巻頭言

第３期中期計画（H28-H33 年度）の３年度目にあたる H30 年度は、学内で H29 年度に決定された 7.5%の人事ポイント削減の中で、どのようにして所のアクティビィティをデザインしていくかが問われた一年でした。全学的には、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とが進められる中、本所の活動もそれらに同調させながら、複合領域ナノサイエンスの研究を展開してきました。以下、組織運営、研究、教育、アウトリーチ、研究支援・環境整備などについて、H30 年度の活動を振り返ってみたいと思います。

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鏑矢となっています（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７月には年次報告会を当番校として本学にて開催し、文科省学術機関課長始め、北大研究担当理事、外部委員各位を迎え、盛会にて終えることができました。ご尽力いただいた北キャンパス合同事務部、特に研究協力係に厚く御礼申し上げます。また、H30 年度には、中間評価（研究振興局学術機関課）がありました。今回初めて相対評価となり、かつてない厳しい評価が実施されましたが、最高評価「S」を頂戴することができました。S 評価は、全国 77 拠点中 11 拠点のみでした。評価コメントには「拠点の見本となる」との文言もあり、この高い評価を所員全員で分かち合うとともに、ご尽力いただいた関係各位に深く感謝を申し上げたいと思います。これに慢心することなく、励みと捉え、期末評価やその先にある次期中期計画への対応に早速着手して参ります。

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５月に設立いたしました。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研究室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した。さらに、このセンターは、物質デバイス共同研究拠点全体として推し進める台湾国際化のハブとして機能しており、拠点５研究所と台湾２機関２部局（国立交通大学理学院と中央研究院応用科学研究センター）からなる５＋２アライアンスとして国際連携を推し進めています。５月の共同センター設立セレモニー（国立交通大学にて）を始め、５＋２国際連携シンポジウム（５月に国立交通大学にて）、５＋２共同講義（国立交通大学の３単位分のオムニバス形式講義）を実施いたしました。シンポジウムには５名の大学院生の参加、講義には３名の若手教員の参加があり、若手育成の機会にもなりました。

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、平成 29 年度に第 2 回目の中間評価を受け、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ました。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開始した概算要求事業（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　電子研、工学研究院、理学研究院、地球環境科学研究院、情報科学研究院）を推進しております。さらにもう一つの概算要求事業「フォトエキサイトニクス研究拠点-光励起状態制御の予測と高度利用-」（H31-33 年度理学研究院、遺伝子病制御研究所）が採択され、これにも遺伝子病制御研究所との密な連携を通じて実効的に参画しており次年度からの予算措置に照準を合わせ、ニコンイメージングセンターを核にした研究活動計画を策定しました。

以上、三つのナノテク関連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、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。これにより、H 30 年度で凡そ９０万円の利用料金収入を得ることができ、新規工作機器の購入費用に当てることができました。また、技術部のうち機械工作室だけが、離れのプレハブ棟で作業をしていましたが、創成研究機構との話し合いにより、念願の創成研究棟への入居が叶いました（改修工事の後の引っ越しはH 31 年度）。これまで述べてきたナノテク関連事業は、本所附属のグリーンナノテクノロジー研究センターやナノテク連携推進室が中心となって運営しています。

本所は、これまでクリーンルームやニコンイメージングセンターの先端機器の共同利用とそれを活用した共同研究を促進し、さらには全学の機器共用化事業であるグローバルファシリティセンターにも大きく貢献してきました。これらの機器共用化の経験やノウハウは本所の財産であり、今後さらに発展・強化させていくことが重要です。そのために、共同利用・共同研究拠点事業を包括的かつ戦略的に推し進める体制を整えるべく組織改革を実施しました。すなわち、ナノテク連携推進室、ニコンイメージングセンター、国際連携推進室の三つのセクションが属する現在の研究支援部を「共創研究支援部」として刷新し、三セクションの連携を密にして運営できるようにしました。共創研究支援部に統括職を配し、初代部長として松尾保孝教授が就任しました。この改組により、共同利用・共同研究拠点事業をより国際的かつ学内的に展開していきたいと思います。

本年度で 19 回目となる電子研-北大国際シンポジウムは、本年度のテーマ「組」を掲げ、12 月に定山渓ビューホテルにて泊まり込みで実施されました。国内外の著名な研究者による招待講演、所内・学内から５０件ほどの若手ポスター発表を中心に、活発な研究交流が行われました。本所附属の社会創造数学研究センターは、設立 4 年目を迎え、国内の数理科学拠点を迎えて公開シンポジウム「数理連携の現状と未来」を 8 月に鈴木章ホールにて開催いたしました。理学部数学科での連携講義も３年目を迎え、また日立との連携講座「新概念コンピューティング」の成果も上がり、ステップアップの時期を迎えつつあります。学内では、８つの共同利用・共同研究拠点でアライアンスを組み、ボランタリーな活動体として、今後合同フォーラム、シンポジウム、アウトリーチ活動を共に実施していくことになりました。

H30 年度には、新たに二つの研究事業を始めることができました。一つは、学術振興会研究拠点形成事業(Core-to-Core Program)「１分子・１粒子レベルの細胞間コミュニケーション解明のための先端研究拠点の確立」（H31～35 年度）（日本側コーディネーター雲林院宏教授）であり、これは、連携拠点であるベルギーのルーバン大学とオーストラリアのメルボルン大学と持続的な協力関係を確立して、世界的水準の研究交流拠点を構築しながら、次世代の中核を担う若手研究者の育成を目指すものです。この事業の申請には、過去の不採択の経験を活かすべく本所の国際連携推進室や全学の国際部とスクラムを組んで臨み、念願の採択にこぎつけたものです。この採択には、雲林院教授がこれまでルーバン大学とクロスアポイントメントを交わして（北大初の海外大学とのクロスアポイントメント）連携基盤を築いてきたことも大きく貢献しております。予算措置は、H31 年 4 月からですが、事業推進者の雲林院宏教授を中心にして事業計画の策定に着手いたしました。来年度から、所をあげて支援していきます。もう一つは、日本学術振興会世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI program）「化学反応創成研究拠点」（拠点長理学研究院前田理教授）であり、この全学的な事業に、本所の小松崎民樹教授が参画しております。

科学研究費助金等外部資金の獲得は、概ね昨年並みで堅調でした。その中には、科学研究費補助金特別推進研究や JST のクレストの獲得など、卓越した成果がありました。また、若手向けの JST さきがけ研究の採択もありました。

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が、理学部数学教室との連携で応用数理科学科目を開講しました。また国際連携推進室長のビジュ教授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。また、多くの大学院生、特に博士課程大学院生を海外・国内から迎い入れることにより、教育部局の大学院充足率に貢献しております。

アウトリーチ活動については、毎年恒例となっている６月の研究所一般公開イベントが、例年通り千数百名の来場者を集め、新聞等でも報道されました。また、北海道新聞と北海道大学が包括連携のもとに実施す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(全学で 20 名のうち 4 名が電子研)。さらに、H30 年度から新たな取り組みとして、読売新聞と連携協定を交わして中高生向けの体験型サイエンスレクチャーを開始しました。第一回は夏休みに、ニコンイメージングセンターが中心となり「スマホ顕微鏡」をテーマに、第二回は冬休みに、北大の博物館と連携して「バイオミメティクス」をテーマにそれぞれ実施し、参加者から好評をいただきました。その様子は、読売新聞にて大々的な特集記事で紹介されました。このサイエンスレクチャーには、本学の CoSTEP や URA、広報課の協力もいただき、加えて札幌市教育委員会の後援もいただいて、コンテンツの質を高めることができました。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極めて重要な草の根的活動であるとの認識を所内で共有し、今後も積極的に取り組んでまいります。

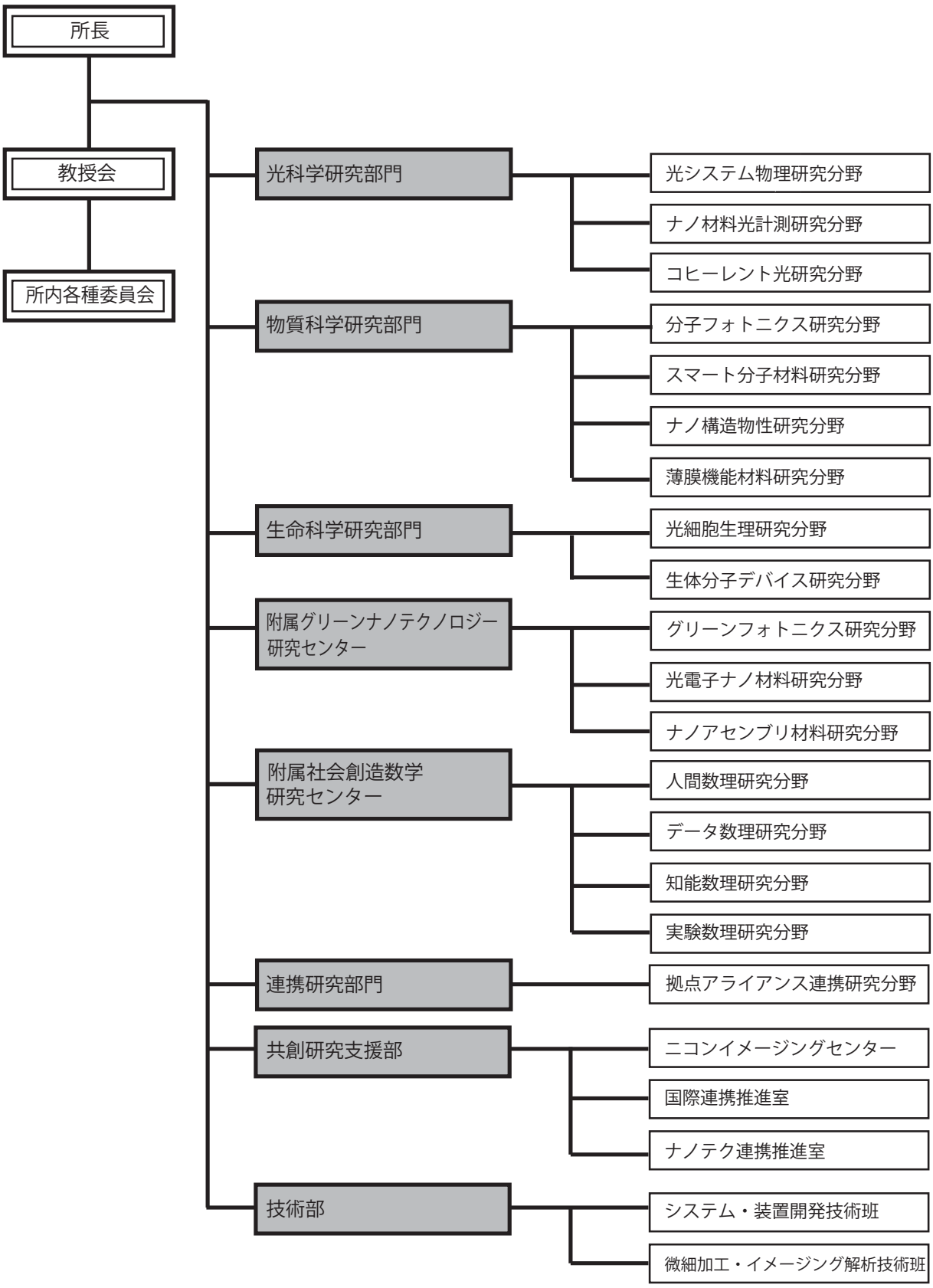
所員としての意識を高めるべく、予算申請書添削事業やプレスリリースの書き方講座等を開催し、ファカルティデベロップメントに取り組んでおります。その甲斐あり、新聞やテレビなどのマスコミを通じた広報活動も増えております。また、所員向けの研究支援のため、北キャンパス図書室の情報機器設備（WiFi 環境、文献検索用端末計算機など）を整備し直し、図書室と協力して文献データベース等の講習会を開催しました。今後さらに図書室の研究支援機能を開拓していきたいと思います。また、所内のハラスメントを防止し、多様な学生・教職員の一人一人が力を発揮できるような教育研究環境・職場環境をさらに整えていくために、ハラスメント対応の講演会を実施するとともに、毎週金曜日午後に専門のカウンセラーを招聘して所独自のカウンセリングを学生教職員対象に実施しています。

H30 年 9 月には、胆振東部地震が発生し、道内全域の停電も含め、甚大なる被害が発生しました。被害に遭われた方々に対しまして、心よりお見舞い申し上げます。本書でも、機器等の不具合が発生し億円単位の被害がありました。建物にも、壁パネルの損壊・剥離、壁のヒビ割れなどがありましたが、幸運にも大事にはいたらずに済みました。もとより、所員も学生も全員無事であったことが何よりでした。この地震によるライフラインの一時停止時には、少なからぬ学生や教職員が、所の防災備蓄品である水と食料（乾パン）を利用いたしました。所の防災備蓄品が今回初めて活用されましたが、一方で停電に伴うスマホ等の充電需要には十分に応えられませんでした。これを教訓にして、今後、防災備蓄品の見直しと拡充（発電機や充電器、懐中電灯、水と食料の増量など）を図ることにいたしました。

所員の親睦の場として、教職員の親睦会が中心となって、7 月下旬に野外ジンギスカンパーテイを実施しました。これは、毎年の恒例行事となっており、教職員のみならず、その家族、所内の大学院生や卒研生、さらには時として海外・国内からのゲストも交えて、北海道の夏を共に楽しむ機会になっております。

人件費ポイントの 7.5%削減をはじめ、大学改革の流れがより一層厳しさを増した H30 年度でありましたが、以上のように充実した研究・教育活動を行うことができました。どのような状況になろうとも、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。今後のますますのご指導ご鞭撻を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
共創研究支援部
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
技術部
システム・装置開発技術班
微細加工・イメージング解析技術班

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 …… 34
薄膜機能材料研究分野 …… 41

生命科学研究部門
光細胞生理研究分野 …… 52
生体分子デバイス研究分野 …… 63

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 …… 70
光電子ナノ材料研究分野 …… 78
ナノアセンブリ材料研究分野 …… 85

附属社会創造数学研究センター
人間数理研究分野 …… 94
データ数理研究分野 …… 105
知能数理研究分野 …… 116

連携研究部門
拠点アライアンス連携研究分野 …… 122

共創研究支援部
ニコンイメージングセンター …… 125
国際連携推進室 …… 129
ナノテク連携推進室 …… 131

Ⅱ．各種データ
Ⅱ－１．　研究成果公表に関する各種の統計表 …… 136
Ⅱ－２．　予算 …… 137
Ⅱ－３．　外国人研究者の受入状況 …… 139
Ⅱ－４．　修士学位及び博士学位の取得状況 …… 140

Ⅲ．研究支援体制
Ⅲ－１．　技術部 …… 144
Ⅲ－２．　学術情報 …… 145

Ⅳ．資料

Ⅳ－１．　沿革…… 148
Ⅳ－２．　建物…… 151
Ⅳ－３．　現員…… 151
Ⅳ－４．　教員の異動状況 …… 152
Ⅳ－５．　構成員…… 153

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、2008.6～2019.3）
助　教　　酒井恭輔（京大院、工博、2010.12～2018.11）
ポスドク、助教 Christophe Pin（University of Bourgogne Franche-Comte、PhD、2016.10～）
特任助教 瀬戸浦（阪大院、工博、2018.12～）
その他のメンバー
修士課程　鈴木達朗、須藤広太、髙橋玄太、山内喬介、相川大貴、喜多信介、北嶋大暉、佐藤一生、藤川聖也

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)　プラズモン共鳴を利用した選択的な酸化亜鉛の水熱合成法の開発

金属ナノ構造中に誘起される局在表面プラズモンは、ナノスケールの光局在と高い電場増強効果を示すため、ナノ領域における光物質間相互作用を強く増強することが可能となる。この実現のためには、局在電場分布に応じたナノ物質の正確な配置方法が必要とされている。

本研究では、この目的のためにプラズモニックナノアンテナ構造中で酸化亜鉛を局所的かつ選択的に合成するための新しい水熱合成法を提案した。この方法の実証実験を行った結果、金ナノアンテナ構造の局在プラズモンモードの1つを選択的に励起することにより、プラズモン共鳴に基づくナノスケールの局所加熱にを誘起し、ターゲットと構造上にのみ選択的に酸化亜鉛（ZnO）を合成できることを確認した（図1）。

(b)　テーパーキャピラリー内のダイヤモンドナノ粒子の光輸送

光を用いることにより、非侵襲かつ効率的なコロイド溶液中のナノ物体の操作や選別が可能となると期待されているが、ナノサイズの粒子操作を行うためにはナノ粒子と光を効率的に作用させるために、両者をナノスケール領域に閉じ込めることが望ましい。

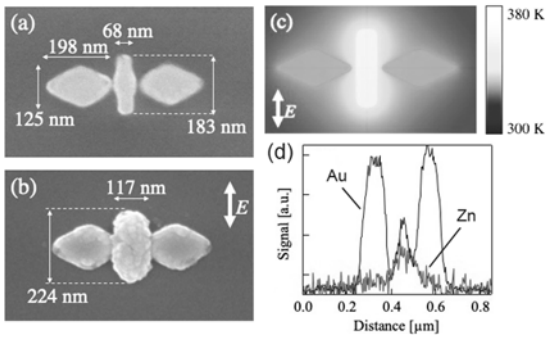


図１　(a, b) レーザー照射前後の金ナノアンテナ構造の SEM 像．レーザー照射後、中心のバー構造の加熱により、局所的に ZnO が合成されている．(c) 縦直線偏光（図中矢印）のレーザーを照射した時の温度分布の計算結果．プラズモニックアンテナの光学的応答と熱的応答の両方を制御することにより、ナノスケールの温度分布制御を達成している．(d) レーザー照射後の構造の水平方向断面の EDS 測定結果．ナノアンテナ構造の中心にのみ、ZnO の合成を示唆する Zn の信号が現れている．

本研究では、入射レーザー光とナノ粒子集合体間の相互作用を最大化するための有望な方法として、内径がナノ～サブミクロンサイズとなるテーパーキャピラリーを用いた粒子の光操作技術の開発を行った。既存のテーパーファイバー作製装置を流用し、光キャピラリーの作製条件の探索を行った結果、マイクロ～ナノサイズの内径を有するナノキャピラリーの製造に成功した（図2(a)）。このキャピラリーの内部に直径300 nm 未満の蛍光ナノダイヤモンド（図2(b)）を含有する試料溶液を注入した後、キャピラリー内部を導波するレーザー光の光圧によりナノダイヤモンドが輸送される様子の確認に成功した（図2(c)）。

(c) 金ナノ三量体構造中の局在プラズモン場を用いたナノ粒子回転運動

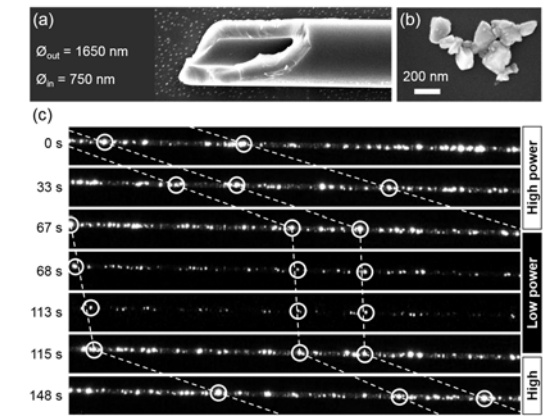


図２　(a) テーパーガラスキャピラリー、および、(b) 蛍光性ナノダイヤモンドのＳＥM像．(c) 緑色レーザー光をテーパーキャピラリーに入射した際の内部のナノダイヤモンドの蛍光顕微鏡像．高パワーのレーザー入射によりキャピラリー内部のナノダイヤモンドの光輸送を確認した．一方、低パワーでは、ナノダイヤモンドのブラウン運動のみが観測される．

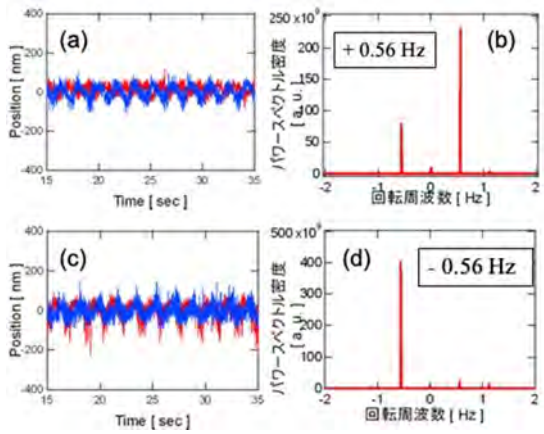


図 3　金ナノ三量体構造を用いたダイヤモンドナノ粒子の軌道回転運動．(a, b) 右回転、および、(c, d) 左回転直線偏光入射時のナノ粒子中心位置の経時変化と回転周波数のパワースペクトル．

集光レーザーを用いた光ピンセットは，非接触，非破壊でマイクロ粒子を操作でき，粒子の配列や単一分子に働く力の測定，光の角運動量転写による回転運動などの応用が進められている．近年，この光ピンセットをナノ粒子に適用し、回折限界以下の領域で操作するために局在表面プラズモンの利用が提案され，粒径100 nm のナノ粒子捕捉や捕捉ポテンシャル解析などが報告されている。本研究では、金ナノ三量体構造と回転する直線偏光を用いて捕捉した粒子をナノ空間で回転させ、その回転運動を解析した。

粒径100 nm の蛍光ポリスチレンナノ粒子を分散させた水溶液を用いて実験サンプルを構築し，プラズモン励起光（1064 nm）を直線偏光に設定し，半波長を2 rpm で回転させながら捕捉粒子の位置を測定した結果を図3（a,c）に示し，このパワースペクトルを計算した結果を図3(b,d)に示す．図3(a,c)に示すように三量体構造で捕捉したナノ粒子が直径50 nm 程度の範囲に強く捕捉され、さらにその捕捉位置が直線偏光の回転に合わせて周期的に運動することを確認した。 また、パワースペクトルからは偏光の回転方向とは逆向きに偏光速度の２倍の周期にピークが現れた。さらに偏光の回転方向の変化に応じて、ピーク周波数の符号が逆転することも確認した。これらの結果は、局在プラズモンを用いた光捕捉において,ギャップ部のナノサイズの領域に光を集光するだけでなく、ナノサイズの円偏光場を形成できていることを示唆する重要な結果を示しており、数値計算で示されているような光渦照射により、ナノ光渦が形成され、それらの運動量が捕捉された粒子に転写される可能性を示唆する重要な結果である。

(d) ポインティングベクトル制御による光ナノ粒子操作

集光レーザーや光導波路を利用した光マニピュレーション技術は、生体組織をはじめとしたマイクロメートルサイズの物体を、三次元的に操作するための光学的手法として用いられている。これに対し本研究では、集光レーザーや光導波路を必要としない新規の手法として、ポインティングベクトル場の制御によるナノ粒子操作を提案している。今年度は、ガラス基板上に特徴的なポインティングベクトル場を形成し、制御されたポインティングベクトル場が粒子運動に及ぼす影響について検証を行った。

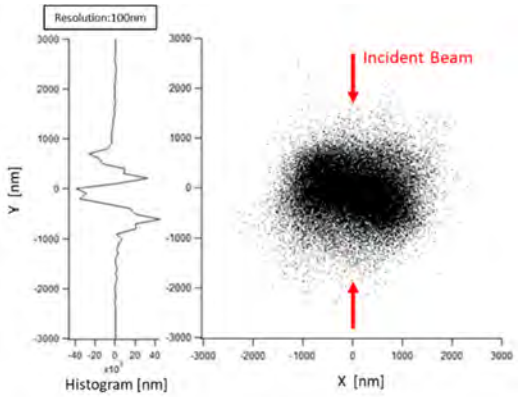


図４　捕捉したポリスチレン粒子の位置解析結果（右図）．図中の矢印はレーザー光の入射方向を示す．左図は各 y 方向の位置に置いて、x 方向の１フレーム毎の位置変化量を積分した結果を示す．

実験では、直交した偏光状態を持つ、波長1064nm の直線偏光２ビームを顕微鏡対物レンズ（倍率100倍、NA 1.4）に入射し、ガラス基板上で２ビームを交差させた。この時の基板平面上のポインティングベクトル場の分布を計算すると、入射ビーム方向（Y 軸）に対して周期的にポインティングベクトルの X 軸方向の向きが変化することが期待される。この場に、水中に分散した粒径535nm のポリスチレン粒子を光捕捉し、粒子位置を記録・解析することにより、粒子に作用するポインティングベクトル場の影響について調べた。図4は、トラップした粒子位置の分布と CCD カメラの1フレーム毎の粒子の移動量を X 方向に積算した結果となっている。Y 軸に沿った方向から入射する直行直線偏光２ビームに対し、Y 軸方向に対して周期的に粒子の X 軸方向の運動が変化する様子が確認でき、入射条件から予測されるポインティングベクトル場の変化の周期と一致することを確認した。この結果は、ポインティングベクトル場によってナノ粒子の運動を制御できる可能性を示唆しており、ポインティングベクトル場の制御が、ナノ粒子の自在な操作・輸送のための新たな手法となることが期待される。

(e) 外部磁場によるランダムレーザー発振制御

我々はこれまでに不規則な構造中に誘起されるランダムレーザー発振の発振モード制御を目指した研究を行っており、ナノ粒子膜やナノロッドアレイにおいて低しきい値化や発振波長帯制御に成功している。しかし、これらの方法は、構造作製条件の最適化により、発振波長やしきい値の制御を達成しているため、構造作製後にその発振モードの緻密なチューニングを行う事は難しい。本研究では、磁性薄膜の磁化による反射偏光のカー回転を利用する事で、ナノ粒子膜中にフィードバックされる偏光状態の変化から発振モ

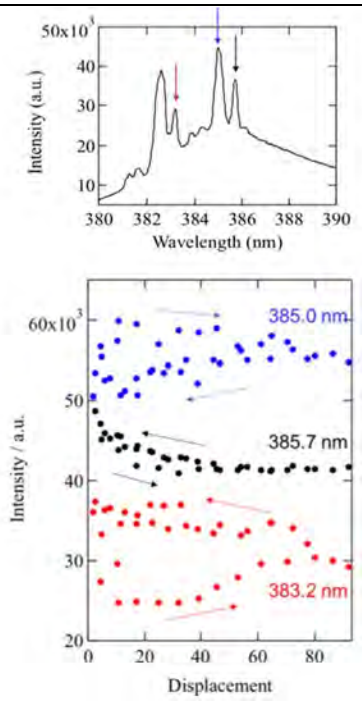


図 5　上図：NiFe 合金フィルム上に作製した ZnO ナノ粒子膜からのレーザー発振スペクトル．下図：上図の矢印で示した発光ピーク強度のサンプル―磁石間距離依存性．図中の矢印は磁石を移動した方向を示す．

ードをスイッチ･チューニングする事が可能となると考え、その第一歩としてレーザー発振の磁場応答を確認した。

実験では、ガラス基板上にニッケル鉄合金薄膜（厚み50nm）を形成し、その上に市販の酸化亜鉛ナノ粒子膜を堆積させた。試料を顕微鏡上にセットし、励起光として UV パルスレーザーを粒子膜側から照射することでニッケル鉄合金薄膜近傍においてランダムレーザー発振を誘起した。磁場強度依存性を測定するため、ネオジム磁石を電動ステージに固定し、試料との距離を変化させながらランダムレーザー発振スペクトルを測定した。また、試料表面における磁場強度の距離依存性を別途測定し、発振スペクトルの磁場強度依存性を得た。図5は、得られた発振スペクトルとネオジウム磁石と試料間の距離を連続的に変化させた際に観測される各ピーク強度の磁石―試料間の距離依存性を示している。下図中の数字はプロットした各ピーク（上図の各矢印に対応）を示し、縦軸は発振ピーク強度を磁場強度に対してプロットした結果である。また矢印は磁石―試料間距離の変化の向きを示している。結果を見ると、各ピーク波長で度合いが異なるものの、磁石を近付けた場合と遠ざけた場合で、各ピーク強度が変化し、各々の条件において強度が２値化している様子が確認できる。

３．今後の研究の展望

本研究分野は、2019年度からスタッフが大幅に入れ替わり、准教授と助教２名が着任して新しい体制となる。研究テーマとしても、これまでのナノマニピュレーション、プラズモニクス、ナノフォトニクスをベースとした研究課題に加えて、紫外フォトニクス、分子光操作、ナノフルイディクス等への展開も視野に入れながら新しいプロジェクトの企画を進めている。光物理分野における新しい領域を切り拓く挑戦的な研究に今後とも取り組んでいく。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

１）　H. Fujiwara, H. Kaiju, J. Nishii and K. Sasaki: “Magnetic response of random lasing modes in a ZnO nanoparticle film deposited on a NiFe thin film”, Appl. Phys. Lett., 113: 131108- (2018)　【電子研内共著】

２）　H. Fujiwara and K. Sasaki: “Amplified spontaneous emission from a surface-modified GaN film fabricated under pulsed intense UV laser irradiation”, Appl. Phys. Lett., 113: 171606- (2018)

３）　X. SHI, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki and H. Misawa: “Enhanced water splitting under modal strong coupling conditions”, Nature Nanotechnology, 13: 953-958 (2018)　【電子研内共著】

４）　K. Sakai, T. Yamamoto and K. Sasaki: “Nanofocusing of structured light for quadrupolar light-matter interactions”, Sci. Rep., 8: 7746- (2018)

５）　C. Pin, S. Ishida, K. Sudo, T. Fukaminato and K. Sasaki: “Trapping and Deposition of Dye–Molecule particles in the Nanogap of a Plasmonic Antenna”, ACS Omega, 3: 4878-4883 (2018)

4.2　学術論文（査読なし）

該当無し

4.3　総説・解説・評論等

該当無し

4.4 著書

１）　笹木 敬司 ：「プラズモンと光圧が導くナノ物質科学」-ナノ空間に閉じ込めた光で物質を制御する」、化学同人、(2019)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

１）笹木 敬司、藤原 英樹、石原 一 ：特願2018-163206、分光装置、2018年08月31日

4.6　講演

ａ．招待講演（国際学会）

１）　K. Sasaki*：“Conversion and Inversion of Plasmonic Angular Momenta in Nano-Space”, SPIE Optics + Photonics, Plasmonics, San Diego, California, United States, United

States of America (the) (2018-08)

２） K. Sasaki* : “Interactions of Plasmonic Nano-Vortex Fields with Nanoparticles and Molecules”, PIERS 2018: Photonic nanostructures for enhancing light-matter interaction, Toyama, Japan, Japan (2018-08)

３） K. Sasaki*, “ Nano-space manipulation with designed optical and plasmonic fields ”, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara Kasugano International Forum, Japan(2018-07)

４） K. Sasaki and H. Fujiwara* : “Localized field control by plasmonic mode interference”, META 2018, the 9th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Marseille, France (2018-06 ～ 2018-07)

５） K. Sasaki* : “Optical Manipulation with Linear and Angular Momenta in Nano-Space”, The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2018), Hangzhou, China (2018-05)

６） S. Ishida, K. Sudo and K. Sasaki* : “Nano-Particle Manipulation using Plasmonic Multimer Structures”, The 5th Optical Manipulation Conference, Pacifico Yokohama, Japan (2018-04)

ｂ．招待講演（国内学会）

１） 藤原 英樹、笹木 敬司* : 「テーパーファイバーを用いたナノ粒子操作」、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

ｃ．一般講演（国際学会）

１） H. Fujiwara*, K. Yamauchi and K. Sasaki : “Nanoparticle manipulation using a tapered fiber”, The 5th Optical Manipulation Conference, Pacifico Yokohama, Japan (2018-04)

２） H. Fujiwara*, K. Yamauchi, and K.Sasaki, “Selective manipulation of nano-diamonds using an optical tapered fiber”, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara Kasugano Inter-national Forum, Japan(2018-07)

３） K. Sakai*, H. Kitajima, K. Sasaki, “Plasmonic nanogap resonances for multipole light-matter interactions”,E The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Ma-terials (EXCON 2018), Nara Kasugano Inter-national Forum, Japan(2018-07)

４） C. Pin*, S. Ishida, G. Takahashi, K. Sudo, T. Fukaminato and K. Sasaki : “Hybrid nanostructures assembled by laser trapping and deposition of nanoparticles in the nanogap of a plasmonic antenna”, PIERS 2018: Photonic nanostructures for enhancing light-matter interaction, Toyama, Japan, Japan (2018-08)

ｄ．一般講演（国内学会）

１） 相川 大貴*、藤原 英樹、笹木 敬司 :「ポインティングベクトル制御による光ナノ粒子操作」、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

２） 鈴木 達朗*、藤原 英樹、笹木 敬司 :「酸化亜鉛ナノ発光体のプラズモンアシスト水熱合成」、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

３） 藤原 英樹*、海住 英生、西井 準治、笹木 敬司 :「外部磁場に依存したランダムレーザー発振特性の解析」、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

４） C. Pin*, G. Takahashi, T. Fukaminato and K. Sasaki: “Measurement of the single-photon and two-photon fluorescence chirality of chiral dye molecules and nanoparticles”, 2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

５） 瀬戸浦 健仁*、辻 徹郎、伊都 将司、川野 聡恭、宮坂 博 :「光圧と熱泳動によるプラズモニックナノ粒子のマニピュレーション」、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

６） 高橋 玄太*、石田 周太郎、パン クリストフ、深港 豪、笹木 敬司 :「局在表面プラズモンを用いた円偏光二色性高感度検出」、第 54 回応用物理学会北海道支部/第１５回日本光学会北海道支部合同学術講演会、函館市勤労者福祉センター・「サン・リフレ函館」、Japan (2019-01)

７） 笹木 敬司* : 「レーザー誘起表面凹凸形成法による半導体基板表面への ランダムレーザー素子の作製」、第 54 回応用物理学会北海道支部/第１５回日本光学会北海道支部合同学術講演会、函館市勤労者福祉センター・「サン・リフレ函館」、Japan (2019-01)

８） 鈴木 達朗*、藤原 英樹、笹木 敬司 :「酸化亜鉛ナノ発光体のプラズモンアシスト水熱合成」、Optics & Photonics Japan 2018、筑波大学東京キャンパス、Japan (2018-10 ～ 2018-11)

９） 北嶋 大暉*、酒井 恭輔、笹木 敬司 :「金ナノディスク正方格子状アレイにおける六重極子プラズモン励振」、2018 年第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、Japan (2018-09) 4.6a と同様に記入。

１０） C. Pin*, H. Fujiwara and K. Sasaki, “Optical manipulation of nanoparticles in a tapered glass capillary”, 2018 年第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、Japan (2018-09)

１１） S.Kadri Ayop*、K. Sasaki, “Optical Force Manipulation of Nematic Liquid Crystal Assembly”, 2018 年第 79 回応

用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、Japan (2018-09)

e． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） K. Sudo*, S. Ishida, C. Pin, S. Odasima, Y. Matsuo, H. Fujiwara and K. Sasaki : “Observation of Orbital Rotational Motion of a Trapped Nano-particle Using a Circularly-Polarized Light”, The 19th RIES-Hokudai International Symposium, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan (2018-12)

2） K. Sasaki* : “Observation of Orbital Rotational Motion of a Trapped Nano-particle Using a Circularly-Polarized Light”, The 19th RIES-Hokudai International Symposium, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan (2018-12)

4.7 シンポジウムの開催

該当無し

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信制御、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置 、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

c．委託研究

該当無し

d．国際共同研究

1） 笹木 敬司， 杉山 輝樹(台湾交通大学(台湾)) “円偏光局在場を用いた塩素酸ナトリウムのキラル結晶化”、2016 年度～

2） K. Sasaki and M. Gu(RMIT Univ.(AUS)) : “3D ナノプリンティング技術を用いたナノファイバグレーティングの作製”, 2017 年度～,

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） 笹木 敬司、基盤研究 A、プラズモニックナノ渦場を用いた分子光ダイナミクス制御、2018～2020 年度

2） 瀬戸浦 健仁、若手研究、金ナノ粒子のプラズモニック加熱によるナノスケール流体制御、2018～2019 年度

3） 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

4） 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

5） 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

6） 笹木 敬司、萌芽研究、単一分子キラリティーセンシング、2016～2018 年度記入例；広報太郎、基盤研究 A 一般、研究課題名、2016～2018 年度

b． 大型プロジェクト・受託研究

1） 藤原 英樹、公益財団法人日本板硝子材料工学助成会、ゾルゲルガラスを用いた低空間コヒーレンス近一中赤外レーザー光源の開発、2018～2019 年度

4.10 受賞

1） 笹木 敬司 : 応用物理学会フェロー 2018 年 09 月

4.11 社会教育活動

a． 公的機関の委員

1） 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 （2019 年 06 月 01 日～2021 年 03 月 31 日）

2） 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）

3） 笹木 敬司 : 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (さきがけ)領域アドバイザー （2017 年 04 月 12 日～2021 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～2020 年 03 月 31 日）

5） 笹木 敬司 : 日本学術振興会産学協力研究委員会「フォトニクス情報システム第 179 委員会」委員 （2006 年 04 月 01 日～2022 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)

2） 笹木敬司：日本分光学会 代議員（2016年4月01日～2019年3月31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～2020 年 03 月 31 日）

d． 外国人研究者の招聘

１） Shahrul Kadri Ayop、Malaysia、（2018 年 04 月 26 日～2019 年 03 月 27 日）
２） Johan Hofkens、Belgium、（2018 年 04 月 21 日～2018 年 04 月 27 日）
３） Kishan Dholakia、United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland、（2018 年 04 月 21 日～2018 年 04 月 28 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、2018 年 10 月 01 日～2019 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、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日
３） 工学部、電磁気学、藤原 英樹、2015 年 10 月 01 日～2016 年 03 月 31 日
４） 情報科学研究科､情報エレクトロニクス特別研究第一、笹木 敬司、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日
５） 工学部、光エレクトロニクス、笹木 敬司、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日
６） 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、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日
７） 工学部、光工学、笹木 敬司、2018 年 04 月 01 日～2018 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）

該当無し

ｇ． 新聞・テレビ等の報道

該当無し

ｈ． ポスドク・客員研究員など

１） Christophe Pin（新学術領域研究「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」）

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：4人

１） 山内 喬介 ： テーパ―ファイバ―を用いたナノ粒子の運動制御に関する研究
２） 鈴木 達朗 ： 酸化亜鉛ナノ発光体のプラズモンアシスト水熱合成
３） 須藤 広太 ： 円偏光を用いた捕捉粒子の軌道回転運動に関する研究
４） 髙橋 玄太 ： 金属ナノ構造を用いた円偏光二色性高感度検出

博士学位：0人

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、有機から無機まで、様々なナノ材料を化学的手法により作製し、その光特性を調べ、その光特性を最大限に利用した高感度センサー基板や、新たな光学顕微鏡法を開発している。また、これらナノ構造や新たな光学顕微鏡法を用いて、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

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(Surface Enhanced Raman Scattering: 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。

このSERSと、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy: AFM）のような走査型プローブ顕微鏡と組み合わせた表面解析技術を、探針増強ラマン顕微鏡（Tip-Enhanced Raman Scattering: TERS）という。TERSでは、走査型プローブ顕微鏡のプローブ、例えばAFMカンチレバーの先端を貴金属化することで、試料表面からのSERSを励起する。SERSの増強度は、貴金属のナノ構造に強く依存するため、プローブ先端をどのように貴金属で修飾するかが、TERSの精度や感度を左右する重要な点となる。一般的なTERSプローブは、AFMカンチレバーに貴金属を真空蒸着したものがよく用いられる。しかしながら、蒸着された貴金属の構造は制御されないため、再現性が低いのが現状である。また、蒸着した貴金属の剥離により、TERS増強が測定中に失われてしまうことも課題となっている。

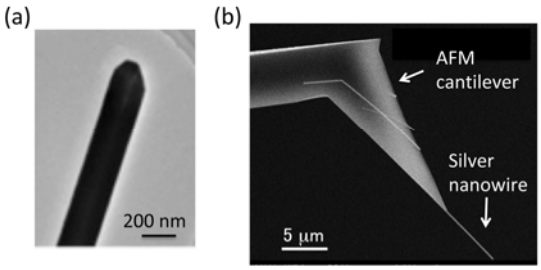


図１　(a) 銀ナノワイヤーの透過型電子顕微鏡像(b) TERS プローブの走査型電子顕微鏡像

本研究では、化学的手法により溶液中で合成した銀ナノワイヤーを、AFMカンチレバーに導入することにより、再現性が高く、高い増強度が安定に得られるTERSプローブを新たに開発した（学術論文６，８）。具体的には、ポリオル法を用いて、直径200 nm程度、長さ数十μmの銀ナノワイヤーを合成し（図１a）、その溶液にAFMカンチレバー先端を浸しながら電圧を印加することで、銀ナノワイヤーをカンチレバーに付着させるAC電気泳動法を用いてTESRプローブを作成した。図１bに、TERSプローブの電子顕微鏡像を示す。

化学合成により作成された銀ナノワイヤーは、five-fold multiple twinned 構造を有しており、その形状の再現性は非常に高い。先端形状は、図1aに示すように台形状であり、その再現性も比較的高い。そのため、銀ナノワイヤーTERSプローブの再現性も高いと予想される。図２に示すとおり、高低差の高い試料に対しては、ナノワイヤーの１次元構造

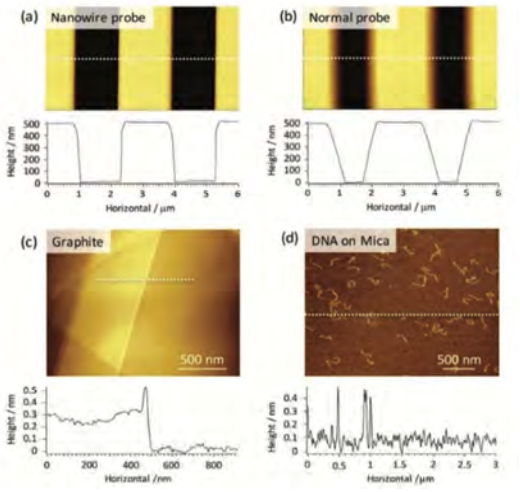


図２(a, b) AFM images and line profiles of a calibration grating using a silver nanowire (a) and an un-functionalised (b) tip. (c, d) AFM height images observed using a nanowire tip of freshly-cleaved graphite (c) and DNA on Mica (d), along with associated line profiles. All AFM images were obtained under non contact-mode.

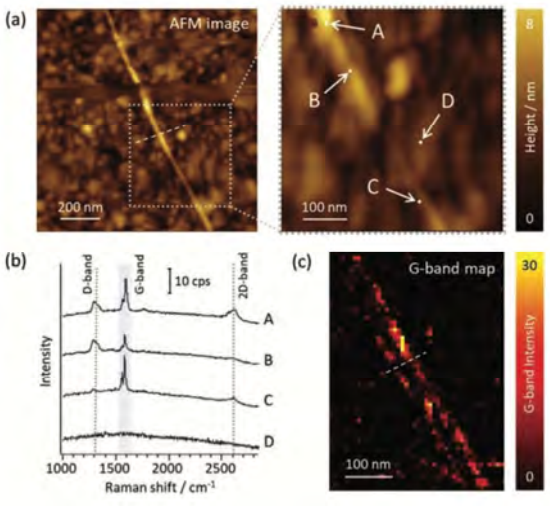


図３　(a) Contact-mode AFM image of a CNT dispersed on Au(111) obtained with a silver nanowire-tip along with a zoomed image. (b) TERS spectra recorded at the positions indicated in (a). (c) Contact-mode TERS image displaying the G-band intensity of the same nanotube as found in (a). The pixel size was set to 8.3 nm. The spectrum at each pixel point was collected under irradiation of 632.8 nm laser light with approximately 28.0 kW cm^{-2} with an acquisition time of 0.3 s, and then the image was reconstructed by extracting G-band peak height

のため、AFM イメージングで問題となる探針コンボリューション効果が抑えられる。通常の AFM 探針で高さ500nmのグレーティングを走査した場合、円錐形の AFM 探針とのコンボリューションが図に現れているが（図２ｂ）、ナノワイヤー探針ではコンボリューション効果が抑えられており、グレーティングの形状がはっきりと得られている（図２a)。また、高分解能走査では、グラファイトのテラス（図2c）や単一 DNA の AFM 像（図2d）も得られることから、AFM 探針として利用可能であることが明らかとなった。

ナノワイヤー先端にレーザー光を集光すると、ワイヤー先端に局在化プラズモンが励起される。その状態で試料表面を操作することで、AFM 像に加えて、SERS マッピングを同時に行うことが可能となる（この測定法を TERS と言う)。図３a は、Au(111)上に分散させたカーボンナノチューブの AFM 像である。図3a 右図の A～D 点に、ナノワイヤー先端を配置して、SERS を測定すると、場所によって得られるラマンスペクトルが異なることがわかる（図3b)。C 点では、1590 cm^{-1}(G-band)にピークが観測されるが、 A や B 点ではそれに加えて1300cm^{-1}（D-band）が観測される。これは、A や B 点では欠陥が存在することを示す。また、スペクトルを取得しながらイメージを取得し、あるピーク値でマッピングを行うことも可能である。図3c は、G-band 値で作成した TERS イメージである。また、図４のように、G-band, D-band, 2D-band のピーク値を同時にまっピンスすることで、カーボンナノチューブのナノメートルスケールでの不均一性を明らかにすることが可能である。

以上のように、本研究では、安定で再現性の高い、かつ高感度 TERS 測定が可能な新たな TERS プローブの開発を行った。

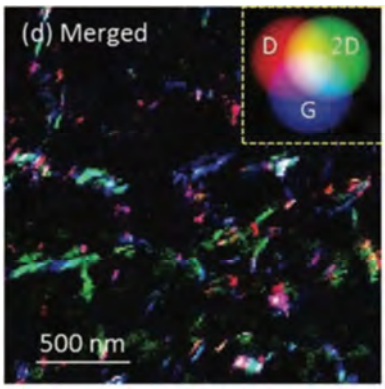


図4 Combined map of the D-, G- and 2D-bands. The red, blue, and green colours respectively correspond to D-, G-, and 2D-bands intensity.

３．今後の研究の展望

TERSプローブの、感度の高さや、AFMイメージの空間分解能は、ナノワイヤー先端形状に依存する。本研究では、先端が台形であるナノワイヤーを用いたが、先端を先鋭化することにより、空間分解能や感度をより向上させることができると考えられる。そのため、今後の展望としては、ナノワイヤー先端形状の制御を行う。また、第２次高調波など、非線形光学現象を利用した、新たな探針増強ラマン・蛍光顕微鏡の開発を行う。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

1) Gangamallaiah Velpula, Roald Phillipson, Jian Xiang Lian, David Cornil, Peter Walke, Ken Verguts, Steven Brems, Hiroshi Uji-i, Stefan De Gendt, David Beljonne, Roberto Lazzaroni, Kunal S. Mali, Steven De Feyter “Graphene Meets Ionic Liquids: Fermi Level Engineering via Electrostatic Forces”, ACS Nano, 2019, 13, 3512−3521.

2) B. Fortuni, T. Inose, M. Ricci, Y. Fujita, I. van Zundert, A. Masuhara, E. Fron, H. Mizuno, L. Latterini, S. Rocha, H. Uji-i, Polymeric Engineering of Nanoparticles for Highly Efficient Multifunctional Drug Delivery Systems, Sci. Rep., 2019, 9, 2666.

3) Benoit Cox, Emma Laporte, Annelies Vennekens, Hiroto Kobayashi, Charlotte Nys, Indra Van Zundert, Hiroshi Uji-i, Alizée Vercauteren Drubbel, Benjamin Beck, Heleen Roose, Matteo Boretto, Hugo Vankelecom, “Organoids from pituitary as a novel research model toward pituitary stem cell exploration”, Journal of Endocrinology, 2019, 240, 287-308.

4) Rashad Baiyasi, Seyyed Ali Hosseini Jebeli, Qingfeng

Zhang, Liang Su, Johan Hofkens, Hiroshi Uji-i, Stephan Link, Christy F. Landes, ″PSF Distortion in Dye-Plasmonic Nanomaterial Interactions: Friend or Foe?″, ACS Photonics, 6, 3, 699-708 , 2019

5) Xueting Zhai, Zhuoyao Li, Zichen Lu, Guilin Wang, Ping Li, Yongqian Gao, Xiao Huang, Wei Huang, Hiroshi Uji-i, Gang Lu “Synthesis of 42-faceted bismuth vanadate microcrystals for enhanced photocatalytic activity”, Journal of Colloid and Interface Science, 542 (2019) 207-212

6) P. Walke, S. Toyouchi, M. Wolf, W. Peeters, S. Prabhu, T. Inose, S. De Feyter, Y. Fujita, H. Uji-i, ″Facilitating Tip-Enhanced Raman Scattering on Dielectric Substrates via Electrical Cutting of Silver Nanowire Probes″, J. Phys. Chem. Lett. 2018, 9, 7117−7122.

7) H. De Keersmaecker, R. Camacho, D. M. Rantasa, E. Fron, H. Uji-i, H. Mizuno, S. Rocha ″Mapping Transient Protein Interactions at the Nanoscale in Living Mammalian Cells″ ACS Nano, 2018. 12 (10), 9842-9854.

8) Peter Walke, Yasuhiko Fujita, Wannes Peeters, Shuichi Toyouchi, Wout Frederickx, Steven De Feyter, Hiroshi Uji-i*, ’Silver nanowires for highly reproducible cantilever based AFM-TERS microscopy: towards a universal TERS probe’, Nanoscale, 2018, 10, 7556-7565.

9) Kazuki Umemoto, Masaki Takeda, Yuki Tezuka, Takayuki Chiba, Matthew S White, Tomoko Inose, Tsukasa Yoshida, Satoshi Asakura, Shuichi Toyouchi, Hiroshi Uji-i, Akito Masuhara, ″Separation of mono-dispersed CH3NH3PbBr3Perovskite Quantum dots via dissolution of nanocrystals″, CrystEngComm. 2018,20, 7053-7057

10) Kazuki UmemotoYong-Jin PuCigdem YumusakMarkus Clark ScharberMatthew Schuette WhiteNiyazi Serdar SariciftciTsukasa YoshidaJun MatsuiHiroshi Uji-i, Akito Masuhara, ″Size control of CH3NH3PbBr3 perovskite cuboid fine crystals synthesized by ligand-free reprecipitation method″, Microsystem Technologies. 2018, 24, 619-623.

11) Ahmed I. A. Abd El-Mageed, Murni Handayani, Zhijin Chen, Tomoko Inose, and Takuji Ogawa,“Assignment of Absolute-Handedness Chirality of Single-Walled Carbon Nanotubes using Organic Molecule Supramolecular Structures” Chem. Eur. J., 24, 1-9, 2018

12) Daisuke Tanaka, Naoki Aketa, Hirofumi Tanaka, Satoshi Horike, Minoru Fukumori, Takashi Tamaki, Tomoko Inose, Tomoki Akai, Hirotaka Toyama, Osami Sakata, Hiroo Tajiri, and Takuji Ogawa, “Facile Preparation of Hybrid Thin Films Composed of Spin-Crossover Nanoparticles and Carbon Nanotubes for Electrical Memory Devices”, Dalton Transactions, 2018., DOI: 10.1039/C8DT02923G

13) T. Inose, D. Tanaka, J. Liu, M. Kajihara, P. Mishra, T. Ogawa and T. Komeda, “Coordination Structure Conversion of Protonated Bisporphyrinato Terbium(III) Double-Decker Complexes and Creation of a Kondo Assembly by Electron Injection on Au(111) Surface”,Nanoscale, 10, 19409-19417., 2018

14) K. Takahashi, L. Takahashi, I. Miyazato, J. Fujima, Y. Tanaka, T. Uno, H. Satoh, K. Ohno, M. Nishida, K. Hirai, J. Ohyama, T. N. Nguyen, S. Nishimura, T. Taniike, “The Rise of Catalyst Informatics: Towards Catalyst Genomics” ChemCatChem, 11, 1146-1152, 2018

4.2 学術論文（査読なし）

1) 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） “Silver nanowire tip-enhanced Raman scattering probe”, Hiroshi Uji-i, 2018, ACSIN-14 and ICSPM26, Oct, 22, 2018

２） “Infrared Laser Writing of Functional Materials”, Kenji Hirai, 2018, The first International Joint Symposium of CEFMS-NCTU, RCAS-AS and 5-Star Alliance, May, 8, 2018

３） “Coordination Polymers Boost Nano- and Micro-Fabrication”, Kenji Hirai, 2018, 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Nov, 15, 2018

ｂ．招待講演（国内学会）

１） “ナノスケールでみるポリマーダイナミクス”, 雲林院宏, 第 67 回高分子討論会, Sep, 14, 2018.

２） “細胞内分子検出に向けた銀ナノワイヤーの表面処理”, 平井健二, 2018 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 生命機能 物質・デバイスシステムＧ３分科会, Nov, 27, 2018.

ｃ．一般講演（国際学会）

１） “Layer by layer surface coating of silver nanoparticles for active SERS detection inside live cells”, Takuto Ishida, Tomoko Inose, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 11, 2018.

２） “Intracellular Behavior of Mesoporous Silica Nanoparticles as Drug Carriers”, Ibuki Kotani, Tomoko Inose, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 11, 2018.

ｄ．一般講演（国内学会）

１） “Layer by layer surface coating of silver nanoparticles for active SERS detection inside live cells”, Tomoko Inose, Takuto Ishida, Kiri Watanabe, Taemaitree Farsai, Beatrice Fortuni, Yoshitaka Koseki, Hitoshi Kasai, Hiroshi Uji-i, 2018 年光化学討論会, Sep. 6, 2018.

２） “銀ナノワイヤの表面処理と表面増強ラマン散乱に与える影響”, 堀 菜月, 平井 健二, 猪瀬 朋子, 雲林院 宏, 第 12 回分子科学討論会 2018, Sep. 13, 2018.

３） “Layer by layer surface coating of silver nanoparticles for active SERS detection inside live cells”, 小谷伊吹, 猪瀬朋子, Fortuni Beatrice, 平井健二, 雲林院 宏, 日本化学会第 99 春季年会(2019), Mar. 16, 2019.

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

１） “Plasmonic waveguiding tip-enhanced Raman microscopy”, Hiroshi Uji-i, Raman Fest 2018, June 25, 2018.

２） “広域 pH 応答性を示す新規 PDMS 上金被覆銀ナノ粒子 SERS 基盤の作製”, 猪瀬朋子, 第 6 回アライアンス若手研究交流会, Nov. 1, 2018.

３） “Novel and facile fabrication method of Au coated AgNPs flexible SERS substrate”, Tomoko Inose, ナノ構造・物性・ナノ機能・応用部会合同シンポジウム, Nov. 20, 2018.

４） “Novel and facile fabrication method of AgNPs@Au-shell SERS substrate on PDMS film with pH response over wide pH range”, Tomoko Inose, 金沢大学 NanoLSI 公開セミナー, Nov. 21, 2018.

５） “広域 pH 応答性金被覆銀ナノ粒子フレキシブル SERS 基板の作製”, 猪瀬朋子、上園周平、Beatrice Fortuni、豊内秀一、藤田康彦、雲林院宏, 第 16 回医用分光学研究会, Nov. 22, 2018.

６） “Nanoparticle engineering towards highly efficient drug delivery systems and SERS-based bio-sensing”, Tomoko Inose, The SPIRITS International Symposium, Mar. 28, 2019.

