北海道大学電子科学研究所

〒001-0021　札幌市北区北21条西10丁目
〒060-0812　札幌市北区北12条西 6 丁目
TEL（011）706-9102　FAX（011）706-9110

URL http://www.es.hokudai.ac.jp/

平成21年4月発行

研究活動　北海道大学電子科学研究所　平成十九年度

1100部

研究活動

北海道大学電子科学研究所

平成19年度

―― 点検評価報告書 ――

Research Activities

Research Institute for Electronic Science
Hokkaido University
2007

平成21年発行

はじめに

「物理・化学・生物」、「理論・実験」、「有機・無機・半導体・生体」といった研究領域の縦割りの壁を越え、分野横断的な新しいフィールドを切り拓く、このことは、基礎研究・応用研究を問わず、新しい世代の科学技術を進展していく上で、極めて重要な課題と認識されつつある。

電子科学研究所の前身の超短波研究所は、65年前に、医学と工学の共同研究としてマイクロウェーブの人体への影響を研究するために発足され、当初から物理、化学、生物、さらには数学も含めた幅広い分野の研究者を集結して、新しい学際的研究領域を開拓してきた。その伝統は、応用電気研究所、電子科学研究所と改組しながらも受け継がれ、現在では、光に関する科学、分子に関する科学、生命に関する科学、数理に関する科学を融合した「複合領域ナノサイエンス」の創出を目指している。また、国内外の研究者や産業界との接点として、附属ナノテクノロジー研究センター（平成14年発足）、寄附部門ニコンバイオイメージングセンター（平成17年発足）を擁して、多次元空間に広がる研究領域をカバーしながら、さらに高い次元に新しい独創的な複合領域研究のベクトルを張り出すべく努力している。平成19年度からは、大阪大学産業科学研究所、東北大学多元物質科学研究所、東京工業大学資源化学研究所と連携を組んで、附置研究所間連携（ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス）の事業を開始している。

教育面でも、理学院、情報科学研究科、医学研究科、環境科学院に協力して大学院教育を行うとともに、3つの北大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」「特異性から見た非線形構造の数学」「トポロジー理工学の創成」、2つの北大グローバルCOEプログラム「触媒が先導する物質科学イノベーション」「知の創出を支える知識情報科学の新展開」に参画して人材育成に努めている。法人化後、大学組織の改革が進む中、大学における附置研究所の役割をしっかりと考えながら、電子科学研究所全体が一丸となって「複合領域ナノサイエンス」の独創的な研究を推進している。本冊子は平成19年度の研究活動をまとめたものである。光・生命・分子・数理の4つの柱を軸にそれらを融合した「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21年2月

北海道大学電子科学研究所長
笹　木　敬　司

目　次

組織図

Ⅰ．研究成果・活動

電子材料物性部門
光電子物性研究分野 …… 4
相転移物性研究分野 …… 10
量子情報フォトニクス研究分野（相転移物性から名称変更 H19.10～） …… 13
有機電子材料研究分野 …… 19
ナノ光高機能材料研究分野 …… 27

電子機能素子部門
量子機能素子研究分野 …… 34
分子認識素子研究分野 …… 40
細胞機能素子研究分野 …… 48

電子計測制御部門
光システム計測研究分野 …… 54
量子計測研究分野 …… 60
分子生命数理研究分野（自律調節から名称変更 H19.10～） …… 64
ナノシステム生理学研究分野 …… 71

電子情報処理部門
情報数理研究分野 …… 78
神経情報研究分野 …… 84
極限フォトンプロセス研究分野 …… 91
計算論的生命科学研究分野 …… 99
並列分散処理研究分野（客員研究分野） …… 104

寄附研究部門
ニコンバイオイメージングセンター …… 108

ナノテクノロジー研究センター
ナノデバイス研究分野 …… 112
ナノ理論研究分野 …… 117

Ⅱ．予算

Ⅱ－１．　研究成果公表に関する各種の統計表 …… 127
Ⅱ－２．　予算 …… 129
Ⅱ－３．　外国人研究者の受入状況 …… 130
Ⅱ－４．　修士学位及び博士学位の取得状況 …… 131

Ⅲ．研究支援体制

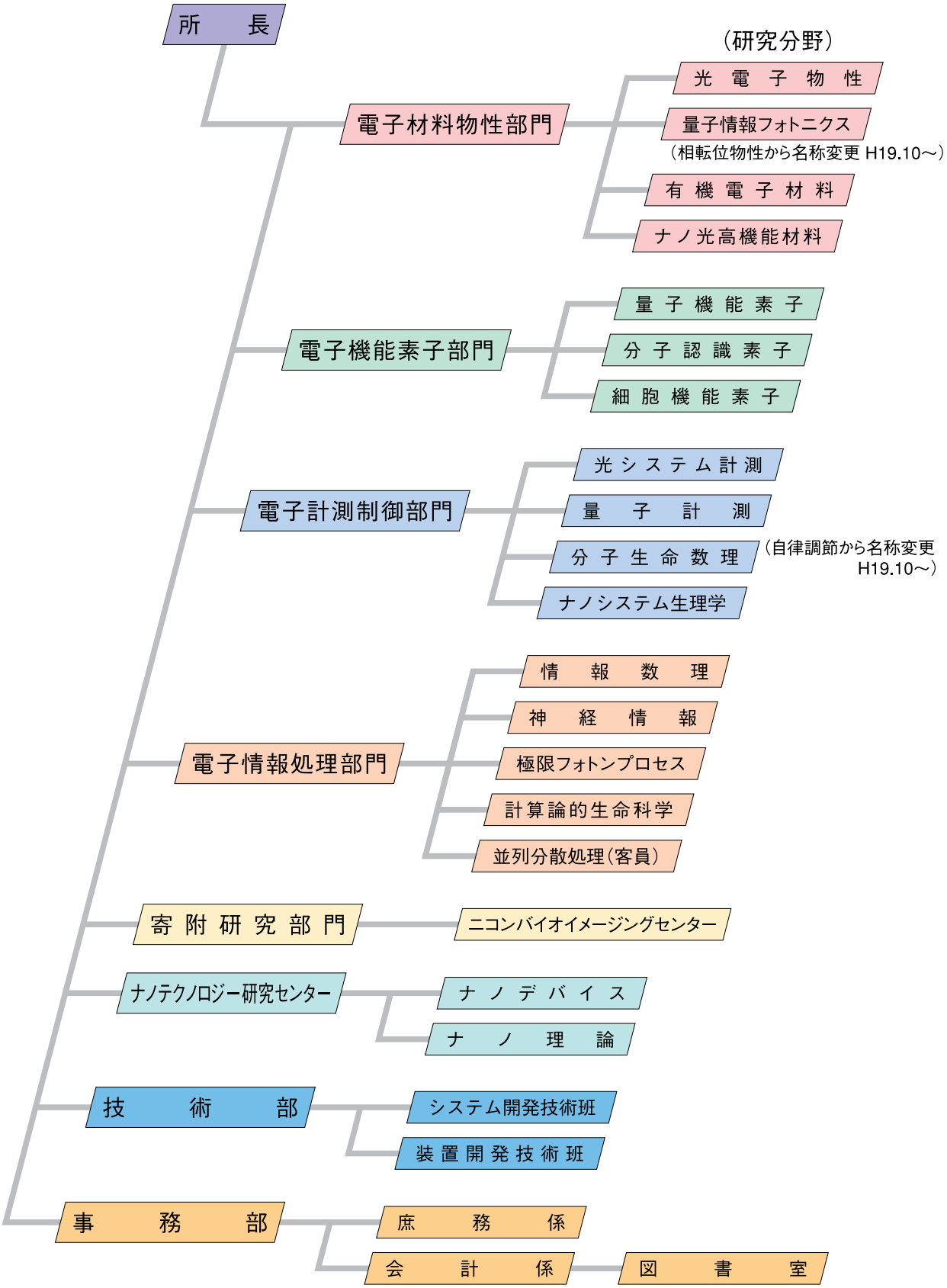
Ⅲ－１．　技術部 …… 135
Ⅲ－２．　事務部 …… 135
Ⅲ－３．　学術情報 …… 136

Ⅳ．資料

Ⅳ－１．　沿革 …… 139
Ⅳ－２．　建物 …… 141
Ⅳ－３．　現員 …… 141
Ⅳ－４．　教員の異動状況 …… 142
Ⅳ－５．　構成員 …… 143

表紙の説明「結晶成長過程のシミュレーション」

■組織図


所　長
（研究分野）
電子材料物性部門
光電子物性
量子情報フォトニクス
（相転位物性から名称変更 H19.10～）
有機電子材料
ナノ光高機能材料
電子機能素子部門
量子機能素子
分子認識素子
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
分子生命数理
（自律調節から名称変更 H19.10～）
ナノシステム生理学
電子情報処理部門
情報数理
神経情報
極限フォトンプロセス
計算論的生命科学
並列分散処理（客員）
寄附研究部門
ニコンバイオイメージングセンター
ナノテクノロジー研究センター
ナノデバイス
ナノ理論
技術部
システム開発技術班
装置開発技術班
事務部
庶務係
会計係
図書室

Ⅰ．研究成果・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　太田信廣（東北大院、理博、1998.10～）
准教授　中林孝和（東大院、理博、2002.7～）
助　教　飯森俊文（京大院、理博、2003.6～）
非常勤研究員　牛坂　健（2004.4～）、吉沢友和（2006.4～2007.1）Mohan S. Mehata（2007.11～）、伊藤寿之（2007.11～）
院　生
・平成19年度
博士課程
　Kamlesh Awasthi、Rahima Khaton
修士課程
　大島瑠利子、中畑喬之、酒井實

1．研究目標

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起こるダイナミクスが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、光励起に伴う分子構造や電子構造の変化はどうか、また光誘起導電性、電界発光の出現など電気、磁気特性と光学特性の関係はどうなのかを明らかにする。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と共に、例えば光誘起超伝導といった光に関係する全く新しい機能物性の発現を探索する。生体内のダイナミクスと機能についても、生体内の「場」に着目しながら調べる。

2．研究成果

(a)　有機導電体の光応答と新奇光機能物性

近年の分子性材料の発展は目覚ましく、有機電界発光（EL）素子や有機太陽電池など次世代デバイスへの応用が盛んに研究されている。それら分子性材料を開拓するうえにおいて、有機導電体と総称される有機半導体、分子性金属、および有機超伝導体はもっとも先端的な材料の一つであり、また応用面のみならず固体物理学・物理化学といった基礎学問的にも非常に重要な物質である。これまでの有機導電体の研究においては、静圧下や静磁場下での輸送特性や磁性を調べるといった定常・熱平衡状態における物性を調べる研究が主流であった。しかし近年、有機導電体に光や外場をパルス的に加えた場合に誘起されるダイナミックスを時間分解計測する研究に関心が高まっている。その理由の一つは、超高速・高効率といった特異的なスイッチング素子を開発するための基礎研究としての側面が注目を集めているためである。我々は、電荷秩序絶縁体状態や超伝導体といった多彩で興味深い物性を示すことが知られているビス（エチレンジチオ）テトラチアフルバレン（BEDT-TTF、図1）をドナーとした有機電荷移動錯体に着目し、レーザー光とパルス電場に対する応答に関して研究をすすめた。

α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ 単結晶を試料として、電荷秩序絶縁体状態において、パルスレーザー光を用いて時間分解光電流計測を行った。図2(a)は、ナノ秒パルスレーザー（532 nm）と3 Vのパルス電圧を用いて測定した過渡光電流である。測定は、金属－絶縁体相転移温度（135 K）に近い115 Kで行った。光電流の減衰プロファイルにおいて、光強度を増加させるにともなって長寿命の成分が増大し、1 μs程度の準安定状態が実現した。また、計測された電流値から結晶の電気伝導度を算出し、光強度に対してプロットした図を図2(b)に示す。ここでは、レーザー照射直後（$t = 0$）における電気伝導度を示した。ある光強度（I_{TH}）を超えると、電気伝導度が急激に増加するといった顕著な非線形性（しきい値的挙動）が観測された。これらの光強度依存性は、一般的な半導体の光伝導においてみられる挙動とは異質であり、光励起によって固体中に生成した局所的な励起状態の間に、協同的な相互作用が働き、別の相を形成することが考えられる。以上から、α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$の絶縁相から金属相へ光誘起相転移が起きていると考えられる。

電場強度をさらに増加させると、電流が減衰せず、電場がかかっているかぎり電流が流れ続けるといった、電気伝導度のスイッチング現象が観測された。図3(a)は、10 Vの電圧パルスを加えたときの電流プロファイルである。暗中（Dark）では絶縁体であり、低電気伝導（Low Conductivity;

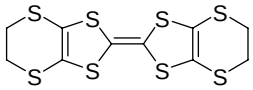


図1．BEDT－TTFの分子構造。

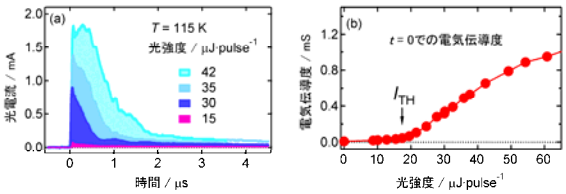


図2．(a)過渡光電流プロファイル、(b)電気伝導度の光強度依存性。

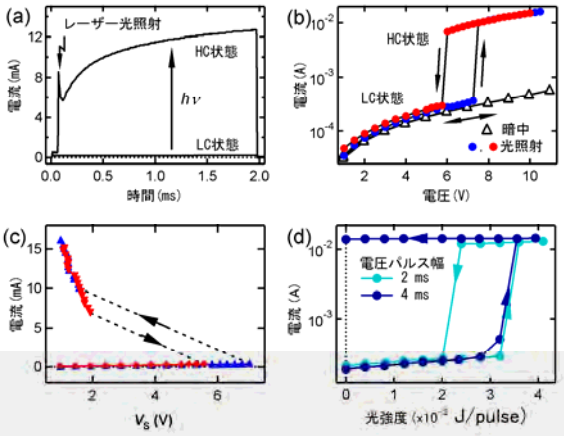


図3．(a)電流の時間プロファイル、(b)電流値の電圧依存性、(c)試料にかかる電圧(V_S)と電流値のプロット、(d)電流値の光強度依存性。

LC)状態と示した低い電流値しか流れない。一方、光照射を行うと、高電気伝導(High Conductivity; HC)状態へスイッチングを起こし、電流値が約100倍に増大する。図3(b)は、実験に用いた回路の電流Iと電圧Vの関係（I-V特性)である。ここでは、一定の光強度で光照射を行いながら電圧を掃引した場合と、暗黒下で同様の測定を行った場合の結果を共に示してある。光照射を行った場合には、ある電圧範囲において電流値が双安定性を示しており、ヒステリシスを伴う光誘起スイッチングが見られた。また、試料にかかっている電圧(V_S)を求め、電流との関係を示すと図3(c)のようになり、負性抵抗効果が現れている。光照射を行わない場合は、負性抵抗効果は観測されなかった。図3(d)は、電流値の光強度依存性のプロットであり、一定の電圧高さをもつ電圧パルスを用いて測定した。ここではパルスの繰り返しは8.3 Hzであり、2 msと4 msの2種類の電圧パルス幅で測定を行った。光強度に対するヒステリシスが観測されていることに加えて、電圧パルスの幅に依存してヒステリシスループの形が変化していることがわかる。$I-V_S$特性の温度依存性を図4に示す。ここでは、一定の光強度で光照射を行いながら測定を行った。温度の上昇にともない、負性抵抗効果が出現するしきい電圧の値が減少し、光誘起スイッチング効果は温度で制御できる。これらの結果から、α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$は、光励起することで負性抵抗効果を示すといった光サイリスター素子に類似した特性を持っていることが明らかになった。

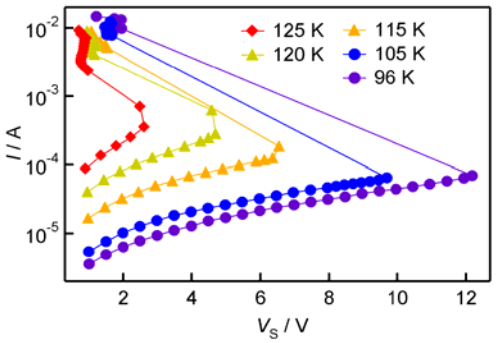


図４． I-V_S特性曲線の温度依存性。

スイッチング効果によって LC 状態から HC 状態へ変化させるためには、電圧印加と同時に光照射を行うことが必要である。一方、HC 状態へスイッチングを起こしたあと、光を切ったときに、電圧パルスの幅に依存した挙動の違いが見られた(図5)。7ミリ秒の電圧パルスを用いた場合（図5(a)）は、レーザー光を切った後においても、電圧パルス列を加え続けることによって、HC 状態が保持されている。つまり、いったん HC 状態への光誘起スイッチングが起きた後は、光照射なしでも、電圧パルス列だけで HC 状態へスイッチングでき、光を切っても HC 状態が保持されるというメモリー効果を示している。しかしその一方、電圧パルスの幅を狭めて6ミリ秒の電圧パルスを用いた場合（図5(b)）は、レーザー光を切ってしまうと HC 状態から LC 状態へ戻ることがわかった。すなわち、結晶に加える電圧

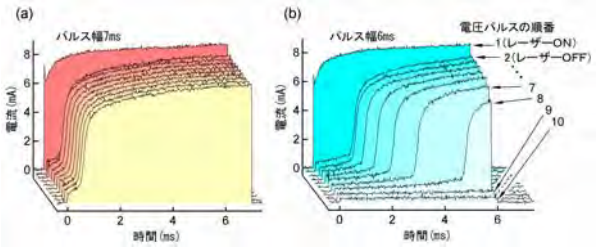


図５． 電圧パルスを連続して10個加えた時の電流プロファイル。1個目の電圧パルスにおいてレーザー光照射を同期させ、それ以降のパルスにおいてはレーザー光を切って測定した。用いた電圧パルス幅は(a) 7 ms, (b) 6 ms。

パルス列のパルス幅に依存して、結晶にメモリー効果を持たせたり、メモリー効果を消滅させたりといった制御が可能である。このような現象は、この物質において我々が初めて見いだしたものである。

(b) 蛍光寿命イメージングによる高度好塩菌の細胞内環境変化の研究

蛍光による細胞のイメージングにおいて，蛍光強度ではなく蛍光寿命をイメージングすることにより、各種刺激に対する細胞内の応答機構を検討している。蛍光寿命は光退色や励起光強度などに依存しないために、強度測定に比べて定量性が大きく増加し、細胞内の環境変化などを高感度に検出できると考えられる。本年度は、高度好塩菌(*Halobacterium Salinarum*)の細胞内環境について、蛍光寿命イメージングを用いて検討した。高度好塩菌は、高濃度の塩溶液中で生育する古細菌であり、プロトン輸送機構や極限環境適応機構など様々な角度から盛んに研究が行われている。高度好塩菌の細胞内の状態を理解するためには、イオン感応性色素を用いて細菌を染色し、色素の蛍光強度を測定する方法がよく用いられる。しかし絶対強度を定量的に測定することが難しいために、蛍光顕微鏡とイオン感応性色素とを組合せた研究は殆ど行われていなかった。本研究では、pH 感応性色素である BCECF によって細菌を染色し、細菌内の BCECF の蛍光寿命イメージング測定を行った。

初めにBCECFの蛍光寿命とpHとの関係について検討した。緩衝溶液中における pH と蛍光寿命(τ_f)との関係を図6に示す。pH と τ_fとの関係は次式を用いて再現した。

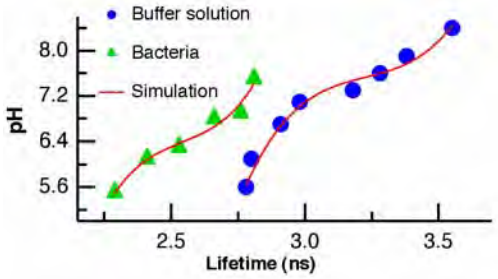


図６． HEPES 緩衝溶液中(●)と高度好塩菌内(▲)における BCECF の蛍光寿命と pH との関係。励起波長、450nm; 蛍光波長、530nm。

$$pH = -514.51 + 483.09 \times \tau_f - 149.38 \times \tau_f^2 + 15.434 \times \tau_f^3 \quad (1)$$

(1)式を用いることにより、緩衝溶液中の pH を BCECF の蛍光寿命から求めることができる。次に細胞内の pH と BCECF の蛍光寿命との関係を検討した。細菌が分散された緩衝食塩水にモネンシン溶液を滴下し、細菌内の BCECF の蛍光寿命のpH依存性を測定した。モネンシンによって、細胞内外の pH は等しくなっており、細胞外の pH を測定することによって細胞内の pH を求めることができる。図6に示すように、細胞内 pH と τ_f との関係は、次式を用いて表すことができた。

$$pH = -440.42 + 523.91 \times \tau_f - 205.49 \times \tau_f^2 + 26.961 \times \tau_f^3 \quad (2)$$

pH と τ_f の関係式は細胞内外で異なっており、緩衝溶液中の関係式をそのまま細胞内に用いることはできないことがわかる。pH7.7の緩衝食塩水に分散させた高度好塩菌内の BCECF の蛍光寿命は2.93ns であった。(2)式より細胞内 pH は7.2と計算され、この値は蛍光強度から求めた値と一致する。蛍光強度測定では、絶対強度の定量性が低いために、2つの励起波長を用いて蛍光強度を測定し、その比を計算するレシオ法が用いられる．本結果は、レシオ法を用いなくても、蛍光寿命から細胞内の pH を求めることができることを示している。

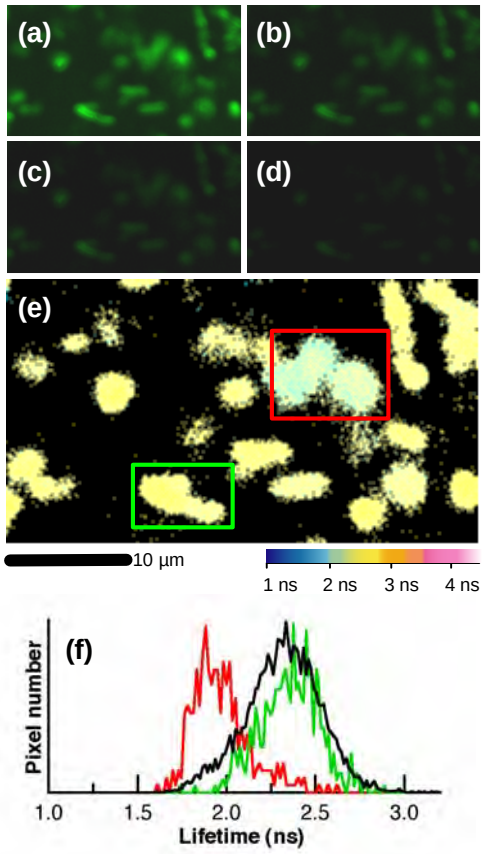


図７．(a)-(d) BCECFによって染色された高度好塩菌の時間分解共焦点蛍光画像。時間領域は、0-2ns(a)、2-4ns(b)、4-6ns(c)、6-8ns(d)。(e) (a)-(d)の時間分解画像を解析して得られた蛍光寿命画像。(f) 蛍光寿命ヒストグラム。緑色、緑色の四角形で囲まれた細菌；赤色、赤色の四角形で囲まれた細菌；黒色、観測されているすべての細菌．励起波長、450nm; 蛍光波長、515-560nm。

図7(a)-(d)に BCECF によって染色された高度好塩菌の時間分解共焦点蛍光画像を示す。蛍光によって細菌一つ一つを判別することができ、蛍光強度が時間とともに減少する様子がわかる。この結果を解析して得られた蛍光寿命画像を図7(e)に示す。高度好塩菌の蛍光寿命の多くは約2.4nsと計算され、単一指数関数を仮定した蛍光寿命画像測定では、蛍光寿命の値が10%程度小さく見積られる。しかし2.4ns の成分の他に、約1.9ns の速い蛍光寿命を持つ細菌も存在することがわかる。図7(f)に2.4ns の蛍光寿命を持つ細菌と1.9ns の蛍光寿命を持つ細菌の蛍光寿命のヒストグラムを示す。ヒストグラムのピーク位置は明らかに異なっており、異なる蛍光寿命を持つ2種類の細菌が存在することがわかる。蛍光強度と蛍光寿命の間には相関関係はなく、蛍光強度からではこのような2種類の細菌を見分けることはできない。細胞内 pH が5から6とすると速い蛍光寿命を説明することができるが、このような低い細胞内 pH は細菌の生理的条件とは異なっており、細胞内 pH のみでは寿命の違いを説明することは難しい。BCECF の蛍光寿命は外部電場に大きく依存することから、細菌内における BCECF の静電的環境の違いを反映していると考えられる。

３．今後の研究の展望

電場・磁場変調発光分光法、ナノ秒、ピコ秒時間分解電場・磁場発光分光法、さらにはフェムト秒時間分解超高速発光分光法を適用することにより、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、励起錯体形成といった諸々の光化学反応への電場、磁場効果を種々の有機分子系、無機分子系、有機・無機ハイブリッド系、さらには細胞を対象として調べ、自然界における光化学反応と外場との関係をさらに明らかにする。また、光誘起電子移動反応を示すドナー・アクセプター系を始めとする諸々の光化学反応系を対象に、電気・磁気的光機能物性を調べ、光反応への電場、磁場効果との関係を明らかにする。上で述べたように広い温度領域にわたる光電流測定や伝導度の光照射効果を種々の系で調べ、光化学ダイナミクスと光導電性発現との関係や EL 電界発光発現との関係を調べる。特に、単なる光伝導性ということではなく、究極の光機能物性というべき光誘起超伝導発現の可能性を探る。また、固体膜だけではなく、分子が比較的自由に動くことのできる溶液系や生体試料にも実験を発展させ、光と電場を組み合わせての分子の回転運動のコントロールや配向分子系の構築、および蛍光寿命イメージング測定に基づいて生体系における反応機構および生体内電場や生体内環境の解明を行なう。

4．資料

4.1　学術論文等

1）T. Iimori, T. Naito and N. Ohta : “Photoinduced Phase Transition in the Organic Conductor α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ at Temperatures near the Metal－Insulator Phase Transition”, *Chem. Lett.*, 36(4) : 536-537 (2007)

2）E. Jalviste and N. Ohta : “Theoretical foundation of electroabsorption spectroscopy: Self-contained derivation of the basic equations with the direction cosine method and the Euler angle method”, *J. Photochemi. Photobiol. C*, 8 : 30-46 (2007)

3）T. Iimori, N. Ohta and T. Naito : “Molecular-based light-activated thyristor”, *Appl. Phys. Lett.*, 90 : 262103-1-262103-3 (2007)

4）A. Ishii, S. Kishi, H. Ohtsu, T. Iimori, T. Nakabayashi, N. Ohta, N. Tamai, M. Melnik, M. Hasegaswa and Y. Shigesato : “Molecular Distortion Effect on ff-Emission in a Pr(III) Complex with 4, 7-Diphenyl-1, 10-Phenanthroline”, *ChemiPhysChem*, 8 : 1345-1351 (2007)

5）H.-P. Wang, T. Nakabayashi, K. Tsujimoto, S. Miyauchi, N. Kamo and N. Ohta : “Fluorescence lifetime image of a single halobacterium”, *Chem. Phys. Lett.*, 442(4-6) : 441-444 (2007)

6）A. M. Ara, T. Iimori, T. Nakabayashi, H. Maeda, K. Mizuno and N. Ohta : “Electric Field Effects on Absorption and Fluorescence Spectra of Trimethylsilyl- and Trimethylsilylethynyl-Substituted Compounds of Pyrene in a PMMA Film”, *J. Phys. Chem. B*, 111(36) : 10687-10696 (2007)

7）Md. Wahadoszamen, T. Hamada, T. Iimori, T. Nakabayashi and N. Ohta : “External Electric Field Effects on Absorption, Fluorescence, and Phosphorescence Spectra of Diphenylpolyynes in a Polymer Film”, *J. Phys. Chem. A*, 111(38) : 9544-9552 (2007)

8）N. Ohta : “Electric Field Effects on Excitation Dynamics in Electron Donor and Acceptor Pairs of Porphyrin and Fullerene”, *ECS-Transactions*, 6(16) : 3-10 (2007)

9）M. Sakai, T. Ohmori, M. Kinjo, N. Ohta and M. Fuji : “Picosecond Time-resolved Infrared Imaging by a Non-scanning Two-color Infrared Super-resolution Microscope”, *Chem. Lett.*, 36(11) : 1380-1381 (2007)

10）M. Inamo, C. Okabe, T. Nakabayashi, N. Nishi and M. Hoshino, “Femtosecond Time-Resolved Photo-Absorption Studies on the Excitation Studies on the Excitation Dynamics of Chromium(Ⅲ) Porphyrin Complexes in Solution”Chemical Physics Letters, 445(4-6),167-172,(2007)

11）T. Iimori, T. Iwahashi, K. Kanai, K. Seki, D. Kim, H. Hamaguchi, and Y. Ouchi, “Local Structure at the Air/Liquid Interface of Room-Temperature Ionic Liquids probed by Infrared-Visible Sum Frequency Generation Vibrational Spectroscopy: 1-Alky-3-methylimidazolium Tetrafluoroborates” *J. Phys. Chem. B*, 111(18):4860-4866 (2007)

4.2　総説・解説・評論等

1）中林孝和、太田信廣 :「蛍光寿命を用いた生体試料の画像観測」、ぶんせき : 597-600 (2007)

4.7　講演

a．招請講演

1）N. Ohta : “Electric Field Effects on Excitation Dynamics in Electron Donor and Acceptor Pairs of Porphyrin and Fullerene”, 211th ECS Meeting, Chicago, USA (2007-05)

2）太田信廣 :「反応場としての生細胞と発光測定」、分子研研究会「生細胞の分子科学」、岡崎市 (2007-05)

3）中林孝和:「蛍光寿命イメージングを用いた細胞内の微視的環境変化の計測」、第68回分析化学討論会、宇都宮 (2007-5)

4）中林孝和:「蛍光寿命イメージングを用いた細胞内の環境変化の In Vivo 計測」、分子研研究会「生細胞の分子科学」、岡崎 (2007-5)

5）飯森俊文:「新しい光制御スイッチング材料としての分子性導体」、第22回創成科学セミナー、北海道大学（札幌）(2007-06)

6）T.Nakabayashi : “Studies of Microenviroment in a Single Cell Using Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy”,The 12th Korea-Japan Joint Symposium on Frontiers of Molecular Science,Cheju, Korea(2007-07)

7）太田信廣:「光と電場による反応制御と新奇機能物性の創成」、平成19年度化学系学協会東北大会、山形 (2007-09)

8）N. Ohta : “Control of Reaction and Function with Photon and Electric Field”, 2007 Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, Gyeongju, Korea (2007-11)

9）太田信廣:「細胞内蛍光寿命イメージング測定と生体機能」、群馬大学生体調節研究所シンポジウム機能性発光プローブと生体機能イメージング、群馬大学（前橋市）(2007-11)

10）T. Nakabayashi and N. Ohta : “In vivo measurements of intracellular environments by fluorescence lifetime imaging”, Joint Symposium on Dhaka University and Hokkaido University, Dhaka, Bangladesh (2007-11)

11）太田信廣:「細胞内蛍光寿命イメージング測定と細胞活性」、生細胞分光シンポジウム、東京工業大学（横浜市）(2007-12)

12）N. Ohta : “Electric field effects on dynamics and function in molecular system and biological system”, Seminar in National Chiano Tung University, Hsinchu, Taiwan (2007-12)

13) N.Ohta : “Application of Time-Resolved Emission Measurements to Polymer System and Biological System”, Tokyo International Symposium on Time-and Space-Resolved Vibrational Spectroscopy, Tokyo(2008-01)

14) 太田信廣:「蛍光寿命イメージング測定と細胞内ダイナミクス」、日本化学会第88春季年会（2008）、東京(2008-03)

b．一般講演

i）学会

1）アワスティ カムレシュ、飯森俊文、中林孝和、太田信廣:「光誘起電子移動反応への電場効果と温度依存性」、第23回化学反応討論会、神戸市（2007-06）

2）中林孝和、長尾一生、王会平、金城政孝、太田信廣:「蛍光寿命イメージングによる細胞内における緑色蛍光タンパク質の光励起ダイナミクスの研究」、第23回化学反応討論会、神戸市（2007-06）

3）飯森俊文、内藤俊雄、太田信廣:「分子性導体の光誘起相転移と電場制御メモリー機能の発見」、第23回化学反応討論会、神戸市（2007-06）

4）大島瑠利子、太田信廣:「量子サイズ効果を有する金ナノクラスターの発光特性」、日本化学会北海道支部2007年夏季研究発表会、旭川市（2007-07）

5）N. Ohta, T. Nakabayashi, T. Iimori, T. Yoshizawa, A. M. Ara and K. Awasthi : “Remarkable Temperature Dependence of External Electric field effects on Photochemical Reactions”, ICP2007, Cologne, Germany（2007-07～2007-08）

6）T. Iimori and N. Ohta : “Electroabsorption spectroscopy of ionic liquids”, 2nd International Congress on Ionic Liquids, Yokohama (2007-08)

7）中林孝和、王会平、長尾一生、金城政孝、太田信廣：「EGFP の蛍光寿命イメージングを用いた細胞内 pH の検出」、2007年光化学討論会、松本（2007-09）

8）中林孝和、王会平、辻本和雄、宮内正二、加茂直樹、太田信廣:「蛍光寿命イメージングによる高度好塩菌の細胞内環境変化の研究」、2007年光化学討論会、松本(2007-09)

9）Awasthi Kamlesh、吉沢友和、浜田辰夫、飯森俊文、中林孝和、太田信廣 :「Electric field effects on fluorescence of photoinduced electron transfer system: D-A distance dependence and temperature dependence」、2007年光化学討論会、松本市（2007-09）

10）大島瑠利子、浜田辰夫、飯森俊文、中林孝和、太田信廣:「溶液中およびポリマー中における金クラスターの蛍光特性」、2007年光化学討論会、松本市（2007-09）

11）飯森俊文、内藤俊雄、太田信廣 :「有機導体における光サイリスタ特性」、2007年光化学討論会、松本市(2007-09)

12）田山純平、飯森俊文、中林孝和、太田信廣田 :「種々の溶媒中におけるクマリンおよびピレンの紫外・可視電場吸収スペクトル」、2007年光化学討論会、松本市(2007-09)

13）飯森俊文、内藤俊雄、太田信廣 :「有機電荷移動錯体を用いた光サイリスタ」、第1回分子科学討論会、仙台(2007-09)

14）中林孝和、王会平、長尾一生、金城政孝、太田信廣 :「蛍光寿命イメージングによる単一細胞内 pH 計測」、第1回分子科学討論会、仙台（2007-09）

15）Awasthi Kamlesh、飯森俊文、中林孝和、吉沢友和、太田信廣 :「Effects of electric field and magnetic field on photoinduced electron transfer between N-ethylcarbazole and dimethyl terepthalate in a polymer film」、第1回分子科学討論会、仙台（2007-09）

16）Khaton Rahima、飯森俊文、太田信廣 :「Photoirradiation effects on the impedance spectra and the photocurrent spectra of silver iodide」、第1回分子科学討論会、仙台市（2007-09）

17）大島瑠利子、浜田辰夫、飯森俊文、中林孝和、太田信廣:「金ナノクラスターの発光特性と電場効果」、第1回分子科学討論会、仙台市（2007-09）

18）T. Nakabayashi and N. Ohta : “Fluorescence Lifetime Imaging Study on Microenvironment in a Single Cell”, Joint Conference of JMLG/EMLG Meeting and 30th Symposium on Solution Chemistry of Japan, Fukuoka (2007-11)

19）中林孝和、王会平、辻本和雄、宮内正二、加茂直樹、太田信廣:「蛍光寿命イメージングによる高度好塩菌の外部電場効果の研究」、日本化学会第88春季年会、東京(2008-03)

20）Awasthi Kamlesh、飯森俊文、中林孝和、太田信廣 :「分子内光誘起電子移動反応への外部電場効果と温度依存性」、日本化学会第88春季年会、東京（2008-03）

21）飯森俊文、メハタ モハン、太田信廣 :「高分子中に分散した Alq_3の蛍光スペクトルへの外部電場効果」、日本化学会第88春季年会、東京（2008-03）

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）太田信廣、吉沢友和、中林孝和、飯森俊文 :「PL への外部電場効果：EL の効率および安定性との関連」、有機 EL 討論会、東京都（2007-06）

3）吉沢友和、飯森俊文、中林孝和、太田信廣 :「ピレンエキシマー蛍光への電場効果とエレクトロルミネッセンス」、「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」発足記念シンポジウム、東京都（2007-06）

4）T.Nakabayashi : “Application of Vibration Stark Spectroscopy to a-Helocal Polypeptide”, The 67th Okazaki Conference-Molecular Science and Chemical Biology of Biomolecular Function-, Okazaki(2007-11)

4.8 シンポジウムの開催

a．国際シンポジウム

1）K. Hatanaka, T. Tani, K. Sasaki, K. Ijiro, N. Ohta and H.

Misawa：“The 9th RIES-Hokudai International Symposium on 創[sou]”，北海道大学（札幌）(2008年1月28日～2008年1月29日)

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）太田信廣：「分子研研究会「生細胞の分子科学」」、64人、岡崎コンファレンスセンター（岡崎市)(2007年5月22日～2007年5月23日)

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）太田信廣、特別研究員奨励費、光励起ダイナミクス及び分子運動への外部電場効果（2007年度）

2）中林孝和、若手研究Ａ、時間分解顕微吸収イメージングシステムによる非蛍光性の生体試料の画像観測（2006～2008年度）

3）飯森俊文、特定領域研究、電場吸収・発光分光法によるイオン液体の分子配向と溶媒溶質相互作用の研究（2006～2007年度）

b．奨学寄付金（研究担当者、機関名、研究課題、研究期間、総経費、研究内容）

1）中林孝和、分子科学研究奨励森野基金運営委員会、凝縮相分子の微視的構造と高速ダイナミクスに関する実験的・理論的研究、2007年～

c．海外機関との共同研究

1）太田信廣、日台共同研究事業（財団法人交流協会)、電場注入発光機構の解明とエレクトロルミネッセンス発光素子の開発、2007年度

d．民間との共同研究

1）太田信廣、富士フィルム、癌をターゲットとして自家蛍光蛍光寿命イメージング技術の研究（2007年～2008年)

4.11　受賞

1）　中林孝和：分子科学研究奨励森野基金、2007年8月

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）太田信廣：日本学術振興会、科学研究費委員会専門委員、(2007年6月5日～2007年12月31日)

2）太田信廣、分子科学研究所、光分子科学研究領域外部評価委員、(2007年8月7日～2007年8月9日)

3）太田信廣、科学系研究設備有効ネットワーク北海道地域委員会委員（2007年6月1日～2008年5月31日)

b．国内外の学会の役職

1）太田信廣：日本化学会北海道支部幹事（2007年3月1日～2008年2月28日)

2）太田信廣：光化学協会理事（2008年1月1日～2009年12月31日)

3）太田信廣：日本分光学会北海道支部長（2005年5月1日～2007年11月30日)

4）太田信廣：分子科学会幹事（2006年10月1日～2008年8月31日)

5）太田信廣：分子科学会運営委員会委員

6）太田信廣：平成19年度日本化学会北海道支部学会賞、学術賞等推薦委員（2007年6月20日～2008年7月9日)

7）太田信廣：日本分光学会生細胞分光部会幹事（2007年6月1日～2009年5月)

8）太田信廣：日本分光学会平成20年度推薦委員会委員（2010年6月～2011年5月)

9）中林孝和：日本分光学会編集委員会委員（2005年2月18日～2007年5月31日)

g．北大での担当授業科目

・大学院担当講義科目

1）環境物質科学基礎論Ⅰ（2007)

2）分子環境学特論Ⅲ（2007)

3）光分子化学持論（2007)

4）環境物質科学実習Ⅰ（2007)

5）環境物質科学実習Ⅱ（2007)

6）環境物質科学論文購読Ⅰ（2007)

7）環境物質科学特別研究Ⅰ（2007)

8）環境物質科学論文購読Ⅱ（2007)

9）環境物質科学特別研究Ⅱ（2007)

h．北大以外での非常勤講師

1）太田信廣：非常勤講師　群馬大学大学院工学研究科、2007年4月5日～2008年3月31日

2）太田信廣：非常勤講師　群馬大学、2007年7月12日～2007年7月14日

相転移物性研究分野

准教授　辻見裕史（北大院、理博、1993.3～）

１．研究目標

相転移物性研究分野では物質が相転移を起こすときに観測される顕著な物性変化を手がかりにして、新しい未知の物性の探求およびその発現機構の解明を研究目標としている。従来の物性研究は安定に存在している状態に関するものであるが、相転移現象では、物質が新しい相に転移しようとして示す不安定過程において大きな非線形性などまったく新しい性質が発現する。当研究分野では相転移現象においてこれらの新しい物性を探求し、電子科学材料物性の基本的解明を目指す。

２．研究成果

(a)　$SrTiO_3$の量子常誘電性状態における異常散乱光

量子常誘電体として知られている $SrTiO_3$は、0～40K の広い温度範囲で、電気分極を揃える双極子・双極子相互作用と、それをバラバラにする量子揺らぎ（ゼロ点振動）が拮抗しており、臨界領域（量子常誘電性状態）が実現されている系であると考えている。臨界領域があれば、臨界散乱光（臨界蛋白光）が観測できるはずである。

そこで、$SrTiO_3$を試料として温度を図１(a)の様に時間的に段階的に変化させて（昇温）、180° 散乱配置で全散乱光強度 I_{total} を測定した。図１(b)は散乱ベクトル q が$[001]_c$ 方向で測定したときの I_{total} の時間依存性である。図１(b)には、主要な時刻での温度を記入してある。図から、①24～37K の温度範囲で I_{total} が異常に強くなることと、②温度を一定に止めていても I_{total} は変化して行くことが分かる（非定常）。この I_{total} の異常は、明らかに光散乱に用いている光の波長（結晶内では100nm 程度）と“何らかのゆらぎの長さのスケール”がほぼ一致することによるものである。臨界散乱光の可能性も大である。

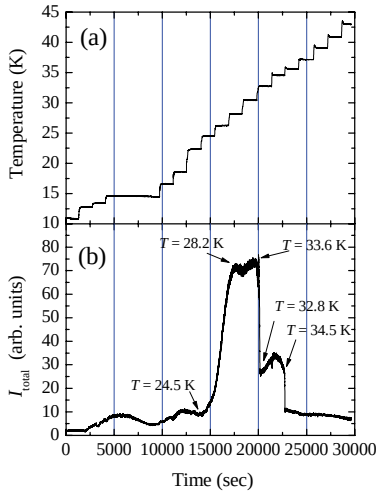


図１．$SrTiO_3$の量子常誘電状態における光散乱強度の異常

一方、“Nb^{5+}を0.02w%ドープした $SrTiO_3$ (STN)”試料でも I_{total} は同じような振る舞いを示すが、異常を示す温度範囲が21～31 K となり、$SrTiO_3$ に比べて低い。ドープ試料では、結果的に自由電子がドープされるため、双極子・双極子相互作用がスクーリニングされ、量子揺らぎの無い場合の仮想的相移転温度は STN の方が低いと考えられる。I_{total} の異常が臨界散乱だとすると辻褄が合う。

(b)　$SrTiO_3$ におけるブロード・ダブレット

$SrTiO_3$の量子常誘電状態において、“ブロード・ダブレット（BD：約20GHz）”という光散乱ピークが特異的に出現する。このピークは最低周波数の横波音響波よりも低い周波数を持つ。このことから分かるように、BD は通常の物質では決して存在し得ない励起ピークであり、量子常誘電相だけに現れる新素励起かも知れないと大いに興味が持たれている。

図２の上パネルは BD の周波数の温度依存性で、下パネルは BD の線幅の温度依存性である。白丸は、散乱ベクトル $\boldsymbol{q}$が$[001]_c$ 方向から$[1\bar{1}0]_c$ 方向へ3.4° 傾いた方向の180° 光散乱の結果であり、黒丸は $\boldsymbol{q}$ // $[001]_c$ の90° 光散乱の結果である。180° と90° 光散乱の違いは主に散乱ベクトルの長さにある。本実験結果から、BD の周波数も線幅も散乱ベクトルの長さに比例していることが判明した。$SrTiO_3$ における BD の物理的起源については、“強誘電的領域を走る横波音響フォノン”であるという説と“第二音波”であるという説がある。第二音波の場合、BD の線幅は散乱ベクトルの長さの自乗に比例することから、第二音波説に疑問を投げかけた。

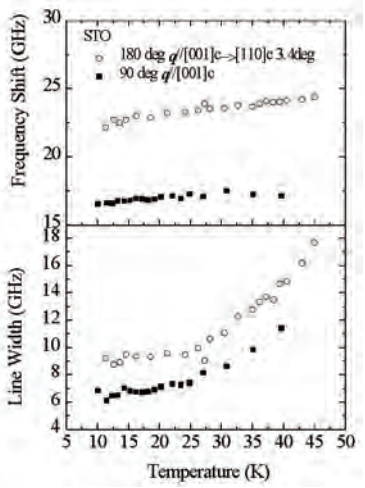


図２．ブロード・ダブレットの周波数と線幅の温度依存性
架橋度が増加したときの緩和時間の変化を示す。

(c)　Nb^{5+} をドープした $SrTiO_3$ における素励起

Nb^{5+} をドープした $SrTiO_3$（STN：自由電子濃度が15K で 12.0×10^{18} cm^{-3}）において、散乱ベクトル $\boldsymbol{q}$ を$[001]_c$ 方向とした光散乱により、図３のように純粋な $SrTiO_3$ にはない新しいピークを２本（素励起：NP1と NP2）見いだした。図３

の上パネルと下パネルは、それぞれ$[001]_c$と$[1\bar{1}0]_c$板試料で得られた光散乱スペクトルである。試料形状だけでNP1の強度が変わっていることが分かる。純粋な$SrTiO_3$は約105Kで立方晶から正方晶に相転移するが、そのとき正方晶分域の出き方が試料形状に依る。そして、$[1\bar{1}0]_c$板試料の方が正方晶単分域になり易いと報告されている。このことから、NP1は理想的な単分域試料では現れないピークであることが結論された。この結論と$\boldsymbol{q}$の方向を考慮することにより、NP1はプラズモン-$E_u(x, y)$ LOフォノン結合モードでNP2はプラズモン-$A_{2u}(z)$ LOフォノン結合モードであると同定した。

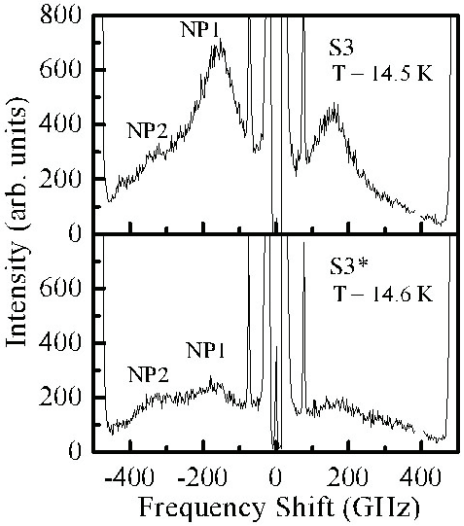


図３．Nb^{5+}をドープした$SrTiO_3$において新しく発見した素励起のスペクトル

(d)　$SrTiO_3$のBDとSTNのNP1

問題は、$SrTiO_3$の量子常誘電性状態において、臨界領域を特徴づける長さのスケールが存在するかどうかにある。図4は、周波数を線幅で割った値(Δν/δν)の温度依存性を示している。○は$SrTiO_3$のBD、□と■と▲はそれぞれ15Kでの電子密度が$2.3\times10^{18}\,cm^{-3}$, $3.6\times10^{18}\,cm^{-3}$, $12.0\times10^{18}\,cm^{-3}$のSTNのNP1のデータである。ところで、Δν/δνはBDやNP1の平均自由行程が、測定波長（結晶内の光の波長:100nm程度)の何倍あるかを表わしている。BDとNP1とは全く別の物理的起源の励起にも関わらず、Δν/δνの温度依存性が同じであるということは、温度によって決まる長さのスケールがあることを示唆している。さらに、図4から40K近傍で、この長さのスケールと光の波長が同じ程度になっていることも分かる。このことは、前項(a)で示した実験事実（$SrTiO_3$やSTNの40K近傍では、100nm程度の長さのスケールがある）のクロスチェックにもなっている。さらに、この長さのスケールが電気分極の揺らぎの相関長であると考えると、$SrTiO_3$の^{16}Oを^{18}Oに同位元素置換した場合、量子揺らぎが抑制されて電気分極の揺らぎ（緩和モード：強誘電性Euソフトモードではない）が凍結するために、$SrTi^{18}O_3$では常誘電相のなかに小島のように強誘電相領域ができるという重成らの報告（強誘電性E_uソフトモードが完全には凍結しない：PRB74,2006,174121）と辻褄があってくる。

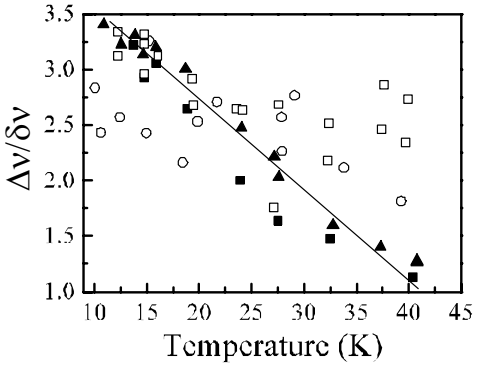


図４．$SrTiO_3$におけるブロード・ダブレットと、Nb^{5+}をドープした$SrTiO_3$において新しく発見した素励起のΔν/δν値の比較

３．今後の研究の展望

今後はさらに研究対象とする相転移を結晶から生体まで拡大し、当研究グループの特徴である周波数領域分光法と実時間分解分光法を総補的に利用し、周波数、時間の二次元的な方向から、転移ダイナミクスをより踏み込んだ形で解明して行くことできると期待される。

４．資料

4.1　学術論文等

１）Y. Tujimi and M. Itoh: “ Broad Doublet Spectra Observed in Strontium Titanate”, *Journal of the Korean Physical Soceity,* 51: 819-823 (2007)*

２）Y. Tujimi and M. Itoh: “Broad Doublet and Partially Softened Acoustic Mode in $SrTiO_3$”, *Ferroelectrics,* 355: 61-65 (2007)*

4.7　講演

ｉ）学会

１）辻見裕史、植寛素：「ペロフスカイト系酸化物におけるブロードダブレットとプラズモン」、日本物理学会2007年春期大会鹿児島大学 (2007-03)

２）辻見裕史、植寛素、南英俊：「ペロフスカイト系酸化物におけるブロードダブレットとプラズモンⅡ」、日本物理学会第62回年次大会北海道大学 (2007-09)

４）Y. Tsujimi, H. Uwe, H. Mianmi: “Broad Doublet and Plasmon Peak in Perovskite-type Oxides”, The 11th European Meeting on Ferroelectricity, Bled, Slovenia (2007/09)

4.10　予算獲得状況

ａ．科学研究費補助金

１）辻見裕史、基盤研究 C 一般、量子常誘電体における動的スケーリング構造とナノスケール強誘電体領域 (2006～2007年度)

4.12　社会教育活動

ａ．公的機関の委員

１）辻見裕史：基盤研究等審査員（2006年12月1日～2008年11月30日）

量子情報フォトニクス研究分野

教　授　竹内繁樹　（京大院、理博、2007.6～）
准教授　辻見裕史　（北大院、理博、2007.6～）
助　教　岡本亮　（北大院、工博、2007.8～）
ポスドク　ソージャエフ・アレクサンドレ（Franche Comte Univ.、Ph.D.、2007.6～2007.9）
岡本亮（北大院、工博、2007.6～2007.7）
院　生
博士課程
川瀬大輔、永田智久、シャハルル・カドリ・アヨプ
修士課程
浜端洋右、浅井健志、市橋和明、上田哲也、谷田正人、中村真一郎

1．研究目標

本研究分野では、光子１粒１粒を発生させ、その状態間の量子相関を自在に制御することで、これまでの「光」を超える「新しい光」の実現と応用について実験的な研究を行っている。光子を自在に制御、検出するために、ナノスケールの微小光デバイスの研究と、その光量子デバイスや単一光子源の実現について研究している。また、応用としては、光子を操る量子コンピュータ・光量子回路のほか、通常の光の限界を超えた「光計測」、「光リソグラフィー」の研究に主に実験的に取り組んでいる。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。

また、物質が相転移を起こすときには、その物質に隠れていた特性が顕在化する。この顕在化した特性の動的な原因を究明することにより、高機能特性を持つ電子材料を創世する設計指針を得ることも目的としている。

2．研究成果

(a)　４つのもつれ合い光子による古典限界を超える位相測定

干渉計を用いた位相測定は、重力波検出から、光ジャイロ、天体観測に至るまで非常に広範に渡って用いられている。このような位相測定は量子的な状態を用いることで、その測定感度を飛躍的に向上できることが分かっている。そのような量子的な状態の代表的なものに NOON 状態がある。NOON 状態とは、N 光子が光路でもつれ合った状態である。

我々は、一対の２光子状態を用意し、ビームスプリッタで量子干渉させることで、４光子 NOON 状態を含む状態を発生させた（図１(a)）。その状態をもう一度ビームスプリッタに入力し、出力部分で４光子 NOON 状態を選択的に測定することで、４光子 NOON 状態の干渉を得た。図１(b)に４光子 NOON 状態の干渉結果を示した。その結果、干渉計の位相感度が古典限界を超えることを確認した。

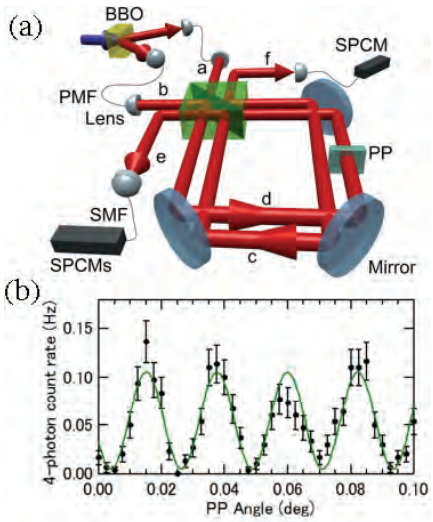


図１．(a) 実験系：a,b から２光子状態を対で入力。出力の一方 e で３光子検出、もう一方 f で１光子検出することで４光子 NOON 状態を測定。(b) 実験結果：干渉計内の位相差を走査しながら、出力の同時計数率を測定。

(b)　量子もつれ合い光を用いた回折限界を超える干渉縞

レーザー光を用いたリソグラフィーでは、用いる光の回折限界によって、加工の細線化に原理的な限界が存在する。しかし近年、量子もつれ合い光を用いることで、回折限界を超える干渉縞の実現が可能になることが分かってきた。しかし、これまで、実際に回折限界を超える干渉縞を観測した報告はなかった。

我々は、高精度な２光子もつれ合い状態を発生させ、それらを干渉させることで、回折限界を超える干渉縞を作った。そして、サブミクロンの空間解像度を持った、NSOM プローブを用いることで、初めて、実際に回折限界を超える干渉縞を観測することに成功した（図２）。

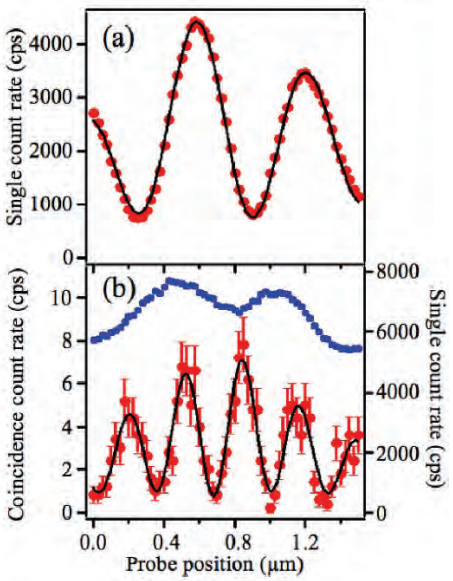


図２．干渉縞観測結果：(a) 単一光子の干渉縞　(b)量子もつれ合い光子対の干渉縞

(c)　テーパファイバの細線化技術の確立

シングルモードファイバを熱して、引き伸ばすと、引き伸ばされた部分が細くくびれた特殊なファイバを作製することができる。このようなファイバはテーパファイバと呼ばれる。テーパファイバのくびれ部分からは直接光が染み出しており、他の光導波路や、光共振器、また発光微粒子といったものと光をやりとりすることが可能になる。このくびれ部分は細ければ細いほど、より強力に、他の光デバイスと光をカップリングすることができるようになる。また細くなると、くびれ部分内部の光エネルギー密度が高くなるため、その部分に非線形光学媒質を導入することで、これまでにない高い非線形応答が期待できる。

我々は、より細いテーパファイバ作製技術を確立することで、細さ約500nm のテーパファイバを実現した（図３）。

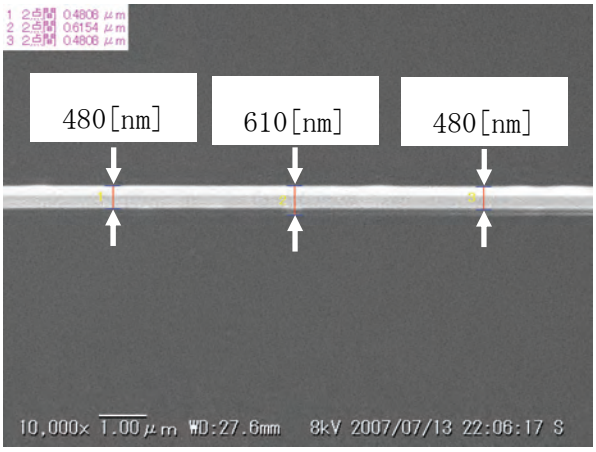


図３．作製したテーパファイバの電子顕微鏡像。

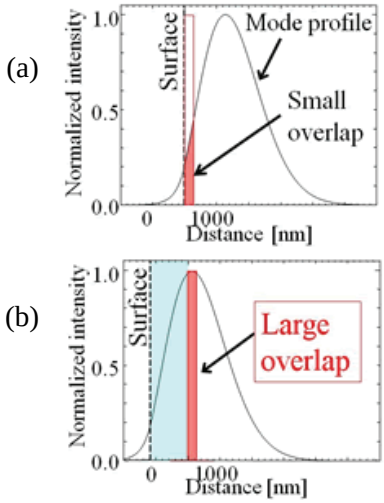


図４．(a)ゲイン層位置制御がない場合のゲイン層とモード分布のオーバーラップ　(b) ゲイン層を制御することで、モード分布とゲイン層のオーバーラップを増強させた場合

(d)　ファイバ結合微小球共振器を用いた発光制御

ファイバ結合微小球は高いQ値と高効率光入出力が可能な微小共振器として注目されている。我々は Er と P をドープしたゾルゲルガラスをゲイン層としてコートした微小球をファイバと結合させることで、これまでにない薄い膜厚でのレーザー発振に成功した。

さらに、このゲイン層の位置を制御することで、Er イオンが放出した自然放出光が微小球に結合する割合を増大させることができることを見いだした。（図４）

(e)　$SrTiO_3$の量子常誘電性状態における異常散乱光

量子常誘電体として知られている $SrTiO_3$ は、0～40K の広い温度範囲で、電気分極を揃える双極子・双極子相互作用と、それをバラバラにする量子揺らぎ（ゼロ点振動）が拮抗しており、臨界領域（量子常誘電性状態）が実現されている系であると考えている。臨界領域があれば、臨界散乱光（臨界蛋白光）が観測できるはずである。そこで、$SrTiO_3$ を試料として温度を時間的に段階的に変化させて（昇温）、180° 散乱配置で全散乱光強度 I_{total} を測定した。その結果　①24～37K の温度範囲で I_{total} が異常に強くなることと、②温度を一定に止めていても I_{total} は変化して行くことが分かる（非定常）。この I_{total} の異常は、明らかに光散乱に用いている光の波長（結晶内では100nm 程度）と“何らかのゆらぎの長さのスケール”がほぼ一致することによるものである。臨界散乱光の可能性も大である。一方、“Nb^{5+} を0.02w%ドープした $SrTiO_3$ (STN)”試料でも I_{total} は同じような振る舞いを示すが、異常を示す温度範囲が21～31 K となり、$SrTiO_3$に比べて低い。ドープ試料では、結果的に自由電子がドープされるため、双極子・双極子相互作用がスクーリニングされ、量子揺らぎの無い場合の仮想的相移転温度は STN の方が低いと考えられる。I_{total} の異常が臨界散乱だとすると辻褄が合う。

３．今後の研究の展望

本研究分野では現在、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業のプロジェクトとして「光子間の高効率固体量子位相ゲートの実現に関する研究」、「多光子量子演算ゲートの研究」の研究を実施している。また、科学研究費課題として、「空中フォトニック結晶ファイバを用いた、光子の量子位相ゲートに関する研究」、「パラメトリック蛍光対を用いた、２光子干渉における光子のアンチバンチングの実現」の研究を遂行してきた。これらのプロジェクトの展開として、(a)光子を用いた線形量子計算の実現、(b) テーパファイバー結合微小球を用いた単一光子制御デバイスの開発、(c) パラメトリック蛍光対を用いた光子数状態の制御、(d) 輻射場を制御した単一分子の分光計測、(e) 高量子効率光子数検出器の開発と特性解析、(f) もつれ合い光子を用いた量子リソグラフィー要素技術開発、(g) 単一光子制御デバイスの作製と特性解析等の研究テーマを遂行する予定である。また、量子相転移に関連して、量子常誘電体が示す特異な異常現象と、それをモディファイした物質で発現する超伝導状態とを、時空間スケーリングの観点から統一的に解釈して行く。さらに、磁性体で見られる量子臨界現象との関わりを追求する。

４．資料

4.1　学術論文等

１）　T. Nagata, R. Okamoto, J. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi : "Beating the Standard Quantum Limit with Four Entangled Photons", *Science*, 316 : 726-729 (2007)

２）Y. Kawabe, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Investigation of the Spatial Propagation Properties of Type-I Parametric Fluorescence by Use of Tuning Curve Filtering Method", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46(9A) : 5802-5808 (2007)

３）　Y. Kawabe, H. Fujiwara, R. Okamoto, K. Sasaki and S. Takeuchi : "Quantum interference fringes beating the diffraction limit", *Opt. Exp.*, 15(21) : 14244-14250 (2007)

４）　H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi : "Control of spontaneous emission coupling factor β in fiber-coupled microsphere resonators", *Appl. Phys. Lett.*, 92(7) : 07115/1-07115/3 (2008)

５）Y. Tujimi and M. Itoh: " Broad Doublet Spectra Observed in Strontium Titanate", *Journal of the Korean Physical Soceity*, 51: 819-823 (2007)

６）Y. Tujimi and M. Itoh: "Broad Doublet and Partially Softened Acoustic Mode in $SrTiO_3$", *Ferroelectrics*, 355: 61-65 (2007)

4.2　総説・解説・評論等

１）竹内繁樹：「他分野でいま何が話題？⑮－量子光学－光子を自在に操り光量子コンピュータの実現を目指す」、化学(CHEMISTRY)、化学同人、62：39-42 (2007)

２）竹内繁樹：「線形工学素子を用いた量子計算-その仕組みと最新状況-」、オプトロニクス、オプトロニクス社、26(12)：218-224 (2007)

3）　竹内繁樹：「単一光子を自在に操る－量子情報、量子計測への応用－」、応用物理、社)応用物理学会、77(2)：129-135(2008)

4.4　著書

１）竹内繁樹(監訳：西野哲朗、井元信之)：「第５章　量子計算の実現に向けた最先端の実験（The Physics of Quantum Information:Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation)」、量子情報の物理～量子暗号、量子テレポーテーション、量子計算～、共立出版、D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger 編：165-232(2007)

２）竹内繁樹：「第３章 光子どうしの相関を操る」、光と物理学、京都大学学術出版会、嶺重慎、高橋義朗、田中耕一郎 編：45-62 (2007)

4.6　特許

１）長谷川俊夫、西岡毅、安部淳一、竹内繁樹：特願2007-158655号、量子暗号送信装置及び量子暗号システム及び量子暗号送信方法及び量子暗号送受信、2007年6月15日

4.7　講演

ｉ）学会

１）T. Nagata, R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Analysis of errors in an optical Controlled-NOT gate with a high-precision testing bed", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-IQEC), The ICM Center of the New Munich Trade Fair Centre, Germany (2007-06)

２）A. Soujaeff, S. Takeuchi, K. Sasaki, T. Nishioka, T. Tsurumaru, T. Hasegawa and M. Matsui : "Secure quantum key distribution over 40km of fiber with a pulsed heralded single photon source", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-IQEC), The ICM Center of the New Munich Trade Fair Centre, Germany (2007-06)

３）S. Takeuchi : "Optical phase measurement using quantum entanglement", Topology and Singularity in Optical Physics, Hokkaido University (2007-07)

４）H. Fujiwara, T. Chiba, S. Tamura, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Analysis of single-molecule emission dynamics using photon interarrival time recording", SPIE Optics & Photonics 2007, SanDiego convention center, USA (2007-08)

５）S. Takeuchi : "Small scale quantum circuits using linear optics", SPIE Optics & Photonics 2007, SanDiego convention center, USA (2007-08)

６）高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司、高橋雅英：「ファイバー結合微小球共振器における自然放出結合係数の制御」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

７）川瀬大輔、竹内繁樹、宮本洋子、笹木敬司、武田光夫：「軌道角運動量重ね合わせ状態検出における余分な方位角成分の影響」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

８）永田智久、岡本亮、ホフマン F. ホルガ、竹内繁樹、笹木敬司：「高精度評価系による、光制御ノットゲートのエラー解析」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

９）岡本亮、オブライエン ジェレミィ、ホフマン F. ホルガ、永田智久、竹内繁樹、笹木敬司：「非局所量子フィルタの検証実験」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

10) 千葉 孝志、藤原英樹、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司：「ポリマーフィルム中単一分子の三重項状態寿命の時間応答解析」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

11) 高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司、高橋雅英：「テーパーファイバー結合微小球における自然放出結合係数の制御」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

12) 岡本亮、永田智久、オブライエン ジェレミィ、竹内繁樹、笹木敬司：「4光子干渉による古典限界を超えた位相測定」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

13) 笹木敬司、藤原英樹、高島秀聡、竹内繁樹：「テーパファイバ結合微小球共振器における分子発光プロセス」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

14) 竹内繁樹：「光量子技術のユメ」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

15) 竹内繁樹：「光量子技術のユメ」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

16) 永田智久、岡本亮、ホフマン F. ホルガ、竹内繁樹、笹木敬司：「高精度評価系による、光制御ノットゲートのエラー解析 II」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学大学本部キャンパス (2008-03)

17) 浅井健志、小西秀典、高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司:「テーパファイバ結合微小球共振器の共鳴モードにおける光位相シフト」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学大学本部キャンパス (2008-03)

18) 谷田真人、岡本亮、永田智久、竹内繁樹、笹木敬司：「独立した伝令付き単一光子源による Hong-Ou-Mandel ディップ」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学大学本部キャンパス (2008-03)

19) 高島秀聡、浅井健志、上田 哲也、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司:「低温での微小球共振器とテーパーファイバーとのカップリング」、2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学理工学部 (2008-03)

20) 竹内繁樹：「量子情報技術のための光源」、シンポジウム「半導体の新しい光機能の探索」、2008年春季第56回応用物理学関係連合講演会、日本大学理工学部 (2008-3)

21) Y. Tsujimi, H. Uwe, H. Mianmi: "Broad Doublet and Plasmon Peak in Perovskite-type Oxides", The 11th European Meeting on Ferroelectricity, Bled, Slovenia (2007/09)

22) 辻見裕史、植寛素：「ペロフスカイト系酸化物におけるブロードダブレットとプラズモン」、日本物理学会2007年春期大会鹿児島大学 (2007-03)

23) 辻見裕史、植寛素、南英俊：「ペロフスカイト系酸化物におけるブロードダブレットとプラズモンⅡ」、日本物理学会第62回年次大会北海道大学 (2007-09)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）岡本亮、永田智久、オブライエン ジェレミィ、笹木敬司、竹内繁樹：「4光子干渉による古典限界を超えた位相測定」、ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム、東京大学駒場Ⅰキャンパス (2007-10)

2）浅井健志、小西秀典、高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司:「テーパファイバ結合微小球共振器の共鳴モードにおける光位相シフト」、第17回量子情報技術研究会(QIT17)、山陽新聞社さん太ホール (2007-11)

3）竹内繁樹：「単一光子を自在に操る－量子通信、量子計測への応用」、フォトニクスイノベーション・シンポジウム、京都大学桂キャンパス (2007-11)

4）竹内繁樹：「ナノ光ファイバに光子を閉じこめる」、JST さきがけ研究21「場と反応」懇話会2007、鹿児島県霧島市 (2007-12)

5）竹内繁樹：「複数光子を用いた量子回路の実現に向けて」、第3回量子情報ワークショップ、リゾーピア熱海 (2007-12)

6）岡本亮：「非局所量子フィルタの検証実験」、量子エレクトロニクス研究会公開講演会「量子が支配する世界：光と原子の物理学」、明治大学リバティホール (2007-12)

7）竹内繁樹：「光子の不思議と量子コンピュータ」、量子エレクトロニクス研究会公開講演会「量子が支配する世界：光と原子の物理学」、明治大学リバティホール (2007-12)

8）竹内繁樹：「光子の不思議と量子情報通信処理」、平成19年度、北海道高等学校教育研究会、札幌南高校 (2007-1)

9）T. Nagata, R. Okamoto, J. O'Brien, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Four Photon NOON State Interferometer", 2008 International Symposium on Global COE Program of Center for Next-Generation Information Technology based on Knowledge Discovery and Knowledge Federation, International Conference Hall, Hokkaido University (2008-01)

10) R. Okamoto, T. Nagata, J. O'Brien, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Control of spontaneous emission coupling factor in tapered-fiber-coupled microspheres", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Creative Research Initiative "Sousei",Hokkaido University (2008-01)

11) H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi : "Control of spontaneous emission coupling factor in tapered-fiber-coupled microspheres", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Creative Re-

search Initiative "Sousei",Hokkaido University (2008-01)

iii）コロキウム・セミナー等・その他

1）竹内繁樹：「標準量子限界と位相超感度」、第４回原子・分子・光科学(AMO)討論会、電気通信大学 (2007-06)

4.8　シンポジウムの開催

1）竹内繁樹：「光量子技術のユメ」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

4.9　共同研究

a．海外機関との共同研究

1）英国ブリストル大学 (Prof. Jeremy O'Brien)

2）独国フンボルト大学 (Prof. Oliver Benson)

3）米国デューク大学 (Prof. Jungsang Kim)

b．所内共同研究

1）光システム計測研究分野（笹木敬司教授、藤原英樹助教）と密接に共同研究を実施した

c．民間等との共同研究

1）竹内繁樹（三菱電機株式会社）:「量子暗号通信技術の盤技術開発とシステム化」、2007年度、4000千円、光ファイバー通信を利用した量子暗号通信システムを開発し、通信の実証実験を行う。また、通信波長帯での高効率の検出器の検討及び作成を行い、長距離通信系への適用を検討する。

d．受託研究

1）竹内繁樹、ホフマン F. ホルガ、ソージャエフ アレクサンドレ、岡本亮（科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」）:「多光子量子演算ゲートの研究」、2003～2008年度、５光子以上のゲート実現と量子回路、テレポーテーション的リピーター、制御 NOT の新提案及び実現、単光子状態発生及びフォトンカウンティング技術発展、マルチパーティコンピューテーションへ多光子及びフォトンカウンティング技術

2）竹内繁樹、笹木敬司、藤原英樹、ホフマン F ホルガ（戦略的情報通信研究開発制度（SCOPE）特定領域重点型研究開発（情報通信新技術・デバイス技術））:「光子間の高効率固体量子位相ゲート素子の実現に関する研究」、2006～2007年度、光子間の高効率固体量子位相ゲート素子の実現に関する研究（課題名）

