

# 研究活動

北海道大学電子科学研究所

令和6年度

— 点検評価報告書 —

## Research Activities

Research Institute for Electronic Science

Hokkaido University

2024-2025

## はじめに

この巻頭言を執筆するにあたり、2024 年度の世界のニュースを振り返りました。2024 年には、円安が 34 年ぶりに 1 ドル=160 円台を記録し、日本経済の不安定さが国際的な影響を及ぼしました。私は 2024 年 4 月、米国シアトルで開催された材料科学分野の国際会議に 5 年ぶりに参加しました。その際、「材料研究で認められるためには米国で開催される会議に出席する必要があるが、米国の物価高騰により滞在費が大きな負担になる」という現実を痛感しました。こうした状況は、日本の研究者が国際競争力を維持しつつ、世界に貢献するためのハードルを高めています。一方、米大リーグでは大谷翔平選手が史上初の「50-50」を達成し、日本人としてスポーツの世界に新たな歴史を刻みました。彼が世界中の一流選手と競いながらも際立った活躍を見せたことは、国際舞台で活躍する研究者にとっても励みとなる象徴です。

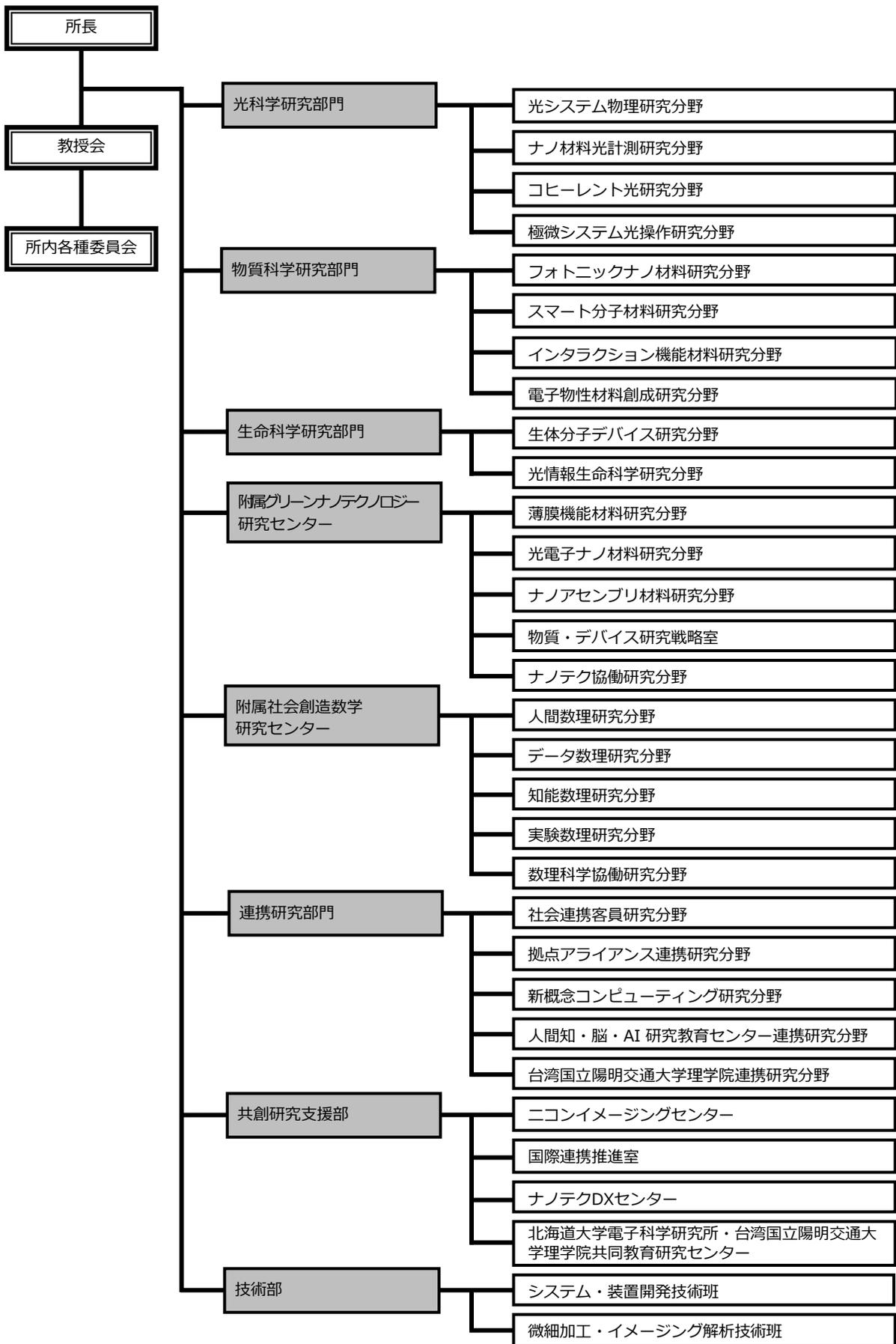
また、2024 年はビジネス AI 元年とも言える年であり、ノーベル物理学賞および化学賞は AI に関する研究に授与されました。物理学賞は機械学習のパイオニアであるジョン・ホップフィールド名誉教授とジェフリー・ヒントン名誉教授に、化学賞は AI を用いたタンパク質構造予測を成功させたデミス・ハサビス氏（英 Google ディープマインド）らに授与されました。AI 技術の進展は 2025 年に入っても続き、世界はますます大きな変革の時代を迎えています。

こうしたグローバルな動向を背景に、北海道大学電子科学研究所は「新しい学際領域の開拓」を使命に掲げ、光科学、物質科学、生命科学、数理科学の各分野を横断する最先端の研究を推進しています。当研究所は、80 年以上の歴史を誇り、エネルギー効率向上や環境負荷の低減を目指し、持続可能な社会の実現に貢献しています。特に、附属グリーンナノテクノロジー研究センターは環境調和型技術の研究開発を、附属社会創造数学研究センターは数理モデリングの基盤の構築を推進し、それぞれ多くの成果を上げています。2025 年 4 月には新たに 3 名の教授を迎え、専任教授 16 名体制となり、分野横断的な研究をさらに促進しやすい環境が整いました。また、2009 年より文部科学省認定「物質・デバイス領域ネットワーク型共同研究拠点」として、国内外の大学・研究機関との連携を強化し、年間 400 件以上の共同研究を展開しています。たとえば、欧州の主要大学との国際共同研究や、国内産業界との技術連携など、幅広いパートナーシップを構築しています。これにより、多くの革新的な研究成果を生み出し、国際的な研究ネットワークの構築や若手研究者の育成にも寄与しています。

