巻頭言

2019 年度は平成から令和へと元号が改まった年でした。その令和元年度は、第 3 期中期計画（H28-R3 年度）の 4 年度目にあたり、全学的に中期計画 4 年目終了時評価が実施されました。また、本所の創立から 76 年目となり、本所も喜寿を迎えつつあります。現在、所全体として複合領域ナノサイエンスの研究を推進しております。以下に昨年度の活動を、組織運営、研究、教育、アウトリーチ、研究支援・環境整備などの観点から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ます。平成 30 年度には、第 3 期中期目標期間の中間評価（研究振興局学術機関課）において、かつてない厳しい相対評価が実施されましたが、最高評価「S」（全国 77 拠点中 11 拠点のみ）を頂戴しました。これを受けて、次期中期目標期間でのあるべきネットワーク型拠点の姿を、文部科学省学術機関課などに向けて積極的に提言しています。次期中期目標期間での予算増に向けて、５研究所合わせての組織的な取り組みを続けて参ります。

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、令和元年度にはさらに武漢紡織大学とも協定を結びました。一昨年（H30 年度）に設置した台湾国立交通大学理学院との共同研究教育センターは、物質デバイス共同研究拠点全体の台湾国際化のハブとなり、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、第二回目となる５＋２国際連携シンポジウム（１１月に東北大学にて）、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。電子研からは、シンポジウムには大学院生の参加、講義には若手教員の参加もあり、若手育成の機会となっています。

本所の柱の一つであるナノテクノロジープラットフォーム事業は、平成 24 年度～令和 3 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。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-R3 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、令和元年度には中間評価において良好な評価をいただきました。

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-R3 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、ニコンイメージングセンターに超解像度顕微鏡と光シート顕微鏡の導入ができました。ニコンイメージングセンター長の根本教授が生理学研究所へ転出することになり、これを機会に、ニコンイメージングセンターの事業計画を練り直しました。根本センター長を中心に実施してきた先端バイオイメージングプラットフォーム事業（ABiS）は、根本先生のご尽力もあり仕切り直して継続することができました。本センターを核にして、遺伝子病制御研究所との連携を強化するべく、新規概算要求事業「新たな学際領域を生み出す異分野融合研究拠点をコアにした若手研究者育成」を共同申請いたしました。物質科学と生命医科学は北大の研究力が強い分野であり、それぞれの分野を担う両研究所が連携することで、北大の研究力向上に資するものです。特に、医療保健業界と活発に共同研究を展開する遺伝子病制御研究所に、本所のナノフォトニクス・数理科学・イメージング分野の研究力を導入して研究基盤の拡大を狙うものです。また、ニコンとも新しい形の共同研究契約を締結することができ、新型共焦点顕微鏡の設置も叶いました。現在は、所長がセンター長を兼務していますが、新任教授を迎えたのちに順次引き継ぐ予定です。根本教授は、転出後に客員教授として本センターの顧問になり、共創研究支援部長の松尾教授とともにニコンイメージングセンターの運営に携わっていただけることになりました。

以上の複合領域ナノサイエンス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。技術部の業務をより円滑にかつ効果的に進められるように、技術職

員との話し合いを通じて組織の再編を行い、2 班 4 グループ体制へと変更し、各班に監督教員と技術職員コーディネータを配しました。

平成 30 年度に技術部機械工作室の作業料金を適正化（引き上げ）し、科研費等外部資金での支払いもできるように（所内のみ）したことにより、利用料金収入が増加しました。新設したシステム班も、業務を受ける体制を整え利用料金を得られるようになりました。一方、主に技術職員（他に事務職員も含む）向けの「組織力アップ研修（組織を活性化させるための手法をロールプレイングで学び、PDCA サイクルを実践する研修）」を外部講師を招聘して実施しました。技術職員の活躍の場を広げるべく、専門技術研修と一般研修をさらに充実させていく予定です。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。

令和元年度で 20 回目となる電子研-北大国際シンポジウムは、テーマ「稀」を掲げ、ノーベル賞受賞者 Stoddart 教授をメインスピーカーに迎えて実施されました。国内外の著名な研究者による招待講演、所内・学内から 110 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 5 年目を迎え、平成 30 年度の公開シンポジウム「数理連携の現状と未来」（鈴木章ホール）に続いて、国内数理科学拠点と合同でシンポジウムを開催しました。理学部数学科での連携講義も 4 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、部局横断シンポジウム「計算科学が拓く汎分野研究」を開催しました。

平成 31 年度から、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～R5 年度）（日本側コーディネータ雲林院宏教授）を開始しました。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。

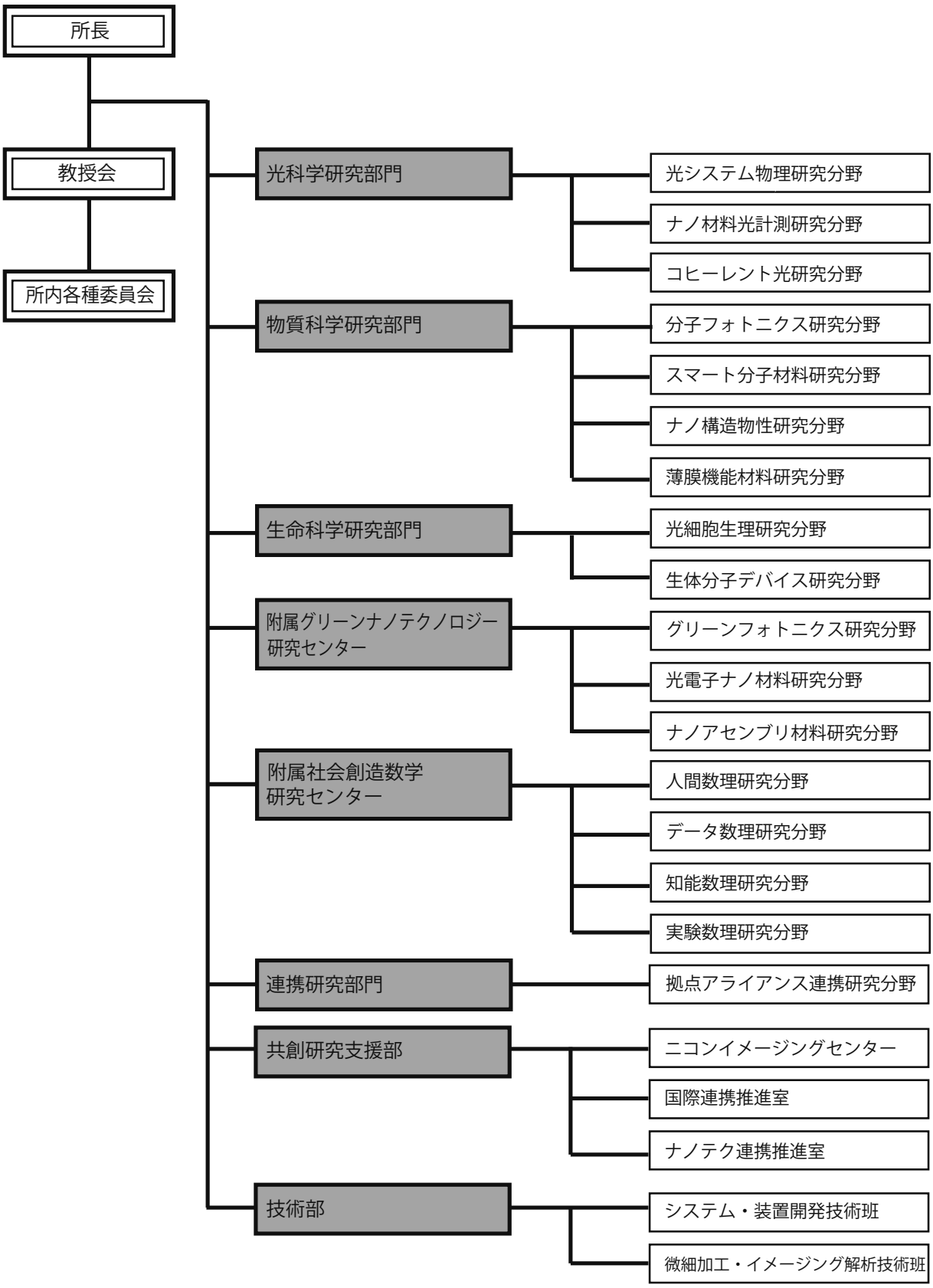
科学研究費補助金等外部資金の獲得は、概ね昨年並みで堅調でした。その中には、科学研究費補助金特別推進研究や JST の CREST など、卓越した成果がありました。また、若手向けの JST さきがけ研究もありました。

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・国内から迎え入れることにより、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には千数百名の来場者を迎え、その盛況ぶりが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 21 名のうち 4 名が電子研)。さらに、平成 30 年度から始めた読売新聞との連携講座（中高生向けの体験型科学講座）は、創成研究機構と読売新聞との連携講座（札幌市教育委員会後援）に拡大し、2 回実施（夏に人獣共通感染症リサーチセンター主催、冬に情報基盤センター主催）しました。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。

令和 2 年 1 月には、新型コロナ感染症が発生し、その後、世界的な大流行となり、政府や自治体指導のもとかつてない感染防止対策が呼びかけられ、社会活動が大きく制限されました。本学においても、期末試験や入学試験の変更が余儀なくされましたし、極力在宅勤務をすることになり、研究活動も最小限に抑制されました。コロナ禍の社会状況は、今後もしばらく続き、大学の研究教育のあり方も、大きく見直されるようになりました。本所も、それを受けて、新しいあり方を検討していく必要があります。関係各位のご指導ご鞭撻を引き続き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

巻頭言
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…… 9
コヒーレント光研究分野…… 14
物質科学研究部門
分子フォトニクス研究分野…… 20
スマート分子材料研究分野…… 25
ナノ構造物性研究分野…… 33
薄膜機能材料研究分野…… 40
生命科学研究部門
光細胞生理研究分野…… 54
生体分子デバイス研究分野…… 59
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…… 66
光電子ナノ材料研究分野…… 75
ナノアセンブリ材料研究分野…… 80
附属社会創造数学研究センター
人間数理研究分野…… 90
データ数理研究分野…… 101
知能数理研究分野…… 111
共創研究支援部
ニコンイメージングセンター…… 118
国際連携推進室…… 123
ナノテク連携推進室…… 125

Ⅱ．各種データ
Ⅱ－１．　研究成果公表に関する各種の統計表…… 130
Ⅱ－２．　予算…… 132
Ⅱ－３．　外国人研究者の受入状況…… 133
Ⅱ－４．　修士学位及び博士学位の取得状況…… 135

Ⅲ．研究支援体制
Ⅲ－１．　技術部…… 138
Ⅲ－２．　学術情報…… 139

Ⅳ．資料
Ⅳ－１．　沿革…… 142
Ⅳ－２．　建物…… 145
Ⅳ－３．　現員…… 145
Ⅳ－４．　教員の異動状況…… 146
Ⅳ－５．　構成員…… 147

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　　田口敦清（阪大院、工博、2019.4～）
助　教　　Christophe Pin（University of Bourgogne Franche-Comte、PhD、2016.10～）
助　教　　瀬戸浦健仁（阪大院、工博、2018.12～2020.3）
その他のメンバー
修士課程　相川大貴、喜多信介、北嶋大暉、佐藤一生、藤川聖也、大塚涼平、砂場侑司、西川洋平

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)　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と選別

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必要がある。特に、サイズが小さなナノ粒子や分子に対しては、光圧の作用も小さくなり、ブラウン運動による拡散の効果に対抗するのが難しくなる。我々は、テーパーガラスキャピラリーを用いることで拡散の効果を低減し､ナノ粒子に働く fN オーダーの極めて微弱な光圧を観察することに成功した。

本研究では､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い、キャピラリーの内径をマイクロ～ナノサイズまで細くすることができた。このキャピラリーの内部に粒径が100 nm 程度の蛍光ナノダイヤモンド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（波長532 nm）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1)。

試料に用いたナノダイヤモンドは大きさがばらついている。大きいナノダイヤモンドの場合には光圧によって光の伝搬方向と同じ向きにナノダイヤモンドが移動する。ナノダイヤモンド粒子にかかる光圧の大きさを見積もったところ、数 fN と極めて微弱な力であることが分かった。一方、サイズが小さいナノダイヤモンドに対しては、光圧はさらに小さくなり、水の流れに従って光圧と反対方向に移動する様子が観察された。

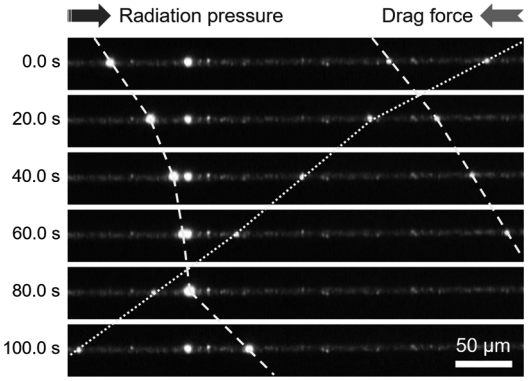


図１　テーパーガラスキャピラリー内を移動するナノダイアモンド粒子の蛍光像のタイムラプス画像。光の入射方向は図の左手から右手に向かう方向。サイズの大きな粒子に対しては光圧の作用により、右手方向に移動するのが分かる。一方、サイズに小さな粒子に対しては光圧の力は弱く、キャピラリー内の液体の流れを受け手右から左に流れている。

(b)　光ピンセットとプラズモニックナノ構造を用いたナノダイヤモンドの光捕捉と吸着

光圧を用いたナノ粒子操作を応用し、プラズモニックナノアンテナにナノ粒子を直接吸着させる実験を行った。ボウタイアンテナの中心に比較的強いパワーのレーザーを集光することで､アンテナのギャップ部分に色素分子が凝集し、レーザーを切った後も凝集した色素がそのまま付着することを観察した。この現象はある種の光プリンティング法として活用できる。そこで、今回はその技術を使用して１００nmの蛍光ナノダイアモンドをアンテナギャップ部に吸

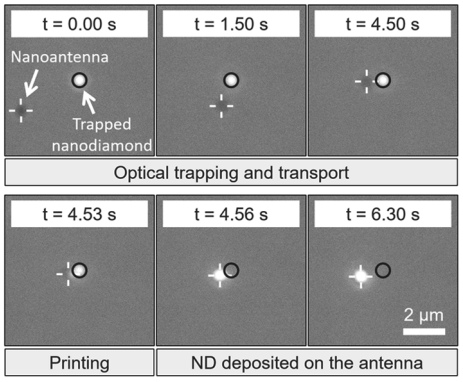


図 2　光捕捉されたナノダイヤモンドがナノボウタイアンテナに輸送され吸着する様子を示す一連の光学顕微鏡画像。吸着後は捕捉レーザーを切った後（t>4.56 s）もナノダイヤモンド粒子はアンテナの位置に留まり続けていることから、吸着されたと推測される。

着させ堆積を試みた。図２に示すように、ナノダイアモンド粒子を光捕捉し、金プラズモニックナノ構造の近くまでにレーザー輸送し、プラズモンの勾配力を用いてナノダイアモンドがナノ構造の表面に吸着することを確認した。この技術は様々な材料をボトムアップでナノ構造化することに使えると期待される。

(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

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。

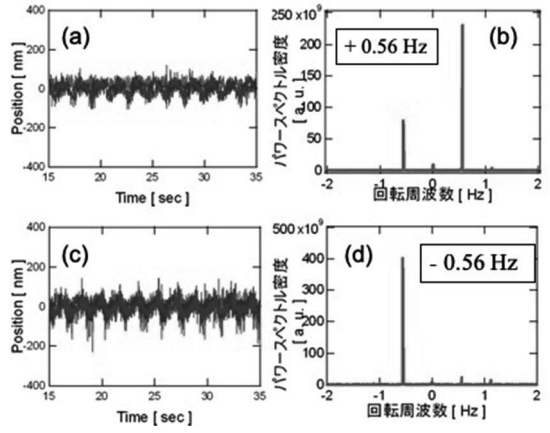


図 3 金ナノ三量体構造を用いたダイヤモンドナノ粒子の軌道回転運動．(a, b)右回転、および、(c, d)左回転直線偏光入射時のナノ粒子中心位置の経時変化と回転周波数のパワースペクトル．

さらに、回転運動だけでなくリニア運動を誘起することができれば、運動の自由度が広がり、ナノ物質輸送の応用が広がると期待される。そこで、リニア運動を含む様々な運動の自由度を実現するナノ構造の設計にも着手している。その手法として、計算機による逆設計手法を検討し、アルゴリズム構築を進めている。

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った。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） C. L. Pin, G. Takahashi, S. Fujikawa, K. Sudo, T. Fukaminato and K. Sasaki: “Optical trapping of nanoparticles using dimer and trimer plasmonic nanogap antennas”, Proc. SPIE , 11141(1114101): 84-86 (2019)

２） C. L. Pin, R. Otsuka, H. Fujiwara and K. Sasaki: “Optical propulsion of fluorescent diamonds inside a tapered capillary”, Proc. SPIE , 11141(1114101): 46-48 (2019)

３） K. Setoura, T. Tsuji, S. Ito, S. Kawano and H. Miyasaka: “Opto-thermophoretic separation and trapping of plasmonic nanoparticles”, Nanoscale, RSC Publishing (2019)

４） C. L. Pin, R. Otsuka, H. Fujiwara and K. Sasaki: “Optical transport of fluorescent diamond particles inside a tapered capillary ”, EPJ Web of Conferences, 215: 16002/1-16002/3 (2019)

５） H. Fujiwara, T. Suzuki, C. L. Pin and K. Sasaki: “Localized ZnO Growth on a Gold Nanoantenna by Plasmon-Assisted Hydrothermal Synthesis”, Nano Lett., 20(1): 389-394 (2020)

６） C. L. Pin, R. Otsuka and K. Sasaki: “Optical Transport and Sorting of Fluorescent Nanodiamonds inside a Tapered Glass Capillary: Optical Sorting of Nanomaterials at the Femtonewton Scale”, ACS Appl. Nano Mater. (2020)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） 藤原 英樹、クリストフパン、笹木 敬司: 「プラズモン場を用いたナノ粒子操作」、光アライアンス、30(7): 51-54 (2019)

2） 田口 敦清: 「深紫外領域のプラズモニクスとラマン顕微鏡」、光学、48(9): 360-366 (2019)

3） 笹木 敬司: 「ナノ粒子の光マニピュレーション」、電子情報通信学会誌、102(10): 952-956 (2019)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） K. Sasaki*, H. Kitajima and K. Sakai : “Interference of Multipolar Lattice Resonances in Plasmonic Crystal Excited by Structured Light”, The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019), Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal (2019-07)

2） K. Sasaki* : “Poynting Vector Analysis of Multipolar Plasmonic Fields”, SPIE Optics + Photonics, Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVII, San Diego Convention Center, San Diego, United States of America (the) (2019-08)

3） K. Sasaki* : “Rotational Manipulation of Nanoparticles Using Plasmonic Nano-Vortex Fields”, SPIE Optics + Photonics Optical Trapping and Optical Micromanipulation XVI, San Diego Convention Center, San Diego, United States of America (2019-08)

4） A. Taguchi* : “Taming DUV Raman microscopy with plasmonic metals”, SciX2019, Palm Springs Convention Center, Palm Springs, California, United States of America (2019-10)

5） K. Sasaki* : “Optical manipulation based on linear and angular momenta of nanogap plasmon ”, SPIE Photonics Asia: Plasmonics IV, Hangzhou International Expo Center, Hangzhou, China, China (2019-10)

6） A. Taguchi* : “Enhancing DUV Raman Sensing and Imaging with Surface Plasmons”, SciX2019, Palm Springs Convention Center, Palm Springs, California, United States of America (2019-10)

b．招待講演（国内学会）

該当なし

c．一般講演（国際学会）

1） C. L. Pin*, G. Takahashi, S. Fujikawa, K. Sudo, T. Fukaminato and K. Sasaki : “Optical trapping of nanoparticles using dimer and trimer plasmonic nanogap antennas”, 6th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2019), Pacifico Yokohama, Japan (2019-04)

2） C. L. Pin*, R. Otsuka, H. Fujiwara and K. Sasaki : “Optical propulsion of fluorescent diamonds inside a tapered capillary”, 6th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2019), Pacifico Yokohama, Japan (2019-04)

3） C. L. Pin*, R. Otsuka, H. Fujiwara and K. Sasaki : “Optical transport of fluorescent diamond particles inside a tapered capillary”, World of Photonics Congress, 5th Conference on Optofluidics, ICM - International Congress Center, Munich, Germany (2019-06)

4） A. Taguchi, A. Nakayama*, S. Kawata and K. Fujita : “Nonlinear DUV lithography for 3D nano fabrication”, Nonlinear DUV lithography for 3D nano fabrication, San Diego Convention Center, San Diego, United States of America (2019-08)

5） C. L. Pin*, H. Fujiwara, T. Suzuki and K. Sasaki : “Localized growth of ZnO on gold nano-antennas for nanophotonic applications”, 4th A3 Metamaterials Forum 2019, Hokkaido University, Sapporo, Japan (2019-08)

6） A. Taguchi* : “Plasmonics in deep UV: materials and applications”, SPIE.COS Photonics Asia, Hangzhou International Expo Center, Hangzhou, China (2019-10)

7） C. L. Pin*, R. Otsuka and K. Sasaki : “Optical transport of fluorescent diamond nanoparticles inside a tapered glass capillary”, The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019), Ikuta Shrine Hall, Kobe, Japan (2019-11)

8） C. L. Pin*, R. Otsuka and K. Sasaki : “Optical transport of fluorescent nanodiamonds inside a tapered glass capillary”, 2019 International Symposium of RIES, Hokkaido University & CEFMS, National Chiao Tung University, Hokkaido University, Japan (2019-12)

d.一般講演（国内学会）

1） 田口 敦清、齋藤 広大*、河田 聡 : 「先端ラマン増強と原子間力の同時計測：周波数変調 AFM の実装と応用」、2019 年日本分光学会年次講演会、京都大学化学研究所, 宇治、Japan (2019-05)

2） K. Setoura*, T. TSUJI, S. ITO, S. KAWANO and H. MIYASAKA : “Thermophoresis-assisted optical trapping of single gold nanoshells”, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学, Japan (2019-09)

3） 大塚 涼平*、クリストフ パン、笹木 敬司 : 「テーパーキャピラリーを用いた光圧ナノ粒子操作」、2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、Japan (2019-09)

4） 喜多 信介*、瀬戸浦 健仁、チェン アン-ジェ、杉山 輝樹、笹木 敬司 : 「円偏光局在場を用いたキラル結晶化のエナンチオ制御」、第５５回応用物理学会北海道支部／第１６回日本光学会北海道支部合同学術講演会 、北海道大学、Japan (2020-01)

5） 佐藤 一生*、田口 敦清、笹木 敬司 : 「逆電磁場計算を利用したプラズモニックナノ構造の設計と最適化」、第５５回応用物理学会北海道支部／第１６回日本光学会北海道支部合同学術講演会、北海道大学、Japan (2020-01)

6） 藤川 聖也*、クリストフパン、笹木 敬司 : 「ナノ構造を用いたナノ粒子の光捕捉と二光子蛍光特性評価 」、第５５回 応用物理学会北海道支部／第１６ 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会、北海道大学、Japan (2020-01)

7） C. L. Pin*, S. Fujikawa and K. Sasaki : “Design of plasmonic antennas with double nano-gap resonance”, 2020 年第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 四谷キャンパス, Japan (2020-03)

8） 佐藤 一生*、田口 敦清、笹木 敬司 : 「ナノ粒子の光圧操作に向けたナノ構造の逆設計の提案」、2020 年第 67 回応用物理学会春季学術講演会、上智大学 四谷キャンパス、Japan (2020-03)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 田口 敦清*：「紫外プラズモニクスとその光圧研究への展開」、新学術領域研究「光圧ナノ物質操作」第4回領域会議、北海道大学学術交流会館，札幌、Japan (2019-05)

2） 笹木 敬司*：「光ピンセットが拓く新しいナノ科学の世界」、ナレッジキャピタル超学校、グランフロント大阪、Japan (2019-05)

3） K. Sasaki*: "Selective Trapping and Transport of Nanoparticles using Optical Forces", The 7th International Symposium on Organic and InorganicMaterials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2019) , Shinshu University, Nagano, Japan (2019-06)

4） 笹木 敬司*：「局在プラズモンがつくるナノスケール円偏光場と光渦場」、第16回プラズモニック化学シンポジウム、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス、Japan (2019-06)

5） C. L. Pin* and K. Sasaki : "Optical manipulation of nanoparticles using plasmonic antennas and glass capillaries", Invited seminar, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, French Guiana (2019-07)

6） 笹木 敬司*:「光のピンセット」、第36回物理教育研究大会 特別講演、北星学園大学、Japan (2019-08)

7） K. Sasaki* : "Nano-Sized Whispering-Gallery-Mode Plasmonic Cavities", The International Workshop on Ultrafast Micro/Nano Photonics and Photochemistry, Hokkaido University, Japan (2019-08)

8） 田口 敦清*:「添加剤不要の二光子光重合：マイクロ３D造形の新機軸！」、イノベーションジャパン2019～大学見本市&ビジネスマッチング～、東京ビッグサイト，有明、Japan (2019-08)

9） 田口 敦清*:「深紫外プラズモニクスとラマン分光」、日本分光学会・第55回夏期セミナー、幕張メッセ，千葉、Japan (2019-09)

１０）田口 敦清*：「紫外光ラマン計測技術に関する最新技術開発動向」、精密工学将来構想研究会、ホテル阪急エキスポパーク、Japan (2019-09)

１１）瀬戸浦 健仁*、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微粒子の光マニピュレーション」、OCU先端光科学シンポジウムーナノフォトニクスが切り拓く分子運動・化学反応制御の探求ー、大阪市立大学杉本キャンパス、Japan (2019-10)

１２）笹木 敬司*：「光の力：どんな役に立つんだか？」、さきがけ量子生体第5回領域会議、札幌コンベンションセンター、Japan (2019-11)

１３）K. Setoura*, H. Aikawa, H. Fujiwara and K. Sasaki : "Shaping Poynting vectors for optical manipulation of nanoparticles", The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019), Ikuta Shrine Hall, Kobe, Japan (2019-11)

１４）K. Sasaki*: "Linear and Angular Momentum Transfer In Nano- Scale Fields", The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019) , Ikuta Shrine Hall, Kobe, Japan (2019-11)

１５）田口 敦清*：「深紫外ラマン顕微鏡を用いた材料観察:その現在と未来」、ダイナミック・アライアンス G1グループ分科会、札幌、Japan (2019-11)

１６）田口 敦清*：「紫外領域の計測加工技術の新たな潮流」、P3フォーラム、中村屋旅館，札幌、Japan (2019-11)

１７）H. Aikawa*, K. Setoura, H. Fujiwara and K. Sasaki : "Spatial shaping of Poynting vectors for optical nanomanipulation", The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Japan (2019-12)

１８）K. Setoura*, Y. Kitamura, Y. Nishikawa and K. Sasaki : "Plasmonic optical trapping of molecular nano-aggregates", 2019 International Symposium of RIES, Hokkaido University & CEFMS, National Chiao Tung University , Hokkaido University, Japan (2019-12)

１９）A. Taguchi*："Plasmonics in deep UV for nanoimaging and spectroscopy", International Symposium of RIES (Hokudai) and CEFMS (NCTU), Sapporo, Japan (2019-12)

２０）田口 敦清*：「紫外プラズモニクスとその光圧研究への展開」、新学術領域研究「光圧ナノ物質操作」公開シンポジウム、大阪大学豊中キャンパス、Japan (2020-01)

２１）田口 敦清*：「分子イメージングにおける紫外光の可能性」、第19回 OMIC 事業推進セミナー、岡山大学鹿田キャンパス、Japan (2020-01)

２２）田口 敦清*：「深紫外ラマン顕微鏡の現在と未来」、2019 年度日本分光学会北海道支部シンポジウム、北海道大学、Japan (2020-03)

4.7 シンポジウムの開催

1） A. Taguchi : "SPIE Optics & Photonics, UV and Higher Energy Photonics: From Materials to Applications", San Diego Convention Center, San Diego (San Diego United States of America) (2019 年 08 月 11 日～2019 年 08 月 15 日)

4.8 共同研究

a．所内共同研究

該当なし

b．民間等との共同研究

該当なし

c．委託研究

1） 田口 敦清(北海道大学情報基盤センター)：「GPUアクセラレーターを活用した高速逆計算によるナノフォトニックデバイスの設計」、2019年度、ナノフォトニック構造の設計手法に関する研究を情報基盤センターとの共同研究により行う。

d．国際共同研究

1） 笹木敬司（台湾交通大学）杉山輝樹

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、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

2） 田口 敦清、基盤研究 C、ナノスケール深紫外吸収分光顕微鏡の開発、2017～2019 年度

3） 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

4） 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

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 笹木敬司(JSPS)、光工学および光量子科学関連分野に関する学術研究動向、2017～2019 年度

2） 瀬戸浦建仁(京都大学)、光ピンセット系の構築と熱源となる試料の選定、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） 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)

2） 田口 敦清 : 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 04 月 01 日～現在)

3） 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)

4） 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)

5） 笹木 敬司 : 日本学術会議連携会員 (2017 年 10 月 02 日～2023 年 09 月 30 日)

6） 笹木 敬司 : 日本学術会議 ICO(International Comission for Optics)分科会委員 (2017 年 11 月 24 日～2023 年 09 月 30 日)

7） 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)

8） 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)

b．国内外の学会の役職

1） 田口 敦清 : 日本分光学会紫外フロンティア分光部会・幹事 (2018年02月24日～現在)

2） 田口 敦清 : SPIE Optics & Photonics: UV and Higher Energy Photonics, Chair (2018年09月01日～現在)

3） 田口 敦清 : SPIE.COS Photonics Asia, Program Committee (2019年04月01日～現在)

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～2021 年 03 月 31 日)

d．外国人研究者の招聘

1） Cheng Anchieh、Taiwan (Province of China)、(2019 年 09 月 02 日～2019 年 10 月 01 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、情報エレクトロニクス特別研究第一、笹木 敬司、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

2） 工学部、光工学、笹木 敬司、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

3） 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、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

4） 全学共通、令和元年度全学教育科目、笹木 敬司、2019 年 05 月 31 日

5） 情報科学研究科、光情報システム学特論、笹木 敬司、田口 敦清、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

6） 工学部、電気電子工学実験基礎、瀬戸浦 健仁、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

7） 工学部、電気電子工学実験Ⅳ、瀬戸浦 健仁、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

8） 工学部、電気電子工学実験Ⅴ、田口 敦清、瀬戸浦 健仁、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

9） 全学共通、物理学 II、田口 敦清、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

１０) 工学部、電磁気学、田口 敦清、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

１１) 情報科学研究科、電子情報工学演習Ⅱ、笹木 敬司、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 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：5人

1） 相川 大貴 : 情報科学研究科 、修士 (情報科学)、 ナノ粒子光操作に向けたポインティングベクトル場の制御と可視化

2） 喜多 信介 : 情報科学研究科 、修士 (情報科学)、 円偏光プラズモン場を用いたキラル結晶化の制御と解析

3） 北嶋 大暉 : 情報科学研究科 、修士 (情報科学)、 金属ナノ多量体を用いた多重極子遷移に関する研究

4） 佐藤 一生 : 情報科学研究科 、 修士 (情報科学)、ナノ粒子光操作のためのナノ構造探索手法

5） 藤川 聖也 : 情報科学研究科 、修士 (情報科学)、 プラズモニックナノ構造を用いたナノ粒子の光捕捉と二光子蛍光測定

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, Wen Han, Tian Ya, Feng Guillin
修士課程　小谷伊吹、明石大輝、石田拓都、杉岡祥治、中尾佑輔、村杉拓、Li Jiangrao
学部生　　石川紘人、小川達哉、小島悠、北川泰成、 島田航、斎藤浩哉、長橋篤志、本田勇輝、山口大輔

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

化学合成によって得られた銀ナノワイヤー（AgNW）は高い電子、熱伝導率を持つ事や、可視光においてプラズモン活性で高効率なプラズモン導波路効果など、その特異な物理的及び光学的特性から高い注目を集めている[1]。これまで我々は、リモート励起表面増強ラマン散乱分光[2,3]やリモート励起単一分子蛍光分光[4]など、AgNWプラズモニック導波路効果を用いた新たな分光手法を開発してきた。近年、これらの分光法を線形光学から非線形光学へと拡張し、AgNW上でのリモート励起第2次高調波発生（SHG）、多光子励起を実現した[5]。

非線形光学現象を効率よく発生させるために、先端の尖った新たなAgNWの合成法を改良した。AgNWは、広く用いられるポリオール法を用いて容易に合成される。具体的には、エチレングリコールを溶媒・還元剤として用い、polyvinylpyrrolidone (PVP)を保護剤としながら、銀イオンを還元することで直径100 ~ 200 nm、長さ5 ~ 数十 um程度のAgNWが得られる。これは、保護剤であるPVPがAgNWのボディーである{100}面に強く吸着し、先端の{111}面には弱く吸着するため、長軸方向に選択的に成長するためにワイヤーが得られる。[Y. G. Sun, B. Mayers, T. Herricks and Y. N. Xia, Nano Lett., 2003, 3,955-960.]

我々は、この合成溶液に、純水を少量加えることにより、AgNWの先端形状が変化することを見出した。図1aは、通常の方法で合成したAgNW、1bは水を0.2wt%加えて合成したAgNWのSEM像である。水を加えるだけで、AgNWの先端がシャープになることが明らかとなった。

AgNWポリオール反応の初期段階では、Ag^+の濃度が高く、アセトアルデヒドの生成が還元の律速となる。この反応系に少量の水が加わると、反応（１）の平衡が左にシフトし、アセトアルデヒドの生成が抑えられる。そのため、銀イオンの還元速度が遅くなる。確かに、誘導結合プラズマ発光分析によると、反応開始後８分で、水0.4 wt% (2.3 wt%)存在下で、91.6% （87.9%）の銀イオンが還元されており、水が存在しない条件では94%が還元されていたことから、完全速度が水の存在により低くなっていることが明らかとなった。

$$CH_2OH\text{–}CH_2OH \leftrightarrows CH_3CHO + H_2O \qquad (1)$$

$$2Ag^+ + 2CH_3CHO \leftrightarrows 2Ag^0 + CH_3COCOCH_3 + 2H^+ \qquad (2)$$

反応の初期段階では、多重双晶粒子（MTP）の結合四面体の境界にある双晶欠陥に、還元された銀原子の堆積する。これらの境界が銀原子で満たされた後、四面体のファセットの表面エネルギーが高くなるため、還元された銀原子のMTPへの被覆が始まり、AgNWが縦方向に成長する。一方、反応が空気中で進行する限り、酸素によるMTPの連続エッチングも発生する。反応混合物に水を添加すると、Ag +からAg原子への還元速度がMTPの酸素によるエッチング速度よりも遅くなることが予想され、最終形態に大きな影響を与える可能性が考えられる。そのため、適切な量の水がシャープなエンドモルフォロジーの形成につながる可能性が高い。一方、0.8%（v / v）を超える過剰な水を加えると還元率が非常に低くなるため、さまざまな最終形態を持つより短いAgNW（数um）が増加し、AgNWの本体全体がエッチングされ、質の低いAgNWが得られる。このように、還元速度の低減と酸素による先端でエッチングとのバランスを制御することで、AgNW先端形状制御が可能であることが明らかとなった。

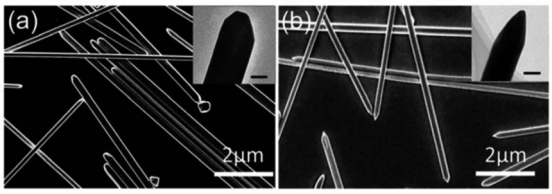


図 1 SEM images of AgNWs synthesized in pure EG (a) and in EG containing 0.2% (v/v) of H2O (b). The insets show TEM images of the nanowire end (scale bar in the insets is 50 nm).

非線形光学現象を用いた新たな顕微分光法開発のため、AgNW の先端形のSHG 特性への依存性を調べた。AgNW は優れたプラズモニック導波路として機能していることから、SHGのリモート励起の可能性を検討した。本実験では、AgNW の尖端の一方に fs レーザーを集光し（図 2a の「in」）、他端のアウトカップリング光をモニターした（図 2a の「out」）。図 2a に示すように、左端に fs レーザーを照射すると、ナノワイヤの右端の頂点にSHGが観察された。スペクトル測定の結果、SHG は端部では検出されたが、NW

の中央部では検出されなかった。また、410 nm の光は AgNW に沿ってほとんど伝搬しないことから、820 nm の SPP が伝搬して遠位端に SHG を誘起した可能性が高い。

先端形状依存性を調べるため、SHG の point spread function (PSF)の全幅半値幅を、先鋭化された AgNW と通常の AgNW(先端形状は台形)において比較したところ、先鋭化された先端では~216 nm、台形先端では~275 nm 程度と明らかな違いが観測された（図２b)。このことは、先鋭化された先端では LSPR が狭い領域に限定されていることを示しており、台形先端のものと比較して、シャープ NW の端ではより高い電磁場強調があることを示している。有限差分時間領域法（FDTD）を用いて、鋭利な AgNW 端での局所的な表面プラズモン共鳴を数値的に計算した。実験を模倣するために、820 nm の光を AgNW 端の一方に集光し、遠位端の電磁場をモニターした。シミュレーションによると、端部に局在する電磁場の大きさは１０ｎｍ以下と推定されるので、SHG はナノスケールで発生していると考えられる。

近接場超解像顕微鏡に応用する際には、ナノワイヤの端から SHG を放出するポインティングベクトルが重要な役割を果たす。放出された SHG は AgNW の長軸に平行な偏光を示す。しかし、このような偏光測定では、遠方散乱の方向に関する情報は得られない。そこで、PSF パターンの発光の角度分布を反映したデフォーカス像を解析した。図２c に示すように、デフォーカス像は、1 つのローブが他のローブよりも明るい 2 つのローブパターンを示している。この非対称な 2 ローブのデフォーカスパターンは、SHG が長軸に沿って AgNW の外側に向かって放射していることを示唆している。このことを確認するために、鋭い AgNW の端からの光の放射の遠方視野投影を FDTD シミュレーションから計算したところ、ポインティングベクトルは長軸から±15 度以内に一方向に伝播していることが明らかになった（図２d)。すなわち、図２d に模式的に示されているように、SHG は 30° のコーン角内に SHG は AgNW の端から far field に放出しているとかんがえられる。

３．今後の研究の展望

ポリオール合成に少量の水を加えるのみで、AgNW先端形状の制御法を新たに開発した。合成時の溶媒中の水分量がAgNWの端部形状を制御する鍵となることがわかった。反応液中の水の量や水を注入するタイミングを変えることで、末端形状を制御することができる。適切な水の量（0.2～0.4%（v/v））と適切な反応時間（1時間）により、90%以上の収率でシャープな末端形状を持つ鉛筆状のAgNWを得ることがきた。鋭利ナノワイヤーに対する非線形光学効果(SHG)を調べたところ、SHGはAgNW上を伝搬するプラズモンを介してリモート励起を用いて遠隔で発生でき、その発生領域はナノメートルスケールに局在しうることが示唆された。ナノワイヤ端から放出されたSHGは、AgNWの長軸に沿って一方向のポインティングベクトルを示すことから、シャープエンドAgNWが超解像非線形光学顕微鏡や分光などの非線形プラズモン応用に適していることを示唆している。今後の展望としては、このリモート励起非線形光学現象を用いた超空間分解能を有する近接場顕微鏡の開発を行い、例えばoptical DNA/RNA mappingなどへの応用につなげていく。

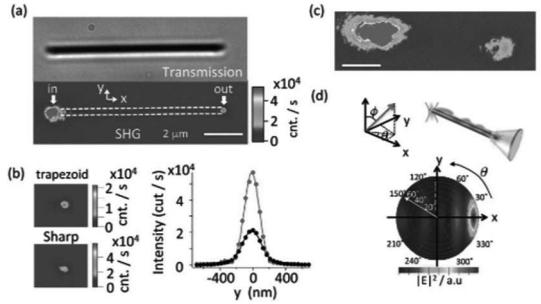


図２ (a) Remote excitation of SHG on a sharp-end AgNW. Although an 820 nm fs laser was focused at the left end of the nanowire, a strong SHG signal was observed at the right end. The white dashed lines are eye guides to indicate the nanowire position. (b) The FWHM of SHG at the out-coupling end of trapezoid (black) and sharp (red), respectively. (c) Defocused image of SHG. (d) Numerically calculated far-field projec- tion of fan-out from the right end.

References

[1] X. Xiong, C. L. Zou, X. F. Ren, A. P. Liu, Y. X. Ye, F.W. Sun, G. C. Guo, Laser Photonics Rev. 2013, 7, 901.

[2] J. A. Hutchison, S. P. Centeno, H. Odaka, H. Fukumura, J. Hofens, H. Uji-i, Nano Lett., 2009, 9, 995-1001.

[3] G. Lu, H. D. Keersmaecker, L. Su, B. Kenens, S. Rocha, E. Fron, C. Chen, P. V. Dorpe, H. Mizuno, J. Hofkens, J. A. Hutchison, H. Uji-I, Adv. Mater. 2014, 26, 5124.

[4] L. Su, G. Lu, B. Kenens, S. Rocha, E. Fron, H. Yuan, C. Chen, P. Van Dorpe, M. B.J. Roeffaers, H. Mizuno, J. Hofkens, J. A. Hutchison, H. Uji-i, Nat. Commun., 2015, 6, 1-9.

[5] T. Inose, S. Toyouchi, G. Lu, K. Umemoto, Y. Tezuka, B. Lyu, A. Masuhara, E. Fron, Y. Fujita, K. Hirai, H. Uji-i, Chem. Common., 2019, 55, 11630-11633.

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1) Shuichi Toyouchi, Mathias Wolf, Yusuke Nakao, Yasuhiko Fujita, Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Kenji Hirai, Johan Hofkens, Steven De Feyter, James Hutchison, Hiroshi Uji-i, ‘Controlled Fabrication of Optical Signal Input/Output Sites on Plasmonic Nanowires, Nano Letters, 2020, 20, 2460-2467.

2) Kenji Hirai, Rie Takeda, James A. Hutchison, Hiroshi Uji-i, ‘Modulation of Prins Cyclization by Vibrational Strong

Coupling, Angew. Chem. Int. Ed. 2020, 59, 5332–5335.

3) Hans Van Gorp, Peter Walke, Joan Teyssandier, Brandon E. Hirsch, Hiroshi Uji-i, Kazukuni Tahara, Yoshito Tobe, Mark Van der Auweraer, Steven De Feyter, 'On the Thermal Stability of Aryl Groups Chemisorbed on Graphite', J. Phys. Chem. C 2020, 124, 1980−1990.

4) Masaki Takeda, Masaaki Yokoyama, Kazuki Umemoto, Bozhang Lyu, Yoshihito Takahashi, Sasiphapa Rodbuntum, Junya Enomoto, Keitaro Tozawa, Tomohiro Nohara, Keisuke Tabata, Ryota Sato, Takayuki Chiba, Satoshi Asakura, Hiroshi Uji-i, Akito Masuhara, 'Synthesis of highly luminescent $CH_3NH_3PbBr_3$ perovskite nanocrystals via a forced thin film reactor', Jpn. J. Appl. Phys.2020, 59, Number SI

5) Tomoko Inose, Shuichi Toyouchi, Gang Lu, Kazuki Umemoto, Yuki Tezuka, Bozhang Lyu, Akito Masuhara, Eduard Fron, Yasuhiko Fujita, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, 'Water-Mediated Polyol Synthesis of Pencil-like Sharp Silver Nanowires Suitable for Nonlinear Plasmonics', Chem. Common. 2019, 55, 11630-11633.

6) Matteo Boretto, Nina Maenhoudt, Xinlong Luo, Aurélie Hennes, Bram Boeckx, Bich Bui, Ruben Heremans, Lisa Perneel, Hiroto Kobayashi, Indra Van Zundert, Hilde Brems, Benoit Cox, Marc Ferrante, Hiroshi Uji-i, Kian Peng Koh, Thomas D'Hooghe, Arne Vanhie, Ignace Vergote, Christel Meuleman, Carla Tomassetti, Diether Lambrechts, Joris Vriens, Dirk Timmerman, Hugo Vankelecom, 'Patient-derived organoids from endometrial disease capture clinical heterogeneity and are amenable to drug screening', Nature Cell Biology, 2019, 21, 1041

7) Thanh Hai Phan, Hans Van Gorp, Zhi Li, Thi Mien Trung Huynh, Yasuhiko Fujita, Lander Verstraete, Samuel Eyley, Wim Thielemans, Hiroshi Uji-i, Brandon E. Hirsch, Stijn F. L. Mertens, John Greenwood, Oleksandr Ivasenko, Steven De Feyter, 'Graphite and Graphene Fairy Circles: A Bottom-Up Approach for the Formation of Nanocorrals', ACS Nano, 2019, 13, 5559-5571.

8) 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, 2019, 542, 207-212

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1) 豊内秀一，猪瀬朋子，平井健二，雲林院宏，プラズモン導波路を用いた単一細胞解析と操作，月間「細胞」，ニューサイエンス社, 2020 年 2 月号, 51-54

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) 該当なし

b．招待講演（国内学会）

1) "Synthesis of pencil-like silver nanowires through water-mediated polyol process and its applications in nonlinear plasmonics", Tomoko Inose, Shuichi Toyouchi, Akito Masuhara, Yasuhiko Fujita, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, Sep., 20, 2019.

2) "生きた細胞内の分子間相互作用を光で観測", 猪瀬朋子, Fortuni Beatrice, Ricci Monica, 平井健二, Rocha Susana, 雲林院 宏, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, Sep., 20, 2019.

3) "リモート励起単一細胞内表面増強ラマン検出", 猪瀬朋子, Fortuni Beatrice, Ricci Monica, 小谷伊吹, 豊内秀一, 猪瀬朋子, 平井健二, 雲林院宏, 2019 年日本表面真空学会学術講演会, Oct., 28, 2019.

4) "Vacuum Rabi Splitting in Molecular Chemistry: Modulation of Organic Reactions and Selective Crystallization of Metal-Organic Frameworks", Kenji Hirai, 日本化学会第 100 春季年会(2020), March, 24, 2020.

c．一般講演（国際学会）

1) "Intracellular time-lapse observation of mesoporous silica nanoparticles", Ibuki Kotani, Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Indra Van Zundert, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2, 2019.

2) "Size-selective surface-enhanced Raman scattering by MOF coating of metal nanowires", Taku Murasugi, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2, 2019.

3) "Site-specific gold nanoparticles deposition on silver nanowires for nano-heat source", Yusuke Nakao, Toyouchi Shuichi, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2, 2019.

4) "SERS-based pH sensors with highly reduced cytotoxicity", Qiang Zhang, Kiri Watanabe, Ibuki Kotani, Beatrice Fortuni, Taemaitree Farsai, Hitoshi Kasai, Johan Hofkens, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2,

2019.

5） “End-shape engineering on metal nanowires”, Taiki Akashi, Tomoko Inose, Shuichi Toyouchi, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2, 2019.

6） “Particle Tracking of Individual Nanoparticles Using Chemical Fingerprint”, Takuto Ishida, Tomoko Inose, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2, 2019.

7） “Tip-enhanced Raman spectroscopy on chemically unzipped carbon nanoribbon”, Shoji Sugioka, Tomoko Inose, Shinnosuke Hara, Shuichi Toyouchi, Peter Walke, Kenji Hirai, Yasuhiko Fujita, Hirofumi Tanaka, Hiroshi Uji-i, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Dec. 2, 2019.

8） “Intracellular time-lapse observation of mesoporous silica nanoparticles”, Ibuki Kotani, Tomoko Inose, Beatrice Fortuni, Indra Van Zundert, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

9） “Size-selective surface-enhanced Raman scattering by MOF coating of metal nanowires”, Taku Murasugi, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

１０）“Site-specific gold nanoparticles deposition on silver nanowires for nano-heat source”, Yusuke Nakao, Toyouchi Shuichi, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

１１）“SERS-based pH sensors with highly reduced cytotoxicity”, Qiang Zhang, Kiri Watanabe, Ibuki Kotani, Beatrice Fortuni, Taemaitree Farsai, Hitoshi Kasai, Johan Hofkens, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

１２）“End-shape engineering on metal nanowires”, Taiki Akashi, Tomoko Inose, Shuichi Toyouchi, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

１３）“Particle Tracking of Individual Nanoparticles Using Chemical Fingerprint”, Takuto Ishida, Tomoko Inose, Kenji Hirai, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

１４）“Tip-enhanced Raman spectroscopy on chemically unzipped carbon nanoribbon”, Shoji Sugioka, Tomoko Inose, Shinnosuke Hara, Shuichi Toyouchi, Peter Walke, Kenji Hirai, Yasuhiko Fujita, Hirofumi Tanaka, Hiroshi Uji-i, 2019 International Symposium of RIES Hokkaido University & CEFMS National Chiao Tung University, Dec. 3, 2019.

d. 一般講演（国内学会）

1） “金属ナノワイヤーの MOF 被覆によるサイズ選択的表面増強ラマン散乱”, 村杉 拓, 平井 健二, 猪瀬 朋子, 雲林院 宏, 第 13 回分子科学討論会 2019, Sep. 17, 2019.

2） “Gold coated silver nanoflowers toward SERS-based intracellular pH sensing with low cytotoxicity”, Qiang Zhang, Kiri Watanabe, Ibuki Kotani, Beatrice Fortuni, Taemaitree Farsai, Hitoshi Kasai, Johan Hofkens, Kenji Hirai, Tomoko Inose, Hiroshi Uji-i, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, Sep. 20, 2019.

3） “共振器ポラリトンを利用した多孔性配位高分子の選択的合成”, 平井健二, 石川紘人, James A. Hutchison, 雲林院宏, 第 67 回応用物理学会 春季学術講演会, March 14, 2020.

4） “End shape engineering of silver nanowire for tip-enhanced Raman microscopy”, Tomoko Inose, Shuichi Toyouchi, Shinnosuke Hara, Kenji Hirai, Yasuhiko Fujita, Hirofumi Tanaka, Hiroshi Uji-i, 日本化学会第 100 春季年会(2020), March 22, 2020.

5） “Sharpening and surface engineering on metal nanowires”, Taiki Akashi, Hiroshi Uji-i, Kenji Hirai, Tomoko Inose, 日本化学会第 100 春季年会(2020), March 23, 2020.

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） “共振器の化学: 反応制御～自己集合”, 平井健二, 京都大学化学研究所・光ナノ量子物性科学セミナー, July, 21, 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

1） 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, University of Melbourne, Australia

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

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） 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
３） 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
４） 猪瀬朋子、国際共同研究強化(B)、サイト選択的化学吸着によるグラフェンナノリボンのバンドギャップアクティブ制御、2019～2023 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

１） 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
２） 雲林院宏、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、研究拠点形成事業、2019～2024 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

該当なし

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

１） 工学部、応用物性工学、雲林院宏、平井健二、猪瀬朋子、2019 年 10 月 7 日～2019 年 11 月 25 日
２） 情報科学研究院、ナノマテリアル特論、雲林院宏、平井健二、猪瀬朋子、2019 年 6 月 6 日～2017 年 7 月 25 日
３） 工学部、生体医工学基礎・医用工学概論、平井健二、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、2019 年 10 月 7 日～11 月 6 日
５） 大学院共通授業科目、Hokkaido University Summer Institute、雲林院宏、平井健二、2018 年 7 月 10 日～7 月 13 日
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、2019 年 11 月 11 日～11 月 13 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） 2020 年 1 月 27 日，日本経済新聞，「北大など、光共振ミラーにより化学反応を制御する新技術を開発」
２） 2020 年 1 月 31 日，電波新聞 8 面，「北大の研究グループ 光共振器中の分子振動状態の変更で化学反応操作する新手法」

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） 小谷 伊吹：メソポーラスシリカ薬輸送システムの細胞内挙動
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　　鈴木明大（阪大院、工博、2016.4～）
博士研究員　楊影（東工大院、工博、2015.12～2020.1）
技術補助員　新井田雅学（2015.12～）
　　西岡晶子（2016.5～2020.3）
事務補助員　山崎涼子（2014.7～2019.7, 2020.2～）
　　古林亜紗子（2019.6～2020.1）
院生　小西祐輔（MC2）、鈴木芳幸（MC2）

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

Ｘ線自由電子レーザー（XFEL）を用いた複雑系生体粒子等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ている。

XFELでの測定は破壊型であるが、再現可能な構造を持つ粒子に対しては、多数の粒子からのコヒーレント回折パターンを取得して、データ解析することにより、3Dイメージングや新規の動的イメージングに道が開かれる。3Dイメージングに関して、測定した多数の回折パターンから試料方位を決定し、3Dイメージングを行う原理検証を三角柱形状の金ナノ粒子に対して進めた。測定では、SACLA との共同研究により開発した100 nm 集光システムと試料チャンバーを一体化したナノビームコヒーレント回折イメージング装置（MAXIC-S）を利用した。数値シミュレーションやデータ解析においてはスーパーコンピュータ「京」を活用した（課題名「計算機実験を援用するXFELバイオイメージング」、課題代表者：西野吉則）。

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。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、「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」）。

また、生体膜に埋め込まれ活性を保った膜タンパク質等のXFELイメージングに向けて高傾斜角用MLEAを開発し、SACLA においてその有効性を確かめた。本成果を発表したPhys. Chem. Chem. Phys. (PCCP)誌の論文は、2019 PCCP HOT Articlesに選出され、Inside Front Coverに採用された（図１）。

図１　生体膜に埋め込まれ活性を保った膜タンパク質の XFEL イメージングに向けた試料セルに関する論文が PCCP 誌の Inside Front Cover に採用された。

(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。

2019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、各種の自動車用ナノマテリアルのイメージング研究を進めた。特に、次世代二次電池として注目を集めている全固体電池に用いられる固体電解質に対する XFEL データの解析を進めた。固体電解質の中には、放射線損傷に対して脆弱なものもあり、XFELを用いた無損傷イメージングが重要となる。

また新たに、燃料電池自動車（FCV）用の固体高分子形燃料電池（PEFC）における膜・電極複合体（MEA）の触媒層で

用いられるナノ材料の XFEL イメージングに向けた議論を開始した。

(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。

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、材料設計最適化に求められるが未解明の凝集・分散過程を、PCXSS 法とポンプ・プローブ法を組み合わせて捕らえる研究を行った。試料は直径15 nm の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て、がん組織に特異的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（図2）。

ポンプ・プローブ PCXSS 測定は、ポンプ・プローブ計測に対応したコヒーレントＸ線回折測定用試料チャンバーである MAXIC-II を用いた。MLEA 内の試料に、ポンプ光およびプローブ光を干渉なく同軸で照射する光学設計を行い実装した。ここで、ポンプ光がＸ線センサー（MPCCD）に入射しないように、アキシコンレンズと XFEL 光軸上の穴あきミラーを用いた。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 の反応を開始させた。プローブ光には XFEL（波長：0.3 nm）を用いた。

ポンプ・プローブ計測の結果、pH 低下に伴い、金ナノ粒子凝集体や短距離相関構造（数個の金ナノ粒子の結合体）が、ナノ秒のスケールで、個々の金ナノ粒子がバラバラになった状態に分散することが示唆された。

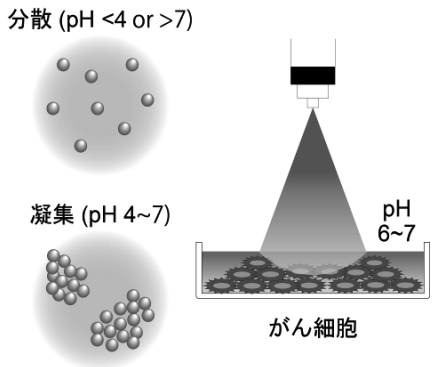


図２　がんのフォトサーマル治療の概念図

(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

平成30年度ごろより、SPring-8の軟Ｘ線ビームライン BL25SU において、Ｘ線イメージング手法の1つであるタイコグラフィ測定系を立ち上げ、技術開発を進めている。本測定系の照明光学素子には、東京大学三村准教授グループが開発した独自製造法によって作製された回転楕円ミラーを用いている。本年度は、回転楕円ミラーが形成する軟Ｘ線集光ビームをタイコグラフィにより精密に評価し、ミラー表面形状の高精度計測へと展開した。

タイコグラフィとは、フーリエ反復位相回復法に基づいたイメージング手法であり、試料像だけでなく、入射プローブの波動場も同時に再構成されるという特長をもつ。図３(a)(b)に、収束イオンビーム加工によって作製した Ni テストパターンのタイコグラフィ像（複素透過関数の振幅に相当）と、入射集光ビームの試料面における2次元強度分布を示す。集光ビーム径（半値全幅）は垂直方向、水平方向ともに200 nm 程度であることが分かった。また、光子エネルギーを300、400、500 eV と変化させても集光位置は変化せず、色収差がないことも確かめられた。さらに、集光ビームの波動場をミラー位置へ伝搬することで、ミラー表面の形状誤差を導出した。ミラー中心付近での円周方向の1次元プロファイルを図３(c)に示す。光子エネルギーが異なり、それぞれが独立な測定結果は1 nm(root mean square, RMS)精度で一致しており、既存技術では困難であった回転ミラー表面の高精度形状計測を実現できたことが分かる。

本成果は Applied Physics Letters の Featured Article に選出されるとともに、米国物理学協会（AIP）発行の全論文から特集される Scilight でも紹介された。

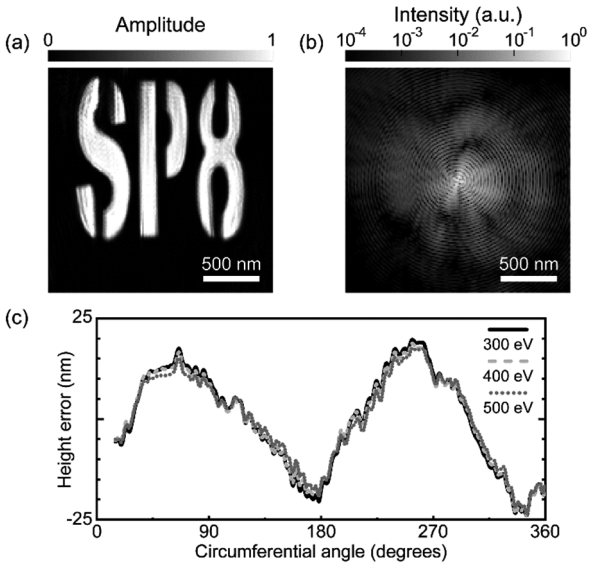


図３　タイコグラフィによる回転楕円ミラーの形状計測。(a)試料振幅像。(b)試料像と同時に再構成された入射ビームの 2 次元強度分布。(c)ミラー中心付近での円周方向の形状誤差プロファイル。

３．今後の研究の展望

当研究分野では XFEL 施設 SACLA や大型放射光施設

SPring-8を利用したイメージング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。学術研究に加えて、産業界とも連携した研究を今後さらに発展させる。また、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、応用研究への展開を目指す。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） Y. Takeo, A. Suzuki, H. Motoyama, Y. Takei, T. Kume, Y. Matsuzawa, Y. Senba, H. Kishimoto, H. Ohashi and H. Mimura: “Soft x-ray nanobeam formed by an ellipsoidal mirror”, Appl. Phys. Lett., 116: 121102 (2020)

2） A. Suzuki, T. Kimura, Y. Yang, Y. Niida, A. Nishioka, T. Tachibana, M. Takei, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa, T. Oshima, Y. Bessho, Y. Joti and Y. Nishino: “Design of a liquid cell toward three-dimensional imaging of unidirectionally-aligned particles in solution using X-ray free-electron lasers”, Phys. Chem. Chem. Phys., 22(5): 2622-2628 (2019)

4.2 学術論文（査読なし）

1） 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」、超精密、24: 5-6 (2019)

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

1） 西野 吉則 : 「X 線自由電子レーザー」、基礎高分子科学 第 2 版、東京化学同人 : 437 (2020)

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） Y. Nishino* : ″Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction″, SHINE Forum 2019, Shanghai, China (2019-04)

b．招待講演（国内学会）

1） 鈴木 明大*、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 : 「X 線レーザー回折による溶液試料のナノ構造分析」、第 11 回放射光学会若手研究会「放射光を用いたナノ分光技術とスピントロニクスとの協奏～リサーチネットワークの形成に向けて～」、東北大学、Japan (2019-08)

2） 鈴木 明大*: 「X 線レーザー回折による溶液中試料イメージング -高度化に向けた最新の取り組み-」、レーザー学会「レーザーバイオ医療」技術専門委員会、北海道大学、Japan (2019-07)

c．一般講演（国際学会）

1） Y. Bessho*, T. Masatada, Y. Yang, A. Suzuki, Y. Joti, Y. Nishino and T. Oshima : ″XFEL Coherent Diffractive Bio-Imaging at SACLA/SPring-8″, 15th International Congress on Thermophiles (Thermophiles 2019), 九州大学, Japan (2019-09)

2） Y. Takeo*, A. Suzuki, Y. Senba, H. Kishimoto, H. Ohashi and H. Mimura : ″Soft X-ray focusing system using ellipsoidal mirror for ptychographic imaging″, International Conference on X-ray Optics and Applications (XOPT2019), Yokohama, Japan (2019-04)

d．一般講演（国内学会）

1） 小西 祐輔*、鈴木 明大、竹尾 陽子、島村 勇徳、仙波 泰徳、岸本 輝、大橋 治彦、三村 秀和、西野 吉則 : 「回転体ミラーを用いた軟 X 線タイコグラフィの確立に向けた予備実験」、第 33 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋、Japan (2020-01)

2） 鈴木 明大*、湯本 博勝、小山 貴久、城地 保昌、別所 義隆、登野 健介、矢橋 牧名、石川 哲也、大橋 治彦、西野 吉則 : 「1 粒子 XFEL イメージングのための超低バックグラウンド溶液試料セル開発に向けて」、第 33 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋、Japan (2020-01)

3） 鈴木 明大*、城地 保昌、別所 義隆、西野 吉則 : 「パルス状コヒーレント X 線溶液散乱法の現状と高度化に向けた取組み」、第 33 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋、Japan (2020-01)

4） 楊 影*、森屋 利幸、別所 義隆、西野 吉則、大島 泰郎 : 「高度好熱菌 Thermus thermophilus HB27 のミニセルの作製」、極限環境生物学会第 20 回年会、京都大学、Japan (2019-11)

5） 楊 影*、森屋 利幸、別所 義隆、西野 吉則、大島 泰郎 : 「高度好熱菌 Thermus thermophilus HB27 のミニセルの作製」、第 92 回日本生化学会大会、パシフィコ横浜、Japan (2019-09)