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金

1）竹内繁樹、若手研究 A、空中フォトニック結晶ファイバを用いた、光子の量子位相ゲートに関する研究、2005～2007年度

2）竹内繁樹、萌芽研究、パラメトリック蛍光対を用いた、2光子干渉における光子のアンチバンチングの実現、2006～2007年度

3）辻見裕史、基盤研究 C 一般、量子常誘電体における動的スケーリング構造とナノスケール強誘電体領域 (2006～2007年度)

b．科学技術振興調整費

1）竹内繁樹：平成18年度科学技術振興調整費先端融合領域イノベーション創出拠点「ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点」研究分担者

e．ＣＯＥ関係

1）竹内繁樹：北海道大学21世紀 COE プログラム「トポロジー理工学の創成」事業推進担当者

f．その他

1）竹内繁樹、ホフマン F. ホルガ、ソージャエフ アレクサンドレ、岡本亮（科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」）:「多光子量子演算ゲートの研究」、2003～2008年度、５光子以上のゲート実現と量子回路、テレポーテーション的リピーター、制御 NOT の新提案及び実現、単光子状態発生及びフォトンカウンティング技術発展、マルチパーティコンピューテーションへ多光子及びフォトンカウンティング技術

4.11　受賞

1）S. Takeuchi, K. Sasaki, J. O'Brien, R. Okamoto and T. Nagata : 第６回 SCIENTIFIC AMERICAN50 "Quantum metrology に関する研究"（Scientific American 誌）2007年12月

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）竹内繁樹：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7月11日～現在）

2）竹内繁樹：独 情報通信研究機構 高度通信・放送研究開発委託研究評価委員会 専門委員（2004年4月1日～2010年3月31日）

3）辻見裕史：基盤研究等審査員（2006年12月1日～2008年11月30日）

b．国内外の学会の役職

1）竹内繁樹：電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年11月1日～現在）

c．併任・兼業

1）竹内繁樹:科学技術振興機構 領域アドバイザー（2003年7月24日～現在）

2）竹内繁樹：東京大学　ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構　委嘱教授　（2007年4月1日～現在）

3）竹内繁樹：大阪大学産業科学研究所　招聘教授（2007年10月1日～現在）

d．その他

1）竹内繁樹：Nonlinear Optics, Quantum Optics 編集委員 (2003年4月1日～現在)

e．新聞・テレビ等の報道

・新聞

1）竹内繁樹：読売新聞 2007年5月4日「「量子もつれ」応用 超精密の計測」

2）竹内繁樹:日刊工業新聞 2007年5月5日「光位相測定 限界値突破に成功」

3）竹内繁樹：日経産業新聞 2007年5月6日「限界値超え精密に/特別な光で距離など測定」

4）竹内繁樹：科学新聞 2007年5月18日「従来の限界超える光位相測定に成功 量子もつれ合い状態の４個の光子用いる」

5）竹内繁樹：朝日新聞 2007年5月25日「光子で距離・密度を測定」

6）竹内繁樹、笹木敬司:北海道新聞 2007年10月30日「光技術の北大・ナノテクの阪大 次世代半導体開発で連携」

7）竹内繁樹、笹木敬司：日経産業新聞 2007年10月30日「北大の研究チーム誘致 阪大産研次世代素子を共同開発」

8）竹内繁樹、笹木敬司：朝日新聞 2007年10月30日「阪大の中に北大研究室 スペース借り活動「ヨコの連携必要」

9）竹内繁樹、笹木敬司：毎日新聞 2007年10月30日「北大と阪大連携研究へ-協力協定に調印」

10）竹内繁樹、笹木敬司:日刊工業新聞 2007年10月30日「ポストシリコン研究技術連携を本格化-阪大ラボで北大が活動 新デバイステーマに5年間」

f．外国人研究者の招聘

1）Jeremy L. O'Brien、UK、(2007年4月19日～2007年4月29日)

2）Jungsang Kim、USA、(2007年7月01日～2007年7月3日)

3）Jeremy L. O'Brien、UK、(2007年7月23日～2007年7月27日)

4）Holger F. Hofmann、JAPAN、(2007年7月24日～2007年7月26日)

5）Oliver Benson、Germany、(2007年10月28日～2007年10月29日)

6）Holger F. Hoffmann、JAPAN、(2008年1月7日～2008年1月8日)

g．北大での担当授業科目

1）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別研究第一、竹内繁樹、2007年4月1日～2008年3月31日

2）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別研究第二、竹内繁樹、2007年4月1日～2008年3月31日

3）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別演習、竹内繁樹、2007年4月1日～2008年3月31日

4）情報科学研究科、光情報システム学特論、竹内繁樹、2007年10月1日～2008年3月31日

5）工学部、電磁気学、竹内繁樹、2007年10月1日～2008年3月31日

h．北大以外での非常勤講師

1）竹内繁樹、光子操作による新しい光を用いた計測科学、物性科学、光量子情報に関する研究、2007年10月1日～2008年3月31日

i．ポスドク・客員研究員

・ポスドク（２名）

1）Soujaeff Alexandre（科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域・研究員）

2）岡本亮（科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域・研究員）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（1名）

浜端洋右（情報科学研究科　光システム計測研究分野）

・博士後期課程（1名）

川辺喜雄（情報科学研究科　光システム計測研究分野）

・修士論文

浜端洋右：ランダム構造内導波路を用いた局在モード制御に関する研究（情報科学研究科　光システム計測研究分野）

有機電子材料研究分野

教　授　中村貴義（東大院、理博、1997.4～）
准教授　芥川智行（京大院、理博、2003.5～）
助　教　野呂真一郎（京大院、工博、2004.7～）
博士研究員　綱島　亮(2007.4～2008.3)
院　生　遠藤大五郎(DC2)、野田祐樹(M2)、遠藤格(M2)、越中裕之 (M2)、青沼昌樹 (M1)、工藤史人 (M1)

1．研究目標

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の実現を目指した、分子エレクトロニクスに関する研究が活発に行われている。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するバイオコンピューティングの研究も平行して進行している。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、集積型分子エレクトロニクスを目指している。

2．研究成果

(a)　超分子ローター構造を含む分子磁性体に関する研究

超分子化学の手法を用いる事で、磁性や伝導性を有する機能性分子集合体の構造制御や物性の複合化が可能である。各種のカチオンとクラウンエーテルが非共有結合性の分子間相互作用から形成する超分子集合体カチオン構造に着目し、生体分子系で見られる分子モーター構造を模倣した新規な分子ローター構造の設計とその分子磁性体への導入を試みた。

既に、Cs_2([18]crown-6)$_3$[Ni(dmit)$_2$]$_2$ や(Anilinium)([18]crown-6)[Ni(dmit)$_2$] 結晶における、[18]crown-6分子の回転運動やAnilinium カチオンの180° フリップーフロップ運動の存在を報告した。最密充填構造を取る結晶中において、分子ローターの回転対称性や周波数などの回転ポテンシャルの設計は、固相分子モーターの回転運動の制御の観点で重要である。パイ平面を有する Anilinium カチオンでは、分子間相互作用の対称性から、180° フリップーフロップ運動が生じる。そこで、古くから柔粘性結晶を形成する事が知られ且つ分子形状が等方的なアダマンタン基に着目した新規な分子ローター構造の構築を試みた。拡散法を用いた結晶化により(Adamantylammonium)([18]crown-6)[Ni(dmit)$_2$] 錯体（1）を得た。結晶中で、Adamantylammonium の-NH_3^+基は、[18]crown-6分子のキャビティに包接される事で超分子カチオン構造を形成していた（図１）。また、結晶中でのパッキング様式は、超分子カチオンと磁性を担う [Ni(dmit)$_2$] 層が *b* 軸方向に交互に配列した層状構造であった（図２）。固体 ^{1}H-NMR の線幅の温度変化から、結晶中で Adamantylammonium 基と[18]crown-6分子が、それぞれ独立に回転運動を行っている事が明らかとなった。異なる回転周波数を有する二重分子ローター構造が構築された。[18]crown-6分子の回転運動が200K 付近で凍結するのに対して、等方的な分子形状を有する Adamantyl 基は100K 以下の低温領域においても熱的な回転運動を行っていた。Anilinium カチオンと比べて回転障壁エネルギーの大幅な低下を実現した。

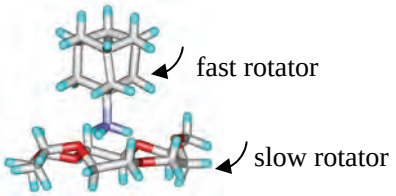


図１．(Adamantylammonium)([18]crown-6)超分子カチオンから実現した二重分子ローター構造。

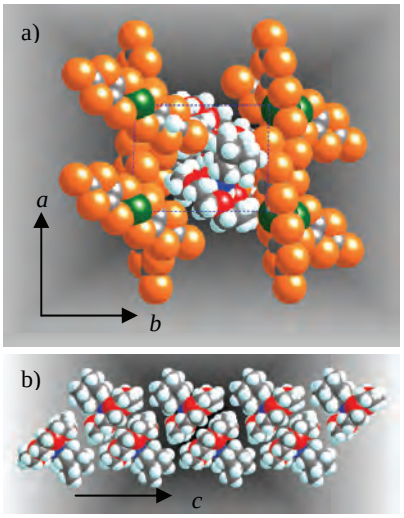


図２．錯体１の結晶構造。a) *c* 軸方向から見たユニットセル。b) (Adamantylammonium)([18]crown-6)カチオンの *ac* 面内の配列様式。

結晶1の磁気的な性質は、S = 1/2スピンを有する[Ni(dmit)$_2$]分子の配列様式に依存して変化する。結晶中で、孤立した[Ni(dmit)$_2$]（A アニオン）と一次元鎖を形成する[Ni(dmit)$_2$]（B アニオン）が共存した複雑な分子配列が観測された。その結果、A アニオンに由来する Curie-Weiss 則に従う磁性と B アニオン由来の一次元ハイゼンベルグ反強磁性鎖モデルに従う磁気挙動が共存していた（図３）。現在、分子ローター構造への双極子構造やキラルなユニットの導入などにより、外場により制御が可能で、且つ非対称な回転ポテンシャルを実現する為の分子設計を行っており、一方向回転が可能な固体分子モーターの構築を目指した研究を展開している。

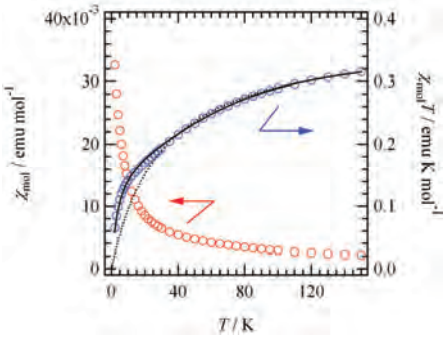


図３．錯体１の磁化率（χ_{mol}）の温度依存性。χ_{mol} T vs. T プロット（右スケール）の実線は、Curie-Weiss 則と一次元ハイゼンベルグ反強磁性鎖モデルによるフィテッィングの結果。

(b)　Cs^+[18]crown-6分子ローターを導入した二電子還元型ケギン塩の作製

パイ平面型 [Ni(dmit)$_2$] 塩は、導電性や磁性機能の設計が可能であり、固相分子ローター構造と磁性や導電性との機能の複合化が可能である。本研究では、等方的な分子形状を有するポリオキソモリブデート（POM）クラスターに着目し、超分子ローター構造とのハイブリッド化に関する検討を行った。POM クラスターは、構造の多様性に加えて酸触媒機能や多段階の酸化還元プロセスの存在から、電子活性な複合材料の観点から注目を集めている。中でも、直径～1 nm の $[PMo_{12}O_{40}]^{3-}$ クラスターは、古くからケギン構造として知られ、一電子還元により S = 1/2スピンを有する $[PMo_{12}O_{40}]^{4-}$ へと変化し、分子磁性材料への展開が可能である。また、その二電子還元体である $[PMo_{12}O_{40}]^{5-}$ は、クラスター内に二つの S= 1/2スピンが閉じ込められ、スピン対形成のダイナミクスの観点から興味深い研究対象である。そこで、クラスター内のスピンダイナミクスと分子ローター構造をカップリングさせた新規な分子磁性材料への展開を期待して本研究を試みた。

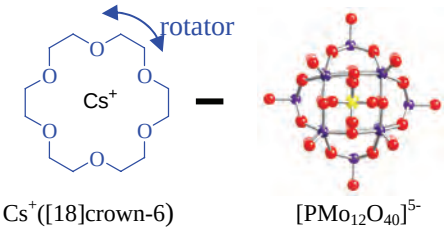


図４．Cs^+([18]crown-6)分子ローター構造と $[PMo_{12}O_{40}]$ クラスターとのハイブリッド化。

拡散法により、$(Cs^+)_3(H^+)_2$([18]crown-6)$_3[PMo_{12}O_{40}]^{5-}$ 塩（**2**）を作製し、結晶構造および固体 ^{1}H-NMR の温度変化から、結晶中の [18]crown-6分子のダイナミクスについて検討を行った。結晶 **2** の電子スペクトルおよび磁化率から、クラスターの電子状態は、二電子還元体である $[PMo_{12}O_{40}]^{5-}$ である事が確認できた。結晶中で、Cs^+([18]crown-6) から成る超分子構造の形成が見られ、さらに二個の Cs^+([18]crown-6) 構造が $[PMo_{12}O_{40}]^{5-}$ の上下から Cs^+ ～ O 相互作用によりサンドイッチされた集積構造を形成していた（図５）。$(Cs^+)_2$([18]crown-6)$_2[PMo_{12}O_{40}]$ ユニットは、*ab* 面内で互いに垂直に配列し、[18]crown-6分子が噛み合うように配列していた。固体 ^{1}H-NMR の温度変化から、[18]crown-6分子のダイナミクスを評価したところ、室温で数10kHz の周波数で分子回転を行っている事が確認された。現在、化学的な修飾に自由度がある (Anilinium)(crown ethers) 型の超分子ローター構造を POM クラスターに導入した結晶の作製を検討している。

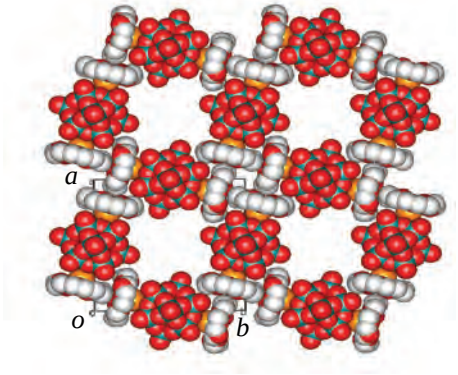


図５．塩２の結晶構造。*c* 軸方向から投影したユニットセル *ab* 面内に形成した $(Cs^+)_2$([18]crown-6)$_2[PMo_{12}O_{40}]$ 二次元配列。隙間には、disorder した[18]crown-6分子が存在するが、図では省略している。

(c)　分子ナノワイヤー金ナノ粒子複合構造を用いた量子伝導デバイスの作製

低次元電子構造に由来した多彩な電子状態が実現可能な分子性導体は、電子材料への展開の観点から興味深い研究対象である。分子性導体を基盤とした薄膜構造やナノ構造の作製は、次世代ナノデバイス構築のキーテクノロジーの一つである。既に、ウエット法の適用が可能な両親媒性マクロサイクリック TTF 分子（**3**）の設計から、分子集合体ナノワイヤやナノドット構造などの低次元ナノ構造の作製について報告している（図６）。特に、(**3**)$(F_4$-TCNQ$)_2$電荷移動錯体は、マイカ基板上で配向性を有した半導体ナノワイヤを形成する。分子間力から形成する分子集合体ナノ構造は、機械的な強度と量子伝導などのサイズ効果の発現の観点で、無機材料と比較してデバイス化に不利である。一方、金ナノ粒子などの無機ナノ構造は、サイズ効果による単一電子トンネリングなどの興味深い伝導物性を、比較的高い温度領域で発現する事が可能である。そこで、分子ナノワイヤと金ナノ粒子を複合化させ、量子伝導性の発現を目指した集積ナノ構造の作製を行った。

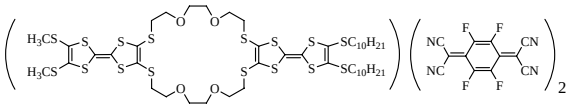


図６．分子集合体ナノワイヤを形成する(3)$(F_4$-TCNQ$)_2$ 電荷移動錯体の分子構造。

ナノワイヤとサイズが適合する直径13nm の金ナノ粒子を用いて、Langmuir-Blodgett（LB）法を用いた薄膜化を試みた。下層水に金コロイド溶液を導入し、LB 法により基板上に(**3**)$(F_4$-TCNQ$)_2$錯体を累積した。図７に、下層水中の金

コロイド濃度（c_{Au}）を変化させた時に得られるナノワイヤー金ナノ粒子複合構造を示す。基板上における金ナノ粒子の占有率は、c_{Au}に依存して変化する。$c_{Au} < 1\times10^{-5}$ M では、金ナノ粒子はナノワイヤの交差点上に孤立して存在し、この様な LB 膜では金ナノ粒子間の伝導性が期待できない。一方、$c_{Au} > 5\times10^{-5}$ M では、金ナノ粒子同士が互いに接合し基板表面の大部分を覆っていた。

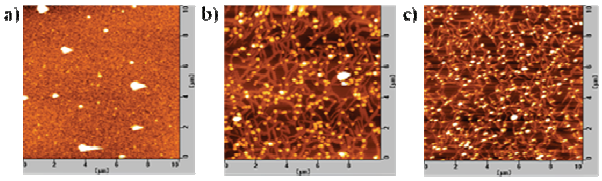


図７．分子ナノワイヤー金ナノ粒子複合構造の表面構造。a) $c_{Au} = 1\times10^{-3}$, b) 1×10^{-4}, c) 1×10^{-4} M を含む下層水から、マイカ基板上に一層累積した LB 膜。金ナノ粒子は、明るいスポットとして観測される。全ての AFM 画像は、10 x 10 μm^{2}領域で測定した。

複合ナノ構造の電子状態は、LB 膜の電子スペクトルから評価した。$c_{Au} < 1\times10^{-5}$ M で作製した LB 膜では、電荷移動錯体に起因する電子遷移が観測され、一方、$c_{Au} > 1\times10^{-5}$ M で作製した LB 膜では、金ナノ粒子の二次元的な凝集に由来する吸収が新たに出現した。LB 膜の電気伝導性は、金ナノ粒子の占有面積に依存し、その占有面積が二次元パーコレーションの閾値を越えると、金ナノ粒子間の量子伝導挙動が出現する（図８）。特に、$c_{Au} = 1\times10^{-3}$ M で作製した LB 膜では、150K 以下の温度領域において、活性化エネルギーが小さな伝導領域が出現する（図８）。室温付近の伝導性は、半導体ナノワイヤの伝導挙動と良く一致する事から、低温領域の伝導は金ナノ粒子間の伝導と考えられる。6K における *I*−*V*特性では、しきい電圧を有する非線形的な挙動が観測され、これは LB 膜中における単一電子トンネル素子のランダムな多重接合に起因するクーロンブロッケード現象と考えられた。その結果、低温におけるナノ粒子間のトンネル電流は、協奏的なランダムなトンネル接合に従って変化した。

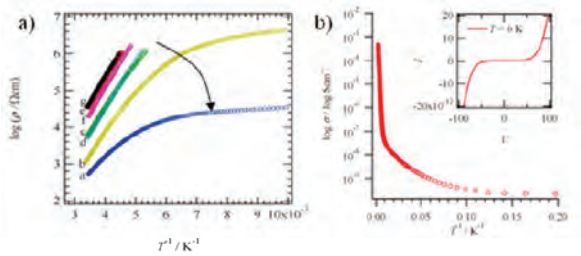


図８．ナノワイヤー金ナノ粒子集積化構造の伝導物性。a) c_{Au} に対する電気抵抗の温度依存性。b) 薄膜 a の電気伝導度の温度依存性と *I*− *V*特性。

(e)　リング状巨大 POM クラスターの安定化および薄膜化に関する研究

直径 4 nm にも達する巨大リング状 POM クラスターは、構造が明確な巨大分子として注目を集めている。その分子構造は、[MoO_6]ユニットの点または辺共有により縮合した混合原子価錯体である。$Na^+_{14}[Mo_{154}O_{462}H^+_{14}(H_2O)_{70}]400H_2O$ 単結晶の結晶構造が既に明らかとなっているが、水溶液中のクラスター分子は徐々に分解し、化学的な安定性に問題がある。そこで、巨大リング構造を化学的に安定化し且つ薄膜化を可能とする事で、巨大 POM クラスターの次世代ナノ材料としての展開について検討した。

リング構造の安定化は、両親媒性分子である dimethyldioctadecylammonium（$DODA^+$）カチオンとの複合化により試みた（図９）。結果、両親媒性の $(DODA^+)_{20}[Mo_{154}O_{462}H^+_8(H_2O)_{90}]$（**4**)は、クロロフォルムなどの有機溶剤中で高い安定性を示し、巨大リング状クラスターの分解は観測されなかった。

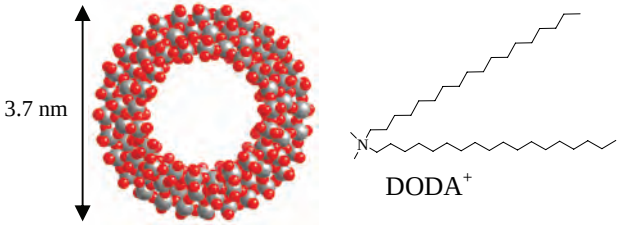


図９．巨大リング状 POM クラスターと $DODA^+$カチオンの分子構造。

巨大リング状{Mo_{154}}クラスターは、$DODA^+$カチオンにより表面を保護される事で、高い化学的な安定性を得たと考えられる。この様な両親媒性 POM クラスターの分子集合状態の評価を試みた。小角Ｘ線散乱、STM 及び AFM を用いた評価から、溶液中では直径90nm 程度のミセル状の分子集合体構造の形成が確認された（図10a)。一方、酸性水面上で安定な単分子膜構造の形成が確認できたので、基板上に Langmuir-Blodgett 法を用いて **4** の累積を試みた。AFM による表面構造の観測から、均一な二次元薄膜構造の形成が確認された（図10b)。また、XRD、AFM 及び偏光スペクトルを用いた LB 膜内の分子配向に関する検討から、{Mo_{154}}巨大クラスター分子は、基板上でリング面を平行に配列している事が確認された。両親媒性を付加した巨大 POM クラスターは、高い化学的安定性を示すと同時に多彩な分子集合体構造を示す事が明らかとなった。現在、より精密なクラスター配列の制御を試みており、クラスターの混合原子価状態を利用した電子ー磁気デバイスの構築に関する検討を行っている。

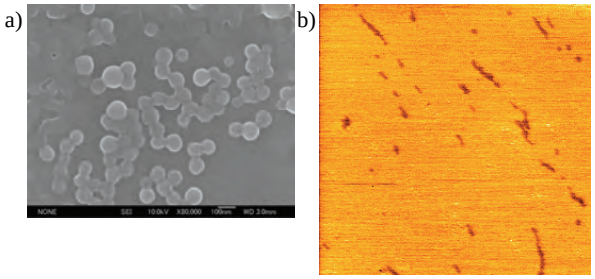


図10．$(DODA^+)_{20}[Mo_{154}O_{462}H^+_8(H_2O)_{90}]$ が形成する分子集合体構造。a) 有機溶媒中で形成するミセル状集合体。b) 固体基板上で形成する均一な２次元薄膜構造。

(f)　金属錯体薄膜トランジスタに関する研究

近年、有機物を半導体層として用いた薄膜トランジスタ(Thin-Film Transistor, TFT)デバイスの開発が精力的に行われている。有機半導体は、①分子構造の多様性に富んでいる、②フレキシブル、③大面積化が可能、④作製プロセスのローコスト化・簡略化、といった無機半導体には無い特徴を有しているため、無機半導体に取って代わる次世代の半導体材料として注目されている。本研究では、これまで報告例がほとんど無い有機－無機複合体である金属錯体を半導体層として用いた金属錯体 TFT (Metal-Organic TFT, MOTFT) の開発を試みた。実験に用いた金属錯体は、酸化還元両性配位子である *o*-ジイミノベンゾセミキノネート配位子が配位した平面型ニッケル錯体である (図11)。この錯体は狭い HOMO-LUMO ギャップ (~ 1eV) を有しているため、電子及びホールキャリアの注入が容易に行える。すなわち p 型及び n 型半導体特性を兼ね備えたアンバイポーラー半導体材料として期待できる。

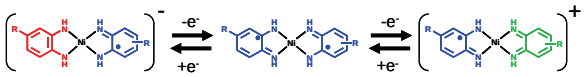


図11.　平面型ニッケル錯体の分子構造と多様な電子状態変化。

まず、R = H のニッケル錯体(**5**) に関して検討を行った。**5** の薄膜は真空蒸着法によって PMMA/SiO_2/n-Si 基板上に作製した。薄膜内において、**5** は分子の長軸方向を基板の法線に対して約25度傾けて配列した 1 軸配向構造を形成し、集積構造はペンタセンと類似のヘリングボーン型であった。グレインサイズは60～80nm であった。Ca 金属をソース・ドレイン電極として半導体薄膜上に作製し、得られたデバイス(図12a)の嫌気下における TFT 特性について評価を行った。その結果、作製したデバイスはホール移動度4.3×10^{-3} cm^2/Vs、電子移動度1.6×10^{-2} cm^2/Vs を示した。一方、R = CH_3基を有するニッケル錯体誘導体(**6**) に関しても同様の検討を行ったところ、**5** と同構造のデバイスが、ホール移動度1.7×10^{-2} cm^2/Vs、電子移動度1.3×10^{-3} cm^2/Vs を示した。これまでバランスの取れた高いホール・電子移動度を示す半導体材料の例はほとんど無く、本研究で用いたニッケル錯体がアンバイポーラー半導体材料として非常に高いポテンシャルを持つことが明らかとなった。

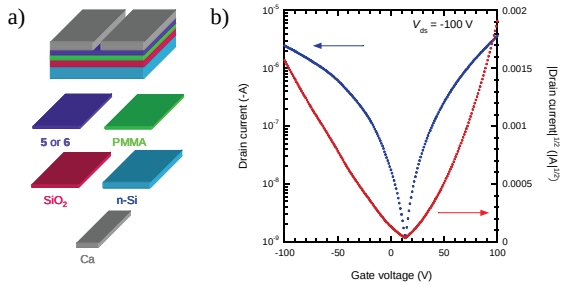


図12.　a) TFT デバイス構造。b) **5** を用いたデバイスの伝達特性。

(g)　柔軟性金属錯体を用いた新規多孔性材料の開発

金属イオンと有機架橋配位子を自己集積させることによって得られる高分子状の金属錯体（配位高分子）は、構造の多様性･設計性･柔軟性に富んだ高結晶性の物質である。また、無機部品の金属イオンと有機部品の配位子が共存しているため、それぞれの特性を兼ね備えることが可能となる。そのため、様々な機能性物質（磁性、誘電性、光学特性、多孔性）の研究対象として注目されてきた。特に、均一なマイクロ孔を有する多孔性配位高分子はここ20年の間に急速に発展した分野であり、ゼオライト・活性炭に続く第 3 の多孔性材料として精力的に研究されている。本研究では、配位高分子の柔軟性に着目し、従来の多孔性材料では実現困難な機能を有する多孔性配位高分子の開発を試みた。

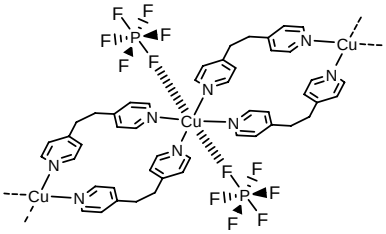


図13.　$[Cu(PF_6)_2(bpetha)_2]_n$ (**7**) の 1 次元 2 重鎖構造。

$[Cu(PF_6)_2(bpetha)_2]_n$ (bpetha = 1,2-bis(4-pyridyl)ethane)の組成で表される配位高分子(**7**)は、有機架橋配位子 bpetha が Cu イオンを架橋した 1 次元 2 重鎖構造を有している(図13)。PF_6アニオンは銅イオンのアキシャルサイトに弱く配位している。**7** を様々なルイス塩基性ゲスト分子の飽和蒸気にさらすと、ある特定のゲストのみを高選択的に取り込むことが明らかとなった。エタノール・テトラヒドロフラン・ジエチルエーテル（ゲスト A）を用いた場合、**7** は全くゲスト分子取り込み能を示さなかったが、アセトニトリル・2-ブタノン・ジメチルホルムアミド（ゲスト B）などのゲスト分子は Cu イオンのアキシャル位の結合開裂・再形成

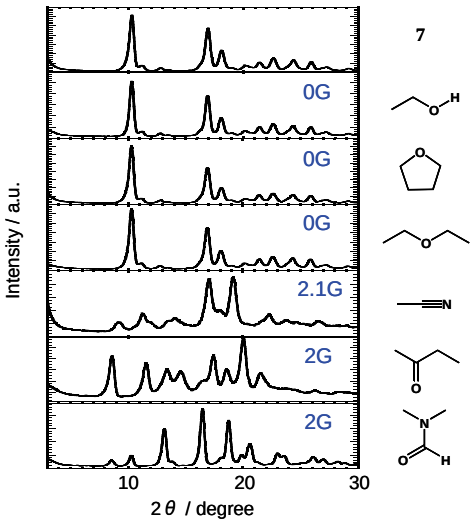


図14.　**7** 及び **7** を各種有機ゲスト蒸気にさらした後の XRD パターン。青色の数字は、熱重量分析から求めたゲスト分子取り込み量。

を伴いながら7の骨格中に取り込まれた（図14）。この様なゲスト選択性は、ゲストＡが配位原子周りが立体的に込み合っている Cu イオンのアキシャル位に近接できないために発現している。この特性を利用することにより、ゼオライトのような分子ふるい効果を示す分離材料では分離困難な混合物の分離（例えば、エタノール／2-ブタノン混合物からサイズの大きな2-ブタノンのみの分離）が可能となる（逆分子ふるい効果）。

３．今後の研究の展望

我々は、機能性の分子集合体（分子性導体・磁性体）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いる。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で、これらの研究は特徴的であると言える。しかし、これらの二つのアプローチの区別は、本質的でないと考えられ、むしろユニット間のフロンティア軌道の重なりの設計から、ナノスケールでの機能性の発現を理解するべきである。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。これらの研究を進捗することで、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　学術論文等

１）R. Tsunashima, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, T. Karasawa, H. Kawakami, K. Toma, One-dimensional array of Au nanoparticles fixed on nanofibers of organogelators by the Langmuir-Blodgett method, *J. Phys. Chem. C.* **111**, 901-907 (2007).

２）T. Akutagawa, D. Endo, S. Noro, L. Cronin, T. Nakamura, Organic - Inorganic Hybrid Molecular-Assemblies of Phenylenediamines - Crown ethers - $[PMo_{12}O_{40}]^{4-}$ Salts, *Coord. Chem. Rev.* **251**, 2547-2561 (2007).

３）S. Nishihara, T. Akutagawa, D. Sato, S. Takeda, S. Noro, T. Nakamura, Multirotations of (Anilinium^{+})([18]crown-6) Supramolecular Cation Structure in Magnetic $[Ni(dmit)_2]^{-}$ Salt; *Chem, Asian J.* **2**, 1083-1090 (2007).

４）S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, Formation of Strong OH_2-O_2C Hydrogen Bonds in a Trinuclear Core-Based Nickel 1,3,5-Benzenetricarboxylate Coordination Polymer, *Crystal Growth & Design* **7**, 1205-1208 (2007).

５）D. Fu, Y.Song, G. Wang, Q. Ye, R. Xiong, T. Akutagawa, T. Nakamura, P. W. H. Chan, S. D. Huang, Dielectric Anisotropy of a Homochiral Trinuclear Nickel(II) Complex, *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 5346-5347 (2007).

６）X. M. Ren, S. Nishihara, T. Akutagawa, S. Noro, T. Nakamura, W. Fujita, K. Awaga: Pressure effect on spin-Peierls-like transition in quasi-1D spin systems [RBzPy][Ni(mnt)$_2$]; *Chem. Phys. Lett.* **439**, 318-322 (2007).

７）Q. Ye, H. Zhao, Z. Qu, D. Fu, R. Xiong, B. Wang, T. Akutagawa, P. H. Chan, T. Nakamura, “Large Anisotropy and Effect of Deuteration on Permittivity in an Olefin Copper(I) Complex”, *Angew. Chem. Int. Ed.* **46**, 6852-6856 (2007).

８）X. M. Ren, S. Nishihara S, Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, 2D H-bonding molecular magnets based on [Ni(mnt)(2)](-) monoanion: Syntheses, crystal structures and magnetic properties, *POLYHEDRON* **26** (9-11), 1787-1792 (2007).

９）Y. Tatewaki, Y. Noda, T. Akutagawa, R. Tunashima, S. Noro, T. Nakamura, H. Hasegawa, S. Mashiko, J. Becher, Langmuir-Blodgett Films Constructed from a Charge-Transfer Complex and Gold Nanoparticles, *J. Phys. Chem. C.* **111**, 18871-18877 (2007).

10) T. Akutagawa, R. Jin, R. Tunashima, S. Noro, L. Cronin, T. Nakamura, Molecular-Assemblies of Amphiphilic Gigantic $\{Mo_{154}\}$-Ring: (Dimethydioctadecylammonium)$_{20}$ $[Mo_{154}O_{462}H^{+}_{8}(H_2O)_{90}]$, *Langmuir* **24**, 231-238 (2008)

11) T. Akutagawa, D. Endo,F. Kudo, S. Noro, S. Takeda, L. Cronin, T. Nakamura, A Solid State Supramolecular *Rotator* Assembled from a Cs-Crown Ether Polyoxometalate-Hybrid: $(Cs^{+})_3$([18]crown-6)$_3(H^{+})_2[PMo_{12}O_{40}]$. *Crystal Growth & Design*, **8**, 812-816 (2008).

4.6　特許

１）綱島亮、芥川智行、中村貴義、川上宏子、戸澗一孔：フラーレン縮合ゲル化剤：特許出願番号：特開2007-238531 (P2007-238531A)

２）野呂真一郎、芥川智行、中村貴義：二酸化炭素吸着剤: 特許出願番号：特願2008-055757

4.7　講演

ｉ）学会

１）T. Akutagawa, Y. Noda, Y. Tatewaki, T. Nakamura, *Quantum Conduction of Gold Nanoparticles in TTF-based Langmuir-Blodgett Films*, 12th international Conference on organized Molecular Films (LB-12), Krakow, Poland (July 1-5, 2007).

２）R. Tsunashima, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, H. Kawakami, K. Toma, *One-Dimensional Nanostructures of Fullerene Substituted Organogelators Fabricated by Langmuir-Blodgett Method,* 12th international Conference on organized Molecular Films (LB-12), Krakow, Poland

(July 1-5, 2007).

3) T. Akutagawa, R. Jin, L. Cronin, T. Nakamura, *Langmuir-Blodgett Films of Gigantic Mo_{154} Polyoxometalate Clusters,* 12th international Conference on organized Molecular Films (LB-12), Krakow, Poland (July 1-5, 2007).

4) T. Endo, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, *Cast and Langmuir-Blodgett Films of Charge Transfer Complexes between Ethylenedithio-Substituted bis-TTF Macrocycle and TCNQ Derivatives,* 12th international Conference on organized Molecular Films (LB-12), Krakow, Poland (July 1-5, 2007).

5) Y. Noda, Y. Tatewaki, T. Akutagawa, T. Nakamura, H. Hasegawa, S. Mashiko, J. Becher, *Conduction Behavior of Hybrid Structures between Gold Nanoparticles and Charge Transfer Complex of Amphiphilic Bis-TTF Macrocycle,* 12th international Conference on organized Molecular Films (LB-12), Krakow, Poland (July 1-5, 2007).

6) T. Akutagawa, Dielectric Properties Associated with Molecular Motion in [Ni(dmit)$_2$] Salts, The First Asian Conference on Coordination Chemistry, Okazaki, Japan (July 29 - August 2).

7) D. Endo, T. Akutagawa, S. Noro, H. Imai, T. Nakamura, Crystal Structures and Physical Properties of Supramolecules Introduced Polyoxometalate Salts, The First Asian Conference on Coordination Chemistry, Okazaki, Japan (July 29 - August 2).

8) H. Koshinaka, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, Crystal Structures and Magnetic Properties of [Ni(dmit)$_2$] Salts with Supramolecular Cations of Fluoroanilinum - Dibenzo[18]crown-6, The First Asian Conference on Coordination Chemistry, Okazaki, Japan (July 29 - August 2).

9) S. Noro, S. Horike, D. Tanaka, H. Sakamoto, S. Kitagawa, T. Akutagawa, T. Nakamura, Host-guest properties of Cu(II) complexes with flexible axial space, The First Asian Conference on Coordination Chemistry, Okazaki, Japan (July 29 - August 2).

10) T. Akutagawa: Quantum Conduction of Gold Nanoparticles - Molecular Nanowire Hybrid Nanostructures, International Conference of Crystalline Organic Metals, Superconductors, and Ferromagnets, Peniscola, Spain (2007. 10. 24 - 29).

11) D. Endo, T. Akutagawa, S. Noro, H. Imai, T. Nakamura, L. Cronin, T. Ozeki, Crystal Structures and Physical Properties of Spin introduced Gigantic Polyoxomolybdate Ring, International Conference of Crystalline Organic Metals, Superconductors, and Ferromagnets, Peniscola, Spain (2007. 10. 24 - 29)

12) H. Koshinaka, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, Rotor structures based on dibenzo[18]crown-6 supramolecular cations in magnetic [Ni(dmit)$_2$] salts, International Conference of Crystalline Organic Metals, Superconductors, and Ferromagnets, Peniscola, Spain (2007. 10.24-29)

13) T. Nakamura, T. Akutagawa, MOLECULAR ROTATORS IN MAGNETIC AND CONDUCTING CRYSTALS; STRUCTURES AND ELECTRONIC PROPERTIES, Korea-Japan Joint Forum (KJF) 2007, Korea (2007.9.27-29).

14) M. Aonuma, D. Sato, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, Fluoroanilinium Derivative / [18]crown-6 based Supramolecular Cations in [Ni(dmit)2] Salt, Korea-Japan Joint Forum (KJF) 2007, Korea (2007.9.27-29)

15) K. Sakai, T. Akutagawa, T. Nakamura, T. Hasegawa, THIN FILM FABLICATION OF ONE-DIMENSIONAL PLATINUM CHAIN COMPAUND, BIS(4,5-DIALKOXY-1,2-BENZOQUINONE-DIOXIMATO)PLATINUM(II) BY SOLUTION PROCESSING, Korea-Japan Joint Forum (KJF) 2007, Korea (2007.9.27-29)

16) T. Akutagawa, Y. Noda, Y. Tatewaki, T. Nakamura, Collective Tunneling Charge Transport of Gold Nanoparticles in TTF-based Langmuir-Blodgett Films, The 9th China-Japan Joint Symposium on Conduction and Photoconduction Inorganic Solids and Related Phenomena, Beijing China (2007. Oct. 27-29)

17) T. Akutagawa, T. Nakamura, Molecular Rotations in Magnetic and Conducting [Ni(dmit)$_2$] Crystals, The 9th China-Japan Joint Symposium on Conduction and Photoconduction Inorganic Solids and Related Phenomena, Beijing China (2007. Oct. 27-29).

18) S. Noro, T. Takenobu, T. Akutagawa, T. Nakamura, Y. Iwasa, H.-C. Chang, S. Kitagawa, Development of Metal-Organic Thin-Film Transistors, Third International Symposium on Chemistry of Coordination Space -ISCCS 2007-, Awaji, Japan (10th-12th, December 2007).

19) T. Akutagawa, Protonic, Ionic, and Molecular Motions in Organic Solid for Conducting and Ferroelectric Materials, INDIA-JAPAN COOPERATIVE SCIENCE PROGRAMME, Indian Institute of Technology (IIT) Delhi (Delhi, India, 2008. 1. 25)

20) S. Noro, H. Sakamoto, S. Takeda, S. Kitagawa, T. Akutagawa, T. Nakamura, Host-Guest Properties of Cu(II) Coordination Polymers with Flexible Axial Space, Coordination Chemistry Conference 2008, Cancun, Mexico (6th-9th, March 2008).

21) 野田祐樹、帯刀陽子、芥川智行、中村貴義：金ナノ粒子-TTF 誘導体が形成する集合構造における量子伝導挙動：第68回応用物理学会：北海道工業大学 (2007.9.4-8)

22) 野田祐樹、帯刀陽子、芥川智行、中村貴義：TTF 誘導体-金ナノ粒子複合体の構造と量子伝導の相関：第１回分子科学討論会：東北大学 (2007.9.17-20)

23) 越中裕之、野呂真一郎、芥川智行、中村貴義：強誘電応答を示す[Ni(dmit)$_2$]$^-$結晶中の分子ローター構造：第1回分子科学討論会：東北大学（2007.9.17-20）
24) 遠藤大五郎、芥川智行、野呂真一郎、Cronin Leroy、中村貴義：ニトロアニリン誘導体を用いた超分子カチオンと[PMo$_{12}$O$_{40}$]$^{3-}$クラスターから成る錯体の結晶構造：第1回分子科学討論会：東北大学（2007.9.17-20）
25) 綱島亮、野田祐樹、帯刀陽子、野呂真一郎、芥川智行、中村貴義、松本卓也、川合知二：点接触電流イメージング AFM による二鎖型マクロサイクリックビス TTF ナノワイヤの電気伝導評価：第1回分子科学討論会：東北大学（2007.9.17-20）
26) 野呂真一郎、竹延大志、芥川智行、中村貴義、岩佐義宏、張浩徹、北川進：オルトキノン金属錯体を用いたアンバイポーラーTFT デバイスの構築：第1回分子科学討論会：東北大学（2007.9.17-20）
27) 石川学、内藤俊雄、稲辺保、松田真生、田島裕之、芥川智行、中村貴義：次元性 π-d系、ジシアノ鉄フタロシアニン伝導体の圧力による物性変化：第1回分子科学討論会：東北大学（2007.9.17-20）
28) 遠藤格、野呂真一郎、芥川智行、中村貴義：マクロサイクリック bis-TTF 電荷移動錯体の薄膜および結晶状態における電子構造：第1回分子科学討論会：東北大学（2007.9.17-20）
29) 遠藤格、野呂真一郎、芥川智行、中村貴義：Ethylenedithio 型 bis-TTF マクロサイクルと TCNQ 誘導体からなる電荷移動錯体薄膜の電子状態制御：第60回コロイドおよび界面化学討論会：信州大学（2007.9.20-22）
30) 野呂真一郎、坂本裕俊、田中大輔、武田定、北川進、芥川智行、中村貴義：Cu(II)金属錯体を用いた分離材料の開発：第60回コロイドおよび界面化学討論会：信州大学（2007.9.20-22）
31) 芥川智行：伝導性を有する分子性ナノ構造の設計と物性：若手研究者のための有機化学札幌セミナー：北海道大学（2007.10.5）
32) 芥川智行：結晶内における分極反転場の設計と誘電物性：第4回錯体誘電体研究会：北海道大学（2007.10.12）
33) 工藤史人、今井裕之、遠藤大五郎、芥川智行、伊藤光宏、豊田和弘、野呂真一郎、中村貴義： Co^{II}イオンをカウンターカチオンとして含む巨大環状 Mo$_{176}$クラスターの結晶構造と磁性：第57回錯体化学討論会：名古屋工業大学（2007.9.25-27）
34) 青沼昌樹、佐藤大介、野呂真一郎、芥川智行、中村貴義：*o*-, *m*-, *p*-アニリニウム誘導体/クラウンエーテル超分子カチオンを導入した[Ni(dmit)$_2$]導電性結晶の作製：第57回錯体化学討論会：名古屋工業大学（2007.9.25- 27）
35) 野呂真一郎、竹延大志、芥川智行、中村貴義、岩佐義宏、張浩徹、北川進：オルトキノン金属錯体を用いたアンバイポーラー電界効果トランジスターの構築：第57回錯体化学討論会：名古屋工業大学（2007.9.25-27）
36) 越中裕之・佐藤大介・武田定・野呂真一郎・芥川智行・中村貴義：*m*-aminoanilinium/dibenzo [18]crown-6を含む[Ni(dmit)$_2$]結晶の強誘電分子ローター構造：日本化学会北海道支部冬季研究発表会：北海道大学（2008.1.29-30）
37) 芥川智行・越中裕之・野呂真一郎・武田定・高橋幸裕・熊井玲児・中村貴義：強誘電超分子ローター構造を含む[Ni(dmit)$_2$]塩の物性：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
38) 綱島亮・野田祐樹・帯刀陽子・野呂真一郎・芥川智行・中村貴義・松本卓也・川合知二：点接触電流イメージング AFM による二鎖型マクロサイクリックビス TTF/F$_4$-TCNQ ナノワイヤの電気抵抗率評価：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
39) 青沼昌樹・綱島亮・野呂真一郎・芥川智行・中村貴義：(*o*-,*m*-,*p*-fluoroanilinium)([18]cronw-6) [Ni(dmit)$_2$]$_3$結晶の構造と物性：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
40) 遠藤大五郎・芥川智行・野呂真一郎・リロイ クローニン・中村貴義：*o*-, *m*-, *p*-ニトロアニリンを含む超分子カチオンを用いた[PMo$_{12}$O$_{40}$]$^{3-}$錯体の結晶構造及び物性：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
41) 工藤史人・今井宏之・芥川智行・遠藤大五郎・野呂真一郎・Cronin, Leroy・中村貴義：{Mo$_{176}$}及び{Mo$_{57}$}リング状 POM クラスターの結晶構造と磁性：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
42) 遠藤格・野呂真一郎・芥川智行・中村貴義：Ethylenedithio 型 bis-TTF マクロサイクルと TCNQ 誘導体からなる電荷移動錯体 LB 膜：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
43) 野田祐樹・帯刀陽子・野呂真一郎・芥川智行・中村貴義・BECHER, Jan：TTF 誘導体-金ナノ粒子複合構造におけるトンネル接合の形成と量子伝導挙動：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）
44) 石川学・内藤俊雄・稲辺保・芥川智行・中村貴義ジシアノ金属フタロシアニン伝導体の静水圧下における I-V 特性：日本化学会第88春季年会：立教大学(2008.3.26-30)
45) 芥川智行・越中裕之・野呂真一郎・中村貴義：4$_1$-らせんスタック構造を有する[Ni(dmit)$_2$]塩の構造と磁性：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008. 3.26-30）
46) 野呂真一郎・坂本裕俊・田中大輔・植村一広・武田定・北川進・喜多英敏・芥川智行・中村貴義：低次元金属錯体のガス吸着特性：日本化学会第88春季年会：立教大学（2008.3.26-30）

4.9 共同研究

a. 海外機関との共同研究

1）芥川智行、中村貴義、川俣純「日本ーインド二国間国際交流事業」、日本学術振興会：2006-2007年度

b. 所内共同研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究

期間、研究内容）

1）芥川智行（電子科学研究所　若手国際共同研究）:「ホモキラル錯体の誘電－磁気マルチフェロイック特性に関する研究」、2007年度、キラルポーラス錯体の合成に関する研究で実績のある東南大学を海外における共同研究機関とすることで、電子科学研究所の若手研究者との研究交流の場を提供し、キラルポーラス錯体の誘電－磁気物性評価および材料化に関する国際共同研究拠点づくりを目指す。

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）中村貴義、基盤研究 A 、固相人工分子モーターの構築、2007～2010年度

2）野呂真一郎、若手研究 B 、金属錯体半導体を用いたアンバイポーラーTFT デバイスの開発、2007～2008年度

3）野呂真一郎、特定領域研究「新しい環境下における分子性導体の特異な機能の探索」公募研究、分子性金属錯体半導体の可塑性導入による機能探索、2006～2007年度

f．その他（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）芥川智行（稲盛財団研究助成金）:「両親媒性巨大 POM クラスターの材料化に関する研究」、2007年度、1,000千円、両親媒性巨大ポリオキサメタレート（POM）クラスターを作製し、その新規材料の作製について検討する。

2）野呂真一郎（公益信託 ENEOS 水素基金研究助成）:「柔軟性金属錯体を用いた高効率 CO_2分離材料の開発」、2007～2008年度、8,500千円、構造柔軟性を持つ銅金属錯体を利用した高効率 CO_2分離材料を開発する。

3）野呂真一郎（熊谷科学技術振興財団研究助成）:「柔軟性金属錯体を用いた二酸化炭素分離材料の開発」、2007年度、1,100千円、構造柔軟性を持つ金属錯体を利用した高効率 CO_2分離材料を開発する。

4）野呂真一郎（向科学技術振興財団研究助成）:「金属錯体を用いた CO_2ガス分離材料の開発」、2007年度、1,500千円、金属錯体を利用した CO_2分離材料を開発する。

4.12　社会教育活動

g．北大での担当授業（対象、講義名、担当者、期間）

1）環境科学院、電子材料科学特論、中村貴義、2007年10月1日～2008年3月31日

2）環境科学院、環境物質科学基礎論Ⅲ、中村貴義、2007年10月1日～2008年3月31日

3）環境科学院、環境物質科学研究、中村貴義、2007年4月1日～2008年3月31日

4）環境科学院、環境物質科学実習、中村貴義、2007年4月1日～2008年3月31日

5）環境科学院、環境物質科学論文購読Ⅰ、中村貴義、2007年4月1日～2008年3月31日

6）環境科学院、環境物質科学論文購読Ⅱ、中村貴義、2007年4月1日～2008年3月31日

7）環境科学院、環境物質科学特別研究、中村貴義、2007年4月1日～2008年3月31日

8）全学教育科目、「環境と人間」光・バイオ・分子で拓くナノテクノロジー、芥川智行、2007年度

9）大学院共通講義、「ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅱ」、芥川智行、2007年度

10）環境科学院、電子材料科学特論、芥川智行、2007年10月1日～2008年3月31日

11）環境科学院、環境物質科学基礎論Ⅲ、芥川智行、2007年10月1日～2008年3月31日

12）環境科学院、環境物質科学研究、芥川智行、2007年4月1日～2008年3月31日

13）環境科学院、環境物質科学実習、芥川智行、2007年4月1日～2008年3月31日

14）環境科学院、環境物質科学論文購読Ⅰ、芥川智行、2007年4月1日～2008年3月31日

15）環境科学院、環境物質科学論文購読Ⅱ、芥川智行、2007年4月1日～2008年3月31日

16）環境科学院、環境物質科学特別研究、芥川智行、2007年4月1日～2008年3月31日

17）環境科学院、環境物質科学研究、野呂真一郎、2007年4月1日～2008年3月31日

18）環境科学院、環境物質科学実習、野呂真一郎、2007年4月1日～2008年3月31日

19）環境科学院、環境物質科学論文購読Ⅰ、野呂真一郎、2007年4月1日～2008年3月31日

20）環境科学院、環境物質科学論文購読Ⅱ、野呂真一郎、2007年4月1日～2008年3月31日

21）環境科学院、環境物質科学特別研究、野呂真一郎、2007年4月1日～2008年3月31日

i．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク（1名）

綱島亮（H19.4-H20.3　電子科学研究所研究員）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（5名）

野田祐樹、遠藤格、越中裕之、青沼昌樹、工藤史人

・博士後期課程（1名）

遠藤大五郎

・修士論文

1）野田祐樹：TTF 誘導体－金ナノ粒子からなる複合構造の量子伝導挙動（H20年3月）

2）遠藤格：両親媒性マクロサイクリック TTF と TCNQ 誘導体からなる超薄膜構造と物性（H20年3月）

3）越中裕之：強誘電応答を示す[Ni(dmit)$_2$]結晶中の超分子ローター構造と物性（H20年3月）

ナノ光高機能材料研究分野

教授　　末宗幾夫（東工大院、工博，1993.4～）
准教授　熊野英和（北大院，工博，1997.4～）
博士研究員
定昌史，井筒康洋，林雄二郎
院生
海老原正人，小林創，佐藤充，佐藤弘康，高田真，伊藤早紀，オウ　カショウ

1．研究目標

本研究分野では、(Ⅰ)量子ドットなどナノ構造作製による電子状態ならびに発光波長の制御、(Ⅱ)ナノテク技術を用いた単一量子ドット状態の作製と評価、(Ⅲ) 超伝導効果による光子生成過程の制御、(Ⅳ) 量子ドットと組み合わせて光子生成過程を制御する光高機能材料の実現と、これを用いた量子情報処理への応用を目指している。

2．研究成果

(a)　開放型 InAs 量子ドットと長波長発光

InAs はエネルギーギャップが~0.42eV と小さく、長波長発光しやすい半導体であり、InP 基板上に成長した InAs 量子ドットでは1.55 μm 発光が観測されている。また基板をホーン型に加工することによって高い光子取り出し効率が得られている。

一方これまで培われた半導体集積技術と GaAs 基板系の分布反射ミラーによる高反射率ミラー技術を生かした長波長単一光子発生ダイオードの研究も魅力的である。GaAs 系では InAs 量子ドット内部に過剰に蓄積される圧縮ひずみによって、その発光波長は1.1 μm 程度と予想外に短波長化した発光がしばしば観測される。その点、いわゆるキャップ層で埋め込まない InAs ドットは表面が応力フリーでありひずみが表面から解放されるため、1.5μm 付近の長波長発光が比較的容易に観測される。しかし自由表面は環境敏感であり、そのままでは応用に適さない。またデバイスを製作するにあたり、InAs ドット表面は幾度もレジストプロセスにさらされる。

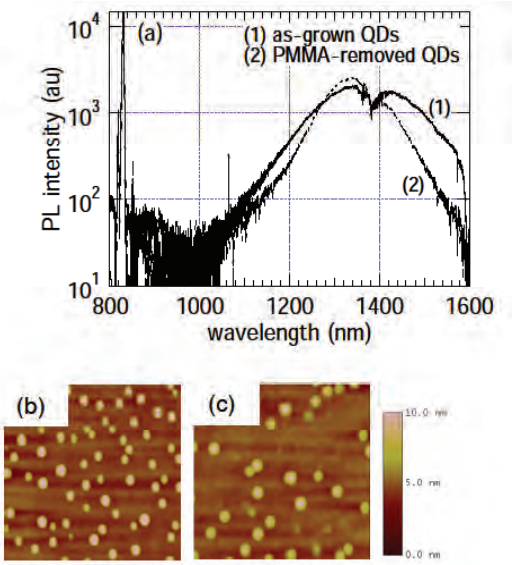


図１(a)　InAs 量子ドットを成長直後および PMMA 処理後に測定した PL スペクトル。(b) 成長直後および(c)PMMA 処理後に測定した InAs 量子ドットの AFM 観察像。

そこで現在主に使用されている電子ビームレジスト処理による InAs ドットへ与える影響を検討した。その結果、PMMA レジストは InAs ドットへ与える影響が小さいことが判明した。図１(a)は(001)GaAs 基板上に InAs 量子ドットを成長し、キャッピング層で埋めることなくそのまま観測した発光スペクトルと、一度 PMMA を表面にスピンコートして通常通り180℃３分の Prebake 処理をしてから PMMA を取り除いて観測した InAs ドット発光スペクトルの比較である。1380nm 付近のディップは測定に用いた光ファイバーの OH 吸収である。若干変化はあるものの、大きなピークシフトは観測されていない。また PMMA 処理の前と後の AFM 観測像をそれぞれ図１(b)と(c)に示す。PMMA 処理後、小さめのドットの数が少し減っているが、平均としては処理前後の（ドット高さ、直径、密度）がそれぞれ（6.34nm, 63.2nm, and $7.0\times10^{9}cm^{-2}$）と（5.25nm, 62.7nm, and $3.5\times10^{9}cm^{-2}$）と観測され、大きな変化はない。InAs ドットと PMMA レジスト界面のドット発光に与える影響を調べる目的で、PMMA を塗布した直後と２ヶ月後に測定した発光スペクトルを比較したが、両者はほとんど重なっており、PMMA レジストが表面パッシベーション膜としても利用できることがわかった。

(b)　Nb/GaAsNSe-GaAs 系超伝導電極の作製とクーパー対の GaAs への注入

超伝導電極から n 型半導体を介して，電子クーパー対を量子ドットに供給する発光ダイオードを実現するためには、多数の電子クーパー対を n 型半導体中に誘起する必要がある。このためには、超伝導電極と n 型半導体の間に形成されるショットキーバリアの低減が克服すべき課題となる。InGaAs 系においては昨年ジョセフソン電流を確認しているが、量子ドットの研究が進んでいる GaAs 基板を用いた半導体系では、通常のアニールを行わないでオーミック特性を実現するのはそれほど容易ではない。そこで我々が以前に開発した n^{+}-GaAsNSe オーミックコンタクト層を用いることにより、Nb 超伝導電極との間でオーミックコンタクトが実現できるかどうかを検討した。MOMBE 成長した n^{+}-GaAsNSe/n-GaAs ヘテロ構造を用いて、Nb/GaAs/Nb 超伝導接合を作製し、その輸送特性の評価を行った。

図２に、本接合の模式図を示す。接合形状は、チャネル幅 W=10・m, Nb 電極間隔 L=0.7μm である。オーミックコンタクト層として、GaAs(1nm)/GaAsNSe (1nm)を５周期、その上に GaAs(2nm)/GaAsNSe (2nm)を５周期とした n^{+}-GaAsNSe /n-GaAs ヘテロ構造を作製した。その上に Nb 膜(80nm)を蒸

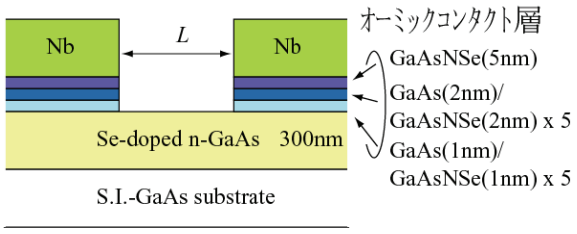


図２　Nb/GaAs/Nb 接合の模式図

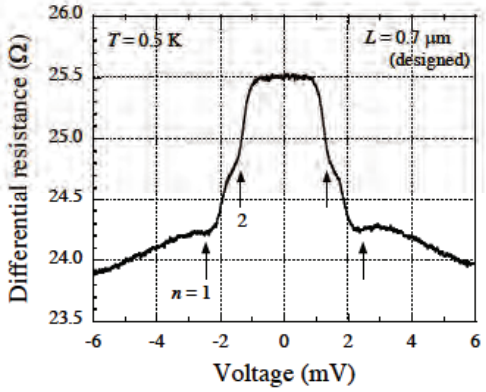


図３　微分抵抗特性

着、リフトオフ後、Nb 膜をマスクとして、余分な GaAsNSe オーミックコンタクト層を除去している。図３に0.5K での微分抵抗特性を示す。約±3mV 以下の領域でわずかに抵抗の増大が見られるものの、$n=2$ までの多重 Andreev 反射によるサブハーモニックギャップ構造（$|V| = 2\Delta_{Nb}/ne$, Δ_{Nb}: Nb の超伝導ギャップエネルギー）が観測された。この結果は、GaAsNSe オーミックコンタクト層を挿入することにより、熱処理を行うことなく、Nb と n-GaAs 間で良好なオーミックコンタクトが実現できることを示している。

さらにトンネル確率の計算もふまえて界面半導体ヘテロ構造の最適化を進め、図３で測定された低バイアス領域で微分抵抗が増加する特性から微分抵抗が減少する特性へと改善し、超伝導/半導体界面での反射が低下していることを確認した。具体的には Nb 超伝導電極の間隔を300nm と狭くし、n^+-GaAsNSe/GaAs 擬似傾斜バンドギャップ超格子を、2 nm の GaAsNSe/GaAs 層×2 と 1 nm の GaAsNSe/GaAs 層×2 としてクーパー対が透過する領域の長さを短縮した。0.3K における測定では、微分抵抗―バイアス電圧特性は、原点近傍で小さな窪み構造を示し、アンドレーエフ反射が確認された。

(c)　超伝導 LED の製作と基本特性

InP/InGaAs p-n 接合を用いてクーパー対の注入に適した超伝導 LED 構造の検討を行った。p-InP 基板上に p-InP と n-InGaAs から構成される p-n 接合を成膜し、n-InGaAs 上に Nb 電極を蒸着することで超伝導電極を有する LED を作製した。熱処理によって Nb 電極の超伝導特性が消失する課題を発見したが、デバイス作製工程を工夫することで Nb 電極に対する熱の影響を極力抑えたデバイス作製方法を確立した。その結果、図４に示す Nb の超伝導特性を損なうことなく100μA 以下の低電流で発光するデバイスを作製することができた。また図５に示すように、極低温でも良好な V-I 特性が実現できた。この例でも示すように、クーパー対を注入する n-InGaAs の膜厚は、以前に近接効果を確認した Nb/n-InGaAs/Nb の n-InGaAs 膜厚（~1000nm）よりも薄く、注入されたクーパー対の発光への寄与が期待できる。

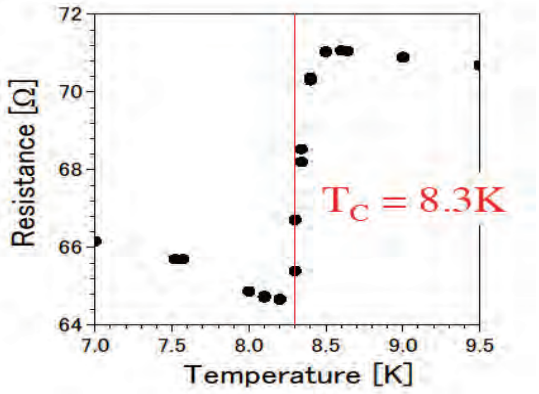


図４　作製した LED の Nb 電極について測定した電極抵抗値の温度依存性。Nb 超伝導臨界温度が8.3K と見積もられる。

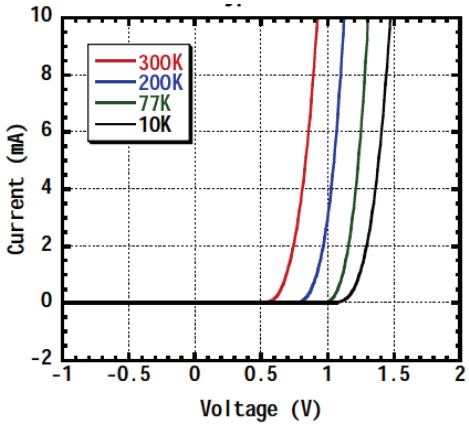


図５　典型的な LED の電流―電圧特性。室温から10K まで、デバイスのオーミックコンタクトは良好な特性を維持している。

(d)　超伝導 LED における発光増強効果

試作した InGaAs 系超伝導発光ダイオードの光学評価を行った。発光ダイオードの表面に Nb 超伝導電極をつけ、その一部に幅100nm 程度の開口を設け、この部分から InGaAs 発光層からのエレクトロルミネッセンスを観測した。図６にその発光スペクトルを示すように，光通信波長帯の1600nm 付近で発光し、かつ10K 以下の低温で急激にその発光強度の増大が観測された。温度変化に対するその積分強度を図７に示す。図４に示した超伝導臨界温度の8.3K 以下で、温度の低下に伴う急激な発光増強を観測した。これはニオビウム電極が臨界温度以下で超伝導状態になり、そこから InGaAs 発光層にしみこむ電子クーパー対が発光遷移確率を増大する、いわゆる「超伝導効果」を初めて確認したことになる。発光強度を対数プロットすることにより、[超伝導効果]による発光増強は20倍程度に達することが見積もられた。

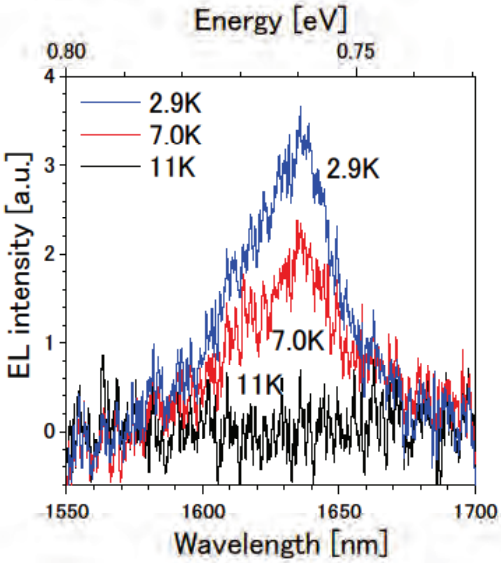


図６．Nb 電極/n-InGaAs バリア/n-InGaAs 量子井戸/p-InP 基板/Au 電極を持つ発光ダイオードの表面 Nb 電極に幅約100nm の細長い開口を形成。この開口部分から、InGaAs 量子井戸の発光を観測した。6K～8.7K のわずかの温度変化で、発光スペクトルの強度が大きく変化する。

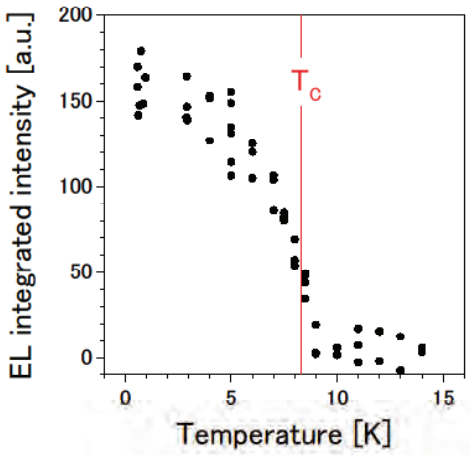


図７．図６で測定したエレクトロルミネッセンス積分強度を温度に対してプロットした図。Nb 電極が超伝導体に転移する臨界温度8.3K より低い温度で、発光強度の急激な増加が観測された。

さらに長波長ストリークカメラを用いて、InGaAs 系超発光ダイオードにおける発光再結合寿命の検討を行った。ピコ秒パルスレーザを用いた光励起でも、超伝導臨界温度以下で発光増強が観測されるとともに、発光再結合寿命の短縮が確認された。また発光ダイオードのパルス電流注入による寿命測定も行い、超伝導臨界温度以下での発光寿命の短縮を観測している。これらの結果は、超伝導による発光増強の観測結果は、電子クーパー対による発光再結合レートの増大によるものであることを明確に示している。

３．今後の研究の展望

このような半導体量子ドットの発光波長領域の光ファイバー通信領域への拡大、量子ドットからの光子生成過程の制御、発光波長の制御などとともに、特に電子をそれぞればらばらに注入する通常の方法に比べ、電子をペアー状態で注入することにより、発光増強などの新しい現象を確認している。特に、超伝導とフォトニクスの境界領域をつなぐ基盤技術の研究は、まだ始まったばかりであり、まだ未解明の点が多い。その意味で、実験的に確認された「超伝導効果による発光増強」も、より詳細に実験的な確認を行い、理論的にこれまで知られているコンセプトと照らし合わせ、理論・実験両面から基盤を固めていく必要がある。現在のところ、クーパー対が関与した発光プロセスによって、発光再結合確率が増強されることは、LED 構造のフォトルミネッセンス測定、電流注入による EL 発光、量子ドットのフォトルミネッセンス測定などにより、複数のサンプルで再現性よく確認されており、その確実性を増しつつある。今後この超伝導 LED を、超伝導とフォトニクスをつなぐ基盤技術、特に量子情報処理への応用を展開していくために、電子系から光子系へのコヒーレンスの伝達、量子もつれ合い光子対の生成に関する研究を進めていきつつある。またこれと並行して、光子を高い量子効率で外部に取り出すためのフォトニック結晶など 3 次元微小光共振器の検討，金属など反射率の高い媒体中に発光領域を埋め込む研究などを進めつつあり、一度に一つの光子（対）を確実に発生する「オンデマンド」ダイオード光源の開発を進めつつある。

４．資料

4.1　学術論文等

１）P. Thilakan, G. Sasikala, and I. Suemune: “Fabrication and Characterization of a High Q Microdisc Laser Using InAs Quantum Dot Active Regions” Nanotechnology Vol. 18 (2007) 055401-1~4.

２）M. Jo, M. Endo, H. Kumano, and I. Suemune: “Lumi-nescence Study on Evolution from Te Isoelectronic Centers to Type-II ZnTe Quantum Dots Grown by Meta-lorganic Molecular-beam Epitaxy” J. Cryst. Growth Vol. 301-302 (2007) pp. 277-280.

３）M. Ebihara, S. Tanaka, and I. Suemune: “Nucleation and Growth Mode of GaN on Vicinal SiC Surfaces” Japanese J. Applied Physics, Vol. 46, No. 15 (2007) pp. L348-L351.

４）R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: “Detailed Measurements of Nuclear Spin Po-larizations in a Single InAlAs Quantum Dot Through Overhauser Shift of Photoluminescece” J. Supercond. Nov. Magn. Vol. 20 (2007) pp. 447-451.

５）Z. G. Yao, X. Q. Zhang, I. Suemune, S. H. Huang: “Room-temperature Stimulated Emission from ZnO Thin Films Grown by Radio-frequency Magnetron Sputtering” J. Luminescence Vol. 122-123 (2007) 825-827.

4.4 著書

1）I. Suemune: “Modern Wide Bandgap Semiconductors and Related Optoelectronic Devices” Edited by K. Takahashi, A. Sandhu, and A. Yoshikawa, 2007 Springer-Verlag, 500pageChapter 2 2.2.2 Quantum Structure of Wide Bandgap Semiconductors pp. 63-67.

2）H. Kumano and I. Suemune: “Modern Wide Bandgap Semiconductors and Related Optoelectronic Devices” Edited by K. Takahashi, A. Sandhu, and A. Yoshikawa, 2007 Springer-Verlag Chapter 5 5.1.1 Wide bandgap sin-gle photon device pp. 281-287.

4.7 講演

a．招待講演

1）I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Aka-zaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Controlled Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications” The International Photonics Technology Conference (IPTC2007) September 4-5, 2007, Gwangju, Korea

2）I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Aka-zaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots: Their Control and Applications” 8th Chitose International Forum, Chitose on Nov. 29 and 30, 2007

3）I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Aka-zaki, M. Jo, and Y. Idutsu: “Possibility of Semicon-ductor-based Single Photon Sources for Quantum Infor-mation Networks” International Conference on Micro-waves and Optoelectronics (ICMO2007) December 17-20, 2007, Aurangabad, India (Plenary Invited Talk) PS1, p. 34

b．一般講演

i）学会

1）笹倉弘理、足立智、鍛冶怜奈、武藤俊一、末宗幾夫:「単一 InAlAs 量子ドットにおける核磁場形成時間」2007年（平成19年）秋季第68回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

2）鍛冶怜奈、笹倉弘理、足立智、武藤俊一、末宗幾夫:「単一 InAlAs 量子ドットでの核スピン偏極の双安定特性」2007年（平成19年）秋季第68回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

3）足立智、鍛冶怜奈、笹倉弘理、武藤俊一、末宗幾夫:「単一 InAlAs 量子ドットにおける核磁場形成と外部磁場補償」2007年（平成19年）秋季第６８回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

4）小林創、熊野英和、末宗幾夫、笹倉弘理、足立智、武藤俊一:「単一量子ドット起源の円偏光単一光子発生およびその励起波長依存性」2007年（平成19年）秋季第68回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

5）定昌史、林雄二郎、熊野英和、末宗 幾夫、笹倉弘理、足立智、武藤俊一、S. Suraprapapich, C. W. Tu：「InAs/GaAs 量子リング構造の単一分光測定」2007年(平成19年）秋季第68回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

6）定昌史、林雄二郎、熊野英和、末宗幾夫：「ZnSe 中の Te 等電子中心における励起子―格子相互作用の観測」2007年（平成19年）秋季第68回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

7）林雄二郎、田中和典、赤碕達志、熊野英和、末宗幾夫：「Nb/n-InGaAs/Nb ジョセフソン接合を持った JFET-LED の特性」2007年（平成19年）秋季第68回応用物理学関係連合講演会、北海道工業大学(2007-09)

8）佐藤充、井筒康洋，定昌史、熊野英和，末宗幾夫：「GaAsSb/GaAs QD ヘテロ構造の発光特性と伝導帯制御」第43回応用物理学会北海道支部合同学術講演会，北海道大学(2008-01)

9）高田真、井筒康洋、林雄二郎、熊野英和、末宗 幾夫：「GaAs 埋め込み InAs/GaAs QD の微小領域フォトルミネッセンス・スペクトルの測定」第43回応用物理学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学(2008-01)

10）伊藤早紀、遠藤礼暁、林雄二郎、井筒康洋、熊野英和、末宗幾夫：「Carbon acceptor を用いた微小共振器の作製に関する研究」第43回応用物理学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学(2008-01)

11）江国晋吾、小林創、熊野英和、末宗 幾夫：「単一量子ドット起源の光学フォノンを介した高円偏光度光子発生」第43回応用物理学会北海道支部合同学術講演会，北海道大学(2008-01)

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, H. Sasa-kura, S. Adachi, and S. Muto: “Highly Circu-lar-polarized Photon Generation from a Single Quantum Dot at Zero Magnetic Field” Sixth International Confer-ence on Low Dimensional Structures and Devices (LDSD2007), April 15-20, 2007, San Andres, Mexico.