電子科学研究所は、自由な発想を尊重し、既存の枠組みにとらわれない研究を推進し続けます。特に、基礎研究に注力しながら、その成果を国際的な共同研究や産業応用を通じて社会に還元し、AI 技術の進展による変革の波にも主体的に対応してまいります。また、地域社会や産業界とも連携し、世界に貢献できる技術イノベーションの創出を目指しています。この「研究活動」は 2024 年度中の電子科学研究所における研究成果をまとめた自己点検報告書です。関係各位には、引き続き忌憚のないご意見・ご批判を賜りますようお願い申し上げます。

2025 年 6 月

北海道大学電子科学研究所 所長  
太田裕道



# 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	7
コヒーレント光研究分野	11
極微システム光操作研究分野	15

### 物質科学研究部門

フォトニックナノ材料研究分野	22
スマート分子材料研究分野	26
インタラクション機能材料研究分野	29
電子物性材料創成研究分野	37

### 生命科学研究部門

生体分子デバイス研究分野	42
光情報生命科学研究分野	49

### 附属グリーンナノテクノロジー研究センター

薄膜機能材料研究分野	56
光電子ナノ材料研究分野	65
ナノアセンブリ材料研究分野	69
ナノテク協働研究分野	76

### 附属社会創造数学研究センター

人間数理研究分野	80
データ数理研究分野	88
知能数理研究分野	100
数理科学協働研究分野	106

### 共創研究支援部

ニコンイメージングセンター	110
国際連携推進室	113
ナノテク DX センター	114

## II. 各種データ

II-1. 研究成果公表に関する各種の統計表	118
II-2. 予算	119
II-3. 外国人研究者の受入状況	121
II-4. 修士学位及び博士学位の取得状況	122

## III. 研究支援体制

III-1. 技術部	126
III-2. 学術情報	127

IV. 資料	
IV-1. 沿革	130
IV-2. 建物	134
IV-3. 現員	134
IV-4. 教員の異動状況	135
IV-5. 構成員	136

## 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、微細加工技術、および数値シミュレーション技術をベースとして、光マニピュレーション、キラル光科学、プラズモニック分光、強結合光反応制御、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

スタッフ

准教授 田口 敦清 (博士 (工学)、2019 年 4 月 1 日着任)

事務補助員 石田 真美

学生

博士課程 竹原 光

修士課程 尾川 功起、永岡 太一

## 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、新世代の光化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、テーパファイバー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

鏡像関係にある分子、すなわちエナンチオマーは、化学式は同一であるにもかかわらず、生体内で全く異なる作用を示すことが知られている。そのため、医薬品や機能性材料の開発においては、エナンチオマーを選択的に識別・制御する手段が極めて重要となる。近年、こうした分子の選択的な光励起や反応制御を実現する物理的指標として、「光学キラリティ」が注目を集めている。光学キラリティは、円偏光と物質の相互作用に深く関わっており、光学キラリティを高めることで、分子レベルでの左右識別に資することが期待される。

本研究では、光の持つスピン角運動量や偏光状態をナノスケールで制御し、光学キラリティを局所的に強化できる構造を、トポロジー最適化という数理的逆問題アプローチによって自動設計する技術を開発した。トポロジー最適化は、設計領域内の材料分布を数理モデルに基づいて最適化する技術であり、人間の直観だけでは設計困難な複雑な構造の探索が可能である。

具体的には、532 nm の右回り円偏光を z 軸の正負両方向から設計領域に入射させ、中心部における電場強度を最大化するよう最適化を行った (図 1(a))。誘電体材料には高屈折率を有する酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) を用い、対称性を持たない初期構造から最適化を進めた。その結果、図 1(b)に示すように、中央の z=0 面にギャップ構造を持ち、ギャップから上下方向に沿って、ねじれたアームを有する三次元構造が得られた。この構造は z=0 面を対称面として鏡像対称の配置となった。さらに、入射する円偏光の回転方向に対して、結合効率が劇的に変化する高い異方性を示した (図 1(c))。

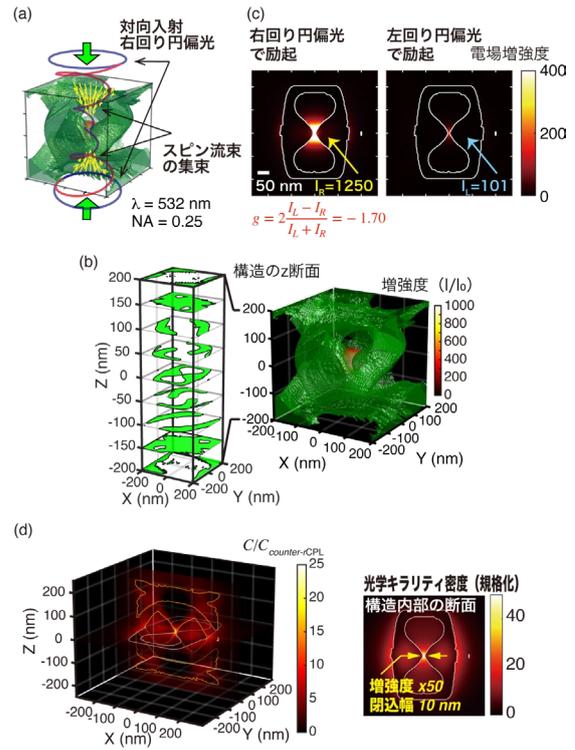


図 1 右回り円偏光に対するトポロジー最適化。(a)最適化計算の概念。(b)トポロジー最適化で得られた構造。カラースケールは電場増強度。(c)左右の円偏光で励起した時のナノギャップ部の電場増強度の違い。(d)構造がもたらす光学キラリティ分布と増強度。