6） 竹尾 陽子*、鈴木 明大、仙波 泰徳、岸本 輝、大橋 治彦、三村 秀和 : 「軟 X 線タイコグラフィを用いた回転楕円ミラーの形状評価」、精密工学会学術講演会、静岡大学、Japan (2019-09)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） Y. Nishino*, A. Suzuki, Y. Niida, Y. Joti and Y. Bessho : ″Controlled Environment Nano-Imaging Free From Radiation Damage by X-ray Laser Diffraction″, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Japan (2019-12)

2） A. Suzuki*, H. Yumoto, T. Koyama, Y. Joti, Y. Bessho, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Nishino : ″Towards development of a very low-background liquid cell for single particle imaging using X-ray free-electron lasers″, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Japan (2019-12)

3） Y. Nishino* : ″Towards development of a very low-background liquid cell for single particle imaging using X-ray free-electron lasers″, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium 稀（国際学会）, Hokkaido

University, Japan (2019-12)

4） 鈴木 明大、山重 寿夫、田中 展望、折笠 有基、西野 吉則*：「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」、SPring-8 シンポジウム 2019、岡山大学、Japan (2019-08)

5） A. Suzuki*: "Feasibility study on solution sample holding technique for XFEL based single-particle imaging", SACLA Users' Meeting 2019, SACLA, Japan (2019-08)

6） 西野 吉則*：「環境制御微生物と酵素の創生」、ATI 第 26 回研究報告会、東京、Japan (2019-07)

4.7 シンポジウムの開催

該当なし

4.8 共同研究

a．所内共同研究

1） 居城　邦治（生体分子デバイス研究分野）

2） 三友　秀之（生体分子デバイス研究分野

b．民間等との共同研究

1） 西野 吉則(トヨタ自動車株式会社)：「平成 31 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」」、2019 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．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） 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

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） 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 :SACLAユーザー協同体 評議員 （2013年05月01日～現在）

2） 西野 吉則 : X線結像光学研究会 幹事 （2015年12月16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） 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 10 月 02 日～2019 年 10 月 04 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 12 月 11 日

2） 工学部、生体情報工学実験 II、鈴木 明大、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

3） 工学部、応用光学 II、西野 吉則、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

4） 工学部、コースアワー、西野 吉則、2019 年 07 月 09 日

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」、西野 吉則、2019 年 06 月 28 日

6） 工学部、生体情報工学実験 I、鈴木 明大、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

7） 全学共通、一般教育演習（フレッシュマンセミナー）: 暮らしの中のサイエンス、鈴木 明大、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

8） 情報科学研究科、ナノイメージング特論、鈴木 明大、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

9） 情報科学研究科、ナノイメージング特論、西野 吉則、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

１０）工学部、情報エレクトロニクス演習（電気回路）、鈴木 明大、2019 年 04 月 01 日～2019 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） 西野 吉則、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、2019 年 10 月 31 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） 小西 祐輔 : 回転体ミラーを用いた軟X線タイコグラフィの確立に向けた予備実験

2） 鈴木 芳幸 : 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

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大学、Ph.D.化学、2016.2～）
准教授　髙野　勇太（筑波大学、博士(理学)、2017.4～）
助　教　柚山　健一（奈良先端大、博士(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、Lata Chouhan、Bhagya Lakshmi、Md Shahjahan、Sachith Mahesha, Jeladhara Sobhanan,
修士課程　Hanjun, Zhao, Danyang Chen, Feijun Xu（環境科学院）、
研究生　Zhijing Zhang（電子研）

１．研究目標

本研究分野は、半導体量子ドットおよび有機分子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。

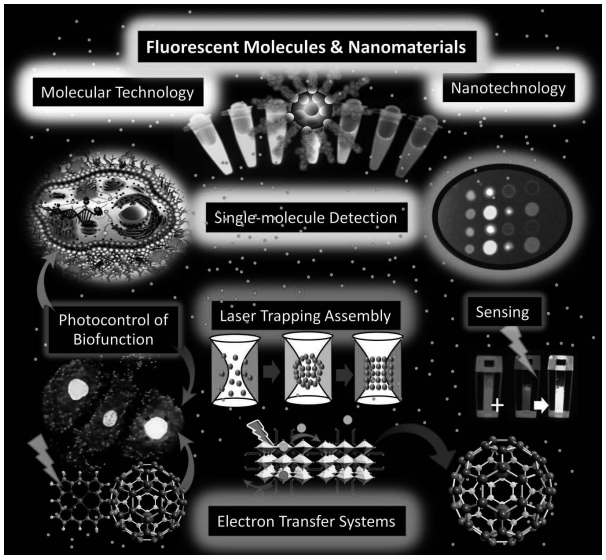


図１　本研究分野の研究概要

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するナノスケールサイズ（<20 nm）の半導体性量子ドット（ナノ結晶）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盛んに行われている。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4.1-1,5,6,9)】。１例として、ピエゾ化学的手法（＝高圧圧迫法）により混合ハロゲン化物ペロブスカイト結晶薄膜を作成し、その光誘起発光挙動を明らかにした。混合ハロゲン化物ペレット中で、臭化物とヨウ素をともに含むドメインの発光寿命は、純粋な $FAPbBr_3$ペレットと比較して大幅に減少した。これは、より高い臭化物組成を持つドメインがエネルギー供与体として働き、ヨウ化物に富むドメインがアクセプターとして働くためである。この結果は、光子リサイクルにおける非放射エネルギー移動の役割を明らかにし、将来的に高効率のペロブスカイト太陽電池を設計するうえで重要な知見となる【資料4.1-5,6)】。

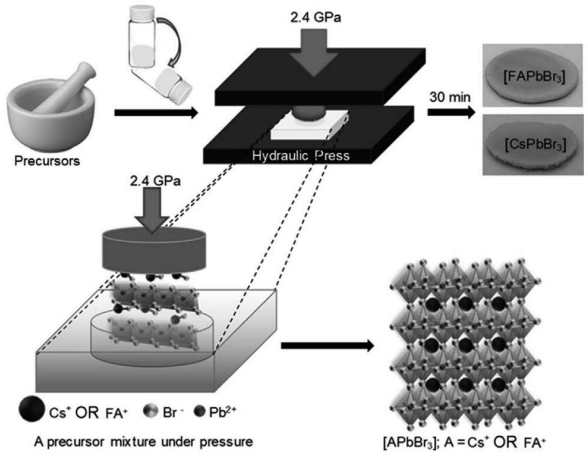


図２　ピエゾ化学法による混合ハロゲン化物ペロブスカイト結晶薄膜の作成方法

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。これらの光の力学作用を用いるレーザートラッピング技術を効果的に用いることで、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4.1-1,9)】。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、レーザートラッピング技術をL-Phenylalanineに用いることでバイオ応用を施行した材料作成にも成功した【資料4.1-1,8)】。

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・量によって光応答性を変化させる分子は、部位特異的な光操作を可能とす

るため有用な技術である。９－アクリジニウム誘導体に光を照射した際にのみ生成する準安定ベタインを利用することで、幅広い波長にわたって光を吸収し、効果的な光線温熱効果を発現する分子を開発した【資料4.1-3)】。また近赤外光を効果的に吸収し一重項酸素（$^1O_2$）を生成する分子を合成開発し、これをドラッグデリバリキャリアと複合化してがん細胞のミトコンドリアに送達することで、効果的にがん細胞を死滅させる光治療薬候補を確立した【資料4.1-2、4.5-1)】。その他にも、銀ナノ粒子―シリカ複合体を構築することで、抗菌性を示す新規ナノバイオ物質の開発を行った【資料4.1-7)】。

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

今後も、ペロブスカイト型結晶や半導体量子ドット、各種有機分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｡そして、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プローブ材料の開発および利用技術開発を行う。以上を通して、ナノ材料分野や生物有機化学、光物理学にわたって応用可能な革新的光学分子材料の開発技術基盤の探索と構築を行っていく。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） M. Islam, M. Shahjahan, K. Yuyama and V. P. Biju: “Remote Tuning of Bandgap and Emission of Lead Perovskites by Spatially Controlled Halide Exchange Reactions”, *ACS Materials Letters* (2020)

２） Satrialdi, R. Munechika, V. P. Biju, Y. Takano, H. Harashima and Y. Yamada: “The optimization of cancer photodynamic therapy by utilization of a pi-extended porphyrin-type photosensitizer in combination with MITO-Porter”, *Chemical Communication*, 56: 1145-1148 (2019)

３） D. Sasikumar, Y. Takano and V. P. Biju: “Photoinduced Betaine Generation for the Efficient Photothermal Energy Conversion”, *Chemistry-A European Journal*, 2(6): 2060-2066 (2019)

４） T. Umeyama, T. Hanaoka, Y. Takano, N. Tkachenko and H. Imahori: “Exclusive occurrence of photoinduced energy transfer and switching of its direction by rectangular π-extension of nanographenes”, *Chemical Science*, 10(27): 6642-6650 (2019)

５） B. S. Balachandran, S. Ghimire, K. Takahashi, K. Yuyama, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju: “Nonradiative Energy Transfer through Distributed Bands in Piezochemically Synthesized Cesium and Formamidinium Lead Halide Perovskites”, *Chemistry-A European Journal*, 26(10): 2033-2137 (2019) 【電子研内共著】

６） G. Sushant, K. Takahashi, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju: “Photon Recycling by Energy Transfer in Piezochemically Synthesized and Close-Packed Methylammonium Lead Halide Perovskites”, *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(45): 27752-27758 (2019) 【電子研内共著】

７） J. Jose, A. Anas, A. B. Anand, S. Athiyanathil, C. Jasmin, R. M. Anantharaman, S. Nair, C. Subrahmanyam and V. P. Biju: “Extinction of Antimicrobial Resistant Pathogens Using Silver Embedded Silica Nanoparticles and an Efflux Pump Blocker”, *ACS Applied Bio Materials*, 2(11): 4681-4686 (2019)

８） J. Chen, K. Yuyama, T. Sugiyama and H. Masuhara: “In-situ Reflection Imaging and Microspectroscopic Study on Three-Dimensional Crystal Growth of L-Phenylalanine under Laser Trapping”, *Applied Physics Express* (2019)

９） J. Islam Md, K. Yuyama, K. Takahashi, T. Nakamura, K. Konishi and V. P. Biju: “Mixed-halide perovskite synthesis by chemical reaction and crystal nucleation under an optical potential”, *NPG Asia Materials*, 11: 31-(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） Y. Yamada, Y. Takano, Satrialdi, J. Abe, M. Hibino and H. Harashima: “Therapeutic Strategies for Regulating Mitochondrial Oxidative Stress”, *biomolecules*, 10: 83-(2020)

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） 原島 秀吉、山田 勇磨、髙野 勇太、Satrialdi: PCT/JP2019/ 36124、光機能性化合物及び脂質ナノ粒子、2019年09月13日

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） V. P. Biju*: “The Effect of Plasmonic Gold Nanoparticles on the Photoluminescence of Perovskites”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

b．招待講演（国内学会）

1） 柚山 健一*：「光の力学作用を利用した分子集合制御」、2019 年度日本化学会北海道支部奨励賞受賞講演、北海道大学 学術交流会館、Japan (2020-01)

2） 髙野 勇太*：「有機分子の特異な光励起状態を利用したミトコンドリア内酸化・還元反応の誘起」、第 72 回日本酸化ストレス学会、札幌市、Japan (2019-06)

c．一般講演（国際学会）

1） G. S. Ghimire*, Y. Takano and V. P. Biju : “Photon-recycling by Nonradiative Energy Transfer in Piezochemically Synthesized Organic- Inorganic Hybrid Lead Halide Perovskites”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

2） L. Chouhan* and V. P. Biju : “The Role of Iodide Vacancy on Blinking of Lead Iodide Perovskite Single Nanocrystals”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

3） Shahjahan MD*, J. Islam. MD, K. Yuyama and V. P. Biju : “Bandgap Modification at Specific Sites of Lead Halide Perovskite by Local Halide Exchange Reaction under Laser Trapping”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

4） B. S. Balachandran*, S. Ghimire, K. Takahashi, K. Yuyama, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju : “Photon Recycling through Close-packed Energy Donor-Acceptor Interfaces in Perovskite Pellets”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

5） Z. Zhang*, S. Ghimire and V. P. Biju : “The Control of Bandgap and Exciton Lifetime in Perovskite Crystallites by the Mechanical Deformation”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

6） S. Mahesha. Bhagyashree*, A. Onishi, H. Misawa and V. P. Biju : “Evaluation of the Coupling between Perovskite Exciton and Gold Plasmon in Films and Cavities”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

7） Jeladhara Sobhanan *, Y. Takano and V. P. Biju : “Quantum Dot-Folic Acid Conjugate for Analyzing Cell-to-Cell Communication In Vitro”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

8） D. Sasikumar*, Y. Takano and V. P. Biju : “Acridinium-Based Electron Donor- Acceptor Dyads for Efficient Photothermal Energy Conversion”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, Japan (2019-12)

9） S. Bhagyalakshmi*, G. Sushant, K. Takahashi, K. Yuyama, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju : “Delayed Emission by Energy Transfer-induced Photon Recycling in Close-packed Perovskite Crystallites”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, International Conference Hall, Japan (2019-12)

10） M. Shahjahan*, M. Islam, K. Yuyama and V. P. Biju : “Bandgap Tuning of Lead Halide Perovskite by Local Halide Exchange Reaction Under Laser Trapping”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, International Conference Hall, Japan (2019-12)

11） S. Ghimire* and V. P. Biju : “Piezochemical Synthesis and Close-packing of Lead Halide Perovskites for Photon-recycling by Energy Transfer”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, Japan (2019-12)

12） D. Sasikumar*, K. Yuyama, Y. Takano and V. P. Biju : “Photoinduced Betaine Generation for Efficient Photothermal Energy Conversion”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, Japan (2019-12)

13） L. Chouhan* and V. P. Biju : “Blinking Suppression in Lead Iodide Perovskite Single Nanocrystals Supplemented with Iodide Precursors”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, Japan (2019-12)

d．一般講演（国内学会）

1） M. Shahjahan*, K. Yuyama and V. P. Biju : “Chemically- and Optically- Controlled Bandgap Modification of Lead Halide Perovskites”, 日本化学会 第 100 春季年会 (2020), 東京理科大学 野田キャンパス, Japan (2020-03)

2） L. Chouhan* and V. P. Biju : “Blinking Suppression in Lead Halide Perovskite Quantum Dots by Filling the Halide Vacancies”, 日本化学会第 100 春季年会 2020, 東京理科大学野田キャンパス, Japan (2020-03)

3） 柚山 健一*、Shahjahan Md、Vasudevan Pillai Biju : 「光学的および化学的アプローチによるハロゲン化鉛ペロブスカイト結晶のバンドギャップ制御」、第 67 回応用物理学会春季学術講演会、上智大学 四谷キャンパス、Japan (2020-03)

4） 柚山 健一*、Islam Md Jahidul、Shahjahan Md、Vasudevan Pillai Biju : 「集光レーザー照射によるハロゲン化鉛ペロブスカイトの結晶化とアニオン交換反応」、第 48 回結晶成長国内会議、大阪大学 銀杏会館、Japan (2019-10 ～ 2019-11)

5） 柚山 健一*、Md Shahajahan、Islam Md Jahidul、Vasudevan Pillai Biju : 「集光レーザー照射下でのアニオン交換反応によるハロゲン化鉛ペロブスカイトのバンドギャップチューニング」、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学 札幌キャンパス、Japan

(2019-09)

6） 柚山 健一*、Islam Md Jahidul、Md Shahjahan、Vasudevan Pillai Biju：「ハロゲン化鉛ペロブスカイト結晶の光誘起選択的ハロゲン交換反応」、2019 年光化学討論会、名古屋大学 東山キャンパス、Japan (2019-09)

7） D. Sasikumar*, Y. Takano, M. Hamada, K. Yuyama, Y. Kobori and V. P. Biju : “The Activated Reaction of Singlet Oxygen Trapped in an Electron Donor-Acceptor Molecular Sensor”, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学 東山キャンパス, Japan (2019-09)

8） S. Bhagya Lakshmi*, S. Ghimire, Y. Takano, K. Yuyama and V. P. Biju : “Delayed Red-Shifted Emission by Energy Transfer-Induced Photon Recycling in Pressed Lead Halide Perovskites”, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学 東山キャンパス, Japan (2019-09)

9） L. Chouhan*, S. Ghimire, Y. Takano, K. Yuyama and V. P. Biju : “The Role of Non-Radiative Relaxation on the Suppression of Superoxide Generation by Methylammonium Lead Iodide Perovskite”, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学 東山キャンパス, Japan (2019-09)

１０）S. Ghimire*, Y. Takano and V. P. Biju : “ Photon recycling via efficient non-radiative energy transfer in close-packed lead halide perovskites synthesized by a pressure-induced solid-state method”, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学, Japan (2019-09)

１１）S. Ghimire*, K. Yuyama, Y. Takano and V. P. Biju : “Pressure-induced solid-state synthesis of pure and mixed halide lead perovskites with tunabale emission”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会, 苫小牧高専, Japan (2019-07)

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） V. P. Biju* : “Luminescent Nanocrystals of Semiconductors: Challenges and Prospects at the Nano-Bio Interface”, 次世代バイオナノ研究会, 産業技術総合研究所臨海副都心センター, Japan (2020-02)

2） 髙野 勇太*：「近赤外光を用いたミトコンドリア標的型光がん治療薬開発と腫瘍内動態の改善に向けたフォトエキサイトニクス材料の利用方策」、「フォトエキサイトニクス拠点」研究会、北海道大学、Japan (2020-01)

3） K. Yuyama*, M. Shahjahan, M. Islam and V. P. Biju : “Optically-Controlled Synthesis and Modification of Lead Halide Perovskites under Laser Trapping”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, Hokkaido University, International Conference Hall, Japan (2019-12)

4） 柚山 健一*、Islam Md Jahidul、Shahjahan Md、Vasudevan Pillai Biju：「光の力学作用を利用した分子集合制御」、第 7 回アライアンス若手研究交流会、大阪大学 産業科学研究所、Japan (2019-11)

5） Y. Takano*, - Strialdi, R. Munechika, H. Harashima, Y. Yamada and V. P. Biju : “Effective conjugate of pi-extended porphyrin/drug delivery carrier for near-infrared cancer phototherapy”, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学 東山キャンパス, Japan (2019-09)

6） V. P. Biju* : “otoluminescence of semiconductor nanocrystals: Challenges and applications”, ARC International Workshop, Indian Institute of Technology, Hyderabad, Indian Institute of Technology, Hyderabad, India (2019-08)

7） Y. Takano* : “Mitochondrial targeting phototherapy by near-infrared light and pi-extended porphyrin/drug delivery carrier conjugate”, 7th International conference for young chemists, Penang, Malaysia (2019-08)

8） J. Md Islam*, S. Md, K. Yuyama and V. P. Biju : “Modification of band gaps in lead halide perovskites by chemical reactions under optical trapping”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会, 苫小牧工業高等専門学校, Japan (2019-07)

9） S. Devika*, K. Reiko, K. Yuyama, Y. Takano and V. P. Biju : “Activated reaction of singlet oxygen trapped in an electron donor-acceptor system”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会, 苫小牧工業高等専門学校, Japan (2019-07)

１０）Y. Takano* : “Light control of cellular activities by the artificial molecules inspired by organic solar cells”, ibmc-CNRS seminar, ストラスブール大学, France (2019-07)

１１）A. Bhagya Lakshmi*, G. Sushant, K. Takahashi, T. Nakamura, K. Yuyama and V. P. Biju : “Delayed emission from close-packed crystals of lead halide perovskites”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会, 苫小牧工業高等専門学校, Japan (2019-07)

１２）V. P. Biju* : “Photoluminescence Intermittency and Fading of Semiconductor Nanocrystals: Challenges and Prospects in the Single-molecule World”, Seoul National University Chemistry Symposium, Seoul, Korea (the Republic of) (2019-05)

１３）V. P. Biju* : “Blinking and Beaching Photoluminescence of Semiconductor Nanocrystals: Challenges and Prospects in Single-molecule Bioimaging”, Ewha Women’s university chemistry and nanoscience Seminar, Seoul, Korea (the Democratic People’s Republic of) (2019-05)

１４）V. P. Biju* : “Photoluminescence Blinking and Bleaching of Semiconductor Nanocrystals”, Pohanf University of Science and Technology Chemistry Symposium, Pohan, Korea (the Republic of) (2019-05)

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。

3）　フィンランド Tampere 大学の Nicolai Tkachenko 教授と分子の光励起ダイナミクスに関する研究。

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）　Vasudevan Pillai Biju、基盤研究 B 一般、Defect-free, Highly-luminescent and Non-blinking Perovskite Nanocrystals、2019～2022 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

1）　柚山 健一、CREST 共同研究者、 光渦が拓く超解像スピンジェット技術、2019～2022 年度

4.10　受賞

1）　M. Shahjahan, The Research Excellence Award of the Department of Environmental Science, Hokkaido Univeristy. (2020-3)

2）　柚山 健一 : 日本化学会北海道支部奨励賞 「光の力学作用を利用した分子集合制御」 （日本化学会北海道支部） 2020 年 01 月

3）　柚山 健一 : 光化学協会奨励賞 「界面での光マニピュレーションと半導体材料への展開」（光化学協会） 2019 年 09 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）　Biju Vasudevan Pillai :日本化学会北海道支部幹事

2）　高野　勇太 : FNTG学会ナノカーボンバイオシンポジウム運営委員

ｃ．兼任・兼業

該当なし

ｄ．外国人研究者の招聘

1）Palyam Subramanyam、India、(2019年10月02日～2019年12月25日)

2）Venkata Seshaiah Katta、India、(2019年10月02日～2019年12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）全学共通、自然科学・応用科学 グリーンエネルギー革新のためのナノサイエンス・ナノテクノロジー基礎論、Vasudevan Pillai Biju、2019年06月10日～2019年06月13日

2）全学共通、大学院共通授業科目(教育プログラム):STSI STSIリーダー型インターンシップ-持続可能な輸送システムと社会インフラ構築、Vasudevan Pillai Biju、2019年07月07日～2019年07月14日

3）地球環境科学研究科、環境物質科学基礎論Ⅱ、Vasudevan Pillai Biju、2019年10月01日～2020年03月31日

4）地球環境科学研究科、光電子科学特論Ⅰ、Vasudevan Pillai Biju、髙野 勇太、2019年10月01日～2020年03月31日

5）全学共通、英語演習、Vasudevan Pillai Biju、2019年04月01日～2019年09月30日

6）全学共通、化学II、髙野 勇太、2019年10月01日～2020年03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：０人

博士学位：３人

1）　Md Jahidul Islam、環境科学院 : 環境科学、Spatially- and temporally controlled synthesis and modification of lead halide perovskite by laser trapping

2）　Devika Sasikumar、環境科学院:環境科学、Spectrpscopic investigation of photothermal and photochemical activities of electron donor-acceptor molecular dyads

3）　Sushant Ghimire、環境科学院：環境科学、Microspectroscopic investigations and correlations of photoluminescence in microcrystals, nanocrystals and assemblies of lead halide perovskites

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、2015.7～2020.3）
　　松尾和哉（京都大院、工博、2015.6～）
博士研究員　AMMATHNADU SUDHAKAR Amrutha（2018.4～2020.3）、
　　李潔（2018.9～2019.9）
事務補助員　小林恵美（2019.1～）
学生
　博士課程　NOUSHABA NUSRAT Mafy、Sampreeth THAYYIL、Shariful HAQUE、THAZHATHETHIL Shakkeeb
　修士課程　村松達也、植田海透、斉嘉俊、林潤澤
　学部生　　湯谷真也

１．研究目標

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

２．研究成果

(a) モータータンパク質 CENP-E に対する光応答性阻害剤の合成と細胞分裂の光スイッチ

アゾベンゼン部位を含む様々な分子スイッチがモータータンパク質の運動機能を光刺激によって可逆的にON―OFF 制御すること可能にすることを示してきた。次のステップとしては、その分子レベルでのモータータンパク質の運動制御を使ってよりマクロな事象を制御することが期待される。すでに、当研究室ではミオシンの運動機能を制御する光応答性高エネルギー化合物を利用することで10mm サイズの筋繊維の収縮を光で制御できることを示している。本研究では細胞分裂時に染色体移動を司っているモータータンパク質に対して光応答的に阻害効果を示す化合物を合成し、細胞分裂というマクロな事象を光スイッチすることを目指した。

細胞分裂には、そのタイミングによっていくつかのモータータンパク質がその役割を担っているが、今回はいわゆるM 期において染色体の赤道面への運搬を司っているモータータンパク質 CENP-E の機能を可逆的に阻害する光応答性阻害剤の開発を目指した。CENP-E 阻害剤は、細胞分裂を頻繁に繰り返しているがん細胞を死滅させる抗がん剤のターゲットとして期待されている。本光応答性阻害剤をがん患者に投与し、必要なタイミングで必要な場所で、阻害効果を生む波長の光を照射することで、その場所のがん細胞の細胞分裂をストップしてアポトーシスへと導き、がん細胞を選択的に死滅しうると考えられる。また、がん細胞へ作用したあとは、阻害剤は正常細胞へと拡散していくが、その前に阻害効果を消滅させる別の波長の光を照射することで、正常細胞への副作用を低減できると期待できる。

これまでの、我々のモータータンパク質の運動機能の光スイッチに関する知見とすでに報告がある光に応答しない CENP-E 阻害剤（GSK923295）の分子構造から、図１に示す化合物１を分子設計し、合成した。化合物１では、色のついたピラゾリルアゾフェニル部位が光によって可逆的なトランスーシス異性化反応を起こすことを水溶液中の吸収スペクトル変化および^{1}H-NMR によって確認した（図２）。

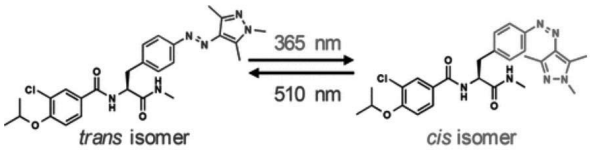


図１　合成した光応答性CENP-E阻害剤の分子構造とトランス―シス光異性化反応

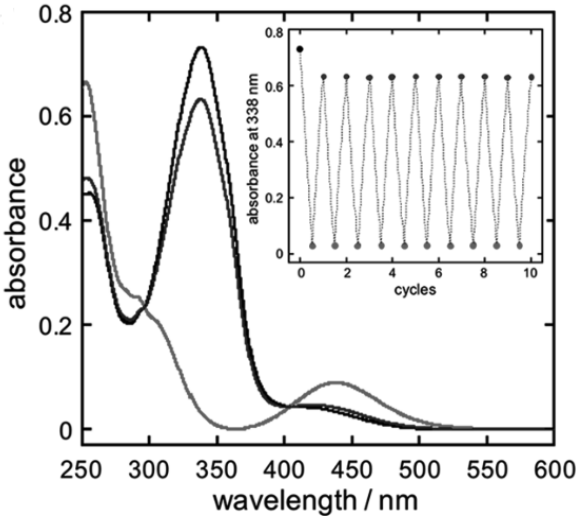


図２　1の水溶液の吸収スペクトル変化。
黒線：光照射前、赤：365nm照射後、青：510nm照射後

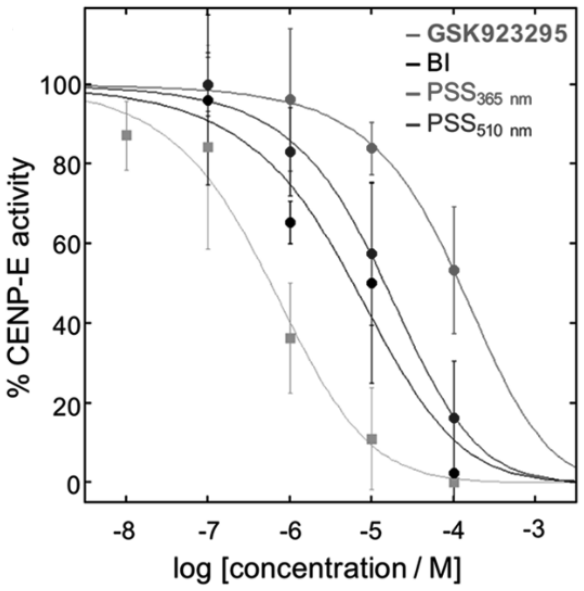


図３　1とGSK923295のCENP-Eに対するATP加水分解活性阻害

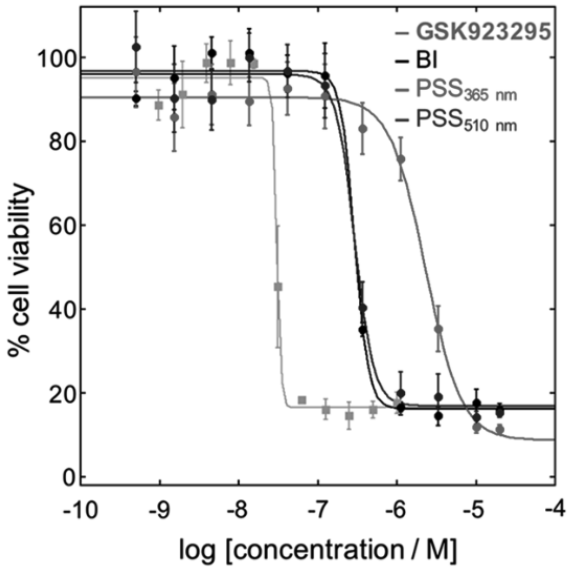


図４　1をHeLa細胞に投与したときの細胞死の割合。

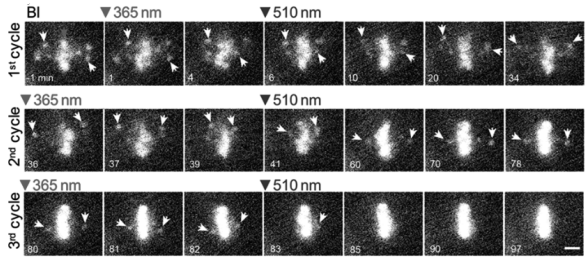


図５　1をLLC-PK細胞に投与したときの光照射による染色体移動の方向のスイッチ。

図３には、CENP-E の ATP 加水分解活性に対する **1** の阻害効果における光照射の影響を示す。**1** の阻害効果は、紫外線照射後と可視光照射後ではIC_{50}値で約 10 倍の違いがあることがわかった。図４には **1** をがん細胞である HeLa 細胞へ投与したときの細胞死の割合を添加濃度および光照射条件ごとにプロットしたものである。１μM 程度においては、光照射条件でほぼ ON-OFF に近い割合で細胞死に導くことができることがわかった。図５には、**1** を添加した細胞内で光の波長による染色体移動の方向のスイッチの様子を示す。紫外線照射によって阻害効果が消失し、本来の赤道面への移動が誘起され、可視光照射によって CENP-E による染色体の赤道面への移動が阻害されると同時に微小管の成長に伴う極方向への移動が起こっていることがわかる。

以上の結果より、化合物１が CENP-E の ATP の加水分解反応に対する酵素活性を阻害する阻害剤として働き、またその阻害活性が光照射の波長によって変化することを明らかにした。10μM の濃度では、ATP 加水分解活性を約７０％光でスイッチできることがわかった。また、本化合物の CENP-E の染色体移動の働きを光スイッチさせることで、HeLa 細胞の細胞死を誘起させる状態と誘起させない状態を取らせることがわかった。さらに、１を添加した細胞の染色体移動をライブセルイメージングの手法で観察し、染色体移動の方向を望みのタイミングで光スイッチできることを示した。この成果は、細胞周期の研究者にとって本化合物が有用な分子ツールとして用いることができることを示している。

本化合物に関して、株式会社フナコシが 2020 年より試薬としての販売を開始している。

（b）アゾベンゼン誘導体をクロモファーとするプロトンポンプ構築の試み

光などの与えられたエネルギーによって分子レベルで構造を変化させる分子機械の研究が盛んである。しかし、真の意味で分子機械と呼ばれるためには、単に分子構造の変化が起こるだけでなくいくつかの要件を満足する必要がある。その一つが、“連続的に”または“サイクルで”エネルギーの形態を変えることである。エネルギーの形態変化としては、「化学エネルギー⇒機械的仕事」、「光エネルギー⇒機械的仕事」、「光エネルギー⇒化学エネルギー」など様々なものがある。これまでに、当研究室では、光応答性キラル化合物とネマティック液晶の組み合わせによって、２つの波長の光の交互照射によって、「光エネルギー⇒機械的仕事」を連続的に達成する分子機械を報告している。一方で、機械的仕組みを利用して「光エネルギー⇒化学エネルギー」のエネルギー変換を達成している自然界の分子システムとしては、微生物が有するプロトンポンプが存在する。バクテリオロドプシンやプロテオロドプシンは典型的なプロトンポンプ特性を有する膜貫通型タンパク質である。リジン残基とイミン結合でつながったレチナールが光を受けて異性化反応を起こし、それに伴うタンパク質の構造変化によ

ってプロトンを一方向に運び、膜の内側と外側の間にプロトン勾配を作る。すなわち、光エネルギーをプロトン勾配という一種の化学エネルギー（化学ポテンシャル）に変換している。プロトンポンプにおけるレチナールの役割は２つ考えられる。一つは、分子構造がオールトランス構造から 13-シス構造に変化することで立体的な効果でタンパク質の高次構造を変化させることである。もう一つは、オールトランス構造から 13-シス構造に変化する際のリジン残基との間のシッフ塩基部の塩基性の変化に伴うプロトンの受け渡しである。われわれは、これらの役割を満足する可能性がある人工的なクロモファーとしてアゾベンゼンを用いることができるのではないかと考えた。そこで、アルデヒド部を有する３種類のアゾベンゼン誘導体を合成し、それをバクテリオオプシンやプロテオオプシンに導入したときの、プロトンポンプ特性について調べた。

これまでに、レチナール部をアゾベンゼン誘導体で置き換えたバクテリオロドプシンの研究としては、唯一A. K. Singhらの報告があった（A. K. Singh, J. Das and N. Majumdar, J. Am. Chem. Soc., 1996, 118, 6185-6191）。しかし、彼らの研究では、アゾベンゼンの系でプロトンポンプ特性が示されたのかが不明確であった。

図６にアルデヒドを含有する３種類のアゾベンゼン誘導体の構造を示す。また、図７にアゾベンゼン誘導体とオプシンとの複合体の水溶液およびその吸収スペクトルを示す。いずれの複合体も可視域に特徴的な吸収を示し、レチナールと同様にアゾベンゼン誘導体がクロモファーとしてタンパク質に結合していることがわかった。また、水溶液中でのレーザーフラッシュフォトリシス実験より、オプシンとアゾベンゼン誘導体の複合体は、アゾベンゼン誘導体単独に比べて非常に長寿命の中間体を経てもとの状態に戻ることがわかった（図８）。また、ITO電極を用いた複合体膜の光誘起電位変化の実験より、光照射直後に膜と電極の間でプロトン移動を示唆するシグナルが観察された（図９）。一方で、複合体をベシクルまたは大腸菌の膜部分に埋め込んだ試料を使った膜の外側でのｐH 測定の結果、光照射によってｐH変化がないことがわかった（図10）。以上の結果より、プロテオオプシンまたはバクテリオオプシンとAz ＩまたはAz II の複合体は、光照射によって３種の長寿命中間体を経てもとに戻るフォトサイクルを示し、かつその光反応に伴ってプロトンを移動するものの、膜の内側と外側の間で一方向に連続的にプロトンを移動するプロトンポンプ特性は示さないことがわかった。プロトンポンプ機能にとって重要な役割を果たしているアミノ酸を置き換えた変異体を使った実験より、本来初期状態でプロトンをシッフベースに供給しているアスパラギン酸が光照射後にプロトンを供給する役割を担っていることなどが判明した。これらの結果をもとに、アゾベンゼン色素部が光照射後に細胞外側からプロトンを受けて、もとの方向（細胞外側）にそのままプロトンを戻す光反応のスキームを提案した（図11）。

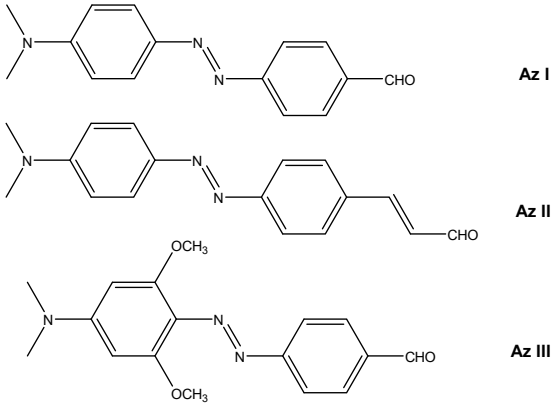
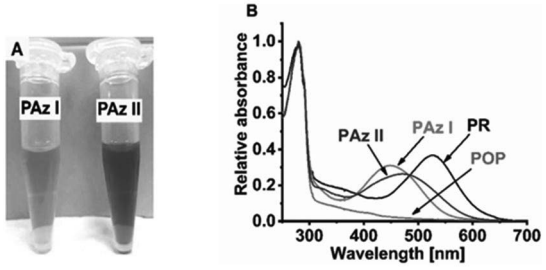


図６　タンパク質に導入したアゾベンゼン誘導体



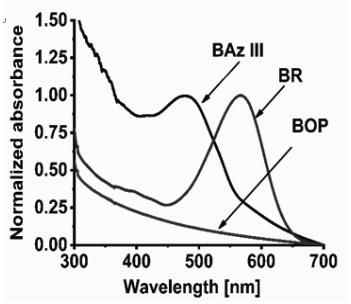


図７　プロテオオプシンとAz ＩまたはAz II複合体（それぞれPAz ＩとPAz II）の水溶液の写真およびそれらの吸収スペクトルとバクテリオオプシンとAz IIIの複合体（Baz III）

PR, POP、BR、BOPはそれぞれプロテオロドプシン、プロテオオプシン、バクテリオロドプシン、バクテリオオプシンの意味。

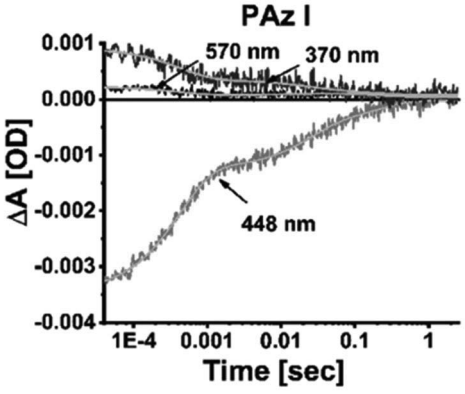


図８　PAｚ Ｉの過渡吸収

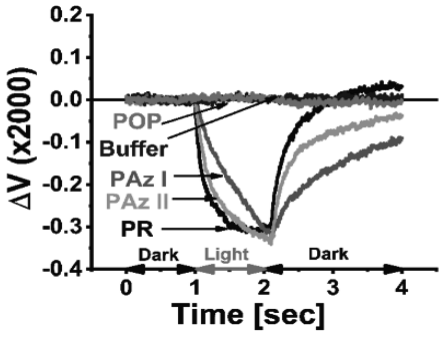


図９　PAｚIとPAz II膜の光誘起電位変化

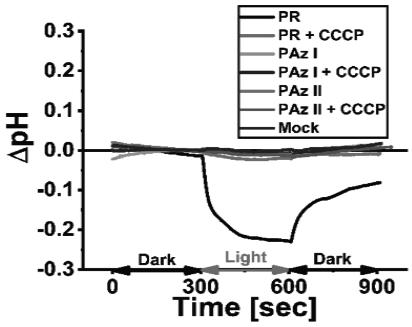
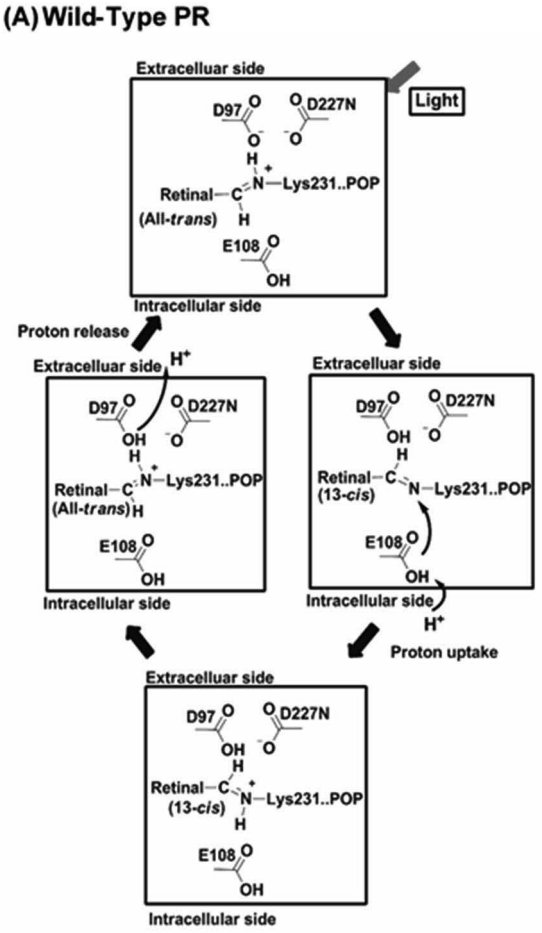


図10　PAｚ IとPAｚ IIのプロトンポンプ実験



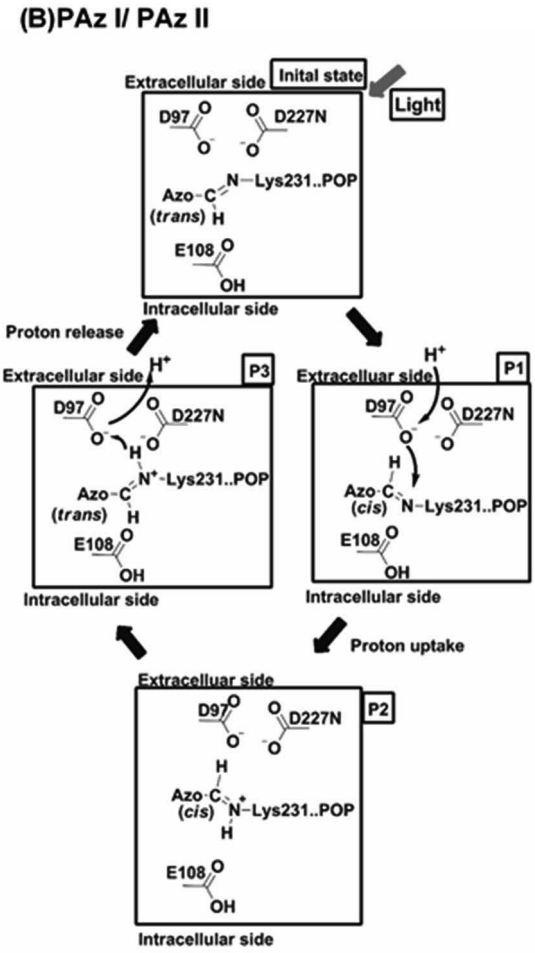


図11　ワイルドタイプ（A）および PAz IとPAz II（B）のフォトサイクル機構

３．今後の研究の展望

CENP-E に対する光応答性阻害剤の研究では、光で可逆的に染色体移動をスイッチすることができた。その結果、望みのタイミングで阻害効果を発現してがん細胞をアポトーシスへと誘導することもできた。光分子スイッチを用いることでマクロな事象を制御する研究の次の目標は、個体の運動の光スイッチである。そのために、微生物の鞭毛の運動を引き起こしている軸糸ダイニンの運動を光応答的に阻害する化合物を設計、合成する予定である。

レチナールをアゾベンゼン誘導体で置き換えたプロトンポンプタンパク質は、特徴的なフォトサイクルと光誘起プロトン移動反応を示すものの、プロトンポンプ特性を示さないことが分かった。この理由は、レチナールが満足しているいくつかの要件を今回のアゾベンゼン誘導体が満足していないためである。その一つが初期状態としてシッフベース部がプロトン化されていることである。アゾベンゼンクロモファーのフェニルアゾ基はもともと電子吸引性がある。今回の化合物では電子供与性基であるジメチルアミノ基を導入しているが、それでもタンパク質内でシッフベース部が光照射前にプロトンを受けるほどの塩基性がないこ

とが分かった。２つのメトキシ基を追加したAzo III でも不十分であった。今後は、さらにもうひとつのジメチルアミノ基を追加するなどの方法で初期の塩基性を増強することが考えられる。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） N. Noushaba, K. Matsuo, S. Hiruma, R. Uehara and N. Tamaoki: “Photoswitchable CENP-E inhibitor enabling the dynamic control of chromosome movement and mitotic progression”, J. Am. Chem. Soc., 142(4): 1763-1767 (2020)

２） Y. Sagara, K. Takahashi, T. Nakamura and N. Tamaoki: “Mechanochromic Luminescence from Crystals Consisting of Intermolecular Hydro-gen-Bonded Sheets”,Chem. Asian J., 45: 478-482 (2019)【電子研内共著】

３） Y. Sagara, K. Takahashi, T. Nakamura and N. Tamaoki: “Crystal structure and thermoresponsive luminescence of a 9,10-bis (phenylethynyl) anthracene-based cyclophane”, Molecular Systems Design & Engineering, Royal Society of Chemistry,1(5): 205-211 (2019) 【電子研内共著】

４） T. Muramatsu, Y. Sagara, H. Traeger, N. Tamaoki and C. Weder: “Mechanoresponsive Behavior of a Polymer-Embedded Red-Light Emitting Rotaxane Mechanophore”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 11(27): 24571-24576 (2019)

５） Y. Sagara, M. Karman, A. Seki, M. Pannipara, N. Tamaoki and C. Weder: “Rotaxane-Based Mechanophores Enable Polymers with Mechanically Switchable White Photoluminescence”, ACS Cent. Sci., 5(5): 874-881 (2019)

６） N. Noushaba, Y. Kim, R. Thomas, T. Akasaka and N. Tamaoki: “Molecular Crankshaf Effect Converting Piston-like Molecular Motion to Continuous Rotation of Macro Objects”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 11(16): 15097-15102 (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） H. PADINHARE KAYAKALI and N. Tamaoki: “Enantiose lective Photochromism under Circularly Polarized Light”, ChemPhotoChem, 3(6): 347-355 (2019)

２） A.AMMATHNADU S, K. R. Snil Kumar and Nobuyuki Tamaoki:“Azobenzene‐Based Photoswitches Facilitating Reversible Regulation of Kinesin and Myosin Motor Systems for Nanotechnological Applications”,ChemPhotoChem, 3(6): 337-346 (2019)

３） Y. Kim and N. Tamaoki: “Photoresponsive Chiral Dopants: Light-Driven Helicity Manipulation in Cholesteric Liquid Crystals for Optical and Mechanical Functions”, ChemPhotoChem, 3(6): 284-303 (2019)

４） 相良剛光:「クロミックポリマー」、高分子、高分子学会、68(9), 501-505 (2019)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

１） K. Matsuo* :“Optochemical Motion Control for Biomachines Under Live Cell Condition” Kazuya Matsuo, International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC) Yangon 2019, August 6-9, 2019. Yangon, Myanmar.

２） Y. Sagara* :“Development of Rotaxane-based Supramolecular Mechanophores ” Asian International Symposium - Organic Crystals - in The 100th CSJ Annual Meeting, 12th Mar 2020, Tokyo.

b．招待講演（国内学会）

１） 松尾 和哉*：「「動く」タンパク質を自在に作する光化学技術の開発」, ChemBio 講演会-2019, 京都大学（京都市）, 2019 年 7 月 2 日.

２） 松尾 和哉*：「「動く」タンパク質を標的とした光化学技術戦略とその展開」、2019 年度 北海道高分子若手研究会、 定山渓グランドホテル瑞苑（札幌市)、2019 年 8 月 24 日

c．一般講演（国際学会）

１） Y. Kim*, J. Qi and N. Tamaoki : “Mechanoresponsive crys tal engineering of diacetylenes for novel patterning method”, The 2019 Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS) , Congress & Exhibition Centre Acropolis, Nice, France (2019-05)

２） K. Matsuo*, M. Noushaba Nusrat, S. Hiruma, R. Uehara and N. Tamaoki : “A photoswitchable inhibitor for the mictotic motor protein”, 2019 CSH-Asia conference: Chemical Biology & Drug Discovery, Suzhou dushu lake conference center, China(2019-10)

d．一般講演（国内学会）

１） 金子 凌平、相良 剛光、片尾 昇平、玉置 信之、中野 英 之 *: 「 1,4-Bis(2-cyano-2-{4-[5-(4-methylphenyloxy) pentyloxy]phenyl}ethenyl)-2,5-dimethoxybenzene の固相における光誘起発光色変化」、第 68 回高分子学会年次大会、大阪府立国際会議場、大阪、Japan(2019-05)

２） 相良剛光* :「微小な力を可視化するためのロタキサン型超分子メカノルミノフォア」、第 58 回日本生体医工学会 シンポジウム、沖縄コンベンションセンター、宜野湾、Japan (2019-06)

３） 相良剛光* :「伸縮により白色蛍光を ON/OFF スイッチするエラストマーの開発」、第 68 回高分子討論会、福井大学、福井、Japan (2019-09)

4） 村松 達也*、相良 剛光、玉置 信之 ： 「BODIPY骨格を有するロタキサン型超分子メカノフォアの開発」、第 68 回高分子討論会、福井大学、福井、Japan (2019-09)

5） 松尾 和哉*、Noushaba Nusrat Mafy、比留間 翔太、上原 亮太、玉置 信之 ： 「細胞分裂のオプトケミカルコントロール」、第 13 回バイオ関連化学シンポジウム 2019、東北大学、仙台、Japan (2019-09)

6） 村松 達也*、相良 剛光、玉置 信之 ： 「BODIPY 誘導体を有する赤色蛍光を示すロタキサン型メタノフォアの開発」、第 9 回 CSJ 化学フェスタ 2019、タワーホール船堀、東京、Japan(2019-10)

7） Y. Kim, M. Noushaba Nusrat*, J. XIE, S. MAISONNEUVE and N. Tamaoki ：“Glycomacrocycle-based azobenzene derivatives as chiral dopants for photoresponsive cholesteric liquid crystals ”, The 100th CSJ Annual Meeting, Tokyo University of Sience, Japan (2020-03)

8） S. Haque*, T. Kikukawa and N. Tamaoki ： “Driving the photoreaction of proteorhodopsin by azo derivatives”, The 100th CSJ Annual Meeting, Tokyo University of Sience, Japan (2020-03)

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 相良剛光＊ ： 「Rotaxane-based Supramolecular Mechanophores」、化学生命工学専攻　講演会 化学と生命のかけはし 2019、東京大学、東京、Japan (2019-7)

2） 相良剛光* ： 「伸縮に応じて様々な蛍光色を On/Off スイッチするエラストマー」、第 377 回　蛍光体同学会、北日本弘道会ビル、東京、Japan (2019-8)

3） 相良剛光* ： 「ロタキサンをモチーフとした超分子メカノフォア」、JST さきがけ「光極限」公開セミナー、北海道大学、札幌、Japan (2019-10)

4） Y. Sagara*, ： “Rotaxane-based Supramolecular Mechanophores”, The 2nd edition of the international symposium of CEFMS-NCTU, RCAS-AS and 5-star Alliance, Tohoku University, Sendai, Japan (2019-11)

5） Y. Kim* ： “Photoresponsive molecular systems for advanced optical and mechanical functions”, 高知大学複合領域科学部門主催 特別講演会, 高知大学、高知, Japan (2019-12)

6） Y. Kim*, C. Allain, P. Audebert, K. Takahashi, T. Nakamura and N. Tamaoki ： “ Tetrazine derivatives exhibiting mesomorphism-dependent emission properties”,20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

7） Y. Sagara*, N. Tamaoki and C. Weder ： “Rotaxane-Based Mechanophores Enable Polymers with Mechanically Swichable White Photoluminescense”, 20th RIESHOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

8） K. Matsuo*, M. Noushaba Nusrat, S. Hiruma, R. Uehara and N. Tamaoki ：“Development of the photoswichable mitotic inhibitor”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

9） A. Ammathnadu Sudhakar* and N. Tamaoki ： “DNA-based, Photoresponsive, ArtificialMolecular Machines for Applications in Nanotechnology”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan(2019-12)

１０） S. Haque*, T. Kikukawa and N. Tamaoki ： “Proteorhodopsin photoreaction driven by photoisomerization of azobenzene derivatives”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

１１） T. Muramatsu*, Y. Sagara, H. Traeger, N. Tamaoki and C. Weder ： “Development of a Rotaxane-based Mechanophore Exhibiting Red Fluorescence”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

１２） J. Qi*, Y. Kim and N. Tamaoki ： “A series of bisamide-substituted deacetylenes with a mechano-photoresponsive property for patterning applications”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

１３） K. Aoki* and N. Tamaoki ： “Novel types of di acetylene organogelators with excellent photopolymerizability to apply to photopatterning of π-conjugated polymers in gel films”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019-12)

4.7 シンポジウムの開催

1） 松尾 和哉 ： 第7回バイオ関連化学シンポジウム若手フォーラムー第34回生体機能関連化学部会若手フォーラム・第7回バイオテクノロジー部会若手フォーラムー、東北大学 片平キャンパス 生命科学プロジェクト総合研究棟、2019年9月3日

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

1） ナノアセンブリ材料研究分野の高橋助教と結晶性の機械的刺激応答性発光材料に関して密接に共同共同研究を行った。

ｂ．民間等との共同研究

1） Yuna KIM、長谷川美貴（青山学院大学）:「レドックス活性なユウロピウム(III)錯体の酸化還元的発光制御」

2） Yuna KIM、久保和也（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」

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

1） Y. Kim and P. Audebert(École normale supérieure Paris-Saclay(FRA)) ： “平成30年度「総長奨励による若手教員海外派遣支援事業」”, 2018～2019年度

2） Y. Kim and Joanne Xie ： “Glycomacrocycle-based azobenzene derivatives as chiral dopants for

photoresponsive cholesteric liquid crystals”, PPSM, ENS Paris-Saclay, フランス

3） Y. Sagara and C. Weder (Adolphe Merkle Institute (Switzerland)):超分子メカノフォアに関して密接に共同研究を行った。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a．科学研究費補助金

1） 玉置 信之、基盤研究 B、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） 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

3） 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。

4） Yuna KIM、基盤研究 C、選択反射特性を光・電場で自在制御できるマイクロ液晶球体、2019～2021 年度

5） 松尾和哉、若手研究（代表）、「モータータンパク質が駆動する細胞分裂の光操作法」、2019-2020 年度

6） 松尾和哉、国際共同研究強化(B)（分担）、「少数細胞の分裂異常が個体機能を喪失させる原理の解明」2、019-2023 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 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。

2） 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

3） 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

4） 玉置 信之(公益財団法人東京応化科学技術振興財団):「新しいがん治療法を目指した細胞分裂の光化学的制御に関する研究」、2019年度

5） 玉置 信之(公益財団法人小笠原科学技術振興財団):「圧力誘起光重合性の機構の解明とそれを利用する新規微細加工技術〝メカノリソグラフィー法”の開拓」、2019～2021年度

6） 相良剛光、公益財団法人泉科学技術振興財団、2019 年度研究助成、「FRET 機構を組み込んだロタキサン型超分子メカノフォアの開発」、2019-2020 年度

7） 相良剛光、公益財団法人東京生化学研究会、 2019 年度研究奨励金、「インターロック分子を利用したメカノ蛍光プローブの創製」、2019-2020 年度

8） 相良剛光、公益財団法人小笠原科学技術振興財団、令和元年度一般研究助成、「エネルギー移動機構を導入したロタキサン型超分子メカノフォアの創製」、2019-2020 年度

9） 相良剛光、公益財団法人 松籟科学技術振興財団、2019 年度研究助成金、「エネルギー移動機構を組み込んだ超分子メカノフォアの開発」、2019-2020 年度

10） 松尾和哉、公益財団法人日本応用酵素協会、酵素研究助成、「「動く」酵素の光操作による分裂期染色体の自在制御」2019 年度

11） 松尾和哉、公益財団法人総合工学振興財団、令和 1 年度研究奨励金、「光と薬剤による細胞エンジニアリングの新手法」、2019-2020 年度

12） 松尾和哉、公益財団法人秋山記念生命科学振興財団研究助成（一般）、「細胞工学のための新たな光化学技術」、2019 年度

13） 松尾和哉、公益財団法人イオン工学振興財団、2019 年度研究助成、「生体ナノマシンによる動的イオン反応場の in situ 活用」、2019-2020 年度

14） 松尾和哉、公益財団法人寿原記念財団、第 34 回研究助成金、「細胞内バイオマシンのダイナミック光操作システムの開発」、2019-2020 年度

4.10 受賞

1） 相良剛光：平成 31 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞「機械的刺激に応じて発光特性が変化する有機超分子材料の研究」（文部科学省）2019 年 4 月

2） 松尾和哉：日本ケミカルバイオロジー学会第 14 会年会ポスター賞「分裂期染色体の光操作」（公益社団法人日本ケミカルバイオロジー学会）2019 年 6 月 12 日

3） 村松達也：第 68 回高分子討論会 優秀ポスター賞「BODIPY 骨格を有するロタキサン型超分子メカノフォアの開発」（公益社団法人高分子学会）2019 年 10 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1日～現在)

2） 松尾 和哉 ： 第7回バイオ関連化学シンポジウム若手フォーラム、世話人代表 (2019年9月3日)

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、2019年4月9日～2019年6月4日

2） 期間大学院共通, Communicating Your Research, Yuna KIM (2019-4～2019-9)

3） 全学教育科目、一般教育演習（ﾌﾚｯｼｭﾏﾝｾﾐﾅｰ）、生き物を測る -分子, 細胞, 組織, 個体まで-、松尾和哉、

(2019-4～2019-6)

4） 生命科学院、生命融合科学概論、玉置 信之、2019年5月16日

5） 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、玉置信之、2019年5月24日

6） 全学共通、Hokkaido Summer Institute, Fundamentals and Applications of Nanoscience and Nanotechnology、Yuna KIM、2019年6月12日

7） 生命科学院、生命物質科学特論（分子組織科学)、玉置 信之、2019年11月5日～2019年11月26日

8） 大学院共通講義、ナノテクノロジー・ナノサイエンスと光科学、松尾和哉、2019年11月13日

9） 全学共通、あなたの研究を伝えよう：生物学研究の発表と論文執筆の技術、Yuna KIM、2019年9月27日～2019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

1） AMMATHNADU SUDHAKAR Amrutha（博士研究員）

2） 李 潔（客員研究員）

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：１人

1)村松達也、生命科学院生命科学専攻 ：修士(生命科学)、赤色蛍光を示すロタキサン型超分子メカノフォアの開発 Development of rotaxane-based supramolecular mechanophores showing red fluorescence

博士学位：１人

1)NOUSHABA NUSRAT Mafy、生命科学院生命科学専攻 ： 博士（生命科学)、 Driving and Regulation of Macroscopic Motile Functions in Artificial and Living Systems by Molecular Photoswitches（光分子スイッチによる人工系および生体系での巨視的運動機能の駆動と制御）

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　　黄倉侑人 (M2)
　　小森至瑠 (M2)
　　森島一輝 (M1)
　　余　佳興 (M1)
　　周　子凌 (M1)
　　成瀬貴彦 (B4)

１．研究目標

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。

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）。

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。

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

循環型の緑の地球には高効率の太陽電池が必要である。本来、熱力学限界に迫ることの可能なタンデム構造太陽電池にはまだ向上の余地がある。本研究では、図２に示すように、①太陽からの光をハーベストする部分と光電変換を行う部分とを空間的に分離することで耐候性・長期信頼性向上を実現しつつ、更に②光ハーベスト部分に離散的併進対称性を有する全く新しい導波路を採用することで高集光と長距離導波を両立する。特に、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・システムを構成することにより、太陽光の吸収とフォトキャリアの収集効率の最適化を両立可能とし、全太陽光スペクトルに亘って光電変換を行うことを目指している。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、太陽電

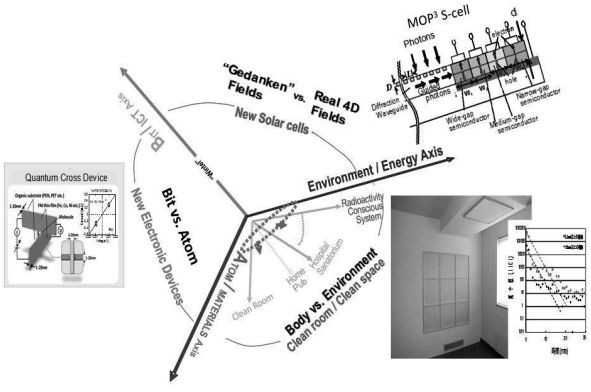


図1. ABE^2 空間とおける多角的な展開

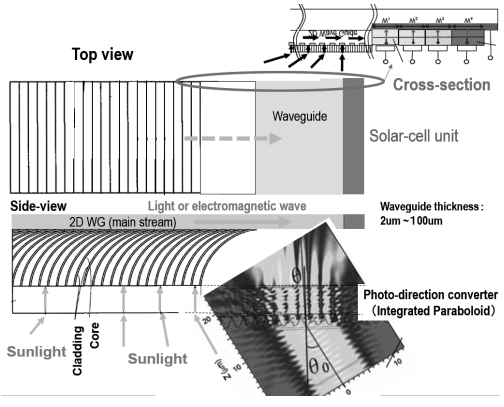


図 2. 新型導波路結合光電変換システムの上面図（中央）と、その断面図（下段）。下段右は、光進行方向変換層の光導波シミュレーション。右上は、マルチストライプフォトンフォトキャリア直交型光電変換素子の断面図。

池を配置する。その際に用いる導波路構造について、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て変換効率向上へ繋がると期待される。

空間反転(左右)非対称性を持つ非対称導波路構造の作製法として、樹脂をベースとした材料の延伸と型押しを併用して作製するシステムを検討している。本系は、導波路という一種の反射光学系より成るので､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得ると予想され、良好な導波特性を得ることが期待される。この導波路端にフォトン・フォトキャリア直交型の太陽電池を結合して総合的に最適なシステムへとつなげることで、高い光電変換効率の実現を目指す。この導波路端に、エッジ入射型太陽電池を結合することもできる。今後、より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 の高清浄環境により、病院、高齢者養護施設や学校はもとより、一般家庭においても、高感受性者（呼吸器系や循環器系疾患のある者、小児、高齢者等）を守ることができる。PM２．５防御策を確立することは、喫煙時の副流煙により受動喫煙の防止、花粉症対策や空気感染性の感染症対策にもつながる。現在、酸素濃度を制御した環境下での代謝測定システムは、特に非接触式では存在しない。

