巻頭言

H29 年４月１日、名和豊春総長を中心に新しい大学執行部体制が始まりました。H29 年度は、第３期中期計画（H28－H33 年度）の２年度目にあたります。全学的な２大事業であるスーパーグローバル大学創成支援事業（Hokkaido ユニバーサルキャンパス・イニシアチブ）と研究大学強化促進事業が推し進められている中、本所の事業もこれら全学の動きに同調させながら、本所の目指す複合領域ナノサイエンスの研究を展開してきました。

大学新執行部で早速断行されたのが 7.5%の人事ポイント削減でした。これにより電子研の人件費ポイントも削減されました。運営費交付金の漸減傾向は、まだしばらく続くと予想されます。この厳しい予算状況を踏まえて、本所の事業計画を策定していく必要があります。

本所は、物質・デバイス領域共同研究拠点として文部科学省により認定されております。この拠点は、日本列島を縦断する５つの研究所（北海道大学電子科学研究所、東北大学多元物質科学研究所、東京工業大学科学技術創成研究院化学生命科学研究所、大阪大学産業科学研究所、九州大学先導物質化学研究所）からなるネットワーク型拠点として活動しており、新しい共同研究拠点のあり方を示す嚆矢となっています（第２期中期計画期間の期末評価で最高評価「S」）。H28 年度から、第３期中期計画期間となりネットワーク型拠点としてもリニューアルし、課題解決型アライアンスプロジェクト事業「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」を推し進めております。H30 年度早々に中間評価を受けるため、年度末にはそのための評価資料を５研究所をあげて作成しました。

また国際化に関しては、これまでに海外教育研究機関と 15 の連携協定を結んでおりますが、その中で最も連携実績のある台湾国立交通大学と共同研究教育センターを設立(H30 年度に設置予定)することにいたしました。この国際センターは、９年間続いた国際ジョイントシンポジウムや、相互の人事交流の積み重ね、５研究所にも及ぶ共同研究など、時間をかけて築いてきた礎の上に設立されます。この国際センターは、物質デバイス共同研究拠点の台湾国際化のハブとしても機能していきます。H30 年度には５研究所と連携した国際シンポジウムや共同講義を国立交通大学で実施する予定です。

本所の柱の一つであるナノテクノロジープラットフォーム事業は、平成 24 年度～平成 33 年度（10 年間）で実施されており、6 年目となる平成 29 年度に第 2 回目の中間評価を受けました。その結果、質の高い研究論文の増加、民間における事業化事例の増加などから、必要性、有効性、効率性のいずれの観点においても高い評価をいただきました。特に、委託費を核として、実施機関の負担と利用料収入の相乗効果による投資効率の最大化の結果、委託費の約 2.9 倍の総活動規模にまで成長・発展し、運営を軌道に載せてきた実績は高い評価を得ています。

このプラットフォーム事業に関連して、学内での部局横断型プロジェクトを起こすべく概算要求事業（機能強化促進分）「最先端フォトニクス材料・デバイスを支えるナノテク整備事業」（H30-33 年度）を提案し採択されました。これは、工学研究院、理学研究院、地球環境科学研究院、情報科学研究科と共同で実施するものです。以上、二つのナノテク事業の推進には技術部の貢献が非常に大きく、特に共同利用に関しては極めて高い実績を誇っています。技術部のより生産的な業務体制を作り上げるために、H30 年度に向けた見直作業に着手いたしました。その一端として、技術部機械工作室の作業料金を引き上げるとともに、これまでは運営費交付金のみの支払いしかできなかったものを科研費等外部資金での支払いもできるように（所内のみ）しました（開始は H30 年度より）。

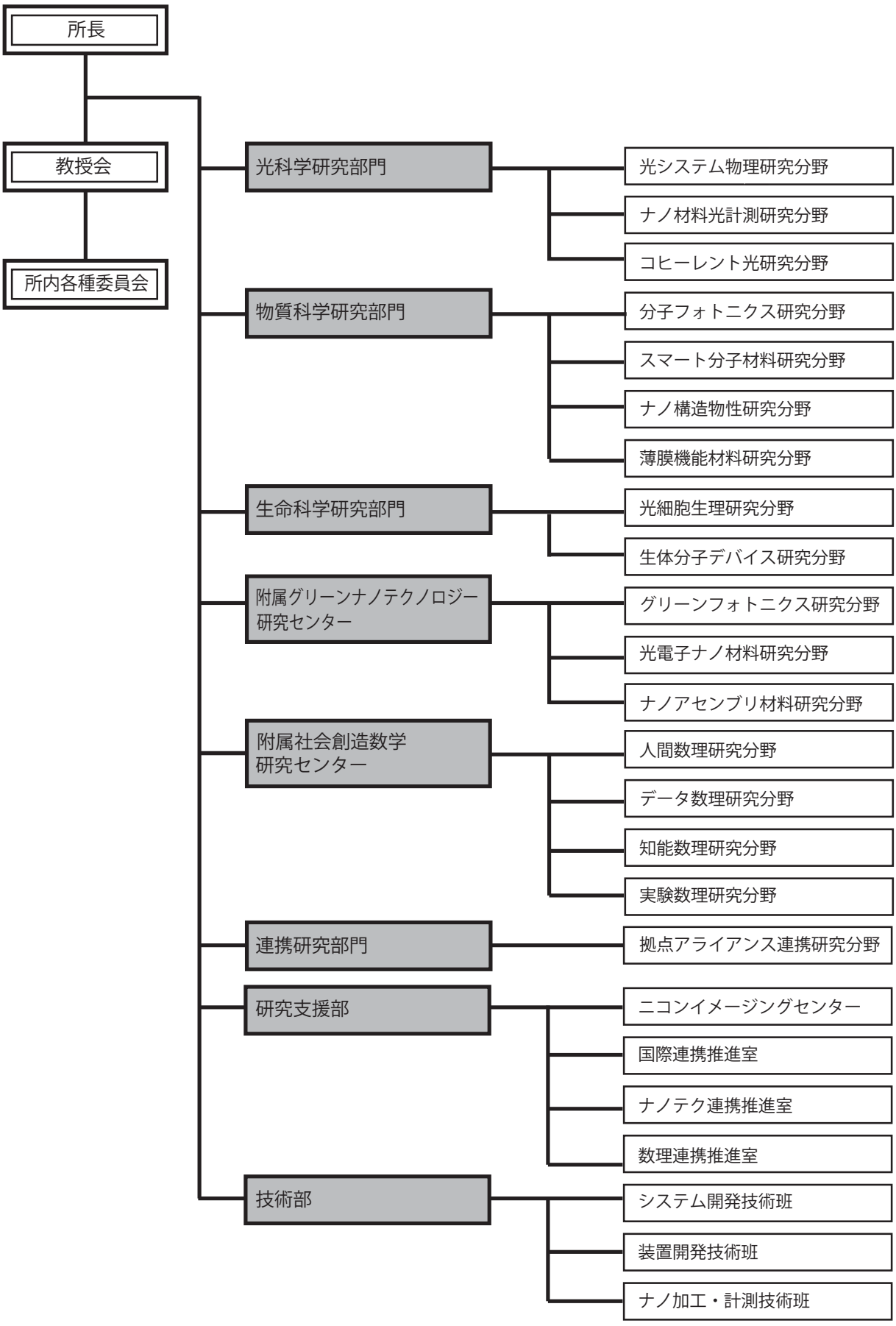
教育面に関しては、複合領域ナノサイエンスの授業科目を大学院や学部向けに提供しました。また、社会創造数学研究センターでは、産学連携として日立ラボの活動を活発化させるとともに、数学教室との連携で応用数理科学科目を開講しました。またニコンイメージングセンターが中心となり外国語で実施する講義（北海道大学サマーインスティテュートの登録科目）を行いました。

所員の意識を高めるべく、予算申請書添削事業やプレスリリースの書き方講座等を開催し、ファカルティデベロップメントに取り組んでおります。その甲斐あり、新聞やテレビなどのマスコミを通じた広報活動も増えております。また、所員向けの研究支援のため、北キャンパス図書室に協力して文献データベース等の講習会を開催しました。

アウトリーチ活動である６月の研究所一般公開イベントは、例年通り千数百名の来場者を数え恒例の市民イベントとして定着しています。北海道新聞と北海道大学が包括連携のもとに推し進めている高校生向けの講義シリーズ（アカデミックファンタジスタ事業）にも、積極的に貢献しております。新たな取り組みとして、読売新聞との連携講座を H30 年度より開始することになりました。研究成果の発信、高大接続などアウトリーチ活動は、日本の科学の裾野を広げるために重要であり、今後も積極的に取り組んでまいります。

大学改革の流れはより一層厳しさを増しておりますが、H29 年度も充実した研究・教育活動を行うことができました。大学本来の理念を肝に銘じ、本所のより良いあり方を追求し続けていく所存です。ご指導ご鞭撻のほど切にお願い申し上げます。

所長　中垣俊之


所長
教授会
所内各種委員会
光科学研究部門
光システム物理研究分野
ナノ材料光計測研究分野
コヒーレント光研究分野
物質科学研究部門
分子フォトニクス研究分野
スマート分子材料研究分野
ナノ構造物性研究分野
薄膜機能材料研究分野
生命科学研究部門
光細胞生理研究分野
生体分子デバイス研究分野
附属グリーンナノテクノロジー研究センター
グリーンフォトニクス研究分野
光電子ナノ材料研究分野
ナノアセンブリ材料研究分野
附属社会創造数学研究センター
人間数理研究分野
データ数理研究分野
知能数理研究分野
実験数理研究分野
連携研究部門
拠点アライアンス連携研究分野
研究支援部
ニコンイメージングセンター
国際連携推進室
ナノテク連携推進室
数理連携推進室
技術部
システム開発技術班
装置開発技術班
ナノ加工・計測技術班

目　次

組織図

Ⅰ．研究成果・活動
光科学研究部門
光システム物理研究分野 …… 4
ナノ材料光計測研究分野 …… 10
コヒーレント光研究分野 …… 15

物質科学研究部門
分子フォトニクス研究分野 …… 22
スマート分子材料研究分野 …… 26
ナノ構造物性研究分野 …… 32
薄膜機能材料研究分野 …… 39

生命科学研究部門
光細胞生理研究分野 …… 50
生体分子デバイス研究分野 …… 58

附属グリーンナノテクノロジー研究センター
グリーンフォトニクス研究分野 …… 68
光電子ナノ材料研究分野 …… 77
ナノアセンブリ材料研究分野 …… 84

附属社会創造数学研究センター
人間数理研究分野 …… 92
データ数理研究分野 …… 104
知能数理研究分野 …… 113

連携研究部門
拠点アライアンス連携研究分野 …… 120

研究支援部
ニコンイメージングセンター …… 123
国際連携推進室 …… 126
ナノテク連携推進室 …… 128

Ⅱ．各種データ
Ⅱ－１．　研究成果公表に関する各種の統計表 …… 132
Ⅱ－２．　予算 …… 133
Ⅱ－３．　外国人研究者の受入状況 …… 135
Ⅱ－４．　修士学位及び博士学位の取得状況 …… 136

Ⅲ．研究支援体制
Ⅲ－１．　技術部 …… 140

Ⅲ－２．　学術情報 …… 141

Ⅳ．資料
Ⅳ－１．　沿革 …… 144
Ⅳ－２．　建物 …… 147
Ⅳ－３．　現員 …… 147
Ⅳ－４．　教員の異動状況 …… 148
Ⅳ－５．　構成員 …… 149

Ⅰ. 研究成果・活動

光科学研究部門

研究目的

本研究部門では、光と電子系との相互作用に関わる先端的な計測・制御・操作技術、高度光ナノイメージング技術、および微細加工技術をベースとして、フォトンマニピュレーション、プラズモニック材料、コヒーレントＸ線イメージングなどの光科学・光技術のフロンティア開拓に取り組んでいます。このような研究を、量子情報通信や機能性ナノ材料デバイスなどの量子工学や、生命現象や病理の解明などの生命科学に広く応用展開します。

光システム物理研究分野

教　授　　笹木敬司（阪大院、工博、1997.11～）
准教授　　藤原英樹（北大院、工博、2008.6～）
助　教　　酒井恭輔（京大院、工博、2010.12～）
特任助教　石田周太郎（名大院、工博、2012.12～）
ポスドク　Christophe Pin（University of Bourgogne Franche-Comte、PhD、2016.10～）
その他のメンバー
修士課程　井手柾希、織田洋彰、新宅貴志、菅原翔太郎、鈴木達朗、須藤広太、髙橋玄太、山内喬介

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、微小球や金属ナノ構造、ランダム構造、テーパファイバ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。さらに、プラズモン場を利用したナノ空間の光計測技術やマニピュレーション、単一分子・単一ナノ微粒子の分光計測、光の偏光・位相によるプラズモン場の直接制御や電子状態制御に関する研究を行っている。

2．研究成果

(a) 多重極子相互作用を増強するプラズモニック構造

ラゲール・ガウスビームに代表される光渦やその重ね合わせで得られるベクトルビームなどの光波は、ビーム断面に位相特異点をもち、特異点周りの位相変化は整数値(l)で与えられる。このビーム断面の位相変化は光の軌道角運動量(l)に対応することが示されており、円偏光として知られるスピン(s=1)と合わせて光の角運動量を構成する要素として活発に研究が進められている。特に注目を集めるのが、電子が光を放出・吸収する際の電子遷移の選択則である。「スピンに加えて軌道角運動量も光から電子へ与えられるのであれば、電子の角運動量変化は$\Delta j=\pm 1$とは限らず、全角運動量($|l\pm s|=n$)で決まる$\Delta j=\pm n$ となるのではないか」という予想が永らく議論されている。本予想が真実であれば、光物質相互作用は双極子近似での遷移則($\Delta j=\pm 1$)から解放され多重極子遷移($\Delta j=\pm n$)での多様な発光・吸収過程が利用可能となる。しかし、光の軌道角運動量が電子へ与えられるためには、光の分布関数を電子の波動関数へ近づけ、光の位相変化を電子が感じられるようにする必要がある。つまり、光渦やベクトルビームの分布をナノメートル程度に非常に小さくしなければならない。本研究では、局在表面プラズモンを用いて、光渦やベクトルビームの分布をナノ空間に局在させる構造の検討を行った。図1(a)にその概要を示す。金ナノ円板の周期構造で囲まれた4つの三角形からなる四量体に光渦やベクトルビームを照射すると、四量体中心にナノメートルサイズの四重極子場(局在プラズモン光渦場)が形成される。金ナノ円板の周期構造は、アンテナアレイの役割を果たし、照射ビームのエネルギーを四量体中心へ効率的に導く機能がある。また、照射ビームと構造中心との位置合わせ精度について、金ナノ円板の周期構造がある場合は、ない場合に比べて緩い条件となる(冗長性が生まれる)(図1(b))。現在、本構造を作製・評価し、多重極子遷移($\Delta j=\pm n$)の実現へ向けた実験準備を行っている。

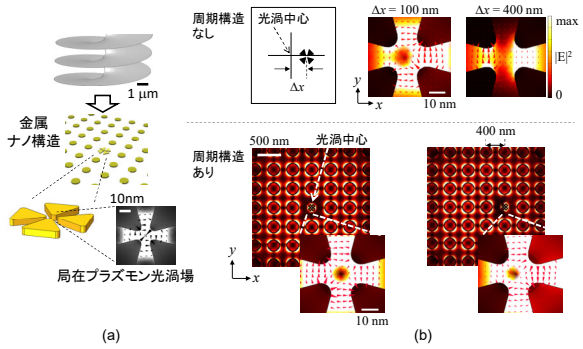


図１　多重極子遷移の利用を目指す局在プラズモン光渦場の概要．(a) ナノ円板と四量体からなる金属ナノ構造に光渦やベクトルビームを照射することで、ナノメートル領域に局在プラズモン光渦場が形成される．(b) ナノ円板の周期構造は位相アレイアンテナとして動作し、照射ビームと四量体との位置合わせ条件を緩やかにし、効率的にエネルギーを局在プラズモン光渦部へと導く．

(b) プラズモン場を利用した色素粒子の光捕捉と選択的堆積

金属ナノ構造中に勇気されるサブ波長サイズのプラズモンホットスポットを利用すると、その強い勾配力によりナノ粒子を正確に捕捉・配置することが可能となる。このため、近年、プラズモン場の光圧によるナノ粒子操作が注目を集めている。しかし、ナノ粒子をナノスケールのホットスポットに粒子を引き寄せ、配置するのに必要な長距離の引力および表面結合は、通常、電熱加熱および表面化学処理などの光圧以外の技術を必要とする。

本研究では、薄いマイクロ流体チャンバー内の金プラズモンアンテナに近赤外レーザービームを集光することで、アンテナのナノギャップにナノ粒子（φ30～40nm）を捕捉して堆積させることに成功した（図２）。試料として、熊本大学・深港教授から提供された蛍光色素分子の凝集により作製した蛍光ナノ粒子を使用した。同様のサイズの標準的な蛍光ポリスチレンナノ粒子を用いて実験を再現できるも確認した。解析の結果、ナノ粒子の短距離引力および析出は、プラズモンナノギャップの近傍における強い光勾配力の作用から生じるが、数マイクロメートルを超えるナノ粒子の速い引力は、熱浸透として知られる熱現象に起因していた。ナノスケールの精度でコロイド状ナノ粒子とプラズモニックナノアンテナで構成されるヘテロ構造を直接構築

可能なこの技術は、ハイブリッドプラズモニックナノフォトニックデバイスにおけるナノスケールの光–物質間相互作用のさらなる研究と利用を可能にする新しい技術としての活用が期待される。

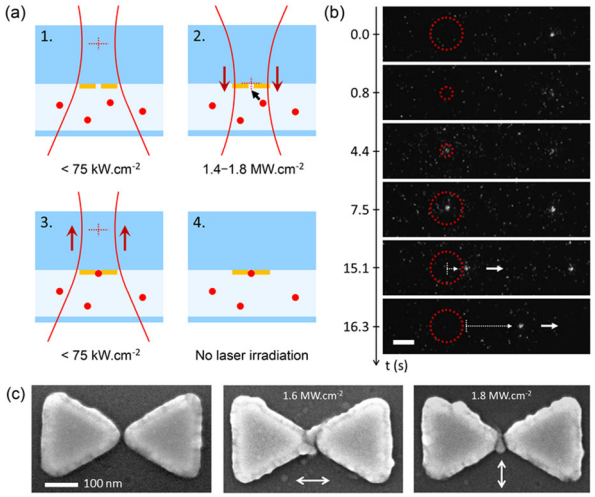


図２　トラッピングと堆積技術の（a）概念図および（b）堆積プロセスの顕微鏡写真（横の数字は経過時間）．近赤外レーザーは、目標の金のアンテナに数秒間照射した．この間、少数のナノ粒子が金ナノアンテナに引き寄せられて堆積する．レーザー照射により、以前に堆積した粒子（画像の右側の輝点）と同様に、左側にも輝点が現れている．レーザー集光位置からアンテナが離れても、粒子は試料に付着したままである．（c）レーザー照射前（左）とナノ粒子堆積後のアンテナ（真中と右）の SEM 画像。

(c) 光熱変換を利用したランダムレーザー発振制御

本研究で注目しているランダム構造は、ナノ粒子の凝集体や基板表面のラフネス等を利用する事で簡単に作製できるだけでなく、光多重散乱と干渉効果により光局在現象が誘起されるため、発光デバイスへの応用の他、光触媒や光電変換、センサー等の大面積化や高機能化にむけた簡便・安価な光反応場としての利用が期待されている。近年では、光多重散乱に基づく、無指向性や低空間コヒーレンス性を利用し、強度ムラの無い、高輝度な全視野イメージング用のレーザー光源として注目されているが、構造の最適化が難しく、低しきい値化に不可欠な空間・周波数的な局在モード制御が困難であるという問題がある。これに対し、我々の研究では、サイズ・形状が均一な散乱体の共鳴を利用した簡便な光局在・発振モード制御方法を提案し、ランダムレーザー発振の低しきい値化を実証している。今年度の研究では、このランダムレーザー発振モード制御の一環として、レーザー発振の外部刺激によるスイッチング動作の実現を目指し、グラフェン粉末の高効率な光熱変換を利用した ZnO ランダム構造のレーザー発振制御を試みた。

実験では、グラフェン粉末（平均粒径 600 nm）と ZnO ナノ粒子（平均粒径 400 nm）を水中に分散した後、分散液をガラス基板上に滴下・乾燥させたものを試料として用いた。励起光源として紫外パルスレーザー(355 nm、1 kHz、300 ps)を試料上に集光し、制御光として顕微鏡の照明光を照射(ON)／非照射(OFF)した際の発振スペクトルと発光強度の励起光強度依存性を測定した。図３は、試料の同一スポットにおけるレーザー発振スペクトルを示している。励起光強度を一定（128 MW/cm^2）としているにも関わらず、照明光の照射により、発振スペクトルのレッドシフトおよび発光強度の減少が確認できる。励起光強度依存性の測定結果から、照明光の照射により、発振しきい値が約 50 MW/cm^2（照明光 OFF）から 90 MW/cm^2（照明光 ON）と変化する様子が確認できる。また、この現象を利用し、空間的な照明光のパターン照明により、空間的にレーザー発振の On、Off を制御できることを示した（図４）。さらに照明光照射の代わりに試料温度を室温から 50 度まで変化させた結果、同様の現象を確認した。この結果から、照明光がグラフェンにより熱に変換された結果、グラフェンの負の熱膨張率を持つグラフェンが収縮し、ランダム構造が変化したことによってレーザー発振が変化したと考えられる。

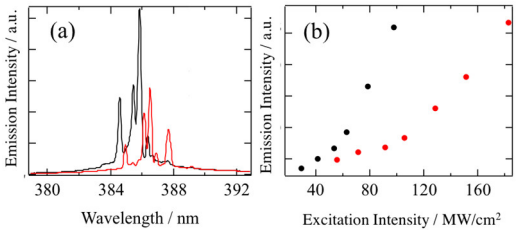


図３　グラフェン混入 ZnO ランダム構造における(a)発振スペクトルと(b)発光強度の励起光強度依存性(照明光 ON:赤，OFF:黒)．

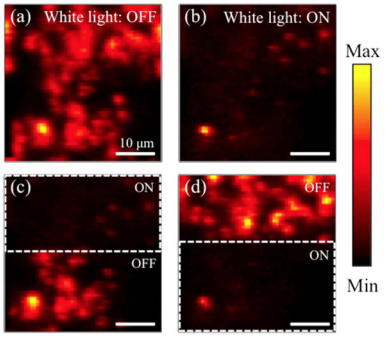


図４　粉末グラフェン混入 ZnO ランダム構造の同じ領域のレーザー発振強度分布．(a) 照明光 OFF、(b) 照明光 ON．(c)、(d)中の破線領域は照明光を ON とした領域を示している．

3．今後の研究の展望

本研究分野では現在、「金属ナノ構造中のプラズモン局在モードの自在制御」、「微小共振器構造を用いた高効率プラズモン励起」、「不規則構造を利用した高効率光捕集構造の開発」、「１分子光捕捉を目指したプラズモニックナノ構造の作製」等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)テーパファイバ結合微小球・トロイド構造を用いた光子制御デバイスの開発、(b)輻射場を制御した単一分子・粒子の分光計測、(c)テーパファイバを用いたナノ粒子の選択捕捉・輸送、(d)高空間分解分光イメージング

システムによる光局在場解析、(e)金属ナノ構造体による光制御技術の開発、(f)光の偏光・位相制御によるプラズモンモード制御、等の研究テーマを遂行する。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） H. Fujiwara, R. Niyuki and K. Sasaki: “White light induced photo-thermal switching in a graphene-flake-mixed ZnO nanoparticle random laser”, *J. Phys. Commun.*, 2(3): 35022 (2018)

2） S. Ishida, K. Sudo and K. Sasaki: “Nano-particle rotation using a gap-mode plasmonic field of nano-structure”, *Proc. OECC and PGC* (2017)

3） H. Fujiwara and K. Sasaki: “Fabrication of low-threshold ZnO nanorod array random laser using a laser-induced hydrothermal synthesis”, *Proc. Optofluidics 2017*, 04196: 04196 (2017)

4） C. Pin, S. Ishida, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki: “Near-field optical forces-assisted molecular nanoparticle deposition in the nanogap of plasmonic nanoantennas”, *Proc. SPIE*, 10252: 102520Z (2017)

5） S. Ishida, K. Sudo and K. Sasaki: “Analysis of a nano-particle rotation using a plasmonic trimer nano-structure”, *Proc. SPIE*, 10252: 1025210-(2017)

6） H. Fujiwara, Y. Yasuda, H. Orita, S. Ishida and K. Sasaki: “Localized field control at the nano-scale”, *Proc. SPIE*, 10252: 1025216 (2017)

4.3 総説・解説・評論等

1） 藤原 英樹、笹木 敬司: 「研究室紹介 光システム物理研究分野」、フォトニクスニュース、3(1): 38-40 (2017)

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） K. Sasaki*: “Whispering Gallery Mode Plasmonic Nano-Cavities and Their Interaction with Nano-particles and Molecules ”, 653. WE-Heraeus-Seminar: Optical Microcavities and Their Applications (WOMA2017), Physikzentrum, Bad Honnef, Germany (2017-11)

2） K. Sasaki*: “Optical Manipulation Using Designed Plasmonic Fields”, The International Nanophotonics Symposium (INP-2017), Kawana Hotel, Japan (2017-08)

3） K. Sasaki* : “Plasmonic Manipulation with Nano-Vortex Fields”, The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan (2017-08)

4） K. Sasaki*, M. Ide, S. Ishida and K. Sakai : “Plasmonic Nano-Shaping & Nano-Manipulation”, SPIE Optics & Photonics, San Diego Convention Center, United States of America (the) (2017-08)

5） K. Sasaki* : “Interference of Plasmonic Vortex Fields with Different Angular Momenta”, 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2017), Songdo Convensia, Incheon - Seoul, Korea (the Republic of) (2017-07)

6） H. Fujiwara* and K. Sasaki : “Fabrication of low-threshold ZnO nanorod array random laser using a laser-induced hydrothermal synthesis”, The 7th International Multidiscipline Conference on Optofluidics 2017, Grand Copthorne Waterfront Hotel, Singapore, Singapore (2017-07)

7） K. Sasaki* : “Plasmonic Nano-Manipulation Using Angular Momenta ”, The Second A3 Metamaterials Forum, Fudan University, China (2017-06)

8） K. Sasaki* : “Efficient Light Coupling to Plasmonic Nanostructures ”, Optical Nanofibre Applications (ONNA), OIST Seaside House, Japan (2017-06)

9） K. Sasaki* and S. Ishida : “Nano-Manipulation with Plasmonic Chiral Fields”, The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics(SPP8), Academia Sinica, Taipei, Taiwan (Province of China) (2017-05)

b．招待講演（国内学会）

1） 笹木 敬司*：「ナノ光電場制御による分子・分子集合体の自在操作と精密化」、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、京都市勧業館みやこめっせ、(2018-01)

2） C. Pin*, S. Ishida, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki : “Optical trapping and deposition of molecular nanoparticles in the nanogap of plasmonic antennas”, 日本化学会第 98 春季年会, 日本大学理工学部船橋キャンパス, Japan (2018-03)

c．一般講演（国際学会）

1） C. Pin*, S. Ishida, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki : “Thermo-plasmonic deposition of nanoparticles in the gap of gold nanoantennas”, SPIE Nanophotonics Australasia 2017, Swinburne University of Technology, Australia (2017-12)

2） C. Pin*, S. Ishida, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki : “Nanoparticle trapping and deposition using gold plasmonic nano-antennas”, 18th RIES-Hokudai International Symposium, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 ～

2017-12)

3） H. Fujiwara* and K. Sasaki： “Lasing from a GaN substrate by intense pulsed laser irradiation”, 653. WE-Heraeus-Seminar: Optical Microcavities and Their Applications (WOMA2017), Physikzentrum, Bad Honnef, Germany (2017-11)

4） H. Fujiwara*, R. Niyuki and K. Sasaki： “Fabrication of low-threshold ZnO nanorod array random lasers”, SPIE Optics & Photonics, San Diego Convention Center, United States of America (the) (2017-08)

5） S. Ishida*, K. Sudo and K. Sasaki： “Nano-particle rotation using a gap-mode plasmonic field of nano-structure”, 2017 CLEO Pacific Rim Conference, Marina Bay Sands Expo and Convention Center, Singapore (2017-07 ～ 2017-08)

6） K. Sakai*, S. Sugawara, M. Ide and K. Sasaki： “Nanofocusing of Optical Vortex in Plasmonic Structures”, CLEO®/Europe-EQEC 2017, ICM Centre of the New Munich Trade Fair Centre, Germany (2017-06)

7） H. Fujiwara*, Y. Yasuda, H. Orita, S. Ishida and K. Sasaki： “Localized field control at the nano-scale”, Optical Manipulation Conference 2017, Pacifico Yokohama, Japan (2017-04)

8） S. Ishida*, K. Sudo and K. Sasaki： “Analysis of a nano-particle rotation using a plasmonic trimer nano-structure”, Optical Manipulation Conference 2017, Pacifico Yokohama, Japan (2017-04)

9） C. Pin*, S. Ishida, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki： “Near-field optical forces-assisted molecular nanoparticle deposition in the nanogap of plasmonic nanoantennas”, Optical Manipulation Conference 2017, Pacifico Yokohama, Japan (2017-04)

ｄ． 一般講演（国内学会）

1） 辻 剛志*、榊 祥太、越崎 直人、石川 善恵、藤原 英樹、菊池 裕嗣：「コロイド状ナノ粒子のレーザー誘起凝集過程の解析と制御 ~保護剤が球状サブミクロン粒子の粒径分布に与える影響~」、電気学会 電子材料研究会 、くにびきメッセ、(2018-03)

2） 酒井 恭輔*、北嶋 大暉、菅原 翔太郎、笹木 敬司：「金属ナノ四量体の光学特性 ―多極子相互作用へ向けて―」、2018 年第 65 回応用物理学会 春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス、(2018-03)

3） 北嶋 大暉*、酒井 恭輔、笹木 敬司：「金属ナノ四量体の光学特性Ⅱ ―散乱スペクトル―」、2018 年第 65 回応用物理学会 春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス、(2018-03)

4） 藤原 英樹*、海住 英生、西井 準治、笹木 敬司：「外部磁場によるランダムレーザー発振モード制御」、2018 年第 65 回応用物理学会 春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス、(2018-03)

5） 山内 喬介*、藤原 英樹、笹木 敬司：「テーパファイバを用いたダイヤモンドナノ粒子の選別」、2018 年第 65 回応用物理学会 春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス、(2018-03)

6） 山内 喬介*、藤原 英樹、笹木 敬司：「テーパファイバを用いたナノ粒子マニピュレーション」、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、京都市勧業館みやこめっせ、(2018-01)

7） 織田 洋章*、藤原 英樹、石田 周太郎、笹木 敬司：「白色光全反射照明による局在プラズモン場分布の波長依存性の解析」、第５３回応用物理学会北海道支部/第１４回日本光学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学、(2018-01)

8） 菅原 翔太郎*、酒井 恭輔、笹木 敬司：「金属 四量体構造 四量体構造 の形状パラメータ の形状パラメータ が四重極子場 が四重極子場 に与える影響の解析」、第５３回応用物理学会北海道支部/第１４回日本光学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学、(2018-01)

9） C. Pin*, S. Ishida, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki： “Deposition of fluorescent nanoparticles in the gap of plasmonic nano-antennas”, 2017 年第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, (2017-09)

１０）藤原 英樹*、笹木 敬司：「GaN 平面基板上への高強度パルスレーザー照射による自己形成ランダムレーザー発振」、2017 年第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場、(2017-09)

１１）新宅 貴志*、クイトゥネン ヨウニ 、煮雪 亮、藤原 英樹、笹木 敬司：「レーザー誘起水熱合成法を用いたランダムレーザー発振特性制御」、2017 年第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場、(2017-09)

ｅ． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

招待講演（国際研究会等）

1） K. Sasaki*： “Nano-Scale Optical Manipulation using Designed Plasmonic Fields”, The 6th Hsinchu Summer Course and Workshop, NCTU, Hsinchu, Taiwan (Province of China) (2017-07)

招待講演（国内研究会等）

1） 笹木 敬司*：「プラズモニックナノ渦場による物質マニピュレーション」、固体物理セミナー、大阪大学基礎工学研究科シグマホール、(2018-01)

2） 笹木 敬司*：「ナノ光成形で拓く物理とその応用」、第 28 回 光物性研究会、京都大学 宇治キャンパス、

(2017-12)

3） 笹木 敬司*：「マイクロ・ナノ光共振器による物質操作」、第 24 回 レーザー夏の学校、NTT 北海道セミナーセンター、(2017-10)

4） 藤原 英樹*：「レーザープロセス技術を利用した共鳴制御ランダムレーザーの開発」、電子材料研究会、甲南大学 ネットワークキャンパス東京、(2017-09)

5） 笹木 敬司*：「ナノ光マニピュレーション技術」、第 64 回 PST-net 例会、千歳アルカディアプラザ、(2017-07)

一般講演（国際研究会等）

1） K. Yamauchi*, H. Fujiwara and K. Sasaki：“Study on light and matter control using a tapered fiber”, The 6th Hsinchu Summer Course and Workshop, NCTU, Hsinchu, Taiwan (Province of China) (2017-07)

一般講演（国内研究会等）

1） 山内 喬介*、藤原 英樹、笹木 敬司：「テーパファイバを用いたナノダイヤモンドマニピュレーション」、新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」第 2 回公開シンポジウム、大阪大学豊中キャンパス、(2018-01)

2） 藤原 英樹*：「高強度パルスレーザー照射による GaN 基板上へのランダムレーザー素子作製」、人・環境と物質をつなぐイノベーション創出 ダイナミック・アライアンス エレクトロニクス 物質・デバイス(G1) グループ分科会、山口県湯田温泉 ホテル常盤、(2017-10 ～ 2017-11)

4.8 共同研究

a．所内共同研究

1） ダークモードプラズモントラップのポテンシャル計測、上野貢生

2） 円偏光局在場・光渦局在場を用いた２光子重合、上野貢生

3） 金属ナノスリット構造を用いたナノ粒子マニピュレーション、雲林院宏

4） 外部磁場印加によるランダムレーザー発振制御、海住英生

b．民間等との共同研究

1）金属ナノギャップ構造を用いた真空中ナノ粒子の精密配、芦田昌明、大阪大学

2）原子間力顕微鏡を用いた局在表面プラズモン場による光圧の精密計測、菅原康弘、大阪大学

3）ナノファイバ対向伝搬光によるNV中心含有ナノダイヤモンド粒子の選別輸送、石原一、大阪府立大学

4）THz領域擬似プラズモンにおける軌道角運動量の観測と解析、田中耕一郎、京都大学

5）サブミクロン酸化亜鉛球状粒子を用いたランダムレーザー発振制御、辻 剛志、島根大学

c．委託研究

d．国際共同研究

1） 台湾交通大学応用化学科 副教授 杉山 輝樹

2） RMIT Univ.Prof. Min Gu

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 酒井 恭輔、若手研究 A、ナノ空間に局在するプラズモン反応場の角運動量状態制御、2017～2019 年度

2） 藤原 英樹、基盤研究 C 一般、半導体ナノロッドアレイ構造の光局在場制御技術の開発とその応用に関する研究、2017～2019 年度

3） 笹木 敬司、新学術領域研究 研究領域提案型、光圧を極める：分子操作の極限化と光制御によるマクロ化、2016～2020 年度

4） 笹木 敬司、萌芽研究、単一分子キラリティーセンシング、2016～2017 年度

5） 笹木 敬司、基盤研究 A 一般、局在プラズモン角運動量制御による光ナノシェーピング、2014～2017 年度

4.10 受賞

1） パン クリストフ: 松本・羽鳥奨学賞 2018年02月

4.11 社会教育活動

a． 公的機関の委員

1） 笹木 敬司 ： 日本学術会議北海道地区会議運営協議会委員 （2017年11月24日～2023年09月30日）

2） 笹木 敬司 ： 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (ERATO)追跡評価委員 （2017年11月13日～2018年03月31日）

3） 笹木 敬司 ： 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST)領域アドバイザー （2017年04月12日～2019年03月31日）

4） 笹木 敬司 ： 日本学術振興会学術システム研究センター研究員 （2017年04月01日～2018年03月31日）

b． 国内外の学会の役職

1） 藤原 英樹 ： 電気学会 ナノ材料作製のための最先端レーザプロセッシング技術調査専門委員会委員 (2016年05月01日～2018年04月30日)

c． 兼任・兼業

1） 笹木 敬司 ： 電気通信大学 レーザー次世代研究センター 共同研究員 （2008 年 04 月 01 日～2018 年 03 月 31 日）

d. 外国人研究者の招聘

1） AN Kyungwon、Korea、(2018 年 02 月 07 日)

e． 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、電子情報工学演習Ⅱ、笹木 敬司、2017年10月01日～2018年03月31日

2） 情報科学研究科、光情報システム学特論、笹木 敬司、2017年10月01日～2018年03月31日

3） 工学部、電磁気学、藤原 英樹、2017年10月01日～2018年03月31日

4） 工学部、光工学、笹木 敬司、2017年04月01日～2017年09月30日
5） 工学部、光エレクトロニクス、笹木 敬司、2017年04月01日～2017年09月30日
6） 全学共通、物理学Ⅰ、藤原 英樹、2017年04月01日～2017年09月30日
7） 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、2017年04月01日～2018年03月31日
8） 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、2017年04月01日～2018年03月31日
9） 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、2017年04月01日～2018年03月31日

h. ポスドク・客員研究員など

1） Christophe Pin（電子科学研究所非常勤研究員、電子科学研究所学術研究員）

i. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：4名

1） 菅原 翔太郎 ： 金属ナノ四量体構造における四重極子場の解析
2） 井手 柾希 ： プラズモニック構造体によるナノ渦場とナノ物質の相互作用の解析
3） 織田 洋彰 ： 分光ナノイメージングによるプラズモンモード干渉の観測に関する研究
4） 新宅 貴志 ： レーザー誘起水熱合成法を用いたランダムレーザー発振特性制御に関する研究

ナノ材料光計測研究分野

教　授　　雲林院　宏(東北大院、博(理学)、2015年7月～)
准教授　　平井　健二(京大院、博(工学)、2017年12月～)
助　教　　猪瀬　朋子(阪大院、博(理学)、2015年10月～)
大学院生
博士後期課程　Zhang Qiang
修士課程　上園周平、堀菜月、渡邉希理、石田拓都、小谷伊吹、広瀬慎太郎
学部生　　明石大輝、中尾佑輔、村杉拓

1．研究目標

本研究分野では、金や銀をはじめとする貴金属ナノ構造体を化学的手法により作成し、その光特性を最大限に利用した超高感度センサー基板の開発や、新たな光学顕微鏡の開発を行っている。また、これらナノ構造体や新規光学顕微鏡を用いて、生体細胞など、不均一で複雑なシステムの理解、病理診断・治療への応用を目指している。

2．研究成果

表面増強ラマン散乱を用いたケミカルセンシング

ラマン分光法は、測定対象物質の振動スペクトルを測定することで化学結合の情報を直接得ることができる。振動スペクトルは分子構造の変化を鋭敏に反映するため、局所的な化学反応や生命機能などの詳細を解明するための本質的な情報を得ることができると期待されている。一方ラマン分光法の課題として、非常に感度が低い点が挙げられる。このようなラマン分光法の弱点を補う方法の一つが表面増強ラマン散乱(SERS)である。SERSは、金や銀などの貴金属ナノ構造体に光を当てた時に、ナノ構造体表面に存在する分子のラマン散乱が強く励起される現象であり、理想的な条件では通常のラマン散乱と比較して最大10^7倍程度の増強が起こり、感度の良いラマン分光が可能となる。SERSの感度は、ナノ構造体のサイズや形状に強く依存することが知られており、高感度SERS基板の実現を目指し、これまでリソグラフィーやナノ粒子の凝集を利用した方法など様々な作製法が報告されている。そのようななか近年、ポリジメチルシロキサン(PDMS)と呼ばれるポリマーフィルム上に銀・金ナノ粒子を並べたフレキシブルなSERS基板が報告され、注目を集めている。このフレキシブルSERS基板を使うことで、平坦でない表面上の物質検出、例えばりんご表面に付着している微量な農薬の高感度検出が可能であることが報告されている。しかしながら、報告されているPDMS上SERS基板の作製法では、作製ステップ数が多く収率の向上が課題となっている。

本研究室ではこれまでに、新たなPDMS上SERS基板の作製方法として、金ナノ粒子をワンステップで容易に合成する新たな方法を開発した。金ナノ粒子は大気中でも安定なため、SERS基板の粒子として広く用いられているが、SERS特性を示す波長は近赤外領域に限られる。一方、銀ナノ粒子は紫外・可視光領域の光を吸収するため、SERS基板の汎用性向上につながるが、空気中で非常に酸化されやすいという問題点が挙げられる。そこで本研究ではPDMS上に銀ナノ粒子を直接合成する方法を開発するとともに、合成した銀ナノ粒子表面を金の薄膜で覆うことで、銀ナノ粒子の特性を維持しつつ、酸化にも強い新たなフレキシブルSERS基板の実現を目指し、実験を行った。 実際に銀ナノ粒子を直接PDMS上に合成したところ、図1(a)に示すようなフラワー形状を有する銀ナノ粒子が得られた。さらに、金コーティングの際の反応速度を精密に制御することにより、フラワー形状を維持したまま銀ナノ粒子表面上のみを金でコーティングすることにも成功した(図1(b))。これらのナノ粒子のSERS特性を、0.2 mMの4-mercaptobenzoic acidを用いて評価したところ、ナノ粒子合成直後では銀ナノ粒子および金コーティング銀ナノ粒子のいずれにおいても高感度なSERS特性を示した。さらに同じ基板を1週間後に同様の方法で測定したところ、銀ナノ粒子では大きなバックグラウンドが観察されたのに対し、金コーティングした銀ナノ粒子では1週間前と同様のSERSスペクトルが得られ、金コーティングを行うことで銀ナノ粒子の酸化が抑制され、SERS基板としての特性を長期間維持することに成功した。さらに、図2で見られる1370cm-1付近で見られるブロードなSERSスペクトルは、銀ナノ粒子を用いた時に観測すること

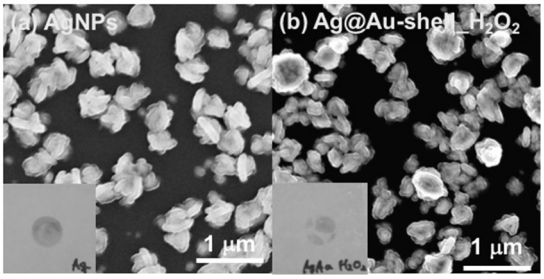


図1　新たに合成したPDMS上(a)銀ナノ粒子、(b)金コート銀ナノ粒子のSEM像

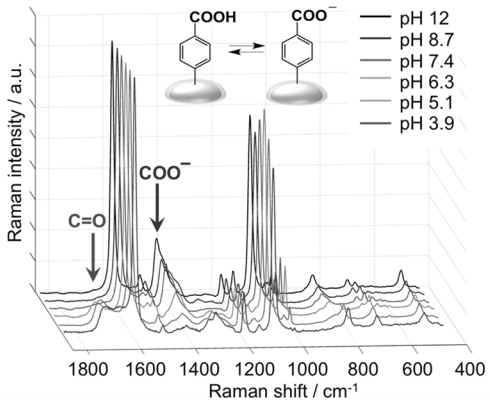


図2　作製したPDMS上金コート銀ナノ粒子SERS基板のpH応答性

が可能な特有のスペクトルであり、金コーティング後も銀ナノ粒子の特性が維持されることを確かめている。作製した金コーティング銀ナノ粒子のSERS基板について、pH応答性を調べたところ、図2に示すように広範囲のpH応答性を示し、pHセンサーとしての応用が可能であることを示唆する結果が得られた。(Chem. Commun. 2017.)

超解像顕微鏡を用いた生体分子相互作用の解明

プロテインなど生体マクロ分子の相互作用は、細胞プロセスにおける機能と制御に重要な役割を果たす。ナノメートルスケールでの単一分子イメージングは、それら相互作用の不均一性などの直接的な情報を得るために有効な手段である。このような背景から、様々な超高空間分解能蛍光顕微鏡法が開発されてきており、現在では20〜50nm 程度の空間分解能が蛍光顕微鏡で達成されている。しかしながら、蛍光顕微鏡では、蛍光ラベルのみが可視化されるにとどまり、世帯マクロ分子自体の構造は不明な場合がほとんどである。反面、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) などの走査型プローブ顕微鏡を用いることでラベリングすることなくサブナノスケールイメージングが可能であるが、走査型プローブ顕微鏡は表面構造を可視化するのみであり化学的情報は得られない。

これら２つの顕微鏡法を組み合わせることで、生体マクロ分子同士の相互作用の詳細が得られることは自明であるが、双方から得られる画像の相関を得ることが、しばしば困難である。本研究室では、走査型プローブ顕微鏡によって可視化された DNA–プロテイン集合体のナノスケールイメージと、超高空間分解能蛍光顕微鏡の相関を取ることにより、いくつのプロテインが DNA と相互作用しているか、その相互作用によって DNA の形状がどのように変化するかなどの詳細をえる「correlative fluorescence and force microsocpy」を開発した。(ACS Nano 2018)

制限酵素(EcoRV)と DNA の相互作用の様子を AFM で観測し、EcoRV バインド後の DNA の曲り角 (bending angle)を測定することにより、曲がり角に２つの異なる分布が存在することが明らかになった（図３A-B)。これは相互作用に不均一性が存在することを示す。また、AFM 像では、DNA プラスミドと相互作用した EcoRV 酵素は、白い輝点として観測される（図3E)。しかし、AFM 像には化学的情報が欠如しているため、実際に EcoRV なのか、また幾つの EcoRV が結合しているかなどの情報は得られない。本研究で使用した EcoRV には、それぞれ単一の蛍光分子がラベルされている。そのため、AFM で観測されたプロテイン位置で、単一分子蛍光分析を行うことで何個の EcoRV が結合しているかの情報も得られる（図3D, F)。ここで、酵素同士の距離が光の回折限界以下であるため、超解像蛍光顕微鏡を用いてそれぞれの酵素を位置的に分離する必要がある。そのように位置分離をし、AFM 像と相関をとった EcoRV 結合位置での単一蛍光分析結果が図３F のようになり、４段階の蛍光体色が観測されたことから、図３E の矢印部分では EcoRV の４量体が結合している可能性を示唆している。

以上のように、超解像蛍光顕微鏡と走査型プローブ顕微鏡を組み合わせ、その位置相関を取ることにより複雑な生体分子相互作用に関する詳細情報を得ることが可能である。

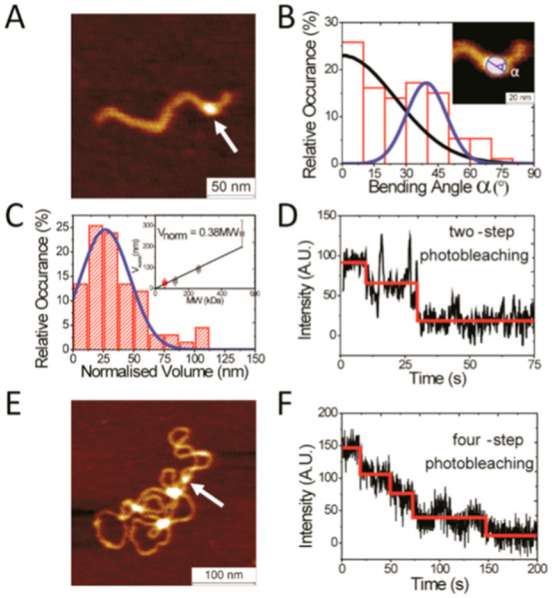


図 3 制限酵素（EcoRV）と DNA の相互作用不均一性の解析。(A) EcoRV-lamda DNA 相互作用の AFM 像。(B) EcoRV バインド後の DNA の Bending 角分布。(C) EcoRV の AFM 体積測定分布。(D) EcoRV にラベルした蛍光分子のステップ退色。(E) EcoRV-DNA プラスミドコンプレックスの AFM 像。(F) 図３E 矢印部分のステップワイズ蛍光退色。

３．今後の研究の展望

超解像蛍光顕微や表面増強ラマン散乱顕微と走査型プローブ顕微鏡のようなナノスケールの分解能を有する顕微鏡法を組み合わせることで、ナノメートル領域でおこる化学反応を、固体表面のみならず、単一細胞内部で解析する手法を開発する。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） P. Walke, Y. Fujita, W. Peeters, S. Toyouchi, W. Frederickx, S. De Feyter, H. Uji-i, “Silver nanowires for highly reproducible cantilever based AFM-TERS microscopy: towards a universal TERS probe”, *Nanoscale* 2018, 10, 7556-7565.

２） W. Frederickx, S. Rocha, Y. Fujita, K. Kennes, H. De Keersmaecker, S. De Feyter, H. Uji-i, “Orthogonal Probing of Single Molecule Heterogeneity by Correlative Fluorescence and Force Microscopy”, *ACS Nano* 2018 12, 168-177.

3） R. Sola-Llano, Y. Fujita, L. Gómez-Hortigüela, A. Alfayate, H. Uji-i, E. Fron, S. Toyouchi, J. Pérez-Pariente, I. López-Arbeloa, V. Martínez-Martínez, “One-Directional Antenna Systems: Energy Transfer from Monomers to J-Aggregates within 1D Nanoporous Aluminophosphates”, *ACS Photonics* 2018, 5, 151-157.

4） R. Aubert, B. Kenens, M. Chamtouri, Y. Fujita, B. Fortuni, G. Lu, J. A. Hutchison, T. Inose, H. Uji-i, “Surface density-of-states engineering of anataseTiO_2 by small polyols for enhanced visible-light photocurrent generation”, *ACS Omega* 2017, 2, 6309-6313.

5） B. Fortuni, T. Inose, S. Uezono, S. Toyouchi, K. Umemoto, S. Sekine, Y. Fujita, M. Ricci, G. Lu, A. Masuhara, J. A. Hutchison, L. Latterini, H. Uji-i, “In situ synthesis of Au-shelled Ag nanoparticles on PDMS for flexible, long-life, and broad spectrum-sensitive SERS substrates”, *Chem. Commun.* 2017, 53, 11298-11301.

6） Rahmoun, S; Mairesse, F; Uji-i, H; Hofkens, J; Sliwa, T, “Curve computation by geodesics and graph modelling for polymer analysis”, *Signal Image and Video Processing* 2017, 11, 1469-1476.

7） Y. Fujita, R. Aubert, P. Walke, H. Yuan, B. Kenens, T. Inose, B. Fortuni, M. Chamtouri, K. Jansen, S. De Feyter, M. B. J. Roeffaers, “Highly controllable direct femtosecond laser writing of gold nanostructures on titanium dioxide surfaces”, *Nanoscale*, 2017, 9, 13025-13033.

8） M. Chamtouri, B. Kenens, R. Aubert, G. Lu, T. Inose, Y. Fujita, A. Masuhara, J. Hofkens, H. Uji-i, “Facet-Dependent Diol-Induced Density of States of Anatase TiO_2 Crystal Surface”, *ACS Omega* 2017, 2, 4032-4038

9） G. Lu, H. Yuan, L. Su, B. Kenens, Y. Fujita, M. Chamtouri, M. Pszona, E. Fron, J. Waluk, J. Hofkens, H. Uji-i, “Plasmon-Mediated Surface Engineering of Silver Nanowires for Surface-Enhanced Raman Scattering”, *J. Phys. Chem. Lett.* 2017, 8, 2774-2779.

１０）K. Hirai, B. Yeom, K. Sada, “Pyrolysis of helical coordination polymers for metal-sulfide-based helices with broadband chiroptical activity”, *ACS Nano* 2017, 11, 5309-5317.

１１）K. Hirai, K. Sada, “Infrared laser writing of MOFs”, *Chem. Commun.* 2017, 53, 5275-5278.

１２）S. Tajima, Y. Kuroshima, T. Katayama, N. Tamai, K. Sada, K. Hirai, “Solid-Solution Coordination Polymers as Precursors for $Zn_xCd_{1-x}S$/C Composite Nanowires”, *Eur. J. Inorg. Chem.* 2017, 18, 2444-2449.

１３）B. Fortuni, Y. Fujita, M. Ricci, T. Inose, R. Aubert, G. Lu, J. A. Hutchison, J. Hofkens, L. Latterini, H. Uji-i, “A novel method for in situ synthesis of SERS-active gold nanostars on polydimethylsiloxane film”, *Chem.Commun.* 2017, 53, 5121-5124.

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） “Remote Spectroscopy Using Plasmonic Waveguide toward Single-Cell Interrogation”, Hiroshi Uji-i, 2017 RIIES-CIS Symposium, Oct. 28, 2017

２） “Plasmonic Waveguiding Remote Excitation Spectroscopy toward Single-cell Interrogation”, Hiroshi Uji-i, 15th Conference on Methods and Applications in Fluorescence, Sep. 11, 2017

３） “Plasmonic endoscopy toward single cell interrogation”, Hiroshi Uji-i, RACI National Centenary Conference 2017, July 26, 2017

ｂ．招待講演（国内学会）

１） “シルバーナノワイヤー探針増強ラマン散乱顕微鏡”, 藤田康彦, 猪瀬朋子, 雲林院宏, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, Mar. 18, 2018

２） “Layer by layer 法を利用した抗がん剤含有ナノ粒子のコーティングと細胞への取込み観察”, 猪瀬朋子, 「ナノマテリアルの実用展開」in ナノマテリアルコロキウム, Jun. 19, 2018

３） “フレキシブルポリマー上への新規 SERS 基板作製法”, 猪瀬朋子, 第 6 回錯体化学若手の会北海道支部勉強会, Nov. 10, 2017

４） “Plasmonic endoscopy at single cell level”, Hiroshi Uji-i, 日本物理学会 2017 年秋季大会, Sep. 23, 2017

５） “プラズモン導波路リモート励起探針増強ラマン顕微鏡”, 藤田康彦, 猪瀬朋子, 雲林院宏, 第 73 回日本顕微鏡学会学術講演会, Jul. 1, 2017

ｃ．一般講演（国際学会）

１） “Noble And Facile Fabrication Of Chemically Insert SERS_Active Au Nanostars And AgNPs@Au-Shell On PDMS Films”, Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Syuhei Uezono, Yasuhiko Fujita, Hiroshi Uji-i, 15th Conference on Methods and Applications in Fluorescence, Sep. 11, 2017

２） “Nano-sponge for active-targeting anti-cancer drug delivery”, Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Yasuhiko Fujita, Yositaka Koseki, Hitoshi Kasai, Hiroshi Uji-i,

RACI National Centenary Conference 2017, Jul. 24, 2017

d．一般講演（国内学会）

1） “Functionalization of Mesoporous Silica Nanoparticles with efficient Endosomal Escape for Cancer Targeted Drug Delivery”, Fortuni Beatrice, Ricci Monica, Susana Rocha, Masuhara Akito, Inose Tomoko, Uji-i Hiroshi, 日本化学会第 98 春季年会, Mar. 20, 2018

2） “Novel and facile fabrication method of AgNPs@Au-shelled flexible SERS substrate with a wide range of pH response”, Inose Tomoko, Uezono Shuhei, Fortuni Beatrice, Toyouchi Shuichi, Fujita Yasuhiko, Umemoto Kazuki, Masuhara Akito, Uji-i Hiroshi, 日本化学会第 98 春季年会, Mar. 20, 2018

3） “MOF-高分子フィルムのレーザー分解による電気二重層キャパシタの作製”, 田島信哉, 平井健二, 佐田和己, 日本化学会第 98 春季年会, Mar. 20, 2018

4） “C_{60} 混合有機高分子フィルムを用いたレーザー照射による炭素電極の作製”, 川合茉利奈, 田島信哉, 平井健二, 佐田和己, 第 52 回高分子学会北海道支部研究発表会, Jan. 15, 2018

5） “Surface density-of-states engineering of TiO2 by adsorption of small polyols for enhanced visible photo-catalytic activity” Remko Aubert, Bart Kenens, Maha Chamtouri, Yasuhiko Fujita, Tomoko Inose, Akito Masuhara, Hiroshi Uji-i, 錯体化学会第 67 回討論会, Sep. 18, 2017

6） “Noble, simple fabrication of flexible SERS substrates on PDMS” Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Syuhei Uezono, Yasuhiko Fujita, Hiroshi Uji-i, 錯体化学会第 67 回討論会, Sep. 18, 2017

7） “MOF 担持高分子フィルムを原料とした無機-炭素コンポジットのレーザーライティング”田島信哉,平井健二, 佐田和己, 錯体化学会第 67 回討論会, Sep. 16, 2017

8） “Noble fabrication of flexible Ag@Au NPs SERS substrate on PDMS” 猪瀬朋子、上園周平、Fortuni Beatrice、豊内秀一、藤田康彦、雲林院宏, 2017 年光化学討論会, Sep. 5, 2017

9） “Study of anti-cancer drug administration in single cancer cells using remote excitation of SERS (RE-SERS)” 雲林院宏、Ricci Monica、Fortuni Beatrice、Rocha Susana、豊内秀一、藤田康彦、猪瀬朋子, 2017 年光化学討論会, Sep. 4, 2017

10）“Plasmonic waveguiding Remote Excitation of Tip-enhanced Raman Scattering” Yasuhiko Fujita, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, ナノ学会第 15 回大会, May 10, 2017

11）“Layer by layer surface modification of mesoporous silica nanoparticles for taergeting drug delivery system” Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Kiri Watanabe, Natsuki Hori, Yasuhiko Fujita, Yoshitaka Koseki, Hitoshi Kasai, Hiroshi Uji-i, ナノ学会第 15 回大会, May 10, 2017

12）“配位高分子を前駆体とした金属硫化物ナノワイヤの合成と光水素発生” 田島信哉, 黒島佳希, 平井健二, 佐田和己, ナノ学会第 15 回大会, May 10, 2017

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

該当なし

4.7 シンポジウムの開催

該当なし

4.8 共同研究

a．所内共同研究

該当なし

b．民間等との共同研究

1） 東レリサーチセンター

c．委託研究

1） 東レリサーチセンター

d．国際共同研究

1） Prof. Steven De Feyter, KU Leuven, Belgium

2） Dr. James A. Hutchison and Prof. Thomas Ebbesen, University of Strasbourg, France

3） Prof. Virginia Martínez-Martínez, Universidad del País Vasco, Spain.

4） Prof. Lusiale, University of Strasbourg, France

5） Prof. Loredana Latterini, University of Perugia, Italy

6） Prof. Maurilio Sampaolesi, KU Leuven, Belgium

7） Prof. Paolo Samoli, University of Strasbourg, France

8） Prof. Jacek Waluk, Polish Academy of Sciences, Poland

9） Prof. Gang Lu, Nanjing Tech University, China

10） Prof. Hua Zhang, Nanyang Technological University, Singapole

11）Prof. Bongjun Yeom, Hanyang University, South Korea

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a．科学研究費補助金

1） 雲林院宏、基盤研究 B、ナノ粒子型薬輸送システムの単一細胞レベル解析、2017～2020 年度

2） 雲林院宏、新学術領域研究、プラズモン共鳴を用いた多光子異性化反応のナノメータ制御と巨視的光応答性制御、2017～2018 年度

3） 雲林院宏、新学術領域研究、プラズモン導波路を用いたリモート励起多機能光トラッピング、2017～2018 年度

4） 平井健二、若手研究 B、配位高分子の犠牲鋳型法による無機酸化物のマルチスケール構造制御、2016～2018 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

該当なし

4.10　受賞

該当なし

4.11　社会教育活動

ａ．公的機関の委員

該当なし

ｂ．国内外の学会の役職

１）　雲林院宏:ナノ学会第15回大会実行委員(2017年5月)

２）　猪瀬朋子:ナノ学会第15回大会実行委員(2017年5月)

ｃ．兼任・兼業

該当なし

d.外国人研究者の招聘

１）　Edwin Yeow、Singapore、(2017 年 12 月)

ｅ．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、雲林院宏、2017 年 10 月 1 日～2017 年 11 月 30 日

２）　情報科学研究科､ナノマテリアル特論､雲林院宏､2017 年 6 月 1 日～2017 年 8 月 2 日

３）　工学部､生体医工学基礎･医用工学概論､雲林院宏､2017 年 10 月 1 日～2018 年 02 月 10 日

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

ｇ．　新聞・テレビ等の報道

該当なし

ｈ．　ポスドク・客員研究員など

該当なし

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0名

博士学位：0名

コヒーレント光研究分野

教　授　　西野吉則（阪大院、理博、2010.4～）
助　教　　木村隆志（阪大院、工博、2011.4～）
　　鈴木明大（阪大院、工博、2016.4～）
博士研究員　楊影（東工大院、工博、2015.12～）
技術補助員　新井田雅学（2015.12～）
　　西岡晶子（2016.5～）
事務補助員　山崎涼子（2014.7～）
院生　谷直哉(MC2)、丸岡篤史(MC2)、木村円香(MC1)、橘 健朗（MC1）

１．研究目標

Ｘ線回折は、伝統的に、結晶試料に対する原子構造解析に威力を発揮してきた。さらに、位相の揃ったコヒーレントＸ線を用いることにより、例えば、細胞や細胞小器官など、結晶化できない試料に対しても、Ｘ線回折に基づく構造解析への扉が開く。Ｘ線の高い透過性を活かすことにより、透過電子顕微鏡では困難な、マイクロメートルを超える厚みのある試料も、薄切片にする必要なく、丸ごと 3次元的にイメージングできる。これにより、試料が機能する自然な状態に近い内部構造の観察が実現する。

本研究分野では、放射光や自由電子レーザーなどの先端的短波長コヒーレント光源の特徴を最大限活かし、マクロな世界から原子の世界までをイメージングする基礎および応用研究を展開する。これは、我々にとって関心の対象となるマクロな機能を、原子・ナノ構造と結びつけて理解する上で極めて重要であり、生命科学から物質科学に至る幅広い科学分野で、新しい知見を与えるブレークスルーをもたらすと期待する。

２．研究成果

(a)　Ｘ線自由電子レーザーを用いた複雑系生体分子の構造可視化に向けた研究

新世代のＸ線であるＸ線自由電子レーザー（XFEL）を用いた複雑系生体分子の構造可視化を目指して、独自提案したパルス状コヒーレントＸ線溶液散乱（PCXSS）法の構築を進めている。XFEL がフェムト秒オーダーのパルス幅をもつことを利用して、Ｘ線照射による試料の損傷なく、溶液中で自然な状態にある生物試料等をスナップショットイメージングする。PCXSS 測定において溶液試料を自然な状態に保持するマイクロ液体封入アレイ（MLEA）の作製には、文科省ナノテクノロジープラットフォーム事業で運用されている北大のクリーンルーム内の微細加工装置群を利用した。

これまでの PCXSS 測定では、マイクロメートル程に集光した XFEL を用いて、サブマイクロメートルサイズの細菌等の試料のイメージングを行ってきた。更に小さな100-nm 程に集光した XFEL を利用して、数十 nm サイズのターゲットを測定するナノビームコヒーレントＸ線イメージング装置（MAXIC-S）の開発を、高輝度光科学研究センターと共同で進めている。MAXIC-S では、世界最先端技術で作製された KB（Kirkpatrick-Baez）配置のクロム/カーボン多層膜ミラーを用いることにより、コンパクトであるが大開口で、XFEL を取りこぼしなく、超高密度に集光できる。

平成29年度は、MAXIS-S の立ち上げ実験を行い、ほぼ設計通りの集光径を達成した。また、MAXIC-S を用いたコヒーレントＸ線回折のテスト測定を行った。

MAXIC-S で新たにターゲットとなる数十 nm サイズの試料には、生体粒子など再現性のある構造を持つものが含まれる。再現性のある構造を持った粒子を多数用意し、様々な方位の粒子を XFEL で照射することにより、3次元イメージングが実現する。3次元イメージングに向けた試料粒子の保持方法として、異なる方法の検討を進めている。重要な展開として、膜タンパク質を活性を保ったまま埋め込むことのできる脂質膜マイクロチャンバーの開発に着手した。図1に蛍光色素 Sulforhodamine B を封入した脂質膜マイクロチャンバーの蛍光顕微鏡像を示す。

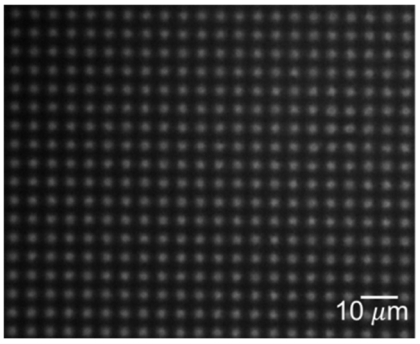


図１　蛍光色素 Sulforhodamine B を封入した脂質膜マイクロチャンバーの蛍光顕微鏡像。

MAXIC-S を用いた PCXSS 実験で生理条件下にある生体超分子の姿と動態を捉えるには、測定条件の最適化や実験データの解析において、大規模な計算が必要となる。MAXIC-S 実験に計算機シミュレーションを援用すべく、スーパーコンピュータ「京」の2017B 期の課題に申請し採択された（課題名「計算機実験を援用する XFEL バイオイメージング 」）。

(b)　XFEL を用いた自動車用ナノマテリアルのイメージング

SACLA を用いた産業応用研究を推し進めた。理化学研究所は、SACLA の産業利用を促進するため、平成26年度より「SACLA 産学連携プログラム」を開始した。平成28年度からは、当プログラムは、「SACLA 産業利用推進プログラム」へと発展した。平成26年度より、これらプログラムにトヨ

タ自動車（株）と共同で申請し、共同研究を進めている。

平成29年度は、課題名「XFEL を用いた自動車用ナノマテリアルの形態や状態の把握」が採択され、SACLA を用いて各種の自動車用ナノマテリアルのイメージング実験を行った。新たなターゲットとして、次世代二次電池として注目を集めている全固体電池に用いられる固体電解質のPCXSS 測定を行った。固体電解質は、放射線損傷に対して脆弱であり、XFEL を用いた無損傷イメージングが重要となる。図2に硫化物固体電解質からのシングルショットコヒーレントＸ線回折パターンを示す。

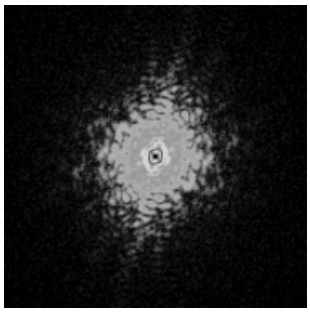


図 2　硫化物固体電解質からのシングルショットコヒーレントＸ線回折パターン。

(c)　Ｘ線レーザー回折による生細胞ダイナミクスの解明に向けた研究

XFEL のフェムト秒オーダーのパルス幅を利用して、異なる状態の細胞を、独自開発した PCXSS 法で放射線損傷なくイメージングすることにより、生細胞のナノレベルダイナミクスを観察することを目指した研究を、平成27年度に採択された科研費基盤（S）（課題名「Ｘ線レーザー回折による生細胞ダイナミクス」）の一環として進めた。異なる状態の細胞の調製方法として、同調培養による細胞周期の同期、温度制御、ケージド化合物を用いたフラッシュ・フォトリシスなどの手法の検討を進めた。

同調培養に関しては、PCXSS 測定に適する *Microbacterium* 菌の細胞分裂周期の特定の段階にある細胞に対して XFEL 施設 SACLA を用いた PCXSS 測定を行い、データ解析を進めた。また、フローサイトメーターを用いて同調率の評価を行った。

ケージド化合物を用いたフラッシュ・フォトリシスに関しては、平成29年度より SACLA において運用が始まったポンプ・プローブ法に対応したコヒーレントＸ線イメージング用試料チャンバ（MAXIC-II）を用いた研究を開始した。測定では、波長可変ナノ秒レーザーをポンプ光に、XFEL をプローブ光に用いた。MLEA 内の試料に、ポンプ光およびプローブ光を干渉なく照射する光学設計を行い実装した。開発した光学系を用いて、ポンプ・プローブ PCXSS 測定およびケージドプロトンを用いたフラッシュ・フォトリシス測定を開始した。図3に MAXIC-II を用いたポンプ・プローブ PCXSS 実験の様子を示す。

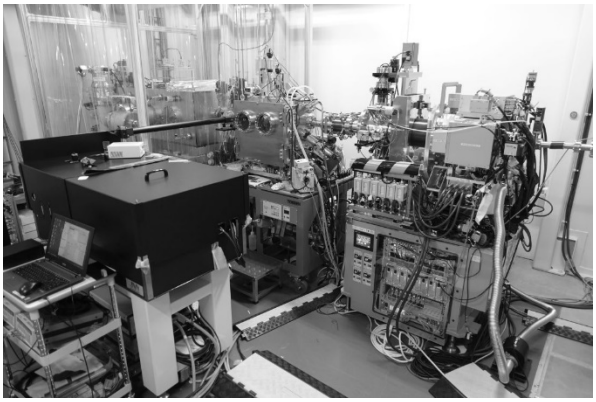


図 3　MAXIC-II を用いたポンプ・プローブ PCXSS 実験の様子。

温度制御に関しては、MAXIC-II 用に新たに試料温度制御装置を開発した。開発した装置を用いて、温度応答性金ナノ粒子や温度制御 Microbacterium 菌の PCXSS 法による測定を進めた。

試料探索の過程で平成28年度に発見した、Thermus 属細菌細胞が培養条件に依って短くなる新規現象に関して、その機構を解明するべく、ポリアミン分析するなどの研究を進めた。

３．今後の研究の展望

日本の XFEL 施設 SACLA は、平成24年3月に供用運転が開始され、当研究分野ではこの新規光源を利用した研究を推進している。具体的には、溶液中で自然な状態にある生物試料をイメージングする研究や、溶液中でのみ構造を保ち機能を発揮するナノ物質をイメージングする研究を行っている。研究は順調に進んでおり、さらなる技術開発を推進する。また、平成26年度より開始したトヨタ自動車（株）との共同研究では、触媒や電池材料など産業応用上重要な物質の実使用環境やプロセス過程でのナノレベル解析が期待される。

SACLA での PCXSS 測定における試料チャンバには、これまで MAXIC を用いてきたが、平成29年度からは、MAXIC の後継機である MAXIC-II の運用が始まった。これにより、ポンプ・プローブ PCXSS など、SACLA のパルス性を活かした時間分解測定の可能性が広がった。

また、分子レベルでのイメージングに向けて、100 nm 集光 XFEL を実現する MAXIC-S の開発も平行して進められており、平成30年度以降の本格運用が期待される。

。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

１）　K. Kuga, Y. Matsumoto, M. Okawa, S. Suzuki, T. Tomita, K. Sone, Y. Shimura, T. Sakakibara, D. Nishio-Hamane, Y. Karaki, Y. Takata, M. Matsunami, R. Eguchi, M. Taguchi, A. Chainani, S. Shin, K. Tamasaku, Y. Nishino,

M. Yabashi, T. Ishikawa and S. Nakatsuji: “Quantum valence criticality in a correlated metal”, Sci. Adv., 4(2): eaao3547- (2018)

2） 吉田 力矢、後藤 遼平、松浦 徹、丹田 聡、香村 芳樹、田中 良和、西野 吉則: 「コヒーレントX線回折による電荷密度波物質の研究」、SPring-8 利用研究成果集、6(1): 60-64 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） 西野 吉則、木村 隆志、鈴木 明大、城地 保昌、別所 義隆: 「SACLA を用いた環境制御ナノイメージング」、レーザー研究、45(8): 508-512 (2017)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） Y. Nishino*, T. Kimura, A. Suzuki, Y. Joti and Y. Bessho : “Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction”, 5th Ringberg Workshop on Structural Biology with FELs, Ringberg Castle, Germany (2018-02)

2） Y. Nishino* : “Coherent diffraction imaging”, SACLA Users’ Meeting 2017, SACLA, Japan (2017-12)

b．招待講演（国内学会）

1） 西野 吉則* : 「X線自由電子レーザーを用いたバイオ関連イメージングにおける表面技術」、ASTEC2018（第 13 回先端表面技術展・会議）、東京ビッグサイト、Japan (2018-02)

2） 鈴木 明大*、木村 隆志、飯田 良、三友 秀之、城地保昌、別所 義隆、新倉 謙一、居城 邦治、西野 吉則 : 「X 線レーザー回折による温度応答性ナノ粒子の溶液中イメージング」、第 14 回 X 線結像光学シンポジウム、筑波大学つくばキャンパス、Japan (2017-11)

c．一般講演（国際学会）

1） Y. Nishino*, T. Kimura, A. Suzuki, Y. Joti, T. Oshima and Y. Bessho : “Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction”, Gordon Research Conference on X-Ray Science , Stonehill College Easton, MA, United States of America (the) (2017-07 〜 2017-08)

2） N. Tani*, T. Kimura, A. Suzuki, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : “Lipid bilayer chambers for pulsed coherent X-ray solution scattering”, International Conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT17), Pacifico Yokohama, Yokohama city, Kanagawa prefecture, JAPAN, Japan (2017-07 〜 2017-08)

3） T. Kimura*, A. Suzuki, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : “Development of Micrometer-sized Liquid Enclosure Chip for Imaging of Samples in Solution by Single-shot X-ray Laser Diffraction”, International Conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT17), Pacifico Yokohama, Yokohama city, Kanagawa prefecture, JAPAN, Japan (2017-07 〜 2017-08)