本構造に右回り円偏光を照射すると、ギャップ部での電場強度は顕著に増大し、光学キラリティも約 25 倍に増強された (図 1(d))。さらに、スピン角運動量 (SAM) の分布とその発散を解析した結果、構造内部を伝播する SAM がギャップ部に向かって収束し、そこで消失して局所的にキラリティへと変換される描像が明らかとなった (図 1(a))。光学キラリティとそのフラックスに関する保存則は理論的に知られていたが、今回の解析結果により、具体的なナノ構造によるスピン集束、キラリティ増強現象として具体化されたことで、キラルナノ構造設計の新しい指導的原理に発展することが期待される。

また、図 1(c)に示すように、2アームの本構造が、円偏光の左右の回転方向に対するカップリング効率において顕著な異方性を示したことは、従来の Gammadion 型構造 (4 回対称) ではなく、2 回対称性を持つ構造でも光の回転方向を識別可能であることが数値最適化からも示された結果と言える。抽象的な概念である「対称性」が、トポロジー最適化を通じた光学構造設計において合理的に実装された点は、物理構造設計の自動化技術のポテンシャルを感じさせる新展開として示唆に富む。

現在、螺旋性の異なる構造化光 (光渦や高次スピン状態を含む) に対しても同様の最適化を展開しており、構造に内在する一般的法則の抽出を目指している。加えて、金属材料を用いたナノ構造の最適設計も進行中である。

### 3. 今後の研究の展望

今後は、三次元ナノ加工技術の確立を通じて、設計構造の実際のナノスケールでの実装を図り、光学キラリティに基づく高感度なキラル分子センシング、分光技術、さらには化学反応制御技術への応用を目指す。

### 4. 資料

#### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) [A. Taguchi\\*](#), F. Yamato, and [K. Sasaki](#), Nanoscale chirality enhancement using topology-designed three-dimensional dielectric nanogap antennas, *Phys. Rev. Appl.* 23, L021002 (2025). (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.23.L021002)
- 2) D. P. Gulo, N. Tuan Hung, W-L. Chen, S. Wang, M. Liu, E. I. Kauppinen, H. Takehara, [A. Taguchi](#), T. Taniguchi, S. Maruyama, Y-M. Chang, R. Saito\*, and H-L. Liu\*, Quenching of Defect-Induced Photoluminescence in a Boron-Nitride and Carbon Hetero-nanotube, *J. Phys. Chem. Lett.* 16, 1711-1719 (2025). (DOI: 10.1021/acs.jpcclett.4c03681)
- 3) 【電子研内共著】L. Gong, [A. Taguchi](#), W. Zhou, R. Mitsuya, [H. Ohta](#), and [T. Katayama\\*](#), Ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> freestanding sheets for ultra-high-speed light driven actuator, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 54146-54153 (2024). (DOI: 10.1142/9781786344243\_0005)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

- 1) G. Lérondel, Y.-H. Cho, and [A. Taguchi](#), “UV and Higher Energy Photonics: From Materials to Applications 2024,” *Proceedings of SPIE, Proceedings 13115* (2024).

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) [田口 敦清](#), 深紫外領域の顕微ラマン分光とイメージング技術, *分光研究* 73, 55-65 (2024).

#### 4.4 著書

- 1) [A. Taguchi](#), “Tip-Enhanced Raman Microscopy: Theory, Practice and Applications for Nanomaterials Visualization and Characterization”, *Surface- and Tip-Enhanced Raman Scattering Spectroscopy: Bridging Theory and Applications*, Chapter 24, 721-745, Springer Nature (2024). (ISBN: 978-981-97-5817-3)

#### 4.5 特許

- 1) 片山司, 田口敦清, 周瑋琨, 三津谷伶, “光アクチュエータおよびその製造方法”, 特願 2024-151653, 2024 年 9 月 3 日.

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) [A. Taguchi](#), “Deep-UV Two-Photon Polymerization for 3D Microstructuring of Metal Oxides and Nanopatterning Applications”, *International Conference on Materials Processing Technology 2025 (MAPT 2025)*, Sapporo, Japan, March 6th, 2025.
- 2) [A. Taguchi](#), “Tip- and Surface-enhanced Raman spectroscopy in DUV”, *The 12th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (VASSCAA-12)*, Taipei, Taiwan, October 16th, 2024.
- 3) [A. Taguchi](#), “Exploring chiral nanogap structures using topology optimization”, *SPIE Optics+Photonics*, San Diego, USA, August 18th, 2024.
- 4) [A. Taguchi](#), “Engineering UV-active chiral nanostructures

with inverse topology design”, *SPIE Optics+Photonics*, San Diego, USA, August 18th, 2024.

- 5) [A. Taguchi](#), “Exploring chiral nanogap structures using inverse topology design”, *META 2024 (14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics)*, Toyama, Japan, June 17th, 2024.
- 6) [A. Taguchi](#), “Advanced material processing with multiphoton DUV lithography”, *The 7th International Workshop on UV Materials and Devices (IWUVM 2024)*, Toyama, Japan, June 5th, 2024.
- 7) [A. Taguchi](#), K. Sasaki, “A proposed design strategy of chirality-enhanced gap antennas using topology optimization”, *Optics & Photonics International Congress 2024 (OPIC 2024)*, Yokohama, Japan, April 24th, 2024.

##### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) [田口敦清](#), “計算機逆設計で拓くキラル誘電体ナノ光学”, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会 特別シンポジウム, 広島国際会議場, 広島, 2025 年 1 月 23 日.

##### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) [H. Takehara](#), “3D printing of metal nanostructures via two-photon polymerizable Pt nanoclusters”, *The 12th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (VASSCAA-12)*, Taipei, Taiwan, October 16th, 2024.