高清浄環境技術 CUSP は、孤立・閉鎖系であり内気がフィルタを何度も通過するため清浄度が高く、捕集効率γが 0.9 程度の市販の空気清浄機でも、図２左下式(2)に示す通り、到達清浄度 n =S σ / γ F が得られ、γ=1 の理想的な場合と比べ、1/0.9～1.1 と僅か 10%しか劣らない高清浄度が得られる。しかも内部の清浄化後は無負荷運転となるためフィルタの寿命が極めて長く、維持コストが安く、又“省エネ”上の優位性を持つ。空気質を決めるもう一つのパラメータは、空気中のガス分子濃度である。酸素は十分に多く、二酸化炭素濃度やホルムアルデヒドなどの濃度は低く保つ必要がある。図３に示す孤立した閉空間である Clean Unit System Platform (CUSP)では、壁の一部が GEM から成ることで分子の拡散を通じて、CUSP 内部のガス分子濃度を制御することができる。即ち､図２に示す T-CUSP では、内外の界面に面積 A、厚み L、分子拡散定数 D を有するガス交換膜(GEM)を用いることで、図２の⑶式より導かれる換気風量 F =AD/L なる対応原理（スケーリング則）に従って機械換気風量 F と同等の換気が実現できる。ガス分子濃度を空気流の出し入れに頼ることなく、対応の必要な分子のみに着目してその濃度を制御でき、環境中立な成分である窒素を動かさないので、省エネ効果の大きい重要な技術である。これにより､②T-CUSP 中での酸素と二酸化炭素濃度を測定することで就寝者の代謝を測定することができる。キネトソムノグラム(KSG)､代謝分析およびそこから得られるビッグデータも活用して展開することで、今後老齢人口比率の高まる日本の健康維持・増進を実現して行きたい。

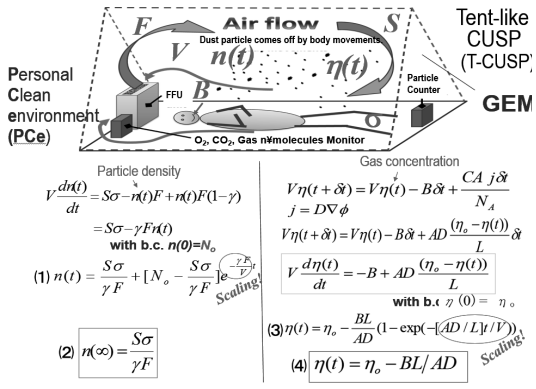


図３　CUSP 内での粒子数とガス分子濃度分析

(b)物性理論

(b1)スカーミオンのホール効果

磁気構造にジャロシンスキー相互作用があるとスピンはお互い，避けあうようになり，螺旋構造などが見られるが，その中でも特異なのは，トポロジカル励起であるスカーミオンである。スカーミオン構造はネール型とブロッホ型が存在するが，薄膜ではネール型が支配的である。ネール型スカーミオンの磁化を以下のようにモデル化すると

$$\boldsymbol{m}=\begin{pmatrix}\cos\Phi(\phi)\sin\theta(r)\\ \sin\Phi(\phi)\sin\theta(r)\\ \cos\theta(r)\end{pmatrix}.\qquad \Phi(\phi)=n\phi+\psi.$$

この極角 $\theta(\boldsymbol{r})$ は次の Euler－Lagrange 方程式に従う。

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial\theta}{\partial\tilde{r}}-\frac{\sin\theta\cos\theta}{\tilde{r}^2}+\frac{D}{\sqrt{AK'}}\frac{\sin^2\theta}{\tilde{r}}-\sin\theta\cos\theta=0.\quad(1)$$

ここで,

$$\tilde{r}=\sqrt{\frac{D}{A}}r,\ K'=K-\frac{\mu_0 M_s^2}{2}.$$

であり，D はジャロシンスキー相互作用定数，K は一軸異方性定数，Ms は飽和磁化である。式(1)を次の境界条件

$$\theta(0)=\pi,\ \theta(\infty)=0.$$

のもと解くと以下のスカーミオンチャージ:-１のスカーミオンが得られる。

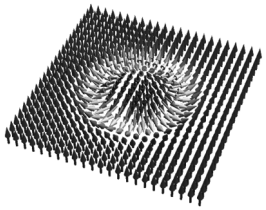


図４(*a*) Neel-type スカーミオンの磁気構造

図１(*b*) Neel-type スカーミオンの中心を通る断面図

スカーミオンチャージ Q は以下のように定義される。

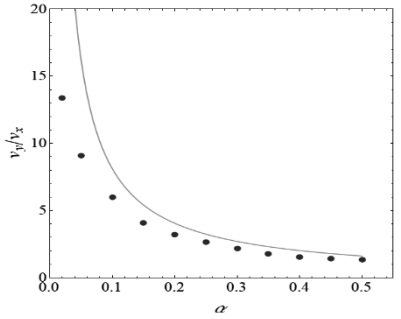
$$Q=\frac{1}{4\pi}\int \boldsymbol{m}\cdot\left(\frac{\partial \boldsymbol{m}}{\partial x}\times\frac{\partial \boldsymbol{m}}{\partial y}\right)dxdy.$$

この量がトポロジカル不変量になっている。
この構造に電流を流すと，スカーミオンのスカーミオン・チャージが±１により，進行方向が偏移する。その時の偏向角のダンピング定数 α 依存性を，磁気構造に剛体近似をして導出した Thiele 方程式による解析解と LLG を使用した近似のない数値解を比較した。その結果が図５である。

図５の実線は解析解で青丸が LLG による数値解である。*Vx,Vy* はそれぞれスカーミオンの速度の *x, y* 成分である。*X*

$$\begin{aligned}H(\boldsymbol{k})=&-[2m-t'(\cos k_y+\cos k_z)+2t_x(\cos k_x-\cos k_0)]\sigma_1\\&-2t\sin k_y\sigma_2-2t\sin k_z\sigma_3+\gamma(\cos k_x-\cos k_0)\sigma_0\\&-\gamma_x(\cos 3k_x-\cos 3k_0)\sigma_1\end{aligned}$$

軸方向に電流は流している。つまり速度の *y* 成分があるということは偏向してることを意味する。この図から解析解と LLG の数値解では，ギルバートダンピング定数 α が小さいときに誤差が大きいことがわかる。実際の物質の金属の鉄などでは α＝0.01などであるので，定量性を持たせるには，LLG を解かないとまずいことがわかる。



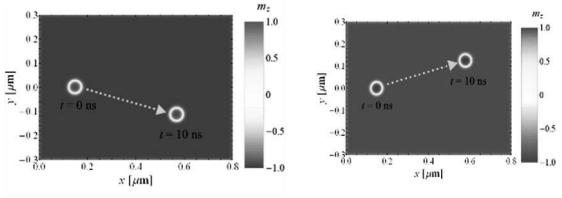


図６：スカーミオン・ホール効果の計算結果のスナップショット
(*a*)*Q*=1 の結果と(*b*) *Q*=-1 の結果。

図６はスカーミオン・ホール効果の計算結果のスナップショットの結果で，スカーミオンチャージ Q が±1の結果を示した。スカーミオンチャージ *Q*＝+1(-1)のときには，y 軸の負(正)の方に偏向しているのがはっきりと確認できる。

(b2) タイプ II ワイル半金属のフェルミアーク

近年，トポロジカル絶縁体の発見以来，トポロジカル物質が次々と発見されている。その中で，スピントロニクスなどの工学応用の観点から，トポロジカル半金属である Weyl 半金属が注目されている。Weyl 半金属にはタイプ I とタイプ II があることが知られている。以前，学生の伊藤君とはタイプ I の Weyl 半金属のフェルミアークの電子状態を計算したが，今年度は，学生の森島君とタイプ II の Weyl 半金属のフェルミアークの電子状態を計算した。

タイプ I とタイプ II の Weyl 半金属の違いは，下の図７に模式的に示してある。つまりタイプ II の Weyl 半金属はチルトしていて，電子ポケットやホールポケットをもつことが違っている。このタイプ II の Weyl 半金属のフェルミアークを計算するために，以下のモデルハミルトニアンを使用する。このハミルトニアンは時間反転対称性を破っている。

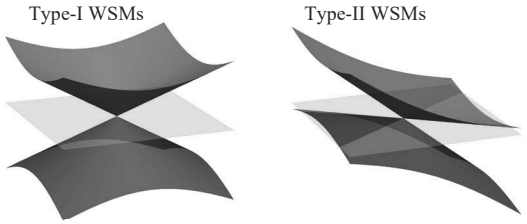


図７：タイプ I とタイプ II のワイル半金属の模式図

ここで，k_0 はワイル点のある場所であり，k_x 軸上にある。γ がワイルコーンのチルトを制御するパラメータである。Weyl 半金属は時間反転対称性か反転対称性のどちらかを破った系でしか存在しない。図８はタイプ I とタイプ II のワイル半金属のフェルミアークの電子構造を *y* 軸を開放端条件で計算したものである。*E*=0 でバンドがギャップレスになっていることがわかる。(*a*)と(*b*)は E=0 付近だけでなく，考えているエネルギー全体をプロットしたもので，(*c*)と(*d*)は E=0 の近傍の領域をプロットしたものである。図5(*c*)と(*d*)の中で上の実線が *xz* 面の上面にギャップレス状態を持つフェルミアークであり，下の実線が *xz* 面の下面にギャップレス状態を持つフェルミアークである。これから，タイプ II でもフェルミアークが出るが，タイプ I と違い，フェルミポケットを囲むように出現することがわかる。このことより，電気伝導性はタイプ I よりタイプ II の方が高

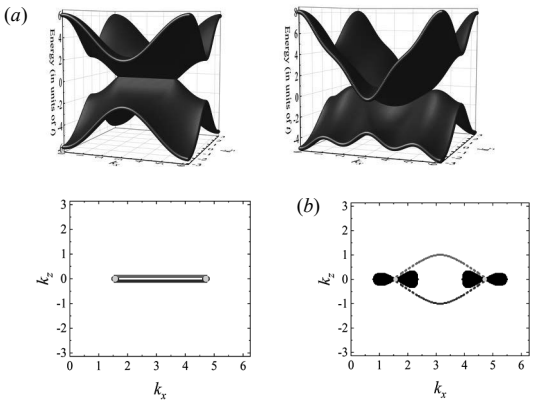


図８：タイプ I とタイプ II のワイル半金属のフェルミ

いと予想され，実際計算するとそのようになっている。

３．今後の研究の展望

デバイスベース並びにプラットフォームベースで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。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。

物性理論の方からは、今年度は，強磁性体中のトポロジカルな励起であるスカーミオンのホール効果の研究を行ったが，近年注目されている反強磁性体でもスカーミオンが存在していることが判明しているので，反強磁性体でのスカーミオンの形状ならびに反強磁性体のスカーミオンにスピンtransfer torque及びspin orbit torqueなどが作用したときの反強磁性体中のスカーミオンの運動をLLGなどの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。今年度は，F.Schindler等のモデルの電子構造の再現を行ったが，これらのモデルは，自由電子モデルなので，来年度は，その高次トポロジカル絶縁体のモデルに電子相関を導入した際の電子構造や電気伝導特性の計算を行う予定である。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。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。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1) T. Hsieh, Y. Liu, S. Liang, M. Yasutake and **A. Ishibashi**: “The Tent-type Clean Unit System Platform for Air Cleaning and Non-contact Sleep Assessment ”, Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Biology and Bioinformatics (ICCBB 2019), Association for Computing Machinery, New York, NY, United States: 47-51 (2019)

2) **A. Ishibashi,** N. Sawamura, T. Matsuoka, H. Kobayashi and T. Kasai: “Asymmetric Waveguide-Coupled Scheme for Multi-striped Orthogonal Photon-Photocarrier-Propagation Solar Cell (MOP3SC) ”, Transactions of the Materials Research Society of Japan, 44(5): 187-191 (2019)

3) **A. Ishibashi,** M. Yasutake, T. Hsieh and S. Liang: “Clean Unit System Platform for Exercise Science and Sports Medicine”, Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 124(S3): 356- (2019)

4) 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 & Clinical Pharmacology & Toxicology, 124(S3): 187-188 (2019)

5) K.Kondo and R.Ito,” Quantum spin Hall phase in honeycomb nanoribbons with two different atoms: edge shape effect to bulk-edge correspondence”, *J. Phys. Commun.* **3** 055007 (2019).

6) Y. Ishida and K. Kondo, “An effect of the Gilbert damping constant on the skyrmion Hall effect”, *J. Magn. Magn. Mater.* 493 165687 (2020).

7) Y. Ishida and K. Kondo,” Theoretical comparison between skyrmion and skyrmionium motions for spintronics applications”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** SGGI04 (2020).

8) H.Teramoto, A. Tsuchida, K. Kondo, S. Izumiya, M. Toda, T. Komatsuzaki, “APPLICATION OF SINGULARITY THEORY TO BIFURCATION OF BAND STRUCTURES IN CRYSTALS”, Journal of Singularities **21** 289 (2020).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解読・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

・国内特許

1) 石橋 晃 ： 特願2019-543728、「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」、2020年02月28日

・国際特許

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1) **Ishibashi***, T. Etoh, N. Noguchi, J. Matsuda and Y. Ohashi : “Clean Unit System Platform for Houses, Buildings, and Schools ”, The 6th International Symposium on Engineering and Natural Sciences, Centara Watergate Pavillion Hotel, Bangkok, Thailand (2019-11)
2) **A. Ishibashi***: “CUSP in Atom-Bit-Energy・Environment (ABE2) Space ”, NCKU Symposium, 国立成功大学(台湾), Taiwan (Province of China) (2019-08)
3) **A. Ishibashi*** : “Waveguides with Spatial Asymmetry for Concentrator Solar-Cells ”, 2019 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR), Goyang Gyeonggi, Korea (the Republic of) (2019-06)

ｂ．招待講演（国内学会）

1) **石橋 晃***：「新型導波路および同導波路結合光電変換システム」、第 21 回 光無線給電検討会 兼 第 6 回レーザー学会光無線給電技術専門委員会、電気通信大学、Japan (2020-02)

ｃ．一般講演（国際学会）

1) T. Hsieh*, S. Liang, **A. Ishibashi,** Y. Liu and M. Yasutake : “The Tent-Type Clean Unit System Platform for Air Cleaning and Non-Contact Sleep Assessment”, The 4th Int. Conf. Biomedical Imaging, Signal Processing (ICBSP 2019), Nagoya City University, Nagoya, Japan (2019-10)
2) **A. Ishibashi*,** Y. Ohkura and N. Sawamura : “Towards a Planer Photon-harvesting Waveguide having Discrete Translational Symmetry with Open Core Geometry”, The 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference, PACIFICO Yokohama, Japan (2019-04)
3) Z. Zhou*, C. Chiu, S. Liang and **A. Ishibashi** : “Comparison of the relation between dusts particles and mass in Clean Unit System Platform (CUSP) by different devices”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2019-12)
4) Y. Ohkura*, N. Sawamura, T. Kasai and A. Ishibashi : “Asymmetric Redirection Waveguide for Concentration Solar Cell Systems”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2019-12)
5) Y. Ishida* and K. Kondo,” Topological Hall Effects and Topological Spin Hall Effects Caused by a Skyrmion and a Skyrmionium”, The 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials(MMM2019), Las Vegas, USA (2019/11).
6) S. Komori* and K. Kondo,” Higher-Order Topological Insulator Taking into Consideration Uniaxially Anisotropic Hopping” ,The 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials(MMM2019), Las Vegas, USA (2019/11).
7) Y. Ishida* and K. Kondo,” A Study of Dynamics of Skyrmioniums by Spin Transfer Torque”, 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019), Nagoya University, Japan (2019/9).
8) Y. Ishida* and K. Kondo,” A Study of Topological Hall Effects and Topological Spin Hall Effects Caused by a Skyrmion” 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan (2019/12).
9) S. Komori* and K. Kondo,” A Study of Higher-Order Topological Insulator with Uniaxially Anisotropic Hopping” , The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium ″ki″, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo Japan (2019/12).
10) K. Morishima*,S. Komori and K. Kondo,” A Study of Fermi Arcs in Type-II Weyl Semimetals”, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan, 2019/12.

ｄ．一般講演（国内学会）

1) 黄倉 侑人*、河西 剛、澤村 信雄、**石橋 晃** ：「非対称導波路結合集光型太陽電池における方向変換層の構造と性能評価 」、日本応用物理学会 2020年春季大会、上智大学、東京、Japan (2020-03)
2) 余 佳興*、澤村 信雄、**石橋 晃** ： 「Mechanical Simulation for Asymmetrical Waveguides for Concentrator Solar Cells 」、日本応用物理学会 2020年春季大会、上智大学、東京、Japan (2020-03)
3) 周 子凌*、Chiu Ching-Yu、Liang Sheng-Fu、**石橋 晃** ：「Comparison of the dust particles number and mass using new sensor module in Clean Unit System Platform (CUSP) 」、日本応用物理学会 2020年春季大会、上智大学、東京、Japan (2020-03)
4) **石橋 晃***、周 子凌、Hsieh Tsung-Hao、Liang Sheng-Fu、安武 正弘 ：「孤立・閉鎖系清浄環境ＣＵＳＰとその睡眠分析応用 」、日本応用物理学会 2019年秋季大会、北海道大学、Japan (2019-09)
5) **石橋 晃***、黄倉 侑人、余 佳興、澤村 信雄 ：「非対称導波路結合集光型太陽電池及び周期配列放物線鏡付テイパー非対称導波路とSi系太陽電池の結合 」、日本応用物理学会 2019年秋季大会、北海道大学、Japan (2019-09)
6) 石田 雄一*,近藤 憲治:「スカーミオンによるトポロジカル・ホール効果及びトポロジカル・スピン・ホール効果」，第80回　応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学札幌キャンパス (2019/9).
7) 小森 至瑠*, 近藤 憲治:「一軸異方性を有するホッピングが高次トポロジカル絶縁体へ与える影響」，第80回　応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学札幌キャンパス (2019/9).
8) 森島 一輝 *,近藤 憲治:「Type-Ⅱワイル半金属におけるフェルミアーク」，第80回　応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学札幌キャンパス (2019/9).

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1) **石橋 晃***：「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池の進捗と清浄環境ＣＵＳＰの展開」、2019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 、北海道大学、Japan (2019-07)
2) T. Hsieh*, C. Chen, **A. Ishibashi** and S. Liang : "The Tent-type Clean Unit System Platform for Air Cleaning and Non-contact Sleep Assessment", The 5th Hokkaido University Cross-departmental Symposium 第5回北海道大学部局横断シンポジウム, Hokkaido University, Japan (2019-11)
3) C. Chiu*, Z. Zhou, T. Hsieh, S. Liang and **A. Ishibashi** : "A versatile isolated closed-system, Clean Unit System Platform (CUSP), and its application for sleep enhancement-system design and performance verification", The 5th Hokkaido University Cross-departmental Symposium 第5回北海道大学部局横断シンポジウム, Hokkaido University, Japan (2019-11)

4.7 シンポジウムの開催

1) 石橋 晃 ：「令和元年度物質・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 」、11人、北海道大学 電子科学研究所1階会議室 (札幌) (2019年07月05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) 石橋 晃、榎本良治 (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) A. Ishibashi, S. Liang (NCKU, Taiwan) : "清浄環境ＣＵＳＰを利用した睡眠品質の数値解析の検討", 物質・デバイス拠点事業
3) 石橋 晃 (シーズテック株式会社) : 「導波路結合タイプ光電変換素子のパワービーミング応用の検討」
4) 石橋 晃、久保 耕司 (帝人株式会社フィルム事業本部) : 「屈折率異方性層を有する左右非対称導波路の作製の検討 」
5) 石橋 晃、松田 順治 (飛栄建設株式会社) : 「就労・居住・静養空間への清浄環境ＣＵＳＰの展開の検討」

ｃ．委託研究

1) 石橋 晃、松田 順治 (飛栄建設株式会社) : 「病院・家庭環境導入用テント式ＣＵＳＰ量産可能タイプの完成」
2) 石橋 晃 (株式会社 石橋建築事務所) : 「新型光導波路の建築素材応用の検討」

ｄ．国際共同研究

1) A. Ishibashi、S. Liang(台湾国立成功大学) : "清浄環境ＣＵＳＰを利用した睡眠解析実験", MOST(台湾)

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：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」
2) 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（基盤研究（B））13,500千円：「**スピン軌道トルクによるハーフメタル強磁性体磁化制御とそのデバイス応用**」

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

該当なし

4.11 社会教育活動

ａ．公的機関の委員

1) 石橋 晃: 独立行政法人日本学術振興会科学研究費委員会専門委員(審査委員)
2) 石橋 晃: 産業技術総合研究所客員研究員(ファブシステム研究会委員)

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 : 第２回 Optical Wireless Power Transmission Conference, Program Committee
3) Kenji Kondo: Editorial Board Member for Scientific Reports (published by Nature Publishing Group) (2014-06- present)
4) 磁気学会:スピントロニクス専門研究会 世話人

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-現在)

ｄ．外国人研究者の招聘

1) Ching-Yu Chiu、NCKU (Taiwan)(2019年09月01日～2019年09月15日)
2) Sun-Yuan Hsieh 、Professor, Department of Computer Science and Information Engineering, NCKU (Taiwan)、(2019年08月21日～2019年08月27日)

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1) 理学院: 半導体物理学 I、石橋 晃、2019年10月1日～2020年3月31日
2) 理学部、物理外国語演習、石橋 晃、2019年10月01日～2020年03月31日
3) 理学院: 現代物理学(分担)、石橋 晃、2019年4月1日～2019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、2019年4月1日～2019年9月30日
5) 全学教育: 現代物理学入門(分担)、石橋 晃、2019年4月1日～2019年9月30日

6) 理学部、物理外国語文献講読II、近藤 憲治、2019年4月1日～2019年8月31日
7) 理学院、物理学特別研究I、近藤 憲治、2019年4月1日～2020年3月31日
8) 理学院、物理学論文輪講、近藤 憲治、2019年4月1日～2020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、2019年4月1日～2019年8月31日

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

ｇ．新聞・テレビ等の報道

新聞

1) Liang Sheng-Fu、石橋 晃：自由時報（台湾） 2019年08月07日 「就怕睡不著！成大與北海道大學合作研究睡眠感測與改善」
2) Liang Sheng-Fu、石橋 晃：中華日報（台湾）2019年08月07日 「成大偕日校 跨國續研究睡眠感測」
3) Liang Sheng-Fu、石橋 晃：台湾国立成功大学新聞中心 2019年08月07日 「成大醫資所與日本北海道大學電子所國際合作 建構全方位睡眠促進方案」

テレビ

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）石田雄一，物性物理学専攻，修士(理学),
主査：近藤憲治
論文タイトル「トポロジカル磁気渦構造のマイクロマグネティクスによる理論研究 ースピントロニクスにおける応用への考察ー」

博士学位（０人）

〇卒論指導

１）森島 一輝，物理学科，学士(理学),
主査:近藤 憲治
卒論タイトル「Fermi Arcs and Magnetoresistance in Weyl Semimetals」

（石橋 晃）

1) 博士論文副査(理学院物性物理学専攻):Doan Tung Anh, “Microstructured Resonant Infrared Absorbers and Emitters for Spectroscopic Sensing and Thermal Heating Applications”
2) 博士論文副査(理学院物性物理学専攻): Kaur Manpreet, “Plasmonic Dielectric Hybrid Composite Structure for Solar Energy Harvesting and Water Purification”
3) 修士論文副査(理学院物性物理学専攻): 石田雄一「トポロジカル磁気渦構造のマイクロマグネティクスによる理論研究―スピントロニクスにおける応用への考察―」

（近藤 憲治）

1) 森島 一輝, **（理学部物理）**:「Fermi Arcs and Magnetoresistance in Weyl Semimetals」
2) 修士論文主査: 石田 雄一(物性物理学専攻):「２トポロジカル磁気渦構造のマイクロマグネティクスによる理論研究 ースピントロニクスにおける応用への考察ー」
3) 修士論文副査：村田達志 (物性物理学専攻):「相互作用する3 次元Bose 気体における異常次元の評価」

〇博士論文副査 (近藤憲治)

1) 河野航(理学院物性物理学専攻):「VARIATIONAL THEORIES WITH MANY-BODY CORRELATIONS FOR DILUTE BOSE{EINSTEINCONDENSATES（多体相関を含む希薄ボーズ・アインシュタイン凝縮に対する変分理論）」

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, Ph.D, 2018.4～）
ポスドク　Anup Sanchela（IIT Bombay，Ph.D，2016.7～2019.6），張　雨橋（JSPS Fellow，博士(情報科学), 2019.4～）
事務補助員　石野松美　（2019.5～）
博士課程　小野里尚記，魏　冕，キム ゴウン（情報科学研究科），楊　倩，呉　宇璋（情報科学院）
特別研究学生　梁　豆豆（USTB，中国）
修士課程　佐藤晃一，須郷堅雄（情報科学研究科），龔　李治坤，高嶋佑伍（情報科学院）
研究生　陳　斌杰，呉　礼奥
学部学生　酒井貴樹，井口璃音，藤本卓嗣，大倉拓真，権　寧河，吉田健吾（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」、「透明酸化物半導体」、「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) 透明酸化物半導体

ITO（スズ添加酸化インジウム）に代表される透明導電性酸化物は、古くから液晶テレビや有機ELテレビの透明電極として利用されている。一般的には、スパッタリング法などでガラス基板上に作製されたセラミックスのような多結晶薄膜が用いられている。当研究室では、透明導電性酸化物を、透明酸化物半導体として利用可能にするための研究を行っている。具体的には、積層構造の作製を可能にし、高いキャリア移動度を実現するための高品質エピタキシャル薄膜の作製と、製造コストを下げ、実用化が可能な材料にするために、室温下で高品質アモルファス薄膜を作製する研究を行っている。高品質薄膜化することで、化合物半導体で実現されてきたダイオードやトランジスタが実現した。当研究室では、こうした透明酸化物半導体薄膜の作製と物性計測について、基礎から応用まで、幅広く研究している。

(d) スピントロニクスデバイスの開発

スピントロニクスデバイスを構成素子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は、低消費電力なエレクトロニクスの実現のために注目されている。そのようなスピントロニクスデバイスへの情報書き込み動作には電気的な磁化方向の制御が不可欠であり、現状、この動作に比較的大きな電力を要することが応用上の課題の一つとなっている。そこで、従来から用いられている強磁性金属にはない特異な電気的・磁気的な性質を示す酸化物、及び酸化物積層構造に着目し、これらを利用した電気的磁化方向制御の高効率化に関する研究に取り組んでいる。特に、酸化物、及び酸化物積層構造を用いて、近年、高速かつ低消費電力な電気的磁化反転手法として期待されているスピン軌道相互作用に基づいたスピン軌道トルクについての研究を進めている。

２．研究成果

(a) 酸化物熱電変換材料

熱電変換材料候補として知られるNa_xCoO_2を含む一群の層状コバルト酸化物A_xCoO_2（A = Li，Ca，Na，Sr，Baなど）の結晶構造は，Ax層と，CoO_6八面体が稜共有して作られるCoO_2層が，c軸方向に交互積層されたものとみなせる。A_x層とCoO_2層の界面で電子散乱が起こるため，層に平行な方向の熱電変換出力因子（$PF = S^2 \cdot \sigma$）は直交方向の数倍大きいことが実験的に示されている。熱伝導率についても同様の議論がなされてきたが，最近，我々の研究グループは，A_xが軽い（eg. Li）場合には層に平行な方向で熱伝導率κが大きく、熱輸送特性の異方性が大きいが，A_xが$Ca_{0.33}$，$Na_{0.8}$，$Sr_{0.33}$と重くなるにつれて徐々に層に平行な方向のκが減少し，異方性が減少することを見出した（Fig. 1）[H.J. Cho et al., Adv. Mater. Interfaces (2020)]。この描像が正しければ，より重い金属でA_xを置換することでκの異方性はほぼなくなるはずであり，また，$Na_{0.8}CoO_2$のように高い出力因子が維持されればZTを大きく増強できるはずである。今年度は，AをBaに置換した$Ba_{0.33}CoO_2$が層に平行な方向において高いPFと低いκを両立し，酸化物の室温のZTとしては極めて大きなZT = 0.23が得られた。温度依存性も含め，現在詳細に調査中である。

(b) 「電気は通すが熱は通さない」一次元原子欠陥ワイヤーを導入した酸化タングステンエピタキシャル薄膜

高電子伝導と低熱伝導の共存など、異常な電子伝導と熱伝導を示す材料は、熱電変換などの効率的な熱管理システムを実現するために本質的に重要である。点欠陥または層を導入することは、熱伝導率を低下させる効果的な方法として知られているが、高電子伝導と低熱伝導の共存は、電子とフォノンが不純物、欠陥、および境界によって同時に散乱されるため、依然として困難である（Fig. 2）。本研究では、正確に制御された酸素雰囲気下で$LaAlO_3$基板上にヘテロエピタキシャル成長した酸素欠乏酸化タングステン（WO_x）膜（$2.7 < x < 3.0$）で、高電子伝導と低熱伝導が同時に共存できることを明らかにした。結晶学的解析により、得られたWO_x膜は面内方向に1D原子欠陥トンネルを含み、xの減少とともに欠陥密度が増加することが分かった。WOx 薄膜の面直方向の熱伝導率は x の減少とともに劇的に減少したが、電気伝導率はキャリア電子の増加により大幅に増加し、$x < 2.9$の場合に高電子伝導と低熱伝導が共存した。これはアモルファス[G. Kim, H. Ohta et al., J. Phys. Chem. C (2019)]や多結晶 WO_xでは見られない現象である。この発見は、熱電材料などの効率的な熱管理材料を設計するのに役立つだろう。[G. Kim, H. Ohta et al., 投稿中]

(c) $SrCoO_x$酸素スポンジの電気化学反応の巨視的可視化

コバルト酸ストロンチウム（$SrCoO_x$）は、「酸素スポンジ」と呼ばれるほど高速のトポタクティックな電気化学酸化・還元反応を示す材料として知られている。我々は、反強磁性絶縁体である$SrCoO_{2.5}$から、強磁性金属$SrCoO_3$への変化を利用した記憶デバイスを提案したが、その動作速度が遅く、繰り返し耐久性が良くないという問題がある。本研究では、こうした問題を改善する鍵となる電気化学酸化・還元反応の巨視的な現象を明らかにすることを目的とし、$SrCoO_x$の電気化学的酸化をマクロスコピックに視覚化する。PLD法により$SrCoO_{2.5}$エピタキシャル薄膜を作製し、酸化電流を制御することで様々な酸化状態の$SrCoO_x$を調製した。電気化学的に酸化された$SrCoO_x$エピタキシャル膜の抵抗率と熱電能の絶対値の両方の急激な減少は、酸化方向に沿って最初に柱状酸化が発生し、その後酸化方向に垂直に広がることを示した（Fig. 3 upper）。さらに、導電性AFM

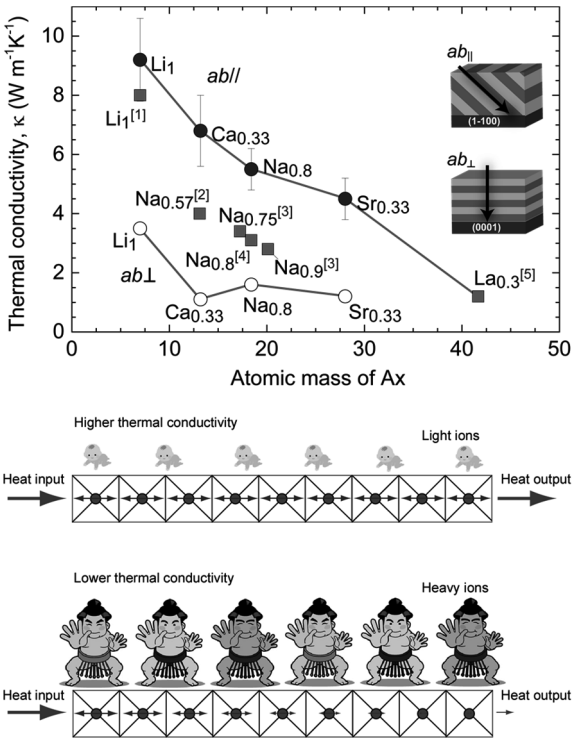


FIG. 1 | Anisotropic thermal conductivities of A_xCoO_2. The sizes of the error bars of $\kappa_\perp$ were smaller than the circles. $\kappa_{||}$ tends to decrease with the average atomic mass of A_x, but $\kappa_\perp$ only depends on x.

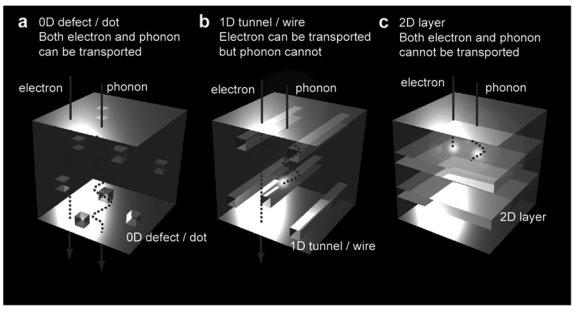


FIG. 2 | Hypothesis for the realization of electron transmitting phonon suppression.

を使用して現象を直接視覚化した（Fig. 3 lower)。この巨視的な描像は、$SrCoO_x$の電気化学的酸化還元反応を利用した機能デバイスの開発に役立つだろう。[Q. Yang, H. Ohta et al., Adv. Mater. Interfaces (2019)]

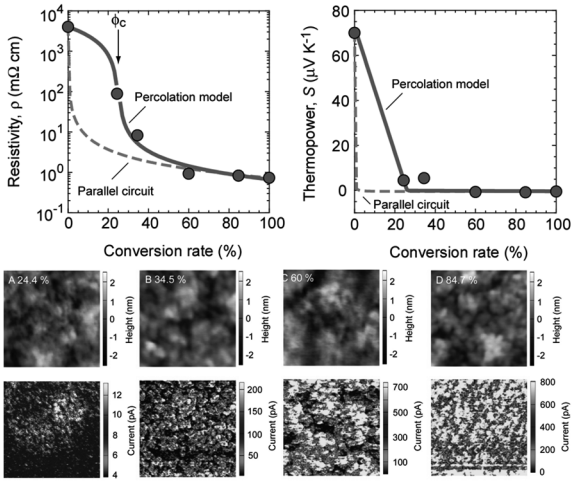


FIG. 3 | (upper) Electron transport properties of the $SrCoO_x$ as a function of the conversion rate at room temperature. (left) Resistivity and (right) thermopower. The as grown sample (0 %) showed the resistivity of 4.0 Ω cm and the thermopower of +70 μV K^{-1}, whereas 100 % converted sample showed 0.7 mΩ cm and −0.5 μV K^{-1}. (lower) Macroscopic mapping of insulating $SrCoO_{2.5}$ region and conducting $SrCoO_{3-\delta}$ region using conductive AFM (bottom). Topographic AFM images (2 μm × 2 μm).

(d) 熱電能電界変調法によるSnO_2薄膜トランジスタの解析

高度なフラットパネルディスプレイの開発には、高電界効果移動度（μ_{FE}）を備えた透明アモルファス酸化物半導体（TAOS）ベースの透明薄膜トランジスタ（TTFT）が不可欠である。現在、TAOS として広く普及したアモルファス（a-）$InGaZnO_4$の次の世代の TAOS として、我々は a-SnO_2に着目している。a-SnO_2は、a-$InGaZnO_4$と比較して、μ_{FE}が高いことから更なる高精細ディスプレイの実現に繋がる。また、希少元素であるインジウムが含まれていないことから材料コストが下げられる。更にバンドギャップが a-$InGaZnO_4$と比較して約1 eV 大きく（~4 eV)，DNA の光吸収波長である270 nm の深紫外線に対しても透明性を有するなど、いくつかの利点がある。これまでに a-SnO_2-TTFT の動作特性は数件報告されたが、SnO_2のガス検知特性が強いため、トランジスタ動作が不安定であり、その動作メカニズムは明らかにされていない。本研究では、熱電能電界変調法により a-SnO_2-TTFT の動作メカニズムを明らかにすることを目的とした。膜厚4.2 nm の a-SnO_2薄膜を表面パッシベーションなしでチャネルとして使用して、ボトムゲートトップコンタクトタイプの TTFT を作製し、空気中と真空中におけるトランジスタ特性および熱電能の印加ゲート電圧依存性を計測した（Fig. 4)。ゲート電界変調から得られた熱電能のシートキャリア濃度依存性と、キャリア有効質量を0.47 m_0と仮定して算出した熱電能のバルクキャリア濃度依存性の比較から、チャネルの有効厚さは、ガスの雰囲気に関係なく常に約1.7±0.4 nm だったが、異なる雰囲気で大きなしきい値ゲート電圧シフトが発生した。これは、a-SnO_2のガス分子との相互作用および結果として生じるフェルミエネルギーのシフトにより、a-SnO_2薄膜表面付近（～2.5 nm）でキャリアが枯渇するためである。これらの結果は，a-SnO_2-TTFT を開発するための有用な設計指針に繋がるものである。[D. Liang, H. Ohta et al., Appl. Phys. Lett. (2020)]

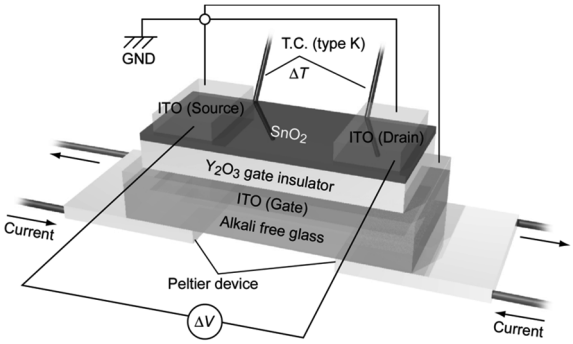


FIG. 4 | Electric-filed thermopower modulation measurement of the bottom-gate top-contact a-SnO_2 TTFT. The top surface of the 4.2-nm-thick SnO_2 channel is exposed to the air. The channel length L is 200 μm and the channel width W is 400 μm. The gate insulator is 300-nm-thick polycrystalline Y_2O_3 (ε_r = 20). The SnO_2 channel is placed on the gap (~2 mm) between two Peltier devices, which are used to give temperature difference (ΔT) between both edges of the channel. Two K-type thermocouples (T.C.) are located at both edges of the SnO_2 channel to measure the temperature difference between both edges of the SnO_2 channel. The thermo-electromotive force (ΔV) and ΔT are measured simultaneously during fixed gate voltage (V_g) application.

(e) $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/LaAlO_3/SrTiO_3$積層構造における電流誘起有効磁場

スピン軌道相互作用に基づくスピン軌道トルク(電流誘起有効磁場)を利用したスピントロニクスデバイスは、高速・低消費電力な不揮発性ランダムアクセスメモリ・ロジックの構成素子として期待されている。LAO/STO 界面に誘起される2次元電子系は、強いスピン軌道相互作用によって電流誘起有効磁場の発生に必要な電流-スピン流変換を高効率に行うことが可能であり、電流誘起有効磁場の発生構造への応用が期待される。本研究では、このような2次元電子系のスピン軌道相互作用を利用した電流誘起有効磁場の発生効率向上を目的として、LSMO と LAO/STO の積層

構造において電流誘起有効磁場を調べた。

LSMO(18)/LAO(0, 6)を STO(001) 基板上にパルスレーザー堆積法を用いて成膜した[括弧内の数字はユニットセル(u.c.)単位の各層の膜厚]。作製した LAO(6)/STO は伝導性を示し、4 u.c.以上の LAO 膜厚を有する LAO/STO で界面に2次元電子系が誘起されるという先行研究の結果と一致する。これらの積層構造を、フォトリソグラフィと Ar イオンミリングによって[100]方向に幅10 μm のチャネルと2対のホールプローブを有するホールバー形状素子に加工した。プレーナーホール抵抗を反映した横抵抗の外部磁場角度依存性から、LSMO/LAO/STO は LSMO/STO と正負反対符号のプレーナーホール係数を示すことがわかった。続いて、チャネルに電流を印加した状態での横抵抗の外部磁場依存性を解析することにより有効磁場 $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ を求めた。Fig. 5に T_{d} = 40 K における $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ の電流 I 依存性を示す。ここで、ジュール発熱の影響を除くため、低電流で測定した縦抵抗の温度依存性を用いて高電流印加時の素子温度 T_{d} を求めた。LSMO/LAO/STO と LSMO/STO では、ともに膜面内方向の電流によって $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ が LSMO に作用し、LSMO/LAO/STO における $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ は LSMO/STO と逆方向であった。さらに、LSMO/LAO/STO における単位電流当たりの $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ の大きさは LSMO/STO の約3.5倍であった。プレーナーホール効果はスピン軌道相互作用に起因していること、及びプレーナーホール係数と $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ の符号はともに LAO/STO 界面の2次元電子系の有無に依存していることから LSMO/LAO/STO で観測された $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ は、LAO/STO 界面の2次元電子系によって LSMO のスピン軌道相互作用が変化したことに関係していることが示唆される。これらの結果は、スピン軌道トルクを利用したスピントロニクスデバイスの高性能化に関する知見を与えるものである。[M. Yamanouchi, T. Oyamada, H. Ohta, AIP Advances **10**, 015129 (2020).]

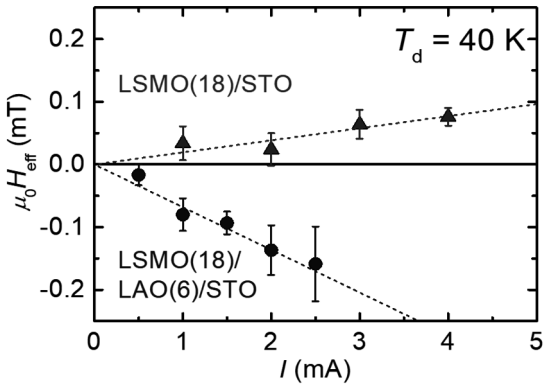


Fig. 5. | Current I dependence of effective magnetic field $\mu_0 H_{\mathrm{eff}}$ at device temperatgure T_{d} = 40 K.

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、強磁性金属/酸化物積層構造を用いた電流誘起有効磁場の高効率発生、及び特異な電子状態を有する強磁性酸化物における電流誘起磁壁移動に関する研究に取り組む。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） Anup Sanchela*, Mian Wei, Joonhyuk Lee, Gowoon Kim, Hyoungjeen Jeen, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hai Jun Cho, Hiromichi Ohta*, “Buffer layer-less fabrication of high-mobility transparent oxide semiconductor, La-doped $BaSnO_3$”, J. Mater. Chem. C 7, 5797-5802 (2019).

2） Kyeong Tae Kang, Chang Jae Roh, Jinyoung Lim, Taewon Min, Jun Han Lee, Kyoungjun Lee, Tae Yoon Lee, Seunghun Kang, Daehee Seol, Jiwoong Kim, Hiromichi Ohta, Amit Khare, Sungkyun Park, Yunseok Kim, Seung Chul Chae, Yoon Seok Oh, Jaekwang Lee, Jaejun Yu, Jong Seok Lee, and Woo Seok Choi*, “Room-temperature ferroelectric ferromagnet in 1D tetrahedral chain network”, Adv. Mater. 31, 1808104 (2019).

3） Gowoon Kim, Hai Jun Cho*, Yu-Miin Sheu, and Hiromichi Ohta*, “Electrical, optical and thermal transport properties of oxygen deficient amorphous WO_x ($2.5 < x < 3$) films”, J. Phys. Chem. C 123, 15419 (2019). Cover

4） Yuqiao Zhang*, Kenyu Sugo, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta*, “Thermoelectric Phase Diagram of the $SrTiO_3$ - $LaTiO_3$ Solid-Solution System through a Metal to Mott Insulator Transition”, J. Appl. Phys. 126, 075104 (2019).

5） Hai Jun Cho*, Bin Feng, Takaki Onozato, Mian Wei, Anup Sanchela, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta*, “High electron and thermal transport properties of La-doped $BaSnO_3$ films fabricated under ozone atmosphere”, Phys. Rev. Materials 3, 094601 (2019). Editor’s Suggestion

6） Qian Yang, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen*, and Hiromichi Ohta*, “Macroscopic visualization of fast electrochemical reaction of $SrCoO_x$ oxygen sponge”, Adv. Mater. Interfaces 6, 1901260 (2019). Outside Back Cover

7） Kaito Kanahashi, Masatou Ishihara, Masataka Hasegawa, Hiromichi Ohta, and Taishi Takenobu*, “Giant power factors in p- and n-type large-area graphene films on a

flexible plastic substrate", npj 2D Mater. Appl. 3, 44 (2019).

8） Tingting Yao, Yixiao Jiang, Chunlin Chen*, Xuexi Yan, Ang Tao, Lixin Yang, Chuihong Li, Kenyu Sugo, Hiromichi Ohta, Hengqiang Ye, Yuichi Ikuhara, and Xiuliang Ma*, "Ferroelectric oxide thin film with an out-of-plane electrical conductivity", Nano Lett. 20, 1047-1053 (2020).

9） Hai Jun Cho*, Yugo Takashima, Yukio Nezu, Takaki Onazato, and Hiromichi Ohta*, "Anisotropic Heat Conduction in Ion Substituted Layered Cobalt Oxides", Adv. Mater. Interfaces 7, 1901816 (2019).

10）Seung Gyo Jeong, Taewon Min, Sungmin Woo, Jiwoong Kim, Yu-Qiao Zhang, Seong Won Cho, Jaeseok Son, Young-Min Kim, Jung Hoon Han, Sungkyun Park, Hu Young Jeong, Hiromichi Ohta, Suyoun Lee, Tae Won Noh, Jaekwang Lee* and Woo Seok Choi*, "Phase Instability amid Dimensional Crossover in Artificial Oxide Crystal", Phys. Rev. Lett. 124, 026401 (2020).

11）Mian Wei, Anup Sanchela, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hai Jun Cho*, and Hiromichi Ohta*, "High electrical conducting deep-ultraviolet-transparent oxide semiconductor La-doped $SrSnO_3$ exceeding ~3000 S cm^{-1}", Appl. Phys. Lett. 116, 022103 (2020).

12）Michihiko Yamanouchi*, Tatsuro Oyamada, and Hiromichi Ohta, "Current-induced effective magnetic field in $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/LaAlO_3/SrTiO_3$ structures", AIP Adv. 10, 015129 (2020).

13）Takaki Onozato*, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta*, "An oxide-based flexible electrochromic transistor under mechanical stress", Jpn. J. Appl. Phys. 59, 024002 (2020).

14）Tomoya Oshikiri, Hiroki Sawayanagi, Keisuke Nakamura, Kosei Ueno, Takayoshi Katase, Hiromichi Ohta, and Hiroaki Misawa*, "Arbitrary control of the diffusion potential between a plasmonic metal and a semiconductor by an angstrom-thick interface dipole layer" , J. Chem. Phys. 152, 934705 (2020).

15）Hisaaki Tanaka*, Kaito Kanahashi, Naoya Takekoshi, Hiroaki Mada, Hiroshi Ito*, Yukihiro Shimoi, Hiromichi Ohta, Taishi Takenobu*, "Thermoelectric properties of a semicrystalline polymer doped beyond the insulator-to-metal transition by electrolyte gating", Science Adv. 6, eaay8065 (2020).

16）Hai Jun Cho*, Koichi Sato, Mian Wei, Gowoon Kim, and Hiromichi Ohta*, "Effect of lattice distortions on the electron and thermal transport properties of transparent oxide semiconductor $Ba_{1-x}Sr_xSnO_3$ solid solution films", J. Appl. Phys. 127, 115701 (2020). Editor's pick

17）Dou-dou Liang*, Yu-qiao Zhang, Hai Jun Cho and Hiromichi Ohta*, "Electric field thermopower modulation analyses of the operation mechanism of transparent amorphous SnO_2 thin-film transistor", Appl. Phys. Lett. accepted for publication

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1） Takayoshi Katase and Hiromichi Ohta, "Surface charge accumulation and electrochemical protonation of transition metal oxides using water-infiltrated nanoporous glass", Semiconductor Science and Technology 34, 123001 (2019).

4.4 著書

1） 太田裕道，小野里尚記，第 2 編 エレクトロクロミック材料の応用】 第 11 章 酸化物エレクトロクロミック材料を用いたメモリデバイスの開発「エレクトロクロミックデバイスの開発最前線」樋口昌芳 監修，シーエムシー出版

2） Hiromichi Ohta, Chapter 5 "Electric Field Thermopower Modulation of 2D Electron Systems" in Thermoelectric Thin Films: Materials and Devices, Ed. Paolo Mele, Dario Narducci, Michihiro Ohta, Kaniskha Biswas, Juan Morante, Shrikant Saini, Tamio Endo, (Springer, 2019).

3） Yu-qiao Zhang and Hiromichi Ohta, "2D thermoelectrics", 2D Nanomaterials for Energy Applications (1st Edition) (Elsevier) (November 1st, 2019).

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，国際特許出願 PCT/JP2019/046479 「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」（2019 年 11 月 28 日 出願）

4.6 講演

a．招待講演（国際学会）

1） Hiromichi Ohta, Anup V. Sanchela, "Electron transport properties of transparent oxide semiconductor, $BaSnO_3$-$SrSnO_3$: Epitaxial films and thin film transistors", EM-NANO 2019, Shinshu University, Nagano, June 19-22, 2019 (Invited)

2） Hiromichi Ohta, "Thermoelectric properties of two-dimensional electron system -superlattices and TFT channel-", 2019 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2019), HANWHA RESORTS HAEUNDAE, Busan, Korea, July 1-3, 2019 (Invited)

3） Hiromichi Ohta, Yuqiao Zhang, "Double enhancement of thermoelectric power factor in $SrTiO_3$ based electron

sandwitch", 4th Functional Oxide Thin Films for Advanced Energy and Information Technology Conference, Torres Vedras, Portugal, July 17-20, 2019 (Invited)

4) Hiromichi Ohta, Hai Jun Cho, Yuzhang Wu, Bin Feng, Masashi Mikami, Woosuck Shin, Yuichi Ikuhara, and Keiji Saito, "Single Crystalline Film Growth of Layer Structured Oxides and Their Phonon Transports", 2019 MRS Fall Meeting, Hynes Convention Center, Boston, MA, December 1-6, 2019 (Invited)

5) Hiromichi Ohta, "Electron transport properties of wide bandgap transparent oxide semiconductor, $BaSnO_3$-$SrSnO_3$", The 12th International Workshop on Oxide Surfaces: IWOX-XII, Lake Placid, NY, USA, January 5-10, 2020 (基調講演)

b. 招待講演（国内学会）

1） 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 (Invited)

2） 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(Invited)

3） 太田裕道, "透明酸化物半導体 $BaSnO_3$-$SrSnO_3$ の電子輸送—エピタキシャル薄膜と薄膜トランジスター", 日本金属学会 2019 年秋期(第 165 回)講演大会, 岡山大学津島キャンパス（岡山県岡山市）2019 年 9 月 11 日-13 日（基調講演）

4） 山ノ内路彦, "強磁性酸化物における電流誘起有効磁場", 強的秩序とその操作に関わる第 9 回研究会ー若手夏の学校ー, 定山渓ビューホテル（北海道札幌市）, 2019 年 9 月 16 日-17 日（講師）

5） 小野里尚記, Hai Jun Cho, 太田裕道, "WO_3 固体エレクトロクロミックフレキシブルトランジスタの高速動作", 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市, 2019 年 9 月 18 日-21 日（講演奨励賞受賞講演）

6） 太田裕道, "酸化物を使った電界（電解）効果トランジスタの開発", 日本セラミックス協会東北北海道支部第 27 回北海道地区セミナー2019, 北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟, 北海道札幌市, 2019 年 11 月 25 日

c. 一般講演（国際学会）

1) 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).

2) 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).

3) Rongbin Wang, Takayoshi Katase, Ke-Ke Fu, Tianshu Zhai, Jiacheng Yang, Qiankun Wang, Hiromichi Ohta, Steffen Duhm, and Norbert Koch, "Stoichiometric and Oxygen-Deficient VO_2 as Versatile Electrode for Organic Semiconductors", The 14th International symposium on Functional pi-electron systems, Berlin, Germany, June 2-7, 2019 (Poster) 国際共同研究

4) Shun Sasano, Ryo Ishikawa, Hiromichi Ohta, Naoya Shibata, and Yuichi Ikuhara, "Atomistic Structures and Li-ion Conductivities at High-angle Tilt Grain Boundaries in (Li, La)TiO_3", The 6th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC6), Winc Aichi, Nagoya, Japan, June 14th-15th, 2019.

5) Shun Sasano, Ryo Ishikawa, Hiromichi Ohta, Naoya Shibata, Yuichi Ikuhara, "Atomic structure, chemistry and Li-ion conductivity at tilt grain boundaries of (La, Li)TiO_3", 22nd International Conference on Solid State Ionics (SSI-22), PyeongChang, Korea, June 16th-21st, 2019

6) Shun Sasano, Ryo Ishikawa, Hiromichi Ohta, Naoya Shibata, and Yuichi Ikuhara, "Atomic structure and Li-ion conductivity at (La, Li)TiO_3 high-angle tilt grain boundaries", Intergranular and Interphase Boundaries in Materials (IIB 2019), Paris, July 1-5, 2019

7) Hai Jun Cho, Bin Feng, Takaki Onozato, Mian Wei, Anup V. Sanchela, Yuichi Ikuhara, Hiromichi Ohta, "Electron and heat transport properties of La-doped $BaSnO_3$ epitaxial films", 26th International Workshop on Oxide Electronics (iWOE26), Kyoto, Japan, Sep. 29 - Oct. 2, 2019. (Oral)

8) Qian Yang, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, Hiromichi Ohta, "Anomalous Thermopower Behaviour of Brownmillerite $SrCoO_{2.5}$ Epitaxial Films", 26th International Workshop on Oxide Electronics (iWOE26), Kyoto, Japan, Sep. 29 - Oct. 2, 2019. (Poster)

9) Gowoon Kim, Hai Jun Cho, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hiromichi Ohta, "Systematic Clarification of Electron and Heat Transports in Oxygen Deficient WO_x - Comparison between Amorphous Films and Epitaxial Films -", TOEO-11, Nara, Japan, October 7-9, 2019. (Poster)

10) Mian Wei, Anup V. Sanchela, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "New Deep-Ultraviolet Transparent Oxide Semiconductor, La-doped $SrSnO_3$", TOEO-11, Nara, Japan, October 7-9, 2019. (Poster) Best Poster Award (Gold)

11) Hiromichi Ohta and Anup V. Sanchela, "Transparent Oxide Semiconductor $BaSnO_3$-$SrSnO_3$ Solid-Solutions", TOEO-11, Nara, Japan, October 7-9, 2019. (Oral)

12) Michihiko Yamanouchi, Tatsuro Oyamada, and Hiromichi Ohta, “Current-induced effective magnetic field in $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/LaAlO_3/SrTiO_3$”, Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM), Las Vegas, NV, November 4-8, 2019

13) Takaki Onozato, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Flexible electrochromic transistor”, The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS2019), Okinawa, Japan, November 10-15, 2019. (Poster)

14) Yuqiao Zhang, Hai Jun Cho, Kenyu Sugo, Masashi Mikami, Sungmin Woo, Myung-Chul Jung, Woosuck Shin, Woo Seok Choi, Myung Joon Han, and Hiromichi Ohta, “High and Low Thermal Conductivity Phase Boundary in $SrTiO_3$ - $SrNbO_3$ Solid-Solution System”, 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, MA, December 1-6, 2019. (Poster)

15) Gowoon Kim, Hai Jun Cho, Yu-Miin Sheu, Hiromichi Ohta, “Electrical, optical and thermal transport properties of oxygen deficient amorphous WO_x ($2.5 < x < 3$) films”, 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, MA, December 1-6, 2019. (Poster)

16) Takaki Onozato, Hai Jun Cho, Hiromichi Ohta, “Fabrication of electrochromic transistor on flexible substrate”, Materials Research Meeting 2019, Yokohama, Japan, December 10-14, 2019. (Oral)

17) Mian Wei, Anup V. Sanchela, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “High electrical conductivity exceeding ~3000 S cm^{-1} of a transparent oxide semiconductor, La-doped $SrSnO_3$”, Materials Research Meeting 2019, Yokohama, Japan, December 10-14, 2019. (Oral)

18) Katsuya Watanabe, Kaito Kanahashi, Naoya Takekoshi, Hisaaki Tanaka, Hiroshi Ito, Hiromichi Ohta, Taishi Takenobu, “Gate-tuned Thermoelectric Performances in Aligned Conducting Polymers”, Materials Research Meeting 2019, Yokohama, Japan, December 10-14, 2019. (Poster)

19) Takaki Onozato, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “A WO_3-based electrochromic transistor on PET substrate”, The 12th International Workshop on Oxide Surfaces: IWOX-XII, Lake Placid, NY, USA, January 5-10, 2020 (Poster)

d．一般講演（国内学会）

1） 渡辺且弥，金橋魁利，太田裕道，田中久暁，伊東裕，竹延大志，“一軸配向した導電性高分子 PBTTT における熱電特性”，日本物理学会 2019 年秋季大会（物性），岐阜大学（岐阜県岐阜市），2019 年 9 月 10 日-13 日．（口頭）

2） 渡辺且弥，金橋魁利，田中 久暁，伊東 裕，太田裕道，竹延大志，“一軸配向した導電性高分子 PBTTT 膜における熱電特性”，2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

3） 楊 倩，Hai Jun Cho，Hyoungjeen Jeen，太田裕道，“SrCoO2.5 エピタキシャル薄膜の電気化学酸化と電子輸送特性”，2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

4） 楊 倩，Hai Jun Cho，Joonhyuk Lee，馮 斌，幾原雄一，Hyoungjeen Jeen，太田裕道，“種々の基板上に作製したブラウンミラライト型 $SrCoO_{2.5}$ エピタキシャル薄膜の熱電能”，2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

5） Hai Jun Cho, Bin Feng, Takaki Onozato, Mian Wei, Anup V. Sanchela, Yuichi Ikuhara, Hiromichi Ohta, “Investigation of transport property reductions in epitaxial La-doped BaSnO3 films”, 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市, 2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

6） 魏 冕，Anup Sanchela，馮 斌，幾原雄一, Hai Jun Cho，太田裕道，“3000 S cm^{-1} を超える高導電酸化物半導体 La ドープ $SrSnO_3$”，2019 用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

7） キム ゴウン，ジョ ヘジュン，Yu-Miin Sheu，太田裕道，“アモルファス WO_x ($2.5 < x < 3$) 薄膜の光・電子・熱輸送”， 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

8） キム ゴウン，ジョ ヘジュン，馮斌，幾原雄一，太田裕道，“酸素欠損 WO_x ($2.83 < x < 3$) エピタキシャル薄膜の電子・熱輸送特性”， 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

9） Yuqiao Zhang, Hai Jun Cho, Kenyu Sugo, Masashi Mikami, Sungmin Woo, Myung-Chul Jung, Woosuck Shin, Woo Seok Choi, Myung Joon Han, and Hiromichi Ohta, “High and Low Thermal Conductivity Phase Boundary in $SrTiO_3$ - $SrNbO_3$ Solid-Solution System”, 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

１０）須郷堅雄，張 雨橋，ジョヘジュン，太田裕道，“$Sr_{1-x}La_xTiO_3$ 全率固溶体エピタキシャル薄膜の熱電特性”， 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

１１）高嶋佑伍，小野里尚記，ジョヘジュン，太田裕道，“層状酸化物エピタキシャル薄膜の熱伝導率異方性”，2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学 札幌キャンパス，北海道札幌市，2019 年 9 月 18 日-21 日．（口頭）

１２）呉 宇璋, ジョヘジュン, 馮 斌, 三上祐史, 申ウソク, 幾原雄一, 齊藤圭司, 太田裕道, “自然超格子酸化物 $InGaO_3(ZnO)_m$の異方的熱輸送”, 2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市, 2019 年 9 月 18 日–21 日.（口頭）

１３）高嶋佑伍, 小野里尚記, ジョヘジュン, 太田 裕道, “温度差を電気に変換する熱電材料としての層状コバルト酸化物”, 第 5 回北海道大学部局横断シンポジウム, 北海道大学医学部学友会館フラテホール（北海道札幌市）, 2019 年 11 月 6 日.（ポスター）

１４）楊 倩, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, 太田裕道, “$SrCoO_x$ 酸素スポンジの高速電気化学反応の巨視的可視化”, 令和元年日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会, 新潟大学工学部, 新潟県新潟市, 2019 年 11 月 8 日–9 日（口頭発表）

１５）楊 倩, ジョ ヘジュン, Joonhyuk Lee, 馮 斌, 幾原雄一, Hyoungjeen Jeen, 太田裕道, “ブラウンミラライト型 SrCoO2.5 薄膜の異常熱電能”, 令和元年日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会, 新潟大学工学部, 新潟県新潟市, 2019 年 11 月 8 日–9 日（ポスター発表）優秀発表賞 受賞

１６）太田裕道, Anup V. Sanchela, “透明酸化物半導体 $BaSnO_3$–$SrSnO_3$ 固溶体”, 令和元年日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会, 新潟大学工学部, 新潟県新潟市, 2019 年 11 月 8 日–9 日（口頭発表）

１７）須郷堅雄, 張 雨橋, ジョ・ヘジュン, 太田裕道, “バンド絶縁体 $SrTiO_3$–モット絶縁体 $LaTiO_3$ 全率固溶体エピタキシャル薄膜の熱電特性”, 薄膜材料デバイス研究会 第 16 回研究集会 in 京都「新時代に向けた薄膜材料のデバイス技術」, 龍谷大学 響都ホール, 京都府京都市, 2019 年 11 月 8 日–9 日(Oral) スチューデントアワード受賞

１８）梁 豆豆, 張 雨橋, ジョ・ヘジュン, 太田裕道, “アモルファス SnO_2 透明薄膜トランジスタの熱電能電界変調”, 薄膜材料デバイス研究会 第 16 回研究集会 in 京都「新時代に向けた薄膜材料のデバイス技術」, 龍谷大学 響都ホール, 京都府京都市, 2019 年 11 月 8 日–9 日(Oral) スチューデントアワード受賞

１９）佐々野駿, 石川亮, 太田裕道, 柴田直哉, 幾原雄一, “(Li, La)TiO_3 対応粒界における原子構造とイオン伝導特性”, 第 60 回 電池討論会, 国立京都国際会館, 京都府京都市, 2019 年 11 月 13 日–15 日

２０）Lizhikun Gong, Dou-dou Liang, Mian Wei, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “深紫外透明酸化物半導体を活性層とする薄膜トランジスタの作製と熱電能電界変調”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）

２１）Dou-dou Liang, Yu-qiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “熱電能電界変調法によるアモルファス SnO_2 透明薄膜トランジスタ動作解析”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）発表奨励賞 受賞

２２）Yuzhang Wu, Hai Jun Cho, Bin Feng, Masashi Mikami, Woosuck Shin, Yuichi Ikuhara, Keiji Saito, and Hiromichi Ohta, “Clarification of anisotropic heat transport in a natural oxide superlattice $InGaO_3(ZnO)_m$”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）

２３）須郷堅雄, Yu-qiao Zhang, Hai Jun Cho, 太田裕道, “$Sr_{1-x}La_xTiO_3$ 全率固溶体エピタキシャル薄膜の熱電特性の解明”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）

２４）高嶋佑伍, 小野里尚記, Hai Jun Cho, 太田裕道, “配向の異なる層状コバルト酸化物エピタキシャル薄膜の熱伝導率”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）

２５）Gowoon Kim, Bin Feng, Hai Jun Cho, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, “高電気伝導率を示す Magneli WO_x 薄膜の異常低熱伝導率”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）

２６）楊 倩, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, 太田裕道, “熱電特性と導電性 AFM による $SrCoO_x$ の電気化学反応の巨視的可視化”, 第 55 回応用物理学会北海道支部/第 16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 11 日–12 日.（口頭）

２７）楊 倩, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, 太田裕道, “情報記憶材料 $SrCoO_x$ 薄膜における電気化学酸化反応の巨視的可視化”, 化学系学協会北海道支部 2020 年冬季研究発表会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 28 日–29 日.（口頭）

２８）高嶋佑伍, 小野里尚記, Hai Jun Cho, 太田裕道, “層状コバルト酸化物 A_xCoO_2 (A = Li, Na, Ca, Sr) 薄膜の熱電特性の結晶方位依存性”, 化学系学協会北海道支部 2020 年冬季研究発表会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 28 日–29 日.（口頭）

２９）Lizhikun Gong, Dou-dou Liang, Mian Wei, Hai Jun Cho, Hiromichi Ohta, “Fabrication and thermopower modulation of deep-ultraviolet transparent $SrSnO_3$ thin film transistor”, 化学系学協会北海道支部 2020 年冬季研究発表会, 北海道大学（北海道, 札幌市）, 2020 年 1 月 28 日–29 日.（口頭）

３０）Gowoon Kim, Hai Jun Cho, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, and

Hiromichi Ohta, “Phonon-Glass Electron-Crystal behavior in Magneli tungsten oxide”, 第 67 回 応用物理学会春季学術講演会（開催は中止，発表は成立），上智大学 四ツ谷キャンパス（東京都，千代田区）, 2020 年 3 月 12 日-15 日.