4） A. Suzuki*, T. Tachibana, N. Tani, Y. Joti, Y. Bessho, T. Kimura and Y. Nishino : “New design of environmental cells as a first step toward 3D imaging in solution by X-ray laser diffraction”, International Conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT17), Pacifico Yokohama, Yokohama city, Kanagawa prefecture, JAPAN, Japan (2017-07 〜 2017-08)

d．一般講演（国内学会）

1） 湯本 博勝*、小山 貴久、木村 隆志、鈴木 明大、亀島 敬、城地 保昌、登野 健介、谷 直哉、橘 健朗、小西 祐輔、別所 義隆、西野 吉則、矢橋 牧名、大橋 治彦 : 「コヒーレント回折顕微鏡のための高密度 X 線ミラー集光光学系の開発」、2018 年度精密工学会春季大会学術講演会、中央大学後楽園キャンパス、Japan (2018-03)

2） 木村 隆志*、鈴木 明大、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 : 「パルス状コヒーレント X 線溶液散乱計測用マイクロ流路型環境セルアレイの開発」、2018 年度精密工学会春季大会学術講演会、中央大学後楽園キャンパス、Japan (2018-03)

3） 木村 隆志*、鈴木 明大、三友 秀之、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 : 「インクジェット技術を利用した微量試料の X 線自由電子レーザーイメージング手法の開発」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場、Japan (2018-01)

4） 鈴木 明大*、木村 隆志、飯田 良、三友 秀之、城地保昌、別所 義隆、新倉 謙一、居城 邦治、西野 吉則 : 「X 線レーザー回折による温度応答性金ナノ粒子の溶液中イメージング」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場、Japan (2018-01)

5） 木村 円香、楊 影、木村 隆志、鈴木 明大*、城地 保昌、森屋 利幸、大島 泰郎、別所 義隆、西野 吉則 : 「X線レーザー回折による生細胞の温度制御イメージング 」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場、Japan (2018-01)

6） 小山 貴久*、湯本 博勝、木村 隆志、鈴木 明大、亀

島 敬、城地 保昌、登野 健介、谷 直哉、橘 健朗、小西 祐輔、別所 義隆、西野 吉則、矢橋 牧名、大橋治彦 :「SACLA における高分解能コヒーレント回折イメージングのための超高密度集光光学系の開発―多層膜ミラー光学系の評価― 」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場、Japan (2018-01)

7） 湯本 博勝*、小山 貴久、木村 隆志、鈴木 明大、亀島 敬、城地 保昌、登野 健介、谷 直哉、橘 健朗、小西 祐輔、別所 義隆、西野 吉則、矢橋 牧名、大橋治彦 :「SACLA における高分解能コヒーレント回折イメージングのための超高密度集光光学系の開発―顕微システムの構築と集光ビームの評価―」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場、Japan (2018-01)

8） 谷 直哉*、木村 隆志、鈴木 明大、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 :「X線レーザー回折イメージングのための脂質二重膜マイクロチャンバーの開発」、2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会、大阪大学豊中キャンパス、Japan (2017-09)

9） 木村 隆志*、鈴木 明大、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 :「超微細インクジェットを利用した微量混合液体試料の X 線自由電子レーザーイメージング技術の開発」、2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会、大阪大学豊中キャンパス、Japan (2017-09)

e． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 西野 吉則* :「X線レーザーで観た、生きた細胞」、国立大学附置研究所･センター長会議(JCRIC) × ナレッジキャピタル-日本の研究、最前線-、CAFE Lab. / グランフロント大阪 北館 ナレッジキャピタル、Japan (2018-01)

2） 鈴木 明大*、木村 隆志、飯田 良、三友 秀之、城地保昌、別所 義隆、新倉 謙一、居城 邦治、西野 吉則 :「X 線レーザー回折による温度応答性金ナノ粒子の溶液中イメージング」、北海道大学電子科学研究所平成 29 年度研究交流会、北海道大学電子科学研究所、Japan (2018-01)

3） 西野 吉則*、木村 隆志、鈴木 明大、城地 保昌、別所 義隆 :「X 線自由電子レーザー施設 SACLA を用いた環境制御ナノイメージング」、量子ビーム科学研究施設研究会 / 人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス「物質・物性評価横串サブグループ」研究会、大阪大学産業科学研究所、Japan (2017-12)

4） A. Suzuki*, T. Kimura, R. Iida, H. Mitomo, Y. Joti, Y. Bessho, K. Niikura, K. Ijiro and Y. Nishino : “X-ray laser imaging of thermoresponsive gold nanoparticles in solution”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium on 極, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

5） N. Tani*, T. Kimura, A. Suzuki, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : “Lipid bilayer chambers to observe membrane proteins by pulsed coherent X-ray solution scattering”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium on 極, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

6） T. Kimura*, A. Suzuki, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : “X-ray Laser Imaging of DNA-Bound Nanoparticles in Inkjet-Dispensed Mixed Solution”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium on 極, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

7） 西野 吉則* :「X線顕微鏡」、大阪大学ナノサイエンス・ナノテクノロジー高度学際教育研究プログラム、大阪大学中之島センター、Japan (2017-11)

8） 鈴木 明大*、木村 隆志、飯田 良、三友 秀之、城地保昌、別所 義隆、新倉 謙一、居城 邦治、西野 吉則 :「X 線レーザー回折による温度応答性ナノ粒子の溶液中イメージング」、第 5 回アライアンス若手研究交流会、東京工業大学すずかけ台キャンパス、Japan (2017-08)

9） 西野 吉則* :「計算生命科学の進展」、新世代研究所第 24 回研究報告会 (2016 年度研究成果報告会)、御茶ノ水ソラシティ カンファレンスセンター、Japan (2017-07)

１０）西野 吉則* :「X 線自由電子レーザー施設 SACLA を用いた環境制御ナノイメージング」、平成 29 年度 ダイナミックアライアンス G2 分科会、北海道大学電子科学研究所、Japan (2017-07)

4.7 シンポジウムの開催

該当なし

4.8 共同研究

a． 所内共同研究

1） 居城 邦治（生体分子デバイス研究分野）

2） 三友 秀之（生体分子デバイス研究分野）

b． 民間等との共同研究

1） 西野 吉則(トヨタ自動車株式会社) :「平成 29 年度 SACLA 産業利用推進プログラム「XFEL を用いた自動車用ナノマテリアルの形態や状態の把握」」、2017 年度、X線自由電子レーザー施設ＳＡＣＬＡを用いて自動車用ナノマテリアルの形態や状態の把握を目指した研究を行う。

c． 委託研究

該当なし

d． 国際共同研究

1） 別所 義隆（Academia Sinica）

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 西野 吉則、基盤研究 S、X線レーザー回折による生細胞ダイナミクス、2015～2019 年度

2） 木村 隆志、若手研究 A、破壊計測用マイクロ流路による液中反応X線レーザーイメージング、2016～2019 年度

3） 鈴木 明大、研究活動スタート支援、X線ナノイメージング技術を応用したシングルショット波面計測、2016～2017 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 木村 隆志、JST さきがけ、ビッグデータアプローチによる X 線レーザーイメージングの高度化、2017～2020 年度

4.10 受賞

1） スタイルは任意。名前、授与機関、タイトル、日付など

該当なし

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1） 西野 吉則：日本学術会議連携会員 （2017 年 10 月 01 日～現在）

2） 西野 吉則：ＣＲＥＳＴ・さきがけ複合領域「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測･解析手法の開発と応用」領域アドバイザー（2016 年 06 月 16 日～現在）

3） 西野 吉則：公益財団法人 新世代研究所 バイオ単分子研究会 委員長 （2015 年 04 月 01 日～現在）

4） 西野 吉則：文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター専門調査員 （2013 年 06 月 27 日～現在）

b．国内外の学会の役職

1） 西野 吉則：X線結像光学研究会 幹事 （2015年12月16日～現在）

2） 西野 吉則：SACLA ユーザー協同体 評議員 （2013 年 05 月 01 日～現在）

c．兼任・兼業

1） 西野 吉則：理化学研究所客員研究員（2010 年 04 月 01 日～現在）

2） 木村 隆志：理化学研究所客員研究員（2011 年 06 月～現在）

3） 鈴木 明大：理化学研究所客員研究員（2016 年 06 月～現在）

d. 外国人研究者の招聘

該当なし

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 工学部、生体工学概論、西野 吉則、2018 年 01 月 16 日

2） 工学部、応用光学 II、西野 吉則、2017 年 10 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

3） 全学共通、環境と人間「ナノテクノロジーが拓くバイオサイエンスの新潮流」、西野 吉則、2017 年 06 月 16 日

4） 工学部、科学技術英語演習、西野 吉則、2017 年 04 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

5） 情報科学研究科、ナノイメージング特論、西野 吉則、木村隆志、鈴木明大、2017 年 04 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

6） 工学部、情報エレクトロニクス演習、木村 隆志、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

7） 工学部、生体情報工学実験 1、木村 隆志、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

8） 工学部、生体情報工学実験 2、鈴木 明大、2017 年 10 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

9） 全学共通、フレッシュマンセミナー、鈴木 明大、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 社会人、大阪大学ナノサイエンス・ナノテクノロジー高度学際教育研究プログラム「X線顕微鏡法」、西野 吉則 2017 年 11 月 02 日

g． 新聞・テレビ等の報道

該当なし

h． ポスドク・客員研究員など

1） 楊 影（博士研究員）

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：1名

1） 谷 直哉：修士（情報科学）、X線レーザー回折イメージングによる膜タンパク質観察に向けた脂質膜マイクロチャンバーの開発

博士学位：0名

物質科学研究部門

研究目的

本研究部門では、電子科学や生命科学を支える物質創製と物性評価技術をベースとして、フォトニクスのための光機能性分子とナノ材料の創製、生体の情報機能や運動機能を理解し応用するための分子機能材料の創製、新規な太陽電池システムの物理学とクリーン系およびスピントロニクスへの物性理論を用いた基礎物理の解明、バルクでは見られない特異な電子・イオン輸送現象を示す薄膜機能材料の合成とそれを用いたデバイス開発に取り組んでいます。このような研究は、実社会で役に立つ機能材料や機能デバイスの創製に貢献します。

分子フォトニクス研究分野

教　授　Biju Vasudevan Pillai（Kerala大学、Ph.D.化学、2016.2～）
准教授　髙野　勇太（筑波大学、博士(理学)、2017.4～）
助　教　　柚山　健一（奈良先端大、博士(理学)、2016.10～）
事務補助員　藤井　敦子（2016.4～）
博士課程　Sushant Ghimere、Devika Sasikumar、Ajith Nair（環境科学院）
修士課程　小原　怜子（環境科学院）

1．研究目標

本研究分野は、分子および量子ドットにおける新規光学特性と量子効果を利用した有機・無機フォトニクス材料の開発と、それらを利用したレーザー光学的技術の開発および細胞工学的応用利用技術の開発を目標としている。

新たなフォトニクス材料やレーザー光学技術は、光発電材料や発光性材料、医療向けの光検知試薬や光治療薬、レーザー加工技術における技術革新やブレークスルーをもたらすことが期待される。

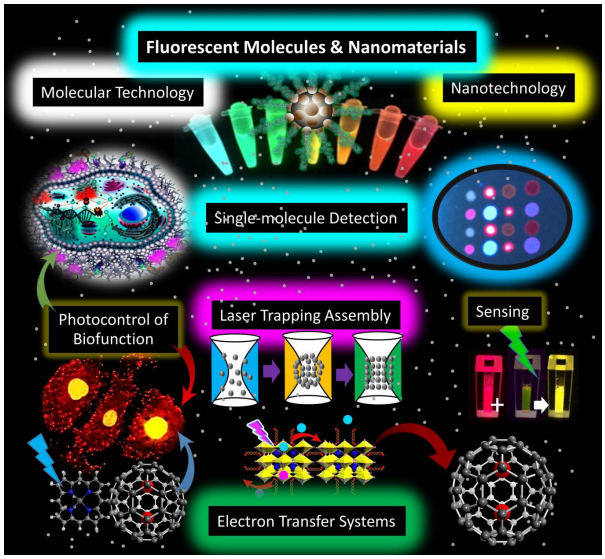


図１　本研究分野の研究概要

2．研究成果

周辺環境や周辺分子の状態・量によって発光性を変化させる分子は、環境中の有毒物質や、生体内中の活動に影響を与える分子の分布状況や状態を検知することが可能である。また同様の性質を有する半導体性ナノ粒子（ナノ結晶ともいわれる）は、高い安定性と発光性を有することが知られていおり、上記のような検知のためや、ナノスケールでの光学素子開発に向けて盛んに研究が行われているフォトニクス材料である【資料4.1-11)】。

生体において活性酸素は老化や疾病の原因として着目を集める物質である。活性酸素の中でも一重項酸素（$^1O_2$）は特に生体毒性が高いため、その毒性を防ぐことによる病気の治療法や、あるいは毒性を癌組織中にて選択的に発生させる光治療に有用である。従来法における$^1O_2$の検知はSOSGRなどの市販に蛍光検知試薬において行われているが、SOSGRは可視光条件下での安定性が乏しいことが知られている。当研究室ではこの問題点を克服するために、クマリンとアントラセンを接続した新規分子を開発し、可視光に安定な$^1O_2$検知蛍光試薬の開発に成功した【資料4.1-1)】。

また光エネルギーを利用した細胞機能の制御手法の開発を並行して行った。光照射によって分子内が正電荷と負電荷に分離した状態をもつ分子を利用し、これを細胞膜や細胞内オルガネラに送達することにより、光照射をトリガーとした分子および周辺環境の変調による細胞活動の制御に成功した【資料4.1-2),-3),-4)】

開発している光機能性のナノ材料や分子を、溶液中で任意に操るための光操作技術の研究も行っている。高強度レーザーを集光照射すると、光圧やキャビテーションバブル発生に伴う衝撃力などが誘起される。本年度は、これらの光の力学作用をタンパク質の局所濃縮に応用した。レーザーの焦点近傍でタンパク質を濃縮することにより、結晶化やアミロイド形成を時空間的に制御して誘起することに成功した【資料4.1-5),-6),-8)】。また、本手法を次世代半導体材料として期待されているハイブリッド型ハライドペロブスカイトの前駆体に応用し、溶液中で一つのペロブスカイト結晶を任意の場所に作製することにも成功した。

以上のように、有機化合物や半導体量子ドットをベースとしたフォトニクス材料の開発を基にした研究遂行によって、新たな材料開発、機能性解明、および生物学的な応用における重要な知見を見出した。

3．今後の研究の展望

今後は、各種半導体性ナノ粒子についての新規合成手法の開発から基礎物性解明、応用利用についての包括的研究の遂行を行う。併せて、新規発光性材料の発見や細胞内環境の酸化還元反応の人為制御への利用を目指して有機分子プローブの開発を行う。そして、開発材料に最適な光操作技術の開発を並行して行う。これにより、分子生物学的および細胞工学的に利用可能な革新的光学分子材料の開発を行う。

4．資料

4.1　学術論文（査読あり）

1）　R. Kohara, K. Yuyama, Y. Shigeri and V. P. Biju: “Blue Emitting Electron Donor–Acceptor Dyads for Naked-Eye Fluorescence Detection of Singlet Oxygen”, *ChemPho-*

toChem, Wiley-VCH, 1(7): 299-303 (2017)

2） Y. Takano, E. Hanai and H. Imahori: “Photoinduced electron transfer reaction in mitochondria for spatio-temporal selective photo-oxidation of lipids by donor/acceptor linked molecules ”, *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, 9: 17909-17913 (2017)

3） Y. Takano, R. Munechika, V. P. Biju, H. Harashima, H. Imahori and Y. Yamada: “Optical control of mitochondrial reductive reactions in living cells using an electron donor-acceptor linked molecule”, *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, 9: 18690-18698 (2017)

4） C. Ning, Y. Takano, T. Numata, R. Inoue, T. Murakami and H. Imahori: “Strategy to Attain Remarkably High Photoinduced Charge-Separation Yield of Donor-Acceptor Linked Molecules in Biological Environment via Modulating Their Cationic Moieties”, *Journal of Physical Chemistry C*, American chemical society, 121(32): 17457-17465 (2017)

5） T. Liu, K. Yuyama, T. Hiramatsu, N. Yamamoto, E. Chatani, H. Miyasaka, T. Sugiyama and H. Masuhara: “Femtosecond Laser-Enhanced Amyloid Fibril Formation of Insulin”, *Langmuir*, 33(33): 8311-8318 (2017)

6） K. Yuyama, M. Ueda, S. Nagao, S. Hirota, T. Sugiyama and H. Masuhara: “A Single Spherical Assembly of Protein Amyloid Fibrils Formed by Laser Trapping”, *Angewandte Chemie International Edition*, 129(24): 6843-6847 (2017)

7） A. Umeno, V. P. Biju and Y. Yoshida: “In vivo ROS production and use of oxidative stress-derived biomarkers to detect the onset of diseases such as Alzheimer’s disease, Parkinson’s disease, and diabetes.”, *Free Radical Research*, Taylor & Francis, 51(4): 413-427 (2017) V. P. Biju, T. Mori, T. Aasahi and H. Miyasaka: “Preface for special issue on photosynergetics”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C*, Elsevier, 34: 1-(2018)

8） K. Yuyama, K. Chang, J. Tu, H. Masuhara and T. Sugiyma: “Rapid localized crystallization of lysozyme by laser trapping”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20: 6034-6039 (2018)

9） M. Ando, V. P. Biju and Y. Shigeri: “Development of Technologies for Sensing Ozone in Ambient Air”, *Analytical Sciences*, The Japan Society for Analytical Chemistry, 34(3): 263-271 (2018)

１０）S. Pillai. Sreenadh , H. Yukawa, D. Onoshima, V. P. Biju and Y. Baba: “Quantum Dot-Peptide Nanoassembly on Mesoporous Silica Nanoparticle for Biosensing”, *Nano Hybrids and Composites*, Trans Tech Publications, 19: 55-72 (2018)

１１）G. Sushant、V. P. Biju: ”Relations of exciton dynamics in quantum dots to photoluminescence, lasing, and energy harvesting”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C*, Elsevier、34: 137-151 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） 杉山 輝樹、柚山 健一: 「集光レーザーの光圧によるタンパク質結晶成長制御」、レーザー研究 (The Review of Laser Eingineering)、45(5): 283-287 (2017)

２） 柚山 健一: 「結晶成長の光学的な制御を可能とする液面での光トラッピング」、光化学 (Photochemistry)、光化学協会、48(1): 32-35 (2017)

３） 髙野 勇太: 「光機能性フラーレンを用いた細胞機能の光制御アプローチ」、生物工学会誌、日本生物工学会、95(12): 705-707 (2017)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） Y. Takano* : “Electron Transfer for Photocontrol of Cellular Activities”, The RIES International Seminar on ’Light, Molecules and Nanomaterials’, Hokkaido Univ., Hokkaido, Japan (2017-05)

２） Y. Takano* : “Unique Properties of Paramagnetic Endohedral Metallofullerenes for the Future Molecular Tools”, 2nd International Symposium on NanoCarbons - Fullerenes,Endofullerenes, Carbon Nanotubes, Graphenes and Carbon Nanostructures, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, China (2017-06)

３） V. P. Biju* : “A Few Intracellular Pathways Of Quantum Dot Bioconjugates”, MAF2017, ブルッヘ, Belgium (2017-09)

４） V. P. Biju* : “Quantum Dots for Single Molecule Detections: Recent Progress and Challenges”, 2017 RIES-CIS Symposium, 国立交通大学, Taiwan (Province of China) (2017-10)

５） V. P. Biju* : “Semiconductor Quantum Dots in Single Molecule Detections: Prospects and challenges”, ICPA, Kottayam, India (2017-11)

６） V. P. Biju* : “Semiconductor Quontum Dots in Bioimagion: Progress and Challenges”, 9th Bangalore India NANO, Bangalore, India (2017-12)

7） V. P. Biju* : “Semiconductore Quantum Dots for Single-molecule Detections in Living Cells: Challenges and Progress”, Nanobiotechnology, Trivandrum, India (2017-12)

b．招待講演（国内学会）

該当なし

c．一般講演（国際学会）

1） V. P. Biju* : “Single molecule detections &Bioimaging using Semiconductor Nanocrystals”, Emerging Frontiers in Chemical Science 2017, India (2017)

d．一般講演（国内学会）

1） 髙野 勇太*、花井 衣里奈、Vasudevan Pillai Biju、今堀 博 :「光誘起電子移動反応を利用したミトコンドリア内脂質の選択的光酸化剤の開発」、第１２回日本ケミカルバイオロジー学会年会、北海道大学、札幌、Japan (2017-06)

2） 山田 勇磨*、髙野 勇太、宗近 玲那、福田 豊、今堀 博、原島 秀吉 :「癌細胞ミトコンドリアを標的とした光殺細胞効果の検証」、第 70 回日本酸化ストレス学会学術集会、茨城、つくば国際会議場、Japan (2017-06)

3） 柚山 健一*、Vasudevan Pillai Biju : 「界面での半導体ナノ材料の光トラッピング」、2017 年光化学討論会、東北大学青葉山キャンパス、Japan (2017-09)

4） 髙野 勇太*、宗近 玲那、福田 豊、Vasudevan Pillai Biju、今堀 博、原島 秀吉、山田 勇磨 :「光誘起電荷分離分子からの電子移動反応を利用した癌細胞ミトコンドリア内での光還元反応手法の開発」、2017 年光化学討論会、宮城、東北大学青葉山キャンパス、Japan (2017-09)

5） D. Chiu*, Y. Liu, K. Yuyama, H. Masuhara and T. Sugiyama : “Laser trapping-controlled crystal growth and dissolution of L-phenylalanine”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス, Japan (2017-09)

6） J. J. Chen*, K. Yuyama, H. Masuhara and T. Sugiyama : “Bubble generation in L-phenylalanine solution by laser irradiation at solution surface”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス, Japan (2017-09)

7） T. Liu*, K. Yuyama, T. Hiramatsu, N. Yamamoto, E. Chatani, H. Masuhara and T. Sugiyama : “Femtosecond laser-induced crystallization and amyloid fibril formation of insulin”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス, Japan (2017-09)

8） S. Wang*, T. Kudo, K. Yuyama, T. Sugiyama and H. Masuhara : “Spectroscopic study on laser trapping-ssembling dynamics of nanoparticles at solution surface”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス, Japan (2017-09)

9） R. Kohara*, K. Yuyama and V. P. Biju : “Fluorescence Detection of Singlet Oxygen Using Intramolecular Electron Donor-Acceptor Dyads ”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス, Japan (2017-09)

１０）V. P. Biju* : “Single molecule detections &Bioimaging using Semiconductor Nanocrystals.”, Emerging Frontiers in Chemical Science 2017, カリカット, India (2017-09)

１１）髙野 勇太*、宗近 玲那、Vasudevan Pillai Biju、原島 秀吉、山田 勇磨、今堀 博 :「Fullerene-porphyrin-ferrocene linked molecule for optically-controlled intracellular electron transfer in mitochondria for targeted cancer cell death」、第 53 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム、京都、京都大学 宇治キャンパス、Japan (2017-09)

１２）S. Ghimire*, L. Chouhan, K. Yuyama, Y. Takano and V. P. Biju : “Extended Diffusion of Charge Carriers in Perovskite Nanocrystal Assembly”, 日本化学会第 98 春季年会 2018, 日本大学理工学部 船橋キャンパス, Japan (2018-03)

１３）柚山 健一*、Vasudevan Pillai Biju : 「気液界面への連続発振レーザー集光照射による有機無機ハイブリッドペロブスカイト化合物の結晶化」、日本化学会第 98 春季年会 2018、日本大学理工学部 船橋キャンパス、Japan (2018-03)

１４）Y. Takano*, R. Munechika, V. P. Biju, H. Harashima, H. Imahori and Y. Yamada : “Photoinduced reductive reaction in mitochondria by electron donor/acceptor linked molecules”, 日本化学会第 98 春季年会, 日本大学理工学部 船橋キャンパス, Japan (2018-03)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 柚山 健一* : 「集光レーザーの放射圧を用いた分子・ナノ粒子集合体の時空間形成」、第 33 回ライラックセミナー・第 23 回若手研究者交流会、おたる自然の村おこばち山荘、Japan (2017-06)

2） K. Yuyama* and V. P. Biju : “Crystallization of $CH_3NH_3PbBr_3$ by Optical Trapping at Solution Surface”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

3） S. Ghimire*, V. Nair, K. Yuyama and V. P. Biju : “The Dynamics of Photogenerated Charge Carriers in Self-Assembled Semiconductor Nanocrystal Structures”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

4） R. Kohara*, K. Yuyama and V. P. Biju : “Electron Donor-Acceptor Dyads for Singlet Oxygen Detection: Oxidation vs Dimerization”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

5） 柚山 健一*、Vasudevan Pillai Biju : 「集光レーザーの

放射圧を用いたタンパク質の光捕捉とアミロイド集合体形成」、第５回アライアンス若手研究交流会、東京工業大学すずかけ台キャンパス、Japan (2017-08)

６） 柚山 健一*、Vasudevan Pillai Biju：「集光レーザーの光圧を用いたペロブスカイト前駆体溶液表面での光捕捉」、「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」第２回公開シンポジウム、大阪大学豊中キャンパス、Japan (2018-01)

4.7 シンポジウムの開催

１） 1st International Seminar on Light, Molecules and Na-nomaterials, Vasudevan Pillai BIJU, Hokkaido University, Sapporo, (2017-05)

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

該当なし

ｂ．民間等との共同研究

該当なし

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

１） 台湾国立交通大學の増原教授、杉山副教授と光トラッピングに関する共同研究を実施した。

２） インド Mahatma Gandhi 大学の Raju Francis 教授と量子ドットを用いた新規ポリマー材料開発に関する共同研究を実施した。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

ａ． 科学研究費補助金

１） Biju Vasudevan Pillai、新学術領域研究、One and multiple photon induced generation、2017-2018 年度

２） 高野勇太、基盤研究 C、光電荷分離分子による細胞小器官機能の光制御法開発、2016-2017 年度

３） 柚山健一、若手研究 B、光捕捉によるアミロイド集合体の時空間形成と蛍光解析によるそのダイナミクス解明、2017-2018 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

１） 髙野 勇太、カシオ科学振興財団研究助成、ナノ炭素ケージ内に封じた金属原子の特異な磁性・発光性の開拓と利用、2017-2018年度

4.10 受賞

１） S. Ghimire, 優秀ポスター賞, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, (2017-11 ～ 2017-12)

4.11 社会教育活動

ａ．公的機関の委員

該当なし

ｂ．国内外の学会の役職

該当なし

ｃ．兼任・兼業

１） Biju Vasudevan Pillai：Mahatma Gandhi University 招聘教授（2017.8.1-2018.7.31）

２） Biju Vasudevan Pillai: 名古屋大学招聘教員 (2017.4.1-2018.3.31)

d. 外国人研究者の招聘

１） H. Peter Lu, アメリカ、(2017.4.23-2017.4.25)

２） Andey L. Rogach, 香港、(2017.5.8-2017.5.11)

３） Raju Francis, インド、(2017-05.14-2017.5.27)

４） Elizabeth Mariam Thomas 、インド (2018.2.1-2018.3.31)、

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

１） 大学院、光電子科学特論 I、Biju Vasudevan Pillai、2017.10.1-2018.03.31

２） 大学院、英語演習中級、Biju Vasudevan Pillai, 2017.04.01-2017.09.30

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

ｇ． 新聞・テレビ等の報道

該当なし

ｈ． ポスドク・客員研究員など

該当なし

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：１人

博士学位：０人

修士学位：

１） 小原 怜子：修士、Electron Donor-Acceptor Molecular Dyads for Fluorescence Sensing of Singlet Oxygen

スマート分子材料研究分野

教　授　玉置信之（千葉大院、工博、2008.10～）
助　教　Yuna Kim（Yonsei University、工博、2011.8～）
　　相良剛光（東京大院、工博、2015.7～）
　　松尾和哉（京都大院、工博、2015.6～）

事務補助員　田山紘子
学　生
博士課程
Halley M M、Islam MD Jahirul、Viswanatha H M、Noushaba Nusrat Mafy、Sampreeth Thayyil、Shariful Haque
修士課程
芦野史弥
学部生
山下和希、植田海透

１．研究目標

生体内では、DNA、タンパク質、糖、脂質などが、生体内外の刺激を受け、分子構造、集合状態、他の分子との相互作用を変化させることで結果的に情報を処理して、何らかの最終的な化学的または物理的変化として出力を行う、いわゆる「スマート分子」として働いている。われわれは、スマート分子を合成によって創成することを目的として、光等の刺激によって構造変化を示す分子の合成、分子構造変化によって誘起される分子集合状態や他の分子との相互作用の変化の解析を行っている。具体的には、光刺激を利用した分子内の回転運動の制御、生体分子機械の運動の光スイッチ、光エネルギーを使って位置を変化させる光駆動分子機械の創成、光応答性分子による液晶分子配列の制御、物理的キラル場による分子キラリティーの誘起を目指している。

２．研究成果

(a) モータータンパク質ミオシン-アクチンの光制御

これまでに当研究室では、アデノシン三リン酸（ATP）に代わって高エネルギー化合物として働き、かつ高エネルギー化合物としての活性を光で可逆的にスイッチしうる「光応答性高エネルギー化合物」AzoTPを開発し、モータータンパク質キネシンに与えて、その運動速度を光で可逆的に約８０％スイッチできることを示してきた（N. Perur et al., Chem. Commun., 2013, 49, 9935）。光による活性の変化は、AzoTP内のアゾベンゼン部位のトランス－シス光異性化に伴うキネシンに対する親和性の変化に依っている。今回、AzoTPの働きの一般性およびマクロな運動系への適用の可能性を明らかにするために、ATPを基質とするもう一つのモータータンパク質ミオシンーアクチンを用いたモーティリティー実験、筋繊維の収縮現象といったマクロな運動現象へAzoTPを適用する実験を行った。

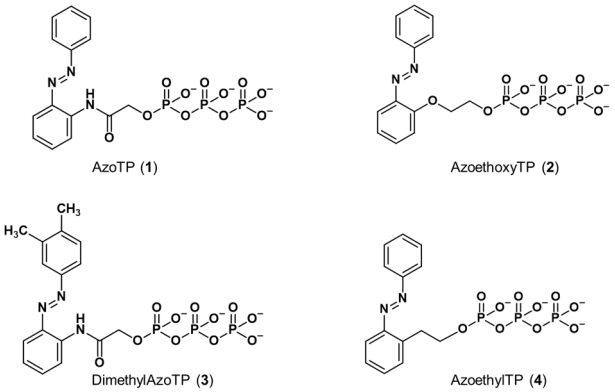


図１　光応答性高エネルギー化合物の分子構造

図１にAzoTPを含む今回新たに合成した光応答性高エネルギー化合物の分子構造を示す。アゾベンゼンの芳香環上のメチル基や三リン酸とアゾベンゼンをつなぐリンカーの構造の高エネルギー化合物としての特性への影響を調べるためにこれらの化合物を設計、合成した。図２には、ミオシンに対する高エネルギー化合物の活性を評価するためのF-アクチンモーティリティーアッセイの結果を示す。キネシンに対して活性を示したAzoTPおよびその誘導体はミオシンに対しても活性があること、特にエーテル結合を有するAzoethoxyTPは高い活性と親和性を有すること、アゾベンゼン部位がトランス体からシス体に変化すると活性が大きく低下すること、が明らかとなった。以上の結果は、アゾベンゼン部位を有する三リン酸化合物であるAzoTP及びその誘導体の光応答性高エネルギー化合物としての特性は、モータータンパク質に対してある程度の一般性があることを示す。

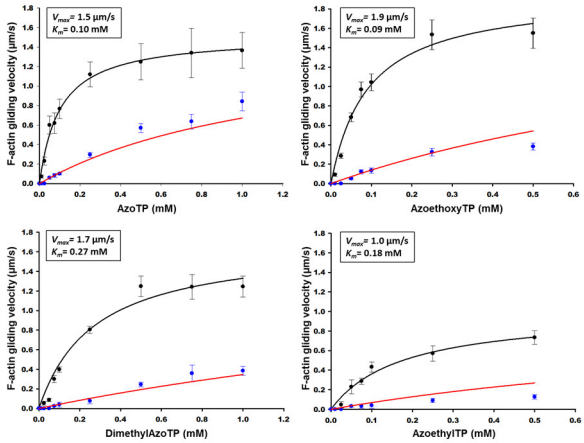


図２　モーティリティー実験における F-アクチンの滑走速度の高エネルギー化合物の濃度依存性。黒丸（上部の曲線上の丸）は光照射前（トランス体）。青丸（下部の曲線上の丸）は、紫外線照射後（シスリッチ状態）。赤線（下部の曲線）は、光定常状態での残存トランス体の活性のみを考慮したときの F-アクチンの滑走速度の計算値。

次に、AzoTPを用いて筋繊維の運動を光反応によって制御することを試みた。これまでに、ニワトリからとった筋繊維にATPを添加すると筋繊維が収縮することが知られている。ミオシンーアクチンを含む筋繊維内でその分子運動がATPの加水分解によって誘起され、結果的に筋繊維の収縮という目に見える大きさの現象が起こっている。ATPの加水分解という分子レベルの変化が、筋繊維の収縮というマクロレベルの運動へとつながっている点が興味深い。今、光応答性の高エネルギー分子であるAzoTPを用いることで、筋繊維のマクロな運動を光で制御できるかに関心が持たれる。あらかじめ紫外線照射によってシス体としたAzoTPを添加したときは、ミオシンーアクチンを含む筋繊維の収縮は全く起こらなかった（図３a 写真内左）。シス体のAzoTPを添加した後に、AzoTPのアゾベンゼン部位のシス→トランス光異性化反応が誘起される510nm光を照射すると直ちに約４０％の筋繊維の収縮が起こった（図３b 写真内右）。この結果は、AzoTPの分子レベルでの活性の光変化を利用することで、マクロなサイズの運動を制御できることを初めて示したもので興味深い。本研究成果を模式的に表した絵は、本論文を掲載した英国王立化学会の雑誌”Organic & Biomolecular Chemistry”誌のInside coverに使われた（図４）。

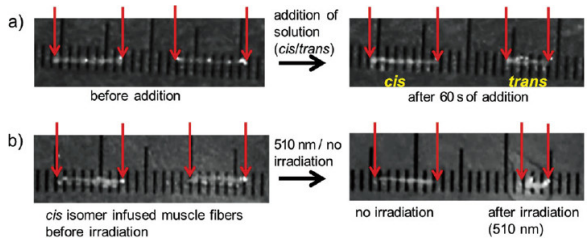


図３　光応答性高エネルギー化合物AzoTPを添加したときの筋繊維の収縮。　a）左の写真はAzoTPを加える前の２本の筋繊維の状態を示す。右の写真は２本の筋繊維にそれぞれ、紫外線照射してシス体にしたAzoTP（写真内左）または光を照射せずにトランス体のままのAzoTP（写真内右）を添加し、60秒経過後の筋繊維の状態を示す。b）左の写真は予め紫外線照射してシス体にしたAzoTPを添加した２本の筋繊維の状態を示す。右の写真はそのまま光を照射せずに保った筋繊維（写真内左）とシス→トランス光異性化反応を誘起する510nm光を照射した筋繊維（写真内右）の状態を示す。

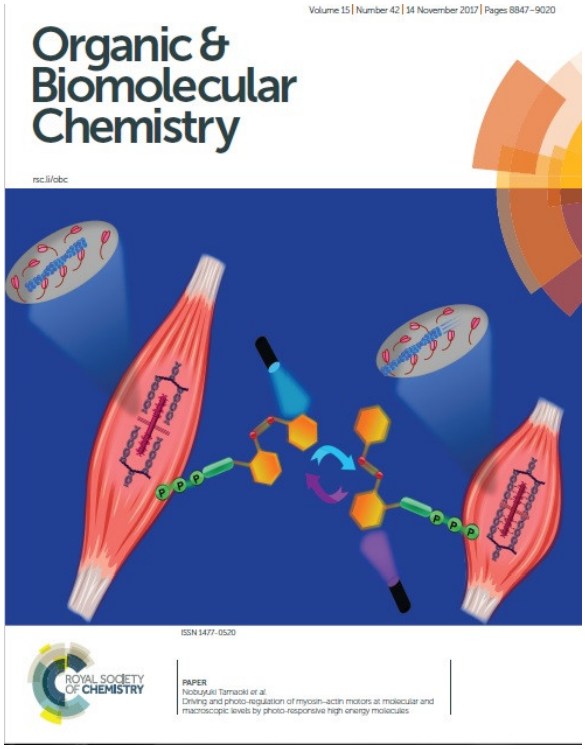


図４　”Organic & Biomolecular Chemistry”誌のInside cover

(b) 圧力印加によって光不活性状態から光重合状態に転移するジアセチレン結晶

当研究室では、刺激として主に光に応答する有機化合物の研究を行っている。一方で、単一の刺激ではなく２つ以上の刺激が与えられたときにのみ応答する有機化合物またはその集合体は、より選択的な応答と、その機能を活かした応用が期待されるために、注目されている。一部のジアセチレン誘導体は、結晶状態で光照射することによってジアセチレン部位が重合反応を起こすことが古くから知られていた。これまでに研究室ではジアセチレン誘導体の一部に、結晶状態の違いによって光重合性が大きく変化する化合物が存在することをいち早く見出し、研究を続けてきた。例えば、水素結合性のウレタン結合やアミド結合を分子内に有するジアセチレン誘導体の中には、通常の再結晶によって得た三次元結晶では光重合しないものの、特定の溶媒から得られる一次元結晶（有機ゲル状態）では速やかに光重合するものが存在することを示した(N. Tamaoki, et al., *Langmuir*, 2000; J. Nagasawa, et al.,*Eur. J. Org. Chem.*, 2011)。この一連の研究の中で、最近になって、全く新しい現象として、溶媒から再結晶によって得られた結晶中では光重合しないものの、その結晶に１MPa 程度以上の圧力を印加した後では光重合が起こるジアセチレン誘導体を見出した（図５，６、特願 2017-222951)。すなわち、圧力印加によって「光重合特性が変化する」ジアセチレン誘導体結晶が存在するということである。本現象は、圧力という外部刺激を位置選択的に与えることで、位置選択的に光重合体を形成できることを意する。この特性を利用すれば、モールドを埋め込んで樹脂に凹凸をつけて固める従

来のナノインプリントとは異なり、材料の表面に凹凸を有するモールドを接触させて位置選択的に圧を加えて、光重合性を変化させてから全面照射して、位置選択的に光重合物を得るという新しいナノインプリント法を可能にすると考えられる。この方法によれば、モールドを表面に接触させるだけで、埋め込むことがないため、離型時にモールドが樹脂からうまく剥がれないという問題点を克服できる。

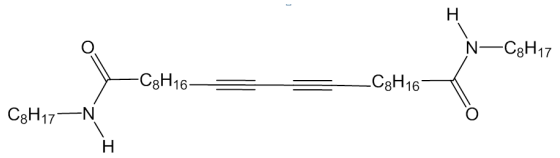


図５　結晶状態で圧力印加後に光重合性を示すジアセチレン誘導体の分子構造

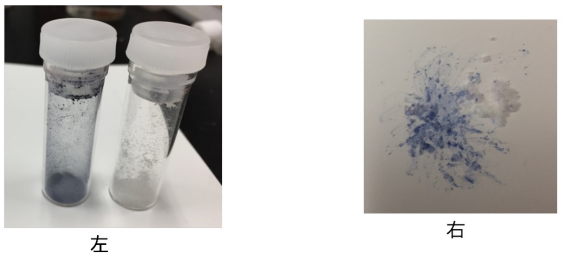


図６　左は結晶粉末に 254nm 光を当てた後の結晶の様子。写真内右の瓶は圧力をかけずに光を当てたもので、写真内左の瓶はペイントシェーカーで圧力をかけた後に光を当てたもの。右の写真は、結晶粉末み部分的（写真内左側の部分）に爪で圧力をかけ、その後全体に 254nm 光を照射したもの。圧力をかけた部分だけが青く変化（光重合）している。

われわれは、上記の圧力に応答して光重合性を変化させるジアセチレン誘導体の結晶薄膜を基板上に作成し、その上からパターン状の凹凸を有するモールド（線幅は約 1㎜）を押し付け、その後、全面に紫外線照射することで、モールドの凸部が当たって圧力がかかった部分のジアセチレン誘導体のみが重合反応を起こして青色のポリジアセチレンに変化していることを確認した。その薄膜が付いた基板をジアセチレン誘導が溶解する溶媒でリンスすることで未重合部のみが除かれ、モールドの凸部のパターンと同じ形状のポリジアセチレン薄膜が基板に形成された（図７）。

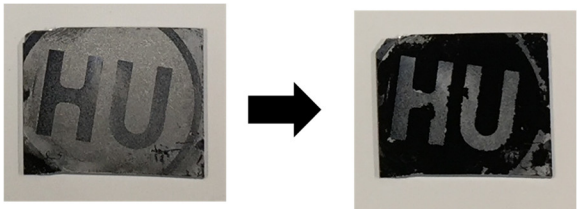


図７　左は、“HU”の凸部を有するモールドを押し付けた後に全面を紫外線照射した後の試料。右は、その後溶媒でリンスした後の試料（“HU”以外の膜が洗い流された）。

圧力印加によって光重合特性が変化する機構や光照射後に得られる化合物の分子構造および光重合収率に関しては、粉末Ｘ線回折、ラマンスペクトル、熱分析、重量法などで調べた。その結果、圧力印加によって明確に結晶構造が転移していること、圧力印加後の紫外線照射によってジアセチレンがポリアセチレンへと重合していること、紫外線照射によって３０％近くのジアセチレンモノマーが有機溶媒に溶解しないポリマーに変化しておりその重合率は紫外線を照射する前の圧力を大きくするに従い増加することが明らかになった。

３．今後の研究の展望

モータータンパク質の運動の光制御に関しては、すでに報告していたキネシンやF1―ATPaceに加えてミオシンの運動を制御できることを今回示すことができた。光反応性のアゾベンゼンを組み込んだ高エネルギー化合物(AzoTPやその類縁体）や阻害剤を用いることで、他のモータータンパク質の運動機能を光で可逆的に制御できると考える。モータータンパク質は、生体において様々な重要な機能を司っていることから、その機能を外部刺激によって位置選択的に自由に制御できることは基礎科学としてのみならず、医療応用という点からも関心が持たれる。今後は、我々のモータータンパク質に対して働く光応答性高エネルギー化合物または光応答性阻害剤という概念を、より広い範囲のタンパク質に適用し､医療応用の可能性も探っていきたい。圧力印加によって光重合性が発現するジアセチレン誘導体の研究では、今回、基礎的な知見と新しいナノインプリント技術への応用の可能性を示すことができた。今後は、より広い範囲の分子骨格を有する化合物を合成して構造－物性相関を調べ、より低い圧力に応答して光重合性を変化させる化合物を開発する予定である。また、実際にナノインプリントへ応用する場合には、均一な２次元薄膜を得る必要がある。近年、有機半導体の成膜技術としてキャスト法などで大面積の均一な２次元結晶薄膜を得る技術などの報告があるので、類似の方法で我々のジアセチレン誘導体の均一二次元結晶薄膜が得られるかを検討する予定である。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

１）　Halley M. Menezes, Md. Jahirul Islam, Masayuki Takahashi and Nobuyuki Tamaoki, ″Driving and photo-regulation of myosin-actin motors at molecular and macroscopic levels by photo-responsive high energy molecules″, *Org. Biomol. Chem.*, **2017**, 15, 8894-8903

２）　Ammathnadu S. Amrutha, K. R. Sunil Kumar, Takashi Kikukawa and Nobuyuki Tamaoki, ″Targeted Activation of Molecular Transportation by Visible Light″, *ACS Nano*, **2017**, 11(12), 12292-12301

3） Minsu Han, Mithrabinda K. Poduval, Haijin Shin, Nobuyuki Tamaoki, Taiho Park, Yuna Kim, Eunkyoung. Kim: “Programmable dual electrochromism in azine linked conjugated polymer” *Opt. Mater. Exp.* **2017**, 7, 2117-2125.

4） Yoshimitsu Sagara, Christoph Weder, Nobuyuki Tamaoki, “Asymmetric Cyclophanes Permit Access to Supercooled Nematic Liquid Crystals with Stimulus-Responsive Luminescence”, *Chem. Mater.* **2017**, *29*, 6145-6152.

5） Yoshimitsu Sagara, Nobuyuki Tamaoki, “Mechanoresponsive Luminescence and Liquid-Crystalline Behaviour of a Cyclophane Featuring Two 1,6-Bis(Phenylethynyl)Pyrene Groups”, *RSC Adv.* **2017**, *7*, 47056-47062.

6） Yoshimitsu Sagara, Marc Karman, Ester Verde-Sesto, Kazuya Matsuo, Yuna Kim, Nobuyuki Tamaoki, Christoph Weder, “Rotaxanes as Mechanochromic Fluorescent Force Transducers in Polymers”, *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 1584-1587.

7） Kazuma Mase, Yoichi Sasaki, Yoshimitsu Sagara, Nobuyuki Tamaoki, Christoph Weder, Nobuhiro Yanai, Nobuo Kimizuka, “Stimuli-Responsive Dual-Color Photon Upconversion: A Singlet-to-Triplet Absorption Sensitizer in a Soft Luminescent Cyclophane”, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 2806-2810.

8） Kazuya Matsuo, Yuki Nishikawa, Marie Masuda, Itaru Hamachi, “Live-cell Protein Sulfonylation Based on Proximity-driven N-Sulfonyl Pyridone Chemistry”, Angew. Chem. Int. Ed., 2018, 57, 659-662.

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） Kazuya Matsuo, Itaru Hamachi : “Ligand-Directed Tosyl and Acyl Imidazole Chemistry”、Chemoselective and Bioorthogonal Ligation Reactions: Concepts and Applications, Chapter 6, 147-164 (2017)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

1）玉置信之、Yuna Kim：特願2017-222951、「パターンの製造方法および半導体装置の製造方法」、平成29年11月20日

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） Nobuyuki Tamaoki: 21st International Symposium on Advanced Display Materials & Devices, ″Twisting or untwisting: Two possible mechanisms in photo-regulating cholesteric liquid crystals″, Nagoya, (2017-7)

2） Yuna Kim: “Light-driven color and mechanical motion control based on chiral liquid crystals”, 2017 RIES-CIS Symposium, Center for Interdisciplinary Science, NCTU, Taiwan (Province of China) (2017-10)

b．招待講演（国内学会）

該当なし

c．一般講演（国際学会）

1） Yuna Kim : “Photoresponsive cholesteric liquid crystals for color and mechanical functions”, 81st Prague Meeting on Macromolecules, Prague, Czech Republic (2017-09)

d．一般講演（国内学会）

1） 寺内賢太郎、伊藤誠一郎、玉置信之、青木健一：「脂環末端型ジアセチレン有機ゲル化剤の合成と光パターニング材料への応用」、第２６回ポリマー材料フォーラム、大阪、2017 年 11 月 16 日

2） 小谷昌輝、高橋大樹、玉置信之、青木健一：「ジアセチレン誘導体の２成分混合によるハイブリッド型ゲルネットワークの形成と光重合ゲルの高性能化」、第２６回ポリマー材料フォーラム、大阪、2017 年 11 月 16 日

3） 内田啓太、植田美里、玉置信之、青木健一：「高い光重合率を有する L-アラニン末端型ジアセチレンゲル化剤の合成と特性評価」、第２６回ポリマー材料フォーラム、大阪、2017 年 11 月 16 日

4） 相良 剛光、「非対称性シクロファンが示す刺激応答発光特性」、第 66 回高分子討論会、2017 年 9 月 21 日（依頼講演）

5） 松尾和哉、玉置信之：「アフィニティ駆動型化学修飾を利用した光制御型キネシンの開発」、日本薬学会第 138 年会、石川県立音楽堂ほか（2018-3）

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 玉置信之、「分子機能の光スイッチ」、物質・デバイス領域共同研究拠点「光応答性ナノ集合体の生体機能開拓」講演会、2017 年 3 月 17 日

2） Yuna Kim: “Light-driven color and mechanical functions from photoresponsive cholesteric liquid crystals”, Séminaire PPSM, ENS Cachan (Paris-Saclay), France (2017-09)

3） Kazuya Kubo, Yuna Kim, Asako Morita, Tomofumi Kadoya,Shin-ichiro Noro, Takayoshi Nakamura and Jun-ichi Yamada: “Development of new electrochromic materials based on unsymmetrical metal-dithiolene complexes”, JSPS Core-to-Core/Leverhulme Trust 7th Joint Workshop, Nagoya, 2017,″Organic Electronics of Highly-Correkated Molecular Systems″, Nagoya, Japan (2017-11)

４） Yuna Kim: “Light-Driven Color and Mechanical Motion Control Based on Chiral Liquid Crystals”, Invited Seminar, Yonsei University, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea (the Republic of) (2018-01)

５） Yoshimitsu Sagara: “Thermo- and Mechanoresponsive Luminescent Cyclophanes”, 1st International Seminar on ’Light, Molecules and Nanomaterials’ 2017 年 5 月 10 日. （招待講演）

６） 相良 剛光、「環状化合物が凝集相で示す外部刺激応答特性」、第 38 回光化学若手の会、2017 年 6 月 17 日.（依頼講演）

７） 相良 剛光、「ピレン骨格を持つ非対称型シクロファンが示す刺激応答発光特性」、第 5 回アライアンス若手研究交流会～共同研究の輪を広げる～、2017 年 8 月 21 日.（ポスター）

８） 相良 剛光、「水中で機械的刺激を検知する分子集合体の開発」、第 10 回ナノバイオ若手ネットワークシンポジウム、2017 年 6 月 10 日.（口頭発表）

９） Yoshimitsu Sagara, “Development of mechanoresponsive luminescent materials utilizing flexible cyclophanes”, KAKENHI International Symposium on “Studying the Function of Soft Molecular Systems”, 2017 年 6 月 28 日.（口頭発表）

１０） 松尾和哉、玉置信之：「化学修飾による光応答性モータータンパク質の構築」、第 5 回アライアンス若手研究交流会、東京工業大学　すずかけ台キャンパス　大学会館（2017-8）

１１） Kazuya Matsuo, Nobuyuki Tamaoki: “A Reversibly Photoswitchable Biomachine Constructed by Chemical Pro-tein Engineering”, The 18th RIES-HOKUDAI Interna-tional Symposium 極 , Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo (2017-11)

１２） 松尾和哉、玉置信之：「ケミカルエンジニアリングによるモータータンパク質の機能改変」、第 3 回北大部局間横断シンポジウム、北海道大学　医学部学友会館フラテホール（2018-1）

4.7 シンポジウムの開催

該当なし。

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

１） 光電子ナノ材料研究分野の西井準治教授、藤岡正弥助教とナノインプリント材料に関する共同研究を行った。

２） ナノアセンブリ材料研究分野の高橋仁徳助教と機械的刺激応答性発光材料に関する共同研究を行った。

ｂ．民間等との共同研究

該当なし。

ｃ．委託研究

該当なし。

ｄ．国際共同研究

１） 相良 剛光: スイスの Adolph Merkle Institute の Christoph Weder 教授と機械的刺激応答性発光材料に関する共同研究を行った。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

ａ．科学研究費補助金

１） 相良剛光、若手研究 B（代表）、「水溶性の機械的刺激応答性発光材料の機能拡張と生体応用」、2016～2017 年度。

２） 相良剛光、新学術領域研究「柔らかな分子系」・公募班（代表）、「柔らかなシクロファンを用いた機械的刺激応答性発光材料の開発」、2016～2017 年度。

３） 松尾和哉、若手研究（B）（代表）、「キネシンの細胞内物質輸送における分子機構の解明を目指した化学修飾法の開発」、2016～2017 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

1） 玉置信之、公益財団法人 光科学技術研究振興財団研究助成（代表）、「分子ロボットに視覚と知能を与えるための光応答性化合物の研究」2016～2018 年度

2） 玉置信之、公益信託伊藤徳三ひまし研究基金研究助成（代表）、「ウンデシレン酸を原料とする新規感圧光記録材料の創成」2017 年度

3） 相良剛光、JST さきがけ（代表）、「ロタキサン型メカノプローブの開拓とメカノバイオロジーへの応用」2017～2020 年度。

4） 相良剛光、旭硝子財団（代表）、「機械的刺激に応じて発光特性が変化するインターロック分子の開発」、2016～2017 年度。

5） 相良剛光、江野科学振興財団　田中ゴム科学技術賞（代表）、「ロタキサンを超分子メカノルミノファーとして導入したエラストマーの開発」、2017～2018 年度。

6） 相良剛光、公益財団法人　新世代研究所（ATI）2017 年度 ATI 研究助成（代表）、「シクロファンを用いた機械的刺激を鋭敏に検知する複合材料の開発」、2017～2018 年度。

7） 相良剛光、公益財団法人クリタ水・環境科学振興財団 2017 年度　国内研究助成（代表）、「水中で起きる機械的刺激を可視化するための有機分子の開発」、2017～2018 年度。

8） 相良剛光、公益財団法人 双葉電子記念財団（代表）、「水中で微小な力を検出できる蛍光性シクロファンの創製と生細胞への導入」、2017 年度。

9） 相良剛光、公益財団法人 中谷医工計測技術振興財団奨励研究助成（代表）、「インテグリンが生み出す力の定量評価を目指した超分子メカノプローブの開発」、2017 年度。

10） 相良剛光、公益信託　五峯ライフサイエンス国際基金（海外研究者招聘）（代表）、「細胞が生み出す力の計測に資する機械的刺激応答性発光材料の開発」、2017年度。

11） 相良剛光、公益財団法人 小笠原科学技術振興財団 2016 年度一般研究助成（代表）、「インターロック構造を積極活用することによる機械的刺激に応答して発光特性が変化する高分子材料の創製」、2017 年度。

12） 相良剛光、公益財団法人コスメトロジー研究振興財団 平成 28 年度研究助成（代表）、「化粧品の評価・開発に資する微小な力を検知する水溶性の分子集合体の開発」、2017 年度。

4.10　受賞

１） 相良剛光、公益財団法人　江野科学振興財団　田中ゴム科学技術賞

4.11　社会教育活動

ａ．公的機関の委員

該当なし

ｂ．国内外の学会の役職

１） 松尾和哉：日本化学会　生体機能関連化学部会　若手会幹事（2018年3月～現在）

ｃ．兼任・兼業

１） 相良剛光、JST さきがけ研究員（兼任）

d. 外国人研究者の招聘

１） Eunkyoung Kim、韓国（2018 年 01 月 11 日～2018 年 01 月 13 日）

２） Younghoon Kim、韓国（2018 年 01 月 09 日～2018 年 01 月 31 日）

３） Mehboobali Pannipara、インド　（2017 年 6 月―2017 年 8 月）

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

１） 理学部、生物系の熱力学、玉置信之、2016 年 4 月 7 日～2016 年 6 月 9 日

２） 生命科学院、生命物質科学特論（分子組織科学）、玉置信之、2016 年 7 月 10 日～2016 年 8 月 7 日

３） 生命科学院、生命融合科学概論（生体機能を合成する）、玉置信之、2016 年 5 月 25 日

４） 大学院共通, Communicating Your Research, Yuna Kim, 2017-4 ~ 2017-9

５） 全学教育、一般教育演習（フレッシュマンセミナー）「体験して学ぶ物質と生命の科学最前線:ナノからマクロまで」、相良剛光、2017年04月01日～2017年09月30日

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

ｇ．新聞・テレビ等の報道

該当なし

ｈ．ポスドク・客員研究員など

該当なし

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

博士学位：１名

１） Halley Mariet Menezes : Driving and photo-regulation of myosin-actin motor at molecular and macroscopic level by photo-responsive high energy molecules

ナノ構造物性研究分野

教　授　石橋　晃（東大院、理博、2003. 01～）
准教授　近藤憲治（東大院、工博、2003. 04～）
学生　　石田 雄一(B4)
　　伊藤 蓮(M1)

１．研究目標

アトム(Atom)・ビット(Bit)・エネルギー(Energy)/環境(Environment)空間［ABE^{2}空間］を念頭において、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、今後、SiベースのITインフラ構造やエネルギーデバイスと接続して相乗効果を引出すことで、ナノとマクロを結合することを目指している。

ロードマップに沿った展開を示しつつも遂に限界が指摘され始めたSiベースのLSIや従来型太陽電池は、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。次世代高機能デバイス・システムに向けて、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は重要である。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、長所を各々活かして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(接続・統合による和集合の)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、その意義は極めて大きい。

次世代デバイスの作作製に向け、極限高清浄環境を実現するクリーンユニットシステムプラットフォーム(CUSP)を利用して、金属薄膜のエッジ同士が対向した量子十字デバイス、特に次世代超高密度メモリーや、高効率の光電変換素子創製を目標としている。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は極めて重要である。当研究室では、デバイスベースのアプローチとツールベースのアプローチにより上記の課題に取り組むことで、新しい高機能デバイスやシステムを効率的に創出することを実験と理論の両面から進めている。

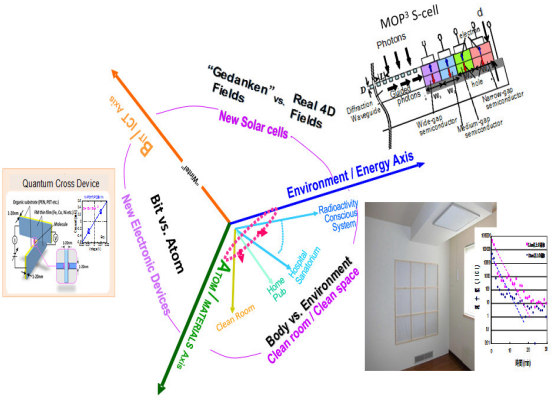


図1. ABE^2 空間における多角的な展開

２．研究成果

(a)　次世代高機能デバイス・システム

(a1) 新型光電変換システム

従来型の太陽電池では光進行方向と生成フォトキャリア移動方向が平行であることに起因する光吸収とフォトキャリア収集の間のトレードオフが存在するのに対し、図２に示す新型光電変換素子では、太陽光の進行方向とキャリアの移動方向を直交させることができ（図２左下断面図参照）、このトレードオフを解消することができる。そこでは太陽光の吸収とフォトキャリアの収集効率の最適化が両立可能となり、異なるエネルギーギャップを有する半導体マルチストライプを用いて全太陽光スペクトルに亘って光電変換を実行することで究極の変換効率に肉迫することができる。その際、空間伝搬光を効率的に２次元導波光化することが重要である。回折格子構造を設けることで、空間伝搬光の２次元導波光化は可能であるが、波長依存性が大きいため、周期性のことなる複数の回折格子を用いても、太陽光スペクトル全体に亘る２次元導波光化は容易ではない。より根源的な問題として、空間反転(左右)対称性を持つ構造では、時間反転対称性と相まって、３次元より２次元導波光化した光が再び３次元光化することの抑制が難しいが、左右非

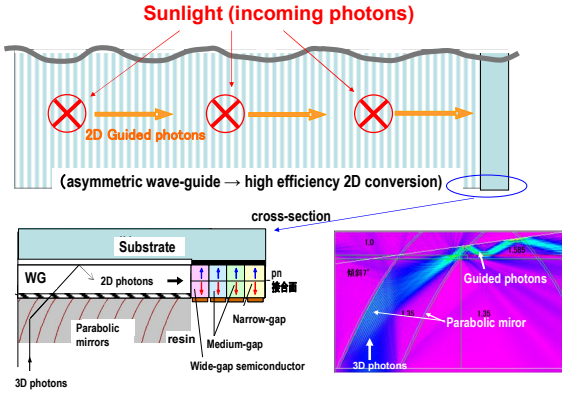


図 2. 非対称導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池(上面図)。左下：同断面図、右下：テイパー非対称導波路の場合の導波シミュレーション結果。

対称な導波路（WG）では、この制約から解放され、変換効率向上へ繋がると期待される。

そこで３次元伝播太陽光を２次元伝播光化する導波路（リディレクション導波路）の一つの候補として、図２左下内挿図に示すような周期配列した放物線鏡を作製し、更に今回 WG としてテイパー非対称導波路を採用した。本系は、反射光学系を成すので、回折光学系と異なり、導波効率の波長依存性を小さく抑えることができる。図２右下に示すように良好な導波特性が期待される。この導波路端には、在来の面入射型の（タンデム型を含む）太陽電池を結合することもできる。多角的に最適なシステムへと進化させることで高い光電変換効率の実現が期待される。

(a2)極限高清浄環境（Clean Unit System Platform: ＣＵＳＰ）の展開

半導体クリーンルームに留まらず、一般住宅を構成する各部屋の居住環境でも無菌・無塵環境は、今後益々重要となる。できるだけ既存のフレームワークを維持しつつ、製造、医療・看護施設、オフィス、学習施設、リラクゼーション施設等における居住性能向上を実現することが求められる。今回、更に放射性物質を含む塵埃に対応することのできる CUSP の開発を行った。図３の内挿図に示すように、一般に用いられる家庭用空気清浄機のフィルターに放射線のラディエーションレンジ程度の厚みを有する金属筐体を装着して、ファンフィルターユニット（FFU）として、コンパクト CUSP に適用し清浄度を測定した。セシウム 137 を始め、チェルノブイリ原発事故で観測された放射性元素からのγ崩壊エネルギーは 600～900keV のレンジにほぼ収まっているので、このエネルギーに対応する Ｐｂの必要厚みは約 10ｍｍである。今回は加工性を重視して、10 ㎜厚みの鉄板を金属筐体材料として採用した。この CUSP システム内の清浄度を時間経過と共に計測した結果を図３に示す。用いたファンフィルターユニット(FFU)は、一般的な中性能フィルターであるが、初期値の 100000／cf のダスト粒子数から、約 20 分で 100／cf 程度へ減少し、US209D クラス１００のクリーンルームと同等乃至それ以上の清浄度を実現することができた。塵埃・菌に対してはもとより、放射線も含めて、人に対して害を及ぼさない環境は今後ますます重要となってくる。CUSP は孤立・閉鎖環境性を特徴として持っており、それを最大限に活用することで、原子力発電所本体はもとより近隣自治体に設けられる非常時の避難施設（学校の体育館等）への装備が有効である。即ち、非常時のみならず、平時においても CUSP システムをフィルターへの負荷を極小にしながら活用することができる。今回開発した CUSP システムにより原子力発電所施設、近隣避難施設を始め、放射線を利用する医療機関に対しても、より高度な対放射線上の安心・安全の向上を図ることができる。

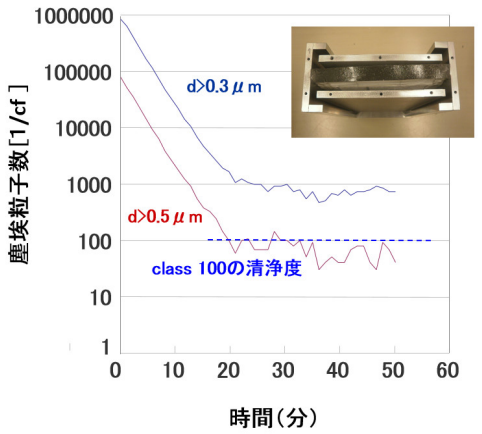


図 3. 放射線対応CUSPの清浄度。内挿装図は放射性塵埃対応の金属筐体付きフィルターの実写。

(*b*)理論：全体の目的としては、物性理論の観点から、トポロジカルな磁性現象の解明やトポロジカル絶縁体の特異なバンド構造を利用した新奇なスピンデバイスの提案ならびにスピン軌道相互作用の非可換ゲージ場の側面を活かしたデバイスの検討を行うことにより、工学的にはスピントロニクスへ寄与することを目指しており、理学的にはトポロジーの物性への影響を調べることを目的としている。

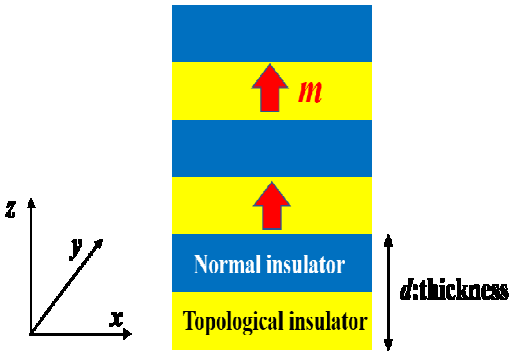


図 4： The superlattice consisting of topological insulators with magnetization and ordinary insulators.

今年度の成果は以下のものである。

今年度は、Burkov 等によって提唱されたトポロジカル絶縁体と通常絶縁体で形成される超格子構造において発現するワイルセミメタルについて、通常具体的に計算されることが少ない Fermi アークについて計算を行った。図４にトポロジカル絶縁体と通常絶縁体で形成される超格子構造を示す。図中の赤い矢印は、時間反転対称性を破る目的でいれた磁性不純物の磁化の方向である。ワイルポイントは時間反転対称性か反転対称性が破れないと出現しないので、磁性トポロジカル絶縁体を考えている。この系のハミルトニアンは Burkov によって与えられているが、以下のようになる。

$$H=\sum_{\boldsymbol{k}_\perp,ij}\Big[v_F\tau^z(\hat{z}\times\boldsymbol{\sigma})\cdot\boldsymbol{k}_\perp\delta_{ij}+m\sigma^z\delta_{ij}+\Delta_s\tau^x\delta_{ij}$$
$$+\frac{1}{2}\Delta_D\tau^+\delta_{j,i+1}+\frac{1}{2}\Delta_D\tau^-\delta_{j,i-1}\Big]c^\dagger_{\boldsymbol{k}_\perp,i}c_{\boldsymbol{k}_\perp,j}$$

ここで、τ はトポロジカル絶縁体の表面と裏面を区別する擬スピンであり、i と j は異なるトポロジカル絶縁体を区別する指標である。M は磁化で、Δ_S と Δ_D はそれぞれ、同じトポロジカル絶縁体の表面と裏面間のトンネルおよび隣接するトポロジカル絶縁体間のトンネルを示している。この固有値を求めれば、バルクのワイルセミメタルのバンド構造は簡単にわかるが、Fermi アークは出てこない。

そこで、このハミルトニアンを x 軸方向に離散化した以下のハミルトニアンを構築する。こうすることで、x 軸方向に垂直な面の情報を取り出せる。

$$H=\sum_{kx}[v_F(k_y\sigma^x-\sin k_x\sigma^y)+\{m(1+\cos k_x)/2-\Delta(k_z)\}\sigma^z]c^\dagger_{k_x}c_{k_x}.$$

ここで

$$\Delta(k_z)=\sqrt{\Delta_S^2+\Delta_D^2+2\Delta_S\Delta_D\cos(k_z d)}$$

である。この固有値問題を解いた結果が図５である。

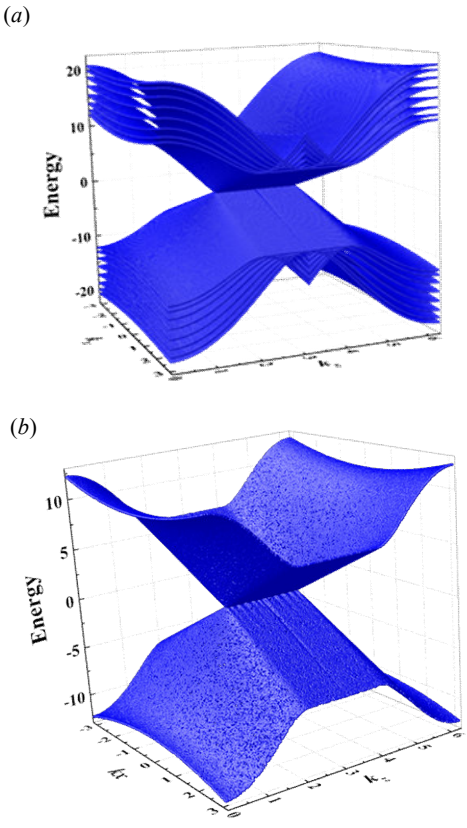


図５: The band structure of (*a*) both bulk and surface states and (*b*) only the surface state (so-called Fermi-Arc). In both cases, parameters are $v_F=2.0, \Delta_S=\Delta_D=m=10.0$.

図５(*a*)はバルクの状態と表面状態を両方描いたもので、ワイル点は真ん中の接している辺の両端である。バルクだけプロットすればそれはわかる。一方、ワイル点を結んでいるのは表面状態の Fermi アークであることも図 2(*b*)を見ると分かる。

３．今後の研究の展望

トップダウン系とボトムアップ系の接続・統合を Generating function として、デバイスベース並びにプラットフォームベースのアプローチを進めていく。フォトンの進行方向とフォトキャリアの移動方向が直交した、マルチストライプ構造を有する新しい光電変換デバイスの実現を念頭に、太陽光（黒体輻射）の吸収とフォトキャリアの収集効率の最適化を両立可能とし、全太陽光スペクトルに亘って光電変換を実行することを目指す。従来の入射モードでは、光吸収量に支配されて変換効率が決まる活性層厚みの小さい領域でも、端面入射配置では高い変換効率が得られる。移動度の高い無機半導体材料を用いることで、電極間隔を広げることが可能となり、より高効率の光電変換素子を実現することができる。これを更に、導波路と結合したフォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池と進化させる。即ち、太陽光の伝播方向を変換する仕組みであるリディレクション導波路の端に、エッジ入射型の太陽電池を配置する。空間伝播する太陽光を、周期的屈折率変調構造により平面導波光に変換し、この光を導波路の端に設けた複数のバンドギャップを持つマルチストライプ半導体pn接合面に沿って導くことで、太陽光の全スペクトルに亘って光電変換が可能で、熱はけが良くまた拡散光にも強い熱力学限界に迫る高光電変換効率を有する集光発電システムの可能性を追求して行く。

理論の方からは、トポロジカルなDirac点やWeyl点における摂動をUniversal unfoldingという特異点論の手法で行い、従来と異なる観点から、トポジカル絶縁体の分類を行う予定である。これはすでに寺本先生などと一緒に、一部行い、発表している。同時にトポロジカルな物性はトポロジカル絶縁体に限らないので、他のトポロジカルな励起であるスカーミオンというトポロジカルな磁気渦の研究にも着手する。そこでは、スカーミオンの移動やスカーミオン・ホール効果などの特性をLLGによるマイクロマグネテック・シミュレーションで明らかにすることによって、スカーミオンのデバイスへの応用を考える。また、トポロジカル絶縁体の概念は最近進化し、高次トポロジカル絶縁体という概念が議論されている。そこで、この電子構造やスピン構造の計算も行う予定である。一方、低次元電子のシステムにスピン軌道相互作用と電子間斥力が同時に働く場合において、1電子スペクトラムやスピン圧縮率や電荷圧縮率にどのような変化が定量的に現れるかも基礎理論として検討する予定である。

アトム(Atom)・ビット(Bit)・エネルギー(Energy)/環境(Environment)空間［ABE^{2}空間］において、AB平面では、次世代の高機能電子デバイスを、またBE平面では、フォトン・フォトキャリア直交型高効率太陽電池を、そしてAE平面では、プラットフォームベースのアプローチとして、廉価にして高性能である CUSP 技術を展開し、“Clean space for all of us”の観点で製造環境としてはもとより、医療や養

護・療養環境としてもCUSPの機能性を高め、社会へのフィードバックへとつなげていく。市民生活の様々な局面で生活水準の向上、健康維持に役立ち、高齢者はもとより、乳幼児等の免疫力が弱く環境対応力が相対的に少ない高感受性者への福音となろう。ナノとマクロの世界とをつなぎ、今後も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を目指していく。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） *A. Ishibashi, T. Matsuoka, R. Enomoto, M. Yasutake, “New solar cell and clean unit system platform (CUSP) for earth and environmental science”, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **93** 012081 1-7 (2017) DOI :10.1088/1755-1315/93/1/012081

2） *A. Ishibashi, H. Kobayashi, N. Sawamura, K. Kondo, T. Kasai, “Symmetric and Asymmetric Wave-guides for Multi-striped Orthogonal Photon-Photocarrier-Propagation Solar Cells (MOP^{3}SC)”, IEEE-ICASI 2017, Meen, Prior & Lam (Eds) ISBN 978-1-5090-4897-7, p1477-1479 (2017)

3） *Hiroshi Teramoto, Kenji Kondo, Shyūichi Izumiya, Mikito Toda, and Tamiki Komatsuzaki”, Classification of Hamiltonians in neighborhoods of band crossings in terms of the theory of singularities”, Journal of Mathematical Physics 58, 073502 (2017).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解読・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 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 : 特許第6292563号、建築物およびその製造方法、2018年02月23日

2） 石橋 晃 : 特許第6261088号、光電変換装置、建築物および電子機器、2017年12月22日

3） 石橋 晃 : 特許第6241784号、放射性物質及び放射線対応ファンフィルターユニット、放射性物質及び放射線対応高清浄環境システム、放射性物質含有廃棄物の減容処理システム、放射性物質および放射線対応フィルタ並びに水洗除染装置、2017年11月17日

4） 石橋 晃、原 史郎: 特許第6241862号, 高清浄装置、高清浄環境システム、高清浄環境装置の使用方法およびデバイス製造装置の組み立て、立上げまたはメンテナンス方法, 2017年11月17日

5） 石橋 晃 : 特願2017-219568、建築物およびその製造方法、2017年11月15日

6） 石橋 晃、安武 正弘 : 特願2017-203211、代謝測定システムおよび代謝測定方法、2017年10月20日

7） 石橋 晃 : 特願2017- 181884、光導波装置、光電変換装置、建築物、電子機器及び移動体、2017年09月22日

8） 石橋 晃 : 特許第6202412号、高清浄環境システム、2017年09月08日

9） 石橋 晃、江藤 月生、野口 伸守、松田 順治 : 特願2017- 81064、建築物およびプレフィルター、2017年04月17日

・国際特許

１０） S. Hara, S. Haraichi and A. Ishibashi : (China登録) ZL201510790429.X, Device Manufacturing Apparatus, 2018年03月27日

１１） 石橋 晃 : PCT/JP2018/11601、建築物およびプレフィルター、2018年03月23日

１２） 石橋 晃 : (Thailand登録) 1703000921、Construction and Gas Exchange Device、2017年05月29日

１３） A. Ishibashi, M. Yasutake and F. Ishibashi : (Singapore登録) 11201604190R, System and method using information of involuntary body movement during sleep, and sleeping state detection system and method, 2017年05月11日

１４） A. Ishibashi, M. Yasutake and F. Ishibashi : (Singapore出願) 11201703256W, System and method using information of involuntary body movement during sleep, and sleeping state detection system and method, 2017年04月20日

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1） *A. Ishibashi, T. Matsuoka, R. Enomoto, M. Yasutake, “New solar-cell system and clean unit system platform (CUSP) for Electronics, Communications and Networks”, The 7th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNet2017), Hualien, Taiwan (2017-11)

2） *A. Ishibashi, R. Enomoto, T. Ishikawa, M. Yasutake, “Systems Development in Atom-Bit-Energy/Environment (ABE^2) Space for a New Solar-cell, Medical and Safety Applications Based on Clean Unit System Platform (CUSP)”, Collaborative Conference on Materials Research (CCMR2017), Jeju Island, Korea (2017-06)

ｂ．招待講演（国内学会）

1) **石橋 晃***：「体動分離型代謝測定システム」、JSTものづくり系新技術説明会、東京・市ヶ谷 (2017-12)

ｃ．一般講演（国際学会）

1) ***A. Ishibashi**, "Symmetric and Asymmetric Waveguides for Multi-striped Orthogonal Phton-Photocarrier-Propagation Solar Cells (MOP3SC) ", 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation, Sapporo, Japan (2017-05)
2) ***A. Ishibashi**, Y. Ohtsuki, R. Enomoto, M. Yasutake, J. Matsuda, Y. Ohashi, "Clean Unit System Platform (CUSP) for radioactive dusts", The 18th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2017-12)
3) *M. Yasutake, **A. Ishibashi**, "A Unique Non-Contact Method To Assess Sleep Quality By Detecting Body Movements Via Monitoring Air-borne Particles In An Ultraclean Space", SLEEP 2017, Boston, USA (2017-06)
4) **K. Kondo*** and H. Teramoto: "An Arbitrary Order Effective Hamiltonian of Hexagonal Warping Effects of Dirac Cone", The 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Pittsburg, Pennsylvania, USA (2017).
5) R. Itoh* and **K. Kondo**, "Topological Spin Currents in Graphene Nanoribbons", SpinTech IX, New Fukuoka, JAPAN (2017).