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、基盤研究（B)、レーザー加熱による機能性材料の３次元合成、2018～2020 年度

５） 平井健二、挑戦的研究(萌芽)、振動励起による自己集合マニュピレーション、2018～2019 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

１） 雲林院宏、中谷医工計測技術振興財団研究助成、銀ナノワイヤー探針増強ラマン顕微鏡を用いた超高密度 DNA マッピング、2018 年度

２） 平井健二、JST さきがけ研究、ラビ分裂による化学反応操作法の確立、2018～2021 年度

３） 猪瀬朋子、中谷医工計測技術振興財団研究助成、液中局在プラズモン共鳴 microRNA センシング、2018 年度

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

該当なし

ｃ．兼任・兼業

１） 平井健二、JST さきがけ研究員（兼任）

ｄ．外国人研究者の招聘

1） James Hutchison、オーストラリア、(2018 年 12 月 8 日~12 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、応用物性工学、雲林院宏、平井健二、猪瀬朋子、2018 年 10 月 1 日～2018 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、、平井健二、猪瀬朋子、2018 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、2018 年 10 月 1 日～2019 年 02 月 10 日

4） 工学部、生体情報工学演習 II、平井健二、2018 年 10 月 1 日～11 月 5 日

5） 大学院共通授業科目、Hokkaido University Summer Institute、雲林院宏、猪瀬朋子、2018 年 7 月

6） 大学院共通授業科目、ナノテクノロジー・ナノサイエンスと光科学、雲林院宏、平井健二、2018 年 11 月 7 日~11 月 9 日

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 国立台湾交通大学、New International Cross-Disciplinary Course on Emergent Materials and Devices、平井健二、2018 年 12 月 3 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

該当なし

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：3人

1） 上園　周平：細胞内SERS測定を志向した新規金コート銀ナノワイヤーの開発

2） 堀　菜月:銀ナノワイヤーの表面処理と表面増強ラマン散乱に与える影響

3） 渡邉　希理：細胞膜・内物質のSERS検出を目指した単分散金コート銀ナノフラワーの合成

博士学位：0人

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、2011.4～2018.9）
　　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　木村円香(MC2)、橘健朗(MC2)、小西 祐輔(MC1)、鈴木 芳幸（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持つことを利用して、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）を、高輝度光科学研究センター（JASRI）と共同で開発した。MAXIC-Sは、2018B期のSACLAビームタイムより共用が始まり、MAXIC-Sを用いたコヒーレントＸ線回折測定を開始した（図１）。

MAXIC-Sを用いた測定で対象とする数十ナノメートルサイズの試料粒子からの回折シグナルは極めて微弱なため、試料以外からのバックグラウンド散乱を従来よりも格段に低減させる必要がある。実際に、マイクロメートル集光XFELを利用したPCXSS測定で真空中での溶液試料の保持にこれまで用いてきたMLEAを、MAXIC-S実験に用いると、従来問題とならなかったMLEAからの弾性散乱や蛍光X線が無視できないノイズとなることが実験で示された。そこで、XFELを用いた単粒子イメージングに向けて、溶液試料の保持技術の開発を、平成30年度に理化学研究所が新たに創設した「SACLA基盤開発プログラム」で進めた（課題名「XFEL単粒子イメージングに向けた溶液試料保持技術のフィージビリティー調査」）。

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、2017B期に続き、2018B期のスーパーコンピュータ「京」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 」）。

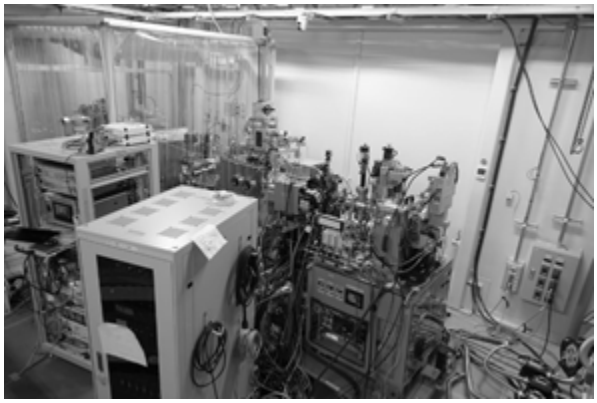


図１　SACLA の BL2 EH3 に設置された MAXIC-S

(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30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。マイクロメートル集光 XFEL を利用する MAXIC-II を用いた測定に加え、100-nm 集光 XFEL を利用する MAXIC-S を用いた測定も開始した。MAXIC-S を用いた実験では、燃料電池の電極における触媒などで用いられる金属ナノ粒子などを測定した。図２に金属ナノ粒子触媒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。2 nm の分解能に対応する検出器の端まで延びるコヒーレントＸ線回折パターンの測定に成功した。

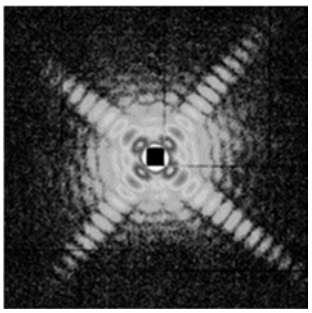


図２　MAXIC-S を用いて測定した金属ナノ粒子触媒からのシングルショットコヒーレントＸ線回折パターン

(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。

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、がんのフォトサーマル治療用に近年開発された pH 応答性金ナノ粒子に対して測定を行った（図３）。試料は金ナノ粒子の表面をアニオンとカチオンの両方で修飾した MC-GNPs（Mixed-Charge Gold Nano-Particles）である。この粒子は pH4-7で凝集し、それ以外の pH では分散する。がん細胞近傍の pH が、正常細胞よりも低い pH6-7であることを利用し、がん組織に金ナノ粒子を凝集させ、近赤外光照射による熱でがん組織を選択的に死滅させる設計である。

MC-GNPs 溶液にケージドプロトンを混合し、ポンプ光である波長可変ナノ秒レーザー（波長：365 nm）を照射することで pH を7から3まで低下させて、MC-GNPs の凝集体が分散する反応を開始させた。pH 低下に伴い、凝集体が分散したことを示唆する回折データが得られた。

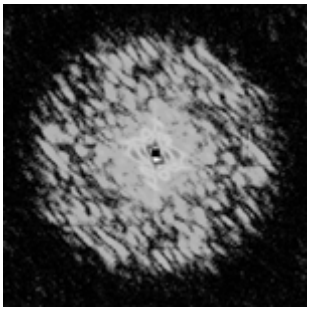


図３　がん治療用 pH 応答性金ナノ粒子からのシングルショットコヒーレントＸ線回折パターン

(d)　高開口数回転楕円集光ミラーを用いた軟 X 線タイコグラフィー

放射光軟Ｘ線をプローブとしたイメージング研究に新たに着手した。軟Ｘ線は、生体に欠かせない炭素、酸素、窒素だけでなく、鉄やコバルトなどの強磁性元素の吸収端をカバーしているため、これらの元素に着目した化学・磁気イメージングが可能である。タイコグラフィという走査型イメージング法に基づき、従来手法では到達できない高空間分解能の軟Ｘ線イメージング手法の確立を目指している。平成30年度は、共同研究者である東大三村准教授を中心に研究開発された回転楕円ミラーの特長を生かした、波長可変・高分解能軟 X 線タイコグラフィの実証を目的とした。

東大、JASRI と共同開発したイメージングチャンバ（図４）を SPring-8 BL25SU A ブランチの最下流に設置し、タイコグラフィ測定を実施した。焦点近傍に設置したテスト試料をピエゾステージで走査させながら、100枚以上のコヒーレント回折強度パターンを取得した。さらに、入射Ｘ線の光子エネルギーを300～1000 eV の範囲で変化させながら測定を繰り返し、取得した回折強度パターンに位相回復計算を適用した結果、事前に測定した電子顕微鏡画像と一致する結果が得られた。また、タイコグラフィー法で試料像と同時に再構成される入射波動場より、回転楕円ミラーの形状誤差を評価した。

図４　高開口数回転楕円集光ミラーを用いた軟 X 線タイコグラフィー装置

３．今後の研究の展望

当研究分野では日本のXFEL施設SACLAを利用した研究を推進している。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継続させる。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。

また、平成30年度に着手した高開口数回転楕円集光ミラーを用いた軟X線タイコグラフィーに関しても、技術開発と平行して、応用研究を目指す。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） T. Koyama, H. Yumoto, T. Kimura, A. Suzuki, T. Kameshima, Y. Joti, K. Tono, N. Tani, T. Tachibana, Y. Konishi, Y. Bessho, Y. Nishino, M. Yabashi and H. Ohashi: “Development of Multilayer Focusing Mirror System for XFEL CDI Experiments of Biological Particles”, Microscopy and Microanalysis, 24(Suppl 2): 294-295 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

２） 西野 吉則、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆: 「X 線自由電子レーザーを用いた環境制御ナノイメージング」、精密工学会学術講演会講演論文集、精密工学会、2018A: 665-666 (2018)

4.3 総説・解説・評論等

３） 西野 吉則: 「コヒーレントＸ線イメージング」、実験医学、羊土社、36(20): 3484-3485 (2018)

４） 西野 吉則、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆: 「Ｘ線自由電子レーザーによる溶液試料のナノ観察」、光学、日本光学会、47(10): 413-417 (2018)

５） 西野 吉則: 「レンズのない顕微鏡」、パリティ、丸善出版、33(7): 4-12 (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）

１） 該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） Y. Nishino*, A. Suzuki, T. Kimura, Y. Joti and Y. Bessho : “Capturing Radiation-Damage-Free Nanostructures in Solution by X-ray Laser Diffraction”, The 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) & the 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26), Sendai, Miyagi, Japan (2018-10)

２） H. Yumoto*, T. Koyama, T. Kimura, A. Suzuki, T. Kameshima, Y. Joti, K. Tono, N. Tani, T. Tachibana, Y. Konishi, Y. Bessho, Y. Nishino, M. Yabashi and H. Ohashi : “High-fluence x-ray focusing optics for high-resolution coherent diffractive imaging using X-ray free electron laser”, The 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2018), Taipei, Taiwan (Province of China) (2018-06)

３） H. Yumoto*, T. Koyama, T. Kimura, A. Suzuki, T. Kameshima, Y. Joti, K. Tono, N. Tani, T. Tachibana, Y. Konishi, Y. Bessho, Y. Nishino, M. Yabashi and H. Ohashi : “High-fluence x-ray focusing system for high-resolution coherent diffraction imaging at SACLA”, International Conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2018 (XOPT2018), Yokohama, Japan (2018-04)

４） T. Kimura* : “Radiation-Damage-Free Imaging of Solid Electrolytes for Lithium-Ion Batteries by Single-Shot Coherent Diffraction Imaging”, International Conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2018 (XOPT2018), Yokohama, Japan (2018-04)

５） Y. Nishino*, T. Kimura, A. Suzuki, Y. Joti and Y. Bessho : “Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction”, 2018 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix, Arizona, United States of America (the) (2018-04)

ｂ．招待講演（国内学会）

１） 西野 吉則*、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆 :「Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction」、日本生物物理学会第 56 回年会、岡山県岡山市、Japan (2018-09)

２） 西野 吉則*、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆 :「X 線自由電子レーザーを用いた環境制御ナノイメージング」、精密工学会 2018 年度秋季大会、北海道函館市、Japan (2018-09)

３） 西野 吉則*、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆 : 「XFEL を用いたイメージング研究の最前線」、第 21 回 XAFS 討論会、北海道札幌市、Japan (2018-09)

ｃ．一般講演（国際学会）

１） T. Koyama*, H. Yumoto, T. Kimura, A. Suzuki, T. Kameshima, Y. Joti, K. Tono, N. Tani, T. Tachibana, Y. Konishi, Y. Bessho, Y. Nishino, M. Yabashi and H. Ohashi : “Development of Multilayer Focusing Mirror

System for XFEL CDI Experiments of Biological Particles", The 14th International Conference on X-ray Microscopy (XRM2018), SASKATOON, SASKATCHEWAN, Canada (2018-08)

2） A. Suzuki*, T. Kimura, R. Iida, H. Mitomo, Y. Joti, Y. Bessho, K. Ijiro and Y. Nishino : "Imaging thermoresponsive gold nanoparticles in solution by X-ray laser diffraction", International Conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2018 (XOPT2018), Yokohama, Japan (2018-04)

d. 一般講演（国内学会）

1） 木村 円香*、鈴木 明大、木村 隆志、三友 秀之、城地 保昌、別所 義隆、居城 邦治、西野 吉則 :「がん治療用pH応答性金ナノ粒子のX線レーザーを用いたダイナミクス測定」、第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、福岡県福岡市、Japan (2019-01)

2） 鈴木 芳幸*、鈴木 明大、木村 隆志、三友 秀之、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 :「X線自由電子レーザーを用いたポンプ・プローブコヒーレント回折イメージング法の開発」、第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、福岡県福岡市、Japan (2019-01)

3） 橘 健朗*、山崎 憲慈、鈴木 明大、木村 隆志、城地保昌、別所 義隆、西野 吉則 :「グラフェンに担持した白金ナノ粒子の X 線レーザー回折測定に向けた試み」、第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、福岡県福岡市、Japan (2019-01)

4） 竹尾 陽子*、鈴木 明大、仙波 泰徳、岸本 輝、大橋治彦、三村 秀和 :「回転楕円ミラーによる高NA集光ビームを用いた軟X線タイコグラフィ計測」、第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、福岡県福岡市、Japan (2019-01)

5） 竹尾 陽子*、鈴木 明大、仙波 泰徳、岸本 輝、大橋治彦、三村 秀和 :「回転楕円ミラーによるナノ集光ビームを用いた軟X線タイコグラフィ顕微鏡の開発」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2018 、東京都文京区、Japan (2018-10 ～ 2018-11)4.6aと同様に記入。Same style as 4.6a

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*、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆 :「X線レーザー回折による環境制御ナノイメージング」、第2回アライアンス横串研究会、宮城県仙台市、Japan (2019-02)

2） 西野 吉則* :「1 分子/1 細胞解析技術で環境問題に挑む」、2018年度第2回ATIバイオ単分子研究会、神奈川県三浦郡葉山町、Japan (2018-12)

3） A. Suzuki*, T. Kimura, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : "Recent progresses and Future Prospects in XFEL-Based Coherent Diffractive Imaging at SACLA", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Hokkaido, Japan (2018-12)

4） Y. Suzuki*, A. Suzuki, T. Kimura, H. Mitomo, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : "Recent progresses and Future Prospects in XFEL-Based Coherent Diffractive Imaging at SACLA", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Hokkaido, Japan (2018-12)

5） 西野 吉則*、鈴木 明大、木村 隆志、城地 保昌、別所 義隆 :「X線自由電子レーザーを用いた放射線損傷のない環境制御ナノイメージング」、理研シンポジウム 第6回「光量子工学研究」 -サブ波長フォトニクス研究と新たな光量子工学の展開-、埼玉県和光市、Japan (2018-11)

6） 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、大阪府大阪市、Japan (2018-11)

7） A. Suzuki*, T. Kimura, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : "Recent Advances and Future Prospects in XFEL-Based Coherent Diffractive Imaging at SACLA", SACLA International Users' Meeting 2018, Sayo-gun, Sayo-cho, Hyogo, Japan (2018-09)

8） A. Suzuki* : "Higher-Resolution XFEL-Based Coherent Diffractive Imaging with Multilayer Focusing Mirror System", SACLA International Users' Meeting 2018, Sayo-gun, Sayo-cho, Hyogo, Japan (2018-09)

9） 西野 吉則* :「機能するタンパク質を活写する」、ATI第25回研究報告会、東京都千代田区、Japan (2018-07)

10） 西野 吉則、鈴木 明大、木村 隆志、新井田 雅学*、城地 保昌、別所 義隆 :「Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction」、第８回 物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会及び平成29年度ダイナミック・アライアンス成果報告会、北海道札幌市、Japan (2018-06)

11） T. Kimura, A. Suzuki, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino* : "Direct Observation of Solid Electrolyte Nanoparticle for Lithium-Ion Secondary Batteries by Single-Shot Coherent Diffractive Imaging at SACLA", Coherence 2018: International Workshop on Phase Retrieval and Coherent Scattering, Port Jefferson, New York, United States of America (the) (2018-06)

12） A. Suzuki*, T. Kimura, Y. Joti, Y. Bessho and Y. Nishino : "Recent Advances in XFEL-Based Coherent Diffractive Imaging at SACLA", Coherence 2018: International Workshop on Phase Retrieval and Coherent Scattering, Port Jefferson, New York, United States of America (the) (2018-06)

13） Y. Nishino* : "Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction", STROBE seminar, Los Angeles, California, United States

of America (the) (2018-04)4.6a と同様に記入。Same style as 4.6a

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、若手研究 A、X 線レーザーとナノ構造形成技術を駆使した高速電子密度マッピング、2017～2019 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

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

1） 別所義隆、Taiwan (Province of China)、(2019 年 01 月 24 日～2019 年 01 月 25 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、生体工学概論・生体医工学基礎、西野 吉則、2019 年 01 月 23 日

2） 情報科学研究科、ナノイメージング特論、西野 吉則、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

3） 工学部、ナノ工学基礎、西野 吉則、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

4） 工学部、生体情報工学実験 II、鈴木 明大、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

5） 全学共通、物理学 II、西野 吉則、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

6） 工学部、コースアワー、西野 吉則、2018 年 07 月 03 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」、西野 吉則、2018 年 06 月 22 日

8） 全学共通、環境と人間「2030 年エレクトロニクスの旅」、西野 吉則、2018 年 05 月 02 日

9） 工学部、科学技術英語演習、西野 吉則、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

１０）情報科学研究科、ナノイメージング特論、鈴木 明大、2018 年 04 月 01 日～2018 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、2018 年 11 月 1 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、科研費基盤(S)）

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：2人

１） 木村 円香、情報科学研究科: 修士（情報科学)、がん治療用pH応答性金ナノ粒子のＸ線レーザーを用いた液中ダイナミクス観察

２） 橘 健朗、情報科学研究科: 修士（情報科学)、グラフェンに担持した白金ナノ粒子のX線レーザー回折測定に向けた試み

博士学位：0人

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、Ph.D.化学、2016.2～）
准教授　髙野　勇太（筑波大、博士(理学)、2017.4～）
助　教　　柚山　健一（奈良先端大、博士(工学)、2016.10～）
事務補助員　藤井　敦子（2016.4～）
博士課程　Md. Jahidul Islam, Sushant Ghimere、Devika Sasikumar、Ajith Nair、Lata Chouhan、Bhagya Lakshmi、Md Shahjahan（環境科学院）
研究生　赵 韩俊、陳 丹陽（電子研）

１．研究目標

本研究分野は、分子および量子ドット材料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技術の開発および細胞工学向け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開発は、高性能の発光性材料や光発電材料、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。

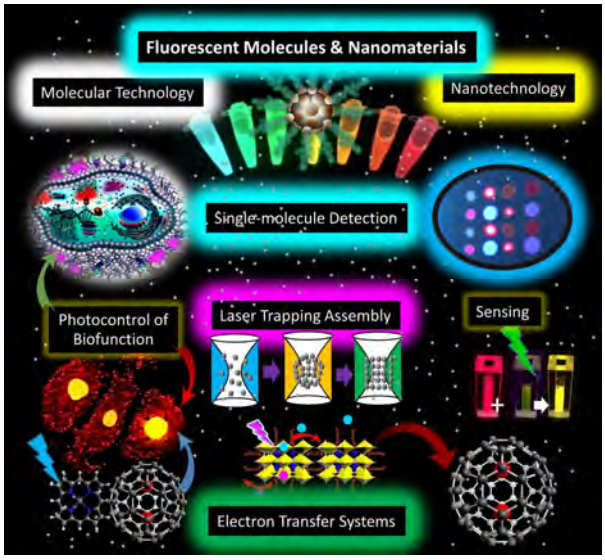


図１　本研究分野の研究概要

２．研究成果

半導体性ナノ結晶は、ナノサイズの量子効果に基づく特異な発光性を有することが知られており、新規発光材料や、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。なかでも量子効果を発現しえるサイズ(<20 nm)を有する半導体性量子ドットは、ユニークな発光特性や電子・正孔輸送特性を持つため、次世代材料として研究が行われており、最近ではディスプレイ用素子として上市されるものもみられる。また一方、ペロブスカイト型結晶は、比較的安価な原料を元に、極めて高い電子・正孔輸送特性や発光性を有するために、近年特に注目を集めている半導体性材料である。

われわれのグループは、種々のペロブスカイト型ナノ結晶において１分子レベルで光学特性観察を行うことによって、その実用化に向けて有用な知見を発見した【資料4.1-2,3,5,6,8,9)】。１例として、大気下における酸素との特徴的な相互作用を解明した。ペロブスカイトナノ結晶における極短時間の発光-消光の点滅現象に着目し、これがナノ結晶における酸素による劣化現象と競合することを明らかにした【資料4.1-2)】。これはペロブスカイト型ナノ結晶の実用化に向けて、高耐久性を実現するための一つの重要な知見である。また、ペロブスカイト型ナノ結晶に光を照射して電子・正孔などの励起子を発生させる際に、ある光強度を閾値として、光強度依存的に励起子発生・持続の減弱が見られることを見出した【資料4.1-2)】。これは、ペロブスカイト型結晶を光学利用する際に必要な最適化パラメータをの一つを見出したことと同義であり、本材料系の機能効率の改善に役立つ重要な知見である。

また一方我々は、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応用研究を行っている。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ハイブリッド型ハライドペロブスカイトの前駆体に用い、溶液中で単一のペロブスカイト結晶を任意の場所に作製することに成功した【資料4.1-9)】。これはミクロ-ナノサイズのデバイス作成の際に素子の任意配置などにつながる技術として大変有用である。

また、分子フォトニクス材料の生体応用における研究遂行も行った。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。生体における活性酸素は、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、その抑制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。当研究室では最近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センサーを開発し、可視光に安定な$^1O_2$検知蛍光試薬の開発に成功した。その詳細な速度論的解析により、分子センサーの置換基依存的な$^1O_2$反応速度変化を明らかにした【資料4.1-4)】。この結果は、今後の分子設計の最適化により$^1O_2$の検知性能をより一層向上させるための重要な指針を与えた。

以上のように我々は、半導体量子ドットや有機化合物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てきている。

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間コミュニケーションの新規解明を目指した分子プローブの開発および利用技術開発を行う。そして、開発材料に最適なレーザー光操作技術の開発を並行して行うことにより、ナノ材料分野をはじめとし、将来的な分子生物学的および細胞工学的にも利用可能な革新的光学分子材料の開発を行っていく。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） G. P. Geethy, A. N. Anil, S. Ghimire, N. Joy, K. Yuyama, V. P. Biju and R. Francis: “Phase transfer reaction for the preparation of stable polymer–quantum dot conjugates”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Elsevier, 371: 91-97 (2019)

２） L. Chouhan, S. Ghimire and V. P. Biju: “Blinking Beats Bleaching: The Control of Superoxide Generation by Photo-ionized Perovskite Nanocrystals”, *Angew. Chem. Int. Ed.* , Wiley (2019)

３） S. K. Dharmendar, S. Hirata, V. P. Biju and M. Vacha: “Stark Effect and Environment Induced Modulation of Emission in Single Halide Perovskite Nanocrystals”, *ACS nano*, American Chemical Society, 13(1): 624-632 (2019)

４） D. Sasikumar, R. Kohara, Y. Takano and V. P. Biju: “Kinetics of singlet oxygen sensing using 9-substituted anthracene derivatives”, *Journal of Chemical Sciences*, Springer, 131(1): 131-136 (2019)

５） S. Ghimire, L. Chouhan, Y. Takano, K. Takahashi, T. Nakamura, K. Yuyama and V. P. Biju: “Amplified and Multicolor Emission from Films and Interfacial Layers of Lead Halide Perovskite Nanocrystals”, *ACS Energy Letters*, American Chemical Society, 4(1): 133-141 (2018) 【電子研内共著】

６） B. Li, H. Huang, G. Zhang, Changgang Yang, W. Guo, R. Chen, Q. Chengbing, Y. Gao, V. P. Biju, A. L. Rogach, Liantuan Xiao and S. Jia: “Excitons and Biexciton Dynamics in Single $CsPbBr_3$ Perovskite Quantum Dots”, *The journal of physical chemistry letters*, American Chemical Society, (9): 6934-6940 (2018)

７） G. Gopalan, A. Anil, S. Ghimire, N. Joy, K. Yuyama, V. P. Biju and R. Francis: “Phase transfer reaction for the preparation of stable polymer–quantum dot conjugates”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 371: 91-97 (2018)

８） E. M. Thomas, S. Ghimire, R. Kohara, A. N. Anil, K. Yuyama, Y. Takano, K. Thomas and V. P. Biju: “Blinking Suppression in Highly-Excited CdSe/ZnS Quantum Dots by Electron Transfer under Large Positive Gibbs (Free) Energy Change”, *ACS Nano*, 12(9): 9060-9069 (2018)

９） K. Yuyama, M. Islam, K. Takahashi, T. Nakamura and V. P. Biju: “Crystallization of Methylammonium Lead Halide Perovskites by Optical Trapping”, *Angewandte Chemie International Edition*, 57(41): 13424-13428 (2018) 【電子研内共著】

１０）S. Ghimire, A. Sivadas, K. Yuyama, Y. Takano, R. Francis and V. P. Biju: “Quantum dot-polymer conjugates for stable luminescent displays ”, *Nanoscale*, 10: 13368-13374 (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） 髙野 勇太: 「金属有機構造体（MOF）の光エネルギーのリレーを利用したイメージング」、ファルマシア、日本薬学会、55(3): 253 (2019)

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） V. P. Biju*：“Blinking Suppression in Quantum Dots by Electron Transfer under Large Positive Gibbs Energy Change”, 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis, Guangzhou, China (2018-10)

２） V. P. Biju*：“ Photoluminescence of Semiconductor Quantum Dots: The Roles of Electron Donors/Acceptors and Incident Photon Flux”, NANO2018, 香港, Hong Kong (2018-06)

３） V. P. Biju*：“Quantum Dots for single-molecule bioimaging: Callenges and prospects”, International Conference on Nanoscience and Technology(ICONSAT 2016), Pune, India (2016-02 ～ 2106-03)

ｂ．招待講演（国内学会）

１） V. P. Biju*：“Blinking Suppression in Quantum Dots by Electron Transfer under Large Positive Gibbs Energy Change”, 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis, Guangzhou, China

(2018-10)

2） V. P. Biju* : “ Photoluminescence of Semiconductor Quantum Dots: The Roles of Electron Donors/Acceptors and Incident Photon Flux”, NANO2018, 香港, Hong Kong (2018-06)

3） V. P. Biju* : “Quantum Dots for single-molecule bioimaging: Callenges and prospects”, International Conference on Nanoscience and Technology(ICONSAT 2016), Pune, India (2016-02 〜 2106-03)

c . 一般講演（国際学会）

1） G. Sushant*, L. Chouhan and V. P. Biju : “The Dynamics of Photogenerated Charge Carriers in Perovskite Nanocrystal Films”, APC2018, 台北, Taiwan (2018-12)

2） K. Yuyama*, J. M. Islam and V. P. Biju : “Crystallization of Methylammonium Lead Halide Perovskites Controlled by Laser Trapping at Solution Surface”, APC2018, 台北, Taiwan (2018-12)

3） V. P. Biju* : “Blinking Suppression of CdSe/ZnS Quantum Dots by Photoinduced Electron Transfer under Large Positive Free Energy Change”, APC2018, 台北, Taiwan (2018-12)

4） Y. Takano*, R. Tashita, M. Suzuki, H. Imahori and T. Akasaka : “Anisotropic magnetic properties of an endohedral metallofullerene for molecular location sensing”, 256th The American Chemical Society meeting, Boston, MA, United States of America (2018-08)

d . 一般講演（国内学会）

1） 柚山 健一*、Islam Md Jahidul、Vasudevan Pillai Biju : 「酸性条件下でのニワトリ卵白リゾチームの光捕捉挙動」、2018 年光化学討論会、関西学院大学・上ケ原キャンパス、Japan (2018-09)

2） Islam Md Jahidul*、柚山 健一、Vasudevan Pillai Biju : 「 Crystallization of mixed chloride-bromide methylammonium lead perovskites by optical trapping at solution surface」、2018 年光化学討論会、関西学院大学・上ケ原キャンパス、Japan (2018-09)

3） D. Sasikumar*, Y. Takano, K. Yuyama and V. P. Biju : “Steady-state Spectroscopic Studies of the Kinetics of Singlet Oxygen Sensing by 9-Substituted Anthracene Derivatives”, 日本化学会第 99 春季年会, 神戸市、甲南大学, Japan (2019-03)

4） Chouhan Lata*、Ghimire Sushant、Vasudevan Pillai Biju : 「Relations of Oxygen and Electron Transfer to Photoluminescence of Methylammonium Lead Iodide Perovskite Nanocrystals」、日本化学会第 99 春季年会、神戸市、甲南大学、Japan (2019-03)

5） 柚山 健一*、イスラム ジャヒダル、Vasudevan Pillai Biju : 「光トラッピングによる混合ハロゲン化物ペロブスカイトの結晶化」、日本化学会第 99 春季年会 2019、神戸市、甲南大学、Japan (2019-03)

6） 髙野 勇太*、Satrialdi、宗近 玲那、原島 秀吉、山田 勇磨、Vasudevan Pillai Biju : 「Conjugate of pi-extended porphyrin/drug delivery carrier for near-infrared cancer phototherapy」、日本化学会第 99 春季年会 、神戸市、甲南大学、Japan (2019-03)

7） 柚山 健一*、イスラム ジャヒダル、Vasudevan Pillai Biju : 「界面での光捕捉によるハロゲン化鉛ペロブスカイトの合成と改変」、第 66 回 応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 大岡山キャンパス、Japan (2019-03)

e . 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） K. Yuyama*, M. Islam and V. P. Biju : “Crystallization of methylammonium lead halide perovskites spatiotemporally controlled by optical trapping”, 18th International Symposium on Advanced Organic Photonics (ISAOP-18), Yamagata University, Japan (2018-09)

2） V. P. Biju* : “Electron Transfer under Large Positive Gibbs Energy: Highly-excited Quantum Dots for Energy Harnessing and Photocatalysis”, 水素社会のための第３回国際シンポジウム , 東京都, Japan (2018-08)

3） L. Chouhan*, S. Ghimire, K. Yuyama, Y. Takano and V. P. Biju : “Control of Perovskite Nanocrystal Oxidation by Charge Carrier Trapping”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, 札幌市, Japan (2018-12)

4） D. Sasikumar*, Y. Takano, K. Yuyama and V. P. Biju : “Kinetic Studies of Singlet Oxygen sensing using 9-substituted anthracene derivatives; Comparison of coumarin conjugated anthracene with 9-methyl anthracene.”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, 札幌市, Japan (2018-12)

5） L. Chouhan* and V. P. Biju : “Single particle microspectroscopy detection of the dynamics of perovskite nanocrystal blinking”, 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌市, Japan (2019-01)

6） L. S. B. Bhagya* and V. P. Biju : “Lifetime of photogenerated charge carriers in 0-, 1-, and 3- dimensional perovskite structures”, 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌市, Japan (2019-01)

7） D. Sasikumar* and V. P. Biju : “Photosensitized generation of singlet oxygen by Rose Bengal and its reaction with 9-substituted Anthracene”, 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌市, Japan (2019-01)

8） G. Sushant* and V. P. Biju : “Optical control of charge-carrier diffusion and confinement in perovskite nanocrystal film”, 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌市, Japan (2019-01)

9） J. M. Islam*, K. Yuyama, K. Konishi and V. P. Biju : “Mixed halide lead perovskite single crystals prepared by

optical trapping at solution surface”, 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌市, Japan (2019-01)

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） ナノアセンブリ研究分野(ＰＩ:中村貴義教授)との、Ｘ線構造解析による新規開発半導体材料の構造解明。

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技術に関する共同研究。

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。

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） 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

該当なし

4.10 受賞

1） D. SASIKUMAR, 優秀ポスター賞, The 19th RIES-Hokudai International Symposium, (2018-12)

2） L. CHOUHAN, The Research Excellence Award of the Department of Environmental Science, Hokkaido Univeristy. (2019-3)

3） 柚山健一, 日本結晶成長学会 第 35 回論文賞 「光圧によるアミノ酸、タンパク質の結晶成長制御」, (2018-11)

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） Biju Vasudevan Pillai :日本化学会北海道支部幹事

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） Elizabeth Mariam Thomas、India、(2019 年 01 月 15 日～2019 年 03 月 29 日)

2） Pradeep Thalappil、India、(2018 年 05 月 15 日～2018 年 05 月 16 日)

3） Alberto Bianco、France、(2019 年 02 月 22 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、英語演習、Vasudevan Pillai Biju、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日

2） 環境科学院、光電子科学特論 I、Vasudevan Pillai Biju、髙野 勇太、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

3） 環境科学院、分子環境学特論 II、髙野 勇太、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

4） 環境科学院、環境物質科学基礎論 II、髙野 勇太、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日

5） 全学共通、フレッシュマンセミナー、柚山 健一、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日 (2018 年 05 月 30 日、06 月 06 日、06 月 13 日)

6） 環境科学院、分子環境学特論 II、柚山 健一、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日 (2018 年 11 月 29 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人

博士学位：０人

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～）
准教授　　Yuna Kim（Yonsei University、工博、2011.8～）
助　教　　相良剛光（東京大院、工博、2015.7～）
　　松尾和哉（京都大院、工博、2015.6～）
博士研究員　Ammathnadu Sudhakar Amrutha（2018.4～）、
　　李潔（2018.9～）、
事務補助員　田山紘子（2016.4～2018.8）、
　　小林恵美（2019.1～）
学生
　博士課程 MD JAHIRUL ISLAM、Viswanatha H. M.、
　　Noushaba Nusrat Mafy、Sampreeth Thayyil、
　　Shariful Haque
　修士課程 芦野史弥、村松達也
　学部生　植田海透
　研究生　斉嘉俊、林潤澤

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)　一方向の連続的な回転運動を生む光駆動分子機械の開発

近年、分子機械の研究が盛んに行われている。分子機械に関しては様々な定義がされるが、生体を分子機械のお手本と考えて、満足すべき要件をまとめると、「分子レベルの機構で働き、運動を伴って、何らかのエネルギーを連続的にマクロな仕事に変換する物体または仕組み」ということができる。これまでに報告されている分子機械の研究を分類するといくつかのカテゴリーに当てはめることができる。まず、光、熱、ｐH 変化、酸化還元反応などの刺激に応じて分子構造が可逆的に変化する化合物の研究がある。典型的には、アゾベンゼン誘導体に代表されるフォトクロミック化合物やステーション部の酸化還元反応によって、環状部がシャトル運動を示すロータキサンが挙げられる。光や化学的な（または電気的な）エネルギーを受けて、分子構造変化という分子の可逆的な“運動”を起こすが、その構造変化は、トランス体とシス体の間で、または、軸部上で環状部が行ったり来たりするのみで、トータルでは仕事を生み出さない。従ってこれらの分子は上記の狭義の意味での分子機械とは言えない。一方で、Feringa らは、一定温度下で光を当てることで、分子の一部がその他の部分に対して一方向に回転し続けるキラルエテン誘導体を報告している。この化合物は、分子レベルで光エネルギーを連続的に仕事に変換している。しかし、そのままでは、マクロな量の仕事を取り出すことは困難である。Feringa らは、更に上記のキラルエテン誘導体を液晶に添加した薄膜を作成して、その液晶薄膜に光を照射すると、キラルエテン誘導体のキラリティーのR,Sに依存した方向に液晶のテクスチャーが回転し、それに伴い薄膜上に載せた数十ミクロンサイズのガラスロッドも回転することを見出した。一見、本現象は分子レベルの機構を使った光エネルギーのマクロな仕事への連続的な変換に見える。しかし、この回転運動は、光を当て続ける限り続くのではなく、キラルエテンの誘導体の光反応が光定常状態に達すると止まることがわかっている。以上のような分子機械研究の状況を踏まえ、本研究では、光エネルギーを連続的にマクロな仕事に変換する分子機械の構築を目指した。

図１に本研究で用いた光応答性キラル添加剤と液晶性化合物の構造を示す。これらの混合物をガラス基板上に薄膜状にコーティングすると、液晶のテクスチャーが紫外線または青色光の照射によって光定常状態に達するまで、それぞれ右回りまたは左回りに回転することがわかっていた（R. Thomas, et al., *Chem. Eur.J*, **2012**, 18, 12337）。

図１　光応答性キラル添加剤の分子構造及びその光異性化反応（左）と液晶性化合物の分子構造（右）

今回、薄膜の厚みを 50 マイクロメートルと以前より厚くし、かつ青色光の強度を 30mW cm^{-2} とより高強度にしたところ、紫外線照射時にはフィンガープリント様の液晶テクスチャーが右回りで回転するのに対して、青色光照射時には、液晶テクスチャーの様子が大きく変化し、テクスチャーの回転が全く起こらないことがわかった。液晶薄膜の上に数百ミクロン程度のガラス薄片を乗せると紫外線照射時にはガラス薄片が右回りに回転するが、青色光照射時にはガラス薄片は動かなかった。すなわち、紫外線照射と青色光照射を交互に繰り返すと、ガラス薄片は右回りに回転し

続けた。光応答性キラル添加剤をＳ体からＲ体に変えると回転は左回りとなった。これらの結果を図２に示す。

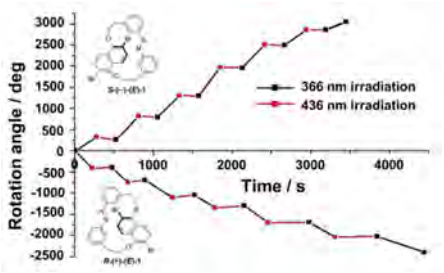


図２　S 体または R 体の光応答性キラル添加剤を用いたときの紫外線（366nm）、可視光（436nm）交互光照射によるガラス薄片の累積回転角度

本現象は、光の波長をスイッチする必要があるものの、光エネルギーをマクロな物体の一方向への累積的な回転運動に変換していると言える。また、光応答性キラル添加剤のキラリティーによって回転方向が決まることから分子レベルの機構で起こっていることがわかる。青色光照射時に発生するテクスチャーは、その形状等からフォーカルコニックテクスチャーと同定された。すなわち、光応答性添加剤の光異性化の方向がトランス→シスであるか、シス→トランスであるかによって、生じる液晶のテクスチャーがフィンガープリントテクスチャーからフォーカルコニックテクスチャーに変化するという新しい現象が起こっていることがわかった。それに伴って液晶薄膜上のガラス片の回転の可否が生じた。本研究により、アゾベンゼン誘導体のトランスーシス光異性化反応という行ったり来たりの反応を特定の液晶場で起こすことにより、一方向のマクロな回転運動に変換できることを示した。本作用は、ピストン運動を回転運動に変換するエンジンのクランクシャフトの作用と同種の作用を分子レベルの機構で実現したと言える（図３参照）。

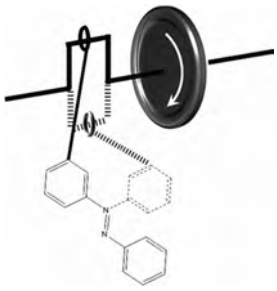


図３　アゾベンゼンのピストン用の行ったり来たりの運動から一方向回転運動を有む今回の分子クランクシャフト効果を表す模式図

(b)　ロタキサン型超分子メカノフォアの開発

機械的刺激を受けて吸収・発光特性変化、反応の誘起、化合物の放出など多様なアウトプットを示す分子骨格は“メカノフォア”と呼ばれ、この 10 年で盛んに研究が進んでいる。特に、吸収・発光特性が変化するメカノフォアを導入した高分子材料は、材料の受けるダメージを簡便に可視化・評価できるため、盛んに研究されている（D. A. Davis et al., *Nature* **2009**, *459*, 68）。これまでに報告されている多くのメカノフォアでは、activation するのに共有結合の切断が必要であった。しかし、従来の共有結合切断型のメカノフォアを論理的に設計することは極めて困難である。また、共有結合を切断するにはある程度の大きさの力が必要であり（～数 nN）、生細胞が生み出すような極めて小さい機械的刺激（数 pN～数 100pN）は検出できない。さらに、吸収・発光特性を変化させるために共有結合を切断してしまうため、可逆性に乏しいという欠点がある。その上、スピロピランを含むいくつかのメカノフォアは、光や熱などのその他の刺激に対しても鋭敏に反応して吸収・発光特性変化を示すため、機械的刺激のみを特異的に検出できてはいない。つまり、微小な機械的刺激のみを特異的・可逆的に検出できるメカノフォアを開発するためには、共有結合を切断する以外の画期的なメカニズムを確立する必要がある。

そこで、本研究では、超分子化学の分野で盛んに研究されてきたインターロック分子の一つであるロタキサンの特殊な構造に着目し、微小な力でも共有結合を切断することなく activation でき、かつ非常に高い蛍光量子収率を示す、「ロタキサン型超分子メカノフォア」の開発を行った。本研究で開発した新規メカノフォアの動作原理を図４に示す。このロタキサン型メカノフォアは、蛍光部位を持つ環状分子と、消光団と立体的にかさ高いストッパー部位からなるロッド状分子で形成される。機械的刺激が印加されていない状態では、消光団が環状分子に包摂されており、環状分子の蛍光は完全に消光される（図４左）。しかし、機械的な刺激（図４、赤色の矢印の方向）が加わると、環状分子が消光団からスライドして離れ、その結果、環状分子由来の強い蛍光が観察されるようになる（図４右）。

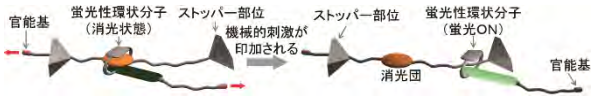


図４　ロタキサン型超分子メカノフォアの動作原理

今回開発したロタキサン型超分子メカノフォアの具体的な分子骨格を図５に示す。このロタキサン **1** は発光部位として拡張されたベンゾチアジアゾール部位を持ち，消光団として，ナフタレンジイミド構造を持つ。ストッパー部位として、ロタキサンの分野でよく用いられているテトラフェニルメタン骨格を採用した。また、ポリマー鎖を導入するため、蛍光団とストッパー部位のそれぞれに水酸基を一つずつ導入した。

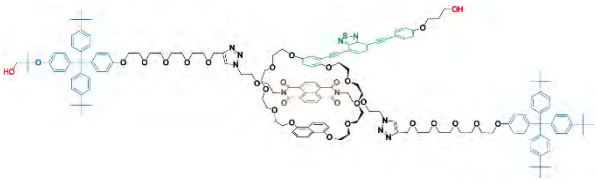


図５　本研究で開発したロタキサン型超分子メカノフォアの分子骨格

まず、ロタキサン1の吸収・蛍光スペクトル測定をTHFを溶媒として用いて行ったところ、蛍光団であるベンゾチアジアゾール誘導体からの蛍光は、消光団であるナフタレンビスイミドによって完全に消光されていることがわかった。次に、ポリウレタンの主鎖に共有結合を介してロタキサン1を導入した。具体的には、ロタキサン1、poly(tetrahydrofuran) (Mn = 2000 g/mol)、4,4’-methylenebis(phenylisocyanate)、および1,4-butanediolをTHF中で触媒存在下で反応させることで、分子量約71 kDaのポリウレタンを得ることに成功した。得られたポリウレタンの物性は、ロタキサンの導入率が低いため(0.4 wt%)、通常のポリウレタンの物性と比較して、ほとんど変化はなかった。得られたポリマーもTHF溶液中では蛍光を示さなかった。

図６　作製したエラストマーが伸縮に応じてその蛍光を On/Off させる様子

開発したメカノフォアが機械的刺激に応答して発光特性を変化させるかどうかを明らかにするために、キャスト法により均一な厚みのフィルムを作成し、Dog-bone 型のフィルムに成型加工し、各種実験を行った。大変興味深いことに、得られたフィルムは伸縮に応じて蛍光を可逆的に何回でも ON/OFF スイッチすることができる画期的なエラストマーとなった（図６）。このような可逆性は共有結合切断型のメカノフォアでは到底達成することができないため、本超分子メカノフォアの優れた点の一つである。水酸基を持たないロタキサンを単純にドープしたポリウレタンでは、伸縮には全く応答せず、常に発光が OFF 状態となっていることから、直接メカノフォアに力を共有結合を介して伝達することが本メカノフォアの activation に必要不可欠であることがわかった。また参照実験として、ロタキサンの構成分子である軸分子と蛍光性シクロファンをロタキサンを形成せずにポリウレタンにドープしたフィルムでは、常に発光が ON 状態となることも確認した。

さらに本メカノルミノフォアは、エラストマーの応力緩和を評価することができるプローブとなることもわかった。例えば、作製したフィルムを 600%の延伸率で保持すると応力が緩和するに従って、その発光強度も減少することが明らかとなった。

３．今後の研究の展望

今回示した分子機械では、紫外線と可視光を交互に照射することで液晶薄膜上の数百ミクロン程度のガラス薄片の累積的な一方向の回転運動が起こった。今後は、照射する波長を切り替えることなく一定の照射条件下において連続回転の仕事を行う分子システムの構築を目指す。

超分子メカノフォアに関しては、今後、本研究を基盤として多種多様なメカノセンシング材料が開発されることが容易に想像できる。また、蛍光団として様々な光機能性分子骨格を導入することにより、それらの光機能を機械的刺激で、分子レベルで制御することができるようになるはずである。しかし、現状、ロタキサン合成の合成ステップ数が多く、これを簡略化する必要がある。さらに、ロタキサン以外のモチーフを用いてメカノフォアを開発することを検討している。

より長期的な展望としては、今回世界に先駆けて開発することに成功した超分子メカノフォアは、activationするために共有結合を切断する必要が無いため、細胞が分子レベルで生み出す程度の微細な力を検出できると考えられ、本研究が進展すれば、メカノバイオロジーや生物物理などの基礎研究に多大な貢献ができるのではないかと考えている。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

１）Yuna Kim, Ken’ichi Aoki, Masaya Fujioka, Junji Nishii, Nobuyuki Tamaoki: “Pressure-Induced Transition of Bisamide Substituted Diacetylene Crystals from Non-Photopolymerizable to Photopolymerizable State” *ACS Appl. Mater. Interfaces,* 10, 36407 (2018). 【電子研内共著】

２）Yoshimitsu Sagara, Atsushi Seki, Yuna Kim, Nobuyuki Tamaoki: “Linearly polarized photoluminescence from an asymmetric cyclophane showing thermo- and mechanoresponsive luminescence” *J. Mater. Chem. C.* 6, 8453 (2018).

３）Yoshimitsu Sagara, Nobuyuki Tamaoki, Gaku Fukuhara, Cyclophane-Based Fluorescence Tuning Induced by Hydrostatic Pressure Changes, *ChemPhotoChem* **2018**, *2*, 959-963.

４）Anu Kundu, Subramanian Karthikeyan, Yoshimitsu Sagara, Dohyun Moon, Savarimuthu Philip Anthony, Unusual Fluorescent Photoswitching of Imidazole Derivatives: The Role of Molecular Conformation and Twist Angle Controlled Organic Solid State

Fluorescence, *PCCP* **2018**, *20*, 27385-27393.

5） Palamarneri Sivaraman Hariharan, Gayathri Parthasarathy, Anu Kundu, Subramanian Karthikeyan, Yoshimitsu Sagara, Dohyun Moon, Savarimuthu Philip Anthony, Drastic Modulation of Stimuli-Responsive Fluorescence by a Subtle Structural Change of Organic Fluorophore and Polymorphism Controlled Mechanofluorochromism, *Crystal Growth & Design* **2018**, *18*, 3971-3979.

6） Yoshimitsu Sagara, Tatsuya Muramatsu, Nobuyuki Tamaoki, "A 1,6-Diphenylpyrene-Based, Photoluminescent Cyclophane Showing a Nematic Liquid-Crystalline Phase at Room Temperature", *Crystals* **2019**, *9*, 92.

7） Céline Calvino, Yoshimitsu Sagara, Véronique Buclin, Alexander P. Haehnel, Anselmo del Prado, Christian Aeby, Yoan C. Simon, Stephen Schrettl, Christoph Weder, "Mechanoresponsive, Luminescent Polymer Blends Based on an Excimer-Forming Telechelic Macromolecule", *Macromol. Rapid Commun.* **2019**, *40*, 1800705.

8） MD. Jahirul Islam, Kazuya Matsuo, Halley M. Menezes, Masayuki Takahashi, Hidehiko Nakagawa, Akira Kakugo, Kazuki Sada and Nobuyuki Tamaoki, ″Substrate selectivity and its mechanistic insight of the photo-responsive non-nucleoside triphosphate for myosin and kinesin″, **2019**, *17*, 53-65.

9） Marie Masuda, Kazuya Matsuo, Itaru Hamachi, "Ligand-Directed N-Sulfonyl Pyridone Chemistry for Selective Native Protein Labeling and Imaging in Live Cell" *Methods Mol. Biol.* **2019**, *2008*, 203-224.

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） 相良 剛光､「伸ばすと光るゴム―超分子メカノルミノフォアの創製―」、現代化学、572、56-59、2018.

2） 相良 剛光、「機械的刺激で発光色が変化する有機材料」、化学と教育、66、232-235、2018.

3） Stephen Schrettl, Diederik W. R. Balkenende, Céline Calvino, Marc Karman, Anna Lavrenova, Laura N. Neumann, Yoshimitsu Sagara, Ester Verde-Sesto, Michela di Giannantonio, Yoan C. Simon, Katharina M. Fromm, Marco Lattuada, Christoph Weder, "Functional Polymers through Mechanochemistry", *Chimia* **2019**, *73*, 7-11.

4.4 著書

1） Yuna Kim, Noushaba N. Mafy, Nobuyuki Tamaoki：「Photochemical Chirality Induction and Inversion in Soft Materials」Wiley-VCH (2019).

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） Nobuyuki Tamaoki, "Precise photo-regulation of molecular motions", Molecular Rotors, Motors, and Switches, 26th June 2018, Telluride, America.

2） Nobuyuki Tamaoki, "Optical manipulation of motor proteins using newly synthesized photochromic compounds", 2018 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics(KJF-ICOMEP), 5th Sep 2018, Nagaragawa, Japan.

3） Yoshimitsu Sagara, "Development of rotaxane-based supramolecular mechanoluminophores", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, 12th Dec 2018, Sapporo, Japan.

4） Yoshimitsu Sagara, "Development of Rotaxane-based Supramolecular Mechanoluminophores", International Congress on Pure & Applied Chemistry Langkawi (ICPAC Langkawi) 2018, 2nd Nov 2018, Langkawi island, Malaysia.

ｂ．招待講演（国内学会）

1） 松尾和哉：「モータータンパク質をオプトケミカルコントロールする手法の構築」、第6 回アライアンス若手研究交流会、東北大学片平キャンパス 片平さくらホール、2018 年 11 月 1 日

ｃ．一般講演（国際学会）

1） K. Kubo, Y. Kim, A. Morita, T. Kadoya, S. Noro, T. Nakamura, J. Yamada: "Development of New Electrochromic Materials Based on Unsymmetrical Platinum Dithiolene Complexes",The 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018), Sendai, Japan, (2018-08)

2） Tatsuya Muramatsu, Yoshimitsu Sagara, Nobuyuki Tamaoki, "A rotaxane-based mechanophore exhibiting red fluorescence", 11th Dec 2018, Sapporo, Japan.

3） Ammathnadu S. Amrutha, K. R. Sunil Kumar, Takashi Kikukawa, and Nobuyuki Tamaoki, ″Spatiotemporal Activation of Molecular Shuttle by Vis-

ible Light", 6th International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials, 11 Mar 2019, Sitges, Spain

d. 一般講演（国内学会）

1） 相良 剛光、「環状構造を利用した外部刺激に応答する有機発光材料」、高分子学会北海道支部若手研究会、2018年8月25日、札幌

2） 八幡 慎史・奥山 太賀 ・玉置 信之・青木 健一、「ジアセチレンジアミド結晶の加熱による集合状態制御とそれに伴う光重合活性の発現」、第67回高分子討論会、2018年9月12日、札幌

3） 奥山 太賀・八幡 慎史・玉置 信之・青木 健一、「ジアセチレンジアミド誘導体の化学構造が結晶構造や光重合特性に及ぼす影響」、第 67 回高分子討論会、2018年9月12日、札幌

4） 相良 剛光、「メカノバイオロジーに向けたロタキサン型メカノプローブの創製」、第8回 CSJ化学フェスタ2018、2018年10月23日、船堀

5） 相良 剛光、「インターロック構造を積極活用した超分子メカノルミノフォアの開発」、化学系学協会北海道支部2019年冬季研究発表会、2019年1月23日、札幌

6） A. Hori, K. Kubo, Y. Kim, A. Morita, C. Tomota, T. Kadoya, S. Noro, N. Tamaoki, T. Nakamura, J. Yamada: “Electrochromic Properties of Unsymmetrical Platinum Complexes Coordinated by Bipyridine and Dithiolene Ligand Derivatives”, 日本化学会 第99春季年会、2019年3月16日、神戸

7） MD. JAHIRUL ISLAM, Kazuya Matsuo, Halley M. ; Menezes, Nobuyuki Tamaoki, “Selective and reversible photoregulation of myosin motility in kinesin-myosin composite motility assay using myosin selective Azo-triphosphate” The 99th CSJ Annual Meeting、March 17th, 2019、Kobe.

8） Shariful Haque, Takeshi Kikukawa, Nobuyuki Tamaoki, “Bacteriorhodopsin and Proteorhodopsin analogues: Substitution of retinal by azobenzene chromophores”, The 99th CSJ Annual Meeting、March 17th, 2019、Kobe.

9） Y. Kim, K. Aoki, M. Fujioka, J. Nishii, N. Tamaoki: “Pressure-induced transition from nonphotopolymerizable to photopolymerizable state based on bisamide-substituted diacetylene crystals”, 日本化学会 第99春季年会、2019年3月18日、神戸

１０） 松尾和哉、Noushaba Nusrat Mafy・比留間 翔太・上原 亮太・玉置 信之：「分裂期モータータンパク質CENP-Eを光制御する阻害剤の開発」、日本化学会第99春季年会、2019年3月18日、神戸

１１）Noushaba Nusrat Mafy, Kazuya Matsuo, Shota Hiruma, Ryota Uehara, Nobuyuki Tamaoki, “Dynamic Photocontrol of CENP-E and Chromosome Movements During Cell Division”, The 99th CSJ Annual Meeting、March 18th, 2019、Kobe.

１２）相良 剛光、「Development of Rotaxane-based Supramolecular Mechanoluminophores」、日本化学会第99春季年会、2019年3月19日、神戸

１３）村松達也・相良剛光・玉置信之、「赤色蛍光を示すBODIPY誘導体を用いた超分子メカノフォア」、日本化学会第99春季年会、2019年3月19日、神戸

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 相良 剛光、「ロタキサン型超分子メカノルミノフォアの開発」、第11 回ナノバイオ若手ネットワーキングシンポジウム、2018年6月15日、札幌。

2） 松尾和哉、玉置信之：「化学的手法による光応答性生体ナノマシンの開発」、第8回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会及び29年度ダイナミック・アライアンス成果報告会、北海道大学フロンティア応用科学研究棟（鈴木章ホール）、2018年6月28日

3） Y. 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) (2018-08)

4） Y. Kim: “Photocontrol of chiral liquid crystals for optical and dynamic mechanical functions”, 兵庫県立大学 物質理学研究科 (2018-11)

5） Ammathnadu S. Amrutha and Nobuyuki Tamaoki, “Selective and Localized Regulation of Motor Protein-Driven Molecular Transportation by Visible Light”, Dynamic Alliance for Open Innovation Bridging Human, Environment and Materials G3 meeting 2018, 26th Nov 2018, Tokyo Institute of Technology, Suzukakedai Campus, Tokyo, Japan.

6） Y. Kim: “Amplification of chirality in liquid crystals and its photocontrol for optical and dynamic mechanical functions” Japan/Korea Young Materials Scientist Workshops, Yonsei University, Seoul, Korea (2018-12)

7） 松尾和哉：「モータータンパク質のオプトケミカルバイオロジー」、コネクトサッポロ in MeCCS フォーラム 企業と研究者のポスター・パネル展、

札幌ビューホテル大通公園、2018 年 12 月 10 日（依頼講演）

８） Ammathnadu S. Amrutha, K. R. Sunil Kumar, Takashi Kikukawa, and Nobuyuki Tamaoki, “Targeted Activation of Motor Protein - Driven Molecular Transportation by Visible Light”, 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, 11 Dec 2018, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan

９） Noushaba Nusrat Mafy, Kazuya Matsuo, Shota Hiruma, Ryota Uehara, Nobuyuki Tamaoki, “Optochemical Control of Chromosome Movements in Mitotic Cells”, The 19th RIES-Hokudai international symposium 組, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan. Dec 11th, 2018.

１０)MD. JAHIRUL ISLAM, Kazuya Matsuo, Halley M. Menezes, Nobuyuki Tamaoki, “Selective and reversible photoregulation of myosin motility in kinesin-myosin composite motility assay using myosin selective Azo-triphosphate”, The 19th RIES-Hokudai international symposium 組, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan. Dec 11th, 2018.

１１)Y. Kim: “Chirality amplification in liquid crystals for photoresponsive optical and mechanical functions”, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, Daejeon, Korea (2019-01)

１２)Ammathnadu S. Amrutha, K. R. Sunil Kumar, Takashi Kikukawa, and Nobuyuki Tamaoki, “Spatiotemporal Regulation of Motor Protein - Driven Molecular Transportation by Visible Light”, Young Researchers in Cutting Edge Life Science Symposium, 25th Jan. 2019, Furate Hall, Hokkaido University, Sapporo, Japan

１３)Noushaba Nusrat Mafy, Kazuya Matsuo, Shota Himura,Ryota Uehara, Nobuyuki Tamaoki, “Optochemical Regulation of Chromosome Congression During Mitotic Cell Division”, Young Researchers in Cutting Edge Life Science Symposium, 25th Jan. 2019, Furate Hall, Hokkaido University, Sapporo, Japan

１４)Shariful Haque, Takashi Kikukawa, Nobuyuki Tamaoki, “Development of artificial Proteorhodopsin containing azobenzene photochromophore”, Young Researchers in Cutting Edge Life Science Symposium, 25th Jan. 2019, Furate Hall, Hokkaido University, Sapporo, Japan

１５)Y. Kim: “Photoresponsive smart molecular systems with amplified functions”, Séminaire, Xlim, University of Limoges, France (2019-02)

１６)Y. Kim: “Photoresponsive smart molecular systems with amplified functions”, Séminaire, PPSM, ENS Paris-Saclay, France (2019-02)

１７)相良 剛光、「ロタキサン型メカノルミノフォアの創製」、材料・応用化学科講演会、2019 年 2 月 1 日、熊本。(依頼講演)

１８)松尾 和哉：「生体ナノマシンのオプトケミカルコントロール」、材料・応用化学科講演会、熊本大学工学部研究棟 II、2019 年 2 月 1 日（依頼講演）

１９)相良 剛光、「機械的刺激に応答して発光特性が変化する有機機能性材料」、生命理工学院セミナー、2019 年 2 月 14 日、すずかけ台，東工大。(依頼講演)

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） 相良剛光: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密接に行った。

ｂ．民間等との共同研究

１） Yuna Kim（兵庫県立大学）：「非対称白金錯体エレクトロクロミック材料の開発」、2018 年度、久保和也

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

１） Yuna Kim: “Development of unprecedented multifunctional fluorescent tetrazines and their advanced organic device applications” Prof. Pierre Audebert, Dr. Clémence Allain, Laboratoire de Photophysique et Photochimie Supramoléculaires et Macromoléculaires, École Normale Supérieure Paris-Saclay, France

２） Yuna Kim: “Facile fabrification of photoresponsive cholesteric liquid crystal microcapsules based on microfluidic channel” Prof. Shin-Hyun Kim, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, Korea

３） 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密接に行った。

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）　玉置信之、基盤研究Ｂ（代表）、「光異性化反応によるモータータンパク質の駆動の試み」、2018～2020 年度

２）　相良剛光、基盤研究Ｂ（代表）、「シクロファン型超分子メカノフォアの開拓と高分子材料への応用展開」、2018～2021 年度。

３）　Yuna Kim、基盤研究 Ｂ（分担）、「シクロファン型超分子メカノフォアの開拓と高分子材料への応用展開」、2018～2021 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）　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。

３）　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。

４）　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。

５）　Yuna Kim、公益財団法人マツダ財団研究助成、光・電場に鋭敏に応答するコレステリック液晶マイクロカプセルの創製、2018～2019 年度

６）　Yuna Kim、第 2 回総長奨励による若手教員海外派遣支援事業、2018～2019 年度

７）　相良剛光、公益財団法人　高橋産業経済研究財団　平成 30 年度研究助成（代表）、「生細胞が外部に及ぼす力を定量評価するためのメカノプローブの創製」、2018 年度。

８）　松尾和哉、公益財団法人　ノーステック財団、札幌タレント補助金、「モータータンパク質の光制御による細胞機能の解明」、2018 年度

９）　松尾和哉、公益財団法人　武田科学振興財団　2018 年度ライフサイエンス研究助成、「細胞の癌化メカニズムの解明に向けた分裂期染色体のピンポイント光操作」、2018～2020 年度

１０）松尾和哉、公益財団法人　ホクト生物科学振興財団、平成 30 年度研究奨励金、「モータータンパク質を標的としたオプトバイオテクノロジーの確立」、2018 年度

１１）松尾和哉、公益財団法人　津川モーター研究財団、平成 30 年度　研究助成金、「DDS を指向した光制御型生体分子モーターによるソフトアクチュエーターの開発」、2018～2019 年度

１２）松尾和哉、公益財団法人　東京生化学研究会、平成 30 年度研究奨励金、「生体分子機械を光制御するための分子戦略と細胞工学の新手法」、2018～2019 年度

１３）松尾和哉、公益財団法人　野口研究所、第 10 回　野口遵研究助成金、「オプトケミカルサージェリー技術の確立」、2018～2019 年度

１４）松尾和哉、公益財団法人　コニカミノルタ画像科学振興財団、コニカミノルタ画像科学奨励賞（優秀賞）、「細胞内バイオマシンのピンポイント光操作系の構築」、2018～2019 年度

4.10　受賞

１）　松尾和哉、公益財団法人　コニカミノルタ画像科学振興財団、コニカミノルタ画像科学奨励賞（優秀賞）、「細胞内バイオマシンのピンポイント光操作系の構築」、2019 年 2 月 27 日

２）　Noushaba Nusrat Mafy、公益社団法人　日本化学会、日本化学会第 99 春季年会（2019）学生講演賞、Dynamic Photocontrol of CENP-E and Chromosome Movements During Cell Division、2019 年 3 月

4.11　社会教育活動

ａ．公的機関の委員

１）　Yuna Kim: Advisory board, Industrial R&D Project Planning and Verification Team, Korea Institute for Advancement of Technology, Korea (2018.11～present)

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～）

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

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）　理学部、生物系の熱力学、玉置信之、2018 年 4 月 16 日～6 月 12 日

２）　全学教育、はじめての生命科学、玉置信之、2018 年 4 月 16 日

３）　生命科学院、生命融合科学概論、玉置信之、2018 年 5 月 17 日

４）　全学教育、ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命、玉置信之、2018 年 5 月 25 日

５）　大学院共通, Communicating Your Research, Yuna Kim, 2018 年 4 月～9 月

６） 生命科学院、生命物質科学特論（分子組織科学)、玉置信之、2018 年 7 月 9 日～8 月 6 日

７） 大学院共通講義, Hokkaido Summer Institute「Light-Matter Interactions at the Nano/molecular Scale-I, “Molecular Machines: Nano Meets Macro”」Yuna Kim, 2018 年 7 月

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

１） 国立台湾交通大学　創発機能物質科学研究センター・応用化学科, NCTU - 5Star Alliance Lectures 2018「Current Topics in Emergent Materials and Devices, “Light-driven artificial molecular machines”」Yuna Kim, (2018-10)

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） Ammathnadu Sudhakar Amrutha（博士研究員）

２） 李潔（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人

１） 芦野史弥:様々なアゾベンゼン型三リン酸誘導体を用いたキネシンの光運動制御 Photoswitching of kinesin activity with various azobenzene-based triphosphates

博士学位：１人

１） MD. JAHIRUL ISLAM：Study on the Effect of Chemical Structures of Photo-Responsive Non-Nucleoside Triphosphates on the Interaction with Motor Proteins（光応答性非ヌクレオシド三リン酸の化学構造がモータータンパク質との相互作用に与える影響に関する研究）

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　　伊藤 蓮(M2)
　　石田 雄一(M1)
　　黄倉 侑人(M1)
　　小森 至瑠(B4)

１．研究目標

より高位の統合を図るべくアトム(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、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と共に、ナノ構造とマクロシステムの良好な結合を目指している（図１）。

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。

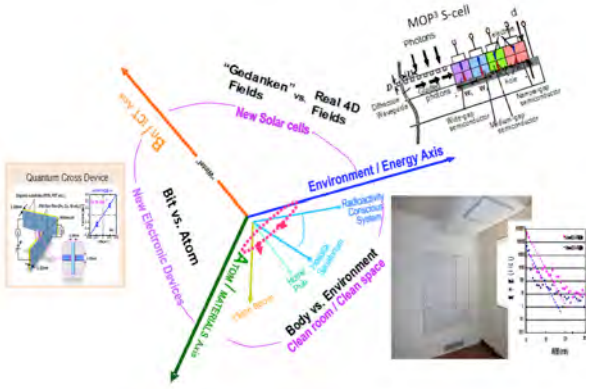


図1. ABE^2 空間における多角的な展開

２．研究成果

(a)　次世代高機能デバイス・システム

(a1) 新型高効率光電変換システム

太陽電池の高効率化と光によるワイヤレス電力輸送は今後益々重要となって来る。従来型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、我々が目指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、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。3 次元伝搬光の２次元導波光化における導波路構造に対する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

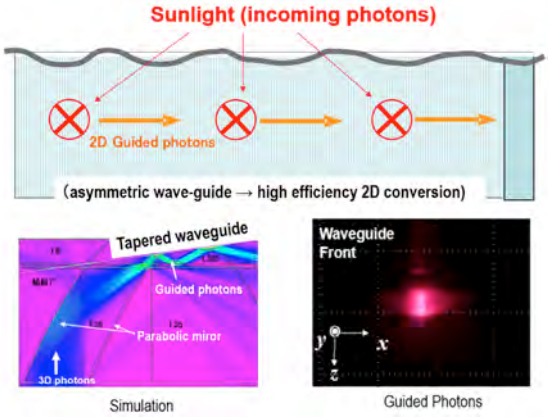


図 2. 新型光電変換システムの上面図と、非対称導波路の一つである周期配列放物線鏡とテーパー導波路を結合した系における光導波シミュレーション(左下)、及びその実機における光導波実験結果(右下)。

（リディレクション導波路）の一つとして、図２左下内挿図に示すような周期配列した放物線鏡とテイパー導波路を組み合わせた新しい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左下に示すように良好な導波特性がシミュレーションにより示され、また３Ｄプリンティングにより実際にこの構造を作製して、良好な光導波が得られることを実験的に示した。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。光ビームのふらつきに強い光無線給電装置の集光部としての応用など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

CUSP の応用範囲として、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や病院へも展開できる。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、CUSP の 100%循環環境で内部の空気質を良好なものに維持するための装置である Gas Exchange Unit (GEU)の開発を行った。図３の内挿図に示すように、一種の“4 端子デバイス”であり、室内気体(内気)用に 2 開口部を、外気用に 2 開口部を有する。一般に用いられる建築物の給気口に外気部を直列に接続し、部屋への空気導入部と部屋からの排気口を上記 GEU の内気用 2 端子に接続することで、部屋内部へのフレッシュエアの供給を行うことができる。そのメカニズムは図３に示すようなガス交換膜を多数枚積層した構造において、各ガス交換膜の片側へは内気をその反対側には外気を導入し、両者は決して交わらないようにしつつ、もし両者の間に各種ガス分子の濃度に差があるときのみ、濃度勾配によって拡散を生じさせ、必要な酸素の濃度を保ったり、上昇した二酸化炭素濃度を正常値に下げることが可能である。この GEU と併行してファンフィルターユニット(FFU)を用いて CUSP 動作させることで、一般的な中性能フィルターであっても、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 級という、通常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る。GEU を併用することで CUSP は孤立・閉鎖環境性を維持することができ、それを最大限に活用することで、原子力発電所施設や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）へ展開できる。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できる。今回開発した GEU を有する CUSP システムにより生活のいろいろな局面でより高度な安心・安全の向上を図ることができる。

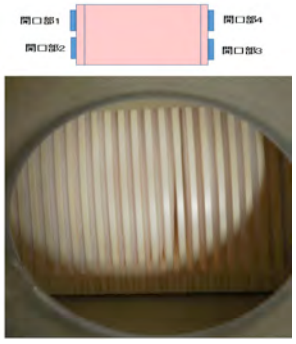


図３　新型のガス交換ユニット(GEU)：全体図(上)および開口部から覗いた内部の様子(下)。

(b)理論:高次トポロジカル絶縁体の電子状態

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を行い、物理学への新しい知見を導入することを目的としている。その中で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、スピントロニクスなどの工学にも寄与することを目指している。今年度の成果は以下のものである。

2018 年 6 月に従来のトポロジカル絶縁体とは異なる“高次トポロジカル絶縁体”の概念が Science Advances で発表された。それを受けて、彼らの論文で使用されたハミルトニアンを用いて、具体的な電子状態の計算等を行った。まず、高次トポロジカル絶縁体の概念を説明する。

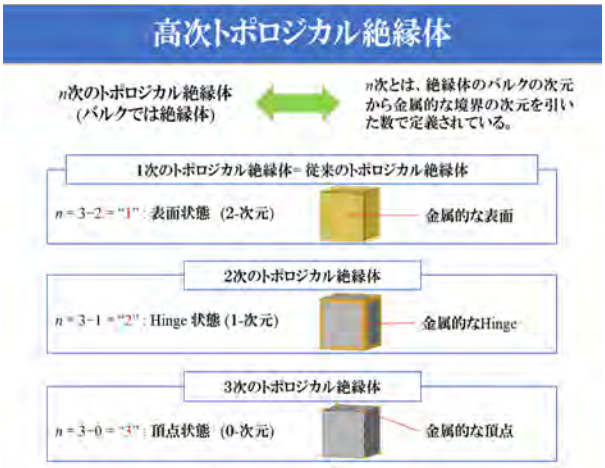


図 4：高次トポロジカル絶縁体の概念図

図 4 にあるように、高次といっているのは、gapless 状態の次元の余次元があがるので、高次と呼んでいる。例えば、3 次元において、2 次元表面の gapless 状態の場合、その余次元は３－２＝１なので、1 次のトポロジカル絶縁体＝従来のトポロジカル絶縁体である。一方、ヒンジ（もしくは辺）にしか gapless 状態がない場合、その余次元は３－１＝２なので、2 次の高次トポロジカル絶縁体となる。そこで、この 2 次のトポロジカル絶縁体である以下のハミルトニアン $\boldsymbol{H}$ の電子状態をスラブ構造で計算した。使用したパラメーターは、$M/t=2.0,\ \Delta_1/t=1.0,\ \Delta_2/t=1.0$ である。図 5 はバンド図、図 6 はそれに対応する電子密度図である。

$$H(\boldsymbol{k}) = \left(M + t\sum_i \cos k_i \right) \tau_z \otimes \sigma_0 + \Delta_1 \sum_i \sin k_i \tau_x \otimes \sigma_i$$
$$+\Delta_2 \left(\cos k_x - \cos k_y \right) \tau_y \otimes \sigma_0$$

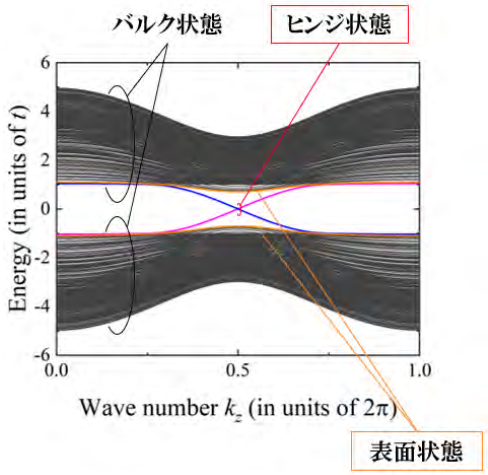


図５：２次トポロジカル絶縁体のバンド図

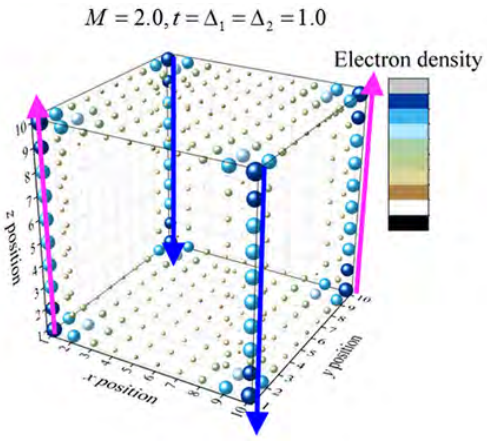


図６：２次トポロジカル絶縁体の電子密度

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。後者では、CUSP 清浄環境の医療展開も視野に入れる。前者では、高効率の太陽電池を目指し、新しいリディレクション導波路の作製と共に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を実現して、全太陽光スペクトルに亘って光電変換を実行することを目指す。また上記新型導波路の光無線給電応用も図る。新型太陽電池においては、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。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) *T. Hsieh, A. Ishibashi, M. Yasutake and S. Liang: “Tent-type Clean Unit System Platform for Sleep Environment Enhancement and non-contact Sleep Assessment”, *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.*, 124(S3) (to be published) (2019)

2)* A. Ishibashi, M. Yasutake, T. Hsieh and S. Liang: “Clean Unit System Platform for Exercise Science and Sports Medicine”, *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.*, 124(S3) (to be published) (2019)

3)* A. Ishibashi, T. Kasai and N. Sawamura: “Redirection Waveguide having Discrete Translational Symmetry for Photovoltaic Systems with Solar-Cell Units Placed at the Periphery”, *Energies*, 11: 3498-1-3498-9 (2018)

4)* A. Ishibashi, N. Noguchi, T. Etoh, J. Matsuda, Y. Ohashi, “Clean Unit System Platform (CUSP) based upon 100%-feedback closed system”, *Proc. 35th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*: 38-41 (2018)

5)* M. Inoue, K. Inubushi, D. Mouri, T. Tanimoto, K. Nakada, K. Kondo, M. Yamamoto, and T. Uemura:” Origin of biquadratic interlayer exchange coupling in Co2MnSi-based current-perpendicular-to-plane pseudo spin valves”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.114, 062401/1-5 (2019)

6) * K. Kondo and R. Itoh: ″Quantum spin Hall phase in honeycomb nanoribbons with two different atoms: edge shape effect to bulk-edge correspondence″, *Journal of Physics Communications*, 3 055007 (2019).

