研究活動

北海道大学電子科学研究所

平成9年度—平成14年度

—— 点検評価報告書 ——

Research Activities

Research Institute for Electronic Science
Hokkaido University

1997—2002

平成16年発行

表紙の説明

「結晶成長過程のシミュレーション」

はじめに

北海道大学電子科学研究所は、前身である北海道大学応用電気研究所を改組・転換し平成4年4月に発足し、その設置目的を「電子科学に関する学理及びその応用の研究」に設定し、4大部門、1施設から成る新たな体制で出発した。平成9年10月に改組・転換後、最初の外部評価を実施し、多くの貴重な助言を得たが、とくに従来の学問体系を超えた真の融合領域（trans-disciplinary field）の開拓が強く求められた。これに基づき物理・化学・数学に基礎をおく枠組みから脱却し、生命科学の成果をも積極的に取り込んで新しい電子科学の領域を開拓するため、光に関する科学、生命に関する科学、分子に関する科学の三つの科学が融合した「複合領域ナノサイエンス」を電子研の柱とし邁進してきた。生命の秘密を解明するためには光や分子を扱うナノサイエンスが必要となり、またナノテクノロジーも天与の分子機械である細胞に学ばざるを得ない。この方向への具体的成果の一つとして、平成14年度には「分子•原子集合体の自己組織化によるボトムアップ手法を基軸としたナノテクノロジー創成」を課題とした附属施設「ナノテクノロジー研究センター」を発足させた。

新たな学問の再編成と高度の研究者の養成を目指す21世紀COEプログラムの展開に際しても、電子研は平成14年度発足の「バイオとナノを融合する新生命科学拠点」及び平成15年度発足の「特異性から見た非線形構造の数学」に参画している。これらは一見、無関係に思われるが、数学の「非線形構造」を形成するダイナミックな駆動力は「自己組織化」であり、これはボトムアップによる階層的ダイナミクスに基盤を置くナノサイエンスの基本思想を成している。これは電子研の持つ横断的性格をよく反映していると同時に北大のメルティングポットの役割を十分に果たしていることを示唆している。

このような流れの中で、平成16年1月に電子研は外部評価を実施し、将来の電子研のあり方も含めて多くの貴重な提言を得た。とりわけ生命系の将来構想については、具体的な指針を頂いた。本冊子はこの外部評価の基礎資料としての自己点検報告書であり、平成9年度から平成14年度までの研究活動をまとめたものである。光・生命・分子の3つの柱を軸にそれらが融合した「複合領域ナノサイエンス」の研究成果の一端を紹介したい。

関係各位には忌憚のない批判をお寄せ下さるようにお願いいたします。

平成16年3月

北海道大学電子科学研究所長　　西　浦　廉　政

目　次

組織図

〈研究業績資料〉

電子材料物性部門…… 1
光電子物性研究分野…… 2
相転移物性研究分野…… 12
有機電子材料研究分野…… 24
光材料研究分野…… 37

電子機能素子部門…… 53
量子機能素子研究分野…… 54
分子認識素子研究分野…… 68
超分子分光研究分野…… 80
細胞機能素子研究分野…… 94

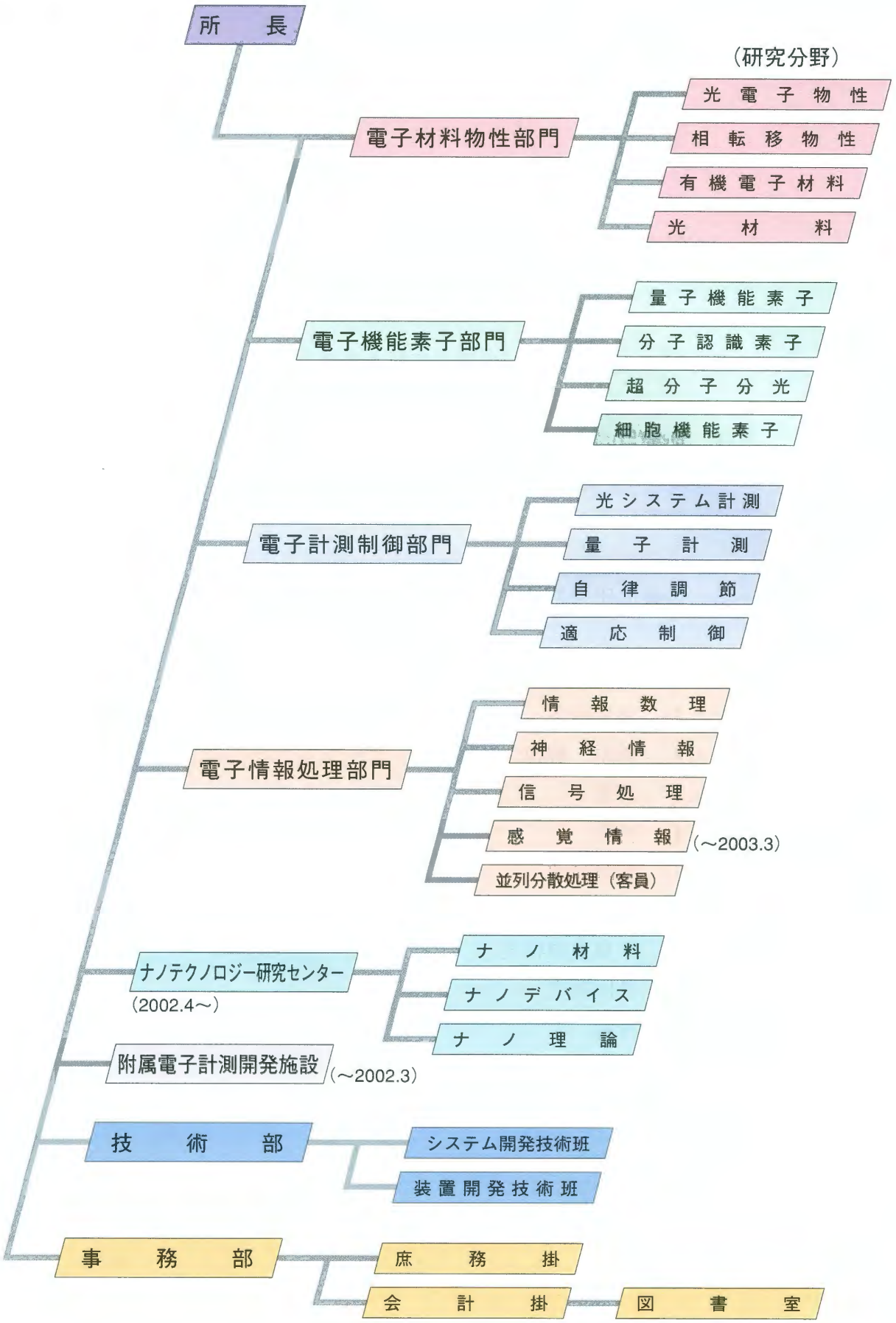
電子計測制御部門…… 103
光システム計測研究分野…… 104
量子計測研究分野…… 117
自律調節研究分野…… 130
適応制御研究分野…… 140

電子情報処理部門…… 153
情報数理研究分野…… 154
神経情報研究分野…… 168
信号処理研究分野…… 180
感覚情報研究分野…… 190
並列分散処理研究分野（客員研究分野）…… 205

ナノテクノロジー研究センター…… 215
ナノ材料研究分野…… 216
ナノデバイス研究分野…… 222
ナノ理論研究分野…… 224

附属電子計測開発施設…… 227
附属電子計測開発施設…… 228

■組織図


所　長
（研究分野）
電子材料物性部門
光電子物性
相転移物性
有機電子材料
光材料
電子機能素子部門
量子機能素子
分子認識素子
超分子分光
細胞機能素子
電子計測制御部門
光システム計測
量子計測
自律調節
適応制御
電子情報処理部門
情報数理
神経情報
信号処理
感覚情報
（～2003.3）
並列分散処理（客員）
ナノテクノロジー研究センター
（2002.4～）
ナノ材料
ナノデバイス
ナノ理論
附属電子計測開発施設
（～2002.3）
技術部
システム開発技術班
装置開発技術班
事務部
庶務掛
会計掛
図書室

本資料の構成

各分野について、下記の項目資料を掲載しております。

１．研究目的

２．研究成果

３．今後の研究の展望・将来計画

４．資料

4.1　学術論文
4.2　総説、解説、評論等
4.3　著書
4.4　特許
4.5　招請講演
4.6　シンポジウムの開催
4.7　予算獲得状況
4.8　共同研究
4.9　受賞
4.10　社会教育活動

電子材料物性部門

研究目的

電子材料を構成する原子、分子、分子集合体、半導体、誘電体及びそれらの物質が示す光・電子相互作用などの物理・物性を明らかにすることを通じて、電子科学を支える次世代電子材料の開発を目指している。

光電子物性研究分野

教授　竹村　健（北大理、理博、1997.4～1998.3）
　　太田信廣（東北大院理、理博、1998.10～）
助教授　中林孝和（東大院理、理博、2002.7～）
助手　竹中信夫（静岡大工、理博、1963.2～2002.3）
　　大坂直樹（早大理工、理博、1999.9～2002.3）
講師　津島　稔(阪大院理、理博、2001.4～2003.3)(研究機関研究員)

院生
・平成９－14年度
博士課程
伊東　孝、川畑　弘、岩城祐司、溝口美和子
修士課程
竹原裕一、山本　庸、東山健一、小菅将洋、三上　智、小原祐樹、森川武弘、南　俊介

１．研究目的

光励起後のスピン一重項状態から三重項状態への項間交差過程の機構を明らかにすると共に、腫瘍集積性をもち光照射によりその組織を壊すことが知られているポルフィリン誘導体を用いて、蛍光癌腫瘍診断法および癌光線力学的治療法の可能性を探る。(平成９年度)

分子や分子集合体に光を照射した時に電子励起状態への遷移に伴って新たにどのようなダイナミクスが起こるのか、そしてそれら動的過程は外部からの電場や磁場の作用に対してどのような変化を示すのかを調べる。また光励起に伴う分子構造、電子構造、準位構造、配列構造の変化を調べる。さらに光誘起導電性、光誘起磁性、非線形光学効果あるいは電界発光の出現など光励起に伴う電気、磁気特性および光学特性の変化を調べる。これらの結果に基づいて、『光励起ダイナミクス』、『光励起分子の構造』、『光機能物性』がお互いにどのように関係するかを明らかにする。また新たな分子システムを設計、構築することにより、例えば光誘起超伝導といった光励起に伴う全く新しい機能物性の発現を探索する。(平成10年度以降)

２．研究成果

・平成９－10年度

(a)　ポルフィリン類を用いた蛍光癌腫瘍診断剤の開発

蛍光の高検出感度を利用した、測定感度のすぐれた蛍光腫瘍診断剤を開発するための重要な条件は、(1)腫瘍集積性があること、(2)蛍光を高い収率で発すること、(3)光毒性がないこと、である。現在までに、ある種のポルフィリン類は癌腫瘍集積性が高いことを見い出しており、事実このことを利用して腫瘍診断シンチ剤、腫瘍診断MRI増感剤の開発を行なってきた。ところで、これまでのシンチ剤や増感剤には、上記(3)を満たすために励起三重項状態における寿命の短い化合物が主に用いられてきた。しかし、三重項状態の寿命の減少と共に蛍光強度（蛍光収率）は減少するのが一般的であり、光毒性が無いと同時に測定感度のすぐれた蛍光物質とはなりえないのが通常である。しかし今回三重項状態の寿命が著しく短い金属置換ポルフィリンに無置換ポルフィリンをmeta-phenyleneにより連結させた分子を合成したところ光毒性がない蛍光腫瘍診断剤として有効であることを示すことができた。また蛍光性のポルフィリン分子と、鉄金属錯体分子とを結合させた分子も上記の分子以上に蛍光腫瘍診断薬として有効であることを示すことができた（平成９年度)。

(b)　均一分散系における光誘起電子移動反応への電場効果の研究

光誘起電子移動反応を示す電子供与性分子であるエチルカルバゾール（ECZ）と電子受容性分子であるテレフタル酸ジメチル（DMT）をPMMAポリマー中に別々に分散させた系について電場蛍光スペクトル（電場を作用させた場合の蛍光強度の変化を波長の関数としてプロットしたもの）を測定することにより、電子励起状態からの電子移動反応および電荷再結合過程が電場によりどのように変化するかを調べた。図１に示すように、光励起直後の局在励起状態から発する蛍光は電場により消光することがわかった。これは電子移動反応の速度が電場により促進され、競争過程である発光プロセスの収率が減少することを示している。また光誘起電子移動反応によりラジカルイオン対が生成する結果生じるブロードなエキサイプレックス蛍光も電場効果を示すことがわかった。例えば、ECZが1 mol%でDMTが10 mol%（図１左)、逆にDMTが1 mol%でECZが10 mol%の場合（図１右）を比較した場合、蛍光スペクトルはほぼ同じ形をしていることから電子移動の速度はどちらの条件下でもほぼ同じと考えられる。ただし、エキサイプレックス蛍光はECZが高濃度の場合のみ電場消光を示し、ECZが低濃度の場合にはシュタルクシフトのみでありDMTの濃度を増しても電場消光が起こらない。電子供与体であるECZの濃度が大きい場合にのみ消光が観測されるということは、生成する光キャリアーはホールキャリアであり、電子キャリアーはほとんど生成しないことを意味する。実際、エキサイプレックス蛍光の電場消光が観測される条件下でのみ光電流を検出することができた。また電子供与性分子と受容性分子をメチレン鎖で連結させた化合物をポリマー中に分散させた系ではメチレン鎖の長さに依存したエキサイプレックス蛍光の電場による増加が観測され、電荷再結合過程が電場により抑制されることもわかった。

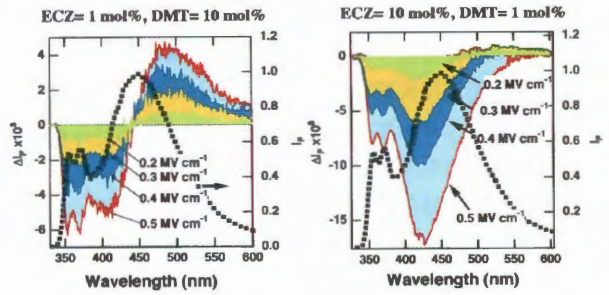


図1．蛍光スペクトル（点線）と電場蛍光スペクトル

(c) 配向分子膜を用いた層間光誘起電子移動反応へ電場効果の研究

典型的なシアニン系色素であるオキサカルボシアニン（OCC）とビオローゲン（VIO）をLB単分子膜として各々異なる層に累積し、図2のような配向分子膜を作成し蛍光の電場効果を調べた。いずれの色素も脂肪酸との混合LB膜として累積されており、両色素間にアラキン酸単分子膜（AA）を一層スペーサーとして挿入してある。この系では光励起されたOCCからVIOへ電子移動が起こるため、VIO存在下では電子移動と競合する蛍光過程の収率が減少しOCC蛍光の消光が観測される。この系において観測された電場蛍光スペクトルが図3に示してある。VIOが存在しない場合（VIOの単分子膜をアラキン酸の単分子膜で置換した）のOCCの電場蛍光スペクトルは蛍光スペクトルの一次微分とほぼ同じ形状を示す。これは発光状態と基底状態間の電気双極子モーメントが異なるために、電場によりスペクトルがシフトするいわゆるシュタルクシフトによるものである。一方、VIOへ電子移動が起こる系では、電場蛍光スペクトルの形状が蛍光スペクトルに似てくる。これは、電子移動の速度が電場により変化するために蛍光の収率が変化することを示している。図3は電子移動の方向と電場の向きが図2の関係において得られたものであり、蛍光強度が電場により減少することを示している。一方電場の向きを反転させた場合に得られた電場蛍光スペクトルは正負が逆になり、蛍光は減少し電子移動の速度が増加することがわかった。これらは光誘起電子移動反応への電場効果はお互いの方向および分子配向や配列が重要な役割を果たすと共に、光機能性分子素子（例えば光スイッチング素子）として応用できる可能性を示すものである。

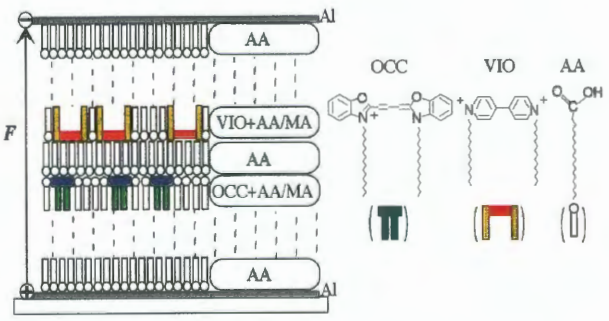


図2．層間光誘起電子移動反応を示す配向分子膜

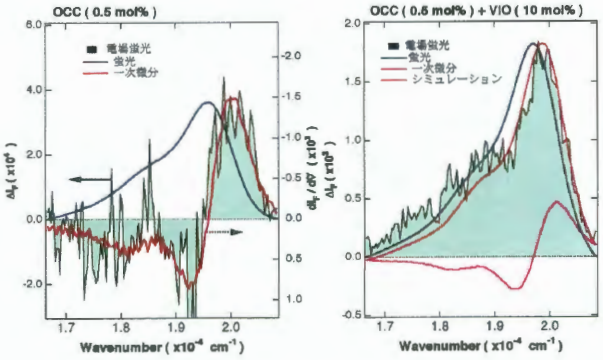


図3．VIO層がある時とない時の電場蛍光スペクトル（電場が1 MV/cm）、蛍光スペクトル、一次微分スペクトルおよびシミュレーション

(d) 電場吸収スペクトルと表面モルフォロジーの関係に関する研究[9]

光励起に伴う電気的特性の変化を調べるためには上図2に示すような配向分子膜を作成し、光吸収や発光の電場効果を調べる方法が有用である。そこでオキサシアニン（OC）混合LB単分子膜を作成し、電場吸収スペクトルを測定した。光励起に伴う電気双極子モーメントの変化が、OCがある濃度以上で急激に変化することを見い出した。そこで、単分子膜表面における色素分子の分散がどのようになっているかを蛍光顕微鏡を用いて測定したところ、低濃度の混合LB膜では色素は均一に分散しているが、ある濃度以上になるとゴム輪状の会合体を形成するようになることがわかった。このように電場吸収スペクトルから、吸収、発光スペクトルからは知ることのできない表面モルフォロジーの変化を知ることができることがわかった。

・平成11－12年度

(a) 連結分子系における光誘起電子移動反応と電場効果

電子供与体（D）と受容体（A）の均一分散系およびDとAを分子鎖で繋いだ連結分子系を対象に、光誘起電子移動反応およびその電場効果を調べた。例えばDとしてカルバゾール（CZ）、Aとしてテレフタル酸メチルエステル（TPM）を種々の長さのメチレン鎖で連結させた分子をPMMAポリマー中にドープし、蛍光の電場効果を観測することにより調べた。図1にメチレン鎖の長さが異なる試料について得られた電場蛍光スペクトルを蛍光スペクトルと共に示してある。いずれも短波長部にCZの局在励起状態から発する振動構造を有する蛍光（モノマー蛍光）が観測される。またCZの励起状態からTPMに電子移動が起こる結果として、～450 nmにピークをもつブロードなエキサイプレックス（EXC）蛍光が観測される。CZのモノマー蛍光に関しては電場蛍光スペクトルの形状が蛍光スペクトルと似ており、電場によりモノマー蛍光の収率が減少することを示している。すなわち励起CZからTPMへの電子移動速度が電場により増加し、このプロセスと競合する蛍光過程の収率が減少する。CZの励起状態からTPMへの電子移動の速度が電場により増加することは、蛍光寿命の

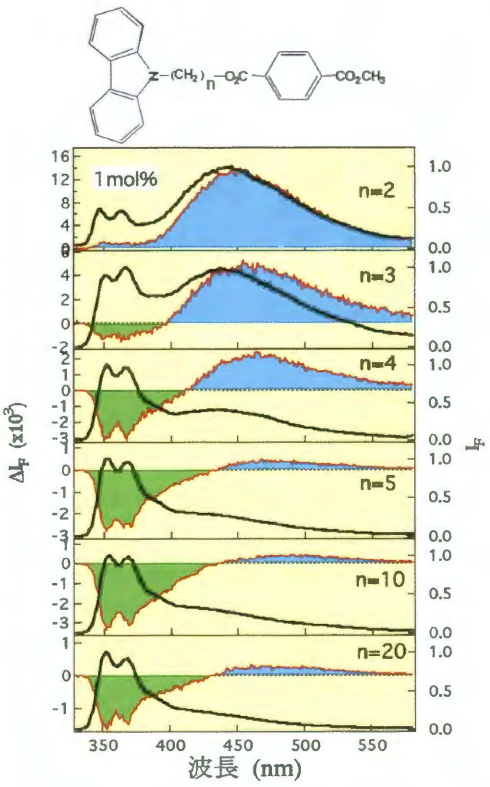


図1．CZ（D）とTPM（A）のメチレン鎖連結化合物，（D－$(CH_2)_n$－A），における蛍光スペクトルと電場蛍光スペクトルの鎖長依存性、電場の強さはいずれも 0.5 MV/cm。

電場依存性を直接測定することによっても確かめられた。

モノマー蛍光と異なり、EXC 蛍光は電場により増加する。しかもその増加量はメチレン鎖が短いほど大きい（図1参照）。DからAへの電子移動により生成するラジカルイオン対を経由して EXC が生じる場合、EXC 蛍光強度はラジカルイオン対の量に比例する。ここで陽イオンと陰イオン間の静電的な力によるイオン対の再結合が存在すれば、再結合を起こさない場合に比較して、EXC 蛍光の強度は減少することになる。メチレン鎖長が短くなるにつれて、EXC 蛍光の電場による増加の効率が単調に増加するという事実は、この再結合が電場により抑制され、再結合により消光していた蛍光が復活することを示している。結局、図2に示すように、電子移動反応系においては、電子移動反応速度それ自身、D あるいは A の励起状態を生成する逆電子移動反応、ラジカル対から基底状態分子を生成する電荷再結合反応、そしてラジカル対解離を含むキャリアー生成過程に外部電場が観測されることがわかった。

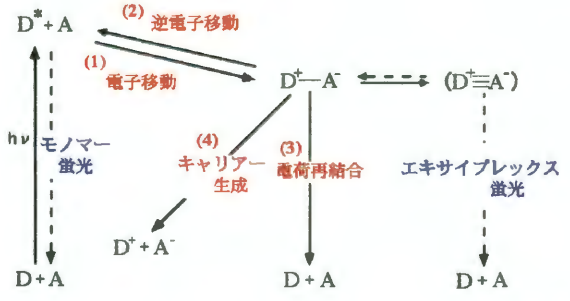


図2．光誘起電子移動反応系における諸々のプロセス。電場効果を示す過程は赤で示されている。

(b)　連結化合物におけるエキシマー電界発光

ピレンを PMMA 中にドープした薄膜を作成し、発光の電場効果を調べた。ピレンの濃度が小さい場合にはピレン局在励起状態からのモノマー蛍光のみが観測され、電場蛍光スペクトルはシュタルクシフトのみを示す。濃度を増すと、モノマー蛍光以外に、～470 nm にピークを持ついわゆるサンドイッチ型エキシマーからのブロードな蛍光が観測される。かかる高濃度ではモノマー蛍光の量子収率は電場により減少する。また、サンドイッチ型のエキシマー蛍光収率も電場により減少する。一方、通常は非常に発光収率の小さい～415 nm にピークを持つ別のエキシマー蛍光が電場により顕著に増加する。これらの結果はエキシマーの生成効率が電場により変化することを示している。この電場効果の理由として、電子の軌道の電場による偏極、すなわちお互いのピレン間の軌道の重なりの変化を考えている。ピレンとピレンをメチレン鎖で連結させた分子を PMMA 中にドープした系についても、同様の電場効果が観測される。すなわち、ピレンのモノマー蛍光とサンドイッチ型のエキシマー蛍光が電場により減少し、ピレン同志が部分的な重なりを持つと考えられる別のタイプのエキシマー発光（発光ピークが～415 nm）の強度が電場により増加する。ただし、図3に示すように連結化合物の電場蛍光スペクトルは、ピレン単独の場合とは異なり、顕著な電場強度依存性を示す。すなわち、モノマー蛍光および～415 nm にピークを持つ部分的な重なりを持つエキシマーの蛍光はピレン単独の場合と同様、作用する電場の強さの2乗に比例して減少および増加するのに対して、サンドイッチ

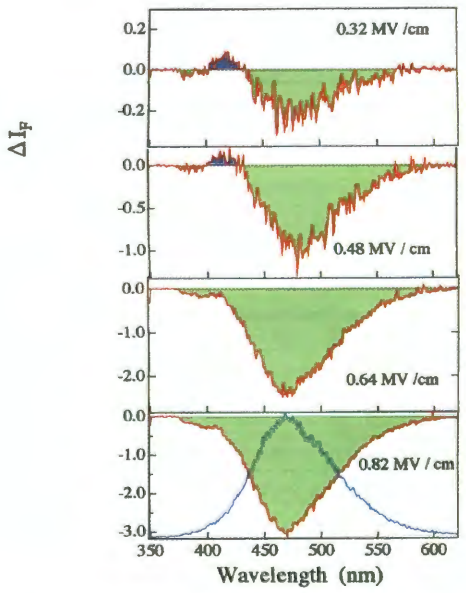


図3．ピレン連結化合物の電場蛍光スペクトルの電場強度依存性。蛍光スペクトルは下に示す。

型のエキシマー蛍光は電場の強さの4乗に比例した電場消光を示す。これはサンドイッチ型のエキシマーが電場により生成量が変化するばかりでなく、生成したエキシマーが電場により消滅していくことを示している。実は、図4に示すようにピレン連結化合物では効率の良いエキシマー電界発光が生じることもわかった。結局、色素分子間の配向や連結が光化学反応およびその電場効果に大きな影響を与えると共に、電界発光といった光機能物性にも密接に関係していることがわかった。

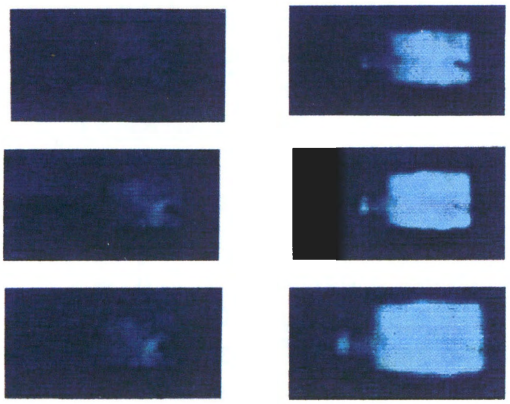


図4．ポリマー中におけるピレン連結化合物の電界発光

・平成13年度

(a) 一体型光吸収・発光電場変調スペクトル測定装置の開発

光吸収スペクトルや発光スペクトルへの電場効果を容易に調べることができるように、これまで開発してきた電場変調光吸収測定装置と電場変調発光測定装置を改良し、図1で示すような「光吸収・発光電場スペクトル測定装置」を作製した。コンピューター制御により測定が容易であり、しかも測定された電場スペクトルの解析より、光励起に伴う電気双極子モーメントや分子分極率の変化を容易に見積もることが可能となった。本装置の特徴として次の点を挙げることができる。

(1) 電場吸収スペクトル、電場発光スペクトル、電場発光励起スペクトルの測定が可能である。

(2) 電場吸収スペクトルと電場発光励起スペクトルを同時に測定することが可能である。また、吸収強度が非常に小さく、電場吸収スペクトル測定ができない場合でも、電場発光励起スペクトルで代用することが可能となる。

(3) 入射光強度および発光強度の電場による変化量が10^{-4}程度あれば充分精度よく測定することが可能である。入射光強度あるいは発光強度が大きくなるにつれて、検出感度も向上する。

(4) 電場スペクトルの測定により、光励起および脱励起に伴う電気的特性の変化を定量的に求めることができる。また発光収率の電場による変化を測定することにより、光ダイナミクスが電場によりどの程度影響を受けるかを知ることが可能である。

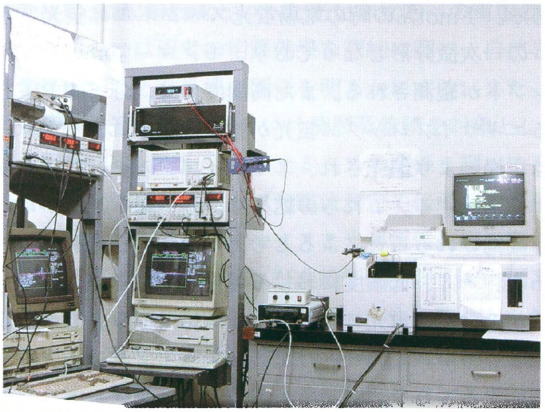


図1．一体型光吸収・発光電場スペクトル測定装置

(b) 光誘起電子移動反応系における光ダイナミクスへの電場効果

芳香族分子からなる電子供与体と電子受容体をメチレン鎖で連結させた系あるいは両者の混合分散系における蛍光の電場効果を調べ、電子移動反応、逆電子移動反応、電荷再結合反応および光キャリアー生成に対する電場効果を調べた。特にフェナントレン（PH）やピレンとフタルイミド（PMD）やジメチルアニリンの系について調べた。

例えば、PHとPMDを各々別々にポリメタクリル酸メチル（PMMA）高分子フィルムに分散させた系、PHとPMDを長さの異なるメチレン鎖で連結させた分子を同様にPMMAに分散させた系について電場吸収および電場蛍光スペクトルの測定を行った。この系では、光励起されたPHからPMDへ電子移動（PIET）が起こる。図2（左）にPHとPMDを種々の濃度で混合分散させた系について得られた電場蛍光スペクトルを示す。短波長側に観測される構造を有する発光は、PHの局在励起状態から発するモノマー蛍光である。濃度を増すにつれて、長波長部の発光強度が増加するが、これは分子間でPIETが起こる結果生じたエキサイプレックスからの蛍光である。低濃度では、得られた電場蛍光スペクトルの形状は蛍光スペクトルの一次微分形となっており、発光状態と基底状態間の分子分極率の違いを反映したシュタルクシフトによるものである。濃度を増すにつれて、モノマー蛍光の電場蛍光スペクトルは、負の値を持ちその形状が蛍光スペクトルに似てくる。このことは、モノマー蛍光の量子収率が電場印加により減少することを意味する。すなわち、分子間でPIETが起こる条件下では、電子移動の速度が電場により増加するために、電子移動過程と競合する蛍光過程の収率が減少したと考えられる。逆にエキサイプレックス蛍光の強度が電場により増加するのは、エキサイプレックスの前駆体であるラジカルイオン対の量が電子移動促進のために増えたためと考えられる。

長さの短いメチレン鎖でPHとPMDを連結させた系については、異なる電場効果が得られる。炭素数が3のメチレン鎖連結化合物（PH-(3)-PMD）に関して得られた蛍光スペクトルおよび電場蛍光スペクトルが図2（右）に示し

てある。1 mol%の時の電場蛍光スペクトルは蛍光スペクトルの一次微分形となっており、モノマー蛍光のシュタルクシフトが観測される。また高濃度では、分子間 PIET によるエキサイプレックス蛍光が強く観測され、モノマー蛍光は電場により消光され、エキサイプレックス蛍光は電場により増加する。これらの結果は、分子間 PIET が電場により促進されることによると考えられ、混合分散系と同様である。一方、低濃度における電場蛍光スペクトルはその形状がモノマー蛍光スペクトルと同様であり、しかも正の符号をしめす。このことは電場によりモノマー蛍光の収率が増加することを意味する。これらの結果は、メチレン鎖が短い場合には分子内 PIET が起こり、しかも生じるラジカルイオン対から PH の励起状態が形成する逆電子移動反応の効率が電場により増加することを示している。

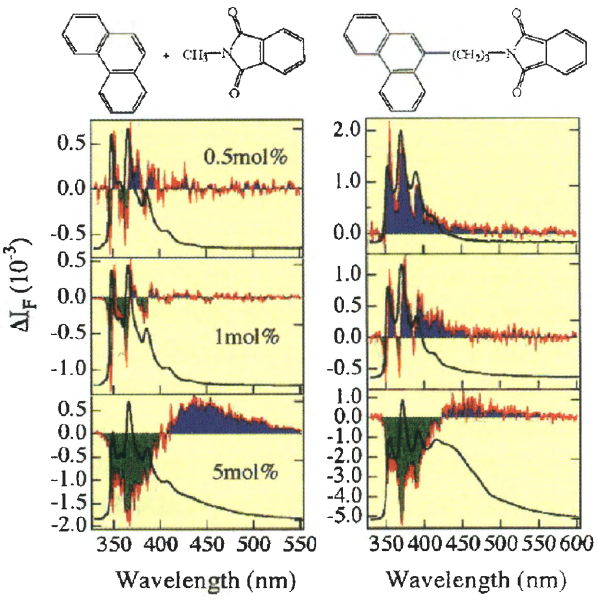


図2．フェナントレンとフタルイミドの混合分散系（左）およびメチレン鎖連結系（右）を PMMA 中に種々の濃度でドープした薄膜試料の蛍光スペクトル（実線）と電場蛍光スペクトル。電場の強さは 1.0 MV/cm.

(c) 光誘起電子移動反応への電場効果と時間分解電場蛍光測定

光化学反応への電場効果に関して、定常光励起での実験に基づく議論では、発光量子収率の変化を非常に精緻に求めることができるにもかかわらず、実時間測定に基づくような議論を展開することはできず、例えば複数の発光種に対して同様の電場効果を考えるといったように、どうしても解析上ある仮定を導入しなければならない場合がほとんどである。そこで我々は定常光実験と並行して、パルス光励起直後から数ピコ秒の時間分解能で各時間領域に分けて電場発光スペクトルを得ることのできる装置の開発を進めてきた。そして、光誘起電子移動反応をはじめとする光誘起プロセスへの電場効果を実時間測定により定量的に調べることが可能となってきた。

ITO とアルミを電極として用い、電極間に挟まれたポリマー試料に対して～1 MV/cm までの電場を印加して測定を行う。試料の励起には、パルスピッカーによって繰り返し周波数を 2 MHz 程度に間引いたフェムト秒 Ti：Sapphire レーザーの第二高調波もしくは第三高調波を取り出すことにより、赤外から紫外の広い波長領域にわたる超短パルス光を用いる。発光はマイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管によって検出する。単一光子計数法を用いて発光減衰曲線の電場依存性を測定するために、マルチチャンネルアナライザーを 4 つのセグメントに分割し、この 4 つのセグメントを、セグメントルータによって設定した時間ごとに切り替えられるようにした。セグメントの切り替えに同期して試料に印加する電場を切り替える。これを繰り返すことで、電場が存在するときと存在しないときの発光減衰曲線を各セグメントに分けて一度に測定することを実現した。これを観測波長を変えて行うことにより、ピコ秒以下の時間領域にわたる時間分割電場発光スペクトルの測定が可能となった。

この装置を用いて、ピレン（Py）とジメチルアニリン（DMA）の連結分子系（p-Py-(3)-DMA と記し、分子構造を図 4 に示す）の光誘起電子移動反応に対する電場効果を調べた。この分子は溶液中では、光励起された Py へ DMA から電子移動が起こる結果としてブロードなエキサイプレックス（Exc）蛍光が観測される。但し、固体膜中に低濃度でドープした場合には、Exc 蛍光はほとんど観測されず、分子内電子移動反応は無視できるようになる。一方、高濃度にドープした場合には、図 4 に示すように 450 nm にピークをもつ Exc 蛍光が観測され、分子間で光誘起電子移動が起こる。既に我々は、この系での蛍光への電場効果を定常光励起で調べており、短波長側の Py の局在励起状態からの発光も、長波長側の Exc 蛍光も電場により消光することを示す電場蛍光スペクトルを得ている（図 4 参照）。これらの結果は、電子移動反応初期過程が電場により促進されること、また、電子移動反応により生成するラジカルイオン対が電場により解離することを示唆している。そこで、作製された装置をこの系に適用し、蛍光減衰曲線への電場効果の測定を行った。作製された装置により得られる結果が信頼できるものであるかどうかをチェックした結果を図 5 に示す。上で述べたように、4 個の蛍光減衰曲線が同時に測定されるわけであるが、2 つはゼロ電場での減衰であり同じものを与える必要がある。実際、二つの減衰曲線の比は、全時間領域で 1 とみなすことができる。しかし、1 MV/cm を印加した場合とゼロ電場での減衰曲線の比は、時間初期ではほぼ 1 であるが、時間と共に減少し、蛍光寿命が短くなることを示している。電子移動速度が電場により促進されることを実証している。このような蛍光減衰曲線の電場効果を観測波長の関数として求めることにより、図 6 に示すような時間分解電場蛍光スペクトルを初めて観測することができ、Py の局在励起蛍光と Exc 蛍光の電場効果の時間的な関係を明らかにすることができた。

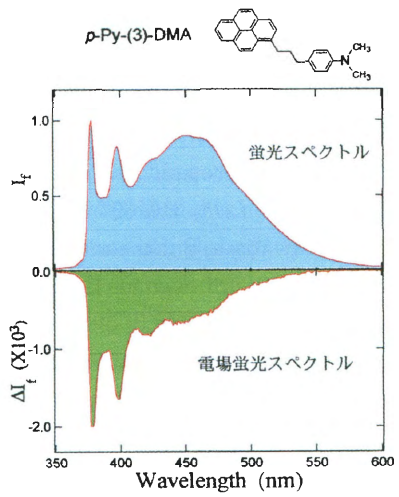


図4．p-Py-(3)-DMA の蛍光スペクトルと電場蛍光スペクトル（1.0 MV/cm）

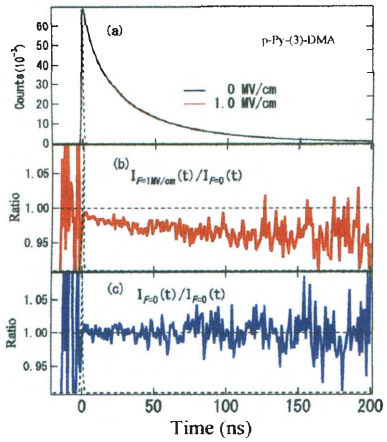


図5．零電場と 1.0 MV/cm での蛍光減衰（上）、両者の比（中）、零電場間の蛍光減衰の比（下）

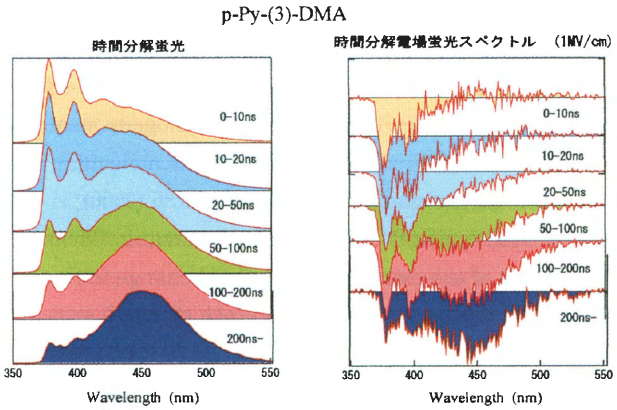


図6．時間分解蛍光スペクトル（左）と時間分解電場蛍光スペクトル（1.0 MV/cm）

3．今後の研究の展望・将来計画

電場・磁場変調発光分光法と、高速時間分解電場・磁場発光分光法を積極的に活用し、種々の分子系を対象として、光誘起電子移動反応、励起エネルギー移動、光誘起プロトン移動反応、励起錯形成といった光化学反応への電場効果、磁場効果さらには両者の相乗効果を詳細に調べ、自然界における光化学反応と外場の関係を明らかにする。また、配向単分子膜や連結分子、あるいは積層蒸着膜を対象として、分子の配列構造と光反応ダイナミクスの関係を調べると共に、広い温度領域にわたって光電流測定や伝導度の光照射効果を調べ、光化学ダイナミクスと光導電性発現の関係、電界発光発現との関係、および非線形光学現象との関係を明らかにする。特に分離積層型の D-A 分子系を人工的に構築し光誘起電子移動反応および光導電性の機構を調べると共に、光と電場により電荷量や移動度をコントロールできるということを利用し、単なる光導電性というだけではなく、究極の光機能というべき光誘起超伝導性発現の可能性を探る。また、固体膜だけではなく、分子が自由に動くことのできる溶液系にも実験を発展させ、光と電場・磁場を組み合わせ、分子の回転運動や反応ダイナミクスを自由自在にコントロールすることを試みる。

4．資料

4.1　学術論文

1）竹村健、安田紀彦、中島進、阪田功：「レーザー治療におけるレーザー光の特性―波長、パルス幅、フルエンス、パワー密度―の検討」、第 17 回日本レーザー医学会大会論文誌（1997）

2）中島進、阪田功、竹村健：「第二世代のフォトセンシタイザー ATX―S 10 Na（II）の抗腫瘍効果」（『医学のあゆみ』）、180-10：689-690（1997）

3）Nakajima, S., Shigemi, N., Murakami, T., Aburano, I., Sakata, I., Maruyama, I., Inoue, M. and Takemura, T.: Tumor-localizing radiosensitive Mn-porphyrin on SCCVII tumor-bearing C3H/He mice:", *Anti-Cancer Drugs*, 8: 386-390 (1997)

4）Ohta, N., Umeuchi, S., Nishimura, Y. and Yamazaki, I.: "Electric-field-induced quenching of exciplex fluorescence and photocurrent generation in a mixture of ethyl carbazole and dimethyl terephthalate doped in a PMMA polymer film", *J. Phys. Chem.*, 102: 3784-3790 (1998)*

5）Ohta, N., Ito, T. and Yamazaki, I.: "External Electric Field Effect on Photoinduced Electron Transfer from Monomer and Dimer of Oxacarbocyanine in Langmuir-Blodgett Films", *Mol. Crys. Liq. Crys.*, 314: 119-124 (1998)*

6）Ohta, N., Kanada, T., Yamazaki, I. and Itoh, M.: "External electric field effects on fluorescence of methylene-linked pyrene and N, N-dimethylaniline doped in a PMMA polymer film", *Chem. Phys. Lett.*, 292: 535-541 (1998)*

7）Nishimura, Y., Ohta, N., Yamamoto, M. and Yamazaki, I.: "Electric Field Effects on the Charge Migra-

tion of Methylene-Linked Carbazole and Terephthalic Acid Methyl Ester in PMMA Polymer Films", *Mol. Crys. Liq. Crys.*, 315: 181-186 (1998)*

8) Yamazaki, I., Osuka, O. and Ohta, N.: "Quantum Mechanical Processors Based on Organized Molecular Assemblies", *Mol. Crys. Liq. Crys.*, 315: 235-246 (1998)*

9) Ohta, N., Nakamura, M., Yamazaki, I., Shimomura, M. and Ijiro, K.: "Relationship between surface morphology and electroabsorption spectrum of oxacyanine chromophore in a mixed Langmuir-Blodgett film", *Langmuir*, 14: 6226-6230 (1998)*

10) Ohta, N., Kanada, T., Yamazaki, I., Ito, S. and Suzuka, I.: "External electric field effects on fluorescence of a mixture of pyrene and C60 in PMMA polymer films and in thin solid films", *J. Luminescence*, 79: 177-183 (1998)*

11) Görling, Ch., Jalviste, E., Ohta, N. and Ottinger, Ch.: "Lifetime measurements of the collision-free slow fluorescence from glyoxal S_1/T_1 gateway levels in a beam", *J. Phys. Chem.*, 102: 10620-10629 (1998)*

12) Abe, S., Nishimura, Y., Yamazaki, I. and Ohta, N.: "Remarkable external electric field effect on the absorption intensity of a molecular aggregate of photomerocyanine in a PMMA polymer film", *Chem. Lett.*, 165-166 (1999)*

13) Sakurai, M., Nakamura, K., Nitta, K., Takenaka, N., Mukae, K.: "Partial molar isentropic compressions of alkyl acetates in water", J. Chem. & Eng. DATA, 43: 249-254 (1998)*

14) S. Abe, Y. Nishimura, I. Yamazaki and N. Ohta: "Remarkable external electric field effect on the absorption intensity of a molecular aggregate of photomerocyanine in a PMMA polymer film," *Chem. Lett.*, 165-166 (1999)*

15) Y. Nishimura, I. Yamazaki, M. Yamamoto and N. Ohta: "Measurements of the electric-field-induced change in fluorescence decay profile of methylene-linked carbazole and terephthalic acid methyl ester in a PMMA polymer film," *Chem. Phys. Lett.*, 9(2): 8-14 (1999)*

16) H. Kono, I. Kawata and N. Ohta: "High-resolution frequency analysis by the use of derivatives of the Fourier transform: Application to fluorescence quantum beats," *Bull. Chem. Soc. Jpn*, 72: 1225-1231 (1999)*

17) M. H. Wall, Jr., S. Akimoto, T. Yamazaki, N. Ohta, I. Yamazaki, T. Sakuma and H. Kido: "Ultrafast intramolecular electron transfer in peripherally ruthenated zinc tetraarylporphyrins," *Bull. Chem. Soc. Jpn*, 72: 1475-1481 (1999)*

18) N. Ohta, H. Kawabata, S. Umeuchi and I. Yamazaki: "Efficient fatigue of excimer fluorescence by an electric field and generation of electroluminescence of 1,3-bis-(1-pyrenyl)propane in a PMMA polymer film," *Chem. Phys. Lett.*, 310: 397-404 (1999)*

19) N. Ohta, H. Kawabata, S. Umeuchi and I. Yamazaki: "Efficient fatigue of excimer fluorescence by an electric field and generation of electroluminescence of 1,3-bis-(1-pyrenyl)propane in a PMMA polymer film," *Chem. Phys. Lett.*, 315: 151 (1999)*

20) S. Abe, Y. Nishimura, I. Yamazaki and N. Ohta: "Electroabsorption spectra of spiropyran and its photoisomer in a PMMA polymer film," *Asian Journal of Spectrosc.*, 4: 105-114 (1999)*

21) N. Ohta, Y. Iwaki, T. Ito, I. Yamazaki and A. Osuka: "Photoinduced charge transfer along a meso,meso-linked porphyrin array," *J. Phys. Chem.*, 103(51): 11242-11245 (1999)*

22) N. Ohta, T. Ito and I. Yamazaki: "External electric field effects on photoinduced electron transfer between cyanine dye and viologen," *Z. Physik. Chem.*, 213(2): 191-197 (1999)*

23) N. Yasuta, N. Takenaka and T. Takemura: "Mechanism of Photosensitized Chemiluminescence of 2-Methyl-6-phenylimidazo [1, 2-a] pyrazin-3 (7H)-one (CLA) in Aqueous Solution," *Chem. Lett.*, 451-452 (1999)*

24) N. Yasuta, S. Takahashi, N. Takenaka and T. Takemura: "Mechanism of the Photosensitized Chemiluminescence of Luminol," *Bull. Chem. Soc. Jpn*, 72(9): 1997-2003 (1999)*

25) N. Ohta, S. Umeuchi, T. Kanada, K. Akita, H. Kawabata and I. Yamazaki: "Electric field effects on fluorescence of pyrene in a homogeneously distributed system and in an oriented molecular system," *J. Luminescence*, 87-89, 733-735 (2000)*

26) Y. Nishimura, N. Ohta and I. Yamazaki: "Measurements of the electric-field-induced change in fluorescence decay profile of a mixture of ethylcarbazole and dimethylterephthalate in a PMMA polymer film," *J. Luminescence*, 87-89, 791-793 (2000)*

27) Y. Iwaki and N. Ohta: "Electric-field-induced quenching of fluorescence of tetraphenylporphyrin in a polymer film," *Chem. Lett.*, 894 (2000)*

28) T. Kanada, Y. Nishimura, I. Yamazaki, M. Yamamoto and N. Ohta: "A back electron transfer through a methylene chain in a linked compound of carbazole and terephthalic acid methyl ester in a PMMA polymer film," *Chem. Phys. Lett.*, 332: 442-

448 (2000)*

29) J. Folorunso Ojo, Y. Hasegawa, Y. Sasaki, K. Kunimasa, M. Abe and N. Ohta: "Kinetics of the reduction of tris(1,10-phenanthroline)iron(III) and emission quenching of tris(2,2'-bipyridine) ruthenium(II) by di- and trinuclear oxoacetato bridged ruthenium complexes," *Inorganic Reaction Mechanism*, 2, 301-311 (2000)*

30) N. Ohta. Y. Iwaki, A. Osuka and N. Aratani: "Excitation dynamics and its electric field dependence of meso, meso-linked porphyrin arrays in a polymer film," Proceeding of 2000 International Conference on "*Excitonic Processes in Condensed Matter*", Edited by K. Cho and A. Matsui, World Scientific, Singapore 20-24 (2000)*

31) H. Kawabata, N. Ohta, H. Arakawa, M. Ashida, S. Kohtani and R. Nakagaki: "Evidence for Electric Field-Assisted Back-Electron Transfer Through a Methylene Bond in a Linked Compound of Phenanthrene and Phthalimide in a Polymer Film," *J. Chem. Phys.*, 114(18): 7723-7726 (2001)*

32) N. Ohta, T. Tanaka and I. Yamazaki: "A reduction of the high symmetry of C60 in a PMMA polymer film as revealed by electroabsorption spectra," *Res. Chem. Intermed.*, 27(1): 61-71 (2001)*

33) H. Kawabata, Y. Nishimura, I. Yamazaki, K. Iwai and N. Ohta: "Electric field effects on fluorescence of methylene-linked compounds of phenanthrene and N, N-dimethylaniline in a PMMA polymer film," *J. Phys. Chem. A*, 105(45): 10261-10270 (2001)*

34) Y. Takehara, N. Ohta, S. Shiraishi, S. Asaoka, T. Wada and Y. Inoue: "External electric field effects on exciplex formation of 1,1-diphenyl-1-propene with a chiral sensitizer of 1,4-naphthalenecarboxylate in a PMMA polymer film," *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 145: 53-60 (2001)*

35) N. Ohta, Y. Iwaki, A. Osuka and N. Aratani: "Excitation dynamics and its electric field dependence of meso, meso-linked porphyrin arrays in a polymer film," *Int. J. Mod. Phys. B*, 15(28,29,30): 3588-3592 (2001)*

36) M. Tsushima, N. Ikeda, H. Yonehara, H. Etori, C. Pac and T. Ohno: "A charge-separation pair in thin crystals of oxotitanium (IV) phthalocyanine revealed by means of femtosecond time-resolved absorption", Coordination chemistry reviews, 229: 3-8 (2002)

37) T. Ito, I. Yamazaki and N. Ohta: "Distance dependence of the electric field effect on photoinduced electron tunneling between cyanine dye and viologen through a fatty acid monolayer", J. Phys. Chem. B, 106: 895-898 (2002)

38) T. Nakabayashi, S. Kamo, K. Watanabe, H. Sakuragi and N. Nishi: "Observation of Formation Dynamics of Solvated Aromatic Cation Radicals Following Photoionization", Chem. Phys. Lett., 355 (3, 4): 241-248 (2002)

39) T. Nakabayashi and N. Nishi: "States of Molecular Associates in Binary Mixtures of Acetic Acid with Protic and Aprotic Polar Solvents: A Raman Spectroscopic Study", J. Phys. Chem. A, 106(14): 3491-3500 (2002)

40) N. Ohta, S. Mikami, Y. Iwaki, M. Tsushima, H. Imahori, K. Tamaki, Y. Sakata and S. Fukuzumi: "Acceleration and Deceleration of Photoinduced Electron Transfer Rates by an Electric Field in Porphyrin-Fullenene Dyads", Chem. Phys. Lett., 368: 230-235 (2003)

4.2 総説、解説、評論等

1) 太田信廣：(解説)「光誘起電子移動反応への電場効果」、光化学、29：34-35 (1998).

2) N. Ohta: "Intramolecular photoexcitatoin dynamics and magnetic field effects in an intermediate case molecule," *Photochem. Photobiol. C, Photochem. Rev.*, 1: 195-221 (2000)

3) 岩城裕司、太田信廣：「ポルフィリン誘導体の光吸収、発光への電場効果」、電子科学研究、8：41-42 (2000)

4) 太田信廣：「分子配列系における光化学反応と電場効果」、光化学の課題と展望、52(7)：47-52 (2001)

5) 中林孝和：「化学物質が溶けること・混ざること」、ガイア、10：3 (2002)

6) N. Ohta: "Electric field effects on photochemical processes in solid films", Bull. Chem. Soc. Jpn., 75: 1637-1655 (2002)

4.3 著書

1) 山崎巌、太田信廣：「LB 多層膜の光化学過程とダイナミックス」、231-238(『光化学の基礎と先端研究(気相・液相・表面の光化学から光合成や地球環境光化学まで)』化学総説、日本化学会編 (学会出版センター)、No.36 (1998)

2) H. Hayashi and N. Ohta: "Magnetic Field Effects on Dynamic Behavior of Excited Molecules in the Gas Phase": in Dynamic Spin Chemistry, edited by S. Nagakura, H. Hayashi and T. Azumi, (Kodansha-Wiley, 1998) Chap.4.

3) Y. Iwaki, N. Ohta, A. Nakano and A. Osuka: "Electric field effects on absorption and emission spectra of end-phenylethynylated meso-meso linked por-

phyrin arrays in a polymer film": in Advanced Macromolecular and Supramolecular Materials and Processes, edited by K.E. Geckeler (Kluwer, 2003) p. 125-137.

4.5 招請講演

1）太田信廣：「光化学ダイナミクスの電場・磁場効果」、(光化学協会賞受賞講演)、光化学討論会、八王子 (1998)

2）Ohta, N.: "Electric Field Effects on Excimer Fluorescence and Electroluminescence in Pyrene and its Related Compound doped in a Polymer Film", Frontiers in Photonics, Electronics & Materials Science-from Molecules to Devices-, Sapporo (1999)

3）N. Ohta: "External electric field effects on photochemical processes in thin solid films," The XIX International Conference on Photochemistry, Durham, U. S. A. (1999-8)

4）太田信廣：「分子配列系における光化学反応と電場効果」、第一回公開シンポジウム「分子連鎖配列系のコヒーレント光化学反応とその制御」、文部文部省科研費、特定研究(B)、京都、日本 (2000-6)

5）N. Ohta: "External electric field effects on photochemical processes in thin solid films," The Gordon Research Conference, Newport, U. S. A. (2000-8)

6）N. Ohta: "Excitation dynamics and its electric field dependence of meso,meso-linked porphyrin arrays in a polymer film," 2000 International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (Yamada Conference LIII), Osaka, Japan (2000-8)

7）太田信廣：「光化学ダイナミクスへの外部効果と光機能物性」、物理化学コロキウム、仙台、日本 (2000)

8）N. Ohta: "Electric field effects on Photochemical Processes in Solid States," Indo-Japan Exchange Seminar in Structure and Dynamics of Chemical and Biological Systems, Bangalore, India (2001)

9）N. Ohta: "Control of Photochemical Reaction of Electron Transfer in Solid States by an Electric Field," The 4th NIMC International Symposium on Photoreaction Control and Photofunctional Materials (PCPM2001) Tsukuba, Japan (2001)

10）N. Ohta: "Electric Field Effects on Absorption and Emission Spectra and Nonlinear Optical Properties of Porphyrin Oligomers," The 1st International Symposium on Macro- and Supramolecular Architectures and Materials (MAM-01): Biological and Synthetic Systems, Kwangju, South Korea (2001-4)

11）太田信廣：「光誘起電子移動反応と電場効果」、第 12 回北海道大学触媒化学研究センター研究討論会（触媒基本反応の検討；表面ナノ構造と反応ダイナミクス)、札幌 (2001-11)

12）太田信廣：「固体薄膜中における光化学ダイナミックスへの電場効果」、第 740 回分子研コロキウム、岡崎 (2001-11)

13）N. Ohta: "Effects of Static Electric Field on Photochemical Dynamics," Symposium on Advanced Photonic Science, Sapporo, Japan (2001-12)

14）N. Ohta: "Effects of Electric field and Magnetic field on Photoinduced Dynamics of Electron Donor and Acceptor in a Solid Film", 14th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy (IPS-14), Sapporo (2002-08)

15）中林孝和：「水のクラスター構造―基本的な考え方と応用の可能性―」、食品膜技術懇談会第 14 回春季研究例会、東京 (2002-06)

16）太田信廣：「光、電場、磁場によるダイナミクスの制御と光機能物性」、特定領域研究(B)「分子配列系の光化学と光分子デバイス構築の戦略」公開シンポジウム、札幌 (2002-11)

17）中林孝和：「水素結合性液体の局所構造と分子レベルでの混合の経験則の提案」、平成 14 年度低温科学研究所共同利用研究集会「氷、水およびクラスレート水和物の物性に関する研究集会」、札幌、Japan (2002-12)

18）太田信廣：「ポルフィリンを含む系における光反応ダイナミクスと電場効果」、東北大学理学部化学科数理化学研究室セミナー、仙台 (2002-06)

19）太田信廣：「光誘起ダイナミクスへの電場・磁場効果に関する研究」、日本化学会第 82 回秋季年会（日本化学会学術賞受賞講演)、大阪 (2002-09)

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）太田信廣、基盤Ｂ　一般(2)、光化学ダイナミクスの電場効果に関する研究、10,200 千円 (1998)

2）太田信廣、基盤Ｂ　一般(2)、光化学ダイナミクスの電場効果に関する研究、2,300 千円 (1999)

3）太田信廣、基盤Ｂ　展開(2)、簡易一体型電場変調吸収・発光測定装置の作製と光機能材料研究への応用、9,200 千円 (2000)

4）太田信廣、基盤Ｂ　展開(2)、簡易一体型電場変調吸収・発光測定装置の作成と光機能材料研究への応用、2,100 千円 (2001)

5）中林孝和、奨励研究Ａ、ピコ秒誘導ラマン断熱透過法による溶液中のコヒーレント分布移動、2,000 千円 (2001～2002 年度)

6）太田信廣、特定領域研究(2)、電磁場制御環境下における光化学反応の研究 3,000 千円 (2002 年度)

b．奨学寄付金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1）太田信廣、㈱岩谷直治記念財団、光化学反応への電磁

場効果を利用した光導電性有機配向分子膜の開発、2,100千円（1999）
2）太田信廣、㈶寿原記念財団、連鎖型分子配列システムの構築による光機能分子素子の開発、2,000千円（1999）
3）太田信廣、光科学技術研究振興財団、時間分解発光シュタルク分光法の開発と光誘起ダイナミクスへの電場効果に関する研究、3,600千円（2002）

c．受託研究費（受入者氏名、委託先、研究課題、金額、年度）

1）竹村健、中小企業事業団、新機能ポルフィリン素材の開発に関する研究、1,155千円（1997）
2）中村貴義、竹中信夫、中小企業事業団、新機能ポルフィリン素材の開発に関する研究、1,250千円（1998）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）太田信廣（電子材料物性部門）、下村政嗣、上田哲男（電子機能素子部門）：光が絡む分子材料と生体機能；時空間分解電場吸収・電場発光測定に基づいて（2001～2002年度）
2）八木駿郎、太田信廣（電子材料物性部門）、伊福部達（電子情報処理部門）：リラクサー強誘電体の電気機械結合機構の解明とその福祉工学への応用（2001～2002）
3）笠原勝、竹中信夫（電子材料物性部門）：水素結合研究に関する新たな視点の可能性（2001～2002）

4.9 受賞

1）太田信廣、光化学協会賞「光化学ダイナミクスの電場・磁場効果に関する研究」（光化学協会）（1997）
2）太田信廣、日本化学会学術賞「光誘起ダイナミクスへの電場・磁場効果に関する研究」（日本化学会）（2002.3.27）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）太田信廣：岡崎国立共同研究機構分子科学研究所運営協議員（2001～2004年度）
2）太田信廣：特別研究員等審査会専門委員（2002年8月1日～2004年7月31日）
3）太田信廣：科学研究費委員会専門委員（2003年1月1日～2003年9月30日）

b．国内外の学会の主要役職

1）太田信廣：編集委員、Asian Journal of Spectroscopy（1999～現在）
2）太田信廣：光化学協会理事（2000～2001年度）
3）太田信廣：日本化学会化学技術賞等選考委員（2000～2001年度）
4）太田信廣：日本化学会北海道支部代議員（2001年度）
5）太田信廣：Local Organizing Committee Member（スピン化学国際会議）（2001年7月15日～2001年7月20日）
6）太田信廣：第16期分子科学研究会委員（2002～2003年度）
7）太田信廣：Local Organizing Committee Member（光エネルギー変換国際会議）（2002年8月4日～2002年8月9日）
8）太田信廣：分子構造総合討論会運営委員会委員（2002年10月2日～2006年10月31日）
9）太田信廣：日本化学会北海道支部代議員（2002年11月1日～2003年10月31日）

c．新聞・テレビ等の報道

1）太田信廣：科学新聞、「電界が光化学反応を制御することがわかった」、平成12年6月2日
2）太田信廣：日経産業新聞、「電界が光化学反応を制御することがわかった」、平成12年6月5日

d．教育活動

・修士学位

1）小菅将洋：気液界面におけるオキサカルボシアニン混合LB膜の表面モルフォロジーと電場吸収スペクトル（2001）
2）東山健一：高分子薄膜中におけるピレンを含むドナー・アクセプター系での光誘起電子移動反応と外部電場効果（2001）
3）三上智：ポルフィリンとC60の連結化合物における光誘起電子移動反応と外部電場効果（2001）

・博士学位

1）川畑弘：PMMA薄膜中におけるメチレン鎖連結化合物の光誘起電子移動反応およびエネルギー移動反応と外部電場効果（2001）
2）岩城裕司：固体薄膜中におけるポルフィリン連結分子の光吸収と発光への電場効果（2002）

e．大学院担当講義科目

1）大気環境科学特論II（1998）
2）光物理化学特論I（1999）
3）大気環境化学特論II（2000）
4）分子環境学特論III（2000）
5）物質科学特論II（2001）
6）光物理化学特論I（2001）
7）大気環境化学特論II（2002）

相転移物性研究分野

教授　八木駿郎（北大院、理博、1988.12～）
助教授　辻見裕史（北大院、理博、1993.8～）
助手　笠原　勝（北大院、理博、1968.5～2003.3）
武貞正樹（北大院、理博、2001.8～）

院生
・平成9－14年度
博士課程
吉田節生、高坂繁弘、吉岡伸也、渡辺城太郎、渡辺　学、山崎洋一、石和田隆、小林美加、綿貫丈雄、狩野　旬、
修士課程
小林美加、佐藤公宣、綿貫丈雄、長谷部弘毅、皆木裕介、矢野弘明、五郎谷善弘、渡邊一雄

1．研究目的

相転移物性研究分野では物質の相転移において観測される顕著な物性変化を手がかりにして、新しい未知の機能性物質の探求とその機能発現機構の原理的解明を研究目標としている。従来の多くの物性研究は安定状態の物質においてなされており、そこで得られる基本的物性定数などは材料物性研究上一定の役割を果たしてきている。しかしながら相転移現象では、物質が新しい相に転移する際の不安定状態において物理量の大きなゆらぎが生じ、このとき物質は巨大感受率などの通常では見られない異常物性を発現する。当研究分野では相転移現象においてこれらの未知の物性を探求し、その発現機構の基本プロセスを解明することで電子科学のための新しい材料物性の設計原理を開拓することを目指す。

2．研究成果

(a)　リン酸二水素カリウム（KDP）の強誘電性構造相転移機構の解明

KDPの強誘電相転移機構を解明するために、パルス誘導ラマン散乱実験（ISRS）を行い、強誘電性ソフトモードの波数ベクトル依存性を測定した。ISRSの大きな特色は、励起するモードの波数ベクトルkの大きさを励起光の交差角度で調節できる点にある。これを利用した実験の結果、波数ベクトルの小さい領域（$k<1000\ cm^{-1}$）においては、強誘電性ソフトモードが振動的に振る舞うことが明らかになった。その振動数は顕著な温度依存性を示し、相転移温度に向かってソフト化した。一方、減衰定数は温度依存性をほとんど示さないことが分かった。これらのことを、緩和型の強誘電性ソフトモードとフォトンとの結合で形成されるフォノン・ポラリトンによりこれらの実験結果を矛盾なく説明することに成功した。フォノン・ポラリトンでは波数ベクトルが小さな領域においては、強誘電性ソフトモードの振動数は波数ベクトルの大きさにほぼ比例する。図1に実験から求められた振動数の分散関係を示す。また直線の傾きはTHz領域の誘電率を表すが、図1から求められたその値は、これまでの報告値とよく一致し、実験の正確さを示した。

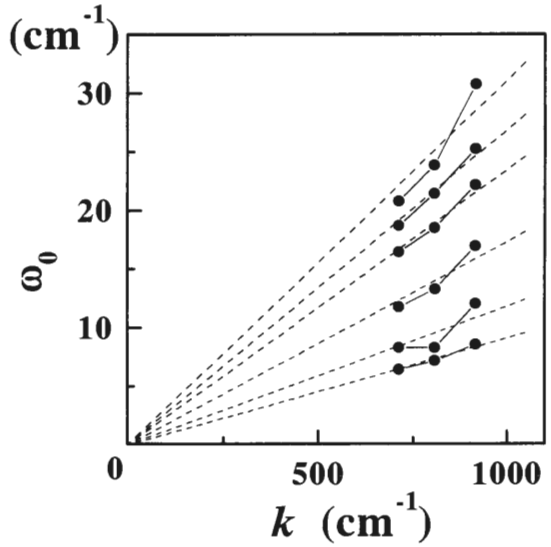


図1．強誘電性ソフトモードポラリトンの分散関係

(b)　硫酸グリシンにおけるセントラルピークの物理的起源

硫酸グリシン（TGS）は典型的な規則・不規則型の構造相転移をする一軸性強誘電体（自発分極がb軸に平行）である。1980年TGSのブリルアン散乱実験において、周波数がゼロの位置を中心とする光散乱ピーク（セントラルピーク）が発見された。ところが光散乱に用いた分光器の周波数分解能限界が約1GHzであったため、セントラルピークの線幅の温度依存性を測定することができなかった。これが、セントラルピークの起源について、全く異なる2つの説が提案される原因となった。熱緩和モードをセントラルピークの起源とする説と、分極緩和モードを起源とする説である。

時間分解分光法であるパルス誘導光散乱（ISLS）測定装置を用いて、周波数に換算すると1GHzにある分光器の周波数分解能限界を超える非常にゆっくりとした10 μsec程度の緩和時間を持つ熱緩和モードを観測することに成功している。図2は$t=0$におけるパルス励起後の熱緩和モード強度I（0）の温度依存性と異方性である。c軸方向だけにλ型の異常が現われている特徴を見出した。解析の結果、このI（0）の温度依存性と異方性はブリルアン散乱で発見されたセントラルピークと同じ物理起源によるものであることが分かり、この結果から、論争中のセントラルピークの物理的起源は分極緩和モードではなく熱緩和モードであることが結論された。

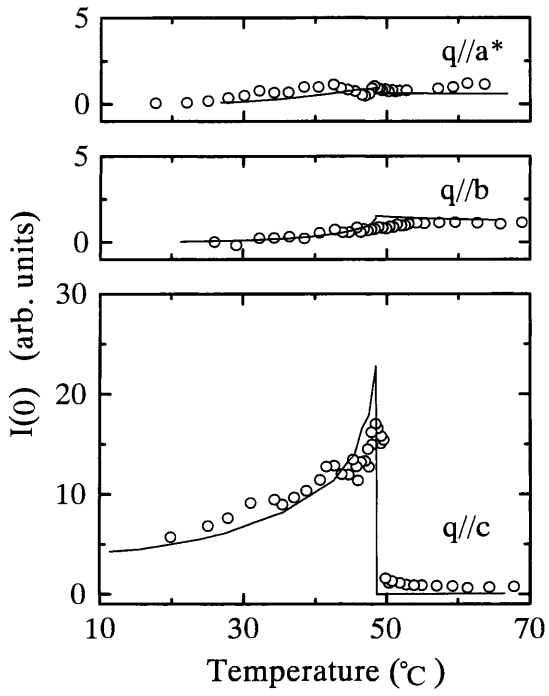


図2．熱緩和モードの強度I(0)の温度依存性

(c) $KHCO_3$ のダイマーモードの波数依存性とその緩和時間の同位元素効果

$KHCO_3$ の $(HCO_3)_2$ ダイマーの配向に関するゾーンセンターモード(Q_F モード)とゾーン境界モード(Q_A モード)は相転移点 $T_N=318$ K に向かってソフト化するが、Q_A モードが Q_F モードより先に凍結することで、antiferrodistortive 相が生じる。水素結合中のプロトンの運動と強い相関を持つダイマーの配向運動の同位元素効果が、$KHCO_3$ と $KDCO_3$ の Q_F モードの光散乱スペクトルの比較から解明された。

しかし、光散乱と中性子散乱で得られた $KDCO_3$ の Q_F モードの緩和時間 τ は、T_N において1桁程度の違いがあった。この違いを説明するために、Q_F モードが c_{66} モードと双1次結合していることを考慮に入れて運動方程式を解き、τ の波数依存性を求めた。光散乱実験の結果を用いて中性子散乱で観測される τ を計算し、中性子散乱実験の結果と比較したところ、図3の●と△に示すように非常に良く一致した。このことから、τ の違いは Q_F モードの波数依存性によることが結論された。さらに、中性子散乱で観測される波数における $KHCO_3$ の Q_F モードの τ を $KDCO_3$ のそれと比較した。その結果、図3の□と●で示すように、中性子散乱で観測される波数における Q_F モードの緩和時間 τ の同位元素効果が明らかにされた。

(d) 表面融解相のブリルアン散乱

物質の表面が融解現象において重要な役割を担うという考えは非常に古く Faraday により19世紀半ばに始まり、それ以後、表面融解の視点から融解現象はこれまで多くの研究がなされてきた。今世紀半ばに Stranski によって融点より下の温度においてすでに結晶表面の数分子層の厚みで原子配列の長距離秩序が消失する疑似液体層の概念が導入され、その存在について実験的、理論的、さらにコンピューターシミュレーションなど数多くの研究が報告されているが、いずれも間接的な確認にとどまっており、融解機構は解明されていない。

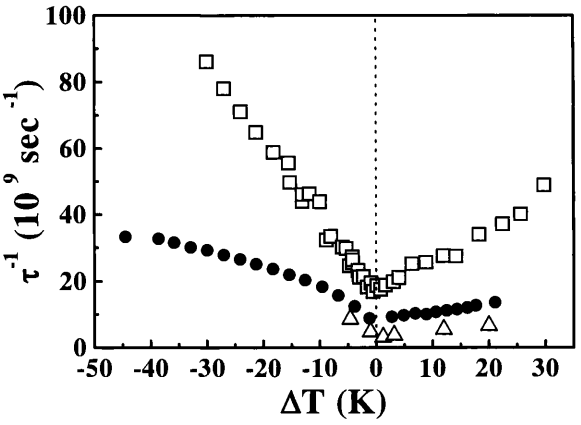


図3．Q_F モードの緩和時間の逆数の温度依存性

本研究は強誘電体結晶 $LiH_3(SeO_3)_2$（略称 LTS）が示す表面融解に注目し、融点近傍でブリルアン散乱実験を行い分光学的立場から融解現象の動的機構を明らかにするために行なわれた。測定は180°散乱配置で行い、サンダーコック型タンデム式ファブリ・ペロー分光器を用いた。ブリルアン散乱スペクトルには固体中の音響モード（縦波音響（LA）モードと横波音響（TA）モード）に加え、図4に示すような融点（380 K）の約25 K下の温度領域からさらにもう1つの興味あるモード（融解前駆モード）がそれぞれのフォノン波数ベクトルで観測された。このモードは融点（T_M）に向かって融解の前駆現象として顕著なソフト化を示し振動数シフトが連続的に液体相の LA モードへつながる。さらにスペクトルの偏光特性が VV であることを考慮するとこの融解前駆モードは表面融解領域における LA タイプのモードであると考えられる。

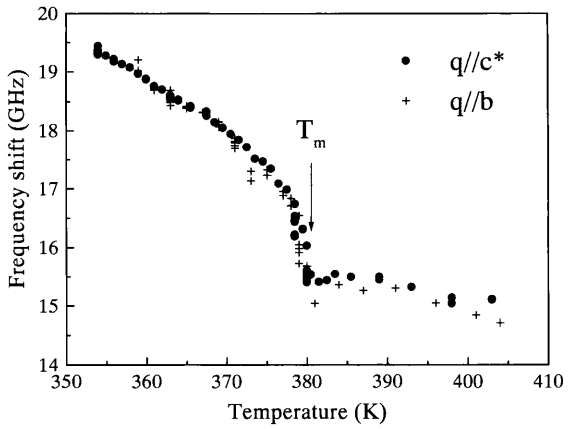


図4．融解前駆モードの周波数シフトの温度依存性

(e) ブリルアン散乱による SrTi $(^{18}O_{0.87}{}^{16}O_{0.13})_3$ の音響フォノン異常の測定

チタン酸ストロンチウム $SrTiO_3$ の ^{16}O を ^{18}O に部分的に置き換えることにより、170,000 を越える極めて巨大な誘電率を持つ強誘電体 SrTi $(^{18}O_x{}^{16}O_{1-x})_3$ が得られている。本研究では音響フォノンの精密測定により、SrTi $(^{18}O_x{}^{16}O_{1-x})_3$ の強誘電性相転移の動的機構を解明することを目的として 90°ブリルアン散乱を行った。用いた試料は ^{18}O 置換率 x が 0.87 の SrTi $(^{18}O_{0.87}{}^{16}O_{0.13})_3$ で、誘電率の測定から相転移温度 T_c は 22 K のものである。図 5 は縦波音響フォノン (c_{33}) と横波音響フォノン (c_{44}) の周波数の温度依存性を示している。この図から、正方晶で 2 重に縮退している c_{44} フォノンが温度 $T_B \approx 25$ K 以下で、縮退がとけて TA 1 フォノンと TA 2 フォノンに分離している。このことは、T_B ですでに相転移が起こっており、T_B 以下では結晶の対称性が正方対称より低くなっていることを意味する。

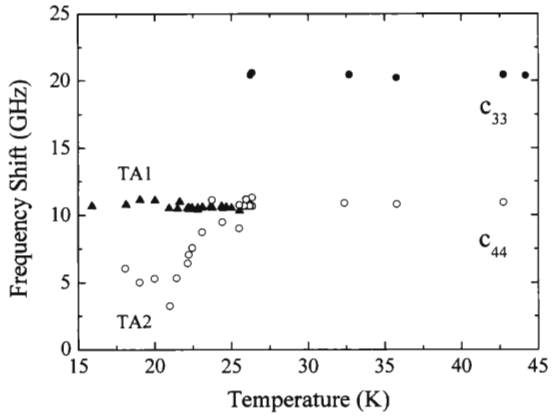


図 5．c_{33}、c_{44} 音響フォノンの周波数の温度依存性

(f) ラマン散乱による SrTi $(^{18}O_{0.87}{}^{16}O_{0.13})_3$ の強誘電性微少領域スペクトルの測定

SrTi $(^{18}O_{0.87}{}^{16}O_{0.13})_3$ のラマン散乱は 40 K 以下相転移点 (24 K) まで強誘電性微少領域 (FMR) の存在を示唆するスペクトル (図 6 の FMR と示された非対称線) を示す。また図 7 には、FMR のサイズの温度変化を示す。強誘電相では 110 K の構造相転移に関するソフトモードのほかに、高温相の強誘電モード A_{2u} に対応すると思われるモードのみ観測され、それはソフト化しない。転移点以上で観測される FMR がある程度の大きさになり、その相互作用の結果、FMR が結晶全体を占めたとき強誘電相が発生すると考えられる。

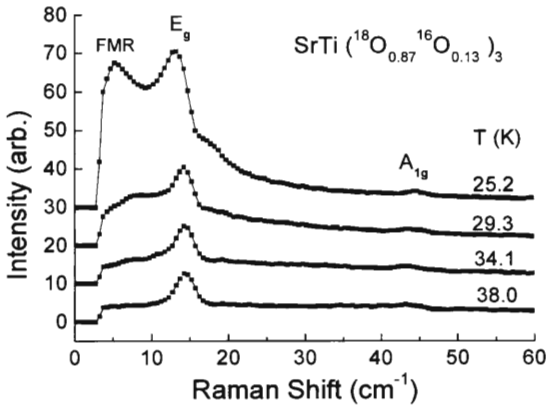


図 6．SrTi $(^{18}O_{0.87}{}^{16}O_{0.13})_3$ のラマン散乱スペクトル

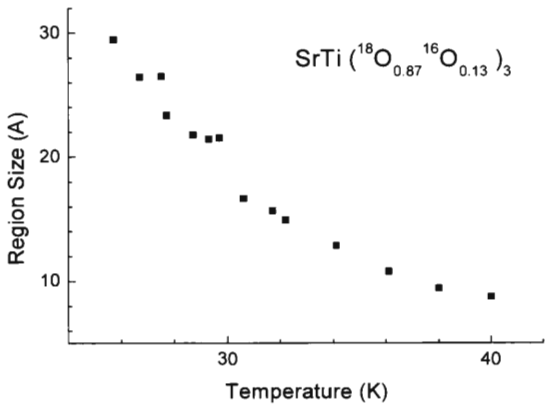


図 7．強誘電性微少領域のサイズの温度依存性

FMR では運動量の保存則が成り立たず、ラマンスペクトルの低周波数端が、ブリルアンゾーンにおける波数ゼロのフォノンの最低周波数に対応している。これ用いて、常誘電相でラマン非活性なソフトモードが存在することを確認した。結果は、図 8 に示すように、ソフトモードの周波数が相転移点でゼロ、またはゼロ近くに減少する。これらの事から、STO18 の相転移はソフトモード凍結により引き起こされると結論できた。

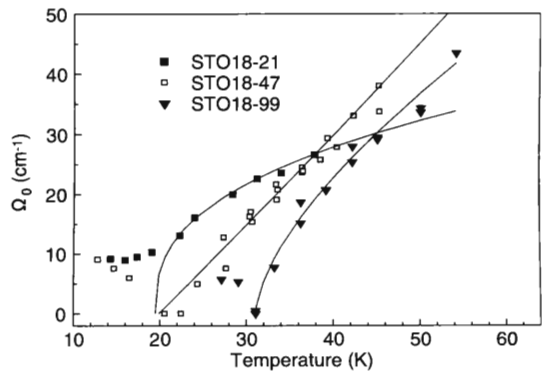


図 8．FMR スペクトルから得られたソフトモード振動数の温度依存性

(g) 時間分解分光法によるグリセロールの緩和ダイナミクス

ISS (Impulsive Stimulated light Scattering) では、試料を過渡的干渉電場により熱的に励起することで、選択した波数をもつ密度揺らぎをつくることができる。

ガラス形成物質であるグリセロール ($HOCH_2CHOH$-CH_2OH) (ガラス転移点 $T_g = 185$ K、融点 $T_m = 291$ K) において ISS 測定を行った結果、密度揺らぎの緩和時間 τ_R がガラス転移点よりも数十度高い温度付近でピークをとる

という異常を示した。各波数($q_1=8.3\times10^2cm^{-1}$、$q_2=8.6\times10^3cm^{-1}$、$q_3=3.4\times10^4cm^{-1}$）での τ_R の温度依存性を誘電緩和測定による構造緩和時間（q＝0）とともに図9に示す。この図から、τ_R がピークを示す温度が低波数になるに従い低温側にシフトしていることがわかる。これらのことから、ガラス転移現象の理解のために導入されている密度ゆらぎを特徴づける長さのスケールを直接決定することができた。

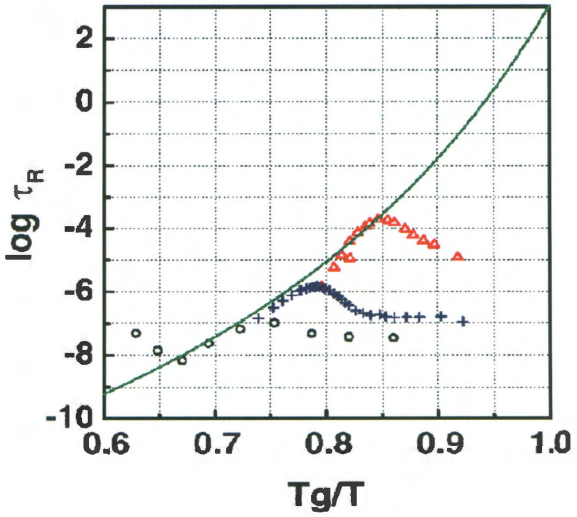


図9．q＝0の誘電緩和測定による構造緩和時間のアレニウスプロットと各波数での τ_R の温度依存性
△：q_1、＋：q_2、○：q_3、実線：誘電緩和測定

(h) フェムト秒光パルス列によるソフトフォノン非線形ダイナミクスの研究

構造相転移を引き起こすソフトフォノン不安定化の機構を本質的に解明するには、フォノンの振動の非線形性を観測し、ソフトフォノンの受けるポテンシャルの非調和性を考慮する必要がある。

そこで本研究では、マッハツェンダー干渉計型の光学系をn段階用い、コンピューターで制御された光学遅延装置を組み込むことにより、任意の時間間隔を有する 2^n 個のフェムト秒光パルス列を生成するシステムを構築した。さらにこのシステムを用いてパルス誘導ラマン散乱実験(ISRS)を行い、フォノンの選択励起や大振幅励起など、固体の光学フォノン振動の制御に成功した。その一例として、KTS [$KH_3(SeO_3)_2$] の TO フォノン（B_{3g} モード）を選択励起した結果を図10に示す。

(i) ISRS による KDP の強誘電性 B_2 ソフトモードの初期過程の解明

りん酸二水素カリウム（KDP）は、秩序無秩序型の水素結合型強誘電体である。歴史的に秩序無秩序型の分極ゆらぎの動的振舞いは Debye モデルで記述され、実時間での分極ゆらぎの振舞いは単一指数関数で表されるが、時間原点(t＝0)近傍の振舞いは与えられていない。本研究では時間

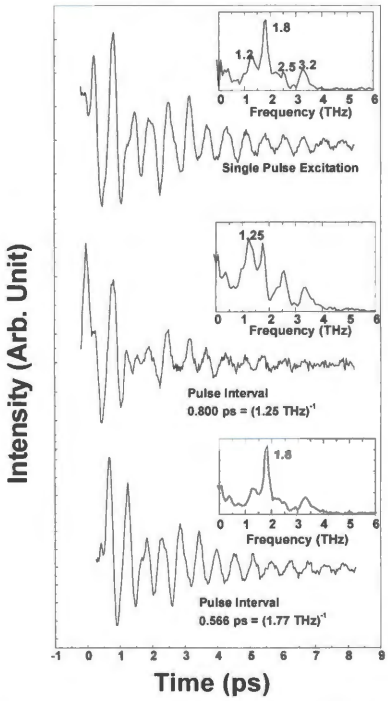


図10．$KH_3(SeO_3)_2$ の B_{3g} モードの選択励起

巾80フェムト秒の超短パルスレーザーを用いたパルス誘導ラマン散乱実験（ISRS）でKDPの強誘電性 B_2 ソフトモード（分極ゆらぎ）を励起し、特に立ち上がりの特性に注目して、その振舞いを直接時間領域で観測した。図11に転移点（T_c＝123 K）付近で観測し得られたKDPの強誘電性 B_2 ソフトモードの時間依存性を示す。このように電子応答の裾からの明瞭な立ち上がりを発見した。観測された動的振舞いは従来の分極ゆらぎの緩和過程のみを記述したDebyeモデルでは記述できない全く新しい現象であることが判明した。さらに測定波数 k を1,570、2,620、3,140 cm^{-1} と変えることにより、B_2 モードの初期過程の詳細を明らかにした。なお、測定には高S/N比が期待できる光ヘテロダイン検波法を採用した。図12にそれぞれの波数で測定した B_2 モードを修正Debyeモデル（MDM）で解析し、得られた立ち上がり特性時間 τ_m の温度依存性を示す。その結果 τ_m は温度依存せず、さらに波数依存もほとんどないことがわかった。またMDMの適用限界も明らかになった。

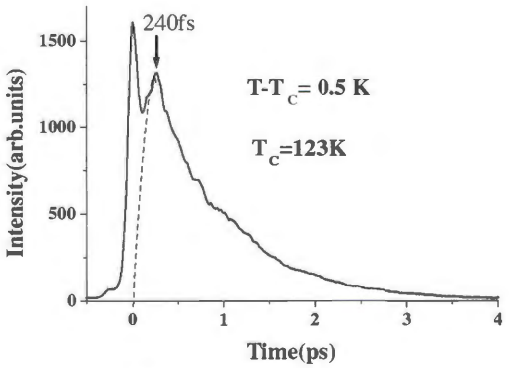


図11．強誘電性 B_2 ソフトモードの時間依存性

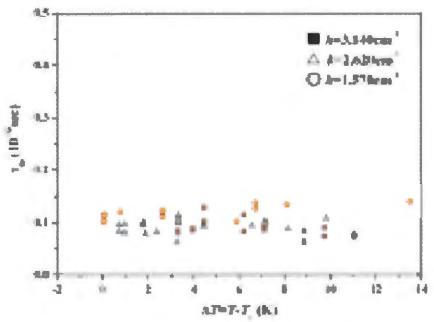


図 12. いくつかの波数ベクトルにおける τ_m の温度依存性

(j) フォノンーポラリトンの観測による STO18 の相転移機構の研究

量子常誘電体 $SrTiO_3$ の ^{16}O を ^{18}O に同位体置換した $SrTi(^{18}O_x{}^{16}O_{1-x})_3$：STO18 は、置換率 $x \geqq 0.33$ において強誘電性を示すことが知られているが、その相転移機構に関しては不明な点が多く残る。本研究で、パルス誘導ラマン散乱（ISRS）実験を行い、ソフトモードとフォトンの結合系である A_1 フォノン-ポラリトンを観測した。なお、光学位相マスクを用いたヘテロダイン検波を導入し、初めて STO18 ($x=0.53$) のポラリトンの観測に成功した。測定温度は強誘電相である 9.5 K、励起波数は約 1400 cm^{-1} ～4500 cm^{-1} である。図 13 は分散関係であり、これから静的誘電率を求めたところ 2.37×10^4 であった。したがって、このモードが強誘電性ソフトモードであると考えられる。

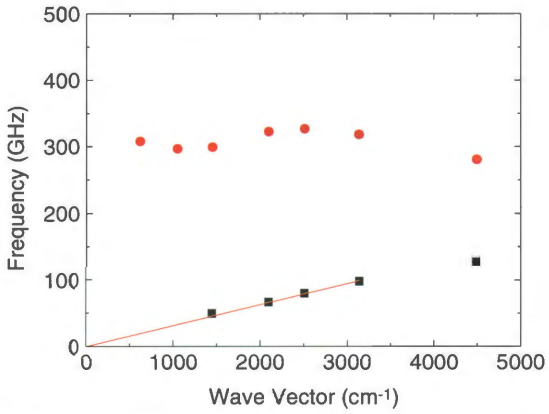


図 13. STO18 の A_1 フォノン・ポラリトン分数関係

(k) 量子常誘電状態の光誘起効果

光誘起相転移に関する研究は特に電子相関や電子格子相互作用の大きな有機系の物質群や半導体、磁性半導体等の物質群で精力的な研究が行われている。しかし実際に光誘起相転移が確認された物質例はまだ僅かであり、さらに新たな光誘起相転移系の物質開拓や光誘起相転移機構解明がこれからの重要な研究課題として考えられる。またレーザ技術の進歩で、いわゆるワイドギャップ系の物質群で興味深い光誘起相転移の出現が期待される。本研究では量子常誘電状態を示すペロブスカイト型酸化物 $SrTiO_3$ に注目し、バイアス電場下で電子励起を伴った光励起を行った。その誘電率を測定した結果、光誘起効果として図 14 に示されるように光励起ー電場印加下で絶対零度に向かって異常な増大を示し、さらに誘電損失にも顕著な増加が測定された。光ー電場誘起誘電率の励起光強度依存性は強度の増加と共に数千倍に達することが発見された。

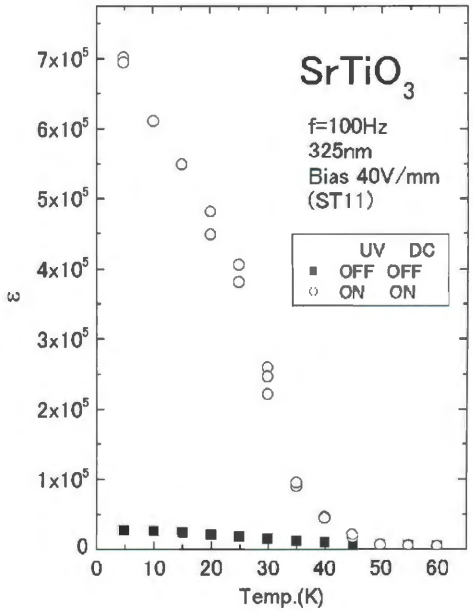


図 14. 光・電場誘起効果による誘電率の異常増大

(l) リラクサーPZN のブリルアン散乱

$Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZN) は $T_m=413$ K で誘電率（f= 1 kHz）のピークをとり、広い温度領域にわたって高い誘電率を示す強誘電体リラクサーである。常温での菱面晶相から温度上昇につれ立方晶相に相転移することが知られている。誘電特性の解釈として、相転移温度よりも高い温度から発生する、温度に依存した極性マイクロクラスター (PMC) によるものとされ、電子顕微鏡でも直接観測されている。しかし、誘電率に直接影響を及ぼすと考えられる PMC の動的振る舞いについては解明するに至っていない。本研究では、分光学的立場から PMC の動的機構と相転移機構との関係を明らかにすることを目的とし、$(001)_c$ 平板試料を用いてブリルアン散乱を 300～470 K 温度領域で行った。散乱ベクトルは $q//[100]_c$ である。図 15 は特徴的な(a) V-V、(b) V-H 散乱スペクトルである。ブリルアン散乱スペクトルには固体中の音響モード（縦波音響（LA）モードと横波音響（TA）モード）に加え、セントラルピークが顕著に観測された。図 16 では、セントラルピークが PMC に依るものとして superparaelectric model を適用し、0 K での活性化エネルギー $H_0=900$ K $=0.0774$ eV が求められた。

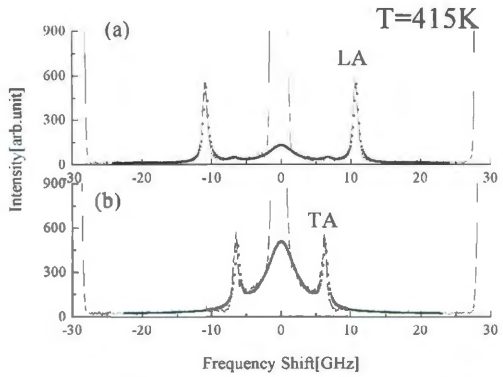


図 15. 415 K におけるリラクサーPZN のブリルアン散乱スペクトル.

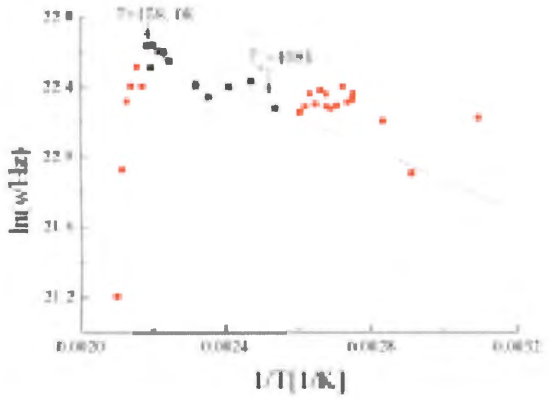


図 16. リラクサーPZN のセントラルピーク幅の温度依存性

(m) PAMPS ゲルの光散乱

高分子ゲルにおいてその多様な機能性と高分子ネットワークダイナミクスの関連が興味深い。この研究ではポリ-2-アクリルアミド-2-メチルプロパンスルホン酸（PAMPS）機能性電解質高分子ゲルを試料として高分解能・広帯域分光法を用いて、±600 GHz の振動数範囲においてセントラルピーク（CP）と縦波音響（LA）フォノンのスペクトルを観測した。実験システムの光源はアルゴンレーザー（λ = 514.5 nm）で、分光器は 6 パス方式サンダーコック干渉分光計を用いた。実験では試料の架橋度を変えて、スペクトルの架橋度依存性を観測した。その結果 PAMPS ゲルにおいて、CP スペクトル（図 17）から観測した振動数領域において二種類の緩和現象があることがわかり、LA フォノンスペクトル（図 18）に明らかな架橋度依存性があることが観測された。CP のスペクトル幅の逆数はネットワーク揺らぎの緩和時間を与えるが、得られた緩和時間はそれぞれ 0.48 ps と 3.2 ps となり、これは従来の動的光散乱実験（DLS）で報告されている緩和時間に比べて 5 ～ 6 桁小さい。本実験では観測範囲として 10^{-8}～10^{-12}s の緩和時間測定が可能であり、本研究の結果と DLS の観測範囲（10^{-7} ～ 1 s）を相補的にあわせると高分子ネットワーク揺らぎを 1 ～10^{-12}s の範囲で解明したことになる。これにより緩和時間に高分子ゲルの高次構造を反映した階層構造が存在することが明らかになった。

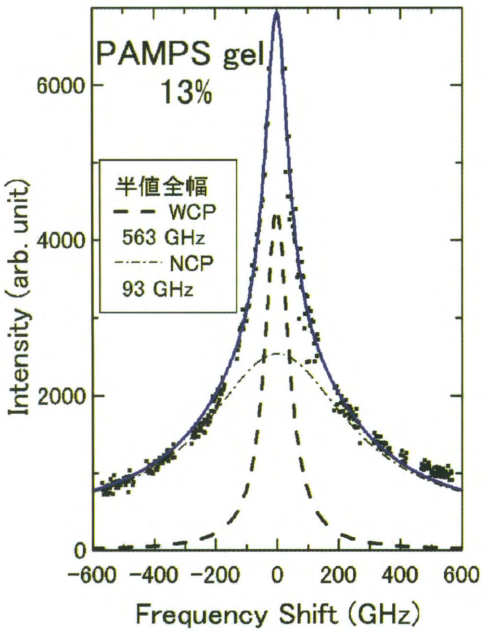


図 17. PAMPS（架橋密度 13%）のセントラルピークスペクトル

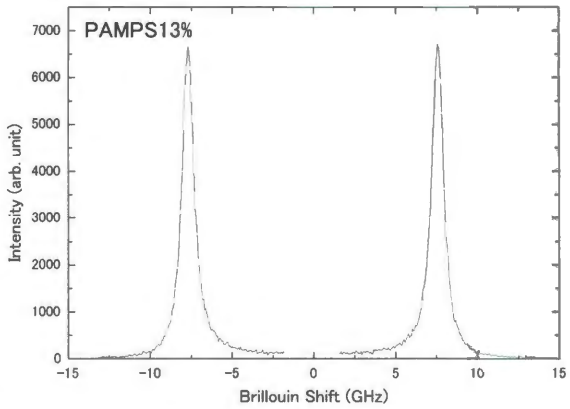


図 18. PAMPS（架橋密度 13%）の縦波音響フォノンスペクトル

3．今後の研究の展望・将来計画

現在までは結晶、液体などの空間的に均一な系における極性状態あるいはガラス状態などの秩序の発生機構を、振動数ドメインと時間ドメインの両方から相転移ダイナミクスとして解明してきた。今後は、現在までの均質系の相転移の研究に用いて成果をあげて確立した実験手法を、不均一系における相転移現象、特に高分子ゲルなどのソフトマテリアルさらにはバイオ物質までを広く対象として適用してそのダイナミクスを解明したい。さらに新しい対象として量子ゆらぎやリラクサー強誘電体における量子ゆらぎと拮抗するマイクロ極性クラスターのダイナミクスなどが興味深い。実験手段としては時間分解分光法において光学位相マスクとヘテロダイン検波法を組み合わせることで顕著な効果があることが明らかにされており、今後は更なる高性能化を充実したい。

4. 資料

4.1 学術論文

1) S. Takasaka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Acoustic anomaly in the antiferrodistortive phase transition of $KHCO_3$ studied by Brillouin scattering", Phys. Rev., B56: 10715-10718 (1997)*

2) A. Simon, M. Takesada, K. Weishaupt, M. Gelfand, A. Onodera and H. D. Hochheimer: "A High Pressure Brillouin Scattering Study of Ammonium Fluorberyllate", Solid State Commun., 101: 139 (1997)*

3) M. Kasahara, J. Watanabe and T. Yagi: "A new pressure-induced phase of the zero-dimensional hydrogen bonded $K_3D(SO_4)_2$ studied by Raman scattering", Ferroelectrics, 203: 127-132 (1997)*

4) M. Yamaguchi, T. Yagi, T. Azuhata, T. Sota, K. Suzuki, S. Chichibu and S. Nakamura: "Brillouin scattering study of gallium nitride: elastic stiffness constants", J. Phys.: Condens. Matter, 9: 241-248 (1997)*

5) S. Takasaka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Light scattering Study of Dimer Mode Dynamics in $KDCO_3$", Ferroelectrics, 203: 167-178 (1997)*

6) S. Yoshioka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "The B_2 polariton mode in KDP studied by impulsive stimulated Raman scattering", J. Phys. Soc. Jpn., 67: 2178-2181 (1998)*

7) K. Weishaupt, M. Takesada, A. Simon, M. P. Gelfand, A. Onodera and H. D. Hochheimer: "Pressure and temperature dependence of the elastic constants of ammonium fluoroberyllate", Phys. Rev., B57: 5693-5698 (1998)*

8) Y. Tsujimi, T. Matsui, H. Furuta and T. Yagi: "Physical origin of dynamical central peak in ferroelectric triglycine sulfate", Phys. Rev., B59: 28-31 (1998)*

9) Y. Tsujimi, T. Matsui, H. Furuta and T. Yagi: "Anisotropic thermal relaxation dynamics in TGS studied by impulsive stimulated light scattering", J. Phys. Soc. Jpn., 67: 1509-1512 (1998)*

10) S. Yoshioka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "A single exponential time decay of the ferroelectric soft B_2 mode of KDP studied by impulsive stimulated Raman scattering", Solid State Commun., 106: 577-580 (1998)*

11) S. Yoshioka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Coherent excitation of ferroelectric soft B_2 mode of KDP by impulsive stimulated Raman scattering", J. Phys. Soc. Jpn., 67: 377-380 (1998)*

12) Y. Yamazaki, M. Kasahara, T. Yagi and Y. Akishige, "Micro-Raman scattering of reduced hexagonal barium titanate", J. Korean Phys. Soc., 32: S594-S596 (1998)*

13) T. Ishiwada, M. Kasahara and T. Yagi, "Dynamics of hydrogens and deuterons in $K_3D_xH_{1-x}(SeO_4)_2$ studied by Raman scattering", J. Korean Phys. Soc., 32: S562-S564 (1998)*

14) M. Watanabe, T. Yagi and M. Yamaguchi, "The field dependence of the doublet spectra in quantum paraelectric $SrTiO_3$ studied by Brillouin scattering", J. Korean Phys. Soc., 32: S556-S558 (1998)*

15) H. Furuta, Y. Tsujimi and T. Yagi, "Relaxation time of the molecular orientation in ammonium chloride studied by impulsive stimulated Brillouin scattering", J. Korean Phys. Soc., 32: S512-S514 (1998)

16) J. Watanabe, M. Kasahara and T. Yagi, "Raman scattering studies of $K_3H(SO_4)_2$ under high pressure", J. Korean Phys. Soc. 32: S559-S561 (1998)

17) Y. Tsujimi, T. Matsui, H. Furuta and T. Yagi: "Physical Origin of Dynamical Central Peak in Ferroelectric Triglycine Sulfate," *Phys .Rev .B*, 59(1): 28-31 (1999)*

18) Y. Tsujimi, M. Kobayashi, H. Furuta and T. Yagi: "Ultraslow Relaxation Dynamics in TGS and D-sorbitol Studied by Time-resolved Spectroscopy," *J. Therm. Anal,* 57: 859-865 (1999)*

19) M. Yamaguchi, T. Nakayama and T. Yagi: "Effect of High Pressure on the Bose Peak in a-GeS_2 Studied by Light Scattering," *Physica B*, 263-264: 258-260 (1999)*

20) M. Takesada, M. Kasahara and T. Yagi: "Premelting Phenomena of $LiH_3(SeO_3)_2$ studied by Brillouin scattering," *Physica B,* 263-264: 258-260 (1999)*

21) Y. Tsujimi, M. Kobayashi and T. Yagi: "Frequency and Time-resolved Spectroscopic Study of Liquid-glass Transition in D-sorbitol," *Physica B*, 263-264: 310-312 (1999)*

22) S. Yoshioka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "High Frequency Dielectric Constant of KDP Determined by Polariton Dispersion Relation," *Physica B*, 263-264: 829-831 (1999)*

23) S. Takasaka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Anisotropy of Thermal Relaxational Mode of $KHCO_3$ Studied by Impulsive Stimulated Thermal Scattering," *Physica B*, 263-264: 657-659 (1999)*

24) J. Watanabe, M. Kasahara and T. Yagi: "Phase Transition of Zero-dimensional Hydrogen-bonded Crystals Studied by Raman Scattering," *Physica B*,

263-264: 640-642 (1999)*

25) M. Sanada and T. Yagi: "High-resolution Brillouin Scattering Observation of Ferroelestic Soft Phonon, Using Spherical Fabry-Perot Interferometer and Computer Controlled Spectra Accumulation," *Physica B*, 263-264: 584-587 (1999)*

26) M. Yamaguchi, T. Yagi, T. Sota, T. Deguchi, K. Shimada and S. Nakamura: "Brillouin Scatteing Study of Bulk GaN," *J. Appl. Phys*, 85: 8502-8504 (1999)*

27) T. Deguchi, D. Ichiryu, K. Toshikawa, K. Sekiguchi, T. Sota, R. Matsuo, T. Azuhata, M. Yamaguchi, T. Yagi: "Structual and Vibrational Properties of GaN," *J. Appl. Phys*, 86: 1860-1866 (1999)*

28) M. Yamaguchi and T. Yagi: "Anharmonicity of Low-frequency Vibrations in a-GeS_2 Studied by Light Scattering," *Euro. Phys. Lett.*, 47: 462-467 (1999) *

29) M. Kobayashi, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Time-resolved Spectroscopic Study of Characteristic Length Scale in a Fragile-Glass Former D-Sorbitol," *J. Korean Phys. Soc.*, 35: S 1331-S1334 (1999) *

30) S. Takasaka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Dispersion Relation of the Relaxation Time of the Dimer Mode in $KDCO_3$," *J. Korean Phys. Soc.*, 35: S 1343-S1345 (1999)*

31) Y. Tsujimi, K. Sato, S. Yoshioka, M. Kobayashi, M. Kasahara,T. Shigenari K. Abe and T. Yagi: "Non-linear Phonon-Photon Interaction Dynamics in α-Quarts Studied by Time-resolved Spectroscopy," *J. Korean Phys. Soc*, 35: S 1392-S1395 (1999)*

32) T. Watanuki, S. Yoshioka, M. Kasahara,T. F. Crimmins, K. A. Nelson and T,Yagi: "Plariton Dispersion of $LiNbO_3$ Studied by Heterodyne ISRS with Phase Masks," *J. Korean Phys. Soc.*, 35: S 1400-S1403 (1999)*

33) M. Sanada and T. Yagi: "Brillouin Line Width Observation with High-Resolution Spherical Fabry-Perot Interferometer," *J. Korean Phys. Soc.*, 35: S 1490-S1492 (1999)*

34) M. Takesada, M. Kasahara and T. Yagi: "Acoustic Anomaly in a Pre-melting Layer on a Crystal Surface Studied by Brillouin Scattering," *J. Phys. Soc. Jpn.*, 69(3): 40-44 (2000)*

35) T. Yagi, T. Watanuki and S. Yoshioka: "Coherent Excitation of Ferroelectric Mode of KDP and $LiNbO_3$," *Ferroelectrics*, 239: 173-180 (2000)*

36) T. Yagi: "Coherent Phonon Excitation by Ultrashort Laser Pulses and Its Application for Phase Transition Study," *Proc. of The XVIIth International Conference on Raman Spectroscopy*, 430-437 (2000)*

37) H. Furuta, S. Endo, M. Kobayashi, J. Watanabe, M. Kasahara and T. Yagi: "Pressure-temperature Phase Diagram of Zero-dimensional Hydrogen-bonded Crystal K_3 $H(SO_4)_2$ Studied by Raman Scattering," *Ferroelectrics*, 242: 37-45 (2000)*

38) M. Yamaguchi, T. Yagi, R. Wang and M. I toh: "Light scattering study of ferroelectric phase transition in $SrTi^{18}O_3$," *Phys. Rev. B*, 63: 172102-172104 (2001)*

39) M. Kasahara, H. Hasebe, R. Wang, M. Itoh and T. Yagi: "Raman scattering study of $SrTi^{18}O_3$," *J. Phys. Soc. Jpn.*, 70(3): 648-651 (2001)*

40) T. Watanuki, S. Yoshioka, M. Kasahara, T. F. Crimmins, K.A. Nelson and T. Yagi: "Reinvestigation of the dispersion relation fo A_1 phonon-polariton in $LiNbO_3$ by the improved heterodyne ISRS study," *J. Phys. Soc. Jpn.*, 70(9): 2784-2787 (2001)*

41) Y. Tsujimi, H. Hasebe, R. Wang, M. Itoh and T. Yagi: "Ferroelectric phase transition of $SrTi^{18}O3$ studied by Brillouin scattering," *Ferroelectrics*, 261: 213-281 (2001)*

42) M. Takesada and S. Koshihara: "Photo-induced effect of ferroelastic phase transition in $KD_3(SeO_3)_2$," *Ferroelectrics*, 264: 309-314 (2001)*

43) M. Takesada and S. Koshihara: "The Heat is off at cutting edge," *Look Japan*, 47(541): 30-31 (2001)*

44) S. Koshihara, Y. Ogawa, T. Ishikawa, M. Takesada, A. Oiwa, H. Munekata, T. Komori and J. Yoshino: "Photo-induced phase transition in organic and inorganic materials," *Current Applied Physics*, 1: 21-27 (2001)*

45) M. Kasahara, R. Wang, M. Itoh and T. Yagi: "Soft mode of $SrTi^{18}O_{3x}{}^{16}O_{3(1-x)}$ studied by Raman scattering", J. Phys. Soc. Jpn., 71-5: 1254-1256 (2002)

46) M. Yamaguchi, T. Yagi, Y. Tsujimi, H. Hasebe, R. Wang and M. Itoh: "Brillouin Scattering Study of the Broad Doublet in Isotoically Exchanged $SrTiO_3$", Phys. Rev. B, B65: 172102 (2002)

47) H. Hasebe, Y. Tsujimi, R. Wang, M. Itoh and T. Yagi: "Brillouin Scattering Study of Ferroelectric SrTi $(^{18}O_x{}^{16}O_{1-x})_3$", Ferroelectrics, 272: 39-44 (2002)

48) T. Yagi, M. Kasahara, Y. Tsujimi, M. Yamaguchi, H. Hasebe, R. Wang and M. Itoh: "Brillouin and Raman scattering study of the isotopically induced ferroelectric phase transition of $SrTi^{18}O_3$", Physica B, 316-317: 596-599 (2002)

49) Y. Gorouya, Y. Tsujimi, Y. Yamashita, T. Ifukube

and T. Yagi: "Central Peak in Pb ($Z_{n1/3}N_{b2/3}$) O_3/9% $PbTiO_3$ Relaxor Studied by 90° Brillouin Scattering", Ferroelectrics, 266: 165-169 (2002)

50) Y. Ogawa, S. Koshihara, M. Takesada and T. Ishikawa: "Electric and Structural Phase Transition Controlled by Photo-excitation and Magnetic Field in Spin Crossover Complex", Mol. Crst. Liq. Cryst., 379: 357-364 (2002)

51) J. Kano, Y. Tsujimi, K. A. Nelson and T. Yagi: "Initial Process of the Ferroelectric B_2Soft Mode of KDP Studied by Impulsive Stimulated Raman Scattering with heterodyne detection", Ferroelectrics, 272: 57-62 (2002)

52) T. Yagi, M. Kasahara, Y. Tsujimi, M. Yamaguchi, H. Hasebe, R. Wang and M. Itoh: "Isotropically Induced Ferroelectric Phase Transition in $SrTi^{18}O_3$ Studied by Brillouin and Raman Scattering", Ferroelectrics, 266: 153-163 (2002)

53) M. Kasahara, H. Hasebe, R. Wang, M. Itoh and T. Yagi: "Phase transition of $SrTi^{18}O_3$ studied with Raman scattering", Ferroelectrics, 272: 15-19 (2002)

54) M. Kobayashi, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Relaxation Dynamics in Glycerol Studied by Impulsive Stimulated Thermal Scattering", Journal of Non-Crystalline Solids, 307-310C: 252-256 (2002)

55) S. Takasaka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Shear Stress Induced Phase Transition in $KHCO_3$ Studied by Brillouin Scattering.", Phys. Rev. B, B65: 174102 (2002)

56) T. Luty, H. Cailleau, S. Koshihara, E. Collet, M. Takesada, M. H. Leeme-Cailleau, B. M. Cointe, N. Nagaosa, Y. Tokura, E. Zienkiewicz and B. Ouladdiaf: "Static and dynamic order of cooperative multi-electron transfer", Europhys. Lett., 59: 619-625 (2002)

57) S. Yoshioka, T. Yagi, S. Nakashima and T. Okada: "Temperature Dependence of Low-frequency Response of Liquid 1-alkenes Studied by Femtosecond Optical Kerr Effect Spectroscopy", J. Mol. Liq., 96-97: 275-285 (2002)

58) M. Kasahara and T. Yagi: "The phase transition of $(ND_4)_3D(SO_4)_2$ studied with Raman scattering", Ferroelectrics, 266: 131-137 (2002)

59) T. Yagi, M. Kasahara, Y. Tsujimi, H. Hasebe, M. Yamaguchi, R. Wang and M. Itoh: "Soft-phonon Dynamics in the Iisotopically Induced Phase Transition of Strontium Titanate", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 718: 183-188 (2002)

4.2 総説、解説、評論等

1) 笠原勝、ポーカウン、八木駿郎：〝ゼロ次元水素結合系のダイナミクス —$K_3D_xH_{1-x}(SO_4)_2$のラマン散乱—〟、固体物理、32：83-88 (1997)

2) 笠原勝、八木駿郎：〝ラマン散乱による水素結合系混晶におけるH結合とD結合の相互作用の解明〟、日本結晶学会誌、40：48-51 (1998)

3) 八木駿郎：「ピコ・フェムト秒時間分解分光法による相転移研究の展開」、電子科学研究、7：10-17 (1999)

4) 八木駿郎：「コヒーレントフォノン励起法による相転移ダイナミクスの研究」、固体物理「誘電体物理の新しい展開」特集号、35(9)：83-90 (2000)*

5) 山口雅史、八木駿郎：「光散乱による$SrTiO_3$の最近の研究から」、固体物理「誘電体物理の新しい展開」特集号、35(9)：161-170、(2000)*

6) 辻見裕史、長谷部弘毅、八木駿郎、王瑞平、伊藤満：「ブリルアン散乱による$SrTi(^{18}O_x{}^{16}O_{1-x})_3$の音響フォノン異常の測定」、電子科学研究、8：43-44(2000)

4.3 著書

1) T. Yagi: "Ferroelectrics and related substances, Oxides: Perovskite type oxides and $LiNbO_3$ family," Landolt-Bornstein/New Series; III, [36-A1] (Springer) (2001)*

2) T. Yagi: "Ferroelectrics and Related Substances, Oxides: Oxides other than Perovskite-type and $LiNbO_3$ family", Landolt-Bornstein III/36A2, Springer, 36A2: (2002)

4.5 招請講演

1) 八木駿郎：〝時間分解法による相転移ダイナミクスの研究〟、神奈川科学アカデミー (KAST) 腰原プロジェクトセミナー、川崎 (1998)

2) 武貞正樹：〝1次相転移のミクロモデル〟、神奈川科学アカデミー (KAST) 腰原プロジェクトセミナー、川崎 (1998)

3) 吉岡伸也：〝時間分解分光法によるKDPの相転移機構〟、北海道大学電子科学研究所公開シンポジウム、札幌 (1998)

4) 辻見裕史：〝TGSの熱緩和ダイナミクス〟、北海道大学電子科学研究所公開シンポジウム、札幌 (1998)

5) 山口雅史、八木駿郎：〝ペロフスカイト系酸化物の光散乱による研究〟、日本物理学会第53回年会、千葉(1998)

6) M. Kobayashi, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Time-Resolved Spectroscopic Study of Characteristic Length Scale in a Fragile-Glass Former D-Sorbitol," The 3-rd Korea-Japan Conference on Ferroelectrics, Kyongju, Korea (1999-6)

7) S. Takasaka, Y. Tsujimi and T. Yagi: "Dispersion Relation of the Relaxation Time of the Dimer Mode

in $KDCO_3$," The 3-rd Korea-Japan Conference on Ferroelectrics , Kyongju, Korea (1999-6)

8) 八木駿郎：「$SrTi^{18}O_3$ のブリルアン散乱」、KEK 研究会「水素結合誘電体―水素結合プロトンの振動スペクトルと同位体効果―」、高エネルギー研究機構、日本 (1999-12)

9) T. Yagi: "Coherent Phonon Excitation by Ultrashort Laser Pulses and Its Application for Phase Transition Study, The XVII International Conference on Raman Spectroscopy," Beijin (2000-8)

10) T. Yagi: "Fluctuation in solids observed by the ω-and t domain supectroscopies," The second RIES-Hokudai symposium 〝揺 [Yoh]、〞 北海道大学、日本 (2001-3)

11) 八木駿郎：「時間と振動数で相転移ダイナミクスを見る―電子研相転移物性研究室の研究―」、平成 13 年度第 1 回物理専攻物性談話会、北海道大学 (2001-6)

12) 八木駿郎：「時間分解分光法による相転移ダイナミクスの研究」、平成 13 年度東京工業大学応用セラミックス研究所客員講演会、東京工業大学応用セラミックス研究所 (2001-7)

13) 小林美加、辻見裕史、八木駿郎：「パルス誘導光散乱によるガラス転移の特徴的長さの測定「ガラス過冷却液体の物性―理論と実験の接点を求めて―」」、KEK 中性子科学研究施設研究会、高エネルギー研究所 (つくば市) (2001-8)

14) 狩野旬、八木駿郎：「実時間ラマン分光 (Debye model の限界)」、平成 13 年度科研費基盤研究 C 1(企画調査) [新ソフトモード概念の構築]研究会、しんきんけんぽ会館 (2001-8)

15) 武貞正樹：「量子ゆらぎの光による制御」、平成 13 年度科研費基盤研究 C 1 (企画調査) 研究会 [新ソフトモード概念の構築]、しんきんけんぽ会館 (2001-9)

16) 八木駿郎：「誘電体相転移の時間分解分光法による研究―相転移の揺らぎを時間で見る―」、東京工業大学大学院理学研究科物理専攻物性談話会、東京工業大学理学研究科大会議室 (東京都)、平成 13 年 11 月 30 日) (2001-12)

17) Y. Tsujimi: "Initial process of the ferroelectric soft mode studied by femtosecond spectroscopy," Third RIES-Hokudai Symposium, "彩" (SAI), Hokkaido University, Japan (2001-12)

18) 八木駿郎：「振動数と時間で見た相転移―光散乱法とコヒーレントフォノン励起法―」、九州大学大学院理学院物理学府第 17 回教室談話会、九州大学大学院理学院物理学府会議室 (福岡市) (2001-12)

19) 武貞正樹：「酸化物量子常誘電系における光誘起効果」、科研費特定領域研究(B)「光誘起相転移とその動力学」研究会、鎌倉プリンスホテル (鎌倉市) (2002-1)

20) 八木駿郎：「コヒーレントフォノン励起法による時間分解ラマン散乱」、日本物理学会 2002 年秋季大会、中部大学 (2002-9)

21) T. Yagi: "Phase Transition Dynamics Studied by Coherent Phonon Excitation with Ultrashort Laser Pulses", The 7th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity, St. Petersburg, Russia (2002-6)

22) Masaki Takesada: "Photo-induced effect of quantum paraelectric system in perovskite oxides", International Quantum Electronics Conference (IQEC2002)、モスクワ (2002-6.22-28)

23) 武貞正樹：「ペロフスカイト型量子常誘電性酸化物の電場・光誘起相転移」、第 79 回 Spring-8 セミナー、高輝度光科学研究センター (兵庫県三日月町) (2002.7.18-19)

24) M. Takesada, M. Itoh, T. Yagi, S. Koshihara: "Photo-induced enhancement of dielectric constant under a DC electric field in quantum paraelectric oxide", NEDO Europe-Japan Meeting "Intelligent CT Materials", Rennes, France (2002. 10. 26-29)

25) T. Ishikawa, M. Itoh, M. Kurita, H. Shimoda, M. Takesada, and S. Koshihara: "Giant photoconductivity in quantum paraelectric oxides", NEDO Europe-Japan Meeting "Intelligent CT Materials", Rennes, France (2002. 10. 26-29)

4.6 シンポジウムの開催

a. 国際シンポジウム (組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間)

1) K. S. Aleksandrov, L. A. Shuvalov, J. Kobayashi, Y. Ishibashi, V. V. Lemanov, Y. Uesu, A. S. Sigov, B. A. Strukov and T. Yagi: "1The 7th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity" (Ioffe Physico-Technical Institute (St.Petresburg)) (2002. 6. 24～2002. 6. 28)

b. 一般のシンポジウム (組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間)

1) 八木駿郎：〝電子科学研究所公開シンポジウム「誘電体研究で現在何がわかっているか、そして来世紀では？」〞 (約 15 名、北海道大学電子科学研究所) (1998.1.12-13)

2) 八木駿郎：〝電子科学研究所公開シンポジウム〞 (50 名、北海道大学電子科学研究所) (2001.2.21-22)

3) 八木駿郎：〝新ソフトモード概念の構築〞 (60 名、しんきんけんぽ会館) (2001.10.5-7)

4.7 予算獲得状況

a. 科学研究費補助金 (氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度)

1) 辻見裕史、基盤 C　一般(2)、インパルス応答関数の実

時間測定による構造相転移ダイナミクスの検討、3,400千円（1998）
2）八木駿郎、国際学術研究　共同研究、可干渉性フォノン励起法の確立ー相転移研究の新しい方法としてー、3,100千円（1998）
3）八木駿郎、基盤B　一般(2)、可干渉性フォノン励起法の確立ー相転移研究の新しい方法としてー、2,700千円（1999）
4）辻見裕史、基盤C　一般(2)、インパルス応答関数の実時間測定による構造相転移ダイナミクスの検討、500千円（1999）
5）八木駿郎、萌芽、超短光パルスによる量子ゆらぎの位相制御、1,400千円（1999）
6）辻見裕史、基盤C　一般(2)、過冷却液体のガラス転移における密度ゆらぎの時間相関と空間相関の同時決定、3,000千円（2000）
7）笠原勝、基盤C　一般(2)、ソフト水素結合及びハード水素結合と水素結合型誘電体相転移、3,300千円（2000）
8）八木駿郎、萌芽、超短光パルスによる量子ゆらぎの位相制御、700千円（2000）
9）八木駿郎、基盤C　企画(1)、新ソフトモード概念の構築、3,200千円（2001）
10）笠原勝、基盤C　一般(2)、ソフト水素結合及びハード水素結合と水素結合型誘電体相転移、500千円（2001）
11）辻見裕史、基盤C　一般(2)、過冷却液体のガラス転移における密度ゆらぎの時間相関と空間相関の同時決定、700千円（2001）
12）辻見裕史、基盤研究B　一般(2)、[期間]同位体元素置換により誘起された強誘電性の動的発現機構の解明、7,500千円（2002～2003）
13）武貞正樹、若手研究A　(2)、量子揺らぎにおける非平衡光誘起協力現象の機構解明、17,680千円（2002～2004）
14）八木駿郎、基盤研究A　一般(2)、コヒーレントフォノン励起法による量子ゆらぎダイナミクスの研究、29,600千円（2002～2004）

4.8　共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）
1）八木駿郎、太田信廣(電子材料物性部門)、伊福部達(電子情報処理部門)：リラクサー強誘電体の電気機械結合機構の解明とその福祉工学への応用、7,000千円（2001～2002）
2）辻見裕史（電子材料物性部門)、迫田和彰（電子機能素子部門)：超短パルスレーザーを用いた誘電体薄膜の特性評価システムの開発（2001～2002）
3）笠原勝、竹中信夫(電子材料物性部門)：水素結合研究に関する新たな視点の可能性（2001～2002）

d．国際共同研究（代表者名、エージェンシー、研究課題、経費、研究期間）
1）八木駿郎(電子材料物部門)、日本学術振興会日米科学協力事業(共同研究)：コヒーレントフォノン励起による相転移ダイナミクスの研究、8,000千円（1995～1997）
2）八木駿郎(電子材料物性部門)、文部省科学研究費補助金（国際学術研究（共同研究))：可干渉性フォノン励起法の確立、3,100千円（1998年度）

f．教育研究基盤校費（プロジェクト研究）（担当者名、研究題目、経費、研究期間）
1）八木駿郎(電子材料物性部門)：生体組織の再生に対する力学的制御機構の研究、1,000千円(平成2001年度)

4.10　社会教育活動

a．公的機関の委員
1）八木駿郎：日本学術振興会特別研究員等審査委員（1999年度）
2）八木駿郎：高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所中性子共同利用実験審査委員会委員（1999年度）
3）八木駿郎：日本学術振興会国際科学協力事業セミナー等審査委員（1999年度）
4）八木駿郎：学術審議会専門委員（2000年度）
5）八木駿郎：高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所中性子共同利用実験審査委員会委員（2000年度）
6）八木駿郎：高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所日英中性子散乱研究協力事業研究計画委員会委員（2000年度）
7）八木駿郎：奨励研究員等審査員（2001.9.1～2003.8.31）
8）八木駿郎：日本学術振興会（2001.9.1～2003.8.31）
9）八木駿郎：高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所中性子共同利用実験審査委員会委員（2001.9.1～2003.8.31）
10）八木駿郎：高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所日英中性子散乱研究協力事業研究計画委員会委員（2001.9.1～2003.8.31）
11）八木駿郎：学術審議会専門委員（2001.9.1～2003.8.31）

b．国内外の学会の主要役職
1）八木駿郎：日本物理学会プログラム委員会物性分科領域10代表（1999年度）
2）八木駿郎：日本物理学会代議員（2000年度）
3）八木駿郎：日本物理学会代議員（2001.9.1～2003.8.31）

d．修士学位及び博士学位の取得状況
・修士学位
1）泉裕友：ファン・デル・ワールス過冷却液体o-

terphenyl のパルス誘導光散乱」(1997)

2）小林美加：時間分解分光法による D-ソルビトールのガラス転移ダイナミクス（1998）

3）佐藤公宣：フェムト秒時間分解分光法による α 水晶の E モード（1998）

4）綿貫文雄：パルス誘導ラマン散乱による $LiNbO_3$ のポラリトンの研究（1999）

5）狩野旬：ISRS による KDP の強誘電性 B_2 ソフトモードの研究（2000）

6）中西誠：時間分解分光法によるグリセロールの緩和ダイナミクス（2000）

7）長谷部弘毅：高分解能・広帯域光散乱による $SrTi(^{18}O_{x16}O_{1-x})_3$ の研究（2001）

8）皆木裕介：$SrTi^{18}OX$ のハイパーラマン散乱（2001）

9）五郎谷善弘：PZN/xPT 系リラクサー強誘電体のブリルアン散乱（2002）

10）矢野弘明：$Rb_3D_xH_{1-x}(Se0_4)_2$ のラマン散乱（2002）

・博士学位

1）吉岡伸也：Soft Mode Dynamics of KH_2PO_4 Studied by Impulsive Stimulated Raman Scattering (1998)

2）高坂繁弘：Phase Transition Dynamics of $KHCO_3$ Studied by Light Scattering (1998)

3）小林美加：Long-range density fluctuation in the liquid-glass transition studied by impulsive stimulated thermal scattering (2002)

4）綿貫丈雄：Phonon-Polariton Excitation by lmpulsive Stimulated Raman Scattering and lts Application for the Study of THz Dynamics (2002)

e．大学院担当講義科目

1）相転移物性物理学特論（1998～2003）

2）相転移物性物理学（1998～2003）

3）物理学論文輪講 I、II（1998～2003）

4）物理学特別実験 I、II（1998～2003）

5）物理学実験研究 I～V（1998～2003）

有機電子材料研究分野

教授　　中村貴義（東大院、理博、1997.4～）
助教授　長谷川達生（東大院、工博、1997.9～2003.2）
助手　　芥川智行（京大院、理博、1995.2～）

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
安田紀彦、下神耕造、西原禎文、佐藤　祐
修士課程
阿部裕佳子、湯本　徹、鈴木徹也、高松信博、石橋　徹、太田宇則、佐藤　祐、高橋利行、西原禎文、山田聖人、橋本麻子、垣内慶子、坂上　誠、高橋幸裕、帯刀陽子、宮田英人

1．研究目的

単一分子の持つ機能を利用して、既存のコンピュータの処理能力、集積度を遙かに凌駕したシステムを実現しようという、分子エレクトロニクスの考え方が 20 年ほど前に登場し、国内外で、研究が活発行われてきた。一方、単一分子ではなく、生体における情報処理を模倣し、生体分子を利用して新たなシステムを構築しようとするバイオコンピューティングの研究もこの間平行して進行した。本研究分野では、単一分子やバイオ分子を直接用いるのではなく、分子が集合体を作る性質（自己集積化能）を利用して、ナノサイズの機能性ユニットを創製し、それを複合化・集積化することで、分子ナノデバイスの構築を進めている。人工の分子集合体における協同現象を積極的に利用し、単分子では達成できない分子集合体デバイスとしての機能を開拓し、次世代のコンピューティングの基盤としての、分子ナノエレクトロニクスの実現を目指している。

有機分子の特徴として、分子間の電子軌道の重なりを制御することで、有機固体の電子状態は様々に変化させる事が可能である。電子の基底および励起状態を設計し、対応する分子集合体・分子組織体を構築することで、電気伝導性・強磁性・非線形光学性などの物性発現に適した電子系を、創成することが可能である。分子の持つ自己組織化能を最大限に利用して、高度な秩序構造を持つ機能性分子組織体を作製し、その光・電子機能を物性研究の対象に昇華させるとともに、分子組織体における電子的な相互作用に基づく、新奇な機能を開拓することが当研究分野の研究目的である。

分子組織化の手法として、超分子化学的な視点からのクリスタルエンジニアリング、分子マニピュレーション法としての Langmuir-Blodgett（LB）法、自己組織化膜法等を用いている。

2．研究成果

(a)　超分子構造を利用した分子性導体の伝導性制御

ジチオレン系分子性導体、特に $Ni(dmit)_2$ 錯体中にクラウンエーテルを用いて超分子カチオンを導入した（図 1 a）。結晶内でクラウンエーテルとアルカリ金属イオンは様々な超分子構造を形成したが、中でもクラウンエーテルが 1 次元にスタックし、$Ni(dmit)_2$ 錯体が形成する 1 次元導電カラムと共存する系は、イオン伝導－電子伝導ハイブリッド系として興味深い物性を示した。また、イオンチャンネル内でカウンターカチオンは非化学量論的に存在し、その量を規制することにより、電子系のバンドフィリング制御が可能であることを見いだした。

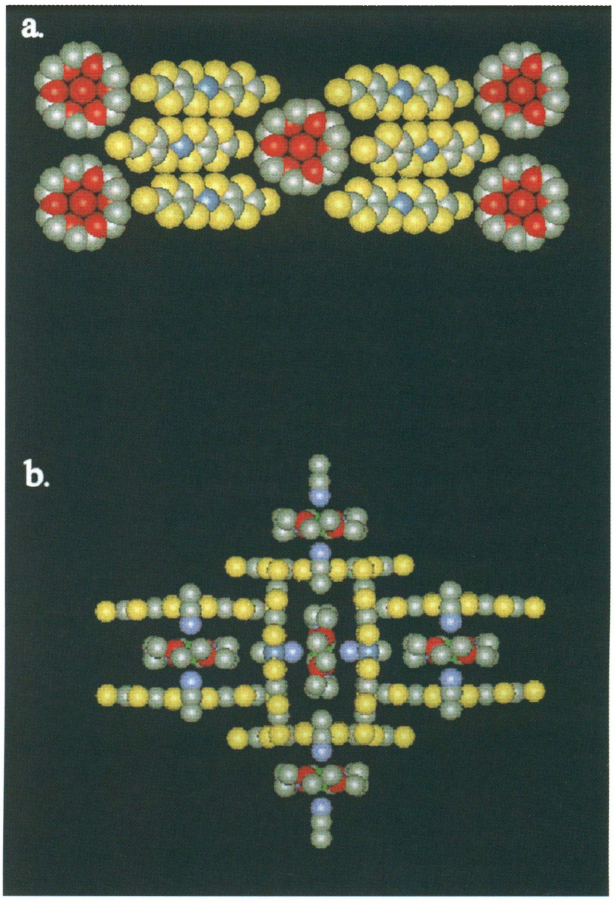


図 1．M(crown ether)[$Ni(dmit)_2$] 錯体の電気及び磁気特性の制御と結晶構造の相関
a）イオンチャネル構造を有するイオン－電子ハイブリッド伝導体
b）[$Ni(dmit)_2$] 井桁構造を有する磁性体

(b)　磁性体の複合機能化に関する研究

スピンラダーと共存した分子ローター構造をもつ結晶、[$PhNH_3^+$](18-crown-6)[$Ni(dmit)_2$]（図 2）を得ることに成功した。結晶を用いた、NMR の測定から、アニリニウムのベンゼン環は 1 MHz 程度で回転（flip）しており、一方、[$Ni(dmit)_2$]$^-$ はスピンギャップ 190 K のスピンラダー構造を形成していることが示唆された。現在、超伝導転移の発現を目指し、スピンラダーへのホールドーピングを検討

している。

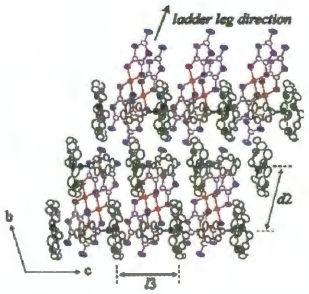


図２．[$PhNH_3^+$](18-crown-6)[$Ni(dmit)_2$] の結晶構造

(c)　超分子構造を利用した分子磁性体の磁性制御

分子性磁性体内に存在するカウンターカチオン構造を、超分子化学の手法を利用して設計した。平面 π-共役分子である［$Ni(dmit)_2$］アニオンは、S＝1/2 スピンを有し、その結晶内における配列制御が可能となれば、多様な磁性を有する分子磁性体を構築できる(図１b)。結晶中における、［$Ni(dmit)_2$］分子の配列制御の実現には、設計の自由度が高い有機アンモニウムカチオンを含む超分子構造の利用が適している。本研究では、フェニル基を含むアンモニウムカチオンとして、Xylylenediammonium 及び Cyclohexanediammonium と種々の環サイズを有するクラウンエーテルから形成される超分子構造に着目して、［$Ni(dmit)_2$］分子の配列及び磁性制御を行った。

結晶中で観測された超分子カチオン構造は、アンモニウムジカチオンが２つクラウンエーテルにサンドイッチ型に包接された構造を有していた(図３)。これらのカチオン構造は、磁性を有する［$Ni(dmit)_2$］アニオンと共存させる事が可能であり、カチオン構造の僅かな変化を反映した［$Ni(dmit)_2$］アニオンの多彩な配列様式を見いだした。結晶中でのカチオン構造の僅かな違いを反映して、［$Ni(dmit)_2$］分子間の配列様式が変化する結果、磁気特性に大きな変化が生じる事を明らかとした。カチオン構造の設計が、［$Ni(dmit)_2$］分子配列及び磁性制御に対して、有効な手段である事が示された。

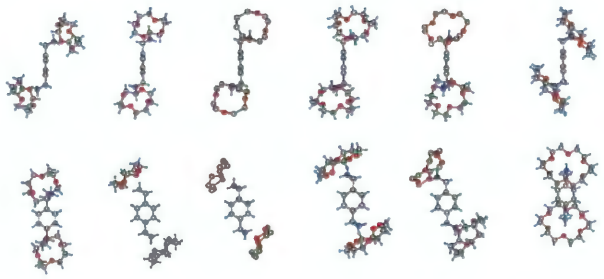


図３．結晶中で［$Ni(dmit)_2$］アニオンと共存する様々な (Xylylenediammonium^{2+})(crown ethers)$_2$ 超分子カチオン構造

(d)　水素結合を利用した分子性導体・磁性体の複合機能化に関する研究

アンモニウムやヒドラジニウム等の水素結合能を有するカチオン構造に着目して、新規な伝導・磁性機能を有する［$Ni(dmit)_2$］錯体の作製を目標に研究を行った。その結果、イオンチャンネルカチオン構造を含む伝導性結晶(NH_2-NH_3^+ or NH_4^+)$_x$([18]crown-6)[$Ni(dmit)_2$]$_2$（図４）及び強磁性相互作用を示す導電性結晶(NH_2-NH_3^+)$_2$([15]crown-5)$_3$[$Ni(dmit)_2$]$_6$(図５)を得る事に成功した。前者においては、NH_4^+ 及び NH_2-NH_3^+ カチオンと［18］crown-6 分子間の水素結合が、特異的なイオンチャンネル構造を誘起する事が明らかとなり、イオンの静－動的な性質が［$Ni(dmit)_2$］伝導電子系に影響を与える事が明らかとなった。また、後者の結晶においては、室温付近では半導体的な伝導挙動が観測されるが、２Ｋの極低温下において磁化曲線に強磁性的相互作用の存在が確認された（図５)。これは、(NH_2-NH_3^+)$_2$([15]crown-5)$_3$ 超分子カチオン構造が、強磁性相互作用の出現に有利な［$Ni(dmit)_2$］配列を

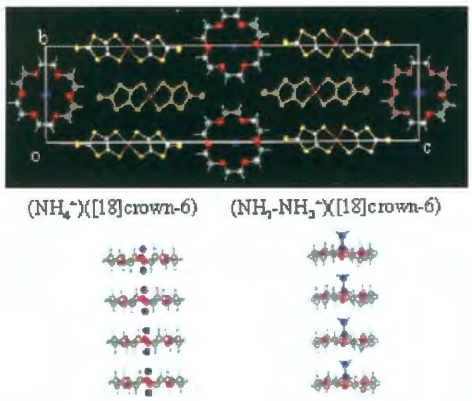


図４．イオンチャンネルを含む伝導性結晶(NH_2-NH_3^+ or NH_4^+)$_x$([18]crown-6)[$Ni(dmit)_2$]$_2$ の結晶構造。ユニットセル（上）と［18］crown-6 分子の積層から形成されるイオンチャネル構造（下）

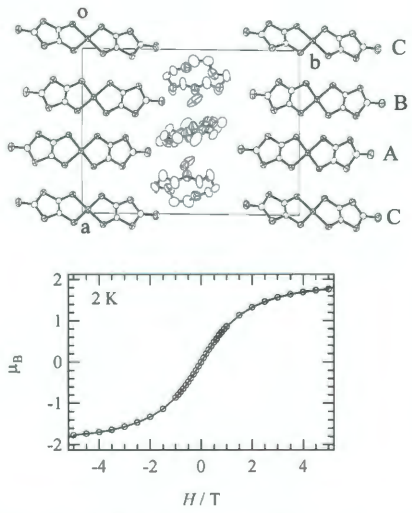


図５．強磁性相互作用を示す導電性結晶(NH_2-NH_3^+)$_2$([15]crown-5)$_3$［$Ni(dmit)_2$］$_6$ の結晶構造（上）と２Ｋにおける磁化曲線（下）

もたらした結果と考えられる。

(e)　新しいタイプの有機超伝導体の開発研究

有機ドナー分子と有機アクセプター分子を組合わせたドナー―アクセプター型電荷移動錯体系において、初の超伝導体が得られた。超伝導は、BEDT-TSeF 分子（ドナー）と、Cl_2TCNQ 分子（アクセプター）を二対一で組合わせた組成を持つ錯体で得られる。錯体は、常圧では低温まで金属状態を保持するが、約 5 kbar の圧力下において、臨界温度 Tc＝1 K の超伝導転移を示す（図 6）。

これまでに知られている有機超伝導体は、何れも、有機ドナー（アクセプター）分子と、電子を受け取って閉殻構造となる無機陰（陽）イオンを組合わせたものであった。その点、全有機系によるドナー―アクセプター型超伝導体の開発はこれが初めてであり、1）有機分子の混合原子価性によってバンドフィリングの調整が可能、2）イオン化したラジカル分子のスピンの自由度が存在すること等、物性科学的に今後発展が期待される。

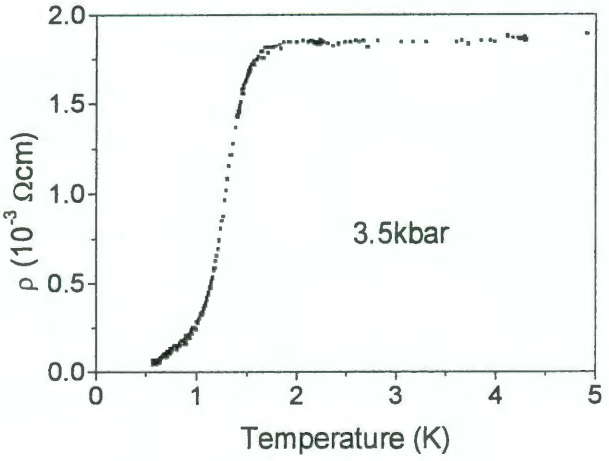


図 6．ドナー―アクセプター型錯体・$(BEDT\text{-}TSeF)_2(Cl_2TCNQ)$ の圧力下（3.5 kbar）における電気抵抗率の温度依存性

(f)　中性―イオン性転移系

電子供与性分子（D）と電子受容性分子（A）が交互に積み重なって形成される交互積層型電荷移動錯体では、DA 間の電荷移動相互作用が系の物性を支配し、構成分子のドナー性・アクセプター性を制御することによって系の電子構造を大きく変化させることが可能な、優れた有機半導体群が得られる。我々は、これら物質に特有の強い電子―格子相互作用や、分子間の協力的電荷移動に基づく電子相転移、また、その相転移に伴って発生する強誘電性やその光誘起効果を利用した有機半導体デバイスの開発を目指した研究を行っている。

この中で、構成分子の次元性を考慮した新しい交互積層型錯体の設計によって、我々は、従来型の有機半導体には全く見られない、顕著な磁気的機能を示す錯体を得ることに成功した（図 7）。(BEDO-TTF)(Cl_2TCNQ) は、二次元的相互作用を示す BEDT-TTF 系分子を構成要素とし、DA 間で電荷がほぼ完全に移動した一次元スピン-1/2 系と見なせるイオン性錯体である。この錯体では、一次元系に特有な非磁性二量体化が低温まで抑制されるという特徴を持ち、約 110 K 付近の低温で、格子系とスピン系の対称性を不変に保ったまま、構成分子の僅かな分子回転によってスピン系の性質が著しく変化する新しいタイプの磁気―格子相転移が観測された。図 7 右に示したように、この結晶の 110 K 相転移は、分子性物質に特有な強いスピン―格子相互作用が結合することによって生じたものであり、系の質的な変化を伴うことなくスピン間交換相互作用の量的な変化のみを伴った、いわばスピン気体―スピン液体間の転移を見なせる一次相転移であることが明らかになった。

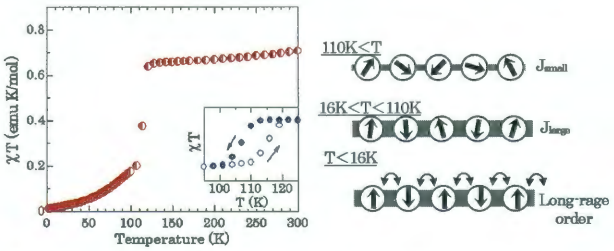


図 7．交互積層型電荷移動錯体（BEDO-TTF）(Cl_2TCNQ) の磁気特性と各温度領域における電子相の模式図

(g)　中性-イオン性相転移系の量子効果

本研究では、圧力下で中性状態（D^0A^0）とイオン性状態（D^+A^-）の間の相転移を起こす（BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) という物質を対象として、この物質が相境界の低温極限（量子臨界点）近傍で示す誘電的挙動を詳細に調べた。図 8 に転移前後の各圧力における誘電率の温度依存性を示す。図から明らかなように、量子臨界点に近い 0.32 GPa の圧力下（図 8）において、温度・周波数に依らない誘電応答の顕著な増大が観測された。このような低温極限での特徴的な振舞には、フォノンの熱揺らぎ等を媒介としない、中性-イオン性相間の量子的な揺らぎが関与しているものと考えられる。

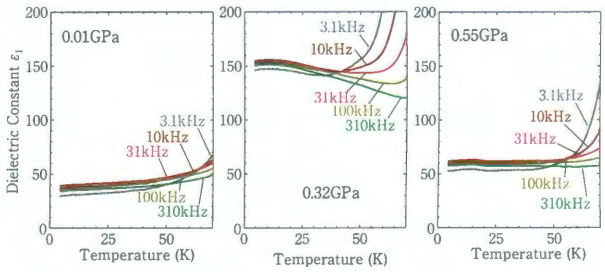


図 8．(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) 錯体結晶の誘電率の温度・圧力依存性

(h)　水素結合・プロトン伝導

水素結合は、生体分子・包接化合物・超分子構造の形成等における重要な分子間相互作用である。水素結合中のプロトン位置・強さ、その運動自由度を制御する事は、双安定

構造の制御（スイッチング・メモリー素子）の観点から興味深いと考えられる。結晶中におけるプロトンの動的性質を設計する為に、非対称な N-H-O 水素結合系のポテンシャル曲線のデザインを試みた。その結果、分子間の多段階の酸解離定数を利用したデザインが有効である事が示され、対称的な 2 極小ポテンシャル曲線のデザインに成功した。

プロトン伝導機構を、分子性導体中に導入する事で、新規なプロトン―電子連動系の構築を試みた。電子とプロトンの両者が動的自由度を有する系は、プロトン―電子カップリングに由来する新規な電子物性が期待される。本研究では、2,2'-bi-1*H*-benzimidazole（H2BBIM）分子の有する多様なプロトン移動・水素結合状態に着目し、TCNQ との電荷移動錯体を作製し、その水素結合及びプロトン―電子伝導性についての検討を試みた（図 9）。その結果、室温で約 20 Scm^{-1} の高い電子伝導性が観測された。同時に、1.2×10^{-3} Scm^{-1} のプロトン伝導性が見られ、結晶における値としては、極めて高いものであった。また、低温における金属状態からの電子系の転移は、プロトンの運動自由度と関係している事が示され、新規なプロトン―電子カップリングの存在が明らかとなった。

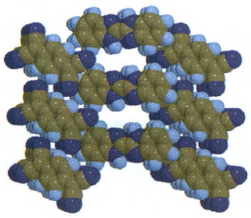


図 9．プロトン―電子混合伝導体（H3BBIM$^+$）(TCNQ)（Cl^-）$_{0.5}$（H_2O）の結晶構造

(i)　有機超薄膜の光および電子機能開拓に関する研究

LB 法により電荷移動錯体の超薄膜を形成し、その電子および光物性を明らかにした。

これまでに高い導電性あるいは金属的な導電性を有する LB 膜を開発してきたが、LB 膜化にあたり長鎖アルキル基を導入していたため、不必要な絶縁体部分が膜内に不可避的に存在していた。そこで今回は、短鎖型の TCNQ（CF_3 TCNQ）と BEDO-TTF の錯体を用い、絶縁性部分のほとんどない LB 膜の作製について検討を行った。その結果、室温で数 S/cm の導電率を持ち、200 K 付近まで金属的な電気伝導度の温度依存性を示す LB 膜を作製できた。また、TTF－ジチオレートを配位子とする単成分電気伝導体 Au(tmdt)$_2$ を用いた LB 膜の作製を試みた。長鎖アルキルアンモニウムをカウンターカチオンとする 1 価の前駆体塩を用いて LB 膜を作製したところ、膜形成過程で酸化反応が進行し、中性錯体の累積膜が形成されることを確認した。

電荷移動錯体の分子間電荷移動を利用して、LB 膜と言う非対称場において、高い 2 次の非線形光学効果の発現を目指して研究を行った。電荷移動量の異なる種々の電荷移動錯体を用いて LB 膜を作製し、それらの非線形光学特性を電場変調スペクトルを用いて検討し、非線形光学パラメータを見積もった。

新しい超薄膜系として、金属表面に redox 活性な有機分子の π 系が結合した自己組織化膜の作製を進めた。金属表面上の π 系は、金属中の遍歴電子とカップルすることにより、高い非線形光学特性や特異な電気伝導性を発現する可能性がある。金属表面の電位を制御することにより π 系の酸化状態を規制し、これら特異な物性を外部からコントロールすることが本研究の目的である。また、π 系の酸化状態の規制により金属表面のフェルミレベルを制御できれば、新たな電極材料としての応用も可能であると期待している。モデル系として、金蒸着膜表面上に TTF－ジチオレートを化学結合させた自己組織化膜の形成を試みた。電気化学的にジチオレートアニオンを酸化することで、薄膜形成が可能であることを確認した。

(j)　マクロサイクリック TTF 誘導体を用いた分子ナノワイヤの構築

分子エレクトロニクスデバイス作製に不可欠な基本ユニットとして考えられるナノワイヤ構造の作製を行った。これまでナノワイヤ構造としては、カーボンナノチューブやシリコンナノワイヤが、ナノスケール電子素子の実現化の為の次世代ナノ電子材料として期待され各方面から注目を集めてきた。一方、分子の自己集積化能を利用した分子集合体ナノワイヤに関しては、報告例が殆ど存在しない。しかしながら、分子集合体ナノワイヤはボトムアップの手法によるナノスケールの素子構築に対して有望な電子材料であると考えられる。本研究では、分子性導体の複合機能化に関するこれまでの基礎的な研究を基に、伝導性の分子集合体ナノワイヤを分子の自己組織化により実現し、さらに基板上での配向性までを制御する事を目的に行った。これらのユニットを集積する事で、将来的にはさらに複雑な集積分子デバイスを構築する事が可能となる。

図 10 に示す分子は、導電性をになう TTF ユニット 2 個、イオン認識能を有するマクロサイクリック部位、疎水性のアルキル基、の 3 つの部分からなる。分子の中心にあるポリエーテル部位は親水性であるため、分子は全体としては両親媒性で、LB 法が適用可能となる。TTF は高伝導性を与える典型的なドナー分子の骨格であり、立体障害が大きいために比較的 1 次元的な伝導体を与えるものと予測される。

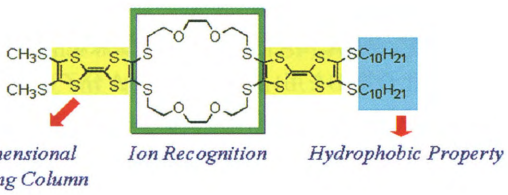


図 10．マクロサイクリック TTF 誘導体の設計

導電性・イオン認識・両親媒性の観点から設計した分子

にLB法を適用する事で、分子集合体ナノワイヤが優先的に形成する事を見いだした(図11)。分子は、ナノワイヤの形成・導電性・基板上での配向性を考慮して超分子化学の手法からプログラムされた自己組織化能を有する分子である。(1)$(F_4TCNQ)_2$錯体が形成する分子集合体ナノワイヤは、TTF部位の$\pi-\pi$相互作用を介した1次元的な集積化から形成し、ナノワイヤがマイカ基板上のイオン配列を認識する事で、配向性が出現する事が明らかとなった。ナノワイヤの室温でのバルク伝導度は、$\sim 10^{-3}$ Scm^{-1}と見積もられている、現在、単一ナノワイヤの伝導度測定に向けて微小多極電極の作製に取り組んでいる（図12)。

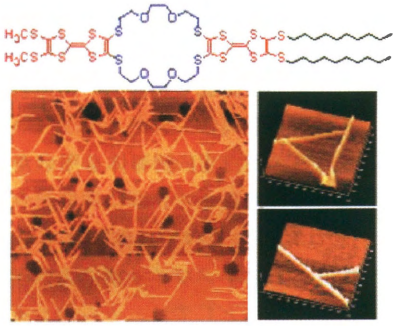


図11. 分子1がマイカ表面で形成する分子集合体ナノワイヤ構造

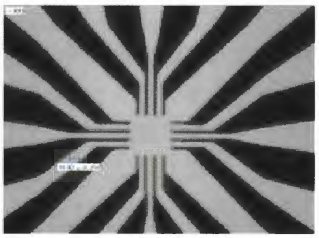


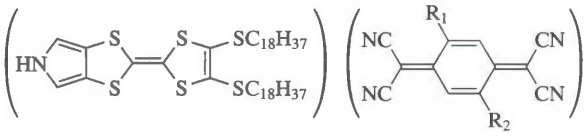
図12. 石英基板上に作製した微小多極電極構造

(h) D-A型LB膜の電子状態制御

電子供与性(D)と電子受容性(A)から形成する荷移動錯体では、D分子のイオン化ポテンシャル(I_p)とA分子の電子親和力(E_A)に依存した多様な電子状態を創成する事が可能である。この様な電荷移動錯体の基底状態制御は、中性—イオン性転移に伴うスイッチング材料・強誘電材料などへの応用が期待できる。本研究では、次世代の分子エレクトロニクス素子への展開を考慮し、D-A型の電荷移動錯体をLangmuir-Blodgett（LB）法を用いる事でナノスケールの薄膜材料とし、その基底状態の制御をに関する研究を行った。

D分子には、安定な電荷移動錯体を与えやすいピロロTTF骨格を基礎として、両新媒性の観点から新たに設計・合成した化合物(1)を用いた。（図13）A分子には、E_Aを調整する観点から、置換基の異なる6種類のTCNQ誘導体を用い、こららのD及びA分子が形成する電荷移動錯体を用いてLB膜の作製を行った。作製したLB膜の電子状態、基板上での分子配向・表面構造に関する評価を試みた。

TCNQ誘導体は、導入される置換基の種類に依存して、E_Aが変化する。本研究では、2,5-F_2-TCNQ、F-TCNQ、



TCNQs

2a: $R_1 = R_2 = F$
2b: $R_1 = F, R_2 = H$
2c: $R_1 = R_2 = H$
2d: $R_1 = C_{10}H_{21}, R_2 = H$
2e: $R_1 = R_2 = CH_3$
2f: $R_1 = CH_3O, R_2 = C_2H_5O$

図13. 両新媒性ピロロTTF誘導体(1)と様々なTCNQ誘導体が形成する電荷移動錯体

TCNQ、$C_{10}H_{21}$-TCNQ、2,5-Me-TCNQ、2-MeO-5-EtO-TCNQを用いる事で、ドナー1に対して約0.4 eVに及ぶE_Aの調整を行った。LB膜の電子スペクトル及び振動スペクトル測定の結果、(1)(2,5-F_2-TCNQ)錯体では、DとA分子が完全にイオン化した（D^+）（A^-）型の基底状態が形成している事が明らかとなり、(1)(2-MeO-5-EtO-TCNQ)錯体では、（D^0）（A^0）型の中性の基底状態を有する電解移動錯体が形成していた(図14)。また、中程度のE_Aを有する(1)（TCNQ）及び(1)($C_{10}H_{21}$-TCNQ)錯体は、中性—イオン性転移の境界領域の電子状態を有する電荷移動錯体である事が判明した。現在、これらの錯体を利用したナノスケールのスイッチング・強誘電材料への展開についての研究を進めている。

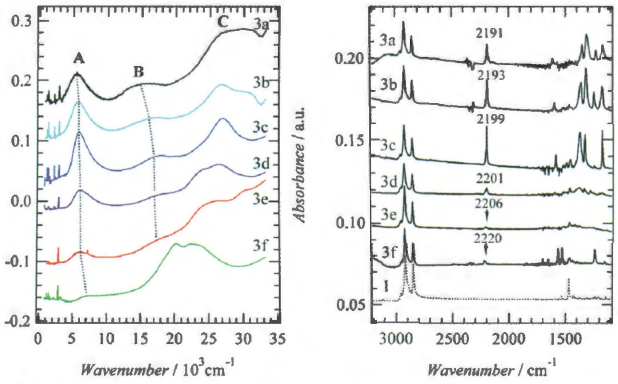


図14. 6種類の(1)（TCNQs）錯体が形成するLB膜の電子スペクトル（左）と振動スペクトル（右）

(1) 微小重力下における材料創成に関する研究

微小重力下における無対流・無沈降などの性質を利用して、重力下では得られない新奇な構造・物性を有する有機電子材料の作製を目的として研究を行った。上砂川の地下無重力実験センターで得られる10秒間の良質な微小重力環境を用いて研究を行うため、短時間で反応が終結するピロールの酸化重合をモデル系に用い、得られる導電性ポリマーの物性・構造を重力下との重合と比較した。その結果、微小重力下では反応点へのモノマーの供給が拡散律速となるため、重力下よりも微小なポリマー粒子の作製が可能で

あることが明らかとなった。

(m) TTF ジチオレン配位子を用いた導電性超薄膜の作製

導電性を持つ分子性超薄膜は将来のデバイス開発において重要な位置を占める。我々はこれまでに、分子レベルでの配列制御法として知られている LB 法を用いて、分子性導体の薄膜化を行ってきた。今回、TTF ジチオレン配位子と Ni との錯体である $[Ni(tmdt)_2]$ を用いた薄膜系の構築について検討した。

LB 法では水面上に単分子膜を形成する物質が必要であるため、両親媒性の保持のために比較的大きな絶縁性の疎水基（主としてアルキル基）が存在する。中性状態で高伝導性の結晶を与える $[Ni(tmdt)_2]$ 系錯体に着目して、その単成分錯体 LB 膜の作製を試みた。絶縁性疎水基の除去は、化学的な酸化により行い、同時に $[Ni(tmdt)_2]$ 中性錯体をから成る LB 膜を作製した。現在、LB 膜の伝導性・電子状態・膜構造の詳細について検討を行っている。

3．今後の研究の展望・将来計画

分子性導体を用いて、分子デバイス構築に不可欠な材料創製を行っており、単一分子エレクトロニクス研究が隆盛を極めている状況の中で、特徴的であると言える。しかし、単一分子からのアプローチと、分子集合体からのエレクトロニクスデバイスへのアプローチを区別することはあまり本質的でない。電子機能の発現においては、ユニット間のフロンティア軌道の重なりが重要なのであって、それよりエネルギー的に深いところにある共有結合は、そういう意味で本質的な存在ではない。

一方、分子集合体を積極的に利用することで様々な利点が生まれる。最大の利点は、単一分子では達成できない分子間の相互作用や、多数の分子による協同現象に基づく機能を利用できる点である。さらに分子集合体の柔らかさ、すなわち共有結合で機能ユニットが繋がっていないために、ある程度分子間の相互作用を時空間的に制御できること、を利用したデバイス動作の道も拓けてくる。

我々の研究成果の中には、分子集合体中にいくつかの自由度を持ち、それらの自由度が互いに結合して、分子集合体内での集団現象を引き起こすものが散見される。これらの物性発現を足がかりに、今後は分子集合体における非線形現象の開拓、さらには酸化還元などの駆動力を用いた集団現象の制御を目指して研究を進めようと考えている。最終的には、生物にみられるような自己組織化現象が、これらの集団現象の制御を通じて実現することを期待し、分子エレクトロニクス科学の確立に寄与したいと考えている。

4．資料

4.1 学術論文

1) Akutagawa, T., Nakamura, T., Inabe, T. and Underhill, A. E.: "A Supramolecular Cation in an Electrically Conducting Nickel-dithiolate Salt" *J. Mater. Chem.*, 7, 183-185 (1997).