ｄ．一般講演（国内学会）

1) **石橋 晃***, 河西 剛, **近藤 憲治**, 澤村 信雄, 「フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池に向けた周期配列放物線鏡付テイパー非対称導波路構造」、日本応用物理学会 2018年春季大会, 早稲田大学 (2018-03)
2) **石橋 晃***、松田 順治、野口 伸守、江藤 月生、大橋 美久、原 史朗、「Clean Unit System Platform (CUSP)とミニマルファブシステムのシナジーの可能性」、日本応用物理学会 2017年秋季大会、福岡国際会議場 (2017-09)
3) 伊藤 蓮*、**近藤 憲治**：「グラフェンナノリボンと量子スピンホール相」、2017年 第64回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）、Japan (2017).
4) 伊藤 蓮*、寺本 央, **近藤 憲治**：「ディラック・コーンのヘキサゴナルな歪みの効果に対する任意次数の有効ハミルトニアンの導出」、第78回応用物理学会 秋季学術講演会、福岡国際会議場（福岡県博多）、Japan (2017).

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1) **石橋 晃***、澤村 信雄、野口 伸守、江藤 月生、大橋 美久、「ミニマルファブとのシナジー を目指した高機能清浄環境CUSPと新型太陽電池の最近の展開」、平成29年度ファブシステム研究会臨時総会、産業技術総合研究所（つくば中央）(2017-09)
2) **石橋 晃***、松田 順治、安武 正弘、「トレーニング、介護等にも活用可能な高清浄環境CUSP(クリーンユニットシステムプラットフォーム)」、SPORTEC 2017、東京ビッグサイト (2017-07)
3) **石橋 晃***, 松田 順治*, 大橋 美久、「高清浄環境ＣＵＳＰ(クリーンユニットシステムプラットフォーム)」、平成29年度北海道トライアル新商品展示会、札幌・北海道庁 (2018-01)
4) **石橋 晃***、「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池の進展とクリーン環境ＣＵＳＰの展開」、平成29年度物質・デバイス領域共同研究拠点事業『次世代デバイス・システムの展望 ～ 新型太陽電池並びに清浄環境の新展開』研究会、北海道大学 (2017-07)
5) **石橋 晃***、「ABE^2 4次元空間と新型高清浄環境(CUSP)」、平成29年度附置研アライアンス～人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス G2分科会、北海道大学 (2017-07)
6) **石橋 晃***、河西 剛、**近藤 憲治**、澤村 信雄、「非対称導波路結合フォトンフォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池」、平成28年度附置研アライアンス成果報告会～人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス、東京工業大学 (2017-06)
7) 石橋 晃*、安武 正弘、野口 伸守、松田 順治、大橋 美久、「高機能清浄環境CUSP・新型太陽電池の展開とミニマルファブ」、平成29年度ファブシステム研究会定期総会、産業技術総合研究所（つくば中央）(2017-04)
8) 松田 順治*、**石橋 晃**、「一家に１部屋「どこでもクリーンルーム」を！！」、第31回ビジネスEXPO 2017、アクセスサッポロ(札幌市) (2017-11)
9) 松田 順治*、**石橋 晃**、「CUSPがもたらす"どこでもクリーンルーム"」、いきいき健康･福祉フェア２０１７、アクセスサッポロ(札幌市) (2017-10)

4.7 シンポジウムの開催

1） **石橋 晃:** 平成29年度附置研アライアンス～人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス G2分科会
2） **石橋 晃**: 平成29年度物質・デバイス領域共同研究拠点事業『次世代デバイス・システムの展望～新型太陽電池並びに清浄環境の新展開』研究会

4.8 共同研究

a. 所内共同研究

1）**近藤 憲治**-寺本 央、「特異点論を用いたトポロジカル絶縁体の分類と有効ハミルトニアンの導出」

b. 民間等との共同研究

2） 安武 正弘（日本医科大学）、石橋 晃: 「」
1） **石橋 晃**(H29年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究)：「フォトン・フォトキャリア直交型太陽電池に向けたラテラル方向に組成の傾斜したInGaAlN層の成長」。研究代表者：東北大学金属材料研究所 松岡 隆志
2） **石橋 晃**(H29年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究)：「放射線検出器γＩと清浄環境ＣＵＳＰの結合の進展」、研究代表者：東京大学宇宙線研究所 榎本良治
3） **石橋 晃**(H29年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究)：「睡眠障害診断への高清浄度環境技術CUSPの応用、研究代表者：日本医科大学 安武正弘
4） **石橋 晃**(H28年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究)：「ミラー構造を組み込んだ非対称リディレクション導波路の検討」、研究代表者：帝人株式会社フィルム事業本部 久保耕司
5） **石橋 晃**(H29年度物質・デバイス領域共同研究拠点共

同研究):「清浄環境 CUSPの展開の検討」、研究代表者 飛栄建設株式会社 松田順治

6）**石橋 晃**(H29年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究):「ガス交換ボックスによるCUSP高清浄環境の展開の研究」、研究代表者: シーズテック株式会社大橋美久

c. 委託研究

該当なし

d. 国際共同研究

該当なし

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a．科学研究費補助金

1）研究代表者：**石橋 晃**、基盤研究(B) 一般、16H04221「非対称導波路結合光子･フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池の研究」、2016～2018年度

2）研究代表者：**石橋 晃**、挑戦的萌芽研究、「新清浄環境(CUSP)を用いた安否確認・睡眠分析(KSG) ビッグデータの研究」、2016～2017年度

3）研究代表者：**近藤憲治** 科学研究費助成事業（基盤研究 (C)）4,810千円：「スピン軌道相互作用が強い物質及び現象のトポロジーに基づく研究とスピン素子への応用」

2）研究代表者：笹倉 弘理、研究分担者：**近藤憲治** 科学研究費助成事業（基盤研究 (B)）18,980千円：「量子ドット内蔵光ファイバーを用いた光子を介する遠隔電子スピン間制御」

3）研究代表者：植村 哲也、研究分担者：**近藤憲治** 科学研究費助成事業（挑戦的萌芽研究）3,900千円：「核電気共鳴を用いた全電気的核スピン制御法の確立」

b. 大型プロジェクト・受託研究

1）**石橋 晃:**飛栄建設株式会社 松田順治：「ガス交換ユニットの高機能化とCUSP清浄環境の向上」

2）**近藤憲治**（Center for Spintronics Research Network(CSRN),Tohoku University)（スピントロニクスデバイス理論研究領域):「トポロジカルな性質を持つ物質とその応用の研究」2016年度-現在。
URL: http://www.csrn.tohoku.ac.jp/jp/research/

4.10 受賞

該当なし

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1）石橋 晃: 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

2）石橋 晃: 国立研究開発法人 新エネルギー･産業技術総合開発機構 (NEDO) 技術委員

b．国内外の学会の役職

1）石橋 晃: 産総研コンソーシアム ファブシステム研究会委員(2010-03-2018-03)

2）石橋 晃:光給電検討委員会委員(2016-04-2018-03)

3）Kenji Kondo: Editorial Board Member for Scientific Reports (published by Nature Publishing Group) (2014-06-present)

c．兼任・兼業

1） 石橋晃:産業技術総合研究所 客員研究員 (2010.02 - 2018.03)

2） 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)技術担当取締役(CTO) (2007-04-2018-05)

d．外国人研究者の招聘

該当なし

e. 北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 理学院: 半導体物理学 I 石橋 晃、2017年10月1日～2018年3月31日

2） 理学部、物理外国語演習、石橋 晃、2017年10月01日～2018年03月31日

3） 理学院: 現代物理学(分担)、石橋 晃、2017年4月1日～2017年9月30日

4） 全学教育:環境と人間「ナノテクノロジー」(分担)、石橋 晃、2017年4月1日～2017年9月30日

5） 全学教育: 現代物理学入門(分担)、石橋 晃、2017年4月1日～2017年9月30日

6） 理学部、物理外国語文献講読II、近藤憲治、2017年4月1日～2017年8月31日

7） 理学院、物理学特別研究I、近藤憲治、2017年4月1日～2018年3月31日

8） 理学院、物理学論文輪講、近藤憲治、2017年4月1日～2018年3月31日

9） 理学院、電子物性物理学（トポロジカル物質の理論とスピントロニクス)、近藤憲治、2017年4月1日～2017年8月31日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

g．新聞・テレビ等の報道

新聞

1） 松田 順治、**石橋 晃**：さっぽろ経済 2017年08月10日「どこでもクリーンルーム」

テレビ

1） 松田 順治、**石橋 晃**：北海道放送（ＨＢＣ）今日ドキッ 特集 2017年12月04日 「松田社長の活動紹介とＣＵＳＰの最近の展開の紹介」 (17：16-17:31放映)

h．ポスドク・客員研究員など

該当なし

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：４人

博士学位：１人

〇卒論指導（近藤憲治）

１） **石田　雄一**：「A Formation and Dynamics of a Magnetic Skyrmion」

○修士論文副査（近藤憲治）

１） 寺山　拓：「超流動量子渦の構造と１粒子励起」

２） 木村　卓：「Kitaev梯子模型に観る分数励起」

３） 千葉 大祐：「擬一次元有機導体(TMTTF)2Xにおける非線形電気伝導」

４） 河野　航：「Abrikosov格子状態におけるHall効果の微視的研究」

○博士論文副査 (近藤憲治)

１） 植木 輝：「Microscopic Theory of the Flux-Flow Hall Effect in Type-II Superconductors」

薄膜機能材料研究分野

教　授　　太田裕道（東工大院、工博、2012.9～）
准教授　　山ノ内路彦（東北大院、工博、2014.5～）
ポスドク　Anup Sanchela（IIT Bombay、Ph.D、2016.7～）
事務補助員　春日さと子　(2016.10～)
博士課程　張　雨橋、小野里尚記（情報科学研究科）
修士課程　魏　冕(10月入学)、小山田達郎、根津有希央、呉　宇璋（10月入学）（情報科学研究科）
学部学生　横井直樹（生体情報）、佐藤壮（電気電子）、佐藤晃一（電気電子）、小澤良輔（電気電子）、善正晴紀（電気電子）（工学部情報エレクトロニクス学科）

１．研究目標

従来セラミックスとして扱われてきた機能性酸化物を素材として、原子レベルで平坦な表面を有する高品質薄膜を作製し、機能性酸化物の持つ真のポテンシャルを最大限引き出し、世の中で役に立つデバイスの開発を目指している。具体的には、「熱電変換材料」、「透明酸化物半導体」、「光・電気・磁気記憶デバイス」、「スピントロニクスデバイス」の開発を行っている。そのために必要な高品質薄膜を作製するための「特殊なエピタキシャル薄膜成長方法」の開発も行っている。

(a) 熱電変換材料の開発

熱を電力に変える「ゼーベック効果」と、電流で冷やす「ペルチェ効果」に代表される、金属や半導体などの導体が示す、熱⇔電気変換効果は、総称して「熱電効果」と呼ばれている。熱電効果は、熱源さえあれば電力を取り出せるという特長を利用した惑星探査機の動力源や、振動・騒音を発生しない冷却が可能という特長を利用した小型冷蔵庫として実用化されている。希少・毒性元素を含まず、化学的・熱的に安定な金属酸化物で高い変換性能を示すものが見つかれば、例えば、工場や発電所、自動車などから排出される熱を電力に変換できるようになる。現在は、超精密な薄膜合成技術を武器として、極薄の金属酸化物が示す巨大な熱電効果の起源を解き明かし、真に実用的な変換性能を示す酸化物熱電材料の実現を目指している。

(b) 透明酸化物半導体の開発

ITO（スズ添加酸化インジウム）に代表される透明導電性酸化物は、古くから液晶テレビや有機ELテレビの透明電極として利用されている。一般的には、スパッタリング法などでガラス基板上に作製されたセラミックスのような多結晶薄膜が用いられている。当研究室では、透明導電性酸化物を、透明酸化物半導体として利用可能にするための研究を行っている。具体的には、積層構造の作製を可能にし、高いキャリア移動度を実現するための高品質エピタキシャル薄膜の作製と、製造コストを下げ、実用化が可能な材料にするために、室温下で高品質アモルファス薄膜を作製する研究を行っている。

(c) 光・電気・磁気記憶デバイスの開発

遷移金属酸化物の多くは、酸素過剰／欠損やプロトン化などの非化学量論組成とすることにより、その光・電気・磁気特性が大きく変化することが知られている。例えば、エレクトロクロミック材料として知られる WO_3 は、そのままでは可視光に対して透明な絶縁体だが、電気化学反応を利用してプロトン化する（H_xWO_3）ことで青色の金属に変化する。また、ブラウンミラライト型の結晶構造を有する $SrCoO_{2.5}$ は、磁石にならない絶縁体だが、酸素中で加熱して酸化するか、電気化学的に酸化すると、ペロブスカイト型の結晶構造を有する $SrCoO_3$ に変化し、電気が良く流れる強磁性金属になることが知られている。このように、遷移金属酸化物をうまく利用することで、光透過率と電気伝導度、磁性と電気伝導度を切替え、記憶するデバイスが実現できると考えられる。遷移金属酸化物にとって、H^+イオン（プロトン）は強力な還元剤、OH^-イオンは強力な酸化剤として働くので、電気化学反応を利用すれば上記デバイスは実現可能だが、電解液などの液体を用いなければならないという課題がある。当研究分野では、ナノ多孔質ガラスのナノ孔に自然に導入される水を電解液の代わりに使い、様々な 機能性酸化物の光・電気・磁気特性を切替えることに成功した。

(d) スピントロニクスデバイスの開発

エレクトロニクスの低消費電力化を可能とする不揮発性ランダムアクセスメモリや不揮発性ロジックの構成素子として、三端子磁気トンネル接合(MTJ)が注目されている。この三端子MTJの動作では、電気的な磁化方向の検出と制御が必要である。高スピン偏極率のハーフメタルを三端子MTJに適用することにより、電気的な磁化方向検出の高感度化が期待されるが、ハーフメタルにおいては電気的な磁化方向制御に関する研究は少なく、ハーフメタルのスピントロニクス応用の可能性を調べるうえでも、さらなる研究が必要である。そこで酸化物ハーフメタルをベースとする機能性酸化物において、電気的な磁化方向制御手法として期待されているスピン軌道相互作用に基づく電流誘起有効磁場と電流誘起磁壁移動に関する研究を行っている。

(e) 特殊なエピタキシャル薄膜成長方法の開発

高温超伝導体として知られる$YBa_2Cu_3O_7$に代表されるように、多くの複合酸化物が複雑な層状の結晶構造になることが知られている。層状複合酸化物を原子・分子オーダー周期の超格子とみなすと、様々な興味深い物性を示すことが期待される。単結晶薄膜は薄膜デバイスを作製するために必要不可欠だが、層状複合酸化物の単結晶薄膜を合成することは容易ではない。例えば、$InGaO_3(ZnO)_m$（mは自然数）単結晶薄膜を一般的な気相薄膜成長法で作製しようとしても、構成成分の蒸気圧差が大きいため、単一結晶相を得ることすらできない。当研究分野では「反応性固相エピタキシャル成長（R-SPE）法」を発展させ、様々な層状複合酸化物のエピタキシャル薄膜作製に取り組んでいる。

２．研究成果

(a) 熱電変換材料の開発

効率良く熱（温度差）を電気に変換するため、熱電変換材料には、高い導電率、大きな熱電能、低い熱伝導率の三つの性質を同時に満たすことが求められる。しかし、導電率と熱電能の大きさの間にはトレード・オフの関係があり、性能を高めるためには導電率と熱電能の相関関係を改良する必要がある。ひとつの解決方法として、1993年にマサチューセッツ工科大学のドレッセルハウス教授らによって「狭い空間に電子を閉じ込めると,導電率を変えることなく熱電能を高められる」という理論が提案された。この理論は、2007年、「導電性の極薄層を、絶縁体で閉じ込めた人工超格子」を用いて実証されたが、バルクの約5倍大きな熱電能増強が起こるものの、絶縁層を含む人工超格子全体の変換性能はバルクの最大値とほとんど変わらないという問題があった。

この問題を解決するため、本研究では、2016年に齋藤理一郎教授（東北大学）とドレッセルハウス教授らによって新たに提案された理論「大きく広がった電子を狭い空間に閉じ込めることで、より大きな熱電能増強が起こる」の実証に取り組んだ。電子には、粒子としての性質と、波としての性質があることが知られている。ここで、電子の広がりを、ド・ブロイ波長を用いて規格化する。まず、従来よりもド・ブロイ波長が長い極薄層（厚さ0.4 nm～5 nm）を用意し、この極薄層を電気が流れない絶縁体(厚さ約4 nm)で挟み込んだ,サンドウィッチのような構造(人工超格子)を作製することにより、大きく広がった電子を狭い空間に閉じ込めた。

電気を通す極薄層の材料として、2007年の報告と同じチタン酸ストロンチウムにニオブを加えた物質を選択した。チタン酸ストロンチウムとニオブ酸ストロンチウムの間には、$SrTi_{1-x}Nb_xO_3$固溶体（$0 \leqq x \leqq 1$）を形成できることが知られています。まず、$SrTi_{1-x}Nb_xO_3$固溶体（$0 \leqq x \leqq 1$）の薄い膜を作製し、そのド・ブロイ波長を調べたところ、$x \leqq 0.3$の場合には従来と同じ4.1 nmだったが、$x \geqq 0.4$の場合には5.3 nmとなり、約30%大きく広がることが分かった。

次に、$SrTi_{1-x}Nb_xO_3$固溶体（x=0.2，0.3，0.8）を極薄の導電層として使用し、絶縁体$SrTiO_3$層で挟み込んで人工超格子（図1上）を作製し、熱電特性を計測した。ここでは便宜的に、$x \leqq 0.3$をA領域，$x \geqq 0.4$をB領域と定義する。図1下左に、$x \leqq 0.3$（A領域）と$x \geqq 0.4$（B領域）の導電極薄層（1～12単位格子、1単位格子の厚さは0.4 nm）を、厚さ約4 nmの絶縁体層で挟み込んだ人工超格子の熱電能増強度合を示す。導電層の厚さが減少するにつれて熱電能が増大し、$x \leqq 0.3$（A領域）の人工超格子では、従来と同じくバルク比4-5倍の熱電能増強が見られたが、本研究の$x \geqq 0.4$(B領域)の人工超格子の熱電能増強度合は10倍に達した。

次に、極薄導電層の厚さを1単位格子（0.4 nm）に固定して、導電率と熱電能を計測した。バルクと同様に、人工超格子の導電率は電子キャリア濃度にほぼ正比例して変化したが、人工超格子の熱電能の電子キャリア濃度依存性は、バルク（キャリア濃度が1桁変化すると、熱電能は198 μV K^{-1}変化する）よりも急な傾き（約300 μV K^{-1}）で変化することが分かった。これらのデータを用いて、熱電出力因子(＝熱電能×熱電能×導電率)を算出したところ(図1下右)、x＝0.6の人工超格子が、従来比約2倍に相当する5.5 mW/mK^{2}の熱電変換出力を示すことを見出した。これらの結果は、2016年に齋藤教授とドレッセルハウス教授らによって提案された理論が正しいことを実験的に証明するものであり、チタン酸ストロンチウム以外の熱電材料に適用することで、その熱電変換出力が大幅に高められることを明確に示すものである。

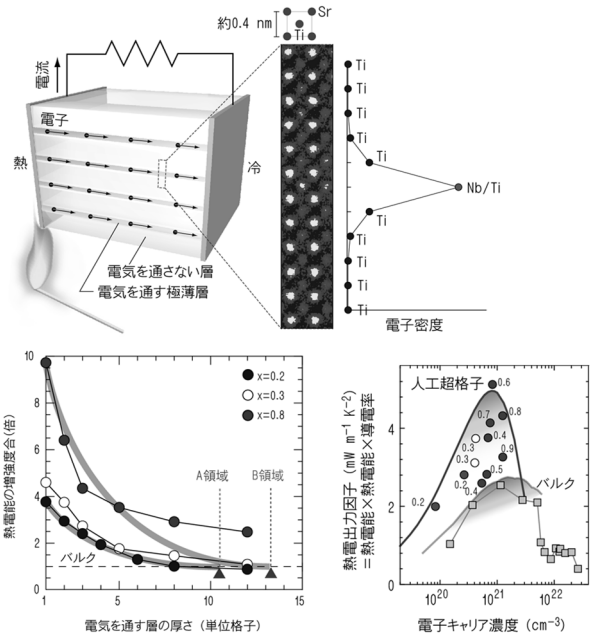


図１　（上）作製した$SrTiO_3$人工超格子の模式図、HAADF-STEM 像、計算によって求めた超格子中の電子密度、（下左）熱電能の増強度合い、（下右）熱電変換出力因子

今回の発見は、ド･ブロイ波長が長い材料を低次元化し、電子を無理矢理狭い空間に閉じ込めることで、熱電材料に温度差を与えた際に発生する電圧に相当する熱電能をバルク比１桁増強するという画期的な結果であり、現在、世界中で活発に研究されている熱電材料を高性能化するための有力な材料設計指針となると期待される。(この研究成果は、2018年6月20日 Nature Communications に掲載された)

(b) 透明酸化物半導体の開発

透明酸化物半導体La ドープ$BaSnO_3$(以下LBSOと略す)は、可視光の最大エネルギー（3.1 eV）よりも大きなバンドギャップを有するため透明であり、バルク単結晶が320 cm^2 V^{-1} s^{-1}の高い電子移動度を示すことが報告されて以来、世界中で活発に研究が行われている。しかし、LBSO 薄膜の電子移動度は低く（<100 cm^2 V^{-1} s^{-1})、実用化の障害となっている。移動度を抑制している原因は、LBSO 薄膜/酸化

物単結晶基板間の格子不整合に由来する貫通転位と信じられているが、格子不整合のない単結晶基板（$BaSnO_3$単結晶）を用いた場合も移動度は低いことが報告されており、その原因は明らかにされていない。

本研究では、LBSO 薄膜の電子移動度が低い原因を明らかにし、バルク単結晶と同等の高移動度を示す薄膜を実現するため、格子定数の異なる２種類の酸化物単結晶を基板とし、電子輸送特性の膜厚依存性を計測するという、極めて基本的な検討を行った。その結果、LBSO よりも格子定数が小さい $SrTiO_3$基板と、LBSO よりも格子定数が大きい MgO 基板上に作製した LBSO 薄膜において、両者の電子輸送特性はほぼ同様の膜厚依存性を示した。（結晶粒径、格子定数、微細構造の膜厚依存性は全く異なった）膜厚増加に伴って、キャリア電子濃度と移動度が共に増加した（図2）。（この研究成果は、2018年6月6日 Applied Physics Letters に掲載された）

作製した薄膜表面の Sn の酸化数を XAS で調べたところ、Sn^{4+}とともに Sn^{2+}が検出された。成膜時の雰囲気の酸化力が十分ではないと判断し、酸素よりも酸化力の強いオゾンを10%ほど混合した雰囲気中で薄膜成長を行ったところ、薄膜が薄い段階でキャリア濃度、移動度が急激に増加し、最終的には酸素中の薄膜を15%上回る移動度が得られた。（論文投稿中）

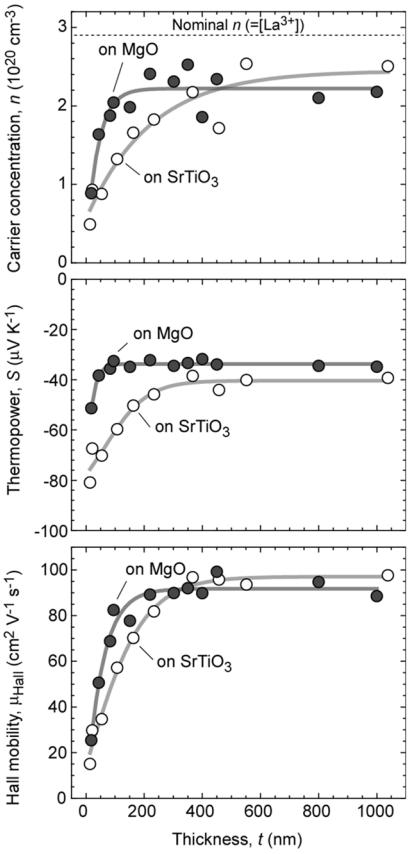


図２　LBSO 薄膜の（上）キャリア濃度、（中）熱電能、（下）Hall 移動度の膜厚依存性（室温）

（c）光・電気・磁気記憶デバイスの開発

2017年度下期から三菱財団自然科学部門 助成金を獲得して研究を継続して行っている。本研究のターゲットは、電解質代わりに利用している多孔質絶縁体（細孔に水を含む）の組成や微細構造を変化させることで、イオン伝導性を高め、デバイス化した際の動作電圧・動作時間を下げることである。具体的な数値目標は、駆動電圧3 V 以下、駆動時間1 s 以内である。2017年度末には、WO_3を活性層とする薄膜デバイスでこの数値目標をクリアし、現在新しい研究プロジェクトに向けた研究を行っている。

（d）スピントロニクスデバイスの開発

近年、スピントロニクス素子の磁化方向を電気的に制御する方法として、スピン軌道相互作用に起因した電流誘起有効磁場の利用が注目されている。本年度は、昨年度に観測した酸化物ハーフメタル$La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$（LSMO）における電流誘起有効磁場の機構を調べるため、有効磁場のチャネル方向依存性を調べた。膜厚11 u.c. の LSMO 薄膜を$SrTiO_3$(001)基板上にパルスレーザ堆積法によりエピタキシャル成長させた。そして、薄膜をフォトリソグラフィとウェットエッチングにより、[100]と[110]に沿った幅10 μmのチャネルと2対のホールプローブを備えたホールバー形状に加工した。磁化方向を容易軸方向の1つに揃えた後、外部磁場を掃引して磁化方向を別の容易軸方向にスイッチングさせた。そのスイッチング磁場の電流依存性から有効磁場を調べたところ、[100]と[110]チャネルの素子ではともに電流と直交する方向の有効磁場が誘起された。また、有効磁場の大きさを[100]と[110]チャネルの素子で比較したところ、図3に示すようにそれらにエラーバーの範囲で違いは見られなかった。このことから、LSMOの有効磁場は試料構造などの結晶方向によらない機構に起因していることが示唆される。

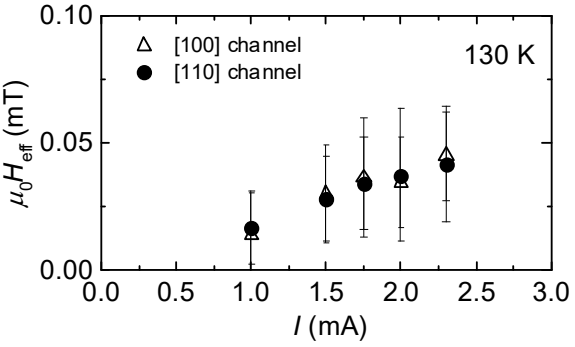


図３　[100]と[110]チャネルの素子における電流誘起有効磁場の電流依存性

（e）特殊なエピタキシャル薄膜成長方法の開発

2017年度から開始した基盤研究(A)「熱電材料の高 *ZT* 化に向けたナノ周期平行平板構造の熱伝導率解明」に供する試料として、反応性固相エピタキシャル成長法による$Ca_3Co_4O_9$薄膜および $InGaO_3(ZnO)_m$ 薄膜の作製に取り組ん

だ。現在、両薄膜の作製と熱伝導率の計測が完了したところであり、今後、比較・解析・計算を行った後、論文投稿する予定である。

３．今後の研究の展望

2016年度末で前助教が栄転し、その後、すぐに助教を採用することができなかったため、2017年度は一部研究が滞った部分があったが、2018年度に入りHai Jun Cho助教が着任し、再びアクティブな研究体制に戻すことができた。特に、2017年度から新たに開始した薄膜の熱伝導率に関する研究テーマや、熱デバイスの開発に大きな進展が予想される。また、国際共同研究が活発になってきており、2018年度のJSPS-NRF日韓二国間共同研究事業に採択されるなど、学生・若手研究者の交流の機会も大幅に増えそうである。これまでの国際交流の成果も、高インパクトファクタの学術論文掲載という形で徐々に現れてきており、お互いにWin-Winの関係で交流できている。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） Amit Khare, Dongwon Shin, Taesup Yoo, Minu Kim, Tae Dong Kang, Jaekwang Lee, Seulki Roh, Jungseek Hwang, Sung Wng Kim, Tae Won Noh, Hiromichi Ohta, and Woo Seok Choi, “Topotactic Metal-Insulator Transition in Epitaxial $SrFeO_x$ Thin Films”, Adv. Mater. 29, 1606566 (2017).

２） A.V. Sanchela, T. Onozato, B. Feng, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Thermopower modulation clarification of the intrinsic effective mass in a transparent oxide semiconductor, $BaSnO_3$”, Phys. Rev. Materials 1, 034603 (2017).

３） Shao-Pin Chiu, Michihiko Yamanouchi, Tatsuro Oyamada, Hiromichi Ohta, and Juhn-Jong Lin, “Gate tunable spin-orbit coupling and weak antilocalization effect in an epitaxial $La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$ thin film”, Phys. Rev. B 96, 085143 (2017).

４） Jae-Yeol Hwang, Young-Min Kim, Kyu Hyoung Lee, Hiromichi Ohta, Sung Wng Kim, “Te monolayer-driven spontaneous van der Waals epitaxy of two-dimensional pnictogen chalcogenide film on sapphire”, Nano Lett. 17, 6140 (2017).

５） Takayoshi Katase, Yuki Suzuki , Hiromichi Ohta, “Highly conducting leakage-free electrolyte for $SrCoO_x$-based non-volatile memory device”, J. Appl. Phys. 122, 135303 (2017).

６） Yukio Nezu, Yu-Qiao Zhang, Chunlin Chen, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, “Solid-phase epitaxial film growth and optical properties of a ferroelectric oxide, $Sr_2Nb_2O_7$“, J. Appl. Phys.122, 135305 (2017).

７） Hiromichi Ohta*, Sung Wng Kim, Shota Kaneki, Atsushi Yamamoto, and Tamotsu Hashizume*, “High thermoelectric power factor of high-mobility two-dimensional electron gas”, Adv. Sci. 4, 1700696 (2017).

８） Amit Khare, Jaekwang Lee, Jaeseoung Park, Gi-Yeop Kim, Si-Young Choi, Takayoshi Katase, Seulki Roh, Tae Sup Yoo, Jungseek Hwang, Hiromichi Ohta, Junwoo Son, and Woo Seok Choi, “Directing oxygen vacancy channels in $SrFeO_{2.5}$ epitaxial thin films”, ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 4831-4837 (2018).

９） Hirofumi Matsuoka, Kaito Kanahashi, Naoki Tanaka, Yoshiaki Shoji, Lain-Jong Li, Jiang Pu, Hiroshi Ito, Hiromichi Ohta, Takanori Fukushima, and Taishi Takenobu, “Chemical hole doping into large-area transition metal dichalcogenide monolayers using boron-based oxidant”, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 02CCB15 (2018).

１０）Ke-Ke Fu, Rong-Bin Wang, Takayoshi Katase, Hiromichi Ohta, Norbert Koch, and Steffen Duhm*, “Stoichiometric and oxygen deficient VO_2 as versatile hole injection electrode for organic semiconductors”, ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 10552-10559 (2018).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） Takayoshi Katase and Hiromichi Ohta, “Transition-metal-oxide based functional thin-film device using leakage-free electrolyte”, J. Ceram. Soc. Jpn. 125, 608-615 (2017). The 71st CerSJ Awards for Advancements in Ceramic Science and Technology (Dr. Katase): Review

２） 太田裕道:「特集:電子材料の新展開 エレクトロクロミック材料とその可能性」、日本電子材料技術協会会報、48:2-5 (2017)

4.4 著書

１） Hiromichi Ohta, Chapter 18 Thermoelectrics based on metal oxide thin films in “Metal Oxide-Based Thin Film Structures (1st Edition) Formation, Characterization and Application of Interface-based Phenomena”, Ed. Nini Pryds, Vicenzo Esposito (ISBN 9780128111666), ELSEVIER (2017).

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） H. Ohta, “Electrochemical function modulation of oxides

using three-terminal thin film transistor structure with water infiltrated insulator", The 3rd Functional Oxide Thin Films for Advanced Energy and Information Technology, Sheraton Roma, Roma, Italy, 2017 年 7 月 5 日-8 日 (Invited)

2） H. Ohta, "Electric field modulation of thermopower in two-dimensional electron gas", IUMRS-ICAM (The 15th International Conference on Advanced Materials), Yoshida Campus, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2017 年 8 月 27 日-9 月 1 日 (Invited)

3） Hiromichi Ohta, "Electrochemical modulation of functional oxides using three-terminal thin film transistor structure with water infiltrated gate dielectrics", Seminar at Tshinghua University (hosted by Prof. Yu Pu), Tshinghua University, Beijing, China, 2017 年 9 月 26 日 (セミナー講演)

4） Hiromichi Ohta, "Epitaxial film growth and some applications of functional oxides", Distinguished Lecture Series at Materials Science & Engineering, University of Toronto, Toronto (Canada), 2017 年 10 月 3 日 (招待講演)

5） Hiromichi Ohta, "Electric field thermopower modulation measurement", Seoul National University, Seoul (Korea), 2017 年 10 月 13 日 (セミナー講演)

6） Hiromichi Ohta, Yu-Qiao Zhang, "Double enhancement of thermoelectric power factor in oxide two-dimensional electron system via precise dimensionality control", 2017 Fall Korean Physical Society (KPS) Meeting, Gyeongju, Korea, 25-27 October, 2017 (Invited)

7） Michihiko Yamanouchi, Tatsuro Oyamada, Takayoshi Katase, and Hiromichi Ohta, "Current-induced effective magnetic field in $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/SrTiO_3$", The 9th RIES-CIS symposium, National Chiao Tung University, Taiwan, 27th October, 2017 (Invited)

8） Takayoshi Katase and Hiromichi Ohta, "Room-temperature-protonation-driven optoelectronic device with water-gated thin-film-transistor structure", the 8th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics, Las Vegas, USA, 15-17 November, 2017 (Invited)

9） H. Ohta, A. Sanchela, "Thermopower of oxide heterostructure", ICAMD2017 (The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices), Jeju, Korea, 5-8 December, 2017 (Invited)

b．招待講演（国内学会）

1） 太田裕道，"水を使った機能性酸化物薄膜の光・電気・磁気物性切替え手法"，産業技術総合研究所 中部センター 講演会，産総研中部センター(愛知県，名古屋市)，2017 年 9 月 5 日(招待講演)

2） 太田裕道，"固相エピタキシャル成長法を駆使した機能性酸化物ナノ層の創製"，日本金属学会 2017 年 秋期講演大会，北海道大学，札幌，2017 年 9 月 6 日―8 日 (基調講演)

3） 太田裕道，"薄膜トランジスタ構造を用いた熱電能の計測"，第 14 回 薄膜材料デバイス研究会，龍谷大学 響都ホール校友会館，京都，2017 年 10 月 20 日－21 日 (招待講演)

4） 片瀬貴義，太田裕道，"含水多孔質ガラスを用いたオンデマンド赤外線透過率-導電率制御デバイス"，日本真空学会 スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会，機械振興会館（東京都）2017 年 10 月 31 日 (招待講演)

5） 太田裕道，"半導体薄膜の熱電特性"，電子情報通信学会シリコン材料デバイス・電子デバイス合同研究会，北海道大学 百年記念会館（北海道，札幌市），2018 年 2 月 28 日-3 月 1 日 (招待講演)

6） 太田裕道，"水を使った機能性酸化物の光・電気・磁気特性切替え"，平成 29 年度日本表面科学会東北・北海道支部講演会，室蘭工業大学，北海道室蘭市，2018 年 3 月 8 日-9 日 (招待講演)

7） 太田裕道，"二次元電子系の熱電ゼーベック効果"，第 65 回 応用物理学会春季学術講演会，早稲田大学 西早稲田キャンパス(東京都，新宿区)，2018 年 3 月 17 日-20 日 (招待講演)

c．一般講演（国際学会）

1） Anup V. Sanchela, Takaki Onozato, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, "Thermopower modulation clarification of intrinsic carrier transport of novel transparent conducting oxide, $BaSnO_3$", IUMRS-ICAM 2017 (The 15th International Conference on Advanced Materials), Yoshida Campus, Kyoto University, Kyoto, Japan, 27 Aug.-1 Sep. 2017 (Oral).

2） Y. Zhang, B. Feng, H. Hayashi, T. Tohei, I. Tanaka, Y. Ikuhara, and H. Ohta, "Thermoelectric Performance of $SrTi_{1-x}Nb_xO3$ System (Bulk and Superlattices)", IUMRS-ICAM 2017 (The 15th International Conference on Advanced Materials), Yoshida Campus, Kyoto University, Kyoto, Japan, 27 Aug.-1 Sep. 2017 (Oral).

3） Rongbin Wang, Keke Fu, Takayoshi Katase, Hiromichi Ohta, Steffen Duhm, and Norbert Koch, "Vanadium dioxide as high work function electrode", DPG Spring Meeting and EPS-CMD27, Berlin, 11-16 March, 2018

4） Hiroaki Nakade, Shun Kondo, Eita Tochigi, Bin Feng, Yukio Nezu, Hiromichi Ohta, Naoya Shibata, and Yuichi Ikuhara, "Direct observation of martensitic phase transformation in yttria stabilized tetragonal zirconia", 6th International Symposium on Advanced Ceramics (ISAC-6), Tohoku University, Sendai, Japan, March

12-14, 2018

d．一般講演（国内学会）

1） 金橋魁利，竹腰直哉，Yong-Young Noh，太田裕道，田中久暁，竹延大志，“電解質ゲートによる導電性高分子DPPT-TTの熱電特性変調”，第78回 応用物理学会 秋季学術講演会，福岡国際会議場（福岡県，福岡市），2017年9月5日-8日

2） Kaito Kanahashi, Naoki Tanaka, Yoshiaki Shoji, Masatou Ishihara, Masataka Hasegawa, Hiromichi Ohta, Takanori Fukushima and Taishi Takenobu, “Extremely high-density hole-carrier doping into graphene films by a boron-based oxidant”，第53回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン 総合シンポジウム，京都大学 宇治おうばくプラザ（京都府，宇治市），2017年9月13日-15日（ポスター）

3） 金橋魁利，竹腰直哉，Yong-Young Noh，太田裕道，田中久暁，竹延大志，“導電性高分子のフィリング制御と熱電変換特性”，日本物理学会 2017 年秋季大会，岩手大学（岩手県，盛岡市），2017 年 9 月 21 日-24日（ポスター）

4） 竹腰直哉，金橋魁利，田中久暁，伊東裕，太田裕道，竹延大志，“イオン液体ゲートトランジスタによる導電性高分子 PBTTT の熱電特性制御”，日本物理学会2017年秋季大会，岩手大学（岩手県，盛岡市），2017年9月21日-24日（ポスター）

5） 小野里尚記，Yi-Ming Chang，Yu-Miin Sheu，太田裕道，“配向制御した層状コバルト酸化物エピタキシャル薄膜の熱電特性”，平成 29 年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会，東北大学片平さくらホール（宮城県仙台市），2017年11月1日-2日

6） 根津有希央，張 雨橋，陳 春林，幾原雄一，太田裕道，“固相エピタキシャル成長法による$Sr_2Nb_2O_7$エピタキシャル薄膜の作製と光物性”，平成 29 年度日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会，東北大学片平さくらホール（宮城県仙台市），2017 年 11 月 1日-2 日（ポスター）

7） Yuqiao Zhang, Bin Feng, Hiroyuki Hayashi, Isao Tanaka, Yuichi Ikuhara and Hiromichi Ohta, “Large enhancement in effective thermoelectric power factor of $Sr(Ti,Nb)O_3$ superlattice”，平成 29 年度日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会，東北大学片平さくらホール（宮城県仙台市），2017 年 11 月 1 日-2 日

8） Anup V. Sanchela, Takaki Onozato, Bin Feng, Yuichi Ikuhara and Hiromichi Ohta, “Electric field thermopower modulation of a transparent oxide semiconductor, $BaSnO_3$: Carrier effective mass and degenerate/non-degenerate threshold”，平成 29 年度日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会，東北大学片平さくらホール（宮城県仙台市），2017 年 11 月 1日-2 日

9） M. Wei, A. V. Sanchela, B.Feng, J. Lee, G. Kim, H. Jeen, Y. Ikuhara and H. Ohta, “Origin of mobility suppression in La-doped $BaSnO_3$ films”，第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会，北海道大学・学術交流会館（北海道・札幌市），2018年1月6日-7日

10）小山田達郎，片瀬貴義，太田裕道，山ノ内路彦，“$La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/SrTiO_3$ ホールバー構造における電流誘起有効磁場の膜厚・チャネル方向依存性”，第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会，北海道大学・学術交流会館（北海道・札幌市），2018 年 1 月 6 日-7 日

11）中出博暁，栃木栄太，馮 斌，柴田直哉，幾原雄一，近藤 隼，根津有希央，太田裕道，“イットリア安定化正方晶ジルコニアの応力誘起相変態その場観察”，日本セラミックス協会 2018 年年会，東北大学川内北キャンパス（宮城県仙台市），2018 年 3 月 15 日-18 日

12）魏 冕，サンチェラ・アナップ，馮 斌，李 浚赫，金 高韻，陳 亨秦，幾原雄一，太田裕道，“La ドープ $BaSnO_3$ 薄膜の電子移動度抑制の起源（I）”，2018 年 第 65 回応用物理学会春季学術講演会，早稲田大学・西早稲田キャンパス（東京都），2018 年 3 月 17 日-20 日

13）サンチェラ・アナップ，魏 冕，馮 斌，李 浚赫，金 高韻，陳 亨秦，幾原雄一，太田裕道，“La ドープ $BaSnO_3$ 薄膜の電子移動度抑制の起源（II）”，2018 年 第 65 回応用物理学会春季学術講演会，早稲田大学・西早稲田キャンパス（東京都），2018 年 3 月 17 日-20 日

14）田中久暁，竹腰直哉，金橋魁利，太田裕道，伊東 裕，竹延大志，“電解質ゲートによる導電性高分子の電子状態及び熱電特性変調”，2018 年 第 65 回応用物理学会春季学術講演会，早稲田大学・西早稲田キャンパス（東京都），2018 年 3 月 17 日-20 日

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 太田裕道，“酸化物ナノ層の熱電特性”，文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓-材料科学の新展開」 第9回全体会議，メルパルク京都，京都，2017年7月19日

2） Yu-Qiao Zhang, Feng Bin, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, “Thermoelectric power factor of $Sr(Ti,Nb)O_3/SrTiO_3$ superlattices”，新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓 ― 材料科学の新展開」第５回若手の会，晴海グランドホテル，東京，2017 年 7 月 25 日-26 日（ポスター発表）

3） 小野里尚記，太田裕道，“層状コバルト酸化物エピタキシャル薄膜の熱電特性－結晶方位依存性－”，新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓 ― 材料科学の新展開」第５回若手の会，晴海グランドホテ

ル，東京，2017年7月25日-26日（ポスター発表）

4） 根津有希央，Yu-Qiao Zhang，Chunlin Chen，幾原雄一，太田裕道，“固相エピタキシャル成長法による$Sr_2Nb_2O_7$エピタキシャル薄膜の作製と光物性”，新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓 ― 材料科学の新展開」第５回若手の会，晴海グランドホテル，東京，2017年7月25日-26日（ポスター発表）

5） 小山田達郎，片瀬貴義，太田裕道，山ノ内路彦，“酸化物ハーフメタル$La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$における電流誘起有効磁場の膜厚依存性”，新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓 ― 材料科学の新展開」第５回若手の会，晴海グランドホテル，東京，2017年7月25日-26日（ポスター発表）

6） 太田裕道，“透明酸化物半導体$BaSnO_3$薄膜のキャリア有効質量”，人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス G1 エレクトロニクス 物質・デバイス グループ分科会，西の雅常盤，山口，2017年10月31日-11月1日

7） 山ノ内路彦，“酸化物ヘテロ構造における電流誘起有効磁場”，人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス G1 エレクトロニクス 物質・デバイス グループ分科会，西の雅常盤，山口，2017年10月31日-11月1日

8） Anup V. Sanchela, H. Zensyou, Bin Feng, Yuichi Ikuhara and Hiromichi Ohta, “High-mobility transparent conducting $BaSnO_3$ film”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium 極 [Kyoku], Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Sapporo, Japan, 30 Nov.-1 Dec. 2017（ポスター）

9） Y. Zhang, B. Feng, H. Hayashi, I. Tanaka, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Double enhancement of thermoelectric power factor in advanced oxide two-dimensional electron system”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium 極 [Kyoku], Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Sapporo, Japan, 30 Nov.-1 Dec. 2017（ポスター）

10）Y. Nezu, Y. Zhang, C. Chen, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Solid-phase epitaxial film growth and optical properties of a ferroelectric oxide, $Sr_2Nb_2O_7$“, The 18th RIES-Hokudai International Symposium 極 [Kyoku], Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Sapporo, Japan, 30 Nov.-1 Dec. 2017（ポスター）

11）Takaki Onozato, Yi-Ming Chang, Yu-Miin Sheu, and Hiromichi Ohta, “Absence of thermal conductivity anisotropy in $Ca_3Co_4O_9$“, The 18th RIES-Hokudai International Symposium 極 [Kyoku], Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Sapporo, Japan, 30 Nov.-1 Dec. 2017（ポスター）

12) 太田裕道，“捨てられている熱を電気に変えよう！”，札幌市青少年科学館 先端科学技術講座，18 Feb. 2018

13）太田裕道，“酸化物ナノ層の熱電特性増強”，文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓-材料科学の新展開」第 5 回公開シンポジウム，メルパルク京都，京都，2018 年 3 月 7 日

4.7 シンポジウムの開催

1） 電子科学研究所学術講演会、「Trial devices for thermal diode （熱のダイオードの試作）」、講師：寺崎一郎 教授（名古屋大学）、電子科学研究所学術交流委員会主催、2017 年 6 月 30 日.

2） 電子科学研究所学術講演会、「Brownmillerite $SrFeO_x$ epitaxial thin films: Topotactic phase transformation, orientation control, and improper ferroelectricity」、講師：Woo Seok Choi（韓国・成均館大学校）、電子科学研究所学術交流委員会主催、2017 年 8 月 7 日.

3） 電子科学研究所学術講演会、「電圧スピン制御技術の進展 ～電圧制御型磁気メモリの実現に向けて～」、講師： 野崎隆行 氏（産業技術総合研究所）、「高分解能電子顕微鏡法による酸化物機能性発現メカニズムの解明」、講師： 藤平哲也 氏（大阪大学 基礎工）、電子科学研究所学術交流委員会主催、2017 年 12 月 13 日

4） 電子科学研究所学術講演会、「The Mott insulator Ca_2RuO_4 in a non-equilibrium steady state (非平衡定常状態におけるモット絶縁体 Ca_2RuO_4)」、講師： 寺崎一郎 教授（名古屋大学）、電子科学研究所学術交流委員会主催、2017 年 12 月 13 日

4.8 共同研究

a．所内共同研究

1） グリーンフォトニクス研究分野（三澤弘明教授、上野貢生准教授、押切友也助教）と密接に共同研究を実施した.

2） 光システム物理研究分野（藤原准教授）と酸化亜鉛薄膜作製などの共同研究を実施した。

b．民間等との共同研究

該当なし

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

1） 韓国・成均館大学校の Woo Seok Choi 助教と密接に遷移金属酸化物薄膜の熱電能計測に関する共同研究を実施した。

2） 韓国・成均館大学校の Sung Wng Kim 教授との共同研究成果が独科学誌 Advanced Materials に掲載された。

3） 台湾・アカデミアシニカの Wei-Li Lee 博士に CAN ゲート $SrTiO_3$ トランジスタを送付し、共同研究を継続中。超伝導転移を確認したとの報告を受けている。

4） 台湾・国立交通大学の Yu-Miin Sheu 助教と、超格子薄膜の熱伝導率計測に関する共同研究を行った。

5） 韓国・釜山大学校の Hyoungjeen Jeen 准教授と二国間共同研究を申請し、採択された。
6） 韓国・ソウル大学校の Kookrin Char 教授と透明酸化物半導体に関する共同研究を開始した。
7） 中国・清華大学の Pu Yu 教授と遷移金属酸化物の酸化還元反応に関する共同研究を開始した。
8） カナダ・トロント大学の Uwe Erb 教授との共同研究を開始した。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 太田裕道（代表）、基盤研究(A)、「熱電材料の高 ZT 化に向けたナノ周期平行平板構造の熱伝導率解明」、2017～2020 年度.
2） 太田裕道（代表）、新学術領域、「ナノ構造情報」計画班：「原子層制御による新しい材料機能探索」、2013～2017 年度.
3） 寺崎一郎（代表）、太田裕道（分担）、基盤研究(B)、「光ドープされた伝導体の電子輸送特性」、2013～2017 年度.

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 太田裕道、旭硝子財団 2017 年度 ステップアップ助成「半導体界面に蓄積された二次元電子ガスの熱電能電界変調」 2017 年度～2019 年度.
2） 太田裕道、三菱財団 平成 29 年度 自然科学部門 助成金「色・導電率を切替え可能な三端子型 WO_3 薄膜トランジスタの低電圧・高速動作に向けた材料改質」 2017 年 10 月～2018 年 9 月

4.10 受賞

1） 第 71 回（平成 28 年度）日本セラミックス協会賞 進歩賞，片瀬貴義，「遷移金属酸化物の酸化・還元を利用した薄膜機能デバイスの開発」，2017 年 6 月 2 日
2） Award for Encouragement of Research in IUMRS-ICAM 2017, Anup V. Sanchela, “Thermopower modulation clarification of intrinsic carrier transport of novel transparent conducting oxide, $BaSnO_3$”, IUMRS-ICAM 2017 (The 15th International Conference on Advanced Materials), Yoshida Campus, Kyoto University, Kyoto, Japan, 27 Aug.-1 Sep. 2017 (Oral)
3） 平成 29 年度日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会 優秀発表賞 小野里尚記, Yi-Ming Chang, Yu-Miin Sheu, 太田裕道,“配向制御した層状コバルト酸化物エピタキシャル薄膜の熱電特性”, 東北大学片平さくらホール（宮城県仙台市），2017 年 11 月 1 日-2 日 国際共同研究
4） Mian Wei[1], 第 21 回応用物理学会北海道支部発表奨励賞, “Origin of mobility suppression in La-doped $BaSnO_3$ films”, Anup V. Sanchela[2], Bin Feng[3], Joonhyuk Lee[4], Gowoon Kim[4], Hyoungjeen Jeen[4], Yuichi Ikuhara[3], Hiromichi Ohta[1,2]（北大院情報 [1], 北大電子研 [2], 東大院工 [3], 釜山大物理 [4]）
5） サンチェラ アナップ クマール, 第 47 回 電子科学研究所 松本・羽鳥奨学賞

4.11 社会教育活動

a． 公的機関の委員

該当なし

b． 国内外の学会の役職

1） 太田裕道：日本熱電学会 評議員、2014 年 11 月 20 日～.
2） 太田裕道：日本セラミックス協会東北・北海道支部理事、2017年4月1日～.
3） 山ノ内路彦：応用物理学会 北海道支部 庶務幹事、2016年4月1日～2018年3月31日.

c． 兼任・兼業

1） 太田裕道：韓国・成均館大学校 BK21＋プロジェクト Visiting Professor、2014 年 3 月～.

d. 外国人研究者の招聘

1） Jason Tam、カナダ、2017 年 6 月 20 日～2017 年 8 月 21 日
2） Soogil Lee、韓国、2017 年 9 月 10 日～2017 年 9 月 23 日
3） Gowoon Kim、韓国、2017 年 9 月 10 日～9 月 23 日
4） Joonhyuk Lee、韓国、2017 年 9 月 10 日～9 月 23 日
5） Gowoon Kim、韓国、2018 年 1 月 14 日～1 月 29 日
6） Eunyoung Ahn、韓国、2018 年 1 月 14 日～22 日
7） Jianbing Zhang、中国、2018 年 3 月 4 日～18 日
8） Jason Tam、カナダ、2018 年 3 月 19 日～4 月 19 日

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 工学部情報エレクトロニクス学科、電子デバイス工学、太田裕道、2017 年 4 月～7 月.
2） 大学院、光電子物性学特論、太田裕道、山ノ内路彦、2017 年 6 月～7 月.
3） 全学教育科目「環境と人間」ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命（分担）、太田裕道、2018 年 4 月 14 日.
4） 大学院、ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅱ 講義責任者、太田裕道、2017 年 11 月 15 日-17 日.
5） 大学院、ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅱ、太田裕道、2017 年 11 月 16 日.
6） 工学部情報エレクトロニクス学科、応用数学演習Ⅱ、山ノ内路彦、2017 年 4 月～7 月.
7） 工学部情報エレクトロニクス学科、学生実験（分担）、太田裕道、山ノ内路彦、2017 年 4 月～7 月.

8） 工学部情報エレクトロニクス学科電気電子工学コース、科学技術英語演習、太田裕道、山ノ内路彦、2017年11月～2018年3月.

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 該当なし

g． 新聞・テレビ等の報道

1） “北海道大学ほか 高効率な熱電変換材料 窒化ガリ由来で発見”, 日刊産業新聞 朝刊 12面, 2017年11月21日

2） “Method for recycling waste energy with 2D electron gas developed”, Electronics 360, November 20, 2017

3） “Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Science Daily, November 20, 2017

4） “Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Technology Breaking News, November 20, 2017

5） “Reusing waste energy with 2-D electron gas”, EurekAlert!, November 20, 2017

6） “Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Phys.org, November 20, 2017

7） “Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Science Newsline, November 20, 2017

8） “Reusing waste energy with 2D electron gas”, Humanitarian News, November 20, 2017

9） “Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Physics News, November 20, 2017

10）“Reusing waste energy with 2D electron gas”, EnviromentGuru, November 20, 2017

11）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, The Expanding Universe, November 20, 2017

12）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, 15 Minute News, November 20, 2017

13）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Parallel State, November 20, 2017

14）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, My News, November 20, 2017

15）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, HiTechDays, November 20, 2017

16）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, News Locker, November 20, 2017

17）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, telezkope, November 20, 2017

18）“Reusing waste energy with 2-D electron gas”, Energy Daily, November 23, 2017

19）“青色 LED の材料を活かして、熱を電気に高効率に変換！:北海道大学/産業技術総合研究所ほか”, つくばサイエンスニュース, 2017年11月24日

20）“青色LED材料を活かして、熱を電気に変換”, J-Net 21, 2017年11月27日

21）“北大と産総研など、半導体二次元電子ガスが熱電変換材料に比べ2～6倍も大きな熱電変換出力因子を示すことを発見”、日本経済新聞(プレスリリース)、2017年11月27日

22）“産総研, GaN を用いた高効率熱電変換に成功”, OPTRONICS ONLINE, 2017年11月27日

23） “北大と産総研など、半導体二次元電子ガスが大きな熱電変換出力因子を示すことを発見”, fabcross for エンジニア, 2017年11月28日

24） “青色 LED 材料を活かして熱電材料を高性能化、北大など(森元美稀)”, 日経テクノロジーonline, 2017年11月29日

25） “青色LED材料を活かして、熱を電気に変換”, “科学技術書・理工学書”読書室－SBR－（科学技術研究者 勝 未来), 2017年11月29日

26） “北大ら、性能を高める熱電材料の設計指針を示す(馬本隆綱, EE Times Japan)”, EE Times Japan, 2017年11月29日

27） “北大、青色 LED 材料を活かして熱を電気に変換- 最先端熱電変換材料の2～6倍(早川厚志)”, マイナビニュース, 2017年12月1日

28） “北大、青色 LED 材料を活かして熱を電気に変換- 最先端熱電変換材料の2～6倍”, excite ニュース, 2017年12月1日

29） “青色 LED 材料を活かして熱電材料を高性能化、北大など”, エネ速, 2017年11月29日

30） ”北大、青色 LED 材料を活かして熱を電気に変換- 最先端熱電変換材料の2～6倍”, goo ニュース, 2017年12月1日

31）“北大など 青色ＬＥＤ材料で熱を電気に効率変換”, 日本経済新聞（電子版）, 2017年12月3日

h． ポスドク・客員研究員など

1） Anup Sanchela （科研費新学術領域研究）

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0名

博士学位：0名

生命科学研究部門

研究目的

本研究部門では、非線形光学過程を用いたイメージングや解析、分子配列制御などの基盤技術をベースとして、生きたままの個体、組織深部の“*in vivo*”観察・操作を実現する新しい生命機能の解析法の開発、ＤＮＡやタンパク質およびナノ粒子などの超分子構造体創製などに取り組んでいます。このような研究は、生命現象の基盤となる生体分子ネットワークや生命機能発現の解明のみならず、「光と細胞や脳科学」などの学際領域やナノテク・バイオ融合領域の発展に貢献すると共に、新しい治療や臨床応用へと繋げます。

光細胞生理研究分野

教　授　根本知己（東工大院、博(理)、2009.9～）
准教授　榎木亮介（東京薬大院、博（生命科学）、2018.1～）
助　教　川上良介（九大院、博(理)、2010.6～2017.6）
助　教　大友康平（東北大院、博(薬),2016.4～）
特任助教　飯島光一朗（京大院、博(生命科学)、2011.1～2018.3）
特任助教　堤　元佐（北大院、博士(生命科学)、2017.4～）
特任助教　石井宏和（甲南大院、博士（理工学）、2017.6～）
博士研究員　喬　琳（北大院、博士(理)、2017.6～2918.2）
学術研究員　何　倩（中国広西医科大院、Ph.D.、2018.1～2018.3）
事務補佐員　佐藤絵美（2017.3～）
大学院生
　博士後期課程　青柳佑佳、澤田和明、山口和志
　修士課程　山中祐実、安宅光倫、後藤亜衣、高橋泰伽
学部生　鎌田恭史、柴田雅史、柏葉　紘則

１．研究目標

本研究分野は、超短光パルスレーザーによる非線形光学過程を用いたイメージングを中心に、遺伝子工学、電気生理学、光機能分子などを活用することで、生き個、組織での、「光による観察」と「光による操作」を同時に実現する新しい生命機能のイメージング法を展開させることを目標とする。さらに、光バイオイメージングの技術を駆使し、哺乳動物の持つ24時間周期の概日性リズムの研究を推進すると共に、中枢神経系のコネクトミクスや、内分泌・外分泌腺の生理機能や糖尿病、がん等の疾患の分子機構の基礎の解明に応用し、光学から生命科学までにわたり、医学的な応用を目指す新たな学際的な研究領域「光・脳科学」「光・細胞生物学」を推進することを目的とする。

２．研究成果

(a) 2光子顕微鏡は、近赤外域のフェムト秒光パルスにより生じる非線形光学過程である2光子励起過程を利用する顕微鏡法であり、他の顕微鏡法では観察が困難な、生体組織深部の観察が可能である。現在、生物個体中で細胞や生体分子機能の非侵襲的な可視化解析が可能な方法論として、期待されている。我々は、この顕微鏡法の黎明期より、その確立と生命科学への応用を先導し，世界で最も深い深部到達性とサブマイクロメーターの分解能を実現する生体用 “***in vivo***” 2光子顕微鏡システムを構築することに成功した（図1）。特に、物質・デバイス共同研究拠点事業やJST・CREST、AMED・BRAIN/MIND（革新脳）による共同研究を通じて、東北大学NICHeの横山研究室と開発した半導体ベースの新規パルスレーザー光源を活用することで、世界深度記録というべき、マウス生体脳の脳表から約1.6 mmの蛍光断層観察に成功し、大脳皮質全層及び海馬CA1，歯状回の蛍光イメージングに成功している。その他、前頭前野、小脳、RMS等での生体脳*in vivo*イメージングに成功している。さらに聴覚野の*in vivo*イメージングのための外科処理法の新プロトコルの確立を目指した。

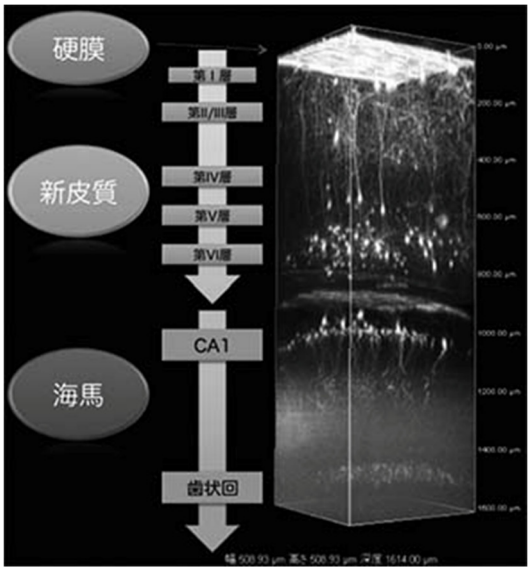


図１ “*in vivo*” 2光子顕微鏡は生体内の組織の深部を高分解能で長期間観察を可能とする。麻酔下のマウス大脳新皮質の神経細胞及び海馬 CA1・歯状回ニューロン。

(b) 我々は一連の*in vivo*2光子顕微鏡システムを用いた研究によって、その原因は標本の種類や観察部位に依存した光学的なパラメーターの非一様性にあることを見出した。そこでレーザー波面操作による収差補償に関する補償光学の研究を推進した。光学的なパラメーターや収差の評価を行い、レーザー光導入光学系の改良を実施した。特に微小な蛍光ビースの生体脳内への導入法を検討し、生体脳での点像分布関数を評価するための方法論を確立した。この方法論を用いて、レーザー照射条件、特に有効NAと補正環効果の検索を行った。その結果、深部イメージングにおいて最適な照射条件は浅層とは異なっていることが判明した。浸液の屈折率のミスマッチによって発生する球面収差がマウス生体脳深部の空間分解能に与える影響を検討し、最も高い空間分解能を与える条件を決定した。さらに、レーザー波面操作による補償光学システムの構築に着手した。これらの成果は日本バイオイメージング学会「ベストイメージング賞ニコン賞」の受賞につながった。

この方法論を用いて、マウス生体脳中の皮質深層での神経線維破断をターゲットとし、照射時間や浸液の屈折率、レーザー照査条件の検討を行った。その結果、同一のマウス個体の生体脳中において、近赤外超短光パルスレーザー光を神経細胞の局所に集中させることにより、知る限り世界で初めて、脳表から500μm以上の深部で神経線維のin vivo光操作・光破断に成功した（図2）。さらに生体脳中での光破談の影響を

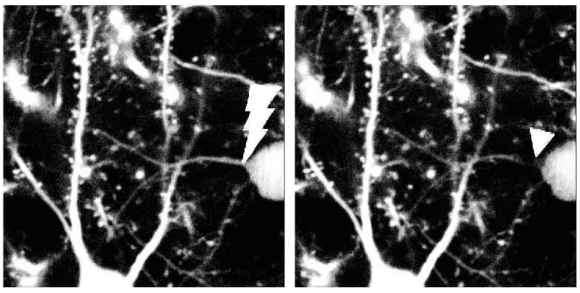


図2　マウス生体脳における神経線維の光切断

評価するために、理研BSI・平瀬肇博士よりご提供いただいた、主としてアストロサイトにCa^{2+}感受性蛍光タンパク質であるGCaMP7を発現するトランスジェニックマウスを用いて、*in vivo* Ca^{2+}イメージングを開始した。その結果、大脳新皮質深部でのCa^{2+}振動のライブイメージングに成功した。なお本成果は「第3回北大部局横断シンポジウム・ベストポスター賞」を受賞した。

また、物質・デバイス共同研究拠点事業を通じて、*in vivo*イメージングにおけるオープンスカル法の改善を目指し、東海大学工学部・岡村陽介准教授のグループと、ナノシートを用いて頭蓋骨の置換を行いという全く新しい手法の開発に着手した。その結果、外科手術が容易となり、今までは困難であったマウス前頭前野の深部イメージングや全脳イメージングに成功した。本成果はInternational Symposium on Nanomedicine 2017 (ISNM2017)において「The Best Poster Award」を受賞した。

(d) 固定脳における深部イメージングの改善のため、透徹剤として有力な試薬の候補を発見した(PLOS ONE誌被引用数トップ25%)。本方法論を用いて、名古屋市立大・医、澤本和延教授との共同研究を通じて、新生ニューロンの網羅的解析を推進した。特に脳側室から、RMSから嗅球への移動する新生ニューロンの観察に成功し、微細なニューロンの形態の解析を進めた。さらに詳細なニューロン形態の自動的な画像解析の方法論については、自然科学研究機構基礎生物学研究所の木森義隆博士と共同研究を実施し、パターンマッチングの基づくアルゴリズムを確立した。その結果、RMS周辺領域の新生ニューロンの位置の網羅的な自動検出に成功した。

また、超解像顕微鏡である構造化照明法とこの新規透徹剤を組み合わせることで、樹上突起スパインネックなど微細な構造が可視化できることが明らかになった。鬱病モデルマウスにおいて樹上突起スパインの構造が変化する様子を解析することに成功し、原著論文として出版した。

(e)　神経科学に資する新たなイメージング技術を開拓するために、AMED「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト」の個別技術開発課題を受託し、新規レーザー光源による超深部*in vivo*顕微鏡法、超解像顕微鏡法の開発を推進している。光は波動としての性質のために回折限界が存在するため、レンズを用いた場合、波長程度の有限な大きさまでしか絞ることができない。これが光学顕微鏡の空間分解能の限界の1つの大きな原因となっており、300 nm程度である。従って、シナプス小胞を始め、生理機能を担っていある。そこで、回折限界を越える蛍光イメージングを可能とする方法論を、「ベクトルビーム」を用いて開発した。特に、液晶デバイスを用いて光渦を発生させることで、誘導放出抑制現象(STED)を利用し、2光子顕微鏡の空間分解能を上げ、2光子顕微鏡の超解像イメージング化の開発に成功した(図3)。さらにSTED用新規レーザー光源を導入し、超解像イメージングの分解能の向上と安定化を推進した。

(f) (株)横河電機と共に、ニポウディスク式高速2光子顕微鏡システムによる時間分解能の向上にも着手した。高ピークパワーの近赤外超短光パルスレーザーシステムの導入や光学パラメーターの最適化を実施することで、視野を10倍に拡大しつつも、10 msという高速のフレームレートを実現することに成功した。さらに新規917nm高出力レーザーの導入により

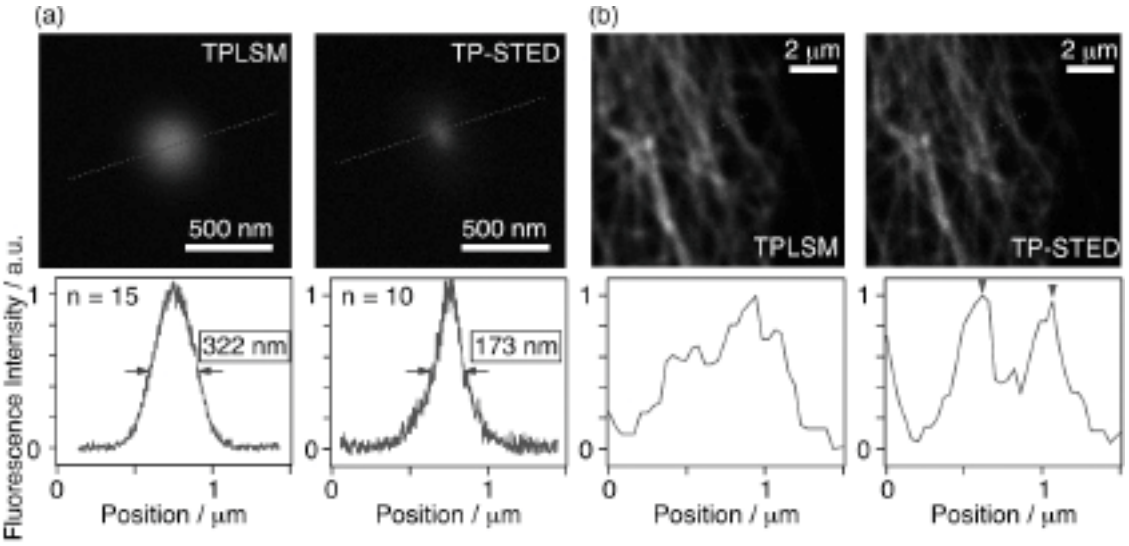


図 3：２光子 STED 顕微鏡による超解像イメージングの比較。(a)微小蛍光ビーズ像、(b) 固定した COS7 細胞の微小管の抗体蛍光染色サンプル。TPLSM は通常の２光子顕微鏡、TP-STED は２光子 STED 顕微鏡

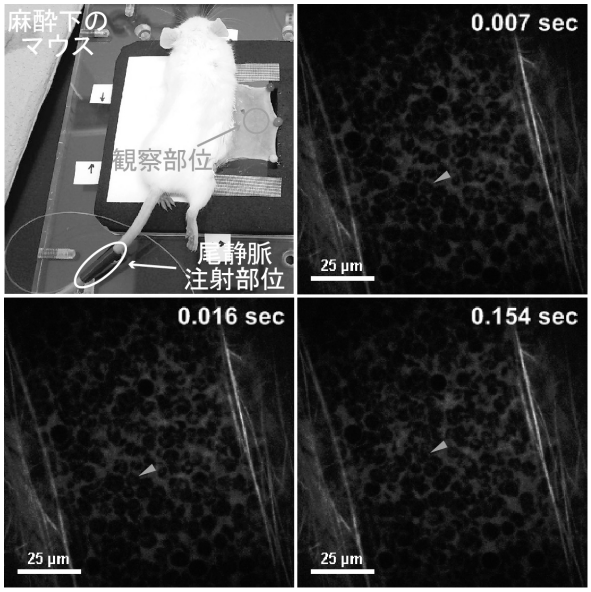


図 4: 二光子 CSU 顕微鏡によるマウス血流の *in vivo* 超高速イメージング

緑色系の蛍光分子や蛍光タンパク質への適用をはかることに成功した(図4)。本研究は、新学術領域研究(研究領域提案型)「レゾナントバイオロジー」において研究計画「ベクトルレーザー光を用いた高速*in vivo*イメージング技術の高度化と応用」を受託し研究を進めた。

本方法論と先述の GCaMP7 を発現するトランスジェニックマウスを用いて膵臓外分泌腺および膵臓ランゲルハンス氏島の*in vivo*Ca^{2+}イメージングを開始した。長期間に渡って同一個体内部の同一の細胞の応答を追跡することが可能となった。

さらに W-VIEW 光学系を改良することにより、蛍光および SHG の高速偏光分解イメージングを実現するシステムの開発に着手した。その結果、日本顕微鏡学会北海道支部会優秀ポスター賞の受賞につながった。

本法により、拠点アライアンス・コラボ村田隆客員教授との共同研究において、植物細胞における細胞分裂過程においての微小管の再構成の3D ライブイメージングに成功した。また麻酔下のマウスの血流を、2 光子励起蛍光や第2次高調波発生を用いて 100fps 以上の高速度で、撮影することにも成功した。

さらに開発した装置は、研究支援部ニコンイメージングセンターにおいてstation-5として共同利用に供しており、物質・デバイス共同研究拠点事業や、科学研究費補助金新学術領域先端バイオイメージング支援授業を通じて、多くのユーザーに利用をしていただいた。