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) [三津谷伶](#), [周瑋琨](#), [田口敦清](#), [太田裕道](#), [片山司](#), “光で大きく速く繰り返し変形する BiFeO<sub>3</sub> 自立膜”, 第 72 回応用物理学会春期学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 野田, 2025 年 3 月 15 日.
- 2) [田口敦清](#), [笹木敬司](#), “アルミニウムナノ構造のトポロジー最適化と深紫外キラルプラズモンニックナノアンテナ設計”, 第 72 回応用物理学会春期学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 野田, 2025 年 3 月 14 日.
- 3) [三津谷伶](#), [周瑋琨](#), [田口敦清](#), [太田裕道](#), [片山司](#), “光で大きく速く繰り返し変形する BiFeO<sub>3</sub> 自立膜”, 第 61 回応用物理学会北海道支部/第 21 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 釧路市生涯学習センターまなぼつと幣舞, 釧路, 2024 年 11 月 3 日.
- 4) [周瑋琨](#), [田口敦清](#), [三津谷伶](#), [Diwen Chen](#), [太田裕道](#), [片山司](#), “強誘電 PLZT 自立膜の作製と光アクチュエータ特性”, 第 61 回応用物理学会北海道支部/第 21 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 釧路市生涯学習センターまなぼつと幣舞, 釧路, 2024 年 11 月 3 日.
- 5) [永岡太一](#), [竹原光](#), [田口敦清](#), “ドリフト補正システムを搭載した高安定クライオ蛍光顕微鏡の開発”, 第 61 回応用物理学会北海道支部/第 21 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 釧路市生涯学習センターまなぼつと幣舞, 釧路, 2024 年 11 月 2 日.
- 6) [田口敦清](#), [笹木敬司](#), “Optical chirality enhancement at the nanoscale using inversely-designed 3D nanogap antennas”, 第 85 回応用物理学会秋期学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, 2024 年 9 月 17 日.
- 7) [尾川功起](#), [田口敦清](#), “多光子吸収を活用した深紫外マスクレス・リソグラフィ”, 2024 年度精密工学会北海道支部学術講演会, 苫小牧工業高等専門学校, 苫小牧, 2024 年 8 月 17 日.
- 8) [竹原光](#), [田中慎一](#), [田口敦清](#), “レーザー多光子造形による金属ナノ構造の 3D プリンティング”, 2024 年度精密工学会北海道支部学術講演会, 苫小牧工業高等専門学校, 苫小牧, 2024 年 8 月 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) [田口敦清](#), “深紫外光による微細技術”, 分光基礎セミナー, オンライン, 2024 年 7 月 29 日.

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) 日本分光学会紫外フロンティア分光部会シンポジウム「分子固有の吸収や発光を活用したコンテナラリ一分光研究」オンライン, 2024年12月20日.

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 片山司 (電子科学研究所, 北海道大学), “薄膜アクチュエーターに関する研究”.
- 2) 長島一樹 (電子科学研究所, 北海道大学), “分子センサー開発に関する研究”.
- 3) 田中慎一 (呉工業高等専門学校), “2光子3次元プリンタに関する研究”.

##### b. 国際共同研究

- 1) H.-L. Liu (Physics, National Taiwan Normal University), “UV Raman and photo-luminescence characterization of hetero-nanotubes”.
- 2) Junze Zhou (Molecular Foundry, Lawrence Berkeley National Laboratory) “Optical characterization of 2D semiconductor nanomaterials”.

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 田口敦清 (代表), 新学術領域研究 A (計画研究), “光の螺旋性を操るプラズモニクスの開拓とナノキラル物質操作”, 2022年10月~2027年3月.
- 2) 田口敦清 (代表), 基盤研究 A, “深紫外ナノラマン・イメージング顕微鏡の開発と応用”, 2023年4月~2028年3月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

##### c. 民間助成金

- 1) 田口敦清 (代表), 天田財団・重点研究開発助成, “金属ナノクラスターインクと多光子励起深紫外重合による金属ナノ3Dプリンター”, 2024年12月~2026年3月.

#### 4.10 受賞

- 1) 尾川功起 (多光子吸収を活用した深紫外マスクレス・リソグラフィ), 精密工学会 2024年度北海道支部学術講演会, 優秀プレゼンテーション賞 (精密工学会北海道支部) 2024年8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) 田口敦清, 会誌「光学」編集委員 (日本光学会), 2025年1月~現在.
- 2) 田口敦清, 紫外フロンティア分光部会幹事 (日本分光学会), 2018年2月~現在.
- 3) 田口敦清, UV and Higher Energy Photonics, Chair (SPIE

Optics+Photonics), 2018年9月~現在.

- 4) 田口敦清, Program Committee (SPIE/SOC Photonics Asia), 2019年10月~現在.

- 5) 田口敦清, 北海道支部支部幹事 (日本光学会), 2023年1月~2024年12月.

##### c. 兼任・兼業

- 1) 田口敦清, 大阪大学招へい研究員, 2019年4月~現在.

##### d. 外国人研究者の招聘

- 1) Dr. Junze Zhou, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024年5月15日~31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、光情報システム学特論、田口敦清、秋ターム
- 2) 工学部、電磁気学、田口敦清、秋ターム
- 3) 工学部、電気電子工学実験 V、田口敦清、後期

##### 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. アウトリーチ活動

該当なし

##### h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

##### i. 客員教員・客員研究員など

- 1) Dr. Junze Zhou, 客員研究員, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024年5月15日~31日.

##### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位: 2人

- 1) 尾川功起, 情報科学院, 修士 (情報科学), 多光子吸収を活用した深紫外マスクレスリソグラフィ.
- 2) 永岡太一, 情報科学院, 修士 (情報科学), ドリフト補正システムを搭載した高安定クライオ分光顕微鏡の構築.

博士学位: 0人

該当なし

## ナノ材料光計測研究分野

### スタッフ

教授 雲林院 宏 (博士 (理学)、2015年7月1日着任)

准教授 平井 健二 (博士 (工学)、2017年12月1日着任)

助教 Taemaitree Farsai (博士 (工学)、2022年3月21日着任)

事務補助員 齊藤 奈穂子

### 学生

博士課程 Ya Tian, Jiangtao Li, Konstantin Kachruin

修士課程 大森 健司、石田 郁巳、熊谷 怜士、長阪 雄介、吉岡 跳生、阿部 奎太、山下 雄大

学部 今井 俊輔、高橋 大夢、波田 玲斗

## 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

ナノ粒子を利用した光熱療法 (PTT) は、作用を時空間的に制御可能することができるため、副作用を最小限に抑えることができる新たな腫瘍治療法として注目を集めている。しかし、多くの研究が実験室レベルでの有望な結果を示している一方で、PTT によるがん細胞や腫瘍組織の生理学的応答、例えばストレス誘導性の細胞挙動や細胞間シグナル伝達については未だ解明されていない。例えば、細胞外シグナル制御キナーゼ (ERK) 活性は、細胞増殖・分化、適応・生存、アポトーシスに重要な役割を果たすため、治療効果を予測するためのモニターすべきシグナル経路の一つである。しかし、特に固形腫瘍においてこれらシグナル経路を解析する有効な手法が乏しく、知見が限られているため、治療メカニズムの理解、ひいては治療法の発展を妨げている。