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

該当なし

・国際特許

1) 石橋 晃：PCT/JP2018/035015、光導波装置、光電変換装置、建築物、電子機器、移動体および電磁波導波装置、2018 年 09 月 21 日

4.6 講演

1) A. Ishibashi: “Multi-striped orthogonal photon-photocarrier-propagation solar cells (MOP3SCs) with new asymmetric redirection waveguides”, Advanced Energy Materials 2018, Finnstown Castle Hotel, Dublin, Ireland (2018-08)

2) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya and T. Komatsuzaki, “Normal forms in singularity theory for geometric classifications of band structures”, TraX International Conference, Madrid, Madrid (Spain) (2018-05).

3) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya and T. Komatsuzaki,” Normal forms in singularity theory for geometric classifications of local band structures”, Telluride Workshop ″Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases”, Telluride (United States) (2018-07).

4) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki,” Normal Forms in Singularity Theory for Geometric Classifications of Band Structures”, Dynamics Days Europe 2018, Loughborough (United Kingdom) (2018-09).

b. 招待講演 (国内学会)

1) A. Ishibashi*, N. Sawamura, T. Matsuoka, H. Kobayashi and T. Kasai : “Multi-striped Orthogonal Photon-Photocarrier Propagation Solar Cell (MOP3SC) in Waveguide-Coupled Scheme”, 第 28 回日本 MRS 年次大会(2018-12)

c. 一般講演（国際学会）

1) A. Ishibashi, T. Kasai, Y. Ohkura and N. Sawamura：“Redirection Waveguide for Concentration Solar Cell Systems”, The 19th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2018-12)

2) R. Itoh* and K. Kondo,” Fermi arcs for Weyl semimetals and line-node semimetals in topological insulator superlattice”, 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS10), Austria (Linz) (2018-08).

3) Y. Ishida* and K. Kondo, “A Dependence of the Skyrmion Hall Effect on the Gilbert Damping Constant”, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo (The University of Tokyo) (2018-09).

4) S. Komori* and K. Kondo: “Manifestation of Quantum Anomalous Hall Phase in Modified Qi-Wu-Zhang Model”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium ″So″, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan (2018-12).

5) R. Itoh* and K. Kondo: “A Study of Fermi Arcs for Weyl Semimetals and Line-Node Semimetals”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium ″So″, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan (2018-12).

6) Y. Ishida* and K. Kondo: “Influence of the Gilbert

Damping Constant on the Skyrmion Hall Effect”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium ″So″, Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan (2018-12)

ｄ．一般講演（国内学会）

7) 石橋 晃*、黄倉 侑人、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離散的併進対称性を有する新しい非対称導波路構造 」、日本応用物理学会 2019年春季大会、東京工業大学（大岡山）、Japan (2019-03)

8) 石橋 晃*:「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池の非対称導波路の進展とクリーン環境ＣＵＳＰの展開」、平成30年度 物質・デバイス領域共同研究拠点事業『新型太陽電池並びに清浄環境の新展開～ 次世代デバイス・システムの展望』研究会（電子研学術講演会） 、北海道大学、Japan (2018-07)

9) 石橋 晃*、野口 伸守、江藤 月生、松田 順治、大橋 美久：「孤立・閉鎖系高清浄環境クリーンユニットシステムプラットフォーム 」、第35回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会、早稲田大学国際会議場 (2018-04)

10) 小森 至瑠*、近藤 憲治：“高次トポロジカル絶縁体で発現するヒンジ状態のロバスト性”、日本物理学会第74回年次大会、福岡（九州大学）(2019-03)．

11) 伊藤 蓮*、近藤 憲治: “2種類の原子を加えたHoneycombナノリボンにおける2次元量子スピンホール相の研究”, 第66回応用物理学会春季学術講演会、目黒区(東工大)、(2019-03).

12) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki,” 結晶点群、時間反転対称性の下でのバンド構造の幾何学的分類 特異点論の観点から”、 第65回トポロジーシンポジウム 松本市 （2018-08）．

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1) M. Yasutake and A. Ishibashi*: “Clean Unit System Platform for Materials Research and Beyond”, 第28回日本MRS年次大会～循環型社会のためのマテリアルズイノベーション B4-P19-049, 北九州国際会議場 (2018-12)

2) 大橋 美久、松田 順治*、石橋 晃 ：「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)の近況の紹介 」、平成30年度北海道トライアル新商品展示会、北海道庁 (2019-02)

3) 松田 順治*、石橋 晃:「一家に１部屋「どこでもクリーンルーム」！！」、第32回ビジネスEXPO 2018、アクセスサッポロ(札幌市) (2018-11)

4) 松田 順治*、石橋 晃:「CUSPがもたらす高清浄環境の福祉機器応用～「どこでもクリーンルーム」」、第45回国際福祉機器展示会～45th International Home Care & Rehabilitation Exhibition、東京ビッグサイト (2018-10)

5) 石橋 晃*、澤村 信雄、河西 剛:「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池用のた めの新しい非対称導波路 」、平成30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）(2018-10)

6) 石橋 晃*、安武 正弘 ：「ミニマルファブとシナジーを発揮するクリーンユ ニットシステムプラットフォーム (CUSP)の医療・介護応用展開可能性 」、平成30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）(2018-10)

7) 石橋 晃*、河西 剛、近藤 憲治、澤村 信雄: フォトン・フォキャリア直交型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の作製評価」、第8回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会及び平成29年度ダイナミック・アライアンス成果報告会 ～拠点・アライアンスの大学機能強化への貢献～ 、北海道大学、Japan (2018-06)

8) 石橋 晃*、河西 剛、近藤 憲治、澤村 信雄: 周期配列放物線鏡付テーパー導波路具有光子・フォトキャリア直交型半導体太陽電池」、PV Japan 2018、Pacifico 横浜（横浜市） (2018-06)

9) 石橋 晃*、安武 正弘、松田 順治、大橋 美久: フォトン・フォトキャリア直交型半導体太陽電池プラットフォーム及び孤立閉鎖系清浄環境としてのクリーンユニットシステムプラットフォーム（ＣＵＳＰ)」、PV Japan 2018、Pacifico 横浜(横浜市)、Japan (2018-06)

10) 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太陽電池用非対称 導波路のミニマルファブによる作製可能性 」、平成30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) (2018-04)

11) 石橋 晃*、野口 伸守、江藤 月生、松田 順治、大橋 美久 ：「CUSP（クリーンユニットシステムプラットフォーム） 開発過程で発見した新技術「拡散換気」のミニマルファブ応用可能性 」、平成30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）(2018-04)

4.7 シンポジウムの開催

1) 石橋 晃 :「平成30年度物質・デバイス領域共同研究拠点事業研究会『新型太陽電池並びに清浄環境の新展開～次世代デバイス・システムの展望』」、12人、北海道大学電子科学研究所1階会議室 (札幌) (2018年07月13日)

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

1) 榎本 良治、石橋 晃(東京大学宇宙線研究所)：「放射線検出器γＩと清浄環境ＣＵＳＰの結合の展開」、
2) 松岡 隆志、石橋 晃(東北大学金属材料研究所)：「ラテラル方向に組成の傾斜したInGaAlN層に基づくマルチストライプ フォトン･フォトキャリア直交型太陽電池の研究」
3) 安武 正弘、石橋 晃(日本医科大学)：「新型高清浄環境技術（CUSP)による高齢者ウェルネス・健康増進への応用」
4) 久保 耕司、石橋 晃(帝人株式会社フィルム事業本部)：「左右非対称リディレクション導波路の検討 」
5) 松田 順治、石橋 晃(飛栄建設株式会社)：「清浄環境ＣＵＳＰの活動・居住・静養空間展開及び食品加工分野展開の検討」

c. **委託研究**

1) 石橋 晃(飛栄建設株式会社, 株式会社石橋建築事務所, 有限会社近代設備設計事務所, シーズテック株式会社)：「CUSP清浄環境に向けたガス交換ユニット(GEU)の開発」

d. **国際共同研究**

1) Sheng-Fu Liang, National Cheng Kung University, Taiwan: ”Sleep analysis using Clean Unit System Platform (CUSP)”

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、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：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」
3) 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」
4) 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) 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): 250千円：「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**

B4学生 小森至瑠君が、優秀な卒業研究にたいして表彰される「北大理学部同窓会賞」を受賞：卒業研究発表題目:「Manifestation of Hinge States in Higher-order Topological Insulators」

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 ： レーザー学会光無線給電技術専門委員会委員
2）Akira Ishibashi : Optical Wireless Power Transmission Conference, Program Committee
3）石橋 晃 ： 第28回日本MRS年次大会オーガナイザー
4）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: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

1) Ttsung-Hao Hsieh、National Cheng Kung University,Taiwan

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、2018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、2018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、2018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、2018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、2018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、2018年4月1日～2018年8月31日
7) 理学院、物理学特別研究I、近藤憲治、2018年4月1日～2019年3月31日
8) 理学院、物理学論文輪講、近藤憲治、2018年4月1日～2019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、2018年4月1日～2018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

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

〇卒論指導

(石橋　晃)

１) 修士論文副査: 伊藤　蓮「２種原子からなるハニカム・ナノリボンの2 次元量子スピンホール相の理論研究」

（近藤憲治）

１）小森 至瑠（理学部物理）:「Manifestation of Hinge States in Higher-order Topological Insulators」

２）修士論文主査: 伊藤　蓮「２種原子からなるハニカム・ナノリボンの2 次元量子スピンホール相の理論研究」

３）修士論文副査:大内まり絵（理学院物性物理学専攻）:「超伝導渦電荷の微視的理論」

〇博士論文副査（近藤憲治）

１）Xiaotian Si（理学院物性物理学専攻）:「Number-Phase Fluctuations in Isolated Superconductors」

薄膜機能材料研究分野

教　授　　太田裕道（東工大、博士(工学)、2012.9～）
准教授　　山ノ内路彦（東北大、博士(工学)、2014.5～）
助　教　　Hai Jun Cho（トロント大学、Ph.D、2018.4～）
ポスドク　Anup Sanchela（IIT Bombay、Ph.D、2016.7～）
事務補助員　春日さと子　(2016.10～2018.3)
博士課程　張　雨橋、小野里尚記、魏　冕、キム ゴウン（情報科学研究科）
特別研究学生　梁　豆豆（USTB，中国）
修士課程　小山田達郎、根津有希央、呉　宇璋、佐藤晃一、須郷堅雄（情報科学研究科）
研究生　龔　李治坤
学部学生　橋本大輝、酒井貴樹、井口璃音、藤本卓嗣（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」、「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)　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。

(c) 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。強磁性酸化物の中には、電気的な磁化方向検出の高感度化が期待されるハーフメタル性を示すものや、高効率な電流誘起磁壁移動を示すものがあるが、強磁性酸化物を用いたスピントロニクスデバイスに関する研究は少なく、強磁性酸化物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。そこで強磁性酸化物をベースとする積層構造において、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。

(d) 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

<u>(a) 酸化物熱電変換材料</u>

2017年度に取り組んだ$SrTiO_3$系酸化物人工超格子の研究成果がNature Communications誌に掲載された後、$SrTiO_3$-$SrNbO_3$系全率固溶体の熱伝導率の計測を行っている。結果はまだまとまっていないが、電子伝導を担うキャリアがポーラロンか否かによって、熱伝導率が大きく異なるというデータが得られ、現在も多くの共同研究者を巻き込みんで研究を行っている。

(b) 酸化物自然超格子$InGaO_3(ZnO)_m$のKapitza抵抗

極めて低い熱伝導率 κ を示すセラミックスは、熱電変換材料や遮熱コーティングなどの熱管理・応用技術にとって本質的に重要な材料である。熱を運搬するフォノンは、異種接合界面に存在するKapitza抵抗によって効率良く散乱されるため、原子レベルの積層構造（超格子）を作製することは、セラミックスの κ を最小にする有効なアプローチである。しかし、人工超格子は、大面積化が困難であるが故、大面積が必要な用途での実用化には不向きである。

これに対し、天然の超格子構造をもつ材料はスケールアップにも適している。これまでに自然超格子$InMO_3(ZnO)_m$（M = In、Fe、およびGa、m =自然数）多結晶体の低い κ が報告されたが、結晶方位・粒径が揃っていない多結晶体が用いられたため、Kapitza抵抗の効果を明らかにすることは不可能であった。

本研究では、Kapitza抵抗に由来する自然超格子の非常に低い κ を報告する。我々は、反応性固相エピタキシャル成長法により$InGaO_3(ZnO)_m$単結晶薄膜 (m=3, 4, 5, 7, 10, 15, 35) を作製し、超格子に対して垂直方向の κ を測定した(図1)。超格子周期 d_{SL} が1.93 nmよりも長い場合、界面密度 d_{SL}^{-1} に比例して熱抵抗が増加し、InO_2^-/ $GaO(ZnO)_m^+$ 界面でフォノン輸送が抑制されることがわかった。このときのKapitza抵抗は1.64 m^2 K GW^{-1}であり、最小 κ は1.12 W m^{-1} K^{-1} (m = 5) であった。これはセラミックの約1/3の値であり、アモルファス$InGaZnO_4$よりも低い(図2)。本研究の結果は、今後益々重要になる高度な熱管理技術の材料設計に役立つであろう。

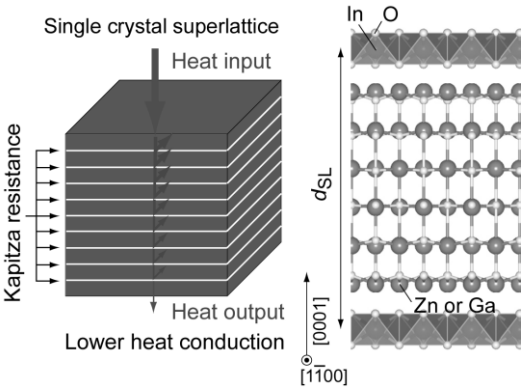


FIG. 1 | Hypothesis. The ballistic phonon transport in perpendicular to the superlattice is suppressed at the boundary between two different layers (Kapitza resistance) in the natural superlattice oxide.

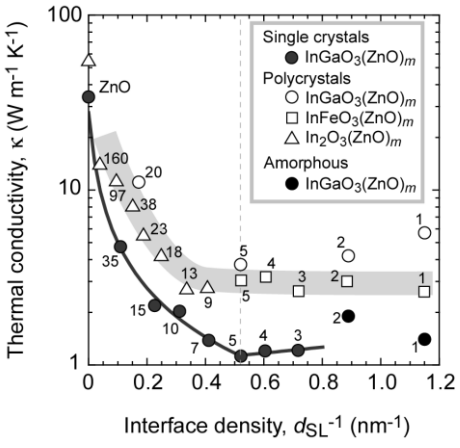


FIG. 2 | Thermal conductivity. Thermal conductivity (κ) of the resultant $InGaO_3(ZnO)_m$ films normal to the film surface. The κ drastically decreases with the interface density d_{SL}^{-1} when the d_{SL}^{-1} is less than 0.52 nm^{-1} (d_{SL}=1.93 nm) whereas it upturns when the d_{SL}^{-1} is greater than 0.52 nm^{-1}. The minimum κ was 1.12 W m^{-1} K^{-1} (m=5), which is approximately 1/3 of the ceramics. Very low κ (similar to the amorphous one) of the natural superlattices is originated by Kapitza resistance.

(c) 深紫外透明酸化物半導体$SrSnO_3$

波長300 nm 以下の深紫外光を透過する透明電極が実現すれば、例えば深紫外 LED を用いた新たな発光素子や光検出器の開発に繋がる。我々は、透明酸化物半導体として知られる $BaSnO_3$の Ba を Sr に置換することで、バンドギャップを深紫外域まで拡大し、深紫外透明酸化物半導体の開発を目指す。

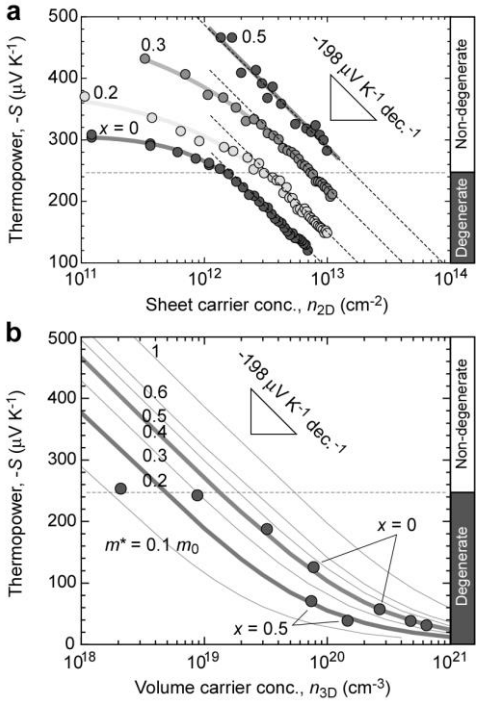


FIG. 3 | (a) Electric field modulated thermopower and (b) bulk thermopower. From these thermopower data, effective thickness of the channel for the TFT can be estimated.

まず、$Ba_{1-x}Sr_xSnO_3$エピタキシャル薄膜を作製し、その薄膜上に三端子トランジスタを形成した。トランジスタ特性の計測に加えて、ゲート電圧印加中にチャネルの熱電能（**図3**）を計測することで、電子状態に関する考察を行った（**図4**）。Sr 置換を行うことでキャリア有効質量は減少したが、バンドギャップが増大したため、通常のゲート電界では十分にキャリアを蓄積できないことが示唆された。この成果は、2019年1月に独科学誌 Small に掲載された。

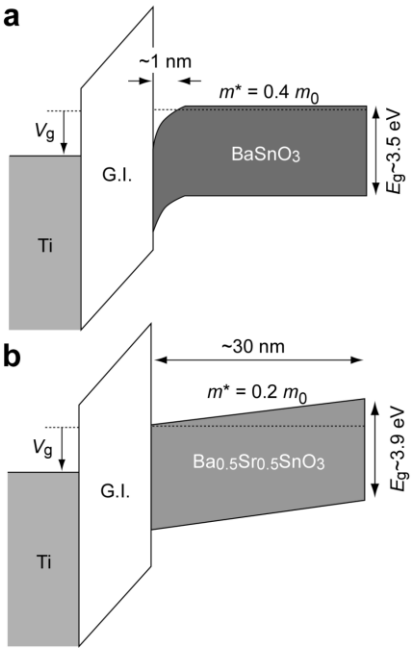


FIG. 4 | Schematic electric field carrier accumulation of $BaSnO_3$ TFT and $Ba_{0.5}Sr_{0.5}SnO_3$ TFT. The effective channel thickness (t_{eff}) of $BaSnO_3$ TFT is ~1 nm, whereas $Ba_{0.5}Sr_{0.5}SnO_3$ is ~30 nm. The carrier effective mass of $BaSnO_3$ is ~0.4 m_0, whereas $Ba_{0.5}Sr_{0.5}SnO_3$ is ~0.2 m_0.

(d) 強磁性酸化物 $SrRuO_3$における電流誘起磁壁移動

電流誘起磁壁移動を利用したスピントロニクス素子は、高速・低消費電力な不揮発性ランダムアクセスメモリや不揮発性ロジックへの応用が期待されている。しかし、磁壁移動に必要な閾値電流密度の低減が課題となっている。強磁性酸化物 $SrRuO_3$においては、一般的な強磁性金属よりも1-2桁低い電流密度で磁壁移動が報告されており、その機構を明らかににすることにより、高効率な電流誘起磁壁移動の手がかりが得られると期待される。そこで、$SrRuO_3$における電流誘起磁壁移動の機構を明らかにするために、磁壁移動の保磁力の電流依存性を調べた。

パルスレーザー堆積法を用いて作製した膜厚21 nm の $SrRuO_3$薄膜をフォトリソグラフィと Ar イオンミリングによってチャネル幅5 μm のホールバー形状素子に加工した。そして、膜面垂直方向の磁場でチャネル内の磁化方向を揃えた後、チャネル内に磁壁を導入した。続いて、チャネルに電流を印加し、膜面垂直方向の磁場を掃引したときの横抵抗の変化から磁壁移動の保磁力を求めた。図5に異なる温度で求めた保磁力の電流依存性を示す。正(負)電流は外部磁場による磁壁移動方向と平行(反平行)方向の電流である。保磁力は電流に対して線形に変化する。このことから、電流は磁壁に対して膜面垂直方向の磁場と等価な有効磁場として作用すると考えられる。また、電流方向と保磁力の変化の関係から、有効磁場の方向は電流方向に磁壁を移動させる方向である。この有効磁場の大きさは磁壁内での伝導電子スピンのスピン緩和に起因したフィールドライクトルクによって良く説明できる。また、$SrRuO_3$のスピン偏極率が負であることを考慮すると、磁壁移動方向もこのトルクにより説明できる。したがって、$SrRuO_3$の電流誘起磁壁移動は、このフィールドライクトルクによるものと考えられる。本研究で明らかになったフィールドライクトルクと $SrRuO_3$の物性の関係を明らかにすることによって、高効率な電流誘起磁壁移動のための指針が得られると考えている。

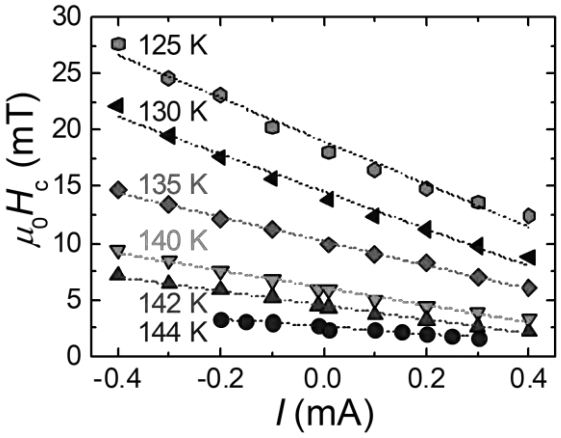


FIG. 5 | Current (I) dependence of coercive field ($\mu_0 H_c$) for domain wall motion at various temperature. The values of H_c are modulated linearly by current.

3．今後の研究の展望

水を利用した遷移金属酸化物の光・電気・磁気記憶デバイスの開発については、大学の研究室で実施可能な基礎研究はほぼ完了した。現在は、共同研究先企業とともに実用化研究を行っている。今後は超構造を有する物質や、金属-絶縁体転移を起こす物質の熱伝導率に注目し、熱伝導を電気的に制御するデバイスの開発を行ってみたい。スピントロニクスデバイスについては、今年度に得られた知見をもとに、強磁性酸化物をベースとする積層構造を用いて電流誘起有効磁場の高効率発生、及び電流誘起磁壁移動デバイスの開発に取り組む。なお、機能性酸化物の薄膜化・デバイス化に関する基礎研究については、今後も国内外の大学・研究機関を中心として共同研究を広く展開し、世の中で役立つ材料・デバイス開発に貢献する。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1) Keisuke Nakamura, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Ta-kayoshi Katase, Hiromichi Ohta, and Hiroaki Misawa, “Plasmon-Assisted Polarity Switching of a Photoelectric Conversion Device by UV and Visible Light Irradiation”, J. Phys. Chem. C 122, 14064-14071 (2018). 【電子研内共著】

2) Yuqiao Zhang, Bin Feng, Hiroyuki Hayashi, Cheng-Ping Chang, Yu-Miin Sheu, Isao Tanaka, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta*, “Double thermoelectric power factor of a 2D electron system”, Nature Communications 9, 2224 (2018).

3) Anup V. Sanchela*, Mian Wei, Haruki Zensyo, Bin Feng, Joonhyuk Lee, Gowoon Kim, Hyoungjeen Jeen, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta*, “Large thickness de-pendence of the carrier mobility in a transparent ox-ide semiconductor, La-doped $BaSnO_3$“, Appl. Phys. Lett. 112, 232102 (2018).

4) Jason Tam, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hiromichi Uwe Erb*, “Crystallographic orientation - surface energy - wetting property relationships of rare earth oxides”, **J.** Mater. Chem. A 6, 18384-18388 (2018).

5) Rongbin Wang, Takayoshi Katase, Ke-Ke Fu, Tianshu Zhai, Jiacheng Yang, Qiankun Wang, Hiromichi Ohta, Norbert Koch,* and Steffen Duhm*, “Oxygen vacancies allow tuning the work function of vanadium dioxide”, **Adv.** Mater. Interfaces 5, 1801033 (2018).

6) Gowoon Kim, Yu-Qiao Zhang, Taewon Min, Hoyoung Suh, Jae Hyuck Jang, Hyeonjun Kong, Joonhyuk Lee, Jaekwang Lee, Tae-Yeol Jeon, Inwon Lee, Jinhyung Cho, Hiromichi Ohta* and Hyoungjeen Jeen*, “Extremely light carrier effective mass in a distorted simple metal oxide”, Adv. Electron. Mater. 5, 1800504 (2019).

7) Hai Jun Cho*, Takaki Onozato, Mian Wei, Anup Sanchela, and Hiromichi Ohta*, “Effects of vacuum an-nealing on the electron mobility of epitaxial La-doped $BaSnO_3$ films”, APL Mater. 7, 022507 (2019).

8) Kaito Kanahashi, Naoki Tanaka, Yoshiaki Shoji, Mina Maruyama, Il Jeon, Kenji Kawahara, Masatou Ishihara, Masataka Hasegawa, Hiromichi Ohta, Hiroki Ago, Yutaka Matsuo, Susumu Okada, Takanori Fukushima, and Taishi Takenobu*, “Formation of environmentally stable hole-doped graphene films: Instantaneous and high-density carrier doping by a boron-based oxidant”, npj 2D Materials and Applications 3, 7 (2019).

9) Anup V. Sanchela*, Mian Wei, Hai Jun Cho, and Hi-romichi Ohta*, “Thermopower modulation clarification of the operating mechanism in wide bandgap $BaSnO_3$—$SrSnO_3$ solid-solution based thin film transistors”, Small 15, 1805394 (2019).

10) Michihiko Yamanouchi*, Tatsuro Oyamada, Koichi Sato, Hiromichi Ohta, and Jun’ichi Ieda, “Current-induced modulation of coercive field in the ferromagnetic oxide $SrRuO_3$“, IEEE Transactions on Magnetics (DOI: 10.1109/TMAG.2019.2894897).

11) Takaki Onozato, Yukio Nezu, Hai Jun Cho, and Hi-romichi Ohta*, “Fast operation of a WO_3-based sol-id-state electrochromic transistor”, AIP Advances 9, 025122 (2019).

12) Michihiko Yamanouchi*, Tatsuro Oyamada, and Hi-romichi Ohta, “Peculiar magnetotransport properties in $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/LaAlO_3/SrTiO_3$“, AIP Advances 9, 035129 (2019).

13) Hai Jun Cho*, Gowoon Kim, Takaki Onozato, Hyoung-jeen Jeen, and Hiromichi Ohta, “Thermal conductivity tensor of NbO_2“, International Journal of Heat and Mass Transfer 137, 263 (2019).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） T. Katase and H. Ohta, “Oxide-based optical, electrical, and magnetic properties switching devices with wa-ter-incorporated gate insulator”, Jpn. J. Appl. Phys. 58, 090501 (2019).

２） 太田裕道, 張 雨橋, “薄い電子層を絶縁体でサンドイッチ：熱電変換特性を高める方法”, **車載テクノロジー** 6[5], 38 (2019).

３） Yuqiao Zhang and Hiromichi Ohta, “Electron sandwich doubles the thermoelectric power factor of $SrTiO_3$“, Phys. Status Solidi A, 1800832 (2019). Back Cover

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） 太田裕道、小野里尚記：特願 2018-243861、「エレクトロクロミックトランジスタ、電子カーテン、情報表示記憶装置および防眩ミラー」、2018 年 12 月 27 日 出願

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） Hiromichi Ohta, “Electric field thermopower modulation of two-dimensional electron gas”, The 25th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and De-vices - TFT Technologies and FPD Materials -

(AM-FPD 18), Ryukoku University Avanti Kyoto Hall, Kyoto, Japan, 3rd-6th July, 2018 (Invited)

2） Hiromichi Ohta, "Double enhancement of thermoelectric power factor in two-dimensional electron system", the 16th International Nanotech Symposium & Nano-Convergence Exhibition, NANO KOREA 2018, KINTEX, Ilsan, Korea, July 10-13, 2018 (Invited)

3） Hiromichi Ohta, "Thermopower of 2D electron systems", The 2018 International Symposium for Advanced Ma-te-rials Research (ISAMR 2018), Sun Moon Lake, Taiwan, August 16-19, 2018 (Invited)

4） Hiromichi Ohta, "Development of three-terminal elec-trochromic device using water electrolysis", IUMRS-ICEM 2018, Daejeon, South Korea, 19th-24th August, 2018 (Invited)

5） Hiromichi Ohta, "Double thermoelectric powerfactor of a 2D electron system", the International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green En-vironment (ENGE 2018), Jeju, South Korea, 11th-14th November, 2018 (Invited)

b．招待講演（国内学会）

1） 太田裕道，"二次元電子層の Seebeck 効果－人工超格子と電界誘起二次元電子ガスー"，物性談話会，名古屋大学，愛知県名古屋市，2018 年 6 月 14 日（招待講演）

2） 太田裕道，"捨てられている熱を電気に変える熱電変換材料"，国立大学共同利用・共同研究拠点協議会 知の拠点セミナー，京都大学東京オフィス（東京都・千代田区），2018 年 7 月 20 日

3） 太田裕道，"熱電材料の二次元薄膜化と特性向上"，日本学術振興会 161 委員会 研究会，Hotel & Resort KYOTO-MIYAZU，京都府宮津市，2019 年 1 月 24 日-25 日

4） 太田裕道，"熱電変換材料としての金属酸化物の可能性"，第 5 回大型実験施設とスーパーコンピュータとの連携利用シンポジウム，秋葉原 UDX，東京，2019 年 3 月 15 日

c．一般講演（国際学会）

1） 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", 2018 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix, Arizona, 2-6 April, 2018 (Oral)

2） Gowoon Kim, Yu-Qiao Zang, Taewon Min, Hoyoung Suh, Jae Hyuck Jang, Hyeonjun Kong, Joonhyuk Lee, Jaek-wang Lee, Tae-Yeol Jeon, Inwon Lee, Jinhyung Cho, Hiromichi Ohta and Hyoungjeen Jeen, "Orientation de-pendent physical properties of epitaxial NbO_2 thin films", 2018 KSP Spring Meeting, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea, 25th-27th April, 2018.(Oral)

3） Hiroaki Nakade, Shun Kondo, Eita Tochigi, Bin Feng, Yukio Nezu, Hiromichi Ohta, Naoya Shibata, and Yuichi Ikuhara, "In-situ TEM observation of stress induced phase transformation in zirconia", 18th International Conference on the Strength of Materials (ICSMA 18), The Ohio State University, Clumbus, Ohio, USA, July 15-19, 2018

4） Kaito Kanahashi, Naoya Takekoshi, Haruka Isoai, Yong-Young Noh, Hiromichi Ohta, Hisaaki Tanaka, and Taishi Takenobu, "Thermoelectric properties of organic donor-acceptor copolymers investigated by electrolyte gating", 2018 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEP 2018), Nagaragawa, Gifu, Japan, September 4-7, 2018

5） Gowoon Kim, Yu-Qiao Zang, Taewon Min, Hoyoung Seo, Jaehyuck Jang, Hyeonjun Kong, Joonhyuk Lee, Jaekwang Lee, Tae-Yeol Jeon, Inwon Lee, JinHyung Cho, Hi-romichi Ohta, and Hyoungjeen Jeen, "Facile path for electron hopping in epitaxial NbO_2 thin films", the In-ternational Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2018), Jeju, South Korea, 11th-14th November, 2018

6） M. Yamanouchi, T. Oyamada, K. Sato, H. Ohta, and J. Ieda, "Effects of current on domain wall motion in $SrRuO_3$", 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, January 14-18, 2019 (Poster).

7） M. Yamanouchi, T. Oyamada, and H. Ohta, "Anomalous magnetotransport properties of $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/LaAlO_3/SrTiO_3$", 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, January 14-18, 2019 (Poster).

d．一般講演（国内学会）

1） Yuqiao Zhang, Bin Feng, Hiroyuki Hayashi, Cheng-Ping Chang, Yu-Miin Sheu, Isao Tanaka, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, "Double thermoelectric power factor of a 2D electron system, $SrTiO_3$-based superlattice", 日本セラミックス協会 第 31 回秋季シンポジウム，名古屋工業大学（愛知），2018 年 9 月 5 日-7 日

2） Michihiko Yamanouchi, Tatsuro Oyamada, Koichi Sato, Jun'ichi Ieda, and Hiromichi Ohta, "Current-induced effects on domain wall motion in $SrRuO_3$", 2018 年 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会，名古屋国際会議場（名古屋・愛知），2018 年 9 月 18 日-21 日

3） Hai Jun Cho, Wei Mian, Feng Bin, Anup V. Sanchela, Yuichi Ikuhara, Hiromichi Ohta, "Investigation of the Electron Mobility in La-doped $BaSnO_3$ films using Time-Domain Thermoreflectance (TDTR) Method", 2018 年 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会，名古屋国際会議場（名古屋・愛知），2018 年 9 月 18 日-21 日

4） 小野里尚記, Cho Hai Jun, Yi-Ming Chang, Yu-Miin Sheu,

フウ ビン，幾原雄一，太田裕道，“TDTR 法による層状酸化物薄膜の熱伝導率の結晶方位依存性計測”，2018 年 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会，名古屋国際会議場（名古屋・愛知），2018 年 9 月 18 日−21 日

5） M. Wei, A. Sanchela, J. Lee, G. Kim, H. Jeen, B. Feng, Y. Ikuhara, H. Cho and H. Ohta, “A perverse transparent oxide semiconductor, La:$BaSnO_3$“, 2018 年 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会，名古屋国際会議場（名古屋・愛知），2018 年 9 月 18 日−21 日

6） Tatsuro Oyamada, Hiromichi Ohta, and Michihiko Ya−manouchi, “Anomalous magneto−transports of $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$/2DES−$LaAlO_3$/$SrTiO_3$“, 2018 年 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会，名古屋国際会議場（名古屋・愛知），2018 年 9 月 18 日−21 日

7） Y. Wu, H. Cho, B. Feng, M. Mikami, W. Shin, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Cross−plane thermal conductivity of $InGaO_3(ZnO)_m$ (m=integer) single crystalline thin films”, 2018 年 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会，名古屋国際会議場（名古屋・愛知），2018 年 9 月 18 日−21 日

8） 呉 宇璋，ジョ ヘジュン，フウ ビン，三上祐史，申 ウソク，幾原雄一，齊藤圭司，太田裕道，“酸化物自然超格子 $InGaO_3(ZnO)_m$ の Kapitza 抵抗”，平成 30 年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会，日本大学工学部（福島県郡山市），2018 年 11 月 2 日−3 日

9） Y. Wu, H. Cho, B. Feng, M. Mikami, W. Shin, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Natural superlattice structure based ul−tralow thermal conductivity in $InGaO_3(ZnO)_m$ single crystalline films”, 第 54 回応用物理学会北海道支部/第 15 回日本光学会北海道支部合同学術講演会，サン・リフレ函館，北海道函館市，2019 年 1 月 5 日−6 日

１０）須郷堅雄，張 雨橋，ジョ ヘジュン，太田裕道，“$Sr_{1-x}La_xTiO_3$ 固溶体薄膜の熱電輸送特性”，第 54 回応用物理学会北海道支部/第 15 回日本光学会北海道支部合同学術講演会，サン・リフレ函館，北海道函館市，2019 年 1 月 5 日−6 日

１１）Michihiko Yamanouchi, Tatsuro Oyamada, and Hiromichi Ohta, “Sign reversal of current−induced effective mag−netic field in $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ heterostructures”, 2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会，東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都目黒区)，2019 年 3 月 9 日−12 日

１２）A.V. Sanchela, M. Wei, H.J. Cho, and H. Ohta, “Ther−mopower modulation clarification of the operating mechanism in wide bandgap $BaSnO_3$−$SrSnO_3$ sol−id−solution based thin film transistors”, 2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会，東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都目黒区)，2019 年 3 月 9 日−12 日

１３）Y. Zhang, H.J. Cho, M. Mikami, S. Woo, M. Jung, W.S. Shin, W.S. Choi, M.J. Han, and H. Ohta, “Anomalous change of heat transfer in $Sr(Ti,Nb)O_3$ solid solution”, 2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会，東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都目黒区)，2019 年 3 月 9 日−12 日

１４）小野里尚記，根津有希央，Hai Jun Cho，太田裕道，“WO_3 固体エレクトロクロミックトランジスタの高速動作”，2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会，東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都目黒区)，2019 年 3 月 9 日−12 日

１５）金橋魁利，竹腰直哉，中嶋大志，Yong−Young Noh，太田裕道，田中久暁，竹延大志，“導電性高分子のフェルミレベル制御と熱電変換特性”，日本物理学会 第 74 回年次大会，九州大学伊都キャンパス，福岡県福岡市，2019 年 3 月 14 日−17 日

１６）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，“イットリア安定化ジルコニア正方晶薄膜における正方晶−単斜晶相変態の TEM 内その場観察”，日本金属学会 2019 年春期（第 164 回）講演大会，東京電機大学東京千住キャンパス（東京都足立区），2019 年 3 月 20 日−22 日

１７）佐々野駿，石川亮，太田裕道，柴田直哉，幾原雄一，“(La，Li)TiO_3 対応傾角粒界における原子構造とリチウムイオン伝導度の関係”，日本セラミックス協会 2019 年年会，工学院大学新宿キャンパス，2019 年 3 月 24 日−26 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） Yuqiao Zhang, Bin Feng, Hiroyuki Hayashi, Cheng−Ping Chang, Yu−Miin Sheu, Isao Tanaka, Yuichi Ikuhara, Hi−romichi Ohta, “Double thermoelectric power factor of a 2D electron system”, The first International Joint Symposium of CEFMS−NCTU, RCAS−AS (Taiwan) and 5−Star Alliance (Japan), National Chiao Tung University, Taiwan, 18th−20th May, 2018

2） H.J. Cho, M. Wei, A. Sanchela, and H. Ohta, “Effect of dopants on the thermal stability of oxygen in $BaSnO_3$ and engineering of electronic transport properties”, The 2nd Workshop on Functional Materials Science, Busan, South Korea, October 22−23, 2018

3） Y. Zhang, H.J. Cho, M. Mikami, W.S. Shin, W.S. Choi, and H. Ohta, “Anomalous phonon transport in $SrTi_{1-x}Nb_xO_3$ alloy”, The 2nd Workshop on Functional Materials Science, Busan, South Korea, October 22−23, 2018

4） T. Onozato, H.J. Cho, Y−M. Chang, Y−M. Sheu, B. Feng, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Anisotropic thermal conduc−tion behavior of a complicated layered structure oxide”,

The 2nd Workshop on Functional Materials Science, Busan, South Korea, October 22-23, 2018

5） G. Kim, Y. Zhang, T. Min, H. Seo, J. Jang, H. Kong, J-H. Lee, J-K. Lee, T.Y. Jeon, I. Lee, J.H. Cho, H. Ohta, and H. Jeen, "A facile path for electron hopping in NbO_2", The 2nd Workshop on Functional Materials Science, Busan, South Korea, October 22-23, 2018

6） M. Wei, A. Sanchela, J. Lee, G. Kim, H. Jeen, B. Feng, Y. Ikuhara, H. Cho, and H. Ohta, "Electron mobility im-provement of La-doped $BaSnO_3$ films grown under the ozone atmosphere", The 2nd Workshop on Functional Materials Science, Busan, South Korea, October 22-23, 2018

7） Y. Wu, H. Cho, B. Feng, M. Mikami, W. Shin, Y. Ikuhara, and H. Ohta, "Heat transportation across parallel layers of natural superlattice $InGaO_3(ZnO)_m$ single crystalline films", The 2nd Workshop on Functional Materials Sci-ence, Busan, South Korea, October 22-23, 2018

8） Hai Jun Cho, Hiromichi Ohta, "Time-domain ther-more-flectance: A powerful tool for the thermal conduc-tivity measurement of thin films", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組 [So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

9） Gowoon Kim, Yu-Qiao Zhang, Taewon Min, Hoyoung Suh, Jae Hyuck Jang, Hyeonjun Kong, Joonhuyk Lee, Jaekwang Lee, Tae-Yeol Jeon, Inwon Lee, Jinhyung Cho, Hiromichi Ohta, Hyoungjeen Jeen, "Extremely light car-rier effective mass in a distorted simple metal oxide, NbO_2", The 19th RIES-HOKUDAI International Sym-posium 組[So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

10）T. Onozato, H.J. Cho, Y-M. Chang, Y-M. Sheu, B. Feng, Y. Ikuhara, H. Ohta, "Thermal conductivity anisotropy of layered complex oxide", The 19th RIES-HOKUDAI In-ternational Symposium 組[So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

11）Anup V. Sanchela, Mian Wei, Hai Jun Cho, Hiromichi Ohta, "Electric field thermopower modulation of $BaSnO_3$-$SrSnO_3$ solid solutions", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組[So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

12）Y. Wu, H.J. Cho, B. Feng, M. Mikami, W. Shin, Y. Ikuhara, K. Saito, H. Ohta, "Kapitza resistance based ultralow thermal conductivity of natural superlattice ce-ramic single crystalline films", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組[So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

13）Y. Zhang, H.J. Cho, M. Mikami, W.S. Shin, W.S. Choi, H. Ohta, "Phase transition induced anomalous phonon transports in $SrTiO_3$-$SrNbO_3$ system", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組 [So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

4.7 シンポジウムの開催

1） 応用物理学会北海道支部主催　講演会「Perovskite oxide heterostructures based on $BaSnO_3$」: Prof. Kookrin Char（ソウル大学)、2018 年 6 月 28 日

2） 電子研学術交流委員会主催　講演会「Mini Workshop on Functional Materials and Devices 2018 Summer, Sapporo」: Prof. I. Terasaki (Nagoya U.)、Prof. W.S Choi (SKKU)、Prof. B. Feng (U. Tokyo)、Prof. T. Takenobu (Nagoya U.)、Prof. Y. Nonoguchi (NAIST)他、2018 年 8 月 9 日－10 日

3） 釜山大学 Hyoungjeen Jeen 准教授が主催（JSPS 二国間共同研究)、The 2nd Workshop on Functional Materials Science、2018 年 10 月 22 日―23 日

4） 電子研学術交流委員会主催　講演会「Unraveling thickness-dependent spin relaxation in colossal magne-toresistance manganite films」、Prof. Yu-Miin Sheu (台湾・国立交通大学)、2019 年 1 月 9 日

4.8 共同研究

a．所内共同研究

1） 三澤教授（グリーンフォトニクス研究分野）のグループとの共同研究成果が J. Phys. Chem. C 誌に掲載された。

b．民間等との共同研究

1） 太田裕道、市光工業

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

1） 台湾・国立交通大学の Yu-Miin Sheu 助教との共同研究成果が英科学誌 Nature Communications に掲載された。

2） 韓国・釜山大学校の Hyoungjeen Jeen 准教授との共同研究成果が米応用物理学誌 Applied Physics Letters に掲載された。

3） カナダ・トロント大学の Uwe Erb 教授との共同研究成果が英科学誌 Journal of Materials Chemistry A に掲載された。

4） ドイツ・フンボルト大学ベルリン校の Norbert Koch 教授との共同研究成果がドイツ科学誌 Advanced Materials Interfaces に掲載された。

5） 韓国・釜山大学校の Hyoungjeen Jeen 准教授との共同研究成果がドイツ科学誌 Advanced Electronic Materials に掲載された。

6） 韓国・釜山大学校の Hyoungjeen Jeen 准教授との共同研究成果が International Journal of Heat and Mass

Transfer に掲載された。

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.

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

3） 山ノ内路彦、東芝メモリ「傾斜磁気異方性強磁性体におけるスピン軌道トルク磁化反転」2019 年 1 月～2020 年 3 月

4） 山ノ内路彦、村田学術振興財団 研究助成、2017 年 7 月～2018 年 7 月

4.10 受賞

1） Mian Wei, Poster Award, The 19th RIES-Hokudai In-ternational Symposium, Mian Wei, Anup V. Sanchela, Hai Jun Cho, Hiromichi Ohta, “Thermopower analysis of ef-fective mass in a transparent oxide semiconductor, La-doped $SrSnO_3$“, The 19th RIES-HOKUDAI Interna-tional Symposium 組[So], Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11th-12th, 2018 (Poster)

2） ジョ・ヘジュン, 第 48 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（2018.9-2020.8）

2） 太田裕道、日本セラミックス協会東北・北海道支部：幹事（平成30年度）

c. 兼任・兼業

該当なし

d. 外国人研究者の招聘

1） Jason Tam、Canada、(2018.3.19-2018.4.19)

2） Hahoon Lee、韓国、(2018.6.17-7.3)

3） Joonhyuk Lee、韓国、(2018.9.20-10.6)

4） Hyunjung Kim、韓国、(2018.9.20-10.6)

5） Yu-Miin Sheu、台湾、(2019.1.8-15)

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、2018 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、2018 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 13 日.

4） 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、2018 年 11 月 8 日.

5） 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、2018 年 4 月～7 月.

6） 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、2018 年 4 月～7 月.

7） 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、2018 年 11 月～2019 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）

該当なし

g. 新聞・テレビ等の報道

1） 日刊工業新聞,「電子閉じ込めで熱電変換向上 北大」, 2018 年 6 月 21 日 27 面

2） OPTRONICS ONLINE, “北大、熱電変換材料の性能を 2 倍にできることを実証”, 2018 年 6 月 21 日

3） Fabcross for エンジニア, “熱電材料の性能を従来比 2 倍に増強―北大、電子を狭い空間に閉じ込め熱電材料を高性能化する理論を実証”, 2018 年 6 月 22 日

4） “Electron Sandwich Doubles Thermoelectric Performance”, I Connect 007, June 20, 2018

5） “Electron Sandwich Doubles Thermoelectric Performance”, Chem Europe.com, June 21, 2018

6） “Electron Sandwich Doubles Thermoelectric Performance”, Tech Explorist, June 20, 2018

7） “Electron Sandwich Doubles Thermoelectric Performance”, Photonics Online, June 20, 2018

8） “Electron Sandwich Doubles Thermoelectric Performance”, Spinoff.com, June 20, 2018

9） “Electron Sandwich Doubles Thermoelectric Performance”, Phys.org, June 20, 2018

10） “Artificial Superlattice Yields Higher Voltage and Improves Thermoelectric Conversion Rate”, AZO Materials, June 21, 2018

11） “Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, EurekAlert!, June 20, 2018

12） “Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Science Daily, June 20, 2018

13） “交通大學與北海道大學跨校合作 研發電子三明治使熱電性能倍增”, National Chiao Tung University, June 20, 2018

14） “Electron sandwich doubles the thermoelectric performance!”, Device & Materials Engineering, Nature Research, June 20, 2018

１５）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Science & Technology Research News, June 20, 2018

１６）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Revolution Green, June 21, 2018

１７）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance, BrightSurf.com, June 20, 2018

１８）　“Electron sandwich doubles thermoelectric efficiency (News)”, PressCute.com, June 20, 2018

１９）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Green Car Congress, June 25, 2018

２０）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Innovations Report, June 20, 2018

２１）　“Artificial Superlattice Yields Higher Voltage and Improves Thermoelectric Conversion Rate”, Converter News, June 21, 2018

２２）　“Tech: Electron sandwich doubles thermo-electric performance－(Report)”, TuniseSoir News, June 20, 2018

２３）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Nanowerk, June 20, 2018

２４）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Programming News Payments & Trade Networks, June 27, 2018

２５）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, Technology News, June 20, 2018

２６）　“Electron sandwich doubles thermoelectric performance”, ECN, June 20, 2018

２７）　“Thermoelectric performnce doubles in electron sandwich”, New Energy and Fuel, June 27, 2018

２８）　“Researches Improve Ability Of Material To Convert Heat Into Electricity”, Chem Info, June 21, 2018

２９）　日刊工業新聞, 「車の廃熱再利用」, 2018 年 6 月 28 日

３０）　dmenu ニュース, 「自動車エンジンまわりの熱を電気に変換する材料開発へ」, 2018 年 6 月 28 日

３１）　“Nature 子刊:研究人员将热电材料的转化效率提高了一倍多”, 中国材料网, June 25, 2018

３２）　“Nature 子刊:研究人员将热电材料的转化效率提高了一倍多”, 中国科学院上海硅酸盐研究所, June 27, 2018

３３）　“Hokkaido University design sandwich structure enhances electron diffusion capability”, June 28, 2018

３４）　“Superlattice ‘Sandwich’ Converts Wasted Heat To Electricity”, Asian Scientist Newsroom, July 4, 2018

３５）　国立環境研究所, 「北海道大など、熱電変換材料の性能を増強する理論（2016 年提案）を実証」, 2018 年 7 月 10 日

３６）　マイナビニュース, 「電子を「ギュッ」と閉じ込めると、熱電材料の性能が倍増した-京大 」, 2018 年 7 月 11 日

３７）　日本経済新聞プレスリリース, 「京大など、熱を電気に変換する熱電材料の性能が狭い空間に電子を閉じ込めることで従来比の 2 倍に増強できることを実証」, 2018 年 7 月 10 日

３８）　EE Times Japan, 「電子を閉じ込めて性能が 2 倍、熱電材料の新理論を実証」, 2018 年 7 月 13 日

３９)読売新聞 ONLINE, 「捨てられている熱を電気に変える熱電変換材料」, 2018 年 8 月 13 日

ｈ．ポスドク・客員研究員など

１） Anup Sanchela （電子科学研究所）

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：3人

１） Mian Wei、情報科学研究科: 修士 (情報科学)、Study of the origin of mobility suppression in a transparent oxide semiconductor, La-doped $BaSnO_3$

２） 根津有希央、情報科学研究科: 修士 (情報科学)、層状コバルト酸化物$AxCoO_2$ (Ax=$Na_{0.8}$, $Ca_{0.3}$, $Sr_{0.3}$) エピタキシャル薄膜の熱伝導率に関する研究

３） 小山田達郎、情報科学研究科: 修士 (情報科学)、強磁性酸化物$La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ヘテロ構造における電流誘起有効磁場に関する研究

博士学位：1人

１） 張　雨橋、情報科学研究科：博士 (情報科学)、Study on the thermoelectric properties of SrTiO3 - SrNbO3 solid solutions using the epitaxial thin films and the artificial superlattices

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　大友康平(東北大院、博(薬),2016.4～)
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～)
学術研究員　飯島光一朗 (京大院、博(生命科学)、2011.1～2018.3)
技術補佐員　山田淑子(2018.4～)
事務補佐員　佐藤絵美(2017.3～2019.3)
事務補佐員　春日さと子(2019.3～)

大学院生
博士後期課程　青柳佑佳、澤田和明、山口和志、張菁圃
修士課程　安宅光倫、後藤亜衣、高橋泰伽、鎌田恭史
学部生　柏葉紘則、井口奈美、小川拓希、廣　蒼太

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、

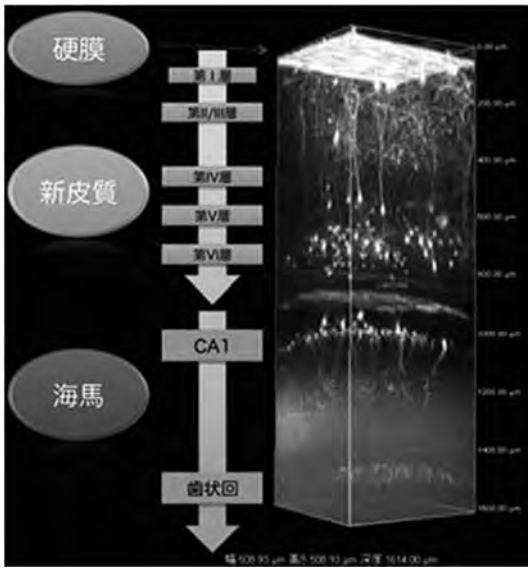


図１ “*in vivo*” 2光子顕微鏡は生体内の組織の深部を高分解能で長期間観察を可能とする。麻酔下のマウス大脳新皮質の神経細胞及び海馬 CA1・歯状回ニューロン。

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。さらに東京大学医学部・尾藤晴彦教授らのグループが開発した新規蛍光Ca^{2+}インジケータタンパク質をもちいることで、世界で初めて広範囲で非侵襲的なビデオレイトの*in vivo*Ca^{2+}イメージングに成功した(***Cell,*** *in press*)。

(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。生体脳と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、空間位相変調器を用いた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

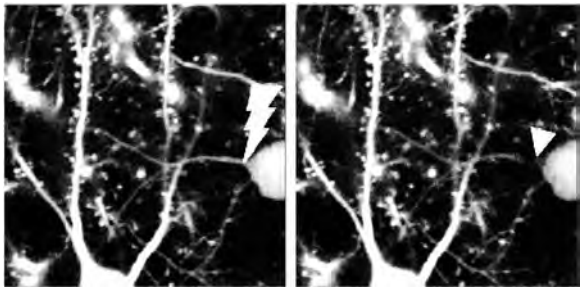


図2 マウス生体脳における神経線維の光切断

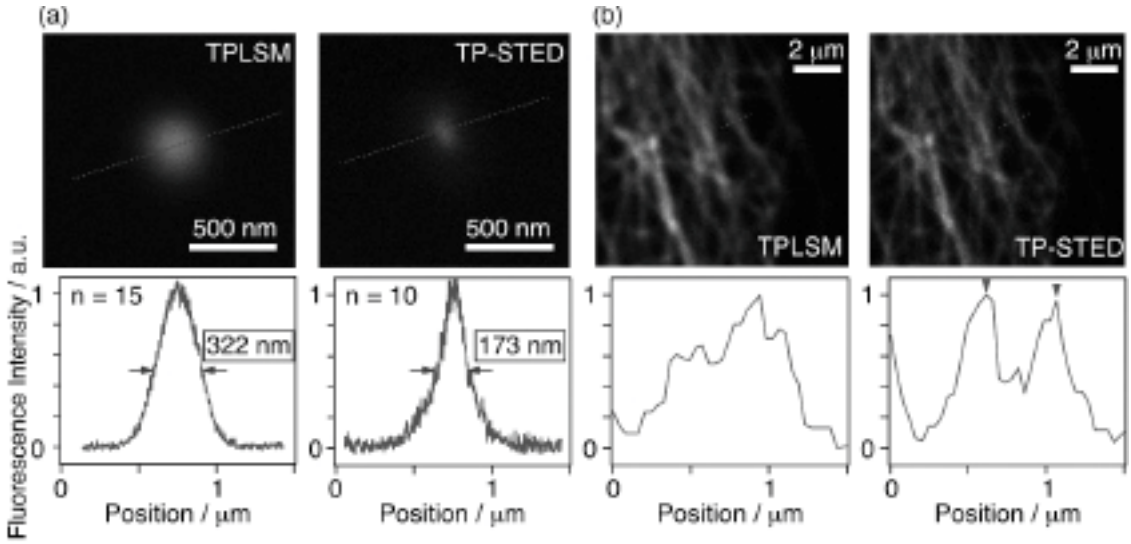


図３：２光子 STED 顕微鏡による超解像イメージングの比較。(a)微小蛍光ビーズ像、(b) 固定した COS7 細胞の微小管の抗体蛍光染色サンプル。TPLSM は通常の２光子顕微鏡、TP-STED は２光子 STED 顕微鏡

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+}ライブイメージングに成功した。

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 2018 (ISNM2018)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。本成果は原著論文として発表した(Journal of Comparative Neurology, 2018)

(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、原著論文として出版した(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・コラボにおいて基礎生物学研究所・村田隆准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。

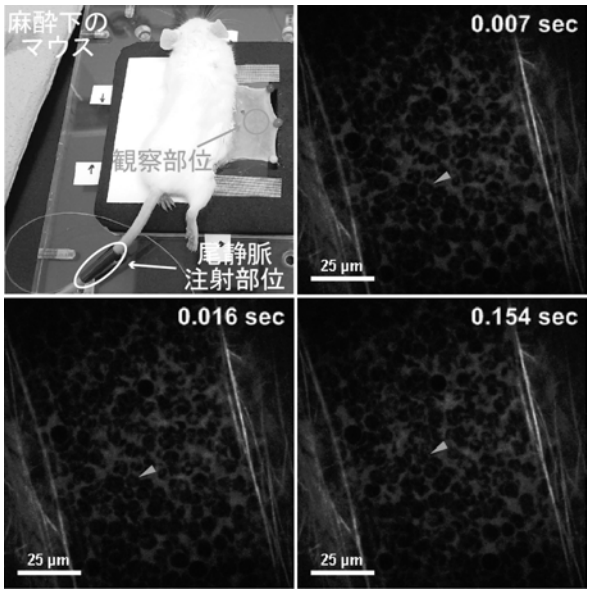


図 4: 二光子 CSU 顕微鏡によるマウス血流の *in vivo* 超高速イメージング

(g) 哺乳類の約24時間の概日リズムの中枢は，脳深部の視床下部にある視交叉上核に存在し，網膜を介して光情報を受けて固有の周期を24時間に調節し，全身の細胞や臓器に統一のとれたリズム情報を伝達している。近年の研究により，概日リズムを生み出す分子や細胞レベルでのメカニズムが次第に明らかとなってきている。一方で，哺乳類の生体内では，レム-ノンレム睡眠サイクルやホルモン分泌など，様々な生理機能に数十分～数時間の短い周期のウルトラディアンリズムが観察されることが知られている。これまでウルトラディアンリズムを長期的・高精細に計測するよい方法がなく，ウルトラディアンリズムを生成する脳の領域がどこにあるのかは長く不明であった。

これまでに、概日リズム観察のための長期間の光イメージング計測法を確立し，視交叉上核の神経細胞ネットワークの働きを観察してきた(Enoki et al., PNAS, 2012, 2017等)。本年度の研究では，視交叉上核とその周辺領域を含む組織を長期間培養し，緑色蛍光タンパク質からなるカルシウムイオンセンサーを多数の神経細胞に発現させ，高感度カメラ，恒温培養装置，顕微鏡からなる光計測システムを用いて，概日リズム中枢を含む複数の脳領域の神経細胞から，細胞内カルシウム濃度変化を指標に神経細胞の活動を数日間測定することを試みた。

その結果，視交叉上核の主な神経投射先である室傍核と傍室傍核領域の多数の神経細胞において，30分～4時間周期で同期する細胞内カルシウムのウルトラディアンリズムを見いだした。このリズムは室傍核と傍室傍核領域のみを単離した組織でも観察されることから，この部位がウルトラディアンリズムの発生源であることがわかった。さらに，神経細胞ネットワークのミリ秒スケールの早い神経細胞の同期活動がウルトラディアンリズムを生み出すことや，興奮性と抑制性の神経伝達物質のバランスによりウルトラディアンリズムが制御されていることがわかった。室傍核と傍室傍核領域には，様々なホルモンを産生する神経細胞が存在していることが知られており，さらにこの脳部位は他の脳領域へと投射して，体温や睡眠サイクルを調節する中枢領域へと情報を伝えていると推察されていることから，本研究で見いだしたウルトラディアンリズムは，生体の様々な生理機能のリズムを制御していると考えられる。本研究は復旦大学（上海）の黄志力教授との国際共同研究のもと推進し、原著論文として発表した（PNAS, 2018）

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） M. Inoue, A. Takeuchi, S. Manita, S. Horigane, M. Sakamoto, R. Kawakami, K. Yamaguchi, K. Otomo, H. Yokoyama, R. Kim, T. Yokoyama, Sayaka Takemoto-Kimura, M. Abe, M. Okamura, Y. Kondo, S. Quirin, C. Ramakrishnan, T. Imamura, K. Sakimura, T. Nemoto, M. Kano, H.Fujii, K. Deisseroth, K. Kitamura and H. Bito: “Rational engineering of XCaMPs, a multicolor GECI suite for in vivo imaging of complex brain circuit dynamics”, Cell (in press)

2） A. Goto, K, Otomo, and T. Nemoto, “Real-time polarization-resolved imaging of living tissues based on two-photon excitation spinning-disk confocal microscopy”, Frontiers in Physics, 7: 56 (2019)

3） K. Yamamoto, K. Otomo, T. Nemoto, S. Ishihara, H. Haga, A. Nagasaki, Y. Murakami and M. Takahashi: “Differential contributions ofnonmuscle myosin IIA and IIB to cytokinesis in human immortalizedfibroblasts”, Experimental Cell Research, 376(1): 67-76 (2019)

4） Y. Aoyagi, T. Hibi, Y. Kimori, M. Sawada, R. Kawakami, K. Sawamotoand, T. Nemoto: “Heterogeneous distribution of doublecortin-expressing cells surrounding the rostral migratorystream in the juvenile mouse”, Journal of Comparative Neurology, 526(16): 2631-2646 (2018)

5） Titinunt Kitrungrotsakul, Xian-Hau Han, Yutaro Iwamoto, Satoko Takemoto, Hideo Yokota, Sari Ipponjima, Tomomi Nemoto, Xiong Wei, and Yen-Wei Chen: “A 2.5D CascadedConvolutional Neural Network with Temporal Information for AutomaticMitotic Cell Detection in 4D Microscopic Images”、Proc. the 2018 14th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD 2018) (2018)

6） K. Otomo, T. Hibi, Y. Fang, J. Hung, M. Tsutsumi, R. Kawakami, H.Yokoyama and T. Nemoto: “Advanced easySTED microscopy based ontwo-photon excitation by electrical modulations of light pulsewavefronts”, Biomed. Opt. Express, 9: 2476-2680 (2018)

7） Y. Inoue, S. Hasegawa, K. Miyachi, T. Yamada, S. Nakata, S.Ipponjima, T. Hibi and T. Nemoto: “Development of 3D imagingtechnique of reconstructed human epidermis with immortalized humanepidermal cell line”, Experimental Dermatology, 27(5): 563-570 (2018)

8） Wu Y, Enoki R, Oda Y, Huang ZL, Honma KI, Honma S. “Ultradian calcium rhythms in the paraventricular nucleus and subparaventricular zone in the hypothalamus”, PNAS, 115(40):E9469-E9478 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

1） Kouichirou Iijima, Takuto Oshima, Ryosuke Kawakami, Tomomi Nemoto:”Optical clearing of living brains with MAGICAL to extend in vivo imaging”, BioXriv, #507426 (2019)

2） 髙橋 泰伽、鎗野目 健二、張 宏、川上 良介、岡村 陽介、根本 知己:「高分子超薄膜を用いたマウス生体脳の in vivo 二光子イメージング手法の開発」、レーザー学会第 524 回研究会報告: 35-39 (2018)

4.3 総説・解説・評論等

1） 根本 知己、山口 和志:「マウス生体脳深部の 2 光子蛍光断層イメージング」、月刊オプトロニクス、38(3): 57-61 (2019)

2） 大友 康平、根本 知己:「「2 光子顕微鏡・多光子顕微鏡」」、実験医学増刊「イメージングの選び方・使い方」、羊土社、36(20): 82-83 (2018)

3） T. Nishikata, T. Goto, H. Yagi, H. Ishii: “Massive cytoplasmic transport and microtubule organization in fertilized chordate eggs”, Dev Biol.