2) Akutagawa, T., Nakamura, T., Inabe, T. and Underhill, A. E.: "Crystal Structure and Electrical Conductivity of $[NH_4^+][18\text{-crown-6}][Ni(dmit)_2]_3$" *Synthetic Metals*, 86, 1861-1862 (1997)

3) Nakamura, T., Konuma, T. and Akutagawa, T.: "Langmuir-Blodgett Films of Binary Mixture of Donors and Acceptors with Long Alkyl Chains" *Synthetic Metals*, 86, 1903-1904 (1997)

4) Hasegawa, T., Inukai, K., Kagoshima, S., Sugawara, T., Mochida, T., Sugiura, S., and Iwasa, Y.: "(BEDT-TTF)(F_1TCNQ) and (BEDT-TTF)(F_2TCNQ)$_x$(TCNQ)$_{1-x}$(x ca.0.5): all-organic metals down to 2K" *Chem. Commun.* 1377-1378 (1997).

5) Hasegawa, T., Kagoshima, S., Mochida, T., Sugiura, S., and Iwasa, Y.: "Electronic states and antiferromagnetic order in mixed-stack charge-transfer compound (BEDT-TTF)(F_2TCNQ)", *Solid State Commun.* 103, 489-493 (1997).

6) Ikegami, K. and Nakamura, T.: "Preparation of Langmuir-Blodgett Films Containing a Charge-Transfer Complex of Alkylated Dicyanoquinonediimine (DCNQI) and Copper" *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, L550-L552 (1998).

7) Akutagawa, T., Nezu, Y., Abe, Y., Nakamura, T., Yamanaka, A., Inoue, K., Inabe, T., Christensen, C. A., Becher, J.: "Linear Pentaidodide in the Radical Cation Salt of Tetrathiafulvalene Bisannulated Macrocycle" *Inorg. Chem.*, 37, 2330-2331 (1998).

8) Nakamura, T., Akutagawa, T., Honda, K., Underhill, A. E., Coomber, A. T., and Friend, R. H: "A Molecular Metal with an Ion-Conducting Channel" *Nature*, 394, 159-161 (1998).

9) Akutagawa, T., Nezu, Y., Hasegawa, T., Sugiura, K., Nakamura, T., Inabe, T., Sakata, Y. and Underhill, A. E.: "Supramolecular Cation of Acyclic Polyether: Potassium (pentaethyleneglycoal) in Molecular Conductor of Nickel Dithiolate Salt" *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 2599-2600 (1998).

10) Bondarenko, V. A., Kagoshima, S., M. Maesato, Hasegawa, T., Miura, N., and Yamaguchi, T.: "A thermopower study of the SDW state of quasi one-dimensional conductor $(TMTSF)_2AsF_6$" *Solid State Commun.* 107, 477-481 (1998).

11) Hanasaki, N., Kagoshima, S., Hasegawa, T., Osada, T., and Miura, N.: "Contribution of small closed orbits to magnetoresistance in quasi-two-dimensional conductors" *Phys. Rev. B* 57, 1336-1339 (1998).

12) Robertson, N., Roehrs, S., Akutagawa, T., Na-

kamura, T. and Underhill, A. E.: "Preparation and Structure of [Na.15-crown-5] [Ni(mnt)$_2$] .H_2O: the First [Ni(mnt)$_2$] - Complex Containing a Supramolecular Counterion" *J. Chem. Res.*, 54-55 (1999).

13) N. Robertson, T. Akutagawa, T. Nakamura, S. Roehrs and A. E. Underhill: "Preparation, Structure and Properties of [Na. cis-anti-cis-dicyclohexyl-18-crown-6][Ni(dmit)$_2$]$_4$ 2Me_2CO," *J. Mater. Chem.*, 9: 1233-1236 (1999)*

14) T. Nakamura, T. Yumoto, T. Suzuki, T. Akutagawa, T. Hasegawa, H. Tachibana, M. Matsumoto, S. Horiuchi, H. Ikegami, H. Yamochi and G. Saito: "Electrical and Nonlinear Optical Properties of Langmuir-Blodgett Films of Charge Transfer Complexes," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 327: 83-86 (1999)*

15) T. Nakamura, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Kikukawa, T. Araiso, M. Higuchi and K. Hiratani: "Polymerization of pyrrole in microgravity," *Synthetic Metals*, 101: 78-79 (1999)*

16) T. Yumoto, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, H. Ikegami and G. Saito: "Langmuir-Blodgett Films of BEDO-TTF・CF_3TCNQ," *Synthetic Metals*, 102: 1733-1734 (1999)*

17) Y. Abe, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, K. Sugiura, Y. Sakata, T. Inabe, C. A. Christensen and J. Becher: "Electronic and Structural Properties of TTF Bisannulated 24-crown-8 Charge Transfer Complexes," *Synthetic Metals*, 102: 1599-1600 (1999)*

18) K. Ikegami, M. Lan and T. Nakamura: "Optical Characterization of Langmuir-Blodgett Films of AlkylDCNQI and AlkylDCNQI-Cu Complexes," *Synthetic Metals*, 102: 1615-1616 (1999)*

19) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe, K. Sugiura, Y. Sakata and A. E. Underhill: "Ion Cavities within NH_4^+(crown ether)[Ni(dmit)$_2$] Salts," *Synthetic Metals*, 102: 1747-1748 (1999)*

20) T. Hasegawa, T. Akutagawa, T. Nakamura, Y. Sasou, R. Kondo, S. Kagoshima, T. Mochida, G. Saito and Y. Iwasa: "Electronic Phase Transition of BEDT-TTF Based Mixed-Stack Charge-Transfer Complexes," *Synthetic Metals*, 103: 1804-1805 (1999)*

21) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Konuma, T. Nakamura and M. Matsuoka: "Nonlinear Optical Properties of Langmuir-Blodgett Films of Pyrazine-based Dye Molecule," *Nonlinear Optics*, 22: 127-130 (1999)*

22) T. Hasegawa, T. Akutagawa, T. Konuma, T. Nakamura, J. Kawamata and K. Inoue: "Valance-Modulation-Induced Optical Nonlinearlity of Intermolecular Charge-Transfer Langmuir-Blodgett Films," *Nonlinear Optics*, 22: 143-146 (1999)*

23) J. Kawamata, M. Kiguchi, T. Nakamura and K. Inoue: "A New Method for Evaluating Third-Order Nonlinear Optical Efficiency of Powder Crystals," *Nonlinear Optics*, 22: 349-352 (1999)*

24) J. Kawamata, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, K. Inoue, M. Kiguchi and G. Saito: "Observation of Third-Order Nonlinear Optical Effects of Metallo-Dimethylglyoxime Complexes by Methods Using the Evanescent Wave," *Nonlinear Optics*, 22: 373-376 (1999)*

25) T. Akutagawa, Y. Abe, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe, K. Sugiura, Y. Sakata, C. A. Christensen and J. Becher: "Crystal Structure and Optical Properties of Cation Radical Salts of Tetrathiafulvalene Tris-annulated Macrocycles," *J. Mater. Chem.*, 9: 2737-2742 (1999)*

26) S. Kagoshima, Y. Soso, M. Maesato, R. Kondo and T. Hasegawa: "Low-Temperature Diffuse X-ray Studies of Charge-Density Waves Coexisting with Spin-Density Waves in the Organic Conductors (TMTSF)$_2PF_6$ and (TMTSF)$_2AsF_6$," *Solid State Commun*, 110: 479-483 (1999)*

27) T. Mochida, T. Hasegawa, R. Kondo, S. Kagoshima and Y. Iwasa: "Organic Metals Involving Double Chain Donor Arrangements," *Synthetic Metals*, 102: 1680 (1999)*

28) T. Mochida, H. Moriyama, T. Hasegawa, R. Kondo, S. Kagoshima and Y. Iwasa: "Structure and Properties of (BEDSe-TTF) (FnTCNQ) Charge Transfer Complexes (n=1,2,4)," *Synthetic Metals,* 102: 1678-1679 (1999)*

29) R. Kondo, S. Kagoshima, T. Hasegawa, T. Mochida and Y. Iwasa: "Structure and Properties of all organic conductor (BEDT-TseF)$_2$(X_1X_2TCNQ) (X_1, X_2=Cl,Br)," *Synthetic Metals*, 102: 1628-1629 (1999)*

30) R. Kondo, T. Hasegawa, T. Mochida, S. Kagoshima and Y. Iwasa: "Donor-Acceptor Type Superconductor, (BETS)$_2$(Cl_2TCNQ)," *Chem. Lett.*, 333-334 (1999)*

31) K. Ikegami, M. Lan and T. Nakamura: "Structural Change in Langmuir and Langmuir-Blodgett Films of AlkylDCNQI Induced by Charge-Transfer Reaction at the Air-Water Interface," *J. Chem. Phys.*, 112: 881-886 (2000)*

32) T. Akutagawa, Y. Abe, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe, C. A. Christensen and J. Becher: "Tuning of Intramolecular π-π Overlap Mode of Tetrathiafulvalene bisannulated Macrocycles in the Open-

Shell Electronic State," *Chem. Lett.*, 132-133 (2000)*

33) N. Takamatsu, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe, W. Fujita and K. Awaga: "One-dimensional Antiferromangetic Chain in [Ni(dmit)2]- Salts of [K^+ or Rb^+ (4,13-diaza-18-crown-6) Supramolecular Cation," *Inorg. Chem.*, 39: 870-871 (2000)*

34) K. Uesugi, I. Suemune, T. Hasegawa, T. Akutagawa and T. Nakamura: "Temperature Dependence of Band Gap Energies of GaAsN Alloys," *Appl. Phys. Lett.*, 76: 1285-1287 (2000)*

35) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, S. Takeda, T. Inabe, K. Sugiura, Y. Sakata and A. E. Underhill: "M^+(12crown-4) Supramolecular Cations (M^+ = Na^+, K^+, Rb^+ and NH_4^+) within $Ni(dmit)_2$ Molecular Conductor," *Inorg. Chem.*, 39: 2645-2651 (2000)*

36) T. Akutagawa, S. Nishihara, N. Takamatsu, T. Hasegawa, T. Nakamura and T. Inabe: "Co^{2+}(15-crown-5) Magnetic Supramolecular Cation in $[Ni(dmit)_2]^-$ π Spin System," *J. Phys. Chem.*, 104: 5871-5873 (2000)*

37) Y. Abe, N. Takamatsu, T. Yumoto, T. Suzuki, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, M. Higuchi, K. Hiratani: "Polymerization of Pyrrole under Microgravity Conditions," *Space Forum*, 6: 221-226 (2000)*

38) N. Takamatsu, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe, W. Fujita and K. Awaga: "M^+ (Crown Ether) Supramolecular Cations (M^+=K^+, Rb^+, $NH4^+$) for Controlling Magnetic Properties of Monovalent $[Ni(dmit)_2]$ Salts," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 343: 163-168 (2000)*

39) T. Hasegawa, T. Mochida, R. Kondo, S. Kagoshima, Y. Iwasa, T. Akutagawa, T. Nakamura and G. Saito: "Mixed-Stack Organic Charge-Transfer Complexes with Intercolumnar Networks," *Phys. Rev. B*, 62: 10059-10066 (2000)*

40) T. Akutagawa, Y. Abe, T. Ohta, T. Hasegawa, T. Nakamura, C. A. Christensen and J. Becher: "Crystal Structure of Tetrathiafulvalene Multiannulated Macrocycles in Open-Shell Electronic State," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 349: 379-382 (2000)*

41) J. Kawamata, T. Akutagawa, T. Hasegawa, K. Inoue and T. Nakamura: "Nonlinear Optical Properties of the Langmuir-Blodgett Films of an Intermolecular Charge Transfer Complex," *Nonlinear Optics*, 25: 425-430 (2000)*

42) T. Nakamura, T. Takahashi, T. Yumoto, T. Akutagawa and T. Hasegawa: "Conducting Langmuir-Blodgett Films of Bis [bis (methylthio) tetrathiafulvalenedithiolate] -gold Complex," *Chem. Lett.*, 134-135 (2001)*

43) S. Mikami, K. Sugiura, T. Maruta, Y. Maeda, M. Ohba, N. Usuki, H. Okawa, T. Akutagawa, S. Nisihara, T. Nakamura, K. Iwasaki, N. Miyazaki, S. Hino, E. Asato, J. S. Miller and Y. Sakata: "Structure, optical and magnetic behaviour of meso - tetraphenylporphyrinatoiron (III) tetracyanoethenide, $[FeIII(TPP)]^+[TCNE]^{\cdot -}$," *J. Chem. Soc. Dalton Trans.*, 448-455 (2001)*

44) L. Cronin, S. J. Clark, S. Parsons, T. Nakamura, N. Robertson: "Unique Structural Topologies Involving Metal-Metal and Metal-Sulphur Interactions: Salts of $[Ni(dmit)_2]^{x-}$ with *cis-anti-cis*-dicyclohexyl-18-crown-6 Complexed Counterions," *J. Chem. Soc. Dalton Trans.*, 1347-1351 (2001)*

45) K. Sakai, T. Akutagawa, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Partially-Oxidized $Ni(dmit)_2$ Salt with Copper Ions," *Synthetic Metals*, 120: 805-806 (2001)*

46) T. Hasegawa, R. Kondo, S. Kagoshima, Y. Iwasa, T. Mochida, T. Akutagawa and T. Nakamura: "Donor-Acceptor Type Complexes of (BEDT-TTF) (TCNQ) Analogues: Peculiar Magnetic Transistion in (BEDO-TTF)(Cl2TCNQ)," *Synthetic Metals*, 120: 991-992 (2001)*

47) T. Naito, T. Inabe, K. Takeda, K. Awaga, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Kakiuchi, H. Sawa, T. Yamamoto and H. Tajima: "Peculiar Physical Properties of $(ET)_3(MnCl_4)(TCE)$," *Synthetic Metals*, 120: 877-878 (2001)*

48) S. Nishihara, T. Akutagawa, T. Hasegawa and T. Nakamura: "$[Ni(dmit)_2]$-Salts of a Supramolecular Cation, $Sc^+(12\text{-crown-}4)_2$," *Synthetic Metals*, 121: 1806-1807 (2001)*

49) T. Akutagawa, N. Takamatsu, K. Shitagami, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe, W. Fujita and K. Awaga: "Diversity in 1/2 spin arranement of $[Ni(dmit)_2]$- anions in divalent Ca^{2+}(crown ethers) supramolecular cation salts," *J. Mater. Chem.*, 11: 2128-2124 (2001)*

50) T. Naito, T. Inabe, K. Takeda, K. Awaga, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Kakiuchi, H. Sawa, T. Yamamoto and H. Tajima: ""β"-$(ET)_3$ $(MnCl_4)$ $(1,1,2\text{-}C_2H_3Cl_3)$ (ET=bis (ethylenedithio) tetrathiafulvalene); A Pressure-Sensitive New Molecular Conductor with Localized Spins," *J. Mater. Chem.*, 11: 2221-2227 (2001)*

51) T. Takahashi, K. Sakai, T. Yumoto, T. Akutagawa, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Structure and

Electronic Properties of Bis [bis (methylthio)-tetrathiafulvalenedithiolate]-Gold (III) Langmuir-Blodgett Films," *Thin Solid Films*, 393: 7-11 (2001)*

52) T. Hasegawa, T. Akutagawa, T. Nakamura, T. naito, T. Inabe, T. Mochida, R. Kondo, S. Kagoshima and Y. Iwasa: "Neutral-Ionic Phase Transition of (BEDT-TTF) (ClMeTCNQ) under Pressure," *Phys. Rev. B*, 64: 85106-1-85106-7 (2001)*

53) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, S. Takeda, T. Inabe, K. Sugiura, Y. Sakata and A.E. Underhill: "Ion Channel Structures in M^+ (18-Crown-6) [Ni(dmit)$_2$] Molecular Conductors," *Chem. Eur. J.*, 7: 4902-4912 (2001)*

54) K. Shitagami, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura and N. Robertson: "Potassium Bis (4, 5-dimercapto-1,3-dithiole-2-thionato) nickelate (1,4, 7,10,13,16-hexaoxa-2,3: 11,12-dibenzocyclooctadeca-2,11-diene) Propanone Solvate," *Acta Crystallographica Section C*, 57: 1271-1273 (2001)*

55) K. Shitagami, T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura and N. Robertson: "An Infinite Supramolecular Array Structure in Metal Dithiolate Complexes: Crystal Structure of K (Dibenzo-18-crown-6) [M(dmit)$_2$] (CH_3CN)$_2$ (M: Ni, Au)," *Cryst. Eng. Commun.*, 52-52 (2001)*

56) S. Nishihara, T. Akutagawa, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Formation of Molecular Spin Ladder Induced by Supramolecular Cation Structure," *Chem. Commun.*, 408-409 (2002)*

57) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura, T. Inabe and G. Saito: "Coupled Protonic and Electronic Conduction in Molecular Conductor: [2-(2-1H-benzimidazolyl)-1H-benzimidazolium]-TCNQ", *Chem. Eur. J.*, 8: 4402-4411 (2002)

58) T. Akutagawa, N. Takamatsu, T. Hasegawa, T. Nakamura and T. Inabe: "Crystal Structures and Magnetism of [Ni (dimit)$_2$]-Salts with Supramolecular Cations of M^+ (15-crown-5)", *Cryst. Liq. Cryst.*, 376: 39-46 (2002)

59) T. Akutagawa, T. Ohta, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Formation of Oriented Molecular Nanowires on Mica Surface", *Pro. Natl. Acad. Sci. USA*, 99: 5028-5033 (2002)

60) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura and G. Saito: "Hydrogen-bonded supramolecular (2, 2'-bi-1H-benzimidazole) (2-(2-1H-benzimidazolyl)-1H-benzimidazolium^2)$_2$ (Cl) as an electron donor in a TCNQ complex", *Cryst. Eng. Commun.*, 5: 54-57 (2002)

61) T. Akutagawa, A. Hashimoto, S. Nishihara, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Magnetic Properties of [Ni (dmit)$_2$]-Anions Induced by Flexible Hydrogen-bonded Supramolecular Cations (p-Xylylenediammonium^{2+}) (Crown Ethers)$_2$", *J. Phys. Chem. B*, 107: 66-74 (2002)

62) T. Akutagawa, T. Hasegawa, T. Nakamura and T. Inabe: "Supramolecular Cation Assemblies of Hydrogen-Bonded (NH_4^+/$NH_2NH_3^+$) (Crown Ether) in [Ni (dmit)$_2$]-Based Molecular Conductors and Magnets", *J. Am. Chem. Soc.*, 124: 8903-8911 (2002)

63) S. Nishihara, T. Akutagawa, T. Hasegawa, S. Fujiyama, T. Nakamura and T. Nakamura: "Two Polymorphs of (anilinium) (18-crown-6) [Ni (dmit)$_2$]; Structure and Magnetic Properties", *J. Solid. State. Chem.*, 168: 661-667 (2002)

64) S. Takeda, G. Maruta,, T. Akutagawa, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Dynamic behavior of ammonium ion in the crown ether cavity within Ni (dmit) 2 salt as studied by solid-state NMR", *Synth. Met.*, 133-134: 427-429 (2003)

65) H. Sakamoto, K. Mizoguchi and T. Hasegawa: "ESR studies of (BEDT-TTF) (ClMeTCNQ) under pressure", *Synth. Met.*, 133-134: 627-628 (2003)

4.2 総説、解説、評論等

1) 芥川智行、中村貴義：『ポリマー材料によるレーザーの実現』化学、52(6)、64－65 (1997)

2) T. Akutagawa and T. Nakamura: "[Ni(dmit)$_2$] Salts with Supramolecular Cation Structure," *Coordination Chemistry Review*, 198: 297-311 (2000)

3) 中村貴義：「分子エレクトロニクスーブームの再来ー」、化学、55(12)：72-73 (2000)

4) 近藤隆佑、鹿児島誠一、長谷川達生：「ドナー・アクセプター型有機超伝導体(BETS)$_2$(Cl_2TCNQ)」、固体物理、35(5)：363-368 (2000)

5) T. Akutagawa and T. Nakamura: "Control of Assembly and Magnetism of Metal-dmit Complexes by Supramolecular Cations," *Coordination Chemistry Reviews*, 226: 3-9 (2002)*

4.3 著書

1) Nakamura, T., "Electrically Conductive Langmuir-Blodgett Films" pp.727-780, H. S. Nalwa (ed.), *Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers vol. 1*, John Wiley & Sons., Chichester (1997).

2) T. Akutagawa, T. Hasegawa and T. Nakamura: "Supramolecular Aspects of Organic Conductors." In Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials, ed. H. S. Nalwa, Volume 3: High Tc

Superconductors and Organic Conductors (Academic Press, San Diego) pp.267-301 (2001)

3) T. Nakamura, T. Matsumoto, H. Tada and K. I. Sugiura:, *Chemistry of Nanomolecular Systems; Toward the Realization of Molecular Devices*, Editor, Springer Verlag (Berlin) (2002)

4) T. Akutagawa and T. Nakamura: "Semiconductor and Molecular-Assembly Nanowires", *Chemistry of Nanomolecular Systems; Toward the Realization of Molecular Devices*, Springer Verlag (Berlin), 123-147 (2002)

5) 中村貴義：「第13章　有機分子材料・バイオ関連技術、13.1有機材料物性、13.1.1低分子材料」、応用物理ハンドブック、第2版　応用物理学会編、丸善（2002）

4.5 招請講演

1) Nakamura, T.: "Structural Control of Molecular Conductors from Supramolecular Aspect" Towards Molecular Electronics '97, Poznan Poland (1997-6)

2) Hasegawa, T. and Koda, T.: "Excitons in Conjugated Polymers" 13th Interdisciplinary Laser Science Conference (ILS-XIII), Long Beach, California (1997-10)

3) Akutagawa, T. and Nakamura, T.: "Supramolecular-Ion Structures in $Ni(dmit)_2$ Conducting Crystals" International Workshop on Nano-Molecular Electronics '97, Kobe (1997-12)

4) Nakamura, T.: "Crown Ether Based Supramolecular Cations in Conducting $Ni(dmit)_2$ Salts: A Possible Ion-Electron Correlated System" XVI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry, St. Petersburg (1998-5).

5) 長谷川達生：「ドナーアクセプター型・BEDT-TTF系錯体の構造と物性」、東京大学物性研究所短期研究会「強相関電子系としての分子性導体」、東京、日本（1999-5）

6) T. Nakamura and T. Akutagawa: "Self-Assembled Supramolecular Cations in [$Ni(dmit)_2$] Molecular Crystals: Possible Ion-Electron Correlated System," Towards Molecular Electronics '99, Poznan, Poland (1999-7)

7) 中村貴義：「金属錯体に自己集積化した超分子イオン構造：イオン―電子結合系としての可能性」、日本化学会第77秋季年会、札幌、日本（1999-9）

8) T. Nakamura: "Supramolecular Approach to Novel Molecular Conductors and Magnets," NAIR Workshop '00 on Chemo-Intelligence, Tsukuba, Japan (2000-3)

9) T. Nakamura and T. Akutagawa: "Supramolecular Aspects of Molecular Conductors," International Symposium on Chaos and Order in Chemistry, Nara, Japan (2000-3)

10) T. Nakamura: "Supramolecular Cation Structures in [$Ni(dmit)_2$] Salts," Pacifichem 2000, Multifuncitionality of Inorganic, Organic and Their Hybrid Solids, Honolulu, USA (2000-12)

11) T. Nakamura and T. Akutagawa: "Integrated Molecular Systems based on Molecular Conductors and Magnets: Channels, Rotors and Wires," Okazaki COE Symposium on Electronic Properties of Molecular Assemblies, Okazaki, Japan (2001-3)

12) 中村貴義：「集積型分子システムから分子エレクトロニクスへ」、第2回表面改質フォーラム、千歳（2001-7）

13) T. Nakamura, T. Akutagawa and T. Hasegawa: "Molecular Sysytems based on Molecular conductors and Magnets," The 4th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets, Rusutsu, Japan (2001-9)

14) T. Hasegawa, T. Akutagawa, T. Nakamura: "Symmetry-invariant spin-lattice phase transition in ionic mixed-stack charge-transfer compound, (BEDO-TTF) (Cl2TCNQ)," The 4th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets, Rusutsu, Japan (2001-9)

15) 中村貴義：「固定表面への分子ナノワイヤ構造の構築」、日本物理学会2001年秋季大会、徳島（2001-9）

16) 長谷川達生：「(BEDT-TTF)(TCNQ)系交互積層型錯体の電子相転移」、日本物理学会2001年秋季大会、徳島（2001-9）

17) 芥川智行：「イオン認識性分子集合体が形成するナノワイアー構造」、分子構造総合討論会、札幌（2001-9）

18) T. Nakamura, T. Akutagawa and T. Hasegawa: "Control of Structure and Electrical Properties of [$Ni(dmit)_2$] Salts by Supramolecular-Cation Systems," International Symposium on Coorporative Phenomena of Assembled Metal Complexes, Osaka, Japan (2001-11)

19) T. Nakamura, T. Akutagawa and T. Hasegawa: "Molecular Systems of [$Ni(dmit)_2$] and Crown Ethers," International Workshop on Control of Conduction Mechanism in Organic Conductors, Shonan, Japan (2002-1)

20) 中村貴義：「分子システムから分子デバイスへ」、日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会第26回研究会「分子エレクトロニクス」、東京（2002-3）

21) T. Nakamura: "Assembly of Molecular Conductors and Magnets towards Molecular Electronics," Japan-India Meeting on Molecular and Su-

pramolecular Materials, Tokyo, Japan (2002-3)

22) 中村貴義：「分子性導体・磁性体を利用した分子システムの構築」、分子スケールナノサイエンス研究会、岡崎(2002-3)

23) 芥川智行：「マクロサイクリック TTF 誘導体が形成する多彩な分子集合体ナノ構造」、平成 14 年度分子科学研究所研究会〝分子を構成要素とする新しい電子機能物質〟、岡崎（2003-03）

24) 中村貴義：「金属錯体からなる電子機能性分子システムの構築」、日本化学会第 83 春季年会、東京(2003-03)

25) 中村貴義：「分子システムからナノデバイスへの展開」、日本学術振興会未踏・ナノデバイステクノロジー第 151 委員会公開シンポジウム「有機ナノテクノロジーとデバイス応用」、東京（2002-09）

26) 長谷川達生：「中性―イオン性転移の実験的検証と誘電性」、東北大金研研究会「新しい機構による巨大誘電性の探索」、仙台市（2002-10）

27) T. Hasegawa: "Field-Effect Doping in Organic Charge-Transfer Complexes", NEDO Europe-Japan Meeting "Intelligent CT Materials", レンヌ市, France (2002-10)

28) T. Nakamura: "Development of Nanomolecular Systems toward the Realization of Molecular Electronics", Symposium on Nanochemistry, Ulsan, Korea (2002-11)

29) 長谷川達生：「電荷移動錯体結晶の電界効果ドーピング」、東大物性研短期研究会〝分子性導体の物質探索と新機能開拓〟、柏市（2002-11）

30) 中村貴義：「複合分子システムの構築と材料化：分子エレクトロニクスへのアプローチ」、理研シンポジウム「ソフト・オプトエレクトロニクスマテリアル―分子デザイン、操作、電子状態制御―」、和光（2003-01）

31) 長谷川達生：「分子性強相関半導体結晶を用いた電界効果型デバイス」、分子研コロキウム、岡崎市(2003-02)

4.6 シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）中村貴義（電子材料物性部門）：〝RIES International Workshop on Molecular Electronics II〟（100 名、北海道大学学術交流会館）（2000.3.10）

2）T. Nakamura：〝電子科学研究所国際共同研究ミニシンポジウム〟（30 名、北海道大学）（2003.3.26）

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）中村貴義（電子材料物性部門）：〝電子科学研究所　公開シンポジウム「分子エレクトロニクス―有機機能材料の新たな地平を目指して」〟（約 50 名、北海道大学学術交流会館）（1998.3.18-19）

2）中村貴義（電子材料物性部門）：〝分子エレクトロニクスの化学〟（100 名、北海道大学）（2001.12.6-7）

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）中村貴義、基盤Ｂ　展開(2)、粉末結晶のための新しい三次非線形光学定数測定方法の開発、9,500 千円（1997）

2）中村貴義、萌芽、金属錯体塩における電子伝導系とイオンチャンネルのハイブリッド化と電気伝導制御、700 千円（1997）

3）中村貴義、特定Ａ　(2)、d-π 複合電子系単成分電気伝導体の次元構造制御、1,500 千円（1997）

4）中村貴義、基盤Ａ　一般(2)、超分子イオン―遍歴電子結合系の自己組織化と機能、23,800 千円（1998）

5）長谷川達生、基盤Ｂ　一般(2)、有機低次元導体の密度波相における電子状態、4,400 千円（1998）

6）中村貴義、基盤Ｂ　展開(2)、粉末結晶のための新しい三次非線形光学定数測定方法の開発、2,700 千円（1998）

7）中村貴義、萌芽、分子組織体―微小電極インターフェース、1,300 千円（1998）

8）長谷川達生、萌芽、有機伝導体の制御微細構造の作成、600 千円（1998）

9）芥川智行、奨励Ａ、イオン―電子複合輸送系を目指した有機伝導体中の超分子カチオン場、1,400 千円（1998）

10）中村貴義、特定領域Ａ　(2)、マイクロサイクリック TTF 系の開発と機能開拓、2,000 千円（1999）

11）中村貴義、特定領域Ａ　(2)、d-π 複合電子系単成分電気伝導体の次元構造制御、1,700 千円（1999）

12）中村貴義、基盤Ａ　一般(2)、超分子イオン―遍歴電子結合系の自己組織化と機能、4,900 千円（1999）

13）長谷川達生、基盤Ｂ　一般(2)、有機低次元導体の密度波相における電子状態、2,500 千円（1999）

14）中村貴義、萌芽、分子組織体―微小電極インターフェース、700 千円（1999）

15）芥川智行、奨励Ａ、イオン―電子複合輸送系を目指した有機伝導体中の超分子カチオン場、600 千円（1999）

16）中村貴義、特定領域Ａ　(2)、マイクロサイクリック系の開発と機能開拓、1,800 千円（2000）

17）中村貴義、特定領域Ａ　(2)、d-π 複合電子系単成分電気伝導体の次元構造制御、1,600 千円（2000）

18）中村貴義、基盤Ａ　一般(2)、超分子イオン―遍歴電子結合系の自己組織化と機能、2,600 千円（2000）

19）芥川智行、基盤Ｃ　一般(2)、低分子有機錯体を用いた非水系プロトン伝導体の設計、2,400 千円（2000）

20）中村貴義、特定領域Ａ　(2)、水素結合を利用した超分子複合構造の構築と電子機能の動的制御、1,600 千円（2001）

21) 中村貴義、基盤A　一般(2)、超分子イオン—遍歴電子結合系の自己組織化と機能、直接 2,700 千円、間接 810 千円（2001）
22) 長谷川達生、基盤B　一般(2)、二次元有機半導体による圧力下中性・イオン性転移、6,500 千円（2001）
23) 中村貴義、基盤C　企画(1)、分子エレクトロニクスの化学、3,500 千円（2001）
24) 芥川智行、基盤C　一般(2)、低分子有機錯体を用いた非水系プロトン伝導体の設計、1,100 千円（2001）
25) 中村貴義、基盤研究B　一般、二次元有機半導体による圧力下中性—イオン性転移、12,600 千円（2001～2003）
26) 中村貴義、基盤研究A、分子性ナノワイヤの構築と機能開拓、32,300 千円（2002～2005）
27) 中村貴義、萌芽研究、固相での分子モーターの構築、3,300 千円（2002～2003）

b．奨学寄付金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1）中村貴義、公益信託分子科学研究奨励森野基金、分子性導体におけるイオン系と電子系の相互制御に関する研究、1,000 千円（1997）
2）長谷川達生、㈱実吉奨学会、国際会議出席のための渡航費助成、80 千円（1997）
3）芥川智行、㈱宇宙科学振興会、合成金属の科学・技術に関する国際会議渡航費助成、200 千円（1998）
4）長谷川達生、㈱日産科学振興財団、有機半導体結晶における非パイエレス型・中性—イオン性転移の研究、1,600 千円（2000）
5）長谷川達生、㈱丸文研究交流財団、国際会議出席のための渡航費助成、256 千円（2000）
6）芥川智行、㈱新世代研究所、有機伝導体ナノテクノロジーの開発、1,600 千円（2001）

c．受託研究費（受入者氏名、委託先、研究課題、金額、年度）

1）中村貴義　竹中信夫、中小企業事業団、新機能ポルフィリン素材の開発に関する研究、1,250 千円（1998）
2）芥川智行、科学技術振興事業団、動的イオン場を介した電子物性制御、900 千円（1998）
3）中村貴義、新エネルギー・産業技術総合開発機構、分子プログラムを利用したメゾスコピック領域構造機能制御、30,368 千円（1998）

4.8　共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）川俣純、井上久遠(電子機能素子部門)、中村貴義、芥川智行(電子材料物性部門)：粉末結晶のための新しい三次非線形光学定数測定方法の開発）（1997～1998 年度）
2）植杉克弘、長谷川達生(電子材料物性部門)：「GaNAs 系混晶半導体の結晶成長とその物性評価」(1998 年度)
3）中村貴義、長谷川達生、芥川智行、長谷川達生：超分子化学から分子エレクトロニクスへのアプローチ（2002～2005 年度）

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）芥川智行、長谷川達生、中村貴義(電子材料物性部門)：無重力下での光高速重合によるポリマー粒子の合成、4,510 千円(1997 年度)、4,610 千円(1998 年度)（1995～1998 年度）
2）中村貴義、松本睦良、中村徹、武井文雄、真鍋敏夫、戦略創造研究：新規な電子機能を持つ分子ナノ構造体の構築（分子性物質の材料化•システム化)、76,000 千円（2002～2007 年度）

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）中村貴義(電子材料物性部門)、NEDO 新産業創造型提案公募事業：分子プログラムを利用したメゾスコピック領域構造機能制御」、30,368 千円（平成 10 年度）
2）芥川智行(電子材料物性部門)、科学技術振興事業団さきがけ研究 21：「動的イオン場を介した電子物性制御」、12,100 千円（平成 10 年度）
3）中村貴義(電子物性材料部門)、新規産業創造型提案公募事業　新エネルギー・産業技術総合開発機構：分子プログラムを利用したメゾスコピック領域構造機能制御、49,812 千円（1998～2000 年度）
4）芥川智行(電子物性材料部門)、個人研究推進事業さきがけ研究 21 科学技術振興事業団：動的イオン場を介した電子物性制御、4,700 千円（1999～2001 年度）
5）芥川智行(電子材料物性部門)、若手研究者研究推進事業　科学技術振興事業団：動的イオン場を介した電子物性制御、5,600 千円(平成 13 年度 1,000 千円)（1998～2001 年度）
6）中村貴義、川端和重、21 世紀 COE：チューブリンを用いたナノデバイス構築技術（2002～2003 年度）

d．国際共同研究（代表者名、エージェンシー、研究課題、経費、研究期間）

1）中村貴義(電子材料物性部門)、文部省創造開発研究経費：分子素子微小インターフェース構築に関する研究、1,637 千円（1997 年度）
2）中村貴義(電子材料物性部門)、日本学術振興会外国人研究者招へい事業：イオン—電子結合系のデバイス展開に関する理論的研究、2,400 千円（1998 年度）

4.10　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）中村貴義：㈱宇宙環境利用推進センター、生体高分子調査研究委員会委員（1997 年度）
2）中村貴義：㈱宇宙環境利用推進センター、生体親和材料調査研究委員会委員長（1998 年度）

c．新聞・テレビ等の報道

1）芥川智行：日本工業新聞、「ここがポイント私の研究：

動的イオン場を介した電子物性制御」、平成11年2月

2）中村貴義：日経産業新聞、「電流制御の可能性も　北大分子素子の材料開発」、平成13年1月10日

3）芥川智行：日本工業新聞、「動的イオン場を介した電子物性制御」、平成12年2月22日

4）中村貴義：日経産業新聞、「電流制御の可能性も　北大分子素子の材料開発」、平成13年1月10日

5）芥川智行：日経先端技術、「陽子と電子を伝導できる初の有機固体材料」、平成13年11月12日

6）下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：科学新聞、「ピラミッド型発光素子開発」、2002年4月26日

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）小沼太朗：分子性電荷移動錯体のLangmuir-Blodgett膜における2次の非線形光学効果（1997）

2）根津雄一郎：クラウンエーテルあるいはポリエチレングリコールに包接されたアルカリ金属イオンをカウンターカチオンとするM（dmit）$_2$錯体の作製（1997）

3）阿部裕佳子：マクロサイクリックTTFラジカル塩の合成と物性（1998）

4）湯本徹：電荷移動錯体及び金属錯体LB膜の作製と物性（1998）

5）鈴木徹也：TTF骨格を有する自己組織化膜の作製と電子状態制御（1999）

6）高松信博：超分子カチオンを含む［Ni（dmit）$_2$］錯体の構造と磁性（1999）

7）太田宇則：マクロサイクリックTTF分子集合体の組織構造制御（2000）

8）佐藤祐：新しいドナー・アクセプター型電荷移動錯体の構造と物性（2000）

9）石崎徹：GaAsN混晶半導体の電場変調分光（2000）

10）高橋利行：ビス（TTFジチオレート）金属錯体を用いた導電性LB膜の物性評価（2000）

11）西原禎文：超分子カチオン構造を利用した分子磁性体の開発（2000）

12）山田聖人：TTFジチオレートアニオン超薄膜の作製と機能開拓（2000）

13）橋本麻子：超分子アンモニウムカチオンを含むNi（dmit）$_2$塩の構造と物性（2001）

14）帯刀陽子：二鎖型マクロサイクリックTTF・F_4TCNQが形成する分子集合体ナノワイヤの複合化と物性評価（2002）

15）高橋幸裕：（BEDT）（ClMeTCNQ）量子臨界点近傍の誘電挙動（2002）

16）内潟昌則：Pyrrolo-TTFとTCNQ誘導体からなる電荷移動型LB膜の作製および構造評価（2002）

17）垣内慶子：新規マクロサイクリックTTF誘導体の合成とLB膜の構造（2002）

18）宮田英人：マクロサイクリックTTF誘導体の電荷移動錯体が形成するLB膜の構造と電子状態（2002）

・博士学位

1）安田紀彦：Mechanism of Photosensitized Chemiluminescence of Luminol and CLA (1999)

2）下神耕造：クラウン型包接化合物と組み合わせた金属錯体結晶の作製とその構造ー物性相関に関する研究（2001）

e．大学院担当講義科目

1）光物理化学特論II（1997～1998）

2）大気環境化学特論I（1997～1998）

3）物質科学特論II（1997～1998）

4）分子環境学特論I（1997～1998）

5）大気環境化学特論I（1999～2000）

6）物質科学特論II、III（1999～2000）

7）分子環境学特論I、III（1999～2000）

8）光物理化学特論II（1999～2000）

9）大気環境化学特論I（2001）

10）分子環境学特論III（2001）

11）一般教育演習「分子エレクトロニクス」（2002）

12）総合講義「先端の化学」（2002）

13）光分子化学実習（2002）

14）物質環境科学論文購読I（2002）

15）物質環境科学論文購読II（2002）

16）光物理化学特論II（2002）

17）分子環境科学特論I（2002）

18）分子エレクトロニクス（2002）

19）光分子化学研究（2002）

20）光分子化学特別研究（2002）

21）地球環境科学研究科（2002）

光材料研究分野

教授　末宗幾夫（東工大院、工博、1993.4～）
助教授　田中　悟（ノースカロライナ州立大学、Ph.D.、1998.4～）
助手　植杉克弘（広大院、工博、1994.4～2002.3）
　　熊野英和（北大院、理修、1997.4～）
技官　星山満雄
講師　栗本　誠(工学院大院、工博、2001.9～)（研究機関研究員）

院生
・平成9－14年度
博士課程
アドリアン・アブラメスク、上田章雄、俵　毅彦、アルママン・アシュラフィ、海老原正人
修士課程
星　健一、村沢　智、諸岡展樹、吉田浩章、下沢東吾、加藤純一、山田哲史、余湖孝紀、堀口英明、妹尾俊輔、飛高功明、中川啓志、豊田啓貴、中屋大佑、寺田一教

1．研究目的

光通信・光情報処理などを中心とした光エレクトロニクスは、現代社会のキーテクノロジーと位置づけられており、特に高密度情報記録のための半導体レーザの短波長化、端末まで光ファイバー通信を実現するために必要な高い安定性を持つ新しい光通信用長波長半導体レーザ、波長多重光通信用発光素子の多波長化・集積化、光インターコネクションのための低消費電力発光素子・光電子融合化などの高性能化が求められている。本研究分野では、独自のAFM・電子ビーム結合微細パターニング技術、ワイドギャップ（窒化物、II-VI族）半導体、ナロウギャップ（III-V-N窒化物混晶）半導体の量子構造作製技術を用いて、光と電子の相互作用の量子制御と物理現象の解明を通して、光素子の高速化・高い発光量子効率による低消費電力化など上記のような発光素子の高性能化を目指している。

2．研究成果

・平成9－10年度

(a)　AFM/SEM複合ナノメートル微細加工技術の開発に関する研究

電子ビーム描画によるカーボン膜の直接パターニングとAFMによるナノスケール陽極酸化を組み合わせた新しいナノメートル微細加工技術を開発し、直接半導体量子構造を選択成長できることを示した[1]。

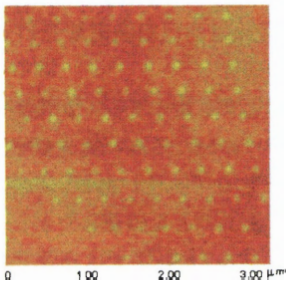


図1．電子ビームで直接GaAs基板上に堆積したカーボン膜に、AFMナノリソグラフィで～50 nmの開口アレイを作製した例。

(b)　次世代光通信用III-V-N半導体の開発・物性評価

情報量の大きい画像イメージの通信が増加するにつれ、各ユーザ端末まで光ファイバー通信化する要求が高まっている。しかし現在使われている光通信用長波長半導体レーザは温度安定性が悪く、より大きなバンドオフセットがとれ、レーザの漏れ電流を低減できる可能性があるIII-V-N窒化物半導体を用いて、レーザの高性能化を目指して研究を進めている。これまでにGaNAs系では状態密度が大きく大きな最大光学利得が期待できること[2]、エネルギーギャップの温度依存性がGaAsより小さくなりレーザの温度安定性を向上できる可能性があることを明らかにしている。

(c)　ZnSeへのクラスタードーピング法によるP型伝導度制御に関する研究

一般にワイドギャップ半導体では伝導度制御が困難になり、特にGaNのMOVPE成長、ZnSeのMBE成長でのP型伝導度制御は短波長レーザ実現のブレークスルーとなった。しかしZnSe系の選択成長が可能なMOMBE、MOVPE法では伝導度制御が確立しておらず、マイクロキャビティ、フォトニックドットのダイオード動作を目指して、P型半導体の原子レベルクラスターをZnSeにドーピングすることにより、クラスター中の価電子帯量子準位をZnSeの価電子帯に近づけ、正孔を活性化することを提案している。これまでにZnTe:Li[3]ならびにGaAs:Znにより～10^{17}cm^{-3}のP型伝導を確認できた。

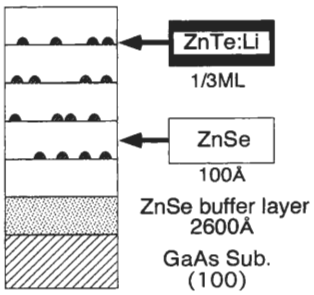


図2．ZnSe10nmごとにZnTe:Liを1/3分子層挿入すると、フォトルミネッセンスからZnTeは数分子層サイズのクラスターになっていることが示唆され、量子化によるアクセプター準位のシフトにより正孔がZnSe層に活性化される。

(d) CdSe、CdS、ZnSe 自己組織化量子ドットの作製・物性評価に関する研究

これらの半導体による量子ドットが作製できれば、可視領域全般（赤～青）にわたる高い発光量子効率を持った発光ダイオードができる可能性がある。CdSe 系の自己組織化ドットが作製できることを確認したが、大気中では不安定性を示すこと、一方 ZnSe 系では安定であることを示すとともに[4]、ドットサイズと発光波長のブルーシフトの明瞭な相関を明らかにし、発光起源がドットの量子準位であることを示した。

(e) アンチサーファクタントを用いた GaN ドットの作製・光物性に関する研究

窒化物系の化合物半導体は、その化学的・熱的安定性や優れた光学物性により高効率・高性能の光デバイスが実現可能である。次世代の〝あかり〟－白色光源として、蛍光灯に紫外線の発光デバイスを応用する研究や、He－Cd レーザー、窒素レーザーあるいはエキシマレーザーといったガスレーザーを固体化（半導体レーザー）しようとする研究が始まっている。これらのデバイスを実現する手法として、発光活性層に量子ドットを用いることが有効である。しかしながら、GaN 量子ドットは通常の成長条件においては作製できない。我々は独自に開発したアンチサーファクタントを用いる手法により、この系で世界で初めて窒化物量子ドットの作製に成功した[5]。

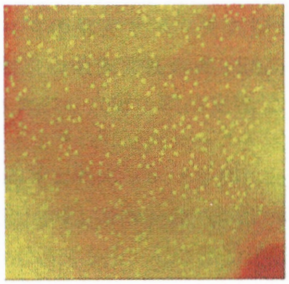


図 3．AlGaN 表面上に作製した GaN 量子ドットの AFM 像（高さ 5 nm、幅 20 nm）5 μmx 5 μm。

(f) ZnSe/MgS 超格子の作製と励起子光物性の研究

ZnSe と MgS は格子不整合が比較的小さく、またエネルギーギャップ差が～2.3 eV と大きいため、ZnSe/MgS 超格子は伝導帯、価電子帯ともに強い量子閉じこめが期待できる青色領域半導体である。MgS は自然には岩塩構造を取り以前には閃亜鉛鉱構造 MgS は報告されていなかったが、閃亜鉛鉱構造 ZnSe/MgS 超格子を作製することに世界で初めて成功し、その励起子特性の検討を進めている[6]。

(g) ZnSSe/MgSSe 系 DBR を用いたマイクロキャビティと励起子ポラリトンに関する研究

マイクロキャビティの研究はこれまで主に III-V 族化合物半導体で進められてきたが、ワイドギャップ半導体ではその基礎となる励起子の束縛エネルギーが大きく、これまで困難であった室温での動作が期待されている。その構造作製、励起子ポラリトンの特性評価の研究を進めている。現在、ZnSe/ZnS、ZnSe/ZnMgS DBR を作製し、理論計算に近い 90%以上の反射率を持つ DBR が作製できている[7]。

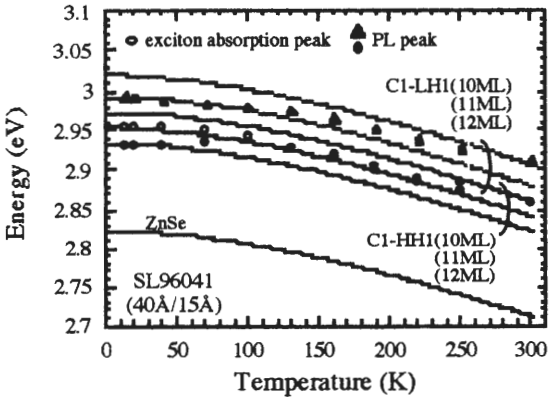


図 4．ZnSe/MgS 超格子のヘテロ界面は原子レベルの平坦さを持つ。低温では ZnSe 井戸層の 1 分子層の変化による局在励起子からの発光が観測される（図の低温領域で白丸で示した吸収ピークに対して、黒丸で示した発光ピークは 1 分子層相当のレッドシフトを示す）。

(h) フォトニックドットによる自然放出寿命・コヒーレンスの制御に関する研究

自然には物質本来の発光寿命は決まった値を持つが、光波長サイズの微小光共振器（フォトニックドット）により光場を量子化することができれば、自然放出寿命を速くしたり遅くしたりと自由に制御できるようになる。これを用いると高速かつコヒーレントな発光ダイオードが実現できる可能性があり、これを実現するためのフォトニックドットの研究を進めている。これまでに MOMBE 選択成長で作製した ZnS フォトニックドットアレイにおいて、光モードによる共鳴吸収ピークが観測され、共振 Q 値としては 160～330 と比較的大きな値が得られている[8]。

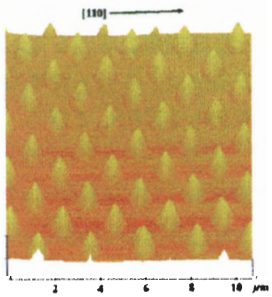


図 5．MOMBE 選択成長で作製した ZnS フォトニックドットアレイ

・平成 11－12 年度

(a) 次世代光通信用 III-V-N 窒化物半導体の開発・物性評価

情報量の大きい画像イメージの通信が増加するにつれ、各ユーザ端末まで光ファイバー通信化する要求が高まっている。しかし現在使われている光通信用長波長半導体レーザは温度安定性が悪く、より大きなバンドオフセットがと

れ、レーザの漏れ電流を低減できる可能性があるIII-V-N窒化物半導体を用いて、レーザの高性能化を目指して研究を進めている。特に波長多重通信には発光波長の温度依存性を小さくすることが重要であるが、GaNAs系ではエネルギーギャップの温度依存性がGaAsの60%程度に小さくなること、さらにこれは窒素の局在レベルの温度安定性によることを理論的に説明した。

(b) アンチサーファクタントによるGaN貫通転位の低減

窒化物系化合物半導体は、その化学的・熱的安定性や優れた光学物性により高効率・高性能の光デバイスが実現可能である。しかし青色レーザの信頼性はその欠陥密度の低減が重要な鍵を握っている。我々は独自に開発したアンチサーファクタントを用いる手法により、GaN/GaN界面で貫通転位が減少していることが見いだした。GaN成長初期の観察等により、これは量子ドットが融合する過程において転位同士の反応、転位ループの形成によりこうした減少が生じていることが明らかとなった。

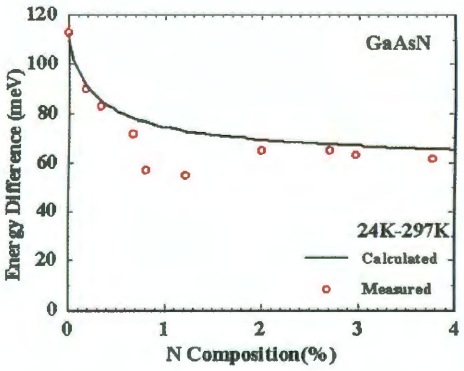


図1．GaNAsにおける低温と室温におけるエネルギーギャップのエネルギー変化量。窒素が1%以上では変化量が60%程度に低減され、これは窒素エネルギーレベルと自由バンドとのエネルギー交差モデルで実線のように説明できる。

図2．アンチサーファクタントとしてのSiを供給することによって、GaN薄膜の転位密度が急激に減少することを示す断面透過電子顕微鏡写真。

(c) ZnSe/MgS超格子による分布反射ミラーならびに微小共振器の作製

ZnSeとMgSは格子不整合が比較的小さく、またエネルギーギャップ差が~2.3 eVと大きいため、ZnSe/MgS超格子は伝導帯、価電子帯ともに強い量子閉じこめが期待できる青色領域半導体である。この超格子を用いて高い反射効率を持つ分布反射ミラー（DBR）を作製し、これを組み合わせることによって青色領域では初めてのモノリシックな微小共振器を作製した。今後さらに量子ドットとの強い結合を目指して研究を進めていく。

(d) ピラミッド微小光共振器による自然放出光制御に関する研究

以前には物質の発する自然放出光は制御できないと考えられていたが、光波長サイズの微小光共振器（フォトニックドット）により光場を量子化することができれば、自然放出を自由に制御できるようになることがわかってきた。我々は将来自然放出光制御に基づいた実用的な光デバイスを実現することを目指して、ピラミッド型微小光共振器の研究を進めている。ピラミッドはZnSの選択成長によってその側面を自己組織的に原子レベルに平坦化することができ、波長400 nm程度の青色領域で共振Q値5000程度の非常に鋭い共振モードの観測に成功した。

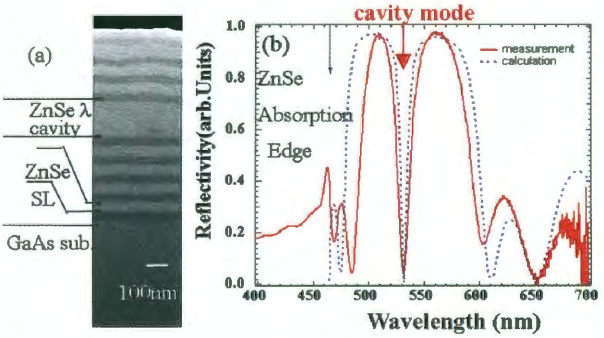


図3．ZnSe/MgS超格子を用いたDBRにより上下に反射ミラーを構成し、II-VI族ワイドギャップ半導体だけからなる微小共振器を初めて作製した。その反射スペクトルは理論結果とよく一致している。

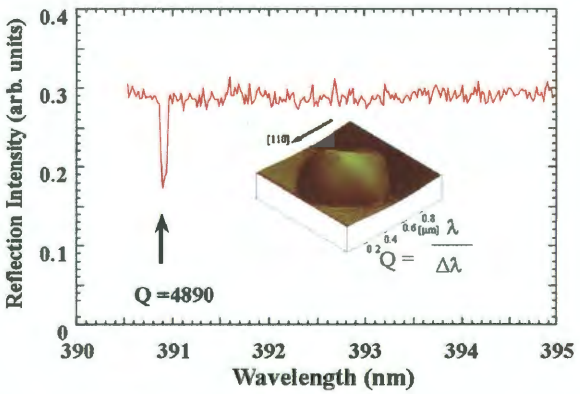


図4．MOMBE選択成長で作製したZnSフォトニックドットアレイと観測された共振Q値~5000の共振モードによる共鳴吸収。

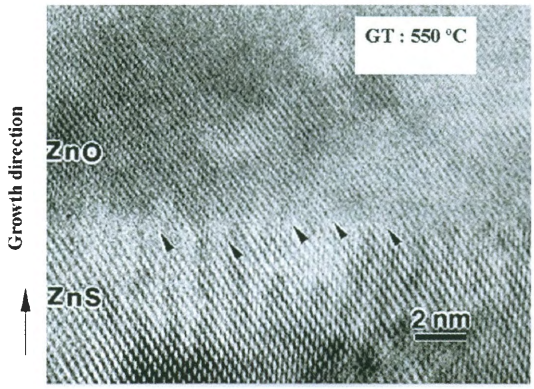


図５．ZnS/GaAs 上に閃亜鉛鉱構造 ZnO 薄膜が成長していることを示す断面透過電子顕微鏡写真。

(e)　閃亜鉛鉱構造を持つ酸化物半導体の実現

光波長サイズの微小な光共振器を実現し、これに単一電子を注入すれば単一光子の発生器が実現できる可能性がある。しかし光場に摂動を与えることなく電子入力をすることは容易ではない。そこで今後の透明導電膜として有望視されている ZnO をピラミッド上に形成することによってこれを実現することを目指している。そのためにはピラミッドと同じ閃亜鉛鉱構造の ZnO を形成する必要がある。我々は ZnS/GaAs 上で世界で初めて閃亜鉛鉱構造の ZnO 薄膜の成長に成功した。

(f)　AFM/SEM 複合ナノメートル微細加工技術による量子ドット 2 次元配列の選択成長

電子ビーム描画によるカーボン膜の直接パターニングと AFM によるナノスケール陽極酸化を組み合わせた新しいナノメートル微細加工技術を開発し、高密度半導体量子ドット配列を選択成長できることを示した。この方法により光と量子ドットを強く結合させることができる。

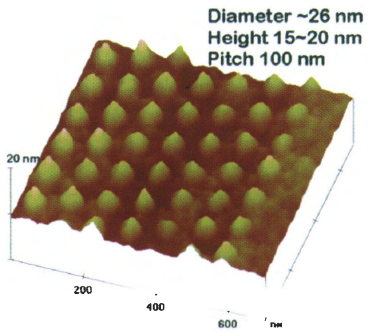


図６．電子ビームで直接 GaAs 基板上に堆積したカーボン膜に、AFM ナノリソグラフィで～20 nm の開口アレイを作製し、選択成長した 1 ×10^{10} cm^{-2} と高密度の量子ドット配列。

・平成 13 年度

(a)　次世代光通信用Ⅰ-Ⅴ-Ｎ窒化物半導体の開発・物性評価

情報量の大きい画像イメージの通信が増加するにつれ、各ユーザ端末まで光ファイバー通信化する要求が高まっている。しかし現在使われている光通信用長波長半導体レーザは温度安定性が悪く、より大きなバンドオフセットがとれ、レーザの漏れ電流を低減できる可能性がある III-V-N 窒化物半導体を用いて、レーザの高性能化を目指して研究を進めている。特に GaP にエルビウムを添加することにより室温で温度依存性の非常に少ない 1.5 ミクロン帯の発光を観測するとともに、InAs 量子ドットに GaNAs 埋め込み層を適用することによりこれまで困難であった 1.5 ミクロン帯の発光が可能となりつつある。

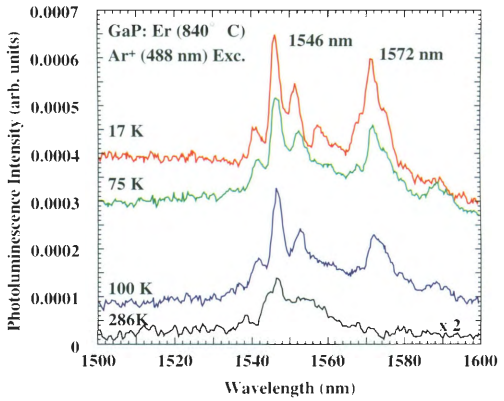


図１．エルビウムを添加した GaP からの 1.55 ミクロン帯発光スペクトルの観測例。発光ピークが温度によってほとんど変化していないことがわかる。

(b)　原子レベル表面状態制御による窒化物半導体のヘテロエピタキシー

窒化物系化合物半導体は、その化学的・熱的安定性や優れた光学物性により短波長域（可視～紫外）の高効率・高性能の光デバイスが実現可能である。しかし構造欠陥（貫通転位や原子空孔など）が他の系に比較して格段に多いため、実用上の問題となっている。我々は原子レベルの表面状態制御により高品質なエピタキシャル薄膜を得ることを目的として、ヘテロエピタキシャル成長機構、欠陥生成機構、および光学特性との関連、また GaN 量子ドットの成長などの検討を行った。得られた結果について以下に説明する。

(1)　SiC 表面におけるステップ構造の実現・エネルギー安定構造の評価

SiC 基板表面を高温 HCl/H_2 処理することにより、原子レベルで平坦なステップ・テラス構造を実現した。更にステップ構造のポリタイプ（４H、６H）および微傾斜角依存性を調べ、ステップ間相互作用にポリタイプ依存性があることを明らかにした。

(2)　ステップ SiC 基板表面上における AlN、GaN ヘテロエピタキシー

ステップ・テラス構造を有する SiC 表面における AlN の核発生・欠陥導入機構をモデル化し、高品質な AlN 薄膜の作製に成功した。また、ステップ構造を有する AlN 表面上の GaN 成長カイネティックス（特にステップダイナミックス）の検討を行った。

(3) GaN 量子ドットの空間配列機構および光デバイスへの応用

フランス CEA 研究所との共同研究により、ステップバンチングした AlN 表面上の Stranski-Klastanov GaN 量子ドットの 1 次元空間配列に成功した．また、配列ドットの発光特性は、サイズ均一性が増大することにより、ランダムに核形成したドットに比較して改善されることがわかった。

(4) アンチサーファクタント法による低転位 GaN 薄膜の成長および GaN ナノ構造（量子ドット）の作製

アンチサーファクタント法によりサファイア基板上の GaN 薄膜の転位密度を $10^7 cm^{-2}$ 程度に減少させ、2 インチ基板全面に均一な特性を持つ GaN 薄膜を得た。また、同手法によってGaNナノ構造作製の基礎的な実験を行った。

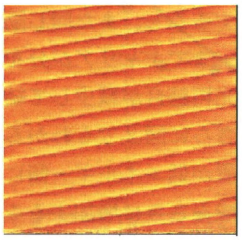


図 2．高温 HCl/H_2 処理により得られた 6 H-SiC（0001）表面の規則正しいステップ構造を示す AFM 像。ステップ高さは、6 H-SiC の 1 ユニット高さに相当する 1.5 nm で安定する。

(c) ZnSe/MgS 超格子による分布反射ミラーを用いた微小共振器への CdS 量子ドットの埋め込み

ZnSe と MgS はエネルギーギャップ差が～2.3 eV と大きいため、ZnSe/MgS 超格子は伝導帯、価電子帯ともに強い量子閉じこめが期待でき、高い反射効率を持つ分布反射ミラー（DBR）を作製するとともに、これを組み合わせることによって青色領域では初めてのモノリシックな微小共振器を作製した。この共振器の中に CdS 量子ドットを埋め込むとともに、光励起キャリアが複数の光学フォノンを放出する際に、これとエネルギー共鳴する量子ドットを選択励起出来ることを見いだした。この特定の量子ドットを選択励起する方法を用いて、明瞭なラビ分裂、励起子ポラリトンモードを初めて観測し、量子ドットと共振器モードの強い結合を実現した。

(d) ピラミッド微小光共振器による自然放出光制御に関する研究

以前には物質の発する自然放出光は制御できないと考えられていたが、光波長サイズの微小光共振器（フォトニックドット）により光場を量子化することができれば、自然放出を自由に制御できるようになることがわかってきた。我々は自然放出光制御に基づいた実用的な光デバイスを実現することを目指して、ピラミッド型微小光共振器の研究を進めている。今回 ZnS ピラミッドに埋め込んだ CdS 量子ドットからの発光が共振モードによって強く変調されていることを室温で観測した。

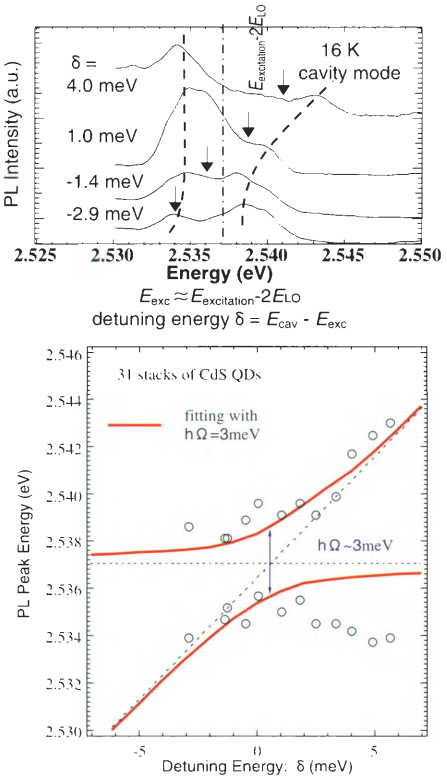


図 3．ZnSe/MgS 超格子を用いた DBR からなる微小共振器の中に CdS 量子ドットを埋め込み、観測したラビ分裂。離調エネルギーδ は共振器モード E_{cav} と励起エネルギー E_{exc}（光励起エネルギー$E_{excitation}$ から光学フォノンを 2 個放出したことによるエネルギー E_{LO} を差し引いたエネルギーを使用）の差で定義される。実線は励起子ポラリトンモデルによる計算結果。

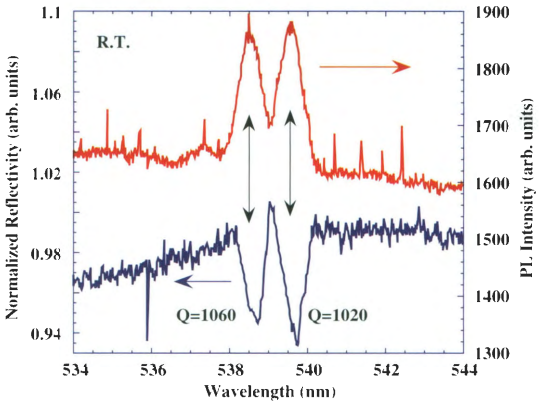


図 4．MOMBE 選択成長で作製した ZnS フォトニックドットに埋め込まれた CdS 量子ドットから観測された共振モードで変調された自然放出光。

(e) 単結晶 CdO 酸化物半導体の実現

酸化物半導体は、光波長サイズの微小な光共振器に対する透明導電膜として有望であり、昨年ピラミッドと同じ閃亜鉛鉱構造の ZnO 薄膜の成長に成功したが、このほかにも可視・紫外発光素子、可視域透明薄膜トランジスタ、圧電薄膜などその機能を組み合わせることにより広い応用が可能であり、現在研究が活発化している。今後酸化物系で可

視発光素子を実現するにはCdOの開発が重要であるが、まだ単結晶薄膜の成長すら実現していない状況であった。我々は原子レベルで平坦な表面を持つ岩塩構造のCdO単結晶薄膜の成長に成功し、その端緒を開きつつある。

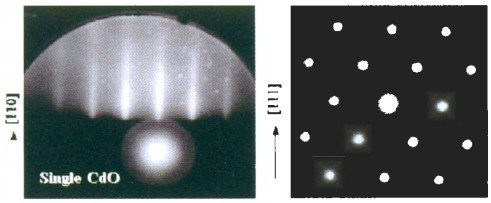


図5．単結晶CdOが成長していることを示す断面透過電子顕微鏡写真（右図）。左図は原子レベルで表面が平坦であることを示す反射高エネルギー電子線回折像

・平成14年度

(a) 広い波長域をカバーする次世代光通信用III-V-N窒化物半導体の開発・物性評価

波長多重通信の進展に伴い、これまでよりも広い波長域をカバーするレーザ光源が必要となりつつある。III-V-N系窒化物半導体はより大きなバンド不連続を利用したより温度安定性のよい光源を実現できる半導体として注目されているが、1.3 μmより長波長化するのが困難であった。これに対してGaNAsにSeを加えたGaAsNSe混晶を用いると容易に長波長領域での発光が得られることがわかった。例を図1に示す。1.4 μm～1.6 μmの広い波長域で発光していることがわかる。この例ではGaAsNSe/GaAs超格子を発光層としているが、この層は2次元に引っ張り応力を受けている。この超格子を2次元圧縮応力を受けたGaAsSb/GaNAs超格子で両側から挟んでひずみを補償することにより、低温に比べて室温でも20%の発光強度を保った発光効率のよい良好な長波長発光材料が実現できることがわかった。このような広帯域発光材料は波長分割多重光回路に対して一括してクロック光パルスを与えるユニークな光源として利用されることが期待される。

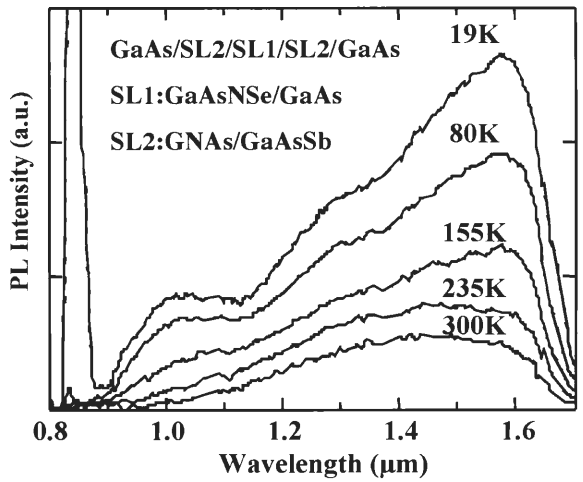


図1．GaAsNSe/GaAs超格子から観測された広帯域長波長発光スペクトル

(b) III-V-N窒化物混晶ひずみ補償層によるInAs量子ドットの1.55 μm長波長化

量子ドットの離散準位を用いて高性能レーザ、波長多重用光増幅器の実現が期待されている。しかしInAsのエネルギーギャップは0.35 eVと小さいにもかかわらず、光ファイバー通信に用いられる1.3 μm（0.95 eV）よりも長波長発光を実現するのは比較的困難であった。その主な理由として、InAs内に生じる2次元圧縮応力によるエネルギーギャップの増大が原因とされている。そこでこのような圧縮応力を伴うInAsドットを形成した後で、これを引っ張り応力を受けたGaNAs層で埋め込み、両者の逆のひずみで互いに補償しあう効果を検討した。その結果図2に示すように、GaAs層で埋め込んだ場合に比べてGaNAs（N組成0.7%）で埋め込んだ場合には、量子ドットの離散準位からのサブピークの発光がより顕著となりドットサイズの均一性が向上すること、また同じ励起光強度に対してより高いエネルギーまでキャリアが分布して発光線幅が広がることから非発光再結合が減少して結晶品質も向上することがわかった。さらに図2でもわかるように基底量子準位のエネルギー位置が低エネルギー側にシフトすることがわかった。窒素組成をさらに増加することによって発光波長を1.55 mmまで長波長化することもできることがわかってきた。

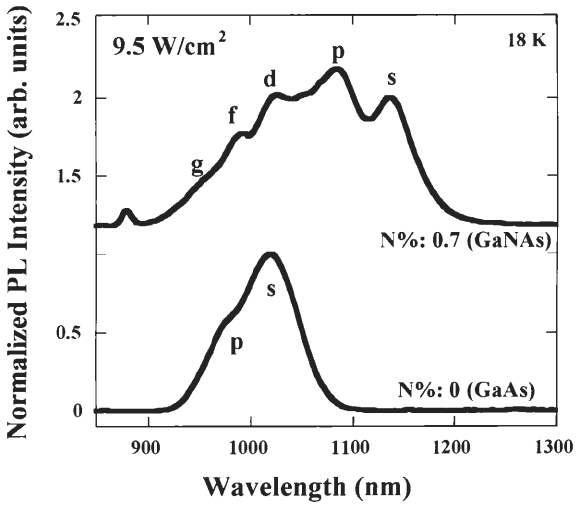


図2．InAs量子ドットをGaAs（下図）とGaNAs（上図）で埋め込んだ場合の発光スペクトル

(c) 窒素添加によるZnO酸化膜p型伝導の実現

現在窒化物半導体で緑、青、さらに紫外域の発光ダイオードが実現されている。一方ZnOなどの酸化物半導体は透明導電膜、圧電膜、センサーなどへの応用の観点から研究が進められてきたが、最近p型伝導の可能性も示されつつあり、酸化物による透明な発光ダイオード、トランジスタの開発を通してこれらを集積した透明エレクトロニクスと呼ばれる新たな展開が期待されるようになりつつある。しかしこれまでのp型伝導の報告は再現性に乏しく、基礎データの十分な検討も進んでいなかった。我々のグループは酸

素源として純水を使ったユニークな方法でZnOに窒素を添加し、再現性のよいp型伝導を確認した。再現性の良さの一端は図3に示す実効アクセプター濃度の成長条件依存性からもわかる。図では電圧—容量特性から2種類の評価方法で不純物濃度を見積もっており、成長時のZn/O比率によって特性が変化することを明瞭に示している。このような再現性が確認されたのは初めてであり、今後の進展が期待される。

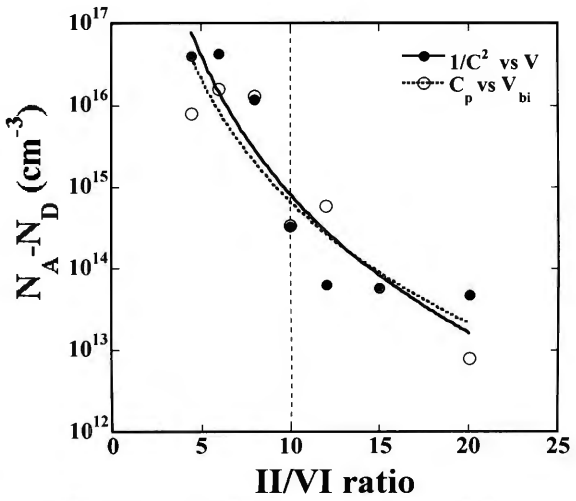


図3．窒素を添加して成長したZnOで測定した実効アクセプター濃度のZn/O（II/VI）比率依存性

(d) 半導体表面自己組織化現象の解明とその応用に関する研究

ボトムアップ手法としての半導体表面ナノスケール自己組織化現象の解明と応用を目指した研究を行っている。特に本年度は、傾斜SiC表面に特有なナノファセット構造の形成機構とナノファセットを利用した表面極微細構造の形成に関する知見を得た。以下に具体的な成果を示す。

(1) 傾斜SiC表面の自己組織化ナノファセット構造の実現及びその形成機構に関する研究

傾斜SiC基板の高温HCl/H_2ガス処理を行うとナノスケールの周期構造（ナノファセット）が生じる。この形成機構をSiCに特有なポリタイプ（4H、6H）及び傾斜角依存性を明らかにすることにより、議論を行った。2相からなる周期的ナノファセットは、ステップ間相互作用によるファセット表面エネルギーの減少により、全体の表面エネルギーの最小化にともなう表面相分離の結果生じるモデルを提案した。図4にナノファセットの高分解能透過型電子顕微鏡像を示す。また、周期構造は各ナノファセット端において表面ストレステンソルにより誘起されたダイポールモーメントの相互作用によるエネルギー安定化によるものと考えられた。また、ポリタイプにより安定なナノファセット構造及び構造揺らぎに違いを生じることがわかった。

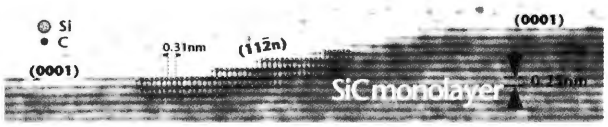


図4　ナノファセットの断面高分解能電子顕微鏡像

(2) 陽極酸化によるSiC表面のナノホールの自己組織化（1次元配列）

上述のSiC表面の周期的ナノファセット構造を利用し、陽極酸化により表面にナノスケールのホールを生成させ、更にそれらの配列を実現した。半導体表面の陽極酸化によるナノホールの作製は新規であり、超高密度記録媒体等への応用が期待される。本年度は、ナノホールの生成および配列機構に関する考察を行った。陽極酸化に必要な正孔を表面のみに誘起するために、特に励起光源と電流密度の最適化を行った。短波長（253 nm）励起及び極低電流密度により、表面近傍にのみ正孔を生成させ、表面のナノファセット構造の形状効果によりファセット端に沿った1次元配列高密度ナノホールが生成可能であることを示した。（図5）

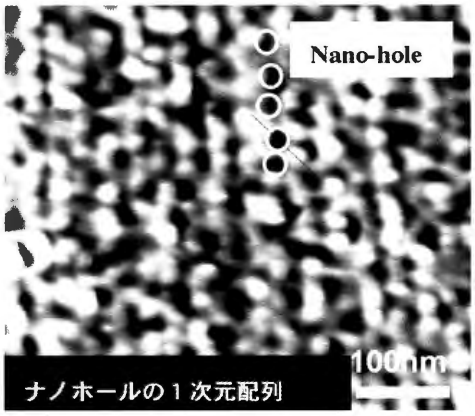


図5．SiC陽極酸化によるナノホールの1次元配列

(e) GaN量子ドットLEDに関する研究

GaN量子ドットを活性層に用いた紫外線発光ダイオードを作製した。窒化物系における量子ドットを用いた発光デバイスでは初めての報告である。量子ドットは著者らにより開発された「アンチサーファクタント法」により作製した。特徴は、歪み誘起によるStranski-Klastanov(S-K)量子ドットとは異なりヘテロ界面の格子不整合を必要としないため、低Al組成の$Al_xGa_{1-x}N$（x~0.1）（格子不整合は約0.35%）の表面上にも高密度の量子ドットが作製できる点である。高Al組成の$Al_xGa_{1-x}N$あるいはAlN上には、S-K量子ドットが作製可能だが、ドーピング制御（特にp型）が困難である。GaN量子ドットを活性層とするDH構造へ電流注入（CW）を行い、室温で360 nmからの発光を観察した。図6に電流注入による発光スペクトルを示す。

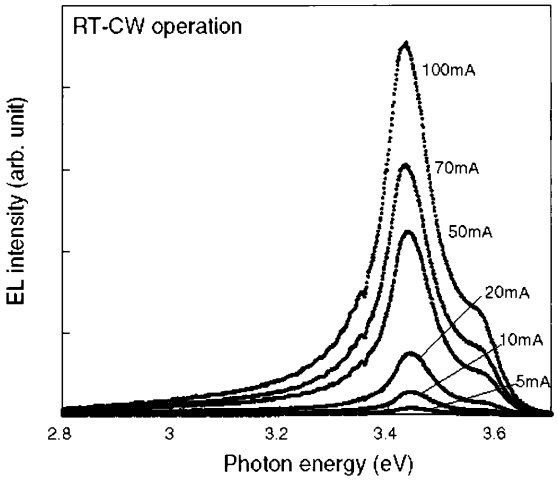


図6　GaN 量子ドット LED の EL スペクトル（室温）

3．今後の研究の展望・将来計画

これまでの研究により AFM/SEM リソグラフィによる微細な選択成長マスクの作製とこれを使った II-VI 族半導体量子ドット構造の作製、また同じく選択成長を用いてピラミッド 3 次元微小共振器が製作できるようになった。サブミクロンサイズのこの微小共振器では共振 Q 値が 5000 に近い良好な共振特性が観測されている。さらにこの共振器中に CdS 量子ドットを埋め込み、室温で自然放出の変調を観測している。今後さらに自然放出寿命の共振器による変調(パーセル効果)、単一の量子ドットと共振器モードの強結合の実現を通して、量子情報処理へ応用が期待される単一光子源の開発、共振器による大きな非線形性を利用した量子位相ゲートの開発を目指す。酸化物半導体の研究は今後の透明エレクトロニクスへの展開とともに、こうした微小共振器を実用的なダイオード化するための透明導電膜としても重要である。

一方窒化物系半導体は青色、紫外などの短波長領域とともに光通信用赤外波長まで幅広い領域をカバーするユニークな半導体である。紫外域では独自のアンチサーファクタントを用いた量子ドットの作製、結晶成長初期条件の制御による転位密度の大幅な低減を実現した。このようにして作製した GaN 量子ドットを用いて初めての発光ダイオードも実現した。現在研究を進めつつある SiC 表面構造の原子制御、ナノ構造制御を用いれば、さらに新しい量子構造制御法の開発やこの上に成長する窒化物半導体のさらなる転位密度の低減が期待される。赤外域では InAs 量子ドットを窒化物混晶で埋め込むことにより 1.55 ミクロン帯への新しい可能性を開きつつあり、光ファイバー通信分野における高機能光素子実現のための展望が開けてきた。

4．資料

4.1　学術論文

1）A. Avramescu, A. Ueta, K. Uesugi, and I. Suemune: "Atomic Force Microscope Lithography on Carbonaceous Films Deposited by Electron-beam Irradiation" Appl. Phys. Lett. Vol.72, No.6 (1998) pp. 716-718.

2）K. Uesugi and I. Suemune: "Bandgap Energy of GaNAs Alloys on (001) GaAs by Metalorganic Molecular Beam Epitaxy" Jpn J. Appl. Phys. Lett. Vol.36, No.12A (1997) pp.L1572-L1575.

3）J. Hirose, K. Uesugi, M. Hoshiyama, T. Numai, I. Suemune, H. Machida, and N. Shimoyama:"p-Type Conductivity Control of ZnSe with Insertion of ZnTe: Li Submonolayers in Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy" J. Appl. Phys. Vol.84, No.11 (1998) pp.6100-6104.

4）I. Suemune, T. Tawara, T. Saitoh, and K. Uesugi: "Stability of CdSe and ZnSe Dots Self-organized on Semiconductor Surfaces" Appl. Phys. Lett. Vol.71, No.26 (1997) pp.3886-3888.

5）S. Tanaka, H. Hirayama, S. Nomura, Y. Aoyagi, Y. Narukawa, Y. Kawakami, Sz. Fujita, and Sg. Fujita, "Stimulated emission from optically pumped GaN quantum dots", Appl. Phys. Lett. 71, 1299 (1997).

6）H. Kumano, H. Nashiki, I. Suemune, M. Arita, T. Obinata, K. Uesugi, and J. Nakahara:"Excitonic Properties of Zincblende ZnSe/MgS Superlattices by Reflectance Spectroscopy" Phys. Rev. B Vol.55, No.7 (1997) pp.4449-4455.

7）T. Tawara, M. Arita, K. Uesugi, and I. Suemune: "MOVPE Growth of ZnSe/ZnS Distributed Bragg Reflectors on GaAs (100) and (311)B Substrates" J. Cryst. Growth Vol.184/185 (1998) pp.777-782.

8）P. Hacke, P. Ramvall, S. Tanaka, Y. Aoyagi, A. Kuramata, K. Horino and H. Munekata: "Optical characterization of the "E2" deep level in GaN," *Appl. Phys. Lett.*, 74: 543-545 (1999)*

9）K. Uesugi, N. Morooka and I. Suemune: "Reexamination of N composition Dependence of Coherently Grown GaNAs Band Gap Energy with High-Resolution X-ray Diffraction Mapping Measurements," *Appl. Phys. Lett.*, 74(9): 1254-1256 (1999)*

10）I. Suemune, A. Ueta, A. Avramescu, S. Tanaka, H. Kumano and K. Uesugi: "Semiconductor Photonic Dots: Visible-Wavelength-Sized Optical Resonators," *Appl. Phys. Lett.*, 74(14): 1963-1965 (1999)*

11）A. Petersson, A. Gustafsson, L. Samuelson, S. Tanaka and Y. Aoyagi: "Cathodoluminescence spectroscopy and imaging of individual GaN," *Appl. Phys. Lett*, 74: 3513-3515 (1999)*

12）A. Avramescu, A. Ueta, K. Uesugi and I. Suemune:

"Nucleation in the Nanometer Scale Selective Area Growth of II-VI Semiconductors," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, 38(5B): L563-L566 (1999)*

13) J. S. Hwang, S. Tanaka, S. Iwai, Y. Aoyagi and S. Seong: "High quality GaN film growth on AlN buffer layer, pretreated with alternating pulsative supply of TMG and NH," *J. Cryst. Growth*, 200: 63-69 (1999)*

14) K. Uesugi, N. Morooka and I. Suemune: "Strain Effect on the N Composition Dependence of GaNAs Bandgap Energy Grown on (001) GaAs by Metalorganic Molecular Beam Epitaxy," *J. Cryst. Growth*, 201/202: 355-358 (1999)*

15) A. Ueta, A. Avramescu, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: "Nucleation and Faceting in Selectively Grown ZnS Pyramidal Dot Array for Short-wavelength Light Emitters," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38(7A): L710-L713 (1999)*

16) T. Tawara, S. Tanaka, H. Kumano and I. Suemune: "Growth and Luminescence Properties of Self-organized ZnSe Quantum Dots, "*Appl. Phys. Lett.*, 75(2): 235-237 (1999)*

17) S. Tanaka, I. Suemune, P. Ramvall and Y. Aoyagi: "GaN Quantum Structures with Fractional Dimension-From Quantum Well to Quantum Dot-," *phys. stat. sol. (b)*, 216: 431-434 (1999)*

18) N. Morooka, K. Uesugi and I. Suemune: "Role of Indium on Nitrogen Incorporation in GaNAs Grown by Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38(11B): L1309-L1311 (1999)*

19) H. Kumano, K. Hoshi, S. Tanaka, I. Suemune, X. Q. Shen, P. Riblet, P. Ramvall and Y. Aoyagi: "Effect of Indium Doping on the Transient Optical Properties of GaN Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, 75(19): 2879-2881 (1999)*

20) P. Ramvall, P. Riblet, S. Nomura, Y. Aoyagi and S. Tanaka: "Optical properties of GaN quantum dots," *J. Appl. Phys.*, 87(15): 3883 (1999)*

21) H. Kumano, H. Nashiki, H. Suzuki, K. Uesugi and I. Suemune: "Intrinsic and Extrinsic Excitonic Features in MgS/ZnSe Superlattices Revealed by Micro-reflection and Micro-photoluminescence Spectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39(2A): 501-504 (2000)*

22) X. Q. Shen, P. Ramvall, P. Riblet, Y. Aoyagi, K. Hoshi, S. Tanaka and I. Suemune: "Investigations of Optical and Electrical Properties of In-doped GaN films Grown by Gas-source Molecular Beam Epitaxy," *J. Cryst. Growth*, 209: 396-400 (2000)*

23) A. Ueta, A. Avramescu, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: "Fabrication of Selectively Grown II-VI Widegap Semiconductor Photonic Dots on (001) GaAs with MOMBE," *J. Cryst. Growth*, 209: 518-521 (2000)*

24) ABM Almamun Ashrafi, A. Ueta, A. Avramescu, H. Kumano, I. Suemune, Y. W. Ok and T. Y. Seong: "Growth and Characterization of Hypothetical Zinc-blende ZnO Films on GaAs (001) Substrates with ZnS Buffer Layers," *Appl. Phys. Lett.*, 76(5): 550-552 (2000)*

25) K. Uesugi, I. Suemune, T. Hasegawa, T. Akutagawa and T. Nakamura: "Temperature Dependence of Band Gap Energies of GaAsN Alloys," *Appl. Phys. Lett.*, 76(10): 1285-1287 (2000)*

26) I. Suemune, J. Hirose and A. Ueta: "Hole Activation from GaAs: Zn Nano-clusters for p-Type Conduction in ZnSe," *Appl. Phys. Lett.*, 76(13): 1701-1703 (2000)*

27) A. Avramescu, A. Ueta, K. Uesugi and I. Suemune: "New Type of ZnCdS/ZnMgCdS Heterostructures Lattice-matched to GaAs for Selective-Area Growth," *J. Cryst. Growth*, 214/215: 125-129 (2000)*

28) H. Kumano, A. A. Ashrafi, A. Ueta, A. Avramescu and I. Suemune: "Luminescence Properties of ZnO Films Grown on GaAs Substrates by Molecular-beam Epitaxy Excited by Electron Cyclotron Resonance Oxygen Plasma," *J. Cryst. Growth*, 214/215: 280-283 (2000)*

29) J. Hirose, I. Suemune, A. Ueta, H. Machida and N. Shimoyama: "Periodic doping of GaAs: Zn Nano-clusters in ZnSe Grown by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy," *J. Cryst. Growth*, 214/215: 524-528 (2000)*

30) I. Suemune, H. Ohsawa, T. Tawara, H. Machida and N. Shimoyama: "Study of Site Change of Li Impurities in ZnSe by Co-doping with Iodine," *J. Cryst. Growth*, 214/215: 562-566 (2000)*

31) T. Tawara, I. Suemune and S. Tanaka: "MOVPE Growth of ZnSe/ZnMgS Distributed Bragg Reflectors with High Refractive Index Contrast," *J. Cryst. Growth*, 241/215: 1019-1023 (2000)*

32) A. Ueta, A. Avramescu, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: "Enhancement of Spontaneous Emission by ZnS-based II-VI Semiconductor Photonic Dots," *J. Cryst. Growth*, 214/215: 1024-1028 (2000)*

33) T. Tawara, S. Tanaka, H. Kumano and I. Suemune: "Origin of Size Distributions in ZnSe Self-organized Quantum Dots Grown on ZnS Layers," *J. Electron. Materials*, 29(5): 515-519 (2000)*

34) A. Avramescu, A. Ueta, K. Uesugi and I. Suemune: "Atomic Force Microscope Based Patterning of Carbonaceous Masks for Selective Area Growth on Semiconductor Surfaces," *J. Appl. Phys.*, 88(6): 3158-3165 (2000)*

35) S. Tanaka, M. Takeuchi and Y. Aoyagi: "Anti-surfactant in III-nitride epitaxy-Quantum dot formation and Dislocation termination-," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 8B: L831 (2000)*

36) S. Nakamura, T. Kimoto, Hiroyuki Matsunami, S. Tanaka, N. Teraguchi and A. Suzuki: "Formation of periodic steps with a unit-cell height on 6H-SiC (0001) surface by HCl etching," *Appl. Phys. Lett.*, 76(23): 3412-3414 (2000)*

37) I. Suemune, K. Uesugi and W. Walukiewicz: "Role of Nitrogen in the Reduced Temperature Dependence of Band-Gap Energy in GaNAs," *Appl. Phys. Lett.*, 77(19): 3021-3023 (2000)*

38) A. A. Ashrafi, A. Ueta, H. Kumano and I. Suemune: "Role of ZnS Buffer Layers in Growth of Zincblende ZnO on GaAs Substrates by MOMBE," *J. Cryst. Growth*, 221: 435-439 (2000)*

39) I. Suemune, N. Morooka, K. Uesugi, Y. W. Ok and T. Y. Seong: "Formation of Wire-like Surfaces and Lateral Composition Modulation in GaAsN Grown by Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy," *J. Cryst. Growth*, 221: 546-550 (2000)*

40) A. Ueta, A. Avramescu, T. Shimozawa and I. Suemune: "Growth Mechanism of Selectively Grown II-VI Semiconductor Photonic Dots for Short Wavelength Light Emitters," *J. Cryst. Growth*, 221: 425-430 (2000)*

41) T. Tawara, H. Yoshida, T. Yogo, S. Tanaka and I. Suemune: "Microcavities with Distributed Bragg Reflectors Based on ZnSe/MgS Superlattice Grown by MOVPE," *J. Cryst. Growth*, 221: 699-703 (2000)*

42) Adrian Avramescu, Akio Ueta, Katsuhiro Uesugi, and Ikuo Suemune: "Selective Growth of Highly Packed Array of ZnCdS Quantum Dots with a Mask Prepared by Atomic Force Microscope Nanolithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40(3B): 1899-1901 (2001)*

43) S. Yamada, J. Kato, S. Tanaka, I. Suemune, A. Avramescu, Y. Aoyagi, N. Teraguchi, A. Suzuki: "Nucleation and Growth Kinetics of AlN Films on Atomically Smooth 6H-SiC (0001) Surfaces," *Appl. Phys. Lett.*, 78(23): 3612-3614 (2001)*

44) ABM Almamun Ashrafi, Hidekazu Kumano, Akio Ueta, Ikuo Suemune, Young Woo Ok, and Tae-Yeon Seong: "Single-Crystalline Rocksalt CdO Layers Grown on GaAs (001) Substrates by Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, 79(4): 470-472 (2001)*

45) K. Uesugi and I. Suemune: "Highly Conductive GaAsNSe Alloys Grown on GaAs and Nonalloyed Ohmic Properties," *Appl. Phys. Lett.*, 79(20): 3284-3286 (2001)*

46) Hidekazu Kumano, Satoshi Murasawa, Adrian Avramescu, Akio Ueta, and Ikuo Suemune: "Radiative Efficiency of Localized Excitons in ZnCdS Ternary Alloys," *International Journal of Modern Physics B*, 15(28, 29 & 30): 3718-3721 (2001)*

47) A. Ueta, H. Kumano, T. Shimozawa, and I. Suemune: "Study of Resonance Wavelengths in II-VI Semiconductor Photonic Dots - Pyramidal Size Dependences and Their Luminescence Properties -," Phys. *Stat. Sol. (b)*, 229(2): 971-976 (2002)*

48) I. Suemune, T. Tawara, H. Kumano, and H. Yoshida: "Longitudinal-Optical-Phonon-Assisted Resonant Excitations of CdS Quantum Dots Embedded in ZnSe/(ZnSe-MgS Superlattice) Microcavitie," Phys. *Stat. Sol. (b)*, 229(2): 961-969 (2002)*

49) Y.W. Ok, C.J. Choi, T.Y. Seong, K. Uesugi, and I. Suemune: "Structural Properties of GaAsN Grown on (001) GaAs by Metalorganic Molecular Beam Epitaxy," *J. Electronic Materials*, 30(7): 900-906 (2001)*

50) M. Kuball, J. Gleize, S. Tanaka, Y. Aoyagi: "Resonant Raman scattering on self-assembled GaN quantum dots," *Appl. Phys. Lett.*, 78(7): 987-989 (2001)*

51) M. Kuball, J. Gleize, S. Tanaka, Y. Aoyagi: "On phonon confinement effects and free carrier concentration in GaN quantum dots," *Phys. Stat. Solidi B*, 228(1): 195-198 (2001)*

52) Y. Aoyagi, S. Tanaka, H. Hirayama, M. Takeuchi: "Quantum dot formation and crystal growth using an atomic nano-mask," *Physica E*, 11(2-3): 89-93 (2001)*

53) A. Avramescu, H. Hirayama, Y. Aoyagi, S. Tanaka: "Growth of AlN-SiC solid solutions by sequential supply epitaxy," *J. Cryst. Growth*, 234(2-3): 435-439 (2001)*

54) 田中悟、青柳克信：「原子レベルの表面構造制御による窒化物半導体の欠陥密度の低減」、応用物理、70(5): 542-545 (2001)*

55) K. Uesugi and I. Suemune: "Highly Conductive GaAsNSe Alloys Grown on GaAs and Nonalloyed Ohmic Properties," *Appl. Phys. Lett.*, 79(20): 3284-3286 (2001)*

56) I. Suemune, T. Shimozawa, K. Uesugi, H. Kumano,

H. Machida, and N. Shimoyama: "Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy Growth and Optical Properties of Er-doped GaNP," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41(Part 1, No. 2B): 1030-1033 (2002)*

57) A. A. Ashrafi, H. Kumano, I. Suemune, Y. W. Ok and T. Y. Seong: "CdO Epitaxial Layers Grown on (001) GaAs Surfaces by Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy", *J. Cryst. Growth*, 237-239: 518-522 (2002)

58) I. Suemune, K. Uesugi, T. Shimozawa, H. Kumano, H. Machida and N. Shimoyama: "Erbium-doped GaP Grown by MOMBE and Their Optical Properties", *J. Cryst. Growth*, 237-239: 1423-1427 (2002)

59) A. A. Ashrafi, I. Suemune, H. Kumano and K. Uesugi: "Growth Activation of ZnO Layers with H_2O Vapor on a-face of Sapphire Substrate by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy", *Phys. stat. sol. (a)*, 192: 224-229 (2002)

60) I. Suemune, K. Uesugi and T. Y. Seong: "Growth and Structural Characterization of III-N-V Semiconductor Alloys", *Semiconductor Science and Technology*, 17(8): 755-761 (2002)

61) A. A. Ashrafi, I. Suemune and H. Kumano: "H_2O-Vapor-Activated ZnO Growth on a Face Sapphire Substrates by Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy.", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41(5A): 2851-2854 (2002)

62) H. Kumano, H. Yoshida, T. Tawara and I. Suemune: "LO-phonon-assisted energy relaxation in self-assembled CdS quantum dots embedded in ZnSe", *J. Appl. Phys.*, 92: 3573-3578 (2002)

63) H. Kumano, A. Ueta and I. Suemune: "Modified Spontaneous Emission Properties of CdS Quantum Dots Embedded in Novel Three-dimensional Microcavities", *Physica E*, 13: 441-445 (2002)

64) A. A. Ashrafi, I. Suemune, H. Kumano and S. Tanaka: "Nitrogen-doped p-type ZnO layers prepared with H_2Ovapor-assisted metalorganic molecular-beam epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett.*, 41: L1281-L1284 (2002)

65) X. Q. Zhang, S. Ganapathy, H. Kumano, K. Uesugi and I. Suemune: "Photoluminescence study of InAs quantum dots embedded in GaNAs strain compensating layer grown by MOMBE", *J. Appl. Phys.*, 92: 6813-6818 (2002)

66) J. Brault, S. Tanaka, E. Sarigiannidou, J. L. Rouviee, B. Daudin, G. Feuillet and H. Nakagawa: "Spatial ordering of GaN quantum dots grown on vicinal AlN surfaces", *J. Appl. Phys.*, 93(5): 3108-3110 (2002)

67) T. Tawara, I. Suemune and H. Kumano: "Strong Coupling of CdS Quantum Dots to Confined Photonic Modes in ZnSe-based Microcavities", *Physica E*, 13: 403-407 (2002)

68) I. Suemune, H. Yoshida, H. Kumano, T. Tawara, A. Ueta and S. Tanaka: "II-VI Quantum Dots Grown by MOVPE", *J. Cryst. Growth*, 248: 301-309 (2003)

69) I. Suemune, K. Uesugi, S. Ganapathy, X. Q. Zhang, M. Kurimoto, B. J. Kim, T. Y. Seong, H. Machida and N. Shimoyama: "III-V-N-Related Quantum Structures for 1.5μm Emission", *IEEE: Optoelectronics*, 150(1): 52-55 (2003)

70) K. Uesugi, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: "Metalorganic molecular-beam epitaxy and characterization of GaAsNSe/GaAs superlattices emitting around 1.5-μm-wavelength region", *Appl. Phys. Lett.*, 82(6): 898-900 (2003)

71) H. Fujikura, K. Iizuka and S. Tanaka: "Realization of low dislocation GaN/sapphire wfers by 3-step metalorganic vapor phase epitaxial growth with island induced dislocation control", J. Appl. Phys.42 Part1(5A), 2767-2772 (2003)

4.2 総説、解説、評論等

1) 田中悟、青柳克信、"GaN 系半導体の自己形成量子ドット"、応用物理 67 巻、第 7 号、828 (1998).

2) 末宗幾夫：「II-V-N系窒化物混晶の新展開」、応用物理学会誌、68(6)：705 (1999)

3) 末宗幾夫，上田章雄，俵毅彦：「ワイドギャプ半導体量子ドットの自己形成とフォトニック・ドットの選択成長 —光・電子系の量子制御に向けて—」、電子科学研究、7：23-28 (1999)

4) 末宗幾夫：「III-V-N系長波長窒化物半導体と光通信への応用」、マテリアルインテグレーション、14(6)：39-44 (2001)

5) 末宗幾夫：「III-V-N系長波長窒化物半導体と光通信への応用」、『マテリアルインテグレーション』、14(6)：39-44 (2001)*

4.3 著書

1) I. Suemune: "Properties of Widegap II-VI Semiconductors" Edited by Ramesh Bhargava, IEE EMIS Datareview Series No.17, January 1997 (分担執筆) 12.2 Optically Pumped II-VI Lasers

2) 末宗幾夫：応用物理学会編「応用物理用語大事典」オーム社、1998 年 1 月 (分担執筆)

3) 末宗幾夫：「4．5節 発光デバイス材料 III-V族半導体」、『図解・薄膜技術』、日本表面科学会編(培風館) (1999)

4) 末宗幾夫：「8．4節 光物性」、『第 2 版 応用物理ハ

ンドブック』、応用物理学会編（丸善）（1999）
5）末宗幾夫：『半導体大辞典』、監修　菅野卓雄、川西　剛（工業調査会）（1999）
6）青柳克信、田中悟：「ナノレベルの微細構造量子ドット」、科学フロンティアーナノマテリアル最前線、化学同人第9章、75-81（2002）
7）末宗幾夫：「応用物理学会編「第2版　応用物理ハンドブック」」、8.4節　光物性、応用物理学会編、丸善、516-521（2002）

4.4 特許

1）末宗幾夫：特願2001-134649、エルビウムと窒素を含む化合物半導体層を、その上下から化合物半導体層を積層してなることを特徴とする半導体発光素子、2001年3月27日
2）末宗幾夫、植杉克弘：特願2001-395421、窒素とセレンを含む化合物半導体層を、その上下から化合物半導体層を積層してなることを特徴とする長波長半導体発光素子、2001年11月19日
3）末宗幾夫、ガナパシーサシカラ：特願2002-170688、ひずみ補償長波長半導体発光素子（インジウムと砒素を含む化合物半導体島構造に、窒素を含む化合物半導体層をこれに接するように積層してなることを特徴とする長波長半導体発光素子。）、2002年5月7日

4.5 招請講演

1）I. Suemune, M. Arita, K. Uesugi and A. Avramescu: “Self-organization of CdSe Quantum Dots on (100) ZnSe/GaAs Surfaces with MOMBE” 1997 39th Electronic Material Conference (Colorado State University, Fort Collins, Colorado, June 25-27, 1997) V1.
2）S. Tanaka, H. Hirayama, S. Nomura, S. Iwai, and Y. Aoyagi, “GaN quantum dots - growth mechanisms, application to laser diode, and mesoscopic physics”, 1997 MRS Spring Meeting Symposium D Gallium Nitride and Related Materials, San Francisco, U.S.A., Apr.1-4, 1997.
3）S. Tanaka, H. Hirayama, S. Nomura, S. Iwai, and Y. Aoyagi, “Fabrication of GaN quantum dots and their optical properties”, 1997 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM '97), Sep.16-19, 1997.
4）S. Tanaka, S. Nomura, H. Hirayama, S. Iwai, and Y. Aoyagi, “Growth mechanism of GaN quantum dots on Si-AlGaN surfaces and their optical properties”, The 4th International Union of MRS (IUMRS) International Conference in Asia, Chiba, Japan, Sep.16-18, 1997.
5）田中悟、平山秀樹、野村晋太郎、岩井荘八、青柳克信：「III-V属窒化物半導体の量子構造形成技術の現状」日本学術振興会短波長光デバイス第162委員会1997年7月3日.
6）S. Tanaka, P. Ramvall, P. Riblet, S. Nomura, Y. Aoyagi, K. Hoshi, and I. Suemune: “Growth and Characterization of GaN Quantum Dots on Closely Lattice-Matched AlGaN Surfaces” MRS Fall Meeting Symposium G, GaN and related alloys (November 30-December 4, 1998, Boston).
7）田中悟、青柳克信：「アンチサーファクタントを用いたGaN量子ドットの形成機構」第59回応用物理学会シンポジウム「ヘテロ界面における欠陥制御」1998年9月15～18日.
8）植杉克弘、末宗幾夫：「MOMBEによるナロウギャップGaNAs系混晶の成長と物性」1999年春季応用物理学会シンポジウム〝III-V-N窒化物混晶の新展開〟、1999年3月28-31日.
9）末宗幾夫：「II-VI族化合物半導体量子ドットの形成とそのフォトニック・クリスタルへの展開」、日本学術振興会「短波長光デバイス第162委員会」第19研究会「短波長光材料・デバイスの新しい展開」、仙台、日本（1999-12）
10）末宗幾夫：「III-V-N系デバイスの期待される新機能」、「III-V-N窒化物系混晶材料とその応用」セミナー（光未来技術ブレークスルー技術フォーラム）、東京、日本（2000-3）
11）S. Tanaka, M. Takeuchi and Y. Aoyagi: “Anti-surfactant in nitride epitaxy - Quantum dot formation and Dislocation termination-,” European Materials Research Society Spring meeting, Strasbourg, France (2000-5)
12）S. Tanaka, M. Takeuchi and Y. Aoyagi: “Anti-surfactant in nitride epitaxy - Quantum dot formation and Dislocation termination-,” FRONTIER SCIENCE RESEARCH CONFERENCE, SCIENCE and TECHNOLOGY of NITRIDE MATERIALS, La Jolla, California, U. S. A. (2000-8)
13）I. Suemune, T. Tawara, and H. Kumano: “Longitudinal-Optical-Phonon-Assisted Resonant Excitations of CdS Quantum Dots Embedded in ZnSe/(ZnSe-MgS Superlattice) Microcavities,” The 10th International Conference on II-VI Compounds, Bremen, Germany (2001-9)
14）I. Suemune, T. Tawara, A. Ueta, and H. Kumano: “Photonic Low-dimensional Structures and Their Coupling to Quantum Dots Based on II-VI Semiconductors,” 9th Conference on Luminescence of China, Beijing, China (2001-9)
15）I. Suemune and K. Uesugi: “Reduced Temperature Dependence of the Bandgap Energy in Narrow Gap GaNAs,” The International Narrow Gap Nitride

Workshop (INGNW-01), Singapore (2001-10)

16) T-Y Seong, C.W. Tu, and I. Suemune: "Microstructural properties of GaN (P, As) semiconducting layers grown by molecular beam epitaxy," 3rd Asian Microscopy Society Conference, Chiang Mai, Thailand (2002-2)

17) 末宗幾夫：「III-V族ならびにII-VI族化合物半導体の現状と将来展望」、日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会　第25回研究会、豊田工業大学 (2002-2)

18) 末宗幾夫：「II-VI Quantum Dots Grown by MOVPE」, Interntional Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE XI), Bellin, Germany (2002-06)

19) I. Suemune, K. Uesugi, S. Ganapathy, X. Q. Zhang and M. Kurimoto: "III-V-N related quantum structures for 1.5μm emission "International Research Workshop on Physics and Technology of Diluted Nitride for Optical Communications, Istanbul, Turkey (2002-9)

20) I. Suemune, A. B. M. A. Ashrafi, H. Kumano, B.-J. Kim, Y.-W. OK, and T.-y. Seong: "Control of Structural and Electrical Properties of Zn0 and Related Materials", the 3rd International Workshop on II-VI Heterostructures, Wuerzburg (2002-10)

21) I. Suemune and H. Kumano: "Nanofabrication on pyramidal optical microcavities", "International Symposium on Nanotechnology for Photonics and Opto-Electronics (NPO)", Tokyo (2003-3)

22) I. Suemune, A. B. M. A. Ashrafi, H. Kumano, B.-J. Kim, Y.-W. OK, and T.-y. Seong: "Properties of Zn0 Related Materials Grown by MOMBE", The first International NIMS Conference, Material Solutions for Photonics, Tsukuba (2003-3)

23) 末宗幾夫、熊野英和：「II-VI俗半導体における光物性制御」、日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会(第33回)薄膜第131委員会(第231回) 合同研究会資料、大阪 (2003-3)

24) 末宗幾夫、植杉克弘、サシカラ・ガナパシー、ジャン・シーチン：「1.5μm波長域で発光するIII-V-N系量子構造の研究」2、2003年春季応用物理学関係連合講演会講演予稿集、横浜 (2003-3)

4.6　シンポジウムの開催

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1) 末宗幾夫（電子材料物性部門）：1999年春季応用物理学会シンポジウム「III-V-N窒化物混晶の新展開」（約120名、千葉）(1999.3.29)

2) I. Suemune: Symposium on Advanced Photonic Science (Third RIES-Hokudai Symposium), (Hokkaido Univ., Sapporo), (2001.12.4-5)

4.7　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1) 末宗幾夫、重点(2)、ワイドギャップ半導体を用いた単電子ナノ構造の作製とその集積化に関する基礎研究、2,300千円 (1997)

2) 末宗幾夫、基盤A　展開(2)、MOCVD法による青色半導体レーザの試作研究、2,400千円 (1997)

3) 末宗幾夫、基盤B　一般(2)、可視発光量子細線・量子箱の作製と誘導放出機構の基礎研究、6,200千円 (1997)

4) 末宗幾夫、萌芽、室温エキシトンによる青色微小光共振器の研究、1,000千円 (1997)

5) 植杉克弘、奨励A、MOVPE法によるZnSe/MgS量子井戸箱の試作研究、1,200千円 (1997)

6) 末宗幾夫、特定A　(2)、ワイドギャップ半導体を用いた単電子ナノ構造の作製とその集積化に関する基礎研究、1,500千円 (1998)

7) 末宗幾夫、基盤B　一般(2)、可視発光量子細線・量子箱の作製と誘導放出機構の基礎研究、3,900千円 (1998)

8) 末宗幾夫、基盤B　展開(2)、ナノ構造デバイス作製のためのAFM・電子ビーム結合リソグラフィ技術の開発、4,700千円 (1998)

9) 末宗幾夫、萌芽、ワイドギャップ半導体光強閉じ込め系での励起子—フォトン相互作用の研究、1,200千円 (1998)

10) 植杉克弘、奨励A、MOVPE法によるZnSe/MgS量子井戸箱の試作研究、900千円 (1998)

11) 田中悟、奨励A、III族窒化物半導体量子ドット成長機構の解明、1,200千円 (1998)

12) 末宗幾夫、基盤B　一般(2)、可視発光量子細線・量子箱の作製と誘導放出機構の基礎研究、4,000千円 (1999)

13) 末宗幾夫、基盤B　展開(2)、ナノ構造光デバイス作製のための・電子ビーム結合リソグラフィ技術の開発、4,200千円 (1999)

14) 末宗幾夫、萌芽、ワイドギャップ半導体光強閉じ込め系での励起子—フォトン相互作用の研究、1,000千円 (1999)

15) 田中悟、奨励A、III族窒化物半導体量子ドット成長機構の解明、900千円 (1999)

16) 熊野英和、奨励A、量子ドットと光ドットの結合による室温励起子遷移レートの制御、1,100千円 (1999)

17) 末宗幾夫、基盤B　一般(2)、選択成長した半導体フォトニックドットによる自然放出光制御の研究、7,300千円 (2000)

18) 末宗幾夫、基盤B　展開(2)、ナノ構造光デバイス作製のための・電子ビーム結合リソグラフィ技術の開発、3,700千円（2000）
19) 熊野英和、奨励A、量子ドットと光ドットの結合による室温励起子遷移レートの制御、1,000千円（2000）
20) 末宗幾夫、特定領域A　(2)、可視・赤外波長域での多波長同時発光デバイスとその集積化の研究、4,200千円（2001）
21) 末宗幾夫、基盤B　一般(2)、選択成長した半導体フォトニックドットによる自然放出光制御の研究、7,200千円（2001）
22) 田中悟、基盤B　展開(2)、III族窒化物半導体量子ドットLED・レーザの開発研究、12,500千円（2001）
23) 熊野英和、奨励A　(2)、半導体微小共振器中の励起子ポラリトンのエネルギー緩和過程の研究、1,000千円（2001）
24) 熊野英和、若手研究B、半導体微小共振器中の励起子ポラリトンのエネルギー緩和過程の研究、1,000千円（2001～2002）
25) 田中悟、基盤研究B　展開(2)、III族窒化物半導体量子ドットLED・レーザの開発研究、14,000千円（2001～2002）
26) 末宗幾夫、特定領域研究　(2)、可視・赤外波長域での多波長同時発光デバイスとその集積化の研究、7,900千円（2001～2002）
27) 末宗幾夫、基盤研究B　一般(2)、3次元微小光共振器における巨大プーセル効果の検証、7,500千円（2002）
28) 田中悟、基盤研究A　一般(2)、原子レベル表面状態制御による低欠陥窒化物半導体のヘテロエピタキシー、14,100千円（2002）

b．奨学寄付金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1）植杉克弘、㈶山田科学振興財団、II-IV族半導体国際会議派遣助成、200千円（1997）
2）田中悟、㈶カシオ科学振興財団、表面制御による無転位窒化物系化合物半導体の成長及び物性評価、1,000千円（2000）
3）田中悟、㈶村田学術振興財団、アンチサーファクタントを用いた極低転位III族窒化物半導体薄膜および厚膜の成長に関する研究、1,200千円（2000）
4）熊野英和、㈶吉田科学技術財団、低次元電子系と光場の相互作用の研究、250千円（2001）

4.8　共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）植杉克弘、長谷川達生(電子材料物性部門)：「GaNAs系混晶半導体の結晶成長とその物性評価」(1998年度)

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）田中悟（電子材料物性部門)、三菱電線工業㈱：「GaN系ドット構造作製技術のデバイス応用」、1,000千円（2000年度）

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）末宗幾夫（電子物性材料部門)：「情報通信分野における基礎研究推進制度　通信・放送機構：高い温度安定性と光学利得を持つIII-V-N系長波長半導体レーザの研究」、80,400千円(平成13年度26,500千円)（1999～2003年度）

d．国際共同研究（代表者名、エージェンシー、研究課題、経費、研究期間）

1）I. Suemune, H. Kumano(電子物性材料部門)、L. Dang and G. Bacher：「フォトニックドットによる自然光放出制御の研究」、電子科学研究所プロジェクト研究A、8,007千円（1999～2001年度）

4.9　受賞

1）俵毅彦、吉田浩章、余湖孝紀、末宗幾夫、田中悟：〝II-VI族半導体分布ブラック反射鏡の成長と微小共振器構造への応用〟第35回応用物理学会北海道支部・第5回レーザ学会東北・北海道支部合同学術講演会、北海道大学、札幌｛2000年2月21-22日｝講演予稿集、p.2、A-2)、「発表奨励賞」受賞（2000）
2）上田章雄、A. Avramescu、末宗幾夫、町田英明、下山紀男：〝Znsフォトニックドット構造における発光層材料の検討〟(2000年春季第47回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学、東京｛2000年3月28-31日｝講演予稿集、p.309、30a-YL-10)、「講演奨励賞」受賞
3）俵毅彦、吉田浩章、余湖孝紀、田中悟、末宗幾夫：〝微小共振器中に埋め込まれた量子ドットの発光特性〟(2000年秋季第61回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、札幌｛2000年9月3-7日｝講演予稿集、p.248、6a-Z-7.)、「講演奨励賞」受賞（2000）
4）A. Ashrafi, S. Tanaka, A. Ueda, H. Kumano, I. Suemune: “TEM Study of Oxide Films Grown on GaAs Substrates by MOMBE”（第36回応用物理学会北海道支部・第6回レーザ学会東北・北海道支部合同学術講演会、室蘭工業大学、室蘭{2000年11月1・2日}、B-29、p.59.)、「発表奨励賞」受賞（2000）
5）A. B. M. A. Ashrafi, I. Suemune, and H. Kunmano: “H_2O-vapor-activated growth of ZnO layers on a-sapphire substrates with metal organic molecular-beam epitaxy”、(2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集｛2002年3月27日～30日、東海大学｝、28a-ZN-7、p.313.)「講演奨励賞」受賞(2002)

4.10　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）末宗幾夫：日本学術振興会光電相互変換第125委員会委員（2001）
2）末宗幾夫：日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・

電子デバイス第162委員会委員（2001）
3）熊野英和：日本学術振興会光電相互変換第125委員会委員（2001）
4）末宗幾夫：日本学術振興会科学研究費委員会専門委員（2001年1月1日～2002年12月31日）
5）熊野英和：日本学術振興会光電相互変換第125委員会委員（2001年4月1日～現在）
6）末宗幾夫：日本学術振興会光電相互変換第125委員会委員（2001年4月1日～現在）
7）末宗幾夫：日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会委員（2001年4月1日～現在）
8）末宗幾夫：総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度」専門評価委員（2002年度）
9）末宗幾夫：日本学術振興会平成14年度特別研究員等審査会専門委員（2002年8月1日～2004年7月31日）
10）末宗幾夫：ナノ物質材料微細構造支援事業解析支援事業プロジェクト運営委員会委員（2002年10月1日～2004年3月31日）

b．国内外の学会の主要役職

1）末宗幾夫：Publication Chairman. The 9th International Conference on II-VI Compounds/京都（1999年度）
2）末宗幾夫：ProgramCommittee. 7th International Conference on Chemical Beam Epitaxy and Related GrowthTechniques/つくば（1999年度）
3）末宗幾夫：Local Arrangement. 10th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy/札幌
4）末宗幾夫：第20回電子材料シンポジウムプログラム委員（2001年度）
5）田中悟：Electronic Materials Conference（電子材料シンポジウム）論文委員、会計委員（2001年9月1日～2002年7月1日）
6）末宗幾夫：第21回電子材料シンポジウムプログラム委員（2002年6月19日～2002年6月21日）
7）田中悟：ICNS5実行委員、論文委員（2003年1月1日～2003年5月1日）
8）末宗幾夫：1st International Sympojium on Point Defect and Nanstoichiometry, Program Committee（2003年3月18日～2003年3月20日）

c．新聞・テレビ等の報道

1）末宗幾夫：読売新聞「世界最小の光共振器」、2000年1月28日
2）末宗幾夫：科学新聞「世界最小の光共振器開発」、2000年2月11日
3）末宗幾夫：日経産業新聞「最小規模の光共振器」、2000年2月22日
4）末宗幾夫：半導体産業新聞「世界最小の光共振器の開発に成功」、平成12年3月15日
5）田中悟：日経産業新聞「新製法で欠陥1/100に・青紫色レーザー用の基板」、2000年2月18日
6）田中悟：日刊工業新聞「窒化ガリウム薄膜基板・結晶欠陥抑制で新技術」、平2000年2月18日
7）田中悟：北海道新聞「窒化物半導体の高品質基板開発」、2000年2月18日
8）下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：科学新聞「ピラミッド型発光素子開発」、2002年4月26日

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）俵毅彦：ZnSe系自己組織化量子ドットならびに分布ブラック反射鏡の作製に関する研究（1997）
2）鈴木秀樹：MOVPE法によるZnSe/MgS超格子の成長およびヘテロ界面に関する研究（1997）
3）梨木裕之：MOVPE成長ZnSe/MgS超格子構造の光学特性に関する研究（1997）
4）上田章雄：MOMBE法を用いたZnSe、ZnSの低温選択成長と光導波路構造の作製（1997）
5）広瀬淳：クラスタードーピングによるZnSe p型伝導度制御の研究（1998）
6）大澤英明：同時ドーピング法によるZnSeのp型化に関する研究（1998）
7）星健一：フォトニックドットにおける電磁界分布のFDTD解析（1999）
8）吉田浩章：MOVPE法による系自己組織化量子ドットの作製と評価に関する研究（1999）
9）諸岡展樹：GaAsNのMOVPE法成長における窒素組成制御に関する研究（1999）
10）村沢智：三元混晶Zn1-xCdxSの光学特性に関する研究（1999）
11）下澤東吾：GaAs系フォトニックドットの作製と評価に関する研究（2000）
12）加藤淳一：MOMBE法によるGaN薄膜のエピタキシャル成長機構に関する研究（2001）
13）山田哲史：原子レベル表面構造制御による窒化物半導体ヘテロエピタキシャル成長に関する研究（2001）
14）余湖孝紀：ZnSe/MgS超格子を用いた分布反射ミラーのMOVPE成長と微小光共振器特性の研究（2001）

・博士学位

1）アドリアン・アブラメスク：AFM lithography its application to II-VI compound nanostructures (1999)
2）上田章雄：Study of selectively grown II-VI semiconductor photonic dots toward small light emitters (2000)
3）俵毅彦：Study of coupling between monolithic II-VI semiconductor microcavities and self-organized quantum dots (2000)
4）アシュラフィ アブム アルマムン：Control of

crystalline structures of II-VI oxide materials by metalorganic molecular-beam epitaxy (2002)

e．大学院担当授業

1）光電子物性工学特論（1997～1998）
2）光量子デバイス工学特論（1997～1998）
3）光電子物性工学特論（1999～2000）
4）電子情報エレクトロニクス特別演習（1999～2000）
5）電子情報エレクトロニクス特別研究第一、第二（1999～2000）
6）光量子デバイス特論（1999～2000）
7）光電子物性工学特論（2001）
8）光量子デバイス工学特論（2001）
9）光電子物性工学特論（2002）00
10）応用数学II演習（2002）
11）電気回路（2002）

電子機能素子部門

研究目的

物質や生物が有する階層的な構造性と各階層に特徴的な機能発現の解明に基づいて、電子科学を支える機能素子の設計と開発に関わる基礎的研究を行うことを目的としている。

量子機能素子研究分野

教授　井上久遠（東大院、工博、1984.8～2001.3）
助教授　迫田和彰（東大院、工博、1993.9～2002.3）
助手　川俣　純（北大院、理博、1989.8～2003.3）
　　山中明生（北大院、理博、1985.4～1999.3）
講師　宮井英次（北大院、理博、2000.4～2001.3）（研究機関研究員）

院生
・平成9－14年度
博士課程
栗林亮介、笹田道秀、河合紀子、儀部朋子、伊藤琢範
修士課程
片岡満史、城間ひとみ、儀部朋子、高橋宏通、伊藤琢範、竹永勝宏

1．研究目的

次世代に期待されている、より高度な情報化社会を築くには、電子に加えて光の果たす役割がますます重要となる。オプトエレクトロニクスの分野においても新しい光・電子機能材料、および素子の開発の社会ニーズは高い。これに対応するためには、新しい概念の導入による創造的な基盤研究が不可欠である。当研究分野では、このような立場から、輻射場の制御、制御された輻射場と物質との相互作用、ならびに、光機能性有機分子の設計・合成と自己組織化技術を中心とした基礎研究を進めている。

2．研究成果

・平成9－10年度

(a)　半導体量子閉じ込め系の基礎研究

ガラス中に希薄に埋め込んだ、半径が2.0～6.0 nmの球状の半導体量子ドットの量子閉じ込め電子状態、光学フォノン、並びに励起子－格子相互作用を、独自に開発した2光子共鳴分光法、等を駆使して解明する研究を行っている。その結果、(1) CdSドット（強い閉じ込め系）の第4電子励起状態までの固有状態、(2) CuBrドット（弱い閉じ込め系）で励起子が光学フォノンと強く結合している事実、並びに相互作用のドットサイズ依存性、(3) CuClドットでの位相緩和時間 T_2 が低温で孤立原子系の場合のように非常に長く、またエネルギー緩和時間 T_1 できまっている事実などを明らかにした。なお、上記の実験事実と関連して、2光子吸収の選択則、励起子－フォノンの相互作用のサイズ依存性の理論的導出も行なった。

(b)　フォトニック結晶と輻射場の制御の基盤研究

誘電率が周期的に大きく変化する2次元、3次元フォトニック結晶の基礎研究を、輻射場の制御の観点から推進している。

(1)　配列した鉛ガラスファイバーから格子定数が1 μm程度の2次元エアロッド格子を世界で初めて作製し、H偏光に関して2次元面内の全方向でフォトニックバンドギャップが開く事実、並びに、バンド特性を反映して0次から3次までのブラッグ反射の相対強度が顕著な波長依存性を示すこと、などを見出した。次に、格子中に導入した僅かな色素分子の自然放出光強度がギャップに対応するエネルギー域で減少する事実を明らかにした。

(2)　色素溶液を導入した上記格子を光励起することにより、外部共振器を用いずに二次元面内で新しいタイプのレーザー作用を観測し、この現象が特定のバンドの群速度が小さいために増幅度が大きくなるためであることを明らかにした。

(3)　高分子、ゲルマニウム、シリコンなどを材料に用いてサブミリメートルの格子定数の2次元、3次元結晶を作製し、その基礎特性を明らかにし、光の領域での試料作製のための重要知見を得た。

(4)　群論による固有モードの対称性の分類

フォトニック結晶の光学応答では、固有モードの空間対称性がしばしば重要な役割を果たす。そこで、2次元および3次元フォトニック結晶の固有モードを群論を用いて分類した。2次元結晶では電磁場がスカラー場と見なせるので、結晶中の電子の場合と同様である。3次元結晶では、自由度2のベクトル場であるが、この場合も基底の取り方に注意を払うことで群論が適用できることを示した。さらに、この方法による対称性の分類から、入射平面波では励起できない非結合モード（不活性モード）が同定できた。

(5)　透過およびブラッグ反射スペクトル

平面波展開法を用いて、2次元フォトニック結晶の透過

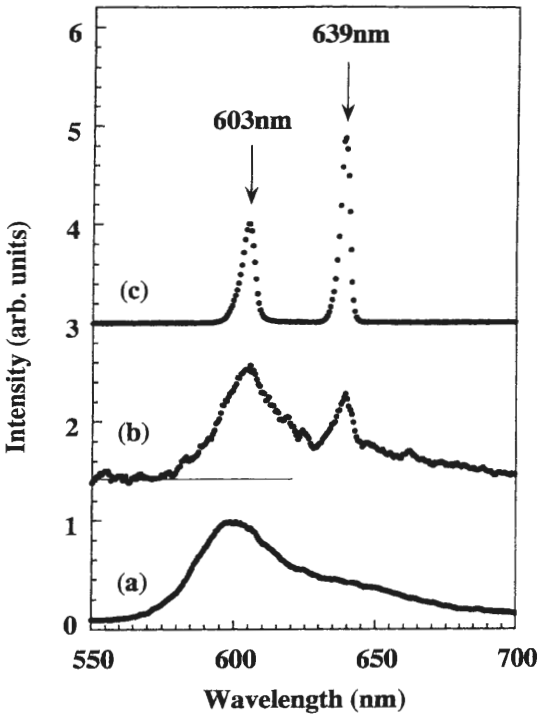


図1．2次元エアロッド格子からのレーザー発振

およびブラッグ反射スペクトルの計算法を考案した。この方法を2次元正方および3角格子に適用して、・バンドギャップおよび非結合モード（不活性モード）による低透過率領域の理論予測、・透過スペクトルに現れる非周期的かつ先鋭な干渉パターンの起源の解明、・ブラッグ反射スペクトルの周波数依存性の理論予測、および、・固有モードの群速度と干渉パターンの関係の解明、を行なった。

(6) 局在モードの数値解析

誘電率の周期構造に乱れを導入したフォトニック結晶では、ギャップ内局在モードが生成する場合がある。ギャップ内モードは輻射場の局在現象という純理学的な観点のみならず、狭帯域光学フィルターや単一モード発光ダイオード等への応用の観点からも重要である。そこで、マックスウェル方程式を差分近似して数値的に解くことにより、誘電率の乱れの近くに置かれた振動双極子からの輻射場を求め、これを以前の研究で得られた光学応答の一般解と比較して、局在モードの固有周波数と固有関数が算出できることを示した。この方法を・2次元正方格子中の点欠陥、・2次元3角格子中の点欠陥、および、・2次元正方格子中の線状欠陥に適用して、実験値と極めてよい一致を得た。さらに、この方法が規則格子のバンド計算へ拡張できることを示し、従来の方法では難しかった誘電率が周波数依存性をもつ場合のバンド計算が高精度で可能になった。

(c) 新しい光記録素子開発のための非晶質中の電子・格子相互作用の研究

光化学ホールバーニング（PHB）は波長次元での多重記録を可能とするので、将来の高密度光記録方式として期待されている。PHB素子の性能は電子・格子相互作用による光学的位相緩和に強く依存する。そこで、代表的なPHB材料であるポルフィリンについて位相緩和時間の温度変化を調べて、以下の結論を得た。①10 K付近を境にして主たる緩和機構が変化する、②低温領域では非晶質に特有の2準位系のフォノン誘起トンネリングが、③高温領域では低周波フォノンによるラマン過程が、それぞれ支配的である。

(d) 新しい光機能性有機結晶の開発に関する研究

(1) 非線形光学素子のための新しい有機材料の開発

有機物による新しい二次非線形光学結晶開発を目指し、独自に編み出した分子設計指針に基づいて種々の化合物を設計・合成の上、調査した。その結果、KTPなどの無機材料による二次非線形光学結晶よりも大きな非線形光学定数をもつのみならず、角度トレランスが大きいなど、応用上の観点からも極めて優れた特性をもつMBCPやMBBCH等の新規な有機非線形光学結晶を開発した。

(2) 有機結晶中の分子配列とC−H…O水素結合の研究

結晶構造制御技術の一手法としてC−H…O水素結合に着目し、C−H…O水素結合を形成しうる官能基をもつ有機物の結晶構造を、X線結晶構造解析を駆使して系統的に調査した。その結果、共役ケトンにおいては、分子配列を決める因子としてC−H…O水素結合が大きな役割を果たしていることを明らかにした。

(e) 遷移金属酸化物の構造相転移に関する研究

新しいコヒーレントな低温凝縮相（Muller相）の存在可能性を念頭において、$SrTiO_3$の量子常誘電相の光学フォノンを高分解能ハイパーラマン分光と非弾性中性子散乱法を用いて詳細に研究した。単分域化した試料を用いて、(1)横波音響モードの低温異常が極性光学ソフトフォノンとの結合により生じている事実、並びに(2)強誘電性前兆現象の主な起源が量子効果（零点振動）のみによるものでなく、立方晶−正方晶相転移による上記のフォノンの影響にも大きく依存している事実などを明らかにした。なお、上記のMuller相の問題に関しても、いくつかの新しい異常を見出している。

(f) ラマン散乱分光による高温超伝導体の研究

代表的高温超伝導体$YBa_2Cu_3O_{7-d}$の光学格子振動モードを詳しく調べた。その結果、(1)超伝導状態と強く結合するバックリングモードの応答がab面内で著しい異方性を示す事実を明らかにし、超伝導状態が単純なd波状態ではなく、s波の寄与があること、(2)共鳴ラマン効果によるラマン不活性モードの初めての観測などからフォノン−スピン結合に関して再検討が必要なこと、(3)特定フォノンのラマン信号強度がレーザー光照射により著しい時間変化を示し、Cu-O鎖上の酸素の秩序化と相関をもつ事実などを明らかにした。

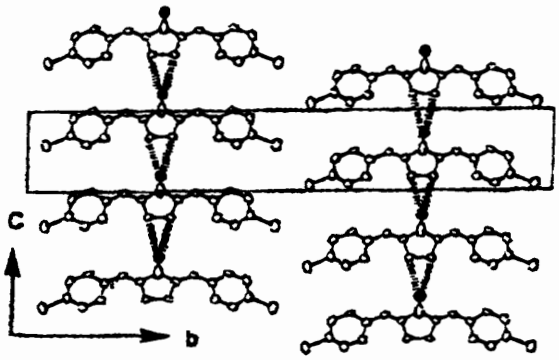


図2．共役ケトン（BrBCP）のX線結晶構造解析に基づくパッキングの模様と分子間C−H…O水素結合（刻線）

・平成11−12年度

(A) フォトニック結晶と輻射場の制御に関する理論研究

屈折率が互いに異なる複数の誘電体（あるいは半導体や金属）を光の波長程度の周期で積層した人工結晶（フォトニック結晶）中では、光の固有モードの存在しない周波数領域（フォトニックバンドギャップ）や極めて遅い光の群速度（群速度異常）等が実現できる。これらを利用すると一様媒質中では見られない特異な光学現象が実現でき、将来の波長多重・大容量光通信のための要素技術として大きな期待が掛けられている。

我々はこの数年来、グリーン関数を用いた解析的な方法やスーパーコンピューターを用いた大規模シミュレーションなどによって、フォトニック結晶の基礎的な光学特性を明らかにするとともに、光通信および光演算デバイスの可能性を種々提案してきた。当該2年間の研究成果は以下の通りである。

(1) 直交位相成分スクイージングの増強効果

群速度異常による増強効果をグリーン関数法による摂動計算で解析的に示した。群速度異常に伴う量子光学過程の増強効果の発見は世界初である。

(2) 異常ラムシフト

制御された輻射場中の量子電気力学（QED）の基礎として大変重要なラムシフトについて、等方的な有効質量をもつバンド端における解析表現を導出し、真空中と比べて40%程度もの変化の生じることを示した。

(3) 超放射の空間伝播効果

励起状態にある原子集団の協力現象としてレーザー発振と並んで重要な光の超放射について、フォトニック結晶中の群速度分散の効果を調べている。鞍点法と平均場近似の範囲で超放射の時間・空間発展を記述する微積分方程式を導出し、解析中である。