本研究では、貴金属ナノ粒子のプラズモン励起に伴う局所光熱効果が固形腫瘍内の細胞挙動に与える影響を、単一細胞レベルで ERK 活性の変化をモニタリングすることで調査した。光熱変換体として金ナノスター (GNS) を用い、3 次元がんスフェロイドモデル内で局所的な温度上昇を誘導した。ERK 活性は FRET バイオセンサーにより可視化し、2 光子顕微鏡および 3 次元画像解析ツール「3DeeCellTracker」と組み合わせリアルタイムで観察した。この方法で得られた知見は、次世代のナノ粒子媒介光熱療法の開発に重要な示唆を与え、3D がんモデルにおける複雑な生物学的プロセスの理解を促進する実用的なツールとなる。

本研究で用いた金ナノスター (GNS) は、既報に基づく

種結晶法により合成した。粒子表面はシステアミンで修飾し、細胞やスフェロイド表面への吸着を促進した。システアミン修飾 GNS (GNS-Cys) の形状やサイズは STEM で評価し (図 1A)、多尖頭の星形構造が確認できた。平均粒径は  $37.8 \pm 6.5$  nm、コア直径は  $101.3 \pm 15.0$  nm であった。GNS および GNS-Cys の表面電荷はゼータ電位測定で確認し (図 1B)、GNS-Cys の正の電位へのシフト ( $+19.5 \pm 5.1$  mV) はシステアミン修飾の成功を示している。また、GNS-Cys の消光スペクトルは NIR 領域に広がる広帯域プラズモンバンドを示し、ピークは 890 nm 付近にあった (図 1C)。光熱変換効率は 32.4% と推定され、近赤外光照射による効率的な加熱が可能であることが示された。

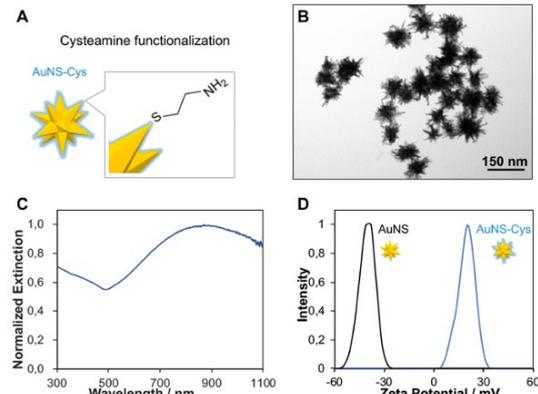


図 1: AuNS-Cys の特性評価。(A) システアミンによる AuNS の機能化の模式図。(B) AuNS-Cys の STEM 画像。(C) 水中における AuNS-Cys の消光スペクトル。(D) AuNS (黒線) および AuNS-Cys (青線) のゼータ電位プロファイル。

EKAREV-NLS という FRET バイオセンサーを発現する HeLa 細胞から 3D スフェロイドを作製し、96 ウェルの U 字型プレートで培養した。播種から 48 時間後に GNS-Cys を添加し、10 分間インキュベート後、非吸着粒子を除去するため洗浄した。続いて、スフェロイドをガラス底ディッシュに移し、850 nm の 2 光子励起レーザーを用いて観察した。共焦点蛍光画像から、GNS-Cys は主にスフェロイドの周辺層に局在し、大部分の粒子が表面に付着していることが確認された (図 2)。

GNS 媒介の光熱刺激により、スフェロイド内部のがん細胞において FRET 強度比が急激に上昇し、ERK 活性が活発化した。この活性は時間とともに徐々に減少し、10 分後には基礎状態に戻った。GNS-Cys は主にスフェロイドの周辺部に位置しているため、光熱刺激は外層の細胞に集中して起こると考えられる。興味深いことに、スフェロイド表面の数層内側の細胞でも ERK 活性が観察され、局所的な熱ストレスによる細胞間シグナル伝達が生じている可能性が示された。

AuNS-Cys と共に 10 分間インキュベート後、850 nm の二光子励起で取得した #T-HeLa スフェロイドの z スタックから抽出した低倍率 (K) および高倍率 (L) の xy 蛍光画像。マゼンタ色は細胞 (YFP 蛍光) を示し、緑色は AuNS-Cys の光ルミネッセンスを示す (CFP 蛍光も緑チャンネルで検出され、CFP と YFP の重なりは白色として表示される)。

「3DeeCellTracker」を用いて、スフェロイド内の単一細胞から時間経過に伴う ERK シグナルの変動を解析した。全細胞の平均値より 2 標準偏差以上の FRET 効率を示す細胞を「ERK 活性細胞」と定義し、その頻度を時間経過とともに

にプロットした (図 3)。コントロールスフェロイドの基礎 ERK 活性は  $3.9 \pm 0.6\%$  と低く、これは高密度培養に伴う接触阻害による増殖抑制が背景にあると考えられる。対照的に、GNS-Cys を含むスフェロイドでは、2 光子励起直後に  $53.7 \pm 11.0\%$  の細胞で ERK 活性の一過性上昇が認められた。レーザー照射開始 15 分後には活性細胞頻度は大幅に減少し、95 分まで大部分の細胞で活性が抑制された。