4） 榎木亮介:「睡眠に関係しそうな「短い周期の体内時計」の発振源がみつかった」、Science Portal 掲載、2018 年 10 月 17 日

5） 榎木亮介:「地球の環境変化を予測する仕組み～概日リズム～」、日本脳科学関連学会連合,「知ってなるほど！脳科学豆知識」 掲載、2018 年 4 月

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） 田辺 綾乃、橋本 信幸、根本 知己、日比 輝正、大友 康平、小澤 祐市: PCT/JP2017/005002、ILLUMINATION DEVICE AND METHOD FOR GENERATING ILLUMINATION LIGHT、2018年09月14日

4.6 講演

a. 招待講演（国際学会）

1） T. Nemoto*, T. Takahashi, K. Otomo and A. Goto : “Improvement of Multi-photon Microscopy by Utilizing Novel Optical Technologies and Materials”, the 12th International Symposium of Nanomedicine (ISNM2018), Yamaguchi Univ., Japan (2018-12))

2） T. Nemoto*: “Novel multi-photon microscopy utilizing optical technologies and nanomaterials”, The 6th Japan-China Symposium on Nanomedicine., Hotel Hakucho, Japan (2018-05)

3） R.Enoki*: “Ultradian Calcium Rhythms in the Paraventricular Nucleus and Subparaventricular Zone in the

Hypothalamus” Sapporo Symposium on Biological Rhythms (Sapporo), Japan (2018-07)

b．招待講演（国内学会）

1） 根本知己:「多光子過程を用いたバイオイメージングの展開」日本分光学会北海道支部シンポジウム、北海道大学（北海道札幌市）(2019-02)

2） 根本 知己*:「生きたままの脳をみる」、第 27 回日本バイオイメージング学会学術集会、つくば市 (2018-09)

3） 根本 知己*:「先端レーザーフォトニクス技術を用いた細胞生理機能の可視化解析」、第 74 回日本顕微鏡学会学術講演会シンポジウム、久留米市 (2018-05)

c．一般講演（国際学会）

1） M. Ataka, T. Kamada, K. Otomo, T. Nemoto : “In vivo Ca^{2+} imaging of mouse brain by two-photon excitation spinning-disk confocal microscopy ″, 9th FAOPS congress, Kobe (2019-03)

2） T. Takahashi, K. Yarinome, H. Zhang, R. Kawakami, Y. Okamura, T. Nemoto : “Novel fluoropolymer nanosheets extending in vivo two-photon imaging of living mouse brain″, 9th FAOPS congress, Kobe (2019-03)

3） K. Yamaguchi, R. Kawakami,T.Nemoto: ″Two-photon laser ablation can cut single neural processes without severe damages on nearby surrounding astrocytes″, 9th FAOPS congress, Kobe (2019-03)

4） R. Enoki, Y.Wu, Y.Oda, ZL.Huang, K.Honma, S.Honma :「Ultradian Calcium Rhythms in the PVN and SPZ in the Hypothalamus」、第 9 回アジア・オセアニア生理学会連合 2019 年大会（FAOPS2019)、神戸（2019-03）

5） Y.Hirata, R.Enoki, K.Kuribayashi-Shigetomi, Y.Oda, S.Honma, K.Honma :「Optical imaging of circadian calcium rhythm in a solitary suprachiasmatic neuron」、第 9 回アジア・オセアニア生理学会連合 2019 年大会（FAOPS2019)、神戸（2019-03）T. Takahashi, H. Zhang, K. Yarinome, R. Kawakami, Y. Okamura, T. Nemoto:“Novel fluoropolymer PEO-CYTOP nanosheets advancing open skull method for in vivo two-photon imaging of living mouse brain”, SfN 2018, San Diego (2018-11)

6） T. Takahashi, H. Zhang, K. Yarinome, R. Kawakami, Y. Okamura, T. Nemoto: “Novel fluoropolymer PEO-CYTOP nanosheets expanding open skull method for in vivo two-photon imaging of living mouse brain”, The 6th Japan-China Symposium on Nanomedicine, Hotel Hakucho, Shimane (2018-05)

7） K. Otomo, A. Goto, T. Nemotol: “Real-time polarization resolved imagin for living mice tissues by two-photon excitaoin spinning disk confocal microscopy”, The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium -Cutting Edge Techniques of Bioimaging, Okazaki (2019-02)

8） M. Tsutsumi, K.Kobayashi, K. Otomo, Y. Matsuo, T. Nemoto: ““Imaging support in Nikon imaging center at Hokkaido university”, The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium -Cutting Edge Techniques of Bioimaging, Okazaki (2019-02)

9） T. Murata, K. Otomo, K. Kato., T. Nemoto, M. Hasebe: “Two-photon Spinning Disk Microscopy Reveals Steps of Chromosome Alignment during Mitotic Spindle Formation in Plant Cells”, The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium -Cutting Edge Techniques of Bioimaging , Okazaki (2019-02)

１０）T. Takahashi, H. Zhang, K. Yarinome, R. Kawakami, Y. Okamura, T. Nemoto: “Novel fluoropolymer nanosheets “PEO-CYTOP” improving open skull window for in vivo imaging of living mouse brain”, the 19th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2018-12-12)

１１）A. Goto, K. Otomo, T. Nemoto: ”High-speed polarization resolved imaging for living mice tissues by two-photon excitation multi-point scanning microscopy”, the 19th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2018-12-12)

１２）T. Kamada, K. Otomo, T. Murata, M. Hasebe, T. Nemoto, poster: “Two-photon excitation spinning disk confocal microscopy utilizing two laser light pulses”, the 19th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo (2018-12-12)

d． 一般講演（国内学会）

1） 岩永 ひろみ, 堤 元佐, 大友 康平, 岩永 敏彦, 根本 知己:「ラット頬ひげ動き受容器周辺の星形シュワン様細胞における Ca 信号の生成と伝播―高速 2 光子励起顕微鏡による解析―」第 124 回日本解剖学会総会・全国学術集会、新潟コンベンションセンター (2019-03)

2） 佐々木武馬、村田隆、大友康平、堤元佐、根本知己、長谷部光泰、小田祥久:「微小管付随タンパク質 CORD は細胞分裂におけるフラグモプラストの形成に必要である」第６０回植物生理学会年会、名古屋大学, 愛知県名古屋市 (2019-03)

3） 鎗野目 健二, 張 宏, 青木 拓斗, 川上 良介, 高橋 泰伽, 根本 知己, 岡村 陽介,”Fabrication of Water-Repellent Nanosheet for Coverslip-Free Deep Tissue Imaging”, 第 28 回日本 MRS 年次大会, 福岡県小倉市 (2018-12)

4） 安宅光倫, 鎌田恭史, 大友康平, 根本知己, ポスター「多点走査型 2 光子顕微鏡を用いたマウス生体脳

の in vivo イメージング」第 41 回分子生物学会年会、2018/11/28-30、パシフィコ横浜 (2018-11)

5） 後藤亜衣、大友康平、根本知己、ポスター「新規高速偏光分解 2 光子蛍光イメージングによる膵臓外分泌腺の小胞動態の可視化解析」、第 41 回分子生物学会年会、パシフィコ横浜 (2018-11)

6） 岡村 陽介, 張 宏, 鎗野目 健二, 高橋 泰伽, 大友 康平, 川上 良介, 根本 知己、口頭「撥水性超薄膜を活用したカバーグラスフリー生体深部イメージング法の提案」第 40 回日本バイオマテリアル学会大会、兵庫県神戸市 (2018-11)

7） 高橋泰伽, 鎗野目健二,張宏 , 川上良介 , 岡村陽介, 根本知己、口頭発表「新規高分子超薄膜を用いたマウス脳の in vivo イメージングにおける観察窓作成法の開発」第 98 回北海道医学大会生理系分科会（日本生理学会北海道地方会)、北海道大学、北海道札幌市(2018-10)

8） 後藤亜衣、大友康平、根本知己、口頭発表「高速偏光分解イメージング法による生体組織の観察」第 98 回北海道医学大会生理系分科会（日本生理学会北海道地方会）2018 年 10 月 6 日、北海道大学、北海道札幌市 (2018-10)

9） 石井宏和、谷知己「ホヤ受精卵内の極性輸送を司る細胞骨格系の動態」日本動物学会 第 89 回大会、札幌コンベンションセンター、北海道札幌市 (2018-09)

１０）鎌田 恭史*、大友 康平、村田 隆、長谷部 光泰、根本 知己 :「多点走査型 2 光子顕微鏡による 4 重標識生細胞の 3 次元経時観察」、第 27 回日本バイオイメージング学会学術集会、つくば市 (2018-09)

１１）後藤 亜衣*、大友 康平、根本 知己 :「多点走査型 2 光子顕微鏡への偏光光学系の導入と生体イメージングへの応用」、第 27 回日本バイオイメージング学会学術集会、つくば市、Japan (2018-09)

１２）山口 和志*、川上 良介、根本 知己 :「Two-photon laser ablation can cut single neural processes without serious damage on surroundingastrocytes in living mouse brains」、第 41 回日本神経科学大会、神戸コンベンションセンター,兵庫県神戸市 (2018-07)

１３）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偏光分解イメージング」、新学術領域レゾナンスバイオ班会議、湘南国際村センター、神奈川県 (2018-06)

１４）山本 啓*、大友 康平、根本 知己、石原 誠一郎、芳賀 永、村上 洋太、高橋 正行 :「Differential function of myosin IIA and IIB incytokinesis of human immortalized fibroblasts」、第 70 回日本細胞生物学会大会、タワーホール船橋、東京都 (2018-06)

１５）岡村 陽介*、張 宏、青木 拓斗、鎗野目 健二、川上 良介、高橋 泰伽、根本 知己、樺山 一哉、波多野 佳奈枝、深瀬 浩一 :「超薄膜ラッピング法による細胞・組織の高解像度イメージング」、高分子学会 超分子研究会、中央大学後楽園キャンパス、東京都文京区 (2018-06)

１６）T. Takahashi*, K. Yarinome, H. Zhang, R. Kawakami, Y. Okamura and T. Nemoto :“Novel fluoropolymer PEO-CYTOP nanosheets expanding openskull method for in vivo two-photon imaging of living mouse brain”, The 6th Japan-China Symposium on Nanomedicine, 松江市 (2018-05)

１７）織田善晃 、榎木亮介、高須奈々、中村渉、本間研一、本間さと :「高速蛍光イメージングを用いた概日時計中枢神経細胞の概日 Ca2+ リズム形成機構の解析」、西日本生理学会、北九州国際会議場、福岡 (2018-10)

ｅ． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 根本知己:（招待講演）「多光子顕微鏡による生理機能イメージング」東北大学未来科学技術共同研究センター 未来科学３月ワークショップ『光・非線形・バイオメディカル』 - 科学と技術の連続性と非連続性、東北大学青葉山コモンズ(宮城県仙台市)(2019-03)

2） Kohei Otomo, Tomomi Nemoto:（招待講演）「Improvements of two-photon microscopy for intravital micro/nano-imaging」, Nikon Imaging Center Seminar “Technical development of laser scanning fluorescent microscopy”, Sapporo (2019-02)

3） Kohei Otomo, Tomomi Nemoto:（招待講演）「Real-time polarization resolved imaging for living mice tissues by two-photon excitation spinning disk confocal microscopy」the 66th NIBB Conference/ABiS International Symposium “Cutting Edge Techniques of Bioimaging”, Okazaki (2019-02)

4） 根本知己:（招待講演）「北大ニコンイメージングセンター」ニコンイメージングフォーラム、東京都品川区 (2019-02)

5） 大友康平、根本知己:（招待講演）「二光子スピニングディスク共焦点顕微鏡の開発と多次元イメージングへの展開」多次元性細胞イメージング研究会」、北海道札幌市 (2018-12)

6） 根本知己, 川上良介、大友康平、高橋泰伽、後藤亜衣:（招待講演）「近赤外超短光パルスレーザーを用いた生体内部の顕微観察法の展開」 第 16 回医用分光学研究会、北海道大学、北海道札幌市 (2018-11)

7） 根本知己:（招待講演）「非線形光学過程を用いた生体顕微イメージングの展開」兵庫県立大学計算科学

連携センターシンポジウム、兵庫県神戸市
（2018-11）

８） 根本知己:（招待講演）「近赤外超短パルスレーザー光を用いた in vivo 顕微イメージングの展開」北海

９） 道大学大学院医学研究科消化器外科学教室Ｉモーニングセミナー、北海道大学医学部（2018-11）

１０）Yosuke Okamura, Hong Zhang, Takuto Aoki, Kenji Yarinome, Ryosuke Kawakami, Tomomi Nemoto. Oral: “Polymer Nanosheet Wrapping for High Quality Imaging of Tissues and Cells”, 1st Glowing Polymer Symposium in KANTO, 東京都新宿区（2018-12）

１１） 根本知己:（招待講演）「最先端レーザー顕微鏡」第 86 回創薬科学セミナー、名古屋大学, 愛知県名古屋市(2018-10)

１２） 根本知己:（招待講演）「新規レーザー光技術を用いた光学顕微鏡による細胞生理のイメージング」、第 68 回 PST-net 例会(平成 30 年度第 2 回)、千歳市,（2018-07）

１３） 根本知己:（招待講演）「新規光レーザー技術による非線形光学過程を用いたバイオイメージング」, 生理学研究所所長招聘セミナー, 岡崎市
（2018-06）

１４） 根本知己:（招待講演）「ベクトルビームによる高速 in vivo 多光子顕微鏡の高度化」学術領域レゾナンスバイオ班会議、湘南国際村センター, 神奈川県三浦郡葉山町(2018-06)

１５） Kohei Otomo, Motosuke Tsutsumi, Kentarou Kobayashi, Tomomi Nemoto:(招待講演)「NIC@Hokkaido Universit and collaborative works」Nikon Imaging Center World Directors’ meeting, Genoa, Italy
(2019-05)

１６） 高橋泰伽, 鎗野目健二, 張宏, 川上良介, 岡村陽介, 根本知己:「新規ナノシートを用いたマウス生体脳の in vivo 二光子イメージング法の改良」第 4 回北大・部局横断シンポジウム、北海道大学医学部、北海道札幌市 (2019-01)

１７） 鎌田恭史、大友康平、村田隆、長谷部光泰、根本知己 (2019) ポスター「励起光の高速切替が可能なマルチビームスキャン型 2 光子励起共焦点顕微鏡による多色 4D ライブイメージング法の開発. 第 4 回北海道大学部局横断シンポジウム. 北海道大学医学部、北海道札幌市(2019-01)

１８） 村田隆、大友康平、加藤輝、根本知己、長谷部光泰「植物紡錘体における染色体の配列運動は３つの過程に分けられる」、2019 年 生体運動研究合同班会議、福岡大、福岡県福岡市 (2019-01)

１９） 村田隆、大友康平、加藤輝、根本知己、長谷部光泰細胞形状に依存した微小管の配列機構の検証」定量生物学の会第 9 回年会、大阪大学吹田キャンパス銀杏会館 (2019-01)

２０） 鎗野目 健二, 張 宏, 青木 拓斗, 川上 良介, 高橋 泰伽, 根本 知己, 岡村 陽介、ポスター「撥水性超薄膜の調製とカバーグラスフリー生体深部イメージング法の確立」第 8 回 CSJ 化学フェスタ 2018,（2018-10）

２１） 高橋泰伽, 鎗野目健二, 張宏 , 川上良介, 岡村陽介, 根本知己、口頭発表「高分子超薄膜を用いたマウス生体脳の in vivo 二光子イメージング手法の開発」レーザー学会第 524 回研究会（ニューロフォトニクス研究会)、アクトシティ浜松コングレスセンター（静岡県浜松市） (2018-09)

２２） 鎗野目 健二, 張 宏, 青木 拓斗, 川上 良介, 高橋 泰伽, 根本 知己, 岡村 陽介「カバーガラスフリーイメージングへの応用を目指した撥水性超薄膜の創製」東海大学マイクロ・ナノ啓発会（Tμne）第 9 回学術講演会, 熊本県熊本市
(208-05)

２３） 村田隆, 大友康平, 鎌田恭史, 加藤輝, 小林健太郎, 長谷部光泰, 根本知己ポスター「多点走査型２光子顕微鏡による多次元画像取得とその応用」第 8 回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会・平成 29 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・アライアンス成果報告会、北海道札幌市（2018-06）

２４） 堤元佐, 根本知己、ポスター「画像解析による新規超解像顕微鏡法 SRRF の実用性評価」第 8 回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会・平成 29 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・アライアンス成果報告会、北海道札幌市（2018-06）

２５） Y. Okamura, H. Zhang, K. Yarinome, K. Otomo, R. Kawakami and T. Nemoto*： “Fabrication of Fluoropolymer Nanosheets as a WrappingMount for High Quality Tissue Imaging”, MEXT Grant-in-Aid foScientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, Onna(Okinawa) (2018-10)

２６） Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, “Improvements of two-photon excitation microscopy for clear visualization of intravital subcellular structures”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, OIST, Onna(Okinawa) (2018-10)

２７） Hirokazu Ishii:“Cytoskeletal dynamics for directional transport in the fertilized ascidian eggs”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, OIST,

Onna(Okinawa) (2018-10)

２８） Hong Zhang, Kenji Yarinome, Ryosuke Kawakami, Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, Yosuke Okamura, “Using nanosheet instead of coverslip for facilitating deep tissue imaging”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, OIST, Onna(Okinawa) (2018-10)

２９） Ai Goto, Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, “Development of multi-point scanning two-photon microscopy utilizing polarizing optics and its application for intravital imaging”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, OIST, Onna(Okinawa) Onna(Okinawa) (2018-10)

３０） Kazushi Yamaguti, Ryosuke Kawakami, Tomomi Nemoto,”In vivo two-photon laser ablation within deep regions of living mouse brains”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru,, OIST, Onna (Okinawa), Onna(Okinawa) (2018-10)

３１） Takafumi Kamada, Kohei Otomo, Takashi Murata, Mitsuyasu Hasebe, Tomomi Nemoto: ”Two-photon excitation spinning disk confocal microscopy utilizing two laser light sources,” MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, OIST, Onna(Okinawa), Onna(Okinawa) (2018-10)

３２） Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, “Improving two-photon microscopy for clear visualization of intravital subcellular structures”, 1st international joint symposium of CEFMS-NTCU, RCAS-AS and 5-star Alliance Taiwan, Hsinchu (2018-05)

３３） 髙橋 泰伽*、鎗野目 健二、張 宏、川上 良介、岡村 陽介、根本 知己「高分子超薄膜を用いたマウス生体脳の in vivo 二光子イメージング手法の開発」、レーザー学会第 524 回研究会（ニューロフォトニクス研究会）、アクトシティ浜松コングレスセンター、Japan (2018-09)

３４） T. Nemoto*： “Novel multi-photon microscopy utilizing opticaltechnologies and nanomaterials”, The 6th Japan-China Symposium on Nanomedicine, 松江市, Japan (2018-05)

３５） 大友 康平*、後藤 亜衣、根本 知己：「生体コラーゲンの in vivo 高速偏光分解イメージング」、G3 分科会、東工大すずかけキャンパス、横浜市 (2018-11)

３６） 堤 元佐*、小林 健太郎、大友 康平、松尾 保孝、根本 知己：「北大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」、G3 分科会、東工大すずかけキャンパス(2018-11)

３７） 大友 康平、後藤 亜衣*、山中 祐実、根本 知己：「二光子励起スピニングディスク顕微鏡の開発と生物学応用」、新学術領域レゾナンスバイオ班会議、湘南国際村センター、横浜市 (2018-06)

３８） 山口 和志*、北村 瞭次、川上 良介、根本 知己：「2 光子レーザー光照射条件の改良によるマウス生体脳深部観察」、新学術領域レゾナンスバイオ班会議、湘南国際村センター、神奈川県三浦郡葉山町(2018-06)

３９） 石井 宏和*：「ホヤ受精卵の細胞質再配置を制御する細胞骨格系の動態」、新学術領域レゾナンスバイオ班会議、湘南国際村センター、神奈川県三浦郡葉山町 (2018-06)

４０） K. Otomo*, M. Tsutsumi, K. Kobayashi and T. Nemoto :(invited) “NIC@HokkaidoUniv. and collaborative works”, Nikon Imaging Center Directors’ Meeting, Genova, Italy (2018-05)

４１） 榎木亮介：「Ultradian Calcium Rhythms in the Paraventricular Nucleus and Subparaventricular Zone in the Hypothalamus」、新学術領域レゾナンスバイオ班会議、湘南国際村センター、神奈川県三浦郡葉山町(2018-06)

４２） 榎木亮介：「生物時計中枢を司る神経細胞ネットワークの可視化解析」、第 8 回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会及び平成 29 年度ダイナミック・アライアンス成果報告会、北海道大学、北海道札幌市 (2018-06)

４３） 榎木亮介：「ウルトラディアンカルシウムリズムの発生と制御メカニズムの全容解明」、新学術領域オシロロジー班会議、北海道函館市 (2018-06)

４４） 榎木亮介：「視床下部 ウルトラディアンカルシウムリズムの発生機序」、NanoBio 第 11 回若手ネットワーキングシンポジウム、北海道大学、北海道札幌市 (2018-06)

４５） 榎木亮介：「生物時計の光イメージングで 生きる道（ニッチ）を探る」、さきがけ細胞構成研究会 2018、北海道大学、北海道札幌市 (2018-07)

４６） 榎木亮介（招待講演）：「時を刻む脳 ～生物時計中枢神経回路の 光イメージング解析～、金沢大学統合神経生理学セミナー、石川県金沢市 (2018-09)

４７） R. Enoki（招待講演）:“lluminating Neuronal Circuits Controlling Circadian and Ultradian Rhythms in Mammals”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ Inter-

national Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru, OIST, Onna(Okinawa) (2018-10)

４８） 平田快洋、榎木亮介、繁富（栗林）香織、織田義晃、本間さと、本間研一：「マイクロパターン基板を用いた視交叉上核単一ニューロンの概日振動解析」、化学とマイクロ・ナノシステム学会第38 回研究会（CHEMINAS 38th)、札幌市民交流プラザ、北海道札幌市（2018-10）

４９） 榎木亮介:「視床下部の室傍核及び傍室傍核領域における ウルトラディアンカルシウムリズム」、アライアンス G3 分科会、東京工業大学、神奈川県 yoko はなし（2018-11）

５０） 榎木亮介（招待講演）:「時を刻む脳 ～生物時計中枢における神経回路の光イメージング解析～」、生理学会北海道地方会総会、北海道大学、北海道札幌（2018-12）

５１） 榎木亮介:「視床下部の室傍核及び傍室傍核領域における ウルトラディアンカルシウムリズム」、新学術領域オシロロジー領域会議、一橋講堂，東京（2018-12）

５２） 榎木亮介:「生物時計中枢を司る神経回路の光イメージング解析 ～電子研着任 1 年間の進捗報告～」、北海道大学電子科学研究所・研究交流会、北海道大学、札幌（2019-01）

５３） 榎木亮介（招待講演）:「時を刻む脳～生物時計中枢を司る神経回路の光イメージング解析～」、生理学研究所、所長招聘セミナー、愛知県岡崎市（2019-02）

５４） 榎木亮介（招待講演）：「生物時計中枢の光イメージング解析」、ニコン顕微鏡イメージングフォーラム、品川，東京（2019-02）

4.7 シンポジウムの開催

１） 大友 康平、根本 知己:「Nikon Imaging Center Seminar “Technical development of laser scanning fluorescent microscopy” 」（札幌市)(2019 年 2 月 22 日）

２） 根本 知己 ：「ニコンイメージングフォーラム」、品川シーズンテラスカンファレンスホール（東京都）(2019 年 02 月 08 日）

３） 大友 康平、根本 知己:「北海道大学電子科学研究所学術講演会・ニコンイメージングセンターセミナー 多次元生細胞イメージング研究会」（札幌市)(2018 年 12 月 17 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）(2018 年 11 月 26 日）

５） 大友康平、石井宏和、榎木亮介、根本知己：「 ABiS-GBI-OIST-ResonanceBioJoint Symposium ”Frontiers in Bioimaging”」（恩納村)(2018 年 10 月 31 日）

６） 大友康平、石井宏和、榎木亮介:「新学術領域研究 レゾナンスバイオ Meeting of Bioimaginf for Young Researchers “Chanpuru”」（恩納村)(2018 年 10 月 29, 30 日）

７） 根本 知己、大友 康平 ：「第 25 回 医用近赤外線分光法研究会・2018 年度分光学会生細胞分光部会・第 7 回 ニューロフォトニクス研究会」、アクトシティ浜松 (2018 年 09 月 14 日～2018 年 09 月 15 日）

８） 根本 知己、中垣 俊之 ：「北海道大学サイエンスレクチャー2018」、北海道大学電子科学研究所（札幌市）(2018 年 08 月 03 日）

９） 榎木亮介 :「さきがけ細胞構成研究会 2018」、北海道大学（札幌市）(2018-07）

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

１） 共創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)

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) 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

4) 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

5) 榎木亮介、 新学術領域研究(公募班)、ウルトラディアンカルシウムリズムの発生と制御メカニズムの全容解明、2018～2019 年度

6) 石井宏和、若手研究、二光子顕微鏡と光操作による単一神経・グリア回路網の活動伝播様式の可視化、2018～2019 年度

7) 榎木亮介、(国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(A))、生物時計中枢の生体内計測と操作、2018～2021 年度

8) 大友康平、基盤研究(C)、生体内ナノ構造を長期間にわたり可視化追跡する超解像顕微鏡法の開発、2018-2020 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
6） 榎木亮介、公益財団法人 上原記念生命科学財 研究助成金、異なる時間スケールのリズムを統合する神経機構の解明、2018～2019 年度

4.10 受賞

1） 大友康平:コニカミノルタ画像科学奨励賞「高速偏光分解二光子顕微鏡法による生体内小胞動態の高次可視化解析」 2019年2月
2） 青柳佑佳:北海道大学大塚賞、2019年3月
3） 青柳佑佳:北海道大学大学院情報科学研究科研究科長賞、2019年2月
4） 後藤亜衣:北海道大学大学院情報科学研究科研究科長賞、2019年2月
5） 高橋泰伽:北海道大学大学院情報科学研究科、三上賞、2019年2月
6） 小川拓希、生体情報工学学生研究賞、2019年2月
7） 髙橋 泰伽、鎗野目 健二、張 宏、川上 良介、岡村陽介、根本 知己 ： ポスター賞第1位「新規ナノシートを用いたマウス生体脳の in vivo二光子イメージング法の改良」（第4回北大・部局横断シンポジウム） 2019年01月
8） T. Takahashi, H. Zhang, K. Yarinome, R. Kawakami, Y. Okamura and T.Nemoto : The Best Poster Award “Novel fluoropolymer nanosheets“PEO-CYTOP” improving open skull window for in vivo imaging ofliving mouse brain”,the 12th International Symposium of-Nanomedicine (ISNM2018)) 2018年12月
9） 鎗野目 健二, 張 宏, 青木 拓斗, 川上 良介, 高橋 泰伽, 根本 知己, 岡村 陽: MRS-J 奨励賞,”Fabrication of Water-Repellent Nanosheet for Coverslip-Free Deep Tissue Imaging”, 第28回日本MRS年次大会, 福岡県小倉市、2018年12月
10）A. Goto, K. Otomo and T. Nemoto : poster award “Development of multi-point scanning two-photon microscopy utilizing polarizing optics and its application for intravital imaging” （MEXTGrant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers-Chanpuru） 2018年10月
11）K. Yamaguchi, R. Kawakami and T. Nemoto : poster award “In vivo two-photon laser ablation within deep regions of living mouse brains” （MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on InnovativeAreas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers -Chanpuru） 2018年10月
12）後藤 亜衣、大友 康平、根本 知己 ： ベストイメージング賞ニコン賞 「多点走査型 2 光子顕微鏡への偏光光学系の導入と生体イメージングへの応用」（第27回日本バイオイメージング学会学術集会） 2018年09月
13）鎌田 恭史、大友 康平、村田 隆、長谷部 光泰、根本知己 ： ベストイメージング賞浜ホト賞「多点走査型2光子顕微鏡による4重標識生細胞の3次元経時観察」（第27回日本バイオイメージング学会学術集会） 2018年09月
14）榎木亮介：中山奨励賞（中山人間科学振興財団）2018年9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「新学術領域研究（研究領域提案型）」専門委員会委員、平成 29 年 11 月~平成 30 年 3 月
2） 根本 知己：日本学術振興会科学研究費委員会専門委員（日本学術振興会） 平成 30 年 12 月1日～平成 31 年 3 月 31 日
3） 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

4） 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～）
5） 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～）
6） 根本 知己 ： 国際複合医工学会 評議員 （2013年04月01日～）
7） 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～)
8） 榎木 亮介：日本生理学会、評議員 (2014年～)
9） 榎木 亮介：日本生理学会、編集委員 (2015年～)
10）榎木 亮介：日本時間生物学会、評議員 (2014年～)

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（対象、講義名、担当者、期間）

1） 根本知己、市民講座「北海道大学の最先端の顕微鏡で見えるミクロの決死圏」、サイエンスレクチャー2018　2018年8月3日
2） 工学部、量子力学、根本 知己、2018年06月01日～2019年08月30日
3） 情報科学研究科、脳神経科学特論、榎木 亮介、根本知己、2018年04月01日～2018年05月30日
4） 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～2019年03月10日
5） 全学共通学部科目、環境と人間、根本 知己、2018年06月30日
6） 工学部、電気回路演習、根本知己　（2017－）

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

１） 出張授業「脳の不思議・心の謎」北海道立札幌南高校　2018年10月18日
２） 名古屋大学理学部、集中講義（15コマ）、非常勤講師、「生物学特論VI」、2018/10/10-12
３） 高知大理工学部、集中講義（15コマ）、非常勤講師、「先端化学特論I」、2018/9/27-28
４） 招待講演「脳の不思議、心の謎」UHB大学、北海道新聞社道新ホール、2018年6月26日
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

該当なし

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)

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：3人

1） 安宅 光倫 ： 修士(情報科学)、マウス聴覚野における神経活動を可視化するためのin vivo2光子イメージング法の開発
2） 後藤 亜衣 ： 修士(情報科学)、多点走査型二光子顕微鏡への偏光分離光学系の導入と生体イメージングへの応用
3） 髙橋 泰伽: 修士(情報科学)、高分子超薄膜を用いたマウス生体脳のin vivo2光子イメージング法

博士学位：1人

１） 青柳佑佳 ：博士（情報科学）「新規透明化法を用いたマウス脳における新生ニューロンの分布に関する研究」

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～）
助　教　与那嶺雄介（東工大院、博（工）、2018.4～）
院　生
博士課程　田崎太悠、中村聡、MBA Joshua
修士課程　濱島暁、二瓶瑞生、加藤達也、中野健太郎、石 軼尓、熊 坤
学部生　関澤侑祐

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現れる。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３０年度は、(a)センシングデバイスへの応用を指向した金ナノ構造体間距離の動的制御技術の開発、(b)異方性ナノ粒子の配向制御技術の開発、において顕著な成果をあげたので報告する。

２．研究成果

(a) ゲルを利用した金ナノ構造体間距離の精密制御

金属のナノ構造体が示す局在表面プラズモンの有効利用が注目されている。特に、金属ナノ構造体表面におけるラマン散乱の増強は表面増強ラマン散乱（SERS)と呼ばれ、センシングデバイスへの展開が期待されている。しかしながら、研究の多くは低分子を対象としたものであり、タンパク質や細菌などのセンシングではその感度は低い。SERSはナノ構造体のギャップ部位、特にそのギャップ間距離が短いほど高い増強効果が期待できるが、ギャップを小さくすると測定対象物質がギャップ部位に入り込みにくくなるという問題があるためであると考えられた。そこで、我々は、外部刺激に応答して膨潤・収縮するハイドロゲルの上に金ナノ構造体を固定化し、ゲルの膨潤・収縮によるサイズの変化によって金ナノ構造体のギャップを動的に制御することで、効率よくターゲットを金ナノ構造体間に取り込み、SERSを著しく増強可能な高感度検出デバイスの創製に取り組んできた。

これまでに、ハイドロゲル上に金ナノ構造体を転写する技術を確立し、ゲルの体積を変化させることで金ナノ構造体間の距離が動的に変化することをスペクトルの波長シフトから確認している。さらに、金ナノ粒子間距離を動的に変化させることで、タンパク質(Cytochrome C)の検出において10倍程度強いシグナルが得られ、本手法が巨大分子のSERS測定において有効であることも明らかにした。一方で、本手法をより有効に活用するためには、ギャップ距離を精密に制御することが重要になると考えられたが、ゲルの体積変化による実際の金ナノ構造体間距離の変化は不明瞭であった。そこで、本年度はゲルを利用した金ナノ構造体間距離の制御の精度について調べた。

電子線リソグラフィーを用いて約80nm角のドットパターンを作製し、それをポリアクリル酸ゲルの表面に転写した（図１)。得られたゲルは、外液の塩濃度を変えることで大きさが可逆的に変化し、その体積変化に応じて金ナノパターンの吸収（消光）スペクトルも変化することが確認された。ゲルの体積変化を行った際の金ナノドットパターンを原子間力顕微鏡を用いてイメージングを行った結果、ドットパターンは均一に変化している様子が観察できた。しかしながら、柔らかいゲル表面のイメージングであるため、高い解像度のイメージングは難しかった。

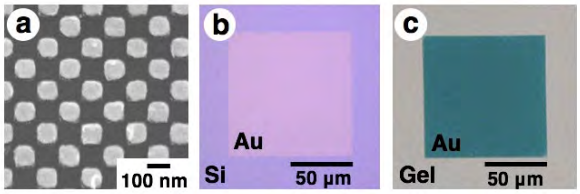


図１．シリコン基板表面に作製された大きさ約80nm の金ナノドット配列の電子顕微鏡像(a)と大きさ100×100μm の金ナノドット配列全体の光学顕微鏡像(b)、ゲル表面に転写後の金ナノドット配列全体の光学顕微鏡像(c)。

そこで、ゲルの膨潤溶媒を水から不揮発性のイオン液体に置換し、電子顕微鏡観察を行うことで、ゲルの体積変化に応じた金ナノドットパターンの変化をイメージングした。その結果、nm レベルの解像度で精細な画像を得ることに成功し、数 nm 程度以下のばらつきで、均一に構造体間距離を変えられることが明らかになった（図２)。この結果は、nm スケールで精密に構造体間距離を制御可能になることを意味しており、ゲルを利用したギャップ距離制御技術の有用性を支持するものである。

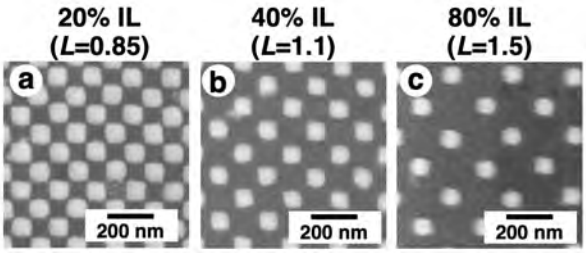


図２．イオン液体（IL）で膨潤したゲルの表面にある金ナノドットの走査型電子顕微鏡像。

(b) DNA 固定化表面を利用した金ナノロッドの垂直配向固定化

金属ナノ粒子で起こる表面プラズモン共鳴（SPR）は、粒子の大きさや形状に依存し、棒状の金ナノ粒子（金ナノロッド）などの異方的な形状の粒子では複数のプラズモン吸収ピークを示す。特に、長波長側でみられるLongitudinal SPRは短波長側のTransverse SPRよりも高感度であり、その形状により波長を制御可能であることなどから、その応用が検討されている。一方で、異方性ナノ粒子を用いてLongitudinal SPRを効果的に利用する場合、その配向を制御することが重要になる。これまで、金ナノロッドを自己集合化させることで配向が揃った集合体の作製などが報告されているが、粒子の密度と配向を適切に制御可能な技術はほとんどない。

我々はこれまで、DNAを片末端で固定化した基板（DNAブラシ）の機能性界面としての利用を検討してきており、本研究ではDNAブラシを足場（鋳型）とした金ナノロッドの配向固定化法について、詳細に検討を行った（図３）。

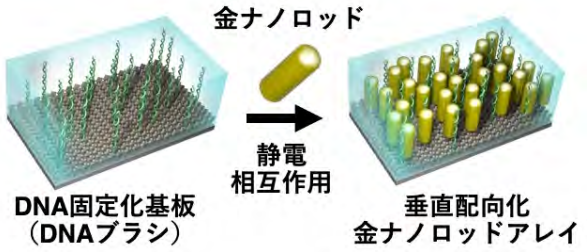


図３．DNA固定化基板を足場とした垂直配向化金ナノロッドアレイ作製の模式図

片末端にビオチンを有する148 bp（長さ50 nm程度）のDNAを調製し、ストレプトアビジン基板上に固定化した。この基板にカチオン性リガンドで被覆した金ナノロッド（約10 nm x 34 nm）を静電的に吸着させた。金ナノロッド表面のカチオン被覆量（割合）が10～40%程度と低めであれば、基板に垂直に入射した光ではTransvers SPRは励起されるが、Longitudinal SPRがほとんど観察されないことが確認され、概ね垂直に配向固定化されていることがわかった。しかしながら、わずかではあるが800 nm付近にLSPRが観察されており、配向度に関して改善の余地があると考えられた。電子顕微鏡観察の結果から、DNA鎖に沿って吸着している垂直配向化金ナノロッドの上に、横たわって吸着している金ナノロッドが存在していることがわかった。この横たわって吸着している金ナノロッドは、200mMの塩溶液で洗浄することで選択的に除去することができ、きれいな金ナノロッドの配向化アレイが得られることが明らかになった（図４，５）。

本手法は、鋳型（足場）に柔らかく構造変化できる材料（DNA）を用いていることから、外部刺激や環境変化によって配向を動的に制御可能なアレイへの展開が期待される。

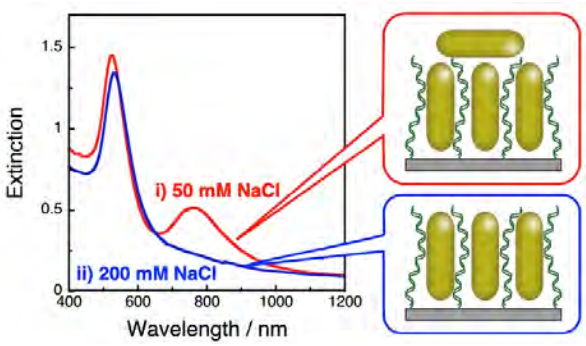


図４．DNA固定化基板上に吸着した金ナノロッドの消光スペクトルと金ナノロッドアレイのイメージ。i）50 mM NaCl溶液で洗浄後、ii）200 mM NaCl溶液で洗浄後

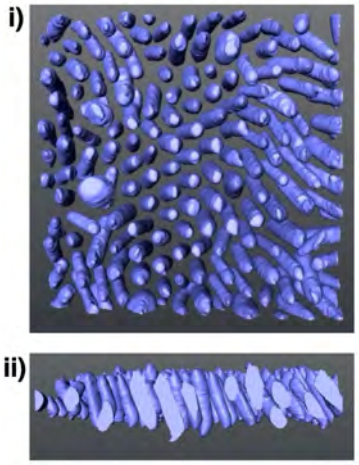


図５．金ナノロッドアレイの透過型電子顕微鏡観察より得られた３次元イメージ。i）上方からのイメージ ii）側方からのイメージ（東北大学多元物質科学研究所・陣内教授との共同研究による成果）

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） J. Wei, H. Mitomo, T. Tani, Y. Matsuo, K. Niikura, M. Naya and K. Ijiro: “Size-Defined Cracked Vesicle Formation via Self-Assembly of Gold Nanoparticles Covered with Carboxylic Acid-Terminated Surface Ligands”, *Langmuir*, 34 (41), 12445-12451 (2018) 【電子研内共著】

２） T. Tazaki, K. Tabata, A. Ainai, Y. Ohara, S. Kobayashi, T. Ninomiya, Y. Orba, H. Mitomo, T. Nakano, H. Hasegawa, K. Ijiro, H. Sawa, T. Suzuki and K. Niikura: “Shape-dependent adjuvanticity of nanoparticle-conjugated RNA adjuvants for intranasal inactivated influenza vaccines”, *RSC Adv.*, 8 (30), 16527-16536 (2018)

３） S. Hamajima, H. Mitomo, T. Tani, Y. Matsuo, K. Niikura, M. Naya and K. Ijiro: “Nanoscale uniformity in the active tuning of a plasmonic array using polymer gel volume change”, *Nanoscale Advances*, 1, 1731-1739 (2019) 【電子研内共著】

４） K. Hiramatsu, T. Ideguchi, Y. Yonamine, S.-W. Lee, Y. Luo, K. Hashimoto, T. Ito, M. Hase, J.-W. Park, Y. Kasai, S. Sakuma, T. Hayakawa, F. Arai, Y. Hoshino and K. Goda, “High-throughput label-free molecular fingerprinting flow cytometry” *Sci. Adv.,* **5**, eaau0241 (2019).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） 三友秀之：「1 種類の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段階集合化」、*Colloid & Interface Communication*, 43(3), 35-37 (2018)

２） 三友秀之、居城邦治：「DNA 固定化基板を足場としたロッド状金ナノ粒子の配向化」、セラミックス（日本セラミックス協会）, 53(6), 407-410 (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*, M. Nihei, S. Nakamura, Y. Matsuo, K. Ijiro: “Alignment Change of AuNRs on the DNA Brush Substrates by the Applied Electric Field towards Active Plasmonic Control”, SPIE optics + Photonics, San Diego, USA (2018-08)

２） K. Ijiro*: “Development of Stimuli-Responsive Gold Nanostructure Assembly and those Applications”, NMS-XIV (14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis), Guangzhou, China (2018-10)

ｂ．招待講演（国内学会）

１） H. Mitomo*: “Active control of metal nanostructures using flexible polymers”, 第 67 回高分子討論会 The Japan-Korea Joint Symposium, 北海道大学, (2018-09)

ｃ．一般講演（国際学会）

１） H. Mitomo*, R. Iida, K. Niikura, K. Ijiro: “Two-Step Assembly of Gold Nanorods Using Curvature-Dependent Dehydration of the Surface Ligands”, ICOMF17 (17th International Conference on Organized Molecular Films), New York, USA (2018-07)

２） H. Mitomo*, S. Hamajima, Y. Matsuo, K. Niikura, K. Ijiro: “Active Gap Control of Gold Nanodots on the Gel Surface”, AsiaNANO 2018 (Asian Conference on Nanoscience and Nanotechnology 2018), Qingdao, China (2018-10)

３） S. Hamajima*, H. Mitomo, Y. Matsuo, K. Niikura, K. Ijiro: “Evaluation of Change in Gap Distances between Gold Nanodots Immobilized on Hydrogel Surface”, NMS-XIV (14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis), Guangzhou, China (2018-10)

４） M. Nihei*, S. Nakamura, Y. Matsuo, H. Mitomo, K. Ijiro: “Immobilization of Gold Nanorods on Electrode Surface and Orientation Change by Electric Field”, NMS-XIV (14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis), Guangzhou, China (2018-10)

ｄ．一般講演（国内学会）

１） 濱島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：「高分子ゲル表面に固定化した金ナノドット間のギャップ距離変化の評価」、ナノ学会 第 16 会大会、東京大学 (2018-05)

２） 三友 秀之*、飯田 良、新倉 謙一、居城 邦治：「単一のリガンド分子で修飾した金ナノロッドの二段階温度応答性自己集合」、第 67 回高分子学会年次大会、名古屋国際会議場 (2018-05)

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：「電解質高分子ブラシを用いたロッド状ナノ粒子の垂直配向アレイの作製」、第 67 回高分子学会年次大会、名古屋国際会議場 (2018-05)

４） 濱島 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固定化した金ナノドット間のギャップ距離変化の評価」、第 67 回高分子学会年次大会、名古屋国際会議場 (2018-05)

５） 濱島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦

治：「高分子ゲル表面に配置した金ナノドット間のギャップ距離変化の評価」、日本化学会北海道支部 2018 年夏季研究発表会、北見工業大学 (2018-07)

6） 二瓶 瑞生*、中村 聡、三友 秀之、松尾 保孝、居城 邦治：「ITO 基板上に垂直固定化した金ナノロッドの電場による配向変化」、日本化学会北海道支部 2018 年夏季研究発表会、北見工業大学 (2018-07)

7） 与那嶺 雄介*、平松 光太郎、伊藤 卓朗、井手口、 拓郎、三浦 佳子、合田 圭介、星野 友：「安定同位体標識を用いた共鳴ラマンイメージングによる藻類の代謝追跡」、第 28 回バイオ・高分子シンシンポジウム、東京工業大学大岡山キャンパス (2018-07)

8） 二瓶 瑞生*、中村 聡、三友 秀之、松尾 保孝、居城 邦治：「電極表面への金ナノロッドの固定化と電場による配向変化」、北海道高分子若手研究会、札幌市 (2018-08)

9） 与那嶺 雄介*、平松 光太郎、伊藤 卓朗、井手口 拓郎、三浦 佳子、合田 圭介、星野 友：「安定同位体標識と共鳴ラマンイメージングによる藻類の色素生産プロセス追跡」、第 67 回 高分子討論会、北海道大学 (2018-09)

１０）中村 聡*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、樋口 剛志、陣内 浩司、居城 邦治：「二本鎖 DNA ブラシを用いた垂直配向金ナノロッドからなる単層アレイの作製」、第 67 回高分子討論会，北海道大学 (2018-09)

１１）濱島 暁*、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：「高分子ゲルを利用した金ナノドット間距離と表面プラズモンの制御」、第 67 回高分子討論会，北海道大学 (2018-09)

１２）濱島 暁、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：「高分子ゲル表面に作製した金ナノドット間のナノスケールでの距離変化の評価」、化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会，北海道大学，(2019-01)

１３）与那嶺 雄介*、鈴木 祐太、合田 圭介、小関 泰之、星野 友：「安定同位体標識を用いたラマンイメージングによる藻類の代謝追跡」、日本化学会 第 99 春季年会、甲南大学岡本キャンパス (2019-03)

１４）濱島 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を利用した金ナノドット間のナノスケールでの距離制御」、日本化学会 第９９春季年会，甲南大学岡本キャンパス，(2019-０３)

ｅ． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） Y. Yonamine*, K. Hiramatsu, T. Ito, T. Ideguchi, Y. Miura, K. Goda, Y. Hoshino, “Spaciotemporal monitoring of carotenoid production in microalgal cells by resonance Raman imaging probing with $^{13}CO_2$ incubation.”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium，定山渓ビューホテル (2018-12)

2） S. Hamajina*, H. Mitomo, Y. Matsuo, K. Niikura, K. Ijiro: “Nanoscale uniformity of gold nanodot array prepared on the poly(acrylic acid) gel surface”, The 19th RIES-Hokudai International Symposium, 札幌市 (2018-12)

3） M. Nihei*, S. Nakamura, Y. Matsuo, H. Mitomo, K. Ijiro: “Active orientation change of gold nanorods immobilized on the electrode surface”, The 19th RIES-Hokudai International Symposium，札幌市 (2018-12)

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） 三友 秀之：「金ナノ粒子集合体の構造解析」、西野 吉則、鈴木 明大（コヒーレント光研究分野）

ｂ．民間等との共同研究

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

2） 居城 邦治: 「フェノール性水酸基を持つポリイミド微粒子の合成」、渡邉 眞次（北見工業大学）

3） 居城 邦治: 「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」、木村-須田 廣美（千歳科学技術大学）

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

5） 居城 邦治、三友 秀之：「金属ナノ構造体の３次元構造解析」、陣内 浩司（東北大学）

6） 三友 秀之：「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」、新倉 謙一（日本工業大学）

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

1） K. Ijiro：“Enzymatic fabrication of conductive materials”, Newcastle University, UK, 2018 年

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

3） K. Ijiro: “Molecular diagnostics through DNA modification and interfacial engineering”, University of Newcastle upon Tyne, UK, 2018 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、基盤研究 B（代表）：三角形ナノプレートと脂質膜への誘導システムによる超高感度バイオセンサーの創製、2018～2020 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） 与那嶺 雄介、基盤研究C（代表）：合成高分子アシストによる機能強化タンパク質の開発、2018～2020 年度

4） 中村 聡、特別研究員奨励費：偏光面や入射角に依存して動く光駆動型ゲルアクチュエータの開発、2018～2019 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 居城 邦治、三友 秀之、納谷 昌之、谷 武晴（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、公益財団法人 日揮・実吉奨学会、ロッド状金ナノ粒子の動的な配向制御システムの創製、2018～2019 年

3） 与那嶺 雄介、ImPACT プログラム（セレンディピティの計画的創出による新価値創造）、「有用細胞をスクリーニングするための高感度ラマンプローブ開発」、2018 年

4） 与那嶺 雄介、科学技術人材育成のコンソーシアムの構築事業（連携型博士研究総合育成システム）「次世代研究者育成プログラム」、2018～2019 年度

4.10 受賞

1） 濱島 暁、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：Young best presentation award 「高分子ゲル表面に固定化した金ナノドット間のギャップ距離変化の評価」 （ナノ学会第 16 回大会） 2018 年 05 月

2） 濱島 暁、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：優秀講演賞「高分子ゲル表面に配置した金ナノドット間のギャップ距離変化の評価」（日本化学会北海道支部 2018 年夏季研究発表会） 2018 年 07 月

3） H. Mitomo, S. Hamajima, Y. Matsuo, K. Niikura, K. Ijiro: Best Presentation Award「Active Gap Control of Gold Nanodots on the Gel Surface」(Asian Conference on Nanoscience and Nanotechnology 2018) 2018 年 10 月

4） K. Ijiro: Distinguished Award 2018 for Novel Materials and their Synthesis「Development of Stimuli-Responsive Gold Nanostructure Assembly and those Applications」(14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis) 2018 年 10 月

5） M. Nihei, S. Nakamura, Y. Matsuo, H. Mitomo, K. Ijiro: Excellent Poster Prize「Immobilization of Gold Nanorods on Electrode Surface and Orientation Change by Electric Field」(14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis) 2018 年 10 月

6） 濱島 暁、三友 秀之、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治：優秀講演賞（口頭部門）「高分子ゲル表面に作製した金ナノドット間のナノスケールでの距離変化の評価」（化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会） 2019 年 01 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～現在）

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～現在)

6） 居城 邦治：バイオミメティクス研究会 第34期運営委員 (2018年4月1日～現在)

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～2019年3月31日)

8） 三友 秀之 ： 高分子学会 会誌「高分子」編集委員 (2018年6月1日～2020年5月31日)

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～2019 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 34 期運営委員 （2018 年 04 月 01 日～現在）

d．外国人研究者の招聘

1） Andrew Pike, UK, (2018 年 1 月)

2） Eimer Tuite, UK, (2018 年 8 月)

3） R. John Errington, UK, (2018 年 8 月)

4） Javier Barroso Lázaro, Spain, (2019 年 2－4 月)

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 総合化学院、総合化学特別研究、居城 邦治、2018年4月～2019年3月

2） 総合化学院、総合化学実験指導法、居城 邦治、2018年4月～2019年3月

3） 総合化学院、総合化学実験研究法、居城 邦治、2018年4月～2019年3月

4） 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、2018年4月－6月

5） 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、2018年6月－8月

６） 全学共通、科学技術の世界　はじめての生命科学、居城 邦治、2018年7月

７） 生命科学院、ソフトマター分子科学特論（高分子化学）、居城 邦治、三友 秀之、2018 年 6 月－8 月

８） 生命科学院、ソフトマター分子科学特論（超分子化学）、居城 邦治、2018 年 10 月－11 月

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：２名

１） 濱島 暁：修士(理学)、高分子ゲルを利用した金ナノロッド間距離変化の精密評価

２） 二瓶 瑞生：修士（環境科学）、DNAブラシに固定化した金ナノロッドの刺激応答性配向制御

博士学位：２名

１） 田崎 太悠：博士(理学)、Design and preparation of influenza vaccines using gold nanoparticle

２） 中村 聡：博士(理学)、Orientation Control of Nanorods with the Assistance of Polymer Brush

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
中村圭佑、曹 艳凤、臧 潇倩、王 亜光
修士課程
山田拓樹、三上剛志、城春樹、巽亮太、清水風希、劉言恩

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に先駆けて提唱し、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、国際的にも本分野を牽引してきた。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29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。また、波長可変レーザーを用いて光電子強度の作用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し、光電子顕微鏡が金属ナノ構造間に誘起される強結合や弱結合の本質を理解する上で有用な方法論であることを示した。

これまでの研究成果に基づき、平成30年度は、「モード強結合」を用いて、より幅広い可視波長域の光を強く吸収する機能を発現する光プラズモン電極の開発に成功するとともに、局在型と伝搬型プラズモンをモード強結合させ、位相緩和時間を自在に制御することに初めて成功した。

２．研究成果

（１）モード強結合による広帯域吸収光電極の創製

石英ガラス基板上に金フィルム（Au-film）をスパッタリングにより100 nm成膜し、金表面をメルカプトエタノールで表面処理した後、原子層堆積(ALD)装置で任意の膜厚の酸化チタン（TiO_2）を成膜後、TiO_2上に真空蒸着により金を数ナノメートル成膜・アニーリング（300℃）し、金ナノ微粒子(Au-NPs)/TiO_2/Au-film（ATA）構造を作製した。図1に、ATA構造基板、Au-NPs/TiO_2基板、TiO_2/Au-film基板の写真を示す。Au-NPsを配置しないTiO_2/Au-film基板は、金色（図1(c)ではグレースケールのため灰色）に近い色を呈しているが、TiO_2/Au-film基板上にAu-NPsを配置すると黒色に変化することが明らかになった。

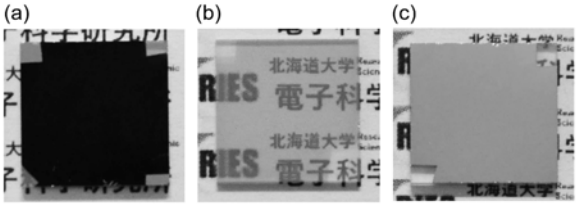


図１（a）ATA構造基板、（b）Au-NPs/TiO_2基板、および(c) TiO_2/Au-film基板の写真

吸収スペクトル（1-T-R）を測定したところ可視波長域で強い光吸収が観測された。さらに、ATA構造にALD装置を用いてTiO_2を数ナノメートル成膜するとAu-NPsがTiO_2層に部分的に埋め込まれることにより、図2(a)に示すように可視光の幅広い波長域において強い光吸収を示すATA構造を得ることに成功した。吸収スペクトルの広帯域化は、プラズモン共鳴スペクトルが2つのピークに分裂することによる。これは、Au-NPsの局在プラズモン（LSPR）と、TiO_2/Au-film構造によって形成されるFabry-Pérotナノ共振器モードが空間的に接近し、且つそれらの共鳴周波数が近接したときに、LSPRと共振器モードがモード強結合を示し、ハイブリッドモードと呼ばれる2つのモードが生じ、その内の反結合モードが元のピークより短波長側に、結合モードが長波長側に出現するためである。ATA光電極を用いて光電気化学計測を行ったところ、入射光量に対する電流変換効率(IPCE)の作用スペクトル（図2(b)）は、吸収スペクトルの形状とほぼ一致した。さらに、水を電子源とした際の

IPCE（光電流の外部量子収率）が強結合系電極を用いると非強結合電極に比べて増大し、波長400 nm～950 nmの平均IPCE値が約11倍となることが示された。特筆すべきは、IPCEのみならず、強結合波長領域において内部量子収率(IQE)も増大することが明らかになった点である。

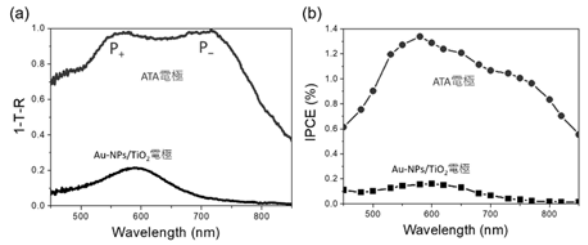


図2（a）ATA 電極および Au-NPs/TiO_2電極の1-T-R スペクトル、（b）ATA 電極および Au-NPs/TiO_2電極の IPCE 作用スペクトル

（２）モード強結合によるプラズモン位相緩和の制御

透明電導成膜である ITO（インジウムスズ酸化物）をコートしたガラス基板上に、厚さ20 nm の Au-film を成膜し、さらにその上に厚さ25 nm のアルミナ層（Al_2O_3）を成膜した。このアルミナ層の上に金ナノブロック（Au-NBs）の周期構造（直方体形状100～160 nm の任意のサイズ（縦と横の長さは同じ）、高さ40 nm）を既報の電子ビームリソグラフィー／リフトオフにより Au-NBs/Al_2O_3/Au-film 構造を作製した。図3(a)に Au-NBs/Al_2O_3/Au-film 構造の上面走査型電子顕微鏡（SEM）像、および図3(b)に断面エネルギー分散型 X 線分光（EDS）像を示す。

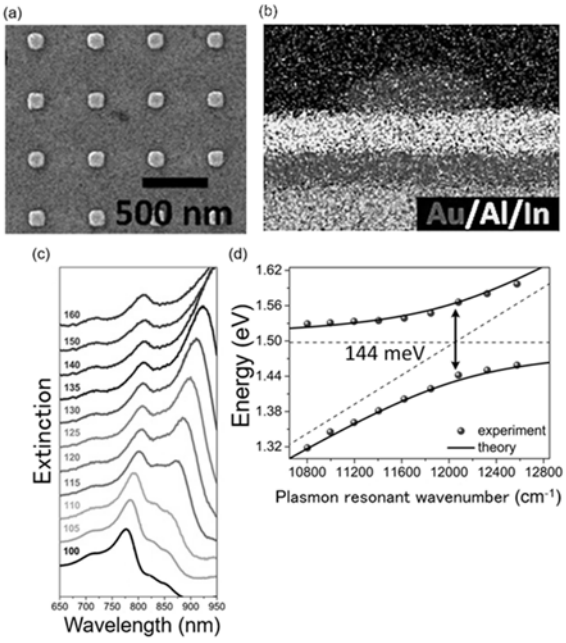


図 3（a） Au-NBs/Al_2O_3/Au-film 構造の上面 SEM 像、（b）Au-NBs/Al_2O_3/Au-film 構造の断面 EDS 像、(c) Au-NBs/Al_2O_3/Au-film 構造の消光スペクトル、（d）分散曲線

図3(c)に、Au-NBs/Al_2O_3/Au-film 構造の金ナノブロック側から光を入射して測定した消光スペクトルを示す（構造周期は500 nm）。この消光スペクトルの波長800 nm 付近に観測されるピークは、金ナノブロック周期構造により生じた回折光が下方の Au-film の伝型プラズモンを励起することによって生じた共鳴帯であると考えられ、またそれより長波長側に存在するピークは、金ナノブロックのサイズを小さくすると短波長シフトすることから局在型プラズモン共鳴帯であると考えられる。これらの帰属は、電磁場シミュレーションによって支持された。

特筆すべき点は、構造サイズが115 nm、または110 nm 程度になると、伝搬型プラズモン由来のピークと局在プラズモンのピークの波長が近づき、短波長側のピークでさえ波長シフトが引き起こされていることである。図3(d)に、短波長側および長波長側のピークエネルギーをそれぞれ元の局在プラズモン波数に対してプロットした分散曲線を示すが、強結合に特有の反交差な振る舞いが見られており、伝搬型プラズモンモードが金ナノ微粒子の局在プラズモンモードと強結合することによって生じるハイブリッドモードと呼ばれる新しい状態が形成されたことを示している。

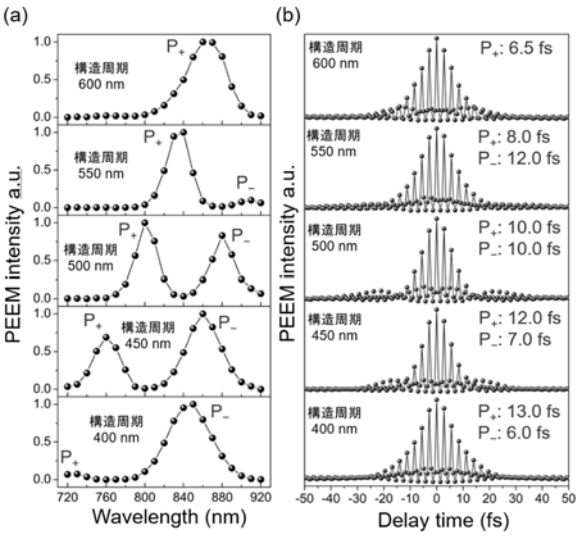


図4（a）さまざまな構造周期における光電子強度の作用スペクトル、（b）さまざまな構造周期における光電子強度のレーザー光パルス（プローブ光）の遅延時間依存性

本現象をより深く理解するために、図4(a)に示すようにさまざまな構造周期における光電子強度の作用スペクトルを測定して、近接場スペクトルを得た。測定レーザー光の波長可変領域が720～920 nm と限られるために、構造周期が600 nm の構造ではハイブリッドモードの P_-は測定波長の範囲内に収まっていないが、構造周期500 nm と450 nm においては、明瞭に P_+と P_-由来の2つのバンドが観測された。

さらに時間分解光電子顕微鏡を用いて、図4(b)に示すようにさまざまな構造周期における光電子強度のレーザー光パルス（プローブ光）の遅延時間依存性を測定した。このデータの解析により、P_+と P_-それぞれのモードの位相緩和時間を見積もることができ、伝搬型プラズモンモードと局

在プラズモンモードの共鳴波長が最も近い構造周期500 nmにおいては、それぞれ10.0 fs であること、そして最も離れている構造周期400 nm ではそれぞれ13.0 fs と6.0 fs であることが明らかとなった。このことから、強結合条件下プラズモンの共鳴波長を変調することにより、金ナノ微粒子の位相緩和時間を制御できることを明らかにした。

３．今後の研究の展望

従来、局在プラズモンにより生成する近接場を時間的により長く閉じ込めることは難しいと考えられてきた。しかし、本研究により、伝搬型と局在型のプラズモンの強結合を用いれば、空間のみならず、時間的にもより効果的に近接場を閉じ込められることが示された。したがって、プラズモン太陽電池や人工光合成系（水分解・アンモニア合成・二酸化炭素固定など）などの光エネルギー変換系のアンテナのみならず、局在プラズモン共鳴を利用した種々の光化学反応系や化学センサーの高感度化にも応用が期待される。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） K. Nakamura, T. Oshikiri, K. Ueno, T. Katase, H. Ohta, H. Misawa, “Plasmon-Assisted Polarity Switching of a Photoelectric Conversion Device by UV and Visible Light Irradiation”, J. Phys. Chem. C, 122, 25, 14064-14071 (2018).【電子研内共著】

２） X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki, H. Misawa, “Enhanced water splitting under modal strong coupling conditions”, Nat. Nanotechnol., 13, 953-958 (2018). 【電子研内共著】

３） M.-N. Su, Q. Sun, K. Ueno, W.-S. Chang, H. Misawa, “Optical characterization of gold nanoblock dimers: from capacitive coupling to charge transfer Plasmons and rod modes”, J. Phys. Chem. C, 122, 31, 18005-18011 (2018).