(4) ポラリトンバンドの高精度数値計算法の開発

可視・近赤外領域に電子準位をもつ半導体や金属を母体とするフォトニック結晶の解析では、結晶中の共鳴分極と輻射場の連成波である、ポラリトンの分散関係を求める必要が有る。大変高精度で効率的なアルゴリズムをFDTD(時間領域差分)法を用いて開発できた。図1は金属円柱から成る2次元フォトニック結晶中のプラズモンポラリトンの解析例である。通常の輻射モード(b)に比べてプラズモンポラリトンの輻射場(a)は金属表面に局在し、極端に小さなバンド幅と群速度を与えることが分かった。

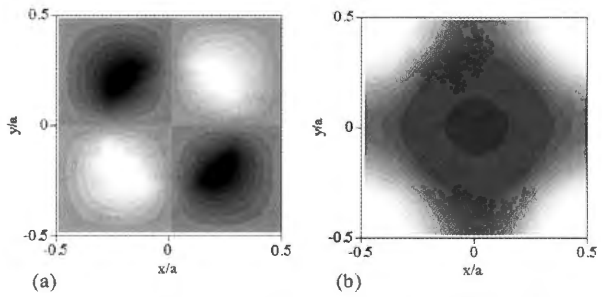


図1．単位格子内の固有モードの電磁場分布の解析の例。(a) プラズモンポラリトン、(b) 通常のモード。

(5) スラブ型2次元フォトニック結晶の光波解析

エレクトロニクス分野で開発された薄膜成長やリソグラフィー技術を応用して、極めて良質の2次元結晶（スラブ型フォトニック結晶）が半導体基板上に作製されるようになった。そこで、スラブ型結晶の分散関係とモードの寿命、光透過率、および、局在モード解析用のシミュレーションソフトを開発した。これを用いて、固有モードの寿命と群速度が光透過率に大きく影響すること、および、対称性の不整合から光回折が禁止されるために極端に長い寿命をもつモードの存在することなどを発見した。これらの知見はデバイス設計にとって大変重要である。

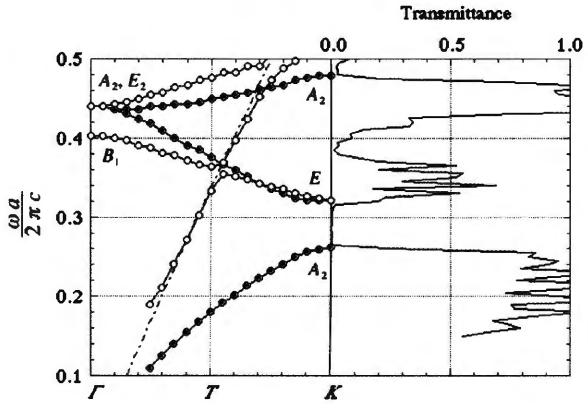


図2．スラブ型フォトニック結晶のバンド構造（左）と光透過率（右）の一例。

以上に加えて過去数年間の理論研究の成果を単行本にまとめ、Optical Properties of Photonic Crystals（Kazuaki Sakoda著）と題してSpringerから2001年5月に出版した。

(B) フォトニック結晶と輻射場の制御に関する実験研究

(1) スラブ型2次元フォトニック結晶の透過率と群速度

AlGaAsを母体とする格子定数450 nmのスラブ型結晶について、波長可変レーザーによる透過率測定と、フェムト秒レーザーパルスを用いたtime-of-flight法による群速度測定を行い、バンド計算と良く一致する結果を得た。

(2) 2次元結晶の位相整合SHG

中空光ファイバー束から成る2次元フォトニック結晶に有機非線形光学材料の微粉末を分散して、SHG（第2高調波発生）信号の励起被長依存性を観測した。フォトニック結晶に特徴的な多彩な分散関係を利用することにより、一様媒質中では実現できない位相整合が可能な事実を明らかにした。

(C) ガラスの低温熱現象異常の起源の解明研究

溶融水晶、および無機、有機物を問わずガラスとよばれている物質で普遍的に生じる低温熱現象異常（過剰比熱、熱伝導の温度変化異常、など）の起源は、多くの研究にもかかわらず物性物理学分野の未解決な重要問題として残されている。モンペリエ大学ガラス研究所のE. Coutens教授のグループとの共同研究により、非弾性中性子散乱（グルノーブル研究所の最新の装置）と光散乱（ハイパーラマン、ラマン、ブリュアン散乱分光法）の実験研究を推進した。その結果、アモルファスのSiO_2、GeO_2、通常のガラスで上記の異常と関係するボゾンピークの起源を、初めて解明することに成功した。国際的に大きな反響をよんでいる。現在、普遍性の程度についてさらに詳しく調べると同時に、低温異常現象を説明するモデルの構築を試みている。

(D)　粘土-機能性分子ハイブリッド系の分子配列制御

粘土鉱物がイオン性分子や極性分子と混ざるだけで、自発的に分子を層間に取り込み、層間化合物を形成することは良く知られている。得られた化合物は、二次元周期性を有する無機・有機ハイブリッド材料として様々な応用がなされている。しかし、カオリナイトの場合を唯一の例外に、粘土鉱物の層間にインターカレートしたゲスト分子は対称中心を持った配列様式をとる。二次の非線形光学特性や磁性のように、興味深い物性の中には対称中心を持たない分子配列を要求するものがある。そこで我々は、粘土と有機分子との複合系に、対称中心をもたない分子配列を誘起することを目指した研究を行っている。

(1)　粘土-機能性分子ハイブリッド LB 膜

粘土の水分散液上で LB 膜を作製することにより、粘土-機能性分子ハイブリッド LB 膜を作製している。通常の LB 膜には、両親媒性分子が用いられるが、粘土 LB 法においては、粘土と分子との間の静電気的な相互作用も利用できるので、長鎖アルキル基を持たなくてもイオン性分子であれば対称中心を持たずに並べられる事を明らかにした。

インドールと TCNQ をベースとした D-π-A 型分子内電荷移動化合物（ind-TCNQ；図 3 ）と、モンモリロナイトとを組み合わせて作製した粘土 LB 膜の SHG 測定結果を図 4 に示した。垂直浸積法により作製した試料に観測された明瞭なフリンジパターンから、この膜が極めて均質であることが伺える。また、水平付着法により得られた試料からは、対称中心を持たない分子配列を取る薄膜試料に典型的な SH 挙動が観測された。現在はより多くの化合物群への配列制御へのこの手法の応用を目指し、製膜条件を精査している。

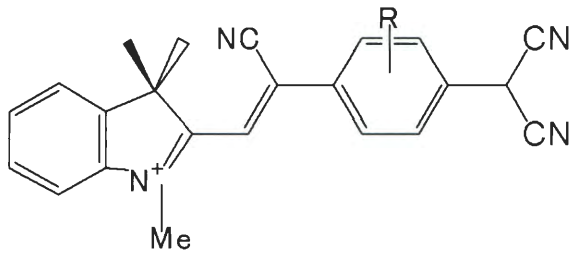


図 3．インドールと TCNQ をベースとした D-π-A 型分子内電荷移動化合物（ind-TCNQ）の構造式。

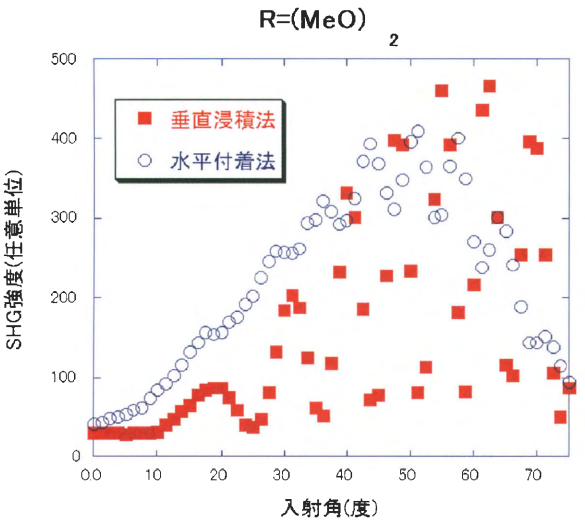


図 4．ind-TCNQ とモンモリロナイトとのハイブリッド膜から発生する SHG 強度の角度依存性。入射光、SH 光ともに p 偏光。

(2)　カオリナイトへの大型分子のインターカレーション

カオリナイトは対称中心を持たない分子配列でのインターカレーションが起こる例外的な粘土鉱物である。しかし、これまでにインターカレーションできた最大の分子は DMSO にとどまっていた。我々は条件を工夫する事で、ニトロアニリン等大型のベンゼン誘導体をカオリナイトにインターカレートする事に成功した。

・平成 13 年度

(a)　多光子吸収挙動に優れた新しい有機材料の開発

二光子吸収（Two-Photon Absorption：TPA）とは物質（分子）が 2 つの光子を吸収して励起される現象であり、そのメカニズムから「段階的」二光子吸収と「同時」二光子吸収の二種類に分類される（図 1 ）。

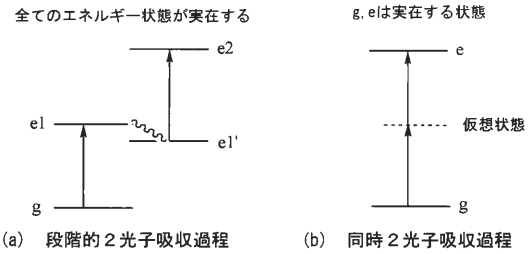


図 1．段階的二光子吸収と同時二光子吸収

段階的二光子吸収は実励起の足し合わせであるため、一光子めの励起波長は必ず吸収スペクトルでの吸収の存在する領域（共鳴領域）でなければならない。一方、同時二光子吸収では、励起に用いた光子の 2 倍のエネルギーに実励起状態が存在すれば良いので、吸収が全く存在しない領域（非共鳴領域）の波長を用いて分子励起することも可能となる。

「同時」二光子吸収の起こる確率は、加えた光電場（入射光）強度の自乗に比例するため、上手に制御すれば入射光のエネルギーが集中している領域でのみ二光子吸収を誘起させる事が可能である。すなわち、入射光をフォーカスすれば、焦点付近でのみ二光子吸収が起こり、焦点の合っていないその他の空間では吸収が起こらないという高い空間分解能を得ることもできる。図 2 には一光子吸収（通常の吸収）と二光子吸収の比較を示した。

通常の吸収では、光が照射されたすべての空間で光吸収が起こるため、空間選択性を持たせることは不可能であるが、二光子吸収を用いると、フォーカスされた光強度の強い空間でのみ光吸収が起こる半面、デフォーカスされた空間の光吸収は無視し得るほど小さいため、焦点付近のきわ

めて限られた空間でのみ光吸収を誘起することが可能となる。

以上の特徴を用いて、二光子蛍光像影、三次元光記録、光スイッチ、光学的センサープロテクション（オプティカルリミッティング）、光通信、二光子レーザー色素、三次元マイクロ光造形、光治療（PDT）等の様々な応用が提案されている。

一方、二光子吸収の最大の欠点は、二光子吸収が三次の非線形光学現象で効率が極めて低いため、現状では二光子吸収現象を活用するには非常に強力な光源が必要となることである。したがって、簡便な光源で二光子吸収現象が活用できるように、化合物の側の吸収効率の増大が応用的な観点から強く望まれている。

量子機能素子研究分野では、半導体レーザーで駆動可能な高効率二光子吸収デバイスの開発を目指した研究を進めている。その一環として、ビス（シンナミリデン or ベンジリデン）シクロアルカノン誘導体を 100 種以上合成し、2 光子吸収断面積と分子構造に関する系統的な調査を行った結果の一例を示す。2,5-ビス（4'-ジメチルアミノシンナミリデン）シクロペンタノンは、波長 1064 nm の YAG レーザーで励起した際にこれまでに知られているいかなる化合物より強い二光子励起蛍光を発することなどが明らかとなった。

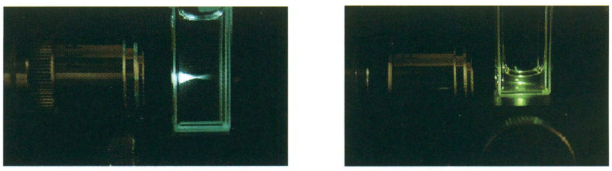


図 2．一光子過程と二光子過程の違い

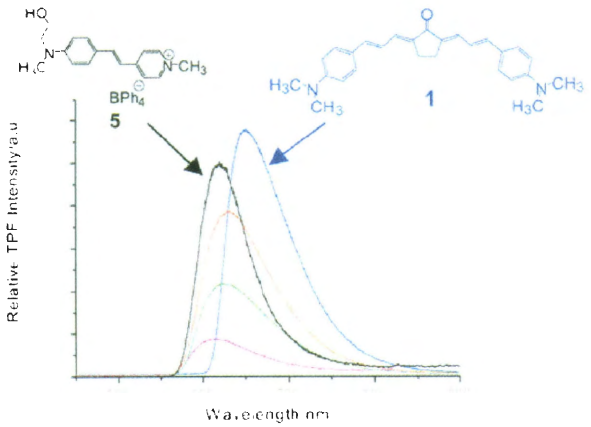


図 3．1064 nm で励起した際のビス（シンナミリデン）シクロアルカノン誘導体の二光子励起発光挙動。(1) 2,5-ビス（4'-ジメチルアミノシンナミリデン）シクロペンタノン、(5) ASPT（既知化合物）

(b)　フォトニック結晶による輻射場の制御

屈折率が光の波長程度の周期で空間変動する人口結晶（フォトニック結晶）を用いると輻射場の制御が可能であり、これまでに無い各種の光学ならびに量子光学過程が実現できる。我々はこれまでに、低閾値レーザー発振や、第 2 高調波発生あるいは直交位相成分スクイージングなどの非線形光学過程の効率化が達成できることを理論計算で示し、その一部は実験で検証してきた。今年度はこれをさらに発展させて、協力的発光現象の一種である超放射に、量子電気力学（QED）効果に由来する極めて特異な振る舞いが見られることを理論計算によって見出した。

フォトニック結晶中には、輻射場の固有モードの存在しない周波数領域（フォトニックバンドギャップ）が生じるが、その両端では逆に固有モードの状態密度が著しく増大する場合がある。このとき、物質の電子準位と輻射場の間に強結合状態が実現して、電子準位は大きなエネルギー差をもつ 2 つの準位に分裂する（ラビ分裂）。一方の準位はバンドギャップの外にあるので、超放射光を放って基底状態に回帰するが、もう一方の準位はバンドギャップ中にあるので光を放出することができず、他の失活過程が存在しなければ永久に励起状態にとどまる。

図 4 は、パルス光照射によって励起した電子が基底状態へ回帰していく様子のシミュレーション結果である。電子の遷移周波数 δ がギャップ端 $\triangle\omega_g$ の十分外側にある場合（$\delta \gg \triangle\omega_g$）には、ほとんどすべての電子が基底状態に回帰する。逆に、遷移周波数がギャップ内にある場合（$\delta \ll \triangle\omega_g$）には輻射緩和は起こらず、ほとんどすべての電子が励起状態にとどまる。中間的な場合（$\delta \approx \triangle\omega_g$）には部分的な緩和が生じる。このような部分的緩和はフォトニックバンドギャップの存在に由来しており、フォトニック結晶に固有の現象である。励起状態にとどまる電子は、位相の揃った巨視的な大きさの振動分極を形成するが、これもまた、フォトニック結晶に固有の電磁波の量子論的局在現象の一つの現れである。

バンドギャップ外の電子準位から放出される超放射光には、ラビ分裂に伴うスペクトルシフトが見られる。図 5 は、

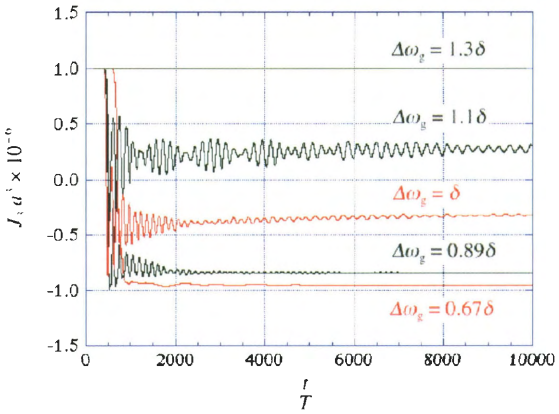


図 4．電子の反転分布の時間変化

これを示したものであり、ギャップ端（矢印）が電子の遷移周波数に近づくにしたがって、超放射光のスペクトルが高周波数側へ押しやられる様子が分かる。

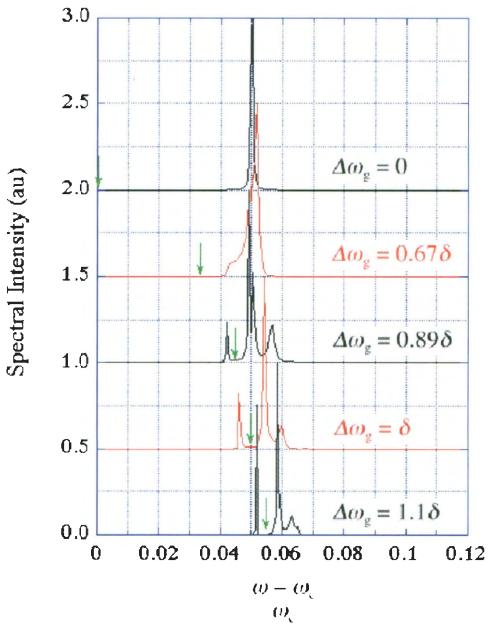


図５．超放射光のスペクトルシフト

３．今後の研究の展望・将来計画

○光の領域のフォトニック結晶を開発すると共に、輻射場の制御並びにユニークな光の伝播特性、等に関する基礎研究の一層の展開を図り、新しい光エレクトロニクスの基盤とする。

○これまでの成果を踏まえて半導体量子ドットの量子閉じ込め電子、フォノン等の一層の解明研究を行ない、新しい素子としての可能性を追求する。

○粉末結晶のための新しい非線形光学定数評価方法の開拓研究を進める。

○電荷移動錯体や金属錯体における、電荷移動相互作用に起因する非線形光学挙動を解明する。

◯群速度異常に伴う光学過程の増強効果の実験的検証を目指して、比較的小さな誘電率の周期的変調を有するスラブ型フォトニック結晶を新たに作製し、光の誘導放出、第２高調波発生、および、直交位相成分スクイージングを評価する予定である。

◯テラヘルツ領域で機能する銅酸化物超伝導体からなるスラブ型結晶や光造形法などによる３次元フォトニック結晶について、大阪大学・信州大学と協力して研究を開始した。現在はバンド計算を行っている段階であるが、今後、透過率と不純物モードの計算を行う予定である。

◯これまでの高性能有機非線形光学材料の探索と開発に加えて、アップコンバージョンやナノ微細加工への応用を目指して高効率２光子吸収材料の開発を開始した。

(a)　これまでに得られた成果に立脚し、優れた特性を有する多光子吸収体を開発すると共に、有機物による多光子吸収体の分子設計指針の提案を予定している。

(b)　自己集積能を利用した有機薄膜による、新しい光機能性ナノデバイスの開発を計画している。

(c)　超放射光のスペクトルシフトと巨視的振動分極の量子局在を検証するための試料作製にとりかかったところである。

４．資料

4.1　学術論文

1）M. Wada, Y. Doi, K. Inoue, Z. Yuan, and J. W. Haus, “Far-infrared transmittance and band structure correspondence in two-dimensional air-rod photonic crystals”, *Phys. Rev. B*, 55, 10443-10451 (1997)*

2）A. V. Baranov, Y. Masumoto, K. Inoue, A. V. Fedorov, and A. A. Onushchenko, “Size-selective two-photon spectroscopy of CuCl spherical quantum dots”, *Phys. Rev. B*, 55, 15675-15680 (1997)*

3）R. Kuribayashi, K. Inoue, K. Sakoda, V. A. Tsekhomskii, and A. V. Baranov, “Observation of long phase-relaxation time in CuCl quantum dots: Four-wave-mixing signals analogous to dye-molecules in polymer”, *Phys. Rev. B*, 57, R15084-R15087 (1998)*

4）T. Kuroda, F. Minami, K. Inoue, and A. V. Baranov, “Accumulated photon echo in semiconductor microcrystallite quantum dots”, *Phys. Rev. B*, 57, R2077-R2080 (1998)*

5）B. Hehlen, L. Arzel, A. K. Tagantsev, E. Courtens, Y. Inaba, A. Yamanaka, and K. Inoue, “Brillouin-scattering observation of the TA-TO coupling in $SrTiO_3$”, *Phys. Rev. B*, 57, R13989-R13992 (1998)*

6）K. Inoue, M. Sasada, J. Kawamata, K. Sakoda, and J. W. Haus, “Laser action characteristic of a two-dimensional photonic lattice”, *1998 OSA Technical Digest Series*, 7, 47-48 (1998)*

7）K. Sakoda, “Group-theoretical classification of eigenmodes in three-dimensional photonic lattices”, *Phys. Rev. B*, 55, 15345-15348 (1997)*

8）K. Sakoda, “Numerical analysis of the interference patterns in the optical transmission spectra of a square photonic lattice”, *J. Opt. Soc. Am.* B14, 1961-1966 (1997)*

9）K. Sakoda and H. Shiroma, “Numerical method for localized defect modes in photonic lattices”, *Phys. Rev. B*, 56, 4830-4835 (1997)*

10）K. Sakoda, T. Ueta, and K. Ohtaka, “Numerical analysis of eigenmodes localized at line defects in photonic lattices”, *Phys. Rev. B*, 56, 14905-14908 (1997)*

11) A. Yamanaka and K. Inoue; "Anomalous behavior of the polar soft phonon of hexagonal $BaTiO_3$ at low temperature and its relation to static dielectric constant", *J. Phys. Soc. Jpn.* 66, 3277-3282 (1997)*
12) K. Sakoda and J. Kawamata, "Novel approach to photonic bands with frequency-dependent dielectric constants", *Opt. Express*, 3, 12-18 (1998)*
13) K. Sakoda, "Numerical study on localized defect modes in two-dimensional triangular photonic crystals", *J. Appl. Phys.*, 84, 1210-1214 (1998)*
14) N. Kawai, M. Wada, and K. Sakoda: "Numerical analysis of localized defect models in a photonic crystal: Two-dimensional triangular lattice with square rods," Jpn. J. Appl. Phys. 37, 4644-4647 (1998)
15) Zhenyu Yuan, J. W. Haus and K. Sakoda: "Eigenmode symmetry for simple cubic lattices and the transmission spectra:" *Opt. Express,* 3, 19-27 (1998)*
16) T. Ueda, K. Ohtaka, N. Kawai, and K. Sakoda: "Limits on quality factors of localized defect modes in photonic crystals due to dielectric loss," *J. Appl. Phys.* 84, 6299-6304 (1998)*
17) K. Sakoda: "Enhanced stimulated emission in a two-dimensional photonic crystal," *Proc. SPIE,* 3491, 248-253 (1998)*
18) M. F. Limonov, A. I. Rykov, S. Tajima and A. Yamanaka, "Raman scattering study on fully oxygenated $YBa_2Cu_3O_7$ single crystals: x-y anisotropy in the superconductivity-induced effect", *Phys. Rev. Lett.*, 80, 825-828 (1998)*
19) A. G. Panfilov, M. F. Limonov, A. I. Rykov, S. Tajima and A. Yamanaka, "Superconductivity-induced effect on Raman-forbidden mode in underdoped $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals", *Phys. Rev. B*, 57, R5634-R5637 (1998)*
20) A. G. Panfilov, A. I. Rykov, S. Tajima and A. Yamanaka, "Photoinduced oxygen reordering in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals", *Phys. Rev. B*, 58, 12459-12466 (1998)*
21) J. Kawamata, T. Inabe, and K. Inoue, "Molecular and crystal structures of novel second-order nonlinear optical crystals; bis (benzylidene) cycloalkanones", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 71, 2777-2786 (1998)*
22) T. Konuma, T. Akutagawa, T. Yumoto, T. Nakamura, J. Kawamata, K. Inoue, T. Nakamura, H. Tachibana, M. Matsumoto, H. Ikegami, S. Horiuchi, H. Yamochi and G. Saito: "Charge-transfer interactions and non-linear optocal properties of tetrathiafulvalene-based Langmuir-Blodgett films", Thin Solid Films, 327-329: 348-352. (1998)*
23) K. Inoue, M. Sasada, J. Kawamata, K. Sakoda and J. W. Haus: "A two-dimensional photonic crystal laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32(2B): 157-159 (1999)*
24) K. Sakoda, M. Sasada, T. Fukushima, A. Yamanaka, N. Kawai and K. Inoue: "Detailed analysis of transmission and Bragg reflection spectra of a two-dimensional photonic crystal with a lattice constant of 1.15μm," *J. Opt. Soc. Am*, 16(3): 361-365 (1999)*
25) K. Sakoda: "Enhanced light amplification due to group-velocity anomaly peculiar to two- and three-dimensional photonic crystals," *Opt. Express,* 4, 167-176 (1999)*
26) J. Kawamata, M. Kiguchi, T. Nakamura and K. Inoue: "A new method for evaluating third-order nonlinear optical efficiency of powder crystals," *Nonlinear Optics*, 22: 373-376 (1999)*
27) R. Kuribayashi, K. Inoue, K. Sakoda, V. A. Tsekhomskii and A. V. Baranov: "Heterodyne-detected accumulated photon-echo spectroscopy of CuCl quantum dots," *Jpn. J. Appl. Phys*, 38(1B): 577-580 (1999)*
28) B. Hehlen, A. Arzel, K. Tagantsev, E. Courtens, Y. Inaba, A. Yamanaka and K. Inoue: "Observation of the coupling between TA and TO modes in $SrTiO_3$ by Brillouin scattering," *Physica*, 263: 627-631 (1999)*
29) T. Nakamura, J. Kawamata, K. Inoue and T. Konuma: "Nonlinear Optical properties of Langmuir-Blodgett films of pyrazine-based dye molecule," *Nonlinear Optics*, 22: 127-130 (1999)*
30) T. Hasegawa, T. Nakamura, J. Kawamata and K. Inoue: "Valence-moduration-induced optical nonlinearity of intermolecular charge-transfer Langmuir-Blodgett films," *Nonlinear Optics*, 22: 143-146 (1999)*
31) K. Inoue, N. Kawai, M. Sasada, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, S. Abe, S. Yamada, and Y. Katayama: "Characteristics of two-dimensional AlGaAs photonic crystals in a waveguide configuration for test devices," Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics '99 (Seoul, 1999-8): Summary of Papers, pp.563-564, (IEEE, New Jersey, 1999-3)*
32) T. Aoki, M. Wada-Takeda, J. W. Haus, Z. Yuan, M. Tani, K. Sakai, N. Kawai and K. Inoue: "The photonic dispersion relation of the pseudo-simple-cubic lattice revealed by THz time domain measurements," *Proc. of the 7th IEEE Conference on Teraheltz Electronics*, 256-259 (1999)*

33) Y. Miyoshi, M. Wada, N. Kawai, K. Sakoda, K. Inoue, Z. Yuan, J. W. Haus and H. Matsuo: "The photonic line defect modes in the square air-rod pseudo-triangular lattice revealed by far-infrared measurements," *Proc. of the 7th IEEE Conference on Teraheltz Electronics* (IEEE, New Jersey, 1999), 253-255 (1999)*

34) K. Sakoda, K. Ohtaka and T. Ueta: "Low-threshold laser oscillation due to group-velocity anomaly peculiar to two - and three-dimensional photonic crystals," *Opt. Express*, 4(12): 481-489 (1999)*

35) J. Kawamata, M. Kiguchi, T. Nakamura, K. Inoue, T. Hasegawa, T. Akutagawa and G. Saito: "Observation of Third-Order Nonlinear Optical Effects of Metallo-Dimethylglyoxime Complexes by Methods Using the Evanescent Wave," *Nonlinear Optics*, 22: 349-352 (1999)*

36) B. Hehlen, E. Courtens, R. Vacher, A. Yamanaka, M. Kataoka and K. Inoue: "Hyper-Raman Scattering Observation of the Boson Peak in Vitreous Silica," *Phys. Rev. Lett.*, 84(23): 5355-5358 (2000)*

37) A. Yamanaka, M. Kataoka, Y. Inaba, K. Inoue, B. Hehlen and E. Courtens: "Evidence for competing orderings in strontium titanate from hyper-Raman scattering spectroscopy," *Europhysics Lett.*, 50(5): 688-694 (2000)*

38) K. Inoue, M. Sasada, N. Kawai and J. Kawamata: "Phase-Matched Second-Harmonic Generation in a Two-Dimensional Photonic Crystal," *Quantum Electronics and Laser Science Conference* (OSA, Washington, 2000), 3 (2000)*

39) N. Kawai, K. Inoue, M. Sasada, N. Ikeda, N. Carlsson, S. Abe, K. Asakawa, S. Yamada and Y. Katayama: "Characterization of Two-Dimensional AlGaAs Photonic Crystals with Waveguides as a Test Device," *Quantum Electronics and Laser Science Conference, OSA Technical Digest* (OSA, Washington, 2000), 25-26 (2000)*

40) J. W. Haus, Z. Yuan, T. Aoki, M. Wada, M. Tani, K. Sakai, N. Kawai and K. Inoue: "THz spectroscopy of a pseudo-simple cubic photonic band structure," *Quantum Electronics and Laser Science Conference, OSA Technical Digest* (OSA, Washington, 2000), 84-85 (2000)*

41) B. Hehlen, E. Courtens, R. Vacher, A. Yamanaka, M. Kataoka and K. Inoue: "Hyper-Raman scattering and the boson peak of silica glasses," *Proc. of the XVII-th International Conference on Raman Spectroscopy*, ed. S. Zhang (Wiley & Sons, New York), 612-613 (2000)*

42) K. Sakoda, R. Yamaguchi, J. Nishikawa, T. Gibe, T. Uchida, J. Kawamata and K. Inoue: "Temperature dependence of optical homogeneous width of mesoporphyrin and its aggregate in polyvinylalcohol at 1.8-50 K," *J. Lumin.*, 86(3 & 4): 249-255 (2000)*

43) J. Kawamata, Y. Ogata, M. Taniguchi, A. Yamagishi and K. Inoue: "Second-Order Nonlinear Optical Properties of the Hybrid Film of a Clay and a Chiral Metal Complex," *Mol. Cryst. & Liq. Cryst.*, 343: 53-58 (2000)*

44) J. Kawamata, T. Akutagawa, T. Hasegawa, K. Inoue and T. Nakamura: "Nonlinear Optical Properties of the Langmuir-Blodgett Films of an Intermolecular Charge Transfer Complex," *Nonlinear Optics*, 25: 425-430 (2000)*

45) J. Kawamata, Y. Ogata, A. Yamagishi and K. Inoue: "Structural Analyses of Clay-Metal Complex Hybrid Films by Observing Optical Second Harmonic Generation," *Nonlinear Optics*, 25: 431-436 (2000)*

46) S. Yamada, T. Koyama, Y. Katayama, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Observation of light propagation in two-dimensional photonic-crystal-based bent optical waveguides," *J. Appl. Phys.*, 89(2): 855-858 (2001)*

47) N. Kawai, K. Inoue, N. Carlsson, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa and T. Takemori: "Confined Band Gap in an Air-Bridge Type of Two-Dimensional AlGaAs Photonic Crystal," *Phys. Rev. Lett.*, 86(11): 2289-2292 (2001)*

48) K. Inoue, N. Kawai, Y. Sugimoto, N. Carlsson, N. Ikeda and K. Asakawa: "Optical Properties of Different Types of GaAs-Based Photonic Crystal Slabs and Their Application to Devices,"; *in Microphotonics-Materials, Physics and Applications-(MRS Internat'l Sympos. Vol 637) ed. T.F. Krauss et al. (Material Research Society, Pennsylvannia, 2001)*, E3.2: 1-12 (2001)*

49) T. Ochiai and K. Sakoda: "Dispersion relation and optical transmittance of a hexagonal photonic crystal slab," *Phys. Rev. B*, 63(12): 125107-1-125107-7 (2001)*

50) Y. Sugimoto, N. Carlsson, N. Ikeda, K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Fabrication and Characterization of 2D AlGaAs Photonic Crystals with High-Aspect-Ratio Hole Patterns by Cl_2 RIBE"; in *Microphotonics —Materials, Physics and Applications—* (MRS Internat'l Sympos. Vol. 637) ed. T. F. Krauss etal. (Material Research Society, Pennsylvania,

2001), E-5-10, pp.1-6 (2001).*

51) E. Miyai and K. Sakoda: "Quality factor of localized defect modes in a photonic crystal slab on a low-index dielectric substrate," *Opt. Lett.*, 26(10): 740-742 (2001)*

52) H. Kitahara, N. Tsumura, H. Kondo, M. Wada-Takeda, J. W. Haus, Z. Yuan, N. Kawai, K. Sakoda, and K. Inoue: "Terahertz wave dispersion in two-dimensional photonic crystals," *Phys. Rev. B*, 64(4): 45202-1- 45202-7 (2001)*

53) T. Ochiai and K. Sakoda: "Nearly-free-photon approximation for two-dimensional photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B*, 64(4): 45108-1-45108-11 (2001)*

54) K. Sakoda, N. Kawai, T. Ito, A. Chutinan, S. Noda, T. Mitsuyu, and K. Hirao: "Photonic bands of metallic systems. I. Principle of calculation and accuracy," *Phys. Rev. B*, 64(4): 45116-1-45116-8 (2001)*

55) T. Ito and K. Sakoda: "Photonic bands of metallic systems. II. Features of surface plasmon polaritons," *Phys. Rev. B*, 64(4): 45117-1-45117-8 (2001)*

56) J. Kawamata, M. Akiba and Y. Inagaki: "Effective Second-Order Nonlinear Optical Coefficient of a Novel Transparent Material: N, N-Diphenyl-8-[2-(4-pyridinyl) ethenyl] dibenzofuran-2-ylamine," *Chemistry Letters*, 1026-1027 (2001)*

57) R. Takenawa, Y. Komori, S. Hayashi, J. Kawamata, and K. Kuroda: "Intercalation of Nitroanilines into Kaolinite and the Second Harmonic Generation," *Chemistry of Materials*, 13: 3741-3746 (2001)*

58) Y. Ogata, J. Kawamata, C. Chong, Y. Makihara, A. Yamagishi and G. Saito: "Optical Second Harmonic Generation of Zwitter Ionic Molecules Aligned on Clays," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 376: 245-250 (2002)*

59) N. Kawai, K. Inoue, N. Ikeda, N. Carlsson, Y. Sugimoto, K. Asakawa, S. Yamada, and Y. Katayama, "Transmittance and time-of-flight study of AlxGa1-xAs-based photonic crystal waveguides"; Phys. Rev. B63 (15), 153313-pp.1-pp.4 (2001).*

60) T. Aoki, M. Wada-Takeda, J. W. Haus, Z. Yuan, N. Kawai, and K. Inoue, "Teraheltz time-domain study of a pseudo-simple-cubic photonic lattice"; Phys. Rev. B64 (4), 045106-pp.1-pp.5 (2001).*

61) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, N. Kawai, K. Inoue, and K. Asakawa, "AlGaAs-based two-dimensional photonic crystal with defect waveguides for miniaturized ultra-fast optical-pulse control/delay devices"; Proceedings of SPIE Symposium on Active and Passive Optical Components for WDM Communication, vol.4532, pp.180-pp.190. (SPIE, Washington, 2001).*

62) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, N. Kwai, K. Inoue, and K. Asakawa, "Light propagation characteristics of photonic crystal waveguide for miniaturized ultrafast optical-pulse control/delay devices", Proceedings of SPIE Symposium on Photonics Technology in the 21st Century, vol.4598, pp.58-pp.72 (SPIE, Washington, 2001).*

63) T. Iwai, K. Ishii, and K. Inoue, "Numerical simulation of ordered polystyrene particles using radiation pressure and self-organization"; Proceedings of SPIE Symposium on Photonics Technology in the 21st Century, vol.4598, pp.80-pp.85 (SPIE, Washington, 2001).*

64) K. Ishii, T. Iwai, and K. Inoue, "Optical fabrication of ordered polystyrene particles using radiation pressure and self-organization"; Proceedings of SPIE Symposium on Photonics Technology in the 21st Century, vol.4598, pp.94-pp.100 (SPIE, Washington, 2001).*

65) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Theoretical and experimental investigation of straight defect-waveguides in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs"; Appl. Phys. Lett., 79 (25), 4286-4288 (2001).*

66) B. Hehlen, E. Courtens, A. Yamanaka, and K. Inoue, "Nature of the boson peak of silica glasses from hyper-Raman scattering observations"; J. Non-Crystalline Solids, 297(1), 89-94 (2001).*

67) N. Carlsson, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa, T. Takemori, N. Kawai, and K. Inoue, "Design and nano-fabrication of near-infrared 2D photonic crystal air-bridge structure"; J. Optical and Quantum Electronics, 34, 123-128 (2002).*

68) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson. K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Fabrication and characterization of different types of two-dimensional AlGaAs photonic crystal slabs"; J. Appl. Phys. 91(3), 922-929 (2002).*

69) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Theoretical and experimental mode analysis of 60°-bent and Y-branch defect-waveguides in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs"; IEEE J. Quantum Electronics, 91(5), 760-769 (2002).*

70) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Experimental verification of guided modes in 60-degree-bent defect-waveguides

in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs", J. Appl. Phys. 91(5), 3477-3479 (2002).*

71) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Light propagation characteristics of Y-branch defect-waveguide in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs"; Opt. Lett., 27(6), 388-390 (2002).*

72) K. Inoue, N. Kawai, Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, and K. Asakawa, "Observation of small group velocity in two-dimensional AlGaAs-based photonic crystal slabs"; Phys. Rev. B, 65(12), 121308(R), 1-4 (2002).*

73) A. Yamagishi, Y. Ogata, J. Kawamata, C. H. Chong and G. Saito: "Clay and a twitter ionic molecule hybrid film: analysis of the relationship between the film structure and the condition for film preparation", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.,* 379: 425-430 (2002)*

74) J. Kawamata, Y. Ogata and A. Yamagishi: "Two-Photon Fluorescence Property of Tris-(4, 7-Diphenyl-1, 10-phenanthroline)ruthenium(II)-perchlorate", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.,* 379: 389-394 (2002)*

75) J. Kawamata, M. Akiba and Y. Inagaki: "Second-Harmonic Generation of a Novel Transparent-Material: N, N-Diphenyl-8-[2-(4-pyridinyl)-ethenyl]-dibenzofuran-2-ylamine", *Optical Materials,* 21: 71-74 (2003)*

76) Y. Ogata, J. Kawamata and A. Yamagishi: "Structural Features of a Clay Film Hybridized with a Zwitter Ionic Molecule as Analyzed by Second Harmonic Generation Behavior", *Clays and Clay Minerals,* 51: 182-186 (2003)*

77) J. Kawamata, M. Akiba and Y. Inagaki: "Two-Photon Induced Fluorescent Properties of a Class of Conjugated Ketone Derivatives", *Japanese Journal of Applied Physics,* 42(1): L17-L19 (2003)*

78) Y. Ogata, J. Kawamata and A. Yamagishi: "A Novel Film with a non-centrosymmetric Molecular Alignment of D-π-A Zwitter Ionic Molecules Fabricated at an Air-water Interface," Thin Solid Films, 133-134: 425-430 (2003)*

4.2 総説、解説、評論等

1) 井上久遠、〝10年の歴史をもつフォトニック結晶〞、日経エレクトロニクス、No.720、11月号、62-63(1998)*

2) 迫田和彰、〝微細構造中の光波解析理論—フォトニック結晶を中心にして—〞、光学、27、2-5 (1998)*

3) 山中明生、〝ペロブスカイト型強誘電体の巨大TO—LO分離〞、固体物理、33、701-709 (1998)*

4) 井上久遠、〝フォトニック結晶の基礎と応用—概観—〞；1998年電子情報通信学会ソサイエテイー大会、講演論文集、SC-5-1、398-399 (1998)*

5) K. Sakoda: "Optics of Photonic Crystals," *Opt. Rev.*, 6(5): 381-392 (1999)*

6) 迫田和彰、笹田道秀、川俣純、井上久遠：「フォトニック結晶中の光学応答—群速度異常による増強効果—」、日本物理学会誌、54(11)：893-896 (1999)*

7) 迫田和彰、井上久遠：「フォトニック結晶のレーザー動作」、応用物理学会誌、68(12)：1372-1375 (1999)*

8) 迫田和彰：「フォトニックバンドと輻射場制御」、O plus E、21(12)：1533-1538 (1999)*

9) 川俣純、中村貴義：「電荷移動錯体及び金属錯体LB膜の非線形光学特性」、光学、29：72-77 (2000)*

10) 川俣純：「集積型金属錯体の非線形光学挙動」、特定領域研究「集積型金属錯体」広報、9：12-15 (2001)*

11) 迫田和彰：「国内でも進む多彩な研究」、日経サイエンス、32(3)：65-65 (2002)*

12) 井上久遠、「フォトニック結晶による光の場の制御」；表面科学、第22巻、11号、702-709 (2001)*

13) 岩井俊昭、石井勝弘、井上久遠、「光の放射圧と自己組織化を利用した微粒子配列」；レーザー研究、第30巻、2号、70-74 (2002)*

14) 井上久遠、「フォトニック結晶による光制御の最新技術」；光学、第31巻、5号、410-415 (2002)*

4.3 著書

1) K. Sakoda, "Photonic crystals", in Optical Properties of Low-Dimensional Materials 2, ed. T. Ogawa and Y. Kanemitsu, World Scientific, Singapore (1998) 402-450.

2) K. Sakoda: "Optical Properties of Photonic Crystals" (Springer, Berlin) pp.1-223 (2001)*

4.4 特許

1) 川俣純、秋葉雅温：「光情報記録媒体および情報の記録方法」、特願2001-268990(P2001-268990) (2001.9.5)

2) 川俣純、秋葉雅温：「2光子重合性組成物及びその光重合方法」、特願2001-268989(P2001-268989) (2001.9.5)

3) 石橋晃：「ナノ構造を有する機能材料、その製造方法及びフレキシブル超高密度メモリー」、2003-063048 (2003.3.10)

4.5 招請講演

1) K. Inoue, "Optical Properties of 2D Photonic Crystals", CLEO/Pacific Rim '97 (幕張メッセ) 1997年7月15日.

2) 井上久遠、〝フォトニック結晶の基礎と応用〞、電子情報通信学会ソサイエティ大会 (甲府) 1998年9月30

日.

3）迫田和彰、〝フォトニック結晶中の光波解析〞，ニューガラスフォーラム（日本ガラス工業センター）1997年11月14日.

4）山中明生、〝ペロブスカイト型強誘電体のTO－LO分離〞、日本物理学会第53回年会（東邦大学）1998年3月31日.

5）井上久遠：「フォトニック結晶と輻射場の制御」、第9回マイクロ化学懇談会（科学技術振興事業団)、東京(1998-11)

6）迫田和彰：〝フォトニック結晶〞、ブレークスルー技術フォーラム、東京大学山上会館、東京（1998-3)

7）迫田和彰：〝フォトニック結晶の光波解析〞、電子情報通信学会、慶応大学（1999-3)

8）K. Inoue, “Laser action of two-dimensional photonic crystals”, International Topical Workshop on Contemporary Photonic Technologies (CPT'99), Sendai, Jan. -1999, Extended Abstracts 75-76.

9）K. Sakoda: “Low-threshold lasing due to group-velocity anomaly in two-dimensional photonic crystals,” International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Sendai, Japan (2000-3)

10）J. W. Haus, Z. Yuan, T. Aoki, M. Wada, M. Tani, K. Sakai, N. Kawai and K. Inoue: “THz spectroscopy of a pseudo-simple-cubic photonic band structures,” Quantum Electronics and Laser Science Conference, San Francisco, U.S.A. (2000-5)

11）K. Inoue: “Nano-fabrication and characterization of slab type of 2-dimensional semiconductor photonic crystal,” The 7th International Workshop on Femtosecond Technology, Tsukuba, Japan (2000-6)

12）迫田和彰：「フォトニック結晶中の光学応答―群速度異常による増強効果―」、応用物理学会北海道支部講演会、北海道大学、日本（2000-6)

13）迫田和彰：「フォトニック結晶の研究動向」、理研フォーラム、理化学研究所、日本(2000-6)

14）迫田和彰：「光のバンド構造による群速度異常のもたらすもの」、応用物理学会応用電子物性分科会研究例会、機会振興会館、日本（2000-7)

15）B. Hehlen, E. Courtens, R. Vacher, A. Yamanaka, M. Kataoka and K. Inoue: “Hyper-Raman scattering and the boson peak of silica glasses,” The XVII-th International Conference on Raman spectroscopy, Beijin, China (2000-8)

16）K. Inoue: “Optical Properties of Different Types of GaAs-Based Photonic Crystal Slabs and Their Application to Devices,” Material Research Society Conference, Boston, U. S. A. (2000-11)

17）迫田和彰：「周期構造中の光の場の解析」、日本光学会第27回冬期講習会、東京大学生産技術研究所、日本(2001-1)

18）井上久遠：「ハイパーラマン散乱によるボゾンピークの観測とその起源」、第56回日本物理学会年次大会、中央大学、日本（2001-3)

19）迫田和彰、落合哲行：「フォトニック結晶の理論解析技術」、第48回応用物理学関係連合講演会、明治大学駿河台キャンパス、日本（2001-3)

20）迫田和彰：「フォトニック結晶の光波解析」、電磁界理論研究会(電気学会)、北海道大学百年記念会館(2001-6)

21）迫田和彰：「フォトニック結晶のバンド構造と光学特性」、３Ｄマイクロ構造研究会、大阪大学（2001-9)

22）迫田和彰：「群速度異常と量子光学」、日本物理学会秋季分科会、徳島文理大学（2001-9)

23）井上久遠、河合紀子、楊濡、杉本喜正、池田直樹、淺川潔；「半導体フォトニック結晶スラブにおけるフェムト秒光パルスの伝搬特性」、第5回超高速エレクトロニクス研究会、東京（2001-6)

24）井上久遠；「フォトニック結晶のデバイスの可能性」、電子情報通信学会技術時限専門委員会シンポジウム「次世代情報通信ヘットワークを支えるフォトニックルータ技術」、支笏湖（2001-8)

25）淺川潔、杉本喜正、池田直樹、井上久遠；「光半導体2次元フォトニック結晶の作製・評価と極微小・超高速光制御素子回路への応用」、第82回微小光学研究会「微細構造の微小光学」、東京国際交流会議場（2001-11)

26）淺川潔、杉本喜正、池田直樹、井上久遠「ナノ量子構造と集積光デバイスへの新展開―フォトニック結晶と量子ドットの融合」、第3回光材料、応用技術研究会、熱海（2001-11)

27）淺川潔、杉本喜正、池田直樹、楊濡、河本　滋、中村　均、井上久遠；「集積ナノフォトニック・デバイスの作製と応用」、第4回集積光デバイス技術研究会、通信総合研究所、(2001-12)

28）杉本喜正、池田直樹、楊濡、淺川潔、井上久遠；「２次元フォトニック結晶のナニ加工・作製・評価―極微小平面光素子・回路への応用」、次世代リソグラフィー技術研究委員会、東京（2001-12)

29）T. P. Radhakrishnan, M. Sharath Chandra, Y. Ogata and J. Kawamata: “Polyelectrolyte Assisted Deaggregation and SHG Enhancement in Hemicyanine Based Langmuir-Blodgett Films”, Asian Symposium on Nanotechnology and Nanoscience, (Nippon Kagaku Miraican, Tokyo), (2002.11. 27)

4.6 シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）井上久遠（電子機能素子部門）：International Workshop in photonic and Electromagnetic Crystal structures (PECS-II),（220名、Sendai Daiichi-Hotel, Japan）(2000.3.8-10)

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）井上久遠、迫田和彰（電子機能素子部門）：〝電子科学研究所　公開シンポジウム「フォトニック結晶による輻射場の制御」〞（約50名、北海道大学百年記念会館）(1998.3.4-5)

2）井上久遠（電子機能素子部門）：〝文部省科学研究費補助金特定領域研究(B)、「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」に関する公開シンポジウム〞（約50名、ホテル富士見ハイツ(静岡県伊豆長岡町)）(1999.2.1-2)

3）井上久遠（電子機能素子部門）：〝科学研究費補助金特定領域(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第2回公開シンポジウム〞（120名、北海道大学学術交流会館）(1999.7.29-30)

4）井上久遠（電子機能素子部門）：〝科学研究費補助金特定領域(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第3回公開シンポジウム〞（40名、KKR宮の下(箱根町)）(2000.1.28-29)

5）井上久遠（電子機能素子部門）：〝科学研究費補助金特定領域(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第4回公開シンポジウム〞（70名、定山渓ビューホテル）(2000.7.27-28)

6）井上久遠（電子機能素子部門）：〝科学研究費補助金特定領域(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第5回公開シンポジウム〞(90名、主婦会館）(2001.1.31-2.1)

7）井上久遠（電子機能素子部門）：〝科学研究費補助金特定領域研究(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第6回公開シンポジウム〝(50名、ヒルサイドホテル富士見）(2001.7.30-31)

8）井上久遠（電子機能素子部門）：〝科学研究費補助金特定領域研究(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」第6回公開シンポジウム〞（120名、コープイン京都）(2002.1.24)

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）迫田和彰：重点(2)、分光プローブによるポリマーの構造ゆらぎとダイナミクスの研究、900千円（1997）

2）井上久遠：重点(2)、2光子共鳴分光によるⅠ-Ⅶ、Ⅱ-Ⅵ化合物微結晶の量子閉じ込め電子構造の研究、2,100千円（1997）

3）井上久遠：基盤A　一般(2)、フォトニック結晶における輻射場と物質の新しい相互作用の研究、1,100千円（1997）

4）井上久遠：国際学術研究　共同研究、量子常誘電体における新しい低温凝縮相の探索、1,600千円（1997）

5）井上久遠：特定A(2)、2光子共鳴分光によるⅠ-Ⅶ、Ⅱ-Ⅵ化合物微結晶の量子閉じ込め電子構造の研究、1,000千円（1998）

6）井上久遠：特定B(1)、「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」の総括、1,800千円（1998）

7）井上久遠：特定B(2)、フォトニック結晶における輻射場と物質との相互作用、22,500千円（1998）

8）井上久遠：基盤B　展開(2)、輻射場の制御のためのフォトニック結晶の開発、5,300千円（1998）

9）川俣純：奨励A、電荷移動錯体の三次非線形光学特性に関する系統的研究、1,500千円（1998）

10）井上久遠：国際学術研究　共同研究、量子常誘電体における新しい低温凝縮相の探索、1,600千円（1998）

11）川俣純：特定領域A(2)、集積型金属錯体の非線形光学定数測定、1,500千円（1999）

12）井上久遠：特定領域B(1)、「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」の総括、3,200千円（1999）

13）井上久遠：特定領域B(2)、フォトニック結晶における輻射場と物質の相互作用、24,500千円（1999）

14）井上久遠：基盤B　展開(2)、輻射場の制御のためのフォトニック結晶の開発、5,700千円（1999）

15）迫田和彰：基盤C　企画(1)、微小構造体の量子光学、2,400千円（1999）

16）川俣純：奨励A、電荷移動錯体の三次非線型光学特性に関する系統的研究、600千円（1999）

17）川俣純：特定領域A(2)、集積型金属錯体の非線形光学定数測定、1,400千円（2000）

18）井上久遠：特定領域B(1)、「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」の総括、3,200千円（2000）

19）井上久遠：特定領域B(2)、フォトニック結晶における輻射場と物質の相互作用、10,800千円（2000）

20）井上久遠：基盤B　展開(2)、輻射場の制御のためのフォトニック結晶の開発、2,000千円（2000）

21）井上久遠：特定領域B(1)、「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」の総括、3,400千円（2001）

22）迫田和彰：基盤B　一般(2)、多次元・多重周期構造体の非線形および量子光学、2,700千円（2001）

23）川俣純：特定領域研究(2)「LB膜の構造制御への静電的相互作用の活用」2,700千円（2002）

b．奨学寄付金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1）迫田和彰：㈶住友財団、「フォトニック結晶における光の局在と量子光学」、1,300千円（1997）

2）迫田和彰：㈶稲盛財団、「フォトニック格子中の局在電磁モードの数値シミュレーション」、1,000千円(1998)

3）迫田和彰：㈶三菱財団、「フォトニック結晶の群速度異

状が引き起こす」、5,100 千円（1999）
4）迫田和彰：㈱三菱財団、「フォトニック結晶の群速度異状が引き起こす特異な量子光学現象の研究」、1,900 千円（2000）
5）迫田和彰：㈱マツダ財団、「スラブ型フォトニクス結晶による輻射場制御と非線形光学現象の増強効果」、1,100 千円（2001）
6）川俣純：富士写真フィルム足柄研究所、「2 光子励起化合物の評価」、1,000 千円（2000）、1,000 千円（2001）、1,000 千円（2002）

c．受託研究費（受入者名、委託先、研究課題、金額、年度）

1）迫田和彰：科学技術振興事業団、「フォトニック結晶バンド構造解析手法の確立」、2,000 千円（1998）
2）井上久遠：技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構、「フォトニック結晶：輻射場制御微小光源の解析及び応用：1,575 千円（1999）
3）井上久遠：技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構、「フォトニック結晶：光伝搬特性の評価と群速度の解析」、1,575 千円（2000）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）川俣純、井上久遠（電子機能素子部門）、中村貴義、芥川智行（電子材料物性部門）：粉末結晶のための新しい三次非線形光学定数測定方法の開発）（平成1997～1998 年度）
2）迫田和彰（電子機能素子部門）竹内繁樹、堀田純一（電子計測制御部門）：固体光子スイッチの実現に向けた基礎研究（平成 1999～2001 年度）
3）辻見裕史（電子材料物性部門）、迫田和彰（電子機能素子部門）：超短パルスレーザーを用いた誘電体薄膜の特性評価システムの開発（平成 2001～2002 年度）
4）竹内繁樹、堀田純一（電子計測制御部門）、迫田和彰（電子機能素子部門）：固体光子スイッチの実現に向けた基礎研究（平成 1999～2001 年度）

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）井上久遠（電子機能素子部門）領域代表：文部省科学研究費補助金特定領域研究(B)：「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」、約 2.3 億円（1998～1999 年度）
2）井上久遠（電子機能素子部門）：技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構：フォトニック結晶：輻射場制御微小光源の解析及び応用、1,575 千円（1999 年度）
3）迫田和彰（電子機能素子部門）：科学技術振興事業団：スラブ型 2 次元フォトニック結晶の光波解析、7,965 千円（1999 年度）
4）迫田和彰（電子機能素子部門）：日本原子力研究所：フォトニック結晶による重力波検出の可能性、1,500 千円（1999 年度）
5）井上久遠（電子機能素子部門）：技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構：フォトニック結晶：光伝搬特性の評価と群速度の解析、1,575 千円（2000 年度）

d．国際共同研究（代表者名、エージェンシー、研究課題、経費、研究期間）

1）井上久遠（電子機能素子部門）：日本学術振興会日米科学協力事業（共同研究）：「周期構造をもつ複合物質の光の状態と伝播」、6,300 千円（1996～1998）
2）井上久遠（電子機能素子部門）：文部省科学研究費補助金（国際学術研究）：量子常誘電体における新しい低温凝縮相の探索」、2,900 千円（1997～1998）
3）井上久遠（電子機能素子部門）：日本学術振興会外国人研究者招へい事業：「高分解能レーザー分光による半導体量子微結晶の素励起の研究」、1,960 千円（1998 年度）

4.9 受賞

1）井上久遠：平成 13 年度北海道科学技術賞「レーザーと物質との相互作用の研究」（北海道）（2002.3）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）井上久遠：日本学術振興会専門委員（1997 年度）
2）迫田和彰：科学技術振興事業団平尾誘起構造プロジェクト研究推進委員（1997～1998 年度）
3）井上久遠：日本学術振興会専門委員・同審査会専門委員（1999 年度）
4）井上久遠：日本学術振興会特別研究員等専門委員・審査委員（2000 年度）
5）迫田和彰：科学技術振興事業団平尾誘起構造プロジェクト推進委員（1999 年度）

b．国内外の学会の主要役職

1）井上久遠：レーザー学会評議員（1997～2000）
2）井上久遠：第 2 回フェムト秒テクノロジー国際ワークショップ（FST-1999）組織委員・プログラム委員（1999）
3）井上久遠：第 3 回フェムト秒テクノロジー国際ワークショップ（FST-2000）組織委員・プログラム委員（2000）
4）井上久遠：第 2 回 Photonic and Electromagnetic Crystal Structures 国際シンポジウム組織委員長（1999.3）
5）井上久遠：第 4 回フェムト秒テクノロジー国際ワークショップ組織委員・プログラム委員（2001）
6）井上久遠：第 3 回 Photonic and Electromagnetic Crystal Structures（PECS-III）国際シンポジウム（St. Andrews, 2001-6）：国際アドバイザー委員（2001）
7）井上久遠：第 5 回国際フェムト秒テクノロジー・ワークショップ組織委員・プログラム委員（2002）
8）迫田和彰：CLEO Pacific Rim 国際会議プログラム委

員（1999 年度）
9）川俣純：応用物理学会北海道支部会場幹事（2000 年度）
10）川俣純：応用物理学会北海道支部会場幹事（2001 年度）
11）井上久遠：第 10 回高圧半導体物理学国際会議国際委員（2001 年度）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）稲場靖彦：ハイパーラマン散乱による単分域 $SrTiO_3$ における強誘電的ソフトフォノンモードの研究(1997)
2）山口玲介：レーザー分光によるポルフィリン分散ポリマーにおける光学的位相緩和の研究（1997）
3）片岡満史：$SrTiO_3$ における強誘電性前兆現象に対する立方晶一正方晶構造相転移の効果（1998）
4）儀部朋子：蓄積フォトンエコー分光法による色素・ポリマー系の位相緩和の研究（1998）
5）城間ひとみ：二次元フォトニック結晶中の局在モード(1998)
6）高橋宏通：２光子共鳴分光による微結晶の量子閉じ込め励起子の研究（1999）
7）竹永勝宏：フォトニック結晶における光第二高調波発生現象の研究（2000）
8）伊藤琢範：２次元金属フォトニック結晶の表面プラズモンポラリトン（2000）

・博士学位

1）栗林亮介：Phase Relaxation Characteristics of Confined Excitons in Cuprous Chloride Spherical Quantum Dots（銅ハライド球状量子ドットの励起子の位相緩和特性）(1998)
2）笹田道秀：Study on Control of Radiation Field by Using a Two-Dimensional Photonic Crystal (1999)
3）河合紀子：Experimental Study of Optical Properties of Twio-Dimensional AlGaAs-Based Photonic Crystal Slabs and Control of the Radiation Field (2000)

e．大学院担当講義科目

1）レーザー分光学特論Ⅰ、Ⅱ（1997-1998）
2）量子物性物理学特論Ⅰ（1999-2000）

分子認識素子研究分野

教授　下村政嗣（九州大院、工博、1993.2～2002.3）
助教授　居城邦治（東工大院、工博、1998.4～）
助手　オラフ・カートハウス（ヨハネスグーテンベルグ大学、Ph.D.、1994.1～2000.3）
助手　西川雄大（京都大院、工博、1996.4～2000.3）
　　田中　賢（北大院、理博、2000.9～）
講師　澤田石哲郎（北大院、地球環境博、1998.4～2000.3）（研究機関研究員）

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
西田　仁、松本　仁、角南　寛、西川和孝、丸山則彦、森末光彦、鶴間章典、藪　浩、橋本裕一
修士課程
池田俊明、小糸健夫、深沢　忠、新井景子、大倉隆介、三田村リカ、藪　浩、橋本裕一、佐藤雄久、竹林允史

1．研究目的

生物は高度な分子認識とそれによって組織化された分子集合体システムを駆使して、効率の良いエネルギー変換や物質生産、様々な情報変換を達成している。本研究分野では、生物の分子組織化を手本とすることで、ナノメーターからサブミリメーターにいたるメゾスコピック領域における分子の階層的な組織化を行い、新規な機能性材料の開発を行っている。分子認識や自己集合などの超分子化学の手法によりナノメーターサイズで分子を組織化し、さらに散逸構造形成を利用することでマイクロメーターサイズでの分子集合体の組織化を行い、分子の階層的な組織化を計ろうとしている。この研究によって、分子組織科学を確立するとともに、自己組織化に基づくボトムアップ方式によるナノテクノロジーを展開し、光エネルギー変換材料やバイオマテリアル、分子情報機能素子などの新規な分子素子の開発を目指している。

2．研究成果

(a)　ナノスケールの研究：DNA および DNA-mimetics の組織化と光機能化に関する研究

DNA は、相補的な水素結合によって形成された塩基対が一次元にスタックした特異な二重螺旋構造を有し、また重合度、モノマーシーケンスが厳密に制御された高分子である。最近、DNA の塩基対スタッキングを介した長距離にわたる光誘起電子移動が話題になっている。本研究分野では、分子組織化の制御が容易な気水界面における核酸塩基間の特異な水素結合を利用し、DNA の有する制御された重合度・シークエンスを鋳型として会合数・配列が完全に制御された一次元 π 電子系を構築することで、非局在化した π 電子系に特徴的な光機能の発現をめざしている。

これまでの研究において、核酸塩基を有する両親媒性化合物が気液界面において単分子膜を形成すること、界面における特異的な水素結合を用いることで、DNA 中で形成されるような Watson-Crick 型の塩基対ならびに Hoogsteen 型の塩基三量体が形成され、さらにそれらがスタッキングしていることを見出した。これらの結果は、DNA が有する自己組織化能に学ぶ材料創製の新しい戦略を可能とするものであり、分子情報機能とフォトニクス機能を併せ持つ新規機能性材料としての DNA-mimetics の概念をもたらした（図 1）。たとえば、下水相に添加した一本鎖のオリゴヌクレオチドを鋳型とすることで、光重合性基であるジアセチレングループを有する両親媒性の核酸塩基誘導体の重合を制御できる。これは、DNA が有する分子情報（塩基配列と制御された重合度）を転写することで、分子配列が完全に制御された分子材料としての DNA-mimetics の設計が可能となったことをしめす。最近、アゾベンゼンなどのパイ電子系グループを有する核酸塩基単分子膜が、環状のオリゴヌクレオチドを鋳型にして配列する可能性を見いだし、光合成の光捕集アンテナシステムを形態的にも機能的にも模倣した人工光合成システムが可能となった。一方、気液界面におけるカチオン性単分子膜と DNA のイオン対形成を利用することで、Langmuir-Blodgett 法による単一 DNA 分子の伸長固定化に成功した（図 2）。また、導電性

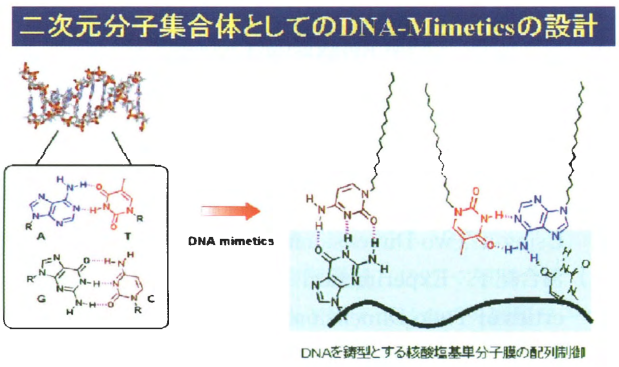


図 1．二次元分子集合体としての DNA-mimetics

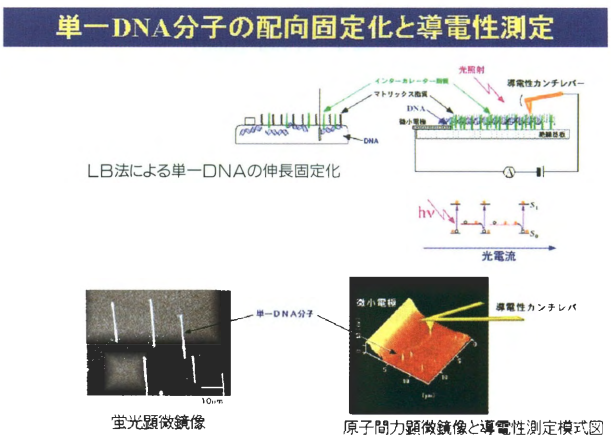


図 2．単一 DNA 分子の配向固定化と導電性測定

のカンチレバーを用いた原子間力顕微鏡を用いることで、微少領域の光電導性の測定が可能となった。また、アルキル鎖に金などと特異的な相互作用をするチオールやジスルフィド基を導入することで、DNA-mimetics を自己集合単分子膜（Self-assembled Monolayer, SAM）として固定化することに成功した。原子間力顕微鏡の探針の表面に固定化することで、選択的な水素結合に基づく分子間力のマッピング（化学力マイクロスコピー）に成功した（図３）。

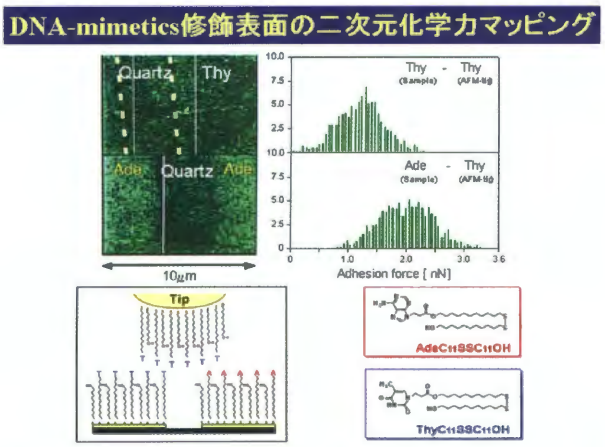


図３．DNA-mimetics で修飾した表面の二次元化学力マッピング

(b)　メゾスコピックスケールの研究：散逸構造を利用した高分子メゾスコピックパターンの形成と機能化に関する研究

本研究の目的は、希薄溶液から高分子を固定基板上にキャストする過程で生じる、非平衡熱力学に支配された散逸構造の形成を制御することで、サブマイクロメーターサイズの規則的な高分子パターンを作製し、リソグラフィーフリーの新しいマイクロ加工技術の開発を行うことにある。我々の身の回りには、散逸構造と呼ばれる非平衡熱力学に支配された動的なパターン形成が知られている。散逸構造によるパターン形成は複雑な現象ではあるものの、一般的な物理現象であるが故に、分子構造に依存することなく多様な高分子材料系に適用することが可能である。これまでの研究において分子の希薄溶液をキャストすることで、ナノメーターサイズからミクロンにいたる領域において、規則的に配列したドット構造やストライプ構造などが形成されることを見出した。キャストプロセスのその場観察によって、これらのパターンが、溶媒蒸発時に形成される散逸構造が基板上に固定化される過程で高分子の dewetting 現象がカップリングすることによって形成されることを明らかにした（図４）。DNA やデンドリマーなどの種々の高分子、ポリスチレンやシリカなどのナノパーティクルなどからもパターンが形成されることを見出しており、パターン形成が高分子の化学構造によらない一般的な現象であることを示しパターン化を特徴とする新たなフォトニクス・エレクトロニクス材料、バイオマテリアルの開発を行っている。

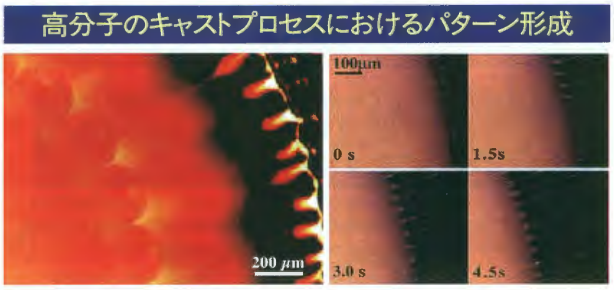


図４．高分子のキャストプロセスで形成されるベナールセル(a)と三相界面でのフィンガリング不安定化とストライプ構造形成(b)

散逸構造が溶液の界面で形成されることに注目し、連続的にメニスカスが形成される装置を開発した。二枚のスライドガラスに高分子溶液をはさみガラスを徐々にスライドさせることで高分子溶液の薄い液膜を連続的に形成し、空気との界面において散逸構造にともなう周期的な高分子の濃縮がおこること、さらに、図５のようなパターンが再現性よく形成されることを見いだした。このようにして作製したフィルムの二次的な加工により、複雑なダブルメッシュパターンがリソグラフィーなどの微細加工を用いることなく作製できることを明らかにした。また、高湿度条件でベンゼンやクロロフォルムなどの水と不溶の溶媒からキャストすると、蒸発の潜熱によって結露した水滴の規則配列を鋳型として、規則的な細孔構造を持つ多孔質高分子フィルム（ハニカム構造フィルム）が形成されることを見いだした。系統的な実験の結果、孔径は水の供給量によって数百ナノメーターから数百ミクロンにいたる幅広いスケールで制御できることを明らかにした(図６)。ハニカムフィルムの二次加工により、マイクロピラーが規則的に配列したパターンも作製できる。

高分子メゾスコピックパターンのバイオメディカルへの応用を目指して、パターン化フィルム上への細胞接着を調べた。図７に示すように、平滑な表面を有する高分子フィルム上では肝細胞は接着伸展しアルブミンの産生や尿素の分解などの肝機能を発現しないのに対し、ハニカム状の規

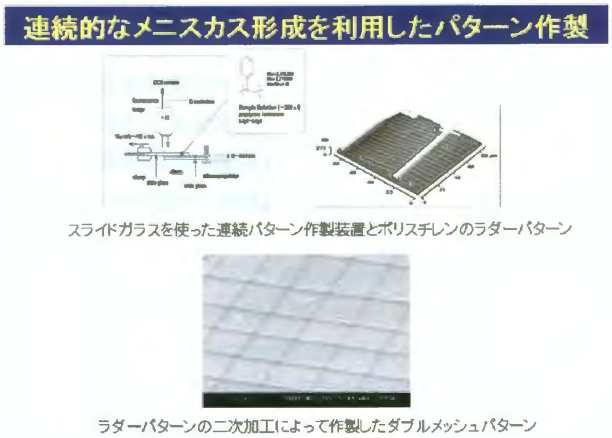


図５．連続的なメニスカス形成を利用したパターン作製

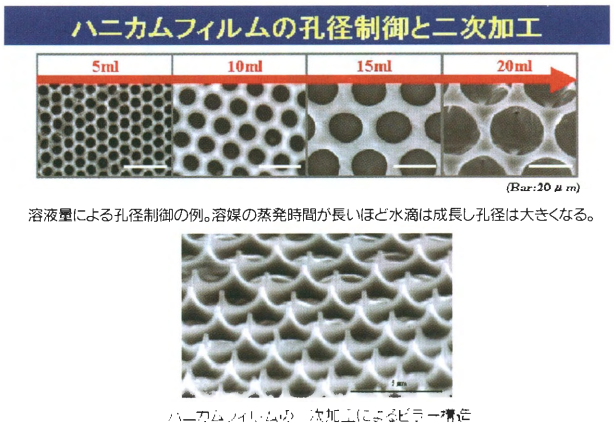


図6．ハニカムフィルムの孔径制御と二次加工

則的な細孔を有する高分子を基板として培養すると、肝機能の最小単位であるスフェロイドを形成した。この結果は、メゾスコピックなパターンが細胞機能発現を制御したことを意味しており、パターンに特徴的な機能を有する新しい材料の可能性を示している。

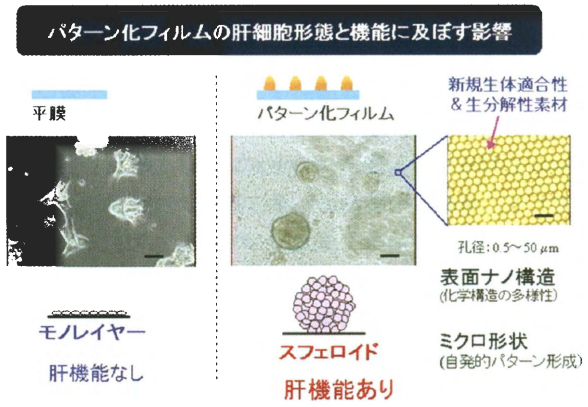


図7．ハニカムフィルム上の肝細胞培養

3．今後の研究の展望・将来計画

ナノテクノロジーにおいてボトムアップ手法と自己組織化が注目されている。

本研究の最終的な目標は、分子あるいは分子集合体の自己組織化過程を制御することでナノメーターからサブミリメーターにいたるメゾスコピック領域における物質の組織化を行い、組織化によって発現される新しい機能を見出すことにある。そのためには、個々の分子を配列し検出する技術が不可欠である。平成9年～10年度科学研究費A「単一分子DNAの配向固定化技術とその高感度検出法の開発」に引き続き、平成11年～13年度振興調整費地域先導研究「海洋生物由来DNAの新機能材料化に関する研究」、平成11年～13年度科学研究費特定領域研究B「一次元π電子系の集積化とそのコヒーレント光化学反応特性」などにおいて、単一DNA分子の高速センシングや、DNA•DNA-mimeticsを用いた新しい分子フォトニクス材料の開発を目指している。

近年、散逸構造などの非平衡現象への数理・物理的な取り組みが盛んになされているが、材料科学とりわけ高分子材料のマイクロ加工に非平衡性を適用しようとする試みはない。時間発展に従って空間的秩序が形成されるような非平衡現象を制御することにより、高分子のメゾスコピックパターンを自己組織化的に形成し、さらにはパターンに特徴的な機能を探ることで「時空間」性を特徴とする新たな高分子材料の開発を目指している。また、平成11年度よりスタートした理化学研究所フロンティア研究システム時空間機能材料研究グループとの研究ネットワークを形成し、自己組織化とボトムアップをキーワードとするナノテクノロジーの新展開をはかっている。そのためには、超分子化学的な手法による分子配列制御の技術が不可欠であるとともに、非平衡現象を利用した自己組織化を制御するための数理的かつ物理的な取り組みが要求される。

平成14年度から本研究分野担当教授の下村が平成14年度に新設された当研究所附属ナノテクノロジー研究センターナノ材料研究分野の担当教授として転任した。平成14年度から本研究分野は目標をバイオに重点化して、ナノ材料研究分野と共同研究を行いながらバイオデバイス、バイオマテリアルの開発を目指している。

4．資料

4.1　学術論文

1）Shimomura, M., Nakamura, F., Ijiro, K., Taketsuna, H., Tanaka, M., Nakamura, H., Hasebe, K.: “Two-dimensional DNA-Mimetic Molecular Organization at the Air-Water Interface”, *J. Am. Chem. Soc.*, 119, 2341-2342 (1997)*

2）Shimomura, M., Karthaus, O., Maruyama, N., Ijiro, K., Sawadaishi, T., Tokura, S., Nishi, N.: “Mesoscopic Patterns of DNA-Amphiphile Complexes”, *Rep. Prog. Polym. Phys. Jpn.*, 40, 523-524 (1997)*

3）Karthaus, O., Hioki, M., Shimomura, M.: “Photochemistry in Stilbene-containing Monolayers. Part II: Effect of Cation Binding on Photoisomerization”, *Colloids and Surfaces*, 126, 181-188 (1997).*

4）Maruyama, N., Koito, T., Sawadaishi, T., Karthaus, O., Ijiro, K., Nis hi, N., Tokura, S., Nishimura, S., Shimomura, M.: “Mesoscopic Pattern Formation of Nanostrucrtured Polymer Assemblies” *Supramol. Sci.*, 5, 331-336 (1998)*

5）Nakamura, F., Ijiro, K., Shimomura, M.: “Construction of Two-dimensional DNA-mimetics. Supramolecular Architecture with Highly Stacked Base-Pairs of Amphiphilic Adenine and Thymine at the Air-Water Interface”, *Thin Solid Films*, 327-329, 603-606 (1998)*

6）Maruyama, N., Koito, T., Nishida, J., Nishimura, S.,

Cieren, X., Karthaus, O., Shimomura, M.: "Mesoscopic Patterns of Molecular Aggregates on Solid Substrates.", *Thin Solid Films,* 327-329, 854-856 (1998).*

7) Karthaus, O., Grasjo, L., Maruyama, N., Shimomura, M: "Formation of Ordered Mesoscopic Patterns in Polymer Cast Films by Dewetting.", *Thin Solid Films,* 327-329, 829-832 (1998).*

8) Shimomura, M., Koito, T., Maruyama, N., Arai, K., Nishida, J., Grasjo, L., Karthaus, O: "Photonic and Electronic Application of Mesoscopic Polymer Assemblies.", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.,* 322, 305-312 (1998).*

9) Okahata, Y., Kobayashi, T., Tanaka, K., Shimomura, M.: "Anisotropic Electric Conductivity in an Aligned DNA Cast Film.", *J. Am. Chem. Soc.,* 120, 6165-6166 (1998).*

10) Hellmann, J., Hamana, M., Karthaus, O., Ijiro, K., Shimomura, M., Irie, M.: "Aggregation of Dendrimers with a Photochromic Dithyenylethene Core Group on the Mica Surface-Atomic Force Microscopic Imaging.", *Jap. J. Appl. Phys.,* 37, L816-L819 (1998).*

11) Marchi-Artzner, V., Artzner, F., Karthaus, O., Shimomura, M., Ariga, K., Kunitake, T., Lehn, J-M.: "Molecular Recognition between 2, 4, 6-Triaminopyrimidine Lipid Monolayers and Complementary Barbituric Molecules at the Air/Water Interface: Effects of Hydrophilic Spacer, Ionic Strength, and pH.", *Langmuir,* 14, 5164-5171 (1998).*

12) O. Karthaus, L. Grasjo, N. Maruyama and M. Shimomura: "Formation of Ordered Mesoscopic Polymer Arrays by Dewetting," *Chaos*, 9(2): 308-314 (1999)*

13) O. Karthaus, X. Cieren, N. Maruyama and M. Shimomura: "Mesoscopic 2-D Ordering of Inorganic/organic Hybrid Materials," *Mater. Sci. Eng. C*, 10: 103-106 (1999)*

14) T. Nishikawa, J. Nishida, R. Ookura, S. Nishimura, S. Wada, T. Karino and M. Shimomura: "Honeycomb-Patterned Thin Films of Amphiphilic Polymers as Cell Culture Substrates," *Mater. Sci. Eng. C*, 8-9: 495-500 (1999)*

15) T. Nishikawa, J. Nishida, R. Ookura, S. Nishimura, S. Wada, T. Karino and M. Shimomura: "Mesoscopic Patterning of Cell Adhesive Substrates as Novel Biofunctional Interfaces," *Mater. Sci. Eng. C*, 10: 141-146 (1999)*

16) O. Karthaus, T. Koito and M. Shimomura: "Patterning of Functional Polymers by Mesoscopic Dewetting: Conductivity of Poly (3-hexylthiophene) Patterns," *Mater. Sci. Eng. C*, 8-9: 523-526 (1999)*

17) K. Ijiro, T. Ikeda and M. Shimomura: "Effect of Polynucleotides on Fluorescence Quenching in Monolayers at the Air-Water Interface," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 327: 45-48 (1999)*

18) O. Karthaus, T. Koito, N. Maruyama and M. Shimomura: "Mesoscopic Patterns of Polythiophenes for Electronic Applications," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 327: 253-256 (1999)*

19) K. Kago, H. Matsuoka, R. Yoshitomi, H. Yamaoka, K. Ijiro and M. Shimomura: "Direct in Situ Observation of a Lipid Monolayer-DNA Complex at the Air-Water Interface by X-ray Reflectometry," *Langmuir*, 15(16): 5193-5196 (1999)*

20) M. Shimomura, J. Matsumoto, F. Nakamura, T. Ikeda, T. Fukazawa, K. Hasebe, T. Sawadaishi, K. Ijiro: "Preparation of DNA-Based Molecular Assemblies by Self-Organization. From Nanometer Scale to Mesoscopic Scale," *Polymer J.*, 31(11-12): 1115-1120 (1999)*

21) M. Taniguchi, N. Ueno, K. Okamoto, O. Karthaus, M. Shimomura and A. Yamagishi: "Monolayer and Fluorescence Properties of a Chiral Amphiphilic Ruthenium (II) Complex at an Air-Water Interface," *Langmuir*, 15(22): 7700-7707 (1999)*

22) M. Morisue, H. Nakamura, K. Ijiro and M. Shimomura: "Molecular Recognition and Monolayer Formation of Azobenzene-containig Nucleobase Amphiphile Assisited by Cis → Trans Photoisomerization at the Air-Water Interface," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 337: 457-460 (1999)*

23) R. Ookura, J. Nishida, T. Nishikawa and M. Shimomura: "Stabilization of Micropatterned Polymer Films as Artificial Extracellular Matrices for Tissue Engineering," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 337: 461-464 (1999)*

24) M. Weisser, J. Kaeshammer, B. Menges, J. Matsumoto, F. Nakamura, K. Ijiro, M. Shimomura and S. Mittler: "Adenine-Uridine Base Pairing at the Water-Solid-Interface," *J. Am. Chem. Soc.*, 122(1): 87-95 (2000)*

25) T. Nishikawa, J. Nishida, R. Ookura, S. Nishimura, V. Scheumann, M. Zizlspenger, R. Lawall, W. Knoll and M. Shimomura: "Web-structured Films of an Amphiphilic Polymer from Water in Oil Emulsion: Fabrication and Characterization," *Langmuir*, 16(3): 1337-1342 (2000)*

26) O. Karthaus, N. Maruyama, X. Cieren, M. Shimomura, H. Hasegawa and T. Hashimoto:

"Water-Assisted Formation of Micrometer-size Honeycomb Patterns of Polymers," *Langmuir,* 16(15): 6071-6076 (2000)*

27) J. Matsumoto, K. Ijiro and M. Shimomura: "Molecular Recognition and Photopolymerization of Nucleobase Monolayer Containing Diacetylene Group at the Air-Water Interface," *Chem. Lett*., 1280-1281 (2000)*

28) O. Karthaus, N. Maruyama, H. Yabu, T. Koito, K. Akagi and M. Shimomura: "Pattern Formation in Polymer Films by Non-Linear Processes," *Makromol. Chem., Makromol. Symp*., 160: 137-142 (2000)*

29) M. Shimomura and T. Sawadaishi: "Bottom-up Strategy of Materials Fabrication. A New Trend in Nanotechnology of Soft Materials," *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 6(1): 11-16 (2001)*

30) S. Ikeda, H. Nur, T. Sawadaishi, K. Ijiro, M. Shimomura and B. Ohtani: "Direct Observation of Bimodal Amphiphilic Surface Structures of Zeolite Particles for a Novel Liquid-Liquid Phase Boundary Catalysis," *Langmuir*, 17(26): 7976-7979 (2001)*

31) K. Ijiro, T. Sawadaishi and M. Shimomura: "Fabrication and Photoconductivity Measurement of Mesoscopic 2-D Patterned DNA.," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*., 371: 371-378 (2001)*

32) H. Sunami, K. Ijiro, O. Karthaus, S. Kraemer, S. Mittler, W.Knoll and M.Shimomura: "Nucleobase Mapping of Self-Assembled Monolayers by Chemical Force Microscopy.," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*., 371: 151-154 (2001)*

33) H. Ohno, S. Yoneyama, F. Nakamura, K. Fukuda, M. Hara and M. Shimomura: "Optical Waveguide Spectrometry of Acridine Orange in Monolayer and Langmuir-Blodgett Film," *Langmuir*, 18(5): 1661-1665 (2002)*

34) J. Matsumoto, K. Ijiro and M. Shimomura: "Photopolymerization of the Diacetylene Nucleobase Monolayers Controlled by Triplex Formation," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*., 371: 33-36 (2001)*

35) O. Karthaus, H. Yabu, T. Koito, K. Akagi and M. Shimomura: "Substrate Effect on the Surface Structures of Liquid Crystalline Polymers," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*, 370: 353-358 (2001)*

36) M. Morisue, K. Ijiro and M. Shimomura: "Two-Dimensional Nucleobase Self-Organization Supported by Base-Pairing and Stacking at the Air-Water Interface.," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*., 371: 379-382 (2001)*

37) T. Sawadaishi, K. Ijiro, M. Shimomura, Y. Shiraishi, N. Toshima, T. Yonezawa and T. Kunitake: "Two-Dimensional Patterning of Nanoparticles Using Dissipative Structures.," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*., 371: 123-126 (2001)*

38) O. Karthaus, H. Yabu, K. Akagi and M. Shimomura: "Mesoscopic Surface Structures in Dewetted Films of Liquid Crystalline Polymers.," *Mol. Cryst. Liq. Cryst*., 364: 395-401 (2001)*

39) K. Ijiro, H. Sunami, K. Arai, J. Matsumoto, O. Karthaus, S. Kraemer, S. Mittler, N. Nishi, B. Juskowiak, S. Takenaka, W. Knoll and M. Shimomura: "Base_pair mapping by chemical force microscopy on nucleobase self-assembled monolayers," *Colloids and Surfaces*, A(198-200): 677-682 (2002)*

40) J. Nishida, J. Matsumoto, M. Morisue, K. Ijiro and M. Shimomura: "Circular Arrangement of Azobenzene Chromophores in the Nucleoamphiphile Monolayer by Base-Pairing with Cyclic DNA", *International Journal of Nanoscience,* 1(5-6): 667-681 (2002)

41) K. Ijiro, J. Matsumoto, M. Morisue and M. Shimomura: "Controlled Aggregation of Azobenzene Based on DNA-Mimetics at the Air-Water Interface", *International Journal of Nanoscience,* 1(5-6): 597-601 (2002)

42) Y. Hashimoto, K. Ijiro, t. Sawadaishi and M. Shimomura: "Electric Conductivity of Nucleic Acid Polymer Monolayer", *International Journal of Nanoscience,* 1(5-6): 707-711 (2002)

43) T. Nishikawa, R. Ookura, J. Nishida, K. Arai, J. Hayashi, N. Kurono, t. Sawadaishi, M. Hara and M. Shimomura: "Fabrication of Honyecomb Film of an Amphiphilic Copolymer at the Air-Water Interface", *Langmuir*, 18(15): 5734-5740 (2002)

44) H. Sunami, K. Ijiro and M. Shimomura: "Molecular Recognition of Nucleobeses Attached to Self-Assembled Monolayers Detected by Chemical Rrce Microscopy and Quartz Crystal Microbalance", *International Journal of Nanoscience,* 1(5-6): 667-671 (2002)

45) J. Nishida, K. Nishikawa, S. -I. Nishimura, S. Wada, T. Karino, T. Nishikawa, K. Ijiro and M. Shimomura: "Preparation of Self-Organized Micro-Patterned Polymer Films Having Cell Adhesive Ligands", *Polymer Journal,* 34(3): 166-174 (2002)

46) K. Sato, M. Tanaka, m. Takebayashi, K. Nishikawa and M. Shimomura: "Preparation of the patterned film of biodegradable polymer for tissue engineering scaffolds", *International Journal of Nanoscience,* 1(5-6): 689-693 (2002)

47) Y. Matsuo, K. Ijiro and M. Shimomura: "Stretching of Single DNA Molecules by Langmuir-Blodgett Method", *International Journal of Nanoscience,* 1(5-6): 695-699 (2002)

48) 橋本裕一、澤田石哲郎、居城邦治、下村政嗣：「導電性原子間力顕微鏡を用いたポリチオフェン細線の微小領域光導電性測定」、高分子論文集、59(10)：651-655 (2002)

4.2 総説、解説、評論等

1) 下村政嗣、居城邦治：「DNAの二次元配列と光機能化」高分子、46、334 (1997)

2) 下村政嗣：「研究室へようこそ」化学、52、No.4、37 (1997)

3) 下村政嗣：「リソグラフィーを使わない高分子のマクロ加工」、化学、55(1)：70-71 (2000)

4) 居城邦治：「さきがけ研究　DNAを鋳型とした機能性分子の配列制御」、高分子、49：781-781 (2000)

5) 西川雄大、西川和孝、大倉隆介、西田仁、大久保尚、蒲池浩文、松下通明、藤堂省、下村政嗣：「両親媒性高分子の自己組織化による人工細胞外マトリックスの構築」、高分子加工、1：10-15 (2001)

6) 居城邦治、松本仁、森末光彦、三田村リカ、沢田石哲郎、下村政嗣：「自己組織性を利用したDNAのインテリジェント化」、高分子加工、2：81-87 (2001)

7) 下村政嗣、西田仁、西川雄大：「有機材料の機能化における最近の動向―バイオインターフェースに向けて―」、真空、44(2)：65-72 (2001)

8) 下村政嗣：「ナノテクノロジー―欧米の研究動向―」、高分子、50：300-303 (2001)

9) 松本仁、居城邦治、下村政嗣：「二次元DNA-mimeticsの鋳型重合」、光化学、32：1-6 (2001)*

10) T. Nishikawa, R. Ookura, J. NIshida, T. Sawadaishi and M. Shimomura: "Honeycomb film of an amphiphilic copolymer: Fabrication and characterization," *RIKEN Review*, 37: 43-47 (2001)*

11) 下村政嗣：「分子の自己組織化でデバイスを創ることができるだろうか―」、化学、57：17-20 (2002)

12) 居城邦治：「DNA1分子の塩基配列を解析する」、化学と教育、50(7)：507-509 (2002)

13) 居城邦治、松本仁、西田仁、森末光彦、下村政嗣：「環状DNAを用いた人工光合成アンテナ系構築に向けて」、化学工業、53(7)：17-21 (2002)

14) 田中賢、竹林允史、深山真史、佐藤雄久、長谷部清、大久保尚、蒲池浩文、河合朋昭、松下通明、藤堂省、西川雄大、下村政嗣：「新しいバイオメディカルインターフェイス―高秩序多孔質薄膜の自発的形成―」、化学工業、53(12)：901-906 (2002)

4.3 著書

1) M. Shimomura: "Hierarchical Structuring of Nanostructured Two-dimensional Polymer Assemblies." In Chemistry for the 21st Century-Organic Mesoscopic Chemistry, Ed. By Masuhara, H., De Schryver, F. C. (IUPAC monograph, Blackwell Science) pp. 107-126 (1999)

2) M. Shimomura: "Architecture and Applications of Films Based on Surfactants and Polymers." In Supramolecular Polymers, Ed. by A.Ciferri (Marcel Dekker) pp.471-504 (2000)

3) 下村政嗣：「時空間機能材料＝パターン制御」、『二千年紀の有機エレクトロニクス材料の方向を探る』、(ぶんしん出版) pp.156-167 (2000)

4) M. Shimomura, N. Maruyama, T. Koito and O. Karthaus: "Mesoscopic Pattern Formation of Nanostructured Polymer Assemblies." In Hyper-Structured Molecules: Chemistry, Physics and Applications, Ed. by H. Sasabe (Gordon and Breach Science Publishers, UK) pp.163-177 (2001)

5) M. Morisue, K. Ijiro and M. Shimomura: "Fine Tuning of Chromophore Orientation Due to Hydrogen Bond Formation in Nucleobase-Terminated Azobenzen Monolayers," In Studies in Surface Science and Catalysis 132, Ed. by Y. Iwasawa, N. Oyama and H. Kunieda (Elsevier Scinece B. V.) pp. 549-552 (2001)*

6) M. Shimomura, N. Maruyama, T. Koito and O. Karthaus: "Mesoscopic Pattern Formation of Nanostructured Polymer Assemblies," In Hyper-Structured Molecules: Chemistry, Physics and Applications, Ed. by H. Sasabe, (Gordon and Breach Science Publishers, UK) pp.163-177 (2001)

7) K. Ijiro, J. Matsumoto and M. Shimomura: "Molecular Assemblies Based on DNA-Mimetics: Effect of Monolayer Matrix on Photopolymerization of Diacetylene-containing Nucleobase Monolayers," In Studies in Surface Science and Catalysis 132, Ed. by Y. Iwasawa, N. Oyama and H. Kunieda (Elsevier Scinece B. V) pp.481-484 (2001)*

8) T. Nishikawa, J. Nishida, K. Nishikawa, R. Ookura, H. Ookubo, H. Kamachi, M. Matsushita, S. Todo, and M. Shimomura: "Novel Cell Culture Substrates based on Micro-Porous Films of Amphiphilic Polymers," In Studies in Surface Science and Catalysis 132, Ed. by Y. Iwasawa, N. Oyama and H. Kunieda (Elssevier Scinece B. V.) pp.509-512 (2001)*

4.4 特許（発明者、特許番号、特許名、出願年月日）

1) 下村政嗣、居城邦治、特願平9-340380、導電性核酸ポ

リマー、1997年12月10日
2）下村政嗣、居城邦治、特願平9-340381、遺伝子センサー、1997年12月10日
3）下村政嗣、西川雄大、望月明、田中賢、特願1999-157574、ハニカム構造体およびその調整方法、ならびにその構造体を用いたフィルムおよび細胞培養基材、1999年11月30日
4）田中賢、徳永則文、特願2001-323030、共重合体およびこれを用いた血液フィルター、2000年5月17日
5）田中賢、落合庄司、徳永則文、野口由紀子、特願2000-105136、抗血栓性表面処理剤および医療用具、2000年9月29日
6）田中賢、鮫島正、特願2000-159292、標的物質の分離回収方法、2000年11月29日
7）M. Tanaka、US09/858564, Antithrombotic Surface Treating Agent and Medical Apparatus, 2001年5月1日
8）下村政嗣、藪浩、特願2001-273294、ポリイミド多孔質膜およびその製造法、2001年9月10日
9）下村政嗣、澤田石哲郎、玉木浩一、黒野暢仁、小山珠美、室伏克巳、白根浩朗、特願2001-325367、自己組織化有機薄膜を有する構造体、2001年10月23日
10）下村政嗣、居城邦治、小山珠美、特願2001-337318、DNA分子の伸長固定化方法、2001年11月2日
11）田中賢、下村政嗣、境野佳樹、伊藤敏古、寺島薫、2001-342484、血液濾過方法、2001年11月7日
12）下村政嗣、藪浩、田口敏樹、事特番号31-1570、微細光パターン及びその製造方法、微細パターンを用いた、発光素子、光学デバイス、電子デバイス、2001年11月7日
13）下村政嗣、田中賢、藪浩、竹林允史、門田隆二、小山珠美、細田喜一、坂口雅司、2002-17468、複合金属材料およびその製造方法、エッチングされた金属材料およびその製造方法、ならびに電解コンデンサ、2002年1月25日
14）居城邦治、松本仁、下村政嗣、2002-263434、有機超薄膜とその累積体並びにその製造方法、2002年9月9日
15）安斎崇王、中川雄司、田中賢、特願2002-332138、血液適合性高分子およびこれを用いた医療用具、2002年11月15日
16）下村政嗣、田中賢、藪浩、田畑憲一、特願2002-341855、塞栓微粒子材料の製造方法、2002年11月26日
17）田中賢、下村政嗣、竹林允史、特願2002-344513、微細突起構造およびその形成方法、2002年11月27日
18）K. Ijiro and M. Shimomura (America)、S. N. 08/966, 403、METHOD FOR DETECTING NUCLEIC ACID POLYMER、1997年10月7日

4.5 招請講演

1）M. Shimomura, M.: "Molecular Architecture and Function of Inorganic Self-Assembled Multilayers" The 59th Okazaki Conference, Okazaki, August 7, (1997).
2）Shimomura, M.: "Mesoscopic Patterning of Nanostructured Polyion Complexes by Freezing of Dissipative Structure" The Eighth International Conference on Organized Molecular Films, Asilomar, August 24-29, (1997).
3）Shimomura, M.: "Mesoscopic Pattern Formation of Nanostructured Polymer Assemblies." The 11th Toyota Conference, Shizuoka, November 5-8, (1997).
4）Shimomura, M.: "Photonic and Electronic Applications of Mesoscopic Polymer Assemblies" 3rd Japan-France Joint Forum on Organic Materials for Electronics and Photonics, Tsukuba, April 6, (1998).
5）Shimomura, M.: "Mesoscopic Ordering of Nanostructured Polymer Assemblies" International Forum on New Frontiers in Functional Organic Nanomaterials, Munich, June 24, (1998).
6）Shimomura, M.: "Hierarchically Structured Polymer Assemblies as Organic Photonics Materials" Korean-Japan Joint Forum '98 Organic Materials for Electronics and Photonics, Sapporo, June 30, (1998).
7）Shimomura, M.: "Hierarchical Structuring and Mesoscopic Patterning of Polymer Assemblies Based on Self-organization" Xiangshan Science Conference on Supramolecular Systems, Beijing, October 16, (1998).
8）Shimomura, M., Ikeda, T., Fukazawa, T., Hasaebe, K., and Ijiro, K.: "Can DNA Enhance Photoinduced Electron Transfer from Acridine Monolayer to ITO Electrode?" The 2nd Asian Symposium on Organized Molecular Films for Electronics and Photonics, Beijing, November 1, (1998).
9）Shimomura, M.: "Immobilized DNA as Molecular Photonics Devices. Photoinduced Electron Transfer in DNA Assemblies," NAIST International Symposium on Nano- and Biotechnology for Future Devices, Nara, November 25, (1998).
10）Shimomura, M.: "Preparation of Two-dimensional DNA-mimetics for Molecular Photonics," 1st RIKEN Conference on Molecular Design, Hayama, December 7, (1998).
11）下村政嗣；「超分子の組織化と機能」第47回高分子討論会、名古屋（1998）
12）下村政嗣：「DNAおよびDNA—mimeticsで修飾した電極の機能化」、電気化学会第66回学術講演会、横浜、日本（1999-4）

13) 下村政嗣：「ポリマーキャスト膜の自己組織的凝集構造」、ナノプローブテクノロジー第167委員会「第9回研究会」、東京、日本（1999-5）
14) M. Shimomura: "Preparation of DNA-Based Molecular Assemblies By Self-Organization. From Nanomerer Scale to Mesoscopic Scale," CREST, JST 4th International Forum on Hyper-Structured Molecules for Organic Quantum Device Applications, Kanagawa, Japan (1999-6)
15) 下村政嗣：「散逸構造を利用した微粒子のメゾスコピックパターンニング」、第3回「単一微粒子光科学」シンポジウム、札幌、日本（1999-7）
16) M. Shimomura: "Novel Photonic and Electronic Devices Based on DNA and DNA Mimetics," Chitose International Forum on Photonic Sciences, Chitose, Japan (1999-10)
17) M. Shimomura, T. Nishikawa, S. Wada, T. Karino, J. Nishida, K. Nishikawa, R. Ookura, S. Nishimura, H. Ookubo, M. Matsushita and S. Todo: "Mesoscopic Patterning of Biomedical Polymers. A Novel Approach for Designing Biologically Active Interface," Biomedical Polymers for 21st Century, Tomakomai, Japan (1999-11)
18) M. Shimomura, J. Matsumoto, M. Morisue and K. Ijiro: "DNA-mimetics as Novel Electrophotonic materials," 6th China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics, Beijing, China (1999-12)
19) Tetsuro Sawadaishi, Kuniharu Ijiro, Masatsugu Shimomura, Yukihide Shiraishi, Naoki Toshima, Tetsu Yonezawa and Toyoki Kunitake: "Two-Dimensional Patterning of Nanoparticles Using Dissipative Structure," 8th JST International Symposium Molecular Processes in Small Time and Space Domains, Nara, Japan (2000-3)
20) 下村政嗣：「超分子の設計と界面での分子認識」、日本化学会第78春季年会、千葉、日本（2000-3）
21) 居城邦治：「DNAの構造を模倣した気水界面単分子膜の作製とその光機能」、反応研若手交流講演会、宮城、日本（2000-4）
22) 居城邦治：「DNAのインテリジェント化」、第49回高分子学会年次大会、愛知、日本（2000-5）
23) 下村政嗣：「水を鋳型とする高分子マイクロ加工」、第20回高分子と水に関する研究会講座、東京、日本（2000-6）
24) 下村政嗣：「DNAを用いた分子配向制御」、日本学術振興会142委員会、埼玉、日本（2000-10）
25) M. Shimomura and T. Sawadaishi: "Mesoscopic Patterning of Nanoparticles using Dissipative Structures,"「ナノ構造物質とその機能」ポストシンポジウム, Sapporo, Japan (2000-11)
26) 下村政嗣：「時空間機能材料―散逸構造を使って新しい材料を創る―」、理研と親しむ会、東京、日本(2000-11)
27) 下村政嗣：「散逸構造を利用した高分子の階層的構造化」、日本化学会第79春季年会、兵庫、日本(2001-3)
28) M. Shimomura: "Mesoscopic patterning of polymers based on dissipative structures," The Second RIES-Hokudai Symposium, Sapporo, Japan (2001-3)
29) 下村政嗣：「散逸構造を利用したフォトニクス材料の創製」、2001年春季応用物理学会学術講演会、東京、日本（2001-3）
30) 下村政嗣：「ナノテクノロジーにおけるモレキュラーアッセンブリー　―自己組織化によるボトムアップ戦略―」、2001-1　高分子学会講演会　主題：「ナノテクノロジーを支える高分子」、東京工業大学（2001-7）
31) Masatsugu Shimomura: "Mesoscopic Patterning and Hierarchical Structuring of Polymers and Nanoparticles Based on Dissipative Structures," Pattens and Wave, Leiden, Germany (2001-9)
32) M. Shimomura, J. Matsumoto and K. Ijiro: "DNA-mimetics:Towards a Novel Molecular Ddevices Having Molecular Information," ISCOM, Rusutsu, Japan (2001-9)
33) 居城邦治・角南寛・下村政嗣：「AFMを用いた核酸塩基対形成のマッピング」、第16回生体関連シンポジウム若手フォラム、東京大学（2001-9）
34) 下村政嗣：「自己組織化を用いた分子集合体の階層的構造化」、日本化学会第80回秋季年会、千葉大学西千葉キャンパス（2001-9）
35) 田中賢：「自己組織化ポーラスポリマーネットによるバイオインターフェイスの構築」、多元物質科学研究所反応研棟若手交流講演会、東北大学（2001-12）
36) 居城邦治：「水面単分子膜を用いたDNAの配向固定化」、生研機構プロジェクト中間検討会、幕張（2001-12）
37) Kuniharu Ijiro: "Immobilized DNA and DNA-Mimetics towards Novel Molecular Devices with Molecular Information," DNA/RNA/Protein for Nanotechnology, Tokyo, Japan (2002-2)
38) 下村政嗣、居城邦治、田中賢：「自己組織化によるメディカル―ナノデバイスの作製―」、21世紀COEシンポ、札幌（2003-2）
39) 居城邦治：「DNAおよびDNAミメティクスを用いた機能性分子組織体の構築」、第1回界面ナノアーキテクトニクスワークショップ、産業技術総合研究所つくばセンター（2002-3）

4.6　シンポジウムの開催（組織者、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

a．国際シンポジウム

1）下村政嗣（電子機能素子部門）、雀部博之（電子情報処理部門・客員研究分野）：Frontiers in Photonics, Electronics & Materials Science in Hokkaido from Molecules to Devices（60名、フジヤサンタスホテル）（1999.1.28-29）

2）下村政嗣（電子機能素子部門）、雀部博之（電子情報処理部門・客員研究分野）：有機材料のエレクトロニクス・フォトニクス応用に関する日韓ジョイントフォーラム（約100名、北海道大学・学術交流会館）（1998.6.30-7.1）

b．一般のシンポジウム

1）下村政嗣（電子機能素子部門）、雀部博之（電子情報処理部門・客員研究分野）：電子科学研究所　公開シンポジウム・第2回フロンティア時空間機能材料研究フォーラム　ジョイントシンポジウム（80名、北海道大学・学術交流会館）（1998.1.21-22）

2）居城邦治（電子機能素子部門）：日本化学会生体機能関連化学部会若手フォーラム（50名、北海道大学電子科学研究所）（1999.9.22）

3）下村政嗣（電子機能素子部門）：日本化学会「DNAと超分子化学の接点」（150名、北海道大学）（1999.9.25-26）

4）下村政嗣（電子機能素子部門）：有機エレクトロニクス材料研究会「二千年紀の有機エレクトロニクス材料の方向を探る」（50名、支笏湖観光ホテル）（2000.7.6-8）

5）下村政嗣（電子機能素子部門）：日本化学会「ナノ構造物質とその機能」に関するポストシンポジウム（59名、札幌ガーデンパレスホテル）（2000.11.10-11）

6）下村政嗣（電子機能素子部門）：フロンティア一北海道ナノテクノロジー・サイエンスジョイントフォーラム（70名、函館啄木亭）（2000.12.6-8）

7）下村政嗣（電子機能素子部門）：北海道ナノテクフォーラム（50名、北海道大学電子科学研究所）（2001.2.24）

8）下村政嗣（電子機能素子部門）：北海道/理化学研究所ジョイントフォーラム（150名、ホテル札幌ガーデンパレス）（2002.2.4-5）

4.7　予算獲得状況（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額）

a．科学研究費補助金

1）下村政嗣、重点(2)、高分子一単分子膜複合体を用いた分子クラスタの配列制御、2,000千円（1997）

2）下村政嗣、重点(2)、分子量が制御された高分子を鋳型とする単分子膜の重合、2,200千円（1997）

3）下村政嗣、重点(2)、分子認識機能電極のメゾスコピックパターンニング、1,900千円（1997）

4）下村政嗣、基盤A　一般(2)、単一分子DNAの配向固定化技術とその高感度検出法の開発、32,500千円（1997）

5）下村政嗣、基盤B　展開(2)、LB膜を用いたマルチチャンネル型オプティカルセンサによるイオンのパターン認識、1,000千円（1997）

6）居城邦治、奨励A、原子間力顕微鏡を用いた単一DNAの二次元導電性測定、1,000千円（1997）

7）西川雄大、奨励A、自己組織性多糖のメゾスコピックパターニング、1,500千円（1997）

8）Karthaus, Olaf、奨励A、固体表面における高分子の自発的な組織化とパターン形成、1,300千円（1997）

9）下村政嗣、特定A(2)、分子量が制御された高分子を鋳型とする単分子膜の重合、2,100千円（1998）

10）下村政嗣、特定A(2)、分子認識機能電極のメゾスコピックパターンニング、1,400千円（1998）

11）下村政嗣、特定A(2)、相補的核酸塩基対ナノ組織体中の電子移動、2,000千円（1998）

12）下村政嗣、基盤A一般(2)、単一分子DNAの配向固定化技術とその高感度検出法の開発、9,400千円（1998）

13）居城邦治、奨励A、原子間力顕微鏡を用いた単一DNAの二次元導電性測定、1,100千円（1998）

14）西川雄大、奨励A、自己組織性多糖のメゾスコピックパターニング、900千円（1998）

15）Karthaus, Olaf、奨励A、固体表面における高分子の自発的な組織化とパターン形成、700千円（1998）

16）下村政嗣、国際学術研究共同研究、高分子コンプレックスの階層的なメゾスコピック構造の構築、2,200千円（1998）

17）下村政嗣、特定A(2)、分子認識機能電極のメゾスコピックパターンニング1,700千円（1999）

18）下村政嗣、特定A(2)、相補的核酸塩基対ナノ組織対中の電子移動、2,200千円（1999）

19）下村政嗣、特定A(2)、散逸構造を利用した分子フォトニクス材料の創製、1,500千円（1999）

20）カートハウス・オラフ、特定領域A(2)、高分子の自己組織化によるナノパターニングとフォトニクス材料への応用、2,000千円（1999）

21）下村政嗣、特定B(2)、一次元・電子系の集積化とそのコヒーレント光化学反応特性、3,700千円（1999）

22）下村政嗣、基盤B(2)、高分子コンプレックスの階層的なメゾスコピック構造の構築、2,200千円（1999）

23）居城邦治、奨励A、近接場プローブ顕微鏡を用いた単一DNA分子のセンシング、1,300千円（1999）

24）カートハウス・オラフ、奨励A、新しいミクロンサイズ機能性高分子パターン、1,300千円（1999）

25）下村政嗣、特定A(2)、散逸構造を利用した分子フォトニクス材料の創製、2,200千円（2000）

26）下村政嗣、特定B(2)、一次元π電子系の集積化とそのコヒーレント光化学反応特性、17,900千円（2000）

27）居城邦治、基盤B(2)、光誘起電子移動反応を利用した遺伝子の無標識高感度分析法の開発、8,800千円

(2000)
28) 下村政嗣、基盤C　一般(2)、分子性機能材料・単一デバイスとしての新展開、3,300千円（2000）
29) 居城邦治、奨励A、近接場プローブ顕微鏡を用いた単一分子のセンシング、900千円（2000）
30) 下村政嗣、特定B(2)、一次元・電子系の集積化とそのコヒーレント光化学反応特性、16,400千円（2001）
31) 居城邦治、基盤B　展開(2)、光誘起電子移動反応を利用した遺伝子の無標識高感度分析法の開発、4,600千円（2001）
32) 田中賢、基盤B　展開(2)、3次元微細光ファブリケーションによる組織工学材料の設計・開発、10,400千円(2001)
33) 居城邦治、萌芽(2)、塩基対形成で組織化したジアセチレンアレーによる単一分子ワイヤーの作製と導電性測定、1,000千円（2001）
34) 田中賢、奨励A(2)、自己支持性ハニカムネットを用いた選択的細胞分離法の開発、1,600千円（2001）
35) 居城邦治、基盤B(2)、DNAを鋳型とした半導体ナノ微粒子の自己組織化によるナノデバイスの作製、8,800千円（2002）
36) 居城邦治、萌芽、塩基対形成で組織化したジアセチレンアレーによる単一分子ワイヤーの作製と導電性測定、1,200千円（2002）
37) 田中賢、基盤B(2)、3次元微細光ファブリケーションによる組織工学材料の設計・開発、900千円（2002）
38) 田中賢、奨励A、自己支持性ハニカムネットを用いた選択的細胞分離法の開発、800千円（2002）

b．奨学寄附金（研究助成金）

1）西川雄大、㈶花王芸術・科学財団、細胞培養におけるマイクロパターン化された接着面の効果に関する研究、1,000千円（1999）
2）下村政嗣：㈱ユーエスアイシステム、2,600千円(1997)
3）下村政嗣：㈱ユーエスアイシステム、1,800千円(1998)
4）下村政嗣：㈱ユーエスアイシステム、800千円（1999）
5）下村政嗣：日産化学工業㈱、600千円（2001）
6）下村政嗣：フジ写真フィルム㈱、1,000千円（2001）
7）田中賢：テルモ㈱、500千円（2001）
8）下村政嗣：昭和電工㈱、500千円（2002）
9）下村政嗣：㈱巴川製紙所、500千円（2002）
10）下村政嗣：フジ写真フィルム㈱、1,000千円（2002）
11）下村政嗣：帝人㈱、1,000千円（2002）
12）下村政嗣：JSR㈱、400千円（2002）
13）下村政嗣：東レ㈱、1,500千円（2002）
14）下村政嗣：三井化学㈱、2,500千円（2002）
15）田中賢：テルモ㈱、500千円（2002）

c．受託研究費

1）居城邦治、科学技術振興事業団、「二次元に秩序配向したDNAを場とする電子移動反応」、2,000千円(1997)
2）居城邦治：科学技術振興事業団、「二次元に秩序配向したDNAを場とする電子移動反応」、2,000千円(1997)
3）下村政嗣：㈶北海道科学・産業技術振興財団、「鮭を中心としたDNAフィルムの光電変換機能の評価」、10,987千円（1999）
4）下村政嗣：科学技術振興事業団、「DNAの化学ドーピングによる超構造分子の創製」、1,000千円（1999）
5）下村政嗣：㈶北海道科学・産業技術振興財団、「鮭を中心としたDNAフィルムの光電変換機能の評価」、9,834千円（2000）
6）下村政嗣：科学技術振興事業団CREST、「DNAの化学ドーピングによる超構造分子の創製」、495千円(2000)
7）居城邦治：科学技術振興事業団TRESTO、「環状DNAを用いた人工光合成系の構築」、1,000千円(2000)
8）居城邦治：科学技術振興事業団TRESTO、「環状DNAを用いた人工光合成系の構築」、1,000千円(2001)
9）田中賢：科学技術振興事業団さきがけ研究21、「バイオインターフェイスにおいて組織化された水分子の機能」、400千円（2001）
10）下村政嗣：農水省食品総合研究所、「生物機能の革新的利用のためのナノテクノロジー・材料技術の開発」、4,980千円（2002）
11）下村政嗣：科学技術振興事業団CREST、「高分子の階層的自己組織化による再生医療用ナノ構造材料の創製」、1,100千円（2002）
12）居城邦治：科学技術振興事業団TRESTO、「環状DNAを用いた人工光合成系の構築」、390千円(2002)
13）田中賢：科学技術振興事業団さきがけ研究21、「バイオインターフェイスにおいて組織化された水分子の機能」、910千円（2002）

d．その他

1）下村政嗣：日本学術振興会日独科学協力事業、「秩序化された表面を用いた高分子の組織化」、1,528千円(1997)
2）居城邦治：科学技術振興事業団さきがけ研究21、「二次元に秩序配向したDNAを場とする電子移動反応」、2,300千円（1997）
3）下村政嗣：科学技術振興事業団、「DNAの化学ドーピングによる超構造分子の創製」、4,000千円（1999）
4）下村政嗣：科学技術振興事業団CREST、「DNAの化学ドーピングによる超構造分子の創製」、7,505千円(2000)
5）居城邦治：科学技術振興事業団TRESTO、「環状DNAを用いた人工光合成系の構築」、29,660千円(2000)
6）下村政嗣：㈶北海道科学・産業技術振興財団、「鮭を中心としたDNAフィルムの光電変換機能の評価」、9,821千円（2001）
7）居城邦治：科学技術振興事業団TRESTO、「環状DNAを用いた人工光合成系の構築」、24,280千円(2001)
8）田中賢：科学技術振興事業団さきがけ研究21、「バイ

オインターフェイスにおいて組織化された水分子の機能」、32,000千円（2001）
9）下村政嗣：科学技術振興事業団CREST、「高分子の階層的自己組織化による再生医療用ナノ構造材料の創製」、56,400千円（2002）
10）居城邦治：科学技術振興事業団TRESTO、「環状DNAを用いた人工光合成系の構築」、23,290千円(2002)
11）田中賢：科学技術振興事業団さきがけ研究21、「バイオインターフェイスにおいて組織化された水分子の機能」、40,000千円（2002）

4.8 共同研究（研究者、部門名、研究課題、成果・内容、期間）

a．所内共同研究

1）下村政嗣、居城邦治（電子機能素子部門）、西浦廉政、小林亮（電子情報処理部門）：「単分子膜における2次元デンドライト結晶成長のモデル化と機構解明」（1997～1998年度）
2）下村政嗣、カートハウス・オラフ(電子機能素子部門)、西浦廉政、小林亮(電子情報処理部門)：「メゾスコピックパターン形成機構の非平衡ダイナミクスによる解析」（1997～1998年度）
3）太田信廣(電子材料物性部門)、下村政嗣、上田哲男(電子機能素子部門)：光が絡む分子材料と生体機能：時空間分解電場吸収・電場発光測定に基づいて（2001～2002年度）
4）青沼仁志、丹羽光一、中島崇行、田中賢、西野浩史：昆虫の神経細胞を用いた培養系による神経回路網の再構築と（2002～2004年度）
5）太田信廣、下村政嗣、上田哲男：光が絡む分子材料と生体機能：時空間分解電場吸収・電場発光測定に基づいて（2001～2002年度）

b．民間等との共同研究

1）田中賢、科学技術振興事業団さきがけ研究21：バイオインターフェイスにおいて組織化された水分子の機能、32,000千円（2001～2003年度）

c．大型プロジェクト・受託研究

1）下村政嗣(電子機能素子部門)、戦略的基礎研究推進事業　科学技術振興事業団：DNAの化学ドーピングによる超構造分子の創製、1,495千円（1999～2000）
2）下村政嗣(電子機能素子部門)、振興調整費地域先導事業　北海道科学・産業技術振興事業団：鮭を中心としたDNAフィルムの光電変換機能の評価、30,821千円(1999～2001)
3）居城邦治(電子機能素子部門)、若手研究者研究推進事業　科学技術振興事業団：環状DNAを用いた人工光合成系の構築、3,000千円（2000～2003）
4）居城邦治(電子機能素子部門)、若手研究者研究推進事業　科学技術振興事業団：環状DNAを用いた人工光合成系の構築、2,000千円（2001年度1,000千円）（2000～2001年度）
5）田中賢（電子機能素子部門)、若手個人研究推進事業科学技術振興事業団：バイオインターフェイスにおいて組織化された水分子の機能、520千円（2001年度）

d．国際共同研究

1）下村政嗣(電子機能素子部門)、日本学術振興会日独科学協力事業(共同研究)：秩序化された表面を用いた高分子の組織化、1,513千円（平成7年度)、3,792千円（平成8年度)、1,528千円(平成9年度)（1995～1997）
2）下村政嗣(電子機能素子部門)、文部省科学研究費補助金(国際学術研究)：高分子コンプレックスの階層的なメゾスコピック構造の構築、2,200千円（1998年度)、2,200千円（1999年度）（1998～1999）

e．科学技術振興調整費

1）下村政嗣（電子機能素子部門)：鮭を中心としたDNAフィルムの光電変換機能の評価、30,642千円(2001年度9,821千円)（1999～2001年度（1999、2000年度は㈱北海道科学・産業技術振興財団から受託研究として受入れ))

4.9 受賞（氏名、受賞内容、受賞年・月）

1）下村政嗣：日本化学会第18回学術賞「自己組織化を用いた分子集合の階層的構造化」(日本化学会)（2001.3）
2）Karthaus Olaf：日本化学会第70会春季年会講演奨励賞「光をトリガーとする単分子膜の可逆的相変化」(日本化学会)（1996.4.22）
3）居城邦治：日本化学会第71回秋季年会シンポジウム賞「表面プラズモン共鳴による核酸塩基対形成の観察」(日本化学会)（1997.1.14）
4）小糸健夫：第一回卒業研究経過報告会最優秀ポスター賞（北海道大学理学部生物科学科）（1997.2.10）
5）居城邦治：高分子学会奨励賞（高分子学会）（1997.5.25）
6）中村史夫：日本MRS学術シンポジウム奨励賞「Organization of DNA-mimetics at the Air-Water Interface」（日本MRS）（1997.12.11）
7）新井景子：第二回卒業研究経過報告会最優秀ポスター賞（北海道大学理学部生物科学科）（1998.2.16）
8）松本仁：XSCSS 98 Poster award（XSCSS）（1998.10.16-21）
9）三田村リカ：第三回卒業研究経過報告会最優秀発表賞（北海道大学理学部高分子機能学教室）（1999.2.15）
10）M. Takebayash: Korea Japan Joint Forum KJF2001 Organic Materials for Electronics and Photonics, Best Poster Award「Fabrication of regular porous polymer films for biomedical devices-Control of pore structure and size-」（KJF）（2001.9）
11）藪浩：XSCSS 2001 Poster award「Preparation of Honeycomb-Patterned Polyimide Films by Self-Organization」（XSCSS）（2001.10.19-21）

12) 田中賢：2002 春季第 61 回応用物理学会第 12 回応用物理学会講演奨励賞「規則的な孔径を有する自己組織化多孔性膜を用いたバイオインターフェイス」(応用物学会) (2002.3)
13) 竹林允史：第 81 日本化学会春季年会 2002 講演奨励賞「規則的な孔径を有する多孔性膜を用いた細胞分離」(日本化学会) (2002.3)
14) 佐藤雄久：第 83 日本化学会春季年会 2003 講演奨励賞「生分解性高分子を用いた多孔性 scaffold の作製と細胞接着・形態の変化」(2003.3.21)

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員（氏名、所属、役職、任期期間）

1）下村政嗣：通産省・厚生省共幹　医療福祉機器研究所開発委員（1997～）
2）下村政嗣：日本学術振興会情報科学用有機材料第 142 委員会委員（2001～）
3）下村政嗣：日本学術振興会分子ナノテクノロジー第 174 委員会委員（2001～）

b．国内外の学会の主要役職（氏名、所属、役職、任期期間）

1）下村政嗣：電気化学会評議員（1998）

c．新聞・テレビ等の報道

・新聞等（氏名、掲載内容、新聞社名、掲載年・月）

1）下村政嗣：日本工業新聞、「北大　高分子で微細パターン形成」1998 年 10 月 13 日
2）下村政嗣：工業日報、「ひと学界」「散逸構造に着目した分子デバイスの作成」1998 年 11 月 9 日
3）下村政嗣：科学新聞、「一次元パイ電子系分子を集積化」2000 年 1 月
4）下村政嗣：科学工業日報、「科学技術　自己組織化で多孔質膜」2001 年 10 月 22 日
5）下村政嗣：科学新聞、「人物百花　身近な〝散逸構造〟利用」2001 年 4 月 27 日
6）下村政嗣：日経先端技術、「理化学研究所・散逸階層構造研究チーム高分子や微粒子から格子を自在に作成」2002 年 2 月 11 日
7）下村政嗣、田中賢：科学工業日報「科学技術　自己組織化で多孔質膜」2001 年 10 月 22 日
8）下村政嗣：日経先端技術、「理化学研究所・散逸階層構造研究チーム高分子や微粒子から格子を自在に作成」2002 年 2 月 11 日
9）下村政嗣、田中賢：科学工業日報、「科学技術　自己組織化で多孔質膜」2001 年 10 月 22 日
10）下村政嗣：科学新聞、「人物百花　身近な〝散逸構造〟利用」2001 年 4 月 27 日

・テレビ報道

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）池田俊明：DNA 単分子膜中における光誘起電子移動 (1997)
2）丸山則彦：メゾスコピック領域における規則的高分子パターンの自発的形成（1997）
3）森末光彦：フォトクロミック分子の組織化と光反応制御（1997）
4）小糸健夫：光機能性高分子の自己組織化による二次元パターン作製（1998）
5）深澤忠：インターカレーター単分子膜を用いた核酸ポリマーの高感度検出法の開発（1998）
6）橋本裕一：DNA および RNA 薄膜の光導電性に関する研究（2001）
7）藪浩：自己組織化による高分子集合体のメゾスコピックパターン形成（2001）
8）新井景子：離散フーリエ変換を利用した周波数領域における画像処理コマンドの開発（1999）
9）大倉隆介：高分子の自己組織化による新規人工細胞外マトリックスの開発（1999）
10）三田村リカ：水面単分子膜を用いた DNA の配向・固定化とその単一分子検出に関する研究（2000）
11）佐藤雄久：生分解性高分子を用いたパターン化フィルムの作製と組織工学への応用（2002）

・博士学位

1）森末光彦：Organization of Two-Dimensional Chromophore Aggregates in Nucleobase Architectures (2000)
2）丸山則彦：Self-Organized Regular Patterns of Polymer Aggregates in Mesoscopic Scale (2000)
3）松本仁：Template Polymerization of Nucleobase Monolayer Having Diacetylene Group (2000)
4）西田仁：自己組織化に基づく細胞接着性リガンドのマイクロパターン固定化（2001）
5）西川和孝：パターン化された基板上での細胞接着挙動 (2001)

e．大学院講義科目

1）超分子化学特論 I（1997～2001）
2）超分子化学特論 II（1997～2002）
3）超分子化学概論（1997～2001）
4）特別講義（1999～2000）
5）総合講義（1999～2000）
6）論文購読III（2002）
7）論文購読 V（2002）
8）特別研究III（2002）

f．その他

1）田中賢：科学技術振興事業団　研究員（2001～2004）
2）下村政嗣：特定非営利活動法人　ホトニクスワールドコンソーシアム　理事（2001～2003）
3）居城邦治：科学技術振興事業団（2000～2003）

超分子分光研究分野

教授　田村　守（北大院、理博、1988.12～）
助教授　金城政孝（自治医大、医博、1997.4～）
助手　西村吾朗（阪大院、理博、1989.7～）
　　野村保友（北大院、理博、1991.4～2001.9）
講師　吉田直人（北大院、理博、2001.4～2003.3）（研究機関研究員）
リサーチ・アソシエイト
　　星　詳子（秋田大、医博、1998.8～2000.3）
　　田野崎真人（弘前大、医博、2000.4～2000.7）
　　島田美帆（筑波大院、工博、2001.4～2002.3）
技官　大沼英雄（1997～2000）

院生
・平成9－14年度
博士課程
弓野邦夫、吉田直人、中山憲司、白　燦基、群　俊志、鈴木知晴、佐藤知絵、高澤　啓、藤井文彦、近岡洋子、齋藤健太、山田純史、伊藤隆志、矢部芳治
修士課程
南ゆかり、山田純史、武都拓也、河村崇史、三國新太郎、西村公貴

1．研究目的

〝脳と光と遺伝子〞を中心とした生体分光学に関する基礎及び応用研究を行う。一般的に生体が営む多彩な機能は、生体高分子－細胞－組織－個体と複雑な階層構造を持ち、その機能はその構造と密接に結びつく。この生体を外部から無侵襲で計測する技術の中で、特に光を利用した手法は、広く医用光学と呼ばれ近年急激に発展している。当研究分野はこの医用光学の新たな開拓を行う。特に近赤外領域の光の持つ生体透過性を利用した光イメージング法による脳機能解明と細胞内での単一分子診断を中心的課題とする。

生体は生体高分子―細胞―組織―個体と複雑な階層構造を持ち、その機能はその構造と密接に結びつく。この生体を外部から無侵襲で計測する技術の中で、特に光を利用した手法は、広く医用光学と呼ばれ近年急激に発展している。当研究分野はこの医用光学の新たな開拓を行う。特に近赤外領域の光の持つ生体透過性を利用した光イメージング法による脳機能解明と細胞内での単一分子診断を中心的課題とする。次に分子生物学的手法を取り入れ、〝脳と光と遺伝子〞を中心とした生体分光学に関する基礎研究を行い、その成果を広く医学分野に応用したい。

生体組織が営む多彩な機能を、蛋白質や核酸などの分子レベルから単一細胞や組織、そして個体レベルまで階層性を中心に解析する。このため、特に生体組織を生きたまま単一分子レベルで追跡可能な種々の光学技術の開発も行う。具体的目標は、

(a)　光学計測を中心とした脳、神経系の機能発現
(b)　単一分子診断法による細胞内情報伝達系の生きた丸ごとでの解析
(c)　光診断学の基礎研究と医学・生物学への応用
(d)　生体分光学の確立
(e)　機能画像を利用した人高次脳機能の解明

などである。これらを中心として、広く光技術と遺伝子工学を結びつけ生命機能の解明を目指す。

2．研究成果

・平成9－10年度

(a)　時間分解近赤外診断法の開拓

近赤外分光法による酸素濃度計測法の確立とCT化への基礎研究を行い、特に近赤外領域のピコ秒パルス光を用いた生体組織の散乱特性の解析とそれによるCT化への基礎データの集積を行った。またこれに基づき、時間分解光CT装置の試作と臨床応用を試みた。

(b)　脳機能の光計測法の開発

ラット灌流標本を用いて脳波等を手がかりとしながら種々の刺激に応じた応答と近赤外分光法による酸素変動の解析を行い、特に脳表での酸素化ヘモグロビンの変化をミリ秒の時間分解で計測することができた。

(c)　光イメージング法による高次脳機能の解明

光イメージング法による脳機能の解明を行い、特に高次機能の発現に伴う脳局所血流変動を連続的記録することができた。この結果は近赤外光による脳機能の画像化の道を拓いた。

(d)　蛍光相関分光法の確立と単一分子診断

蛍光相関分光法を用いて単一分子診断の可能性を検証した。特に遺伝子診断が可能であることを示し、また、広く本手法が蛋白質相互作用の研究や細胞や組織への応用が可能であることを示すことができた。

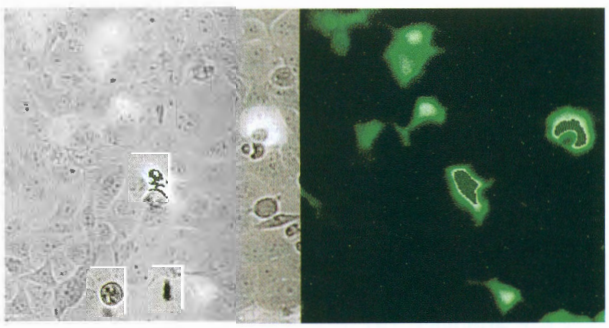


図1．蛍光相関分光法による細胞内単一分子検出を目的として蛍光性蛋白質（Green Fluorescent Protein）を遺伝子工学的に発現させた光る動物細胞（左：位相差像、右：蛍光像）

(e) 時間分解法による蛋白質及び細胞系での酸素濃度及びエネルギー状態の計測法の開発

ピコ秒分光システムを用いて紫外－可視領域での蛍光寿命測定から蛋白質の動的挙動や細胞レベルでの酸素濃度計測法を確立した。また、色素を用いたエネルギー状態の計測技術も合わせて開発し、顕微分光システムを作製した。これらの結果より、蛍光寿命測定法の医療診断への道を開くことができた。

(f) 分光学的手法を用いた生体エネルギー代謝の解析

ミトコンドリアや細胞レベルでエネルギー状態を反映する蛍光色素を用いて機能と代謝を解析し、脳や心臓、肝臓等に最終的に応用した。特に近赤外〝光造影剤〞の提案を行った。更に、NMR と分光学的計測法を併用して、ラット脳でのエネルギー代謝の解析と海馬を中心とした薬物の生理作用の検討を行い、NMR による酸素濃度測定法の開発を行った。

(g) レーザーを中心とした生体分光学の開発

紫外－可視－近赤外の全領域を用いた吸収、散乱、蛍光、リン光、化学発光による生体分光学の基礎研究を行い、その結果は、臨床用医療診断法に応用されている。次に、生体系における光散乱現象の解析を行った。レーザー干渉計を用いて生体組織での光の挙動を詳細に解析した。特に多重散乱現象に重点を置いて解析した。この結果は生体散乱の診断応用の可能性を示すことができた。

(h) マルチチャンネル近赤外分光装置の開発と高次脳機能計測

光 CT の前段階である 6 チャンネル近赤外分光装置を試作し、人高次機能計測に応用した。その結果、比較的複雑なタスク遂行時、脳局所の活動の時間的・空間的変動の連続追跡が可能となり、個々人での情報処理過程の差異を明らかにした。特に我々の装置を米国・NIH に運び、Cognitive Study に近赤外分光法が使用可能であることを各種のパラダイム下で詳細に検討した。

(i) 光 CT 装置の試作完了と本装置を用いた脳の定量的可視化

近赤外分光法の持つ最大の欠点である絶対値定量を時間分解光 CT 法を用いて克服することができた。これにより、単純な生理学的刺激のみならず、課題遂行などの複雑な刺激による神経興奮に伴う血行動態（血液量、酸素化ヘモグロビン、脱酸素化ヘモグロビン）の絶対値を画像表示できる。この手法によりはじめて多数の被験者間での近赤外画像の統計処理を導入することが可能となった。これにより fMRI や PET の統計画像と比較、検討が行える。

(j) 神経興奮--代謝変動のカップリング機構の基礎的検討—動物モデル系の作製と光学計測

脳表の光学的直接観察が可能な cranial window 及び thinned skull ラットを作製し、生理的刺激における脳活動部位での血行動態を時間的・空間的に追跡するシステムを完成させ、興奮に伴う脳組織の光散乱と真の吸光度変化を分離する手法を完成した。分光データーの解析結果より神経興奮とその後の酸素化及び脱酸素化ヘモグロビン、血流速度との間には時間的に大きな隔たりが存在することを見い出した。我々の光学的手法は今後、カップリング機構に関与した遺伝子改変マウス等の脳機能計測に用いることができる。

・平成 11－12 年度

(a) 前年度に引き続き、脳機能解明に必要な光計測法を動物レベル及び人への応用可能なイメージング方を開発した。

(b) 蛍光相関分光法の細胞内情報伝達系への応用

情報伝達系分子と発光性蛋白質を結合した遺伝子の発現系を確立した。本発現系と共焦点光学系及び FCS を用い、細胞内情報伝達系の可視化と動的挙動を解析した。

(c) 多光子蛍光相関分光システムの試作と応用。

多光子励起蛍光相関分光法システムを試作し、紫外領域での分子診断を試みた。

(d) レーザーを中心とした生体分光学の開発と光診断

紫外—可視—近赤外の全領域を用いた吸収、散乱、蛍光、リン光、化学発光による生体分光学の基礎研究を行い、その結果は、臨床用医療診断法に応用されている。次に、生体系における光散乱現象の解析を行った。光子相関法を用いて生体組織での光の挙動を詳細に解析した。特に多重散乱現象に重点を置いて解析した。この結果は生体散乱の診断応用の可能性を示すことができた。

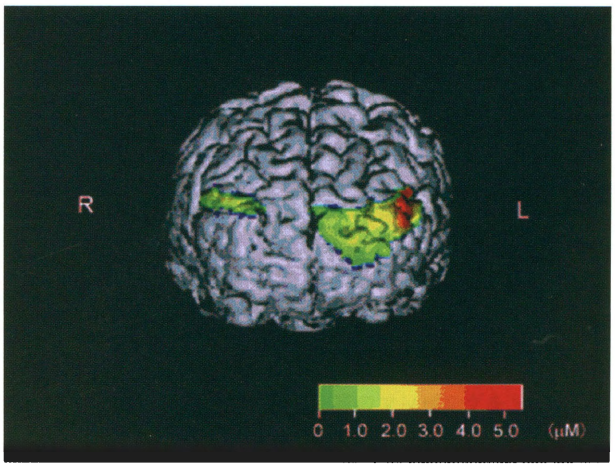


図 1．ヒト脳の MRI 画像に、光 CT により得られたオキシヘモグロビン濃度マップを重ねたもの。

(e)　多変量解析を用いた血液グルコースの計測システムの開発

近赤外領域の吸収スペクトルを人で行い血中グルコースの定量化を試みた。

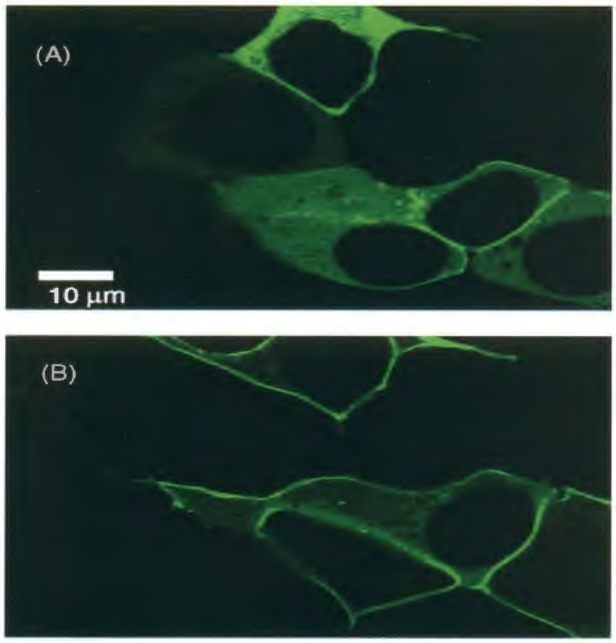


図2．(A)　HEK293細胞に発現した、PKC-EGFP。
(B)　ホルボールエステル刺激により、細胞膜近傍に移行したPKC-EGFP。

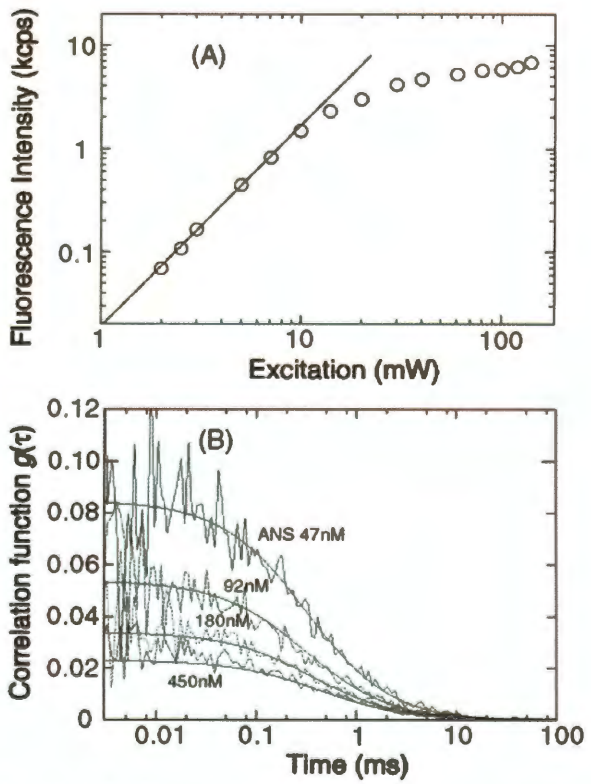


図3．牛血清アルブミン（BSA）に結合したアニリノナフタレンスルホン酸（ANS）の2光子相関測定。
(A)　励起光強度と蛍光強度の関係。
(B)　BSA-ANS複合体の蛍光相関関数。

・平成13年度

(a)　細胞内のタンパク質の機能解析のために蛍光相関分光法を用い、単一分子レベルで、時間的、空間的変化を考慮した解析方法を研究している。これまでに、細胞外からの刺激を受けとり、タンパク質（PKC）が細胞質から細胞膜へとブラウン運動により移動する過程の解析を行った。

(b)　医用光学の提案と光CTによる脳機能解明

我々が見い出し発展させてきた近赤外分光法による、脳機能解明の有力な武器となる光CTにより脳の活動部位の可視化を行なった。

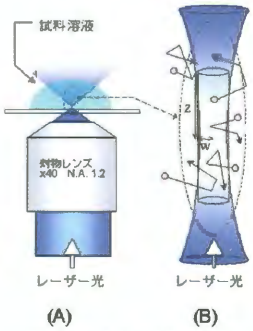
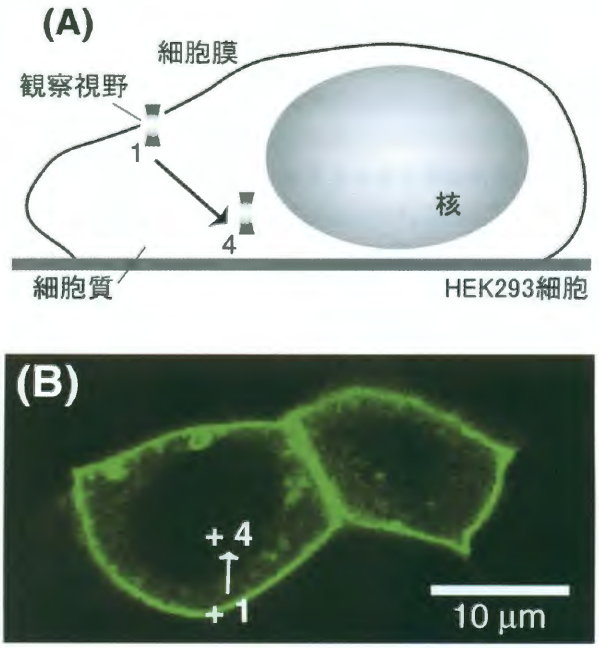


図1．蛍光相関分光装置の測定部(A)と観察視野(B)の模式図　励起光であるレーザー光を対物レンズで極限まで絞り、そこで形成された極微小領域で蛍光分子によるゆらぎを観察する



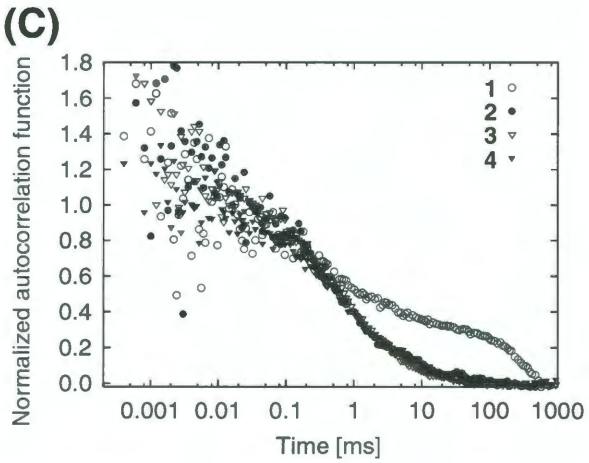


図２．FCS 測定によるタンパク質分子の細胞質、細胞膜で動き易さの違い（PKCβI-EGFP の例）

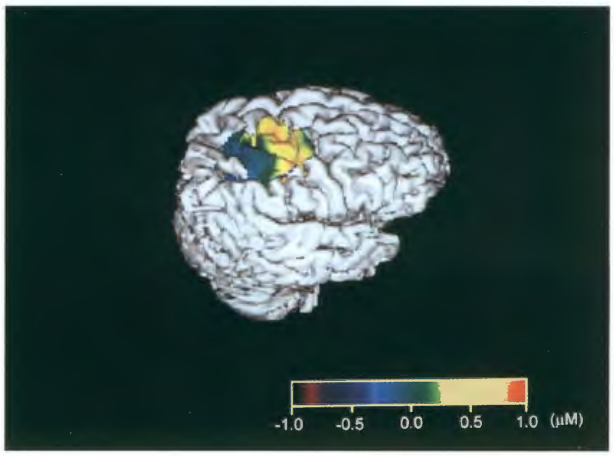


図３．左手のタッピングにおける脳の賦活部位
酸素化ヘモグロビン濃度で示す

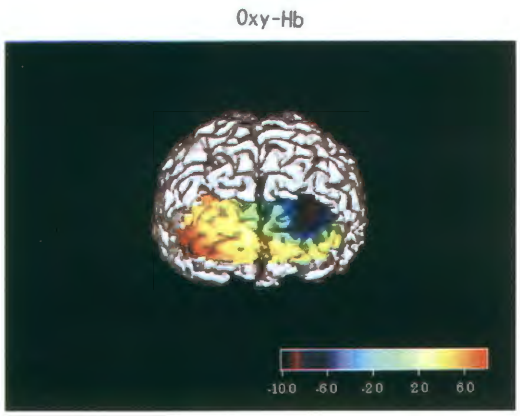


図４．数字記憶における前頭部の酸素化ヘモグロビン濃度の変化

・平成 14 年度

(a)　脳神経の働きを分光学的手法と分子生物学を併用して、遺伝子レベルから固体まで広い範囲で解明し、生体が営む多彩な機能を、生体高分子―細胞―組織―個体と複雑な階層構造から明らかにしたい。特に新しい生体分光学の一つである単一分子診断を遺伝子発現に応用する。

(b)　機能的近赤外分光法（fNIRS）を利用した、人高次脳機能解明を他の手法とともに行う。特に光計測の利点を生かした無拘束連続計測を試みる。

(c)　光イメージング法による高次脳機能の解明―光イメージング法による脳機能の解明を行い、特に高次機能の発現に伴う脳局所血流変動を連続的記録する。この結果を用い、近赤外光による脳機能の画像化の道を拓きたい。

(d)　脳機能の光計測法の開発―ラット灌流標本を用いて脳波等を手がかりとしながら種々の刺激に応じた応答と近赤外分光法による酸素変動の解析を行い、特に脳表での酸素化ヘモグロビンの変化をミリ秒の時間分解で計測する。これにより、脳活動のマッピングを完成させる。

(e)　時間分解近赤外診断法の開拓―近赤外分光法による酸素濃度計測法の確立と画像化への基礎研究を行い、特に近赤外領域のピコ秒パルス光を用いた生体組織の散乱特性の解析とそれによる画像化への基礎データの集積を行う。またこれに基づき、時間分解三次元画像化装置の試作と生物系への応用を試みる。