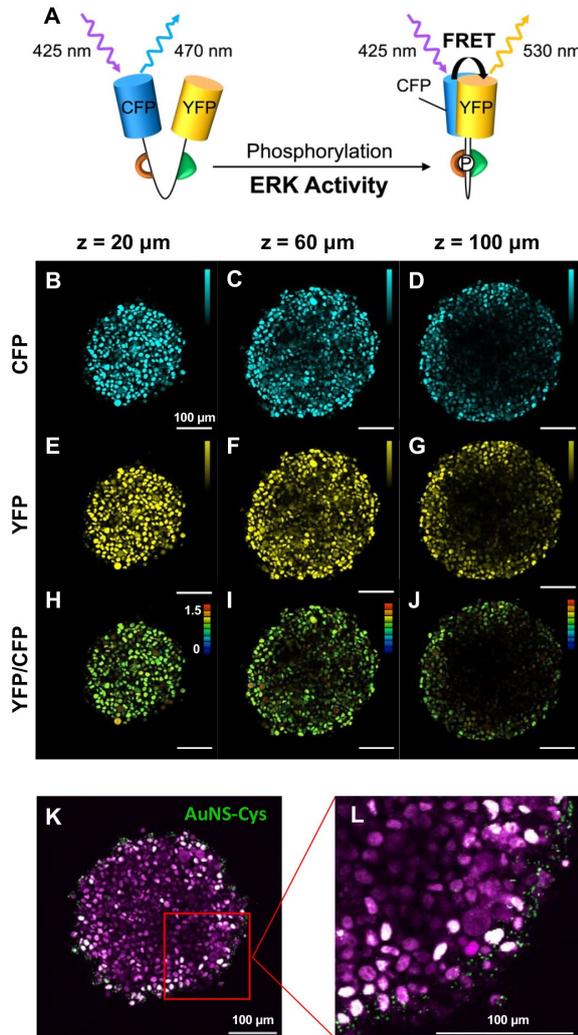


図 2: AuNS-Cys の特性評価。(A) システアミンによる AuNS の機能化の模式図。(B) AuNS-Cys の STEM 画像。(C) 水中における AuNS-Cys の消光スペクトル。(D) AuNS (黒線) および AuNS-Cys (青線) のゼータ電位プロファイル。

さらに、穏やかな光熱刺激 ( $1.5 \text{ mW/mm}^2$ ) 下での細胞増殖への影響を観察した。ERK 活性は細胞増殖を制御することが知られており、その活性増加は細胞分裂を促進する。光刺激後 2 時間以内に核分裂を起こした細胞数を解析したところ、光熱刺激により ERK 活性の頻度とともに細胞分裂頻度も有意に増加した。本手法は、スフェロイド内の単一細胞レベルで ERK 活性と光熱応答を可視化でき、照射エネルギー依存的な細胞の活性化や抑制イベントを明らかにする。

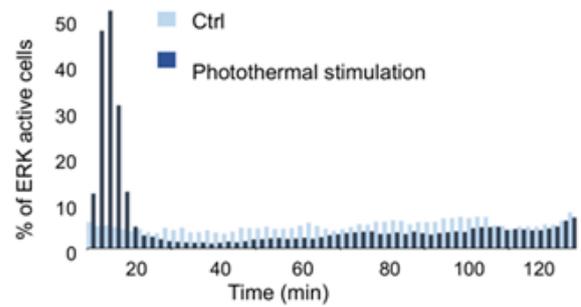


図 3: コントロール (紺色) および AuNS-Cys 誘発熱条件 (シアン) における、時間の関数としての ERK 活性細胞の割合。

### 3. 今後の研究の展望

本研究により、スフェロイド内の細胞が局所的に発生する熱にどのように応答するかについて新たな知見が得られた。未刺激のスフェロイドでは、少数の細胞がランダムかつ自発的に ERK 活性を示すことが確認された。一方、プラズモン誘導による熱刺激を与えると、ERK 活性を示す細胞の数が劇的に増加した。また、ERK シグナルは局所的な熱源から数マイクロメートルにわたり伝播し、このシグナル伝播は細胞間コミュニケーションに関連している可能性が高いことが示された。これらの独自の知見は、光熱治療の効果予測に不可欠であり、次世代の光熱治療法の設計に資すると考えられる。さらに、本手法は固形腫瘍内の単一細胞レベルで多様な治療刺激の効果を解析する汎用的なツールとしても期待される。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) Y. Tian, Q. Zhang, K. Hirai, H. Wen, G. Feng, J. Li, F. Taemaitree, T. Inose, K. Kanekura, and H. Uji-i\*, Spatially heterogeneous dynamics of droplets formed by arginine-rich dipeptides and poly-A RNA during liquid-liquid separation, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **768**, 403–409 (2024). (DOI:10.1080/15421406.2024.2335223)
- 2) Y. Iwai, S. Kusumoto, R. Suzuki, M. Tachibana, K. Komatsu, T. Kikuchi, S. I. Kawaguchi, H. Kadobayashi, Y. Masubuchi, Y. Yamamoto, Y. Ozawa, M. Abe, K. Hirai, B. Le Ouay, M. Ohba, and R. Ohtani\*, Mechanical properties of modulative undulating layers in two-dimensional metal-organic frameworks, *Chem. Mater.* **36**, 5446–5455 (2024). (DOI:10.1021/acs.chemmater.4c00355)
- 3) K. Hirai\* and H. Uji-i, Molecular assembly in optical cavities, *Chem. Asian J.* **20**, e202401262 (2025). (DOI:10.1002/asia.202401262)
- 4) 【電子研内共著】I. Sasaki, K. Takahashi, F. Taemaitree, T. Nakamura, J. A. Hutchison, H. Uji-i, and K. Hirai\*, Optical cavity enhancement of visible light-driven photochemical reaction in the crystalline state, *Chem. Commun.* **61**, 2766–2769 (2025). (DOI:10.1039/D4CC05598E)

### 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

- 1) K. Hirai, H. Uji-i, "Reactions and Assembly under Vibrational Strong Coupling", Polariton Chemistry: Molecules in Cavities, Chapter 12, John Wiley & Sons (2025). (ISBN: 978-1119783299)
- 2) Edited by H. Kasai, H. Uji-i, J. Hofkens, "Nanomedicines for Effective Cancer Therapy (Nanomedicine and Nanotoxicology)" 2024/10/24, Springer. (ISBN-10: 9819752876, ISBN-13: 978-9819752874)

#### 4.5 特許

該当なし

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) K. Hirai, "The Effects of Vibrational Strong Coupling on Crystallization and Reactions", E-MRS 2024 Spring Meeting, Strasbourg, France, May 28th, 2024.