４） W. Liu, Z. Dai, J. Yang, Q. Sun, C. Gong, N. Zhang, K. Ueno, H. Misawa, “Ultrabroad and angle tunable THz filter based on multiplexed metallic bar resonators”, IEEE Photon. Technol. Lett., 30, 24, 2103-2106 (2018).

５） J. Yang, Q. Sun, K. Ueno, X. Shi, T. Oshikiri, H. Misawa, Q. Gong, “Manipulation of the dephasing time by strong coupling between localized and propagating surface plasmon modes”, Nat. Commun., 9, 4858 (2018).

６） M. Eguchi, J. Li, K. Ueno, H. Misawa, “Formation of Nanostructure-Controlled Strong Coupling of Porphyrin Molecules and Silver Nanoparticles Using Layered Silicates”, Chem. Lett., 48, 3, 211-214 (2019).

７） H. Song, Q. Sun, J. Li, F. Yang, J. Yang, Y. Li, K. Ueno, Q. Gong, and H. Misawa, “Exotic Mode Suppression in Plasmonic Heterotrimer System”, J. Phys. Chem. C, 123, 2, 1398-1405 (2019).

８） W.-Y. Tsai, T. L. Chung, H.-H. Hsiao, J.-W. Chen, R. J. Lin, P. C. Wu, G. Sun, C,-M. Wang, H. Misawa, D. P. Tsai, “Second Harmonic Light Manipulation with Vertical Split Ring Resonators”, Adv. Mater., 31, 7, 1806479 (2019).

９） X.-Y. Zhang, Z.-Y. Li, Y. Zhang, X.-Q. Zang, K. Ueno, H. Misawa, K. Sun, “Bacterial concentration detection using a PCB-based contactless conductivity sensor”, Micromachines, 10, 1, 55-1-11 (2019).

１０）W.-Y. Tsai, Q. Sun, G. Hu, P. C. Wu, R. J. Lin, C.-W. Qiu, K. Ueno, H. Misawa, and D. P. Tsai, “Twisted Surface Plasmons with Spin-Controlled Gold Surfaces”, Adv. Optical Mater., 7, 1801060 (2019).

１１）K. Ueno, J. Yang, Q. Sun, D. Aoyo, H. Yu, T. Oshikiri, A. Kubo, Y. Matsuo, Q. Gong, H. Misawa, “Control of plasmon dephasing time using stacked nanogap gold structures for strong near-field enhancement”, Appl. Mater. Today, 14, 159-165 (2019). 【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） 押切友也、上野貢生、三澤弘明：「局在表面プラズモン共鳴を用いた人工光合成」、触媒、60(3)：140-145 (2018)

２） 上野 貢生, 石 旭, 押切 友也, 孫 泉, 松尾 保孝, 笹木 敬司, 三澤 弘明：「モーダル型強結合を利用した広帯域光吸収体の構築とその水の完全解システムへの展開」、NanotechJapan Bulletin、11(5)：企画特集 ナノテクノロジーPick Up ～新展開をもたらすナノテクノロジープラットフォーム～ 第 17 回 (2018) 【電子研内共著】

4.4 著書

１） 上野　貢生、三澤　弘明：「化学の要点シリーズ 29 プラズモンの化学」、共立出版 (2019)

２） 三澤弘明：「CSJ カレントレビュー32　プラズモンと光圧が導くナノ物質科学」、Part I: 2 章、4 章、化学同人 (2019)

３） 石原一、岡本裕巳、笹木敬司、笹倉英史、鳥本司、三澤弘明、村越敬、(聞き手) 栗原和枝：「CSJ カレントレビュー32　プラズモンと光圧が導くナノ物質科学」、Part I: 第 3 章、化学同人 (2019)

４） 三澤弘明、上野　貢生、押切　友也：「CSJ カレントレビュー32　プラズモンと光圧が導くナノ物質科学」Part I: 2 章、Part II:13 章、化学同人 (2019)

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. Oshikiri, R. Takakura, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, “Artificial photosynthesis using plasmonic photoanode”, 233rd ECS Meeting, Seattle Sheraton and Washington State Convention Center, Seattle, USA, May 13-17, 2018.

2） K. Ueno, J. Guo, X. Shi, T. Oshikiri, H. Misawa, “Plasmon-induced photocurrent generation for exploring the near-field of strongly coupled plasmonic systems”, 233rd ECS Meeting, Seattle Sheraton and Washington State Convention Center, Seattle, USA, May 13-17, 2018.

3） H. Misawa, “Water Splitting Using Strong Coupling Between Localized Surface Plasmon and Cavity Modes”, Noble Metal Nanoparticles Gordon Research Conference, Mount Holyoke College, South Hadley, USA, June 17-22, 2018.

4） K. Ueno, Q. Sun, and H. Misawa, “Near-field spectral properties of nano-engineered metallic nanoparticles”, OSA Advanced Photonics Congress 2018, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, July 2-5, 2018.

5） K. Ueno, Q. Sun, X. Shi, T. Oshikiri, H. Misawa, “Near-field spectral properties of the coupled plasmonic systems”, Asia Pacific Society for Materials Research (APSMR 2018), Sapporo Convention Center, Sapporo, July 19-22, 2018.

6） Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced water splitting promoted by strong coupling between nanocavity and localized surface plasmon modes”, The 15th international conference of Near-field Optics and Nanophotonics (NFO-15), The University of Technology of Troyes, Troyes, France, August 26-28, 2018.

7） K. Ueno, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, K. Sasaki, H. Misawa, “Construction of visible responsive broadband absorber utilizing strong coupling between plasmon and nanocavity modes and its application to light energy conversions”, The 79th JSAP Autumn Meeting, JSAP-OSA Joint Symposia, 名古屋国際会議場, 名古屋, 2018 年 9 月 19 日

8） H. Misawa, “Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions”(Keynote), 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018), Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 16-20, 2018.

9） K. Ueno, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, H. Misawa, “Fluorescence properties of organic dye in infrared plasmon-cavity strong Coupling”, 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018), Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 16-20, 2018.

b．招待講演（国内学会）

1） 上野貢生、石 旭、孫 泉、押切友也、笹木敬司、三澤弘明,「プラズモンーナノ共振器強結合による広帯域光吸収体の構築と光エネルギー変換系への展開」, 第 67 回高分子討論会, 北海道大学, 札幌, 2018 年 9 月 12 日～14 日

2） 三澤弘明,「局在プラズモン共鳴を用いた光エネルギー変換システムの構築」, 第 122 回触媒討論会, 北海道教育大学函館校, 函館, 2018 年 9 月 26 日～28 日

3） Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Multidimensional characterization of plasmonic nanomaterials in near field by photoemission electron microscopy”, 第 28 回日本 MRS 年次大会, 北九州国際会議場・西日本総合展示場, 北九州, 2018 年 12 月 18 日～20 日

4） X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki, H. Misawa, “Enhanced plasmon-induced water splitting under modal strong coupling conditions”, 第 28 回日本 MRS 年次大会, 北九州国際会議場・西日本総合展示場, 北九州, 2018 年 12 月 18 日～20 日

c．一般講演（国際学会）

1） K. Ueno, J. Yang, R. Tatsumi, Q. Sun, T. Oshikiri, H. Misawa, “Near-field spectral properties of metal/insulator/metal nanostructures showing quadrupole plasmon mode”, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara Kasugano International Forum, Nara, July 8-13, 2018.

2） T. Oshikiri, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, “Fabrication of high-absorption plasmonic photoanode with through-hole array”, 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018), Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 16-20, 2018.

3） Y. Wang, X. Shi, T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, “Improvement of plasmon-induced photocurrent generation on Ga2O3 loaded with gold nanoparticles based on interfacial modification”, 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018), Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 16-20, 2018.

4） X. Zang, X. Shi, T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, “Modal strong coupling for versatile surface-enhanced Raman scattering chips”, 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018), Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 16-20, 2018.

5） Y.-E. Liu, K. Ueno, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, H. Misawa, “Spectral properties of modal strong coupling between localized surface plasmon and Fabry-Pérot nanocavity modes”, 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018), Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 16-20, 2018.

d．一般講演（国内学会）

1） Y. Li, Q. Sun, K. Ueno, Q. Gong, H. Misawa, “Correla-

tion between near-field enhancement and dephasing time in plasmonic dimers", 2018 年光化学討論会, 関西学院大学, 西宮, 2018 年 9 月 5 日～7 日

2） K. Ueno, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, H. Misawa, "Spectral properties of dye molecules in infrared plasmon-cavity strong coupling systems", 2018 年光化学討論会, 関西学院大学, 西宮, 2018 年 9 月 5 日～7 日

3） 城 春樹, 押切友也, 上野貢生, 三澤弘明, 「プラズモン誘起電荷分離を用いた芳香族の光電気化学還元」, 2018 年光化学討論会, 関西学院大学, 西宮, 2018 年 9 月 5 日～7 日

4） Y. Wang, X. Shi, T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, "Plasmon-induced photocurrent generation on Ga2O3 loaded with gold nanoparticles", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, 2019 年 3 月 9 日～12 日

5） 大西 梓, S. Zu, 石 旭, 孫 泉, 押切友也, 上野貢生, 三澤弘明, 「局在プラズモンーナノ共振器強結合場における蛍光分子 の発光特性」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, 2019 年 3 月 9 日～12 日

6） Q. Sun, J. Yang, K. Ueno, T. Oshikiri, H. Misawa, "Strong coupling between localized and propagating surface plasmon modes revealed in the near field from spectral and temporal domains", 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, 2019 年 3 月 9 日～12 日

7） 上野貢生, J. Yang, 巽 亮太, 孫 泉, 押切友也, 三澤弘明, 「金属／誘電体／金属ナノ構造の近接場分光特性」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, 2019 年 3 月 9 日～12 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） H. Misawa, "Plasmon-induced water splitting promoted by strong coupling between nanocavity and localized surface plasmon modes"(Invited), The Second International Workshop on Strong Coupling with Organic Molecules (SCOM 18), Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, April 16-18, 2018.

2） Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, "Ultrafast plasmons probed by photoemission electron microscopy"(Invited), The 9th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves (ISUPTW 2018), National University of Defence Technology, Changsha, Hunan China, April 23-26, 2018.

１０）H. Misawa, "Plasmon-induced photoenergy conversion"(Invited), 2018 International Symposium on Resource Chemistry (ISRC 2018), Shanghai Normal University, Shanghai, China, May 11-12, 2018.

１１）K. Ueno, Q. Sun, H. Misawa, "Spectral properties of plasmonic strong coupling systems"(Invited), The international Symposium On Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2018), Hangzhou, China, May 25-27, 2018.

3） 三澤弘明, 「プラズモン強結合状態の解明とその応用」（招待講演）, 講演会, 東京工業大学, 横浜, 2018 年 6 月 1 日

4） Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, "Accessing the near field of coupled plasmonic nanostructures from multiple domains"(Invited), Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2018, Toyama International Conference Center and ANA Crowne Plaza Toyama, Toyama, August 1-4, 2018.

5） X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki, H. Misawa, "Strong coupling between Fabry-Pérot nanocavity and localized surface plasmon resonance and its application for water splitting"(Invited), Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2018, Toyama International Conference Center and ANA Crowne Plaza Toyama, Toyama, August 1-4, 2018.

6） K. Ueno, Q. Sun, H. Misawa, "Spectral properties of plasmonic strong coupling systems"(Invited), International workshop on coupled plasmonic nanostructures and their applications to chemical sensing/reactions, Hokkaido University, Sapporo, August 6, 2018.

7） 三澤弘明, 「プラズモンを用いた太陽光エネルギー変換システム」（招待講演）, 防衛大学校応用化学専攻課外講演, 防衛大学校、横須賀, 2018 年 10 月 26 日

8） Q. Sun, H. Yu, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, "Near-field and dynamic properties of coupled plasmonic nanostructures probed by PEEM from multiple domains", The 11th LEEM/PEEM workshop, Radisson Blu Hotel, Chongqing, China, October 30-November 3, 2018.

9） Y. Li, Q. Sun, H. Song, K. Ueno, H. Misawa, Q. Gong, "Correlation between near-field enhancement and dephasing time in plasmonic dimer nanostructures revealed by PEEM", The 11th LEEM/PEEM workshop, Radisson Blu Hotel, Chongqing, China, October 30-November 3, 2018.

１０）H. Misawa, "Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions" (Invited), Seminar, National Chi Nan University, Puli, Taiwan, November 14, 2018.

１１）H. Misawa, "Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions"(Invited), PEEM/CL Plasmonic and Photonic Fabrication Research Workshop, Peking University, Beijing, China, November 27, 2018.

１２）Q. Sun, H. Yu, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, "Visualization of coupled plasmonic nanostructures in the near-field by PEEM from multiple domains"(Invited), PEEM/CL Plasmonic and Photonic Fabrication Research Workshop, Peking University, Beijing, China, November 27, 2018.

１３）H. Misawa, “Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions”(Invited), Seminar, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, November 28, 2018.

１４）三澤弘明,「可視光閉じ込め機能を有する光電極による高効率光反応」（招待講演）, スマートデバイス・計測　新技術説明会, 科学技術振興機構、東京, 2018 年 11 月 29 日

１５）T. Oshikiri, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, “Fabrication of three-dimensional plasmonic photoanode with through-hole array”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組, Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11-12, 2018.

１６）K. Ueno, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, H. Misawa, “Fluorescence properties of dye molecules in infrared-cavity strong coupling systems”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組, Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11-12, 2018.

１７）H. Yamada, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Exploring mechanism of near-field chirality generation on achiral plasmonic structure”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組, Jozankei View Hotel, Sapporo, December 11-12, 2018.

１８）H. Misawa, “Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions”(Invited), Seminar, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December 20, 2018.

１９）三澤弘明,「モーダル型強結合を用いた可視光水分解反応の増強」（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、岡山, 2019 年 1 月 10 日

２０）Q. Sun, H. Yu, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, “Multi-dimensional characterization of coupled plasmonic nanostructures by photoemission electron microscopy”, Symposium on Surface and Nano Science 2019 (SSNS’19), Shizukuishi Prince Hotel, Shizukuishi, January 14-18, 2018.

4.7　シンポジウムの開催

１）　第 14 回プラズモニック化学シンポジウム「プラズモンのバイオ応用」、筑波大学東京キャンパス、東京（2018 年 6 月 8 日）

２）　電子科学研究所学術講演会「Plasmonic Hot Electrons Doping of 2D Materials」(Prof. Zheyu Fang: Peking University)、北海道大学、札幌（2018 年 7 月 4 日）

３）　International workshop on coupled plasmonic nanostructures and their applications to chemical sensing/reactions、北海道大学、札幌（2018 年 8 月 6 日）

４）　電子科学研究所学術講演会「Surface Plasmon Spectroscopy of Metal Nanoparticles」(Prof. Paul Mulvaney : University of Melbourne)、北海道大学、札幌（2018 年 10 月 19 日）

５）　第 15 回プラズモニック化学シンポジウム「光・キャリア・物質を操るプラズモニクス」、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス、東京(2018 年 11 月 9 日)

６）　電子科学研究所学術講演会「Plasmonics at the Space-Time Limit」(Prof. Martin Aeschlimann : University of Kaiserslautern、北海道大学、札幌（2019 年 1 月 18 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バイオセンサに関する研究」（2018 年度）サスティナブルエネルギー社会実現の為の技術探究を目的として、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、孫泉（エア・ウォーター株式会社）:「SiC メンブレンの特性評価」(2018 年度) MEMS 等種々のデバイスへの応用が期待できる SiC メンブレンの光学特性や耐熱性の評価を実施する。

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

１）　Prof. Qihuang Gong, Peking University, China

２）　Dr. Kuang-Li Lee, Academia Sinica, Taiwan

３）　Prof. Ding-Ping Tsai, Academic Sinica, Taiwan

４）　Prof. Koji Hatanaka, Academic Sinica, Taiwan

５）　Prof. Shangjr Gwo, Academic Sinica, Taiwan

６）　Prof. Stephan Link, Rice University, USA

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、2018 年度（特別推進研究と重複するため廃止）

２）　三澤弘明、特別推進研究、ナノ共振器－プラズモン強結合を用いた高効率光反応システムの開拓とその学理解明、2018-2022 年度

３）　上野貢生、新学術領域研究、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、2016-2018 年度

４）　上野貢生、新学術領域研究、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、2016-2018 年度

５）　押切友也、基盤研究 C、局在プラズモンが示す近接場円偏光による光不斉化学反応場の開拓、2018～2020

年度

6） 中村圭佑、特別研究員奨励費、プラズモン光アンテナを用いた透明太陽電池の構築、2017-2018 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

1） 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）

2） 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～)

3） 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）

4） 三澤弘明：日本学術振興会　科学研究費委員会専門委員（基盤研究 A）（2017 年 12 月 1 日～2019 年 11 月 30 日）

5） 上野貢生：日本学術振興会　2 段階書面審査委員（2017 年 12 月 1 日～2018 年 11 月 30 日）

6） 三澤弘明：日本学術振興会　科学研究費委員会専門委員（国際科学研究費）（2018 年 6 月 1 日～2018 年 11 月 30 日）

7） 三澤弘明：文部科学省　「新学術領域研究（研究領域提案型）」中間・事後評価にかかる評価意見書の作成者（2018 年 7 月 5 日-2018 年 8 月 31 日）

8） 三澤弘明：科学技術振興機構 国際科学技術共同研究推進事業（戦略的国際共同研究プログラム）アドバイザー（2018 年 7 月 13 日～2019 年 3 月 31 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） 上野貢生 :日本分析化学会 北海道支部 幹事(2013年3月1日～2020年2月29日)

3） 三澤弘明：Asian Nanoscience and Nanotechnology Association, President (2013年5月～)

4） 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～）

5） 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～）

6） 三澤弘明：ACS Photonics, Editorial Advisory Board (2014年1月1日～現在)

7） 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)

8） 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）

9） 三澤弘明：12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON2018), Program Advisory Board member

10）三澤弘明：The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019), International Advisory Board Member

11）上野貢生：光化学協会, Journal of Photochemistry and Photobiology C, Photochemistry Reviews 誌 Associate Editor（2018年3月1日～2021年2月28日）

12）上野貢生：第31回マイクロプロセス・ナノテクノロジー国際会議, 実行委員会・現地実行委員（2018年3月16日～2018年12月31日）

13）三澤弘明：International Foundation of Photochemistry (IFP), Executive member (2018年9月25日～)

c．兼任・兼業

1） 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)

2） 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） Yaolong Li、中国（2017.12.16-2018.10.25）

2） Kuang-Li Lee、台湾、(2018.5.24-2018.8.21)

3） Zheyu Fang、中国、(2018.7.4)

4） Yu-Han Chen、台湾、(2018.7.11-2018.7.25)

5） Jia-Wern Chen、台湾、(2018.7.11-2018.7.25)

6） Stephan Link、米国、(2018.8.3-2018.8.6)

7） Christy Landes、米国、(2018.8.3-2018.8.6)

8） Paul Mulvaney、オーストラリア、(2018.10.19)

9） Wanping Guo、中国、(2018.11.11-2019.1.10)

10）Martin Aeschlimann、ドイツ、(2019.1.17-2019.1.21)

11）Cheng Hung Chu、台湾、(2019.3.18-2019.4.10)

12）Tzu-Ting Huang、台湾、(2019.3.18-2019.4.10)

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、2018 年 4 月 4 日～2018 年 6 月 4 日（春ターム）

2） 工学部「情報エレクトロニクス演習」押切友也、2018年4月4日～2018年9月30日

3） 全学教育科目、化学Ⅰ、三澤弘明、2018 年 4 月 10 日～2018 年 7 月 31 日

4） 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、2018 年 4 月 27 日

5） 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、2018 年 10 月 1 日～11 月 28 日

6） 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、上野貢生、2018 年 11 月 8 日

7） 工学部、生体工学概論、上野貢生、2019 年 1 月 29 日

8） 工学部「生体情報工学実験 I」上野貢生、石 旭、2018

年 4 月 4 日～2018 年 8 月 3 日

9） 工学部「生体情報工学実験 II」押切友也、2018 年 10 月 1 日～2019 年 2 月 4 日

１０）Hokkaido Summer institute, NanoScience, nanotechnology & Green Energy, 上野貢生、2018 年 7 月 9 日

１１）Hokkaido Summer institute, NanoScience, nanotechnology & Green Energy, 押切友也、2018 年 7 月 9 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、2018 年 10 月 18 日

２） 大学生・大学院生（台湾国立交通大学）、Light energy conversion utilizing localized surface plasmon、押切友也、2018 年 10 月 29 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） 李潔（博士研究員、科研費「特別推進研究」、2014.9.1～2018.11.30）

２） ZU Shuai（博士研究員、科研費「特別推進研究」および共同研究費、2018.10.9～）

３） 曹恩（学術研究員、科研費「特別推進研究」および共同研究費、2018.10.18～2019.3.31）

４） HE Guiying（博士研究員、科研費「特別推進研究」および共同研究費、2018.10.26～）

５） YAPAMANU Adithya Lakshmanna（特任助教、科研費「特別推進研究」および共同研究費、2018.12.1～）

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：１人

１） 山田　拓樹、情報科学研究科：修士(情報科学)、光電子顕微鏡を用いた金ナノ構造の近接場円二色性に関する研究（Study on near-field circular dichroism of gold nanostructures using photoemission electron microscopy）

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～）
助　教　　Melbert Jeem（北大院、工博、2019.3～）
外国人研究員　Tong Fang（2018.11～）
大学院生　舘林　尭（総合化学院M2）
　　Robin Msiska（総合化学院M2）
　　佐々木悠馬（総合化学院M1）
学部生　　佐藤賢斗（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

(2) プロトン駆動イオン導入法による新規超伝導物質 Ag_xTaS_2の発見

「温度」は物質を合成する上で最も容易に制御できるパラメータである。例えば、焼成などの固相反応法では多くの材料が生み出されており、処理温度に応じて熱力学的に安定な相が得られる。一方、圧力や電界、磁界等を物質合成のパラメータとして加えた手法では、熱力学的に準安定な相や、通常では形成し得ない構造体を生み出す可能性を秘めている。例えば、炭素元素で作られるカーボンは、数 GPa の高圧下、千数百度の高温下に保持することで、ダイヤモンドへと転移する。つまり、ダイヤモンドは高圧安定相であり、常圧では準安定な物質である。このように圧力というパラメータを調整することで、常圧では合成されない熱力学的準安定物質が合成可能となる。本研究では、このような合成パラメータとして、「電界」に着目した物質合成手法について報告する。電界を利用する代表的な合成手法として電気化学が挙げられるが、我々のグループでは、液相プロセスを用いた従来の電気化学ではなく、全固体で反応が進行する固体電気化学に着目し、研究を推進している。

相プロセスを用いた電気化学では、電解質の電離により生成したイオンが液中の電気伝導を担う。一方、固体電気化学では、溶媒を一切使わずに固体中をイオンが伝導することで、反応が進行する。このため固体電気化学では、高温で高い電圧を印加しても、溶媒の電気分解や蒸発を考慮する必要がない。つまり、電圧と温度を幅広く変調できる特殊な合成環境を作り出すことが可能であり、従来の固相反応法や電気化学では形成できない準安定物質の合成に有効である。これは、固体電気化学を用いる合成の最大の利点である。さらに、インターカレーション等の反応に液相プロセスを用いた場合、試料表面から一部の溶媒が同時に侵入する等、結晶性の劣化は避けられない問題となっている。一方、溶媒を用いずにイオンのみを導入できる固体電気化学では、高い結晶性を維持した生成物を得ることが可能である。これは、得られた化合物の本質的な物性を調査する上でも有効な手法である。

我々は、この固体電気化学を取りいれた新規合成手法として図１に示す「プロトン駆動イオン導入法(Proton-driven ion introduction: PDII)」を開発し、様々な物質合成に適用している。ここではその一例として、遷移金属ダイカルコゲナイド（TaS_2）にAgイオンをインターカレーションして得られた新規超伝導物質（Ag_xTaS_2）について述べる。

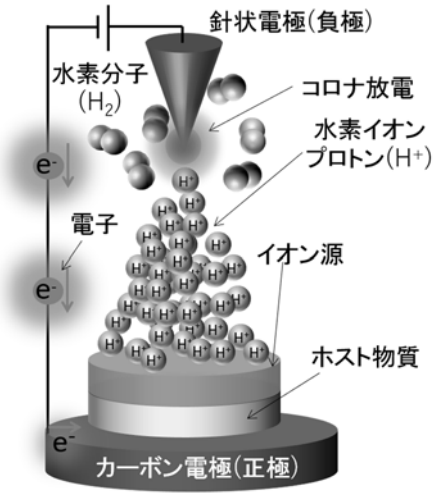


図１プロトン駆動法の概念図

図２に示されるように、TaS_2は様々な多形構造を有している。八面体構造を作る1T（図２(a)）、三角プリズム構造を作る2H（図２(b)）、さらに八面体層と三角プリズム層が交互に積層した4Hb（図２(c)）等が知られている。これまでの経験から、三角プリズム層は八面体層に比べてイオンがインターカレーションされ易い。このため、これらの層が交互に積層した４Hb構造をホスト物質に採用すると、ゲストイオンが2層ごとにインターカレーションされたステ

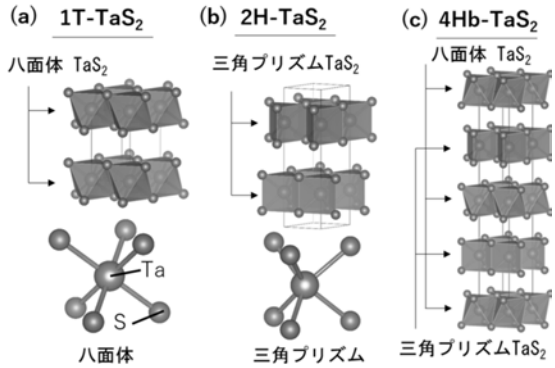


図２ TaS_2の多形構造

ージ2の構造を形成できる可能性がある。一方、TaとSで形成する八面体は高温安定相であり、高温からのクエンチによって作られる。そのため200℃以上のアニールにより低温相である三角プリズムへと転移する。実際、図３は1T-TaS_2のメインピークがポストアニールによって生じる変化を示している。210℃程度からわずかにピークの形状が変化し、アニール温度の上昇に伴い、1T構造から4Hb構造を経由し、最終的には2H構造へと変化する。つまり、4Hb構造をホスト材料としてインターカレーションを行うには、構造に影響を与えない程度の低温処理で実施する必要がある。

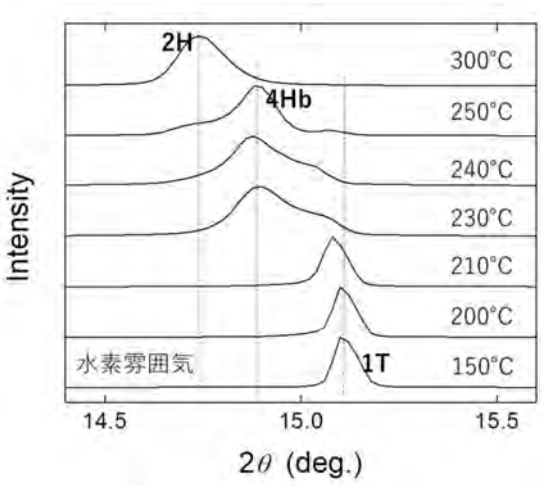


図３ 1T-TaS_2のXRDピークのポストアニール依存性

図４(a)は低温処理を用いて4Hb-TaS_2にAgをインターカレーションした後のXRD測定結果である。ステージ1のAg_xTaS_2の合成には、350℃程度の処理温度を採用していたが、ステージ2の合成では100℃まで処理温度を下げて、印加電圧もそれに応じて適切に調整した。処理温度、印加電圧の低下に伴い、生成物の反応速度は半減したが、図４(a)の中段に示されるように，上面と下面で同じXRDスペクトルを示す試料の合成に成功した。これはAgが試料全体にわたって均質に導入されていることを示している。しかし、得られたピークはブロードで、高い結晶性は確認されず、4Hb構造への電界による強制的なイオン導入が、準安定的な結晶構造を作り出したと予想される。現状ではこの構造は明らかになっていないが、これを250℃程度でポストアニールすると図４(a)の上段に示されるように極めてシャープな回折ピークが得られ、結晶性が改善される。しかし、アニール処理により、単純にピークがシャープになるだけではなく、高角と低角に現れるピークが僅かにシフトし、シフトの方向が異なる。これは、何らかの構造変化を示唆するが、図３で示すように、低温アニールによる八面体から三角プリズムへの転移と関連したものであると予想される。最終的に得られたステージ2のAg_xTaS_2の結晶構造を図４(b)に示す。

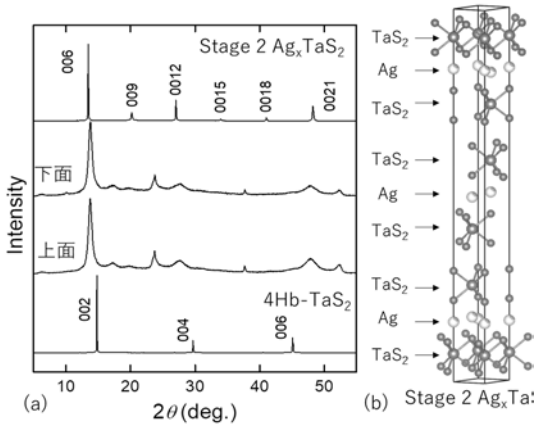


図４ (a)4Hb-TaS_2のPDII直後およびポストアニール後のXRD測定結果、(b) Stage2 Ag_xTaS_2の結晶構造

次に、AgがインターカレーションされたTaS_2の物性について述べる。まず、母相であるTaS_2は78 Kで電荷密度波(CDW)が観測され、0.8 Kで超伝導転移を起こすことが知られている。また、この超伝導転移温度は層間に様々なゲストをインターカレーションすることで向上する。ゲストとしては、有機分子や、アルカリ金属(Li, Na, K)、3d金属(Fe, Cu)、低融点金属(Hg, In, Sn, Pb, Bi)などが知られているが、これまでにAgのインターカレーションに伴う超伝導発現は報告されていない。本研究では、PDII法により合成したステージ1の$Ag_{0.58}TaS_2$単結晶、およびステージ2の$Ag_{0.21}TaS_2$単結晶において、これらの物質の超伝導転移を初めて確認している。

図５(a)に示されるように、Ag_xTaS_2の電気抵抗率は温度の上昇に伴い増加し、金属的な振る舞いが確認された。ステージ2の$Ag_{0.21}TaS_2$では170 K付近、ステージ1の$Ag_{0.58}TaS_2$では80 K付近と180 K付近で、2つのCDW由来と思われる抵抗の異常が確認された。さらに低温では、それぞれ1.7 Kと0.4 Kで抵抗が下がり始め、超伝導状態へと転移した。一般に超伝導転移温度(T_c)はCDWの抑制に伴い上昇することが知られており、CDWが2つ観測されるステージ1の$Ag_{0.58}TaS_2$で、最もT_cが低くなることがわかる。一方、$Ag_{0.21}TaS_2$ではこの2つのCDWの内80 KのCDWが抑制され、1.7 KまでT_cが上昇し、180 K付近のCDWが抑制された場合、TaS_2で見られるように0.8 KまでT_cが上昇すると考えられる。これらのCDWと超伝

導の相関はさらに調査を進める必要があるが、本系ではインターカレーションに伴うCDWの変調が超伝導特性の向上に大きな効果を与えているものと予想される。

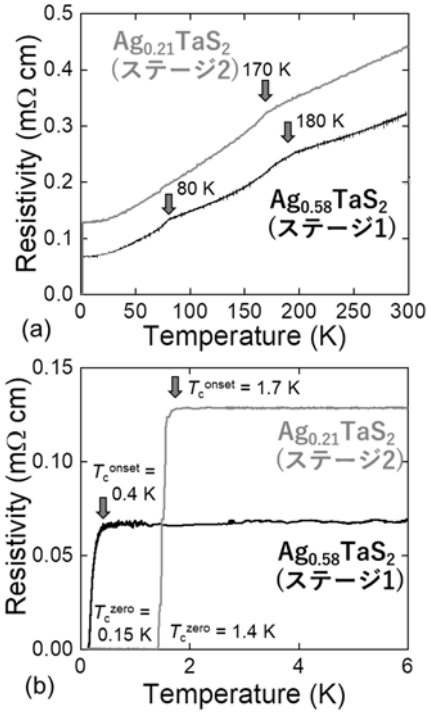


図５(a)ステージ1および2のAg_xTaS_2における電気抵抗率の温度依存性 (b)0-6 Kにおける(a)の拡大図

３．今後の研究の展望

PDII法をはじめ、固体電気化学を利用した物質合成はまだまだ発展途上にある。本研究では遷移金属ダイカルコゲナイドTaS_2へのインターカレーションに取り組んだが、ホスト材料の候補は、多様な二次元層状物質に加えて、MCh_3(*M*: Ti, Zr, Hf, Ta, *Ch*: S, Se, Te)等の擬一次元物質、結晶内に空間を有するNASICON材料、$AxM_2(XO_4)_3$ (*M*: Transition metals, *X*: S, P, As, Mo, W, V, *A*: Li, Na, K)やゼオライト、Metal Organic Framework (MOF)、クラスレート化合物など、多岐にわたる。また、近年では一価カチオンだけでなく、多様な固体電解質が開発されており、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$Zr_{1-x/4}TaP_{3-x}W_xO_{12}$、$Ti^{4+}$伝導体の$Ti(Nb_{0.8}W_{0.2})_{5.0/5.2}(PO_4)_3$等、これらの多価イオン伝導体の利用により、さらなる固体電気化学合成の可能性が広がるものと期待される。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） Y. Kim, K. Aoki, M. Fujioka, J. Nishii and N. Tamaoki: “Pressure-Induced Transition of Bis-amide-Substituted Diacetylene Crystals from Nonphotopolymerizable to Photopolymerizable State”, *Applied Materials Interfaces*, 10: 36407-36414 (2018) 【電子研内共著】

２） H. Kaiju, T. Misawa, T. Nagahama, T. Komine, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and G. Xiao: “Robustness of Voltage-induced Magnetocapacitance”, *Scientific Reports*, 8: 14709-1-14709-10 (2018)

３） 平井 慈人、藤岡 正弥、古中 晶也、大野 智也、松田 剛: 「LaPt5As超伝導体-酸素発生・還元反応に対する新しい二元機能触媒-」、Material Science and Technology of Japan、55(5): 180-184 (2018)

４） M. Fujioka, N. Kubo, M. Nagao, R. Msiaka, N. Shirakawa, S. Demura, H. Sakata, H. Kaiju and J. Nishii: “Superconductivity in $AgxTaS_2$ single crystals with stage structure obtained via proton-driven ion introduction.”, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 126(12): 963-967 (2018)

５） T. Yamaguchi, S. Tsukuda, T. Ishiyama, J. Nishii, T. Yamashita, H. Kawazoe and T. Omata: “Proton-conducting phosphate glass and its melt exhibiting high electrical conductivity at intermediate temperatures”, *Journal of Materials Chemistry A*, Royal Society of Chemistry, 6(46): 23628-23637 (2018)

６） D. Sakai, K. Harada, H. Shibata, K. Kawaguchi and J. Nishii: “Surface relief hologram formed by selective SiO_2 deposition on soda-lime silicate glass”, *PLOS ONE*, Public Library of Science, 14(1) (2019)

4.2 学術論文（査読なし）

1) 藤岡 正弥、出村 郷志、猪石 篤: 「インターカレーションおよびイオン交換の新展開」、セラミックス、53(6): 378-381 (2018)

4.3 総説・解説・評論等

1) 藤岡 正弥、海住 英生、西井 準治: 「固体電気化学を利用したイオン制御による物質合成 」、ケミカル・エンジニヤリング、化学工業社、64: 57-63 (2019)

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） M. Fujioka, C. Wu, N. Kubo, K. Sato, H. Kaiju and

J. Nishii ： “Topotactic Reaction using Solid State Electrochemistry”, 日本材料科学会 第4回マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会 3rd Workshop on Novel Superconducting materials and biomimetic processes 2018 , Sapporo, Japan (2018-09)

2） M. Fujioka：“New method for intercalation and ion exchange utilizing solid state electrochemical reaction”, 28th International Conference and Expo on Nanosciences and Nanotechnology, Barcelona, Spain (2018-11)

3） H. Kaiju, T. Nagahama, O. Kitakami, J. Nishii and G. Xiao：“Magnetocapacitance effect in magnetic tunnel junctions”, 14th Hokkaido University-Nanjing University-NIMS/MANA Joint Symposium ″Designed Chemistry for Future″, Sapporo, Japan (2018-12)

b．招待講演（国内学会）

1） 藤岡 正弥 ：「固体電気化学を用いたイオン制御による物質合成と応用展開」、CUPAL 若手研究者研究発表会 、島津製作所 基盤技術研究所 (2018-10)

2） 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治 ：「薄膜エッジを利用した磁性体/分子/磁性体ナノ接合デバイスの創製」、9th 分子アーキテクトニクス研究会、函館 金森ホール (2018-11)

3） 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治 ：「磁性薄膜エッジを利用したナノ接合分子スピントロニクスデバイス」、ダイナミックアライアンス G1 および物質・デバイス領域共同研究拠点事業合同研究会「有機分子集積体の機能設計と精密計測」 、北海道大学電子科学研究所 (2018-12)

4） 藤岡 正弥、海住 英生、西井 準治 ：「固体電気化学によるイオン制御とナノ空間の利用 」、日本金属学会 2019 年春季（第 164 回）講演大会、東京電機大学 (2019-03)

c．一般講演（国際学会）

1） H. Kaiju, T. Misawa, T. Nagahama, T. Komine, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and G. Xiao ：“Voltage-induced Magnetocapacitance in Magnetic Tunnel Junctions”, 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA (2019-01)

2） Y. Sasaki, R. Msiska, T. Misawa, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju ：“Electric and magnetic properties of $Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ nanoscale junction devices utilizing magnetic thin-film edges”, 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA (2019-01)

d． 一般講演（国内学会）

1） 海住 英生、三澤 貴浩、長浜 太郎、小峰 啓史、北上修、藤岡 正弥、西井 準治、Xiao Gang：「強磁性トンネル接合における電圧誘起磁気キャパシタンス効果」、第 42 回日本磁気学会学術講演会、日本大学理工学部駿河台キャンパス 1 号館 (2018-09)

2） R. Msiska, S. Honjo, Y. Asai, M. Arita, A. T. Fukuchi, Y. Takahashi, N. Hoshino, T. Akutagawa, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：“Tunnel Magnetocapacitance in Single-layered Fe/MgF_2 Granular Films”, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場 (2018-09)

3） 佐々木 悠馬、Msiska Robin、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 ：「磁性薄膜エッジを利用した $Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ ナノ接合素子の電気磁気特性」、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場 (2018-09)

4） 藤岡 正弥、久保 直紀、出村 郷志、坂田 英明、足立 伸太郎、高野 義彦、海住 英生、西井 準治 ：「ステージ構造を有する $AgxTaSTaSTaS_2$ の超電導特性」、第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会 、愛知県 名古屋国際会議場 (2018-09)

5） 佐藤 賢斗、藤岡 正弥、長尾 雅則、海住 英生、西井 準治 ： 「固体電気化学を用いたトポタクティック反応による $AgxZrTe_3$ の合成と超伝導の発現」、平成 30 年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会 、日本大学工学部 (2018-11)

6） 舘林 尭、Fang Tong、Fang Xinxiong、藤岡 正弥、海住 英生、Zhao Gaoyang、西井 準治 ： 「希土類含有リン酸塩ガラスのプロトン伝導性と熱的安定性」、日本セラミックス協会 2019 年年会、工学院大学新宿キャンパス (2019-03)

7） 藤岡 正弥、佐藤 賢斗、海住 英生、西井 準治 ：「固体電気化学を利用した物質合成 」、日本セラミックス協会 2019 年年会、工学院大学 (2019-03)

e． 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 藤岡 正弥 ：「固体電気化学を利用したトポタクティック反応」、「新材料創生技術と計算・データ統計学を融合した熱電材料探索と素子創出」第 2 回ワークショップ、大阪大学 (2018-08)

2） 佐々木 悠馬、Msiska Robin、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 ：「磁性薄膜エッジを利用した分子ナノ接合素子の作製と電気磁気特性」、日本材料科学会第 4 回マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会、北海道大学電子科学研究所 (2018-09)

3） R. Msiska, S. Honjo, Y. Asai, M. Arita, A. T. Fukuchi, Y. Takahashi, N. Hoshino, T. Akutagawa, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：“Study on Tunnel Magnetocapacitance in Fe/MgF_2

Nanogranular Films”，日本材料科学会第4回マテリアルズ･インフォマティクス基礎研究会，北海道大学電子科学研究所（2018-09）

4） 藤岡 正弥、海住 英生、西井 準治：「固体電気化学によるイオン制御とイオンビームへの応用」、第7回アライアンス若手研究交流会、東北大学 片平キャンパス（2018-11）

5） 舘林 尭、Fang Xinxiong、藤岡 正弥、海住 英生、Zhao Gaoyang、西井 準治：「Nb添加リン酸塩ガラスにおける高プロトン伝導性の長時間維持」、平成30年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会、日本大学工学部（2018-11）

6） 佐々木 悠馬、Msiska Robin、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：「$Ni_{78}Fe_{22}$ 薄膜エッジを利用したナノ接合分子スピントロニクスデバイス」、平成30年度 物質･デバイス領域共同研究拠点 展開共同研究B「新機能創出に向けたスピンダイナミクスに関する研究」研究会、伊豆長岡千歳荘会議室（2018-11）

7） R. Msiska, S. Honjo, Y. Asai, M. Arita, A. T. Fukuchi, Y. Takahashi, N. Hoshino, T. Akutagawa, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：“Tunnel Magnetocapacitance in Fe/MgF_2 Magnetic Nanogranular Films”，平成30年度 物質･デバイス領域共同研究拠点 展開共同研究 B「新機能創出に向けたスピンダイナミクスに関する研究」研究会，伊豆長岡千歳荘会議室（2018-11）

8） Y. Sasaki, R. Msiska, T. Misawa, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：“Molecular nano-spintronic devices utilizing $Ni_{78}Fe_{22}$ thin-film edges”，14th Hokkaido University-Nanjing University-NIMS/MANA Joint Symposium ″Designed Chemistry for Future″, Hokkaido University（2018-12）

9） T. Tatebayashi, X. Fang, M. Fujioka, H. Kaiju, G. Zhao and J. Nishii：“Thermal stability of high-proton-conductive phosphate glasses containing rare earth elements”，The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel（2018-12）

１０）Y. Sasaki, R. Msiska, T. Misawa, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：“$Ni_{78}Fe_{22}/Alq_3/Ni_{78}Fe_{22}$ nanoscale junction devices utilizing magnetic thin-film edges”，The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel（2018-12）

１１）R. Msiska, S. Honjo, Y. Asai, M. Arita, A. T. Fukuchi, Y. Takahashi, N. Hoshino, T. Akutagawa, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：“Tunnel Magnetocapacitance in Single-layered Fe/MgF_2 Magnetic Granular Films”，The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel（2018-12）

１２）K. Sato, M. Fujioka, M. Nagao, H. Kaiju and J. Nishii：“Synthesis of intercalation compound $AgxZrTe_3$ by a topotactic reaction based on solid state electrochemistry”，The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel（2018-12）

１３）舘林 尭、Fang Xinxiong、藤岡 正弥、海住 英生、Zhao Gaoyang、西井 準治：「希土類及びアルカリ土類含有リン酸塩ガラスのプロトン伝導度の長時間維持」、化学系学協会北海道支部2019年冬季研究発表会、北海道大学（2019-01）

１４）佐藤 賢斗、藤岡 正弥、長尾 雅則、海住 英生、西井準治：「固体電気化学反応を利用した遷移金属カルコゲナイド層間化合物の合成」、化学系学協会北海道支部2019年冬季研究発表会、北海道大学（2019-01）

１５）藤岡 正弥：「固体電気化学を用いた新たな物質合成技術の開発 」、CUPAL 諮問委員会、秋葉原 UDX（2019-03）

4.7 シンポジウムの開催

1） 関 剛斎、海住 英生：「第41回日本磁気学会サマースクール」、中央大学駿河台記念館（2018年06月20日～2018年06月22日）

2） 海住 英生、神原 陽一、渡辺 良祐：「日本材料科学会 第4回 マテリアルズ･インフォマティクス基礎研究会」、北海道大学（2018年09月02日～2018年09月03日）

3） 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治：「電子科学研究所学術講演会（共催：応用物理学会北海道支部・エンレイソウの会・日本材料科学会）」、北海道大学電子科学研究所（2018年09月03日）

4） 海住 英生：「第42回日本磁気学会学術講演会」、日本大学 （2018年09月11日～2018年09月14日）

5） 海住 英生、西井 準治：「平成30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」、伊豆長岡千歳荘会議室 （2018年11月29日～2018年11月30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（研究代表者、分類、研究課題、期間）

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、萌芽研究、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、磁気トンネル接合における電圧誘起型巨大磁気キャパシタンス効果の発現、2018～2020 年度

4） 海住 英生、萌芽研究、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、萌芽研究、電圧印加型プロトン充填材料の探索による水素貯蔵イノベーション、2018～2019 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、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

4） 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)：「室温巨大磁気キャパシタンス効果の発現とメカニズム解明」、2017～2018年度

4.10 受賞

1） 藤岡 正弥 ：CUPAL 優秀活動賞 (Nanotech Career-up Alliance) 2018 年 06 月

2） 佐々木 悠馬、Msiska Robin、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 ： 日本材料科学会第 4 回マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会 講演最優秀賞「磁性薄膜エッジを利用した分子ナノ接合素子の作製と電気磁気特性」 （日本材料科学会） 2018 年 09 月

3） R. Msiska, S. Honjo, Y. Asai, M. Arita, A. T. Fukuchi, Y. Takahashi, N. Hoshino, T. Akutagawa, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii and H. Kaiju：日本材料科学会第 4 回マテリアルズ･インフォマティクス基礎研究会 講演優秀賞 “Study on Tunnel Magnetocapacitance in Fe/MgF_2 Nanogranular Films”（日本材料科学会） 2018 年 09 月

4） 佐藤 賢斗、藤岡 正弥、長尾 雅則、海住 英生、西井 準治 ： 平成 30 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 「固体電気化学を用いたトポタクティック反応による $AgxZrTe_3$ の合成と超伝導の発現」 （日本セラミックス協会） 2018 年 11 月

5） 舘林 尭、Fang Xinxiong、藤岡 正弥、海住 英生、Zhao Gyaoyang、西井 準治 ： 平成 30 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 「Nb 添加リン酸塩ガラスにおける高プロトン伝導性の長時間維持」 （日本セラミック協会） 2018 年 11 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） 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04月01日～現在）

2） 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04月01日～2019年03月31日）

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04月01日～2019年03月31日）

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04月01日～2019年03月31日）

5） 海住 英生 ： 磁気学会企画委員 （2017年05月08日～2019年03月31日）

6） 海住 英生 ：31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018) 実行委員 (2018年01月01日～2018年11月30日)

7） 海住 英生 ： 第41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ー＆座長 （2018年04月01日～2018年06月30日）

8） 海住 英生 ： 第42回日本磁気学会学術講演会実行委員 （2018年06月01日～2018年09月30日）

9） 海住 英生 ： 日本材料科学会第4回マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会運営委員 （2018年08月01日～2018年09月30日）

１０)海住 英生 ： 第42回日本磁気学会サマースクールチーフオーガナイザー＆座長 （2018年10月01日～2019年03月31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 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日）

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） 全学共通、一般教育演習（フレッシュマンセミナー）未来を切り開く物質材料科学の最前線 -固体無機結晶からソフト有機分子まで-、藤岡 正弥、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日

２） 全学共通、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』「ナノテクを駆使したスピントロニクスの最前線」、海住 英生、2018 年 05 月 18 日

３） 理学部、ナノ物性化学、海住 英生、2018 年 06 月 01 日～2018 年 06 月 30 日

４） 総合化学院、物質化学（ナノフォトニクス材料論）、西井 準治、2018 年 06 月 11 日～2018 年 07 月 02 日

５） 総合化学院、物質化学（ナノフォトニクス材料論）、海住 英生、2018 年 07 月 01 日～2018 年 08 月 09 日

６） 全学共通、自然科学実験、藤岡 正弥、2018 年 06 月 13 日～2018 年 07 月 18 日

７） 全学共通、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』「スピントロニクスが切り拓く次世代磁気デバイス」、海住 英生、2018 年 11 月 07 日～2018 年 11 月 09 日

８） 全学共通、大学院共通授業科目 『トポロジー理工学特別講義』「スピントロニクスとスピン流」、海住 英生、2018 年 12 月 07 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：１人

１） 舘林　尭、総合化学院 ： 希土類含有リン酸塩ガラスのプロトン伝導性と熱的安定性

博士学位：０人

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　久木一朗（阪大院、工博、2018.7～）
助　教　高橋仁徳（東北大院、博(工)、2017.8～）
院　生　李思敏（DC1）、陳 昕（DC1）、吉 沁（DC1）、
白川祐基（MC2）、陳姣（MC2）、
呉佳冰（MC2）、土井雄登(MC1)、

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) 柔軟な一次元超分子カラム構造と磁気異常

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等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。

当研究分野はこれまでに,多くの金属イオン-クラウンエーテルからなる超分子カチオンを構築し、アニオンラジカル$[Ni(dmit)_2]^-$ の対カチオンとして組み合わせることによって、超分子カチオン構造設計による新奇な電子的・磁気的機能の開拓が行ってきた。たとえば、$Li_{0.6}$([15]crown-5)$[Ni(dmit)_2]_2(H_2O)$ 結晶は、[15]crown-5が一次元にスタックしてチャネル構造を形成し、チャネル内でLi^+ がイオン伝導を示した。さらに部分酸化された$[Ni(dmit)_2]$ 分子はπスタッキングによって電気伝導カラムを形成しており、同一結晶内において電子伝導とイオン伝導が共存することを報告している。また，$[Ni(dmit)_2]^-$のモノアニオン塩であるCs^+_2([18]crown-6)$_3[Ni(dmit)_2]^-_2$ ではCs^+_2([18]crown-6)$_3$ トリプルデッカー構造中で[18]crown-6が結晶内で回転しており、その回転が$[Ni(dmit)_2]^-$ の磁気相互作用に摂動を与えていた。

上記のようなチャネル構造に有機カチオンを導入することで、チャンネル構造内に存在する有機カチオン間のプロトン移動や、有機カチオンの運動に基づく誘電物性の発現が可能となるだけで無く、これらの運動と $[Ni(dmit)_2]^-$が示す磁性や導電性とをカップリングさせることで、スイッチングや、マルチフェロイック性などの交差物性を示す新奇材料、多重機能性材料などの開拓が期待できる。複素環カチオン等の有機カチオンを包接できるクラウンエーテルとして、大きな環サイズを持つdibenzo[24]crown-8(DB[24]crown-8)に着目した。[24]crown-8は平面的な複素環カチオンを包接できるだけの十分な空孔を有しており、さらに、フェニレン基間のπ-π相互作用やCH-π相互作用を通じてクラウンエーテル同士でのスタッキングを容易にし、結晶内でのチャネル構造の形成が容易になると考えられる。

DB[24]crown-8と複素環カチオンであるH-pydidazinium$^+$ (H-pdaz$^+$) との組み合わせからなる超分子カチオンを$[Ni(dmit)_2]^-$ 塩に導入し、$(H\text{-}pdaz^+)_2(DB[24]crown\text{-}8)_3[Ni(dmit)_2]^-_2$ の組成を持つ結晶**1**を得た。123 K における単結晶X線構造解析より、DB[24]crown-8 が一次元チャネル構造を形成し、チャネル内にH-pdaz$^+$ が取り込まれていることが判明した。一次元チャネル内のH-pdaz$^+$ は2分子が結晶学的に独立であり、そのうちの1分子は2サイト間で配向のディスオーダーを示し、その占有率の比は0.6 : 0.4 であった。一方、293 K においては配向のディスオーダーは観察されなかった（図1b)。123 Kにおいて凍結されていたH-pdaz$^+$の回転運動が、温度上昇により励起され、293 K では回転運動が平均化されたために、ディスオーダーが消失したと考えられる。一方、$[Ni(dmit)_2]^-$ はC･･･S原子間のファンデルワールス半径以下の分子間相互作用により2量体を形成し、DB[24]crown-8一次元チャネルの間に存在した。

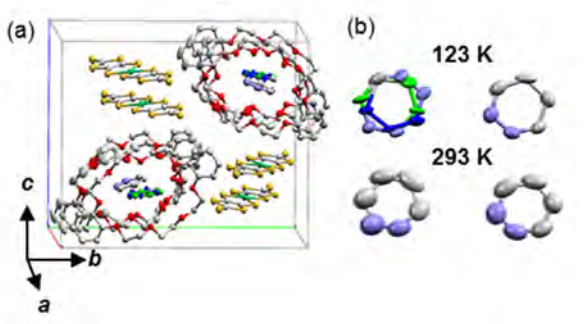


図1. 結晶1の単結晶X線構造解析。水素原子は省略している。(a) 123 K における結晶 1 のパッキング。(b) 123 および 293 K での H-pdaz$^+$ の構造。123 K において、結晶学的に独立な 2 分子の H-pdaz$^+$のうち、1 つの H-pdaz$^+$ (図左)は 2 サイト間で配向のディスオーダーを示した。

$[Ni(dmit)_2]^-$ は S= 1/2 を有するアニオンラジカルであり、磁気的性質を担う。1 T における結晶 **1** の磁化率の温度依存性を図 2 に示す。1.8 から 40 K の範囲で磁化率を Curie-Weiss 則でフィッティングしたところ、 Curie 定数 0.421 cm^3 K mol^{-1}、 Weiss 温度 -1.96 K で温度依存性を再

現出来た。40 K から 180 K では、Curie-Weiss に従わない磁気異常が見られた（図 2）。

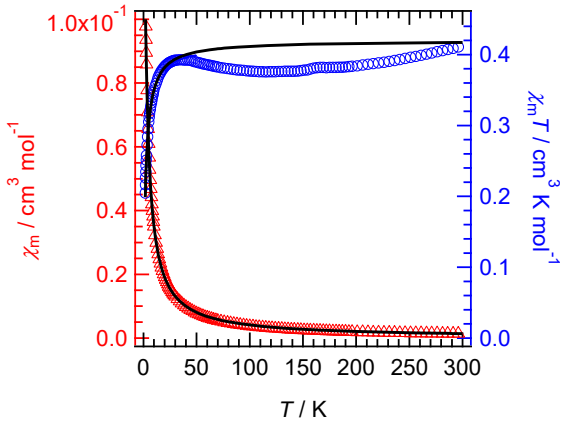


図 2. 磁場 1 T 下での磁化率（χ_m, $\chi_m T$）の温度依存性（結晶 1）。実線は Curie-Weiss 則に基づくフィッティング。

既報の $Cs^+_2([18]crown\text{-}6)_3[Ni(dmit)_2]^-_2$ では，結晶内のクラウンエーテルが室温で回転しており，クラウンエーテルの回転に伴う磁気異常が観察されている。結晶 **1** においても，H-pdaz$^+$ 面内分子回転運動が $[Ni(dmit)_2]^-$ 磁気相互作用に摂動を与え、磁化率の異常を引き起こしたと考えられる。

(b) 融解するイオンラジカル塩の合成と物性評価

電気伝導性を示すイオンラジカル塩は、1950 年代の良導性半導体ペリレン－臭素を端緒とし、1970 年の金属的導電性を示す TTF・TCNQ の発見、それに続く多数の超伝導体の報告に見られるように、高い電子機能性を持つ系として広範な研究が行われてきた。イオンラジカル塩は導電性のみならず、TTF-クロラニルの中性イオン性転移における誘電異常や、BEDT-TTF 塩の超伝導相に隣接した Mott 絶縁体状態との間のスイッチングなど、興味深い物性を発現する。特に後者では、Mott 絶縁体相への電荷注入により超伝導 FET が実現しており、単結晶上への電極作製によりデバイス動作を実現している。イオンラジカル塩を用いたデバイスは、単結晶を用いた基礎段階にあり、応用展開はほとんど試みられていない。その理由は、イオンラジカル塩は大きな結晶化エネルギーを持つため、ほとんどの溶媒に溶解せず、また、加熱により融点を示さず分解するためである。従って、溶液等の液相を経由する薄膜化、インクジェット印刷等のハイスループットなデバイス製造過程への適用は極めて困難である。溶媒に溶解するだけでなく、明確な融点を示し、液相が安定なイオンラジカル塩の開発が実現すれば、薄膜化を通じたデバイス化など新たな応用展開が期待できる。

そこで、イオン液体を構成する複素環カチオン 1-ethyl-3-methylimidazolium（C_2mim^+）に着目し、DB[24]crown-8 に包接させて、$[Ni(dmit)_2]$塩との超分子カチオン塩を作製した。C_2mim^+を DB[24]crown-8 に包接させることで、カチオンと$[Ni(dmit)_2]^-$ との距離を離し、静電相互作用に基づく結晶化エネルギーの低下が期待できる。また、C_2mim^+ の imidazole 環 N 末端が ethyl 基で修飾されており、DB[24]crown-8 と水素結合を形成することができない事も、結晶化エネルギーの低下に有利に働く。

得られた（C_2min^+)(DB[24]crown-8)$_2[Ni(dmit)_2]^-$（**2**）の構造を図 3 に示す。結晶内で DB[24]crown-8 はフェニレン環のπ－π相互作用を介して一次元チャネル構造を形成し、チャネル内には C_2mim^+ が包接されていた。$[Ni(dmit)_2]^-$はカラム間に存在し、アニオンーカチオン分離構造が実現した（図 3a)。また C_2mim^+と DB[24]crown-8 の間には水素結合は見られなかった（図 3b)。

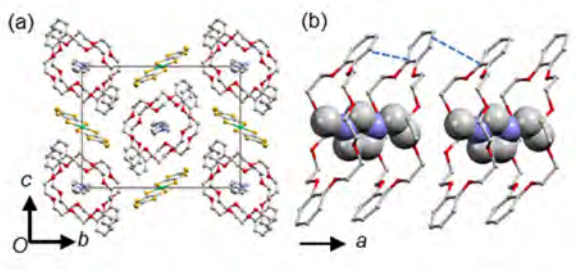


図 3 (a) 結晶 2 のパッキング。(b) C_2mim^+ と DB[24]crown-8 による超分子カチオンの構造。

結晶 **2** は 378 K で融解した。熱重量―示差熱測定（TG-DTA）より、融点に対応する 378 K で吸熱ピークを示すとともに、450 K まで重量減少が見られなかったことから、**2** は安定な液相を持つイオンラジカル塩であることが分かった（図 4)。超分子化学的な手法を用いることで、安定に融解するイオンラジカル塩が得られた。