(f)　遺伝改変マウスにおける臓器代謝の解析―臓器灌流法を用いて蛍光相関法による単一分子の挙動を生体組織で直接解析する。

(g)　蛍光相関分光法の確立と単一分子診断―分子のゆらぎを利用した蛍光相関分光法を用いて単一分子診断の可能性を検証する。特に遺伝子診断が可能であることを示し、また、広く本手法が蛋白質相互作用の研究や細胞や組織への応用が可能であることを示す。

(h)　分子計測による蛋白質の構造―機能相関：プリオン蛋白を中心に―抗原―抗体反応を利用した新しいプリオン蛋白の検出法及び病原性変異の機構解明。

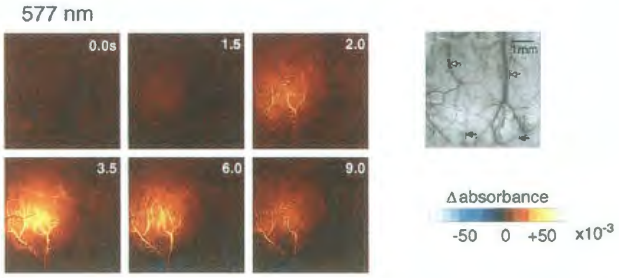


図-1　ラット脳表における光イメージング
局所脳活動における血流上昇のマッピングを 560 nm で測定

3．今後の研究の展望・将来計画

(a)　光イメージング法による人の高次脳機能の解明

当研究分野で開発された近赤外光による脳機能イメージングシステム、特に光 CT システムを利用して種々のタスクや生理学的刺激による脳内各部位の神経活動の時間的・空間的変動を追跡する。

(b)　生体分光学の基礎研究－特に時間分解及び相関分光法の生体系への応用

不均一散乱系を中心とした光子の吸収と散乱に関する基礎研究を行い、最終的に光 CT の画像再構成のアルゴリズムに組み込む。

(c)　遺伝子を中心とした生体組織での単一分子診断

蛍光相関分光法を利用すると単一分子の検出が可能である。この手法を利用して、脳組織内での遺伝子発現・蛋白合成を分子レベルで追跡する。

(d)　脳灌流法を中心とした脳酸素代謝の解析

当分野で行っている人工血液を用いた脳灌流系は生体のホメオスタシスの維持に働く情報伝達・制御系である神経性調節と液性調節を切り離して個々に解析し得る優れた実験系である。この実験系を用い、臓器代謝における中枢神経系とホルモン系との相互の関係を明らかにする。この時、我々が開発している種々の分光測定技術を利用する。

(e)　脳活動に伴う血行動態の定量化

光 CT 装置及びマルチチャンネル計測装置を用い、脳活動に伴う血行動態の定量化及び統計的処理を行う。これを用い、現行の SPM による fMRI 及び PET のデーター処理の妥当性の検討-特に各個人間での応答の差異の意味付けとその評価法の確立を目指す。

(f)　カップリング機構の解明

光学計測可能な各種動物モデルによる神経興奮－代謝変動のカップリング機構の解明－特に遺伝子改変マウスによる計測を行う。

(g)　光 CT と MEG の同時計測

我々が得ている光 CT による課題遂行時の脳局所の時間的・空間的変動を直接神経活動を画像化し得る MEG によって確認する。これにより、最終的に光計測法が高次機能解明の新しいツールとなることを示す。

(h)　光学技術を生命現象の解明に広く応用するため、その基本である不均一散乱系の分光計測の実験的・理論的研究を行い、生体分光学を確立する。さらに、より臨床医学への応用を目ざした光診断法を開拓し、その中で新たに遺伝子造影剤や光造影剤を提案・実用化する。

(i)　単一分子診断の１つである蛍光相関分光法をより発展させ、遺伝子診断、蛋白質相互作用、あるいは超高感度異常タンパク質の検出などを試みる。また、単一細胞内及び、生体組織における情報伝達系を遺伝子工学的手法を併用して解析したい。

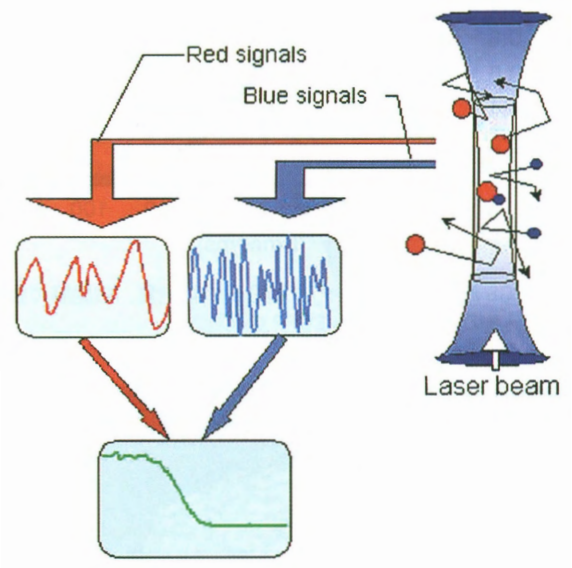


図１．２つの蛍光信号から、蛍光相互相関分光法を導き、分子間相互作用を解析する。

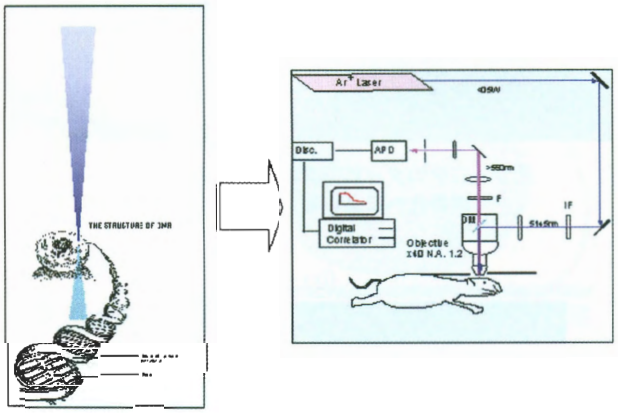


図２．生きた細胞の中の単一分子検出から、生体応用へ向けて研究解析を進めている。

(j)　fMRI や fNIRS 等による人高次脳機能の解明を行う。特に従来では計測が困難な、新生児、幼児等に、当研究室で開発中の新しい光 CT、ウエアブル CT、を用いて、小児や新生児の発達課程を追跡する。

この実験系を用い、我々が開発した種々の分光測定技術を利用し、臓器代謝における中枢神経系とホルモン系との相互の関係を明らかにする。

(k)　多変量解析を用いた血液中グルコースの計測システムの開発

近赤外領域の吸収スペクトルを人で計測し、血中グルコースの定量化を試みる。

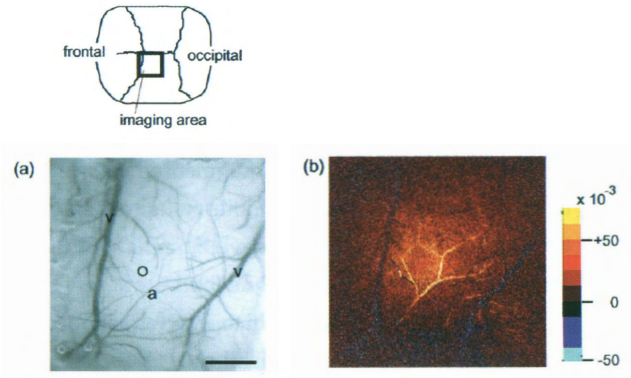


図3．光学窓を装着したラット頭部脳表における運動野領域の光学計測。波長 580 nm における酸素化ヘモグロビンの反射光強度マップ
(a) 白色画像
(b) 刺激後 3 秒の 580 nm の反射光強度マップ

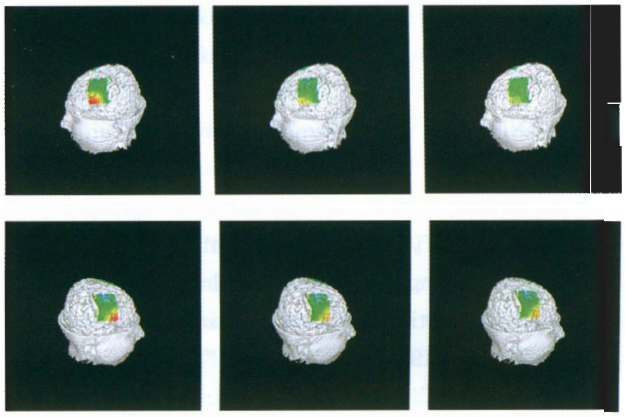


図4．n-back タスク時の光による脳賦活領域。右より 1-back、2-back、3-back

4．資料

4.1 学術論文

1) T. Nakai, G. Nishimura, K. Yamamoto and M. Tamura: "Expression of optical diffusion coefficient in high-absorption turbid media", *Phys. Med. Biol.*, 42: 2541-2549 (1997)

2) Y. Hoshi, O. Hazeki, Y. Kakihana and M. Tamura: "Redox behavior of cytochrome oxidase in the rat brain measured by near-infrared spectroscopy", *J. Appl. Physiol.*, 83: 1842-1848 (1997)

3) Y. Hoshi and M. Tamura: "Fluctuations in the cerebral oxygenation state during the resting period in functional mapping studies of human brain", *Med. Biol. Eng. Comput.*, 35: 328-330 (1997)

4) Y. Nomura, U. Hazeki and M. Tamura: "Relationship between time-resolved and non-time-resolved Beer-Lambert law in turbid media", *Phys. Med. Biol.*, 42: 1009-1022 (1997)

5) M. Tamura Y. Hoshi and F. Okada: "Localized near-infrared spectroscopy and functional optical imaging of brain activity", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, 352: 737-742 (1997)

6) Y. Hoshi and M. Tamura: "Near-infrared optical detection of sequential brain activation in the prefrontal cortex during mental tasks", *Neuroimage*, 5: 292-297 (1997)

7) J. Sakanoue, K. Ichikawa, Y. Nomura and M. Tamura: "Rhodamine 800 as a probe of energization of cells and tissues in the near-infrared region", *J. Biochem.*, 121: 29-37 (1997)

8) G. Nishimura, R. Rigler and M. Kinjo: "Number analysis of fluorescence correlation spectroscopy for cleaving process of fluorescence labeled DNA", *Bioimaging*, 5: 129-133 (1997)

9) M. Kinjo and G. Nishimura: "Fluorescence correlation spectroscopy as a detection tool of point mutation in gene", *Bioimaging*, 5: 134-138 (1997)

10) M. Tamura, Y. Hoshi, O. Hazeki and F. Okada: "Cerebral oxygenation states as revealed by near-infrared spectrophotometry" *Optical Imaging of Brain Function and Metabolism II*, 10: 91-96 (1997)

11) M. Nemoto, Y. Nomura, M. Tamura, C. Sato and H. Abe: "Optical imaging and measuring of local hemoglobin concentration and oxygenation changes during somatosensory stimulation in rat cerebral cortex", *Oxygen Transport to Tissue XIX*, 521-531 (1997)

12) K. Nakayama, A. Takasawa, T. Ohyama and M. Tamura: "Abnormal accumulation of porphyrin derivatives in the kidneys of long-evans cinnamon rats, as evidenced by microspectrophotometry", *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 242 (1): 164-169 (1998)

13) Y. Hoshi, S. Kosaka, Y. Xie, S. Kohri and M. Tamura: "Relationship between fluctuations in the cerebral hemoglobin oxygenation state and neuronal activity under resting conditions in man", *Neurosci. Lett.*, 245: 147-150 (1998)

14) Y. Nomura, A. Matsunaga and M. Tamura: "Optical characterization of heme a+a3 and copper of cytochrome oxidase in blood-free perfused brain", *J. Neurosci. Meth.*, 82: 135-144 (1998)

15) A. Matsunaga, Y. Nomura, M. Tamura, S. Kuroda, N. Yoshimura and J. Nishihira,: "Energy dependence of redox state of heme a+a3 in cytochrome oxidase in perfused rat brain in situ", *Am. J. Physiol.*, 275: C1022-C1030 (1998)

16) S. Bjorling, M. Kinjo, Z. Folders-Papp, E. Hagman, P. Thyberg and R. Rigler: "Fluorescence Correlation Spectroscopy of Enzymatic DNA Polymeriza-

tion", *Biochemistry*, 37: 12971-12978 (1998)
17) M. Kinjo: "Detection of asymmetric PCR products in homogenous solution by fluorescence correlation spectroscopy", *BioTechniques*, 25: 706-715 (1998)
18) M. Kinjo, G. Nishimura, T. Koyama, U. Mets and R. Rigler: "Single Molecules Analysis of Restriction DNA Fragments using Fluorescence Correlation Spectroscopy", *Anal Biochem.*, 260: 166-172 (1998)
19) K. Monde, H. Satoh, M. Nakamura, M. Tamura and M. Takasugi "Organochlorine Compounds form a Terrestrial Higher Plant: Structures and Origin of Chlorinated Orcinol Derivatives from Diseased Bulbs of Lilium Maximowiczii" *J. Nat. Prod.*, 61(7), 913-921 (1998)
20) Y. Nomura, F. Fujii, A. Matsunaga and M. Tamura "The Reaction of Copper in Cytochrome Oxidase with Cytochrome C in Rat Brain In *Situ" Int. J. Neurosci.*, 94, 205-212 (1998)
21) A. Kawaji, M. Isobe, Y. Tochino, E. Takabatake, Y. Chikaoka, Y. Nomura and M. Tamura "Flavin-Containing Monooxygenase Mediated Metabolism of Benzydamine in Perfused Brain and Liver" *Biochemica Et Biophysica Acta*, 1425, 41-46 (1998)
22) M. Kinjo, Quantitative analysis of polymerase chain reaction using fluorescence correlation spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, 356, 43-48 (1998)
23) M. Kinjo, T. Araiso and T. Koyama, Synthesis of bioactive fluorescence dye and enzymatic labeling at 3-terminal of RNAs: an application for the characterization of the thermal stability of tRNAs and oligonucleotides using fluorescence anisotropy measurements. *Dyes and Pigments*, 38, 77-95 (1998)
24) T. Jin, M. Kinjo, Y. Kobayashi and H. Hirata, Ion transoport activity of calix [n=4,5,6,7,8] esters toward alkali-metal cations in a phospholipid bilayer membrane. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 94, 3135-3140 (1998)
25) M. Nemoto,Y. Nomura, C. Sato, M. Tamura, I. Koyanagi, K. Houkin and H. Abe: "Analysis of optical signals evoked by peripheral nerve stimulation in rat somatosensory cortex: Dynamic changes in local hemoglobin concentration and oxygenation," *J .Cereb. Blood Flow Metabol.*, 19: 246-259 (1999)
26) Y. Chikaoka and M. Tamura: "7-Ethoxycoumarin deethylation activity in perfused isolated rat brain," *J. Biochem.*, 125: 634-640 (1999)
27) H. Eda, I. Oda, Y. Ito, Y. Wada, Y. Oikawa, Y. Tsunazawa, M. Takada, Y. Tsuchiya, Y. Yamashita, M. Oda, A. Sassaroli, Y. Yamada and M. Tamura: "Multichannel time-resolved optical tomographic imaging system," *Rev. Sci. Instrum.*, 70: 3595-3602 (1999)
28) T. Suzuki, A. Ogata, K. Tashiro, K. Nagashima, M. Tamura and J. Nishihira: "Augmented expression of macrophage migration inhibitory factor (MIF) in the telencephalon of the developing rat brain," *Brain Research,* 816: 457-462 (1999)
29) T. Suzuki, A. Ogata, K. Tashiro, K. Nagashima, M. Tamura, K. Yasui and J. Nishihira: "A method for detection of a cytokine and its mRNA in the central nervous system of the developing rat," *Brain Research Protocols*, 4: 271-279 (1999)
30) C. G. Pack, G. Nishimura, M. Tamura, K. Aoki, H. Taguch, M. Yoshida and M. Kinjo: "Analysis of interaction between chaperonin GroEL and its substrate using fluorescence correlation spectroscopy," *Cytometry*, 36: 247-253 (1999)
31) M. Nemoto, Y. Nomura, C. Sato, M. Tamura, I. Koyanagi, K. Houkin and H. Abe: "Observation of the activity-related optical intrinsic signals in rat somatosensory cortex form the viewpoint of dynamic changes in local hemoglobin concentration and oxygenation," *J. Cereb. Blood Flow Metabol.*, 19: 246-259 (1999)
32) Takakuwa, C. -G. Pack, X. -L. An, S. Manno, E. Ito and M. Kinjo: "Fluorescence correlation spectroscopy analysis of the hydrophobic interactions of protein 4.1 with phosphatidyl serine liposomes," *Biophysical Chemistry*, 82: 149-155 (1999)
33) Y. Nomura, K. Kamibayashi, S. Takuma and T. Akaike: "Changes in neural activity progagation in rat hippocampus following ischemia-like conditions as studied by optical recording Neurosci," *Res. Communa.*, 24: 71-80 (1999)
34) Y. Hoshi, H. Okuhara, S. Nakane, K. Hayakawa, N. Kobayashi and N. Kajii: "Reevaluation of the hypoxic theory as the mechanism of hyperventilation-induced EEG slowing," *Pediatr. Neurol.*, 21: 638-643 (1999)
35) Y. Hoshi, H. Okuhara, S. Nakane, K. Hayakawa, N. Kobayashi and N. Kajii: "Reevaluation of the hypoxic theory as the mechanism of hyperventilation-induced EEG slowing," Pediatr. Neurol., 21: 638-643 (1999)
36) N. Sugawara, T. Ohta, Yu-Rong Lai, C. Sugawara, M. Yuasa, M. Nakamura and M. Tamura "Iron Depletion Prevents Adenine Nucleotide Decomposition and an Increase of Xanthine Oxidase Activity in the Liver of the Long Evans Cinnamon (LEC) Rat,

an Animal Model of Wilson's Disease" *Life Sci.*, 62(13), 1423-1431 (1999)

37) Y. Nomura, M. Kinjo and M. Tamura: "C-fos expression and redox state of cytochrome oxidase of rat brain in hypoxia," *Neuro Report*, 11: 301-304 (2000)

38) Y. Nomura, F. Fujii, C. Sato, M. M. Nemoto and M. Tamura: "Exchange transfusion with fluorocarbon for studying synaptically evoked optical signal in rat cortex," *Brain Research Protocols*, 5: 10-15 (2000)

39) Y. Hoshi, I. Oda, Y. Wada, Y. Ito, Y. Yamashita, M. Oda, K. Ohta, Y. Yamada and M. Tamura: "Visuospatial imagery is a fruitful strategy for the digit span backward task: a study with near-infrared optical tomography," *Cognitive Brain Res.*, 9: 339-342 (2000)

40) K. Nakayama, A. Takasawa, I. Terai, T. Okui, T. Ohyama and M. Tamura: "Spontaneous porphyria of the Long-Evans Cinnamon Rat: An Animal model of wilson's Disease," *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 375: 240-250 (2000)

41) N. Yoshida, M. Kinjo and M. Tamura: "Fluorescence correlation spectroscopy : A new tool for probing the microenvironment of the internal space of organelles," *Single Molecules*, 1(4): 279-283 (2000)

42) S. Terada, M. Kinjo and N. Hirokawa: "Oligomeric tubulin in large transporting complex is trasported via kinesin in squid giant axons," *Cell*, 103: 141-155 (2000)

43) Y. Hoshi, Shing-Jen Chen, Ai Qui Liu and M. Tamura "Movable Cognitive Studies with a Portablel, Telemetric Near-Infrared Spectroscopy System" *Research and Clinical Center for Child Development* 23, 21-27 (2000)

44) H. Hanada, K. Okita, K. Yonezawa, M. Ohtsubo, T. Kohya, T. Murakami, H. Nishijima, M. Tamura and A. Kitabatake "Dissociation Between Muscle Metabolism and Oxygen Kinetics During Recovery from Exercise in Patients with Chronic Heart Failure" *Heart* , 83(2), 161-166 (2000)

45) Chan-Gi Pack, K. Aoki, H. Taguchi, M. Yoshida, M. Kinjo and M. Tamura "Effect of Electrostatic Interactions on the Binding of Changed Sustrate to GroEL Studied by Highly Sensitive Fluorescence Correlation Spectroscopy" *Biochem. Biophis. Res. Commun.*, 267, 300-304 (2000)

46) S. Terada, M. Kinjo and N. Hirokawa, Okigomeric tubulin in large transporting complex is transported via kinesin in squid giant axons. *Cell*, 103, 141-155 (2000)

47) 金城政孝、Confocor：蛍光相関顕微鏡、細胞、38、254-258 (2000)

48) N. Yoshida, M. Kinjo and M. Tamura: "Microenvironment of endosomal aqueous phase investigated by the mobility of microparticles using florescence correlation," *Biochem. Biophys. Research Comm.*, 280: 312-318 (2001)

49) Y. Nomura, H. Pellinger, F. Higashino and M. Kinjo: "Monitoring of in vitro and in vivo translation of green fluorescent protein and its fusion proteins by fluorescence correlation," *Cytometry*, 44(1): 1-6 (2001)

50) J. Sakanoue, M. Tamura, S. Fukushima, Y. Takeuchi, I. Sakuma and A. Kitabatake: "Assessment of Newly Developed Perfluorocarbon Emulsion: Oxygen Carrying Capacity as the Blood Substitute in Vivo," *Art. Cells, Blood Subs., and Immob. Biotech.*, 29(5): 389-397 (2001)

51) N. Yoshida, M. Tamura, and M. Kinjo: "Fluorescence correlation spectroscopy: A new tool for probing the microenvironment of the internal space of organelles," *Single Molecules*, 1(4): 279-283 (2001)

52) Y. Hoshi, N. Kobayashi, M. Tamura: "Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model," *J. Appl. Phys.*, 90(5): 1657-1662 (2001)

53) M. Shimada, Y. Yamada, M. Itoh and T. Yatagai: "Melanin and blood concentration in human skin model studied by multiple regression analysis: assessment by Monte Carlo simulation," *Phys. Biol. Med.*, 16(9): 2397-2406 (2001)

54) M. Shimada, Y. Yamada, M. Itoh and T. Yatagai: "Melanin and blood concentration in human skin studied by multiple regression analysis Experiments," *Phys. Biol. Med.*, 46(9): 2385-2395 (2001)

55) N. Yoshida, M. Kinjo, and M. Tamura: "Microenvironment of Endosomal Aqueous Phase Investigated by the Mobility of Microparticle Using Fluorescence Correlation Spectroscopy," *Bioch. Bioph. Res. Com.*, 280(1): 312-318 (2001)

56) Y. Nomura, H. Tanaka, L. Poellinger, F. Higashino and M. Kinjo: "Monitoring of in vivo and in vitro translation of green fluorescence protein and its fusion proteins by fluorescence correlation spectroscopy," *Cytometry*, 44(1): 1-6 (2001)

57) Y. Hoshi, Shing-Jen Chen, M. Tamura: "Spatiotemporal Imaging of Human Brain Activity by Functional Near-infrared Spectroscopy," *American Laboratory*, 33(20): 35-39 (2001)

58) J. P. Gong, T. Kurokawa, T. Narita, G. Kagata, Y.

Osada, G. Nishimura and M. Kinjo: "Synthesis of hydrogels with extremely low surface friction," *J. Am. Chem. Soc.*, 123(23): 5582-5583 (2001)
59) 舛田勇二、高橋元次、坂本哲夫、島田美帆、伊藤雅英、谷田貝豊彦：「新しいシミ計測法の開発」、日本化粧品技術者会誌、35(4)：325-332 (2001)
60) Y. Hoshi, Shing-Jen Chen, and M. Tamura "Spatiotemporal Imaging of Human Brain Activity by Functional Near-infrared Spectroscopy" *Am. Lab.*, 33(20), 35-39 (2001)
61) M. Shimada, J. Hata, Y. Yamada, M. Itoh, A. Uchida and T. Yatagai: "Experimental and numerical study of the color appearance of tattoo models," *Med. Biol. Eng. Comp.*, 40(20): 218-224 (2002)
62) T. Muto, K. Saito, M. Tamura and M. Kinjo: "Microenvironment Analysis in Squid Axons using Fluorescence Correlation Spectroscopy and Laser Scanning Microscopy", *Acta Histochem Cytochem*, 35: 87-91 (2002)
63) N. Doi, H. Takashima, M. Kinjo, K. Sakata, Y. Kawahashi, Y. Oishi, R. Oyama, E. Miyamoto-Sato, T. Sawasaki, Y. Endo and H. Yanagawa: "Novel Fluorescence Labeling and High-Throughput Assay Technologies for In Vitro Analysis of Protein Interactions", *Genome Res.*, 12: 487-492 (2002)
64) K. Yumino, I. Kawakami, M. Tamura, T. Hayashi and M. Nakamura: "Paraquat-and Diquat-Induced Oxygen Radical Generation and Lipid Peroxidation in Rat Brain Microsomes", *J. Biochem.*, 131: 565-570 (2002)
65) S. Kohri, Y. Hoshi, M. Tamura, C. Kato, Y. Kuge and N. Tamaki: "Quantitative Evaluation of the Relative Contribution Ratio of Cerebral Tissue to Near-infrared Signals in the Adult Human Head: a Preliminary Study", *Physilo. Meas.*, 23: 301-312 (2002)
66) C. Sato, M. Nemoto and M. Tamura: "Reassessment of Activity-Related Optical Signals in Somatosensory Cortex by an Algorithm with Wavelength-Dependent Path Length", *Jpn. J. Physiol.*, 52: 301-312 (2002)
67) Y. Kakihana, A. Matsunaga, K. Tobo, S. Isowaki, M. Kawakami, I. Tsuneyoshi, Y. Kanmura and M. Tamura: "Redox Behavior of Cytochrome Oxidase and Neurological Prognosis in 66 Patients who Underwent Thoracic Aortic Surgery", *Eur. J. Cardio-Thorac. Surg.*, 21: 434-439 (2002)
68) 田村守：「光を用いた脳機能イメージング(1)」、臨床脳波、44(6)：389-397 (2002)
69) 田村守、郡俊志：「光を用いた脳機能イメージング(2)」、臨床脳波、44(7)：463-467 (2002)

4.2 総説、解説、評論等

1) 田村守：(総説)「連載講座：新・光を使った生体計測－医用光学への招待」、(『O plus E』、新技術コミュニケーションズ、東京) (1997.11～1999.3)
2) 星詳子：(総説)「近赤外光による脳機能計測」(臨床検査、41：455-456) (1997)
3) 田村守、星詳子、野村保友、垣花泰之、松永明：(総説)「近赤外分光法の基礎と臨床応用—チトクロームオキシダーゼを中心として—」(痲酔、47：S 33-S 45) (1998)
4) 星詳子、田村守：「脳の働きを光で探る」、科学、69：449-457 (1999)
5) 高澤啓、中山憲司、寺井格、奥井登代、大山徹、田村守：「ヒト・ウィルソン病モデル動物におけるポルフィリン代謝異常」、ポルフィリン、8：15-20 (1999)
6) 金城政孝：「蛍光相関分光法による一分子検出」、蛋白質核酸酵素、44：1431-1738 (1999)
7) 金城政孝：「蛍光相関分光法によるDNAの検出」、精密工学、65：175-180 (1999)
8) 金城政孝、西村吾朗：「蛍光相関法による単一レベルの酵素反応解析」、生物物理、222：81-85 (1999)
9) 垣花泰之、星詳子、松永明：「近赤外線による体内物質測定—生体内酸素指示物質チトクロームオキシダーゼについて」、呼吸、18：595-602 (1999)
10) 田村守、野村保友、星詳子、根本正史：「光学技術を用いた脳機能計測」、脳の動態をみる ── 記憶とその障害の分子機構、：134-150 (2001)
11) 田村守：「光診断学の現状と未来」、現代医療、33(7)：51-60 (2001)
12) 田村守、垣花康之、星詳子：「近赤外線分光法の原理と生体応用」、体育の科学、51(7)：502-506 (2001)
13) 田村守、星詳子、根元正史、佐藤知絵、光を用いた脳機能計測—その問題点を探る—、Brain and Nerve、53(2)、140-150 (2001)
14) 田村守、医用光イメージング—序にかえて—、精密工学会誌、67(4)、537-540 (2001)

4.3 著書

1) J. Sakanoue, M. Tamura, H. Sato, K. Nakai, I. Sakuma and K. Kitabatake: "Redox states of cerebral tissues of rats substituted by the polyethyleneglycol-conjugated hemoglobin." In Oxygen transport to tissues XXII, Plenum Press, New York, (1999)
2) 田村守、星詳子：「近赤外光の医療への応用」、『光りが拓く生命科学6　光による医学診断』、日本光生物学協会編 (田村守担当編集)、共立出版、p.196 (1999)
3) 金城政孝、吉田直人、野村保友：「蛍光相関分光法」、

『ポストゲノム時代の実験講座3　GFPとバイオイメージング』、宮脇敦史編、羊土社、pp.215-222(2000)

4）Fodes-Papp Z., and Kinjo M.: "Fluorescence correlation spectroscopy in nucleic acids analysis," In Fluorescence Correlation Spectroscopy - Theory and Applications, Springer Series in Physical Chemistry (Springer) 65: 25-64 (2001)

5）M. Tamura, Y. Hoshi, M. Nemoto, C. Sato and S. Kohri: "Qutantitative Optical Imaging of Brain Activity - Human and Animal Studies", *International Congress Series*, Elsevier Science, 1235: 181 (2002)

6）金城政孝、齊藤健太：「タンパク質相互作用のリアルタイム解析 蛍光相関顕微鏡」、プロテオミクスの最前線、羊土社、61-69（2003）

7）金城政孝：「細胞内生体高分子相互作用の解析をめざす蛍光相関分光法」、バイオイメージングでここまで理解る、羊土社、126-131（2003）

4.4　特許

1）金城政孝：特願平10-347493、標的核酸の定量分析方法および装置、1998年12月7日

2）金城政孝：特願平10-353254、標的核酸の定量分析方法、1998年12月11日

3）C. G. De Kruif, E. Ten Grotenhuis, D. A. Weitz, G. Nishimura and A. G. Yodh:Europe (特許国)、Europe Application ＃98201042.3-2204、Arrangement and method to apply diffusion wave spectroscopy to measure the properties of multi-phase system, as well as the changes therin、1998年4月2日

4）田村守：特願平11-316534、光計測装置、1999年11月8日

4.5　招請講演

1）M. Tamura: "Near-infrared Spectroscopy in Medicine-Functional Brain Mapping and Optical CT," Advanced-Topics Research School "Laser Medicine and Biophysics 99," La Jolla, U.S.A. (1999-4)

2）星詳子：「脳機能研究の新しいツール　光計測の現状とその将来」、第10回日本臨床モニター学会、東京、日本（1999-4）

3）M. Tamura: "Near-infrared Spectroscopy in Medical and Veterinary Sciences," 9th International Conference on Near-infrared Spectroscopy Towards the Third Millennium, Verona, Italy (1999-6)

4）M. Tamura: "An Optical CT: The Total System and Its Performance," Optical Society of America (OSA)-Biomedical Optics, Munich, Germany (1999-6)

5）M. Tamura: "Functional Near-Infrared Optical Brain Mapping and Cognitive Processes," Latest Advanced in Neuroimaging , Madrid, Spain (1999-7)

6）N. Yoshida, T. Sakai, T. Naiki and M. Tamura: "A ruthenium complex as an intracellular oxygen probe in vivo," 27th annual meeting international society on oxygen transport to tissue," Hanover, U. S. A. (1999-8)

7）M. Tamura: "Quantitative Functional Imaging of Human Brain Activity by NIR Optical Imaging," Inter-Institute Workshop on In Vivo Optical Imaging at the NIH," Bethesda, U.S.A. (1999-9)

8）金城政孝：「蛍光相関分光法によるDNAの単一分子レベル解析」、日本化学会第77回秋季年会、札幌、日本（1999-9）

9）金城政孝、野村保友：「単一分子補足と診断及びその可視化」、日本化学会第77回秋季年会、札幌、日本(1999-9)

10）M. Kinjo: "Fluorescence Correlation Analysis of Bioactive Protein in Single Living Cell," 5th International Workshop on "Single Molecule Detection and Ultrasensitive Analysis in the Life Sciences," Berlin, Germany (1999-9)

11）金城政孝：「蛍光相関分光法による生体分子の単一分子検出」、日本生化北海道支部、日本生物物理北海道支部、北海道分子生物学研究会合同シンポジウム、札幌、日本（1999-11）

12）野村保友：「生命現象の分子レベルでの解明―世界にはばたく北海道若手研究者の視点―」、日本生化北海道支部、日本生物物理北海道支部、北海道分子生物学研究会合同シンポジウム、札幌、日本（1999-11）

13）星詳子：「脳機能画像の応用と問題点、近赤外光脳機能イメージング―PETと比較して」、第29回日本脳波筋電図学会シンポジウム、東京、日本（1999-11）

14）N. Yoshida, M. Tamura and M. Kinjo: "Fluorescence Correlation Analysis for Microenvironment of Organelles in Single Living Cell," Bios 2001, San Jose, U.S.A. (2000-1)

15）金城政孝：「蛍光相関分光法を用いた細胞観察」、第12回共焦点顕微鏡国際会議ワークショップ、吹田、日本(2000-4)

16）M. Tamura: "Optical Imaging of Human Brain Activity," Human Brain Mapping, Albuquerque, U. S.A. (2000-6)

17）Y. Hoshi, I. Oda, Y. Wada, Y. Ito, Y. Yamashita, M. Oda, K. Ohta, Y. Yamada and M. Tamura: "Visuospatial imagery is a fruitful strategy for the digit span backward task: a study with near-infrared optical tomography," 6th annual meeting of

the organization for human brain mapping conference on functional mapping of the human brain, San Antonio, U.S.A. (2000-6)

18) 金城政孝：「蛍光相関分光法の生物物理と医学への応用」、第2回分子ダイナミック分光ワークショップ～複雑系のダイナミクスと光計測技術～、浜松、日本(2000-7)

19) M. Tamura: "Quantitative Near Infrared Spectrophotometry in Scattering Media," International Conference of Diffuse reflectance Photometry, Chambersburg, U.S.A. (2000-8)

20) M. Kinjo, N. Yoshida, T. Muto and K. Saito: "Fluorescence Correlation Spectroscopy as a Tool for Study of Microenvironment in Living Cells," Fluorescence Correlation Spectroscopy symposium, St. Louis, U.S.A. (2000-8)

21) N. Yoshida, M. Tamura and M. Kinjo: "Fluorescence correlation spectroscopy as a tool for study on microenvironment of intracellular organelles," 6th international workshop on single molecule detection and ultrasensitive analysis in life sciences, Berlin, Germany (2000-9)

22) 金城政孝：「生細胞における蛍光相関分光法」、第53回日本細胞生物学会、福岡、日本 (2000-10)

23) N. Yoshida, M. Tamura and M. Kinjo: "Fluorescence correlation analysis for micro-environment of organelles in a single living cell," International biomedical optics symposium, San Jose, U.S.A. (2001-1)

24) N. Yoshida and M. Kinjo: "FCS measurement of viscosity and pH in endosomal aqueous phase," 5th International Carl Zeiss Workshop on Fluorescence Correlation Spectroscopy and Related Methods, Jena, Germany (2001-4)

25) 金城政孝：「蛍光相関分光法による生体高分子の相互作用の解析」、第8回日本クロマトグラフィーシンポジウム、東京 (2001-5)

26) 金城政孝：「蛍光相関分光法による細胞内微環境の解析」、第54回日本細胞生物学会、岐阜 (2001-6)

27) Y. Hoshi, Shing-Jen Chen, AI-Qin Liu and M. Tamura: "Movable cognitive studies with a portable, telemetric near-infrared spectroscopy system," Seventh Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Brighton, U.K. (2001-6)

28) S. Kohri, Y. Hoshi and M. Tamura: "Quantitative Evaluation of the Optical Signals in Human Head: A time-and spatially resolved near-infrared photometry," 29th ISOTT Annual Meeting, Philadelphia, U.S.A (2001-8)

29) 田村守：「光CTによる脳機能計測― 問題点とその解決法」、第29回日本磁気共鳴医学会大会、つくば(2001-9)

30) 田村守：「光CTの現状と問題点」、第24回日本神経科学・第44回日本神経化学合同大会、京都 (2001-9)

31) 金城政孝：「最先端顕微鏡が捉える細胞からのイメージ」、レーザー顕微鏡研究会第27回講演会、東京(2001-10)

32) 島田美帆：「拡張Lambert-Beerの法則に基づいた重回帰分析による皮膚の色解析」、Optics Japan 2001、東京 (2001-11)

33) 金城政孝：「蛍光相関分光法を用いた生体高分子相互作用の解析」、第24回日本分子生物学会、横浜(2001-12)

34) 金城政孝：「蛍光相関分光法による細胞内分子間相互作用の解析」、第25回日本分子生物学会年会、横浜(2002-12)

35) 田村守：「機能的近赤外分光法による脳機能解明」、第38回脳のシンポジウム、東京 (2003-03)

36) 金城政孝：「蛍光相関分光法を用いた細胞内単一分子解析：in vitroからin vivoへ向けて」、第4回分子ダイナミック分光ワークショップ、浜松 (2002-07)

37) 金城政孝：「蛍光相関分光法による単一分子検出:in vitroからin vivoへ」、第17回生体・生理工学シンポジウム、札幌 (2002-09)

38) M. Kinjo: "Fluorescence Correlation Spectroscopy: New Tool for Probing Inside of Cell", Joint A-IMBN/EMBO Course: Fluorescence Microscopy of Living Cell, Kobe (2002-11)

39) 田村守：「蛍光相関分光法によるプリオン蛋白の超高感度検出法の開発」、平成14年度厚生労働省科学研究(肝炎克服緊急対策研究「牛海面状脳症研究分野」) 研究発表会、東京 (2003-03)

40) 金城政孝：「蛍光相関分光法によるin vivo 1分子観察」、北海道大学脳科学シンポジウムRR 2002、札幌(2003-03)

41) 金城政孝：「共焦点レーザスキャン顕微鏡とFCSを用いた生体高分子相互作用の解析」、第2回 日本蛋白質科学会 ランチョンセミナー、名古屋 (2002-06)

4.6 シンポジウムの開催

a. 国際シンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1) 田村守（電子機能素子部門）："Japan Italy Workshop「Recent Advances and Further Development of Near infrared Optical Methods for Non invasive Tissue Monitoring in Medicine」" (30名、北海道大学・電子科学研究所) (1998.2.25-28)

2) 金城政孝（電子機能素子部門）：〝電子研国際シンポジウム「Single Molecule Observation in Bioscience: Detection and Diagnosis」「バイオサイエンスにおけ

る単一分子観察：単一分子検出から分子診断へ」(75名、北海道大学・学術交流会館)(1998.6.8-9)

3) M. Tamura, T. Iwai, M. Kinjo and G. Nishimura: "Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine"(174名、北海道大学　学術交流会館)(2002.10.21～2002.10.23)

4.7　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1) 野村保友、基盤B　展開(2)、近赤外領域の光トレーサーを利用した新しいエネルギー代謝評価法の開発、7,100千円（1997～1998）

2) 野村保友、奨励A、神経活動に依存した光散乱変化を用いる無侵襲脳活動計測の新たな試み、1,700千円(1998～1999)

3) 金城政孝、特定領域A　(2)、皮質ニューロン内遺伝子発現の単一分子レベル計測開発、6,100千円（1999～2000)

4) 金城政孝、基盤C　一般(2)、蛍光相互相関分光法による三重鎖DNA分子間相互作用の解析、3,200千円(1999～2000)

5) 金城政孝、基盤B　展開(2)、集団分子診断を目指した蛍光相関遺伝子検出システムの開発、9,700千円(2000～2002)

6) 野村保友、基盤C　一般(2)、燐光プローブを用いた低酸素誘導因子が活性化される細胞内酸素濃度の測定、3,300千円（2000～2001）

b．奨学寄付金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1) 西村吾朗、㈶伊藤医薬学術交流財団、拡散波分光法の医用・工学への応用研究、200千円（1997）

2) 金城政孝、㈶伊藤医薬学術交流財団、電子科学研究所公開シンポジウム「バイオサイエンスにおける単一分子検出：分子観察から分子診断へ」学会等助成、300千円（1998）

3) 金城政孝、㈶実吉奨学会、「第4回ライフサイエンスにおける単一分子検出と超高感度分析に関する国際ワークショップ」出席の渡航費助成、190千円（1998）

4) 田村守、伊藤財団、400千円（2002）

5) 田村守、オリンパス光学工業株式会社　医療事業光学開発部、1,500千円（2002）

6) 金城政孝、オリンパス光学工業株式会社、1,260千円(2002)

4.8　共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1) 河原剛一、栗城眞也、中村孝夫、魚住純、小林哲生(電子計測制御部門)、田村守（電子機能素子部門)、下澤楯夫、西浦廉政、水波誠（電子情報処理部門)：「神経回路網動作の非侵襲・高精度計測法に関する総合的研究」(1996～1997年度)

2) 野村保友（電子機能素子部門)、馬場欣哉（電子情報処理部門)、山内芳子(電子計測制御部門)：「中枢神経系の賦活領域に置けるエネルギー代謝　無酸素無グルコースによる海馬切片神経活動変化の光学測定による検出」(1997年度)

3) 内貴猛（電子計測制御部門)、金城政孝（電子機能素子部門)：「蛍光相関分光法による細胞内物質輸送の測定法の開発」(1997年度)

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1) 田村守(電子機能素子部門)、北海道立衛生研究所：「尿中ポルフィリンを用いた先天性銅代謝異常症の早期診断法の開発などに関する基礎的研究」、522千円(1998)

2) 金城政孝(電子機能素子部門)、オリンパス光学工業株式会社：紫外域励起蛍光相関分光装置に関する研究開発、5,000千円（1999年度）

3) 田村守(電子機能素子部門)、北海道立衛生研究所：尿中ポルフィリンを用いた先天性銅代謝以上症の早期診断法の開発などに関する基礎的研究、379千円(1999～2000年度)

4) 田村守(電子機能素子部門)、松下電工電気R＆Bセンター：光学的血糖値測定システムの開発（2000年度）

5) 金城政孝(電子機能素子部門)、オリンパス光学工業株式会社：FCSによる生細胞内分子相互作用解析技術に関する研究開発、3,200千円（2000～2001年度）

6) 田村守(電子機能素子部門)、カナレ電気㈱：LEDを光源とする生体分光計測の応用的研究、500千円(2001年度)

7) 金城政孝(電子機能素子部門)、オリンパス光学工業株式会社：FCSによる生細胞内分子相互作用解析技術に関する研究開発、3,200千円（平成13年度1,600千円）（2000～2001年度）

8) 田村守、小林邦彦、中山憲司、北海道立衛生研究所：先天性銅代謝異常症（ウィルソン病）の包括的医療システムの構築―3歳児健診を利用したウィルソン病スクリーニングの導入―、913千円（2002年度）

9) 田村守、石井正孝、医療法人社団静和会静和記念病院：光学的血糖測定システムの開発、500千円(2002年度)

10) 田村守、岩瀬正、カナレ電気㈱：LEDを光源とする生体分光計測の応用的研究、500千円（2002年度）

11) 金城政孝、高橋保夫、オリンパス光学工業株式会社：FCSを用いた蛋白質相互作用の解析とその応用研究に関する共同研究、1,850千円（2002年度）

12) 金城政孝、長谷川寛、浜松ホトニクス株式会社：一分子蛍光計測装置の開発、1,000千円(2002～2003年度)

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1) 代表・開発委員長　田村守（電子機能素子部門)、技術研究組合　医療福祉機器研究所：「光断層イメージン

グシステムの研究開発」、5,850千円(1997～1998年度)
2）田村守(電子機能素子部門)、生物系特定産業技術研究推進機構：生体器官の無侵襲隔測手法の開発、27,666千円（1996～2000年度）
3）田村守（電子機能素子部門)、日本学術振興会・未来開拓学術研究推進事業：光CTおよび脳磁図を用いた高次脳機能の研究、168,116千円（1997～2001年度）
4）田村守(電子機能素子部門)、日機装株式会社：光学的血糖値測定システムを応用した体内埋め込み型インスリン注入システムの開発、8,073千円（2000年度）
5）田村守（電子機能素子部門)、科学技術振興事業団：BSE（牛海面状脳症）生前診断の可能性試験―蛍光相関分光法による超高感度検出の確立―、3,000千円（2001年度）
6）田村守（電子機能素子部門)、松下電工㈱NBTプロジェクト：光学的血糖値測定システムを応用した体内埋め込み型インスリン注入システムの開発、10,500千円（2001年度）
7）田村守、技術研究組合医療福祉機器研究所：光学的血糖値測定システムを応用した体内埋込み型インスリン注入システム、420千円（2002年度）

e．科学技術振興調整費（担当者名、研究題目、経費、研究期間）

1）金城政孝、文部科学省：蛍光相関分光法を利用した高感度分子間相互作用検出装置の開発、72,781千円（1999～2003年度）

g．その他（担当者名、機関名、研究題目、研究期間）

1）品川森一、堀内基広、北本哲之、小野寺節、毛利資郎、田村守、堂浦克美、高橋秀宗、岡田義昭、西島正弘、菊地裕、厚生科学研究費補助金：プリオン病の診断技術の開発に関する研究、3,500千円（2002年度）
2）田村守、金城政孝、岩井俊昭、品川森一、堀内基広、田村正秀、澤田幸治、池田徹也、科学技術振興事業団研究成果活用プラザ北海道：病原性変異蛋白質のウルトラハイスループット検査法の確立―BSEスクリーニングを目指して―、未定（2002～2005年度）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）田村守：通産省・光イメージングシステム開発委員会・委員長

b．国内外の学会の主要役職

1）田村守：日本生化学会・理事（1997～1998）
2）田村守：日本生物物理学会・理事（1997～1998）
3）田村守：新エネルギー産業技術総合開発機構NEDO技術評価委員（2001～2002年度）
4）田村守：伊藤医薬学術交流財団　審査委員（2002年4月1日～現在）

c．新聞・テレビ等の報道

1）田村守、石井正孝：北海道新聞「血糖値を光で測定　採血不要　北大・田村教授ら開発」2002年4月23日
2）田村守：日本経済産業新聞「採血せずに血糖値測定・札幌で臨床試験開始」2002年4月24日
3）田村守：朝日新聞「血糖値、光で計測」2002年8月28日
4）田村守：北海道新聞「BSE生体診断を採択　科学技術振興事業団　本年度の補助対象」2003年2月11日
5）田村守：NHK「サイエンスアイ　にっぽん名物研究室　光の科学②：光CTで脳の機能に迫る」2002年2月2日

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）佐藤知絵：刺激によるラット賦活皮質野の酸素動態(1997)
2）高澤啓：LECラット腎臓における蛍光物質の同定(1997)
3）藤井文彦：血液置換ラットモデルにおける脳のチトクロムCとチトクロムオキシダーゼの酸化還元挙動(1997)
4）武都拓也：光学的手法を用いた神経軸索内輸送の測定(2001)
5）三國新太郎：蛍光相関分光法を用いた細胞質・核内微環境の解析（2002)
6）西村公貴：蛍光相関分光法によるトランスフェリン輸送過程の解析（2002)
7）河村崇史：Investigation of the movement of VAMP associated vesicles in living cells by using FCS (2002)

・博士学位

1）中井達也：光拡散方程式の拡散係数および適用条件に関する基礎的研究（1997)
2）近岡洋子：Drug Metabolizing Activity of Cerebral Tissue:7-Ethoxycoumarin Deethylation Activity in the Perfused Rat Brain（脳組織の薬物代謝活性：灌流脳における7－エトキシクマリンの脱エチル活性)(1998)
3）足利雄一：Tissue Oxygenation Changes in the Irradiated Mandibular Bone: A Near Infrared Spectroscopy Study（放射線照射を受けた下顎骨における酸素濃度変化の測定：近赤外分光法による計測)(1998)
4）鈴木知晴：The Histochemical study of macrophage migration inhibitory factor(MIF) in the central nervous system (1999)
5）中山憲司：Spectrophometric and biochemical studies on spontaneous porphyria in the ling-evans cinnamon rat an animal model of human wilson's disease. (1999)
6）白燦基：Analysis of binding interaction betweeb cgaoeronin GroEL and substrate protein by fluores-

cencecorrelation spectroscopy (1999)

7）吉田直人：Studies on the intracelluar microenvironments using microscopic optical methods (2000)

8）佐藤知絵：光計測によるラット体性感覚賦活領野の酸素代謝および脳循環調節に関する研究（2001）

9）郡俊志：成人ヒト頭部におけるヘモグロビン酸素化状態の定量的解析―濁った媒質中におけるピコ秒領域の飛行時間法―(2001)

e．大学院担当講義

1）生体超分子化学特論Ⅰ、Ⅱ（1997～1998 年度）

2）生物学のための物理学（1999～2000 年度）

3）生体超分子化学概論（2001 年度）

4）生体超分子化学特論Ⅰ、Ⅱ（2001 年度）

5）分子生理学（2002 年度）

6）生物系の物理学（2002 年度）

7）生体超分子化学特論Ⅰ、Ⅱ（2002 年度）

細胞機能素子研究分野

教授　上田哲男（北大院、薬博、1998.2～）
助教授　西山宣昭（九大院、工博、1998.7～2000.7）
中垣俊之（名大院、学博、2000.11～）
助手　神　隆（北大院、理博、1988.7～）
講師　（研究機関研究員）山田裕康（名大院、理博、1999.4～2001.3）
萩原伸也（北大院、理博、2001.4～2002.3）

1．研究目的

細胞は、生物学的にはすべての生物の構成素子であり、物理・化学的には分子という機能素子が高度に自己組織化したダイナミカルな体系である。このような認識に基づいて、細胞という機能体の構築原理を解明することが、本研究分野の目標である。

おもに多核の巨大アメーバ様細胞である粘菌変形体を研究材料として用いる。この生物ならではの特徴を生かし、環境情報の受容・判断機構、ならびに細胞形状・サイズの制御に関わる機能素子を解明する。

特に、細胞原形質がしめす高次情報機能、とりわけ〝インテリジェンス〟の探求およびそのメカニズムの解明をめざす。変形体の原形質が示す情報統合や判断という〝脳〟機能を、非線形ダイナミクスに基づいて解明する。

2．研究成果

平成9年度から平成14年度の研究成果を次の3つの項目に大別してまとめる。：(A)変形体のフラグメンテーション～細胞のサイズ制御～、(B)細胞形状と計算～バイオコンピューティング～、(C)リズム素子の自己組織化

(A)　変形体のフラグメンテーション～細胞のサイズ制御～

a．新しい細胞質分裂現象の発見

真正粘菌変形体は、通常の細胞とは異なり、核分裂は細胞質分裂を伴わない。また2つの変形体は自然に細胞融合して1つの変形体となる。これが繰り返されて、変形体は細胞構造を維持しながらも多核となり際限なく大きくなる。容易に数m以上に達する。粘菌のサイズは10～$10^7$$\mu$mと広い。粘菌は自らのサイズを制御できないのだろうか？

従来、胞子形成に先立って大きな変形体が1mm程度の小さな変形体に分かれること、あるいはスフェルレーションに先立って、直径10μm程度の微小な変形体に分かれることがしられていた。しかしこれらは休眠状態へ移行する形態形成過程とは切り離せない過程であると考えられ、変形体の存在様式として研究されることはなかった。われわれは粘菌をある状況におくと、過渡的に大きさのそろった多数の微小な変形体に分裂することを見出した。

図1に25℃から15℃へ温度を下げたときの、変形体の形状変化（フラグメンテーション）を示す。

このフラグメンテーションは、次のような特徴を持つ。

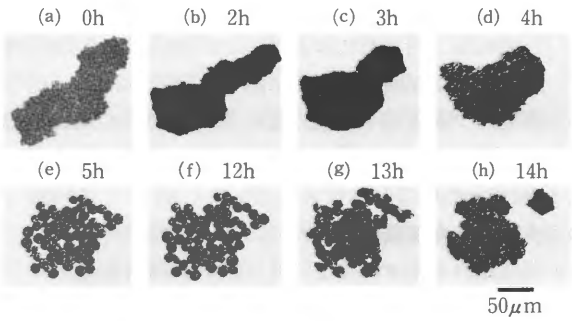


図1．粘菌変形体のフラグメンテーション

1．低温下、あるいは光照射により、刺激後約5時間で急に微小なフラグメントに分裂し、10－20時間後に元に戻る。
2．アクチノマイシンD、シクロヘキシミドにより阻害されるので、新しい遺伝子発現、タンパク合成をともなう。
3．フラグメントは、約8個の核を持つ。圧迫に対してある程度安定であるが、厚みが10ミクロン以下になると、急に約半分の大きさになる。
4．転移温度があり16℃以下で、フラグメント化が起きる。
5．16℃以下で培養すると、転移温度は順次低温側へシフトする。
6．転移温度が約10℃の突然変異株がある。
7．従来知られている胞子形成や皮体形成という形態形成と異なり、過渡的である。
8．光感受性は、温度の低下とともに高くなる。

以上のように、変形体は、環境変動に応答してサイズを制御する。この新しい形態形成現象は、細胞サイズの制御という基礎生物学上の課題を解くのによいモデル系であると期待される。

b．変形体のサイズ制御と誘導レセプターの発見

粘菌変形体が低温刺激あるいは光照射により、約5時間後に約8個の核を持つ微小な変形体に分裂するフラグメント化現象を見出した(図2)。基礎生物学研究所大型スペクトログラフの共同利用実験により、作用スペクトルを決定した。波長300－800 nmにおいて、紫外A(350 nm)、青色光(460 nm)、遠赤色光(750 nm)に誘導のピークがあった。赤色光（780 nm）は、遠赤色光の誘導を阻害し、この効果は光可逆的であった。粘菌変形体をすりつぶし、超遠心(10万g）をかけ、沈殿部の750 nmおよび680 nm光照射前後の差スペクトルを測定した(図3)。差吸収スペクトルは光可逆的に変化し、ピークは750 nmおよび680 nmであった。以上のことより、光レセプターの1つはフィトクロームであると結論される。変形菌類で吸収波長が全体に長波

長側へシフトしているものの、高等植物の光調節系としてしられているフィトクロームの存在が生化学的レベルで初めて示された。

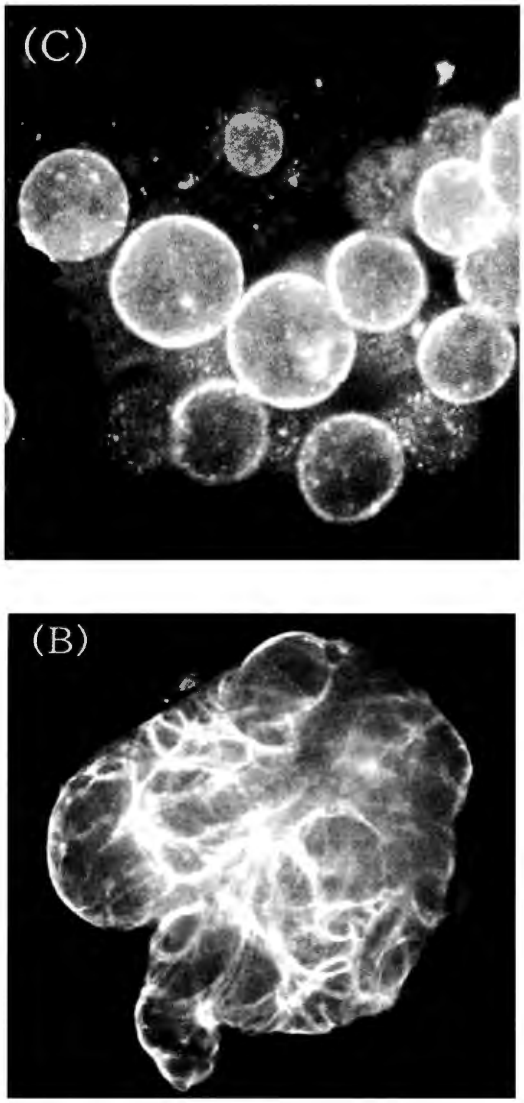


図2．粘菌のフラグメント化の写真。巨大なアメーバ様体制を持つ変形体（下）が、温度や光の刺激によりほぼ一定の大きさを持つフラグメントに分裂した（上）。この現象の光受容体はフィトクロームであった。低温刺激の効果に関して原始的な記憶が観察された。

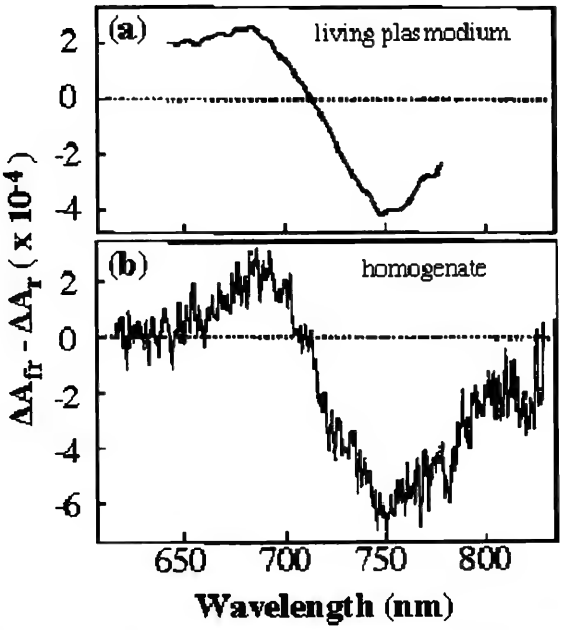


図3．生きた粘菌（上）と粘菌破砕液（下）における光刺激前後の差吸収スペクトル。

c．フラグメント化における記憶現象の発見

低温誘導フラグメント化において、刺激の中断、再刺激の実験を行った。フラグメント化の起こる以前のいつでも、刺激を中断すると、フラグメント化は誘導されなかった。ところが、中断後、2回目の刺激を行うとフラグメント化が誘導された。しかも、1回目と2回めの刺激時間の合計が約5時間となっていた。すなわち、過去の刺激時間を記録し、次の応答に反映させている。この意味で、記憶があると言える。

(B)　細胞形状と計算～バイオコンピューティング～

アメーバ様細胞の形状は不定形である。このことは、アメーバが形状を決定する情報を持たないことを意味しない。むしろ自らの遺伝子情報だけで形状を決めるのではなく、時々刻々と変動する環境情報を取り入れ、適切に形状を決めているのではないだろうか。こう考えると細胞形状は、ある条件下である目的を達するための〝計算〟と密接に関係していることになる。ここにバイオコンピューティングという未知なる分野がある。

寒天ゲル上を這い回る変形体では、原形質は進行先端部でシート状に広がり後部へ向かうにつれて管が網目状に発達している(図4)。餌であるオートミール片をまばらに播いておくと、餌のあるところではシート状に群がるが、それらは管のみで繋がれるような形状をとる。これらの形状は、一定量の原形質を、全体としてつながっているという制約条件下で、前者は速く移動させるような分布、後者は栄養をよりよく吸収するような分布を求めよという、最適化問題の解であると考えられる。このような計算は細胞の代謝反応によって可能なのだ。

「絶えず変形し続ける。」これはアメーバ細胞の一大特徴

であるが、その機能はよくわかっていない。粘菌では、同調して規則正しい収縮リズムとなる。局所的な光、温度、化学物質などによる刺激により、位相差が生じ、これが波動となって伝播する。この伝播方向が、誘引・忌避行動で、丁度逆になる。一方、振動的な外部刺激に、粘菌の収縮リズムは引き込まれる。この性質により誘引刺激でも遅く振動させると、位相波の進行方向を逆転させることができる。このとき、粘菌は忌避行動をとる。このことから、好き・嫌いの判断が位相の空間パターン、とりわけ波動の進行方向に関係していることがわかる。固有な誘引・忌避刺激というようなものがあるわけではなく、粘菌細胞は環境との相互作用のあり方で、情報を判断している。

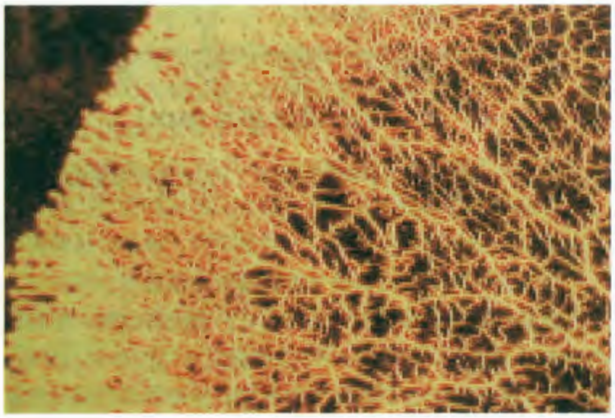


図4．移動中の粘菌変形体

a．粘菌変形体による迷路問題の解法

粘菌変形体を迷路内に這わすと、原形質は細い管状になって迷路内にほぼ均一に分布する(図5上)。出口と入口に餌を置く。するとまず行き詰まりとなっている迷路部分の管は消滅し、繋がっている部分の管は太くなる。2つの経路があると、とりあえず2つとも残る(図5中)。さらに時間が経過すると、2つのうちより短い経路が残る（図5下)。このようにして最終的に、入り口と出口を最短コースで結ぶ太い管が形成される。すなわち、迷路問題が解けたことになる。

b．管形成と運動リズムのカップリング

移動中の粘菌は、進行前部では原形質がシート状に広がり、後部へ行くにつれて管状の原形質が最初は進行方向に配向して形成される。左右半々にペルチエ素子を置き、温度を変えられるようにする。外部温度を振動的に変化させると、粘菌の固有の運動リズムは、ある振動数の範囲で外部振動に引き込まれる。このような方法で、人工的に位相勾配を作ることができる。数十分のうちに、通常では見られない方向に、すなわち、人工的な位相勾配の方向に管が形成される。このように、リズム場が形状形成に密接に関連していることがわかった。この事実は、構造がリズムという機能を生み出すだけではなく、機能が構造形成へフィードバックすることを示す、重要な発見である。

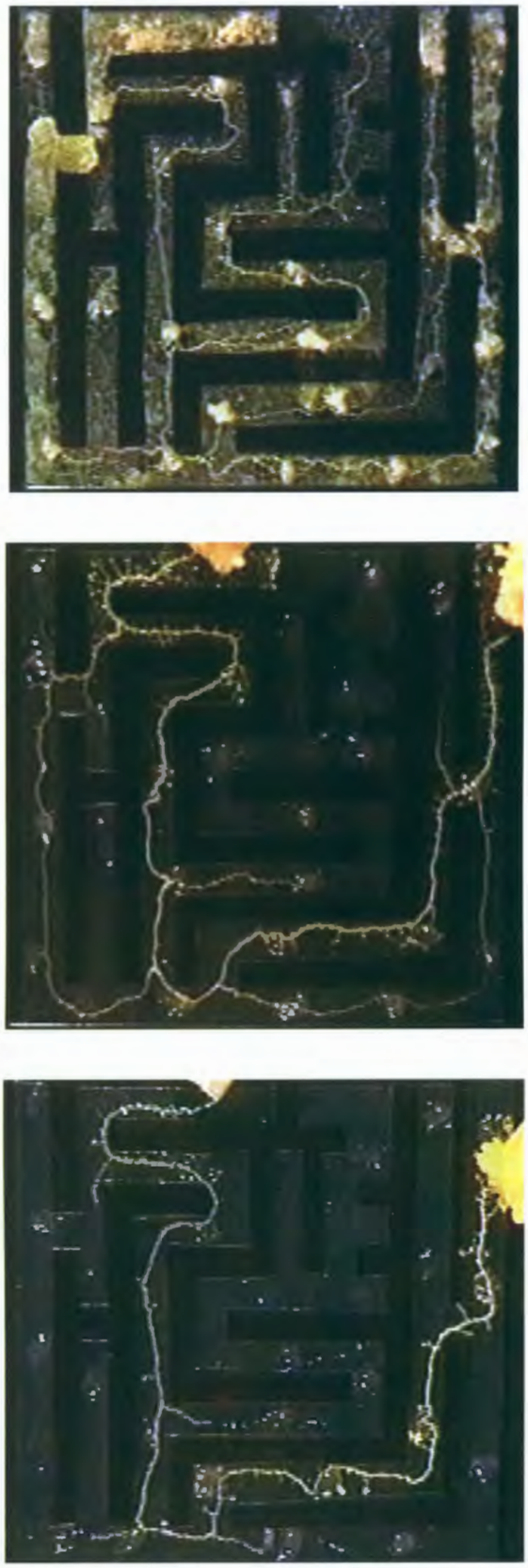


図5．迷路を解く粘菌を上から見た図。迷路いっぱいに広がる粘菌（上段図）に対して二つの場所に餌を与えると、行き止まりの経路にある管は消滅し（中段図）やがて最短の経路にのみ管を残した（下段図)。

c．複数の餌場所に対する機能的な流路網のデザイン

寒天ゲル上を広がる粘菌の両端にそれぞれ餌を与えると、変形体の大部分が餌に群がって養分を吸収する一方で、たった一本の太い管が二つの餌の間をほぼ最短な経路で結ぶように形成された。管内の流量は、ポアズイユ流の近似の下で管の太さの4乗に比例し長さの1乗に反比例するので、太くて短い管は流動効率が高い。粘菌のこのような形は、限られた大きさの体で、餌の吸収と原形質の交換の高い効率を両立させている。この機能は、複雑な状況でも発揮された。迷路いっぱいに広がった粘菌に対し二つの出口に餌を与えると、最短経路にだけ一本の太い管が現れた。この事は、粘菌が迷路を解く計算能力を持つ事を意味する。

管のネットワーク形成に見るこの様な最適化能力はさらに困難な状況でも発揮された(図6)。寒天ゲル上を広がる粘菌に複数個の餌を与えると、ほとんど全ての餌場所を数本の太い管で結んだ。与える餌の数(3、4、6、7、12、24、49、64、144個)と配置を様々に変えると、それに応じて餌場所を繋ぐ太い管のネットワークの形も劇的に変わった。これらの輸送ネットワークは、効果的な輸送ネットワークの持つべき幾つかの基準を満たした。すなわち、管の総長の短さ、餌場所間の密な繋がり、事故による管の断線に対する耐久性は、いずれも良い値を示した。

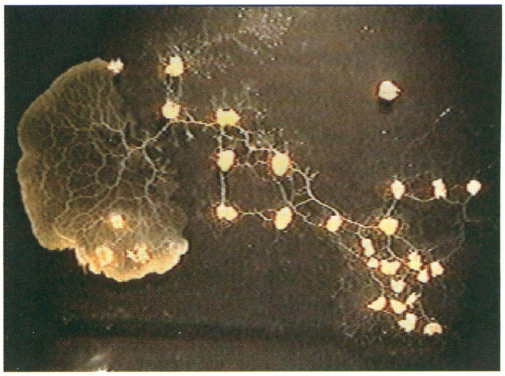


図6．片の餌（オーツフレーク）場所をつなぐ流路ネットワーク。黄色く見えるのが粘菌変形体である。左側に扇状に広がる先端部、右側に管状の後方部が見える。後方部では高々数本の管が、ほとんど全ての餌場所をむすんでいる。餌場所では粘菌が養分を吸収している

d．迷路問題解法における最短コース検出

ヒトにあっても、迷路を解くことはやさしくない。それにもかかわらず、単細胞生物の巨大なアメーバ様生物・粘菌変形体は、迷路を解く。粘菌を迷路内に広がらせた後、出口と入口に餌を置くと、まず袋小路になっている部分から粘菌は退却し、繋がっている経路には太い管が形成される。その後、長い経路の管が消滅し、最終的に最短コースを繋ぐ管が残る。

どの程度の長さの差を検出できるのだろう？　より単純な実験系を考案した(図7)。粘菌をリング状の寒天上に這わした。2つの餌場間の角度θとし、管のでき方の頻度を調べた。結果を表にまとめた(図2の右側の表c)。距離の差が大きいとき（90°、135°）短い方の経路がもっぱらに選ばれた。距離の差が小さくなると(160°)、まだ短いほうが選ばれるが、一方でどちらも選ばない場合が増える（2本の管)。同じ距離になると、2本の管(選ばない)の場合や、1本の管の場合や、餌に集まって分離してしまい管が作られない場合などが同程度の頻度で出てくる。餌の量も重要な因子で、粘菌に比べて餌が多いと、1つの変形体が分離して2つの餌に群がった。

以上の結果から、2％程度の長さの違いを検出できることがわかった。複雑な収縮波の伝播が見られ、精度の高い検出と関係していると予想される。

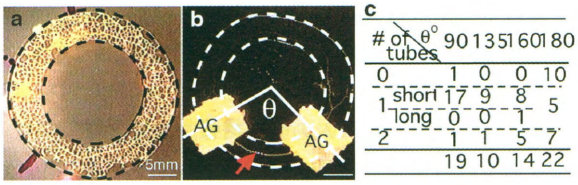


図7．リング状の寒天上での管の形成。A）初期状態、b）中心角θで二つの餌場所を置いた時の管の形成。短いほうの経路に管ができている（赤い矢印)。c）管の形成頻度に関する統計表

e．Dn対称性を持つ粘菌結合振動子系の振動モード解析

粘菌の小さな塊は、同調して収縮弛緩するので、1つの自励振動子とみなすことができる。このような粘菌を管でつなぐと、結合振動子系を構成することができる。3個、4個、5個の粘菌をリング状に結合し、振動リズムの集団パターンを測定・解析した。位相の振舞いに、従来知られていない時間空間的な対称性をもつ集団運動を見出した。

3結合振動子の場合だと、回転、一部同相、半周期の3モードが見られた。4結合振動子の場合だと、回転、半周期、部分的同相／逆相、および隣同士が逆位相の4モードが見られた。5結合振動子の場合だと、位相が72°ずれた回転、位相が144°ずれた回転、半周期、部分的な同相のモードが見られた。いずれの場合も、モード間の切り変えが見られた。これらのモードは、ホップ分岐の対称性解析から予想されるすべてのモードである。このように対称性の解析は、実現可能なモードを数え上げるのに有効である。

(C)　リズム素子の自己組織化

～サイズ増大による新機能の発現～

成熟した大きな変形体（図4）の内部では、ゾル状の原形質が激しくかつ規則正しく往復流動している。従来この運動リズムの発現は、アメーバから変形体への細胞型の変換に伴う生化学的変化に基づくと考えられていた。また一方で、発生直後の小さな変形体では、往復の規則正しい原形質流動が見られず、きわめて弱く不規則な流れしかみられないことも知られていた。これは、変形体がまだ成熟していないせいであると考えられた。上のフラグメント化により、大きさのそろった微小変形体が得られる。わかった

数のフラグメントを細胞融合させることで、大きさの異なる変形体を同じ時刻で調整することができる。この方法により生物の成長・成熟とは切り離して、細胞形状の変形と流動のサイズ依存性を調べることができた。結果を要約する。

1．変形体の大きさがある臨界サイズ以下のとき、細胞はおおむねまるっぽい形状をとり、原形質流動は弱くかつ不規則である。(図8)
2．臨界サイズ（約150個の核をもつ）以上になって、変形体は細長く変形し、原形質流動は大きくかつ規則正しく往復する。
3．F－アクチンは、臨界サイズ以下では等方的に分布し、臨界サイズ以上で極性のある分布を示す。

このように、収縮リズムの発現には、年齢とは関係なく最小の単位（素子）がある。収縮リズム素子の空間位相パターンが行動発現に見られる好き・嫌いの判断と関連している。この情報を担う収縮リズム素子自体がサイズ依存的に自己組織化されることがわかった。粘菌変形体は、核約8個のサイズに分裂しやすく、核数約150個のサイズで流動リズムが発現するなど、一見均一に見えるが、サイズ毎にそれぞれの機能素子（要素）から階層的に構成されると考えられる。

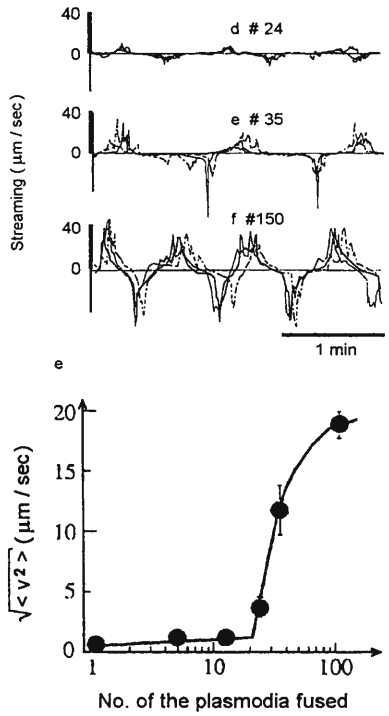


図8．原形質流動速度の時間変動と流動速度のサイズ依存性

3．今後の研究の展望・将来計画

粘菌は裸の原形質である。しかし、環境情報を受容し情報判断し、適切に応答する。実験的には光受容素子の決定、光感受性機構の解明、リズム素子の自己組織化を細胞内化学反応に基づいて解明する。理論的には、流動発現の数理モデルを構築し、情報判断の動的機構を解明していく。特にわれわれが独自に見出した〝計算〟や〝記憶〟という高次情報機能を、リズム場の示すグローバルな動的パターン形成と関係させて解明する。これらを糸口にして、バイオコンピューティングの原理を解明していく。

4．資料

4.1 学術論文

1) Nishiyama, N. and Matsuyama, T.: "Transition from an unstable synchronization state with transient oscillation cessation to spiral rotation in a coupled chemical oscillator system", *J. Chem. Phys.*, 106: 3427-3429 (1997)*
2) Koya, S. and Ueda, T.: "The onset of rhythmic streaming in the Physarum plasmodium: Cooperative hierarchic organization of a multi-nucleate cell", *ACH Models in Chemistry*, 135: 297-304 (1998)
3) Ueda, T.: "Changing shape, size and pattern in the Physarum plasmodium", Forma, 13: 405-412 (1998)*
4) Nishiyama, N.: "Excentric motions of spiral cores in aggregates of Dictyostelium cells", *Phys. Rev. E*. 57: 4622-4626 (1998)*
5) Kakiuchi, Y. and Ueda, T.: "Fragmentation of the plasmodium into equally sized pieces by low temperatures in the true slime mold Physarum polycephalum: a new morphogenesis", *Protoplasma*, 206: 131-136 (1999)*
6) Jin T., Kinjo, M., Kobayashi, Y., and Hirata, H.: "Ion Transport Activity of Calix [n] arene (n=4, 5, 6, 7, 8) esters toward Alkali-metal Cations in a Phospholipid Bilayer Membrane", *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 94: 3135-3140 (1998)*
7) Jin T. and Monde K.: "Synthesis and Optical Resolution of a Fluorescent Chiral Calix [4] arene with Two Pyrene Moieties Forming an Intramolecular Excimer", *Chem. Commun.*, 1357-1358 (1998)*
8) T. Nakagaki, H. Yamada and T. Ueda: " Modulation of cellular rhythm and photoavoidance by oscillatory irradiation in the Physarum plasmodium," *Biophysical Chemistry*, 82: 23-28 (1999)*
9) T. Ueda, S. Koya and Y. Maruyama: "Dynamic patterns in the locomotion and feeding behaviors by the placozoan Trichoplax adhaerence," *BioSystems*, 54: 65-70 (1999)*
10) Takashi Jin: "A new Na+ sensor based on intramolecular fluorescent energy transfer derived from calix [4] arene," *Chem. Commun.*, 2491-2492 (1999)*

11) Takashi Jin: "Membrane transport of neurotransmitter acetylcholine and related compounds across a phospholipid bilayer by a calix [6] arene ester," *Chem. Commun.*, 2129-2130 (1999)*
12) T. Nakagaki, H. Yamada and T. Ueda: "Interaction between cell shape and contraction pattern in the Physarum plasmodium," *Biophysical Chemistry*, 84: 195-204 (2000)*
13) T. Nakagaki, H. Yamada and A. Toth: "Maze-solving by an amoeboid organism," *Nature*, 407(6803): 470-470 (2000)*
14) Qing Yang, Xue-Ying Liu, Koujiro Umetani, Tatsuya Ikehara, Seiji Miyauchi, Naoki, Kamo, Takashi Jin and Jun Miyake: "Membrane partitioning and translocation of hydrophobic phosphonium homologues: thermodynamic analysis of immobilized liposome chromatography," *J. Phys. Chem. B*, 104: 7528-7534 (2000)*
15) Takashi Jin: "Photocontrol of Na+ ion transport across a phospholipid bilayer containing a bisanthroylcalix [4] arene carrier," *Chem. Commun.*, 1379-1380 (2000)*
16) Takashi Jin: "Kinetics and mechansim of the dissociation of a sodium-calix [4] arene ester complex in nonaqueous solution," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2: 1401-1406 (2000)*
17) Y. Kakiuchi., T. Takahashi, A. Murakami and T. Ueda: "Light irradiation induces fragmentation of the Plasmodium, a Novel Photomorphogenesis in the True Slime Mold Physarum polycephalum: Action Spectra and Evidence for Involvement of the Phytochrome," *Photochemistry and Photobiology*, 73(3): 324-329 (2001)*
18) 高松敦子、田中玲子、山田裕康、中垣俊之：「リング状に結合した粘菌振動子系における時空間振動パターン」、第13回自律分散システム・シンポジウム資料、411-414 (2001)
19) 田中玲子、山田裕康、高松敦子、中垣俊之：「結合振動子系の解析—対称系の Hopf 分岐理論の適用」、第13回自律分散システム・シンポジウム資料、415-420 (2001)
20) 山田裕康、中垣俊之、田中玲子、高松敦子：「振動子の結合形態と位相パターン—粘菌ネットワーク形態ダイナミクスの解析をめざして—」、第13回自律分散システム・シンポジウム資料、421-424 (2001)
21) 中垣俊之、山田裕康：「粘菌の経路探索」、第13回自律分散システム・シンポジウム資料、425-428 (2001)
22) T. Nakagaki, H. Yamada, and A. Toth: "Path finding by tube morphologenesis in an amoeboid organism," *Biophys. Chem.*, 92: 47-52 (2001)*
23) A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii and I. Endo: "Spatio-temporal symmetry in rings of coupled biological oscillators of Physarum Plasmodium," *Phys. Rev. Lett.*, 87: 781021-1-781021-4 (2001)*
24) T. Jin: "Selective transport of potassium ions across a planar phospholipid bil ayer by a calix [4] arene-crown-5 as a synthetic carrier," *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2*, 1: 151-154 (2002)*
25) 中垣俊之：「粘菌の流路ネットワーク形成と細胞リズム」、第17回生体・生理工学シンポジウム論文集、373-376 (2002)
26) 小林亮、中垣俊之：「真性粘菌変形体の運動の数理モデル」、数理解析研究所講究録、1305：8-14 (2003)
27) 中垣俊之、小林　亮：「粘菌変形体の流路ネットワークの形態形成」、数理解析研究所講究録、1305：1-7 (2003)
28) T. Ueda: "An intelligent slime mold: self-organizing system of shape and information.", *The fourth RIES-Hokudai Symposium*, 4: 24-28 (2002)

4.2 総説、解説、評論等

1) 中垣俊之、山田裕康：「粘菌の収縮リズムと数理モデル」、京都大学数理解析研究所講究録、1167：65-68 (2000)
2) 垣内康孝、上田哲男：「粘菌にみる巨大細胞体制の構築」、生物物理、4(2)：70-73 (2001)*
3) 垣内康孝、上田哲男：「粘菌にみる巨大細胞体制の構築」、生物物理、41(2)：70-73 (2001)*
4) 中垣俊之：「迷路を解く単細胞生物」、遺伝、55：23-25 (2001)
5) Toshiyuki Nakagaki: "Smart behavior of true slime mold in labyrinth, "*Res. Microbiol.*, 152: 767-770 (2001)*
6) 中垣俊之：「迷路を解く巨大アメーバ細胞：粘菌」、生物物理、41：224-226 (2001)*
7) 中垣俊之：「To be stationary or oscillatory, that is a question?」、日本時間生物学会会誌、8：32-37 (2002)
8) 中垣俊之：「生物専攻課程に数理生物学を」、数学のたのしみ、30：43-48 (2002)
9) 上田哲男：「粘菌に知性はあるか？」、生命誌、34：(2002)

4.3 著書

1) 上田哲男、中垣俊之(1997)「細胞に心はあるか—細胞行動の心理生理学の試み」53-67 (松本修文：脳と心のバイオフィジックス、共立出版、東京) (1997)
2) 上田哲男「真正粘菌における生体リズムと光シグナリング」63-68 (蓮沼仰嗣、木村成道、徳永史生：光シグナルトランスダクション、シュプリンガーフェアラーク、東京) (1999)

3）上田哲男：「生物と情報処理―粘菌を例に―」、『バイオミメティックス　ハンドブック』（エヌ・テイー・エス）pp.1072-1080（2000）*

4）T. Nakagaki and H. Yamada: "Rhythmic contraction and its fluctuations in an amoeboid organism of the Physarum plasmodium," In Quantum Information II, (World Scientific Publisher) p.107-102 (2000)

5）上田哲男：「粘菌、特にその個体性」、『複雑系のバイオフジックス』、（共立出版）pp.111-124 (2001)*

4.5　招請講演

1）上田哲男：「粘菌に学ぶ細胞インテリジェンス」、早稲田大学シンポジウム、東京、日本（2000-5）

2）T. Nakagaki and H. Yamada: "Path finding by an amoeboid organism,"日伊応用数学会ジョイントシンポジウム -Mathematics Moving Toward Biology-, Kobe, Japan (2000-11)

3）中垣俊之、山田裕康：「粘菌変形体における管ネットワークの形成と細胞リズム」、第10回協同現象と非線形反応研究会、宇部、日本（2000-11）

4）高松敦子、田中玲子、山田裕康、中垣俊之：「リング状に結合した粘菌振動子系における時空間振動パターン」、第13回自律分散システム、福岡、日本(2001-1)

5）田中玲子、山田裕康、高松敦子、中垣俊之：「結合振動子系の解析―対称系の Hopf 分岐理論の適用」、第13回自律分散システム、福岡、日本（2001-1）

6）山田裕康、中垣俊之、田中玲子、高松敦子：「振動子の結合形態と位相パターン―粘菌ネットワーク形態ダイナミクスの解析をめざして―」、第13回自律分散システム、福岡、日本（2001-1）

7）中垣俊之、山田裕康：「粘菌の経路探索」、第13回自律分散システム、福岡、日本（2001-1）

8）中垣俊之：「迷路を解くアメーバ―単細胞生物が持つ高度な情報処理能力のメカニズム―」、名古屋市理化学研究所ジョイント講演会、名古屋、日本（2001-2）

9）T. Nakagaki: "Maze-solving by an amoeboid organism," The 2nd RIES-Hokudai Symposium on "揺[You]," Sapporo, Japan (2001-3)

10）中垣俊之：「粘菌による迷路の解法」、第39回生物物理学会年会　シンポジウム「生体のシステム原理と工学：情報伝達・協同性」、大阪大学（2001-10）

11）Toshiyuki Nakagaki: "Morphology of tube-network in true slime mold," NSC Niniworkshop On Mathematical Physiology and Related Topics, Hokkaido University, Japan (2001-10)

12）中垣俊之：「巨大アメーバ様細胞の形と機能」、日本生化学会北海道支部・日本生物物理学会北海道支部・北海道分子生物研究会合同シンポジウム「生命現象の分子レベルでの解明―世界にはばたく若手研究者の視点―」、北海道大学（2001-11）

13）中垣俊之：「粘菌変形体の細胞リズムの生理」、第8回日本時間生物学会ワークショップ「生物リズムの理論的基礎と多様性」、山口（2001-11）

14）中垣俊之：「粘菌の流路ネットワークの生理」、名古屋大学理学部物理学科　小西助教授主催セミナー、名古屋大学（2002-1）

15）中垣俊之：「粘菌の流路ネットワークの生理」、東京大学総合文化研究科　金子教授主催セミナー、東京大学（2002-1）

16）中垣俊之：「巨大アメーバ様細胞の形と機能」、JST 異分野交流フォーラム「バイオインフォマティクス」、静岡県大仁町（2002-3）

17）小林亮、中垣俊之：「真性粘菌のパターンダイナミクスのモデリング」、応用数理学会：ワークショップ「自己組織化現象の数理モデルとシミュレーション」、慶応義塾大学（2002-09）

18）中垣俊之：「粘菌の流路ネットワークと細胞リズム」、第17回生体・生理工学シンポジウム、北海道大学（2002-09）

19）中垣俊之：「粘菌の細胞リズムと流路ネットワークの形」、盛岡応用数理小研究集会、岩手大学（2002-10）

20）中垣俊之：「アメーバ様生物粘菌の行動と計算」、電気学会　産業システム情報化研究会「ナチュラルコンピュテーション」、東京（2002-12）

21）中垣俊之：「粘菌変形体の賢さを探る」、変形菌研究会25周年記念講演、上野国立科学博物館（2003-02）

22）小林亮、中垣俊之、手老篤史：「真性粘菌変形体の運動に関する数理モデル」、基礎生物学研究所　研究会プログラム　生命科学における Informatics と Mathematics、岡崎（2003-03）

23）R. Kobayashi and T. Nakagaki: "Modeling Approach to the Dynamics of Plasmodium of Physarum Polycephalum", Seminar in Keener's Labo, Univ. of Utah, USA (2002-07)

24）R. Kobayashi and T. Nakagaki: "Modeling Approach to the Dynamics of Plasmodium of Physarum Polycephalum", Seminar in Alt's Labo, Bonn Univ., Germany (2002-08)

25）小林亮、中垣俊之、手老篤史：「真性粘菌変形体の運動と形態形成の数理モデル」、蔵本研セミナー、京都大学（2002-12）

26）中垣俊之：「真正粘菌変形体の行動とマクロな形態」、大阪大学　生命機能研究科セミナー、大阪大学(2002-12)

4.6　シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）上田哲男、中垣俊之（電子機能素子部門）、西浦廉政、小林亮（電子情報処理部門）："NSC-Cell Info. Sympo-

sium on "Cell Dynamics And Physiological Functions In Physarum"" (15名、北海道大学) (2002.3.25-26)

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

2）上田哲男（電子機能素子部門）："日本生物物理学会北海道支部例会" (50名、北海道大学) (2002.2.22)

3）上田哲男、中垣俊之（電子機能素子部門)、西浦廉政、小林亮(電子情報処理部門)："Cell Info.-NSCワークショップ"粘菌のダイナミックな生命像を求めて"" (15名、北海道大学) (2002.2.25-26)

4）上田哲男、槌屋美實、中田聡："リズムと自己組織化の制御—分子シンクロにゼーションに基づく新規材料設計を目指して—" (30名、支笏湖丸駒温泉旅館) (2002.11.8-9)

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）上田哲男、特定領域A (2)、代謝・運動リズムのシンクロナイゼーションに基づくアメーバ様細胞の情報システム設計、2,000千円 (1999)

2）西山宣昭、基盤C 一般(2)、粘菌の代謝ダイナミクスによる記憶・学習、2,600千円 (1999)

3）上田哲男、特定領域A (2)、代謝・運動リズムのシンクロナイゼーションに基づくアメーバ様細胞の情報システム設計、2,400千円 (2000)

4）西山宣昭、基盤C 一般(2)、粘菌の代謝ダイナミクスによる記憶・学習、900千円 (2000)

5）上田哲男、特定領域A (2)、代謝・運動リズムのシンクロナイゼーションに基づくアメーバ様細胞の情報システム設計、2,100千円 (2001)

6）上田哲男、基盤研究C 一般(2)、巨大アメーバ粘菌の形状変化に基づく細胞インテリジェンスの創発、2,300千円 (2001)

7）中垣俊之、基盤研究C 一般(2)、粘菌における迷路解法と細胞システム構築の動的メカニズム、2,400千円 (2001)

8）上田哲男、特定領域研究A (2)、代謝・運動リズムのシンクロナイゼーションに基づくアメーバ様細胞の情報システム設計、2,100千円 (2002)

9）上田哲男、基盤研究C 一般(2)、巨大アメーバ粘菌の形状変化に基づく細胞インテリジェンスの創発、1,200千円 (2002)

10）中垣俊之、基盤研究C 一般(2)、粘菌における迷路解法と細胞システム構築の動的メカニズム、1,200千円 (2002)

b．奨学寄付金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1）神隆、㈶伊藤医薬学術交流財団、第4回カリックスアレンおよびその関連化合物に関する国際会議派遣助成、250千円 (1997)

2）神隆、㈶秋山記念生命科学振興財団、人工イオンチャネルの分子設計とリン脂質二重層膜における輸送特性、500千円 (1997)

3）西山宣昭、㈶加藤記念バイオサイエンス研究振興財団、粘菌の代謝ダイナミクスによる記憶・学習、2,000千円 (1999)

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）太田信廣(電子材料物性部門)、下村政嗣、上田哲男(電子機能素子部門)：光が絡む分子材料と生体機能：時空間分解電場吸収・電場発光測定に基づいて (2001～2002)

2）西浦廉政、小林亮(電子情報処理部門)、上田哲男、中垣俊之(電子機能素子部門)：非線形化学ダイナミクスに基づく細胞インテリジェンスの発現 (2001～2003)

3）太田信廣、下村政嗣、上田哲男：光が絡む分子材料と生体機能：時空間分解電場吸収・電場発光測定に基づいて (2001～2002)

4）西浦廉政、小林亮、上田哲男、中垣俊之：非線形化学ダイナミクスに基づく細胞インテリジェンスの発現 (2001～2003)

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）芳賀永、小林亮、中垣俊之、21世紀COEプログラム「バイオとナノを融合する新生命科学拠点」：ナノ力学走査型プローブ顕微鏡を用いた細胞システム挙動の実験的・理論的解析、4,000千円 (2002～2003)

g．その他（担当者名、機関名、研究題目、研究期間）

1）中垣俊之、北海道大学創成科学研究機構流動研究部門：原生生物粘菌に学ぶ最適化情報ネットワークの自己組織化、13,750千円 (2002～2004)

4.10 社会教育活動

b．国内外の学会の主要役職

1）上田哲男：生物物理学会・運営委員 (2000～2002年度)

2）上田哲男：生物物理学会・北海道支部長 (2000～2002年度)

3）中垣俊之：電気学会ナチュラルコンピュテーション協同研究委員会委員 (2001～2002年度)

4）中垣俊之：理化学研究所非常勤研究員 (2000年11月20日～現在)

5）中垣俊之：大阪大学 生命機能研究科 客員助教授 (2002年4月1日～現在)

6）中垣俊之：日本ゆらぎ現象研究会 運営委員 (2002年11月28日～現在)

c．新聞・テレビ等の報道

1）上田哲男：岐阜新聞、「賢さ際立つ変形体 好き嫌いし記憶も」(2000年12月12日)

2）上田哲男：山陽新聞、「賢さ際立つ変形体　好き嫌いし記憶も」（2000年12月19日）
3）上田哲男：秋田さきがけ、「賢さ際立つ変形体　好き嫌いし記憶も」（2000年12月20日）
4）上田哲男：神戸新聞、「賢さ際立つ変形体　好き嫌いし記憶も」（2001年1月9日）
5）上田哲男：高知新聞、「真性粘菌は賢い？　好き嫌いを〝判断〟」（2001年2月5日）
6）中垣俊之：Smithonian Magazine、「Trekking with Slime mould」（2000年11月17日）
7）中垣俊之：BBC WILDLIFE、「Simply not a problem」（2000年12月）
8）中垣俊之：サピオ、「〝アメーバ状生物〟粘菌の計算能力はスパコンを凌駕する」（2000年11月）
9）中垣俊之：STA TODAY―科学技術庁広報誌、「Discovery of the ability of Myxomycetes to detect the shortest route of labyrinth 2000, vol. 12, No. 11」（2000）
10）中垣俊之：Illustrei Videnskab (Denmark)、「Klog slimsvamp finder vej i labyrint NR. 5/2001」（2001）
11）中垣俊之：子供の科学、「迷路解く粘菌」（2001年1月）
12）中垣俊之：Natural History (The Magazine of the Americam Museum of Natural History)、「Smart Slime」（2001年3月1日）
13）中垣俊之：Times Higher Educational Supplement、「Do single-cell organisms have intelligence? Slime mould, for one, can solve a maze and find food」（2001年3月23日）
14）T. Nakagaki: ARTE: a special French-German cultural TV-Channel、―Like Nothing On Earth The Incredible Life of Slime Moulds―(Color/43min.)、2002年7月1日
15）中垣俊之、上田哲男：サイエンスチャネル（千代田ソフトプランニング制作）迷路を解く謎の生物：粘菌（Color/30min.）2001年6月1日放映

e．大学院担当講義科目

1）細胞機能素子学研究（1999～2001）
2）機能素子解析法Ⅰ、Ⅱ（1999～2002）
3）一般教育演習（2002）
4）細胞機能素子研究学（2002）
5）統合細胞生物（2002）
6）生理学（2002）
7）基礎特別演習（2002）
8）化学Ⅱ（2002）
9）基礎特別演習（2002）

電子計測制御部門

研究目的

電子計測を基盤とする計測と制御に関する研究を中心課題とし、光や電子の特性を利用した高速、高感度、高精度計測法に基づき、生体のような柔軟性と適応性をもつ新しい制御システムについて研究することを目的としている。

光システム計測研究分野

教授　笹木敬司（阪大院、工博、1997.11～）
助教授　魚住　純（北大院、工博、1989.4～1999.3）
竹内繁樹（京大院、理博、1999.10～）
助手　堀田純一（阪大院、工博、1998.4～）
技官　牛坂　健（札幌電波専、1961.11～2000.3）
講師　藤原英樹（北大院、工博、2000.4．～2002.3 研究機関研究員、2002.4～ポスドク）
ポスドク　ホフマン・ホルガ（Stuttgart Univ. Ph. D.、2001.6～）
大橋弘明(北陸先端大・材料科学博、2002.4～)

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
マクラム・イブラヒム、三宮　俊、藤原英樹、松尾保孝、辻野賢治、小島邦裕、岡　寿樹、千葉明人
修士課程
齋藤孝充、辻野賢治、宮坂英太、高崎秀久、千葉明人、岡本　亮、更科昌弘、千葉孝志、坂東稔彦、川瀬大輔、川辺喜雄、髙島秀聡、西村和哉、百瀬義剛

1．研究目的

本研究分野では、光テクノロジーの究極を目指して、光の量子性・波動性をフルに活用した新しい概念に基づく光情報処理、光計測制御など、新しい世代の光科学の研究に取り組んでいる。具体的には、単一光子制御デバイスや高効率レーザーの開発を目指して、微小球やランダム媒質等の微細構造体における光子閉じ込めの解析や発光ダイナミクス制御の研究を進めている。また、量子コンピュータや量子暗号通信の実現に向けて、量子力学的なもつれ合いをもつ光子対の発生や制御、高効率な光子検出装置の開発、光子情報処理システムのプロトタイプの構築に取り組んでいる。さらに、ナノ空間の光計測技術やレーザーマニピュレーションを利用した極微弱な力の解析、単一光子源の開発に向けた単一分子・単一ナノ微粒子の分光計測システムの開発を目指している。

2．研究成果

・平成 9 －10 年度

(a)　微小球における共振器増強遷移過程の解析

高分子微小球にドープした芳香族分子の自然放出過程が共振器量子電気動力学効果により増強する現象を観測することに成功した。また、2 種類の芳香族分子間のエネルギー移動ダイナミクスについても観測を行った結果、双極子・双極子相互作用によるエネルギー移動の効率がバルクにおける観測値に比べて数十倍高くなることを明らかにした。

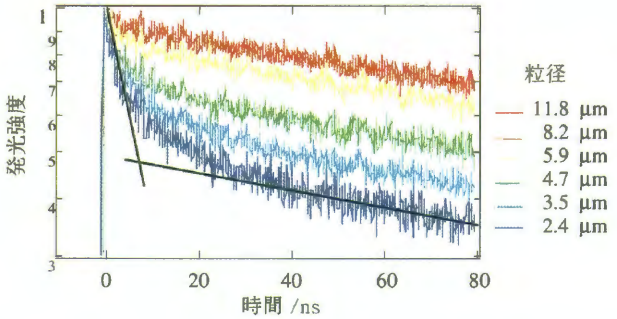


図 1．ピレンドープ高分子微小球の蛍光減衰波形

(b)　アップコンバージョン微小球レーザー発振の研究

微小球レーザー発振の長時間安定性、ポンプ光と発振光の波長域の分離を目的として、希土類イオンをドープしたガラス微小球の作製を試み、レーザーマニピュレーション用近赤外光を用いた多光子励起により青色領域の安定したアップコンバージョンレーザー発振光を得ることに成功した。

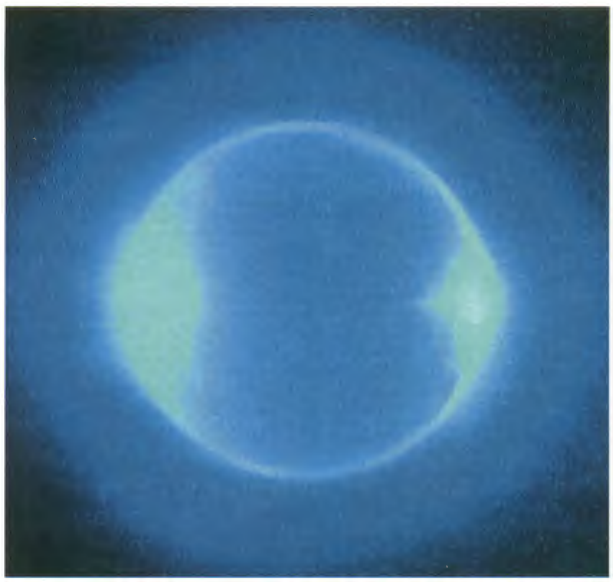


図 2．希土類イオンドープガラス微小球のアップコンバージョンレーザー発振

(c)　微小球レーザーのフォトントンネリング現象の解析

レーザー発振微小球とガラス基板との距離をレーザーマニピュレーションにより制御しながら発振スペクトルを測定した結果、エバネッセント場の強度分布に対応した発振ピークの強度変化が観測された。このことから微小球とガラス基板の間で光局在場を介したフォトントンネリングが起こっていることが確認され、近接場顕微鏡のプローブとしての有効性が示された。

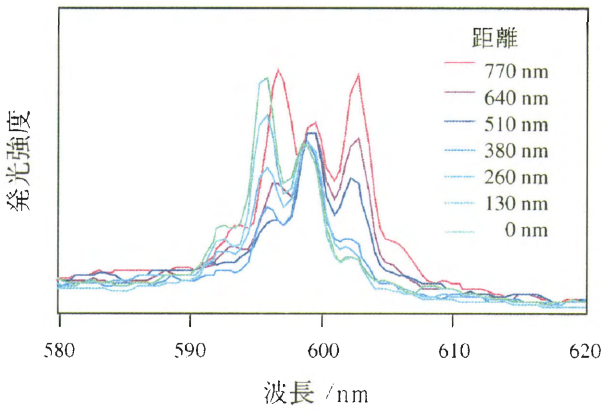


図３．微小球レーザー発振スペクトルの距離依存性

(d)　微粒子に作用する放射圧３次元ポテンシャル計測

エバネッセント場を用いた３次元ナノメートル光位置検出法を新たに考案し、レーザー発振微小球の揺らぎを直接測定するシステムを開発した。また、微粒子の熱揺らぎにボルツマン分布を適用して微粒子に作用するポテンシャルを瞬時に高精度で解析する手法を開発し、エバネッセント場の放射圧ポテンシャル計測や静電力測定による表面電荷密度の解析に応用した。

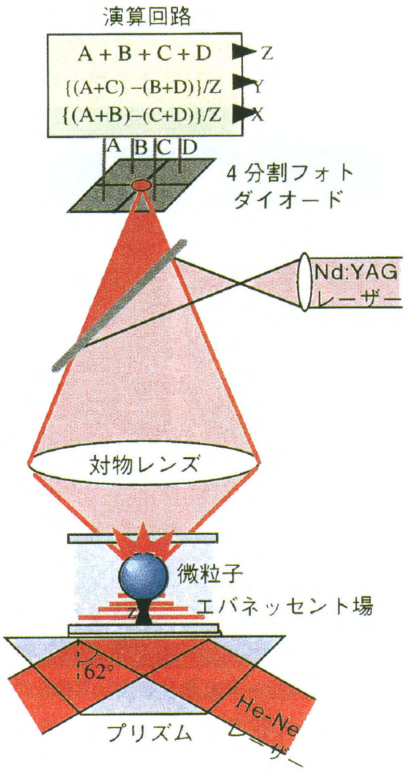


図４．３次元ナノメートル位置検出法

(e)　超高速微分干渉顕微計測システムによる単一ナノ微粒子のダイナミック分光解析

短パルスレーザーと微分干渉計を組み合わせ、ナノメートルサイズの単一励起微粒子からの前方散乱光の振幅と位相の変化を高精度に測定し、複素屈折率、つまり屈折率と吸収の情報をフェムト秒のタイムスケールで時間分解分光計測するシステムを開発した。本システムを用いてナノ金属微粒子の過渡吸収を測定するのに成功し、励起状態ダイナミクスを解析した。

(f)　フラクタル的強度分布を有する光散乱場の生成

フラクタル散乱体と通常の散乱体を用いた二重散乱現象により、フラクタル性を有するランダムな光強度場を生成できることを実験により示した。また、生成されたフラクタル強度分布のフラクタル次元は、用いたフラクタル散乱体のフラクタル次元に依存することを示した。

(g)　フラクタル凝集媒質からの強調後方散乱現象の解析

フラクタル凝集媒質におけるコヒーレント光多重散乱現象によって生ずる強調後方散乱現象を計算機シミュレーションにより解析し、後方散乱ピーク形状のフラクタル次元依存性などを明らかにした。

(h)　ろう管ネガティブ用音声再生装置の開発

原理的に触針式再生法が適用不可能なろう管ネガティブから非接触で音声再生を行うため、レーザ光の反射特性を利用した光学的音声再生装置を開発し、約 100 年前の日本の音楽等を録音したネガティブからの音声再生に成功した。

(i)　多重散乱媒質におけるコヒーレント効果

通常、光のコヒーレンスを消滅させると見なされる光多重散乱現象において、光弱局在や散乱光路の共有などによって生ずるコヒーレントな干渉効果を理論および計算機シミュレーションにより解析し、媒質の線形および非線形吸収の影響を明らかにした。

(j)　リングスリット開口を用いた長相関スペックル場の生成

リングスリット開口でマスクしたスリガラスにより生ずるスペックル場には、光軸に垂直な面内には平均スペックル径よりも大きな空間相関が現れること、また、光軸方向には極めて長い空間相関が現れることを理論および実験により示した。

・平成 11－12 年度

(a)　微粒子ランダム媒質における光閉じ込め現象とレーザー発振の解析

ナノメートルオーダーの微粒子が高密度かつ不規則に配置された系（ランダム媒質）では光閉じ込め現象が誘起され局所的に極めて強い光相互作用が生じる可能性が理論的に指摘されている。ランダム媒質は、平均散乱自由行程が波長と同程度になるように作製する必要があることを除けばフォトニック結晶等に比べて作製が容易であるため、新しい光閉じ込め構造として超高感度光反応過程等への応用

が期待されている。我々は、希土類イオン含有ガラス微粒子を用いたランダム媒質を新たに作製し、高効率な光閉じ込め効果によるアップコンバージョンレーザー発振の誘起に成功するとともに、その空間特性を詳細に解析した。

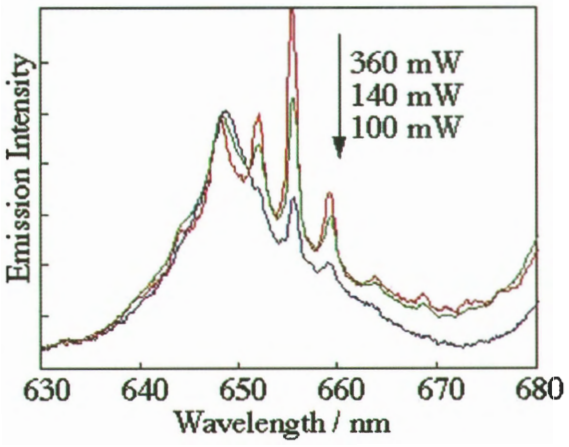


図1．ランダム媒質におけるレーザー発振スペクトル

(b) 実時間ナノ計測によるエバネッセント場放射圧のポテンシャル解析

レーザーマニピュレーション技術と実時間3次元ナノポジション検出技術を組み合わせ、微粒子に作用する極微弱な力のポテンシャルを高感度・高精度に計測する手法を用いて、ナノメートルサイズの金属微粒子とエバネッセント場の相互作用により発生する放射圧の解析を行った。250 nmの金微粒子に働く力を解析したところ、界面に垂直・水平方向にそれぞれエバネッセント場の勾配力・散乱力によるフェムトニュートンオーダーの放射圧が作用することが明らかになった。

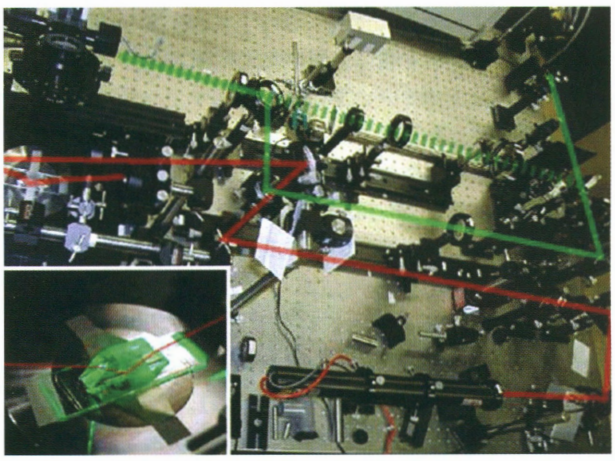


図2．放射圧ポテンシャル測定用光学系

(c) 微分干渉顕微鏡による単一ナノ金属微粒子のダイナミック吸収分光

単一ナノ微粒子に照射したレーザー光の前方散乱光に吸収の情報が含まれることに着目し、前方散乱光の位相と振幅の変化を微分干渉計を用いて高精度に測定することにより単一微粒子の複素屈折率と粒径を同時に解析する手法を開発した。システムを構築し、70 nmの銀微粒子一粒の表面プラズモン吸収による微分干渉信号を検出するとともに、ピコ秒オーダーの時間変化の計測を実現した。ナノ銀微粒子の研究は微粒子分散溶液の測定が既に行われているが、単一微粒子の極微弱な過渡吸収の観測に成功したのはこれがはじめてである。

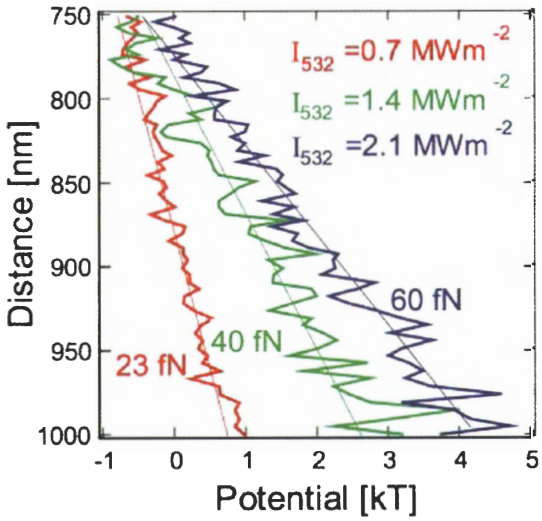


図3．光吸収ポテンシャルの励起光強度依存性

(d) 放射圧スペクトロスコピーによる単一微粒子の極微吸収測定

全く新しい原理に基づく単一微粒子の吸収測定法として放射圧ポテンシャルを利用した光計測法を開発した。本手法は、微粒子の複素屈折率が僅かに変わると放射圧の空間分布が大きく変化することを利用し、すなわち、吸収を光強度の変化としてではなく吸収に伴って発生する光の力に変換して計測するという新しいアイデアに基づいて、単一微粒子の極めて小さい吸収、過渡吸収を高感度、高精度に計測するものである。また、パルスレーザーを用いたポンプ・プローブ法により超高速過渡吸収現象をフェムト秒の時間スケールで解析できる

(e) ビーム状パラメトリック蛍光対の発生方法の開発

複屈折結晶中では、ある条件が満たされた場合、エネルギーの高い光子が、2つの光子（パラメトリック蛍光対）に分裂する。これらの光子は発生時刻が同時で、また量子力学的にもつれ合った状態にあるため、量子情報通信への応用が期待されている。しかし、これまでの方法では非常に広がった方向に放射してしまい、集光効率が悪かった。今回我々は、結晶の角度を適切に調節することで、ビーム状にパラメトリック蛍光対を発生できることを発見した。今後、単一光子源などへの応用が期待される。

(f) 高量子効率光子数検出器の開発

我々は、Boeing社の開発した、Visible Light Photon

Counter という検出器を用い、逐次型光子検出器として最高の量子効率（88%）をもち、かつ、入射した光子数を区別可能な検出器を開発してきた（Stanford 大学との共同研究）。この 2 年間で、その改良に取り組んだ。現在 2 台の検出器が稼働できる状態にあり、今後量子テレポーテーション実験への応用を予定している。

(g)　量子計算、量子暗号に関する諸研究

そのほか、三菱電機との共同研究による日本初の量子暗号通信システムの構築に成功している。また、線形光学素子を用いた量子計算実験について、そのエラー原因の定量的な解明にも成功した。

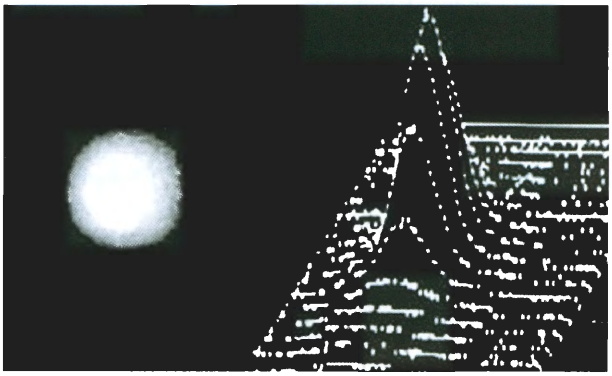


図 4．光子対ビーム（一方）の冷却 CCD 像

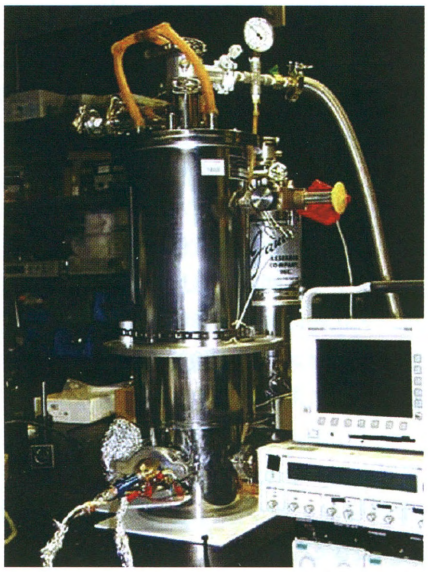


図 5．高量子効率光子数検出器

・平成 13－14 年度

(a)　単一光子制御デバイスの実現に向けた枝付き微小球の作製と高 Q 値測定システムの開発

光子一個でもう一個の光子の位相を反転させる単一光子制御デバイス（量子位相ゲート）の開発には、高い Q 値と小さいモード体積を有する微小共振器が不可欠である。我々は、シンプルな構造でありながら特性の優れた微小球に注目してデバイス開発を進めている。光ファイバーとのカップリング時の位置調整用に微細ロッドの付いた数十～数百マイクロメートルのガラス微小球を作製する技術を開発し、さらに微小球の Q 値やモード同定を行うための高分解能散乱スペクトル測定装置を構築した。また、電磁界シミュレーションにより、微小球における光閉じ込めやファイバーとのカップリング状態の解析を進めている。

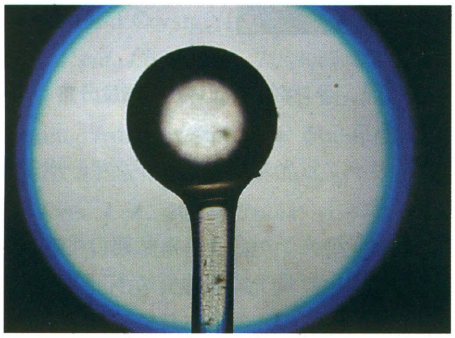


図 1．枝付き微小球

(b)　完全な量子テレポーテーションの実現に向けた光子もつれ合い状態の解析

量子テレポーテーションとは、もつれ合った光子対を用いて、ある光子の量子状態を、遠方にある別の光子へと乗せかえる技術である。光子を用いた量子計算や、長距離量子鍵配送への応用が期待でき、注目されている。いくつかのグループで検証実験が報告されていたが、それらの実験ではいつ光子が検出されるかがわからないなどの欠点が指摘されており、我々はその困難を解決した完全な実験を目指している。

今回我々は、フェムト秒レーザー光励起で、明暗比 90% 以上のもつれ合った光子対を発生する光源を開発した。また、完全な実験を行うために必要な実験条件を理論的に厳密に導出することに成功した。その結果、我々の所有する高量子効率（>88%）でかつ入射光子数を区別可能な検出器を用いた場合、開発したもつれ合い光源を用いて 1 日程度の実験で「完全な実験」を実現可能であることが明らかになった。

(c)　ナノ微粒子ランダム媒質中の光カー効果による増幅自然放出光の制御

ローダミン色素溶液に数十ナノメートルサイズの酸化チタン散乱体を高濃度で混入したランダム媒質に励起光を照射すると、光の閉じ込め効果による増幅自然放出光が観測された。さらに、このランダム媒質にポリジアセチレン系ナノ微結晶を混入し、波長の異なるレーザー光を照射して光カー効果を誘起することにより増幅自然放出光を制御することに成功した。本実験は、ランダム媒質における光閉じ込め現象の詳細な解析につながるとともに、高速光スイッチングデバイス開発への道を拓くものである。

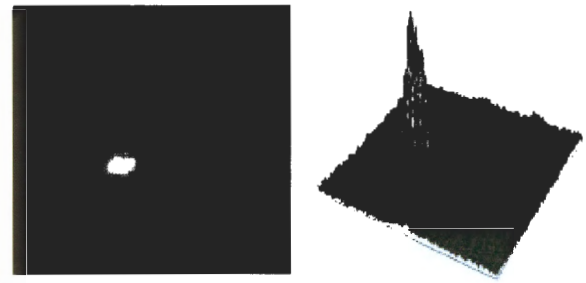


図２．ランダム媒質の発光強度分布

(d)　パラメトリック蛍光光子対を用いた単一光子発生装置の開発

パルス内に単一の光子が含まれる状態の生成（単一光子源）は、光子を用いた量子情報通信に不可欠なデバイスである。しかし、これまでに報告されている単一光子源は、広範囲に広がって光子が射出されてしまうために、その利用が非常に困難であった。

今回我々は、独自に見出した「光子対ビーム発生法」を応用し、単一光子発生装置の開発を行った。発生時刻の等しく、異なる方向に出力される２つの光子の一方を検出器に導き、検出信号が得られたときだけ、非常に短い時間(25 ns) だけシャッターを開き、もう一方の光子を射出するという方法である。現在遅延光学系、電子制御系など各部の動作検証を終了し、出力状態の光子数分布の測定に取り組んでいる。

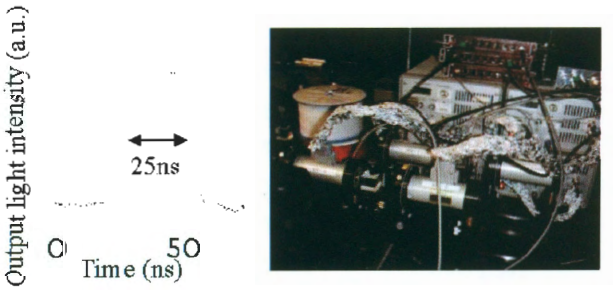


図３．単一光子源用超高速シャッター光学系

(e)　線形光学素子を用いた量子計算

前述した、量子位相ゲートのデバイスの実現には、まだ困難が山積している。その相補的な方法として、線形光学素子と単一光子源を用いる方法が2000年にKnillらによって提唱されている。しかしこの方法では、複雑な光学干渉計と多数の単一光子源を必要とした。

今回我々は、同様の効果を、反射率が1/3のビームスプリッター一つで得られることを見出した。この方法では、出力光子数が１である状態を選び出さなければならない欠点があるが、非常にシンプルに光学系を構成できるため、光子を用いた量子計算の検証実験や、ある種の量子回路の実現には有益である。

また、同様の手法で、もつれ合い状態にある光子対のみを透過するフィルターも発明した。

(f)　共焦点顕微鏡を用いた単一分子ダイナミック分光システムの開発

単一分子の蛍光挙動を観測することを目的とした共焦点ダイナミック顕微分光システムを開発した。本システムを用いて、ガラス基板上に分散したジオクタデシルーテトラメチルインドカルボシアニン過塩素酸（DiI）分子の蛍光像ならびに蛍光の時間変化を観測した結果、ブリンキング現象が確認され、その応答特性解析から三重項状態の寿命を推定することができた。さらに、偏向特性を観測することにより、単一分子の向きや局所的な環境を解析することが可能なシステムに拡張している。また、単一分子による単一光子源の開発に向けて、アンチバンチング現象等の観測が可能な高時間分解発光解析装置を組み込むことを検討している。

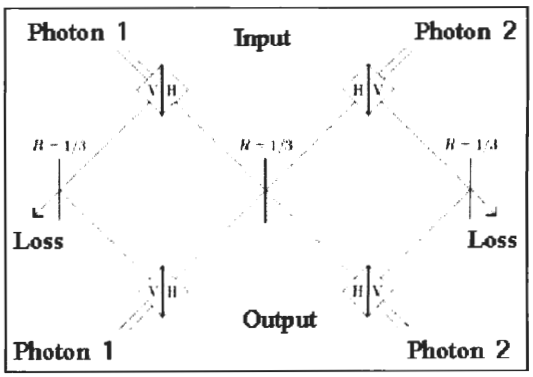


図４．線形光学素子を用いた制御ノット光学回路

(g)　ナノポジションセンシングによる基板界面近傍における離散化放射圧ポテンシャルの観測

光の放射圧により基板界面近傍で微粒子をレーザー捕捉するとき、微粒子・界面間における多重反射（共振器効果）がトラッピング状態に与える影響を、新たに開発した３次元ナノポジションセンサで実験的に解析した。レーザー光の焦点と基板界面の距離を変化させながら微粒子の位置を観測すると、界面から半波長の整数倍の距離で放射圧ポテンシャルが極小値をとることが解明された。本実験結果は、拡張Mie散乱理論に基づいたシミュレーション解析結果とよく一致することを示した。この知見は、レーザーマニピュレーションを用いた近接近接場顕微鏡や分子間相互作用の研究に重要な情報を提供するものである。

３．今後の研究の展望・将来計画

・平成９－10年度

これまでの研究で得られた技術を組み合わせ、レーザー発振微小球をプローブとしてナノメートルの微小空間を光で計測し制御することができるフォトントンネリング顕微鏡の開発を考えている。本システムが開発できれば、ナノ空間における原子・分子集合系の光物理・光化学現象の解

析、微小球と固体表面の微小空間に閉ざされた原子・分子の振る舞いの超高速時間分解分光を実現することができる。また、開発した単一微粒子に作用するポテンシャルの測定法は原子間力顕微鏡で観測できる力より遥かに小さいピコ～フェムトニュートンオーダーの力測定が可能であり、高分子凝集体、ミセル、ベシクル、色素分子会合体等の凝集・会合の観察や吸着・付着の解析など原子・分子間力、表面力の研究への応用を計画している。さらに、単一ナノ微粒子のダイナミック分光計測法に関しては、放射圧計測法と組み合わせて高感度化を図り、単一分子レベルの過渡吸収測定への展開を考えている。

・平成11－12年度

本研究分野は、この2年間は立ち上げの時期にあり、実験装置を組み立て研究環境を整えるとともに、これからの種になる基礎的な研究を開始したところである。今後は、以下のようなチャレンジングな研究テーマのもとに新しい世代の光科学の研究を進める予定である。

- 微細構造体による光閉じ込めを利用した超高効率光デバイスの構築
- 放射圧スペクトロスコピーによるナノメートル微粒子の物性解析
- 光局在場における単一分子の光相互作用に関する理論的・実験的解析
- 微小共振器を用いた光量子位相ゲート（単一光子スイッチ）の実現
- 蛍光光子対を用いた単一光子源の開発と量子情報通信への展開
- 光子数検出器を用いた完全な量子テレポーテーションの実現

・平成13－14年度

本研究分野では、これまでの研究成果に基づき、総務省量子情報通信研究開発プロジェクト、科学技術振興事業団若手個人研究推進事業、戦略的基礎研究推進事業のプロジェクトとして、「微小球共振器を用いた量子位相ゲートの実現に関する研究」、「光子数状態の生成と制御」、「量子相関光子ビームナノ加工」の研究を本年度から開始した。これらのプロジェクトを含め、以下のような短期的な研究テーマをもとに研究を展開する予定である。

(a) 量子暗号の実現に向けた単一光子発生装置と高効率光子数検出器の開発
(b) 光子もつれ合い制御による量子テレポーテーション・量子リソグラフィ
(c) 微小球や不規則媒質の光共振現象の解析と単一光子制御デバイスの開発
(d) 単一分子・単一ナノ微粒子のダイナミック分光計測と単一光子源の開発
(e) 3次元ナノ位置検出技術と光マニピュレーションを用いた極微弱力解析

4．資料

4.1 学術論文

1) K. Sasaki: "Microspectroscopy with an Optically-Manipulated Lasing Particle," *Mater. Sci. Eng. B*, 48: 147-152 (1997)*

2) J. Hotta, K. Sasaki and H. Masuhara: "Manipulation of Liquid Crystal Texture by a Focused Laser Beam," *Appl. Phys. Lett.*, 71: 2085-2087 (1997)*

3) K. Sasaki, H. Fujiwara and H. Masuhara: "Photon Tunneling from an Optically Manipulated Microsphere to a Surface by Lasing Spectral Analysis," *Appl. Phys. Lett.*, 70: 2647-2649 (1997)*

4) K. Sasaki, K. Horio and H. Masuhara: "In Situ Measurement of Adhesion Force between a Single Microparticle and a Surface Using Radiation Pressure of Pulsed Laser Light," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36: L721-L723 (1997)*

5) K. Sasaki, H. Fujiwara and H. Masuhara: "Optical Manipulation of a Lasing Microparticle and Its Application to Near-Field Microspectroscopy," *J. Vac. Sci. Technol. B*, 15: 2786-2790 (1997)*

6) J. Hofkens, J. Hotta, K. Sasaki, H. Masuhara, T. Taniguchi and T. Miyashita: "Molecular Association by the Radiation Pressure of a Focused Laser Beam: Fluorescence Characterisation of Pyrene Labeled PNIPAM," *J. Am. Chem. Soc.*, 119: 2741-2742 (1997)*

7) M. Ibrahim, J. Uozumi and T. Asakura: "On the Generation of Clustered Speckles Due to Ring-Slit Illumination," *Optik*, 106: 33-41 (1997)*

8) J. Hofkens, J. Hotta, K. Sasaki, H. Masuhara and K. Iwai: "Molecular Assembling by the Radiation Pressure of a Focused Laser Beam: Poly (N-isopropylacrylamide) in Aqueous Solution," *Langmuir*, 13(3): 414-419 (1997)*

9) S. Shibata, M. Yamane, K. Kamada, K. Ohta, K. Sasaki and H. Masuhara: "Laser Emission from Dye-Doped Organic-Inorganic Particles of Microcavity Structure," *J. Sol-Gel Sci. Tech.*, 8: 959-964 (1997)*

10) K. Sasaki, M. Tsukima and H. Masuhara: "Three-dimensional Potential Analysis of Radiation Pressure Exerted on a Single Microparticle," *Appl. Phys. Lett.*, 71(1): 37-39 (1997)*

11) P. Borowicz, J. Hotta, K. Sasaki and H. Masuhara: "Laser-Controlled Association of Poly (N-vinylcarbazole) in Organic Solvents: Radiation Pressure Effect of a Focused Near Infrared Laser Beam," *J. Phys. Chem. B*, 101: 5900-5904 (1997)*

12) K. Sasaki, J. Hotta and H. Masuhara: "Fast and Accurate Analysis of Molecular Relaxation Processes on High-Intensity Excitation: Non-linear Analysis with a Convoluted Autoregressive Model," *J. Photochem. Photobiol. Chem. A*, 107: 21-25 (1997)*
13) P. Borowicz, J. Hotta, K. Sasaki and H. Masuhara: "Chemical and Optical Mechanism of Microparticle Formation of Poly (N-vinylcarbazole) in N, N-Dimethyl-formamide by Photon Pressure of a Focused Near-Infrared Laser Beam," *J. Phys. Chem. B*, 102: 1896-1901 (1998)*
14) J. Hotta, K. Sasaki, H. Masuhara and Y. Morishima: "Laser-Controlled Assembling of Repulsive Unimolecular Micelles in Aqueous Solution," *J. Phys. Chem. B*, 102: 7687-7690 (1998)*
15) J. Uozumi, M. Ibrahim and T. Asakura: "Fractal Speckles," *Opt. Commun.*, 156: 350-358 (1998)*
16) I. Ishii, T. Iwai, J. Uozumi and T. Asakura: "Optical Free-Path-Length Distribution in a Fractal Aggregate and Its Effect on Enhanced Backscattering," *Applied Optics*, 37: 5014-5018 (1998)*
17) M. Ibrahim, J. Uozumi and T. Asakura: "Longitudinal Correlation Properties of Speckles Produced by Ring-Slit Illumination," *Optical Review*, 5: 129-137 (1998)*
18) J. Widjaja, J. Uozumi and T. Asakura: "Real-Time Analysis of Specklegram Using Wavelet-Matched Filters," *Asian J. Phys.*, 7: 37-41 (1998)*
19) H. Yoshikawa, K. Sasaki and H. Masuhara: "Near-Field Fluorescence Microspectroscopy of Tetracene Microcrystals," *Mol. Cry. Liq. Cry.*, 314: 203-208 (1998)*
20) H. Masuhara, K. Sasaki, H. Fukumura and H. Furutani: "Time-Resolved Microspectroscopy and Interferometry of Organic Mesoscopic Materials," *Analyst*, 123: 531-536 (1998)*
21) M. Rucker, H. Yoshikawa, K. Sasaki, H. Masuhara and F. C. De Schryver: "Near Field Fluorescence Microspectroscopy of Anthracene-Tetrachlorophthalic Anhydride Charge Transfer Microcrystal," *Chem. Lett.*, 557-558 (1998)*
22) H. Yoshikawa, K. Sasaki and H. Masuhara: "Picosecond Fluorescence Analysis of Charge Transfer Microcrystals by Near-Field Microspectroscopy," *Chem. Phys. Lett.*, 293: 185-190 (1998)*
23) S. Sangu, T. Okamoto, J. Uozumi and T. Asakura: "Effect of Absorption on Surface Speckles in Random Media," *Waves in Random Media*, 9: (1999)*
24) S. Sangu, T. Okamoto, J. Uozumi and T. Asakura: "Enhanced Intensity Fluctuations of Multiply Scattered Light in Nonlinear Absorbing Media," *Optical Review*, 6: 104-109 (1999)*
25) H. Fujiwara, K. Sasaki and H. Masuhara: "Pyrene Fluorescence Dynamics within a Polymer Microspherical Cavity," *J. Appl. Phys.*, 85(4): 2052-2056 (1999)*
26) T. A. Smith, J. Hotta. K. Sasaki, H. Masuhara and Y. Itoh: "Photon Pressure-Induced Association of Nanometer-Sized Polymer Chains in Solution," *J. Phys. Chem. B*, 103(10): 1660-1663 (1999)*
27) H. Fujiwara and K. Sasaki: "Upconversion Lasing of a Thulium-ion-doped Fluorozirconate Glass Macrosphere," *J. Appl. Phys.*, 86(5): 2385-2388 (1999)*
28) J. Won, T. Inaba, H. Masuhara, H. Fujiwara, K. Sasaki, S. Miyawaki and S. Sato: "Photothermal Fixation of Laser-Trapped Polymer Microparticles on Polymer Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, 75(11): 1506-1508 (1999)*
29) H. Fujiwara and K. Sasaki: "Lasing of a Microsphere in Dye Solution," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38(9): 5101-5104 (1999)*
30) S. Takeuchi, J. Kim, Y. Yamamoto and H. H. Hogue: "Development of a High-Quantum-Efficiency Single-Photon Counting System," *Appl. Phys. Lett.*, 74(8): 1063-1065 (1999)*
31) J. Kim, S. Takeuchi, Y. Yamamoto and H. H. Hogue: "Multi-photon Counting using Visible Light Photon Counter," *Appl. Phys. Lett.*, 74(7): 902-904 (1999)*
32) H. Yoshikawa, K. Sasaki and H. Masuhara: "Picosecond Near-Field Microspectroscopic Study of a Single Anthracene Microcrystal in Evaporated Anthracene-Tetracene Film: Inhomogeneous Inner Structure and Growth Mechanism," *J. Phys. Chem. B*, 104(15): 3429-3437 (2000)*
33) K. Wada, K. Sasaki and H. Masuhara: "Optical Measurment of Interaction Potentials between a Single Microparticle and an Evanescent Field," *Appl. Phys. Lett.*, 76(20): 2815-2817 (2000)*
34) K. Sasaki, J. Hotta, K. Wada and H. Masuhara: "Analysis of Radiation Pressure Exerted on a Metallic Particle within an Evanescent Field," *Opt. Lett.*, 25(18): 1385-1387 (2000)*
35) S. Takeuchi: "Experimental Demonstration of a Three-qubit Quantum Computation Algorithm using a Single Photon and Linear Optics," *Phys. Rev. A*, 62: 032301/1-4 (2000)*
36) S. Takeuchi: "Analysis of Errors in Linear-optics Quantum Computation," *Phys. Rev. A*, 61: 052302/1-

15 (2000)*

37) Y. Matsuo, H. Takasaki, J. Hotta and K. Sasaki: "Absorption Analysis of a Single Microparticle by Optical Force Measurement," *J. Appl. Phys.*, 89(10): 5438-5441 (2001)*

38) Y. Matsuo and K. Sasaki: "Time-resolved Laser Scattering Spectroscopy of a Single Metallic Nanoparticle," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40: 6143-6147 (2001)*

39) S. Takeuchi: "A Simple Quantum Computer: Experimental Realization of Quantum Computation Algorithms with Linear Optics," *Electronics and Communications in Japan*, 84(3): 52-59 (2001)*

40) S. Takeuchi: "Beam Like Twin Photon Generation using Type-II Parametric Down Conversion," *Optics Letters*, 26(11): 843-845 (2001)*

41) T. Vosch, J. Hofkens, M. Cotlet, F. Kohn, H. Fujiwara, R. Gronheid, K. Van Der Biest, T. Weil, A. Herrmann, K. Mullen, S. Mukamel, M. Van Der Auweraer and F. C. De Schryver: "Influence of Structural and Rotational Isomerism on the Triplet Blinking of Individual Dendrimer Molecules," *Angewandte Chemie International Edition*, 40(24): 4643-4648 (2001)*

42) H. Fujiwara and K. Sasaki: "Lasing Emission from a Random Medium Composed of Thulium-ion-doped Glass Particles and Titanium Dioxide Powders," *Proc. of SPIE*, 4416: 190-193 (2001)*

43) H. Fujiwara and K. Sasaki: "Microspherical Lasing of an Erbium-Ion-Doped Glass Particle," *J. J. Appl. Phys.*, 41(1A/B): L46-L48 (2002)*

44) T. Hasegawa, T. Nishioka, H. Ishizuka, J. Abe, K. Shimizu, M. Matsui and S. Takeuchi: "An Experimental Realization of Quantum Cryptosystem," *IEICE Trans. Fundamentals*, E85-A: 149-157 (2002)*

45) T. Ide, H. F. Hofmann, A. Furusawa and T. Kobayashi: "Gain tuning and Fidelity in Continuous-variable Quantum Teleportation," *Phys. Rev. A*, 65: 062303/1-7 (2002)*

46) H. F. Hofmann and S. Takeuchi: "Quantum Phase Gate for Photonic Qubits using Only Beam Splitters and Postselection," *Phys. Rev. A*, 66: 024308/1-3 (2002)*

47) H. F. Hofmann: "Causality in Quantum Teleportation: Information Extraction and Noise Effects in Entanglement Distribution," *Phys. Rev. A*, 66: 032317/1-7 (2002)*

48) K. Tsujino, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Detailed Analysis of the Fidelity of Quantum Teleportation using Photons: Considering Real Experimental Parameters," *Phys. Rev. A*, 66: 042314/1-6 (2002)*

49) K. Wada, K. Sasaki and H. Masuhara: "Electric Charge Measurement on a Single Microparticle using Thermodynamic Analysis of Electrostatic Forces," *Appl. Phys. Lett.*, 81(10): 1768-1770 (2002)*

50) J. Hotta, H. Takasaki, H. Fujiwara and K. Sasaki: "Precise Analysis of Optically Trapped Particle Position and Interaction Forces in the Vicinity of an Interface," International Journal of Nanoscience, 1(5&6): 645-649 (2002)*

51) H. F. Hofmann and S. Takeuchi: "Quantum Filter for Nonlocal Polarization Properties of Photonic Qubits," *Phys. Rev. Lett.*, 88(14): 147901/1-4 (2002)*

4.2 総説、解説、評論等

1) 堀尾浩司、鹿野修司、笹木敬司、増原宏：「光の放射圧を利用したレーザマニピュレータ」、自動化技術、29：70-73 (1997)

2) 堀田純一、笹木敬司、増原宏：「光圧による単一微粒子のマニピュレーションと創製」、レーザー研究、25：760-764 (1997)

3) 笹木敬司：「光局在場を利用した分子集合構造の計測と制御」、生産と技術、49：70-72 (1997)

4) 増原宏、堀田純一、笹木敬司：「レーザマイクロ化学：高分子溶液の光誘起相転移現象を例に」、BME、12(4)：1-8 (1998)

5) 笹木敬司、増原宏：「マイクロ光マニピュレーション」、*O plus E*、20：36-42 (1998)

6) 笹木敬司：「単一微粒子の光操作とポテンシャル測定」、M&BE、9：16-25 (1998)

7) 魚住純：「フラクタル構造における光散乱現象」、応用物理、67：1270-1275 (1998)

8) 魚住純、牛坂健、伊福部達：「古ろう管からの名演の復活」、日本音響学会誌、54：443-449 (1998)

9) 吉川裕之、笹木敬司、増原宏：「有機微結晶膜のピコ秒近接場蛍光分光」、表面、37(7)：396-412 (1999)

10) 笹木敬司：「顕微分光の新展開：多光子過程と近接場光学 IV. 微小球キャビティと多光子顕微分光」、分光研究、48(4)：165-173 (1999)

11) 藤原英樹、笹木敬司：「多光子顕微鏡と微小球レーザー」、レーザー研究、27(12)：823-826 (1999)

12) 竹内繁樹：「21 世紀、量子猫は計算をするか？」、日本物理学会誌、54(4)：263-274 (1999)*

13) 竹内繁樹、井須俊郎：「量子計算の実現にむけて」、応用物理学会誌：」68(9)：1038-1041 (1999)*

14) 竹内繁樹：「「量子計算機」の現状と今後」、情報処理、40(12)：1192-1197 (1999)*

15) 堀田純一：「レーザー光の放射圧を用いた分子集合構造の形成」、電子科学研究、7：57-58 (2000)

16) 笹木敬司：「分光」、光学、29(4)：204-205 (2000)

17) 竹内繁樹：「光子を用いた量子計算」、レーザー研究、28(10)：671-676（2000）*
18) 竹内繁樹：「光量子ビットを用いた量子計算機」、光学、29(12)：745-750（2000）*
19) 堀田純一：「レーザー捕捉微粒子をプローブに用いた近接場光学顕微鏡」、光化学、31：200-202（2000）
20) 笹木敬司：「ナノの揺らぎを観てフェムトニュートンの力を測る」、電子科学研究、8：13-17（2000）
21) 藤原英樹：「希土類イオン含有ガラス粉末ランダム媒質におけるアップコンバージョンレーザー発振」、電子科学研究 8：62-64（2000）
22) 藤原英樹、笹木敬司：「希土類イオン含有ガラス微粒子ランダム媒質におけるアップコンバージョン発光」、応用物理学会薄膜・表面物理分科会 News Letter、110：3-8（2000）
23) 河田聡、笹木敬司：「第2章　カオス/フラクタル理論が重要になってくる　信号と雑音の発生メカニズム」、Interface、5：60-65（2001）
24) 竹内繁樹：「量子計算、量子情報通信の未来と展望」、数理科学、39(6)：64-71（2001）
25) 竹内繁樹：「量子計算と量子情報通信　—何が可能になるのか—」、電子情報通信学会誌、84(1)：17-25（2001）*
26) 竹内繁樹：「量子計算ってなに？」、システム/制御/情報、56(6)：351-352（2001）*
27) 竹内繁樹：「量子情報デバイスとナノテクノロジー」、機能材料、22(1)：44-51（2002）
28) 竹内繁樹：「量子コンピューター研究の近況レポート」、応用物理、71(11)：1367-1371（2002）
29) S. Takeuchi: "I wish to be a photon juggler," *JSAP International*, 7: 25-26 (2002)

4.3 著書

1) 笹木敬司（分担執筆）：レーザー技術総合研究所編『レーザーの科学』、（丸善）（1997）
2) 竹内繁樹（分担執筆）：『速解光サイエンス辞典』、（オプトロニクス社）（1999）
3) H. Masuhara, K. Sasaki and J. Hotta: "Laser Chemistry of Individual Microparticles," *In Organic Mesoscopic Chemistry*, Eds. H. Masuhara & F. C. De Schryver (Blackwell Science) pp.89-105 (1999)
4) 笹木敬司：「微小球レーザの世界」、『新しいフォト二クス時代の材料とデバイス』（TIC）pp.203-208（2000）
5) 笹木敬司：「マイクロ光マニピュレータ」、『新編光学材料ハンドブック』（リアライズ社）pp.701-703（2000）
6) 笹木敬司（分担執筆）：「4章自己回帰モデルと最大エントロピー法」、南茂夫監修、河田聡編著『科学計測のためのデータ処理入門—科学技術分野における計測の基礎技術—』、（CQ出版社）pp.70-92（2002）
7) 笹木敬司（分担執筆）：「9章未知成分の発見と分離」、南茂夫監修、河田聡編著『科学計測のためのデータ処理入門—科学技術分野における計測の基礎技術—』、（CQ出版社）pp.170-189（2002）
8) S. Takeuchi: "Chapter 11: Chemistry of Nanomolecular Systems: Towards the Realization of Nanomolecular Devices," *Nanodevices for Quantum Compution Using Photons*, Eds. T. Nakamura, T. Matsumoto, H. Tada and K. Sugiura (Springer) pp.183-193 (2003)
9) H. Fujiwara and K. Sasaki: "Chapter 7: Lasing Spectroscopy of Single Microspheres," *Single Organic Nanoparticles*, Eds. H. Masuhara, H. Nakanishi and K. Sasaki (Springer) pp.82-933 (2003)
10) K. Sasaki: "Chapter 9: Force Measurement for a Single Nanoparticle," *Single Organic Nanoparticles*, Eds. H. Masuhara, H. Nakanishi and K. Sasaki (Springer) pp.109-120 (2003)

4.4 特許

a．国内特許

1) 竹内繁樹：「光子ビーム発生装置」、特願平09-353078（1997年12月22日）
2) 笹木敬司、増原宏、藤原英樹、稲葉孝徳、佐藤節哉、宮脇稠、元済亨：「マイクロボンディング方法」、特願平10-082311（1998年3月27日）
3) 竹内繁樹：「光子数状態発生装置」、特願平11-104600（1999年4月12日）
4) 竹内繁樹：「単一光子発生装置」、特願平11-104608（1999年4月12日）
5) 笹木敬司、堀田純一：「微粒子位置計測装置」、特願2000-081025（2000年3月22日）
6) 竹内繁樹：「低損失光スイッチング方法および光スイッチ装置」、特願2001-028533（2001年2月5日）
7) 竹内繁樹：「量子暗号通信システム」、特願2001-081501（2001年3月21日）
8) 竹内繁樹、長谷川俊夫、西岡毅、安部淳一：「光信号伝送装置及び光信号伝送システム及び光信号伝送方法」、特願2001-225678（2001年7月26日）
9) 竹内繁樹：「もつれ合い光子対ビーム発生装置」特願2002-026085（2002年2月1日）
10) 笹木敬司、三澤弘明、堀田純一：「DNA-金属微粒子系の共振周波数解析方法および共振周波数解析システム」、特願2002-158126（2002年5月30日）
11) 笹木敬司、三澤弘明、藤原英樹：「量子相関光子対増幅装置」、特願2002-163342（2002年6月4日）
12) 竹内繁樹、ホフマンF.ホルガ：「位相シフト光スイッチ」、特願2002-176385（2002年6月17日）

b．国際特許

1) S. Takeuchi: "Photon Beam Generator"、特願PCT/JP98/05771(1998.12.21)、取得登録番号US6421488B

1 (2002.7.16)

2) K. Sasaki and J. Hotta: "Fine-particle Position Measuring Apparatus"、特願 PCT/JP01/01267(US/CA) (2001.2.21)

3) S. Takeuchi: "Quantum Cipher Communication System"、特願 PCT/JP02/02672 (2002.3.20)

4) S. Takeuchi "Entangled Photon Pair Generator"、特願 PCT/JP03/00762 (2003.1.28)

4.5 招請講演 (国際会議招待講演のみ)

1) K. Sasaki: "Optical Manipulation of Lasing Microparticle and Its Application to Near-Field Microscopy," The 41th Int. Conf. on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, Dana Point, CA, USA (1997)

2) K. Sasaki: "Near-Field Measurement and Control with an Optically-manipulated Lasing Microparticle," The Jpn-US Information Exchange Seminar on Photophysics and Photoconversion in Small Domains by Near-Field Scanning Optical Microscopy, Napa, CA, USA (1998)

3) J. Uozumi: "Laser Speckle with Fractal Spatial Correlations," Third International Symposium on Optics in Engineering, Kajaani, Finland (1999)

4) K. Sasaki and H. Masuhara: "Photophysics and Photochemistry of Fine Particles Manipulated by Laser," The 5th International Symposium on Polymers for Advanced Technologies, Tokyo, Japan (1999-8)

5) K. Sasaki and H. Fujiwara: "Cavity Quantum Electrodynamics and Lasing Dynamics within Microspheres," The 8th JST Int. Symposium "Molecular Processes in Small Time and Space Domains", Nara, Japan (2000-3)

6) S. Takeuchi: "Quantum Computation using Photons," NTT Workshop, Atsugi, Japan (2000-6)

7) S. Takeuchi: "Experiments on Quantum Computers," 2000 International Conference on Solid State Ddevices and Materials, Sendai, Japan (2000-8)

8) S. Takeuchi: "Quantum Information Technology Using Photons," RCIQE シンポジウム, Sapporo, Japan (2001-1)