2）I. Suemune, T. Akazaki, K. Tanaka, M. Jo, K. Uesugi, M. Endo, H. Kumano, and E. Hanamura: “Role of Cooper Pairs for the Generation of Entangled Photon Pairs from Single Quantum Dots” Sixth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDSD2007), April 15-20, 2007, San Andres, Columbia.

3）Y. Idutsu, M. Endo, K. Uesugi, and I. Suemune: “Surface Passivation Effect of Electron-beam Resist on InAs Quantum Dots and Their Improved Luminescence Effi-ciency” 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM’07), May 14-18, 2007, Matsue, Japan, PB21, Conference Proceedings, pp. 285-288.

4）K. Uesugi, M. Sato, Y. Idutsu, and I. Suemune: “Growth

Process of GaAs Cap Layers on GaSb/GaAs Quantum Dot Surfaces" 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM'07), May 14-18, 2007, Matsue, Japan, ThA1-4, pp. 462-465.

5）Ikuo Suemune: "Photon Generation Processes from Single Quantum Dots" International Symposium for the Promotion of Academic Exchange, Sapporo, March 22 (2007).

6）H. Kumano, H. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: "High Degree of Circular Polarization Single Photon Emission from a Single Quantum Dot Under Non-Resonant Excitation and Zero Magnetic Field" International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems and Modulated Semi-conductor Structures, Genova, Italy, July 15-20 (2007), S. M2, pp. 18-20.

7）N. Yatsu, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: "Fourier Spectroscopy of Decoherence of Exciton and Exciton Complexes in Single InAlAs Quantum Dots" 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-15) Tokyo, July 23-27 (2007).

8）J. Ibanez, E. Alarcon-Llado, R. Cusco, L. Artus, D. Fowler, A. Patane, K. Uesugi, and I. Suemune: " LO Photon-Plasmon Coupled Modes and Carrier Mobilities in Heavily Se-doped Ga(As, N) Thin Films" The International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA2007) London, July 30-August 3 (2007).

9）M. Jo, M. Endo, Y. Hayashi, H. Kumano, and I. Suemune: "Observation of Exciton-Phonon Interaction at Te Isoelectronic Centers in ZnSe" The 13th International Conference on II-VI Compounds, September 10-14, 2007 Jeju, Korea, Tu-10, p. 96.

10) Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, H. Kumano, and I. Suemune: "Luminescence Observed from A Junction Field-Effect Transistor with Nb/n-InGaAs/Nb Josephson Junction" 34th International Symposium on Compound Semiconductors, October 15-18, 2007, Kyoto, Japan, WeB I-3, p. 260.

11) H. Takayanagi, R. Inoue, T. Akazaki, K. Tanaka, M. Jo, and I. Suemune: "Differential Resistance Oscillations in a Superconductor-semiconductor Junctions" International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, December 2-7, 2007, Waikoloa, Hawaii, USA.

4.9　共同研究

d．受託研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容）

1）末宗幾夫、熊野英和、植杉克弘、田中和典、菅博文、山西正道、赤崎達志、高柳英明（科学技術振興機構）：「超伝導フォトニクスの創成とその応用」、2005～2010年度、157,500千円、これまで遊離していた超伝導領域とフォトニクスをつなぐ基幹デバイスを開発する。

2）末宗幾夫、熊野英和、植杉克弘、田中和典、菅博文、山西正道、赤崎達志、高柳英明（科学技術振興機構）：「超伝導フォトニクスの創成とその応用」、2005～2010年度、157,500千円、これまで遊離していた超伝導領域とフォトニクスをつなぐ基幹デバイスを開発する

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）末宗幾夫、基盤研究 S、ピラミッド微小光共振器を用いた量子ドット励起子状態のコヒーレント制御に関する研究、2004～2008年度

2）末宗幾夫、特定領域研究、光ファイバー通信波長帯量子ドットを用いた高次機能光子源の研究、2005～2008年度

3）熊野英和，若手研究 A（2006～2008年度）高効率量子ドット量子光源の作製と空間伝送量子暗号通信への応用に関する研究

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）末宗幾夫：JJAP 編集委員（2003年4月1日～現在）

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年4月1日～現在）

3）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）

4）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）

b．国内外の学会の主要役職

1）末宗幾夫: 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM'07) May 14-18, 2007, Matsue,プログラム委員会 Epitaxy 領域委員長

2）Sixth International Conference on Low-Dimensional Structures and Devices (LDSD2007) April 15-20, 2007, Archipelago of San Andres, International Advisory Committee.

3）13th International Conference on II-VI Comounds (II-VI 2007) September 10-14, 2007, Seoul, Korea, International Program Committee.

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）工学研究科、情報エレクトロニクス特別演習、末宗幾夫、熊野英和、2007年4月1日～2008年3月31日

2）工学研究科、光電子物性学特論、末宗幾夫、2007年4月1日～2007年9月30日

3）工学部（情報エレクトロニクス学科）統計力学、熊野英和、2007年10月1日～2008年3月31日

4）工学部（情報エレクトロニクス学科）電子情報工学実

験、熊野英和、2007年4月1日～2008年3月31日

5）全学共通、光・バイオ・分子で拓くナノテクノロジー、末宗幾夫、2007年4月1日～2007年9月30日

6）大学院共通講義,ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅰ、末宗幾夫、2007年4月1日～2007年9月30日（集中講義7月25-27日）

ｉ．ポスドク・客員研究員など

定　昌史（日本学術振興会）

林　雄二郎（日本学術振興会）

井筒　康洋（JST-CREST 受託研究博士研究員）

ｊ．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）小林創：InAlAs 単一量子ドット起源の高円偏光度単一光子発生に関する研究（平成20年2月）

・博士学位（課程博士）

1）海老原正人：表面構造制御された基板上におけるワイドギャップ半導体の結晶成長に関する研究（平成19年6月）

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　石橋　晃（東大院、理博、2003. 01～）
講師　近藤憲治（早大院、工修、2003. 04～）
助教　海住英生（慶大院、工博、2004. 09～）
院生
博士課程
Md. Dalilur Rahaman、川口敦吉、山形整功
修士課程
小野明人

1．研究目標

Si ベースの LSI は、その構造が外在的ルールで決まるトップダウン型のシステムの代表格であるが、素子サイズ上、動作パワー上、及び製造設備投資上の限界がいわれて久しい。トップダウン系に対するアンチテーゼとして最近その重要性が認識されてきたもう一つの流れは、自律分散型相互作用など内在的ルールにより構造が決まっていくボトムアップ系である。バイオ系に代表される自律立分散系の他、たとえば半導体量子ドットなど無機物のセルフアセンブル系を含め、広くボトムアップ系に期待が集まっている。しかしながら、両系は未だに専ら独立で、トップダウン、ボトムアップ両系の間に橋渡しすること(究極的には統合・融合すること)は極めて重要にも係らず、未だ実現されていない。

従来の「ボトムアップとトップダウンの統合」が両者のいいとこ取りでナノ構造を作るというもの(積集合)であったのと異なり、我々は両者の相互乗り入れを可能とする(和集合の)観点から取組んでいる。両者の構成原理が大きく異なるため、勿論容易ではないが、もしトップダウンーボトムアップの両系を繋ぐことができれば、今後ナノテク・ナノサイエンス分野で得られる新しい効果や機能を既存の Si ベースの IT インフラ構造と接続し相乗効果を引出しつつナノとマクロを結合することができる。当研究室では、このような立場から、局所的かつ個別的にアドレスすることの可能なナノ構造体を大局的サイズで得、さらに新しい量子機能を創出することを目指した基礎研究を進めている。

2．研究成果

(a)　トップダウン系とボトムアップの接続の基礎、及びスパイラルヘテロ構造応用素子

(a1)　極限高清浄環境の展開と新型光電変換素子応用

地球環境保全、石油資源の有効活用上も、太陽エネルギーのユビキタスな利用を可能とすることが急務であることに鑑み、フレキシブル基板を用いた光電変換素子・太陽電池の作製可能性を探っている。特に、熱力学的限界のため高効率を得ることの難しい、温度差の小さい黒体輻射源に対応するべく、黒体輻射の全スペクトル巾に亘って高効率に光電変換を達成し、グリーン IT 用電源として供する可能性も検証する。図 1 に示すように、フォトンの進行方向とフォトキャリアの移動方向を直行させ、かつフォトンの進行方向に沿ってバンドギャップの昇降順を配した複数の半導体ストライプを有する新しい光電変換素子を提案している。 また、非常に高い清浄度を実現可能な CUSP の展開として ISO クラス-1（マイナス 1）が可能であることを示した。

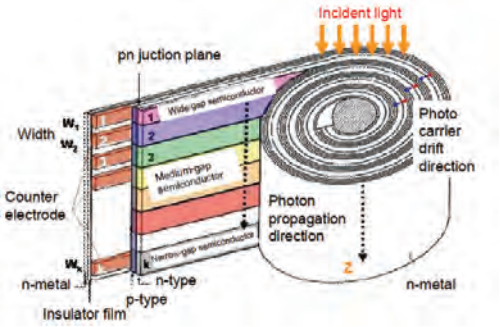


図 1　新型光電変換素子構造

(a2)　スパイラルヘテロ構造作製の基礎と量子十字デバイス応用

次世代超高密度メモリへのデバイス応用、並びに、単一分子系のキャラクタリゼーションを目指し、我々はスパイラルヘテロ構造を用いた量子十字デバイスを提案している．スパイラルヘテロ構造とは金属薄膜/有機膜を渦巻状に巻き取った構造(図 2)で、ここから 2 枚の多層膜薄片を切り出し、互いに直交するように貼り合わせると、金属薄膜のエッジとエッジが互いに対向した、いわゆる、量子十字デバイスができる。膜厚 1-20nm の金属薄膜を用いれば、原理的に 1-20nm サイズの超微細接合が作製可能となり、これにより、例えば金属薄膜間に自己組織化単分子膜(SAM)、DNA 等を挟むと、これらの少数分子あるいは単一分子系のキャラクタリゼーションが可能となる。また、スイッチング作用をもつ単分子膜を用いれば、次世代超高密度メモリへの応用が可能となる。

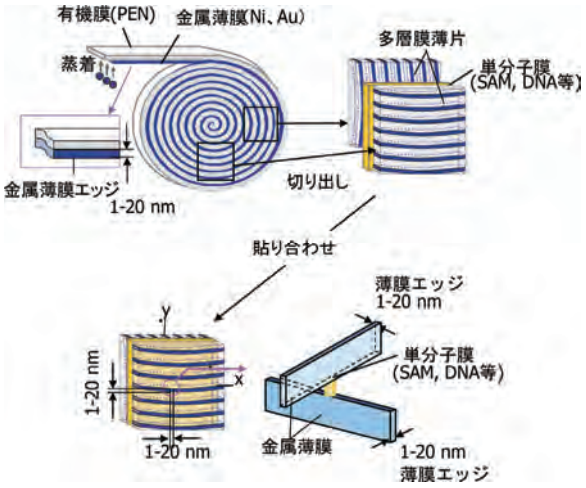


図 2　金属薄膜/有機膜スパライルヘテロ構造からの多層膜薄片の切り出し＆貼り合わせによる量子十字デバイス。

今回、我々は量子十字デバイスの実現に向け、量子十字デバイスに用いるポリエチレンナフタレート(PEN)有機膜上のNi及びAu薄膜を作製し、表面構造解析を行った。PEN有機膜(帝人デュポン社製 TEONEX Q65)上のAu及びNi金属薄膜の作製には抵抗加熱式の巻き取り式真空蒸着装置を用いた。抵抗加熱にはBNルツボとWフィラメントを用い、Au及びNi金属薄膜がPEN有機膜に均一に、かつ、ビーム状に蒸着するように、シュテファンボルツマンの式、及び、幾何学的シミュレーションを用いて、BNルツボとWフィラメントの形状・寸法、及び、遮熱板の開口部寸法を厳密に設計した。また、蒸着時にPEN有機膜の温度がガラス転移温度(=120℃)を超えないように、遮熱板、及び、冷却機構を設置した。Au及びNiの蒸着パワーは280-320W、蒸着時の真空度は～10^{-3} Pa、蒸着膜厚レートは0.44-0.93nm/min とした。膜厚測定には触針段差型膜厚計DEKTAKによる機械的手法、及び、ダイオードポンプ型固体レーザー(DPSS)による光学的手法を用いた。表面分析には原子間力顕微鏡(AFM) Nanoscope IIIa、及び、構造解析プログラムGwyddionを用いた。

図3aにPEN上のAu及びNi薄膜における表面粗さ(AFM観測スケール:1 μm)のAu及びNi膜厚依存性を示す。Au薄膜では膜厚dが厚くなるに従い、表面粗さRaが大きくなる。それに対し、Ni薄膜では膜厚dが厚くなるに従い、表面粗さRaが小さくなる。ここで、表面粗さの観点から量子十字デバイスへの適用可能性について検討する。量子十字デバイスでは、図2に示したように、金属薄膜のエッジとエッジが重なる領域が重要であるため、表面粗さは膜厚サイズの観察スケールで調べる必要がある。図3bにNi薄膜における表面粗さの観察スケール依存性を示す。いずれのNi膜厚においても観察スケールが小さくなるに従い、表面粗さは小さくなる。Ni膜厚が2.2nm、6.3nm、11nmでは、観察スケールがNi膜厚サイズと等しいとき、表面粗さはそれぞれ0.05nm、0.18nm、0.25nmとなる。これらはNi原子1層以下の表面粗さに相当する。また、同様にAu/PENに関しても表面粗さの観察スケール依存性を調べたところ、Au膜厚が6.9nm、14nm、21nmでは、観察スケールがAu膜厚サイズと等しいとき、表面粗さはそれぞれ0.4nm、0.6nm、0.9nmとなった。これらはAu原子4層以下の表面粗さに相当し、Ni/PENの表面粗さより大きいものの、量子十字デバイスへの適用が十分可能であることを示している。

PEN上のAu及びNi金属薄膜は表面粗さのみならずグレインサイズによっても特徴付けられる。Au薄膜では膜厚dが6.9nm、14nm、21nmのとき、グレインサイズlgが28.0±4.6nm、45.8±5.8nm、48.5±11.4 nmとなり、膜厚が厚くなるに従いグレインサイズが大きくなった。Ni薄膜でも膜厚dが6.3nm、29nm、41nmのとき、グレインサイズlgが31.1±3.9nm、65.8±14.0nm、79.0±20.1nmとなり、膜厚が厚くなるに従いグレインサイズが大きくなった。いずれの膜厚においてもlg>dを示すことから、Au/PEN及びNi/PENを量子十字デバイスに適用すれば、表面凹凸構造から生じる表面増強効果等の影響を受けることなく、少数分子あるいは単一分子系の本質的なキャラクタリゼーションや超高密度メモリへの応用が可能となると考えられる。今後はAu/PEN及びNi/PENを量子十字デバイスに適用することにより超高密度メモリ・高感度磁気センサーへの応用に展開していき、新機能量子十字デバイスの創出を目指す。

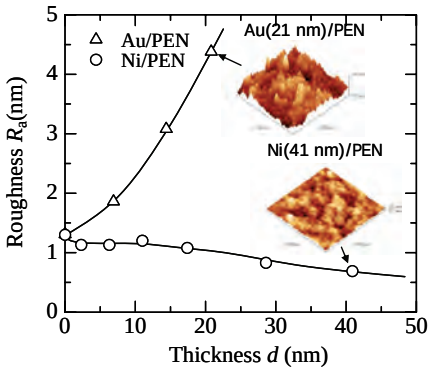


図3a　PEN有機膜上のAu及びNi薄膜における表面粗さ(AFM観測スケール:1 μm)のAu及びNi膜厚依存性。

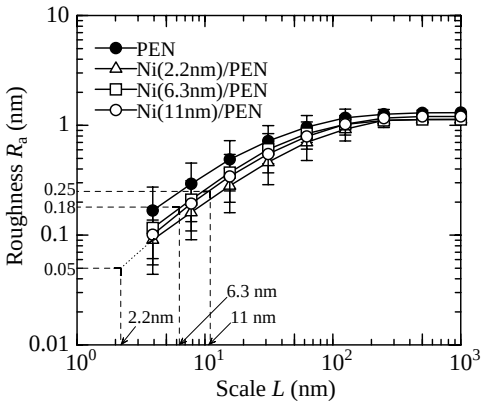
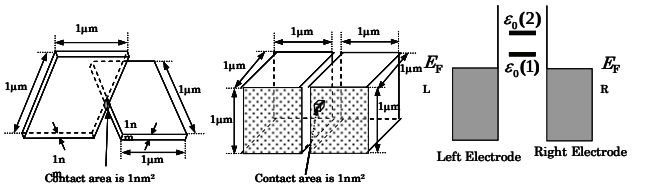


図3b　PEN有機膜上のNi薄膜における表面粗さのAFM観察スケール依存性。

(b)　量子十字構造素子の輸送特性の理論的検討

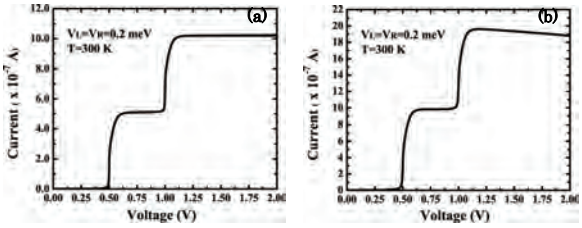
量子十字構造素子の輸送特性をアンダーソンハミルトニアンを用いて、電極の次元性を考慮して計算した(図4)。



(a) QCS model with 2D electrodes　(b) QCS model with 3 electrodes　(c) Energy diagram for QCS device

図4　計算に用いた量子十字構造のモデルとエネルギー図。

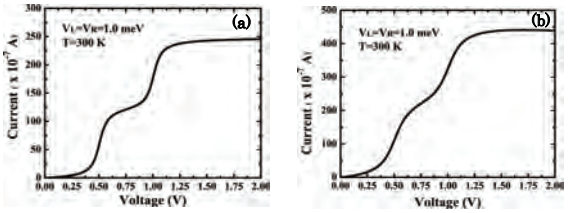
計算の結果、分子との結合が室温のエネルギーより小さいweak couplingの時には、図5のように電極が2次元であろうが、3次元であろうが関係なく、シャープなピークを持つ電流・電圧特性が得られ、switching素子として機能することが判明した。また動作電力も10nW程度で、現在のCMOSを凌駕することが判った。



(a) QCS devices with 2D electrodes (b) QCS devices with 3D electrodes.

図５　弱結合時の量子十字構造素子の電流電圧特性

また、分子との結合が室温のエネルギーより大きい strong coupling の時には、図６のような電流・電圧特性が得られ、電極が２次元の時にはまだ switching 素子として機能するが、３次元の場合は難しい事が判明した。



(a) QCS devices with 2D electrodes. (b) QCS devices with 3D electrodes.

図６　強結合時の量子十字構造素子の電流電圧特性

(c)　コンパクトクリーンユニットシステムの開発

トップダウンとボトムアップの融合・統合をプラットフォームベースで実現するため、高清浄度を持つクリーンユニットシステムプラットフォームのモバイル版の要素技術を検討した。図７に示すように、ISO クラス２のハンドキャリー可能な高清浄度環境を実現することができた。本技術は量子十字構造作製のためのコアテクノロジーとなると同時に、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、次世代植物作製技術の異種研究分野の融合・統合を可能にするプラットフォームベーステクノロジーとしても期待できる。

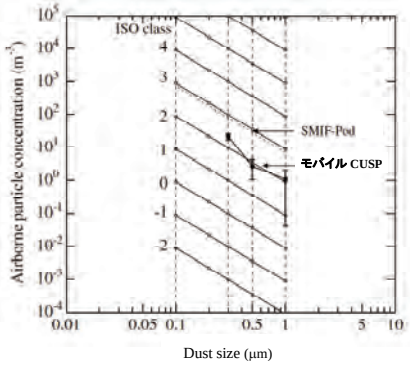


図７．清浄度の実測値。△、□、○は HEPA フィルタを用いたときの値、◎は自己発塵のないフィルタを用いたときの値。これにより ISO-1～-2級の極限高清浄度を得た.

３．今後の研究の展望

次のステップとして、２次元ボトムアップ構造への局所アドレシングを可能とすることにより、２次元ボトムアップ系とトップダウン系との接続を実現することを目指している。従来、トップダウン系をなす半導体集積回路などでは一括露光等によるパターニングが用いられ、実質的な配線幅は数十 nm であったが、本研究ではサブナノメートルの膜厚制御せいをもつ真空蒸着の特性を活かし、且つ成長速度が遅いという弱点を克服することにより、丁度鳴門かまぼこの如く金属と絶縁体が巻き込まれたスパイラル状円盤を形成し、そこから一角を切出すことにより得られる金属/絶縁体交互多層膜薄片を金属層がクロスするように重ねた構造（ダブルナノバウムクーヘン構造）を創ることを試みる。この構造中には、多重平行金属リボン群によるエッジ対向した交差構造（Quantum Cross）がＮｘＮ個形成されることで、ナノサイズの分解能とバルクサイズの拡がりを両立したｘｙグリッドが実現する。両薄片に挟まれた２次元ボトムアップ構造に対し原子層の分解能でボトムアップ構造の各部分へ個別アクセスが可能である。しかも本構造は主要部分がリソグラフィーフリーで形成できる。

また、本研究の目指すダブルナノバウムクーヘン構造は、既存の素子の特性を飛躍的に向上させる可能性も持っている。リボンの厚みと巾を独立制御できることにより、例えば、分子素子では従来の Break Junction 電極（Reed, 1997）や 40nm 程度の粗大な Cross-bar 構造（Williams, 2002）と異なり、配線抵抗は小さく抑えながらも、対向２電極のクロスセクションを極めて小さく押さえ真に少数の分子系を挟む事ができるのみならず、原子層オーダーで急峻な D_{2d} 対称性もつサドルポイント状のナノスケール電極配置の創成と同電極に挟まれた活性エレメントの物性評価を行うことができる。２次元電子液体において、さらに厳密な解を得るために、バーテックス補正を取り入れた GWΓ法を開発し、適用する。密度汎関数法の基礎に関わる交換・相関カーネルについて新しいカーネルの提案を行う。またすでに結果が得られつつあるが、ナノコンタクトにおけるコンタクト物質の次元性とコンダクタンスについての関係を明らかにする。また磁気記録応用でも超高密度化の可能性が期待できる。ダブルナノバウムクーヘン構造により得られる多重並列エッジ対向金属リボン交差構造により（２次元的な）ナノとマクロの世界とをつなぎ、トップダウンーボトムアップ両系の統合に端緒をつける可能性が出てくる。またスパイラルヘテロ構造を用いた新型太陽電池の応用も期待される。

４．資料

4.1　学術論文等

１）H. Kaiju, A. Ono, N. Kawaguchi and A. Ishibashi : “Ultra-Smooth Ni Thin Films Evaporated on Polyethylene Naphthalate Films for Spin Quantum Cross Devices”, J. Appl. Phys., (103) : 07B523-1-07B523-3 (2008)

２）海住英生、小野明人、石橋晃：「Surface Morphology of Ferromagnetic Nickel Thin Films on Polyethylene Naphtalate Organic Films for Spin Quantum Cross Structures」、J. Vac. Soc. Jpn.、51(3) : 211-213 (2008)

３）H. Kaiju, A. Ono, N. Kawaguchi and A. Ishibashi : “Surface morphology of gold thin films deposited on polyethylene naphthalate organic films for quantum cross devices”,

Jpn. J. Appl. Phys., 47 : 244-248 (2008)

4）M. D. Rahaman, K. Gomita, N. Kawaguchi, H. Kaiju, K. Kondo and A. Ishibashi : "High Cleanliness of portable clean-unit-box to unite clean-unit system platforms (CUSPs) and CUSP units", Electron. Lett., 43(24) : 1356-1357 (2007)

5）H. Kaiju, K. Kondo and A. Ishibashi : "Quantum-Cross Tunneling Junction for High Density Memory", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 961 : O5.5.1-O5.5.6 (2007)

4.6 特許（発明者、特許番号、特許名、出願年月日）

・国内特許

1）石橋晃：特願2008-70768、太陽電池および光電変換素子、2008年3月19日

2）石橋晃：特願2008-70767、クリーンユニット、連結クリーンユニット、およびプロセス方法、2008年3月19日

3）海住英生、小野明人、石橋晃：特願2008-66929、ニッケル薄膜およびその形成方法ならびに強磁性ナノ接合およびその製造方法、2008年3月17日

4）石橋晃：実願2008-390、クリーンユニット、および連結クリーンユニット、2008年1月29日

5）石橋晃：特願2008-8032、クリーンユニットおよびクリーンユニットシステム、2008年1月17日

6）石橋晃：特願2008-8033、太陽電池の製造方法および光電変換素子の製造方法、2008年1月17日

7）石橋晃：特願2008-8034、機能素子の製造方法および機能材料の製造方法、2008年1月17日

8）石橋晃：2007-306847、クリーンユニット、クリーンブース、クリーンユニットの運転方法および連結クリーンユニット、2007年11月28日

9）石橋晃：2007-298755、高清浄度環境測定装置および測定方法、2007年11月19日

10）石橋晃、平坂 雅男：2007-269653、繊維状光電変換素子、同使用方法、同製造方法、織物、織物の使用方法、衣服および壁紙、2007年10月17日

11）海住英生、小野明人、石橋晃：特願2007-248809、ニッケル薄膜およびその形成方法ならびに強磁性ナノ接合およびその製造方法、2007年9月26日

12）石橋晃：実願2007-4616、クリーンユニット、および連結クリーンユニット、2007年6月19日

13）石橋晃：2007-101305、機能素子および機能材料、2007年4月09日

14）石橋晃：2007-101306、機能素子およびその製造方法ならびに機能システム、2007年4月9日

・国際特許

1）A. Ishibashi : PCT/JP2008/054685, クリーンユニット、クリーンユニットの運転方法および連結クリーンユニット, 2008年3月7日

2）A. Ishibashi : PCT/JP2008/054679, 高清浄度環境測定装置および測定方法, 2008年3月7日

4.7 講演

b. 一般講演

i）学会

1）K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi : "Theoretical Investigation of New Quantum-Cross-Structure Device as a Candidate beyond CMOS", 2008 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA (2008-03)

2）H. Kaiju, A. Ono, N. Kawaguchi, K. Kondo and A. Ishibashi : "Study of Gold Thin Films Evaporated on Polyethylene Naphthalate Films toward the Fabrication of Quantum Cross Devices", 2007 Material Research Society Fall Meeting, Boston, USA (2007-11)

3）海住英生、小野明人、石橋晃：「スピン量子十字構造の作製に向けた強磁性 Ni 薄膜/ポリエチレンナフタレート有機膜の AFM 表面観察」、第48回真空に関する連合講演会、学習院大学 (2007-11)

4）H. Kaiju, A. Ono, N. Kawaguchi and A. Ishibashi : "Ultra-Smooth Ni Thin Films Evaporated on Polyethylene Naphthalate Films for Spin Quantum Cross Devices", 52nd Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Tampa, USA (2007-11)

5）山形整功、近藤憲治：「量子ドット中における不純物の影響についての考察」、日本物理学会 第62回年次大会、北海道札幌市 (2007-09)

6）小野明人、海住英生、川口敦吉、近藤憲治、石橋晃：「ポリエチレンナフタレート有機膜上 Au 蒸着薄膜の作製と表面構造解析」、日本物理学会秋季大会、北海道大学 (2007-09)

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）大橋美久、石橋晃：「CUSP による ISO クラス マイナス1極限高清浄度」、北海道・札幌 IT＆Bio ビジネスマッチング in 大阪、大阪 (2008-01)

2）大橋美久、石橋晃：「CUSP による ISO クラス マイナス1極限高清浄度」、北海道・札幌 IT＆Bio ビジネスマッチング in 神戸、神戸 (2008-01)

3）H. Kaiju, A. Ono, N. Kawaguchi, K. Kondo and A. Ishibashi : "Metal Thin Films Evaporated on Polyethylene Naphthalate Substrates for Quantum Cross Devices", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2008-01)

4）N. Kawaguchi, H. Kaiju, K. Kondo and A. Ishibashi : "Spiral heterostructure-based next generation solar cell", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2008-01)

5）A. Ishibashi : "clean-unit system platform (CUSP) for research, developments, and industries", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2008-01)

6）海住英生、近藤憲治、石橋晃：「スパイラルヘテロ構造

ベースの新機能デバイス」、ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス平成19年度成果報告会、東北大学、片平さくらホール (2007-12)

7）K. Kawaguchi, M. D. Rahaman, K. Gomita, H. Kaiju and A. Ishibashi : "Spiral Heterostructure-based new solar cell to be fabricated in clean-unit system platform", 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Fukuoka, (2007-12)

8）石橋晃、大橋美久、海住英生 :「極限高清浄環境を提供するクリーンユニットシステム」、ビジネス EXPO、アクセスサッポロ (2007-10)

9）近藤憲治、海住英生、石橋晃 :「電極の伝導電子の次元性とコンダクタンスの変化」、4研究所アライアンス分科会大阪シンポジウム、大阪府吹田市 (2007-09)

10）海住英生、大橋美久、石橋晃 :「完全無菌・無塵環境クリーンユニットシステムプラットフォーム（CUSP II)」、イノベーションジャパン2007、東京国際フォーラム (2007-09)

11）石橋晃、大橋美久、海住英生 :「ISO クラス マイナス１極限高清浄度の実現」、北海道・札幌 IT＆Bio ビジネスマッチング with 川崎／横浜、パシフィコ横浜 (2007-07)

12）石橋晃 :「ISO クラス マイナス１の極限高清浄環境クリーンユニットシステムの開発」、北海道バイオ産業クラスター・フォーラム、ホテルモントレーエーデルホフ札幌 (2007-06)

13）石橋晃:「クリーンユニットシステムプラットフォームによる完全無菌・無塵環境」、第６回国際バイオフォーラム＆国際バイオ EXPO2007、東京ビッグサイト (2007-06)

14）海住英生、近藤憲治、石橋晃 :「量子十字、光電変換デバイスの創製」、ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス発足記念シンポジウム、東京、学士会館 (2007-06)

iii）コロキウム・セミナー等・その他

1）石橋晃 :「特許論 I ～ 研究成果の特許化について～」、ニセコ オータムスクール 2007 第７回北大ビジネス入門コース、北海道虻田郡ニセコ町 (2007-11)

4.9 共同研究

a．所内共同研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容）

1）石橋晃、徳本洋志、末宗幾夫、中村貴義、近藤憲治（電子科学研究所）、極微細接合素過程に対する次元・空間配位の影響の研究、2003～2004年度、4800千円、次元数表記で3-0-3、3-2-0-2-3などの従来行われてきた接合構造・配置に対し、特に3-2-0-R2-3（R2は相対的に回転した２次元面であることを示す）の極微細接合について理論的に考察するとともに、この構造（ユニット）を作るための要素技術を確立する。

4.10 予算獲得状況

a．科学研究費補助金

1）海住英生、若手研究 B、スピン量子十字構造を用いた超高密度メモリの作製とその評価、2006～2007年度

f．その他（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）石橋晃、北大リサーチ＆ビジネスパーク構想推進協議会、極限高清浄度環境を提供するクリーンユニットシステムのビジネス開発、9000千円、2006～2007年度
21世紀に花開くと期待されるナノ・バイオテクノロジーに広く資する共通基盤技術・環境としての極限高清浄度環境装置を社会へ供給する。クリーンユニット システムプラットフォームによる世界最高レベルの清浄空間（完全無塵・無菌空間）を低価格で提供するシステムの事業化を目指す。

2）石橋晃、札幌市、クリーンシステムプラットフォームによる極限高清浄環境、7000千円、2006～2007年度
ロケーションフリーで無塵・無菌環境を実現するクリーンシステムプラットフォームの高性能化を行う。これまでのクリーン環境提供法を質･量ともに一変させ、必要な性能を、必要なだけ、必要なときに、必要な場所へ、低コストで提供することができる。

3）海住英生（科学技術振興機構 重点地域研究開発推進プログラム(シーズ発掘試験)）:「強磁性ナノエッジ接合を用いた高感度磁気センシングの実用化研究」、2007年度、2000千円、強磁性ナノエッジ接合を用い、高感度磁気センシングへの応用可能性を検討する。

4.11 受賞

1）石橋晃、大橋美久：北海道 新商品トライアル制度 H19年度認定「クリーンユニットシステムプラットフォーム(CUSP)」（北海道）2007年9月

4.12 社会教育活動

b．国内外の学会の役職

1）近藤憲治：日本物理学会 第62回年次大会 実行委員（2007年9月21日～2007年9月24日）

2）海住英生：日本物理学会第62回年次大会実行役員（2007年5月1日～2007年9月24日）

c．併任・兼業

1）石橋晃：シーズテック株式会社（北海道大学発ベンチャーカンパニー）取締役

d．その他

1）石橋晃：2007北大オープンキャンパス 講師（2007年8月6日～現在）

2）近藤憲治：2007年度北海道大学入学試験問題作製委員（2007年4月1日～現在）

e．新聞・テレビ等の報道

・雑誌

1）石橋晃：Challenger（経済産業省北海道産業局発行）

2008年3月31日「極限高清浄環境 CUSP の紹介」

2）石橋晃：さっぽろ経済 579号 2007年11月10日「極限高清浄環境 CUSP の紹介」

3）小野明人、山形 整功、海住英生、石橋晃：朝日新聞社『論座』 2007年10月号 グラビア 2007年10月1日「極限高清浄環境 CUSP の紹介」

・その他

1）石橋晃：日経 BP 2007年9月14日「クリーンユニットシステムプラットフォーム CUSP II, モバイルタイプ M-CUSP」

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）全学共通、基礎物理学 I、石橋晃、2007年4月1日～2007年9月30日

2）理学院、半導体物理学、石橋晃、2007年10月1日～2008年3月31日

3）全学共通、複合科目 環境と人間「現代物理学入門」(分担)、石橋晃、2007年4月1日～2007年9月30日

4）全学共通、ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論 I（分担)、石橋晃、2007年7月25日～2007年7月27日

5）全学共通、基礎物理学 II（電磁気学と熱力学)、近藤憲治、2007年10月1日～2008年3月31日

6）理学院、量子デバイス物理学(非平衡グリーン関数論)、近藤憲治、2007年10月1日～2008年3月31日

7）理学院、物理学論文輪講、石橋晃、2007年4月1日～2008年3月31日

8）理学院、物理学特別研究１、石橋晃、2007年4月1日～2008年3月31日

9）理学院、物理学特別研究２、石橋晃、2007年4月1日～2008年3月31日

10）全学共通、複合科目 環境と人間「現代物理学入門」(分担)、石橋晃、2007年4月1日～2007年9月30日

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士論文

1）小野明人：「ポリエチレンナフタレート有機膜上の Ni 及び Au 蒸着薄膜の作製と評価」

・博士論文

1）Rahaman Dalilur Md : Study of Ultra-high Cleanliness Clean-Unit System Platform (CUSP) for the Cross-Disciplinary Research

分子認識素子研究分野

教　授　居城邦治（東工大院、工博、2004.3～）
准教授　新倉謙一（東工大院、工博、2005.1～）
助　教　松尾保孝（北大院、工博、2004.8～）
博士研究員　橋本裕一（2007.4～2007.11）
理研研究員　澤田石哲郎（2007.4～2007.9）
院　生
博士課程
　治田修、樋口剛志、田中あや、神谷亮介、門間太志、福平由佳子、大竹範子
修士課程
　西尾崇、平井悠司、田島孝訓、吉澤恵子、永川桂大
研究生
　栃木隆
学部生
　関口翔太、石川綾子

1．研究の目的

生物は高度な分子認識と自己集合・自己組織化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、情報変換を達成している。本研究分野ではこのような生物の持つ機能とナノテクノロジーとを融合することで、電子デバイスからバイオに至る幅広い分野をターゲットとした分子素子や機能性材料の構築を目指して研究を行っている。タンパク質、核酸、脂質、糖といった生物の主役分子を駆使することで高度な機能を持った素子を作製できると期待される。例えば、分析手法や分子素子の開発のために、生命活動の中心にある DNA 分子に着目している。DNA の持つ分子メモリー機能、分子認識、自己会合性を利用することで分子配列を塩基配列情報で制御し、一分子の DNA の塩基配列を位置情報に変換するシステム構築や DNA 分子の情報を転写した分子ナノ組織体の構築を目指している。また、細胞内に核酸を高効率で導入するウイルスのタンパク質だけを使った再構築ウイルスカプセルによる薬剤の細胞内への効率よい導入法の開発や生体分子を提示したナノ粒子の細胞内動態の観察による細胞内の新しい認識の発見を目指している。これらの研究を通じてバイオ・ナノサイエンス研究の新展開を目指す。

2．研究成果

(a)　DNA を保護材にした金ナノ粒子の形成

金属ナノ粒子はサイズに応じた光学的・電気的・磁気的性質を示すため様々な分野において注目されている。通常ナノ粒子は凝集を防ぐため、その表面を界面活性剤やチオール化合物などの分散剤で被覆する必要がある。核酸は水溶性でその塩基は金表面に対して選択的に強く吸着することが知られていることから、金の析出のための鋳型ポリマーとして有用である。今回、種々のオリゴヌクレオチドの存在下で金イオンの光還元を行うことにより、塩基選択的な金ナノ粒子の分散を見出した。吸収スペクトルと STEM による観察の結果、dA20を用いて粒子を作製した場合にのみ平均粒径1.1nm のシングルナノサイズの金粒子が形成し（図１）、dG20、dC20、dT20 を用いた場合には10-50nm の粒子が形成したことを確認した。アデニンは４種類の塩基の中で金表面に最も強く吸着することから、dA20は金ナノ粒子が成長する前に粒子表面を保護したと考えられる。

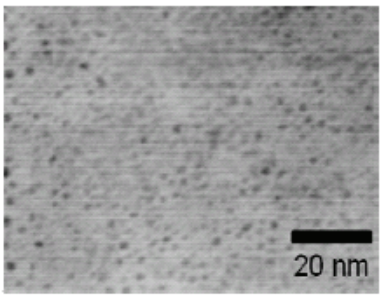


図１．dA20 から調製した金ナノ粒子の STEM 像

(b)　ウイルス様微粒子を用いた薬剤ナノキャリアーの開発

ウイルスのタンパク質が自己集合して形成するウイルス様微粒子(Virus-like particle: VLP)は、ウイルスゲノムを持たずにウイルスと同じ経路で細胞内へ導入されるため、ドラッグデリバリーシステムのキャリアー等として注目されている。VLP は内部が空洞なため、核酸以外の様々な薬剤を内包可能なキャリアーとなりうる。これまで VLP の細胞への導入法には主に細胞培養液に直接 VLP を添加するという方法がとられていた。それに対して我々は、より効率の良い導入法の確立を目指して、VLP の基板への固定化を行った。VLP を固定化した基板上で細胞を培養すると、VLP が直接細胞に接することで高い導入効率が見込まれる（図２）。特に、糖鎖を提示した基板を使用することで VLP を効果的に固定・導入することが可能であった。この方法を利用して VLP を使ったセルマイクロアレイが作製できれば、薬剤スクリーニング等への応用も期待される。

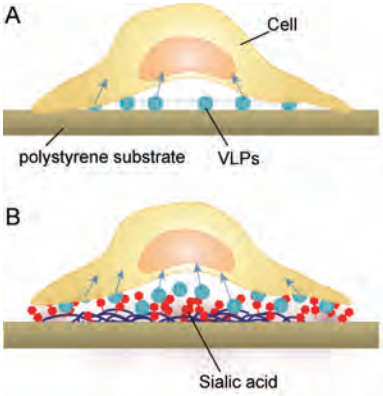


図２．基板に固定したウイルス様微粒子の（VLP）の細胞内への取り込み。

VLP は大腸菌発現系を用いて作製し、密度勾配遠心法によって精製した(図３)。VLP の細胞への取り込み量をフローサイトメトリー、共焦点顕微鏡観察によって見積もったところ、基板へ固定化した VLP は溶液中で拡散する VLP よりも細胞に取り込まれやすいことを明らかにした。これは界面からのドラッグデリバリーの有効性を示したという意味で新規性の高いデータである。これらの結果は2008年のアメリカ化学会誌に報告した。

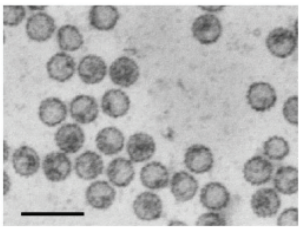


図３．ウイルス様微粒子(VLP)の STEM 画像

(c)　ウイルス様微粒子を用いた薬剤ナノキャリアーの開発

本研究は直径40nm のウイルスを鋳型として３次元空間に金属微粒子を規則配列させ、金属微粒子で覆われた空間を作り出すことを目的として研究を進めた。我々が用いているウイルスはポリオーマウイルス属 JC ウイルスで、シアル酸を認識する。そこで VLP 表面へ規則配列化させる金ナノ粒子には、シアル酸を表面に提示させた。この糖鎖提示金ナノ粒子とウイルスカプセルを共存条件におくことで、ウイルスカプセルに沿った金ナノ粒子の二次元環状配列化に成功した（図４）。

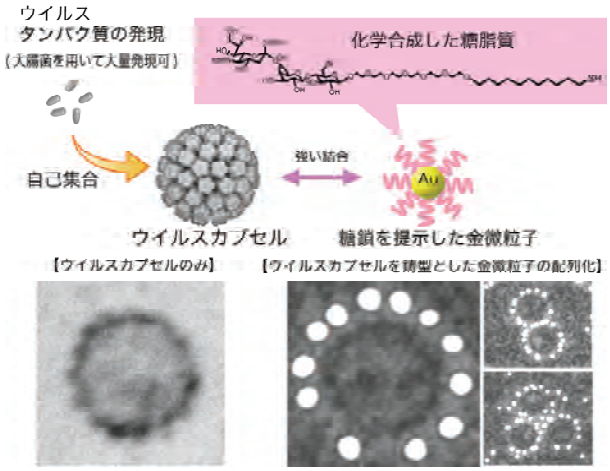
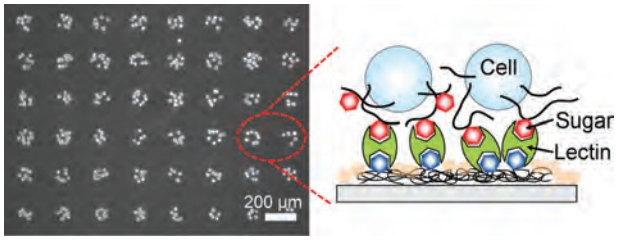


図４．ウイルス様微粒子の糖鎖認識を利用した金属微粒子を規則配列化。シアル酸とウイルスの特異的な結合で微粒子がウイルス周辺に結合している。

(d)　細胞表層への人工リガンドの提示手法と細胞マニピュレーションへの応用

細胞膜は細胞外環境との相互作用を担い、細胞接着やシグナル伝達を調節する重要な器官である。そのため細胞膜に人工リガンドを提示できれば細胞が外部から受ける刺激をコントロールすることが可能となる。目的の薬剤を積極的に取り込ませる事や目的の場所に細胞を接着させる事が可能になれば、医療やバイオセンサー作製への貢献が期待される。しかし、これまで報告されているリガンド提示法は、共有結合による膜蛋白質の修飾や疎水性相互作用を利用した細胞膜への脂質誘導体挿入法であるため、天然のシグナル伝達の攪乱による高い細胞毒性やリガンド提示時間が短い事など問題があった。我々は細胞表層がアニオン性であることに着目し、静電相互作用によりカチオン性ポリマーを細胞表層に固定化する新規な細胞表層修飾技術を開発した。これは細胞毒性が低くかつ汎用性の高い手法である。細胞表層に非天然な糖鎖レセプターを提示しることで、その認識能により細胞を基板上に自由に配置する事や細胞間の結合を制御することを可能とした（図５）。

(a)



(b)

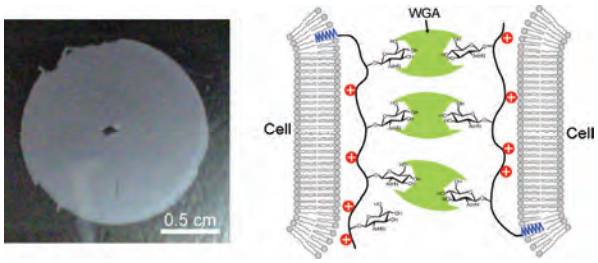


図５．NIH3T3 細胞へ人工リガンドを提示させ、(a)細胞を目的の場所に固定化できた例（細胞アレイ）と、(b)細胞同士を結合させてシート状にした例。

３．今後の研究の展望・将来計画

近年バイオ分子のもつ高い自己組織化能を駆使することにより、ナノスケールで構築されている複雑な構造体を、より簡便に作り出す技術が注目されている。我々は生物あるいは生体分子を鋳型とすることで、電子デバイス・光学素子・医療素子などへと展開してきた。今後は我々の構築したナノ材料の機能をさらに検証し、バイオ分子の有用性を示していく。

4．資料

4.1　学術論文等

1）O. Haruta, Y. Matsuo, Y. Hashimoto, K. Niikura and K. Ijiro : "Sequence-Specific Control of Azobenzene Assemblies by Molecular Recognition of DNA", Langmuir, 24(6) : 2618-2624 (2008)

2）N. Ohtake(Ishizuka), K. Niikura, T. Suzuki, K. Nagakawa, H. Sawa and K. Ijiro : "Enhanced Cellular Uptake of Virus-Like Particles through Immobilization on a Sialic Acid-Displaying Solid Surface", Bioconjugate Chemistry, 19(3) : 507-515 (2008)

3）T. Masuda, H. Akita, T. Nishio, K. Niikura, K. Kogure, K. Ijiro and H. Harashima : "Development of lipid particles targeted via sugar-lipid conjugates as novel nuclear gene delivery system", Biomaterials, 29 : 709-723 (2008)

4）山本貞明、田中賢、伊藤絵美子、森田有香、角南寛、居城邦治、下村政嗣 :「血管内皮細胞の初期伸展に及ぼすハニカムフィルム細孔径の影響」、表面科学、日本表面科学会、8(8) : 433-439 (2007)

5）R. Kamitani, K. Niikura, T. Onodera, N. Iwasaki, H. Shimaoka and K. Ijiro : "Patterned Immobilization of Unprotected Carbohydrates on an Aminooxy Polymer-Grafted Solid Surface", Bulletin of the Chemical Society of Japan, 80(9) : 1808-1813 (2007)

6）Y. Tsuboi, M. Nishino, Y. Matsuo, K. Ijiro and N. Kita-mura : "Phase Separation of Aqueous Poly(vinyl methyl ether) Solutions Induced by the Photon Pressure of a Focused Near-Infrared Laser Beam", Bulletin of the Chemical Society of Japan, 80(10) : 1926-1931 (2007)

7）T. Masuda, H. Akita, T. Nishio, K. Niikura, K. Kogure, K. Ijiro and H. Harashima : "Development of lipid particles targeted via sugar-lipid conjugates as novel nuclear gene delivery system", Biomaterials, 29 : 709-723 (2007)

4.2　総説、解説、評論等

1）松尾保孝、居城邦治 :「高分子と金属の複合化と高機能創製-ナノスケールでの研究展開-」、高分子、56(10) : 845-849 (2007)

4.4　著書

1）新倉謙一、居城邦治 :「細胞ストレスのイメージングを目指した糖鎖修飾量子ドットの作製」、量子ドットの生命科学領域への応用、シーエムシー出版、18 : 195-203 (2007)

2）居城邦治，松尾保孝 :「(Langmuir-Blodgett) 膜」、ナノバイオ大事典 -COMPREHENSIVE NANO-BIO HANDBOOK-、テクノシステム、8-100 (2007).

3）居城邦治 :「座談会 自己組織化ナノマテリアルと生産技術の革新」、自己組織化ナノマテリアル -フロントランナー85人が語るナノテクノロジーの新潮流-、国武豊喜 監修，フロンティア出版、379-392 (2007).

4）居城邦治 :「1次元 DNA ナノマテリアル」、自己組織化ナノマテリアル -フロントランナー85人が語るナノテクノロジーの新潮流-、国武豊喜 監修、フロンティア出版、第3章　9節、124-130 (2007).

5）居城邦治 :「DNA を鋳型として用いたボトムアップ型ナノテクノロジー」、バイオとナノの融合Ⅱ-新生命科学の応用-、北海道大学 COE 研究成果編集委員会 編集、北海道大学出版会、第Ⅲ部第11章、163-172 (2007).

4.6　特許（発明者、特許番号、特許名、出願年月日）

1）西埜文晃、高木斗志彦、桑原昌宏、下村政嗣、居城邦治、山本貞明、松尾保孝、藪浩 : 特願2007-146849、周期的な構造が形成された樹脂フィルムの製造方法、2007年6月1日

2）西埜文晃、高木斗志彦、桑原昌宏、下村政嗣、居城邦治、山本貞明、松尾保孝、藪浩 : 特願2007-145890、3次元構造が形成された樹脂フィルムの製造方法、2007年5月31日

4.7 講演

ｉ）学会

1）田中あや、松尾保孝、居城邦治 :「単分散 DNA ポリマーの酵素合成およびそれを鋳型にしたプラチナナノワイヤーの作製」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

2）永川桂大、新倉謙一、大竹（石塚）範子、鈴木忠樹、松尾保孝、澤洋文、居城邦治 :「ウイルスカプセルを鋳型とした金ナノ粒子3D アレイの作製」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

3）治田修、松尾保孝、居城邦治 :「気液界面における DNA の分子認識を利用したアゾベンゼン単分子膜の組織化とその光機能」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

4）治田修、松尾保孝、居城邦治 :「超音波照射によるアゾベンゼンクロロホルム溶液の色調変化」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

5）石川綾子、松尾保孝、居城邦治 :「核酸を分散剤とした発光性銀ナノ粒子の作製とその発光特性」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

6）関口翔太、西尾崇、新倉謙一、松尾保孝、居城邦治 :「糖鎖修飾量子ドットを用いた細胞内核内移行の解析」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

7）神谷亮介、新倉謙一、岡嶋孝治、居城邦治 :「細胞膜修飾高分子を用いた細胞操作技術の開発」、日本化学会第88春季年会、立教大学 (2008-03)

8）N. Ohtake(Ishizuka), K. Niikura, T. Suzuki, K. Nagakawa, H. Sawa and K. Ijiro : "Solid surface-promoted cellular uptake of immobilized virus-like particles", The 9th

RIES-Hokudai International Symposium on “創”, Hokkaido Univ.(Sapporo) (2008-01)

9) T. Nishio, K. Niikura, Y. Matsuo, H. Akita, K. Kogure, H. Harashima and K. Ijiro : “Dynamic Cellular Stress Sensing using Sugar Displaying CdTe Quantum Dots”, The 9th RIES-Hokudai International Symposium on “創”, Hokkaido Univ.(Sapporo) (2008-01)

10) A. Ishikawa, M. Sato, Y. Matsuo and K. Ijiro : “Preparation of Photoluminescent DNA/Ag Nanoparticles by Photore-duction”, 8th Chitose International Forum on Photonics Sci-ence & Technology -Optical Materials and Devices New Stage-, Chitose Institute of Science and Technology (CIST) (2007-11)

11) K. Ijiro : “DNA-assisted Fabrication of Photoluminescent Silver Nanoparticles”, 2007 Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience(KJFP 2007), Gyeongju,Korea, Korea (2007-11)

12) 山本貞明、水谷武臣、田中賢、伊藤絵美子、Eniwumide Joshua、森田由香、角南寛、居城邦治、川端和重、下村政嗣 :「第27回表面科学講演大会」、第27回表面科学講演大会、東京大学生産技術研究所 (2007-11)

13) 松尾保孝、佐藤壮人、石川綾子、居城邦治 :「DNA でコートした銀ナノ粒子の作製と光励起発光現象」、第60回コロイドおよび界面化学討論会、信州大学 (2007-09)

14) 神谷亮介、新倉謙一、岡嶋孝治、居城邦治 :「生理活性物質を提示した膜挿入型ポリマーによる細胞表層修飾技術の開発」、第56回高分子討論会、名古屋工業大学 (2007-09)

15) 西尾崇、新倉謙一、松尾保孝、秋田英万、小暮健太朗、原島秀吉、居城邦治 :「単一細胞のストレスをイメージングできる糖鎖プローブ分子の開発」、第56回高分子討論会、名古屋工業大学 (2007-09)

16) 石塚範子、新倉謙一、鈴木忠樹、澤洋文、居城邦治 :「ウイルスタンパク質の自己集合によるナノカプセルの作製と高効率細胞導入」、第56回高分子討論会、名古屋工業大学 (2007-09)

17) 平井悠司、藪浩、松尾保孝、居城邦治、下村政嗣 :「自己組織化により作製した銀ピラー状構造フィルム作製とそれを用いた表面増強ラマン錯乱(SERS)測定」、第56回高分子討論会、名古屋工業大学 (2007-09)

18) 田中あや、松尾保孝、居城邦治 :「ナノギャップ電極のための DNA-x-DNA トリブロック型ポリマーの酵素重合」、第56回高分子討論会、名古屋工業大学 (2007-09)

19) 居城邦治、佐藤壮人、石川綾子、松尾保孝 :「オリゴヌクレオチド/銀ハイブリットナノ粒子の作製と発光特性解析」、第56回高分子討論会、名古屋工業大学 (2007-09)

20) S. Yamamoto, M. Tanaka, J. Eniwumide, E. Ito, Y. Morita, H. Sunami, K. Ijiro and M. Shimomura : “Early Cellular Response to Micro-Patterned Surfaces in the Absence of Ahesion Proteins”, 21st European conference on Biomaterials (ESB2007), Brighton, UK (2007-09)

21) Y. Hirai, T. Higuchi, Y. Matsuo, H. Yabu, K. Ijiro and M. Shimomura : “Novel silver pincushion substrates prepared by self-organization for surface-enhanced Raman scattering spectroscopy”, SPIE Optics East 2007, Boston, USA (2007-09)

22) 門間太志、松尾保孝、居城邦治 :「カーボンナノチューブ薄膜作製のための可溶化条件の検討」、2007年秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学 (2007-09)

23) 松尾保孝、石川綾子、佐藤壮人、居城邦治 :「核酸塩基を用いて作製した銀ナノ粒子の発光特性」、2007年秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学 (2007-09)

24) 居城邦治、田中あや、佐藤壮人、橋本裕一、松尾保孝 :「分子集合体システムの金属化による機能性ナノ構造形成」、2007年秋季 第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学 (2007-09)

25) K. Ijiro, M. Sato, K. Niikura and Y. Matsuo : “DNA-metal hybrid nanomaterials”, SPIE Optics + Photonics 2007, San Diego Convention Center, USA (2007-08)

26) O. Haruta, Y. Matsuo and K. Ijiro : “DNA Base Pair-Controlled Assembly of Azobenzene at the Air-Water Interface”, SPIE Optics + Photonics 2007, San Diego Convention Center, USA (2007-08)

27) 神谷亮介、新倉謙一、岡嶋孝治、居城邦治 :「細胞表層への糖鎖提示を可能とする膜挿入型糖鎖ポリマーの合成」、第27回日本糖質学会年会、九州大学 (2007-08)

28) 新倉謙一、西尾崇、松尾保孝、秋田英万、小暮健太朗、原島秀吉、居城邦治 :「細胞のストレスイメージングを可能とする糖鎖プローブの開発」、第27回日本糖質学会年会、九州大学 (2007-08)

29) 西尾崇、新倉謙一、松尾保孝、秋田英万、小暮健太朗、原島秀吉、居城邦治 :「O-GlcNAc 提示量子ドットを用いた細胞ストレス蛍光イメージング」、第27回日本糖質学会年会、九州大学 (2007-08)

30) 新倉謙一、西尾崇、秋田英万、原島秀吉、松尾保孝、居城邦治:「糖鎖半導体ナノ微粒子による細胞ストレス可視化技術の開発」、第17回バイオ・高分子シンポジウム、上智大学 (2007-07)

31) 田中あや、松尾保孝、居城邦治 :「DNA ポリメラーゼによる塩基配列をデザインした DNA ポリマーの合成」、第17回バイオ・高分子シンポジウム、上智大学 (2007-07)

32) O. Haruta, Y. Matsuo and K. Ijiro : “Photo-Triggered Fluorescence Emission Enhancement of Azobenzene Thin Films”, ICP2007 - XXIII International Conference on Photo-chemistry, Cologne(ケルン), Germany (2007-07

～ 2007-08)

33) Y. Matsuo, M. Sato and K. Ijiro : "Photoluminescence of silver nanoparticles complexed with DNA", ICP2007 - XXIII International Conference on Photochemistry, Cologne(ケルン), Germany (2007-07 ～ 2007-08)

34) Y. Hirai, H. Yabu, Y. Matsuo, K. Ijiro and M. Shimomura : "A Highly Sensitive Substrate for Surface-Enhanced Raman Scattering Prepared by Self-Organization", 46th Microsympo-sium of PMM (Prague Meetings on Macromolecules), Prague (プラハ), Czech Republic (チェコ共和国) (2007-07)

35) S. Yamamoto, M. Tanaka, H. Sunami, E. Ito, Y. Morita, K. Ijiro and M. Shimomura : "Effect of pore size and 3D structure of honeycomb-patterned polymer films on the initial spreading process of endothelial cells", IVC-17/ICSS-13 and ICN+T, Stockholm, スウェーデン (2007-07)

36) Y. Hirai, H. Yabu, Y. Matsuo, K. Ijiro and M. Shimomura : "Pincushion Films For Highly Sensitive Surface Enhanced Raman Scattering Substrates Prepared by Self-organization", The 12th International Conference on Organized Molecular Films, Krakow (クラクフ or クラカウ), Poland (2007-07)

37) 田中あや、松尾保孝、居城邦治 :「リンカー分子を介した長鎖 DNA ブロックコポリマーの合成」、第56回高分子学会年次大会、国立京都国際会館 (2007-05)

38) 永川桂大、新倉謙一、石塚範子、鈴木忠樹、松尾保孝、澤洋文、居城邦治 :「金属ナノデバイスの構築を目指したウイルスナノカプセルの作製」、第56回高分子学会年次大会、国立京都国際会館 (2007-05)

39) 佐藤壮人、松尾保孝、居城邦治 :「DNA と複合化した銀ナノ粒子の発光挙動」、第56回高分子学会年次大会、国立京都国際会館 (2007-05)

40) 石塚範子、新倉謙一、鈴木忠樹、澤洋文、居城邦治 :「ウイルス様微粒子の細胞内導入を促進する糖鎖基板の作製」、第56回高分子学会年次大会、国立京都国際会館 (2007-05)

41) 治田修、松尾保孝、居城邦治 :「アゾベンゼンを担持した高分子薄膜における UV 照射による蛍光増強」、第56回高分子学会年次大会、国立京都国際会館 (2007-05)

42) 山本貞明、田中賢、角南寛、伊藤絵美子、森田有香、居城邦治、下村政嗣 :「血管内皮細胞の初期伸展に及ぼすハニカムフィルム細孔径の影響」、第56回高分子学会年次大会、国立京都国際会館 (2007-05)

43) S. Yamamoto, M. Tanaka, H. Sunami, E. Ito, Y. Morita, K. Ijiro and M. Shimomura : "Effect of pore size and 3D structure of honeycomb-patterned polymer films on the initial spreading process of endothelial cells", AFM Bio-Med Conference, Barcerona, スペイン (2007-04)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1） O. Haruta, Y. Matsuo and K. Ijiro : "DNA-Templated Control of Azobenzene Assembly at the Air-Water Interface", ISEM2008, Miraikan-National Museum of Emerging Science and Innovation (2008-03)

2） 永川桂大、石塚範子、新倉謙一、松尾保孝、鈴木忠樹、澤洋文、居城邦治 :「超分子ナノ材料としてのウイルスカプセルの作製」、高分子学会 第42回北海道支部研究発表会、北海道大学 (2008-01)

3） 石川綾子、佐藤壮人、松尾保孝、居城邦治 :「核酸で被覆した発光性銀ナノ粒子の作製」、高分子学会 第42回北海道支部研究発表会、北海道大学 (2008-01)

4） 神谷亮介、新倉謙一、岡嶋孝治、居城邦治 :「生理活性物質をグラフトした膜挿入型ポリマーを用いた細胞認識制御」、高分子学会 第42回北海道支部研究発表会、北海道大学 (2008-01)

5） 門間太志、松尾保孝、居城邦治 :「LB 法によるカーボンナノチューブ薄膜作製条件の検討」、高分子学会 第42回北海道支部研究発表会、北海道大学 (2008-01)

6） 松尾保孝、田中あや、居城邦治 :「単一分子素子の作製をめざした DNA-x-DNA トリブロック型 DNA ポリマーの酵素合成」、「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」平成19年度 成果報告会、東北大学 (2007-12)

7） K. Ijiro : "DNA-templated fabrication of metal nanowires and nanoparticles", Joint Symposium for the Promotion of Academic exchange on Nanotechnology and Nanobiology, Hokkaido Univ.(Sapporo) (2007-11)

8） 松尾保孝、佐藤壮人、石川綾子、居城邦治 :「DNA を用いた発光性銀ナノ粒子の作製とバイオイメージングへの応用」、第22回生体機能関連化学シンポジウム、東北大学多元物質科学研究所 (2007-09)

9） 西尾崇、新倉謙一、秋田英万、松尾保孝、原島秀吉、居城邦治:「糖鎖提示量子ドットによる細胞ストレスのイメージング技術の開発」、第22回生体機能関連化学シンポジウム、東北大学多元物質科学研究所 (2007-09)

10) 神谷亮介、新倉謙一、居城邦治 :「膜挿入型ポリマーを用いた細胞表層修飾技術の開発」、第22回生体機能関連化学シンポジウム、東北大学多元物質科学研究所 (2007-09)

11) 神谷亮介、新倉謙一、居城邦治 :「生理活性物質提示細胞膜挿入型ポリマーによる細胞表層修飾技術の開発」、2007年度北海道高分子若手研究会、ないえ温泉 ホテル北乃湯 (2007-09)

12) 永川桂大、石塚範子、新倉謙一、松尾保孝、澤洋文、居城邦治:「三次元ナノデバイス構造体を目指したウイルスナノカプセルの作製」、高分子学会 プラスチックフィルム夏季研究交流会 2007、KKR 鎌倉わかみや (2007-08)

13) 藪浩、下村政嗣、春菜ゆかり、新倉謙一、居城邦治 :「人

工ウィルスをめざした DNA-脂質ポリイオンコンプレックスからなる単一分子粒子の作製」、第17回バイオ・高分子シンポジウム、上智大学 (2007-07)

14) Y. Hashimoto, Y. Matsuo and K. Ijiro : "Nano Electroless Plating of DNA toward Fabrication of Nano Wires", Joint Symposium on Fundamental Aspects of Nanostructured Materials and Electrocatalysis, Hokkaido University (2007-06)

15) A. Tanaka, Y. Matsuo and K. Ijiro : "Enzymatic Synthesis of DNA Block Copolymers for Site-Selective Metal Deposition", Joint Symposium on Fundamental Aspects of Nanostructured Materials and Electrocatalysis, Hokkaido University (2007-06)

16) 居城邦治 :「水面単分子膜上での核酸分子の認識」、超分子組織体の構造と機能化に関するシンポジウム、東京工業大学 (2007-04)

iii）コロキウム・セミナー等・その他

1）居城邦治 :「DNA を用いた新規電子材料について」、第8回ナノ・バイオによる新電子材料研究委員会、三井業際研究所 (2007-12)

2）居城邦治 :「DNA で作るナノ構造」、JST さきがけ研究21「場と反応」懇話会2007、鹿児島 (2007-12)

3）居城邦治:「大学を取り巻く研究環境と研究者の生き残り策」、第21回 分子工学若手夏の学校、小樽 (2007-09)

4）居城邦治 :「DNA を鋳型とした機能性ナノ構造の構築」、第40回若手ペプチド夏の勉強会、おたる自然の村おこばち山荘 (2007-08)

4.9 共同研究

b. 民間等との共同研究

1）居城邦治、本望修（札幌医科大学）:「骨髄由来の細胞を用いた新規な再生医療法の開発」、(2006.10.1～現在)

d. 受託研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1) 居城邦治、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（研究代表者 : 下村政嗣）:「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」、250,000千円 (2002～2007年度)

2) 居城邦治、松尾保孝、NEDO 産業技術研究助成事業:「非対称ナノハニカム構造を持つ高機能癒着防止膜とその自己組織化プロセスの開発」、(2007～2009年度)

3) 居城邦治、科学技術振興機構 :「安定同位元素イメージング技術による産業イノベーション」、(2007～2011年度)

4.10 予算獲得状況

a. 科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）居城邦治、基盤研究 B 一般、DNA コンジュゲート導電性高分子による単一分子エレクトロニクス素子の作製 (2007～2008年度)

2）新倉謙一、基盤研究 B、シャペロンの糖鎖認識を原理とした新規細胞ストレスセンシング法の開発 (2007～2009年度)

3）新倉謙一、萌芽研究、ウイルスを鋳型とした金属微粒子 3 次元規則配列構造の構築 (2007～2008年度)

4）松尾保孝、若手研究 B、DNA 結合たんぱく質の単一分子計測に向けた伸長固定化 DNA チップの作製 (2007～2008年度)

5）治田修、特別研究員奨励費、DNA を鋳型にした金属細線の作製および X 線光学素子への応用 (2007～2008年度)

6）樋口剛志、特別研究員奨励費、高分子微粒子中の自己組織化ナノ構造を利用した単色・指向性・低閾値レーザーの開発 (2007～2008年度)

7）神谷亮介、特別研究員奨励費、細胞分化誘導を目指したプロテオグリカン様糖鎖フィルムの創製 (2006～2008年度)

8）大竹（石塚）範子、特別研究員奨励費、ウイルス様カーゴカプセル固定化基板によるセルトランスフェクションアレイの開発 (2007～2009年度)

f. その他

1）岡嶋孝治、田中賢、新倉謙一、石井勝弘（産業技術研究助成事業）:「単一細胞表層の全方向ナノダイナミクス計測技術の開発」、2006～2009年度、本研究では、生細胞表層のマイクロドメイン構造および表面ダイナミクスを測定する手法を確立する。研究開発期間の前半は、細胞の表層を選択的に計測することができる、原子間力顕微鏡（AFM）法とエバネッセント波動的光散乱法（EW-DLS）とを組み合わせた細胞表層の全方向計測装置を試作する。そして、糖鎖ナノプローブ合成技術と細胞培養制御技術を利用して細胞表層の定量測定が可能なナノ計測技術を確立する。研究期間の後半は、本研究で開発したナノ計測技術を用いて、多数個の正常細胞と異常細胞の解析結果から、生細胞表層の時空間構造と疾患との相関を解明する。

2）新倉謙一、ノーステック財団・平成19年度基盤的研究開発育成事業:「癌細胞膜を標的とした高分子型プローブ分子の創製」

4.11 受賞

1）田中あや：日本化学会学生講演賞「酵素による DNA ブロックコポリマーの合成と塩基配列に選択的な修飾」2007年5月

2）治田修：日本化学会学生講演賞「アゾベンゼンからなる薄膜の UV 照射による蛍光増強」2007年5月

3）田島孝訓：2007高分子学会東北支部研究発表会若手優秀発表賞「イオン液体を用いた発光微粒子の作製」2007年11月

4）居城邦治：第2回モノづくり連携大賞 モノづくり連携大賞「北海道の地の利と人材を活かしたバイオとナノの連携プロジェクト―自己組織化ハニカム膜の製造技術と医療応用―」（日刊工業新聞社主催、NEDO 共催、中小企業基盤整備機構特別協力）2007年11月

4.12 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）新倉謙一：経済産業省 地域技術開発支援事業に係わる事前評価委員（2007年5月14日～2009年8月31日）

b．国内外の学会の役職

1）新倉謙一：高分子学会男女共同参画委員（2007年4月1日～2009年3月31日）

2）新倉謙一：第53回高分子夏季大学運営委員（2007年4月1日～2008年3月31日）

3）居城邦治：社団法人高分子学会北海道支部幹事（2004年4月1日～現在）

4）居城邦治：社団法人高分子学会バイオ・高分子研究会運営委員（2002年4月1日～現在）

5）Kuniharu Ijiro: Asian Conference on Nanoscience & Nanotechnology (AsiaNANO), Steering Committee (2004年度～現在)

6）松尾保孝：日本化学会・生体機能関連化学部会若手の会幹事（2005年～現在）

c．併任・兼業

1）居城邦治：独立行政法人 理化学研究所 基幹研究所 分子情報生命科学特別研究ユニット 客員主管研究員（2007年12月1日～現在）

2）居城邦治：独立行政法人 科学技術振興機構「戦略的創造研究推進事業」領域アドバイザー （2006年6月19日～2010年6月18日）

3）居城邦治：独立行政法人 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 散逸階層構造研究チーム 客員研究員（2006年4月1日～2007年9月30日）

4）居城邦治：独立行政法人 日本学術振興会 科学研究費委員会専門委員（2006年1月1日～2007年12月31日）

5）居城邦治：社）日本化学会「欧文誌」編集員会 編集委員（2006年3月1日～現在）

e．新聞・テレビ等の報道

・新聞

1）居城邦治：北大学生新聞 2007年6月21日 「第49回北大祭「札幌沸騰」子供も大人も楽しめる「ナノ」から脳まで社会への応用進む 電子科学研究所 最先端科学の世界紹介」

2）居城邦治：北海道新聞 2007年12月14日 「理研内に研究室 ナノテクで連携」

f．外国人研究者の招聘（氏名、国名、期間）

1）Rudolf Zentel、Germany、（2007年11月28日）

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）全学共通、環境と人間（光・バイオ・分子で拓くナノテクノロジー）、居城邦治、2007年10月1日～2008年3月31日

2）理学部、超分子化学、居城邦治、2007年10月1日～2008年3月31日

3）理学院、物理化学特別講義Ⅰ（分子組織化学）、居城邦治、2007年10月1日～2008年3月31日

4）全学共通、ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅰ、居城邦治、2007年7月26日

5）理学院、化学研究総合講義Ⅰ、居城邦治、2007年4月01日～2007年9月30日

6）理学院、特別研究 Ⅰ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

7）理学院、特別研究 Ⅱ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

8）理学院、特別研究Ⅲ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

9）理学院、特別研究Ⅳ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

10）理学院、特別研究 Ⅴ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

11）理学院、論文購読 Ⅰ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

12）理学院、論文購読 Ⅱ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

13）理学院、論文購読Ⅲ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

14）理学院、論文購読Ⅳ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

15）理学院、論文購読 Ⅴ、居城邦治、2007年4月1日～2008年3月31日

16）全学共通、先端の化学、居城邦治、2007年4月1日～2007年9月30日

17）工学部、基礎化学 Ⅰ、居城邦治、2007年4月1日～2007年9月30日

i．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク(3名)

塚本里加子（電子科学研究所）

橋本裕一（電子科学研究所）

澤田石哲郎（理化学研究所）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（4名）

西尾崇、田島孝訓、平井悠司、吉澤恵子

・博士課程（7名）

樋口剛志、治田修、門間太志、神谷亮介、福平由佳子、田中あや、大竹（石塚）範子

・修士論文

1）西尾崇：ナノ微粒子を用いた細胞ストレス下におけるタンパク質糖鎖認識に関する研究

2）田島孝訓：自己組織化析出法によるナノ構造体高分子

微粒子及び機能性高分子微粒子の作製

3）平井悠司：自己組織化による金属微細構造体の作製とその応用

4）吉澤恵子：癌細胞の細胞活性・接着性に及ぼすハニカムフィルムの効果

・博士論文

1）治田修：Organization of Azobenzene Monolar besed on DNA-mimetics at the Air-Water Interface toward the Fabrication of Functional Thin Films（気液界面を反応場とする DNA-mimetics を利用したアゾベンゼン単分子膜の組織化と機能性薄膜の作製）

2）樋口剛志：Fabrication of nanostructured polymer particles by self-organization（自己組織化による微細構造を有する高分子微粒子の作製）

細胞機能素子研究分野

教　授　上田哲男（北大院、薬博、1998.2～）
准教授　中垣俊之（名大院、学博、2000.11～）
助　教　神　　隆（北大院、理博、1988.7～）
助　教　高木清二（名大院、学博、2003.9～）
博士研究員　三枝徹（北里大院、医博、2005.4～）
博士研究員　手老篤史（北大院、理博、2006.4～）
院　生　伊藤穂菜美（M2）
学部生　山口将大（B4）
研究生　若生公一

1．研究目標

細胞は、生物学的には全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。特に細胞原形質がしめす高度な情報処理機能、細胞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。多核のアメーバ様単細胞（図１）である真性粘菌変形体の特徴を利用して、変形体の原形質が示す情報統合や判断という脳的機能を、非線形ダイナミクスに基づいて解明する。

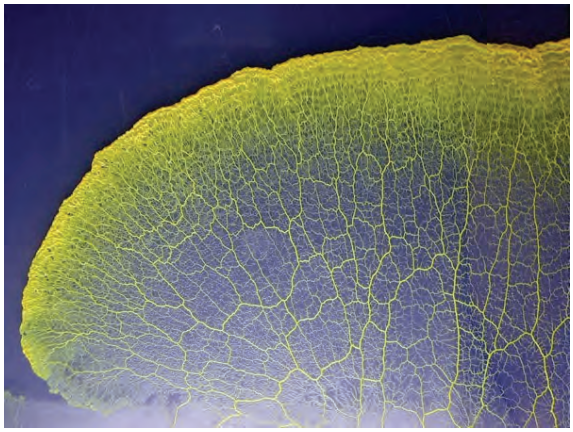


図１．寒天上を這う粘菌変形体。

2．研究成果

(a)　真正粘菌の時間記憶

高次の情報処理能力として“記憶”をする事が出来るか調べた。小さく切った粘菌変形体を寒天ゲルのレーン上に置き、移動速度を記録した。低温・乾燥の刺激を加えると粘菌は移動を止め、良い環境に戻すと移動を再開した。この刺激を60分周期で3回与え、その後は良い環境を保った。粘菌は一定状態にもかかわらず、刺激周期と同じタイミングで減速行動を示した（図2）。粘菌が環境変化を予測して、環境悪化に備えるために自身の行動を抑えたといえる。3回目の刺激から十分に時間がたった後に1回だけ刺激を与えると、60分後に減速行動を示した。あたかも、粘菌が刺激の周期性を思い出して、ブレーキをかけたかのようである。刺激周期を30分から90分の範囲で変えても、同様の応答が見られた。

この時間記憶能のメカニズムは簡単な力学モデルで説明する事ができる。粘菌の活動性（例えば変形や収縮）を長時間にわたり観察すると、速いフーリエ成分から遅いフーリエ成分まで連続的に分布していることがわかる。このような時間挙動をもたらすのは複雑な化学反応ネットワークであろうが、ここでは簡単化のために各成分を独立な一つの振動子と考えることにする。原形質のある微小な塊をとってくると、そこには自然振動数の異なるたくさんの振動子が（小さいものから大きいものまで）存在するという訳である。変形体は、巨大な原形質の塊なので、このような一連の振動数をもった振動子群が複数（例えば100000セット程度の数）存在する。細胞全体の活動性は、これら全ての振動子の総和として捉えられる。ただし、ここでは振動子間の相互作用は一切考えないものとする。さて、このような系に周期的な外力を加え、ある種のオーダーパラメタで系を特徴づけると、実験で観察されたような予想、記憶、想起が再現された。この数理モデルは、現時点では現象論的で比喩的なものであるが、何らかの意味で動力学的本質をとらえているのではないかも期待できる。今後、実験と理論の両面からその検証を進める予定である。

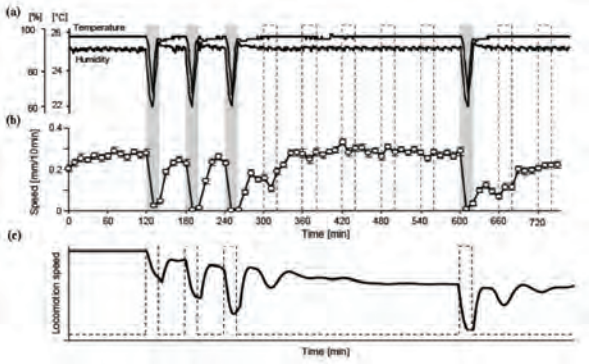


図２．周期刺激実験とシミュレーション
（a）温度と湿度の時間変化、（b）粘菌の平均移動速度（n=120）、（c）モデルシミュレーション

(b)　粘菌の逡巡行動

脳神経系を持たない単細胞生物の粘菌が高等動物の示す逡巡のような行動を示すことを発見した。レーン状の寒天ゲルの途中に忌避物質を置いた系に粘菌を這わせると、いずれ粘菌は忌避物質に出くわす。すると、粘菌は忌避物質上で移動を止め数時間留まり（個体により時間は異なる）その後移動を再開するが、その際、忌避物質濃度に応じて３通りの行動を示す。忌避物質の濃度が低い場合には粘菌は忌避領域を通り抜け、濃度が高い場合は忌避領域を通り抜けずにもと来た道を引き返してゆく。これらの中間の濃度では、忌避領域を通り抜ける部分と引き返す部分に分裂する個体が現れ、この条件ではこれら３種類の行動のうち、

どれが出現するかは個体によって異なる。

このような長時間忌避領域でとどまる、いわば逡巡のような振舞いと、その後に現れる行動の原理を理解するため、単純な反応拡散系を基にしたモデルを構築することにより粘菌の行動を再現した。その結果、これらの行動は刺激により粘菌に内在する移動端の分裂という不安定性が引き出されることに起因することがわかった。

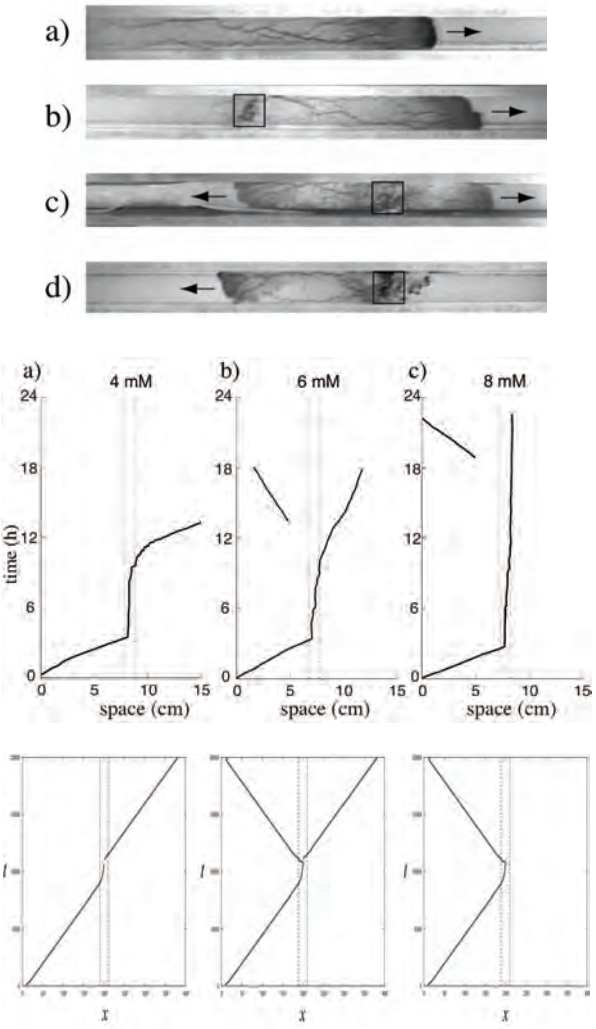


図３．上図：１次元レーン上に忌避物質が存在する場合の粘菌の行動。中図：粘菌の先端位置の時間変化。中央が忌避領域。下図：数理モデルによる粘菌の移動端の数値シミュレーション。一次元反応場を伝播するパルスの位置の時間変化。

(c)　危険度最小経路の探索

暗所にて二つの餌場所を粘菌に与えると、一本の太い管が二つの餌場所を最短の経路でつなぐように作られる。粘菌に障害性のある光を体の一部分に照射すると、しかしながら、餌場所をつなぐ管は異なる経路を示す。照射する光をどれほど嫌うか実験で定量することにより、管がとった経路が危険度最小の経路であることがわかった。危険度最小とは、場の量として定義された危険度を経路にそって積分したとき、総危険度が最小になるという意味である。これまでに提案した粘菌の適応的管ネットワークの数理モデルが、このような危険度最小経路の探索をも再現することがわかった。幾何学的最適化問題を解く新たな能力を発見した。

３．今後の研究の展望

生物情報処理機構の解明は、脳科学の華やかな国家プロジェクトを見るまでもなく、現在、最もチャレンジングなテーマの一つである。粘菌変形体は、脳や神経系を持たないにもかかわらず予想以上の情報処理能力を持っていることが我々の研究により明らかとなってきた。粘菌のような比較的単純な生物を用いることは、この分野に対する脳科学とは異なる有力な手法となるであろう

粘菌変形体は複合刺激情報を統合判断し適切な行動をとるという刺激情報の統合演算だけでなく、効率的な流路ネットワークをデザインするという空間情報の計算など、多彩な情報処理能力を持つことを明らかにしてきた。さらに、これらの能力はリズム場の示すグローバルな動的パターン形成と関係しているようだ。われわれが独自に見いだしたこれらの現象を糸口にして、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　学術論文等

１）T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki and K. Yoshiki : “Aomoebae anticipate periodic events”, Phys. Rev. Lett., 100 : 018101-1-018101-4 (2008)

２）A. Tero, R. Kobayashi and T. Nakagaki : “A mathematical model for adaptive transport network in path finding by the true slime mold”, J. Theor. Biol., 244 : 553-564 (2007)

３）H. Yamada, T. Nakagaki, B. E. Ruth and M. K. Philip : “Dispersion relation in oscillatory reaction-diffusion systems with self-consistent flow in true slime mold”, J. Math. Biol., 54 : 745-760 (2007)

４）T. Nakagaki, M. Iima, T. Ueda, Y. Nishiura, T. Saigusa, A. Tero, R. Kobayashi and K. Showalter : “Minimum-risk path finding by an adaptive amoebal network”, Phys. Rev. Lett., 99 : 068104- (2007)

５）S. Takagi, T. Ueda: “Emergence and transition of dynamic patterns in thickness oscillation by the plasmodium of the true slime mold Physarum polycephalum”, Physica D, 237: 420-427 (2008).