３１）Dou-dou Liang, Yu-qiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Electric field thermopower modulation analyses of the operation mechanism of amorphous SnO2 thin film transistor”, 第 67 回 応用物理学会春季学術講演会（開催は中止，発表は成立），上智大学 四ツ谷キャンパス（東京都，千代田区）, 2020 年 3 月 12 日-15 日.

３２）高嶋佑伍，小野里尚記, Hai Jun Cho，太田裕道, “層状コバルト酸化物薄膜の熱電変換性能指数増強”, 第 67 回 応用物理学会春季学術講演会（開催は中止，発表は成立），上智大学 四ツ谷キャンパス（東京都，千代田区）, 2020 年 3 月 12 日-15 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） Dou-dou Liang, Yu-qiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Electric field thermopower modulation analyses of high mobility transparent amorphous SnO_2 thin film transistor”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

２） Kenyu Sugo, Yuqiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Systematic investigation of thermoelectric properties in $Sr_{1-x}La_xTiO_3$ solid-solutions”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

３） Gong Lizhikun, Dou-dou Liang, Mian Wei, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Fabrication and thermopower modulation of thin film transistor using deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor as active layer”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

４） Mian Wei, Anup V. Sanchela, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Epitaxial film growth of a deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor, La-doped $SrSnO_3$”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

５） Qian Yang, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, and Hiromichi Ohta, “Macroscopic visualization of fast electrochemical reaction of $SrCoO_x$ oxygen sponge”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

６） Takashi Fujimoto, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Effect of heat treating on electronic and structural properties of lightly doped epitaxial $La_xBa_{1-x}SnO_3$ films”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

７） Yugo Takashima, Takaki Onozato, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Thermal conductivity of layered cobalt oxide epitaxial films with different crystallographic orientation”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster) Poster Award 受賞

８） Yuzhang Wu, Hai Jun Cho, Bin Feng, Masashi Mikami, Woosuck Shin, Yuichi Ikuhara, Keiji Saito, and Hiromichi Ohta, “Thermal conductivity of $InGaO_3(ZnO)_m$ (m = integer) natural superlattice”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019. (Poster)

９） Dou-dou Liang, Yu-qiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Electric field thermopower modulation analyses of high mobility transparent amorphous SnO_2 thin film transistor”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), National Chiao Tung University, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１０）Kenyu Sugo, Yuqiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Systematic investigation of thermoelectric properties in $Sr_{1-x}La_xTiO_3$ solid-solutions”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１１）Lizhikun Gong, Dou-dou Liang, Mian Wei, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Fabrication and thermopower modulation of thin film transistor using deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor as active layer”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１２）Mian Wei, Anup V. Sanchela, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, “Epitaxial film growth of a deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor, La-doped $SrSnO_3$”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１３）Qian Yang, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, and Hiromichi Ohta, “Macroscopic visualization of fast electrochemical

reaction of $SrCoO_x$ oxygen sponge", 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１４）Takashi Fujimoto, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "Effect of heat treating on electronic and structural properties of lightly doped epitaxial $La_xBa_{1-x}SnO_3$ films", 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１５）Yugo Takashima, Takaki Onozato, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "Thermal conductivity of layered cobalt oxide epitaxial films with different crystallographic orientation", 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１６）Yuzhang Wu, Hai Jun Cho, Bin Feng, Masashi Mikami, Woosuck Shin, Yuichi Ikuhara, Keiji Saito, and Hiromichi Ohta, "Thermal conductivity of $InGaO_3(ZnO)_m$ (m = integer) natural superlattice", 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019. (Poster)

１７）H.J. Cho, G. Kim, T. Onozato, H. Jeen, and H. Ohta, "Characterization of thermal conductivity tensors using time-domain thermoreflectance", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

１８）Doudou Liang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "Electric field thermopower modulation of high-mobility SnO_2 transparent thin film transistor", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

１９）Lizhikun Gong, Dou-dou Liang, Mian Wei, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "Fabrication and characterization of deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor thin film transistors", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２０）G. Kim, H. J. Cho, B. Feng, Y. Ikuhara, and H. Ohta, "Systematic Clarification of Electron and Heat Transports in Oxygen Deficient WO_x", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２１）Hai Jun Cho, Bin Feng, Takaki Onozato, Mian Wei, Anup V. Sanchela, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, "Investigation of transport property reductions in epitaxial La-doped $BaSnO_3$ films", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Oral)

２２）Kenyu Sugo, Yuqiao Zhang, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "Systematic investigation of thermoelectric properties in $Sr_{1-x}La_xTiO_3$ solid-solution system", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２３）Qian Yang, Joonhyuk Lee, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Gowoon Kim, Hai Jun Cho, Hyoungjeen Jeen, and Hiromichi Ohta, "Thermopower detection of electronic structure modulation of $SrCoO_{2.5}$ film on lattice mismatched substrates", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２４）Takaki Onozato, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "A flexible electrochromic transistor under mechanical fatigue", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２５）Y. Takashima, T. Onazato, Y. Nezu, H.J. Cho, and H. Ohta, "Anisotropy of Thermal Conductivity for Epitaxial Films of Layered Cobalt Oxides, A_xCoO_2 (A = Li, Na, Ca, and Sr)", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２６）Y. Zhang, H.J. Cho, K. Sugo, M. Mikami, S. Woo, M.-C. Jung, Y.H. Zhuang, Y-M. Sheu, W. Shin, W.S. Choi, M.J. Han, and H. Ohta, "Zero contribution of conduction electrons in the thermal conductivity of a metallic conductor", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２７）Y. Wu, H.J. Cho, B. Feng, M. Mikami, W. Shin, Y. Ikuhara, K. Saito, and H. Ohta, "Phonon propagation competition across natural superlattice $InGaO_3(ZnO)_m$", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

２８）Mian Wei, Anup V. Sanchela, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Hai Jun Cho, and Hiromichi Ohta, "New Deep-Ultraviolet Transparent Oxide Semiconductor, La-doped $SrSnO_3$", The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Sapporo, Japan, December 18th-20th, 2019. (Poster)

4.7 シンポジウムの開催

１） 北海道大学電子科学研究所 学術交流委員会主催，応用物理学会北海道支部共催　講演会「Electronic properties of electronic materials: interfaces & doping」: Prof.

Norbert Koch（Humboldt-Universität zu Berlin），2019年4月8日

2） Tutorial of The 3rd Workshop on Functional Materials Science「Oxygen vacancy in complex oxides - The good, the bad, and the ugly」: Dr. Ho Nyung Lee (Director of the Materials Science and Engineering Program, Oak Ridge National Laboratory, USA), 2019年12月17日

3） The 3rd Workshop on Functional Materials Science, Nest Hotel Sapporo Ekimae, 2019年12月18日-20日（https://sites.google.com/view/fms2019）

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

2） 山ノ内路彦、イムラ・ジャパン

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

1） 韓国・釜山大学校のHyoungjeen Jeen准教授との共同研究成果がJ. Mater. Chem. C誌に掲載された（2019.4.8）。

2） 韓国・成均館大学校のWoo Seok Choi准教授との共同研究成果が独材料科学誌Advanced Materials誌に掲載された（2019.4.29）。

3） 台湾・国立交通大学のYu-Miin Sheu助教との共同研究成果が米化学会誌J. Phys. Chem. Cに掲載された（2019.5.31）

4） 韓国・釜山大学校のHyoungjeen Jeen准教授との共同研究成果が独材料科学誌Adv. Mater. Interfaces誌に掲載された（2019.10.23）。

5） 中国Shenyang National Laboratory for Materials ScienceのChunlin Chen博士らとの共同研究成果が米化学会誌Nano Lettに掲載された（2019.12.26）。

6） 韓国・成均館大学校のWoo Seok Choi准教授との共同研究成果が米国物理学誌Physical Review Letters誌に掲載された（2020.1.13）。

7） 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を論文投稿中。

8） 台湾・国立交通大学のYu-Miin Sheu助教との共同研究成果を論文投稿中。

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a．科学研究費補助金

1） 太田裕道（代表）、基盤研究(A)、「熱電材料の高ZT化に向けたナノ周期平行平板構造の熱伝導率解明」、2017～2020年度.

2） 太田裕道（代表）、新学術領域研究（研究領域提案型）領域番号6103 「機能コアの材料科学」（領域代表者：松永克志 教授・名古屋大学）19H05791 界面制御による高機能薄膜材料創製（研究代表者） 2019年度～2023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） 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

4.10 受賞

1） 小野里尚記，第46回（2019年春季）応用物理学会講演奨励賞

2） 馮 斌，太田裕道，物質・デバイス共同研究賞 「原子分解能操作透過電子顕微鏡法による機能性酸化物薄膜の微細構造解析」（基盤共同研究）

3） Mian Wei, Best Poster Award (Gold) at 11th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-11)

4） 楊 倩，優秀発表賞，2019年度 日本セラミックス協会東北北海道支部 研究発表会

5） 梁 豆豆，スチューデントアワード，第16回 薄膜材料デバイス研究会

6） 須郷堅雄，スチューデントアワード，第16回 薄膜材料デバイス研究会

7） Yugo Takashima, Poster Award, The 20th RIES-Hokudai International Symposium

8） Gowon Kim, Best Poster Award Nomination, 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit

9） 梁 豆豆，発表奨励賞，第55回応用物理学会北海道支部/第16回日本光学会北海道支部合同学術講演会

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31年度）

3） 山ノ内路彦、応用物理学会：第80回応用物理学会秋季学術講演会 現地実行委員（2019.4-2019.9）

c．兼任・兼業

該当なし

d．外国人研究者の招聘

1） Ang Tao、中国、(2019.9.1-2019.10.30)

2） Fabian Krahl、フィンランド、(2019.9.26-12.20)

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、2019 年 4 月～7 月.
2） 工学部情報エレクトロニクス学科、応用数学Ⅱ、山ノ内路彦、2019 年 4 月～6 月.
3） 工学部情報エレクトロニクス学科、電気電子工学実験 I、II、III（分担）、太田裕道、山ノ内路彦、Hai Jun Cho 、2019 年 4 月～8 月.
4） 全学教育科目、フレッシュマンセミナー、Hai Jun Cho 、2019 年 4 月～2020 年 3 月.
5） 全学教育科目「環境と人間」ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命（分担）、太田裕道、2019 年 4 月 12 日.
6） 大学院、光電子物性学特論、太田裕道、山ノ内路彦、2019 年 6 月～8 月.
7） 工学部情報エレクトロニクス学科、電気電子工学実験 IV、V（分担）、Hai Jun Cho 、2019 年 10 月～2020 年 2 月.
8） 工学部情報エレクトロニクス学科、電気電子工学実験基礎（分担）、Hai Jun Cho 、2019 年 10 月～2020 年 2 月.
9） 大学院、ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論Ⅱ、山ノ内路彦、2019 年 11 月 12 日.
１０）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、2019 年 11 月～2020 年 3 月.
１１）大学院、電子材料学特論（分担）、太田裕道、山ノ内路彦、2019 年 12 月～2020 年 2 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） Yano E plus 2019.7 次世代先端デバイス動向(3) 超格子デバイス 6.7 国立大学法人北海道大学 で当研究室が紹介された。
2） OPTRONICS ONLINE, “北大ら，電気化学酸化反応を可視化”, 2019 年 11 月 11 日
3） fabcross for エンジニア, “熱電特性と導電性原子間力顕微鏡観察を組み合わせた新可視化手法を開発――次世代情報記憶素子の開発を加速　北海道大学ら”, 2019 年 11 月 11 日
4） EE Times Japan, “北海道大学と釜山大学校：情報記憶素子用材料の電気化学酸化反応を可視化 - 熱電特性の計測と導電性原子間力顕微鏡観察を組み合わせ-“, 2019 年 11 月 12 日
5） ジェグテックヘッドライン, “北海道大学などが、情報記憶素子材料の反応を可視化することに成功”, 2019 年 11 月 18 日
6） OPTRONICS ONLINE, “名大ら，導電性高分子における熱電変換機構を解明”, 2020 年 2 月 17 日
7） Yahoo!ニュース, “導電性高分子、半導体と金属の境で熱電変換性能が最大に フレキシブルな IoT 電源に道”, 2020 年 2 月 18 日
8） 日本経済新聞（プレスリリース）, “名大と北大、電気を流すプラスチックで熱電変換性能の上限を決めるメカニズムの解明に成功”, 2020 年 2 月 17 日
9） fabcross エンジニア, “導電性高分子の熱電変換性能を決定するメカニズムを解明――フレキシブルな電池の開発へ前進　名大ら”, 2020 年 2 月 18 日
１０） マイナビニュース, “導電性高分子、半導体と金属の境で熱電変換性能が最大に フレキシブルな IoT 電源に道”, 2020 年 2 月 18 日
１１） ITmedia, “温度差で発電する“やわらかい電池”の実現へ前進、性能上限の仕組みを解明”(2020.2.19)
１２） TechEyesOnline, “温度差で発電する“やわらかい電池”の実現へ前進、性能上限の仕組みを解明”(2020.2.19)
１３） JPubb, “温度差で発電する柔らかい電池の開発へ前進～ＩｏＴ社会を支えるウェアラブルな電源～”(2020.2.19)
１４） 財経新聞, “温度差で発電するウェアラブルな電池　名大などが高性能化の条件を導出”(2020.2.21)
１５） BIGLOBE ニュース, “温度差で発電するウェアラブルな電池　名大などが高性能化の条件を導出”(2020.2.21)
１６）電波新聞, “名大と北大、産総研導電性高分子の熱電変換性能上限を決めるメカニズム解明”(2020.2.21)

ｈ．ポスドク・客員研究員など

1） Anup Sanchela （電子科学研究所）、張　雨橋（JSPS Fellow）

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：3人

1） Yuzhang Wu, 情報科学研究科: 修士(情報科学), Conduction of heat across $InGaO_3(ZnO)_m$ natural superlattices
2） 佐藤晃一, 情報科学研究科: 修士（情報科学）、透明酸化物半導体$(Ba_{1-x}Sr_x)SnO_3$固溶体薄膜の熱・電子輸送特性に及ぼす格子歪の影響
3） 須郷堅雄, 情報科学研究科: 修士（情報科学）、バンド絶縁体$SrTiO_3$ -モット絶縁体$LaTiO_3$固溶体エピタキシャル薄膜の熱電特性

博士学位：1人

1） 小野里尚記, 情報科学研究科：博士（工学）, Development of electrochromic transistors using amorphous tungsten oxide thin film as the active layer

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)、2009.9～2019.9)
准教授　榎木亮介(東京薬大院、博(生命科学)、2018.1～2019.8)
助 教　大友康平(東北大院、博(薬),2016.4～2019.11)
特任助教　堤　元佐(北大院、博士(生命科学)、2017.4～2019.9)
特任助教　石井宏和(甲南大院、博士(理工学)、2017.6～2019.9)
技術補佐員　山田淑子(2018.4～2019.9)
事務補佐員　春日さと子(2019.3～2019.9)
大学院生
博士後期課程　澤田和明、山口和志、張菁圃、安宅光倫、高橋泰伽
修士課程　中田開人、廣蒼太

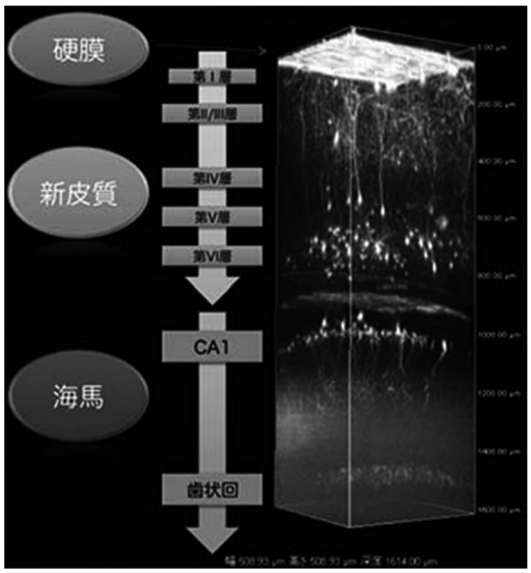


図１ “*in vivo*” 2光子顕微鏡は生体内の組織の深部を高分解能で長期間観察を可能とする。麻酔下のマウス大脳新皮質の神経細胞及び海馬 CA1・歯状回ニューロン。

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、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, 2019)。

(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、

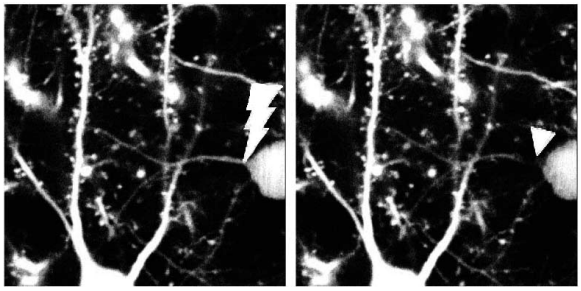


図2 マウス生体脳における神経線維の光切断

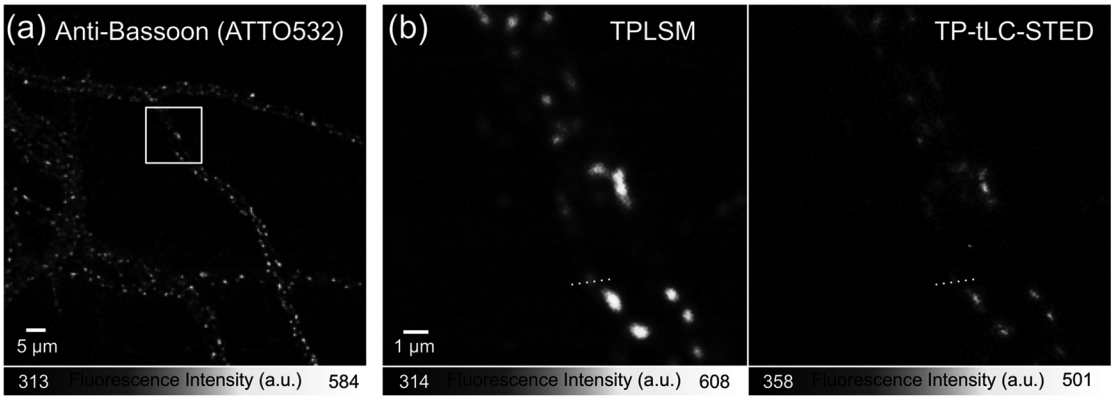


図３：２光子 STED 顕微鏡によるシナプス前終末に集積したタンパク質の超解像イメージング

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。

(d)　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た。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、STED用新規レーザー光源を導入し、誘導放出抑制現象(STED)を利用し、2光子顕微鏡の超解像イメージング化の開発に成功し、100nmの壁を越える分解能の実現に成功した。(図3)。

(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(Biochem. Biophys. Res. Comm, 2019)。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。

本方法論において 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成功した (Fron. Phys., 2019)。

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。

(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。

３．今後の研究の展望

2019年度に研究スタッフは、大学共同利用機関法人自然科学研究機構生命創成探究センターに異動を完了した。

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）J.-H. Hung, Y. Gao, H. Yan, K. Sato, H. Yamada, L.-H.Peng, T. Nemoto, H. Yokoyama, “587 nm nanosecond optical pulse generation by synchronously-driven gain-switched laser diodes with optical injection locking”, App. Phys. Express 2019, 12(8), 082002-1 - 082002-5

２）H. Ishii, K. Otomo, J.-H. Hung, M. Tsutsumi, H. Yokoyama, T. Nemoto, “Two-photon STED nanoscopy realizing 100-nm spatial resolution utilizing high-peak-power sub-nanosecond 655-nm pulses”, Biomed. Opt. Express, 2019, 10 (7), 3104-3113.

３）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, 2019, 177 (5), 1346-1360.

４）A. Goto, K, Otomo, and T. Nemoto, ″Real-time polarization-resolved imaging of living tissues based on two-photon excitation spinning-disk confocal microscopy″, Front.Phys., 7: 56 (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）

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）大友康平，「二光子励起顕微鏡の機能向上と生体内部高精細イメージング」，第14回 日本分子イメージング学会学術集会 （札幌），2019年5月24日.

２）根本知己，「ニコンイメージングセンター活動報告」，ABiS ミーティング，自然科学研究機構 生理学研究所（岡崎），2019年7月1日.

３）根本知己，大友康平，石井宏和，「生体組織における生理機能の高速多光子イメージング」，第44回レーザー顕微鏡研究会シンポジウム，大阪大学 （吹田），2019年7月４日.

４）根本知己，基調講演 「２光子顕微鏡による生体イメージングの基礎と応用」，東海大学マイクロ・ナノ啓発会 第11回学術講演会，東海大学札幌キャンパス，2019年8月24日.

５）根本知己，「２光子顕微鏡による生体イメージングの基礎と応用」，日本生理学会北海道支部会，旭川医科大学，2019年8月31日.

６）Tomomi Nemoto,：「” in vivo″ two-photon microscopyfor vast and longtime neural activiy」日本生物物理学会第 57 回年会、宮崎シーガイア（宮崎県宮崎市）(2019-09)

ｃ．一般講演（国際学会）

１）Hirokazu Ishii, Kohei Otomo, Jui-Hung Hung,

Motosuke Tsutsumi, Hiroyuki Yokoyama, Tomomi Nemoto, “Compact Two-Photon Excitation STED Nanoscopy with High-Peak-Power Sub-Nanosecond 655-nm Pulsed Light Source”, Focus On Microscopy 2019 (London, UK), April-16, 2019.

2) Kohei Otomo, Takafumi Kamada, Takashi Murata, Mitsuyasu Hasebe, Tomomi Nemoto, “Four-Color Three-Dimensional Live Cell Imaging by Two-Photon Excitation Spinning Disk Confocal Microscopy”, Focus On Microscopy 2019 (London, UK), April-16, 2019.

d．一般講演（国内学会）

1) S. Hiro, Y. Yamada, T. Nemoto, R. Enoki,”Optical imaging of nuclear and cytoplasmic circadian calcium rhythm in the master circadian clock、第 26 回(2019 年度)日本時間生物学会学術大会、金沢市文化ホール、2019 年 10 月 13-15 日

2) 村田 隆、大友 康平、加藤 輝、根本 知巳、長谷部 光泰「植物の細胞分裂は独自の染色体配列機構を持つ」日本植物学会第 83 回大会、東北大学川内キャンパス、2019 年 9 月 15-17 日

3) 佐々木 武馬、堤 元佐、大友 康平、村田 隆、中村 匡良、根本 知己、長谷部 光泰、小田 祥久「微小管付随タンパク質 CORD により制御されるフラグモプラストの動態」日本植物学会第 83 回大会、東北大学川内キャンパス、2019 年 9 月 15-17 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) K. Otomo, “Improving two-photon microscopy for deeper, sharper and/or faster bioimaging”, NIG seminar, the 2050th Biological Symposium, 国立遺伝学研究所 （三島）, 2019年4月4日.

2) T. Nemoto, T. Takahashi, H. Ishii, K. Otomo, “Improvement of Two-photon Microscopy for Biological Specimens by Utilizing Novel Optical Laser and Materials”, The 7th China-Japan symposium on nanomedicine, Xi’an, China, Northwest University, May 24-26, 2019.

3) 根本 知己「非線形光学過程を活用した新規光学顕微鏡によるバイオイメージングの展開」、ExCELLS セミナー、自然科学研究機構生命創成探究センター（岡崎市）、2019年5月29日.

4) T. Nemoto, “Nikon Imaging Center@Hokkaido Univ. and our recent works”, Nikon directors’ meeting, Nikon, Tokyo, June-28, 2019.

5) K. Otomo, “Improvements of two-photon excitation fluorescence microscopy for deeper, sharper and/or faster bio imaging”, JSPS Core-to Core Program AiC-Cubix3 Kick-off meeting, (Leuven, BE), July-8, 2019.

6) T. Nemoto, “Improvement in two-photon microscopy utilizing novel optical techniques”, ABiS symposium, Okazaki Conference Center, July-17, 2019.

7) T. Nemoto, “Cutting edge of microscopy - Seeing is believing”, Science Camp, Hokkaido Univ., July-29, 2019.

8) 大友 康平, 「生物イメージングのための多光子顕微技術開発」 第7回糸状菌分子生物学研究会若手の会, (南幌町)、 2019年11月5日.

9) 大友 康平、「レーザー走査型蛍光顕微鏡の基礎, 光技術応用による機能向上」、定量生物学の会 北海道キャラバン2019、北海道大学（札幌市）、2019年11月6日.

10) 鎌田 恭史、大友 康平、村田 隆、比留間 翔太、上原 亮太、長谷部 光泰、根本 知己、ポスター発表「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」、定量生物学の会 北海道キャラバン2019、北海道大学（札幌市）.

11) T. Nemoto, “Multi-photon Microscopy Improved by Resonance with Novel Optical Laser and Material Technology”, McGill - NIPS Collaborative Workshop on Multi-Scale Imaging, Physiology, and Analysis 2019, McGill University, November-7, 2019.

4.7 シンポジウムの開催

1) Nikon Imaging Center World Directors’ meeting in Japan, 参加者40名, 品川, 2019年6月27日-28日.

2) Nikon Imaging Center Fluorescence Imaging Sympodium, 参加者52名, 品川, 2019年6月28日.

4.8 共同研究

a．所内共同研究

1） ニコンイメージングセンター

b．民間等との共同研究

1） (株)ニコン

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、 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
5) 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
6) 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
7) 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
8) 堤 元佐、若手研究、新規高速超解像顕微鏡による転写因子促進拡散挙動の可視化、2019-2020 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、「先端レーザー光技術を駆使した高速超解像 *in vivo* 3D イメージング法の研究」、2019～2023 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 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） ニコンの国際顕微鏡写真コンテスト、“Small World: PHOTOMICROGRAPHY COMPETITION 2019”で、堤元佐の応募作品が“Images of Distinction”を受賞.
2） 優秀ポスター賞、第26回(2019年度)日本時間生物学会学術大会、S. Hiro, Y. Yamada, T. Nemoto, R. Enoki,”Optical imaging of nuclear and cytoplasmic circadian calcium rhythm in the master circadian clock”

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1） 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

1） 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～)
2） 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～)
3） 根本 知己 : 国際複合医工学会 評議員 (2013年04月01日～)
4） 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～)
5） 榎木 亮介:日本生理学会、評議員 (2014年～)
6） 榎木 亮介:日本生理学会、編集委員 (2015年～)
7） 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） 工学部、量子力学、根本 知己、2019年06月01日～2019年08月30日
2） 情報科学研究科、脳神経科学特論、榎木 亮介、根本知己、2019年04月01日～2019年05月30日
3） 全学共通学部科目、環境と人間、根本 知己、2019年07月12日
4） 工学部、電気回路演習、根本知己 (2017－2019)

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 藤女子大学付属中学校・高等学校, 公開講義「脳の不思議・心の謎」, 根本知己, 2019年9月28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) 堤元佐(特任助教)
2) 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：

該当なし

博士学位：1人

1） 澤田 和明 :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　MBA Joshua
修士課程　加藤達也、中野健太郎、石 軼尓、熊 坤、関澤侑祐、岡田直大、楊 婧妍
学部生　杉山亮

１．研究目標

近年、分子の代わりにナノ・マイクロメートルサイズの構造体を疑似巨大分子として用いた「分子を超えた自己組織化」が注目を集めている。自己組織化による創発の基礎的研究は、分子のサイズを超えた自己組織化のコンセプトの理解と材料開発への応用において重要であると考えられる。本研究分野ではプラズモン共鳴現象に基づく蛍光やラマン散乱の増強などを示す金のナノ粒子や細胞の集合体形成の制御を通して､新奇な物理現象の発見をめざしている。令和１年度は、(a) 温度変化に応答して集合化する金ナノ粒子の応答温度の制御､(b) DNA固定化基板を利用した金ナノロッドの配向の動的制御システムの構築、(c) マイクロ流路内に単離した遊泳性微細藻類のラマンイメージングによる代謝追跡､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) 温度変化に応答して集合化する金ナノ粒子の応答温度の制御

金ナノ粒子の集合化を制御する手法はこれまで広く研究されてきた。中でも、外部刺激や環境変化（熱、pH、光など)によってその集合化を制御する手法が注目されている。我々はこれまでに、アルキル基を有するオリゴエチレングリコール（OEG）誘導体で覆われた球状金ナノ粒子は昇温に伴い表面修飾分子の脱水和が起こり集合化すること、また、このとき粒子表面の曲率が小さい（粒径が大きい）ほど低い温度で集合化することを見いだしてきた。ポリエチレングリコールは生体適合性も高く、粒子等の分散安定性や血中滞留性を高めることができる物質としてよく知られているが、オリゴエチレングリコールを有するアルカンチール分子で自己組織化膜を形成することでも同様の機能が期待できるため、この温度応答性OEG被覆金ナノ粒子はバイオ応用に向いていると考えられる。バイオ応用の観点から、応答温度を体温付近で精密に制御可能にすることが望まれた。そこで、本研究では、OEG誘導体で覆われた球状金ナノ粒子の温度応答性を精密に制御するシステムの開発に取り組んだ。

これまでの研究より、粒子表面に修飾する分子の疎水性や粒子表面の曲率によって応答温度が変わることが明らかになっていたが、粒子の曲率を精密に制御することは難しく、また必要に応じて自由に粒子サイズを選べることが望ましいため、本研究では表面修飾分子のデザインによる応答温度の制御を行った。異なる温度応答性を示す末端にメチル基を有するリガンド分子(EG6-C1)とエチル基を有するリガンド分子(EG6-C2)を異なる比率で混合して修飾した結果、混合比率の制御による応答性の精密制御は難しいことがわかった。これは、一部のEG6-C2リガンド分子が脱水和して疎水的になると、隣接するEG6-C1リガンド分子の環境も変化することで脱水和温度に影響を与えるためではないかと推察された。一方で、図１Aに示すように、温度応答性リガンド(EG6-C2)とオリゴエチレングリコール（OEG)部分の長さの短い非温度応答性リガンド(EG2-OH)を混合することで温度応答性リガンド分子の局所密度を変えると、混合比に応じて集合化する温度が変化することが確認された(図１Ｂ)。これは、粒子サイズ（表面曲率）の違いによってリガンド分子（OEG部）の局所密度が変わって温度応答性が変わった結果と一致する。つまり、OEG部の長さの異なるアルカンチオール分子を用い、混合比を調整することで応答温度を適切に制御可能になることが明らかとなった。

本研究の成果は、バイオ応用の観点から有用な材料であるオリゴエチレングリコールの物性を制御する新しい手法としても画期的であり、様々な医用応用への展開が期待されるものと考えられる。

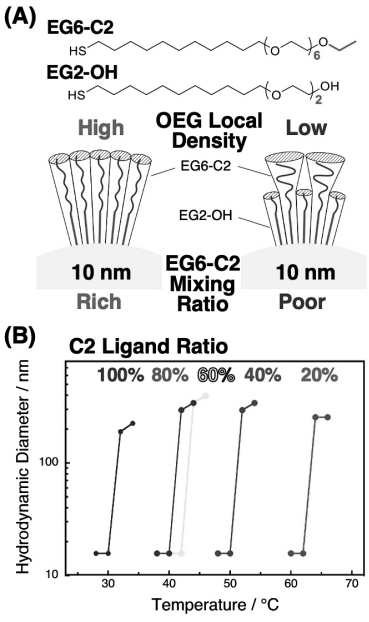


図１．(A) 表面修飾に用いたリガンド分子の化学構造式とそれぞれのリガンドを異なる比で混合し、修飾したときのリガンド分子のイメージと (B)２種類のリガンド分子を任意の比率で混合して修飾した金ナノ粒子の温度に依存した流体力学半径の変化

(b) DNA 固定化基板を利用した金ナノロッドの配向の動的制御システムの構築

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、その応用が広く検討されている。一方で、異方性ナノ粒子のLongitudinal SPRを効果的に利用するには、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かった。我々はこれまで、DNAを片末端で固定化した基板（DNAブラシ）を足場として利用することで、金ナノロッドの静電的な吸着現象により簡便に広範囲で金ナノロッドが垂直配向固定化されたアレイを作製する手法を開発してきた（図２a)。

一般的に、分子が配向すると偏光特性が発現する。この分子の配向（偏光特性）が外部刺激で制御可能になると、液晶モニタのような光機能性材料へと発展的に展開できる。そのため、金ナノロッドの配向状態も外部刺激によりアクティブに制御可能にすることが望まれる。ここで、我々が開発している垂直配向化金ナノロッドアレイはソフトマターであるDNAブラシを鋳型にしているため、外部刺激（環境変化）によって配向を動的に変えることが可能であると期待された。そこで、本研究では溶液のpH変化を利用して金ナノロッド–DNA間の相互作用を制御することで、金ナノロッドの配向を動的に制御する手法の開発に取り組んだ(図２ｂ)。

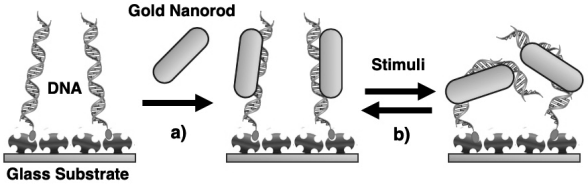


図２．DNA固定化基板を足場とした垂直配向化金ナノロッドアレイ作製(a)と刺激に応答した配向変化(b)の模式図

既報の方法により、短軸が約10 nm、長軸が約34 nmの大きさの金ナノロッドを調製し、カチオン性およびノニオン性の表面修飾リガンドを 1:9 の比で混合し、表面修飾を行った。金ナノロッドの表面電位（ゼータポテンシャル）はpHを10から４まで下げていくと、徐々に大きくなる挙動が確認された。DNAブラシ基板にカチオン性金ナノロッドを吸着させ、バッファーを用いて溶液のpHを変え、スペクトル測定により吸着した金ナノロッドの配向を評価した。柔軟性の高い一本鎖DNAを用いた場合、pH 7.6から4.0 にかけて段階的なスペクトルの変化 (800 nm付近のL-SPRの増大）が観察された (図３A)。また、pHを4.0から7.6まで段階的に戻していくと、ヒステリシスを示しながらもL-SPRは減少して元に戻ることが確認できた（図３Ｂ)。このpH変化における段階的なスペクトルの変化は表面電位の変化と相関するため、金ナノロッド–DNA間の静電相互作用の制御により金ナノロッドの配向変化が誘起されたと考えられる。

以上より、本研究では高分子ブラシと金ナノロッド間の相互作用を制御することで、高分子ブラシ基板状に固定化された金ナノロッドの配向を動的に制御可能であることが明らかになった。

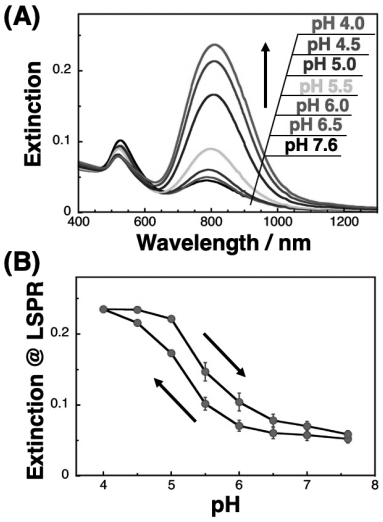


図３. (A) pHを7.6から4.0に変えたときのDNA固定化基板上に吸着した金ナノロッドの消光スペクトルの変化と(B) pHを可逆的に変化させたときの 800 nm 付近のLSPRピーク強度の変化

(c) マイクロ流路内に単離した遊泳性微細藻類のラマンイメージングによる代謝追跡

遊泳性の微細藻類ユーグレナ（ミドリムシ）は、光合成によりパラミロンと呼ばれる多糖類の顆粒を蓄積する。パラミロンはさらに、ワックスエステルと呼ばれるバイオ燃料にも転用可能な油脂成分に変換されるため、ユーグレナはバイオ燃料源として着目されている。一方、同じ種であっても細胞ごとに個性があるため、一細胞ごとの代謝を測定する手法を確立し、「油脂蓄成量が多い」細胞を選別するシステムの構築が望まれる。本研究では、細胞を堰き止める構造をもつマイクロ流体チップを利用し、遊泳性ユーグレナをマイクロ流路中に単離して培養し、特定のユーグレナ細胞内でパラミロンが形成される様子を、ラマン顕微鏡により経時的に観察した。

まず、ガラス基板に対してフッ化水素によるエッチングを行い、厚さ0.7ミリメートルのガラス基板表面に126本の細胞単離用の流路を、厚さ0.2ミリメートルのガラス基板表面に深さ１マイクロメートルの培地交換用の流路を形成した。この2枚のガラス基板を貼り合わせることで、遊泳性細胞の単離と細胞培養液の灌流が両立できるダム構造を持ったガラス製マイクロ流体チップを作製した（図４)。

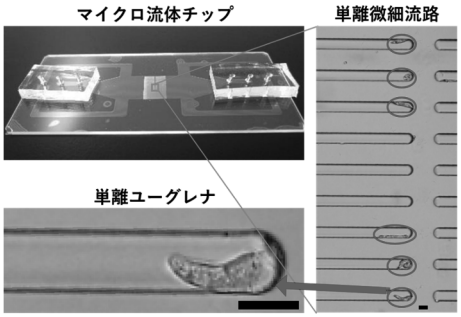


図4.（左上）ガラス製マイクロ流体チップ。（右）ダム構造を有する、細胞単離用の微細流路。（左下）微細流路に単離されたユーグレナ。スケールバー：20 μm。

このガラスチップにユーグレナ細胞の懸濁液を導入した後、単離したユーグレナが正常に代謝活動を行っているか、共鳴ラマン分光法で確認した。重水を含む培地を与えてユーグレナを培養した結果、カロテノイド成分に重水素が取り込まれ、ストレスを与えずに培養できることが分かった。一方、固定処理によって代謝活動を停止させたユーグレナには、重水素は取り込まれなかった（図５）。

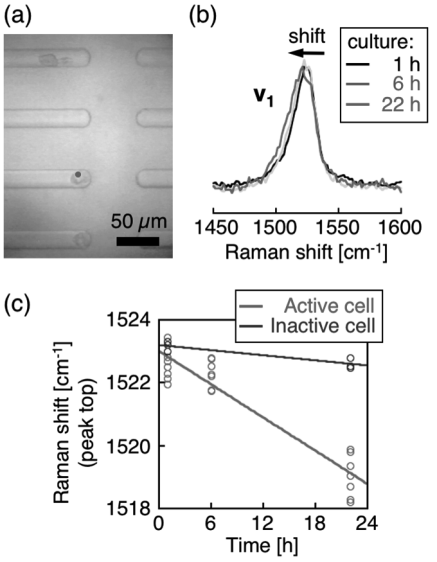


図5. 共鳴ラマン分光法による、単離したユーグレナの代謝活動の確認。(a)単離したユーグレナ。測定点をスポットで示した。(b)カロテノイドの共鳴ラマンスペクトル。重水素を取り込みスペクトルが遷移した。(c)ピーク遷移を培養時間でプロットしたグラフ。代謝活動を停止させたユーグレナは、重水素を取り込まなかった。

続いて、単離したユーグレナに対しパラミロンを生産する条件で培養し、誘導ラマン散乱（SRS）顕微鏡で追跡した。培地中に、安定同位体（炭素13）ラベルした CO_2源を添加して培養した結果、炭素13を含むパラミロンの形成が観察された。元々存在していた炭素12から成るパラミロンとは、明確に区別して検出できた。

本研究では、ガラスマイクロ流体チップ中にダム構造を持たせることで、遊泳性細胞の単離と培養を両立し、経時的な観察を可能としたことで、ユーグレナのパラミロン産生を一細胞レベルで確認することに成功した。本研究成果は、動きが多く継続的な観察の難しい微生物の追跡を可能とし、特定の代謝を高効率に行う微生物細胞の選別に応用が期待できる。

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自己組織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集合体の機能をシミュレーションも含めさらに検証し、自己組織化ならではの階層性構造の構築と応用を追求していく。

４．今後の研究の展望

4.1 学術論文（査読あり）

１） S. Nakamura, H. Mitomo, Y. Sekizawa, T. Higuchi, Y. Matsuo, H. Jinnai, K. Ijiro: “Strategy for Finely Aligned Gold Nanorod Arrays using Polymer Brushes as a Template”, *Langmuir*, 36(13): 3590−3599 (2019) 【電子研内共著】

２） N. Ota, Y. Yonamine, T. Asai, Y. Yalikun, T. Ito, Y. Ozeki, Y. Hoshino, Y. Tanaka: “Isolating single *Euglena gracilis* cells by glass microfluidics for Raman analysis of paramylon biogenesis”, *Anal. Chem.,* 91(15), 9631-9639 (2019).

３） Y. Hoshino, S. Taniguchi, H. Takimoto, S. Katakami, S. Akashi, Y. Yonamine, Y. Miura: “Homogeneous oligomeric ligands prepared via radical polymerization that recognize and neutralize a target peptide”, *Angew. Chem. Int. Ed.,* **59,** 679-683 (2020)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1) 濱島 暁、三友秀之、居城邦治：「ハイドロゲル表面に固定化した金ナノドット間距離の動的変化のナノスケール評価」、The Bulletin of the Nano Science and Technology （ナノ学会会誌）, 18(1)：1-7 (2019)

2) Hideyuki MITOMO：“Fabrication of sophisticated metal nanostructures for actively tunable plasmonic devices”Impact, 2020/2, 54−56 (2020) (DOI:

10.21820/23987073.2020.1.54)

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1） H. Mitomo*, S. Hamajima and K. Ijiro : “Active Gap Control of Gold Nanodots using Gels in Nanoscale”, The 3rd International Symposium for Advanced Gel Materials & Soft Matters (ISAGMSM), Xi’an, China (2019-06)

2） K. Ijiro* : “Stimuli-Responsive Gold Nanoparticle Assembly and Those Applications”, 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019), Marina Bay Sands, Singapore (2019-06)

3） K. Ijiro* : “DNA Brush-Directed Aligning Self-Assembly of Gold Nanorods as Photonic Nanomaterials”, 16th European Conference on Organized Films (ECOF16), Universite Paris Descartes, Centre universitaire des Saints-Peres, Paris, France (2019-07)

4） K. Ijiro* : “Self-Assembly of Rod-Shaped Au Nanoparticles and those Plasmonic Functions”, 15th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XV), Shenyang, China (2019-09)

ｂ．招待講演（国内学会）

1） 居城 邦治* : 「バイオミメティクスへの取り組みについて」、機能性フィルム研究会夏季特別研修会、北海道大学 百年記念会館 (2019-07)

ｃ．一般講演（国際学会）

1） H. Mitomo*, S. Hamajima, K. Ijiro: “Active Tuning of Plasmonic Nanostructures Using Polymer Gels” 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019), Marina Bay Sands, Singapore (2019-06)

2） Mitomo*, Y. Shi, R. Iida, Y. Yonamine and K. Ijiro : “Tuning of Thermo-responsive Assembly of Gold Nanoparticles Coated with Oligo(Ethylene Glycol) Derivatives”, Okinawa Colloids 2019, Nago, Okinawa, Japan (2019-11)

3） Y. Sekizawa*, H. Mitomo, S. Nakamura, Y. Yonamine, A. Hozumi and K. Ijiro : “pH-induced reversible orientation change of gold nanorods immobilized on a DNA-modified substrate”, Okinawa Colloids 2019, Nago, Okinawa, Japan (2019-11)

4） Y. Shi*, H. Mitomo, Y. Yonamine and K. Ijiro : “Tuning of the assembly temperature of thermo-responsive gold nanoparticles via change in mixing ratio of surface ligands”, Okinawa Colloids 2019, Nago, Okinawa, Japan (2019-11)

ｄ．一般講演（国内学会）

1） 三友 秀之*、二瓶 瑞生、中村 聡、松尾 保孝、居城 邦治 : 「DNA ブラシを利用した金ナノロッドの外部環境変化に依存した配向変化」、ナノ学会 第 17 回大会、かごしま県民交流センター(2019-05)

2） 三友 秀之*、濵島 暁、松尾 保孝、新倉 謙一、居城 邦治 : 「ポリマーゲル表面に固定化した金ナノドットパターンの動的変化の評価」、第 68 回高分子学会年次大会、大阪府立国際会議場 (2019-05)

3） 三友 秀之*、関澤 祐侑、二瓶 瑞生、中村 聡、与那嶺 雄介、松尾 保孝、居城 邦治 : 「DNA ブラシ基板上に吸着させたカチオン性金ナノロッドの pH に依存した配向変化」、第 68 回高分子学討論会、福井大学 文京キャンパス (2019-09)

4） 与那嶺 雄介*、ンバ ジョシュア、星野 友、三友 秀之、居城 邦治 : 「藻類由来カロテノイドを用いた多色ラマンプローブの開発」、日本化学会 第 100 春季年会 (2020)、東京理科大学 野田キャンパス (2020-03)

5） 関澤 祐侑*、三友 秀之、中村 聡、与那嶺 雄介、居城 邦治 : 「pH に依存した金ナノロッドの配向変化」、日本化学会 第 100 春季年会 (2020)、東京理科大学 野田キャンパス (2020-03)

6） 熊 坤*、三友 秀之、与那嶺 雄介、居城 邦治 : 「シクロデキストリンの添加による金ナノ粒子の曲率依存的な集合化」、日本化学会 第 100 春季年会 (2020)、東京理科大学 野田キャンパス (2020-03)

7） 堀合 理子*、谷地 赳拓、松原 正樹、三友 秀之、村松 淳司、蟹江 澄志 : 「単分散 Au ナノロッドへの液晶性デンドロンの精密修飾による自己組織性の付与」、日本化学会 第 100 春季年会 (2020)、東京理科大学 野田キャンパス (2020-03)

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 加藤 達也*、三友 秀之、与那嶺 雄介、松尾 保孝、居城 邦治 : 「高感度ラマン散乱デバイスを指向した、ゲル上での三角形プレート状金ナノ粒子の間隙制御」、2019 年度北海道高分子若手研究会、定山渓グランドホテル瑞苑 (2019-08)

2） 中野 健太郎*、三友 秀之、与那嶺 雄介、居城 邦治 : 「リガンド交換反応を介した自己集合による pH 応答性金ナノ粒子カプセルの開発」、2019 年度北海道高分子若手研究会、定山渓グランドホテル瑞苑 (2019-08)

3） Y. Shi*, H. Mitomo, Y. Yonamine and K. Ijiro : “Tuning of the assembly temperature of thermo-responsive gold nanoparticle via change in mixing ratio of surface ligands”, 2019 年度北海道高分子若手研究会, 定山渓グランドホテル瑞苑, Japan (2019-08)

4） 熊 坤*、三友 秀之、与那嶺 雄介、居城 邦治 : 「シクロデキストリの包接を利用した金ナノ粒子の曲率依存的な集合化制御法の開発」、2019 年度北海道高分子若手研究会、定山渓グランドホテル瑞苑、Japan (2019-08)

5） 関澤 祐侑*、三友 秀之、中村 聡、与那嶺 雄介、居城 邦治 : 「pH 変化を利用した金ナノロッドの配向変化」、第 9 回 CSJ 化学フェスタ、タワーホール船堀 (2019-10)

6） 居城 邦治* : 「ゲル表面に固定化した金ナノドットパターンの動的変化の評価」、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、大阪大学吹田キャンパス (2019-11)

7） 三友 秀之* : 「DNA ブラシ基板上に吸着させた金ナノロッドの pH に依存した配向変化」、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、大阪大学吹田キャンパス (2019-11)

8） Y. Sekizawa*, H. Mitomo, S. Nakamura, Y. Yonamine and K. Ijiro : “pH-induced reversible orientation change of gold nanorods adsorbed on a DNA-modified substrate”,

The 20th RIES-Hokudai International Symposium, Hokkaido University (2019-12)

9） Y. Shi*, H. Mitomo, S. Nakamura, Y. Yonamine and K. Ijiro : "Tunable assembly temperature of thermo-responsive gold nanoparticles fabricated via surface modification", The 20th RIES-Hokudai International Symposium, Hokkaido University (2019-12)

１０）与那嶺 雄介*、小関 泰之、合田 圭介、星野 友、三友 秀之、居城 邦治 ：「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」、第 54 回(2019 年度)高分子学会北海道支部研究発表会、北海道大学 学術交流会館 (2020-01)

１１）関澤 祐侑*、三友 秀之、中村 聡、与那嶺 雄介、居城 邦治 ：「DNA 修飾基板に固定化した金ナノロッドの可逆的な配向変化」、第 54 回(2019 年度)高分子学会北海道支部研究発表会、北海道大学 学術交流会館 (2020-01)

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） 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(千歳科学技術大学(木村－須田 廣美)) :「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」、2019 年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

２） 居城 邦治(日本工業大学(佐野 健一)) :「ナノ構造体を利用した細胞透過性 DDS 担体の開発」、2019 年度 物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

３） 居城 邦治(富士フイルム(谷 武晴)) :「金属ナノ粒子集合体の新奇な光学的特性の研究」、2019 年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

４） 居城 邦治(関西大学(葛谷 明紀)) :「非天然 DNA アナローグを用いた DNA 分子機械の構築と基板上固定化」、2019 年度、物質・デバイス領域共同研究 展開共同研究 B

５） 居城 邦治(千歳科学技術大学(百々瀬 愛)) :「精密に制御された化学修飾表面上におけるキプリス幼生の接着挙動評価」、2019 年度、物質・デバイス領域共同研究 次世代若手

６） 居城 邦治(九州大学(玉田 薫)) :「局在プラズモンシートによる細胞接着ナノ界面の超解像度ライブセルイメージング」

７） 三友 秀之(千歳科学技術大学(木村－須田 廣美)) :「血管石灰化のメカニズムに関する研究」、2019 年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

８） 三友 秀之(慶応義塾大学(斎木 敏治)) :「アルキル鎖間相互作用を利用した金ナノ粒子複合体形成機構の解明」、2019 年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

９） 三友 秀之(東北大学(蟹江 澄志)) :「ナノ粒子コア型ハイブリッドデンドリマーの異方的形状動的変化に基づく協奏機能の誘起」

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

１） 居城 邦治(英国・ニューカッスル大学(Andrew Pike)) :「修飾核酸からなる導電性ＤＮＡの有機合成法の開発」2007 年度-

２） 居城 邦治(中国・中国海洋大学(王 国慶)) :「金ナノワイヤーで覆われた金ナノプレートの表面解析と表面増強ラマン散乱による細胞イメージング」、2019 年度、2019 年度 物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

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） 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） 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

３） 三友 秀之、基盤研究 A (分担)、ナノ粒子コア型ハイブリッドデンドリマーの異方的形状動的変化に基づく協奏機能の誘起、2019-2022 年度

４） 居城 邦治、基盤研究 S (分担)、局在プラズモンシートによる細胞接着ナノ界面の超解像度ライブセルイメージング、2019-2023 年度

ｂ．大型プロジェクト・受託研究

１） 居城 邦治、新倉 謙一、松尾 保孝、納谷 昌之、白田 真也(富士フイルム株式会社) ： 「金属微細構造による光制御に関する基礎検討」、2011 年度-

２） 三友 秀之(池谷科学技術振興財団) ： 「温度応答性金ナノ粒子の集合化温度の厳密制御システムの開発」、2019 年度、池谷科学技術振興財団研究助成金

３） 三友 秀之(泉科学技術振興財団) ： 「薬剤送達システムへの展開を志向した金ナノ粒子正多面体カプセルの創製」、2019-2020 年度、公益財団法人泉科学技術振興財団研究助成

4.10 受賞

１） 関澤 祐侑、三友 秀之、中村 聡、与那嶺 雄介、居城 邦治 ： 優秀ポスター発表賞 「pH 変化を利用した金ナノロッドの配向変化」（第 9 回 CSJ 化学フェスタ） 2019 年 10 月

4.11 社会教育活動

ａ．公的機関の委員

１） 居城 邦治 ： 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業「技術スタッフ表彰選定委員」 (2019 年 09 月 02 日～2020 年 03 月 31 日)

ｂ．国内外の学会の役職

１） 居城 邦治 ： 社団法人高分子学会北海道支部幹事 (2004年04月01日～現在)

２） 居城 邦治 ： Asian Conference on Nanoscience & Nanotechnology (AsiaNANO), Steering Committee (2004年04月01日～2020年03月31日)

３） 三友 秀之 ： 高分子学会 北海道支部 若手会幹事 (2012年06月01日～現在)

４） 居城 邦治 ： 日本化学会 生体機能関連化学部会 幹

事 （2016年03月01日～2021年02月28日）

5） 居城 邦治 ： 日本化学会 生体機能関連化学・バイオテクノロジーディビジョン 幹事（2018年03月01日～2020年02月28日）

6） 居城 邦治 ： 日本化学会 2019学会賞選考委員会委員（2019年06月01日～2020年03月31日）

7） 居城 邦治 ： 高分子学会 行事等検討委員会委員（2019年07月25日）

c．兼任・兼業

1） 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）

2） 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）

3） 三友 秀之 ：高分子学会 第 34 期「高分子」編集委員会 委員（2018 年 06 月 01 日～2020 年 05 月 31 日）

4） 居城 邦治 ：理化学研究所 開拓研究本部 伊藤ナノ医工学研究室 客員主幹研究員 （2019 年 04 月 01 日～2022 年 03 月 31 日）

d．外国人研究者の招聘

1） Javier Barroso Lazaro、Spain、（2019 年 02 月 01 日～2019 年 04 月 30 日）

2） Andrew Pike、United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland (the)、（2019 年 08 月 01 日～2019 年 10 月 06 日）

3） DENG, XU、China、（2019 年 11 月 20 日～2019 年 11 月 30 日）

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 生命科学院、ソフトマター科学研究、居城 邦治、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

2） 生命科学院、ソフトマター科学論文購読Ⅰ、居城 邦治、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

3） 生命科学院、ソフトマター科学論文購読Ⅱ、居城 邦治、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

4） 生命科学院、ソフトマター科学実習、居城 邦治、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

5） 生命科学院、ソフトマター科学特別研究、居城 邦治、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

6） 生命科学院、ソフトマター科学論文購読、居城 邦治、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

7） 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、2019 年 04 月 08 日～2019 年 06 月 06 日

8） 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、2019 年 06 月 10 日～2019 年 08 月 05 日

9） 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、2019 年 06 月 10 日～2019 年 08 月 05 日

１０）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、2019 年 09 月 27 日～2019 年 11 月 26 日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 与那嶺 雄介、(大)千歳科学技術大学、マテリアルフォトニクス実験 A、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

2） 三友 秀之、札幌啓成高等学校、スーパーサイエンスハイスクール 講師、2019 年 09 月 06 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：4人

1） 加藤 達也 ：生命科学院ソフトマター専攻、修士(理学)、温度応答性ゲルを利用した三角形プレート状金ナノ粒子の間隙制御法の開発

2） 中野 健太郎 ：生命科学院ソフトマター専攻、修士(理学)、 pH応答性金ナノ粒子カプセルの開発

3） 熊 坤 ：生命科学院ソフトマター専攻、修士(理学)、シクロデキストリンを利用した金ナノ粒子の曲率依存的な集合化

4） 石 軼尔 ：生命科学院ソフトマター専攻、修士(理学)、表面修飾による温度応答性金ナノ粒子の集合温度の制御

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～）
特任准教授　GOMEZ Daniel（Ph.D.、2019.8.1-2019.11.30）
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～）
特任助教　YAPAMANU Adithya Lakshmanna（Ph.D.、2018.12.1～2019.10.31）
大学院生
博士課程
中村圭佑、曹 艳凤、臧 潇倩、王 亜光、曹恩、范昕
修士課程
三上剛志、城春樹、巽亮太、清水風希、劉言恩、菅浪誉騎、大西梓

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30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（LSPR）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。さらに、LSPRとその他の光学モードとが形成する「モード強結合」に着目し、特にファブリ・ペローナノ共振器として機能する酸化チタン/金反射膜の上に、金ナノ微粒子を担持することで、LSPRとナノ共振器とのモード強結合を形成し、広い可視光波長域の光を強く吸収して光電変換可能な光電極の作製に成功した。

これまでの研究成果に基づき、令和元年度は、「モード強結合」における反応機構の探求とともに、強結合電極を用いた光アンモニア合成反応を試みた。

２．研究成果

（１）犠牲試薬存在下でのモード強結合電極の光電変換特性の検討

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、表面にチタン2 nmを成膜後、原子層堆積(ALD)装置で酸化チタン（TiO_2）28 nmを成膜した。その後、TiO_2上に真空蒸着により金を3 nmアニーリング(300℃）して金ナノ微粒子(Au-NPs)を形成した。さらに、Au-NPsを部分的に埋め込むために、TiO_2 7 nmをALDで追加成膜した(Au-NPs/TiO_2/Au-film（ATA）構造、図1a)。その上面・断面の電子顕微鏡像を図1b, 1cに示す。また、ATA電極の吸収スペクトルから、広い波長領域で強い光吸収が観測された（図1d)。これは、Au-NPsのLSPRと、TiO_2/Au-film構造によって形成されるファブリ・ペローナノ共振器モードが空間的・エネルギー的に近接状態にあるときに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（上肢・UB）が元のピークより短波長側に、結合モード（下肢・LB）が長波長側に出現するためである。

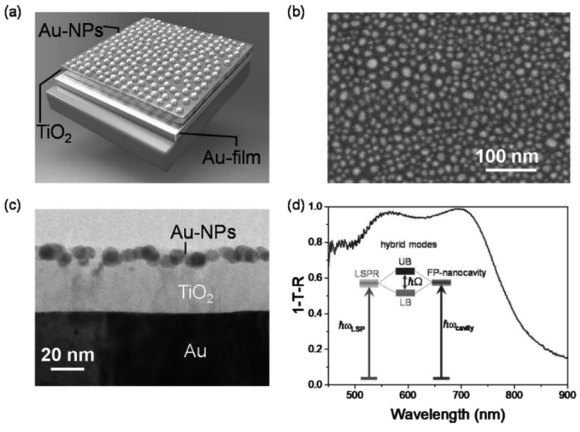


図1 (a) ATA構造の模式図、(b) ATA構造の走査型電子科学顕微鏡像、(c)ATA構造断面の透過型電子顕微鏡像、(d)ATA構造の吸収スペクトル. 図1d挿入図はモード強結合のエネルギー模式図.

ATA光電極を用いて水を電子供与体とした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の外部量子収率（IPCE）の作用スペクトル（図2a、左列最下段）は、吸

収スペクトルの形状とほぼ一致した。

さらに、犠牲電子供与体としてトリエタノールアミン(TEOA)を添加してそのホットエレクトロンのTiO_2への注入効率を見積もった。特に、TEOA濃度が低い場合は反結合性モードの反応が優位に増大した(図2b)。また、TEOAを1vol%と十分高い濃度で添加した場合、ピークでのIPCEは約4%に達し、可視光を有効に利用可能なことが示された。本反応は図3に示すように、金ナノ微粒子に生成する電子・正孔対(ホットキャリア)の電荷分離機構に基づくものであり、犠牲試薬の添加により反応基質の酸化による正孔の消費が促進されることで逆電子移動が抑制され、光電変換効率が増大したものと考えられる。反結合性・結合性モードでは生成する電子・正孔のエネルギー分布が異なるため、金ナノ微粒子から半導体への電子移動速度定数(k_{et})および基質との反応速度(k_{ox}[S])も異なると考えられるが、上述の[S]が小さいときにみられる増大率の差は反結合性モードによって生成した正孔のエネルギーが結合性モード由来の正孔よりもより貴な電位に存在することを示唆している。これは、モード強結合と化学反応との橋渡しとなる重要な成果である。

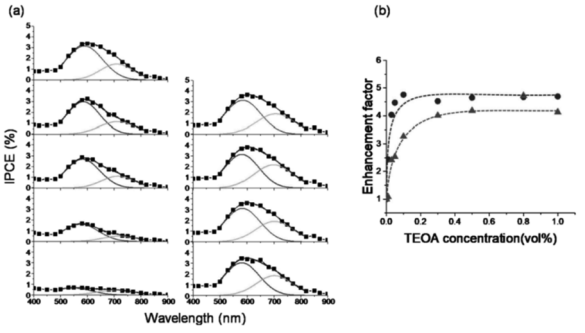


図2 (a) ATA 光陽極の IPCE 作用スペクトル. TEOA 添加濃度: 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 vol%(左列下段から), 0.3, 0.5, 0.8, 1.0 vol%(右列下段から). 0.1 moldm^{-3} KOH 水溶液中. (b) TEOA 添加時の IPCE の増大率(●:上肢、▲:下肢).