9) S. Takeuchi: "Quantum Information Technology using Photons," The 4th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim 2001), Makuhari, Japan (2001-7)

10) S. Takeuchi: "Twin Photon Beams for Single Photon Generation," ISQM-Tokyo'01 (The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology), Saitama, Japan (2001-8)

11) K. Sasaki and H. Fujiwara: "Lasing and Manipulation of Nanoparticles," Multi-dimensional Microscopy 2001 (MDM 2001) (The 3rd Asia-Pacific International Symposium on Confocal Microscopy and Related Technologies), Melbourne, Australia (2001-11)

12) K. Sasaki: "Photon Manipulation with particles," Zhejiang Univ. and Hokkaido Univ. Joint Symposium, Hangzhou, China (2002-04)

13) K. Sasaki: "3-D Nanoposition Sensing for Femtonewton Force Detection," 3rd Chitose International Forum on Photonics Science & Technology, Chitose, Japan (2002-10)

14) H. F. Hofmann: "Quantum Teleportation: Information Dynamics and Non-local Operations," Workshop on Quantum Information and Quantum Dynamics, Trieste, Italy (2002-10)

15) H. F. Hofmann: "Quantum Teleportation: Basic Principles and Experimental Realizations," Workshop on Quantum Information and Quantum Dynamics, Trieste, Italy (2002-10)

16) K. Sasaki: "Photon Manipulation with Particles," 10th International Symposium on Laser Spectroscopy (SOLS2002), Taejon, Korea (2002-11)

17) S. Takeuchi: "Quantum Computation using Photons," The 8th International Symposium on Advanced Physical Fields (APF8) "Advanced Materials for Quantum Computing", Tsukuba, Japan (2003-01)

4.6 シンポジウムの開催

a. 国際シンポジウム (組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間)

1) K. Sasaki: The 8th International Conference on Unconventional Photoactive Systems (UPS-8), Organizing Committee, Nara (1997.8.25-29)

2) K. Sasaki: 1st Asian Symposium on Nanotechnology and Nanoscience (Asia NANO 2001), Local Organizing Committee, Saitama (2001.10.9-10)

3) K. Sasaki: Asian Symposium on Nanotechnology and Nanoscience2002 (Asia NANO 2002), Local Organizing Committee, Tokyo (2002.11.27-29)

b. 一般のシンポジウム (組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間)

1) 竹内繁樹 (世話人):〝第 2 回量子情報技術研究会 (QIT2)〞(100 名、大阪大学基礎工学部シグマホール) (1999.11.18-19)

2) 竹内繁樹:〝日本物理学会第 56 回年次大会シンポジウ

ム「量子情報と物理」″（500名、中央大学多摩キャンパス）（2001.3.28）

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額）

1）魚住純：基盤(C)(2)一般「レーザー光のガウス的散乱場における特異な強度変動現象の解析と応用」、3,400千円（1997－1998）

2）笹木敬司：基盤(B)(2)展開「パルスレーザー光の放射圧を利用した微粒子の吸着力計測法の開発」、8,700千円（1997－1998）

3）魚住純：基盤(B)(2)展開「録音ろう管ネガティブのための光学的音声再生装置の開発」、3,000千円（1998）

4）笹木敬司（分担分配）：特定領域研究(B)(2)「光圧による単一有機微粒子の走査と配向制御」、27,000千円（1998－2000）

5）笹木敬司：基盤(A)(2)「単一微粒子の光共鳴ダイナミック分光計測法の開発」、28,500千円（1998－2000）

6）笹木敬司：基盤(B)(2)展開「近接場顕微鏡用アップコンバージョン微小球レーザーの開発」、13,100千円（1999－2001）

7）笹木敬司：萌芽「ヘテロダイン微分干渉近接場顕微鏡による単一分子検出」、2,000千円（1999－2000）

8）竹内繁樹：基盤(B)(2)展開「量子情報通信用の単一光子源の開発」、9,800千円（2000－2001）

9）竹内繁樹：奨励A「量子力学の非局所性の完全な検証実験」、2,200千円（2000－2001）

10）堀田純一：奨励A「パルスエバネッセント場を利用したナノメートル微粒子の相互作用解析」、2,100千円（2000－2001）

11）笹木敬司：基盤(B)(2)一般「単一ナノ構造体のレーザー放射圧スペクトロスコピー」、14,900千円（2001－2002）

12）笹木敬司：萌芽「放射圧による微粒子ランダム媒質の創製と光局在解析」、2,000千円（2001－2002）

b．奨学寄附金（研究者氏名、研究課題、寄付者名、金額、年度）

1）笹木敬司：「微小球レーザー発振ダイナミクス解析と超高速近接場分光への展開」、公益信託分子科学研究奨励森野基金、1,000千円（1999）

2）竹内繁樹：「量子暗号通信技術の基盤技術開発とシステム化」、三菱電機㈱情報技術総合研究所、1,000千円（1999）

3）竹内繁樹：「量子通信用単一光子源評価システム構築に関する研究」、㈶国際コミュニケーション基金、3,200千円（2001）

4）堀田純一：「走査干渉縞の放射圧を利用した界面張力波解析法の開発」、㈶北海道大学クラーク記念財団、450千円（2002）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）下澤楯夫、西浦廉政、水波誠（電子情報処理部門）、河原剛一、栗城眞也、中村孝夫、魚住純、小林哲生（電子計測制御部門）、田村守（電子機能素子部門）：「神経回路網動作の非侵襲・高精度計測法に関する総合的研究」（1996－1997）

2）笹木敬司、魚住純、堀田純一（電子計測制御部門）：「近接場ナノ光学による微粒子相互作用ポテンシャル解析」7,620千円（1998）

3）竹内繁樹（電子計測制御部門）、迫田和彰（電子機能素子部門）、堀田純一（電子計測制御部門）：「固体光子光子スイッチの実現に向けた基礎研究」、3,500千円（1999－2001）

4）下澤楯夫（電子情報処理部門）、笹木敬司、堀田純一（電子計測制御部門）：「熱揺動の光学的計測法を用いた感覚細胞の刺激受容機構の研究」、3,500千円（2000）

5）笹木敬司、竹内繁樹、堀田純一（電子計測制御部門）：「単一ナノ微粒子ダイナミクス吸収分光システムの開発」、4,500千円（2000）

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）竹内繁樹：三菱電機株式会社情報技術総合研究所、「量子暗号通信技術の基盤技術開発とシステム化」、12,000千円（2000－）

2）竹内繁樹：産学連携等研究費共同（三菱電機株式会社）、「量子暗号通信技術の基盤技術開発とシステム化」、697千円（2002）

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究課題、経費、研究期間）

・受託研究

1）笹木敬司：科学技術振興事業団個人研究推進事業「場と反応」、「光局在場を利用した分子集合構造の計測と制御」、1,000千円（1997－1998）

2）竹内繁樹：科学技術振興事業団個人研究推進事業「場と反応」、「単一光子状態を用いた量子場制御の研究」、1,000千円（1999－2000）

3）竹内繁樹、ホフマンF.ホルガ：科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「電子・光子等の機能制御」、「光量子コンピュータ」、5,653千円（1999－）

4）笹木敬司、堀田純一：四国産業・技術振興センター、「次世代マイクロアレイの開発のうち「DNA鎖長変化検出技術の精査」」、2,511千円（2000－2001）

5）笹木敬司、竹内繁樹、堀田純一、藤原英樹：科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」、「量子相関光子ナノ加工の理論的解析」、3,900千円（2001－）

6）竹内繁樹、大橋弘明、ホフマンF.ホルガ：科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「光と制御」、「光子

数状態の生成と制御―光子数マニピュレーションの実現」、2,600千円（2001－）
7）竹内繁樹、笹木敬司、堀田純一：㈱テレコム先端技術研究支援センター、「微小球共振器を用いた量子位相ゲートの実現に関する研究」、27,000千円（2001－）

・COE関係

1）堀田純一、J. P. Gong：バイオとナノを融合する新生命科学拠点事業；部局間・異分野間の共同研究プロジェクト、「筋肉蛋白自己集合体ゲルフィラメントのナノメートル位置検出法の開発」、5,000千円（2002）

g．その他（担当者名、機関名、研究課題、経費、研究期間）

1）笹木敬司：科学技術振興事業団個人研究推進事業「場と反応」、「光局在場を利用した分子集合構造の計測と制御」、40,000千円（1995－1998）
2）竹内繁樹：科学技術振興事業団個人研究推進事業「場と反応」、「単一光子状態を用いた量子場制御の研究」、50,000千円（1995－2000）
3）竹内繁樹、ホフマンF. ホルガ：科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「電子・光子等の機能制御」、「光量子コンピュータ」、60,000千円（1999－）
4）笹木敬司、竹内繁樹、堀田純一、藤原英樹：科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」、「量子相関光子ナノ加工の理論的解析」、81,900千円（2001－）
5）竹内繁樹、大橋弘明、ホフマンF. ホルガ：科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「光と制御」、「光子数状態の生成と制御―光子数マニピュレーションの実現―」、49,000千円（2001－）

4.9 受賞

1）松尾保孝：第6回応用物理学会講演奨励賞「単一ナノ金属微粒子の微分干渉ダイナミクス吸収分光法の開発」（1999.5）
2）笹木敬司：分子科学研究森野基金奨励賞「微小球レーザー発振ダイナミクス解析と超高速近接場分光への展開」（公益信託分子科学研究奨励森野基金）（1999.10）
3）藤原英樹：第19回井上研究奨励賞「微小球共振器による発光過程の制御と光プローブ顕微鏡への応用に関する研究」（2003.2.4）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）竹内繁樹：郵政省・量子力学的効果の情報通信技術への適応とその将来展望に関する研究会委員（2000.2～2000.6）
2）竹内繁樹：専門調査員文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター（2001年3月22日～現在）
3）笹木敬司：日本学術振興会「フォトニック情報システム」に関する先導的研究開発委員会委員（2002.10.31～現在）
4）笹木敬司：総務省量子情報通信研究推進会議戦略専門委員会委員（2003.1.1～現在）

b．国内外の学会の主要役職

1）笹木敬司：日本光学会奨励賞選考委員会委員（1998）
2）竹内繁樹：量子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ第2種時限専門委員会委員（1998.11～現在）
3）竹内繁樹：量子情報技術研究会委員（1998.11～現在）
4）竹内繁樹：日本物理学会領域1量子エレクトロニクス分科世話人（1999.11～2000.10）
5）笹木敬司：応用物理学会代議員（2002.2～現在）
6）笹木敬司：「応用物理」編集委員会委員（2002.4～現在）

c．新聞・テレビ等の報道

1）魚住純：「よみがえる100年前の音色/ロウ管の型にレーザー光/再生装置を開発」（北海道新聞）（1997.6.3夕刊）
2）魚住純：「ロウ管型から100年前の音色/レーザー光当て再生」（東京新聞）（1997.6.6朝刊）
3）魚住純：「円筒型レコード/100年前の音色奏でます！/北大の魚住助教授ら/再生装置を開発」（北海タイムス）（1997.6.7朝刊）
4）魚住純：「エジソンが発明「ろう管レコード」の型枠/96年前の音色再生しました/北大電子研が装置開発し公開」（朝日新聞）（1997.6.8朝刊）
5）魚住純：「ブラームスのピアノ／ロウ管から再生／北大電子研が技術協力」（北海道新聞）（1997.8.25夕刊）
6）魚住純：北海道放送（TBS系全国ネット）平成9年8月30日　ドキュメンタリー番組「過ぎし日のブラームス～没後100年に聞く幻のピアノ録音～」
7）竹内繁樹：「量子計算の理論検証に第一歩」（日経産業新聞）（1999.4.19）
8）笹木敬司：「光の可能性、限界を追求したい」（日経サイエンス）（1999.8）
9）竹内繁樹：「夢を実現に」（日刊工業新聞）（2000.2.23）
10）竹内繁樹：「量子暗号通信に成功」（毎日新聞）（2000.9.15）
11）竹内繁樹：「究極の暗号基礎実験成功」（日本経済新聞）（2000.9.15）
12）竹内繁樹：「量子暗号通信システム」（日刊工業新聞）（2000.9.15）
13）竹内繁樹：「量子暗号を用いた通信システム実験」（電波新聞）（2000.9.15）
14）竹内繁樹：「量子暗号実用化に道」（電気新聞）（2000.9.18）
15）竹内繁樹：「量子暗号伝送に成功」（日経産業新聞）（2000.9.18）
16）竹内繁樹：「盗聴防止に量子暗号」（日本工業新聞）（2000.9.18）
17）竹内繁樹：「情報保護へ量子暗号を活用」（北海道新聞）

(2000.11.28)

18) 竹内繁樹：「暗号原理的に解読は不可能」（日経産業新聞）（2001.1.1）

19) 竹内繁樹：「量子コンピューター、光の粒で高速情報処理」、（日経産業新聞）（2001.5.17）

20) 竹内繁樹：「超高速量子コンピューター、花の33歳トリオ研究の最前線に」（日本経済新聞）（2001.12.5）

21) 下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：「ピラミッド型発光素子開発」（科学新聞）（2002.4.26）

22) 竹内繁樹：「世界最高精度の単一光子源を開発　パラメトリック蛍光対利用」（日経先端技術32）（2003.2.24）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）高崎洋：強調後方光多重散乱現象における媒質のフラクタル性の影響（1997）

2）田畑克彦：拡散波トポグラフィの基礎的研究（1997）

3）齋藤孝充：フラクタル媒質からの後方散乱エンハンスメント現象の3次元シミュレーション解析（1998）

4）宮坂英太：Generation of Fractal Speckles in Image Plane and Their Application to Measurement (1999)

5）辻野賢治：特異的スペックル場の統計的特性とその応用（1999）

6）高崎秀久：単一微粒子に作用するレーザー放射圧の解析（2001）

7）千葉明人：微小球共振器を用いた量子位相ゲートの実現に関する基礎的研究（2001）

8）千葉孝志：単一分子蛍光検出に向けた共焦点レーザー顕微鏡システムの構築（2002）

9）坂東稔彦：レーザー光の干渉縞により誘起した界面張力波の解析（2002）

10）更科昌弘：ランダム媒質内の局在モード制御に関する基礎的研究（2002）

11）岡本亮：パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源の構築（2002）

・博士学位

1）マクラム・イブラヒム・ハリル・イブラヒム：Statistical Properties of Laser Speckles with Long Spatial Correlations（長い空間相関を有するレーザスペックルの統計的特性）（1998）

2）三宮俊：Statistical Properties of Optical Coherent Phenomena in Multiple Scattering Media（多重散乱媒質における光学的コヒーレント減少の統計的特性）（1998）

3）藤原英樹：微小球共振器による発光過程の制御と光プローブ顕微鏡への応用に関する研究（1999）

4）松尾保孝：光散乱を利用した単一微粒子吸収分光法に関する研究（2001）

e．大学院担当講義科目名

1）光情報エレクトロニクス特論（笹木敬司）（1997～現在）

2）光情報エレクトロニクス特論（竹内繁樹）（1999～現在）

3）電子情報エレクトロニクス特別演習（笹木敬司）（1997～現在）

4）電子情報エレクトロニクス特別演習（竹内繁樹）（1999～現在）

5）電子情報エレクトロニクス特別演習（堀田純一）（1998～現在）

6）電子情報エレクトロニクス特別研究第一・第二（笹木敬司）（1997～現在）

7）電子情報エレクトロニクス特別研究第一・第二（竹内繁樹）（1999～現在）

8）電子情報エレクトロニクス特別研究第二（堀田純一）（1998～現在）

9）北海道大学大学院共通授業「ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅰ」（笹木敬司）（2002分担）

量子計測研究分野

教授　栗城眞也（北大院、工博、1991.8～）
助教授　小林哲生（北大院、工博、1994.2～）
助手　平田恵啓（北大院、工博、1993.4～）
竹内文也（北大院、工博、1995.12～）

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
野界武史、横澤宏一、黄孔　良、小池佑辰、平野　悟、砂盃尚子、小山　洋、鄭　址旭、丸山雅紀、白井直仁
修士課程
久保真輝、小山　洋、丸山雅紀、林　　周、橋本竜明、李　玉文、桂　卓成、鷲尾知暁、藤田　学、中島利崇、高橋賢一、二川裕之、三島　喬、川口洋平

1．研究目的

量子計測研究分野では、超伝導量子効果に基づく高感度 SQUID 磁気センサ、および SQUID を用いた生体磁気計測、各種の無侵襲イメージング法による脳機能計測と解析を主要な研究としている。SQUID センサと磁気計測の研究では、高温超伝導体 SQUID の設計、試作を含めて心磁図マッピング計測に適したデバイスやシステムの開発を目指している。イメージング研究では、低温 SQUID による MEG（脳磁図）計測や fMRI（機能的 MRI）計測と解析法の確立・改善を進めながら、視覚、聴覚機能や音楽鑑賞や文章理解などの高次機能にともなう脳神経活動の様式を明らかにすることを目標としている。

2．研究成果

・平成 9 －10 年度

(a)　直結型高温超伝導 SQUID の開発

生体磁気計測に応用する高温超伝導 SQUID を YBCO 単層膜から形成する直結型磁束計の開発を行っている。9～10 年度の研究では、伝送線路型の SQUID 素子を設計し、ワッシャー型の検出コイルに結合した磁束計（マグネトメータ）を試作、評価した（図 1）。その結果、5×10 mm の STO 基板面上で検出コイルのホール内に SQUID を配置した新構造のデバイスで、0.18～0.30 mm^2 の有効面積と 100～200 $fT/Hz^{1/2}$ の磁場感度が得られた。

(b)　超伝導薄膜デバイスの磁束ゆらぎ測定

超伝導薄膜中の磁束量子のゆらぎを SQUID と結合した超伝導検出コイルによって直接検出する方法を用いて、Nb 多結晶及びエピタキシャル薄膜上に作成した膜厚変化型ブリッジ（VTB）の磁束ノイズを測定した。Nb の膜質に依存する特異なノイズ特性が観測され、エピタキシャル膜による VTB では臨界電流での磁束ノイズの増加は磁束量子のブリッジ内への侵入によって生じるのに対し、多結晶膜 VTB では、トラップされた多数の磁束量子が広く分布したピニング中心から次々にデピンされて磁束量子の〝なだれ〟が生じるという描像が示唆された。

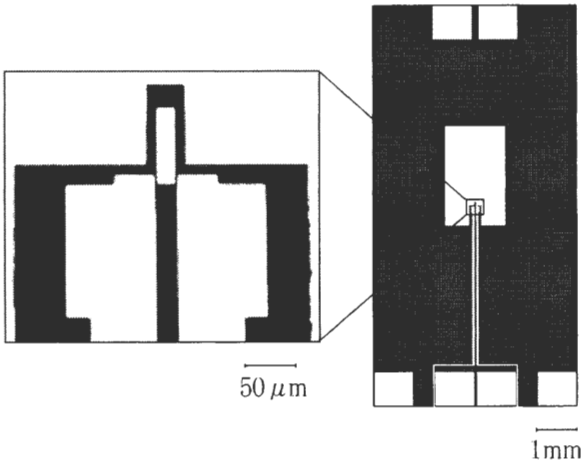


図 1．伝送線路型高温超伝導 SQUID

(c)　誘発脳磁界に重畳する背景脳磁界成分の除去

多チャネルシステムにより同時計測された誘発脳磁界には、加算平均後にもコヒーレンスの高い背景（自発）脳磁界が残存し、信号源推定の誤差の原因となる。本研究では、この加算平均後にも残存するコヒーレンスの高い自発脳磁界の影響を低減するため、この自発成分を除去する手法を開発し、37 チャネル MEG システムによる模擬脳磁界計測データに適用しその妥当性を検討した。その結果、第 1 主成分を除去することにより SN 比の高い誘発脳磁界が得られる事が確認できた。さらに本手法を全頭型の MEG システムに適用するため、全頭にわたる背景脳磁界の主成分分析による検討を行った。

(d)　視覚単語処理の MEG 計測と解析

日本語の仮名からなる単語を視覚的に呈示し、被験者が認知課題を遂行しているときの脳磁界（MEG）反応を計測・解析し、脳内プロセスについて検討した。側頭後部を計測した実験では左脳底部を中心とした部位の活動が 150～250 ms の潜時で観測され、側頭部を計測した実験では左側頭内側下部と左側頭上部の活動が 290～390、420～520 ms の二つの潜時帯で並行して観測された。以上から、視覚言語処理には脳底部から側頭に至る物体（対象）認知経路（ventral pathway）の活動が関与することが分かった。

(e)　発話運動プログラムに関する脳活動

前頭葉の下前頭回（ブローカ野）の障害と運動性失語症（ブローカ失語）との関係が明瞭でないことが知られている。発話運動（調音）のプログラミングに関わる脳活動を調べるために、5 つの単語をランダムな順に一定の間隔で

発話させるパラダイムを構成し、発話前の前頭部の活動をMEGで計測した。その結果、音声の立ち上がりの120～320 ms前で、調音のための口唇の筋活動の100 ms前に相当する時間にMEG反応が検出され、前頭葉の島の上端近傍に活動源が推定された。この位置はブローカ野より内側・上方であり、前頭部の深い位置にある皮質が発話運動プログラムに関わる可能性が示唆された。

(f) 両眼視野闘争に関わる脳内プロセスに関する研究

視覚系の競合的情報処理機構並びに視覚的アウェアネスや意識の一端を解明することを目的として、両眼視野闘争過程に注目し、その脳内プロセスを調べた。本研究では、主観的な知覚図形の交替を被験者のボタン押しにより決定し、これをトリガとして事象関連電位並びに脳波α波(8－13 Hz)分散の計測・解析を行った。その結果、知覚交替に関連する神経活動を反映すると判断できる電位変動を後側頭および後頭において観測した。また、反対方向にドリフト運動する一組の格子図形を観察中、知覚交替に伴う眼球運動変化が、被験者のボタン押しに対し約500 ms先行して生じることを明らかにした。

(g) 音楽家の音楽認知機構に関する研究

音楽家の脳内での音楽認知機構の解明を目的とし、楽器を専攻し絶対音感を持つ被験者(AP)と特別な音楽経験のない被験者(non-AP)にピアノ音などの音を呈示して聴覚誘発脳磁界を記録し、潜時約100 msの脳内活動を解析した。その結果、APとnon-AP間の聴覚皮質内の活動位置を比較すると、右半球に差はないが、左半球ではAPはnon-APに対して6 mm後方に位置した(図2)。本研究により、絶対音感を持つ音楽家の脳活動に機能的な位置の非対称性があることが明らかとなった。

(h) 仮名文字黙読・照合の脳内プロセスに関する研究

仮名文字の黙読・照合に関わる脳内プロセスを課題遂行時における被験者の行動指標である反応時間と事象関連電位の計測により調べた。本研究ではカタカナとひらがなを用い、形態的には異なるが読みが同じという仮名文字の特徴を生かし、音韻的操作に注目して研究を行った。その結果、黙読と照合に関わる反応時間が呈示する文字数に比例して増加することが分かった。また、仮名文字の呈示後、文字の認知、音韻的変換、黙読、音韻的照合という段階的なプロセスに対応すると思われる、潜時並びに空間分布の異なる事象関連電位成分を観測することができた。

(i) 文字認知戦略による視覚皮質の活動の変化

文字や形の認知における早期の脳活動を調べるため、ひらがな文字の(1)形態的な特徴あるいは(2)母音について判断する課題の遂行に伴う脳磁界反応を計測・解析し、課題間での脳活動を比較した。視覚野や高次視覚野を含む後頭あるいは後側頭において、形態課題では右半球の外側の活動

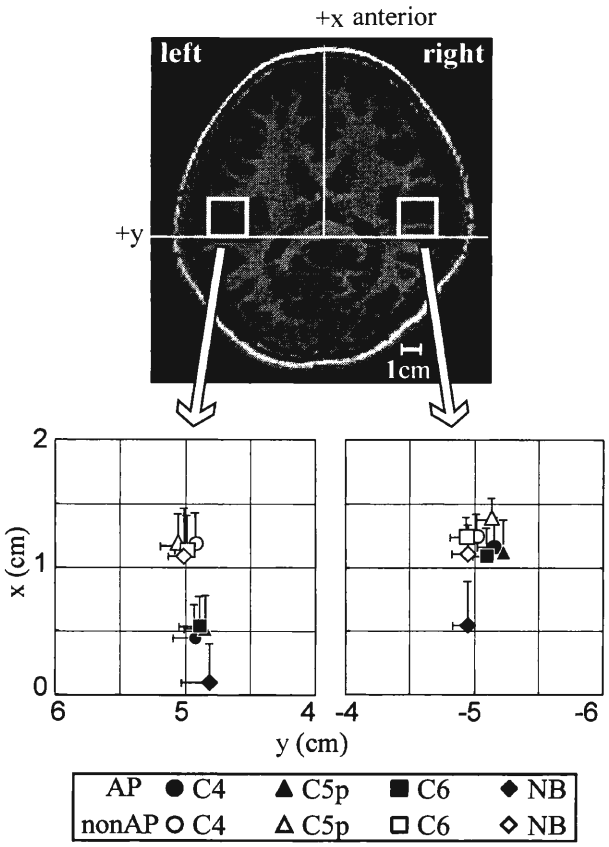


図2．音楽家(AP、黒印)と非音楽家(non-AP、白抜き)における潜時約100 msの聴覚活動の平均位置と標準誤差。左半球ではAPはnon-APに対して6 mm後方に位置した。耳孔前点から6 cm上のMRI断層図の枠は範囲を示している。

が主に観測され、母音課題では両半球の内側及び底部の活動が観測された。以上から、文字を見るポイントや文字処理手順が視覚皮質における早期の脳活動に影響を与えることが示唆された。

・平成11－12年度

(a) 高温超伝導dc SQUID

液体窒素温度で動作する高感度で応用範囲の広い高温超伝導dc SQUIDを開発するため、YBCO($YBa_2Cu_3O_y$)粒界接合SQUIDの研究を進めてきた。$SrTiO_3$基板の高誘電率性と高周波ジョセフソン振動を考慮に入れ、分布定数回路モデルによる電流－電圧特性の解析法を考案し、平行ストリップ形状のSQUIDをデザインした。このストリップ線はジョセフソン周波数において伝送線路として働き、変調電圧の振幅に関与する。図1は横型(左)および縦型(右)の伝送線路SQUIDの模式図である。直結型磁束計を構成する検出コイルのYBCO薄膜には、磁束トラップを抑制するために5 μm幅の細いホールをメッシュ状に空けている。横型伝送線路SQUIDでは検出コイル上に粒界接合がなく、100 μT(1.0 G)の磁場の中でSQUID素子を冷却した場合でも低周波1/fノイズの増加が見られなかった。両タイプの磁場感度は100 Hz以下で100－200 fT/Hz$^{1/2}$で

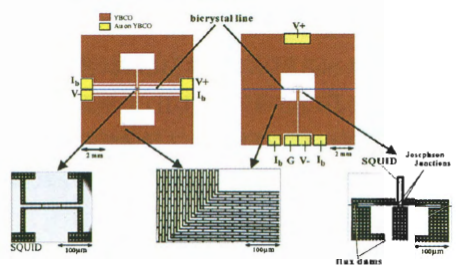


図１．横型（左）および縦型（右）の伝送線路 SQUID

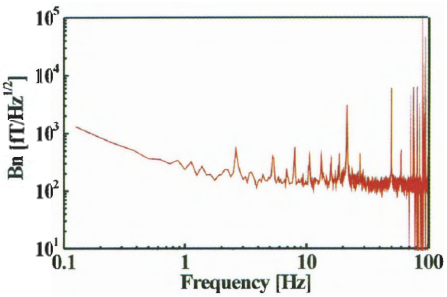


図２．磁束計の磁場感度

あった（図２）。これらの SQUID は生体磁気や地球環境磁気の計測において高感度磁気センサとしての応用が期待される。

(b)　両眼視野闘争に関わる脳内プロセスに関する研究

視覚的アウェアネス（visual awareness）を定量的に研究することのできる稀少な現象である両眼視野闘争過程の脳内プロセスに関し、両眼眼球運動と機能的 MRI の計測に基づく検討を開始した。

知覚運動図形の交替に伴う視運動性眼振（OKN）の緩徐相における眼球運動方向が変化する時刻を抽出した結果、視野融合時と同様、視野闘争時においても OKN の変化はボタン押し交替より有意に先行する事が判明した。OKN 変化に対するボタン押し交替の遅れが視野融合時に比べ視野闘争時は有意に増大した。又、ボタン押しに比べ OKN 変化の個人差が小さく知覚交替を客観的かつ正確に決定できる事が分かった。

一方、視野闘争に関連する中枢神経活動を fMRI により検討した結果、後頭葉のブロードマンの脳地図における 19 野、頭頂葉の 7 野、前頭葉の 6 野、44 野において視野闘争に関連すると思われる活動を捉えることができた（図３）。

(c)　脳内の音楽認知機構の探求

脳がどのように音楽を鑑賞（理解・感知）しているのかを調べるために、SQUID 磁束計による右半球の脳磁場計測を行った。刺激にはピアノ音を用い，よく知っている旋律の最終音が調性に沿っている場合（調和終止）と、調性から離れた場合（不調和終止）の脳磁場反応を比較・検討した（図４）。その結果，調和終止に比べて不調和終止に対する N1m 反応（潜時約 120 ms に聴覚野で起こる反応）が有意に大きいことが分かった。旋律の開始音による N1m 反応と比較すると（図５）、不調和終止を聴取した際の振幅の増加は、終止音の前までの刺激音によって減衰した N1m 反応が不調和終止によって回復したと考えることができる。聴覚野において 100 ms という早い潜時でメロディーを認知する神経活動の存在が示唆される。

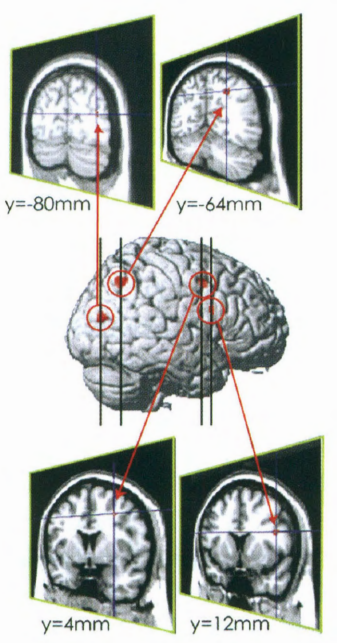


図３．視野闘争条件における BOLD コントラストが対照条件の場合に比べ有意（$P<0.05$、corrected）に高い部位を Talairach 脳座標上に表示した結果

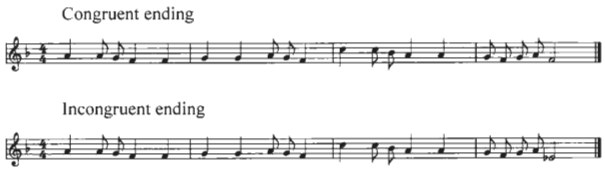


図４．よく知られたメロディを用いた刺激の例
〝むすんでひらいて〟

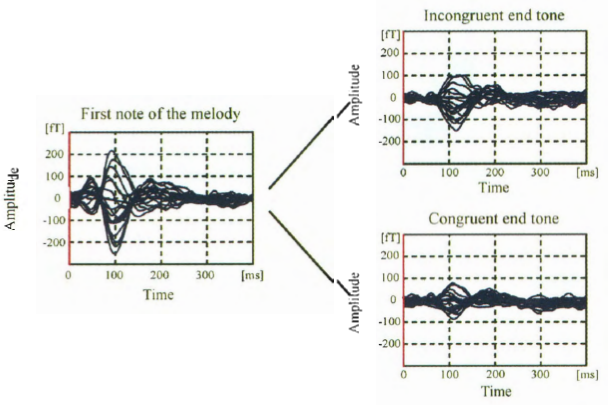


図５．メロディの開始音に対する N1m 反応と調和・不調和終止音それぞれに対する N1m 反応

(d)　文字を読むときと見るときの脳活動

文字の特徴抽出過程（読むときと見るとき）における高次視覚領野の情報処理を調べるために、文字の音韻的な特徴を抽出する課題（PH）と文字の形態的な特徴を抽出する課題（GR）を構成し、これらの遂行中に脳磁界応答を計測して後頭葉を中心に脳活動を解析した。

図6上段に示すように、いずれの課題においても、最初の大きな成分が潜時約220 msに現れた。この成分の振幅は左側頭よりも右側頭で大きく、潜時は右側頭で50 msほど早い。図6下段には、潜時150－300 msで推定された脳磁界信号源位置をMRIに重ねて示す。左下部の信号源はPH課題でのみ見られ、内側部の信号源は、PH課題で6名の被験者中4名で見られたのに対し、GR課題では2名のみであった。

このようにPH課題における脳活動と、GR課題における脳活動の間には差異がみられた。このような結果は、日常使用している文字の早期の処理に関わる高次視覚領野の脳活動がトップダウン的に変化することを示唆している。

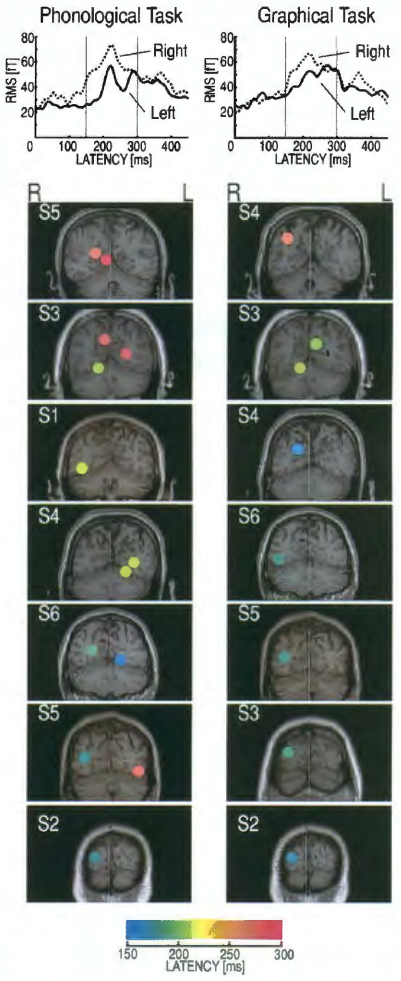


図6．母音照合課題（PH：Phonological Task）と形態照合課題（GR：Graphical Task）における、左右側頭後部からの脳磁界応答のRMS値の被験者にわたる平均（上段）と、単一電流双極子モデルによる脳磁界信号源位置（下段）

・平成13－14年度

(a)　高温超伝導体SQUIDによるMCG計測装置

昨年に続いて高温超伝導体SQUIDと能動型磁気シールドによるMCG計測用の磁束計システムの研究を行い、以下の要素技術を開発して10チャンネル装置を試作した。

(1)　環境磁場雑音の低減技術

二層のミューメタルからなる磁気シールドルームに組み合わせる多チャンネル用の磁場雑音低減法として、シールドルーム内の参照マグネトメータの磁束ロック用磁場信号を、信号マグネトメータのフィードバックコイルに印加する方法を検討した。また、線スペクトル性の電源（50 Hz）磁場雑音については、アクティブ消音として使われている適応フィルタ型キャンセル技術を適用し、DSP（Digital Signal Processor）を使って50 Hz成分のみを消去する方法を開発した。これらの磁場雑音法の組み合わせにより、二層磁気シールドと併用し、1～100 Hz帯域で50～60 dBの雑音低減が可能となった。

(2)　計測システム

上記の雑音低減装置、多チャンネル用のデュワーとガントリ（架台）、SQUIDコントローラ、アンプフィルタユニット、ADコンバータ、データ収録装置などからなるシステムを構築した。シールドルーム内にコントローラを設置して操作を容易とし、SQUID周辺を完全電磁シールドしてシールドルームのドアを開放した状態でも計測ができるシステムとした。試作したシステムは、液体窒素のもつ高い冷却能力のため、その補給に特殊な技術を必要としない。また、窒素のランニングコストは非常に低く、低温超伝導体SQUIDを使った生体磁気計測装置と比較すると大きな優位性がある。システムの概観（図1）と計測したMCG波形の例（図2）を示す。

(b)　事象関連電位に基づくテクスチャー分離に関わる脳内プロセスに関する研究

テクスチャー分離とは、群化の類同性の要因により小さいパターン（マイクロパターン）が集まって視覚的に領域分離を引き起こす現象を意味し、その時に要因となるマイクロパターンの方向、運動の方向、大きさなどの属性はテクストンと呼ばれる。本研究では、視覚刺激におけるテクスチャーによるターゲットとグラウンドの分離・認知に関わる脳内プロセスの解明を目指し、視野内におけるターゲットの呈示領域と分離・認知されるまでに要する反応時間との関係や、また課題遂行時の事象関連電位を頭皮上63ヶ所で同時計測し、さらにスプライン・ラプラシアン解析を行い脳活動の検討を行った。その結果、ターゲットの呈示される領域によって反応時間に有意な差が生ずることが明らかとなった（図3(B)）。また、課題遂行に伴い潜時の異なる4つの事象関連電位成分が観測された。事象関連電位のスプライン・ラプラシアン解析により、これらの成分の信号源は左右両半球の後頭葉、頭頂葉、前頭葉にあり、このうち反応時間との関連から、潜時約270 ms以降の前

頭葉の活動が主にターゲットの認知に関わる脳内プロセスを反映していると推察された（図４）。

図１．高温超伝導 SQUID システム

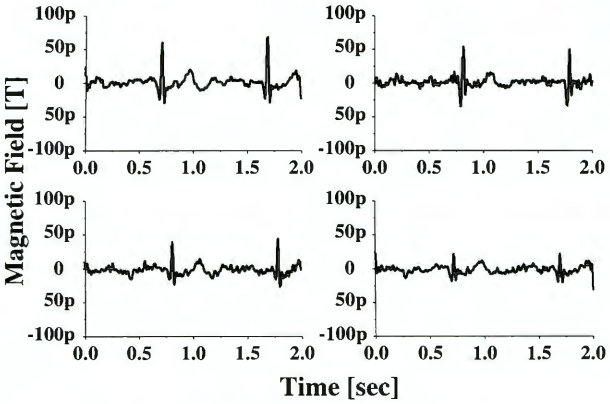


図２．MCG 計測波形

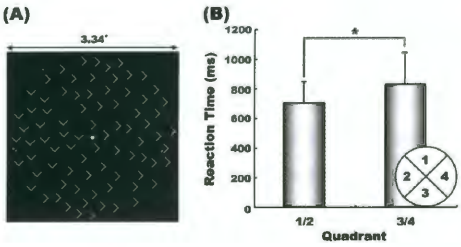


図３．ターゲット［U］、グラウンド［>］の二種類のマイクロパターンで構成された刺激(A)と四分円 1/2 と 3/4 に対する反応時間の総平均(B)

(c)　脳深部に巨大電流双極子を局在させる脳磁界応答の解析

高次脳機能に関わる脳磁界応答には、単一の等価電流双極子推定では誤った結果を生じる成分がしばしば見られる。例えば図５に示すように、著しく深い位置に、非常に大きなモーメント値をもつ単一電流双極子源が算出される。このような電流双極子源は脳磁界計測者にとっては受け入れることが出来ないが、ダイポールの信頼性を調べるための評価基準である GOF（Goodness of fit）や相関係数は満足している。我々は、このような誤った解を避け、かつ、より正しい双極子源位置を得るために新たな双極子源の推定方法を開発した。

本方法では、回転双極子推定の評価関数にモーメント値と SN 比を含む項を加えた。通常の評価関数を使った場合には受け入れがたい解を与えるような模擬 MEG 応答から、2 個の電流双極子を求めることができた。応答の SN 比が 10 以上であれば、推定された双極子と真の双極子との位置の誤差は 5 mm 以内である。

図６は、本方法を高次脳機能解析のための脳磁界応答に適用した例である。左側頭から得られた応答波形の潜時 200～240 msec に見られる成分を通常の単一および二電流双極子推定を用いて解析すると、視床付近の正中線上に特異電流双極子が生じた。本方法で同じ成分を二電流双極子推定した場合には、左側頭前方底部のブロードマンの 38 野付近（D１）と、左上側頭溝深部付近（D２）に位置した。今後さらに検討を重ねることで言語処理過程に関する新たな知見が得られる可能性がある。

このように本方法を使うことで、実際の MEG 応答から、

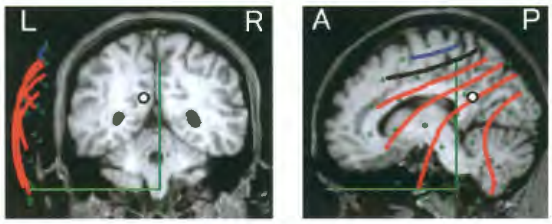


図５．特異電流双極子（脳表面から深い位置で大きなモーメントを持つ双極子）と特異磁界（特異電流双極子を解として持つ磁界）の例

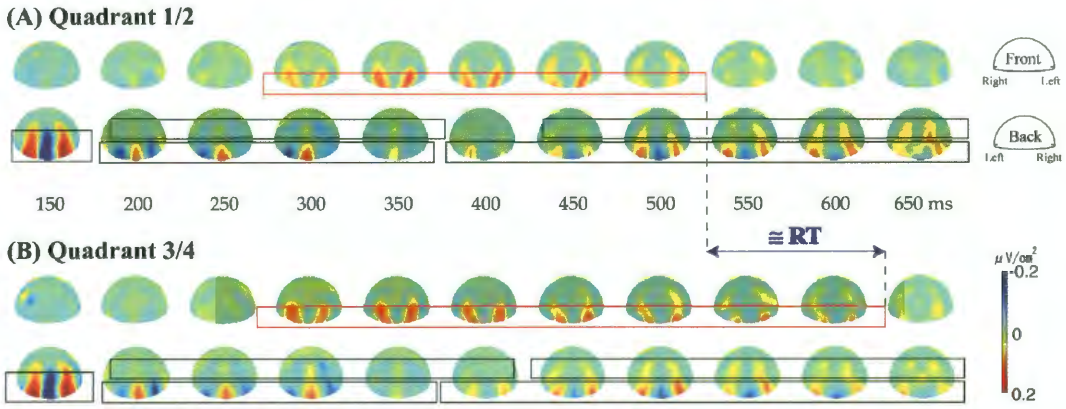


図４．四分円 1/2 と 3/4 におけるスプライン・ラプラシアン分布の経時変化

受け入れがたい解を得てしまう可能性を減らせる。

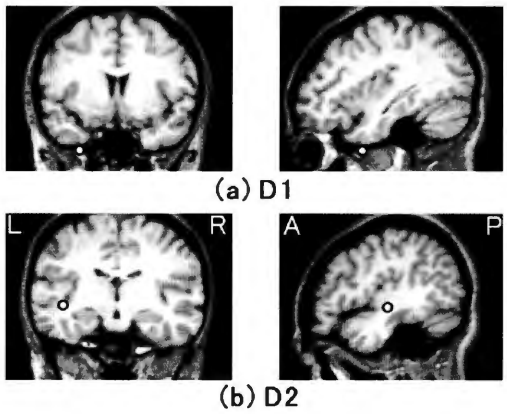


図6．文字列黙読課題遂行時の脳磁界応答に本手法を適用した結果一名の被験者に対して得られた2個の電流双極子の位置をMR画像上に示す。

3．今後の研究の展望・将来計画

高温超伝導SQUIDでは、これまで実用的な磁気センサを目指して超伝導薄膜中への磁束量子の侵入やそれらの運動機構を解明する基礎的な研究を続けてきた。今後は、超伝導薄膜の物理的・電気的特性を考慮に入れてさらに磁束運動の解明を目指す。また、SQUIDシステムの研究ではMCG計測を可能とする高温超伝導SQUIDとシステム化技術を開発した。今後は、汎用性のある磁気計測システムの開発を目指す。

イメージングによる脳機能解析の研究では、視覚系では両眼視野闘争並びに群化に関して、高次機能解析では、和音などの複雑な音響構造を持つ楽音の認知、また言語機能では複文構造をもつ日本語文章の理解にかかわる脳の活動を明らかにすべく研究を展開する。ヒトがもつ最も重要な高次機能である言語と音楽に対し、MEGとfMRIのイメージングにより神経基盤を探索する。

4．資料

4.1 学術論文

1）Rashdi Shah Ahmad, M. Kubo, Y. Hirata, S. Kuriki and S. Nakayama: "Large inductance superconducting quantum interference device magnetometer for magnetoencephalography measurement", *Jpn. J. App. Phy.*, 36: 6737-6741 (1997)*

2）S. Kuriki, F. Takeuchi and Y. Hirata: "Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex", *Cogn. Brain Res.*, 6: 193-203 (1998)*

3）N. Fujimaki, S. Kuriki, H. Nakajima, V. A. Kony chev and T. Musha: "Event-related potentials and equivalent current dipoles in silent speech using a vowel and word", *J. Psychophysiol.*, 11: 12-20 (1997)*

4）K. Yokosawa, E. Maruyama, R. S. Ahmad, H. Oyama, S. Kuriki, D. Suzuki, M. Koyanagi: "Single-layer high-Tc superconducting quantum interference device magnetometer with double-pickup-coil configuration", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, Pt.1 (8): 4362-4366 (1998)*

5）E. Maruyama, S. Kuriki, K. Yokosawa, R. S. Ahmad, D. Suzuki, M. Koyanagi: "Flux coupling in the direct-coupled high-Tc superconducting quantum interference devices", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, Pt. 2 (6B): L722-L724 (1998)*

6）E. Maruyama, S. Kuriki, Y. Kurisu, M. Matsuda: "Analytical approach to calculate the flux dependent current-voltage characteristics of dc superconducting quantum interference devices", *J. Appl. Phys.*, 83 (11): 6166-6171 (1998)*

7）T. Kobayashi, K. Kato and S. Kuriki: "ERPs reflecting awareness of changes in perceived images in binocular rivalry", *Recent Advances in Human Neurophysiology*, (eds.) I. Hashimoto and R. Kakigi, (Elsevier, Amsterdam), pp.660-666 (1998)

8）K. Huang, K. Kato, T. Kobayashi and S. Kuriki: "Event-related potentials during the comparison of Japanese kana symbols", *ibid*, pp.631-638 (1998)

9）T. Kobayashi and S. Kuriki: "Improvement of S/N in evoked neuromagnetic fields by eliminating a spontaneous field component", *Proceedings of 20th Annual International Conference of the IEEE-EMBS*, pp.2217-2220 (1998)

10）S. Kuriki, T. Mori, Y. Hirata: "Motor planning center for speech articulation in the normal human brain", *NeuroReport*, 10: 765-769 (1999)*

11）Y. Hirata, S. Kuriki and C. Pantev: "Musicians with absolute pitch show distinct neural activities in the auditory cortex", *NeuroReport*, 10(5): 999-1002 (1999)*

12）野界武史、矢原昭人、松葉博則、栗城真也：〝超伝導磁気シールド環境下の短・中潜時聴性誘発脳磁界の計測〟、日本応用磁気学会誌、22(4)：204-209 (1998)*

13）加藤和夫、小林哲生、栗城真也：〝両眼視野闘争における内的知覚図形交替に伴う事象関連電位〟、医用電子と生体工学、36(2)：111-118 (1998)*

14）野界武史、平田恵啓、小林哲生、栗城真也、V. Cscepe：〝三連続音声刺激の第二音欠如に関連する脳磁界反応〟、医用電子と生体工学、36(2)：119-126 (1998)*

15）S. Kuriki, N. Isahai, F. Takeuchi and R. Kakigi: "Where do perception and recognition of words take place in the brain? A neuromagnetic approach," *Functional Neuroscience: Evoked Potentials and Magnetic Fields (EEG J. Suppl. 49)*, Ed. By C. Berber, C. G. Celestia, I. Hashimoto, R. Kakigi

(Elsevier Science B. V.) 179-183 (1999)

16) T. Kobayashi and S. Kuriki: "Principal component elimination method for the improvement of S/N in evoked neuromagnetic field measurements," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 46(8): 951-958 (1999)*

17) S. Kuriki, A. Hayashi and H. Oyama: "On the ac bias readout scheme for high-Tc superconducting quantum interference devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38: 4733-4736 (1999)*

18) S. Kuriki, H. Oyama, E. Maruyama, A. Hayashi, S. Hirano, D. Suzuki and M. Koyanagi: "Transmission line high-Tc dc-SQUIDs," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9: 3275-3278 (1999)*

19) S. Hirano, Y. Hirata, M. Matsuda, T. Morooka, S. Nakayama and S. Kuriki: "Vortex dynamics of Nb variable-thickness bridges measured by direct flux detection method," *J. Appl. Phys.*, 85: 7819-7823 (1999)*

20) 砂盃尚子、竹内文也、栗城真也、柿木隆介：「ボタン押しパラダイムによる単語弁別に関わる脳磁界応答の検出」、医用電子と生体工学、37(3)：235-242 (1999)*

21) 小池佑辰、竹内文也、栗城真也：「簡易磁気シールド環境下の生体磁気計測におけるオフライン処理による商用電源ノイズ低減の検討」、日本応用磁気学会誌、24(3)：141-145 (1999)*

22) K. Yokosawa, H. Oyama, S. Kuriki, M. Matsuda and K. Tsukada: "Fabrication of high-Tc SQUID magnetometer with double-pickup-coil configuration," *Advances in Superconduvctivity*, XI: 1225-1228 (1999)

23) S. Hirano, Y. Hirata, M. Matsuda, T. Morooka, S. Nakayama and S. Kuriki: "Direct flux-noise measurement of Nb variable-thickness-bridges," *Advances in Superconductivity*, XI: 1205-1208 (1999)

24) M. Matsuda, S. Ono, K. Kato, K. Yokosawa, H. Oyama and S. Kuriki: "High-Tc SQUIDs on bicrystal substrate with low permittivity," *Extended Abstract of International Superconductive Electronics Conference*, 137-139 (1999)

25) Y. Hirata, T. Sakai, S. Kuriki, M. Yamaguchi and M. Tonoike: "Event related magnetic fields during auditory word processing," *Recent Advances in Biomagnetism* (Tohoku University press, Sendai) 668-671 (1999)

26) S. Ohyu, S. Aida, K. Komatsu, Y. Okamoto and S. Kuriki: "Three-dimensional distribution of ventricular action potential amplitude estimated from magnetocardiogram," *Recent Advances in Biomagnetism* (Tohoku University press, Sendai) 1059-1062 (1999)

27) T. Kobayashi, D. Cheyne, S.E. Robinson and H. Weinberg: "Principal components representing oscillatory MEG sctivities over the whole cortex," *Recent Advances in Biomagnetism* (Tohoku University Press, Sendai), 361-364 (1999)

28) T. Kobayashi: "Nonstationary analysis of human coherent oscillatory MEG activities over the whole cortex", *Proc. of 1999 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, 57-60 (1999)

29) T. Kobayashi and D. Cheyne: "New aspects of human oscillatory MEG activities revealed by nonstationary analysis of principal components," *Proc. of the third International Workshop on Biosignal Interpretation*, 358-361 (1999)

30) S. Hirano, S. Kuriki, M. Matsuda, T. Morooka and S. Nakayama: "Direct measurement of vortex motion in Nb variable-thickness-bridges," *Inst. Phys. Conf. Ser.*, 167 (Applied Superconductivity, 2): 461-464 (2000)

31) K. Yokosawa, H. Oyama, S. Kuriki, D. Suzuki and K. Tsukada: "Evaluating the entry of vortices into a slotted high-Tc SQUID magnetometer with a double-pickup-coil configuration," *Physica*, C341(348): 2705-2706 (2000)

32) H. Oyama, K. Yokosawa, M. Matsuda and S. Kuriki: "High-Tc SQUID magnetometer with mesh structure," *Advances in Superconduvctivity*, XII: 1027-1029 (2000)

33) S. Hirano, H. Oyama, M. Matsuda, T. Morooka, S. Nakayama and S. Kuriki: "Direct flux noise measurement of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ grain boundary junction," *Advances in Superconduvctivity*, XII: 1039-1041 (2000)

34) S. Hirano, H. Oyama, S. Kuriki, M. Matsuda, T. Morooka and S. Nakayama, "Direct detection of the magnetic flux noise from moving vortices in wide $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ grain boundary junctions," *Appl. Phys. Lett.*, 78: 1715-1717 (2000)*

35) F. Takeuchi, Y. Hirata and S. Kuriki: "Modulation of neural activities during visual processing in the human extrastriate visual cortex," *Frontiers Med. Biol. Engng.*, 10: 33-41 (2000)*

36) T. Hashimoto, Y. Hirata and S. Kuriki: "Auditory cortex responds in 100 ms to incongruity of melody," *NeuroReport*, 11: 799-801 (2000)*

37) 小山洋、栗城眞也、横澤宏一：「磁場中における高温超伝導 SQUID 磁束計の動作特性」、電子情報通信学会論文誌、J 83-C: 860-866 (2000)*

38) 丸山雅紀、小林哲生、栗城真也：「両眼視野闘争時における知覚運動交替に関連した視運動性眼振の変化」、電

子情報通信学会論文誌、J 84-D-II：196-202 (2000)*
39) J. Jung, T. Kobayashi, M. Maruyama and S. Kuriki: "Measurements of reaction time and ERPs in a similarity grouping task," *Proc. of 2000 International Ergonomics Symposium*, 333-336 (2000)
40) T. Kobayashi, D. Cheyne and T. Cheung: "Detection of human neocortical dynamics based on frequency-tagged multimodal evoked neuromagnetic fields," *proc. of 2000 International Ergonomics Symposium*, 355-358 (2000)
41) T. Kobayashi and T. Katsura: "Functional imaging of conscious perception in binocular rivalry," *Proc. of IEEE-EMBS Asia-Pacific Conference on Biomedical Engineering*, 619-620 (2000)
42) S. Kuriki and Y. Hirata: "Cerebral activities in the occipital and temporal regions when subjects perform a matching task of visual stimuli," *Biomag 96*, Ed. by Aine, C.J., Okada, Y., Stroink, G., Swithenby, S.J. and Wood, C.C., (Springer-Verlag, New York) 817-820 (2000)
43) Y. Hirata, T. Sakai and S. Kuriki: "Evoked magnetic fields at semantic judgment of simple Japanese sentences," *Biomag 96*, Ed. by Aine, C.J., Okada, Y., Stroink, G., Swithenby, S.J. and Wood, C.C., (Springer-Verlag, New York) 773-776 (2000)
44) T. Kobayashi, K. Kato and S. Kuriki: "Local modulation of MEG rhythmic activities related to the alternation of binocular rivalry and binocular fusion," *Biomag 96*, Ed. by Aine, C.J., Okada, Y., Stroink, G., Swithenby, S.J. and Wood, C.C., (Springer-Verlag, New York) 947-950 (2000)
45) 小林哲生、桂　卓成、加藤和夫：「眼視野闘争に関わる脳機能の非侵襲的研究：ERP、fMRI 計測とパラダイム」、臨床神経生理学、28：341-349 (2000)
46) S. Hirano, H. Oyama, M. Matsuda, T. Morooka, S. Nakayama and S. Kuriki: "Direct detection of vortex motion in high-Tc grain boundary junctions," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 11: 924-927 (2001)*
47) H. Oyama, S. Kuriki and M. Matsuda: "Effect of flux dam on the low frequency noise in high-Tc SQUID magnetometer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 11: 1331-1334 (2001)*
48) M. Matsuda, S. Ono, K. Kato, T. Matsuura, H. Oyama, A. Hayashi, S. Hirano, S. Kuriki and K. Yokosawa: "High-Tc SQUID magnetometers for use in moderate magnetically-shielded room," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 11: 1323-1326 (2001)*
49) K. Yokosawa, H. Oyama, S. Kuriki, D. Suzuki, K. Tsukada and M. Matsuda: "Effect of a static magnetic field on a slotted high-Tc SQUID magnetometer without flux dam," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 11: 1335-1338 (2001)*
50) S. Hirano, H. Oyama, M. Matsuda, T. Morooka, S. Nakayama and S. Kuriki: "Direct flux noise measurement of YBCO grain boundary junctions," *Physica C*, 357-360: 1455-1458 (2001)
51) H. Oyama, S. Hirano, M. Matsuda, and S. Kuriki: "Suppression of field-induced low frequency noise in high Tc SQUID magnetometers using slotted flux dams," *Physica C*, 357-360: 1451-1454 (2001)
52) K. Yokosawa, S. Kuriki, S. Hirano, H. Oyama, D. Suzuki, K. Tsukada: "Mechanisms of noise increase in direct-coupled high Tc super- conducting quantum interference device magnetometers exposed to magnetic fields," *J. Appl. Phys.*, 90: 4049-4055 (2001)*
53) K. Yokosawa, H. Oyama, S. Kuriki, D. Suzuki, and K. Tsukada: "Axial high-temperature superconducting-quantum-interference-device gradiometer composed of magnetometers with a monolithic feedback and compensation coil," *Appl. Phys. Lett.*, 78: 2745-2747 (2001)*
54) S. Hirano, H. Oyama, S. Kuriki, T. Morooka and S. Nakayama: "Direct detection of the magnetic flux noise from moving vortices in wide YBa2Cu 3O7-d grain boundary junctions," *Appl. Phys. Lett.*, 78: 1715-1717 (2001)*
55) S. Kuriki, N. Isahai, T. Hashimoto, F. Takeuchi and Y. Hirata: "Music and language: Brain activities in processing melody and words," *Biomag 2000, Proc. 12th Int. Conf. on Biomagnetism*, 319-327 (2001)
56) N. Isahai, F. Takeuchi and S. Kuriki: "Whole head MEG study on word processing," *Biomag 2000, Proc. 13th Int. Conf. on Biomagnetism*, 367-380 (2001)
57) S. Kuriki, A. Hayashi and Y. Hirata: "Hybrid technique for reduction of environmental magnetic field noise," *Biomag 2000, Proc. 14th Int. Conf. on Biomagnetism*, 957-960 (2001)
58) 竹内文也、白井直仁、栗城真也：「脳深部に巨大電流双極子を局在させる脳磁界応答の解析」、医用電子と生体工学、39(3)：189-196 (2001)*
59) 林周、小山洋、平田恵啓、栗城眞也：「生体磁気計測のための低磁場空間の生成」、電気学会論文誌、121-C(11)：1704-1710 (2001)*
60) 山崎慶太、藤原耕二、栗城眞也、林周、平田恵啓：「簡易型磁気シールドに適したアクティブシールドシステム設計のための磁界分布と位相遅れの検討」、電気学会論文誌A、121-A(12)：1085-1092 (2001)*
61) 藤田学、小山洋、栗城眞也、内貴猛、河原剛一：「小動物心磁図計測用高温超伝導 SQUID 磁束計の開発」、

電気学会論文誌A、122-A(12)：1104-1109 (2001)*
62) Y. Hirata and S. Kuriki: "Music score elicits neuronal activation in the temporal region," *Biomag 2000, Proc. 12th Int. Conf. on Biomagnetism*, 111-114 (2001)
63) K. Kamada, F. Takeuchi, T. Harada, B. Qiao, K. Houkin, S. Kuriki, Y. Iwasaki and K. Mitsumori: "Enhanced late components of AEFs associated with the temporal lobe lesions," *NeuroReport*, 12(6): 1297-1300 (2001)*
64) K. Kamada, F. Takeuchi, K. Houkin, M. Kitagawa, S. Kuriki, A. Ogata, K. Tashiro, I. Koyanagi, K. Mitsumori and Y. Iwasaki: "Reversble brain dysfunction in MELAS, MEG, and 1H MRS analysis," *Neurology, Neurosurgery*, 70(5): 675-678 (2001)*
65) H. Oyama, S. Hirano, S. Kuriki and M. Matsuda: "Low-frequency noise of dc SQUID magnetometers having slotted structure along grain boundary junction," *Supercond. Sci. Technol.*, 15: 1-4 (2002)*
66) S. Kuriki, A. Hayashi, T. Washio and M. Fujita: "Active compensation in combination with weak passive shielding for magnetocardiographic measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, 73: 440-445 (2002)*
67) S. Kuriki, H. Oyama, A. Hayashi, S. Hirano, T. Washio, M. Matsuda and K. Yokosawa: "Development of a high-Tc SQUID-based magnetometer system for MCG measurement," *ICICE Trans. Electron*, E85-C(3): 670-676 (2002)*
68) M. Matsuda, T. Matsuura, K. Kato, H. Oyama, A. Hayashi, S. Hirano, and S. Kuriki: "First derivative high-Tc SQUID gradiometers with narrow structure from single layer YBCO thin film," *ICICE Trans. Electron*, E86-C(3): 677-680 (2002)*
69) L. Yuwen, T. Kobayashi, J. Ji and S. Kuriki: "A study on multiple source separation using spline Laplacian: Simulation and ERP measurements", *Recent Advances in Human Brain Mapping*, 345-349 (2002)
70) S. Hirano, H. Oyama, T. Morooka, A. Nakayama and S. Kuriki: "Flux noise of YBCO grain boundary junction", *Physica*, C371-381: 1396-1399 (2002)
71) S. Kuriki, K. Takahashi, Y. Kawaguchi, M. Matsuda and T. Otowa: "High critical current density YBCO films and fabrication of dc-SQUIDs", *Supercond. Sci. Technol*, 15: 1693-1697 (2002)*
72) H. Kwon, Y. Lee, J. Kim, Y. Park and S. Kuriki: "Localization accuracy of single current dipoles from tangential components of auditory evoked fields", *Phys. Med. Biol*, 47(4145): 4145-4154 (2002)*
73) S. Kuriki, T. Mishima, F. Takeuchi, H. Hagiwara and K. Ariji: "MEG imaging of brain activities during the comprehension of Japanese complex sentences", *Neurosci. Res.*, S26: S54 (2002)
74) K. Kamada, K. Houkin, Y. Iwasaki, F. Takeuchi, S. Kuriki, K. Mitsumori and Y. Sawamura: "Rapid identification of the primary motor area by using magnetic axonography",. *J. Neurosurg*, 97: 558-567 (2002)*
75) S. Ohyu, Y. Okamoto and S. Kuriki: "Use of the ventricular propagated excitation model in the magnetocardiographic inverse problem for reconstruction of electrotrophysiological properties", *IEEE Trans. Biomed. Eng*, 49: 509-519 (2002)*
76) 鄭址旭、小林哲生、栗城眞也：「テクスチャーに基づく標的の認知を反映する脳波変動」、ヒューマンインタフェースシンポジウム2002論文集、167-170 (2002)
77) 鄭址旭、小林哲生、李玉文、栗城眞也：「テクスチャに基づく標的の分離・認知課題遂行時における事象関連電位」、電子情報通信学会論文誌、J85-D-II：1084-1092 (2002)*
78) 丸山雅紀、小林哲生、栗城眞也：「運動透明刺激に誘発される視機性応答に対する奥行き知覚に基づく注意の効果～明るさによる奥行き手掛かりを与えた場合～」、第17回生理・生体工学シンポジウム論文集、17：75-76 (2002)
79) 平田恵啓、酒井統史、栗城眞也：「音声単語のカテゴリ分類時に生じる脳磁界」、電気学会論文誌．C、122-C(9)：1542-1546 (2002)*
80) 二川裕之、小林哲生、鄭址旭、栗城眞也：「両眼視知覚における競合的処理と協調的処理のfMRIによる検討」、ヒューマンインタフェースシンポジウム2002論文集、159-162 (2002)
81) T. Kobayashi, H. Futakawa and J. Ji: "A functional neuroimaing study on change detection using fMRI", *Proceedings of 2nd European Medical & Biological Engineering Conference*, 908-909 (2002)
82) A. Hayashi, Y. Hirata and S. Kuriki: "Active compensation for multi-channel high temperature superconductor MCG system", *Proceedings of the 13th International Conference on Biomagnetism*, 928-930 (2002)
83) F. Takeuchi and S. Kuriki: "Analysis of MEG responses during a visual-word memory task", *Proceedings of the 13th International Conference on Biomagnetism*, 294-296 (2002)
84) J. Ji, T. Kobayashi, L. Yuwen and S. Kuriki: "Event-related potentials in a similarity grouping task", *Recent Advances in Human Brain Mapping*, 0: 283-287 (2002)
85) M. Matsuda, T. Otowa, Mikami, S. Kuriki, K.

Takahashi and Y. Kawaguchi: "Fabrication and characterization of high-Tc SQUIDs with stripline structure", *Proceedings on Taiwan-Japan Symposium on SQUID & Communication Electronics*, 30-32 (2002)

86) S. Kuriki, T. Mishima, F. Takeuchi and H. Hagiwara: "Intra- and inter-phrase responses in the comprehension of Japanese complex sentences", *Proceedings of the 13th International Conference on Biomagnetism*, 334-336 (2002)

87) S. Kuriki, T. Hashimoto and N. Isahai: "MEG responses from the superior temporal cortex processing unknown melodies", *Proceedings of the 13th International Conference on Biomagnetism*, 353-355 (2002)

88) S. Kuriki, A. Hatashi, K. Takahashi and M. Matsuda: "Multichannel high-Tc SQUID system", *Proceedings on Taiwan-Japan Symposium on SQUID & Communication Electronics*, 4-7 (2002)

89) 内貴猛、藤田学、李玉文、林あさこ、河原剛一、栗城眞也：「心磁計測による心筋梗塞ラットにおける心拍リズムゆらぎの計測」医用電子と生体工学、40：84（2002）*

4.2 総説、解説、論文等

1）栗城真也：〝SQUIDによる脳活動の無侵襲計測〟、日本学術振興会「協力会会報」71：10-17（1997）

2）栗城真也、砂盃尚子、竹内文也：「MEGによる高次脳機能へのアプローチ—単語認識に関わる脳活動の解析—」、臨床脳波、41：298-303（1999）

3）栗城真也：「SQUIDの生体磁気計測への応用」、電気学会誌、120：219-222（2000）

4）栗城真也：「生体磁気計測における低磁場雑音空間の生成技術」、電磁環境工学情報EMC、147：28-33（2000）

5）栗城真也：「脳磁場の発生と計測」、脳の科学、22：607-611（2000）

6）栗城眞也：「高温超伝導SQUIDの基礎と応用の現状・未来」、低温工学協会東北・北海道支部第6回超伝導・若手セミナー資料、1-29 (2001)

7）栗城眞也：「超伝導生体工学」、応用物理、71(1)：23-28 (2002)

8）松田瑞史、栗城眞也：「SQUIDの原理とシステム化技術」、応用物理「基礎講座」、71：1534-1537（2002）

9）小林哲生：「視覚から意識の謎に迫る」、脳と精神の医学、13(4)：403-410（2002）

10）小林哲生、鄭址旭：「視覚的認知の脳研究から画像工学へ：テクスチャ分離に基づく標的認知課題遂行に伴う事象関連電位」、画像ラボ、13(11)：17-21（2002）

11）小林哲生：「複合定常誘発脳磁界の分離・抽出とダイナミクス解析」、臨床脳波、44(8)：481-488（2002）

12）小林哲生：「両眼視野闘争：意識の脳内機構探究の鍵」、電子情報通信学会技術研究報告、NC 2002-115：73-78（2003）

4.3 著書

1）栗城真也：「聴性磁場反応—基礎」、『聴性脳幹反応ガイドブック』（メジカルビュー社）pp.165-172（2000）

2）T. Kobayashi and K. Kato: "Reactivity of human cortical oscillations reflecting conscious perception in binocular rivalry", *No matter, Never Mind*, John Benjamins Publishing CO, 261-271 (2002)

4.5 招請講演

1）S. Kuriki, F. Takeuchi and Y. Hirata: "Dynamic excitation of cortical areas during visual information processing", Pan-Pacific Conference on Brain Topography (Tokyo, 1997-04)

2）S. Kuriki, N. Isahai, F. Takeuchi: "Where do perception and recognition of words take place in the brain?: A neuromagnetic approach", International Evoked Potentials Symposium (Okazaki, 1998-03)

3）栗城真也：〝視覚高次機能を脳磁界（MEG）でみる〟、「脳機能情報処理」及び「脳型コンピュータ・アーキテクチャ」ワークショップ（東京、1998-01）

4）栗城真也：〝計測応用のための高温超電導SQUIDの技術課題〟、低温工学会「第4回超電導応用研究会」シンポジウム（東京、1998-02）

5）S. Kuriki, Y. Hirata, F. Takeuchi, T. Mori: "Magnetic field measurements with SQUIDs and application to brain researches", The 5th Japan-Korea Joint Symposium on Applied electromagnetics, Power Systems and Controls (Sapporo, 1998-08).

6）S. Kuriki: "Cortical functions revealed by MEG", Satellite Symposium on Biomag '98. Advanced Biomagnetism in Biological Engineering and Neuroscience (Tokyo, 1998-08).

7）平田恵啓、栗城真也、クリスト・パンテフ：〝絶対音感を持つ音楽家の聴覚誘発脳磁界について〟、平成10年度日本音響学会学術講演会（米沢、1998-09）.

8）平田恵啓、栗城真也、クリスト・パンテフ：〝絶対音感を持つ音楽家の聴覚皮質の活動〟、第28回日本脳波・筋電図学会学術大会—シンポジウム—(神戸、1998-11).

9）小林哲生：「脳磁図(MEG)による脳機能計測と信号解析」、秋田県立脳血管研究センター講演会、秋田、日本(2000-1)

10）小林哲生：「両眼視野闘争に関わる脳機能の非侵襲的研究」、—fMRI、EEG/MEG計測とパラダイム—」、第2回ヒト脳機能マッピング研究会学術集会プレシンポ

ジウム（東京、2000-3）
11) T. Kobayashi, D. Cheyne and Teresa Cheung: "Detection of human neocortical dynamics based on frequency-tagged multimodal evoked neuromagnetic fields," 2000 International Ergonomics Symposium, Kyungju (Korea, 2000-4)
12) 栗城眞也：「脳磁図による高次脳機能研究」、日本エム・イー学会大会シンポジウム「生体磁気研究の新しい展開」（東京、2000-5）
13) 小林哲生：「主成分分析（PCA）を用いた脳磁界データの信号処理」、性格・行動と脳波研究会（宮古、2000-6）
14) S. Kuriki, N. Isahai, T. Hashimoto, F. Takeuchi and Y. Hirata: "Music and language: Brain activities in processing melody and words," 12th International Conference on Biomagnetism (Espoo, 2000-8)
15) 林周、小山洋、藤田学、鷲尾知暁、栗城眞也：「高温超伝導体 SQUID を用いた MCG 計測のための低磁場空間の生成法　一簡易磁気シールドと能動補償一」、学術振興会超伝導エレクトロニクス委員会研究会（大阪、2000-11）
16) 小林哲生：「高次脳機能の非侵襲計測とイメージング」、日本人間工学会北海道支部大会（小樽、2000-11）
17) 小林哲生：「複合定常誘発脳磁界の分離・抽出とダイナミクス解析」、日本臨床神経生理学会サテライトシンポジウム「電磁図による脳機能解析技術の新展開」（京都、2000-12）
18) 小林哲生、鄭址旭、李玉文：「高分解能脳波による脳機能計測：類同性に基づく群化に関連する脳活動の検討」、第 16 回日本生体磁気学会大会（東京、2001-6）
19) 小林哲生：「機能的 MRI と MEG によるヒト脳機能マッピング」、第 42 回日本人間工学会大会（網走、2001-9）
20) S. Kuriki, T. Nakajima and F. Takeuchi: "MEG imaging of cerebral neural activities underlying sentence comprehension," Joint France-Japan Symposium on Cognitive Neurosciences (Wako, 2001-9)
21) 栗城眞也：「高次脳機能を目指した脳磁図計測と解析」、平成 13 年度統計数理研究所「逆問題とその周辺」研究会（東京、2001-9）
22) 小林哲生：「ヒト高次脳機能の非侵襲計測とイメージング」、日本 ME 学会第 85 回バイオメカニクス研究会（札幌、2001-11）
23) T. Kobayashi: "Brain mechanisms of visual awareness: Functional neuroimaging studies on binocular rivalry," The Third RIES-Hokudai Symposium (Sapporo, 2001-12)
24) 小林哲生：「視覚から意識の謎に迫る」、第 24 回日本生物学的精神医学会シンポジウム「精神症状は生物学的言語で語れるか」（さいたま、2002-04）
25) 小林哲生：「生体電磁気現象の基礎と脳電磁図イメージング」、東北学院大学学術講演会（仙台、2002-10）
26) 平田恵啓：「音楽家の脳を MEG で探る」、平成 14 年度日本人間工学会北海道支部大会（札幌、2002-11）
27) 小林哲生：「複数信号源活動のダイナミクスを探る」、第 32 回日本臨床神経生理学会シンポジウム「今、脳波にできること」（福島、2002-11）
28) 小林哲生：「両眼視野闘争：意識の脳内機構探究の鍵」、電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会・非線形問題研究会特別講演（札幌、2003-02）

4.6　シンポジウムの開催

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）栗城眞也（電子計測制御部門）：「応用物理学会「高温超伝導 SQUID と生体計測」（秋田、1997.10.3）
2）栗城眞也（電子計測制御部門）：「日本生体磁気学会「生体磁気計測は臨床にどう貢献するか？」（東京、1998.5.23）
3）栗城眞也（電子計測制御部門）：〝日本学術振興会超伝導エレクトロニクス委員会、文部省特定領域研究「ボルテックスエレクトロニクス」〟（大阪、1998.11.20）
4）小林哲生（電子計測制御部門）：「ヒト脳機能マッピングの新展開」（150 名、東京農業大学）（2001.9.5）
5）小林哲生：「脳機能探究への様々なアプローチ」（50 名、北海道大学・札幌市）（2002.4.20）
6）小林哲生：「人間の脳と体の機能を測る最新の研究」（45 名、北海道大学・札幌市）（2002.11.9）
7）栗城眞也、柿木隆介：〝生理学研究所研究会「第 3 回脳磁場ニューロイメージング」〟（100 名、岡崎コンファレンスセンター・愛知県岡崎市）（2002.12.11〜12.12）

4.7　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）栗城眞也：基盤Ｂ、一般(2)「反応観察と脳磁界計測に基づく生体の知的視覚活動の解析」、1,800 千円（1997）
2）栗城眞也：特定Ａ、(1)：「磁気一光一電子・量子機能基礎研究」、57,300 千円（1998）
3）小林哲生：基盤Ａ、一般(2)：「両眼視野闘争における内的知覚交替現象の高分解能脳波計測による非侵襲的研究」、11,800 千円（1998）
4）小林哲生：萌芽、「視覚的認知・意識に関わる脳内プロセスの非侵襲的定量計測」、1,400 千円（1998）
5）平田恵啓：奨励Ａ、「音楽家の楽音認知脳内機構の無侵襲計測」、1,000 千円（1998）
6）栗城眞也：特定領域Ａ、(1)「磁気一光一電子・量子機能基礎研究」、42,400 千円（1999）
7）小林哲生：特定領域Ａ、(2)「周波数標識された定常誘発脳磁界のクロスダイナミクスに基づく意識遷移の定量

的研究」2,500千円（1999）
8）小林哲生：基盤A、一般(2)「両眼視野闘争における内的知覚交替現象の高分解能脳波計測による非侵襲的研究」、3,800千円（1999）
9）栗城眞也：基盤A、展開(1)「高温超伝導体によるSQUID生体磁気計測技術の構築」、12,000千円(1999)
10）小林哲生：萌芽、「視覚的認知・意識に関わる脳内プロセスの非侵襲的定量計測」、700千円（1999）
11）平田恵啓：奨励A、「音楽家の楽音認知脳内機構の無侵襲計測」、700千円（1999）
12）栗城眞也：特定領域A、(1)「磁気一光一電子・量子機能基礎研究」、43,700千円（2000）
13）小林哲生：特定領域A、(2)：「周波数標識された定常誘発脳磁界のクロスダイナミクスに基づく意識遷移の定量的研究」、2,000千円（2000）
14）栗城眞也：基盤A、展開(1)：「高温超伝導体によるSQUID生体磁気計測技術の構築」10,700千円（2000）
15）小林哲生：萌芽、「競合する感覚情報処理過程における意識遷移の非侵襲的定量計測」、1,300千円（2000）
16）栗城眞也：基盤A、展開(1)：「高温超伝導体SQUIDによる生体磁気計測技術の構築」、直接5,700千円、間接1,710千円（2001）
17）小林哲生：萌芽、(2)：「競合する感覚情報処理過程における意識遷移の非侵襲的定量計測」700千円（2001）
18）平田恵啓：奨励A、(2)：「器楽演奏家の局所失調症とその脳磁界に関する研究」、1,500千円（2001～2002）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（研究者名、部門名、研究課題、研究期間）

1）河原剛一、栗城眞也、中村孝夫、魚住純、小林哲生(電子計測制御部門)、田村　守（電子機能素子部門）、下澤楯夫、西浦廉政、水波　誠(電子情報処理部門)：「神経回路網動作の非侵襲・高精度計測法に関する総合的研究」（1996～1997）
2）栗城真也、河原剛一、内貴猛、平田恵啓、竹内文也、山内芳子(電子計測制御部門)、西浦廉政、柳田達夫(電子情報処理部門)：「高温超伝導体SQUID計測による虚血心疾患に伴った拍動リズムゆらぎ解析」（2000～2002）

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）栗城眞也（電子計測制御部門）：株式会社東芝：「SQUIDによる環境雑音下での生体計測の研究」、2,910千円（1997～1998）
2）栗城眞也(電子計測制御部門)：新機能素子研究開発協会：「高温超電導薄膜及び素子の特性評価に関する共通基礎研究Ⅰ」、2,100千円（1997）

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究課題、経費、研究期間）

1）栗城眞也(電子計測制御部門)：株式会社東芝医用システム社：「SQUIDによる環境雑音下での生体計測の研究」、1,365千円（1997～1999）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）栗城眞也：日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第146委員会・第一分科会主査（1997～2002）

b．国内外の学会の主要役職

1）栗城眞也：日本エム・イー学会評議委員（1997～2002）
2）栗城眞也：日本生体磁気学会理事（1997～2002）
3）栗城眞也：科学技術振興事業団地域振興事業評価委員会専門委員（2000）
4）栗城眞也：日本生体磁気学会副会長（2000～2002）
5）栗城眞也：日本エムイー学会教育技術委員会委員（1997～2002）
6）栗城眞也：電気学会論文委員会委員（2000～2002）
7）栗城眞也：応用物理学会欧文誌論文委員会委員(2000)
8）栗城眞也：電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究専門委員会・委員（1997～2002）
9）小林哲生：日本人間工学会支部幹事（2000～現在）
10）小林哲生：日本人間工学会役員選挙管理委員会委員（2000～2001）
11）小林哲生：日本人間工学会第41回大会運営委員（2000）
12）小林哲生：日本脳電磁図トポグラフィー研究会評議員（2000～現在）
13）小林哲生：日本人間工学会評議員（2001～現在）
14）小林哲生：日本人間工学会第42回大会運営委員（2001）
15）小林哲生：日本臨床神経生理学会奨励論文審査委員会委員（2001.4.1～2002.10.31）
16）小林哲生：日本エム・イー学会支部幹事（2001～2002）
17）小林哲生：計測自動制御学会生体・生理工学シンポジウム実行委員（2001.4.1～2002.9.11）
18）平田恵啓：電気学会計測技術委員会「先端波動干渉計測」調査専門委員会委員（2000.4.1～2002.9.30）
19）小林哲生：ヒューマンインターフェースシンポジウム2002実行委員（2001.2.1～2002.9.3）
20）小林哲生：日本ME学会第42回大会実行委員（2002.10.1～2003.6.5）
21）小林哲生：日本人間工学会北海道支部第14回支部大会大会長（2002.11.9）

c．新聞・テレビ等の報道

1）栗城眞也：科学新聞「メロディー検知に関わる脳内部位をSQUIDで推定」（2000.2.18）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）久保真輝：dc SQUID の素子パラメータ変化による動作解析（1998）

2）小山洋：高温超伝導 SQUID 磁束計の製作と特性評価に関する研究（1998）

3）林周：高温超伝導体 SQUID の計装化に関する研究（1999）

4）丸山雅紀：眼球運動計測に基づく両眼視野闘争時における知覚交替に関する研究（1999）

5）李玉文：スプライン・ラプラシアン法を用いた複数脳波信号源の分離に関する研究（2000）

6）桂卓成：fMRI 計測による両眼視野闘争に関連する脳活動の研究（2000）

7）橋本竜明：旋律により誘発される聴感性脳磁界反応（2000）

8）鷲尾知暁：適応フィルタを用いた環境磁場雑音のアクティブキャンセレーションに関する研究（2001）

9）藤田学：高温超伝導体 SQUID 磁束計の開発とラット心磁図の計測（2001）

10）中島利崇：日本語の文章理解に関わる脳活動の計測と解析（2001）

11）高橋賢一：高温超伝導薄膜の高品質化と MCG 計測用 SQUID の特性改善（2002）

12）二川博之：fMRI 計測による視覚認知に関連する脳活動の研究（2002）

13）三島喬：日本語複文理解時における脳磁図計測(2002)

・博士学位

1）野界武史：聴性誘発脳磁界反応の計測と解析（1998）

2）横澤宏一：生体磁場計測を目的とした高温超伝導 SQUID 磁束計の高感度化に関する研究（1998）

3）黄孔良：事象関連電位に基づく仮名文字黙読・照合に関わる脳内プロセスの研究（1998）

4）小池佑辰：色覚関連誘発脳脳界の計測に関する研究（1999）

5）平野悟：Vortex dynamics in supercon devicse measured by direct flux detection method（直接磁束検出法による超伝導薄膜デバイスの磁束量子ダイナミクスの計測と解析）（1999）

6）小山洋：環境磁場下における高温超伝導体 SQUID 磁束計の低雑音化に関する研究（2001）

7）鄭址旭：事象関連電位に基づく視覚的群化の脳内プロセスに関する研究（2001）

e．大学院担当講義科目名

1）脳機能工学特論（栗城眞也・小林哲生）（1997～2002）

2）生体情報工学特別演習（栗城眞也・小林哲生・平田恵啓・竹内文也）（1997～2002）

3）生体情報工学特別研究第一（栗城眞也・小林哲生・平田恵啓・竹内文也）（1997～2002）

4）生体情報工学特別研究第二（栗城眞也・小林哲生・平田恵啓・竹内文也）（1997～2002）

自律調節研究分野

教授　狩野　猛（マギル大院、Ph.D.、1991.11～）
講師　和田成生（阪大院、工博、1994.9～2002.9）
助手　内貴　猛（北大院、工博、1992.1～2000.8）
　　丹羽光一（北大院、獣医博、1997.10～）
技官　石坂高英（1992.4～2001.3）

院生
・平成９－14年度
博士課程
金川幸紀、中村匡徳、村上智也
修士課程
坂井友幸、糀屋　睦、角　竜憲、福崎重隆、安田哲也、坂井滋郎

１．研究目的

生体における血管は、血流の変化に対して適応的にその内径および管壁の構造を変えるという自律調節機能を持っており、あらゆる適応的変化が、流れによって負荷されている壁せん断応力の値が一定（約15 dynes/cm²）になるように起こると言われている。しかしながら、どのような機構により壁せん断応力が血管系のどこでも一定になるように内径が調節されているのか、また、どのようにして血管壁が壁せん断応力の変化に対して適応的に再構築されるのかはまだ良く判っていない。我々の研究目標は、このような血管の流速変化に対する生理的調節機構およびその調節可能な範囲を逸脱して起こる内膜肥厚、動脈硬化、および脳動脈瘤形成などの血管病の病変発生並びに局在化の機構を明らかにし、これらの血管病の予防および治療に役立てるとともに、内膜肥厚の起こらない人工血管の開発および内膜肥厚を起こさない又は最小にするような最適血行再建術の確立に寄与することである。

２．研究成果

・平成９－10年度

(a)　血管病の局在化機構に関する研究

動脈硬化症、脳動脈瘤形成、および閉塞してしまった血管に対して自家静脈や人工血管を用いて血行再建を行った場合に起こる吻合部内膜肥厚など、ヒトに起こる血管病のほとんどが、比較的大きな血管の分岐部や湾曲部、および血行再建を行った血管の吻合部など、流体力学的観点よりみて血流の乱れやすい場所に局所的に発生することから流体力学的因子が関与していることが示唆され、1960年代より今日まで色々な角度から研究が行われて来た。その結果、これらの血管病の局在化に最も深く関与している流体力学的因子として壁せん断応力が挙げられるようになった。しかしながら、それが具体的にどのような役割を果たしているのかは未だ不明な点が多く、局在化機構の解明には至っていない。

我々は、この流速変化によって引き起こされる血管壁の病変が、他の多くの研究者によって言われているところのせん断応力によるものではなく、血管壁構成細胞にとって重要な栄養素の一つであるところのコレステロールを多量に含有しているリポ蛋白の血液より血管壁への物質移動によって支配されるものであり、血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度が、これまでほとんど無視されてきた血管壁の水透過性および管壁近傍の血流速度によって局所的に異なることにより起こる、即ち、リポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象によるものであるとの全く新しい考えに基づいて理論および実験の両面より研究を進めている。平成９－10年度の２年間では、我々が提唱している上記の仮説、即ち、血管内壁表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃度分極説を実証するための理論的検討、培養血管細胞を用いたモデル実験、および慢性動物実験を行った。その結果は以下のように要約することができる。

〔１〕理論的検討：コンピュータ・シミュレーションにより動脈のまっすぐな部分について血管壁の水透過性を考慮に入れて定常流および拍動流の条件下でリポ蛋白の半径方向の濃度分布および管軸方向の管壁表面における濃度分布を求め、これらにおよぼすレイノルズ数、壁せん断速度、および水透過速度などの影響について検討した。その結果、血管壁が血漿に対して透過性を有することに起因する一種の濾過作用により、図１および２に示したように血管内壁表面上でリポ蛋白の濃縮が起こり、そのリポ蛋白の壁面濃度は、流れが遅く、リポ蛋白分子のサイズが大きく、管壁における水透過速度が大きいほど、そして図３に示したように血管に沿って下流に行くほど高くなることが判った。

〔２〕実験的検討：理論解析により示唆された血管内壁表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象が血管内皮上で起こることを実証するための試みの一つとして、多孔質フィルター上に播種培養したウシ大動脈由来内皮細胞の単層を平行平板型流路の壁の一部となるように装着し、リポ蛋白の懸濁液を用いて流れの実験を行い、内皮細胞単層表面上におけるリポ蛋白の濃度によって変化する細胞単層よりの水の透過速度を測定することによりリポ蛋白の壁面濃度におよぼす流速（壁せん断速度）の影響について検討した。その結果、図４に示したように水透過速度が壁せん断速度の大きさに応じて可逆的に変化し、これを灌流液中におけるリポ蛋白の濃度と水透過速度との関係を用いると水透過速度とリポ蛋白の濃度との関係に変換することができ、壁せん断速度が小さいほどリポ蛋白の壁面濃度が高くなることが判った。また、血漿蛋白のうちでも分子量が大きく、従ってサイズの大きいリポ蛋白の方が分子量およびサイズの小さいアルブミンよりも濃縮現象が顕著に現れることが判った。これらの結果により、リポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象が血管内皮表面上で起こることを実験的に確認することができた。

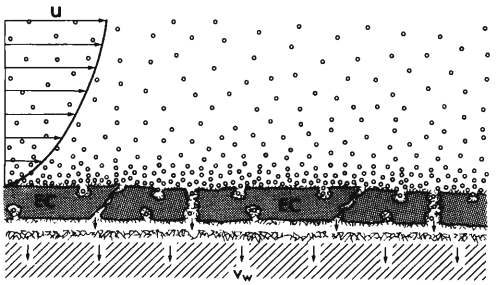


図１．リポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象の模式図

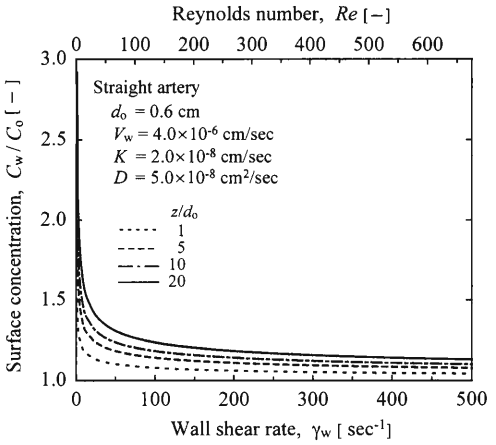


図２．リポ蛋白の壁面濃度におよぼす壁せん断速度およびレイノルズ数の影響

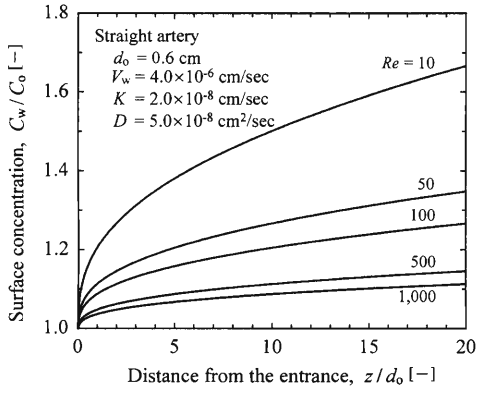


図３．リポ蛋白の壁面濃度と入り口からの距離との関係

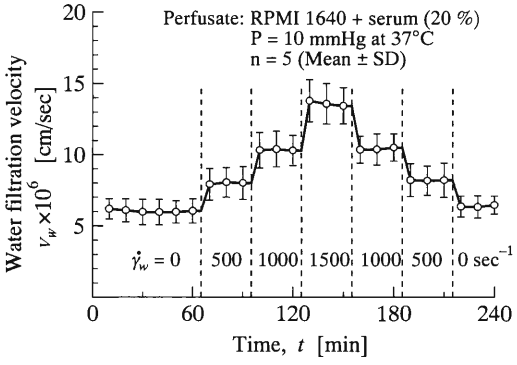


図４．培養血管内皮細胞単層における水透過速度におよぼす壁せん断速度の影響

(b)　移植した人工血管の管壁における水透過速度と内膜肥厚との関係に関する研究

上記 (a) の理論解析の結果、管壁における水透過速度が大きいほど血管内壁表面上におけるリポ蛋白濃度が高くなることが判り、このことより水透過速度の大きい人工血管ほど内膜肥厚が進行する可能性があることが示唆された。そこで水透過速度が極端に異なる３種類の人工血管をイヌの総頸動脈に移植し、それを移植後数週から１年の期間に取り出し、管壁における水透過速度および形成された偽内膜の厚みを測定した。その結果、いずれの人工血管においても水透過速度は移植後１～２ヶ月程度でホスト動脈における値に近い値まで低下し落着くが、偽内膜の厚みに関しては血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度が高くなっていると予測されるところの水透過速度の大きい人工血管ほど厚くなる傾向があることが判った。

(c)　落球式血液粘度計の開発に関する研究

血液の粘度を測定する方法として、定常流を利用した回転型粘度計が一般に使用されているが、この方法により得られる血液の粘度は測定開始からの経過時間およびせん断速度（回転速度）の大きさによって異なった値を示し、普遍的な値を得ることができない。そこで、静置した液体中をゆっくりと自然落下する微小固体球の終末速度を測定し、それをもとにして球の表面に作用しているせん断速度およびせん断応力を算出して液体試料の粘度を求める新しい方法、すなわち「落球式粘度測定法」に関して理論的に検討した。同時に、超音波エコーを利用した粒子速度測定装置を作製し、これを用いて試験管に採取した水あめ、油、高分子物質の水溶液、およびヒトの血液試料中を自然落下する直径１mm 前後のポリスタイレン球の速度を実測して実験的にも検討を行った。その結果、この方法により、水あめや油などのニュートン流体の場合にはもちろんのことながら、高分子物質の水溶液や血液のような非ニュートン流体の場合でも、測定開始からの経過時間にも、また、せん断速度の大きさにも影響を受けない、液体の普遍的な物性値としてのレオロジー定数を求めることが可能であり、特に本法によりフィブリノーゲンの存在下で赤血球集合体の形成により起こる血液粘度の異常性を従来の回転型粘度計よりも感度良く検出できることが判った。

・平成 11－12 年度

(a)　血管病の局在化機構に関する研究

平成 11－12 年度の２年間では、動脈硬化症、脳動脈瘤形成、および吻合部内膜肥厚の共通の局在化機構として我々が提唱している仮説、即ち「リポ蛋白の流速依存性濃度分極説」を実証するために、複雑な形状をした血管についてのコンピューター・シュミレーションによる理論的検討および培養血管内皮細胞を用いたモデル実験を行った。その結果は、以下のように要約することができる。

〔１〕理論的検討：形状が複雑なために血流が局所的に乱

れ、動脈硬化が起こりやすい血管の典型的な例として、透明化して流れの可視化実験に用いたヒトの冠動脈の湾曲部について、その写真よりコンピュータ・シミュレーション用の三次元形状モデルを構築し、血管内における流れに関する情報およびリポ蛋白の壁面濃度を求め、それらと透明化した血管で見られる動脈硬化の起こっている部位との関係について検討を行った。その結果、図5に示したように、この血管内の流れは、湾曲部内側壁の湾曲の頂点付近で流れの剝離が起こり、そのすぐ下流の剝離領域に外側壁にあった流体素子が管壁に沿って共通直径面の両側からゆっくりと流れ込み、その一部は流れの方向を変え、管壁に沿って逆流し、剝離点近傍で再び方向を変え、共通直径面近傍で本流に引き込まれるようにして出て行くという構造になっていることが判った。これは、透明化した血管でトレーサー粒子を用いて行った流れの可視化実験で観察された結果と良く一致するもので、このゆっくりとした逆流の起こっている部位は、ずり応力の最も低い部位になっていた。また、この部位は、リポ蛋白の壁面濃度が最も高くなっている部位であり、透明化した血管で観察された動脈硬化の起こっている部位にほぼ一致することが判った。リポ蛋白の壁面濃度に関しては、コレステロールを多量に含有している低密度リポ蛋白など、分子サイズが大きいものほど、そして管壁における水透過速度が大きいほど高くなることが判った。

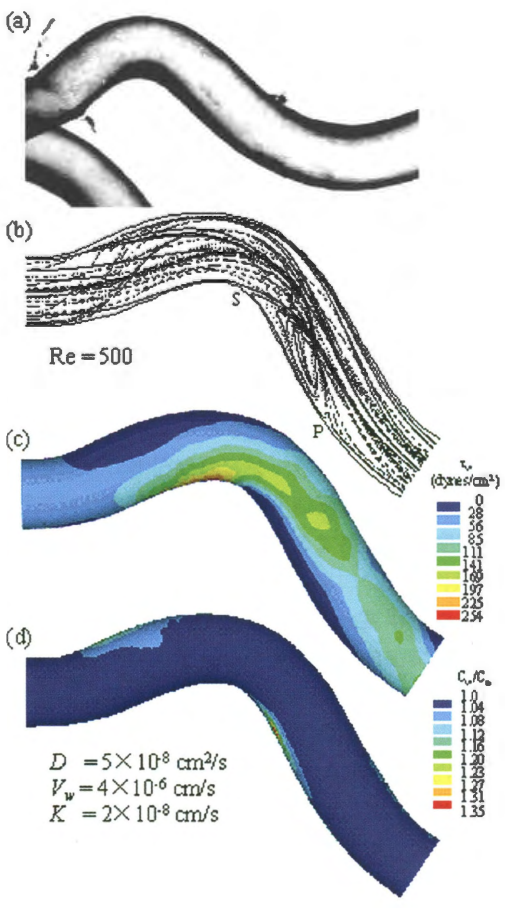


図5．ヒト右冠動脈の湾曲部(a)におけるフローパターン(b)、壁ずり応力分布(c)、およびLDLの壁面濃度分布(d)

〔2〕実験的的検討：理論的検討により示唆された流速に依存したリポ蛋白の濃縮・枯渇現象が血管内壁表面上で起こることを実験的に立証する方法として、内皮細胞単層上のリポ蛋白分子の数を直接計測することにより実証しようと考え、培養したウシ大動脈由来内皮細胞単層を血管壁のモデル、リポ蛋白と同サイズで、蛍光物質で標識したポリスチレン微粒子(直径20 nm)をリポ蛋白のモデルおよびトレーサーとして用い、平行平板型流路で流れの実験を行い、内皮細胞単層上におけるその微粒子の濃度を蛍光顕微鏡で蛍光の強度を測定して求め、それに及ぼす流れおよび灌流圧の影響について検討を行った。その結果、図6に示したように、微粒子の蛍光強度が灌流圧の上昇度合いに比例して増大し、初期値（10 mmHg）に戻すと低下すること、そして、その値は流れの方向に下流に行くほど高くなっていることが判った。また、この実験において灌流圧を増大した後、再び初期値に戻した場合の蛍光強度の値が、負荷した灌流圧の大きさに比例するように増大していることから、細胞単層に取り込まれたり付着した状態になっている微粒子の数も細胞単層表面における微粒子の濃度に比例して増加することが判った。灌流圧を一定に保ち、流量(従って壁ずり速度）のみを変化させた場合の内皮細胞単層上における微粒子の蛍光強度は、図7に示したように、壁ずり速度が小さいほど高く、流れが止まった場合には急速に上昇することが判った。これらの結果より、先の理論解析により示唆された通りに、血管内皮表面上で確かにリポ蛋白の濃縮・枯渇が起こり、リポ蛋白の濃度が灌流圧（水透過速度）に比例し、流速（壁ずり速度）にほぼ逆比例して変化すること、および下流に行くほど増大することが判った。

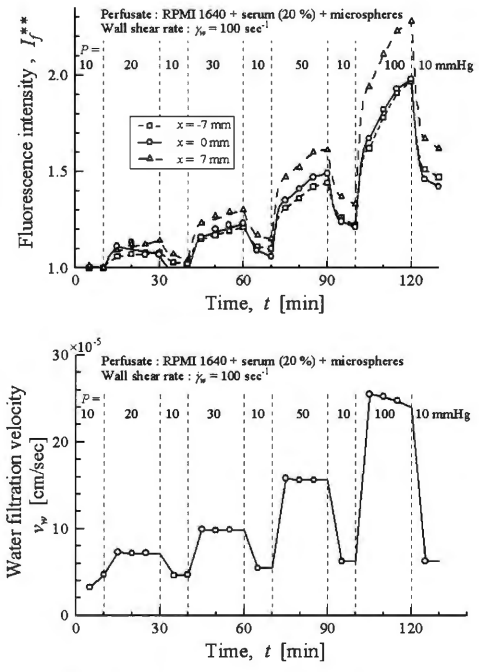


図6．培養血管内皮細胞単層上におけるリポ蛋白のモデルとしての蛍光微粒子の濃度に及ぼす灌流液の圧力の影響

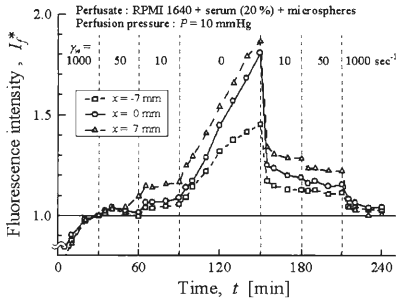


図7．培養血管内皮細胞単層上におけるリポ蛋白のモデルとしての蛍光微粒子の濃度に及ぼす壁ずり速度の影響

(b)　動脈硬化の発症・進展に係わる血管内皮細胞のアポトーシスに関する研究

動脈硬化の発症・進展に寄与していると考えられる酸化LDLや白血球から放出された活性酸素によるストレスが原因となって起こると思われる血管内皮細胞のアポトーシスの分子機構を培養ウシ大動脈由来内皮細胞を用いて検討した。その結果、酸化ストレスとして用いた過酸化水素による内皮細胞のDNA断片化は、細胞内カルシュームイオンのキレーター（BAPTA）により抑制され、PI3キナーゼの阻害剤（Wortmannin）により増強されることから、過酸化水素は細胞内カルシュームイオン濃度を上昇させることによりアポトーシスを引き起こすこと、およびこの経路にはPI3キナーゼによる抑制機構が存在することが判った。

・平成13－14年度

(a)　血管病の局在化機構に関する研究

平成13－14年度の2年は、血管病の局在化機構として我々が提唱している仮説即ち「リポ蛋白の流速依存性濃度分極説」を実証するために、端端吻合を施した血管についての理論的検討および血管平滑筋細胞と内皮細胞を重層共培養して作成した血管壁モデルによるリポ蛋白の取り込みに及ぼす流れの影響について実験的に検討を行った。

(1)　理論的検討：内膜肥厚が起こりやすい血管の例として、先に透明化して流れの実験に用いた45°端々吻合を行ったイヌ大腿動脈について、図8(a)に示した写真よりコンピュータ・シミュレーション用の三次元形状モデルを構築し、血管内における流れに関する情報およびリポ蛋白の壁面濃度を求め、それらと透明化した血管で見られる内膜肥厚の起こっている部位との関係について検討した。その結果、この血管内の流れは、図8(b)に示したように、吻合部尾部に形成された緩やかな狭窄の頂点付近で流れの剝離が起こり、そのすぐ下流に外側壁にあった流体素子が共通直径面の両側から管壁に沿ってゆっくりと流れ込み、その一部は流れの方向を変え、管壁に沿って逆流し、剝離点近傍で再び方向を変え、共通直径面で本流に引き込まれるようにして出て行くという構造になっていることが判った。これは、透明化した血管でトレーサー粒子による流れの可視化実験で観察された結果と良く一致するもので、このゆっくりとした逆流の起こっている部分は、ずり応力の最も低い部分になっていた。また、この部分は、図8(c)に示したように、リポ蛋白の壁面濃度が最も高くなっている部分であり、透明化した血管で観察された内膜肥厚の起こっている部位とも良く一致することが判った。

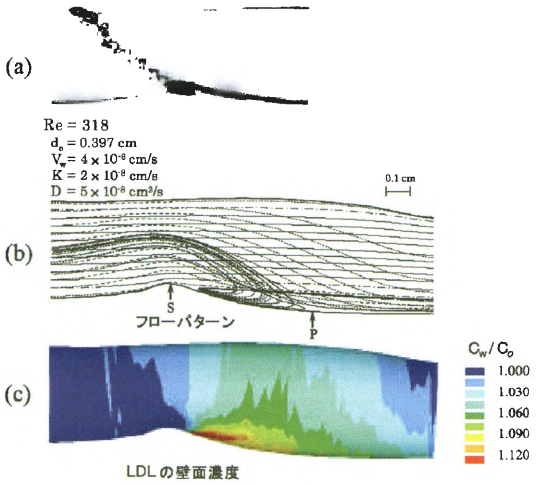


図8．45°端々吻合を行ったイヌ大腿動脈(a)におけるフローパターン(b)、およびLDLの壁面濃度分布(c)

(2)　実験的検討：血管内壁表面上で局所的な流速の大小によりリポ蛋白の濃縮又は枯渇が起こることを立証するために、これまでは培養したウシ大動脈由来内皮細胞単層を血管壁のモデルとして用いて実験を行って来た。しかしながら、実際の血管壁は、内皮細胞の下に内弾性膜があり、そのさらに下には平滑筋およびコラーゲンやエラスチン等の結合組織から成る中膜があるという構造になっている。従って、内皮細胞単層のみでは血管壁のモデルとして完全に生体血管の機能を果たしているとは言い難い。そこで我々は、生体血管により近い血管壁のモデルとして、ウシ大動脈より採取した内皮細胞（EC）を平滑筋細胞（SMC）上に直接重層播種して共培養することにより、図9に示したような血管壁モデル（EC-SMC bilayer）を作製した。そして、その血管壁モデルの蛍光物質で標識したLDLおよび酸化LDLのモデルとしてのアセチル化LDL（Ac-LDL）に対する透過性を調べると共に、回転円盤型せん断装置を用いて流れの実験を行い、血管壁モデルによるLDLおよびAc-LDLの取込におよぼすせん断流れの影響について検討を行い、内皮細胞単層で得られた結果と比較検討した。図10はその結果を示したものである。図より明らかなようにLDLの取込に関しては、EC単層よりも平滑筋細胞のあ

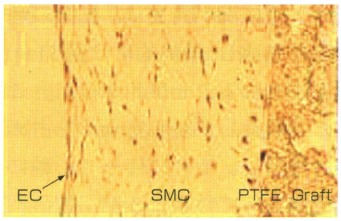


図9．血管壁モデル（EC-SMC bilayer）の写真

る EC-SMC bilayer の方に圧倒的に多く取り込まれ、せん断応力の影響は微少であることがわかった。これに対し、酸化 LDL のモデルとしての Ac-LDL の取込に関しては、この物質が内皮細胞にだけしか取り込まれないため、流れのない状態では EC 単層と EC-SMC bilayer により取込まれる量はほぼ等しいが、いずれの場合にもせん断応力を負荷することにより取込が顕著に減少することがわかった。Ac-LDL は内皮細胞の表面にあるスカベンジャー受容体に結合し細胞内に取り込まれるが、上記の結果は、せん断応力がスカベンジャー受容体の細胞内への移動を阻止する働きをしていることを示している。このことより、生体血管内では、流れが遅く、壁せん断応力の小さい部位ほど酸化 LDL が取込まれやすく、従って内皮細胞への単核細胞（マクロファージ）の付着頻度も高く、動脈硬化や内膜肥厚が発症しやすくなっている可能性があることが示唆された。

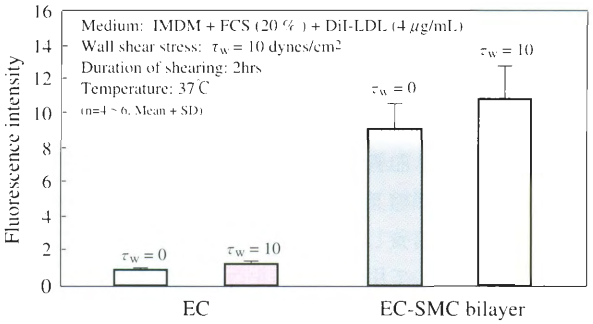


図 10. EC 単層および EC-SMC 共培養血管壁モデルによる LDL の取込におよぼすせん断流れの影響

(b)　心臓左心室の拡張早期における血流動態の解析

左心室の拡張機能の非侵襲的診断法として、カラーMモード・ドップラー法（CMD）が広く用いられているが、それにより計測される血流速度と左心室の拡張機能を表す心壁運動との関係は明白ではない。したがって、この方法によって左心室の拡張機能を正確に評価するためには心壁の運動と左心室内の血流動態との関係を明確にし、それがMモード画像にどのように反映されるかについて検討する必要がある。そこで、本研究では、ヒトの左心室の標準的な形状を参考にして左心室を僧帽弁から大動脈弁に向かって湾曲した１本の管と見なしてコンピュータ・シミュレーションにより拡張早期における血流動態を解析した。その結果、左心室の拡張開始と共に血液が流入し、心室内全体に広がりながら心尖部の方向に進行するが、拡張減速期に入ると大動脈弁下側に渦が発生し、拡張の進行と共に側壁に沿って周方向に発達し､最終的には図 11 (a)に示したような環状の渦が形成されることがわかった。この渦は、正常心の場合は大きく成長して左心室全体を占め、渦の中心が心尖部の方向に移動し、それに伴って心軸における最大流速点も心尖部に向かって移動するが、拡張不全心の場合には、あまり成長せず、大動脈弁下側に留まっていることがわかった。図 11 (b)は、この結果をMモード画像で表示したものであるが、正常心の場合は、最大速度の 70%以上の速度を表している牙状に映し出された青塗りの部分（折り返し領域）が細長くなり、その先端が心室の中央部付近まで達しているのに対し、拡張不全心の場合には、あまり伸びないということがわかった。この結果より、(CMD)画像に見られる折り返し領域の形状や血流伝搬速度が左心室内全体の血流動態を反映していることが判った。

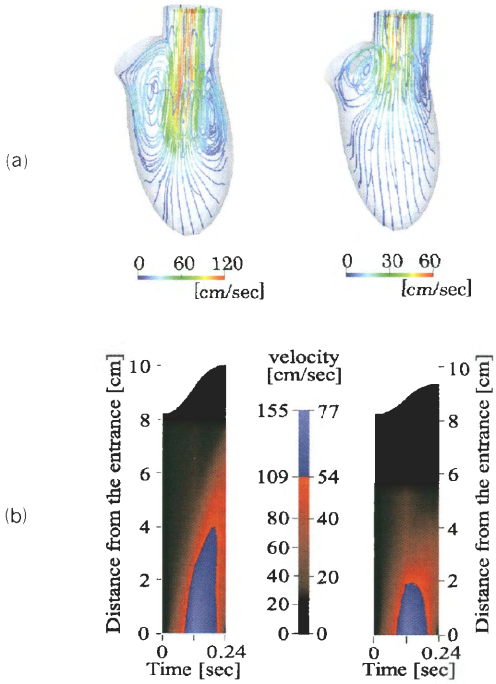


図 11. 拡張開始 0.2 秒後におけるフローパターン(a)、およびカラーMモード画像(b)

3．今後の研究の展望・将来計画

我々が行ってきたこれまでの研究により、血流が乱れて流れが局所的に遅くなっている部位でコレステロールの担体であるリポ蛋白の壁面濃度が高くなっており、この部位が動脈硬化の好発部位にほぼ一致することが判った。しかしながら、血管壁へのコレステロールの取り込みの増大および過剰蓄積によって起こる動脈硬化という血管壁の病変が、リポ蛋白の壁面濃度が局所的に高くなることそれ自体によるものか、あるいは、流れが遅く、内皮細胞との接触時間が長くなることによるものかは不明である。そこで、今後の研究計画としては、吻合部内膜肥厚についても上述の動脈硬化の場合と同じことがいえるのかどうかを動物実験およびコンピュータ・シミュレーションによる理論解析により検討する。また、層状に培養したウシ大動脈由来平滑筋細胞上に内皮細胞を播種共培養した血管壁モデルを用いて生理的に可能な範囲の極端に異なった壁ずり速度の条件下でリポ蛋白の取込み実験を行い、内皮細胞下にある平滑筋細胞の増殖や衰退に及ぼすリポ蛋白の濃度、流速、および水透過速度の影響について検討する。それによって、

血管壁におけるコレステロールの過剰蓄積から始まる動脈硬化の局所的な発病および進展の直接の原因が、リポ蛋白の濃度が局所的に高くなっていることにあるのか、あるいは、リポ蛋白と内皮細胞との接触時間が局所的に長くなっていることにあるのかを明らかにできるものと考えている。

本研究は、我々の全く新しい、独創的な考えに基づくものであり、もしも、この流速（従って壁せん断応力）に依存した血管内壁表面上でのリポ蛋白の濃縮現象が生体の血管内で起こっていることを実証することができれば、これは、血管現象に関する重大な発見となり、吻合部内膜肥厚、動脈硬化症は勿論のこと、嚢状脳動脈瘤の形成、狭窄後拡張、および流量変化に伴って起こる血管系の適応的変化など、ほとんどの血管現象に対して栄養（コレステロール）供給の過不足によるものとして理論的説明が可能になる。また、この理論に基づいて、内科的薬物投与や外科的手法により血管壁における水透過速度を局所的に変えたり、水透過速度を低下させて内膜肥厚を起こさないような人工血管を開発したり、血流の乱れを低減するような血管吻合を行うことにより、これらの血管病を予防したり、治療したり出来るようになるものと思われる。

4．資料

4.1 学術論文

1）Barakat, A. I., Karino, T. and Colton, C. K.: “Microcinematographic studies of flow patterns in the excised rabbit aorta and its major branches”, *Biorheology*, 34(3): 195-221 (1997)*

2）内貴猛、川口学、狩野猛：「弁無し拍動流ポンプの開発に関する研究」、『日本機械学会論文集（C編）』、63（607）：46-51（1997）*

3）鶏内雅司、狩野猛、石坂高英：「異なる水透過速度を有する人工血管の移植後の水透過速度と内膜の厚さについて」、『電子情報通信学会技術研究報告』、MBE 97-27：17-23（1997）

4）狩野猛、江口陽子：「液体の流動特性を求めるための新手法（落球式粘度測定法）」、『日本機械学会講演論文集』、No.96-48：107-108（1997）

5）内貴猛、杉山博信、狩野猛：「血管内皮細胞による巨大分子の取り込みに及ぼす血清濃度およびせん断速度の影響」、『日本機械学会講演論文集』、No.96-48：145-146（1997）

6）和田成生、狩野猛：「血管狭窄部非定常流れにおける低密度リポ蛋白分子の輸送に関する数値シミュレーション」、『日本機械学会講演論文集』、No.96-48：147-148（1997）

7）和田成生、鶏内雅司、狩野猛：「外膜を剝離した家兎総頚動脈の管壁における水透過速度と組織構造の変化」、『電子情報通信学会技術研究報告』、MBE 98-33：51-57（1998）

8）平野繁樹、佐藤淳一、和田成生、狩野猛、：「分岐管における懸濁粒子の分配におよぼす粒径、管径、および流量の影響」、『日本機械学会講演論文集』、No.98-1：567-568（1998）

9）Kaichi, M., Karino, T. and Ishizaka, T.: “Water filtration velocity and intimal thickness at the wall of artificial vascular grafts implanted in the dog common carotid artery”, *Proceedings of The Fifth Japan-USA-Singapore-China Conference on Biomechanics*, 38-39 (1998)

10）坂井友幸、内貴猛、狩野猛：「培養血管内皮細胞の物質取り込みにおよぼすせん断流れの影響」、『日本機械学会講演論文集』、No.98-3：257-258（1998）

11）糀屋睦、和田成生、狩野猛：「端々吻合を施したイヌ大動脈内の血流とリポ蛋白輸送の数値シミュレーション」、『日本機械学会講演論文集』、No.98-2：179-180（1998）

12）狩野猛、和田成生、内貴猛：「血管病の局在化機構に関する一仮説－血管内皮表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象」、『日本機械学会講演論文集』、No.98-3：261-262（1998）

13）和田成生、糀屋睦、狩野猛：「実形状に基づいて計算された血管内壁面上におけるリポ蛋白濃度と内膜肥厚の好発部位との関係」、『日本機械学会講演論文集』、No.99-3：392-393（1999）

14）Naiki, T., and Karino, T.: “Visualization of flow-dependent concentration polarization of macromolecules at the surface of a vascular endothelium by means of fluorescence microscopy”, *ASME BFD*-Vol.42: 289-290 (1999)

15）Wada, S. and Karino, T.: “Relationship between wall shear stress and surface concentration of lipoproteins calculated for a multiple bend of the human right coronary artery”, *ASME BFD*-Vol.42: 735-736 (1999)

16）Wada, S., Iwai, T. and Karino, T.: “Optical measurements of the concentration profile of macromolecules at the luminal surface of a semipermeable vessel wall”, *ASME BFD-Vol*.42: 653-654 (1999)

17）Wada, S. and Karino, T.: “Theoretical study on flow-dependent concentration polarization of low density lipoproteins at the luminal surface of a straight artery”, *Biorheology*, 36(3): 207-223 (1999)*

18）Naiki, T., Sugiyama, H., Tashiro, R. and Karino, T.: “Flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at the luminal surface of a cultured endothelial cell monolayer”, *Biorheology*, 36(3): 225-241 (1999)*

19）Naiki, T. and Karino, T.: “Flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at the

luminal surface of a semipermeable membrane", *Biorheology*, 36(3): 243-256 (1999)*

20) Shigeo Wada, Toshiaki Iwai and Takeshi Karino: "Optical monitoring of the concentration profile of submicron latex particles in flow through a translucent water-permeable tube-A model experiment for a demonstration of flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at a blood/endothelium boundary -," *Proceedings of SPIE*, 3740: 191-194 (1999)*

21) Takeru Naiki, Yukinori Kanegawa and Takeshi Karino: "Relationship between arterial diameter and blood flow rate at major arterial bifurcations of the dog," *JSME International Journal*, 42(3): 656-663 (1999)*

22) Shigeo Wada, Toshiaki Iwai and Takeshi Karino: "Experimental demonstration of flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at a blood/endothelium boundary by optically measuring the concentration profile of flowing microspheres through a straight tube with a semipermeable wall," *JSME International Journal*, 42(3): 664-672 (1999)*

23) Takehiro Nishikawa, Jin Nishida, Ryusuke Ookura, Shin-Ichiro Nishimura, Shigeo Wada, Takeshi Karino and Masatsugu Shimomura: "Mesoscopic patterning of cell adhesive substrates as novel biofunctional interfaces," *Mater. Sci. Eng. C*, 10: 141-146 (1999)*

24) Takehiro Nishikawa, Jin Nishida, Ryusuke Ookura, Shin-Ichiro Nishimura, Shigeo Wada, Takeshi Karino and Masatsugu Shimomura: "Honeycomb-patterned thin films of amphiphilic polymers as cell culture substrates," *Mater. Sci. Eng. C*, 8-9: 495-500 (1999)*

25) J. H. Sweiry, I. Shibuya, N. Asada, K. Niwa, K. Doolabh, Y. Habara, T. Kanno and G. E. Mann: "Acute oxidative stress modulates secretion and repetitive Ca^{2+} spiking in rat exocrine pancreas," *Biochimica et Biophysica Acta*, 1454: 19-30 (1999)*

26) S. Nakajo, F. Hirayama, K. Niwa, M. Akino, T. Mitani, M. Chiba, K. Ikebuchi and S. Sekiguchi: "Clump formation in apheresis platelet concentrates," *Transfusion*, 39: 913-915 (1999)*

27) Takeru Naiki and Takeshi Karino: "Visualization of flow-dependent concentration polarization of macromolecules at the surface of a cultured endothelial cell monolayer by means of fluorescence microscopy," *Biorheology* , 37: 371-384 (2000)*

28) Shigeo Wada and Takeshi Karino: "Computational study on LDL transfer from flowing blood to arterial walls," In: Clinical application of computational mechanics to the cardiovascular system, ed. T. Yamaguchi, 157-173 (2000)

29) Y. -D. Chiu, O. Inanami, T. Yamamori, K. Niwa, H. Nagahata and M. Kuwabara: "FMLP-induced formation of F-actin in HL60 cells is dependent on PI3-K but not on intracellular Ca^{2+}, PKC, ERK or p38 MAPK," Inflammation Research, 49: 684-691 (2000)*

30) Shigeo Wada, Makoto Koujiya and Takeshi Karino: "Changes in water filtration velocity and wall structure of the rabbit common carotid artery after removal of the adventitia," *JSME International Journal, Series C*, 44(4): 996-1004 (2001)*

31) Koichi Niwa, Osamu Inanami, Toshio Ohta, Sigeo Ito, Takeshi Karino and Mikinori Kuwabara: "p38 MAPK and Ca^{2+} contribute to hydrogen peroxide-induced increase of permeability in vascular endothelial cells but ERK does not," *Free Radical Research*, 35(5): 519-527 (2001)*

32) Masanori Nakamura, Shigeo Wada, Taisei Mikami, Akira Kitabatake and Takeshi Karino: "Relationship between intraventricular flow patterns and the shapes of the aliasing area in color M-mode Doppler echocardiograms. A CFD study with an axisymmetric model of the LV," *JSME International Journal, Series C*, 44(4): 1013-1020 (2001)*

33) Katsuhiro Ishii, Toshiaki Iwai, Shigeo Wada, Masaoki Miyakoshi: "Simultaneous viscometry and particle sizing on the basis of dynamic light scattering," *Proceedings of SPIE*, 4263: 112-121 (2001)*

34) Hideki Abe, Kenji Ikebuchi, Koichi Niwa, Osamu Inanami, Mikinori Kuwabara, Mitsuhiro Fujihara, Junichi Hirayama and Hisami Ikeda.: "Superoxide generation from human polymorphonuclear leukocytes by liposome-encapsulated hemoglobin," *Artifical cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology*, 29(4): 275-283 (2001)*

35) Shigeo Wada, Makoto Koujiya and Takeshi Karino: "The effects of creating a moderate stenosis on the localization of intimal thickening in the common carotid artery of the rabbit fed on cholesterol-rich diet," *JSME International Journal, Series C*, 44(4): 1021-1030 (2001)*

36) S. Wada and T. Karino: "Theoretical study on the effect of local flow disturbances on LDL concentration at the luminal surface of end-to-end anastomosed vessels", *Med. Biol. Eng. Comput.*, 40: 576-587 (2002)*

37) S. Wada and T. Karino: "Theoretical prediction of LDL concentration at the luminal surface of an artery with a multiple bend", *Ann. Biomed. Eng.*, 30: 778-791 (2002)*

38) K. Niwa, O. Inanami, T. Yamamori, T. Ohta, T. Hamasu, T. Karino and M. Kuwabara: "Roles of protein kinase C δ in the accumulation of p53 and the induction of apoptosis in H_2O_2-treated bovine endothelial cells", *Free Radic. Res.*, 36: 1147-1153 (2002)*

39) J. Nishida, K. Nishikawa, S. Nishimura, S. Wada, T. Karino, T. Nishikawa, K. Ijiro and M. Shimomura: "Preparation of self-organized micro-patterned polymer films having cell adhesive ligands", *Polymer Journal*, 34: 166-174 (2002)*

40) S. Wada and T. Karino: "Prediction of LDL concentration at the luminal surface of a vascular endothelium", *Biorheology*, 39: 331-336 (2002)*

41) M. Nakamura, S. Wada, T. Mikami, A. Kitabatake and T. Karino: "A computational fluid mechanical study on the effects of opening and closing of the mitral orifice on a transmitral flow velocity profile and an early diastolic intraventricular flow", *JSME International Journal Series C*, 45: 913-922 (2002)*

42) 和田成生、小林亮：「膨潤赤血球の体積減少に伴う形状変化の数値シミュレーション」、日本機械学会論文集（A編）、69-677：14-21（2003）*

43) 和田成生、福崎重隆、狩野猛：「低壁せんだん応力説に基ずく血管内腔形状の適応的経時変化の数値シミュレーション」、日本機械学会論文集（A編）、69(677)：62-69（2003）*

44) 内貴猛、河原圭治、狩野猛：「人工高分子物質の定期的投与による実験動物の血液粘度およびヘマトクリットの調節方法の検討（流体力学的研究への応用を目指して）」、日本機械学会論文集（A編）、69（677）：49-54（2003）*

4.2 総説、解説、評論等

1）和田成生、狩野猛：「動脈内の流れと物質輸送」、BME、14(10)：18-20（2000）

4.3 著書

1）狩野猛：「ステント型人工血管の血流に及ぼす影響」、55-64(松本昭彦：『ステント型人工血管のすべて』、中外医学社、東京）（1999）

4.5 招請講演

1）狩野猛：「血小板の凝集および壁付着に及ぼす流れの影響」、第37回日本エム・イー学会大会、倉敷（1998）

2）狩野猛：「ヒトの脳動脈、冠動脈、および大動脈におけるフローパターンと動脈硬化の好発部位との関係」、第37回日本エム・イー学会大会、倉敷（1998）

3）Wada, S. and Karino, T.: "The effect of flow patterns on the surface concentration of LDL in vessels of various geometery", Third World Congress of Biomechanics, Sapporo (1998)

4）糀屋睦、和田成生、狩野猛：「実形状に基づく血管内の血流および物質輸送解析—動脈硬化局在化のメカニズムの解明—」、第6回Star-CDユーザーズセミナー、横浜、日本（1999-6）

5）Takeshi Karino, Shigeo Wada and Takeru Naiki: "Theoretical and experimental study on "flow-dependent concentration polarization of LDL" as a localizing factor of vascular diseases," Imperial College of Science, Technology and Medicine of London Workshop on "Breaking Symmetry in Haemodynamics," London, United Kingdom (2001-4)

6）和田成生：「究極の機械（肺の構造と呼吸のしくみ）」、日本機械学会市民フォーラム「ヒトのからだと機械、先端バイオ研究」、北見（2001-8）

7）和田成生：「肺呼吸と肺循環の連成系におけるガス交換機能」、日本機械学会2001年度年次大会先端技術フォーラム「生体の各種メカニズムの機能調節」、福井（2001-8）

8）Takeshi Karino, Shigeo Wada and Takeru Naiki: "Flow-dependent concentration polarization of lipoproteins as a localizing mechanism of vascular diseases," Switzerland-Japan Workshop on "New Directions in Cellular and Tissue Biomechanics," Les Diablerets, Switzerland (2001-9)

9）丹羽光一：「生体工学における細胞生理学生化学的手法の実践」、第85回バイオメカニクス研究会、札幌（2001-11）

10) T. Karino: "An unsolved puzzle in basic medicine", 11th International Congress of Biorheology and 4th International Conference of Clinical Hemorheology, Antalya, Turkey (2002-09)

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額）

1）狩野猛：基盤B、一般(2)「血管現象に及ぼす流れの影響」3,700千円（1997）

2）和田成生：奨励A、「血管壁面におけるリポ蛋白の局所濃度に及ぼす流れの影響」1,100千円（1997）

3）和田成生：奨励A、「血管壁面におけるリポ蛋白の局所濃度に及ぼす流れの影響」900千円（1998）

4）内貴猛：奨励A、「血管内皮のリポ蛋白の取り込みに及ぼす流れの影響」800千円（1998）

5）和田成生：基盤C、一般(2)「実形状に基づく血管内物質輸送の解析と動脈硬化局在化機構の解明」2,900千円（1999）
6）内貴猛：奨励A、「血管内皮のリポ蛋白の取り込みに及ぼす流れの影響」1,200千円（1999）
7）和田成生：基盤C、一般(2)「実形状に基づく血管内物質輸送の解析と動脈硬化局在化機構の解明」1,100千円（2000）
8）丹羽光一：奨励A、「血管内皮細胞のアポトーシスの分子機構に対する生理的なずり応力の影響」1,100千円（2000）
9）内貴猛：奨励A、「蛍光LDL作製による血管内皮細胞におけるリポ蛋白取込みにおよぼす流れの影響の検討」900千円（2000年度）
10）和田成生：基盤B、一般(2)「高速流動下における赤血球の変形動態の解析と溶血シミュレータの開発」13,000千円（2001～2002年度）
11）丹羽光一：奨励A、(2)「血管内皮細胞のアポトーシスの分子機構に対する生理的なずり応力の影響」1,000千円（2001年度）

b．奨学寄附金（氏名、研究課題、寄付者名、金額、年度）

1）丹羽光一：㈶秋山記念生命科学振興財団：「血管内皮細胞のアポトーシスにおける細胞内皮カルシウムとMAPキナーゼの役割」、500千円（1999年度）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（研究者名、部門名、研究課題、研究期間）

1）和田成生（電子計測制御部門）、岩井俊昭（電子計測開発施設）：「回転走査型二重回折光学系を用いた生体模擬血管内を流れる物質の濃度分布の測定」（1997）
2）内貴猛（電子計測制御部門）、金城政孝（電子機能素子部門）：「蛍光相関分光法による細胞内物質輸送の測定法の開発」（1997年度）
3）和田成生（電子計測制御部門）、小林亮（電子情報処理部門）、岩井俊昭、石井勝弘(電子計測開発施設)：「赤血球集合過程の理論的解析とその実証的研究」(1999～2001年度)
4）和田成生（電子計測制御部門）、小林亮（電子情報処理部門）、岩井俊昭、石井勝弘(電子計測開発施設)：「赤血球集合過程の理論解析とその実験的検証」(2000～2002年度)
5）青沼仁志、丹羽光一、中島崇行、田中賢、西野浩史：「昆虫の神経細胞を用いた培養系による神経回路網の再構築と」(2002～2004年度)

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究課題、経費、研究期間）

1）和田成生（電子計測制御部門）：国立循環器病センター：「高度情報化による循環器病医療・研究の効率的推進に係わる総合的研究」、4,600千円(1997～1999年度)
2）和田成生（電子計測制御部門）：国立循環器病センター：「心臓および脳における血管病臨床への高度計算の展開に関する研究」、1,100千円（2000年度）
3）和田成生（電子計測制御部門）：国立循環器病センター：「左心室拡張時の心室内血流動態の数値流体解析」2,300千円(平成13年度1,200千円)、(2000～2001年度)

f．教育研究基盤校費（プロジェクト研究）（担当者名、研究題目、経費、研究期間）

1）丹羽光一（電子計測制御部門）：「血流刺激による細胞内シグナル活性化と動脈硬化発症の関連」2,700千円（2001年度）

4.9 受賞

1）和田成生：日本機械学会賞(論文)「肺循環の力学モデルと人工呼吸における血流動態」(1997.4)
2）T. Naiki, T. Sakai and T. Karino: Outstanding Paper Award (優秀論文賞), "The effects of a steady laminar shear flow on the uptake of macromolecules by cultured vascular endothelial cells in a monolayer" (National University of Singapore & Biomedical Engineering Society) (2000.12)

4.10 社会教育活動

b．国内外の学会の主要役職

1）狩野猛：日本機械学会バイオエンジニアリング計測と力学―生体への応用―研究会主査（1997～2002）
2）和田成生：日本機械学会バイオエンジニアリング部門運営委員会委員及び広報委員会幹事（2000年度）
3）和田成生：日本機械学会第79期バイオエンジニアリング部門運営委員会委員、日本機械学会バイオエンジニアリング部門広報委員幹事（2001年度）
4）和田成生：第17回生体・生理工学シンポジウム実行委員会委員（2002年度）
5）狩野猛：第17回生体・生理工学シンポジウム実行委員会委員（2002年度）
6）和田成生：第13回日本機械学会バイオエンジニアリング学術講演会・秋季セミナー実行委員会委員（2002年度）
7）和田成生：日本機械学会P-SCC2イメージベースト連成バイオメカニクス解析とその応用に関する研究分科会委員（2002年度）
8）和田成生：日本機械学会第80期論文集編集委員会校閲委員（2002年度）
9）和田成生：日本機械学会第80期バイオエンジニアリング部門第二技術委員会幹事（2002年度）
10）和田成生：日本機械学会第80期バイオエンジニアリング部門運営委員会委員（2002年度）

c．新聞・テレビ等の報道

1）狩野猛：「動脈硬化発症・局在化に新学説」（北海道医療新聞）（2000.3.31）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）池亀幹太：透明化したイヌおよびヒト気管支樹内のフローパターン（1997 年度）

2）平野繁樹：分岐管における懸濁粒子の分配におよぼす主管•側管の直径比、流量比、および粒径の影響（1997 年度）

3）村上智也：軸対称狭窄の作製により起こる家兎総頸動脈の管径および管壁構造の変化（1997 年度）

4）渡邊幸洋：落球式および回転式粘度計による各種液体の流動特性の検討（1997 年度）

5）坂井友幸：血管内皮細胞による物質取り込みに及ぼす流れ及び水透過速度の影響（1998 年度）

6）糀屋睦：血管狭窄部における流れおよびリポ蛋白の壁面濃度と内膜肥厚の好発部位との関係（1999 年度）

7）長田秀信：バイパス手術を施した血管の実形状に基づく流れおよび LDL 輸送の CFD 解析（2000 年度）

8）角竜憲：血管内皮細胞—平滑筋細胞共培養系による LDL の取り込みに及ぼすせん断流れ及び水透過速度の影響（2001 年度）

9）福崎重隆：肥厚性血管病の進展による血管内腔形状の経時的変化の数値シミュレーション（2001 年度）

10）安田哲也：内皮細胞-平滑筋細胞共培養血管壁モデルにおける細胞の形状および層構造に及ぼす流れおよび水透過速度の影響（2002 年度）

・博士学位

1）中村匡徳：Computational Fluid Dynamics for an Advance in the Diagnosis of a Left Ventricular Diastolic Function Based on Color M-mode Doppler Echocardiograms（2002 年度）

e．大学院担当講義科目名

1）バイオメカニクス特論（狩野猛・和田成生）（1997～2002.9.30）

2）生体情報工学特別演習（狩野猛•和田成生）（1997～2002 年度）

3）生体情報工学特別研究第一（狩野猛•和田成生）（1997～2002 年度）

4）生体情報工学特別研究第二（狩野猛•和田成生）（1997～2002 年度）

適応制御研究分野

教授　河原剛一（北大院、工博、1995.7～）
助教授　中村孝夫（北大院、工博、1995.10～2000.3）
　　内貴　猛（北大院、工博、2000.9～）
助手　山内芳子（山形大院、工修、1995.4～）
　　中島崇行（岐阜大院、獣医博、2001.1～）
講師　中島崇行（岐阜大院、獣医博、1999.10～2000.12）
　　（研究機関研究員）

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
佐藤秀巨、齋藤　直、畠山善幸
修士課程
佐藤泰雅、小森啓安、斎藤健太、斎藤宗孝、角谷昌紀、牧坂幸治、細谷　類、阿部麗奈、岩淵禎弘、矢野間潤持、林あさこ、小橋真之、高瀬麻玲、田中基樹、横川隆弘

1．研究目的

生物は悠久の進化の歴史の中で、個体の生命維持と種の保存に適った巧みな制御システムを具備してきた。そのシステムは、環境に対する適応性および可塑性を有する柔らかなシステムであり、それぞれが別個の機能目的を持った複数のサブシステムから構成されている。また、マクロ的生体システムの機能的最小構成単位は細胞であるが、分化を終えた個々の細胞はそれぞれが固有の遺伝子表現型を持ち、細胞独自の機能達成のための制御情報処理機構を有するマイクロシステムとして捉えられる。本研究分野においては生命現象をシステム論的観点から捉え、生物におけるマクロ的制御情報処理機構を解明すると共に、マクロシステム動作の基盤である細胞レベルでのミクロ的制御情報処理機構の解明し、それらの医学・工学への応用を目指している。

2．研究成果

・平成 9 －10 年度

(a)　グルタミン酸神経毒性とニューロン・グリア間相互作用に関する研究

脳が虚血に陥ると、興奮性アミノ酸であるグルタミン酸の細胞外濃度が上昇する。グルタミン酸は神経伝達物質の一つであるが、非生理的な濃度では神経毒性を有することが知られている。本研究では、ニューロンとアストロサイトの共培養系を実験対象とし、グルタミン酸によるニューロン死のメカニズムの解明と、ニューロン死におけるニューロン・アストロサイト間相互作用の機能的意義の解明を目指した。その結果、グルタミン酸のニューロン毒性には NMDA 受容体の賦活とニューロン内 Ca^{2+} ホメオスタシスの破綻が関与していること、およびそれ自体ではニューロン毒性を持たない低濃度のグルタミン酸負荷によっても、アストロサイトのグルタミン酸トランスポータを阻害することによってニューロン死が誘導されることが分かった。この結果は、生理的条件下における脳内では、アストロサイトが細胞外の余剰なグルタミン酸を細胞内に取り込むことによって、グルタミン酸毒性からニューロンを防御している可能性を示唆している。

(b)　心筋細胞アポトーシスの誘導とその細胞内シグナル伝達機構に関する研究

冠血流の途絶、すなわち心筋虚血は心筋細胞傷害を引き起こす。虚血による心筋細胞死は従来、典型的な細胞壊死（ネクローシス）と考えられてきた。しかし最近、虚血性心筋細胞傷害にはネクローシスに加えて、能動的な細胞の自殺と考えられているアポトーシスの関与が次第に明らかにされてきた。心筋細胞アポトーシス機構の解明は、心筋梗塞の予防や心不全の予後改善といった臨床的な意義ばかりではなく、多細胞生物体において分化に伴い細胞分裂能を喪失した細胞の死の意味の理解など、生命現象の本質に迫り得る。本研究では、新生ラット心筋細胞の分散培養系を実験対象とし、心筋細胞アポトーシスの誘導とそのシグナル伝達機構の解明を目指した。その結果、新規タンパク質の合成を阻害するだけで心筋細胞にアポトーシスを誘導できること、およびその細胞死にはカスパーゼ－ 3 の活性化が関与していることなどを明らかにできた。この結果は、心筋細胞のアポトーシスの実行に遺伝子の転写・翻訳による新規なタンパク質の合成が不要であることを示唆しており、従来のアポトーシスの概念に修正を迫る重要な知見である。

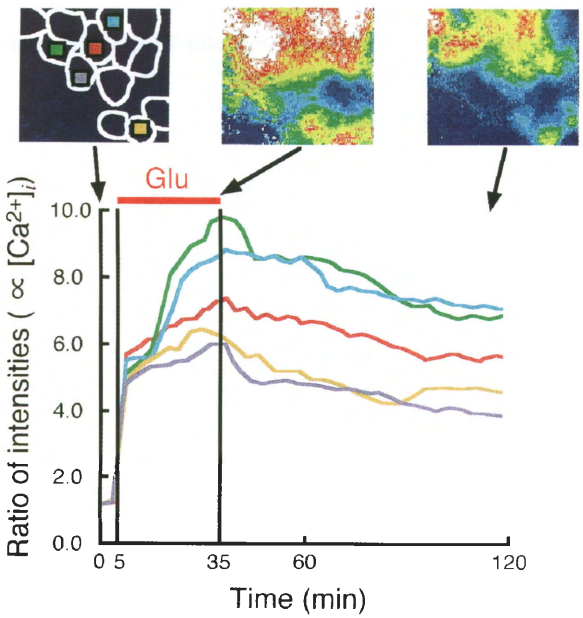


図 1．グルタミン酸負荷による神経細胞内カルシウムイオン濃度の変化

(c)　心筋細胞拍動リズムのゆらぎと非線形ダイナミクスに関する研究

単離した個々の新生ラットの培養心筋細胞は自発的な拍動を示し、数理的には非線形自励振動子としての性質を持つ。本研究は、複数の心筋細胞から成る分散培養系を、非線形自励振動子間相互作用とリズムゆらぎおよびダイナミクスとの関連を解析するための、最も単純化した実験モデルとして捉えたものである。この培養系を実験対象とした解析の結果、培養初期には互いに独立であった心筋細胞群の拍動リズムが培養日数の増加とともに同期すること、そしてその同期化に伴って拍動リズムの静的なゆらぎが減少すること、および心筋細胞間のギャップ結合を薬理的に阻害することで同期が崩れ、リズムゆらぎも増大することが分かった。これらの結果は、心筋細胞集塊の拍動ダイナミクスが同期した分散振動子群における単一のリミットサイクル振動子と見なせることを示唆すると共に、リズムゆらぎと非線形振動子間相互作用との関連に関する新規な知見を与えた。

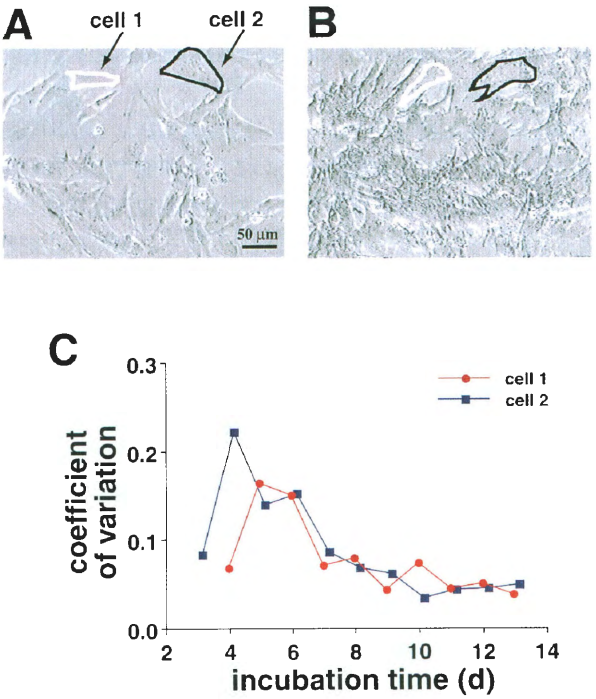


図２．培養心筋細胞拍動リズムゆらぎの培養日数に伴う変化

(d)　幻肢感覚の神経機序に関する研究

交通事故などで四肢の一部を失った場合、存在していない四肢に感覚が定位される、いわゆる幻肢感覚（phantom sensation）がある期間持続する。幻肢現象は古代からその存在が知られてきたにもかかわらず、その発生機序に関しては未だ明確ではない。本研究では、下腿切断患者を対象として、幻肢神経機序の解明と幻肢現象と運動機能再建との関連を明らかにすることを目指した。その結果、幻肢誤局在地図が義肢装着前後で変化すること、幻肢誤局在が下腿筋の走行に密接に関連していること、および幻肢感覚には深部感覚受容器が関与していることが分かった。これらの結果は、幻肢誤局在地図は固定された地図ではなく、感覚入力によって変化し得る可塑性を有していること、および幻肢感覚—運動機能連関の存在を示唆している。(畠山他 義肢装具学会誌、14、1998)

(e)　末梢筋組織糖代謝の神経制御機構に関する研究

運動時には末梢筋における糖の取り込みが著しく増加するが、この現象は血漿インスリン濃度や血流量の増加だけでは説明が不可能である。本研究では麻酔ラットを実験対象とし、末梢筋糖代謝制御における神経系の関与とその神経機構の解明を目指した。ラット後肢の座骨神経に電気刺激を加えることによって、後肢筋の強縮性収縮を誘発すると、刺激開始直後にホルモン系や血行動態の変化を伴わない血糖値の有意な低下が認められ、この低下には末梢を起源とする中枢神経系を介したフィードバック神経制御機構が関与していることを明らかに出来た。また、このフィードバックループの遠心路は筋交感神経である可能性が推定されたために、強縮性筋収縮時における筋交感神経活動の変化を解析したところ、それが有意に増加することが分かった（Nakamura etal. Hormone and Metab. Res., 29, 1997)。これらの結果は、運動時における末梢筋糖代謝への神経系の関与を初めて明確に示したものである。さらに、フィードバック神経制御機構の一部が本研究で解明されたことにより、インスリンに依らない糖尿病の新規な治療法の開発にも繋がり、その臨床的意義も多大である。

・平成 11－12 年度

(1)　ニューロン・グリア間相互作用に関する研究

脳が虚血に陥ると、興奮性アミノ酸であるグルタミン酸の細胞外濃度が上昇する。本研究では、ニューロンとアストロサイトの共培養系を実験対象とし、ニューロン死におけるニューロン・アストロサイト間相互作用の機能解明を目指した。その結果、脳虚血により ATP の枯渇が生じるが、この時のニューロン死にはアストロサイトに発現しているグルタミン酸トランスポータ（GLT-1）の逆転輸送が決定的に関与している可能性を明らかに出来た。一方、生理的条件下における脳内では、アストロサイトはグルタミン酸トランスポータ（GLT-1）によって、細胞外の余剰なグルタミン酸を細胞内に取り込み、グルタミン酸毒性からニューロンを防御している。これらの実験結果は、ニューロンの生死をアストロサイトが支配している可能性を示しているが、アストロサイトにおけるグルタミン酸トランスポータ（GLT-1）の発現自体はニューロンにより制御されており、ニューロン・アストロサイト間相互作用の解明は今後に残された極めて興味深く、重要な課題である。

(2)　心虚血・再灌流不整脈に関する研究

心虚血・再灌流により、致死性の心室性不整脈である心室頻拍（VT）や心室細動（VF）が頻発する。心臓突然死

の主因はこれらの不整脈である。本研究では、器官としての心臓自体の機能を解析するのに適しているランゲンドルフ灌流心を実験対象とし、虚血・再灌流不整脈の生起メカニズムとそれら不整脈の非線形数理科学的特徴の解明を目指した。その結果、虚血・再灌流によるVT、VF受攻性には、一酸化窒素合成酵素（NOS）活性およびミトコンドリアと筋鞘におけるATP感受性K^+チャネル活性とが関与していることを明らかにすることが出来た。また、心虚血などにより心筋内pHは低下するが、この時の心筋の収縮不全においてもミトコンドリアと筋鞘におけるATP感受性K^+チャネル活性が関与している可能性を推定できた。さらに我々の標本においては、再灌流時において頻繁にVTからVFへの遷移現象が認められ（図1）、現在そのメカニズムの解析を行っている。