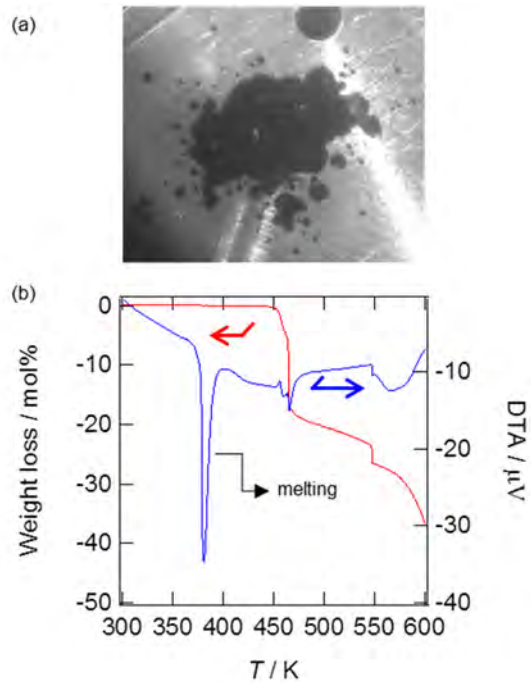


図 4 (a) 380 K における 2 の融点観察写真。(b) 300 から 600 K までの TG-DTA。378 K における吸熱ピークは、融点に対応する。

(c) 酸応答性の有機多孔質フレームワークの構築

π共役分子で構成された２次元ネットワーク構造を積層させた多孔質材料は、層の重なり具合によって空間形状や光電子物性が静的・動的に制御できる可能性があり、資源ガスの分離・貯蔵材料、触媒反応場、センサー、電極や光起電性を有する半導体材料の観点から多大な関心を集めている。これまでに我々は、結合の指向性が高いフェニルカルボキシル基を導入した３回対称性のπ共役系炭化水素をビルディングブロックに用いることによって、多孔性の２次元ヘキサゴナルネットワーク(HexNet) 構造が積層した水素結合性の多孔性有機フレームワークが効率よく構築できることを明らかにしている。本研究では、ヘキサアザトリナフタレン誘導体を用いてHexNet積層体を構築し、その構造安定性、多孔性を調査した。さらに、拡張したパイ共役系に窒素原子を導入することによって、LUMO準位の低下，金属への配位，カチオン種との相互作用などが期待されるが、本系は酸に対する応答性を検討した。

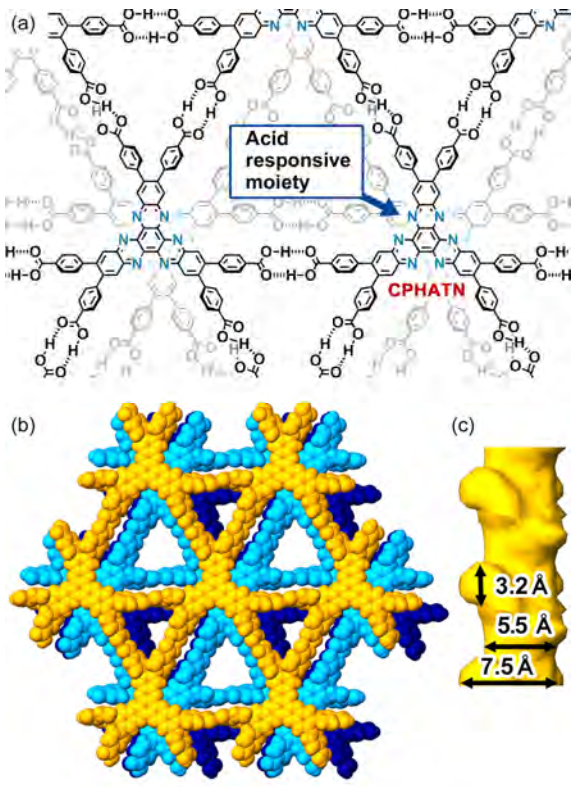


図５ (a) カルボキシ基の水素結合で形成される CHPAT の多孔質ネットワーク。(b) CPHATN-1a の結晶構造。(c) 表面を可視化した 1 次元チャネル空間。

拡張パイ共役分子であるトリナフチレンに６つの窒素原子を導入したヘキサアザトリナフチレン(HATN)を中心部位に、カルボキシフェニル基を周囲に持つ化合物 CPHATN を合成し，高沸点極性溶媒と1,2,4-トリクロロベンゼンを混合した溶液から高温下で結晶化することによって、CPHATNが水素結合で連結されたHexNetシートの積層構造(CPHATN-1)を得た(図5)。CPHATN-1の空間内に包接された結晶溶媒を取り除くために、CPHATN-1を真空下463 Kに加熱し、空間活性化されたCPHATN-1a結晶を得た。CPHATN-1aは、脱溶媒の過程で結晶構造が若干変化するものの，開口径6.2 Åのチャネル状空孔を持つ永続性多孔質フレームワークであることが、単結晶構造解析より明らかになった。CPHATN-1aは耐熱性に優れ、空気中で633 Kまで安定に構造を維持できることがわかった。77 Kにおける窒素ガスの吸着等温線から見積もったCPHATN-1aのBET比表面積は、それぞれ379 m^2g^{-1}であった。

興味深いことに，このCPHATN-1aは塩酸にさらすことによって、黄色から赤褐色へと変色する(図6)。塩酸への曝露によって固体吸収スペクトルでは550～700 nmに新たな吸収帯が現れ，蛍光スペクトルでは524 nmに極大をもつ発光が消光されることが分かった。塩酸を除去すると，もとの蛍光発光を示す黄色固体に戻ることがわかった。窒素部分のプロトン化による電子状態の変化がパイ共役系全体の電子状態に摂動を与えたと考えられる。CPHATN-1aは、ガスを吸着できる永続的多孔性と酸に対する応答性を併せもった複合機能性の水素結合性の有機多孔質フレームワークの初めての例である。

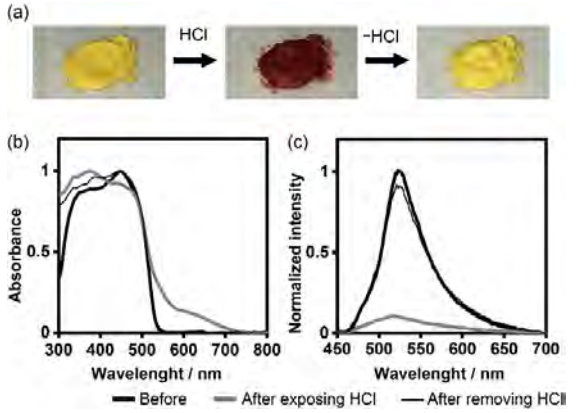


図６ HOF CPHATN-1a の塩酸に対する呈色応答性。(a) 塩酸の添加と除去による呈色変化。(b) 紫外可視吸収および蛍光発光スペクトル変化。

３．今後の研究の展望

ナノアセンブリ材料として、(1) 結晶内における分子運動を利用した、磁気摂動を示す分子結晶の創出や、(2) 分子間相互作用の設計に基づく融解性イオンラジカル塩の開拓を行うとともに、(3) 機能性多孔質材料の開発を進めてきた。いずれの材料系においても、分子集合体内における分子間相互作用を制御し、それを活用することが機能発現の鍵となっており、単一分子では実現しがたい、分子集合体特有の性質を積極的に利用した材料系であるといえる。分子集合体を用いる最大の利点は、多数の分子による共同現象を利用できることである。共有結合で機能ユニットがつながっていないために、ある程度分子間の相互作用を時空間的に制御できる点も利点である。これら分子集合体の特徴を生かし、今後も分子集合に基づく機能材料の開拓を進めていく。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） M. Shiga, S. Kawaguchi, M. Fujibayashi, S. Nishihara, K. Inoue, T. Akutagawa, S. Noro, T. Nakamura and R. Tsunashima: “Chemo-chromism in an orthogonal dabco-based Co(II) network assembled by methanol-coordination and hydrogen bond formation”, *Dalton Transactions*, **47**(23): 7656-7662 (2018)

２） K. Yuyama, M. Islam, K. Takahashi, T. Nakamura and V. P. Biju: “Crystallization of Methylammonium Lead Halide Perovskites by Optical Trapping”, *Angewandte Chemie International Edition*, **57**(41): 13424-13428 (2018)【電子研内共著】

３） M. Kato, K. Ogura, S. Nakagawa, S. Tokuda, K. Takahashi, T. Nakamura and I. Yagi: “Enhancement of Electrocatalytic Oxygen Reduction Activity and Durability of Pt-Ni Rhombic Dodecahedral Nanoframes by Anchoring to Nitrogen-Doped Carbon Support”, *ACS Omega*, **3**(8): 9052-9059 (2018)

４） J. Xiong, K. Kubo, Shao F. Lue, Ming Li and T. Nakamura: “Supramolecular self-assembly for designing non-centrosymmetric crystals based on Keggin polyoxometallates and crown ether”, *Dalton Transactions*, **47**(39): 14001-14007 (2018)

５） T. Takeda, J. Wu, N. Ikenaka, N. Hoshino, I. Hisaki and T. Akutagawa : “C_3 symmetric hexaphenyltriphenylenehexamide: Molecular design of fluorescent ferroelectrics”, *ChemistrySelect*, **3**: 10608-10614 (2018)

６） K. Ichihashi, D. Konno, Takuya Date, Takumi Nishimura, Kseniya Yu . Maryunina, K. Inoue, T. Nakaya, K. Toyoda, Y. Tatewaki, T. Akutagawa, T. Nakamura and S. Nishihara: “Optimizing Lithium Ion Conduction through Crown Ether-Based Cylindrical Channels in $[Ni(dmit)_2]^-$ Salts”, *Chemistry of Materials*, **30**(20): 7130-7137 (2018)

７） S. Ghimire, L. Chouhan, Y. Takano, K. Takahashi, T. Nakamura, K. Yuyama and V. P. Biju: “Amplified and Multicolor Emission from Films and Interfacial Layers of Lead Halide Perovskite Nanocrystals”, *ACS Energy Letters*, **4**(1): 133-141 (2018) 【電子研内共著】

８） I. Hisaki, Y. Suzuki, G. Eduardo, J. Qin, N. Tonai、T. Nakamura, D. Abderrazzak : “Acid Responsive Hydrogen-bonded Organic Frameworks”, *Journal of American Chemical Society*, **141**(5): 2111-2121 (2019)

９） G. Cai, S. Chatterjee, I. Hisaki, Y. Tobe: “[2.2.2.2](2,7)-1-Bromonaphthalenophane from a Desymmetrized Building Block Bearing Electrophilic and Masked Nucleophilic Functionalities”, *Helvetica Chimica Acta*, **102**(3): e180024 (2019)

１０）Y. Shirakawa, K. Takahashi, H. Sato, N. Hoshino, H. Anetai, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura: “Hydrogen-Bonded Polyrotaxane Cation Structure in Nickel Dithiolate Anion Radical Salts, Ferromagnetic and Semiconducting Behavior Associated with Structural Phase Transition”, *Chemistry – a European Journal*, **25**(28): 6920-6927 (2019)

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）中村 貴義、白川 祐基、高橋 仁徳 : 特願2018-162355、「分子性有機導体の融解助剤、分子性有機導体含有固体材料及びそれらの利用」、2018年08月30日

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） K. Takahashi*, N. Hoshino, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Crystal Structure, Gas Sorption and Dielectric Properties of OneDimensional Copper(II) Coordination Polymer with 2-thiophenecarboxylate Ligands”, 43rd International Conference on Coordination Chemistry, 仙台 (2018-07 ～ 2018-08)

２） T. Nakamura* : “Crown Ether Based Supramolecular Cations Salts of Ni(dmit)2”, 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018), 仙台 (2018-07 ～ 2018-08)

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. Ohshima, K. Kubo, S. Noro, S. Takeda, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Molecular Rotation in Semiconducting (3-Fluoroadamantylammonium) (*trans-syn-trans*-dicyclohexano[18]crown-6)$[Ni(dmit)_2]\cdot CH_3CN$”, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2018 (ICSM2018), Busan, Korea (the Republic of) (2018-07)

２） Y. Shirakawa*, K. Takahashi, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of $[Ni(dmit)_2]$ Salts with Pyridazinium or Pyrazinium dibenzo[24]crown-8 Supramolecular Cations”, The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2018 (ICSM2018), Busan, Korea (the Republic of) (2018-07)

３） J. Chen*, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura : “Single Crystals of Sandwich-Type Polyoxometalates $[(PW_9O_{34})_2(H_2OTb)_3CO_3]_{11}$-with$(CH_3)_nH_{4-n}N^+$ (n = 1-4) Counter Cations”, The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2018 (ICSM2018), Busan, Korea (the Republic of) (2018-07)

４） J. Wu*, T. Endo, K. Takahashi, K. Kubo, Y. Suzuki, S. Noro, J. Kawamata and T. Nakamura : “Ferromagnetic $[Mn^{II}Cr^{III}(oxalate)_3]$ Salts with Supramolecular Cations based on Benzo[18]crown-6”, The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2018 (ICSM2018), Busan, Korea (the Republic of) (2018-07)

５） K. Kubo*, Y. Kim, A. Morita, T. Kadoya, S. Noro, T. Nakamura and J. Yamada : “Development of New Electrochromic Materials Based on Unsymmetrical Platinum Dithiolene Complexes”, 43rd International Conference on Coordination Chemistry, 仙台 (2018-07 ～ 2018-08)

６） Y. Shirakawa*, K. Takahashi, S. Noro, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of $[Ni(dmit)_2]$ Salts of Supramolecular Cations with dibenzo[24]cronw-8”, 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018), 仙台 (2018-07 ～ 2018-08)

７） J. Wu*, T. Endo, K. Takahashi, K. Kubo, Y. Suzuki, S. Noro, J. Kawamata and T. Nakamura : “Benzo[18]crown-6 Based Supramolecular Cations in Ferromagnetic Salts $[MnCr(oxalate)_3]$”, 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018), 仙台 (2018-07 ～ 2018-08)

８） I. Hisaki*, N. Ikenaka, Y. Suzuki, E. Gomez, N. Tohnai and A. Douhal : “Hexaazatriphenylene-based, Thermally Stable, Single Crystalline HOF with Permanent Porosity”, 13th International Workshop of the Crystal Growth of Organic Material (CGOM), Seoul, Korea (the Republic of) (2018-08)

９） T. Nakamura* : “Heteroaromatic Cation/Large-Cavity Crown Ether Supramolecules in $Ni(dmit)_2$ Salts”, 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIV), 広州, China (2018-10)

１０） S. Li*, K. Takahashi, S. Noro and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of Novel $[Ni(dmit)_2]$ Salts of Protonated DABCO ”, 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIV), 広州, China (2018-10)

１１） J. Chen*, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Structure and Magnetic Properties of Sandwich-Type Polyoxometalates Containing Carbonate-Bridged Tb Triangle with $(CH_3)_nH_{4-n}N^+$ (n = 1-4) Counter Cations”, 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIV), 広州, China (2018-10)

１２） J. Wu*, T. Endo, K. Takahashi, K. Kubo, Y. Suzuki, S. Noro, J. Kawamata and T. Nakamura : “2D bimetallic oxalate-based ferromagnets prepared by insertion of benzo[18]crown-6 based supramolecules”, 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIV), 広州, China (2018-10)

ｄ． 一般講演（国内学会）

１） X. Zheng*, K. Takahashi, T. Nakamura and S. Noro : “A series of copper coordination polymers constructed by bis(imidazole) ligands and bulky fluorinated anions: synthesis, structures, and physical properties”, 錯体化学会第 67 回討論会, 仙台(2018-07)

２） 久木 一朗*、鈴木 悠斗、藤内 謙光 :「酸の刺激で呈色する水素結合性有機フレームワーク」、基礎有機化学討論会、東工大 (2018-09)

３） 高橋 仁徳*、星野 哲久、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義 :「一次元鎖型 Cu 錯体による混合ガスフローからの選択的 CO_2 吸脱着と誘電応答」、第 12 回分子科学討論会 2018、福岡 (2018-09)

４） 白川 祐基*、李 思敏、高橋 仁徳、野呂 真一郎、中村 貴義 :「 (4,4’-bipyridinium)(dibenzo[24]crown-8)$[Ni(dmit)_2]$ 結晶の構造と物性」、第 12 回分子科学討論会 2018 福岡、福岡(2018-09)

５） S. Li*, K. Takahashi, M. Miyahara, K. Kubo, S. Noro and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of $[Ni(dmit)_2]$ Salt of Hydrogen Bonded $(H\text{-}DABCO)_2(DABCO)$ Trimer ”, 第 12 回分子科学討論会 2018 福岡, 福岡(2018-09)

６） 久木 一朗* :「水素結合性ヘキサゴナルネットワークの積層による機能性多孔質構造の構築」、高分子討論会、札幌 (2018-09)

７） 高橋 仁徳*、星野 哲久、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義 :「一次元鎖型銅錯体結晶の選択的気体吸着による誘電率変化と熱異常」、第 54 回熱測定討論会、横浜 (2018-10 ～ 2018-11)

８） 高橋 仁徳*、白川 祐基、星野 哲久、野呂 真一郎、芥川 智行、中村 貴義 :「Dibenzo[24]crown-8/1-ethyl-3-methylimidazolium 超分子カチオンを導入した$[Ni(dmit)_2]$アニオンラジカル塩の融解挙動と電気物性」、日本化学会第 99 春季年会 2019、神戸 (2019-03)

９） S. Li*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of $[Ni(dmit)_2]$ Salts of Protonated DABCO”, 日本化学会第 99 春季年会, 神戸(2019-03)

１０） J. Wu*, K. Takahashi, N. Hoshino, Y. Suzuki, I. Hisaki, J.

Kawamata, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Crystal Structure, Dielectric and Magnetic properties of Oxalate-Bridged MnCr Complex with Supramolecular Cation of (Anilinium Derivatives)(Benzo[18]crown-6)”, 日本化学会第 99 春季年会, 神戸 (2019-03)

１１)I. Hisaki*, Y. Suzuki, E. Gomez, Q. Ji, N. Tohnai, T. Nakamura and A. Douhal : “Acid-responsive porous hydrogen-bonded organic framework”, 日本化学会第 99 春季年会, 神戸 (2019-03)

ｅ. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

１） K. Takahashi*, Y. Ohshima, K. Kubo, S. Noro, S. Takeda, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Multiple molecular motion in the [Ni(dmit)$_2$] salts of supramolecular rotator”, International Symposium of Structural Thermodynamics for Young Thermodynamicists: ISST-YT , 豊中 (2018-06)

２） 高橋 仁徳*、白川 祐基、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錯体構造を含む[Ni(dmit)$_2$] 錯体結晶の構造と物性」、平成２９年度 ダイナミック・アライアンス成果報告会、札幌 (2018-06)

３） T. Nakamura* : “Constructing Crystalline Molecular Electronic Materials Based on Heteroaromatic Cations in Large-Cavity Crown Ethers”, The 10th International Symposium on Nano & Spramolecular Chemistry(ISNSC2018), Dresden, Germany (2018-07)

４） 久木 一朗*、鈴木 悠斗、藤内 謙光 : 「C_3 対称性のヘキサアザトリナフチレン誘導体を基盤とした水素結合性多孔質フレームワーク：構造とその物性」、第 64 回高分子研究発表会 （神戸）、神戸 (2018-07)

５） 白川 祐基*、高橋 仁徳、野呂 真一郎、中村 貴義 : 「4,4’-bipyridinium-[Ni(dmit)$_2$]塩の特異な結晶構造と物性」、日本化学会北海道支部 2018 年夏季研究発表会、北見 (2018-07)

６） 久木 一朗* : 「結晶工学七転八倒」、2018 構造有機化学研究会ミニシンポジウム、彦根 (2018-09)

７） K. Takahashi*, Y. Ohshima, K. Kubo, S. Noro, S. Takeda, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Molecular Rotation in Semiconducting [Ni(dmit)$_2$] Salt of (3-fluoroadamantylammonium)(*trans-syn-trans*-dicyclohexano[18]crown-6)”, 8th International Workshop ″Organic Electronics of Highly-Correlated Molecular Systems, Suzdal, Russia, Russian Federation (the) (2018-09)

８） T. Nakamura* : “Crystalline Molecular Electronic Materials Based on the Supramolecular Structures of Heteroaromatic Cations and Large-Cavity Crown Ethers”, 8th International Workshop ″Organic Electronics of Highly-Correlated Molecular Systems, Suzdal, Russian Federation (the) (2018-09)

９） 久木 一朗* : 「水素結合性多孔質フレームワーク～パイ共役系を高次超分子シントンで組み上げる～」、第 12 回超分子若手懇談会、加賀 (2018-10)

１０)久木 一朗*、鈴木 悠斗、Gomez Eduardo、藤内 謙光、中村 貴義、Douhal Abderrazzak : 「ヘキサアザトリナフチレン誘導体の水素結合性多孔質フレームワーク 」、第 27 回有機結晶シンポジウム、東大阪 (2018-10)

１１)久木 一朗* : 「水素結合性多孔質フレームワーク」、第７回錯体化学若手の会 北海道支部勉強会、札幌 (2018-11)

１２)S. Li*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of Novel [Ni(dmit)$_2$] Salts of Protonated DABCO”, 第７回錯体化学若手の会 北海道支部勉強会, 札幌 (2018-11)

１３)J. Wu*, T. Endo, K. Takahashi, K. Kubo, Y. Suzuki, S. Noro, J. Kawamata and T. Nakamura : “Benzo[18]crown-6 Based Supramolecular Cations in Ferromagnetic Salts of [MnCr(oxalate)$_3$]$^-$”, 第７回錯体化学若手の会 北海道支部勉強会, 札幌 (2018-11)

１４)高橋 仁徳*、白川 祐基、中村 貴義 : 「水素結合型擬似ロタキサン構造を用いた [Ni(dmit)$_2$] 塩の構造と物性」、有機固体若手の会 2018 秋の学校、滋賀 (2018-11)

１５)S. Li*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of Novel [Ni(dmit)$_2$] Salts of Protonated DABCO”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組, 札幌 (2018-12)

１６)J. Chen*, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Structures and Magnetic Properties of Sandwich-Type Polyoxometalates Containing Carbonate-Bridged Tb Triangle with $(CH_3)_nH_{4-n}N^+$ (n = 1-4) Counter Cations ”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組, 札幌 (2018-12)

１７)J. Wu*, K. Takahashi, K. Kubo, Y. Suzuki, S. Noro, J. Kawamata and T. Nakamura : “Benzo[18]crown-6 Based Supramolecular Cations in Ferromagnetic Salts of [Mn^{II}Cr^{III}(oxalate)$_3$]$^-$”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium 組, 札幌 (2018-12)

１８)久木 一朗* : 「分子性多孔質構造体の設計と構築」、ダイナミックアライアンス G1 および物質・デバイス領域共同研究拠点事業合同研究会「有機分子集積体の機能設計と精密計測」、札幌 (2018-12)

１９)S. Li*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Structure and Physical Properties of [Ni(dmit)$_2$] Salts of Protonated DABCO”, 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌 (2019-01)

２０)白川 祐基*、高橋 仁徳、久木 一朗、野呂 真一郎、

芥川 智行、中村 貴義：「Dibenzo[24]crown-8 超分子カチオンを用いた融解性有機半導体[Ni(dmit)$_2$]塩の開発」、化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会、札幌 (2019-01)

２１）J. Wu*, K. Takahashi, N. Hoshino, Y. Suzuki, I. Hisaki, J. Kawamata, T. Akutagawa and T. Nakamura : "Benzo[18]crown-6 Based Supramolecular Cations in Ferromagnetic Salts of [MnCr(oxalate)$_3$]$^-$", 化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会, 札幌 (2019-01)

２２）張 雲雅*、高橋 仁徳、中村 貴義、野呂 真一郎：「4-スチリルピリジン配位子を有するウェルナー型錯体の合成と性質」、化学系学協会北海道支部 2019 年冬季研究発表会、札幌 (2019-01)

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

該当なし

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） 久木 一朗、基盤研究 B、単純な水素結合で実現する柔剛自在な単結晶性の π 電子系多孔質フレームワークの創出、2018～2019 年度

２） 中村 貴義、基盤研究 B 一般、超分子構造を用いた結晶内分子配列制御と機能開拓、2018～2020 年

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

１） 高橋 仁徳(ノーステック財団)：「配位高分子の構造変化を用いた選択的・高感度ガスセンサーの開発」、2018 年度

4.10 受賞

１） 高橋 仁徳、石井 亮、鈴木 麻実、中村 孝志、吉田 学、蛯名 武雄：平成 30 年度論文賞 「受賞論文：Preparation of lignin/montmorillonite nanocomposite films and its characterization for electronic devices. Clay Science 21, 1-6 (2017)」(一般社団法人 日本粘土学会) 2018 年 09 月

２） J. Chen, M. Fujibayashi, K. Takahashi, K. Kubo, S. Noro, I. Hisaki and T. Nakamura : 14th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XIV)ポスター賞 "Crystal Structure and Magnetic Properties of Sandwich-Type Polyoxometalates Containing Carbonate-Bridged Tb Triangle with $(CH_3)_nH_{4-n}N^+$ (n = 1-4) Counter Cations" (IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis) 2018年10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

該当なし

ｄ．外国人研究者の招聘

１） Lahcène Ouahab、France、(2019 年 01 月 21 日～2019 年 01 月 24 日)

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、2018 年 06 月 12 日～2018 年 08 月 07 日

２） 環境科学院、環境物質科学実習 I、中村貴義、久木一朗、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

３） 環境科学院、環境物質科学実習 II、中村貴義、久木一朗、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

４） 環境科学院、環境物質科学論文購読 I、中村貴義、久木一朗、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

５） 環境科学院、環境物質科学論文購読 II、中村貴義、久木一朗、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

６） 環境科学院、環境物質科学特別研究 I、中村貴義、久木一朗、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2018 年 03 月 31 日

７） 環境科学院、環境物質科学特別研究 II、中村貴義、久木一朗、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

８） 環境科学院、分子環境学特論Ⅱ、中村貴義、久木一朗 高橋仁徳、2018 年 10 月 01 日～2019 年 02 月 04 日

９） 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」、中村貴義、2018 年 04 月 20 日

１０） 全学教育科目、一般教育演習（フレッシュマンセミナー)、藤岡正弥、押切友也、相良剛光、木村隆志、高橋仁徳、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日

１１） 全学教育科目、化学Ⅱ、中村貴義、2018 年 10 月 01 日～2019 年 02 月 04 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

１） 久木 一朗 ： 日刊工業新聞 30 面 2019 年 01 月 24 日
「強酸で変色する多孔質材料開発」

２） 久木 一朗 ： 日経産業新聞8ページ 2019年01月29日
「酸に応答して変色する水素結合性多孔質フレームワークの研究を紹介」

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：2人

１） 白川 祐基 ： 環境科学院環境物質科学専攻： 修士、大環状クラウンエーテルを用いた [Ni(dmit)$_2$]超分子カチオン結晶の合成と物性

２） 陳 姣 ： 環境科学院環境物質科学専攻： 修士、Crystal Structure and Magnetic Properties of Sandwich-type Polyoxometalates Containing Carbonate-Bridged Tb Triangle （炭酸架橋Tb三核錯体を含むサンドイッチ型ポリオキソメタレートの結晶構造と磁性）

博士学位：0人

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～）
准教授　小林康明（東大院,博士（理学）,2019.3～）
助　教　秋山正和(広大院,博士(理学),2012.7～2019.3)
助　教 西野浩史（岡山大院,博士（理学）,2015.4～）
特任助教　上坂正晃（東大院,博士（数理科学）,2018.4～2019.3)
特任助教　後藤田剛（京大院,博士（理学）,2018.4～2019.3)
技術補佐員　出羽真樹子（2018.7～）
技術補佐員　富澤ゆかり（2016.4～2019.3)
実験補助員　星野由佳（2018.11～）
院生
博士課程　Kim Minsoo,岡本守,脇田大輝
修士課程　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）生命系における集団振動現象の解明

さまざまな生命系に現れる集団振動現象を結合振動子系として捉え,振動ダイナミクスの発生メカニズムを解析し,振動現象の生命系における役割について明らかにしていくことを目標とする.空間的に拡がった系にたいする振動場の理論と,離散的な系にたいする振幅振動子・位相振動子の理論を用いて具体的な問題にたいする数理モデルを構築して解析を行っていく.

細胞集団の集団振動は同期現象や進行波といった特徴的な時空間構造を持つが,このような集団特有のダイナミクスには細胞間の相互作用が不可欠である.相互作用には隣り合う細胞間にはたらく局所的なものだけでなく,遠く離れた細胞間にはたらく長距離の相互作用もある.細胞外で拡散する化学物質の濃度場を介した相互作用はそのような例であり,細胞全体に均一な場の作用が仮定されることが多い.しかし細胞集団が複雑な３次元形態を持っていれば,細胞集団に作用する場の空間分布は一般に不均一なものになる.このような不均一な場による相互作用を含んだ,より広い集団振動現象を記述する理論的な手法を構築することを目指す.

（3）増殖細胞集団の形態形成

生物の形態形成においては,細胞が周りの組織との接着によって束縛されつつ増殖していくことで特徴的なパターンが生じる.細胞増殖が周辺組織の変形を促すと同時に,増殖能をもつ細胞の密度分布も周辺組織の変形にともなって変化していくため,増殖細胞の層と周辺組織の間には双方向の相互作用が存在する.したがって形態形成を理解するためには,この双方向の相互作用を考慮した理論的な枠組みが必要である.そこで変形可能なやわらかい組織の上で増殖する細胞系における,理論的に扱いやすい一般的な連続体モデルを構築し,増殖細胞系の形態形成を支配する原理の解明を目指す.

（4）動物の適応的な振る舞いの構成論的理解

常に変化し,予測することが不可能な無限定な環境の中で,私たち動物は生活し,状況に応じて適応的に行動している.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.

（5）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

今年度は,表皮バリア機能の恒常性維持の数理モデリングを中心にすすめた.角層バリア機能についてはこれまで数理モデルから恒常性維持のメカニズムを議論してきた.それに加えて今年度から生物学的バリア機能であるタイトジャンクションバリア機能の発現とその恒常性維持を可能とするメカニズムを数理モデリングを通して研究した.タイトジャンクション（TJ）は顆粒層の中の第二層（SG2 層）だけに発現することが知られており,ほぼ 1 層でシート状にバリアを形成している.GS2 層だけで TJ を発現する数理モデルを構築し,どのような仮定をすれば層構造を維持できるのか考察した.その結果,通常アピカル面にだけ TJ を発現するのであるが細胞の分化に伴い部分的にベーサル面にもTJを発現する細胞があれば,ある程度TJバリア機能を維持できることがわかった.また,細胞周期や分裂回数を変化させた場合,TJ バリア機能よりも先に角層バリア機能が破綻することも数値計算から示唆された.

（２）触錯覚現象の数理解析

慶応大学の仲谷正史氏と共同で Fishbone 触錯覚の起こるメカニズムを解明するための数理モデリングによる理論実験と心理物理学実験を行った. Fishbone 触錯覚の要因には２つの現象が関わっていることが示唆された.一つは凸凹刺激の有無であり,もう一つは凸凹刺激の同期性である.特に,ほぼ同時に凸凹刺激を受けると,その刺激による Fishbone 触錯覚が消えることを心理学実験で見つけ,それを支持する数理モデルの結果を得た.

（３）マウスの歩行の数理モデル

複雑なパターンの足場を配置したホイール上をマウスが歩行するとき,マウスは徐々に足場のパターンを学習し,歩行タイミングのぶれが減少していく.この学習過程でどのような脳内の変化が起こっているかを明らかにする実験が大阪大の木津川氏らのグループにより行われている.そこで歩行ダイナミクスを記述する数理モデルを構築し,学習における脳内の変化を数理モデル上で歩行のパターンを決定する関数の変化としてとらえることを試みた.

構築した数理モデルは実験で得られている歩行パターンをよく説明することができた.とくに与えられた足場パターンにたいして,相互作用関数の形に応じて同相と逆相の歩行パターンの遷移や,同相と逆相の共存状態といった実験事実を再現することができた.また実験データからモデルの相互作用関数を最尤推定する手法を提案し,実際に推定が可能であることを示した.

（３）表皮幹細胞ダイナミクスと真皮形状変形の相互作用モデル

表皮内部の真皮は外側（表皮側）に向かって多数の突起を持っていることが知られている.基底層と真皮は基底膜と呼ばれる弾性膜で仕切られていて,幹細胞は基底膜と強く接着している.多くの場合に幹細胞は突起の上部に多く存在することが実験で確認されている.真皮形状と幹細胞の分布は部位ごとに明らかな法則性があるが,これを決定する要因が何であるかについては明らかになっていない.幹細胞やTA細胞が基底膜と接着していることから,細胞分裂が真皮の形状に影響を与えることは容易に予想され,この問題を弾性膜としての基底膜と細胞分裂を繰り返して成長する基底層を重ね合わせたときの力学の問題とみなすことができる.実際このような観点から,腸の上皮構造の凹凸が,成長率の違う弾性体の2重層における座屈パターンとして生じることを連続体のモデルによって示した研究がある.ただし座屈によって生じる空間周期的なパターンは上下どちらにも突起を生じるので,突起のできる方向を決める要因は明らかになっていない.

そこで本研究では皮膚における細胞分裂と真皮形状変化のモデルとして,弾性膜とその上で複製を繰り返す粒子の相互作用系を導入し,膜の形状と幹細胞分布の関係を数値シミュレーションによって調べた.我々のモデルは上述の連続体モデルでの座屈パターンと同様に真皮の周期的なパターンを再現することができただけでなく,幹細胞は基底膜の突起上に選択的に分布することも再現できた（図１）.またこのことが幹細胞と基底膜の接着の強さに依存していることも明らかにした.

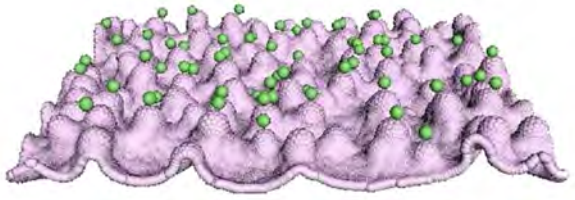


図１　表皮幹細胞ダイナミクスと基底膜の変形の数値シミュレーション

（４）細胞極性の数理解析

形態形成を研究する上で,形を数学的な方法で表現する方法を持つことは非常に重要である.形状を数学的な方法を用いて定式化することで,形の適量的な評価を行うことができるだけでなく,コンピュータ・シミュレーションなどの方法を用いることができ,形作りの原理を明らかにすることができる.しかし,領域の形状が前もってわからない状態で,領域内の変数を解くことは自由境界問題となり非常に難しい.一方,生物はこの問題を何らかのメカニズムによりうまく解決している.それでは生物はどのようにこの問題を解きそして堅牢性を持たせているのであろうか.この方法がわかれば,形の数学的な記述法を確立でき,さらにその妥当性を検証できるに違いない.そこで,今年度は幾つかの生物現象に関して,3 次元形態を表現する数学的方法論を見つけることに重点をおいて研究調査を行った.

松野氏とのショウジョウバエ腸管に関する共同研究では，バーテックスダイナミクスモデルを用いシミュレーションを行い，幾つかの腸管捻転のシナリオを提案した．

近藤氏のカブトムシに関する共同研究では，観察実験より，蛹期に将来角になる部分では，多数の皺（しわ）を見ることができた．成虫の角は２回の分岐があり，合計４箇所の突起構造があるが，この構造は，蛹期のシワにもその痕跡をみることができた．生物組織のほとんどが細胞シートの折り畳みとしてできることから，2D から 3D が出来上がっていく様子を折り紙のアナロジーを使う事で，空間トポロジーの数学として表現できると考えた．そこで，シート状の組織を表現するためのモデルに関して，研究を行った．

船山氏との共同研究でカイメンの形態形成に関して，フェーズフィールド法を用いた数理モデルを構築した．

（５）自励振動運動モデルの数理解析

今年度は，化学反応を伴う液滴の集団運動の数理モデル化を行った．円環状の細長い水路上で複数のサリチル酸エステル（ES）液滴を浮かべると相互作用しながら複数個の集団を形成し，最終的に停止する．この研究では，液滴が集団形成するメカニズムを数理モデリングを通じて解明した．水溶液中の SDS が水面で ES と反応し，減少することで SDS 濃度の壁を形成し，その壁に囲まれた液滴が徐々に集団形成することを示唆した．この現象が横毛管現象による集団形成ではないことも数値計算から示唆した．また，ES 液滴が徐々に停止する現象が起こることによって，ES 液滴が複数の集団を形成することも示唆した．

（６）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，棘皮動物，軟体動物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（図２）．軟体動物を使った研究では，記憶と学習に着目した．学習は，環境の変化に対応するための，ひとつの適応機能である．軟体動物の学習効率の基盤となる神経メカニズムとして，脳内の神経修飾物質である生体アミンの働きについて明らかにした．一方，昆虫や多足類，そして棘皮動物を使った研究では，動物に普遍的にみられる適応的なロコモーションの発現メカニズムに着目し，個体を取り巻く環境や環境の変化に応じて変容する制御メカニズムについて研究した．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．

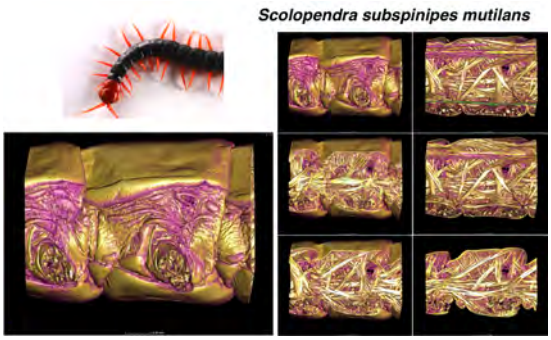


図２：X 線マイクロ CT を用いたイメージングにより，多足類のオオムカデの神経・筋・骨格などの 3 次元構造を非破壊で観察した，また，行動学実験をもとに数理モデルを構築し，筋骨格系の構造的特徴と歩行との関係について考察した．

（７）昆虫が超高速運動を生み出すカラクリ

動物は，進化の過程で多様な素早い行動を進化させた．素早い行動は，脅威から逃れたり，獲物を捕獲するときなどに見られる重要な機能である．素早い行動を産み出すためには，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，昆虫に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．我々は，沖縄に生息するアギトアリ属の行動に着目して研究を進めた．アギトアリは，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３）．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，超高速の筋収縮は起こせない．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．

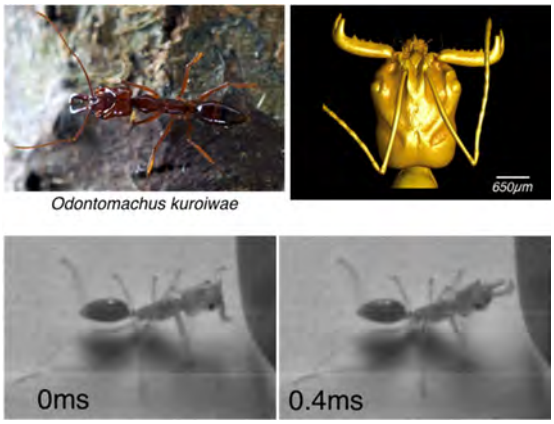


図３：アギトアリは，脅威に対して大顎を 0.4ms 以内という超高速で閉じて，その反動を使って自らの身体を弾き飛ばす．その加速性は，ジェット戦闘機の加速性の 10 倍に相当する．

（８）ゼブラフィッシュ体節の数理的研究（秋山）

前年度までに構築した「三次元空間内での細胞運動を表現する自己駆動粒子モデル」と「基底膜を表現する Phase-field モデル」をカップリングした数理モデルを基盤として,ゼブラフィッシュ胚の体節形成過程を武田氏（東京大学）と共同研究した.研究では実験で観察される集団的な回転運動が組織伸長を促進するという仮説を検証した.武田グループの実験観察の結果として,体節内の細胞が集団的な回転運動を起こすこと,基底膜のフィブロネクチンの分布が側方に多く上下端には少ないことがわかった.また伸長過程において,縦方向に配置換えを起こす 2 つの隣接する細胞の速度プロファイルを調べると,乗り上げられる細胞の速度が一定時間遅くなるという傾向が観察できた.この結果から,提案モデルにおいて「回転運動を起こす駆動力」と「基底膜からの異方的な反発力」を導入したモデルを構築し,提案モデルの数値計算結果として,実験観察で得られた傾向と同様の振る舞いが得られることを示した.さらに,回転力を制御するパラメータの依存性に関して,回転運動を排除した場合に比べて,回転運動を起こす場合の方が伸長率が高くなるパラメータ領域が存在することを示した.

（９）ショウジョウバエの後腸捻転現象の数理的研究（秋山）

ショウジョウバエ胚の後腸捻転現象に関する研究では，実際の後腸内に存在する細胞の形状変化を調べるために，z スタック画像から三次元形状を構築し，頂端面と基底面を繋ぐ細胞辺の長さが捻転過程を経て短くなることが統計的に有意であることを示した．このことから，これまでに提案した三次元バーテックスモデルにおいて，先行研究で示されている「頂端面の形状は正中線に対して左に傾いた形状であること」に次いで，「側面の辺は短くなること」と「基底面は不均一な六角形形状であること」を仮定し，側面の辺が短くなることで，結果として細胞組織全体が反時計回りに捻転し，個々の細胞も反時計回りに捻れることを示唆する数値計算結果を示した．一方で，実験観察における事実として後腸が肛門側から見て反時計回りに捻転することがわかっているが，数値計算結果で得られたように，個々の細胞が反時計回りに捻れるかどうかは統計的に示されていない．そのため，個々の細胞が捻れているかどうかを示すことが望まれる．現在のところ，これまでの実験研究と同様に，２つの色で細胞膜を染め上げたデータを作成したが，色が切り替わる部分で細胞断面がはっきりせず，正確に細胞断面の頂点を抽出できないという問題がある．今後は，一つの色で細胞膜を染め上げた後腸の z スタック画像から個々の細胞の三次元構築を行うことで，個々の細胞の捻れ角を正確に計測し，捻転中に個々の細胞が捻れるという数理モデルで得られた結果が，実際の生体内で起こっているかどうかを明らかにする研究に取り組む．

（１０）昆虫の聴覚器とヒトの耳との構造的類似性を発見

コオロギの前肢にある聴覚器の中に哺乳類の耳小骨に相当する構造を発見した．耳小骨は音によって生じる鼓膜の機械的な振動の音圧成分を増幅し，内耳（蝸牛）を満たすリンパ液の流れへと変換する．音の周波数が低いほどリンパ液は遠くまで届くため，蝸牛のより奥にある感覚細胞が刺激される．本研究では鼓膜と感覚細胞の間を介在し，てこの原理によってリンパ液に一方向の流れを生み出すと想定されるキチン質の構造（上皮コア）を発見した．そして上皮コアが？）上皮細胞の陥入・キチン質の分泌により自己組織化的に形成されることを明らかにした（図４）．

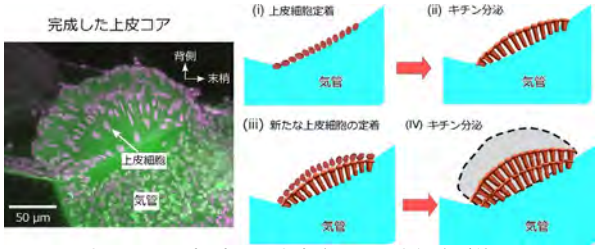


図４：上皮コアの発達．成虫脱皮直後から上皮細胞が体内に入り込んで気管への定着が起こり，キチン質の分泌を繰り返しながら扇状に成長する．

３.今後の研究の展望

（１）皮膚構造の数理モデル

数理モデルの評価を行うために，人工皮膚から細胞核をイメージングにより取り出し，細胞核の中心座標から表皮細胞形状を 3 次元ボロノイ分割で表現する．この結果と数理モデリングから得られる３次元ボロノイ分割細胞形状と比較する。これにより数理モデリングで得られた細胞形状が実際の細胞形状をどの程度再現しているか明らかにする。また、TJ バリア機能の恒常性の視点から顆粒細胞形状として１４面体が多いことが指摘されており、細胞形状の観点から数理モデルの有効性と適切性の検証を行う。さらに、

昨年度に引き続き、角化症の病態再現を進めていく。今年度は汗孔角化症の病態再現をめざし，その病態を再現するために必要な条件を数理モデルから導き、臨床皮膚科医と議論することで汗孔角化症治療法を提案する。乾癬についても同様に病態再現を目指して、数理モデルでの条件を探索していく。

（2）触錯覚現象の数理解析

今後,Fishbone触錯覚の心理物理学実験をさらに進め,数理モデルから与えられた示唆を検証していく.また，数理モデルの予測可能性を調べるために,新しい心理物理学実験系を確立する.さらに,触覚数理モデルの研究は国外でも行われており,我々の数理モデルの優位性をどのように確保するのか検討していく.

（3）マウスの歩行の数理モデル

現状ではひとつの歩行パターンの実験データにたいするモデル推定しか行うことができていない.今後は学習前後のデータを含むより多くの実験データをもとに推定を行い,マウスの学習過程をモデルの変化としてとらえることができるかどうかを明らかにしたい.

（4）増殖細胞系の形態形成モデル

表皮幹細胞ダイナミクスと真皮形状変形の相互作用モデルの研究で得られた真皮上の幹細胞の粒子モデルで,幹細胞ダイナミクスと真皮形状の相互作用の存在が示唆されたが,形態形成の具体的なメカニズムはまだ明らかになっていない.数理的なメカニズムを理解するには理論解析が不可欠であるが,粒子モデルでの解析は困難であり,連続体モデルの構築が求められる.粒子モデルに対応する連続体モデルとして,一様状態からの不安定化を引き起こす項の導出にはすでに成功しているので,まずは完全なモデルの導出を目指す.次に,より広い増殖細胞系の形態形成に適用できる一般的な連続体モデルを構築していくことを試みる.モデルの解析を通して,増殖細胞系の形態形成を支配する原理の解明を目指す.

（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）ゼブラフィッシュ体節の数理的研究

ゼブラフィッシュ胚の体節形成過程に関する研究については,今年度に提案した数理モデルの数値計算結果から,提案モデルを解析することで実際の体節内の細胞運動を理解する手助けになるということが期待できる.実験観察および提案モデルの両方における問題は,どのような機構で縦方向の配置換えを起こす２つの細胞の速度に差が生じるかということである.次年度は,生体内における体節伸長過程で観察される配置換えを理解するために,提案モデルにおいて速度の差が生じる要因を特定する研究に取り組む.また,実験観察において,回転運動を抑制した場合に,個々の細胞運動はランダムな方向に運動し,組織の伸長率が低下するという結果が得られている.このことから,ランダムな細胞運動を表現する確率微分方程式として細胞運動を表現する数理モデルを構築し,実験結果を再現できるかどうかを検証する.さらに,細胞に内在する微小な変動が単に回転運動のみを行う場合に比べて,組織伸長を促進するかどうかを検証する数値実験を行う.

（7）ショウジョウバエの後腸捻転現象の数理的研究

ショウジョウバエ胚の後腸捻転現象の研究については,実験観察における事実として後腸が肛門側から見て反時計回りに捻転することがわかっているが,数値計算結果で得られたように,個々の細胞が反時計回りに捻れるかどうかは統計的に示されていない.そのため,個々の細胞が捻れているかどうかを示すことが望まれる.現在のところ,これまでの実験研究と同様に,2 つの色で細胞膜を染め上げたデータを作成したが,色が切り替わる部分で細胞断面がはっきりせず,正確に細胞断面の頂点を抽出できないという問題がある.今後は一つの色で細胞膜を染め上げた後腸の z スタック画像から個々の細胞の三次元構築を行うことで,個々の細胞の捻れ角を正確に計測し,捻転中に個々の細胞が捻れるという数理モデルで得られた結果が,実際の生体内で起こっているかどうかを明らかにする研究に取り組む.

（8）嗅覚情報処理における気流情報の役割

匂いを関知するにはこれを運ぶ空気流が不可欠である.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から細胞内記録.染色を行うことで,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） T. Shinoda. A. Nagasaka. Y. Inoue. R. Higuchi. Y. Minami, K. Kato, M. Suzuki, T. Kondo, T. Kawaue, K. Saito, N. Ueno, Y. Fukazawa, M. Nagayama, T. Miura, T. Adachi and T. Miyata, “Elasticity-based boosting of neuroepithelial nucleokinesis via indirect energy transfer from mother to daughter”, PLoS Biol. 16(4), e2004426(2018, Apr.),

２） S. Nakata, K. Kayahara, M. Kuze, E. Ginder, M. Nagayama and H. Nishimori, “Synchronization of self-propelled soft pendulums”, Soft Matter, 14, 3791-3798(2018, Apr.)

３） Y. Tanaka, T Yasugi, M. Nagayama M. Sato and S. -I. Ei, “JAK/STAT guarantees robust neural stem cell differentiation by shutting off biological noise”, Scientific Reports, 8, 12484 (2018, August),

４） Y.Kobayashi, Y.Yasugahira, H.Kitahata, M. Watanabe, K. Natsuga and M. Nagayama, “Interplay between epidermal stem cell dynamics and dermal deformation”, npj Computational Materials, 4(1), 45 (2018, August)

5) J.Kumamoto, S.Nakanishi, M.Kakita, M.Uesaka, Y.Yasugahira, Y.Kobayashi, M.Nagayama, S.Denda and M.Denda, “Mathematical-model-guided development of full-thickness epidermal equivalent”, Scientific Reports, 8, 17999(2018, December)

６） E.G.Clark, D.Kanauchi, T.Kano, H.Aonuma, D.Briggs and A.Ishiguro, “The function of the ophiuroid nerve ring: how a decentralized nervous system controls coordinated locomotion”, *J. Exp. Biol.* 222, jeb192104, (2018)

７） T.Watanabe, A.Ugajin and H.Aonuma, “Immediate-early promoter-driven transgenic reporter system for neuroethological researches in a hemimetabolous insect” *eNeuro*. 5(4): e0061-18. (2018)

８） H.Aonuma, Y.Totani, M.Sakakibara, K.Lukowiak and E.Ito, “Comparison of brain monoamine content in three populations of *Lymnae*a that correlates with taste-aversive learning ability” *Biophys. Physicobiol.* 15: 129-135. (2018)

９） N.DiRienzo and H.Aonuma, “Plasticity in extended phenotype increases offspring defense despite individual variation in web structure and behavior” *Animal Behav.* 138: 9-17. (2018)

１０)Y.Momohara, H.Aonuma and T.Nagayama, “Tyraminergic modulation of agonistic outcomes in crayfish” *J. Comp. Physiol.* 204(5):465-473. (2018)

１１)園山貴之,荻本啓介,石橋敏章,須田有輔,青沼仁志,松浦啓一 “沖縄島東岸の浜比嘉島から得られたアマミホシゾラフグの記載と飼育下での行動” *魚類学雑誌*.65 (1): 81-84. (2018)

１２)A.Matsuda, H.Aonuma, K.Naniwa and S.Kaneko, “Image-based measurement of utra-fast movement of mandible in trap-jaw ants” *IEEE, 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics*, 88-93. (2018)

１３)T. Sushida, S. Kondo, K. Sugihara and M. Mimura, A differential equation model of retinal processing for understanding lightness optical illusions, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 35(1) (2018, March).

１４)Y. Yamagishi and T. Sushida, Archimedean Voronoi spiral tilings, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 51(4), 045203 (2018, January)

１５)M. Akiyama, M. Nonomura, A. Tero and R. Kobayashi, Numerical study on spindle positioning using phase field method. Physical Biology, Volume 16, Number 1, (2018, November)

１６)H.Nishino, M.Domae, T.Takanashi and T.Okajima: “Cricket tympanal organ revisited: morphology, development, and possible functions of the adult-specific chitin core beneath the anterior tympanal membrane”, *Cell and Tissue Research*, Springer (2019)

１７)H. Watanabe, Y. Koike, K. Tateishi, M. Domae, H. Nishino and F. Yokohari: “Two types of sensory proliferation patterns underlie the formation of spatially tuned receptive fields in the cockroach Periplaneta americana ”, *Journal of Comparative Neurology*, Wiley, 526: 2683-2705 (2018)

4.2 学術論文（査読なし）

１） 後藤田剛,上坂正晃,安ヶ平祐介,小林康明,北畑裕之,傳田光洋,長山雅晴,”表皮における顆粒層の安定性とタイトジャンクション形成の数理モデリング”,計算工学講演会論文集,23(2018)

２） 小林康明, ノイズのある結合振動子系の位相スリップ, 数理解析研究所講究録, 2063 (2018) 1-6.

３） 秋山 正和, 須志田 隆道, 細胞の極性形成と細胞群の運動に関する数理的アプローチ, 京都大学数理解析研究所(RIMS) 講究録, 2063(2018)

4.3 総説・解説・評論等

１） 該当なし

4.4 著書

１） 西野 浩史:「神経回路網における情報処理と統合(ダイナミックな反射制御）」,動物学の百科事典,丸善, ７(14) 分担執筆 (2018)

２） 西野 浩史: 「捨て身の行動」,動物学の百科事典,丸善出版,10: 590-591 分担執筆 (2018)

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） M.Nagayama, Theoretical analysis of a mathematical model for a self-propelled motion, The

12th AIMS Conference on Dynamical systems, Differential Equations and Applications, Taipei, Taiwan, July 1st - 5th, 2018.

2） M. Uesaka, K.-I. Ueda, K.-I. Nakamura, Y. Kobayashi, M. Nagayama, A variational problem arising from the modelling of epidermal basement mem- brane and its analysis, A3 Foresight Program The 5th Joint Workshop, Mathematics of Biology, Fluid Dynamics and Material Sciences, Lakai Sandpine Hotel, Gangneung, Korea, October 17th-20th, 2018.

3） M. Nagayama, M. Okamoto, Y. Yasugahira, K. Nishi, Y.S. Ikura, S Nakata, Theoretical analysis for a mathematical model of a self-propelled motion, A3 Foresight Program The 5th Joint Workshop, Mathematics of Biology, Fluid Dynamics and Material Sciences, Lakai Sandpine Hotel, Gangneung, Korea, October 17th-20th, 2018.

4） M. Uesaka, G. Nakamura, M.Nagayama, The well-posedness and its short-time asymptotics of the reaction-diffusion-particle model for the camphor motion in two dimension, 2018 China-Japan Workshop on Nonlinear Diffustion Problems, Shanghai Normal University, SHanghai, China, Novemver 3rd-4th, 2018.

5） Aonuma H. (2019 Mar) Modeling of group size dependent aggression in the cricket”, 9th Federation of the Asian and Oceanian Physiological Society Congress (FAOPS 2019), Kobe, Japan.

6） Aonuma H. (2018 May) Oscillator model to understand group size dependent behavior in the cricket”, The 3rd A3 International Workshop for Mathematical and Life Sciences, Hiroshima Univ., Japan.

7） T. Sushida, Geometrical study of phyllotactic patterns by Bernoulli spiral lattices, Fourth International AC-CA-JP/UK Workshop, Kyoto University, March 26, 2018.

8） M. Akiyama, T. Ayukawa, M. Yamazaki, A Mathematical Model of Planar Cell Polarity, 2018 Annual Meeting of the Society for Mathematical Biology & the Japanese Society for Mathematical Biology. Sydney, July 8-12, 2018.

9） M. Akiyama, T. Sushida, H. Mori, S. Ishida, H.Haga, A mathematical model of collective cell migrations based on cell polarity, Japan-Toronto Morphogenesis Symposium (3D Morphologic). Tronto, July 16-17, 2018.

b.招待講演（国内学会）

1） 長山雅晴,非線形現象の数理モデルを作ろう,日本数学会秋期総合分科会（市民講演会）,岡山大学（岡山県,岡山市）,2018年9月23日.

2） 青沼 仁志(2019年1月)昆虫で見られる集団サイズに応じた攻撃性のモデル化　電子情報通信学会 NC&NLP研究会,北海道大学（札幌）

3） 青沼 仁志(2018年9月　震災のため中止,書面開催)X線マイクロイメージングから切り拓く昆虫の運動制御のメカニズム　第89回日本動物学会シンポジウム「シンクロトロン放射光X線は動物学どう役立つか？-SPring-8先端利用技術ワークショップ-」,札幌コンベンションセンター（札幌）

4） 須志田 隆道,反応拡散方程式による網膜情報処理の階層モデルと残像錯視,反応拡散系のパターン形成とその応用,岡山大学,2019年2月17日.

5） 須志田 隆道,ショウジョウバエ胚の後腸捻転現象に対する三次元バーテックスモデル,数理科学と生命科学の融合,北海道大学,2019年1月17日.

6） 須志田 隆道,反応拡散方程式による網膜情報処理の階層モデルと残像錯視,反応拡散系の理論と応用 ～現状と未来～,北海道大学,2018年10月13日.

7） 秋山正和,細胞の集団運動と３次元形態形成に対する数理的アプローチ,北海道大学電子科学研究所附属社会創造数学研究センター　公開シンポジウム「数理連携-知のオープンファシリティ-の現状と未来」,北海道大学,2018年8月24-25.

8） 秋山正和,須志田 隆道,芳賀永,ショウジョウバエ後腸の捻転現象を 3D バーテックスダイナミクスモデルから考える,第５６回日本生物物理学会年会,岡山大学津島キャンパス,2018年9月15-17.

9） 秋山正和,生命の形はどのような仕組みで決まっているのか？　ー数学で解き明かそう！ー,公開講座「データサイエンスが切り拓く生命科学・生体工学の未来」,大阪大学基礎工学研究棟,2018年9月25-27.

１０）秋山正和,須志田 隆道,芳賀永,細胞の集団運動を表現するための自己駆動粒子系の数理モデル,第 41 回日本分子生物学会年会,パシフィコ横浜,2018 年 11 月 28-30.

１１）稲木美紀子,秋山正和,須志田 隆道,松野健治,キラルな細胞変形によって駆動される組織自律的な内臓捻転の機構,第 41 回日本分子生物学会年会,パシフィコ横浜,2018年11月28-30.

１２）西野 浩史:「昆虫の聴覚・振動受容器-発見と観察のテクニック」,昆虫分類学若手懇談会シンポジウム「昆虫の発音と振動-その多様なアプローチ」,名城大学天白キャンパス（名古屋市）,Japan (2018-09)

１３）西野 浩史:「昆虫の生理メカニズムに基づく環境にやさしい飛来虫制御ー見え始めた光ー」,SILaWay 合同報告会,NEXCO 東日本北海道支社,Japan (2018-04)

c.一般講演（国際学会）

1） Sari Ipponjima, Yuki Umino, Masaharu Nagayama, Mitsuhiro Denda, Live imaging of granular cells during cornification in the epidermal equivalent

model, International Investigative Dermatology 2018, Rosen Shingle Creek Resort (Orlando, Florida), May 16-19.

2） Takeshi Gotoda, Masaaki Uesaka, Yusuke Yasugahira, Yasuaki Kobayashi, Hiroyuki Kitahata, Mitsuhiro Denda, Masaharu Nagayama, Mathematical modeling for stabilization of stratum granulosum and epidermal desquamation, 13th EASIAM2018, University of Tokyo (Tokyo, Japan), June 22-25, 2018.

3） Masaaki Uesaka, Hiroyuki Kitahata, Zixia Zhao, Masashi Nakatani, Masaharu Nagayama, A mathematical modeling of sensory receptors in skin toward understanding a tactile illusion, 13th SIAM East Asian Section Conference 2018, University of Tokyo (Tokyo, Japan), June 22-25, 2018.

4） Mamoru Okamoto, Takeshi Gotoda, Masaharu Nagayama, The collective motion of camphor disks in a annular water channel, 13th SIAM East Asian Section Conference 2018, University of Tokyo (Tokyo, Japan), June 22-25, 2018.

5） 岡本守,後藤田剛,長山雅晴, (non-)Existence of (a)symmetrically rotating solution for a mathematical model of self-propulsion,第 20 回北東数学解析研究会,東北大学（宮城県,仙台市）,2019 年 2 月 18 日-2019 年 2 月 19 日.

6） D. Wakita, Y. Hayase and H. Aonuma : “Rhythmic movement of disk in the green brittle star Ophiarachna incrassata”, 16th International Echinoderm Conference, Nagoya Univ., Japan (2018-05 ～ 2018-06)

7） T. Kano, D. Kanauchi, H. Aonuma and A. Ishiguro : “Decentralized control mechanism underlying inter- and intra-arm coordination the brittle star's locomotion”, 16th International Echinoderm Conference, Nagoya Univ., Japan (2018-05 ～ 2018-06)

8） D. Owaki, Y. Sugimoto, A. Ishiguro and H. Aonuma : “Change in Electromyographic Patterns After Leg Amputation in the Cricket”, International Congress for Neuroethology, Brisbane, Australia (2018-07)

9） H. Aonuma, K. Naniwa, K. Kagaya and K. Osuka : “Latching mechanisms to generate ultrafast movement of the trap jaw in the ant Odontomachus kuroiwae”, International Congress for Neuroethology, Brisbane, Australia (2018-07)

１０）T. Sushida and Y. Yamagishi, Phyllotactic Voronoi tilings on the generalized Archimedean spiral lattices, RIMS cooperative research, Tilings, quasiperiodicity and related topics, Kyoto University, October 16, 2018.

１１）T. Sushida, H. Mori, S. Ishida, K. Furusawa, H. Haga, and M. Akiyama, A self-propelled particle model for representing collective cell migrations, 13th SIAM East Asian Section Conference 2018 (EASIAM2018), The University of Toyko, June 23, 2018.

１２）M. Akiyama, T. Sushida, H. Mori, S. Ishida, H.Haga, A mathematical model of collective cell migrations based on cell polarity, 11th European Conference on Mathematical and Theoretical Biology, Lisbon, July 23-27, 2018.

１３）M. Akiyama, T. Sushida, H. Mori, S. Ishida, H.Haga, A mathematical model of 3D collective cell igrations using phase-field model, The 3rd A3 International workshop for athematical and Life Sciences, Hiroshima University, May 17-29, 2018.

１４）M. Akiyama, T. Sushida, H. Mori, S. Ishida, H.Haga, A mathematical model of collective cell migrations based on cell polarity, A3 Foresight Program The 5th Joint Workshop Mathematics of Biology, Fluid Dynamics and Material Sciences, Lakai Sandpine Hotel, Gangneung(Korea), Oct 17-20, 2018.