６）M.D. Fricker, M. Tlalka, D. Bebber, S. Takagi, S.C. Watkinson, P.R. Darrah, Fung. Genet. Biol, 44 : 1077-1084(2007).

4.2　総説、解説、評論等

１）T. Nakagaki and R. D. Guy : “Intelligent behaviors of amoeboid movement based on complex dynamics of soft

matter", Soft Matter, 4 : 57-67 (2008)

2）手老篤史、小林亮、中垣俊之：「アメーバの迷路解きに学ぼう」、数理科学、(535)：7-11 (2008)

3）手老篤史、中垣俊之、小林亮：「アメーバに学ぶ経路探索の方法」、Materials Integration、20(5)：55-60 (2007)

4）小林亮、手老篤史、中垣俊之：「粘菌による迷路の解法」、細胞工学、26(7)：769-773 (2007)

4.3 国際会議議事録等に掲載された論文

1）T. Nakagaki, T. Saigusa, A. Tero and R. Kobayashi : "Effects of food amount on path selection in transport network of an amoeboid organism", Topological Aspects of Critical Systems and Networks, World Scientific : 94-100 (2007)

2）T. Saigusa and T. Nakagaki : "Anticipation of periodic environmental change in an amoeba", Noise and Flucturations, AIP conference proceeding Vol. 922, AIP (American Institute of Physics) press, New York : 655-658 (2007)

3）S. Takagi, Y. Nishiura, T. Nakagaki, T. Ueda and K. Ueda : "Indecisive behavior of amoeba crossing an environmental barrier", Proceedings of the international symposium on "Topological Aspects of Critical Systems and Networks", World Scientific Publishing Co. : 86-93 (2007)

4.4 著書

1）中垣俊之：「粘菌の行動に見る賢さ」、粘菌 -驚くべき生命力の謎- （松本淳解説、伊沢正名写真）、誠文堂新光社：118-119 (2007)

4.7 講演

a．招待講演

1）T. Nakagaki, "Optimization in an amoeboid System", European Conference on Complex Systems - Dresden, Germany (2007-10).

2）S. Takagi: "Various dynamic patterns and pattern transitions in the rhythmic contraction by true slime mould Physarum polycephalum", Satellite Workshop in European Conference on Complex Systems - Dresden, Germany (2007-10).

b．一般講演

i）学会

1）T. Nakagaki, A. Tero, T. Saigusa and R. Kobayashi : "Functional networking by an amoeba", NSC Winter Workshop 2008: Complex Nonlinear Dynamics ranging from Biology to Engineering, Hokkaido Univrsity (2008-03)

2）T. Nakagaki, S. Takagi, T. Ueda, K. Ueda and Y. Nishiura : "Cell bahaviors in heterogeneous media in an amoeba of true slime mold", 6th international Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zurich, Switzerland (2007-07)

3）S. Takagi : "Dynamic Patterns of Thickness Oscillation in Endoplasmic Droplet", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Utah, USA (2007-05 ～ 2007-06)

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）A. Tero, T. Saigusa and T. Nakagaki : "A way of protoplasmic computing to memorize and recall periodic environmental events", 2nd International Workshop on Natural Computing (IWNC2007), Nagoya Univ (2007-12)

2）中垣俊之、手老篤史、小林亮：「粘菌ネットワークの流量適応ダイナミクス」、第13回交通流のシミュレーションシンポジウム、名古屋大学 (2007-12)

3）小林亮、弓木健嗣、手老篤史、中垣俊之：「A Biologically Motivated Shortest Path Finding Problem」、数理解析研究所研究集会、京都 (2007-11)

4）中垣俊之、手老篤史、三枝徹、小林亮：「生物の賢さを生み出す情報処理のしくみーアメーバの事例からー」、北海道大学創成科学シンポジウム、北海道大学 (2007-11)

5）R. Kobayashi, A. Tero and T. Nakagaki : "Dynamical Synchronization in True Slime Mold - Maze Solving Amoeba -", The 23rd Symposium of the Society of Population Ecology "Spatial Structure and Dynamics of Ecological System", Sapporo (2007-10)

6）中垣俊之、高木清二、手老篤史、三枝徹、小林亮：「細胞行動のダイナミクスに学ぶ自律分散制御」、第一回 SICE 生物制御システム調査研究会、早稲田大学 (2007-10)

7）T. Nakagaki, S. Takagi, T. Saigusa, A. Tero and R. Kobayashi : "Optimization in an amoeboid system -Networking multiple food-locations-", European Conference on Complex Systems, Dresden, Germany (2007-10)

8）R. Kobayashi, A. Tero, T. Nakagaki and K. Yumiki : "A Biologically Motivated Shortest Path Finding Algorithm", The Workshop on Mathematical Modelling and Analysis of Biological Pattern Formations and the Related Topics, Nagoya (2007-09)

9）K. Matsumoto, S. Takagi and T. Nakagaki : "Locomotive Mechanism of Physarum Plasmodia based on Spatiotemporal Analysis of Protoplasmic Streaming", BIOCOMP07 -Collective dynamics: Topics On Competition And Cooperation In The Bioscience-, Vetri Sul Mare, Italy (2007-09)

10）T. Saigusa, A. Tero and T. Nakagaki : "Anticipating and recalling the periodic events in an amoeba", the 19th International Conference on Noise and Fluctuations,

Tokyo (2007-09)

11) R. Kobayashi, A. Tero and T. Nakagaki : "A Biologically Motivated Shortest Path Finding Algorithm", Mathematical Modeling and Analysis in Biological and Chemical Systems, Orsay, France (2007-09)

12) 中垣俊之、三枝徹、手老篤史、小林亮:「Physarum solver: アメーバに学ぶ計算法－基礎と応用－」、第13回創発システムシンポジウム －相互作用を考える－、富山市 (2007-08)

13) T. Saigusa and T. Nakagaki : "Amoebae of true slime mold show intellegent behavior", 2007 International Ethological Conference, Halifax, Nova Scotia, Canada, Canada (2007-08)

14) T. Saigusa, A. Tero and T. Nakagaki : "Learning of time interval in an amoeba", International Symposium on "Topology and Singularity in Optical Physics", Sapporo (2007-07)

15) K. Matsumoto, S. Takagi and T. Nakagaki : "Locomotive Mechanism of Physarum Plasmodia based on Spatiotemporal Analysis of Protoplasmic Streaming", International Symposium on "Topology and Singularity in Optical Physics", Sapporo (2007-07)

16) T. Nakagaki, A. Tero, R. Kobayashi and T. Saigusa : "Sovling network problem by amoeba: dynamics and computation", Conference on Unconventional Computiong, Bristol, UK (2007-07)

17) 中垣俊之、手老篤史、小林亮:「アメーバ様生物粘菌の賢さとその自律分散的しくみ」、計測自動制御学会 システム・情報部会主催 第40回自律分散システム部会研究会、北海道大学 (2007-06)

18) T. Nakagaki, K. Matsumoto and S. Takagi : "Minisymposium "Dynamics of Protoplasm in Physarum Plasmodium" Introduction to protoplasmic dynamics in Physarum", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Saltlake City, USA (2007-05 ～ 2007-06)

19) A. Tero, T. Nakagaki and T. Saigusa : "Learning and recalling the periodic environmental changes in an amoeba", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Saltlake City, USA (2007-05 ～ 2007-06)

20) A. Tero, R. Kobayashi, T. Nakagaki and T. Saigusa : "Modeling of the adaptive network of true slime mold", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Saltlake City, USA (2007-05 ～ 2007-06)

21) T. Nakagaki, T. Saigusa and A. Tero : "An amoeba can anticipate periodic events", NSC spring workshop 2007: Complex Dynamics in Physics, Chemistry and Biology, Hokkaido University, Sapporo (2007-05)

4.10 予算獲得状況

a. 科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）中垣俊之、萌芽研究、粘菌アルゴリズム：制約条件付き最適化問題の生物模倣型解法、2006～2007年度

2）高木清二、基盤研究 C 一般、多様な動的パターンの選択に基づく細胞インテリジェンスの創発、2006～2007年度

e. ＣＯＥ関係（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容）

1）中垣俊之（文部科学省21COE プログラム「トポロジー理工学の創成（代表 丹田聡）」）:「生物トポロジーの研究」、2004～2008年度、21COE プログラム「トポロジー理工学の創成（代表 丹田聡）」のサブリーダーとして参加

f. その他（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

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」、2002～2007年度、粘菌が環境に適応的に作るコミュニケーションネットワークの機能性を評価し、その形成機構を数理モデル化を通じて解明する

4.12 社会教育活動

b. 国内外の学会の役職

1）上田哲男：生物物理学会・運営委員（2001年4月1日～現在）

c. 併任・兼業

1）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）

2）中垣俊之：理化学研究所非常勤研究員（2000年11月20日～現在）

d. その他

1）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）

e. 新聞・テレビ等の報道

・新聞

1）手老篤史、中垣俊之、小林亮：中国新聞 2007年6月7日 「迷路解く単細胞生物 － 粘菌の動きを数理モデル化 －」

2）中垣俊之：日刊工業新聞 2007年4月19日「国際ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム（HFSPO）の2007年のグラント分野受賞者に関する新聞記事に、受賞者として紹介された。「自然システムにおける最適化：あり、ミツバチ、粘菌」」

・雑誌

1）Y. Kuramoto, T. Saigusa, A. Tero and T. Nakagaki : Nature 2008年1月24日 "Nature 誌（Vol 451, p. 385）の News and views に1ページにわたり我々の粘菌研究（周期環境変動を学習するという Phys Rev Lett の論文内

容が紹介された。） 記事を書いたのは Philip Ball で、タイトルは Cellular memory hints at the orgins of intelligence.”

2）T. Nakagaki：Ode 2007年5月1日“オランダ、米国などの国際的に出版されている（英語版とオランダ語版をあわせて10万部）生活雑誌の科学欄に我々の粘菌研究が紹介された。”

ｆ．外国人研究者の招聘（氏名、国名、期間）

1）Benjamin Rapoport、USA、（2007年8月27日～2007年8月28日）

ｇ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）医学部、基礎特別演習、上田哲男、中垣俊之、高木清二、2008年2月19日～2008年3月9日

2）全学共通、トポロジー理工学特別講義１、中垣俊之、2007年6月22日

3）理学院、細胞情報学特論、中垣俊之、2007年6月6日～2007年7月28日

4）理学院、生命理学概論、中垣俊之、2007年5月16日

ｉ．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク（2名）

手老篤史、三枝徹

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～）
准教授　竹内繁樹（京大院、理博、1999.10～2007.5）
助　教　藤原英樹（北大院、工博、2005.7～）
ポスドク　ソージャエフ・アレクサンドレ（Franche Comte Univ., Ph.D., 2003.10～2007.9）
岡本　亮（北大院、工博、2006.4～2007.7）
高島秀聡（北大院、情科博、2007.4～）
院　生
博士課程
川瀬大輔、永田智久、シャハルル・カドリ・アヨプ
修士課程
浜端洋右、浅井健志、市橋和明、上田哲也、谷田真人、中村真一郎

1．研究目標

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

(a)　2粒子間相互作用のポテンシャル解析法の開発

コロイド分散系などの多体系のダイナミクスを考えた場合、粒子間には様々な微弱力が働くため、沈降、分散、凝集といった動的挙動を解析するには、巨視的観点ではなく微視的観点から粒子間の相互作用を調べることが非常に重要である。本研究では、ポテンシャル解析手法を2つの微小物体間に働く微弱力解析に拡張する為のシステムの開発を行った。図は、2つの微粒子の速度に対してプロットしたポテンシャル形状を示しており、微粒子間距離に応じてポテンシャル形状が変化する様子を確認した。

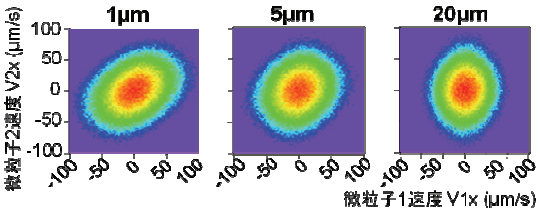


図１．微粒子1，2の中心を結ぶ方向の速度に関する運動ポテンシャル形状の２粒子間距離依存性。

(b)　高空間･周波数分解分光イメージングシステムの開発

金属ナノ構造の局在表面プラズモンにより誘起される強い光局在場を利用した、光・物質間の強い相互作用を利用した強結合光反応（表面増強ラマン散乱や2光子光重合）の研究が盛んに行われている。この金属ナノ構造の光局在特性は、ナノ構造のサイズや形状に強く依存することが知られているが、そのナノ空間における光局在特性について数値解析やバルクでの光学特性評価は行われているものの、実験的に光局在場がナノ構造の何処で、どのように発生しているのかについて評価する方法は十分に確立されていない。本研究では、金属ナノ構造中の光局在場を原子間力顕微鏡(AFM)のプローブで散乱させることにより、金属ナノ構造体の形状とその光局在特性をナノメートルオーダーの高空間分解能で同時イメージングできる AFM プローブ型狭帯域レーザー顕微分光システムの構築を行った。

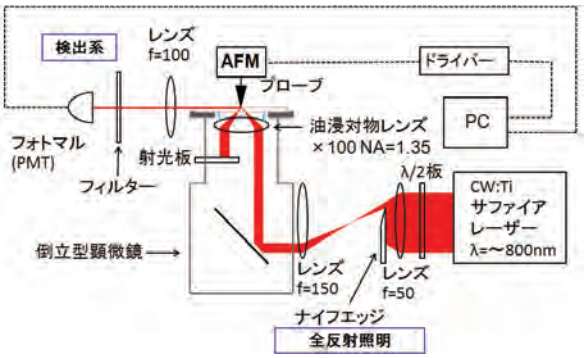


図２．高空間分解分光イメージングシステムの概念図。

(c)　テーパファイバの細線化技術の確立

シングルモードファイバを熱して、引き伸ばすと、引き伸ばされた部分が細くくびれた特殊なファイバを作製することができる。このようなファイバはテーパファイバと呼ばれる。テーパファイバのくびれ部分からは直接光が染み出しており、他の光導波路や、光共振器、また発光微粒子といったものと光をやりとりすることが可能になる。このくびれ部分は細ければ細いほど、より強力に、他の光デバイスと光をカップリングすることができるようになる。ま

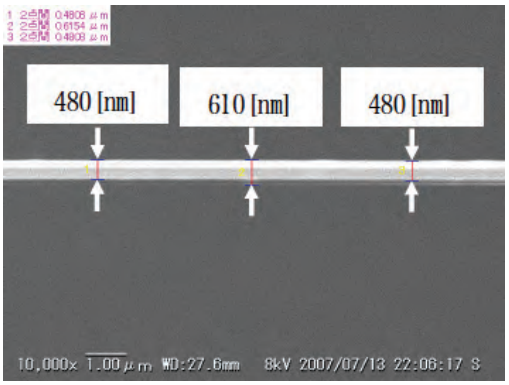


図３．作製したテーパファイバの電子顕微鏡像。

た細くなると、くびれ部分内部の光エネルギー密度が高くなるため、その部分に非線形光学媒質を導入することで、これまでにない高い非線形応答が期待できる。

我々は、より細いテーパファイバ作製技術を確立することで、細さ約500nmのテーパファイバを実現した（図３）。

(d)　ファイバ結合微小球共振器を用いた発光制御

ファイバ結合微小球は高いＱ値と高効率光入出力が可能な微小共振器として注目されている。我々はErとＰをドープしたゾルゲルガラスをゲイン層としてコートした微小球をファイバと結合させることで、これまでにない薄い膜厚でのレーザー発振に成功した。

さらに、このゲイン層の位置を制御することで、Erイオンが放出した自然放出光が微小球に結合する割合を増大させることができることを見いだした（図４）。

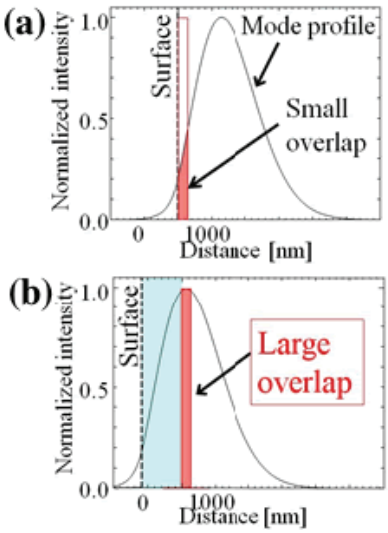


図４．(a)ゲイン層位置制御がない場合のゲイン層とモード分布のオーバーラップ　(b)ゲイン層を制御することで、モード分布とゲイン層のオーバーラップを増強させた場合。

(e)　量子もつれ合い光を用いた回折限界を超える干渉縞

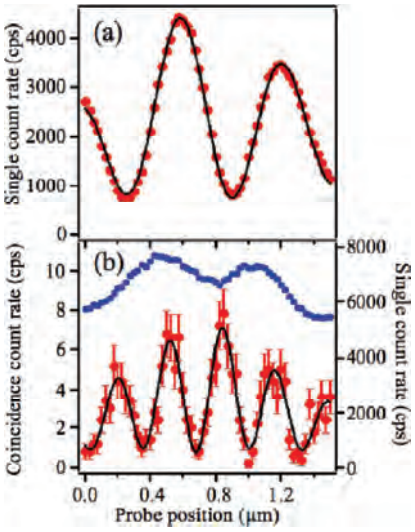


図５．干渉縞観測結果：(a) 単一光子の干渉縞　(b)量子もつれ合い光子対の干渉縞。

レーザー光を用いたリソグラフィーでは、用いる光の回折限界によって、加工の細線化に原理的な限界が存在する。しかし近年、量子もつれ合い光を用いることで、回折限界を超える干渉縞の実現が可能になることが分かってきた。しかし、これまで、実際に回折限界を超える干渉縞を観測した報告はなかった。

我々は、高精度な２光子もつれ合い状態を発生させ、それらを干渉させることで、回折限界を超える干渉縞を作った。そして、サブミクロンの空間解像度を持った、NSOMプローブを用いることで、初めて、実際に回折限界を超える干渉縞を観測することに成功した（図５）。

(f)　欠陥領域を用いたランダム構造内に誘起される局在モード特性の構造依存性の解析

不規則な屈折率分布を持つランダム構造は簡便かつ安価な微小共振器構造として注目されているが、不規則さのため構造内の局在モードの制御は困難である。これに対し我々は、構造中の散乱体を配置しない欠陥領域を利用した局在モードの制御方法について提案している。本研究では、数値解析により構造中の導波路に束縛された局在モード示し、ランダム構造内導波路の屈折率等の構造パラメータが局在モードに及ぼす影響に検討した。その結果、導波路構造に束縛された局在モードが、散乱体サイズ、導波路サイズ、充填率に応じて変化する様子を確認し、最適な構造パラメータに関する条件が存在する事を確認した。

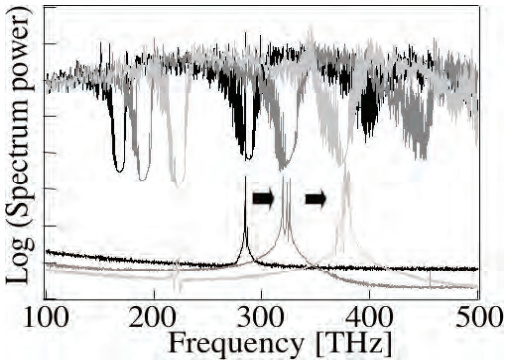


図６．ランダム構造の透過特性（上図）と導波路構造を有するランダム構造の共鳴特性（下図）。散乱体円柱直径が400, 350, 300nmと変化すると、ピークやディップがブルーシフトする。

３．今後の研究の展望

本研究分野では現在、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度のプロジェクトとして「光子間の高効率固体量子位相ゲートの実現に関する研究」の研究を量子情報フォトニクス研究分野との共同研究として実施している。また、科学研究費課題として、「放射圧を利用した非破壊光子検出法の開発」、「超狭帯域レーザー顕微分光イメージングを用いた高次機能性構造の光局在反応解析」、「空中フォトニック結晶ファイバを用いた、光子の量子位相ゲートに関する研究」、「パラメトリック蛍光対を用いた、２光子干渉におけ

る光子のアンチバンチングの実現」の研究を遂行中である。さらに、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業のプロジェクトとして「多光子量子演算ゲートの研究」、「ランダム構造内の欠陥領域を利用した光局在モード制御」の研究を遂行中である。これらのプロジェクトの展開として、(a) 光子を用いた線形量子計算の実現、(b) テーパファイバー結合微小球を用いた単一光子制御デバイスの開発、(c) パラメトリック蛍光対を用いた光子数状態の制御、(d) 輻射場を制御した単一分子の分光計測、(e) 高量子効率光子数検出器の開発と特性解析、(f) もつれ合い光子を用いた量子リソグラフィー要素技術開発、(g) 高空間分解分光イメージングシステムの構築、(h) 単一光子制御デバイスの作製と特性解析、(i) ナノ構造体による光制御技術の開発、(j) 光ナノ計測を用いた微粒子間相互作用力測定、等の研究テーマを遂行する予定である。

4．資料

4.1　学術論文等

a．学術論文

1）T. Nagata, R. Okamoto, J. O'Brien, K. Sasaki and S. Ta-keuchi : "Beating the Standard Quantum Limit with Four Entangled Photons", Science, 316 : 726-729 (2007)

2）Y. Kawabe, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki : "In-vestigation of the Spatial Propagation Properties of Type-I Parametric Fluorescence by Use of Tuning Curve Filtering Method", Jpn. J. Appl. Phys., 46(9A) : 5802-5808 (2007)

3）Y. Kawabe, H. Fujiwara, R. Okamoto, K. Sasaki and S. Takeuchi : "Quantum interference fringes beating the dif-fraction limit", Opt. Exp., 15(21) : 14244-14250 (2007)

4）Y. Yokota, K. Ueno, V. Mizeikis, S. Juodkazis, K. Sasaki and H. Misawa : "Optical characterization of plasmonic metallic nanostructures fabricated by high-resolution li-thography", Journal of Nanophotonics, 1 : 011594/1-15 (2007)

5）K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, D. Ohnishi, K. Sasaki, and H. Misawa : "Inhibition of multipolar plasmon excita-tion in periodic chains of gold nanoblocks", Opt. Exp., 15(25) : 16527-16539(2007)

6）K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, K. Sasaki and H. Mi-sawa : "Clusters of Closely Spaced Gold Nanoparticles as a Source of Two-Photon Photoluminescence at Visible Wavelengths", Advanced Materials,　20(1): 26-30 (2008)

7）H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi : "Control of spontaneous emission coupling factor β in fiber-coupled microsphere resonators", Appl. Phys. Lett., 92(7) : 07115/1-07115/3 (2008)

4.2　総説・解説・評論等

1）竹内繁樹:「他分野でいま何が話題？⑮－量子光学－光子を自在に操り光量子コンピュータの実現を目指す」、化学（CHEMISTRY）、化学同人、62 : 39-42 (2007)

2）竹内繁樹 :「線形工学素子を用いた量子計算-その仕組みと最新状況-」、オプトロニクス、オプトロニクス社、26(12) : 218-224 (2007)

4.4　著書

1）竹内繁樹 :「第３章 光子どうしの相関を操る」、光と物理学、京都大学学術出版会、嶺重慎、高橋義朗、田中耕一郎 編 : 45-62 (2007)

4.6　特許

a．国内特許

1）長谷川俊夫、西岡毅、安部淳一、竹内繁樹 : 特願2007-158655号、量子暗号送信装置及び量子暗号システム及び量子暗号送信方法及び量子暗号送受信、2007年6月15日

b．国際特許

1）K. Ueno, H. Misawa, K. Sasaki and Y. Tsuboi : US-2008-0160287-A1、金属構造体およびその製造方法、2007年8月17日

4.7　講演

a．国際会議招待講演

1）K. Sasaki : "Photon force analysis and spectroscopy", 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics (APBP 2007), Shangri-la Hotel, Australia (2007-07)

2）H. Fujiwara, T. Chiba, S. Tamura, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Analysis of single-molecule emission dynamics using photon interarrival time recording", SPIE Optics & Photonics 2007, SanDiego convention center, USA (2007-08)

3）K. Sasaki : "Novel properties of a micropsherical cavity coupled with a tapered fiber", CREO Pacific Rim 2007(The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Elec-tro-Optics), COEX Convention Center, Seoul, Korea (2007-08)

b．国内会議招待講演

1）笹木敬司、藤原英樹、高島秀聡、竹内繁樹 :「テーパファイバ結合微小球共振器における分子発光プロセス」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

c．国際会議一般講演

1）T. Nagata, R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Analysis of errors in an optical Controlled-NOT gate with a high-precision testing bed", The Euro-pean Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/

Europe-IQEC), The ICM Center of the New Munich Trade Fair Centre, Germany (2007-06)

2）A. Soujaeff, S. Takeuchi, K. Sasaki, T. Nishioka, T. Tsu-rumaru, T. Hasegawa and M. Matsui : "Secure quantum key distribution over 40km of fiber with a pulsed heralded single photon source", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-IQEC), The ICM Center of the New Munich Trade Fair Centre, Ger-many (2007-06)

3）Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and T. Masahide : "Control of spontaneous emission coupling factor in fiber-coupled microsphere resonators", SPIE Photonics West 2008, San Jose, California, USA (2008-01)

4）T. Nagata, R. Okamoto, J. O'Brien, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Four Photon NOON State Interferometer", 2008 International Symposium on Global COE Program of Center for Next-Generation Information Technology based on Knowledge Discovery and Knowledge Federation, International Conference Hall, Hokkaido University (2008-01)

5）R. Okamoto, T. Nagata, J. O'Brien, S. Takeuchi and K. Sasaki : "Control of spontaneous emission coupling factor in tapered-fiber-coupled microspheres", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Creative Re-search Initiative "Sousei", Hokkaido University (2008-01)

6）H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi : "Control of spontaneous emission coupling factor in tapered-fiber-coupled microspheres", The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Creative Re-search Initiative "Sousei", Hokkaido University (2008-01)

d．国内会議口頭発表

1）上野貢生、澁谷俊志、横田幸恵、ミゼイキス ビガンタス、ヨードカジス サウリウス、笹木敬司、三澤 弘明：「非線形光重合反応による金属ナノ構造に局在した光電場強度分布のナノイメージング」、第５６回分析化学討論会、徳島 (2007-09)

2）浜端 洋右、藤原英樹、笹木敬司 ：「ランダム構造内導波路における局在モード特性の数値解析」、2007年秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学 (2007-09)

3）村澤尚樹、上野貢生、渋谷俊志、横田幸恵、ミゼイキス ビガンタス、ヨードカジス サウリウス、笹木敬司、三澤 弘明：「非線形光重合反応による金ナノブロック構造の電場強度空間分布の可視化」、第68回応用物理学会学術講演会、北海道 (2007-09)

4）高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司、高橋 雅英：「ファイバー結合微小球共振器における自然放出結合係数の制御」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

5）川瀬 大輔、竹内繁樹、宮本 洋子、笹木敬司、武田 光夫:「軌道角運動量重ね合わせ状態検出における余分な方位角成分の影響」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

6）永田智久、岡本亮、ホフマン F. ホルガ、竹内繁樹、笹木敬司：「高精度評価系による、光制御ノットゲートのエラー解析」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

7）岡本亮、オブライエン ジェレミィ、ホフマン F. ホルガ、永田智久、竹内繁樹、笹木敬司：「非局所量子フィルタの検証実験」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学札幌キャンパス (2007-09)

8）藤原英樹：「回折限界を越えた干渉縞の実証実験」、井元 CREST 洞爺湖ミーティング、壮瞥町洞爺湖温泉 (2007-09)

9）岡本亮：「非局所量子フィルタの検証実験」、井元 CREST 洞爺湖ミーティング、壮瞥町洞爺湖温泉 (2007-09)

10）高島秀聡:「ファイバー結合微小球における自然放出結合係数の制御」、井元 CREST 洞爺湖ミーティング、壮瞥町洞爺湖温泉 (2007-09)

11）藤原英樹、笹木敬司：「ランダム構造の光反応場への応用」、４研究所アライアンス G2ミーティング、大阪大学産業科学研究所 (2007-09)

12）岡本亮、永田智久、オブライエン ジェレミィ、笹木敬司、竹内繁樹：「４光子干渉による古典限界を超えた位相測定」、ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム、東京大学駒場Ｉキャンパス (2007-10)

13）浅井健志、小西秀典、高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司:「テーパファイバ結合微小球共振器の共鳴モードにおける光位相シフト」、第17回量子情報技術研究会(QIT17)、山陽新聞社さん太ホール (2007-11)

14）藤原英樹、浜端 洋右、笹木敬司：「ランダム構造内導波路を用いた局在モード制御の試み」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

15）市橋 和明、藤原英樹、笹木敬司：「フォトンフォース計測を用いた２粒子間相互作用の解析」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

16）千葉 孝志、藤原英樹、堀田 純一、竹内繁樹、笹木敬司:「ポリマーフィルム中単一分子の三重項状態寿命の時間応答解析」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

17）高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司、高橋 雅英：「テーパーファイバー結合微小球における自然放出結合係数の制御」、日本光学会年次学術講演会 Op-tics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)

18) 岡本亮、永田智久、オブライエン ジェレミィ、竹内繁樹、笹木敬司:「4光子干渉による古典限界を超えた位相測定」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007、大阪大学コンベンションセンター (2007-11)
19) 藤原英樹:「ランダム構造内の欠陥領域を利用した光局在モード制御」、さきがけ「物質と光作用」第3回領域会議、岩沼屋(宮城県仙台市)(2007-11)
20) 村澤尚樹、上野貢生、渋谷俊志、横田幸恵、ミゼイキス ビガンタス、ヨードカジス サウリウス、笹木敬司、三澤弘明:「非線形光重合反応を利用した金ナノブロック構造の近接場強度分布の可視化」、第18回日本 MRS 学術シンポジウム、東京 (2007-12)
21) 岡本亮:「非局所量子フィルタの検証実験」、第3回量子情報ワークショップ、リゾーピア熱海 (2007-12)
22) 藤原英樹、笹木敬司:「微小共振器構造を用いた光子マニピュレーション」、「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」平成19年度成果報告会、東北大学片平さくらホール (2007-12)
23) 浜端洋右、藤原英樹、笹木敬司:「ランダム構造内導波路を用いた局在モード制御」、第2回日本分光学会北海道支部学生シンポジウム、北海道大学創成科学研究棟 (2008-03)
24) 永田智久、岡本亮、ホフマン F. ホルガ、竹内繁樹、笹木敬司:「高精度評価系による、光制御ノットゲートのエラー解析 II」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学大学本部キャンパス (2008-03)
25) 浅井健志、小西秀典、高島秀聡、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司:「テーパファイバ結合微小球共振器の共鳴モードにおける光位相シフト」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学大学本部キャンパス (2008-03)
26) 谷田真人、岡本亮、永田智久、竹内繁樹、笹木敬司:「独立した伝令付き単一光子源による Hong-Ou-Mandel ディップ」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学大学本部キャンパス (2008-03)
27) 高島秀聡、浅井健志、上田哲也、藤原英樹、竹内繁樹、笹木敬司:「低温での微小球共振器とテーパーファイバーとのカップリング」、2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学理工学部 (2008-03)

4.9 共同研究

c. 民間等との共同研究

1) 竹内繁樹: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」、(2007) 4,000千円

d. 受託研究

1) 竹内繁樹、ホフマン F. ホルガ、ソージャエフ アレクサンドレ、岡本亮(科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」):「多光子量子演算ゲートの研究」、(2003～2008)
2) 竹内繁樹、笹木敬司、藤原英樹、ホフマン F ホルガ(戦略的情報通信研究開発制度(SCOPE)特定領域重点型研究開発(情報通信新技術・デバイス技術)):「光子間の高効率固体量子位相ゲート素子の実現に関する研究」、(2006～2007)
3) 藤原英樹(科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(さきがけタイプ)):「ランダム構造内の欠陥領域を利用した光局在モード制御」、(2007～2010)

f. その他

1) 竹内繁樹、ホフマン F. ホルガ、ソージャエフ アレクサンドレ、岡本亮(科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」):「多光子量子演算ゲートの研究」、(2003～2008)
2) 藤原英樹(科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(さきがけタイプ)):「ランダム構造内の欠陥領域を利用した光局在モード制御」、(2007～2010)

4.10 予算獲得状況

a. 科学研究費補助金

1) 竹内繁樹:若手研究 A「空中フォトニック結晶ファイバを用いた、光子の量子位相ゲートに関する研究」(2005～2007)
2) 竹内繁樹:萌芽研究「パラメトリック蛍光対を用いた、2光子干渉における光子のアンチバンチングの実現」(2006～2007)
3) 笹木敬司: 基盤研究 A「放射圧を利用した非破壊光子検出法の開発」(2006～2009)
4) 笹木敬司:特定領域研究 「超狭帯域レーザー顕微分光イメージングを用いた高次機能性構造の光局在反応解析」(2007～2010)

4.11 受賞

1) S. Takeuchi, K. Sasaki, J. O'Brien, R. Okamoto and T. Nagata:第6回 SCIENTIFIC AMERICAN50 "Quantum metrology に関する研究"(Scientific American 誌)(2007.12)

4.12 社会教育活動

a. 公的機関の委員

1) 竹内繁樹:総務省 戦略的情報通信研究開発推進制度専門評価委員 (2002.7.11～現在)
2) 竹内繁樹:独 情報通信研究機構 高度通信・放送研究開発委託研究評価委員会 専門委員 (2004.4.01～2010.3.31)
3) 笹木敬司:ノーステック財団「研究開発助成事業」審査委員会 専門委員 (2005.6.6～2008.3.31)
4) 笹木敬司:科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業領域アドバイザー (2005.6.9～2009.6.8)
5) 笹木敬司:日本学術振興会科学研究費委員会 専門委員

(2006.1.1～2007.12.31)

6）笹木敬司：日本学術振興会産学協力研究委員会「フォトニクス情報システム第179委員会」委員（2006.4.1～2008.3.31）

7）笹木敬司:OPJ2007 実行委員長（2007.4.1～2008.3.31）

8）藤原英樹：OPJ2007 実行委員 （2007.4.1～2008.3.31）

c．併任・兼業

1）竹内繁樹：電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（1998.11.01～現在）

2）竹内繁樹：量子情報技術研究会 委員（1998.11.01～現在）

3）竹内繁樹：科学技術振興機構 領域アドバイザー（2003.7.24～2009.3.31）

4）笹木敬司：日本光学会（応用物理学会）幹事（2006.4.1～現在）

5）藤原英樹：科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業個人研究型（さきがけ）委嘱研究者（2007.10.1～2011.3.31）

d．その他

1）竹内繁樹：Nonlinear Optics, Quantum Optics 編集委員（2003.4.1～現在）

2）笹木敬司：Japanese Journal of Applied Physics 編集委員（2003.4.1～2008.3.31）

e．新聞・テレビ等の報道

・新聞

1）竹内繁樹：読売新聞「量子もつれ」応用 超精密の計測」(2007.5.4)

2）竹内繁樹：日刊工業新聞「光位相測定 限界値突破に成功」 (2007.5.5)

3）竹内繁樹：日経産業新聞「限界値超え精密に/特別な光で距離など測定」(2007.5.6)

4）竹内繁樹：科学新聞「従来の限界超える光位相測定に成功 量子もつれ合い状態の4個の光子用いる」(2007.5.18)

5）竹内繁樹：朝日新聞「光子で距離・密度を測定」(2007.5.25)

6）竹内繁樹、笹木敬司：北海道新聞 「光技術の北大・ナノテクの阪大 次世代半導体開発で連携」(2007.10.30)

7）竹内繁樹、笹木敬司：日経産業新聞「北大の研究チーム誘致 阪大産研次世代素子を共同開発」(2007.10.30)

8）竹内繁樹、笹木敬司：朝日新聞 「阪大の中に北大研究室 スペース借り活動「ヨコの連携必要」(2007.10.30)

9）竹内繁樹、笹木敬司：毎日新聞「北大と阪大連携研究へ-協力協定に調印」(2007.10.30)

10）竹内繁樹、笹木敬司：日刊工業新聞「ポストシリコン研究技術連携を本格化-阪大ラボで北大が活動 新デバイステーマに5年間」(2007.10.30)

f．外国人研究者の招聘（氏名、国名、期間）

1）Jeremy L. O'Brien、UK、2007.04.19～2007.04.29

2）Jun g sang Kim、USA、2007.07.01～2007.07.03

3）Jeremy L. O'Brien、UK、2007.07.23～2007.07.27

4）Holger F. Hofmann、JAPAN、2007.07.24～2007.07.26

5）Jun-ichi Hotta、Belgium、2007.9.29～2007.10.03

6）Oliver Benson、Germany、2007.10.28～2007.10.29

7）Holger F. Hoffmann、Japan、2008.01.07～2008. 01.08

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別演習、笹木敬司、2007年4月1日～2008年3月31日

2）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別研究第二、笹木敬司、2007年4月1日～2008年3月31日

3）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別研究第一、笹木敬司、2007年4月1日～2008年3月31日

4）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別研究第一、竹内繁樹、2007年4月1日～2008年3月31日

5）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別研究第二、竹内繁樹、2007年4月1日～2008年3月31日

6）情報科学研究科、情報エレクトロニクス特別演習、竹内繁樹、2007年4月1日～2008年3月31日

7）工学部、光エレクトロニクス、笹木敬司、2007年4月1日～2007年9月30日

8）情報科学研究科、光情報システム学特論、竹内繁樹、2007年10月1日～2008年3月31日

9）情報科学研究科、光情報システム学特論、笹木敬司、2007年10月1日～2008年3月31日

10）工学部、電磁気学、竹内繁樹、2007年10月1日～2008年3月31日

i．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク（3名）

1）Soujaeff Alexandre（科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域・研究員）

2）岡本亮（科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域・研究員）

3）高島秀聡（電子科学研究所非常勤研究員）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（1名）

1）浜端洋右: ランダム構造内導波路を用いた局在モード制御に関する研究

・博士後期課程（1名）

1）川辺喜雄：パラメトリック蛍光対の空間伝播と量子干渉-回折限界を破る干渉縞の実現-

量子計測研究分野

教　授　栗城眞也（北大院、工博、1991.8～）
准教授　小山幸子（阪大院、博士(人間科学)、2004.3～）
博士研究員　大塚　明香（サザプトン大学、2007.4～）
JST 博士研究員　豊村　暁
（北大院、博士(工学)、2005.7～）
JST 技術補佐員
豊澤悠子（北大、臨床検査技師、2005.1～）
在原百合子（苫・高専、2006.2～）
院　生
玉城祐二、鷲尾大輔、大上和哉、田中光、河本隆史、向舘　健

1．研究目標

量子計測研究分野は、北海道大学・電子科学研究所の電子計測制御部門に所属し、量子効果に基づいた高感度電磁気計測の基礎と応用に関して研究を行っている。また、情報科学研究科・生命人間情報科学専攻の協力講座の研究室として大学院教育に関わっており、修士・博士課程の大学院生を主体とした研究教育を行っている。

本研究分野では高感度な磁気センサであり、ジョセフソン効果によりその機能を発現する SQUID（Superconducting Quan-tum Interference Device）を中心とし、

・SQUID を用いた生体磁気計測法の研究
・MEG（脳磁界）計測と解析によるニューロイメージング
・高次機能を支える脳活動の解明
・言語環境が聴覚野の発達に及ぼす影響
・聴覚フィードバック効果と学習への応用
・自発成分の抽出と位相解析・wavelet 解析
・内因性の要因による脳活動の変調
・音楽の構造認知に関わる脳磁界活動の計測

を主要な研究としている。

2．研究成果

先行音階にプライミングされた和音に対する脳磁界活動

Carol Krumhansl の提唱した probe-tone method という心理実験の手法を参考に、2オクターブの上昇長調/短調音階により調性的・旋法的にプライミングされた主和音と関係調和音に対する音楽家の聴覚性誘発脳磁界反応を計測した。

主和音は安定、関係調和音は不安定に聞こえると弁別された。聴覚野を起源とする脳磁界反応 N1m のモーメントは、長調音階にプライミングされた和音に対して「主和音＜関係調和音」の有意差を示した。しかし、短調音階によるプライミング、また、和音が単独で提示された時には差異がなかった。

これらの結果は、西洋音楽の調性と旋法は、聴者が感じる知覚的な安定度及び聴覚野の神経活動に影響を与える事を示す。主和音と関係調和音に対する活動の有意差は、選択的注意に関連するトップダウン機構に関係があると考えられる。

調性・旋法的プライミングにより主和音（ハ長調の場合、ドミソ）がテンプレートとなり、テンプレート以外の入力音はテンプレート音との相対関係において分析・処理されると仮定すると、和音の知覚的安定度の弁別という課題は、注意を向ける対象を「テンプレート音以外」とした方が容易に遂行できる。テンプレート音である主和音に対する末梢におけるフィルタリングと、テンプレートから逸脱する関係調和音に対する gating の重畳効果で、聴覚野の活動に有意な変調が生じた可能性が指摘される。

短調コンテクストにおける和音の知覚的安定度は、長調に比べ不明瞭である事が報告されている。短調コンテクストでは、主和音のテンプレートとしての確立が劣っていた為に、テンプレート以外に対して喚起される注意の効果が弱く、聴覚野の活動に差異が生じなかったのではないかと考えられる。

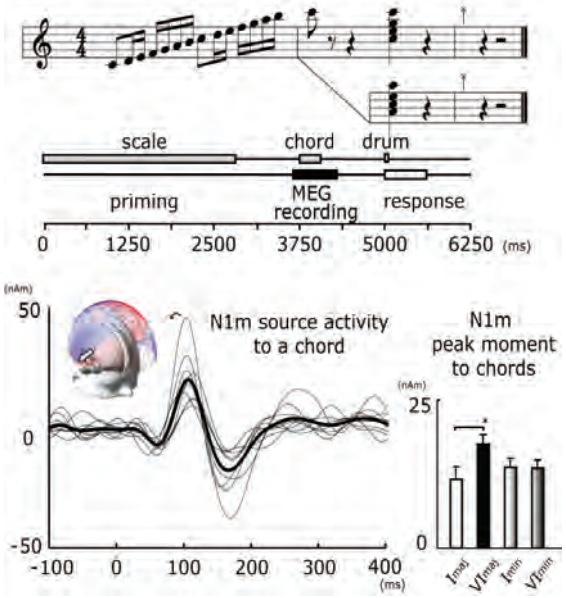


図１　（上段）プライミング音階と和音からなる刺激列、（中段）MEG 記録の時間経過、（下段）和音に対する N1m 活動源の時間変化(左)、種々の音階でプライムされた和音に対する N1m ピークモーメント（右）

3．今後の研究の展望

脳科学研究教育センターに設置された球面型生体磁気計測装置を用いた MEG 計測が研究の中心になる。センターの教員や大学院生の研究、教育を促進するために、実習や共同実験を行って異分野研究者との融合を測る。

高次機能に関する研究は、これまでの成果の上に、的を絞った計測を行う。具体的には、音の周波数、時間構造と誘起される MEG 反応の関係や、音楽的な要素により生じる知覚・認知とそれらのベースとなる脳活動を明らかにしていく。

4．資料

4.1　学術論文等

1）A. Otsuka, S. Kuriki, N. Murata, T. Hasegawa: Neuromagnetic responses to chords are modified by preceding musical scale. *Neuroscience Research*, 60(1): 50-55 (2008)..

2）M. Matsuda, T. Kataishi, and S. Kuriki: SQUID operation at a constant voltage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2): 695-698 (2007).

3）S. Hirano, Y. Inada, H. Kuroyanagi, K. Shibata, E. Matsumoto, A. Saito, K. Aizawa, S. Ohshima, M. Matsuda, and S. Kuriki: SQUID nondestructive testing system with vibrating normal pick-up coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2): 788-791 (2007).

4）A. Toyomura, S. Koyama, T. Miyamoto, A. Terao, T. Omori, H. Murohashi, S. Kuriki: Neural correlates of auditory feedback control in human. *Neuroscience*, 146:499-503 (2007).

5）H. Takeichi, S. Koyama, A. Matani and A. Cichocki: Speech comprehension assessed by electroencephalography: a new method using m-sequence modulation. *Neurosci. Res.*, 57(2): 314-318 (2007).

6）S. Kuriki, K. Ohta and S. Koyama: Persistent responsiveness of long-latency auditory cortical activities in response to repeated stimuli of musical timbre and vowel sounds. *Cerebral Cortex*, 2(8): 2725-2732 (2007).

7）K. Kamada, Y. Sawamura, F. Takeuchi, S. Kuriki, K. Kawai, A. Morita and T. Todo: Expressive and receptive language areas determined by a non-invasive reliable method co-utilizing fMRI and MEG. *J. Neurosurgery*, 60(2)：296-306 (2007).

8）玉城祐二、大塚明香、栗城眞也：和音列の聴取に関わる内因性の要因による聴覚性脳磁界反応の変化. *生体医工学*45(4): 307-312 (2008).

9）大上和哉，向舘健，栗城眞也，松田瑞史，平野悟，SY Yang，HE Horng，HC Yang：交流帯磁率測定を用いた磁気ナノ粒子の検出. *電子情報通信学会技術研究報告*, SCE 107(259)：1-6 (2007).

10）井上康之、小川昭利、荒井宏太、松本秀彦、豊巻敦人、竹市博臣、大森隆司、小山幸子、諸冨隆、北崎充晃：統計的識別による聴覚誘発電位の特徴分析. *電子情報通信学会技術研究報告*, NC107(94)：43-48 (2007).

11）豊村暁、小山幸子、宮本環、寺尾敦、大森隆司、室橋春光、栗城眞也：モーフィング加工音声を用いた自己、知人、他者音声に関する脳活動. *電子情報通信学会技術研究報告*, NC107(98)：67-72 (2007).

12）玉城祐二、大塚明香、栗城 眞也：和音列の聴取に関わる脳磁界反応. *電子情報通信学会技術研究報告*, MBE2007-15：1-4 (2007).

4.7　講演

i）学会

1）鷲尾大輔、栗城眞也：聴覚誘発 MEG 応答の刺激依存性　―刺激音の周期的構造による影響―. *第46回日本生体医工学会大会*, (仙台, 2007-4/26).

2）A. Toyomura, S. Koyama, T. Miyamoto, S. Kuriki: Neural correlates of audio-vocal feedback. 2007 Cognitive Neuroscience Society Meeting (New York, 2007-05).

3）H. Takeichi, S. Koyama, A. Cichocki: Frequency analysis of EGG responses to speech modulated by m-sequence. 2007 Cognitive Neuroscience Society Meeting (New York, 2007-05).

4）H. Takeichi, S. Koyama, A. Cichocki: Measuring Sentence Processing by Electroencephalography (EEG): New Technique Using M-Sequence Modulation. IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering-CME2007 (Beijing, 2007-05) (Invited).

5）大塚明香、栗城眞也、村田昇、長谷川寿一：先行音階にプライミングされた和音に対する脳磁界反応. *第21回日本生体磁気学会*, (岡崎, 2007-6/21-23).

6）豊村暁、小山幸子、宮本環、寺尾敦、栗城眞也：自己音声に対する脳活動：fMRI による検討. *第12回認知神経科学会学術集会* (福岡, 2007-7).

7）竹市博臣、竹内文也、寺尾敦、豊澤悠子、小山幸子：M 系列変調法を用いた談話理解評価に関係する脳領野の fMRI による同定. *第12回認知神経科学会学術集会* (福岡, 2007-7).

8）荒井宏太、松本秀彦、豊巻敦人、小山幸子、竹市博臣、諸冨隆：純音連続呈示に挿入される短時間無音部の検出についての検討－小、中、高生における ERP の発達変化－. *第25回　日本生理心理学会大会*（札幌, 2007.-7).

9）A. Toyomura, S. Koyama, T. Miyamoto, A. Terao, T. Omori, S. Kuriki: Neural substrates for auditory feedback control of vocal pitch. International Brain Research Organization 2007 (Melbourne, 2007-07).

10）H. Takeichi, F. Takeuchi, A. Terao, Y. Toyosawa, S. Koyama: Brain Areas responsible for the intelligibility-dependent signal with 400 ms latency in the m-sequence EEG technique as identified with fMRI. International Brain Research Organization 2007 (Melbourne, 2007-07).

11）A. Otsuka, Y. Tamaki, S. Kuriki: Modulation of auditory evoked responses to chords unfolded in musical sequence. First Conference of International Society for the Advancement of Clinical Magnetoencephalography (ISACM 2007) (Matsushima, 2007-08)

12）竹市博臣、寺尾敦、竹内文也、小山幸子、豊澤悠子、室橋春光：ランダムプローブ法による談話理解の客観的評価：fMRI 研究. *第46回日本生体医工学会北海道支*

部大会 (札幌 2007-09).

13) 玉城祐二、大塚明香、栗城眞也：和音列の聴取に関わる内因性の要因による聴覚性脳磁界反応の変化. *生体医工学シンポジウム2007*(札幌, 2007-09/21).

14) 鷲尾大輔、栗城眞也：複合音の時間特性による聴覚誘発 MEG 応答の変化. *生体医工学シンポジウム2007*(札幌, 2007-9/21).

15) H. Takeichi, S. Koyama, A. Cichocki: Correlation analysis of scalp EEG responses to spoken sentences modulated by M-sequence. *第30回日本神経科学大会* (東京 2007-09).

16) A. Toyomura, S. Koyama, T. Miyamoto, A. Terao, T. Omori, H. Murohashi, S. Kuriki: Neural Substrates involved in auditory feedback and feed-forword controls of pitch modulation. *第30回日本神経科学大会* (東京 2007-09).

17) A. Toyomaki, S. Koyama, Y. Toyosawa, F. Takeuchi, H. Takeichi, S. Kuriki S: Neural responses to gap embedded in continuous sound: simultaneous recording of MEG and EEG. *第30回日本神経科学大会* (東京 2007-09).

18) 松本秀彦、諸冨隆、豊巻敦人、小山幸子、竹市博臣：連続音中の短い無音部に対する中枢聴覚処理の特徴：小・中・高生における発達変化. *日本心理学会第71回大会* (東京, 2007-09).

19) 竹市博臣、小山（竹市）幸子、松本秀彦、諸冨隆：Andrzej Chochocki　聴覚野におけるリアルタイム音声言語（談話）の処理の脳波を用いた検討：発達研究への適用. *日本心理学会第71回大会* (東京, 2007-09).

20) 大上和哉，向舘健，栗城眞也，松田瑞史，平野悟，SY Yang，HE Horng，HC Yang: SQUID を用いた磁気ナノ粒子の交流帯磁率測定. *第68回応用物理学会秋季学術講演会* (札幌, 2007-09).

21) S. Kuriki: Detection of magnetic nanoparticles by ac susceptometry, 2007 China-Japan Joint Meeting on Superconducting Electronics (CJMSE 2007) (Nanjing, 2007-10).

22) 松本秀彦、豊巻敦人、小山幸子、竹市博臣、諸冨隆：音の持続呈示中の無音部に対する中枢聴覚処理の発達的特徴(2). *第37回日本臨床神経生理学会学術大会・第44回日本臨床神経生理学会技術講習会* (宇都宮, 2007-11).

23) S. Kuriki, K. Ogami, T. Mukaidate, M. Matuda, S. Hirano, S. Y. Yang, H. E. Horng, H. C. Yang: Detection of magnetic nanoparticles with a normal coil coupled to a SQUID current-meter, East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2007) (New Delhi, 2007-11).

24) S. Koyama, A. Toyomura, T. Miyamoto, A. Terao, H. Murohashi, T. Omori, S. Kuriki: Cortical and sub-cortical activations associated with auditory feedback and feed-forward controls of vocal pitch modulation in human. The 37th annual meeting of the Society for Neuroscience (San Diego, 2007-11).

25) A. Gunji, S. Koyama, J.F. Houde, A. Toyomura, A. Senju, Y. Tojo, M. Kaga: The auditory feedback of vocalization in children with autistic disorders. The 37th annual meeting of the Society for Neuroscience (San Diego, 2007-11).

26) H. Takeichi, S. Koyama: A coherence analysis of EEG responses to spoken sentences with and without m-sequence modulation. The 37th annual meeting of the Society for Neuroscience (San Diego, 2007-11).

27) H. Takeichi, S. Koyama: Assessment of speech comprehension by a random probing technique. The 2nd International Symposium of Design of Artificial Environments. (Fukuoka, 2007-12) (Invited).

28) S. Koyama , H. Matumoto, K, Arai, A. Toyomaki, T. Morotomi, H. Takeichi: Auditory Event-related Potentials to Short Temporal Gaps: A developmental study. The 2nd International Symposium of Design of Artificial Environments. (Fukuoka, 2007-12) (Invited).

29) 向舘健，大上和哉，李シン，栗城眞也，松田瑞史，平野悟，SY Yang，HE Horng，HC Yang：バイオ計測のための交流帯磁率測定における検出コイルの検討. *第43回応用物理学会北海道支部学術講演会* (札幌，2008-01).

30) 竹市博臣、竹内文也、寺尾敦、小山幸子、室橋春光：m系列変調（劣化）音声に対する fMRI 応答(2). *脳機能解析学分野第2回シンポジウム* (札幌, 2008-1).

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）玉城祐二、大塚明香、栗城眞也：和音列の聴取に関わる脳磁界反応，*ME とバイオサイバネティックス研究会*,(札幌, 2007-06).

2）豊村暁、小山幸子、大森隆司：発声におけるフィードバック制御と自己音声知覚. *ブレインネットワークコミュニケーション研究会*,(東京, 2007-6).

3）H. Takeichi, S. Koyama, C. Cichocki, BL. Foster, D. Liley: An EEG-coherence analysisof fMRI data on speech comprehension. *脳と心のメカニズム第7回夏のワークショップ「運動と行動」*(札幌, 2007-8).

4）竹市博臣、小山幸子：リアルタイム音声言語（談話）処理の脳波を用いた検討：非線形解析. *脳と心のメカニズム第8回冬のワークショップ「Social Brain」*(留寿, 2008-1).

4.8　シンポジウムの開催（組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）日本生体医工学会北海道支部、生体医工学シンポジウム2007、170人、北海道大学、2007年9月21日～9月22日

4.9　共同研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間，研究内容）

b．所内共同研究

1）栗城眞也、笹木敬司、徳本洋志、三澤弘明（電子科学研究所）「国際連携締結のためのプロジェクト研究」2006～2007年度：本研究所はすでにヨーロッパの大学と部局間協定を結んでいる。今後の発展のためには、近隣アジア諸国でポテンシャルの高い部局との連携を強めていく必要がある。また、研究所が標榜する研究領域と関係する研究内容に関連した連携が最適である。以上の背景のもとに、このプロジェクトでは国立台湾師範大学の光電科技研究所との研究所間協定の締結を目的とする。

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）栗城眞也、基盤研究 B、認知的脳情報の検出と読み出しに関する研究、2007～2010年度

2）栗城眞也、財団法人交流協会共同研究事業、SQUID と磁性微粒子を用いたバイオターゲット磁気検出技術の開発、2007年度

f．その他（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）小山幸子、JST（社会技術研究機構）：社会技術研究システム・公募型プログラム　研究領域「脳科学と教育」タイプⅠ「音声言語知覚機構の解明と英語教育法への展開」2004～2007年

2）小山幸子、ノーステック財団：研究開発助成事業補助金、乳幼児の言語理解能力の他覚的検査法の開発、2007年度

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）栗城眞也：日本学術振興会第146委員会運営委員会運営委員（2003年5月1日～現在）

2）栗城眞也：日本学術振興会第146委員会委員長（2005年4月1日～現在）

b．国内外の学会の役職

1）栗城眞也：日本エムイー（生体医工）学会教育技術委員会委員（2003年4月1日～現在）

2）栗城眞也：日本エムイー（生体医工）学会評議委員（2003年4月1日～現在）

3）栗城眞也：電気学会論文委員会委員（2003年4月1日～現在）

4）小山幸子：日本臨床神経生理学会評議員（2003年7月10日～現在）

5）栗城眞也：日本生体磁気学会，理事（2005年6月1日～現在）

6）小山幸子：日本生体磁気学会評議員（2005年4月1日～現在）

c．併任・兼業

1）栗城眞也：ニューロイメージング PF 委員会委員（2006年4月1日～現在）

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）工学部、応用物性工学、栗城眞也 2007年4月1日～2007年9月30日

2）情報科学研究科、脳機能工学特論、栗城眞也、2007年4月1日～2007年9月30日

3）工学部、電気回路、栗城眞也、2007年10月1日～2007年3月31日

i．ポスドク・客員研究員など

・博士研究員

豊村　暁（JST）

大塚　明香

j．修士学位および博士学位の取得状況

・修士課程（3名）

玉城祐二、鷲尾大輔、大上和哉

分子生命数理研究分野

教　授　小松崎民樹（総研大、理博、2007.10～）
准教授　Chun Biu Li（テキサス大、PhD、2008.3～）
助　教　西村吾朗（阪大院、理博、2007.10～）
研究員
　博士研究員　馬場昭典
　博士研究員　寺本央
院　生
博士課程
　清一人（特別研究学生、神戸大学大学院理学研究科）、Johannes G. Hagmann（日仏博士課程コンソーシアム留学生、リヨン高等師範学校）

１．研究目標

生体分子、細胞、組織、そして個体に至る生命システムは常に外界に晒（さら）されながら、ミクロレベルでの“刺激”がマクロレベルまで伝達し頑健な機能を作り出している。生体系の反応現象の多くは、複雑ななかに特異性、すなわち、選択性・機能性を保有していて、その特異性が生命現象の豊かさの源泉となっている。生体機能とは「外界からの刺激に対する応答として始まる一連の構造変化とそれに伴う化学反応」であり、階層を越えた「状態変化」のつながりの産物といえる。そのような生命システムを理解するためのアプローチには、大別して、背後に存在する数理構造を提唱するトップダウン的構成論的手法と微視的な立場からマクロな現象の再現を試みるボトムアップ的還元論的手法が存在する。前者は大胆な仮定や粗視化のために自然と乖離したモデルに陥る可能性が存在する一方で、後者は個々の微視的事象を枚挙するだけでシステム全体を捉えることは困難である。

自然科学研究において革命的な発展をもたらすものは、多くの場合、新しい実験技術とその新しい実験事実に基づいた理論・概念の転回である。近年、一分子計測技術等の飛躍的な進展により、「観測」の在り方が大きな変貌を遂げ、サブミリ秒程度の時間分解能で、一分子レベルの大規模構造変形や細胞の分化の計時変化を直接観測することが可能になってきた。

当該研究分野では、化学反応や生体分子の構造転移などの状態変化における「偶然と必然」、「統計性と選択性」、「部分と全体」の基礎原理を解明するとともに、“トップダウン”と“ボトムアップ”の両アプローチを橋渡しする概念や方法論を確立し、できるだけ自然現象に照らし合わせながら生命システムの階層性の論理を構成し、生命の中に積木細工をこえる新しい概念を創出することを目指している。

この他、単一分子分光を用いた生体計測を通して、階層を越えた構造と機能の相関を探っている。具体的には、700～1400nm の近赤外波長領域の光計測技術を用いた非侵襲計測により、生きたままの生体組織の単一分子レベルからの定量的な生体計測技術を目指している。

２．研究成果

(a)　強い高次元カオス領域におけるエネルギー移動を支配する擬不変多様体の抽出方法の開発

ポテンシャル井戸内部のどのような相空間構造が“局所平衡”近似を成立させるのか、換言すると、どのような井戸内部の相空間構造が異なるベイスン間を経巡る系の分子記憶を担いえるのかは化学反応における未踏の未解決問題である。2自由度に関しては、1980年代に“トーラス残骸”という概念を提唱し、活性化障壁よりも高いエネルギー領域でトーラスが存在しないような状況下においても、ポテンシャル井戸内部に部分的に“トーラスの残骸”が生き残っていることを示した。しかしながら、高自由度系において、不変多様体の残骸が2自由度系同様に有意に生き残っているのか、更には、存在しているとすると、反応性軌道群がポテンシャル井戸内の“不変多様体の残骸”をどう感じているかは全く調べられていない。

分子内の振動エネルギーの移動機構を理解するために必要となるのは「運動モード」という概念である。運動モードとは、分子の振動、分子内回転、または構造変化などの運動の形態を表し、「（よく用いられる）モード“間”のエネルギー移動」という表現には、第0次近似としてモードは互いに独立とみなせるということを暗黙裡に前提としている。このような運動モードは系がカオスを呈する場合にも、適切な非線形変数変換をもとの基礎方程式に適用することにより抽出できる場合があるが、ほとんど固定点近傍に限定されていた。本研究において、有限次の正準変換摂動理論ではこれまでの新旧の座標変換では、シンプレクティック構造が完全に保存しないことに由来する作用変数の揺らぎが、強い高次元カオス系においては無視できないことが判明した。そこで、我々は新規に母関数をハミルトニアンとする仮想的な時間発展を行い、新旧の座標変換を高精度で求め、固定点から離れたところにおいて、ポテンシャル井戸内の“不変多様体の残骸”を検出する理論を新規に構築した。この理論を HCN という3原子分子系に適用することにより、HCN が高い振動エネルギーをもち乱雑にはげしく振動しているような場合にも、「運動モード」を抽出することができ、一見、確率過程的に見える反応過程も、運動モード間のゆっくりとしたエネルギー移動によって解釈されることが分かった。一方で、この HCN 分子には HNC という配座異性体が存在するが、この配座異性体では運動モードを抽出することができず、運動は真に多次元的であることが示された。HCN と HNC の振動エネルギースペクトルから最近接スペクトル間の幅の分布(エネルギー準位間統計)を比較したところ、HCN ではポアソン分布、HNC ではウィグナー分布に似て、スペクトルが縮退に近くなる頻度が他の場合と比べて小さくなる傾向が認められた。ランダム行列理論によれば、系に運動モードが存在するよう

な場合には、対応するエネルギー準位間統計はポアソン分布になり、系が真に多自由度的な運動を呈する場合には、エネルギー準位間統計はウィグナー分布となることが知られている。それゆえ、我々の解析結果は実験事実とも整合しており、対応する力学構造と化学反応メカニズムを関連づけた最初の研究と位置づけることができる。

(b)　一分子時系列情報から多次元自由エネルギー地形を抽出する解析理論の開発

どのように一分子時系列データから「状態」、そして「状態間の遷移」を定義するのが自然であろうか？時系列データの観測値に対するヒストグラムを正規分布の線形結合でフィットする状態推定が（古典的に）よく用いられているが、局所平衡の成立を陰に前提としており、かつ、一般に「正規」分布の重ね合わせで表わされる保証はどこにもない。分布関数の形状、状態数、ならびに系についての性質（局所平衡など）を予め規定するのではなく、一分子時系列情報から局所平衡、詳細釣り合いの成立の可否を検証しながら多次元自由エネルギー地形を抽出する方法論を開発した。これまでの方法論の概略を図１に示す。時系列データからある観測時間幅 τ 以内の局所確率密度関数を算出し、局所確率密度関数間の（分布関数の近さを評価する）Kantorovich 測度から定義される Kantorovich 計量空間におけるクラスター解析を行う。同じクラスターに帰属される局所密度関数群はほぼ同じ関数形をもつことが保証されることから、それらは局所平衡状態の候補の分布関数（一般には非ガウス分布）として考えることができる。このクラスター間の遷移時間および各”平衡時間“を評価することで、局所平衡の成立の可否を各候補に対して検定したうえで自由エネルギー地形を時系列情報から抽出することができる。その結果、時間スケールが長くなるにつれて、ある時間以内に頻繁に行き来し合う二つの準安定状態は融合すること；すなわち、時間スケールが増大するにつれて、地形はよりスムーズになり、準安定状態の数も減少すること；更には、“平衡”に達して「平均場」として取り扱える熱的な自由度の総数も増えることから、自由エネルギー地形の次元（地形を記述するのに要する次元の数）も、時間スケールの増大とともに減少することなどを新規に見出した。すなわち、多次元自由エネルギー地形は、それが存在する場合には、リガンド結合に特徴的な時間スケール、それに応じて誘起されるタンパク質の構造変化が生じる時間スケールなど、系固有の様々な時間スケールに応じて変化する多様性に富んだ動的な概念であることを意味している。

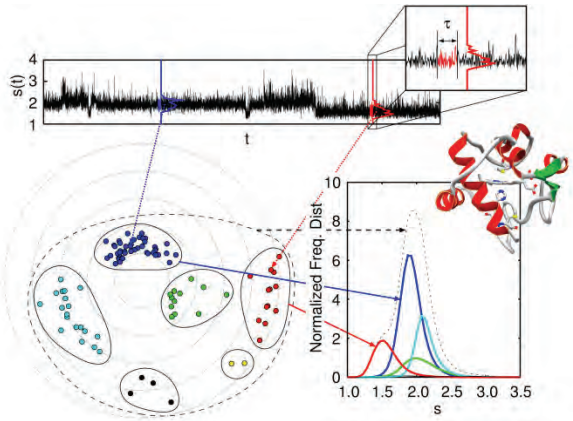


図１．一分子時系列からの状態推定法の概略（Baba ら *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104, 19297 (2007)).