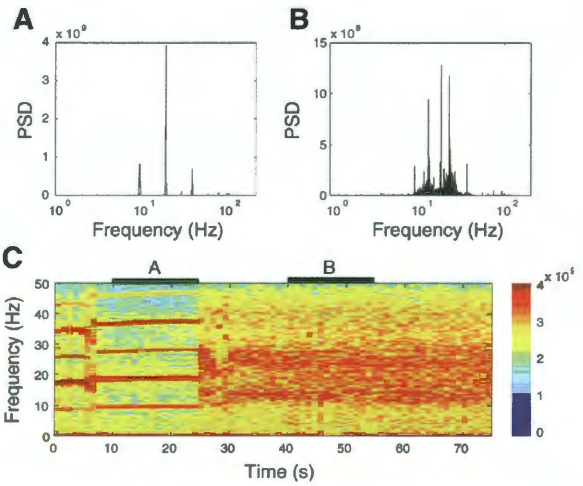


図1．虚血・再灌流時におけるVT/VF遷移現象

(3) 心筋細胞拍動リズムのゆらぎと非線形ダイナミクスに関する研究

単離した個々の新生ラットの培養心筋細胞は自発的な拍動を示し、数理的には非線形自励振動子としての性質を持つ。この培養系を実験対象とした解析の結果、リズムゆらぎと非線形振動子間相互作用との関連に関する新規な知見を得た（***Biological Cybernetics***, in press）。現在は、〝*in vitro*〟虚血時における拍動リズムゆらぎの変化を解析し、心筋細胞間のギャップ結合を介した相互作用の虚血による変化と拍動リズムゆらぎに関する新たな知見が得られつつある。図2には、〝*in vitro*〟虚血・再灌流時における心筋細胞拍動周期の変動係数（縦軸）の変化を示した。

(4) アストロサイト・カルシウム波の光誘導とその伝播メカニズムに関する研究

アストロサイト間およびニューロン-アストロサイト間における情報伝達手段として、カルシウム波が注目されている。本研究ではアストロサイト初代培養系を実験対象として、ケージドカルシウムイオノフォアを用いたアストロサイト・カルシウム波の光誘導を試みた。その結果、単一

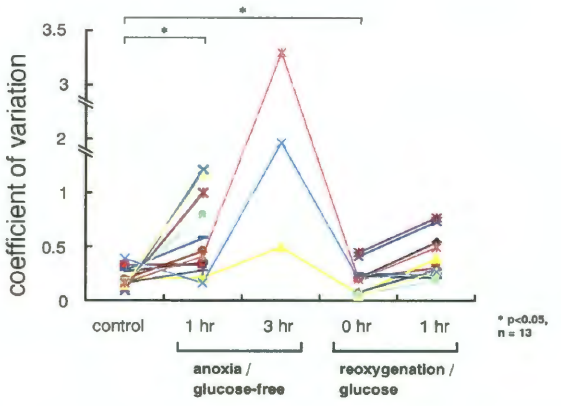


図2．〝*in vitro*〟虚血・再灌流時における心筋細胞拍動リズムの変化

細胞を標的としたケージ解除光の照射により空間伝播性の細胞内カルシウムイオン濃度変化（カルシウム波）を誘発することが出来た（図3；***Experimental Brain Research***、投稿中）。現在は、カルシウム波伝播におけるミトコンドリアの関与を解析している。

(5) 神経系株化細胞（NG108-15）の分化と細胞死抵抗性に関する研究

神経系株化細胞（NG108-15）はdbcAMPにより神経細胞様に分化することが知られている。本研究では、神経系細胞の分化状態と酸化ストレスに対する細胞死抵抗性との関連を解析するためのモデル細胞として、神経系株化細胞（NG108-15）を実験対象とした。NG108-15細胞では、分

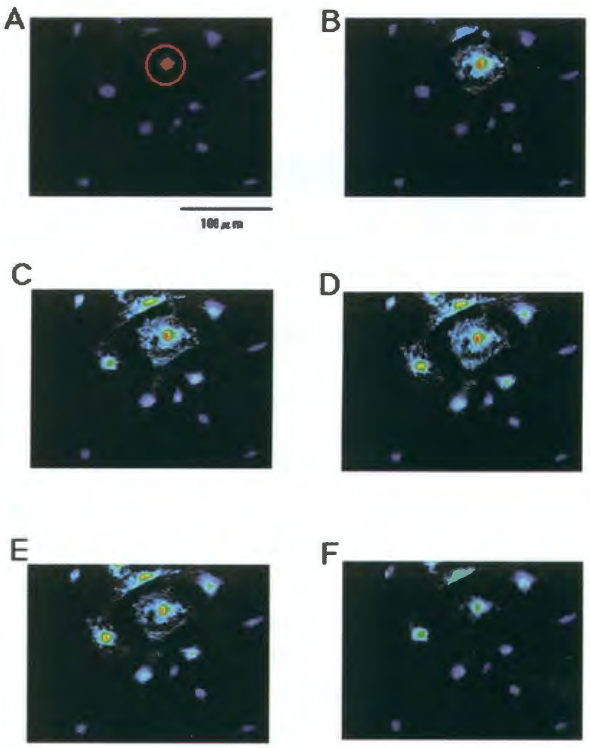


図3．ケージドカルシウムイオノフォアを用いたアストロサイト・カルシウム波の光誘導（Aの赤丸が光照射領域）

化に伴ってNOS(一酸化窒素合成酵素)の活性が昂進すること、および外部からのNO負荷に対する抵抗性が上昇することなどが分かった。そして、その抵抗性増加にNOS活性自体は無関係であり、分化に伴うSOD活性の昂進が関与していることが分かった（***Free Radical Research***、投稿中)。

(6)　心筋のバイオメカニクスと適応現象に関する研究

心臓は血液を全身に送り出す流体ポンプであり、常に力学的バランスの下で仕事を行っている。そして心臓に過度の力学的負荷が長期にわたって加わると、心壁は肥厚してあたかも単位心筋あたりの仕事量を減少させて心　機能を十分維持できるように変化する。しかし、複雑さゆえにその仕組みは未だによくわかっていない。今後本研究において、細胞レベルから全心臓までを対象に力学的特性を測定し、心肥大との関わりを明らかにしていく。図4には、現時点で想定される心肥大のメカニズムを模式的に示した。

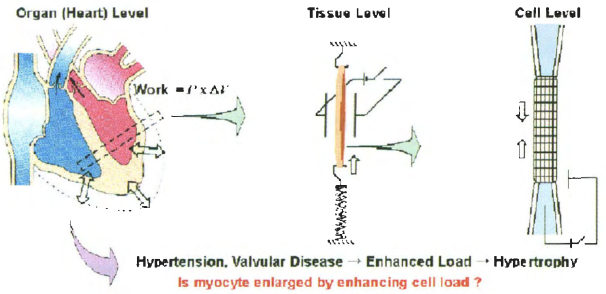


図4．想定される心肥大メカニズムの模式図

・平成13年度

(a)　ニューロン・グリア間相互作用に関する研究

脳が虚血に陥るとグルタミン酸の細胞外濃度が上昇し、神経毒性との関連が注目されている。本研究では、ニューロンとアストロサイトの共培養系を実験対象とし、ニューロン死におけるニューロン・アストロサイト間相互作用の機能解明を目指した。生理的条件下における脳内では、アストロサイトはグルタミン酸トランスポータ（GLT-1）によって、細胞外の余剰なグルタミン酸を細胞内に取り込み、グルタミン酸毒性からニューロンを防御している。一方、脳虚血によりATPの枯渇が生じるが、この時のニューロン死にはGLT-1の逆転輸送が決定的に関与している可能性を明らかに出来た。これらの実験結果は、ニューロンの生死をアストロサイトが支配している可能性を示唆している（Kawahara et al. ***GLIA*** 40, 2002)。

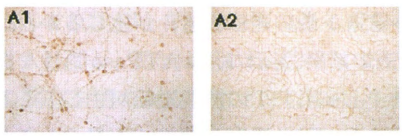


図1．ニューロン・アストロサイト共培養系
A1: MAP-2-positive neurons,
A2: GFAP-positive astrocytes

(b)　心室頻拍―心室細動遷移機構に関する研究

心虚血により、致死性の心室性不整脈である心室頻拍（VT）や心室細動（VF）が頻発する。心臓突然死の主因はこれらの不整脈である。本研究では、器官としての心臓自体の機能を解析するのに適しているランゲンドルフ灌流心を実験対象とし、VT/VF遷移メカニズムの解明を目指した。その結果、VT/VFマクロダイナミクス遷移には、細胞内オルガネラの一つであるミトコンドリアの機能変化の関与が示唆された(図2)。現在、この重要な概念を裏付ける研究を展開している。

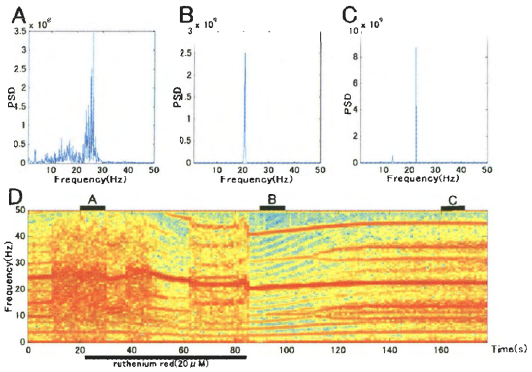


図2．ミトコンドリアの Ca^{2+} uptake と VF/VT 遷移（心筋電図 FFT スペクトルの VF/VT 遷移に伴う変化）

(c)　培養心筋細胞の拍動リズムに関する研究

単離した個々の新生ラットの培養心筋細胞は自発的な拍動を示し、数理的には非線形自励振動子としての性質を持つ。複数の単離心筋細胞から成る培養系を実験対象とした解析の結果、リズムゆらぎと非線形振動子間相互作用との関連に関する新規な知見を得た（Yamauchi et al. ***Biological Cybernetics*** 86, 2002; 山内他　電気学会誌、122, 2002)。また、〝*in vitro*〟虚血時における拍動リズムゆらぎの変化を解析し、心筋細胞間相互作用の虚血による変化と拍動リズムゆらぎに関する新たな知見が得られた（Kawahara et al. ***Biological Rhythm Research***, 33, 2002)。

(d)　アストロサイト・カルシウム波の光誘導とその伝播メカニズムに関する研究

最近、アストロサイト間およびニューロン－アストロサイト間における情報伝達手段としてカルシウム波が注目されるようになった。本研究ではアストロサイト初代培養系を実験対象として、ゲージドカルシウムイオノフォアを用いたアストロサイト・カルシウム波の光誘導を試みた。その結果、単一細胞を標的としたケージ解除光の照射により空間伝播性の細胞内カルシウムイオン濃度変化（カルシウム波）を誘発することが出来た（図3；Iwabuchi et al. ***Experimental Brain Research***, 146, 2002)。さらに，カルシウム波の伝播において、一酸化窒素が重要な役割を果

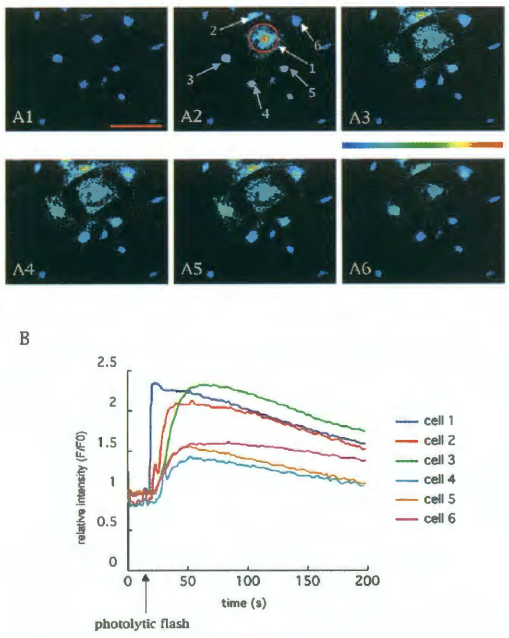


図3．アストロサイト・カルシウム波 A1、光照射前；A2-A6、A2 の赤丸にケージ解除光を照射してから 30 秒毎の画像（Fluo-3 による [Ca^{2+}] i の変化）Scale bar, 100 μm（A1）

たしていることや、その下流に cGMP-PKG を介する経路と介さない経路の関与を示唆する結果が得られた（投稿中）。

(e)　神経系細胞の分化と NOS 活性に関する研究

神経系株化細胞（NG 108-15）は dbcAMP により神経細胞様に分化することが知られている。本研究では、神経系細胞の分化状態と酸化ストレスに対する細胞死抵抗性との関連を解析するためのモデル細胞として、NG 108-15 を実験対象とした。NG 108-15 細胞では，分化に伴って NOS の活性が昂進すること、および外部からの NO 負荷に対する抵抗性が高まること、およびその機序を明らかに出来た（Kawahara et al. ***Free Radical Research*** 36, 2002）。

(f)　大脳皮質虚血耐性現象における CREB の機能的役割に関する研究

神経細胞にあらかじめ非致死的な短時間の虚血（preconditioning, PC）を加えておくと、その後の致死的な長時間の虚血に対して抵抗性を有するようになる。この現象は虚血耐性と呼ばれているが、そのメカニズムについては不明である。本研究では、大脳皮質虚血モデルラットを用いて大脳皮質虚血耐性現象への cAMP-responsive element binding protein（CREB）の関与について調べた。その結果、preconditioning（PC）処置を加えたラットの大脳皮質では、1 時間の虚血後における CREB の活性化が PC 処置を加えていないラットよりも、著しく亢進していることが明らかとなった（Nakajima et al. ***Neuroscience Letters***, 331, 2002）。

(g)　心筋のバイオメカニクスと適応現象に関する研究

心筋梗塞術を施したラットの自律神経活動を測定し、梗塞後に交感神経活動が活発になっていることがわかった。そして、心肥大発生に交感神経活動が直接関与している可能性を調べるために、単離成体心筋細胞を拍動させながら培養できる方法を確立し、細胞内蛋白量を測定してそれらの直接の因果関係を検討する研究段階に入った。また、顕微鏡下でマイクロ・マニピュレータを用いて肥大心筋細胞の力学的特性を測定する方法を確立した。

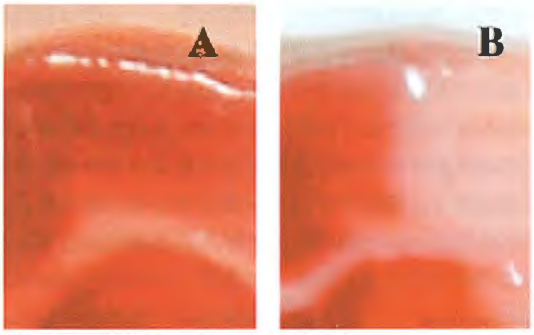


図4．1時間虚血後におけるラット大脳皮質の梗塞巣（TTC 染色）A：PC 処置あり、B：PC 処置無し

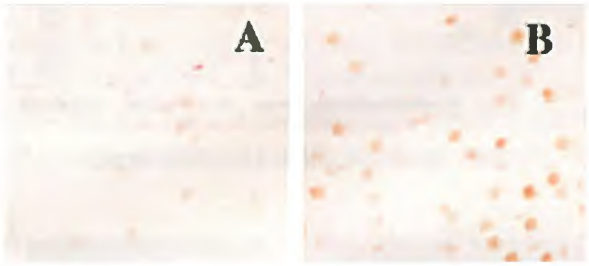


図5．1時間虚血後における活性化 CREB に対する免疫染色 A：PC 処置無し、B：PC 処置あり。PC によって活性化 CREB の発現が増強している

・平成 14 年度

(1)　ニューロン・グリア間相互作用に関する研究

我々はニューロンとアストロサイトの共培養系を実験対象とし、ニューロン死におけるニューロン・アストロサイト間相互作用の機能解明を目的とする研究を行ってきた結果、脳においてニューロンの防御機能を果たしていると考えられてきたアストロサイト・グルタミン酸トランスポータ・GLT-1 は、脳がおかれた状態に依存して「両刃の剣」として機能し、ニューロンを死滅させている可能性を明らかに出来た（Kawahara et al. ***GLIA*** 40: 337-349, 2002）。本年度は虚血による ATP 枯渇時において、GLT-1 の機能逆転（グルタミン酸の逆転輸送）が生じるか否かの解明を目指した。その結果、Na^+/K^+－ATPase 活性を抑制するとアストロサイト・GLT-1 の機能逆転が生じること、および細胞外グルタミン酸の濃度が著しく上昇すること（図 1）を明らかに出来た。

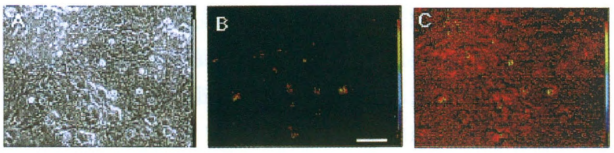


図1．Na^+/K^+－ATPase活性の抑制によるアストロサイトGLT-1の機能逆転。OuabainによりNa^+/K^+－ATPase活性を抑制すると、細胞外グルタミン酸濃度が著しく増加する(C)が、その増加はGLT-1の機能阻害によりほぼ完全に抑制される(B)。

(2) アストロサイト・カルシウム波の伝播メカニズムに関する研究

アストロサイト間およびニューロン—アストロサイト間における情報伝達手段としてカルシウム波が重要な役割を果たしている。我々はアストロサイト初代培養系を実験対象として、ゲージドカルシウムイオノフォアを用い、単一細胞を標的としたケージ解除光の照射により空間伝播性の細胞内カルシウムイオン濃度変化（カルシウム波）を誘発することが出来ること、およびその伝播機構を明らかにした（Iwabuchi et al. ***Experimental Brain Research*** 146: 103-116, 2002)。今年度は、光誘導による空間伝播性カルシウム波において、一酸化窒素が伝播制御に重要な役割を果たしていること（図2）を明らかに出来た（Kawahara & Iwabuchi, ***Neuroscience Research Communications*** 32: 189-196, 2003)。

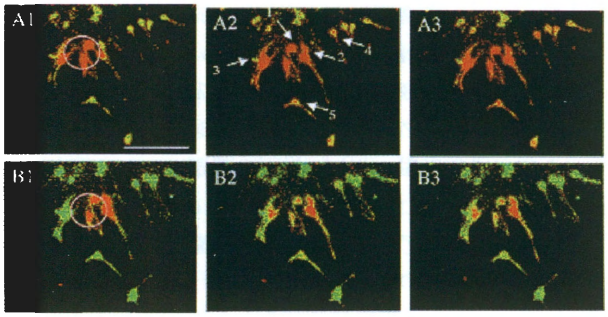


図2．カルシウム波の伝播におけるNOS-NOシグナルの関与。ケージ解除光の照射（A 1、A 2のpink circle）によって、空間伝播性のカルシウム波が誘導されるが(A 1-A 3)、その伝播はNOS活性の阻害によって抑えられる(B 1-B 3)。カルシウム指示薬（Fluo-3）によって細胞内Ca^{2+}の変化を解析した。暖色系ほど細胞内Ca^{2+}濃度が高い。

(3) 脳虚血耐性に関与する細胞内シグナル伝達に関する研究

神経細胞にあらかじめ非致死的な短時間の虚血（preconditioning, PC）を加えておくと、その後の致死的な長時間の虚血に対して抵抗性を有するようになる現象（虚血耐性）のメカニズムに関し、我々は既に転写因子であるCREBのリン酸化の関与を明らかにしてきた（Nakajima et al. ***Neuroscience Letters*** 331: 13-16, 2002)。今年度はニューロンとアストロサイトの共培養系を実験対象とし、PCによるCREBリン酸化亢進をもたらす上流細胞内シグナル伝達系の同定を試みた。その結果、PC時における内因性NOS（nNOS）の活性化に基づいたNOの生成亢進が、ニューロンの虚血耐性獲得に極めて重要であること（図3）が分かった。現在、内因性NOS（nNOS）の活性化をもたらす機序の解明を目的とした研究を実施しており、極めて興味深い結果が得られつつある。

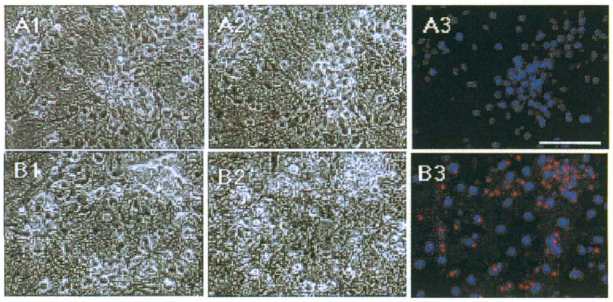


図3．ニューロン虚血耐性におけるNOS-NOシグナル伝達系の関与。PCを施さない群と比較すると（B 1-B 3)、短時間のin vitro ischemia（PC）によってニューロンに耐性が生じて、虚血によりほとんどニューロン死が生じない（A 1-A 3)。赤色が死ニューロンの核（PI染色）を示す。

(4) 心室頻拍—細動マクロダイナミクス遷移メカニズムに関する研究

我々は器官としての心臓自体の機能を解析するのに適しているランゲンドルフ灌流心を実験対象とし、VT/VF遷移メカニズムの解明を目的とした研究を行い、虚血・再灌流によるVT/VF受攻性の上昇には、再灌流時におけるNOSおよびミトコンドリア内膜のATP感受性K^+チャネル活性の亢進の関与を明らかに出来た（Kawahara et al. ***Cardiovascular Pathology*** 12: 49-56, 2003)。今年度はさらに、VT/VFマクロダイナミクス遷移には、細胞内オルガネラの一つであるミトコンドリアの機能変化（Ca^{2+} uniporterによるCa^{2+} uptake）が関与していること（図4)、およびその下流には筋鞘のL-type Ca^{2+}チャネル活性の変化の関与が示唆された（Kawahara et al. ***Cardiovascular Pathology***, in press)。加えて、rapid pacing-induced VF時において、L-type Ca^{2+}チャネル活性をverapamil灌流により抑制することで、VF/VTマクロダイナミクス遷移が生じることも明らかに出来た（Kawahara et al. in submission)。

(5) 培養心筋細胞の拍動リズムの制御とゆらぎに関する研究

非線形自励振動子結合系の実験モデルとして、我々は複数の単離心筋細胞から成る培養系を実験対象とした研究を行い、これまでにリズムゆらぎと非線形振動子間相互作用との関連に関する多くの新規な知見を得てきた（Yamauchi et al. ***Biological Cybernetics*** 86: 147-154, 2002；山内ら　電気学会誌、122-C: 1500-1505, 2002; Kawahara et al. ***Biological Rhythm Research*** 33: 339-350, 2002)。本年度においては、副交感神経系による心筋拍動リズムの

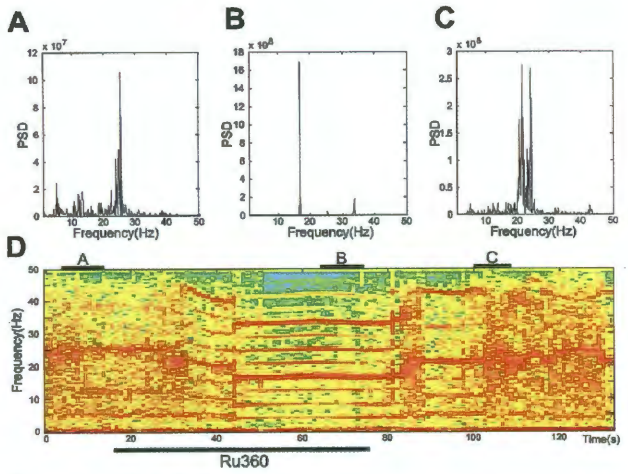


図4．Ru 360 の灌流による VF/VT マクロダイナミクス遷移（FFT 解析）。ミトコンドリアによるカルシウム取り込みの特異的阻害薬である Ru 360 の灌流により、左心室筋電図のスペクトル特性は、VF に特徴的な wide-band spectrum（A＆C）から、VT に特徴的なスペクトル(B)へと可逆的に変化している。D は VF/VT 遷移に伴う短時間スペクトルの変化を示す。

制御に関与している心筋細胞内シグナル伝達系の同定を行った。その結果、アセチルコリン受容体 agonist であるカルバコルによる受容体活性化の下流に、NOS-NO-mitoK$_{ATP}$ channels-ROS (reactive oxygen species)伝達系が関与している可能性（図5）を明らかにすることが出来た（Kohashi et al., ***Biological Rhythm Research*, in press**）。

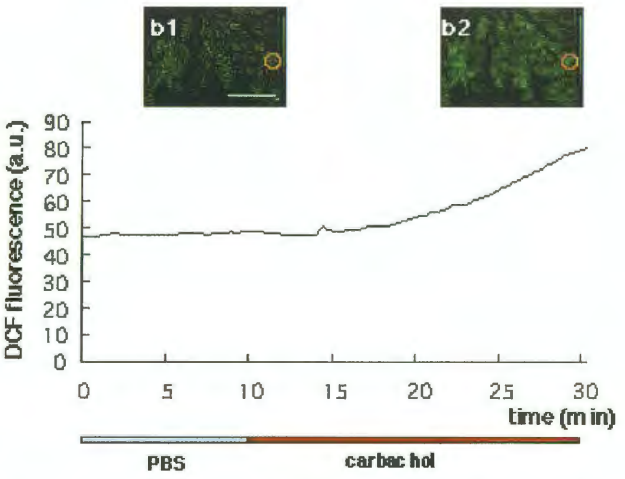


図5．カルバコルによる拍動リズム抑制と ROS 生成亢進。カルバコルの負荷によって拍動リズムが抑制されるが、その時心筋細胞内 ROS 生成が増加する。ROS の蛍光指示薬である DCF の蛍光強度から心筋細胞内 ROS の変化を推定した。

(6)　心筋のバイオメカニクスと適応現象に関する研究

慢性的な力学的過負荷による心筋細胞肥大の発生メカニズムには未だ不明な点が多い。本研究では力学的過負荷が加わった状態において、心拍出量を正常に保つために活性化される交感神経の作用が、心筋細胞肥大形成におよぼす影響を成ラット単離心筋細胞の培養系を用いて検討した。その結果、交感神経活動亢進により β 受容体を介した量的変化（細胞肥大）と機械的負荷感受性受容体を介した収縮関連タンパク産生増加による質的変化が同時に起こること（図6）が明らかになった（内貴ら　循環制御、印刷中）。

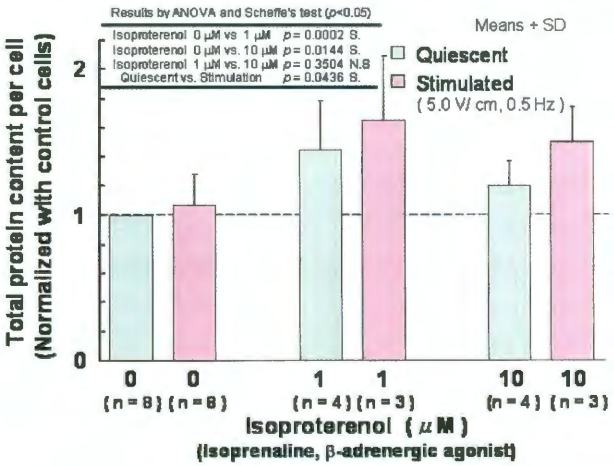


図6．β 受容体活性化に基づく心筋細胞肥大

3．今後の研究の展望・将来計画

生体においては、最小機能単位である最下位階層の細胞から、組織、器官そして個体といった上位階層の秩序を自己組織化によって構築していると共に、上位のマクロ的秩序がより下位の階層の機能を制御しているという際だった特徴が存在する。今後は、本研究分野の研究目標を「生体機能発現機構のミクロおよびマクロなシステム論的理解とその工学・医学応用」とし、以下の課題について重点的に研究を行う。

(a)　ニューロン・アストロサイト間の機能的相互作用
(b)　脳・虚血耐性の分子メカニズム
(c)　細胞内オルガネラの機能変化と拍動リズムのマクロダイナミクス遷移
(d)　心室リモデリングのバイオメカニクスとその適応制御論的、細胞生理学的意義

4．資料

4.1　学術論文

1）Nakamura, T., Kawahara, K., Kusunoki, M., Hara, T. and Minejima, I.: "Involvement of the nervous system in the control of glucose uptake in contracting hindlimb muscle in the rat", *Hormone and Metab. Res.*, 29: 593-598 (1997)*

2）下野真博、中村孝夫、河原剛一、楠正隆、原努：「末梢筋収縮時糖代謝亢進に伴う筋交感神経活動の変化」、『電子情報通信学会技術報告』、MBE 97-29：31-34（1997）

3）Nakamura, T., Shimono, M., Kusunoki, M., Mine-

jima, I., Hara, T. and Kawahara, K.: "Concomitant change in muscle sympathetic nerve activity with temporary decrease in blood glucose level during hindlimb-muscle contraction in rats", *Neurosci. Res.*, Suppl.21, S284 (1997)

4) 山内芳子、原田明彦、中村孝夫、河原剛一：「培養心筋細胞の拍動リズムゆらぎと非線形振動子間相互作用」、『第12回生体生理工学シンポジウム論文集（東京）』：145-148（1997）

5) 中村孝夫、下野真博、楠正隆、峰島一朗、原努、河原剛一：「収縮開始時の末梢筋糖吸収亢進に伴う筋交感神経活動の変化。」、『第12回生体生理工学シンポジウム論文集（東京）』：273-276（1997）

6) Nakamura, T., Shimono, M., Kusunoki, M., Minejima, I., Hara T. and Kawahara, K.: "Muscle sympathetic nerve activity (MSNA) changes concomitantly with temporary decrease in blood glucose during muscle contraction in rats", *J. Auton. Nerv. System (Proc. Inaugural Cong. of Internat. Soc. Auton. Neurosci. (Cairns))*, 65, 92 (1997)

7) Nakamura, T., Kawahara, K., Kusunoki, M., Shimono, M., Hara, T. and Iminejima, I.: "Possibility of the nervous system as one of the non-insulin mediated controllers for muscle glucose uptake", *Proc. 9th ICBME (Singapore)*, 731-732 (1997)

8) Hara, T., Kusunoki, M., Tsutsumi, K., Okada, K., Sakamoto, S., Ohnaka, M., Nakamura, T., Miyata, T., Nakayama, K., Fukatsu, A., Kato, K., Kakumu, S. and Nakaya, Y.: "A lipoprotein lipase activator, NO-1886, improves endothelium-dependent relaxation of rat aorta associated with aging", *Eur. J. Pharmacol.*, 350: 75-79 (1998)*

9) 畠山善幸、河原剛一、沢田雄二、横串算敏、成田寛志：「幻肢誤局在を呈した下腿切断の一例」、『日本義肢装具学会誌』、14：217-222（1998）*

10) 山内芳子、中村孝夫、河原剛一：「鶏胚心拍リズムゆらぎの発生に伴う変化」、『電子情報通信学会技術報告』、MBE 98-26：1-6（1998）

11) 堀淳二、佐藤秀臣、古林与志安、長嶋和郎、葉原芳昭、河原剛一：「ニューロン・グリア共培養系における細胞外グルタミン酸負荷による神経細胞死」、『電子情報通信学会技術報告』、MBE 97-154：79-84（1998）

12) 佐藤秀臣、堀淳二、葉原芳明、河原剛一：「ニューロン・グリア共培養系における細胞内カルシウム上昇によるニューロン死」、『電子情報通信学会技術報告』、MBE 98-27：7-12（1998）

13) Nakamura, T., Shimono, M., Kusunoki, M., Minejima, I., Hara, T. and Kawahara, K.: "Neuromuscular control of glucose uptake in contracting skeletal muscle", *Proc. 3rd WCB (World Cong. Biomech.) '98 (Sapporo)*: 264 (1998)

14) 中村孝夫、楠正隆、原努、河原剛一：「マイクロニューログラム法によるラット座骨神経内交感神経活動の計測」、『第13回生体生理工学シンポジウム論文集（金沢）』：31-34（1998）

15) 山内芳子、佐藤泰雅、中村孝夫、河原剛一：「単離心筋培養系を用いた生体振動子のゆらぎとダイナミクスの解析」、『第13回生体生理工学シンポジウム論文集（金沢）』：433-436（1998）

16) Nakamura, T., Kusunoki, M., Hara, T. and Kawahara, K.: "Microneurography for the measurement of muscle sympathetic activity in the sciatic merve of anesthetized rats", *Proc. 4th Cong. FAOPS (Fed. Asian & Ocean. Physiol. Soc.) and 2nd Cong. FAONS (Fed. Asian-Ocean. Neurosci. Soc.) (Brisbane)*: 213 (1998)

17) Sato, H., Hori, J., Saito, M., Habara Y. and Kawahara K.: "Glutamate-induced neurotoxicity and intracellular calcium homeostasis in neurons", *Neurosci. Res.*, Suppl.22: s136 (1998)

18) 佐藤泰雅、山内芳子、佐藤秀臣、河原剛一：「心筋細胞培養系におけるアポトーシス様細胞死の誘導とその抑制」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 98-150：71-76（1999）

19) 佐藤秀臣、斉藤宗孝、葉原芳明、河原剛一：「ニューロン・グリア共培養系におけるニューロン死と細胞内カルシウムホメオスタシス」、生体・生理工学シンポジウム論文集、14：73-76（1999）

20) 中村孝夫、河原剛一、楠正隆、原努：「末梢筋収縮誘発時の血糖値の変化と筋交感神経活動の関係」、生体・生理工学シンポジウム論文集、14：9-10（1999）

21) 山内芳子、齊藤直、角谷昌紀、中村孝夫、河原剛一：「新生ラット培養心筋細胞における細胞間相互作用の拍動リズムに対する影響」、生体・生理工学シンポジウム論文集、14：35-38（1999）

22) T. Naiki and T. Karino: "Flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at the luminal surface of a semipermeable membrane," Biorheology, 36: 243-256 (1999)*

23) T. Naiki, H. Sugiyama, R. Tashiro and T. Karino: "Flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at the luminal surface of a cultured endothelial cell monolayer," Biorheology, 36: 225-241 (1999)*

24) T. Naiki, Y. Kanegawa and T. Karino: "Relationship between arterial diameter and blood flow rate at major arterial bifurcations of the dog," *JSME International J., Series C*, 42: 656-663 (1999)*

25) 齊藤直、角谷昌紀、佐藤秀臣、山内芳子、河原剛一：「アポトーシス様心筋細胞死のメカニズムと細胞死に

伴う拍動リズムの変化」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 99-104：19-24（2000）
26) 佐藤秀臣、細谷類、斉藤宗孝、葉原芳昭、河原剛一：「ケージドカルシウムイオノフォアを用いた急性神経細胞死と遅発性神経細胞死の誘発」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 2000-3013-18（2000）
27) 岩淵禎弘、中村孝夫、楠正隆、原努、河原剛一：「マイクロニューログラム法を用いて導出したラット交感神経活動の交感神経鎖電気刺激による同定」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 2000-31：19-24（2000）
28) 山内芳子、角谷昌紀、河原剛一：「培養心筋細胞を用いた虚血・再灌流モデルにおける心筋細胞拍動リズムの変化とその機序」、生体・生理工学シンポジウム論文集、15(9)：253-256（2000）
29) T. Naiki and T. Karino: "Visualization of flow-dependent concentration polarization of macromolecules at the surface of a cultured endothelial cell monolayer by means of fluorescence microscopy," *Biorheology*, 37: 371-384 (2000)*
30) 角谷昌紀、小橋真之、阿部麗奈、山内芳子、河原剛一：「生ラット培養心筋細胞を用いた虚血・再灌流模擬状態における拍動リズムの解析」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 2001-03：105-112（2001）
31) 細谷類、佐藤秀臣、矢野間潤持、田中基樹、中島崇行、河原剛一：「ニューロン・グリア共培養系を用いた神経細胞死防御におけるグルタミン酸トランスポータ機能の解析」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 2001-03：77-82（2001）
32) 牧坂幸治、佐藤秀臣、河原剛一：「アストロサイト培養系におけるカルシウム波の光誘導とその時空間解析」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 2001-03：83-90（2001）
33) 藤田学、小山洋、栗城眞也、内貴猛、河原剛一：「小動物心磁図計測用 SQUID 磁束計の開発」、日本電気学会誌、121-A: 1104-1109 (2001)*
34) Y. Yamauchi, A. Harada and K. Kawahara: "Changes in the fluctuation of interbeat intervals in spontaneously beating cardiac myocytes: experimental and modeling studies," *Biol. Cybern.*, 86: 147-154 (2002)*
35) K. Kawahara, M. Saitoh, T. Nakajima, H. Sato, M. Tanaka, T. Tojima and E. Ito: "Increased resistance to nitric oxide cytotoxicity associated with differentiation of neuroblastoma-glioma hybrid (NG108-15) cells," *Free Radical Res.*, 36(5): 545-554 (2002)*
36) 山内芳子、阿部麗奈、小橋真之、河原剛一：「新生ラット培養心筋細胞の拍動リズムゆらぎの発生機序」、電気学会論文誌C、122：1500-1505（2002）*
37) K. Kawahara, R. Hosoya, H. Sato, M. Tanaka, T. Nakajima and S. Iwabuchi: "Selective blockade of astrocytic glutamate transporter GLT-1 with dihydrokainate prevents neuronal death during ouabain treatment of astrocyte/neuron co-cultures.", *GLIA*, 40(3): 337-349 (2002)*
38) T. Nakajima, S. Iwabuchi, H. Miyazaki, O. Inanami, Y. Okuma, M. Kuwabara, Y. Nomura and K. Kawahara: "Relationship between the activation of cyclic AMP responsive element binding protein and ischemic tolerance in the penumbra region of rat cerebral cortex.", *Neurosci. Lett.*, 331: 13-16 (2002)*
39) S. Iwabuchi, K. Kawahara, K. Makisaka and H. Sato: "Photolytic flash-induced intercellular calcium waves using caged calcium ionophore in cultured astrocytes from newborn rats.", *Exp. Brain Res.*, 146: 103-116 (2002)*
40) K. Kawahara, R. Abe, Y. Yamauchi and M. Kohashi: "Fluctuations of contraction rhythm during simulated ischemia/reperfusion in cultured cardiac myocytes from neonatal rats", *Biol. Rhythm Res.*, 33(3): 339-350 (2002)*
41) 内貴猛、河原圭治、狩野猛：「人工高分子物質の定期的投与による実験動物の血液粘度およびヘマトクリットの調節方法の検討（流体力学的研究への応用を目指して）」、日本機械学会論文集（A編）、69（677）：49-54（2003）*
42) K. Kawahara, M. Takase and Y. Yamauchi: "Increased vulnerability to ischemia/reperfusion-induced ventricular tachyarrhythmias by pre-ischemic inhibition of nitric oxide synthase in isolated rat hearts.", *Cardiovasc. Pathol.*, 12(1): 49-56 (2003)*
43) T. Naiki, A. Hayashi and K. Kawahara: "Effects of electrical stimulation on the hypertrophy of cardiac myocytes", *Proceedings of the international conference on biological and medical engineering in CD-ROM* (2002)
44) T. Saitoh, T. Nakajima and K. Kawahara: "Ventricular remodeling and cardiac myocytes death after myocardial infarction.", *Jpn. J. Physiol.*, 52: S33 (2002)
45) 林あさこ、内貴猛、河原剛一：「培養心筋細胞における慢性的な収縮力亢進が心筋肥大に及ぼす影響」、第17回生体・生理工学シンポジウム論文集、17：155-156（2002）
46) 田中基樹、細谷類、佐藤秀臣、矢野間潤持、中島崇行、河原剛一：「神経細胞の生存におけるアストロサイト・グルタミン酸トランスポータの機能的役割の解析」、電子情報通信学会技術研究報告、MBE 2002-15：1-4（2002）
47) 内貴猛、藤田学、李玉文、林あさこ、河原剛一、栗城

眞也：「心磁計測による心筋梗塞ラットにおける心拍リズムゆらぎの計測」、医用電子と生体工学、40(特別号)：84（2002）

48) 齊藤直、中島崇行、河原剛一：「虚血による心室リモデリング」、生体・生理工学シンポジウム論文集、17：161－162（2002）

49) 河原剛一：「階層的ホメオスタシス：ミクロとマクロのシステム論的アプローチ」、生体医工学、40：10（2002）

50) 高瀬麻玲、山内芳子、河原剛一：「ランゲンドルフ灌流心を用いた心室頻拍一心室細動遷移メカニズムの解析」、生体・生理工学シンポジウム論文集、17：157-158（2002）

51) 高瀬麻玲、山内芳子、河原剛一：「ミトコンドリアの Ca^{2+} 取り込み活動に着目した心室頻拍一心室細動遷移メカニズムの解析」、ゆらぎ現象研究会資料、17：17-18（2002）

52) 矢野間潤持、田中基樹、細谷類、佐藤秀臣、中島崇行、河原剛一：「ニューロン・グリア共培養系による脳虚血耐性メカニズムの解析」、生体・生理工学シンポジウム論文集、17：321-322（2002）

53) 小橋真之、阿部麗奈、山内芳子、河原剛一：「アセチルコリンによる培養心筋細胞拍動リズムの変化とそのメカニズムの解析」、生体・生理工学シンポジウム論文集、17：365-366（2002）

54) 林あさこ、内貴猛、河原剛一：「培養心筋細胞肥大におよぼす長期的な収縮性亢進の影響」、日本機械学会第15回バイオエンジニアリング講演会　講演論文集、02(35)：15-16（2003）

55) 内貴猛、和田成生、三神大世、北畠顕、狩野猛：「左心室拡張開始時の流れの乱れが拡張期中の血流構造に与える影響」、日本機械学会第14回計算力学部門講演会講演論文集、02(35)：359-360（2003）

4.2　総説、解説、評論等

1）河原剛一：(解説)「生体リズムゆらぎの機能的解釈」、『BME』、11：66-74（1997）

2）中村孝夫：(解説)「末梢筋収縮時糖代謝の神経制御に関する研究」、『電子科学研究』、5：92-93（1997）

3）楠正隆、水野宏、中村孝夫、原努、榊原文彦、福沢嘉孝、須賀敬、各務伸一：(解説)「医工学治療からみた未来の医療機器に望むこと」、『BME』、12：14-19（1998）

4）河原剛一、佐藤秀臣、細谷類、堀淳二：(解説)「培養系を用いた虚血性脳疾患病態メカニズムの解析」、『電子科学研究』、8：32-37（2001）

4.5　招請講演

1）河原剛一：「生体リズムのゆらぎとダイナミクス：機能的意味と将来の展望」、第6回近畿生体ゆらぎ研究会、大阪（1997）

2）河原剛一：「単離培養心筋における心拍の生成ダイナミクスとゆらぎ」、心血管系のバイオシグナリング機能制御研究会、札幌（1997）

3）河原剛一：「中枢神経系におけるリズム生成器の統御：マクロシステムとマイクロシステム」、公開シンポジウム「ホメオスタシスの現在」、東京（1998）

4）Kusunoki, M., Hara, T., Sakakibara, F., Yajima, M., Asai, K., Usui, K., Iriyama, A., Yamanouchi, K., Nakamura, T., Kakumu, S., and Storlien, L.: "The novel lipoprotein lipase (LPL) activating compound NO-1886 improves insulin sensitivity in high-fat fed NIDDM model rats", 58th Scientific Sessions of Am. Diabetes Assoc., Chigago, U.S.A. (1998)

5）河原剛一：「心筋細胞および神経細胞の培養系実験モデルを用いた研究の現状と展望」、東工大資源化学研究所セミナー、東京（1999）

6）小森啓安、中村孝夫、楠正隆、原努、河原剛一：「ラット座骨神経内筋交感神経信号の両側同期性」、第38回日本ME学会大会、仙台、日本（1999-4）

7）Takeshi Karino, Shigeo Wada and Takeru Naiki: "Theoretical and experimental study on "flow-dependent concentration polarization of LDL" as a localizing factor of vascular diseases," Imperial College of Science, Technology and Medicine of London Workshop on "Breaking Symmetry in Haemodynamics," London, United Kingdom (2001-4)

8）河原剛一：「培養心筋細胞における拍動リズムの制御とゆらぎ」、理化学研究所セミナー、和光（2001-8）

9）Takeshi Karino, Shigeo Wada and Takeru Naiki: "Flow-dependent concentration polarization of lipoproteins as a localizing mechanism of vascular diseases," Switzerland-Japan Workshop on "New Directions in Cellular and Tissue Biomechanics," Les Diablerets, Switzerland (2001-9)

10）河原剛一：「階層的ホメオスタシス：ミクロとマクロのシステム論的アプローチ」、第41回日本エム・イー学会大会、京都（2002.05）

4.6　シンポジウムの開催

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）河原剛一：「第17回生体・生理工学シンポジウム」(270名、北海道大学学術交流会館、札幌市)（2002.9.9～9.11）

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）河原剛一：基盤A、展開「乳幼児突然死症候群実験動物モデルの開発と評価」、1,800千円（1997）

2）中村孝夫：基盤C、一般(2)「運動時筋糖代謝の中枢性フィードバック及びフィードフォワード制御に関する基礎的研究」、3,000千円（1997）

3）河原剛一：基盤B、一般(2)「虚血・再灌流不整脈の非線形ダイナミクスと心筋細胞死」8,400千円（1998）

4）中村孝夫：基盤C、一般(2)「運動時筋糖代謝の中枢性フィードバック及びフィードフォワード制御に関する基礎的研究」、800千円（1998）

5）河原剛一：基盤B、一般(2)「虚血・再灌流不整脈の非線形ダイナミクスと心筋細胞死」1,700千円（1999）

6）山内芳子：奨励A、「心虚血・再灌流時の心筋細胞拍動リズムゆらぎとダイナミクス」1,500千円（1999）

7）河原剛一：基盤B、一般(2)「虚血による心室リモデリング：遺伝子発現と拍動の非線型ダイナミクス」、16,400千円（2000～2002）

8）内貴猛：奨励A、「蛍光LDL作製による血管内皮細胞におけるリポ蛋白取込みにおよぼす流れの影響の検討」、2,100千円（2000～2002）

9）山内芳子：「心虚血・再灌流時の心筋細胞拍動リズムゆらぎとダイナミクス」、800千円（2000）

10）河原剛一：基盤B、一般(2)、「虚血による心室リモデリング：遺伝子発現と拍動の非線形ダイナミクス」3,000千円（2001）

11）内貴猛：奨励A、(2)「蛍光LDL作製による血管内皮細胞におけるリポ蛋白取込みにおよぼす流れの影響の検討」、1,200千円（2001）

12）河原剛一：萌芽研究、「ミトコンドリアによる心室頻拍—心室細動マクロダイナミクス遷移の制御」、2,400千円（2002）

b．奨学寄附金（氏名、寄付者名、研究課題、金額、年度）

1）中島崇行：㈶北海道大学クラーク記念財団：「大脳皮質虚血耐性現象の分子メカニズムにおけるCREBの役割について」、500千円（2001）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）下澤楯夫、西浦廉政、水波誠（電子情報処理部門）、河原剛一、栗城眞也、中村孝夫、魚住純、小林哲生（電子計測制御部門））、田村守（電子機能素子部門）：「神経回路網動作の非侵襲・高精度計測法に関する総合的研究」（1996～1997年度）

2）野村保友（電子機能素子部門）、馬場欣哉（電子情報処理部門）、山内芳子（電子計測制御部門）：「中枢神経系の賦活領域に置けるエネルギー代謝—無酸素無グルコースによる海馬切片神経活動変化の光学測定による検出—」（1997年度）

3）内貴猛（電子計測制御部門）、金城政孝（電子機能素子部門）：「蛍光相関分光法による細胞内物質輸送の測定法の開発」（1997）

4）栗城真也、河原剛一、内貴猛、平田恵啓、竹内文也、山内芳子：（電子計測制御部門）、西浦廉政、柳田達夫（電子情報処理部門）：「高温超伝導体SQUID計測による虚血心疾患に伴った拍動リズムゆらぎ解析」（2000～2002）

5）栗城眞也、河原剛一（電子計測制御部門）、西浦廉政（電子情報処理部門）、他6名：「高温超伝導体SQUID計測による虚血性心疾患に伴った拍動リズムゆらぎの解析」（2000～2002）

6）青沼仁志、丹羽光一、中島崇行、田中賢、西野浩史：「昆虫の神経細胞を用いた培養系による神経回路網の再構築と」（2002～2004）

4.9 受賞

1）内貴猛：優秀論文賞「The effects of a steady laminar shear flow on the uptake of macromolecules by cultured vascular endothelial cells in a monolayer」10th International Conference on Biomedical Engineering（第10回医用工学国際会議）（2000.12）

2）内貴猛：瀬口賞（日本機械学会）（2001.1）

4.10 社会教育活動

b．国内外の学会の主要役職

1）河原剛一：日本生理学会　評議員（1997～現在）

2）河原剛一：日本エム・イー学会評議員（1997～現在）

3）河原剛一：日本エム・イー学会誌編集委員（1997～1998）

4）河原剛一：電子情報通信学会MEとバイオサイバネティクス専門委員会委員（1997～2001）

5）河原剛一：日本電気生理運動学会理事（1998）

6）中村孝夫：日本人工臓器学会　評議員（1997～1998）

7）河原剛一：Frontiers of Medical & Biological Engineering, Editorial Bord（1999年4月1日～現在）

8）河原剛一：計測自動制御学会生体・生理工学部会運営委員（1997～2001）

9）河原剛一：電子情報通信学会誌論文査読委員（1997～現在）

10）河原剛一：日本生理学会評議員（1997年～現在）

11）内貴猛：日本ME学会技術教育委員会委員（1993年4月1日～現在）

12）河原剛一：MEとバイオサイバネティクス研究会専門委員会副委員長（2001年5月1日～2002年5月27日）

13）内貴猛：日本エム・イー学会技術教育委員会委員（2001）

14）内貴猛：電子情報通信学会　MEとバイオサイバネティックス研究会専門別委員会　幹事（2001年5月29

日～2003年5月28日）
15）内貴猛：計測自動制御学会　生体・生理工学部会　幹事（2002年1月1日～2003年12月31日）
16）河原剛一：計測自動制御学会生体・生理工学部会副主査（2002年1月1日～2002年12月31日）
17）内貴猛：日本エム・イー学会　サマースクール実行委員会　委員（2002年3月15日～2003年3月31日）
18）河原剛一：電子情報通信学会MEとバイオサイバネティクス研究専門委員会・委員長（2002年5月28日～2003年5月19日）

c．新聞・テレビ等の報道

1）河原剛一、山内芳子：日経産業新聞「心筋拍動の規則性解明」（2002年5月14日）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）下野真博：末梢筋運動時糖代謝神経制御機構の遠心性経路同定に関する基礎的研究（1997）
2）畠山善幸：幻肢誤局在とその神経機序に関する研究（1997）
3）堀淳二：ニューロン・グリア共培養系におけるグルタミン酸負荷によるニューロン死に関する研究（1997）
4）佐藤泰雅：心筋細胞培養系におけるアポトーシス様細胞死とその細胞内シグナル伝達機構に関する基礎的研究（1998）
5）齊藤健太：真性粘菌変形体のフラグメンテーションにおける記憶現象（1999）
6）斉藤宗孝：神経系株細胞の分化状態と一酸化窒素（NO）神経毒抵抗性に関する研究（2000）
7）小森啓安：マイクロニューログラム法によるラット座骨神経内筋交感神経活動の評価（2000）
8）角谷昌紀：新生ラット培養心筋細胞における虚血・再灌流時の拍動リズムゆらぎに関する研究（2000）
9）細谷類：神経細胞死の防御におけるグルタミン酸トランスポータの機能的役割に関する研究（2000）
10）牧坂幸治：アストロサイトにおける光誘導性カルシウム波の時空間解析とその伝播メカニズムに関する研究（2000）
11）岩淵禎弘：大脳皮質虚血耐性における転写調節因子（CREB）の活性化動態に関する研究（2001）
12）阿部麗奈：培養心筋細胞を用いた虚血・再灌流時における一酸化窒素（NO）の機能的役割に関する研究（2001）
13）矢野間潤持：ニューロン・グリア共培養系を用いた脳虚血耐性メカニズムに関する研究（2002）
14）高瀬麻玲：ランゲンドルフ灌流心を用いた心室頻拍―心室細動遷移機構に関する研究（2002）
15）林あさこ：心筋細胞肥大におよぼす長期的な収縮性亢進の影響に関する研究（2002）
16）小橋真之：培養心筋細胞を用いたアセチルコリンによる拍動リズム制御の細胞内シグナル伝達機構に関する研究（2002）
17）田中基樹：神経細胞の生存におけるアストロサイト・グルタミン酸トランスポータの機能的役割に関する研究（2002）

・博士学位

1）内貴猛：血管内皮表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃縮現象に関する実験的検討（2000）

e．大学院担当講義科目名

1）生体数理工学特論（河原剛一・内貴猛）（2001～2002年度）
2）生体情報工学特別演習（河原剛一・内貴猛）（2002年度）
3）生体情報工学特別研究第一（河原剛一・内貴猛）（2002年度）
4）生体情報工学特別研究第二（河原剛一・内貴猛）（2002年度）
5）生体工学概論（内貴猛）（2002年10月1日～2003年3月31日）
6）統計学（河原剛一・内貴猛）（2002年10月1日～2003年3月31日）

電子情報処理部門

研究目的

情報処理論と生体情報学を基礎にして、状況に応じて推論し判断する生体機能を解明し、人間の脳のように柔軟性のある電子情報処理システムの構築を目的としている。

情報数理研究分野

教授　西浦廉政（京大理院、理博、1995.4～）
助教授　小林　亮（京大工院、数理科学博、1995.4～）
助手　柳田達雄（総研大、学術博、1995.6～）
　　飯間　信（京大理院、理博、1999.4～）

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
上田肇一、横井研介、高橋良昌、斎藤宗孝
修士課程
大山義仁、瀬川知彦、永宮正規、村山弘之、斎藤尚史、佐々木務行、宮川　誠、上坂美花、斎藤伸一、横田一志、菅野　啓、韓　　松、手老篤史、伊藤勝造、久保田一志、早坂靖士、鈴木啓太、菅原真紀子

1．研究目的

人間を含めた自然の営みを理解する方法は様々であるが、本研究分野は計算機の中に小自然を作り、その数理的構造を明らかにすることにより、その本質を解明することを目指す。いわば数理の実験工房とでもいうべきものである。対象は一般に複雑かつ大自由度系であるが、具体的な実体に基づきつつも、それにとらわれない普遍的構造を取り出すことを試みる。平成 9 、10 年度においては自己複製ダイナミクス、粉粒体の相分離、雲の生成と崩壊、結晶成長における Grain boundary のダイナミクスの解明を主に目標においた。

平成 11、12 年度においてはカオス的に挙動する局在パルス、蝶の飛翔の流体力学的考察、分岐血管系の形成のモデルの解明を主目標においた。

平成 13 年度においては、反応拡散系における時空カオス、アスコルビン酸の振動的パターン形成、川の流れパターンの形態分類の解明を主目標においた。

平成 14 年度においては、ブロック共重合体の形態解析、経済学における独占・寡占の数理モデルの開発及び一様流中におかれた物体の運動の解析を主目標においた。

2．研究成果

・平成 9 －10 年度

(a)　結晶成長と Grain boundary

Phase field model をベクトル化することにより、同時多核凝固による多結晶の形成過程を記述するモデルを構成し、そのシミュレーションを行った。さらに多結晶形成後の Grain boundary（粒界）の運動を記述するモデルも構成した（図 1 ）。このモデルは数学的には無限大の拡散性を通して non-local な相互作用が微分方程式に導入され、facet を持つ結晶成長のモデルになるとともに、非線形半群理論の 1 つの重要な応用例ともなっている（[9]、[11]）。

図 1．多結晶の成長。複数の結晶の種から出発し、phase field model に組み込まれた異方性によりいくつかの異なる方向に伸びる結晶を表す。界面は秩序変数のある等高線に対応する。この結晶界面がぶつかったところから grain boundary が形成される。

(b)　高次元 Turing パターンと Microstructure

Turing パターンは反応拡散系における最も基本的なパターンであり、それは活性・抑制系において拡散比の違いによって生み出される。この拡散比の違いを利用して、界面ダイナミクスを含む様々な特異極限法が開発され発展している。空間 1 次元ではこの特異極限において有限サイズの Turing パターンが得られるが、同じ極限でも高次元では全く異なり、「安定」な Turing パターンは Microstructure（微細構造）となることが明らかにされた（[4]）。これは複数の空間スケールが共存することを示しており、見たい構造ととり得るスケールの微妙な関係を示唆している。

(c)　自己複製パターン

自分と同じものを自己再生していくというのは生物の 1 つの基本様式であるが、非線形化学反応系においてもそのような自己複製パターンを示すものが 90 年代に入り、実験的及び数値的にその存在が示された（図 2 参照）。このダイ

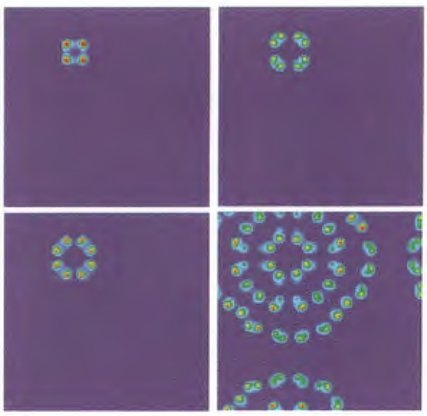


図 2．自己分裂パターン。 4 つの島から出発し、次々とまわりに広がりながら分裂していく様子を表す。全域に広がった後、パラメータの値により周期的な定常状態に落ち着く場合と部分的に島が消滅と生成を繰り返す時空カオスとなる場合がある。

ナミクスを駆動している数理的機構は何であろうか？　自己複製パターンが本質的に遷移ダイナミクスであることがこの疑問に答えることをを難しくしているが、大域的分岐理論の立場から間欠性を生み出す構造が階層的に連なり、自己複製パターンはこれらを次々と経めぐる軌道であることが明らかにされた([5]、[6])。極限点の階層構造と呼ばれるこの大域構造は普遍的な視点の1つを与えている。それは自己複製パターンのみならず、ある秩序から別の秩序へと次々とうつろひゆくダイナミクスを一般に理解できる視点である。

(d)　粉粒体の相分離のシミュレーション

粉粒体は一般的にサイズ、質量、摩擦係数などの違いにより分離することが知られている。その典型的な例として円筒中の2種の粉体は回転により径方向分離（radial segregation)、軸方向分離（axial segregation)、粗視化の3過程からなる。この粉体分離の数理モデルをセルラ・オートマトン（CA）を用いてモデル化し、シミュレーションによりはじめて回転円筒中の粉体分離の3過程を包括的に再現することができた（[8]、[10])。

(e)　雲のパターン形成と生成崩壊のダイナミクス

雲は非常に複雑な形態を持つが、その物理的な起源は明らかではない。この多様な形態を生成する雲の動力学をモデル化し、いかなる状況（パラメータ領域）でどのような雲が形成されるかを調べた。このモデルを用いた広範囲のパラメーター空間におけるシミュレーションの結果、地表温度と水蒸気量の変化に応じて積雲、積乱雲、層雲、層積雲と雲形態が変化することが分かった（図3）([8])。

図3．シミュレーションによって得られた典型的な雲のパターン。地表温度と湿度変化により定性的に異なる四種（層雲・積雲・積乱雲・層積雲）形態が出現する。パラメータを大域的に調べることによりこれらのパターンの相図が得られている。

・平成11－12年度

1）分岐血管系の形成のモデル

心臓から出た血管は､分岐を繰り返し毛細血管網となり、再び合流しながら心臓に戻るという閉じたネットワークを作っている。ウズラの卵の卵黄嚢表面で形成される血管網の形成の観察をもとにして、数理モデルを構築した。このような分岐血管網は、血管内皮細胞がずり応力と圧力の2つの力学的量に対して適応的に血管の太さを変えることによって形成されるという仮説を提出した。

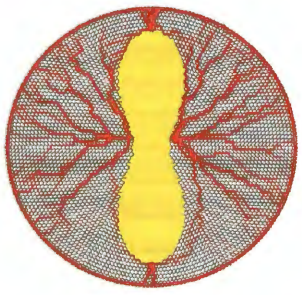


図1．分岐血管系の形成シミュレーション

2）結晶粒と粒界のモデル

多結晶材料では結晶粒や粒界の構造がその性質に大きな影響を与える重要なファクターである。我々は多結晶構造の時間発展を記述するフェーズフィールドモデルを提案し、そのシミュレーションを行った。このモデルは、粒界の運動と結晶粒の回転を同時に記述できるという点が大きな特徴である。また、このモデルを拡張し凝固から粒界の形成さらに多結晶の時間発展までを記述することに成功した。さらに、これらのモデルを数学的に基礎付ける特異拡散理論を展開した。

3）離散散逸系におけるカオス的パルスのダイナミクス

空間を連続的につながっているとみるか離散的なものとみるかは、自然観の変遷、観測技術の発展と共に様々に変化してきた。原子一個を操れる現代では、ミクロからマクロまで様々な空間スケールでの考察がなされており、パターン形成論においても例えばナノスケールでの自発的な構造形成も議論され始めている。このようなスケールの階層構造を考えにいれると、空間は一様で連続的という我々の直観はあやうくなる。実際、結晶構造を考えたときの異方性はむしろ離散的に考えた方が自然にモデル化できる場合もある。空間方向が離散的に分布した反応拡散系を考え、連続系では現れないカオス的に振舞う局在パルスの存在及びその相互作用を考察した（[21])（時間方向は連続のままである)。

4）昆虫飛翔のモデル

昆虫は航空機とは異なり、羽からの剝離渦を有効に利用

図2．多結晶の時間発展モデルのスナップショット

して航空理論の予測より大きな揚力を得ている。その相互作用は剝離、渦力学、羽や昆虫の重心運動を含む動的なもので、詳細はよく分かっていない。そこではばたき運動を可能な限り単純化したモデルの解析を行った。一例として、はばたき運動を含む系全体を水平面に対し対称にしたとき、モデルの重心は単なる対称振動をするように思われる。

図は数値計算の一例である。剝離渦の影響で系の持つ対称性が崩れる様子が示されている。この対称性の崩れは剝離渦が流体中で存在する特徴的時間をパラメータとする分岐として理解できることなどを示した。

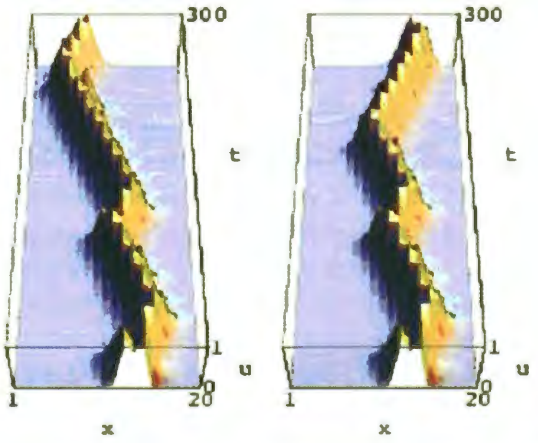


図3．カオス的パルスの初期値敏感性。初期値がわずかに異なる状態から出発した2つのカオス的パルスの時間発展を示している。t＝150 ステップまではほぼ同じ振る舞いであるが、その後大きくずれていく。この初期値への敏感性はカオス的ダイナミクスの特徴である（図の横軸は空間、縦軸は時間方向である）。

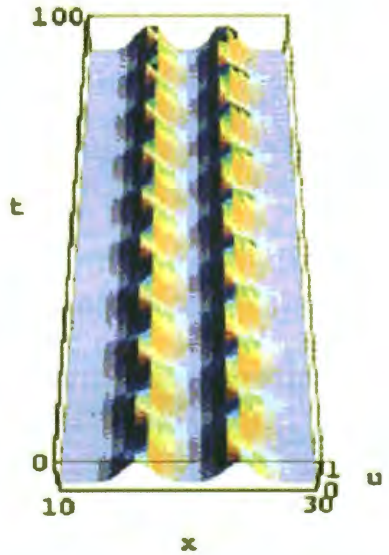


図4．2つのカオス的パルスが衝突して現れる時間周期的分子状振動解

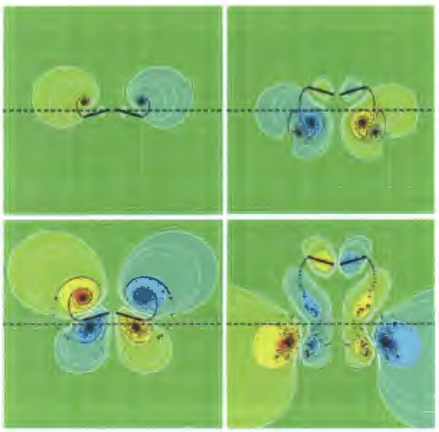


図5．はばたき模型の運動（半周期毎：左上→右上→左下→右下）。2つの線分が羽を、点が流れ場を表現する渦を、そして曲線が流線をあらわす。空間は2次元、左右は鏡像対称性を持ち、重力も無視する。水平面から測った打ち上げ時、打ち下ろし時の角度の大きさは同じである。はばたきに伴って生成する渦と羽の相互作用が重心を移動させている様子が分かる。特に、左下（2周期目の打ち下ろし）で2つの渦が協力して大きな揚力を生成している。

・平成13年度

(a)　反応拡散系における時空カオス

局在パターン間の強い相互作用、例えばよく知られている神経伝搬を記述するFitzHugh-Nagumo方程式におけるパルスの対消滅もその事実を誰も疑わないが、その厳密な証明はまだない。そこでは解の大変形が起こり、スケールの分離は難しい。さらに散逸系におけるパルスやスポットはパラメータ値により、反射したり、対消滅したりする。この遷移はどのように理解されるのであろうか。また局在解そのものが不安定化して自己分裂したり、自己崩壊したりする。これらすべてのダイナミクスを逐一追跡すること

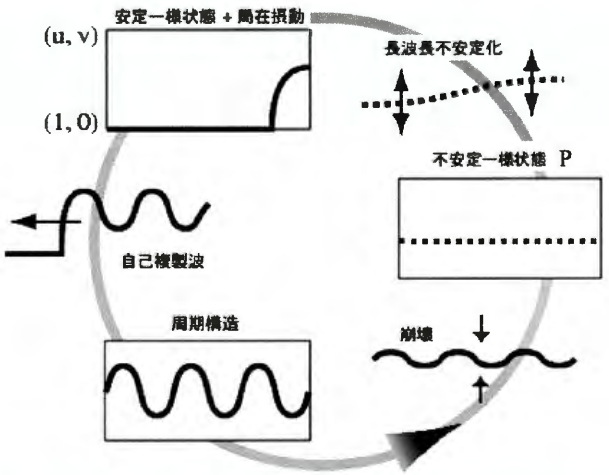


図1．定常解、不安定定数解P、安定定数解（u，v）＝（1，0）をめぐるヘテロクリニックサイクルを構成できる。実際の有限区間で観察される時空カオスではPから（1，0）へ移るとき、区間全体で一様に行くのではなく（真に1，0）へ落ちればそこから軌道は出れない）、必ず自己複製波が生み出される（1，0）以外の部分が残っている。実際、上のサイクルは1次元時空カオスの図においてある固定した部分区間に着目すれば観察できる。

は極めて困難であり、またそのことで全体像が見えてくるわけでもない。そこで次の発想の転換を行う。「個々の軌道の詳細を追うのではなく、分岐空間において解の枝全体が成すネットワークが興味あるダイナミクスをどのように駆動しているかを調べる」という立場をとる。これは言うは易く、行うは難しなのであるが、近年の計算機の発展に助けられて、徐々に可能となってきた。本年度は1次元パルスの自己複製と自己崩壊をともなう複雑な時空カオスパターンが「大域分岐」の視点から「無限次元空間におけるヘテロクリニックループの開折」という記述が可能であることを示した（[20]）。

(b)　アスコルビン酸のパターン形成

アスコルビン酸のメタノール溶液を蒸発によって結晶化させると様々なパターンを示す。このパターン形成の中でも特に周期的な結晶化によって出来る同心円パターン生成に関する実験的および理論的な研究を行った。結晶化が周期的になる理由として、針状結晶の生成により出来た空隙に流体が吸い込まれる機構（void-fluid interaction）を提案した。

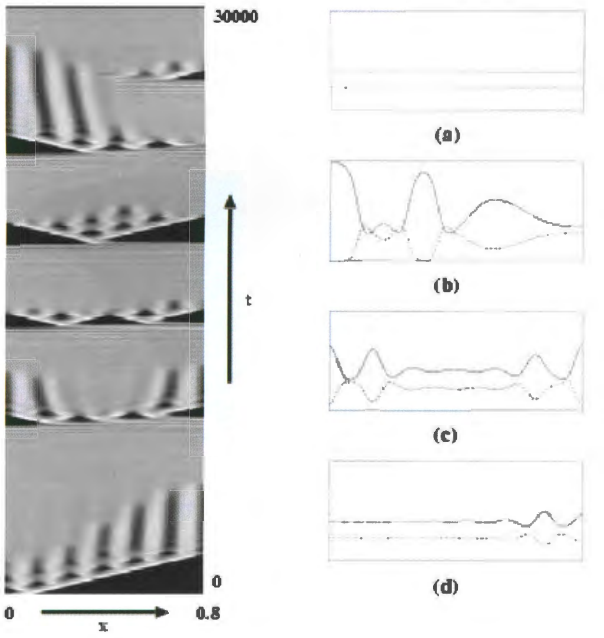


図2．グレイ・スコットモデルにおける1次元時空カオスの時間プロット。空間周期構造が形成され、それが崩壊し、再び自己複製波により周期構造が再生され、また壊れるという過程がカオス的に繰り返される。軌道がどの秩序解を経巡るかは、種となるヘテロクリニックループの構造から決まる。）

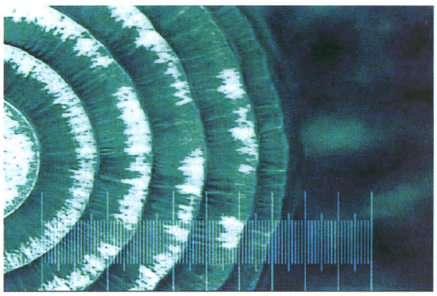


図3．アスコルビン酸のパターン形成

(c)　河川のモデル

河川は流量や川底の土砂特性の変化に伴い直線流、屈曲流、蛇行流、扇状流など多様な流れの様式を持っている。流路の形態は流れによる川岸／川底の掘削と土砂の浮遊／堆積のフィードバック過程による自発的に形成される自己境界であるが、これらの形態がどのような環境下で形成され、どのような条件で構造変化が起こるかは未だ不明である。これは、時間スケールが長く相似則も未知であるため、十分な観測・実験が難しく、しかも境界が変動するため3次元流体方程式による解析の困難さに因っている。

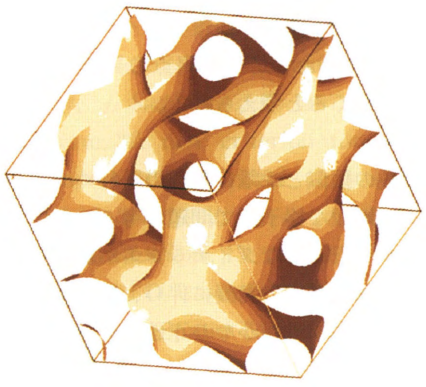
このような系の理解には数理モデル化とシミュレーションによる解析が有効なアプローチとなる。我々は水深方向に対して平均化した2次元流体方程式に現象論的な浸食・堆積のダイナミクスが結合したモデル方程式を立て数値計算による解析を進め、数理モデルで初めて川の基本形態である直線流・蛇行流・網状流を再現し、S.A. Schuum (1985) の観測事実と定性的に一致する結果を得た。

・平成14年度

(a)　「ブロック共重合ポリマーにおけるダブルジャイロイド構造」

非局所項をもつカーン・ヒリアール型の勾配系方程式の有する多彩な解構造とその間の遷移ダイナミクスを明らかにした。共重合ポリマーはその成分比等により多様な形態をとることが実験的に知られている。しかし、その形態間の遷移のダイナミクスや、パラメータに応じてどのような形態が実現されるかについての理論的考察は未解決であった。

非局所項をもつ非常に簡単な上記勾配系方程式がラメラ、ダブルジャイロイド等の多様な解をもつことを示し（図1参照）、さらにこれら2つの形態遷移の間にロンボヘドラルの形状をもつ解をもつことを3次元シュミレーションにより示した。界面の厚さとポリマー長のパラメータのスケーリング則がこれらの解析と数値実験の際の鍵となる（[12]、[30]）。



(b)　独占・寡占の発現の数理モデル

ミクロ経済学によれば、市場が完全競争であれば、「見えざる手」に導かれてパレート最適な均衡が実現される。独占・寡占などの存在により、完全競争が満たされない場合、市場は効率的な資源配分を達成できない。このため、独占やカルテルは社会悪と見なされ、独占禁止法のような競争促進政策が正当化される。一方、実際の産業では完全競争が実現されている証拠を見つけることがほとんど不可能であり、独占・寡占状態となるのが普遍的構造である様に思われる。このような、独占・寡占の発現するメカニズムを解析するため数理的モデルを構築し数値解析により独占・寡占が普遍的に発現することを確かめた。

(c)　一様流中におかれた物体の運動の解析

木の葉の落下等、流体中を運動する物体が放出する渦が、その物体運動に本質的な影響を及ぼす現象は、我々の身近にあるが、渦運動の強い非線形性からその理論的解明は進んでいない。そこで、流体力学的条件の変更が剝離渦と平板運動に与える影響を調べるために、一点を固定した平板を一様流中に置いた系の数値計算を行い、流体力学的条件を様々に変えて平板の運動および剝離渦の形成周期、また渦の放出パターンを調べた。結果の一例として、平板を一様流と水平に振動させたとき、剝離渦列が一様流とは異なる方向に並ぶ wake deflection という現象に似た現象が見られる場合があることなどを発見した。

3．今後の研究の展望・将来計画

複雑なダイナミクスも実は単純な少数自由度のものが駆動しているという考えは中心多様体をはじめとする様々な縮約理論によりその有効性は示され、ミニマルモデルを構成するときの指針でもある。一方、そのようにして得られたミニマルモデルですら自由度が大きい系では成果の所でも述べたように実に多様で複雑なダイナミクスを示す。このことは単にそれらを部品とみなして組み合わせることにより、全体を理解しようとする接近法に限界があることを示唆している。局所と大域の相互作用、連続と離散の狭間、遷移ダイナミクスの役割など、まだ多くのことが十分に理解されておらず、現在それらを融合し、統一的に理解する方法はまだない。今後は計算機の中に単純な種から出発して徐々に複雑な小自然を作り出し、進化的な観点からの理解を試みる構成的手法や、複雑なダイナミクスを生み出す organizing center としての特異点の発見とその解析などが重要となってくると考えられる。

連続と離散の類似と乖離は数理の新しくて古い問題である。空間的に離散な格子上で問題を考えると、連続モデルでは現れなかった様々なダイナミクスが登場する。近年の計算機や実験測定技術の発展に伴い、原子レベル、ナノレベルでのミクロな挙動がかなり正確に捉えられるようになり、同時にこれは離散的な座標系でのモデル化を要求する。コースグレインされた連続的なものの見方と離散的なモデリングの間にはまだまだ解明されていない乖離が多くある。散逸系における離散モデルが有するカオス的パルスは空間方向の離散化がもたらす新たな解のクラスであり、さらにその相互作用の結果として、分子振動のような秩序解も現れるという点で興味深い。離散モデルがこれから多くの分野で出現すると予想される現在、連続と離散の関係の解明は今後の発展が期待される。

生体系の形作りの問題も非線形・非平衡の立場から理解されねばならない分野である。遺伝子的世界像はそれらを考える際の多くの重要な材料を提供するが、構成材料ときっかけが与えられても、どのようなダイナミクスでそれが作られていくかは知ることはできない。非平衡ダイナミクスの立場からさらにそれらの解明を進めていくことが望まれる。

生物の運動を数理的観点から解析することは重要かつ有用である。与えられた生物の生物学的機能を理解することと、その生物の行動を理解することの間には大きな溝がある。前者と後者を繋ぐ架け橋として、生物の運動機構の理解が重要である。これには適切なモデル化を含んだ物理的、

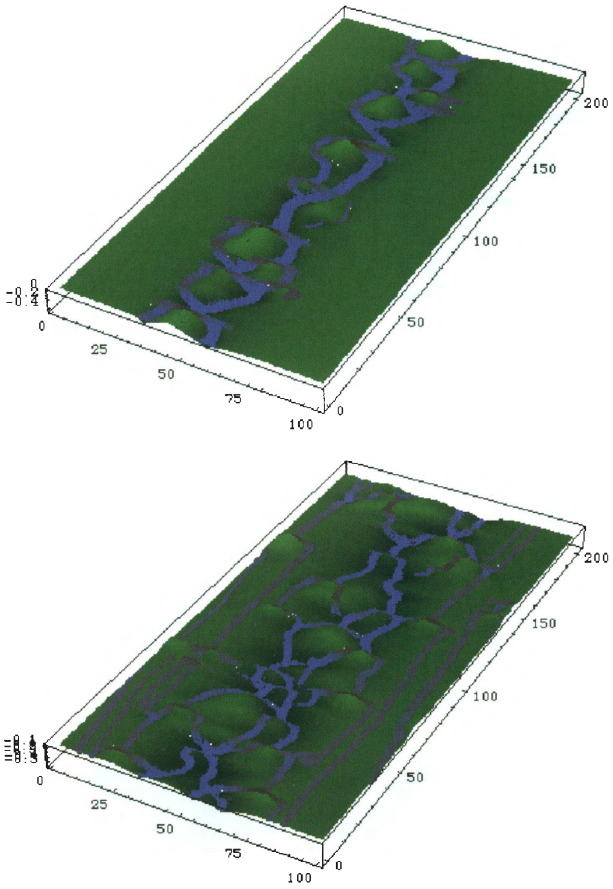


図4．河川の数理モデルのシミュレーション結果。初期に直線流路から時間発展させた時の形態のスナップショット。傾斜の増加にともない直線・蛇行・網状と流路の形態が変化する。ここでは、蛇行流・網状流を示してある。これらの形態変化は Schuum (1985) の観測事実を数理モデルで初めて再現したものである

数理的手法が有用であり、昆虫の飛翔を始めとする様々な対象における適用が期待される。

予測可能性とその現実問題への応用というのは科学者が担うべき重要な問題である。とくに大きな枠として「なにが起こり得、また起こり得ないのか、またそれはどのような時空のスケールで起こるのか？」を考えていくことは今後益々重要となる。今年度取り扱った時空カオスや河川の地形動力学は上の意味での定性的予測を行う上で今後重要となっていくであろう。

複雑時空ダイナミクスを統一的に理解するには個々の軌道や局所的考察のみでは不十分であり、なんらかの大域的情報とそれらのつながりを理解する必要がある。それではそれらを実際に遂行する際の指導原理は何であろうか。それは成果でも触れたように「大域分岐の枝全体のネットワーク構造とそれらのノードにおける特異構造の解明」という立場である。従って単にモデルをシミュレーションしているだけではだめで、AUTOに代表される分岐解追跡ソフトによるネットワーク解明が不可欠となる。さらにこれらの作業を通じて浮かび上がってくる幾何的構造が新たな「視点」を提供すると期待される。

アスコルビン酸のパターン形成や有機溶媒の液滴が蒸発する際に観察される縦方向および横方向のストライプパターン、さらには赤血球の変形を記述する問題などにおいては流体力学的効果が重要となってくる。散逸系におけるパターン形成の駆動力と流体効果がカップルするときの複雑な非線形相互作用の詳細はまだよくわかっていない。今後これらを2つの非線形効果をうまく取り入れたモデリング及びその数値実験法の開発が重要となってくるであろう。

河川流路の基本形態を非線形動力学的手法により再現した。今後、地形動力学に共通した素過程、すなわち流体中の粒子の輸送、侵食、堆積、化学反応、境界条件の動的変化などの物理的特徴を徹底的に洗い出すことで、数値的、理論的手法のモジュール化を試み、それらの組み合わせによってより広い対象の地形現象をシステマティックに再現し得る可能性を秘めている。蛇行河川を改修してショートカットを設けた為に川下の流量の不安定性が増したなどの「制御困難性」の防災問題は経験的科学という側面が大きいが、形態変化の数理的構造が明らかになれば、理論的な予測・制御への道が開ける。

4．資料

4.1 学術論文

1）Y. Nishiura and H. Suzuki: "Asymptotic configuration of stationary interfacial patterns for reaction diffusion systems" *AMS/IP Studies in Math.*, 3: 333-348 (1997)*

2）H. Kokubu, K. Mischaikow, Y. Nishiura, H. Oka, and T. Takaishi: "Connecting Orbit Structure of Monotone Solutions in the Shadow System" *J. Diff. Eq.*, 140(2): 309-364 (1997)*

3）I. Ohnishi and Y. Nishiura: "Spectral comparison between the second and the fourth order equations of conservative type with non-local terms" *Japan J. Ind. Appl. Math.*, 15(2): 253-262 (1998)*

4）Y. Nishiura and H. Suzuki: "Nonexistence of Higher Dimensional Stable Turing Patterns in the Singular Limit" *SIAM J. Math. Anal.*, 29(5): 1087-1105 (1998)*

5）Y. Nishiura and D. Ueyama: "A hidden bifurcational structure for self-replicating dynamics" *ACH-Models in Chemistry*, 135(3): 343-360 (1998)*

6）Y. Nishiura and D. Ueyama : "A skeleton structure of self-replicating dynamics" *Physica D*, 130: 73-104 (1999)*

7）T. Yanagita and T. Kaneko: "Modelling and Characterization of Cloud Dynamics" *Phys. Rev. Lett.*, 78: 4297-4301 (1997)*

8）T. Yanagita: "A Three-Dimensional Cellular Automaton Model of Segregation of Granular Materials in a Rotating Cylinder" *Phys. Rev. Lett.*, 82: 3488-3491 (1999)*

9）R. Kobayashi, J. A. Warren and W. C. Carter: "Vector-valued Phase Field Model for Crystallization and Grain Boundary Formation", *Physica D*, Vol.119, 415-423 (1998)*

10）K. Ueda, R. Kobayashi and T. Yanagita: "Segregation of Granular Materials in a Rotating Tube", *Proceedings of the 2nd Tohwa University International Meeting, Statistical Physics*, eds. M.Tokuyama and I. Oppenheim, World Scientific, pp.141 (1998)

11）R. Kobayashi, J. A. Warren and W. C. Carter: "Mathematical Models for Solidification and Grain Boundary Formation", *ACH-Models in Chemistry*, Vol.135, 287-295 (1998)*

12）I. Ohnishi, Y. Nishiura, M. Imai and Y. Matsushita: "Analytical solutions describing the phase separation driven by a free energy functional containing a long-range interaction term," *Chaos*, 9(2): 329-341 (1999)*

13）R. Kobayashi and Y. Giga: "Equations with Singular Diffusivity," *J. Stat, Phys.*, 95: 1187-1220 (1999)*

14）Y. Nishiura: "A new criterion for the onset of spatio-temporal chaos in the Gray-Scott model," *GAKUTO International Series Mathematical Sciences and Applications*, 13: 222-237 (2000)*

15）Y. Nishiura and D. Ueyama: "Self-replication, Self-destruction and Spatio-Temporal Chaos in the Gray-Scott Model," *Forma*, 15: 281-289 (2000)*

16) 西浦廉政：「数学と化学・生物学―自己複製と自己崩壊のダイナミクスをめぐって」、数学、52(4)：404-416 (2000)*

17) J. A. Warren, R. Kobayashi and W. C. Carter: "Modeling Grain Boundaries Using a Phase-field Technique," *J. Cryst. Growth*, 211: 18-20 (2000)*

18) R. Kobayashi, J. A. Warren and W. C. Carter: "A Continuum Model of Grain Bounday," *Physica D*, 140: 141-150 (2000)*

19) S. Toh and M. Iima: "Dynamical aspect of entropy transfer in free convection turbulence," *Phys. Rev. E*, 61: 2626-2639 (2000)*

20) Y. Nishiura and D. Ueyama: "Spatio-temporal chaos for the Gray-Scott model," *Physica D*, 150: 137-162 (2001)*

21) 西浦廉政、上山大信、柳田達雄：「離散散逸系におけるカオス的パルス」、応用数理、11(2)（2001）*

22) M. Iima and T. Yanagita: "Is a two-dimensional butterfly able to fly by symmetric flapping?" J.Phys. Soc.Japan, 70: 5-8 (2001)*

23) R. Kobayashi and Y. Giga: "On Anysotropy and Curvature Effects for Growing Crystals," JJIAM, 18(2): 207-230 (2001)*

24) J. A. Warren, W. C. Carter and R. Kobayashi: "A Phase Field Model of the Impingement of Solidifying Particles", Physica A, Vol.261, 159-166 (1998)

25) Y. Nishiura: "Global bifurcational approach to the onset of spatio-temporal chaos in reaction diffusion systems," *Methods and Applications of Analysis*, 8(2): 321-332 (2001)*

26) S. Ei, Y. Nishiura, and K. Ueda: "2^n-splitting or Edge-splitting -A manner of splitting in dissipative systems," *JJIAM*, 18(2): 181-205 (2001)*

27) J.Escher and Y.Nishiura: "Smooth unique solutions for a modified Mullin-Sekerka model arising in diblock copolymer melts," *HMJ*, 31(1): 137-149 (2002)*

28) M. Iima and T. Yanagita: "An analysis of a symmetric flapping model: A symmetry-breaking mechanism and its universality," *Theor. and Appl. Mech.*, 50: 237-245 (2001)*

29) H. Uesaka and R. Kobayashi: "Pattern Formation in the Crystallization of Ascorbic Acid", *J. Cryst. Growth*, 237-239(Part 1): 132-137 (2002)

30) Y. Nishiura and T. Teramoto: "Stable gyroid morphology in a gradient system with nonlocal effects", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 71(7): 1611-1614 (2002)

31) 和田成生、小林亮：「膨潤赤血球の体積減少に伴う形状変化の数値　シミュレーション」、日本機械学会論文集（A編）、69-677：14-21（2003）

32) S. Wada and R. Kobayashi: "Simulation of the Shape Change of a Red Blood Cell at the Entrance of a Capillary", *Proceedings CD of the Fourth World Congress of Biomechanics (WCB2002, 4th-9th Aug, 2002)* (2002)

4.2 総説、解説、評論等

1）H. Imai, Y. Shinohara, M. Natori, W. Zhou, I. Ohnishi, and Y. Nishiura, : "Numerical simulation of free boundary problems in quadruple precision arithmetic explicit schemes" 数理解析研究所講究録 989：18-30（1997）

2）西浦廉政：格子力学系の最近の進展、Shui-Nee Chow and John Mallet-Paret,応用数理 7(4)：29-38（1997）（翻訳）

3）西浦廉政：極限点の整列階層構造と自己複製パターン、数理科学　6月号：13-20（1998）

4）飯間信、柳田達雄：「はばたきによる推進の動的メカニズム」、（京都大学　数理解析研究所講究録（複雑流体の数理））、（1999）

5）小林亮、柳田達雄、上田肇一：「粉粒体の偏析現象に対する数理的アプローチ」、粉体工学会誌、37(9)：50-56（2000）*

6）西浦廉政：「うつろひゆくもののダイナミクスをめぐって」、数学のたのしみ　―非線型の沃野―、日本評論社、22（2000）

7）西浦廉政：「<数学の未解決問題>　反応拡散系―散逸構造が数学にもたらしたもの―」、数理科学、サイエンス社、3（2001）

8）小林亮：「フェーズフィールドモデル入門」、パソコンで学ぶ材料工学、67-81 (2001)

9）柳田達雄、西森拓、小西哲郎：「河川の蛇行・網状転移」、京大数理解析研究所講究録、1184：30-40 (2001)

10）柳田達雄：「CML法による雲のパターンダイナミクスの解析」、機械の研究、70：194-198 (2001)

11）飯間信：「昆虫飛翔の物理」、物性研究、77：447-507 (2001)

12）飯間信：「昆虫飛翔と渦―翅相互作用」、ながれ、21：153-160（2002）

13）西浦廉政、寺本敬、上田肇一：「散逸系における散乱現象―その多彩な入出力関係―」、数理科学、41(4)：41-47（2003）

14）小林亮、中垣俊之：「真性粘菌変形体の運動の数理モデル」、数理解析研究所講究録、1305：8-14（2003）

15）中垣俊之、小林亮：「粘菌変形体の流路ネットワークの形態形成」、数理解析研究所講究録、1305：1-7(2003)

4.3 著書

1）西浦廉政：非線形問題1―パターン形成の数理―、岩波講座「現代数学の展開」7：1-279（1999）

2）小林亮：「血管分岐系形成の数理モデル」、『シリーズ・ニューバイオフィジックス　II−6　生物の形づくりの数理と物理』、本多　久夫編著（共立出版）pp.137-153（2000）

3）Y. Nishiura: *Far-from-Equilibrium Dynamics*, American Math. Soc., 209: 1-311 (2002)

4）西浦廉政：自己複製と自己崩壊のパターンダイナミクス、岩波講座「物理の世界」、5：1-84（2003）

5）小野崎保、柳田達雄：「見えざる手による独占・寡占の創発」、複雑系社会理論の新地平、吉田雅明編、専修大学出版会、227-242（2003）

6）西浦廉政：「反応拡散系　散逸構造が数学にもたらしたもの」、臨時別冊・数理科学　数学の未解決問題　21世紀数学への序章、サイエンス社、144-151（2003）

7）T. Onozaki and T. Yanagita: "Monopoly, Oligopoly and Invisible Hand", *The Inst. of Economic Research, Chuo Univ., Discussion Paper Series*, 32: (2002)

4.5　招請講演

1）Y. Nishiura: "Asymptotic vs transient dynamics in nonlinear dissipative systems", Int. Conf. on Asymptotic in Nonlinear Diffusive Systems-towards the understanding of singularities in dissipative structures-, Tohoku Univ., (Sendai, 1997-7).

2）Y. Nishiura: "Self-replicating dynamics in reaction diffusion systems", Variational Methods and Mathematical Phenomena, Keio Univ., (Yokohama, 1997-9).

3）Y. Nishiura: "A skeleton mechanism of self-replicating dynamics", Complex Chemical Dynamics in Polymer Matrices and Nonlinear Dynamics in Chemistry and Biology, (Budapest, 1997-9).

4）Y. Nishiura: "Edge of folding points and self-replicating dynamics", Workshop on Singularities Arising in Nonlinear Problems, Kobe Institute, (Kobe, 1997-11).

5）Y. Nishiura: "Hierarchy structure of folding points leads to self-replicating dynamics", Center for Theoretical Sciences, 清華大学、Taiwan (Hsinchu, 1997-12).

6）Y. Nishiura: "Asymptotic and transient dynamics in pattern formation in dissipative systems", Series lectures at "Summerschool Spatio-temporal Patterns" held at Twente University, the Netherlands, June 2-6, (Twente, 1998-6).

7）Y. Nishiura: "On self-replicating dynamics in reaction-diffusion systems", Seminaire Equations aux Derivees Partielles Non Lineaires, Universite Paris-Sud, France, June 11, (Paris, 1998-6).

8）Y. Nishiura: "A skeleton dynamics of self-replicating patterns", Rahmen des Oberseminars (Nichtlineare Dynamik), Free University Berlin, June 16, (Berlin, 1998-6).

9）西浦廉政：「反応拡散系における自己複製と自己崩壊」、日本応用数理学会、オーガナイズドセッション「複雑現象の数理に向けて」(オーガナイザー：相澤洋二)、早稲田大学（Tokyo、1998-9）.

10）Y. Nishiura: "On some distinguished singular limits of reaction-diffusion systems", Conference on Nonlinear Differential Equations and Numerical Analysis, Nov.4-6, 1998, National Center for Theoretical Sciences, Tsing Hua Univ., Taiwan (Hsinchu, 1998-11).

11）Y. Nishiura: "A dynamical structure of self-replicating patterns", Workshop on Singularities arising in nonlinear problems 1998, (Kyoto, 1998-11).

12）Y. Nishiura: "Self-replication and self-destruction in reaction diffusion systems", Workshop on Fronts, Patterns and Pulses in Reacting Systems, Lefschetz Center for Dynamical Systems, Brown Univ., (Providence, 1999-2).

13）T. Yanagita: "Phase diagram of cloud morphology", The 5-th Internatinal Symposium Starategies for Complex Systems -Constructive and Descriptive Approaches- Hayama Japan, (1999)

14）R. Kobayshi: "Mathematical Models for Solidification and Grain Boundary Formation", Workshop on "Complex Chemical Dynamics in Polymer Matrices and Nonlinear Dynamics in Chemistry and Biology", Budapest, (1997)

15）W. C. Carter, R. Kobayashi and J. A. Warren: "Incorporating Crystallography into Phase Field Models", Gordon Conference on Physical Metallurgy, (1998)

16）J. A. Warren, W. C. Carter and R. Kobayashi: "Phase Field Modeling of Grain Boundary Foramtion" TMS Symposium in Honor of John Cahn's 70th Birthday, Rosemont, (1998)

17）R. Kobayashi: "Mathematical Model of Grain Boundary Using Singular Diffusivities", Sapporo Symposium on Anisotropic Effects in a Crystal Growth Problem and its Mathematical Analysis, Sapporo, (1999)

18）M. Iima: "A 2D flapping-flight model and the breakdown of dynamical symmetry", Conference on Utsurohi-yukumono ── In memory of Masaya Yamaguti ── , Sapporo, (1999)

19）Y. Nishiura: "Complex pulse dynamics in reaction-

diffusion systems," Euroconference: 'Dynamics of Patterns,' Crete, Greece (1999-6)

20) Y. Nishiura: "Self-replicating dynamics -splitting of interfaces-," Minisymposium 'Evolving Interfaces and Differential Equations,' Edinburgh, England (1999-7)

21) Y. Nishiura: "Complex pulse dynamics in nonlinear dissipative systems," Minisymposium 'Patterns,' Berlin, Germany (1999-8)

22) Y. Nishiura: "Complex pulse dynamics in nonlinear dissipative systems," Pattern Formation in Physics and Mechanics,' Berlin, Germany (1999-8)

23) R. Kobayashi: "Mathematical Model of Step Dynamics," Japan-Netherlands Seminar on Crystal Growth: Theory and In-Situ Mesurements, Zeist, Netherlands (1999-8)

24) 西浦廉政：「Nonlinear ODE arising in repulsive pulse dynamics」、研究集会「反応拡散系における特異性の形成」、札幌、日本（1999-9）

25) 小林亮：「フェーズフィールドモデル入門」、製鋼第19委員会　凝固プロセス研究会、大阪大学、日本(1999-9)

26) 西浦廉政：「非線形・非平衡系における自己生成と自己崩壊」、「山口昌哉先生追悼セッション」、愛媛、日本(1999-10)

27) 小林亮：「粉粒体の分離現象に対する数理的アプローチ」、第37回　粉体に関する討論会、大沼、日本(1999-10)

28) 小林亮：「Mathematical Model of Step Dynamics」、散逸系におけるパターンダイナミクスの最近の発展、広島大学、日本（1999-11）

29) R. Kobayashi, J. A. Warren and W. C. Carter: "Grain Boundary Model and Singular Diffusivity," The 8th International Conference Free Boundary Problems: Theory and applications, Chiba, Japan (1999-11)

30) R. Kobayashi: "A Mathematical Model for Grain Boundaries," Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification and Casting, Osaka, Japan (1999-11)

31) Y. Nishiura: "Pulse interaction approach to splitting dynamics," Workshop on Singularities Arising in Nonlinear Problems 1999, Kyoto, Japan (1999-11)

32) Y. Nishiura: "Pulse dynamics and transition to spatio-temporal chaos in dissipative systems," Plenary Talk at IMS Workshop on Reaction-Diffusion Systems, The Insitute of Mathematical Sciences of Chinese University of Hong Kong, HongKong (1999-12)

33) 小林亮：「ステップダイナミクスの数理モデル」、低温研共同研究シンポジウム　「結晶成長におけるパターン生成の数理—実験とモデリング」、北海道大学、日本（1999-12）

34) Y. Nishiura: "Simplicity and Complexity," The First RIES-Hokudai Symposium 'Electronic Science at the Milennium, 'Sapporo, Japan (1999-12)

35) Y. Nishiura: "Self-replication, self-destruction and spatio-temporal chaos in the Gray-Scott model," International Symposium on Chaos and Order in Chemistry, Nara, Japan (2000-3)

36) 飯間信、柳田達雄：「2次元はばたき飛行における剝離秩序渦の役割」、「反応拡散系：　生物、化学における現象とモデル」、京都大学数理解析研究所研究集会、京都、日本（2000-4）

37) 小林亮：「粉粒体の分離現象に対する数理的アプローチ」、新化学発展協会先端化学技術部会コンピュータケミストリー分科会、東京、日本（2000-4）

38) R. Kobayashi, T. Yanagita, K. Ueda and M. Nakagawa: "Can You Believe the Angle of Repose Scenario?," Particles and Beyond: 2000, Golden, USA (2000-5)

39) R. Kobayashi: "Mathematical Model of Solidification and Recrystallization," NSC One Day Workshop on Nonlinear PDE's and Its Applications, Sapporo, Japan (2000-6)

40) 小林亮：「多結晶系のフェーズフィールドモデル」、第26回結晶成長討論会、鳥羽、日本（2000-7）

41) 西浦廉政：「非線形・非平衡系における遷移ダイナミクスの数理」、数理科学セミナー2000-2001、慶応大学理工学部、日本（2000-10）

42) R. Kobayashi, J. A. Warren and W. C. Carter: "Mathematical Modeling of Solidification and Recrystallization," Free Boundary Problems, Kyoto, Japan (2000-10)

43) Y. Nishiura: "A global bifurcational approach to complex dynamics in dissipative systems," Dipartimento di Mathematica Pura ed Applicata, Universita'degli studi di L'aquila, Italy (2000-10)

44) Y. Nishiura: 2^n-splitting or edge-splitting?-A manner of self-replication for the Gray-Scott model," Dipartimento di Mathematica Pura ed Applicata, Universita'degli studi di L'aquila, Italy (2000-10)

45) 上田肇一、西浦廉政：「Gray-Scottモデルに現れるカオスパルス」、第10回「非線形反応と協同現象」研究会、山口大学、日本（2000-11）

46) 小林亮：「Modeling of grain boundary motion and grain rotation」、界面現象に対する実験解析・数値解析・数学解析についてII、神戸インスティチュート、日本（2000-11）

47) Kei-ichi Ueda, Shin-ichiro Ei and Yasumasa Ni-

shiura: "Pulse interaction approach to the manner of wave-splitting 2̂n splitting or edge-splitting-,"非線形問題に現れる特異性の解析'2000, Kyoto, Japan (2000-12)

48) Y. Nishiura: "A geometric approach to spatio-temporal chaos in the Gray-Scott model," Oberwolfach conference on Global Invariant Manifolds in Dynamical Systems, Mathematisches Forschungsinsitut Oberwolfach, Germany (2000-12)

49) 西浦廉政：「自己複製パターンの分裂の仕方について―一斉分裂か境界分裂か？―」、応用数学合同研究集会、瀬田、日本 (2000-12)

50) 飯間信、柳田達雄：「2次元流体中でのはばたき飛行のメカニズム」、第50回理論応用力学講演会、東京、日本 (2001-1)

51) Y. Nishiura: "Geometric approach to complex dynamics in dissipative systems," Reaction-Diffusion Systems: Theory and Applications, Kyoto, Japan (2001-2)

52) 飯間信、柳田達雄：「流体と相互作用をする2次元はばたきモデルの解析」、公開シンポジウム(文部省科学研究費特定領域研究(B)「非線形非平衡現象を支配する特異性の解明」、東京、日本 (2001-2)

53) 西浦廉政：「パターンの生成と消滅の機構について」、研究集会「界面運動の記述と理論解析」、九州大学応用力学研究所、日本 (2001-2)

54) 小林亮：「結晶粒と粒界の運動のモデル」、九州大学応用力学研究所研究集会　界面運動の記述と理論解析、九州大学、日本 (2001-2)

55) 小林亮：「ドメインパターンシミュレーション」、北海道大学電子科学研究所客員研究分野シンポジウム、北海道大学、日本 (2001-2)

56) 小林亮：「凝固と再結晶過程の数理モデル」、ワークショップ「非線形問題の探求」、電気通信大学、日本 (2001-3)

57) Y. Nishiura: "Symmetry and complex dynamics in dissipative systems," Int'l.Workshop on Singular Limits of Reaction-Diffusion Systems: Interfaces and Spikes, Leiden, Netherlands (2001-3)

58) 小林亮：「凝固と再結晶過程の数理モデル」、日本応用数理学会・計算科学的手法による照射腐食割れ研究部会、東京 (2001-4)

59) Y. Nishiura: "Chaotic pulses in discrete systems," Sixth SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Minisymposium "Pulse dynamics in reaction-diffusion systems" (organized by T. Kaper and A. Doelman), Snowbird, USA (2001-5)

60) 小林亮：「粒界のモデルと特異拡散方程式」、数理研研究会　臨界現象と微分方程式の解の分岐、京都大学 (2001-6)

61) Y. Nishiura: "Dynamics of interfaces for domain growth problems," Thematic Programme in Nonlinear Partial Differential Equationss -Phase Transitions Workshop-, The University of British Columbia, Canada (2001-7)

62) M. Iima, T. Yanagita: "An analysis of a two-dimensional flapping model," The 2nd Intl. Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis, Hirosaki, Japan (2001-7)

63) J. A. Warren, A. E. Lobkovsky and R. Kobayashi: "A Phase Field Model of the Premelting of Grain Boundaries in Pure Materials," ICCG-13/ICVGE-11, Kyoto, Japan (2001-8)

64) R. Kobayashi and H. Uesaka: "Model of the Pattern Formation in the Crystallization of Ascorbic Acid," ICCG-13/ICVGE-11, Kyoto, Japan (2001-8)

65) T. Yanagita and R. Kobayashi: "A numerical study of FitzHugh-Nagumoequations," Nonlinear Analysis and Convex Analysis, Hirosaki, Japan (2001-8)

66) Y. Nishiura: "Transient dynamics in dissipative systems," International Conference on Patterns and Waves -Mathematics and Nonlinear Chemistry, Lorentz Center, Leiden University, Netherlands (2001-9)

67) 小林亮：「グレインバウンダリのモデルとその数値計算」、日本応用数理学会2001年度年会　オーガナイズドセッション：現象の数値計算の最近の話題、九州大学 (2001-10)

68) Y. Nishiura: "Transient dynamics in infinite dimensional dynamics," Workshop on Travelling Waves: Theory and Applications, Kobe Institute, Japan (2001-10)

69) R. Kobayashi: "Pattern Formation in the Crystallization of Ascorbic Acid," Understanding of Singularities in non-equilibrium systems Workshop on Traveling Waves: Theory ans Applications, Kobe Institute, Japan (2001-10)

70) R. Kobayashi: "Modeling of Grain Structure Evolution and Singular Diffusivity," Sapporo Guest House Symposium on Mathematics-Image Processing and Differential Equations, Sapporo, Japan (2001-11)

71) 西浦廉政：「散逸系における遷移ダイナミクス」、研究集会　第2回「複雑な多谷ポテンシャルエネルギー面上で生起する動力学的諸問題」、奈良女子大(2001-11)

72) 西浦廉政：「Pattern formation on growing domain」、非線形問題に現れる特異性の解析'2001、関西セミナーハウス (2001-11)

73) 飯間信、柳田達雄：「Bifurcation of a two-dimensional symmetric flapping model」、NSC One-

day Workshop on "Complex dynamics in physical and biological systems"、札幌 (2001-11)

74) 小林亮：「フェーズフィールドモデル入門」、金属学会セミナー　パソコンで学ぶ材料工学、東京 (2001-12)

75) 小林亮：「アスコルビン酸の振動的成長について」、研究会：リーゼガング現象とそれに関連した沈殿形成、九州大学 (2001-12)

76) 柳田達雄、小林亮、菅野啓：「FitzHugh-Nagumo 系における共鳴現象 —— 不安定パルスで構成される安定パルストレイン」、盛岡応用数学小研究会、盛岡大学 (2001-12)

77) R. Kobayashi: "Pattern Formation in the Crystallization of Ascorbic Acid," Japan-Netherlands Joint Symposium on Crystal Growth: Theory and In-Situ Mesurements, JANE-2002, Sendai, Japan (2002-1)

78) 小林亮：「アスコルビン酸の結晶化におけるパターン形成について」、非線形非平衡現象を支配する特異性の解明：平成 13 年度公開シンポジウム、広島大学 (2002-2)

79) 小林亮：「真性粘菌の変形体におけるパターンと計算」、VBL 講演会、山口大学 (2002-2)

80) 小林亮：「変形体の体形変化の数理モデリング」、ワークショップ：粘菌のダイナミックな生命像を求めて、北海道大学 (2002-2)

81) 小林亮：「蒸発によって生じる縞模様」、ミニシンポジウム：Intrinsic 縞々学、北海道大学 (2002-3)

82) R. Kobayashi: "Patterns and Computation in the Amoeba-like Organism," Symposium on Cell Dynamics and Physiological Functions in Physarum, Sapporo, Japan (2002-3)

83) 小林亮：「粒界のモデルと特異拡散」、日本数学会 2002 年度年会特別講演、明治大学 (2002-3)

84) 小林亮、中垣俊之：「真性粘菌のパターンダイナミクスのモデリング」、応用数理学会：ワークショップ「自己組織化現象の数理モデルとシミュレーション」、慶応義塾大学 (2002-9)

85) 西浦廉政：「散逸系における粒子的解の散乱現象」、日本数学会、島根大学 (2002-9)

86) 小林亮：「結晶粒と粒界のフェーズフィールドモデル」、第 52 回理論　応用力学講演会、日本学術会議、東京 (2003-1)

87) 小林亮：「粒界運動のフェーズフィールドモデル」、研究会：材料科学におけるパターン形成の数理、広島大学 (2002-6)

88) Y. Nishiura: "On a stable double-heteroclinic-loop pulse of saddle-focus type", The 5-th Americas Conference on Differential Eqautions and Nonlinear Dynamics, Edmonton, Univ. of Alberta, Canada (2002-7)

89) 飯間信：「離散渦モデルを用いた 2 次元流体中における物体運動の解析」、盛岡応用数学小研究集会、盛岡 (2002-10)

90) 西浦廉政：「散逸系における局在パターンの分裂・合体・散乱」、ミニシンポジウムリズムと自己組織化の制御—分子シンクロニゼーションに基づく新規材料設計を目指して—、千歳市 (2002-11)

91) Y. Nishiura: "Strong interactions among particle-like solutions in dissipative systems", Dynamics of patterns in reaction-diffusion systems and the related topics, Kyoto Univ., Japan (2002-11)

92) Y. Nishiura: "On a stable double-heteroclinic-loop pulse of saddle-focus type arising in a 3-component reaction diffusion system", Workshop on Interfaces and Singularly Perturbed Interface Evolutions, Leipzig, Germany (2002-11)

93) Y. Nishiura: "Scattering of particle-like patterns in dissipative systems", Miniworkshop: Dynamics of Nonlinear Waves, Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach, Germany (2003-1)

94) 飯間信：「Rich Pelz が教えてくれたこと」、京都大学数理解析研究所短期共同研究集会　流体力学における Rich Pelz の貢献、京都 (2003-1)

95) 西浦廉政：「Scattering of particle-like patterns in dissipative systems」、第 2 回　KIT 自律機能性高分子研究会、京都工芸繊維大学 (2003-1)

96) 小林亮、中垣俊之、手老篤史：「真性粘菌変形体の運動に関する数理モデル」、基礎生物学研究所　研究会プログラム　生命科学における Informatics と Mathematics、岡崎 (2003-3)

97) 小林亮：「蒸発によって生じる縞模様の形成」、今話題の結晶成長のテーマ研究会、東京 (2003-3)

98) Y. Nishiura: "Separatrix organizer - A cornerstone of complex dynamics in dissipative systems -", The Sixth Japan-China Joint Seminar on Numerical Mathemayics, Tsukuba, Japan (2002-8)

99) 西浦廉政：「散逸系における粒子的解の散乱現象」、特別講義、名古屋大学物理学教室 (2002-9)

100) Y. Nishiura: "Scattering of particle-like patterns in dissipative systems", Workshop on Modelling and Analysis of Moving Boundaries, LEUCOREA, Wittenberg, Germany (2002-12)

101) Y. Nishiura: "Scattering of particle-like patterns in dissipative systems", Institutskolloquium, Max-Plank-Institut fur Mathematik in den Naturwissenschaften, Germany (2002-12)

4.6　シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）Y. Nishiura（電子情報処理部門）, I. Takagi（東北大

学）and E. Yanagida（東京大学）："International Conference on Asymptotics in Nonlinear Diffusive Systems towards the understanding of singularities in dissipative structures"（120名、Kawai Hall, Sendai, Tohoku University）（1997.7.28-8.1）

2）Y. Giga and R. Kobayashi（電子情報処理部門）："Sapporo Symposium on Anisotropic Effects in a Crystal Growth Problems and its Mathematical Analysis (SAM)"（60名、Centennial Hall (Hokkaido Univ.) and Keio Plaza Hotel）（1999.1.11-15）

3）I. Tsuda and Y. Nishiura（電子情報処理部門）："Conference on Utsurohi-yukumono（「うつろひゆくもの」）In memory of Masaya Yamaguti-"（60名、Shinkin-Kempo Kaikan（信金健保会館）, Sapporo）（1999.1.25-26）

4）Y. Nishiura and Y. Giga（電子情報処理部門）："Minisymposium on Dynamics of Interfaces and Singularities"（35名、Sapporo Guest House）（1999.11. 15-16）

5）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："Pacific Rim Dynamical System Conference"（450名、Maui）（2000.8.9-13）

6）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："Minisymposium on 'Towards the understanding of complex dynamics in dissipative systems"（30名、Maui）（2000.8.11）

7）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："Interfaces, Pulses, and Waves in Nonlinear Dissipative Systems"（60名、RIMS, Kyoto Univ.）（2000.8.28-31）

8）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："Sapporo Guest House Symposium on Mathematics 9 -Nonlinear diffusive equations and singular perturbations-"（30名、Sapporo Guest House）（2001.2.12）

9）T. Ueda, T. Nakagaki（電子機能素子部門）、Y. Nishiura, R. Kobayashi（電子情報処理部門）：NSC -Cell Info. Symposium on "Cell Dynamics And Physiological Functions In Physarum"（15名、北海道大学）（2002.3.25-26）

10）西浦廉政（電子情報処理部門）：NSC One-day Workshop on "Complex dynamics in physical and biological systems"（40名、北海道大学電子科学研究所）（2001.11.29）

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）西浦廉政（電子情報処理部門）、太田隆夫：〝散逸系におけるパターンダイナミクスの最近の発展〟（40名、広島大学）（1999.11.1-2）

2）西浦廉政（電子情報処理部門）：〝札幌ワークショップ2000 遷移ダイナミクスをめぐって〟（40名、北海道大学電子科学研究所）（2000.2.21-22）

3）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："NSC One Day Workshop on Nonlinear PDE's and Its Applications 2000-1"（30名、北海道大学電子科学研究所）（2000.2.22）

4）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："NSC One Day Workshop on Nonlinear PDE's and Its Applications 2000-2"（25名、北海道大学電子科学研究所）（2000.6.28）

5）Y. Nishiura（電子情報処理部門）："NSC One Day Workshop on Nonlinear PDE's and Its Applications 2000-3"（30名、北海道大学電子科学研究所）（2000.11.24）

6）上田哲男、中垣俊之（電子機能素子部門）、西浦廉政、小林亮（電子情報処理部門）：Cell Info. -NSC ワークショップ〝粘菌のダイナミックな生命像を求めて〟（15名、北海道大学）（2002.2.25-26）

7）西浦廉政（電子情報処理部門）：NSC Mini workshop "Mathematical Physiology and Related Topics"（30名、北海道大学電子科学研究所）（2001.10.18）

8）西浦廉政（電子情報処理部門）：〝NSC Workshop「非線形複雑時空パターン解析の数理的アプローチ〟（30名、北海道大学電子科学研究所）（2002.2.13-15）

9）小林亮（電子情報処理部門）：〝ミニシンポジウム：Intrinsic 縞々学〟（40名、北海道大学）（2002.3.18-19）

10）西森拓、柳田達雄、小西哲郎：「計算理論地形　小研究会　その1」、（20名、大阪府立大学（大阪））（2002.12.15）

11）西森拓、柳田達雄、小西哲郎：「計算理論地形　小研究会　その2」、（20名・中央大学（東京））（2003.3.19）

4.7　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）西浦廉政：重点、(2)、「高分子ブロック共重合体系にあらわれるメゾパターンへの数理的アプローチ」、800千円（1997）

2）西浦廉政：基盤B、一般(2)、「散逸系における無限次元遷移ダイナミクスの解明」、8,500千円（1997）

3）小林亮：基盤C、一般(2)、「有限系での相分離過程における弾性効果」、1,500千円（1997）

4）西浦廉政：萌芽、「複雑時空パターンの数理解析」、800千円（1997）

5）西浦廉政：基盤B、一般(2)「散逸系における無限次元遷移ダイナミクスの解明」、2,100千円（1998）

6）小林亮：基盤C、一般(2)、「有限系での相分離過程における弾性効果」、1,400千円（1998）

7）西浦廉政：萌芽、「複雑時空パターンの数理解析」、1,000千円（1998）

8）柳田達雄：奨励A、「相転移を伴う流体運動のカオス理論による普遍的性質の研究」、1,400千円（1998）

9）西浦廉政：特定領域B、(2)、「特異極限的手法による散逸系の時空間パターンの解明」、4,100千円（1999）
10）西浦廉政：基盤B、一般(2)「散逸系における無限次元遷移ダイナミクスの解明」2,600千円（1999）
11）小林亮：基盤C、一般(2)「有限系での相分離過程における弾性効果」800千円（1999）
12）西浦廉政：萌芽、「大域分岐解析及び特異極限法によるパターン選択原理の解明」、900千円（1999）
13）西浦廉政：特定領域B、(2)、「特異極限的手法による散逸系の時空間パターンの解明」5,100千円（2000）
14）西浦廉政：萌芽、「大域分岐解析及び特異極限法によるパターン選択原理の解明」1,100千円（2000）
15）柳田達雄：奨励A、「粉粒体分離の階層的モデル化によるメカニズムの解明」、1,200千円（2000）
16）飯間信：奨励A、「はばたき運動による揚力生成とその安定性の研究」、1,100千円（2000）
17）西浦廉政：特定領域B、(2)「特異極限的手法による散逸系の時空間パターンの解明」、4,700千円（2001）
18）西浦廉政：基盤B、一般(2)、「散逸系における大域分岐構造の幾何学と複雑時空パターン」12,200千円（2001～2002）
19）小林亮：基盤C、一般(2)、「再結晶過程のフェーズフィールドモデルに関する研究」3,300千円（2001～2002）
20）柳田達雄：奨励A、(2)、「粉粒体分離の階層的モデル化によるメカニズムの解明」1,000千円（2001）
21）飯間信：奨励A、(2)、「はばたき運動による揚力生成とその安定性の研究」、1,000千円（2001）
22）柳田達雄：若手研究B、「非線形・非平衡パターン形成現象に対する構成的な動力学手法の確立」1,200千円（2002）
23）西浦廉政：萌芽研究、「逐次分岐によるロバストな形態形成ダイナミクスの解明」、1,500千円（2002）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）下澤楯夫、西浦廉政、水波誠（電子情報処理部門）、河原剛一、栗城眞也、中村孝夫、魚住純、小林哲生（電子計測制御部門）、田村守（電子機能素子部門）：「神経回路網動作の非侵襲・高精度計測法に関する総合的研究」（1996～1997）
2）西浦廉政、小林亮（電子情報処理部門）、下村政嗣、居城邦治（電子機能素子部門）：「単分子膜における2次元デンドライト結晶成長のモデル化と機構解明」（1997～1998）
3）西浦廉政、小林亮（電子情報処理部門）、下村政嗣、カートハウス・オラフ（電子機能素子部門）：「メゾスコピックパターン形成機構の非平衡ダイナミクスによる解析」（1997～1998）
4）西浦廉政、柳田達夫（電子情報処理部門）、栗城真也、河原剛一、内貴猛、平田恵啓、竹内文也、山内芳子（電子計測制御部門）：「高温超伝導体SQUID計測による虚血心疾患に伴った拍動リズムゆらぎ解析」（2000～2002）
5）西浦廉政、小林亮（電子情報処理部門）、上田哲男、中垣俊之（電子機能素子部門）：「非線形化学ダイナミクスに基づく細胞インテリジェンスの発現」（2001～2003）
6）栗城眞也、河原剛一（電子計測制御部門）、西浦廉政（電子情報処理部門）、他6名：「高温超伝導体SQUID計測による虚血性心疾患に伴った拍動リズムゆらぎの解析」（2000～2002）
7）和田成生（電子計測制御部門）、小林亮（電子情報処理部門）、岩井俊昭、石井勝弘（電子計測開発施設）：「赤血球集合過程の理論解析とその実験的検証」（1999～2002）

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）西浦廉政（電子情報処理部門）、理化学研究所：「非平衡ダイナミクスに基づく散逸構造形成制御法の確立」（2000～2003年度）
2）飯間信（電子情報処理部門）：ノーステック財団：「昆虫飛翔における揚力生成機構解明のための基礎的研究」、400千円（2002年度）
3）飯間信（電子情報処理部門）：財団法人　住友財団：「柔らかい物体が流体と相互作用を起こして運動する系の研究」、300千円（2002～2003年度）

d．国際共同研究（代表者名、エージェンシー名、研究課題、経費、研究期間）

1）J. A. Warren、小林亮（電子情報処理部門）、エージェンシー：National Institute for Standards and Technology: “Modeling Solidification and Microstructure”、$8,500（1997～1998）
2）俣野博（東京大学大学院数理科学研究科）、西浦廉政（電子情報処理部門）、三村昌泰（広島大学大学院理学研究科）、D. Hilhorst, H. Berestycki, E. Logak, F. Merle、エージェンシー：日仏科学協力事業（共同研究）CNRS/パリ第11大学：「非線形拡散方程式に現れる界面と特異性の研究」、3,000千円（1999～2001）

g．その他（担当者名、機関名、研究題目、研究期間）

（COE関係）
1）芳賀永、小林亮（電子情報処理部門）、中垣俊之（電子機能素子部門）：21世紀COEプログラム「バイオとナノを融合する新生命科学拠点」：「ナノ力学走査型プローブ顕微鏡を用いた細胞システム挙動の実験的・理論的解析」、4,000千円（2002～2003年度）

4.9 受賞

1）西浦廉政：日本数学会賞秋季賞「散逸系における無限次元遷移ダイナミクスの解明」（日本数学会）（2002.9）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）西浦廉政：学術審議会専門委員（1998～2001）
2）西浦廉政：日本数学会メモワール（MSJ memoirs）編集委員（1999～2002.8.31）
3）西浦廉政：Hokkaido Mathematical Journal, Editor（1995.4.1～現在）
4）西浦廉政：Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Associate Editor（1997.4.1～現在）
5）飯間信：雑誌「物性研究」編集委員（2001.4.1～現在）
6）小林亮：日本機械工業連合会ナノテクノロジー材料開発調査研究委員会委員（2002 年度）
7）西浦廉政：Physica D, Editor（2002.4.1～現在）

b．国内外の学会の主要役職

1）西浦廉政：国際会議 Int. Conf on Asymptotis in Nonlinear Diffusive Systems towards the understanding of singularities in dissipative structures（仙台、東北大学、組織委員）（1997.7）
2）西浦廉政：国際会議 Pacific Rim Dynamical Systems Conference, SIAM（Maui, Hawaii,組織委員）（2000.8）
3）西浦廉政：国際会議 Int. Conf on Frontier of Applied Analysis- Fluid Dynamics and Pattern Formation-（Acros Fukuoka, Fukuoka,総務）（2001.12）
4）西浦廉政：Hokkaido Mathematical Journal, Editor（2001）

c．新聞・テレビ等の報道

1）下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：科学新聞「ピラミッド型発光素子開発」（2002.4.26）
2）西浦廉政：北海道新聞「日本数学会秋季賞受賞」(2002.9.26)
3）下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：科学新聞「ピラミッド型発光素子開発」（2002.4.26）
4）西浦廉政：NHK 島根「日本数学会秋季賞受賞」(2002.9.26)

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）上田肇一：回転する管の中で起きる砂・グラスビーズの分離について（1997）
2）亀田健司：進行波解の速度選択における臨界安定性仮説（1997）
3）大山義仁：多重振り子の運動とエネルギー分布(1998)
4）瀬川知彦：レスリーモデルを用いた人口予測（1998）
5）永宮正規：パランシングロボットの TD 誤差学習と Actor-Critic による制御（1998）
6）村山弘之：離散化された自己複製パターンにおけるパルスの挙動（1998）
7）斎藤尚史：ハミルトン系の数値解法ー多重振り子の解析をめざしてー(1999)
8）佐々木務行：重力下における薄板の挙動に対する流体力学的考察（1999）
9）上坂美花：アスコルビン酸の結晶化におけるパターン形成（2001）
10）斎藤伸一：アクター・クリティック学習法を用いたバランシングロボットの制御（2001）
11）韓松：表面化学反応における複雑時空パターンの解析（2001）
12）横田一志：３種反応拡散系におけるパルス解及び時空間自己相似パターンについて（2001）
13）久保田一志：ショアの因数分解アリゴリズムのシミュレーション（2002）
14）手老篤史：非線形結合振動系による細胞行動のシミュレーション（2002）
15）菅野啓：フィッツヒュー南雲方程式における崩壊パルスの解析、及びその数値解法について（2002）

・博士学位

1）上山大信：Dynamics of self-replicating patterns in the one-dimensional Gray-Scott model（1998）
2）上田肇一：A Manner of Splitting in Dissipative Systems（2000）
3）横井研介：Structure Formation in Circular Hydraulic Jumps:Numerical Studies of Largely Deformed Free-surface Flows（2000）

e．大学院担当講義科目

1）複雑システム論（1997～2000）
2）解析学特別講義 3（1999～2000）
3）数理学特別講義 1（1999～2000）
4）数理科学講義 6（1999～2001）
5）数理・計算理論（1999～2000）
6）大学院先端科学特別講義（1999～2000）
7）計算数学 4（2002.10.1～2003.3.31）
8）数理科学講義 2（2002.4.1～2002.9.30）
9）計算数学続論 2（2002.4.1～2002.9.30）

神経情報研究分野

教授　下澤楯夫（北大院、理博、1988.10～）
助教授　水波　誠（九大院、理博、1993.4～2003.3）
助手　馬場欣哉（岡山大院、学博、1991.4～2000.9）
西野浩史（岡山大院、学博、2000.10～）
青沼仁志（北大院、理博、2001.1～）
技官　土田義和
講師　西野浩史（岡山大院、学博、1996.9～1998.3）
（研究機関研究員）
松本幸久（岡山大院、学博、1998.10～2000.3）
（研究機関研究員）

院生
・平成9－14年度
博士課程
岡田龍一、佐倉　緑、村上　準、山崎吉之、余野央行
修士課程
山口一郎、塚田　慎、土屋博行、木立智英、小林夕子、山下新吾、渡部忠洋、余野央行、石田浩介、本郷秀紀

1．研究目的

神経系は、自然が創り上げた情報通信装置である。この地球上には、長い変異と淘汰を通して、二通りの脳が出現した。一つは、我々脊椎動物の、10^{12}個以上の神経細胞を使った巨大脳（Megalobrain）、もう一つは高々10^6個の神経細胞からなる昆虫などの微小脳（Microbrain）である。昆虫も、我々と同じ物理世界を生き抜いており、その脳は連合学習やコミュニケーションの能力を持ち、ミツバチのように社会構造すら作り出す。

微小脳の研究は、この物理世界に可能で、おそらく必然な「もう一つの情報体」の設計原理を教えてくれる。物理学/化学/数学は、「この世界は何で出来ているか」を教えてくれる。「この世界にはどんな設計が在り得るか」を教えてくれるのは、生物学である。本研究分野は、昆虫の神経系の構造と動作を細胞レベルで調べ、神経細胞から脳を創り上げる根本原理の解明を目指している。

2．研究成果

・平成9－10年度

(a)　昆虫の機械受容器の一つ、コオロギの気流感覚毛の運動をレーザドプラ速度計で測り、その機械設計を決定した。Stokesの粘性理論を適用して、感覚毛を支えるバネの強さ、内部抵抗、毛の慣性能率を逆算し、これらの機械量が長さと明確なアロメトリーを持ち、サイズの異なる感覚毛全体で二桁以上の周波数範囲をカバーする感覚器アレイを構成することを明らかにした[1-3]（図1）。

(b)　コオロギ気流感覚細胞のエネルギー閾値は、常温における分子1個の熱揺動エネルギーkT（$\approx 4\times10^{-21}$J）程度であることを明らかにした。気流感覚細胞が反応する最低の刺激強度と感覚毛を支えるバネの内部抵抗から、刺激の一周期に空気から感覚細胞へ渡される機械エネルギーを求めた。機械受容器は、フォトン1個を検出できる視細胞よりさらに100倍のエネルギー感度を持ち、熱雑音に曝されていることを示した[4]。

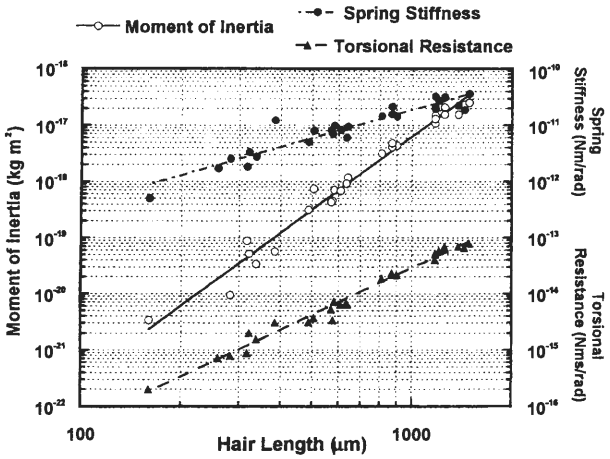


図1．コオロギ気流感覚毛の機械量の長さ依存性[1]。一つの母細胞から分かれた3つの娘細胞、すなわち毛を作る細胞、ばねを作る細胞、機械エネルギーを吸収する感覚細胞、が統一のとれた設計プランに従って感覚毛の機能を実現することがわかる。

(c)　コオロギ気流感覚細胞は、分子の熱揺動に由来する内部雑音を利用して検出感度を向上させ、閾値下の微弱な信号を検出できることを明らかにした。二つの気流感覚細胞を同時に細胞内記録し、パルス発火の揺らぎの相関を調べた。感覚細胞は発火閾値を内部雑音より高く設定して内部雑音への応答をさけているが、雑音のエネルギーによって確率的に閾値を越えて独立に発火する。閾値下であっても共通した信号があると、中枢に送られるパルス列の発火タイミングの変動に共分散成分がのるStochastic resonanceの状態にあることを示した[5]。

(d)　昆虫の脳にはキノコ体とよばれる高次連合中枢がある。ワモンゴキブリを材料とした脳の微小破壊実験と新たに考案した学習実験パラダイムにより、昆虫のキノコ体が場所記憶に関わることを始めて明らかにした[6]。さらに、自由行動中のワモンゴキブリのキノコ体出力ニューロンの活動を埋め込みワイヤ電極法を用いて解析し、出力ニューロンのなかに特定の行動の開始に先行して発火するものを見出して、キノコ体が運動の高次制御に関わることを明らかにした[7]。

(e)　ワモンゴキブリのキノコ体の細胞構築を渡銀染色法およびゴルジ染色法で詳細に調べ、キノコ体が約30の構造単位（モジュール）から成ることを明らかにした（図2）[8,9]。

また、キノコ体を構成する内在ニューロンには4つのサブクラスがありそれぞれ別々のモジュールを形成していることも明らかにした[10]。さらに細胞内記録・染色法、コバルト注入法、免疫組織化学法により、キノコ体の入力ニューロンや出力ニューロンを同定した[11-13]。

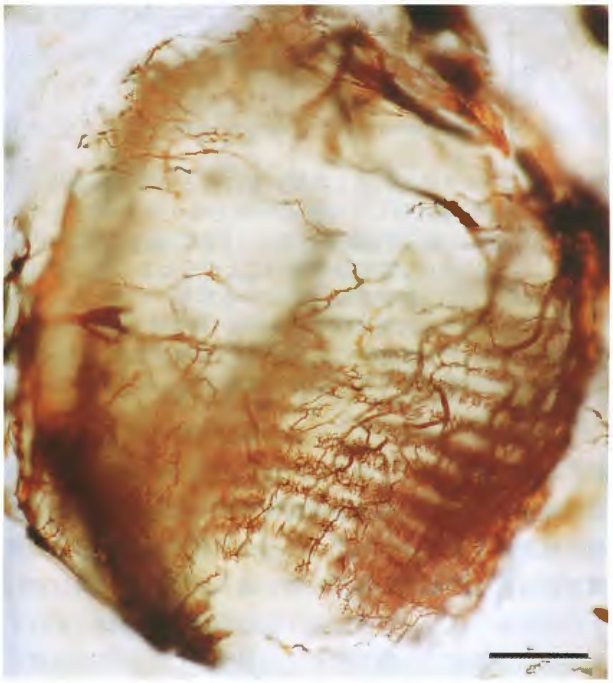


図2．ワモンゴキブリキノコ体 α 葉（連合学習や行動制御の中枢）のスラブ構造（ゴルジ染色）。20万本の繊維の束（透明になっている）の輪切りの中に、出力ニューロンがスラブの幅に対応して分節化（モジュール）した樹状突起を広げて信号を集める[10]。

(f)　コオロギの腹部末端にある一対の感覚器官（尾葉）への気流刺激に対して引き起こされる行動を観察し、強い刺激に対しては逃避行動が、弱い刺激に対しては無視、攻撃、逃避などの行動が特定の確率で出現することを明らかにした[14]。

・平成11－12年度

(g)　コオロギおよびゴキブリの匂いと報酬（砂糖水）や罰（塩水）との連合学習能力を古典的条件付けおよびオペラント条件付け実験（図3）を行って調べたところ、彼らが非常に高い匂い学習能力を持つことが明らかになった。ゴキブリでは一回の訓練で成立した記憶は少なくとも1日保持されること、3回の訓練で成立した記憶は少なくとも1週間保持されることが判った。またコオロギでは、幼虫時に成立した記憶は生涯保持されるが、この記憶はその後の再訓練によって容易に書き換わること、7組の匂いを同時に記憶できること、明暗の条件の違いに応じて異なる匂いを報酬と連合させる状況依存的な学習能力があること、などが明らかになった。ゴキブリおよびコオロギは、脳での情報処理の電気生理学的な解析に有利な材料であるので、これらの昆虫が高度かつ柔軟な匂い記憶操作・処理の能力を持つことを示した本研究は、昆虫の匂い認知の神経機構の解明に新たな展開をもたらす契機となるものと言える。

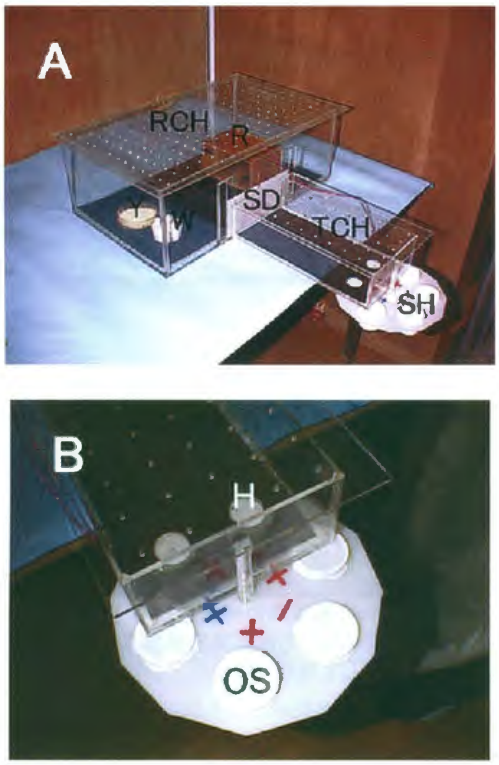


図3．ゴキブリの匂い学習訓練および匂い嗜好性テストのための装置。A：装置には居住室（RH）と実験室（TCH）があり、ドア（SD）で仕切られている。実験室には1対の穴（H）があり、その下に、匂いをしみ込ませたろ紙を入れてガーゼでふたをした容器を置いて、匂い源（OS）とする。容器は回転盤（SH）にはめ込まれており、回転盤をまわして6個の容器のうちの2個を選択して提示する。B：訓練時にはガーゼに砂糖水または食塩水をしみ込ませ、報酬または罰とする。匂い嗜好性テストの際には、匂いのみを提示する。

(h)　ゴキブリの匂い識別能力を、匂いと餌の連合学習実験により調べた。匂い物質には自然界に豊富に存在する直鎖アルコールを用いた。炭素数の異なる3種の直鎖アルコール、同炭素数で構造が異なる3種のアルコール、それらの混合物、同一種アルコールの10倍づつ濃度が違う3つの溶液、についての識別能力を調べた結果、ゴキブリはそれらのほぼ全てに於いて識別が可能であり、ヒトに劣らない優れた匂い識別能力を持つことが明らかになった。少数のニューロンから構成される小さな脳で、そのような優れた匂い識別能力が実現する仕組みを明らかにすることは、大変興味深い。

(i)　昆虫の脳の基本配線を明らかにするための研究の一環として、ゴキブリの脳から胸部神経節に下降するニューロンの数やその樹状突起の脳内分布を調べた。下降性ニューロンは少なくとも210対あった。これらニューロンの樹状突起の脳内分布を詳細に解析し、その結果を従来の研究成果と総合した結果、昆虫の脳の感覚中枢から胸部神経節の

運動中枢に至る神経回路は全体として階層性と並列・分散性を合わせ持つことが明らかになった。種々の並列回路は様々な姿勢制御・逃避などの反射的行動や複雑な本能行動を担い、並列経路を階層的に修飾する高次中枢からの経路は経験による行動の変化を担うと結論づけられた（図４）。これらは昆虫の脳の基本設計を解明するための重要な発見である。

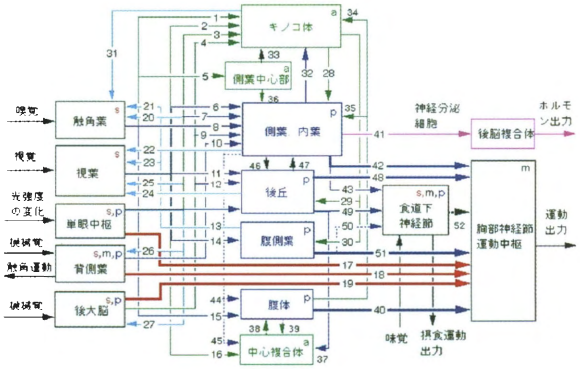


図４．ゴキブリの脳の基本配線。これまでに明らかになったゴキブリの脳の各領域間の神経接続を１つの図にまとめた。脳の感覚中枢から胸部神経節の運動中枢に至る神経回路は全体として階層性と並列・分散性を合わせ持つことがわかる。

(j)　昆虫の機械受容器の一つ、コオロギの気流感覚細胞は常温の分子１個の熱揺動エネルギーkT（約4×10^{-12}ジュール）程度を検出していることを示し、これらの感覚細胞は熱雑音に曝されながら動作していることを明らかにした。気流に対する気流感覚毛の動きをレーザードプラー速度計によって測定し、ストークスの粘性理論を適用して感覚毛を支えるバネの強さと内部抵抗を決定し、気流感覚細胞が反応する最低の気流刺激強度のときに空気から感覚細胞へ渡される機械エネルギーを求めたところ、１周期あたりkTの程度であった。このことから、この感覚細胞が刺激に応答して中枢へ送るパルス列には、内部の熱雑音に由来する独立な揺らぎがあると予測し、２つの神経細胞からの同時細胞内記録によって、無相関なパルス発射揺らぎを実証した（図５）。

(k)　コオロギの気流感覚細胞の情報伝送速度（bits/sec）を測定した。ガウス白色雑音波形の気流刺激を繰り返し与え、感覚神経細胞の応答パルス列の揺らぎから、パルス符号化器としてのコヒーレンスを測定した結果、感覚神経細胞は高々0.3程度のコヒーレンスしか持たない、内部雑音の大きなパルス符号化器であることを明らかにした。神経１本は、3 kHz 程の帯域幅を持つものの、高々400 bits/sec の情報伝送速度しか持たず、神経パルス１発は平均して３bits 程度の情報量を担っていることを明らかにした。この測定結果は、神経細胞は物理的に回避不可能な熱雑音に直面しているが、それぞれの細胞の熱雑音を Stochastic Sampling の種として用いる一種の周波数拡散変調装置として

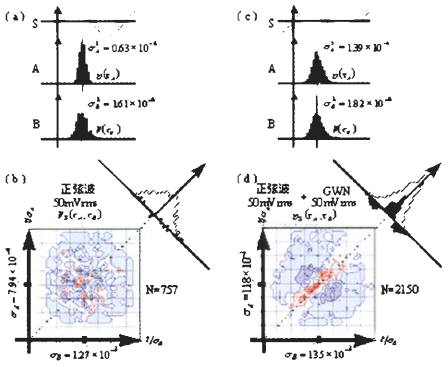


図５．神経パルス時系列の２次統計量に載る情報：閾値付近の正弦波刺激に対して細胞ＡもＢも発火時刻が揺らぐ(a)が、２つの揺らぎの結合確率(b)に相関は無く、細胞は内部に互いに独立な雑音源を持つことが分かる。同じ正弦波刺激いガウス雑音波形（GWN）を共存させる(c)と、発火時刻の揺らぎの結合確率に共分散（対角線上の尾根）が表われ(d)、２つの細胞に共通な外部信号は双方のパルス発火の相対時刻の２次統計量に情報表現されていることが分かる。

動作していること、平均自由行程以上はなれた細胞の熱雑音は無相関であり、並列伝送路を構成して加算すれば、情報伝送速度を上げうること、これが神経系が繊維の束で構成される究極的な原理になっていること、を明らかにした。

・平成 13 年度

(l)　コオロギ気流感覚器の機械的構造と感覚細胞の気流への応答を計測し、分子熱雑音限界のエネルギー感度を持つ機械感覚細胞の刺激受容機構を解明するため受容部位の熱揺動領域の力学的計測を行った。光学顕微鏡を改造して、感覚毛のレーザー照明強拡大像を４分割受光素子上に結ばせたブラウン運動計測装置を製作した（図６）。気流感覚毛のブラウン運動を光学的に測定し、パワースペクトルから受容部の機械的性質を推定した。刺激受容部位におけるエネルギー変換は、気流感覚器の機械模型のエネルギー吸収抵抗 R として表現される。ブラウン運動のパワースペクトルから推定された全抵抗は、R が気流・感覚毛間の粘性摩擦抵抗とほぼ同じ値をもつことが明らかとなり、感覚毛の

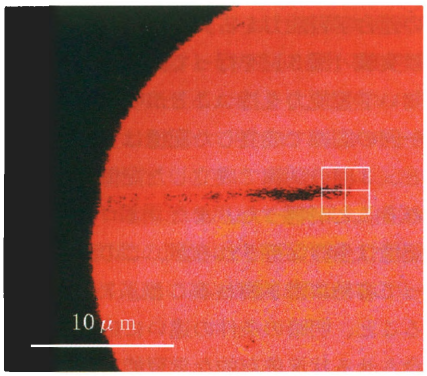


図６．光学顕微鏡を改造して作ったブラウン運動計測装置でナノメートルオーダーの気流感覚毛のブラウン運動を光学的に測定した。気流感覚毛先端部の強拡大像（×900）と４分割フォトダイオードアレイの測定領域（白四角）。

刺激受容部位は気流の持つエネルギーを最も効率よく取り込めるようなインピーダンス整合状態になっていることが明らかとなった。

一方、情報機械としての感覚細胞を解明するため感覚細胞が運ぶ情報、感覚細胞が介在神経に伝える情報量の定量化を試みた。中枢の介在神経から記録をとり、閾値付近の気流刺激への応答から、感覚細胞から介在神経への情報伝送量を測定し、コオロギの気流感覚細胞が運ぶ情報量はスパイク1つ当たり2～4 bitsで、入力感覚繊維1本あたりの情報量はおよそ300 bits/secであることを示した。感覚細胞がスパイク1個を発射するには刺激から数 kT のエネルギーを得るだけでよい事が以前の計測からわかっている。従って、感覚細胞は1 bitの情報量を得るには最低0.7 kT のエネルギー散逸を必要とするという熱力学上の制限に極めて近い動作をしていることがわかった。昆虫の機械受容器は熱力学的な究極感度で動作し熱雑音に直面し、熱雑音のエネルギーと無相関性を逆説的に利用してさらに微弱な信号を検出する中枢機構が進化したことが示唆された。

(m) 昆虫で初めて温度・湿度情報を運ぶ介在神経を同定した。これまでゴキブリの触角表面には冷、湿度、乾燥受容のために特殊化した形態を持つ三種類の受容器が同定されている。受容器内部には温・湿度変化によって伸び縮みする物質があり、この変位により感覚細胞が機械的な刺激を受け、興奮する。これらの軸索は、感覚モダリティーごとに触角葉(触角の一次感覚中枢)の背側にある糸球体のセットに終末する(図7)。触角に0.5度前後の温度変化、5％前後の湿度変化を持つ空気流を与え、これらの刺激に応じる細胞を探索したところ、冷・湿・乾受容器の軸索終末領域に限局した樹状突起を持つ介在神経を各5例ずつ同定することができた。これらは各感覚刺激に対して興奮性の応答を示すが、匂い刺激に対しても抑制性の応答を示した。温・湿度介在神経の終末領域は匂い情報を運ぶ介在神経の終末領域とは隔てられていたが両者は隣接していた(図7)。これは脳内には温・湿度情報を運ぶ専用の神経経路が存在するが、それは匂い情報の処理システムと緊密に関係しあっていることを示している。昆虫は体積に対して体表面積が広いため、頻繁な水分の摂取や生存に適した温度の選択は死活問題であり、空気中のわずかな温・湿度変化を捉えるために匂い情報処理と似たアルゴリズムを採用しているのではないかと考えられる。このことは我々哺乳類の温・湿度情報が体性感覚の一部として処理され、痛覚や触覚に類似した感覚として知覚されることとは対照的である。

(n) 一酸化窒素(NO)は、合成酵素によりアルギニンから合成され、標的細胞の可溶性グアニル酸シクラーゼを活性化することでセカンドメッセンジャーcGMPの濃度を上昇させる。中枢神経系で、NOは神経の可塑性に関与すると考えられているが詳細は未だによくわかっていない。ザリガニやコオロギの微小脳を実験材料に使う事で脊椎動物の脳神経系では実現が難しい実験が可能になり、NOの役割を細胞レベル、行動レベルで詳細に解析できる。微小脳におけるNOの合成細胞と標的細胞の局在を突き止めるためNDAPH-diaphorase組織化学染色法によりNO産生細胞を、cGMP免疫組織化学染色法で標的細胞を染色したところ、コオロギとザリガニの脳ではどちらも匂い情報処理や視覚情報処理に関与する領域がよく染色された(図8)。この事は、NOが脳における匂い情報処理や視覚情報処理に深く関与する事を示唆している。