3．今後の研究の展望

今後の我々の研究目標は、生体脳・中枢神経系モデルにおいて、SNARE分子やその結合因子など、開口放出を引き起こす分子機械の機能解明とその生理機能、破綻として病理の理解にある。そのためには、この分子機械の有力な候補分子の動態、複合体形成などを同時多重可視化し、生合成分子の放出に伴う分子過程を定量化する方法論を開発することが重要である。また、これらの方法論を拡張し、がん組織、骨組織など多様な生組織の深部解像能を向上させ、可視化と光操作の同時実行による生体分子動態の高精度解析を可能としたい。その為に、このような実験を広く可能とするプラットホームの確立や研究コア・グループの形成が必要であろう。さらに、先述のように深部断層イメージングに成功しているマウス大脳新皮質と、その他の生体臓器との間の光学的な差異についても検討し、その結果を反映してレーザー顕微鏡の光学系の改良に努めることが肝要であろう。またマウス生体脳の*in vivo*イメージングは、神経回路網の機能がどのように実現されているのかを理解するためにも有用である。このように、イメージング技術を展開させることと、真の生体内部で生じている現象の定量的、統合的に理解することを縦糸・横糸とすることで、我々の身体における生理機能や病理の理解を推進し、広く国民の福祉へと還元していきたいと考える。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） K. Sawada, R. Kawakami, R. Shigemoto and T. Nemoto: “Super-resolution structural analysis of dendritic spines using three-dimensional structured illumination microscopy in cleared mouse brain slices”, Eur. J. Neurosci, 47(9): 1033-1042 (2018)

2） K. Sawada, R. Kawakami, Y.-C. Fang, J.-H. Hung, Y. Kozawa, K. Otomo, S. Sato, H. Yokoyama, T.Nemoto: “Improvement of two-photon microscopic imaging in deep regions of living mouse brains by utilizing a light source based on an electrically controllable gain-switched laser diode”, Proc. SPIE, p. 104982L-1 - 104982L-10 (2018)

3） J. Hung, K. Sato, Y. Fang, L. Peng, T. Nemoto and H. Yokoyama: ″Generation of high-peak-power sub-nanosecond 650-nm band optical pulses based on semiconductor laser controlling technologies″, Appl. Phys. Express, 10(10): 102701-1-102701-4 (2017)

4) S. Hiruma, T. Kamasaki, K. Otomo, T. Nemoto and R. Uehara: “Dynamics and function of ERM proteins during cytokinesis in human cells”, FEBS Lett, 591(20): 3296-3309 (2017)

5) H. Zhang, A. Masuda, R. Kawakami, K. Yarinome, R. Saito, Y. Nagase, T. Nemoto and Y. Okamura: ″Fluoropolymer nanosheet as a wrapping mount for high quality tissue imaging″, Advanced Materials, 29: 1703139-1-1703139-6 (2017)

4.2 学術論文（査読なし）

1） 大友 康平、渡邊 裕貴、山中 祐実、後藤 亜衣、日比 輝正、根本 知己:「新規光技術を用いた多光子顕微

鏡の空間分解能・時間分解能向上」、顕微鏡、52(2): 67-71 (2017)

4.3 総説・解説・評論等

1) 川上 良介、大友 康平、根本 知己:「新規レーザーによる生体イメージング」、光アライアンス、28(12): 21-25 (2017)
2) 堤 元佐、大友 康平、一本嶋 佐理、川上 良介、根本 知己:「多光子顕微鏡技術の新展開」、生体の科学、68(5): 392-393 (2017)

4.4 著書

1） Ryosuke Kawakami and Tomomi Nemoto :「In vivo imaging of all cortical layers and hippocampal, CA1 pyramidal cells by two-photon excitation microscopy」, Advanced Optical Methods for Brain Imaging, Nature Springer (2018)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1） T. Nemoto*, R. Kawakami, A. Tanabe and T. Hibi : ″Improvement of Multi-photon Microscopy by Utilizing Novel Optical Technologiesand Materials″, 11th Ingternational meeting of Nanomedicine (ISNM2017), Tohoku University, Japan (2017-12)
2） T. Nemoto* : “Improvement of multi-photon microscopy by utilizing new optical technologies”, The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO24), Keio Plaza Hotel (Tokyo), Japan (2017-08)
3） Kohei Otomo*, Tomomi Nemoto, “Improving two-photon microscopy for clear visualization of subcellular structures”, International Symposium on Imaging Frontier 2017 (ISIF2017), Tokyo University of Science, Tokyo (2017-07)
4） T. Nemoto*, R. Kawakami, T. Hibi, K. Otomo, S. Ipponjima, K. Sawada and A. Tanabe : “Improvement of in vivo Two-Photon Microscopy by utilizing novel optical technologies”, CLEO PR, OECC & PGC 2017, Sands Expo and Convention Centre, Singapore, Singapore (2017-07 ～ 2017-08)
5） T. Nemoto*, R. Kawakami, T. Hibi and A. Tanabe : “In vivo two-photon imaging of brain and neurons using a high-peakpower gain-switched laser diode and adaptive optics”, he 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2017), Pacifico Yokohama,Yokohama, Japan (2017-04)

ｂ．招待講演（国内学会）

1） 榎木 亮介*:「室傍核ウルトラディアンリズムの発生機序」、第 95 回日本生理学会大会、サンポートホール高松、高松市 (2018-03)
2） 根本 知己*:「外観検査アルゴリズムコンテスト 2017 画像紹介」、精密工学会画像応用技術専門委員会(ViEW2017)、パシフィコ横浜、横浜市 (2017-12)
3） 根本 知己*:「多光子励起による生体組織や脳の深部イメージング」、応用物理学会第６０回光波センシング技術研究会、東京理科大学、東京都 (2017-12)
4） 大友 康平*, 根本 知己, “新しい光学技術による二光子顕微鏡の機能拡張”, RIKEN seminar「二光子励起顕微鏡による深部高速観察と補償光学」, 理化学研究所, 和光市 (2017-10)
5） 大友 康平*:「Improvements of two-photon excitation microscopy by utilizing novel optical technologies」, 第 55 回生物物理学会年会, 熊本大学、熊本市 (2017-09)
6） 根本 知己*、川上 良介、大友 康平、一本嶋 佐理、山中 祐実 :「２光子顕微鏡による非侵襲的な生体組織観察の高度化」、第 26 回 日本バイオイメージング学会学術集会、東京薬科大学、八王子市 (2017-09)
7） 根本 知己*:「非線形光学過程を利用した光学顕微鏡の原理と応用」、京都大学医学部セミナー、京都大学大学院医学系研究科、京都大学医学部、京都市 (2017-07)
8） 根本 知己*:「多光子過程を用いた in vivo イメージングの展開」、第 69 回日本細胞生物学会大会、仙台国際センター、仙台市 (2017-06)
9） 根本 知己*:「新規レーザー光技術の活用による生体非線形イメージングの高度化」、ナノ学会第 15 回大会、札幌市 (2017-05)

ｃ．一般講演（国際学会）

1） K. Otomo, A. Goto, and T. Nemoto* : ″Real time polarization resolved imaging for living mice tissues by two-photo excitation spining disk microscopy″, Focus on Microscopy 2018 (FOM2018), Singapore, Singapore (2018-03)
2） K. Sawada*, R. Kawakami, Y. Fang, J. Hung, Y. Kozawa, K. Otomo, S. Sato, H. Yokoyama and T. Nemoto : ″Improvement of two-photon microscopic imaging in deep regions of living mouse brains by utilizing a light source based on an electrically controllable gain-switched laser diode″, SPIE Bios, San Francisco, United States of America (2018-01)
3） K. Yamaguchi*, R. Kawakami and T. Nemoto : ″Estimation of effects after two-photon laser ablation on surrounding astrocytes by in vivo astrocytic Ca2+ imaging″, 2017 Society for Neuroscience Annual Meeting,

Washington DC, United States of America (the) (2017-11)

4） K. Otomo*, A. Goto, Y. Yamanaka, H. Nakayama, T. Hori and T. Nemoto : ″High speed imaging for green fluorescent proteins by utilizing multi-point scanning two-photon microscopy″, Focus on Microscopy 2017 (FOM2017), Bordeaux convension center, Bordeaux, France (2017-04)

d. 一般講演（国内学会）

1） 中村 咲耶*、日出間 純、大友 康平、根本 知己、石田 宏幸、泉 正範 : 「紫外線障害時のオルガネラ除去を担うオートファジーの解析」、第 59 回植物生理学会大会、札幌コンベンションセンター、札幌市(2018-03)

2） 後藤 亜衣*、大友 康平、中山 博史、堀 喬、根本 知己 :「多点走査型 2 光子顕微鏡による生体組織の高速 SHG イメージング」、日本顕微鏡学会北海道支部会、北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟、札幌市 (2017-12)

3） 山本 啓*、大友 康平、根本 知己、村上 洋太、高橋 正行 : 「細胞質分裂におけるミオシン IIA, IIB の機能解析」、2017 年度生命科学系学会合同年次大会、神戸ポートアイランド、神戸市 (2017-12)

4） 山中 祐実*、大友 康平、根本 知己 : 「新規多点走査型２光子顕微鏡を用いたマウス膵島 *ex vivo* 及び *in vivo* Ca^{2+}イメージング」、2017 年度生命科学系学会合同年次大会、神戸ポートアイランド、神戸市 (2017-12)

5） 鎗野目 健二*、張 宏、青木 拓斗、髙橋 泰伽、川上 良介、根本 知己、岡村 陽介 : 「生体組織イメージングへの応用を目指した撥水性超薄膜の表面改質」、第 39 回日本バイオマテリアル学会、タワーホール船堀、東京都江戸川区 (2017-11)

6） 張 宏*、増田 愛美、鎗野目 健二、長瀬 裕、川上 良介、根本 知己、岡村 陽介 : 「保水・保定を実現する撥水性超薄膜の創製と生体組織イメージングへの応用」、第 66 回高分子討論会、愛媛大学、目津山市 (2017-09)

7） 北村 瞭次*、毛内 拡、山口 和志、川上 良介、上 喜裕、岡咲 賢哉、濱 裕、平瀬 肇、根本 知己、宮脇 敦史 : 「In vivo イメージングの改善のための最適な観察条件の探索」、第 26 回日本バイオイメージング学会学術集会、東京薬科大学、八王子市(2017-09)

8） 山中 祐実*、大友 康平、根本 知己 : 「多点走査型 2 光子顕微鏡を用いたマウス膵臓における *in vivo* Ca^{2+}イメージング」、第 26 回日本バイオイメージング学会学術集会、東京薬科大学、八王子市 (2017-09)

9） 村田 隆*、大友 康平、根本 知己 : 「Possible roles of nuclear envelope in mitotic spindle formation of plants」、第 69 回日本細胞生物学会大会、仙台国際センター、仙台市 (2017-06)

10）鎗野目 健二*、張 宏、青木 拓斗、川上 良介、根本 知己、岡村 陽介 : 「撥水性超薄膜の表面改質と生体組織イメージングツールへの応用」、第 66 回高分子学会年次大会、幕張メッセ、千葉市 (2017-05)

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 榎木 亮介*、電子科学研究所研究交流会、北海道大学 (2018-03)

2） 山本 啓*、大友 康平、根本 知己、村上 洋太、高橋 正行 : 「胞質分裂におけるミオシン IIA, IIB の機能解析」、平成 29 年度北大細胞生物研究集会、北海道大学理学部、札幌市 (2018-02)

3） 堤 元佐*、小林 健太郎、大友 康平、松尾 保孝、根本 知己 : 「ニコンイメージングセンターにおけるイメージング支援」、 第 3 回北大・部局横断シンポジウム、北海道大学医学部 (2018-01)

4） 山口 和志*、北村 瞭次、川上 良介、根本 知己 :「励起光学条件の改善によるマウス生体脳深部観察の高度化とその応用」、第 3 回北大部局横断シンポジウム、北海道大学医学部、札幌市 (2018-01)

5） 大友 康平*, 根本 知己 :「二光子顕微鏡の機能拡張による生体内微細構造の可視化」、第 3 回 北大部局横断シンポジウム, 北海道大学医学部、札幌市 (2018-01)

6） 村田 隆*、大友 康平、根本 知己、長谷部 光泰「染色体依存の微小管形成経路は植物の紡錘体形成に関与するか？」生体運動合同班会議 2018、法政大学市ヶ谷キャンパス、東京都 (2018-1)

7） T. Takahashi*, K. Yarinome, H. Zhang, R. Kawakami, Y. Okamura and T. Nemoto : ″In vivo two-photon imaging of living mouse brain by utilizing novel fluoropolymer PEO-CYTOP nanosheets″, International Symposium of Nanomedicine (ISNM2017), Sendai, Japan (2017-12)

8） T. Takahashi*, K. Yarinome, H. Zhang, R. Kawakami, Y. Okamura and T. Nemoto : ″Novel open skull method for in vivo two-photon imaging of living mouse brain by utilizing fluoropolymer CYTOP nanosheets″, the 18th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2017-11)

9） M. Ataka*, R. Kawakami and T. Nemoto : ″Development of the open skull technique on the temporal region for in vivo two-photon imaging of mouse auditory cortex″, 18th RIES-Hokudai International Symposium,

Sapporo, Japan (2017-11)

10) A. Goto*, K. Otomo and T. Nemoto : ″High-speed polarization resolved imaging for living mice tissues by two-photon excitation multi-point scanning microscopy″, 18th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2017-11)

11) 根本 知己* :「北海道大学電子科学研究所ニコンイメージングセンター」、ABiS 支援説明会、東京大学医学部、東京都 (2017-05)

4.7 シンポジウムの開催

1) 榎木 亮介 :「中枢概日時計ネットワークの作動基盤」、日本生理学会大会 (高松、香川) (2018 年 3 月 30 日)

2) 大友 康平、根本 知己 :「電子研学術講演会・ニコンイメージングセンターセミナーDr Tsai-Wen Chen (National Yang-Ming University, Taiwan) In vivo imaging of calcium and electrical signals in singlehippocampal neurons」、北海道大学電子科学研究所 (札幌市) (2018 年 03 月 14 日)

3) 根本 知己 :「ニコンイメージングクラブ」、グランドフロント大阪 (大阪市) (2018 年 01 月 26 日)

4) 根本 知己、大友 康平、堤 元佐、小林 健太郎 :「NIC 学術講演会・G3 ダイナミックアライアンス公開シンポ」、東北大学 (仙台市) (2017 年 11 月 28 日)

5) 根本 知己、大友 康平、堤 元佐、小林 健太郎 :「第 24 回 医用近赤外線分光法研究会・2017 年度 分光学会生細胞分光部会・第 6 回 ニューロフォトニクス研究会 合同研究会」、北海道大学 (札幌市) (2017 年 10 月 28 日～2017 年 10 月 29 日)

6) 根本 知己、大友 康平、堤 元佐、小林 健太郎 :「NIC 蛍光ミニシンポジウム 」、北海道大学 (札幌市) (2017 年 07 月 27 日)

7) 根本 知己、松田 道之 :「第 69 回日本細胞生物学会大会シンポジウム「細胞生物学とイメージング技術の共鳴誘導」」、仙台国際センター (仙台市) (2017 年 06 月 13 日～2017 年 06 月 15 日)

4.8 共同研究

a. 所内共同研究

1) 研究支援部ニコンイメージングセンター

b. 民間等との共同研究

1) ニコンインステック(株)
2) ニコン(株)
3) 横河電機 (株)
4) イムラ・アメリカ
5) シチズン時計 (株)
6) 自然科学研究機構基礎生物学研究所

c. 委託研究

該当なし

d. 国際共同研究

該当なし

4.9 予算獲得状況 (研究代表者、分類、研究課題、期間)

a. 科学研究費補助金

1) 根本知己、新学術領域研究(研究領域提案型)、ベクトルレーザー光を用いた高速 in vivo イメージング技術の高度化と応用、2015～2019 年度

2) 狩野方伸、新学術領域研究、先端バイオイメージング支援プラットフォーム、2016～2020 年度(分担)

3) 川上良介、挑戦的萌芽研究、励起レーザーのベクトルビーム化による高精細3次元蛍光イメージング法の開発、2014～2017 年度

4) 大友康平、挑戦的萌芽研究、生きた脂質微小ドメインを可視化する高速超解像顕微鏡法の開発、2016～2017 年度

5) 榎木亮介、基盤研究(C)、多機能計測と細胞機能操作による視交叉上核の光同調メカニズムの解明、2017～2019 年度

6) 榎木亮介、特設基盤研究(B)、概日時計を創る:1 細胞計測と操作による細胞ネットワークの再構築、2015～2018 年度

7) 本間さと、基盤研究(B)、概日時計システムの階層的自己組織化:振動細胞同期と振動体カップリング、2015～2017 年度

b. 大型プロジェクト・受託研究

1) 根本知己、国立研究開発法人日本医療研究開発機構、「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト」、技術開発個別課題、「新規半導体レーザー光源を用いた超解像多光子励起顕微鏡法の開発」、2014～2018 年度

2) 榎木亮介、公益財団法人 武田科学振興財団 医学系研奨励、細胞内カルシウムの計測と操作から迫る生物時計中枢回路のシステム理解、2017～2019 年度

3) 榎木亮介、公益財団法人 持田記念医学薬学振興財団 研究助成金、1 細胞計測から迫る真の中枢時計細胞の探索、2017～2018 年度

4) 榎木亮介、公益財団法人 金原一郎記念医学医療振興財団 研究助成金、概日時計中枢における神経-グリア機能連関の解明:光計測と微細加工による融合アプローチ、2017～2018 年度

5) 榎木亮介、公益財団法人 寿原記念財団 研究助成金、概日リズム-超短リズムの機能連関の解明、2017～2018 年度

4.10 受賞

1) 榎木 亮介: 北海道大学大学院医学研究科 優秀論文賞, 2018 年 03 月

2) 山口 和志、北村 瞭次、川上 良介、根本 知己 : ベストポスター賞「励起光学条件の改善によるマウス生体脳深部観察の高度化とその応用」2018 年 01 月

3) 後藤 亜衣、大友 康平、中山 博史、堀 喬、根本 知己 : 優秀ポスター賞「多点走査型 2 光子顕微鏡による生体組織の高速 SHG イメージング」(日本顕微鏡

学会北海道支部会）2017 年 12 月

4） T. Takahashi, K. Yarinome, H. Zhang, R. Kawakami, Y. Okamura and T. Nemoto : The Best Poster Award “In vivo two-photon imaging of living mouse brain by utilizing novel fluoropolymer PEO-CYTOP nanosheets”（ International Symposium on Nanomedicine 2017 (ISNM2017)）2017 年 12 月

5） 山中 祐実、大友 康平、根本 知己 : ベストイメージング賞ツァイス賞「多点走査型 2 光子顕微鏡を用いたマウス膵臓における in vivo Ca2+イメージング」（第 26 回日本バイオイメージング学会学術集会）2017 年 09 月

6） 北村 瞭次、毛内 拡、山口 和志、川上 良介、上 喜裕、岡咲 賢哉、濱 裕、平瀬 肇、根本 知己、宮脇 敦史 : ベストイメージング賞ニコン賞「In vivo イメージングの改善のための最適な観察条件の探索」（第 26 回日本バイオイメージング学会学術集会）2017 年 09 月

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1） 根本 知己:文部科学省科学研究費専門委員会委員（2017年11月～2018年3月）

2） 根本 知己:（独）科学技術振興機構専門委員 （2010年01月01日～）

b．国内外の学会の役職

3） 根本 知己:日本分光学会・生細胞分光部会、幹事（2006年1月1日～）

4） 根本 知己:日本ナノメデイシン交流協会・理事、運営委員(2006年4月1日～)

5） 根本 知己 : 国際複合医工学会 評議員 （2013年04月01日～）

6） 根本 知己:日本バイイメージング学会 評議員(2017年1月1日～)

7） 榎木 亮介:日本生理学会、評議員 (2014年～)

8） 榎木 亮介:日本生理学会、編集委員 (2015年～)

9） 榎木 亮介:日本時間生物学会、評議員 (2014年～)

c．兼任・兼業

該当無し

d. 外国人研究者の招聘

1) Tsai-Wen Chen, National Yang-Ming University, Taiwan, 2018 年 03 月 14 日

e．北大での担当授業科（対象、講義名、担当者、期間）

1） 工学部、量子力学、根本 知己、2017年06月01日～2017年08月30日

2） 情報科学研究科、脳神経科学特論、根本 知己、2017年04月01日～2017年05月30日

3） 工学部、生体医工学基礎・医用工学概論、根本 知己、2012年10月10日～2018年03月10日

4） 全学共通学部科目、環境と人間、根本 知己、2017年06月30日

5） 全学共通学部科目、「2030年エレクトロニクスの旅」、根本 知己、2017年04月26日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 北海道立札幌南高等学校、出張授業、根本知己、2017年10月26日

g． 新聞・テレビ等の報道

1. 根本 知己 : 日経産業新聞 2017年09月06日 「臓器形状保ち観察 ～東海大と北大 透明膜で縮み防ぐ～」
2. 根本 知己 : 科学新聞 2017年09月01日 「撥水性超薄膜で生体組織をラッピング 乾燥・ブレ防止で鮮明なイメージング実現 ～東海大・北大グループ 新発想の観察試料作製技術確立～」
3. 根本 知己 : 化学工業日報 2017年08月22日 「生体組織 撥水薄膜でラップ ～東海大・北大 高解像度観察が可能～」
4. T. Nemoto : CIENCIASMEDICASNEWS, Mexico, 2017年08月31日 “Nanomaterial wrap for improved tissue imaging”
5. T. Nemoto : Research & Development, United States, https://www.rdmag.com/news/2017/08/new-wrapping-material-enables-high-quality-bioimaging 2017年08月28日 “New Wrapping Material Enables High Quality Bioimaging”
6. T. Nemoto : Technology Networks 2017年08月28日 “New Material Enables High-Quality Bioimaging”
7. T. Nemoto : Gears Of Biz 2017年08月28日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
8. T. Nemoto : Innovations Report 2017年08月28日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
9. T. Nemoto : ScienceNewsline United States 2017年08月26日 “New Wrapping Material Enables High Quality Bioimaging”
10. T. Nemoto : Environmental News Network 2017年08月26日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
11. T. Nemoto : CRWE World http://crweworld.com/article/science/129758/new-wrapping-material-enables-high-quality-bioimaging 2017年08月26日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
12. T. Nemoto : Technology Networks United Kingdom 2017年08月25日 “New Wrapping Material Enables High Quality Bioimaging”
13. T. Nemoto : EedesignIt.com United Kingdom 2017年08月25日 “Organic Polymer Nanosheet Prevents Bio-

logical Samples Drying”

14. T. Nemoto : NewsR India 2017年08月25日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
15. T. Nemoto : Alpha Galileo United Kingdom 2017年08月25日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
16. T. Nemoto : ResearchSEA United Kingdom 2017年08月25日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
17. T. Nemoto : EurekAlert! United States 2017年08月25日 “New wrapping material enables high quality bioimaging”
18. 根本 知己、青柳 佑佳 : PLOS ONE 2017年07月04日「PLOS ONE誌の引用数トップ25%に」

h. ポスドク・客員研究員など

1) 飯島光一朗(特任助教)
2) 堤元佐(特任助教)
3) 石井宏和(特任助教)
4) 喬 琳(博士研究員)
5) 何 倩(学術研究員)

i. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：1

1) 山中祐実 : 修士(情報科学)、2光子顕微鏡を用いたマウス膵臓の*in vivo* Ca^{2+}イメージング

博士学位：0

生体分子デバイス研究分野

教　授　居城邦治（東工大院、工博、2004.3～）
准教授　三友秀之（東工大院、博（工）、2011.4～）
院　生
博士課程　杉村尚俊、飯田良、田崎太悠、中村聡、
修士課程　鳥居悠、濱島暁、二瓶瑞生
学部生　　清澤勉

１．研究目標

物質をナノメールサイズまで小さくすると本来の物性とは異なる性質が表れる。特に金属ナノ粒子は電子、光学、バイオ応答の点で特有な機能が発現することが知られており、近年はナノ粒子の集合体が誘起する機能増強あるいは機能創発、および異方的な形状をしたナノ粒子の光学機能やバイオ応用が注目されている。本研究分野では、生物に見られる生体分子の高度な分子認識と自己組織化に着目し、金属ナノ粒子の表面構造を操作することで金属ナノ粒子の集合体形成の制御を行い、新奇な物理現象の発見を機能性材料や薬物送達キャリアーの開発につなげることをめざしている。平成２９年度は、金ナノ粒子の自己集合化の制御において顕著な成果をあげた。

２．研究成果

(a)金ナノ粒子の自己組織化で形成される中空ベシクル

我々はこれまでに、アルカンチオール基を有するフッ素化オリゴエチレングリコール誘導体が溶解したTHFあるいはDioxane溶液にクエン酸被覆金ナノ粒子を添加すると、即座に金ナノ粒子表面でリガンド交換反応が進行し、その後自己組織化によって中空カプセル構造を形成することを見いだしている。このような光応答性の高い金ナノ粒子で形成される中空カプセルはドラッグデリバリーシステム（DDS）への応用も期待されるが、ナノ粒子の自己組織化による中空カプセル形成のメカニズムは不明であった。そこで、本研究では、表面修飾リガンド分子の末端（フッ素化オリゴエチレングリコール側）に糖やカルボン酸を導入した分子を合成し、粒子間相互作用が中空カプセル構造形成におよぼす影響を調べた。

まず、末端を単糖（Glucose）、二糖（Maltose）、三糖（Maltotriose）に変えた表面修飾リガンドを合成し、これらを用いて金ナノ粒子ベシクルを調製した（図１）。その結果、末端の糖が多くなると形成されるベシクルの大きさが小さくなることが確認された（図２）。末端に付与した糖の数が多くなると糖分子間の相互作用（水素結合など）が強くなると考えられ、粒子間相互作用が強くなるとより小さなベシクルが形成されることが示唆された。一方で、末端をカルボン酸およびカルボン酸ナトリウムに変えた表面修飾リガンドを合成し、これらを用いて金ナノ粒子ベシクルを調製すると、カルボン酸末端の表面修飾リガンドはカルボン酸ナトリウム末端をもつリガンドよりも大きなベシクルを与えた（図３）。動的光散乱測定により経時的な集合体サイズの変化を観察した結果、カルボン酸末端をもつリガンド分子で被覆した場合は、はじめの10分程度で100 nmほどの集合体を形成し、その後2時間程度かけてゆっくりとサイズが大きくなる挙動が観察されたのに対し、カルボン酸ナトリウム末端をもつリガンド分子で修飾した場合は、はじめの10分程度で100 nmほどの集合体を形成した後はほとんど大きさの変化はないことがわかった。これは、カルボン酸ナトリウムを末端にもつリガンド分子は、溶液中でアニオンの電荷を有するため粒子間に静電反発力を生じさせ、集合体が融合して大きく成長する過程を阻害したためであると考えられる。これらの結果より、中空カプセルのナノ粒子集合体の形成には、適当な引力と斥力のバランスが重要であることが示唆された。

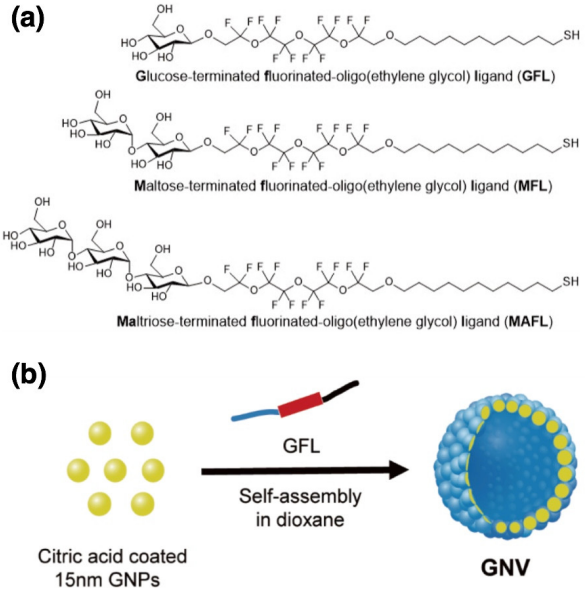


図１．(a)糖鎖を末端に有する表面修飾分子の化学構造と(b)金ナノ粒子の表面修飾による自己組織的なカプセル集合体形成の模式図

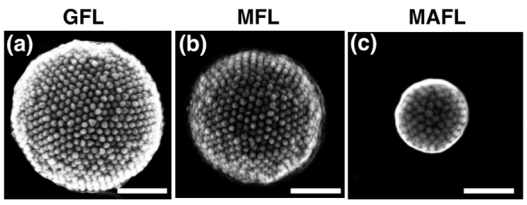


図２．(a)単糖(GFL)，(b)二糖(MFL)，(c)三糖(MAFL)を末端に有する表面修飾リガンドを用いて作製した金ナノ粒子集合体（カプセル）の走査型電子顕微鏡像（スケールバーは100 nm）

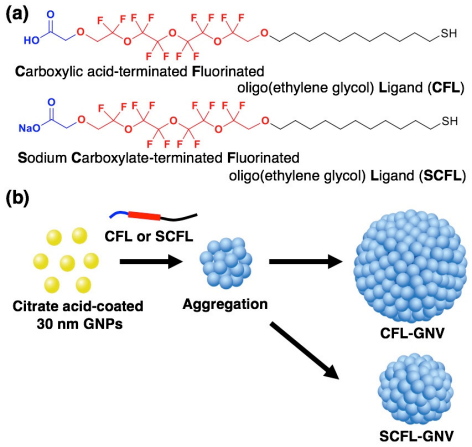


図３．(a)カルボン酸を末端に有する表面修飾分子の化学構造と(b)金ナノ粒子の表面修飾による自己組織的なカプセル集合体形成の模式図

(b)水素結合を介したオリゴエチレングリコール被覆金ナノ粒子とアニオン性高分子のpH応答性共集合体形成

金ナノ粒子の集合化を制御する手法はこれまで広く研究されてきた。中でも、外部刺激や環境変化（熱、pH、光など）によってその集合化を制御する手法が注目されている。これまで、ナノ粒子への刺激応答性の付与は、主に粒子の表面に刺激応答性分子を直接修飾することで実施されてきた。しかし、このような刺激応答性分子をナノ粒子表面に直接修飾する方法では、刺激に応じた集合化–脱集合化を制御することは可能であったが、集合状態（集合したナノ粒子間の距離や集合体のサイズ等）まで制御することは困難であった。そこで本研究では、刺激応答性分子をナノ粒子の表面に修飾（固定化）せず、溶液中に共存させることで刺激に応じて粒子と刺激応答性分子間の相互作用をON-OFF し、刺激に応じて集合化する新しいシステムを開発した（図４）。

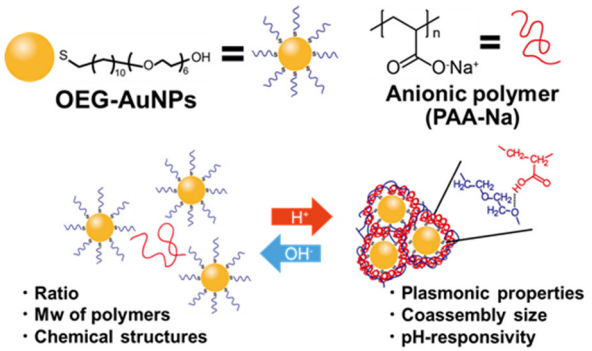


図４．オリゴエチレングリコールを提示した金ナノ粒子とアニオン性高分子の pH に応答した共集合体形成

本システムでは金ナノ粒子の表面を、生体親和性が高く、バイオセンサーなどの表面修飾にも利用されているオリゴエチレングリコール(OEG)を有するアルカンチオール分子で修飾した。この OEG リガンドで修飾した金ナノ粒子(OEG-AuNPs) は、pH を変化させても吸収スペクトルに変化は見られず、集合化する挙動は観察されなかった（図５A）。一方で、OEG-AuNPs にポリアクリル酸ナトリウム(PAA-Na) を添加した混合溶液は、pH が2以下になると表面プラズモンの吸収ピークが長波長へとシフトした（図５B）。動的光散乱測定を行うと、混合溶液では pH が2以下になると集合体のサイズが10 nm から300 nm へと増大した。これらの結果より、PAA-Na を共存させると pH の変化により PAA-Na のプロトン化の状態が変化し、非刺激応答性の金ナノ粒子の集合化が誘起できることが分かった。プロトン化した PAA が金ナノ粒子表面の OEG と水素結合を形成して吸着することが、阻害剤を用いた実験より確認された。また、PAA-Na の分子量が集合化に与える影響について調べた結果、分子量 1200、15000、8000 の順に表面プラズモン吸収のピークは長波長へと大きく変化した。動的光散乱測定より、共集合体のサイズも表面プラズモンのピークシフトと同様の順で大きくなることがわかった。さらには、PAA-Na の混合量を変えることでも、表面プラズモンピークのシフト幅や共集合体の大きさが変わることが明らかになった。また、金ナノ粒子表面の OEG 末端部位へのアルキル基の付加や PAA-Na にメチル基が付いたポリメタクリル酸ナトリウムを用いることで、疎水性を付与すると、集合化する pH 領域がより高 pH 側へとシフトすることも確認された。

以上より、刺激応答性高分子を溶液中に共存させることで、刺激に応答性を有さない金ナノ粒子でも刺激に応じて集合化させることができ、その高分子の化学構造によりその応答性が、分子量、混合量によって集合状態の制御が可能になることを示した。

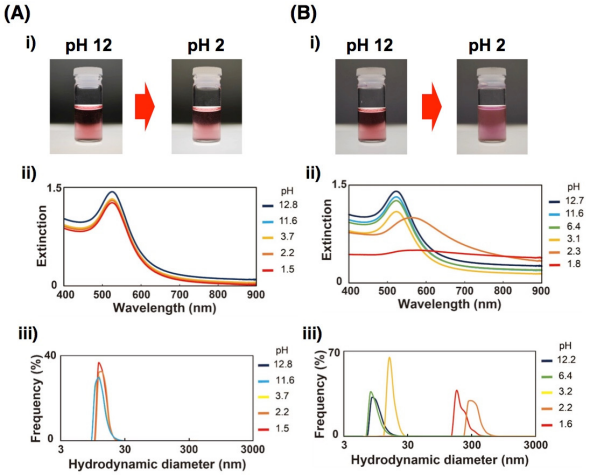


図５．様々な pH 下における OEG を提示した金ナノ粒子の分散液(A)とポリアクリル酸を混合した分散液 (B)の様子。i）pH12と pH2のときの写真、ii）pH を12から2まで変化させたときの消光スペクトルと iii）動的光散乱によるサイズ分布

(c)ロッド状金ナノ粒子の温度応答性自己集合化

我々はこれまでに、アルキル基を持つヘキサエチレングリコール（HEG）誘導体で覆われた球状金ナノ粒子は昇温に伴い表面分子の脱水和が起こり集合化すること、また、

このとき粒子表面の曲率が小さい（粒径が大きい）ほど低い温度で集合化することを見いだしている。一方、異方的な形状を有する金ナノロッド（AuNRs）は近赤外領域にプラズモン共鳴による吸収波長を持ち、集合化するとロッド状粒子間でのプラズモンカップリングがおこり吸収波長がシフトするが、この吸収波長のシフトは AuNRs の集合体形状によって異なることが知られている。従って AuNRs の分散と集合化の制御において、集合形状を制御することが重要な課題となっている。ここで、異方性を有する AuNRs の表面を、我々が見いだした曲率によって集合化する温度が変わる表面修飾リガンド分子で修飾すると、サイド（長軸）部分とエッジ（頂端）部分で異なる曲率を有するために二段階の集合化が誘起でき、集合体の構造を制御できるのではないかと期待された。そこで、末端にエチル基を持つ HEG 誘導体で覆われた AuNRs の温度応答性集合化挙動について調べた（図６）。

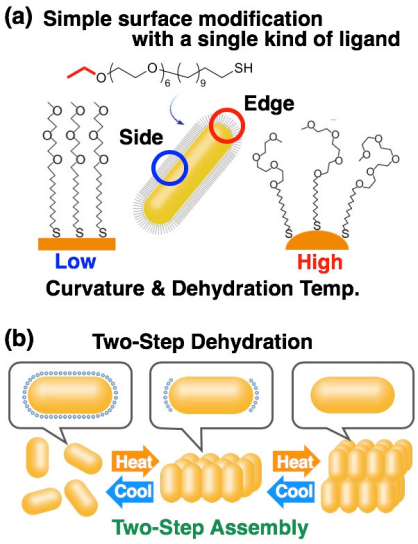


図６．金ナノロッド粒子の表面修飾(a)と Side と Edge の曲率の違いに由来する段階的な脱水和挙動とそれに由来する２段階の自己集合過程(b)の模式図

32 x 14 nm の大きさの AuNRs を合成し、温度応答性リガンド分子で表面修飾を行った。温度を変えながら消光スペクトルを測定して集合化挙動を調べた。その結果、25-30℃の間で、650 nm 付近のプラズモンピークが短波長シフトし、520 nm のプラズモンピークと融合する様子が観察され、溶液は青色からマゼンタ色に変わった。さらに加熱を続けると、融合したプラズモンピークがゆっくりと長波長シフトする様子が観察された。その結果、60℃においては、溶液は紫色に変わった（図 7 a-c)。動的光散乱による溶液中に分散する粒子サイズ測定においても、同じ温度領域（25-30℃と30℃以上）において、大きさが変化する挙動が観察された(図 7 d)。集合体の集合形状を調べるため、30℃および60℃において乾燥させたサンプルの走査型透過電子顕微鏡（STEM）観察を行った。その結果、30℃においては、スペクトルからの予測と一致する side-by-side の集合体構造が観察された（図 7 e)。また、60℃においては、side-by-side 集合体を含んだ大きな凝集体が見られた（図 7 f)。

以上の結果は、AuNRs のサイド（長軸）部はエッジ（頂端）部に比べて曲率が小さくより低温で脱水和が起こり、長軸同士が接触した side-by-side 集合体を形成し、更なる加熱によりエッジ（頂端）部も脱水和して、side-by-side 集合体が集合化した大きな凝集体を形成したものと考えられる。本研究では、異方性ナノ粒子内に存在する異なる曲率を利用することで、ナノ粒子の部位（ナノメールレベルの局所的な場所）毎に異なる温度で脱水和を誘起させ、多段階の自己集合化挙動を実現することに成功した。ナノ粒子表面を局所的に異なる分子で修飾することは未だ難しく、曲率に着目した本手法は粒子表面の修飾を利用した自己集合化制御の新しい方法として画期的である。

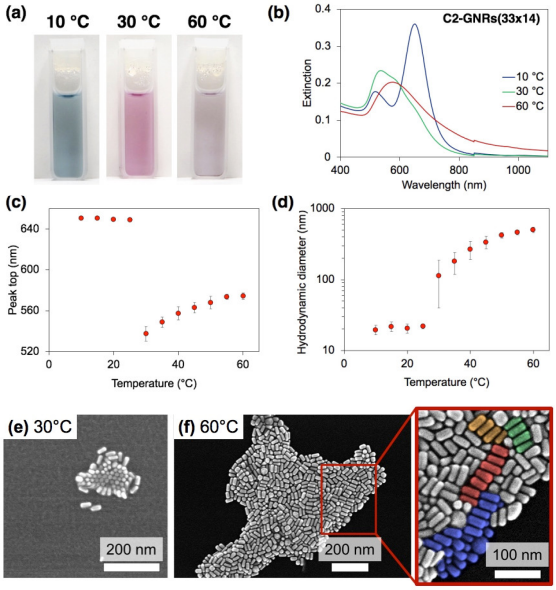


図７．(a)温度応答性金ナノ粒子分散液の10，30，60℃における写真と(b)スペクトル。(c)温度に依存した金ナノロッドの長波長側の LSPR のピークの変化と(d)サイズの変化。(e)30℃、(f)60℃で乾燥させた金ナノ粒子の STEM 像

３．今後の研究の展望

自然に見られる自己組織化能を駆使することにより、ナノスケールオーダーの複雑な構造体をより簡便に作り出す技術は低エネルギーという観点で注目されている。当研究分野では生物あるいは生体分子に着目し、生体分子を鋳型とするアプローチに加え、それらの生体分子の持つ集積化原理そのものを模倣することで新しい電子デバイス・光学素子・医療素子などへと展開してきた。最近は特に、表面修飾を利用した界面制御のみならず、ナノ粒子の形状にも着目して研究を発展させている。今後はここで構築したナノ材料の機能をシミュレーションも含めさらに検証し、生体分子ならではの階層性構造の構築と応用を追求していく。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） R. Iida, H. Mitomo, K. Niikura, Y. Matsuo and K. Ijiro: “Two-step Assembly of Thermoresponsive Gold Nanorods Coated with a Single Kind of Ligand”, *Small,* 14(14): 1704230 (2018)
（ナノテク連携推進室との共著）

２） J. Wei, K. Niikura, H. Mitomo, Y. Matsuo and K. Ijiro: “Formation of Plasmonic Vesicles through the Self-assembly of Sugar-terminated Fluorinated Oligo(ethylene glycol) Ligand-tethered Gold Nanoparticles”, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 17(12): 9149-9156 (2017)
（ナノテク連携推進室との共著）

３） H. Mitomo, S. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Matsuo, K. Niikura and K. Ijiro: “Preparation and characterization of double-stranded DNA brushes via surface-initiated enzymatic polymerization”, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 17(12): 8995-9001 (2017)
（ナノテク連携推進室との共著）

４） S. Nakamura, H. Mitomo, M. Aizawa, T. Tani, Y. Matsuo, K. Niikura, P. Andrew, M. Naya, A. Shishido and K. Ijiro: “DNA Brush-Directed Vertical Alignment of Extensive Gold Nanorod Arrays with Controlled Density”, *ACS Omega*, 2(5): 2208-2213 (2017)
（ナノテク連携推進室との共著）

５） Y. Torii, N. Sugimura, H. Mitomo, K. Niikura and K. Ijiro: “pH-Responsive Co-assembly of Oligo(ethylene glycol)-Coated Gold Nanoparticles with External Anionic Polymers via Hydrogen Bonding”, *Langmuir*, 33(22): 5537-5544 (2017)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） K. Ijiro and H. Mitomo: “Metal nanoarchitecture fabrication using DNA as a biotemplate”, *Polymer Journal*, 49(12): 815-824 (2017)

２） 中村聡: “NA ブラシを用いたロッド状金ナノ粒子の配向制御”, *The Bulletin of the Nano Science and Technology*, 16(2):79-82 (2018)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

１） H. Mitomo*, S. Nakamura, Y. Matsuo, K. Niikura and K. Ijiro : “Polymer-Supported Self-assembly of Gold Nanoparticles”, IC ME&D 2017 , Sogang University, Korea (2017-05)

２） H. Mitomo*, S. Nakamura, A. Pike, Y. Matsuo and K. Ijiro : “DNA brush-assisted vertical alignment of gold nanorods and those chiral plasmonics”, SPIE optics + Photonics, San Diego, California, United States of America (2017-08)

３） K. Ijiro* : “Reversible pH or temperature stimulus-response self-assembly of nanoparticles”, 2017 RIES-CIS Symposium, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan (Province of China) (2017-10)

４） H. Mitomo* : “Structure control of self-assembled gold nanoparticle arrays”, 2017 RIES-CIS Symposium, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan (Province of China) (2017-10)

５） K. Ijiro* : “Active gap SERS with plasmonic nanostructures on hydrogels for the sensitive detection of biomacromolecules”, 8th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics, Las Vegas, United States of America (2017-11)

６） K. Ijiro* : “DNA Brush-Directed Alignment of Extensive Gold Nanorod Arrays as Plasmonic Nanomaterials”, The 15th Pacific Polymer Conference (PPC-15), Xiamen, China (2017-12)

b．招待講演（国内学会）

１） 三友 秀之* : 「金ナノ粒子の形状および集合構造の制御とその応用」、PCXSS Workshop、北海道大学 (2017-09)

２） 三友 秀之* : 「高分子を利用した金ナノ構造体の制御」、第 5 回ナノバイオ融合領域セミナー、日本工業大学 (2017-09)

３） 居城 邦治* : 「刺激応答性金ナノ構造集積体の創製と応用」、日本化学会 第 98 春季年会 (2018)、日本大学理工学部 船橋キャンパス (2018-03)

c．一般講演（国際学会）

１） H. Mitomo*, S. Nakamura, M. Aizawa, Y. Matsuo, K. Niikura, A. Shishido and K. Ijiro : “Vertical alignment of gold nanorods through the immobilization onto DNA grafted substrates”, ISNIT2017 (International Symposium on Nature-Inspired Technology) , Cebu, Philippines (2017-06 ～ 2017-07)

２） R. Iida*, K. Niikura, H. Mitomo and K. Ijiro : “Thermoresponsive side-by-side assembly of gold nanorods coated with oligo(ethylene glycol) derivatives”, APNFO11 (The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics), Cheng Kung University, Taiwan (Province of China) (2017-07)

3） H. Mitomo*, S. Nakamura, M. Aizawa, Y. Matsuo, K. Niikura, T. Tani, M. Naya, A. Shishido and K. Ijiro : “Vertically aligned gold nanorod array with a flexible structure immobilized onto DNA-grafted substrates”, APNFO11 (The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics), Cheng Kung University, Taiwan (Province of China) (2017-07)

4） K. Ijiro* : “Self-assembly of nanoparticles in slution and at surface”, International workshop on 「Active Soft Matter and Ethology」, Hokkaido University, Japan (2017-08)

5） K. Ijiro* : “DNA-Directed Aligning Self-Assembly of Gold Nanorods as Plasmonic Nanomaterials”, 13th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIII), Nanjing Tech University, Nanjing, China (2017-10)

6） G. Wang*, K. Ijiro, M. Maeda and Y. Yadong : “Island Growth in the Seeded Overgrowth of Colloidal Au Nanostructures”, 13th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIII), Nanjing Tech University, Nanjin, China (2017-10)

7） S. Hamajima*, H. Mitomo, Y. Matsuo, K. Niikura and K. Ijiro : “Direct SEM observation of gold nanostructures on the polyacrylic acid gel surface”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom SAPPORO, Japan (2017-11 〜 2017-12)

8） M. Nihei*, S. Nakamura, H. Mitomo, Y. Matsuo and K. Ijiro : “Orientation change of gold nanorods immobilized on the substrate under the electric fields”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom SAPPORO, Japan (2017-11 〜 2017-12)

d. 一般講演（国内学会）

1） 飯田 良*、新倉 謙一、三友 秀之、居城 邦治 :「オリゴエチレングリコール誘導体で被覆された金ナノロッドの温度応答性自己集合化」、ナノ学会第 15 回大会、かでる 2・7 北海道立道民活動センター (2017-05)

2） 南原 克行*、新倉 謙一、三友 秀之、相内 章、二宮 孝文、居城 邦治 :「三角形金ナノプレートの細胞取り込み及びワクチン活性」、ナノ学会第 15 回大会、かでる 2・7 北海道立道民活動センター (2017-05)

3） 中村 聡*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、相沢 美帆、宍戸 厚、居城 邦治 :「DNA ブラシを用いたロッド状金ナノ粒子の配向制御」、ナノ学会第 15 回大会、かでる 2・7 北海道立道民活動センター (2017-05)

4） S. Nakamura*, H. Mitomo, Y. Matsuo, K. Niikura, M. Aizawa, S. Atsushi, K. Ijiro : 「Large area vertical alignment of GNRs by the assistance of a DNA」、第 66 回高分子学会年次大会、幕張メッセ (2017-05)

5） 田崎 太悠*、大原 有樹、新倉 謙一、小林 進太郎、大場 靖子、三友 秀之、澤 洋文、相内 章、鈴木 忠樹、居城 邦治 :「金ナノロッドによる経鼻不活化インフルエンザワクチンにおけるアジュバントの活性増強」、第 66 回高分子学会年次大会、幕張メッセ (2017-05)

6） 居城 邦治*、中村 聡、三友 秀之、相沢 美帆、松尾 保孝、新倉 謙一、宍戸 厚 :「二重鎖 DNA を利用した金ナノロッドの配向制御とプラズモン吸収」、2017 年光化学討論会、東北大学青葉山キャンパス (2017-09)

7） 中村 聡*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、相沢 美帆、宍戸 厚、居城 邦治 :「DNA ブラシを用いたロッド状金ナノ粒子の垂直配向固定法の開発」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場 (2017-09)

8） 三友 秀之*、中村 聡、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治 :「DNA とカチオン性金ナノロッドの静電相互作用を利用した配向制御」、第 68 回コロイドおよび界面化学討論会、神戸大学 (2017-09)

9） 飯田 良*、新倉 謙一、三友 秀之、居城 邦治 :「温度によって異なる集合体構造をとる金ナノロッド」、第 68 回コロイドおよび界面化学討論会、神戸大学 (2017-09)

１０）三友 秀之*、中村 聡、相沢 美帆、松尾 保孝、新倉 謙一、宍戸 厚、居城 邦治 :「DNA との静電相互作用を利用したカチオン性金ナノロッドの配向集積化」、第 66 回高分子討論会、愛媛大学 城北キャンパス (2017-09)

１１）鳥居 悠*、杉村 尚俊、三友 秀之、新倉 謙一、居城 邦治 :「水素結合を介したオリゴエチレングリコール被覆金ナノ粒子とアニオン性高分子の pH 応答性共集合体形成」、第 66 回高分子討論会、愛媛大学 城北キャンパス (2017-09)

１２）田崎 太悠*、大原 有樹、田畑 耕史郎、新倉 謙一、小林 進太郎、大場 靖子、三友 秀之、澤 洋文、松原 輝彦、佐藤 智典、相内 章、鈴木 忠樹、居城 邦治 :「インフルエンザウイルスの交叉防御に向けたナノ粒子ワクチンの作製」、第 66 回高分子討論会、愛媛大学 城北キャンパス (2017-09)

１３）濵島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治 :「ハイドロゲル表面に作製した金ナノ構造体間のギャップ距離変化の評価」、第 66 回高分子討論会、愛媛大学 城北キャンパス (2017-09)

１４）田崎 太悠*、田畑 耕史郎、相内 章、大原 有樹、小林 進太郎、大場 靖子、三友 秀之、澤 洋文、鈴木 忠樹、新倉 謙一、居城 邦治 :「金ナノ粒子による poly(I:C)のアジュバント活性の増強とその形状依存性」、日本化学会 第 98 春季年会 (2018)、日本大学理工学部 船橋キャンパス (2018-03)

１５）飯田 良、三友 秀之*、新倉 謙一、居城 邦治 :「一種類の表面リガンド分子で修飾した金ナノロッドが

示す温度応答型２段階集合」、日本化学会 第 98 春季年会 (2018)、日本大学理工学部 船橋キャンパス (2018-03)

１６）二瓶 瑞生*、中村 聡、三友 秀之、松尾 保孝、居城 邦治：「ITO 基板上に垂直配向した金ナノロッドアレイの作製と電場による配向変化」、日本化学会 第 98 春季年会 (2018)、日本大学理工学部 船橋キャンパス (2018-03)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

１） 田崎 太悠*、大原 有樹、新倉 謙一、三友 秀之、小林 進太郎、大場 靖子、澤 洋文、相内 章、鈴木 忠樹、居城 邦治：「金ナノ粒子を用いた経鼻インフルエンザワクチンの開発」、第 27 回バイオ・高分子シンポジウム、東京工業大学 (2017-07)

２） 濵島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：「ポリアクリル酸ゲル表面に作製した金ナノ構造体間のギャップ距離変化の評価」、2017 年度北海道高分子若手研究会、登別万世閣 (2017-09)

３） 鳥居 悠*、杉村 尚俊、三友 秀之、新倉 謙一、居城 邦治：「水素結合を介したオリゴエチレングリコール被服金ナノ粒子－ポリアクリル酸の共集合体形成」、2017 年度北海道高分子若手研究会、登別万世閣 (2017-09)

４） 濵島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：「ハイドロゲル表面に配置した金ナノ構造体のギャップ距離変化の評価」、第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017、タワーホール船堀 (2017-10)

５） 三友 秀之*、新倉 謙一、居城 邦治：「金ナノ粒子を利用した薬物送達システムの開発」、2017 年度 人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス G3 分科会、東北大学 片平キャンパス (2017-11)

６） 居城 邦治*：「DNA を用いた金ナノロッドの配向固定化」、2017 年度 人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス G3 分科会、東北大学 片平キャンパス (2017-11)

７） 濵島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：「ポリアクリル酸ゲル表面に作製した金ナノドットの走査型電子顕微鏡観察とギャップ距離変化の評価」、第 52 回高分子学会北海道支部研究発表会、北海道大学学術交流会館 (2018-01)

4.7 シンポジウムの開催

１） M. Nagayama, K. Ijiro, N. Tamaoki, H. Uji-i, H. Kaiju, H. Aonuma, H. Mitomo, H. Teramoto, K. Sato, T. Inose, M. Jusup, Y. Kim, M. Akiyama and K. Sakai : “The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium 極 [kyoku] joint with the 2nd International Symposium of Dynamic Alliance for Open Innovation Bridging Human, Environment and Materials (the Five-Star Alliance) ”, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO (北海道札幌市) (2017 年 11 月 30 日～2017 年 12 月 01 日)

4.8 共同研究

a．所内共同研究

１） コヒーレント光研究分野(西野吉則教授)と共同研究を実施した (2014 年-)

b．民間等との共同研究

１） 居城 邦治 (日本工業大学) :「ナノ構造体を利用した細胞透過性 DDS 担体の開発」、2017 年度、佐野健一

２） 居城 邦治 (北見工業大学) :「アミノ化ポリエチレンオキシドを分散安定剤に用いた全芳香族ポリイミド微粒子の合成」、2017 年度、渡邉眞次

３） 居城 邦治 (千歳科学技術大学) :「慢性腎臓病に伴う骨・ミネラル代謝異常(CKD-MBD)評価法の開発」、2017 年度、木村-須田 廣美

４） 居城 邦治 (富士フイルム株式会社) :「金属ナノ粒子集合体の新奇な光学的特性の研究」、2017 年度、納谷 昌之

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

１） K. Ijiro : “Development of Conducting DNA”, Newcastle University, UK, 2007 年-

２） K. Ijiro : “Study on Self-assembling of Nanoparticles”, University of California, Riverside, USA, 2013 年-

３） K. Ijiro : “Development of Nanoparticle Devices”, 2013 年度～, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC, 2013 年-

４） K. Ijiro : “Enzymatic fabrication of conductive materials”, University of Newcastle upon Tyne, UK, 2017 年

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a．科学研究費補助金

１） 三友 秀之、若手研究 B : 可変ナノギャップを利用した表面増強ラマン散乱による生体高分子の高感度検出法の開発、2016～2017 年度

２） 三友 秀之、基盤研究 B (分担) : B 細胞表層での分子認識制御によるユニバーサルナノワクチンの創製、2016～2018 年度

３） 飯田 良、特別研究員奨励費：曲率の違いを利用した異方性ナノ粒子の多段階自己集合化、2016～2017 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

１） 居城 邦治、松尾 保孝、納谷 昌之、白田 真也 (富士フイルム株式会社) : 金属微細構造による光制御に関する基礎検討、2011年度～

２） 三友 秀之 (住友財団基礎科学研究助成) : 新奇金ナノ

構造体修飾方法の開発とナノスケール場の制御による機能創発、2016～2017 年

3） 三友 秀之（寿原記念財団研究助成）：ウィルスを高感度検出するサイズふるい効果を有するバイオセンサーの開発、2016～2017 年

4） 三友 秀之（徳山科学技術振興財団国際交流助成）、2017年

4.10 受賞

1） 中村 聡、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、相沢 美帆、宍戸 厚、居城 邦治 ： ポスター賞 「DNA ブラシを用いたロッド状金ナノ粒子の配向制御」 （ナノ学会第 15 回大会） 2017 年 05 月

2） R. Iida, K. Niikura, H. Mitomo and K. Ijiro ： Student Poster Award “Thermoresponsive side-by-side assembly of gold nanorods coated with oligo(ethylene glycol) derivatives” （APNF011 (The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics)） 2017 年 07 月

3） 田崎 太悠、大原 有樹、田畑 耕史郎、新倉 謙一、小林 進太郎、大場 靖子、三友 秀之、澤 洋文、松原 輝彦、佐藤 智典、相内 章、鈴木 忠樹、居城 邦治 ： 優秀ポスター賞 「インフルエンザウイルスの交叉防御に向けたナノ粒子ワクチンの作製」（第 66 回高分子討論会） 2017 年 09 月

4） 濵島 暁、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治 ： 優秀ポスター発表賞「ハイドロゲル表面に配置した金ナノ構造体のギャップ距離変化の評価」 （第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017） 2017 年 10 月

5） G. Wang, K. Ijiro, M. Maeda and Y. Yin ： Poster Award “Island Growth in the Seeded Overgrowth of Colloidal Au Nanostructures” （13th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIII)） 2017 年 10 月

6） 居城 邦治 ： 第 35 回学術賞「刺激応答性金ナノ構造集積体の創製と応用」 （日本化学会） 2018 年 03 月

4.11 社会教育活動

ａ．公的機関の委員

該当なし

ｂ．国内外の学会の役職

1） 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）

2） 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）

3） 居城 邦治 ：Asian Conference on Nanoscience & Nanotechnology (AsiaNANO), Steering Committee （2004年4月1日～現在）

4） 居城 邦治 ： 一般社団法人電気学会「新しい原子分子組織化物質・材料創出に向けた 光・量子ビーム応用技術調査専門委員会 委員 （2015年5月1日～2017年4月30日）

5） 居城 邦治 ： 日本化学会 生体機能関連化学・バイオテクノロジーディビジョン 幹事 （2016年3月1日～2018年3月1日）

6） 居城 邦治：バイオミメティクス研究会 第33期運営委員（2016年4月1日～2018年3月31日）

7） 居城 邦治：物質・材料研究機構 技術スタッフ表彰選定委員（2017年10月20日～2018年3月31日）

8） 三友 秀之 ： 日本化学会 生体機能関連化学部会若手会幹事 （2012年4月1日～2018年3月31日）

9） 三友 秀之 ： 高分子学会 北海道支部 若手会幹事（2012年6月1日～現在）

ｃ．兼任・兼業

1） 居城 邦治 ： 独立行政法人 理化学研究所 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 01 日～2018 年 03 月 31 日）

2） 居城 邦治 ： ISO/TC266 バイオミメティクス国内審議委員会 委員 （2012 年 10 月 01 日～現在）

3） 居城 邦治 ： 特定非営利活動法人バイオミメティクス推進協議会 理事 （2014 年 07 月 01 日～現在）

4） 居城 邦治 ：バイオミメティクス研究会 第 33 期運営委員 （2016 年 04 月 01 日～2018 年 03 月 31 日）

d. 外国人研究者の招聘

1） Andrew Pike, U.K.,（2018 年 1 月）

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 理学部、化学Ⅰ、居城 邦治、2017年04月01日～2017年09月30日

2） 総合化学院、総合化学特別研究第一、居城 邦治、2017年04月01日～2018年03月31日

3） 総合化学院、総合化学研究・指導法、居城 邦治、2017年04月01日～2018年03月31日

4） 総合化学院、総合化学実験指導法、居城 邦治、2017年04月01日～2018年03月31日

5） 総合化学院、総合化学実験研究法、居城 邦治、2017年04月01日～2018年03月31日

6） 全学共通、環境と人間 ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命、居城 邦治、2017年04月05日～2017年06月07日

7） 全学共通、環境と人間 ナノテクノロジーが拓くバイオサイエンスの新潮流、居城 邦治、2017年06月08日～2017年08月04日

8） 大学院共通講義「ナノテクノロジー・ナノサイエンスと光科学（自己組織化を利用したナノデバイス開発）」（分担）、三友秀之、2017 年 11 月 15 日～17 日

9） 総合化学院、物質化学（分子組織化学）、居城 邦治、三友 秀之、2017年12月02日～2018年02月08日

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

g． 新聞・テレビ等の報道

該当なし

h． ポスドク・客員研究員など

1） 石 軼尓（外国人協力研究員）

2） 熊 坤（外国人協力研究員）

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：1名

1） 鳥居 悠: 修士(理学)、高分子を用いた金属ナノ粒子の自己集合化制御

博士学位：1名

1） 飯田 良：博士（理学）、Control of Nanoparticle Self-Assembly in Water by Rational Surface Design

附属グリーンナノテクノロジー研究センター

研究目的

本研究センターでは、ナノテク技術を基盤としたグリーンイノベーションを目的としており、高効率・広帯域太陽光エネルギー変換システム、フォトンの有効利用を目指したサブ波長デバイス、高効率量子状態変換素子などの極限省エネルギーフォトニックネットワークインターフェース、さらには、室温での二酸化炭素完全分離材料などの研究に取り組んでいます。これらの研究成果は、有機的な産学連携研究に繋がっています。

グリーンフォトニクス研究分野

教　授　三澤弘明（筑波大院、理博、2003.5～）
准教授　上野貢生（北大院、博(理)、2010.1～）
助　教　押切友也（阪大院、博(理)、2012.12～）
助　教　孫泉（北京大院、博(理)、2016.4～）
助　教　石旭（北大院、博(情報科学)、2016.4～）
院　生
博士課程
于 瀚、郭 景春、中村圭佑、曹 艳凤、臧 潇倩、
王 亜光
修士課程
高倉稜平、山下翔平、三上剛志、中村 花、山田拓樹

１．研究目標

近年、二酸化炭素の排出量の増加や石油価格の高騰など地球規模の環境・エネルギー問題が顕在化しつつあり、人工光合成やペロブスカイト太陽電池など、光をエネルギー源・駆動源とする光化学の研究は一段とその重要性が増している。したがって、環境負荷を低減し、真の低炭素社会を実現するためには、光エネルギーを余すところなく利用できる「光反応場」の構築が強く求められている。グリーンフォトニクス研究分野の三澤教授は、光子の有効利用の概念を世界でさきがけて提唱し、金属ナノ構造が示す光アンテナ効果により光エネルギーを高効率に利用する「光–分子強結合反応場の創成」を目的として、文部科学省の科学研究費補助金特定領域研究(領域代表:平成19～22年度)を推進し、本分野を世界的に牽引してきた。また，平成23年度から、プラズモニック化学研究会を新たに立ち上げ、金属ナノ構造が示すプラズモン共鳴に基づく光アンテナ効果を太陽電池や人工光合成など種々の光エネルギー変換系に適用し、多数の研究者との共同による高効率な光エネルギー変換デバイスの創製とプラズモニック化学研究を産業界に広く浸透させる啓蒙活動を行っている。

グリーンフォトニクス研究分野では、「光子の有効利用」という概念のもと、プラズモン増強場における光化学反応の高効率化に関する研究を展開し、平成28年度までの研究において、酸化チタンなどの半導体基板上に光アンテナとして局在表面プラズモン共鳴を示す金属ナノ構造を配置することにより、可視・近赤外光を効率良く光電変換できることを示し、そしてそれを可視光照射による全固体太陽電池や水分解に基づく水素発生および空中窒素の固定に基づく光アンモニア合成など人工光合成の研究に展開してきた。また、光を微小な空間に束縛して強く閉じ込める機能を示す金属ナノ構造の近接場分光特性や位相緩和過程を時間分解光電子顕微鏡計測を用いて明らかにし、光アンテナの構造設計指針を明らかにしてきた。平成28年度には、波長可変レーザーを用いて光電子強度のアクションスペクトルを測定することにより、強結合として知られるプラズモンハイブリダイゼーションを示す結合系プラズモニックナノ構造の近接場分光特性を明らかにすることに成功し、光電子顕微鏡が金属ナノ構造間に誘起される共鳴現象の本質を理解する上で有用な方法であることが示された。

これまでの研究成果に基づき、平成29年度は、弱結合として知られるファノ共鳴を示す結合系プラズモニックナノ構造の近接場分光特性について光電子顕微鏡計測により明らかにするとともに、強結合系プラズモニックナノ構造の近接場分光特性を、プラズモン誘起光電変換の内部量子収率のアクションスペクトルを測定することにより明らかにすることに成功した。

２．研究成果

(ⅰ) 金ヘプタマー構造の近接場分光特性

上述のように、当研究分野では平成28年度に強結合を示す結合系プラズモニックナノ構造（dolmen型構造）の近接場分光特性を光電子顕微鏡計測と電磁場解析により明らかにすることに成功した。強結合系プラズモニックナノ構造においては､結合性と反結合性の2つのハイブリッドモードが誘起されるため、近接場スペクトルは遠方場スペクトルとほぼ同じ波長域において2つのピークを有する。一方､弱結合系のプラズモニックナノ構造は、遠方場スペクトルにおいては、双極子モードと四重極子モードとが干渉して、ある波長域において凹みが生じ、強結合系プラズモニックナノ構造の遠方場スペクトルと同様に2つのピークを示す。しかし、これまで近接場分光特性はあまり明らかになっていなかった。そこで、平成29年度はファノ共鳴を示す金ヘプタマー構造の近接場分光特性を検討した。

ITOコートガラス基板上に電子ビームリソグラフィー／リフトオフ法により7つの金属ナノディスクのうち1つを中心として残りの6つを互いに20 nmのギャップを有して正6角形状に配列したヘプタマー構造を作製した。1つの金ナノディスクの直径は140 nm、厚みは30 nmで、7つの金ナノディスクのサイズは等しい。図1(a)に、作製した金ヘプタマー構造の走査型電子顕微鏡写真を示す。図1(b)の実線は、金ヘプタマー構造の遠方場におけるエクスティンクションスペクトルである。波長810 nm付近においてスペクトルに凹みが生じ、そのため760 nmと870 nm付近に2つのバンドが観測されている。ここで重要なのは、図1(b)中のプロットで示した光電子強度のアクションスペクトルである。光電子強度のアクションスペクトルは、波長可変のフェムト秒レーザー（λ: 720-920 nm, τ: 100 fs, f: 77 MHz）ビームを励起光源として光電子顕微鏡（PEEM-III, Elmitec GmbH）に導入し、ナノ構造から生じた光電子の強度を照射した波長に対してプロットすることにより得た。光電子強度は近接場強度に依存するため、光電子強度のアクションスペクトルは近接場スペクトルと相関がある。測定された近接場ス

ペクトルは、遠方場スペクトルの凹みの若干短波長側である780 nm付近に強いピークを示し、金ヘプタマー構造の近接場分光特性は遠方場スペクトルと類似した近接場分光特性を示す強結合系プラズモニックナノ構造とは大きく異なることが明らかになった。

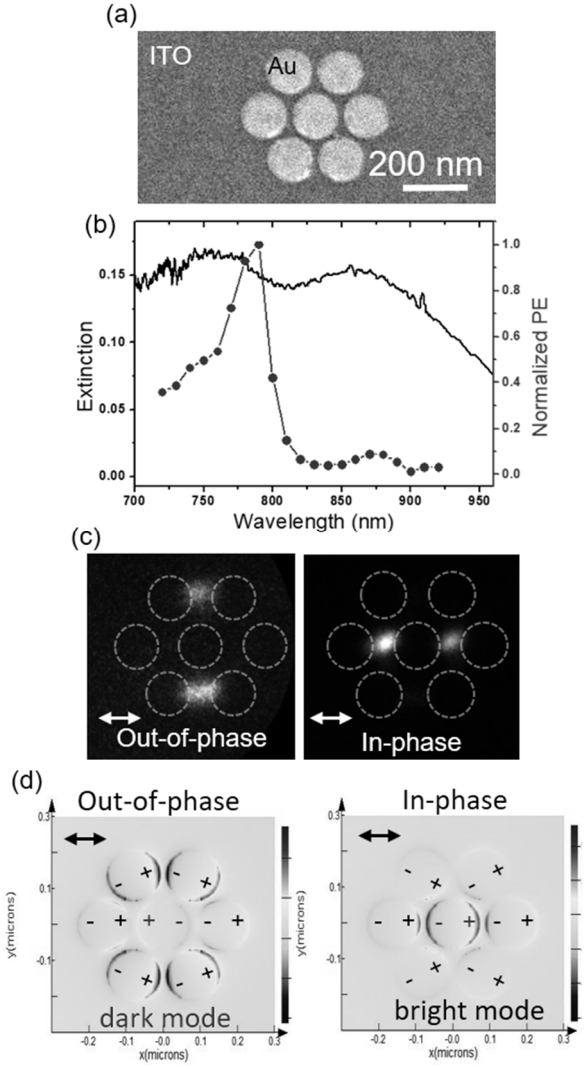


図1 (a) 金ヘプタマー構造の走査型電子顕微鏡写真、(b) 金ヘプタマー構造の遠方場スペクトルと光電子強度のアクションスペクトル、(c) 波長790 nmおよび870 nmにおける光電子強度の空間分布、(d) FDTDシミュレーションによる波長790 nmおよび870 nmの電荷分布（E_z）なお、図中矢印は入射光の偏光方向を示している。

図1(c)に、波長790 nmおよび870 nmにおける光電子強度の空間分布を示す。なお、空間分布を比較しやすいように励起光強度を制御して光電子強度を規格化している。図1(c)から近接場スペクトルの極大ピーク波長とその長波長側の小さなバンドを励起した場合とでは近接場空間分布が大きく異なることが明らかになった。そこで、時間領域差分法（Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法）により電荷（E_z）の分布をシミュレーションしてみたところ、波長790 nmでは中心の金ナノディスクの位相が他の6つのディスクの位相と比較して逆である逆位相モードが、波長870 nmでは7つの金ナノディスクの位相がほぼ同じ向きの順位相モードが誘起されることが明らかになった（図1(d)）。逆位相モードでは＋と－が近接する位置が中心の金ナノディスクに対して上と下のナノギャップ、順位相モードでは＋と－が近接する位置が中心の金ナノディスクに対して左右のナノギャップであることから、図1(c)の光電子強度の空間プロファイルが励起波長によって異なることが考察された。なお、逆位相モードはナノギャップ形成に伴う金ナノディスク間の近接場相互作用によって誘起されるモードであり、禁制なモード（暗モード）であるため光散乱が抑制される。したがって、放射損失が小さいために順位相モードに比べて高い光電場増強効果を示す。以上より、ファノ共鳴を示すことで知られる金ヘプタマー構造の近接場分光特性を測定することにより、強結合系プラズモニック構造とは異なり、明モードである順位相モードと暗モードである逆位相モードがそれぞれが独立して存在していることが明らかになった。

(ⅱ) 化学反応を利用したプラズモン結合モードの近接場分光計測

平成 28 年度の研究および平成 29 年度(i)の研究から、単一のプラズモン共鳴バンドを有する金属のナノ構造体に複数のナノ構造体を隣接させると、近接場相互作用により共鳴スペクトルが 2 つのピークに分裂することが示された。構造間においてコヒーレントなエネルギーのやり取りが起これば強結合状態が誘起され、ハイブリッド準位の形成に基づいてスペクトルが分裂し、コヒーレントなエネルギーのやり取りが起こらなければ単なるモード間の干渉によりスペクトルに凹みが生じるためピークが分裂したように見える。これらは、(i)で述べたように近接場スペクトルを測定すれば区別できる。一方、プラズモンは他の光学のモードである導波路モードとも強結合を示し、共鳴スペクトルの分裂が観測される。本研究では、強結合系プラズモニックナノ構造の近接場分光特性をプラズモン誘起光電変換の内部量子収率のアクションスペクトルを測定することにより計測する新しい測定法を検討した。

ガラス基板上に、厚さ250 nm の酸化チタンを原子層堆積装置により成膜し、その上に電子線リソグラフィー／リフトオフ法により、任意のピッチで金ナノグレーティング構造（Au-NGs）を作製した。Au-NGs の回折光により酸化チタン膜内において導波モードが誘起されるが（図2(a)参照）、重要なのは導波モードの共振波数と金ナノグレーティング構造の局在表面プラズモン共鳴波数が一致した場合、導波モードとプラズモンモードとの強結合が誘起されることである。図2(b)に、強結合によるハイブリッド準位形成を示すエネルギーダイアグラムを示す。導波モードと局在プラズモン共鳴モードが結合して、新たに反結合性（P_+）と結合性(P_-)の二つのハイブリッドモードが形成される。図2(c)に、作製した構造のエクスティンクションスペクトルを示す。P_+と P_-に由来する2つのピークとその中心に1つの鋭い

ピークが観測された。これは、基板に対して完全に垂直な光のみが照射されているわけではないため、対称と非対称の2つの導波モードが存在し、それらがプラズモンモードと相互作用することにより3つピークが出現していることが考察される。

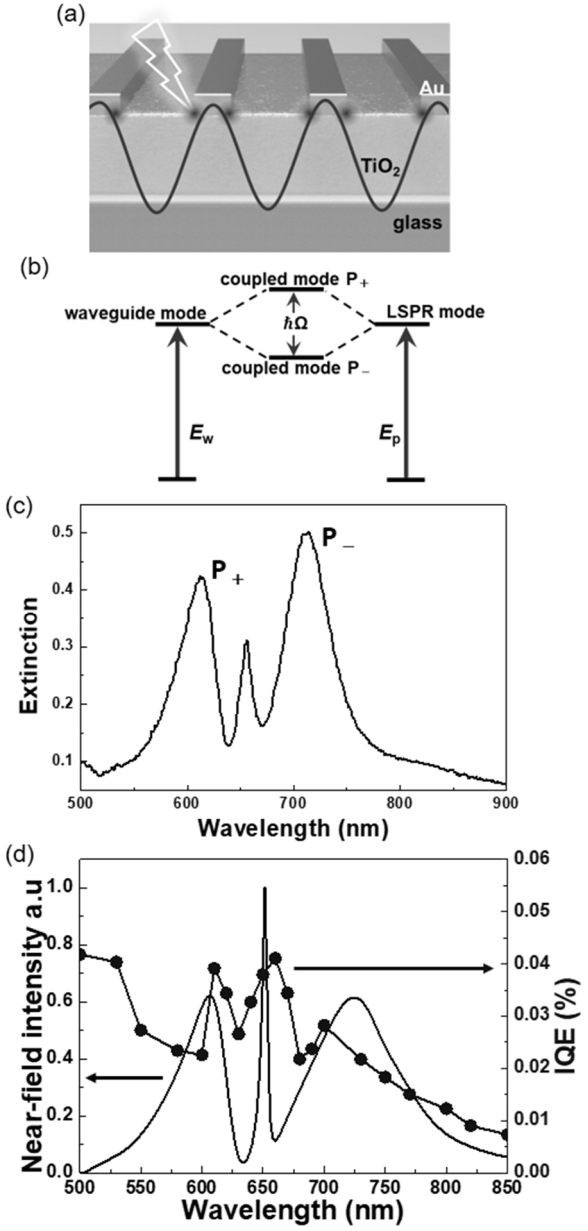


図2 (a) 金ナノグレーティングを配置した酸化チタン光電極の略図、(b) 導波モードと局在プラズモン共鳴モードの強結合によるハイブリッド準位形成を示すエネルギーダイアグラム、(c) 金ナノグレーティングを配置した酸化チタン光電極のエクスティンクションスペクトル、(d) 光電変換の内部量子収率のアクションスペクトルおよびFDTD法による近接場スペクトル

特筆すべきは、金ナノグレーティングを配置した酸化チタン光電極を作用電極として用いて3電極系の光電気化学計測を行い、光電変換の内部量子収率（Internal Quantum Efficiency (IQE)）のアクションスペクトルを求めたところ、3つのピークを有することが明らかになった。FDTD法による電磁場シミュレーションを行い、金ナノグレーティング構造近傍の近接場強度の波長依存性を見積もったところ、図2(d)に示すように光電変換の内部量子収率のアクションスペクトルと同様に3つのピークを示すことが明らかになった。このことから、プラズモンが導波モードと強結合することにより、複数のピークで近接場増強を示し、水を電子源とした光電変換に寄与することが明らかになった。本法は、化学反応を利用した新しい近接場分光計測を行う方法論として期待される。

3．今後の研究の展望

平成29年度は、結合系プラズモニックナノ構造の近接場分光特性を光電子顕微鏡計測や光電変換の内部量子収率のアクションスペクトルを測定することにより明らかにすることに成功した。今後は、平成28年度と29年度に引き続き、結合系プラズモニックナノ構造の近接場分光特性を明らかにし、可視光の幅広い波長域において高い光吸収効率・近接場増強を示す構造の設計指針を得るとともに、最適化された結合系プラズモニックナノ構造を光アンテナとして用いて、太陽電池や人工光合成系を構築し、高い太陽エネルギー変換効率を目指す。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） J. Yang, Q. Sun, H. Yu, K. Ueno, H. Misawa, Q. Gong, “Spatial evolution of the near-field distribution on planar gold nanoparticles with the excitation wavelength across dipole and quadrupole modes”, Photon. Res., 5, 3, 187-193 (2017).