(c)　局所平衡および詳細つり合いを前提としない状態遷移ネットワークを時系列データから検出する解析手法の開発

局所平衡や詳細釣り合いを前提とせず、生体分子が持つ“動的な”状態およびそれらをつなぐネットワークを時系列情報から再構成する方法論を開発した。この方法論では、与えられた時系列をある長さの（時系列）断片に分解し、「与えられた時系列に沿って次に現れる断片（未来配列）の情報を予測するうえで、どれくらいの長さの過去配列の情報を必要とするか？」を問い、その長さを同定し「状態」を同じ遷移確率分布をもつ時系列断片の集合として定義する（図２参照）。定義から、すべての断片は固有の遷移確率分布を持つひとつの状態に帰属することになるので、状態を繋ぐ状態遷移ネットワークを構成することができる。これは一分子時系列情報から離散的マルコフ確率過程を状態空間に構成したことに相当し、種々の関連する物理量を解析的に求めることができる。

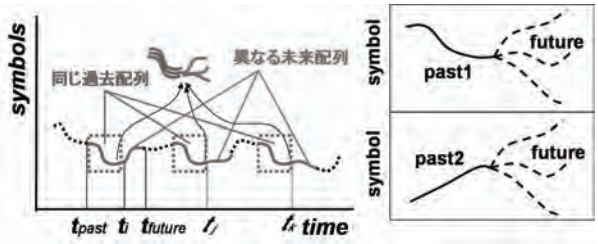


図２．「状態」の定義：（左）同じ“過去”配列 s[n]から続いて生起する“未来”配列 s[j]は一般に異なり、各々異なる条件付き遷移確率 P(j|n)が付与される。（右）異なる過去配列 past 1, past 2に対して、任意の j に対して、P(j|past 1) ≈P(j|past 2)が成り立つとき、past 1と past 2は同じ状態を構成する

図３に一分子観察されたフラビン還元酵素の構造揺らぎの自己相関関数の実測値（Yang, H. et al. Science 302, 262(2003)）と我々の方法で構成された、時間スケールに応じて変化する状態遷移ネットワーク構造ならびにそのマスター方程式から評価される理論値（図中の○）を示した。長時間領域（>>0.1s）ではブラウン拡散を呈するのに対し、短時間領域（<<0.1s）では異常拡散を示しているが、各時間スケールの時系列情報から構成された状態遷移ネットワークに基づく理論値は長短の時間領域で実測値を正しく再現していることがわかる。各時間スケールにおける状態およびその状態遷移ネットワークはどのようになっているのであろうか？図中、異常拡散を示す32ms、120ms および異常拡散からブラウン拡散に移行する480ms における状態遷

移ネットワークを可視化した。円は時系列から抽出された各状態を示し、円の大きさは時系列に沿ってその状態にどれくらい頻繁に滞在したか、換言すると、その状態がどれくらい安定であるかを表している。円の色は各状態から（有意に）遷移している状態（ノード）の数を表し、黄色から赤色になるにつれて、より多くのノードと繋がっていることを意味する。可視化方法の詳細は原著（Li ら *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2008）に委ねるが、“横軸”は各状態の平均色素分子間距離を、“縦軸”はあるノードからその他のノードへの（遷移確率分布で比べた）相対距離の期待値を表している。“縦軸”に対する分散が小さいほど、各状態からの遷移確率分布が類似していることを意味する。図３から①ブラウン拡散の時間領域に近づくにつれて、ネットワークがコンパクトになるとともに、ノード（状態）当たりのリンク数が増大し、状態遷移ネットワークのもつ多様性が減少すること、②異常拡散を示す時間領域において、状態間遷移をマルコフ過程と見做すために、ある有限の長さの時系列断片から状態を定義する必要があること、すなわち、局所平衡に基づくマクロな意味のネットワーク描像はこの短時間領域においては成り立たないこと、③通常拡散を呈する時間領域においては、より少数の状態から構成され、「過去の履歴を伴う必要のない局所平衡概念に基づく通常の準安定状態」として解釈されること、などが新規に時系列情報から読み取ることができることを明らかにした。

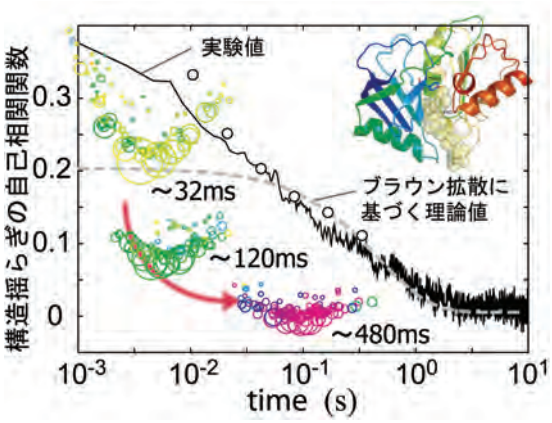


図３．観測時間の関数として変化するフラビン還元酵素の構造揺らぎの状態遷移ネットワーク（Li ら *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2008）：○は時系列から構成した状態遷移ネットワークに基づく理論値。時間スケールの増大とともに非ブラウン拡散からブラウン拡散へ移行する実験値とよく一致しているのがわかる。対応するネットワーク構造の変化を追跡することで背後に存在する動態構造・分子記憶を時系列から自然に読み解くことができる（自由エネルギー地形に基づいて無理矢理に評価するためには、Fractional Langevin 方程式を導入し、実験結果を再現するように *ad hoc* に記憶項をフィッティングするか、実験結果を再現するような自己相似的な自由エネルギー地形を仮定しなければならない）。

(d)　近赤外波長領域の光計測技術を用いた非侵襲計測

生体組織透過性の良い近赤外波長域でも、1.2μm を越える波長域は、ヘムなどの影響を受けにくくより定量的な計測が可能となり得る領域と考えられるが、生体組織の光学特性の測定はほとんどなく、また計測技術も確立していない。長波長側1.2μm近赤外波長領域の組織光学特性をラット頭部を用いて議論するとともに、計測技術も確立する。時間分解手法を用い組織透過光の時間応答特性を解析することにより、定量的な評価を行った。実際には、ラット脳組織に波長可変短パルスレーザからの光を入射し、透過光の時間応答特性をストリークカメラにより計測した(図４)。

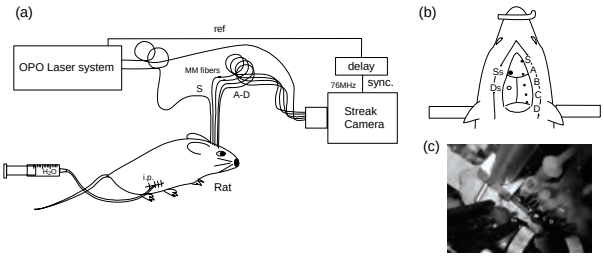


図４．実験模式図　(a)ストリークカメラによる時間応答測定のブロックダイアグラム (b)光ファイバーの頭部における配置図 (c)実際のラット頭部実験風景

時間応答波形のうちピーク位置および傾きを解析した。傾きから相対的な吸収係数を算出し1.2-1.35μm における相対吸収スペクトルを決定し、水の吸収スペクトルと比較した結果、おおよその水分量70%を推定することができた(図5)。この測定から、頭皮の影響も大きいこともわかった。これはファイバ間距離が小さいことによる問題であると理解できた。さらに水中毒ラットモデルを作成し、光信号の変化について議論した。体重10%の水の腹腔注射による水の変化量はかなり小さく光学シグナル変化から5-10%以下の吸収増加を与えると言う結果となった(図6)。水中毒モデルにおける比較的小さな変化の計測についてはストリーク

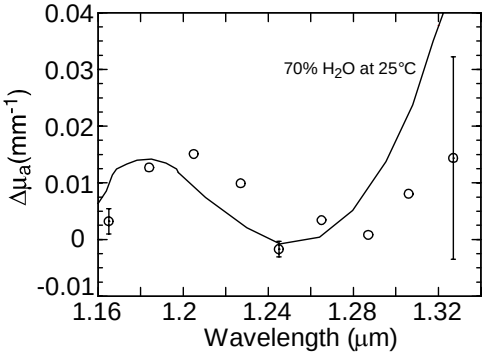


図５．ラット頭部差吸収スペクトル

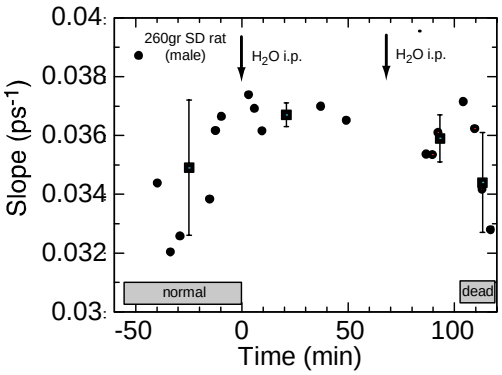


図６．水中毒モデルによる変化

カメラの感度の安定性が悪く、数値を正確に議論するのは難しかった。呼吸酸素濃度を変えヘモグロビンの影響も調べた。この実験より、この波長域ではヘムの影響が少ないことを確かめた。このことは血行動態の影響を軽減した計測がこの波長域で可能であり新たな医用への応用可能性が示されていると言える。これらの測定ではストリークカメラの感度が低いため、測定ファイバ間距離は小さい。ここでの解析の問題点を議論するために拡散方程式の解とモンテカルロ法により求めた光の時間応答特性を比較し、拡散方程式の解を用いた近似的解析が必要であることを確認した。一方、ストリークカメラに代わる高感度で高速な検出器の開発の必要性が認識された。

３．今後の研究の展望

生体機能を司る分子の数は、多くの場合、アボガドロ数レベルではなく、少数が参画し、有限時間内に生体機能が生起する。そこでは平衡統計の枠組みが必ずしも成立している保証はなく、一分子観察を通して、長時間の分子記憶などの動態現象として具現化されているものと思われる。しかしながら、「入出力レベルも熱エネルギー程度である生体機能が、熱揺らぎに晒されながら、なぜ効率的かつ選択的に生起するのか」に関する指導原理は未だに解明されていない。それゆえ、統計性を予め仮定しない基礎理論から化学反応や構造転移の根本原理を追求するとともに、あらかじめ系についての性質（統計性、次元性など）を前提としないで、（実際に観測される）一分子時系列情報から背後に存在する動態構造について読み解く方法論を確立することは熱揺らぎ存在下における生体機能の指導原理を考察するうえで本質的に重要である。今後、階層的な自由エネルギー地形の存在、「自由エネルギー地形」概念そのものの妥当性の再考、生体分子系ダイナミックスと熱揺らぎの拮抗関係、時空間スケールの異なる階層間の情報伝達、環境に適応しながら時々刻々変化する階層ネットワーク構造の遍歴現象、蛋白質の構造空間における遷移ネットワークがもつ（といわれる）スケールフリー性などの魅力的な研究が一分子計測と理論が融合することで展開されてゆくものと期待される。

近赤外波長領域の光計測技術を用いた非侵襲計測においては、ラット組織を用い、ヘムの動態が光信号に与える影響が少ないことから、今後、組織病態のモニターなどに有用と期待できる。特に、水毒モデルの実験は脳浮腫を模したモデルの一つであり脳梗塞などのモニターへの応用可能性を示している。一方、光検出技術を改善するために、光通信技術の技術を積極的に導入し、より高感度な半導体検出器などを利用したシステムを開発する必要があり、それらの開発により、実際の医用応用などへ展開できるものと期待できる。

４．資料

4.1　学術論文等

１）A. Baba and T. Komatsuzaki: “Construction of effective free energy landscape from single molecule time series”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104(49) : 19297-19302 (2007)

２）Y. Matsunaga, C. Li and T. Komatsuzaki: “Anomalous Diffusion in Folding Dynamics on Minimalist Protein Landscape”, *Phys. Rev. Lett.*, 99: 238103-239103 (2007)

３）M. Kinoshita, K. Kamagata, A. Maeda, T. Komatsuzaki and S. Takahashi: “Development of a technique for the investigation of folding dynamics of single proteins for extended time periods”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104: 10453 (2007)

４）A. Shojiguchi, C. Li, T. Komatsuzaki and M. Toda: “Fractional Behavior in Multi-Dimensional Hamiltonian Systems Describing Reactions”, *Phys. Rev. E*, 76: 056205-056218 (2007)

５）G. Nishimura, C. Pack and M. Tamura: “Expansion of intensity correlation spectroscopy for lifetime measurements - application to intracellular oxygen dynamics measurements”, *J. Biomed. Opt.* 12 : 020503 (2007)

６）C. Li, H. Yang and T. Komatsuzaki : “Complex Network of Protein Conformational Fluctuation Buried in Single Molecule Time Series”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105 : 536-541 (2008)

７）A. Shojiguchi, C. Li, T. Komatsuzaki and M. Toda: “Dynamical Foundation and Limitations of Statistical Reaction Theory (Communications)”, *Nonlinear Sci. Numerical Simul.*, 13 : 857 (2008)

4.2　総説・解説・評論等

１）白川智弘、郡司 ペギオ幸夫、小松崎民樹：「惑星科学と非線形科学の接点：化学反応から生物計算まで」、*日本惑星科学会誌 遊星人* 16: 322-329 (2007)（*invited*）

２）松永康佑、小松崎民樹：「高分子とカオス-異常拡散と階層的規則性-」、*日本高分子学会誌　高分子* 57: 1-6 (2008)（*invited*）

4.4　著書

１）西村吾朗：「非侵襲・可視化技術ハンドブック、上野照剛、小川誠二監修」、エヌ・ティー・エス (2007)

4.7　講演

ａ．招待講演

１）Tamiki Komatsuzaki “Multiple-Time-Scale State Network Topography buried in Single Molecule Time Series”, Energy Landscapes: Negotiating the Black Diamonds, Telluride, CO, USA(2007-04)

２）馬場昭典「生体分子の一分子時系列解析：局所平衡状

態と自由エネルギー地形」「非線形振動子系の物理学：現代的問題とその解析」基礎物理学研究所、京都市（2007-06）

3）小松崎民樹「生体分子時系列情報から 我々は何を学び取ることができるか？」分子研研究会　分子科学における連成シュミュレーションの基礎理論と応用、岡崎市（2007-08）

4）馬場昭典「時系列から見る運動の階層性」日本物理学会　第62回年次大会、札幌市（2007-09）

5）西村吾朗:「近赤外生体分光法の展望 -1μm 波長域の可能性」、医用近赤外線分光法研究会、まつもと市民芸術館、松本市（2007-10）

6）小松崎民樹「１分子時系列情報から我々は何を学び取ることができるか？」統計数理研究所研究会「非線形科学と統計科学の対話」、東京都（2007-11）

7）寺本央「Aiming at the universal understanding of molecular systems in terms of theories of dynamical system」若手研究会「理論化学のフロンティアを探る」、岡崎市（2008-01）

8）G. Nishimura：“Near-infrared optics for biological and medical applications”, Advanced Display and Optoelectronics Technology 2008 (ADOT 2008), Catholic University, Daegu, South Korea (2008-02)

b．一般講演

ⅰ）学会

1）G.Nishimura and M.Tamura：“Optical Properties of Rat Heads Measured by Time-Resolved Method over 1-μm Region”, 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics & Biophotonics Downunder II, Cairns, Australia (2007-07)

2）T.Ono, G.Nishimura and M.Tamura：“Improvement of Near-Infrared Imaging by Time-Resolved Method - A simple experimental approach”, 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics & Biophotonics Downunder II, Cairns, Australia (2007-07)

3）西村吾朗:「1μmを越える波長域での生体組織分光 一小動物を用いた評価」、日本光学会（OPJ2007)、大阪大学コンベンションセンター、吹田市（2007-11）

4）西村吾朗、Pack Chan-Gi、田村守：「燐光の強度相関法による寿命測定と酸素濃度測定」、日本生物物理学会、パシフィコ横浜、横浜市（2007-12）

5）李振風、Yan Haw、小松崎民樹：「Complex Multiscale Networks and Information Flows for Protein Dynamics from Single-molecule Time Series」、第45回日本生物物理学会、横浜市（2007-12）

6）木下雅仁、鎌形清人、前田晃央、後藤祐児、小松崎民樹、高橋聡：「たん白質の折り畳み運動を観測するための一分子測定手法の開発」、第45回日本生物物理学会、横浜市（2007-12）

7）寺本央、小松崎民樹：「生体系時系列データから動力学諸量を抽出する方法論」、第45回日本生物物理学会、横浜市（2007-12）

8）寺本央、小松崎民樹：「時系列データから間欠的なカオスおよび規則的挙動を抽出するための方法論」、日本物理学会 第63回年次大会プログラム（近畿大学)、大阪市（2008-03）

9）清一人、小松崎民樹：「分子時系列から抽出する複雑ネットワーク」、日本生物物理学会北海道支部例会（北海道大学)、札幌市（2008-03）

10）G. Nishimura and M. Tamura: “Optical properties on rat heads measured by the diffuse reflectance method over 1μm”, OSA Biomedical Optics Topical Meeting, Hilton St.Petersburg Bayfront, St.Petersburg, Florida, USA (2008-03)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）小松崎民樹：「１分子時系列情報から我々は何を学び取ることができるか？」、統計数理研究所研究会「非線形科学と統計科学の対話」、東京都（2007-11）

2）寺本央、小松崎民樹：「Introduction to theories of dynamical systems」、第１回力学系ルネッサンス、札幌市（2007-12）

3）H. Teramoto and T. Komatsuzaki：“A method to extract intermittent regular and chaotic behavior and their local properties from 1-dimensional time series”, the 9th RIES-Hokudai International Symposium “創”, 札幌市（2008-01）

4）A. Baba and T. Komatsuzaki：“Effective energy landscape from single molecule time series”, the 9th RIES-Hokudai International Symposium “創”, 札幌市（2008-01）

5）寺本央、小松崎民樹：「Aiming at the universal understanding of molecular systems in terms of theories of dynamical system」、若手研究会「理論化学のフロンティアを探る」（岡崎カンファレンスセンター)、岡崎市（2008-01）

6）寺本央、小松崎民樹：「How stable and unstable manifold entangle with each other and what is essentially new in systems with more than 2 dof?」、第２回力学系ルネッサンス（奈良女子大学)、奈良市（2008-02）

7）寺本央、小松崎民樹：「反応性自由度は反応に際して如何にしてエネルギーを獲得するのか？」、大規模計算と分子のダイナミクス、岡崎市（2008-02）

8）李振風、Yang Haw、小松崎民樹：「Multiscale Complex network of protein conformation fluctuations in single molecule time series」、日本生物物理学会北海道支部例会（北海道大学)、札幌市（2008-03）

ⅲ）コロキウム・セミナー等・その他

1）小松崎民樹「法双曲的不変多様体と化学反応ダイナミックス」第102回複雑系セミナー、札幌市（2007-04）

2）小松崎民樹　「化学反応における偶然と必然 ―非再交差仮定を満たす遷移状態の厳密解とその存在条件― 」

第７回理論化学セミナー、札幌市（2007-04）

３）小松崎民樹「複雑反応系に対するダイナミックス理論の基礎構築」特定領域「実在系の分子理論」第３回公開シンポジウム、岡崎市（2007-05）

４）小松崎民樹「１分子時系列情報に基づく反応ネットワーク構造の構成論とその複雑さ解析」特定領域研究「ゲノム４」合同会議、神戸市（2007-06）

５）T. Komatsuzaki：“What will we “talk with” nature?”, The Complexity of Kinetics and Dynamics in Many Degrees of Freedom Systems, 札幌市（2007-10）

６）李振風：「Mining dynamical information for large-scale protein MD simulation: A geometrical perspective」、High-performance Molecular Simulation Team（横浜理研）、横浜市（2007-11）

4.8　シンポジウムの開催

１）高見利也らとの共同主催：分子研研究会「分子科学における連成シュミュレーションの基礎理論と応用」、分子科学研究所（岡崎市）30名（2007-08）

２）T. Komatsuzaki, M. Toda and R.S. Berry: Telluride Workshop on The Complexity of Dynamics and Kinetics in Many Dimensions, Telluride CO USA, 40名（2007-08）

３）戸田幹人、小松崎民樹：日本物理学会領域11&12の合同セッション「反応過程における巾的揺らぎの起源とその可能性」、北海道大学（札幌市）、100名（2007-09）

４）Y. Sato and T. Komatsuzaki: “Perspectives in Nonlinear Science “Complexity in Dynamics of Many-degrees of freedom system””，北海道大学（札幌市）15名(2007-10)

５）伊庭 幸人、小松崎民樹：統計数理研究所研究会「非線形科学と統計科学の対話」、統計数理研究所（東京都）、50名、(2007-11)

６）寺本央：第１回「力学系ルネッサンスワークショップ―高次元相空間幾何学と化学反応や高分子ダイナミックスの接点を探る」、電子科学研究所（札幌市）10名、(2007-12)

７）M. Toda and T. Komatsuzaki: “3rd JSPS-NSF meeting on Dynamical Foundation of Functions and Energy Transfer in Protein Systems”20名、奈良女子大学（奈良市）(2008-02)

4.9　共同研究

ａ．海外機関との共同研究

１）T. Komatsuzaki, D. M. Leitner, R. S. Berry, J. E. Straub, M. Toda, A. Kidera and S. Takada（シカゴ大学・ボストン大学・ネバダ大学レノ校・電子科学研究所・横浜市立大学・京都大学・奈良女子大学）：“JSPS-NSF/NSF-JSPS International Project “Dynamical Foundation of Functions in Protein Systems””、2004年度～、基質結合に伴う立体構造変化の応答・伝達のダイナミックスの原理を解明し、「ダイナミックス＝機能」としてみた分子機能の多様性とその頑健性についての動的構築原理を創出する。

２）T. Komatsuzaki, A. Baba, C. Li and H. Yang（電子科学研究所・カリフォルニア大学バークレー校）：“生体分子機能および化学反応網における選択性と統計性のダイナミックス基盤の創生”、2006～2008年度、１分子観察データから各準安定状態を規定し背後に潜む状態空間上の遷移ネットワーク構造を抽出する解析手法を確立し分子記憶と構造多型性・経路多重性の関係を解明することを目的とする。

３）T. Komatsuzaki and M. Peyrard（リヨン高等師範学校・電子科学研究所）：“たんぱく質フォールディングダイナミックスにおける統計性”、2007年度～、日仏博士課程コンソーシアム制度により、リヨン高等師範学校から10か月期間博士課程学生の派遣を受け入れた。

ｄ．受託研究

１）高橋聡、小松崎民樹、三本木至宏、鈴木 誠（大阪大学・電子科学研究所・広島大学・東北大学）：「JST/CREST「蛋白質の折り畳み運動解明を目指した一分子観測法の確立（一分子観察実験のための新しいデータ解析手法の開発）」」、2004～2009年度、79,482千円、遷移過程の直接観測実験を通して、遷移の非統計性、遷移状態概念の再考、熱揺らぎと蛋白質ダイナミックスのあいだの競合・協同性などを解明するため、生体分子時系列情報からその背後に潜む系の動的構造（＝状態空間構造）を抽出・解析する新しい1分子時系列解析手法を開発する。新しい一分子観察法から得られる時系列情報を解析し、「ダイナミックスから見た」蛋白質の折れ畳み運動の新しい構築原理を考察する。

２）西村吾朗（独立行政法人 科学技術振興機構）：「近赤外光を用いた脳浮腫モニタリング手法の確立」、2007年度、2000千円、本研究は光学的手法により脳浮腫を早期にモニター可能とする技術を確立することが目的である。１μｍ を超える近赤外光領域を利用し浮腫形成を反映する組織の水の吸収および散乱特性を主として時間分解計測法を用いて評価する。これらのために高感度計測法を検討するとともに、小動物モデルを用いた組織の光学特性評価を行うそれにより、実用化に適した波長などの光学測定条件などを決定し、モニタリング異なるベッドサイドなどでのモニターが可能となるシステムへと展開することができる。

4.10　予算獲得状況

ａ．科学研究費補助金

１）小松崎民樹、特定領域研究、１分子時系列情報に基づく反応ネットワーク構造の構成論とその複雑さ解析、2006～2007年度、7100千円、観測される時間軸に沿った情報資源のみから背後に存在する多次元自由エネルギー地形および状態空間上の化学反応ネットワーク構造を構成し、ミクロとマクロをつなぐ新しい統合型ダイナミックス解析基盤を構築する。

2）小松崎民樹、戸田幹人（電子科学研究所・奈良女子大学）:「特定領域研究実在系分子理論：複雑反応系におけるダイナミックス理論の基礎構築」、2007年度、1900千円、統計的アプローチだけでは理解することが困難な複雑反応系における機能ダイナミックスなどを解明するための新たな「メソスケールの理論化学」を目指す。

3）小松崎民樹、基盤研究 B、生体分子機能および化学反応網における選択性と統計性のダイナミックス基盤の創生、2006～2008年度、14700千円、「入力に対する応答としてどのようなダイナミックスが引き起こされ、どの程度の時間スケールまで緩和せず保持し得、次の応答を誘起するのか」という動的記憶に対する指導原理を解明するとともに、「観測される1分子時系列情報からどのように背後に潜む系のエネルギー地形や遷移ネットワーク・パスウェイに関する情報を抽出するのか」に解答しうる新しい統合型ダイナミックス解析基盤を創出する。

d．奨学寄附金

1）西村吾朗（日立製作所基礎研究所）:「近赤外1-1.5ミクロン帯応用を目指した基礎研究」、2007年度、910千円、1μm を越えた近赤外光を用いた生体への応用手法の確立のための基礎技術研究。

4.12　社会的活動

b．国内外の学会の役職

1）小松崎民樹：Board of directors of the Telluride science research institute CO USA （2006年1月1日～2008年12月31日）

2）小松崎民樹：生物物理学会誌編集委員（2007年1月1日～2008年12月31日）

c．併任・兼業

1）小松崎民樹：統計数理研究所講師 （2007年11月26日～2007年11月28日）

2）小松崎民樹：神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻客員准教授 （2007年10月01日～2008年03月31日）

d．その他

1）小松崎民樹：JST/CREST「蛋白質の折り畳み運動解明を目指した一分子観測法の確立（生命現象の解明と応用に資する新しい計測分析基盤技術）」研究分担者（2004年10月1日～2010年3月31日）

e．新聞・テレビの報道

・新聞

1）小松崎民樹、馬場昭典：北海道新聞朝刊2面 2007年11月22日「たんぱく質の折り畳み運動を読み解く新手法を開発」

2）小松崎民樹、馬場昭典：日刊工業新聞25面 2007年11月21日「たんぱく質の折り畳み運動を読み解く新手法を開発」

3）小松崎民樹、馬場昭典：化学工業新聞11面 2007年11月20日「たんぱく質の折り畳み運動を読み解く新手法を開発」

・その他

1）小松崎民樹、馬場 昭典：科学技術振興機構（JST）プレスリリース 2007年11月20日「「たんぱく質の折り畳み運動を読み解く新手法を開発」
http://www.jst.go.jp/pr/info/info440/index.html」

f．外国人研究者の招聘

1） Dr. Dmitry Nerukh (Senior Research Associate), Unilever Centre for Molecular Informatics, Department of Chemistry, Cambridge University, UK（2007-10）

i．ポスドク・研究員など

・ポスドク（2名）

馬場昭典、寺本央

ナノシステム生理学研究分野

教　授　永井健治（東大院、医博、2005.1～）
准教授　谷　知己（東大院、理博、2005.3～）
助　教　後藤デレック（北大院、農博、2005.7～）
さきがけ研究員　小寺一平
博士研究員　竹本研
学振外国人特別研究員　Sang-Yeob Kim
DC2　倉元陽造
DC1　野村真未
MC1　友杉　亘
MC1　岩崎卓也
BC4　植松利亮

1．研究目標

ひとつの受精卵が分裂と分化を経て、多様な細胞が機能的につながりあう多細胞個体を形成する。1個体を構成する様々な細胞が相互に連絡をとりあうことによって、個体としての刺激応答をおこなう。分子間、そして細胞間を相互に結びつけるつながりの仕組みを明らかにすることが、このような生命のしくみを解き明かす鍵であろう。ナノシステム生理学分野では、生体分子、細胞レベルの生命現象を研究対象として、遺伝子工学技術に基づく生体分子可視化技術を駆使して、個体の発生や刺激受容と応答に関わる分子間・細胞間相互作用を明らかにすることを大きな研究目標に掲げている。

2．研究成果

(a) 光安定性とプロトン非感受性を兼ね備えた、群青色蛍光タンパク質の開発

Aequorea（オワンクラゲ）由来の緑色蛍光タンパク質（GFP）及び、その波長変異体を細胞内の目的タンパク質と融合させ、可視化する技術は細胞生物学において必要不可欠な技術になっている。現在、長波長の蛍光をもつ蛍光タンパク質の種類は豊富である一方で、短波長の蛍光を発する変異体の種類は少ない。そこで、発色団を形成するトリペプチドのうち、66番目のチロシンをフェニルアラニンに置換した *Aequrea* GFP の変異体を作製し、さらに、部位特異的変位導入と遺伝子全長に渡るランダム変異導入を行ったところ、群青色蛍光を発する蛍光タンパク質を得ることに成功した。本タンパク質を37℃で培養した大腸菌内で発現させると EBFP 比で2倍明るい蛍光を放つことから、夜空で最も明るい青色の恒星にちなみ、Sirius と命名した（図1a.b）。Sirius の吸収および蛍光極大はそれぞれ355nm および424nm で、EBFP の380nm および448nm よりもさらに短波長であり、今までに報告された蛍光タンパク質変異体の中で最も短波長の吸収・蛍光極大を有する。

Sirius の驚くべき特徴は、光褪色に非常に強い耐性（EBFP の60倍）を持つことと（図2a）、プロトンに対する感受性（pH 感受性）が全く無く、極めて安定な蛍光を発することである（図2b）。

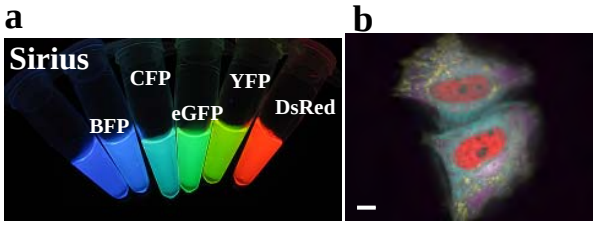


図１．*Aequorea* GFP 変異体の Sirius の精製タンパク質と Sirius を核に発現させ、4 重染色した HeLa 細胞。

そこで、Sirius を発現するバクテリアを *Dictyostelium discoideum*（細胞性粘菌）に餌として与えたところ、酸性条件下で起こるファゴサイトーシスの一連の過程を、二光子励起顕微鏡を用いて、長時間にわたり観察することに成功した。これらの特性に加え、Sirius の蛍光スペクトルは CFP の吸収スペクトルと完全にオーバーラップすることから、Sirius は CFP をアクセプターとする理想的な FRET ドナーであることが判明した。また、UV 領域で励起可能であり、緑色の蛍光を発する Sapphire と呼ばれる GFP 変異体と、Sirius は、同じ波長で同時に励起することが可能であることが分かった。こうした知見を踏まえて、Sirius と CFP の FRET ペアーに加え、Sapphire と DsRed の FRET ペアーを併用することで、1 波長励起 4 波長測光による Dual FRET を試みた。その結果、HeLa 細胞のアポトーシス過程における Ca^{2+}の上昇とカスパーゼ-3 の活性化を同時に可視化することに成功した。今後、このような Dual FRET の手法を用いることにより、生細胞内の同箇所で起こる複数の生理現象をリアルタイムで観察することが可能となるであろう。

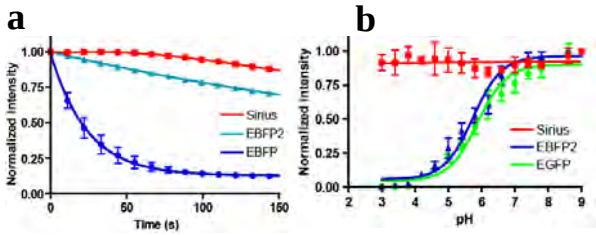


図２．Sirius と既存の蛍光タンパク質の光安定性及び、プロトン感受性の比較。

(b) 光スイッチング蛍光タンパク質を用いた細胞内での分子拡散係数を測定する方法の開発

当研究分野では CFP（水色蛍光タンパク質）と PA-GFP（光活性化型緑色蛍光タンパク質）を FRET 効率が最大になるように連結することで、新規の色変換蛍光蛋白質 Phamret を開発した。Phamret は UV 光照射により、不可逆的にその蛍光色を水色から黄緑色に変化させる。

このような光刺激によって蛍光特性を変化させる光スイッチング蛍光タンパク質を用いたイメージング技術は標識した目的タンパク質のイメージを取得し、生細胞内での分布の経時変化を観察することを主流に発展してきた。

その一方で、細胞内のタンパク質動態の変化を定量的に解析する方法論の開発の努力もなされている。現在、限られた領域の蛍光タンパク質のみを消光させた後分子の流入による蛍光の回復を測定する fluorescence recovery after photobleaching (FRAP) や微小領域の蛍光強度の揺らぎを検出する fluorescence correlation spectroscopy (FCS) がタンパク質拡散係数の決定に主に用いられている。FRAP は速い拡散、FCS は遅い拡散の測定に不向きであるためそれらは相補的に用いられている。本研究では、FRAP 測定法をベースに光スイッチング蛍光タンパク質をタグとして用いる拡散測定法 fluorescent decay after photoactivation (FDAP) を開発した。FRAP では蛍光の回復カーブが描かれるのに対して FDAP の測定では刺激光の照射により現れた蛍光の減衰のカーブが描かれる（図３）。そして、この方法では短時間の刺激、速いスキャンスピードで測定を行うため、FRAP において速い拡散を示す分子の測定に影響を及ぼす光刺激中の分子の拡散の影響を無視することができる。従って FRAP 法が得意とする遅い拡散に加えて速い拡散の測定にも適用できるようになり、FRAP では解析困難であった溶液中の50μm^2/sec 程度の速い拡散を計測することに成功した。蛍光タンパク質分子の HeLa 細胞内での拡散速度を解析して FRAP、FCS、FDAP で比較したところ FDAP での解析結果は速い拡散の解析を得意とする FCS の測定結果とよく一致した。このように FDAP は幅広い速度領域のタンパク質拡散を計測することができる方法であり、細胞内分子動態解析を用いた病態評価への応用が期待される。

さらに、測定系には FCS で用いるような特別な装置を必要としないので FDAP 法は通常の細胞観察の顕微鏡システムを用いて FCS レベルの速い拡散を調べることができる新しいツールとしてタンパク質動態解析の研究に貢献することが期待される。

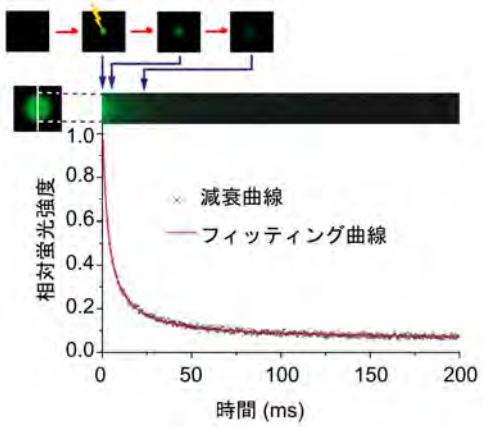


図３．拡散による Phamret 蛍光減衰曲線の FDAP 解析

(c)　生きた細胞内で機能するタンパク質１分子の構造変化を実時間で観察する技術開発

生細胞内で機能するタンパク質の構造変化を１分子単位、リアルタイムで観察する計測技術を開発している。このモデルとして、蛍光タンパク質で標識した神経成長因子受容体の構造変化を、標識した蛍光タンパク質発色団分子方向の経時変化から計測している。発色団分子の方向を計測するために、蛍光１分子像のデフォーカス像を高い時間分解能で取得することが必要となる。しかしながら神経成長因子受容体を含め、細胞内で機能するタンパク質は多くの場合ブラウン運動をおこなっており、デフォーカス像を高いＳ／Ｎ比で取得することは困難である。そこで、通常細胞膜でブラウン運動しながら機能する受容体を固定することにより、受容体の構造変化を観察した（図４）。

受容体の固定は、この受容体と結合する神経成長因子をガラス基板上に固定することによっておこなった。この神経成長因子は、この２量体のＣ末端をビオチン化したのち、ストレプトアビジン修飾したカバーガラス上に固定化した。

固定化した神経成長因子と結合した受容体を１分子単位で観察すると、通常0.3μm^2/s 程度の拡散係数で運動する受容体がある一点で止まって見える。この受容体の細胞質ドメインにつなげた蛍光タンパク質発色団の方向変化をデフォーカス像によって経時的に計測した。（図５）現在受容体の活性を変化させる様々な実験条件で、この方向変化を計測中である。

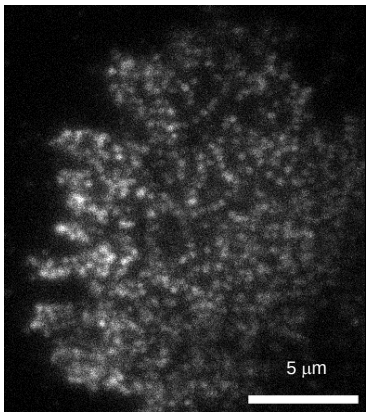


図４．ガラス基板上に固定された神経成長因子と結合する細胞膜上の受容体 Trk-GFP（PC12細胞に発現）の蛍光１分子像

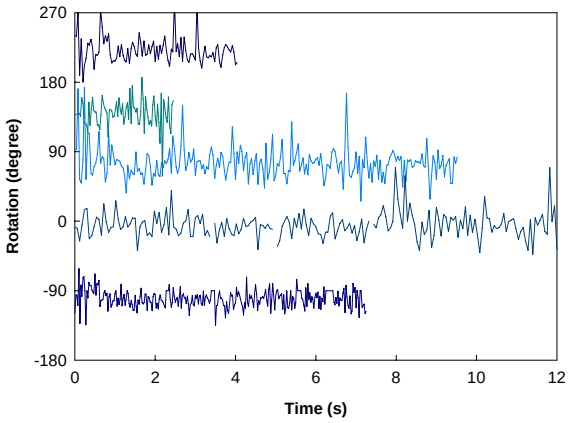


図５．受容体 Trk-GFP のデフォーカス像から計測した受容体細胞質ドメインの角度変化

(d)　全自動 DNA 組換え方法の開発

昨年度までに開発した DNA 解読反応を応用することで、DNA の試験管内組み換えを迅速に行う方法（FASTR; Fully Automated Single Tube Recombination）を開発した。この技術は、電気泳動やアガロースゲルからの DNA 断片精製などを一切必要とせず、PCR 産物を酵素カクテルと混ぜて、

15分程度反応させるだけで全ての操作を終えることが出来る迅速で簡便な方法である。

ClassIIS 制限酵素の認識部位を組み込んだプライマーを用い、本方法で使用する DNA 断片を増幅させる。この PCR 産物に DNA 連結酵素と ClassIIS 制限酵素を同時に加えると、図6の赤線で示した箇所において、DNA の切断と再結合を繰り返す平衡反応が起こる。平衡反応の中で、組み換えパートナーの中間体どうしが出会うと DNA 連結酵素による共有結合が起こるが、この産物には図6の水色のボックスで示した ClassIIS 制限酵素の認識部位が存在しないため、これ以上の反応が起こらず最終産物が集積する。この反応に基づく FASTR 技術の完成により、PCR 産物を「混ぜるだけ」で DNA 組み換えを行うことが可能となった。多断片の組み換えによるハイスループットな用途も実現している。また、通常の方法と同様なコンストラクション設計が可能なことから、従来の方法を完全に置き換えることの出来る技術であると期待される。

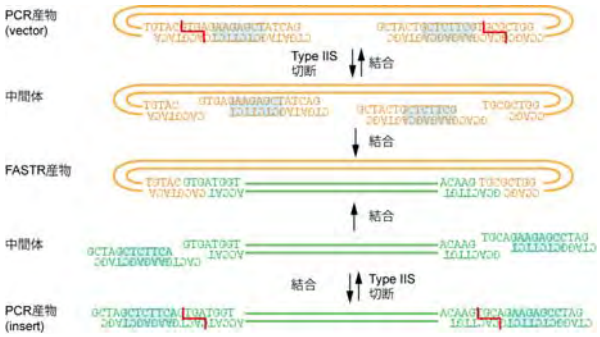


図6．全自動DNA組換え反応の原理

3．今後の研究の展開

ヒューマンゲノムの全貌が明らかになった現在、タンパク質間相互作用を網羅的に解析するプロテオーム解析が生物学研究の主流の1つになっている。その結果、細胞内分子反応に関わる分子群とそれらの相互作用に関する莫大な量の情報が蓄積してきた。しかしながら、個々の生理現象に潜む一般原理の理解には至っていない。それはひとえに細胞内の様々な事象に関与する分子と分子を矢印で結んだ“静的”理解に留まっているからである。そのようなデータのほとんどが百万個以上の細胞をすりつぶして調製した試料を生化学的に調べるという方法から得られるものであるが、このような方法は生理現象の時空間的スケールを全く無視している。より包括的・根源的な理解のためには個々の生理反応がいつ、どこで、どの程度起こるのか、つまり時空間的な“動的”情報を得る必要があるであろう。また、細胞レベルだけでなく、個体レベルでの情報も得なければならない。その為には生理機能を可視化する技術、個体レベルのイメージング技術、そしてリアルタイムに観察しながら生理機能を“いじくる”技術の開発が必要不可欠である。当研究室では、新しい技術を用いた解析による新しい現象の発見を目指して、機能指示薬開発、生理機能操作技術開発、顕微鏡技術開発、生理現象解析の4位1体型研究を今後も展開していくことで、生命の謎に迫りたい。

4．資料

4.1　学術論文等

1）T. Matsuda, A. Miyawaki and T. Nagai : “Direct measurement of protein dynamics inside cells using a rationally designed photoconvertible protein.”, *Nature Methods* 5 : 339-345 (2008)

2）T. Sunabori, A. Tokunaga, T. Nagai, K. Sawamoto, M. Okabe, A. Miyawaki, Y. Matsuzaki, T. Miyata and H. Okano : “Cell-cycle-specific nestin expression coordinates with MORPHOLOGICAL changes in embryonic cortical neural progenitors.”, *J. Cell Sci.* 121 : 1204-1212 (2008)

3）X. J. Zhou, R. Babu, S. da Silva, Q. Shu, I. A. Graef, T. Oliver, T. Tomoda, T. Tani, M. W. Wooten and F. Wang : “Unc-51-like kinase 1/2 mediated endocytic processes regulate filopodia extension and branching of sensory axons.”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 : 5842-5847 (2007)

4）K. Takemoto, E. Kuranaga, A. Tonoki, T. Nagai, A. Miyawaki and M. Miura : “Local initiation of caspase activation in Drosophila salivary gland programmed cell death in vivo.”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104(33) : 13367-13372 (2007)

4.2　総説、解説、評論等

1）松田知己、永井健治：「光活性化・光変換蛍光タンパク質を用いたタンパク質動態解析」、バイオインダストリー、25(2)：21-26 (2008)

2）永井健治：「蛍光イメージング―最近の進歩：回折限界の壁を越える工夫―」、病理と臨床、文光堂、25(6)：514-519 (2007)

3）齊藤健太、谷知己、小林健太郎、永井健治：「大口径ファイバー白色光源を用いた高速共焦点顕微鏡の開発と評価」、顕微鏡、42(3)：161-165 (2007)

4）竹本研、永井健治、宮脇敦史、三浦正幸：「アポトーシスの検出」、実験がうまくいく 蛍光・発光試薬の選び方と使い方、羊土社：143-146 (2007)

5）谷知己、永井健治：「Column：スパイはひとりで充分」、実験がうまくいく 蛍光・発光試薬の選び方と使い方、羊土社：147 (2007)

6）小寺一平、永井健治：「FRET プローブ」、実験がうまくいく 蛍光・発光試薬の選び方と使い方、羊土社：158-162 (2007)

7）永井健治：「改変型蛍光タンパク質の利用」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版：67-78 (2007)

8）永井健治、小寺一平：「共鳴エネルギー移動（FRET）の基礎」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版：110-117 (2007)

9）永井健治、齊藤健太：「FRET の測定法と評価」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版：118-128 (2007)

10）齊藤健太、松田知己、原口徳子、永井健治：「実習6 FRET」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版：268-277 (2007)

11）小寺一平、谷知己、永井健治：「実習9 全反射顕微鏡」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版：291-297 (2007)

12）C. Wei, T. Nagai, W. Wei, T. Nemoto, M. Awais, O. Niwa, R. Kurita and Y. Baba : "New advances in nanomedicine: diagnosis and preventive medicine.", *Med Clin North Am*, 91 : 871-879 (2007)

4.5 講演

a．招待講演

i）学会

1）永井健治：「群青色蛍光蛋白質の開発」、日本生物物理学会第45回年会、横浜（2007-12）

2）永井健治：「蛍光イメージングの新たな展開」、第30回日本分子生物学会年会、横浜（2007-12）

3）T. Nagai : "Engineering fluorescent and bioluminescent proteins to", KSMBM, ソウル, 韓国（2007-10）

4）T. Nagai : "Visualization of biological function by using FRET- and BRET-based indicator", APBP2007 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics & Biophotonics DownunderII, ケアンズ, Australia (2007-07)

5）T. Nagai : "Various Applications of Fluorescent Proteins for Cell Biollogy", 16th Annual Meeting of the Korean Society for Smooth Muscle Research, ソウル, Korea (2007-06)

6）永井健治：「バイオイメージング技術の展望」、第40回日本発生生物学会・第59回日本細胞生物学会 合同大会、福岡（2007-05）

ii）研究会

1）永井健治：「天然ナノ発光粒子 GFP を用いた生理機能センサーの開発とバイオイメージング」、通研共同プロジェクト研究会「フォトニック結晶の光産業技術への展開」、仙台（2008-02）

2）永井健治：「蛍光タンパク質のエンジニアリングによる生理機能指示薬作成とライブイメージング」、東北大学多元物質化学研究所特別講演会ー細胞機能を探るインテリジェントマテリアルの開拓と医療展開ー、仙台 (2008-02)

3）T. Nagai : "Perspective of Bioimaging Technolo-gies using Engineered Fluorescent Proteins", 北海道大学・ソウル大学ジョイントシンポジウム, ソウル, Korea (2008-01)

4）T. Nagai : "Imaging Biological Events Using FRET-based Sensor Proteins", International Symposium on Advance Techniques for Molecular Imaging, 台中, 台湾（2007-12）

5）永井健治：「合理的に設計した光変換蛍光タンパク質による生きた細胞内のタンパク質」、バイオイメージング技術の現状と将来展望、大阪（2007-11）

6）永井健治：「イメージングの現在と未来」、植物科学研究教育推進ユニット 視る生物学２－イメージングの現在と未来－、生駒（2007-11）

7）T. Nagai : "Imaging biological functions using FRET-based sensor proteins", Frontier BIomedical and Electro-optical Science, 台北, 台湾（2007-11）

8）T. Nagai : "Perspective of bioimaging using fluorescent and bioluminescent proteins", Symposium on Promotion of Academic Exellence, 台北, 台湾（2007-11）

9）T. Nagai : "Engneering fluorescent proteins to visualize biological functions.", Joint Symposium for the Promotion of Academic exchange on Nanotechnology and Nanobiology, 札幌（2007-11）

10）永井健治：「蛍光タンパク質の特性とその利用」、第９回細胞生物学ワークショップ、神戸（2007-10）

11）永井健治：「FRET の基礎」、第９回細胞生物学ワークショップ、神戸（2007-10）

12）T. Nagai : "ENGINEERING FLUORESCENT AND BIOLUMINESCENT PROTEINS TO VISUALIZE BIOLOGICAL FUNCTIONS", The 2nd International Workshop on Approaches to Single-Cell Analysis, 東京 (2007-09)

13）永井健治：「蛍光・化学発光タンパク質を利用して何ができるか？」、生物発光化学発光研究会第25回学術講演会、札幌（2007-06）

14）永井健治：「蛍光・発光タンパク質を利用した生理機能センサーの開発とライブイメージング」、生体分子イメージングの新たな技術開発に関する研究会、名古屋

iii）コロキウム・セミナー・その他

1）永井健治：「バイオイメージングの難しさ」、癌研セミナー、東京（2008-03）

2）永井健治：「私の研究観ービジュアルバイオロジーへの道ー」、グローバル COE プログラムの若手・学生研究交流会、京都（2008-02）

3）永井健治：「最新のバイオイメージング技術」、北海道バイオ産業クラスター・フォーラム シーズ公開会～評価技術から道産素材・生産技術まで～、札幌（2008-01）

4）永井健治：「生理機能センサータンパク質によるバイオイメージング」、第３回バイオ機器勉強会、北九州 (2007-12)

5）永井健治、齊藤健太、松田知己：「蛍光を用いた分子動態の定量解析」、BMB2007、横浜（2007-12）

6）T. Nagai : "Vivid visualization of biological events", ASAN

Medical Center, ソウル, 韓国 (2007-10)

7) T. Nagai : "Vivid visualization of biological events using", KAIST, ソウル, 韓国 (2007-10)

8) 永井健治 :「蛍光顕微鏡の展開 ―GFP と FRET―」、第3回ライブセルイメージング講習会、つくば (2007-10)

9) T. Nagai : "SIMS Simultaneous scanner y aplica-ciones avanzadas FRAP, Foto-activación, Fotoconversión, Kaede, PA-GFP", Microscopia de Fluorescencia y Confocal Espectral, メキシコ, メキシコ (2007-09)

10) T. Nagai : "Engineering Fluorescence Proteins. New Probe. (Nuevas Proteínas Fluorescentes)", Microscopia de Fluorescencia y Confocal Espectral, メキシコ, メキシコ (2007-09)

11) T. Nagai : "ENGINEERING FLUORESCENT AND BIOLUMINESCENT PROTEINS TO VISUALIZE BIOLOGICAL FUNCTIONS", The 5th International Forum on Post-Genome Technologies, 蘇州, 中国 (2007-09)

12) 永井健治 :「バイオイメージング技術に望むもの―「細胞は如何にして外界情報を知覚するか？」の探求―」、平成19年度科研費特定領域研究「細胞感覚」夏の班会議・若手の会、葉山 (2007-08)

13) 永井健治 :「GFP は何故光る？」、第16回 浜松医科大学メディカルホトニクス・コース、浜松 (2007-07)

14) T. Nagai : "GFP and Quantum Dot", Advanced Microscopy Course for Bio-Medical Research, 北京, China (2007-05)

b. 一般講演

i) 学会

1) T. Matsuda, A. Miyawaki, T.Nagai: "Phamret: An efficient highlighter protein based on photoconversion-mediated FRET for cell biological studies" International Symposium on Functional Organization of the Nucleus, Awaji Yumebutai International Conference Center, Awaji, Japan (2007-1)

2) T. Tani, K Saito, T. Nagai: "Single molecule imaging of nerve growth factor receptor trkA expressed in the growth cones of dorsal root ganglion explants" Fifth East Asian Biophysics Symposium & Forty-Fourth Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan (2006-11)

3) K. Takemoto, T. Nagai: "A genetically-encoded indicator for RNA in living cells" Fifth East Asian Biophysics Symposium & Forty-Fourth Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan (2006-11)

4) T. Matsuda, A. Miyawaki, T.Nagai: "Phamret: An efficient highlighter protein based on photoconversion-mediated FRET for cell biological studies" Fifth East Asian Biophysics Symposium & Forty-Fourth Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan (2006-11)

5) K. Saito, T. Nagai: "Ca2+ imaging of single living cell with bioluminescence resonance energy transfer (BRET)" Fifth East Asian Biophysics Symposium & Forty-Fourth Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan (2006-11)

6) T. Tani : "Signal input of nerve growth factor into the growth cone visualized by the use of single-molecule imaging", 49th Biophysical Society Meeting,, Long Beach、USA (2005-2)

7) 齋藤健太、永井健治 :「シロイヌナズナにおける重力情報伝達のリアルタイム可視化解析」、第43回日本生物物理学会、札幌コンベンションセンター、札幌 (2005-11)

4.7 予算獲得状況

a. 科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1) 永井健治、若手研究A，少数分子による自己組織化過程の生体機能シグナル可視化による解析、06～08年度

2) 後藤デレック、特定領域公募班、植物の栄養感知に関わるシグナル伝達のリアルタイム可視化、06～07年度

3) 松田知己、若手B、立体構造情報を利用した蛍光イメージング用バイオセンサー設計法の開発、06～07年度

4) 谷知己、萌芽研究、機能蛍光リガンドによる選択的神経細胞標識：in vivo 神経回路形成観察への応用、05～06年度

c. 大型プロジェクト・受託研究

1) 谷知己、科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業さきがけ研究21、タンパク質1分子モーションキャプチャー技術の開発、2006～2009年度

2) 永井健治、厚生労働省、萌芽的先端医療技術推進事業、ナノレベルイメージングによる分子の機能および構造解析、2007～2009年度

3) 小寺一平、科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業さきがけ研究21、超迅速なゲノム配列決定法の開発、2005～2008年度

4.8 共同研究

b. 民間との共同研究

1) 永井健治 (ニコン・インストルメンツカンパニー) :「機能指示タンパク質を効率よく観察するための顕微鏡開発」、2007～2008

4.10 社会教育活動

a. 担当授業科目

1) 全学共通、ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論 II、永井健治、2008年1月30日

2) 理学院、発生進化学特論、永井健治、2007年10月1日～2008年3月31日

3) 理学部、実験生物科学、永井健治、2007年10月1日～2008

年3月31日

4）理学部、生物高分子科学、永井健治、2007年7月5日

5）理学院、生命理学概論、永井健治、2007年6月20日

6）工学部、基礎生物学Ⅰ、永井健治、2007年4月1日～2007年9月30日

g．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク（3名）

1）Sang-Yeob Kim（日本学術振興会外国人特別研究員）

2）竹本研（博士研究員）

3）小寺一平（科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業「構造機能と計測分析」研究領域・研究者

4）松田知己（財団法人医療機器センター流動研究員）

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　柳田達雄（総研大、学術博、1995.6～）
　　飯間　信（京大理院、理博、1999.4～）
事務補佐員
　井上祐子(2005.11～2007.8)、酒井 真理(2007.8～)
電子科学研究所研究員
　トーニヤス ラルフ、ガメイロ マルシオ フゼット、
　一宮尚志
VBL 研究員　小林康明、袁暁輝、宮口智成、齋藤宗孝
COE 研究員　郡　宏
院　生
・博士課程　伊藤賢太郎
・修士課程　鈴木勝也、鈴木悠介、鳥谷部和孝、
　　西　慧、畠中耕平、高井北斗、田中一慶

1．研究目標

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19年度は不均一場における空間局在解の伝搬ダイナミクス、昆虫飛翔モデルにおける渦構造の役割、空間的に分岐をもつ興奮性繊維上のパルスダイナミクス等を主目標においた。

2．研究成果

(a)　不均一場における空間局在解の伝搬ダイナミクス

不均一場におけるシグナル伝達の問題は生物系、化学系において重要な意味をもつ。自然界には常に非一様性が存在するということのみならず、逆に不均一性を積極的に利用して、様々な情報処理を行うということも行われているからである。例えば１次元パルスの一方向の整流作用などは重要な例となる。ここでは不均一性として最も単純な1次元バンプ型、すなわちある一定有限幅の階段状の不均一性を考え、これに１次元進行パルスが衝突する場合を考える。不均一性を特徴付けるものとして、幅、高さ、勾配があるが、勾配を固定して、幅と高さをパラメータとして採用しよう。典型的には適当に幅を固定すれば、高さが凸の方向に高くなれば、通過、振動、反射と変化し、逆に凹の方向に深くなれば、通過、反射、振動、固定というように変化する（図１参照）。ここで振動及び固定はパルスがバンプの近くで捕捉(pinning)されることを意味し、その捕捉のされ方が、時間振動するか定常的かの違いを意味する。このようなパラメータと共に変化するダイナミクスを解析的に理解するには有限次元常微分方程式への縮約が有効となる。実際これはドリフト分岐点の近くでは可能であり、バンプ型不均一性の影響は方程式の外力項として現れる。これにより２次元力学系の理論が直接適用可能となり、上に述べたダイナミクスがなぜ出現するか明らかになった。とくに捕捉から非捕捉(de-pinning)状態への遷移は、ホモクリニック分岐という大域分岐と密接に関連していることがわかった。

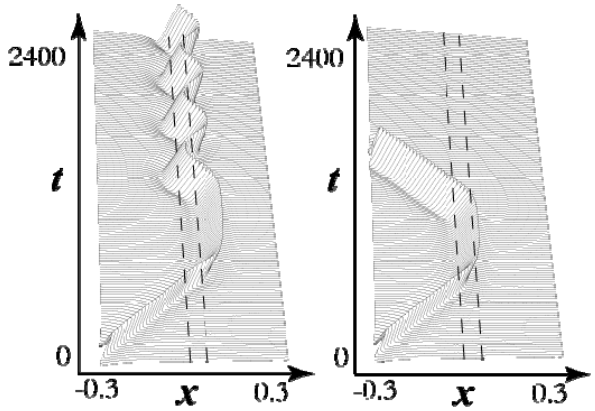


図１．１次元パルスがバンプ型不均一性に衝突する時のパルスの振る舞い：左は振動的に捕捉(pinning)された状態を示す。バンプの高さが少し高くなると右のように反射する。

(b)　昆虫飛翔モデルにおける渦構造の役割

多くの昆虫は翼を水平にはばたいて空中停止飛行を行う。このような場合には翼が生成する渦構造が翼近傍にとどまるため、より強い非線形性が予想される。ここでは水平はばたき運動を行う昆虫飛翔の数値モデルを用いて、外場の強さを変えたときの定常状態の分岐構造を調べた。ここで得られた構造では、渦を用いた定常はばたき飛行の鉛直安定性は２本の安定分岐枝で表されていて、各々の枝は異なる飛行モードに対応している。一つは定常状態であり一周期平均速度の揺らぎはほとんどないが、他方では重心変動はより揺らいでおり一周期平均速度の揺らぎは大きい。これら２本の枝はあるパラメータ領域で重なっており、双安定性を示している。更に分岐枝の端点は空中停止飛行に対応していることがわかった。このような分岐構造は生

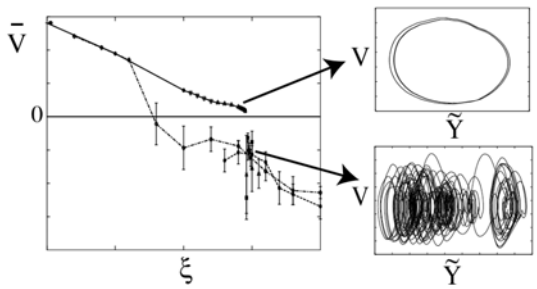


図２．昆虫飛翔モデルの分岐図および相空間での軌道：左は外力に対する平均重心速度の分岐図を表す。２本の分岐枝で構成されていることが分かる。右は同じパラメータ値であるが異なる枝に属する状態の相空間での軌道を表す。上の枝の状態はほぼ周期的であるが、下の枝の状態は非周期的であることがわかる。

成される渦構造の大域的な挙動と深く関わっており、2次元空中停止飛行の特殊性を示唆していると考えられる。またこのモデルの解析結果より、はばたき飛行中の重心変動の効果が臨界外力値を大きくしていることが示唆された。これは翼と流れの相互作用を考えることでより効率良く力を生成出来ることを意味しており、今後の応用に貢献出来る可能性があると思われる。

(c) 空間的に分岐をもつ興奮性繊維上のパルスダイナミクス

脳の多様な機能はニューロン間の複雑な結合に起因すると考えられている。しかしながら、単一ニューロンにおいてさえ信号処理機能を持つことが近年の実験により解明されてきた。単一ニューロンの神経軸索の分岐構造に起因した信号処理機能を数値計算により解析した。ニューロンは複雑な樹状構造をもっている。したがって、その上を伝播する電気信号同士は交叉点において相互作用する。このことは、樹状突起や軸索が単純な電気信号を伝達する興奮繊維ではなく、何らかの機能や演算をする能力を備えている可能性を示唆している。本研究では三叉路をもつ興奮繊維系の端点に刺激入力信号を加えたとき、他の末端での発火を出力信号と満たしたときの入出力関係を解析した。その結果、二つの入力信号の同時性感知機能や周期的刺激にたいするバンドパス・フィルターなどの機能を備えていることを数値的に示した。

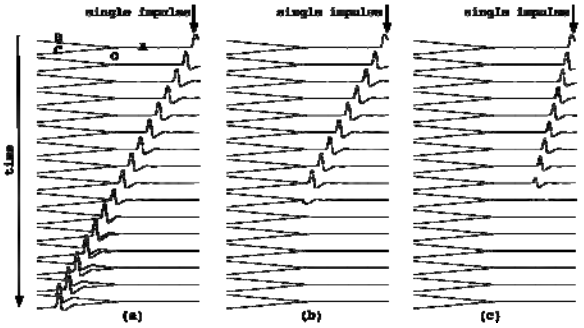


図３．分岐点をもつ興奮性繊維状を伝播するパルスのダイナミクス。単一パルスが分岐点で消滅する状況でも、パルスの周期的入力により分岐点を越えて伝搬する。単純な空間構造を持つ神経繊維においても、刺激の周期やタイミングによって複雑な入出力関係が現れる。

３．今後の研究の展望

時間的、空間的な階層構造、異なるスケールの共存は複雑な系を取り扱うときには常に考慮せねばならない重要な要素である。具体的には、異なる階層あるいは異なるダイナミクスの領域へ転移するきっかけは何であろうか？　またどのような数理的機構がそれを駆動しているのであろうか？　などが直ちに自然な疑問として出てくる。これらに統一的に答える枠組みはまだできていないが、不安定な解の集合から成るネットワークの構造の解明はひとつの鍵を与えていると思われる。単純化された、しかし本質を捉えたいくつかの数理モデルにおいて具体的に検証を積み重ね、大きな枠組みの基盤作りが今後の重要な課題となる。

１．非一様性を用いてある機能をもたせる問題は重要であり、また応用面への展開も広くなる。それらの基礎として最も重要な課題は「非一様性の幾何形状と局在パターンの相互作用ダイナミクス」である。例えば整流機構を考えてみよう。１次元において周期的な非一様性があるとき、そこに微小な非対称性を導入することにより、最初ランダムに動いていたパルスが一定方向に整流されることが可能となるかという問題がある。これは既に数値的にはある程度確認されているが、その数理的解明はまだ端緒についたばかりである。２次元になると、さらに曲率依存性が現れる。幅や高さが同じでも曲率の違いで２次元スポットの挙動は大きく変わってくる。これらを逆に活用すれば、幅、高さ、勾配等は変えずに、幾何形状を微妙に変更するだけで、空間局在解のダイナミクスを自在に操ることも不可能ではなくなる。

２．流体中に置かれた物体に働く力を求める問題は古くからある基礎的な問題である。昆虫飛翔に当てはめた場合、それは物体が作る渦構造から如何に上手に力を取り出すかという問題であるとも考えられよう。このような問題に対するアプローチとしては生物に模したモデルを作り、パラメータを変えてみて効率を探るといったやり方が有効である。今回の問題では分岐構造を作ることでモデルの挙動が明らかとなると同時に、運動自体は非常に単純であっても内在するダイナミクスは多様であることが示唆される結果となった。特に今回のモデルのように相互作用を考慮した場合、問題は流体−物体の結合系となるため解析は難しくなる。渦構造に着目することが次のステップへの足がかりとなると思われる。さらなる発展のためにはナヴィエ・ストークス方程式に立脚した理論解析が必要であると考えられる。

３．単純な分岐構造を持つ興奮性繊維においてさえ、複雑な入出力関係を生み出す事を示した。このことは、単一ニューロンの神経軸索の分岐構造を利用した信号処理が可能である事を示している。しかしながら、実際のニューロンではより複雑な興奮性ダイナミクスや空間構造を持っている。このことは、複数の空間分岐点によるパルス相互作用により高度な信号処理能力を持つ事が可能である事を示唆する。今後はより複雑な空間構造を持つ系の解析が必要とされよう。一方で、このように高度に発達した樹状構造を持つ系は、抽象的レベルにおいてネットワーク結合した興奮素子と見なす事が出来よう。今後は複雑ネットワーク上でのダイナミクスとしての発展が期待される。

4．資料

4.1　学術論文等

1）Y. Tasaka, M. Iima and K. Ito : “Rotating flow related to surface switching”, Journal of Physics: Conference Series, 137 : 012030 (2008)

2）T. Yanagita and T. Onozaki : “Dynamics of a market with heterogeneous learning agents”, Journal of Economic Interaction and Coordination : 102-107 (2008)

3）T. Yanagita : “Input-Output Relation of FitzHugh-Nagumo Elements Arranged in a Trifurcate Structure”, Phys. Rev. E, 76 : 56215-56228 (2007)

4）T. Suzuki, M. Iima and Y. Hayase : “Response to “A comment on “Surface switching of rotating fluid in a cylinder”[Phys. Fluids 18, 101701(2006)]””, Physics of Fluids, 19(6) : 069102 (2007)

5）S. Takagi, Y. Nishiura, T. Nakagaki, T. Ueda and K. Ueda : “Indecisive behavior of amoeba crossing an environmental barrier”, Proceedings of the international symposium on “Topological Aspects of Critical Systems and Networks”, World Scientific Publishing Co. : 86-93 (2007)

6）T. Nakagaki, M. Iima, T. Ueda, Y. Nishiura, T. Saigusa, A. Tero, R. Kobayashi and K. Showalter : “Minimum-risk path finding by an adaptive amoebal network”, Phys. Rev. Lett., 99 : 068104 (2007)

7）I. Z. Kiss, C. Rusin, H. Kori and J. L. Hudson : “Engineering Complex Dynamical Structures: Sequential Patterns and Desynchronization”, Science, 316 : 1886-1889 (2007)

8）T. Onozaki, T. Yanagita, T. Kaizoji and K. Toyabe : “Regional Business Cycle Synchronization through Expectations”, Physica A, 383 : 102-107 (2007)

9）X. Yuan, T. Teramoto and Y. Nishiura : “Heterogeneity-induced defect bifurcation and pulse dynamics for a three-component reaction-diffusion system”, Phys. Rev. E, 75(3) : 036220 (2007)

10）M. Iima : “A two-dimensional aerodynamic model of freely flying insects”, J. Theor. Biol., 247(4) : 657-671 (2007)

4.2　総説・解説・評論等

1）西浦廉政：「実験系研究室における理論研究の12年」、応用数理、18(1) : 60-62 (2008)

2）飯間信、伊藤賢太郎、田坂裕司：「円筒容器内における表面大変形を伴う回転流れの実験的研究」、数理解析研究所講究録、1567 : 132-140 (2007)

3）柳田達雄：「パターン・ダイナミクスの数理モデリングとシミュレーション」、九州大学応用力学研究所研究集会報告、ME-S5(18) (2007)

4）田坂裕司、飯間信、伊藤賢太郎：「自由界面をもつ回転流れの超音波計測」、第35回可視化情報シンポジウム講演論文集 : 269-270 (2007)

5）増田直紀、郡 宏：「複雑ネットワーク:導入およびシナプス可塑性との関係」、日本神経回路学会誌、14(3) : 173-185 (2007)

6）伊藤賢太郎、飯間信、田坂裕司：「表面大変形を伴う円筒容器内の回転流れの不安定性解析」、日本流体力学会年会2007講演論文集 (2007)

7）伊藤賢太郎、飯間信、田坂裕司：「回転円筒内に見られる表面大変形の臨界点近傍の理論モデル」、混相流学会年会講演会2007講演論文集 : 278-279 (2007)

8）飯間信、田坂裕司、伊藤賢太郎：「円筒内の回転流れに見られる表面 switching 現象の可視化および流速計測」、混相流学会年会講演会2007講演論文集 : 280-281 (2007)

4.3　国際会議議事録等に掲載された論文

1）Y. Tasaka, M. Iima and K. Ito : “Flow transition in rotating flow relating with surface switching”, *Proceedings of 15th International Couette-Taylor Workshop* : 334-338 (2007)

4.7　講演

i）学会

1）柳田達雄、伊庭幸人：「拡張アンサンブル法による力学系の分岐解析」、日本物理学会 第63回年次大会、近畿大学 (2008-03)

2）畠中耕平、伊藤賢太郎、柳田達雄：「自発形成したスパイラル上で誘因されるパルス・ダイナミクス」、日本物理学会 第63回年次大会、近畿大学 (2008-03)

3）小野崎保、柳田達雄：「A Model of Market Share Dynamics with Boundedly Rational Agents」、第12回進化経済学会大会、鹿児島国際大学 (2008-03)

4）西浦廉政：「Turning から Ertl までーパターンダイナミクスの半世紀ー」、日本数学会・日本物理学会合同講演会、近畿大学 (2008-03)

5）飯間信：「２次元昆虫飛翔の理論的解析」、日本物理学会第63回年次大会、大阪 (2008-03)

6）柳田達雄：「Exploring Chaotic Dynamical Systems by Extended Ensemble」、第一回「カオスとその応用」ワークショップ 特集「一次元写像とその周辺」、理化学研究所 (2008-02)

7）一宮尚志：「複雑ネットワーク上のコンタクトプロセス」、応用数学合同研究集会、龍谷大学 (2007-12)

8）M. Iima : “Theoretical evaluation of the force acting on the flapping wing in two-dimensional fluid”, 60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics(APS meeting), Salt Lake City, USA (2007-11)

9）Y. Tasaka, K. Ito and M. Iima : “Flow transition in surface switching of rotating fluid”, 60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics(APS meeting), Salt Lake City, USA (2007-11)