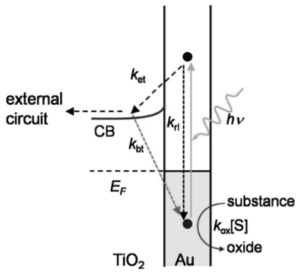


図3 モード強結合を用いた電荷分離のエネルギー図. k_{ex}: 電子移動速度定数、k_{rl}: 熱電子緩和速度定数、k_{bt}: 逆電子移動速度定数、k_{ox}: 酸化反応速度定数、[S]: 基質濃度、CB 伝導帯、E_F: フェルミレベル.

(2) モード強結合電極を用いた光アンモニア合成

これまでに当グループでは、光アノードである Au-NPs/$SrTiO_3$と、カソード部である Zr を用い、選択的光アンモニア合成に成功している。しかし、単層の金ナノ構造のプラズモンで吸収できる光には限界があり、反応のボトルネックとなっていた。そこで、ATA 構造を光アノードとし、Zr のコイル(表面積:0.628 cm^2)または Zr メッシュ(表面積:238 cm^2)をカソードとして用いて水を電子源とする空中窒素固定を試みた(図4)。酸化槽と還元槽をイオン交換膜を介して連結し、また還元槽には窒素ガスを継続的にバブリングした。

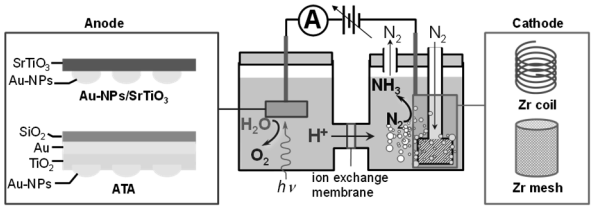


図4 2電極系光アンモニア合成系の模式図. Au-NPs/$SrTiO_3$|Zr coil, Au-NPs/$SrTiO_3$|Zr mesh, ATA|Zr coil, ATA|Zr mesh の4種類の組み合わせを用いた.

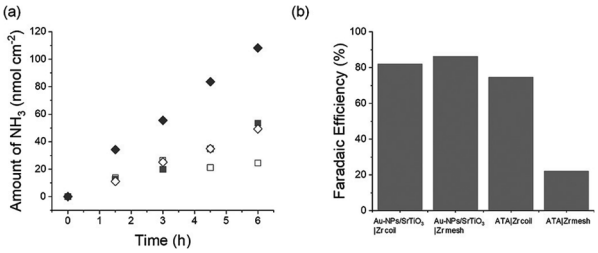


図5 2電極系光アンモニア合成系のアンモニア生成量の時間依存性(a)とファラデー効率 (b). □:Au-NPs/$SrTiO_3$|Zr coil, ■:Au-NPs/$SrTiO_3$|Zr mesh, ◇:ATA|Zr coil, ◆:ATA|Zr mesh. pH3 H_2SO_4水溶液中, 2電極間に1.0 V を印加. 照射波長: 410-800 nm.

2電極系光アンモニア合成系に1 V を印加し、可視光(410～800 nm)を照射した際のアンモニア生成量の時間依存性とそのファラデー効率を図5に示す。Au-NPs/$SrTiO_3$と Zr コイルを用いた系(Au-NPs/$SrTiO_3$|Zr coil)のファラデー効率は80%程度であり、光励起によって生成した電子がほぼ定量的にアンモニア生成に用いられている。ここで、光アノードとして ATA を、カソードとして Zr コイルを用いても(ATA|Zr coil)、アンモニア生成速度・ファラデー効率共に大きな変化は見られなかった。ATA を用いたにもかかわらず反応生成速度に変化が見られなかった要因は、Zr コイル上での窒素還元が律速となっているためであると考えられる。一方、ATA を光アノード、Zr メッシュをカソードとして用いると(ATA|Zr mesh)、アンモニア生成速度は約4倍に向上し、光アンモニア合成効率の大幅な向上に成功した。このときのファラデー効率は20%程度であった。このことは、ATA の高い光吸収・電荷分離効率によってカソードへの電子供給速度が飛躍的に増大するため、Zr コイルと比較して高い表面積を有する Zr メッシュ上でのアンモニア生成の反応速度も向上するが、それでもなお窒素吸着速度が十分

でないために水素生成などの副反応が誘起されていることを示している。すなわち、効率的な光アンモニア合成のためには、高効率に電荷分離可能な光アノードと、窒素を選択的かつ高効率に吸着可能なカソードの両立が不可欠であると考えられる。

３．今後の研究の展望

上記に示す通り、モード強結合の形成により、効率的に可視光を吸収してホットキャリアを利用可能であることが明らかとなってきた。しかし、強結合形成の制御因子については未解明な点が多い。プラズモン粒子のサイズや粒子密度、その近接場特性が結合強度、さらには化学反応性に与える影響を明らかにできれば、光電変換素子や人工光合成系（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、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） Q. Sun, H. Yu, K. Ueno, S. Zu, Y. Matsuo, H. Misawa, “Revealing the plasmon coupling in gold nanochains directly from the near field”, Opto-Electron. Adv., 2, 4, 180030-1-7 (2019).【電子研内共著】

２） Y. Cao, T. Oshikiri, X. Shi, K. Ueno, J. Li, H. Misawa, “Efficient hot‐electron transfer under modal strong coupling conditions with sacrificial electron donors”, ChemNanoMat, 5, 8, 1008-1014 (2019).

３） K.-L. Lee, M.-L. You, X. Shi, Y.-R. Li, K. Ueno, H. Misawa, P.-K. Wei, “Injection compression molding of transmission-type Fano resonance biochips for multiplex sensing applications”, Appl. Mater. Today, 16, 72-82 (2019).

４） J. Yang, Q. Sun, W. Liu, Z. Zhang, X. Hu, K. Liu, H. Yang, H. Misawa, and Q. Gong, “Engineering Ultrafast Carrier Dynamics at the Graphene/GaAs Interface by Bulk Doping Level”, Adv. Optical Mater., 7, 19, 1900580 (1-7) (2019).

５） T. Oshikiri, K. Ueno, and H. Misawa, “Ammonia photosynthesis *via* an association pathway using a plasmonic photoanode and a zirconium cathode”, Green Chem., 21, 16, 4443-4448 (2019).

６） Q. Sun, S. Zu, K. Ueno, Q. Gong, H. Misawa, “Applications of ultrafast photoemission electron microscopy in nanophotonics”, Chin. J. Lasers, 46, 5, 0508008 (2019).

７） T. Oshikiri, H. Sawayanagi, K. Nakamura, K. Ueno, T. Katase, H. Ohta, and H. Misawa, “Arbitrary control of the diffusion potential between a plasmonic metal and a semiconductor by an angstrom-thick interface dipole layer”, J. Chem. Phys., 152, 3, 034705 (1-8) (2020).【電子研内共著】

８） X.-Y. Zhang, Z.-Y. Li, K. Ueno, H. Misawa, N.-Q. Ren, and K. Sun, “On-chip MIC by Combining Concentration Gradient Generator and Flanged Chamber Arrays”, Micromachines, 11, 2, 207 (1-11) (2020).

９） M. Januar, B. Liu, J.-C. Cheng, K. Hatanaka, H. Misawa, H.-H. Hsiao, and K.-C. Liu, “Role of Depolarization Factors in the Evolution of a Dipolar Plasmonic Spectral Line in the Far- and Near-Field Regimes”, J. Phys. Chem. C, 124, 5, 3250-3259 (2020).

１０） T. Oshikiri, X. Shi, and H. Misawa, “Enhancement of Selective Fixation of Dinitrogen to Ammonia Under Modal Strong Coupling Conditions”, Eur. J. Inorg. Chem., 2020, 15-16, 1396-1401 (2020).

１１） W.-P. Guo, W.-Y. Liang, C.-W. Cheng, W.-L. Wu, Y.-T. Wang, Q. Sun, S. Zu, H. Misawa, P-J. Cheng, S.-W. Chang, H. Ahn, M.-T. Lin, and S. Gwo, “Chiral Second-Harmonic Generation from Monolayer WS_2 /Aluminum Plasmonic Vortex Metalens”, Nano Lett., 20, 4, 2857-2864 (2020).

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） H. Misawa, “Enhanced Water Splitting Under Modal Strong Coupling Conditions”, 235th ECS

Meeting, Sheraton Dallas, Dallas, USA, May 26-30, 2019.

2） H. Misawa, X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, and K. Sasaki, “Insight into modal strong coupling and its application to photochemical reactions”, The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019), The University of Colorado Boulder, Boulder, USA, July 21-26, 2019. 【電子研内共著】

3） H. Misawa, X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, and K. Sasaki, “Insight of modal strong coupling and its application to photochemical reactions”(Keynote), SPIE. Optics+Photonics, San Diego Convention Center, San Diego, USA, August 11-15, 2019. 【電子研内共著】

b．招待講演（国内学会）

1） 三澤　弘明、「モーダル型強結合とそれを用いた可視光水分解反応」、第68回高分子討論会、福井大学文京キャンパス，福井、2019年9月25日～27日

2） 三澤　弘明、「局在プラズモンを利用する可視光アンモニア合成」、日本化学会第100春季年会、東京理科大学野田キャンパス、野田、2020年3月22日～25日（開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立）

c．一般講演（国際学会）

1） T. Oshikiri, H. Yamada, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Exploring the Mechanism of Near-field Chirality Generation on an Achiral Plasmonic Structure”, The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019), The University of Colorado Boulder, Boulder, USA, July 21-26, 2019.

2） Y. Liu, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, “Manipulation of Modal Strong Coupling between Localized Surface Plasmon and Fabry-Pérot Nanocavity Modes”, The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019), The University of Colorado Boulder, Boulder, USA, July 21-26, 2019.

3） Y. Suganami, T. Oshikiri, S. Shi, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Optical Properties of Plasmonic Nanoparticles Composed of Au/Ag Nanocomposite Coupled with Fabry-Pérot Nanocavity”, The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019), The University of Colorado Boulder, Boulder, USA, July 21-26, 2019.

4） A. Onishi, S. Zu, X. Shi, Q. Sun, T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa”, “Emission Properties of Fluorescent Molecules Under the Condition of Modal Strong Coupling between Localized Surface Plasmon and Nanocavity Modes”, The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019), The University of Colorado Boulder, Boulder, USA, July 21-26, 2019.

d．一般講演（国内学会）

1） 押切 友也, 山田 拓樹 ,孫 泉,笹木 敬司, 三澤 弘明, 「光電子顕微鏡を用いた金ナノ構造の近接場円二 色性の観測」, 2019年光化学討論会, 名古屋大学, 名古屋, 2019年9月10日～12日

2） 菅浪 誉騎, 押切 友也 , 石 旭 , 孫 泉 , 上野 貢生, 三澤 弘明, 「金銀ナノコンポジット微粒子を用いたモード強結合系の構築とその光化学反応への応用」, 2019年光化学討論会, 名古屋大学, 名古屋, 2019年9月10日～12日

3） 城 春樹, 押切 友也, 石 旭, 三澤 弘明, 「プラズモン光電極を用いた可視光照射によるクロスカップリング反応」, 2019 年光化学討論会, 名古屋大学, 名古屋, 2019年9月10日～12日

4） LIU, Yen-En, SHI, Xu, SUN, Qua, OSHIKIRI, Tomoya, UENO, Kosei, MISAWA, Hiroaki, “In uence of particle density on modal strong coupling photonics properties between localized surface plasmon and Fabry-Pérot nanocavity modes”, 2019年光化学討論会, 名古屋大学, 名古屋, 2019年9月10日～12日

5） 押切友也, 孫泉, 山田拓樹, Zu Shuai, 笹木敬司, 三澤弘明,「円偏光照射下における金属ナノ構造の近接場の観測」, 第67回応用物理学会 春季学術講演会, 上智大学四谷キャンパス, 2020年3月12日～15日(開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立)

6） 清水 風希, 城春樹, 押切　友也, 石　旭, 三澤弘明,「金ナノ粒子/p 型半導体膜/白金膜を用いた光陰極の構築」, 第67回応用物理学会 春季学術講演会, 上智大学四谷キャンパス, 2020年3月12日～15日(開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立)

7） T. Oshikiri, X Shi, H. Misawa, “Ammonia photosynthesis from dinitrogen under modal strong coupling conditions”, 日本化学会第100春季年会, 東京理科大学野田キャンパス、野田、2020年3月22日～25日（開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立）

8） 菅浪　誉騎、押切　友也、石　旭、孫　泉、三澤　弘明、「金銀合金ナノ微粒子を用いたモード強結合の構築とその光酸化反応への応用」、日本化学会第100春季年会，東京理科大学野田キャンパス、野田、2020年3月22日～25日（開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立）

9） Xu Shi, Guiyin He, Tomoya Oshikiri, Hiroaki Misawa, “Effective Hot-Electron Transfer under Modal Strong Coupling Conditions”, 日本化学会第100春季年会, 東京理科大学野田キャンパス、野田、2020年3月22日～25日（開催中止、講演予稿集

の発行をもって発表は成立)

１０） Yen-En Liu, Xu Shi, Quan Sun, Tomoya Oshikiri, Hiroaki Misawa, “Transient Optical Properties and Hot Carrier Dynamics of Modal Strong Coupling between Localized Surface Plasmon Resonance and Fabry-Pérot Nanocavity”, 日本化学会第 100 春季年会, 東京理科大学野田キャンパス、野田、2020 年 3 月 22 日～25 日 (開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立)

１１） Y. Cao, X. Shi, T. Oshikiri, H. Misawa, “Photoelectrochemical Redeposition of Gold on Gold Nanoparticles and its Photoelectrochemical Performance under Model Strong Coupling Conditions”, 日本化学会第 100 春季年会, 東京理科大学野田キャンパス、野田、2020 年 3 月 22 日～25 日 (開催中止、講演予稿集の発行をもって発表は成立)

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, “Insights into modal strong coupling and its application to water splitting” (Invited), The 9th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics (IMCO2019), Crowne Plaza Hotel, Hong Kong, China, June 14-17, 2019.

２） Q. Sun and H. Misawa, “Near-field characterization of coupled plasmonic nanostructures in space-, frequency-, and time-domains” (Invited), The 9th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics (IMCO2019), Crowne Plaza Hotel, Hong Kong, China, June 14-17, 2019.

３） Y. Cao, T. Oshikiri, X. Shi, K. Ueno, J. Li, H. Misawa, “Efficient Hot-electron Transfer under Modal Strong Coupling Conditions with Sacrificial Electron Donors”, The 9th International Multidisci-plinary Conference on Optofluidics (IMCO2019), Crowne Plaza Hotel, Hong Kong, China, June 14-17, 2019.

４） 押切友也、「光電子顕微鏡を用いた金ナノ構造の近接場円二色性計測」(招待講演)、第 16 回プラズモニック化学研究会シンポジウム、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス、東京、2019 年 6 月 21 日

５） Q. Sun, K. Ueno, and H. Misawa, “Applications of Ultrafast Photoemission Electron Microscopy in Nanophotonics” (Invited), 8th Applied Optics and Photonics China (AOPC 2019), China National Convention Center, Beijing, China, July 7-9, 2019.

６） H. Misawa, “Insight of modal strong coupling and its application to water splitting” (Invited), The 12th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO12), Xiamen International Conference & Exhibition Center, Xiamen, China, July 14-19, 2019.

７） Hiroaki Misawa, “Insights into modal strong coupling and its application to water splitting” (Invited), International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 2019 (ISUILS2019), Kushiro Prince Hotel, Kushiro, August 4-9, 2019.

８） T. Oshikiri, H. Yamada, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Observation of near-field chirality generation on an achiral plasmonic structure” (Invited), The 11th International Conference on Information Optics and Photonics, Sofitel Xi’an on Renmin Square Hotel, Xi’an, China, August 6-9, 2019.

９） Hiroaki Misawa, “Manipulation of modal strong coupling and its application to water splitting” (Invited), The International Workshop on Ultrafast Micro/Nano Photonics and Photochemistry, Hokkaido University, Sapporo, August 19-21, 2019.

１０） Hiroaki Misawa, “Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions” (Invited), 10th India-Japan Science & Technology Conclave, The Manekshaw Center, Delhi, India, September 5-6, 2019.

１１） 石 旭, 上野 貢生, 押切 友也, 孫 泉, 笹木 敬司, 三澤 弘明、 “Enhanced Plasmon-Induced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions”, 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～環境エネルギー物質・デバイス・プロセス (G2) グループ分科会, 東北大学, 仙台, 2019 年 10 月 3 日～4 日

１２） Hiroaki Misawa, “Insight into modal strong coupling and its application to photochemical reactions” (Invited), Symposium on Plasmonic and its Application, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, October 31, 2019.

１３） Hiroaki Misawa, “Enhanced water splitting under modal strong coupling conditions” (Keynote), The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2019), Ikuta Shrine Hall, Kobe, November 11-14, 2019.

１４） T. Oshikiri, X. Shi, Q. Sun, H. Misawa, “Visible-light driven artificial photosynthesis via plasmon-induced charge separation” (Invited), 2019 Southwest-Rocky Mountain Regional Meeting, El Paso Convention Center, El Paso, USA, November 13-16.

１５） Hiroaki Misawa, “Enhanced Water Splitting Under Modal Strong Coupling Conditions”

(Keynote), 3rd International Solar Fuels Conference (ISF-3), International Conference on Artificial Photosynthesis 2019 (ICARP2019), Hiroshima Convention Hall, Hiroshima, November 20-24.

１６） X. Shi, G. He, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Plasmon-Induced Energetic Electron Transfer in Modal Strong Coupling Regime”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium ″ki″, Hokkaido University, Sapporo, December 2-3, 2019.

１７） Quan Sun, Yaolong Li (Pelong Univ.), Shuai Zu, Xu Shi, Oshikiri Tomoya, Kosei Ueno, Qihuang Gong (Pelong Univ.), Hiroaki Misawa, “Revealing Plasmon Coupling in Plasmonic Dimers and One-Dimensional Chains Directly from the Near Field”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium ″ki″, Hokkaido University, Sapporo, December 2-3, 2019.

１８） Kuang-Li Lee (Academia Sinica), Meng-Lin You (Academia Sinica), Xu Shi, Yi-Ru Li (Academia Sinica), Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, Pei-Kuen Wei (Academia Sinica), “Injection Compression Molding of Transmission-Type Fano Resonance Biochips for Multiplex Sensing Applications”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium ″ki″, Hokkaido University, Sapporo, December 2-3, 2019.

１９） Yen-En Liu, Xu Shi, Quan Sun, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Influence of Particle Density on Modal Strong Coupling between Localized Surface Plasmon and Fabry-Perot Nanocavity Modes”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium ″ki″, Hokkaido University, Sapporo, December 2-3, 2019.

２０） Tomoya Oshikiri, “Ammonia Photosynthesis using Plasmon-induced Charge Separation under Visible Light Irradiation” (Invited), 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２１） Yanfeng Cao, Tomoya Oshikiri, Xu Shi, Hiroaki Misawa, “Enhanced Hot-Electron Transfer under Modal Strong Coupling Conditions with Sacrificial Electron Donors”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２２） Kuang-Li Lee, Meng-Lin You, Xu Shi, Yi-Ru Li, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, Pei-Kuen Wei, “Injection Compression Molding of Transmission-Type Fano Resonance Biochips for Multiplex Sensing Applications”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２３） Yen-En Liu, Xu Shi, Quan Sun, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Influence of Particle Density on Modal Strong Coupling between Localized Surface Plasmon and Fabry-Perot Nanocavity Modes”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２４） Quan Sun, Yaolong Li, Shuai Zu, Xu Shi, Oshikiri Tomoya, Kosei Ueno, Qihuang Gong, Hiroaki Misawa, “Revealing Plasmon Coupling in Plasmonic Dimers and One-Dimensional Chains Directly from the Near Field”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２５） Yaguang Wang, Xu Shi, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, “Plasmon-induced Photocurrent Generation on Ga2O3 Loaded with Gold Nanoparticles”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２６） X. Shi, G. He, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, “Plasmon-Induced Energetic Electron Transfer in Modal Strong Coupling Regime”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２７） Zang Xiaoqian, Kosei Ueno, Xu Shi, Tomoya

Oshikiri, Hiroaki Misawa, “Surface enhanced Raman Scattering Using Modal Strong Coupling”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) and Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), Hokkaido University International Conference Hall, Sapporo, December 3-4, 2019.

２８） Hiroaki Misawa, “Insight into modal strong coupling and its application to photochemical reactions”(Invited), The 20th RIES-Hokudai International Symposium ″ki″, Hokkaido University, Sapporo, December 2-3, 2019.

２９） Hiroaki Misawa, Xu Shi, Kosei Ueno, Tomoya Oshikiri, Quan Sun, and Keiji Sasaki, “Insight into modal strong coupling and its application to photochemical reactions”(Invited), Optics & Photonics Taiwan, International Conference (OPTIC 2019), National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, December 5-7, 2019. 【電子研内共著】

３０） Hiroaki Misawa, ““Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions” (Keynote), Materials Research Meeting 2019 (MRM 2019), Yokohama Symposia, Yokohama, December 10-14, 2019.

３１） 三澤 弘明、「モーダル強結合とそれを用いた可視光水分解反応」(チュートリアル講演)、第 30 回光物性研究会、京都大学宇治おうばくプラザ、宇治、2019 年 12 月 13 日～14 日

３２） Hiroaki Misawa, “Insight into modal strong coupling and its application for photochemical reactions”(Invited), The 3rd Workshop on Functional Materials Science (FMS2019), Nest Hotel Sapporo Ekimae, Sapporo, December 18-20, 2019.

３３） 押切友也、石旭、三澤弘明、「局在プラズモンを利用する可視光アンモニア合成」(招待講演)、LED 総合フォーラム 2020 in 徳島, 徳島グランヴィリオホテル, 徳島, 2020 年 2 月 29 日(開催中止)

4.7 シンポジウムの開催

１） 第 16 回プラズモニック化学シンポジウム「キラルプラズモンの基礎と展開、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス、東京 (2019 年 6 月 21 日)

２） The International Workshop on Ultrafast Micro/Nano Photonics and Photochemistry, 北海道大学、札幌 (2019 年 8 月 19 日～21 日)

３） 第 17 回プラズモニック化学シンポジウム「プラズモンを用いる光電気化学と光エネルギー変換」、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス、東京 (2019 年 11 月 22 日)

４） 電子科学研究所学術講演会 “Linear and ultrafast plasmonics on ensembles and single metal nanoparticles”(Prof. Natalia Del Fatti, University of Lyon)、北海道大学、札幌 (2019 年 11 月 25 日)

５） 電子科学研究所学術講演会 “New Properties of Matter Under Light-Matter Hybridizat on”(Prof. Thomas W. Ebbesen, University of Strasbourg)、北海道大学、札幌 (2019 年 12 月 19 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 (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」(2019 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」(2019 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。

３） 三澤弘明、押切友也 (日東電工株式会社)「可視・近赤外局在プラズモン技術を利用した水を電子源とする窒素固定に関する研究」(2019 年度) 局在プラズモン技術を利用した水を電子源とする電極材料の開発その要素技術となる (１) Au ナノ粒子および電極構造体のデザイン設計による局在プラズモン利用の最適化、(２) 水分解助触媒の設計、(３) Au-TiO_2 層間の電子移動最適のための材料設計と分析評価、(４) 窒素固定電極の最適設計と評価

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. Yu Zhang, Jilin University, China
７） Prof. Andrey Rogach, City University of Hong Kong, China
８） Prof. Hiroshi Masuhara, Academic Sinica, Taiwan

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、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

2） 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

b．大型プロジェクト・受託研究

該当なし

4.10 受賞

1） Yanfeng Cao, Tomoya Oshikiri, Xu Shi, Kosei Ueno, Jie Li, Hiroaki Misawa, “Efficient Hot-electron Transfer under Modal Strong Coupling Conditions with Sacrificial Electron Donors”, The 9th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics (IMCO2019), Best Poster Award, June 2019.

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～2021年3月31日)

4） 三澤弘明：Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, Peking University, Advisory committee member（2019年10月30日～）

5） 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)（2019年12月1日～2020年11月30日）

6） 三澤弘明：科学技術振興機構　戦略的創造研究推進事業 事後評価委員（2019年11月1日～2020年3月31日）

7） 三澤弘明:文部科学省　公私立大学の共同利用・共同研究拠点の中間・事後評価にかかる評価意見書の作成者（2019年11月25日-2019年12月5日）

8） 三澤弘明：台湾 中央研究院 応用科学研究センター アドバイザリーコミッティーメンバー（2020年1月1日～2022年12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） 三澤弘明：Asian Nanoscience and Nanotechnology Association, President（2013年5月～）

3） 三澤弘明：ACS Photonics, Editorial Advisory Board（2014年1月1日～）

4） 三澤弘明：International Foundation of Photochemistry (IFP), Executive member（2018年9月25日～）

5） 三澤弘明：The Journal of Chemical Physics, Guest Editor of Special Issue “Emerging Directions in Plasmonics”(2019.2.23～)

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） TSAI Wan-Shao、台湾、(2019.7.8-2019.7.12)

2） WU Dong、中国、(2019.8.18-22)

3） DEL FATTI Natalia、フランス、(2019.11.25)

4） EBBESEN Thomas、フランス、(2019.12.18-20)

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、2019年4月3日～2019年6月5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、2019年4月4日～2018年9月30日

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、三澤弘明、2019年4月26日

4） 情報科学研究科、ナノフォトニクス特論、三澤弘明、押切友也、孫泉、石旭、2019年10月2日～11月25日

5） 工学部、生体工学概論、三澤弘明（責任教員)、2019年12月3日

6） 工学部「生体情報工学実験I」孫泉、石 旭、2019年4月4日～2018年8月3日

7） 工学部「生体情報工学実験II」押切友也、2019年10月1日～2019年2月4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、2019年10月16日

2） 高校生(札幌日大高校　韓国 仁川科学芸術英才学校)、夢のエネルギー人工光合成の実現に向けて、三澤弘明、2020年1月22日

g．新聞・テレビ等の報道

なし

h．ポスドク・客員研究員など

1） 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～）

2） HE Guiying（博士研究員、科研費「特別推進研究」および共同研究費、2018.10.26～2019.12.20）

3） LEE Kuang-Li（客員研究員、電子科学研究所ダイナミック・アライアンス国際交流事業、2019.9.17～2019.12.13）

4） Rotti Srinivasamurthy Swathi（客員研究員、IISER-TVM、2019.5.1-2019.7.31）

5） CHU Cheng Hung（客員研究員、Academia Sinica、2019.6.4～2019.7.4）

6） GAO Hui(客員研究員、中国国家留学基金管理委員会、2019.9.16～2020.9.8)

7） BIAN Lifeng（客員研究員、Chinese Academy of

Sciences、2019.9.16-2020.9.7）
８） YAN Qiuchen（客員研究員、北京大学、2019.9.16～2021.3.31）
９） ZHENG Wei（客員研究員、北京大学、2019.9.25～2019.11.30）
１０） AKINOGLU Eser Metin(客員研究員、University of Melbourne、2019.11.11～2019.11.30）
１１） BAI Haoyuan（客員研究員、電子科学研究所ダイナミック・アライアンス国際交流事業、2019.11.14～2019.11.30）
１２） YU Zhiqiang（客員研究員、National Natural Science Foundation of China、2020.1.15-2020.6.21）
１３） WANG Jianxin（客員研究員、National Natural Science Foundation of China、2020.1.15-2020.6.21）

ⅰ．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：4人

１） 城　春樹、情報科学研究科：修士(情報科学)、モード強結合に基づく高光吸収電極を用いた有機還元反応の開拓（Reduction of Organic Compounds by Photoelectrodes Utilizing Modal Strong Coupling）
２） 清水　風希、情報科学研究科：修士(情報科学)、酸化コバルト薄膜をp型半導体として用いたプラズモン光電変換系の構築（Plasmonic Photoelectric Conversion Using Cobalt Oxide as p-Type Semiconductor）
３） 巽　亮太、情報科学研究科：修士(情報科学)、蛍光相関分光法を用いたプラズモンオプティカルトラッピングの評価（Evaluation of Plasmon Optical Trapping by Fluorescence Correlation Spectroscopy）
４） 劉　言恩、情報科学研究科：修士(情報科学)、局在表面プラズモンとファブリ・ペローナノ共振器とのモード強結合における金ナノ粒子密度依存性（Influence of Particle Density on Modal Strong Coupling between Localized Surface Plasmon and Fabry-Pérot Nanocavity Modes）

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　　小野円佳（東大院、科博、2019.8～）
助　教　　藤岡正弥（慶大院、理博、2015.4～）
助　教　　Melbert JEEM（北大院、工博、2019.3～）
客員研究員　Zagarzusem KHURELBAATAR　（2019.4～）
外国人研究員　Tong FANG（2018.11～）
大学院生　Robin MSISKA（総合化学院M2）
　　佐々木悠馬（総合化学院M2）
　　佐藤賢斗　（総合化学院M1）
学部生　　田邊泰人　（理学部化学科B4）

１．研究目標

当研究分野では、無機材料や金属材料中のイオンや結晶欠陥などの状態を制御して新規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)　高プロトン伝導性を示すリン酸塩ガラスの開発
リン酸塩ガラスに対してプロトン注入を行うことにより、伝導度や耐久性の高い材料を開発する。

(2)　超低光損失を示すシリカガラスの開発
高温高圧を用いてファイバのコア材のシリカガラスを処理することで、光損失低減を目指す基礎研究を行う。

(3)　固体電気化学を利用した新規物質の開発
「電気」や「圧力」等の合成パラメータを利用することで、従来の合成手法では得られない熱力学的準安定物質を開発する。

(4)　水中結晶光合成
金属材料を水中に光照射し、金属内部の結晶欠陥準位を利用した光誘起結晶成長により、特徴的な光・電子特性を有するナノ構造を創製する。

２．研究成果

金属腐食反応の原理

金属(M)を含む金属材料を水中に浸した場合、金属が腐食する反応が進行する。すなわち、水中では金属がイオン化し、反応式(1)に示されるように、金属のイオン(M^{n+})が生成される。一般的な金属の腐食反応には、金属が金属イオンとなって溶解するアノード反応(反応式(1))と、水中の酸化剤が還元されるカソード反応と組み合わさった反応である。反応式(2)と(3)は両方カソード反応を示すが、それぞれ水が酸性である場合と中性又はアルカリ性である場合に起こる。

ここで、金属の標準電極電位が正である場合、一般的には、反応式(1)に示されるアノード反応は起こらないと考えられる。ただし、水中の水素イオン濃度(H^+)の濃度又は溶存酸素の濃度によっては、金属がイオン化し、反応式（４）に示されるように、M^{n+}が生成される。反応式(1)又は反応式(4)の反応によって水中に溶け出した金属イオン(M^{n+})は、例えば溶存酸素を含む水中では、反応式(3)の反応により生じた水酸化物イオン(OH^-)と反応する。その結果、下記反応式(5)に示されるように、水酸化物($M(OH)_n$)を生じる。その後、水酸化物が水分子から離脱することで、下記反応式(6)に示されるとおり、酸化物(MO_x)を生成する。しかしながら、以上のような一般的な金属の腐食反応では、結晶性の高い酸化物又は水酸化物のナノ結晶の生成は難しい。

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^- \quad (1)$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (2)$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (3)$$

$$2M + O_2 + 2nH^+ \rightarrow 2M^{n+} + 2H_2O \quad (4)$$

$$M^{n+} + nOH^- \rightarrow M(OH)_n \quad (5)$$

$$M(OH)_n \rightarrow MO_x + (n-x)H_2O \quad (6)$$

水中結晶光合成法による金属酸化物ナノ結晶の作製

我々は、水中における金属材料の光照射により、結晶性が高い酸化物又は水酸化物のナノ結晶が生成すると推測し、水中結晶光合成法(SPSC:Submerged Photosynthesis of Crystallites)を開発した。SPSC法は、光照射をすることにより、反応式(1)-(5)が起り、金属の水酸化物($M(OH)_n$)から、酸化物(MO_x)を含むナノ結晶が金属材料の表面に形成させるものである。

例えば、金属の水酸化物は、水中の水酸化物イオン(OH^-)と反応することで、金属のヒドロキソ錯イオン($[M(OH)_x]^{y-}$)が形成され、水中に再び溶解する。水のpHが大きいほど、ヒドロキソ錯イオンが容易に生成し、上記ヒドロキソ錯イオンの少なくとも一部がナノ結晶に変化する。ナノ結晶は、水酸化物及び酸化物のうち少なくともいずれか一方を含む。例えば、金属(M)が亜鉛(Zn)である場合、下記反応式(7)に示される反応により、テトラヒドロキソ亜鉛(II)酸イオン($[Zn(OH)_4]^{2-}$)が生成される。そして、下記反応式(8)に示される反応により、ZnOのナノ結晶が生成される。

$$Zn(OH)_2 + 2OH^- \rightarrow [Zn(OH)_4]^{2-} \quad (7)$$

$$[Zn(OH)_4]^{2-} \rightarrow ZnO + 2OH^- + H_2O \quad (8)$$

SPSC法により得られるナノ結晶は、先端成長したナノロッド形状であることが大きな特徴である。さらに簡便で安価、大面積にナノロッドの形成が可能であることから、産業応用上も有用である。

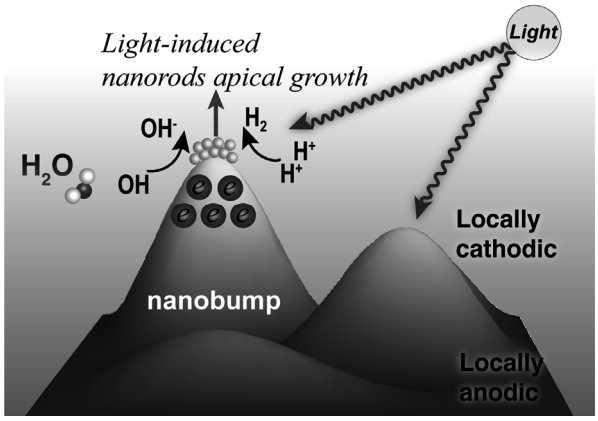


図１　水中結晶光合成を利用した光誘起ナノ結晶形成の概要図。

これまでに、Zn、Cu、Fe、W、Ceなど多様な金属酸化物ナノロッドの合成に成功しており、特にZnOナノロッドに関してはその形成メカニズムを明らかにしている。図1で示されるように、基板材料の表面に存在する凹凸形状(nanobump)に光を照射すると、局所的な陽極と陰極が作製される。陽極ではZn → Zn^{2+} + $2e^-$の反応が起こり、陰極ではZnOナノロッドが形成される。

欠陥準位を利用したSPSCメカニズム

SPSC法によるZnOナノロッド成長は、基板の欠陥準位を利用した水分解及び光ラジカル反応に起因するものであり、従来の水中結晶合成と異なる新たな反応メカニズムが示唆された。ここで、光照射によって水が分解しヒドロキシルラジカル(・OH)の発生が確認されている。p-nitrosodimethylaniline(PNDA) はOHラジカルをトラップすることで、440 nmにおける吸光度が減少する物質であるが、図2に示されるように、UV照射をした場合に、吸光度の減少が顕著であり、光照射によるOHラジカルの発生が確認された。

ヒドロキシルラジカル(・OH)の発生が確認されている。p-nitrosodimethylaniline(PNDA) はOHラジカルをトラップすることで、440 nmにおける吸光度が減少する物質であるが、図2に示されるように、UV照射をした場合に、吸光度の減少が顕著であり、光照射によるOHラジカルの発生が確認された。

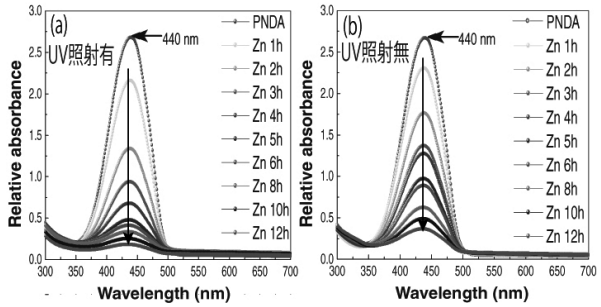


図 2　吸光度による OH ラジカルの同定結果。(a)UV 照射有。(b)UV 照射無。

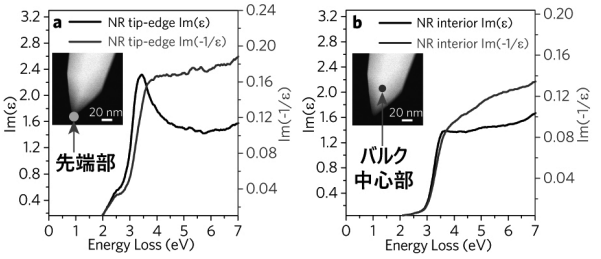


図 3　ZnO ナノロッドの電子エネルギー損失関数。(a)先端部分。(b)バルク部分。

一方、走査型透過電子顕微鏡を用いた価電子エネルギー損失分光(STEM-VEELS)測定よりナノロッドの先端では、中心部と比べて、3.3 eV付近に大きなピークが確認される(図3)。このエネルギー吸収は、電子状態計算から、先端部分の酸素欠損に起因していることが示唆された。つまり、先端部では光吸収に伴う電子の励起とOHラジカルの発生が同時に進行し、OH^-の生成が促進される。生成したOH^-は、水中のZn^{2+}と反応して最終的にZnOを形成する。

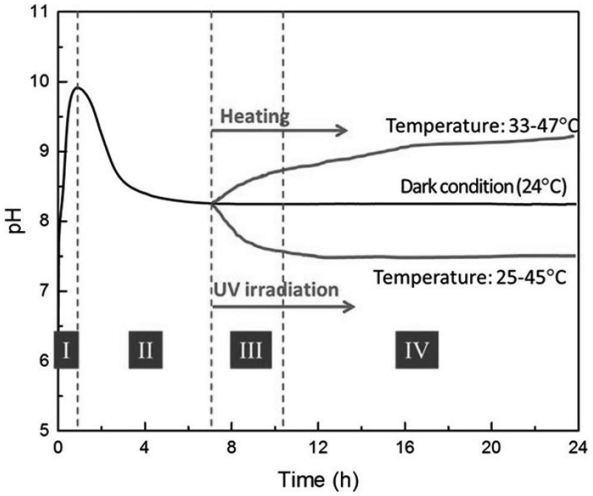


図 4　熱と UV 照射効果による水の pH 変化。

この反応に伴い、ナノロッド周辺のOH^-は局所的に濃度が減少するはずであるが、実際SPSC法の処理過程で局所的にpHをモニターした場合、図4に示されるように光照射に伴うOH^-の減少が確認された。これは、OH^-がZnO形成に使用されていることしめしており、光照射による$Zn+H_2O+h\nu \rightarrow ZnO+H_2(g)$の化学反応を裏付ける結果である。

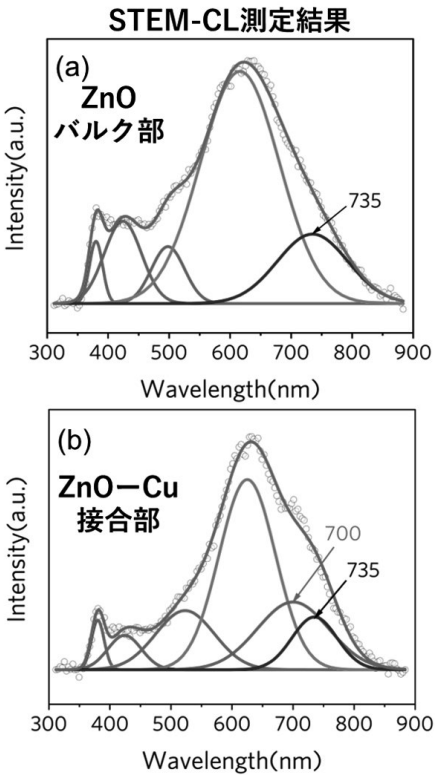


図 5　Cu 基板上形成した ZnO ナノロッドの STEM-CL 測定結果。(a)ZnO バルク部分。(b)ZnO-Cu 接合部分。

ZnOナノロッド-Cu基板間に形成される欠陥準位

STEM-VEELSでは、高エネルギー・空間分解能より、局所的な欠陥のエネルギー吸収を測定できるが、バンドギャップ

内に複数の不純物準位が含まれる場合、それらを見分けることができない。例えば、Cu基板上に形成したZnOナノロッドは、STEM-カソードルミネッセンス(STEM-CL)測定より、ZnO直接バンドギャップ(380nm)と酸素欠損(～600nm)等のそれぞれに由来するピークが確認できる(図5)。さらに、ZnO-Cuの接合部分においてはZnOバルク部分では確認できない特徴的なピークが700nm付近に確認できる。これはZnOとCu基板の格子不整合に伴うピークであることを、STEM-CL測定からしている。

３．今後の研究の展望

SPSC法では、ナノロッドの成長は基板の欠陥準位に由来すると考えられるが、成長メカニズムの詳細を調べるには、欠陥準位における電子状態の定量的な情報を知る必要がある。これを着目し、例えば、STEM-VEELSとSTEM-CLを同時にその場観察することで、上記の情報を引き出すすることを予想される。そして、SPSC法より得られるナノ構造の形態は、非常に多岐にわたる。これらの制御可能性は溶媒の種類と共に重要な課題である。例えば、NaCl添加水溶液中でのZnO結晶成長のSPSC処理後には、超純水で得られるようなペンシル状のナノロッドが見られず、シモンコライトというプレート状のZnOが形成が確認している。今後、各種の水溶液媒体を用いた不純物添加効果の調査により、光による酸化物晶出場所を制御することが可能になれば、形態制御を行いながらSPSCを用いた多様な3次元ナノ構造作製が期待できる。

４．資料

4.1 学術論文（査読あり）

１） L. Deng, K. Miyatani, S.-i. Amma, M. Suehara, M. Ono, Y. Yamamoto, S. Urata, J. Du: ″Reaction Mechanisms and Interfacial Behaviors of Sodium Silicate Glass in an Aqueous Environment from Reactive Force Field-Based Molecular Dynamics Simulations″, *The Journal of Physical Chemistry C,* 123(35): 21538-21547 (2019)

２） K. Hiraiwa, Y. Takahashi, J. Mizuno, M. Jeem, S. Watanabe: ″Luminescence properties of ZnO-M heterostructures fabricated by galvanic-submerged photosynthesis of crystallites″, *Applied Surface Science,* 489: 269-277 (2019)

３） T. Omata, T. Yamaguchi, S. Tsukuda, T. Ishiyama, J. Nishii, T. Yamashita, H. Kawazoe: ″Proton transport properties of proton-conducting phosphate glasses at their glass transition temperatures″, *Physical Chemistry Chemical Physics,* 21(20): 10744-10749 (2019)

４） M. Ono, S. Miyasaka, Y. Takato, S. Urata, H. Yoshino, R. Ando, Y. Hayashi: ″Higher Toughness of Metal-nanoparticle-implanted Sodalime Silicate Glass with Increased Ductility″, *Scientific Reports,* 9(1): 15387 (2019)

５） Y. Takahashi, K. Hiraiwa, M. Jeem, L. Zhang, S. Watanabe: ″Galvanic-submerged photosynthesis of crystallites: Fabrication of ZnO nanorods@ Cu-surface″, *Applied Surface Science,* 489: 313-320 (2019)

６） Y. Yang, H. Tokunaga, M. Ono, K. Hayashi, J.C. Mauro: ″Understanding the molar volume of alkali-alkaline earth-silicate glasses via Voronoi polyhedra analysis″, *Scripta Materialia*, 166: 1-5 (2019)

７） L. Zhang, M. Jeem, K. Okamoto, S. Watanabe: ″Fabrication of Iron Oxide Nanoparticles via Submerged Photosynthesis and the Morphologies under Different Light Sources″, *ISIJ International,* 59(12): 2352-2358 (2019)

８） T. Gotoh, M. Jeem, L. Zhang, N. Okinaka, S. Watanabe: ″Synthesis of yellow persistent phosphor garnet by mixed fuel solution combustion synthesis and its characteristic″, *Journal of Physics and Chemistry of Solids,* 142: 109436 (2020)

９） J. Mizuno, M. Jeem, Y. Takahashi, M. Kawamoto, K. Asakura, S. Watanabe: ″Light and Shadow Effects in the Submerged Photolytic Synthesis of Micropatterned CuO Nanoflowers and ZnO Nanorods as Optoelectronic Surfaces″, *ACS Applied Nano Materials,* 3(2): 1783-1791 (2020)

１０）R. Msiska, S. Honjo, Y. Asai, M. Arita, A. Tsurumaki-Fukuchi, Y. Takahashi, N. Hoshino, T. Akutagawa, O. Kitakami, M. Fujioka, J. Nishii, H. Kaiju: ″Tunnel magnetocapacitance in Fe/MgF_2 single nanogranular layered films″, *Applied Physics Letters,* 116(8): 082401 (2020)

１１）Y. Yang, H. Tokunaga, M. Ono, K. Hayashi, J.C. Mauro: ″Thermal expansion of silicate glass-forming systems at high temperatures from topological pruning of ring structures″, *Journal of the American Ceramic Society,* 103(8): 4256-4265 (2020)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） 海住 英生、藤岡 正弥、西井 準治:「磁性薄膜エッジを利用した新規なナノスケール接合デバイスの創製」、電気学会誌、一般社団法人 電気学会、136(11): 730-735 (2019)

２） 小野 円佳、藤浪 眞紀、伊藤 節郎:「空隙構造制御によるシリカガラスの超低損失化」2018 年日本の光学研究 : 光学、一般社団法人　日本光学会　第 48 巻 第 6 号（2019 年 6 月）

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） 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 : “Experimental and Theoretical Study on Tunnel Magnetocapacitance in Fe/MgF_2 Nanogranular Films”, 6th Japan-Korea

International Symposium on Materials Science and Technology 2019 (JKMST2019), 定山渓ビューホテル, Japan (2019-08)

2） H. Kaiju, T. Nagahama, O. Kitakami, J. Nishii and G. Xiao : “Magnetocapacitance effect in spintronic device”, 6th Japan-Korea International Symposium on Materials Science and Technology 2019（JKMST2019）, 定山渓ビューホテル, Japan (2019-08)

3） M. Fujioka, K. Sato, M. Nagao, S. Demura, H. Sakata, S. Adachi, Y. Takano, H. Kaiju, M. Jeem, J. Nishii: “Solid state electrochemistry for intercalation by using proton-driven ion introduction”, Materials Research Meeting 2019,Yokohama Symposia,Japan (2019-12)

4） M. Ono, K. Hara, M. Fujinami, S. Ito: “Significant suppression of Rayleigh scattering loss in silica glass formed by the compression of its melted phase”, International Summit on Optics, Photonics and laser technologies, (2019-06)

5） M. Ono, M. Fujinami and S. Ito: “Void and optical property in silica glass”, 14th International Conference of Non-Crystalline Materials, (2019-11)

b．招待講演（国内学会）

1） 藤岡 正弥、メルバート ジェーム、西井 準治 :「固体電気化学を活用したアニオンのイオンポンピング」、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、2019 年 11 月 25 日

2） 小野 円佳:「圧力を利用した空隙制御による超低損失シリカガラスの実現」、レーザー学会 第 538 回研究会「ファイバレーザー技術」、2019 年 11 月 15 日

3） 小野 円佳:「高温高圧処理を用いたシリカガラスの超低損失化」筑波大学セミナー（物質科学セミナー）、2019 年 11 月 18 日

4） 小野 円佳:「高温高圧処理を用いたシリカガラスの超低損失化」、レーザー学会学術講演会（受賞記念講演）第 40 回年次大会、 2020 年 1 月 20 日

5） 小野 円佳:「高温高圧処理を用いたシリカガラスの超低損失化－シリカガラスの空隙を制御する－」、The 30th Meeting on Glasses for Photonics 日本セラミックス協会ガラス部会フォトニクス分科会、2020 年 1 月 28 日

c．一般講演（国際学会）

1） T. Fang, T. Tatebayashi, M. Fujioka, H. Kaiju, Y. Ren, G. Zhao and J. Nishii : “Thermal Stability of Proton Conductive Phosphate Glasses”, The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13), 沖縄コンベンションセンター（宜野湾市）, Japan (2019-10 ～ 2019-11)

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 in Ni78Fe22/Mq3(M=Al, Er)/Ni78Fe22 nanoscale junction devices utilizing magnetic thin-film edges”, The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies（PACRIM13）, 沖縄コンベンションセンター（宜野湾市）, Japan (2019-10 ～ 2019-11)

3） Z. Khurelbaataar, S. Tsagaanchuluun, M. Fujioka and J. Nishii : “Fermi Level Depinning in Metal/Germanium Junctions by Insertion of Graphene Layers”, The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13), 沖縄コンベンションセンター（宜野湾市）, Japan (2019-10 ～ 2019-11)

4） T. Fang, T. Tatebayashi, M. Fujioka, H. Kaiju, Y. Ren, G. Zhao, M. Jeem, M. Ono and J. Nishii : “Thermal Stability of Proton Conductive Phosphate Glasses Containing Rare Earth Elements”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University &Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS)National Chiao Tung University, Hokkaido University, Japan (2019-12)

5） Y. Sasaki, R. Msiska, T. Misawa, S. Mori, T. Komine, N. Hoshino, T. Akutagawa, M. Fujioka, M. Jeem, M. Ono, J. Nishii and H. Kaiju : “Junction Area and Bias Voltage Dependence of MR Ratio in $Ni_{78}Fe_{22}$/Mq_3(M=Al, Er)/$Ni_{78}Fe_{22}$ Nanoscale Junction Devices Utilizing Magnetic Thin-film Edges”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University &Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS)National Chiao Tung University, Hokkaido University, Japan (2019-12)

d．一般講演（国内学会）

1） メルバート ジェーム、張 麗華、渡辺 精一 :「Measurement of Optoelectrical Hotspot in ZnO Nanorods using STEM-VEELS」、日本顕微鏡学会第 75 回学術講演会、名古屋国際会議場、Japan (2019-06)

2） 藤岡 正弥、メルバート ジェーム、西井 準治 :「水素イオンの極性を利用した固体電気化学合成」、日本金属学会 2019 年秋期(第 165 回)講演大会、岡山大学、Japan (2019-09)

3） メルバート ジェーム、藤岡 正弥、渡辺 精一、西井 準治 :「ZnO Nanorods Fabrication via Submerged Illumination and its optoelectrical properties」、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、Japan (2019-09)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang :「磁気キャパシタンス効果の新展開」、第 7 回ナノスケール磁性体研究会、慶応大学日吉キャンパス、Japan (2019-04)

2） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang :「磁気キャパシタンス効果の新展開とその学理」、第 1 回 慶大スピントロにクス研究開発センター（CSRN at Keio Univ）研究会、慶応義塾大学理工学部矢上キャンパス、Japan (2019-07)

3） 海住 英生、長浜 太郎、北上 修、西井 準治、Xiao Gang :「磁気トンネル接合における室温巨大磁気キャパシタンス効果」、日本磁気学会 第 224 回研究会、中央大学駿河台記念館、Japan (2019-07)

4） 藤岡 正弥 :「固体電気化学合成による新規物質開発」、NanotechCUPAL 若手研究員による研究講演会、矢崎総業 技術研究所、Japan (2019-08)

5） 田邊 泰人、小野 円佳、西井 準治 :「シリカガラスの高圧合成による構造変化」、令和元年度 日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会、新潟大学、Japan (2019-11)

6） Fang Tong、Ren Yang、メルバート ジェーム、藤岡 正弥、小野 円佳、西井 準治 :「希土類元素を含有するプロトン伝導リン酸塩ガラスの熱的安定性 」、令和元年度 日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会、新潟大学、Japan (2019-11)

7） 藤岡 正弥、西井 準治 ：「電気的イオン拡散による新規物質開発」、日本セラミックス協会東北北海道支部 第 27 回北海道地区セミナー2019、北海道大学、Japan (2019-11)

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） 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、新奇イオン放出現象を利用した全固体イオンガンの創製、2019～2020 年度

3） 西井 準治、特別研究員奨励費、ナノ構造光デバイスの創製、2019～2020 年度

4） 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

5） 藤岡 正弥、基盤研究 B 一般、高濃度水素化物の創製に向けた革新的反応場の構築、2019～2021 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

該当なし

4.10 受賞

1） 小野 円佳: 第４３回レーザー学会奨励賞「超低損失光ファイバの実現に向けたシリカガラスの空隙構造制御」（レーザー学会）2019 年 5 月 31 日

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：Best Poster Award “Experimental and Theoretical Study on Tunnel Magnetocapacitance in Fe/MgF_2 Nanogranular Films.” （日本材料科学会） 2019 年 08 月

3） Fang Tong、Ren Yang、メルバート ジェーム、藤岡 正弥、小野 円佳、西井 準治 ： 令和元年度 日本セラミックス協会 東北北海道支部研究発表会優秀ポスター賞 「希土類元素を含有するプロトン伝導リン酸塩ガラスの熱的安定性 」（日本セラミックス協会） 2019 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

該当なし

c．兼任・兼業

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～2020 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､ナノテクノロジーが拓く光マテリアル革命、西井 準治、2019 年 05 月 10 日

2） 総合化学院､物質化学（ナノフォトニクス材料論） 、西井 準治、2019 年 6 月 10 日～7 月 8 日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

g．新聞・テレビ等の報道

該当なし

h．ポスドク・客員研究員など

1） KHURELBAATAAR Zagarzusem(JSPS 外国人特別研究員、2019.4.1～)

i．修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：2人（総人数を記載）

1） Robin Msiska 、総合科学院： Study of Tunnel Magnetocapacitance Effect in Single-layered Fe/MgF_2 Granular Films

2） 佐々木 悠馬､総合科学院 ： 磁性薄膜エッジを利用した分子スピントロニクス素子の電気・磁気特性

博士学位：0人（総人数を記載）

該当なし

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、2018.7～2020.1）
助　教　高橋仁徳（東北大院、博(工)、2017.8～）
博士研究員　Shivakumar Kilingaru Ishwara (2019.4～)
院　生　李思敏（DC2）、陳 昕（DC2）、吉 沁（DC2）、呉佳冰（DC1）、武冬芳（DC1）、楊竹西（DC1）、土井雄登(MC2)、高橋優太(MC1)、刁子健(MC1)、蓮尾直洋(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) マルチフェロイック分子結晶に向けたアニオン性強磁性錯体と超分子カチオンの複合化

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，有機・無機カチオン-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・磁気的機能の開拓を行ってきた。例えば、*m*-fluoroanilinium$^+$ (*m*-FAni$^+$) とdibenzo[18]crown-6 からなる超分子カチオンを導入した結晶 (*m*-FAni$^+$)(dibenzo[18]crown-6)$[Ni(dmit)_2]$ では、*m*-FAni$^+$ が結晶内で分子回転が可能であり、*m*-FAni$^+$ のC-F結合に基づく分極が結晶全体で反転するため、強誘電体となる。超分子カチオンの分極反転に基づく強誘電性を、強磁性・強弾性などのフェロイックな物性に結び付けることができれば、マルチフェロイックス分子結晶の創製が期待できる。そこで我々は、強磁性を示す分子性アニオンであるオキサラート (ox^{2-}) 架橋$Mn^{II}Cr^{III}$錯体 に超分子カチオンを導入し、強磁性と強誘電性が共存する物質開発を試みている。これまでの検討において、(m-FAni$^+$)(dibenzo[18]crown-6)からなる超分子カチオンを$[Mn^{II}Cr^{III}(ox)_3]$錯体に導入し、強磁性体であることを明らかにしているが、超分子カチオンが強誘電性を発現可能な分子回転空間の確保が困難であるとともに、空間反転対称性のない空間群で結晶化せず、強誘電性を示す結晶は得られていなかった。そこで本年度は、分子対称性をさらに下げることで空間反転対称性のない空間群で結晶化するのではないかと考え、benzo[18]crown-6 を超分子カチオンのホスト分子として用いることを考案した。benzo[18]crown-6 に対して、R-anilinium$^+$ (R = H, o-fluoro, *m*-fluoro, *p*-fluoro) と相互作用させた超分子カチオンを$[Mn^{II}Cr^{III}(ox)_3]$錯体に導入し、構造と物性の評価を行った。

得られた4つの結晶 (R-Anilinium)(benzo[18]crown-6)$[MnCr(ox)_3]$ (**1**, **2**, **3**, **4**, それぞれ R = H, o-fluoro, *m*-fluoro, *p*-fluoro) は 空間群 $P2_1$, *Cc*, $P2_1$ $Pna2_1$ で結晶化しており、非線形光学効果である第二次高調波の発生を観測した。また、4つの結晶に対して、磁化率の温度・磁場依存性を測定したところ、既報と同様に5 K 付近で強磁性転移を示すとともに、ソフト強磁性体であることが明らかになった。

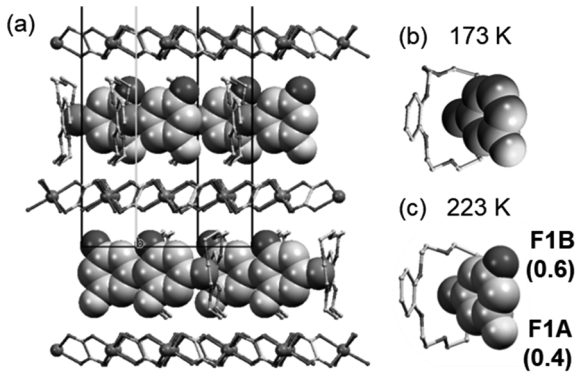


図 1. 結晶 2 の単結晶 X 線構造解析。水素原子は省略している。(a) 223 K における結晶 2 のパッキング。(b, c) 173 および 223 K での超分子カチオンの構造。173 K においてF 基は片方にオーダーしている一方、223 K ではフッ素基が 0.6 : 0.4 の占有率で配向のディスオーダーを示している。

図1 に*m*-FAni$^+$ をカチオンとして導入した結晶 **3** の構造をまとめた。$[MnCr(ox)_3]$によるハニカム2次元シート構造が結晶の*ac* 面と平行に伸長していた。また、2次元シート構造の間に、超分子カチオンが配列していた。これらの分子配列は結晶1 ～ 4 において共通だった。超分子カチオンの動的な構造変化を評価するために、結晶2に対して173 および223 K での結晶構造解析を行った。173 K では、m-FAni$^+$ のフッ素基はAni$^+$ の3位にのみ観測される一方、223 K では、Ani$^+$の3位のほかに5位にもフッ素基が見られ、占有率0.6 ： 0.4 の配向のディスオーダーを示していた。

これは、結晶内で分子が回転可能であることを示唆している。結晶**3**の誘電率の温度―周波数依存性を測定したところ、173 ～ 300 K の温度範囲で誘電緩和を示しており、結晶内で超分子カチオンが動的な運動を示すことを示唆している。一方で、o-FAni$^+$ を導入した結晶 **2** では、そのような誘電緩和は見られなかったが、460 K 付近で構造相転移を示し、対応する温度で誘電率の上昇を示した。

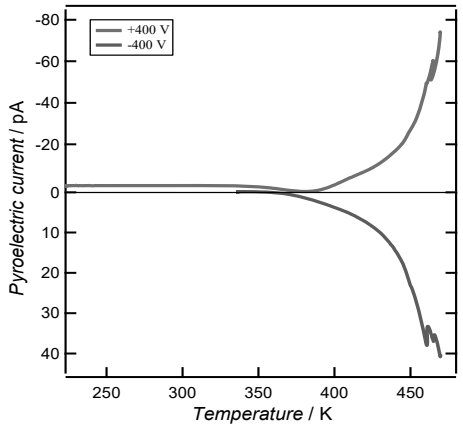


図 2. 結晶 2 の焦電流測定（±400 V 印加）。

この誘電応答および構造転移が極性―非極性結晶間での転移（強誘電―常誘電転移）であることを期待し、焦電流測定を行った。転移温度以上でも焦電流が見られたことから、転移後も極性空間群であることを示唆しているが、逆の電場を印加して測定したとき、焦電流の反転を観測した。小電流の反転から、結晶が分極を持つとともに、分極が電場によって反転可能であることを示している。

以上の結果より、強磁性のカチオンに超分子カチオンを導入することで、結晶内で超分子カチオンが動的な特性を示すとともに、分極反転が可能であることが明らかにした。本研究を通して分子性マルチフェロイックの候補物質の作製に成功したといえる。今後、電気磁気効果の観測を目的とした実験を行うとともに、新たな物質系の開拓を行う。

(b) 融解するイオンラジカル塩の相境界近傍での伝導性変化

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^+), と dibenzo[24]crown-8 (DB[24]crown-8) からなる超分子カチオン導入した $[Ni(dmit)_2]$塩に着目した。C_2mim^+を DB[24]crown-8 に包接させることで、カチオンと$[Ni(dmit)_2]^-$ との距離を離すことで、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と考えた。得られた$(C_2min^+)(DB[24]crown\text{-}8)_2[Ni(dmit)_2]^-$ (**5**) が 380 K で融解し、液相が安定であることをこれまでに報告した。さらに熱物性及び電気特性の評価を行い、融解するイオンラジカル塩の相境界近傍での伝導性について検討を行った。

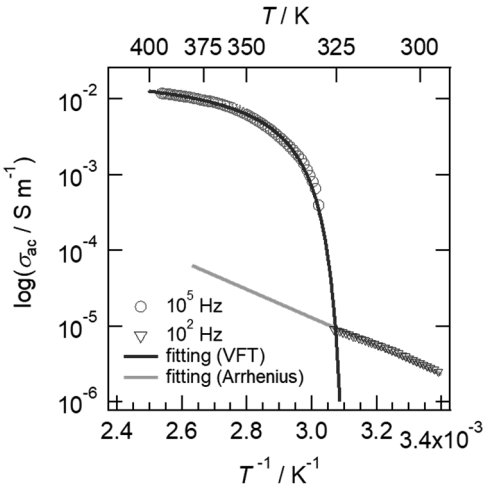


図 3. 結晶 5 の冷却過程における交流伝導度とフィッティング。

200 K から 410 K の温度範囲で示差走査熱量測定を行ったところ、結晶 **5** は、加熱時に 380 K で明確な融点を示し、冷却プロセス中に約 310 K で相転移を示した。液相から冷却過程で交流伝導度を測定したところ、液相のイオン伝導は Vogel-Fulcher-Tamman (VFT) 式に従う一方で、325 K の転移温度近傍では 0.37 eV の活性化エネルギーでアレニウス式に従うことから、液相―固相転移によって伝導メカニズムがイオン伝導から電子伝導にスイッチしたことを示唆している（図 3）。

相境界近傍での伝導メカニズムのスイッチングを示すイオンラジカル塩は、これまでに報告例がなく、超分子カチオンを用いた分子設計に由来するものと考えられる。今後、

基礎応用両面から検討を進めていく。

(c) 構造異性が及ぼす多孔質構造の安定性と物性への影響

π共役分子を積層させて構築する多孔質材料は、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) 構造が積層した多孔質の水素結合性有機フレームワーク (HOF) が効率よく構築できることを見出している。特に拡張π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を用いて構築したHOF CPHATNが、耐熱性に優れ空気中で633 Kまで安定に多孔質構造を維持できること、強酸への曝露によって可逆的に黄色から赤褐色への色調変化と蛍光発光のON/OFFを示すことを明らかとした。

本研究では、ヘキサアザトリナフチレン(HATN)の窒素原子の位置がHOFの構造と物性に及ぼす影響について検討するために、CPHATNの構造異性体であるCPBTQ (図4)を用いてHOFの構築と物性評価を行った。

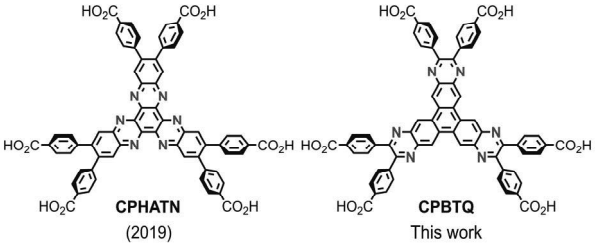


図 4. CPHATN **と** CPBTQ **の分子構造。**

合成したCPBTQを*N*,*N*-dimethylacetamideと安息香酸メチルを混合した溶液から高温下で結晶化することによって、CPBTQの6つのカルボン酸が分子間水素結合で連結された多孔質結晶(CPBTQ-1)を得た(図5)。興味深いことに、CPHATN-1と比べてCPBTQ-1では、HexNet層内のカルボキシ基の相補的な水素結合2量体に加えて、水素結合の一部が不完全な部分や、HexNet層間でのラダー状水素結合なども形成されており、結晶構造の対称性が低いことが分かった(Z' = 4)。詳細な構造分析の結果、この構造の相違は、末端のカルボシキフェニル基の中心π共役平面に対する配座の自由度の違いがもたらしていることが示唆された。図6に示すように、ケンブリッジ結晶構造データベース(CSD)を用いた統計的な調査では、ビフェニルにおけるフェニル基同士がとり得る二面角よりも、2−フェニルピリジンにおけるアリール基同士がとり得る二面角の方が、より広範囲に分布していることがわかる。CPHATN-1とCPBTQ-1においても同様であった。

末端フェニル基の高い配座自由度がもたらす複雑なネットワーク構造のために、CPBTQ-1は、483 K以上の高温で徐々に多孔質構造が崩壊し、アモルファスへと転移する。そこで、減圧下で加熱を463Kまでに抑えて注意深くCPBTQ-1を活性化したところ、永続的多孔性を維持したHOF CPBTQ-1aを得ることができた。195 Kにおける二酸化炭素の吸着実験から求めたBrunauer-Emmett-Teller (BET)比表面積と空孔体積は、それぞれ471 m^2g^{-1}および0.372cm^3g^{-1}であった。またnonlocalized density functional theory (NLDFT)により求めた空孔径分布では、0.7 nmと1.1 nmにピークが観測され、これはCPBTQ-1の結晶構造における溶媒の包接空間とおおよそ一致する。

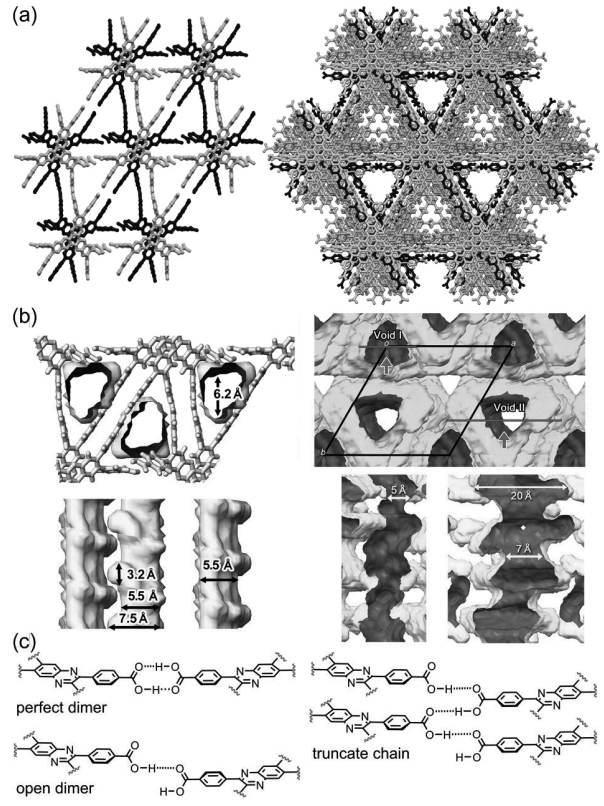


図 5(a) CPHATN-1(**左**) **と** CPBTQ-1(**右**)**の結晶構造**. (b) CPHATN-1(**左**) **と** CPBTQ-1(**右**)**の可視化した空孔表面**. (c) CPBTQ-1 **の構造中で見られたカルボキシル基の水素結合様式**.