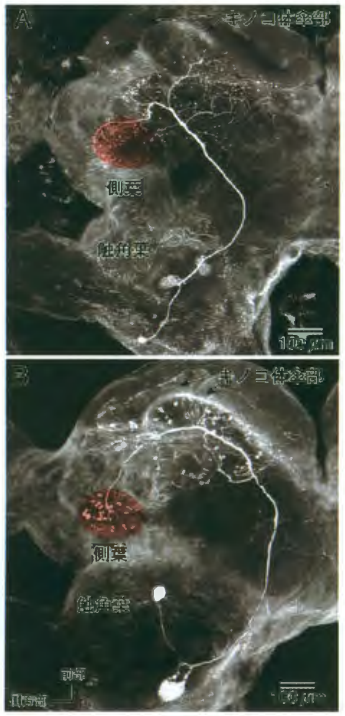


図7．ゴキブリの脳内の湿度情報を運ぶ介在神経(A)と匂い情報を運ぶ介在神経(B)の共焦点レーザー顕微鏡写真。湿度情報を運ぶ介在神経は2つの糸球体に樹状突起を伸ばすのが特徴である。

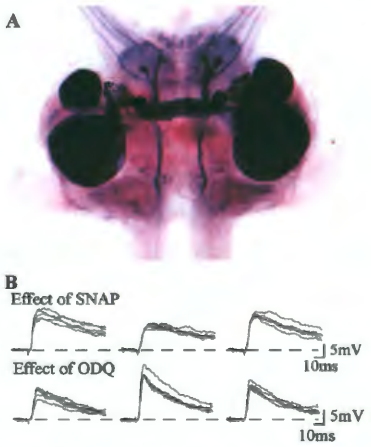


図8．(A)ザリガニ脳におけるNO産生細胞の局在。(B)ザリガニの介在神経のNO供与剤(SNAP)と可溶性グアニル酸シクラーゼ阻害剤(ODQ)に対する応答。神経伝達はNO、cGMPにより抑制性の修飾を受けている。

本研究室では、これまでにコオロギは匂いと報酬（水）や罰（塩水）との連合学習能力を持つことを突き止めている。キノコ体は昆虫の匂い学習の場と考えられており、組織化学の実験からNO産生細胞が局在していることがわかった。コオロギの学習や記憶にNOが関与するか確かめるため薬理行動学的に調べた。予めNO合成酵素の阻害剤（L-NAME）や可溶性グアニル酸シクラーゼの阻害剤（ODQ）を頭部に微量投与した後、学習行動実験をしたところ、コオロギは匂いの識別と、匂いの学習はする事ができ、短期間の記憶も可能であったが、本来なら数日続くはずの長期記憶が阻害された。このことから、NOは記憶成立過程において短期から長期記憶に移行する段階で重要な役割を担っていることが判明した。

・平成14年度

(a)　昆虫の機械受容器は、常温の熱遥動エネルギーk_BT（≈4×10^{-21}J、可視光フォトンのエネルギーの1/100）をも検出できる最高感度の刺激受容系であるが、機械エネルギーが感覚細胞の受容器電位に変換される仕組み、特にその初期過程は解明されていない。コオロギの気流感覚器を実験材料に選び、分子熱雑音限界でのエネルギー変換機構解明の手がかりを得る目的で受容部位の力学計測、特に熱遥動領域の計測に取り組んだ。ブラウン運動に近いレベルの微弱な機械刺激を気流感覚毛に与えたときの感覚細胞の膜電流応答を計測した。ピエゾに取り付けられたチップ電極を気流感覚毛に被せ、チップ電極をナノメートル領域で動かし、ピエゾで与えた機械刺激の大きさと、機械刺激に対する気流感覚細胞の膜電流応答の大きさの関係を調べることで気流感覚細胞でのエネルギー増幅の神経機構を解析した。長さ1000 μmの気流感覚毛の先端がブラウン運動によって動く大きさは、約14 nmであることは既に解析済みである。長さ約1000 μmの気流感覚毛の先端を切除し根元から100 μmの部分を10 nm動かすのは、切除していない長さ1000 μmの気流感覚毛の先端を100 nm動かすことに相当する（図9）。先端を切除した気流感覚毛を10 nmから100 nmの範囲で動かしたことに対する気流感覚細胞の膜電流応答を計測することに成功し、機械エネルギーが感覚細胞の受容器電位に変換される仕組み解明の手がかりを得た。

感覚細胞の熱雑音感受性は進化がもたらした結果でない。観測装置である細胞が、かつて低かった感度を上げて検出限界を熱雑音領域に近づけても、熱雑音によって引き起こされる不規則な応答は観測装置としての性能を低下させる効果しか与えない。従って、感覚細胞の熱雑音感受性は、あとで獲得した適応ではなく、はじめから逃れることの出来ない拘束であったと考えざるを得ない。この、細胞である限り逃れることの出来ない熱雑音感受性が、神経細胞の情報伝送性能を低く制限している。気流感覚細胞は外部信号の観測装置であるにもかかわらず、熱雑音のため、その信号対雑音比は0.1と極めて低い。しかし、観測に要するエントロピーコストは、およそ1 k_BT[Joule/bit]と統

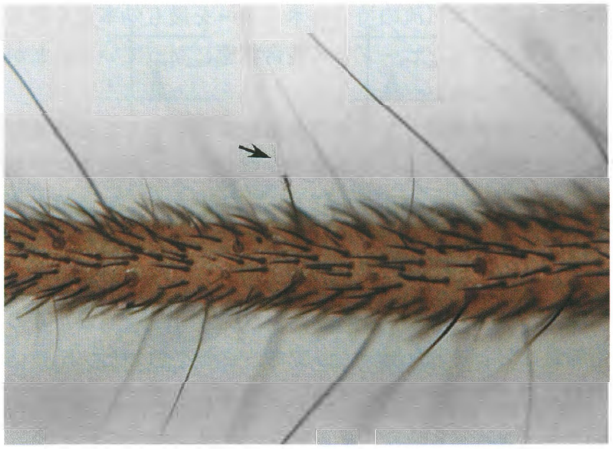


図9．コオロギの気流感覚毛にチップ電極を装着しナノメートルオーダーで気流感覚毛を動かして刺激したときの感覚細胞の応答を計測した。矢印は気流感覚毛を根元から約100 μmのところで切除しチップ電極を装着しているところを示す。

計熱力学上の理論限界0.7 k_BTに近い。熱雑音感受性への拘束の下での非定常な環境への適応は情報伝送性能増大の向きの淘汰圧として働き、生物の多細胞化（加算平均による信号対雑音比の改善）を促し、神経系では並列伝送構造による加算平均化が共通に進化した。

熱雑音感受性は、生命の起源に遡る。生命の起源は、分子による他の分子の認識の連鎖すなわちエネルギーの情報への変換にある。生命誕生直前の原始のスープと生命誕生直後の違いは、情報（構造）の有無にある。生命誕生時の原始のスープで利用可能なエネルギーは、熱平衡における揺らぎ幅k_BTの程度である。この、k_BTの程度のエネルギーを観測して情報（秩序構造としての負のエントロピー）に変換した分だけ、僅かに熱平衡から外れた非平衡系が生命である。

ここ数年にわたる研究成果によって、神経系の並列構造と生命の起源に関する上記の仮説を実証することが出来た。

(b)　節足動物の神経系には一酸化窒素産（NO）生細胞および標的細胞が存在することが組織化学実験から明らかになった。NOは合成酵素（NOS）の活性でアルギニンから合成される。合成されたNOは拡散により標的細胞の可溶性グアニル酸シクラーゼ（sGC）を活性化し、標的細胞内のcGMP濃度を上昇させる（図10）。ザリガニの神経系では、NO-cGMPシグナルは特定の神経細胞において伝達物質の放出を修飾することがわかっている。また、コオロギの匂い学習の成立過程において、短期から長期の記憶の成立に重要であることがわかった。しかし、どの程度の濃度のNOによりcGMPがどの程度合成されているのかは明らかではなかった。まず、コオロギの脳にNOSを持つ細胞が存在するか確認するため、anti-uNOSを使いウェスタンブロッティング法を試みたところ、NO合成酵素は約130 kDaのタンパク質であることが判明した。次に、NOにより蓄積されるコオロギ脳内のcGMPの濃度を酵素抗体測

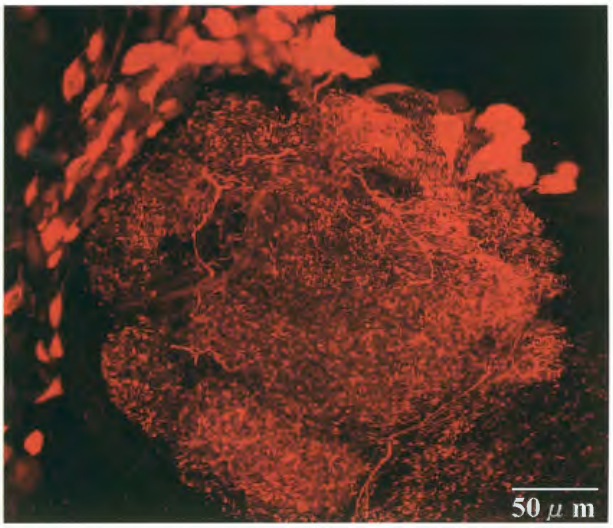


図10. コオロギ脳の触角葉における一酸化窒素誘導性のcGMP抗体染色。一酸化窒素供与剤NOR 3により可溶性グアニル酸シクラーゼを活性化させたときに細胞内のcGMPレベルが上昇した細胞。

定法（ELISA法）により計測した。単離した脳をNO供与剤NOR 3で15分間刺激するとcGMP蓄積量は濃度依存的に増加し、1 μMのNOR 3で約75%増加した。ところが、10 μM以上の高濃度のNOR 3で刺激すると逆にcGMP濃度は減少した。一方、sGC阻害剤ODQ存在下で処理すると逆に40%減少した。これらの結果から、昆虫の脳内では、常に一定濃度のNOが放出され、cGMPが蓄積されていて、cGMPの濃度が変化することで伝達物質の放出量の調節や神経の可塑的な性質に関わる細胞の生理活性を調節していることが示唆された。

(c) 動物が示すジャンプ、飛翔、歩行といった多様な運動の神経基盤については多くの知見の蓄積があるが、不動状態がどのような神経機構により制御されているのかについては不明な点が多い。動物の中には拘束されると突然抵抗するのをやめて凍りついたように身動きひとつしなくなるものがおり、この奇妙な不動状態は通俗的には〝死にまね〟と呼ばれている。死にまね中の動物は休息中とは明らかに異なる独特の筋肉の硬直状態を示すが、外力によって自由な姿勢をとらせることのできる柔軟さも持ち合わせている。コオロギをモデルとして死にまねを特徴づける運動ニューロンの活動を明らかにした。死にまね中には肢の脛節がほぼ完全に屈曲した状態で保持されるため、脛節屈筋を支配する運動ニューロン（図11）から非拘束条件下での細胞外記録を行った。その結果、筋収縮をひきおこす興奮性運動ニューロンについては大きなニューロンの活動は全て停止し（図11、緑色のニューロン）、姿勢保持にあずかる小さなニューロン（図11、赤色のニューロン）の活動のみが持続していることがわかった。その活動は静止個体のそれよりもむしろ低いレベルで維持されていた。一方で、抑制性運動ニューロンの活動は強く抑制されていた。つまり、死にまねを特徴づける筋肉の柔軟性は興奮性ニューロンによってつくられる筋収縮そのものが弱いこと、筋肉の固さは抑制性ニューロンの抑制により、筋緊張が保持されることによりつくられると結論づけられた。

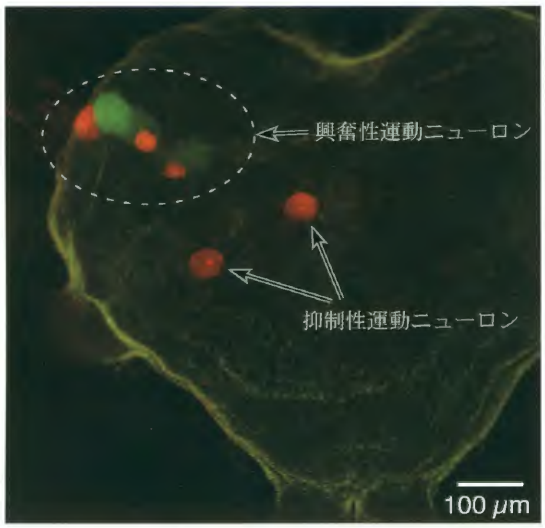


図11. コオロギの後胸神経節に由来する脛節屈筋運動ニューロン群。速筋を支配するニューロンはfluorescein（緑色）で、遅筋を支配するニューロンはrohdamine（赤）で標識されている。

3．今後の研究の展望・将来計画

節足動物の脳神経系の基本設計を解明する上で我々は嗅覚情報の処理機構に着目してきた。外界に無限に存在する匂いを識別、記憶するには他の感覚モダリティーの処理とは異なり、高度に発達した神経システムを必要とすることが脊椎動物での研究からも明らかである。我々は、これまでにたかだか1 mm四方の小さな脳しか持たない昆虫が優れた匂い識別、学習能力を持つこと、昆虫脳内の最高次中枢とされるキノコ体は解剖学的には匂い情報を処理するために特化していることを明らかにしてきた。今後は匂いの質、量、濃度といった情報が階層的に処理されてゆく過程でどのようにコードされているのかを同定可能な単一細胞のレベルで解析する。また、匂い学習や記憶などの可塑的な性質に関与する一酸化窒素の役割を電気生理学的、薬理学的方法で解析を進める。

神経系の構造と動作の基本原理には、熱雑音（熱揺動）が深く関っていることが明らかになってきた。この事は神経系がなぜ学習や可塑性など柔らかい動作ができるのか、なぜ進化の上でかくも多様な神経系が可能であったのか、といった極めて生物学的な現象の基本的理解へ導いてくれる。すべては300 Kの熱平衡に近い非平衡系という細胞および生命の起源にまつわる、熱雑音に曝されて存続し続けた計測・通信系として理解すべきである。雑音に満ちたこの世界が創り上げた情報通信系の設計原理を、物理的な実測に基づいて議論を進めるには、光を用いたナノメートル領域の計測や、情報や信号の確率過程論的考察など、所内外の他研究分野との共同研究を強める必要があり、また小型高密度化の進む次世代電子情報ディバイスの開発に熱雑

音を手なづけた生物系の原理を応用する学際研究を展開すべきである。

4．資料

4.1 学術論文

1) Shimozawa, T., Kumagai, T. and Baba, Y.: "Structural scaling and functional design of the cercal wind-receptor hairs of cricket", *J. Comp. Physiol. A*, 183: 171-186 (1998)*

2) Kumagai, T., Shimozawa, T. and Baba Y.: "Mobilities of the cercal wind-receptor hairs of the cricket, Gryllus bimaculatus", *J. Comp. Physiol. A*, 183: 7-21 (1998)*

3) Kumagai, T., Shimozawa, T. and Baba, Y.: "The shape of wind-receptor hairs of the cricket and cockroach", *J. Comp. Physiol. A*, 183: 187-192 (1998)*

4) 下澤楯夫、村上準：「昆虫の神経系は熱雑音をも利用して感度を上げている」、『電子科学研究』6：85-89(1998)

5) 村上準、熊谷恒子、下澤楯夫：「昆虫気流感覚細胞の感度向上に寄与する内部雑音の独立性」、『電子情報通信学会技術報告』、MBE 97-149：43-50 (1998)

6) Mizunami M., Weibrecht J. M. and Strausfeld N.J.: "Mushroom bodies of the cockroach: Their participation in place memory", *J. Comp. Neurol*. 402: 520-537 (1998)*

7) Mizunami M., Okada R., Li Y. and Strausfeld N. J.: "Mushroom bodies of the cockroach: The activity and identities of neurons recorded in freely moving animals", *J. Comp. Neurol*. 402: 501-519 (1998)*

8) Mizunami M., Iwasaki M., Okada R. and Nishikawa M.: "Topography of modular subunits in the mushroom bodies of the cockroach", *J. Comp. Neurol*. 399: 153-161 (1998)*

9) Mizunami M., Iwasaki M., Okada R. and Nishikawa M.: "Topography of four classes of Kenyon cells in the mushroom bodies of the cockroach", *J. Comp. Neurol*. 399: 162-175 (1998)*

10) Mizunami M., Iwasaki M., Nishikawa M. and Okada R.: "Modular structures in the mushroom body of the cockroach", *Neurosci. Lett*. 229: 153-156 (1997)*

11) Nishino H. and Mizunami M.: "Giant input neurons of the mushroom body: intracellular recording and staining in the cockroach", *Neurosci. Lett*. 246: 57-60 (1998)*

12) Nishikawa M., Nishino H., Mizunami M. and Yokohari F.: "Function-specific distribution patterns of axon terminals of input neurons in the calyces of the mushroom body of the cockroach, Periplaneta americana", *Neurosci. Lett*. 245: 33-36 (1998)*

13) Yamazaki Y., Nishikawa M. and Mizunami M.: "Three classes of GABA-like immumoreactive neurons in the mushroom body of the cockroach", *Brain Res*. 788: 80-86 (1998)*

14) Baba, Y. and Shimozawa, T.: "Diversity of motor responses initiated by a wind stimulus in the freely moving cricket, Gryllus bimaculatus", *Zool. Sci*., 14: 587-594 (1997)*

15) R. Okada, J. Ikeda and M. Mizunami: "Sensory responses and movement-related actitivites in extrinsic neurons of the cockroach mushroom bodies," *J. Comp. Physiol*., 185: 115-129 (1999)*

16) M. Iwasaki, M. Mizunami, M. Nishikawa, T. Itoh and Y. Tominaga: "Ultrastructural analysis of modular subunits in the mushroom bodies of the cockroach," *J. Electron Microsc*., 48: 55-62 (1999)*

17) H. Suzuki, K. Aihara, J. Murakami and T. Shimozawa: "Analysis of neural spike trains with interspike interval reconstruction," *Biological CybernеticsI*, 82: 305-311 (2000)*

18) 下澤楯夫：「神経細胞は熱雑音をも手なずけている」、電子情報通信学会技術研究報告、99(687)：91-96 (2000)

19) Y. Matsumoto and M. Mizunami: " Olfactory learning in the cricket *Gryllus bimaculatus*," *J. Exp. Biol*., 203: 2581-2588 (2000)*

20) H. Nishino: "Topographic mapping of the axons of the femoral chordotonal organ neurons in the cricket *Gryllus bimaculatus*," *Cell. Tissue. Res*., 299: 145-157 (2000)*

21) Y. Matsumoto and M. Sakai Brain: "Control of mating behavior in the male cricket *Gryllus bimaculatus* DeGeer: the center for inhibition of copulation actions," *J. Insect Physiol*., 46: 527-538 (2000)*

22) Y. Matsumoto and M. Sakai: "Brain control of mating behavior in the male cricket *Gryllus bimaculatus* DeGeer: brain neurons responsible for inhibition of copulation actions," *J. Insect Physiol*., 46: 539-552 (2000)*

23) Y. Baba, H. Masuda and T. Shimozawa: "Proportional inhibition in the cricket medial giant interneuron," *J. Comp. Physiol. A,* 187: 19-25 (2001)*

24) M. Sakura and M. Mizunami: "Olfactory learning and memory in the cockroach *Periplaneta americana*," *Zool. Sci*., 18: 21-28 (2001)*

25) H. Aonuma and P. L. Newland: "Opposing actions of nitric oxide on synaptic inputs of identified interneurones in the central nervous system of the crayfish," *J. Exp. Biol.* 204: 1319-1332 (2001)*

26) H. Schuppe, H. Aonuma and P. L. Newland: "NADPH-diaphorase histochemistry in the terminal abdominal ganglion of the crayfish," *Cell. Tissue Res*. 303: 289-299 (2001)*
27) Baba Y., Masuda H. and Shimozawa T.: "Proportional inhibition in the cricket medial giant interneuron ," *J. Comp. Physiol. A*, 187(1): 19-25 (2001)*
28) Sakura M. and Mizunami M.: "Olfactory learning and memory in the cockroach Periplaneta americana," *Zool. Sci*., 18: 21-28 (2001)*
29) Schuppe H., Aonuma H., and Newland P. L.: "NADPH-diaphorase histochemistry in the terminal abdominal ganglion of the crayfish," *Cell Tissue Res*., 303: 289-299 (2001)*
30) Schuppe H., Aonuma H., and Newland P. L.: "Distribution of NADPH-diaphorase-positive ascending interneurones in the crayfish terminal abdominal ganglion," *Cell Tissue Res*., 305: 135-146 (2001)*
31) Aonuma H. and Newland P.L.: "Opposing actions of nitric oxide on synaptic inputs of identified interneurones in the central nervous system of the crayfish," *J. Exp. Biol*., 204: 1319-1332 (2001)*
32) 渡部忠洋、下澤楯夫：「ブラウン運動の光学計測によるコオロギ気流感覚毛の機械設計の解析」、電子情報通信学会、MBE 2001 179：115 (2002)
33) 余野央行、下澤楯夫：「コオロギ気流感覚系の介在神経の同期発火」、電子情報通信学会、MBE 2001 180：121 (2002)
34) Fujie S., Aonuma H., Ito I., Gelperin A. and Ito E.: "The nitric oxide/cyclic GMP pathway in olfactory processing system of the terrestrial slug Limax marginatus," *Zool. Sci*., 19: 15-26 (2002)*
35) H. Nishino, S. Yamashita, Y. Yamazaki, M. Nishikawa, F. Yokohari and M. Mizunami: "Projection neurons originating from thermo- and hygrosensory glomeruli in the antennal lobe of the cockroach.", *J. Comp. Neurol*., 455: 40-55 (2003)
36) 石田浩介、下澤楯夫：「昆虫機会感覚細胞の刺激受容初期過程の力学的研究」、電子情報通信学会技術研究報告 MBE 2002-131、9-12 (2003)
37) H. Aonuma: "Distribution of NO-induced cGMP-like immunoreactive neurones in the abdominal nervous system of the crayfish, Procambarus clarkii", *Zool. Sci*., 19: 969-979 (2002)
38) H. Aonuma and P. L. Newland: "Synaptic inputs onto spiking local interneurons in crayfish are depressed by nitric oxide", *J. Neurobiol*., 52: 144-155 (2002)
39) 村上準、木立智英、長谷山美紀、下澤楯夫：「神経細胞が運ぶ情報量の実測における標本サイズの影響」、電子情報通信学会論文誌 D-(監)、J 85(7)：1233-1243 (2002)

4.2 総説、解説、評論等

1) 下澤楯夫：「昆虫気流感覚毛の機械設計の計測と解析」、『日本機械学会［No.98-8　I］機械力学・計測制御講演論文集』Vol.A：1-4 (1998)
2) 下澤楯夫、熊谷恒子：「昆虫気流感覚毛の機械設計の解析」、『日本音響学会誌』54巻3号：245-253 (1998)
3) 水波誠：「昆虫の脳「微小脳」におけるモジュール構造」、『脳21』、Vol.1、No.3、79-85 (1998)
4) 西野浩史、酒井正樹：「動物の死にまね行動―そのしくみと機能」、裳華房、『生物の科学・遺伝』49：33-39 (1998)
5) 下澤楯夫：「熱雑音を手なずけた昆虫の機械感覚器」、日本神経回路学会誌、6(3)：155-166 (1999)
6) M. Mizunami, F. Yokohari, M. Takahata: "Exploration into the adaptive design of the arthropod "Microbrain," *Zool. Sci*., 16: 703-709 (1999)*
7) 水波誠、松本幸久、佐倉緑、岡田龍一：「昆虫の嗅覚学習」、電子科学研究、7：69-71 (1999)
8) 下澤楯夫：「神経系は熱雑音をも利用する」、生物物理、40(229)：156-161 (2000)*
9) Aonuma H. and Newland P.L.: "The action of nitric oxide and cGMP on intersegmental interneurones in the crayfish terminal abdominal ganglion," *The Crustacean Nervous System*, 305-312 (2001)*

4.3 著書

1) 水波誠：「昆虫の記憶と学習」(分担執筆)、『行動生物学』66-67、青木清編、朝倉書店、東京、(1997)
2) 下澤　楯夫：「情報機械としての脳」、『脳科学実験マニュアル』、本間研一、福島菊郎編(北海道大学図書刊行会) pp.131-147 (1999)
3) M. Mizunami: "Ocelli," In Atlas of arthropod sensory receptors: Dynamic morphology in relation to function, eds. Eguchi E. and Tominaga Y. (Springer-verlag) pp.71-78 (1999)
4) 水波誠：「一寸のゴキブリの5分の魂」、『実験室の小さな生きものたち』、(羊土社) pp.70-73 (1999)
5) 下澤楯夫：「情報理論とその神経系への応用」、『微小脳研究トレーニングコーステキスト』、(文部省科研費特定(A)「微小脳システムの適応的設計」) pp.44-71 (2000)
6) 下澤楯夫：「機械感覚器の高感度化と熱雑音対策『バイオミメティックスハンドブック』、長田義仁編、pp.672-680 (2000)
7) T. Shimozawa, J. Murakami and T. Kumagai: "Cricket wind receptors: Thermal noise for the highest sensitivity known", *Sensors and sensing in biology and engineering*, Springer Verlag Wien, Ed: Barth, Humphrey and Secomb, 145-157 (2003)

4.5 招請講演

1) Shimozawa T., Kumagai T. and Baba Y.: "Mechanical design of wind-receptor hair of cricket", *International Symposium on the Mechanics of Plants, Animals and Their Environments: Integrative Perspectives*, Santa Barbara, California, (1998)
2) 下澤楯夫、村上準、熊谷恒子：「神経系は熱雑音をも利用する」、第21回日本神経科学・日本神経化学合同大会ミニシンポジウム「微小脳」、東京、(1998)
3) 下澤楯夫：「昆虫気流感覚毛の機械設計の計測と解析」、日本機械学会 Dynamics and Design Conference '98 特別講演、札幌、(1998)
4) 下澤楯夫：「昆虫の気流感覚器：その機械設計の解析」、日本音響学会平成9年度秋季研究発表会特別講演、札幌、(1997)
5) 水波誠：「昆虫の記憶中枢のモジュール構造：哺乳類の大脳皮質との比較」、日本神経科学学会、仙台、(1997)
6) 水波誠、岡田龍一：「昆虫の脳のキノコ体における感覚—運動統合」、日本動物学会成茂シンポジウム、広島、(1998)
7) T. Shimozawa, J. Murakami and T. Kumagai: "Cricket wind receptor is sensitive to mechanical energy on the order of kT and utilizes the thermal noise for enhancement of weak signal detection," Symposium on Recent Developments in Auditory Mechanics, Miyagi-Zao Royal Hotel, JAPAN (1999-7)
8) M. Mizunami: "Exploration into higher centers of the cockroach," 国際ワークショップ: Interface between systems brain science and neuroethology, Sendai, Japan (1999-9)
9) T. Shimozawa, J. Murakami and T. Kumagai: "Cell-intrinsic noise of thermal origin helps signal detection in an insect," The 3rd International Workshop on Neuronal Conding,99, Osaka, Japan (1999-10)
10) T. Shimozawa: "Neurons have tamed the thermal noise for signal detection," The first RIES-Hokudai Symposium "Electronic Sciences at the Millenium," Conference Hall, Hokkaido University, Japan (1999-12)
11) 下澤楯夫：「実験と情報理論の観点から」、討論会「微小脳システム研究における特殊性と一般性」、東京都立大学、日本 (2000-1)
12) 下澤楯夫：「神経細胞は熱雑音をも手なずけている」、電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会、MEとバイオサイバネティスク研究会、計測自動制御学会生体・生理工学部会合同特別講演会、玉川大学、日本 (2000-3)
13) 下澤楯夫：「雑音を使いこなす脳」、北海道大学脳科学シンポジウム2000、北海道大学百年記念館、日本 (2000-3)
14) T. Shimozawa, J. Murakami and T. Kumagai: "Mechanoreceptors employ the Thrmal noise for signal detection," Second International Symposium on the Mechanics of Plants, Animals and Their Environments, Il Ciocco Conference Center Castelvecchio Pascoli, Italy (2000-6)
15) Tateo Shimozawa: "Mechanoreceptors Employ the Thermal Noise for Signal Detection," CONFERENCE, LNB, CNRS, Marseille, France (2000-6)
16) 下澤楯夫：「ゆらぎと生体システム」、科学技術振興事業団（柳田）1分子過程プロジェクト、滋賀、日本 (2000-8)
17) Y. Matsumoto and M. Mizunami: "Olfactory learning in crickets," The 18th Tsukuba Insect Science Symposium, Tsukuba, Japan (2000-10)
18) 下澤楯夫：「生物の神経系における情報処理」、第26回自律分散システム部会研究会 SICE、北海道大学百年記念館、日本 (2000-11)
19) 下澤楯夫：「熱雑音を手なずけた昆虫機械感覚器」、日本機械学会バイオエンジニアリング部門　第23回「計測と力学—生体への応用」研究会、北海道大学電子科学研究所、日本 (2000-12)
20) 下澤楯夫：「神経系は熱雑音をも利用して情報を送る」、電子情報通信学会　特別講演会、北見工業大学 (2001-6)
21) Tateo Shimozawa, Jun Murakami and Tsuneko Kumagai: "Mechanical design for airflow detection with thermal-noise-limited sensitivity," The 6th International Congress of Neuroetholog, Bonn, Germany (2001-7)
22) M. Mizunami and Y. Matsumoto: "Elementary and context-dependent olfactory learning in crickts," The 6th International Congress of Neuroethology, Bonn, Germany (2001-7)
23) 下澤楯夫：「神経細胞は熱雑音をも手なづけている」、第7回創発システムシンポジウム〝創発夏の学校〟2001（計測自動制御学会）、富山 (2001-8)
24) 下澤楯夫：「行動と神経回路の進化と多様性：神経細胞の熱雑音感受性に関連して」、2001年度　神経情報科学研究会　変化する脳　—進化/発達/学習/修飾—（神経回路学会）、葉山 (2001-8)
25) 青沼仁志：「ザリガニ神経系における一酸化窒素の神経修飾作用」、第81回北海道医学大会生理系分科会、札幌 (2001-9)
26) 松本幸久、野地澄晴、水波誠：「フタホシコオロギの匂い学習と記憶、驚異的な嗅覚学習能力」、日本動物学会関連集会「動物の適応戦略における記憶の生物学的基盤」、福岡 (2001-10)
27) 青沼仁志：「ザリガニ、コオロギにおける一酸化窒素

(NO)放出系とその役割」、慶應義塾大学理工学部、横浜（2002-2）
28）青沼仁志：「節足動物の神経系における一酸化窒素の役割」、日本比較生理生化学会、つくば（2002-08）
29）西野浩史：「昆虫の死にまねにおける筋緊張制御」、日本生理学会北海道地方会第82回大会、札幌(2002-09)
30）青沼仁志：「昆虫の行動切換えの神経機構解明をめざして(昆虫の中枢神経系における一酸化窒素の役割)」、JST　異分野研究フォーラム、高松（2003-01）
31）T. Shimozawa: “Cricket Mechano-sensory System”, Biology-Engineering Interdisciplinary Workshop on Sensory Systems, University of Virginia, USA (2003-02)
32）下澤楯夫：「生きているとは何か？生理学は生きているか？情報の負エントロピー原理と生命(構造、機能、エネルギー)」、第80回日本生理学会大会教育委員会シンポジウム「生理学にかける橋」、福岡（2003-03）
33）青沼仁志：「節足動物の神経系における一酸化窒素の役割」、筑波大学　神経行動学研究室、つくば（2002-11）
34）T. Shimozawa: “Cricket wind receptors teach us the reason why nerves are bundles of fibers”, Biology Seminar, University of Virginia, USA (2003-02)
35）T. Shimozawa: “Sensory cells paradoxically employ thermal noise for weak signal detection”, Seminar on Sensory Systems and Structured Noise, Georget-own University, USA (2003-03)
36）T. Shimozawa: “Mechanoreceptors Have Tamed Thermal Noise for Weak Signal Detection and Information Transmission”, National Insititute of Health, Bethesda, MD, USA (2003-03)
37）T. Shimozawa: “Mechanoreceptors Have Tamed Thermal Noise for Weak Signal Detection and Information Transmission”, Joint-Seminar Center for Neurodynamics and Department of Physics, University of Missouri-St. Louis, USA (2003-03)

4.6　シンポジウムの開催

b．一般のシンポジウム（組織者、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）K. Arikawa, M. Mizunami（電子情報処理部門）：〝日本神経科学学会シンポジウム「Animal　senses-the leading edge」〟（100名、パシフィコ横浜）(2000.9.6)

4.7　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額）

1）水波誠：基盤C、一般(2)「昆虫のキノコ体の出力ニューロンの生理・形態学的研究」1,600千円（1997）
2）水波　誠：基盤C、一般(2)「昆虫のキノコ体の出力ニューロンの生理・形態学的研究」900千円（1998）
3）下澤楯夫：基盤C、一般(2)「昆虫機械受容器の内部雑音源の正体と微弱信号の検出に果たす役割」2,300千円（1998）
4）下澤楯夫：特定領域A、(2)「昆虫機械受容系の熱雑音感受性と中枢における微弱信号抽出機構」2,300千円（1999）
5）水波誠：特定領域A、(2)「微小脳キノコ体における嗅覚学習の神経機構」44,600千円（1999）
6）下澤楯夫：基盤C、一般(2)「昆虫機械受容器の内部雑音源の正体と微弱信号の検出に果す役割」1,000千円（1999）
7）水波誠：基盤C、一般(2)「昆虫のキノコ体の出力ニューロンの生理・形態学的研究」500千円（1999）
8）下澤楯夫：特定領域A、(2)「昆虫機械受容系の熱雑音感受性と中枢における微弱信号抽出機構」4,200千円（2000年度）
9）水波誠：特定領域A、(2)「微小脳キノコ体における嗅覚学習の神経機構」4,900千円（2000年度）
10）下澤楯夫：基盤B、一般(2)「昆虫機械感覚細胞の刺激受容初期過程の力学的研究」6,900千円（2000年度）
11）水波誠：基盤C、一般(2)「ゴキブリ前大脳の神経配線地図の作成」1,900千円（2000年度）
12）下澤楯夫：特定領域A、(2)「昆虫機械受容系の熱雑音感受性と中枢における微弱信号抽出機構」2,300千円（2001年度）
13）下澤楯夫：基盤B、一般(2)「昆虫機械感覚細胞の刺激受容初期過程の力学的研究」6,400千円（2001年度）
14）西野浩史：奨励A(2)「コオロギ死にまね行動における運動抑制機構の解明」2,100千円（2001～2002年度）
15）下澤楯夫：萌芽、「神経系の基本構造の起源に関する熱雑音仮説」1,800千円（2002年度）
16）青沼仁志：若手研究A、「節足動物中枢神経系における行動制御機構にかかわる一酸化窒素の役割」17,550千円（2002年度）
17）下澤楯夫：基盤研究B(2)、「昆虫機械感覚細胞の刺激受容初期過程の力学的研究」14,700千円（2000～2002年度）

c．受託研究費（受入教官名、研究課題、委託先、金額、年度）

1）水波誠：「微小脳高次中枢のモジュール構造と情報表現」科学技術振興事業団、1,000千円（平成10年度）

4.8　共同研究

a．所内共同研究（研究者名、部門名、研究課題、研究期間）

1）下澤楯夫、西浦廉政、水波　誠（電子情報処理部門）、河原剛一、栗城眞也、中村孝夫、魚住　純、小林哲生（電子計測制御部門））、田村守（電子機能素子部門）：「神経回路網動作の非侵襲・高精度計測法に関する総合

的研究」(1996～1997 年度)

2）野村保友 (電子機能素子部門)、馬場欣哉 (電子情報処理部門)、山内芳子(電子計測制御部門)：「中枢神経系の賦活領域に置けるエネルギー代謝―無酸素無グルコースによる海馬切片神経活動変化の光学測定による検出―」(1997 年度)

3）下澤楯夫(電子情報処理部門)、笹木敬司、堀田純一(電子計測制御部門)「熱揺動の光学的計測法を用いた感覚細胞の刺激受容機構の研究」(2000～2001 年度)

4）青沼仁志 (電子情報処理部門)、丹羽光一、中島崇行、田中賢、西野浩史：「昆虫の神経細胞を用いた培養系による神経回路網の再構築と情報伝達機構の解明」(2002～2004 年度)

b．民間等との共同研究 (担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間)

1）馬場欣哉(電子情報処理部門)：新技術事業団創造科学技術推進事業 (分担者)：「巨大介在神経の可塑性に寄与するカルシウムイオンの測定」、1,000 千円(1997 年度)

2）下澤楯夫 (電子情報処理部門)：東北大・流体科学研究所：「コオロギ気流感覚毛の機械諸元とエネルギー感度の直接計測」4,900 千円 (1999～2001 年度)

c．大型プロジェクト・受託研究 (担当者名、機関名、研究課題、経費、研究期間)

1）水波誠(電子情報処理部門)：科学技術振興事業団さきがけ研究 21：「微小脳の高次中枢のモジュール構造と情報表現」、9,000 千円 (1998～2001 年度)

2）水波誠(電子情報処理部門)：個人研究推進事業さきがけ研究 21 科学技術振興事業団：「微小脳の高次中枢のモジュール構造と情報表現」、4,900 千円 (1998～2000 年度)

e．教育研究基盤校費 (プロジェクト研究) (担当者名、研究課題、経費、研究期間)

1）青沼仁志 (電子情報処理部門)：「脳高次脳機能解明に向けての比較神経生物学からのアプローチ」、1,750 千円 (2001 年度)

f．その他の共同研究 (担当者名、研究課題、経費、研究期間)

1）下澤楯夫(電子情報処理部門)：東北大学流体科学研究所：「ブラウン運動の光学計測によるコオロギ気流感覚毛の機械設計の解析」(1999～2001 年度)

(COE 関係)

2）青沼仁志(電子情報処理部門)、高畑雅一、岩崎正純：「行動制御機構に関与する中枢神経系での NO-cGMP シグナル伝達系の役割」、4,000 千円(2002～2003 年度)

3）西野浩史、高畑雅一：21 世紀 COE〝バイオとナノを融合する新生命科学拠点〟事業、「昆虫のひずみ受容センサー―ナノスケールの感度を生み出す秘密を探る」、3,300 千円 (2002～2003 年度)

4.9 受賞

1）青沼仁志：吉田奨励賞「節足動物の神経系における一酸化窒素の役割に関する研究」(日本比較生理生化学会) (2002 年 8 月)

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）下澤楯夫：秋山記念生命科学振興財団選考委員(1997-1998 年度)

2）下澤楯夫：理化学研究所バイオミメティックコントロール研究センター中間レビュー委員 (1998 年度)

3）下澤楯夫：ME とバイオサイバネティックス研究専門委員 (1999-2000 年度)

4）下澤楯夫：秋山記念生命科学振興財団選考委員(1999-2000 年度)

5）下澤楯夫：東北大学電気通信研究所外部評価委員 (分野別) (2001 年度)

b．国内外の学会の主要役職

1）下澤楯夫：日本比較生理生化学会評議員・幹事 (1997-1998)

2）下澤楯夫：日本エム・イー学会評議員・編集委員(1997-1998)

3）下澤楯夫：日本比較生理生化学会第 8 回大会準備委員長・奨励賞審査委員長 (1997-1998)

4）水波誠：日本比較生理生化学会評議員・編集委員 (1997-1998)

5）水波誠：日本神経科学学会専門委員 (1997-1998)

6）水波誠：日本比較生理生化学会編集委員 (1999-2000 年度)

7）水波誠：ニューロエソロジー談話会世話人(1999-2000 年度)

8）下澤楯夫：社団法人日本エム・イー学会評議員 (2001 年度)

9）下澤楯夫：社団法人日本エム・イー学会評議員 (2001 年 5 月 10 日～現在)

10）下澤楯夫：ME とバイオサイバネティックス研究専門委員会専門委員 (1999 年 5 月 22 日～2005 年 5 月 31 日)

c．新聞・テレビ等の報道

1）水波誠：NHK 総合テレビためしてガッテン「ゴキブリ一掃大作戦」(1997 年 7 月 16 日)

2）下澤楯夫：日本経済新聞「コオロギに学べ！　次世代情報技術を担う意外な生物」(1999 年 9 月 19 日)

3）下澤楯夫：朝日放送　たけしの万物創世紀肌・超音波「超低周波としてのコオロギの気流感覚器」(2000 年 5 月 30 日)

4）下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：科学新聞「ピラミッド型発光素子開発」(2002 年 4 月 26 日)

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）松本茂：ワモンゴキブリ最終腹部神経節の神経活動の光学的計測（1997）

2）山口一郎：コオロギ介在神経における気流情報の統合（1998）

3）木立智英：刺激から神経パルス列への変換におけるコオロギ気流感覚細胞の情報量計測（2000）

4）小林夕子：ゴキブリの味と匂いの古典的条件づけ（2000）

5）余野央行：コオロギ介在神経の同期発火による気流方向の符号化（2001）

6）山下新吾：形態学的および電気生理学的手法によるゴキブリのキノコ体の機能の解析（2001）

7）渡部忠洋：ブラウン運動の光学計測によるコオロギ気流感覚毛の機械設計の解析（2001）

8）石田浩介：昆虫機械感覚細胞のナノメートル領域刺激に対する膜電流応答の計測（2002）

9）本郷秀紀：ゴキブリ匂い応答ニューロンの記録による高次嗅覚情報処理様式の解析（2002）

・博士学位

1）熊谷恒子：An Experimental Analysis of Mechanical Design of the Wind Receptor Hair in Cricket（昆虫気流感覚器の機械設計に関する計測と解析）（1998）

2）岡田龍一：Organization and Neural Activity of a Higher Center of an Insect Brain（1999）

3）佐倉緑：A Study of Odor Perception in an Insect（2000）

4）山崎吉之：昆虫の前大脳側葉の機能的組織化（2000）

5）村上準：昆虫感覚細胞のパルス符号化における内部雑音の効果に関する研究（2002）

e．大学院担当講義科目名

1）神経情報工学特論（1997～2001 年度）

2）生理工学特論（1997～2001 年度）

3）生体情報工学特別演習（1999～2000 年度）

4）生体情報工学特別研究第一、第二（1999～2000 年度）

信号処理研究分野

教授　永井信夫（北大理、工博、1980.8～2001.3）
助教授　鈴木正清（北大院、工博、1996.5～2001.3）
助手　真田博文（北大院、工博、1993.7～2002.3）
講師　松田晃一（北大院、博（理）、1996.11～1999.3）
（研究機関研究員）
小栗栖修（北大院、博（理）、1997.4～1997.9）
（研究機関研究員）
照屋保（北大院、博（理）、1997.10～1998.3）
（研究機関研究員）
技官　鎌田清春（1964.4～2001.3）

院生
・平成9－14年度
博士課程
浅倉邦彦、津久井陽司
修士課程
加藤　修、木村　励、ムジハンドコ・チャトル・W、津田一樹、斎藤秀一、三谷雅城、林　暁冬、陳　　方、外村智之

1．研究目的

(1) 次世代電子デバイスとして期待される電子波デバイスの動作原理となる電子波伝搬の解析・設計理論の構築を目指した研究を行った。波動を記述する方程式の類似性から、電気回路理論、特に分布定数回路理論に基づいた等価回路モデルを導出し、工学的に体系付けられた手法の構築を目指した。また、回路モデルに基づき、安定で、汎用性のある波動伝搬現象の数値シミュレーション手法の研究を行った。

(2) 雑音環境下で、入手される観測データが少数の場合でも、高い正解率で音波あるいは電波の到来信号個数が検出できる評価関数の決定法の確立を目指した。また、到来方向推定のための高精度、高分解能、高効率なアルゴリズムを開発した。これらのアルゴリズムを応用して、サケの母川回帰行動解明の実証のために、サケの自動追尾システムを開発した。

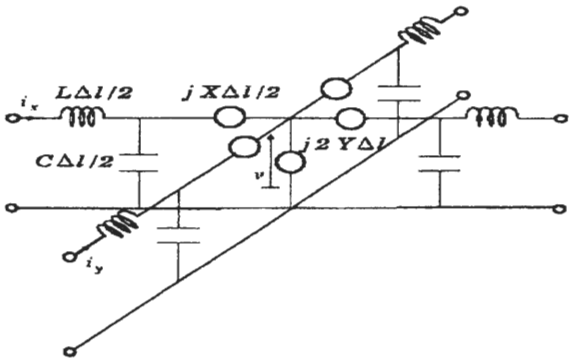
(3) 分布定数形フィルタの小型化および高性能化を目指し、多線条線路の回路理論、回路シミュレーションによる解析、設計手法の確立を目指した研究を行った。

2．研究成果

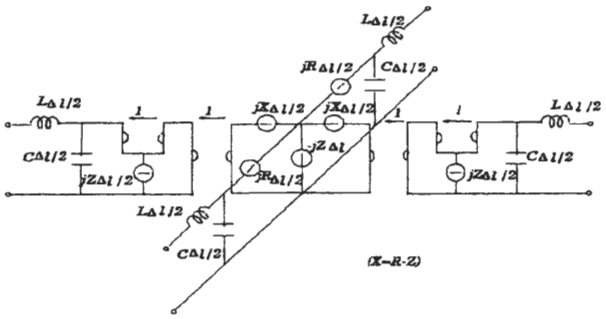
(a) 電子波伝搬の複素等価回路表現と回路理論の概念の導入に関する研究

電子波伝搬を表す等価回路に虚数抵抗を用いることにより、従来不可能と考えられていたヘテロ界面の境界条件を表す等価回路表現、2バンドモデル方程式、3バンドモデル方程式の等価回路表現を示した。これによって、これまで回路理論に従う取扱いができなかった界面行列を必要とするGaAs系以外の超格子、あるいは伝導帯の極小点間のmixingを考慮する必要のある場合、Resonant Interband Tunneling構造における電子や正孔の挙動を回路論的に取扱うことを可能とした[1),4)]。

また、多バンドモデル等の複雑なバンド構造に関して、多線条線路理論の導入を試み、非相反な現象を記述できる一般化伝送線路を利用し、磁場の効果を表現できる回路モデルを図1のように表せることなどを示した。



(a) 微小区間回路（磁場なしの場合）



(b) 微小区間回路（磁場がある場合）

図1．電子波伝搬のための分布回路モデル

(b) 電子波伝搬の時間域解析のための回路モデルに関する研究

電子波の時間域での振る舞いを把握することは、デバイスの動作速度の見積もりや、時間域解析による周波数特性の算出などに利用できる。本研究では、まず電子波の時間発展を記述するディジタルフィルタモデルを利用した時間域解析手法を構築した。次に、有効質量近似シュレディンガー方程式と2バンドモデル方程式によって記述されるポテンシャル構造中の電子波の時間発展をシミュレートするウェーブディジタルフィルタモデルを提案した。また、Transmission Line Matrix法を電子波の時間域シミュレーションに応用することを提案した。これらの提案手法により、回路の無損失性に基づく数値安定性が容易に得られ、ディジタルラティスフィルタの構造をもつため、処理の並列実現に適していて、大規模、長時間のシミュレーショ

ンに適していることが確かめられた（図２）。

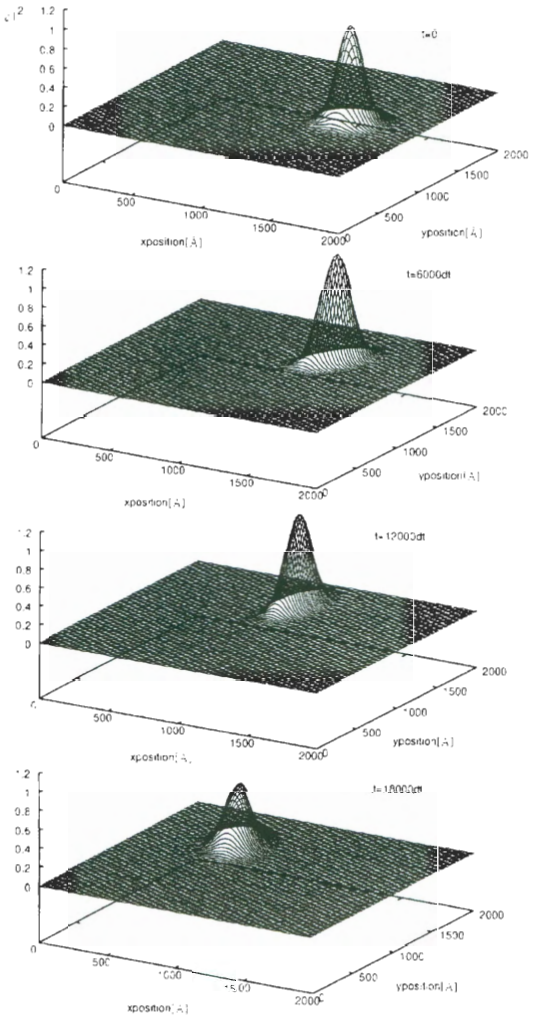


図２．ｚ方向に一様な磁場がかけられた領域を伝播する電子波束のシミュレーション。
提案手法によれば、PC クラスタなどを利用した並列計算が可能であり、かつ数値的安定性は保証される。

(c)　電子波エネルギーフィルタ合成論構築の研究

電子波に対してエネルギーフィルタの役割をする一次元多重バリヤ構造は、電子波デバイスにおける電子の振る舞いを制御する構造として重要である。本研究では、電子波に対して帯域通過型エネルギーフィルタの役割をする一次元多重バリヤ構造の回路理論的設計法について明らかにした。設計された電子波フィルタは、これまでよく用いられている有限長周期的多重バリヤ構造に比べ、通過域の平坦性、電子波束の高速な通過など優れた性質を持つことを明らかにした。また、層幅変化型、バリヤ高さ変化型、δ形ポテンシャル型など、様々な電子波エネルギーフィルタ構造を提案した。

(d)　ポテンシャル変調型電子波エネルギーフィルタ構造の研究

ポテンシャル変調型超格子の一種であるガウス型変調超格子は、透過確率がほぼ１の通過域、透過確率がほぼ０の阻止域の他に、離散的な鋭い共鳴準位からなる準通過域の３種類の帯域に分類されるバンド構造を持つことをはじめて明らかにした。また、無限周期超格子とガウス型変調超格子のガウス型変調超格子のバンド構造の関連性を明らかにし、算出がきわめて容易な無限周期超格子のバンド構造から、ガウス型変調超格子のバンド構造が推定できることを示した。

特に、ガウス型変調超格子のミニバンド構造にはある単純な規則性が存在することをはじめて明らかにし、設計のための有効な指針となりうることを示した。また、材料組成の乱れを考慮した場合の特性評価から、ある程度の材料組成の乱れは許容されることも示した。

(e)　多重ポテンシャル障壁による電子波フィルタの設計法に関する研究

電子波に対してエネルギーフィルタの役割をする多重バリヤ構造は、電子波デバイスにおける電子の振る舞いを制御する構造として重要である。本研究では、電子波に対して帯域通貨型エネルギーフィルタの役割をする多重バリヤ構造の形状の設計法を提案した。それに基づいて電子波エネルギーフィルタの設計をすれば、これまでよく用いられている有限長周期的多重バリヤ構造と比較して、通過域の平坦性、電子波束通過の高速性において非常に優れていることを明らかにした（図３、図４）。

(f)　電子波伝搬について電気回路理論に基づく考察

次世代の電子デバイスとして期待される電子波デバイスの動作原理となる電子波の伝搬現象を電気回路理論に基づいて考察している。マクスウェル方程式を満足する波動回路では、過渡応答および非定常状態は定常状態の応答とは異なること、およびエネルギーの伝搬現象は電界と磁界との積で求められ、電界と磁界との位相が同相でない場合には有効なエネルギー（電気における有効電力）が位相の違いにしたがって小さい量のみが伝送されることが知られている。量子力学ではヒルベルト空間を用いるために、この波動の伝搬現象の性質が量子力学の波動性にはまったく反映していない。そのため、電圧と電流（あるいは電界と磁界）という二つの関数を用いる回路理論の観点から量子力学を観ると「ボタンのかけ違い」と思われる理論構成になっている。すなわち、量子井戸あるいは量子ドットを利用した量子素子では、過渡応答とコヒーレンス性の両方を考え、定常状態に至るまでの非定常時間を考慮する必要があるにもかかわらず、その考察がなされていない。また、量子共鳴などを量子力学では場の理論で考えているが、共鳴現象は波動の伝搬で考えないと時間的なことで食い違いがおきる。本研究では、薄い膜の絶縁体のトンネル効果や、トンネル効果を利用した電子波素子の超高速性などの考察を続けていて、これらの結果は「シングルエレクトロンデバイス」、「量子コンピュータ」や「量子暗号」に大きな関係が

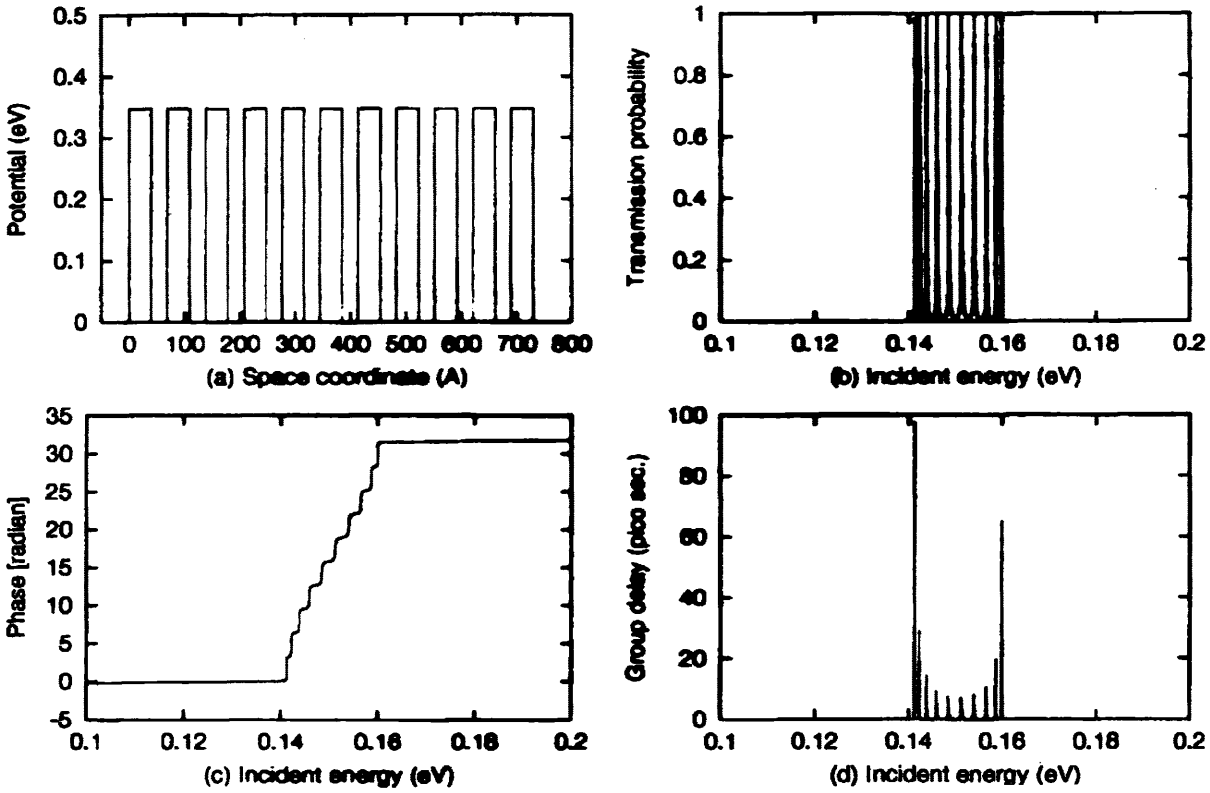


図３．従来より用いられている周期的多重バリヤ構造(a)による透過特性(b)、位相特性(c)、群遅延特性(d)。透過特性は離散的なピークとなっている。また、群遅延が非常に大きいことがわかる

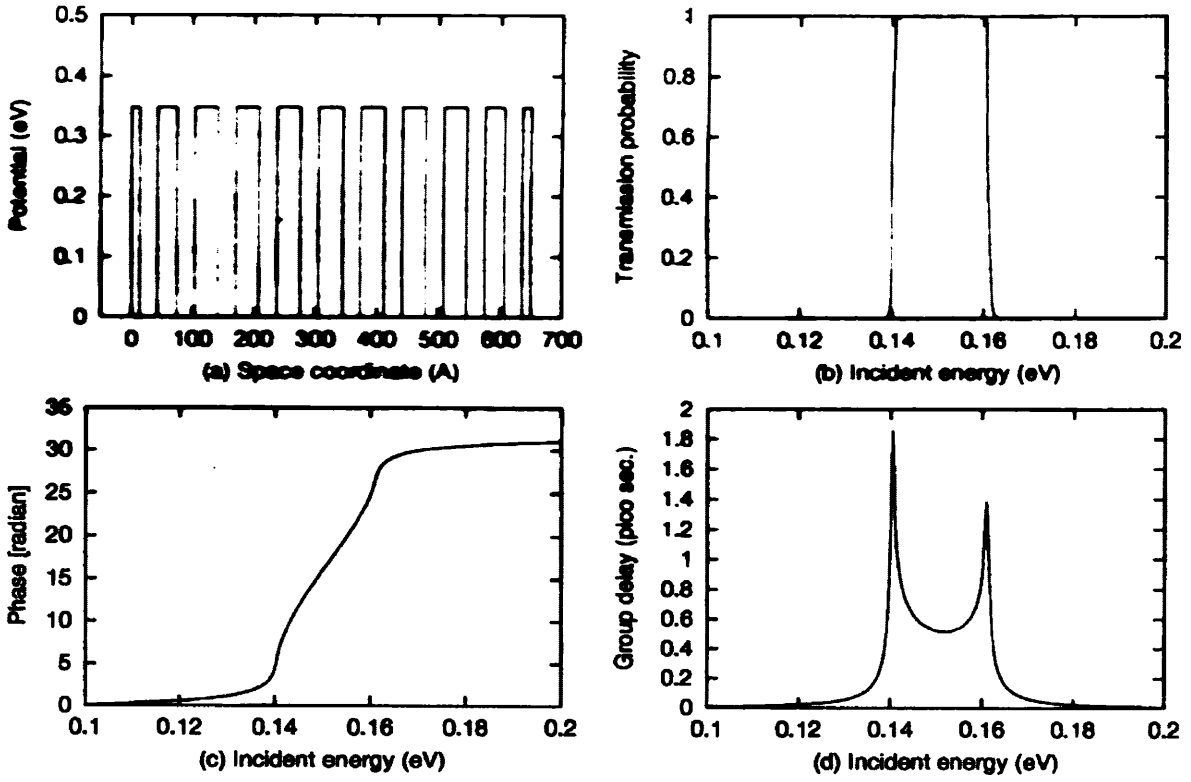
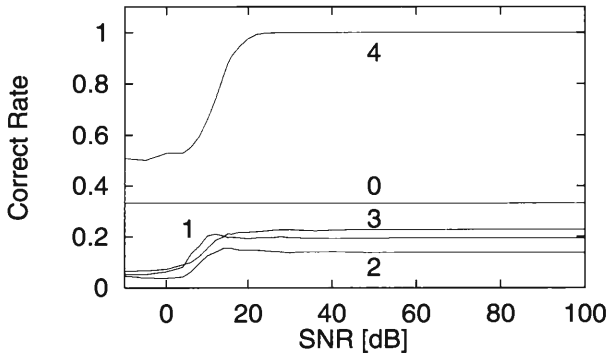


図４．提案手法により設計された多重バリヤ構造(a)とその透過特性(b)、位相特性(c)、群遅延特性(d)。　通過域が平坦であることがわかる。また、群遅延は従来構造に比べ非常に小さい。このような構造が実現されれば、電子波デバイスの高速動作に有効である

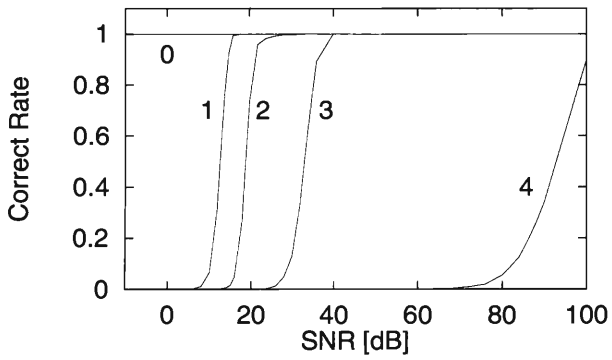
あり、20年後にはこの理論が正しいか誤りであるかの決着がつくであろう。また、現在では相対論と量子論とが対立していて、統合させるために「超ひも理論」を導入した理論が有望といわれている。この対立に対しても、量子論を電場と磁場に対応する二つの関数による回路空間とでも呼ばれる理論構成にすれば、無理なく自然にその対立を消し去ることができる。

(g) 複数信号源の信号数検出法に関する研究

複数の信号が重畳された多チャネル信号から重畳信号数を検出するための新しい手法を提案した。本手法は、重畳信号数を仮定した観測信号モデルの最大尤度の確率的性質に基づき、検出確率を指定して評価基準を定めるものであり、従来の情報量基準では信号数の検出が困難なサンプルデータが少ない場合にも適用可能である。また、センサアレイ信号処理では、マルチパス等により生ずるコヒーレント信号の場合、到来信号数の検出には到来方位の推定が必要になり、多変数の非線形最適化問題を解く必要があるため、一般に計算量が膨大となる。本研究では、等間隔直線アレイの規則性を利用し、効率的な繰り返し算法を提案した[2),3)]。

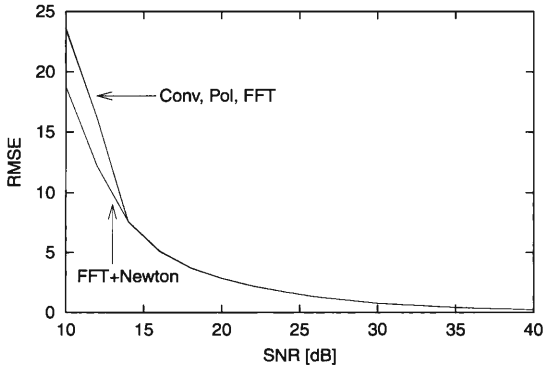


(a) 従来法（MDL）

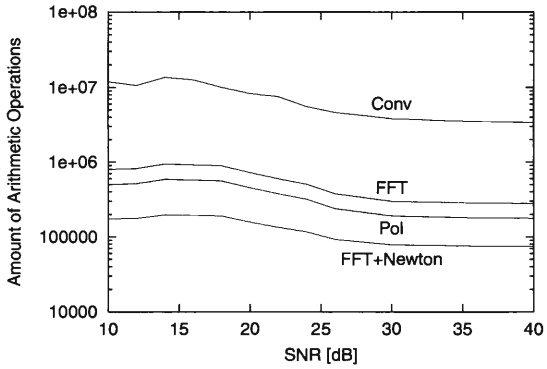


(b) 提案手法（BML）

図5．センサ数5、スナップショット数5における信号個数検出の正解率。図中の数字は信号個数を表す。



(a) 推定誤差（RMSE）



(b) 算術演算量

図6．センサ数5、信号数3、方位0、5、10度、スナップショット数100における方位推定の統計量。
Conv.：従来法、FFT、Pol、FFT＋Newton：提案手法

(h) 鮭の自動追尾システムの開発に関する研究

鮭の回帰行動のメカニズムを解明するために、ボートによる鮭を自動追尾するシステムを開発している。鮭を追尾するために、鮭に小型発信器を埋め込み、発信器からのバースト波を処理して鮭の位置を定位する。本研究では、バースト波の処理手法を開発し、その性能をシミュレーションによって見積った。その結果、1 bitサンプリングによって、十分な推定精度が得られることが分かった[8)]。

また、携帯電話を利用した通信システム、追尾船の制御プログラム、地上でのモニタプログラムをも開発した。

(i) 折り畳み型分布定数ノイズフィルタに関する研究

近年、計算機等のクロック周波数の上昇に伴い、小型で高性能な高周波用ノイズフィルタの要求が高まっており、従来の集中定数型ノイズフィルタを上回る特性を示す可能性から、分布定数型ノイズフィルタが注目されている。これまでは、フィルタ構造と実現される周波数特性との関係が工学的に見通しよく把握されているとはいえなかった。この研究では、折り畳み型ノイズフィルタの解析、設計論の構築を目指し、多線条回路によるモデル化を試みた。その結果、提案モデルが、折り畳み型フィルタの特性をよく表現できることを示した。

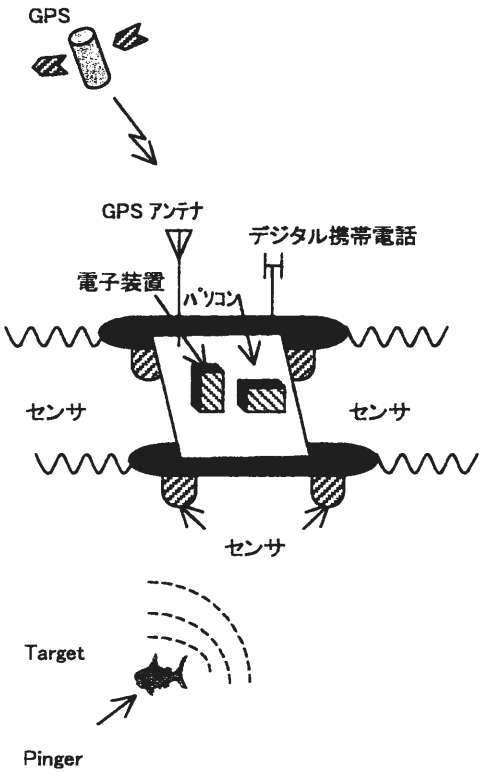


図７．水中音源の自動追尾システムの概念図

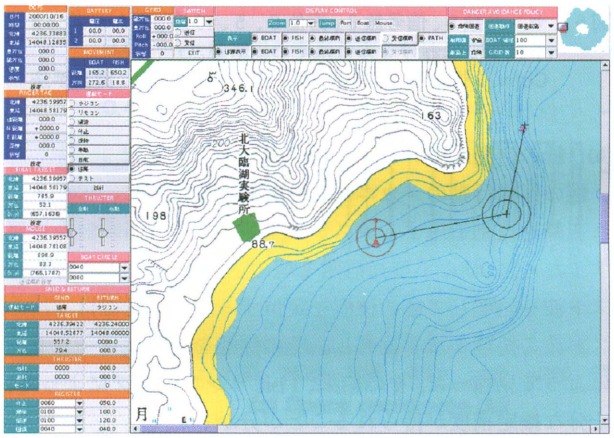


図８．サケ追尾システムのモニタ画面

３．今後の研究の展望・将来計画

電子波伝搬の複素等価回路に関する研究では、多バンドモデル等の複雑なバンド構造に関して、多線条線路理論の導入を試みている。電子波の時間発展のための回路モデルの研究では、非相反な現象を記述できる一般化伝送線路を利用し、磁場の効果を表現できる回路モデルについて検討している。さらに、線幅 0.1 μm 以下の半導体中における電子波の伝搬や、屈折率の異なる薄膜を周期的に用いた光フィルタなどは、古典回路理論の影像パラメータ理論が有効と考えられ、また、波動関数を電圧とする方法も有効と考えられる。

(1)　電子波エネルギーフィルタの設計手法構築に関して、より現実的なポテンシャル形状において設計を可能とすること、変調超格子によるバンド形成のメカニズムの解明と、光ファイバグレーテイング、フォトニック結晶などへの応用が今後の課題である。

(2)　コヒーレントな信号について、雑音環境下で、入手される観測データ数が少数の場合でも、高い正解率で到来信号個数が検出できる評価関数の決定法を確立すること、より一般的な配置を持つセンサアレイについて、高精度、高分解能、高効率な信号到来方向アルゴリズムを開発すること、サケの母川回帰行動解明の実証実験をすることが今後の課題である。

(3)　折り畳み構造、スパイラル構造を持つ分布定数型フィルタの解析と、設計論の構築が課題である。

なお、電子波伝搬についての電気回路理論に基づく考察の将来計画として、シュレディンガー方程式の解として二つの関数があり、そのうちの一つがよく知られた「波動関数」であり、もう一つの解も存在してそれを「準波動関数」とすると、波動関数は電圧に、準波動関数は電流に対応する。そのため、シュレディンガー方程式に対しても回路理論と同様に「インピーダンス」を定義できる。これを用いると、量子論にも回路理論を適用できる。そのため、量子力学にも波動回路の理論が適用できる。

電子科学研究所はナノテクノロジーを大きなプロジェクトにする研究所に方向転換していると聞いている。量子力学をナノテクノロジーに応用する研究に対して、永井の考えを述べさせていただく。

3.1　光とマクスウェル方程式

マクスウェル方程式は線形偏微分方程式であり、光はマクスウェル方程式を満足することは周知の事実である。ところで、光の教科書においては、頻繁に平方根（数学記号では $\sqrt{\ }$）が用いられているが、線形方程式にどうして平方根が現れるのであろうか。

ここで改めて、マクスウェル方程式を観ると、電界と磁界（物理学では電場と磁場）はそれぞれ線形方程式で記述されるが、電界と磁界をそれぞれ別々に測定することが困難であるから、強度を測定して、その強度で電界と磁界の値を求めるために、平方根が用いられている。すなわち、電界と磁界との積である強度が用いられ、強度は電界と磁界の積であるから、強度は線形条件を満たすわけではないことに気が付く。

3.2　電気回路における電圧、電流および電力

ところで、電気では電圧と電流という２つの関数が用いられているが、電圧も電流もそれぞれ測定できて、電圧と電流との積である電力も測定が容易である。なお、電圧も電流も線形方程式を満足する。電気では電圧と電流との比を「インピーダンス」と呼び、重要な物理量としている。どうしてインピーダンスが電気で重要なのかというと、「インピーダンス・マッチング」ということが「エネルギーの

保存則」に深く関係しているからである。これはエネルギーが電圧と電流との積である電力に関係していて、入力と出力とでは電圧と電流との値は異なっていても、積である電力（もっとくわしくいうと有効電力）が等しければ、エネルギーが保存されることになる。

マクスウェル方程式の電界と磁界とはそれぞれ電気の電圧と電流とに対応していて、光の強度は電力あるいはエネルギーに対応している。したがって、マクスウェル方程式を満たす光において、もしも電界と磁界とが別々に容易に測定できているなら、電気と同様に平方根を用いずに計算できる理論が確立していると考えてもよいであろう。

3.3 シュレディンガー方程式とマクスウェル方程式

量子力学は確率の世界であって、古典物理学では破綻した理論と考えられる現象を記述できる理論構成となっているといわれている。ところで、量子力学で用いられるシュレディンガー方程式は光の現象を記述するマクスウェル方程式と似たところがある。すなわち、量子力学は「確率」を問題にするのであるが、量子力学での計算は確率を直接用いないで、確率を平方した「確率振幅」（量子力学では「波動関数」と呼ぶ）で行われるのであって、確率は光の強度に対応させれば、確率振幅は電界あるいは磁界に対応していると考えられる。

このような対応をつけると、マクスウェル方程式における線形性や共鳴現象におけるエネルギーの伝搬などについて改めて考えておくことが、量子力学をナノテクノロジーに応用するときに役立つと考えられよう。

3.4 マクスウェル方程式の回路理論

マクスウェル方程式は時間項 t と 3 次元空間の項 x、y、z なる 4 変数で表される線形偏微分方程式である。マクスウェル方程式の解で共鳴現象は表されるが、共鳴現象は解である波動の多重反射で得られることが知られている。空間的に 3 次元の空間内での波動の多重反射は空間的に拡がった現象であり、非常に複雑になるので、より簡単な空間的に 1 次元の現象を考えておくのが得策である。そこで、空間的に 1 次元のマクスウェル方程式を考えると、それは O. Heaviside が提案した回路理論ではおなじみの「電信方程式」となる。

電信方程式を用いると、波動のエネルギーに関する伝搬の現象がよく表されていることが理解される。すなわち、電圧と電流の波動でエネルギーが伝わるのであるが、電圧と電流とが同調していて、すなわち電圧と電流との波の位相が同相のとき最大のエネルギーが伝送され、電圧と電流との位相が 90°異なるとき、エネルギーは伝送されないことが示される。この位相が 90°異なる場合がエバネッセントモードになっているといわれ、光におけるエバネッセント光、量子力学におけるトンネル効果を説明する現象と考えられる。

3.5 対称性の破れに対する回路理論の応用

ところで、マクスウェル方程式は対称性の強い方程式であるが、ガラスなどの物質を用いると共鳴現象を起こすことができる。ある周波数の光あるいは波動だけが共鳴状態になるということは対称性を破っているためと考えられる。物理学では「対称性の自発的な破れ」は、それによって多様な物質が形成されるとして、重要な研究課題である。

一方、回路は信号やエネルギーを伝える媒体を「ブラックボックス」とし、信号を送り出す「入力源」と、その信号に対して周波数特性をブラックボックスで付加されたものを受け取る「負荷」とが三位一体となって望まれる特性を実現するものと考えることができる。その例として、ブラックボックスの媒体がマクスウェル方程式を満たすとしたとき、入力源や負荷がマクスウェル方程式の対称性を人工的に破る役割をしているものと考えられる。

量子現象には「トンネル効果」や「量子ゆらぎ」という対称性を破ると考えられる現象がある。これらの現象を回路理論のもつ対称性の破れで説明する試みをする。

3.6 マクスウェル方程式の解法(1) —z 変換法—

マクスウェル方程式から波動方程式が導かれ、物理学の教科書では波動方程式をダランベールの解法で解いていて、時間項を主として三角関数で表現している。一方、マイクロ波回路の教科書では、時間項を $\exp(j\omega t)$（マイクロ波回路の理論では虚数単位を i ではなく j を用いて表し、ω は周波数を表す）という複素数で表現している。

この物理学とマイクロ波回路との表現の違いが、「ボタンのかけ違い」となって、量子力学の理論を構築することになったと考えられるので、まずマクスウェル方程式と同等の方程式であり、電圧と電流という 2 つの関数で表される電信方程式の解法から考えてみる。

入力源を除いた無損失の電信方程式は、次のように表される。

$$-\frac{\partial}{\partial x}v(x,t)=L\frac{\partial}{\partial t}i(x,t) \tag{1 a}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}i(x,t)=C\frac{\partial}{\partial t}v(x,t) \tag{1 b}$$

入力源から媒体に信号あるいは波動が入力されると、直ちに微分方程式の境界条件を満たす状態（回路理論では定常状態と呼ぶ）になるわけではなく、過渡状態（別の言い方をすると非定常状態）になる。この過渡状態を表現するにはラプラス変換が用いられる。そこで、式(1)にラプラス変換を行うと、次の空間 1 次元の微分方程式に書き換えられる。

$$-\frac{d}{dx}V(x)=sLI(x) \tag{2 a}$$

$$-\frac{d}{dx}I(x)=sCV(x) \tag{2 b}$$

上の式から、$V(x)$ も $I(x)$ も次の波動方程式を満たす。

$$\frac{d^2}{dx^2}V(x)=s^2LCV(x) \tag{3 a}$$

$$\frac{d^2}{dx^2}I(x)=s^2LCI(x) \tag{3 b}$$

上式に対しては、伝搬定数 γ が次のように求まる。

$$\gamma=s\sqrt{LC}=su^{-1} \tag{4}$$

ここに、u は信号の伝搬速度を表す。

式(4)を用い、積分定数 K_a および K_b を用いると、式(3)は次のように表される。

$$V(x)=K_a\exp(-su^{-1}x)+K_b\exp(su^{-1}x) \tag{5 a}$$

$$I(x)=\frac{K_a}{R_0}\exp(-su^{-1}x)-\frac{K_b}{R_0}\exp(su^{-1}x) \tag{5 b}$$

ここに、$R_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$ と表され、特性インピーダンスと呼ばれる。

式(5)には $\exp(-sT)$ が現れていて、信号処理分野ではそれを「遅れ素子」と呼び、信号の過渡的な伝わり方を表す。この解析手法を z 変換法という。

この解析を続けると、信号の多重反射が求まり、多重反射を繰り返した後に定常状態となる様子が表現される。

3.7 マクスウェル方程式の解法(2) —変数分離法—

マクスウェル方程式を解くことに戻って、式(1)から定常状態の解を求めておこう。定常状態では式(1)は変数分離できて次のように表される。

$$v(x,t)=\exp(j\omega t)V(x) \tag{7 a}$$

$$i(x,t)=\exp(j\omega t)I(x) \tag{7 b}$$

ここで注意すべき点は、時間項を $\exp(j\omega t)$ で表すことで、これを三角関数で表すとすると、周波数が ω の波と同時に $-\omega$ の波が入っていることになる。回路理論では周波数 ω のみの波が伝搬するという扱いをするため、波の伝搬には三角関数は用いない。

その結果、マクスウェル方程式は、次のように表される。

$$V(x)=K_a\exp(-\gamma x)+K_b\exp(\gamma x) \tag{8 a}$$

$$I(x)=\frac{K_a}{Z_0}\exp(-\gamma x)-\frac{K_b}{Z_0}\exp(\gamma x) \tag{8 b}$$

ここに

$$\gamma=j\omega\sqrt{LC} \tag{8 c}$$

$$Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{8 d}$$

上に求めた波動関数により、量子現象特有と考えられる「トンネル効果」や「量子ゆらぎ」を古典物理系の回路理論で説明できるので、次にそれを考えよう。

3.8 トンネル効果およびエバネッセントモード

現在での微細加工上の最大の問題点は、絶縁膜の薄膜化であり、そのトンネル電流の増大を極力小さくすることである。このように、絶縁薄膜という古典力学系の中にトンネル効果という量子現象が現れるのはどうしてであろうか。

このトンネル効果は式(1)のマクスウェル方程式において、係数のLまたはCの符号が正と負とになるときに生じる。その場合、式 (8 c) の γ は実数 α になり、式 (8 d) の Z_0 は純虚数となる。Z_0 が純虚数となることは、V と I との位相が 90°異なることを示し、有効電力が伝搬しないことを意味する。これはその媒体には V と I との波がまったく入らないわけではなく、振幅が指数関数的に小さくはなるが入る。その媒体の厚さが十分に大きければ振幅が 0 になるが、薄膜のように極めて薄ければその媒体を突き抜けても振幅は 0 になるわけではない。その結果、エネルギーがその絶縁体を突き抜けることになる。したがって、トンネル効果は電圧と電流という 2 つの関数の積でエネルギーが伝送される古典物理学の世界で普通に生じる現象であることが、マクスウェル方程式の係数の符号を考えることにより示されたことになる。

3.9 量子ゆらぎ

式(1)において、係数の L も C も正のときの波動関数は次のように表され、V と I との位相は同相(同調していて)であり、エネルギーが伝搬する。

$$V(x)=K_a\exp(-j\beta x)+K_b\exp(j\beta x) \tag{9 a}$$

$$I(x)=\frac{K_a}{R_0}\exp(-j\beta x)-\frac{K_b}{R_0}\exp(j\beta x) \tag{9 b}$$

波動に対するエネルギーは電気での電力を考えることになる。電力は電圧と電流との積で求められるが、電圧と電流との位相の違いで平均電力の値が変わる。平均電力は積分で求まるものであるから、定常状態で定義されるもので、次のような電力が定義される。

複素電力：$V^*(x)I(x)$ (10 a)

皮相電力：$|V(x)||I(x)|$ (10 b)

有効電力：$\mathrm{Re}[V^*(x)I(x)]$ (10 c)

無効電力：$\mathrm{Im}[V^*(x)I(x)]$ (10 d)

ここに $V^*(x)$ は $V(x)$ の共役複素数を表し、Re[ ] は実数部を、Im[ ] は虚数部を表す。

上の電力の中で実際のエネルギーを与えるのは有効電力である。そこで、式(9)の位置 x における有効電力を求めると

$$\mathrm{Re}[V^*(x)I(x)]=\frac{|K_a|^2}{R_0}-\frac{|K_b|^2}{R_0} \tag{11}$$

と求まり、位置 x に無関係な定数である。したがって、式(9)に対しては、位置によって電圧や電流の値は異なるが、どの位置においても、定常状態では一定のエネルギーが蓄えられていると考えることができる。

このように、エネルギーを考えるときは、過渡状態ではなく、定常状態で考える。ところで、量子力学でも「定常状態」という用語が用いられているが、量子力学での使い方と回路理論での使い方の違いがあり、量子力学の使い方では「ボタンのかけ違い」になる可能性の高いので、特に注意しておく。

量子力学では次のような使い方をする。「定常状態にいる

電子からは輻射（光、電磁波）は生じない。」この現象は固有振動になっていることを回路理論では表している。すなわち、量子力学での定常状態は回路理論では固有値問題を表していて、回路理論での固有値問題は波動のエネルギーとして特異な現象であること示そう。

空間的に1次元の媒質が固有振動をしている場合は、媒質に対する境界条件が短絡や開放になったときである。まず、次の境界条件を考えてみよう。

$$x=0 \qquad x=l \text{ で} \qquad V(x)=0 \tag{12}$$

この境界条件を式（9 a）に代入して、次式の関係を得る。

$$K_a=-K_b \tag{13 a}$$

$$-2jK_a\sin\beta l=0 \tag{13 b}$$

したがって、次の関係が得られる。

$$\beta l=n\pi \tag{13 c}$$

この場合、電圧と電流は次のようになっている。

$$V(x)=-2jK_a\sin\beta\chi \tag{14 a}$$

$$I(x)=\frac{2K_a}{R_0}\cos\beta x \tag{14 b}$$

この固有値問題に対して、次のような疑問をもつことがなかったであろうか。すなわち、固有値以外の振動ではどの位置の振幅も0になり、エネルギーを持つことができないのに、固有値の振動は周波数がチョッと変わっただけで、エネルギーが突然変わるように見えることである。

この疑問に答えるために、実際のエネルギーを表す有効電力を求めると、式(14)の関係から電圧と電流との位相差が90°となっていて、有効電力は0になっている。したがって、固有振動は振幅が0ではないので、確かにエネルギーを持っているけれども、そのときの有効電力が0になっているので、エネルギーが固有振動している空間内に閉じ込められていて、なにかの刺激が与えられて固有振動からずれるときに、エネルギーが現れ、量子力学での量子ゆらぎの説明になると考えられる。

3.10 ヒルベルト空間から回路空間へ

以上のように、電圧と電流という2つの関数が与えられて、有効なエネルギーが有効電力で与えられる空間を考えれば、ヒルベルト空間とは異なる数学ができるように考えられ、量子力学に特に有効な理論と考えられるが、いかがなものであろうか。

4．資料

4.1 学術論文

1）H. Sanada, M. Suzuki and N. Nagai: Analysis of Resonant Tunneling Using the Equivalent Transmission-Line Model, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.33, 5, pp.731-741 May. 1997.*

2）北川文基、鈴木正清、永井信夫：最大ゆう度の統計量に基づく信号数検出のための評価関数、信学技報、CAS 97-1（1997）

3）鈴木正清、北川文基、永井信夫：コヒーレント信号の信号数検出のための効率的算法、信学技報、CAS 97-2（1997）

4）真田博文、鈴木正清、永井信夫：Kaneモデルで記述される量子力学系の複素等価回路表示、信学技報、CAS 97-14（1997）

5）津久井陽司、真田博文、鈴木正清、永井信夫：ディラック方程式の複素等価回路を利用した波束の時間発展シミュレーション、信学技報、CAS 97-15（1997）

6）永井信夫、真田博文、鈴木正清：量子回路理論ー量子現象を電子回路に利用するために一、第10回　回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集、Bd3-1-3（1997）

7）真田博文、鈴木正清、永井信夫：Resonant Interband Tunneling構造の複素等価回路表示、電子情報通信学会論文誌、C-II, Vol.J81-C-II, 4, pp.421-429 (1998.4)*

8）チャトル W.、鈴木正清、鎌田清春、永井信夫：鮭の自動追尾システムにおける方位推定のための信号検出法、平成10年度電気関係学会北海道支部連合大会30、(1998)

9）加藤修、真田博文、鈴木正清、永井信夫：〝TLM法による量子力学的波動の時間域解析〞、平成10年度電気関係学会北海道支部連合大会228、(1998)

10）永井信夫：〝量子力学における時間的因果性について〞第1回量子情報技術研究会資料、QIT9 9-10, pp.55-60, (1999)

11）永井信夫：〝古典力学系としてのシュレディンガー方程式の一検討〞　第2回量子情報技術研究会資料、QIT9 9-36, pp.131-136, (1999)

12）真田博文、鈴木正清、永井信夫：「量子力学的一次元波動のBergeron等価回路による時間域解析」、電子情報通信学会論文誌(C)、J 83-C(12)：1093-1103（2000）*

13）永井信夫：〝量子現象における線形方程式の中の非線形現象〞　第3回量子情報技術研究会資料、QIT2000-10, pp.41-46, (2000)

14）永井信夫：〝量子力学におけるトンネル効果とバンドギャップとの違いについて〞　第4回量子情報技術研究会資料、QIT2000-30, pp.27-32, (2000)

15）津久井陽司、鈴木正清、真田博文、永井信夫：「2バンドモデルの時間域解析のためのディジタルフィルタモデル」、電子情報通信学会論文誌(C)、J 84-C(7)：563-573（2001）*

16）浅倉邦彦、鈴木正清、真田博文、永井信夫：「対称なガウス型ポテンシャル包絡をもつ変調超格子のバンド構造」、電子情報通信学会論文誌(C)、J 84-C(7)：574-583（2001）*

17）津久井陽司、鈴木正清、真田博文、永井信夫：「2バンドモデルの時間域解析のためのディジタルフィルタモデル」、電子情報通信学会論文誌、J84-C(7)：563-573 (2001)*

18）浅倉邦彦、鈴木正清、真田博文、永井信夫：「対称なガ

ウス型ポテンシャル包絡を持つ変調超格子のバンド構造」、電子情報通信学会論文誌、J84-C(7)：574-583 (2001)*
19) 真田博文、浅倉邦彦、鈴木正清、永井信夫：「帯域通過型電子波エネルギーフィルタ設計のための回路理論的一手法」、電子情報通信学会論文誌、J84-C(11)：1090-1099 (2001)*
20) 永井信夫：〝偏微分方程式としてのシュレディンガー方程式の回路理論〟 第5回量子情報技術研究会資料、QIT2001-24, pp.129-134, (2001)

4.2 総説、解説、評論等

1) 永井信夫：(解説)電子回路に量子力学を —量子現象の電子回路への応用—、電気学会誌、Vol.117、No.8、pp.536-539 (1997)
2) 永井信夫：(総説)学際的研究への期待 —電子科学研究の立場から—、Journal of signal processing, 1-1, 6 (1997)
3) 鈴木正清、永井信夫：(解説)センサアレイを用いる最大尤度方位推定法、電子科学研究、5、14-22 (1997)
4) 永井信夫：(総説) 21世紀の回路理論に思う、Journal of signal processing, 2-1, 6-12 (1998)
5) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第1回 ガラスによる光の反射・透過、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.2, No.1, pp.25-34, (1998. 1)
6) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第2回 複数の光子による反射・透過、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.2, No.2, pp.111-120, (1998. 3)
7) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第3回 定常状態における光の反射・透過、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.2, No.3, pp.194-203, (1998. 5)
8) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第4回 シュレディンガー方程式による電子の反射・透過、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol. 2, No.4, pp.276-285, (1998. 7)
9) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第5回 集中定数回路における反射・透過、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.2, No.5, pp.337-346, (1998. 9)
10) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第6回 無損失2端子対回路と正規化散乱行列、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.3, No.1, pp. 15-24, (1999. 1)
11) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第7回 電信方程式に基づく分布定数線路、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.3, No.2, pp.99-108, (1999. 3)
12) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第8回 無損失分布定数線路の過渡応答、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.3, No.3, pp.173-182, (1999. 5)
13) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第9回 分布定数回路に対するエネルギーの保存則、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.3, No. 4, pp.249-258, (1999. 7)
14) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第10回 シュレディンガー方程式の複素等価回路、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.3, No. 5, pp.315-324, (1999. 9)
15) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第11回 伝送回路理論から見た量子力学、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.4, No.3, pp.229-240, (2000. 5)
16) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第12回 信号処理と影像パラメータ理論、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.4, No.4, pp.292-304, (2000. 7)
17) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第13回 信号処理とリカッチ微分方程式、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.4, No.5, pp.357-368, (2000. 9)
18) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第14回 超高速電子波伝送素子の実現を目指して、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.4, No. 6, pp.425-442, (2000. 11)
19) 永井信夫：(解説)量子回路理論への道(回路理論・ディジタル信号処理論から得る量子力学)、電子情報通信学会誌、Vol.83, No.5, pp.350-352, (2000)
20) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第15回 回路理論の特徴をよく表す縦続行列、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol.6, No.1, pp. 17-26, (2002)
21) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第16回 ディラック方程式とそのディジタル信号への応用、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol. 6, No.2, pp.91-100, (2002)
22) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第17回 1次元無損失の一般化波動方程式および波動関数、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol. 6, No.3, pp.153-162, (2002)
23) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第18回 一般化無損失波動方程式の共鳴および固有値問題、Journal of Signal Processing (信号処理) Vol. 6, No.4, pp.219-228, (2002)
24) 永井信夫：(解説)講義シリーズ 量子力学と信号処理 第19回 波動方程式の諸性質に基づくシュレディンガー方程式の再考、Journal of Signal Processing (信

号処理）Vol.6, No.5, pp.289-298, (2002)

4.4 特許

a．国内特許

1）永井信夫：「繰込トンネルダイオード」、特願平10-328819（1998.11.5）
2）永井信夫：「繰込トンネルダイオード」、特願平10-329167（1998.11.19）
3）永井信夫：「フィルタ装置」、特願2000-325129(P2000-325129)（2000.10.25）
4）永井信夫：「伝送回路」、特願2002-066037(2002.03.11)

4.5 招請講演

1）永井信夫：古典的回路理論とその量子力学への応用、電子情報通信学会　回路とシステム研究会、信学技報、CAS 97-16（1997）
2）永井信夫：[フェロー受賞特別講演]「周期構造系の回路を信号はどのように伝わるか」、電子情報通信学会回路とシステム研究会、信学技報、CAS2001-47, (2001)
3）N. Nagai: Transmission-Line Circuit Model, PIERS 2001, (Progress In Electromagnetics Research Symposium), p.399, July 2001, Osaka

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）真田博文：奨励A、「量子細線及び量子箱型電子波デバイスの最適形状決定への回路理論の応用に関する研究」1,500千円（2000）
2）真田博文：奨励A、(2)「量子細線及び量子箱型電子波デバイスの最適形状決定への回路理論の応用に関する研究」700千円（2001）

4.9 受賞

1）永井信夫：電子情報通信学会フェロー（2000）

4.10 社会教育活動

a．国内外の主要役職

1）永井信夫：電子情報通信学会　北海道支部長（1997-1998）
2）永井信夫：映像情報メディア学会　北海道支部評議員（1996-1998）
3）永井信夫：電子情報通信学会　北海道支部評議員（1998-1999）
4）永井信夫：信号処理学会　顧問（1997-現在）
5）永井信夫：IEEE Sapporo Section の Director（1997-2002）
6）鈴木正清：電子情報通信学会回路とシステム研究専門委員会委員（1999-2000）

c．新聞・テレビ等の報道

1）鈴木正清：「携帯電話回線で陸上から船操作、北大洞爺湖臨湖実験所　サケ追跡システム公開実験、水質調査に応用利用」（北海道新聞）（2000.10.20）
2）鈴木正清：「北大の洞爺湖臨湖実験所　ロボット船でヒメマス追跡、回遊のなぞ解明に挑戦」（室蘭民報）（2000.10.20）

d-1．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）北川文基：最大尤度の統計的性質に基づく信号数推定法（1997）
2）志賀達也：電子波導波路解析への複素等価回路の応用に関する研究（1997）
3）加藤修：TLM 法による量子力学的波動の時間的解析に関する研究（1998）
4）木村励：遺伝的アルゴリズムを用いた多層膜半導体電子波フィルタの設計に関する研究（1998）
5）ムジハンドコ・チャトル・W：サケの自動追尾システムのための音源方位推定に関する研究（1998）
6）津田一樹：二次元電子波導波路の回路理論的解析法に関する研究（1999）
7）三谷雅城：折り畳み型分布定数フィルタに関する研究（1999）
8）外村智之：折り畳み型分布定数フィルタの特性に関する研究（2000）
9）林暁冬：多線条バンドパスフィルタの研究（2000）
10）陳方：鮭の自動追尾システム（2000）

・博士学位

1）真田博文：電子波伝搬のための分布定数回路モデルに関する研究（1998）
2）浅倉邦彦：変調超格子のミニバンド構造に関する研究（2001）
3）津久井陽司：回路モデルによる電子波束の時間域解析（2001）

e．大学院担当講義科目名

1）情報シミュレーション特論（1997-2000）
2）電子情報エレクトロニクス特別演習
3）電子情報エレクトロニクス特別研究第一
4）電子情報エレクトロニクス特別研究第二

感覚情報研究分野

教授　伊福部達（北大院、工博、1971.4～2002.6）
講師　井野秀一（北大院、工博、1993.4～2003.3）
助手　上見憲弘（北大院、工博、1995.10～2001.3）
　　和田親宗（北大院、工博、1996.4～2001.3）
技官　永井謙芝

院生
・平成 9 －14 年度
博士課程
奈良博之、青木直史、高木哲史、敦賀健志、渡辺哲也、
陸　　健、浅川智恵子、禰寝義人
修士課程
小林有希子、斉藤　幹、李乙松、赤井亮仁、奥村与志照、
小坂井敦、重村典昭、松尾　力、小川喜嗣、高橋はるか、
本間　健、笈沼元紀、加藤士雄、山田貴史

1．研究目的

ヒトの認知機能や運動機能を解析する研究に基づき、衰えたり失った感覚、脳、運動に関する機能を補助・代行する支援機器を設計するとともに、得られた知見や技術をバーチャルリアリティやロボティクスに応用する。

さらに、これらの応用技術を支援機器の開発にフィードバックさせ、機器を現場で使用してまだ問題があれば再び基礎に戻るというループを描きながら福祉工学（Assistive Engineering）のための技術体系を構築する。

具体的には、この研究の流れを「聴覚と発声」、「体性感覚と運動機能」および「空間知覚と平衡機能」に関する支援機器の設計に適用する。現場を重視し、産・官の協力を得ながら、実用器の開発を目指して研究を進める。

2．研究成果

・平成 9 －10 年度

(a)　聴覚と発声に関する研究成果

(1)　九官鳥の発声音の解析研究からヒントを得て、呼気情報を利用して抑揚を制御できる人工喉頭を開発した。我が国で平成 10 年度に 1000 台が製品化され(図 1)、海外でも使用できる道を拓いた。この研究に関連して「ゆらぎ」を考慮した自然性の高い高品質の音声分析合成アルゴリズムを開発した。

(2)　また、音声合成器を利用した視覚障害者のための画面読み上げソフト（図 2 ）を開発し、3000 台が製品化された。

(3)　各種感覚代行のための廉価・低消費電力の振動子マトリクス（ 4 ×16）を開発した（図 3)。

(b)　体性感覚と運動機能に関する研究成果

(1)　水素吸蔵合金（MH）を利用した高出力・高柔軟性・無音・低消費電力などの機能を有する MH アクチュエータが実用化段階に入った。MH アクチュエータを利用して、立ち上がりや着座動作の解析研究を基礎にした移乗介助機器（図 4 ）の試作に成功した。

(2)　また、各種運動機能の訓練リハビリ機器のための小型 MH アクチュエータを開発した(図 5)。テレイグジステンス・ロボットやリハビリ機器のための人工触覚や触覚ディスプレイを試作した。

(3)　テレイグジステンス・ロボットやリハビリ機器のための　人工触覚や触覚ディスプレイを試作した（図 6)。

(c)　空間知覚と平衡機能に関する研究成果

(1)　複合現実感（MR）システム研究所の札幌分室（図 7 ）で進められてきた共同研究の結果から、HMD(頭部搭載型ディスプレイ）や直視ディスプレイを介して 4 時間にわたる 3 次元映像を見せても視覚機能に異常が認められなかっ

図 1．抑揚を制御できる電気式人工喉頭（ユア・トーン）

図 2．視覚障害者対応画面読み上げソフトウエア（95 リーダ）

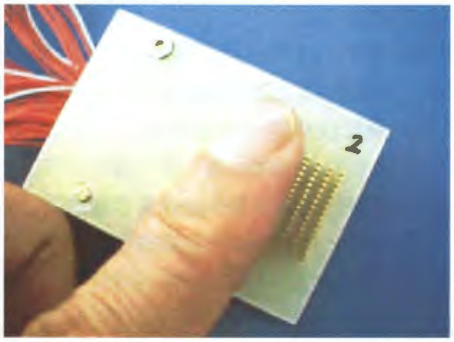


図 3．感覚代行のための廉価・低消費電力型振動子マトリクス

図4．水素吸蔵合金（MH）を利用した移乗介助装置

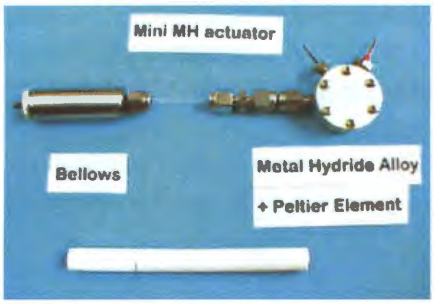


図5．各種リハビリ機器のための小型 MH アクチュエータ

図6．テレイグジステンス型ロボットハンド

図7．MR システム研究所札幌分室で進められている MR 刺激の人体影響に関する実験の様子

たことを確認した。

(2) 左右に移動する縞模様などによって生じる自己運動感覚を定量化するとともに、その感覚を制御できたことから、VR 酔い（動揺病）を軽減する方法が提案した。

(3) 作業環境に呈示された仮想物体の奥行き知覚は理論値よりも手前になり、それを補正する方法を見出すとともに、仮想物体に触れたときに触覚フィードバックを与えると奥行き知覚が極めて正確になることなどを明らかにした。

・平成 11－12 年度

(a) 聴覚と発声に関する研究成果

(1) 先に開発した抑揚制御型人工喉頭を使用者の意見を基に改良し製品化（図1）することができた。これの基礎となった九官鳥音声の解析研究は超腹話術音声の発声方式の研究に発展し、現在、口唇裂者のための発声訓練方法に活かす道を探っている。また、声の「ゆらぎ」も考慮した自然性の高い人工喉頭音声の合成法を提案した。

図1．抑揚を制御できる改良型電気式人工喉頭版

(2) また、抑揚強調機能が難聴者の音声の聞き取り向上に寄与することを、四声（一漢字の意味を決める4種類の抑揚）が特徴となっている中国語音声により明らかにした。

(3) さらに、音声合成器を利用した視覚障害者のための画面読み上げソフトをウィンドウズ 2000 に対応するように改良し、多くのアプリケーションを使用できるようにした。

(4) 各種感覚代行のための廉価・低消費電力の振動子マトリクス（4×16）を開発し（図2）、ヒューマンインタフェースへの触覚利用への道を具体化した。

図2．触覚インタフェースのための振動子マトリクス

(5) 誤りを含む音声認識結果を文字で話者の前に提示する方法で、どの程度の誤りであれば、どの位の理解率が得られるかを調べ、話者の口唇の動きや表情が同時提示されれば 60%の識別率で文意を理解できることが分かった。その

結果に基づき、ポータブル音声認識装置と透過型メガネディスプレイを組み合わせた音声認識補助装置（図３）を試作した。

図３．音声確認結果が話者の口元に表示されるシステム

(b)　体性感覚と運動機能に関する研究成果

(1)　ヒトの運動解析研究に基づき、立ち上がりや着座動作がスムースに遂行されるような移乗介助方式を示した。さらに、その結果に基づき装置（図４）の試作に成功した。

これには実用化段階に入った水素吸蔵合金（MH）アクチュエータを利用しているため、柔らかい動きを実現できるという特徴がある。

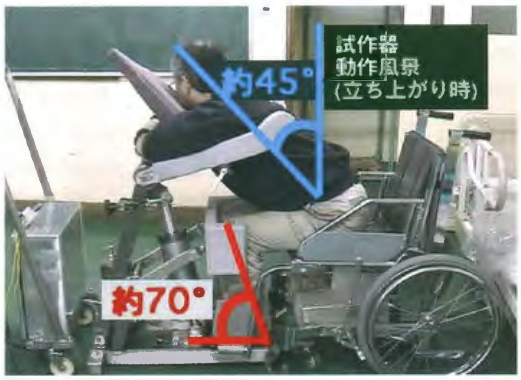


図４．水素吸蔵合金（MH）を利用した移乗介助装置

(c)　空間知覚と平衡機能に関する研究成果

(1)　複合現実感（MR）システム研究所の札幌分室で進められてきた４年間にわたる共同研究が終了した。とくに、CGで作成した立体映像（図５）が視覚機能の調節応答速度の低下をもたらすことを見出し、立体映像の人体影響に関するガイドラインを示すことができた。この成果は著書「立体映像の人体影響を探る～VR環境構築の指針へ向けて～」として纏められた。

(2)　左右に移動する縞模様などによって生じる自己運動感覚が音像刺激により減少することから音刺激を工夫することにより、酔い（動揺病）を軽減できる可能性が示された。

(3)　視運動刺激と移動する音像により立位姿勢を制御できることを見出し、バランスに関するリハビリテーションの新しい方法への道を開くことができた。

図５．直視立体CG映像の人体影響を評価している様子

・平成13年度

(a)　聴覚と発声に関する研究成果

(1)　先に開発した抑揚制御型人工喉頭を使用者の意見を基に改良し製品化（図１）するとともに、できるだけ手を使わないハンズフリー型の人工喉頭の設計に着手した。これの基礎となった九官鳥音声の解析研究は超腹話術音声の研究に発展し、その発声メカニズムが明らかにされた。また、声の「ゆらぎ」も考慮した自然性の高い人工喉頭音声の合成法を示すとともに、抑揚強調機能が難聴者の音声の聞き取り向上に寄与するという知見に基づいて新しいデジタル補聴器を提案した。

図１．抑揚を制御できる改良型電気式人工喉頭

(2)　先に開発した廉価・低消費電力の振動子マトリクス（4×16）を用いて、聴覚代行、視覚代行およびバーチャルリアリティやロボットのための触覚インタフェースを具体化した（図２）。

(3)　不特定の話者が話した音声を特定話者が復唱することにより、既存の音声認識装置でも90%以上の認識率が得られることを示した。さらに、話者の顔画像を遅らせて文字情報と同時に表示することにより、音声理解の手がかりが増えることを確認した。

その結果に基づき、聴覚障害者が会議等に参加するのを助ける音声認識システムを開発し、実際の会議で話者と認識された文字とをスクリーンに表示する実験を行い、実用化の道を拓いた（図３）。

図２．振動子マトリクスを装備した触覚インタフェース

図３．音声認識結果が話者の口元に表示されるシステム

図４．MH アクチュエータを利用した肘関節リハビリ機器

図５．研究成果をまとめた著書

このシステムは 2002 年 10 月に札幌で開かれる障害者国際会議（４年ごとに開かれる国際集会で、約 100 カ国から 2000 人ほどが集まる会議）で使用されることになった。

さらに、通訳者が介在することで汎用性のある音声通訳システムとしても利用できることから、本研究の成果をユニバーサルデザインの一例として生かされることになった。

(b)　体性感覚と運動機能に関する研究成果

(1)　ヒトの運動解析研究に基づき、立ち上がりや着座動作がスムースに遂行されるような移乗介助機器を開発した。

これには実用化段階に入った水素吸蔵合金（MH）アクチュエータを利用しているが、今年度はアクチュエータのベローズとして高分子複合材料を用いることにより、大幅に柔軟性を増加させ、また、小型・軽量化および超廉価に成功した。このソフトアクチュエータを用いて、手指や肘の関節可動域や筋力回復の訓練のための関節リハビリ機器の設計を試みた（図４）。

(c)　空間知覚と平衡機能に関する研究成果（図５）

(1)　現実情報と仮想情報を重ね合わせる新しい情報表示方法すなわち複合現実感（MR）システムにおいて、「VR 酔い」を引き起こす視覚刺激環境について考察した。その結果、CG による立体映像、現実世界を立体カメラで捉えた立体映像、および従来の２次元映像とで酔いの大きさは CG 画像で大きくなることから、現在の CG 画像の問題点を指摘した。

(2)　左右に移動する縞模様などによって生じる自己運動感覚が音像刺激により減少することから音刺激を工夫することにより、酔い（動揺病）を軽減できる可能性が示された。

(3)　移動する音像や画像さらに体制感覚刺激により立位姿勢を変化するという知見に基づき、バランスに関するリハビリテーションの新しい方法を提案するとともにその有効性を検証した。

３．今後の研究の展望・将来計画

(a)「聴覚と発声」に関する支援研究としては、昨年度開発した廉価・低消費電力の振動子マトリクス（図２）を利用して、小型触覚ボコーダの製品化を行う。また、医療福祉機器研究所で進められている失語症在宅リハビリシステム開発研究と連動してそのシステムの評価を行う。

(b)「体性感覚と運動機能」に関する支援研究としては、触感を決める要因を探るとともに、触覚ディスプレイおよび小型 MH アクチュエータを開発し、繊細な動きを実現できるようなリハビリ機器を試作する。

(c)「空間知覚と平衡機能」に関する支援研究としては、

MR 刺激の人体へ及ぼす影響を評価するとともに、MR による感覚統合を利用した平衡機能訓練のためのリハビリ機器の開発を目指す。

(a) 聴覚と発声

(1) 本年度の成果である廉価・低消費電力の振動子マトリクスを利用して、音声や画像に関する感覚代行方式およびバーチャルリアリティやロボットとの触覚インタフェースを具体化する。

(2) 音声自動認識の結果の文字列と顔画像とをスクリーン上で重ねる新しい音声通訳方式を実用化する。

(3) 超腹話術音声における両唇音パ行、バ行、マ行の発音機構をモデル化し、そのモデルを発音訓練や音声楽器に応用する。

(b) 体性感覚と運動機能

(1) 触覚インタフェースを自動車などの人間ー機械系の操作性向上と危険情報提示へ応用する。

(2) 触感を決める要因を探り、バーチャルリアリティにおける触覚ディスプレイを設計する。

(3) 高分子複合フイルム材料で水素を封印できる小型 MH アクチュエータを開発し、繊細で柔軟な動きを実現できるようなリハビリ機器を開発する。

(4) 上記アクチュエータによる移乗介助方式を確立するとともに、弱った筋肉のためのパワーアシストを開発する。

(c) 「空間知覚と平衡機能」

(1) MR による感覚統合機能を利用した平衡機能訓練のためのリハビリ機器を開発する。

(2) MR 刺激の人体影響を軽減する方法として、立体動画像によって生じる「酔い」を軽減する方式を明らかにする。

(3)超音波反射音を頭部伝達関数で処理することで、物体位置から音が聞こえるような視覚補助方式を具体化する。

以上の研究を、図 6 に示したような、ヒューマン機能解析、アシスティブ機器設計およびバーチャルリアリティやロボティクスが一体となった研究方法に沿って進める。

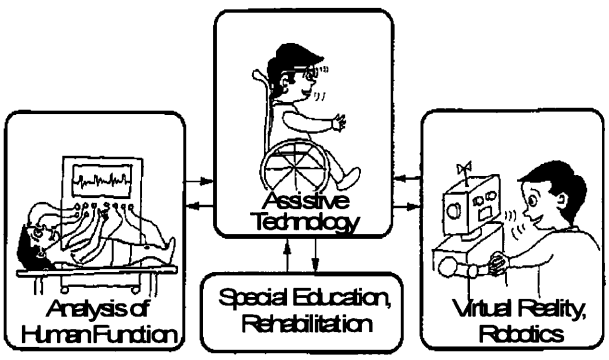


図 6．感覚情報研究分野における研究の流れ

4．資料

4.1 学術論文

1) Ifukube, T.: "A Study on Tele-Existence of the Tactile Sense", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 9(3): 197-202 (1997)*

2) Wakisaka, Y., Muro, M., Kabutomori, T., Takeda, H., Shimizu, S., Ino, S. and Ifukube, T.: "Application of Hydrogen Absorbing Alloys to Medical and Rehabilitation Equipment", *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering*, 5(2): 148-157 (1997)*

3) Shimizu, T., Ino, S., Tsuruga, T., Ifukube, T., Wakisaka, Y. and Izumi, T.: "Evaluation of New Force Display using Metal Hydride Alloy", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 9(1): 14-23 (1997)*

4) Tanaka, T., Takeda, H., Izumi, T., Ino, S., and Ifukube, T.: "Age-related changes in postural control associated with location of the center of gravity and foot pressure", *Physical & Occupational Therapy in Geriatrics*, 15(2): 1-14 (1997)*

5) Miyoshi, S., Sakajiri, M., Ifukube, T. and Matsushima, J.: "Evaluation of the Tripolar Electrode Stimulation Method by Numerical Analysis and Animal Experiments for Cochlear Implants", *Acta Otolaryngol*, 532: 123-125 (1997)*

6) Matsushima, J, Miyoshi, S., Sakajiri, M., Uemi, N., Ifukube, T. and Sakai, N.: "Evaluation of implanted tinnitus suppressor based on tinnitus stress test", *International tinnitus journal*, 3: 123-132 (1997)*

7) Aoki, N. and Ifukube, T.: "The generation of waveform fluctuations for the enhancement of the quality of sustained vowels", *IEEE Information, Proceedings of Communications, and Signal Processing*,: 998-1002 (1997)*

8) 井野秀一、伊福部達、和田親宗、敦賀健志、泉隆、田中敏明：「触覚の材質感呈示システムのための基礎的研究」、『電気学会論文誌 C 分冊』、117(8)：1062-1068 (1997)*

9) Ifukube, T.: "From sensory substitute technology to virtual reality research", *Artificial Life Robotics (Invited Article)*, 4(2), 145-150 (1998)*

10) Ifukube, T., Ino, S., Uemi, N. and Wada, C.: "One basic research approach for assistive technology in Japan", *Computers and Assistive Technology, ICCHP* '98, 499-508 (1998)*

11) Aoki, N. and Ifukube, T.: "Fractal modeling of fluctuations in the steady part of sustained vowels for high quality speech synthesis", *IEICE Tarns. Fundamentals*, E81-A(9): 1803-1810 (1998)*

12) Tanaka, T., Takeda, H., Izumi, T., Ino, S. and

Ifukube, T.: "Effects on the Center of Gravity and Foot Pressure Contribution toStanding Balance Associated with Aging in Healthy Adults", *Journal of Human Movement Studies*, 34: 233-253 (1998)*

13) 敦賀健志、井野秀一、佐藤満、伊福部達、泉隆、田中敏明、室正彦、脇坂裕一：「高齢者のための移乗介助機器開発を目的としたヒトの動作パターンに関する研究」、『電気学会論文誌A分冊』、118(3)：239-244(1998)*

14) Watanabe, T., Okada, S. and Ifukube, T.: "Development of a GUI screen reader for blind persons", *Systems and Computers in Japan*, 29, 13: 18-27 (1998)*

15) N. Aoki and T. Ifukube: "Analysis and Perception of Spectral 1/f Characteristics of Amplitude and Pitch Fluctuations in Normal Sustained Vowels," *The Journal of the Acoustic Society of America*, 106(1): 423-433 (1999)*

16) T. Tanaka, H. Takeda, T. Izumi, S. Ino and T. Ifukube: "Effects on the Location of the Center of Gravity and Foot Pressure Contribution to Standing Balance Associated with Aging," *Ergonomics,* 42(7): 997-1010 (1999)*

17) S. Miyoshi, S. Shimizu, J. Matsushima and T. Ifukube: "Proposal of a New Method for Narrowing and Moving the Stimulated Region of Cochlear Implants: Animal Experiment and Numerical Analysis," *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, 46(4): 451-460 (1999)*

18) S. Miyoshi, T. Ifukube and J. Matsushima: "Measurement of Electric Intensity Distribution Inside Human Cadaver Cochlea for Multichannel Cochlear Implants," *Electrical Engineering in Japan*, 129(1): 1-9 (1999)*

19) C. Wada, H. Shoji and T. Ifukube: "Development and Evaluation of a Tactile Display for a Tactile Vocoder," *Technology and Disability*, 11(3): 151-159 (1999)*

20) T. Ifukube and N. Uemi: "A New Electrical Larynx with Pitch Control Function," *Proceedings of second EACP*, 7-10 (1999)

21) T. Ifukube and N. Uemi: "A Pitch Controlled New Electrical Larynx," *Proceedings of 5th Japan-Taiwan Conference in Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 22 (1999)

22) T. Tanaka, S. Noriyasu, S. Ino and T. Ifukube: "The Influence of Moving Auditory Fields on Standing Balance in a Comparison of the Healthy Young and the Elderly," *Proceedings of 13th World Confederation for Physical Therapy Congress*, 413 (1999)*

23) T. Tanaka, H. Takeda, S. Ino and T. Ifukube: "Influence of the Sensori-motor Function of the Toe and Center of Gravity on Standing Balance in Healthy Adults with Aging," *Proceedings of 13th World Confederation for Physical Therapy Congress*, 414 (1999)*

24) H. Nara, S. Ino, T. Tanaka, T. Izumi and T. Ifukube: "A Proposal of a Rehabilitation Method for Elderly People having Poor Equilibrium Sense using Visual and Auditory Stimulation," *Proceedinsg of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,* I-112-I-117,CD-ROM(1999)*

25) T. Tsuruga, S. Ino, T. Ifukube, M. Sato, T. Tanaka, T. Izumi and M. Muro: "A Basic Study for a Robotic Transfer Aid System Using a High Power MH Actuator," *Proceedinsg of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,* I-147-I-152,CD-ROM(1999)*

26) C. Wada, Y. Li, S. Ino and T. Ifukube: "Proposal to Correct Depth Perception of Virtual Objects by Using Tactile Feedback," *Proceeding of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,* VI-92-VI-97,CD-ROM(1999)*

27) 青木直史、伊福部達：「母音音源信号のランダムフラクタル性を利用した合成音声の自然性改善」、電子情報通信学会論文誌A、J 82-A(9)：1437-1445 (1999)*

28) 青木直史、伊福部達：「合成持続発声母音の自然性改善を目的とした音源波形揺らぎの生成とその主観的及び客観的評価」、電子情報通信学会論文誌D-II、J 82-D-II、(5)：843-852 (1999)*

29) 青木直史、伊福部達：「持続発声母音における振幅ゆらぎ及びピッチゆらぎの周波数特性とその音響心理的効果」、電子情報通信学会論文誌A、J-82-A(5)：649-657 (1999)*

30) 渡辺哲也、岡田伸一、伊福部達：「GUI環境における視覚障害者用CD-ROM電子出版物音声化システムの開発」、電子情報通信学会論文誌D-I、J 82-D-1(4)：589-592 (1999)*

31) 井野秀一、泉隆、伊福部達：「ヒトの感覚特性に基づいたハプティックインタフェースの開発」、ヒューマンインタフェース学会論文誌、1(4)：9-18 (1999)*

32) 井野秀一、赤井亮仁、和田親宗、伊福部達：「表面粗さ感の惹起を目的とした触覚ディスプレイの心理物理学的研究」、豊田理化学研究、53：51-57 (2000)*

33) 和田親宗、庄司壽一、伊福部達：「異なる触感を利用した聴覚代行方式の提案」、ヒューマンインタフェース学会誌、1(3)：29-34 (1999)*

34) T. Tsuruga, S. Ino, T. Ifukube, M. Sato, T. Tanaka, T. Izumi and M. Muro: "A Basic Study for a Robotic Transfer Aid System Based on Human Motion Analysis," *Advanced Robotics*, 14(7): 579-595

(2000)*

35) H. Nara, S. Ino and T. Ifukube: "Effects of Optokinetic Stimulation Presented in a Wide View on the Sense of Equilibrium," *IEICE Transactions on Information and Systems*, E-83-D(4): 937-942 (2000)*

36) C. Wada, T. Ifukube, T. Watanabe and K. Itoh: "A Proposal for a Virtual Input Device for People with Arm Disabilities," *International Conference on Computers Helping People with Special Needs 2000*, 737-744 (2000)*

37) J. Lu, N. Uemi, G. Li and T. Ifukube: "Tone Modifications Used for Improving the Discrimination of Mandarin Words for the Hearing-impaired," *IEEE International Conference on Signal Processing, ICSP2000*, 730-733 (2000)*

38) M. Sakajiri, S. Okada, K. Yamamoto, M. Yoshinari, H. Tomita, C. Wada and T. Ifukube: "The Development of a Communication Aid for Deaf-blind People to Assist Their Finger Braille Communication by using Vibration," *International Conference on Computers Helping People with Special Needs 2000*, 617-623 (2000)*

39) M. Maruishi, N. Uemi, Y. Mano, T. Ifukube, T. Ikeda, M. Sato, T. Koyama, H. Kishimoto and S. Sasaki: "Effect of Sound Stimulation for Ataxia, Part 1: Effect in Patients with Deep Sensory Disturbance," *Proceedings of the 13th Congress of International Society of Electrophysiology and Kinesiology*, 300-301 (2000)*

40) M. Maruishi, N. Uemi, Y. Mano, T. Ifukube, T. Ikeda, M. Sato, T. Koyama, H. Kishimoto and S. Sasaki: "Effect of Sound Stimulation for Ataxia, part2: Effect in Healthy Volunteers with Their Limbs Vibrated," *Proceedings of the 13th Congress of International Society of Electrophysiology and Kinesiology*, 302-303 (2000)*

41) 加藤熙、坂上竜資、畢良佳、王佳敏、小西秀和、堀井毅史、井野秀一、的場一成、池田雅人、谷口威夫：「歯周炎と咬合性外傷との合併による歯周組織破壊のメカニズムの解明」、日本歯科医学会誌、19：81-86(2000)*

42) 堅田秀生、井野秀一、永井謙芝、鈴木康夫、伊福部達：「自由曲面プリズムを用いたヘッドマウントディスプレイ（HMD）による長時間映像負荷が視覚機能に与える影響」、日本神経眼科学会論文誌、17(4)：433-442 (2000)*

43) 奈良博之、井野秀一、恩田能成、伊福部達：「移動する音像刺激を用いた姿勢制御に関する基礎的研究」、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、5(3)：1013-1018 (2000)*

44) T. Ifukube: "A Study of Universal Accessibility for People in Japan with Communicative and Perceptual Disorders -Plenary Lecture," *Proc. EC/NSF Workshop on Universal Accessibility of Ubiquitous Computing: Providing for the Elderly*, IT-1-IT-8 (2001)*

45) T. Ifukube: "A Study of HCI for People in Japan with Communication Disorders," *Proc. of The cooperating conference Universal Access in Human-Computer Interaction*, 924-928 (2001)*

46) T. Ifukube: "A Study of Human Function for People with Sensory/Motor Disorder in Japan," *Proc. The International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions*, 15-20 (2001)*

47) T. Ifukube: "A Study of Human Interface for People in Japan Including the Disabled," *Proc. The Fourth IFAC Symp. on Intelligent Autonomous Vehicles*, 27-31 (2001)*

48) T. Ifukube: "A Guideline for the Design of HMDs/3D-Displays Based on Physiological Parameters for Use in an MR Environment," *Proc. The 2nd International Symp. on Mixed Reality*, 116-121 (2001)*

49) J. Lu, N. Uemi, G. Li and T. Ifukube: "Tone Enhancement in Mandarin Speech for Listeners with Hearing Impairment," *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, E84-D(5): 651-661 (2001)*

50) T. Tanaka, S. Kojima, H. Takeda, S. Ino and T. Ifukube: "The influence of moving auditory stimuli on standing balance in healthy young adults and the elderly," *Ergonomics*, 44(15): 1403-1412 (2001)*

51) 伊福部達：「物まね鳥と超腹話術―その声の謎を診る―」、可視化情報学会論文集、21(1)：11-15（2001)*

52) 伊福部達：「高齢難聴者のための音声情報変換方式」、電子情報通信学会誌、84(5)：325-328（2001)*

53) 伊福部達：「物まね鳥と超腹話術―聴覚をだます仕組―」、日本音響学会講演論文集、138：459-462(2001)*

54) 井野秀一、小坂井敦、奈良博之、服部裕之、伊福部達：「透過型HMDと音声認識技術を利用した聴覚補助方式の提案」、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、6(3)：177-184（2001)*

55) 伊藤和幸、数藤康雄、井野秀一：「注視点の仮想拡大表示による視線入力補助法」、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、6(3)：185-192（2001)*

56) 橋場参生、上見憲弘、須貝保徳、伊福部達：「抑揚制御機能を備えた電気式人工喉頭の製品化と評価」、電子情報通信学会論文誌、D-II（J184D-ii)：1240-1247（2001)*

57) 伊福部達：「立体映像の人体影響の評価と設計指針」、日本光学会誌、31(3)：163-165（2002)*

58) Y. Gorouya, Y. Tsujimi, Y. Yamashita, T. Ifukube and T. Yagi: "Central Peak in Pb ($Z_{n1/3}N_{b2/3}$) O_3/9%

$PbTiO_3$ Relaxor Studied by 90° Brillouin Scattering", *Ferroelectrics*, 266: 165-169 (2002)
59) R. Sakagami, T. Horii, S. Ino, K. Matoba, H. Kato and M. Kawanami: "Development of Portable Bruxizum Monitoring and Analysis Device Equipped with Microcomputer and Its Practical Application", *Frontiers of Medical and Biological Engineering*, 11(4): 295-306 (2002)
60) 坂上竜資、加藤熙、土田泰之、吉田幾代、堀井毅史、井野秀一、川浪雅光：「ブラキシズム自動解析システムの開発」、日本歯科保存学雑誌、45(2)：349-355(2002)
61) 坂上竜資、加藤熙、土田泰之、吉田幾代、堀井毅史、井野秀一、川浪雅光：「覚醒時の意識的クレンチングの筋活動を基準とした睡眠時のブラキシズムの発現状態」、日本歯科保存学雑誌、45(2)：356-361（2002）
62) 坂上竜資、井野秀一、堀井毅史、加藤熙、土田泰之、吉田幾代、川浪雅光：「携帯型ブラキシズム時間計測装置の開発」、日本歯科保存学雑誌、45(3)：376-382(2002)
62) T. Homma, S. Ino, T. Izumi, H. Kuroki and T. Ifukube: "Measurement of mechanical characteristics of a fingerpad surface in the design of a tactile display", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 15(2): 153-161 (2003)
63) C. Asakawa, H. Takagi, S. Ino and T. Ifukube: "Auditory and Tactile Interfaces for representing the Visual Effects on the Web", *Proceedings of the 5th international ACM SIGCAPH conference on Assistive Technologies (ASSETS 2002)*, 65-72 (2002)
64) 加藤士雄、井野秀一、永井謙芝、渡邉括行、堀耕太郎、似鳥寧信、高杉弘子、服部裕之、伊福部達：「国際会議における聴覚障害者支援を目的とした音声字幕変換システムの設計」、ヒューマンインタフェース学会研究報告集、4(4)：65-70（2002）
65) 高橋はるか、加藤士雄、井野秀一、伊福部達：「同時復唱を利用した不特定話者の音声認識—復唱訓練方式について」、日本音響学会聴覚研究会資料、33(1)：H-2003-02（2003）

4.2 総説、解説、評論等

1）伊福部達：(解説)「バーチャル・リアリティが切り拓く新技術体系」、『研究、技術、計画』、12（1/2)：26-31（1997）
2）伊福部達：(解説)「認知科学への新しいアプローチ」、『科学基礎論研究』、25(1)：1-7（1997）
3）伊福部達：(解説)「マルチメディア時代における医療・福祉支援技術」、『電子情報通信学会誌』、80(8)：822-829（1997）
4）伊福部達：(解説)「ライフサポートにおける福祉工学の役割」、『ライフサポート学会誌』、9(1)：1-8（1997）
5）伊福部達：(解説)「聴覚障害者に対する各種福祉工学デバイスの特徴と適応」、『日本ME学会雑誌』、11(4)：34-42（1997）
6）伊福部達：(解説)「人の感覚の代用どこまで」、『電子情報通信学会誌』、81(2)：154-159（1998）
7）伊福部達：(解説)「感覚代行方式」、『日本ME学会雑誌BME』、13(2)：8-13（1999）
8）Ifukube, T.: (解説) "The 3 rd Annual Conference of the Virtual Reality Society of Japan", *Science & Technology in Japan*: 2-8 (1998)
9）伊福部達：「バーチャルリアリティと人間」、パネル講演、98-99（1999）
10）伊福部達：「音の福祉工学—先端技術が果たす役割—」、音声言語情報処理、25(9)：41-47（1999）
11）伊福部達：「聴覚障害と音声コミュニケーション」、電気学会誌、119(11)：679-682（1999）
12）伊福部達：「音響福祉工学」、精密工学会誌、65(12)：1708-1712（1999）
13）伊福部達：「感覚代行方式」、BME、13(2)8-13(1999)*
14）伊福部達：「Virtual Realityが変える医療「福祉への応用」」、ACCESS、14：13-15（1999）
15）伊福部達、上見憲弘：「人工発声器官」、歯科材料・器械、18(34)：237-237（1999）
16）伊福部達：「垣根を越えて」、日本バーチャルリアリティ学会誌、5(1)：4-5（2000）
17）伊福部達：「VR文化フォーラム2000—音と光とトランス・イグジスタンス—」、日本バーチャルリアリティ学会誌、5(2)：34-44（2000）
18）伊福部達、川嶋稔夫：「画像をあやつる—仮想現実感とその応用—(北の国から見る、見せる)」、電子情報通信学会特別小特集、83(9)：670-674（2000）
19）伊福部達：「九官鳥、インコ、そして超腹話術」、日本音響学会誌、56(9)：657-662（2000）
20）井野秀一、伊福部達：「未来を拓く福祉工学への誘い—北海道大学電子科学研究所感覚情報研究室—」、バイオメカニズム学会誌、24(1)：61-62（2000）
21）和田親宗、伊福部達：「触覚による代行」、リハビリテーションエンジニアリング、15(4)：23-30（2000）
22）伊福部達：「透明技術」、バイオメカニズム学会誌、25(2): 57-57（2001)*
23）井野秀一：「VR刺激の生体への影響」、バイオメカニズム学会誌、25(2)：75-80（2001)*
24）井野秀一：「福祉とVR」、TVRSJ、6(3)：155-156（2001)*

4.3 著書

1）伊福部達：(単著)『音の福祉工学』、(コロナ社　東京)、250頁（1997）
2）伊福部達：(分担執筆)「〝気配〟を探る」、辻三郎：『感性の科学－感性情報処理へのアプローチ』：88-93（サイエンス社　東京）（1997）

3）伊福部達：「両耳聴の検査、音源定位検査―スピーカ法―」、『JOHNS』、15(1)：101-104（1999）*

4）T. Ifukube: "One Basic Research Approach of Assistive Technology in Japan," *Human Life Support Biomechanics*, (Springer-Verlag Tokyo) pp.191-198 (2000)*

5）伊福部達：「視覚と聴覚の統合」、『視覚情報処理ハンドブック』、（朝倉書店）pp.481-485（2000）*

6）伊福部達：「聴覚情報とその処理」、『バイオミティックスハンドブック』、（エヌ・ティー・エス）pp.657-663（2000）*

7）伊福部達、井野秀一：「人工現実感の評価　―VRの生理・心理・社会的影響―、『バーチャルリアリティの基礎4』、舘暲監修、伊福部達編、（培風館）pp.42-62（2000）*

8）伊福部達：「感覚補助代行における電気刺激法」、『クリニカルエンジニアリング』、（秀潤社）12(1)：12-18（2001）*

9）伊福部達（監修）：『立体映像の人体影響を探る―VR環境構築の指針に向けて―』、（エム・アール・システム研究所）pp.1-146（2001）*

10）井野秀一、伊福部達、禰寝義人：「聴覚補助・代行装置」、『健康・福祉工学ガイドブック』、（工業調査会）pp.195-206（2001）*

11）関喜一、井野秀一、渡辺哲也、村山慎二郎：「視覚補助・代行装置」、『健康・福祉工学ガイドブック』、（工業調査会）pp.178-194（2001）*

12）井野秀一：「上肢作業から見たビデオシースルーMHDの評価」、『立体映像の人体影響を探る―VR環境構築の指針に向けて―』、（エム・アール・システム研究所）pp.107-124（2001）*

13）井野秀一：「自己運動感覚の定量的評価法と制御法」、『立体映像の人体影響を探る―VR環境構築の指針に向けて―』、（エム・アール・システム研究所）pp.125-143（2001）*

4.4　特許

1）伊福部達：「触覚刺激装置及び方法」、特願平10-377019（1998.12.8）

2）伊福部達：「音声通訳システム及び音声通訳プログラム」、特願2001-44794（P2001-44794）（2001.2.21）

3）伊福部達：「音声表示システム及び音声表示プログラム」、特願2001-44686（P2001-44686）（2001.2.21）

4.5　招請講演

1）伊福部達：「認知科学への新しいアプローチ」基礎科学学会大会、1997.6（札幌）

2）伊福部達：「福祉の家」日本ME学会秋季大会、1997.11（横浜）

3）Ifukube, T.: "One Basic Research Approach of Assistive Technology in Japan", *Pittsburgh University*, 1998.3 (Pittsburgh)

4）伊福部達：「未来を拓く福祉工学への招待」バイオメカニズム学会大会、1998.12（札幌）

5）伊福部達：「福祉ロボット」日本ロボット学会大会、1998.12（札幌）

6）伊福部達：「複合現実感（MR）を利用した手術における感覚統合の役割と重要性」日本外科学会大会、1999.3（福岡）

7）T. Ifukube and N. Uemi: "A New Electrical Larynx with Pitch Control Function," *The Second East Asian Conference on Phonosurgery,* Seoul, Korea (1999-11)

8）T. Ifukube: "One Basic Research Approach of Assistive Engineering in Japan," Toyota International Symposium, Nagoya, Japan (1999-12)

9）井野秀一、伊福部達：「複合現実感を利用した手術支援における感覚統合の重要性」、日本機械学会ロボティクスメカトロニクス99講演会、東京、日本（1999-6）

10）伊福部達：「感覚情報からみた高臨場感」、映像メディア学会高臨場感ディスプレイフォーラム、東京、日本（1999-11）

11）伊福部達：「バリアフリー技術が拓く新規産業への道」、第2回産学官交流会、札幌、日本（1999-11）

12）T. Ifukube: "A Guideline for the Design of HMDs/3D-Displays Based on Physiological Parameters for Use in an MR Environment," The Second International Symposium on Mixed Reality, Yokohama, Japan (2001-3)

13）和田親宗：「触覚を利用した聴覚代行」、筑波技術短期大学、つくば、日本（2000-10）

14）T. Ifukube: "A Study of Universal Accessibility for People in Japan with Communicative and Perceptual Disorders," EC/NSF Workshop on Universal Accessibility of Ubiquitous Computing: Providing for the Elderly, Alader do Sal, Portugal (2001-5)

15）T. Ifukube: "A Study of HCI for People in Japan with Communication Disorders," The co-operating conference Universal Access in Human-Computer Interaction, Neworlins, U.S.A (2001-8)

16）T. Ifukube: "A Study of Human Interface for People in Japan Including the Disabled," The Fourth IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Sapporo, Japan (2001-9)

17）T. Ifukube: "A Study of Human Function f for People with Sensory/Motor Disorder in Japan," The International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, Sapporo, Japan (2001-9)

18）伊福部達：「物まね鳥と超腹話術―聴覚をだます仕組

—」、日本音響学会、大分（2001-10）

19）T. Ifukube: “Technologies for the elderly and disabled,” International Workshop of Generation Research Program, Munich, Germany (2001-12)

4.6 シンポジウムの開催

b．一般のシンポジウム（組織者、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）伊福部達（電子情報処理部門）：〝文部省科学研究費重点領域研究「人工現実感」公開シンポジウム〞（30名、北海道大学・ファカルティハウス）（1997.11）

2）伊福部達（電子情報処理部門）：〝「VRに望むこと—福祉と教育の現場から—」〞（日本バーチャルリアリティ学会第3回大会）（100名、北海道大学・学術交流会館）（1998.8）

3）伊福部達（電子情報処理部門）：〝「北海道における福祉機器開発とその実用化への取り組み」〞（第19回バイオメカニズム学術講演会）（150名、北海道大学・学術交流会館）（1998.11）

4）伊福部達（電子情報処理部門）：〝日本音響学会聴覚研究会〞（30名、北海道大学電子科学研究所）（2001.6.15）

5）井野秀一：〝日本音響学会聴覚研究会〞（30名、北海道大学）（2003.1.17）

6）井野秀一：〝ヒューマンインタフェースシンポジウム2002〞（500名、北海道大学）（2002.9.1-3）

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）伊福部達、重点 (1)、体内および外部世界の人工現実感の評価研究、31,100千円（1997）

2）伊福部達、基盤B 展開(2)、話速・抑揚変換機能の付いたディジタル補聴装置の実用化研究、4,000千円（1997）

3）井野秀一、基盤C 一般(2)、体性感覚インタフェースシステムの構築に関する生体情報工学的研究、1,400千円（1997）

4）上見憲弘、奨励A、喉頭摘出者のための発声代行装置とその実現のための音声知覚処理機構の研究、1,100千円（1997）

5）伊福部達、基盤A 一般(2)、人工現実感刺激の人体へ及ぼす影響の生体情報工学に基づく評価、11,900千円（1998）

6）伊福部達、基盤B 展開(2)、話速・抑揚変換機能の付いたディジタル補聴装置の実用化研究、2,800千円（1998）

7）井野秀一、基盤C 一般(2)、体性感覚インタフェースシステムの構築に関する生体情報工学的研究、1,200千円（19998）

8）上見憲弘、奨励A、喉頭摘出者のための発声代行装置とその実現のための音声知覚処理機構の研究、1,000千円（1998）

9）和田親宗、奨励A、聴覚代行のための触感を利用した触覚ディスプレイの基礎研究、1,100千円（1998）

10）伊福部達、地域連携推進費 (2)、福祉機器のための高機能を備えた水素吸蔵合金アクチュエータの実用化研究、18,400千円（1999）

11）伊福部達、基盤A 一般(2)、人工現実感刺激の人体へ及ぼす影響の生体情報工学に基づく評価、7,800千円（1999）

12）井野秀一、基盤C 一般(2)、体性感覚インタフェースシステムの構築に関する生体情報工学的研究、700千円（1999）

13）和田親宗、奨励A、聴覚代行のための触感を利用した触覚ディスプレイの基礎研究、1,000千円（1999）

14）伊福部達、地域連携推進費 (2)、福祉機器のための高機能を備えた水素吸蔵合金アクチュエータの実用化研究、17,600千円（2000）

15）伊福部達、基盤A 一般(2)、人工現実感刺激の人体へ及ぼす影響の生体情報工学に基づく評価、4,50千円0（2000）

16）井野秀一、基盤C、一般(2)、自己運動感覚に着目したバーチャルリアリティ酔いに関する生体情報工学的研究、1,900千円（2000）

17）和田親宗、奨励A、人工現実感の臨場感を高めるための視覚と触覚の統合化に関する基礎研究、1,200千円（2000）

18）伊福部達、地域連携 推進研究費 (2)、福祉機器のための高機能を備えた水素吸蔵合金アクチュエータの実用化研究、14,800千円（2001）

19）井野秀一、基盤C 一般(2)、自己運動感覚に着目したバーチャルリアリティ酔いに関する生体情報工学的研究、1,800千円（2001）

b．奨学寄付金（氏名、寄附者名、研究課題、金額、年度）

1）和田親宗、㈱日産科学振興財団、聴覚代行のための音声の特徴抽出ならびに触覚への呈示方法の研究、1,650千円（1999）

2）和田親宗、㈱立石科学技術振興財団、触覚を用いた視覚・聴覚重複障害者のための音響情報呈示装置の基礎研究、2,500千円（2000）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）八木駿郎、太田信廣（電子材料物性部門）、伊福部達（電子情報処理部門）：リラクサー強誘電体の電気機械結合機構の解明とその福祉工学への応用（2001～2002年度）

2）八木駿郎、太田信廣、伊福部達：リラクサー強誘電体の電気機械結合機構の解明とその福祉工学への応用（2001～2002年度）

b．民間等との共同研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）伊福部達(電子情報処理部門)、MR システム研究所：「複合現実感用立体映像表示装置の人体への影響の定量的評価に関する研究」、72,637 千円（1996～2001 年度）

2）伊福部達（電子情報処理部門)、NTT サイバースペース研究所：発話障害者のための音声合成用入力インタフェース方式の研究、1,000 千円（1999 年度）

3）伊福部達(電子情報処理部門)、株式会社エム・アール・システム研究所：複合現実感用立体映像表示装置の人体への影響の定量的評価に関する研究、72,636 千円（1997～2000 年度）

3）伊福部達（電子情報処理部門)、株式会社電制：ハンズフリー型電気人工喉頭の研究開発、1,500 千円(2000～2001 年度）

4）伊福部達(電子情報処理部門)、トヨタ自動車㈱：情報機器の使い易さ研究における手・指触覚への情報伝達法、5,000 千円（2001 年度）

c．大型プロジェクト・受託研究（担当者名、機関名、研究題目、経費、研究期間）

1）井野秀一、北海道科学技術総合振興センター：「札幌 IT カロッツェリアの創成」(2002 年度）

2）井野秀一、吉田直樹、伊福部達、NEDO：「水素吸蔵合金を利用したウェアラブルアクチュエータの開発と関節運動リハビリシステムへの応用」(2002～2004 年度）

d．国際共同研究（代表者名、エージェンシー名、研究課題、経費、研究期間）

1）伊福部達(電子情報処理部門)、朝鮮半島新エネルギー開発機構（KEDO)：「人工現実感を利用した平衡機能リハビリ・システムに関する研究」、1,000 千円 (1998)

2）伊福部達（電子情報処理部門)、ジョンソン・エンド・ジョンソン・メディカル研究所：「水素吸蔵合金アクチュエータを利用した介助機器に関する研究 6,000 千円」(1997～1998)

4.9 受賞

1）伊福部達：科学技術庁注目発明賞（1997）

2）伊福部達：優秀賞「電気式人工喉頭」（あさひ中小企業・日刊工業新聞）(1999.4)

3）伊福部達：発明奨励賞「電気式人工喉頭」（日本発明協会）(2000.9)

4）井野秀一：学術奨励賞「視運動刺激によって生じる自己運動感覚の定量化とその制御」(日本バーチャルリアリティ学会）(2000.3)

5）伊福部達：フェロー「情報バリアフリー支援のための福祉工学の開拓と産業応用への貢献」(電子情報通信学会）(2001.9.19)

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）伊福部達：労働省日本障害者雇用促進協会特別研究会委員長（1997～1998 年度）

2）伊福部達：通産省・厚生省共幹　医療福祉機器研究所開発委員長（1997～1998 年度）

3）伊福部達：北海道ウエルフェアテクノハウス研究会会長（1997～2000 年度）

4）伊福部達：学術審議会専門委員（1997～1998 年度）

5）伊福部達：NHK 放送技術研究所客員研究員（1997～1998 年度）

6）伊福部達：通産省・厚生省共幹医療福祉機器研究所医療福祉機器技術研究開発調査委員会委員（1999～2000 年度）

7）伊福部達：郵政省・通信・放送機構・高齢者通信技術研究開発アドバイザリー委員会委員（1999～現在）

8）伊福部達：電子情報技術産業協会・映像評価研究委員会委員（1999～2000 年度）

9）伊福部達：通産省・厚生省共幹医療福祉機器研究所失語症在宅リハビリ支援開発研究委員会委員長（1999～2000 年度）

10）伊福部達：郵政省・通信制作局・五感情報通信技術調査研究委員会委員（2000 年度）

11）伊福部達：新エネルギー・産業技術総合開発機構福祉機器委員会委員（1999 年度）

12）伊福部達：新エネルギー・産業技術総合開発機構エネルギー使用合理化在宅福祉機器システム開発技術価委員会委員（1999 年度）

13）伊福部達：新エネルギー・産業技術総合開発機構福祉用具実用化開発技術評価委員会委員（2000 年度）

14）伊福部達：空知地域新産業総合推進協議会新産業情報フォーラムアドバイザー（1999～2000 年度）

15）伊福部達：㈳日本電子機械工業会映像評価研究委員会委員（2000 年度）

16）伊福部達：㈳日本電子情報技術産業協会/映像生体影響研究委員会委員

17）伊福部達：産業技術総合研究所　人間福祉医工学研究部門評価委員会　評価委員長（2001 年～現在）

18）伊福部達：経済産業省　地域経済産業　事前評価委員(2002 年 1 月 10 日～2004 年 3 月 31 日）

19）伊福部達：北海道大学先端科学技術共同研究センター点検評価委員会委員（1999 年 4 月 1 日～2002 年 6 月 30 日）

20）伊福部達：北海道大学先端科学技術共同研究センター運営委員会委員(1999 年 4 月 1 日～2002 年 6 月 30 日）

21）井野秀一：画像情報教育振興協会画像情報技能検定委員会委員（1999～現在）

22）井野秀一：新エネルギー・産業技術総合開発機構福祉用具実用化開発技術評価委員（2000 年度）

23）井野秀一：総務省/戦略的情報通信研究開発推進制度

専門評価委員（2002年6月28日～現在）
24）井野秀一：新エネルギー・産業技術総合開発機構/NEDO技術委員（2001年1月24日～現在）
25）和田親宗：盲ろう者コミュニケーション機器研究会委員（1999～2000年度）

b．国内外の学会の主要役職

1）伊福部達：電子情報通信学会（HCG）次期委員長
2）伊福部達：電子情報通信学会（HCS研究会）委員長・顧問
3）伊福部達：第3回バーチャルリアリティ学会大会長
4）伊福部達：J. Mechatronics & Robotics Editor.
5）伊福部達：電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ運営委員長（1999～2000年度）
6）伊福部達：日本バーチャルリアリティ学会理事（1997～2002年度）
7）伊福部達：日本生活支援工学会評議員（1999年度）
8）伊福部達：エルエスティ学会評議員（1999～2000年度）
9）伊福部達：日本音響学会聴覚研究会委員長（1999～2000年度）
10）伊福部達：電子情報通信学会福祉情報工学研究会顧問
11）伊福部達：日本バーチャルリアリティ学会副会長
12）井野秀一：電子情報通信学会（HCG）庶務幹事
13）井野秀一：日本バーチャルリアリティ学会第3回大会幹事代表
14）井野秀一：第19回バイオメカニズム学術講演会プログラム副委員長
15）井野秀一：日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門技術委員（1999～2002年度）
16）井野秀一：バイオメカニズム学会編集委員（1999～2002年度）
17）井野秀一：日本バーチャルリアリティ学会ニュースレター編集委員（1999年度）
18）井野秀一：電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ庶務幹事（1999年度）
19）井野秀一：国際電気生理運動学会ISEK 2000実行委員
20）井野秀一：日本バーチャルリアリティ学会論文誌ゲストエディタ（福祉とVR）
21）井野秀一：日本バーチャルリアリティ学会論文委員（2002年度～現在）
22）伊福部達：電子情報通信学会福祉情報工学研究会　顧問（2000年4月1日～現在）
23）伊福部達：電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ　顧問（2000年4月1日～現在）
24）伊福部達：IEEE International Conference on VR実行委員（1999年4月1日～2000年）
25）伊福部達：日本ロボット学会　評議員（1999年4月1日～現在）
26）伊福部達：電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会　顧問（1998年4月1日～現在）
27）伊福部達：音声言語医学会　評議員（1997年4月1日～現在）
28）伊福部達：人工臓器学会　評議員（1997年4月1日～現在）
29）伊福部達：気管・食道学会　評議員（1996年4月1日～現在）
30）伊福部達：ライフサポート学会　評議員（1993年4月1日～現在）
31）伊福部達：日本ME学会　評議員（1993年4月1日～現在）
32）伊福部達：日本音響学会　評議員（1992年4月1日～現在）
33）伊福部達：感覚代行研究会　理事（1990年4月1日～現在）
34）伊福部達：聴覚障害教育工学会　理事（1987年4月1日～現在）
35）伊福部達：産業技術総合研究所　レビューボード委員（2001年5月24日～2003年3月31日）
36）伊福部達：新エネルギー・産業技術総合開発機構/福祉用具実用化開発助成事業事前評価委員（2002年1月24日～2003年3月31日）
37）伊福部達：日本障害者雇用促進協会　個別研究評価委員（2002年1月10日～2004年1月9日）

c．新聞・テレビ等の報道

1）伊福部達：中日新聞1997年6月27日朝刊「VR技術で福祉機器製品化」
2）伊福部達：中日新聞1997年6月27日夕刊「最先端マルチメディア紹介」
3）伊福部達：日本経済新聞1997年6月27日「マルチメディア&VRぎふ'97開幕「伊福部氏　障害者に恩恵を」」
4）伊福部達、井野秀一：日経メカニカル1997年10月13日「ガス圧と熱を自由に操る（水素吸蔵合金アクチュエータ）」
5）伊福部達：北海道新聞1998年3月17日「「複合現実感」人体にどう影響？」
6）伊福部達：Hokkaido Faz Vol.7　1998年3月「Assisted living enters a new world with virtual reality technologies」
7）伊福部達：北海道新聞1998年4月24日夕刊「国産1号（電気式人工喉頭）」
8）伊福部達：北海道新聞1998年7月27日「福祉工学に仮想現実を取り入れる」
9）伊福部達：日本経済新聞1998年8月17日「福祉・教育への応用めざす」
10）伊福部達：信濃新聞1998年8月18日「目で聞く技術実用化へ着々　福祉、医療分野に応用」
11）伊福部達：沖縄タイムス1998年8月18日「仮想現実、福祉に活用」