##### b. 招待講演 (国内学会)

該当なし

##### c. 一般講演 (国際学会)

該当なし

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 熊谷怜士, Taemaitree Farsai, 平井健二, 雲林院宏, "探針増強ラマン分光法のプローブ開発", 第 85 回応用物理学学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, 2025 年 9 月 18 日.
- 2) 石田郁巳, 雲林院宏, 平井健二, Farsai Taemaitree, "抗体結合ナノ薬剤の作製および抗がん活性評価に関する研究", 日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2024, 仙台国際センター, 宮城, 2025 年 10 月 28 日.
- 3) 長阪雄介, 雲林院宏, 平井健二, Farsai Taemaitree, "一酸化窒素による単一平滑筋細胞の弛緩", 日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2024, 仙台国際センター, 宮城, 2025 年 10 月 28 日.
- 4) 河内遥輝, 雲林院宏, 平井健二, Farsai Taemaitree, "がん関連線維芽細胞を用いた多細胞スフェロイドの作製と特性評価", 日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2024, 仙台国際センター, 宮城, 2025 年 10 月 28 日.
- 5) 吉岡跳生, 平井健二, Farsai Taemaitree, 雲林院宏, "光共振器を用いた分子集合体の光物性の変化", 第 72 回応用物理学学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 千葉, 2025 年 3 月 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) 平井健二, "共振器強結合による集合・反応の操作", プラズモニク化学シンポジウム, 北海道大学, 北海道, 2024 年 6 月 20 日.
- 2) 平井健二, "強結合を利用した分子集合の科学", 第 46 回 Chem-Station バーチャルシンポジウム, 2024 年 9 月 20 日.
- 3) K. Hirai, "Assembly and Reactions in Cavity Strong Coupling", ISSP International Workshop, The University of Tokyo, 東京大学物性研究所, 千葉, October 28th, 2024.
- 4) K. Hirai, "Molecular Assembly in Optical Cavities", Japan-France Workshop on Photo-Electro-Responsive Molecular Materials, Université Paris-Saclay, France, March 19th, 2025.
- 5) 平井健二, "光共振器を使った分子集合", フォトエキサイトニクス研究拠点第 7 回研究会, 北海道大学, 北海道, 2025 年 3 月 24 日.

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 高野勇太 (北海道大学)
- 2) 中村貴義, 高橋仁徳 (北海道大学)
- 3) 金蔵孝介 (東京医科大学)

##### b. 国際共同研究

- 1) Prof. Steven De Feyter (KU Leuven, Belgium)
- 2) Prof. Johan Hofkens (KU Leuven, Belgium)
- 3) Prof. Susana Rocha (KU Leuven, Belgium)
- 4) Dr. James A. Hutchison (University of Melbourne, Australia)

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 雲林院宏 (代表), 平井健二, 学術変革領域研究 (A), "メゾ強結合", 2023 年 4 月~2027 年 3 月.
- 2) 雲林院宏, 松崎典弥, 金蔵孝介, 猪瀬朋子, 笠井均, 基盤研究 (A), "単一細胞エンドスコピック増強ラマンによる薬剤の相分離局在化解明と創薬への応用", 2021 年 4 月~2024 年 3 月.
- 3) 平井健二 (代表), 基盤研究 (B), "自己集合による規則配列を利用した高輝度ポラリトン発光", 2024 年 4 月~2026 年 3 月.
- 4) 雲林院宏 (代表), 挑戦的研究 (萌芽), "プラズモン導波路を利用したリモート励起 fs-SRS の開発", 2023 年 6 月~2024 年 3 月.
- 5) 平井健二 (代表), 挑戦的研究 (萌芽), "光共振器を用いた結晶化を誘導する方法の開発", 2024 年 6 月~2025 年 3 月.
- 6) 笠井均 (代表), 雲林院宏, 根本知己, 石岡千加史, 小関良卓, 基盤研究 (A), "がん細胞特有の刺激に応答し薬物を放出する新規抗がん薬ナノ粒子の開発", 2022 年 4 月~2025 年 3 月.
- 7) 猪瀬朋子 (代表), 雲林院宏, 古川修平, 基盤研究 (B), "細胞集団操作に向けた化学的-機械的刺激の運動を可能にする単一細胞内視鏡技術の開発", 2023 年 4 月~2025 年 3 月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 雲林院宏 (代表), 研究拠点形成事業, "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", 2019 年 4 月~2024 年 3 月.

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

該当なし

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

該当なし

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 平井健二, 応用物理学学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会 幹事

##### 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) 工学部、応用物性工学、雲林院宏、平井健二、秋ターム
- 2) 情報科学院、ナノマテリアル特論、雲林院宏、平井健二、Taemaitree Farsai、夏ターム
- 3) 工学部、情報エレクトロニクス演習、平井健二、春ターム
- 4) 工学部、生体情報工学演習 II、平井健二、秋ターム
- 5) 工学部、生体情報工学実験 I、Taemaitree Farsai、春ターム
- 6) 工学部、生体情報工学実験 II、Taemaitree Farsai、秋ターム

**f. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）**

該当なし

**g. アウトリーチ活動**

該当なし

**h. 新聞・テレビ等の報道**

該当なし

**i. 客員教員・客員研究員など**

該当なし

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位：6人

- 1) 大森 健司, 情報科学院, 修士 (情報科学) 光熱刺激に伴うがん細胞の ERK 活性モニタリング.
- 2) 石田 郁巳, 情報科学院, 修士 (情報科学) 抗体結合ナノ薬剤の作製および抗がん活性評価.
- 3) 河内 遥輝, 情報科学院, 修士 (情報科学) ナノ DDS のための生体内の環境を模倣した 3 次元培養モデルの作製.
- 4) 熊谷 怜士, 情報科学院, 修士 (情報科学) 走査型プローブ顕微鏡による修飾グラフェンの分析.
- 5) 長阪 雄介, 情報科学院, 修士 (情報科学) 一酸化窒素による単一ヒト大動脈平滑筋細胞の弛緩の観察.
- 6) 吉岡 跳生, 情報科学院, 修士 (情報科学) 分子集合体を利用したポラリトン形成.