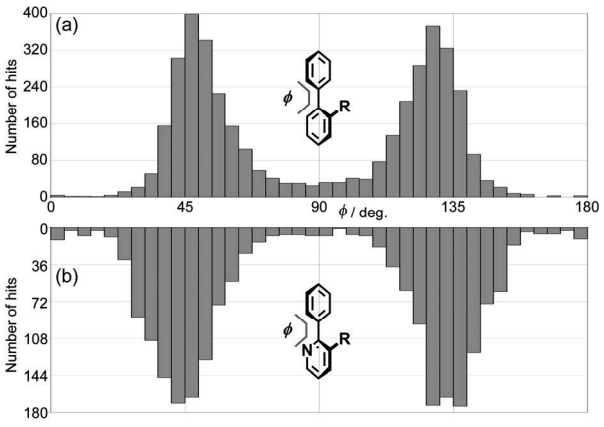


図 6. **ケンブリッジ結晶構造データベースを基に調べたビフェニルと** 2−**フェニルピリジンの二面角**ϕ**の分布。**

π共役部位にピラジン環を有するCPBTQ-1aもCPHATN-1a

と同様に塩酸にさらすことによって、黄褐色から赤褐色へと変色する。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、塩酸を除去すると、その吸収帯が消失し、もとの黄褐色固体に戻ることがわかった。しかし、CPHATN-1a とは異なり、この一連の操作でCPBTQ-1aの結晶性は徐々に低下することがPXRD強度の減衰より示唆された。

以上のように本研究は、CPHATN-1とCPBTQ-1のように、π共役部位における窒素原子の位置の違いがそれらの多孔性の集合構造および物性に与える影響を初めて明らかとした。

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） K. Ichihashi, T. Nishimura, D. Konno, K. Inoue, T. Nakaya, T. Akutagawa, T. Nakamura and S. Nishihara: “Magnetic Switching by Desorption/Adsorption of an Organic Solvent Molecule from/on [Ni(dmit)$_2$]$^-$ Salt”, *Chemistry Letters*, **48**(4): 329-332 (2019)

２） M. Fujibayashi, M. Shiga, R. Tsunashima and T. Nakamura: “Synthesis, Structure, and Electrochemical Properties of [Na(SO$_3$)$_2$(RPO$_3$)$_4$Mo$^{V}_4$Mo$^{VI}_{14}$O$_{49}$]$^{5-}$ (R = Propyl or *t*-Butyl)”, *Bulletin of the Chemical Society of* , **92**(5): 918-922 (2019)

３） J. Islam Md, K. Yuyama, K. Takahashi, T. Nakamura, K. Konishi and V. P. Biju: “Mixed-halide perovskite synthesis by chemical reaction and crystal nucleation under an optical potential”, *NPG Asia Materials*, **11**: 31 (2019) 【電子研内共著】

４） R. Nozawa, J. Kim, J. Oh, A. Kamping, Y. Wang, S. Shimizu, I. Hisaki, T. Kowalczyk, H. Fliegl, D. Kim and H. Shinokubo: “Three-dimensional Aromaticity in an Antiaromatic Cyclophane”, *Nature Communication*, **10**: 3576 (2019)

５） E. Gomez, Y. Suzuki, I. Hisaki, M. Moreno and A. Douhal: “Spectroscopy and Dynamics of A HOF and Its Molecular Units: Remarkable Vapors Acid Sensing”, *The Journal of Materials Chemistry C*, **7**: 10818-10832 (2019)

６） Y. Sagara, K. Takahashi, T. Nakamura and N. Tamaoki: “Crystal structure and thermoresponsive luminescence of a 9,10-bis(phenylethynyl)anthracene-based cyclophane”, *Molecular Systems Design & Engineering*, **1**(5): 205-211 (2019)【電子研内共著】

７） S. Uchikawa, A. Kawasaki, N. Hoshino, T. Takeda, S. Noro, K. Takahashi, T. Nakamura, N. Sato, K. Kokubo, H. Sakurai and T. Akutagawa: “Dielectric and Sorption Responses of Hydrogen-Bonding Network of Amorphous $C_{60}(OH)_{12}$ and $C_{60}(OH)_{36}$”, *The Journal of Physical Chemistry C*, **123**(38): 23545-23553 (2019)

8） M. Muraoka, K. Aoyama, S. Fujihara, R. Yamane, I. Hisaki, M. Miyata, M. Murata and Y. Nakatsuji: “Template-Free Synthesis of a Phenanthroline-Containing [2]Rotaxane: A Reversible pH-Controllable Molecular Switch”, *Symmetry*, **11**(9): 1137 (2019)

９） G. Sushant, K. Takahashi, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju: “Photon Recycling by Energy Transfer in Piezochemically Synthesized and Close-Packed Methylammonium Lead Halide Perovskites”, *The Journal of Physical Chemistry C*, **123**(45): 27752-27758 (2019)【電子研内共著】

１０） B. B. Sankaramangalam, S. Ghimire, K. Takahashi, K. Yuyama, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju: “Nonradiative Energy Transfer through Distributed Bands in Piezochemically - synthesized Cesium and Formamidinium Lead Halide Perovskites”, *Chemistry-A European Journal*, **26**(10): 1-6 (2019) 【電子研内共著】

１１） I. Hisaki, Q. Ji, K. Takahashi, N. Tohnai, and T. Nakamura : “Positional Effects of Annelated Pyrazine Rings on Structure and Stability of Hydrogen-bonded Frameworks of Hexaazatrinaphthylene Derivatives”, *Crystal Growth & Design*, **20**(5): 3190-3198 (2020)

１２） E. Gomez, M. R. di Nunzio, M. Moreno, I. Hisaki, A. Douhal: “Shape-Persistent Phenylene-Ethynylene Macrocycles Spectroscopy and Dynamics: From Molecules to the Hydrogen-Bonded Organic Framework Material”, *The Journal of Physical Chemistry C*, **124**(12): 6938-6951 (2020)

１３） Y. Sagara, K. Takahashi, T. Nakamura and N. Tamaoki: “Mechanochromic Luminescence from Crystals Consisting of Intermolecular Hydrogen - Bonded Sheets”, *Chemistry – An Asian Journal*, **15**(45): 478-482 (2019)【電子研内共著】

１４） K. Sambe, N. Hoshino, T. Takeda, T. Nakamura, T. Akutagawa: “Structural Modulation of Electrically

Conducting TCNQ Salts Using Na^+(crown ether) Supramolecular Cations" *Crystal Growth & Design*, **20**(6): 3625-3634 (2020)

１５）K. Kubo, M. Yoshitake, N. Hoshino, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura: "Stable Ferromagnetic Crystal of Two-Dimensional Manganese-Chromium Oxalate with Supramolecular Cation" *European Journal of Inorganic Chemistry*, **2020**(17): 1670-1675 (2020)

１６）S. Nakamura, T. Takei, S. Nishihara, S. Okada, T. Akutagawa, T. Nakamura, Y. Tatewaki: "One-dimensional molecular nano-branched structures of tetrathiafulvalene derivative with crown ether" *ese Journal of Applied Physics*, **59**, SDDA10 (2020)

１７）P. Vervoorts, A. Schneemann, I. HanteInke, J. Pirillo, Y. Hijikata, T. Toyao, K. Kon, K. Shimizu, T. Nakamura, S, and R. A. Fischer: "Coordinated Water as New Binding Sites for the Separation of Light Hydrocarbons in Metal-Organic Frameworks with Open Metal Sites" *ACS Applied Materials & Interfaces* **12**(8): 9448-9456 (2020)

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

１） 久木 一朗、中村 貴義: 「弱い結合で強固な機能空間をつくる～水素結合を用いた分子多孔質材料創出への挑戦～」、*化学*、**74**: 68-69 (2019)

２） 久木 一朗、高橋 仁徳、中村 貴義: 「カルボン酸の水素結合で組み上げた多孔質有機フレームワーク」、*有機合成化学協会誌*、**77**: 706-715 (2019)

３） I. Hisaki: "Hydrogen-bonded porous frameworks constructed by rigid π-conjugated molecules with carboxy groups", *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, **96**: 215-231(2020)

4.4 著書

１） I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : "Layered Hydrogen-bonded Organic Frameworks as Highly Crystalline Porous Materials", *Advances in Organic Crystal Chemistry,* Supringer (2020)

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

１） T. Nakamura* : "Crystalline Molecular Electronic Materials Based on Supramolecular Structures", 10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10), 奈良 (2019-06)

２） T. Nakamura* : "Supramolecular Crystals for Molecular Electronic Materials", 15th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XV), 瀋陽, China (2019-09)

３） K. Takahashi*, I. Hisaki and T. Nakamura : "Supramolecular structure and physical properties of [$Ni(dmit)_2$] salts with dibenzo-24-crown-8", The 9th International conference on Organic Electronics, Novosibirsk, Russia (2019-9)

４） T. Nakamura* : "Ferromagnetic and Ferroelectric Properties of [$MnCr(oxalate)_3$] Crystals with Supramolecular Cation", the 7th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC7), Kuala Lumpur, Malaysia (2019-10)

５） K. Takahashi*, J. Wu, I. Hisaki and T. Nakamura : "Phase Transition Behavior of Ferromagnetic Oxalate-Bridged Bimetallic Complexes with Structural Polarity", the 13 th -China Joint Symposium on Conduction and Photoconduction in Organic Solids and Related Phenomena, Shanghai, China (2019-10)

６） T. Nakamura* : "Molecular Electronic Materials Based on Supramolecular Cation Structures", The 11th International Symposium on Nano & Supramolecular Chemistry (ISNSC-11), 池州, China (2019-10)

ｂ．招待講演（国内学会）

１） T. Nakamura* : "Supramolecular Structures with Metal-Oxalate Framework for Molecular Electronic Materials based on Gyroids", 日本化学会第 100 春季年会, 千葉県野田市, (2020-03)

ｃ．一般講演（国際学会）

１） I. Hisaki* : "Layered Organic Frameworks Constructed through Hydrogen-bonding", 24th International Conference on the Chemistry of the Organic Solid State, New York City, New York, United States of America (the) (2019-06)

２） N. Hasuo*, K. Takahashi, I. Hisaki, T. Soeta, Y. Ukaji and T. Nakamura : "Synthesis and Crystal Structure of [$Ni(dmit)_2$] Salts with Chiral Supramolecular Cations", 15th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XV), 瀋陽, China (2019-09)

３） Y. Takahashi*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : "Semiconducting of [$Ni(dmit)_2$] Crystals with [2.2.2] Cryptand Supramolecular Cation", 15th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XV), 瀋陽, China (2019-09)

４） Z. Diao*, J. Wu, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : "Hybrid Materials Based on [$Fe^{II}Cr^{III}(oxalate)_3$] Coordination Polymer with Supramolecular Structure", 15th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-XV), 瀋陽, China (2019-09)

５） K. Takahashi*, J. Wu, I. Hisaki and T. Nakamura : "Ferromagnetic polar crystals of MnCr oxalate complex with supramolecular cations for the development of multiferroics", 5th -Taiwan-Singapore-Hong Kong Quadrilateral Symposium on Coordination Chemistry, Nagoya (2019-09)

６） T. Nakamura*, J. Wu, K. Takahashi and I. Hisaki : "Ferromagnetic Polar Crystals of [$MnCr(oxalate)_3$] with Supramolecular Cations, Towards Multiferroics", The 13th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2019), Tomar, Portugal (2019-09)

7） S. Li*, J. Wu, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Structures and Physical Properties of a new class of supramolecular crystals (x-aminopyridinium)(DB[24]crown8)[Ni(dmit)$_2$](x = 2, 3, 4)”, the 7th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC7), Kuala Lumpur, Malaysia (2019-10)

8） J. Wu*, K. Takahashi, M. Fujibayashi, N. Hoshino, Y. Suzuki, S. Nishihara, R. Tsunashima, I. Hisaki, J. Kawamata, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Combining Supramolecular Structures and Ferromagnetic Networks: Towards Molecule-Based Multiferroics”, the 7th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC7), Kuala Lumpur, Malaysia (2019-10)

d．一般講演（国内学会）

1） 渡 優*、藤林 将、高橋 仁徳、中村 貴義、野呂 真一郎、綱島 亮 :「ポリオキソメタレートの分子変形とポスト―ゲスト特性」、第 13 回分子科学討論会、名古屋 (2019-09)

2） A. Wang*, K. Takahashi, I. Hisaki, T. Nakamura and S. Noro : “Introduction of Hydroxy Groups into One-Dimensional Metal Complexes and Their Impact on Adsorption Properties”, 錯体化学会第 69 回討論会, 名古屋 (2019-09)

3） 張 思*、高橋 仁徳、久木 一朗、中村 貴義、野呂 真一郎 :「ピペラジンを含む銅錯体の合成と二酸化炭素吸着特性」、錯体化学会第 69 回討論会、名古屋 (2019-09)

4） X. Zheng*, K. Takahashi, I. Hisaki, T. Nakamura and S. Noro : “Effect of Uptake/Release of Coordinated Molecules on Gate-Opening Adsorption Behavior in Coordination Polymer”, 錯体化学会第 69 回討論会, 名古屋(2019-09)

5） 杉浦 みのり*、高橋 仁徳、久木 一朗、中村 貴義、野呂 真一郎 :「室温低濃度二酸化炭素分離へ向けた柔軟性金属錯体の合成」、錯体化学会第 69 回討論会、名古屋 (2019-09)

6） S. Li*, K. Takahashi, J. Wu, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystalline polymorphism and reversible H_2O sorption behavior of [Ni(dmit)$_2$] salt with supramolecular cation unit with multiple hydrogen-bonding sites”, 日本化学会第 100 春季年会,野田 (2020-03)

7） X. Chen*, I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : “Construction of Ionophore Functional HOFs by Crown Ether Derivatives with 4,4’-Dicarboxy-o-terphenyl Groups”, 日本化学会第 100 春季年会,野田, (2020-03)

8） Q. Ji*, I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : “Construction of Hydrogen-bonded Organic Framework Composed of Pyrazino[2,3-b]pyrazine Derivative”, 日本化学会第 100 春季年会, 千葉県野田市, (2020-03)

9） 高橋 仁徳*、土井 雄登、星野 哲久、久木 一朗、芥川 智行、中村 貴義 :「pyridinium 誘導体/crown ether 超分子カチオンを導入した[Ni(dmit)$_2$]塩の構造と熱挙動」、日本化学会第 100 春季年会(2020)、野田 (2020-03)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 久木 一朗*、高橋 仁徳、中村 貴義 :「有機分子のプログラム自己集合による結晶性機能材料の創出 」、第 9 回 物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会及び平成 30 年度 ダイナミック・アライアンス成果報告会、大阪府豊中市 (2019-07)

2） A. Bhagya Lakshmi*, G. Sushant, K. Takahashi, T. Nakamura, K. Yuyama and V. P. Biju : “Delayed emission from close-packed crystals of lead halide perovskites”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会, 苫小牧(2019-07)

3） S. Li*, J. Wu, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “ Structure and Physical Properties of (x-aminopyridinium)(DB[24]crown8)[Ni(dmit)$_2$] (x＝2, 3, 4)”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会,苫小牧(2019-07)

4） J. Wu*, K. Takahashi, M. Fujibayashi, N. Hoshino, Y. Suzuki, S. Nishihara, R. Tsunashima, I. Hisaki, J. Kawamata, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Molecule-Based Multifunctional Material Formed by Supramolecular Structure and Bimetallic Oxalated-Bridged Complex”, 日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会,苫小牧 (2019-07)

5） 伊藤 彰則*、大関 隆志、高橋 仁徳、久木 一朗、中村 貴義、野呂 真一郎 :「Perfluoroalkyl 基を有する多孔性 Zr 錯体固溶体のガス吸着特性」、日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会、苫小牧、 (2019-07)

6） 孟 宇*、高橋 仁徳、鈴木 和重、久木 一朗、中村 貴義、野呂 真一郎 :「2-アミノピリミジン架橋一次元金属錯体の合成及び二酸化炭素吸着特性評価」、日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会、苫小牧、(2019-07)

7） 張 雲雅*、高橋 仁徳、久木 一朗、中村 貴義、野呂 真一郎 :「光反応性 4-スチリルピリジン配位子を有するウェルナークラスレートの合成と性質」、日本化学会北海道支部 2019 年夏季研究発表会、苫小牧、(2019-07)

8） I. Hisaki*, Y. Suzuki, E. Gomez, Q. Ji, N. Tohnai, K. Takahashi, T. Nakamura and A. Douhal : “ Hexaazatriphenylene- and Hexaazatrinaphtylene-based Porous Frameworks Constructed through Hydrogen-bonding”, The 18th International Symposium on Novel Aromatic Compounds (ISNA-18), 北海道札幌市, (2019-07)

9） 久木 一朗* :「水素結合を介した自己集合による有機多孔質構造体の構築」、構造有機化学研究会(ミニシンポジウム)2019、神奈川県相模原市、 (2019-08)

10）K. Takahashi*, Y. Shirakawa, N. Hoshino, I. Hisaki, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Melting Behavior of Semiconducting Anion Radical Salts with Supramolecular Cation”, The 2nd edition of the International Symposium of CEFMS-NCTU, RCAS-AS (Taiwan) and 5-star Alliance, IMRAM, Tohoku University, Sendai, (2019-11)

11）久木 一朗*、鈴木 悠斗、ゴメス エドアルド、藤内 謙光、ドウハル アブドラザク :「ヘキサアザトリフェニレンのかみ合い積層による水素結合性多孔質構造

体の構築とその限界」、第 28 回有機結晶シンポジウム、高松市、 (2019-11)

１２)X. Chen*, I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : “Construction of HOFs by crown ether derivatives with 4,4’-dicarboxy-o-terphenyl groups”, 第 28 回有機結晶シンポジウム, 香川県高松市, (2019-11)

１３)Q. Ji*, I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : “Synthesis, Structure and Characterization of Dodeca-azatrinaphthylene Derivatives”, 第 28 回有機結晶シンポジウム, 香川県高松市, (2019-11)

１４)久木 一朗* : 「酸応答性を示す水素結合性有機多孔質フレームワーク」、ダイナミック・アライアンス G1 分科会、札幌市、 (2019-11)

１５)K. Takahashi*, Y. Shirakawa, N. Hoshino, I. Hisaki, T. Akutagawa and T. Nakamura : “Switch of Conductive Mechanism by Melting Behavior of Semiconducting Anion Radical Salts”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, (2019-12)

１６)X. Chen*, I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : “Solvents dependent on structures of HOFs by crown ether derivatives with 4,4’-dicarboxy-o-terphenyl groups”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium 絆, 北海道札幌市, (2019-12)

１７)J. Wu*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Ferromagnets of Chiral Crystal Structure Constructed by Supramolecular Cations and Bimetallic Oxalate-Bridged Transition Metal Complex”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium 絆, 北海道札幌市, (2019-12)

１８)Y. Doi*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Heteroaromatic-Cations-Encapsulating Crown Ether in Nickel Dithiolate SaltsHeteroaromatic-Cations-Encapsulating Crown Ether in Nickel Dithiolate Salts”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium 絆, 北海道札幌市, (2019-12)

１９)Y. Takahashi*, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Semiconducting of [Ni(dmit)2] Crystals with [2.2.2] Cryptand Supramolecular Cation”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium 絆, 北海道札幌市, (2019-12)

２０)Z. Diao*, J. Wu, K. Takahashi, I. Hisaki and T. Nakamura : “Hybrid Materials Based on [$Fe^{II}Cr^{III}$(oxalate)$_3$] Coordination Polymer with Supramolecular Structure”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium 絆, 北海道札幌市, (2019-12)

２１)Y. Kim*, C. Allain, P. Audebert, K. Takahashi, T. Nakamura and N. Tamaoki : “Tetrazine derivatives exhibiting mesomorphism-dependent emission properties”, 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, (2019-12)

２２)S. Bhagyalakshmi*, G. Sushant, K. Takahashi, K. Yuyama, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju : “Delayed Emission by Energy Transfer-induced Photon Recycling in Close-packed Perovskite Crystallites”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, International Conference Hall, (2019-12)

２３)S. Li*, K. Takahashi, J. Wu, I. Hisaki and T. Nakamura : “Crystal Polymorphs and Physical Properties of (4-aminopyridinium)(dibenzo[24]crown-8)[Ni(dmit)$_2$]$^-$”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), National Chiao Tung University., 北海道札幌市, (2019-12)

２４)Q. Ji*, I. Hisaki, K. Takahashi and T. Nakamura : “Synthesis, Structure and Characterization of Dodecaazatrinaphthylene Derivatives”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES), Hokkaido University & Center for Emerging Functional Matter Science (CEFMS), National Chiao Tung University., 北海道札幌市, (2019-12)

２５)B. S. Balachandran*, S. Ghimire, K. Takahashi, K. Yuyama, Y. Takano, T. Nakamura and V. P. Biju : “Photon Recycling through Close-packed Energy Donor-Acceptor Interfaces in Perovskite Pellets”, 2019 International Symposium of RIES & CEFMS, 北海道大学, (2019-12)

２６)高橋 仁徳* : 「融解するイオンラジカル塩の合成と相境界近傍での伝導性変化」、有機固体若手の会 2019 冬の学校、静岡、 (2019-12)

２７)土井 雄登*、白川 祐基、高橋 仁徳、久木 一朗、中村 貴義 :「ピリジニウム誘導体とクラウンエーテルを含む[Ni(dmit)$_2$]アニオンラジカル塩の構造と物性」、化学系学協会北海道支部 2020 年冬季研究発表会、札幌、 (2020-01)

4.7 シンポジウムの開催

1) 角屋 智史、小島 広孝、杉浦 栞理、須波 圭史、高橋 仁徳、圓谷 貴夫、藤田 貴敏、渡部 洋 :「有機固体若手の会 2019 冬の学校」、36 人、ホテル伊東ガーデン(伊東市) (2019 年 12 月 05 日～2019 年 12 月 06 日)

4.8 共同研究

ａ．所内共同研究

該当なし

ｂ．民間等との共同研究

該当なし

ｃ．委託研究

該当なし

ｄ．国際共同研究

1） 中村貴義、(独)日本学術振興会 二国間交流事業 共同研究、強誘電性を基礎とした新規分子性複合材料の開拓、2019 年 4 月 1 日～2021 年 12 月 31 日

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 年度

3） 久木 一朗、新学術領域研究 研究領域提案型、環状ポリエーテルの水素結合固定・集積化による柔らかなアシンメトリック配位圏の構築、2019～2020 年度

4） 高橋 仁徳、若手研究、融解するイオンラジカル分子導体・半導体の開発と中間相・相境界近傍での機能開拓、2019～2020 年度

b．大型プロジェクト・受託研究

該当なし

4.10 受賞

1） 久木 一朗 ： SHGSC Award of Excellence 2019「Construction of Porous Organic Frameworks via Hydrogen-bonding Mediated Self-Assembly of Rigid π-Conjugated Molecules」（ホスト-ゲスト・超分子化学研究会） 2019年05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） CompoundEduardo Gomez, Spain（2019 年 07 月 22 日～2019 年 10 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、一般教育演習（フレッシュマンセミナー）、高橋 仁徳、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

1） 全学共通、全学教育科目「環境と人間」、中村 貴義、2019 年 04 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

2） 環境科学院、光電子科学特論Ⅱ、中村 貴義、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

3） 環境科学院、分子環境科学基礎論 III、久木 一朗、2019 年 04 月 08 日～2019 年 06 月 03 日

4） 地球環境科学研究科、分子環境学特論 III、高橋 仁徳、2019 年 10 月 03 日

5） 全学共通、ナノテクノロジー・ナノサイエンスと光科学、高橋 仁徳、2019 年 11 月 11 日～2019 年 11 月 13 日

f．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1） 高橋 仁徳、公立千歳科学技術大学、マテリアルフォトニクス実験 B、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 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） Shivakumar Kilingaru Ishwara（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：2人

1） 土井 雄登 ： 環境科学院、ピリジニウム誘導体-大環状クラウンエーテルからなる超分子カチオンを用いた[Ni(dmit)2]塩の構造と融解挙動

2） 呉 佳氷 ： 環境科学院、Hybrid molecular materials based on Mn-Cr oxalate coordination polymers with supramolecular structures（超分子構造を導入した Mn-Crオキザレート配位高分子を基礎とする分子性複合材料）

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　西野浩史（岡山大院,博士（理学）,2015.4～）
助　教　劉逸侃（東大院，博士（数理科学），2019.8～）
特任助教　大野航太（明治大院，博士（数理科学）,2019.4～）
技術補佐員　出羽真紀子（2018.8.～2019.9）
技術補助員　富澤ゆかり（2019.10～）
実験補助員　星野由佳（2018.11～）
実験補助員　堂前愛（2017.5～）
院生
博士課程　Kim Minsoo，岡本守，安ヶ平裕介，
脇田大輝，松田朝陽
修士課程　沈案鷺，松永哲，森篤志

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）非整数階発展方程式の数学解析

不均質媒質における粒子の特異拡散、細胞膜におけるタンパク質の輸送などの現象において、マルコフ性が破綻し、通常の発展方程式で記述できない場合がある。これらの非マルコフ過程に対し、非局所モデルが数多く提唱されたが、特に 0.5 階、 1.3 階などの時間微分をもつような非整数階発展方程式が注目されている。このような方程式の解の一意存在性などの基礎理論を構築した上、解の漸近挙動や形状など解析的および幾何的特徴を解明することを目的とする。同時に、応用上で重要な数値解法（有限要素法など)を開発し、数値解析を行い数値精度を保証する。一方、解の欠落データから方程式の構成要素である未知な初期値や係数などを決定する逆問題について、順問題の性質に基づき、実用的な問題設定で未知な要素の一意性と条件付き安定性を証明し、効率的な再構成方法を創出する。さらに、幾つかの側面から非整数階発展方程式と通常の発展方程式の本質的な違いと共通点を見極め、整数階と非整数階の場合を横断する統一な数学理論の確立を目指す。

（４）動物の適応的な振る舞いの構成論的理解

時々刻々と変化する環境は、予測することが不可能な無限定な環境といえる。私たち動物は、このような無限定環境の中で状況に応じて適応的に行動を切り替えながら生活している。一方、私ちの生活環境では、計算能力が向上したコンピュータが使われているが、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）高次嗅覚情報処理様式の解析

５感の中で嗅覚の処理様式の研究は最も遅れている。 嗅覚の発達した動物では一次嗅覚中枢から高次中枢へ投射するニューロンが複数の並行経路を形成する。しかし、並行経路で処理される情報が高次嗅覚中枢でどう統合処理され、ひとつの行動出力へと結びつくのかは理解されていない。本研究では嗅感覚ニューロンから糸球体を経て記憶中枢（キノコ体）に至るまで２本の明瞭に分かれた並行経路を持つゴキブリを実験モデルとし、並行経路が統合されるキノコ体の葉部における機能構築を単一ニューロンレベルで精査することで、並列経路の機能的意義を理解することを目標とする。

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。特に、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。さらに、細胞接着等の相互作用の強さによって TJ バリ機能の恒常性が維持されるか検討している。

角層バリア機能の高い人工モデル皮膚が形成されるメカニズムを明らかにするために、周期的な凹凸パターンの固定された基底膜上での表皮構築モデルの解析を行った。

（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。その結果、凸凹変化の有無だだけでなく、凸凹変化による触覚刺激の同調性によって、触錯覚が生じることを明らかにした。凸凹変化刺激を同調して受けると、その刺激による Fishbone 触錯覚が消えることを心理学実験と数理モデルから説明することに成功した。

（３）自己駆動系モデルの数理解析

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。最終的に停止する現象は実験系が閉鎖系になっていることが本質であり、液滴が集団形成するメカニズムは明らかになっていなかった。数理モデルから水溶液中の SDS が水面で ES と反応し、減少することで SDS 濃度の壁が形成され、その壁に囲まれた個々の液滴が徐々に集団形成することを示唆した。

さらに、今年度は数理モデルの数学解析を行った。R 上での解の一意存在証明をおこない、R 上での特殊解の一人である Bimodal 進行波解の存在証明をおこなった。また、周期境界条件下で対称回転解の存在証明、および非対称回転解の存在条件・非存在条件を明らかにした。これらの研究から Bimodal 進行波解や非対称回転解が存在するためには、表面張力関数が界面活性剤分子密度に対して上に凸形状の部分が必要であることを示した。

（４）真皮形状変形の数理モデル

真皮における形態形成のメカニズムを探るための数理モデル構築を行った。従来の弾性膜を粒子で記述する数理モデルでは真皮形状の大変形を伴う形態形成に対処することが困難だった。そこで弾性膜を粒子で記述する数理モデルに、応力に応じて粒子を追加するという効果を加えた新しい数理モデルを導入した。このモデルの数値計算により、基底膜に一定以上の応力を加えたときに一方向に大変形する膜の様子を再現することが可能になった。このモデルを用いて、基底層で細胞分裂を繰り返す条件のもとで基底膜に一方向の力が加わったときの表皮の変形を数値シミュレーションすることができた。実際、真皮側に一定以上の力を加えたとき、はじめはこの力によって膜が弾性的に変形し、続いて細胞分裂のちからによって塑性変形を起こして表皮が真皮側に貫入する様子を再現することができた。

（５）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、マウスが足場のパターンを学習していく様子を簡単な位相振動子系によってモデル化することを試みた。モデルを決定する関数として、２つの足の相互作用と、足と足場の相互作用を表す２つの関数のみで歩行を特徴づけることができることを示した。この数理モデルから、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できることを示した。また最尤推定を用いて実際の実験データを最もよくフィットする相互作用関数を求めると、学習が進んだ状態では両足の相互作用が弱まり、足と足場の相互作用はsinでよく記述できることが明らかになった。この結果から、学習過程を数理モデルの相互作用関数の変化としてよく捉えられることが明らかになった。

（6）非整数階発展方程式の源泉項決定逆問題の数学解析

時間微分 $\alpha \in (0,2)$ をもつ非整数階発展方程式の初期値・境界値問題およびコーシー問題において、外部供給を与える未知な源泉項を決定する逆問題について、源泉項の形と解の観測データの数種類の現実的な組み合わせを研究し、以下の成果を得た。

(a)源泉項を $F(x,t) = f(x)R(x,t)$ のような部分的に変数分離の形をするとし、空間成分 $f(x)$ を、解の最終時刻における観測データから決定する問題については、解析フレドホルム理論を用いて条件付き一意性を示した。すなわち、高々可算個の除外点を除き、$f(x)$ が観測データによって一意的に決められる。

(b)上記と同じ問題設定で、解の部分内部領域における観測データによって源泉項の空間成分 $f(x)$ を数値的に再構成する問題については、離散化された最適化問題の解の存在性、安定性および収束性を示し、反復法に基づく効率的な数値スキームを開発し、空間２次元までの数値例で検証した。

(c)源泉項の形状が既知であるが、ある未知の軌道 $\boldsymbol{\gamma}(t)$ に沿って移動する場合、全空間あるいは有界領域における有限個の点での観測によって $\boldsymbol{\gamma}(t)$ を決定する問題については、条件付き安定性および一意性を示した。具体的に、新たに証明した非整数階デュアメルの原理をもとに、軌道 $\boldsymbol{\gamma}(t)$ が局所的に動く場合に観測データによるリプシッツ安定性を示した。一方、軌道 $\boldsymbol{\gamma}(t)$ が大域的に動く場合、観測点を増やすことで $\boldsymbol{\gamma}(t)$ が観測データににによって一意的に決められることを証明した。

(d)源泉項が既知のベクトルに沿って平行移動するが、その形状が未知の場合、境界付近の観測データによって形状を特定する問題について、一意性を証明した。微分階数 α が 1 以下のとき、一つの形状を特定できるが、α が 1 以上の場合、移動方向が異なる二つの形状を同時に特定できることを示した。

（7）適応的な行動発現の制御構造とその設計原理

無限定な環境のなかで時々刻々と行動を適応的に切り替える動物の行動制御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実験的に操作することで、運動や行動の発現基盤である神経系の制御原理や設計原理を探ることができる。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で、個々の細胞が同定可能な無脊椎動物を使い、適応的な行動の発現基盤となる神経系の制御構造とその設計について行動生理学実験やX線マイクロイメージングなどの方法を使い調べた。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。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ロコモーションの発現メカニズムに着目し、個体を環境の変化に応じて変容する歩容遷移の制御メカニズムについて研究した（図１）。また、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ことを目指した。さらに、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 や SPring-8 を使った X 線イメージングを行い、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。

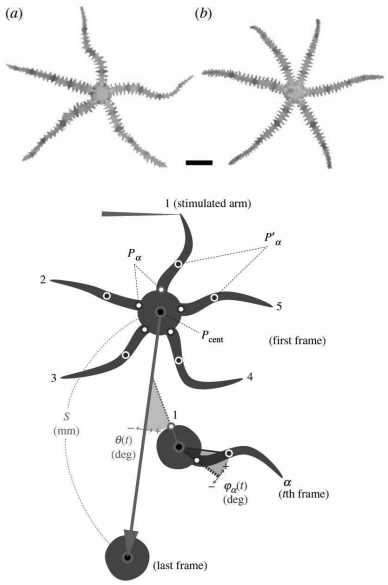


図１：クモヒトデの接触刺激に対する逃避行動、クモヒトデは、身体の中心の盤から放射状に腕を伸ばし、その腕を使って漕ぐように移動する。腕の本数に個体差があることを利用し、刺激に対する移動方向について統計モデルから、行動の制御様式について考察した.

（8）昆虫が超高速運動を生み出すカラクリ

動物にとって素早い動きは生存競争を生き抜く上で意義があり、進化の過程で多様な行動を進化させた。素早い行動は、脅威から逃れたり、獲物を捕獲する場面で重要な機能となる。素早い行動を発現するには、刺激を受容してから感覚情報の処理、運動制御信号の生成、運動出力にかかる時間などを短くすることが重要となる。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。このカラクリを探るため、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

２)。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２：アギトアリの捕食行動と頭部のマイクロ CT イメージ。内側に突起がある大顎を超高速度で閉じて獲物を捕まえる。顎の内転筋と骨格の弾性変形利用して超高速度の運動を生み出している。

（９）虫の嗅覚中枢には並列的な情報処理経路がある

虫（ワモンゴキブリ）の脳の高次嗅覚中枢（キノコ体）に投射する抑制性ニューロンに着目し、それらがキノコ体出力ニューロンからシナプスを受けて、キノコ体出力ニューロンの匂い応答の強度を適正なレベルに調節するフィードバック経路を担っていることを突き止めた。さらに、キノコ体のフィードバック経路には、匂い受容ニューロンのタイプの違いに由来する2つの並列的な経路があること、また2つの並列経路の間に相互作用があることを見い出した。この発見は、動物の嗅覚系において、受容ニューロンから高次中枢に至るまで一貫した並列的な情報処理経路が保たれていることを初めて明らかにしたもので、ヒトなどの哺乳類の脳がもつ嗅覚情報処理系の基本構成の理解にも示唆を与える重要な成果と言える。（図３）

図３：脳内の抑制性ニューロン（マゼンタ）とキノコ体からの出力ニューロン（緑）の二重染色像。神経科学系のトップジャーナルである J. Neurosci.の表紙を飾った。

３．今後の研究の展望

（１）皮膚構造の数理モデル（長山）

TJ バリア機能の恒常性が維持される条件として顆粒細胞形状が１４面体であることが指摘される．この条件の妥当性を明らかにするために、ボロノイ分割で得られる細胞形状が１４面体となるように細胞間接着等の細胞間相互作用の数理モデルを見直す。そして数理モデルの観点から TJ バリア機能の恒常性維持のメカニズムを明らかにする。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）自己駆動系の数理解析

次年度は、Bimodal進行波解や非対称回転解の安定性解析を行う予定である。数値計算からはこれらの解が安定であることが示唆されており、数学解析によってそれらの安定性を示す。さらに、方程式の持つ供給項がデルタ関数となった場合の解の存在証明を考察する。この数理モデルの解構造を明らかにする数値計算手法の開発を行い、数理モデルが持つ解の多様性を示す。また、空間2次元モデルについて解の大域的な存在・非存在について議論を行う。

（３）社会創造数学研究の展開

次年度から日立北大ラボ、北海道電力との共同研究として自立型地産地消エネルギーシステムの数理モデリングの研究を開始する。ここでは小規模の直流ナノグリッドシステムに対するEMSの数理基盤構築を目指す。再生可能エネルギーや急速充放電バッテリー等から成る需給一体型可動式グリッドの安定運用を可能とするEMSを開発したのち、従来のエネルギーシステムでは困難な時空間変動(気象、地域、需要変動)を制御する最適化問題を確立し、二酸化炭素削減、経済効果の向上を目指す。DCナノグリッドをネットワーク化することで得られる持続可能な地域社会を実現するために、DCグリッド内の単位の異なる構成要素

や物流・サービス等を無次元化することで統一的に定式化することで、必要に応じて最良化されたDCグリッド構成やグリッド間ネットワークの構築に対する数理基盤を作る。

（4）真皮形状変形の数理モデル

現在の数理モデルを検証し、これを用いて毛包形成などの具体的な形態形成の問題に取り組む。毛包形成において変形を誘導する因子や変形の方向を決定する因子を明らかにするための数値計算に取り組んでいく。

（5）マウスの歩行の数理モデル

現在のモデルではマウスの学習の効果は相互作用関数を通してしか現れないが、実際には特定の足場のパターンを記憶する効果も重要である。モデルを発展させて、足場に対する記憶効果を記述する数理モデルを構築することで、外部の特定の環境に適応した学習と汎用的な学習を区別することを試みる。

（6）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により、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。

（7）非整数階拡散-波動方程式に対する数学解析

非マルコフ過程を記述する非局所モデルの一つである非整数階発展方程式のうち、時間微分階数 α が $(0,1)$ 区間にある非整数階拡散方程式が特に注目されてきたが、α が $(1,2)$ 区間にある非整数階拡散-波動方程式は、発展方程式論および粘弾性モデルにおいて重要であるにもかかわらず、解析上の困難により研究が進まず、その性質が十分に解明されていない。これからは非整数階拡散-波動方程式の初期値・境界値問題に焦点を当て、「通常の拡散・波動方程式と整合した一般理論への展開」、「解の定性的・定量的な特徴づけ」、「非局所性の逆問題への影響を解明」という 3 大課題に取り込む。今まで非整数階拡散方程式に適用した手法を受け継ぎながら、新たに解の形状や保存則の観点から非整数階拡散-波動方程式の特有な性質を発見し、その性質が逆問題にもたらす効果を評価する。さらに非整数階拡散-波動方程式を（非整数階）拡散方程式および波動方程式と比較し、類似性と差異を見極め、時間微分 α が $(0,2]$ に渡る発展方程式の全体的な一般的理論へと深化させる。

（8）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 イメージングでは、空間分解能が 3μm 程度まで向上し、身体の外部および内部構造が詳細に計測できるようになり、神経系・筋骨格系などの詳細な３次元構造解析を進めている。多くの実験では、乾燥標本を用いて計測しているため、昆虫が実際に運動しているときの筋肉や骨格を様子は観察が困難である。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イメージングすることを目指す。また、Spring-8 を利用して、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る。

（9）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） K. Ikeda, S-.I. Ei, M.Nagayama, M. Okamoto and A. Tomoeda, Reduced model of a reaction-diffusion system for the collective motion of camphor boats, Physical Review E 99, 062208(2019, June).

2） S. Ipponjima, Y. Umino, M. Nagayama, M. Denda, Live imaging of alterations in cellular morphology and organelles during cornification using an epidermal equivalent model, Scientific Reports, 10, 5515(2020, March).

3） J. Cheng, Y.-K. Liu, Y.-B. Wang, M. Yamamoto, “Unique continuation property with partial information for two-dimensional anisotropic elasticity systems”, Acta Math. Appl. Sin. Engl. Ser., 36, 3-17 (2020, January).

4） G. Hu, Y. Liu, M. Yamamoto, “Inverse moving source problems for fractional diffusion(-wave) equations: Determination of orbits”, in: J. Cheng et al. (eds.), Inverse Problems and Related Topics, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics 310, Springer, Singapore, 81-100 (2020, February).

5） D. Wakita, Y. Hayase and H. Aonuma, Different synchrony in rhythmic movement caused by morphological difference between five- and six-armed brittle stars, Scientific Reports, (9): 8298- (2019, June).

6） T. Kano, D. Kanauchi, H. Aonuma, C. G. Elizabeth and

A. Ishiguro, Decentralized control mechanism for determination of moving direction in brittle stars with pentaradially symmetric body, Frontiers in Neurorobotics, (13): 66- (2019, August).

7） T. Kano, K. Daichi, T. Ono, H. Aonuma and A. Ishiguro: “Flexible coordination of flexible limbs: Decentralized control scheme for inter- and intra-limb coordination in brittle stars’ locomotion”, Frontiers in Neurorobotics, (13): 104- (2019, December).

8） K. Yasui, T. Kano, E. M. Standen, H. Aonuma, A. Ijspeert and A. Ishiguro, Decoding the essential interplay between central and peripheral control in adaptive locomotion of amphibious centipedes, Scientific Reports, 9: 18288- (2019, December).

9） D. Wakita, K. Kagaya and H. Aonuma, A general model of locomotion of brittle stars with a variable number of arms, Journal of the Royal Society Interface, 17(162) (2019, December).

１０）H. Aonuma, M. Mezheritskiy, B. Boldyshev, Y. Totani, D. Vorontsov, Z. S. Igor, E. Ito and D. Varvara: The role of serotonin in the influence of intense locomotion on the behavior under uncertainty in the mollusk Lymnaea stagnalis, Frontiers in Physiology, 11: 221- (2020, March).

１１）M. Paoli, H. Nishino, E. Couzin-Fuchs and G. C. Galizia, Coding of odour and space in the hemimetabolous insect *Periplaneta americana*, Journal of Experimental Biology, The Company of Biologists LTD, 223: jeb218032- (2020).

１２）N. Takahashi, H. Nishino, M. Domae and M. Mizunami, Separate but interactive parallel olfactory processing streams governed by different types of GABAergic feedback neurons in the mushroom body of an insect, Journal of Neuroscience, Society for Neuroscience, 39 8690-8704 (2019).

１３）M. Domae, M. Iwasaki, M. Mizunami and H. Nishino, Functional unification of sex pheromone-receptive glomeruli in the invasive Turkestan cockroach derived from the genus *Periplaneta*, Neuroscience Letters, Elsevier, 708(134320): 1-6 (2019).

4.2 学術論文（査読なし）

1） 上坂 正晃, 後藤田 剛, 一本嶋 佐理, 北畑 裕之, 小林 康明, 安ヶ平 裕介, 傳田 光洋, 長山 雅晴, 表皮構造の数理モデルにおける細胞の扁平化と細胞の多面体形状について, 計算工学講演会論文集, 24 (2019).

2） 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, 表皮数理モデルにおける皮膚バリア機能の恒常性, 計算工学講演会論文集, 24(2019).

4.3 総説・解説・評論等

1） 小林 亮, 青沼 仁志, 岡田 美智男, 石黒 章夫、大須賀 公一, 石川 将人: 「「環境を友とする」を学問しよう」, システム/制御/情報, 「環境を友とする制御法の創成」特集号, 63(6): 246-253 (2019).

2） 青沼 仁志: 「生き物がもつ身体構造と身体運動」, システム/制御/情報, 「環境を友とする制御法の創成」特集号, 63(6): 223-228 (2019).

4.4 著書

1） 西野 浩史 : 「音と振動に対する行動と神経メカニズム」, 生き物と音の事典, 朝倉書店, 7 章(9 番) (2019)

2） 西野 浩史 : 「昆虫と動物の聴覚器の収れん進化」、生き物と音の事典、朝倉書店、 8 章(20 番) (2019)

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1) M. Nagayama, M. Okamoto, T. Gotoda, Y. Yasugahira, Y. S. Ikura, S.Nakata, Theoretical analysis of a mathematical model for a self-propelled motion, ReaDiNet 2019, Mathematical analysis for biology and ecology(Nancy, France), September 23rd-25th, 2019.

2) M. Nagayama (invited), Mathematical modeling of a self-propelled motion, and its application, China-Japan Workshop for Younger Researchers on Nonlinear Diffusion Equations, Capital Normal University (Beijing, China), October 26th-28th 2019.

3) Y. Liu, Inverse source problems for time-fractional diffusion(-wave) equations, Inverse Problems and Related Fields ’19, Aix-Marseille University (Marseille, France), November 7-8, 2019.

4) 劉逸侃, Inverse problems for hyperbolic-type equations with time-dependent principal parts, Workshop on PDEs in Direct and Inverse Problems 2019, 広島大学 (広島県, 東広島市), 2019 年 11 月 29-30 日

5) H.Aonuma, Neurobiology and biomechanics of ultra fast movement in the trap-jaw ant, The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM 2019), Okinawa, Japan, November 20th-22nd, 2019.

ｂ．招待講演（国内学会）

1) M. Nagayama, M. Okamoto, T. Gotoda, Y. Yasugahira, Y. S. Ikura, S.Nakata, Theoretical analysis of a mathematical model for a self-propelled motion, ReaDiNet 2019, Mathematical analysis for biology and ecology(Nancy, France), September 23rd-25th, 2019.

2) M. Nagayama (invited), Mathematical modeling of a self-propelled motion, and its application, China-Japan Workshop for Younger Researchers on Nonlinear Diffusion Equations, Capital Normal University (Beijing, China), October 26th-28th 2019.

3） 青沼 仁志, 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-」, 大阪市立大学（大阪府, 大阪市）, 2019 年 9 月 13 日.

c．一般講演（国際学会）

1） M. Nagayama, Y. Kobayashi, K. Ohno, Y. Yasugahira, T.Gotoda, M. Uesaka, M.Denda, S. Nakata, H. Kitahata, Mathematical modeling for the homeostasis of the epidermal barrier function(Mini-Symposium), International Congress on Industrial and Applied Mathematics(Valencia, Spain), July 15th-19th, 2019

2） M. Okamoto, T. Gotoda, M. Nagayama, Non-trivial traveling wave solution of a particle-reaction-diffusion equation, Mini Workshop of Dynamics of localized patterns for reaction-diffusion systems and related topics, Hokkaido University(Hokkaido, Sapporo), Augast 9th, 2019.

3） M. Okamoto, T. Gotoda, M. Nagayama, Existence and non-existence of the asymmetrical rotating solution of the reaction-diffusion particle model (Poster), ReaDiNet 2019, Mathematical analysis for biology and ecology(Nancy, France), September 23rd-25th, 2019.

4） M. Okamoto, T. Gotoda, M. Nagayama, Existence and non-existence of the asymmetrical rotating solution of the reaction-diffusion particle model, China-Japan Workshop for Younger Researchers on Nonlinear Diffusion Equations, Capital Normal University (Beijing, China), October 26th-28th 2019.

5） Kohta Ohno, Mathematical model for the epidermis, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium “Ki” (Poster Presentation), Hokkaido University Conference Hall (Sapporo, Japan), December 2nd-3rd, 2019.

6） M. Okamoto, T. Gotoda, M. Nagayama, Existence and non-existence of the asymmetrical rotating solution of the reaction-diffusion particle model, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium “Ki” (Poster Presentation), Hokkaido University Conference Hall (Sapporo, Japan), December 2nd-3rd, 2019.

7） Shen Anlu, M. Nagayama, Analysis of the phase-field model of camphor movement, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium “Ki” (Poster Presentation), Hokkaido University Conference Hall (Sapporo, Japan), Dcember 2nd-3rd, 2019.

8） Y. Kobayashi, Y. Yasugahira, H. Kitahata, M. Watanabe, K. Natsuga, M. Nagayama, Interplay between epidermal stem cell dynamics and dermal deformation”, RIES-NCTU Joint Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo, Japan, December 3-4, 2019.

9） Y. Kobayashi, Y. Yasugahira, H. Kitahata, M. Watanabe, K. Natsuga, M. Nagayama, Interplay between epidermal stem cell dynamics and dermal deformation”, The 20th RIES-Hokudai International Symposium “Ki”, Hokkaido University Conference, Hall, Sapporo, Japan, December 2-3, 2019.

10） Y. Kobayashi, Interplay between epidermal stem cell dynamics and dermal deformation”, Japan-Singapore Skin Research Conference 2019, Clinical Sciences Building, Novena, Singapore, April 10-12, 2019

11） Y. Liu, Orbit determination in an inverse moving source problem for fractional diffusion(-wave) equations, 若手研究集会「波動・振動・流れの制御と逆問題 -理論と数値計算-」, 東京理科大学（東京都, 新宿区）, 2019 年 8 月 26-27 日.

12） Y. Liu, Determination of an orbit in the moving source of a (time-fractional) diffusion(-wave) equation, The 5th International Symposium on Inverse Problems, Design and Optimization, Holiday Inn Riverside (Tianjin, China), September 24-26, 2019

13） Y. Liu, Unique determination of several co-efficients in a fractional diffusion(-wave) equation by a single measurement, Workshop on Optimal Control and Optimization for Nonlocal Models, Johannes Kepler University Linz (Linz, Austria), October 28-30, 2019.

14） Y. Liu, General introduction to inverse problems for time-fractional evolution equations, Forum on Inverse Problems, Zhejiang University (Hangzhou, China), November 17-18, 2019.

15） Y. Liu, Inverse source problems for time-fractional evolution equations, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium “Ki”, Hokkaido University (Sapporo, Japan), December 2-3, 2019.

16） Y. Liu, Inverse source problems for time-fractional evolution equations, 2019 Interna-tional Symposium of RIES and CEFMS, Hokkaido University (Sapporo, Japan), December 3-4, 2019.

17） Y. Liu, Inverse moving source problems for (time-fractional) diffusion(-wave) equations, 偏微分方程式による逆問題解析とその周辺, 京都大学（京都府, 左京区）, 2020 年 1 月 8-10 日.

18） H. Aonuma,「Mechanism underlying gen-erating ultra fast movement in insect」,9th Interna-tional Congress on Industrial and Applied Mathe-matics (ICIAM 2019), Valencia, Spain, July 15th-19th, 2019.

19） D. Wakita* and H. Aonuma, “Attempt to identify body structure generating a balloon-like rhythmic movement in the green brittle star”, 1st Symposium on Invertebrate Neuroscience, Balaton Limnological Institute, Tihany, Hungary, August 13rd-17th, 2019.

20） V. Dyakonova*, G. Sultanachmetov, H. Aonuma, Y. Totani, M. Mazheritskiy, D. Vorontsov, E. Ito and T. Dyakonova, “Interplay of past and present behavioral

experiences in the molluscan CNS", 1st Symposium on Invertebrate Neuroscience, Balaton Limnological Institute, Tihany, Hungary, August 13rd-17th, 2019.

２１） Y. Totani*, H. Aonuma, J. Nakai and E. Ito, "Effect of 5-HT and insulin on leaning and memory", 1st Symposium on Invertebrate Neuroscience, Ba-laton Limnological Institute, Tihany, Hungary, Au-gust 13rd-17th, 2019.

２２） K. Naniwa*, Y. Sugimoto, K. Osuka and H. Aonuma, "Defecation initiates a stereotyped be-havior in the cricket Gryllus bimaculatus", The 9th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2019), Lausanne, Swaziland, August 20th-23rd, 2019.

２３） Matsuda*, H. Aonuma and S. Kaneko, "A structural anal ysis based on kinetic model of trap-jaw in Odontomachus", AISM2019(The 7th Asia International Symposium on Mechatronics), Hangzhou dianzi University, China, September 19th-22nd, 2019.

２４） Y. Totani*, H. Aonuma, J. Nakai and E. Ito,"Insulin rescues memory impairment caused by the increased 5-HT content in the central nerves system in Lymnaea", The 10th IBRO World Congress of Neuroscience, Degu, Korea (the Democratic People's Republic of), September 21st-25th, 2019.

２５） K. Naniwa and H. Aonuma,"Quantitative evaluation of phase difference among legs during walking and swimming in crickets (Gryllus bimac-ulatus)", The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 4th, 2019.

ｄ．一般講演（国内学会）

１） 後藤田剛，上坂正晃，安ケ平裕介， 小林康明， 北畑裕之， 傳田光洋，長山雅晴，表皮数理モデルにおける皮膚バリア機能の恒常性，第 24 回計算工学講演会，ソニックシティ（埼玉県， さいたま市）， 2019 年 5 月 29 日～31 日．

２） 後藤田剛，上坂正晃，安ケ平裕介， 小林康明， 北畑裕之， 傳田光洋，長山雅晴，表皮数理モデルにおける皮膚バリア機能の恒常性，第 24 回計算工学講演会，ソニックシティ（埼玉県， さいたま市）， 2019 年 5 月 29 日～31 日

３） 岡本守，後藤田剛，長山雅晴，Existence and non-existence of the asymmetrical rotating solution of the reaction-diffusion particle model，日本応用数理学会，東京大学（東京都，目黒区），2019 年 9 月 3 日～5 日．

４） 熊本 淳一，長山雅晴，傳田光洋，数理モデルを利用したヒト培養表皮モデルの高機能化，日本応用数理学会 2019 年度年会，東京大学（東京都，目黒区），2019 年 9 月 4 日．

５） 岡本守，後藤田剛，長山雅晴，Existence and non-existence of the asymmetrical rotating solution of the reaction-diffusion particle model，応用数学合同研究集会，龍谷大学（滋賀県，大津市），2019 年 12 月 12 日～14 日．

６） 大野航太，小林康明，後藤田剛，安ヶ平祐介，北畑裕之，長山雅晴，表皮構造の数理モデルを用いた皮膚疾患への応用，応用数学合同研究集会，龍谷大学（滋賀県，大津市），2019 年 12 月 12 日～14 日．

７） 小林康明，郡宏，木津川尚史，マウスの歩行パターンの数理モデル，応用数学合同研究集会，龍谷大学（滋賀県大津市），2019 年 12 月 12 日

８） 小林康明，後藤田剛，長山雅晴，表皮内タイトジャンクション形成の数理モデル，日本応用数理学会 2019 年度年会，東京大学駒場キャンパス（東京都目黒区），2019 年 9 月 4 日

９） 劉逸侃，Unique continuation property for two-dimensional anisotropic elasticity systems with partial information，応用数学合同研究集会，龍谷大学（滋賀県，大津市），2019 年 12 月 12-14 日．

１０）松田 朝陽， 青沼 仁志， 金子 俊一 ， 「アギトアリの大顎の超高速運動解析のための画像計測手法」，2019 年度 精密工学会 北海道支部 学術講演会，函館工業高等専門学校（北海道，函館市），2019 年 8 月 31 日．

１１）松田 朝陽、青沼 仁志、金子 俊一 ，「アギトアリの大顎の超高速運動計測のための回転照合法」，SSII2019(The 25th Symposium on Sensing via Image Information)，パシフィコ横浜アネックスホール（神奈川県，横浜市），2019 年 6 月 12 日～14 日)．

１２）浪花 啓右、青沼 仁志 ，「神経が切断されたクロコオロギの歩行，遊泳における脚間位相関係」，計測自動制御学会第 32 回自律分散システムシンポジウム，芝浦工業大学（東京都，江東区），2020 年 2 月 24 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） 松永哲，長山雅晴，上坂正晃，岡本守，ベイズ推定を用いた数理モデルのパラメータ推定方法の考察， 札幌非線形現象研究会 2019，北海道大学電子科学研究所中央キャンパス総合研究棟２号館５階講義室(北海道，札幌市)，2019 年 8 月 27 日．

２） 岡本守，後藤田剛，長山雅晴，Existence and non-existence of the asymmetrical rotating solution of the reaction-diffusion particle model，応用数理研究会，能登千里浜休暇村（石川県，羽咋市），2019 年 9 月 5 日～7 日．

３） 松永哲，長山雅晴，上坂正晃，岡本守，ベイズ推定を用いた数理モデルのパラメータ推定方法の考察， 第 13 回応用数理研究会，休暇村能登千里浜(石川県，羽咋市)m、2019 年 9 月 5 日～7 日．

４） 沈案鷺，岡本守，長山雅晴，樟脳運動のフェーズ・フィールドモデルについて，応用数理研究会，能登千里浜休暇村（石川県，羽咋市），2019 年 9 月 5 日～7 日．

５） Kim Minsoo，田中晋平，中田聡，岡本守，長山雅晴，液滴集団運動の数理モデルについて，応用数理研究会，能登千里浜休暇村（石川県，羽咋市），2019 年 9 月 5 日～7 日．

６） 一本嶋佐理，ヒト表皮モデルを用いたケラチノサイト最終分化過程の３次元ライブイメージング，皮膚科学と数理科学の接点，北海道大学（北海道，札幌市），2019 年 10 月 3 日．

7） 熊本淳一，長山雅晴，傳田光洋，数理モデルを利用したヒト培養表皮モデルの高機能化，研究会「皮膚科学と数理科学の接点」，北海道大学電子科学研究所（北海道，札幌市），2019 年 10 月 4 日.

8） 大野航太，小林康明，後藤田剛，上坂正晃，安ヶ平祐介，北畑裕之，傳田光洋，長山雅晴，表皮内タイトジャンクション形成の数理モデル，研究会「皮膚科学と数理科学の接点」，北海道大学電子科学研究所（北海道，札幌市），2019 年 10 月 4 日.