１５）T. Takanashi and H. Nishino : “Vibration sensitivity in a cerambycid pest and its potential for pest management”, 2nd International Symposium on Biotremology, Riva del Garda, Trento, Italy, Italy (2018-09)

１６）H. Nishino and M. Domae : “Sex pheromone processing in Turkestan cockroach”, 日本比較生理生化学会 第 40 回神戸大会, 神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール, Japan (2018-11 ～ 2918-11)

１７）M. Paoli, E. Couzin-Fuchs, M. Sekulic, H. Nishino and G. C. Galizia : “Neural representation of spatial odour perception in the American cockroach”, International Congress of Neuroethology 2018, Brisbane, Australia, Australia (2018-07)

d. 一般講演（国内学会）

1） 表皮における顆粒層の安定化とタイトジャンクション形成の数理モデリング,第 23 回計算工学講演会, ウインクあいち(愛知県,名古屋市), 2018 年 6 月,○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

2） 円環水路上に現れる樟脳円版のクラスター運動に対する数学解析,日本応用数理学会年会 2018,名古屋大学（愛知県,名古屋市）,2018 年 9 月 3 日～9 月 5 日, 岡本守,後藤田剛,長山雅晴

3） 表皮構造の数理モデルにおける細胞の扁平化と安定な角層形成について,RIMS 研究集会「第 15 回 生物数学の理論とその応用 -次世代の数理科学への展開-」, 京都大学（京都市,左京区）,2018 年 9 月 10 日～14

日,○長山雅晴,上坂正晃,後藤田剛,安ヶ平裕介,小林康明,北畑裕之,傳田光洋

4） 表皮構造の恒常性について,RIMS 研究集会「第 15 回生物数学の理論とその応用 -次世代の数理科学への展開-」,京都大学（京都市,左京区）,2018 年 9 月 10 日～14 日,○長山雅晴,上坂正晃,後藤田剛,安ヶ平裕介,小林康明,北畑裕之,傳田光洋

5） 角層剥離の数理モデリング,日本数学会秋期総合分科会,岡山大学（岡山県,岡山市）,2018 年 9 月 24 日～27 日,○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

6） 表皮数理モデルにおける皮膚バリア機能と層構造の安定性,応用数学合同研究集会,龍谷大学（滋賀県,大津市),12 月 13 日～15 日,○後藤田剛,上坂正晃,小林康明,北畑裕之,傳田光洋,長山雅晴

7） 表皮基底膜の数理モデリングに由来する変分問題とその解析,応用数学合同研究集会,龍谷大学（滋賀県,大津市）,12 月 13 日～15 日,○上坂正晃,上田肇一,中村健一,小林康明,長山雅晴

8） 円環水路上に現れる樟脳円板のクラスター運動に対する数学解析,応用数学合同研究集会,龍谷大学(滋賀県,大津市）,12 月 13 日～15 日,○岡本守,後藤田剛,長山雅晴

9） 液滴集団の運動遷移プロセスに対する数理解析,応用数学合同研究集会,龍谷大学（滋賀県,大津市）,12 月 13 日～15 日,○毛利光希,田中晋平,中田聡,住野豊,長山雅晴

１０） 1 次元反応拡散-粒子モデルに対する大域的分岐構造の数値解法とその応用,応用数学合同研究集会,龍谷大学（滋賀県,大津市）,12 月 13 日～15 日,○安ヶ平裕介,岡本守,長山雅晴

１１） 表皮数理モデルにおける層構造と皮膚バリア機能, 日本数学会 2019 年度年会, 東京工業大学大岡山キャンパス（東京都, 目黒区）, 2019 年 3 月 18 日, ○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

１２)小林康明,郡宏,ベイズ推定を用いたマウスの歩行パターンの解析,日本物理学会 2018 年秋季大会,同志社大学(京都府京田辺市) 2018 年 9 月 12 日

１３)脇田 大輝,浪花 啓右,早瀬 友美乃,青沼 仁志 ：「Autonomous decentralized coordination in the disk of the green brittle Star」,計測自動制御学会第 31 回自律分散システムシンポジウム,国立民族博物館,Japan（2019-01）

１４)浪花 啓右,杉本 靖博,大須賀 公一,青沼 仁志 ：「排便に伴い誘発するクロコオロギの定型的行動」,計測自動制御学会第 31 回自律分散システムシンポジウム,国立民族博物館,Japan（2019-01）

１５)安井 浩太郎,古川 和貴,加納 剛史,Standen M Emily,青沼 仁志,石黒 章夫 ：「ムカデの歩行・遊泳間の遷移に内在する自律分散制御則」,計測自動制御学会第 31 回自律分散システムシンポジウム,国立民族博物館,Japan（2019-01）

１６)早瀬 友美乃,脇田 大輝,青沼 仁志 ：「クモヒトデに見られるポンピングダイナミクス」,日本物理学会,同志社大学,Japan（2018-09）

１７)松田 朝陽,青沼 仁志,浪花 啓右,金子 俊一 ：「アギトアリの大顎の機構モデリング」,2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会,函館アリーナ,Japan（2018-09）

１８)高原 聡,青沼 仁志,金子 俊一 ： 「X 線マイクロ CT によるクモヒトデ腕の 3 次元骨格形状抽出～多自由度ロボット設計に向けて～」,2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会,函館アリーナ,Japan（2018-09）

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」, 第 24 回画像センシングシンポジウム SSII2018,パシフィコ横浜アネックスホール,Japan（2018-06）

２０)松田 朝陽,青沼 仁志,浪花 啓右,金子 俊一 ：「アギトアリの顎の超高速回転運動の機構モデル構築のための画像パタン計測」,第 24 回画像センシングシンポジウム SSII2018,パシフィコ横浜アネックスホール,Japan（2018-06）

２１)浪花 啓右,青沼 仁志,杉本 靖博,大須賀 公一 ：「脳による中央制御系を排除したコオロギのふるまい 」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018,福岡,Japan（2018-06）

２２)須志田 隆道, 山岸 義和, 一般アルキメデス螺旋格子による葉序的なボロノイタイリング, 日本数学会 2019 年会(トポロジー分科会), 東京工業大学, 2019 年 3 月 18 日.

２３)須志田 隆道, 山岸 義和, 一般アルキメデス螺旋格子による葉序的なボロノイタイリング, 2018 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 2018 年 12 月 14 日.

２４)山岸 義和, 須志田 隆道, アルキメデス螺旋格子上のボロノイタイリング, 日本数学会 2018 年会(トポロジー分科会), 岡山大学, 2018 年 9 月 25 日.

２５)須志田 隆道, 森 瞳, 石田 すみれ, 古澤 和也, 芳賀 永, 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 年会(応用数学分科会), 東京大学, 2018 年 3 月 21 日.

２６)秋山正和,須志田 隆道,稲木美紀子,松野健治,ショウジョウバエ後腸の左右性を理解するための 3D バーテックスダイナミクスモデル,応用数学合同研究集会,龍谷大学,2018 年 12 月 13-15.

２７)宇賀神 篤,西野 浩史,尾崎 克久 ：「ナミアゲハのメス成虫におけるミカン葉抽出物提示時の活動脳領域の解析」,第 63 回応用動物昆虫学会,筑波大学,Japan（2019-03）

２８)西野 浩史,堂前 愛 :「明瞭分離された２つの嗅覚経路は気流情報を符号化する」,日本動物学会第 89 回札幌大会,札幌市コンベンションセンター,Japan (2018-09)

２９)渡邉 英博,小池 雪乃,立石 康介,堂前 愛,西野 浩史,横張 文男 :「ワモンゴキブリの嗅覚局所受容野の形成機構」,日本動物学会第 89 回札幌大会,札幌市コンベンションセンター,Japan (2018-09)

３０)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,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） 自走粒子運動の数理解析,第 71 回京都駅前セミナー,キャンパスプラザ京都（京都府,京都市） 6 階第 7 講習室, 2018 年 5 月 25 日

２） 自己駆動系モデルの数値分岐計算,常微分方程式の数値解析とその周辺 2018,大阪大学サイバーメディアセンター(大阪府,豊中市),2018 年 7 月 9 日～11 日,○長山雅晴,岡本守,後藤田剛,安ヶ平裕介

３） 2 次元樟脳運動モデルの時間局所適切性と短時間近似解の構成,北陸応用数理研究会 2019,石川県政記念しいのき迎賓館（石川県,金沢市）,2019 年 2 月 18 日,○上坂正晃,中村玄,長山雅晴

４） 2 次元樟脳運動モデルの時間局所適切性と短時間近似解の構成,北陸応用数理研究会 2019,石川県政記念しいのき迎賓館（石川県,金沢市）,2019 年 2 月 18 日,○上坂正晃,中村玄,長山雅晴

５） 自己駆動体運動の数理解析,研究集会「反応拡散系と実験の融合 2」,石川県政記念しいのき迎賓館（石川県,金沢市）,2019 年 2 月 18 日～21 日,○長山雅晴,岡本守,後藤田剛,中田聡

６） (non-)Existence of (a)symmetrically rotating solution for a mathematical model of self-propulsion,非線形現象の数値シミュレーションと解析 2019,北海道大学（北海道,札幌市）,2019 年 3 月 5 日～6 日,○岡本守,後藤田剛,長山雅晴

７） 双安定反応拡散系の分岐数値計算,反応拡散系のパターンダイナミクス,富山大学（富山県,富山市）,3 月 8 日,長山雅晴

８） 化学反応の数理モデリング,非線形現象の数理解析,北海道大学（北海道,札幌市）,3 月 27 日,長山雅晴

９） 小林康明,郡宏,マウスの歩行モデルの最尤推定「オシロロジー」2018 年度第 2 回領域会議,一橋大学（東京都千代田区）2018 年 12 月 15 日

１０)２）小林康明,郡宏,ベイズ推定を用いたマウスの歩行パターンの解析,「オシロロジー」2018 年度第 1 回領域会議グリーンピア大沼(北海道函館市)

１１)ショウジョウバエ複眼のタイリングメカニズム 数理的アプローチ,北陸応用数理研究会 2019,石川県政記念しいのき迎賓館（石川県,金沢市）,2019 年 2 月 18 日,○秋山 正和,林貴史,佐藤純.

１２)須志田 隆道, 一般アルキメデス螺旋格子による葉序的なボロノイタイリング, 2018 年軽井沢グラフと解析研究集会Ⅱ, 日本大学軽井沢研修所,2018 年 10 月 6 日.

１３)須志田 隆道, 一般アルキメデス螺旋格子による葉序的なボロノイタイリング, 第 12 回応用数理研究会, 休暇村紀州加太,2018 年 8 月 31 日.

１４)須志田 隆道, 秋山 正和, 集団細胞遊走を表現するための自己駆動粒子モデル, 2018 年軽井沢グラフと解析研究集会, 日本大学軽井沢研修所,2018 年 2 月 14 日.

4.7 シンポジウムの開催

１） 長山雅晴,電子科学研究所附属社会創造数学研究センター公開シンポジウム,数理連携の現状と未来～知のオープンファシリティー～,北海道大学応用科学フロンティア 2F 鈴木章ホール,2018 年 8 月 24 日～25 日

２） 青沼仁志,第５回日本動物学会国際交流セミナー,開催期間：2018 年 9 月 11-12 日,開催場所：北海道大学学術交流会館,アイヌ文化センター(札幌,震災のため中止,書面開催)

4.8 共同研究

ａ. 所内共同研究

１） 秋山正和.藤岡 正弥助教（光電子ナノ材料研究分野）と新物質創生に向けたシミュレータ構築に関する共同研究プロジェクト.

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,2018年度

ｃ. 委託研究

１） 該当なし

ｄ. 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） 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） 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

３） 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

４） 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
５） 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
６） 青沼仁志（分担）, 挑戦的研究（萌芽）, 運動への介入から解き明かす闘争行動を引き起こすアンテナフェンシングの構成論的理解, 2018～2019 年度
７） 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～2019 年度
８） 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」, 2015～2018 年度
９） 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
１０）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
１１）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
１２）須志田隆道（代表）,若手研究 一般,葉序のパターン形成を理解するための数理モデリングとその幾何学的研究,2018 年度～2021 年度
１３）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, 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
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,2018 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

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, 日本動物学会北海道支部役員
３） 青沼仁志, 日本動物学会国際交流委員
４） 青沼仁志, 日本比較生理生化学会評議委員
５） 青沼仁志, SWARM2018 Program Comittee
６） 青沼仁志, AMAM2019 Program Committee
７） 日本動物学会第89回大会(札幌)運営委員(広報担当)
８） 西野浩史, 日本比較生理生化学会 評議委員

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）
２） 須志田隆道:明治大学先端数理科学インスティテュート客員研究員（2018 年 4 月～2020 年 3 月）
３） 秋山正和:一般社団法人日本応用数理学会誌編集委員会委員（2018 年 4 月～2021 年 3 月）

d. 外国人研究者の招聘

１） Example; Name,Country,（period）

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） 全学 1 年生, 微分積分学Ⅰ, 秋山正和, 2018 年前期
４） 理学部２年生,数学概論級数入門,秋山正和,2018 年前期
５） 理学部２年生,コンピュータ,秋山正和,2018 年後期
６） 大学院, 行動システム制御科学特論, 分担, 西野浩史, 2018 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） 大学院,数理モデリング,長山雅晴,6 月 11 日～15 日(東京大学)
２） 記入例；対象,講義名,担当者,期間

g. 新聞・テレビ等の報道

１） 西野 浩史 : 沖縄タイムス 2018 年 11 月 11 日 「松の害虫振動で退散」
２） 記入例；日付 報道機関 「タイトル」

h. ポスドク・客員研究員など

１） 須志田隆道（博士研究員, 新学術研究）
２） 一本嶋佐理（博士研究員, CREST）
３） 熊本淳一（学術研究員, CREST）
４） 浪花 啓右（学術研究員, 科研費基盤A）

i. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：2人

１） 安ヶ平裕介,大学院理学院数学専攻：修士（理学）,一次元反応拡散―粒子モデルに対する大域的分岐構造の数値解法とその応用
２） 毛利光希,大学院理学院数学専攻：修士（理学）,液滴集団の運動遷移プロセスに対する数理モデル

博士学位：0人

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～）
博士研究員　Sulimon Sarrari（UC Merced、PhD、2017.7～）
学術研究員　土田　旭（北大院、博（理）、2017.12～2019.2）
　　Aurelien Pelissier(University Grenoble – Alpes、2018.10～2019.3)
特別研究員　Jean-Emmanuel Clement(University of Burgundy、PhD、2018.11～）
　　水野雄太（東大院、博(学術)、2019.1～）
学　生
博士課程後期
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
　滝川 皇（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) 対称性下におけるバンド交差の幾何構造の特異点論による分類

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。昨年度は結晶の時間反転対称性又は空間反転対称性が破れた状況におけるブリルアンゾーン上の一般の位置にある結晶運動量において生じるバンド交差の幾何構造を特異点論を用いて分類し、そのバンド交差の特異点分類の不変量と分岐を議論したが、今年度はこの枠組みをより一般の対称性を持つ結晶運動量におけるバンド交差の幾何構造の分類が可能となるように拡張した。その特異点の分類問題は我々が提案するK[r(G)]同値という同値関係による分類問題として定式化することができる。その定式化の結果は現

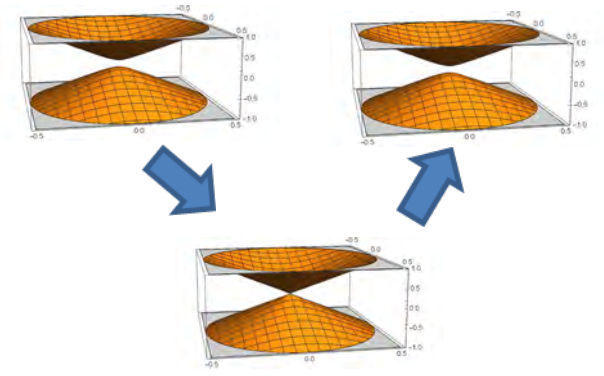


図 1：Γ 点と呼ばれる結晶運動量において Bi2Se2 のフェルミ面近傍の二つのバンドが交差し、その点において TKNN 指数が変化する瞬間のバンドの幾何構造の変化

在論文投稿中である。その一般的な枠組みのもとバンド交差の幾何構造を分類する必要があるのだが、点群の対称群の対称性だけでも122種類の可能な磁気点群があり、さらに着目するバンドがどの既約（複）表現に属しているのかに依存してその幾何構造は変わりうるため、それらを網羅的に手で計算するのはほぼ不可能である。そこで、我々は包括的グレブナー基底系に基づいた特異点の自動分類アルゴリズムを構築した。その自動分類アルゴリズムのおかげで複雑なモジュライパラメータを含み、従来法では分類が難しかったような分類問題も組織的に解くことが可能となった。この成果は現在論文投稿準備中である。

(2) 情報幾何を用いた熱力学理論の構築

大腸菌(E.coli)の走化性における適応のダイナミクスに代表されるような生体の情報処理において，機能の正確性やスピードを高めるために十分な熱力学的なコストを支払っていることが知られていた。これは熱力学的なトレードオフ関係(例えばenergy-speed-accuracy trade-off)とよばれ，様々な模型で各論的に調べられてきた流れがある。これに対して我々は情報幾何と確率過程における熱力学の間の関係性を明らかにすることで，普遍的な情報幾何のトレードオフとして熱力学的な不確定性関係の一種を導出することに成功した。

(3) Raman分光画像による癌／非癌を分類する新しい識別子の開発

我々は高い空間およびスペクトル分解能を持つRaman顕微鏡画像を用いて、ヒト濾胞甲状腺(Nthy-ori 3-1)細胞と、高分化型甲状腺癌であるヒト濾胞甲状腺癌(FTC-133)細胞の違いを調べている。一細胞Ramanスペクトルの分類と比較することで、Raman画像に含まれる細胞内部の情報の重要さが強調される。高い空間分解能(~ 1.7 μm²)でスペクトルの粗視化を行うことで細胞内部の情報が抽出され、似通った生化学的組成をもつ位置を表す特性スペクトルグループの組が生成される。我々はそれぞれの単一細胞内の特性スペクトルの出現頻度に基づく細胞分類器を開発している。この分類器を用いることで、一細胞スペクトルの場合

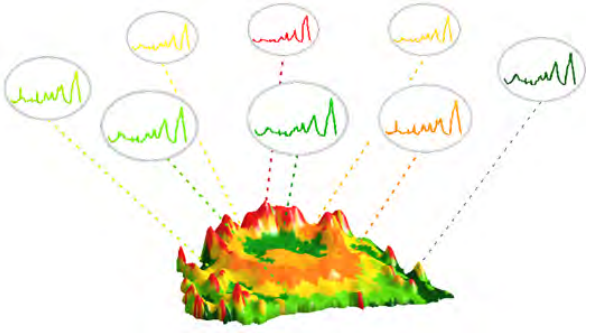


図 2 : 空間的にコヒーレントな細胞域を示す癌性および非癌性のヒト濾胞甲状腺細胞の Raman 顕微鏡画像の分類。通常のヒト濾胞甲状腺細胞からヒト濾胞甲状腺癌細胞を区別する上で有益となる明確な細胞環境を示している。

(77.6%)に比べて、FTC-133およびNthy-ori 3-1をより正確に(89.8%)分類することができる。また、細胞の区分においてどの細胞内成分が重要であるかを推察しており、癌性のFTC-133細胞はNthy-ori 3-1と比べて、脂肪を含有する成分が増加、シトクロームを含有する成分が減少し、寄与した部分の多くは細胞核の外側にあることを発見した。この手法は、分類の正確性を増大させることに加え、通常および癌性の濾胞性甲状腺細胞の区別に関連する生化学的差異や細胞内分布に関する豊富な細胞内部の情報をもたらす。

(4) 悪腕存在チェックアルゴリズムの開発

細胞のRaman顕微鏡を使った癌診断などの病理診断や機械の故障の診断などでは、どこか一箇所に異常があるか、それともどこにも異常かないかどうかのみが知りたい場合がある。このような場合、最初に異常が見つかった時点で計測を打ち切って異常ありと診断すればよい。各箇所の計測において一度の計測では十分な信頼度で結果が得られない場合、異常のある可能性が高い箇所を集中的に計測することができれば診断の高速化が期待できる。

このような異常のあるなしをできるだけ少ない計測で診断する問題は、損失版多腕バンディットモデルにより「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 θ $(\Delta, 1-\Delta)$ 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 δ $(0,0.5)$ 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

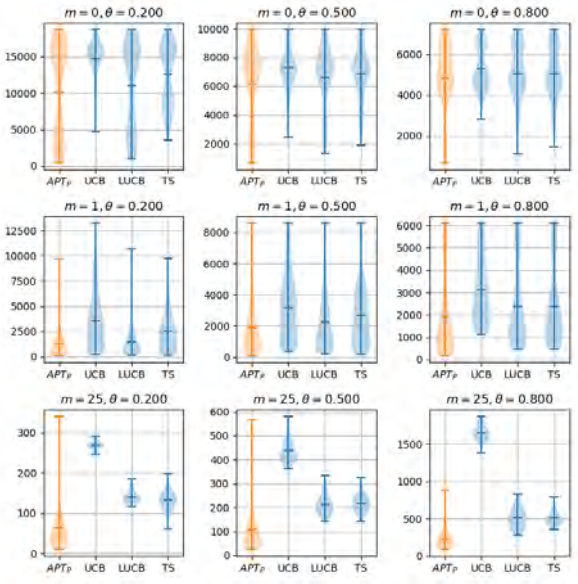


図 3 : 人工データによるシミュレーション実験の結果 (Δ=0.1,δ=0.01)。損失がベルヌーイ分布に従う 100 腕のうち m 腕を平均損失が閾値よりも大きな腕とし、100-m 腕を閾値 θ よりも小さな腕とし、APTp、LUCB、UCB、TS の 100 回実行した停止時刻のバイオリン図と平均を示した。

ることを目標とする。

本研究では(Δ,δ)-悪腕存在チェックアルゴリズムとして、各時刻でどの腕を次に選択するかを決定する腕選択方策と各腕を正・負と判定する腕判定規則の組み合わせによるアルゴリズムのテンプレートを提案した。

新たに腕判定規則を提案し、従来手法と比較して、難しい問題のインスタンスに対しては必要なサンプル数が約半分になることを理論的に示し、また実験的にも確認した。また、閾値バンディットのアルゴリズムAPTを悪腕存在チェック問題に合わせて改良を加えたAPTPと最良腕識別問題のアルゴリズムLUCB，リグレット最小化のアルゴリズムUCBとThompson　Sampling(TS)を腕選択方策として採用した際の停止時刻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APTP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よりその差は顕著であった。

(5) 細胞性粘菌の離合集散ダイナミクスと因果律解析

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を理解する事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。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、彼らの社会を支配するルールの理解が可能である。

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る。Dicty細胞はサイクリックAMPの勾配方向に動き、サイクリックAMPをさらに放出することでサイクリックAMPに応答する。これは、有名なベロウソフ・ジャボチンスキー反応のような、細胞コロニーを伝播するらせん状の波形パターンを生み出すフィードバック効果をもたらす。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、下の図に示したように、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。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移動エントロピー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であれば、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。

この研究でもう一つ取り組んでいる事は、リーダーシップの定量化である。リーダーシップには構造的なもの、情報に基づいたもの、創発的なものなど複数のタイプがある。それぞれのリーダーシップのタイプには個々の特徴があり、個人の定義によってリーダーシップと捉えられる場合とそうでない場合がある。である為、現に根本的なレベルでリーダーシップを理解し、どう定量化するかを理解する為に、我々は、異なるタイプのリーダーシップを探求するトイモデルを開発し、リーダーとフォロワーを分類するために幾

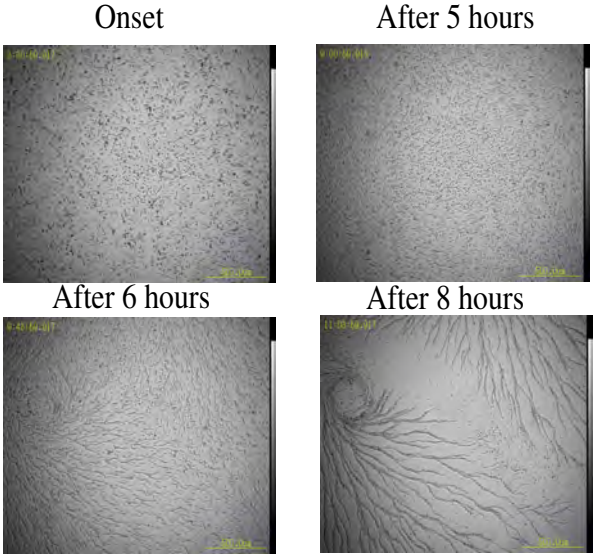


図 4： 典型的な Dicty 細胞の凝集過程

何学的および情報理論的尺度を用いている。

(6) 圧縮センシングによるラマン顕微鏡開発

癌を早期に発見することは、死亡率の減少に大きな影響を与える。しかしながら、早期発見を可能にするためには、良性と悪性の間の過渡的な状態を識別できなければならない。したがって、癌を早期にスクリーニングするためには、例えば細胞や組織のような生物学的システムの構造的変化および微小環境変化を高感度で検知できる新たな技術の開発が必要である。光-物質相互作用の非弾性散乱を利用する、無標識の非侵略的な技術である共焦点Raman顕微鏡は、生物学的サンプルの豊富な化学的指紋を与える診断ツールとして大きな可能性を有すると示されている。特に、生物医学の研究における新しいツールであり、実空間の化学情報を取得できるRamanハイパースペクトルイメージングは、異なる癌のスペクトルマーカーのレベルを評価することにより、細胞内構造レベルで癌疾患の定量化を可能にする。しかし、（例えば生細胞の空間-化学情報のような）高次元データを取得するには時間がかかりすぎ、これは臨床応用の際にこの技術の効果を限定的にする。この難点を乗り越

えるために、我々は、圧縮センシング理論の考えを利用した新たなRaman顕微鏡を開発した。圧縮センシング理論は、古典的なデータ収集システムに共通する方法論に対し、情報のアンダーサンプリングにより対抗するセンシングパラダイムである。実際、この枠組みを用いることで、非適応的線形測定をごく少数回行うだけでRamanハイパースペクトル画像の識別と圧縮を同時に行うことができる。このアンダーサンプリングのシナリオ（測定回数 m は信号次元 n よりもはるかに小さい）で、圧縮センシング理論は、都合のいい基底におけるスパース構造を用いることで、オリジナルのハイパースペクトル画像を復元することが可能であると主張する。ハイパースペクトル画像の復元のための戦略は、空間方向とスペクトル方向両方の平滑度といったハイパースペクトル画像のスパース性およびモデル特性を増進させるような制約つきの、最適化問題を解くことである。この方向性に従い、我々は、変換領域ハイパースペクトル全変動と呼ばれる混合L_1,2ノルムの最小化を提案した。

（7）濾胞甲状腺癌診断のための一細胞Raman画像の知的計測分析

観察者間変動および癌の過剰診断は比較的新しい臨床的問題で、生化学的組成情報によって標準の組織学的評価と細胞学的評価を支援する必要がある。この観点では、Raman分光法が診断の信頼性増加に向けた適切な解決策となり得る。というのも、必要最低限の試料調製しか必要とせずに、高い分子特異性や分子感度を明らかにできる非破壊技術であるためだ。我々の研究では、異なる装置により計測された濾胞甲状腺癌(FTC) (FTC133, RO82W-1 cell lines)と正常甲状腺(NT) (NthyOri 3-1 cell line)の一細胞Ramanハイパースペクトル画像データセットに対して、実験状況の違いに可能な限り左右されない、一貫した測定分析法を開発した。我々は異なる装置を用いて計測したRaman画像データ統一のためのシンプルな実証的手順を提案する。これにより、異なる装置、異なる計測日を全て合わせた計測データの場合でも、この手順無しの場合の69%に比べ、手順有りの場合では分類精度が80%に向上した。FTC (FTC133, RO82W-1)およびNT (NthyOri3-1)細胞系の分類については、3つの異なる手法を用いて考え得る特徴変数を体系的に探っている。3つの手法とは、主成分分析、ANOVA (分散分析)、FUSE (Feature UCT Selection)（バンディットアルゴリズムに基づく強化学習）で、k最近傍(kNN)やRandom Forest (RF)といった分類器と組み合わせる。さらに、我々は細胞状態分類の正確性の細胞小器官依存性について細胞内レベルで研究している。分類という観点では、細胞質領域からのRaman信号は細胞核のものよりも優れており、FUSEは、PCAおよび ANOVAに基づく他の二つの手法に比べて、分類精度86%と圧倒し、特徴量もより明確な意味を持つ。さらに我々は、FTC133細胞およびNthyOri 3-1細胞が混在して相互作用する状態での共培養系を確立した（図5）。また、FTC133およびNthyOri 3-の独立な細胞系のみで訓練した我々の分類器は、この共培養系に対して転移できる。我々は、Raman画像の各ピクセルに対し、「癌指数」を導入する。この指数が１（０）に近いほど、そのピクセルはFTC133 (NthyOri 3-1)の化学的な微小環境に類似する。

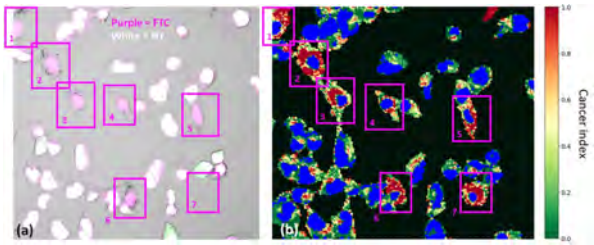


図 5：FTC133 および NthyOri3-1 の共培養系の代表的な画像。(a)SV40 大型 T タンパク質の顕微蛍光画像（マゼンタ）(b)各ピクセルの癌指数の分布。

（8）非アルコール性脂肪肝疾患を予測するためのRaman顕微鏡画像の情報理論的ソフトクラスタリング

適切なデータ分析技術と組み合わせたRaman顕微鏡法は、複雑なラマンスペクトルを詳細に分析するための強力な診断ツールとなり得る。我々は、類似の特性を持つグループにデータをクラスタリングすることで、マウスの肝組織のRamanハイパースペクトル画像が、非アルコール性脂肪肝疾患(NAFLD)のステージをどのように分類できるかを分析した。Raman画像データ対するいくつかの前処理の後、情報理論的アプローチであるレート歪み理論(RDT)によるソフトクラスタリング法を行った。これは、類似の統計的性質を持つスペクトルを同じグループに割り当てる。RDTは、条件付き確率p(C_k |S_i)について汎関数F=I(C;S)+β⟨d⟩を最小化することで、スペクトルの集合をより少ない数のグループにクラスタリングする。ここで、Cは得られたクラスタの集合、Sは所与のスペクトルの集合、I(C;S)はCとSの間の相互情報量、⟨d⟩はそれぞれのクラスタ内での全スペクトルの歪みを全てのクラスタについて平均したもの、βはラグランジュ乗数を表している。我々は、データを説明する最適なモデルを得た。このモデルは７つのクラスタからなり、そのそれぞれが類似の分子情報をもつ画像領域を表現する。図1aに、それぞれの画像内の7つのクラスタの空間分布を示す（それぞれの色が個々のクラスタに相当）。これにより、全ての画像で生化学的類似度の分布が明らかになる。この図では、各画像に対する規定食や組織性状が上部にラベルされている。各組織性状におけるそれぞれのクラスタの平均ポピュレーション分布を図1bに示す（クラスタは脂質の割合に対して降順に配列）。個々のマウスのクラスタ数と平均ポピュレーション分布の類似度を計測し、それを各マウスの診断に用いた。脂肪含量という観点では、NAFLとNASHの差別化は困難である一方で、（脂質含量が低い）正常群はほぼ問題なく識別できていた。NAFLは多様な挙動を見せ、いくつかの画像では（高い脂質含量の）NASHに類似している一方で、NASHからほど遠い画像もあった。これらの分類は類似性スコアによって確認が可能で、我々

のRaman分析では正常(HFD 8w-3)なマウス1匹とNASH (HFHC 4w-4)マウス1匹がNAFLと分類され、奇妙な組織像(HFD 4w -1, mild fibrosis)のマウス1匹とNAFL (HFD 4w-4, 16w-2)マウス2匹が正常と分類され、NAFL (HFHC 4w (1-3), 8w (2,3,4))マウス6匹がNASHと分類された。我々の結果は、このクラスタリング手法を用いたRaman画像によって、組織診断と比べてNAFLDをよりロバストに診断することが可能で、異なるNAFLDの状態の生化学的変動の解明に繋がることを示唆している。

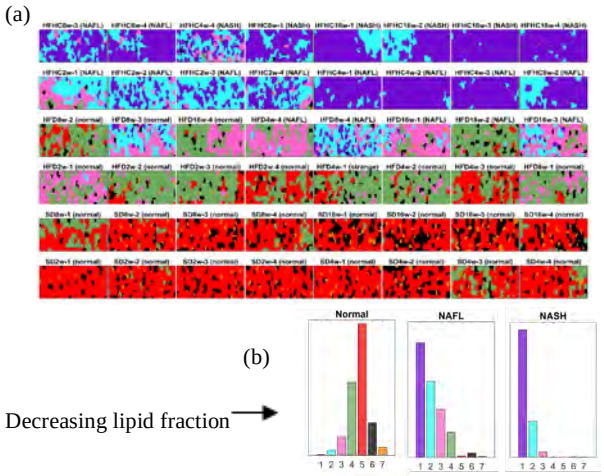


図 6 : (a) クラスタの空間分布 (b) クラスタの平均ポピュレーション

(9) 細胞性粘菌の細胞場解析と因果解析

細胞性粘菌は最も一般的に研究されている種の一つである。細胞性粘菌は、ある条件下では、個体で独立した細胞として働くが、飢餓状態などの過酷な状態におかれると、結合して多画構造を形成する。私たちの目標は、細胞運動とcAMPシグナルから細胞間関係を定量化する事と、周囲を指揮するシンギュラリティ細胞を探求する事である。また、凝集場所に関する事前予測も行いたいと考えている。

私たちは、細胞間の情報と方向性を定量化するという方法で、リーダーとフォロワーの識別可能性の研究を行っている。相互情報量や移動エントロピー、因果エントロピーのようなさまざまなツールが、2つの過程間の情報フローを計測するために開発されてきた。二つの確率変数XとYに対し、条件Xの下でのYの条件付きエントロピーは、$H(Y|X) = -\sum_{X,Y} P(X,Y)\ \log\ P(X,Y)/P(Y)$と定義される。ここで、$P(X,Y)$はその同時確率分布であり、$P(X)$は$X$の周辺確率分布である。移動エントロピー（TE）はこれら2つの過程の情報フローを測るのに用いられる。YからXへのTEは$TE(Y \to X) = H(X_{n+1}|X_n) - H(X_{n+1}|X_n, Y_n)$と定義される。リーダーとフォロワーの関係の場合、リーダー細胞からフォロワー細胞に伝わる情報は、フォロワー細胞からリーダー細胞に伝わるものよりも大きくなるべきである。しかしながら、TEは、より深い解釈をもたらす他の情報量の組に更に分解可能である。私たちはコロニーにおけるリーダーとフォロワーの関係を解明する事でTEの利点と欠点の問題について取り組んでいる。その一方で、凝集場所を明らかにする為に、我々は、位相差画像のシークエンスに対して粒子画像流速測定（PIV）を適用し、画像上の異なる箇所（グリッド）の間でどのように速度が変わるのかを調べている。我々はこれらのグリッドの方位も測定している。速度分布もしくはグリッドの方位がどの位変わるかを判定するために、カントロヴィッチ距離を用いる。この測度は、誘因（になりうる）運動がいつどのように起こるかを知る為の測度の候補であり、細胞場中の情報伝達の解明につながることが分かった。

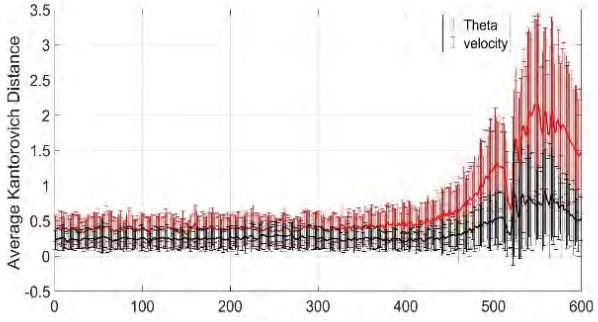


図 7 局所速度ベクトル場の Kantorovich 測度解析：集合流のトリガー領域を同定

(10) 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シミュレーションによる検討

蛍光を用いた組織病変部などの高感度検出法は、従来からの放射性プローブを用いた手法を置き換える手法として重要である。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。昨年度は、ピコ秒時間分解手法により背景光に隠れた蛍光プローブ信号を時間領域で分離することにより、従来より高感度に蛍光プローブ信号を取り出すことが可能であることを確かめた。本年度はその方法をシミュレーションにより考察した。

散乱体の中の蛍光は、モンテカルロ法によりシミュレーションした。このシミュレーションは励起光子をある位置から入射しその軌跡を追跡する。散乱が起きる場所、散乱により変わる方向、さらに吸収され光子が消滅するそれぞれの現象を乱数により決め、それを繰り返すことにより蛍光プローブに吸収されるまでの軌跡を、さらに蛍光を発した後も同様にすることにより、検出器に入るまでの軌跡を追う。検出された光子の辿った軌跡の長さが、光子が入射してから検出されるまでの時間に対応し、実際の実験に合わせ検出時刻に対する検出された光子のヒストグラムで時間応答特性を表す。シミュレーションには実際の生体組織の代表的な吸収、散乱係数を用い、背景光に埋もれることを模擬するために試料全体にも僅かに蛍光体を含むように設定した。

シミュレーションから得られた時間応答関数を用い、蛍

光プローブからの蛍光像のコントラストを評価した（図）。蛍光像の取得は、1点で励起し別の1点で検出しそれを表面で走査することにより得る「表面走査」と通常の蛍光カメラで測定するような励起光の平面照射、平面検出との２つの方法を用いた(図右)。得られた時間応答関数のうちプローブの蛍光体からの信号が強くなる1ns 付近の値を取り出しその強度を用いて求めたものを時間ゲート、時間応答関数を時間に対し積分したものを定常光と図では示している。

蛍光プローブ画像のコントラストは、蛍光プローブの含まれる深さが深くなるにつれ、どの条件の結果も指数関数的に小さくなる。時間ゲートを用いるとすべての場合について定常光のコントラストを大きく改善する。最も一般的な蛍光イメージング手法（平面照射面検出）に比べると1桁程度の改善が得られることがわかる。さらに時間ゲートの場合点照射点検出の2点間の距離が短いほどコントラストが改善すると言う新しい結果が得られた。

以上のことより、時間ゲートを用いることにより蛍光プローブをより高感度に検出でき、また励起検出点間の距離を小さくしたほうがその効果が大きいことがわかった。今後は､例えば今回のシミュレーションでは蛍光寿命は0としているため、それを考慮することなどを行い、結果として最も高感度に蛍光プローブ検出が可能な条件を探る予定である。

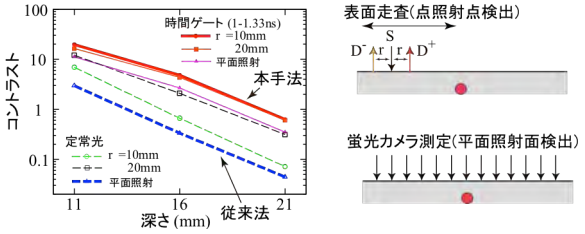


図 8:蛍光プローブ画像のコントラストの深さ依存性

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） T. Takemoto, N. Mertig, M. Hayashi, S. Susa-Tanaka, H. Teramoto, A. Nakamura, I. Takigawa, S. Minato, T. Komatsuzaki and M. Yamaoka: “FPGA-Based QBoost with Large-Scale Annealing Processor and Accelerated Hyperparameter Search”, In Proc. of IEEE CAS 2018 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig 2018), Dec. 2018 (2019)

２） G.Nishimura: “Contrast improvement in indocyanine green fluorescence sensing in thick tissue using a time-gating method”, Biomed.Opt.Exp., 10, pp.1234-1249, (2019)

３） Y. Sugie, Y. Yoshida, N. Mertig, T. Takemoto, H. Teramoto, A. Nakamura, I. Takigawa, S. Minato, M. Yamaoka and T. Komatsuzaki: “Graph Minors from Simulated Annealing for Annealing Machines with Sparse Connectivity”, Theory and Practice of Natural Computing - 7th International Conference, TPNC 2018, Dublin, Ireland, December 12-14, 2018, Proceedings, 11324: 111–123 (2018)

４） S. Ito: “Stochastic thermodynamic interpretation of information geometry”, Physical Review Letters 121(3), pp.030605-1-030605-7 (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) 小松崎 民樹: 「化学反応理論の普遍性：GRRM に期するもの」、IQCE NEWS、57: 1 (2018)

4.4 著書

１） T. Komatsuzaki : “Minorities and Small Numbers from Molecules to Organisms in Biology-Toward a New Understanding of Biological Phenomena”, Springer (2018)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

1) 中村篤祥、田畑公次、小松崎民樹、藤田克昌 2018-244664「計測制御装置、分光計測装置、及び計測制御方法」2018/12/27

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１) H. Teramoto*：“A Fully Automated Algorithm for Classification in Singularity Theory”, AMS Spring Central and Western Joint Sectional Meeting, University of Hawaii at Manoa, United States of America (2019-03)

２) T. Komatsuzaki*：“How can one bridge information science and measurement science to accelerate the measurements?”, The 22nd SANKEN International Symposium The 17th SANKEN Nanotechnology International Symposium "Next Generation Science and Technology for Super Smart Society", 大阪大学, Japan (2019-01)

３) G.Nishimura*:”Sensitivity of Florescence Signal in Strong Scattering Medium”, A3 Workshop in Applied Inverse Problems, Okinawaken Seinenkaikan, Naha, Japan (2019.1).

４) T. Komatsuzaki*：“Revisit transition state theory: Past, Present, Future”, Workshop “Trends in Computational Molecular Biophysics”, The Fourth High School Memorial Museum of Cultural Exchange, Kanazawa, Japan (2018-11)

５) H. Teramoto*：“Normal Forms in Singularity Theory for Geometric Classifications of Band Structures”, Dynamics Days Europe 2018, Loughborough University, Japan (2018-09)

６) G.Nishimura*:”Time-domain Optical Tomography for Fluorescence Objects”, Tianyuan Workshop on Mathe-matical and Computational Challenges of Medical Imaging and Iverse Problems, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai, China (2018-8).

７) S. Sattari* and T. Komatsuzaki：“A turnstile-based view of multi-exponential decay”, Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

８) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki：“Normal forms in singularity theory for geometric classifications of local band structures”, Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

９) T. Komatsuzaki*：“Open questions in Higher rank saddles and related”, Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

１０) S. Sattari* and T. Komatsuzaki：“Computing Chaotic Transport and Phase Space Structure with Symbolic Dynamics”, Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

１１) T. Komatsuzaki*：“Phase Space geometry and Chemical Reaction Dynamics in Driven Systems”, Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

１２) T. Komatsuzaki*：“How One can Extract Energy Landscape from Single -Molecule Time Series under the Existence of Noise?”, Biophysical Dynamics, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

１３) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki：“Normal forms in singularity theory for geometric classifications of local band structures”, Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases, Telluride, CO., United States of America (2018-07)

１４) H. Teramoto*：“Normal forms in singularity for geometric classifications of band structures”, TraX International Conference 2018, Campus de Cantoblanco of the Universidad Autónoma de Madrid, Spain (2018-05)

ｂ．招待講演（国内学会）

１) 寺本 央*:「イジング型計算機、日立製作所と北海道大学の取り組み」、数学パワーが世界を変える 2019、東京ガーデンパレス、Japan (2019-03)

２) 寺本 央*:「包括的グレブナー基底系等を用いた特異点分類のアルゴリズムの紹介」、応用特異点論研究会、神戸大学、Japan (2018-12)

３) 小松崎 民樹*:「ラマン計測と情報科学:情報科学は計測を迅速化できるか」、第1回計測インフォマティクス研究会、大阪大学産業科学研究所、Afghanistan (2018-09)

４) T. Komatsuzaki*：“Information theoretic approach to reveal singularity in biology”, 第56回日本生物物理学会年会, 岡山大学 津島キャンパス, Japan (2018-09)

５) 寺本 央*：「結晶点群、時間反転対称性の下でのバンド構造の幾何学的分類」、第65回トポロジーシンポジウム、信州大学全学教育機構、Japan (2018-08)

６) 西村 吾朗、「組織深部拡散蛍光トモグラフィー：時間領域からのアプローチ」、第37回日本医用画像工学会大会、筑波大学天王台キャンパス大学会館、つくば市、(2018-7).

７) 寺本 央*:「対称性下でのバンド交差近傍でのハミルトニアンの分類」、微分幾何学・微分式系・特異点論の応用、広島工業大学、Japan (2018-05 ～ 2018-06)

ｃ．一般講演（国際学会）

1) G.Nishimura*: “Fluorescence Image Contrast Im-

prove-ment by a Time-domain Method", 2018 OSA Biophonics Congress: Biomedical Optics, The Diplomat Beach Resort, Hollywood, FL, USA (2018-4).

d. 一般講演（国内学会）

1) K. M. Helal*, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : "Machine Learning Approaches to Raman Micro-spectroscopic Images", 第 56 回日本生物物理学会年会, 岡山大学 津島キャンパス, Japan (2018-09)

2) 伊藤 創祐* : 「Information geometry and thermodynamic uncertainty for biochemical process」、第 56 回日本生物物理学会年会, 岡山大学 津島キャンパス, Japan (2018-09)

3) 伊藤 創祐* :「情報幾何の確率的熱力学による解釈と熱力学不確定性関係」、日本物理学会 2018 年秋季大会、同志社大学, Japan (2018-09)

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

8) 寺本央* :「開催趣旨説明」、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、Japan (2019-03)

9) K. M. Helal *, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : "Analysis of Raman Microscopic Images of Liver Tissu to Predict Non-alcholic Fatty Liver Disease", 生物物理・回折構造生物学 合同研究会, 北海道大学, Japan (2019-03)

10) S. Sattari*, U. Basak, S. Nicholson, J. R. Green, M. Toda and T. Komatsuzaki : "A sandbox model system for understanding leadership in collective motion", 生物物理・回折構造生物学 合同研究会, 北海道大学, Japan (2019-03)

11) U. S. Basak*, S. Sattari, S. Ito, K. Horikawa and T. Komatsuzaki : "Identification of Leader(s) in a Dictyostelium Discoideum colony: An Information-theoretic Approach", 生物物理・回折構造生物学 合同研究会, 北海道大学, Japan (2019-03)

12) 田畑 公次*、小松崎 民樹 : 「A bad arm existence checking problem: how to utilize asymmetric problem structure?」、バイオ情報計測技術研究会、グリーンピア大沼、Japan (2019-03)

13) T. Komatsuzaki* : "Mathematical information measurement science: acceleration of Raman spectroscopy by bridging information science", バイオ情報計測技術研究会, グリーンピア大沼, Japan (2019-03)

14) J. N. Taylor* and T. Komatsuzaki : "High resolution Raman microscopic detection of follicular thyroid cancer cells with unsupervised machine learning", バイオ情報計測技術研究会, グリーンピア大沼, Japan (2019-03)

15) A. Pelissier* and T. Komatsuzaki : "In combining single cell hyperspectral Raman images for the diagnosis of follicular thyroid carcinoma measured at different data", バイオ情報計測技術研究会, グリーンピア大沼, Japan (2019-03)

16) J. Clement* and T. Komatsuzaki : "Cell Raman imaging Compress sensing", バイオ情報計測技術研究会 チームミーティング, グリーンピア大沼, Japan (2019-03)

17) 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 10 回（H30-2nd)領域会議、湘南国際村センター、Japan (2019-02)

18) 小松崎 民樹* : 「1 分子時系列情報からどのように背後の反応ネットワーク を抽出できるのか？」、「生命動態の理解と制御のための基盤技術の創出」研究領域第 7 回領域会議・第 11 回数理デザイン道場、AP 市ヶ谷 6 階 会議室 C、Japan (2019-01) (招待)

19) 田畑 公次*、中村 篤祥、小松崎 民樹 : 「病理診断迅速化に向けたバンディットアルゴリズムの応用」、北海道大学電子科研究所平成 30 年度 研究交流会、北海道大学電子科学研究所、Japan (2019-01)

20) 寺本 央* :「特異点論から社会実験へ向けた取り組み、ハードソフト両面から望ましいグラフトポロジーは？」、時空間展開 CREST のキックオフ合宿、定山渓グランドホテル瑞苑、Japan (2018-12)

21) U. S. Basak*, S. Sattari, S. Ito, K. Horikawa and T. Komatsuzaki : "Information theoretic approach to identify the leader(s) in Dictyostelium Discoideum colony", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

22) K. M. Helal*, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : "Information-theoretical Approaches to Raman Microscopic Images to Predict Non-alcoholic Fatty Liver Disease", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

23) S. Sattari*, U. Basak, S. Nicholson, J. R. Green, M. Toda and T. Komatsuzaki : "A sandbox model system for analyzing leadership in collective motion", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

24) K. Tabata*, A. Nakamura and T. Komatsuzaki : "Bad Arm Existence Checking Algorithms with Bandit Feedback", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

25) M. Takigawa*, S. Sattari, S. Ito, H. Teramoto and T. Komatsuzaki : "The origin of why and how reactions take place: Reaction cylinders by Voronoi tessellation", The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

26) J. N. Taylor*, K. Mochizuki, K. Fujita and T. Komatsuzaki : "Data-Driven Analysis of Raman Microscopic Images of Human Follicular Thyroid Cells", The 19th

RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

２７) H. Teramoto*, A. Tsuchida, Y. Kabata, K. Kondo, K. Nabeshima, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki : “Application of Singularity Theory to Material Science”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium, Jozankei View Hotel, Japan (2018-12)

２８) K. M. Helal* and T. Komatsuzaki : “Ensemble Machine Learning Approach to Raman Hyper-spectral Images to Evaluate Non-alcoholic Fatty Liver Disease in Rats”, ダイナミック・アライアンス平成３０年度 生命機能 物質・デバイス・システム G3 分科会, 東京工業大学すずかけ台キャンパス, Japan (2018-11)

２９) 寺本 央* : 「特異点論の物質科学への応用」、ダイナミック・アライアンス平成３０年度 生命機能 物質・デバイス・システム G3 分科会、東京工業大学すずかけ台キャンパス、Japan (2018-11)

３０) Sosuke Ito* : “Stochastic thermodynamics and information geometry”, Advances in Physics of Emergent orders in Fluctuations 2018, Ito International Research Center, Japan (2018-11)

３１) 田畑 公次*、中村 篤祥、小松崎 民樹 : 「非対称性を利用した悪腕存在チェックアルゴリズム」、第 21 回情報論的学習理論ワークショップ、かでる 2.7、Japan (2018-11)

３２) 西村　吾朗* :「医療応用のための近赤外蛍光プローブの高感度検出」、第 34 回近赤外フォーラム,北海道大学学術交流会館、(2018-11)

３３) J. N. Taylor*, K. Mochizuki, K. Fujita and T. Komatsuzaki : “Classification of Raman Spectra of Healthy and Cancerous Human Follicular Thyroid Cells”, 研究会「理論と実験」2018, 広島大学理学部, Japan (2018-10)

３４) S. Sattari*, U. Basak, S. Nicholson, J. R. Green, M. Toda and T. Komatsuzaki : “A sandbox model system for studying leadership in collective motion”, 研究会「理論と実験」2018, 広島大学理学部, Japan (2018-10)

３５) H. Teramoto* : “Application of Singularity Theory to Material Science”, The 6th International Symposium on AMBITIOUS LEADER’S PROGRAM Fostering Future Leaders to Open New Frontiers in Materials Science, Akira Suzuki Hall, Hokkaido University, Japan (2018-10) (招待)

３６) 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(2)」、Optics and Photonics Japan 2018, 筑波大学東京キャンパス文京校舎、(2018-10).

３７) 小松崎 民樹* :「一細胞ラマン計測と情報科学の融合による 細胞診断の迅速解析技術の開発」、CREST さきがけ複合領域「情報計測」CREST 第 3 回領域会議、JST 東京別館 1 階ホール、Japan (2018-08 ～ 2018-09)

３８) 小松崎 民樹* : 「研究内容の概要説明」、新学術領域「シンギュラリティ生物学」キックオフシンポジウム・公募班概要説明、東京大学本郷キャンパス、Japan (2018-09)

３９) 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 9 回(H30-1st)領域会議、ホテルメルパルク長野、Japan (2018-09)

４０) 小松崎 民樹* :「新概念コンピューティングとは？」、平成 30 年度北海道大学公開講座「去る時代、来る時代を考える」、北海道大学高等教育推進機構、Japan (2018-07) (招待)

４１) T. Komatsuzaki* : “How One can Extract Energy Landscape from Single-Molecule Time Series under the Existence of Noise?”, Department Seminar, Johns Hopkins University, Department of Chemistry, Johns Hopkins University, United States of America (2018-07) (招待)

４２) 伊藤 創祐* : 「生物の情報伝達をどう取り扱うか-生体センサーの熱力学の最近の話題-」、物理学にとっておもしろい生物学、東京大学理学部、Japan (2018-05)

４３) 小松崎 民樹* :「１細胞ラマン分光イメージングに基づく細胞場の分子データ科学」、新学術領域研究「分子夾雑化学」 分子夾雑の生命化学 第二回領域会議、ホテルマリノアリゾート福岡、Japan (2018-05)

４４) Sosuke Ito, 「Stochastic thermodynamic interpretation of information geometry」, Big data analysis from a dynamical systems point of view, 北海道大学, Japan (2018-05). （招待）

４５) J. N. Taylor* and T. Komatsuzaki : “Quantification of Raman Microscopic Images of Human Thyroid Cells with Machine Learning”, 理研シンポジウム「細胞システムの動態と論理 X」, 理化学研究所 生物科学研究棟, Japan (2018-04)

４６) S. Sattari*, T. Komatsuzaki, N. B. Schuyler and J. R. Green : “Understanding cell colony dynamics from images using velocity extraction and analysis”, 理研シンポジウム「細胞システムの動態と論理 X」, 理化学研究所 生物科学研究棟, Japan (2018-04)

4.7 シンポジウムの開催

１) 寺本 央: 「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（札幌市）（2019 年 3 月 26 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 2018 表彰式」、福岡大学七隈キャンパス (福岡市) (2019 年 03 月 15 日)

３) 小松崎 民樹、永井 健治、鷲尾 隆 : 「バイオ情報計測技術研究会」、グリーンピア大沼 (北海道茅部郡森町) (2019 年 03 月 01 日～2019 年 03 月 03 日)

４) 小松崎 民樹 : 「シンギュラリティ生物学デザイン思考研究会」、THE HAMANAKO (浜松市) (2019 年 02 月 23 日～2019 年 02 月 25 日)

5） J. R. Green, S. Berry, H. Teramoto and H. Waalkens : “Geometry of Chemical Reaction Dynamics in Gas and Condensed Phases”, Telluride Intermediate School (Telluride, CO. United States of America) (2018 年 07 月 17 日～2018 年 07 月 27 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） 西村　吾朗、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、2015～2019 年度

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、新学術領域研究、細胞集団とシンギュラリティ細胞のデータ駆動型数理解析技術の開発、2018～2022 年度

2） 小松崎 民樹、新学術領域研究、1 細胞ラマン分光イメージングに基づく細胞場の分子データ科学、2018 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） 小松崎 民樹、特別研究員奨励費、1 細胞ラマン分光イメージングのための情報計測技術、2018～2020 年度

6） 伊藤　創祐､若手　B､シグナル伝達系の情報熱力学、2018 年度

7） 田畑　公次、若手　B、確率的多腕バンディット設定における効率的な良腕識別手法の開発とその応用、2018 年度

8） 西村　吾朗、挑戦的研究(萌芽)、蛍光食品を用いた非侵襲誤嚥検査法の研究開発、2018～2019 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） 小松崎 民樹、JSPS 二国間交流協定、データサイエンスと非線形科学の融合による新たな非平衡現象の探求、2018～2019 年度

4） 小松崎 民樹、CREST、数学に依拠する精度保証等の安全・安心を担保する最適化問題の研究、2018～2023 年度

5） 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

6） 伊藤　創祐、JST さきがけ、情報幾何と熱力学による生体コンピューティング理論、2018～2021 年度

7） 西村　吾朗、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、2015～2019 年度

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:日本化学会北海道支部支部役員(幹事)(H26年3月～現在)

3） 小松崎 民樹：Editorial Board “Scientific Reports” Division of Chemical Physics（H29年2月～現在）

4） 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）

5） 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）

6） 小松崎 民樹：JST/ERARO 選考パネルメンバー(H30年8-9月)

7） 人工知能学会第２種研究会 計測インフォマティクス研究会 （Special Interest Group on Measurement Informatics: SIG-MEI）幹事(H30年1月～現在)

c． 兼任・兼業

該当なし

d． 外国人研究者の招聘

1） James P. Crutchfield､UC Davis, United States of America､（2019 年 01 月 13 日～2019 年 01 月 14 日）

2） Steve Presse､ Arizona State Univ., United States of

America、(2018 年 10 月 31 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、ナノ物性化学、小松崎 民樹、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日

2) 全学共通、微分積分学Ⅱ、寺本 央、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

3) 全学共通、数学概論、寺本 央、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

4) 全学共通、入門線形代数学、寺本 央、2018 年 04 月 01 日～2018 年 09 月 30 日

5) 理学部、数学総合講義 I、伊藤創祐、2018 年 10 月 01 日～2019 年 03 月 31 日

6) 全学共通､Hokkaido summer institute (Nanoinformatics)、伊藤創祐、2018 年 04 月 01 日～2018 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) リヨン高等師範学校(Ecole normale supérieure de Lyon)客員教授、院生対象、IXXI system complex Seminar, 小松崎 (11月～12月)

2) 2019年度「北海道大学化学系への二日体験入学」、高校生対象、伊藤 (7月30-31日)

ｇ．新聞・テレビ等の報道

1) 【プレスリリース】情報の幾何学から熱力学的な不確定 性原理を発見 ～生体内の“ゆらぐ化学反応”による情報伝達の普遍的な理解へ～, 2018年7月19日

ｈ．ポスドク・客員研究員など

1) Sulimon Sarrari (博士研究員、2017.7～)

2) 土田 旭 (学術研究員、2017.12～2019.2)

3) Aurelien Pelissier(学術研究員、2018.10～2019.3)

4) Jean-Emmanuel Clement(JSPS外国人特別研究員、2018.11～)

5) 水野雄太 (JSPS特別研究員、2019.1～)

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

博士学位：1人

1) 田宮裕治、理学院数学科：博士 (理学)、The effects of non-equilibrium angle fluctuation on rotary protein motor kinetics: numerical study with a data driven model (回転モータータンパク質の反応動力学における角度非平衡揺らぎの効果:データ駆動モデルによる数値解析研究)

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　　西上 幸範（兵県大院、理博、2018.9～）
大学院生　ダニエル シェンツ (D3), 越智翔大 (M2), 飯塚洸介 (M1)、千葉拓也（M1）, 佐藤耀(M1), 松崎光孝 (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) 原生生物の細胞生物学と行動学、(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。この適応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る。以上の成果を踏まえて、（１）街と交通網の共発展現象,（２）樹木の構造力学を検討した。

前者では、集住地形成モデルを従来の経済モデル（重力モデル）に倣って構成し、流量強化則による交通路形成との相互作用をモデル化した。このモデルを現実の地形情報（標高や河川湖沼海の存在）に合わせて計算機シミュレーションした。ケーススタデイとして北海道を取り上げ、現実の町の分布と比較検討した。

後者では､流量強化則を樹木の樹形形成に拡大適用した。すなわち、樹木の局部が、かかる力の負荷に応じて成長するという性質を、我々の流量強化則で数理モデル化した。樹木は、吹く風に揺さぶられることにより樹形を整えていき、他方樹木全体で揺れることで巧みに力学エネルギーを散逸することで全倒壊しにくい構造を獲得する。このような樹木の構造特性の実験的評価と力学機構を調べた。

（b）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、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ている。近年我々は耐性幼虫が尻尾だけで立ち上がった状態から（nictation）高速で飛び上がることを発見した。その振る舞いが物理的に可能なものなのかを速度や飛ぶ時の形態などを観測しながら力学の視点から検討した。また生物学的な意義につながる実験も行った。

（c）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。クラミドモナスが持つ左右非対称性がマクロなパターンに現れることを発見した。そのパターンを説明する数理モデルを作成した。またその実験的検証も行った。

（d）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る。

（e）繊毛虫の固液界面での行動学

真核単細胞生物である繊毛虫は環境中で重要な役割を果たしていることが分かっており、古くからその行動に関して研究が行われてきた。繊毛虫は一般的に水中を自由に泳いでいると考えられているが、環境中では石や葉の表面といった固液界面に局在していることが分かっている。固液界

面に餌となるデトリタスやバイオフィルムが形成されているため、この行動は環境中で生き抜くために重要な行動だと考えられる。我々は代表的な繊毛虫である*Paramecium caudatum*および*Tetrahymena pyriformis*を用いてこの行動原理に関して研究を進めた。実験及び流体数値計算の結果より、この固液界面への集合は繊毛虫が固液界面上をスライディングすることで実現されており、またこのスライディングは固液界面付近で基盤に接触した繊毛が運動を停止すること及び、細胞形状が楕円体であることによって実現されていることが明らかになった。

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、北海道の町と道の共発展を検討した。今後、欧米など異なる地域、時代における町と道の共発展現象を検討し、人間社会の基盤となる町と道のパタン形成機構を考察して行きたい。

(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) Kunihiko Esashi, Tamotsu Onozaki, Yoshitaka Saiki, and Yuzuru Sato, "Intermittent transition between synchronization and desynchronization in multi-regional business cycles," Structural Change and Economic Dynamics, 44, pp.68-76, (2018).
2) S. Okuda, E. Kuranaga, K. Sato "Apical Junctional Fluctuations Lead to Cell Flow while Maintaining Epithelial Integrity", Biophysical Journal 116, 1159-1170, (2019).
3) C. Gao, C. Liu, D. Schenz, X. Li, Z. Zhang, M. Jusup, Z. Wang, M. Beekman and T. Nakagaki: “Does being multi-headed make you better at solving problem? A survey of Physarum-based models and computations”, Physics of Life Reviews (2018). DOI: 10.1016/j.plrev.2018.05.002

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1) 高木 清二, 佐藤 勝彦, 中垣 俊之, 「モジホコリ」生物工学 第96巻 第8号 (2018) pp. 488-492.

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) “Stochastic bifurcation in a turbulent swirling flow”, invited talk, CRITICS workshop, Imperial College London, London, (March, 2019).
2) “Stochastic bifurcation in random dynamical systems and its application to modeling atmospheric jet dynamics”, invited talk, “Dynamical Systems and Climate Dynamics,” LSCE/CNRS-Saclay, Saclay, France (October, 2018).
3) “Stochastic chaos in a turbulent swirling flow”, invited lecture, LML summer school, London Mathematical Laboratory, London, UK (August, 2018).
4) Katsuhiko Sato, "Left-right Asymmetric Cell Intercalation Drives Directional Collective Cell Movement in Epithelial Morphogenesis", BIT's 9th Anniversary World DNA Day-2018 (WDD-2018), Dalian International Conference Center, Dalian, China (April, 2018).
5) Katsuhiko Sato, "Left-right asymmetric cell intercalation drives directional collective cell movement in epithelial morphogenesis", Asia Pacific Society for Biology and Medical Sciences 2018 Annual Meeting (APSBMS 2018

Annual Meeting), Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan (July, 2018).

6) 中垣 俊之：「Transport network designed by current-reinforcement rule」、Annual Meeting of Society of Mathematical Biology、university of Sydney、Sydney、2018-07-08/12、plenary talk

7) 中垣 俊之：「Adaptive transport network in a living system designed by current-reinforcement-rule」、SOUTH LAKE WORKSHOP IN BIOINFORMATICS AND SYSTEM BIOLOGY、武漢理工大、2018-11-17/18

ｂ．招待講演（国内学会）

1) 中垣 俊之：流れと淀みと語る会、国立遺伝学研究所、三島市、2018-06-10

2) 中垣 俊之：「粘菌における行動の多様性と選択について -モデルを介してみるノイズの役割-」、レーザー学会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」、北大学術交流会館、2018-07-22

3) 中垣 俊之：「原生生物粘菌のアメーバ運動と集団パターン形成」、細胞凝集研究会2018、酒田市ホテルリッチガーデン、2018-07-27

4) 中垣 俊之：「単細胞に学ぶ形作り」、2018 武蔵野大学数理工学シンポジウム、武蔵野大学有明キャンパス、東京、2018-08-28

5) 中垣 俊之：「蠕動的這行運動のバイオメカニクス」、第8回数理科学研究会、岐阜県下呂温泉、2018-10-27

6) 中垣 俊之：「単細胞の賢さを探る」、第32回上田記念講演会（応用物理学会東海支部主催）、名古屋大学、2019-01-05

ｃ．一般講演（国際学会）

1) Katsuhiko Sato, "Direct observation of orientation distributions of actin filaments in a solution undergoing shear banding", Annual European Rheology Conference 2018 (AERC 2018) Sorrento, Italy (April, 2018).