10) 飯間信：「蝶々に学ぶ流体力学 -- 物理的な観点から--」、日本物理学会2007年秋季大会、札幌 (2007-09)
11) 伊藤賢太郎、飯間信、田坂裕司：「表面大変形を伴う円筒容器内の回転流れの不安定性解析」、日本流体力学会年会2007、東京 (2007-08)
12) T. Onozaki and T. Yanagita : "Another View for Regional Business Cycle Synchronization", Fifth International Workshop on Nonlinear Economic Dynamics 2007, Bielefeld University, Bielefeld, Germany (2007-07)
13) T. Nakagaki, S. Takagi, T. Ueda, K. Ueda and Y. Nishiura : "Cell bahaviors in heterogeneous media in an amoeba of true slime mold", 6th international Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zurich, Switzerland (2007-07)
14) 飯間信、伊藤賢太郎、田坂裕司：「円筒内の回転流れに見られる表面 switching 現象の可視化および流速計測」、日本混相流学会年会2007、札幌 (2007-06)
15) 伊藤賢太郎、飯間信、田坂裕司：「回転円筒内に見られる表面大変形の臨界点近傍の理論モデル」、日本混相流学会年会2007、札幌 (2007-06)
16) T. Onozaki and T. Yanagita : "Business Cycle Synchronization through Expectations", Workshop on Economies of Heteroge-neous Interacting Agents (WEHIA) 2007, George Mason Univ., Washington DC, USA (2007-06)
17) T. Yanagita and T. Onozaki : "Dynamics of a Market with Heterogeneous Learning Agents", Workshop on Economies of Heterogeneous Interacting Agents (WEHIA) 2007, George Mason Univ., Washington DC, USA (2007-06)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）T. Ichinomiya : "Epidemic threshold od the contact process on complex networks", NSC Winter Workshop 2008: Complex Nonlinear Dynamics ranging from Biology to Engineering, Hokkaido University (2008-03)
2) 一宮尚志：「複雑ネットワーク上の感染症ダイナミクス」、生命現象と関連した非線形問題の数理、京都大学数理解析研究所 (2008-03)
3) K. Toyabe, T. Yanagita and T. Onozaki : "Very Long Transient Dynamics to Synchronization", The 9th RIES-Hokudai International Symposium "創", Sapporo (2008-01)
4) T. Yanagita, K. Ito and K. Hatanaka : "Irregular Pulse Dynamics on Self-Organized Regular Spiral", The 9th RIES-Hokudai International Symposium "創", Sapporo (2008-01)
5）飯間信、田坂裕司、伊藤賢太郎：「回転流れにおける表面大変形の遷移および分岐」、乱流研究の展望：ブレークスルーを求めて、京都 (2008-01)
6）西浦廉政、寺本 敬、袁 暁輝：「不均一場における波の伝播と発生ダイナミクス」、阪大産研・東北大多元研・北大電子研・東工大資源研「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」成果報告会、東北大学片平さくらホール（片平キャンパス）(2007-12)
7）飯間信：「拡張された Blasius の公式による昆虫飛翔の理論」、応用数学合同研究集会、瀬田 (2007-12)
8）Y. Nishiura : "Pinning and Depinning for Particle-Like Solutions in Dissipative Systems", SIAM Conference on Analysis of Partial Differential Equations(PD07), Hilton Phoenix East/Mesa, USA (2007-12)
9）T. Teramoto and Y. Nishiura : "Information Exchange between moving particles and defects", 2nd International Workshop on Natural Computing, International Conference Hall, Nagoya University (2007-12)
10) M. Iima and Y. Nishiura : "Dynamics of the localized waves in Rayleigh-Benard convection with Heterogeneous Con-centration Field", 2007 SIAM conference on analysis of Partial Differential Equations, Phoenix, USA (2007-12)
11) T. Ichinomiya, Y. Nishiura, K. Motoyasu and I. Mitsuhiro : "Study of the dynamics of dislocations using temperature-accelerated dynamics method", International Workshop of New Cross-Over Project 4, 東京大学 (2007-11)
12) 西浦廉政：「Binary fluid での対流セルの衝突現象」、界面現象のダイナミクスを解明する最前線の数値解析とその展開 III、神戸インスティテュート (2007-10)
13) 飯間信：「自由表面大変形を伴う回転流体の分岐構造」、北大西浦研・東大佐野研合同ワークショップ、札幌 (2007-09)
14) 西浦廉政：「周期構造をめぐって-泡筏・ポリマー・Turning パターン-」、非線形数理秋の学校、明治大学秋葉原サテライトキャンパス (2007-09)
15) T. Yanagita, H. Suetani and K. Aihara : "Pulse dynamics in a coupled excitable system", Nonlinear Dynamics and Chaos, Aberdeen, UK (2007-09)
16) M. Iima : "Role of vortex in free-flight of insects", Vortex dynamics from quantum to geophysical scales, Exeter, UK (2007-09)
17) Y. Nishiura : "Dynamics of Particle Patterns in Dissipative Systems", The 21st Century COE Program "Towards a New Basic Science: Depth and Synthesis", 大阪大学 豊中キャンパス (2007-09)
18) T. Yanagita and T. Onozaki : "A Model of Market Share Dynamics with Boundedly Rational Agents", The Fifth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems, Waseda Univ. (2007-08)
19) M. Iima and Y. Nishiura : "Dynamics of the localized waves in a model equation of binary fluid convection", Equadiff 07, Vienna, Austria (2007-08)
20) Y. Nishiura : "Heterogenity-induced pulse dynamics in dissipative systems", 6th ICIAM: Dynamics of nonlinear waves in heterogeneous media, Zurich, Switzerland

(2007-07)

21) Y. Tasaka, M. Iima and K. Ito : "Flow transition in rotating flow relating with surface switching", 15th International Couette-Taylor Workshop, Le Havre, France (2007-07)

22) Y. Nishiura : "Pinning and Depinning for localized waves in heterogeneous media", Nonlinear Collective Behaviour: Networks, Swarming and Reaction Diffusion Dynamics, Lorentz Center, Netherland (2007-06)

23) 飯間信、柳田達雄、西浦廉政 :「流体中における生物の推進機構の理解に向けた数理科学的アプローチ」、ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス発足記念シンポジウム、東京 (2007-06)

24) 一宮尚志:「ランダムネットワーク上のダイナミクスと経路積分」、非線形振動子系の物理学 : 現代的問題とその解析、京都大学基礎物理学研究所 (2007-06)

25) Y. Nishiura : "Collision Dynamics in Heterogeneous Dissipative Medida", 2007 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems: Propagation of Fronts and Pulse in Reaction-diffusion-advection Systems, Zurich, Switzerland (2007-05)

26) M. Iima : "Mathematical analysis on freely flying insects", NSC Spring Workshop 2007: Complex Dynamics in Physics, Chemistry and Biology, 札幌 (2007-05)

ⅲ）コロキウム・セミナー等・その他

1）柳田達雄、伊庭幸人 :「マルコフ連鎖モンテカルロ法による力学系の解析」、モンテカルロ法とその周辺、統計数理研究所 (2008-03)

2）飯間信 :「Navier-Stokes 方程式に基づく２次元昆虫飛翔の理論」、語ろう数理解析、大阪 (2008-02)

3）西浦廉政 :「新たな数理的世界観 ー 蚊柱と見えざる手に共通するもの ー」、北大フロンティアセミナー＜21世紀数学への序章 シリーズ２＞、東京ステーションコンファレンス (2008-02)

4）西浦廉政:「散逸系粒子解ダイナミクスの最近の発展」、九州関数方程式セミナー、九州大学 六本松キャンパス (2007-11)

4.8 シンポジウムの開催（組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）Y. Nishiura : "Dynamics of Pulses in Heterogeneous Me-dia", Hilton Phoenix East/Mesa (Mesa USA) (2007年12月11日)

2) Y. Suzuki, A. Adamatzky, M. Hagiya, H. Umeo, G. Mauri, V. Manca, K. Morita, H. Miike, Y. Nishiura, G. Paun, T. Yamaguchi and K. Yoshikawa : "2nd International Workshop on Natural Computing", International Conference Hall, Nagoya University (名古屋市) (2007年12月10日～2007年12月13日)

3）遠藤徳孝、水口毅、小西哲郎、西森拓、岡村誠、柳田達雄 :「地形のダイナミクスとパターン」、20人、九州大学応用力学研究所 (福岡) (2007年11月15日～2007年11月16日)

4）M. Murase, Y. Gunji, Y. Murata, Y. Nishiura, T. Hondou, I. Tsuda and S. Nara : "第22回西宮・湯川記念理論物理学シンポジウム : What is life? The Next 100 Years of Yukawa's Dream", 90人, コープ・イン・京都 (京都市) (2007年10月15日～2007年10月20日)

4.10 予算獲得状況

a. 科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）西浦廉政、基盤研究 A 一般 (2)、散逸系における粒子解ダイナミクスの新展開、2004～2007年度

2）西浦廉政、萌芽研究、計算論的ホモロジーの応用による材料科学の新展開、2007～2009年度

3）柳田達雄、基盤研究 C 一般、結合興奮素子系の自己組織的 スパイクパターン形成と機能、2007～2008年度

4）郡 宏、若手研究 スタートアップ、振動子ネットワークの応答と制御 : 基礎理論と生体システムへの応用、2007～2008年度

5）飯間信、若手研究 B、渦を用いたはばたき飛行の流体力学に基づく理論的・数値的手法による解明、2007～2008年度

f. その他（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）西浦廉政 (日本原子力研究所):「原子燃料細粒化プロセスの縮約的な解析理論 に関する研究」、2004-2008年度

2）西浦廉政 (三菱レイヨン) :「光重合誘起相分離による自己組織化現象のメカニズム解明に関する研究」

3）西浦廉政 (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」、2005-2008年度

4）柳田達雄、伊庭幸人 (統計数理研究所) :「マルコフ連鎖モンテカルロ法による力学系の解析」、2006～2008年度

5）柳田達雄、西浦廉政、津田 一郎、末谷 大道、合原 一幸 (文部科学省) :「パターンダイナミクス・シミュレータに関する研究」、2006～2007年度

4.11 受賞

1）飯間信 : 第１回日本物理学会若手奨励賞(領域11)「蝶の飛翔メカニズムの解明」(日本物理学会) 2007年9月

4.12 社会教育活動

a. 公的機関の委員

1）西浦廉政 : 日本学術会議連携委員 (2006年8月20日～現在)

2）西浦廉政 : 日本数学会科研費問題専門委員 (2005年7月1日～2007年6月30日)

3）科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」研究

総括　西浦廉政（平成19年5月1日～現在）

4）柳田達雄:科学技術政策研究所 科学技術動向センター専門調査員（2004年4月1日～現在）

5）西浦廉政：Physica D, Editor　(2002年4月1日～現在)

6）西浦廉政：European Journal of Applied Mathematics, Associate Editor　(2005年1月1日～現在)

7）飯間信：雑誌「物性研究」編集委員　(2001年4月1日～現在)

8）西浦廉政：Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Associate Editor（1997年4月1日～現在）

9）西浦廉政：Hokkaido Mathematical Journal, Editor（1995年4月1日～現在）

b．国内外の学会の役職

1）西浦廉政：日本応用数理学会評議員　(2006年4月1日～現在)

2）西浦廉政：日本数学会評議員　(2006年3月1日～現在)

d．その他

1）郡 宏：サイエンスカフェ・札幌のゲスト(講師)（2007年6月16日～現在）

2）郡 宏：手稲高校「キャリア探求学習」の講師（2007年2月15日～現在）

e．新聞・テレビ等の報道

・新聞

1）郡 宏：北海道新聞 2007年6月14日「札幌紀之國屋で行われたサイエンスカフェ・札幌「リズムの科学」の講演の予告」

2）H. Kori：北海道新聞 2007年6月8日“Science に載った論文の紹介．”

・雑誌

1）西浦廉政：JST News Vol.4 No.8 (2007年11月号) 2007年11月1日「12頁に掲載＜研究領域＞の“誕生” JST「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」領域、研究総括インタビュー。」

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）理学部、計算数学４、西浦廉政、2007年10月1日～2008年3月31日

2）理学部、数学講読、柳田達雄、2007年10月1日～2008年3月31日

3）理学部、数学購読、飯間信、2007年4月1日～2007年9月30日

4）理学院、数学研究、柳田達雄、2007年4月1日～2008年3月31日

h．北大以外での非常勤講師（担当者、教育機関、講義名、期間）

1）飯間信、旭川西高等学校、大学模擬授業「渦の科学」、2007年7月23日

2）飯間信、山梨県立上野原高校、総合授業「渦の科学」、2007年5月28日

i．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク(8名)

トーニヤス ラルフ、ガメイロ マルシオ フゼット、小林康明（北海道大学 VBL）、袁暁輝（北海道大学 VBL）、宮口智成（北海道大学VBL）、齋藤宗孝（北海道大学VBL）、郡 宏（理学部 COE）、一宮尚志（電子科学研究所）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（2名）

高井北斗、田中一慶

・博士後期課程（1名）

伊藤賢太郎

神経情報研究分野

准教授　青沼仁志（北大院、理博、2001.1～）
助　教　西野浩史（岡山大院、学博、2000.10～）
博士研究員　佐倉　緑（北大院、工博、2005.10～）
院　生　菊地美香(M2)
　　頼経篤史(M2)

1．研究目標

神経細胞が相互に信号をやり取りする神経回路網は、どの様にして感覚信号の中から情報を抽出し、記憶と照合し、運動系を制御する信号を生成するのであろうか？本研究分野では、神経細胞から脳を組み立てる設計原理を明らかにするため、神経細胞の数が少なく構造も簡単な昆虫の神経系について、神経生理学及び情報工学・システム工学的手法を用いて神経細胞レベルにおける信号の流れと回路網を調べている。

2．研究成果

生物は、長い進化の過程でひとつの適応機構として神経系を獲得し、複雑に変化する環境下ですばやく適応的な行動を示すことができる。行動発現にかかわる環境要因には様々なものがある。個体が複数集まると個体間の相互作用が生じ、その状況に応じた行動を発現する。すなわち、社会はひとつの環境要因として捉えることができる。我々は、生物の社会的適応行動の発現メカニズムの解明を目指し、昆虫をモデル動物として研究を進めている。昆虫の身体は脊椎動物などに比べ小さく、微小な脳神経系はわずか10^6個程の細胞からなるが、優れた感覚受容機構、情報処理機構、運動発現機構をもち環境に適応している。我々は、昆虫の神経系における行動の実時間選択の神経機構を明らかにすることで、動物がいかにして環境の変化に対して適応的な行動を発現するのかを理解し、神経系の設計原理や動作原理を解明しようとしている。動物の学習・記憶・知能をはじめ、動機づけによる行動の修飾、階層的ルールに基づく行動選択や決定など、高次行動制御の神経生理学的機序を解明するためには、従来の行動観察や細胞レベルでの生理学的な解析に加え、構成論的・システム論的アプローチを取り入れることが有効である。我々は、実時間における適応行動発現メカニズムを理解するうえで、特に、社会をひとつの環境と捉え、社会適応のメカニズム解明に挑んでいる。そこで、「社会適応」を、個体が他個体との相互作用（経験）により発現行動を柔軟に切り替えることのできる適応機構として、その神経機構の解明をめざしている。

動物は、他の個体と相互に作用しあいながら集団という環境の中でも適応的に行動できる機能を有している。すなわち、動物は、程度の差こそあれ他個体との相互作用により社会を形成し、協調・競合しながら生存している。このような社会への適応機能を生み出すメカニズムを解明するため、動物の個体認識・個体間相互作用・コミュニケーション・社会性形成などの高次行動の発現にかかわる神経生理機構をについて研究した。

昆虫のフェロモン行動は、一般的に定型的なものが多いが、経験により修飾されることも知られている。この様なフェロモン行動をモデル系とし、動物の状況に応じた行動切り替えや発現にかかわる神経機構、学習や記憶、可塑性の神経機構を解明する事を目指している。

クロコオロギを実験材料に、個体間の相互作用と、その社会的な経験により、引き続く行動がいかに選択され適応的な行動が発現するのか、その神経基盤を解明しようとしている。クロコオロギのオスは他のオス個体に遭遇すると互いに威嚇し喧嘩を始める（図1）。この喧嘩行動は、相手の体表物質を受容すると解発される行動である。ところがが、喧嘩に負けた個体はその後一定時間の間、他のオス個体に遭遇しても喧嘩をせずに忌避行動を示すことが知られている。このような昆虫のフェロモン行動をモデルに、行動履歴に伴う行動の修飾や行動切り替えの神経機構について研究を進めた。

図１．オスのクロコオロギ同士の闘争行動。体表物質を検出すると相手を威嚇し、次第に激しい攻撃行動へとかわる。

行動学的実験から、喧嘩に負けた経験は短期的な記憶となり、次の行動選択に関与することが示せた。これまでの研究から、コオロギの匂い学習や記憶の成立過程には一酸化窒素(NO)シグナルが関与すること、脳内では NO が合成され、標的細胞の可溶性グアニル酸シクラーゼ(sGC)を活性化し cGMP（図2）量を増加させることを示してきた。NO が如何にして経験による行動の切替えに関与するのかを解明するため、薬理学的に予め脳内の NO 合成酵素あるいは sGC を阻害し、喧嘩に負けた雄の行動パターンの変化を評価したところ、NO/cGMP カスケードがフェロモン行動の発現や修飾において機能的な役割を担うことが示唆された。さらに、フェロモン情報処理の一次中枢である触角葉（図3）に局在する神経細胞における NO の修飾効果を電気生理学的な方法で解析中である。

また、匂い情報の識別に関わる神経機構を解明するため、コオロギやゴキブリの神経系をモデルに、匂い情報が高次中枢のキノコ体でどのように処理されているのか電気生理学的方法で解析を進めている。ゴキブリでは，キノコ体に

入力する神経細胞は全ての匂いに対して潜時の短い単純な匂い応答を示すものと特定の匂いに対して長い潜時の複雑な匂い応答を示すものに分けられ、これら２つの経路によって並列処理された匂い情報がキノコ体の出力ニューロンの匂い応答の時系列上で順番に読み出されることがわかり、昆虫のキノコ体はまず、匂いの濃度、それから質の分析を行うことが示唆された。

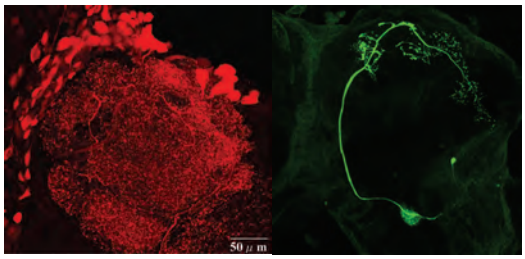


図２．コオロギ触角葉における NO 誘導性 cGMP 免疫陽性細胞と触角葉起源の投射介在ニューロン

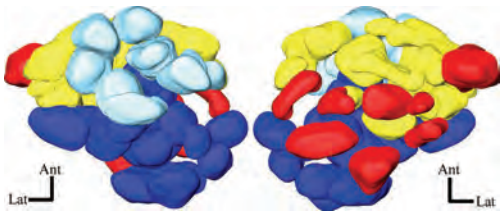


図３．コオロギ脳における触角葉糸球体構造の３次元再構築像。

コオロギの闘争行動の発現機構には体液中の生体アミン、特にオクトパミン(OA)が関与することが知られている。一方、我々は、喧嘩経験の記憶や順位形成には脳内の NO/cGMP シグナル伝達系が関与することを明らかにしてきた。コオロギの脳には、NO 合成酵素(NOS)ニューロンや、OA ニューロンが存在する。喧嘩行動の発現機構において、NO/cGMP シグナル伝達系と OA による調節系が独立に働くのか、それとも修飾作用を修飾する関係になるのかを確かめるため、薬理学実験を行った。NOS ニューロンが触角葉やキノコ体に多く局在することから、NO により生体アミン系の働きが修飾されていると仮説を立てている。

仮説を検証するため、まず、薬理行動学実験を行った。コオロギの脳内の NO 産生を抑制するため、NOS 阻害剤の L-NAME を隔離飼育したオスコオロギの脳に投与し、喧嘩行動を観察すると最初の対戦では L-NAME を投与しない個体と同じように喧嘩を始めた。喧嘩が終結した後、10分間隔離し、再び対戦させると、負けたコオロギは再び喧嘩を始めた。このことは、NO シグナル系が喧嘩行動の発現機構に関与しており、特に負け経験の記憶に関与することを示唆する。一方、闘争が終結した直後の生体アミンの状態を調べると、OA, セロトニン(5HT), ドーパミン(DA)の脳内レベルが低下することがわかった。さらに、コオロギの脳に NO 供与剤(NOR3)を投与すると、脳内の OA レベルが低下し、 NOS 阻害剤 L-NAME あるいは可溶性グアニル酸シクラーゼ阻害剤 ODQ を投与すると逆に上昇することが判明した。このことから、NO/cGMP シグナルは、脳内アミンレベルを調節する働きがあることがわかった。また、これまでの研究から、オスコオロギの触角をオス体表物質で刺激すると触角葉周辺では NO レベルが上昇することがわかっている。これらの結果から、コオロギは他個体と接触することで脳内の NO レベルが上昇し、それにより脳内アミンレベルを調節することが示唆された。現時では、個々の細胞の同定にまでは至っていないが、現在、体表物質の化学情報処理経路の特定を進めているので、今後、さらに同定ニューロンにおける NO シグナルやアミン類の働きについて明らかにしたい。

また、これらの生物学的な知見を基に、コオロギが異なる密度の集団として集まった状況下において、その密度に応じて行動を変容させるときの神経機構を明らかにするために、コオロギ集団の行動モデルの構築と、神経生理モデルの構築に取り組んできた。行動モデルでは、行動実験で得られた知見からボトムアップ的に動的システムモデルを構築した。神経生理モデルでは、神経生理学実験で得られた断片的な知見から拡散方程式を導入した動的モデルを構築した。現在、構築したモデルの妥当性について生物学実験により検証を進めている。

３．今後の研究の展望

適応行動の発現を司る神経生理機構を解明するため、昆虫のフェロモンを介したコミュニケーション行動の発現機構について研究を進めている。従来の生物学研究は、研究で得られた細胞・ネットワーク・個体の各階層における知見は詳細ではあるが断片的で、階層間のギャップが埋まらないまま研究が進められているのが現状である。我々は、各階層における詳細な生物学の知見をシステム工学やロボット工学の方法論で繋ぎ合わせ、動的システムモデルを構築し、さらにシミュレーションと生物学実験による検証を行うことで、階層間のギャップを埋め、社会構築の設計原理、社会適応の神経機能の設計原理解明をめざしている。

得られた生物学の知見をもとに、動的な行動モデルや神経生理モデルを構築し、そのモデルの動作と実際の動物の行動発現や神経回路の動作を比較しながら、繰り返し検証することで、適応行動の発現に関わる神経系の設計原理が理解できる。将来的には、動物の個体認識や個体認識など個体間相互作用、コミュニケーションや社会適応にかかわる神経系の設計原理を理解することができ、新しい情報処理システムの構築につながることが期待できる。

4．資料

4.1　学術論文等

1）M. Sakura, D. Lambrinos and T. Labhart Polarized sky-light navigation in insects: model and electrophysiology of e-vector coding by neurons in the central complex. J Neuro-physiol 99(2): 667-82. (2008)

2）M. Nishikawa, H. Nishino, Y. Misaka, M. Kubota, E. Tsuji, Y. Satoji, M. Ozaki and F. Yokohari Sexual dimor-phism in the antennal lobe of the ant, Camponotus japonicus, Zool. Sci., 25 : 195-204 (2008)

3）E. Tsuji, H. Aonuma, F. Yokohari and M. Nishikawa Se-rotonin-immunoreactive Neurons in the Antennal Sensory System of the Brain in the Carpenter Ant, Camponotus japonicus, Zool. Sci., 24 : 836-849 (2007)

4）S. R. Ott, H. Aonuma, P.L. Newland and M.R. Elphick Nitric oxide synthase in crayfish walking leg ganglia: seg-mental differences in chemo-tactile centers argue against a generic role in sensory integration. J. Comp. Neurol., 501: 381-399. (2007)

5）H. Ai, H. Nishino and T. Itoh Topographic organization of sensory afferents of Johnston's organ in the honeybee brain, J. Comp. Neurol., 502 : 1030-1046 (2007)

6）D. Hatakeyama, H. Aonuma, E. Ito and K. Elekes Local-ization of glutamate-like immunoreactive neurons in the central and peripheral nervous system, The Biological Bulletin, 213 : 172-186 (2007)

7）T. Watanabe, M. Kikuchi, D. Hatakeyama, T. Shiga, T. Yamamoto, H. Aonuma, M. Takahata, N. Suzuki and E. Ito (2007) Gaseous neuromodulator-related genes expressed in the brain of honeybee Apis mellifera. Develop. Neuro-biol., 67: 456-473.

8）M. Iwasaki, H. Nishino, D. Antonia and H. Aonuma Effects of NO/cGMP signaling on the behavioral change in sub-ordinate male crickets, Gryllus bimaculatus, Zool. Sci., 24 : 860-868 (2007)

9）M. Ashikaga, M. Kikuchi, T. Hiraguchi, M. Sakura, H. Aonuma and J. Ota Foraging task of multiple mobile robots in a dynamic environment using adaptive behavior in crickets, Journal of Robotics and Mechatronics, 19(4) : 446-473 (2007)

10）K. Kawabata, T. Fujiki, Y. Ikemoto, H. Aonuma and H. Asama A neuromodulation model for adaptive behavior selection of the cricket, Journal of Robotics and Mecha-tronics, 19(4) : 388-394 (2007)

11）N. Yamagata, H. Nishino and M. Mizunami Neural path-ways for the processing of alarm pheromone in the ant brain, J. Comp. Neurol., 505 : 424-442 (2007)

12）H. Nishino and M. Mizunami Sensilla position on antennae influences afferent terminal location in glomeruli, Neu-roReport, 18 : 1765-1769 (2007)

4.2　総説、解説、評論等

1）淺間一、青沼仁志、太田順、千葉龍介：「総説： 移動知と社会適応」、計測と制御 特集号「移動知：生物の社会適応機能の解明とその工学的応用」、46：885-886 (2007)

2）舩戸徹郎、倉林大輔、奈良維仁、青沼仁志：「振動子網を用いた行動遷移メカニズムの考察」、物性研究、87(4)：579-582 (2007)

3）藍浩之、西野浩史：「ジョンストン器官の比較形態学：構造と中枢投射」、比較生理生化学、24(3)：110-121 (2007)

4）青沼仁志、長尾隆司、太田順、川端邦明、淺間一：「社会的適応行動の動的モデリングと工学応用―コオロギの喧嘩行動を対象として―」、計測と制御特集号「移動知：生物の社会適応機能の解明とその工学的応用」、46：903-909 (2007)

5）岡田 龍一、池野英利、青沼仁志、倉林大輔、伊藤 悦朗:「社会的適応行動から学ぶ情報共有システムの構築ーミツバチの８の字ダンスを対象として」、計測と制御特集号「移動知：生物の社会適応機能の解明とその工学的応用」、46：916-921 (2007)

6）淺間一、神崎亮平、青沼仁志、三浦徹、倉林大輔、太田順：「座談会：生物の社会適応機能の解明その工学的応用」、計測と制御 特集号「移動知：生物の社会適応機能の解明とその工学的応用」、46：951-957 (2007)

7）足利 昌俊、菊地 美香、平口 鉄太郎、佐倉 緑、青沼仁志、太田順：「コオロギ群における社会的行動選択のモデル化」、第13回創発システム・シンポジウム「創発夏の学校」公演資料集、2007. 08：119-122 (2007)

8）足利昌俊、菊地美香、平口鉄太郎、佐倉緑、青沼仁志、太田順:「コオロギ群における社会的行動のモデル化」、第17回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN シン ポジウム)公演論文集、2007. 08：191-196 (2007)

9）川端邦明、藤木智久、青沼仁志、淺間一：「適応的行動選択を実現する昆虫の神経回路モデルに関する研究ー闘争行動の開始・終了に関するモデルの提案ー」、ロボティクス・メカトロニクス講演会'07講演論文集：1A1-A09 (2007)

10）川端邦明、太田順、青沼仁志、淺間一：「コオロギ社会適応行動の神経機構モデリング」、コオロギ社会適応行動の神経機構モデリング：1F14- (2007)

11）矢野史朗、池本有助、青沼仁志、淺間一：「コオロギの適応的行動選択を実現する動的制御機構のモデリング」、第13回創発システム・シンポジウム講演論文集：165-166 (2007)

12）舩戸徹郎、奈良維仁、Angelo A.D'、Pagello E.、倉林大輔、青沼仁志：「結合振動子による行動選択回路の実装

と行動評価」、第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集：1D16-(2007)

13) 倉林大輔、舩戸徹郎、奈良維仁、青沼仁志：「振動子網を用いた行動切替メカニズムの実現」、計測自動制御学会制御部門大会講演論文集、計測自動制御学会：2N4-5-(2007)

4.3 国際会議議事録等に掲載された論文

1) D. Kurabayashi, H. Aonuma, T. Funato, T. Fujiki, M. Ashikaga, J. Ota and H. Asama : "Artificial model for be-havior switching by using network transition through neuro-modulation effect", Comp. Biochem. Physiol., 148A(Suppl.. 1) : S32- (2007)

2) H. Aonuma : "NO/cGMP system and biogenic amine system in antagonistic behavior in the cricket", Comp. Biochem. Physiol., 148A(Suppl.. 1) : S33- (2007)

3) M. Sakura, A. Yoritsune and H. Aonuma : "Fighting experiences modulate aggressive and avoidance behaviors in crickets against male cuticular substances", Proceeding of the 2nd International Symposium on Mobiligence, 2 : 243-246 (2007)

4) M. Ashikaga, M. Kikuchi, T. Hiraguchi, M. Sa-kura, H. Aonuma and J. Ota : "Modeling of socially adaptive behavior in crickets", Proceeding of the 2nd International Symposium on Mobiligence, 2 : 191-194 (2007)

5) H. Aonuma, M. Sakura, M. Kikuchi, T. Hiraguchi, M. Ashikaga, J. Ota, K. Kawabata, T. Fujiki, Y. Ikemoto and H. Asama : "Social experience dependent behavior selection in the cricket - from neuroethological approach to modeling -", Proceeding of the 2nd International Symposium on Mobiligence, 2 : 16-19 (2007)

6) M. Kikuchi and H. Aonuma : "Distributions of aminergic and nitric oxidergic neurons", Proceeding of the 2nd International Symposium on Mobiligence, 2 : 239-242 (2007)

7) A. Yoritsune and H. Aonuma : "3-D atras of the cricket antennal lobe", Proceeding of the 2nd International Symposium on Mobiligence, 2 : 187-190 (2007)

8) K. Kawabata, T. Fujiki, M. Ashikaga, J. Ota, H. Aonuma and H. Asama : "A study on neural circuit model of insects for adaptive behavior selection - Verification of action selection model in multi-individual environments -", Proceed-ing of the 2nd International Symposium on Mobiligence, 2 : 187-190 (2007)

9) Y. Ikemoto, T. Fujiki, K. Kawabata, H. Aonuma, T. Miura and H. Asama : "Neural Modeling of Social Adaptive Behaviors of Insects,Japan-Korea Joint Seminar on Information", Communications and Robotics Technologies for De-pendable and Secure Societies (2007)

10) T. Funato, D. Kurabayashi, M. Nara and H. Aonuma : "Development o Structure-mediated Behavior Selector Using Oscillator Network", Proc. IEEE Int. Conf. Ro-botics and Biomimetics, 2007 : 1206-1211 (2007)

11) H. Ikeno, R. Kanzaki, H. Aonuma, M. Takahata, M. Mizunami, K. Yasuyama, N. Matsui, F. Yokohari and S. Usui : "Development of Inverterate Brain Platform: Management of research resources for invertebrate neuroscience and neuroethology", 14th International Conference on Neural Information Processing (2007)

12) T. Funato, M. Nara, D. Kurabayashi and H. Aonuma : "Development of Structure-mediated Behaviour Selector Using Oscillator Network", IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, 2007 : 1206-1211 (2007)

4.7 講演

ｉ）学会

1) 山崎まどか、佐倉緑、青沼仁志、秋野順治、山岡亮平：「クロコオロギ雄の喧嘩行動誘起フェロモン」、第52回日本応用動物昆虫学会大会、宇都宮大学 (2008-03)

2) T. Funato, D. Kurabayashi, M. Nara and H. Aonuma : "Development o Structure-mediated Behavior Selector Using Oscillator Network", IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, Crowne Plaza Sanya, China (2007-12)

3) H. Ikeno, R. Kanzaki, H. Aonuma, M. Takahata, M. Mizunami, K. Yasuyama, N. Matsui, F. Yokohari and S. Usui : "Development of Inverterate Brain Platform: Management of research resources for invertebrate neuroscience and neuroethology", 14th International Conference on Neural Information Processing, Tsukuba (2007-12)

4) 菊地美香、足利昌俊、太田順、長尾隆司、青沼仁志：「クロコオロギの喧嘩行動修飾にかかわる脳内アミン」、日本動物学会第78回大会、弘前大学 (2007-09)

5) 頼経篤史、佐倉緑、青沼仁志：「クロコオロギ触角葉の3次元構築」、日本動物学会第78回大会、弘前大学 (2007-09)

6) 佐倉緑、頼経篤史、青沼仁志：「クロコオロギの喧嘩行動における触角の役割」、日本動物学会第78回大会、弘前大学 (2007-09)

7) 西川道子、西野浩史、中西あき、夏秋友香、横張文男：「クロオオアリ触角葉糸球体構造の性的二形」、日本動物学会第78回大会、弘前大学 (2007-09)

8) 舩戸徹郎、奈良維仁、D'angelo Antonio、Enrico Pagello、倉林大輔、青沼仁志：「結合振動子による行動選択回路の実装と行動評価」、第25回 日本ロボット学会 学術講演会、千葉工業大学 (2007-09)

9) 川端邦明、太田順、青沼仁志、淺間一：「コオロギ社会適応行動の神経機構モデリング」、第25回 日本ロボット学会 学術講演会、千葉工業大学 (2007-09)

10) H. Nishino : "Topographic organization of olfactory and contact chemosensory afferents in an insect brain.", The 4th Asia-Pacific Conference on Chemical Ecology, Tsu-

kuba (2007-09)

11) K. Ishiura, Y. Satoji, H. Aonuma and O. Mamiko : "Morphological Investigation of Aggressive Center in the Antennal Lobe of Camponotus japonicus", The 4th Asia-Pacific Conference on Chemical Ecology, Tsukuba (2007-09)

12) 青沼仁志、太田順:「コオロギの社会的経験による行動の発現と切り替えー行動モデルの構築にむけて」、日本進化学会第9回 京都大会、京都大学 (2007-08～2007-09)

13) 菊地美香、藤木智久、川端邦明、淺間一、長尾隆司、青沼仁志:「クロコオロギの喧嘩時における行動選択の脳内修飾機構モデルの検証」、日本動物学会北海道支部第53回大会、帯広 (2007-08)

14) 頼経 篤史、青沼仁志 :「クロコオロギ触角葉の糸球体と投射ニューロンの組織学的解析」、日本動物学会北海道支部第53回大会、帯広 (2007-08)

15) H. Aonuma : "NO/cGMP system and biogenic amine system in agonistic behavior in the cricket", The 7th International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry, Salvador, Brazil (2007-08)

16) H. Ai, H. Nishino and T. Ito : "Somatotopic projection of sensory afferents of Johnston's organ in the honybee brain", The Eighth International Congress of Neuroethology, University of British Columbia (Vancouver), Canada (2007-07)

17) Y. Ikemoto, T. Fujiki, K. Kawabata, H. Aonuma, T. Miura and H. Asama : "Neural Modeling of Social Adaptive Behaviors of Insects", Japan-Korea Joint Seminar on Information, Communications and Robotics Technologies for Dependable and Secure Societies, Saku-shi (2007-07)

18) 西野浩史:「匂い受容細胞の3次元的位置情報は糸球体中にマッピングされるか？」、第29回日本比較生理生化学会、岡山大学 (2007-07)

19) 西川道子、西野浩史、中西あき、夏秋友香、横張文男 :「クロオオアリ触角感覚細胞軸索の触角葉糸球体における偏在」、第29回日本比較生理生化学会、岡山大学 (2007-07)

20) 石浦健太郎、里路裕司、青沼仁志、尾崎まみこ :「クロオオアリの中枢における攻撃センターの組織形態学的研究」、日本動物学会近畿支部研究発表会、神戸山手大学3号館2階講義室 (2007-05)

21) 川端邦明、藤木智久、青沼仁志、淺間一 :「適応的行動選択を実現する昆虫の神経回路モデルに関する研究ー闘争行動の開始・終了に関するモデルの提案ー」、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、秋田 (2007-05)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）青沼仁志 :「クロコオロギの社会的適応行動」、非線形数理東京フォーラム「人と自然の数理」、東京大学 (2008-02)

2）佐倉緑、頼経篤史、青沼仁志 :「クロコオロギの喧嘩行動における触角の役割」、第20回自律分散システムシンポジウム、諏訪 (2008-01)

3）足利昌俊、菊地美香、平口鉄太郎、佐倉緑、千葉龍介、青沼仁志、太田順 :「クロコオロギにおける他者識別能力の解析」、第20回自律分散システムシンポジウム、諏訪 (2008-01)

4）矢野史朗、池本有助、青沼仁志、淺間一 :「コオロギの成長段階におけるこみあい効果の数理モデリングに関する研究」、第20回自律分散システムシンポジウム、諏訪 (2008-01)

5）菊地美香、青沼仁志 :「クロコオロギの喧嘩時における行動切替えの生理機構」、無脊椎動物神経研究会、日本電気協会裾野研修センター（静岡県裾野市）(2007-09)

6）M. Sakura, T. Hiraguchi, K. Ohkawara and H. Aonuma : "Distribution of neuromodulators in the olfactory center of the ant Aphaenogaster smythiesi japonica", The 11th ISIN Symposium on the Neurobiology of Invertebrates, Tihany, Hungary (2007-08)

7）R. Okada, H. Ikeno, N. Sasayama, H. Aonuma, D. Kurabayashi and E. Ito : "The dance of the honeybee: how do they dance to transfer the food information effectively?", The 11th ISIN Symposium on the Neurobiology of Invertebrates, Tihany, Hungary (2007-08)

8）足利昌俊、菊地美香、平口鉄太郎、佐倉緑、青沼仁志、太田順:「コオロギ群における社会的行動選択のモデル化 (Modeling of socially adaptive behavior in crickets)」、第13回創発システム・シンポジウム 創発夏の学校、INTEC 大山研修センター (2007-08)

9）矢野史朗、池本有助、青沼仁志、淺間一 :「コオロギの適応的行動選択を実現する動的制御機構のモデリング (A Modeling on Dynamical Control System for Adaptive Behavior Selection of Crickets)」、第13回創発システム・シンポジウム創発夏の学校、INTEC 大山研修センター (2007-08)

10) 足利昌俊、菊地美香、平口鉄太郎、佐倉緑、青沼仁志、太田順:「コオロギ群における社会的行動のモデル化」、第17回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN シンポジウム)、愛知工業大学本山キャンパス (2007-08)

11) 平口鉄太郎、青沼仁志、倉林大輔 :「喧嘩行動後の適応行動選択時における神経活動の変化」、第17回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN シンポジウム)、愛知工業大学本山キャンパス (2007-08)

12) M. Kikuchi and H. Aonuma : "Distributions of aminergic and nitric oxidergic neurons", The 2nd International symposium on Mobiligence, Awaji (2007-07)

13) M. Ashikaga, M. Kikuchi, T. Hiraguchi, M. Sakura, H. Aonuma and J. Ota : "Modeling of socially adaptive be-

havior in crickets", The 2nd International symposium on Mobiligence, Awaji (2007-07)

14) A. Yoritsune and H. Aonuma : "3-D atlas of the cricket antennal lobe", The 2nd International symposium on Mobili-gence, Awaji (2007-07)

15) M. Sakura, A. Yoritsune and H. Aonuma : "Fighting experiences modulate aggressive and avoidance behaviors in crickets against male cuticular substances", The 2nd International symposium on Mobiligence, Awaji (2007-07)

16) H. Aonuma, M. Sakura, M. Kikuchi, T. Hiraguchi, M. Ashikaga, J. Ota, K. Kawabata, T. Fujiki, Y. Ikemoto and H. Asama : "Social experience dependent behavior selection in the cricket- from neuroethological approaches to modeling -", The 2nd International symposium on Mobiligence, Awaji (2007-07)

17) K. Kawabata, T. Fujiki, M. Ashikaga, J. Ota, H. Aonuma and H. Asama : "A study on neural circuit model of insects for adaptive behavior selection - Verification of action selection model in multi-individual environments -", The 2nd International symposium on Mobiligence, Awaji (2007-07)

18) 青沼仁志 : 「昆虫の記憶」、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会部門主催 チュートリアル「昆虫の脳・個体・社会から探る知能」、秋田メトロポリタンホテル (2007-05)

19) D. Kurabayashi, H. Aonuma and R. Kanzaki : "Behaviour switching system based on chemical effects in insect brain", International Workshop on Mobiligence, University of Padova, Italy (2007-04)

20) M. Ashikaga, M. Kikuchi, T. Hiraguchi, M. Sakura, H. Aonuma and J. Ota : "Modeling of Adaptive Mechanism in Crickets and its Application to Robotics", International Workshop on Mobiligence, University of Padova, Italy (2007-04)

4.8 シンポジウムの開催（組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

・国際シンポジウム

1）H. Aonuma and R. Kanzaki: "Symposium on "Multidisciplinary approaches for understanding the adaptive behavior in insects" at the 7th International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry", 250人, Pestana Bahia Hotel (Salvador Brazil) (2007年8月13日)

2）M. Yano, K. Tsuchiya, K. Takakusaki, R. Kanzaki, J. Ota, K. Ito, A. Ishiguro, H. Aonuma, H. Asama and K. Osuka : "The 2nd International Symposium on Mobiligence", 150人, The Awaji Yumebutai Int. Cof. Center (Awaji) (2007年7月18日～2007年7月20日)

・一般のシンポジウム

1）青沼仁志：移動知セミナー「ネットワーク構造と社会性」、9名、北海道大学電子科学研究所（札幌)(2006年2月23日）清水正宏、青沼仁志:「自律分散システム OS」、諏訪（諏訪市)(2008年1月24日)

2）青沼仁志、辻和希：「日本進化学会シンポジウム 移動知 - ロボット工学的手法による動物の適応的行動の理解」、25人、京都大学（京都)(2007年8月31日)

4.9 共同研究

d．受託研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）臼井支朗、池野英利、R. Kanzaki, M. Mizunami, H. Aonuma and M. Takahata（理化学研究所）:「無脊椎動物脳プラットホームの開発と運用」、2005-2008年度、無脊椎動物を対象とする神経生理、生化学、行動学に関連する情報を共有するシステムの開発、構築を進めるもので、NIJC におけるプラットホームの一貫として運用を進めていく計画である。

4.10 予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）青沼仁志、特定領域研究、身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現－移動知の構成論的理解、2005～2009年度

2）青沼仁志、特定領域研究、環境に適応するための高次行動を制御する神経生理機構のシステム的理解、2005～2009年度

3）西野浩史、若手研究 A、昆虫最高次中枢のシステム論的解析、2005～2007年度

4.12 社会教育活動

b．国内外の学会の役職

1）青沼仁志：Advanced Robotics, Special Issue on Mobiligence, Guest Co-Editor （2007年9月13日～2008年12月31日）

2）青沼仁志：計測自動制御学会自立分散システム部会運営委員（2007年1月1日～2008年12月31日）

3）青沼仁志：計測制御学会誌 「計測と制御」特集号 ゲストエディタ（2007年1月1日～2007年12月31日）

4）青沼仁志:日本比較生理生化学会 将来計画委員会委員（2006年4月1日～2008年3月31日）

5）青沼仁志：日本比較生理生化学会 評議委員（2006年1月1日～2007年12月31日）

c．併任・兼業

1）青沼仁志：理化学研究所 客員研究員（2006年11月1日～2008年3月31日）

e．新聞・テレビ等の報道・放送

1）大須賀公一、青沼仁志、荻原直道、土屋和雄、矢野雅文、淺間一：NetRush サイエンスジャーナル 2007年7月17日「移動知プロジェクトについてのインタビュー」

ｆ．外国人研究者の招聘（氏名、国名、期間）

１）Jean-Louis Deneubourg、Denmark、（2007年7月17日～2007年7月31日）

２）Nicolas FRANCESHINI、France、（2007年6月25日～2007年6月27日）

ｇ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

１）全学共通、「複合科目．健康と社会．脳科学：分子から高次機能発現まで」、青沼仁志、2007年10月1日～2008年3月25日

２）生命科学院、生命システム科学基礎論、青沼仁志、2007年4月1日～2007年9月30日

３）生命科学院、生命科学実習、青沼仁志、2007年4月1日～2008年3月31日

４）生命科学院、生命科学論文講読、青沼仁志、2007年4月1日～2008年3月31日

５）生命科学院、行動システム制御科学特論、青沼仁志、2007年4月1日～2007年9月30日

６）生命科学院、生体制御科学概論、青沼仁志、2007年4月1日～2007年09月30日

ｉ．ポスドク・客員研究員など

・ポスドク（1名）

佐倉緑（神経情報）

ｊ．修士学位及び博士学位の取得状況

・大学院生・学位取得

博士課程（1名）

余野央行

修士課程（2名）

菊地美香(M2)、頼経篤史(M2)

極限フォトンプロセス研究分野

教　授　三澤弘明（筑波院、理博、2003.5～）
准教授　ヨードカジス・サウリウス
（Ph.D at Vilnius Univ., Lyon-I Univ.、2004.4～）
助　教　上野貢生（北大院、博(理)、2006.4～2008.3）
院　生
博士課程
西島喜明、横田幸恵、Md. モニール・イスラム
修士課程
神成謙太、三野雅弘

1．研究目標

光の波長よりも小さい金属ナノ微粒子に光を照射すると、局在型の表面プラズモン共鳴が誘起され、回折限界よりも遥かに小さいナノメートルの領域に光電場を局在化させることができる。特に、金属微粒子同士がシングルナノメートル幅で近接したナノギャップ金属構造では、そのギャップ間において入射光電場強度の～10^5倍にも及ぶ極めて高い光電場増強が誘起されることが理論的に予測されている。この光電場増強効果は、表面増強ラマン散乱（SERS）や高効率な高次高調波発生などの非線形光学現象を容易に誘起することが可能であることから、局在表面プラズモンに関する様々な研究が、現在実験・理論の両面から精力的に行われている。本研究グループでは、高度微細加工技術により金属ナノ構造体を高精度に作製し、高い光電場増強効果を示す金属ナノ構造を新規ナノ光化学反応場と位置づけ、種々の光化学反応へ適応するとともに、構造設計の最適化から光化学反応の選択率制御を達成する光化学反応場を構築することを目的として研究を行っている。

2．研究成果

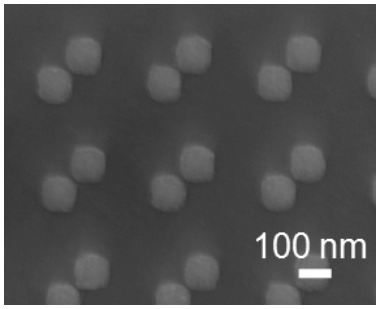
半導体微細加工技術を用いてガラス、シリコンなどの固体基板上に2つの金ナノブロック構造がナノメートルの空隙を有して隣接するナノギャップ金構造を作製し、金の2光子励起発光計測法を用いて構造体が示す光電場増強効果について検討した。また、金ナノブロック構造をシングルナノメートル幅で精密に連結した金ナノチェイン構造が、テラヘルツ帯域において波長選択的に共鳴する特異的な光学特性を示すことを明らかにした。

（ｉ）金2光子励起発光計測による光電場増強の効果

金は、500 nm 以下の光を吸収して発光することが知られている。金の発光は、金の実励起状態（d バンドから sp バンドへのバンド間遷移）が d-band（荷電子帯）にホールを形成し、緩和過程において電子とホールが再結合することにより発光すると言われている。また、金ナノ構造は、バンド間遷移を波長800 nm のフェムト秒レーザーを用いた2光子吸収によって励起することにより2光子発光が観測される。金からの発光の量子収率は10^{-4}～10^{-5}と極めて低く、表面プラズモン励起に基づく光電場増強が発光に強く関わっていることが複数の研究者等によって明らかにされてきた。本研究では、局在プラズモンによる光電場増強効果が、金の2光子発光に及ぼす影響について詳細に検討するため、励起波長である800 nm 近傍に局在表面プラズモン共鳴バンドを有するナノギャップ金構造を作製し、発光強度のギャップ幅依存性に関して検討を行った。

ギャップ幅を精密に制御して作製したナノギャップ金ダイマー構造（図1(a)）を用いて、2光子発光強度のギャップ幅依存性について検討を行った。発光計測は、フェムト秒レーザー光（λ_p = 800 nm, τ_p = 100 fs, f = 82 MHz）を倒立型光学顕微鏡（IX-71, オリンパス）に導入してサンプルに集光照射し（×100, NA = 1.25)、金ナノ構造からの発光を光電子増倍管により検出した（モニター波長: 550-650 nm)。図1(b)に、設計ギャップ幅を0.9 nm ステップで変化させたナノギャップ金ダイマー構造を作製し、2光子発光強度のギャップ幅依存性を測定した結果を示す（入射レーザー光強度1.3 kW/cm^2)。なお、設計におけるマイナスのギャップ幅とは（例: -9 nm)、二つのブロック構造がオーバーラップしている設計を示している。図1(b)の結果から、ナノギャップ金構造の2光子発光強度は、ギャップ幅が20 nm 以下になると顕著に増大し、ギャップ幅の設計が0.9または1.8 nm で極大を示すことが明らかになった。また、金ナノ構造からの発光が2光子吸収過程を介した発光であることを確かめるために、発光強度のレーザー光強度依存性について検討したところ、発光強度はレーザー光強度の2乗に対し

(a)



(b)

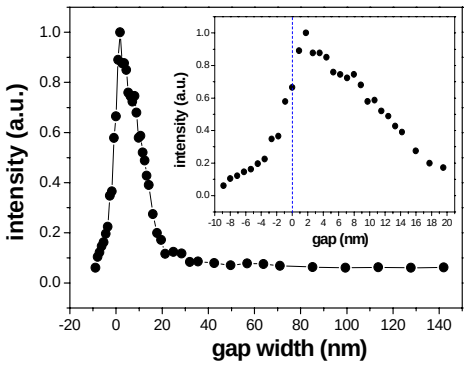


図1　(a) ナノギャップ金ダイマー構造の電子顕微鏡写真、(b) ナノギャップ金ダイマー構造からの発光強度のギャップ幅依存性（挿入図；ギャップ幅9～20 nm の拡大図）

て線形的な応答を示すことが明らかになった。つまり、ナノギャップの形成が、光電場増強に基づく金の２光子発光の増強を引き起こしていることを実験的に明らかにすることに成功した。

（ⅱ）テラヘルツ帯域に特異的なプラズモン共鳴バンドを有する金ナノチェイン構造の光学特性

近年、空港などにおけるＸ線検査の代替として、テラヘルツ光を用いた検査技術が注目されている。また、テラヘルツ光は医療診断や生体分析、或いは情報通信技術などにも応用が期待されている新しい研究分野である。そのため、テラヘルツ光を用いた応用技術はまだまだ途上であり、小型で簡便なテラヘルツ光発生・検出装置の開発が強く求められている。局在プラズモン共鳴は、赤外・テラヘルツ帯域における分光光学素子（光アンテナ）として有用であるが、従来の化学的な方法により微粒子を合成する方法では構造設計の制御が難しく、テラヘルツ帯域に共鳴を有する構造を作製することができなかった。本研究では、金ナノ構造をシングルナノメートル幅で精密に連結した金ナノチェイン構造（図2(a)）が、テラヘルツ帯域において波長選択的に共鳴する特異的な光学特性を示すことを明らかにした。

図2(b)に、金ナノロッド構造(幅40 nm)の局在プラズモン共鳴スペクトルを示す。構造体の長さ(x)を140 nm ごとに長く設計して作製した場合、双極子共鳴バンドが低周波数側にシフトすることが明らかとなった。一方、高周波数側に高次のプラズモンバンドも同時に観測され、マルチモードのプラズモンバンドが存在していることから、この構造は波長選択的なテラヘルツ共鳴センサーとしては必ずしも有用ではないことがわかる。図2(c)に、シリコン基板上に作製した金ナノチェイン構造（正方形型、100 x 100 x 40 nm^3, ボトルネック幅10 nm）のプラズモン共鳴スペクトルを示す。図より、プラズモン共鳴バンドは、ブロック数の増加に伴ってピーク強度が増大し（ピーク幅の減少）、ピーク波長は低周波数シフトすることがわかる。FT-IR の測定周波数範囲の問題から、16個連結した構造で最小周波数20 THz までにしか実験結果は至っていないが、共鳴ピーク波長はナノチェイン構造の長さに厳密に比例関係にあるために、36個連結した構造では10 THz（半値幅2.3 THz）、72個連結した構造では5 THz（半値幅1.2 THz）に共鳴周波数を有する構造になることが予想される。さらに、どの長さ(x，ナノブロック長に対応)においても、構造の形状を反映して双極子共鳴バンドのみを選択的に観測することが可能であることから、金ナノチェイン構造は波長選択性のよい光学アンテナとして有用であることが示された。

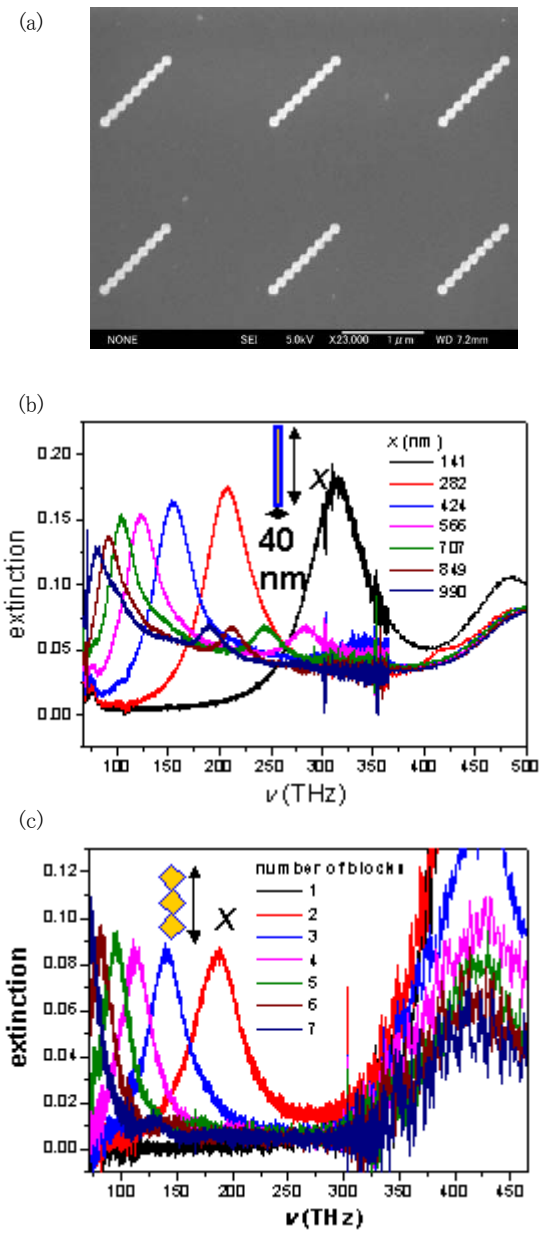


図２　(a) 金ナノチェイン構造の電子顕微鏡写真、局在プラズモン共鳴スペクトル；　金ナノ構造(b)、金ナノチェイン構造(c)

３．今後の研究の展望・将来計画

以上の研究より、ナノギャップ金構造が示す光電場増強効果について明らかにした。また、金ナノチェイン構造がテラヘルツ帯域において波長選択的に共鳴する特異的な光学特性を示すことを明らかにした。今後は、高い光電場増強効果を示すナノ・マイクロ構造を用いて、光子一つ一つの有するエネルギーや情報を自在に変換する場を高度に集積し、高い量子収量に加えて、高選択的な光反応を実現する化学反応場を構築することを目的とする。本研究で提案する反応場は、光エネルギー変換、光センシング、光情報通信などの科学技術に対して全く新しいブレークスルーをもたらすことが期待される。

4．資料

4.1　学術論文

1）K. Sun, Z. Li, K. Ueno, S. Juodkazis, S. Noji and H. Misawa: “Electrophoretic Chip for High-Fidelity Fractionation of Double-Stranded DNA”, Electrophoresis, 28: 1572-1578 (2007).

2）S. Juodkazis, N. Murazawa, H. Wakatsuki and H. Misawa: “Laser Irradiation Induced Disintegration of a Bubble in a Glass Melt”, Appl. Phys. A., 87: 41-45 (2007).

3）S. Juodkazis, K. Nishimura and H. Misawa: “In-bulk and Surface Structuring of Sapphire by Femtosecond Pulses”, Appl. Surf. Sci., 253: 6539-6544 (2007).

4）V. Mizeikis, S. Juodkazis, R. Tarozaite, J. Juodkazyte, K. Juodkazis, and H. Misawa: “Fabrication and Properties of Metalo-dielectric Photonic Crystal Structures for Infrared Spectral Region”, Opt. Exp., 15: 8454-8464 (2007).

5）T. Hashimoto, S. Juodkazis, and H. Misawa: “Void Formation in Glasses”, New J. Phys., 9: Doi; 10.1088/1367-2630/9/8/253 (2007).

6）K. Kamada, Y. Tanamura, K. Ueno, K. Ohta, and H. Misawa: “Enhanced Two-Photon Absorption of Chromophores Confined in Two-dimensional Nanospace”, J. Phys. Chem. C, 111, 11193-11198 (2007).

7）Y. Nishijima, K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, H. Misawa, T. Tanimura, and K. Meda: “Inverse Silica, Opal Phonic Crystals for Opical sensing Applications”, Opt. Exp., 15: 12979-12988 (2007).

8）N. Murazawa, S. Juodkazis, H. Misawa, and H. Wakatsuki: “Laser Trapping of Deformable Object”, Opt. Exp., 15: 13310-13317 (2007).

9）V. Jarutis, S. Juodkazis, V. Mizeikis, and H. Misawa: “Azimuthal Correlation of Photon Pairs Generated in Spontaneos Parametric Down-conversion”, Phys. Rev. A., 76: 043845/1-4 (2007).

10）K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, D. Ohnishi, K. Sasaki, and H. Misawa: “Inhibition of Multipolar Plasmon Excitation in Periodic Chains of Gold Nanoblocks”, Opt. Exp., 15: 16527-16539 (2007).

11）S. Juodkazis, V. Mizeikis, K.-K. Seet, H. Misawa, and U. G. K. Wegst: “Mechanical Properties and Tuning of Three-dimensional Polymeric Photonic Crystals”, Appl. Phys. Lett., 91: 241904/1-3 (2007).

12）Y. Yokota, K. Ueno, V. Mizeikis, S. Juodkazis, K. Sasaki, and H. Misawa: “Optical characterization of plasmonic metallic nanostructures fabricated by high-resolution lithography”, Journal of Nanophotonics, 1: 011594/1-15 (2007).

13）G. Kopitkovas, T. Lippert, N. Murazawa, C. David, A. Wokaun, J. Gobrecht and R. Winfield : “Laser Processing of Micro-Optical Components in Quartz”, Appl. Surf. Sci., 254: 1073-1078 (2007).

14）K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, K. Sasaki, and H. Misawa: “Clusters of closely-spaced gold nanoparticles as a source of two-photon photoluminescence at visible wavelengths”, Adv. Mater., 20: 26-30 (2008).

15）T. Kondo, S. Juodkazis, V. Mizeikis, and H. Misawa: “Three-dimensional High-Aspect-Ratio Recording in Resist”, Journal of Non-Crystalline Solids, 354: 1194-1197 (2008).

16）Matsumi Takagi, Takayuki Kitabayashi, Satoru Koizumi, Haruka Hirose, Shin-ichi Kondo, Masahi Fujiwara, Kosei Ueno, Misawa Hiroaki, Yoichiroh Hosokawa, Hiroshi Masuhara and Shigeyuki Watitani, “Correlation between Cell Morphology and Expression Rate of Aggrecan Gene during Differentiation from Mesenchymal Stem Cells to Chon-drocytes”, Biotechnology Letters, in press (2008).

4.2　総説・解説・評論等

1）三澤弘明:「北海道における光産業の可能性」、開発こうほう、525：24-25 (2007).

2）村澤尚樹、三澤弘明：「レーザートラッピングにより捕捉された液晶液滴の回転制御」、高分子、56、510 (2007).

3）上野貢生:「金属ナノ構造を利用した分光計測技術」、ぶんせき、7月号、356-361 (2007).

4）上野貢生、三澤弘明:「半導体加工技術により作製した金属ナノ構造による新しいフォトニック材料」、未来材料、1月号、14-21 (2008).

4.3　国際会議議事録等に掲載された論文

1）S. Juodkazis, K. Nishimura, H. Okuno, Y. Tabuchi, S. Matsuo, S. Tanaka, and H. Misawa: “Three-dimensional laser microfabrication of metals, semiconductors, and dielectrics”, Proc. SPIE, 6732, 67320B/1-10 (2007).

2）S. Juodkazis, K. Nishimura, and H. Misawa: “Three-dimensional Laser Structuring of Materials at Tight Focusing”, Proceedings of the Fifth Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2006), Chinese Optics Letters, 5, S198-S200 (2007).

3）S. Juodkazis, A. V. Rode, T. Kondo, H. Misawa, M. Samoc, and B. Luther-Davies: “Femtosecond laser structuring of As_2S_3 glass for erasable and permanent optical memory”, Materials Research Society Symposium Proceedings, 997, 357-362 (2007).

4）V. Mizeikis, S. Juodkazis, M. Sudzius, H. Misawa, E. G. Gamaly, A.V. Rode, W.Z. Krolikowski, K. Kitamura: “Reversible photomodification of $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ by femtosecond laser pulses”, Proc. SPIE, 6801, DOI: 10.1117/12.759232 (2008).

4.4 著書

1）三澤弘明:「三次元有機フォトニック結晶」、光機能性有機・高分子材料、シーエムシー出版、監修：市村國宏：225-234 (2007).

4.6 特許（発明者、特許番号、特許名、出願年月日）

・国内特許

1）上野貢生、三澤弘明、大西大、坂口拓生、麦野遥一：特願2007-228159、光検出器、2007年9月3日

2）上野貢生、三澤弘明、大西大、坂口拓生、麦野遥一：特願2007-228160、金属構造体、2007年9月3日

3）上野貢生、三澤弘明、大西 大、坂口拓生、麦野遥一：特願2007-337404、プラズモン共鳴検出器、2007年12月27日

4）西井準治、金高健二、三澤弘明、上野貢生:特願2008-066260、微量物質検出素子、2008年3月14日

・国際特許

1）Hiroaki Misawa, Kosei Ueno, Yasuyuki Tsuboi, Keiji Sasaki: 11/884,614, Metal Structure and Production Method Therefor, 2007/08/17

2）Hiroaki Misawa, Kosei Ueno, Yasuyuki Tsuboi, Keiji Sasaki: 11/886,641, Sensing Device, Sensing Apparatus, and Sensing Method Inventors, 2007/09/18

3）Hiroaki Misawa, Sumihare Noji: PCT/JP2007/69340, マイクロチップおよびマイクロチップ電気泳動装置、2007/10/03

4.7 講演

ｉ）学会

1）Saulius Juodkazis, Hiroaki Misawa: “3D laser microfabrication”(招待講演), Int. Conf. on Coherent and nonlinear Optics; Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies ICONO/LAT, Minsk, Belarus (2007-05).

2）Hiroaki Misawa, Saulius Juodkazis, Kosei Ueno, Vygantas Mizeikis: “Nano-Structured Materials in Plasmonics and Photonics”(招待講演), The Fifteenth International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-15), Haikou, China (2007-07).

3）Saulius Juodkazis, Hiroaki Misawa: “3D laser nano/microfabrication by femtosecond pulses”(招待講演), 7th Conf. on Lasers and Electro-Optics CLEO/Pacific Rim, Seoul, Korea (2007-08).

4）上野貢生、大西大、三野雅弘、坂口拓生、V. Mizeikis、S. Juodkazis、三澤弘明：「金ナノチェイン構造によるテラヘルツ帯域光アンテナの構築」2007年秋季 第68回応用物理学会学術講演会、札幌 (2007-09).

5）村澤尚樹、上野貢生、渋谷俊志、横田幸恵、Vygantas Mizeikis、Saulius Juodkazis、笹木敬司、三澤弘明：「非線形光重合反応による金ナノブロック構造の電場強度空間分布の可視化」、第68回応用物理学会学術講演会、札幌 (2007-09).

6）上野貢生、澁谷俊志、横田幸恵、V. Mizeikis、S. Juodkazis、笹木敬司、三澤弘明：「非線形光重合反応による金属ナノ構造に局在した光電場強度分布のナノイメージング」第56回分析化学討論会、徳島 (2007-09).

7）上野貢生：「マイクロ・ナノ構造の創製と構造特異的物性を利用した分析システム」(受賞講演)、日本分析化学会第56年会、徳島 (2007-09).

8）三澤弘明、上野貢生、ヨードカジス サウリウス、ミゼイキス ビガンタス：「多光子重合反応によるマイクロ・ナノ構造の作製」(招待講演)、第56回高分子討論会、名古屋 (2007-09).

9）Saulius Juodkazis, Hiroaki Misawa: “3D femtosecond laser processing”, Conf. on Laser Ablation COLA, Tenerife, Spain (2007-09).

10）Y. Yukie, K. Ueno, V. Mizeikis, S. Juodkazis, H. Misawa: “Clusters of closely-spaced gold nanoparticles showing strong surface-enhanced Raman scattering”, KOREA-JAPAN Symposium on Frontier Photoscience , (2007-11).

11）Y. Nishijima, K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, H. Misawa, T. Tanimura, K. Maeda: “Spectroscopic Studies of Laser Emission from Dye Solution in Pyramidal Opal Structures.”, Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, (2007-11).

12）K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, K. Sasaki and H. Misawa: “Plasmonic Optical Properties of Gold Nanoparticles Defined with Sub-Nanometer Precision”, KOREA-JAPAN Symposium on Frontier Photoscience, (2007-11).

13）Hiroaki Misawa: “Photochemistry on Gold Nanoparticles”, KOREA-JAPAN Symposium on Frontier Photoscience, (2007-11). (招待講演)

14）三澤弘明:「フェムト秒レーザーによる機能性材料の開拓」(特別講演)、第69回レーザ加工学会講演会、東京 (2007-12).

15）Kai Sun, Nobuko Suzuki, Zheyu Li, Ryoko Araki, Kosei Ueno, Saulius Juodkazis, Masumi Abe, Sumihare Noji, Hiroaki Misawa: “Electrophoretic chip for fractionation of selective double-strand DNA fragment”, Singapore International Chemistry Conference 5 & APCE Asia-Pacific International Symposium on Microscale Separation and Analysis, Singapore (2007-12).

16）V. Mizeikis, S. Juodkazis, M. Sudzius, H. Misawa, E. G. Gamaly, A.V. Rode, W.Z. Krolikowski, K. Kitamura: “Reversible photomodification of $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ by femtosecond laser pulses”, SPIE conference on Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology 2007, Canberra, Australia (2007-12).

17）横田幸恵、上野貢生、Vygantas Mizeikis、Saulius Juodkazis、三澤弘明：「半導体微細加工技術による表面増

強ラマン散乱分光計測用分析チップの作製と評価」、日本化学会北海道支部2008冬季発表会、札幌 (2008-01).

18) 三野雅弘、上野貢生、大西大、坂口拓生、麦野遥一、Vygantas Mizeikis、Saulius Juodkazis、三澤弘明：「テラヘルツ帯域に局在表面プラズモン共鳴を有する金ナノチェイン構造の分光特性」、北海道支部2008年冬季研究発表会、札幌 (2008-01).

19) 西島喜明、上野貢生、Saulius Juodkazis、Vygantas Mi-zeikis、三澤弘明、前田暢、皆木正司：「微粒子集積型3次元周期構造体中における色素溶液のレーザー発振挙動」、日本化学会北海道支部2008冬季発表会、札幌 (2008-01).

20) 神成謙太、Saulius Joudkazis、Vygantas Mizeikis、上野貢生、三澤弘明：「多光束レーザー干渉露光法による3次元フォトニック結晶の作製と評価」第42高分子学会北海道支部研究発表会、札幌 (2008-01).

21) 横田幸恵、上野貢生、Vygantas Mizeikis、Saulius Juodkazis、三澤弘明：「半導体微細加工技術により作製した金ナノ構造基板の表面」、日本化学会第88春季年会、東京 (2008-03).

22) 上野貢生、高畠聡章、ミゼイキス ビガンタス、ヨードカジス サウリウス、三澤弘明：「ナノギャップ金構造に局在する増強光電場を利用したフォトレジストのナノパターン形成」日本化学会第88春季年会、東京 (2008-03).

23) 西島喜明、上野貢生、Saulius Juodkazis、Vygantas Mizeikis、三澤弘明、前田暢、皆木正司：「ジルコニアを材質とした逆オパールフォトニック結晶中における色素分子のレーザー発振」、日本化学会第88春季年会、東京 (2008-03).

24) 村澤尚樹、上野貢生、ミゼイキス ビガンタス、ヨードカジス サウリウス、三澤弘明：「非線形光重合反応を用いた金ナノロッド構造体に局在する光電場強度空間プロファイルの可視化」、日本化学会第88春季年会、東京 (2008-03).

25) 井村考平、岡本裕巳、上野貢生、三澤弘明：「金ナノ構造体の近接場単一粒子分光・イメージング」、2008年春季 第55回応用物理学関係連合講演会、船橋 (2008-03).

26) Kai Sun、Nobuko Suzuki, Kosei Ueno, Masumi Abe, Sumihare Noji, Hiroaki Misawa：「高解像度遺伝子発現解析法のための電気泳動チップを用いたDNA断片分取」2008年春季 第55回応用物理学関係連合講演会、船橋 (2008-03).

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）三澤弘明:「金属によるナノ空間を使って実現する新しい反応と計測」（招待講演）、ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス発足記念シンポジウム、東京 (2007-06).

2）西島喜明、上野貢生、藤原英樹、Mizeikis Vygantas、Juodkazis Saulius、三澤弘明、笹木敬司、谷村敏博、前田浩平:「単結晶フォトニック結晶を利用した有機色素のレーザー発振」、粉体工学会夏季シンポジウム、京都 (2007-08).

3）Saulius Juodkazis, Hiroaki Misawa: “Laser manipulation and characterization of liquid crystal droplets”（招待講演), 12th Int. Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, Puebla, Mexico (2007-10).

4）Saulius Juodkazis: “Non-Linear and Photochemical Effects due to Plasmonic Near-Field on Gold Nanoparticles”（招待講演), Joint Symposium for the Promotion of Academic Exchange on Nanotechnology and Nanobiology, Sapporo (2007-11).

5）Hiroaki Misawa: “Photochemistry on Gold Nanoparticles”（招待講演), 2007 KOREA-JAPAN Symposium on Frontier Photoscience (KJFP 2007), Gyeongju, Korea (2007-11).

6）村澤尚樹、上野貢生、渋谷俊志、横田幸恵、ミゼイキス・ビガンタス、サウリウス・ヨードカジス、笹木敬司、三澤弘明: “Visualization of Plasmonic Near-Field Patterns of Gold Nanoblocks by Non-Linear Photopolymerization”、第18回日本MRS学術シンポジウム、東京 (2007-12).

7）横田幸恵、上野貢生、Vygantas Mizeikis、Saulius Juodkazis、三澤弘明: “A Spectroscopic Study on the Origin of Surface Enhanced Raman Scattering Based on Structural Design of Closely-Spaced Gold Nanoparticles”、第18回MRS学術シンポジウム、東京 (2007-12).

8）Y. Nishijima, K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, H. Misawa, T. Tanimura, K. Maeda: “Lasing emission form dye-doped single crystal opal and inverse opal structures”、第18回MRS学術シンポジウム、東京 (2007-12).

9）K. Ueno: “Plasmonics and Its Chemical Applications; To-ward Realization of Nano-Photolithography”（招待講演), The 9th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2008-01).

10) N. Murazawa, K. Ueno, V. Mizeikis, S. Juodkazis, and H. Misawa: “Near-Field Imaging on Gold Nanoblocks by Non-Linear Photopolymerization”, The 9th RIES-Hokudai Symposium, Sapporo (2008-01).

iii）コロキウム・セミナー等・その他

1）三澤弘明：「金属ナノ構造による光制御」（招待講演）、北海道光科学技術研究会講演会　光科学とナノテクノロジー、札幌 (2007-05).

2）三澤弘明：「ライフサイエンスビジネスの展開について」（招待講演）、ベンチャー企業のラストワンマイルを繋ぐマーケティングセミナー、札幌 (2007-08).