2） A. E. Shalan, S. Narra, T. Oshikiri, K. Ueno, X. Shi, H.-P. Wu, M. M. Elshanawany, E. W.-G. Diau, H. Misawa, “Optimization of a compact layer of TiO2 via atomiclayer deposition for high-performance perovskite solar cells”, Sustainable Energy & Fuels, 1, 1533-1540 (2017).

3） K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, X. Shi, H. Misawa, “Solid-State Plasmonic Solar Cells”, Chem. Rev., 118, 6, 2955-2993 (2018).

4） J. Guo, K. Ueno, J. Yang, X. Shi, J, Li, Q. Sun, T. Oshikiri, H. Misawa, “Exploring the Near-Field of Strongly Coupled Waveguide-Plasmon Modes by Plasmon-Induced Photocurrent Generation Using a Gold Nanograting-Loaded Titanium Dioxide Photoelectrode”, J. Phys. Chem. C, 121, 39, 21627-21633 (2017).

5） C. V. Hoang, K. Hayashi, Y. Ito, N. Gorai, G. Allison, X. Shi, Q. Sun, Z. Cheng, K. Ueno, K. Goda, and H. Misawa, “Interplay of hot electrons from localized and propagating plasmons”, Nature Communications, 8, 771 (2017).

6） K.-L. Lee, P.-G. Tsai, M.-L. You, M.-Y. Pan, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, P.-K. Wei, “Enhancing surface sensitivity of nanostructure-based aluminum sensors using capped dielectric layers”, ACS Omega, 2, 10, 7461-7470 (2017).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） 押切友也、上野貢生、三澤弘明 ： 「局在プラズモンの人工光合成への展開」、機能材料、37(8) ： 40-49 (2017)

2） 押切友也、上野貢生、三澤弘明 ： 「局在表面プラズモンの基礎とその光化学反応への展開」、色材協会誌、90(12) : 408-413 (2017)

4.4 著書

1） Kosei Ueno and Hiroaki Misawa: “Nanolithography based on surface plasmon”,「Handbook of Solid State Chemistry, Vol. 2」、Wiley-VCH, 573-588 (2017)

2） Shinji Matsui, Hiroaki Misawa and Quan Sun: “3-D Nanostructure Fabrication by Focused-Ion Beam, Electron- and Laser Beam”, 「Springer Handbook of Nanotechnology, Fourth Edition」, Springer, 87-112 (2017)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

1） 鈴木博紀、G. Allison, 佐々木雅紀、林弘毅、上野貢生、三澤弘明：特願 2017-155187、「電流測定型表面プラズモン共鳴バイオセンサ及びそれに用いる電気測定型表面プラズモン共鳴センサチップ」、2017 年 8 月 10 日

2） 三澤弘明、石旭、上野貢生、押切友也、孫泉、笹木敬司：特願 2017-248071、「光吸収デバイスおよびその製造方法ならびに光電極」、2017 年 12 月 25 日

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） Kosei Ueno, Quan Sun, Hiroaki Misawa, “Near-Field Spectral Properties of Coupled Plasmonic Systems”, Progress In Electromagnetics Research Symposium 2017 (PIERS 2017), Park Inn by Radisson Pribaltiyskaya hotel (St Petersburg, Russia), May 22-25 (2017)

2） Tomoya Oshikiri, Xu Shi, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Inorganic Solid-state Solar Cells Using Plasmon-induced Charge Separation”, 231st ECS Meeting, Hilton New Orleans Riverside (New Orleans, USA), May 28-June 1, 2017.

3） Tomoya Oshikiri, Xu Shi, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Artificial photosynthesis using plasmon-mediated electron transfer”, 231st ECS Meeting, Hilton New Orleans Riverside (New Orleans, USA), May 28-June 1, 2017.

4） Kosei Ueno, Quan Sun, Hiroaki Misawa, “Near-Field Spectroscopy of the Coupled Plasmonic Systems Using Multiphoton Photoemission Electron Microscopy”, 9th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2017), Suntec Singapore (Singapore), June 18-23, 2017

5） Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photocurrent generation using strong coupling between localized surface plasmon and cavity modes”, The 28th International Conference on Photochemistry (ICP 2017), Strasbourg Convention and Exhibition Centre (Strasbourg, France), July 16-21, 2017

6） Tomoya Oshikiri, “Nitrogen fixation using plasmonic photoanode composed of n-semiconductor and metal nanostructures”, META’17 The 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Songdo Convensia (Incheon, Korea), July 25-28, 2017.

7） Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photoenergy conversions”, The 7th International Conference on Nanoscience & Technology, China (ChinaNANO 2017), Beijing International Convention Center (Beijing, China), August 29-31, 2017

8） Hiroaki Misawa, “Spectral and Temporal Evolution of Near Field on Coupled Plasmonic Nanostructures by Photoemission Electron Microscopy”(Plenary), The 6th Asian Spectroscopy Conference (ASC2017), National Tsing Hua University (Hsinchu, Taiwan), September 3-6, 2017

9） Hiroaki Misawa, “Spectral and Temporal Evolution of Near Field on Coupled Plasmonic Nanostructures by Photoemission Electron Microscopy”, Optics & Photonics Taiwan, the International Conference (OPTIC 2017), National Sun Yat-sen University (Kaohsiung, Taiwan), December 7-9, 2017

b．招待講演（国内学会）

1） 三澤弘明,「光電子顕微鏡を用いた空間分解近接場スペクトル･位相緩和測定によるプラズモンカップリングの解明」, 第１１回分子科学討論会, 東北大学川内北キャンパス（仙台）, 2017 年 9 月 15 日～18 日

c．一般講演（国際学会）

1） Hiroaki Misawa, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, “Ammonia photosynthesis using plasmon photoanode”, The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP8), (Taipei,Taiwan), May 22-26, 2017

2） Quan Sun, Han Yu, Kosei Ueno, Atsushi Kubo, Yasutaka Matsuo, Hiroaki Misawa “Spectrally and Spatially Resolving the Near Field of Coupled Plasmonic Nanostruc-

tures by PEEM,” The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP8), (Taipei,Taiwan), May 22-26, 2017

3） Xu Shi, Oshikiri Tomoya, Kosei Ueno, Keiji Sasaki, Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photocurrent generation using coupling between localized surface plasmon resonance and cavity mode”, The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP8), (Taipei, Taiwan), May 22-26, 2017

4） Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Quantitative evaluation of plasmon-induced ammonia photoelectrochemical synthesis”, The 28th International Conference on Photochemistry (ICP 2017), Strasbourg Convention and Exhibition Centre (Strasbourg, France), July 16-21, 2017

5） Kosei Ueno, Jinghuan Yang, Han Yu, Quan Sun, Tomoya Oshikiri, Atsushi Kubo, Yasutaka Matsuo, Qi-Huang Gong, Hiroaki Misawa, “Spectral properties and dynamics of localized surface plasmon resonances in metal/insulator/metal nanostructures”, The 28th International Conference on Photochemistry (ICP 2017), Strasbourg Convention and Exhibition Centre (Strasbourg, France), July 16-21, 2017

6） Quan Sun, Han Yu, Jinghuan Yang, Kosei Ueno, Tomoya Oshikiri, Atsushi Kubo, Yasutaka Matsuo, Qihuang Gong, Hiroaki Misawa, “Resolving the Near Field of Coupled Plasmonic Nanostructures in Both Spectral and Spatial Domains Using Photoemission Electron Microscopy”, The 7th International Conference on Nanoscience & Technology, China (ChinaNANO 2017), Beijing International Convention Center (Beijing, China), August 29-31, 2017

d. 一般講演（国内学会）

1） 高倉稜平、押切友也、近藤敏彰、 上野貢生, 益田秀樹、三澤弘明,「金ナノ粒子を担持した 3 次元プラズモン光アノードの構造・光エネルギー変換特性評価」, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス(仙台）, 2017 年 9 月 4 日～6 日

2） Kosei Ueno, Jie Li, Tomoya Oshikiri, Hiroaki Misawa, “Spectral modulations of molecular vibrational modes by infrared localized surface plasmon resonance”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス (仙台) , 2017 年 9 月 4 日～6 日

3） Jinghuan Yang, Quan Sun, Han Yu, Kosei Ueno, Qihuang Gong, Hiroaki Misawa, “Near-field spectral properties and ultrafast dynamics of coupling modes between localized surface plasmon and surface plasmon polariton Bloch wave”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス（仙台）, 2017 年 9 月 4 日～6 日

4） 中村圭佑, 押切友也, 石 旭, 上野貢生, 三澤弘明,「局在プラズモンとマイクロキャビティとのカップリングを用いた高光吸収プラズモン太陽電池の構築」, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス(仙台）, 2017 年 9 月 4 日～6 日

5） 山田拓樹, 押切友也, 孫 泉, 上野貢生, 三澤弘明,「アキラル構造における近接場キラリティーの観測」, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス(仙台）, 2017 年 9 月 4 日～6 日

6） Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Reaction mechanism on plasmon-induced ammonia synthesis”, 2017 年光化学討論会, 東北大学青葉山キャンパス(仙台）, 2017 年 9 月 4 日～6 日

7） Jie Li, Kosei Ueno, Quan Sun, Tomoya Oshikiri, Hiroaki Misawa, “Dynamics of electron transfer in gold nanoparticles/titanium dioxide system by transient absorption spectroscopy”, 日本化学会 第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス（船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

8） 中村圭佑、押切友也、石 旭、上野貢生、三澤弘明,「ファブリ・ペローナノ共振器-プラズモン強結合を利用した高光吸収太陽電池の電気特性評価」, 日本化学会第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス（船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

9） 高倉稜平、押切友也、上野貢生、近藤敏彰、益田秀樹、三澤弘明,「3 次元プラズモン光アノードの金属/半導体界面制御」, 日本化学会 第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス（船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

10）Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Fabrication of high-absorption plasmonic photoanode with microhole array”, 日本化学会 第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス（船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

11）Xu Shi, Kosei Ueno, Tomoya Oshikiri, Quan Sun, Keiji Sasaki, Hiroaki Misawa, “Strong coupling between Fabry-Pérot nanocavity and localized surface plasmon resonance and its application for efficient water splitting”, 日本化学会 第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス（船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

12）Kosei Ueno, Tomoya Oshikiri, Hiroaki Misawa, “Spectral properties of the strong coupling between microcavity and molecular vibrational modes”, 日本化学会 第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス (船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

13）Miharu Eguchi, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Special Program Lecture Plasmonic nanoparticles and the coherent interaction with dye molecules”, 日本化学会 第 98 春季年会 (2018), 日本大学理工学部船橋キャンパス（船橋）, 2018 年 3 月 20 日～23 日

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以

外）

1） 三澤弘明,「プラズモンカップリングとその光エネルギー変換への展開」（特別講演）, 新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」領域会議, 北海道大学（札幌）, 2017 年 6 月 19 日

2） Quan Sun, Han Yu, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Micro/nanofabrication and probing surface plasmons by ultrafast pulses,” (Invited) Light Conference 2017- Young Scientist Forum, (Changchun, China), July 17-18, 2017

3） Quan Sun, “Micro/nanofabrication and probing surface plasmons by ultrafast pulses” (Invited), Seminar, Jilin Uniersity (Changchun, China), July 17, 2017

4） Quan Sun, “Probing surface plasmons from multiple domains using photoemission electron microscropy” (Invited), Seminar, Changchun University of Science and Tecchnology (Changchun, China), July 19, 2017

5） Xu Shi, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photocurrent generation using coupling between localized surface plasmon resonance and cavity mode”, Light Conference 2017- Young Scientist Forum, (Changchun, China), July 17-18, 2017

6） Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photoenergy conversion systems” (Invited), The 2nd Symposium of Advanced Lectures on Fundamentals for Solar Energy Conversion: Theory and Experiment, Dalian Institute of Chemical Physics (Dalian, China), July 25-29, 2017

7） 上野貢生,「プラズモニックナノ構造の作製と近接場分光特性」, 名古屋大学 応用物質化学セミナー、名古屋大学（名古屋）, 2017 年 8 月 2 日

8） 三澤弘明,「局在表面プラズモンとその光エネルギー変換への展開」（特別講演）, NEDO 平成 29 年度エネルギー・環境新技術先導プログラム「極微小液滴が形成する反応場を用いたナノ材料の構造・機能制御技術の研究開発」全体会議, 産業技術総合研究所（つくば), 2017 年 8 月 10 日

9） 上野貢生,「プラズモン放射圧による高分子ゲルの体積相転移」, 分子研研究会「共鳴条件下における光と分子の力学的相互作用 -分子操作への展開-」, 分子科学研究所岡崎コンファレンスセンター（岡崎）, 2017 年 8 月 18 日～19 日

10）Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photoenergy conversions” (Invited), Seminar, Peking University (Beijing, China), August 29, 2017

11）Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photoenergy conversions”(Invited), Seminar, Nankai University (Tianjin, China), August 30, 2017

12）Quan Sun, Hiroaki Misawa, “Resolving the Near Field of Coupled Plasmonic Nanostructuresin Both Spectral and Spatial Domains by PEEM,” International Workshop on PEEM and Applications, (Beijing, China), November 22-23, 2017

13）三澤弘明,「局在プラズモンの結合状態の解明とそのエネルギー変換への応用」（特別講演）, 理研シンポジウム 第５回「光量子工学」, 仙台市中小企業活性化センター（仙台）, 2017 年 11 月 29 日～30 日

14）上野貢生,「プラズモニックナノ構造の近接場分光特性と光化学研究への展開」, 東工大化学系セミナー, 東工大（東京都目黒区）, 2017 年 11 月 29 日

15）Asuka Maruyama, Ryohei Takakura, Xu Shi, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Photoelectric Conversion using Gold Nanoparticles Loaded TiO2 Photoelectrode with 3D Photonic Crystal Structure”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium ″極″, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo (Sapporo), November 30-December 1, 2017

16）Keisuke Nakamura, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “High light-absorbing plasmonic solar cells using localized surface plasmon and cavity of bilayer thin film”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium ″極″, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo (Sapporo), November 30-December 1, 2017

17）Ryohei Takakura, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Toshiaki Kondo, Hideki Masuda, Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced photoelectric conversion using photoanode of TiO2 nanotubes loaded with gold nanoparticles”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium ″極″, Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo (Sapporo), November 30-December 1, 2017

18）Hiroaki Misawa, “Spectral and Temporal Evolution of Near Field on Coupled Plasmonic Nanostructures by Photoemission Electron Microscopy”(Invited), Seminar, Academia Sinica (Taipei, Taiwan), December 5, 2017

19）Quan Sun, “Ultrafast time-resolved photoemission electron microscropy and its applications in nanophotonics” (Invited), Seminar, Harbin Institute of Technology (Harbin, China), December 30, 2017

20）三澤弘明,「プラズモンを用いた太陽光エネルギー変換」（招待講演）, 平成 29 年度岡山大学次世代研究コア形成支援事業「触媒科学による持続可能な開発への貢献」ミニシンポジウムシリーズ「光触媒開発が先導する「人工光合成」技術 Ⅰ」, 岡山大学津島キャンパス（岡山）, 2018 年 1 月 10 日

21）Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced water splitting and its enhancement by strong coupling between nanocavity and localized surface plasmon modes”(Invited), International CLS Forum on Photo and Catalytic Science for Sustainable Society, 東京工業大学 大岡山キャンパス（東京）, 2018 年 3 月 3 日～4 日

２２）Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced water splitting and its enhancement by strong coupling between nanocavity and localized surface plasmon modes”(Invited), 2018 IMCE International Symposium, ITO Campus, Kyushu University (Fukuoka), March 16, 2018

4.7 シンポジウムの開催

1） 三澤弘明:第 12 回プラズモニック化学シンポジウム、筑波大学東京キャンパス、東京（2017 年 6 月 23 日）
2） 三澤弘明:第 13 回プラズモニック化学シンポジウム、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス、東京（2017 年 11 月 24 日）

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

該当なし

ｂ．民間等との共同研究

1） 三澤弘明、上野貢生（株式会社イムラ・ジャパン）:「プラズモンを利用したセンシングデバイスに関する研究」（2017 年度）サスティナブルエネルギー社会実現の為の技術探求を目的として、プラズモン共鳴を利用したセンシング技術について研究をおこなう。
2） 三澤弘明、上野貢生、押切友也（株式会社ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン）:「プラズモニック太陽電池、並びにプラズモンを利用した CO_2 還元に関する共同研究」(2017 年度)プラズモンを利用した光電変換装置の効率向上に関するデバイス試験を含む検討、並びにプラズモンを利用した CO_2 還元装置の実現可能性に関するデバイス試験を含む検討

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

1） Prof. Qihuang Gong, Peking University, China
2） Prof. Pei-Kuen Wei, Academia Sinica, Taiwan
3） Prof. Ding-Ping Tsai, Academic Sinica, Taiwan
4） Prof. Stephan Link, Rice University, U.S.A.

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

ａ． 科学研究費補助金

1） 三澤弘明、基盤研究 A 一般、フォトニック結晶と結合する局在プラズモンを用いた光アンモニア合成、2017～2019 年度
2） 上野貢生、基盤研究 C、金属を担持した光触媒系界面反応の高分解能 in-situ 計測、2015～2017 年度
3） 上野貢生、新学術領域研究（研究領域提案型）、プラズモン強結合系における電子状態の変調と光反応場への応用、2017 年～2018 年
4） 上野貢生、新学術領域研究（研究領域提案型）、制御されたナノ空間を利用した光圧による物質捕捉と光化学反応場の構築、2017 年～2018 年

ｂ． 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

4.10 受賞

1） 三澤弘明、北海道大学、平成 29 年度「北海道大学総長表彰」、2018 年 3 月 15 日
2） 于 瀚、北海道大学情報科学研究科、研究科長賞、2017 年 9 月 25 日
3） 郭景春、北海道大学情報科学研究科、研究科長賞、2018 年 3 月 22 日
4） 高倉稜平、北海道大学情報科学研究科、研究科長賞、2018 年 3 月 22 日

4.11 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 科学技術予測センター 専門調査員（2006 年 4 月 4 日～2018 年 3 月 31 日）
2） 三澤弘明：日本学術振興会 先端科学（FoS）シンポジウム事業委員会 事業委員（2010 年 4 月 1 日～2018 年 3 月 31 日）
3） 三澤弘明：日本学術会議 連携会員（2011 年 10 月 3 日～2023 年 9 月 30 日）
4） 三澤弘明：科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 研究領域「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」 領域アドバイザー（2011 年 5 月 1 日～2018 年 3 月 31 日）
5） 三澤弘明：文部科学省 新学術領域研究専門委員会（高次複合光反応） 評価者（2016 年 12 月 8 日-2017 年 12 月 7 日）
6） 三澤弘明 :独立行政法人理化学研究所 客員主幹研究員(2012 年 1 月 26 日～)
7） 三澤弘明：科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 研究領域「光の極限制御・積極利用と新分野開拓」領域アドバイザー（2015 年 7 月 1 日～2019 年 3 月 31 日）
8） 上野貢生：日本学術振興会 科学研究費委員会専門委員（2015 年 12 月～2017 年 11 月）
9） 三澤弘明 :日本学術振興会 科学研究費委員会専門委員（2017 年 1 月 1 日～2017 年 12 月 31 日）
１０） 三澤弘明：文部科学省研究振興局 科学研究費補助金評価委員会の評価者（2016 年 12 月 8 日～2017 年 12 月 7 日）

ｂ． 国内外の学会の役職

1） 三澤弘明 :日本化学会 学術研究活性化委員会 委員(2010.4.30～)
2） 三澤弘明：Nanotechnology Innovation Center for Environment & Ecosystem, Harbin Institute of Technology, Academic Committee（2012年7月31日～2017年12月31日）

3） 上野貢生：日本分析化学会 北海道支部 幹事(2013年3月1日～2019年2月28日)
4） 三澤弘明：Asian Nanoscience and Nanotechnology Association, President (2013年5月～)
5） 上野貢生：応用物理学会極限ナノ造形・構造物性研究会運営委員（2013年11月～）
6） 上野貢生：電気学会メタマテリアル・プラズモニクスの光・電子デバイス応用調査専門委員会（2013年12月～）
7） 三澤弘明：ACS Photonics, Editorial Advisory Board (2014年1月1日～現在)
8） 三澤弘明：FWO (Research Foundation Flanders) Expert Panel W&T3: Condensed Matter and Physical Chemistry (2015年1月1日～2018年12月31日)
9） 上野貢生：The 14th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics, and Related Techiques (NFO-14), Local Committee Member (2015年2月～2017年3月)
１０）三澤弘明：公益社団法人新化学技術推進協会 GSC賞一次選考委員（2015年10月13日～2016年6月30日, 2016年10月13日～2017年7月31日）
１１）上野貢生：日本分析化学会 日本分析化学会第65年会実行委員（2015年10月～2017年3月）
１２）上野貢生：The 24th Congress of the International Commisssion for Optics (ICO-24), Program Committee Member (2016年5月～2017年7月)
１３）三澤弘明：日本化学会 学会賞選考委員 (2016年9月1日～2018年11月30日)
１４）上野貢生：31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018), Steering Committee Members (2017年9月～)
１５）三澤弘明：The 28th International Conference on Photochemistry (ICP 2017), International Advisory Board Member（2017年7月）
１６）孫泉: International Workshop on PEEM and Applications, Program Committee Member (2017年10月-11月)
１）

c．兼任・兼業

1） 三澤弘明：株式会社レーザーシステム 顧問（2015年6月1日～2017年5月30日）
2） 三澤弘明：国立交通大学（台湾） 講座教授(2015年8月1日～2021年7月31日)
3） 孫泉：Jilin University Visiting Professor (2017年1月-2019年12月)

d. 外国人研究者の招聘

1） Jinghuan Yang、中国(2015年12月10日～2017年5月31日)
2） Markus Weipert、ドイツ（2017年4月1日～2017年8月31日）
3） Hanfa Song、中国（2017年5月1日～2018年2月12日）
4） Yaolong Li、中国（2018年1月7日～2019年1月6日）
5） Jianwern Chen、台湾（2018年2月19日～3月17日）
6） Hsin-Yu Hu、台湾（2018年2月19日～3月17日）
7） Sai Santosh Kumar Raavi、インド（2018年2月26日～27日）
8） Qihuang Gong、中国（2017年8月18日）
9） Xiaoyong Hu、中国（2017年8月18日）
１０）Hong Yang、中国（2017年8月18日）
１１）Guowei Lv、中国（2017年10月18～20日）

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 工学部、電気回路、三澤弘明、2017年4月1日～2017年6月5日（春ターム）
2） 工学部、電気回路、上野貢生、2017年4月1日～2017年6月5日（春ターム）
3） 工学部「生体情報工学実験I」押切友也、2017年4月5日～2017年9月30日
4） 工学部「情報エレクトロニクス演習」押切友也、2017年4月5日～2017年9月30日
5） 全学教育科目、環境と人間 ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命、上野貢生、2017年5月12日
6） 全学教育科目、環境と人間 2030年エレクトロニクスの旅、三澤弘明、2017年7月12日
7） 情報科学研究科、ナノフォトニクス特論、三澤弘明、上野貢生、押切友也、2017年10月2日～11月29日
8） 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、上野貢生、2017年11月15日
9） 工学部、生体工学概論、上野貢生、2018年1月25日
１０）工学部「生体情報工学実験II」押切友也、2017年10月2日～2018年2月5日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 高校生（札幌南高校）、夢のエネルギー人工光合成の実現に向けて、三澤弘明、2017年10月26日
2） 高校生（札幌創成高校・札幌北高校）、光を蓄える金属、上野貢生、2017年10月27日、11月28日

g． 新聞・テレビ等の報道

1） 2017年10月11日 日経産業新聞 「光の波長で電流反転 北大など 色識別センサー開発」

h． ポスドク・客員研究員など

1） 李潔（博士研究員、2014.9.1～）
2） 丸山明日香（技術補佐員、2017年4月1日～2018年3月31日）

i． 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：1名

1） 高倉 稜平 ： 修士（情報科学）、3次元プラズモン光アノードを用いた光電変換・水分解反応系の構築

(Photoelectric conversion/water splitting system using three-dimensional plasmonic photoanode)

博士学位：2名

1） 于　瀚：博士（情報科学）、Exploring the near-field properties on coupled plasmonic nanostructures by photoemission electron microscopy（光電子顕微鏡によるプラズモン結合モードの近接場特性に関する研究）

2） 郭　景春：博士（情報科学）、Plasmon-induced photoelectrochemical biosensors using gold nanostructured titanium dioxide photoelectrodes（金ナノ構造担持酸化チタン電極を用いた光電気化学バイオセンサー）

光電子ナノ材料研究分野

教　授　　西井準治（都立院、工博、2009. 7～）
准教授　　海住英生（慶大院、工博、2013. 10～）
助　教　　藤岡正弥（慶大院、理博、2015. 4～）
博士研究員　三澤貴浩（2017. 4～9）
外国人研究員　Bian Weibai（2016. 10～2017. 9）
　　Fang Xinxiong（2017. 9～2018. 2）
大学院生　久保直紀（総合化学院M2）
　　舘林　尭（総合化学院M1）
　　Robin Msiska（総合化学院M1）
学部生　　佐々木悠馬（理学部化学科B4）

1. 研究目標

当該研究分野では、無機材料や金属材料中のイオンや電子スピンの状態を制御して新奇な機能や特性を引き出すことを目的として以下の基盤研究に取り組んでいる。

(1) 電子スピンの制御

固体中の電子が持つ「電荷」に新たな自由度である「スピン」を加えたスピントロニクスに、ナノ構造や光を取り入れた新たなデバイスの創製

(2) イオンの制御

固体材料への電圧印加によって、内部に含まれるイオンの置換やその濃度分布を変化させ、新たな電気的、光学的な特性を有する機能材料の創製

(3) 光波制御機能の発現

光学異方性、電磁場増強、光波の閉じ込めなど、自然界に存在しない光学特性を発現する光の波長レベル以下の微細な周期構造デバイスの創製

2. 研究成果

(1) 磁気トンネル接合における逆磁気キャパシタンス効果の発見

電子の電荷とスピンの2つの自由度を利用する「スピントロニクス」は、現代のエレクトロニクスを凌駕する次世代技術として期待され、近年大きな注目を集めている。中でも、磁性体/絶縁体/磁性体から構成される磁気トンネル接合(MTJ)は室温にて巨大なトンネル磁気キャパシタンス(TMC)効果を示すことから国内外で精力的に研究が進められてきた。通常のTMC効果では、両磁性層の磁化が平行であるときキャパシタンスC_Pが大きくなり、反平行であるときC_{AP}が小さくなる。本研究では$Fe/AlO_x/Fe_3O_4$ MTJにおいてその逆の現象($C_P < C_{AP}$)である逆トンネル磁気キャパシタンス(iTMC)効果を発見したので、その詳細について報告する。

我々は2015年に150%を超える巨大なTMC比を観測することに成功した。また、TMC効果のメカニズムが

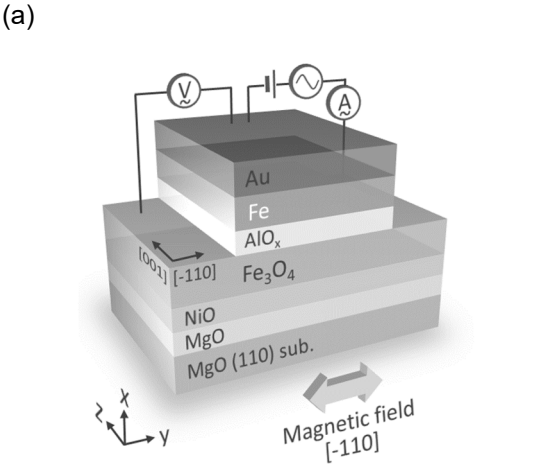


図１ (a) $Fe/AlO_x/Fe_3O_4$ MTJ と(b)iTMC 効果

Debye-Fröhlich(DF)模型を用いた理論計算により定量的に良く説明できることも明らかにした。本理論によれば、磁性層と絶縁層の界面に生じる電気的なダイポールが交流電場によって振動し、この振動モードがDF模型に従う。つまり、磁化平行(P)状態では、その振動が俊敏である(=緩和時間が短い)ため、誘電分極が大きくなりキャパシタンスが大きくなる。磁化反平行(AP)状態では、その逆で、振動が緩慢となる(=緩和時間が長い)ため、キャパシタンスが小さくなる。このような物理的描像に基づくと、P状態で緩和時間が長くなり、AP状態で緩和時間が短くなれば、TMC効果とは逆の現象($C_P < C_{AP}$)であるiTMC効果を見出すことが期

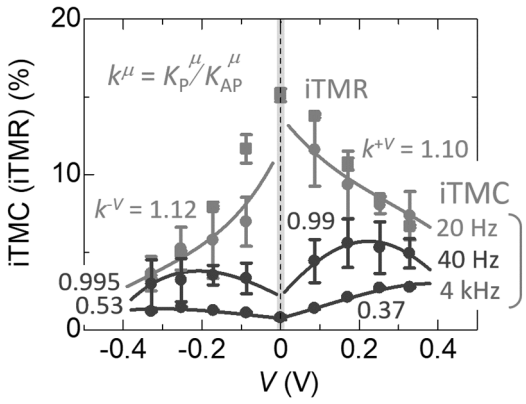


図２ iTMC比の電圧依存性

待される。P状態とAP状態の緩和時間の反転($\tau_P > \tau_{AP}$)は、両磁性層のスピン分極率が互いに異符号であることにより実現することが予想される。

そこで、我々は、正のスピン分極率を示すFeと負のスピン分極率を示すFe_3O_4に着目し、Fe/AlO_x/Fe_3O_4 MTJを作製した(図1(a))。分子線エピタキシー法によりMgO(110)基板上にMgO(20 nm)/NiO(5 nm)/Fe_3O_4(60 nm)/AlO_x(2-4 nm)/ Fe(10 nm)/Au(30 nm)から構成されるMTJを作製した。微細加工にはフォトリソグラフィー、及びArイオンミリング法を用いた。作製したMTJのTMC測定には、室温磁場中交流4端子法を用いた。図1(b)に示すようにFe/AlO_x/Fe_3O_4 MTJにおいて明瞭なiTMC効果が観測された。すなわち、P状態ではキャパシタンスC_Pが小さくなり、AP状態ではキャパシタンスC_{AP}が大きくなる。このときの変化率をiTMC比（$=(C_{AP}-C_P)/C_P$）と定義する。図2にiTMC比の電圧依存性を示す。周波数が低いときは、高いiTMC比を示すが、電圧上昇に伴い、iTMC比は減少する。一方で、周波数が高いときは、低いiTMC比を示すが、電圧上昇に伴い、iTMC比は増大する(=ロバスト性を示す)。これらの実験結果はZhang模型と放物線バリア近似を取り入れたDF模型、及びスピン依存ドリフト拡散模型を用いた理論計算(=図2の実線)により定量的に説明できることがわかった。

さらに、本理論を用い、iTMC比向上に関する検討を行った。図3にiTMC比の周波数特性に関する計算結果を示す。図3よりCoFeBを想定したスピン分極率65%を示す材料(FM1)とFe_4Nを想定したスピン分極率−42%を示す材料(FM2)をMTJの磁性層に用いれば、最大で177%のiTMC比が得られることが理論的に明らかになった。

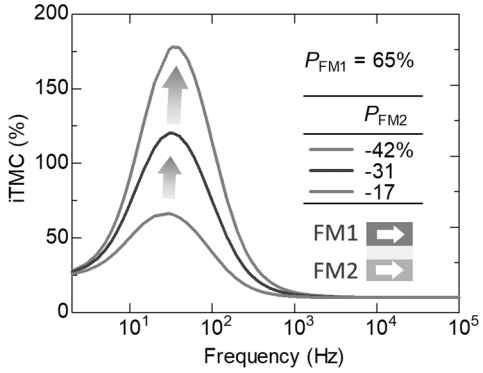


図３ iTMC比の周波数特性に関する計算結果

(2) 固体電気化学を利用したトポタクティック反応技術の開発

トポタクティック反応とは、物質の構造骨格を保ったまま、一部の元素をその構造に出し入れする反応である。例えば、リチウムイオン電池では、正極の$LiCoO_2$から負極の黒鉛にリチウムイオンが侵入することで充電され、黒鉛から$LiCoO_2$にリチウムが戻る際に放電する。これらの反応は、リチウムイオンの出し入れに対して構造骨格が保たれており、トポタクティック反応の代表的な例といえる。このようなイオンの出し入れは、電池反応に利用されるだけでなく、物質の電子物性にも大きな変調を与えることが知られている。我々の研究室では、固体電気化学を利用したトポタクティック反応により、様々な構造骨格とイオン種を組み合わせた新規物質の開発に取り組んでおり、この材料開発を進めることで、従来法では得られない革新的な機能性材料の創出を目指している。

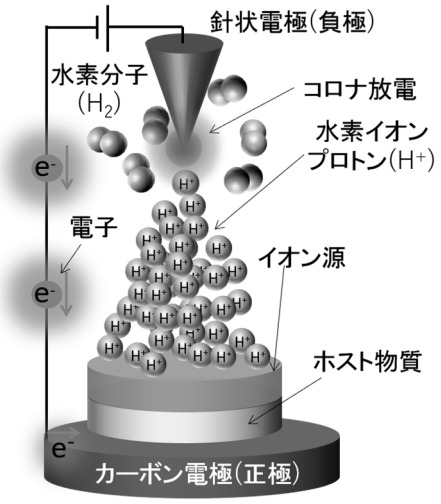


図４ プロトン駆動法の概念図

図4にトポタクティック反応を進行させる手法として我々が開発したプロトン駆動法の概念図を示す。負極を針状の電極として、その直下に固体電解質およびホスト物質(イオンを受け入れる物質)を設置する。水素雰囲気中で高電圧を印加すると、水素がプロトンに電離し、固体電解質へと侵入する。固体電解質内の伝導イオンは電気的中性を保つように、ホスト物質へと移動し、トポタクティック反応が進行する。

このようにして2次元層状物質TaS_2の層間に様々なイオンを導入したx-ray diffraction (XRD)の測定結果を図5に示す。イオンの導入に伴い、系統的にピークがシフトし、イオンの大きさに応じて層間が広がっていることがわかる。またこの手法は、従来のイオンインプラントのようなイオ

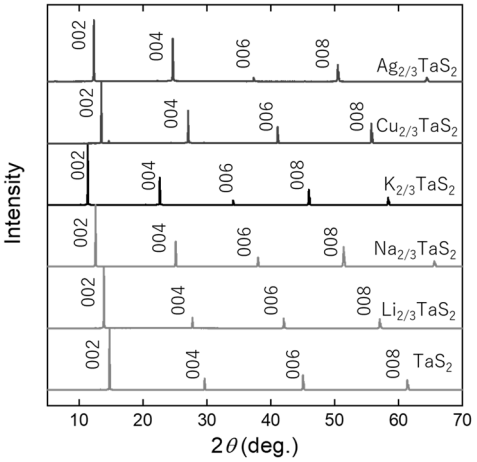


図５ A_xTaS_2 (A = Ag, Cu, K, Na, Li)のXRD測定

ンの打ち込みと異なり、物質固有のイオン伝導を利用するため、単結晶内に均質にイオンが分布する。さらに、従来の電気化学で見られるような溶媒の同時侵入に伴う結晶性の劣化は確認されず、半値幅はイオン導入前とほとんど変わらない。

また、NASICON型$Na_3V_2(PO_4)_3$は固体イオン電池への応用が期待されており、このNASICON構造を有する物質は数多く報告されている。しかし、NaサイトをKイオンに置換した$Na_{3-x}K_xV_2(PO_4)_3$は、NaとKのイオン半径が大きく異なるため、熱力学的準安定な相となり従来の手法では合成が困難であった。一方、本手法は、高温高電圧の特殊環境下に物質を置くことでKイオンを電気的に拡散し、Naイオンとの交換を促す。このため、元の構造骨格を保持したまま、Kイオンが置換された熱力学的準安定物質が合成されることを見出した。図6は$Na_3V_2(PO_4)_3$にKイオンが上部から徐々に侵入している様子を表している。

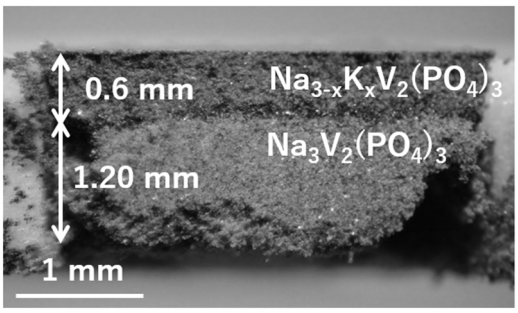


図６　NASICON型$Na_3V_2(PO_4)_3$へのKイオン交換

本研究により、トポタクティック反応に固体電気化学を利用することで、高い結晶性を維持した均質な物質が得られ、熱力学的にも準安定な材料が合成可能であることが明らかとなった。

３．今後の研究の展望

磁場によりキャパシタンスが変化する磁気キャパシタンス効果は、磁気トンネル接合のみならず、近年盛んに研究が行われているマルチフェロイック材料においても発見されている。最近では、絶縁体中に磁性ナノ粒子を分散させたナノグラニュラー材料や磁性層と磁性層の間に分子を挟んだ分子スピントロニクス素子においても発見されており、磁気キャパシタンス効果をキーワードとした当該研究分野が急速に発展している。このような観点から他の様々な材料・物質・デバイスにおいても室温巨大磁気キャパシタンス効果が発見される可能性は極めて高く、学術的に広く展開していくものと期待できる。さらに、将来的には、磁気キャパシタンス効果の特徴を活かした革新的低ノイズ・低消費電力メモリ素子の創製のみならず、磁気抵抗効果と組み合わせることで、従来にない多値磁気メモリ素子の創製も期待でき、応用工学的な観点からも極めて大きな意義をもつものと考えられる。また、固体電気化学を利用したトポタクティック反応技術の開発では、アルカリ金属イオンや銅イオン、銀イオンなどの、１価イオンの導入に成功した。また近年、様々な多価数イオン伝導体が開発されている。例えばMg^{2+}伝導体の$MgFeSiO_4$や、Al^{3+}伝導体の$(Al_{0.2}Zr_{0.8})_{20/19}Nb(PO_4)_3$、$Zr^{4+}$伝導体の$Zr_{1-x/4}TaP_{3-x}WxO_{12}$、$Ti^{4+}$伝導体の$Ti(Nb_{0.8}W_{0.2})_{5.0/5.2}(PO_4)_3$等である。これらの物質はイオン源の候補として挙げられ、これらのトポタクティック反応を利用した多価数イオンの導入が実現すれば、材料合成の幅は格段に広がり、革新的機能性材料の創出に貢献すると期待される。また、本手法は準安定物質をバルクな状態で取り出すことが可能であり、このような合成技術の開発は今後の材料科学の発展に大きく寄与するものと期待される。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

１）　N. Kubo, N. Ikutame, M. Takei, W. Bian, S. Ikeda, K. Yamamoto, K. Uraji, T. Misawa, M. Fujioka, H. Kaiju, G. Zhao and J. Nishii : “Nano-imprinting of surface relief gratings on soda-aluminosilicate and soda-lime silicate glasses”, *Optical Materials Express*, 7 : 1438-1455 (2017)

２）　T. Yamaguchi, Y. Saito, Y. Kuwahara, H. Yamashita, T. Ishiyama, J. Nishii, T. Yamashita, H. Kawazoe and T. Omata : “Effect of alkaline-earth species in phosphate glasses on mobility of proton carriers”, *Journal of Materials Chemistry A*, 5 : 12385-12392 (2017)

３）　H. Kaiju, T. Nagahama, S. Sasaki, T. Shimada, O. Kitakami, T. Misawa, M. Fujioka, J. Nishii and G. Xiao : “Inverse Tunnel Magnetocapacitance in Fe/Al-oxide/Fe_3O_4”, *Scientific Reports*, 7 : 2682(1-12) (2017)

４）　W. Bian, Y. Chen, W. Huang, G. Zhao, J. Nishii, H. Kaiju, M. Fujioka, L. Li, N. Li and F. Yan : “Effect of F/Ba ratio of precursor solution on the properties of solution-processed YBCO superconducting films”, *Ceramics International*, 43 : 8433-8439 (2017)

５）　F. Caglieris, A. Leveratto, I. Pallecchi, F. Bernardini, M. Fujioka, Y. Takano, A. Jost, U. Zeitler and M. Putti : “Quantum oscillations in the SmFeAsO parent compound and superconducting SmFeAs(O,F)”, *Physical Review B*, 96 : 104508(1-5) (2017)

６）　T. Yamaguchi, T. Kataoka, S. Tsukuda, T. Ishiyama, J. Nishii, T. Yamashita, H. Kawazoe and T. Omata : “Mobility of Proton Carriers in Phosphate Glasses Depends on Polymerization of Phosphate Framework”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19 : 29669-29675 (2017)

７）　M. Fujioka, C. Wu, N. Kubo, G. Zhao, A. Inoishi, S. Okada, S. Demura, H. Sakata, M. Ishimaru, H. Kaiju and

J. Nishii : “Proton-Driven Intercalation and Ion Substitution Utilizing Solid-State Electrochemical Reaction”, *Journal of the American Chemical Society*, 139 : 17987-17993 (2017)

8） S. Tsukuda, K. Miyake, T. Yamaguchi, M. Kita, T. Ishiyama, J. Nishii, T. Yamashita, H. Kawazoe and T. Omata : “Formation of Amorphous $H_3Zr_2Si_2PO_{12}$ by Electrochemical Substitution of Sodium Ions in $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ with Protons”, *Inorganic Chemistry*, 56 : 13949-13954 (2017)

9） T. Kinoshita, A. Miyazaki, K. Kawaguchi, D. Sakai, T. Yamaguchi, T. Omata, T. Ishiyama, M. Fujioka, H. Kaiju and J. Nishii : “Dense proton injection into phosphate glasses using corona discharge treatment”, *Applied Surface Science*, 428 : 718-722 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） 藤岡 正弥、海住 英生、西井 準治 : 「100 年にわたる超電導物質探索の営み―高圧合成の可能性」、化学、化学同人、72 : 64-65 (2017)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

1） 藤岡 正弥、西井 準治、海住 英生 : PCT/JP2017/016263、「インターカレーション物質の製造方法および製造装置ならびにイオン置換物質の製造方法および製造装置」、2017 年 4 月 25 日

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

該当なし

b．招待講演（国内学会）

1） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang : 「計算機科学に基づいた磁気キャパシタンス効果の発見」、平成 29 年度日本材料科学会学術講演会、関東学院大学 KGU 関内メディアセンター(2017-06)

2） 藤岡 正弥、猪石 篤、岡田 重人、海住 英生、西井 準治 :「高電界イオン導入法を用いた新規材料の合成」、第 5 回アライアンス若手研究交流会、東京工業大学すずかけ台キャンパス (2017-08)

3） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang : 「強磁性トンネル接合における磁気キャパシタンス効果」、第 34 回光機能磁性デバイス・材料専門研究会、東京工業大学キャンパス・イノベーションセンター (2017-09)

4） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang : 「磁気トンネル接合における逆磁気キャパシタンス効果」、第 22 回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-22、大阪大学豊中キャンパス基礎工学国際棟（Σホール）(2017-12)

5） 海住 英生、西井 準治 : 「薄膜エッジを利用したナノスケール分子接合デバイス」、東工大化生研講演会、東京工業大学すずかけ台キャンパス (2017-12)

6） 藤岡 正弥 : 「プロトン駆動イオン導入法を用いたインターカレーションの新展開」、物質・デバイス領域共同研究拠点展開共同研究 B 研究会、北海道大学 (2017-12)

7） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang : 「スピンデバイスにおける磁気誘電効果の理論とその実証」、第 2 回マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会、中央大学駿河台記念館(2018-03)

c．一般講演（国際学会）

1） M. Fujioka, H. Kaiju and J. Nishii : “Novel Platinum-Based Superconductor $LaPt_5As$ with Unique Crystal Structure”, 13th European Conference on Applied Superconductivity, Centre International de Congrès Genève (CICG), Switzerland (2017-09)

2） H. Kaiju, T. Nagahama, S. Sasaki, T. Shimada, O. Kitakami, T. Misawa, M. Fujioka, J. Nishii and G. Xiao : “Inverse Tunnel Magnetocapacitance in Fe/Al-oxide/Fe_3O_4”, 62nd Annual Confernece on Magnetism and Magnetic Materials, Pittsburgh, USA (2017-11)

d．一般講演（国内学会）

1） 村田 陽、神原 陽一、海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治、松本 裕介、Chelali Imad : 「$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ナノ/マイクロワイヤの低温合成と輸送現象測定」、平成 29 年度日本材料科学会学術講演会、関東学院大学 KGU 関内メディアセンター (2017-06)

2） 舘林 尭、Bian Weibai、藤岡 正弥、海住 英生、西井 準治、山口 拓哉、小俣 孝久 : 「リン酸塩ガラスのプロトン伝導におけるアルカリ土類及び希土類イオンの影響」、日本化学会北海道支部 2017 年夏季研究発表会、旭川工業高等専門学校 (2017-07)

3） 三澤 貴浩、森 澄人、佐々木 悠馬、小峰 啓史、星野 哲久、芥川 智行、藤岡 正弥、西井 準治、海住 英生 : 「$Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ ナノ接合素子の電気伝導特性」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場 (2017-09)

4） 佐々木 悠馬、三澤 貴浩、森 澄人、小峰 啓史、星野 哲久、芥川 智行、藤岡 正弥、西井 準治、海住 英生 : 「$Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ ナノ接合素子における量子・古典状態間遷移領域に関する研究」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場 (2017-09)

5） 藤岡 正弥、久保 直紀、海住 英生、西井 準治 : 「イ

オン導入における新手法を用いた物質合成」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場 (2017-09)

6） 海住 英生、長浜 太郎、佐々木 駿、島田 敏宏、北上 修、三澤 貴浩、藤岡 正弥、西井 準治、Xiao Gang：「$Fe/AlO_x/Fe_3O_4$における逆トンネル磁気キャパシタンス効果」、第 41 回日本磁気学会学術講演会、九州大学 (2017-09)

7） 久保 直紀、藤岡 正弥、海住 英生、西井 準治：「イオン導入量を制御したAg_xTaS_2の結晶構造及び電気磁気特性の評価」、第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学 (2018-01)

8） 佐々木 悠馬、三澤 貴浩、Msiska Robin、森 澄人、小峰 啓史、星野 哲久、芥川 智行、西井 準治、海住 英生：「磁性薄膜エッジを利用した$Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ナノ接合素子に関する研究」、第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学（2018-01）

9） 舘林 尭、Fang Xinxiong、Bian Weibai、藤岡 正弥、海住 英生、Zhao Gaoyang、西井 準治：「リン酸塩ガラスにおけるプロトン伝導特性と含有プロトン濃度の相関」、化学系学協会北海道支部 2018 年冬季研究発表会、北海道大学（2018-01）

１０）藤岡 正弥、白川 直樹、長尾 雅則、久保 直紀、海住 英生、西井 準治：「プロトン駆動イオン導入法を用いた$Ag_{1/5}TaS_2$の結晶構造と超電導特性」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (2018-03)

１１）藤原 英樹、海住 英生、西井 準治、笹木 敬司：「外部磁場によるランダムレーザー発振モード制御」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (2018-03)

１２）海住 英生、長浜 太郎、佐々木 駿、島田 敏宏、北上 修、三澤 貴浩、西井 準治、Xiao Gang：「$Fe/AlO_x/Fe_3O_4$磁気トンネル接合における逆磁気キャパシタンス効果」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス (2018-03)

e． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 舘林 尭、Bian Weibai、山口 拓哉、藤岡 正弥、海住 英生、小俣 孝久、西井 準治：「リン酸塩ガラスのプロトン伝導におけるアルカリ土類及び希土類イオンの影響」、第 49 回日本セラミックス協会ガラス部会夏季若手セミナー、おたる自然の村・おこばち山荘 (2017-08)

2） Y. Sasaki, T. Misawa, R. Msiska, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, J. Nishii and H. Kaiju : “Study of $Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ nanoscale junction devices utilizing thin-film edges”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan（2017-11）

3） T. Tatebayashi, T. Yamaguchi, M. Fujioka, H. Kaiju, T. Omata and J. Nishii : “Effect of alkaline-earth and rare-earth ions on proton conductivity of phosphate glass”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan（2017-11）

4） M. Fujioka, H. Kaiju and J. Nishii : “Mechanism behind superconductivity in Pt-based superconductors”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan（2017-11）

4.7 シンポジウムの開催

1） 関 剛斎、海住 英生：「第 40 回日本磁気学会サマースクール」、中央大学駿河台記念館（2017 年 6 月 7 日-9 日）

2） M. Nagayama, K. Ijiro, N. Tamaoki, H. Uji-i, H. Kaiju, H. Aonuma, H. Mitomo, H. Teramoto, K. Sato, T. Inose, M. Jusup, Y. Kim, M. Akiyama and K. Sakai : “The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium 極 [kyoku] joint with the 2nd International Symposium of Dynamic Alliance for Open Innovation Bridging Human, Environment and Materials (the Five-Star Alliance) ”, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO (2017 年 11 月 30 日～12 月 1 日)

3） 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治：「平成 29 年度物質・デバイス領域共同研究拠点展開共同研究 B 研究会」、北海道大学電子科学研究所（2017 年 12 月 22 日）

4） 朝倉 清高、白岩 孝行、ゴータム ピタンバル、中島 千絵、長縄 宣博、海住 英生、北村 秀光、高草木 達、大西 富士夫：「第 1 回創成研究機構フォーラム～北大研究所・センターが提案する国際化戦略」、北海道大学（2018 年 3 月 2 日）

4.8 共同研究

a． 所内共同研究

1） 光システム物理研究分野（笹木教授、藤原准教授）との共同研究：「外部磁場によるランダムレーザー発振モード制御に関する研究」

b． 民間等との共同研究

該当なし

c． 委託研究

該当なし

d． 国際共同研究

1） 海住 英生、西井 準治、長浜 太郎、北上 修、小峰 啓史、Xiao Gang ：「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」拠点整備事業共同研究プロジェクト、2017～2018 年度

4.9 予算獲得状況

ａ． 科学研究費補助金

1） 西井 準治、基盤研究 B 一般、希土類元素含有ガラス中のプロトンキャリアの超安定化;中温域燃料電池の新展開、2017～2019 年度

2） 西井 準治、挑戦的研究（萌芽）、コロナ放電を用いた革新的イオン導入法の開拓と新物質合成、2017～2018 年度

3） 海住 英生、基盤研究 B 一般、強磁性ナノ接合を用いた巨大磁気キャパシタンス効果素子の創製、2015～2017 年度

4） 海住 英生、挑戦的研究（萌芽）、ペロブスカイト磁気ナノグラニュラーにおける光誘起型巨大磁気誘電効果の発現、2017～2018 年度

5） 藤岡 正弥、若手研究 B、電界効果型ダイヤモンドアンビルセルの開発による未知領域の物性探索、2015～2017 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

1) 神原 陽一、海住 英生（H24-30 年度 物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究）:「鉄系超電導体の微結晶を利用した輸送臨海電流密度測定」、2012～2018 年度

2) 小峰 啓史、海住 英生（H25-30 年度 物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究）:「積層磁性膜の粒間相互作用が磁化状態に及ぼす影響」、2013～2018 年度

3) 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治、北上 修、芥川 智行、星野 哲久（H29 年度 物質・デバイス領域共同研究拠点 人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス「アライアンス若手研究支援プログラム」）:「ナノ構造スピントロニクスデバイスにおける磁気キャパシタンス効果」、2017 年度

4) 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治、北上 修（北海道大学電子科学研究所「ダイナミック・アライアンス研究支援事業若手研究者共同研究推進事業」）:「強磁性トンネル接合における非平衡トンネル磁気キャパシタンス効果に関する研究」、2017 年度

5) 海住 英生、西井 準治（旭硝子）:「電気的作用によるガラス表層のイオンマイグレーションメカニズムの解明」、2017～2018 年度

6) 藤岡 正弥（ナノテクキャリアアップアライアンス（Nanotech CUPAL）:「超高圧を利用した新規機能性物質の創出」、2015～2017 年度

7) 藤岡 正弥（池谷科学技術振興財団）:「高電界イオン導入法を用いたプロトン伝導体の探索的研究」、2017 年度

4.10 受賞

1) S. Demura, K. Deguchi, Y. Mizuguchi, K. Sato, R. Honjyo, A. Yamashita, T. Yamaki, H. Hara, T. Watanabe, S. J. Denholme, M. Fujioka, H. Okazaki, T. Ozaki, O. Miura, T. Yamaguchi, H. Takeya and Y. Takano：Highly Cited Articles in 2016 “Coexistence of Bulk Superconductivity and Magnetism in $CeO_{1-x}FxBiS_2$”（Journal of Physical Society of Japan）2017 年 5 月

2) 佐々木 悠馬、三澤 貴浩、Msiska Robin、森 澄人、小峰 啓史、星野 哲久、芥川 智行、藤岡 正弥、西井 準治、海住 英生：第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会発表奨励賞 「薄膜エッジを利用した $Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ ナノ接合の作製とその構造・電気伝導特性」（応用物理学会）2018 年 1 月

4.11 社会教育活動

ａ．公的機関の委員

1） 海住 英生 ： 文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター専門調査員（2014 年 2 月 24 日～現在）

ｂ．国内外の学会の役職

1） 西井 準治 ： 応用物理学会ナノインプリント研究会運営委員会委員（2014年4月1日～現在）

2） 西井 準治 ： 日本セラミックス協会東北北海道支部役員（2014年4月1日～現在）

3） 海住 英生 ： 電気学会「高周波磁性材料の実用化のための技術動向調査専門委員会」委員（2017年4月1日～現在）

4） 海住 英生：日本材料科学会マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会プログラム編集委員（2017年4月1日～現在）

5） 海住 英生 ： 日本磁気学会企画委員（2017年5月8日～現在）

6） 海住 英生 ： 第41回日本磁気学会学術講演会実行委員（2017年6月1日～9月30日）

7） 海住 英生 ： 第40回日本磁気学会サマースクールサブチーフオーガナイザ-&座長（2017年6月7日～6月9日）

8） 海住 英生 ： 日本化学会北海道支部2017年夏季研究会座長、優秀講演賞審査委員（2017年7月22日）

9） 海住 英生 ： 第53回応用物理学会北海道支部第14回日本光学会北海道支部合同学術講演会A-Ⅲ座長（2018年1月6日）

１０）藤岡 正弥：第53回応用物理学会北海道支部第14回日本光学会北海道支部合同学術講演会B-Ⅱ座長（2018年1月6日）

１１）海住 英生 ： 日本物理学会第73回年次大会 領域3（23pK304）座長（2018年3月23日）

ｃ．兼任・兼業

1） 西井 準治 ： 住友財団基礎科学研究選考委員（2015 年 4 月 1 日～現在）

ｄ．外国人研究者の招聘

該当なし

ｅ．北大での担当授業科目

1） 理学部、ナノ物性化学、西井 準治、2017 年 4 月 1 日

～7 月 31 日

2） 全学共通、環境と人間：ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命「ナノテクが切り拓くスピントロニクスとスピン流」、海住 英生、2017 年 5 月 19 日

3） 総合化学院、物質化学（ナノフォトニクス材料論）、西井 準治、2017 年 6 月 5 日～6 月 25 日

4） 総合化学院、物質化学（ナノフォトニクス材料論）、海住 英生、2017 年 7 月 1 日～7 月 31 日

5） 全学・大学院共通、ナノテクノロジー・ナノサイエンスと光科学「スピントロニクスが切り拓く次世代革新的デバイス」、海住 英生、2017 年 11 月 15 日～11 月 17 日

6） 全学共通、自然科学実験、藤岡 正弥、2017 年 6 月 14 日～7 月 19 日

ｆ．北大以外での非常勤講師

該当なし

ｇ． 新聞・テレビ等の報道

1） 2017 年 6 月 2 日　日本経済新聞「新たな物理現象・逆磁気キャパシタンス（iTMC）効果を発見」

2） 2017 年 6 月 2 日　ScienceDaily “Flipping the script on magnetocapacitance”

3） 2017 年 6 月 3 日　AZO MATERIALS “Scientists Induce Magnetocapacitance Opposite to Normal Capacitance”

4） 2017 年 6 月 6 日　EE Times Japan「北大ら、逆磁気キャパシタンス効果を発見」

5） 2017 年 6 月 8 日　IEEE Spectrum “Magne-to-capacitance Turned Upside Down Offers a New Tool in Spintronics”

6） 2017 年 6 月 9 日　Nanotech Japan「新たな物理現象、逆磁気キャパシタンス（iTMC）効果を発見～磁石の向きにより電気の溜まり方を自在にコントロール」

7） 2017 年 11 月 21 日 ScienceDaily “‘Ion billiards’ cue novel material synthesis method”

8） 2017 年 11 月 22 日 Excite ニュース「“イオンのビリヤード”で新材料の開発へ―北大、新たな物質合成技術を確立」

9） 2017 年 12 月 26 日 Chem-Station 「イオンのビリヤードで新しい物質を開発する」

ｈ． ポスドク・客員研究員など

該当なし

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：１名

1） 久保 直紀 ： 固体電解質を利用したインターカレーションの新規手法開発

博士学位：0名

ナノアセンブリ材料研究分野

教　授　中村貴義（東大院、理博、1997.4～）
准教授　野呂真一郎（京大院、工博、2004.7～2017.11）
助　教　高橋仁徳（東北大院、博(工)、2017.8～）
院　生　鄭鑫（DC1）、白川祐基（MC1）、陳姣（MC1）、
　　呉佳冰（MC1）
特別研究学生　藤林将
研究生　張雲雅

1．研究目標

分子が発現する機能は多様であり、光・電子機能性、生理活性などに基づき、分子はエレクトロニクス・材料・医薬など広範な分野で応用に供されている。複数の分子が集合すると、それぞれの分子に起因する機能だけでなく、分子間の相互作用により、単一の分子では実現できない新たな機能が発現する。ナノアセンブリ材料研究分野では、ナノメートル領域で複数の分子が集合した“ナノアセンブリ”に着目し研究を進めている。分子の自己集積化過程を設計・制御することで新奇なナノアセンブリ構造を実現し、さらに集合体における協同現象を積極的に利用することで、単一分子では達成できない機能の発現を目指す。ナノアセンブリ材料の構造と機能の相関を詳細に検討し、次代を担う新奇な材料を開拓することが、我々の研究目標である。

2．研究成果

(a) 有機カチオン包接による一次元超分子カラム構造

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機能開拓を行っている。

これまでに、Cs_2([18]crown-6)$_3$[Ni(dmit)$_2$]$_2$や(Ani^+)([18]crown-6)[Ni(dmit)$_2$]、(m-$FAni^+$)([18]crown-6)[Ni(dmit)$_2$]結晶（$dmit^{2-}$ = 1,3-dithiole-2-thioxo-4,5-dithiolate, Ani^+ = anilinium$^+$, m-$FAni^+$ = m-fluoroanilinium$^+$）における、[18]crown-6分子の回転運動や、Ani^+あるいはm-$FAni^+$カチオンの180° フリップ－フロップ運動に関する報告を行った。中でも、(m-$FAni^+$)(dibenzo[18]crown-6)[Ni(dmit)$_2$]結晶では、m-$Fani^+$カチオンのフリップ－フロップ運動が協調的に起こることで、分子の分極反転に基づく強誘電体となることを見いだした。超分子結晶中におけるカチオンの回転空間、回転に伴うエネルギー障壁・障壁間の回転ダイナミクスなどを合理的に設計・制御可能になれば、新たな有機強誘電性材料の開発・構築手法を確立することができる。

さらに分子回転による強誘電性とアニオンの分子・配列構造に由来する電気伝導性・磁性を効果的に組み合わせることで、交差物性を示す新奇系ならびに多重機能性材料の開発が期待できる。

分子のダイナミクスを利用したカテナンやロタキサンなどの分子機械に関する研究が基礎・応用の観点から広く展開されている。例えば、24員環のクラウンエーテルを用いたロタキサンでは、クラウンエーテルの環の内部に、π共役系芳香族化合物が包接された分子シャトル構造を形成する。そこで、これまでに当研究分野で数多くの検討を行ってきた15・18員環のクラウンエーテルに比べて環サイズの大きい、24員環のクラウンエーテルを用いることで、有機カチオンの包接による新たな高次構造の構築を試みた。また、クラウンエーテルへの分子修飾によって、隣接クラウンエーテル間でのπ･･･π，C-H･･･π相互作用を誘起し、固相での分子配列の制御も視野に入れることができる。本年度は、dibenzo[24]crown-8と複素環カチオンであるpyridazinium（$pdaz^+$）および$pyrazinium^+$（$praz^+$）について検討を行った。

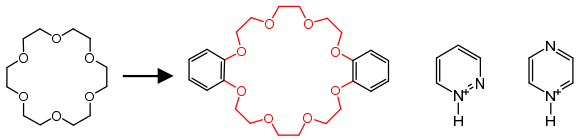


図1　[18]crown-6、dibenzo[24]crown-8、$pyridazinium^+$（$pdaz^+$），$pyrazinium^+$（$praz^+$）の分子構造。

アセトンからの蒸発法により、カチオン：クラウンエーテル：[Ni(dmit)$_2$] = 2: 3: 2の組成を持つ($pdaz^+$)$_2$(dibenzo[24]crown-8)$_3$[Ni(dmit)$_2$]$_2$ (**1**)，($praz^+$)$_2$(dibenzo[24]crown-8)$_3$[Ni(dmit)$_2$]$_2$•H_2O (**2**)を得た。結晶**2**は、組成あたり1分子のH_2O分子を含んでいた。図2に結晶**1**のパッキング構造を示した。$pdaz^+$がクラウンエーテルに包接され超分子カチオンを形成するとともに、超分子カチオンと[Ni(dmit)$_2$]が分離集積し、a軸に沿って配列していた。また、クラウンエーテルは一次元カラム構造を形成していた。

図3に超分子カチオンの配列を示した。クラウンエーテルのフェニレン環に着目すると、最近接C原子間距離が3.58(1) Åであったことから、クラウンエーテル間に弱いπ･･･π相互作用が働き、一次元カラム構造を形成したと考えられる。$pdaz^+$のN原子は隣接したクラウンエーテルのO原子と2.910, 2.971 Åの距離で近接していることから、N-H･･･O水素結合を形成していた。一方、$pdaz^+$-$pdaz^+$間に有意な分子間相互作用は確認できなかった（図3a）。$pdaz^+$の温度因子に着目すると、水素結合位置から離れるほど温度因子が大きいことから、水素結合を軸とする振り子型の運動が起こっていることが示唆される。

結晶**2**においても結晶**1**と同様に，クラウンエーテル間でπ･･･π相互作用が働き、一次元カラムが形成していた。カラム内には$praz^+$とともにH_2Oが包接されていた。水分子と$praz^+$のN-H基のH原子に2サイトでのディスオーダーが

見られた。カチオン―カチオン間、カチオン―H_2O間には水素結合が存在し、一次元の水素結合鎖が形成していた。一次元鎖を形成するプロトンが隣接分子間で協奏的に移動している可能性が示唆される。

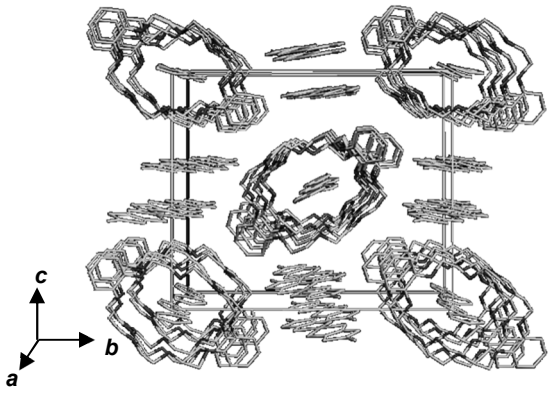


図2 結晶1の*a* 軸投影図。超分子カチオンと$[Ni(dmit)_2]^-$ の分離積層し、クラウンエーテルは一次元のチャネル構造を形成。

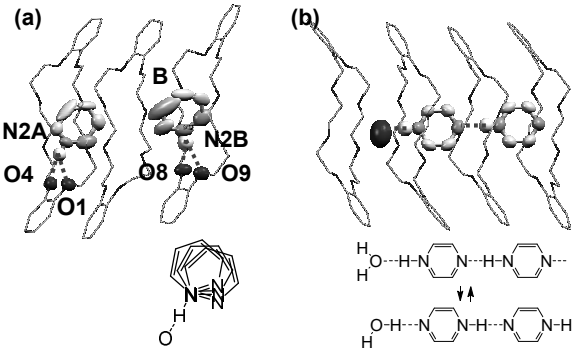


図3 超分子カチオンの配列 (a) 結晶1, (b) 2。両結晶とも、クラウンエーテル環内に有機カチオンが包摂されている。結晶1ではpdaz$^+$ とクラウンエーテル間でC-H···O水素結合を形成していた。結晶2では、-[-praz$^+$-praz$^+$-H_2O-]- をユニットとする一次元水素結合鎖が形成した。結晶1においては水素結合を軸とする振り子型のカチオン分子運動が、結晶2では-[praz$^+$-praz$^+$-H_2O]-鎖内のプロトン運動が起こっている可能性がある。

(b) 超分子構造に基づく一次元水素結合鎖の形成と多重機能性開拓

結晶 **2** では、超分子カチオンの一次元カラム構造内において、水素結合鎖が形成していた。そこで、4,4'-bipyridinium (bpy^+) をカチオンとする結晶 (bpy^+)(dibenzo[24]crown-8)$[Ni(dmit)_2]$ (**3**) を作製し、超分子構造内における水素結合鎖の形成とそれに基づく機能開拓を目指した。

図 4 に 298 K における結晶 **3** の構造を示す。結晶 **1**, **2** とは異なり、クラウンエーテルと bpy^+は交互にスタックし、一次元カラム構造を形成していた。bpy^+ の N 原子間距離が 2.644 Å だったことから、比較的強い N-H···N 水素結合を形成していると考えられる。また、bpy+ の片方のピリジン環とクラウンエーテルのフェニレン環の間にはπ···π相互作用が見られた。

結晶 **3** の示差走査熱量測定を行ったところ、235 K 付近で 1 次の相転移を示すことが明らかとなった。93 K で測定した結晶構造においては、298 K では直交していた bpy の二面角は約 60 度となり、bpy の一次元鎖は全体としてねじれた構造をとっていた（図 5)。

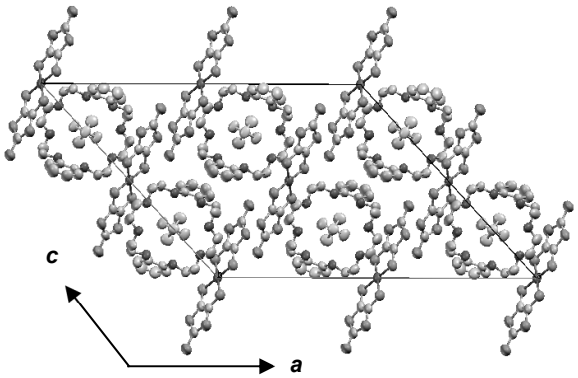


図4 298 Kにおける結晶3のパッキング（*b* 軸投影図)。

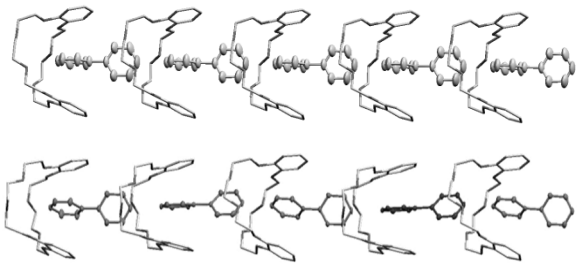


図5 相転移前後における超分子カラム構造の変化。(上)298 K, (下) 93 K。

2 端子法により結晶 **3** の直流伝導度を測定したところ、室温から半導体的な挙動を示し、活性化エネルギーは 0.21 eV だった。DSC で熱異常が観測された 235 K 以下で直流伝導度の測定値が大きくばらついていた。装置の測定限界のため分かりにくいが、この温度以下で絶縁化が起こっていると考えられる。DSC の熱異常は主に bpy のコンホメーション変化に起因すると考えられ、相転移に伴う$[Ni(dmit)_2]$の配列変化は大きくないが、$[Ni(dmit)_2]$の配列のわずかな変化が、伝導度に大きな変化を及ぼしているものと考えられる（図 6a)。結晶 **3** の磁化率の測定を行ったところ、低温で弱い強磁性的な相互作用が見られた。キュリーワイスの式から、キュリー定数は 0.386 cm^3 K mol^{-1}、ワイス温度は +0.57 K と見積もられた。1.8K において測定した磁化とブリルアン関数を比較すると、測定値は S = 1/2 よりわずかに大きな値を示し、強磁性的な相互作用と一致していた(図 6b)。現在、プロトン移動に伴う誘電物性について検討している。

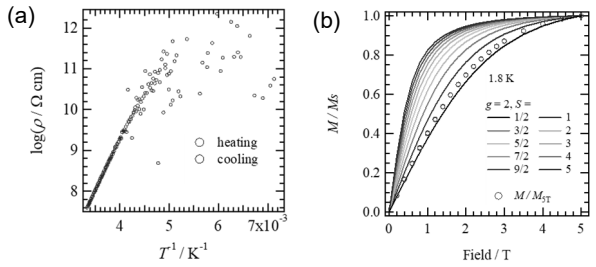


図6　(a) 2端子法による結晶3の直流電気伝導度の温度依存性。(b) 1.8 K における磁化の磁場依存性と、ブリルアン関数（g = 2, S = 1/2 – 5）との比較。

(c)　金属錯体を用いた新奇多孔性材料の開発

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金属錯体は、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金属錯体はここ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、金属錯体の構築部品として軽金属イオンに着目し、軽金属イオンを骨格中に導入するための新規配位子の設計を行った。