2) Yukinori Nishigami, ""“Statistical analysis of amoeboid locomotion on the constant photoirra-diation", International Conference on Advances of Physics of Emergent Oeders in Fluctuations 2018 (APEF 2018) Tokyo, Japan (November, 2018).

ｄ．一般講演（国内学会）

1) 佐藤 勝彦, 奥村 悦子, 越智 翔大, 黒田 茂, 中垣 俊之, 杉 琢磨, “線虫の高速ジャンプ”, 日本物理学会2018年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス(京田辺市多々羅) (2018年9月).

2) 西上 幸範, 大村 拓也, 市川 正敏, “繊毛虫の固液界面への集合”, 第51回日本原生生物学会大会, 島根大学松江キャンパス（松江市）(2018年10月).

3) 中垣 俊之：「細胞マターの流量強化則に基づくスマートネットワークの設計原理」、第４１回日本分子生物学会 セッション「自然界の様々な階層で見られるスマートマターによる集合的知性の創成（佐藤、阿部)」、パシフィコ横浜、2018-11-29

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：「粘菌、運動、知恵」、第100回北大CoSTEP主催サイエンスカフェ札幌。北大農学部講堂、2018-06-03

2) 中垣 俊之：「自然知能と人工知能-アメーバとヒトの比較から-」、第27回先端科学移動大学市民講演会、函館市総合保健センター、2018-11-17

3) 中垣 俊之：「単細胞の賢さを探る-アメーバと人の比較から-」、SSH岩見沢農業高校講演会、2018-11-07

4) 中垣 俊之：「自然知能と人工知能-アメーバとヒトの比較から-」、第27回先端科学移動大学、函館中部高校2018-11-16

4.7 シンポジウムの開催

1) 電子科学研究所附属社会創造数学研究センター主催公開シンポジウム「数理連携の現状と未来」、北海道大学鈴木章ホール、8 月 24−25 日、長山雅春、小松崎民樹、中垣俊之、佐藤勝彦、佐藤譲ら

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) Y. Sato, CEA-CNRS, France と流体、気象データ解析に関する共同研究。

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) 佐藤譲: 研究代表者,「ランダム力学系理論に基づく確率カオスの現象論とその応用」,科学研究費補助金 基盤(C) No.18K03441, 日本学術振興会 (2018-2020)

2) 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).

3) 佐藤譲: 研究代表者, “Understanding the dynamics of atmospheric circulation”, PICS grant, LSCE, CEA, France,(2017-2020).

4) 佐藤譲: 研究代表者, London Mathematical Laboratory Fellowship, London Mathematical Laboratory, UK,

(2018-2019).

5) 佐藤 勝彦: 研究代表者,「上皮細胞の集団運動: 形態形成の基礎メカニズムの解明」, 学術研究助成基金助成金 (基盤研究(B)) 17H02939, (2017-2020)

6) 佐藤 勝彦: 研究分担者,「粘弾性流体に特有な渦の数理解析」, 基盤研究(B) 18H01135, (2018-2022)

b. 大型プロジェクト・受託研究

1) 西上 幸範:「原生生物の行動原理の解明」, 次世代研究者育成プログラム(2018-2023)

4.10 受賞

1) 西上 幸範: 第51回日本原生生物学会大会ベストプレゼンテーション賞

4.11 社会教育活動

a. 公的機関の委員

1) 北海道立啓成高等学校 SSH 運営委員

b. 国内外の学会の役職

1) 佐藤譲：JSIAM Letters 編集委員（2018.4-2019.3）
2) 西上幸範：日本原生生物学会編集委員（2014.10-）
3) 西上幸範：日本原生生物学会評議委員（2018.10-）

c. 兼任・兼業

1) 東京大学工学部精密工学科非常勤講師
2) 公立はこだて未来大学非常勤講師

d.外国人研究者の招聘

1) ドイツ バイロイト大学 Helmut Brand 教授、9 月 12-14 日.
2) フランス クロードベルナール リヨン第一大学、Jean Paul Rieu 教授、11 月 10−11 日
3) フランス ポールサバチエ ツールーズ大学､Audrey Dousstour 教授、2019 年 1 月 9−10 日
4) 台湾国立交通大学、Yaw Kan Li 教授,7 月 7−9 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、2018 年 1 学期
2) 理学部/理学院、数理解析学続論、佐藤譲、2018 年 1 学期
3) 大学院生命科学院 生命融合科学コース、ソフトマター専攻、ソフトマター物理学特論 (連続体力学)、佐藤勝彦、2018 年 10 月から 11 月
4) 理学部、生命科学特別講義 III、中垣俊之、佐藤勝彦、2018 年 7 月
5) 大学院生命科学院ソフトマター専攻、ソフトマター物理学特論「非線形現象」、中垣俊之、2018 年 10 月
6) 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」15 回のオムニバス形式の講義のうち 1 回を担当、中垣俊之、夏ターム
7) 大学院理学院、「数学総合講義 1 （集中講義）: 数理で読み解く生物行動学」、中垣俊之、佐藤勝彦、2018 年 11 月
8) 大学院生命科学院、「ソフトマター科学概論」15 回のオムニバス形式の講義のうち 1 回を担当、中垣俊之、春ターム

f. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1) 中垣 俊之 :「単細胞生物に学ぶ形作りと知恵作り」、東大工学部精密工学科特別講義、2018-06-22
2) 中垣 俊之 :「単細胞に学ぶ自然知能の基礎 -見方を変えると見え方が変わる-」、千歳科学技術大学「テクノロジー基礎」、2018-11-12
3) 中垣 俊之 :「物質の科学」、公立はこだて未来大学、2019-02-14/19
4) 中垣 俊之 : JST さくらサイエンス事業にて外国人学生と教員ら 5 名の一日体験を受け入れ、2018-06-19
5) 中垣 俊之 : 旭川明誠成高校の生徒 10 名の一日体験と見学の受け入れ、2018-05-01

g. 新聞・テレビ等の報道

1) 中垣 俊之 : 朝日新聞 2019年01月28日 「科学の扉「粘菌 単細胞でも賢い！？-体を伸縮し迷路を解く交通網などに応用-」」
2) 中垣 俊之 : 北海道新聞 2018年11月18日 「がん、気象 先端科学知る一函館で移動大学 北大教員が講演一」
3) 中垣 俊之 : 函館新聞 2018年11月18日 「研究者が最新技術紹介 先端科学移動大学に100人」
4) 中垣 俊之 : 北海道新聞 2018年11月2日 「北海道から平成がわかる-ノーベル賞 イグノーベル賞 探究心道民に刺激-」
5) 中垣 俊之 : 読売KODOMO新聞 2018年10月4日 「イグノーベル賞の世界 -下品が最高-」
6) 中垣 俊之 : 北海道新聞 2018年06月04日 「粘菌の生態 雌雄逆の昆虫一ユニーク研究を紹介一北大で講演」
7) 中垣 俊之 : 朝日新聞 2018年06月04日 「イグノーベル受賞者と語る一北大で100回目「サイエンスカフェ札幌」一」
8) 中垣 俊之 : 読売新聞 2018年06月04日 「科学を市民に 100回目講演 イグノーベル受賞者登壇」
9) 中垣 俊之 : THE BIG ISSUE 日本版 VOL.332 2018年04月01日 「特集「こんにちは！変形菌」で２ページ記事「粘菌がつくる賢いネットワークは知の原型」として紹介された。」
10) 中垣 俊之 : 日立自動分析情報誌 Lab SCOPE VOL.56 2018年04月01日 「INVITATIONコーナーにて「知性とは何か。単細胞生物にそのメカニズムを探る。」という３ページ記事。」
11) 中垣 俊之 : HTBテレビニュース 2018年06月03日 「北大 イグノーベル賞の二人が講演」
12) 中垣 俊之 : 和歌山県立自然博物館 平成３０年度特別展「小さな粘菌の大きなワンダーランド」7/21-9/2,

2018

１３) 中垣 俊之 ： 南方熊楠記念館 2018特別展示「不思議ないきもの・粘菌展」 2018年09月15日～2018年11月18日

１４) 中垣 俊之 ： 茨城県自然博物館ミュージアムパークの第７１回企画展「変形菌-ふしぎ？かわいい！森の妖精-」に協力 2018年02月17日～06月10日

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

１） 越智翔太、生命科学院、線虫 Caenorhabditis elegans の集団分散と社会性集合

博士学位：1人

1) Daniel Thorsten Schenz、生命科学院、博士（生命科学）、Transportation Network Optimisation during Exploratory Migration in Physarum polycephalum (モジホコリの探索移動中の輸送網効率化)

連携研究部門

共創研究支援部

拠点アライアンス連携研究分野

客員教授　　小田祥久（東大、生命科学、2018.4～）
研究員　村田隆（都立大院、理博、2018.4～）
研究員　佐々木武馬（総研大院、基礎生物、2018.4～）
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、光学顕微鏡の空間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。

顕微鏡の評価材料に植物細胞を用いてきた。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。昨年度までは培養細胞を用いて基礎データを集めてきたが、本年度は実証実験のためにシロイヌナズナの根を用いて多細胞組織の深部観察をスタートした。

２．研究成果

2.1　シロイヌナズナ根を用いた実証実験

シロイヌナズナの根組織は多層構造を形成していることから、様々な深度でのイメージングを試すことが可能であり、顕微鏡の深部イメージングの性能評価に適している。また、細胞壁や細胞内構造を容易に染色することが可能である上、細胞内の様々な構造を恒常的に可視化したラインが樹立済みであり、これらの可視化ラインを用い撮像テストを容易に行うことができる。まずシロイヌナズナの根の細胞壁をヨウ化プロピジウム（PI）で染色し、２光子スピニングディスク共焦点顕微鏡(CSU-MP）によりz-stackを取得した。シロイヌナズナ根端の深部は表層に比べ細胞が小さくなる。CSU-MPにより得られた画像では通常の共焦点レーザー顕微鏡と比べ、特に最深部において細胞の形態を鮮明にとらえることができ、高い深部観察性と十分な空間分解能を備えていることが分かった（図１）。組織最深部に発達する道管の細胞壁を染色し、同様にz-stackを取得した。道管の細胞壁は表面に微細な凹凸構造が認められるが、これを含め道管全体の構造をゆがみ無く正確にとらえることができた。次に微小管を可視化したラインを用い、根端組織および木部道管の微小管構造をCSU-MPを用いて観察した。その結果、通常の共焦点レーザー顕微鏡よりもより深い組織まで鮮明に観察することができた。とりわけ、深部におけるZ方向の分解能の高さが顕著であり、細胞全体の立体的な構造や分裂時に形成される微小管の立体構造を高い精度で解析できることが分かった。

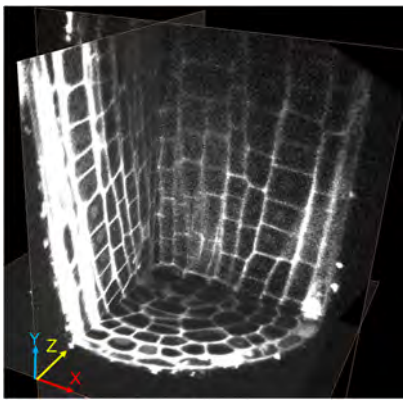


図１　シロイヌナズナ根端の細胞壁

2.1　微小管付随タンパク質の機能解析

上記の実証実験およびこれまでの培養細胞で得られた知見から、本プロジェクトで構築してきた顕微鏡システムが実用レベルの性能を備えていると判断し、シロイヌナズナ微小管付随タンパク質の機能解析に投入した。我々はこれまでにシロイヌナズナの道管ではたらく新規の微小管付随タンパク質を多数同定し、その機能を明らかにしてきた。それらのタンパク質のファミリーの解析を進めてきた結果、細胞分裂期において特異的に発現する新規の微小管付随タンパク質を同定した。植物の細胞分裂は細胞板による細胞質分裂により完了する。細胞板の形成は前期前微小管束やフラグモプラスト微小管といった植物に特徴的な微小管構造により誘導されるが、その挙動を制御する機構とその分子的な実態は多くが不明である。我々が同定したタンパク質は前期前微小管束およびフラグモプラストに局在するこ

とが分かった。CRISPRによるノックアウト個体ではフラグモプラストの形態異常が見られた。CSU-MPを用いることによりフラグモプラストの形成開始から細胞板の完成に至る全過程におけるこのタンパク質の挙動を微小管と共に捉えることに成功した。その結果、このタンパク質が分裂期後期から終期への移行期に形成され始めたフラグモプラストに偏在しその微小管の動態を制御している様子を捉えることに成功した。これらの成果から、このタンパク質はフラグモプラストの動態を制御することにより植物の細胞分裂を支えていることが明らかとなった。本プロジェクトで開発してきたCSU-MPはその深部観察性の高さに加え、高い時間空間分解能を備え、生体における細胞動態の解析に優れたパフォーマンスを発揮することが示された。

３．今後の研究の展望

本プロジェクトでは２光子顕微鏡に共焦点スピニングディスクを導入することにより、深部可視化性と高い時間空間分解能、多色観察の両立を実現してきた。今年度は組織における細胞構造の観察においてもこの顕微鏡システムが優れた性能を有していることを実証し、さらに微小管付随タンパク質の研究にも貢献した。このように本システムはこれまでにない光学系として実用レベルに到達していると言える。一方、今後この顕微鏡システムをさらに改善・普及させるための課題として、１）観察条件の最適化、２）使用可能プローブの拡大、３）広視野性の確保、４）より安全・簡便なユーザーインターフェースの実装、５）普及に向けたハードウェアの改良・コストダウン、等が挙げられるだろう。本プロジェクトでのさらなる試行錯誤に加え、多様なユーザーの参加、ユーザー間の情報交換がこれらの課題を解決する上で大いに助けになると期待される。今後は本システムの研究への投入とその成果のアピールを積極的に進める予定である。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） Sugiyama Y, Nagashima Y, Wakazaki M, Sato M, Toyooka K, Fukuda H, Oda Y. “A Rho-actin signaling pathway shapes cell wall boundaries in Arabidopsis xylem vessels”, Nat. Commun., 2019, 10: 468 DOI:10.1038/s41467-019-08396-7

２） Fujimoto M, Sazuka T, Oda Y, Kawahigashi H, Wu J, Takanashi H, Ohnishi T, Yoneda JI, Ishimori M, Kaji-ya-Kanegae H, Hibara KI, Ishizuna F, Ebine K, Ueda T, Tokunaga T, Iwata H, Matsumoto T, Kasuga S, Yonemaru JI, Tsutsumi N. “Transcriptional switch for programmed cell death in pith parenchyma of sorghum stems”, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2018, 115: E8783-E8792. doi: 10.1073/pnas.1807501115

３） Nagashima Y, Tsugawa S, Mochizuki A, Sasaki T, Fukuda H, Oda Y. “A Rho-based reaction-diffusion system governs cell wall patterning in metaxylem vessels”, Sci. Rep., 2018, 8: 11542. doi: 10.1038/s41598-018-29543-y.

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） Oda Y, Nagashima Y, Fukuda H. “Reconstruction of ROP GTPase Domains on the Plasma Membrane in Tobacco Leaves”, Methods Mol. Biol., 2018, 1821: 393-399. doi: 10.1007/978-1-4939-8612-5_26

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） Yoshihisa Oda. “Secondary cell wall patterning in meta-xylem vessels”, 1st PSC Advanced Microscopic Imaging Symposium, Shanghai, Aug 3rd 2018.

ｂ．招待講演（国内学会）

１） 小田祥久．「細胞壁パターン形成」，第九回 定量生物学の会，大阪, 2019 年 1 月 13 日．

２） 小田祥久，佐々木武馬，村田隆，大友康平，堤元佐，根本知己．「２光子共焦点顕微鏡による植物組織イメージング」，多次元生細胞イメージング研究会，札幌，2018 年 12 月 17 日．

３） 村田隆，「マルチカラーイメージングと３D 画像解析による細胞分裂のダイナミクス」，多次元生細胞イメージング研究会，札幌, 2018 年 12 月 17 日．

ｃ．一般講演（国際学会）

１） Takema Sasaki, Hiroo Fukuda, Yoshihisa Oda. ″A novel microtubule-associated protein, CORTICAL MICRO-TUBULE DISORDERING1 (CORD1), regulates the cell-wall structure of xylem vessels”, Gordon Research Conference-Plant and Microbial Cytoskeleton-, Andover, NH, USA, 2018 年 8 月 13 日．

ｄ．一般講演（国内学会）

１） 杉山友希，長島慶宜，若崎眞由美，佐藤繭子，豊岡公徳，福田裕穂，小田祥久．「二次細胞壁の形成を制御する新規アクチンシグナル経路の解析」，日本植物学会第 82 回年会，広島, 2018 年 9 月 14 日．

２） 長島慶宜，杉山友希，福田裕穂，小田祥久．「道管における新規 ROP-アクチン経路の解析」，日本植物学

会第 82 回年会，広島, 2018 年 9 月 14 日.

3） 佐々木武馬，村田隆，長谷部光泰，小田祥久．「微小管付随タンパク質 CORD の細胞分裂における機能」，日本植物学会第 82 回年会，広島, 2018 年 9 月 14 日.

4） 佐々木武馬，村田隆，大友康平，堤元佐，根本知己，長谷部光泰，小田祥久．「微小管付随タンパク質 CORD は細胞分裂におけるフラグモプラストの形成に必要である」，第 60 回日本植物生理学会年会，名古屋, 2019 年 9 月 14 日.

5） 杉山友希，長島慶宜，若崎眞由美，佐藤繭子，豊岡公徳， 福田裕穂，小田祥久．「新規－ROP アクチン経路による二次細胞壁沈着の制御」，第 60 回日本植物生理学会年会，名古屋, 2019 年 9 月 14 日.

6） 鎌田恭史，大友康平，村田隆，長谷部光泰，根本知己．「多点走査型２光子顕微鏡による 4 重標識生細胞の 3 次元経時観察」，第 27 回日本バイオイメージング学会学術集会，筑波, 2018 年 9 月 3 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） Murata,T., Otomo, K., Kato, K., Nemoto, T., Hasebe, M. “Two-photon spinning disk microscopy reveals steps of chromosome alignment during mitotic spindle formation in plant cells” The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium ″Cutting Edge Techniques of Bioimaging″, 岡崎, 2019 年 2 月 17 日.

2） Kamada, T., Otomo, K., Murata, T., Hasebe, M., Nemoto, T.”Two-photon excitation spinning disk confocal microscopy utilizing two laser light pulses ”, The 19th RIES-HOKUDAI International Symposium ″So″ 札幌, 2018 年 12 月 11 日.

3） 杉山友希，長島慶宜，若崎眞由美，佐藤繭子，豊岡公徳，福田裕穂，小田祥久.「道管における新規 ROP-アクチン経路の解析」，植物細胞骨格研究会 Plant Cytoskeleton 2018，奈良, 2018 年 11 月 14 日.

4） 佐々木武馬，村田隆，大友康平，堤元佐，根本知己，長谷部光泰，小田祥久．「微小管付随タンパク質 CORD の細胞分裂における機能」，植物細胞骨格研究会 Plant Cytoskeleton 2018，奈良, 2018 年 11 月 14 日.

4.7 シンポジウムの開催

1） 該当なし

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

該当なし

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） 小田祥久、基盤研究 B 一般、細胞内空間情報の構築原理の解明、2018～2020 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） 小田祥久：日本植物生理学会広報委員

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）

1） 小田祥久:東京大学大学院新領域創成科学研究科先端生命科学専攻、自然科学概論、 1 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

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人

博士学位：0人

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～）
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。

特に近年では、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、大学等の各研究機関で優れた機器を整備し、運用を継続することは一層困難となっている。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30年４月～平成31年3月）

平成30年度の延べ利用人数・利用時間は、489人・2728時間に達した。平成24年度～29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，　平成29: 578名・2767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）。29年度と比較すると、やや利用人数が低下することとなった。30年度は当研究所内の利用がやや少なく、一方で学内研究者・学外研究者の利用は、近年はほぼ同程度となっている。

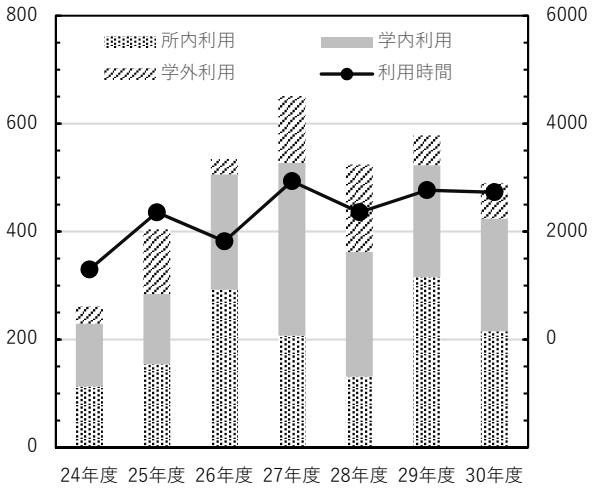


図１．平成 24 年度以降のイメージングセンター利用状況

平成30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。

また平成30年度は、当センターの利用者が著した７報の論文が学術誌に掲載された。

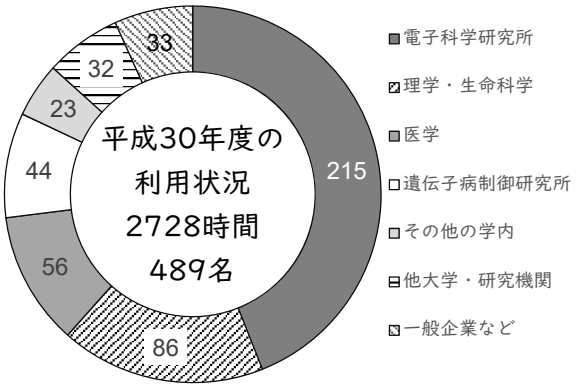


図２．平成 30 年度の利用者の所属の詳細

(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、特にイメージングの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30年度は、計19件の利用問い合わせがあり、33名の研究者に操作指導を行った。これは前年度とほぼ同程度である。

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、平成29年度より一般研究者への提供を開始した。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、30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。

現在の運営・活動体制となってから、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。平成30年６月８日には「第７回　蛍光イメージング・ミニシンポジウム」を当研究所で、平成30年11月27日には、ダイナミックアライアンス分科会の開催に併せて、「ダイナミックアライアンスG3公開シンポジウム　兼　ニコンイメージングセンター学術講演会」を東京工業大学で開催した。それぞれ43名・38名の参加があった。

前述のマルチビーム走査型２光子顕微鏡システムは、高速画像取得･深部観察に対応･低侵襲性などが特徴であり、そのため培養細胞・動物組織・植物組織など、多彩な試料や目的で利用されている。この顕微鏡システム利用者の現状での研究状況を講演してもらうことで。顕微鏡システムのアピールとともに、更なる研究の発展の可能性を見出すことを目的として、平成30年12月17日には「多次元生細胞イメージング研究会」と冠した講演会を開催した。こちらも予想を大幅に上回る42名の参加があり､大盛況となった。

(c)　その他の主な活動状況

平成 30 年６月中旬に４日間、協賛企業のアンドール･テクノロジーの高速共焦点イメージングプラットフォーム: Dragonfly のデモンストレーションを開催し、多くの反響があった。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) Kazuaki Sawada, Ryosuke Kawakami, Ryuichi Shigemoto and Tomomi Nemoto. “Super-resolution structural analysis of dendritic spines using three-dimensional structured illumination microscopy in cleared mouse brain slices”, European Journal of Neuroscience, 2018, 47 (9), 1033-1042.
2) Kohei Otomo, Terumasa Hibi, Yi-Cheng Fang, Jui-Hung Hung, Motosuke Tsutsumi, Ryosuke Kawakami, Hiroyuki Yokoyama and Tomomi Nemoto. “Advanced easy STED microscopy based on two-photon excitation by electrical modulations of light pulse wavefronts”, Biomedical Optics Express, 2018, 9 (6), 2671-2680.
3) Yuka Aoyagi, Terumasa Hibi, Yoshitaka Kimori, Masato Sawada, Ryosuke Kawakami, Kazunobu Sawamoto and Tomomi Nemoto. “Heterogeneous distribution of double-cortin-expressing cells surrounding the rostral migratory stream in the juvenile mouse”, Journal of Comparative Neurology, 526 (16), 2631-2646.
4) Kei Yamamoto, Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, Seiichiro Ishihara, Hisashi Haga, Akira Nagasaki, Yota Murakami and Masayuki Takahash. “Differential contributions of non-muscle myosin IIA and IIB to cytokinesis in human immortalized fibroblasts”, 2019, 376(1), 67-76.

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、根本知己.「2光子顕微鏡・多光子顕微鏡」, 実験医学増刊「イメージングの選び方・使い方」, 2018, 36 (20), 82-83.

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）

該当なし

ｂ．招待講演（国内学会）

1） 根本知己.「先端レーザーフォトニクス技術を用いた細胞生理機能の可視化解析」, 第74回日本顕微鏡学会学術講演会シンポジウム, 久留米 (2018-.05).
2） 根本知己.「生きたままの脳をみる」, 第27回日本バイオイメージング学会学術集会, つくば (2018-09).

ｃ．一般講演（国際学会）

該当なし

ｄ．一般講演（国内学会）

1） 鎌田恭史, 大友康平, 村田隆, 長谷部光泰, 根本知己.「多点走査型2光子顕微鏡による4重標識生細胞の3次元経時観察」, 第27回日本バイオイメージング学会学術集会, つくば (2018-09).
2） 後藤亜衣, 大友康平, 根本知己.「多点走査型 2 光子顕微鏡への偏光光学系の導入と生体イメージングへの応用」, 第27回日本バイオイメージング学会学術集会, つくば (2018-09).
3） 安宅光倫, 鎌田恭史, 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生体脳の in vivo イメージング」, 第41回分子生物学会年会, 横浜 (2018-12).
4） 後藤亜衣, 大友康平, 根本知己.「新規高速偏光分解2光子蛍光イメージングによる膵臓外分泌腺の小胞動態の可視化解析」, 第４１回分子生物学会年会, 横浜 (2018-12).

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） Tomomi Nemoto. “Novel multi-photon microscopy utilizing optical technologies and nanomaterials”, The 6th Japan-China Symposium on Nanomedicine, Matsue, Japan (2018-05).
2） 大友康平, 後藤亜衣, 山中祐実, 根本知己.「二光子励起スピニングディスク顕微鏡の開発と生物学応用」, 新学術領域レゾナンスバイオ班会議, 葉山 (2018-06).
3） 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偏光分解イメージング」, 新学術領域レゾナンスバイオ班会議, 葉山 (2018-06).
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偏光分解イメージング」, 新学術領域レゾナンスバイオ班会議, 葉山 (2018-06).
6） 根本知己.「ベクトルビームによる高速 in vivo 多光子顕微鏡の高度化」, 新学術領域レゾナンスバイオ班会議, 葉山 (2018-06).
7） 村田隆, 大友康平, 鎌田恭史, 加藤輝, 小林健太郎, 長谷部光泰, 根本知己.「多点走査型2光子顕微鏡による多次元画像取得とその応用」, 第8回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会・平成29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成果報告会, 札幌 (2018-06).
8） 堤元佐, 根本知己.「画像解析による新規超解像顕微鏡法 SRRF の実用性評価」, 第8回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会・平成29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成果報告会, 札幌 (2018-06).
9） 堤元佐, 根本知己.「画像解析による新規超解像顕微鏡法 SRRF の実用性評価」, 第8回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会・平成29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成果報告会, 札幌 (2018-06).
10） 根本知己.「最先端レーザー顕微鏡」, 第86回創薬科学セミナー, 名古屋 (2018-10).
11） Ai Goto, Kohei Otomo and Tomomi Nemoto. “Development of multi-point scanning two-photon microscopy utilizing polarizing optics and its application for intravital imaging”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers – Chanpuru, Okinawa (2018-10).
12） Takafumi Kamada, Kohei Otomo, Takashi Murata, Mitsuyasu Hasebe and Tomomi Nemoto. “Two-photon excitation spinning disk confocal microscopy utilizing two laser light sources”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers – Chanpuru, Okinawa (2018-10).
13） 大友康平, 後藤亜衣, 根本知己.「生体コラーゲンの *in vivo* 高速偏光分解イメージング」, ダイナミックアライアンスG3分科会, 横浜 (2018-11).
14） 堤元佐, 小林健太郎, 大友康平, 松尾保孝, 根本知己.「北大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」, ダイナミックアライアンスG3分科会, 横浜 (2018-11).
15） Takafumi Kamada, Kohei Otomo, Takashi Murata,

Mitsuyasu Hasebe and Tomomi Nemoto. “Two-photon excitation spinning disk confocal microscopy utilizing two laser light pulses”, the 19th RIES – Hokudai International Symposium, Sapporo (2018-12).

16) Ai Goto, Kohei Otomo and Tomomi Nemoto. “High-speed polarization resolved imaging for living mice tissues by two-photon excitation multi-point scanning microscopy”, the 19th RIES – Hokudai International Symposium, Sapporo (2018-12).

17) 村田隆，大友康平，加藤輝，根本知己，長谷部光泰，「植物紡錘体における染色体の配列運動は3つの過程に分けられる」，2019年生体運動研究合同班会議，福岡 (2019-01).

18) 村田隆，大友康平，加藤輝，根本知己，長谷部光泰，「細胞形状に依存した微小管の配列機構の検証」，冷涼生物学の会 第9回年会，大阪 (2019-01).

20) 鎌田恭史、大友康平、村田隆、長谷部光泰、根本知己. 「励起光の高速切替が可能なマルチビームスキャン型2光子励起共焦点顕微鏡による多色4D ライブイメージング法の開発」，第４回北大・部局横断シンポジウム，札幌 (2019-01).

21) Kohei Otomo, Ai Goto and Tomomi Nemoto. “Real-time polarization resolved imagin for living mice tissues by two-photon excitaoin spinning disk confocal microscopy”, The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium –Cutting Edge Techniques of Bioimaging, Okazaki (2019-02).

22) Motosuke Tsutsumi, Kentaro Kobayashi, Kohei Otomo, Yasutaka Matsuo and Tomomi Nemoto. “Imaging Support in Nikon Imaging Center at Hokkaido university”, The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium –Cutting Edge Techniques of Bioimaging, Okazaki (2019-02).

23) Takashi Murata, Kohei Otomo, Kagayaki Kato, Tomomi Nemoto and Mitsuyasu Hasebe, “Two-photon Spinning Disk Microscopy Reveals Steps of Chromosome Alignment during Mitotic Spindle Formation in Plant Cells”, The 66th NIBB Conference / ABiS International Symposium –Cutting Edge Techniques of Bioimaging, Okazaki (2019-02).

4.7 シンポジウムの開催

ｂ．一般のシンポジウム

1) 第７回 蛍光イメージング・ミニシンポジウム，参加者43名，北海道大学 (2018-06).

2) ダイナミック・アライアンスＧ３公開シンポジウム兼 ニコンイメージングセンター学術講演会，参加者38名，東京工業大学 すずかけ台キャンパス 大学会館 (2018-11).

3) 多次元生細胞イメージング研究会 ー2光子スピニングディスク顕微鏡ユーザーズミーティングー，参加者42名，北海道大学 (2018-12).

4) Technological Developments of Laser Scanning Fluorescence Microscopy，参加者30名程度，北海道大学 (2019-02).

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

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）

1) 根本知己、科研費新学術領域研究・学術研究支援基盤形成，「先端バイオイメージング支援プラットフォーム」，2016 – 2022年度.

4.10 受賞

１）第28回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，後藤亜衣、大友康平、根本知己. 「多点走査型 2 光子顕微鏡への偏光光学系の導入と生体イメージングへの応用」 (2018-09).

2) 第28回日本バイオイメージング学会 ベストイメージング賞浜松ホトニクス賞，鎌田恭史、大友康平、村田隆、長谷部光泰、根本知己. 「多点走査型２光子顕微鏡による４重標識生細胞の3次元経時観察」 (2018-09).

3) Ai Goto, Kohei Otomo and Tomomi Nemoto. “Development of multi-point scanning two-photon microscopy utilizing polarizing optics and its application for intravital imaging”, poster award in MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas ″Resonance Bio″ International Meeting on Bioimaging for Young Researchers – Chanpuru, Okinawa (2018-10)..

4.11 社会教育活動

ａ．公的機関の委員

ｂ．国内外の学会の役職

ｃ．兼任・兼業

ｄ．外国人研究者の招聘

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

ｇ． 新聞・テレビ等の報道

ｈ． ポスドク・客員研究員など

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

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．活動目標

国際連携推進室は、電子科学研究所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、電子科学研究所が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。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・支援も行っている。

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既に共同研究が行われているルーヴァン・カトリック大学（ベルギー）、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）、台湾交通大学などを中心とした研究所単位の協力関係をもとにしたセミナーの開催を支援した。また、ルーヴァン・カトリック大学（ベルギー）、メルボルン大学（オーストラリア）と電子科学研究所の国際協力関係の構築を計画したうえで、雲林院宏教授主導のもと日本学術振興会先端拠点形成事業に申請し、採択された（図１）。今後は、本事業のもと、戦略的かつ組織的に研究協力体制を構築し、さらなる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

図１　ＪＳＰＳにより採択された先端拠点形成事業（代表：雲林院宏 教授）の概要図

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。その一貫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2018(HSI2018)においてBiju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教授らを招へいに、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HSI2019においてはBiju教授を代表とするグループがまた採択され、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、これを基にした講義を通したグローバル人材育成を行う。

(c) 第19回RIES-HOKUDAI国際シンポジウム「組」開催のサポート

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30年度は12月11日-12月12日に定山渓ビューホテルにおいて開催した。本学をはじめ国内では東北大学、沖縄科学技術大学院大学 OIST や理化学研究所などから、海外からはオーストラリア Monash University、韓国 KAIST、フランス University of Strasbourg、米国 Virginia Polytechnic Institute and State University などから総勢100人を超える大学院生、ポスドク、研究者らが参加し、６６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、先端拠点形成事業の支援をベースとした新たな研究展開と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30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. Clement Jean-Emmanuel、Burgundy University、フランス（2018年11月14日～2018年11月13日）
2. Tam Jason、トロント大学、カナダ(2018年3月19日～2018年4月20日)
3. 李　光立、台湾中央研究院 (2018年5月24日～2018年8月21日)
4. Rachel Clare Little、ニューキャッスル大学、イギリス (2018年5月24日～2018年8月21日)
5. Devers Louis、チャルマース工科大学、スウェーデン、(2018年6月4日～2018年8月3日)
6. Kim Hyounjung、釜山大学校、韓国 (2018年9月20日～2018年10月6日)
7. Lee Joonhyuk、釜山大学校、韓国 (2018年9月20日～2018年10月6日)
8. 陳　昕、南京工業大学、中国 (2018年8月20日～2018年9月30日)
9. 吉　沁、江蘇科技大学、中国 (2018年8月20日～2018年9月30日)
10. RICCI Monica、ルーバン大学、府、ベルギー (2018年7月3日～2018年9月3日)
11. Robert John Errington、ニューキャッスル大学、イギリス (2018年7月20日～2018年8月21日)
12. Eimer Mary Tuite、ニューキャッスル大学、イギリス (2018年7月20日～2018年8月21日)
13. Li Jie、太原科技大学、中国 (2018年9月1日～2019年8月31日)
14. Chen Jia-Wern、国立台湾大学 (2018年7月11日～2018年7月25日)
15. Chen Yu-Han、国立台湾大学 (2018年7月11日～2018年7月25日)
16. Chu Cheng Hung、台湾中央研究院(2019年3月18日～2019年8月31日)
17. Huang Tzu-Ting、台湾中央研究院(2019年3月18日～2019年8月31日)

ナノテク連携推進室

教　授　　松尾保孝（北大院、博士(工学)、2018.1～）
（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～）
特任助教　小田島聡（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30年 4月～平成31年 3月）

平成30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70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91件、こちらも60%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350件以上、論文掲載が90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るとともに、学生研修や技術支援員を受け入れての技術トレーニングによりナノテク技術の普及への活動を行っている。この他に、センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、北海道地域産業技術連携推進会議など、学会・展示会への出展や各種会議での講演を行い、外部ユーザーへの広報活動を行った。

今年度は微細加工領域の支援成果から、ナノテクノロジープラットフォームの秀でた支援成果に選出された。企業への支援課題かつ北海道大学の特徴的な支援が活かされた成果について評価された。

(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) 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

電子科学研究所はナノテク装置を活用して学内外の研究者や企業に対し高度な研究開発支援を行っている。一方、支援する人的資源も不十分であり、また導入から15年以上経過した装置が多数存在しているため、世界トップレベルの研究開発を支えることが困難になりつつある。本事業では、支援する人材確保・スキルアップを図ると共に、最先端装置への更新により、地域創生の鍵となるイノベーティブな研究開発、並びにクリエーティブな研究を創発することを目的とし、本年どから4年間のプロジェクトとしてスタートした。今年度は、集束イオンビーム加工装置の取り扱い試料の拡大と、近年求められている雰囲気制御（大気非暴露）の電子顕微鏡観察環境の整備、広帯域レーザーシステムを収差補正時間分解光電子顕微鏡（TR-PEEM）へ追加して世界トップレベルの研究設備の整備を行い、「世界の課題解決に貢献する北海道大学へ」の実現に向けた研究環境を準備して支援活動を行った。

(ｅ)設備運用状況

平成30年度は、東北大学から大気中紫外光光電子分光装置（理研計器、AC-3）を移設し、10月より稼働を開始した。これを含め、ナノテク整備事業による機器の拡充を図った。

一方、北海道胆振東部地震の影響により、装置の破損や故障が生じたが、一部の装置を除いて地震後ほぼ1ヶ月後には再稼働を実施した。また、完全に修理不能となった装置についても次年度に復旧させるべく、引き続き対策を行っていく。

３．今後の研究の展望

ナノテク連携室は先端共用事業の終了にともない、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（NPF）を核として研究支援活動を行っていく予定である。NPF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) Y. Yoshida, K. Ohnishi, Y. Matsuo, S. Watanabe, “Design of a patterned nanostructure array using a nanosecond pulsed laser”, AIP ADVANCES, Vol.8, No.4, 045122

2) R. Iida,H. Mitomo, K. Niikura, Y. Matsuo, K. Ijiro, “Two-Step Assembly of Thermoresponsive Gold Nanorods Coated with a Single Kind of Ligand”, SMALL, Vol. 14, No. 14, 1704230 【電子研内共著】

3) Y. Hirai, Y. Matsuo, H. Yabu, “Near-Infrared-Excitable SERS Measurement Using Magneto-Responsive Metafluids for in Situ Molecular Analysis”, ACS APPLIED NANO MATERIALS, Vol. 1, No. 9, p.p. 4980-4987

4) JJ. Wei, H. Mitomo, T. Tani, Y. Matsuo, K. Niikura, M. Naya, K. Ijiro, “Size-Defined Cracked Vesicle Formation via Self-Assembly of Gold Nanoparticles Covered with Carboxylic Acid-Terminated Surface Ligands”, LANGMUIR, Vol. 34, No. 41, p.p. 12445-12451【電子研内共著】

5) C. Urata, R. Hones, T. Sato, H. Kakiuchida, Y. Matsuo, A. Hozumi, “Textured Organogel Films Showing Unusual Thermoresponsive Dewetting, Icephobic, and Optical Properties”, ADVANCED MATERIALS INTERFACES, Vol. 6, No. 2, 1801358

6) T. Sato, N. Singh, R. Hones, C. Urata, Y. Matsuo, A. Hozumi, “Organic Thin Film-Assisted Copper Electroless Plating on Flat/Microstructured Silicone Substrates”, IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS, Vol. E102C, No. 2, p.p. 147-150

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）

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） アグス・スアギョ、松尾保孝、柴山環樹　「TEMによる抵抗変化型メモリの動作原理解析および高誘電率積層膜材料の界面状態解析」、2018年度　微細構造解析プラットフォームシンポジウム､産業技術総合研究所　臨海副都心センター（2018年7月）

4.7　シンポジウムの開催

1） 微細加工講演会「３次元微細加工を活用したバイオ計測用マイクロ流体デバイスの開発」、14名、北海道大学（2018年11月）

2） 粉末X線回折講習会、約30名参加、北海道大学（2019年1月）

3） 第4回分析TEMユーザーズミーティング、28名参加、北海道大学（2019年3月）

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） 日産自動車、共同研究

2） 横浜ゴム、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、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

2） 坂口紀史、基盤研究(C)、近距離 Casimir 力の起源となる表面プラズモン振動モードの EELS 解析と力評価、2018～2020 年度

3） 小田島聡、基盤研究(C)、高純度かつ高耐性な単一光子発生源の探求、2017～2019 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

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）

1） 全学教育、化学 I、松尾保孝、

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

該当なし

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

部門等＼年度		平成27年	平成28年	平成29年	平成30年
光科学研究部門	欧　文	18(18)	16(16)	20(20)	19(19)
	邦　文	0	0	1(1)	1(0)
物質科学研究部門	欧　文	14(14)	31(31)	32(32)	37(37)
	邦　文	1(1)	0	0	0
生命科学研究分野	欧　文	10(10)	5(5)	10(10)	13(12)
	邦　文	1(1)	0	1(0)	1(1)
附属社会創造数学研究センター	欧　文	28(25)	27(27)	34(34)	23(23)
	邦　文	2(1)	1	3(0)	4(1)
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)	24(24)
	邦　文	0	0	0	2(1)
計	欧　文	108(105)	104(103)	96(96)	115(114)
	邦　文	4(3)	1	5(1)	8(3)

( )内の数はレフェリー付き。
※出版済のものを集計。客員研究分野は除外して集計。

２．総覧、解説、評論等及び著書数

部門等＼年度		平成 27 年	平成 28 年	平成 29 年	平成 30 年
光科学研究部門	総説等	8(2)	6(0)	2(0)	3(0)
	著　書	0	0	0	1(0)
物質科学研究部門	総説等	2(1)	3(0)	5(2)	7(3)
	著　書	0	0	1(1)	1(1)
生命科学研究部門	総説等	9(3)	4(0)	3(1)	7(1)
	著　書	0	3(2)	1(1)	0
附属社会創造数学研究センター	総説等	11	5(1)	5(0)	2(0)
	著　書	0	1(1)	3(3)	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)	3(0)
	著　書	2(0)	0(0)	2(2)	4(0)
計	総説等	31(6)	19(1)	15(3)	22(4)
	著　書	2	4(3)	5(5)	8(1)

( )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27年	平成28年	平成29年	平成30年
光科学研究分門	国際学会	26(8)	23(11)	29(14)	22(14)
	国内学会	39(21)	29(1)	41(9)	49(6)
物資科学研究部門	国際学会	36(10)	21(10)	32(20)	35(15)
	国内学会	34(6)	29(6)	46(8)	108(9)
生命科学研究部門	国際学会	23(3)	26(10)	23(11)	21(5)
	国内学会	19(3)	38(17)	38(12)	94(4)
附属社会創造数学研究センター	国際学会	26(20)	39(9)	47(25)	50(30)
	国内学会	35(9)	28(11)	49(18)	129(26)
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	国際学会	46(14)	35(24)	27(12)	33(14)
	国内学会	42(0)	35(4)	45(8)	96(9)
計	国際学会	175(55)	144(64)	131(70)	161(78)
	国内学会	169(39)	159(39)	174(47)	476(54)

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 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
業　務　費	155,177	120,230	130,195	124,615
科学研究費補助金	262,325(59)	273,367(74)	305,736(74)	479,781(75)
その他の補助金	5,450(2)	7,500(2)	1,100(2)	91,780(3)
寄　附　金	29,877(14)	23,957(19)	36,117(21)	22,020(17)
受託事業等経費	266,215(20)	252,471(25)	244,713(25)	189,278(26)
(受託研究費)	249,835(13)	236,716(15)	218,297(13)	166,252(14)
(共同研究費)	16,380(7)	15,755(10)	26,416(12)	23,026(12)
合計	719,044(95)	677,525(120)	717,861(122)	907,474(121)

() 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 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
光科学研究部門	科学研究費補助金	44,700(5)	93,000(8)	112,400(13)	110,027(14)
	その他の補助金	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	9,997(5)	4,084(2)	9,017(3)	900(1)
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	500(1)	500(1)
	受託事業等経費	74,989(4)	49,389(1)	22,880(2)	24,171(3)
	(受託研究費)	64,950(3)	49,389(1)	22,880(2)	24,171(3)
	(共同研究費)	10,039(1)	0	0	0
	小　　計	129,686(14)	146,473(11)	144,797(19)	135,598(19)
物質科学研究部門	科学研究費補助金	55,100(6)	51,500(14)	59,466(15)	27,200(8)
	その他の補助金	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	3,200(2)	12,000(7)	22,100(11)	12,080(9)
	寄　附　金　Ⅱ	600(1)	1,200(1)	1,200(1)	340(1)
	受託事業等経費	0	13,491(3)	32,075(3)	17,744(4)
	(受託研究費)	0	11,843(1)	31,719(2)	17,344(3)
	(共同研究費)	0	1,648(2)	356(1)	400(1)
	小　　計	58,900(9)	78,191(25)	114,841(30)	57,364(22)
生命科学研究部門	科学研究費補助金	52,400(6)	44,800(8)	35,000(8)	39,100(11)
	その他の補助金	0	0	0	5,430(1)
	寄　附　金　Ⅰ	1,200(2)	3,873(5)	200(1)	7,700(4)
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	0	0
	受託事業等経費	22,162(4)	20,961(3)	28,767(3)	26,862(4)
	(受託研究費)	21,382(2)	20,181(1)	27,987(1)	26,082(2)
	(共同研究費)	780(2)	780(2)	780(2)	780(2)
	小　　計	75,762(12)	69,634(16)	63,967(12)	79,092(20)
附属社会創造数学研究センター	科学研究費補助金	54,585(23)	46,270(24)	58,570(26)	64,592(27)
	その他の補助金	0	0	0	5,430(1)
	寄　附　金　Ⅰ	13,380(1)	0	1,000(1)	0
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	0	0
	受託事業等経費	125,495(7)	103,172(11)	119,397(10)	113,845(10)
	(受託研究費)	122,885(5)	94,383(7)	104,005(6)	98,655(6)
	(共同研究費)	2,610(2)	8,789(4)	15,392(4)	15,190(4)
	小　　計	193,460(31)	149,442(35)	178,967(37)	183,867(38)

部門等	研究費	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 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	49,950(17)	29,750(17)	39,500(10)	238,162(14)
	その他の補助金	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	500(2)	0	1,100(2)	0
	寄　附　金　Ⅱ	1,000(1)	2,800(4)	1,000(1)	500(1)
	受託事業等経費	27,268(4)	53,923(5)	37,586(4)	4,656(3)
	(受託研究費)	24,317(2)	49,385(3)	29,198(1)	4,656(3)
	(共同研究費)	2,951(2)	4,538(2)	8,388(3)	0
	小　　計	78,718(24)	86,473(26)	79,186(17)	243,318(18)
その他	科学研究費補助金	5,590(2)	8,047(3)	800(2)	700(1)
	その他の補助金	5,450(2)	7,500(2)	1,100(2)	80,920(1)
	寄　附　金　Ⅰ	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	0	0
	受託事業等経費	16,301(1)	11,535(2)	4,008(3)	2,000(2)
	(受託研究費)	16,301(1)	11,535(2)	2,508(1)	0
	(共同研究費)	0	0	1,500(2)	2,000(2)
	小　　計	27,341(5)	27,082(7)	5,908(7)	83,620(4)

() 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 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
光科学研究部門	2	7	2	13
物質科学研究部門	3	9	15	9
生命科学研究部門	0	1	2	4
附属社会創造数学研究センター	5	8	14	12
附属グリーンナノテクノロジー研究センター	12	13	12	4
計	22	38	45	32

Ⅱ－4. 修士学位及び博士学位の取得状況

Ⅱ－４－１）平成３０年度　修士学位

情報科学研究科

■ 山内 喬介 ： テーパ―ファイバ―を用いたナノ粒子の運動制御に関する研究
■ 鈴木 達朗 ： 酸化亜鉛ナノ発光体のプラズモンアシスト水熱合成
■ 須藤 広太 ： 円偏光を用いた捕捉粒子の軌道回転運動に関する研究
■ 髙橋 玄太 ： 金属ナノ構造を用いた円偏光二色性高感度検出
■ 上園 周平 ： 細胞内 SERS 測定を志向した新規金コート銀ナノワイヤーの開発
■ 堀　 菜月 ： 銀ナノワイヤーの表面処理と表面増強ラマン散乱に与える影響
■ 渡邉 希理 ： 細胞膜・内物質の SERS 検出を目指した単分散金コート銀ナノフラワーの合成
■ 木村 円香 ： がん治療用 pH 応答性金ナノ粒子のＸ線レーザーを用いた液中ダイナミクス観察
■ 橘　 健朗 ： グラフェンに担持した白金ナノ粒子の X 線レーザー回折測定に向けた試み
■ Mian　Wei：Study of the origin of mobility suppression in a transparent oxide semiconductor, La-doped BaSnO3
■ 根津有希央 ： 層状コバルト酸化物 AxCoO2 (Ax=Na0.8, Ca0.3, Sr0.3) エピタキシャル薄膜の熱伝導率に関する研究
■ 小山田達郎 ： 強磁性酸化物 La0.67Sr0.33MnO3 ヘテロ構造における電流誘起有効磁場に関する研究
■ 安宅 光倫 ： マウス聴覚野における神経活動を可視化するための in vivo2 光子イメージング法の開発
■ 後藤 亜衣 ： 多点走査型二光子顕微鏡への偏光分離光学系の導入と生体イメージングへの応用
■ 髙橋 泰伽 ： 高分子超薄膜を用いたマウス生体脳の in vivo2 光子イメージング法
■ 山田　拓樹 ： 光電子顕微鏡を用いた金ナノ構造の近接場円二色性に関する研究

生命科学院

■ 芦野 史弥: 様々なアゾベンゼン型三リン酸誘導体を用いたキネシンの光運動制御
■ 濱島　 暁: 高分子ゲルを利用した金ナノロッド間距離変化の精密評価
■ 二瓶 瑞生: DNA ブラシに固定化した金ナノロッドの刺激応答性配向制御

総合化学院

■ 舘林　尭: 希土類含有リン酸塩ガラスのプロトン伝導性と熱的安定性

環境科学院

■ 白川 祐基: 大環状クラウンエーテルを用いた [Ni(dmit)2]超分子カチオン結晶の合成と物性
■ 陳 姣 ： Crystal Structure and Magnetic Properties of Sandwich-type Polyoxometalates Containing Carbonate-Bridged Tb Triangle

理学院

■ 伊藤　　蓮： ２種原子からなるハニカム・ナノリボンの 2 次元量子スピンホール相の理論研究
■ 安ヶ平裕介： 一次元反応拡散―粒子モデルに対する大域的分岐構造の数値解法とその応用
■ 毛利　光希： 液滴集団の運動遷移プロセスに対する数理モデル

Ⅱ－４－２）平成３０年度　博士学位

情報科学研究科

■ 張　雨橋： Study on the thermoelectric properties of SrTiO3 – SrNbO3 solid solutions using the epitaxial thin films and the artificial superlattices
■ 青柳 佑佳： 新規透明化法を用いたマウス脳における新生ニューロンの分布に関する研究

生命科学院

■ MD. JAHIRUL ISLAM ： Study on the Effect of Chemical Structures of Photo-Responsive Non-Nucleoside

Triphosphates on the Interaction with Motor Proteins

■ 田崎 太悠 ： Design and preparation of influenza vaccines using gold nanoparticle

■ 中村　聡　： Orientation Control of Nanorods with the Assistance of Polymer Brush

■ 田宮 裕治 ： Control of NThe effects of non-equilibrium angle fluctuation on rotary protein　motor kinetics: numerical study with a data driven model

理学院

■ Xiaotian Si：Number-Phase Fluctuations in Isolated Superconductors

Ⅱ－4－3）大学院生在籍数

研究科名＼年	修　士			博　士		
	平成28年	平成29年	平成30年	平成28年	平成29年	平成30年
理　学　院	8	6	6	5	4	3
環境科学院	3	4	4	1	4	10
情報科学研究科	21	34	34	12	12	13
生命科学院	0	4	13	9	12	11
総合化学院	5	3	3	7	0	0
計	37	51	60	34	32	37

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。

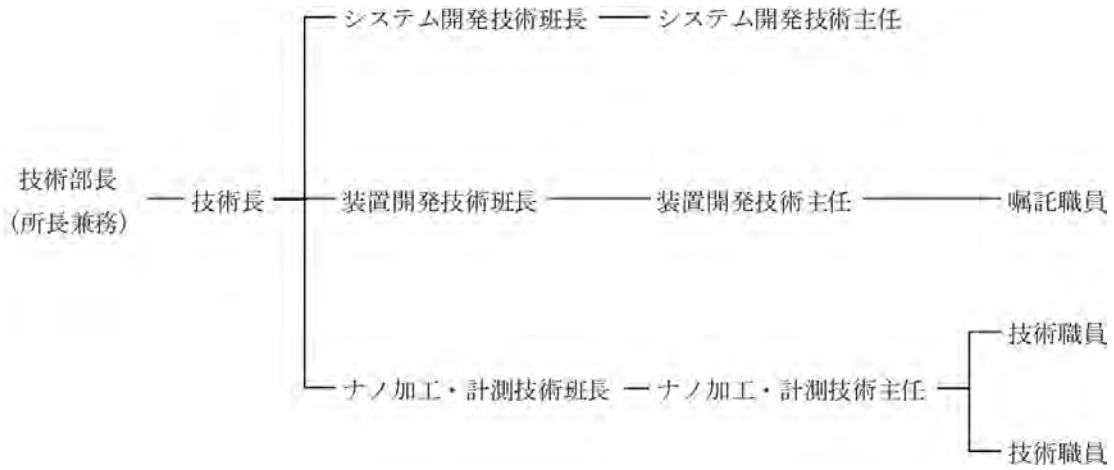
ナノ加工・計測技術班はクリーンルーム及び共用設備の維持管理、利用指導、ナノ加工計測を行っており、それらに関する技術相談も受けている。また両班は研究所全体に関わる業務として行事等の技術支援や液化窒素ガス汲み出し作業従事者への講習会の支援なども行っている。

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。図書室はカードロックシステムを導入しており、研究所の教職員、学生は24時間利用できる。

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27年*	平成28年*	平成29年*	平成30年*
和　書	5,777	5,311	5,316	5,339
洋　書	17,558	17,222	17.225	17.260
計	23,335	22,533	22,541	22,599

2．所蔵雑誌種類数

年　度	平成27年*	平成28年*	平成29年*	平成30年*
和雑誌	106	107	107	106
洋雑誌	388	387	385	385
計	494	494	492	491

3．雑誌受入種類数

年　度	平成27年*	平成28年*	平成29年*	平成30年*
和雑誌	43	41	30	32
洋雑誌	6	4	5	3
計	49	45	35	35

4．学外文献複写数

年　度	平成27年*	平成28年*	平成29年*	平成30年*
依　頼	20	12	48	20
受　付	127	96	65	57

* 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

平成30年度末に無線LAN（HINES-WLANとeduroam）が設置されたことで、図書室の情報環境が向上した。

北海道大学構成員は持ち込んだノートパソコン等のデバイスからHINES-WLANに接続することで、21,000タイトルを超える電子ジャーナルのフルテキストを閲覧できる。また、“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も利用可能である。

なお、図書室内に設置されている情報検索用パソコンからも、同様の学術情報を入手できる。さらに、電子ジャーナルおよびデータベースは、平成22年度より運用を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ている。

また、学外の研究者もeduroamのアカウントがあれば、インターネットに接続することができる。

近年の学術情報の電子化を踏まえ、平成30年度からは図書室内でガイダンスや講習会を開催している。研究所構成員は、データベースの利用指導や学術情報まわりの動向に関する情報提供を受けることができる。

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	簑島　　高
応用電気研究所	昭和21年４月１日～昭和21年９月10日	簑島　　高
	昭和21年９月11日～昭和35年７月31日	淺見　義弘
	昭和35年８月１日～昭和38年７月31日	東　　健一
	昭和38年８月１日～昭和45年３月31日	松本　秋男
	昭和45年４月１日～昭和48年３月31日	望月　政司
	昭和48年４月１日～昭和51年３月31日	馬場　宏明
	昭和51年４月１日～昭和54年３月31日	吉本　千禎
	昭和54年４月１日～昭和57年３月31日	馬場　宏明
	昭和57年４月１日～昭和60年３月31日	山崎　勇夫
	昭和60年４月１日～昭和63年３月31日	達崎　　達
	昭和63年４月１日～平成４年４月９日	安藤　　毅
電子科学研究所	平成４年４月10日～平成６年３月31日	安藤　　毅
	平成６年４月１日～平成９年３月31日	朝倉　利光
	平成９年４月１日～平成13年３月31日	井上　久遠
	平成13年４月１日～平成15年３月31日	下澤　楯夫
	平成15年４月１日～平成15年９月30日	八木　駿郎
	平成15年10月１日～平成17年９月30日	西浦　廉政
	平成17年10月１日～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）	簑島　　高
昭和37年４月	（故）	淺見　義弘
昭和43年４月	（故）	東　　健一
昭和45年４月	（故）	松本　秋男
昭和55年４月	（故）	吉本　千禎
昭和57年４月	（故）	横澤彌三郎
昭和62年４月	（故）	羽鳥　孝三
	（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30年度）

（３月末 日現在）

職名	人数
教授	15(9)
准教授	16
講師	0
助教	18
特任教授	0
特任准教授	1
特任講師	0
特任助教	8
教員小計	58(9)
技術部	8
合計	66(9)

（ ）内の数字は客員で外数

Ⅳ－4. 教員の異動状況（平成30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	助教	CHO HAI JUN	H30.4.1	トロント大学博士後期課程
生命科学研究	助教	与那嶺　雄介	H30.4.1	九州大学大学院工学研究院特任助教
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	准教授	久木　一朗	H30.7.1	大阪大学大学院工学研究院助教
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	西上　幸範	H30.9.16	日本学術振興会特別研究員
物質科学研究	准教授	KIM YUNA	H31.1.1	北海道大学電子科学研究所助教
光科学研究	助教	PIN CHRISTOPHE LOUIS MARIE	H31.3.1	北海道大学電子科学研究所博士研究員
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	准教授	小林　康明	H31.3.1	東京大学大学院新領域創成科学研究科 特任助教
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	助教	MELBERT JEEM	H31.3.16	北海道大学大学院工学研究院学術研究員

○転出状況

所属部門	職　名	氏　　名	退職年月日	転　出　先
技術部	技術専門職員	伊勢谷　陽一	H30.6.30	北海道大学情報企画課技術専門職員
技術部	技術専門職員	笠　晴也	H30.8.31	日本山村硝子株式会社技術係
光科学研究	助教	木村　隆志	H30.9.30	科学技術振興機構さきがけ専任研究員
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	伊藤　創祐	H30.11.30	東京大学理学系研究科講師
光科学研究	助教	酒井　恭輔	H30.11.30	生活協同組合コープさっぽろ
光科学研究	准教授	藤原　英樹	H31.3.31	北海学園大学工学部教授
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	准教授	上野　貢生	H31.3.31	北海道大学大学院理学研究院教授
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	准教授	海住　英生	H31.3.31	慶応義塾大学理工学部准教授

(31.3.31)

Ⅳ－5. 構成員（平成30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　　PIN CHRISTOPHE LOUIS MARIE
　　特任准教授　　SHAHRUL KADRI BIN AYOP
　　特任助教　　瀬戸浦　健　仁
　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　　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
　　准教授　　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
　　助　教　　CHO HAI JUN

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
　　助　教　　与那嶺　雄　介

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　　高　原　　淳
　　（九州大学）
　　客員教授　　奈　良　人　司
　　（日本技術士会）
　　客員教授　　栗　原　和　枝
　　（東北大学）
　　客員教授　　吉　田　宇　一
　　（岩波書店）
　拠点アライアンス連携研究分野
　　客員教授　　小　田　祥　久
　　（国立遺伝学研究所）
　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）
　　客員教授　　湊　　真　一
　　（京都大学）

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
　　特任助教　　YAPAMANU ADITHYA LAKSHMANNA
　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
　　助　教　　MELBERT JEEM
　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
　　准教授　　久　木　　一朗
　　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　　小　林　康　明
　　准教授　　青　沼　仁　志
　　助　教　　秋　山　正　和
　　助　教　　西　野　浩　史
　　特任助教　　後藤田　　剛
　　特任助教　　上　坂　正　晃
　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
　　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　　西　上　幸　範
　実験数理研究分野

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

（平成31年３月末日現在）

ナノテク連携推進室

室長　教授	松　尾　保　孝

技術部

技術部長（兼）	中　垣　俊　之

システム・装置開発技術班

班　長	武　井　将　志
技術職員	楠　崎　真　央
技術専門職員（主任）	今　村　逸　子
技術専門職員（兼）	小　林　健太郎
技術専門職員（兼）	遠　藤　礼　暁

微細加工・イメージング解析技術班

班　長	小　林　健太郎
技術専門職員（主任）	大　西　　広
技術専門職員	遠　藤　礼　暁
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

契約職員・短時間勤務職員

博士研究員	楊　　影
〃	ZU SHUAI
〃	HE GUIYING
〃	須志田　隆　道
〃	一本嶋　佐　理
〃	SATTARI SULIMON
学術研究員	山　田　美　和
〃	飯　島　光一朗
〃	山　口　由美子
〃	CAO EN
〃	熊　本　淳　一
〃	浪　花　啓　右
〃	土　田　　旭
〃	PELISSIER AURELIEN PASCAL OLIVIER
非常勤研究員	AMMATHNADU SUDHAKAR AMRUTHA
〃	SANCHELA ANUP KUMAR
研究支援推進員	佐々木　彩　乃
〃	駒　井　京　子
〃	石　田　裕　美
事務補佐員	山　崎　涼　子
〃	伊　藤　春　奈
〃	本　元　　舞
〃	柳　　亮　輔
技術補佐員	新井田　雅　学
〃	石　田　麻衣子
事務補助員	藤　井　敦　子
〃	小　林　恵　美
〃	大　森　素　子
〃	春　日　さと子
〃	浦　田　絵　美
〃	藤　原　由美恵
〃	富　澤　ゆかり
〃	田　口　栄　子
技術補助員	村　松　達　也
〃	KIM GOWOON
〃	山　田　淑　子
〃	山　田　拓　樹
〃	清　水　風　希
〃	城　　春　樹
〃	巽　　亮　太
〃	堂　前　　愛
〃	出　羽　真樹子
〃	木　村　京　子