3）三澤弘明：「1000兆分の1秒パルスレーザーが広げる新しい加工技術の可能性ーナノ空間における「光」で北海道に新産業をー」（招待講演）、北海道中小企業家同友会産学官連携研究会HoPE 9月例会、札幌(2007-09).

4）三澤弘明:「北海道大学におけるナノテクノロジー支援

事業」(招待講演)、産学官連携講演会～科学者・技術者の「ノウハウ」と「先端設備と技術」を連携させた研究、技術・製品開発の支援事業～、千歳 (2008-03).

5) 三澤弘明:「光ー分子強結合反応場の創成と展開」(招待講演)、集積分子工学部門講演会「金属ナノ構造のプラズモニクスと分子回路工学」、横浜 (2008-03).

6) 上野貢生:「金属ナノ構造のフォトニクスーナノリソグラフィーの実現に向けてー」(招待講演)、化学を基盤とする物質科学イノベーション、札幌 (2008-03).

4.8 シンポジウムの開催(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) 三澤弘明、益田秀樹、山田淳、村越敬:「文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 『光ー分子強結合反応場の創成』第1回公開シンポジウム」、学士会館 (東京) (2007年10月2日).

2) 三澤弘明、益田秀樹、山田淳、村越敬:日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2007 (OPJ2007) 企画シンポジウム「プラズモニクスとその分子制御への展開」大阪大学コンベンションセンター(吹田)(2007年11月27日).

3) 三澤弘明、太田信廣、中村貴義、居城邦治、笹木敬司、谷 知己、畑中耕治:"The 9th RIES-Hokudai International Symposium on 創[sou]" (100名、札幌 (北海道大学)、2008年1月28日～29日).

4) 三澤弘明、益田秀樹、山田淳、村越敬:「文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究『光ー分子強結合反応場の創成』第2回公開シンポジウム」、東京大学生産技術研究所 (東京)(2008年2月2日～2008年2月3日).

5) 三澤弘明、益田秀樹、山田淳、村越敬:2008年春季 第55回応用物理学関係連合講演会 シンポジウム「光ー分子強結合反応場の基礎・応用・展開」、日本大学理工学部 (船橋) (2008年3月27日).

6) 三澤弘明、益田秀樹、山田淳、村越敬:日本化学会第88春季年会 特別企画「光ー分子強結合反応場の創成 ー光の限界を超えた光化学反応の実現に向けてー」、立教大学 (東京) (2008年3月30日).

4.9 共同研究

b. 所内共同研究(研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容)

1) 三澤弘明、笹木敬司、ヨードカジス・サウリウス、藤原英樹、上野貢生 (カナダ・トロント大学および米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校):光と強く結合するナノ・マイクロ構造に関する戦略的国際連携、2007年度、UCLA の CNSI と電子研との部局間連携研究契約については、本申請代表者と笹木所長によって締結に関する具体的な話し合いが進められ、本年度中に締結する予定である。また、トロント大学とも学術的な連携を進め、これまでにない新奇的なフォトニック結晶を設計・作製し、光学的評価を進めており、これに関しても部局間連携研究契約を早期に締結するよう努める。

2) ヨードカジス・サウリウス、三澤弘明、村澤尚樹 (フランス・ボルドー第一大学):"Magnus Effect in a Micro-Flow"、2007年度、We aim at the first demonstration of Magnus effect in a micro-domain. Since laser manipulation by spinning can be induced even in a non-birefringent material which are of certain shapes or irregular (the shape birefringence), we expect that the micro-Magnus effect can find number of applications in bio-science and micro fluidics.

c. 民間等との共同研究(研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容)

1) 三澤弘明 (ローム株式会社):「局在プラズモンを用いた受光素子」、2006～2007年度、テラヘルツと呼ばれる帯域の電磁波を検出する簡便なデバイスを構築するために、局在プラズモン技術を用いて新規の検出素子を研究開発する。

2) 三澤弘明 (三洋化成):「微粒子配列制御技術に関する研究」、2005～2007年度、単分散高分子微粒子を用いて新規な微粒子組織化制御技術を開発する。その技術を用いたいデバイスの開発を進める。

d. 受託研究(研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容)

1) 三澤弘明(財) とくしま産業振興機構):「Lab-On-a-Chip 法とナノ計測法による自動ゲノム診断法の開発(知的創造による地域産学官連携強化プログラム「知的クラスター創成事業」に係る研究)」、2003～2007年度(38,000千円)、〈研究目的〉マイクロピラー構造を有する電気泳動チップの開発〈研究内容〉シリコンのナノ加工によって形成したマイクロピラーを用いて DNA を効率よく分離する新しいシステムを開発するために、ピラー界面を化学修飾することにより、マイクロピラーと DNA との化学的相互作用を用いて高効率に分離する手法を開発する。

2) 上野貢生、大西大 (科学技術振興機構):「金ナノチェイン構造によるテラヘルツ受光素子の開発」、2006～2007年度、8000千円、JST (顕在化ステージ) の研究リーダー 金属ナノチェイン構造を基板上に精密に作製して、テラヘルツ帯の受光素子に応用する。

3) 上野貢生 (科学技術振興機構):「ナノ光リソグラフィーによる金属ナノパターン作製技術の開発」、2007～2010年度、40000千円、シングルナノメートルの加工分解能を有するナ ノ光リソグラフィー技術を開発し、プラズモニックデバイスやナノ電気回路として動作する金属ナノパターンを作製する技術を確立する。高い光電場増強を示すナノギャップ金構造をフォトマスクとして、近赤外光による局所的なフォトレジストの非線形光反応を誘起し、高分解能リソグラフィーを実現す

る従来とは異なる動作原理に基づいた光加工技術を開発する。

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）三澤弘明、基盤研究 B 一般 (2)、金属ナノ周期構造を用いた高感度 DNA アレイチップ開発、2005～2007年度（15,300千円）

2）上野貢生、科学研究費補助金（若手研究（スタートアップ））、ナノギャップ金属構造が示す光電場増強機構の解明、2006～2007年度（2,620千円）

3）三澤弘明、特定領域研究、光−分子強結合反応場の創成、2007～2010年度（2007年度：9,100千円）

4）三澤弘明、特定領域研究、金属ナノ構造を用いた光局在場の創製と光化学反応への応用、2007～2010年度（2007年度：35,600千円）

5）ヨードカジス・サウリウス、基盤研究 B 一般、衝撃波によるナノ構造物質の形成、2007～2010年度（2007年度：8,710千円）

d．奨学寄付金（研究担当者、機関名、研究課題、研究期間、総経費、研究内容）

1）三澤弘明（財団法人新生資源協会）:「集光フェムト秒レーザーパルスによるサファイアの３次元微細加工」、2007～2008年度（1,600千円）、近赤外波長域のフェムト秒レーザーパルスをサファイア基板中に集光照射すると、多光子吸収により焦点付近にのみアモルファス相の形成が誘起される。このアモルファス相の化学的性質は､結晶相とは著しく異なることが示されている。本研究においては、形成したアモルファス相の短周期・長周期構造、およびその未解明な物性を解明することを目的とする。

e．ＣＯＥ関係（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容）

1）三澤弘明、北海道大学、局在表面プラズモン共鳴に基づく光電場増強を利用した光−エネルギー変換素子の構築、2007年度～2011年度、半導体微細加工技術によってナノギャップ金属構造体を作製し、種々の非線形光学効果の増強を利用した顕微分光計測法や非線形光重合反応を用いることにより、ナノギャップ金属構造体に局在する光電場増強効果を解明するとともに、この原理を利用した高効率の光−エネルギー変換素子を構築することを目的として研究を行う。

4.11　受賞

1）上野貢生：日本分析化学会奨励賞「マイクロ・ナノ構造の創製と構造特異的物性を利用した分析システム」(日本分析化学会) 2007年9月

2）横田幸恵：2007年光化学討論会最優秀学生発表賞「金属ナノ構造設計に基づいた表面増強ラマン散乱増強因子の検討」（光化学協会）2007年9月

3）横田幸恵：2007年日本 MRS 奨励賞「A Spectroscopic Study on the Origin of Surface Enhanced Raman Scattering Based on Structural Design of Closely-Spaced Gold Nanoparticles」(2008年1月)

4）西島喜明：平成19年度日本化学会北海道支部冬季研究発表会優秀講演賞「微粒子集積型3次元周期構造体中における色素溶液のレーザー発振挙動」（2008年3月）

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）三澤弘明：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 専門調査委員 （2006年4月1日～2008年3月31日）

2）三澤弘明：文部科学省 ナノテクノロジー・ネットワーク運営委員会 委員（2007年6月21日～2008年3月31日）

3）三澤弘明：文部科学省　科学技術・学術審議会専門委員（2007.12.14-2009.1.31）

b．国内外の学会の役職

1）三澤弘明：光化学協会　常任理事（2006年1月1日～2007年12月31日）

2）三澤弘明：Associate Editor, TNANO (IEEE Transactions on Nanotechnology) (2007年3月23日～現在)

3）三澤弘明：電子情報通信学会　超高速光エレクトロニクス研究専門委員会　専門委員(2007年3月12日～2008年12月31日）

4）三澤弘明：日本化学会北海道支部 幹事（2008年3月1日～2009年2月28日）

c．併任・兼業

1）三澤弘明：浙江大学客員教授（2005年11月1日～現在）

2）三澤弘明：株式会社レーザーシステム　取締役（2004年6月1日～現在）

3）三澤弘明：徳島大学産学連携関連分野客員教授（2006年11月1日～現在）

d．その他

1）三澤弘明：首都大学東京教員選考委員会 委員(2008.2)

e．新聞・テレビ等の報道

・新聞

1）三澤弘明：千歳民報 2008年3月12日「千歳市産学官連携事業実行委員会は11日、千歳科学技術大学で産学官連携講演会を開き、北大ナノテクノロジー研究センター長の三澤弘明教授が「北海道大学におけるナノテクノロジー支援事業」をテーマに講演した。」

f．外国人研究者の招聘（氏名、国名、期間）

1）David Lundberg、USA、2007年11月8日

2）Kudryashov Sergey、ロシア、2007年10月18日～29日

3）Xavier Michalet、USA、2008年1月27日～30日

4）Chennupati Jagadish、オーストラリア、2008年1月29日

5）Elke Scheer、2008年1月29日～31日

6）Brasselet Etienne、フランス、2008年2月17日～3月5日

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）工学研究科、バイオオプティクス特論、三澤弘明、2007年10月1日～2008年3月31日

2）工学研究科、バイオオプティクス特論、ヨードカジスサウリウス、2007年10月1日～2008年3月31日

3）工学部、電気回路、三澤弘明、2007年10月1日～2008年3月31日

4）工学部、生体工学概論「バイオセンシングII」、三澤弘明、2008年1月9日

i．ポスドク・客員研究員など

1）孫　凱（とくしま産業振興機構　徳島地域知的クラスター創成事業・博士研究員）

2）村澤尚樹（北海道大学グローバルCOEプログラム「触媒が先導する物質科学イノベーション」・博士研究員）

3）ミゼイキス・ビガンタス（文部科学省 科学研究費補助金特定領域研究「金属ナノ構造を用いた光局在場の創製と光化学反応への応用」・博士研究員）

4）李 哲ゆう（文部科学省 科学研究費補助金特定領域研究「金属ナノ構造を用いた光局在場の創製と光化学反応への応用」・学術研究員）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（２名）

1）神成謙太：多光束レーザー干渉露光法による可視域にストップバンドを有する３次元フォトニック結晶の作製に関する研究（2008年3月）

2）三野雅弘：テラヘルツ帯域に特異的なプラズモン共鳴バンドを有する金ナノチェイン構造の光学特性に関する研究（2008年3月）

計算論的生命科学研究分野

教　授　津田一郎（京都大学理院、理博、2005.10～）
准教授　佐藤　譲（東京大学、博士(学術)、2006.4.～）
COE 研究員
　　田所　智（北海道大学理院、理博、2003.9～）
　　畠山元彦（北海道大学、修士(理学)、2003.9～）
　　黒田　茂（北海道大学、修士(理学)、2005.4～）
研究生　安岡卓男（愛媛大学医、MD、2001.4～）
　　玉井信也（東京大学、修士（学術）、2006.4～）
事務補佐員　渡辺厚子（2003.9～）
院　生　山口　裕(D3)、伊藤孝男(D3)、前田真秀(D3)、
　　松本和宏(D3)、渡部大志(D3)、森　秀夫(D3)、
　　黒田　拓(D1)、塚田啓道(D1)、岩澤和子(M2)、
　　岸本匡広(M2)、清水明士(M2)、太田康亮(M1)

1．研究目標

計算論的生命科学は、電子科学研究所と理学院数学専攻との共同事業の一環として構築された。分子、細胞、システムにまでわたる生命現象の複雑さを数理的に解明するとともに、新しい生命システム論の構築をめざしている。複雑系としての生命システムの機構を解明することを目指し、新しい複雑システム論を構築する。特に、記憶、思考・推論の脳神経機構および認知機構の解明のための数理的アプローチを確立するとともに、非線形大自由度力学系の理論の構築を目標とする。具体的には次の研究を行なう。すでに構築した海馬 CA1の生理学的モデルを実験に照らして詳細に研究する、特にカントルコーディングの理論を精密化する (a)、ラット海馬スライスでのカントルコーディングの実証を玉川大学工学部塚田研究室と協力して行う (b)、ニホンザルを使った思考・推論の実験を玉川大学脳科学研究所にて引き続き行なう (c)、海馬 CA3で現れると期待される複雑な遷移現象のひとつとしてのカオス的遍歴の神経系における雛形モデルの構築 (d)、カオスネットワークにおける情報伝播 (e)、エンジンカオスの制御 (f)、エージェントモデルによる学習理論 (g)、noise-induced order の再検討 (h) を主目標においた。

2．研究成果

(a)　エピソード記憶形成が如何に行われるかを理解するために、まず神経回路網レベルで、空間パタンの時系列入力の情報表現について理論的、計算論的に行い、理論的予測を行い、実験によって検証する。具体的には、海馬のニューラルネットをモデル化し、海馬の役割に関する計算論的な研究を行った。海馬 CA3と CA1のネットワーク構造を調べ数学的な取り扱いが簡単な離散時間・連続状態モデルをつくりそのダイナミックスを調べた。その結果、モデル CA3では事象記憶の列が生成され、各事象記憶間を連結する軌道はカオス軌道であり、いわゆるカオス的遍歴が生じることが分かった。また、モデル CA1ではモデル CA3で生成された時系列情報がモデル CA1のニューロンの膜電位に生じるカントル集合にコードされ得ることが分かった。これが生物学的に意味のあるコーディングかどうかを調べる目的で、CA1ニューロンを神経生理学的な Pinsky-Rinzel の2－コンパートメントモデルでモデル化し、ランダム時系列入力に対する CA1ニューロンネットワークの活動度を調べた。その結果、時系列の履歴が膜電位空間にカントル集合（フラクタルパタンの一種）として表現されることがわかった。これをスパイキングニューロンとバースティングニューロンの場合について、それぞれ NMDA チャンネルと AMPA チャンネルの効果とともに調べた。AMPA チャンネルだけを活性化させた場合は、スパイキングニューロンでは10msec 近傍で、バースティングニューロンでは50msec－200msec の入力パタン間隔において、カントルコーディングはわずかに成立するようである。AMPA チャンネルとともに NMDA チャンネルを活性化させた時には、スパイキングニューロンにおいては10－30msec 近傍の間隔において、バースティングニューロンにおいては、50－200msec 間隔でカントルコーディングは可能であることがわかった。さらに、幕電位の一次元写像を構成すると、入力時系列の要素であるパタンの種類に応じて、その数だけ縮小アフィン変換が構築されていることがわかった。（山口、黒田、津田）

(b)　玉川大学工学部塚田稔研究室との共同研究として、ラット海馬スライスでのカントルコーディングの有無を調べる実験を行なった。さまざまな入力時系列に対して、CA1の膜電位に入力時系列を表現する階層的なパターンが現れ、この階層パターンの生成規則は、理論モデルが予測する複数のアフィン変換が得られた。これらの実験結果は、ラット海馬が時系列入力をカントルコーディングを行なっている可能性を強く示唆する結果である。（黒田、山口、津田）

(c)　サル（ニホンザル）を使った思考・推論実験を玉川大学脳科学研究所と共同で行っている。12年前から共同実験のための議論を開始し、現在のサルに対して3年間実験を繰り返し、最初の結果が得られた。タスクは2回の連続する連想にもとづくカテゴリー形成とそのメンバーの推論を行うように工夫された。行動実験においてサルは推移、反射を駆使した推論を行えるという結果を得た。さらに、対応するニューロン活動が前頭前野外側部から得られ、少なくとも3種類の区別されるニューロンが見つかった。結果は Nature Neuroscience 誌に掲載された。さらに次の段階の実験を進めている。（津田）

(d)　μ-モデルをさらに詳しく研究している。この研究は京都産業大学工学部の藤井宏教授との共同研究である。（田所、津田）

(e)　情報混合を許す型の一次元カオス写像のランダムネットワーク系における情報伝播の様子を調べた。シグモイ

ド型の入出力関数をもつ興奮性ニューロンと抑制性ニューロンの結合系は上記の一次元写像で単峰写像の典型であるＢＺ反応のモデルと類似した写像になる。一様なパラメーター値の場合にはそれは単峰にすらなる。これらのランダム結合系においても、入力されたパルスやカオスの動的な保持と伝播が可能であるという数値実験の結果を得た。このパラメーターは微妙なので、進化アルゴリズムを使ってネットワークを進化させた。相互情報量を最大にするという制約のもとで、閾値関数が最終的に進化した関数になることがわかった（渡部、津田）

(f)　エンジン出力に広く見られる不規則変化の原因の究明とハーネシングを目的として、エンジン出力のカオス解析を行なった。ヤマハ発動機製エンジンを用いた。決定論的カオスの存在を以前に発見したので、今回は制御可能性を調べた。エンジンの内部構造は複雑を極めるため、何が本質的なパラメータかの判別は難しい。そこで、カオス軌道を与えられた周期を持つ内在する周期軌道への引き込みが容易なピラガス法を採用し、これをデータに津田－田原－岩永の方法を使って直接適用した。その結果、カオス軌道は消滅し、与えられた周期をもつ周期軌道が得られた。さらに、実機のヤマハエンジンに直接この制御方式を適用し、制御可能性を実証をヤマハで行った。松本がヤマハに就職し、研究は第一段階が終了した。アメリカの国際会議や国内会議での発表を行い、いくつかの論文を発表した。（松本、津田）

(g)　神経回路網、細胞集団、動物集団、社会システムなどの集団的な学習機構を解明するために、相互適応系を結合ゲームダイナミクスでモデル化し、適応系の集団が導く大域的な学習、記憶構造を研究した。巡回的な相互作用構造を持つ少数自由度の結合学習系はハミルトンカオス、散逸カオス、間欠性、ヘテロクリニックサイクルといった多様な振る舞いを示し、大集団においては乱流的振る舞いが観察された。さらに各適応系をマルコフ系に拡張し、学習を情報の流入と流出によって生じる動的な構造形成と捉えることにより、情報理論的な解析を行った。（佐藤）

(h)　Noise-induced order に関して分岐現象をさらに詳しく研究し、従来の分岐とは異なるリアプノフ指数の特徴的な変化の相が見つかった。（佐藤、津田）

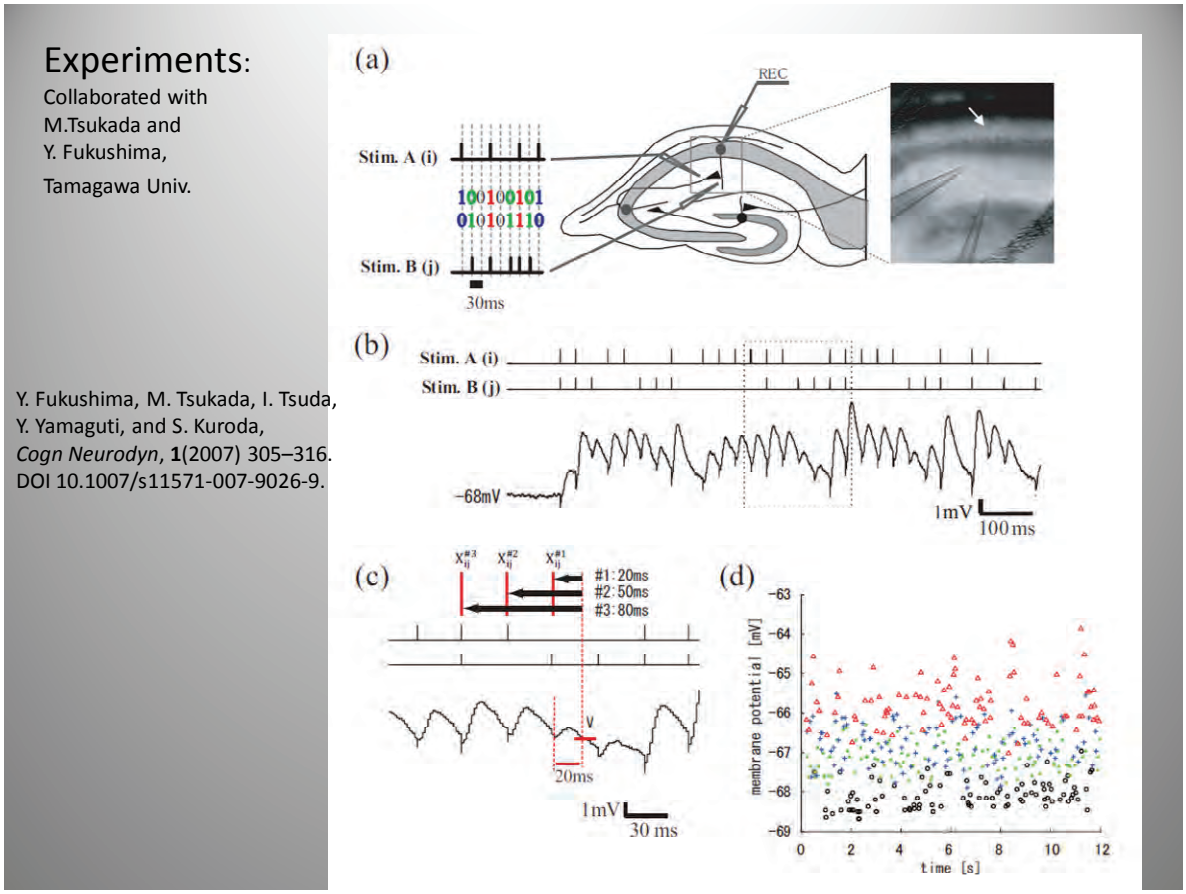
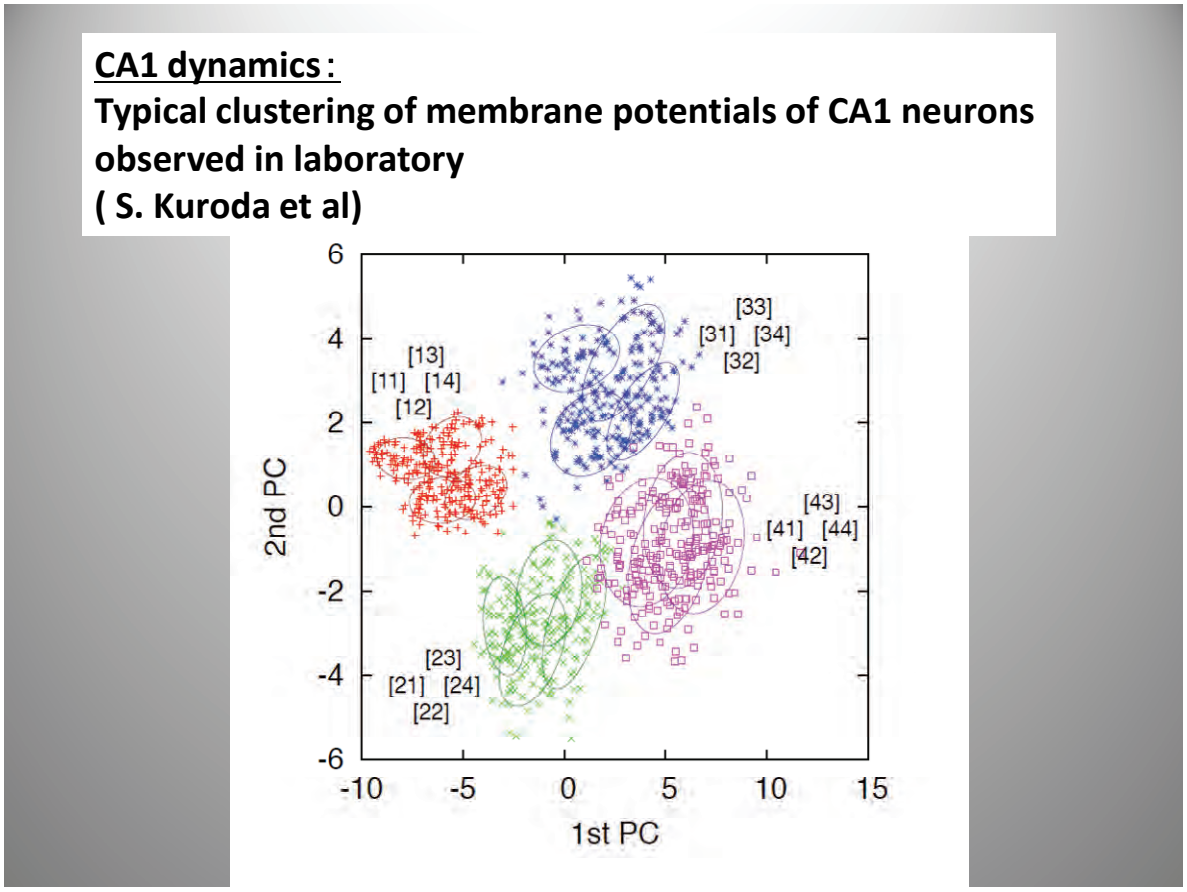


図１．ラット海馬のスライス実験）



3．今後の研究の展望

脳神経系の数理モデルによる研究は、理論の予測と実験による検証の段階に入り、予測の一部が実証された。さらに、モデルと実験系を共に海馬全体、さらには海馬と新皮質相互作用系へと発展させ、将来的にはラットの行動実験に伴う in vivo 計測によって、理論の予測するエピソード記憶に対するカオス的遍歴とカントルコーディングの実証を行っていきたい。サルを使った思考推論実験に関しては、将来的には、さらに高度な推論実験、思考の実験タスクを考えたい。サルの実験はリスクが大きいので、ラットの行動実験も視野に入れている。脳のダイナミックス、生命活動に対する正しい解釈を与えるための枠組みとして大自由度力学系、ゲーム理論、進化ダイナミックスに関する理論を提供したい。特に、遍歴の機構の解明と抽象化された雛形モデルの構築を目指す。また、進化・発生におけるダイナミックスの機構の解明のための数理的な方法論の確立を目指す。

4．資料

4.1　学術論文等

1）Ito Takao、津田一郎：「フィードバック結合を持つネットワークにおける入力シグナルの伝播と保持」、物性研究、vol.87(no.4)：598-599 (2007)

2）M. Hatakeyama and I. Tsuda : “Internal logic viewed from observation space: Theory and a case study”, BioSystems,90(1) : 273-286 (2007)

3）K. Matsumoto, I. Tsuda and Y. Hosoi : “Controlling Engine System: a Low-Dimensional Dynamics in a Spark Ignition Engine of a Motorcycle”, Z. Naturforsch., 62a : 587-595 (2007)

4）I. Tsuda and H. Fujii : “Chaos Reality in the Brain”, J. of Integrative Neuroscience, 6 : 309-326 (2007)

5）Y. Fukushima, M. Tsukada, I. Tsuda, Y. Yamaguti and S. Kuroda : “Spatial clustering property and its self-similarity in membrane potentials of hippocampal CA1 pyramidal neurons for a spatio-temporal input sequence.”, Cogn. Neurodyn., 1 : 305-316 (2007)

6）佐藤譲、立川正志、行木孝夫、『ルールを生成する力学系：関数マップ概説』、Technical Report # 134、研究会報告書「動的システムの情報論(7)」, p33-44, Dept. of Math. Hokkaido University (2008)

4.4　著書

1）津田一郎（監訳）、星野高志、松本和宏、黒田拓、阿部巨仁（訳）：カオス－力学系入門　第３巻１-209ページ（アリグッド、サウアー、ヨーク著）（シュプリンガー東京、2007年）

4.7 講演

ｉ）学会

1）I. Tsuda : “Hippocampus Generates Duality of Chaos and Fractal in Episodic context”, 3rd International Nonlinear Science Conference(3rd INSC), Surugadai Hall, Chuo University (2008-03)

2）津田一郎 :「Episodic memory: chaos model of the hippocampus 」, JSIAM, Hokkaido University, Sapporo (2007-09)

3）津田一郎 :「Towards the understanding of the dynamic brain: chaotic itinerancy Iand fractal.」, The Society of Instrument and Control Engineers, Special lecture、Sapporo (2007-09)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）S. Kuroda, Y. Yamaguti, Y. Fukushima, M. Tsukada and I. Tsuda : “Iterated Function Systems in Hippocampal CA1 Neurons.”, The 1st International Conferenceon Cognitive Neurodynamics, Shanghai, China (2007-11)

2）H. Fujii, K. Aihara and I. Tsuda : “Corticopetal Acetylcholine: A role in attentional state transitions and the genesis of quasi-attractors during perception.”, The 1st International Conferenceon Cognitive Neurodynamics, Shanghai, China (2007-11)

3）I. Tsuda, Y. Yamaguti, S. Kuroda, Y. Fukushima and M. Tsukada : “A mathematical model for the hippocampus: towards the understanding of episodic memory and imagination.”, Nishinomiya-Yukawa International & Interdisciplinary Symposium 2007 ″What is Life ? The Next 100 Years of Yukawa’s Dream″ organized by M. Murase, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University (2007-10)

4）I. Tsuda : “A mathematical model for the hippocampus”, Workshop on Dynamics, Informatics and Cognition, organized by Fullop Bazso, Polytechnical Engineering College, Department of Informatics, Subatica, Serbia (2007-07)

5）I. Tsuda : “Chaotic itinerancy reality in brain dynamics”, 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, University of Zurich, Switzerland (2007-07)

6）Y.Sato, “Noise-induced Phenomena in one-dimensional maps,” invited talk, ASI,RIKEN, Saitama, Japan, (2008).

7）Y.Sato, “Function Dynamics: An Introductory Review,’’ Invited talk, Workshop ``Nonlinear Dynamics and Informatics VII,” ISM, Tokyo, Japan, (2007).

8）Y.Sato, “`Heteroclinic Cycles in N-person Game Dynamics,” invited talk, Minisymposium at SIAM Conference on Application of Dynamical Systems, Snowbird, USA (2007).

9）Y. Yamaguti and I. Tsuda: “The Role of the Hippocampus for Mobiligence”, 2nd International Symposium of Mobiligence, Hyogo, Japan (2007-07).

10）Y. Yamaguti, S. Kuroda, I. Tsuda, Y. Fukushima and M. Tsukada: “Cantor Coding of Temporal Sequences in Hippocampal CA1 Model Neurons”, 39th Annual European Brain and Behaviour Society, Trieste, Italy (2007-09).

11）Y. Yamaguti, S. Kuroda, I. Tsuda, Y. Fukushima, and M. Tsukada: “Coding sequential information on a Cantor set”, 7th International Neural Coding Workshop, Montevideo, Uruguay (2007-11).

ⅲ）コロキウム・セミナー等・その他

1）津田一郎 :「Chaotic dynamical systems viewpoint of the brain.」, Kyushu University, Department of Engineering, Lecture series、Kyushu University (2007-10)

2）津田一郎 :「On the mathematical model for the hippocampus. (In Japanese).」, Special lecture at Tokyo University 、 Tokyo University, Department of Engineering (2007-08)

3）I. Tsuda : “A mathematical model for the hippocampus.”, Institute for nuclear physics (organized by Peter Erdi), Biophysics laboratory, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary (2007-07)

4）Y.Sato, `N-person Game Dynamics,’’ invited seminar, Santa Fe Institute, Santa Fe, USA, (2007).

4.8 シンポジウムの開催（組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

1）重俊奈良, I. Tsuda, 毅本堂, Y. Nishiura, 勉村田, 幸夫郡司 and 雅俊村瀬 :“第22回西宮・湯川記念理論物理学シンポジウム : What is life? The Next 100 Years of Yukawa’s Dream”, 90人, コープ・イン・京都（京都市）(2007年10月15日～2007年10月20日）

2）K. Umeno, Y. Sato, Workshop “Chaos and Its Applications,” 20 participants, ASI, RIKEN, Tokyo, Feb., 2008.
Y. Sato, Workshop ``Perspectives in Nonlinear Science,” 20 participants, RIES, Hokkaido University, Sapporo, Sept., 2007.

3）R. Kozma, Y. Sato, Minisymposium “Dynamical Systems Approaches in Neuroscience: Theory, Experiments, and Applications,’’ 20 participants, ICIAM, Zurich, Switzerland, July, 2007.

4.10 予算獲得状況

ａ．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）津田一郎、基盤研究 B 一般、カオス的遍歴のシナリオに関する研究、2006～2009年度

2）津田一郎、特定領域研究、海馬 CA1 のカントルコーディングの数理モデルと実証実験、2006～2007年度

3）津田一郎、特定領域研究、移動知における大脳辺縁系の役割、2006～2007年度

4）津田一郎、萌芽研究、結合神経ベクトル場のカオス的

遍歴とその情報処理への応用、2005～2007年度

e．ＣＯＥ関係（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容）

1）津田一郎（21世紀 COE プログラム）:「特異性から見た非線形構造の数学」、2003年度～現在、非線形構造という様々な分野に共通の重要課題について数学的基礎を築くとともに、他分野との連携を一層進展させる。

4.12　社会教育活動

c．併任・兼業

1）津田一郎、独立行政法人科学技術振興機構、「戦略的創造研究推進事業」領域アドバイザー（2007年6月6日～2008年3月31日）

2）津田一郎、北陸先端科学技術大学院大学、アカデミックアドバイザー（2007年4月1日～2008年3月31日）

3）津田一郎、玉川大学術研究所、非常勤特別研究員客員教授（2007年4月1日～2008年3月31日）

4）津田一郎、財団法人 国際高等研究所、特別委員（2007年4月1日～2008年3月31日）

5）津田一郎、財団法人 国際高等研究所、「生物進化の持続性と転移」研究プロジェクト研究代表者（2007年4月1日～2008年3月31日）

6）津田一郎、財団法人 国際高等研究所、「認識と運動における主体性の数理脳科学」研究プロジェクトメンバー（2007年4月1日～2008年3月31日）

7）津田一郎、大阪大学工学研究科知能・機能創成工学専攻、招へい教員（招へい教授）（2007年4月1日～2008年3月31日）

8）津田一郎、科学技術動向研究センター、専門調査員（2007年4月1日～2008年3月31日）

9）津田一郎、京都大学数理解析研究所、専門委員（2007年4月1日～2008年3月31日）

10）津田一郎、九州大学大学院システム情報科学府、非常勤講師（2007年10月1日～2008年3月31日）

11）佐藤譲、理化学研究所　次世代移動体通信チーム、客員研究員（2007年11月1日～2008年3月31日）

f．外国人研究者の招聘（氏名、国名、期間）

1）James Wright、New Zealand、（2008年3月10日～2008年3月18日）

2）Gerogy Kampis、Hungary、（2008年2月11日～2008年2月17日）

3）Steven Bressler、USA、（2007年7月15日～2007年7月20日）

4）Robert Kozma、USA、（2007年7月14日～2007年7月21日）

5）Leslie Kay、USA、（2007年7月14日～2007年7月20日）

6）Yakov B. Pesin、USA、（2007年4月1日～2007年4月6日）

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）理学部、微分積分学１、津田一郎、2007年4月1日～2007年9月30日

2）理学部、科学技術の世界、津田一郎、2007年4月1日～2007年9月30日

3）理学部、計算数学続論１、津田一郎、2007年4月1日～2007年9月30日

4）医学研究科、脳科学研究の展開Ⅳ「脳科学研究パラダイム」カオス理論、2007年4月1日～2008年3月31日

5）工学研究科、数理科学と情報科学の基礎、2007年4月1日～2008年3月31日

6）全学教育、数学概論、佐藤譲、2007年10月1日～2008年3月31日

7）理学研究科、数理解析学講義 、佐藤譲、2007年10月1日～2008年3月31日

h．北大以外での非常勤講師（担当者、教育機関、講義名、期間）

1）津田一郎、大阪大学工学部部、知能・機能創成工学に関する研究と教育について、2007年4月1日～2008年3月31日

2）津田一郎、九州大学大学院システム情報科学府、カオス力学系からの脳の眺め、2007年4月1日～2008年3月31日

i．ポスドク・客員研究員など

・その他（4名）

黒田　茂（北海道大学大学院理学研究科数学 COE）
田所　智（北海道大学大学院理学研究科数学 COE）
畠山元彦（北海道大学大学院理学研究科数学 COE）
安岡卓男（北海道大学大学院理学研究科数学専攻）
玉井信也（北海道大学大学院理学研究科数学専攻）

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（2名）

畠山元彦、松本和宏

・博士論文

1）畠山元彦：Internal logic viewed from observation space: Theory and a case study（観測空間から見た内部理論－理論と事例研究）

2）松本和宏：Controlling Engine System:A Low-Dimensional Dynamics in a Spark Ignition Engine of Motorcycle（エンジンシステムの制御：二輪自動車用火花点火機関の低次元ダイナミクス）

・修士課程（3名）

岩澤和子、岸本匡広、清水明士

・修士論文

1）岩澤和子：CMME モデルによる集団運動のパターン形成について

2）岸本匡広：複雑系時系列解析によるゼブラフィッシュ Branchydanio rerio の学習評価法

3）清水明士：知覚情報の分離・統合の神経回路モデル

並列分散処理研究分野（客員研究分野）

教授　中西八郎（東北大学多元物質科学研究所）
小中元秀（科学技術振興機構）
瀬川尚彦（電通北海道）

1．研究目標

光エネルギーを直接力学的仕事に変換できる材料は，エネルギーや環境問題の観点から次世代のアクチュエーターとして注目されている。架橋フォトクロミック液晶高分子(CLCP)では，光照射によって液晶の配向を乱すことにより，異方的変形を誘起できることが知られている。本研究では，この CLCP を光アクチュエーターとして応用し，光を直接仕事へと変化できる光運動材料の創出を目指す。これまでに CLCP を用いて，光屈伸の方向制御や光−力変化特性についての検討を行った。

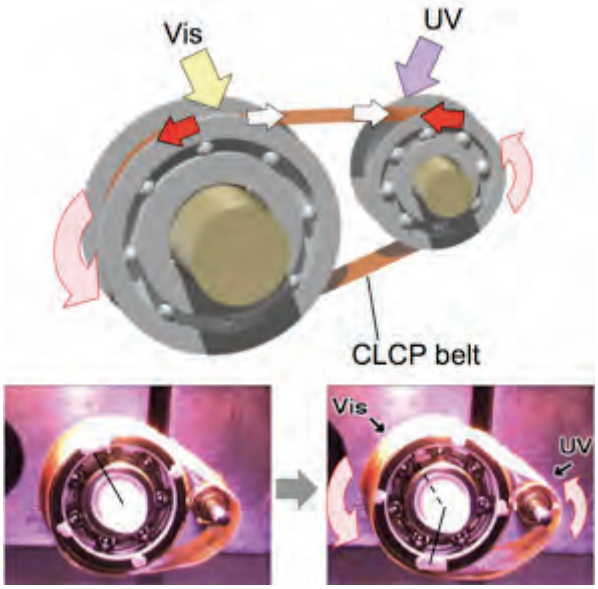


図１．光プラスチックモーター

2．研究成果

(a)　架橋フォトクロミック液晶高分子フィルムにおけるフォトメカニカル機能の評価

CLCP の光運動特性を評価する上での指標の一つとして、フィルムの光照射により発生する応力があげられる。そこで、液晶モノマーおよび架橋剤の混合比を調整することにより架橋密度の異なる CLCP フィルムを作製し、CLCP フィルムにおける紫外光照射時に発生する応力について検討した。その結果、架橋剤濃度の増加に伴い応力が増大した。特に架橋剤濃度の最も高いフィルムにおいては、1MPa を超える収縮力を示すことが明らかとなった。この結果から、CLCP において液晶分子の配向変化を系全体に効率よく増幅させるためには、架橋点を増加し、側鎖の液晶分子と主鎖との相関を強くすることが重要であることがわかった。

(b)　多様な運動を誘起可能な架橋液晶高分子積層フィルムの開発

CLCP フィルムの機械的強度を向上させるため、汎用プラスチックフィルムと CLCP 層からなる CLCP 積層フィルムを調製し、その積層フィルムにおける光運動特性について検討した。CLCP 積層フィルムは、接着層を塗布したポリエチレンフィルム上に CLCP フィルムを加熱圧着することにより作製した。CLCP 積層フィルムをベルト状に加工し、光プラスチックモーターの検討を行った（図１）。室温において、紫外光・可視光をそれぞれ図に示す箇所に同時に照射することにより、ベルトおよびプーリーが回転した。これはベルトの光照射部分に局所的な収縮力と伸長力が発生し、この力により回転力が誘起されるためと考えている。このベルト状の CLCP 積層フィルムを用いることにより、光エネルギーを直接回転運動へ変換することに成功した。

3．今後の研究の展望

今後は、フォトクロミック液晶モノマーの分子構造、光異性化および分子配向変化の観点から検討を行い、新たな運動モードを示す光運動材料の開発を進める予定である。

４．資料

4.2　総説、解説、評論等

１）　Y. Yu, T. Maeda, J. Mamiya and T. Ikeda: “Photomechanical effects of ferroelectric liquid-crystalline elastomers containing azobenzene chromophores”, *Angew. Chem. Int. Ed.,* 46: 881-883 (2007)

２）　T. Ikeda, J. Mamiya and Y. Yu: “Photomechanics of liquid-crystalline elastomers and other polymers”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46: 506-528 (2007)

３）　山田宗紀、池田富樹：「光運動材料の設計と機能」、機能材料、27：13-18 (2007)

４）　近藤瑞穂、池田富樹:「偏光制御による光駆動高分子」、O plus E, 29：11-17 (2007)

５）　M. Yamada, M. Kondo, J. Mamiya, Y. Yu, M. Kinoshita, C. J. Barrett and T. Ikeda: “Photomobile polymer materials - towards light-driven plastic motors”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 47: 4986-4988 (2008)

６）　山田宗紀、池田富樹：「光アクチュエータ材料としての架橋液晶高分子」、プラスチックス、59:91-93(2008)

4.12　社会教育活動

ａ．公的機関の委員

１）池田富樹：日本学術会議連携会員（2006年度～2008年度）

ｂ．国内外の学会の役職

１）池田富樹：日本液晶学会副会長（2009年1月1日～現在）

２）池田富樹：Associate Editor, Journal of Materials Chemistry, Royal Society of Chemistry (2007年2月1日～現在)

３）池田富樹：日本化学会ナノテク・材料化学ディビジョン主査（2006年度～現在）

寄附研究部門

研究目的

バイオイメージング技術に関する更なる技術改良、或いは新技術開発およびその生物学研究への応用を推進し、本学と顕微観察技術関連企業との連携強化ならびに本学における教育研究の豊富化、活性化や国際的な交流を目的としている。

ニコンバイオイメージングセンター

教　授　永井健治（東大院、博士(医学)、2005.10～）
教　授　上田哲男（北大院、博士(薬学)、2005.10～）
特任准教授　堀川一樹
（京大院、博士(理学)、2006.12～）
特任助教　齊藤健太
（北大院、博士(理学)、2005.10～）
技術職員　小林健太郎
（北大院、博士(理学)、2005.10～）

1．研究目標

近年、蛍光バイオイメージング技術の需要が増大し、その需要に呼応して遺伝子導入技術、蛍光タンパク質をはじめとする分子マーキング技術や機能指示薬作成技術が向上した。また、顕微鏡やカメラなどの機器の性能も飛躍的に向上してきている。しかしながら、これらの最新技術・機器を用いれば最新のデータがすぐさま得られる訳ではないところにバイオイメージング技術の難しさがある。

本研究部門は、北海道大学のみならず日本全国の研究者に最新の生物顕微鏡を利用できる環境を提供するための施設として㈱ニコンインステックの協力により設立され、多数の協賛企業の援助を受けて活動している。研究者と企業の双方と緊密な連絡を取り合うことによってニーズとシーズを結びつけ、利用者の要望を速やかに反映させたバイオイメージングに関する更なる技術改良や新技術開発、およびその生物学研究への応用を推進し、そして本学と顕微観察技術関連企業との連携強化ならびに本学における教育研究の量と質の充実や活性化、国際的な交流を目指している。

以上の目的を達成するため、以下に掲げる項目に沿った活動を行っている。

1．最先端の顕微鏡とイメージング関連機器を設置し、基礎研究の環境を提供する。
2．顕微鏡に馴染みのない研究者からハイエンドユーザーまで、さまざまなレベルに合わせて顕微観察法のトレーニングコースを行う。
3．イメージング操作について専属スタッフが指導を行う。
4．顕微鏡ユーザーのアイデアを反映した新型顕微技術の開発を行う。

2．研究成果

(a)　利用実績（平成17年11月～平成20年3月）

平成19年度の延べ利用人数・利用時間は、440人・2802時間にのぼる。研究者の所属の内訳は、北海道大学学内では所内はもちろんのこと、遺制研・低温研・創成科学共同研究機構・医学部・薬学部・歯学部・農学部・情報科学研究科などが挙げられる（図1）。学外では、群馬大学や九州工業大学の研究者の利用があり、一般企業からも問い合わせや利用が数件あった。

平成17年度の開設当初の一ヶ月の総利用人数・時間は20人・100時間程度にとどまっていたものの、研究者間での広がりやポスターによって学内外へ活動をアピールすることにより、月間総利用は52人・430時間（平成19年11月）へ、年間利用人数・利用時間も大いに拡大している（図2）。また本年度は、当センターでの観察による研究成果として、利用者による2報の論文が学術雑誌に掲載された。

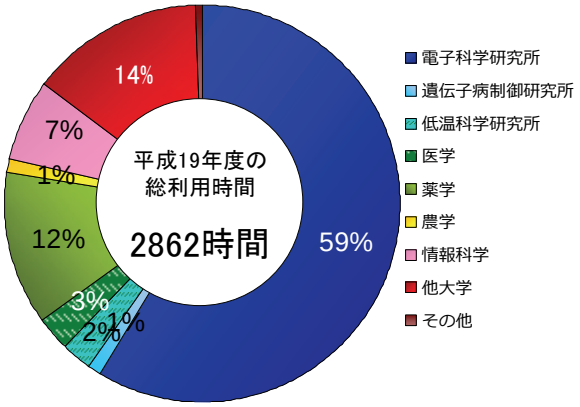


図１．平成19年度イメージングセンター利用者の所属内訳

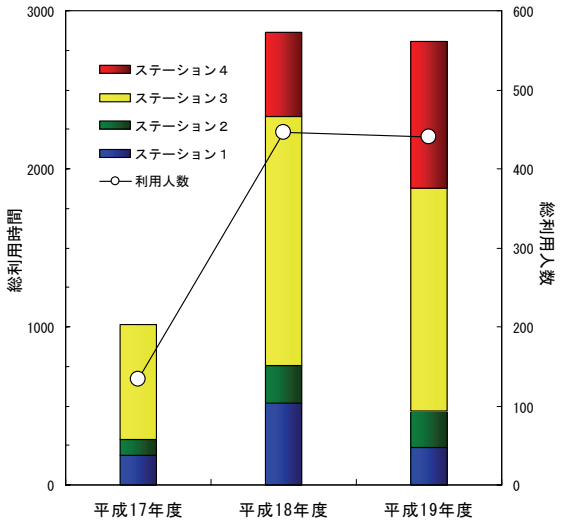


図２．年度別イメージングセンター利用状況

(b)　バイオイメージング技術と知識の普及

利用を希望する研究者には機器の利用方法の指導を行っており、初心者にはイメージングや蛍光色素に関する相談も受けつけている。これらを通じて顕微鏡やその関連技術、細胞生物学に関する知識や技術の普及に貢献している。

特に2008年１月に北海道大学と大阪大学の COE が開催して40名程度が参加した細胞生物学ワークショップでは、一週間にわたって人員、機材、観察試料提供など全面的に協力を行った。また本年度は、バイオイメージングでの観察・解析用ソフトウエア講習会も開催し、初歩的な使用方

法やイメージング画像の解析方法などの習得を通して、より高度な観察・解析方法の普及にも努めた。この講習会の参加者は20名以上であった。

(c)　顕微鏡技術の開発

マイクロレンズ付きニポウディスク走査方式の共焦点スキャナユニット(CSU10, CSU22、横河電機)は、多点同時走査により高速観察とサンプルへの光毒性軽減を可能とする。当センターではCSUシリーズをより安価に利用するために、CSUの光源として従来用いられてきたレーザーに変えて水銀ランプを用いた画像取得を試みた。レーザーと水銀アークランプを光源とした場合で比較したところ、空間分解能には差がなかった。照射強度の均一性に関しては、レーザーを光源とした場合よりも水銀アークランプを光源とした場合の方が高かった。また、多色蛍光画像を取得する場合において、レーザーであれば基本的には蛍光色素の数だけ光源が必要となるが、水銀ランプであれば蛍光波長選択フィルタにより波長を自由に選択できる。このように安価で拡張性の高いシステムが構築でき、バイオイメージング分野における今後の利用が期待される。

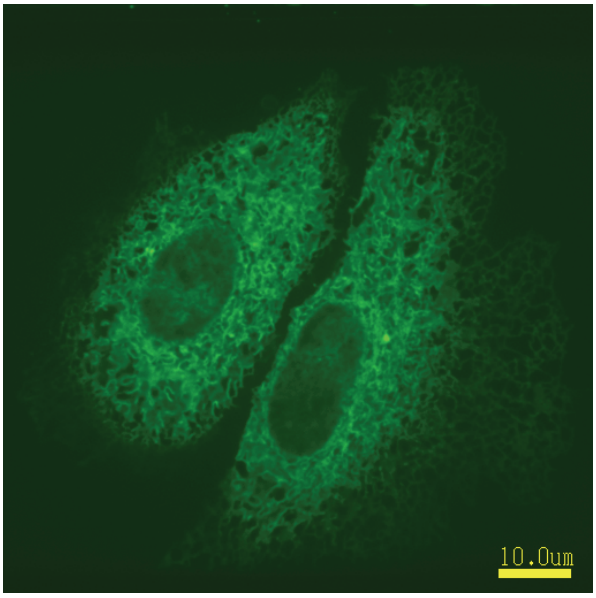


図３．水銀アークランプを利用した CSU 共焦点システムで観察した HeLa 細胞小胞体のイメージング。

３．今後の研究の展望

引き続き、蛍光バイオイメージング機材の提供およびイメージングの指導・トレーニングを行う。また、協賛企業と協力して新型顕微鏡の開発を行う。

４．資料

4.1　学術論文等

1）S. Nagayoshi, E. Hayashi, G Abe, N. Osato, K. Asakawa K, A. Urasaki, K. Horikawa, K. Ikeo, H. Takeda, K. Kawakami. “Insertional mutagenesis by the Tol2 transposon-mediated enhancer trap approach generated mutations in two developmental genes: tcf7 and synembryn-like”, Development. 135:159-169 (2008).

4.2　総説・解説・評論等

1）石松愛、武田洋幸、堀川一樹：「分節振動体がノイズの影響を緩和する機構」、時間生物、13(1)： 20-26 (2007)

2）齊藤健太、谷知己、小林健太郎、永井健治：「大口径ファイバー白色光源を用いた高速共焦点顕微鏡の開発と評価」、顕微鏡、42(3)：161-165 (2007)

3）永井健治、齊藤健太：「FRETの測定法と評価」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版：118-128 (2007)

4）齊藤健太、松田知己、原口徳子、永井健治：「実習６ FRET」、講義と実習 生細胞蛍光イメージング、共立出版 ：268-277 (2007)

4.7　講演

ｂ．一般講演

ｉ）学会

1）K. Saito, K. Kobayashi, T. Tani, T. Nagai: “Development of a spinning-disc confocal microscopy for multi-color imaging using Hg arc lamp as a light source” 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics, Cairns, Australia (2007-7)

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）野地博行、永井健治、齊藤健太、今村博臣：「FRET プローブを用いた生細胞内 ATP の蛍光イメージング」、日本光学会年次学術講演会シンポジウム「バイオイメージング技術の現状と将来展望」、大阪コンベンションセンター（2007-11）

2）堀川一樹「生物の理論研究会」神戸セミナーハウス（2008-03）

iii）コロキウム・セミナー等・その他

1）永井健治、齊藤健太、松田知己：「蛍光を用いた分子動態の定量解析」、BMB2007、横浜（2007-12）

4.8　シンポジウムの開催（組織者名、シンポジウム名、参加人数、開催場所、開催期間）

・一般のシンポジウム

1）永井健治、金城政孝、堀川一樹、齊藤健太：「第10回細胞生物学ワークショップ」、40名、2008年1月28日～2008年2月2日、北海道大学 電子科学研究所（札幌市）

4.9　共同研究

ｄ．受託研究

１）堀川一樹、JST さきがけ、相互作用に支配される細胞集団の協調的振る舞い、2006年10月-2010年3月

4.10　予算獲得状況

ａ．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

１）堀川一樹、若手研究スタートアップ、エンハンサートラップ法とライブイメージングを軸とした聴覚システム発生機構の研究、2006年-2008年

4.11　受賞

１）堀川一樹：文部科学大臣表彰　科学技術者賞（若手科学者賞)「多細胞システムが遺伝子発現のノイズを解消する機構の研究」2007年4月

4.12　社会教育活動

ｇ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

１）理学院生命理学専攻、発生進化特論、堀川一樹、2007年10月

ｈ．北大以外での非常勤講師（担当者名、教育機関、講義名、期間）

１）堀川一樹、京都大学、生命科学研究科、生命現象の解明を目指す複合的アプローチ、2007年10月2日～2007年10月3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。

ナノデバイス研究分野

教　授　辻井　薫（阪大院、理博、2003.3～）
助　教　眞山博幸（北大院、博(工)、2003.5～）
助　教　松尾　剛（慶大院、博(工)、2003.7～2007.9）
学術研究員　厳　虎（東大院、工博、2003.4～2006.2）
COE 研究員　方　文軍
（中国浙江大学教授、2005.10～2006.9）
院　生
・博士課程
陳　新江
・修士課程
石原敬基、小野祐輔、南　貴之（理学研究科）

１．研究目標

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。次の二つの研究テーマを柱とする。

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、無限大の表面積はあり得ないが、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）ナノ分子組織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ナノ分子組織体（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、特徴的な機能性材料を開拓する。例えば、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、それが可視光を回折することによって発色する現象が知られているが、その発色構造をゲル中に固定化することが出来る。また、この系に流動のシェアをかけて、二分子膜を配向させてから重合することにより、異方性のヒドロゲルが得られる。各種のナノ分子組織体をゲル中に固定化し、特徴的機能を有するデバイスを構築する。

２．研究成果

１）フラクタル・ナノテクノロジーの開拓

(a)　フラクタル構造による超撥水／超撥油表面の開発と応用

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、フッ素系の化合物を表面に配列させることにより、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、0.2－34μm 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。

アルキルケテンダイマーは、接触角が174°の超撥水表面を形成するが、残念ながらその性能に耐久性がなく、実用化への障害になっている。図３は、電解酸化重合法で合成されたポリアルキルピロール表面の電子顕微鏡像と、その上に置かれた水滴の写真である。この表面もフラクタルであり、接触角154°の超撥水性を示す。更に、少なくとも耐熱性と耐溶剤性に関しては、大変優れた耐久性を示すことが判明した。

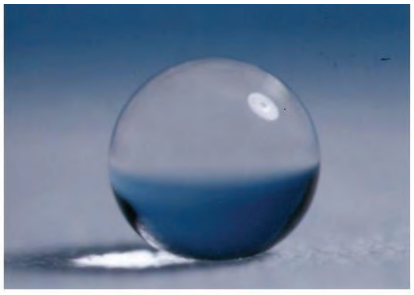


図１．超撥水フラクタル表面上の水滴。材料はアルキルケテンダイマーで、接触角は174°

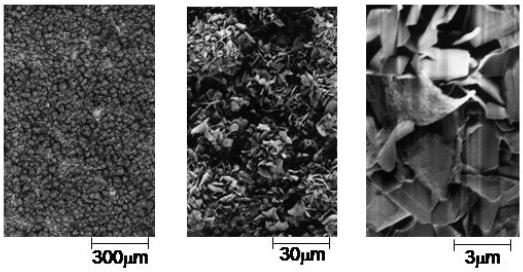


図２．フラクタル表面の電子顕微鏡像。凹凸の入れ子構造が見て取れる

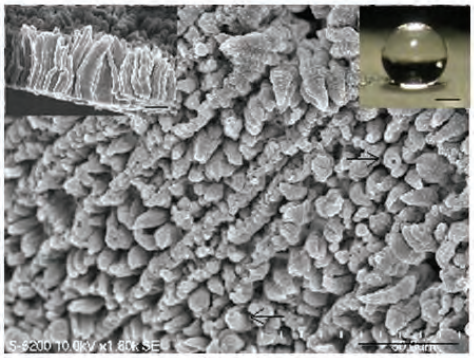


図３．耐久性を有するポリアルキルピロールの超撥水表面の電子顕微鏡写真と、その上に置かれた水滴。スケールバーは、電子顕微鏡写真の場合は15 μm、水滴の写真では500 μm である

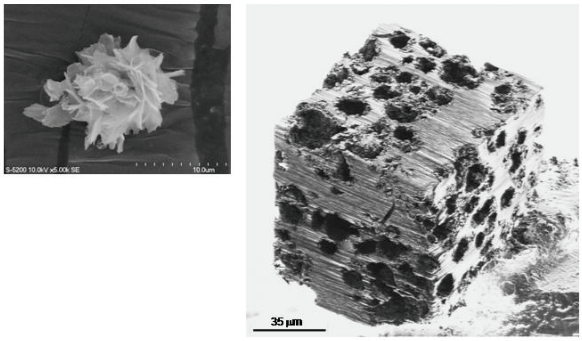


図４．シリカのフラクタル立体（右）と、その合成に鋳型として利用された、アルキルケテンダイマーのフラクタル微粒子の電子顕微鏡写真（左）。

(b)　ワックス表面における自己組織的フラクタル構造形成のメカニズム

先のアルキルケテンダイマー・ワックスは、自己組織的（自発的）にフラクタル表面を形成する。この自発的フラクタル表面形成のメカニズムを解明することは、フラクタル構造を自在に作製して利用したり、フラクタル次元の制御等に有効であると考えられる。そこで、各種のワックスの融液を固化することによって表面を作製し、その撥水性、表面構造、相挙動を研究した。その結果、ワックスが融液から固化する際に、一度準安定な結晶相になり、その後熱力学的に最も安定な結晶相に転移する過程が、フラクタル表面形成に必須であることが判明した。その様な準安定相を有するワックスがフラクタル表面を形成し、直接安定相に固化するワックスは平滑な表面となり、超撥水性も示さないことが、少なくとも研究に用いた15種のワックスに関しては、例外なく確かめられた。

(c)　フラクタル立体の創製

フラクタル表面の実現と応用だけではなく、フラクタル立体の創製にも取り組んできた。フラクタル立体は、純数学的には体積が０で、表面積が無限大の物体である。実世界でフラクタル立体を実現すれば、大変体積が小さく表面積の大きな物体が出来るはずである。当研究室では、上記の自己組織的にフラクタル構造を形成するアルキルケテンダイマー・ワックスを利用し、表面にフラクタル構造を有する微粒子を鋳型として用いることによって、その合成に成功した。具体的には、アルキルケテンダイマーの微粒子を噴霧法で作製し、その表面がフラクタル構造になってから寄せ集め、その集積微粒子間をテトラメチルオルトシリケート溶液で満たし、ゾル／ゲル法で固化してから、鋳型の微粒子を焼成することによって除去した。得られたシリカのフラクタル立体を、図４に示す。この立体のフラクタル次元、空隙率等の測定結果は、Menger sponge と呼ばれる数学モデルとよく一致することが分かった。また、内部に50 nm から30 μm まで連続的に大きさの異なる孔が存在することも確認された。この新規な材料の特徴的な性質の開拓を、現在研究中である。

２）ナノ分子組織体を固定化したヒドロゲル

(a)　二分子膜固定化ゲルの合成と応用

ある種の重合性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５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。

二分子膜固定化ゲルは、他にも引っ張り強度が大きくなる、世界一速く収縮する NIPA ゲルを作成できる、シェア下で配向させた後に重合することによって異方性ゲルを作製できる等の、幾つもの興味深い性質を示す。二分子膜が何枚も筒状に重なったミエリン構造は、その大きな表面積のために不安定で、球形のベシクルに変化してしまう。重合性界面活性剤を利用することにより、このミエリン構造をゲル中に重合固定化して安定化することにも成功した（図６）。

(b)　高分子界面活性剤ミセルを封入したヒドロゲル

二分子膜以外にも、高分子界面活性剤ミセルを固定化したヒドロゲルも開発し、次の様な興味深い現象を発見した；

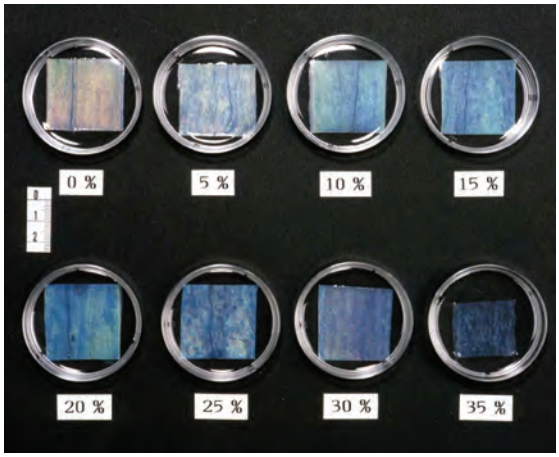


図５．二分子膜の規則構造を固定化した発色性ヒドロゲル。ゲルの膨潤／収縮によって色が変わる

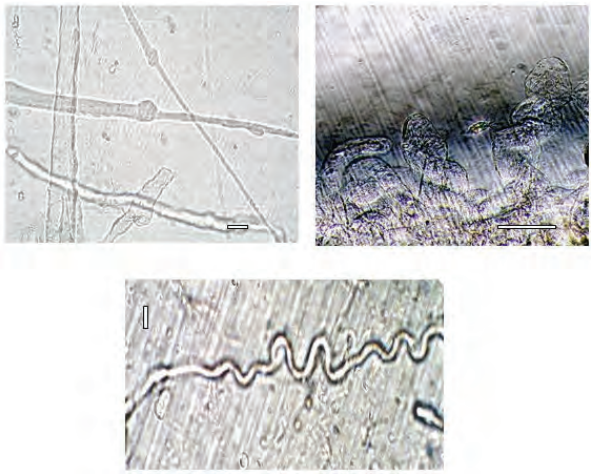


図６．ゲル中に固定化されることによって安定化されたミエリン構造。この構造は、少なくとも半年以上全く変化しない。スケールバーは、50 μm

ｉ）NIPA ゲルの相転移速度が著しく速くなる、ⅱ）相転移速度の上昇によって、ゲルにレーザー光を照射すると水が噴出する、ⅲ）電気泳動の手法を利用して高分子界面活性剤をゲル中で偏析させると、bimorph 構造のゲルが出来る等である。

３．今後の研究の展望

フラクタル・ナノテクノロジーの研究では、先ず超撥水／超撥油表面の実用化を目指す。そのために必要なことは、超撥水／超撥油性能の耐久性向上である。既にかなり改良は進んでいるが、機械的耐久性の改善、撥油性能の向上が、更なる課題である。耐久性の超撥水／超撥油表面を実現し、汚れない表面を作ることが最終ターゲットである。フラクタル立体については、現在合成に成功した段階で、今後は特異な物性／機能を見出すことが重要である。現在その研究が進行中である。

二分子膜固定化ヒドロゲルについては、異方性ゲルの創製を行う。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るためである。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。しかし、現在得られているゲルの異方性は完全なものではない。この異方性をより完全なものにすることと、異方性ゲルの応用を見出すことが今後の課題である。更に、二分子膜固定化ゲルの応用として、ゲル電気泳動基材としての検討を行った。水溶性蛋白質は泳動するが、膜蛋白質はゲルに入った途端に動かなくなることが判明した。この結果は、水溶性蛋白質と膜蛋白質の分離に使えることを示唆している。ゲル電気泳動法の開発を更に検討するとともに、新たな応用も見出したい。

４．資料

4.1　学術論文等

１）H. Yan, K. Kurogi and K. Tsujii: “High Oil-Repellent Poly(alkylpyrrole) Films Coated with Fluorinated Alkylsilane by a Facile Way”, Colloids Surfaces A, 292: 27-31 (2007)

２）X. Chen, H. Mayama, G. Matsuo, T. Torimoto, B. Ohtani and K. Tsujii: “Effect of Ionic Surfactant on the Iridescent Color in Lamellar Liquid Crystalline Phase of a Nonionic Surfactant”, J. Colloid Interface Sci., 305: 308-314 (2007)

３）W. Fang, H. Mayama and K. Tsujii: “Spontaneous Formation of Fractal Structures on Triglyceride Surfaces with Reference to Their Super Water-Repellent Properties”, J. Phys. Chem. B, 111: 564-571 (2007)

４）K. Kurogi, H. Yan, H. Mayama and K. Tsujii: “Super Water-Repellent Poly(alkylpyrrole) films having environmental stability”, J. Colloid Interface Sci., 312: 156-163 (2007)

５）H. Mayama, T. Nakai, E. Takushi, K. Tsujii and K. Yoshikawa: “Marked Differences in Volume Phase Transitions between Gel and Single Molecule in DNA”, J. Chem. Phys., 127: 034901 (2007)

６）T. Minami, H. Mayama, S. Nakamura, S. Yokojima, J. -W. Shen and K. Tsujii: “Formation Mechanism of Fractal Surfaces on Wax Surfaces with References to Their Super Water-Repellency”, Soft Matter, 4(1):140-144 (2008)

4.2　総説、解説、評論等

１）眞山博幸:「ＤＮＡ単分子鎖の折りたたみと自励振動―高分子単分子鎖がつくりだす時空間構造―」、高分子、56(6)：428 (2007)

4.3　国際会議議事録等に掲載された論文

１）眞山博幸、辻井薫：「Menger sponge-like fractal body created with a designed template method」、the Proceedings of “Topological Aspects of Critical Systems and Networks”: 195-201 (2006).