12）伊福部達：室蘭新聞 1998 年 8 月 19 日「「目で聞く」「耳で見る」バーチャルリアリティを福祉や医療に」
13）伊福部達：讀賣新聞 1998 年 8 月 20 日「バーチャルリアリティ　VR 技術情報交換」
14）伊福部達：讀賣新聞 1998 年 10 月 23 日「抑揚ある声が出せるセンサー付き「喉頭」」
15）伊福部達：日本経済新聞 1999 年 4 月 5 日「喉頭がんで声帯を摘出」
16）伊福部達：北海道新聞 1999 年 5 月 27 日「開発中の介護支援装置に NEDO の支援」
17）伊福部達：毎日新聞 1999 年 6 月 25 日「内部と外部への扉「皮膚」触知ボコーダが「芸術祭典・京」へ展示
18）伊福部達：北海道新聞社編 1999 年 7 月 27 日「北海道ひと紀行　文化・芸能編」
19）伊福部達：北海道新聞 1999 年 12 月 28 日「専門家が総括 90 年代の研究次代へ夢を紡いだか」
20）伊福部達：十勝毎日新聞 2000 年 4 月 15 日「産官学協働新時代　北大の研究者紹介　福祉機器を改良、実用化　道内企業と提携し 3 種類」
21）伊福部達：日経産業新聞 2000 年 5 月 2 日「北大と技術交流福祉分野を開拓　電気式人工喉頭」
22）伊福部達：日経産業新聞 2000 年 5 月 12 日「躍動するサッポロバレー　大使を抱き新領域開拓」
23）伊福部達：北海道新聞 2000 年 7 月 25 日「喉頭失った人のための発声機「ユアトーン」欧米で発売へ」
24）伊福部達：北海道新聞 2000 年 10 月 25 日「話術で口唇裂発声「お手本はいっこく堂」独特の技術を分析」
25）伊福部達、井野秀一：北海道医療新聞 2001 年 1 月 1 日「地域と大学一体化―北大電子科学研究所感覚情報研究室　障害者補助具開発へ医、歯、工と活発交流「聴覚・音声」など 3 分野」
26）伊福部達：北海道新聞 2001 年 4 月 14 日「バリアフリー社会へ　対話できる機器最前線」
27）伊福部達：HOKTAC 2001 年 5 月 23 日「聴覚障害者用音声認識装置の研究開発チームに聞きました」
28）伊福部達：第二経済新聞 2001 年 6 月 5 日「産学官研究支援 2 事業を選定」
29）伊福部達：広報さっぽろ 2001 年 6 月 1 日「産学官共同研究開発チャレンジ事業　聴覚障害者向け国際会議等参加支援システム」
30）伊福部達：日本経済新聞 2001 年 6 月 5 日「聴覚障害者向け支援システム」
31）井野秀一：日本経済新聞 2001 年 6 月 5 日「聴覚障害者向け支援システム」
32）井野秀一：朝日新聞 2001 年 7 月 21 日「聴覚障害者の国際会議参加支援」
33）井野秀一：北海道新聞 2001 年 10 月 26 日「話した言葉同時に字幕・聴覚障害者用支援システム」
34）井野秀一：日刊工業新聞 2001 年 11 月 15 日「言葉が見える認識補助装置」
35）井野秀一：北海道新聞 2001 年 11 月 2 日「音声の文字化　地元発の技術を応用」
36）伊福部達：朝日新聞 2001 年 7 月 21 日「聴覚障害者の国際会議参加支援」
37）伊福部達：北海道新聞 2001 年 10 月 26 日「話した言葉同時に字幕・聴覚障害者用支援システム」
38）伊福部達：北海道新聞 2001 年 11 月 2 日「音声の文字化　地元発の技術を応用」
39）伊福部達：北海道新聞 2001 年 11 月 2 日「障害者インターナショナル　事務局だより」
40）伊福部達：日刊工業新聞 2001 年 11 月 15 日「言葉が見える認識補助装置」
41）伊福部達：産経新聞 2002 年 1 月 16 日「発言を瞬時に字幕変換　聴覚障害者向け　北大教授ら開発」
42）伊福部達：室蘭民報 2002 年 1 月 16 日「会議の発言瞬時に字幕化　聴覚障害者向けの支援システム開発　北大教授ら、試験運用も好評」
43）伊福部達：埼玉新聞 2002 年 1 月 16 日「会議の発言を瞬時に字幕に変換　北海道大教授ら共同で開発　聴覚障害者支援システム」
44）伊福部達：秋田魁新報 2002 年 1 月 18 日「会議の発言瞬時に字幕変換　聴覚障害者支援へ研究者ら共同開発」
45）伊福部達：熊本日日新聞 2002 年 1 月 18 日「北大など共同開発　会議の発言瞬時に字幕に障害者のプレ大会で好評」
46）伊福部達：JAPAN　TIMES　2002 年 1 月 18 日「Japanese, English voice-recognition system set up for deaf」
47）井野秀一：JAPAN　TIMES　2002 年 1 月 18 日「Japanese, English voice-recognition system set up for deaf」
71）井野秀一：福祉新聞 2002 年 12 月 9 日「IT 活用し情報保障」
72）井野秀一：日本経済新聞 2002 年 12 月 2 日「講演を同時翻訳・字幕化―横浜の国際会議で試験―」
73）井野秀一：北海道新聞 2002 年 11 月 22 日「札幌発「音声字幕変換システム」」
74）井野秀一：読売新聞 2002 年 10 月 16 日「話し言葉を素早く字幕に　新システム大活躍」
75）井野秀一：毎日新聞 2002 年 10 月 15 日「発言をすぐ字幕にする装置が登場」
76）井野秀一：北海道新聞 2002 年 10 月 12 日「音声を数秒で字幕化」
77）井野秀一：朝日新聞 2002 年 10 月 11 日「講演内容すぐ字幕に「従来より速く正確」」
78）井野秀一：北海道新聞 2002 年 9 月 15 日「DPI 広がれ支援の輪　字幕システムも開発」
79）伊福部達：熊本日日新聞 2002 年 1 月 18 日～現在「北大など共同開発　会議の発言瞬時に字幕に障害者のプ

レ大会で好評」
80) 伊福部達：秋田魁新報 2002 年 1 月 18 日～現在「会議の発言瞬時に字幕変換　聴覚障害者支援へ研究者ら共同開発」
81) T. Ifukube and S. Ino: JAPAN TIMES　2002 年 1 月 18 日～現在〝Japanese, English voice-recognition system set up for deaf〟
82) 伊福部達：埼玉新聞 2002 年 1 月 16 日～現在「会議の発言を瞬時に字幕に変換　北海道大教授ら共同で開発聴覚障害者支援システム」
83) 伊福部達：室蘭民報 2002 年 1 月 16 日～現在「会議の発言瞬時に字幕化　聴覚障害者向けの支援システム開発　北大教授ら、試験運用も好評」
84) 伊福部達：産経新聞 2002 年 1 月 16 日～現在「発言を瞬時に字幕変換　聴覚障害者向け　北大教授ら開発」
85) 伊福部達、井野秀一：日刊工業新聞 2001 年 11 月 15 日～現在「言葉が見える認識補助装置」
86) 伊福部達：北海道新聞 2001 年 11 月 2 日～現在「障害者インターナショナル　事務局だより」
87) 伊福部達、井野秀一：北海道新聞 2001 年 11 月 2 日～現在「音声の文字化　地元発の技術を応用」
88) 伊福部達、井野秀一：北海道新聞 2001 年 10 月 26 日～現在「話した言葉　同時に字幕・聴覚障害者用支援システム」
89) 伊福部達、井野秀一：朝日新聞 2001 年 7 月 21 日～現在「聴覚障害者の国際会議参加支援」
90) 伊福部達：第二経済新聞 2001 年 6 月 5 日～現在「産学官研究支援 2 事業を選定」
91) 伊福部達、井野秀一：日本経済新聞 2001 年 6 月 5 日～現在「聴覚障害者向け支援システム」
92) 伊福部達：北海道新聞 2001 年 4 月 14 日～現在「バリアフリー社会へ　対話できる機器最前線」
93) 伊福部達：広報さっぽろ 2001 年 6 月 1 日～現在「産学官共同研究開発チャレンジ事業　聴覚障害者向け国際会議等参加支援システム」
94) 伊福部達：HOKTAC 2001 年 5 月 23 日～現在「聴覚障害者用音声認識装置の研究開発チームに聞きました」
95) 伊福部達：フジテレビ 1998 年 8 月 11 日「人工喉頭」
96) 伊福部達：北海道文化放送 1998 年 8 月 27 日「MR システム研究所札幌分室紹介」
97) 伊福部達：TBS 1998 年 10 月 23 日「VR を利用した聴覚障害者用音声認識
98) 伊福部達：UHB 1998 年 5 月 30 日「北海道発なるほどビックリ新製品」
99) 伊福部達：HBC 1998 年 6 月 19 日「北海道経済変革への道「研究室を飛び出した新技術」」
100) 伊福部達：フジテレビ 1998 年 6 月 20 日「テクノマエストロ　歌声を呼び戻す男」
101) 伊福部達：NHK 総合 1998 年 8 月 16 日「北の最新技術」
102) 伊福部達：HBC 2000 年 12 月 21 日「北方見聞録」
103) 井野秀一：NHK 総合 2002 年 10 月 18 日「音声自動字幕システム」
104) 井野秀一：NHK 教育 2002 年 10 月 14 日「音声自動字幕システム」
105) 井野秀一：HBC 2002 年 10 月 14 日「音声自動字幕システム」

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）石井正樹：難聴者と健聴者における音声のホルマント遷移部の知覚特性に関する研究（1997）
2）安田星季：上肢接触動作による作業空間知覚にカンスルハプティック・ディスプレイの基礎的研究（1997）
3）小林有希子：視運動刺激によって生じる自己運動感覚の計測と制御に関する研究（1998）
4）斉藤幹：失聴者のための音声認識技術を利用したマン・マン・インタフェースに関する研究（1998）
5）李乙松：仮想物体の奥行き知覚における視覚と触覚の統合化に関する研究（1998）
6）赤井亮仁：表面粗さ感を惹起させるための触覚ディスプレイに関する研究（1999）
7）奥村与志照：肘関節リハビリへの応用を目的とした小型 MH アクチュエータに関する研究（1999）
8）小坂井敦：複合現実感技術を利用した音声認識補助に関する研究（2000）
9）重村典昭：表面粗さ感の皮膚温度依存性を考慮した触覚ディスプレイの基礎的研究（2000）
10）松尾力：複合現実感における上肢の作業効率に基づく視覚表示方式の評価（2000）
11）小川喜嗣：腹話術発声における両唇音の知覚特性に関する研究（2001）
12）本間健：触覚ディスプレイの設計を目的とした指先皮膚の機械特性に関する研究（2001）
13）笈沼元紀：鉛直方向の知覚の偏位を指標とした VR 刺激の人体影響評価に関する研究（2002）
14）加藤士雄：聴覚障害者の国際会議参加支援を目的とした「音声—字幕」変換システムに関する研究（2002）
15）山田貴史：関節リハビリ機器のための水素吸蔵合金ソフトアクチュエータに関する研究（2002）
16）高橋はるか：不特定話者音声認識における復唱能力の個人差と訓練方式に関する研究（2002）

・博士学位

1）三好茂樹：人工内耳における伝達情報量の増加を目的とした刺激方式に関する研究（1997）
2）田中敏明：A Rehabilitation Engineering Study of Somatosensory Contribution to Standing Balance with Aging（加齢に伴う立位バランスへの体性感覚の寄与に関するリハビリテーション工学研究）（1998）
3）青木直史：A study of high quality speech synthesis

based on the analysis of the randomness in speech signals（音声信号におけるランダムネスの解析に基づいた高品質音声合成に関する研究）（1999）

4）奈良博之：人工現実感技術で呈示された感覚刺激による生体反応に関する研究（1999）

5）陸健：A study of pitch frequency modification for the Chinese hearing aids（中国語音声の補聴方式におけるピッチ周波数加工に関する研究）（2000）

6）渡辺哲也：音声情報を活用した対応スクリーンリーダに関する研究（2000）

e．大学院担当講義科目

1）人間情報工学特論（1997～2001）

2）生体情報工学特別演習（1999～2000）

3）生体情報工学特別研究第一（1999～2000）

4）生体情報工学特別研究第二（1999～2000）

5）生理工学特論（2001）

並列分散処理研究分野(客員研究分野)

教授　雀部博之（東京大院、工博、1997.4〜1999.3）

1．研究目的

本研究の目的は、「非平衡状態」下における「空間的秩序」と「時間的秩序」形成に着目し、新しい「時空間機能」という概念の基に、「時空間機能材料」の新しい概念を提案し、わが国における「時空間機能材料」研究プロジェクトの形成を行うことにある。

これまでの材料開発においては、無機・金属・半導体・有機・生体材料などを個別に研究する縦割り型から、それらを横断的に組み合わせた横割り型への展開が盛んとなり、さらにマクロな（巨視的な）複合化から、分子・原子レベルの組織化へと精密化が進んで来た。しかし、これらの研究の目指すところはいずれも分子・原子レベルの集合構造を単に制御することによる材料機能の発現であり、「空間的秩序」の構造制御が主となっていた。言い換えれば、熱力学的に閉じた系での平衡状態における機能を主たる対象とした材料開発であり、開放系の特長である非平衡性が得られた材料の構造や機能発現に直接的に反映されるものではなかった。

自然界に存在する現象、特に生体系における高度な機能の多くは、局所的な物質/エネルギー移動を伴った非平衡過程に支配され、「時間発展」を考慮に入れた開放系として非平衡状態を取り扱うことによって初めて理解されるものである。同様に、次世代の材料開発には、今までの延長上にはない、この新しい「時間的」因子を導入し、「空間的秩序」と「時間的秩序」を制御した機能材料の創製が必要となる。

2．研究成果

時間的・空間的情報を取り込んだ材料の開発を実現するために、1．組織構造の発生が時間因子に左右されユニークな構造を生じる材料　2．時間因子が機能に直結する新規材料、についての研究分野をわが国において積極的に展開すべく、この研究領域を支えて行くであろう萌芽的な研究テーマ・研究グループのサーベーを行った。

具体的には、1997年9月16〜17日に理化学研究所にて主催した第1回時空間機能材料研究フォーラム、1998年10月21〜22日に北海道大学学術交流会館で共催した電子科学研究所公開シンポジウム（第2回時空間機能材料研究フォーラム）、1990年1月28〜29日に札幌市内にて共催した電子科学研究所国際シンポジウムにおいて、国内外の研究者を招き、本研究分野の現状と将来展望・可能性について広く意見交換を行った。

3．今後の研究の展望

上記の成果を基に、1999年10月より国武豊喜北九州大学教授をグループディレクターとする第二世代フロンティア研究「時空間機能材料研究」が発足するはこびとなった。グループの研究課題の第一は、散逸構造と呼ばれる非平衡・非線形現象に基づくダイナミックな空間構造に着目し、それらを固定化した階層的な特性をもつ材料を作ることである。さらに階層構造の基本となる分子組織を解明し、自発的パターン・リズム形成のメカニズムを明らかにし、新材料開発につなぐ。第二の課題は、ナノ粒子のトポロジーを制御する手法を開拓し、原子・分子の2次元面における配置ならびにそれを三次元に積層して秩序性の高い材料の設計を可能とすることにある。また、多光子遷移過程の特性解明や材料としての必要条件を見出す。これにより励起子マニピュレーションを実現し、多光子材料開発へと展開する。第三の課題は、量子コヒーレンスの新概念を推進して、量子コンピューティングを実現するために基礎となる量子ドットなどの材料開発、時間・空間コヒーレンスに関わる新現象の解明を行うことにある。これらの研究により(i)散逸構造を利用する微細加工技術、(ii)高度の光エネルギー変換機能をもつ分子デバイス、(iii)多光子過程に基づく高密度メモリーデバイス、(iv)量子コヒーレンス効果に基づく情報処理、などが期待される。

4．資料

4.1　学術論文

1）Tao, X. T., Zhang, Y. D., Wada, T., Sasabe, H., Suzuki, H., Watanabe, T., Miyata. S.: “Hyperbranched polymers for electrluminescence applications”, Adv. Mater. 10, 226-230 (1998)*

2）Zhang, Y. D., Wada, T., Wang, L., Sasabe, H.: “Amorphous conjugated carbazole trimers for photorefractive materials”, Chem. Mater, 9, 2798-2804 (1997)*

3）Tian, M. Q., Sasabe, H.: “Synthesis of unsymmetrically substituted dodecakis (trifluoroethoxy) phthalocyaninato vanadyl complexes”, J. Heterocycl. Chem. 34, 171-176 (1997)*

4）Nakahara, H., Liang, W., KimuraSuda, H., Wada, T., Sasabe, H.: “Linear and nonlinear optical behaviors of Langumuir-Blodgett multilayers of push-pull tolan derivatives”, J. Opt. Soc. Am. B15, 458-465 (1998)*

5）Tian, M. Q., Yanagi, S., Sasaki, K., Wada, T., Sasabe, H.: “Syntheses and nonlinear optical properties of nonaggragated metallophthalocyanines.”, J. Opt. Am. B15, 846-853 (1998)*

助教授　泉　　隆（北大院、工博、1997.4〜1999.3）

1．研究目的

人間と機械との間のヒューマンインタフェースに関する研究は古くから行われているが、市販の製品のインタフェースは、高齢者や障害者にとって必ずしも使やすいものばかりではない。ヒューマンインタフェースを最適化するためには、生体の高次の脳神経系・感覚系・筋運動系などの機能に学ぶ必要がある。

本研究分野では、優れたヒューマンインタフェースを開発するために筋骨格系や感覚系に関する知見を得るための基礎的研究、および障害者のためのリハビリテーション機器などのインタフェースの開発を目的とした応用的研究に取り組んでいる。

2．研究成果

(a)　肘関節運動の能動的な補助手段に関する研究成果

肘関節は屈曲・伸展の自由度の運動を行なう。この関節を外部から動力を与えて補助する手段として外骨格型の装置を提案した(図1)。動力源を組み込む前段階で装置の可動機構の検討を行なうため受動的な装置を試作した。また、試作装置を健常者に装着して肘関節運動に対する追随性の評価を行なった。

図1．肘関節運動の能動的な補助手段

図2．手先作業姿勢を支持する補助手段

(b)　筋ジストロフィー者の手先作業姿勢を支持する補助手段に関する研究成果

腕を浮かせて上肢の重量を支えることができない筋ジストロフィー者の手先作業時の姿勢を補助し、動作を行いやすい肩・肘・手関節角度を作りだす方法を提案した。また、前腕支持部の高さを変えて上肢の姿勢を変化させる装置を試作した（図2）。

3．今後の研究の展望・将来計画

筋ジストロフィーの患者の日常の手先作業に着目し、肘関節運動の能動的な補助手段と手先作業姿勢を支持する補助手段について研究成果を得た。今後は、これらの方法を組み合わせることで、作業を行ないやすい姿勢の下で十分な関節トルクを発揮できる実用的な補助手段の構築を目指す。

4．資料

4.1　学術論文

1）佐藤満、伊福部達、井野秀一、泉隆、敦賀健志：「身体と柔軟に接触する介助支援機器の可動部コンプライアンス値の設定」、『電気学会論文誌C分冊』、117-C(5)：494-499（1997）*

2）Shimizu, S., Ino, S., Tsuruga, T., Ifukube, T., Wakisaka, Y. and Izumi, T.: Evaluation of New Force Display using Metal Hydride Alloy, Journal of Robotics and Mechatronics, 9 (1): 14-23 (1997)*

3）井野秀一、伊福部達、和田親宗、敦賀健志、泉隆、田中敏明：「触覚の材質感呈示システムのための基礎的研究」、『電気学会論文誌C分冊』、117-C(8)：1062-1068 (1997)*

4）Tanaka, T., Takeda, H., Izumi, T., Ino, S., Ifukube, T.: Age-Related Changes in Postural Control Associated with Location of the Center of Gravity and Foot Pressure, Physical & Occupational Therapy in GERIATRICS, 15 (2): 1-14 (1997)*

5）敦賀健志、井野秀一、佐藤満、伊福部達、泉隆、田中敏明、室正彦、脇坂裕一：「高齢者のための移乗介助機器開発を目的としたヒトの動作パターンに関する研究」、『電気学会論文誌A分冊』、118-A(3)、239-244 (1998)*

6）Tanaka, T., Takeda, H., Izumi, T., Ino, S., Ifukube, T.: Effects on the Center of Gravity and Foot Pressure Contribution to Standing Balance Associated with Ageing in Healthy Adults, Journal of Human Movement Studies, 34: 233-253 (1998)*

並列分散処理研究分野（客員研究分野）

教授　南部信次（関西大院、理博、1999.4～2001.3）

1．研究目的

リラクサ強誘電体薄膜は高速デジタル回路・高周波回路・光/電子回路へのデバイス応用が期待されるだけでなく、複雑系の相転移を示す興味深い材料でもある。その特徴は広い温度範囲にわたり大きな誘電率と周波数分散を示しかつ巨視的な自発分極を持たない点にある。デジタル回路の高速化や無線 RF 回路の高周波化・多重波送受信システムに伴う高機能集積電子回路/部品の創造を目指し、本研究ではその大きな誘電率を利用した今後の情報・通信デバイスへの応用にとって本質的と思われる諸問題、非線形応答とその誘電応答の実体についての理論的解明とデバイス応用への可能性を探る。

2．研究成果

リラクサ強誘電体の非線形誘電応答の定式化をおこない、非線形応答関数のバイアス電圧依存性と誘電損失のバイアス電圧依存性を導出した。リラクサの動的な振る舞いを緩和方程式（TDGL 方程式）で記述する。

$t_0 \partial p(t)/\partial t = -d[f(p(t)) - p(t)E(t)]/dp(t)$

自由エネルギー関数[1] $f(p(t))$ は

$$f(p(t)) = 2^{-1}Ap(t)^2 + 4^{-1}Bp(t)^4$$

と書ける。リラクサ強誘電体の場合を念頭におけば、〝凍結〟したローカルなモードは十分ゆっくりした運動で、高周波電場 E（t）とは decouple できるとすると

$$A = (e_0C)^{-1}[T - T_0] + gq(T)$$

と書ける（$B > 0$）。TDGL 方程式を解けばバイアス電界 E_0 が存在するときの非線型応答が以下のように計算された。

$$e_0e_{eff}(w, E_0) = e_0c^{(1)}(w) + e_0c^{(2)}(w, 0)E_0 + e_0c^{(3)}(w, 0, 0)E_0^2 = e_0c^{(1)}(w) - B[e_0c^{(1)}(w)]^2[e_0c^{(1)}(0)]^2E_0^2,$$

$$\tan d(w,E_0) = wt_{eff}[1 - B\{e_0c^{(1)}(0)\}^3E_0^2 + H.O.(Eo)]$$

$$t_{eff} = t_0/[(e_0C)^{-1}(T - T_C) + gq(T)]$$

リラクサ強誘電体薄膜の実用デバイスへの応用において、GHz 帯におけるバイアス電圧下の誘電応答がきわめて重要である。本研究結果は材料物性の微視的な理論・実験結果[1)-3)]と巨視的なデバイス機能・物性を結びつける現象論であり、dynamical mode coupling を取り入れることにより、より定量的な考察が可能となるであろう。

3．今後の研究の展望・将来計画

近年話題となりつつある強誘電体薄膜を用いた非線形応答デバイスへの応用に向けての指針について述べた。大容量情報通信を目指して、マイクロ波応用分野で強誘電体薄膜を用いた可変容量素子（Tunable Capacitor）の研究が近年盛んになりつつある。強誘電体の非線型性（電界強度によって誘電率が変化する）を利用して、フィルタの通過帯域をバイアス電圧で可変にしたり、また位相速度を制御するフェーズシフタやフェーズドアレイアンテナの開発が現実味をおびてきている。強誘電体薄膜の研究が進み、作製技術が標準化されつつあるごく最近になって、再びマイクロ波応用が注目を集めている。高誘電率系薄膜 BST は次世代 DRAM 材料と目され半導体メーカーの研究も盛んであるが、リラクサ強誘電体薄膜もそのポテンシャルにおいて魅力的な材料である。

助教授　川辺　豊（京都大院、工博、1999.4～2001.3）

1．研究目的

ネットワーク社会が要求する超高度かつ並列分散的な情報処理を実現するためには、分野の枠組みを横断し、さらに材料・デバイス・システムを縦断するような新しいアプローチが求められる。

半導体素子の高性能化が早晩突き当たる限界を克服するためには、多電子による協力的な状態や、ナノオーダーの自己組織化を積極的に利用すべきであろう。このような観点からわれわれは次に来るべき光・電子材料の候補として、強相関電子系、有機材料、生体高分子などに着目し、材料開発と非線形光学等の手法を用いた応用可能性の検討を行っている。

2．研究成果

(a)　DNA を利用した光学材料の研究

DNA の二重らせん構造中に色素を挿入すると、色素間の会合が抑制され、蛍光効率が増大する。したがって蛍光消光を起しにくい高濃度色素膜を形成することが可能になる。（図）われわれは DNA 中に各種色素をドープした薄膜を用いてレーザーの発振を行った。また近年 DNA における電気伝導性が議論されているが、これらの特性を組み合わせることによりや新しい有機 EL 素子などが可能になると考えられる。

（図：ローダミン６Ｇをドープした DNA―脂質複合膜）

(b) 強相関電子系の非線型光応答

高温超伝導体の母体である La_2CuO_4 薄膜の第三高調波スペクトルを波長可変フェムト秒レーザーを用いて広い波長範囲で測定した。通常の吸収スペクトルでは観測できない対称性の異なる電荷移動準位への多光子共鳴の構造が観測され、励起子クラスターモデルとよく一致することがわかった。

(c) アルミニウム酸化物の発光物性

透明ペロブスカイト型化合物である $LaAlO_3$ や $YAlO_3$ を還元雰囲気下で作製すると可視域に強い発光が生ずることが見出された。この発光は還元雰囲気下で作製した試料でのみ観測され、酸素存在下のアニーリングによって消失することから、結晶中の酸素欠損に由来するものであることが明らかになった。

3．今後の研究の展望・将来計画

今後は、これまでの結果を踏まえ実用化を進める上で必要な高機能化の検討や劣化の評価を進める一方、詳細な物性の解明を行う予定である。さらに、材料探索を通して新規な材料や新しい発光機構の実現等を目指す予定である。

4．資料

4.1 学術論文

1) S. E. Shaheen, B. Kippelen, N. Peyghambarian, J. F. Wang, J. D. Anderson, E. A. Mash, P. A. Lee, N. R. Armstrong and Y. Kawabe: "Energy and charge transfer in organic light-emitting diodes: A soluble quinacridone study" J. Appl. Phys. 85, 7939 (1999)

2) Y. Kawabe, A. Yamanaka, E. Hanamura, T. Kimura, Y. Takiguchi, H. Kan and Y. Tokura: "Photoluminescence of perovskite lanthanum aluminate single crystals" J. Appl. Phys. 87, 7594 (2000). J. Appl. Phys. 88, 1175 (2000) corrected version.

3) Y. Kawabe, L. Wang, S. Horinouchi and N. Ogata: "Amplified spontaneous emission from fluorescent dye-doped DNA-surfactant films" Adv. Mater. 12, 1281 (2000)

4) Y. Kawabe, A. Yamanaka, E. Hanamura, T. Kimura, Y. Tokura, Y. Takiguchi and H. Kan: "Ultraviolet and visible photoluminescence from aluminate crystals with perovskite structure" Proc. SPIE 4102, 144 (2000)

5) Y. Kawabe, L. Wang, T. Koyama, S. Horinouchi and N. Ogata: "Light amplification in dye doped DNA-surfactant complex" Proc. SPIE 4106 369-376 (2000)

6) A. Schulzgen, Y. Kawabe, E. Hanamura, A. Yamanaka, P.-A. Blanche, J. Lee, N. T. Dan, H. Sato, M. Naito, S. Uchida, Y. Tanabe and N. Peyghambarian: "Two-Photon Resonant Third Harmonic Generation in La2CuO4" Phys. Rev. Lett. 86, 3164 (2001)

4.2 総説、解説、評論等

1) 南部信次：「リラクサ強誘電体薄膜とそのデバイスへの応用」、電子科学研究、7：29-32 (1999)

2) 南部信次：「強誘電体分域構造、マイクロクラスター構造と誘電応答」、2000 年度日本物理学会年会シンポジウム「ヘテロ構造と局所秩序」

3) 南部信次：「リラクサーの応用と新しい局面—薄膜デバイスと高周波特性—」、2001 年北海道大学電子科学研究所シンポジウム「抑制されたゆらぎ」

並列分散処理研究分野(客員研究分野)

教授　東倉洋一（東大院、工博、2001．4～2003．3）

1．研究目的

人間と情報の係わりに関して、様々な視点から考察し、今後の高度情報社会の進展に伴って、両者とその係わりが、どのように変化しうるかを論じる。また、高度情報社会の健全な成熟のためには、情報や情報技術がどうあるべきかを考察し、今後取り組むべき研究課題を明確にする。

具体的には、上記の議論を専門家から一般市民にいたる広い対象に情報発信を行い、情報技術の技術的な可能性、人間や社会へのインパクトやこれらが引き起こす様々な問題とその対応などを内容とする講義、講演の実施、論文、解説記事、著書などの発表による啓蒙活動を重視する。

2．研究成果

(a)　社会の変遷と情報社会およびポスト情報社会の位置付け

農業社会、工業社会を経て迎えたIT社会およびこれに続くポストIT社会を次のように位置付けた。まず、現在のIT社会ではITの基盤づくりが行われ、次に迎えるXIT社会（eXtended IT）への出発点になる。すなわち、ITがインフラとなって、多様な分野へと拡張され、XIT社会へと導かれる。

XIT社会のより具体的なイメージは、Xにいろいろな文字を入れると理解しやすい。Bならバイオ（Bio）や脳（Brain）、Eなら環境（Environment）、あるいは、Qなら量子（Quantum）といった具合になる。

文部科学省の科学技術政策研究所の科学技術未来予測によれば、10年後以降の重点課題は、情報技術から地球環境やバイオにシフトするものと予測されており、上記の位置付けを支持する結果となっている。

(b)　情報機器の位置付け

コンピュータやネットワークに代表される情報機器が、今後、人間にとってどのような存在になって行くかを考察した。

情報機器の技術的な進展は著しく、高速化や大容量化による処理速度の向上とともに、小型化と軽量化が加速される。しかし、これら従来の延長線とは異なる新しい特徴である知能化と能動化、さらに、個性化と多様化が重視される。とくに、能動化は今後の特徴的な方向と考えられ、情報機器から人間に対して能動的に働きかける関係が生まれてくる。

このような技術的な背景に基づいて、従来主体であった人と人のコミュニケーションが、人とモノ、さらにはモノとモノのコミュニケーションへと拡張され、すべてのモノが能動的に情報を発信する〝Anything Active〟の世界が到来することを予見した。

また、情報機器はウェアラブルな状態が進展し、特に意識しなくても常時行動をともにするパラサイト（寄生）へ移行し、さらに、情報機器が体内や脳内に埋め込まれるようになる。

これらの成果を踏まえ、情報機器と人間とを結びつけるインタフェースの将来像に関して検討を行った。まず、今後のインタフェースは、情報機器と人間を一対一に結びつける従来型のものとはまったく異なり、多対多の関係が中心になること、また、このインタフェースを介して行われるコミュニケーションは、マルチモーダルを超えて進化し、「五感＋人工センサ」を通して得られる極めて多様な情報を利用したものとなるものと考えられる。

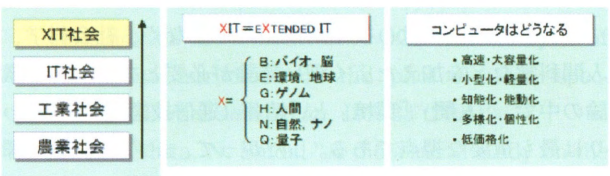
これらの議論に基づいて、今後のヒューマンインタフェースの方向性として、ユビキタスインタフェース、予測インタフェース、無意識インタフェースなどを骨子とする提言をまとめ、総務省のネットワークヒューマンインタフェース研究会や内閣府の情報通信研究開発プロジェクトチームに報告を行った。

(c)　情報空間の拡張

情報空間の変化に影響する要素と変化の性質を考察した。

第一の要素は、センサの技術革新である。感度だけでなく、情報の質に関しても五感を超えるセンサ（Xセンサと名付ける）の開発が進展する。これらのセンサでキャッチできる情報の範囲は、今後も増大し続け、その結果として感覚空間の拡張が起こる。第二は、このXセンサでキャッチする情報をやり取りする手段の飛躍的な進展である。携帯機器により、Xセンサからの情報を含むあらゆる情報をディジタル化し、いつでもどこでも誰とでもやり取りできる。時々刻々変化する環境情報、生活情報、個人情報などの多様な情報が、リアルタイムで飛び交い、個人、家族、組織、社会といったあらゆるレベルにおいて、知識空間、行動空間、コミュニケーション空間の拡大をもたらす。これが、情報空間のX空間と呼べる拡大情報空間である。

さらに、これらの情報空間の拡大が、人間の視点からは、人間能力の拡大と等価であることを指摘し、この概念を「ヒューマン•エンパワメント」と名付けた。また、情報空間の地球規模への拡大も可能であり、地球が一つの頭脳として働く「地球ブレイン」時代の到来を予見した。この地球ブレインは、環境ITの究極的な姿にもなりうることを指摘し、これらの考え方が、今後の循環型社会の形成にも密接に関わる重要なものであることを主張した。



(d)　情報技術の影響による人間の変化

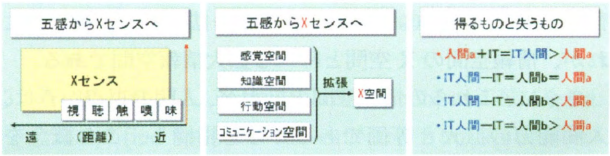
情報技術(IT)の影響による人間の変化を、人間とITの相互作用としてとらえ、両者の関係についての図「得るものと失うもの」に示す仮説を提案した。

まず、ITに未経験の人間aは、ITを使うことによって、機能的、能力的に向上したIT人間になることが考えられる。そして、ITを使わない元の状態に戻った人間bは、以前の人間aと全く変わることがない。人間とITの間に単純な加法定理が成立すれば、上記の2つの場合で全てが尽くされる。

しかし、そうでないことも起こりうる。新しい道具の常として、その利便性によって失われるものが出てくる。これが、人間b＜人間aである。一方、人間b＞人間aのように、ITを使うことによって、人間の能力が刺激され、これが向上したり、今までは潜在的であった能力が顕在化する可能性があり、こういった視点は今後の新しい研究課題を提供する。これらの議論を、人間と情報（技術）の係わりに関する歴史的な視点に立ってまとめることを試み、以下のように結論した。

人間と情報（技術）の係わりを、過去、現在、未来に大別すると、餌を捕らえたり、敵から逃れたり、異性と巡り合ったりする「生存のための情報」が主体であった過去から、情報の役割が拡大し、現在では、利便性や効率性を求めたものに変化してきたこと、そして、未来においては、個人の気付かざる能力の開拓や拡大とともに循環型社会の形成へのポテンシャルを備えた「新しい生存のための情報」という役割が期待できる。

これらの議論を情報社会の今後の進展と課題を考えるためのヒントとするため、著書「ITは人間を賢くするか」(ダイヤモンド社、2001年発行)、共編著「高度情報化社会のガバナンス」(NTT出版、2003年3月）にまとめて刊行し、広く普及することに努めた。



3．今後の研究の展望・将来計画

現在、政府のe-Japan重点計画にそって推進されているブロードバンドやユビキタスといった技術的な実現形態を、上記の「人間と情報の係わり」という視点から考察し、現状や今後の課題をより具体的に掘り下げる。

これらの議論には、技術的視点だけでなく、社会科学、人間科学などを加えた広く深い議論が必要となる。その議論の中で、「人間」「環境」と「情報（通信技術）」との係わりは最も重要な視点である。したがって、まず、「人間」「環境」と「情報（通信技術）」との係わりを人類的、地球的視点で概観し、これらの係わりの歴史的変遷をより深く理解する。

つぎに、最近の情報通信技術の急速な進展と、これらがもたらす高度情報化社会の現状と問題点を再整理し、自然科学から社会科学にわたる学際的な視点を導入しながら「人間」「環境」の未来像を議論する。

議論のポイントの具体例を示すと以下のようになる。第一に、高度情報化社会やポスト情報化社会では、「人間」「環境」と「情報（通信技術）」との係わりが従来とは比べものにならないほど速い。したがって、すでに直面している課題に関する議論だけでは、常に時代から取り残されることになる。技術と社会が生み出す変化を先取りした大胆な仮説や未来予測が求められる。

第二に、高度情報化社会は、今までに経験したことのないグローバルでボーダレスな社会である。そこでは、国や地域だけに依存した議論は成立しない。しかし、ネットワーク社会（バーチャル社会）でのグローバル・ボーダレス化が進む一方で、現実社会が、同じように変化するものとは考え難い。グローバル・ボーダレス社会であるネットワーク社会と現実社会という二つの社会を前提とした「人間」と「環境」の議論が必要になる。

最後に、これらの議論を総合して、未来社会における「人間」「環境」と「情報（通信技術）」の新しい係わりの到達点を様々な視点から論じる。

助教授　竹下幸一（東農大、理博、2001．4～2003．3）

1．研究目的

(a)　分子の励起に伴う電気双極子モーメントの変化の研究
ピリミジン（1,3ジアミン、$C_6N_2H_4$）の第一励起状態の電気双極子モーメントは、基底状態のそれとは、符号が異なることが知られている。このような分子は、励起光と外部電場の制御により、分子の回転運動を持続させる、いわば分子モーターの材料としての可能性が考えられる。このような材料を見出す方法として、ab initio 法による理論計算の適応がある。この研究は、基底状態と第一励起状態において、電気双極子モーメントの符号がお互いに異なる分子を、ab initio 法の理論計算を用いて探求することである。

(b)　分子のイオン化に関する理論的研究
分子のイオン化に伴って観測される光電子スペクトルは、分子のイオン化に伴う電子状態・分子構造・振動状態の変化を反映している。従って、光電子スペクトルの理論的な解析には、これらの変化の理論計算が有効な手助けとなる。

今回は、類似の荷電子構造をもつ O_3 と SO_2 の理論的研究を行った。とりわけ15～18 eV の光電子スペクトルは、複雑な振動構造をもつ。この領域には、各々五つのイオン化状態が存在している。この研究では、各イオン化状態の電子スペクトルにおける寄与を明らかにする。

2．研究成果

(a)　分子の励起に伴う電気双極子モーメントの変化の研究
従来の計算結果から、電気双極子モーメントの値は、用いる計算方法に留意する必要がある場合があることが知られている。そこで、基底関数としては、6－31 G と、それに分極関数を加えたものの二種を用いた。電子状態の計算方法としては、MCSCF 法と、電子相関を取り込んだ MRSD-CI 法を用いた。また、MCSCF 法勾配法を用いて、基底状態と励起状態の分子構造の最適化を行った。計算に用いたプログラムは、MCSCF 法が GAMESS、MRSDCI 法が MOLCAS である。

ピリミジンの MCSCF 計算では、二つの基底関数とも、励起状態の電気双極子モーメントの値が基底状態より小さくなるものの、その符号は同一であった。なお、MRSDCI 法の計算は、現在準備中である。

C_{2v} の分子の対称性を保つピリミジンの一置換体（F、Cl、CN、NH_2）に関して、MCSCF 計算を行った。その結果、基底状態と励起状態とで、電気双極子モーメントの向きがお互いに異なるものとして、以下の分子が見出された。5-フロロ-1、3ジアミン、5-クロロ-1、3ジアミン、2-アミノ-1、3ジアミン。

(b)　分子のイオン化に関する理論的研究
電子状態の理論計算より、注目している領域のイオン化状態は、イオン化エネルギーが低い方から、O_3 が 2^2B_2、2^2A_1、$^2B_1$、3^2A_1、3^2B_2 状態、SO_2 が $^2B_1$、2^2A_1、2^2B_2、3^2A_1、3^2B_2 状態である。MRSDCI 法の計算から、O_3 の 2^2B_2 と 2^2A_1、SO_2 の 3^2A_1、3^2B_2 状態は、一電子イオン化の電子配置をもたないことが分かったので、これらの状態は、光電子スペクトルの強度には寄与しない。

振動状態とフランクーコンドン因子の計算から、O_3 の光電子スペクトルの顕著な振動構造は、$^2B_1$ と 3^2B_2 状態の O－O 全対称振動モードへの振動励起に起因していることが分かった。これらのイオン化状態の分子構造は、基底状態に比較して、O－O の結合距離が 0.1 Å ほど伸びている。SO_2 の複雑な振動構造は、$^2B_1$、2^2A_1、2^2B_2 状態の S－O 全対称振動モードと O－S－O 変角振動モードへの振動励起に起因していることが分かった。これらのイオン化状態の分子構造は、基底状態に比較して、S－O の結合距離が 0.15 Å ほど伸びている。また、O－S－O の変角が 10 度以上広がっている。

3．今後の研究の展望・将来計画

ピリミジンの MCSCF 計算では、基底状態と励起状態とで、電気双極子モーメントの向きは同じ結果を得た。これは、実験の示唆することとは異なる結果である。そこで、電子相関を取り込んだ MRSDCI 法を用いることにより、この種の電気双極子モーメントの計算には、何が必要かを検討する必要がある。

ピリミジンの一置換体の MCSCF 計算において、基底状態と励起状態とで、電気双極子モーメントの向きがお互いに異なるもの分子を見出したが、ベンゼン環を含んだ他の分子に関しても検討を行う予定である。

分子のイオン化状態の電子状態、分子構造、振動状態の基礎的な理論計算は、極めて少ない。これらの研究は、分子の Rydeberg 励起状態にかんする研究の発展につながるものであり、Rydeberg 励起状態の研究も視野にいれて、引き続きこの分野の研究を行う予定である。

4．資料

4.1　学術論文

1）M. Yamazaki, N.Kishimoto, M. Kurita, T. Ogawa, K. Ohno, and K.Takeshita: "Two-Dimensional Penning Ionization Electron Spectra of CO/He*(2^3S)," *J. Elect. Spectrosc. Relat. Phenom*, 114: 175 (2001)

2）K. Takeshita, N. Shida, and E. Miyoshi: "A theoretical study on the ionization of OCS with analysis of vibrational structure of the photoelectron spectrum," *Teor. Chem. Acta.*, 107: 33 (2001)

3）K. Takeshita, N. Shida: "A theoretical study on the ionization of NO_2 with analysis of vibrational structure of the photoelectron spectrum," *J. Chem. Phys.*,

116: 4482 (2001)

4.2 総説、解説、評論等

1）東倉洋一：「人と情報の新しい係わりを求めて」、ニュースレター―高等教育とマルチメディア―、4：1-4（2001）
2）東倉洋一：「情報の―奥ゆかしさ―」、NTT広報誌〝.relation〞、6：19（2001）
3）東倉洋一：「宇宙人の眼」、NTT広報誌〝.relation〞、7：19（2001）
4）東倉洋一：「研究開発マネージャーのキャリア探訪」、研究開発マネジメント、6：54-62（2001）
5）東倉洋一：「日本の研究開発拠点」、S＆Tジャーナル、㈶科学技術広報財団、10(6)：50-51（2001）
6）東倉洋一：「ITの課題と光の時代を拓くR＆D」，YRCplaza―横河総研―、32：4-9（2001）
7）東倉洋一：「社会2002」、月刊アイティセレクト―メディアセレクト―、1：40-41（2001）
8）東倉洋一：「食欲から創造性と品格へ」、NTT広報誌〝.relation〞、8：19（2002）
9）東倉洋一：「デモデモダケダケの彼方に」、NTT広報誌〝.relation〞、9：19（2002）
10）東倉洋一：「日米ITセッション」、LooP-ダイヤモンド社―、01：68-69（2002）
11）東倉洋一：「一番大きな世界は何処にある」、NTT広報誌〝.relation〞、12（2002冬）：19（2002）
12）東倉洋一：「森の魔術師」、NTT広報誌〝.relation〞、11（2002秋）：19（2002）
13）東倉洋一：「人間と情報―過去・現在・未来」、国際高等研究所報告書、1(1)：33-44（2002）
14）東倉洋一：「風に吹かれて」、NTT広報誌〝.relation〞、10（2002夏）：19（2002）
15）東倉洋一：「心の中の鏡に輝きを」、NTT広報誌〝.relation〞、13（2003春）：19（2003）

4.3 著書

1）東倉洋一：『ITは人間を賢くするか―デジタル時代を考えるヒント―』、（ダイヤモンド社）pp.1-226 (2001)*
2）東倉洋一：「人間と情報―過去・現在・未来」、高度情報化社会のガバナンス、1(1)1-35（2003）

4.5 招請講演

1）東倉洋一：「ITの未来と課題」、新・近畿長期ビジョン懇話会（国土交通省近畿地方整備局）、大阪（2001-4）
2）東倉洋一：「ITの未来と課題」、東京工業大学精密工学研究所第35回シンポジウム、東京（2001-8）
3）東倉洋一：「事業戦略としての基礎研究」、フォーラム「持続可能な産業創生のシナリオ」（21世紀政策研究所）、東京（2001-12）
4）東倉洋一：「ITの未来と課題―人間と情報の新しい係わりを求めて―」、情報通信懇話会（電経新聞社）、東京（2002-1）
5）東倉洋一：「パネル―科学と芸術の絡み合い―」、東京大学総合研究機構俯瞰工学シンポジウム「アート＋テクノロジ＋ブレイン」、東京（2002-2）
6）東倉洋一：「事業戦略としてのR＆D」、研究開発リーダー研究会（現代経営センター）、東京（2002-2）
7）東倉洋一：「ITの未来と課題」、「第3回日本IT経営大賞」授賞式（日本工業新聞）、東京（2002-3）
8）東倉洋一：「新世紀の情報通信―人間とITの新しい係わりを求めて―」、第30回技術予測シンポジウム(㈶科学技術と経済の会)、東京（2002-3）
9）東倉洋一：「光の時代に向けたITの可能性と課題」、DBJベンチャークラブ、日本政策投資銀行（2002-04）
10）東倉洋一：「ITの未来と課題」、第72回近畿ブロック知事会議、近畿ブロック知事会事務局（2002-05）
11）東倉洋一：「産学連携の現状と課題」、「文部科学部門会議・大学改革ワーキングチーム合同会議」、民主党（2002-06）
12）東倉洋一：「研究マネジメントのパラダイム・シフト」、NKKチーム主査研修、㈱プロフェッショナルネットワーク（2002-09）
13）東倉洋一：「人間と情報の新しい係わりを求めて」、第2回未来フォーラム、財団法人未来工学研究所(2002-10)
14）東倉洋一：「人間と情報の新しい係わりを求めて」、通常総会記念講演会、神奈川県情報サービス産業協会(2003-03)
15）東倉洋一：「ヒューマンインターフェースの新しい姿を求めて」、情報通信研究開発プロジェクト「ヒューマンインターフェース会合」プレゼン、内閣府(2003-03)
16）東倉洋一：「産学連携の課題」、第3回　インターネット技術第163委員会（ITRC）シンポジウム、IT連携フォーラムOACIS（2003-03）

4.6 シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）下村政嗣（電子機能素子部門）、雀部博之（電子情報処理部門・客員研究分野）：〝Frontiers in Photonics, Electronics & Materials Science in Hokkaido-from Molecules to Devices-〞（60名、フジヤサンタスホテル）（1999.1.28～29）
2）下村政嗣（電子機能素子部門）、雀部博之（電子情報処理部門・客員研究分野）：「有機材料のエレクトロニクス・フォトニクス応用に関する日韓ジョイントフォーラム」（北海道大学・学術交流会館）（1998.6.30～7.1）

b．一般のシンポジウム（組織者名、部門名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）下村政嗣（電子機能素子部門）、雀部博之（電子情報処

理部門・客員研究分野)：「電子科学研究所　公開シンポジウム・第2回フロンティア時空間機能材料研究フォーラム　ジョイントシンポジウム」(北海道大学・学術交流会館)（1998.1.21～22)

4.10　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）東倉洋一：文部科学省科学技術・学術審議会「特定領域研究(A)メディア教育利用」専門委員会委員（1999年4月1日～現在)
2）東倉洋一：厚木市都市計画審議委員会委員（2000～2002年度)
3）東倉洋一：総務省情報通信政策局「情報通信ブレイクスルー基礎研究21推進会議」構成委員(2000年4月1日～現在)
4）東倉洋一：日本学術会議情報基礎専門委員会委員(2001年4月1日～現在)
5）東倉洋一：文部科学省科学技術・学術審議会「科学技術振興調整費審査部会」委員(2001年4月1日～現在)
6）東倉洋一：文部科学省科学技術政策研究所「科学技術動向研究センター」専門調査員（2001年4月1日～現在)
7）東倉洋一：文部科学省科学技術・学術審議会［情報科学技術委員会］専門委員（2001～2003年度)
8）東倉洋一：総務省情報通信政策局「量子情報通信研究会議」構成員（2001～2003年度)
9）東倉洋一：文部科学省「革新技術活性化委員会」審議フォローアップ部会委員（2002～2003年度)
10）東倉洋一：総務省情報通信政策局「ネットワーク・ヒューマン・インターフェース研究会」主査代理(2002年度)

b．国内外の学会の役職

1）東倉洋一：Academic Press社 Journal of Phonetics編集委員（1990年4月1日～現在)
2）東倉洋一：日本音響学会評議員・代議員（1989年4月1日～現在)
3）東倉洋一：Elsevier Science社 Speech Communication編集委員（1997年～2004年度)
4）東倉洋一：日本バーチャルリアリティ学会理事・監事・評議員（1997年4月1日～現在)
5）東倉洋一：国際超伝導産業技術研究センター理事(1998～2003年度)
6）東倉洋一：科学技術振興事業団「計算科学技術委員会」委員（1998年～現在)
7）東倉洋一：IEEE Tokyo Section, Fellow Nominations Committee Vice Chair & Chair（1999年1月1日～2002年12月31日)
8）東倉洋一：IEEE Tokyo Section,理事（1999年1月1日～2002年12月31日)
9）東倉洋一：神戸大学運営諮問会議委員（2000～2003年度)
10）東倉洋一：技術組合新情報処理開発機構運営会議委員会（RWCP)（2000年度～2002年度)
11）東倉洋一：半導体研究振興会評議員（2000年7月～2003年6月)
12）東倉洋一：科学技術振興事業団「地域振興事業評価委員会」(2000～2002年度)
13）東倉洋一：日本能率協会「RD&E　マネジメント革新センター」企画委員会委員（2000年4月1日～現在)
14）東倉洋一：科学技術振興事業団「戦略的創造研究推進事業『協調と制御』」領域アドバイザー（2000～2004年度)
15）東倉洋一：第18回国際音響学会組織委員会委員(2000年度～現在)
16）東倉洋一：日本ソフトウェア科学会評議員（2000年4月1日～現在)
17）東倉洋一：電子情報通信学会評議員（2000年6月～2001年5月)
18）東倉洋一：理化学研究所脳科学総合研究センターアドバイザリーカウンシル（2001～2006年度)
19）東倉洋一：独立行政法人産業技術総合研究所研究ユニットレビューボード委員（2001～2003年度)
20）東倉洋一：新世代研究所評議員（2001～2003年度)
21）東倉洋一：熱・エネルギー技術財団評議員(2001～2003年度)
22）東倉洋一：国際高等研究所企画委員（2001～2004年度)
23）東倉洋一：奈良先端科学技術大学院大学「情報科学研究科アドバイザー委員会」委員（2002～2003年度)
24）東倉洋一：研究産業協会理事（2002年度)
25）東倉洋一：科学技術振興事業団「戦略的創造研究推進事業『シュミレーション技術の革新と実用化基盤の構築』」領域アドバイザー（2002～2008年度)
26）東倉洋一：日本学術振興会「21世紀COEプログラム委員会」委員（2002～2003年度)
27）東倉洋一：日本学術振興会「未来開拓学術研究推進事業研究評価委員会」委員（2002～2003年度)

c．新聞・テレビ等の報道（並列分散処理研究分野)

1）東倉洋一：「2003年のNTT　R＆D展望」、通信興業新聞2003年1月1日

ナノテクノロジー研究センター

研究目的

ナノテクノロジーは半導体技術、材料技術、バイオテクノロジー、情報技術、環境技術などを支える基盤技術であり、次世代産業創成のキーテクノロジーである。本センターは、分野横断・領域融合的な研究組織により、分子・原子の自己組織化によるボトムアップ戦略を基軸として半導体テクノロジーにおけるトップダウン戦略を融合した新しいナノサイエンス領域を創成するとともにわが国におけるナノテクノロジーネットワークの一翼を担う研究施設である。

ナノ材料研究分野

教授　　下村政嗣（九州大院、工博、2002.4～）
助教授　岩井俊昭（北大院、工博、2002.4～）
助手　　石井勝弘（北大院、工博、2002.4～）

院生
・平成 14 年度
修士課程
吉田力也、難波法子

1．研究目的

本研究分野は、ナノテクノロジー研究センター新設にともなって設置されたもので、分子認識素子研究分野ならびに附属電子計測施設から配属された教官による分野横断・領域融合的な研究組織として、新たなナノ材料の作製を目指している。

1）自己組織化による階層構造を有するナノマテリアルの創製

分子の自己組織化を用いて分子配列や配向を規制し、ナノメータスケールで構造と機能が高度に制御された分子組織体を作製する。非線形、非平衡ダイナミクスを利用した自己組織化や時空間制御反応プロセスにより分子組織体の高次元組織化をはかり、生物にみられるような階層的な構造化を特徴とする新たな機能性材料を創製する。

2）ナノ微粒子配列のためのレーザ・マニピュレーション技術の開発、ならびに光散乱を利用したナノ粒子とナノ構造の計測

レーザ光がナノサイズ微粒子に照射されるときに発現する光圧と溶媒の乾燥過程で発生する自己組織化現象を利用して、微粒子を 3 次元周期配列させるコロイド・エピタキシ法を開発する。ナノサイズ微粒子とその集合体からの光散乱現象の時空間特性を解明するとともに、光散乱を利用したナノ粒子とナノ構造の新しい計測法を確立する。

2．研究成果

1）自己組織化による階層構造を有するナノマテリアルの創製

本研究分野では、非平衡現象である散逸構造などの自己組織化現象を利用することで、ナノスケールからサブミリメートルにいたる幅広いスケールで階層的な構造を有する材料の作製に成功した。本年度は、自己組織化によるナノ微粒子の規則的なパターン形成を試みた。

すでに我々は、高分子を溶液からキャストする過程で、溶液界面におけるマランゴニ対流（フィンガリング不安定性）に基づく周期的な溶質の濃縮（ワインの涙のような現象）、界面局所濃度の増大による溶液界面の断続的な収縮（スティック・スリップ運動）に起因する高分子の非連続的な沈着（コーヒーの染みのような現象）、などの自己組織化現象を見いだした。これらの自己組織化現象は一般的な物理現象であるので、ナノ微粒子にも適用できる。

粒径のそろったポリスチレンやシリカ微粒子の水分散溶液を固体基板にキャストし、パターン形成におよぼす濃度効果を検討した結果、希薄な条件では、フィンガリングから生じたストライプ構造が形成される。ラインの方向は溶媒界面の後退方向に平行である。電子顕微鏡観察によると、個々のラインはナノ粒子が細密に充填した単層構造を形成している。濃度を高くすると、ラインの方向は溶媒後退方向に垂直になる。これは、スティック・スリップ現象によるものである。微粒子が連続した薄膜層を形成するような高い濃度では、溶媒の後退方向に平行な規則的なひび割れが形成された。これらの規則構造の出現は水溶液のキャスト温度に強く依存していた。さらに興味深いことに、大きさの異なる微粒子を混合してキャストすると図 1 に示すように、粒径にともなう自発的な相分離がおこることを見いだした。

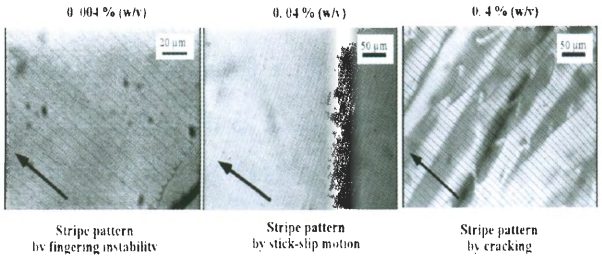


図 1．散逸構造を利用したナノ粒子の集積

2）多重散乱光の光路長分解スペクトル測定

ナノ粒子とナノ構造の新しい計測法の確立のための基礎的実験を行った。低コヒーレンス光源からの光は、光ファイバカップラにカップルされ、2 つに分割される。一方は、ピエゾ素子に取り付けられたミラーにより反射されると同時に周波数変調される。もう一方のビームは、散乱媒質に入射される。散乱媒質からの後方散乱光は、参照光とともに光検出器で検出され、検出光強度のパワースペクトルが測定される。これにより、光路長分解スペクトル測定が可能となる。

図 2 は、測定されたパワースペクトルを示す。横軸は光路長、縦軸はスペクトルの半値半幅を示す。実線は、単散乱理論より予測される半値半幅である。光路長が平均自由行程より短い場合、測定されるスペクトルは、単散乱理論と一致する。光路長の増加とともに、多重散乱光の影響により徐々にスペクトル幅が増加する。このように、これまで明らかになっていない低次散乱光のスペクトルが実験的に得られた。これは、多重散乱光の性質解明、および、新しい計測法につながると考えられる。

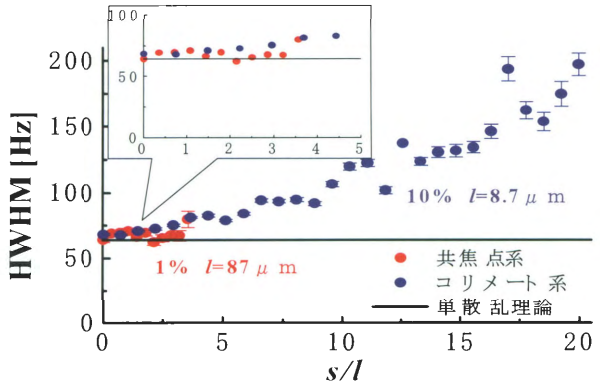


図２．光路長分解された後方散乱光のパワースペクトルの半値半幅

３）拡散反射光の偏光十字像による多分散系粒子径計測

微粒子の凝集・会合を光の放射圧と自己組織化による制御する技術を開発する上で、濃厚微粒子溶液の粒径計測は重要な側面技術である。本研究では、濃厚溶液からの後方多重散乱光が発現する現象の一つである偏光十字像による粒径分布計測技術を開発した。ガラスセル内の被測定溶液の後方出射面に発生する偏光十字像を光軸近傍が不透明なマスク上に結像し、中心付近の強度が極端に強い領域を遮断した後、CCD カメラの撮像面に再度結像される。偏光十字像はコンピュータにディジタル画像として取り込まれ、光軸を中心とする方位角方向に沿って変動する強度変動がフーリエ級数展開され、その係数から粒径分布を計測する。

図３は、105 nm、600 nm、3040 nm の３種類のポリスチレン球が混合された多分散溶液に対する粒子径分布の測定結果を示す。実験において、溶液の体積濃度は 0.1%であった。図より、３種類のポリスチレン球の混合比の変化に応じて、測定された粒子径分布も変化しており、偏光十字像を用いた濃厚溶液の粒子径計測がかのうであることを示している。

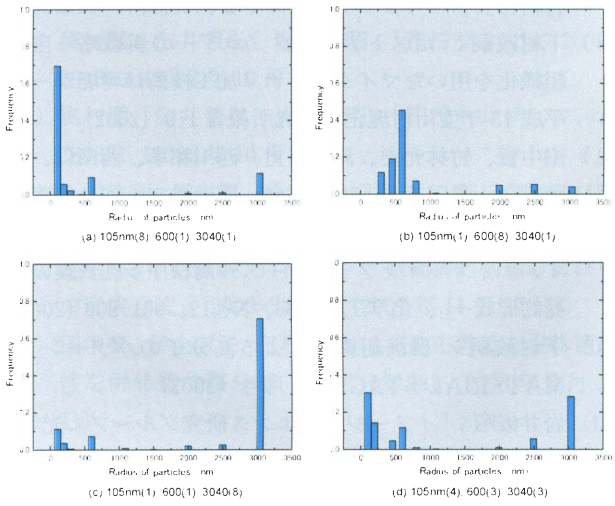


図３．粒径が 105 nm、600 nm、3040 nm のポリスチレン球の多分散溶液の測定結果

３．今後の研究の展望・将来計画

自己組織化によって形成されるナノ微粒子の階層的パターンは様々な分野においての応用が期待される。作製の再現性と大面積化は原理的に可能である。今後の課題は、パターンの規則性の向上と制御パラメーターの定量化、パターンの多様化、多成分物質系でのパターン形成、ナノスケールへの微細化、などである。マイクロレンズアレーや表示デバイス、フォトニック結晶や光エネルギー変換デバイス、メモリーデバイスなどへの応用を図っている。

また、科学技術振興事業団 CREST（戦略的創造研究推進事業「医療に向けた自己組織化等の分子配列制御による機能性材料・システムの創製」領域）において、所内の研究分野、医学研究科、理学研究科、産業技術総合研究所、日立製作所ならびにゼオンメディカル、との産官学連携をはかっている。

４．資料

4.1　学術論文等

１）T. Nishikawa, K. Arai, J. Hayashi, M. Hara and M. Shimomura: ""Honeycomb Films"-Biointerface for Tissue Engineering", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 415-418 (2002)

２）J. Nishida, J. Matsumoto, M. Morisue, K. Ijiro and M. Shimomura: "Circular Arrangement of Azobenzene Chromophores in the Nucleoamphiphile Monolayer by Base-Pairing with Cyclic DNA", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 677-681 (2002)

３）K. Ijiro, J. Matsumoto, M. Morisue and M. Shimomura: "Controlled Aggregation of Azobenzene Based on DNA-Mimetics at the Air-Water Interface", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 597-601 (2002)

４）K. Ishii and T. Iwai: "Double-scattering approximation theory of enhanced backscatterings of light produced from aggregated particles", *Jpn. J. Appl. Phys*, 41(8): 5155-5159 (2002)

５）Y. Hashimoto, K. Ijiro, T. Sawadaishi and M. Shimomura: "Electric Conductivity of Nucleic Acid Polymer Monolayer", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 707-711 (2002)

６）N. Fukuda and M. Shimomura: "Fabrication of CdS Periodic Structures Using Polymer Honeycomb Films", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 551-555 (2002)

７）T. Nishikawa, R. Ookura, J. Nishida, K. Arai, J. Hayashi, N. Kurono, T. Sawadaishi, M. Hara and M. Shimomura: "Fabrication of Honyecomb Film of an Amphiphilic Copolymer at the Air-Water Inter-

face", *Langmuir*, 18(15): 5734-5740 (2002)

8) K. Tamaki and M. Shimomura: "Fabrication of Luminescent Polymeric Nano-Particles Containing Lanthanide (III) Ion Complexes", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 533-537 (2002)

9) H. Yabu and M. Shimomura: "Fabrication of Organic/Inorganic Hybrid Meso-Structures by Self-Organization", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 673-676 (2002)

10) T. Ohzono, N. Fukuda, T. Nishikawa and M. Shimomura: "Imprint of Honeycomb Pattern on PDMS Elastomer", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 569-573 (2002)

11) H. Sunami, K. Ijiro and M. Shimomura: "Molecular Recognition of Nucleobeses Attached to Self-Assembled Monolayers Detected by Chemical Rrce Microscopy and Quartz Crystal Microbalance", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 667-671 (2002)

12) H. Ohno, S. Yoneyama, F. Nakamura, K. Fukuda, M. Hara and M. Shimomura: "Optical Waveguide Spectrometry of Acridine Orange in Monolayer and Langmuir-Blodgett Film", *Langmuir*, 18: 1661-1665 (2002)

13) J. Nishida, K. Nishikawa, S. Nishimura, S. Wada, T. Karino, T. Nishikawa, K. Ijiro and M. Shimomura: "Preparation of Self-Organized Micro-Patterned Polymer Films Having Cell Adhesive Ligands", *Polymer Journal*, 34(3): 166-174 (2002)

14) K. Sato, M. Tanaka, m. Takebayashi, K. Nishikawa and M. Shimomura: "Preparation of the patterned film of biodegradable polymer for tissue engineering scaffolds", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 689-693 (2002)

15) Y. Matsuo, K. Ijiro and M. Shimomura: "Stretching of Single DNA Molecules by Langmuir-Blodgett Method", *International Journal of Nanoscience*, 1(5&6): 695-699 (2002)

16) K. Ishii and T. Iwai, "Spectrum analysis of dynamic scattering light measured via a low-coherence interferometer," SPIE, Vol.4829, pp.895-896 (2002).

17) N. Kurono, R. Shimada, T. Ishihara and M. Shimomura, "Fabrication and Optical Property of Self-Organized Honeycomb-Patterned Films," Mol. Cryst. Liq. Cryst. , 377:285-288 (2002)

18) 居城邦治、松本仁、西田仁、森末光彦、下村政嗣：「環状DNAを用いた人工光合成アンテナ系構築に向けて」、化学工業、53(7)：17-21 (2002)

19) 橋本裕一、澤田石哲郎、居城邦治、下村政嗣：「導電性原子間力顕微鏡を用いたポリチオフェン細線の微小領域光導電性測定」、高分子論文集、59(10)：651-655(2002)

20) K.Ijiro, H.Sunami, K.Arai, J.Matsumoto, O.Karthaus, S.Kraemer, S.Mittler, N.Nishi, B.Juskowiak, S. Takenaka, W.Knoll and M.Shimomura: "Base-pair Mapping by Chemical Force Microscopy on Nucleobase Self-Assembled Monolayers.", Colloids and Surfaces, A: 198-200, 677-682 (2002).

21) H.Ohno, S.Yoneyama, F.Nakamura, K.Fukuda, M. Hara and M.Shimomura: "Optical Waveguide Spectrometry of Acridine Orange in Monolayer and Langmuir-Blodgett Film.", Langmuir, 18, 1661-1665 (2002).

22) M.Shimomura, R.Mitamura, J.Matsumoto and K. Ijiro: "DNA-Mimetics: Towards Novel Molecular Devices Having Molecular Information.", Synthetic Metals, 133/134, 473-475 (2003).

4.2 総説・解説・評論等

1) 岩井俊昭、古西宏治、石井勝弘、井上久遠：「光の放射圧と自己組織化を利用した微粒子配列」、レーザー研究、30(2)：70-74 (2002)

2) 北野正雄、瀧口義浩、堀裕和、岩井俊昭：「光物理」、光学、31(4)：207-209 (2002)

3) 岩井俊昭：「散乱光トポグラフィ法による血管造影」、オプトロニクス、247：215-222 (2002)

4) 北野正雄、瀧口義浩、堀裕和、岩井俊昭、「光学界の今とこれから～ひろがる光の世界～」、日本光学会創立50周年記念CD-ROM、(2002)

5) 下村政嗣：「分子の自己組織化でデバイスを創ることができるだろうか？」、化学、57(1)：17-20 (2002)

6) 下村政嗣：「複雑系の現象を利用したポストナノテクノロジー」、理研ニュース June 2002、252：5-7 (2002)

7) 下村政嗣：「自己組織化による高分子のパターン化と材料化」、マテリアルステージ、2、No.3、77-82(2002)

8) 下村政嗣：「ポストナノテクノロジーの新戦略—自己組織化を用いたマイクロ・ナノ加工技術は可能か—」、平成13年度川村理化学研究所報告 1-9 (2002)

9) 田中賢、竹林允史、深山真史、西川和孝、西田仁、佐藤雄久、長谷部清、大久保尚、蒲池浩文、河合朋明、松下通明、藤堂省、西川雄大、下村政嗣：「新しいバイオメディカルインターフェース—高秩序多孔質膜の自発的形成—」、化学工業、53、No.12、901-906 (2002)

10) 下村政嗣：「自己組織化による高分子のパターン」、MATERIAL STAGE、6月号 (2002)

11) 岩井俊昭：「イメージサイエンス研究グループ」、光学、31(4)：365 (2002)

(3．国際会議議事録等に掲載された論文)

1) K. Ishii and T. Iwai: "Spectrum analysis of dynamic

scattering light measured via a low-coherence interferometer", *19th Congress of the International Commission for Optics*, 4829: 895-896 (2002)

2) K. Ishii, Y. Rikiya and T. Iwai: "Spectrum measuremnt of dynamically scattered light using a low-coherence interferometer", *Proceedings of Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine*, 280-281 (2002)

3) T. Iwai and K. Matsubara, "Image of blood vessels using diffusing light topography based on diffuse reflectance measurements," Proceedings of Asian symposium on Biomedical Optics and Photomedicine BOPM2002, pp.92-93 (2002).

4.3 著書

1) 岩井俊昭：「多重散乱場の光学」、新光学技術ハンドブック、606-626 (2002)

2) 下村政嗣：「ナノテクノロジーにおけるモレキュラーアッセンブリー」、ナノテクノロジーと高分子、エヌ・ティー・エス、141-171 (2002)

3) M.Shimomura: "Polyelectrolyte-Amphiphile Complexes-Their Nanostructured Assemblies and Molecular Films.", Handbook of Polyelectrolytes and Their Applications, Ed. S.Tripathy, J.Kumar, H.Nalwa, American Scientific Publishers, Chapter 6, 150-163 (2002).

4) 下村政嗣：「自己組織化による高分子薄膜のパターン化」、21 世紀版・薄膜作製応用ハンドブック、エヌ・ティー・エス、550-554 (2003)

4.4 特許（発明者、特許名、特許番号、出願年月日）

a. 国内特許

1) 居城邦治、松本仁、下村政嗣：「有機超薄膜とその累積体並びにその製造方法」、2002-263434 (2002 年 9 月 9 日)

2) 奥村聡、臼井豊弘、岩井俊昭：「花粉センサ」、2002-294560 (2002 年 10 月 8 日)

3) 奥村聡、臼井豊弘、岩井俊昭：「花粉センサ」、2002-289881 (2002 年 10 月 8 日)

4) 下村政嗣、田中賢、藪浩、田畑憲一：「塞栓微粒子材料の製造方法」、2002-341855 (2002 年 11 月 26 日)

5) 田中賢、下村政嗣、竹林允史：「微細突起構造およびその形成方法」、2002-344513 (2002 年 11 月 27 日)

6) 田中賢、伊土直子、下村政嗣：「温度応答性と生体適合性を併せ持つ高分子」、2003-091281 (2003 年 3 月 28 日)

4.5 招請講演

1) M. Shimomura: "Self-Organization Strategy in Microfabrication and Nanotechnology of Patterned Soft Materials", Pattern Formation by Molecular Self-Organization at Planar Interfaces, Berlin, Germany (2002-04)

2) M. Tanaka, M. Takebayashi, K. Sato, M. Miyama, K. Nishikawa, J. Nishida and M. Shimomura: "Self-assembly approaches to preparation of regular porous polymer films for biomedical devices", Pattern Formation by Molecular Self-Organization at Planar Interfaces, Berlin, Germany (2002-04)

3) 下村政嗣：「ナノとは？：なぜ今ナノなのか？」、第 1 回研究推進委員会シンポジウム「高分子科学の動向・展望」、横浜 (2002-05)

4) 下村政嗣：「自己組織化を用いたナノ微粒子操作とその応用」、微粒子工学講演会、札幌 (2002-06)

5) 岩井俊昭：「自己組織化現象とナノテクノロジー」、平成 14 年度北海道地区国立学校等技術専門職員研修会、札幌 (2002-07)

6) 下村政嗣：「自己組織化とナノテクノロジー」、腐食防食学会講演、札幌 (2002-08)

7) M. Shimomura: "Nonlinear dynamics for a new micro-fabrication technology of polymer materials.", ACS, Boston, USA (2002.8)

8) 岩井俊昭：「拡散反射光の光路長分布を利用した血管造影法」、電気学会医療のための光応用新技術調査専門委員会、東京 (2002-08)

9) K. Ishii and T. Iwai: "Spectrum analysis of dynamic scattering light measured via a low-coherence interferometer", 19th Congress of the International Commission for Optics, Florence, Italy (2002-08)

10) K. Ishii, R. Yoshida and T. Iwai: "Spectrum measuremnt of dynamically scattered light using a low-coherence interferometer", Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine (BOPM2002), Sapporo, Japan (2002-10)

11) T. Iwai and k. Matsubara: "Image of blood vessels using diffusing light topography based on diffuse reflectance measurements", Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine (BOPM2002), Sapporo, Japan (2002-10)

12) 下村政嗣：「北海道大学におけるナノテクノロジー研究と北キャパス構想」、第 13 回北海道大学触媒化学研究センター研究討論会、札幌、(2002-11)

13) 下村政嗣：「自己組織化によるナノ微粒子の作製とその高次組織化」、高分子学会ナノテク、福島 (2003-1)

14) 下村政嗣：「北海道大学におけるナノテクノロジー研究と北キャンパス構想、」、北海道大学－早稲田大学研究交流会、東京 (2003-1)

11) 下村政嗣、居城邦治、田中賢：「自己組織化によるメディカル―ナノデバイスの作製―」、21 世紀 COE シンポ、札幌 (2003-2)

12) 下村政嗣：「ナノテクノロジーとデータベース」、シンポジウム「物質・材料系データベースの将来展望」、東京（2003-3）
13) 下村政嗣：「北海道大学におけるナノテクノロジー研究の動向ボトムアップと自己組織化」、多元ナノ材料研究センターシンポジウム、仙台（2003-3）
14) 下村政嗣：「北海道大学におけるナノテクノロジー研究の動向―ボトムアップ戦略と自己組織化を中心に―」、北海道・理研ジョイントフォラム―北大北キャンパスエリアが目指すバイオとナノの融合拠点―、札幌（2003-3）
15) M. Shimomura: "Hierarchic Supramolecular Assemblies from Nanometer to Micrometer", 2003 Hokkaido University-Bordeaux University Bilateral Joint Symposium Supramolecular assemblies, biological molecules to materials, Sapporo (2003-3)

4.6 シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム

1）M. Tamura, T. Iwai, M. Kinjo and G. Nishimura: "Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine"（174名、北海道大学　学術交流会館・札幌市）（2002.10.21-10.23）
2）S. Sasabe nad M. Simomura: "3rd Chitose International Forum on Photonics Science & Technology" Chitose, Hokkaido, Japan（2002.10.6-8）
3）T. Kishi, E. Maruyama, T. Kunitake, M. Shimomura, H. Lee and Z. Liu: "ASIANANO2002", NIPPON KAGAKU MIRAIKAN, Japan（2002.11.27-29）
4）M.Shimomura: "2003 Hokkaido University-Bordeaux University Bilateral Joint Symposium Supramolecular assemblies, biological molecules to materials"（2003.3.27-28）

b．一般のシンポジウム

1）下村政嗣：北海道・理研ジョイントフォラム―北大北キャンパスエリアが目指すバイオとナノの融合拠点―（科学技術振興事業団　研究成果活用プラザ北海道セミナー室）（2003.3.14）
2）下村政嗣：ジョイントフォラム「自己組織化とは何か―ナノテクノロジーを支えるもの―」（ニドム・苫小牧）（2002.3.3-5）

4.7 予算獲得状況

a．科研費

1）石井勝弘：若手研究B、「低コヒーレンス干渉計を用いたスペクトル測定システムの構築と散乱計測への応用」、2,200千円（2002年度）
2）下村政嗣：基盤A(2)、「非平衡現象に基づく自己組織化を利用した高分子面状デバイスの開発」、14,300千円（2002-2004年度）

b．奨学寄付金（研究助成金）

1）下村政嗣：昭和電工株式会社、電子科学研究のため、500千円（2002年）
2）下村政嗣：株式会社巴川製紙所、電子科学研究のため、500千円（2002年度）
3）下村政嗣：フジ写真フィルム株式会社、電子科学研究のため、500千円（2002年度）
4）下村政嗣：帝人株式会社、電子科学研究のため、1,000千円（2002年度）
5）下村政嗣：JSR株式会社、電子科学研究のため、400千円（2002年度）
6）下村政嗣：東レ株式会社、電子科学研究のため、750千円（2002年度）
7）下村政嗣：三井化学株式会社、電子科学研究のため、2,500千円（2002年度）

c．受託研究費

1）下村政嗣：農水省　食品総合研究所、「生物機能の革新的利用のためのナノテクノロジー・材料技術の開発」、4,980千円（2002年度）

4.8 共同研究

1）下村政嗣：科学技術振興事業団CREST（戦略的創造研究推進事業「医療に向けた自己組織化等の分子配列制御による機能性材料・システムの創製」領域）、「高分子の階層的自己組織化による再生医療用ナノ構造材料の創製」、56,400千円（2002-2006年度）

4.10 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）下村政嗣：日本学術振興会情報科学用有機材料第142委員会委員（2002年度）
2）下村政嗣：日本学術振興会分子ナノテクノロジー第174委員会委員（2002年度）

b．国内外の学会の役職

1）岩井俊昭：日本光学会イメージサイエンス研究グループ代表幹事（2000-2002年度）
2）岩井俊昭：日本光学会光学奨励賞選考委員会委員（2001-2003年度）
3）岩井俊昭：OSJ/OSA/SPIE International Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine（北海道大学、札幌）組織委員ならびに事務局（2001年4月1日-2002年10月23日）
4）岩井俊昭：応用物理学会北海道支部会計幹事（2002-2003年度）
5）岩井俊昭：日本光学会光学奨励賞選考委員会委員長（2002年度）
6）岩井俊昭：日本光学会「光学」編集委員長（2002-2003年度）
7）岩井俊昭：日本光学会常任幹事（2002-2003年度）
8）岩井俊昭：International Comission for Optics（ICO、

国際光学学会）Topical Meeting in Japanにおける Biomedical Optics Session　責任者ならびにプログラム委員（2003年1月1日-2004年8月31日）

9）岩井俊昭：日本光学会学術論文誌Opitcal Review（Vol.10、No.5、2003：年12月31日）“Special Feature Section “Biomedical Optics and Photomedicine” Guest Editor（2003年1月1日-2003年12月31日）

10）下村政嗣：日本化学会学術賞選考委員（2002年度）

11）下村政嗣：日本化学会北海道支部幹事（2002年度）

12）下村政嗣：高分子学会北海道支部幹事（2002年度）

13）下村政嗣：電気化学会北海道支部幹事（2002年度）

14）下村政嗣：高分子学会高分子ナノテクノロジー調査委員（2002年度）

c．新聞・テレビ等の報道

1）下村政嗣：日経産業2002年4月22日「極微のハニカム膜を作製」

2）下澤楯夫、下村政嗣、西浦廉政、長田義仁、中村貴義、武笠幸一、笹木敬司、末宗幾夫：科学新聞2002年4月26日「ピラミッド型発光素子開発」

3）中村陸男、下村政嗣、武笠幸一、魚崎浩平：科学新聞2002年7月19日「北大ナノテク研究センター始動」

4）下村政嗣：日経新聞2002年9月16日「理研「自己組織化」を応用」

5）下村政嗣：日経新聞2003年3月31日、「大学革新　東京事務所開設」

6）下村政嗣：日経先端技術2002年4月8日、「自己組織化で極微の多孔膜」

7）下村政嗣：大学　知の工場、日本経済新聞社、2002年11月11日、「有望な大学研究者」

e．大学院担当講義科目

1）光物理学特論（岩井俊昭）（2002年4月1日-2002年9月30日）

2）電子情報エレクトロニクス特別研究第一（岩井俊昭）（2002年度）

3）電子情報エレクトロニクス特別研究第二（岩井俊昭）（2002年度）

4）電子情報エレクトロニクス特別演習（石井勝弘）（2002年度）

5）電子情報エレクトロニクス特別研究第一（石井勝弘）（2002年度）

6）電子情報エレクトロニクス特別研究第二（石井勝弘）（2002年度）

7）特別研究Ⅰ（下村政嗣）（2002年度）

8）特別研究Ⅱ（下村政嗣）（2002年度）

10）電子情報エレクトロニクス特別演習（岩井俊昭）（2002年度）

11）超分子化学（下村政嗣）（2002年4月1日-2002年9月30日）

12）超分子化学概論（下村政嗣）（2002年4月1日-2002年9月30日）

13）論文購読Ⅰ（下村政嗣）（2002年度）

f．その他

1）下村政嗣：特定非営利活動法人　ホトニクスワールドコンソーシアム　理事（2002年度）

ナノデバイス研究分野

教授　辻井　薫（阪大院、理博、2003.3〜）

1．研究目的

ボトムアップ・ナノテクノロジーの手法を用い、エレクトロニクス、フォトニクス、バイオニクス等のデバイス開発を行う。その際、自己組織化、メゾスコピック、フラクタル、超分子等の概念を、開発の指導原理として活用する。当面、次の二つの研究テーマを柱として掲げる。

1）フラクタル・ナノテクノロジーの開拓

数学の概念であるフラクタルを、機能性材料開発の指導原理として利用する。ナノサイズのフラクタル構造を現実の物質に実現し、それを特徴的な物性の発現に結びつける。更に、発現した特徴的物性を応用する開発研究まで展開する。フラクタル表面は、純数学的には無限大の表面積を有する。現実の物理世界においては、フラクタル表面は大変大きな実表面積を持つことを意味する。この大きな実表面積が、例えば濡れの現象に応用された時、超撥水/超撥油表面を実現する。この様に、ナノサイズのフラクタル構造を現実の物質に実現し、様々な機能性デバイスを開拓する。

2）分子組織ナノ構造体を固定化したヒドロゲル

ヒドロゲルは、薬剤送達システム、アクチュエーター等としての応用が期待され、大変活発に研究されている。一方、界面活性剤や脂質分子が形成する分子組織ナノ構造体（二分子膜、ベシクル、リポソーム、ミセル、液晶等）も、多くの研究と実用化の実績がある。これら二つのソフトマテリアルを組み合わせ、ハイブリッド材料にすることによって、特徴的機能を有するデバイスを構築する。

2．研究成果

本研究分野は、2003年3月1日に教授が着任して活動を開始した。従って、平成14年度の活動期間は一ヶ月だけであった。その上、研究室スタッフがその間まだ着任しておらず、研究成果を上げることは事実上不可能であった。しかしながら、今後の研究の展望を正しく理解して頂くためにも、ここでは北大着任以前の研究成果を敢えて記し、当研究分野の活動方針の理解を助けたいと思う。

(a)　フラクタル構造による超撥水/超撥油表面の実現

フラクタル表面は、大きな凹凸の中に小さな凹凸があり、小さな凹凸の中に更に小さな凹凸があるといった、入れ子（自己相似）構造を有している。従って、その実表面積は見掛けの表面積に比べて著しく大きくなる。一方、固体表面の濡れは、実表面積の増大によって強調される。濡れる（接触角が90°より小さな）表面はより濡れる様になり、はじく（90°より大きな）表面はよりはじく様になる。濡れのこの性質により、フラクタル表面は完全に濡れる超親水表面や、完全にはじく超撥水表面になる。更に、表面に特殊な物質を選ぶことにより、油をもはじく超撥油表面を得ることが出来る。

図1に、アルキルケテンダイマーというある種のワックスの、フラクタル表面上の水滴の写真を示す。接触角は174°で、世界で最もよく水をはじく表面である。この表面の電子顕微鏡写真を図2に示す。大きなアジサイの花様の凹凸の中に、鱗片状の結晶がぎっしりつまっており、フラクタル的な入れ子構造であることが分かる。この表面が、0.2−34 μm の範囲でフラクタル（自己相似）構造であること、そのフラクタル次元が2.29であること等が、解析の結果分かった。

図1．超撥水フラクタル表面上の水滴。材料はアルキルケテンダイマーで、接触角は174°

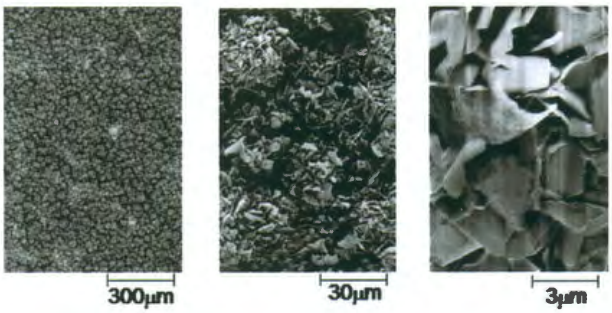


図2．フラクタル表面の電子顕微鏡像。凹凸の入れ子構造が見て取れる

(b)　二分子膜固定化ヒドロゲルの合成とその物性

重合性の界面活性剤の二分子膜が、サブミクロンの距離を隔てて規則的に配列し、その回折現象によって発色するという面白い現象がある。この発色性ラメラ液晶中の界面活性剤分子は、紫外線によって光重合が可能であり、さらにアクリルアミドや *N*-イソプロピルアクリルアミドと共重合して、発色構造を保持したままヒドロゲル中に固定化できる。このゲルは、図3に示す様に、膨潤/収縮によって色を変える等の面白い性質を示す。

更に、上記の重合性界面活性剤を含むモノマーの液晶混

合物を重合セル中に吸い込み、流動のずりをかけた直後にUV照射して重合することにより、異方性ゲルを調製することが出来る。それは、流動のずりによって二分子膜が巨視的に配向し、その配向構造がゲル中に固定化されたためである。この様にして得られた異方性ゲルは、エタノール/水混合溶媒中に浸すと、異方的に膨潤/収縮することが分かった。図4にその結果を示す。図の横軸は円柱状のゲルの太さの膨潤度、縦軸は長さの膨潤度である。二分子膜を含まない単純なアクリルアミドゲルでは、当然ながら等方的に膨潤/収縮し、測定点は図の対角線上に乗る。しかし配向二分子膜を固定化したゲルでは、異方的に膨潤/収縮し、対角線から外れていることが理解できるであろう。この異方性のヒドロゲルは世界で初めての例である。

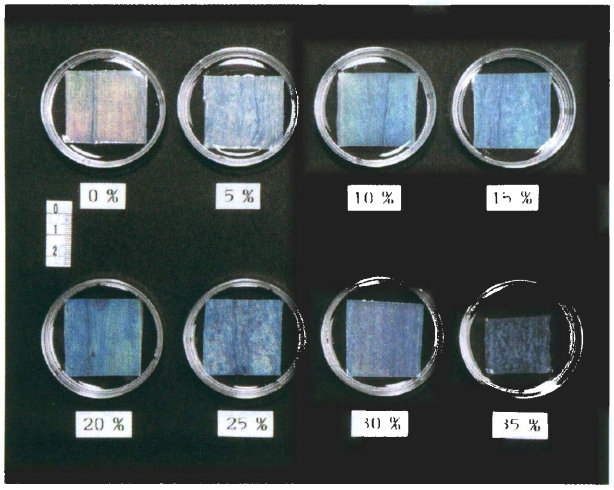


図3．二分子膜の規則構造を固定化した発色性ヒドロゲル。ゲルの膨潤/収縮によって色が変わる

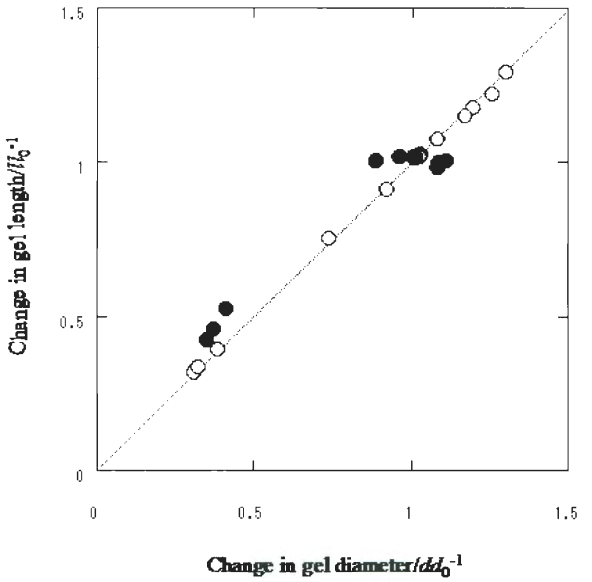


図4．配向二分子膜を固定化した異方性ゲルの膨潤/収縮挙動。単純なアクリルアミドゲルは等方的に膨潤/収縮する（○）が、異方性ゲルは異方的に振る舞う（●）

3．今後の研究の展望・将来計画

北大着任前の上記の研究成果を踏まえ、今後はその展開を図る。先ず、フラクタル・ナノテクノロジーでは、超撥水/超撥油表面の実用化を目指す。超撥水ワックス表面の最大の欠点は、耐久性のない点にある。そこでこの改良のために、各種高分子を基材とするフラクタル表面の作製に挑戦する。予備実験では比較的よい結果が得られており、可能性が高いものと期待している。フラクタル表面の濡れ以外への展開として、摩擦や生物細胞の接着性に関する研究を行う。フラクタル表面の特徴を反映した、特異な性質の発現を期待している。

二分子膜固定化ヒドロゲルについては、先ずゲル電気泳動基材としての応用に着手する。水に不溶性の膜タンパク質に使用可能な、ゲル電気泳動法の開発を目指す。次に、より完全な異方性ゲルの合成法の検討を行う。二分子膜を配向するのに、現在は流動シェアを用いている。その方法のブラッシュアップを行うと同時に、他の方法による配向法も検討する。二分子膜以外の分子組織ナノ構造体（例えば、棒状ミセルや液晶）の配向構造を利用して、異方性ゲルを作製する試みにも挑戦する。更に、異方性ゲルの応用について検討する。一方向あるいは二方向のみに関して膨潤/収縮するという特徴的な性質には、きっと面白い応用分野があるものと期待している。

4．資料

4.5　招請講演

1）辻井薫：「自己組織化フラクタル構造」、ジョイントフォーラム「自己組織化とは何か―ナノテクノロジーを支えるもの―」、ニドム（北海道苫小牧市）（2003-03）
2）辻井薫：「超臨界水中のコロイド科学」、日本表面科学会・東北支部講演会、山形大学工学部（米沢市）（2003-03）

4.10　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）辻井薫：科学技術振興調整費総合研究「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」運営委員会委員（2000～2004年度）
2）辻井薫：文部科学省・科学技術政策研究所　科学技術専門家ネットワーク委員（2000年4月1日～現在）
3）辻井薫：深海調査研究委員会委員（2001～2003年度）
4）辻井薫：宇宙環境を利用する基礎科学検討会・基礎化学検討分科会委員（2001年4月1日～2003年9月30日）
5）辻井薫：産総研・海洋資源環境研究部門　レビューボード委員（2001～2002年度）
6）辻井薫：宇宙環境利用検討委員会・基礎科学WG委員（2002年9月1日～2003年8月31日）

b．国内外の学会の役職

1）辻井薫：日本化学会・コロイドおよび界面化学部会監査（2000年3月1日～2005年2月28日）

ナノ理論研究分野

教授　徳本洋志（阪大院、理博、2002.11～）
助手　植杉克弘（広大院、工博、2002.4～）

1．研究目的

ナノ理論研究分野では、「戦略的複合領域ナノサイエンス研究開拓」を目的として、特に生命科学に関連したナノテクノロジー研究の成果をデータマイニングし、分野横断的・領域融合的な研究課題の探索を行うとともに、ナノテクノロジー新領域創製に向けた戦略的な研究の企画・立案を行う。さらに、カーボンナノチューブと原子間力顕微鏡（AFM）を駆使し生体分子や機能性高分子の１分子物性特性の研究を通し生体関連材料の構造•機能の相関を解明し、生命科学分野での新しい技術の開拓を目指す。

2．研究成果

・平成 14 年度

ナノ理論研究分野は、平成 14 年 11 月 16 日に徳本洋志が教授着任した時点で研究が開始された分野である。そのため、平成 14 年度は主に研究計画の策定に時間を割くと共に、産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門と兼務し、カーボンナノチューブ・プローブ技術に関する研究を行った。

(a)　ナノテクノロジー新領域創製に向けた戦略的な研究の企画・立案に関する研究

「複合領域ナノサイエンス」の一つとして「重点４分野の２つをつなぐ生命科学とナノテクノロジーの融合」がある。特に、「医療用微小システム、ナノバイオロジー（診断•治療機器等のナノテクノロジーを応用した医療等）」、「細胞内のマイクロダイナミクスの研究や遺伝子発現機構の研究の推進、生体分子の構造・機能の計測・解析、生体メカニズムのナノレベル解明」が重要課題としてうたわれている。これらの動きを念頭に、国際的な会議や総合科学技術会議でのナノテクノロジー関連会議、経済産業省、文部科学省のプロジェクト化の動きをいち早く入手（会議の傍聴や積極的議論参加、産業技術総合研究所との連携等を通し）し、また、関連のワークショップを開催し、電子研のポテンシャルと「複合領域ナノサイエンス」に照らし合わせて積極的にプロジェクト立案に資することとした（図１参照）。

(b)　カーボンナノチューブと AFM ナノテクノロジーに関する研究

SPM 技術は「複合領域ナノサイエンス」を支える重要技術の一つであるとの観点に立ち、この技術をより高度化する研究を産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門と共同で研究を継続した。特に、大きな問題を残している探針技術を確立するため、機械的・化学的に安定なカーボンナノチューブを用いて目的に適した安定な探針をルーチーンに作成することを試みた（図２）。これまでの研究で、シリコンやチッカシリコン探針上へカーボンナノチューブを固定する手法は開発していたが、その固定強度や電気的接触に関しては制御できていなかった。そこで、接着剤として低融点の金属を加熱により融解し、そこへカーボンナノチューブを挿入する方法を採用した（図３）。この手法により、これまでの SEM 中のカーボンコンタミを利用したものに比べ、電気的にも機械的にも改善されていることが明らかになった。現在、その定量化を行っている。

以上は、主に産業技術総合研究所において行ってきた研究成果であるが、電子研内での研究に供するためには研究所内にもカーボンナノチューブ探針作成装置を建設することが欠かせない。そのため、非常に簡便なシステムを作るべく設計を開始した。

(c)　新バイオ AFM 技術開発

AFM を用いてソフトなバイオ関連物質の表面形状を無

図１．ナノテクノロジー新領域創製に向けた戦略的な研究の企画・立案の仕組み体制

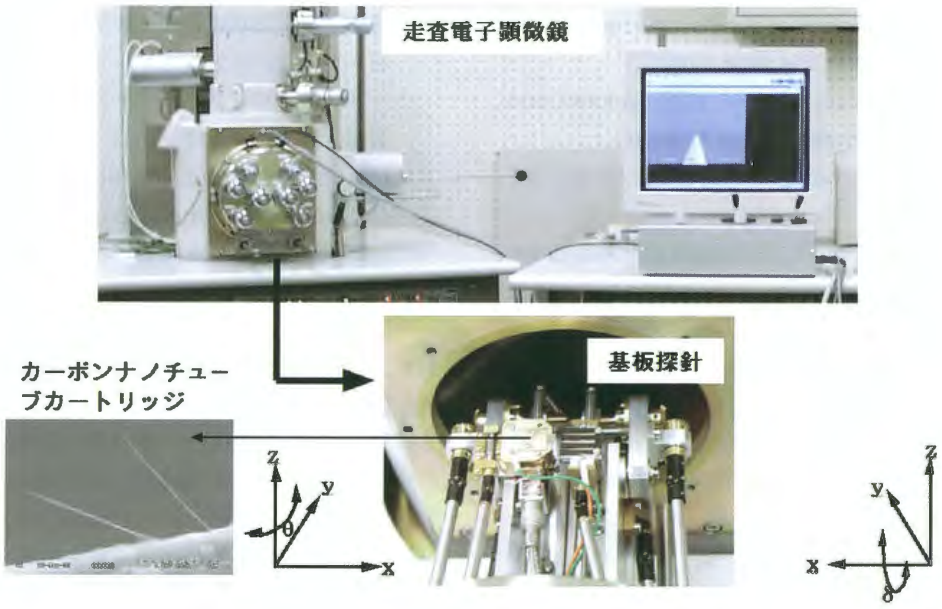


図２．カーボンナノチューブ探針作成装置

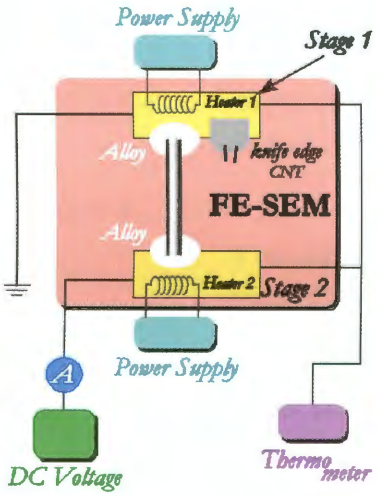


図３．改良型カーボンナノチューブ固定装置

侵襲に近い状態で計測する技術の確立を目指すと共に、その物質の内部構造や機能との関連を計測する技術の確立を目指す。特に、後者の研究の予備的な実験として細胞内への探針の挿入実験などを開始した。このテーマ（特に前者のテーマ）の遂行にあたって、世界的実力を備えた若手の研究者を採用する手立てを整えた。

３．今後の研究の展望・将来計画

電子科学研究所では、物理・化学・生物学から電子工学・情報科学・システム工学・生命科学までを広く融合した「複合領域ナノサイエンス」分野の研究をスローガンに掲げ、附属ナノテクノロジー研究センターを設置し、新研究領域の開拓を目指している。これまでの光・生命・分子に関する研究の蓄積ポテンシャルに加え、カーボンナノチューブSPMを用いたナノテクノロジーに関する研究を融合し、電子科学研究所のオリジナル研究領域を開拓してゆく。特に、生体観察・制御用プローブ顕微鏡や実時間単一分子計測技術などをナノテク技術者と生命科学研究者の力を結集して開発研究に取り組む。

４．資料

4.1　学術論文等

１）S. D. Tzeng, C. L. Wu, Y. C. Tou, T. T. Chen, S. Gwo and H. Tokumoto: “Charge imaging and manipulation using carbon nanotube prorbes”, Appl. Phys. Lett., 81(26): 5042-5044 (2002)

２）M. Watanabe, T. Yagyu, O. Nishikawa, T. Yamaguchi, N. Choi, H. Tokumoto and S. Nakano “: Study of field emission characteristics of carbon with scanning atom probe”, Jpn. J. Appl. Phys., 41(12): 7469-7475 (2002)

３）N. Choi, M. Kimura, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba, W. Mizutani and H. Tokumoto: “Effect of amines on single-walled carbon nanotubes in

organic solvents: Control of bundle structures", Jpn. J. Appl. Phys., 41(10): 6264-6266 (2002)

4) M. Fujita, W. Mizutani, M. Gad, H. Shigekawa and H. Tokumoto: "Patterning DNA on micro-meter scale on mica", Ultramicroscopy 91(1-4): 281-285 (2002)

5) I. Suemune, K. Uesugi, T. Shimozawa, H. Kumano, H. Machida and N. Shimoyama: "Erbium-doped GaP Grown by MOMBE and Their Optical Properties", *J. Cryst. Growth*, 237-239: 1423-1427 (2002)

6) A. A. Ashrafi, I. Suemune, H. Kumano and K. Uesugi: "Growth Activation of ZnO Layers with H_2O Vapor on a-face of Sapphire Substrate by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy", *Phys. stat. sol. (a)*, 192: 224-229 (2002)

7) I. Suemune, K. Uesugi and T. Y. Seong: "Growth and Structural Characterization of III-N-V Semiconductor Alloys", *Semiconductor Science and Technology*, 17(8): 755-761 (2002)

8) X. Q. Zhang, S. Ganapathy, H. Kumano, K. Uesugi and I. Suemune: "Photoluminescence study of InAs quantum dots embedded in GaNAs strain compensating layer grown by MOMBE", *J. Appl. Phys.*, 92: 6813-6818 (2002)

9) H. Azehara, W. Mizutani, Y. Suzuki, T. Ishida, Y. Nagawa, H. Tokumoto and K. Hiratani: "Fixation and Systematic dilution of rotaxane molecules on self-monolayers", Langmuir 19(6): 2115-2123 (2003)

10) I. Suemune, K. Uesugi, S. Ganapathy, X. Q. Zhang, M. Kurimoto, B. J. Kim, T. Y. Seong, H. Machida and N. Shimoyama: "III-V-N-Related Quantum Structures for 1.5μm Emission", *IEEE: Optoelectronics*, 150(1): 52-55 (2003)

11) K. Uesugi, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: "Metalorganic molecular-beam epitaxy and characterization of GaAsNSe/GaAs superlattices emitting around 1.5-μm-wavelength region", *Appl. Phys. Lett.*, 82(6): 898-900(2003)

4.5 招請講演

1) 徳本洋志:「SPMの発展と新展開」、日本セラミックス協会セミナー、東京大学駒場 (2002-11)

2) H. Tokumoto: "Panel discussion (ad hoc)", Asian Symposium on Nanotechnology and Nanoscience (AsiaNANO2002), Nippon Kagaku Miraikan, Tokyo, Japan (2002-11)

3) H. Tokumoto: "New nanobiotechnology field opened by carbon nanotube SPMs", 10th Anniversary RIES-Hokudai International Symposium, Keio Plaza Hotel Sapporo, Sapporo, Japan (2002-12)

4) 徳本洋志、「SPM技術と表面電荷(電位)計測」、第2回メゾテクノロジーフォーラム(先端技術フォーラム)—メゾクコピック構造とナノテクノロジー—、産業技術総合研究所つくば (2003-1)

5) Hiroshi Tokumoto: "Carbon Nanotube SPM: How did Carbon Nanotubes improve SPM?", Japan-US Symposium on Tools and Metrology for Nanotechnology, Cornell University (2003-1)

4.6 シンポジウムの開催

a. 国際シンポジウム

1) H. Tokumoto and S. Tiwari: "Japan-US Sympojium on Tools and Metrology for Nanotechnology", (60名、Cornell University, Ithaca, NY (2003.1.21-24)

2) H. Tokumoto: "2003 International Symposium on Synthetic Nano-Functional Materials Project", (200名、Seiko Instruments Inc. Hall, Kaihin-Makuhari, Chiba)(2003.2.24-25)

附属電子計測開発施設

研究目的

光の散乱、干渉、回折などの物理光学的な現象に基づく光応用計測技術、光学現象のシミュレータ技術及び画像・信号処理技術について各研究分野の研究支援を行うとともに、レーザ光の散乱現象についての研究を推進することにより、時代が要求する多種多様な対象に高度に適合した光応用計測法の開発を目指す。

附属電子計測開発施設

施設長　伊福部達（併任）（1997.3～2000.9）
　　末宗幾夫（併任）（2000.10～2002.3）
助教授　岩井俊昭（北大院、工博、1993.4～2002.3）
助手　　吉村博幸（北大院、工博、1994.4～1998.3）
　　石井勝弘（北大院、工博、1998.10～2002.3）

院生
・平成9－14年度
修士課程
木村　岳、細川裕之、村井偉志、小山数馬、根本充隆、古西宏治、松原兼太、宮越仁隆、福田奈月、吉田力也

1．研究目的

レーザ多重散乱光のコヒーレント後方散乱現象を解明するため、光拡散方程式に基づく理論的研究、モンテカルロ法による物理現象シミュレーション、および光子相関法に基づく実験的研究を行う。この研究では、高密度散乱媒質の粒子径や拡散定数の決定、および局所的な吸収領域の再構成という逆散乱問題への発展を目指している。さらに、部分的コヒーレント光源とアレイ状イルミネータの開発、光学的非整数次フーリエ変換に関する研究、マイクロキャビティからの放射光スペクトル特性に関する研究を行う。

光拡散方程式に基づく理論的研究、モンテカルロ法による物理現象シミュレーション、および光子相関法と微弱光画像解析に基づく実験的研究によりレーザ多重散乱現象の解析を行う。この研究では、後方多重散乱光エンハンスメント現象によるフラクタル凝集体の解析、エバネッセント動的光散乱法の開発、新しい光源を用いた干渉法による動的散乱の解析、および拡散光トポグラフィ法による血管分布造影技術の開発など、多重散乱現象を利用したコンピュータ援用の新しい逆散乱問題の提起を目指す。さらに、高密度周期的構造体であるフォトニック結晶の創生と光回路のインターコネクション素子への応用を目指し、レーザ光の放射圧と微粒子の自己組織化を利用した局所的コロイド・エピタキシ法の開発を行う。

新しい光波伝播制御デバイスであるフォトニック結晶の創製法として、レーザ光の放射圧と微粒子の自己組織化を利用した局所的3次元コロイド・エピタキシ法におけるパラメータの最適化をモンテカルロ・シミュレーションを用いて行い、3次元周期的構造体の創製を目指す。濃厚サブミクロン微粒子溶液の〝その場〟粒質計測を目指し、固液境界に局在するエバネッセント光や低コヒーレンス干渉法を利用する新しい動的光散乱法の開発を行う。光拡散方程式に基づく理論的研究やモンテカルロ法による物理現象シミュレーションを通して、レーザ多重散乱現象の基礎的研究を行い、高密度散乱媒質の粒子径計測を目指す偏光十字像のフーリエ解析や血管分布造影を目指す拡散光トポグラフィ法の再構成像の尖鋭化を行う。

2．研究成果

・平成9－10年度

(a)　コヒーレント後方多重散乱光の時空間偏光特性

高密度散乱媒質の遠方場に発生する後方多重散乱光エンハンスメント現象を光子拡散理論、実験、およびモンテカルロ・シミュレーションにより多角的に検討した。その結果、光子拡散理論に時間反転成分の干渉効果を繰り込むことにより後方散乱光強度分布および時間相関関数を理論的に導出し、時空間において時間反転成分の干渉の影響を受けることを明示し、実験で実証した[1]。モンテカルロシミュレーションにより、散乱光路長分布と散乱次数分布の時間反転成分の干渉の影響を解析し、強度分布の時空間特性への影響を検討した[2,3]。ポリスチレン球のコロイド溶液中の凝集過程を想定したときの自由光路長分布を理論的に導出し[2,8]、後方散乱エンハンスメント現象をモンテカルシミュレーションした。その結果、コヒーレント後方散乱光の強度分布[2,4]および強度ゆらぎの緩和時間[14]から次元解析が可能であることを示し、実験で実証した[10,12]。また、クラスタークラスタ凝集媒質に対して、多粒子分散形モデルを用いて後方散乱エンハンスメントの時空間特性を比較検討した[11]。

(b)　出射面近傍の後方多重散乱光の空間的偏光特性

出射境界近傍における多重散乱光は、平行および垂直偏光成分がそれぞれ蝶ネクタイ状とクローバ葉状強度分布を生じるという極端な偏光空間特性を示す。モンテカルロシミュレーションにより、偏光特性の発生メカニズムおよび媒質内における散乱光伝播特性を明らかにし、一様ランダム媒質およびフラクタル媒質からの後方散乱光について比較検討した。その結果、蝶ネクタイ状およびクローバ葉状強度分布の空間的広がりは輸送平均自由行程で決まり、強度のコントラスト特性は粒子径と媒質次元で決まることを示した[5]。

(c)　マイクロキャビティからの自然放出光とWolf効果

アレイ状光源の理論解析で用いたガウス型シェルモデルを平行平面マイクロキャビティの出射面に適用して、その遠方場におけるスペクトルシフトの発生を理論的に導出した[6]。さらに、非整数次フーリエ変換に基づくガウス型シェルモデル光源の非整数次相互スペクトル密度を定義・導出し、スペクトルシフトの発生があることを理論的に予測した[7]。

(d)　部分的コヒーレント光非整数次フーリエ場の諸特性

非整数次フーリエ変換を光学的に実現し、かつその数学的意味を明確化することを目的として、部分的コヒーレン

ト光と非整数次フーリエ変換とを結び付け、物理光学的に解析することを試み、光学系パラメータと部分的コヒーレント光の非整数次フーリエ場の振幅特性との関係を明らかにした[9]。

(e)　拡散光トポグラフィの基礎的研究

時間分解法と干渉法のそれぞれの長所である拡散波と連続光源を組合せ、入射点のまわりに広がる後方散乱光の空間的な強度分布を光拡散理論から類推される光子伝播の広がりと光路長分布との関係に対応させることによって、高密度媒質の表面から数ミリメートルから数センチメートルの深さに存在する吸収体の表面形状を再構成する。強度分布を2次元画像としてコンピュータ内で空間積分処理することにより、吸収体の表面形状再構成を試み、原理を実証した[13]。

・平成11－12年度

(a)　拡散光トポグラフィ法による血管造影技術の開発

時間分解法と干渉法のそれぞれの長所である拡散波と連続光源を組合せ、入射点のまわりに広がる後方散乱光の空間的な強度分布とその光路長確率密度関数との関係から、空間積分強度と吸収体の深度との関係を定式化した。原理に基づき、強散乱媒質の表面から数ミリメートルの深さに存在する吸収体を造影した。後方散乱光の空間積分処理に関しては、有限開口検出を行うことにより実時間で行う光学系を構築した。さらに、光路長確率密度関数を光拡散理論を用いて理論的に導出し、後方散乱光強度の測定のみから吸収体の造影が可能になった。実時間測定可能な拡散光トポグラフィ法をイントラリピッド溶液中の吸収体の造影に適用して実験的に確認した上で、ヒトの皮膚表層の血管分布の造影に成功した。図1には、ヒトの右手首の20 mm×20 mmの範囲の静脈分布を拡散光トポグラフィ法を用いて70画素×70画素の深度分布画像として造影したものである。

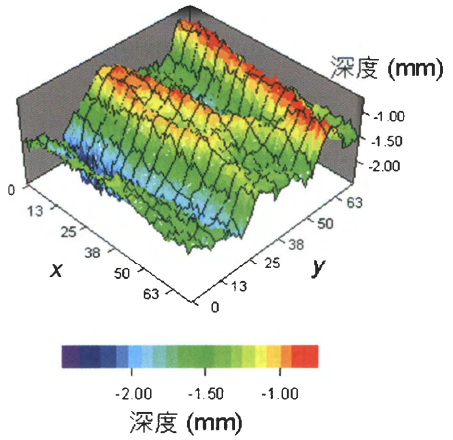


図1．拡散光トポグラフィ法によるヒト手首の静脈分布の造影。赤色の部分が静脈である。

(b)　エバネッセント動的散乱光の時間特性

屈折率が大きな物質から小さな物資に向かって臨界角を超える入射角で光が進行するとき、図2に示すように境界面において全反射が発生し、屈折率の小さい側に光が染み出すエバネッセント場を生じる。このエバネッセント場は、進行方向も染み込む方向にもほぼ波長程度の領域に局在している。このような場に入った微粒子は単散乱を発生するであろう。この単散乱光を解析すると、固液境界面の極近傍に存在する粒子の動態を解析できると予想した。

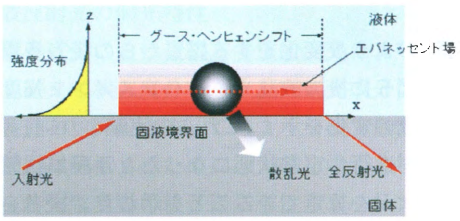


図2．固液境界面に発生するエバネッセント場による動的光散乱現象。

特に、ガラス面に滴下された濃厚溶液からの動的な散乱光の特性に興味がある。一般の濃厚系からの多重散乱現象とどのように異なるのか、局在場の身の寄与であるから単散乱光が抽出できるか、および固液境界面の影響がどのように発生するのかなどについて、図3に示す光学系を構築し実験的研究を中心に行った。その結果、エバネッセント場は局在した場であるが、媒質内部を散乱光が伝播可能であり、後方散乱光は多重散乱光になるため拡散波分光の理論が有効である。バルク状の散乱媒質からの多重散乱光に対する拡散波分光と比べると、以下の特徴が確認された。緩和時間が粒径のみに依存し、媒質の濃度には依存しない。平行偏光成分は単散乱と多重散乱の成分を含むが、垂直偏光成分は単散乱成分が著しく抑制されるため、両偏光成分から単散乱成分のみを抽出できる可能性がある。

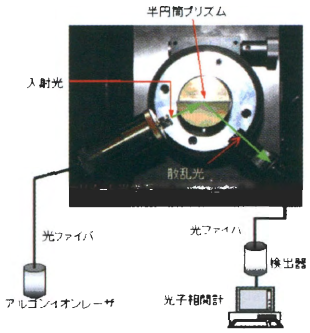


図3．エバネッセント動的光散乱法の光学系

(c)　コヒーレント後方多重散乱光の時空間偏光特性を用いたフラクタル凝集体の解析

高密度散乱媒質の遠方場に発生する後方多重散乱光エンハンスメント現象および拡散波分光法を、光子拡散理論、実験、およびモンテカルロ・シミュレーションを用いて解

析し、濃厚系のフラクタル凝集体のキャラクタリゼーションの新しい手法として検討した。図４には、粒子が一様に分散している状態から凝集体を形成している状態への変化

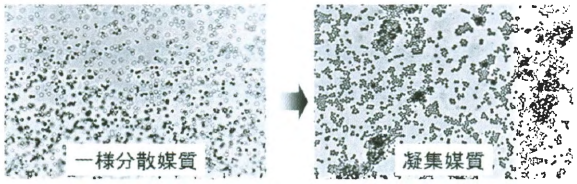


図４．一様分散媒質から凝集媒質への変化

を示す。このような変化をする媒質からの後方多重散乱光について、図５に後方散乱光エンハンスメント強度分布と光子相関関数の変化を示す。これらの実験より、前者では微粒子が凝集が進行し定常状態になったとき凝集状態、すなわち媒質の次元を算定できることを示した。後者を用いると、凝集の発達過程の時間分割解析が可能であり、時間に依存した凝集体内の微粒子数を算定できることを示した。

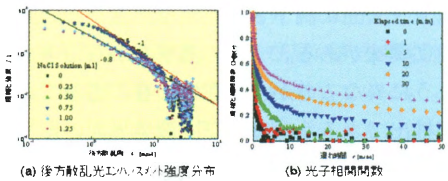


図５．微粒子凝集体からの後方散乱光エンハンスメント強度分布と光子相関関数。

(d)　局所的コロイド・エピタキシー法の開発（量子機能素子研究分野との共同研究）

光の波長程度のサイズの微粒子から構成されるコロイド溶液における微粒子の自己組織化に基づく周期的構造体の新しい製造法の開発を目指している。本手法では、微粒子の自己配列を促す物理的拘束にレーザー放射圧を利用していることおよび微粒子の自己集積において乾燥過程で発生する横毛管力を実時間に有効に発生させるためレーザ散乱力と集光による発熱を利用していることに特徴がある。その結果、微粒子を１粒子づつ選択的に配列・積層することが可能になった。図は、直径３ μm のポリスチレン球を２層に積層させた例である。この結果、微粒子を多層に積層した場合、面心立法構造に積層されることを確認した。

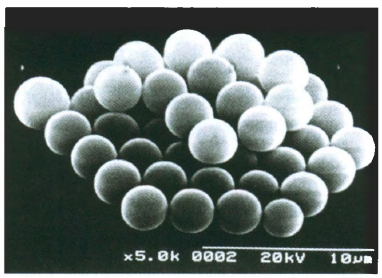


図６．局所的コロイド・エピタキシー法で積層した微粒子の周期的構造体

(e)　血管内壁近傍における LDL の流速依存濃縮現象の実験的検証（自律調整研究分野との共同研究）

動脈硬化症が、動脈血管壁の半透過性、血流速度、および水透過速度に依存する低密度リポ蛋白質の局所的濃縮現象が原因であるという狩野の仮説を実験的に実証することを試みた。実験では、セルロースの半透過膜中にポリスチレン球溶液を加圧しながら流し、セルロースの内壁に濃縮・蓄積したポリスチレン球の濃度を光学的に測定した。その結果、流速が遅いほど、水透過速度が速いほど微粒子の濃度が増加する現象をはじめて確認した。

・平成 13 年度

(a)　コロイド・エピタキシー法による３次元周期的構造体の創製

コロイド溶液中に分散している光の波長程度の微粒子の自己組織化現象を利用して、周期的構造体を創製するための新しい手法の開発を目指している。本手法では、レーザ放射圧による物理的拘束領域内における微粒子の自己配列と乾燥過程で発生する横毛管力による微粒子の自己集積を利用していることに特徴がある。その結果、微粒子を１粒子づつ選択的に配列・積層することが可能になった。図１は、直径３μm のポリスチレン球を３層ピラミッド構造に積層させた例である。この結果、微粒子を多層に積層した場合、面心立方構造になることを確認した。

レーザ放射圧による拘束領域内の微粒子の自己配列現象を、メトロポリス法に基づくモンテカルロシミュレーションを行い、照射レーザパワと照射サイズの条件を明らかにした。図２は、モンテカルロシミュレーションによる自己配列の様子と照射レーザパワと照射サイズの条件を示す。

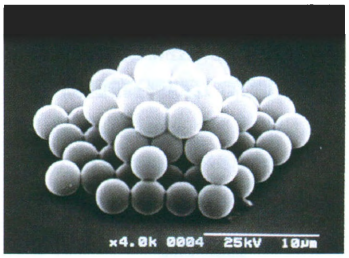


図１．微粒子の３次元周期的構造体

(b)　エバネッセント動的散乱光の時間特性

屈折率が大きな物質から小さな物資に向かって臨界角を超える入射角で光が進行するとき、境界面において全反射が発生し、屈折率の小さい側に光が染み出すエバネッセント場を生じる。このエバネッセント場は、進行方向も染み込む方向にもほぼ波長程度の領域に局在している。本研究では、ガラス面に滴下された濃厚溶液からの動的な散乱光の偏光特性について実験的研究を行った。その結果、S 偏光入射―垂直偏光検出では多重散乱光のみから構成されているため散乱角依存性を示さないこと、平行偏光検出では単散乱光成分を含むため散乱角依存性を示すことが示され

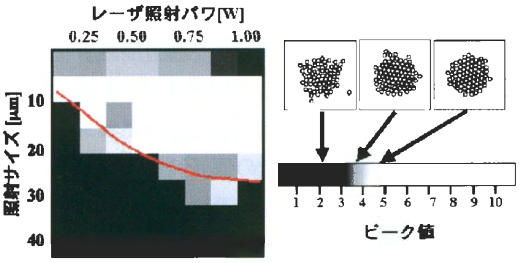


図２．微粒子の自己配列モンテカルロシミュレーション

た。したがって、図３に示すように、S 偏光入射の場合の平行偏光検出強度相関と垂直偏光強度相関との差は、単散乱相関特性になることを示した。

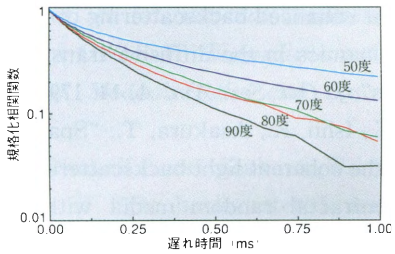


図３．規格化自己相関関数

(c)　低コヒーレンス干渉法を用いた新しい光散乱法の開発

動的光散乱法は単散乱理論を基礎としているため、多重散乱光の影響が大きい高濃度媒質には適用できない。そこで、低コヒーレンス干渉計を用いて、単散乱光成分のみを抽出し、単散乱光のパワースペクトルが測定可能であることならびに高濃度媒質に対して単散乱理論を基礎とする動的光散乱測法が適用可能であることを示した。図４に示す実験系は、光源に SLD（λ＝811.4 nm、$\Delta\lambda$＝48.4 nm）を用いたマイケルソン干渉計である。参照光の反射ミラーの位置をピエゾ素子で正弦的に振動させ、参照光を 1 kHz で位相変調する。図５は、体積濃度１％の粒径 460 nm ポリスチレン球懸濁液に対して測定されたパワースペクトルから、ペデスタル成分を除去較正した干渉成分のパワースペクトルである。実線は、単散乱理論より予測されるパワースペクトルを示し、干渉成分のパワースペクトルが理論とよく一致している。本測定法により、多重散乱光から単散

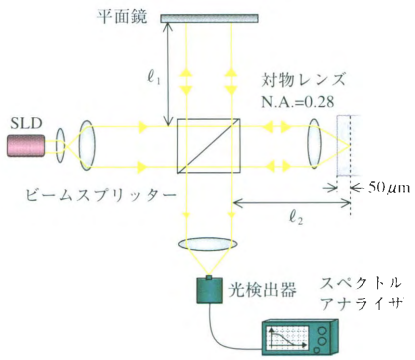


図４．低コヒーレンス干渉計を用いた動的光散乱法

乱光パワースペクトルが抽出できることが確認された。

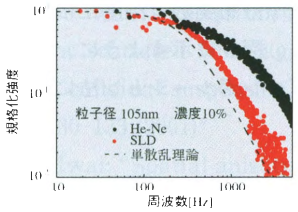


図５．実験結果と単散乱理論との比較

(d)　拡散反射光の偏光特性

出射境界近傍における後方多重散乱光は、平行偏光成分では蝶ネクタイ状強度分布を、垂直偏光成分ではクローバ葉状強度分布を発現する。このような後方散乱光の偏光特性を定量的に解析するために、光軸を中心とする方位角方向に沿った強度変動の粒子径依存性をフーリエ解析し、微粒子の粒質測定への可能性を示した。図６と図７は、それぞれ平行偏光成分を無偏光強度分布で規格化した強度分布とパターン半径の 1/3 の動径距離の円周上の強度分布変化を示す。

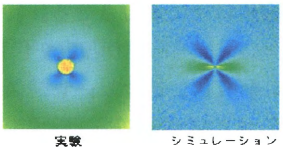


図６．濃度１％の粒径 460 nm 粒子溶液からの拡散反射光の平行偏光成分

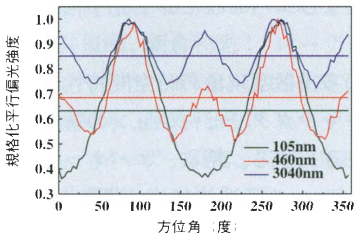


図７．1/3 パターン半径の円周に沿った規格化平行偏光強度分布

(e)　拡散光トポグラフィ法における再構成像の尖鋭化

時間分解法と干渉法のそれぞれの長所である拡散波と連続光源を組合せ、入射点のまわりに広がる後方散乱光の空間的な強度分布とその光路長確率密度関数との関係から、空間積分強度と吸収体の深度との関係を定式化した。原理に基づき、強散乱媒質の表面から数ミリメートルの深さに存在する吸収体を造影した結果、本手法が拡散光を有効に利用している半面、多重散乱光がいろいろな経路を伝搬してくるために再構成像に独特の〝ボケ〟が発現することが確認された。後方散乱光強度分光が散乱媒質境界面に発生するプロセスの点像分布関数を求め、デコンボルーション法によりこのような〝ボケ〟を取り除き、再構成像を尖鋭化することを試みた。点像分布関数が、極微小吸収体が高

密度媒質中に存在するときの後方散乱光強度分布と等しいとしてモンテカルロシミュレーションで求めた。その結果、後方散乱場の点像分布関数は深度に依存することを明らかにした。さらに、図８に示すように、〝ボケ〟再構成像と点像分布関数をデコンボルーション法に適用し、画像の先鋭化を行なった。

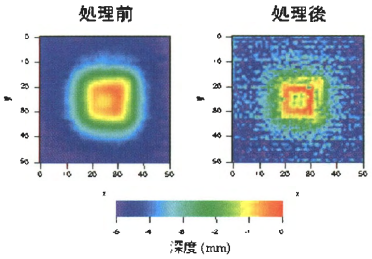


図８．デコンボリューション法による画像の尖鋭化

３．今後の研究の展望・将来計画

(1)　レーザ多重散乱光のコヒーレント後方散乱現象の基礎的研究は、濃厚溶液中の粒子やクラスタのキャラクタリゼーションへの応用研究に進行させる。特に、血液中の血球凝集過程のモニタリングへの応用を目指す。部分的コヒーレント光源の研究は、低コヒーレンス干渉法における光源特性の検討、およびブラウン運動場の動的特性の解析手法の開発に発展させる。拡散光トポグラフィの研究は、高精度化と実時間化を図り、皮膚表層下の血管可視化技術への発展的研究につなげる。さらに、近接場波動の動的散乱場の解析およびエバネッセント光子相関法の研究に着手する。

(2)　濃厚系の多重散乱現象の時空間特性の基礎的研究と主に微粒子のキャラクタリゼーションの新しい手法の開発を目指し研究を遂行する。特に、エバネッセント光散乱法および低コヒーレンス干渉法による新しい光散乱法を中心に、濃厚媒質から発生する多重散乱光から単散乱光成分を有効に抽出する研究を行う。また、気液相境界における後方多重散乱場のシミュレータを開発し、層構造や種々の光学定数をもつ散乱体からの強度分布を検討し、皮膚表層の光学特性について定量的に検討する。拡散光トポグラフィ法の研究では、ヒトの血管造影例を拡大し技術としての確認実験を行うと共に、光ファイバ系を用いて構造のダウンサイジングをはかる。フォトニック結晶の創生のためのコロイド・エピタキシー法の開発研究では、ナノ微粒子の周期的構造体を製造するために、全てのプロセスのコンピュータ制御による自動化およびそのための定量的な検討を積み重ね、フォトニック結晶を製造する。

(3)　フォトニック結晶創製のための局所的コロイド・エピタキシー法の開発では、微粒子のダウンサイジングを行ないサブミクロンの結晶格子構造体を作成するシステムの構築と創製された構造体のバンド構造の測定を行う。エバネッセント動的散乱光の時間特性では、単散乱光相関関数を測定できることから粒径評価法を確立する。低コヒーレンス干渉法を用いた新しい光散乱法の開発では、ペデスタルの影響を除くために変調周波数を増加させ、粒質計測の高精度化を図る。拡散反射光の偏光特性では、多分散系への拡張ならびに多層構造体への適用を模索する。拡散光トポグラフィ法による血管造影技術の開発では、拡散強度分布から直接に吸収体深度を測定できる理論的根拠の導出と実験的な検証を行う。

４．資料

4.1　学術論文

1）Ishii, K., Iwai, T., and Asakura, T.: “Angular dependence of enhanced backscattering of light by Brownian dynamics in the diffusive transport theory of photons”, *J. Opt. Soc. Am. A*, 14: 179-184 (1997)*

2）Iwai, T., Ishii, K., Asakura, T.: “Space-time statistics of the coherent light backscattered from fractal and nonfractal random media with absorption”, *Proc. Int. Soc. Opt. Eng.*, 2982: 104-115 (1997)*

3）Ishii, K., Iwai, T., and Asakura, T.: “Angular polarization properties of dynamic light scattering under influence of enhanced backscatterings”, *Opt. Commun.*, 140: 99-109 (1997)*

4）Ishii K., Iwai T., Asakura T.: “Polarization properties of the enhanced backscattering of light from the fractal aggregate of particles”, *Opt. Rev.*, 4: 643-647 (1997)*

5）Ishii, K., Iwai, T., Asakura, T.: “Monte Carlo simulations of the polarization anisotropy in light backscattered from a fractal aggregation”, *Proc. Int. Soc. Opt. Eng.*, 2979: 566-573 (1997)*

6）Yoshimura, H. and Iwai, T.,: “Spontaneous emission from a planar microcavity below threshold and the Wolf effect”, *J. Mod. Opt.*, 44: 697-706 (1997)*

7）Yoshimura, H. and Iwai, T.: “Properties of the Gaussian Schell-model source field in a fractional Fourier plane”, *J. Opt. Soc. Am. A*, 14: 3388-3393 (1997)*

8）Ishii, K., Iwai, T., Uozumi, J., Asakura, T.: “Optical free-path-length distribution in a fractal aggregate and its effect on enhanced backscattering”, *Appl. Opt*. 37: 5014-5018 (1998)*

9）Yoshimura, H. and Iwai, T.: “Effects of lens aperture on the average intensity in a fractional Fourier plane,” *Pure Appl. Opt*., 7: 1133-1141 (1998)*

10）Ishii, K., Iwai, T., Asakura, T.: “Experimental study on the backscattering enhancement of light produced from fractal aggregates of particles”, *Journal of Optoelectronics・Laser*, 9 (Supp.): 365-367

(1998)*
11) Iwai, T., Ishii, K., Asakura, T.: "Coherent backscattering of light from a polydisperse random medium as a model of fractal aggregations of particles", *Proc. Int. Soc. Opt. Eng.*, 3252: 90-98 (1998)*
12) Iwai, T.: "Enhanced backscattering of light from a fractal aggregate of particles - Empirical laws by Monte Carlo simulations and experiments -", *Proc. the 19th Topical Meeting of the European Optical Society "Electromagnetic Optics"*: 49-50 (1998)*
13) Iwai, T., Tabata, K., Kimura, G., and Asakura, T.: "Depth estimation of an absorbent embedded in a dense medium using diffused wave reflectometry", *Abstracts of 5th International Conference and Euroconference OWLS V "Biomedicne and Cultrue in the Era of Modern Optics and Lasers"*: ThBO6 (1998)*
14) Ishii, K., Iwai, T., and Asakura, T.: "Correlation properties of light backscattered multiply from fractal aggregates of particles under Brownian motion", *J. Bio. Opt.*, 4: 230-235 (1999)*
15) S. Wada, T. Iwai and T. Karino: "Experimental demonstration of flow-dependent concentration polarization of plasma proteins at a blood/endothelium boundary by optically measuring the concentration profile of flowing microspheres through a straight tube with a semipermeable wall," *JSME Int. J. C*, 42(3): 664-672 (1999)*
16) K. Ishii, T. Iwai and T. Asakura: "Correlation properties of light backscattered multiply from fractal aggregates of particles under Brownian motion," *J. Bio. Opt.*, 4(2): 230-235 (1999)*
17) T. Iwai and G. Kimura: "Imaging of an absorbing object embedded in ad dense scattering medium by diffusing light topography," *Opt. Rev.*, 7(5): 436-441 (2000)*
18) K. Ishii and T. Iwai: "Enhanced backscattering of light by aggregation of particles in an absorbing and dense colloidal suspension," *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2(6): 505-509 (2000)*
19) K. Ishii and T. Iwai: "Temporal auocorrelation function of light scattered from aggregated particles in a dense colloidal suspension," *Jpn. J. Appl. P*hys., 40(1A): 130-133 (2001)*
20) K. Ishii, T. Iwai, S. Wada and M. Miyakoshi: "Simultaneous viscometry and particle sizing on the basis of dynamic light scattering," *SPIE Photonics West BiOS 2001*, 4263: 112-121 (2001)*
21) T. Iwai and G. Kimura: "Imainging of an absorbing object embedded in a dense scattering medium by diffusing light topography," *Opt. Rev.*, 7(5): 436-441 (2001)*
22) K. Ishii and T. Iwai: "Temporal autocorrelation function of light scattered from aggregated particles in a dense colloidal suspension," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40(1A): 130-133 (2001)*
23) K. Ishii and T. Iwai: "Spatial anisotropy and polarization in enhanced backscattering of light using double-scattering approximation," *Proc. SPIE*, 4416: 482-484 (2001)*
24) K. Ishii, T. Iwai and K. Inoue: "Numerical simulation of ordered polystyrene particles using the radiation pressure and self-organization," *Proc. SPIE*, 4598: 80-85 (2001)*
25) T. Iwai, K. Ishii and K. Inoue: "Optical fabrivation of ordered polystyrene particles using radiation pressure and self-organization," *Proc. SPIE*, 4598: 94-100 (2001)*

4.2 総説、解説、評論等

1) 岩井俊昭：「Photonics West '98 参加報告」、光学、27：339-340 (1998)
2) 岩井俊昭：「平成10年度日本光学会奨励賞受賞者紹介 石井勝弘氏の紹介」、光学、27：683 (1998)
3) 石井勝弘：「吸収性微粒子凝集体からの後方散乱エンハンスメント現象」、電子科学研究、6：98-100 (1999)
4) 和田成生、岩井俊昭：「回転走査型二重回折光学系を用いた生体模擬血管内を流れる物質の濃度分布の測定」、電子科学研究、6：42-46 (1999)
5) 相津佳永、岩井俊昭、朝倉利光：「レーザー計測の基礎 I：速度計測」、レーザー研究、27(8)：572-578 (1999)
6) 岩井俊昭、相津佳永、朝倉利光：「レーザー計測の基礎 II：散乱計測」、レーザー研究、27(9)：642-651 (1999)
7) 朝倉利光、岩井俊昭、相津佳永：「レーザー計測の基礎 III：総論」、レーザー研究、27(10)：715-718 (1999)
8) 岩井俊昭：「光散乱計測」、光学、30(2)：136-143 (2001)
9) 岩井俊昭、古西宏治、石井勝弘、井上久遠：「光放射圧と自己組織化を利用した微粒子配列」、レーザー研究、30：70-74 (2002)*

4.3 著書

1) T. Iwai, K. Tabata, G. Kimura and T. Asakura: "Depth estimation of an absorbent embedded in a desne medium." In Opitcs and Lsers in Biomedicine and Culture, (Springer-Verlag, Berlin) pp.289-293 (2000)*
2) T. Asakura, J. Uozumi, T. Iwai and T. Nakamura: "Study on reproduction of sound from old wax phonograph cylinders." In Opitcs and Lsers in Biomedicine and Culture, (Springer-Verlag, Berlin)

pp.14-19 (2000)*

4.4 特許

1）岩井俊昭、石井勝弘、村井偉志：特願 2001-297600、低コヒーレンス干渉法を用いた動的光散乱装置（2001 年 4 月 1 日）

4.5 招請講演

1）Iwai, T., Ishii, K., and Asakura T.: "Space-time statistics of the coherent light backscattered from fractal and nonfractal random media with absorption" SPIE Photonics West '98, San Jose, U.S.A. (1997).
2）岩井俊昭：「光技術とエジソンの音楽記録技術との接点ー古蠟管からの光学的音声再生ー」、先端技術講演会、小樽（1998）
3）Asakura, T., Uozumi, J., Iwai, T., and Nakamura, T.: "Study on reproduction of sound from old wax phonograph cylinders using the laser", 5th International Conference and Euroconference OWLS V "Biomedicine and Culture in the Era of Modern Optics and Lasers", Crete, Greek (1998).
4）岩井俊昭：「強散乱体内における光伝播　ー光子密度波の光学ー」、第 38 回日本エム・イー学会大会セミナー「光 CT から医用光学へ：基本的課題と新しい展開」、仙台（1999）.
5）岩井俊昭：「光の多重散乱場の光学」、電気学会医学における光応用基礎技術調査専門委員会主催「光による生体機能計測のための基礎研究」講演会、札幌、日本（1999-7）
6）岩井俊昭：「強散乱体内における光伝播　ー光子密度波の光学ー」、第 38 回日本エム・イー学会大会セミナー「光 CT から医用光学へ：基本的課題と新しい展開」、仙台、日本（1999-4）
7）T. Iwai: "Multiple scattering of laser light," The Second RIES-Hokudai Symposium "揺［Yoh］," Sapporo, Japan (2001-3)
8）岩井俊昭：「拡散反射法による生体計測」、第 2 回研究会「生体光学と光波シンセシス」、東京、日本(2001-3)
9）岩井俊昭：「光多重散乱場の空間特性とその生体計測への応用」、オプトロニクス協会の光センシング技術部会、東京、日本（2001-3）
10）岩井俊昭：「多重散乱光による粒子と分散系のキャラクタリゼーション」、第 12 回散乱研究会、東京、日本（2000-11）

4.6 シンポジウムの開催

b．一般シンポジウム（組織者、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）岩井俊昭（電子計測開発施設）：科研費特定領域研究「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」シンポジウム（45 名、ヒルサイドホテル富士見）（2001.7.30-31）
2）岩井俊昭(電子計測開発施設)：科研費特定領域研究(B)「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」・科学技術振興調整費「3 次元フォトニック結晶の作製、解析法、デバイス展開の総合研究」合同公開シンポジウム（120 名、コープイン京都）（2002.1.24-25）
3）岩井俊昭：科研費特定領域研究「フォトニック結晶の開発と輻射場の制御」シンポジウム（45 名、ヒルサイドホテル富士見）（2002.7.30-31）

4.7 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（氏名、研究種目、区分、研究課題、決定額、年度）

1）吉村博幸：奨励A、「部分的コヒーレント光非整数次フーリエ場の特性と光生体計測への応用」1,600 千円（1997）
2）岩井俊昭：基盤C、一般(2)「拡散光トポグラフィの基礎的研究」、3,500 千円（1998～1999）
3）岩井俊昭：特定領域B、(2)「フォトニック結晶における輻射場と物質との相互作用」6,200 千円（2001）

4.8 共同研究

a．所内共同研究（氏名、部門名、研究課題、研究期間）

1）和田成生（電子計測制御部門）、岩井俊昭（電子計測開発施設）：「回転走査型二重回折光学系を用いた生体模擬血管内を流れる物質の濃度分布の測定」（1997）
2）和田成生（電子計測制御部門）、小林亮（電子情報処理部門）、岩井俊昭、石井勝弘(電子計測開発施設)：「赤血球集合過程の理論的解析とその実証的研究」(1999～2001)
3）和田成生（電子計測制御部門）、小林亮（電子情報処理部門）、岩井俊昭、石井勝弘(電子計測開発施設)：「赤血球集合過程の理論解析とその実験的検証」(2000～2002)

4.9 受賞

1）石井勝弘：第 1 回応用物理学会講演奨励賞（the 1st JSAP Research Paper Presentation Awards）〝拡散光子理論に基づく後方多重散乱エンハンスメントの時間特性の解析〟(社)応用物理学会）（1997.3）
2）石井勝弘：日本光学会奨励賞〝Polarization properties of the enhanced backscattering of light from the fractal aggregate of particles〟(社)応用物理学会分科会　日本光学会）（1998.9）
3）古西宏治：応用物理学会北海道支部学会奨励賞〝レーザー放射圧を利用した新しい微粒子配列法〟(社)応用物理学会北海道支部）（2002.3）

4.10 社会教育活動

b．国内外の学会の主要役職

1）岩井俊昭：日本光学会生体光学研究グループ幹事（1999～2000年度）
2）岩井俊昭：日本光学会50周年記念号編集委員会委員（2000年度）
3）岩井俊昭：日本光学会イメージサイエンス研究グループ代表幹事（2000年度）
4）岩井俊昭：日本光学会学術論文誌Optical Review (Vol.7, No.5) Special Feature Section "Optical Tomography and Topography" Guest Editor（2002年度）
5）岩井俊昭：日本光学会常任幹事（2001～2002年度）
6）岩井俊昭：日本光学会光学副編集委員長（2001年度）
7）岩井俊昭：日本光学会50周年記念号特別編集委員（2001年度）
8）岩井俊昭：日本光学会イメージサイエンス研究グループ代表幹事（2001～2002年度）
9）岩井俊昭：日本光学会生体医用光学研究グループ幹事（2001～2002年度）
10）岩井俊昭：生体・医用のための光学に関するアジア・シンポジウム組織委員会委員・事務局（2001～2002年度）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）村井偉志：低コヒーレンス光源を用いた動的散乱法の開発（2000）
2）小川数馬：濃厚媒質からの拡散反射光の空間特性（2001）
3）根本充隆：エバネッセント光散乱測定法による粒子径計測（2001）
4）福田奈月：光放射圧を利用した微粒子配列法の検証シミュレーション（2001）
5）古西宏治：光放射圧と微粒子の自己組織化を用いたフォトニック結晶構造の創生（2001）
6）松原兼太：拡散光トポグラフィ法による血管分布の造影（2001）
7）宮越仁隆：動的光散乱法による回転粘土計内の媒質の粒径計測（2001）

e．大学院担当講義科目

1）光物理学特論（岩井俊昭）（1999年4月1日～2001年9月30日）
2）電子情報エレクトロニクス特別研究第一（岩井俊昭）（1999年4月1日～2001年9月30日）
3）電子情報エレクトロニクス特別研究第二（岩井俊昭）（1999年4月1日～2001年9月30日）
4）電子情報エレクトロニクス特別演習(石井勝弘)（1999年4月1日～2001年9月30日）
5）電子情報エレクトロニクス特別研究第一（石井勝弘）（1999年4月1日～2001年9月30日）
6）電子情報エレクトロニクス特別研究第二（石井勝弘）（1999年4月1日～2001年9月30日）
7）電子情報エレクトロニクス特別演習(岩井俊昭)（1999年4月1日～2001年9月30日）

北海道大学電子科学研究所
〒060-0812 札幌市北区北12条西6丁目 TEL(011)716-2111(代表) FAX(011)706-4977
URL http://www.es.hokudai.ac.jp/
平成16年7月発行