9） Mathematical modeling for a self-propelled boat with chemical reaction, Colloquium, Normal University (Beijing, China), October 25th 2019, M. Nagayama (invited)

１０）岡本守，森篤志，長山雅晴，自己駆動系モデルに対する体積保存フェーズフィールド方程式近似，北陸応用数理研究会 2020, 石川県政記念しいのき迎賓館（石川県，金沢市），2020 年 2 月 17 日～18 日.

１１）岡本守，後藤田剛，長山雅晴，樟脳円板の運動を記述する数理モデルに対する数学解析，北陸応用数理研究会 2020，石川県政記念しいのき迎賓館（石川県，金沢市），2020 年 2 月 17 日～18 日.

１２）大野航太，小林康明，安ヶ平祐介，傳田光洋，長山雅晴，表皮構造モデルを用いた皮膚疾患再現，北陸応用数理研究会 2020，石川県政記念しいのき迎賓館（石川県，金沢市），2020 年 2 月 17 日～18 日.

１３）長山雅晴，小林康明，大野航太，安ヶ平祐介，後藤田剛，上坂正晃，傳田光洋，堤も絵，後藤真紀子，熊本淳一，一本嶋佐理，中田聡，北畑弘之，表皮の数理モデル，反応拡散系と実験の融合 3，石川県政記念しいのき迎賓館（石川県，金沢市），2020 年 2 月 19 日～20 日.

１４）長山雅晴，森篤志，岡本守，変形する自己駆動体運動を記述する数理モデルを目指した Phase-Field 近似について，非線形現象の数値シミュレーションと解析に関する研究情報交流会，北海道大学理学部（北海道，札幌市），2020 年 3 月 5 日～6 日.

１５）小林康明，郡宏，木津川尚史，マウスの歩行パターン学習の数理モデル，北陸応用数理研究会 2020，石川県政記念しいのき迎賓館（石川県金沢市），2020 年 2 月 17 日～18 日

１６）小林康明，郡宏，木津川尚史，マウスの歩行パターン学習の数理モデル，数学パワーが世界を変える 2020，秋葉原コンベンションホール（東京都千代田区），2020 年 2 月 1 日

１７）小林康明，安ヶ平祐介，北畑裕之，渡邉美佳，夏賀健，長山雅晴，表皮幹細胞ダイナミクスと真皮形状変形の相互作用，第 5 回北海道大学部局横断シンポジウム，北海道大学医学部学友会館フラテホール（北海道札幌市），2019 年 11 月 6 日

１８）小林康明，安ヶ平祐介，北畑裕之，渡邉美佳，夏賀健，長山雅晴，表皮幹細胞ダイナミクスと真皮形状変形の相互作用，皮膚科学と数理科学の接点，北海道大学電子科学研究所（北海道札幌市），2019 年 10 月 4 日

１９）劉逸侃, Unique continuation property with partial information for two-dimensional anisotropic elasticity systems, Summer School on Applied Inverse Problems and Related Topics, 東京大学玉原国際セミナーハウス (群馬県, 沼田市), 2019 年 8 月 7-10 日.

２０）Y. Liu, A concise review on inverse problems for fractional diffusion equations, Seminar, Shandong University of Technology (Zibo, China), September 22, 2019.

２１）Y. Liu, A concise review on inverse problems for time-fractional evolution equations, Seminar, East China University of Technology (Nanchang, China), November 20, 2019.

２２）劉逸侃, 非整数階発展方程式とその逆問題について, 数学教室談話会, 北海道大学 (北海道, 札幌市), 2020 年 2 月 4 日.

２３）劉逸侃, Inverse moving source problems for (time-fractional) evolution equations, 北陸応用数理研究会 2020, 石川県政記念しいのき迎賓館 (石川県, 金沢市), 2020 年 2 月 17～18 日.

２４）H. Aonuma*, “Synthetic approach to understand rhythmic movement of the brittle star”, Seminar at Biochemistry Department, Queen Mary, University of London, London, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland (the) , August 27th, 2019.

２５）N. Takahashi, H. Nishino and M. Mizunami, Separate but interactive parallel olfactory processing streams governed by different types of GABAergic feedback neurons in the mushroom body of cockroaches, JSCPB2019, 東京大学（駒場リサーチキャンパス）, Japan (2019-11 ～ 2019-12)

２６）K. Kurihara , T. Ito, Y. Sato, M. Domae, M. Komatsu, N. Masuya and H. Nishino, Flying insect management in summer highways through academic-industrial collaboration, JSCPB2019, 東京大学(駒場リサーチキャンパス), Japan (2019-11 ～ 2019-12)

２７）H. Watanabe, Y. Otsuka , M. Domae, H. Ai and H. Nishino, Postembryonic development of projection neurons in the cockroach antennal lobe, JSCPB2019, 東京大学（駒場リサーチキャンパス）, Japan (2019-11 ～ 2019-12)

4.7 シンポジウムの開催

1） 山本昌宏，劉逸侃，Summer School on Applied Inverse Problems and Related Topics，東京大学玉原国際セミナーハウス（群馬県，沼田市），2019 年 8 月 7-10 日.

2） 伊藤弘道，石田敦英，劉逸侃，森岡悠，若手研究集会「波動・振動・流れの制御と逆問題 -理論と数値計算-」，東京理科大学（東京都，新宿区），2019 年 8 月 26-27 日.

3） H. Aonuma, Y. Umezono and T. Tokumoto , 日本動物学会国際交流委員会主催「第 1 回動物学国際交流シンポジウム」，50 人，大阪市立大学（大阪府，大阪市），2019 年 9 月 13 日.

4.8 共同研究

a．所内共同研究

該当なし

b．民間等との共同研究

1） 長山雅晴, 新日鐵住金株式会社, 活性汚泥法モデルの高精度化, 2019 年度～2021 年度

2） 長山雅晴, 株式会社資生堂, 表皮構造モデルの構築, 2019 年度

3） 西野浩史, 東日本高速道路, 高速道路の飛来虫 対策に関する研究、2014 年度～2019 年度

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

該当なし

4.9 予算獲得状況（研究代表者、分類、研究課題、期間）

a． 科学研究費補助金

1） 長山雅晴（代表）, 基盤研究 B 一般, 自己駆動系の集団運動に対する数理モデリングとその数理解析, 2016～2019 年度

2） 小林康明（代表）, 基盤研究(C) やわらかい組織の上で増殖する細胞系の連続体モデル構築と解析, 2019～2021 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） 長山雅晴, JST CREST, 2019 年度～2024 年度

3） 青沼仁志, JST, CREST, 環境を友とする制御法の創生, 2014年度～2019年度

4.10 受賞

1） Takahashi, H. Nishino and M. Mizunami : 日本比較生理生化学会第 41 回東京大会(JSCPB2019) 会長賞“Separate but interactive prallel olfactory processing streams governed by different types of GABAergic feedback neurons in the mushroom body of cockroiaches.”（日本比較生理生化学会）2019 年 12 月

4.11 社会教育活動

a．公的機関の委員

1） 長山雅晴, 文科省技術政策研究所専門調査委員

2） 青沼仁志, NEDO「分野横断的公募事業」事前書面審査員

3） 西野浩史, 特別研究員等審査会専門委員（2018.5～2020. 3）

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） 長山雅晴, 日本数学会 応用数学分科会評議員

3） 青沼仁志, 日本比較生理生化学会, 評議委員

4） 青沼仁志, 日本動物学会国際交流委員

5） 青沼仁志, 日本生理学会北海道支部会, 会計監査委員

6） 西野浩史, 日本比較生理生化学会、編集委員

7） 西野浩史, 日本比較生理生化学会、評議委員

c．兼任・兼業

該当なし

d．外国人研究者の招聘

1） Frederic Libersat. The Abraham and Bessie Zacks Chair in Neurobiology; Dept of Life Sciences and Zlotowski Center for Neurosciences; Ben Gurion University, Beer Sheva, Israel,（2019 年 9 月 2～15 日）

e．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

1） 理学部３・４年生、数理科学 A、長山雅晴、2019 年後期

2） 理学部３・４年生、数理科学演習、長山雅晴、2019 年後期

3） 全学教育、線形代数学 1、小林康明、2019 年前期

4） 全学教育、線形代数学 2、小林康明、2019 年後期

5） 理学部３・４年生、数理科学演習、小林康明、2019 年後期

6） 教養 1 年生、化学 I、青沼仁志、2019 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）

該当なし

g．新聞・テレビ等の報道

1） 青沼 仁志 ： 日本経済新聞 2020 年 01 月 19 日 『クモヒトデの動き解明』

2） 青沼 仁志 ： 科学新聞 2020 年 01 月 17 日 『クモヒトデの動き解明』

3） 青沼 仁志 ： 科学新聞 2019 年 12 月 20 日「「陸上と水中 柔軟に適応」

4） 青沼 仁志 ： 科学新聞 2019 年 06 月 28 日『「オオクモヒトデの動き ５本腕と６本腕で相違」水流による協調運動か』

5） 西野 浩史 ： 朝日新聞朝刊 2020 年 03 月 02 日 「コオロギに人間に似た「耳」

6） 堂前 愛、西野 浩史、水波 誠 ： 科学新聞 2019 年 07 月 12 日 「トルキスタンゴキブリ「動物界最高のフェロモン感度」

7） 西野 浩史、堂前 愛、高梨 琢磨、岡嶋 孝治 ： ジュニアエラ「中学受験 2020 時事ニュース完全版」2019 年 10 月 18 日 「コオロギの聴覚器はヒトの耳と原理的に似ている」

8） 西野 浩史 ： ジュニアエラ６月号 P36-37 2019 年 05 月 15 日 「コオロギの耳の秘密がわかった」

h．ポスドク・客員研究員など

1） 一本嶋佐理（博士研究員, CREST）

2） 熊本淳一（学術研究員, CREST）

3） 浪花啓右（学術研究員）

4） 西浦廉政（客員研究員）

5） 中村玄（客員研究員）

6） Paul Anthony Stevenson（客員研究員）

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 2人

1） 脇田大輝, 生命科学院, 博士（生命科学）, Behavioral modeling of coordinated movements in brittle

stars with a variable number of arms

2） 松田朝陽，情報科学研究科，博士（情報科学），生物の回転運動解析のための頑健な画像パタン計測法に関する研究

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　水野雄太（東大院、博(学術)、2019.8～）
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～）
Mikhail Tsitsvero（ローマ・ラ・サピエンツァ大、PhD、2019.10～）
博士研究員　Sulimon Sattari（UC Merced、PhD、2017.7～）
永幡 裕（北大院、博（生命科学）、2019.10～）
学術研究員　Abdul Halim Bhuiyan（University of Dhaka、Master of Science、2019.5～2019.9）
Md. Menhazul Abedin（University of Rajshahi、Master of Science、2020.2～）
特別研究員　Jean-Emmanuel Clement(University of Burgundy、PhD、2018.11～）
外国人協力研究員　Md Motaleb HOSSAIN（北大院、博(理学)、2019.7～）
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）
Abdul Halim Bhuiyan（総合化学院　物質化学コース）
Zannatul Ferdous（生命科学院 ソフトマター専攻）
学部生
宮下 彩季（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) 多目的最適化問題に表れるパレート集合とフロントの微分位相幾何学的分類

多目的最適化問題とは、二つ以上の目的関数を同時に最適化する問題であるが、一般には異なる目的関数は異なる最小点を持っており、一つの目的関数を最小化しようとすれば、他方の目的関数の値は上昇してしまうというように複数の目的関数の最小化は一般にはトレードオフの関係にある。そのような多目的最適化においては単目的関数の最小点を多目的関数へ一般化した概念として、パレート最適解というものが経済学者パレートによって提案されている。ある点がパレート最適解であるとは、その点における目的関数の値の一つを減少させようとすれば、必ずほかの目的関数の値が増大してしまうことを指し、英語では best compromize な解と呼ばれている。多目的最適化問題は現在でも様々な応用に使われており、例えば進化計算のトップカンファレンスの一つである GECCO には RWA (Real World Application)というセッションが設けられており、そこには多目的最適化の実問題への応用が毎年多数集められている。多目的最適化問題において一つ解を選ぶとすると、その解はパレート最適解から選びたいと考えられる。実際にパレート最適解のうちどの解を選ぶべきかはユーザーのニーズによって異なるが、パレート最適解全体の構造がわからない状況では、最適な判断を下すことは難しいため、パレート最適解全体の構造がわかっていることが望ましい。パレート最適解全体の構造は古くは Smale らにより特殊な経済学の問題の設定の下で調べられてはいるものの一般的な状況でどのような構造となりうるのかはほとんど知られていなかった。本研究ではまず多目的最適化問題が強凸問題というクラスの問題であるときに、そのパレート最適解全体の集合ととそれを目的関数の空間でみたパレートフロントの構造がどのようなものとなるかを明らかにした。そ

の結果、それらはその境界が目的関数の数を減じた多目的最適化問題の部分問題のそれになっていること等が明らかになった。そのような階層的な構造を利用することで、パレート最適解全体を効率よく見つけることも可能となる。この成果は SIAM Optimization に投稿し、受理された(N. Hamada, K. Hayano, S. Ichiki, Y. Kabata, H. Teramoto, “Topology of Pareto Sets of strongly convex problems”, SIAM Optimization, accepted)。現在は、より一般のクラスの多目的最適化問題のパレート最適解全体の集合およびパレートフロントの構造の微分位相幾何学的構造の網羅的分類を特異点論を用いて行っている。この分類を得るために、広中平祐らによる局所環上の加群に対する標準基底を混合加群に一般化し、その標準基底を計算するためのアルゴリズムを開発した。この成果は数式処理トップカンファレンス ISSAC2020に投稿し受理された(H. Teramoto and K. Nabeshima, “Parametric Standard System for Mixed Module and its Application to Singularity Theory”, Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, ISSAC2020, accepted)。

(2)相空間幾何学に基づく動力学的反応経路図の自動作成法の開発

ポテンシャルエネルギー面上の最小エネルギー経路に基づく反応経路図は,化学反応機構の系統的解明と反応速度・選択性の予測に不可欠な学術的基盤となっている.しかし,最小エネルギー経路は動力学効果（分子の運動の効果）を無視しているため，この伝統的な反応経路図の枠組みによって扱えない化学反応の例が，近年多数報告されている.そこで本研究では，動力学効果を取り込める相空間幾何学の理論的枠組みと，量子化学計算の技術とを融合させ，動力学的反応経路図の自動作成プログラムを開発する．本年度は，動力学効果の考慮が必要な実在反応系の事例調査と研究計画立案を行うとともに，化学科の卒業研究生と共に Voronoi 分割と動力学計算を用いた相空間構造の数値計算法の研究開発を行った.

(3) 新概念コンピューティングによる化学反応ネットワークの解析と設計

化学反応ネットワークの解析と設計問題（e.g. 合成経路最適化、反応経路列挙）の多くは，従来型計算機では計算困難である,NP 完全な組合せ最適化問題として定式化される(図1参照)．本研究では，組合せ最適化問題に特化したイジング計算機などの新概念コンピューティング技術を用いて，大規模化学反応ネットワークの解析と設計問題を解くことができる実用的計算技術を開発する．本年度は，問題の定式化と，イジング計算機を用いるために必要なイジングハミルトニアンの理論設計を行った.

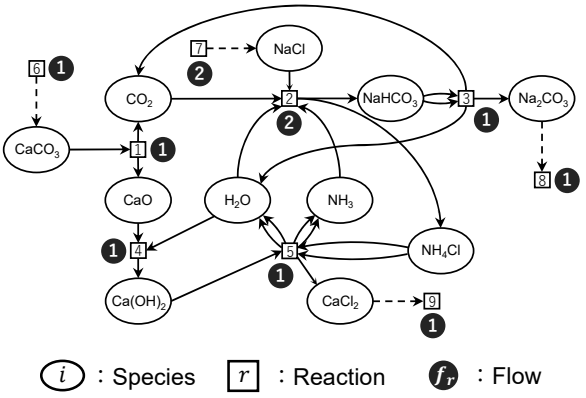


図１　アンモニアソーダ法の化学反応ネットワーク．化学反応を適切に組み合わせて実行することで，有用な化学変換を実現している.

(4)ラマン分光イメージング解析における新しい標準化手法の開拓

Raman 顕微鏡画像は生命システムを深くまで調べることを可能にし、ナノメートルスケールに迫る空間分解能で細胞や細胞小器官内部の化学的環境に関する情報を解き明かしている。しかし Raman 画像には豊富な情報が含まれているものの、しばしばその測定は低い信号対雑音比、自家蛍光、光学部品および実験基質からの不要なシグナル等が混ざることにより悪影響を受ける。。例えば、図 A は2つの異なる装置から得られた Nthy-Ori 3-1細胞の平均ラマンスペクトルを示している。スペクトルの特徴の多くは類似している一方で、2つの異なる装置の光学部品の違いに相当するエリアに大きなずれが生じている。こうしたずれのために、図 B が示すように、2つの装置から得られたスペクトルは主成分空間においてほぼ完全に識別可能となってしまう。この問題を軽減するために、我々は Raman 画像（図 C）の最も暗いピクセルの場所を推定する方法を開発した。そのピクセル（バックグラウンドピクセル）には、図 D の平均スペクトルが示すように、バックグランド（光学と基質）の寄与が主に含まれている。自家蛍光からの寄与を占めるバックグラウンドスペクトルを取り除きベースライン補正を行ったのち、2つの装置から得られたデータについて、図 E では平均スペクトルを、図 F では主成分空間での表現を改めてセンタリングした。

(5)病理診断を応用とした多腕バンディット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、異常のある個所がある一定個数以上かそれ未満なのかのみが知りたい場合がある。Raman 顕微鏡など分光顕微鏡では、一度に明視野の計測を行うのではなく逐次的な計測が行われるため、このような診断を行う場合には、一定個数λ個以上異常がある、または、λ個未満なことが確定した時点で計測を打ち切って異常ありと診断することで高速化が期待できる。

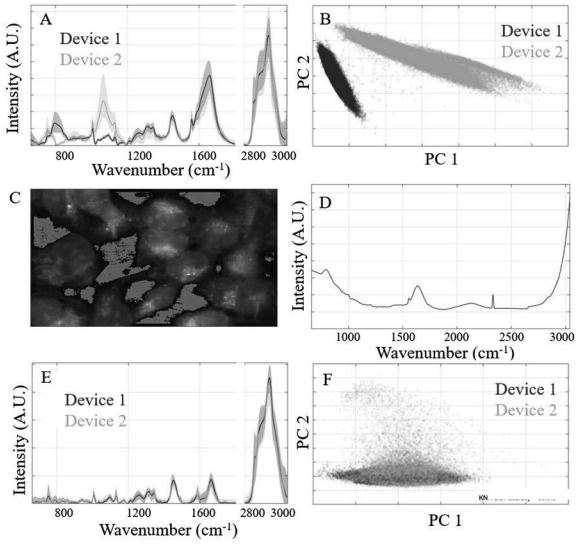


図 2　図 : 異なる実験装置からの Raman 画像データの再センタリング。A)それぞれの装置により計測された平均スペクトル。B)それぞれの装置により計測されたスペクトルの主成分空間での表現。C)Raman 画像（白黒）でのバックグラウンドピクセルの同定（金色）。D)バックグラウンドピクセルの平均スペクトル。E)それぞれの装置により計測された Raman スペクトルを再センタリングしたもの。F)再センタリングしたスペクトルの主成分空間での表現

$\lambda = 1$のときは、このような計測の高速化は「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、確率的多腕バンディット設定において、閾値 $\theta \in (0, 1)$に対し、報酬平均 μ が θ より大きければ正の腕、θ より小さな場合は負の腕と定義し、与えられた許容誤り確率 $\delta \in (0,0.5)$に対し、正の腕が存在する場合には$1-\delta$ 以上の確率で「正」、負の腕しか存在しない場合は$1-\delta$ 以上の確率で「負」と出力するできるだけ試行回数が少ないアルゴリズムを開発することを目標とする。

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、また実験的にも性能が良いことを確認した。この成果は Machine Learning に投稿し、受理された。

また、一般のλに対する識別バンディットと呼ばれる問題にも有用なアルゴリズムを提案している。

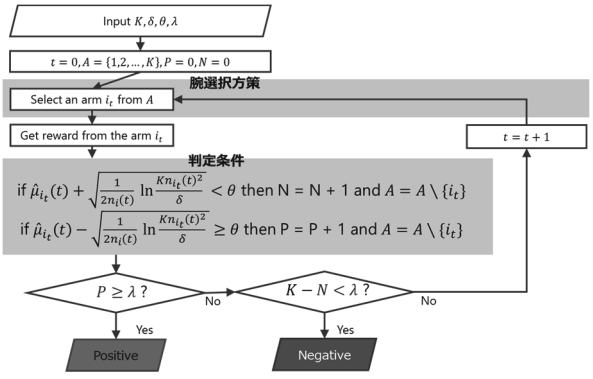


図3　識別バンディット問題に対するアルゴリズムのフローチャート。

(6) 化学探索における不確実性の評価手法の開拓

実験設定下での反応物の物理的コストのため、もしくは、計算化学であれば多大な計算時間/リソースを必要とするために、化学では実験データであっても、計算データであっても、データを得るために非常にコストが掛かる。最も重要なこととして、計算ができることとその計算の精密さとはトレードオフの関係にあるため、得られる計算または実験データの確信度にはばらつきが生じる。

そのため、まず化学データに現れる不確実性の問題に取り組む必要がある。不確実性を定量化する方法として、ガウス過程には望ましい特性が多くある。第一に、ガウス過程はベイズ推論に依拠しており、そのことは事前分布という形で我々が持っている事前信念をモデルに組み込むことを可能とする。第二に、ガウス過程で用いられている様々な核関数は、化学の特定の問題に対処するためにデザインすることができるであろうからである。

さらに次に問題になってくるのが、正確な分子記述子のデザインである。完璧な記述子であるためには、原子座標の変化に関する連続性と微分可能性、回転と置換不変性、完全性といった、いくつかの条件を満たさなければならない。例えば、SOAP のような関数ベースのアプローチは、こういった条件をほぼ満たしている。しかしながら、可能な限り非冗長でありながらも表現の完全性の問題にも対処できるように、更なる改善がこのアプローチには必要である。さらに我々は、分子のトポロジー的特徴を捉える別の記述子の一群についても研究を行った。

(7)シンギュラリティ生物学

下記、4つの主要なプロジェクトに取り組んだ。

1)細胞のリーダーシップと細胞運動に対するサイクリック AMP の影響を推定するためのキイロタマホコリカビのイメージ分析

2) ヴィチェックモデルにおけるリーダー・フォロワーの推定

3) 集団運動における情報フローの異なるモードの解釈

4)モースポテンシャルのおけるポテンシャル最小点の推定

共通するテーマは、多粒子システムにおける相互作用の理解と因果推論である。

私たちは2) における結果を Physical Review E において発表し、現在３）に関する論文を執筆中である。１）については、ぼやけた蛍光画像とぼやけていない蛍光画像（これはサイクリック AMP の検出を増幅する）を用いた、細胞運動に対するサイクリック AMP 波の効果の定量において進歩を成し遂げた。細胞と波の反対方向の動き、波が通過する際の細胞の加速、波が通過した後の細胞の減速、波が通過する際の細胞集団のコヒーレンスを統計的に定量化した。すぐに共同研究者である実験研究者と議論を行い、結果を論文にまとめるつもりである。4) について、我々は分子動力学システムに対して２）の技術を適用したが、異なるシステムパラメータの影響の分析について更なる研究が必要

である。

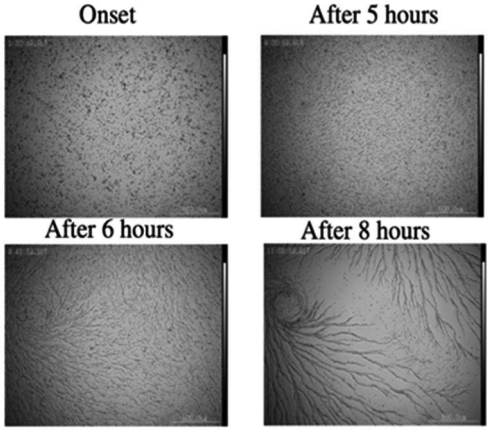


図 4　タマホコリカビの集合

(8) ３次元分子構造がもつ構造モチーフの解析法開発

化学反応を理解する上で分子構造３次元から得られる情報は、立体異性体や創薬におけるドッキング法など、分子の機能を知り、利用する上で欠かすことができない。他方、データベースから得られた情報を使って反応性や機能の予測をする化学情報学は分子構造式もしくは分子グラフに代表される２次元の情報を使っている。これは、一般の部分グラフ同系判定問題が NP 完全だが、平面グラフにおいては多項式時間となるためである。

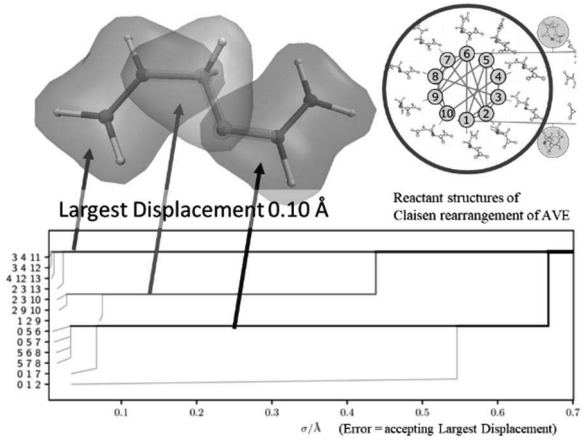


図 5　解析によって得られたアリルビニルエーテルのクライゼン転位反応における反応系分子構造群がもつ構造モチーフ

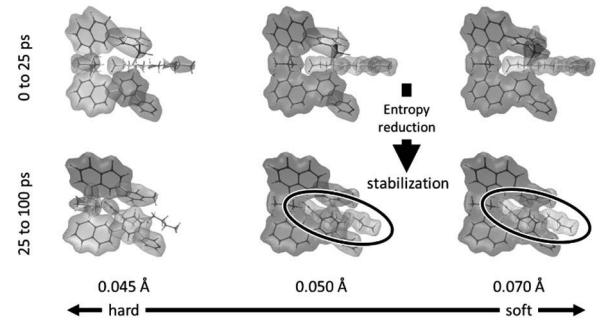


図 6　トラジェクトリーデータから得られた構造モチーフが示す部分構造がある時刻以降安定化

他方、量子化学計算を使って得られるトラジェクトリーや反応経路のデータでは、１．立体構造は変わるが分子構造式はあまり変わらないことが多い、２．立体構造間の原子の移動が特定できている、３．扱う立体構造の原子数に対して量子化学計算による制約がある　といった特徴がある。我々は、複数の分子構造群から、適当な閾値以下の変化（図5）を許容した場合に、変化しない３次元部分構造を特定するアルゴリズムを開発した。

(9) 癌診断のための Raman イメージング

癌は現在、世界の死因の第2位であり、日本では第1位の死因で、世界での2018年の新規の癌患者は1,700万人で、癌による死亡は950万人だった。そのため、癌という病気をより理解するための新たな調査ツールの開発が必要となってくる。無標識で使うことができ非破壊的な手法である Raman 分光法はデータ化学のパイプライン処理技術と相まって、単一細胞から組織に渡る分析において、生体システムの代謝を観測および定量化できる有力な方法である。Raman イメージングは空間情報だけではなく、生体システムの生化学的組成を含む豊富な化学的特徴も提供する。しかしながら、Raman 分光法の難点は、細胞小器官の識別に関して正確性が欠如していることであり、そのために細胞小器官の役割の理解が重要な要素となる生物学において基礎研究課題への Raman 分光法の有用性は限定的なものになってしまっている。この難点を乗り越えるため、そして、発癌に関連するミトコンドリアや脂肪滴のような興味深い細胞小器官を適切に分割するために、それらの細胞小器官のコントラストを強調する異なる画像処理技術を用いた。例えば、形態学的テンソル分解のような線スペクトル強調技術では、ミトコンドリアネットワークの構造を検出することができる。空間で丸く局在化した脂肪滴の分割を適切に行うため、脂肪滴の幾何学的特性を保存するスパース主成分分析と呼ばれる手法を用いた（図7）。腫瘍形成において長い間忘れ去られ、重要ではないと考えられてきたミトコンドリアは、今や腫瘍形成を駆動しているものと見なされている。線スペクトル強調技術を用いて、我々は Raman 分光法で異なる細胞株の間のミトコンドリアネットワークの形態変化や生化学的差異が評価できることを示した。そのことにより Raman 分光法は腫瘍形成におけるミトコンドリアの役割の解明するための有望な技術となった。

図 8 は 3 つの胸部細胞株のミトコンドリアのセグメンテーションを示しており、MCF10 は病的でない細胞、MCF-7 は管腔細胞型乳癌細胞、MDA-MB-231 は転移性トリプルネガティブ癌細胞である。ミトコンドリアネットワークの形態は、病的でない状態から癌の状態に変化しているだけではなく、癌の進行度とも連動していることが図 7 から見てとれる。それだけではなく、低次元空間における多次元化学的特徴量の図 8 の画像が、3 つのはっきりとしたクラスターを示している。このように明確に分かれているということは、3 つの異なる細胞株のミトコンドリアネットワークの生化

学的組成が全く異なっていることを意味している。図 9 はこの画像はミトコンドリアネットワークの代謝が 3 つの細胞株で異なっていることを示している。

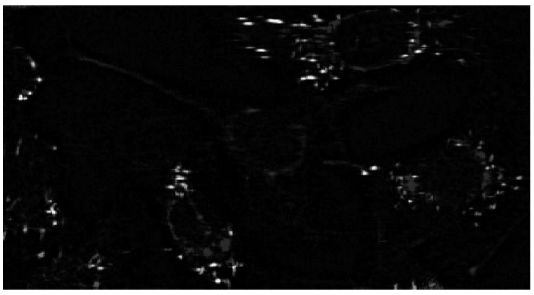


図 7　細胞小器官の形態を考慮した高度信号処理技術を用いたミトコンドリアネットワーク（青）と脂肪滴（黄）の画像セグメンテーション。

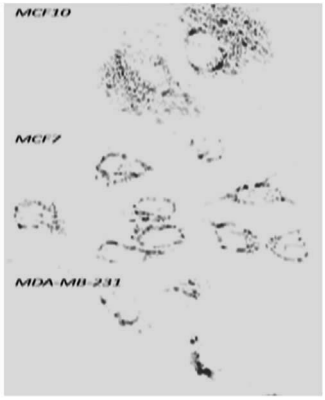


図 8　3 つの異なる細胞株のミトコンドリアネットワーク Raman 画像セグメンテーション。

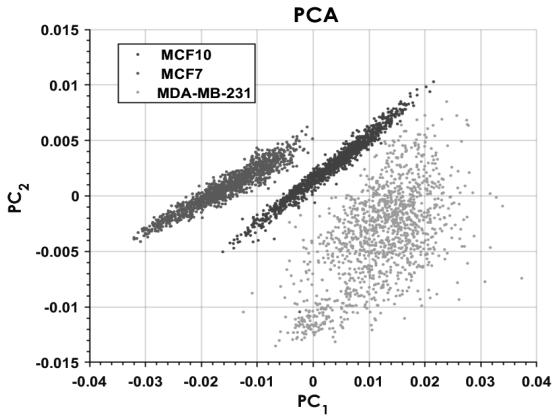


図 9　化学情報を低次元空間に射影した画像。

(10)数理モデルと情報理論における因果推論に基づく集団細胞移動分析

キイロタマホコリカビ細胞はサイクリック AMP と呼ばれる化学誘引物質により伝達を行う。飢餓状態になると細胞はサイクリック AMP スパイクを発し互いにシグナルを送る。これに呼応して近くにある細胞はサイクリック AMP 勾配に向かって移動し、新たにサイクリック AMP スパイクを放つ事によりフィードバック効果とらせん波状のサイクリック AMP パターンをもたらす。この研究において、私たちは細胞速度に対するサイクリック AMP 波の効果を定量化するため、キイロタマホコリカビのぼやけた蛍光画像とぼやけていない蛍光画像（図10）において粒子画像流速測定（PIVlab）を用いている。興味深いのは、画像がぼやけている場合、オイラー描像での運動の方向が反転することである。つまり、ぼやけた画像の PIV ベクトルは、元の画像のそれに対し反対方向へ移動する。我々は、ぼやけている時の方向の“転換”、波が通過する際の細胞の加速とコヒーレンス、そして波が通過した直後の細胞のランダム化と減速を定量化するため、統計的・情報理論的技術を適用している。

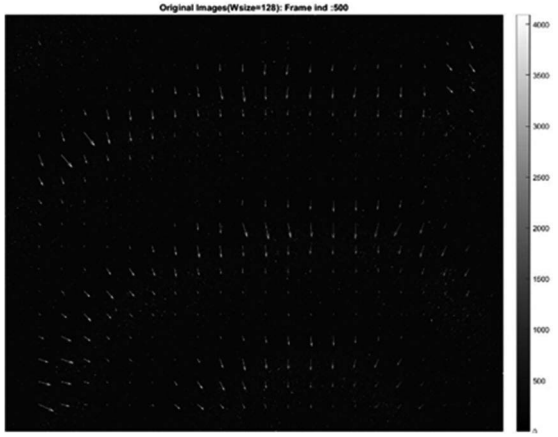


図 10　PIV の元画像

(11)運動解析によるリーダーフォロワー同定

目標：我々の目標は、集団運動しているエージェントグループから、その運動軌跡のアンサンブルだけを使用して、リーダーとフォロワーを特定する情報理論的な枠組みを提案することである。

今年の成果：エージェント間の相互作用領域を運動軌跡から推定する情報理論的枠組みの提案論文を Physical Review E 誌において発表した。我々は、同定された最適な相互作用領域を用いることで、リーダーとフォロワーの分類が大幅に改善する事を示した。

研究概要：鳥、魚と細胞のような、局所的に相互作用する粒子やエージェントからなるシステムは、全体として自然発生的・時空間的な集団挙動を示す。エージェント間の相互作用は、エージェントの時空間的協調の重要な特徴である。ほとんどの場合、２つのエージェントは無限の距離を隔てて交信する事は出来ないため、相互作用は本質的に局所的であると仮定する事は自然だ。相互作用半径は、エー

ジェント間の相互作用ネットワークを定義するので、集団挙動分析の分野において重要な量である。

集団挙動を研究するために、Reynolds’フロッキングモデル、 Vicsek モデル (VM)、Couzin モデルなど、様々なシミュレーション・モデルが提案されてきた。これらのモデルはコンピュータ上でのシミュレーションが容易であり、これは集団運動の解析を容易にする。VM はミニマルなモデルであるため、集団運動する自己駆動粒子 (SPP) の様々なダイナミクス（対称性の破れや相転移など）を研究するのに広く使われているモデルの一つである。このモデルもリーダーとフォロワーの分類に使われてきた。VM では、動いている粒子は距離 R の範囲内にある粒子とのみ相互作用し、相互作用領域は円状であると考える。

我々は、多粒子系において、背後にある粒子間の相互作用領域もしくは相互作用距離を、軌跡アンサンブルから推定する情報理論的枠組みを提案した。集団挙動分析において、捕食者-被食者相互作用とリーダーとフォロワー識別を研究するために、シミュレーションデータと実験データの双方に対し、移動エントロピー (TE) が用いられている。我々は、修正 VM において、同定された最適相互作用領域を用いることで、リーダーとフォロワーの分類が、移動エントロピーが距離にかかわりなくすべてのペアーにおいて計算されるケースと比較して、大幅に改善することを示した。現実には、人は動物、細胞、または鳥のグループの相互作用領域を推察できない。軌跡アンサンブルからそれを推測するために、カットオフ距離 λ を導入する。我々は、カットオフ距離に対する平均 TE の関数の微分が、実際の相互作用半径の近傍で最小となり、この枠組みは集団運動するエージェントの相互作用領域を捉えられることを示した。我々は非線形尺度としての TE が、相互作用領域の同定において、相互相関（CC）より優れていることも示した。

(12) 時間分解法を用いた、蛍光ターゲットの位置形状推定に関する検討

生体組織の内部の病変部の高感度検出法では、放射性プローブを用いた手法が一般的であるが被曝の問題などから傾向などを用いた別の方法に置き換えることが望ましい。しかし、光学的手法は、生体組織の強い散乱により、深部にある蛍光プローブの検出や位置形状の特定は極めて難しい。このような強い散乱の中で拡散する蛍光からその蛍光体の位置や形状を特定する手法は拡散蛍光トモグラフィ（FDOT）と呼び、多くの研究が行われているが、外乱に弱く確立した手法はない。本研究では、ピコ秒時間分解手法を用いて失われた空間情報を時間領域から補完する時間領域手法を用いた FDOT についてより安定的に正しく位置を推定する手法を研究する。特に、本年度は蛍光体の形状を直方体で近似することにより、確定するべきパラメータ数を減らし安定的に推定する手法を研究した。

生体組織での光伝搬は、拡散方程式が良い近似となるが、空間を半空間とし蛍光体を直方体と仮定しその解を解析的に求めた。その結果、未知のパラメータ数は7個を、半空間の界面での計測データから推定する逆問題となる。この問題について、シミュレーションで得たデータと食肉を生体組織模擬サンプルとした実験データの両方を用いて検証したところ、比較的少数のデータから位置と直方体としての形状を再現することができた。またこの手法は計算量も少なく高速に結果を得られることを示した（C.Sun et al, JOSAA2020）。

形状を直方体とした近似と任意の形状との対応関係や複数の蛍光体を含むような条件などの問題を今後検討し、これまでより医療現場で実際に用いることが可能な手法として確立を目指す。

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） K. Yamamoto, K. Ando, N. Mertig, T. Takemoto, M.

Yamaoka, H. Teramoto, A. Sakai, S. Takamaeda-Yamazaki, and M. Motomura, STATICA: A A 512-Spin 0.25M-Weight Full-Digital Annealing Processor with a Near-Memory All-Spin-Updates-at-Once Architecture for Combinatorial Optimization with Complete Spin-Spin Interactions, 2020 IEEE International Solid- State Circuits Conference - (ISSCC), San Francisco, CA, USA, 138, (2020)

2） Y. Sugie, N. Mertig, Y. Iwata, H. Teramoto, A. Nakamura, I. Takigawa, S. Minato, T. Komatsuzaki, and T. Takemoto, “Compiling higher order binary optimization problems into annealing processors”, 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 25th 2020), Beppu, Japan, January 22-24, (2020)

3） H. Teramoto, A. Tsuchida, K. Kondo, S. Izumiya, M. Toda and T. Komatsuzaki, “Application of singularity theory ot bifurcation of band structures in crystals”, Journal of Singularities, 21, 289-302 (2020).

4） K. Tabata, A. Nakamura, J. Honda and T. Komatsuzaki: “A bad arm existence checking problem: How to utilize asymmetric problem structure?”, Machine Learning, 109: 327-372 (2020)

5） T. Komatsuzaki, S. Pressé and P. Senet: “Deciphering Molecular Complexity in Dynamics and Kinetics - From the Single Molecule to the Single Cell Level”, The Journal of Physical Chemistry B, 123(30): 6387-6388 (2019)

6） K. M. Helal, J. N. Taylor, H. Cahyadi, A. Okajima, K. Tabata, Y. Itoh, H. Tanaka, K. Fujita, Y. Harada and T. Komatsuzaki: “Raman spectroscopic histology using machine learning for nonalcoholic fatty liver disease”, FEBS Letters, 593: 2535-2544 (2019)

7） J. N. Taylor, K. Mochizuki, K. Hashimoto, Y. Kumamoto, Y. Harada, K. Fujita and T. Komatsuzaki: “High-Resolution Raman Microscopic Detection of Follicular Thyroid Cancer Cells with Unsupervised Machine Learning”, The Journal of Physical Chemistry B, 123(20): 4358-4372 (2019)

8） H.Toba, S.Odate, K.Otaki, and G.Nishimura, “The stability condition for FDTD of the optical diffusion equations”, Optical Review, 27: 81-89 (2020).

9） C.Sun, G.Nakamura, G.Nishimura, Y.Jang, J.Liu and M.Machida, ″Fast and robust reconstuction algorithm for fluorescence diffuse optical tomography assuming a cuboid target″, Journal of the Optical Soceity of America A, 37: 213-239 (2020).

4.2 学術論文（査読なし）

1） T. Komatsuzaki, H. Nakamura, J. Tame, S. Yanaka, T. Nagai and K. Nagayama: “Editorial for the Special Issue of Biophysical Reviews focused on the Biophysical Society of Japan with select scientific content from the 57th BSJ annual meeting, Miyazaki, Japan”, Biophysical Reviews, 12: 183-185 (2020)

4.3 総説・解説・評論等

該当なし

4.4 著書

1） 寺本　央、″計算機で挑戦する特異点を持つ写像の分類とその応用(1) 様々な応用に現れる特異点″、68, 数学セミナー（日本評論社）2020 年 3 月号

2） 寺本　央、″計算機で挑戦する特異点を持つ写像の分類とその応用(2) 特異点分類アルゴリズム″、68, 数学セミナー（日本評論社）2020 年 3 月号

4.5 特許

1） 山田幸生、西村吾朗、丹羽治樹、牧昌次郎、道脇幸博、小池卓二、鈴木崇弘、田代剛大: 特願 2019-132298,「検出装置、検出方法、及び検出器」2019.7.17

4.6 講演

a. 招待講演（国際学会）

1） T. Komatsuzaki* : “On-the-fly Raman image microscopy by reinforcement machine learning”, Biomedical Raman Imaging 2019, Icho Kaikan, Suita Campus, Osaka University, Japan (2019-11)

2） T. Komatsuzaki* : “Causal inference in Leader-follower relationship”, ICSB 2019: Singularity Biology: small elements change the function of the whole systems, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Japan (2019-10)

3） Y. Mizuno* : “A diagrammatic approach to understanding complicated nonadiabatic chemical reaction dynamics”, XV INTERNATIONAL WORKSHOP ON QUANTUM REACTIVE SCATTERING (QRS2019 workshop), Saitama University, Japan (2019-07)

4） T. Komatsuzaki* : “Raman pathology and its phenotypic landscape for Non-alcoholic fatty liver diseases”, The Complexity of Dynamics and Kinetics from Single Molecules to Cells, Telluride, CO., USA (2019-06)

5） T. Komatsuzaki* : “Deciphering hierarchical features in reaction network and energy landscape”, Network analysis to elucidate natural system dynamics, diversity and performance, CECAM-FR-RA, France (2019-05)

b. 招待講演（国内学会）

1） 西村吾朗、生体組織内に内在する蛍光体の高感度検出、レーザー学会第 3 期第 5 回「レーザーバイオ医療」技術専門委員会、北海道大学、札幌市 (2019-7)

c. 一般講演（国際学会）

1） H.Fujii*, G.Nishimura, S.Endo, N.Nomura, K.Kobayashi, and M.Watanabe: “Numerical study on light propagation in a white bread loaf”, The 7th Asian NIR Symposium, Avani Hotel, Khonkaen, Thailand (2020-2).

2） N.Nomura*,H.Fujii,K.Kobayashi,M.Watanabe and G.Nishimura: “Analysis of interference effects on light scattering in colloidal suspensions”, The 7th Asian NIR Symposium, Avani Hotel, Khonkaen, Thailand (2020-2).

3） A. Pelissier*, A. Nakamura, and K. Tabata : “Feature Selection As Monte-Carlo Search in Growing Single Rooted Directed Acyclic Graph by Best Leaf Identification”, 2019 SIAM International Conference on Data Mining, Hyatt Regency Calgary, Canada (2019-05)

d. 一般講演（国内学会）

1） 西村吾朗* :「生体組織中にある蛍光ターゲットの高感度検出(3)」、Optics and Photonics Japan 2019, 大阪大学 (2019-12).

2） 野村航希*、藤井宏之、西村吾朗、小林一道、渡辺正

夫:「干渉性を考慮したコロイド溶液における光伝搬解析」 Optics and Photonics Japan 2019, 大阪大学 (2019-12).

3） 田代剛大*、鈴木崇弘、山田幸生、丹羽治樹、牧昌次郎、北田昇雄、斉藤亮平、小池卓二、道脇幸博、西村吾朗,「誤嚥検査のための近赤外蛍光を用いた咽頭残留検出システムの開発」 Optics and Photonics Japan 2019, 大阪大学 (2019-12).

4） U. S. Basak*, S. Sattari, K. Horikawa and T. Komatsuzaki : “An Information-theoretic approach toward identifying the leader(s) and aggregation place in Dictyostelium Discoideum colony”, 第 57 回日本生物物理学会年会, シーガイアコンベンションセンター, Japan (2019-09)

5） S. Sattari*, T. Komatsuzaki, M. Toda, S. Nicholson, J. R. Green and U. Basak : “A leadership-based phase transition in a flocking model with activated and un-activated agents”, 第 57 回日本生物物理学会年会, シーガイアコンベンションセンター, Japan (2019-09)

6） 田代剛大*、鈴木崇弘、山田幸生、丹羽治樹、牧昌次郎、北田昇雄、斉藤亮平、小池卓二、西村吾朗、道脇幸博:「近赤外蛍光を用いた咽頭残留食物の非侵襲検出法の開発 -ヒトを対象にした計測-」、日本機械学会第３０回バイオフロンティア講演会 (2019)7.19-20 (霧島国際ホテル、霧島市)

7） ジェームス ニコラス テイラー*、Pirchi Menahem、Haran Gilad、小松崎 民樹 :「アデニレートキナーゼの一分子観察データから再構成するエネルギー地形の階層性」、第 22 回理論化学討論会、北海道大学 学術交流会館、Japan (2019-05)

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 寺本 央* :「特異点論の諸科学への応用」、数学パワーが世界を変える 2020、秋葉原コンベンションホール、Japan (2020-02)

2） 宮下 彩季*、滝川 皇、水野 雄太、寺本 央、小松崎 民樹 :「古典的軌道計算とボロノイ分割を用いた反応チューブの計算方法」、化学系学協会北海道支部 2020 年冬季研究発表会、北海道大学学術交流会館、Japan (2020-01)

3） 小松崎 民樹* :「シンギュラリティ生物学における情報✕計測」、シンギュラリティ生物学×細胞ダイバース合同ワークショップ、東京大学医科学研究所、Japan (2020-01)

4） 滝川 皇、宮下 彩季、水野 雄太*、寺本 央、小松崎 民樹 :「A computational method for reaction tubes based on trajectory calculation and Voronoi tessellation」、北海道大学電子科学研究所 2019 年度 研究交流会、北海道大学、Japan (2020-01)

5） H. Teramoto* : “Standard Basis for Mixed Module, Computational Algorithm and Application to Classification Problems in Singularity Theory”, 研究集会「可微分写像の特異点論とその応用」, 京都大学数理解析研究所, Japan (2019-12)

6） 寺本 央* :「特異点論によるバンド交差の幾何構造の分類、不変量および分岐の解析」、離散幾何解析とその周辺 2019、CIC 東京、Japan (2019-12)

7） H. Teramoto*, Y. Kabata, K. Hayano and N. Hamada : “Type of singularity that can appear in Pareto set”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

8） M. Takigawa, S. Miyashita, Y. Mizuno*, H. Teramoto and T. Komatsuzaki : “A computational method for reaction tubes based on trajectory calculation and Voronoi tessellation”, 2019 International Symposium of Research Institute for Electronic Science (RIES) Hokkaido University & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS) National Chiao Tung University, Hokkaido University, Japan (2019-12)

9） J. Clément*, K. Mochizuki, K. Fujita and T. Komatsuzaki : “Raman Imaging for Exploring Cancer Metabolism”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

１０）J. N. Taylor*, K. Mochizuki, K. Hashimoto, Y. Kumamoto, Y. Harada, K. Fujita and T. Komatsuzaki : “High Resolution Raman Microscopic Detection of Follicular Thyroid Cancer Cells with Unsupervised Machine Learning”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

１１）K. M. Helal*, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : “Raman Microscopic Histology using Ensemble Learning for Non-alcoholic Fatty Liver Disease”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

１２）K. Tabata*, A. Nakamura and T. Komatsuzaki : “Bad Arm Existence Checking Algorithm with Bandit Feeedback”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

１３）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 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

１４）U. S. Basak*, S. Sattari and T. Komatsuzaki : “An Information-theoretic approach to identify the interaction radius of a group of collectively moving animals”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University Conference Hall, Japan (2019-12)

１５）U. Basak* and T. Komatsuzaki : “Identification of interaction radius of a group of collectively moving animals: an information-theoretic approach”, 2019 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, 大阪大学吹田キャンパス銀杏会館, Japan (2019-11)

１６）K. M. Helal*: “Ensemble Learning Framework for Raman Microscopic Analysis of Non-alcoholic Fatty Liver Disease”, 2019 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, 大阪大学吹田キャンパス銀杏会館, Japan (2019-11)

１７）寺本 央* :「計算機でチャレンジする写像の特異点の分類とその応用」、令和元年度第 1 回徳島数学談話会（冬の会）、徳島大学総合科学部、Japan (2019-11)

１８）K. M. Helal*, H. Cahyadi, J. N. Taylor, A. Okajima, Y. Kumamoto, H. Tanaka, Y. Harada and T. Komatsuzaki : “Raman Hyperspectral Image Analysis Using Ensemble Learning for Non-alcoholic Fatty Liver Disease”, Biomedical Raman Imaging 2019, Icho Kaikan, Suita Campus, Osaka University, Japan (2019-11)

１９）J. Clement*, S. Ono, K. Mochizuki, K. Fujita and T. Komatsuzaki : “Accelerated Raman hyperspectral imaging

for cancer diagnosis", Biomedical Raman Imaging 2019, Icho Kaikan, Suita Campus, Osaka University, Japan (2019-11)

２０）H. Teramoto*：“Classification of band crossing geometries, their invariants and bifurcations”, 6th International Workshop on Singularities in Generic Geometry and its Applications, Campus de Burjassot of the Universitat de València, Spain (2019-10)

２１）U. Basak*：“Information theory to classify leaders and followers in collective motion”, 研究会「理論と実験」２０１９, 広島大学, Japan (2019-10)

２２）J. Clement*：“Raman imaging for cancer diagnosis”, 研究会「理論と実験」２０１９, 広島大学, Japan (2019-10)

２３）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 11 回(H31-1st)領域会議、KKR ホテル金沢、Japan (2019-09)

２４）H. Teramoto*：“Automation algorithms of classification of singularities, current status and future perspectives”, Singularity Theory and its Applications in Differential Equations and Differential Geometry, Lomonosov Moscow State University, Department of Mechanics and Mathematics, Russian Federation (the) (2019-09)

２５）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「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」第４回 CREST 領域会議、AP 市ヶ谷、Japan (2019-08)

２６）H. Teramoto*：“Classification, bifurcation and invariants of band crossings in terms of singularity theory”, Progress in the Mathematics of Topological States of Matter, AIMR, Tohoku University, Japan (2019-07 ～ 2019-08)

２７）J. Clement*：“Reflection about Surface Enhanced Raman Spectroscopy”, The Complexity of Dynamics and Kinetics from Single Molecules to Cells, Telluride, CO., USA (2019-06)

２８）寺本 央*：「特異点論によるバンド交差の幾何構造の分類、分岐解析およびその不変量の解析」、研究集会「特異点論による空間研究」、JR 博多シティ会議室、Japan (2019-06)

4.7 シンポジウムの開催

１） 小松崎 民樹、水野 雄太：「International & Interdisciplinary Workshop on Chemical Reaction Dynamics: Mathematics Informatics, and Physics Meet Chemistry」、19 人、北海道大学（北海道札幌市）(2019 年 10 月 08 日)

２） 小松崎 民樹：「ラマン情報計測会議」、18 人、ニセコ町民センター（北海道ニセコ町）(2019 年 08 月 03 日～2019 年 08 月 05 日)

３） T. Komatsuzaki, S. Presse and R. S. Berry：“The Complexity of Dynamics and Kinetics from Single Molecules to Cells”, Telluride Intermediate School (Telluride, CO. United States of America (the)) (2019 年 06 月 16 日～2019 年 06 月 20 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「数学モデルとハードウェアアルゴリズムに基づく社会応用」2016-2021 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」

３） 西村吾朗(北海道大学)、Jijun Liu(東南大学、中国)との国際共同研究「拡散蛍光トモグラフィに関する逆問題とその応用」

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、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

３） 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

４） 寺本　央、基盤研究 C、包括的グレブナー基底系を用いた特異点分類の自動化、2019～2021 年度

５） 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、2018～2021 年度

６） 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、2018～2020 年度

７） 西村　吾朗、基盤研究 C、生体組織内部にある蛍光体の高感度検出を可能とするタイムドメイン蛍光法、2019～2021 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、2016～2021 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

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)、副編集委員長（令和2年1月～）

２）　小松崎 民樹:日本生物物理学会副会長(H31年6月～現在)

３）　小松崎 民樹：日本化学会北海道支部支部役員（幹事(H26年3月～現在)

４）　小松崎 民樹：Editorial Board “Scientific Reports” Division of Chemical Physics（H29年2月～現在)

５）　小松崎 民樹：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）　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)

７）　小松崎 民樹:JST/ERARO 選考パネルメンバー(令和元年8-9月)

８）　小松崎 民樹：JST/さきがけ量子情報処理アドバイザー(令和元年6月～)

ｃ．兼任・兼業

該当なし

ｄ．外国人研究者の招聘

１）　David M Leitner、United States of America、(2019 年 10 月 07 日～2019 年 10 月 12 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、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

２）　総合化学院、化学特別講義、小松崎　民樹、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

３）　総合化学院、物質化学、小松崎　民樹、2019 年 10 月 01 日～2020 年 03 月 31 日

４）　全学共通、微分積分学Ⅰ、寺本 央、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

５）　理学部、数理科学基礎、寺本 央、2019 年 04 月 01 日～2019 年 09 月 30 日

６）　全学共通、自然科学実験、西村　吾朗、2019 年 4 月～6 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

１）　Sulimon Sattari（博士研究員、新学術領域研究）

２）　水野雄太（博士研究員、化学反応創成研究拠点）

３）　永幡 裕（博士研究員、化学反応創成研究拠点）

４）　Abdul Halim Bhuiyan（学術研究員、JST/CREST）

５）　Jean-Emmanuel Clement(JSPS 外国人特別研究員)

６）　Md Motaleb HOSSAIN（外国人協力研究員）

ｉ．修士学位及び博士学位の取得状況

博士学位：1人（総人数を記載）

Khalifa Mohammad Helal、生命科学院 生命融合科学コース：博士（生命科学)、Raman Spectroscopic Histology Using Machine Learning for Non-Alcoholic Fatty Liver Disease

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　飯塚洸介（M2），千葉拓也（M2），佐藤耀(M2)，越後谷駿（M1），松本紘汰（M1），大西舞(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９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)原生生物と線虫の行動に関するバイオメカニクスと細胞生物学、(4)微小な生物の動きを捉えるイメージング技術の開発、(5)繊毛虫の遊泳力学と電気生理学、(6)アメーバの這行力学と高分子レオロジー、(7)胚発生の形態形成における細胞集団の力学解析、(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、(9)ランダム力学系の数理と非線形現象への適用。

２．研究成果

(a) 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：町と道の共発展ならびに樹木の風揺動特性

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イタリアを取り上げ、現実の町の分布（人口ランクと地理分布）と比較検討した（論文投稿中)。

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るために、北大苫小牧研究林にてホウノキを、また北大和歌山研究林にてバリバリノキの揺動実験を行い、その振動特性を計測した。従来の主流である縦揺れ模型の問題点を解明し、より良い模型として横揺れ模型を構築できた。

(g) 線虫の行動学

C. elegans(線虫)は生物の業界で最もよく調べられているモデル生物の一つであり、例えばゲノムすべて明らかにされている。しかしながら、その行動についてはそれほどよく調べられていない。特に、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）高速で空中に飛び上がることを発見した。今年度、我々は高速ジャンプのメカニズムとらえるために、尻尾と基盤の界面エネルギーを変える実験と外的環境を変える実験を行い、高速ジャンプの仕組みを大まかにとらえることに成功した。さらなる解析を行っている。

(h) 鞭毛虫クラミドモナスの運動学

クラミドモナスは単細胞真核生物であり葉緑体を持ち光合成することが知られている。また二本の鞭毛をもち光に向かって泳ぐ正の走光性が報告されている。本研究ではクラミドモナスが集団で形成するパターンに注目した。上述の通りクラミドモナスは正の光走性があるが、細胞集団に対して部分的な光照射を行うと、明暗境界に細胞が集積することが知られている。我々は、特定の条件で照射光が対象でもクラミドモナスの集合パターンが非対称になることを発見し、この機構を明らかにするため実験および数値計算を行った。その結果、クラミドモナスが示す螺旋遊泳軌道

が、非対称マクロパターン形成に重要であることが分かった。

(i) 非線形確率現象における確率カオスの研究

非線形確率現象のひとつである確率カオスをランダム力学系理論の立場から概念化、定式化し、不変量の定量化に成功した。とくにランダム一次元写像における異常拡散を発見し、その間欠的ダイナミクスと劣拡散の性質を解明した。確率共鳴、ノイズ同期、確率カオスといった非線形確率現象は生物系にも普遍的に存在する。

(j) ブレブ駆動型アメーバの形状と運動

アメーバ運動の機構としてアクチン重合依存的な運動がこれまでによく研究されているが、アクトミオシンの収縮を駆動力とするアメーバ運動（ブレブ駆動型アメーバ運動）は近年多くの細胞で報告されているが、その機構は不明な点が多い。アメーバ運動は接着性の細胞が細胞変形を伴いながら移動する方法で、細胞形状の変化が運動において本質的であると考えられている。そこで本研究では典型的なブレブ駆動型アメーバ運動を行う *Amoeba proteus* を用いて、その運動と細胞形状の関係に関して調べた。その結果、細胞の運動活性は活性化および非活性化状態に分かれることが分かり、この変化の過程で細胞形状に対称性の破れが重要であることが明らかになった。またこの細胞活性は超臨界ピッチフォーク分岐となることが分かった。

(k) ブレブ駆動型アメーバにおける牽引力測定

ブレブ駆動型アメーバ運動は多くの細胞で行われていることが近年報告されているが、その機構に関しては不明な点が多い。本研究では典型的なブレブ駆動型アメーバ運動を行う *Mayorella viridis* がアメーバ運動に伴い、接着基盤に伝える牽引力の測定を行った。その結果、細胞の辺縁部で収縮力が生じていた。また前端部ではアクチン重合依存的なアメーバ運動に典型的な進行方向と逆の力は観測されず、ブレブ駆動型アメーバ運動に特徴的な牽引力分布が確認された。

3．今後の研究の展望

(a) 用不用適応則から読み解く形状と機能の最適化

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、欧州と日本の異なる二地域において町と道の共発展を検討した。今後、さらに異なる地域、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。

樹木の風揺動特性については、独自の力学模型を提案するに至ったので、これに基づき樹種、樹齢、生息地の違いを計測し、風揺動耐性（エネルギー散逸機構）を調べたい。

(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。

(e) 高速牽引力顕微鏡の作製

原生生物の中には非常に高速な運動を行うものが知られており、従来の牽引力顕微鏡では時間分解能の問題で細胞の移動に伴う牽引力を測定することが難しい。そこで、本研究では従来の方法の50倍程度の速度で牽引力測定可能な方法の開発を行う。

4．資料

4.1 学術論文（査読あり）

1） Davide Faranda, Yuzuru Sato, Gabriele Messori, Nicholas R. Moloney, Pascal Yiou, ″Minimal dynamical systems model of the Northern Hemisphere jet stream via embedding of climate data,″ Earth System Dynamics, 10(3), 555-567,(2019).

2） Yuzuru Sato and Rainer Klages,“Anomalous diffusion in random dynamical systems,”Phys. Rev. Lett.,122, 174101, (2019).

3） Nicholas R. Moloney, Davide Faranda, and Yuzuru Sato, “An overview of the extremal index”, CHAOS, 29, 022101, (2019).

4） Daniel Schenz, Yukinori Nishigami, Katsuhiko Sato and Toshiyuki Nakagaki, ″Uni-cellular integration of complex spatial information in slime moulds and ciliates″, Current Opinion in Genetics & Development, 57, 78-83, (2019).

5） Chao Gao, Chen Liu, Daniel Schenz, Xuelong Li, Zili Zhang, Marko Jusup, Zhen Wang, Madeleine

Beekman and Toshiyuki Nakagaki, “Does being multi-headed make you better at solving problem? A survey of Physarum-based models and computations”, Physics of Life Reviews, 29, 1-26 and 51-54, (2019). 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） 折原 宏・佐藤勝彦, “せん断流下におけるソフトマターの構造とレオロジー -共焦点レーザー走査顕微鏡による3次元観察-“, 日本流体力学会 学会誌 「ながれ」 38-4号 pp. 262-269.

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1） Yuzuru Sato, “Anomalous diffusion in random dynamical systems”, The Mathematics of Climate and Environment, IHP, Paris, France, (October, 2019).

2） Yuzuru Sato, “Stochastic bifurcation in a turbulent swirling flow”, invited talk, LML summer school, ICTP, Trieste, Italy, (July, 2019).

3） Yuzuru Sato, “Anomalous diffusion in random dynamical systems,” invited talk, DCP19, CNR, Pisa, Italy, (July, 2019).

4） Toshiyuki Nakagaki, “Transport network in living systems designed by current-reinforcement rule”, 13th Annual qBio Conference San Francisco State Univ., CA, USA (August, 2019).

5） Toshiyuki Nakagaki, “Adaptive motion in protozoan ciliate”, ICMMA 2019 Int. Conf. on Spatio-temporal patterns on various levels of hierarchy of life, Meiji University, Tokyo (December, 2019).

6） Toshiyuki Nakagaki, “Adaptive development of biological network based on use-and-growth rule”, Exploratory Workshop on Geometry of Complex Webs 2020, Les Diablerets, Swiss (February, 2020)

ｂ．招待講演（国内学会）

1） 西上 幸範, “流れ場における遊泳原生生物の生存戦略”, 第９回分子モーター討論会, 三島, (2019 年 6 月).

2） 中垣 俊之, “単細胞生物である粘菌は本当に「単細胞」なのか？”, 第 92 回日本細菌学会総会市民公開講座, 札幌市, (2019 年 4 月).

3） 中垣 俊之, “粘菌の用不用適応能に倣った形状最適化”, 日本補綴歯科学会第128回学術大会 特別講演, 札幌市, (2019年5月).

4） 中垣 俊之, “右へ行くべきか左へ行くべきか、それが問題ーアメーバからヒトまでー”, 第５７回全国大学保健管理協会北海道地方部会研究集会, 室蘭市, (2019年8月).