4.7　講演

ａ．招待講演

１）眞山博幸：「非整数次元を有する多孔質体：フラクタル立体の創製」、第10回フォトニックフラクタル研究会、大阪大学接合科学研究所（大阪）(2007-07)

ｂ．一般講演

ｉ）学会

１）眞山博幸、山口大輔、小泉智、橋本竹治、辻井薫：「ナノ多孔質体：フラクタル立体の創製とその次元性」、第5回ナノ学会、つくば国際会議場（2007-05）

２）南貴之、眞山博幸、辻井薫：「超撥水フラクタル表面の

形成メカニズム」、第5回ナノ学会、つくば国際会議場（2007-05）

3）小野祐輔、眞山博幸、辻井薫：「ナノ多孔質体：フラクタル立体の比表面積と細孔分布」、第5回ナノ学会、つくば国際会議場（2007-05）

4）H. Mayama, D. Yamaguchi, S. Koizumi, T. Hashimoto and K. Tsujii; "Small-angle and ultra small-angle neutron scattering studies on fractal body", The 12th International Conference on Organized Molecular Films (LB12), Uniwersytet Jagiellonski in Krakow, Poland (2007-07)

5）南貴之、眞山博幸、辻井薫：「ワックス表面における超撥水フラクタル構造の形成メカニズム」、第60回コロイドおよび界面化学討論会、信州大学理学部（2007-09）

6）小野祐輔、眞山博幸、辻井薫：「フラクタル構造を有するポーラスシリカの表面積・細孔分布測定」、第60回コロイドおよび界面化学討論会、信州大学理学部（2007-09）

7）眞山博幸、山口大輔、小泉智、橋本竹治、辻井薫：「超小角中性子散乱・小角中性子散乱によるフラクタル立体の次元性」、第60回コロイドおよび界面化学討論会、信州大学理学部（2007-09）

8）千葉香織、眞山博幸、門出健次、吉田昌史、辻井薫：「高撥油性ポリフッ化アルキルピロール膜の電気化学的合成」、第60回コロイドおよび界面化学討論会、信州大学理学部（2007-09）

9）眞山博幸、山口大輔、小泉智、橋本竹治、辻井薫：「実空間・逆空間におけるフラクタル立体の次元性」、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学本部キャンパス（2008-03）

ii）研究会・シンポジウム・ワークショップ

1）南貴之、眞山博幸、辻井薫：「超撥水フラクタル表面の形成機構」、第53回高分子夏季大学、洞爺湖万世閣（2007-07）

2）眞山博幸、山口大輔、小泉智、橋本竹治、辻井薫：「中性子散乱実験によるフラクタル立体の次元性」、日本化学会北海道支部2007年夏季研究発表会、旭川工業高等専門学校（旭川）（2007-07）

3）小野祐輔、眞山博幸、辻井薫：「フラクタル構造を有するポーラスシリカの表面積・細孔分布」、日本化学会北海道支部2007年夏季研究発表会、旭川工業高等専門学校（旭川）（2007-07）

4）南貴之、眞山博幸、辻井薫：「ワックスによる超撥水フラクタル表面の形成機構」、日本化学会・北海道支部・2007年夏季研究発表会、旭川工業高等専門学校（旭川）（2007-07）

5）T. Minami, H. Mayama and K. Tsujii : "Formation mechanism of super water-repellent fractal structures on wax surfaces", The 9th RIES-Hokudai International Symposium on「創」, Hokkaido University (Sapporo) (2008-01)

6）H. Mayama and K. Tsujii : "Fractal dimension of fractal porous silica in real and reciprocal spaces", The 9th RIES-Hokudai International Symposium on 創 [Sou], Creatuve Research Initative "Sousei", Hokkaido University (2008-01)

7）南貴之、眞山博幸、辻井薫：「ワックス表面における超撥水フラクタル構造の形成メカニズム」、第42回高分子学会北海道支部研究発表会、北海道大学（札幌）（2008-01）

4.9　共同研究

d．受託研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）辻井薫、眞山博幸、松尾剛、厳　虎、方文軍（科学技術振興機構　戦略的創造研究推進事業（CREST））：「自己組織化フラクタル表面の解析と設計」、2004～2007年度、ナノ領域で機能を示す表面の中でも、特異な存在であるフラクタル表面の生成メカニズムを解明する。

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

1）眞山博幸、若手研究 B、ナノ多孔質物体：フラクタル立体の制御と機能探索、2006～2007年度

2）松尾剛、若手研究Ｂ、二分子膜含有ポリマーゲルの創製と生体分子との活性相関、2006～2007年度

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）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）

2）辻井薫：東洋大学バイオ・ナノエレクトロニクス研究センター外部評価委員（2006年4月1日～2008年3月31日）

3）辻井薫：日本学術会議連携会員（2006年8月20日～2011年9月30日）

4）辻井薫：宇宙環境利用科学委員会・委員（2005年5月10日～2008年3月31日）

b．国内外の学会の役職

1）辻井薫：英国化学会出版雑誌「Soft Matter」の編集幹事（Editorial Board）（2005年1月5日～現在）

2）辻井薫：日本化学会・第59回コロイドおよび界面化学討論会実行委員長（2006年3月1日～2007年2月28日）

3）辻井薫：ナノ学会理事（2006年5月21日～2008年3月31日）

4）辻井薫：日本化学会・化学技術賞等選考委員会委員長（2006年4月1日～2007年3月31日）

d．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士学位

1）南貴之：ワックス表面における超撥水フラクタル構造の形成メカニズム（2008）

2）小野祐輔：フラクタル立体の合成およびキャラクタリゼーションに関する研究（2008）

・博士学位

1）陳新江：Self-Assembly, Polymerization Behaviors and Applications to Functional Polymer Gels of an Amphiphilic Monomer in Lamellar Liquid Crystalline Phase（2007）

2）秋山恵里：Thickening Properties and Emulsification Mechanisms of Water-Soluble Amphiphilic Polysaccharides（2007）、論文博士

ナノ理論研究分野

教　授　徳本洋志（阪大院、理博、2002.11～）
助　教　畔原宏明（東工大院、工博、2004.2～）
学術研究員　浮田桂子（弘前大学、2006.6～）
院　生　藤枝　正（2006.4～）
　　井手康一朗（2006.4～2008.3）
　　勝股宗弘（2006.11～2008.3）
共同研究　岡嶋孝治准教授（情報科学研究科）
　　清水哲夫、安藤　淳、菅　洋志、田中深幸
　　（産業技術総合研究所）
　　(株)寿産業
　　(株)札幌エレクトロプレイティング

1．研究目標

ナノ理論研究分野では、ボトムアップナノテクノロジーの基幹技術の1つである走査プローブ顕微鏡(SPM)技術と優れたナノ材料であるナノカーボン材料（カーボンナノチューブやグラフェン）の高度化を目指す。この両者を組み合わせた新規バイオナノ計測・診断（単一分子、単一細胞の構造と機能の相関解明）技術の開発に力を入れている。さらに、これらの研究成果を下に、ナノテクノロジー新領域（複合領域ナノサイエンス）創製に向け分野横断的・融合的な研究課題の探索を行う。

2．研究成果

(a)　原子間力顕微鏡による細胞レオロジー関する研究

本研究は情報科学研究科・生命人間情報科学専攻　生体システム工学講座　細胞情報工学研究室の河原剛一教授、岡嶋准教授(2007.3までナノ理論研究分野助教授)、学生(平塚伸一郎、水谷祐輔）との共同研究で進めたものである

(a-1)　AFMによる生細胞の複素弾性率計測

細胞のレオロジーは、運動性や分裂、蛋白質の合成などの細胞機能と密接に関係している。AFMを用いて外場振動(0.5～200Hz、振幅10nm）に対する力学応答を測定することにより、生細胞のミリ秒領域の複素弾性率を精密に測定できる。これまでの研究では数個の細胞の測定から議論されてきたが、より定量的な解析のためには充分な量の細胞について計測することが必要である。そこで、本研究ではAFM とマイクロアレイ技術を組み合わせた新しい測定法を構築し、多数細胞（130個、マウス由来の繊維芽細胞NIH3T3）の複素弾性率を測定した。図1に本研究で開発し計測に用いたフォースモジュレーション法の概略を示す。参照周波数におけるカンチレバーの変位振幅と位相をロックイン検出して、細胞の複素弾性率を算出するものである。こうして得られた平均複素弾性率（実部と虚部）の周波数依存を図2に示したようになり、周波数に対してべき関数である structural damping model でよくフィットできることがわかった。

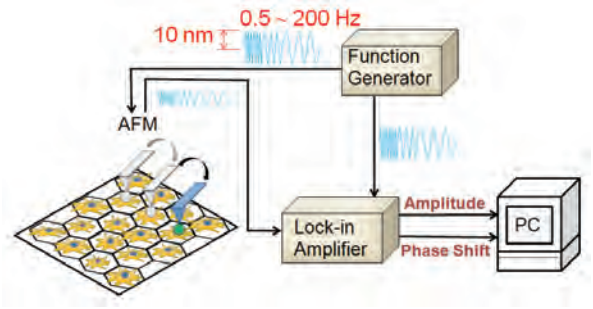


図1．マイクロアレイ細胞培養技術とフォースモジュレーション法の測定概念図。

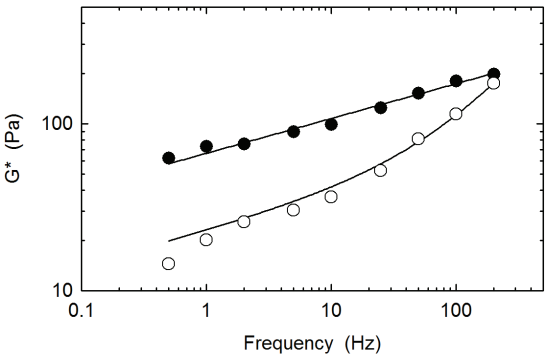


図2．フォースモジュレーションで測定した複素弾性率 G*の実部（●）と虚部（○）の周波数依存性。

(a-2)　AFMによる多数細胞の接着過程の細胞弾性率計測

既に記述したように AFM による単一細胞の力学計測はこれまで1個もしくは数個の細胞の力学計測によって細胞の評価を行ってきた。しかし、同一環境下で同一細胞を用いた場合でも形態･機能において極めてばらつきが大きく、数個の細胞の測定結果から力学特性を定量化することは容易ではない。従って、多数の細胞を測定し統計的な分布を明らかにすることが望まれる。そこで、本研究ではマイクロアレイ技術（図1）を用いて、AFMにより多数の細胞の力学特性を高速に計測することを試みた。細胞接着初期過程では、細胞骨格がダイナミックに変化している。そこで、ハニカム状に加工された microarray に細胞を播種し配列させることで定量的に細胞の初期接着過程の平均的な力学的特性の測定を可能にし、接着時間に伴った細胞の力学的特性の比較・検討を行った。

実験にはコロイドプローブカンチレバーを用いた。図3はマイクロアレイに細胞（マウス由来の繊維芽細胞NIH3T3）を播種した際の核の染色画像であり、配列が確認できた。図4は培養6時間後の細胞のヤング率の度数分布である。培養3，6，9時間と培養時間に伴って、細胞のヤング率は有意に増加することを示した。接着開始より伸展する際、細胞骨格の重合が促進することから、定量的に細胞の力学的特性を計測することが可能であることが分かり、今後細胞への様々な外的刺激に対する力学的特性を介した応答変化を評価できる可能性を示した。

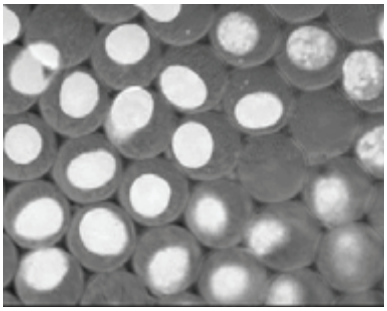


図３．マイクロアレイに細胞を播種した際の核の染色画像

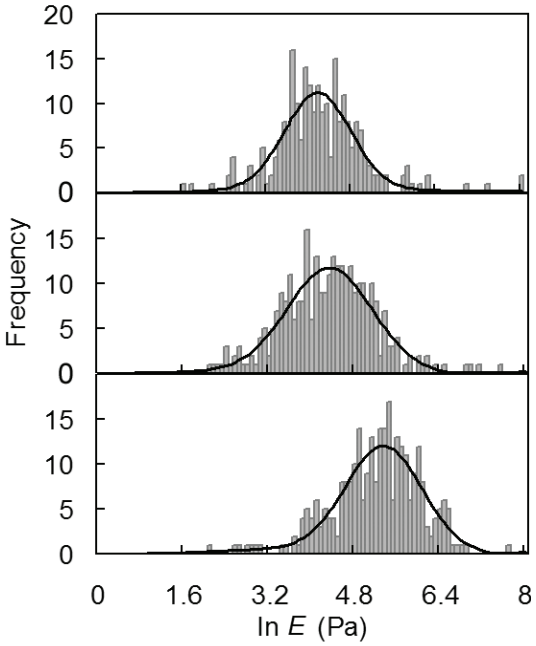


図４．上から培養3, 6, 9時間後の細胞のヤング率の度数分布

(b)　バイオ分析用 CNT-AFM テクノロジーに関する研究

カーボンナノチューブ（CNT）を用いバイオ・生体関連材料の極微小領域の構造を解析・分析する AFM 新技術を開発することを目的に、脂質二分子膜（細胞模擬膜）への探針挿入技術、CNT 探針先端の化学修飾技術および CNT 探針を用いた化学力 AFM プローブ作製技術等の要素技術の研究を行った。

(b-1)　微小孔保持マイクロ人工膜の作成と力学応答

リポソームや脂質二分子膜といった人工膜はバイオセンシング、ドラッグデリバリーシステム、薬物吸収評価システムの膜材料として注目されている。本研究では集束イオンビーム加工観察装置を用い、シリコン薄板に穿孔加工を行い（図5）、その微小孔において自立する人工膜を形成する技術の確立を目指した。Dimyristoyl phosphatidyl choline からなる人工膜を作成し、AFM を用いて形状を確認することができた（図6）。また、フォースカーブの測定結果より、この膜の見かけの剛性はカンチレバーと同程度（およそ 0.05N/m）であることが判った。

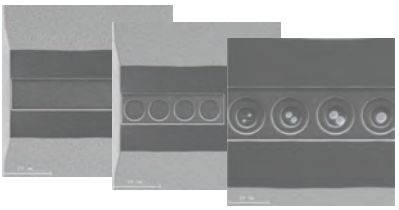


図５．FIB によるシリコン薄板への穿孔加工例

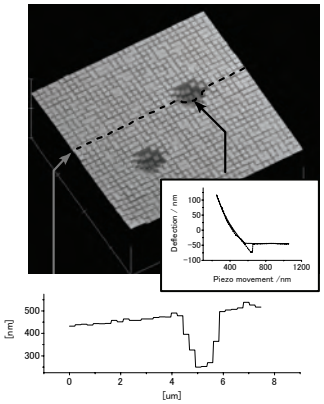


図６．微小孔保持マイクロ人工膜の地形像(8.5 nN)、断面図およびフォースカーブ測定結果

(b-2)　CNT 探針を用いた分子間相互作用測定法の開発

分子間相互作用解析を1分子レベルで行なうことを目指し、探針に生体関連分子を修飾する技術および液中でのフォースカーブ測定に使用する場合の CNT 探針の耐久性を検討した。図7にデカン中での CNT 探針とグアニン修飾基板との間に働く吸着力測定を4000回以上繰り返した結果と、そのヒストグラムを示す。測定を繰り返すことによる吸着力の変化は認められず、CNT 探針の十分な耐久性が示された。

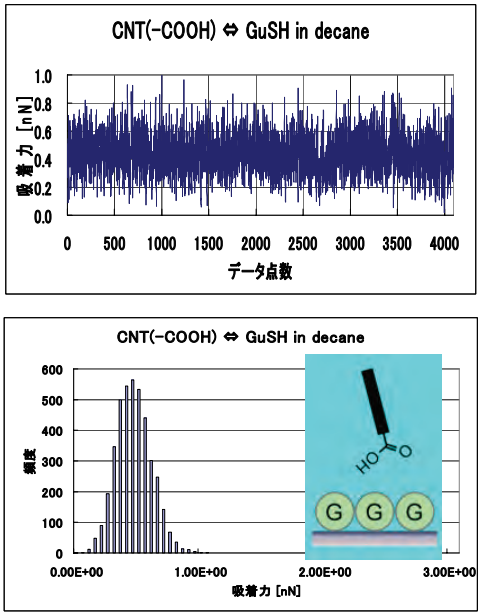


図７．CNT 探針を用いた吸着力測定結果とヒストグラム

(c)　ナノカーボン材料の応用創製に関する研究

本研究は産業技術総合研究所の清水哲夫氏、安藤淳氏、菅洋志氏、田中深幸氏との共同研究で進めたものである。

(c-1)　CNT-FE 電子源に関する研究

電界放出電子源としての高いポテンシャルを秘めたカーボンナノチューブの材料因子（形状、結晶性等）や環境因子（エミッション電流レベル、真空度、動作温度等）の電界放出特性に及ぼす影響把握とメカニズムの解明とともに、probe forming system 用の電界放出電子源としてのポテンシャルを明らかにすることを目指して研究を進めた。これまでに作製した低抵抗、高強度かつ高耐熱な CNT 電子源を用いて、非5員環パターン出現の原因および5員パターン配列と CNT 先端形状の関係（図8）、5員環からの電子ビーム開き角や電流―電圧特性等の電界放出の基礎特性、CNT 先端に内包する触媒金属粒子の電界放出時挙動（図9）およびそのメカニズムの解明、電流安定性に及ぼす MWNT 先端の結晶性やエミッション電流レベル・真空度および動作温度等の影響、電界放出電子エネルギー分布に及ぼす MWNT 先端表面状態の影響(図10)、広範囲な電流レンジ(10～2000nA)（図11）おける ΔE のエミッション電流および先端曲率半径依存性を明確化（図12）、などを明らかにした。

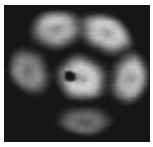


図８．理想的な CNT 先端構造における５員環配置からのエミッションパターン

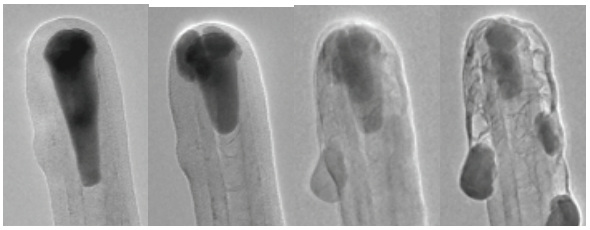


図９．CNT 先端に内包された触媒粒子の電界放出時挙動（左に向って電流値が増加）

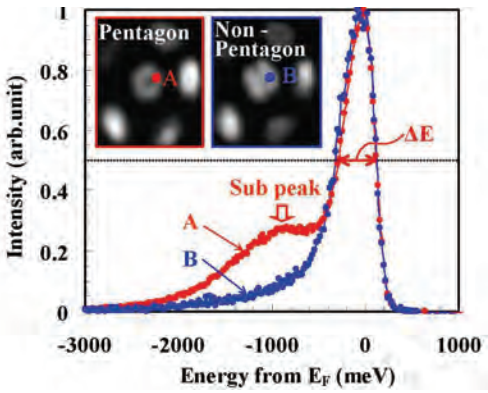


図10．電界放出電子エネルギー分布に及ぼす MWNT 先端表面状態の影響

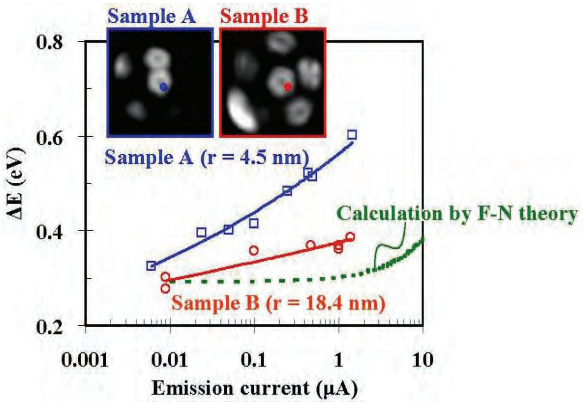


図11．ΔE のエミッション電流依存性

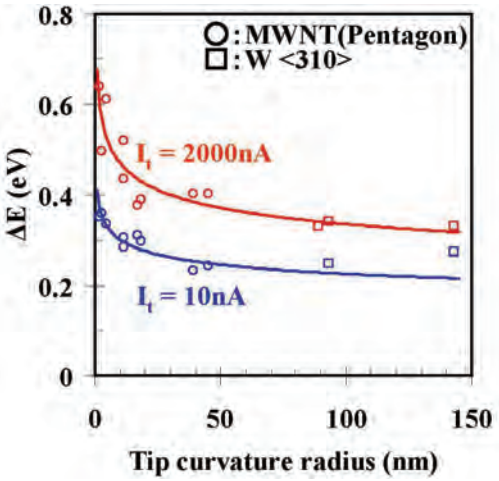


図12．ΔE の先端曲率半径依存性

(c-2)　グラフェンシート創製の研究

グランフェンシートは炭素原子が sp^2 軌道で結合した炭素原子一個の厚さのシートで、特異な物理現象（ディラック・フェルミオン、ドーピングにより n 型・p 型伝導にもなりえる、など）を有している。2004年以降に、グラファイトから一層のグラフェンシートを剥がす、1,400℃の高温加熱により SiC 表面に成長する、などによりグラフェンシートを作製できるようになり、重要な研究材料となった。更に、グラフェンシートは、カーボンナノチューブ（CNT）に匹敵する電気・機械・化学特性を有している。このような特長に注目が集まり、米国やヨーロッパでは研究開発が勢力的に行われている。日本では物性研究に中心がおかれ、CNT に比べて応用研究は非常に少なく、電子源としての応用が試みられている程度で研究の緒についたところである。低温で高品質のグラフェンシートを多量に成長することができれば、基礎から応用にいたる研究を革新的に展開できると期待できる。

本研究では、寿産業株式会社・札幌エレクトロプレイティング株式会社と共同研究体制を組み、リサイクルの一つとして廃タイヤ由来炭化物の高機能化の研究を行ってきた。この研究中に、無電解 Ni メッキを比較的高温（50～90℃）で行うと Ni 粒子表面にグラフェンシートが成長すること

を見出した（図13）。その後、主に電子顕微鏡観察・ラマン散乱測定・X 線回折(XRD)・XPS 測定を中心として評価を行い、グラフェンシートであることを確実なものとし製造特許の申請行った。と同時に、成長制御とナノスケール評価との相関を行った。その結果、メッキ作業に先立って炭化物をボールミルによりいわゆるストラクチャー構造を小さくすると同時に十分に水分散することにより、通常は20～50nm 程度であったグラフェンシートの大きさを10倍程度まで大きくすることができた（図14）。

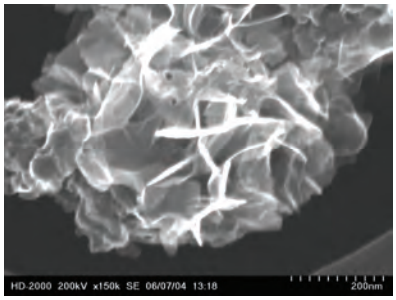


図13. 成長したグラフェンシートの SEM 像

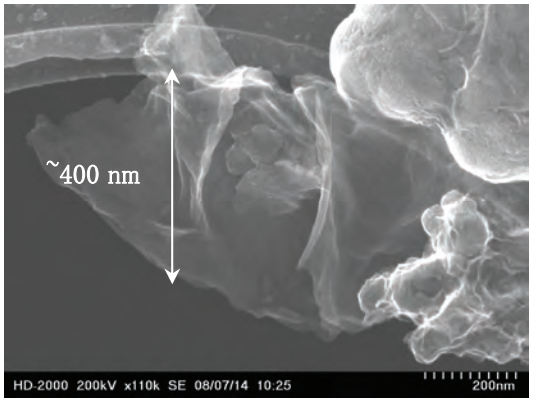


図14. 400nm 程度に増大したグラフェンシートの SEM 像

(c-3)　ナノグラフェンシートの高電界電気測定

無電解メッキで作製したナノグラフェンは図13に示したように Ni 粒子を中心としてその周辺にカーテン状に存在している。そのため、このナノグラフェン・Ni 粒子に高電界を印加することによって電子を電界放出（FE）させることが期待できる。この FE 電子計測のため、まず、先に開発したナノマニピュレータ SEM 装置を用いてナノグラフェン・Ni 粒子数個を先鋭化したタングステン探針の先端に固定した（図15）。これを産業技術総合研究所で開発した FE 計測装置に取り付け、ターボ分子ポンプ排気による真空下（10^{-4}Pa）で FE 測定を行った。図16に電流と同時に観察して FE 像を示した。まず、FE 像が縞状になっていることが明瞭に観察され、この電子源が複数層のグラフェンシートから構成されており、電子顕微鏡の観察結果とも矛盾しないことが確認できた。一方、FE 電流は電圧印加初期では異常に少なく、電圧を上昇させるに伴って増大した。FE 電流の電圧依存性（ファウラー・ノルドハイムプロット）からいわゆるナノグラフェン先端の仕事関数が導き出せ、異常に小さな値（eV）となった。これらの振る舞いは、測定に用いた電子源が清浄でない半導体であることが主な理由と考えられる。ナノサイズのグラフェンは本来半導体であること、さらに、無電解メッキ中に酸化されたナノグラフェンが成長しているものと考えられる。

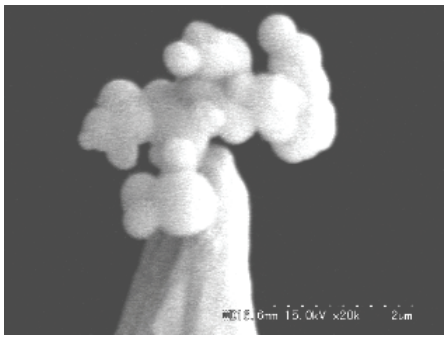


図15. タングステン探針の先端に固定したナノグラフェンコート Ni 粒子の SEM 像

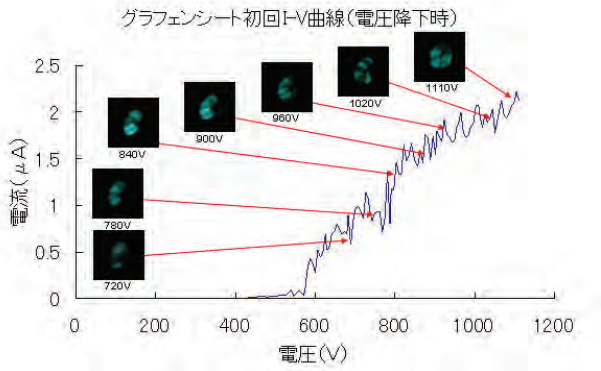


図16. FE 電流の印加電圧依存と各電圧下で観察した FE 像

(c-4)　ナノグラフェンシートの低電界電気測定

無電解 Ni メッキで作製したナノグラフェンの低電界電気測定には２種の方法で行った。その一つは、先に開発したナノマニピュレータ SEM 装置を用いて表面に付着したナノグラフェン Ni 粒子一個を産業技術総合研究所で開発したナノギャップ電極（図17）上に固定し、DC 電流を２端子で測定するものである。測定結果は図20に示したように電圧に対して非線形的であり、FE の結果と同じくナノグラフェンが半導体であること、電極とナノグラフェン・Ni 粒子の接触がトンネル的な接合になっていることを反映しているとみなせる。後者として STM の電流電圧特性の解析に用いられる手法に従って(dI/dV)/(I/V)を計算し、電圧に対してプロットすると V 字型になっており（図18）、グラフェンの典型的な状態密度関数と類似していることが分かった。

次に、ナノグラフェンを Ni 粒子から剥ぎ取り、分散液を作製し基板上に滴下しナノグラフェンシートを作製し、電気計測プローバーあるいは金属電極を配置することにより低電界電気測定（残念ながら２端子測定）を行った。ナノグラフェン分散液は、Ni 粒子を適当量をエタノール中に秤量し、超音波を１時間程度照射した後、10分間の遠心分離

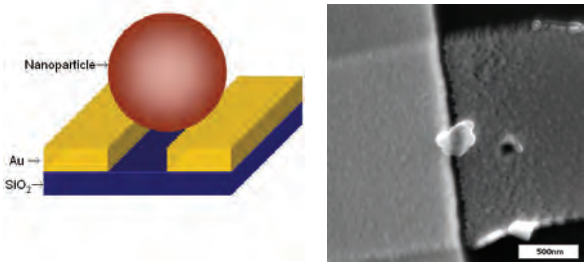


図17. ナノギャップ電極デバイスの模型図（左）と単一のナノグラフェン・Ni 粒子を配置した試料の SEM 像（右）

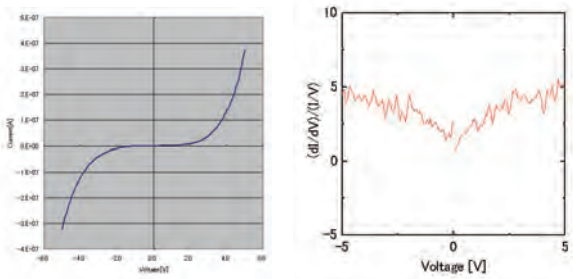


図18. 電流･電圧特性（左）と導出した状態密度（右）の電圧依存

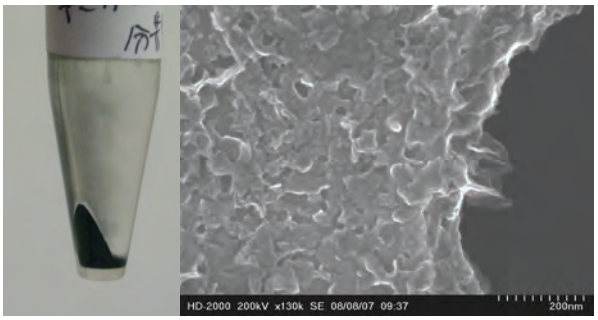


図 19. Ni 粒子から剥離したエタノール分散液（左）と基板上に滴下した試料の SEM 像（右）

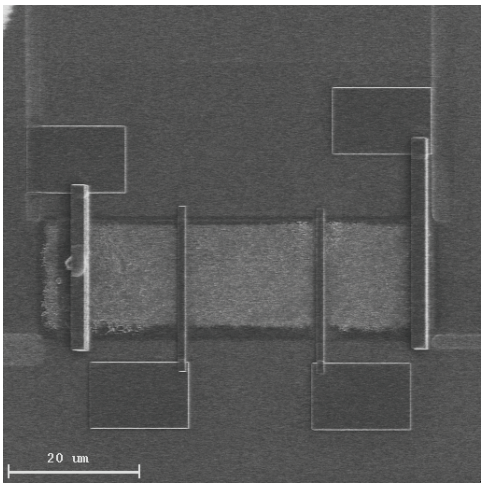


図20. SiO2基板上へ分散液滴下したナノグラフェンシートと FIB 加工で作製した電気測定用電極構造

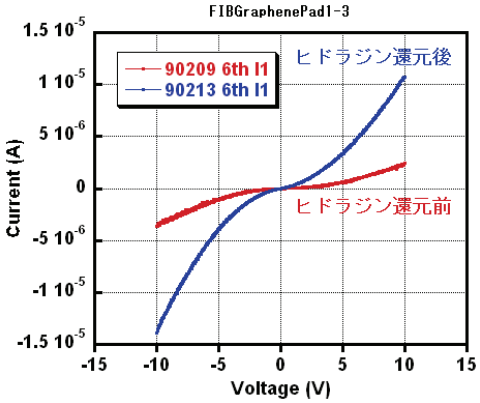


図21. 滴下・乾燥したナノグラフェンシートの電流電圧特性（ヒドラジン水和剤による還元前と後）

（重力加速約10,000 g）で分離し上澄液を採取した（図19）。この上澄液をマイカ基板上や SiO2基板上に数μℓ～数百μℓ滴下し、乾燥させた。表面の構造を AFM と SEM で観察し、充分な量のナノグラフェンシートが存在していることを確認した（図19）。電気測定結果のうちで FIB 加工により電極配置（図20）した SiO2基板上の2端子の結果を図23に示す。構造的には4端子構造を準備したが、測定上の問題で2端子計測しかできなかったが、安定して計測できた（プローバーを用いた計測結果は試料との接触のため不安定）。構造パラメータを考慮し、このナノグラフェンシートの比抵抗を求めると200Ω・cm 程度となり、比較的高純度の Si 半導体程度であった。一つにはナノグラフェンが参加されているためとみなし、この試料をヒドラジン水和剤で還元した（まだ、その最適化を行ってはいない）。その結果、電流特性は少し改善し（図21）、比抵抗が40Ω･cm 程度になった。これは、2端子測定のため電極との接触抵抗を含んでいるという点に注意を要する。このナノグラフェンシートを電磁遮蔽材や透明電極として用いるには充分な電気導電性とはいえないが、半導体的性質を利用したセンサーなどには用いることができる可能性がある。

見出した手法では50～95℃の低温で成長できる、任意の材料表面に成長できる、量産が可能である、などの特長があり、各種のデバイスプロセスとの整合性が優れている。低温で高品質の材料が量産・任意材料表面での成長ができるとともにグラフェンペーパーができれば、物性研究・応用研究が大きく進展すると期待できる。特に、Si や SiO_2 表面に成長できることは、高密度 LSI の横配線（富士通研究所が CREST で研究開発を開始）やセンサーデバイス開発などに大きな寄与ができる。

3．今後の研究の展望

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、CNT-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、「4研究拠点間アライアンスのもとポストシリコンの戦略的研究」の中では、低侵襲で高分解能の生体観察・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）菅洋志、大野 輝昭、田中 深幸、西岡 泰城、徳本洋志、清水哲夫:「小型走査電子顕微鏡用カーボンナノチューブ電子銃の安定性評価」、真空、日本真空協会、50(6)：448-451 (2007).

2）T. Okajima, M. Tanaka, S. Tsukiyama, T. Kadowaki, S. Yamamoto, M. Shimomura, and H. Tokumoto: Stress Relaxation Measurement of Fibrobalst Cells with Atomic Force Microscopy, Jpn. J. Appl. Phys., 46(6B), 5552-5555 (2007).

3）T. Okajima, X-M. Tao, H. Azehara, and H. Tokumoto: Force Spectroscopy on Single Polymer Incorporated into Polymer Gels, J. Nanoscience and Nanotechnology, 7, 790-795, (2007).

4）Y.Mizutani, M. Tsuchiya, S. Hiratsuka, K.Kawahara, H. Tokumoto, and T.Okajima: Elasticity of Living Cells on a Microarray during the Early Stages of Adhesion measured by Atomic Force Microscopy, Jpn. J. Appl. Phys., 47 (2008) 6177.

4.2　総説、解説、評論等

1）T. Okajima and H. Tokumoto：“原子間力顕微鏡による生細胞ナノレオロジー計測”, *Journal of the Society of Rheology*, 日本レオロジー学会, 36(2)：81-86 (2008)

2）岡嶋孝治、徳本洋志：「固液界面ナノ領域の力学」、ナノテクのための物理入門、共立出版：162-177 (2007)

4.6　特許（発明者、特許番号、特許名、出願年月日）

・国内特許

1）徳本洋志、國奥秀雄、徳井博樹、嶋村清隆、特願2007-233021、グラフェンシートの製造方法、2007年9月7日

2）菅洋志、清水哲夫、徳本洋志、特願2007-098930、電子ビームの形状測定に利用可能なナノワイヤ架橋デバイス、2007年4月4日

4.7　講演

a．招待講演

1）H. Tokumoto：“Graphene Sheets: Low Temperature Growth and their Characterization”, The 11th SANKEN International Sympojium 2007, 淡路夢舞台 (2008-04))

b．一般講演

i）学会

1）徳本洋志：「グラフェンは“面白い”・“役に立つ”---基礎物理から応用まで---：はじめに」、第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学船橋校舎 (2008-03)

2）徳本洋志、浮田桂子、國奥秀雄、徳井博樹、Lian Yongfu、嶋村清隆、秋田成司：「ナノグラフェンの低温（100℃以下）成長と構造解析」、第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学船橋校舎 (2008-03)

3）勝股宗弘、浮田桂子、徳本洋志、菅洋志、田中深幸、清水哲夫：「グラフェンシートからの電界放出」、第55回応用物理学関係連合講演、日本大学船橋校舎 (2008-03)

4）平塚伸一郎、水谷祐輔、土屋雅博、河原剛一、徳本洋志、岡嶋孝治：「AFM による生細胞の複素弾性率の解析」、第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学船橋校舎 (2008-03)

5）水谷祐輔、平塚伸一郎、土屋雅博、河原剛一、徳本洋志、岡嶋孝治：「AFM による多数細胞の力学計測：接着過程の細胞弾性率」、第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学船橋校舎 (2008-03)

6）井手康一朗、畔原宏明、徳本洋志：「多層カーボンナノチューブ探針を用いる分子間相互作用測定法の検討」、第55回応用物理学関係連合講演会、千葉 (2008-03)

7）徳本洋志、浮田桂子、勝股宗弘、國奥秀雄、徳井博樹、Kazaui Said、嶋村清隆：「グラフェンシートの低温成長プロセス」、第63回日本物理学会、近畿大学 (2008-03)

8）我妻邦浩、新倉謙一、神谷亮介、春名ゆかり、水谷祐輔、徳本洋志、河原剛一、岡嶋孝治：「蛍光相関分光法による生細胞膜分子の拡散過程の測定」、第63回日本物理学会、近畿大学 (2008-03)

9）M. Yusuke, T. Masahiro, S. Hiratsuka, K. Kawahara, H. Tokumoto and T. Okajima：“Mechanics of Living Cells at Early Stage of Adhesion Investigated with AFM”, the Biophysical Society 52nd Annual Meeting & 16th International Biophysics Congress, USA, USA (2008-02)

10）Y. Mizutani, M. Tsuchiya, S. Hiratsuka, K. Kawahara, H. Tokumoto and T. Okajima：“Force Measurements of Microarray Living Cells”, ICSPM15, 伊豆熱川 (2007-12)

11）T. Okajima, M. Tanaka, S. Tsukiyama, T. Kadowaki, S. Yamamoto, M. Shimomura and H. Tokumoto：“Stress Relaxation and Fluctuation of Living Cells Measured by Atomic Force Microscopy”, ICSPM15, 伊豆熱川 (2007-12)

12）K. Ukita, M. Katsumata, H. Tokumoto, H. Kunioku, H. Tokui and K. Shimamura：“Growth of Graphene Forest on Ni-nanoparticles”, ACSIN9, 東京大学駒場 (2007-11)

13）T. Okajima, M. Tanaka, S. Tsukiyama, S. Yamamoto, M. Shimomura and H. Tokumoto：“Analysis of Stress Re-

laxation Processes of Living Cells Measured by AFM", ACSIN9, 東京大学駒場 (2007-11)

14) H. Tokumoto, K. Ide, K. Ukita and H. Azehara : "Chemical Force AFM with CNT Tips", MNC2007, Kyoto International Convention Center (2007-11)

15) K. Ukita, M. Katsumata, H. Tokumoto, H. Kunioku, H. Tokui, K. Shimamura and S. Akita : "TEM and Raman Spectroscopy Study of Graphene Sheets", ALC07, Kanazawa (2007-10 ～ 2007-11)

16) T. Okajima, M. Tanaka, S. Tsukiyama, S. Yamamoto, M. Shimomura and H. Tokumoto : "Viscoelastic Measurements of Living Cells by AFM: Stress Relaxation and Force Hysteresis Analyses", ALC07, Kanazawa (2007-10 ～ 2007-11)

17) 浮田桂子、勝股宗弘、徳本洋志、國奥秀雄、徳井博樹、嶋村清隆、秋田成司：「グラフェンシートの電子顕微鏡・ラマン散乱評価」、日本物理学会第62回年次大会、北海道大学、札幌市 (2007-09)

18) 浮田桂子、勝股宗弘、徳本洋志、國奥秀雄、徳井博樹、嶋村清隆、秋田成司：「グラフェンシートの電子顕微鏡・ラマン散乱観察」、第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、札幌市 (2007-09)

19) 井手康一朗、畔原宏明、徳本洋志：「チオール化グアニン分子自己組織化膜の AFM/XPS 評価」、第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、札幌市 (2007-09)

20) 岡嶋孝治、田中賢、築山 周作、山本 貞明、下村 雅嗣、徳本洋志：「AFM による生細胞の応力緩和挙動とその解析」、第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、札幌市 (2007-09)

21) 畔原宏明、井手康一朗、徳本洋志：「微小孔保持マイクロ人工膜の形成と剛性測定」、第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学 (2007-09)

22) 藤枝 正、岡井 誠、徳本洋志：「CNT における電界放出電子エネルギー分布幅の先端曲率半径依存性」、第68回応用物理学会、北海道工業大学 (2007-09)

23) 岡嶋孝治、田中賢、築山周作、門脇翼、山本貞明、下村政嗣、徳本洋志：「原子間力顕微鏡による細胞表面の局所緩和過程の測定」、第56回高分子学会年次大会、京都 (2007-05)

ⅱ）研究会・シンポジウム・ワークショップ

・国際シンポジウム

1）K. Ide, H. Azehara and H. Tokumoto : "Adhesion Force Analysis of Interactions between Guanine and Cytosine Molecules by Atomic Force Microscopy in Force Curve Mapping Mode", The 9th RIES-Hokudai International Symposium on "sou", Sapporo (2008-01)

2）Y. Mizutani, M. Tsuchiya, S. Hiratsuka, K. Kawahara, H. Tokumoto and T. Okajima : "Force Measurements of Microarray Living Cells with Atomic Force Microscopy", 2007GCOE－Sympojium, 北海道大学術交流会館 (2008-01)

3）K. Ide, H. Azehara and H. Tokumoto : "AFM and XPS Evaluation of Guanine Thiol Self-assembled Monolayers", The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Shizuoka (2007-12)

4）H. Azehara, K. Ide and H. Tokumoto : "Characterization of Micropore-Spanning Artificial Membranes Using AFM", The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Shizuoka (2007-12)

5）H. Azehara, K. Ide and H. Tokumoto : "A Novel Preparation Method of Micropore-Spanning Artificial Membranes for Use of AFM", ATI International forum "Future of SPM in Life Sciences" - from molecules to cells, from statics to dynamics -, Chiba (2007-10)

6）K. Ide, H. Azehara and H. Tokumoto : "AFM and XPS evaluation of guanine thiol self-assembled monolayers", ATI International forum "Future of SPM in Life Sciences" - from molecules to cells, from statics to dynamics -, Chiba (2007-10)

7）T. Okajima, M. Tanaka, S. Tsukiyama, S. Yamamoto, M. Shimomura and H. Tokumoto : "Stress Relaxation of Living Cells Measured by AFM", ATI International forum "Future of SPM in Life Sciences" - from molecules to cells, from statics to dynamics -, Chiba (2007-10)

・一般シンポジウム

1）畔原宏明、井手康一朗、徳本洋志：「化学力顕微鏡法における多層カーボンナノチューブ探針の有用性」、阪大産研・東北大多元研・北大電子研・東工大資源研「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」平成19年度（2007年度）成果報告会、東北大学 片平さくらホール (2007-12)

2）徳本洋志、浮田桂子、國奥秀雄、徳井博樹、相馬 道明、嶋村清隆：「炭素原子一層のグラフェンシート：100℃以下で成長!?」、阪大産研・東北大多元研・北大電子研・東工大資源研「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」成果報告会、東北大学 片平さくらホール (2007-12)

3）畔原宏明、岡嶋孝治、井手康一朗、徳本洋志：「化学修飾カーボンナノチューブ探針による力計測」、阪大産研・東北大多元研・北大電子研・東工大資源研「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」発足記念シンポジウム、学士会館本館 (2007-06)

4.9 共同研究

c．民間等との共同研究（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、研究内容）

1）徳本洋志、寿産業、札幌エレクトロプレイティング、タイヤ由来炭化物の高機能化、2005年度～2008年度、タイヤ由来の炭化物からグラフェンシートを製造する。

2）徳本洋志、産業技術総合研究所、ナノグラフェンシー

トの電気的評価、2007年～2008年度、北大で作製したナノグラフェンシートの電気的評価を産業技術総合研究所で行う。

4.10　予算獲得状況

a．科学研究費補助金（研究代表者、分類名、研究課題、期間）

3）徳本洋志、基盤研究 B 一般 (2)、細胞内部探索用カーボンナノチューブ AFM 技術の研究、2004～2007年度

d．奨学寄付金（研究担当者、機関名、研究課題、研究期間、総経費、研究内容）

1）徳本洋志、寿産業、廃タイヤ由来ゴムの高機能化に関する研究、100万円、2005年度～2008年度、タイヤ由来の炭化物からグラフェンシートを製造とナノスケール評価

f．その他（研究担当者、機関名、研究題目、研究期間、総経費、研究内容）

1）荻野千秋、畔原宏明、梅津光央、折笠広典（産業技術研究助成事業、NEDO）：高分解能生体分子プローブカンチレバーの創製による生体認識イメージング技術の開発、2006～2010年度、6,000千円、核酸、タンパク質等の分子間相互作用解析による固定化分子の高精度分析のため、原子間力顕微鏡の触診デバイスであるカンチレバー先端へのカーボンナノチューブ(CNT)修飾、更に、CNT 先端への生体分子修飾を行い、新規な“分子認識能とイメージング機能”を備えたバイオセンシングシステム開発を行う。これにより、原子レベルでの分解能を有し、無機材料の表面微細構造解析ツールとして定評ある走査型プローブ顕微鏡技術をバイオ分野へ展開し､バイオチップ等の評価技術確立を目指す。

4.12　社会教育活動

a．公的機関の委員

1）徳本洋志：「ナノリスクに関するネットパネル」専門家パネリスト（2007年12月28日～2008年4月30日）

2）徳本洋志：シーズ発掘試験査読評価委員（2007年4月01日～2009年3月31日）

3）徳本洋志：ATI バイオＳＰＭ研究会委員（2006年4月01日～2009年3月31日）

4）畔原宏明：新世代研究所ナノカーボン研究会委員（2006年4月1日～2009年3月31日）

5）徳本洋志：日本学術会議 産学協力研究委員会 未踏・ナノデバイステクノロジー第151委員会 企画委員（2004年1月1日～現在）

6）徳本洋志：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 専門委員 （2002年11月1日～現在）

7）徳本洋志：日本学術会議 産学協力研究委員会 マイクロビームアナリシス第141委員会 委員（2000年4月1日～現在）

8）徳本洋志：日本学術会議 産学協力研究委員会 ナノプローブテクノロジー第167委員会 委員（2000年4月1日～現在）

b．国内外の学会の役職

1）徳本洋志：日本真空協会　個人理事（2005年4月1日～2009年3月31日）

2）徳本洋志：応用物理学会　薄膜・表面物理分科会　幹事（2004年4月1日～2010年3月31日）

3）徳本洋志：STM05国際会議組織委員長（2003年7月1日～現在）

4）徳本洋志：IUVSTA（International Union for Vacuum Science, Technique and Applications）のナノ分科の日本代表委員（2003年4月1日～2008年3月）

5）徳本洋志：STM 国際会議国際評議員、国際プログラム委員（2002年4月1日～現在）

c．併任・兼業

1）徳本洋志：ナノテクノロジー影響の多領域専門家パネル会議委員（2006年9月1日～2008年3月31日）

d．その他

1）徳本洋志：応用物理学会論文賞委員（2005年4月1日～2008年3月31日）

2）徳本洋志：財団法人新世代研究所　評議員（2003年4月1日～現在）

3）徳本洋志：第27回サイエンスカフェ札幌・講師 （2007年12月15日）

e．新聞・テレビ等の報道・その他

1）徳本洋志：Tech-On 2008年3月28日「「グラフェンと太陽電池の講演に熱気、教室から人あふれる」シンポジウムでは、北海道大学電子科学研究所ナノテクノロジー研究センター教授の徳本洋志氏が、Manchester 大のセロテープの件や発見1年後には既に量子ホール効果が確認されたこと、既に海外の研究会ではカーボンナノチューブについての研究発表と並ぶくらいの発表件数が集まる状況になっていることなどを紹介した。」

g．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）情報科学研究科、バイオナノ工学特論、徳本洋志、2007年10月1日～2008年3月31日

2）情報科学研究科、ナノ工学概論、徳本洋志、2007年10月1日～2008年3月31日

3）全学共通、光･バイオ･分子で拓くナノテクノロジー、徳本洋志、2007年7月14日

4）情報科学研究科、生命人間情報科学専攻特別演習、畔原宏明、2007年4月1日～2008年3月31日

j．修士学位及び博士学位の取得状況

・修士課程（2名）

勝股宗弘、井手康一朗

・修士論文

1）井手康一朗：『カーボンナノチューブ探針 AFM を用いた分子間相互作用測定法の研究』

2）勝股宗弘:『グラフェンシートからの電界放出に関する研究』

Ⅱ．予　　算

Ⅱ－1．研究成果公表に関する各種の統計表

1．学術論文

部門等 ＼ 年		平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
電子材料物性部門	欧　文	32（32）	40（36）	42（27）	30（25）
	邦　文	3（3）	0	1	0
電子機能素子部門	欧　文	23（23）	24（24）	28（28）	19（19）
	邦　文	2	0	0	1（1）
電子計測制御部門	欧　文	24（24）	22（20）	12（12）	23（21）
	邦　文	4	4（2）	4（4）	1（1）
電子情報処理部門※	欧　文	42（39）	37（37）	42（42）	42（42）
	邦　文	2	1（1）	1（1）	2（2）
ナノテクノロジー研究センター	欧　文	30（30）	35（35）	30（28）	14（14）
	邦　文	2	0	6	3（1）
計	欧　文	143（140）	154（148）	152（135）	116（109）
	邦　文	10（3）	5（3）	12（5）	7（5）

（　）内の数はレフェリー付き。
※客員研究分野は除外した。

2．総覧、解説、評論等及び著書数

部門等 ＼ 年		平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
電子材料物性部門	総説等	2（1）	3	7	3
	著　書	1	2（1）	1	1
電子機能素子部門	総説等	11	5	8	3
	著　書	6	3	2	6
電子計測制御部門	総説等	3	4	4	13（1）
	著　書	0	3（1）	2（1）	4
電子情報処理部門※	総説等	16（1）	19	11	14
	著　書	2	4	7	3
ナノテクノロジー研究センター	総説等	9	13（2）	20	5（1）
	著　書	14（3）	10	5（2）	8
計	総説等	41（2）	44（2）	48	36（2）
	著　書	21（3）	22（2）	17（3）	19

（　）内の数は欧文
※客員研究分野は除外した。
※共著に関しては、出版物の数で表示（出版物の数×研究者ではない）。したがって「合計」が表から算出したものと一致しない場合あり。
※年（年度）をまたがっている場合、それぞれの年（年度）でカウントしている。

３．国際学会・国内学会発表件数

部門等	年	平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
電子材料物性部門	国際学会	23（3）	35（5）	24（8）	32（9）
	国内学会	59	65（4）	50（1）	60（5）
電子機能素子部門	国際学会	21（2）	33（7）	28（5）	18（3）
	国内学会	49（4）	50（12）	34（3）	40（4）
電子計測制御部門	国際学会	24（3）	36（6）	19（6）	24（6）
	国内学会	43（4）	34（7）	37（6）	54（10）
電子情報処理部門□	国際学会	15（3）	27（7）	21（6）	17（7）
	国内学会	23（2）	57（6）	30（4）	30（8）
ナノテクノロジー研究センター	国際学会	24（3）	49（5）	35（2）	13（3）
	国内学会	76（2）	61（6）	83（5）	30（1）
計	国際学会	98（12）	173（30）	123（27）	92（24）
	国内学会	220（11）	249（36）	225（19）	188（25）

国際学会・国内学会の（　）内の数は招待講演数
※客員研究分野は除外した（研究所全体の統計の場合）。
※共著に関しては、講演数で表示（講演数×研究者ではない）。したがって「合計」が表から算出したものと一致しない場合あり。
※年（年度）をまたがっている場合、それぞれの年（年度）でカウントしている。

Ⅱ－2. 予算

Ⅱ－２－１）全体の予算

（単位：千円）

年　度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度
業　務　費	661,294	197,656	173,648	205,843
科学研究費補助金	230,651(48)	363,000(62)	292,610(62)	279,947(59)
その他の補助金		4,528 (3)	15,400 (2)	4,357(4)
寄　附　金	12,864(13)	17,700(11)	38,346(27)	42,856(16)
受託事業等経費	130,280(39)	223,768(46)	248,840(44)	226,609(32)
(受託研究費)	87,131(22)	140,868(19)	145,018(24)	184,803(20)
(共同研究費)	43,149(17)	82,900(27)	103,822(20)	41,806(12)
合　計	1,035,089	806,652	768,844(135)	759,612(111)

（　）内の数は受入件数

Ⅱ－２－２）外部からの研究費受入状況

部門別の受入状況

（単位：千円）

部門等	研究費	平成18年度	平成19年度
電子材料物性部門	科学研究費補助金	82,500(14)	87,560(16)
	その他の補助金		1,200(1)
	寄附金Ⅰ	3,600 (3)	1,999(2)
	寄附金Ⅱ	1,500 (2)	8,500(1)
	受託事業等経費	73,139 (7)	61,661(7)
	(受託研究費)	71,209 (6)	56,671(5)
	(共同研究費)	1,930 (1)	4,990(2)
	小計	160,739(26)	160,920(27)
電子機能素子部門	科学研究費補助金	38,600(11)	6,804(5)
	その他の補助金		
	寄附金Ⅰ	3,000 (2)	1,500(2)
	寄附金Ⅱ	2,630 (5)	10,337(1)
	受託事業等経費	53,978 (5)	9,769(3)
	(受託研究費)	1,639 (2)	1,539(1)
	(共同研究費)	52,339 (3)	8,230(2)
	小計	98,208(23)	28,410(11)
電子計測制御部門	科学研究費補助金	63,500(12)	55,154(14)
	その他の補助金	1,400 (1)	2,197(2)
	寄附金Ⅰ	1,999 (2)	
	寄附金Ⅱ	117 (1)	943(3)
	受託事業等経費	40,173(12)	30,232(7)
	(受託研究費)	29,243 (8)	19,182(4)
	(共同研究費)	10,930 (4)	11,050(3)
	小計	107,189(28)	88,526(26)

電子情報処理部門	科学研究費補助金	53,810(14)	46,700(10)
	その他の補助金		
	寄附金Ⅰ		1,300(2)
	寄附金Ⅱ	1,600 (3)	1,280(2)
	受託事業等経費	45,113(10)	8,225(5)
	(受託研究費)	23,703 (4)	6,366(2)
	(共同研究費)	21,410 (6)	1,859(3)
	小計	100,523(27)	57,505(19)
寄附研究部門 (ニコンバイオイメージングセンター)	科学研究費補助金	1,400 (1)	1,400(1)
	その他の補助金		
	寄附金Ⅰ	3,400 (2)	
	寄附金Ⅱ	12,300 (1)	14,500(2)
	受託事業等経費	1,500 (1)	3,000(1)
	(受託研究費)	1,500 (1)	3,000(1)
	(共同研究費)		
	小計	18,600 (5)	18,900(4)
附属ナノテクノロジー研究センター	科学研究費補助金	52,800(10)	82,329(13)
	その他の補助金	14,000 (1)	960(1)
	寄附金Ⅰ		
	寄附金Ⅱ	8,200 (6)	2,500(1)
	受託事業等経費	34,937 (9)	113,722(9)
	(受託研究費)	17,724 (3)	98,045(7)
	(共同研究費)	17,213 (6)	15,677(2)
	小計	109,937(26)	199,511(24)

(　)内の数は受入件数
寄附金Ⅰ　申請による財団等からの研究助成金　　寄附金Ⅱ　Ⅰ以外のもの

Ⅱ－3. 外国人研究者の受入状況

a. 年度別統計表

部門等＼年	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度
電子材料物性部門	2	0	1	7
電子機能素子部門	4	4	4	2
電子計測制御部門	10	9	24	7
電子情報処理部門	9	14	4	8
ナノテクノロジー研究センター	1	10	1	1
計	26	37	34	25

Ⅱ－4. 修士学位及び博士学位の取得状況

Ⅱ－４－１）修士学位

平成19年度

・理学院

岸本 匡広：複雑系時系列解析によるゼブラフィッシュ Branchydanio rerio の学習評価法
岩澤 和子：CMME モデルによる集団運動のパターン形成について
清水 明士：知覚情報の分離・統合の神経回路モデル
小野 佑輔：『フラクタル立体の合成およびキャラクタリゼーションに関する研究』
南　 貴之：『ワックス表面における超撥水フラクタル構造の形成メカニズム』
西尾　 崇：ナノ微粒子を用いた細胞ストレス下におけるタンパク質糖鎖認識に関する研究
田島 孝訓：自己組織化析出法によるナノ構造体高分子微粒子及び機能性高分子微粒子の作製
平井 悠司：自己組織化による金属微細構造体の作製とその応用
小野 明人：「ポリエチレンナフタレート有機膜上の Ni 及び Au 蒸着薄膜の作製と評価」
高井 北斗：勾配が定義できない小数情報源分布における探索アルゴリズム
田中 一慶：空間非一様性を含む３種 Gray-Scott モデルのスポット解のふるまい

・医学研究科

伊藤 菜穂美：真性粘菌 Physarum polycephalum 変形体の原形質液滴における収縮弛緩リズムの時空間秩序形成

・情報科学研究科

井手 康一朗：『カーボンナノチューブ探針ＡＦＭを用いた分子間相互作用測定法の研究』
勝股 宗弘：『グラフェンシートからの電界放出に関する研究』
浜端 洋右：ランダム構造内導波路を用いた局在モード制御に関する研究

Ⅱ－４－２）博士学位

平成19年度

・理学院

樋口 剛志：Fabrication of nanostructured polymer particles by self-organization(自己組織化による微細構造を有する高分子微粒子の作製)
治田　 修：Organization of Azobenzene Monolar besed on DNA-mimetics at the Air-Water Interface toward the Fabrication of Functional Thin Films (気液界面を反応場とする DNA-mimetics を利用したアゾベンゼン単分子膜の組織化と機能性薄膜の作製)
Rahaman Dalilur Md：Study of Ultra-high Cleanliness Clean-Unit System Platform (CUSP) for the Cross-Disciplinary Research
陳　 新江：‘Self-Assembly, Polymerization Behaviors and Applications to Functional Polymer Gels of an Amphiphilic Monomer in Lamellar Liquid Crystalline Phase’
松本 和宏：Controlling Engine System: A Low-Dimensional Dynamics in a Spark Ignition Engine of a Motorcycle
大杉　 友：Study on Molecular Dynamics in Cell Membrane by using Total Internal Reflection Fluorescence Correlation Spectroscopy
伊藤 賢太郎：Intermittent switching for three repulsively coupled oscillators

Ⅱ－４－３）大学院生在籍数

研究科名＼年	修士		博士	
	18年	19年	18年	19年
理学院	21	28	26	28
工学研究科	7	5	10	6
医学研究科	3	2	0	0
環境科学院	12	6	9	5
情報科学研究科	20	22	4	6
理学研究科	12	0	3	0
計	75	63	52	45

Ⅲ．研究支援体制

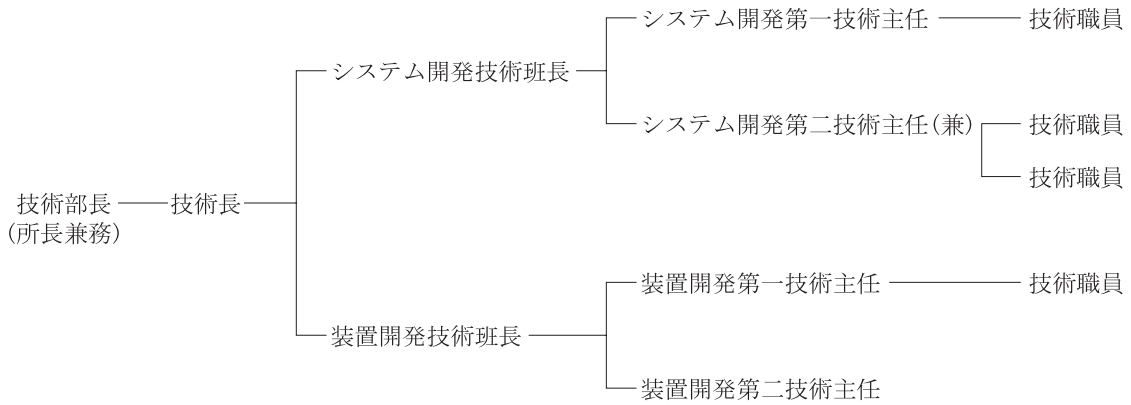
Ⅲ－1．技術部

本研究所の研究を技術面からの支援組織として、システム開発班と装置開発班よりなる「技術部」を置いている。

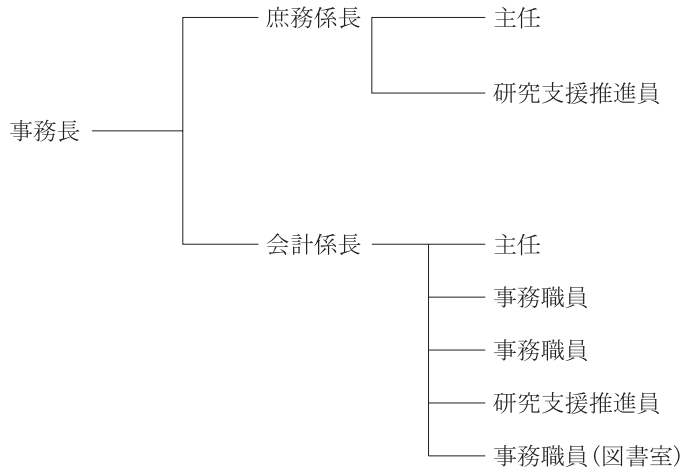
システム開発班は、研究所のホームページと研究成果データベースなどの情報管理運営、研究用電子回路の設計・製作、実験装置計測用ソフトウエア開発など、専門技術による研究分野からの支援要請に対応している。

さらに、附属ナノテクノロジー研究センターにおいては、クリーンルーム、X線回折装置などのオープンファシリティーへの保守・管理、特殊ナノカーボチューブ製作などの特殊技術支援を行っている。この他に、電子科学研究所の大型共通機器・設備の操作・管理、液化窒素貯槽装置とヘリウム回収装置の保守管理および安全教育講習会の実施、学術講演会等の運営補助などの研究所全体に関わる支援を行っている。

装置開発技術班は、研究分野により要請される特殊実験機器の開発・製作にあたっている。機械工作室では、ステンレスの精密切削とアルゴン溶接、大型旋盤・縦フライス盤などの工作機械を用いて、多くの実験装置の開発・製作を行っている。近年は、アルミ溶接技術による特殊要請にも対応できる体制を備えている。ガラス工作室では、光学レンズ・プリズム等の加工と研磨、ステンレス製計測装置へのコバールを介しての硝子の溶着の技術・その他大型デュワー瓶、各種石英セルの製作を行っている。また、同班は所外からの技術相談、装置製作などの技術支援要請にも応えている。



Ⅲ－2．事務部



Ⅲ－3. 学術情報

a．図書・学術雑誌

単行本の大部分は、各研究分野で購入し管理されている。図書室では参考図書を中心に購入している。学術雑誌は、共通分野で利用され研究所として必要と認められたものは、研究所全体で購入し図書室で管理されている。この他、各分野の必要性から、各分野で購入・管理されている雑誌もある。また、研究分野が理学・工学・医学など広範囲なため、大学内において研究所のみ購入している雑誌も数種あり、他学部からの利用者も多い。

平成14年度より電子ジャーナルが本格的に導入されるにあたり、研究所内の雑誌の重要度調査を行い、購入洋雑誌の見直しをした結果、購入洋雑誌の種類が減少した。

電子ジャーナルの普及により、学外への文献複写の依頼・受付件数共に減少している。

１．蔵書冊数

年　度	平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
和　書	5,361	5,409	5,415	5,806
洋　書	20,525	20,751	20,915	20,983
計	25,886	26,160	26,330	26,789

２．所蔵雑誌種類数

年　度	平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
和雑誌	366	368	369	121
洋雑誌	455	454	454	390
計	821	822	823	511

３．購入外国語雑誌受入種類数

年　度	平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
和雑誌	45	42	38	34
洋雑誌	36	34	30	29
計	81	76	68	63

４．学外文献複写数

年　度	平成16年	平成17年	平成18年	平成19年
依　頼	166	112	64	65
受　付	418	237	175	136

b．学術情報システム

図書室には附属図書館と結んだ３台の業務用パソコンと LAN（HINES）に接続しているパソコンが４台ある。図書館業務用の２台は、図書の受入発注、目録作成、雑誌受入等の日常業務用として、他の１台は北大蔵書検索システムを提供する閲覧用として利用されている。また、業務用パソコンは国立情報学研究所とオンラインで接続しており、文献複写申込、現物貸借（ILL システム）等にも利用されている。

閲覧室の隣には情報検索室が設けられ、閲覧用業務パソコンと検索システム用パソコン２台が利用者用として提供されていて、誰もが自由に必要な情報を得ることができる。

プリンターも１台設置されているので、入手した情報のプリントアウトも自由にできる。

平成14年度からは電子ジャーナルが本格的に導入され、学内の利用に限定されるが、15000タイトルを超える電子ジャーナルの利用が可能で、フルテキストを購読できる。

また、パソコンからは HINES を通して附属図書館の検索システムを利用できる。以前は CD-ROM マルチ検索システムであったが、現在はオンラインでの学術文献データベース検索システムが利用できる。利用できるデータベースの種類は豊富で、「雑誌記事索引　NDL-OPAC、Web of Science、Current Contents」のような引用文献、目次速報データベースから「SciFinder Scholar、MEDLINE、INSPEC」のような抄録データベース、「LexisNexis Academic」のような新聞記事のデータベース、学位論文データベース、辞典類など58種類にのぼる。また、インターネットを利用して国内外の大学図書館等の情報を得ることもできる。

他に有料のオンラインによる情報検索としては、国立情報学研究所の NACSIS-IR、科学技術振興事業団の JOIS などのシステム検索が利用可能であり、研究者の研究活動を支援している。

平成13年よりカードロックシステムを利用して、研究所内の教職員院生は24時間図書室の利用が可能になり、図書室の利用がしやすくなった。

Ⅳ．資　　料

Ⅳ－1．沿革

超短波研究所

昭和16．1　超短波研究室が設置される

18．1　超短波研究所に昇格

第二部門、第四部門、第六部門、第七部門開設

18．3　第三部門開設

19．1　第一部門、第五部門開設

20．1　第八部門開設

応用電気研究所

21．3　応用電気研究所と改称する

部門構成：電気第一部門、電気第二部門、物理第一部門、物理第二部門、化学部門、医学及び生理第一部門、医学及び生理第二部門、数学部門

24．5　北海道大学附置研究所となる

36．4　メディカルエレクトロニクス部門新設

37．4　電子機器分析部門新設

38．4　メディカルトランスデューサ部門新設

39．2　研究部門は一部名称変更等により次のとおりとなる(昭和38年４月１日適用)

電子回路部門、電波応用部門、物理部門、化学部門、生理部門、生体物理部門、応用数学部門、メディカルエレクトロニクス部門、電子機器分析部門、メディカルトランスデューサ部門

39．4　メディカルテレメーター部門新設

42．6　強誘電体部門新設

46．4　生体制御部門新設

48．4　附属電子計測開発施設新設

50．4　光計測部門新設(10年時限)

53．4　感覚情報工学部門新設

60．3　光計測部門廃止(時限到来)

60．4　光システム工学部門新設(10年時限)

電子科学研究所

平成４．4　研究所改組により電子科学研究所となる

14．4　附属電子計測開発施設を附属ナノテクノロジー研究センターに改組転換

15．5　電子情報処理部門感覚情報研究分野を廃止

17．4　電子計測制御部門適応制御研究分野を廃止

電子計測制御部門ナノシステム生理学研究分野を新設

17．10　電子材料物性部門光材料研究分野をナノ光高機能材料研究分野に名称変更

電子情報処理部門信号処理研究分野を極限フォトンプロセス研究分野に名称変更

電子情報処理部門計算論的生命科学研究分野を新設

寄附研究部門「ニコンバイオイメージングセンター研究部門」を新設（開設期間3年）

英国ニューカッスル大学ナノスケール科学技術研究所との学術交流協定締結

19．10　電子材料物性研究部門相転移物性研究分野を量子情報フォトニクス研究分野に名称変更

電子機能素子研究部門超分子分光研究分野を廃止

電子計測制御研究部門自律調節研究分野を分子生命数理研究分野に名称変更

20．1　バングラデシュダッカ大学物理化学生物薬学先端科学研究センターとの学術交流協定締結

20．1　台湾師範大学光電科学技術研究所との学術交流協定締結

［歴代所長］

超短波研究室	昭和16年２月20日～昭和18年１月31日	蓑島　　高
超短波研究所	昭和18年２月１日～昭和21年３月31日	簑島　　高
応用電気研究所	昭和21年４月１日～昭和21年９月10日	簑島　　高
	昭和21年９月11日～昭和35年７月31日	淺見　義弘
	昭和35年８月１日～昭和38年７月31日	東　　健一
	昭和38年８月１日～昭和45年３月31日	松本　秋男
	昭和45年４月１日～昭和48年３月31日	望月　政司
	昭和48年４月１日～昭和51年３月31日	馬場　宏明
	昭和51年４月１日～昭和54年３月31日	吉本　千禎
	昭和54年４月１日～昭和57年３月31日	馬場　宏明
	昭和57年４月１日～昭和60年３月31日	山崎　勇夫
	昭和60年４月１日～昭和63年３月31日	達崎　　達
	昭和63年４月１日～平成４年４月９日	安藤　　毅
電子科学研究所	平成４年４月10日～平成６年３月31日	安藤　　毅
	平成６年４月１日～平成９年３月31日	朝倉　利光
	平成９年４月１日～平成13年３月31日	井上　久遠
	平成13年４月１日～平成15年３月31日	下澤　楯夫
	平成15年４月１日～平成15年９月30日	八木　駿郎
	平成15年10月１日～平成17年９月30日	西浦　廉政
	平成17年10月１日～現在	笹木　敬司

〔名誉教授〕

昭和32年４月	（故）	簑島　　高
昭和37年４月	（故）	淺見　義弘
昭和43年４月	（故）	東　　健一
昭和45年４月	（故）	松本　秋男
昭和55年４月	（故）	吉本　千禎
昭和57年４月	（故）	横澤彌三郎
昭和62年４月	（故）	羽鳥　孝三
		馬場　宏明
		松本　伍良
昭和63年４月		達崎　　達
		山崎　勇夫
平成７年４月		安藤　　毅
平成９年４月		朝倉　利光
		小山　富康
平成13年４月		井上　久遠
		永井　信夫
平成18年４月		八木　駿郎
平成19年４月		狩野　　猛
		下澤　楯夫
		下村　政嗣
		伊福部　達

Ⅳ－2. 建物

本研究所は、当初から現在地（土地　11,723㎡）にあり、この間研究棟は昭和38年度、39年度、47年度、54年度にそれぞれ新増築され、管理棟は昭和40年度に新築された。建物は、大きく3棟に分かれており、それぞれ渡り廊下で結ばれている。平成15年度には創成科学研究棟新築（北21西10）に伴い、ナノテクノロジー研究センター及び関連研究分野が移転した。

建物名称	構造	建面積 ㎡	延面積 ㎡	建築年度
研究棟	鉄筋コンクリート造５階建	1,677	8,477	38、39、47、54年度
管理棟	〃　２階建	533	1,260	40年度
井戸上屋他	〃　平屋建	79	79	40、58年度
自動車車庫	軽量鉄骨造平屋建	39	39	41年度
自転車置場	〃	34	34	59、60、61年度
ナノテクノロジー研究センター	鉄筋コンクリート造５階建	——	4,166	平成15年度
計		2,362	14,055	

Ⅳ－3. 現員（平成19年度）

（７月１日現在）

職名	人数
教授	15（3）
准教授	11
講師	1
助教	16
特任准教授	2
特任助教	1
教員小計	46（3）
事務系職員	18
合計	64（3）

（　）内の数字は客員で外数

Ⅳ－4. 教員の異動状況（平成19年度）

○ 転入状況

ナノテク支援室	特任准教授	畑中　耕治	19. 5.16	東北大学大学院理学研究科助教
電子材料物性部門	助　教	岡本　　亮	19. 8. 1	科学技術振興機構研究員
電子計測制御部門	教　授	小松﨑民樹	19.10. 1	神戸大学大学院理学研究科准教授
電子材料物性部門	助　教	笹倉　弘理	19.11. 1	科学技術振興機構研究員
電子計測制御部門	准教授	李　　振風	20. 3. 1	北海道大学電子科学研究所博士研究員

○ 転出状況

ナノテクノロジー研究センター	准教授	岡嶋　孝治	19. 4. 1	大学院情報科学研究科 生命人間情報科学専攻准教授(19. 4. 1)
電子機能素子部門	准教授	金城　政孝	19. 6. 1	大学院先端生命科学研究院(19. 6. 1)
ナノテクノロジー研究センター	助　教	松尾　　剛	19. 9.30	慶應義塾大学先端生命科学研究所講師 (19.10. 1)
電子機能素子部門	助　教	神　　隆	19.12.15	大阪大学免疫学フロンティア研究センター (19.12.16)
電子計測制御部門	助　教	GOTO DEREK	19.12.15	北海道大学創成科学共同研究機構助教 (19.12.16)
ナノテクノロジー研究センター	教　授	辻井　　薫	20. 3.31	定年退職
ナノテク支援室	特任准教授	畑中　耕治	20. 3.31	東京大学大学院理学系研究科准教授 (20. 4. 1)
ナノテクノロジー研究センター	助　教	上野　貢生	20. 3.31	北海道大学電子科学研究所特任准教授 (20. 4. 1)

Ⅳ－5. 構成員（平成19年度）

所　長　　笹　木　敬　司

電子材料物性研究部門

光電子物性研究分野

教　授　　太　田　信　廣
准教授　　中　林　孝　和
助　教　　飯　森　俊　文

量子情報フォトニクス研究分野

教　授　　竹　内　繁　樹
准教授　　辻　見　裕　史
助　教　　岡　本　　亮

有機電子材料研究分野

教　授　　中　村　貴　義
准教授　　芥　川　智　行
助　教　　野　呂　真一郎

ナノ光高機能材料研究分野

教　授　　末　宗　幾　夫
准教授　　熊　野　英　和
助　教　　笹　倉　弘　理

電子機能素子研究部門

量子機能素子研究分野

教　授　　石　橋　　晃
講　師　　近　藤　憲　治
助　教　　海　住　英　生

分子認識素子研究分野

教　授　　居　城　邦　治
准教授　　新　倉　謙　一
助　教　　松　尾　保　孝

細胞機能素子研究分野

教　授　　上　田　哲　男
准教授　　中　垣　俊　之
助　教　　髙　木　清　二

電子計測制御研究部門

光システム計測研究分野

教　授　　笹　木　敬　司
助　教　　藤　原　英　樹

量子計測研究分野

教　授　　栗　城　眞　也
准教授　　小　山　幸　子

分子生命数理研究分野

教　授　　小松﨑　民　樹
准教授　　李　　振　風
助　教　　西　村　吾　朗

ナノシステム生理学研究分野

教　授　　永　井　健　治
准教授　　谷　　知　己

電子情報処理研究部門

情報数理研究分野

教　授　　西　浦　廉　政
助　教　　柳　田　達　雄
助　教　　飯　間　　信

神経情報研究分野

准教授　　青　沼　仁　志
助　教　　西　野　浩　史

極限フォトンプロセス研究分野

教　授　　三　澤　弘　明
准教授　　JUODKAZIS SAULIUS
助　教　　上　野　貢　生

計算論的生命科学研究分野

教　授　　津　田　一　郎
准教授　　佐　藤　　譲

並列分散処理研究分野（客員）

教　授　　中　西　八　郎
（東北大学多元物質科学研究所）
教　授　　小　中　元　秀
（科学技術振興機構）
教　授　　瀬　川　尚　彦
（電通北海道）

寄附研究部門（ニコンバイオイメージングセンター）

寄附研究部門教員(兼)	上田哲男
〃	永井健治
特任准教授	堀川一樹
特任助教	齊藤健太

ナノテクノロジー研究センター

センター長（兼）	三澤弘明

ナノデバイス研究分野

教授	辻井薫
助教	眞山博幸

ナノ理論研究分野

教授	徳本洋志
助教	畔原宏明

ナノテク支援室

特任准教授	畑中耕治
非常勤研究員	高島秀聡
研究支援推進員	森恵美子
〃	内田有沙
〃	木村美香
学術研究員	星山満雄
〃	李哲煜
〃	八木駿郎
〃	浮田桂子
〃	髙橋平七郎
〃	望月進
〃	小山正孝
〃	笠沼由香
博士研究員	伊藤寿之
〃	綱島亮
〃	井筒康洋
〃	塚本里加子
〃	大塚明香
〃	寺本央
〃	馬場昭典
〃	一宮尚志
〃	佐倉緑
〃	村澤尚樹
〃	MIZEIKIS VYGANTAS
〃	孫凱
〃	安達隆文

技術部

技術部長（兼）	笹木敬司
技術長	土田義和

システム開発技術班

班長・第二技術主任	大沼英雄
第一技術主任	伊勢谷陽一
技術職員	今村逸子
〃	小林健太郎
〃	遠藤礼暁

装置開発技術班

班長	太田隆夫
第一技術主任	平田康史
第二技術主任	女池竜二
技術職員	武井将志

事務部

事務長	石川雄一
庶務係	
係長	藤井幹彦
主任	隅田由美子
会計係	
係長	柴野仁
主任	上野真志
事務職員	吉田裕子
〃	竹田慎太郎
〃	渡辺香織
〃（図書室）	岩田慈子
事務補佐員	山口由美子
技術補佐員	福本愛
事務補助員	柴田久恵
〃	數瀬しのぶ
〃	佐々木公美
〃	三浦亜希子
〃	国松泉
〃	酒井真理
〃	菊地美耶
〃	阿部香代
〃	四ツ屋泉
〃	渡邊道
〃	沼田優子
〃	吾孫子まゆ
技術補助員	清一人

（平成20年３月末日現在）