これまで多孔性金属錯体の金属イオンとして重金属イオンが頻繁に用いられてきた。一方で、軽金属イオンは重金属イオンと比べてユビキタスかつ低毒であるため、多孔性金属錯体の実用・応用化を進める上で必須の構築部品といえる。我々はこれまで硬い酸である軽金属イオンに結合可能な新規配位部位としてピリジン-*N*-オキシドに着目し、ピリジン-*N*-オキシド部位を有する有機架橋配位子と軽金属イオンを反応させることにより多孔性軽金属錯体が得られることを報告してきた。今回、新たな配位部位として中性のメチルスルホニル基に着目した。この配位部位もピリジン-*N*-オキシドと同様に電荷分極したS-Oサイトを有することから0を介した軽金属への配位が期待できる。このメチルスルホニル基とカルボキシル基を有する配位子4-(methylsulfonyl)benzoic acid (H-msbza, 図7a) と軽金属イオンを反応させたところ、3種類の新規金属錯体結晶、$[Mg_2Na_2(msbza)_6(H_2O)_3)]$ (**4**), $[KH(msbza)_2]$ (**5**), $[Na(msbza)]$ (**6**)、を得ることができた。単結晶X線構造解析から、結晶**4**は三次元(図7b)、結晶**5**及び**6**は二次元構造を形成していることが明らかとなった。我々の予想通り、msbza配位子はカルボキシレート基での配位に加えて、負電荷が局在したメチルスルホニル基の酸素原子によるNa,Kイオンへの配位(Na-O = 2.283(4)-2.300(3) Å, K-O = 2.759(2) Å)が観測され、msbza配位子は軽金属イオンに対する有機架橋配位子として機能することが実証された。興味深いことに、**4**は単結晶状態を保持しながら配位水を可逆的に出し入れすることができ、また脱水状態においては単結晶X線構造解析ができなくなるほど結晶性が低下することが分かった(図7c)。このような単結晶性を保持しながら結晶性が変化する物質はこれまで報告例がほとんどなく、配位構造自由度の高い軽金属錯体特有の現象であると言える。

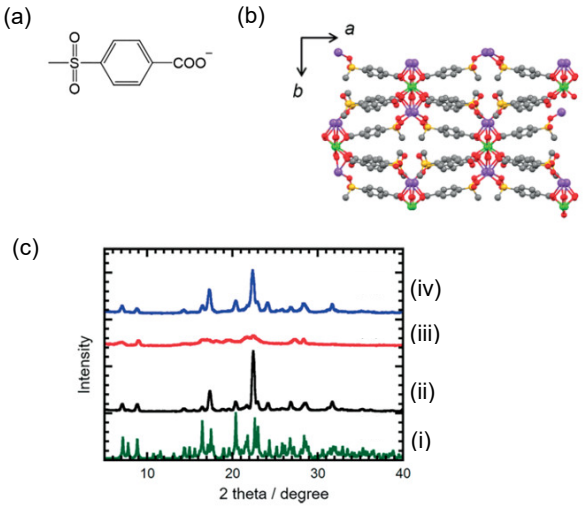


図7. (a) msbza配位子の分子構造。(b) 結晶4の三次元構造。(c) 粉末X線回折パターン（i:単結晶構造データから計算したパターン、ii:298Kにおける4のパターン、iii:200度真空下で脱水後のパターン、iv:水を再吸着した後のパターン）

4．資料

学術論文（査読あり）

1） Y. You, Y. Tang, P. Li, H. Zhang, W. Zhang, Y. Zhang, H. Ye , T. Nakamura and R. Xiong: “Quinuclidinium salt ferroelectric thin-film with duodecuple-rotational polarization-directions”, *Nature Communications*, **8**, 14934 (2017)

2） F. Cheng, Q. Li, J. Duan, N. Hosono, S. Noro, R. Krishna, Hongliang Lyu, S. Kusaka, W. Jin and S. Kitagawa: “Fine-tuning optimal porous coordination polymers by functional alkyl groups for CH_4 purification”, *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 17878-17880 (2017)

3） J. Duan, M. Higuchi, J. Zheng, S. Noro, I. Chang, H. Kim, M. Simon, S. Kusaka, E. Sivaniah, R. Matsuda, S. Sakaki and S. Kitagawa: “Density Gradation of Open Metal Sites in the Mesospace of Porous Coordination Polymers”, *Journal of American Chemical Society*, **139**, 11576-11583 (2017)

4） A. Schneemann, R. Rudolf, S. Henke, Y. Takahashi, H. Banh, I. Hante, C. Schneider, S. Noro and R. Fischer: “Linker Functionalization Triggers an Alternative 3D-Topology for Zn-Isophthalate-4,4′-Bipyridine Frameworks”, *Dalton Transactions*, **46**, 8198-8203 (2017)

5） R. Ochi, S. Noro, Y. Hijikata, K. Kubo and T. Nakamura: “Structural Diversification of Light-Metal Coordination

Polymers Using 4-(Methylsulfonyl)benzoate with a Charge-Polarized Neutral Methylsulfonyl Coordination Moiety", *European Journal of Inorganic Chemistry*, **34**, 4013-4019 (2017)

6） T. Takeda, Y. Suzuki, J. Kawamata, S. Noro, T. Nakamura and T. Akutagawa: "The emergent intramolecular hydrogen bonding effect on the electronic structures of organic electron acceptors", *Physical Chemistry Chemical Physics*, **19**, 23905-23909 (2017)

7） S. Noro and T. Nakamura: "Fluorine-functionalized metal-organic frameworks and porous coordination polymers", *Npg Asia Materials*, **9**, e433 (2017)

8） R. Tsunashima, I. Nakamura, R. Oue, S. Koga, H. Oki, S. Noro, T. Nakamura and T. Akutagawa: "Inter-cluster distance dependence of electrical properties in single crystals of a mixed-valence polyoxometalate", *Dalton Transactions*, **46**, 12619-12624 (2017)

9） T. Takeda, S. Noro, T. Nakamura, Y. Suzuki, J. Kawamata and T. Akutagawa: "Selective MeCN/EtCN sorption and preferential inclusion of substituted benzenes in a cage structure with arylsulfonamide-armed anthraquinones", CrystEngComm, 20: 17-24 (2017)

１０）Y. Tang, P. Li, P. Shi, W. Zhang, Z. Wang, Y. You, H. Ye, T. Nakamura and R. Xiong: "Visualization of Room-Temperature Ferroelectricity and Polarization Rotation in the Thin Film of Quinuclidinium Perrhenate", *Physical Review Letters*, **20**, 119 (2017)

１１）H. Nishiyama, T. Takeda, N. Hishino, K. Takahashi, S. Noro, T. Nakamura and T. Akutagawa: "Host-Guest Molecular Crystals of Diamino-4,4-bithiazole and Dynamic Molecular Motions via Guest Sorption", *Crystal Growth & Design*, **18**, 286-296 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1） T. Nakamura*：“Crystal design for functional metal complexes”, The 6th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC6) , Melbourne, Australia (2017-07)

2） T. Nakamura*：“Supramolecular-Cation Approach for Constructing Crystalline Molecular Electronic Materials”, 9th International Symposium on Nano & Supramolecular Chemistry (ISNSC9), Naples, Italy (2017-09)

3） T. Nakamura*：“Supramolecular-Cation Approach for Controlling Molecular Assemblies in Crystalline Electronic Materials”, 13th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIII), 南京, China (2017-10)

ｂ．招待講演（国内学会）

該当なし

ｃ．一般講演（国際学会）

1） K. Takahashi*, Y. Miyazaki, M. Nakano, T. Akutagawa and T. Nakamura：“Solid-State Phase Transitions and Dielectric Responses of Hydrogen-Bonded Copper(II) Complexes ”, The 6th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC6) , Melbourne, Australia (2017-07)

2） K. Takahashi*, Y. Ohshima, K. Kubo, S. Noro, S. Takeda, T. Akutagawa and T. Nakamura：“Correlative Molecular Motion and Dielectric Response of Solid-State Supramolecular Rotator”, The 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017), 宮城県蔵王町, Japan (2017-09)

3） J. Chen*, D. Nishide, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura：“Structures and Magnetic Properties of Sandwich-Type Lanthanoid-Containing Polyoxometalates”, The 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017), 宮城県蔵王町, Japan (2017-09)

4） M. Fujibayashi*, K. Takahashi, S. Noro, T. Nakamura and R. Tsunashima：“Basket Shaped Organic-Inorganic Hybrid Polyoxometalates Substituted with Alkyl Group”, The 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017), 宮城県蔵王町, Japan (2017-09)

5） Y. Shirakawa*, K. Takahashi, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura：“Crystal Structure and Physical Properties of Supramolecular Asssembly with In-Plane Rotator”, The 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017), 宮城県蔵王町, Japan (2017-09)

6） S. Noro*, X. Zheng and T. Nakamura：“CO_2 gas separation using PCPs/MOFs with fluorinated anions”, 1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry, 神戸, Japan (2017-10)

7） K. Takahashi* and T. Nakamura：“Dynamics of Solid-State Supramolecular Rotator (3-

Fluoroadamantylammonium)(Dibenzo[18]Crown-6)　”, 13th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIII), 南京, China (2017-10)

d. 一般講演（国内学会）

1） K. Takahashi*, Y. Miyazaki, S. Noro, M. Nakano, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Solid-State Phase Transition Behavior and Molecular Dynamics of Hydrogen Bonded One-Dimensional Copper Complexes with Fluorinated Benzoate Ligands”, 錯体化学会 第67回討論会, 札幌, Japan (2017-09)

2） 白川 祐基*、高橋 仁徳、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義 : 「*N*-ヘテロ環カチオン-クラウンエーテル超分子構造を含む[Ni(dmit)$_2$]錯体結晶の構造と物性」、錯体化学会第67回討論会、札幌、Japan (2017-09)

3） J. Chen*, D. Nishide, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro, R. Tsunashima and T. Nakamura : “Structures and Magnetic Properties of Tri-Nuclear Lanthanoid Complexes Sandwiched by Lacunary Keggin Polyoxometalates”, 錯体化学会第 67 回討論会, 札幌, Japan (2017-09)

4） X. Zheng*, S. Noro, K. Takahashi and T. Nakamura : “Solid-solid, Solid-Liquid and Solid-Glass Phase Transitions of The Coordination Polymer Containing Flexible Building Blocks”, 錯体化学会第67回討論会, 札幌, Japan (2017-09)

5） 鈴木 和重*、野呂 真一郎、高橋 仁徳、中村 貴義 : 「Paddle-Wheel 型二核銅錯体と屈曲配位型架橋配位子ピリミジンからなる一次元ジグザグ鎖状錯体の合成と構造」、錯体化学会第 67 回討論会、札幌、Japan (2017-09)

6） 赤星 周平*、丸田 悟朗、景山 義之、高橋 幸裕、野呂 真一郎、武田 定 : 「誘電性スイッチングを目指した [Cu$_2$(4-X-benzoate)$_4$(L)]$_n$ (X=H,Me,F,Cl,Br,I/L=Pyrazine, Diazabicyclooctane) の構造相転移を伴う極性及び無極性気体分子吸蔵」、第11回分子科学討論会、仙台、Japan (2017-09)

7） 越智 里香*、野呂 真一郎、神谷 裕一、土方 優、久保 和也、中村 貴義 : 「水/2-プロパノール混合蒸気分離特性を示す柔軟な二次元層状マグネシウム配位高分子」、第66回高分子討論会、松山、Japan (2017-09)

8） K. Takahashi*, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Gas Sorption and Dielectric Properties of One-Dimensional Copper Coordination Polymers with Heteroaromatic Ligands”, 日本化学会第98春季年会, 船橋, Japan (2018-03)

9） 藤林 将*、高橋 仁徳、野呂 真一郎、中村 貴義、綱島 亮 : 「アルキル鎖を共有結合修飾したポリオキソメタレートの結晶溶媒脱離過程における分子形状変化」、日本化学会第98春季年会、船橋、Japan (2018-03)

10）白川 祐基*、高橋 仁徳、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義 : 「複素環カチオンと dibenzo[24]crown-8 からなる超分子構造を含む[Ni(dmit)$_2$]塩の構造」、日本化学会第98春季年会、船橋、Japan (2018-03)

11）J. Chen*, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura : “Single Crystals of Sandwich-type Polyoxometalates Containing Carbonate-Bridged Tb Triangle with $(CH_3)_nH_{4-n}N^+$ (n = 1-4) Cations”, 日本化学会第98春季年会, 船橋, Japan (2018-03)

12）越智 里香*、野呂 真一郎、久保 和也、中村 貴義 : 「多孔性配位高分子によるグルコースからフルクトースへの異性化促進」、日本化学会第98春季年会、船橋、Japan (2018-03)

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） T. Nakamura* : “Dynamic Supramolecular Structures in the Crystalline State”, Core-to-Core/Leverhulme Trust Joint Workshop, Montreal 2017, モントリオール, Canada (2017-05)

2） K. Takahashi*, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Controls in Gas Adsorption Properties of One Dimensional Copper Coordination Polymers with Halogen-Substituted Benzoate Ligands”, Interdisciplinary Symposium for Up-and-coming Materials Scientists (ISUMS), 豊中, Japan (2017-06)

3） K. Takahashi*, Y. Miyazaki, S. Noro, M. Nakano, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Phase transition behavior of hydrogen-bonded copper complexes with fluorinated benzoates”, International Symposium of Structural Thermodynamics for Young Thermodynamicists: ISST-YT, 豊中, Japan (2017-06)

4） 高橋 仁徳*、大島 雄、久保 和也、野呂 真一郎、武田 定、芥川 智行、中村 貴義 : 「複数の回転障壁を持つ固相分子ローターの開発 」、平成28年度アライアンス成果報告会、東京、Japan (2017-06)

5） 赤星 周平*、景山 義之、丸田 悟朗、高橋 幸裕、野呂 真一郎、武田 定 : 「[Cu$_2$(4-X-benzoate)$_4$(L)]$_n$ (X=H,Me,F,Cl,Br,I/L=pyrazine, diazabicyclooctane)の構造相転移を伴う極性・無極性気体分子の吸蔵」、日本化学会北海道支部 2017 年夏季研究発表会、旭川、Japan (2017-07)

6） 高橋 仁徳*、大島 雄、久保 和也、野呂 真一郎、武田 定、芥川 智行、中村 貴義 : 「3-fluoroadamantylammonium の結晶内分子回転の制御」、低次元系光機能材料研究会 第 6 回サマーセミナー2017 、宮城県気仙沼市、Japan (2017-09)

7） S. Noro*：“Light Metal Coordination Polymers Using Organic Ligands with a Charge-Polarized Neutral Coordination Moiety”, The 2nd Japan-US Bilateral Meeting on Coordination Chemistry, 札幌, Japan (2017-09)

8） 白川 祐基*、高橋 仁徳、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義：「一次元鎖カラム構造を有する新規超分子錯体の合成と構造」、第６回錯体化学若手の会北海道支部勉強会、札幌、Japan (2017-11)

9） 陳 姣*、西出 大輔、藤林 将、高橋 仁徳、久保 和也、野呂 真一郎、中村 貴義：「Structures of Carbonate-Bridged Lanthanoid Triangles Containing Sandwich-type Polyoxometalates」、第６回錯体化学若手の会北海道支部勉強会、札幌、Japan (2017-11)

１０） Y. Shirakawa*, K. Takahashi, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura：“One-dimensional columunar structure of dibenzo[24]crown-8 including pyridazinium or pyrazinium cations in [Ni(dmit)$_2$] salts”, JSPS Core-to-Core/Leverhulme Trust 7th Joint Workshop, Nagoya, 2017,″Organic Electronics of Highly-Correkated Molecular Systems″, 名古屋, Japan (2017-11)

１１）J. Chen*, D. Nishide, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura：“Sandwich-type polyoxometalates containing carbonate-bridged Lanthanoid triangles coordinated by lacunary Keggin polyoxometalates”, JSPS Core-to-Core/Leverhulme Trust 7th Joint Workshop, Nagoya, 2017,″Organic Electronics of Highly-Correkated Molecular Systems″, 名古屋, Japan (2017-11)

１２）K. Kubo*, Y. Kim, A. Morita, T. Kadoya, S. Noro, T. Nakamura and J. Yamada：“Development of new electrochromic materials based on unsymmetrical metal-dithiolene complexes”, JSPS Core-to-Core/Leverhulme Trust 7th Joint Workshop, Nagoya, 2017,″Organic Electronics of Highly-Correkated Molecular Systems″, 名古屋, Japan (2017-11)

１３）X. Zheng*, S. Noro, K. Takahashi and T. Nakamura：“Multiple phase transitions in coordination polymer containing flexible building units”, JSPS Core-to-Core/Leverhulme Trust 7th Joint Workshop, Nagoya, 2017,″Organic Electronics of Highly-Correkated Molecular Systems″, 名古屋, Japan (2017-11)

１４）K. Takahashi*, Y. Ohshima, K. Kubo, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura：“Supramolecular cation structure and molecular flipping of (3-fluoroadamantaneammonium)(dibenzo[18]crown-6) in [Ni(dmit)$_2$] salt”, JSPS Core-to-Core/Leverhulme Trust 7th Joint Workshop, Nagoya, 2017,″Organic Electronics of Highly-Correkated Molecular Systems″, 名古屋, Japan (2017-11)

１５）J. Chen*, D. Nishide, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura：“Structures of Carbonate-Bridged Lanthanoid Triangles Sandwiched by Lacunary Keggin Polyoxometalates”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium 極, 札幌, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

１６）Y. Shirakawa*, K. Takahashi, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura：“Supramolecular cations of (diazinium)(dibenzo[24]crown-8) in [Ni(dmit)$_2$] salt”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium 極, 札幌, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

１７）K. Takahashi*, Y. Ohshima, K. Kubo, S. Noro, S. Takeda, T. Akutagawa and T. Nakamura：“Multiple Rotational Dynamics in Supramolecular Crystal of (3-Fluoroadamantylammonium)(Dibenzo[18]Crown-6)[Ni(dmit)$_2$]”, The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium 極, 札幌, Japan (2017-11 ～ 2017-12)

１８）白川 祐基、高橋 仁徳*、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義：「複素環カチオン-ジベンゾ[24]クラウン-8 超分子構造を含む[Ni(dmit)$_2$]塩の構造」、化学系学協会北海道支部 2018 年冬季研究発表会 、札幌、Japan (2018-01)

１９）J. Chen*, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura：“Structures of Carbonate-Bridged Lanthanoid Triangles Sandwiched by Lacunary Keggin Polyoxometalates”, 化学系学協会北海道支部 2018 年冬季研究発表会 , 札幌, Japan (2018-01)

２０）藤林 将*、高橋 仁徳、野呂 真一郎、中村 貴義、綱島 亮：「18 核ポリオキソメタレートへのアルキルホスホン酸修飾に伴う骨格構造のひずみ」、化学系学協会北海道支部 2018 年冬季研究発表会 、札幌、Japan (2018-01)

4.7 シンポジウムの開催

１） 「ポリオキソメタレート研究の基礎と最前線」：人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス物質・デバイス領域共同研究拠点、山口大学理学部共催、山口大学、2017 年 09 月 20 日

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

１） 高橋 仁徳、芥川 智行、星野 哲久（東北大多元研）：「若手研究者共同研究スタートアップ事業 」、2017年度、200千円、混合気体フロー下において特定の気体吸脱着を選択的に電気検出可能な配位高分子素子の開発を行う。

ｂ．民間等との共同研究

該当なし

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

1） 野呂 真一郎、張 浩徹、武田 定(北海道大学創成研究機構 特定研究部門(JPN))：「金属錯体によるガス分子分離・貯蔵システムの開発」、2012～2017年度、50000千円、来たるべき石油資源枯渇時代に備えて、新規エネルギー・化成品原料の製造とその有効利用技術の開発が急務となっている。本研究では、石油資源にかわるエネルギー・化成品原料として水素ガス・シェールガスに着目し、それらを高効率に利用するための分離・貯蔵プロセス開発を行う。分離・貯蔵材料として、極めて高い構造設計性と多様性を兼ね備えた金属錯体を用いる。また材料開発と平行して、実用化を念頭においた成形加工技術開発も行う。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 中村 貴義、基盤研究 A、分子回転を利用したリラクサーの構築、2014～2017 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 野呂真一郎、戦略的創造研究推進事業 ACCEL（科学技術振興機構)、「PCP ナノ空間による分子制御科学と応用展開」、2014 年度～2017 年度

4.10 受賞

1） 藤林 将: 日本化学会北海道支部優秀講演賞、2018 年 02 月

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

該当なし

b．国内外の学会の役職

該当なし

c．兼任・兼業

1）野呂真一郎：ルール大学ボーフム（2017.09.22）

d.外国人研究者の招聘

1）Dr. Deliang Long、United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland (the)（2017.09.13～2017.09.24）

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1）環境科学院、光電子科学特論Ⅱ、中村貴義、野呂真一郎、2017年04月01日～2017年09月30日

2）環境科学院、環境物質科学実習II、中村貴義、野呂真一郎、2017年04月01日～2018年03月31日

3）環境科学院、環境物質科学論文購読I、中村貴義、野呂真一郎2017年04月01日～2018年03月31日

4）環境科学院、環境物質科学論文購読II、中村貴義、野呂真一郎、2017年04月01日～2018年03月31日

5）環境科学院、環境物質科学特別研究I、中村貴義、野呂真一郎、2017年04月01日～2018年03月31日

6）環境科学院、環境物質科学特別研究II、中村貴義、野呂真一郎、2017年04月01日～2018年03月31日

7）環境科学院、環境物質科学基礎論I、野呂真一郎、2017年04月01日～2017年06月09日

8）環境科学院、環境物質科学基礎論III、中村貴義、2017年10月01日～2018年03月31日

9）環境科学院、分子環境学特論III、中村貴義、高橋仁徳、2017年10月01日～2018年03月31日

１０）全学共通、環境と人間「ナノって何なの？最先端 光・ナノテク概論」、中村貴義、2017年04月21日

１１）大学院共通、ナノテクノロジー・ナノサイエンスと光科学、野呂真一郎、2017年11月15日～2017年11月17日

f． 北大以外での非常勤講師

該当なし

g． 新聞・テレビ等の報道

該当なし

h． ポスドク・客員研究員など

1） 高橋仁徳（博士研究員 2017.04～2017.07）

2） 藤林将（特別研究員 2017.4～2018.3）

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：1名

1） 鄭 鑫：修士：Structures and physical properties of co-ordination polymers containing similar components with ionic liquids

博士学位：0名

附属社会創造数学研究センター

研究目的

諸科学の「合意言語」である数学は、その特質から分野を問わない応用が可能であるために、理論的にはあらゆる学問分野を横断する機能を持っています。本センターでは、数学・数理科学の持つ社会の難問を解決し社会を本質的に変革する潜在力を生かして、大学や企業で活躍する研究者と連携して、数学・数理科学による課題解決研究に取り組みます。具体的には、客観的に抽出される知見と仮説先行型の理論科学を融合させ、新しい研究手法の枠組みの中で実験事実に即した概念の創出を目指します。

人間数理研究分野

教　授　長山雅晴（東大院、博士（数理科学）、2012．4～）
准教授 青沼仁志（北大院、博士（理学）、2015．4～）
助　教　秋山正和（広大院、博士（理学）、2012．7～）
助　教 西野浩史（岡山大院、博士（理学）、2015．4～）
技術補佐員　出羽真樹子（2013．4～2018．1）
事務補助員　富澤ゆかり（2016．11～）
技術補助員　堂前愛（2017.6～）
院生
博士課程　Kim Minsoo、岡本守、脇田大輝
修士課程　佐藤優祐、趙子夏、安ヶ平裕介、毛利光希、沈案鷺

1.研究目標

（1）生命現象の数理解析

氷などの結晶成長、液滴運動、生物の形作り、細胞運動、アメーバ細胞、無脊椎動物などのロコモーション様式、人間や複雑な環境に適応した動物の脳の働きなど我々の身の回りには様々な現象が満ち溢れている。そして、どの現象にもそれらを引き起こすメカニズムが必ず存在している。我々はこのメカニズムの探究を目標としている。例えば、細胞内では非常に多くの物質が相互に複雑に絡み合い、自由度の大きい系（高次元系）を構成しており、発生現象等の複雑な生命現象を、高い自由度のまま理解することは不可能に近い。そこで、まずは自由度の小さいモデル系（toy モデル）を構成し、モデル系が現象を説明しているのかを考察するのである。トップダウン的なこの考え方は、うまく toy モデルを構成出来れば一見複雑に見える現象も見通しよく簡単に説明することができる。しかし、現象の細部には目をつぶらねばならない場合もある。そこで、toy モデルを構成し実際の現象を深く観察・実験し toy モデルに不足分を付け加えることで現象を説明する最小限のモデルを作ることを目指す。即ち、現象を再現するための数理モデル化ではなく、数理モデルを作りながら現象の本質となっている部分を抜き出すのである。我々はこの一連のプロセスを単に数理の範疇だけで行うのではなく、実験系研究者と緊密に連携を取りながら、生命現象に潜むメカニズムを解明していくことが目標である。

（2）自己駆動粒子運動の数理科学

本課題は物理化学実験で見られる「active matter」に対する現象の数理モデリングとそれに付随する数理科学研究を目標としている。この研究では現象を記述するための数理モデリングを行い、数理モデルに対して計算機援用解析から解構造を調べ、目的とする運動の出現機構を明らかにすることを目標としている。さらに、数学解析の側面としてのこの研究は、「co-dimension 1」の界面(図1を参照)を表現するための数理構造の構築に着目している。これは水面での自己駆動ひも運動を記述するために必要な研究となっている。また、数理モデリングではこの数理構造を実現する計算手法と有限要素法のアルゴリズム開発を目標とし研究を進めている。さらに、それらを用いた化学実験のシミュレーションを行い、計算結果を通して実際の現象と比較も設定する。これにより数学の理論、計算の技術、そして対象となる化学実験の現象の発展を学際的に導き出すことを目標としている。

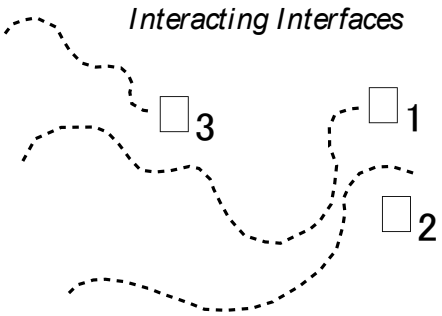


図１　Interfacial Active Matter.

（3）動物の適応的な振る舞いの構成論的理解

時事刻々と変化する予測不可能な環境の中で私たち全ての動物は生活している。そのような無限定環境の中でも動物は、状況に応じた運動や行動をとっている。一方、既存の人工物（ロボット）に動物のような適応的な振る舞いを実装することは未だに至難の技である。私たちがよく目にする産業用のロボット、は迅速でしなやかな動作をしているが、限られた環境に設置し限られた動作をだけを実行する時にだけうまく動作するのであって、ロボットを無限定な環境下に持ち出せばたちまち止まってしまう。ロボットは、周りの環境を観測し、観測結果に応じて動作出力を決めているためで、計測限界を超えた環境下では動作できない。既知の環境の中でしか人工物を制御する方法しか持ち合わせていない我々にとって、このようなフレーム問題に対処するには何らかの手本が必要であり、それが生物である。動物は、フレーム問題に囚われることなく、環境の変化や刻々と変わる状況に応じて適応的な運動や行動発現を実時間で実現している。我々は、この様な適応的な運動や行動の基盤となる身体や脳のメカニズムを理解し、更にそこから新奇な制御論の確立を目標としている。

（4）嗅覚情報処理アルゴリズムの解析

５感の中で嗅覚の処理様式の研究は最も遅れている。とりわけ、絶え間なく変化する匂いの分布や方向についての情報を動物がどう処理しているのかについては全くわかっていない。資源探索に嗅覚を用いる夜行性の昆虫をモデルとし、この問題について明らかにする。

２.研究成果

（１）表皮構造の数理解析（長山）

2017 年度は、バリア機能のひとつであるタイトジャンクションバリア機能を記述するために、顆粒層形成の数理モデリングを行った。その結果、表皮が角層-顆粒層-有棘層と層構造をなすためには、角層直下からの何らかのシグナル伝達があれば層構造を形成できることがわかった。また、顆粒細胞のある分化度で TJ を発現すると仮定した場合、TJ の恒常性維持機能がある程度成立していることがわかった。

さらに、角化症の病態再現性を高める目的と皮膚の老化現象の再現を目指して、角質細胞の接着と剥離に関する数理モデリングを行った。細胞接着分解酵素と酵素の分解抑制物質の 2 変数モデルを構築した。このモデルは今後の病態再現モデルに導入する。

最後に、皮膚感覚機構を理解するための Fishbone 錯触覚の数理モデリングを行った。このモデルはマイスナー小体の圧力センサーモデルに粘弾性体モデル、Hodglin-Huxlay モデルを結合した数理モデルとなっている。この研究で、神経発火頻度比を定義することによって、Fishbone 錯触覚が起こる要因を示唆した。このモデルから得られた示唆を物理心理学実験によって実証した。この結果から、サーストンの一対比較法で得られた結果心理学実験結果と数理モデリングから得られた結果が定性的一致することがわかった。この結果から Fishbone 触錯覚の生じる要因が感覚神経の発火頻度で理解できることを示唆した。

（２）細胞極性の数理解析

我々、人の体表面には“毛”があり、特定の方向への流れを見ることができる。表層は細胞が平面的に並ぶことで構成されるが、この際細胞内で毛の方向を決定する分子の配向性がまるで磁石のように極性を持ち、さらにその方向性が揃う現象が起こる。これを平面内細胞極性と呼ぶ。この毛の流れは、魚の鱗、鳥類の羽毛の流れとも関係があり、古くから研究されている。山崎正和准教授(秋田大医学専攻)との共同研究を行い、私はハエの体表面の翅毛(しもう)パターンを司る分子の動態を数理モデル化することで、平面内細胞極性に潜む問題を解明しようとしている。現在までに我々の構築した数理モデルにより、実際の翅毛パターンを忠実に再現することができた。逆に、数理モデルから翅毛パターンが阻害される条件を予測し、実際のハエに対し実験を行った結果、数理モデルによって導出された結果と一致し、数理的に予測された結果が実験によって正しいと裏付けられたこととなった。2005 年、K。 Amonlirdviman 氏等は雑誌 Science に PCP に関する数理モデルを発表しているが、着目する分子数が非常に多いために式の数は 10 を超えており、さらにそれらの数式には未知のパラメタが非常に多く含まれている。このため、数学的な解析が非常に困難であるばかりでなく、「何が PCP にとって最も重要な機構なのか」という本質的な問に答えることができていない。今年度は K。 Amonlirdviman 氏等の提案した数理モデルに関して、重点的に研究を行った。彼らのモデルは Dsh、Pk、 Fz、 Stbm などの PCP のコア蛋白とその複合体に着目して構築された数理モデルであり、１０変数以上の反応拡散方程式系となっている。また、式中のパラメータに関しては、直接の値は記載されておらず、大まかな範囲として記載されている。さらに式の中で使用されている拡散に関する作用素も、通常とは異なる意味で用いられていることが判明した。また、数値計算の離散化では、正三角形を用いた有限要素的なメッシュ分割が行われているが、メッシュ数は固定値で非常に少ない要素数であり、現実的な拡散を表現するために適切ではないと考えられた。以上のことから、直接的に手計算で解析を適用することはほぼ不可能であると断定した。そこで、彼らのモデルを今後、解析的に取り扱うためには、（１）適切なメッシュの作成、（２）パラメータ同定、が必須であるとの結論を得た。そこで、（１）では、要素数可変のメッシュ生成アルゴリズムを構築した。一方（２）に関しては、パラメータ同定のための適切な条件を定める必要がある。実際の実験系では、コア蛋白が正常に機能する場合は、単一細胞でも極性の形成が行われるため、「Fz、 Stbm が局在パターンを作る」という条件を課した。この条件のもと、40 程度パラメータ空間を探索したが、Fz Stbm の局在パターンを得ることができなかった。パラメータの探索アルゴリズムが不適当であった可能性を否定できないものの、少なくとも文献値に記載されたパラメータ範囲では計算結果を再現することができなった。さらに、力場環境とカップルさせた新しい数理モデルを構築することができた。

（３）自励振動運動モデルの数理解析

今年度は、樟脳円版の集団運動に見られるクラスター運動に対する数理解析を行った。これまでは計算機援用解析で樟脳運動の解の存在と安定性を示していたが、今年度は、解析的に樟脳運動に関する存在証明を行った。樟脳円版、樟脳船に関する存在証明、および 2 つの樟脳円版がつくるクラスター運動解の存在証明を与えることができた。特に、クラスター運動解の存在証明の中で、単調減少下に凸の表面張力関数と線形に単調減少な表面張力関数では、クラスター解の非存在が証明できた。この結果は、表面張力関数を与える指針を示しており、数理モデル構築の視点からも非常に有益な定理となっている。

さらに、樟脳円版の集団運動を数理科学的視点から理解するために、数理モデルの大域的分岐構造を計算する数値分岐計算プログラムを作成した。この数値計算ソフトを用いて 2 個の樟脳円版モデルの分岐解析を行った。その結果、不安定解であるが対称回転振動運動する解や、不安定な対称振動解等を見つけることができた。また、横毛管力の影響を調べるために、横毛管力項を加えた集団運動モデルについても解構造を求めた。その結果、横毛管力によって生

じるクラスター運動解と横毛管力に関係ない自発的なクラスター運動解の共存が示唆された。

（５）適応的な行動発現の制御構造とその設計原理（青沼）

適応的な行動発現の制御構造とその設計原理

動的に変化する環境のなかで適応的に行動を実時間で切り替える動物の脳神経系の働きを理解するためには、個体を取り巻く環境、身体、神経系のいづれかを任意に操作することで、適応的な運動や行動の基盤となる制御機構をあぶり出すことができる。今年は、昆虫、多足類、クモヒトデなど神経系の構造が比較的単純な無脊椎動物を使い、適応的な運動や行動をつくりだす制御構造とその設計について運動生理学学実験やX線マイクロイメージングなどの方法を使い調べた。特に、動物に普遍的にみられるロコモーションや攻撃行動の発現メカニズムに着目し、個体を取り巻く環境や他者が存在する社会環境の変化に応じて変容する脳機能について研究した。コオロギやアリを使い、攻撃行動の動機付けにかかわる脳内の神経修飾物質の働きについて調べ、その結果をもとに、個体が社会環境の変化に応じて行動を変容させる神経生理機構の動的システムモデルを構築し、シミュレーション実験やロボット実装実験から、個体間相互作用と脳神経系に内在する多重フィードバック構造が社会環境における行動の実時間適応には重要であることが明らかになった。一方、ロコモーションの発現では、脳の働きを薬理学的に阻害することで、身体と場との相互作用によって生み出される適応的な運動をあぶり出す方法論の確立を目指した。また、身体の３次限的な構造に内在した運動制御の設計を理解するため、X 線マイクロ CT を使い、非破壊で身体構造を観察するとともに、そのデータをもとに 3D プリンタを使い 3D 模型を作成するとともに、シンプルなロボットを作成し、その動作を解析することで実際の生物の制御機構について考察した。

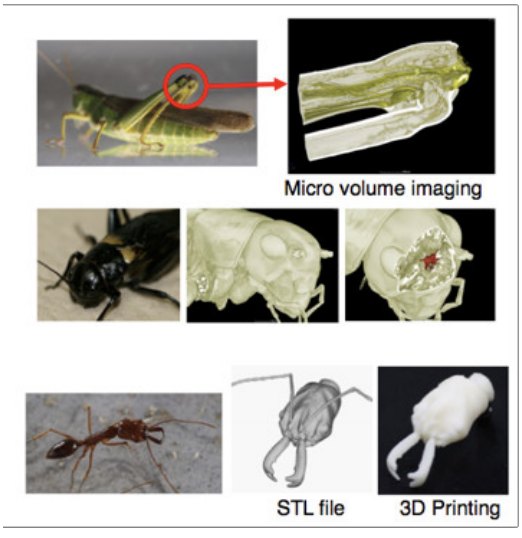


図３：X 線マイクロ CT を用いたイメージングにより、昆虫の神経・筋・骨格などの 3 次元構造を非破壊で観察し、3 次元デジタルデータとして取得した。

（６）昆虫が超高速運動を生み出すカラクリ

動物にとって素早い運動は、脅威から逃れたり獲物を捕獲するなど重要な要素である。素早い運動を作り出すためには、感覚信号を受容してから感覚情報処理、運動制御信号の生成、運動出力にかかる時間を短くする働きが重要となる。神経系には、信号を早く伝える仕組みはあるものの、その伝搬には限界がある。ところが、昆虫は神経細胞を伝わる信号の伝搬速度や筋収縮の速度を超えた素早い動きを作り出すことができる。アギトアリ属は、長く内側に突起がある大きな顎を素早く閉じることで獲物を捕らえる。その時の顎を閉じる速度は、動物が生み出す動きとして世界最速と言われている。大顎の内側には、獲物の接近を検出する長い機械感覚毛が生えている（図４）。この機械受容器で捉えた獲物の情報は、感覚細胞から大顎の運動神経に直接接続し、内転筋を動かして大顎を閉じる。この内転筋は、遅筋から構成されている筋肉であり、筋収縮は高速ではない。このアリが超高速運動を生み出すには、骨格の弾性変形を利用した飛び移り座屈によると考えられる。昆虫の筋骨格系の構造を利用した超高速運動を理解することで、弱い力しか出せないアクチュエーターを使って、高速かつ高出力の運動を生み出す新たな制御論を構築することが期待できる。

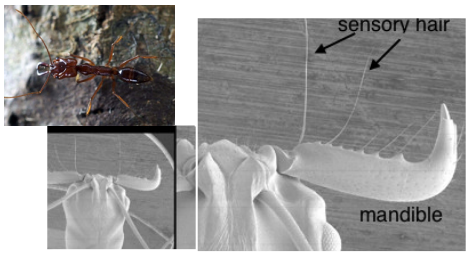


図４：アギトアリの大顎。内側には長い機械感覚毛は生え、獲物に接触すると顎が高速で閉じる。

（７）匂い空間分布情報処理についての研究

匂いは定まった形をとらず、その空間分布は時々刻々と変化する。そのため、動物は匂いの位置情報を検出する手段を持たないとみなされてきた。事実、同じ匂い受容体を発現する感覚細胞群の軸索は一次嗅覚中枢内の１個の糸球体に収束し、文字通り毛糸玉のような構造を形成する。西野らはワモンゴキブリの長い触角（5 cm）全域に分布している嗅感覚細胞の軸索が触角内での基部～先端での細胞体の位置によって糸球体内で層状に組織化されていること、この投射パターンがゴキブリの幼虫期の脱皮を通じて徐々に形成されることを動物で初めて発見した。さらに細胞内記録･染色法により、大糸球体から出力する11本の介在ニューロンの各々が触角の基部～先端の特定領域の刺激に応じること、嗅感覚細胞の投射領域と介在ニューロンの樹状突起が糸球体内に占める領域の間に明瞭な相関が存在するこ

とを明らかにした(図５)。本研究は動物の匂いの空間分布処理を理解する上で最適のモデルシステムを提供するものである。

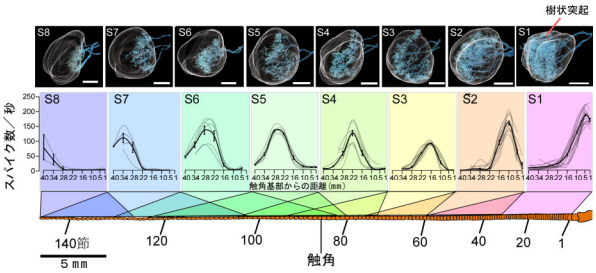


図５：触角基部～末梢の特定領域に受容野を持つ介在ニューロンの樹状突起

３.今後の研究の展望

（１）表皮構造の数理モデル

今後は､最初に TJ バリア機能の恒常性が完全に維持するようなメカニズムを数理モデリングから明らかにしていきたい。そのための角層直下での何らかのシグナル伝達について実験グループと議論することで解決していく。この問題と深く密接に関わっている問題として細胞形状がある。細胞形状が 14 面体であれば TJ バリア機能の恒常的維持は保たれることが実験系から示唆されており、細胞形状を 3 次元ボロノイ分割で定義し､14 面体が多くなる要因を数理モデリングと数値シミュレーションから与えたい。

また、

さらに、これまでに引き続き、皮膚疾患の中で角化症に焦点を合わせ、臨床皮膚科医との共同研究によって病態再現を行いたい。発症要因が知られている疾患に関して、発症要因と病態の関係を明らかにする（KID 症候群）。このために必要なモデリング要素があれば、随時組み込む予定である。この研究が成功裏に進めば、発症要因の不明な皮膚疾患（例えば、乾癬）について、仮説に基づいて病態を再現することから、発症要因を示唆することができる。この結果を臨床皮膚科医にフィードバックすることで、発症要因因子を見つけ出すことを目指す。この手法が成功すれば、病態改善の一手段として数理科学的手法が使えることができる。この研究は今後の重要な課題となっている。

（２）細胞極性の数理

彼らの数理モデルに関して、予備的に以下のような数学的な考察を行った。

(考察１)：初期の Dsh、 Pk、 Fz、 Stbm は正数であるが、その他の蛋白量は 0 である。

(考察２)：少なくとも Fz に関して、初期の最大濃度よりも終状態の最大濃度の方が高い。

(考察３)：考察１と考察２を両方満足するためには、(3)拡散係数が位置に依存する。または(4)移流拡散型の方程式でないとならない。しかしながら、(3)に関しては論文では記載がなく、(4)はそもそも仮定されたモデル系ではない。

以上から、K. Amonlirdviman 氏等のモデルに関しては、論文に記載されていない方法論を用いて計算が行われている可能性が非常に高いことがわかった。K. Amonlirdviman 氏等のモデルを縮約することに関しては、パラメタの観点および考察から、論文に記載された結果を再現することが論理的に困難であることが判明した。そこで、今後は、縮約することに捕らわれず、現在構築している４変数系を拡張することで、K. Amonlirdviman 氏等のモデルへ帰着できるかに関して研究を行いたい。具体的には Fz、 Stbm の分子動態に着目した単一細胞の極性形成に関する偏微分方程式系に着目する。これらは K. Amonlirdviman 氏等以外の研究グループも提案しており、その数理解析結果が近年発表されつつある。そこで、これらのモデルを我々の PCP 研究へ応用する方向を検討している。また、背中の PCP 系では、組織全体の流れと毛の方向性に関係があることが実験により証明されつつあり、そのモデルを構築することができつつある。モデルでは、非圧縮性の Stokes 流を用いているため、FreeFEM++の計算専門家と研究打合せを行う予定である。

（３）集団運動モデルの数理解析

複数の樟脳円盤が円環水路でみせる集団運動の数理解析を進める。４つの樟脳円盤の集団運動では非対称クラスター運動や振動運動が見られるため、これまでに構築した数理モデルを駆使して、現象の再現および分岐理論を用いた集団運動の出現機構の解明を行う。それと同時に、２次元円盤領域における樟脳円盤の集団運動の解析も行う。特に、複数の円盤を浮かべたときに生じる間欠的な振動運動の起こるメカニズムについて考察したい。さらに、液滴の集合離散運動の解析を行う。この運動は長時間に渡って集合と離散を繰り返す運動であり、これまで数理モデルでは説明できないことがわかっている。この現象は前半は表面張力変化による斥力を伴う運動が支配的となっているが、後半は表面張力の変化による運動よりも横毛管力を伴う引力の運動が支配的になっているように見える。今後はこれらの観察結果を踏まえた数理モデルの構築を行いたい。

（５）身体と脳と環境の相互作用によって生まれる適応行動の解析

X 線マイクロ CT を使ったマイクロマイクロボリュームイメージングでは、空間分解能が 3μm 程度まで向上した。これにより、身体や神経系・筋骨格系などの詳細な３次元的な構造解析が可能になった。多くの場合、観察するサンプルは乾燥標本を用いるため、昆虫が実際に運動しているときに筋肉や骨格をどのように動かしているのかを観察することが困難である。そこで、マイクロ CT 内にトレッドミルを設置し、実験動物が運動しているときの筋肉や骨格の動きをライブで撮影することを目指す。また、Spring-8 も利

用して、昆虫が運動中の筋肉や骨格の動きを撮影し、筋収縮に伴う骨格の動きを解析する。これにより、限られた身体リソースしか利用できない昆虫が、神経細胞や骨格筋の性能を上回る運動機能を生み出すカラクリを明らかにす。

（6）嗅覚情報処理における気流の役割

匂いはこれを運ぶ空気流がないと感知できない。したがって、正確な匂い源定位には気流情報と匂いの統合処理が不可欠である。夜行性昆虫の二次嗅覚ニューロンに着目することで、匂いを運ぶ気流速度やその変化によって活動がどのように修飾されるのかを明らかにする。

4.資料

4.1 学術論文（査読あり）

1) S.-I. Ei, H Kitahata, Y. Koyano and M. Nagayama, “Interaction of non-radially symmetric camphor particles”, 368(1), 10-26(2018).

2) E. Ginder, T. Minomo, M. Nagayama, S. Nakata and H. Yamamoto, “Traveling pulse solutions in a point mass model of diffusing particles”, Computer Methods in Materials Science, 17(2), 111-121(20017).

3) Y. Kobayasih, H. Kitahata and M. Nagayama, “Sustained dynamics of a locally excitable system with nonlocal interactions”, Physical Review E 96,022213(2017).

4) M. Watanabe, K. Natsuga, W. Nishie, Y. Kobayashi, G. Donati, S. Suzuki, Y. Fujimura, T. Tsukiyama, H. Ujiie, S. Shinkuma, H. Nakamura, M. Murakami, M. Ozaki, M. Nagayama, F. M Watt, H. Shimizu, “Type XVII collagen coordinates proliferation in the interfollicular epidermis”, eLife, 6, e26635(2017).

5) J. Kumamoto, M. Goto, M. Nagayama and M. Denda, “Real-time imaging of human epidermal calcium dynamics in response to point laser stimulation”, Journal of Dermatological Science, 86(1):13-20(2017).

6) Y. Satoh, Y. Sogabe, K. Kayahara, S. Tanaka, M. Nagayama and S. Nakata, “Self-inverted reciprocation of an oil droplet on a surfactant solution”, Soft Matter 13, 3422-3430(2017).

7) M. Sato, T. Yasugi, Y. Minami, T. Miura and M. Nagayama, “Notch-mediated lateral inhibition regulates proneural wave propagation when combined with EGF-mediated reaction diffusion”, PNAS 113, 35(2016).

8) J. Kumamoto, M. Goto, M. Nagayama and M. Denda, “Real-time imaging of human epidermal calcium dynamics in response to point laser stimulation”, Journal of Dermatological Science, 2017.

9) H. Aonuma, Y. Totani, M. Kaneda, R. Nakamura, T. Watanabe, D. Hatakeyama, V.E. Dyakonovae, K. Lukowiak. and E. Ito, “Effects of 5-HT and insulin on learning and memory formation in food-deprived snail” *Neurobiol. Learn. Mem.*, 148: 20-29. (2018)

10) T. Kano, E. Sato, T. Ono, H. Aonuma, Y. Matsuzaka and A. Ishiguro “A brittle star-like robot capable of immediately adapting to unexpected physical damage” *Royal Soc. Open Sci.* 4: 171200. doi: 10.1098/rsos.171200. (2017)

11) K. Matsuda, H. Gotoh, Y. Tajika, T. Sushida, H. Aonuma, T. Niimi, M. Akiyama, Y. Inoue and S. Kondo “Complex furrows in a 2D epithelial sheet code the 3D structure of a beetle horn” *Sci. Rep.* 7: 13939. doi:10.1038/s41598-017-14170-w. (2017)

12) C. Shirator, N. Suzuki, Y. Momohara, K. Shiraishi, H. Aonuma, and T. Nagayama “Cyclic AMP-regulated opposing and parallel effects of serotonin and dopamine on phototaxis in the Marmorkrebs (marbled crayfish)” *Europ. J. Neurosci.* 46: 1863-1874. doi: 10.1111/ejn.13632. (2017)

13) N. DiRienzo and H. Aonuma “Individual differences are consistent across changes in mating status and mediated by biogenic amines” *Behav. Ecol. Sociobiol.* 71: 118. doi: 10.1007/s00265-017-2345-x. (2017)

14) H. Aonuma, M. Kaneda, D. Hatakeyama, T. Watanabe, K. Lukowiak and E. Ito “Weak involvement of octopamine in aversive taste learning in a snail” *Neurobiol. Learn. Mem.* 141: 189-198. (2017)

15) Y. Matsuzaka, E. Sato, T. Kano, H. Aonuma and A. Ishiguro “Non-centralized and functionally localized nervous system of ophiuroids: evidence from topical anesthetic experiments” *Biology Open.* 6: 425-438. (2017)

16) M. Akiyama, T. Sushida, S. Ishida, H. Haga, “Mathematical model of collective cell migrations based one cell polarity”, Dev., Growth Differ., 59(5), 471-490 (2017).

17) M. Akiyama, A. Tero, M. Kawasaki, Y. Nishiura, Y. Yamaguchi, “Theta-alpha EEG phase distributions in the frontal area for dissociation of visual and auditory working memory”, Sci. Rep., 7, 42776 (2017)

18) H. Nishino, M. Iwasaki, M. Paoli, I. Kamimura, Y. Atsushi and M. Mizunami, “Spatial receptive fields for odor localization”, Curr. Biol., 28:

600-608 (2018).

19) H. Watanabe, H. Nishino, M. Mizunami and F. Yokohari, “Two parallel olfactory pathways for processing general odors in a cockroach”, Front. in Neur. Cir., 11: 1-20 (2017).

4.2 学術論文（査読なし）

1） 田中吉太郎、八杉徹雄、佐藤純、長山雅晴、栄伸一郎、”分化の波のノイズ抑制機構に対する数理モデリングと実験からのアプローチ”、計算工学講演会論文集、22(2017)

2） 長山雅晴、小林康明、安ヶ平裕介、熊本淳一、傳田光洋、北畑裕之、中田聡、”皮膚疾患再現を目指した皮膚構造数理モデル”、計算工学講演会論文集、22(2017)

3） 秋山正和、須志田隆道、細胞極性に着目した細胞群の運動モデル、 計算工学講演会論文集、2017

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

1) H. Aonuma “Fighting behavior: Understanding the mechanisms of group-size-dependent aggression” *in* Cricket as a model organism for the 21st century; Development, Regeneration, and Behavior. (Eds: Noji S., Horch H.W., Ohuchi H. and Mito T.) Springer, p197-209. (2017)

2) H. Aonuma “Synthetic approaches for observing and measuring cricket behaviors” *in* Cricket as a model organism for the 21st century; Development, Regeneration, and Behavior. (Eds: Noji S., Horch H.W., Ohuchi H. and Mito T.) Springer, p313-325. (2017)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ.招待講演（国際学会）

1) M. Nagayama, Mathematical modeling and analysis of the self-propelled disk and its collective motions, International Conference on ”Reaction-diffusion system, theory and applications”, Meiji University (Tokyo, Nakano), March 17ty - 19th, 2017.

2) M. Nagayama, Mathematical analysis of the collective motion of camphor disks, Free Boundary Problems and Nonlinear PDEs, Hokkaido University (Sapporo, Japan), September 26th-28th, 2017.

3) H. Aonuma, Synthetic approach to understand neuronal mechanism of social adaptability in animals. Symposium on Chalenges in Neuroscience, National Center for Theoretical Sciences (NCTS), Taiwan. April 14ht, 2017

4) H. Aonuma, Mechanisms of ultra-high speed movement in the trap jaw ant, SICE Annual Conference (SICE2017), Kanazawa University. September 19th-22nd, 2017

5) M. Akiyama,T. Sushida,S. Ishida,H. Haga, A self-propelled particle model based on cell polarity for understanding collective cell migrations, The 18th RIES-Hokudai International Symposium “Kyoku” (Poster Presentation), CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom Sapporo, (Sapporo, Japan), November 30th - December 1st, 2017

6) M. Akiyama,T. Sushida, A self-propelled particle model based on cell polarity for understanding collective cell migrations, Equadiff 2017(Bratislava,Slovakia),July 24th-28th,2017.

7) H. Nishino, Spatial odor coding in the cockroach, Mini symposium for olfactory processing in insects, University of Konstanz, Germany, Oct. 19, 2017

ｂ.招待講演（国内学会）

1） 長山 雅晴、皮膚の数理モデリング：皮膚感覚モデルへの挑戦、日本数学会 2017 年度秋季総合分科会、山形大学（山形県・山形市）、2017 年 9 月 11 日～14 日

2） 長山 雅晴、皮膚感覚数理モデルへの挑戦、日本時間学会第 9 回大会、山口学芸大学（山口県・山口市）、2017 年 6 月 10 日～11 日

3） 青沼 仁志、脇田 大輝、早瀬 友美乃：単純な神経系を持つ無脊椎動物の運動に見られる振動現象のモデル化、第２７回日本数理生物学会、北海道大学 （札幌）2017 年 10 月 6 日～８日.

4） 青沼　仁志:昆虫の高速運動をつくる不思議な仕組み 技術講演会、北海道大学大学院情報科学研究科、協賛：精密工学会北海道支部、日本ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会、計測自動制御学会北海道支部　2017 年５月 17 日.

5） 稲木 美紀子、大久保 明野、須志田 隆道、秋山 正和、上皮細胞組織変形の三次元シミュレーションを用いたショウジョウバエ消化管の左右非対称な捻転を起こす細胞変形の素過程の同定第 69 回日本細胞生物学会大会、 仙台国際センター（宮城県仙台市）、2017 年 6 月 13 日

6） 西野 浩史、不動の神経メカニズムー擬死の進化的起源を探るー、第 65 回日本生態学会全国大会 W20 自由集会 「昆虫の動きと不動を科学する」：生理学と生態学の融合を目指して、札幌コンベンションセンター、2018 年 3 月 15 日～3 月 18 日

ｃ.一般講演（国際学会）

1) M. Okamoto, M. Nagayama, Mathematical model including fluid's effect of camphor disk's self-motion, The 18th RIES-Hokudai International Symposium "Kyoku" (Poster Presentation), CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom Sapporo, (Sapporo, Japan), November 30th - December 1st, 2017
2) Zixia Zhao, M. Nagayama, M. Uesaka, M. Nakatani and H. Kitahata, The mathematical model for the tactile stimulus response of the skin sensory receptor, The 18th RIES-Hokudai International Symposium "Kyoku" (Poster Presentation), CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom Sapporo, (Sapporo, Japan), November 30th - December 1st, 2017
3) T. Watanabe, A. Ugajinn and H. Aonuma、"Whole-brain activity mapping for neuroethological study in the cricket"、The 8th International Sympo-sium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017)、Hokkaido University(Sapporo、Japan)、June 2017.
4) S. Kuroda、H. Aonuma、K. Yasui and A. Ishiguro、"Adaptive locomotion in centipede: the role of body stiffness and morphology"、The 8th Inter-national Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017)、Hokkaido University (Sapporo Japan)、June 2017.
5) S. Takahara、H. Aonuma and S. Kaneko、"Devel-oping Maximum Likelihood Approach to Three-Di-mensional Reconstruction of Musculo-skeletal Structure of Invertebrate Animals Based on X-ray Micro CT Data"、The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017)、Hokkaido University(Sapporo Japan)、June 2017.
6) K. Yasui、K. Kikuchi、T. Kano、Y. Hayase、S. Kuroda、H. Aonuma、R. Kobayashi and A. Ishiguro、"Decentralized Control Mechanism Underlying In-terlimb Coordination of Centipedes"、The 8th International Symposium on Adaptive Motion of An-imals and Machines (AMAM2017)、Hokkaido Univer-sity (Sapporo Japan)、June 2017.
7) M. Ishikawa、K. Shinohara、K. Goto、K. Naniwa and H. Aonuma、"Analysis and modeling of high-speed running motion of ghost crabs"、The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017)、Hokkaido University (Sapporo Japan)、June 2017.
8) M. Shimizu、D. Ishii、H. Aonuma and K. Hosoda、"Frog Cyborg Driven by Biological Muscle Actu-ators That Packaged Physiological Solution"、The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017)、Hok-kaido University(Sapporo Japan)、June 2017.
9) H. Aonuma、D. Wakita、D. Owaki、A. Ishiguro、K. Naniwa、Y. Sugimoto and K. Osuka、"Micro Volume Imaging to Investigate Musculoskeletal Systems in the Arthropod Animals"、The 8th In-ternational Symposium on Adaptive Motion of Ani-mals and Machines(AMAM2017)、Hokkaido Univer-sity(Sapporo Japan)、June 2017.
10) T.Sushida, A.Ookubo, M.Inaki, Y.Inoue,K. Matuno,M. Akiyama, A three-dimensional vertex dynamics model for understanding the twisting phenomenon of cylindrical cell tissues in Drosophila, The 18th RIES-Hokudai International Symposium "Kyoku" (Poster Presentation), CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom Sapporo, (Sapporo, Japan), November 30th - December 1st, 2017
11) T.Sushida, M.Akiyama, A mathematical model of cell polarity and cell migration, isdb Singapore 2017「18th International Congress of Developmental Biology」, National University of Singapore,(Singapore),June 18th-22nd,2017
12) T. Sushida,S. Ishida,H. Haga,M. Akiyama, A self-propelled particle model based on cell polarity for understanding collective cell migrations, the 50th Annual Meeting of JSDB, Tower Hall Funabori (Edogawa,Tokyo) ,May 9th-11th 2017.
13) H. Koga, H. Watanabe, H. Nishino, M. Hojo, W. Omura, T. Takanashi and F. Yokohari, Comparative study of antennal lobe glomeruli in seven species of termites, JSCPB 2017 Fukuoka, Fukuoka University (Fukuoka City), Japan, Nov. 25-26, 2017
14) H. Nishino, K. Katoh and M. Domae, Axonal layer-dependent dendritic organization of Kenyon cells in a hemimetabolous insect, JSCPB 2017 Fukuoka, Fukuoka University (Fukuoka City), Japan, Nov. 25-26, 2017
15) T. Takanashi, S. Fukui, T. Koike and H. Nishino, Vibration sensitivity in cerambycid beetles and its potential for pest control, 17th Invertebrate Sound and Vibration Meeting, Schloss Rauischholzhausen, Giessen, Germany Sept. 14-17, 2017.
16) H. Koga, H. Watanabe, H. Nishino, M. Hojo, W. Omura, T. Takanashi and F. Yokohari："Interspecies and intercaste comparisons of antennal lobe constitution in seven species of termite", 2017 ISCE/APACE, Fukakusa Campus, Ryukoku University, Kyoto, Japan, Aug.23-27,2017.
17) M. Paoli, H. Nishino and G. C. Galizia："How the cockroach brain can encode spatial olfactory

information, Göttingen School, Göttingen School, Göttingen, Germany, Aug. 11, 2017

d. 一般講演（国内学会）

1) 後藤田 剛、上坂 正晃、安ケ平 裕介、小林 康明、北畑 裕之、傳田 光洋、長山 雅晴、表皮構造の数理モデルにおける顆粒層の安定化とタイトジャンクション形成への取り組み、日本数学会 2018 年度年会、 東京大学駒場キャンパス（東京都、目黒区)、 2018 年 3 月 21 日

2) 後藤田 剛、上坂 正晃、安ヶ平 裕介、小林 康明、北畑 裕之、傳田 光洋、長山 雅晴、 表皮構造の数理モデルにおける顆粒層の形成、応用数学合同研究集会、龍谷大学（滋賀県、大津市)、12 月 14 日～16 日

3) 趙 子夏、上坂 正晃、仲谷 正史、北畑 裕之、長山 雅晴、皮膚感覚受容器の触刺激応答に関する数理モデル、応用数学合同研究集会、龍谷大学(滋賀県、大津市)、12 月 14 日～16 日

4) 岡本 守、長山 雅晴、対流の効果を含む界面活性剤系自走粒子の自律運動に関する数理モデル、応用数学合同研究集会、龍谷大学（滋賀県、大津市)、12 月 14 日～16 日

5) 小林 康明、安ヶ平 裕介、北畑 裕之、傳田 光洋、長山 雅晴、皮膚疾患再現を目指した皮膚構造数理モデル、第 22 回計算工学講演会、ソニックシティー（埼玉県、さいたま市)、2017 年 5 月 31 日～6 月 2 日

6) 大須賀 公一、青沼 仁志、生き物の多様な振る舞いを生み出す源泉をさぐるには？、計測自動制御学会第 30 回自律分散システムシンポジウム、名古屋市名城大学、Japan (2018-01)

7) 浪花 啓右、杉本 靖博、青沼 仁志、大須賀 公一、触角への電気刺激によるクロコオロギの闘争性の増強、計測自動制御学会第 30 回自律分散システムシンポジウム、名古屋市名城大学、Japan (2018-01)

8) 青沼 仁志、トラップジョウをもつアリの超高速運動の発生メカニズム、、計測自動制御学会第 30 回自律分散システムシンポジウム、名古屋市名城大学、Japan (2018-01)

9) 大脇 大、杉本 靖博、石黒 章夫、青沼 仁志、コオロギの脚切断後の筋電位パターンの変容、計測自動制御学会第 30 回自律分散システムシンポジウム、名古屋市名城大学、Japan (2018-01)

10) 安井 浩太郎、菊池 和気、加納 剛史、黒田 茂、青沼 仁志、石黒 章夫、ムカデが足並みの疎密波の向きを変えるメカニズム、計測自動制御学会第 30 回自律分散システムシンポジウム、名古屋市名城大学、Japan (2018-01)

11) H. Aonuma, K. Kagaya, A. Matsuda, S. Kaneko and K. Osuka, Slow and ultra-fast movements of the mandible in the trap jaw ant genus Odontomachus, 日本比較生理生化学会第 39 回大会、 福岡市 福岡大学、 Japan (2017-11)

12) D. Owaki, Y. Sugimoto, A. Ishiguro and H. Aonuma, Change in coordinated motor patterns after leg amputation in the cricket, 日本比較生理生化学会第 39 回大会、 福岡市 福岡大学、 Japan (2017-11)

13) R. Okada, H. Ikeno and H. Aonuma,Behavior of follower bees in a hive before departure after the dance communication, 日本比較生理生化学会第 39 回大会、 福岡市 福岡大学、 Japan (2017-11)

14) 青沼 仁志、Ultra-fast movement of trap jaw ants、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2017 (SSI2017)、浜松市 静岡大学、Japan (2017-11)

15) 渡邊 崇之、宇賀神 篤、青沼 仁志、初期応答遺伝子プロモーターを利用したコオロギ脳機能マッピング、日本動物学会第 88 回大会、富山県民会館、Japan (2017-09)

16) 青沼 仁志、大須賀 公一、オキナワアギトアリの大顎の高速運動をつくりだす外骨格の構造解析、日本動物学会第 88 回大会、富山県民会館、Japan (2017-09)

17) 岡田 龍一、池野 英利、青沼 仁志、ダンス追従バチは複数のダンス蜂を追従する、日本動物学会第 88 回大会、富山県民会館、Japan (2017-09)

18) 早瀬 友美乃、中西 秀、坂上 貴洋、青沼 仁志、高原 聡、松田 朝陽、金子 俊一、マイクロ CT を使った丸めた紙の３次元構造解析、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学、Japan (2017-09)

19) 高原 聡、青沼 仁志、金子 俊一、クモヒトデ模倣ロボット設計に向けた X 線マイクロ CT による骨格形状抽出、精密工学会北海道支部会、北海道大学、Japan (2017-09)

20) 松田 朝陽、青沼 仁志、金子 俊一、アギトアリの大顎の超高速運動解析に向けた動画像計測手法の検討、精密工学会北海道支部会、北海道大学、 Japan (2017-09)

21) 長谷川 英祐、青沼 仁志、寺尾 勘太、小楠 なつき、大久保 祐作、渡邊 紗織、三上 俊太、藤田 悠介、水波 誠、村上 優花、アリは巣仲間と交流してストレスから回復する、日本動物行動関連学会・研究会 合同大会（行動 2017)、東京大学、Japan (2017-08 ～ 2017-09)

22) 渡邊 崇之、宇賀神 篤、青沼 仁志、最初期遺伝子プロモーターを利用したコオロギ脳機能マッピング法の確立、日本動物学会北海道支部大会第 62 回大会、北海道大学理学部、Japan (2017-08)

23) 須志田 隆道、秋山 正和、 基底膜に覆われた細胞群の回転運動を表現するための数理モデル、 日本数学会 2018 年度年会、 東京大学（東京都目黒区)、3 月 18 日～3 月 21 日

24) 秋山 正和、須志田 隆道、石田 すみれ、芳賀 永、 細胞極性と細胞移動の数理モデル、第 27 回　日本数理

生物学会、 北海道大学（北海道札幌市)、10 月 6 日～10 月 8 日

25) 秋山 正和、須志田 隆道、 細胞極性に着目した細胞群の運動モデル、 第 22 回　計算工学講演会、(埼玉県さいたま市)、5 月 31 日～6 月 2 日

26) 宇賀神 篤、西野 浩史、尾崎 克久、ナミアゲハ食草認識における脳の寄与の検討」、第 62 回日本応用動物昆虫学会大会、鹿児島大学郡元キャンパス 2018 年 3 月 25 日～3 月 27 日

27) 小松 正宏、増谷 直輝、栗原 啓伍、西野 浩史、高速道路の飛来虫に関する研究、第 17 回 「野生生物と交通」研究発表会、札幌市教育文化会館、 2018 年 2 月 23 日

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1) 長山 雅晴、皮膚感覚受容器の数理モデルによる触錯覚現象へのアプローチ、非線形現象の数値シミュレーションと解析 2018、北海道大学(北海道、札幌市)、2018 年 3 月 9 日～10 日

2) 長山 雅晴、表皮構造の数理モデル、研究集会「反応拡散系と実験の融合」、石川県政記念しいのき迎賓館（石川県、金沢市)、2018 年 2 月 21 日～22 日

3) 長山 雅晴、自走粒子運動の数理モデル、2018 軽井沢グラフと解析研究集会、日本大学軽井沢研修所(長野県、軽井沢市)、2018 年 2 月 12 日～15 日

4) 長山 雅晴、自己駆動系粒子運動の数理解析、千葉大学非線形科学セミナー、千葉大学(千葉県、千葉市)、6 月 28 日

5) 長山 雅晴、自走粒子系の集団運動に対する数理解析、岡山大学解析セミナー、岡山大学(岡山県、岡山市)、2017 年 5 月 18 日

6) 秋山 正和、A Mathematical Model of Cell Polarity and Cell Migration、平成 29 年度　研究交流会、北海道大学電子科学研究所（北海道札幌市)、1 月 5 日

7) 秋山 正和、須志田　隆道、石田すみれ、芳賀 永、 A self-propelled particle model based on cell polarity for understanding collective cell migrations、 2017 年度　人・環境と物質をつなぐイノベーション創出　ダイナミックアライアンス G3 分科会、 東北大学片平キャンパス（宮城県仙台市）および 秋保温泉 ホテルニュー水戸屋（宮城県仙台市)、11 月 27 日～28 日

8) 秋山 正和、須志田 隆道、石田 すみれ、芳賀 永、 A self-propelled particle model based on cell polarity for understanding collective cell migrations、 2017 年度　人・環境と物質をつなぐイノベーション創出 タダイナミックアライアンス G3 若手研究者交流会（宮城県仙台市）、11 月 26 日

9) 秋山 正和、須志 隆道、 細胞極性と細胞移動の数理モデル、 新学術領域「生物の 3D 形態を構築するロジック」2017 年度　班会議、 北海道大学（北海道札幌市）、6 月 26 日～6 月 27 日

10) 仝 悦、亀谷 治頌、島田 敦子、秋山 正和、 細胞集団の回転運動による 3D 形態形成のロジック、 新学術領域「生物の 3D 形態を構築するロジック」2017 年度　班会議、 北海道大学（北海道札幌市）、6 月 26 日～6 月 27 日

11) 秋山 正和、 数学のメガネで生物を見てみよう！、第１１０回システム情報科学研究会（ＳＳＩセミナー)、 北海道大学大学院情報科学研究科（北海道札幌市)、5 月 24 日

4.7 シンポジウムの開催

1) 長山 雅晴、第 11 回応用数理研究会、休暇村能登千里浜、2017 年 8 月 25 日～8 月 27 日

2) A. Ishiguro (General chair) and H. Aonuma (Local chair): The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Hokkaido Univ. (Sapporo, Japan) 2017 年 6 月 27 日～6 月 30 日

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

該当なし

ｂ．民間等との共同研究

1) 長山 雅晴、新日鐵住金株式会社、活性汚泥法モデルの高精度化、2016 年度～2018 年度

2) 長山 雅晴、株式会社資生堂、表皮構造モデルの構築、2017 年度

3) 西野 浩史、東日本高速道路（株)、高速道路の飛来虫対策に関する研究、2017 年度

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

該当なし

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

ａ．科学研究費補助金

1) 長山 雅晴（代表)、基盤研究 B 一般、自己駆動系の集団運動に対する数理モデリングとその数理解析、2016～2019 年度

2) 長山 雅晴（分担）、基盤研究Ａ 一般、散逸系における空間局在解の階層構造と頑健性の起源の解明、2014 年度～2017年度

3) 長山 雅晴（分担）、基盤研究 C 一般 、動的システムの分岐過程への数値誤差の依存性解析と新規解適合スキームの開発、2015年度～2017年度

4) 長山 雅晴（分担）、基盤研究 C 特設分野、生体内の不均一な場における反応拡散波の伝播機構の解明、2015年度～2017年度
5) 青沼 仁志（分担）、基盤研究 A、マルチテレストリアルロコモーションから解き明かす生物の多様な振る舞いの発現機序、2016～2019 年度
6) 青沼 仁志（分担）、基盤研究 B、ロボット義足による歩行運動への介入から解き明かす昆虫の脚間協調メカニズム、2016～2018 年度
7) 青沼 仁志（分担）、基盤研究 B 特設分野、自切する生物から切り拓くスーパーレジリアントなシステムの設計論、2016～2019 年度
8) 青沼 仁志（分担）、基盤研究 S、昆虫のゾンビ化から紐解く多様な振る舞いの源泉、2017～2021 年度
9) 秋山 正和（代表）、新学術領域件研究（研究領域提案型）、「3 次元形態を表現する数学的基盤の構築」、2015 年度～2020 年度
10) 秋山 正和（代表）、若手研究（Ｂ）、「平面内細胞極性に関する統一的数理モデルの構築」、2015～2019 年度
11) 秋山 正和（分担）、新学術領域（研究領域提案型）、生物の３Ｄ形態を構築するロジック、2015 年度～2019 年度
12) 秋山 正和（分担）、新学術領域（国際活動支援班）、３Ｄ形態ロジックの国際共同研究を加速するバーチャル研究所、2015 年度～2019 年度
13) 秋山 正和（分担）、挑戦的萌芽研究、平面内細胞極性の向きを逆転させる未知の機構の解析、 2016 年～2017 年度
14) 秋山 正和（分担）、基盤研究Ｂ、「組織の力学的基礎を司る第三のＰＣＰ制御グループを介した新たなＰＣＰ調節機構の解明、2016 年度～2018 年度
15) 西野浩史（代表）基盤研究 C、明瞭分離された２つの嗅覚経路のシグナルフローの意義の解明、2017～2019 年度

ｂ. 大型プロジェクト・受託研究

1) 長山 雅晴、JST CREST、数理モデリングを基盤とした数理皮膚科学の創成、2015年度～2020年度
2) 青沼 仁志 （研究代表者） 包括脳ネットワークによる支援、昆虫の行動スイッチングにともなう脳活動の変容、2012年度～2017年度
3) 青沼 仁志、JST、CREST、環境を友とする制御法の創成、リアルタイム運動制御を実現する神経-筋骨格系の生理機構の実験的解明（グループリーダー）2014 年度～2019年度

4.10 受賞

1) M. Shimizu, D. Ishii, H. Aonuma and K. Hosoda: AMAM2017 Outstanding Demo Award, “Frog Cyborg Driven by Biological Muscle Actuators that Packaged Physiological Solution” The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines.
2) 古賀 晴華、渡邉 英博、西野 浩史、北條 優、大村 和香子、高梨 琢磨、横張 文男 ：JSCPB 2017 大会委員長賞 「Comparative study of antennal lobe glomeruli in seven species of termites」 （日本比較生理生化学会） 2017 年 11 月

4.11 社会教育活動

ａ. 公的機関の委員

1) 長山 雅晴、文科省技術政策研究所専門調査委員
2) 秋山 正和、文科省技術政策研究所専門調査委員

ｂ. 国内外の学会の役職

１） 長山 雅晴、日本数学会 教育研究資金検討委員会 委員
２） 青沼 仁志、日本比較生理生化学会、評議委員
３） 青沼 仁志、日本動物学会北海道支部役員
４） 青沼 仁志、日本動物学会国際交流委員
５） 西野 浩史、日本比較生理生化学会 評議委員
６） 西野 浩史、日本動物学会北海道支部 役員

ｃ. 兼任・兼業

１） 長山 雅晴 ：JST さきがけアドバイザー（2014 年 4 月～2019 年 3 月）

d. 外国人研究者の招聘

１） Barry Trimmer (Professor, Tafuts University, USA) (2017年6月30日)
２） Anthony Scibelli (PhD Candidate, Tafuts University) (2018年1月22日～2月28日)
３） Dr. Marco Paoli,Germany, (2017年05月15日～2017年05月26日)

ｅ. 北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1) 理学部３、4 年生、数理科学 A、長山 雅晴、2017 年後期
2) 理学部３、4 年生、数理科学演習、長山 雅晴、2017 年後期
3) 理学部２～4 年生、数学総合講義Ⅰ、長山 雅晴、2017 年後期集中講義
4) 全学１年生、微分積分学Ⅰ、秋山 正和、2017 年前期
5) 理学部２年生、コンピュータ、秋山 正和、2017 年後期
6) 全学１年生、体験して学ぶ物質と生命の科学最前線：ナノからマクロまで、西野浩史、2017 年前期

ｆ. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

１） 工学研究科大学院生修士課程、ロバスト制御理論、青沼仁志（オムニバス）、2017 年 2 月 3 日

ｇ. 新聞・テレビ等の報道

1) 石黒 章夫、青沼 仁志、加納 剛史、松坂 義哉、佐藤 英毅、小野 達也 ： 日本経済新聞 2018年02月26日「サイエンス欄：生物に学ぶロボット、壊れても動き続ける「ヒトデ」」
2) 石黒 章夫、加納 剛史、青沼 仁志、松坂 義哉、佐藤

英毅、小野 達也 ： 日経産業新聞 2017年12月20日「ヒトデのように動くロボ:腕壊れても即座に適応「進むのに望ましい手応えがあると腕で地面を蹴って進む」」

3) 石黒 章夫、加納 剛史、青沼 仁志、松坂 義哉、佐藤 英毅、小野 達也 ： 日刊工業新聞 2017年12月18日「脚がとれても歩き続けるロボ：故障を前提に機能設計、宇宙や災害現場で活用」

4) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono ： Asian Scientist 2017年12月25日 “Headline: Losing An Arm Doesn’t Bother Starfish Bot”

5) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono ： Innovation Toronto 2017年12月18日 “A robot capable of immediately adapting to unexpected physical damage”

6) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono ： IDTechEx 2017年12月18日 “New generation robots able to adapt to physical damage | Robotics Research”

7) A. Ishiguro, T. Kano, H. Aonuma, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono ： Asia Research News 2017年12月17日 “Brittle Stars inspire new generation robots able to adapt to physical damage: The invention of a robot made to adapt to unexpected physical damage is a significant breakthrough for machines made to function in tough environ-ments.”

8) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono：Nanowerk 2017年12月17日 “Brittle Stars inspire new generation robots able to adapt to physical damage”

9) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, T. Ono and E. Sato：Phys.org 2017年12月15日 “Brittle stars inspire new generation robots able to adapt to physical damage”

10) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono ： ScienceDaily 2017年12月15日 “Brittle Stars inspire new generation of robots able to adapt to physical damage”

11) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Sato ： ScienceNewsline 2017年12月15日 “Brittle Stars inspire new generation of robots able to adapt to physical damage”

12) A. Ishiguro, H. Aonuma, T. Kano, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono ： Electronic Component News 2017年12月15日 “Brittle Stars inspire new gen-eration of robots able to adapt to physical damage”

13) A. Ishiguro, H. Aonuma, J. Xue, Y. Matsuzaka, E. Sato and T. Ono：Electronics360 - GlobalSpec 2017年12月15日 “Watch: Robot Can Adapt to Physical Damage Was Inspired by Brittle Stars”

14) 松田 桂祐、後藤 宏貴、多鹿 友喜、須志田 隆道、青沼 仁志、新美 輝幸、秋山 正和、井上 康博、近藤 滋 ： 毎日新聞 2017年11月02日「なぜカブトムシの角は蛹で突然出現できるのか～三次元構造の形態形成における「折り畳みと展開」の重要性を提唱～」、毎日新聞、2017年11月2日

h. ポスドク・客員研究員など

1) 須志田 道隆（博士研究員）
2) 上坂 正晃（博士研究員）
3) 後藤田 剛（博士研究員）
4) 一本嶋 佐理（博士研究員）
5) 熊本 淳一（学術研究員）
6) 渡邊 崇之（研究所研究員）
7) 浪花　啓右（学術研究員）

i. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：2名

１） 佐藤 優祐: 多相環境における界面運動の近似解法

２） 趙 子夏：Traveling pulse solutions in a point mass model of diffusing particles

博士学位：0名

j. アウトリーチ活動（2015年度～2017年度まで）

1) 長山 雅晴、出張講義（北海道立共和高等学校）、国民との科学・技術対話事業、2018 年 1 月 26 日
2) 長山 雅晴、JST 数学キャラバン 第 23 回拡がりゆく数学 in 北海道（北海道大学）、主催、2017 年 11 月 12 日
3) 長山 雅晴、北大魅力発見フェスタ（河合塾）、実験・学部紹介ブース参加「界面活性剤を用いた実験とその数学」、2017 年 10 月 1 日
4) 長山 雅晴、JST数学キャラバン 第20回拡がりゆく数学 in 春日井（中部大学）、講師、2017年7月1日
5) 長山 雅晴、JST数学キャラバン 第18回拡がりゆく数学 in 水戸（水戸第一高等学校）、講師、2016年12月17日
6) 長山 雅晴、出張講義（札幌西高等学校）、国民との科学・技術対話事業、2016年11月2日
7) 長山 雅晴、サイエンス、理系応援キャラバン隊実験体験ブース参加「界面活性剤を使った運動と数学」、2016年7月17日
8) 長山 雅晴、北大魅力発見フェスタ（河合塾）、実験・学部紹介ブース参加「界面活性剤を使った運動と数理科学」、2016年6月19日
9) 長山 雅晴、出張講義（札幌西高等学校）、国民との科学・技術対話事業、2015 年 12 月 2 日
10) 長山 雅晴、電子科学研究所一般公開、サイエンストーク、講師、2015年6月6日
11) 青沼 仁志、第９回北大クロスロード交流会「何かの動きの研究」、講師.2018年2月15日
12) 青沼 仁志、出張講義（札幌西高等学校）、国民との科

学・技術対話事業、2017年10月26日

13) 秋山 正和、GLSC3D講習会、明治大学(東京都中野区)、2017年11月17日

14) 秋山 正和、３次元計算可視化ライブラリ（GLSC3D）講習会、 広島大学（広島県東広島市)、2017年8月7日

15) 秋山 正和、 GLSC3D 講習会　講師、 広島大学（広島県東広島市、2016 年 5 月 9 日

16) 秋山 正和、サイエンス・カフェ講演、 紀伊国屋書店札幌本店（北海道札幌市)、2015年11月19日

データ数理研究分野

教　授　小松崎民樹（総研大、理博、2007.10～）
准教授　寺本央（東大院、博(学術)、2017.4～）
助　教　伊藤創祐（東大院、博（理）、2017.4～）
助　教　西村吾朗（阪大院、理博、2007.10～）
特任助教　James N. Taylor（ライス大、PhD、2014.10～）
田畑公次（北大院、博（情報科学）、2017.7～）
特任講師　Jason Roger Green（Purdue Univ.、PhD、2017.6～2017.8）
博士研究員　Sulimon Sarrari（UC Merced、PhD、2017.7～）
Kernel Enrique Prieto Moreno（2015.8～2017.5）
学術研究員　土田　旭（北大院、博（理）、2017.12～）
学　生
博士課程後期
田宮裕治（理学院数学専攻）
Khalifa Mohammad Helal（生命科学院 生命融合科学コース）
Udoy Sankar Basak（生命科学院 生命融合科学コース）
学部生
山田 寛子（理学部 化学科）

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､複雑な中に特異性､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経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､700～1400 nm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定量的生体計測技術を確立する。それにより、単一分子レベルから個体レベルまでの階層をまたいだ総合的理解を目指している。

２．研究成果

(1) バンド交差近傍のハミルトニアンの微分位相幾何学的分類、バンドエンジニアリングに向けて。

バンドエンジニアリングとは固体の複数のバンドを衝突させることにより、そのバンド構造を変化させ、それにより物性の制御を目指すものであり、Dirac-cone engineeringを含むより一般的な枠組みを指す。近年、ナノテクノロジーおよび観測技術の進歩により、バンド構造を物性パラメータを変化させることで制御したり、バンド構造を直接観測したりすることが可能となってきた。そのバンドエンジニアリングを実現するためには、与えられた結晶の対称性および時間反転対称性の下、二つのバンドを衝突させることでバンドにどのような幾何学的変化が生じ、それによりどのように物性が変わるのかを理解することが重要である。本研究ではまず時間反転対称性又は空間反転対称性が破れた状況で、二つのバンドが衝突する瞬間にバンドにどのような幾何学的な変化が生じうるのかの包括的なリストを作成した[JMP 58, 073502 (2017)]。以上のような時間反転対称性又は空間反転対称性が破れた場合には、クラマース縮重が解けワイル点と呼ばれるバンド交差が生じうる。ワイル点は近年二つの実験グループにより相次いでその存在が実験的にも証明されている。本研究ではそのようなワイル点を含むより一般のバンド交差の包括的なリストを得た。それらは二つのバンドが衝突し、まさにバン

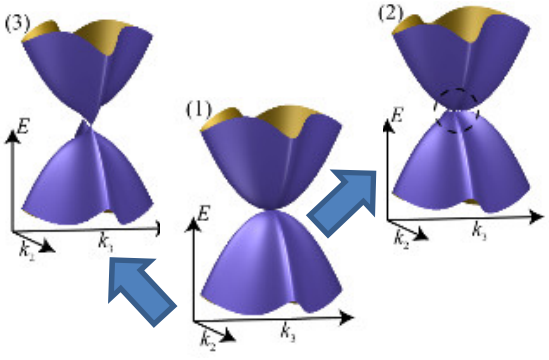


図1：バンド交差がいくつかのワイル点に分岐する様子。

ドの幾何学的構造が変わろうとする分岐において現れる。そのような交差を持つハミルトニアンの普遍開折を調べることにより、その分岐点においてハミルトニアンを摂動すると衝突したバンドにどのような幾何学的変化が生じるのかを調べることができる。

(2) 情報熱力学の構築

マイクロからナノスケールのメゾスコピック領域において，ダイナミクスの確率性を元に熱力学を構成しようとする確率的な熱力学と呼ばれる分野がある。確率的な熱力学において，特に近年では従来の情報理論と熱力学の関係が議論されており，情報理論と熱力学の融合分野である情報熱力学と呼ばれる研究が行われている。この情報熱力学はメゾスコピックな生体現象である細胞内の生化学反応の情報伝達などに適用可能なため，情報熱力学を用いることで生体系の情報処理を熱力学をベースに議論することができる。

直近では確率的な熱力学をベースとして，情報理論の幾何学的な理論形式である情報幾何との関係の解明を行なった。情報幾何における幾何学量は，熱力学的なエントロピー変化を用いて記述できることを明らかにし，幾何学的な不等式から熱力学的な不確定性原理を導くことに成功した。これは，状態の遷移に関する熱コストと，遷移スピードの間のトレードオフ関係になっており，酵素反応系などの生化学反応によって行われる情報伝達の熱力学的な原理的限界を与えるものになっている。

(3) 1 細胞ラマン分光から読み解く細胞診断

生細胞の Raman 顕微鏡画像は細胞全体、例えば膜組織や核といった細胞を成す構成要素、それから脂質、タンパク質、核酸などの細胞成分を形作る構成要素などについての情報を豊富に含んでいる。このように多くの情報を明らかにしているにも関わらず、現在の Raman 画像の分析手法は、観測によって得られる情報のほんの少ししか扱っていない。例えば、アポトーシスの直前にミトコンドリア膜からシトクロム c が放出されることが観察されているが、ミトコンドリアは局在化や同定の助けとなり得るその他多くの化学種を含んでいる。そのため、シトクロム c から生じる少数のスペクトル特性を用いるのではなく、細胞成分の分類における全スペクトルを用いることが有益と言える。さらに、我々は細胞スペクトルの分類に情報理論を活用した。すなわち、レート歪理論によるクラスタリングを用いることで、計測誤差の数ある原因の定量化および組み込みをすることで、雑音を含む Raman スペクトルの分類の精度を格段に高めることができた。図 2 ではそれぞれのスペクトルのクラスタが色分けされており、濾胞甲状腺癌細胞(図 2a)とヒトの濾胞甲状腺細胞(図 2b)の範囲が空間的にコヒーレントな領域に分類されており、それぞれがおおよそ化学的に特殊な細胞環境を示している。この結果を踏まえ、現在の研究ではそれぞれのクラスタが細胞ごとに占める量に焦点を当てることで、癌性および非癌性の細胞を識別する手法の提案を目指す。

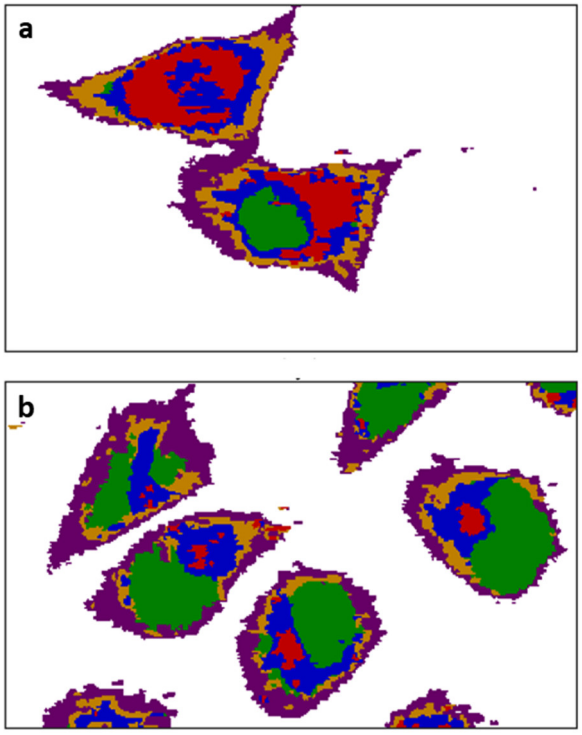


図 2 : 空間的にコヒーレントな細胞領域に示される癌性および非癌性のヒトの濾胞甲状腺細胞の Raman 顕微鏡画像のスペクトルの分類。内部の特殊な細胞環境を示す a) 濾胞甲状腺癌細胞と、b) ヒトの濾胞甲状腺細胞。

(4) 悪腕存在チェックアルゴリズムの開発

病気や機械の故障の診断などでは、どこか一箇所でも異常があると問題があるものと診断される。そのような診断では、最初に異常が見つかった時点で診断を打ち切って、異常ありと結論づけることができる。このような異常のあるなしをできるだけ速く診断する問題は、腕を引く毎に各腕ごとに固有な区間[0, 1]上の分布に従い損失を被る、損失版 K 腕バンディット設定において、損失平均がある閾値以上である腕が存在するか否かを、できるだけ少ない試行回数(腕を引く回数)で判定する「悪腕存在チェック問題」として定式化できる。

悪腕存在チェック問題では、与えられたグレイゾーン幅 $\Delta \in (0, 0.5)$ と閾値 $\theta \in (\Delta, 1-\Delta)$ に対し、損失平均 μ が $\theta+\Delta$ より大きければ正の腕、$\theta-\Delta$ より小さな場合は負の腕とする。与えられた許容誤り確率 $\delta \in (0, 0.5)$ に対し、正の腕が存在する場合には $1-\delta$ 以上の確率で「正」、負の腕しか存在しない場合は $1-\delta$ 以上の確率で「負」と出力するアルゴリズムを (Δ, δ)-悪腕存在チェックアルゴリズムと呼び、できるだけ試行回数が少ない (Δ, δ)-悪腕存在チェックアルゴリズムを開発することを目標とする。この設定に近い研究として、閾値バンディット問題と最良腕識別問題がある。悪腕存在チェック問題が少なくとも一つ正の

腕を見つければいいのに対し，閾値バンディット問題はすべての正と負の腕を正しく区別しなくてはいけない。また、最良腕識別問題は、損失平均が閾値よりも高い腕ではなく、最も高い腕を特定しなければいけない。

本研究では(Δ, δ)-悪腕存在チェックアルゴリズムにおいて、グレイゾーン幅 Δ がある程度大きい場合に、腕の正負の判定を少ないサンプル数で行える腕判定規則をもつアルゴリズムのサンプル複雑度の分析を行った。また、閾値バンディット問題に対する方策 APT を悪腕存在チェック問題に合わせて改良を行った APT-BC と最良腕識別問題に対する LUCB 方策を腕選択方策とした LUCB-BC に加え,累積報酬最大化問題に対する UCB 方策を腕選択方策として採用した UCB-BC を実行した際の停止までのサンプル数を、シミュレーション実験により比較を行った（図 3)。この実験では APT-BC の平均停止時刻がいつも最も早かった。また正の腕が多いときにはその差は顕著であった。これは、LUCB-BC や UCB-BC が複数の正の腕を多く選択してしまうのに対し、APT-BC は一つの正の腕を集中して引く傾向があるためだと考えられる。

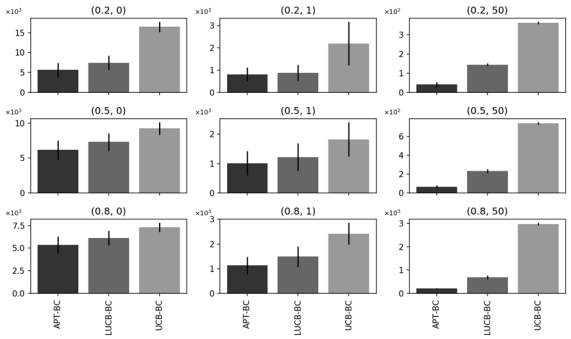


図 3：人工データによるシミュレーション実験の結果（Δ=0.1, δ=0.001)。損失がベルヌーイ分布に従う 100 腕のうち m 腕を平均損失が閾値よりも大きな腕とし、100-m 腕を平均損失よりも小さな腕とし、APT-BC、LUCB-BC、UCB-BC の 100 回実行した平均停止時刻とその 95%信頼区間をグラフにした。各グラフのタイトルは閾値 θ と正腕の個数 m を表す。

(5)アメーバにおけるリーダーフォロアー細胞の役割分化

細胞の集団運動は、例えば、癌の成長、創傷治癒、器官発生といった多くの生物学的過程において重要である。単細胞生物のコロニー、例えばアメーバ Dictyostelium discoideum(Dicty)は、ヒト組織を理解する上での望ましい特性を有している。この研究では情報理論的観点からそのシステムを分析することで、細胞凝集を明らかにすることを目指す。加えて、システム内での情報伝達を研究することで、細胞の影響の定量化、リーダーおよびフォロワー細胞の分類、命令を下す際のルールの理解を可能とする。

Dicty 細胞はサイクリック AMP と呼ばれる化学物質を放出することにより連絡を取り合うが、このサイクリック AMP は普遍的な化学物質であり、例えばヒトおよび動物の肝臓において糖類を ATP に変換する役割を担っているものである。Dicty 細胞はサイクリック AMP の勾配に近づくことでに反応し、さらにサイクリック AMP 自体を放出する。結果として、反応拡散系で有名なベロウソフ・ジャボチンスキー反応のような、細胞群を通るらせん波のパターンを生み出すこととなる。このようならせん波は心不整脈のような心臓の異常を引き起こす事も知られている。よって Dicty 細胞を理解することは、細胞の集団運動の理解を助けるだけでなく、生体系におけるらせん波の出現を理解することに繋がる。

直近では Dicty 細胞を実験とシミュレーションの両方から研究した。実験では、図 4 に示したように、Dicty 細胞の凝集による系の変化を調べるため、粒子画像流速測定を用いて速度場を算出した。凝集過程の発生につれて速度がますます空間的に相関するため、Shannon エントロピーによる凝集の予測が可能であることを発見した。加えて、細胞の凝集が始まると時間と共に「典型的」と「非典型的」の定義が変わるため、一連の典型性の手法により数時間前に凝集を予測することができる。さらには、個別の細胞のサイクリック AMP 濃度をたどることにより、リーダーおよびフォロワー細胞間でのエントロピーの移動がリーダー細胞特定のための有力なツールとなる。移動エントロピーが非対称があれば、リーダー-フォロワー関係が生じているであろうことを意味している。しかしながら、大きな細胞群の中での移動エントロピーの使用にはいまだ課題が残っており、更なるデータが必要となる。そのため、現在、大規模データセットの自動粒子追跡法に取り組んでいる。

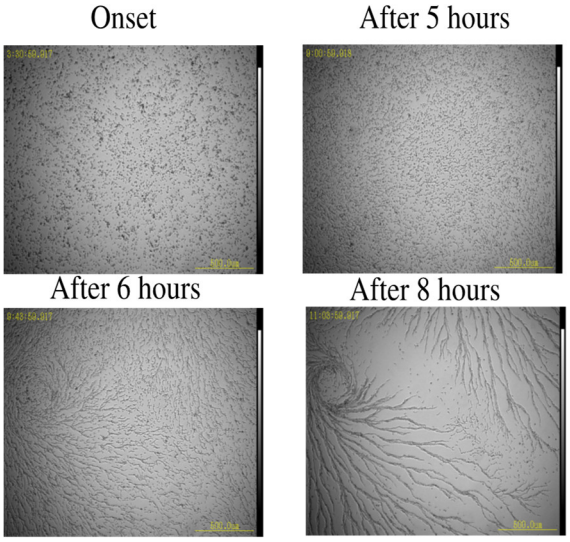


図 4：Dicty 細胞の典型的な凝集過程

(6) ラマン顕微分光画像の機械学習的アプローチ

機械学習によるデータ分析を組み合わせたラマン分光測定は、生体の異なる状態の組織におけるラマンスペクトルの違いを詳細に分析する強力な診断ツールと成り得る。特に、標的となる病気のバイオマーカーが特定されていないような場合にも重要となりうる。なぜなら、ラマンイメー

ジングは特定の分子に関する構造および化学情報をもたらすだけではなく、分析したサンプル全体の情報をももたらすため、あえてマーカー蛋白質によって同定する必要がないからである。

このラマン分光測定による診断において、適切なデータマイニング法の開発が要となる。そこで、ラマン信号に内在する分子のスペクトル差を参照することにより、基本的な組織型、疾病の段階を理論的に識別するアルゴリズムのプラットフォームを我々は開発している。特に我々は(CMDS もしくは ISOMAP のような)次元削減や、分類に基づくアンサンブル学習(ランダムフォレスト)を行なっている。次元削減は遥かに少ない次元で高次元データに内在する構造を探ることを可能にし、かつ、データを可視化することで異なる組織状態に対応するクラスタリングを行える。また、ランダムフォレストはラマンスペクトルの構造を学習することにより、スペクトルの特徴から最も関連のあるクラスタを見出すものである。非アルコール性脂肪肝疾患(NAFL)の線維症を予測するラットモデルを用いて、次元削減およびランダムフォレストをラマンイメージングに対して実行することで、まだ病理が観察されていない初期段階でも組織状態を見分ける診断の能力向上に繋がった。

また疾病の異なる段階を識別可能な特徴的なラマンスペクトルの周波数を同定し、NAFL の状態を２つに分類した。1 つが安定的な NAFL で、もう 1 つが NAFL に進行中の非アルコール性脂肪性肝炎(NASH)である。NAFL スペクトルは通常型および NASH の両方と大きく重複している部分と異なっている部分の両方が観察され、不均一性が見られている。

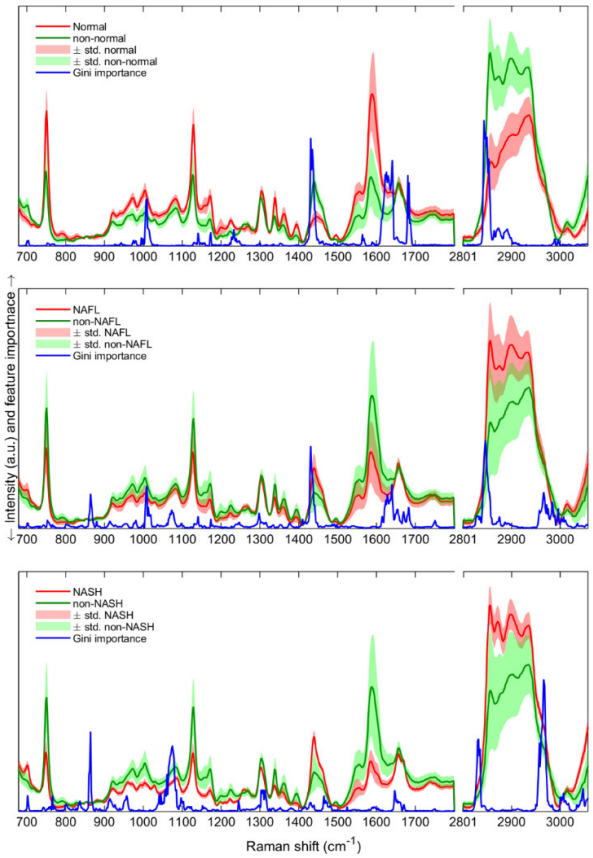


図 5：「正規型」対「非正規型」（上段）、「NAFL」対「非 NAFL」（中段）、「NASH」対「非 NASH」（下段）における重要な特性。

我々の手法でサンプルに内在する生化学的情報を抽出することにより、NAFL の異なる状態を識別するためのバイオマーカーが特定可能であり、またランダムフォレスト分類器を用いて、「正常」か「非正常」か、もしくは「NAFL」か「非 NAFL」かを分ける重要な波数を解明し、その波数は主に脂質と蛋白質に関連することを示した（図 5)。「NASH」では脂質の大量蓄積により、「非 NASH」とはタイプの異なる脂質になっている可能性がある。この診断方法が、ラットモデルの NAFL の線維症の予測に対して新たなツールとなりえ、ひいてはヒトの脂肪肝疾患の分析に非常に有効となり得ると考えている。

(7) 時間分解法を用いた、高感度蛍光ターゲット検出法の開発

放射性プローブを用いたガンなどの病変部の高感度検出法は、被曝また特殊な施設の必要性など問題が多く、放射性プローブを用いた手法から用いない手法への移行が望まれる。その一つには放射性プローブを蛍光プローブなどに置き換える手法である。しかし、生体組織による強い散乱により表面にある蛍光プローブの観測に限られ、深部にある蛍光プローブの検出は極めて難しい。これまで、光子検出システムとパルスレーザーを組み合わせた高い時間分解能を持つ計測により、深さ１ｃｍ程度に埋め込まれた蛍光プローブについての画像再構成手法を研究してきたが、実用に至るには、課題が多い。しかし、実際の医療現場では、その存在と定性的な位置に関する情報だけでも実用になる可能性があり、本年度はその方法を考察した。

蛍光体が組織などに埋め込まれている場合、検出限界は背景光により覆い隠されることによる。特に強い散乱体である場合、蛍光体の像が著しく広がることと、媒質の吸収による強度の減衰が相まって、背景光に埋もれ易くなっている。そのため、背景光と蛍光体由来の蛍光とを区別して測定することにより、より蛍光体の検出能を上げることができる。蛍光プローブに用いる色素は臨床に使用可能なインドシアニングリーン(ICG)に限られるため、その制限のもとに、時間応答の違いから区別する方法を確かめた。図には食肉をヒト組織と見立てたファントムを用い、ICGを含む蛍光体を埋め込みその蛍光の励起光パルスに対する時間応答関数を測定した。背景光の時間応答は蛍光体のそれよりも速く、その違いは2ns付近で最大であった図6(a)。その時間領域の強度を用いて蛍光像を作ったものと(gated)、定常光で得られるであろう蛍光像(total)を比較した(図6(b))。背景光が主体となる辺縁部での強度が時間領域を選ぶことにより下がり、コントラストが上昇していることがわかる。背景光と蛍光と強度比をコントラストと定義し、それを示したのが図6(c)である。コントラストは約５倍改善した。これは生体組織に埋め込まれた蛍光体についてより高感度

に検出可能であることを示している。今後、センチネルリンパ節の検出などの実際のヒトへの応用へと進める予定である。

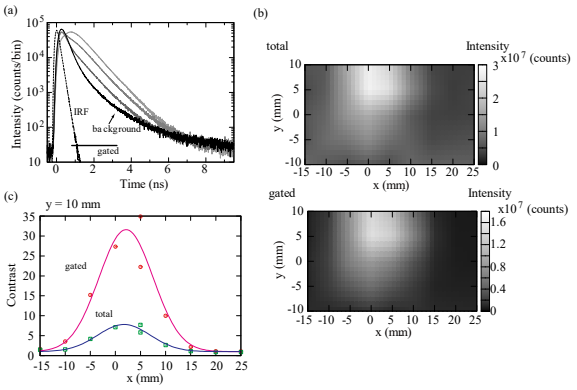


図 6：蛍光体を埋め込まれたファントムでの時間応答関数(a)とそれを用いて得られた蛍光像(b)。また蛍光像の y=10㎜ でのコントラストのプロファイル(c)。

3．今後の研究の展望

生体機能を司る分子は、多くの場合、アボガドロ数個ではなく、少数個が参画し、有限時間内に生体機能は生起する。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、シグナル伝達、エネルギー伝達、DNA複製などの細胞機能において重要な役割を果たす分子機械は、熱揺らぎに晒されながら、入力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から成り、平均熱エネルギー（～kBT）よりもさほど大きくない入力に対し、その機能を効率的かつ選択的に発現する。しかしながら、その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、引き続き、一分子生物学における自由エネルギー地形概念そのものの再考、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などを考察していき、一分子基礎学の創出を目指していく予定である。

一方、近赤外波長域を用いた生体組織レベルでの定量的計測法の確立を目指し、それを用いた生物システムの階層をまたいだ計測とその医学生物学応用を進めていく予定である。またそれにとどまらず幅広い応用も進めて行く。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） J. N. Taylor, M. Pirchi, G. Haran and T. Komatsuzaki: “Deciphering hierarchical features in the energy landscape of adenylate kinase folding/unfolding”, J. Chem. Phys. Special Issue Single Molecule Biology, 148: 123325-1-123325-14 (2018)

2） Y. Tamiya, R. Watanabe, H. Noji, C. Li and T. Komatsuzaki: “Effects of non-equilibrium angle fluctuation on F1-ATPase kinetics induced by temperature increase”, Physical Chemistry Chemical Physics, 3(20): 1872-1880 (2017)

3） N. Hervieux, S. Tsugawa, A. Fruleux, M. Dumond, A. Routier-Kierzkowska, T. Komatsuzaki, A. Boudaoud, J. C. Larkin, R. S. Smith, C. Li and O. Hamant: “Mechanical Shielding of Rapidly Growing Cells Buffers Growth Heterogeneity and Contributes to Organ Shape Reproducibility”, Current Biology, 27(22): 3468-3479 (2017)

4） J. Alfermann, X. Sun, F. Mayerthaler, T. E. Morrell, E. Dehling, G. Volkmann, T. Komatsuzaki, H. Yang and H. D. Mootz: “FRET monitoring of a nonribosomal peptide synthetase”, Nature Chemical Biology, 13: 1009-1015 (2017)

5） H. Teramoto, K. Kondo, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki: “Classification of Hamiltonians in neighborhoods of band crossings in terms of the theory of singularities”, Journal of Mathematical Physics, 58: 073502-1-073502-39 (2017)

6） K.Prieto, and G.Nishimura, “A new scheme of the time-domain fluorescence tomography for a semi-infinite turbid medium.” Opt.Rev. **24**, 242-251, (2017)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） 小松崎 民樹:化学反応理論の普遍性：GRRM に期するもの、IQCE NEWS No.57, 1(2018).

2） 西村 吾朗 :「組織等散乱体内部に含まれる蛍光物質の高感度検出技術」、ケミカルエンジニアリング、６３(２):165-170 (2018).

3） 冨樫 祐一、新海 創也、小松崎 民樹: 「特集：少数性生物学ってなんだ？:「少数と個性―分子の数と生命らしさ」」、実験医学、35(19): 3190-3196 (2017)

4） 伊藤創祐, 沙川貴大: 「ネットワーク上の情報熱力学とその生体情報処理への応用」、日本物理学会誌、72(9):658 (2017)

5） 伊藤創祐: 「《講義ノート》ネットワーク上の情報熱力学とその生体情報処理への応用（第 62 回物性若手

夏の学校　集中ゼミ)」、物性研究、6(4):064232 (2017)

6） 西村 吾朗 ：「近赤外生体分光に関する最新技術」、光アライアンス 、28(6): 7-10 (2017).

4.4 著書

1） M. Tavakoli, J. N. Taylor, C.-B. Li, T. Komatsuzaki and S. Pressé : “Single Molecule Data Analysis: An Introduction” Advances in Chemical Physics”, John Wiley & Sons Inc. 162, 205-306 (2017)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

1） 西村 吾朗：特願2017-181583、「生体検査装置及び生体検査方法」、2017.9.21.

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） S. Ito* : “Stochastic thermodynamics of information”, Frontiers of complex systems science: soft matter, biophysics, and statistical physics, Institute of Physics Auditorium, Academia Sinica, Taipei, Taiwan (2018-01).

2） T. Komatsuzaki* : “How one can extract energy landscape from single molecule time series under the existence of noise?”, The 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Single-Molecule Biophysics, Seoul National University, Korea (the Republic of) (2017-11)

3） T. Komatsuzaki* : “Energy landscapes learned from single molecule FRET time series : Role of Photobleaching”, Deciphering complex energy landscape and kinetic network from single molecules to cells: a new challenge to make theories meet experiments, Hotel Mercure Dijon, France (2017-09)

4） S. Ito* : “Thermodynamics of information on biochemical signaling networks”, Deciphering complex energy landscape and kinetic network from single molecules to cells: a new challenge to make theories meet experiments, Hotel Mercure Dijon, France (2017-09)

5） T. Komatsuzaki* : “Global Transition States in Reaction Network”, Telluride Workshop on Chemistry & Dynamics in Complex Environments, Telluride Elementary School, United States of America (2017-06)

6） T. Komatsuzaki* : “Data-driven mathematics in single cell Raman imaging”, Telluride Workshop on The Complexity of Dynamics and Kinetics from Single Molecules to Cells, Telluride Elementary School, United States of America (2017-06)

b．招待講演（国内学会）

1） 小松崎 民樹* ：「一細胞ラマン計測と情報科学の高度融合による情報計測技術」、2017 年度第 2 回バイオ単分子研究会、御茶ノ水ＡＴＩ会議室(2018-03)

2） 小松崎 民樹* :「1 細胞ラマン分光イメージングと情報科学の interdependent な融合を目指して」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス(2018-03)

3） 小松崎 民樹* ：「一細胞ラマン計測と情報科学の融合による少数性の生命科学」、2017 年度生命科学系学会合同年次大会、神戸国際会議場(2017-12)

4）伊藤 創祐* : 「生化学系の情報熱力学」、第 60 回自動制御連合講演会、電気通信大学(2017-11)

5）小松崎 民樹* : 「How can one quantify singularity in cells from Single Cell Raman Imaging?」、第 55 回日本生物物理学会年会、熊本大学黒髪北地区(2017-09)

6）伊藤 創祐*, ten Wolde Pieter rein: 「Information thermos dynamic study of biochemical clock」、第 55 回日本生物物理学会年会、熊本大学黒髪北地区 (2017-9)

7）伊藤 創祐* : 「生体適応センサーの情報熱力学」、日本神経回路学会 時限研究会 2017、京都大学吉田キャンパス、Japan (2017-7).

8）小松崎 民樹* : 「一細胞ラマン計測と情報科学の融合による細胞診断」、2017 年度人工知能学会全国大会、ウインクあいち(2017-05)

c．一般講演（国際学会）

1） T.Suzuki, R. Saito, N.Kitada, T.Koike, S.Maki, Y.Michiwaki, G.Nishimura, H.Niwa and Y.Yamada, “Aspiration Risk Detection Using Oral Administration of Fluorescent Food -- Preliminary Experiments Using Meat Phantoms”, 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2017, Oct.17-Oct.19, Science Park of Beijing Institute of Technology, Beijing, China).

2） H. Teramoto* : “Application of Singularity Theory to Material Sciences ”, Geometric and Algebraic Singularity Theory, Będlewo Conference Center, Poland (2017-09)

d．一般講演（国内学会）

1） 西村　吾朗,「生体組織中にある蛍光ターゲットの高感度検出」,Optics and Photonics Japan 2017, (2017) 10.30-11.2 (筑波大学東京キャンパス文京校舎、文京区)

2） 寺本 央*、泉屋 周一、小松崎 民樹 ：「断熱エネルギー面交差近傍でのハミルトニアンの特異点論による分類」、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学 上田キャンパス(2017-09)

3） K. M. Helal*, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : “Information-theoretical data analysis approaches to Raman micro-spectroscopic images”, 第 11 回分子科学討論会, 東北大学 川内北キャンパス(2017-09)

4） 伊藤 創祐*, P. R. ten Wolde : 「生化学時計の情報熱力学」、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学上田キャンパス(2017-09)

e． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以

外）

1） 小松崎 民樹*：「一細胞ラマン計測と情報科学の高度融合による情報計測技術」、2017 年度第 2 回バイオ単分子研究会、御茶ノ水ＡＴＩ会議室、Japan (2018-03)（招待）

2） K. M. Helal*, C. Harsono, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : “Mulitivariate Data-driven approach to Raman Hyper-spectral Images to Diagnose Non-alcoholic Fatty Liver Disease(NAFLD)”, 2017 年度日本生物物理学会北海道支部例会, 北海道大学理学部 5 号館, Japan (2018-03)

3） S. Sattari* and T. Komatsuzaki : “Understanding cell colony dynamics from images using velocity extraction and analysis”, 2017 年度日本生物物理学会北海道支部例会, 北海道大学理学部 5 号館, Japan (2018-03)

4） 田畑 公次*、中村 篤祥、本多 淳也、小松崎 民樹：「試行回数の少ない悪腕存在チェックアルゴリズム」、人工知能学会第 106 回人工知能基本問題研究会、指宿市民会館、Japan (2018-03)

5） 伊藤 創祐*:「Stochastic Thermodynamic Interpretation of Information Geometry」、若手研究会「統計物理学とその周辺」、東京大学理学部(2018-03) （招待）

6） 寺本 央*:「特異点論の物質科学への応用」、さきがけ「数学協働」第 8 回領域会議、ホテルコスモスクエア国際交流センター、Japan (2018-02)

7） G.Nishimura, “Diffuse Correlation Spectroscopy: Analysis of Moving Particles”, Inverse problems and medical imaging, (Graduate School of Mathematical Science, The University of Tokyo, 13 Feb.-- 16 Feb., 2018)

8） 西村　吾朗,「散乱光の時間応答関数と入射出射ジオメトリ」、輸送理論と生体医用光学, (産総研臨海副都心センター, 1 Feb. 2018).

9） 伊藤 創祐*：「情報熱力学の進展：細胞内ネットワーク及び情報幾何への拡張」、東北大学数理科学連携研究センター・ワークショップ　細胞内ネットワークのダイナミクス～生物学と数理科学の協働～、東北大学大学院情報科学研究科(2018-01) （招待）

10）田畑 公次*、中村 篤祥、小松崎 民樹：「多階層システム生物学におけるデータ駆動科学の展開」、北海道大学電子科学研究所 平成２９年度 研究交流会、北キャンパス電子科学研究所・１階会議室、Japan (2018-01)

11）伊藤 創祐*:「情報理論と熱力学」、北海道大学電子科学研究所 平成２９年度 研究交流会、北キャンパス電子科学研究所・１階会議室、Japan (2018-01)

12）小松崎 民樹*：「北大と日立基礎研センタ連携による新概念コンピューティングの理論と応用」、AIMaP 異分野連携のノウハウの共有と水平展開を目指すワークショップ、日本橋ライフサイエンスビルディング、Japan (2017-12) （招待）

13）寺本 央*:「自然現象の中に潜む特異点」、琵琶湖特異点論ワークショップ、ビューロッジ琵琶、Japan (2017-12) （招待）

14）H. Teramoto*, S. Izumiya and T. Komatsuzaki : “Toward Molecular Propagation through Degenerated Electron Energy Level Crossings”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 〜 2017-12)

15）S. Ito* : “Thermodynamics and information geometry”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 〜 2017-12)

16）K. M. Helal*, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : “Raman Microscopic Image Analysis based on Information-theoretic Approach”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 〜 2017-12)

17）K. Tabata*, A. Nakamura and T. Komatsuzaki : “Bad Arm Existence Checking Algorithm”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 〜 2017-12)

18）J. N. Taylor* and T. Komatsuzaki : “Apparent Nonequilibrium Behavior in Single-Molecule FRET Time-Series Induced by Photophysics”, The 18th RIES-Hokudai International Symposium, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan (2017-11 〜 2017-12)

19）スリモン サッタリ*、小松崎 民樹：「Predicting Biological Cell Aggregation Using Scalable Random Forest Decision Trees」、The 18th RIES-Hokudai International Symposium、Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo、Japan (2017-11 〜 2017-12)

20）小松崎 民樹*、中村 篤祥、藤田 克昌、原田 義規：「ラマン分光イメージング計測と情報科学との高度融合」、2017 年度 人・環境と物質をつなぐイノベーション創出 ダイナミックアライアンス G3 分科会ー異分野融合とイノベーション創出を目指してー、東北大学 片平キャンパス さくらホール / 秋保温泉 ホテルニュー水戸屋、Japan (2017-11)

21）小松崎 民樹*：「ラマン分光イメージングにおける情報計測技術の展開」、基盤(S) 離散構造処理系プロジェクト 「2017 年度 秋のワークショップ」、ホテル五味、Japan (2017-11)

22）田畑 公次*、中村 篤祥、本多 淳也、小松崎 民樹：「グレイゾーン幅を利用した悪腕存在チェックアルゴリズム」、第 20 回情報論的学習理論ワークショップ、東京大学本郷キャンパス、Japan (2017-11)

23）山田 寛子*、小松崎 民樹：「ラマンスペクトルで細胞の病態を分けるーPCA とランダムフォレストを用

いてー」、研究会「理論と実験」2017、広島大学東広島キャンパス、Japan (2017-10)

２４)伊藤 創祐*:「生化学時計の情報熱力学」、研究会「理論と実験」2017、広島大学東広島キャンパス、Japan (2017-10)

２５)伊藤 創祐*:「Langevin 系における熱力学, 情報熱力学」、Perspectives of Nonlinear Phenomena in Random and Non-autonomous Dynamics、京都大学 理学部 3 号館、Japan (2017-9) (招待).

２６)伊藤 創祐*:「ネットワーク上の情報熱力学と生体シグナル伝達への応用」、第 62 回物性若手夏の学校、ぎふ長良川温泉ホテルパーク、 Japan (2017-8) (招待)

２７)寺本 央*:「特異点論による固有値交差近傍でのハミルトニアンの分類」、RIMS 共同研究 力学系 ー 理論と応用の連携探索、京都大学数学教室、Japan (2017-06)

２８)小松崎 民樹*:「多階層システム生物学におけるデータ駆動科学の展開」、「新学術領域研究」スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成 2017 年度第 1 回公開シンポジウム、東京大学 武田ホール、Japan (2017-06)

２９)寺本 央*:「特異点論によるバンド交差近傍でのハミルトニアンの分類」、微分幾何学と特異点論の応用、岩手医科大学創立６０周年記念館、Japan (2017-06)

３０)田宮 裕治*、小松崎 民樹:「タンパク質一分子の粘弾性挙動を記述する方程式と内部摩擦の考察」、理研シンポジウム「細胞システムの動態と論理 IX」、理化学研究所 生物科学研究棟、Japan (2017-04)

4.7 シンポジウムの開催

1) 寺本 央、山岡 雅直:「AIMaP ワークショップ「非ノイマン型計算、理論と応用」、北海道大学電子科学研究所 (北海道札幌市) (2018 年 03 月 30 日)

2) 小松崎 民樹:「北大・日立新概念コンピューティングコンテスト 2017 表彰式」、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区) (2018 年 03 月 15 日)

3) M. Nagayama, K. Ijiro, N. Tamaoki, H. Uji-i, H. Kaiju, H. Aonuma, H. Mitomo, H. Teramoto, K. Sato, T. Inose, M. Jusup, Y. Kim, M. Akiyama and K. Sakai : “The 18th RIES-HOKUDAI International Symposium 極 [kyoku] joint with the 2nd International Symposium of Dynamic Alliance for Open Innovation Bridging Human, Environment and Materials (the Five-Star Alliance) ”, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO (北海道札幌市) (2017 年 11 月 30 日～2017 年 12 月 01 日)

4) P. Senet and T. Komatsuzaki : “Deciphering complex energy landscape and kinetic network from single molecules to cells: a new challenge to make theories meet experiments”, Hotel Mercure Dijon (Dijon France) (2017 年 09 月 03 日～2017 年 09 月 08 日)

5) 小松崎 民樹 :「ラマン情報計測会議」、19 人、ニセコ町民センター (虻田郡ニセコ町) (2017 年 08 月 18 日～2017 年 08 月 20 日)

6) T. Komatsuzaki, R. S. Berry and S. Presse : “The Complexity of Dynamics and Kinetics from Single Molecules to Cells”, 25 人, Telluride Intermediate School (Telluride, CO. United States of America) (2017 年 06 月 20 日～2017 年 06 月 24 日)

4.8 共同研究

ａ. 所内共同研究

該当なし

ｂ. 民間等との共同研究

1) 株式会社日立製作所「数理モデルとハードウェアアルゴリズムに基づく社会応用」2016-2018 年度

2) 株式会社ニコン「光学的手法を用いた生体組織計測技術に関する応用研究」2015.6-2018.7

ｃ. 委託研究

該当なし

ｄ. 国際共同研究

1) J. N. Taylor, 小松崎民樹 (北海道大学)、Gilad Haran (ワインズマン研究所、イスラエル) との国際共同研究「AKタンパク質の折りたたみ一分子観察からのエネルギー地形再構成」

2) 小松崎民樹 (北海道大学)、Rigoberto Hernandez (ジョンズ・ホプキンス大学) との国際共同研究「化学反応動力学における相空間構造理論」

4.9 予算獲得状況 (研究代表者、分類、研究課題、期間)

ａ. 科学研究費補助金

1) 小松崎 民樹、基盤研究 B 特設分野研究、少数系から複雑反応ネットワークを含む遷移状態概念の深化と制御、2015～2017 年度

2) 小松崎 民樹、新学術領域研究、多階層システム生物学におけるデータ駆動科学の展開、2017 年度

3) 小松崎 民樹、萌芽研究、細胞の集団と少数性のシステム生物学、2016～2018 年度

4) 小松崎 民樹、基盤研究 B 、生命動態システムに対する分子データ科学の構築、2017～2019 年度

5) 伊藤 創祐、若手 B、シグナル伝達系の情報熱力学、2017 年度

ｂ. 大型プロジェクト・受託研究

1) 小松崎 民樹、CREST、一細胞ラマン計測と情報科学の融合による細胞診断の迅速解析技術の開発、2016～2021 年度、科学技術振興機構

2) 小松崎 民樹、株式会社日立製作所)、数理モデルとハードウェアアルゴリズムに基づく社会応用、2016～2018 年度

3) 寺本 央、さきがけ、特異点論の物質科学への応用、

2016～2019 年度、科学技術振興機構

4) 西村吾朗、連携協定活用型事業「構造化照明と機械学習による散乱媒体内部の検査技術に関する調査研究」北海道総合研究機構, 2017.7.-2018.2

4.10 受賞

該当なし

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1） 小松崎 民樹：(財)新世代研究所 バイオ単分子研究会委員（H21 年 4 月～現在）

2） 小松崎 民樹：北海道大学共同プロジェクト拠点「知識メディアラボラトリ」運営委員(H29 年 4 月～現在)

b．国内外の学会の役職

1） 小松崎 民樹：生物物理学会刊行「Biophysics and Physicobiology」編集委員（H25年1月～現在）

2） 小松崎 民樹:生物物理学会理事（H27年6月～H29年6月）

3） 小松崎 民樹:日本化学会北海道支部支部役員(幹事)(H26年3月～現在)

4） 小松崎 民樹：Editorial Board “Scientific Reports” Division of Chemical Physics（H29年2月～現在）

5） 小松崎 民樹：日本化学会北海道支部学会賞推薦委員・学術賞等推薦委員（H29年4月～現在）

6） 小松崎 民樹:生物物理学会理事重点大型研究計画マスタープラン2017作業部会メンバー(H29年4月～現在)

c．兼任・兼業

1） 西村　吾朗:理化学研究所生命システム研究センター細胞動態計測コア、客員研究員(2014.5～)

d. 外国人研究者の招聘

1） Henry Arguello、Colombia（2017 年 09 月 25 日～2017 年 09 月 27 日）

2） Arezki Boudaoud、France（2017 年 07 月 31 日～2017 年 08 月 01 日）

3） Bi-Chang Chen、Taiwan (Province of China)、(2017 年 07 月 31 日)

4） Sky Nicholson、United States of America、(2017 年 07 月 11 日～2017 年 08 月 07 日)

5） Jason Roger Green、United States of America、(2017 年 06 月 12 日～2017 年 08 月 11 日)

6） David Allouche、France、(2017 年 05 月 01 日～2017 年 05 月 02 日)

7） Andrey Gritsenko、United States of America、(2017 年 04 月 04 日～2017 年 04 月 30 日)

e．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、微分積分学Ⅱ、寺本　央、2017 年 10 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

2） 理学部、基礎数学演習Ｄ、寺本　央、2017 年 10 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

3） 全学共通、化学Ⅰ、小松崎 民樹、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

4） 理学部、ナノ物性化学、小松崎 民樹、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

5） 理学部、超分子化学、小松崎 民樹、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

6） 生命科学院、生命情報分子科学特論、小松崎 民樹、2017 年 04 月 01 日～2017 年 09 月 30 日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 高校生(北海道立札幌西高等学校)、国民との科学・技術対話出張講義、「光で生体を見る！」西村 吾朗(2016. 10. 25)

g．新聞・テレビ等の報道

該当なし

h．ポスドク・客員研究員など

1） Sulimon Sarrari（博士研究員、2017.7～）

2） 田畑公次（博士研究員、2017.7～2017.12）

3） Sky Nicholson（外国人協力研究員、2017.7～2017.8）

4） Kernel Enrique Prieto Moreno (博士研究員, ニコンとの共同研究(2017.4.1-5.31)).

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0名

博士学位：0名

知能数理研究分野

教　授　中垣俊之（名大院、学博、2013.10～）
准教授　佐藤勝彦（京大院、理博、2014. 12～）
准教授　佐藤譲（東大院、学博、2017.4～）
助　教　黒田茂　（北大院、理博、2013.10～2018.03）
大学院生　ダニエル シェンツ（D2），越智翔大（M1），飯塚洸介（B4）

１．研究目標

生き物の賢さは一体どのようにして生み出されるのだろうか？　生命システム特有の情報処理のしくみは、古代ギリシャ時代から今日に至るまで、その時代の学問を総動員して連綿と問い直されてきた問題である。これに取り組むことは、基礎学問として、人間そのものの理解を深めるであろう。生物らしい情報処理の方法を捉えることができれば、人間になじみの良い知能機械の設計応用も期待できる。

我々は、細胞の行動を主な対象として、生物の情報処理能力の高さを実験により評価し、さらにそのしくみをダイナミクスの観点から解明することを目指す。単純な体制を活かして、モノの運動法則から生物行動を理解するという、いわば生命情報処理の原点を志向している。そのために、理論や実験ならびにフィールド調査を、また生命科学や数物科学および情報科学を活用する。

具体的には８つの研究テーマを掲げている。(1)単細胞生物からヒトにいたる生命知の基本アルゴリズムの探求、(2)生体システムの用不用適応則から読み解く形状と機能の最適化、(3)単細胞生物の行動と情報処理過程の可視化技術の開発、(4)生物行動の多様性と柔軟性を担うダイナミクスの解明、(5)這行運動の一般力学とその制御機構の解明、(6)胚発生の形態形成における細胞集団の力学解析、(7)生体の神経系と身体の相互作用に関する進化的検討、(8)収縮性タンパク質のレオロジーから読み解く細胞運動。

２．研究成果

(a) 粘菌の用不用則にならった形状最適化設計法の検討

生物システムのつくる構造物は優れた機能性を有しているとしばしば指摘される。そのような機能的な構造がどのようなアルゴリズムによって設計されているかは，興味深い問題である。本研究では，真正粘菌モジホコリという真核単細胞生物がつくる輸送ネットワークの設計方法にヒントを得た構造物の設計方法を検討した。最たる特徴は，「よく使われる部分は強化され，そうでない部分は弱化される」という，いわゆる「用不用則」である。この運動規則がシステムの局部で自律的かつ分散的に作用することによって，全体としてある種の最適性が実現された。まずはじめに，流量強化則の事例として交通網と町の共発展現象を検討し，次に構造物に題材を変えてヒト大腿骨におけるリモデリング現象を検討した。そののち，単純な例題として片持梁のデザインに用不用則を適用した。「どれほど使われるとどれほど強化されるか」を定める関数形（さじ加減）によって，多様なトポロジーをもつ形状が生み出された。また，初期状態をあえて一様でなくして，偏りをつけておくことによっても，多様さが生じた。これら二つの要因で形状を調整できることは設計の立場からすると都合がよいと思われる。この最適化法の可能性について議論した。

(b) 粘菌の輸送ネットワークの生理と数理

血管や葉っぱの支脈などのような管のネットワークの形成は生物にとって重要である。なぜなら栄養を隅々まで効率よく分配しまた老廃物を回収しなければならないからである。この管のネットワークは遺伝的に決まっているものというよりは、その場の状況に合わせてフレキシブルに変化するものであり、何によってその形成がコントロールされているのかは未だ謎のままである。

我々この問題に対して、実験と理論の両方からアプローチするために、有用なモデル系である真正粘菌モジホコリの管ネットワークに注目した。その最大の利点は、約一日で複雑な管ネットワークを作り上げることである。粘菌モジホコリの管ネットワークの幾何学を解析するための画像処理ソフトウエアを開発した。ある特定形状の閉鎖空間から脱出するときにできる管ネットークの輸送性能を評価した。ポアズイユ流を仮定して太さと長さにより管のコンダクテビテイを空間の任意の点で出口点を基準に定量化して等高線図を描いた。粘菌の管ネットワークは、空間形状に合わせて効率的な輸送性能を有することがわかった。血管などで知られるマレー則が成立することも明らかになり、生物輸送系一般の共通性を研究する上でも興味深くなってきた。

さらに粘菌の輸送ネットワークの配管規則（空間のどこに管を敷設するかという性質）について調べた。粘菌の輸送管は、細長いジグザグ通路を伸びる時、曲がり角でインコースをなぞるようにできる。そうすることで通路を貫く管路の長さが短くなり輸送効率も上昇する。この管路のコース取りは、これまで知られている流量強化則（管内の流れに強さに依存して管径が変化するという適応性）によるので、流れの方向性を画像処理により見積もることで、管ができるコースを予測した。この予測は、現実と概ね一致した。

また粘菌のネットワーク形成は収縮運動のパターン形成に基づいているので、収縮運動の性質についても研究成果を得た。

(c) 真正粘菌変形体の逡巡行動の多様性

真正粘菌変形体は毒物に遭遇すると迷い行動を示した後で、複数の行動の選択肢の中から一つを選んで行動する（行動多様性と呼ぶ）。その粘菌の行動選択の仕組みを明らかにするために、粘菌の行動を再現する数理モデルの構築と解析を行った。その結果、（１）毒物のみならず栄養物等の複数種類の化学物質で類似の行動多様性がみられたことから、この行動多様性は特定の化学物質に限定した性質ではない

こと、(２) 粘菌が化学物質帯に遭遇すると、化学物質帯の直前､途中､直後など異なる場所で立ち止まったことから、さらなる行動多様性が見つかったこと、(３) 粘菌運動の数理モデリングにより、粘菌の内的揺らぎや環境のちょっとしたゆらぎにより、行動多様性が生み出される可能性があることがわかった。

(d) 適応的這行運動の力学的数理モデル

ムカデやヤスデといった脚式這行動物やナメクジやミミズといった非脚式這行動物は、ともに体軸に沿って配置された多数の身体部位を時空間的に高度に協調（“運動波”と呼ばれる）させて移動している。我々はある種のムカデが接地面の状況により逆向波と順向波を使い分けていること、更に逆向波から順向波へまたはその逆方向への連続的な歩容遷移等が存在することを発見した。本年度は、運動波を用いた這行移動の力学的数理モデルを構成し多自由度系の自律分散式適応制御の観点から解析を行い以下の有力なシナリオを得た：(1) 各身体部位の周期的な基本運動は中枢神経系によりルーズに規定され、それ自体は多様な歩容を包含する。これら多様な潜在的歩容リズムは、(2)接地による地面と体の力学的相互作用の情報が筋肉の力学的状態を感知する自己受容性感覚神経系から中枢神経系へフィードバックされることにより単一の歩容が安定化される。(3)このフィードバック様式が状況依存性･種依存性を持つことにより状況依存的・種依存的歩容が生じる。

(e) 繊毛虫テトラヒメナの空間記憶能

生物の記憶や学習の物理機構を明らかにするために、繊毛虫テトラヒメナの空間適応能を調べてきた。生物実験からテトラヒメナが空間の形状や大きさに対する記憶能を持つことを示しえた。テトラヒメナ遊泳速度や方向は、それを司る膜電気現象の動態によっているので、ホジキンハクスレー方程式の考え方にならって、単純化した数理モデルを構成した。膜電位をもたらすカルシウムイオンチャネルの運動に関わる遅い緩和モードのはたらきによって、空間記憶能がもたらされうることをつきとめた。

(f) 繊毛虫ゾウリムシの学習行動における実験的評価とその動力学的機構

単細胞生物繊毛虫のゾウリムシに着目して，数分程度で起こる学習行動のメカニズムの解明を試みた．ゾウリムシは繊毛という小器官を打つことによって遊泳する．そしてその繊毛運動は,膜電位やCa2+ によって制御されていることがよく調べられており，行動と生体内反応が対応付けられている．また，その膜電位の挙動がHodgkin-Huxleyタイプのモデル方程式で説明できることが知られている．このことは，学習行動のしくみが膜電位方程式に帰着できることを示唆している．したがって，ゾウリムシは学習行動のメカニズムを研究するうえで非常に良いモデル生物である．

本研究での成果は以下の 3 点である．(1) キャピラリー空間に閉じ込められた際に生じる新規学習行動の発見．ゾウリムシは転回できないほど細いキャピラリー空間に閉じ込められると，それまで見られなかった長期後退遊泳を示すようになった．(2) キャピラリー空間での運動経験がもたらす新規学習行動の発見．ゾウリムシはキャピラリー空間をしばらく遊泳すると，その後，広い空間に出た後も直線的な遊泳を示すようになった．(3) これらの実験により発見した新たな学習行動のメカニズムを解明するための数理モデルの提案．従来の膜電位方程式と繊毛打調節の関係を再検討し，新たな膜電位方程式を構成した．このモデルは，我々が発見したゾウリムシの新規の学習行動を再現した．モデルからの解析により，ゾウリムシの学習行動をもたらす機構は，繰り返し起こる壁との衝突刺激によって Ca^{2+} チャネルが遅い時間スケールで反応することが鍵であることが示唆された．より一般的にいうと，短時間の学習行動が膜電位の挙動として理解できることを示した．これはゾウリムシの短期学習機構の新しい概念といえる．

(g) 線虫の行動学

C. elegans(線虫)は生物の業界で最もよく調べられているモデル生物の一つであり、例えばゲノムすべて明らかにされている。しかしながら、その行動についてはそれほどよく調べられていない。特に集団的な振る舞いや、dauer と呼ばれる耐性状態の行動はあまり調べられていない。これらの行動には自然界で生き延びる知恵が隠されていると考えられ、生物学的にも重要なテーマとなっている。集団運動に関しては、昨年度、我々はC. elegans を高密度で寒天上に放置すると、自発的に集合し、ある特有のパターンを作ることを発見した。今年度、我々はその現象に対する数理モデルを作成し、線虫がパターンを作る仕組みを提案した。耐性幼虫の行動学に関しては耐性幼虫をある状況下に設定すると高速で移動することを発見した。その高速移動が力学的メカニズムと生物学的意義を考察した。

(h) 鞭毛虫クラミドモナスの運動学

クラミドモナスは古くから繊毛の動力学や走光性などのメカニズム解明のためによく用いられているが、そのアプローチは分子的なものがほとんどであり、運動学的、力学的なアプローチはほとんどない。我々はクラミドモナスが光の明暗の境界に集まることに注目し、クラミドモナスがマクロ的に作る集合パターンを調べた。新奇なパターンを発見した。そのパターンの生成メカニズムを実験と数理との両方から解き明かすことに挑戦している。

(i) 非線形確率現象における確率カオスの研究

非線形確率現象のひとつである確率カオスをランダム力学系理論の立場から概念化、定式化し、分岐や不変量の定量化に成功した。とくに旋回流の実験データにおいてstochastic Duffing chaosを発見し、分岐構造などの現象論的な分析を行うことにより、実際の大自由度動力学系の解析を行った。確率共鳴、ノイズ同期、確率カオスといった確率非線形現象は生物系にも普遍的に生じると考えられている。とくに微生物の空間運動の異常拡散性を実験データに基づきランダム力学系理論を用いて解析した。

３．今後の研究の展望

(a) 用不用則による交通輸送ネットワークの構築

粘菌が形成する管ネットワークの発達の仕組みは、「多く流れる部位は発達し、そうでない部位は衰退する」という用不用則に依っている。この生物式適応ネットワーク形成の基本設計則に基づいて、現実社会の様々なネットワーク(北海道の交通網や国際的光ケーブル網など）の設計を、複数要因間の最適トレードオフの観点から検討する。また更に進んで、町と道の共発展モデルを考察する。

(b) 繊毛の運動の力学モデル

繊毛は真核生物のほとんどすべての細胞に生えており、細胞の感覚器官、運動器官として重要な役割を果たしている。繊毛の異常は直ちに真核生物の表現型の異常につながってしまうほど、真核細胞の最も重要な器官の一つである。繊毛は基本的には微小管の束（９本もしくは９＋２本）からできており、キネシンなどの分子モーターなどの駆動力、相互作用によって波うち運動のような多種多様な動きができることが知られている。しかしながらその力学的メカニズムは未だ明らかにされていない。微小管、分子モーター、結合分子の相互作用を力学モデルで表現し、単純な力学相互作用だけでこれらの繊毛の運動が再現できるかを確認する。

(c) マイクロ流路によるマイクロエソロジー研究の確立

今年度、笠晴也氏らナノ加工・計測技術班の協力によりゾウリムシ等の繊毛虫が遊泳可能なサブミリオーダーの流路をガラス基板上に自在に実現する為のノウハウの蓄積を行った。今後、これらの技術を基盤として繊毛虫の為の系統的な行動研究法を確立し、新たな研究分野を開拓することを目指す。

(d) 単細胞生物の自発運動の時系列解析

微生物の自発運動の実験データから空間運動のダイナミクスを抽出し、その異常拡散性について、ランダム力学系理論の観点から解析する。リターンマップにより単体の自発運動のダイナミクスを離散写像系でモデル化し、集団の運動を結合写像系でモデル化する。少数の単細胞生物の相互作用による空間運動の多様性のメカニズムを探る。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1) S. Daniel, S. Yasuaki, S. Kuroda, T. Nakagaki and K. Ueda, “A mathematical model for adaptive vein formation during exploratory migration of Physarum polycephalum: routing while scouting”, Journal of Physics: Applied Physics, 50 : 434001(14pp)- (2017).

2) I. Kunita, K. Ueda, D. Akita, S. Kuroda and T. Nakagaki, “Behavioural differentiation induced by environmental variation when crossing a toxic zone in an amoeba”, Journal of Physics D: Applied Physics, 50 : 354002 (15pp)- (2017).

3) D. Akita, T. Nakagaki, D. Schenz, S. Kuroda, K. Sato and K. Ueda, “Current reinforcement model reproduces centre-in-centre vein trajectory of Physarum polycephalum”, Development Growth and Differentiation, 59(5) : 465-470 (2017).

4) T. Umedachi, K. Ito, R. Kobayashi, A. Ishiguro and T. Nakagaki,“Response to Various Periods of Mechanical Stimuli in {¥it Physarum} Plasmodium”, Journal of Physics D: Applied Physics, 50 : 254002- (2017).

5) M. Fricker, D. Akita, L. L. Heaton, N. Jones, B. Obara and T. Nakagaki, “Automated analysis of Physarum network structure and dynamics”, Journal of Physics D: Applied Physics, 50 : 254005 (14pp)- (2017).

6) K. Sato, ″Direction-dependent contraction forces on cell boundaries induce collective migration of epithelial cells within their sheet″, Development, Growth & Differentiation 59, 317-328 (2017).

7) S. Ishiwata, M. Miyazaki, K. Sato, K. Nakagome, S. A. Shintani, F. K. Shimozawa, N. Fukuda, K. Suzuki, J. Takagi, Y. Shimamoto and T. Itabashi, ″Dynamic properties of bio-motile systems as a liquid-crystalline structure″, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 647, 127-150 (2017).

8) Davide Faranda, Yuzuru Sato, Brice Saint-Michel, Cecil Wiertel, Vincent Padilla, Bérengère Dubrulle, François Daviaud, ″Stochastic chaos in a turbulent swirling flow,″ Physical Review Letters, 119, 014502, (2017).

9) Anna Maria Cherubini, Jeroen S W Lamb, Martin Rasmussen, and Yuzuru Sato, ″A random dynamical systems perspective on stochastic resonance,″ Nonlinearity, vol. 30, pp. 2835-2853, (2017).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1) T. Nakagaki* : “Introduction to Recent Advances in RIES; Transport Network in Living Systems Designed by Current-Reinforcement Rule.”, 2017 RIES Hokkaido University - CIS National Chiao Tung University Taiwan Symposium, National Chiao Tung University, Taiwan

(Province of China) (2017-10)

2) T. Nakagaki* : “Adaptive motions in protozoan ciliates”, The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Hokkaido University, Sapporo, Japan (2017-06)

3) T. Nakagaki* :「Ethology of the plasmodium of Physarum polycepharum」、The 9th International Congress of Systematics and Ecology of Myxomycetes、和歌山県田辺市紀南文化会館、Japan (2017-08)

4) K. Sato*: ″Direction-dependent contraction forces on cell boundaries induce collective migration of epithelial cells within their sheet″, 17th International Conference CoMFoS17: Mathematical Analysis of Continuum Mechanics, OIST, Okinawa (2017-09).

5) Y. Sato: “Stochastic chaos in a turbulent swirling flow”, invited lecture, CIMPA spring school, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (2018-03).

6) Y. Sato: “Stochastic chaos in a turbulent swirling flow”, Lorentz Center Workshop on Random Dynamical Systems, Leiden, Netherlands, (2017-12).

7) Y. Sato: “Anomalous diffusion and intermittency in random dynamical systems,” Statistical and nonlinear physics seminar at CNRS, Saclay, France, (2017-11).

8) Y. Sato: “Anomalous diffusion and intermittency in random dynamical systems ,” Marseille neuroscience workshop, Marseille, France, (2017-11).

9) Y. Sato: “Anomalous diffusion and intermittency in random dynamical systems,” ANOCOS, Tempare, Finland, (2017-08).

10) Y. Sato: “Stochastic bifurcation in random logistic maps,” SIAM Conference on Applications of Dynamical systems, Snowbird, USA, (2017-05).

11) Y. Sato: “Noise-induced bifurcations in a random logistic map,” Kyoto Dynamics Days: Random Dynamical Systems Theory and Its Applications, Kyoto University, Kyoto, Japan, (2017-04).

12) Y. Sato: “Anomalous diffusion and intermittency in random dynamical systems,” Kyoto Dynamics Days: Random Dynamical Systems Theory and Its Applications, Kyoto University, Kyoto, Japan, (2017-04)

ｂ．招待講演（国内学会）

１） 中垣 俊之*：「繊毛虫の物理エソロジー」、８８回日本動物学会、富山県富山市富山県民会館、Japan (2017-09)

２） 中垣 俊之*：「粘菌の用不用則に倣ったネットワーク設計」、生態系バイオミメティクスの新潮流と自然史博物館の役割、東京上野 国立科学博物館、Japan (2017-06)

３） 中垣 俊之*：「粘菌の流れと知性」、流れと澱みを語る会、名古屋大学医学部、Japan (2017-06)

４） 中垣 俊之*：「物理エソロジーから読み解く自然知能の基本設計」、第１回クレスト「ビッグデータ応用」若手研究者合宿研究会、兵庫県シーサイドホテル舞子ビラ神戸、Japan (2017-06)

ｃ．一般講演（国際学会）

１） Y. Sato: ″Stochastic chaos in a turbulent swirling flow,″ RIMS workshop on dynamical systems theory and its applications, Kyoto, Japan, (2017-06)

２） Y. Sato: ″Stochastic bifurcation in random logistic maps,″ SIAM Conference on Applications of Dynamical systems, Snowbird, USA, (2017-05)

ｄ．一般講演（国内学会）

該当なし

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

１） 中垣 俊之*：「現象数理学で読み解く生物行動学～楽しいネンキン生活～」、未来へのバイオ技術勉強会（バイオインダストリー協会主催）、東京都、(2017-12-22)

２） 中垣 俊之*：「単細胞生物から読み解くヒトの社会」、第 26 回先端科学移動大学（北海道青少年科学文化財団主催）、旭川市科学館、Japan (2017-11)

３） 中垣 俊之*：「単細胞生物から読み解くヒトの社会」、北海道青少年科学分化財団主催第 26 回先端科学移動大学 北海道立旭川北高校講演会、旭川北高校、Japan (2017-11)

４） 中垣 俊之*：「粘菌の用不用則に倣った機能的形状の設計法」、岐阜大学応用数学物理コロキウム、岐阜大学、Japan (2017-07)

５） 中垣 俊之*：「単細胞の知恵に学ぶヒトの知恵」、国立大学附置研究所・センター長会議 X ナレッジキャピタル「日本の研究、最前線」、グランフロント大阪北館１F カフェラボ、Japan (2017-06)

６） K. Sato*: ″Left-right asymmetric cell intercalation drives directional collective cell movement in epithelial morphogenesis″, International workshop on cellular dynamics, Hokkaido university, Sapporo (2017-05)

７） K. Sato*: ″Direct observation of orientation distributions of actin filaments in a solution undergoing shear banding″, 新学術領域研究 「ゆらぎと構造の協奏:非平衡系における普遍法則の確立」第 4 回領域研究会, 東京大学 本郷キャンパス, 東京 (2017-06)

８） Y. Sato: ″Anomalous diffusion and intermittency in random dynamical systems,″ seminar at Tokyo Metroplitan University, Tokyo, Japan, (2017-06).

９） Y. Sato: ″Noise-induced bifurcations in a random logistic map,″ Kyoto Dynamics Days: Random Dynamical Systems Theory and Its Applications, Kyoto

University, Kyoto, Japan, (2017-04).

4.7 シンポジウムの開催

1） 佐藤勝彦、中垣 俊之:“第二回アクティブ・ソフトマター研究会”，２０ 人，横浜国立大学、横浜（2017 年 12 月 26 日～2017 年 12 月 28 日）

2） 佐藤譲、佐藤勝彦、中垣俊之: International Workshop on Active Soft Matter and Ethology、20 名、北海道大学、札幌（2017 年 8 月 4 日）

4.8 共同研究

a．所内共同研究

該当なし

b．民間等との共同研究

該当なし

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

1） M. Fricker, T. Nakagaki, N. Jones and A. Pringle （University of Oxford (The Leverhulme Trust, Research Project Grant)) ： “The third mode of life”, 2015～2018 年度, The Leverhulme Trust 財団の Research Project Grant による国際共同研究プロジェクト。

2） T. Nakagaki (大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所) ： “FS (機関連携型) 共同研究「ヒト・自然・地域ネットワークの再構築：ナラティブとアクションリサーチをつなぐ数理地理モデリング」代表 村山聡(香川大学教育学部教授)”, 2016～2017 年度, 国内研究者１６名、海外研究者１２名からなる国際共同研究

3） 台湾 National Chiao Tung University の Ming-Chih Lai 教授と粘弾性方程式の数値的解法に関する共同研究。

4） Y. Sato, CEA-CNRS, France と流体、気象データ解析に関する共同研究。

5） 黒田茂、佐藤勝彦、中垣俊之:仏国クロードベルナール・リヨン第 1 大学ジャンポール・リュー教授と細胞運動の力学測定に関する共同研究。

6） 佐藤勝彦、黒田茂、中垣俊之:米国カリフォルニア大学デービス校ロバート・ガイ准教授と数値流体力学による物理エソロジーの共同研究。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 佐藤 勝彦： 学術研究助成基金助成金（基盤研究(B)）「上皮細胞の集団運動: 形態形成の基礎メカニズムの解明」、研究代表者、2017 年度～2019 年度.

2） 佐藤勝彦：科学研究費補助金 新学術領域研究「ゆらぎの構造と協奏：非平衡系における普遍法則の確立」計画研究分担者, 平成 25 - 29 年度, テーマ：非平衡定常状態におけるソフトマターのゆらぎとレオロジー, 代表者：折原宏(北海道大学).

3） 佐藤譲: 研究分担者,「ヒトの脳の形態形成から行動生成に至る発達のダイナミクス」, 科学研究費補助金 基盤 (S) No. 26220044, 日本学術振興会 (2014-2018).

4） 佐藤譲: 研究代表者,「マウス全半球膜電位伝播波の甘利神経場モデルによる解析」,科学研究費補助金 基盤(C) No. 26520201, 日本学術振興会 (2014-2018).

5） 佐藤譲:研究代表者, 「低次元の確率分岐の研究」外国人特別研究員, Dr. Thai Son Doan (Imperial College London/ベトナム科学アカデミー), 日本学術振興会 (2015-2017).

6） 佐藤譲:研究分担者, 「古典および量子統計的システムにおける新規な情報幾何構造の探究」, 科学研究費補助金 基盤(B) No. 17H02861, 日本学術振興会 (2017-2021).

7） 佐藤譲: 研究代表者, “Understanding the dynamics of atmospheric circulation”, PICS grant, LSCE, CEA, France, (2017-2020).