5） 中垣 俊之, “「粘菌に学ぶ知能と数理科学」北緯43度からの独創研究発信”, 応用物理学会秋季講演会第80回記念シンポジウム, (2019年9月).

6） 中垣 俊之, “単細胞生物にみる社会づくりの基本設計”, 北海道技術者養成プラットフォーム シンポジウム, 札幌市, (2019年10月).

7） 中垣 俊之, “外遊・宇宙遊・逍遥遊”, 札幌圏大学国際交流フォーラム設立３０周年記念講演会, 札幌市, (2020年1月).

8） 中垣俊之, “アメーバとヒトの行動に共通した「知的」なるもの～比較生物行動学の視点から～”, 第４５回札幌市医師会医学会特別講演, 札幌市, (2020年2月).

ｃ．一般講演（国際学会）

1） Yuzuru Sato, “Anomalous diffusion and intermittency in deterministic /random dynamical systems”, contributed talk, RIMS workshop, Kyoto University, Kyoto, (September, 2019)

2） Yuzuru Sato, “Noise-induced Statistical Periodicity in Lasota-Mackey Maps”, contributed talk, RIMS workshop, Kyoto University, Kyoto, (August, 2019).

3） Yuzuru Sato, “Stochastic bifurcation in a turbulent swirling flow”, ICIAM, Valencia, Spain, (July, 2019).

4） Yukinori Nishigami, Takuya Ohmura, Masatoshi Ichikawa, “The cellular shape affects the behavior of ciliates”, VIII European Congress of Protistology, Roma, Italy, (July, 2019)

5） Takuya Chiba, T. Sugi, Y. Nishigami, T. Nakagaki, K. Sato, “Physical mechanisms behind high speed jump of nematode *Caenorhabditis elegans*”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, (December, 2019)

6） Syun Echigoya, Katsuhiko Sato, Toshiyuki Nakagaki, Yukinori Nishigami, “The shape of ciliate, S*tentor coeruleus*, decides its swimming and adhesive behavior”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, (December, 2019)

7） Kosuke Iizuka, Ken-ichi Wakabayashi, Ritsu Kamiya, Yukinori Nishigami, Toshiyuki Nakagaki, Katsuhiko Sato, “Asymmetric patterns appearing in collective photobehavior of *Chlamydomonas*”, The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, (December, 2019)

d．一般講演（国内学会）

1） Yuzuru Sato, “Stochastic bifurcation in a turbulent swirling flow”, contributed talk, JSIAM, University of Tokyo, Tokyo, (September, 2019)

2） 西上幸範, 野村真未, 谷口篤史, 野中茂紀, Rieu Jean-Paul, “這う原生生物の行動研究”, 生体運動研究合同班会議 2020, 京都, (2020 年 1 月).

3） 飯塚洸介, “クラミドモナスの集団光応答に現れる非対称パターン”, 2019年度北海道植物学会大会, 札幌市, (2019年12月).

e．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） Yuzuru Sato, “Stochastic bifurcation and intermittency in random dynamical systems”, contributed talk, RIMS workshop, Kyoto University, Kyoto, (October, 2019).

2） Yuzuru Sato, “Anomalous diffusion in random dynamical systems,” summer school lecture, Shiga, Japan, (October, 2019)

3） Yuzuru Sato, “Anomalous diffusion and intermittency in random dynamical systems”, Seminar at Tokyo Metropolitan University, Tokyo, (September, 2019).

4） Yuzuru Sato, “Stochastic bifurcation in a turbulent swirling flow”, contributed talk, RIMS workshop, Kyoto University, Kyoto, (June, 2019).

5） Katsuhiko Sato, “Direction-dependent contraction forces on cell boundaries induce collective migration of epithelial cells within their sheet”, GSS international Mini-Symposium “Soft Matter Deformation and Function”, Sapporo, Japan, (July, 2019).

6） Katsuhiko Sato, “Left-right asymmetric aggregation in Chlamydomonas”, 2019 RIMS Workshop “Mathematical Methods in Biofluid Mechanics”, Hyogo, Japan, (October, 2019).

7） Toshiyuki Nakagaki, “Transport network designed by an amoeboid organism”, Russia-Japan Scientific Forum, on Environmental Science, Moscow, Russia, (September, 2019).

8） Toshiyuki Nakagaki, “Nature-inspired design of transport network -how the natural system works properly-“, The 2nd General Assembly Meeting of The Association of Institutions of Higher Education of The Russian Federation and Japan. 2nd Russia-Japan Student Forum, Moscow, Russia, (September, 2019). - Public Interactive Lecture -

9） Toshiyuki Nakagaki, “Transport network theoretically modeled by current-reinforcement rule”, UC Davis Science Summer Camp COSMOS, California, USA, (July, 2019).

10） 飯塚洸介, “クラミドモナスの集団光応答に現れる非対称パターン”, 第13回クラミドモナス研究会, 東京, (2019年9月).

4.7 シンポジウムの開催

1） Yuzuru Sato, Chief-organizer, Conference on ″Random Dynamical Systems Theory and Its Applications″, RIMS, Kyoto, Japan, (August, 2019).

2） Yuzuru Sato, Chief-organizer, Data analysis and machine learning in dynamical systems, University of Tokyo, Tokyo, Japan, (May, 2019).

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） 中垣俊之, 佐藤勝彦, 西上幸範, 佐藤譲: 株式会社ジイ・シイ企画, 「集団的知性の探求ならびにその社会動態や経済現象への展開応用に関する研究」, 2019～2020 年度, 1,000 千円

c．委託研究

該当なし

d．国際共同研究

1） 佐藤譲：CEA-CNRS, France と流体力学・気象データ解析に関する共同研究.

2） 中垣俊之：オックスフォード大学植物科学科マーク・フリッカー博士, 町と道の共発展ダイナミクスに関する研究

3） 西上幸範, 佐藤勝彦, 佐藤譲, 中垣俊之：リヨン第１大学, ジャンポール・リュー教授, 細胞運動の力学に関する研究

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: 研究分担者,「ランダムな実および複素力学系, 正則写像半群とフラクタル幾何学の研究」, 科学研究費補助金 基盤(B) No.19H1790, 日本学術振興会 (2019-2023).

4） 佐藤譲:研究分担者, 「確率過程論的アプローチによるランダム力学系の理論研究」, 科学研究費補助金 基盤(B) No.19H21834, 日本学術振興会 (2019-2021).

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」, 科学研究費補助

金 基盤(B) No.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」, 科学研究費補助金 基盤(B) No.18H01135, (2018-2022).

7） 西上幸範:研究分担者, 「再構成アプローチで解明するダイナミンの膜切断機構とその破綻に起因する疾患発症機序」,国際共同研究強化(B) No. 19KK0180, (2019-2023).

b．大型プロジェクト・受託研究

1） 佐藤譲: 研究代表者, “Understanding the dynamics of atmospheric circulation”, PICS grant, LSCE, CEA, France,(2017-2020).

2） 佐藤譲: 研究代表者, London Mathematical Laboratory Fellowship, London Mathematical Laboratory, UK, (2019-2020).

3） 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）飯塚洸介：第13回クラミドモナス研究会「学生優秀発表賞」東京工業大学 (2019/9/5)

2）飯塚洸介：第20回電子研国際シンポジウム「優秀ポスター賞」北海道大学 (2019/12/2)

3）千葉拓也：北海道大学共同利用共同研究拠点アライアンス部局横断シンポジウム「計算科学が拓く汎分野研究」「優秀ポスター賞」北海道大学 (2019/10/31)

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 (2019.4-2020.3)

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-)

4） 西上幸範:日本原生生物学会ネットワーク委員委員長 (2019.10-)

c．兼任・兼業

1） 佐藤譲：London Mathemtical Laboratory External Fellow (2013-).

d．外国人研究者の招聘

1） Davide Faranda, France, (23-30 May, 2019).

2） Prof. Jean Paul Rieu, University of Lyon 1, (13-20 June, 2019)

3） Prof. Helmut Brand, University of Bayreut, (4-7 September, 2019)

4） Dr. Yunchang Seol, National Chia-Tung University, Taiwan (19 July - 3 August, 2019)

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, 2019 年 2 学期

2） 理学部/理学院, 数理解析学続論, 佐藤譲, 2019 年 2 学期

3） 全学共通, フレッシュマンセミナー「暮らしの中のサイエンス」, 西上幸範, 2019 年 1 学期

4） 理学部専門科目, 生物系のための物理学, 佐藤勝彦, 2019 年 1 学期

5） 生命科学院専門科目, ソフトマター物理学特論（連続体力学), 佐藤勝彦, 2019 年 7-8 月

6） 生命科学院専門科目, 中垣俊之, ソフトマター物理学特論「非線形現象」, 1単位, 2019年11月27日-12月20日

7） 全学共通, 中垣俊之, 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」, 1/15単位, 2019年06月21日

8） 全学共通, 中垣俊之, ソフトマター概論, 1/15単位, 2019年04月01日-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） 私立甲南大学, 生物学特殊講義Ⅰ, 西上幸範, 2019.4-2020.3

2） 私立甲南大学大学院, 生物学特殊講義Ⅳ, 西上幸範, 2019.4-2020.3

3） 東京大学工学部精密工学科, 「精密工学特別講義V 領域を超えるテクノロジー」, 2/15単位, 中垣俊之, 2019年5月13日

4） 公立はこだて未来大学, 「物質の科学」, ２単位, 中垣 俊之, 2019年08月26日～08月30日

5） 大阪大学大学院生命機能研究科, 「生命科学者のための数理細胞生理学序論」, １単位, 中垣 俊之, 2019年11月14日～15日

g．新聞・テレビ等の報道

1） 佐藤譲: 2019 年 5 月 14 日, 北海道大学プレスリリース「ノイズの伴う力学系での異常拡散のメカニズムを解明」.

2） 中垣俊之：「ヤンセンは手触りで世の中を理解する」札幌市芸術の森企画展「テオヤンセン展」での研究内容展示, 2019年7月13日-9月1日

3） 中垣 俊之：「イグ・ノーベル賞２度受賞 中垣俊之元未来大教授　広い世界に進み出て遊泳せよ」 元日の地域特集「作り出す はこだて未来大学20年」北海道新聞, 2020年1月1日

4） 中垣 俊之：「粘菌　脳のない天才」 NHK BS１　世界ドキュ選　フランスARTE製作科学ドキュメンタリー番組, 2019年11月25日, 2020年1月1日他

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（総人数を記載）

1） 飯塚洸介, 生命科学院, 理学修士, “クラミドモナスの集団光応答に現れる非対称パターン”

2） 千葉拓也, 生命科学院, 理学修士, “線虫*Caenorhabditis elegans* の高速度跳躍の力学的メカニズム”

3） 佐藤耀, 生命科学院, 理学修士, “真正粘菌キイロモ

ジホコリの厚み振動の位相波パターンと管ネットワークの形態との関係に関する研究”

博士学位：0人（総人数を記載）

連携研究部門

共創研究支援部

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）、2012.03～2019.09）
教授　中垣俊之（名大院、学博、 2019.10～）
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）、2012.06～2019.11）
特任助教　堤元佐（北大院、博士（生命科学）、2016.09～2019.09）
技術職員　小林健太郎（北大院、博士（理学）、2012.03～）
客員教授　根本知己（東工大院、博士（理学）、2019.10～）

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る。専任スタッフが機器操作やソフトウエアの利用方法などを説明することにより、光学顕微鏡を取り扱ったことのない初級者でも、観察技術全般を習得できる。特に近年では、遠方の大学や企業の研究者からサンプルを送付してもらい、スタッフが観察を行う依頼観察への対応も開始した。その一方で、利用者の視点に基づく機器等の詳細な要望や感想が寄せられるため、協賛企業への迅速かつ綿密なフィードバックも開設当初より行っている。

このように研究者と企業の双方と緊密な連絡を取り合うことにより、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と推進を目的としている。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31年４月～令和２年３月）

令和１年度（平成31年度）の延べ利用人数・利用時間は、407人・2198時間となった。平成24年度以降の利用実績を図１のグラフに示す。利用者の所属ごとの年間利用人数を棒グラフ（上部の第１軸）で、年間総利用時間を折れ線グラフ（下部の第２軸）で表示する。年を追うごとに概ね利用が増加していたものの、近年は常連研究者の異動が多いのもあり、利用がやや減少している。

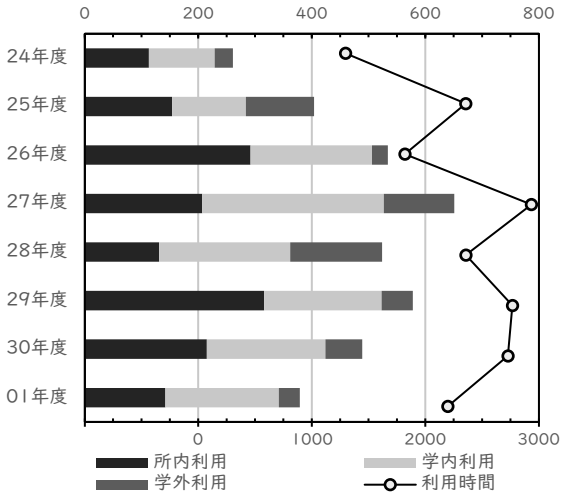


図１．平成 24 年度以降のイメージングセンター利用状況.

この利用者所属の詳細を、図２のグラフで示す。学内の多くの学部等から幅広く利用があり、また１割程度は学外研究者の利用となっている。

また令和１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。

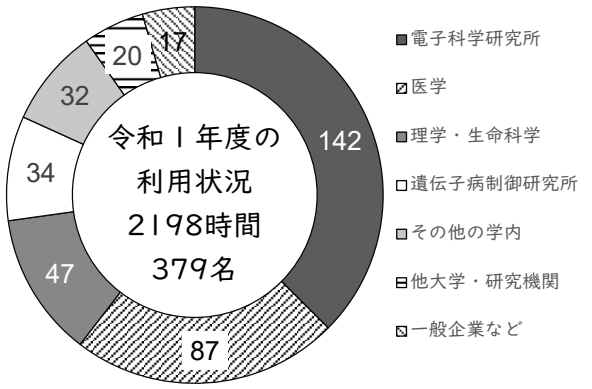


図２．利用状況と所属の詳細(グラフ数値は利用回数).

(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、顕微鏡やソフトウエアの操作指導を行っている。令和１年度は30件の新規の利用相談が寄せられ、計39名の研究者に操作指導を行った。図３には、利用相談が寄せられた後の利用動向を示す。半分程度は継続して当センターを利用しているものの、換言すると半数は実際の利用にまで至っていないこととなり、更なるサポート体制の充実などが課題である。

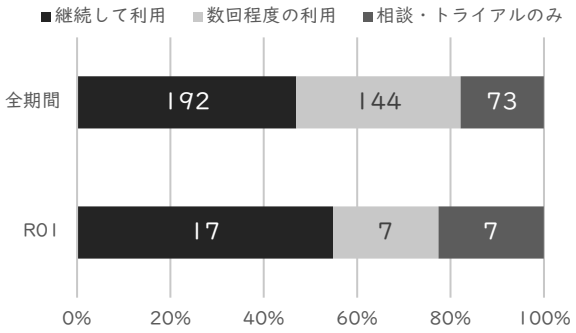


図３．当センターへの利用相談後の動向.

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は、平成29年度より全国の研究者へ広く設備提供を開始した。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、他大学や他の研究法人を含めて、令和１年度は５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を行う環境を定期的に提供している。令和１年６月28日には、“Nikon Imaging Center Fluorescence Imaging Sympodium”を品川で開催した。52名の参加があり、盛況となった。

(c)　その他の主な活動状況

令和１年６月 27 日には、世界のニコンイメージングセンターのディレクターが来日し、各センターの活動状況の報告や運営に関する協議を行った。当センターは国内で唯一の拠点であるため、主体的に開催に携わった。

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光学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く。

４．資料

4.1　学術論文（査読あり）

1) Masatoshi Inoue, Atsuya Takeuchi, Satoshi Manita, Shin-ichiro Horigane, Masayuki Sakamoto, Ryosuke Kawakami, Kazushi Yamaguchi, Kohei Otomo, Hiroyuki Yokoyama, Ryang Kim, Tatsushi Yokoyama, Sayaka Takemoto-Kimura, Manabu Abe, Michiko Okamura, Yayoi Kondo, Sean Quirin, Charu Ramakrishnan, Takeshi Imamura, Kenji Sakimura, Tomomi Nemoto, Masanobu Kano, Hajime Fujii, Karl Deisseroth, Kazuo Kitamura, Haruhiko Bito: “Rational Engineering of XCaMPs, a Multicolor GECI Suite for In Vivo Imaging of Complex Brain Circuit Dynamics”, *Cell*, 2019, 177 (5), 1346-1360.

2) Ai Goto, Kohei Otomo, Tomomi Nemoto: “Real-Time Polarization-Resolved Imaging of Living Tissues Based on Two-Photon Excitation Spinning-Disk Confocal Microscopy”, *Frontiers in Physics*, 2019, 7, Article 56.

3) Hirokazu ISHII, Kohei OTOMO, JUI-HUNG HUNG, Motosuke TSUTSUMI, Hiroyuki YOKOYAMA, Tomomi NEMOTO: “Two-photon STED nanoscopy realizing 100-nm spatial resolution utilizing high-peak-power sub-nanosecond 655-nm pulses”, *Biomedical Optics Express*, 2019, 10 (7), 3104-3113.

4) Takema Sasaki, Motosuke Tsutsumi, Kohei Otomo, Takashi Murata, Noriyoshi Yagi, Masayoshi Nakamura, Tomomi Nemoto, Mitsuyasu Hasebe, Yoshihisa Oda: “A Novel Katanin-Tethering Machinery Accelerates Cytokinesis”, *Current Biology*, 2019, 29, 4060-4070.

5) Hong Zhang, Kenji Yarinome, Ryosuke Kawakami, Kohei

Otomo, Tomomi Nemoto, Yosuke Okamura: “Nanosheet wrapping-assisted coverslip-free imaging for looking deeper into a tissue at high resolution”, *PLoS ONE*, 2020, 15 (1), e0227650.

6) Yuta Sato, Keiju Kamijo, Motosuke Tsutsumi, Yuta Murakami, Masayuki Takahashi: “Nonmuscle myosin IIA and IIB differently suppress microtubule growth to stabilize cell morphology”, *The Journal of Biochemistry*, 2020, 167 (1), 25-39.

7) Ramon Francisco Avena, Lin Qiao, Yuki Fujii, Kohei Otomo, Hirokazu Ishii, Takeyuki Suzuki, Hirofumi Tsujino, Tadayuki Uno, Yasuo Tsutsumi, Yusuke Kawashima, Tatsuya Takagi, Kenichi Murai, Tomomi Nemoto, and Mitsuhiro Arisawa: “Absorption, Fluorescence, and Two-Photon Excitation Ability of 5-Phenylisolidolo[2,1-a]quinolines”, *ACS Omega*, 2020, 5 (5) , 2473-2479.

4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

4.3 総説・解説・評論等

1) 石井宏和, 根本知己, 大友康平, 「２光子励起顕微鏡法のナノイメージングへの展開」. 光アライアンス, 2019, 30 (11), 49-53.

2) 大友康平, 石井宏和, 根本知己, 「透過型液晶素子を用いた二光子励起 STED 顕微鏡」. フォトニクスニュース, 2019, 5 (4), 192-195.

4.4 著書

該当なし

4.5 特許（発明者：特許番号、特許名、出願年月日）

該当なし

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

1) T. Nemoto, “Multi-Photon Microscopy Improved by Novel Optical Laser and Material Technologies”, the 13th International Symposium of Nanomedicine (ISNM 2019), Konan Univ. (Kobe), December-4, 2019.

ｂ．招待講演（国内学会）

1) 大友康平, 「二光子励起顕微鏡の機能向上と生体内部高精細イメージング」, 第14回 日本分子イメージング学会学術集会 （札幌）, 2019年5月24日.

2) 根本知己, 「ニコンイメージングセンター活動報告」, ABiS ミーティング, 自然科学研究機構 生理学研究所（岡崎）, 2019年7月1日.

3) 根本知己, 大友康平, 石井宏和, 「生体組織における生理機能の高速多光子イメージング」, 第44回レーザー顕微鏡研究会シンポジウム, 大阪大学 （吹田）, 2019年7月４日.

4) 根本知己, 基調講演 「２光子顕微鏡による生体イメージングの基礎と応用」, 東海大学マイクロ・ナノ啓発会 第11回学術講演会, 東海大学札幌キャンパス, 2019年8月24日.

5) 根本知己, 「２光子顕微鏡による生体イメージングの基礎と応用」, 日本生理学会北海道支部会, 旭川医科大学, 2019年8月31日.

6) Tomomi Nemoto, “Novel “*in vivo*” two-photon microscopy for vast and longtime neural activity”, 日本生物物理学会第57回年会, 宮崎シーガイア, 2019年9月24日.

7) 根本知己, 特別講演 「２光子顕微鏡による生体イメージング」, さきがけ「光極限」領域 第８回領域会議, 北海道大学, 2019年10月26日.

8) 根本知己, 「新規レーザー光技術を用いた２光子顕微鏡による細胞機能イメージング」, 高分子・ハイブリッド材料研究センター 2019 PHyM シンポジウム, 東北大学多元物質科学研究所, 2019年11月12日.

9) 根本知己, 「生命機能の解明のための新規的な光・レーザー技術を用いた革新的なバイオイメージング」, 第２回 ExCELLS シンポジウム, 岡崎コンファレンスセンター, 2019年11月18日.

10) 大友康平. 「生命現象の可視化のための二光子顕微技術開発」. 日本分光学会 令和元年度 生細胞分光部会シンポジウム （つくば）, 2019年12月12日.

11) 根本知己, 「生命機能の可視化解析に向けた多光子イメージングの展開」, The Imaging Frontier Center Symposium 2019, 東京理科大学野田キャンパス, 2019年12月14日.

ｃ．一般講演（国際学会）

1) Hirokazu Ishii, Kohei Otomo, Jui-Hung Hung, Motosuke Tsutsumi, Hiroyuki Yokoyama, Tomomi Nemoto, “Compact Two-Photon Excitation STED Nanoscopy with High-Peak-Power Sub-Nanosecond 655-nm Pulsed Light Source”, Focus On Microscopy 2019 (London, UK), April-16, 2019.

2) Kohei Otomo, Takafumi Kamada, Takashi Murata, Mitsuyasu Hasebe, Tomomi Nemoto, “Four-Color Three-Dimensional Live Cell Imaging by Two-Photon Excitation Spinning Disk Confocal Microscopy”, Focus On Microscopy 2019 (London, UK), April-16, 2019.

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) Kohei OTOMO, “Improving two-photon microscopy for deeper, sharper and/or faster bioimaging”, NIG seminar, the 2050th Biological Symposium, 国立遺伝学研究所（三島), 2019年4月4日.

2) Tomomi Nemoto, Taiga Takahashi, Hirokazu Ishii, Kohei Otomo, “Improvement of Two-photon Microscopy for Biological Specimens by Utilizing Novel Optical Laser and Materials”, The 7th China-Japan symposium on nanomedicine, Xi’an, China, Northwest University, May 24-26, 2019.
3) 根本知己, 「非線形光学過程を活用した新規光学顕微鏡によるバイオイメージングの展開」, ExCELLS セミナー, 自然科学研究機構生命創成探究センター（岡崎）, 2019年5月29日.
4) T. Nemoto, “Nikon Imaging Center @ Hokkaido Univ. and our recent works”, Nikon directors’ meeting, Nikon, Tokyo, June-28, 2019.
5) Kohei OTOMO, “Improvements of two-photon excitation fluorescence microscopy for deeper, sharper and/or faster bio imaging”, JSPS Core-to Core Program A iC-Cubix3 Kick-off meeting, (Leuven, BE), July-8, 2019.
6) T. Nemoto, “Improvement in two-photon microscopy utilizing novel optical techniques”, ABiS symposium, Okazaki Conference Center, July-17, 2019.
7) T. Nemoto, “Cutting edge of microscopy - Seeing is believing”, Science Camp, Hokkaido Univ., July-29, 2019.
8) T. Nemoto, “Multi-photon microscopy innovated by cutting-edge light technologies”, The 2nd NIBB-Princeton Joint Symposium “Imaging and Quantitative Biology”, Okazaki Conference center, October-28, 2019.
9) T. Nemoto, “Multi-photon Microscopy Improved by Resonance with Novel Optical Laser and Material Technologies”, Resonance Biology International Conference, Tokyo University of Science, Katsusika Campus, October-30, 2019.
10) 大友康平, 「生物イメージングのための多光子顕微技術開発」 第7回糸状菌分子生物学研究会若手の会, (南幌町), 2019年11月5日.
11) 大友康平, 「レーザー走査型蛍光顕微鏡の基礎, 光技術応用による機能向上」, 定量生物学の会 北海道キャラバン 2019 (札幌), 2019年11月6日.
12) T. Nemoto, “Multi-photon Microscopy Improved by Resonance with Novel Optical Laser and Material Technology”, McGill - NIPS Collaborative Workshop on Multi-Scale Imaging, Physiology, and Analysis 2019, McGill University, November-7, 2019.
13) T. Nemoto, “Novel Two-photon Microscopy, “Utilizing Novel Optical Laser and Material Technologies”, Tohoku Forum for Creativity “Cancer - from Biology to Acceptance” International Symposium2: New Technology for Diagnosis and Therapeutics of Cancer, Sairyo Campus, Tohoku Univ, December-2, 2019.
14) 根本知己, 「最先端の顕微鏡と生体の機能」, 国研セミナー, 自然科学研究機構生理学研究所 (岡崎), 2020年1月28日.
15) Yasutaka Matsuo, “Imaging support of Co-creative Research Support Department, Research Institute for Electronics Science, Hokkaido University”, ABiS Symposium - Forefront and Future of Electron Microscopic Imaging, Okazaki Conference Center, February-14, 2020.
16) Kohei Otomo, “Two-photon excitation spinning-disk confocal microscopy for visualizing higher-dimensional biological events”, ABiS Symposium - Forefront and Future of Electron Microscopic Imaging, Okazaki Conference Center, February-14, 2020.
17) Motosuke Tsutsumi, “Super resolution imaging support based on spatial/temporal fluorescence correlation analysis”, ABiS Symposium - Forefront and Future of Electron Microscopic Imaging, Okazaki Conference Center, February-14, 2020.
18) Kentaro Kobayashi, “Activity report at Nikon Imaging Center”, ABiS Symposium - Forefront and Future of Electron Microscopic Imaging, Okazaki Conference Center, February-14, 2020.
19) Kohei Otomo, Tomomi Nemoto, “Improvements of two-photon microscopy techniques for understanding intravital phenomena”, The 8th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (Sendai, JP), February-15, 2020.

4.7 シンポジウムの開催

1) Nikon Imaging Center World Directors’ meeting in Japan, 参加者40名程度, 品川, 2019年6月27日-28日.
2) Nikon Imaging Center Fluorescence Imaging Sympodium, 参加者52名, 品川, 2019年6月28日.

4.8 共同研究

a. 所内共同研究

該当なし

b. 民間等との共同研究

該当なし

c. 委託研究

該当なし

d. 国際共同研究

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) ニコンの国際顕微鏡写真コンテスト、“Small World: PHOTOMICROGRAPHY COMPETITION 2019”で、堤元佐の応

募作品が“Images of Distinction”を受賞.

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

該当なし

ｃ．兼任・兼業

該当なし

ｄ．外国人研究者の招聘

該当なし

ｅ．北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

ｆ．北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

1) 藤女子大学付属中学校・高等学校, 公開講義「脳の不思議・心の謎」, 根本知己, 2019年9月28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

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、2009.9～2019.9）
教　授　雲林院 宏（東北大学、理学博士、2015.7～）
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

電子科学研究所の各研究分野が国際連携戦略を推進するための準備補佐、国際連携イベントの運営を行った。具体例として、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を運営補佐している（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招聘した上でのリレー講義を行った。

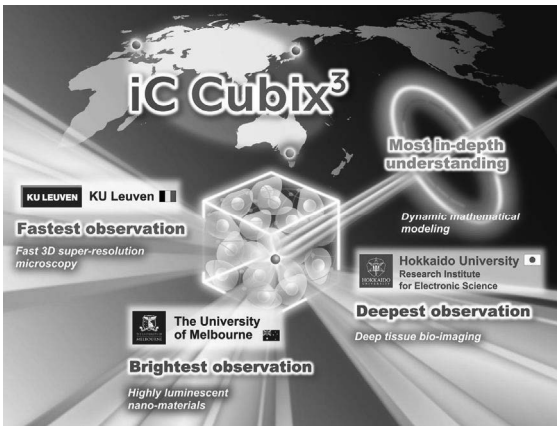


図１　雲林院宏 教授をコーディネータとして進行中のＪＳＰＳ先端拠点形成事業のプロジェクト概要図

その中では、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し、大学院生と若手研究者を主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HSI2020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た。以上のように、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っている。

図２　北海道大学サマーインスティテュートポスター

(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。令和元年12月2-3日に北海道大学学術交流会館で開催した｡本学をはじめ国内では東京大学、大阪大学、九州大学から、海外からは米国 Northwestern Univ. 、米国 Tufts Univ.、スイス Univ of Fribourg、ドイツ Fritz Haber Institute、ドイツ Ludwig-Maximilians-Universität München 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、１４件の口頭発表・１１１件の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。

(d) 2019 International Symposium of RIES & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS) の開催

令和元年12月3-4日に北海道大学学術交流会館で北大RIES-国立交通大学 CEFMS（台湾）の合同シンポジウムを開催した。両国から合わせて10人の口頭発表と62件のポスター発表が行われ、活発な研究交流が行われた。

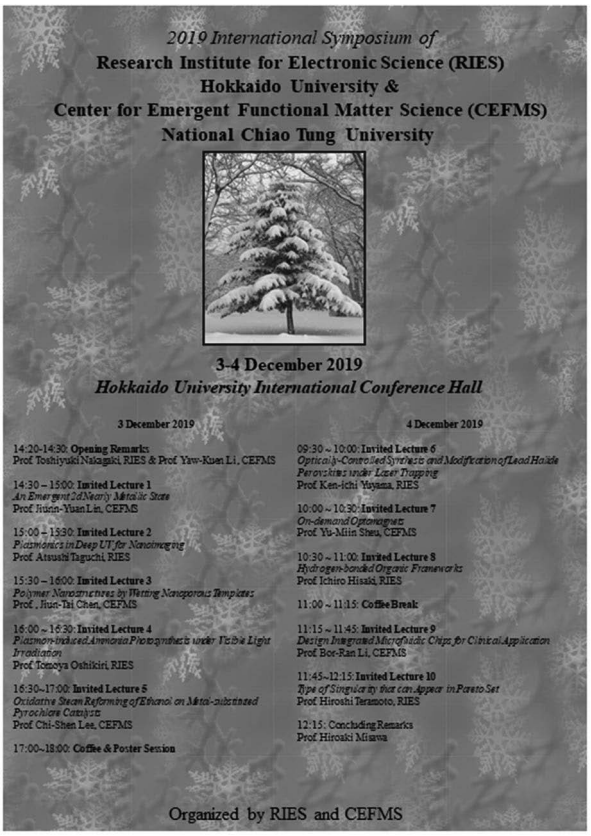


図３ RIES-CEFMS（台湾）の合同シンポジウムポスター

３．今後の展望

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31/令和元年度も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. Chu Cheng Hung､台湾中央研究院(2019年3月18日～2019年8月31日)
2. Huang Tzu-Ting、台湾中央研究院(2019年3月18日～2019年8月31日)
3. An-Chieh CHENG、National Chiao Tung University (2019年9月2日～2019年10月1日)
4. Ching-Yu CHIU、台湾国立成功大学(2019年9月1日～2019年9月15日)
5. Andrew PIKE 、 School of Chemistry,Newcastle University, Senior Lecturer(2019年8月1日～2019年10月6日)
6. LEE Kuang Li、 Academia Sinica (Taiwan) (2019年9月17日～2019年12月13日)
7. BAI Haoyuan 、The Chinese University of Hong Kong(2019年11月14日～2019年11月30日)
8. PALYAM Subramanyam、Indian Institute of Technology Hyderabad(2019年10月2日～2019年12月25日)
9. KATTA Venkata Seshaiah 、Indian Institute of Technology Hyderabad(2019年10月2日～2019年12月25日)
10. 黄 瑞康、中山大学(2019年12月5日～2019年12月19日)
11. Collin WILKINSON、ペンシルバニア州立大学(2020年2月25日～2020年4月30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～）
博士研究員　佐々木仁（2019.4～）
学術研究員　福本　愛（2007.6～）
学術研究員　細井浩貴（2012.9～）
学術研究員　山崎郁乃（2019.4～）
学術研究員　浮田桂子（2019.6～）

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31年 4月～令和2年 3月）

令和元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71件、うち、55%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95件、こちらも55%以上を学外への支援として実施した。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100件以上であった。また、支援結果を活用したユーザーがベンチャー企業を立ち上げる成果も得られている。

(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、セ応用物理学会、北洋銀行ものづくりテクノフェアなど、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・構造解析の技術支援員が、ナノテクノロジープラットフォームへの支援実績を評価され、支援貢献賞を受賞するに至った。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がなされている。

(c) 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、地域創成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、昨年度から4年間のプロジェクトとしてスタートした。今年度は、多様な材料へ対応するため多元スパッタ装置導入、低加速電圧でも試料観察が可能な超高分解能走査電子顕微鏡の導入、粉末へもナノメートルオーダーで成膜可能な原子層堆積装置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。

(d)設備運用状況

令和元年度は、北海道胆振東部地震で全損したシリコンドライエッチング装置の代替装置(SPPテクノロジー、Pegasus)を10月に立ち上げることでバイオ・MEMS領域への対応を再開した。また、新型スパッタ装置および超高分解能走査型電子顕微鏡、粉末対応原子層堆積装置を順次導入し、機器の拡充と研究力向上を図った。

3．今後の研究の展望

ナノテク連携室は引き続き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） Uemura, S ; Matsuo, Y; Okamatsu, T; Arita, T; Shimomura, M; Hirai, Y; “Low-Friction, Superhydrophobic, and Shape-Memory Vulcanized Rubber Microspiked Structures”, ADVANCED ENGINEERING MATERIALS, Vol.22, 1901226 (2020)

2） Abe, H; Hirai, Y; Ikeda, S; Matsuo, Y; Matsuyama, H; Nakamura, J; Matsue, T; Yabu, H; “Fe azaphthalocyanine unimolecular layers (Fe AzULs) on carbon nanotubes for realizing highly active oxygen reduction reaction (ORR) catalytic electrodes”, NPG ASIA MATERIALS, Vol. 11, 57 (2019)

3） Hirai, Y; Mayama, H; Tamura, R; Matsuo, Y; Okamatsu, T; Arita, T; Shimomura, M; “Microstructured rubber and its wettability”, POLYMER JOURNAL, Vol. 51, p.p. 721-730 (2019)

4） Hamajima,; Mitomo, H; Tani, T; Matsuo, Y; Niikura, K; Naya, M; Ijiro, K, “Nanoscale uniformity in the active tuning of a plasmonic array by polymer gel volume change”, NANOSCALE ADVANCES, Vol. 1, p.p. 1731-1739 (2019) 【電子研内共著】

5） Ueno, K; Yang, JH; Sun, Q; Aoyo, D; Yu, H; Oshikiri, T; Kubo, A; Matsuo, Y; Gong, QH; Misawa, H, “Control of plasmon dephasing time using stacked nanogap gold structures for strong near-field enhancement”, APPLIED MATERIALS TODAY, Vol. 14, p.p.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

該当なし

4.4 著書

該当なし

4.5 特許

1. 特許第 6302144 号・岡松隆裕、下村政嗣、平井悠司、松尾保孝、有田稔彦・ゴム部材、タイヤおよびゴム部材の製造方法・横浜ゴム(株)、千歳科学技術大学、北海道大学、(株)東北テクノアーチ・平成 30 年 3 月 9 日

4.6 講演

ａ．招待講演（国際学会）

該当なし

ｂ．招待講演（国内学会）

1） 笹倉弘理、小田島聡、「光ファイバー接続型量子ドットを用いた高純度単一光子状態の生成」、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、2019 年 9 月 18 日～21 日

ｃ．一般講演（国際学会）

該当なし

ｄ．一般講演（国内学会）

該当なし

ｅ．研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

1） 松尾保孝、「電子顕微鏡を用いたバイオ研究」、第 18 回ナノテクノロジー総合シンポジウム、東京、2020 年 1 月 31 日

4.7 シンポジウムの開催

1） 第7回北海道大学微小部・表面分析研究ユーザーズミーティング、北海道大学（2019年10月23日～24日）、

2） 第4回分析TEMユーザーズミーティング、北海道大学(2019年3月)

3） 北海道大学微細構造解析プラットフォーム技術セミナー、北海道大学（2019 年 12 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） 松尾保孝、基盤研究(C)、ナノ構造を用いた光増強ソフトイオン化法による大気中有機ナノ粒子の直接質量分析、2019～2021 年度

4） 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

1） 大西広、中野和佳子、ナノテクノロジープラットフォーム技術支援貢献賞、2020 年 2 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

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、ナノ物性化学、西井準治、小松崎民樹、松尾保孝、2019 年 6 月～2019 年 8 月

2） 総合化学院、物質科学（ナノフォトニクス材料論）、西井準治、松尾保孝、2019 年 6 月～2019 年 8 月

3） 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」、松尾保孝、2019 年 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

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28年	平成29年	平成30年	平成31年/令和元年
光科学研究部門	欧　文	16(16)	20(20)	19(19)	16(16)
	邦　文	0	1(1)	1(0)	1(0)
物質科学研究部門	欧　文	31(31)	32(32)	37(37)	40(40)
	邦　文	0	0	0	0
生命科学研究分野	欧　文	5(5)	10(10)	13(12)	6(6)
	邦　文	0	1(0)	1(1)	0(0)
附属社会創造数学研究センター	欧　文	27(27)	34(34)	23(23)	28(27)
	邦　文	1(0)	3(0)	4(1)	0
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	欧　文	25(24)	26(26)	24(24)	34(34)
	邦　文	0	0	2(1)	2(0)
計	欧　文	104(103)	96(96)	115(114)	124(123)
	邦　文	1(0)	5(1)	8(3)	3(0)

( )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。
※共著に関しては、筆頭著者の分野にて集計。

２．総覧、解説、評論等及び著書数

部門等＼年度		平成 28 年	平成 29 年	平成 30 年	平成31年/令和元年
光科学研究部門	総説等	6(0)	2(0)	3(0)	3(0)
	著　書	0	0	1(0)	1(0)
物質科学研究部門	総説等	3(0)	5(2)	7(3)	5(4)
	著　書	0	1(1)	1(1)	3(2)
生命科学研究部門	総説等	4(0)	3(1)	7(1)	2(0)
	著　書	3(2)	1(1)	0	0
附属社会創造数学研究センター	総説等	5(1)	5(0)	2(0)	3(0)
	著　書	1(1)	3(3)	2(0)	4(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)	3(0)	3(0)	5(1)
	著　書	0(0)	2(2)	4(0)	1(1)
計	総説等	19(1)	15(3)	22(4)	18(5)
	著　書	4(3)	5(5)	8(1)	9(3)

( )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、筆頭著者の分野にて集計。

３．国際学会・国内学会発表件数

部門等＼年度		平成28年	平成29年	平成30年	平成31年/令和元年
光科学研究分門	国際	23(11)	29(14)	22(14)	31(7)
	国内	29(1)	41(9)	32(6)	25(6)
物質科学研究部門	国際	21(10)	32(20)	36(16)	55(11)
	国内	29(6)	46(8)	52(9)	70(11)
生命科学研究部門	国際	26(10)	23(11)	21(5)	10(4)
	国内	38(17)	38(12)	35(4)	17(7)
附属社会創造数学研究センター	国際	39(9)	47(25)	50(30)	51(16)
	国内	28(11)	49(18)	62(26)	34(12)
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究センター	国際	35(24)	27(12)	33(14)	31(14)
	国内	35(4)	45(8)	33(8)	31(8)
計	国際	144(64)	131(70)	162(79)	178(52)
	国内	159(39)	174(47)	214(53)	177(44)

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。
※シンポジウム・研究会は除外して集計。
※共著に関しては、筆頭著者の分野にて集計。

Ⅱ－2. 予算

Ⅱ－2－1）全体の予算

（単位：千円）

内訳＼年	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度/令和元年度
業　務　費	120,230	130,195	124,615	237,169
科学研究費補助金	273,367(74)	305,736(74)	479,781(75)	329,427 (77)
その他の補助金	7,500(2)	1,100(2)	91,780(3)	450(1)
寄　附　金	23,957(19)	36,117(21)	22,020(17)	33,730(28)
受託事業等経費	252,471(25)	244,713(25)	189,278(26)	221,306(37)
(受託研究費)	236,716(15)	218,297(13)	166,252(14)	189,442(20)
(共同研究費)	15,755(10)	26,416(12)	23,026(12)	31,864(17)
合計	677,525(120)	717,861(122)	907,474(121)	822,082(143)

() 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 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度/令和元年度
光科学研究部門	科学研究費補助金	93,000(8)	112,400(13)	110,027(14)	88,724(13)
	その他の補助金	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	4,084(2)	9,017(3)	900(1)	3,700(3)
	寄　附　金　Ⅱ	0	500(1)	500(1)	900(1)
	受託事業等経費	49,389(1)	22,880(2)	24,171(3)	34,350(5)
	(受託研究費)	49,389(1)	22,880(2)	24,171(3)	33,850(4)
	(共同研究費)	0	0	0	500(1)
	小　　計	146,473(11)	144,797(19)	135,598(19)	127,674 (22)
物質科学研究部門	科学研究費補助金	51,500(14)	59,466(15)	27,200(8)	53,153(10)
	その他の補助金	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	12,000(7)	22,100(11)	12,080(9)	26,300(20)
	寄　附　金　Ⅱ	1,200(1)	1,200(1)	340(1)	0
	受託事業等経費	13,491(3)	32,075(3)	17,744(4)	16,151(8)
	(受託研究費)	11,843(1)	31,719(2)	17,344(3)	14,226(4)
	(共同研究費)	1,648(2)	356(1)	400(1)	1,925(4)
	小　　計	78,191(25)	114,841(30)	57,364(22)	95,604(38)
生命科学研究部門	科学研究費補助金	44,800(8)	35,000(8)	39,100(11)	29,187(12)
	その他の補助金	0	0	5,430(1)	450(1)
	寄　附　金　Ⅰ	3,873(5)	200(1)	7,700(4)	2,000(2)
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	0	30(1)
	受託事業等経費	20,961(3)	28,767(3)	26,862(4)	17,175(3)
	(受託研究費)	20,181(1)	27,987(1)	26,082(2)	16,395(1)
	(共同研究費)	780(2)	780(2)	780(2)	780(2)
	小　　計	69,634(16)	63,967(12)	79,092(20)	48,842(19)
附属社会創造数学研究センター	科学研究費補助金	46,270(24)	58,570(26)	64,592(27)	44,540(23)
	その他の補助金	0	0	5,430(1)	0
	寄　附　金　Ⅰ	0	1,000(1)	0	0
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	0	0
	受託事業等経費	103,172(11)	119,397(10)	113,845(10)	134,088(12)
	(受託研究費)	94,383(7)	104,005(6)	98,655(6)	118,888(8)
	(共同研究費)	8,789(4)	15,392(4)	15,190(4)	15,200(4)
	小　　計	149,442(35)	178,967(37)	183,867(38)	178,628(35)

部門等	研究費	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度/令和元年度
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	29,750(17)	39,500(10)	238,162(14)	101,550(9)
	その他の補助金	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅰ	0	1,100(2)	0	800(1)
	寄　附　金　Ⅱ	2,800(4)	1,000(1)	500(1)	0
	受託事業等経費	53,923(5)	37,586(4)	4,656(3)	16,742(7)
	(受託研究費)	49,385(3)	29,198(1)	4,656(3)	6,083(3)
	(共同研究費)	4,538(2)	8,388(3)	0	10,659(4)
	小　　計	86,473(26)	79,186(17)	243,318(18)	119,092(17)
その他	科学研究費補助金	8,047(3)	800(2)	700(1)	4,210(5)
	その他の補助金	7,500(2)	1,100(2)	80,920(1)	0
	寄　附　金　Ⅰ	0	0	0	0
	寄　附　金　Ⅱ	0	0	0	0
	受託事業等経費	11,535(2)	4,008(3)	2,000(2)	2,800(2)
	(受託研究費)	11,535(2)	2,508(1)	0	0
	(共同研究費)	0	1,500(2)	2,000(2)	2,800(2)
	小　　計	27,082(7)	5,908(7)	83,620(4)	7,010(7)

() 内の数は受け入れ件数。　寄附金Ⅰ：申請による財団等からの研究補助金。寄附金Ⅱ：Ⅰ以外のもの。

Ⅱ－3. 外国人研究者の受入(招へい)状況

a. 年度別統計表

年 / 部門等	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度/令和元年度
光科学研究部門	7	2	13	2
物質科学研究部門	9	15	9	6
生命科学研究部門	1	2	4	3
附属社会創造数学研究センター	8	14	12	6
附属グリーンナノテクノロジー研究センター	13	12	4	5
計	38	45	32	22

Ⅱ－4. 修士学位及び博士学位の取得状況

Ⅱ－４－１）令和元年度　修士学位

情報科学研究科

■ 相川 大貴 ： ナノ粒子光操作に向けたポインティングベクトル場の制御と可視化
■ 喜多 信介 ： 円偏光プラズモン場を用いたキラル結晶化の制御と解析
■ 北嶋 大暉 ： 金属ナノ多量体を用いた多重極子遷移に関する研究
■ 佐藤 一生 ： ナノ粒子光操作のためのナノ構造探索手法
■ 藤川 聖也 ： プラズモニックナノ構造を用いたナノ粒子の光捕捉と二光子蛍光測定
■ 小谷 伊吹 ： メソポーラスシリカ薬輸送システムの細胞内挙動
■ 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
■ 小西 祐輔 ： 回転体ミラーを用いた軟Ｘ線タイコグラフィの確立に向けた予備実験
■ 鈴木 芳幸 ： 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
■ 城　 春樹 ： モード強結合に基づく高光吸収電極を用いた有機還元反応の開拓
■ 清水 風希 ： 酸化コバルト薄膜をｐ型半導体として用いたプラズモン光電変換系の構築
■ 巽　 亮太 ： 蛍光相関分光法を用いたプラズモンオプティカルトラッピングの評価
■ 劉　 言恩 ： 局在表面プラズモンとファブリ・ペローナノ共振器とのモード強結合における金ナノ粒子密度依存性
■ Yuzhang Wu ： Conduction of heat across $InGaO_3(ZnO)m$ natural super-lattices
■ 佐藤 晃一 ： 透明酸化物半導体$(Ba1-xSrx)SnO_3$固溶体薄膜の熱・電子輸送特性に及ぼす格子歪の影響
■ 須郷 堅雄 ： バンド絶縁体$SrTiO_3$ -モット絶縁体$LaTiO_3$固溶体エピタキシャル薄膜の熱電特性

生命科学院

■ 加藤 達也 ： 温度応答性ゲルを利用した三角形プレート状金ナノ粒子の間隙制御法の開発
■ 中野 健太郎 ： pH 応答性金ナノ粒子カプセルの開発
■ 熊 坤 ： シクロデキストリンを利用した金ナノ粒子の曲率依存的な集合化
■ 石 軼尓 ： 表面修飾による温度応答性金ナノ粒子の集合温度の制御
■ 飯塚 洸介 ： クラミドモナスの集団光応答に現れる非対称パターン
■ 千葉 拓也 ： 線虫 Caenorhabditis elegans の高速度跳躍の力学的メカニズム
■ 佐藤 耀 ： 真正粘菌キイロモジホコリの厚み振動の位相波パターンと管ネットワークの形態との関係に関する研究

総合化学院

■ Robin Msiska ： Study of Tunnel Mag-netocapacitance Effect in Single-layered Fe/MgF_2 Gran-ular Films
■ 佐々木 悠馬 ： 磁性薄膜エッジを利用した分子スピントロニクス素子の電気・磁気特性

環境科学院

■ 土井 雄登 ： ピリジニウム誘導体-大環状クラウンエーテルからなる超分子カチオンを用いた[Ni(dmit)2]塩の構造と融解挙動
■ 呉 佳氷 ：Hybrid molecular materials based on Mn-Cr oxalate coordination polymers with supramolecular structures（超分子構造を導入した Mn-Cr オキザレート配位高分子を基礎とする分子性複合材料）

理学院

■ 石田 雄一 ： トポロジカル磁気渦構造のマイクロマグネティクスによる理論研究 -スピントロニクスにおける応用への考察-

Ⅱ－４－２）令和元年度　博士学位

情報科学研究科

■ 小野里 尚記： Development of electrochromic transistors using amorphous tungsten oxide thin film as

the active layer

■ 松田 朝陽 ： 生物の回転運動解析のための頑健な画像パタン計測法に関する研究

■ 澤田 和明 ： 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

環境科学院

■ Md Jahidul Islam: Spatially- and temporally controlled synthesis and modification of lead halide perovskite by laser trapping

■ Devika Sasikumar: Spectrpscopic investigation of photothermal and photochemical activities of electron donor-acceptor molecular dyads

■ Sushant Ghimire: Microspectroscopic investigations and correlations of photoluminescence in microcrystals, nanocrystals and assemblies of lead halide perovskites

生命科学院

■ 脇田 大輝 ：Behavioral modeling of coordinated movements in brittle stars with a variable number of arms

■ Khalifa Mohammad Helal：Raman Spectroscopic Histology Using Machine Learning for Non-Alcoholic Fatty Liver Disease

Ⅱ－4－3）大学院生在籍数

年 / 研究科名	修士			博士		
	平成29年	平成30年	令和元年	平成29年	平成30年	令和元年
理学院	6	6	5	4	3	0
環境科学院	4	4	7	4	10	14
情報科学研究科	34	34	30	12	13	20
生命科学院	4	13	19	12	11	14
総合化学院	3	3	3	0	0	0
計	51	60	74	32	37	47

III. 研究支援体制

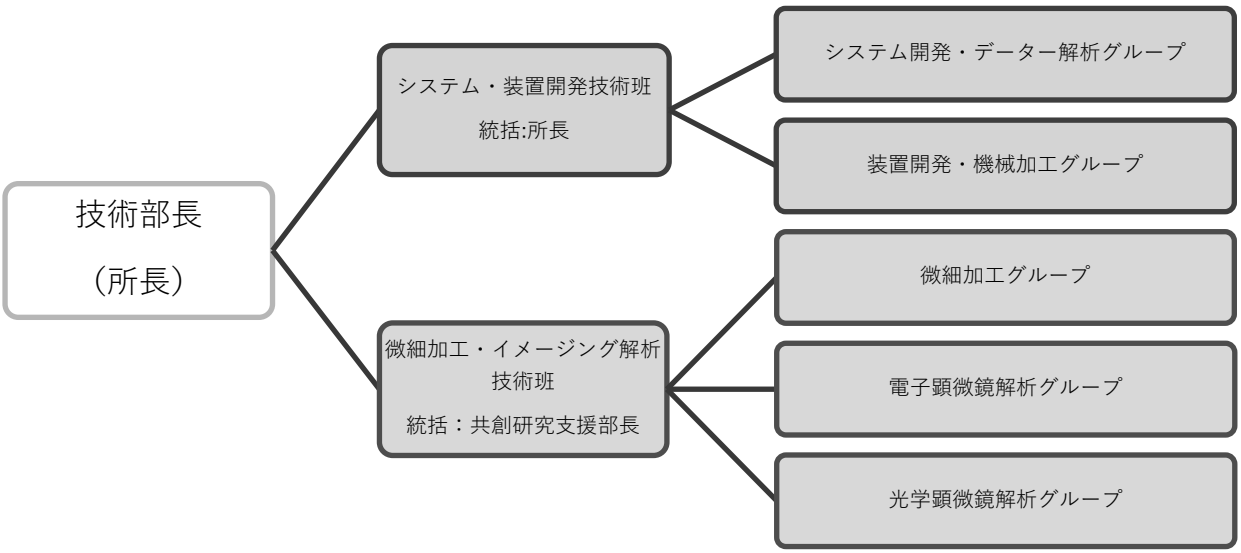
Ⅲ－1. 技術部

技術部は、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の２班で構成されており、令和元年度現在では 10 名の技術職員が配置されている。

システム・装置開発技術班は、広報・情報・ネットワーク・研究所の Web サイト管理運営・IoT 技術を駆使したシステム開発などを行うシステム開発・データ解析グループと、各種工作機械や 3DCAD システム・3D プリンタなどを利用して市販されていない研究機器などの製作にあたる装置開発・機械加工グループで構成される。近年ではシングルボードコンピュータを用いた装置制御の需要にも対応し、数多くの研究機器の開発・製作を行っている。

微細加工・イメージング解析技術班は、微細加工グループ、電子顕微鏡解析グループ、光学顕微鏡解析グループから構成されている。各グループでは、クリーンルームや微細加工装置、電子顕微鏡、光学顕微鏡といった最先端共用設備の維持・管理や装置利用の指導に携わり、また技術相談も受けている。

他にも技術部では、研究所全体に関わる業務として、研究所行事の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。



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。

1．蔵書冊数

年　度	平成28年*	平成29年*	平成30年*	令和元年*
和　書	5,311	5,316	5,339	5,339
洋　書	17,222	17.225	17.260	17.248
計	22,533	22,541	22,599	22,583

2．所蔵雑誌種類数

年　度	平成28年*	平成29年*	平成30年*	令和元年*
和雑誌	107	107	106	103
洋雑誌	387	385	385	383
計	494	492	491	486

3．雑誌受入種類数

年　度	平成28年*	平成29年*	平成30年*	令和元年*
和雑誌	41	30	32	28
洋雑誌	4	5	3	4
計	45	35	35	32

4．学外文献複写数

年　度	平成28年*	平成29年*	平成30年*	令和元年*
依　頼	12	48	20	19
受　付	96	65	57	33

* 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、本学が契約する20,000タイトル弱の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-n”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
30. 6　研究支援部を共創研究支援部へ改組
連携研究部門台湾国立交通大学理学院を新設
令和元.10　中国武漢紡織大学化学・化学工学院との学術交流協定締結
令和２．３　連携研究部門人間知・脳・AI 研究教育センターを新設

［歴代所長］

超短波研究室	昭和16年２月20日～昭和18年１月31日	蓑島　　高
超短波研究所	昭和18年２月１日～昭和21年３月31日	蓑島　　高
応用電気研究所	昭和21年４月１日～昭和21年９月10日	蓑島　　高
	昭和21年９月11日～昭和35年７月31日	淺見　義弘
	昭和35年８月１日～昭和38年７月31日	東　　健一
	昭和38年８月１日～昭和45年３月31日	松本　秋男
	昭和45年４月１日～昭和48年３月31日	望月　政司
	昭和48年４月１日～昭和51年３月31日	馬場　宏明
	昭和51年４月１日～昭和54年３月31日	吉本　千禎
	昭和54年４月１日～昭和57年３月31日	馬場　宏明
	昭和57年４月１日～昭和60年３月31日	山崎　勇夫
	昭和60年４月１日～昭和63年３月31日	達崎　　達
	昭和63年４月１日～平成４年４月９日	安藤　　毅
電子科学研究所	平成４年４月10日～平成６年３月31日	安藤　　毅
	平成６年４月１日～平成９年３月31日	朝倉　利光
	平成９年４月１日～平成13年３月31日	井上　久遠
	平成13年４月１日～平成15年３月31日	下澤　楯夫
	平成15年４月１日～平成15年９月30日	八木　駿郎
	平成15年10月１日～平成17年９月30日	西浦　廉政
	平成17年10月１日～平成21年９月30日	笹木　敬司
	平成21年10月１日～平成25年９月30日	三澤　弘明
	平成25年10月１日～平成29年３月31日	西井　準治
	平成29年４月１日～現在	中垣　俊之

〔名誉教授〕

昭和32年４月	（故）	蓑島　　高
昭和37年４月	（故）	淺見　義弘
昭和43年４月	（故）	東　　健一
昭和45年４月	（故）	松本　秋男
昭和55年４月	（故）	吉本　千禎
昭和57年４月	（故）	横澤彌三郎
昭和62年４月	（故）	羽鳥　孝三
	（故）	馬場　宏明
	（故）	松本　伍良
昭和63年４月	（故）	達崎　　達
		山崎　勇夫
平成７年４月		安藤　　毅
平成９年４月		朝倉　利光
		小山　富康
平成13年４月	（故）	井上　久遠
		永井　信夫
平成18年４月		八木　駿郎
平成19年４月		狩野　　猛
		下澤　楯夫
		下村　政嗣
		伊福部　達
平成21年４月		栗城　眞也
平成23年４月		上田　哲男
平成27年４月		太田　信廣
平成28年４月		末宗　幾夫
		西浦　廉政

Ⅳ－2. 建物

本研究所は、平成15年度に現在の創成科学研究棟新築（北21西10）に伴い、ナノテクノロジー研究センター及び関連研究分野が北12条西６丁目から移転し、平成20年度に北キャンパス総合研究棟５号館が新築され、平成21年度に同館５階の一部が増築された。平成21年度には中央キャンパス総合研究棟２号館（旧Ｂ棟）が改修された。

建物名称	構　　造	建面積 ㎡	延面積 ㎡	建築年度
創成科学研究棟	鉄筋コンクリート造5階建	——	4,154	平成15年度
北キャンパス総合研究棟５号館	鉄筋コンクリート造5階建	1,104	5,419 (116)	平成20年度 (平成21年度増築)
中央キャンパス総合研究棟２号館	鉄筋コンクリート造5階建	——	1,294	平成21年度 (改修)
計		——	10,867	

延面積欄の（ ）内の数字は増築分で内数

Ⅳ－3. 現員（平成31年度）

（３月末 日現在）

職　　名	人　数
教　　授	15(10)
准 教 授	13
講　　師	0
助　　教	19
特任教授	0
特任准教授	0
特任講師	0
特任助教	4
教員小計	51(10)
技 術 部	10
合　　計	61(10)

（ ）内の数字は客員で外数

Ⅳ－4. 教員の異動状況（平成31年度）

○転入状況

所属部門	職　名	氏　　名	採用年月日	前　　職
光科学研究	准教授	田口　敦清	H31.4.1	大阪大学大学院工学研究科助教
光科学研究	助教	瀬戸浦　健仁	H31.4.1	北海道大学電子科学研究所特任助教
技術部	技術職員	森　有子	H31.4.1	北海道大学創成研究機構学術研究員
技術部	技術職員	冨樫　愛采	H31.4.1	旭川工業高等専門学校技術創造部技術職員
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	准教授	小野　円佳	R1.8.1	AGC 株式会社技術本部商品開発研究所 マネージャー
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	劉　逸侃	R1.8.1	東京大学大学院数理科学研究科特任助教
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	水野　雄太	R1.8.1	北海道大学創成研究機構化学反応創成研究 拠点博士研究員

○転出状況

所属部門	職　名	氏　　名	退職年月日	転　出　先
社会創造数学研究ｾﾝﾀｰ	助教	秋山　正和	H31.4.30	明治大学研究・知財戦略機構特任准教授
生命科学研究	准教授	榎木　亮介	R1.8.31	自然科学研究機構生命創成探究センター 准教授
生命科学研究	教授	根本　知己	R1.9.30	自然科学研究機構生命創成探究センター 教授
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	助教	孫　泉	R1.10.31	北海道大学大学院理学研究院特任講師
生命科学研究	助教	大友　康平	R1.11.30	自然科学研究機構生命創成探究センター 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	R2.1.31	大阪大学大学院基礎工学研究科教授
光科学研究	助教	瀬戸浦　健仁	R2.3.31	神戸市立工業高等専門学校講師
物質科学研究	助教	相良　剛光	R2.3.31	東京工業大学物質理工学院准教授
ｸﾞﾘｰﾝﾅﾉﾃｸﾉﾛｼﾞｰ研究ｾﾝﾀｰ	助教	石　旭	R2.3.31	北海道大学創成研究機構特任講師

(R2.3.31)

Ⅳ－5. 構成員（平成31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　　田　口　敦　清
　　助　教　　PIN CHRISTOPHE LOUIS MARIE
　　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　　K I M　　Y U N A
　　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

　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　　栗　原　和　枝
　　（東北大学）
　　客員教授　　吉　田　宇　一
　　（岩波書店）
　　客員教授　　穐　田　宗　隆
　　（東京工業大学）
　　客員教授　　川　上　伸　昭
　　（宮城大学）

　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）
　　客員教授　　根　本　知　己
　　（自然科学研究機構）
　新概念コンピューティング研究分野
　　客員教授　　山　岡　雅　直
　　（(株)日立製作所）
　　客員教授　　竹　本　享　史
　　（(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）　　松　尾　保　孝
　グリーンフォトニクス研究分野
　　教　授　　三　澤　弘　明
　　助　教　　押　切　友　也
　　助　教　　石　　旭
　光電子ナノ材料研究分野
　　教　授　　西　井　準　治
　　准教授　　小　野　円　佳
　　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
　　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）　　長　山　雅　晴
　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　　劉　　逸　侃
　　助　教　　西　野　浩　史
　　特任助教　　大　野　航　太
　データ数理研究分野
　　教　授　　小松崎　民　樹
　　准教授　　寺　本　　央
　　助　教　　水　野　雄　太
　　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

共創研究支援部
　　部長（兼）　　松　尾　保　孝
　ニコンイメージングセンター
　　センター長（兼）　　中　垣　俊　之
　国際連携推進室
　　室長（兼）　　BIJU VASUDEVAN PILLAI
　ナノテク連携推進室
　　室長　教授　　松　尾　保　孝
　　特任助教　　小田島　　聡
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
技術職員	冨　樫　愛　采
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	森　　有　子
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	ZU SHUAI
〃	一本嶋　佐　理
〃	SATTARI SULIMON
学術研究員	山　田　美　和
〃	酒　井　恭　輔
〃	山　口　由美子
〃	熊　本　淳　一
〃	浪　花　啓　右
〃	安ケ平　裕　介
〃	ABEDIN MD MENHAZUL
非常勤研究員	AMMATHNADU SUDHAKAR AMRUTHA
〃	SHIVAKUMAR KILINGARU ISHWARA
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
事務補助員	伊　野　淳　子
〃	藤　井　敦　子
〃	小　林　恵　美
〃	大　森　素　子
〃	石　野　松　美
〃	奥　原　亜　季
〃	浦　田　絵　美
〃	藤　原　由美恵
〃	田　口　栄　子
技術補助員	村　松　達　也
〃	城　　春　樹
〃	大　西　　梓
〃	菅　浪　誉　騎
〃	富　澤　ゆかり

（令和2年３月末日現在）