8） 佐藤譲: 研究代表者, London Mathematical Laboratory Fellowship, London Mathematical Laboratory, UK, (2017-2018).

b． 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

4.10 受賞

該当なし

4.11 社会教育活動

a． 公的機関の委員

1） 中垣俊之:道立啓成高等学校スーパーサイエンスハイスクール運営指導委員会運営指導委員

b． 国内外の学会の役職

1） 佐藤譲：JSIAM Letters 編集委員 (2017.4-2018.3)

c． 兼任・兼業

1） 佐藤譲: CEA-CNRS 客員研究員 (2017.10-2017.12)

d. 外国人研究者の招聘

1） ヘルムート･ブラント教授 独国バイロイト大学（2017 年 09 月 12 日～14 日）

2） ジャンポール･リュー教授 仏国クロードベルナール･リヨン第 1 大学（2017 年 6 月 15 日～8 月 20 日）

3） ハンスギュンター･ドブレイナー教授 独国ブレーメン大学（2017 年 8 月 23 日～8 月 27 月）

4） マーク･フリッカー准教授 英国オックスフォード大学植物科学科（2018 年 1 月 13 日～2 月 3 日）.

e． 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、線形代数学 I、佐藤譲、2017 年 1 学期

2） 理学部/理学院、非線形数学 2、佐藤譲、2017 年 1 学期
3） 理学部/理学院、数理解析学続論、佐藤譲、2017 年 1 学期
4） 全学共通､Maximaによる新世代の数学､佐藤譲(分担)、2017 年 1 学期
5） 理学部/理学院/生命科学院、数学総合講義 I/数理解析学特別講義/生命科学特別講義 III､「生命科学におけるソフトマター物理学」、佐藤勝彦、中垣俊之、2017 年 2 学期
6） 生命科学院、生命機能制御学特論「数理生理学」、黒田茂、中垣俊之、2017 年 2 学期
7） 全学教育科目「環境と人間」､「ナノって何なの？最先端 光ナノテク概論」、中垣俊之（1/15 を分担)、2017 年 1 学期
8） 生命科学院、生命融合科学概論「An introduction to Physical Ethology」、中垣俊之（1/15 を分担)、2017 年 1 学期

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 大阪大学生命機能研究科､数理細胞生理学序論､中垣俊之、2018 年 01 月 26 日～01 月 29 日
2） 北海道薬科大学薬学部、自然科学概論 II、中垣俊之（1/15 を分担)、2017 年 11 月 22 日
3） 公立はこだて未来大学システム情報科学科､物質の科学、2018 年 02 月 05 日～02 月 08 日

g． 新聞・テレビ等の報道

1） 中垣 俊之: 2017 年 09 月 29 日　NHK 総合テレビ「愛しの粘菌 -身近にある生命の神秘-」
2） 中垣 俊之: 2017年09月16日 NHK総合テレビ「イグノーベル賞と日本の科学研究」
3） 中垣 俊之: 2017年08月26日 NHK総合「NENKIN QUEST 森の宝石といのちの輪」
4） 中垣 俊之 ： 2017年08月24日　NHKラジオ第１放送「イグノーベル賞受賞者に聞く~２回受賞の粘菌~」
5） 黒田 茂、佐藤 勝彦、中垣 俊之 ：2017年05月18日～2017年05月20日　ニコニコ生放送　「【粘菌コンピュータ】人類はどのように世界に広 がった？ 粘菌さんに教えてもらう生放送」
6） 中垣 俊之 ： 2017年10月08日　日本経済新聞「「手のひらの科学」人々驚かす」
7） 中垣 俊之 ：2017年06月25日　フランス Le Monde 紙 L「Le blob, cet ?trange g?nie visqueux, ni plante, ni animal, ni champignon」
8） 中垣 俊之 ：2017年10月14日　週刊現代「本当はスゴい イグノーベル賞」
9） 中垣 俊之 ： 2017年04月01日～2017年07月01日生活クラブ事業連合生活協同組合連合会「本の花束」402 号「『知的なるもの』って何？」

h． ポスドク・客員研究員など

該当なし

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0名
博士学位：0名

連携研究部門

研究支援部

拠点アライアンス連携研究分野

客 員 教 授　村田隆（都立大院、理博、2015.10～）
技術補佐　木村京子

１．研究目標

多細胞生物の個体の内部の細胞活動の可視化は生物学の大きな目標の一つである。個体の内部で起こる細胞の活動を分子レベルで可視化できれば、個体の活動と細胞内分子動態を関連づけて理解することができる。生物の構成分子を蛍光分子で標識する方法は、特定の分子を特異的に標識できるため広く用いられているが、蛍光分子を励起する光が生物組織に吸収されてしまうため、多くの細胞が重なる多細胞生物の内部を観察することは困難を伴う。近赤外超短パルスレーザを用いた２光子励起法は、生物組織の吸収の少ない近赤外光を励起光とするため、生物個体の内部を観察する方法として近年普及してきた。しかしながら、顕微鏡の分解能は光の波長に比例するため、この方法で細胞内の細かい構造を観察するのは限界がある。

２光子顕微鏡の高解像化のための様々な試みが行われている。その一つが共焦点スピニングディスクの導入である。マイクロレンズアレイとピンホールを備えた共焦点スピニングディスクの導入により、２光子励起法で通常の１光子励起法と同様の空間分解能が得られることが理論的および実験的に示されている。本研究分野では、２光子励起法と共焦点スピニングディスクの組み合わせに着目し、実際の生物研究に有用な顕微鏡を構築すること、更なる高解像化を行うことを目指す。最終的な目標は、多細胞組織の内部の細胞活動の可視化である。この目標を達成するため、電子研・光細胞生理研究分野およびニコンイメージングセンターの協力を得て光学系の構築と撮像素子の最適化を行い、光学系に適した蛍光標識の導入と評価を組み合わせることにより、生物材料側と光学系側の改善を連携させて研究を進めている。

顕微鏡の評価に適した生物材料として、植物の培養細胞を用いている。この材料はマウス等のモデル動物と異なり迅速に新しい蛍光標識を導入できること、生物材料による光の吸収を評価するのに充分な厚みがあること、常に安定して材料供給が行えることの条件を満たしている。村田客員教授の所属する基礎生物学研究所の研究室において蛍光標識を遺伝的に導入するためのDNA構築を行い、電子研において培養細胞の育成と顕微鏡評価を行っている。植物は我々動物と異なる道筋で進化してきたため、植物細胞の利用は顕微鏡の評価に有用なだけでなく、生物学的に重要な知見をもたらすことも期待される。

２．研究成果

2.1　細胞表層切り出し法（桂剥きイメージング法）の確立

円筒状の細胞を３D（xyz）高速タイムラプスイメージングを行った後の画像処理法を開発した。タバコ培養細胞を色素液に封入し、2光子励起を行うことでmCitrine-βチューブリンで標識した細胞表層の微小管と細胞外液の2色イメージングを行った。自然科学研究機構・新分野創成センターの加藤輝博士との共同研究により、色素と細胞の境界の画像情報を用いて細胞全周の微小管画像を切り出して展開し（桂剥きイメージング法）、微小管マップを作成した（図1）。従来のシングルポイントスキャン式共焦点顕微鏡や2光子顕微鏡では高速３D画像取得が難しく、高速撮影可能な1光子スピニングディスク顕微鏡では立体イメージングで焦点外の色素液蛍光の漏れ込みが起こるので、この解析は2光子スピニングディスク共焦点でないと達成できない。得られた微小管マップを用いて、細胞表面全域の微小管配置や向きが時間とともに変化する様子を捉えることに成功した。今後は微小管の自己組織化メカニズムを解析する予定である。

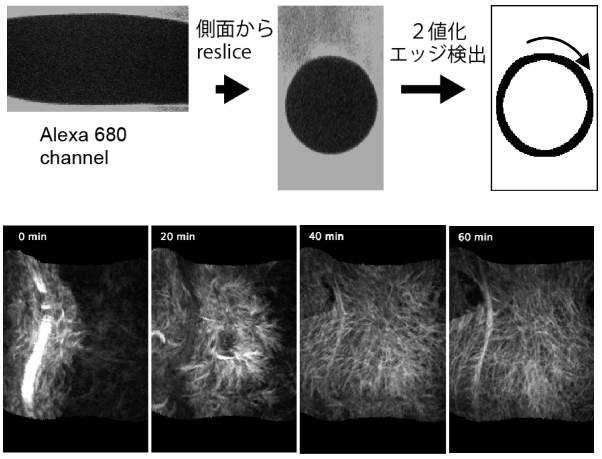


図１　桂剥きイメージング法による表層微小管の解析。上：円筒状の培養細胞からの表面像の展開。下：展開した細胞円周の微小管経時変化。

2.2　GFPとYFPの分離、および３標識分離法の開発

GFP と YFP は他の波長の蛍光タンパク質に比べて高い光安定性と輝度を兼ね備えているが、励起波長、蛍光波長が近接しているため、励起波長の特異性が低い 2 光子励起ではこの 2 標識を分離することは難しかった。そこで、根本研究室メンバーとの共同研究により、スプリット光学系を用いた励起光の切り替えと演算を組み合わせた GFP と YFP の分離方法を開発した。GFP-H2B 融合タンパク質により核を標識し、さらに mCitrine-βチューブリン融合タンパク質により微小管を標識したタバコ培養細胞を用いて核標識と微小管標識を分離することに成功した。さらに、GFP-H2B, mCitrine-βチューブリン, CenH3-mCherry による 3 重標識細胞を作製し、分離を試みている。

2.3　デコンボリューション法による更なる高解像化

細胞核の内部を高解像度に観察する方法の開発を試みた。タバコ培養細胞に染色体上のセントロメアにを標識するCenH3-mCitrine融合遺伝子を導入した。mCitrine-CenH3タンパク質はセントロメアを標識し､核内に点状に局在した。この細胞を細胞を用いて、前年度に確立した内蔵拡大レンズによる高解像条件で光軸方向の連続断層像を取得し、Huygensソフトウエアによるデコンボリューションを行った。通常の共焦点顕微鏡のYFP波長における分解能である800 nmを切る分解能を得ることができたが、演算による偽構造の出現を抑えきれなかった。更なる改善が必要と考えられる。

３．今後の研究の展望

２光子スピニングディスク共焦点顕微鏡によるGFP-YFP標識分離が可能になった。GFPとYFPは蛍光標識としての性能に優れるため、これら２標識の分離が可能になったことは、多重標識の選択肢が大幅に増えただけでなく、より高い時間分解能、空間分解能で２標識観察が可能になったことを意味する｡平成30年度の更なる実験により、GFP-YFP-mCherryの３標識分離も可能になりつつある。これら３種類の蛍光タンパク質は現在最も普及しているため、標識の導入のためのプラスミドDNAを容易に入手できる。平成30年度中には汎用性の高い３標識観察システムが使用可能になると期待される。

デコンボリューションによる更なる解像度の向上は今後の研究課題だが、平成30年度の実験により、偽構造の出現が抑えられる条件が見つかっている。高時間分解能、高空間分解能で多標識の試料を撮影することが可能になりつつある。

我々は､遺伝子導入が容易に行えて顕微鏡評価に適切な厚みのある植物培養細胞を使うことにより、多標識観察、高解像度の観察の条件を確立するに至った。次のステップは多細胞の生物組織を観察することによって生物個体の多標識・高時間空間分解能での観察が可能なことを実証し、研究に役立てることである。平成30年度の拠点アライアンス連携分野はメンバーを刷新して多細胞組織の観察を行う計画である。今後の展開を期待したい。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

１）　Koshimizu, S., Kofuji, R., Sasaki-Sekimoto, Y., Kikkawa, M., Shimojima, M., Ohta, H., Shigenobu, S., Kabeya, Y., Hiwatashi, Y., Tamada, Y., Murata, T. and Hasebe, M. (2018) Physcomitrella MADS-box genes regulate water supply and sperm movement for fertilization. Nat. Plants 4, 36-45.

２）　Kofuji, R., Tagita, Y., Murata, T., Hasebe, M. (2017) Antheridial development in the moss *Physcomitrella patens*: implications for understanding stem cells in mosses. Phylos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. DOI: 10.1098/rstb.2016.0494

３）　Kosetsu, K., Murata, T., Yamada, M., Nishima, M., Boruc, J., Hasebe, M., Van Damme, D. and Goshima, G. (2017) Cytoplasmic MTOCs control spindle orientation for asymmetric cell division in plants. PNAS 114, E8847-E8854.

4.2　学術論文（査読なし）

１）　該当なし

4.3　総説・解説・評論等

１）　Smertenko, A., Assaad, F., Baluska, F., Bezanilla, M., Buschmann, H., Drakakaki, G., Hauser, M.-T., Janson, M., Mineyuki, Y., Moore, I., Müller, S., Murata, T., Otegui, M. S., Panteris, E., Rasmussen, C., Schmit, A.-C., Šamaj, J., Samuels, L., Staehelin, A., Van Damme, D., Wasteneys, G., Žárský, V. (2017) Plant cytokinesis: terminology for structures and processes. Trends Cell Biol. 27, 885-894.

4.4 著書

１）　該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

１）　該当なし

4.6　講演

ａ．招待講演（国際学会）

１）　該当なし

ｂ．招待講演（国内学会）

１）　村田隆　分裂期から間期にかけての細胞骨格ダイナミクス、日本植物学会第 81 回大会シンポジウム、野田、2017 年 9 月

２）　T. Murata, K. Otomo, T. Hibi, H. Nakayama, T. Nemoto, M. Hasebe. Possible roles of nuclear envelope in mitotic spindle formation of plants. 第 69 回日本細胞生物学会大会、仙台、2017 年 6 月

３）　村田隆　多点走査共焦点ディスクによる 2 光子顕微鏡の時間空間解像度の向上と細胞分裂研究への応用、第 73 回日本顕微鏡学会学術講演会、札幌、2017 年 5 月

ｃ．一般講演（国際学会）

１）　該当なし

ｄ．一般講演（国内学会）

１）　村田隆; 川井絢子; 関本弘之; 長谷部光泰　ヒメミカヅキモの細胞分裂における微小管再編成過程の可視化、第 59 回日本植物生理学会年会、札幌、2018 年 3

月

e． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 村田隆、大友康平、根本知己、長谷部光泰　染色体依存の微小管形成経路は植物の紡錘体形成に関与するか？　2018年生体運動合同班会議、東京、2018年1 月

2） 村田隆　細胞円周に沿って微小管が並ぶしくみの解析　第12回細胞運動研究会、札幌、2017年9月

3） 村田隆　細胞分裂のイメージング：染色体捕捉の瞬間は見えるのか？　第6回植物イメージングの会、横浜、2018年2月

4.7 シンポジウムの開催

1） ABiS 生物画像解析トレーニングコース、2017年7月5日～7月6日、電子科学研究所

2） 生物画像解析トレーニングコース 2017　2017年11月20日～11月22日、基礎生物学研究所

4.8 共同研究

a．所内共同研究

1） 該当なし

b．民間等との共同研究

2） 該当なし

c．委託研究

3） 該当なし

4） 国際共同研究

1） 該当なし

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 村田隆、挑戦的萌芽研究、オプトジェネティクスによる細胞分裂方向の制御方法の開発、2016～2017年度

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 該当なし

4.10 受賞

1） 該当なし

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1） 該当なし

b．国内外の学会の役職

1） 村田隆：日本細胞生物学会編集委員（2017.1.1～2018.12.31）

c．兼任・兼業

1） 該当なし

d.外国人研究者の招聘

1） 該当なし

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 該当なし

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 該当なし

g． 新聞・テレビ等の報道

- 読売新聞、2018年1月10日、「花咲く遺伝子 コケに起源」
- 朝日新聞、2018年1月17日、「花咲か遺伝子 秘めた役割」
- 中日新聞、2018年1月27日、中日春秋
- 東京新聞、2018年1月27日、筆洗
- 日刊工業新聞、2018年1月11日、「花作る遺伝子の起源を推定」
- Science Daily、2018年1月10日、「The origin of flower making genes」

h． ポスドク・客員研究員など

1） 該当なし

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0名

博士学位：0名

ニコンイメージングセンター

教　授　根本知己（東工大院、博士(理学)、2012.03～）
准教授　松尾保孝（北大院、博士(工学)、2012.03～）
助教　大友康平（東北大院、博士(薬学)、2012.06～）
特任助教　堤元佐（北大院、博士(生命科学)、2016.09～）
技術職員　小林健太郎（北大院、博士(理学)、2012.03～）

１．活動目標

近年になって蛍光バイオイメージング技術の必要性が増大し、そうした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の作成技術も大きく向上している。また顕微鏡やカメラなどの各種機器の性能も、飛躍的な向上を遂げている。しかしながら、これらの最新技術・機器を用いることで、誰でも即座に優れたデータを得ることができる訳ではないところに、蛍光バイオイメージング技術の難しさがある。

ニコンイメージングセンターは、最新の光学顕微鏡を利用できる施設として、平成18年にニコンインステック社をはじめとした多数の協賛企業の協力による寄附研究部門として設立された。平成24年度の研究所の改組に伴い、現在は研究支援部の一部門として活動している。

特に最近は、生命科学の分野においてイメージングの果たす重要性は高くなる一方で、イメージング機器の多様化・先端化と最新鋭イメージング機器の高額化、操作技術の高度化、あるいは画像解析技術の高度化により、個々の大学等の研究機関で優れた機器の整備・運用はますます困難となってきている。当センターは、平成28年４月より開始された文部科学省・科学研究費助成事業の「先端バイオイメージング支援プラットフォーム（ABiS)」にも参画して、先端イメージング機器を運用する国内機関と更なる連携を取り、生命科学を幅広く包括した先端イメージングの支援を開始している。

当センターの特色は、所内や学内の研究者のみならず、全国の研究者が広く設備等を利用可能な点であり、特に近年では委託分析も開始したため、遠方の大学や企業の研究者の委託観察にも対応している。専任スタッフが機器操作やソフトウェアの利用方法などを説明することにより、顕微鏡に関しては初級者の研究者であっても、観察技術全般を習得できる。その一方で、利用者の視点に基づく機器等の詳細な要望を受けられるため、協賛企業へ迅速かつ綿密なフィードバックも当初より行っている。

このようにして、研究者と企業の双方と緊密な連絡を取り合うことで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更なる技術改良や新技術開発、およびその多様な研究分野への応用を推進することを目的としている。更には本学と顕微観察技術の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、そして国際的な交流をも視野に入れて、以下の項目に沿った活動を展開している。

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．研究者へのイメージングの知識と技術の習得を目的として、専属スタッフがイメージング操作の指導を行う。
４．顕微鏡ユーザーのアイデアを反映した新型顕微鏡、ならびにその関連技術の開発を行う。
５．イメージングに関する最先端の研究、関連技術などを、積極的に紹介する。

２．活動成果

(a)　利用実績（平成29年４月～平成30年3月）

平成29年度の延べ利用人数・利用時間は、578人・2767時間に達した。平成24年度～28年度の利用（平成24: 261名・1297時間，平成25: 404名・2356時間，平成26: 534名・1820時間，平成27:651名・2933時間，平成28: 524名・2357時間）からも、年を追うごとに概ね着実に利用が増加していることがうかがえる（図１）。本年度は当研究所内の利用が多く、数分野から頻繁に利用されていた。学内の研究者の利用は、近年はほぼ同程度である。

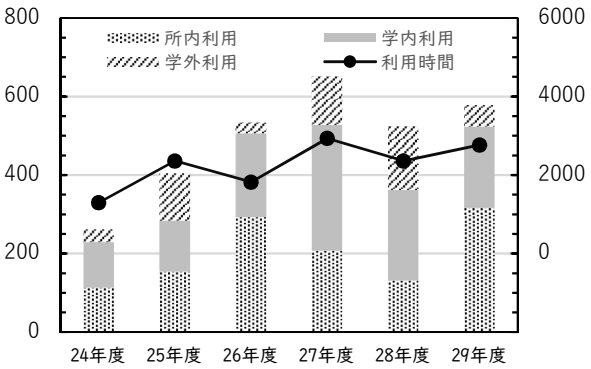


図１．平成 24 年度以降のイメージングセンター利用状況

平成29年度に当センターを利用した研究者の所属の詳細を図２に示す。近年では学内の多くの学部等からの利用や、学外研究者からの利用も増加しているが、27年度・28年度と比較すると一般企業からの利用は少ない結果となった。

また本年度は、当センターの利用者が著した11報の論文

が学術誌に掲載された。

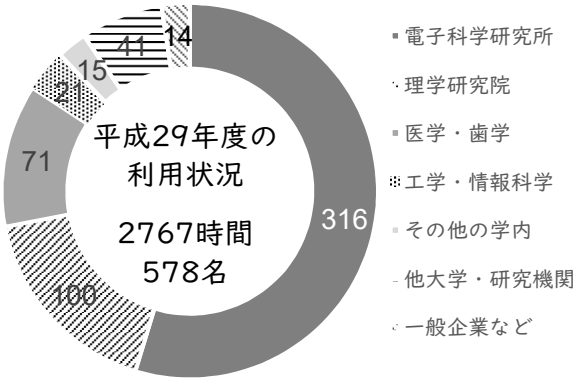


図２．平成 29 年度の利用者の所属の詳細

(b)　イメージングに関連する知識と技術の普及

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。平成29年度は、合計19件の利用問い合わせがあり、27名の研究者に操作指導を行った。

また当センターで新規に開発したマルチビーム走査型２光子顕微鏡についても、一般の研究者への提供を開始した。特にこのシステムは、世界で唯一の顕微鏡システムであるため、学内外に広くアピールを行っており、29年度は他大学や他の研究法人を含めて、８件の研究テーマに基づく利用があった。

そして現在の運営・活動体制となってからは、ニコンインステック社などとの共催により、「蛍光イメージング・ミニシンポジウム」を始めとする各種学術講演会を積極的に開催し、顕微鏡関連分野の最先端研究の紹介を行うことで、研究者とメーカーの双方がフィードバックし合える環境を定期的に提供し続けている。特に平成29年度は、前述のABiSのイメージング画像解析チームと協力して、「画像解析トレーニングコース」も実施した。画像解析を専門とする講師により、２日間で画像解析の基礎から応用までの講習を行ったところ、当初の予定を大幅に上回る35名の受講となる盛況となった。

(c)　その他の主な活動状況

本年度より、光学フィルターを製造するクロマテクノロジも当センターの協賛企業に加わり、協賛企業は計 15 社となった。29 年度は各社の新製品のデモンストレーションなどを行う機会はなかったが、今後も新製品のアピールの場としても積極的に当センターを活用してもらうべく、協賛各社と密な連携を取ってゆく所存である。

３．今後の活動の展望

引き続き、学内外へ当センターを広くアピールするとともに、光学顕微鏡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。また協賛企業と連携した新型蛍光顕微観察技術の開発や各種セミナーの開催など、顕微鏡やその関連手法に関する知識と技術の更なる深化と普及に努めてゆきたい。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1)　Shota Hiruma, Tomoko Kamasaki, Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, and Ryota Uehara, “Dynamics and function of ERM proteins during cytokinesis in human cells”, FEBS Letter, 2017, 591 (20), 3296-3309.【電子研内共著】

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1)　大友康平，渡邊裕貴，山中祐実，後藤亜衣，日比輝正，根本知己，「新規光技術を用いた多光子顕微鏡の空間分解能・時間分解能向上」，顕微鏡, 2017, 52 (2), 67-71.
2)　堤元佐，大友康平，一本嶋佐理，川上良介，根本知己，「多光子顕微鏡技術の新展開」，生体の科学，2017，68 (5), 392-393.
3)　川上良介、大友康平、根本知己．「新規レーザーによる生体イメージング」，光アライアンス, 2017, 28 (12), 21-25.

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

a.　招待講演（国際学会）

該当なし

b.　招待講演（国内学会）

1)　根本知己，川上良介，大友康平，一本嶋佐理，山中祐実，「2光子顕微鏡による非侵襲的な生体組織観察の高度化」，第26回日本バイオイメージング学会学術集会，東京薬科大学，八王子（2017-09）.
2)　大友康平「Improvements of two-photon excitation microscopy by utilizing novel optical technologies」，第55回生物物理学会年会，熊本大学 (2017-09).

c.　一般講演（国際学会）

1)　Kohei Otomo, Ai Goto, Yumi Yamanaka, Hiroshi Nakayama, Takashi Hori, Tomomi Nemoto, “High speed imaging for green fluorescent proteins by utilizing multi-point scanning two-photon microscopy”, Focus on Microscopy

2017, Palais de Congress, Bordeaux, France (2017-04)

2) Kohei Otomo, Ai Goto, Tomomi Nemoto, “Real time polarization resolved imaging for living mice tissues by two-photon excitation spinning disk microscopy”, Focus on Microscopy 2018, The Singapore EXPO, Singapore (2018-03).

d. 一般講演（国内学会）

1) Takashi Murata, Kohei Otomo, Terumasa Hibi, Hiroshi Nakayama, Tomomi Nemoto, Mitsuyasu Hasebe. “Possible roles of nuclear envelope in mitotic spindle formation of plants“, 第69回日本細胞生物学会大会，仙台国際センター (2017-06).

2) 山中祐実，大友康平，後藤亜衣，中山博史，堀喬，根本知己.「多点走査型2光子顕微鏡を用いたマウス膵臓における *in vivo* Ca^{2+}イメージング」，第26回日本バイオイメージング学会学術集会，東京薬科大学，八王子 (2017-09).

3) 山中祐実，大友康平，根本知己.「新規多点走査型2光子顕微鏡を用いたマウス膵島 *ex vivo* 及び *in vivo* Ca^{2+}イメージング」，2017年度生命科学系学会合同年次大会、神戸ポートアイランド (2017-12).

4) 山本啓，大友康平，根本知己，村上洋太，高橋正行.「細胞質分裂におけるミオシン IIA, IIB の機能解析」, 2017年度生命科学系学会合同年次大会、神戸ポートアイランド (2017-12).

5) 後藤亜衣，大友康平，中山博史，堀喬，根本知己.「多点走査型2光子顕微鏡による生体組織の高速 SHG イメージング」，日本顕微鏡学会北海道支部会，北海道大学 (2017-12).

6) 中村咲耶，日出間純，大友康平，根本知己，石田宏幸，泉正範,「紫外線障害時のオルガネラ除去を担うオートファジーの解析」，第59回植物生理学会大会，札幌コンベンションセンター (2018-03).

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど

1) Tomomi Nemoto Ryosuke Kawakami, Terumasa Hibi, Kohei Otomo, Sari Ipponjima, Kazuaki Sawada, Ayano Tanabe. “Improvement of *in vivo* Two-Photon Microscopy by utilizing novel optical technologies”, CLEO PR, OECC & PGC 2017, Sands Expo and Convention Centre, Singapore (2017-07).

2) Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, “Improving two-photon microscopy for clear visualization of subcellular structures”, International Symposium on Imaging Frontier 2017 (ISIF2017), Tokyo University of Science, Tokyo (2017-07)

3) 大友康平，根本知己，“新しい光学技術による二光子顕微鏡の機能拡張”, RIKEN seminar「二光子励起顕微鏡による深部高速観察と補償光学」，理化学研究所，和光市 (2017-10)

4) Kohei Otomo, Yumi Yamanaka, Ai Goto, Tomomi Nemoto. “Multi-point scanning two-photon microscopy by utilizing a novel neodymium based laser” Taiwan-Japan Joint Meeting on Bioimaging for Young Researchers, Academia Sinica, Taipei, Taiwan (2017-11).

5) 堤元佐，小林健太郎，大友康平，松尾保孝，根本知己.「ニコンイメージングセンターにおけるイメージング支援」第3回北大・部局横断シンポジウム，北海道大学，札幌 (2018-01).

6) 大友康平，根本知己.「二光子顕微鏡の機能拡張による生体内微細構造の可視化」，第3回北大・部局横断シンポジウム，北海道大学，札幌 (2018-01)

7) 村田隆，大友康平，根本知己，長谷部光泰.「植物の紡錘体形成に関与するか？」，生体運動合同班会議2018，東京 (2018-01).

8) 山本啓，大友康平，根本知己，村上洋太，高橋正行.「細胞質分裂におけるミオシン IIA, IIB の機能解析」，平成29年度北大細胞生物研究集会，北海道大学，札幌 (2018-02).

4.7 シンポジウムの開催

1) 第６回 蛍光イメージング・ミニシンポジウム、参加者40名，北海道大学 (2017-7)

2) ダイナミックアライアンスＧ３公開シンポジウム・ニコンイメージングセンター学術講演会，参加者50名，東北大学 (2017-11).

4.8 共同研究

該当なし

4.9 予算獲得状況

1) 大友康平、挑戦的萌芽研究、「生きた脂質微小ドメインを可視化する高速超解像顕微鏡法の開発」， 2016 – 2017年度

4.10 受賞

1）日本バイオイメージング学会　2017年度ベストイメージング賞 Zeiss 賞，山中祐実，大友康平，後藤亜衣，中山博史，堀喬，根本知己「多点走査型2光子顕微鏡を用いたマウス膵臓における *in vivo* Ca^{2+}イメージング」(2017-09)

2) 平成29年度 日本顕微鏡学会北海道支部会 優秀ポスター賞，後藤亜衣，大友康平，中山博史，堀喬「多点走査型２光子顕微鏡による生体組織の高速 SHG イメージング」(2017-12)

3) オランダの Scientific Volume Imaging 社が開催した顕微鏡写真コンテストの「Huygens Image Contest 2017」で、堤元佐が５位に入賞した。なお動画部門では１位である (2017-12)。

4.11 社会教育活動

当センターの場合、いずれも該当なし。

国際連携推進室

室長:教授　Biju Vasudevan Pillai(Kerala大学、Ph.D.化学、2016.2～)
副室長:准教授　髙野勇太(筑波大学、博士(理学)、2017.4～)
教　授　小松﨑　民樹(総合研究大学院大学、理学博士、2007.10～)
教　授　三澤 弘明（筑波大学、理学博士、2003.5～）
教　授　笹木 敬司（大阪大学、工学博士、1997.11～）
教　授　太田 裕道(東京工業大学、工学博士、2012.9～)
教　授　根本 知己(東京工業大学、理学博士、2009.9～)
教　授　雲林院 宏（東北大学、理学博士、2015.7～）
教　授　上野 貢生(北海道大学、博士(理学)、2010.1～)
教　授　藤原 英樹（北海道大学、工学博士、2008.6～）
事務補助員　藤井　敦子（2016.4～）

１．研究目標

電子科学研究所は、欧米の4つの研究所、アジアの6つの研究所・センターと部局単位の交流協定を締結し、スタッフや学生の交流、ジョイントシンポジウム等や共同研究プロジェクトを積極的に実施している。国際連携推進室は、電子研の国際連携活動に関する企画立案・企画助言の役割を担うとともに、国際ネットワークのハブとして連携を充実・強化するために平成24年度に設置されたものである。電子科学研究所の国際連携活動を発展させて、国内の研究所ネットワークと海外の研究組織ネットワークが連携するプログラムなどの計画も行っている。

２．研究成果

(a) 国内の研究所ネットワークと海外の研究組織ネットワークが連携するプログラムの推進

電子科学研究所の将来的な国際連携戦略を推進するための準備、共同研究を行った。具体例として、電子科学研究所のいくつかの研究室と共同研究が行われているリヨン高等師範学校（フランス)、ボーリング・・グリーン州立大学(アメリカ)、ルーヴァン・カトリック大学（ベルギー）を中心とした研究所単位の協力関係構築を計画したうえで日本学術振興会先端拠点形成事業に申請した。平成29年度の申請ではヒアリングまで進んだものの採択に至らなかったが、引き続き戦略的かつ組織的に研究協力体制を構築し、外部予算の獲得も目指していく。

(b) 世界的トップランナー達との協働体制の構築

北海道大学が掲げる「創基１５０周年に向けた近未来戦略」のビジョン「世界の課題解決に貢献する北海道大学」の達成にむけ、人材育成および共同研究の推進によるグローバル協働体制の構築を行っている。その一例として世界的課題解決に資するグローバル人材の育成を目的として北海道大学が実施するHokkaidoサマーインステュート2017(HSI2017)において小松﨑教授をコース代表とする、各国のトップランナーを詔勅した上でのリレー講義を行った。これまでに共同教育機会拡大支援事業などで実績を築いてきたリヨン高等師範学校のArzki Boudaoud教授、アカデミアシニカ（台湾）のBi-Chang Chen研究員らを招へいに、主に大学院生と若手研究者を対象とした先端研究に関する講義を行った。また来年度開催予定のHSI2018においては室長Biju教授を代表とするグループが採択され、本学からのサポートを受けて各国から研究のトップランナーの招へいと、これを基にしたグローバル人材育成を行う。

(c) 第18回RIES-HOKUDAI国際シンポジウム「極」開催に貢献

本シンポジウムは北大･電子科学研究所が主催し､海外、国内および学内の各研究機関に広く開かれた国際シンポジウムであり、関係機関の新たな連携と分野横断的な学問や技術を生み出す土壌を提供することを目的としている。平成29年度は11月30日-12月1日にシャトレーゼ・ガトーキングダム・サッポロにおいて開催した。本学をはじめ国内では東北大学、東京大学、武蔵野大学、明治大学、分子科学研究所、大阪大学や九州大学などから、海外からはシンガポール Nanyang Technological University、スイス Ecole polytechnique federale de Lausanne、National Chiao Tung University などから総勢100人を超える大学院生、ポスドク、研究者などが参加し、70件の口頭・ポスター発表をもとにした研究議論が行われた。ポスター発表を行った大学院生・若手研究者の優れた発表にはポスター賞を授与し、研究のさらなる活発化と国際化を推進した。

３．今後の研究の展望

電子科学研究所の活動をとおして、今後も国際的なネットワーク構築の推進に努める。学術協定を既に締結している海外研究機関とのより強固な協力関係構築、新たな学術協定の締結、先端拠点形成事業などの新たな予算獲得をとおして、電子科学研究所の有する国内研究ネットワークと海外のネットワークが連携するプログラムをサポートしていく。国際共同研究を展開している教授陣が中核となり、戦略的かつ多角的に国際連携推進室の活動のさらなる充実を図っていく。

４．資料

平成29年度は外国人招へい教員制度やダイナミックアライアンス国際交流事業などを活用して、国際研究交流の深化のために海外研究者を招へいした。

1. H. Peter Lu､USA､Bowling Green State University（2017年4月23日～2017年4月25日）
2. Andey L. Rogach、中国、City University of Hong Kong（2017年5月8日～2017年5月11日）
3. Raju Francis、インド、　Mahatma　Gandhi

University（2017年5月14日～2017年5月27日）

4. Cheng An-chieh氏、中国、国立交通大学（2017年6月12日～2017年6月30日）
5. Xiaoqian Zang氏、中国、ハルビン工業大学（2017年8月1日～2017年9月30日）
6. Xinxiong Fang氏、中国、西安理工大学（2017年9月1日～2018年2月28日）
7. Gowoon Kim氏、韓国、釜山大学校（2017年9月10日～2017年9月23日）
8. Soogil Lee氏、韓国、韓国科学院（2017年9月10日～2017年9月23日）
9. Younghoon Kim氏、韓国、延世大学校（2018年1月9日～2018年1月31日）
10. Elizabeth Mariam Thomas、インド、Indian Institute of Science Education and Research（2018年2月1日～2018年3月31日）
11. Jianbing Zhang氏、韓国、清華大学（2018年3月4日～2018年3月18日）

ナノテク連携推進室

准教授　松尾保孝（北大院、博士(工学)、2010.1～）
（以下、創成研究機構・ナノテク連携研究推進室）
特任助教　王　永明（2012.9～）
博士研究員　アグス・スパギョ（2015.4～）
学術研究員　福本　愛（2007.6～）
学術研究員　細井浩貴（2012.9～）

１．研究目標

ナノテク連携推進室はグリーンイノベーションやライフイノベーションといった社会的課題を解決するための学術研究、技術・産業創出には欠かせない超微細加工やナノ領域の構造解析・分析といったナノテクノロジーの利用を支援する組織となっている。通常、ナノテクノロジーを利用・活用するためにはクリーンルームのような特殊環境や最新鋭の大型設備を有し、かつ運用するための知識と経験が無くてはならないが、単独の研究室や研究者だけで実現することは困難になりつつある。そこで、ナノテクノロジー連携推進室では電子研技術部と協力しながら電子研オープンファシリティー機器（共用装置）に関する運営、学内外からのナノテクノロジー研究の相談窓口としての機能を担っている。加えて、平成24年7月よりスタートした文部科学省が行う全国的なナノテクノロジー装置共用プログラムである「ナノテクノロジープラットフォーム」事業についても業務実施者として参画している。北海道大学は微細構造解析プラットフォーム、微細加工プラットフォーム事業の実施機関として名を連ねることとなったが、ナノテクノロジープラットフォーム事業は全学事業として創成研究機構・ナノテクノロジー連携研究推進室が担っており、電子科学研究所ナノテク連携推進室はその一部として工学研究院（ナノ・マイクロマテリアル分析研究室、光電子分光分析研究室、超高圧電子顕微鏡室）、情報科学研究科と連携し、学内だけでなく全国の大学・公的研究機関・民間企業に対してナノテクノロジーに関する支援に取り組んでいる。特に、超微細加工と微細構造解析の 二つの 機能を有機的に連携させた支援を実現し、光・電子・スピンを制御する新規ナノデバイス創製、および新機能ナノ物質創出に関する研究開発を支援することを目的として事業推進を行っている。原子層堆積装置やプラズマCVD装置、超高精度EB 描画装置、マスクアライナー、RIE 装置、ICPドライエッチング装置、FIB 装置、イオンビームスパッタ装置などのナノ加工・デバイス化装置による超微細加工に関する支援を行うとともに、高性能 STEM、超高圧透過型電子顕微鏡、各種プローブ顕微鏡、X線光電子顕微鏡装置、オージェ電子分光装置、集束イオンビーム加工・分析 装置などによる種々のナノ計測・表面分析支援までを幅広く行っている。

２．研究成果

(a)利用実績（平成29年 3月～平成30年 3月）

平成29年度の支援状況として、ナノテクノロジープラットフォーム事業としての実施内容について記載する。微細加工PFに関する利用件数は88件、うち、40%以上が企業・他大学・公的研究機関の学外への支援として実施した。また微細構造解析PFに関しては、電子研以外の施設による支援も含めて利用件数は98件、こちらも50%以上を学外への支援として実施した。昨年度よりも学外への支援を優先して行った結果、学外利用比率が向上している。これ以外にも成果非公開（自主事業）として行った支援活動や、ナノテクノロジープラットフォーム以外の電子研共用設備による支援活動も継続して行った。

支援を行った研究は国内外への論文投稿、学会発表につながっている。微細加工PF・微細構造解析PFの支援課題に関する学会発表は300件以上、論文掲載が110件以上であった。

(b)ナノテクノロジープラットフォーム事業活動

ナノテクノロジープラットフォーム事業は3つのプラットフォーム（微細加工、微細構造解析、分子物質合成）ごとに各機関が参画して行う事業となっており、北海道大学は微細加工・微細構造解析の2つのプラットフォームに属している。電子科学研究所としても両方のプラットフォーム対して装置供出を行っており、研究支援と共に関連する会議などにおいて支援成果報告や広報活動を行っている。また、技術職員を含めた研究支援者は外部での技術研修に参加し、より優れたナノテクノロジー支援の実現を目指して技術研鑽に務めている。この他に、金属学会、オープンファシリティープラットフォームシンポジウムなど、学会・展示会へ出展を行い、外部ユーザーへの広報活動を行った。

（c）先端研究基盤共用促進事業（新たな共用システム導入支援プログラム） -マテリアル分析・構造解析共用ユニット（Material Analysis and Structure Analysis Open Unit：MASAOU）-

先端研究基盤共用促進事業は競争的研究費の改革と連携し、第5期科学技術基本計画期間において共用体制の集中的改革を進めていくため、共用システム（体制）を導入、構築することを目的として実施される事業である。北海道大学においては、本事業は平成28年に4拠点、平成29年には2拠点が採択され、新たな知見やノウハウにより現在のオープンファシリティシステムを発展させ、より良い研究環境の整備を目指していくこととなっている。電子科学研究所は工学研究院（全学共用施設のナノ・マイクロマテリアル分析研究室、高エネルギー超強力X線回折室、光電子分光分析研究室）と連携し、マテリアル分析・構造解析共用ユニット（Material Analysis and Structure Analysis Open Unit：MASAOU）が平成28年度に採択され、事業を推進している。X線関連分析装置を中心とした機器群を運営し、専任コー

ディネータによる受付相談から、試料作製、観察・測定、さらに評価・解析までの一貫したサポート体制の下で、組成分析・構造解析、組織・表面解析、電子状態解析など、マテリアル研究を広範かつ総合的に支援を実施した。企業との連携セミナーやナノテクノロジープラットフォーム事業との連携を行うことで学外研究者へも大きく門戸を開いた支援活動に当たっている。

（d）設備運用状況

平成29年度は、大型設備の増強は行わなかったが、マテリアル分析・構造解析共用ユニットにおいて、X線光電子分光装置の試料交換棒の保守を実施した。また、ナノテクノロジープラットフォーム事業では電子顕微鏡試料作製用のイオン研磨器（PIPSII）やオゾンアッシング装置、ランプ加熱炉（ラピッドサーマルアニーリング装置：RTA）の利用環境を整えた。

3．今後の研究の展望

ナノテク連携室は文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業、新共用事業を核として研究支援活動を行っていく予定である。また、各事業を統括する代表機関（物質・材料研究機構、京都大学）やセンター機関（物質・材料研究機構、JST）との連携による支援活動の充実、学内の共同利用施設とも密な関係を築き、研究支援の効率化や高度化を進める。また、技術部とも協力して、新しい支援技術の開発や民間企業を含めた学内外との共同研究、若手研究者や企業技術者への技術指導を行い、研究開発力強化への支援を継続していく。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） S. Nakamura, H. Mitomo, M. Aizawa, T. Tani, Y. Matsuo, K. Niikura, A. Pike, M. Naya, A. Shishido, K. Ijiro, “DNA Brush-Directed Vertical Alignment of Extensive Gold Nanorod Arrays with Controlled Density”, ACS OMEGA, Vol.2, No.5, pp.2208-2213(2017)　【電子研内共著】

2） Y. Hirai, B. Sawano, T. Takaki, Y. Matsuo, H. Yabu, “Metal Phthalocyanine Derivative Nanocrystals: Color-controlled and Transparent Dispersions by a One-pot UV-assisted Synthetic Process”, Chem. Lett., Vol. 46, No. 5, p695-p698 (2017)

3） Y. Hirai, R. Tamura, S. Emoto, M. Shimomura, Y. Matsuo, T. Okamatsu, T. Arita, “Superhydrophobic Microstructure Imprinted Rubber Sheet by Hot Vulcanization Press”, Nippon Gomu Kyokaishi, (2017),90(6),277-282

4） Y. Hu, Q, Sun, JH. Yang, K. Ueno, T. Oshikiri, A. Kubo, Y. Matsuo, QH. Gong, H. Misawa, “Near-field spectral properties of coupled plasmonic nanoparticle arrays”, Optics Express, Vol. 25, No. 6, p6883-p6894 (2017)
【電子研内共著】

5） Y. Hirai, M. Mayama, Y. Matsuo, and M. Shimomura, “Uphill water transport on a wettability patterned surface: Experimental and theoretical results”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 9, No. 18, pp 15814-15821 (2017)

6） T. Endo, Y. Doi, M. Wakeshima, K. Suzuki, Y. Matsuo, K. Tezuka, T. Ohtsuki, Y. J. Shan, and Y. Hinatsu, “Magnetic Properties of the Melilite-Type Oxysulfide Sr2MnGe2S6O: Magnetic Interactions Enhanced by Anion Substitution”, Inorg. Chem., 2017, 56 (5), pp 2459-2466

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

1） 岡松隆裕、下村政嗣、平井悠司、松尾保孝、有田稔彦、PCT/JP2017/017216、「ゴム部材、タイヤおよびゴム部材の製造方法」、平成 29 年 11 月 9 日

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

該当なし

b．招待講演（国内学会）

該当なし

c．一般講演（国際学会）

該当なし

d．一般講演（国内学会）

該当なし

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 松尾保孝、アグス・スアギョ、柴山環樹　「FIB-SEM による 3 次元構造解析」、2017 年度　微細構造解析プラットフォームシンポジウム、東京大学（2017 年 10 月）

2） 松尾保孝、「プラズモニックデバイス作製のための電子線描画装置活用」、・電子ビームリソグラフィ実践セミナーⅢ、東京ファッションタウン 9F(2018 年 2 月)

4.7 シンポジウムの開催

該当なし

4.8 共同研究

a．所内共同研究

該当なし

b．民間等との共同研究

1） 横浜ゴム　共同研究

2） 日産自動車　共同研究

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

該当なし

4.9　予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a．　科学研究費補助金

1） 藪浩、挑戦的萌芽、バイオミメティックブロック共重合体を用いた３次元可視光メタマテリアルの創製、2016～2017 年度

2） 藪浩、基盤研究(A)、弾性率制御ハニカム多孔膜とラマン計測による幹細胞のメカノトランスダクション解度、2017～2019 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 松尾保孝、NEDO、平成 27 年度第 2 回「エネルギー・環境新技術先導プログラム／生物表面模倣による難付着･低抵抗表面の開発」、2015～2017 年度

4.10　受賞

1） 該当なし

4.11　社会教育活動

a．公的機関の委員

該当なし

b．国内外の学会の役職

該当なし

c．兼任・兼業

該当なし

d.外国人研究者の招聘

該当なし

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

g．　新聞・テレビ等の報道

該当なし

h．　ポスドク・客員研究員など

該当なし

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0 名

博士学位：0 名

II. 各種データ

Ⅱ－1. 研究成果公表に関する各種の統計表

１．学術論文

年度／部門等		平成26年	年度／部門等		平成27年	平成28年	平成29年
光科学研究部門	欧　文	9(7)	光科学研究部門	欧　文	18(18)	16(16)	20(20)
	邦　文	5		邦　文	0	0	1(1)
物質科学研究部門	欧　文	23(18)	物質科学研究部門	欧　文	14(14)	31(31)	32(32)
	邦　文	3		邦　文	1(1)	0	0
生命科学研究部門	欧　文	17(17)	生命科学研究分野	欧　文	10(10)	5(5)	10(10)
	邦　文	1		邦　文	1(1)	0	1(0)
数理科学研究部門	欧　文	14(14)※	附属社会創造数学研究センター	欧　文	28(25)	27(27)	34(34)
	邦　文	1		邦　文	2(1)	1	3(0)
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	欧　文	24(24)	ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	欧　文	39(39)	25(24)	26(26)
	邦　文	0		邦　文	0	0	0
計	欧　文	85(78)	計	欧　文	108(105)	104(103)	96(96)
	邦　文	10(2)		邦　文	4(3)	1	5(1)

(　)内の数はレフェリー付き。
※出版済のもの。客員研究分野は除外した。

２．総覧、解説、評論等及び著書数

年度／部門等		平成26年	年度／部門等		平成 27 年	平成 28 年	平成 29 年
光科学研究部門	総説等	1(0)	光科学研究部門	総説等	8(2)	6(0)	2(0)
	著　書	2(0)		著　書	0	0	0
物質科学研究部門	総説等	2(0)	物質科学研究部門	総説等	2(1)	3(0)	5(2)
	著　書	2(1)		著　書	0	0	1(1)
生命科学研究部門	総説等	4(2)	生命科学研究部門	総説等	9(3)	4(0)	3(1)
	著　書	1(0)		著　書	0	3(2)	1(1)
数理科学研究部門	総説等	2(1)	附属社会創造数学研究センター	総説等	11	5(1)	5(0)
	著　書	1(0)		著　書	0	1(1)	3(3)
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	総説等	2(0)	ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	総説等	1(0)	1(0)	3(0)
	著　書	0		著　書	2(0)	0(0)	2(2)
計	総説等	11(3)	計	総説等	31(6)	19(1)	15(3)
	著　書	6(1)		著　書	2	4(3)	5(5)

(　)内の数は欧文
※客員研究分野は除外して集計。
※共著に関しては、出版物数で表示（出版物の数×研究者ではない）。したがって「計」が表から算出したものと一致しない場合あり。
※年度をまたがっている場合、それぞれの年度でカウントしている。

３．国際学会・国内学会発表件数

年度／部門等		平成26年	年度／部門等		平成27年	平成28年	平成29年
光科学研究部門	国際学会	13(7)	光科学研究分門	国際学会	26(8)	23(11)	29(14)
	国内学会	23(3)		国内学会	39(21)	29(1)	41(9)
物質科学研究部門	国際学会	12(4)	物資科学研究部門	国際学会	36(10)	21(10)	32(20)
	国内学会	25(3)		国内学会	34(6)	29(6)	46(8)
生命科学研究部門	国際学会	13(7)	生命科学研究部門	国際学会	23(3)	26(10)	23(11)
	国内学会	45(13)		国内学会	19(3)	38(17)	38(12)
数理科学研究部門	国際学会	28(9)	附属社会創造数学研究センター	国際学会	26(20)	39(9)	47(25)
	国内学会	35(6)		国内学会	35(9)	28(11)	49(18)
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	国内学会	47(14)	ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	国内学会	46(14)	35(24)	27(12)
	国内学会	55(5)		国内学会	42(0)	35(4)	45(8)
計	国際学会	110(41)	計	国際学会	175(55)	144(64)	131(70)
	国内学会	181(30)		国内学会	169(39)	159(39)	174(47)

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て集計。
※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「計」が表から算出したものと一致しない場合あり。
※年度をまたがっている場合、それぞれの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／部門等	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
業　務　費	128,162	155,177	120,230	130,195
科学研究費補助金	192,260(61)	262,325(59)	273,367(74)	305,736(74)
その他の補助金	4,396(3)	5,450(2)	7,500(2)	1,100(2)
寄　附　金	36,958(18)	29,877(14)	23,957(19)	36,117(21)
受託事業等経費	306,421(27)	266,215(20)	252,471(25)	244,713(25)
(受託研究費)	280,205(14)	249,835(13)	236,716(15)	218,297(13)
(共同研究費)	26,216(13)	16,380(7)	15,755(10)	26,416(12)
合計	668,197(109)	719,044(95)	677,525(120)	717,861(122)

() 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 26 年度	部門等	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
光科学研究部門	科学研究費補助金	14,600(3)	光科学研究部門	44,700(5)	93,000(8)	112,400(13)
	その他の補助金	0		0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	3,252(5)		9,997(5)	4,084(2)	9,017(3)
	寄　附　金　Ⅱ	1,000(1)		0	0	500(1)
	受託事業等経費	81,090(4)		74,989(4)	49,389(1)	22,880(2)
	(受託研究費)	81,090(4)		64,950(3)	49,389(1)	22,880(2)
	(共同研究費)	0		10,039(1)	0	0
	小　　計	99,942(13)		129,686(14)	146,473(11)	144,797(19)
物質科学研究部門	科学研究費補助金	30,300(7)	物質科学研究部門	55,100(6)	51,500(14)	59,466(15)
	その他の補助金	0		0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	4,570(4)		3,200(2)	12,000(7)	22,100(11)
	寄　附　金　Ⅱ	0		600(1)	1,200(1)	1,200(1)
	受託事業等経費	5,000(3)		0	13,491(3)	32,075(3)
	(受託研究費)	0		0	11,843(1)	31,719(2)
	(共同研究費)	5,000(3)		0	1,648(2)	356(1)
	小　　計	39,870(14)		58,900(9)	78,191(25)	114,841(30)
生命科学研究部門	科学研究費補助金	47,300(10)	生命科学研究部門	52,400(6)	44,800(8)	35,000(8)
	その他の補助金	296(1)		0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	9,300(1)		1,200(2)	3,873(5)	200(1)
	寄　附　金　Ⅱ	0		0	0	0
	受託事業等経費	56,445(5)		22,162(4)	20,961(3)	28,767(3)
	(受託研究費)	55,180(2)		21,382(2)	20,181(1)	27,987(1)
	(共同研究費)	1,265(3)		780(2)	780(2)	780(2)
	小　　計	113,341(17)		75,762(12)	69,634(16)	63,967(12)
数理科学研究部門	科学研究費補助金	35,660(25)	附属社会創造数学研究センター	54,585(23)	46,270(24)	58,570(26)
	その他の補助金	2,000(1)		0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	12,191(2)		13,380(1)	0	1,000(1)
	寄　附　金　Ⅱ	0		0	0	0
	受託事業等経費	70,463(4)		125,495(7)	103,172(11)	119,397(10)
	(受託研究費)	67,763(3)		122,885(5)	94,383(7)	104,005(6)
	(共同研究費)	2,700(1)		2,610(2)	8,789(4)	15,392(4)
	小　　計	120,314(32)		193,460(31)	149,442(35)	178,967(37)

部門等	研究費	平成 26 年度	部門等	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
附属グリーンナノテクノロジー研究センター	科学研究費補助金	56,300(11)	附属グリーンナノテクノロジー研究センター	49,950(17)	29,750(17)	39,500(10)
	その他の補助金	0		0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	2,000(1)		500(2)	0	1,100(2)
	寄　附　金　Ⅱ	3,050(3)		1,000(1)	2,800(4)	1,000(1)
	受託事業等経費	75,192(10)		27,268(4)	53,923(5)	37,586(4)
	(受託研究費)	57,941(4)		24,317(2)	49,385(3)	29,198(1)
	(共同研究費)	17,251(6)		2,951(2)	4,538(2)	8,388(3)
	小　　計	136,542(25)		78,718(24)	86,473(26)	79,186(17)
その他	科学研究費補助金	8,100(5)	その他	5,590(2)	8,047(3)	800(2)
	その他の補助金	2,100(1)		5,450(2)	7,500(2)	1,100(2)
	寄　附　金　Ⅰ	1,595(1)		0	0	0
	寄　附　金　Ⅱ	0		0	0	0
	受託事業等経費	18,231(1)		16,301(1)	11,535(2)	4,008(3)
	(受託研究費)	18,231(1)		16,301(1)	11,535(2)	2,508(1)
	(共同研究費)	0		0	0	1,500(2)
	小　　計	30,026(8)		27,341(5)	27,082(7)	5,908(7)

() 内の数は受け入れ件数。　寄附金Ⅰ：申請による財団等からの研究補助金。寄附金Ⅱ：Ⅰ以外のもの。

Ⅱ－3. 外国人研究者の受入(招へい)状況

a. 年度別統計表

部門等＼年	平成26年度
光科学研究部門	1
物質科学研究部門	3
生命科学研究部門	0
数理科学研究部門	2
附属グリーンナノテクノロジー研究センター	3
計	9

部門等＼年	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
光科学研究部門	2	7	2
物質科学研究部門	3	9	15
生命科学研究部門	0	1	2
附属社会創造数学研究センター	5	8	14
附属グリーンナノテクノロジー研究センター	12	13	12
計	22	38	45

Ⅱ－4. 修士学位及び博士学位の取得状況

Ⅱ－４－１）平成２９年度　修士学位

情報科学研究科

■ 菅原 翔太郎 ： 金属ナノ四量体構造における四重極子場の解析
■ 井手 柾希 ： プラズモニック構造体によるナノ渦場とナノ物質の相互作用の解析
■ 織田 洋彰 ： 分光ナノイメージングによるプラズモンモード干渉の観測に関する研究
■ 新宅 貴志 ： レーザー誘起水熱合成法を用いたランダムレーザー発振特性制御に関する研究
■ 谷 直哉:Ｘ線レーザー回折イメージングによる膜タンパク質観察に向けた脂質膜マイクロチャンバーの開発
■ 山中 祐実 ：２光子顕微鏡を用いたマウス膵臓の in vivo Ca^{2+}イメージング
■ 高倉 稜平 ：３次元プラズモン光アノードを用いた光電変換・水分解反応系の構築

生命科学院

■ 鳥居 悠 ： 高分子を用いた金属ナノ粒子の自己集合化制御

総合化学院

■ 久保 直紀 ： 固体電解質を利用したインターカレーションの新規手法開発

環境科学院

■ 小原　怜子 ： Electron Donor-Acceptor Molecular Dyads for Fluorescence Sensing of Singlet Oxygen
■ 鄭　鑫 ：Structures and physical properties of coordination polymers containing similar components with ionic liquids

理学院

■ 寺山　拓： 超流動量子渦の構造と１粒子励起
■ 木村　卓： Kitaev 梯子模型に観る分数励起
■ 千葉 大祐： 擬一次元有機導体(TMTTF)2X における非線形電気伝導
■ 河野　航： Abrikosov 格子状態における Hall 効果の微視的研究
■ 佐藤 優祐 ： 多相環境における界面運動の近似解法
■ 趙　子夏：Traveling pulse solutions in a point mass model of diffusing particles

Ⅱ－４－２）平成２９年度　博士学位

情報科学研究科

■ 于　瀚： Exploring the near-field properties on coupled plasmonic nanostructures by photoemission electron microscopy
■ 郭　景春: Plasmon-induced photoelectrochemical biosensors using gold nanostructured titanium dioxide photoelectrodes

生命科学院

■ Halley Mariet Menezes ： Driving and photo-regulation of myosin-actin motor at molecular and macroscopic level by photo-responsive high energy molecules
■ 飯田 良 ： Control of Nanoparticle Self-Assembly in Water by Rational Surface Design

理学院

■ 植木 輝：Microscopic Theory of the Flux-Flow Hall Effect in Type-II Superconductors

Ⅱ－4－3）大学院生在籍数

年 / 研究科名	修士			博士		
	平成27年	平成28年	平成29年	平成27年	平成28年	平成29年
理学院	11	8	6	4	5	4
工学研究科	0	0	0	0	0	0
環境科学院	2	3	4	3	1	4
情報科学研究科	21	21	34	12	12	12
生命科学院	3	0	4	8	9	12
地球環境科学生命科	0	0	0	0	0	0
総合化学院	6	5	3	5	7	0
計	43	37	51	32	34	32

III. 研究支援体制

Ⅲ－1. 技術部

技術部はシステム開発技術班、ナノ加工・計測技術班、装置開発技術班(機械工作室・ガラス工作室)からなる。

システム開発技術班は、広報・情報・ネットワーク・研究所のウェブサイト管理運営、ニコンイメージングセンターへの技術支援などを行っている。

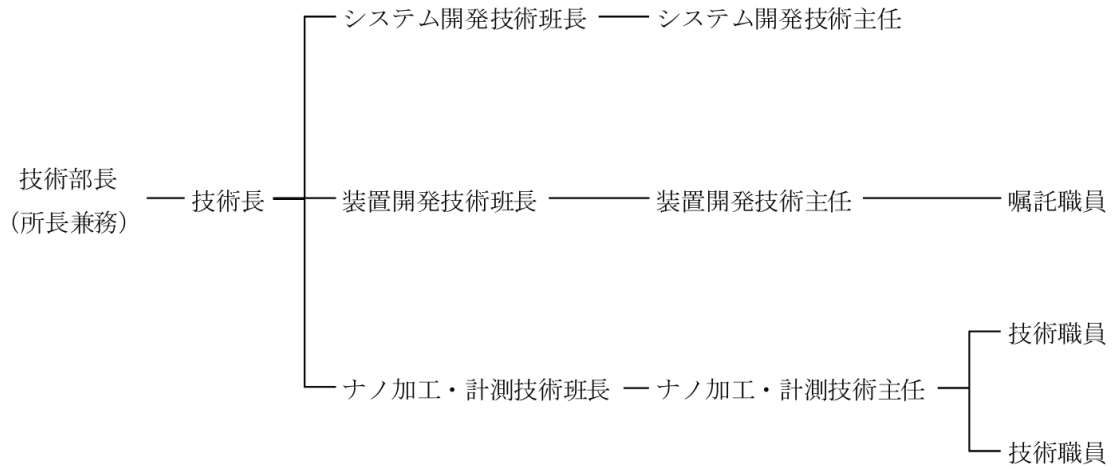
ナノ加工・計測技術班はクリーンルーム及び共用設備の維持管理、利用指導、ナノ加工計測を行っており、それらに関する技術相談も受けている。また両班は研究所全体に関わる業務として行事等の技術支援や液化窒素ガス汲み出し作業従事者への講習会の支援なども行っている。

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、汎用工作機械、NC 加工機を利用した金属・樹脂の精密加工や TIG 溶接(SUS, AL)技術を用いて多くの実験装置の開発・製作を行っている。近年は三次元 CAD を用いた設計相談にも対応している。

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・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. 学術情報

平成20年の北キャンパス移転に伴い電子科学研究所図書室は(旧)北キャンパス図書室と統合し、平成20年8月に電子科学研究所・触媒化学研究センター・創成研究機構の3部局共通の図書室である「北キャンパス図書室」として運営されることとなった。

a．図書・学術雑誌

単行本は、各研究分野で購入し管理されている。図書室には参考図書を中心に配架されている。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、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。

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。

1．蔵書冊数

年　度	平成26年*	平成27年*	平成28年*	平成29年*
和　書	5,670	5,777	5,311	5,316
洋　書	17,519	17,558	17,222	17.225
計	23,189	23,335	22,533	22,541

2．所蔵雑誌種類数

年　度	平成26年*	平成27年*	平成28年*	平成29年*
和雑誌	107	106	107	107
洋雑誌	387	388	387	385
計	494	494	494	492

3．雑誌受入種類数

年　度	平成26年*	平成27年*	平成28年*	平成29年*
和雑誌	48	43	41	30
洋雑誌	6	6	4	5
計	54	49	45	35

4．学外文献複写数

年　度	平成26年*	平成27年*	平成28年*	平成29年*
依　頼	87	20	12	48
受　付	137	127	96	65

* 北キャンパス図書室全体としての数字

b．学術情報システム

閲覧室には情報検索用パソコン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可能である。

平成14年度からは電子ジャーナルが本格的に導入され、21,000タイトルを超える電子ジャーナルの利用が可能で、フルテキストを閲覧・購読できる。

また、情報検索端末からはインターネットを通じ、北海道大学で導入している学術文献データベースを利用することができる。利用できるデータベースの種類は豊富で、“Web of Science”“SciFinder”といった著名な文献書誌・抄録データベースや、新聞記事データベース、辞典類や出版情報等のサービスが利用可能である。

電子ジャーナルおよびデータベースは、平成22年度より運用開始したリモートアクセスサービスにより、一部のタイトルを除き、出張先、自宅など学外からも利用可能となった。

また、インターネットを通じて“PubMed”“CiNii Articles”等の無料データベースを利用したり、国内外の大学図書館等の情報を得ることもできる。

カードロックシステムを導入しており、研究所内の教職員院生は24時間図書室の利用が可能となっている。

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　電子情報処理研究部門感覚情報研究分野を廃止
17. 4　電子計測制御研究部門適応制御研究分野を廃止
電子計測制御研究部門ナノシステム生理学研究分野を新設
17. 10　電子材料物性研究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
電子情報処理研究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
電子情報処理研究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（22. 10　協定終了）
19. 4　附属ナノテクノロジー研究センターの「10年時限」撤廃
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
(21. 12　大学間交流協定へ移行　責任部局：大学院歯学研究科)
20. 1　台湾・国立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
20. 4　台湾・国立台湾大学物理学科との研究交流に関する覚書締結

20. 6　米国・カリフォルニア大学ロサンゼルス校カリフォルニアナノシステム研究所を代表するカリフォルニア大学評議会との学術交流協定締結
20.10　電子情報処理研究部門極限フォトンプロセス研究分野をスマート分子研究分野に名称変更
附属ナノテクノロジー研究センターナノ材料研究分野を極限フォトンプロセス研究分野に名称変更
附属ナノテクノロジー研究センターナノデバイス研究分野をバイオ分子ナノデバイス研究分野に名称変更
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」開設期間更新（更新期間３年）
22. 3　フランス・リヨン高等師範学校との学術交流協定締結
22. 4　電子材料物性研究部門ナノ光高機能材料研究分野をコヒーレントＸ線光学研究分野に名称変更
電子機能素子研究部門分子認識素子研究分野を光波制御材料研究分野に名称変更
電子計測制御研究部門量子計測研究分野を生体物理研究分野に名称変更
附属ナノテクノロジー研究センターナノ理論研究分野をナノ光高機能材料研究分野に名称変更
連携研究部門理研連携研究分野を新設
22. 9　ドイツ・オットー・フォン・ゲーリケ大学マクデブルク自然科学部との学術交流協定締結
23. 1　台湾・国立交通大学理学院との学術交流協定締結
23. 9　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」開設期間満了
24. 4　改組に伴い研究部門名、研究分野名を全面改称
附属ナノテクノロジー研究センターを附属グリーンナノテクノロジー研究センターに改組転換
研究支援部を新設
支援部構成：ニコンイメージングセンター、国際連携推進室、ナノテク連携推進室
25. 7　ベルギー・ルーヴェン・カトリック大学との学術交流協定締結
25.11　英国・グラスゴー大学理工学部との学術交流協定締結
26. 3　中国・吉林大学、ハルピン工業大学及び北京国家ナノテクノロジーセンターとの学術交流協定締結
26.12　台湾・中央研究院応用科学研究センターとの学術交流協定締結
27. 3　台湾・中央研究院物理研究所との学術交流協定締結
27. 4　附属社会創造数学研究センターを設置
数理科学研究部門を廃止
数理科学研究部門複雑系数理研究分野を生命科学研究部門複雑系数理研究分野に改組
研究支援部に数理連携推進室を新設
連携研究部門産研アライアンス研究分野を廃止
27. 6　中国西安交通大学との学術交流協定締結
27. 6　中国西安理工大学との学術交流協定締結
27.12　香港城市大学との学術交流協定締結
27. 9　生命科学研究部門複雑系数理研究分野を廃止

［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	蓑島　　高
応用電気研究所	昭和21年４月１日～昭和21年９月10日	蓑島　　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～平成21年９月30日	笹木　敬司
	平成21年10月１日～平成25年９月30日	三澤　弘明
	平成25年10月１日～平成29年３月31日	西井　準治
	平成29年４月１日～現在	中垣　俊之

〔名誉教授〕

昭和32年４月	（故）	蓑島　　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
	（故）	馬場　宏明
	（故）	松本　伍良
昭和63年４月	（故）	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	（故）	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
平成21年４月		栗城　眞也
平成23年４月		上田　哲男
平成27年４月		太田　信廣
平成28年４月		末宗　幾夫
		西浦　廉政

Ⅳ－2. 建物

本研究所は、平成15年度に現在の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北12条西6丁目から移転し、平成20年度に北キャンパス総合研究棟5号館が新築され、平成21年度に同館5階の一部が増築された。平成21年度には中央キャンパス総合研究棟2号館（旧Ｂ棟）が改修された。

建物名称	構造	建面積 ㎡	延面積 ㎡	建築年度
創成科学研究棟	鉄筋コンクリート造5階建	——	4,154	平成15年度
北キャンパス総合研究棟５号館	鉄筋コンクリート造5階建	1,104	5,419 (116)	平成20年度 (平成21年度増築)
中央キャンパス総合研究棟２号館	鉄筋コンクリート造5階建	——	1,294	平成21年度 (改修)
計		——	10,867	

延面積欄の（ ）内の数字は増築分で内数

Ⅳ－3. 現員（平成29年度）

（3月末 日現在）

職名	人数
教授	14(7)
准教授	14
講師	0
助教	20
特任教授	0
特任准教授	0
特任講師	0
特任助教	5
教員小計	53(7)
技術部	10
合計	63(7)

（ ）内の数字は客員で外数

Ⅳ－4. 教員の異動状況（平成29年度）

○転入状況

所属部門	職　名	氏　　名	採用年月日	前　　職
物質科学研究	准教授	髙野　勇太	H29.4.1	京都大学特定拠点助教
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	准教授	寺本　央	H29.4.1	日立製作所客員主任研究員
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	伊藤　創祐	H29.4.1	FOM Institute AMOLF, Visiting researcher
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	助教	髙橋　仁徳	H29.8.1	北海道大学電子科学研究所博士研究員
生命科学研究	准教授	三友　秀之	H29.9.1	北海道大学電子科学研究所助教
光科学研究	准教授	平井　健二	H29.12.1	北海道大学大学院理学研究院特任助教
生命科学研究	准教授	榎木　亮介	H30.1.1	北海道大学大学院医学研究院助教

○転出状況

所属部門	職　名	氏　　名	退職年月日	転　出　先
生命科学研究	助教	川上　良介	H29.6.30	愛媛大学准教授
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	准教授	野呂　真一郎	H29.11.15	北海道大学大学院地球環境科学研究院教授
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	黒田　茂	H30.3.31	青森大学准教授
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	JUSUP MARKO	H30.3.31	東京工業大学研究員

(30.3.31)

Ⅳ－5. 構成員（平成29年度）

所　長　　中　垣　俊　之

光科学研究部門
- 光システム物理研究分野
  - 教　授　笹　木　敬　司
  - 准教授　藤　原　英　樹
  - 助　教　酒　井　恭　輔
  - 特任助教　石　田　周太郎
- ナノ材料光計測研究分野
  - 教　授　雲林院　　宏
  - 准教授　平　井　健　二
  - 助　教　猪　瀬　朋　子
- コヒーレント光研究分野
  - 教　授　西　野　吉　則
  - 助　教　木　村　隆　志
  - 助　教　鈴　木　明　大

物質科学研究部門
- 分子フォトニクス研究分野
  - 教　授　BIJU VASUDEVAN PILLAI
  - 准教授　髙　野　勇　太
  - 助　教　柚　山　健　一
- スマート分子材料研究分野
  - 教　授　玉　置　信　之
  - 助　教　ＫＩＭ　　ＹＵＮＡ
  - 助　教　松　尾　和　哉
  - 助　教　相　良　剛　光
- ナノ構造物性研究分野
  - 教　授　石　橋　　晃
  - 准教授　近　藤　憲　治
- 薄膜機能材料研究分野
  - 教　授　太　田　裕　道
  - 准教授　山ノ内　路　彦

生命科学研究部門
- 光細胞生理研究分野
  - 教　授　根　本　知　己
  - 准教授　榎　木　亮　介
  - 助　教　大　友　康　平
  - 特任助教　石　井　宏　和
- 生体分子デバイス研究分野
  - 教　授　居　城　邦　治
  - 准教授　三　友　秀　之

連携研究部門
- 理研連携研究分野
  - 客員教授　田　中　拓　男（理化学研究所）
- 社会連携客員研究分野
  - 客員教授　倉　持　隆　雄（科学技術振興機構）
  - 客員教授　浅　羽　雅　晴（科学技術振興機構）
  - 客員教授　永　山　國　昭（総合研究大学院大学）
  - 客員教授　高　原　　淳（九州大学）
  - 客員教授　村　田　　隆（自然科学研究機構）
- 新概念コンピューティング研究分野
  - 客員教授　山　岡　雅　直（(株)日立製作所）

附属グリーンナノテクノロジー研究センター
- センター長（兼）　玉　置　信　之
- グリーンフォトニクス研究分野
  - 教　授　三　澤　弘　明
  - 准教授　上　野　貢　生
  - 助　教　押　切　友　也
  - 助　教　石　　旭
  - 助　教　孫　　泉
- 光電子ナノ材料研究分野
  - 教　授　西　井　準　治
  - 准教授　海　住　英　生
  - 助　教　藤　岡　正　弥
- ナノ光機能材料研究分野

- ナノアセンブリ材料研究分野
  - 教　授　中　村　貴　義
  - 助　教　髙　橋　仁　徳

附属社会創造数学研究センター
- センター長（兼）　小松﨑　民　樹
- 人間数理研究分野
  - 教　授　長　山　雅　晴
  - 准教授　青　沼　仁　志
  - 助　教　秋　山　正　和
  - 助　教　西　野　浩　史
- データ数理研究分野
  - 教　授　小松﨑　民　樹
  - 准教授　寺　本　　央
  - 助　教　西　村　吾　朗
  - 助　教　伊　藤　創　祐
  - 特任助教　TAYLOR　JAMES　NICHOLAS
  - 特任助教　田　畑　公　次
- 知能数理研究分野
  - 教　授　中　垣　俊　之
  - 准教授　佐　藤　勝　彦
  - 准教授　佐　藤　　譲
  - 助　教　黒　田　　茂
- 実験数理研究分野
  - 助　教　MARKO　JUSUP

研究支援部
- ニコンイメージングセンター
  - センター長（兼）　根　本　知　己
  - 助教（兼）　大　友　康　平
  - 特任助教　堤　　元　佐
- 国際連携推進室
  - 室長（兼）　BIJU VASUDEVAN PILLAI
- ナノテク連携推進室
  - 室長　准教授　松　尾　保　孝

技術部
- 技術部長（兼）　中　垣　俊　之

装置開発技術班

班　長	武　井　将　志
技術職員	楠　崎　真　央

システム開発技術班

班　長	伊勢谷　陽　一
技術専門職員	今　村　逸　子
技術専門職員（兼）	小　林　健太郎

ナノ加工・計測技術班

班　長	遠　藤　礼　暁
技術専門職員（主任）	大　西　　広
技術職員	中　野　和佳子
技術職員	平　井　直　美
技術職員（兼）	楠　崎　真　央
技術専門職員（主任）	小　林　健太郎
技術専門職員	笠　　晴　也
技術専門職員（兼）	今　村　逸　子

契約職員・短時間勤務職員

博士研究員	楊　　影
〃	SANCHELA ANUP KUMAR
〃	LI JIE
〃	須志田　隆　道
〃	一本嶋　佐　理
〃	後藤田　　剛
〃	上　坂　正　晃
〃	SATTARI SULIMON
学術研究員	PIN CHRISTOPHE LOUIS MARIE
〃	飯　島　光一朗
〃	何　　倩
〃	山　口　由美子
〃	熊　本　淳　一
〃	浪　花　啓　右
〃	土　田　　旭
非常勤研究員	PIN CHRISTOPHE LOUIS MARIE
研究支援推進員	佐々木　彩　乃
〃	駒　井　京　子
〃	柳　　亮　輔
事務補佐員	山　田　美　和
〃	山　崎　涼　子
〃	中　岡　亜　弓
〃	伊　藤　春　奈
〃	遠　藤　和　恵
〃	須々田　明　子
技術補佐員	丸　山　明日香
〃	石　田　麻衣子
事務補助員	藤　井　敦　子
〃	田　山　紘　子
〃	大　森　素　子
〃	春　日　さと子
〃	佐　藤　恵　美
〃	奥　原　亜　季
〃	浦　田　絵　美
〃	富　澤　ゆかり
〃	五十嵐　知　実
技術補助員	高　倉　稜　平
〃	山　田　拓　樹
〃	堂　前　　愛
〃	木　村　京　子

（平成30年３月末日現在）