博士学位：0人

該当なし

## コヒーレント光研究分野

### スタッフ

教授 西野 吉則 (博士 (理学)、2010 年 4 月 1 日着任)

准教授 鈴木 明大 (博士 (工学)、2016 年 4 月 1 日着任)

学術研究員 新井田 雅学

派遣社員 幸谷かおり

事務補助員 尾崎 麻美子、原田 恵子、大西 安奈

### 学生

修士課程 生田 悠介、野崎 峻平

学部 鶴田 三悟、渡邊 立希、竹内 健人、林 郁歩

## 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粒子等の可視化

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。PCXSS 法は、XFEL を用いた溶液試料に対するコヒーレントX線回折である。測定したコヒーレント回折パターンに位相回復計算を適用することにより、試料像を再構成できる。

PCXSS 法では、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できる。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、創成科学研究棟のクリーンルーム内の微細加工装置群を利用している。

本年度は、単粒子X線レーザーイメージングの実現に向けたグラフェン溶液セルの開発を科研費萌芽研究 (研究代表者: 鈴木明大) の一環として進めた。電子顕微鏡用の試料ホルダとして直径 $\sim 1\text{--}2\ \mu\text{m}$ 程度の自立グラフェン膜がすでに市販されている。しかしながら、これをX線レーザー

イメージング測定へ応用すると、入射X線ビームの裾野とグラフェンを支える孔あきカーボン膜がかすかに干渉し、データ解析上無視できない背景散乱が発生するという課題があった。まず、自立膜の大面积化のため、多層グラフェンを安定的に合成できる化学気相成長 (CVD) レシピを探索した。さらに、孔あきカーボン膜つき透過型電子顕微鏡用銅グリッド (TEM グリッド) への転写プロセスにおいて、洗浄工程等を洗練化することで市販品の100倍以上の面積をもつ自立グラフェン膜を実現した (図1)。

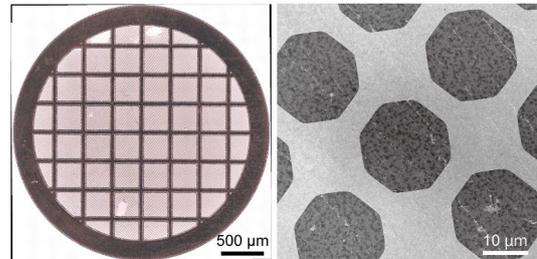


図1. 大面积自立グラフェン膜のデジタルマイクロコブ像と走査型電子顕微鏡像。

開発した大面积自立グラフェン膜からの背景散乱強度をXFEL 施設 SACLA を用いて評価した。生体粒子測定用に独自に開発した膜厚 $50\ \text{nm}$ 以下の窒化ケイ素 (SiN) 薄膜と比較したところ、特に高散乱角において、グラフェン膜からの背景散乱強度が低いことが明らかになった。一方、低角領域では、グラフェンからの背景散乱強度は、SiN 薄膜を上回り、これはグラフェン上のコンタミネーション由来と解釈される。

このコンタミネーションの混入経路の特定と元素分析を目的として、収差補正電子顕微鏡による原子分解能観察を実施した。その結果、先行研究で存在が知られていたシリコンや酸素、炭素のコンタミネーションに加え、重金属である銅などで構成される原子スケールから数ナノメートル程度のコンタミネーションの存在が明らかになった (図2)。さらに、その結果をグラフェンの転写プロセスへフィードバックすることで、コンタミネーションを低減できることを確認した。

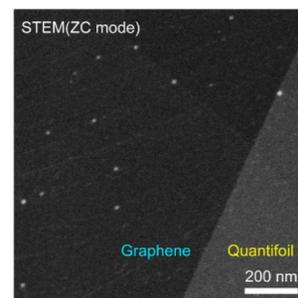


図2. グラフェン上のコンタミネーションの収差補正電子顕微鏡による観察。コンタミネーション粒子が白い輝点として見えている。

更なるコンタミネーションの除去を目指して、コンピュータ制御により自動化されたフェムト秒レーザーシステムを用い、グラフェン膜の大面积クリーニングに適したレーザー照射パラメータを探索した。フェムト秒レーザーの中心波長を $520\ \text{nm}$ とした。また、試料位置でのビームサイズは、20倍の対物レンズによって自立膜の大きさとほぼ等しい直径 $\sim 20\ \mu\text{m}$ とした。クリーニングに最適な条件を見つけ

るため、出力を約1Wから20Wまで変化させながら数千の自立グラフェン膜に照射した。さらに、対物レンズを20倍から100倍に変更することで、より強力なレーザーを照射する実験も実施した。その後、走査型電子顕微鏡によって、フェムト秒レーザーを照射したグラフェン膜を改めて観察した。その結果、20倍の対物レンズを利用した場合は、最大出力であっても、照射前後でグラフェンの表面状態の変化は認められなかった。一方で、100倍の対物レンズを利用した高強度照射の場合は、グラフェン表面のコンタミネーションのSEM像コントラストに変化が見受けられた。コンタミネーションの部分的な除去や組成変化などが考えられ、今後さらなる探索を行う。

大面積自立グラフェン膜が試料支持膜として機能するかを確かめるため、Auナノ粒子溶液を自立グラフェン膜に滴下・自然乾燥させ、光学顕微鏡と電子顕微鏡で評価した。グラフェン膜に試料展開による破損は見られず、SiN膜と同様にAuナノ粒子を保持できることを確認した。さらに、SACLAにおいて、Auナノ粒子からシングルショット回折パターンを取得することにも成功した。

### (b) X線自由電子レーザーを用いた燃料電池触媒材料の無損傷ナノレベル観察

XFELを用いた燃料電池触媒材料の無損傷ナノレベル観察を、NEDO「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」(研究分担者:西野吉則)のPEFC評価解析プラットフォームの一環として進めた。

カーボンニュートラルの実現に向けて、水素と酸素の化学反応により発電を行う燃料電池に対する期待が高まっている。固体高分子型燃料電池(PEFC)は作動温度が低く、軽量でコンパクトであり、燃料電池自動車などで実用化されている。PEFCの触媒層には触媒金属を担持したカーボンブラック(CB)と、CBを薄く覆うアイオノマーが存在する。触媒性能を向上させるためにはアイオノマー被覆状況の理解が重要であるが、従来の電子線やX線を用いた解析では、放射線照射によるアイオノマーの損傷が懸念された。そこで、XFELを用いた放射線損傷のない解析を進めた。研究では100nm程に集光したXFELビームを利用したMAXIC-Sを用いた。コヒーレント回折イメージングでは、試料はビームサイズよりも小さな一次粒子に限られるが、SAXS解析は、一次粒子のみならず粒子凝集体(アグロメレート)にも適用でき、適用範囲が広がる。

燃料電池触媒インクのSACLA測定データからアイオノマー被覆状態を解析する「ダメージフリー100-nm局所コヒーレントSAXS解析」と名付けた新規手法を開発した。MAXIC-Sが実現した100ナノメートル集光XFELによるコヒーレント回折データから、XFELが1次粒子に命中したか、粒子集合体に命中したか、あるいは周辺の触媒金属に当たったかを判別でき、各分類で特徴的な散乱曲線がSACLA実験で得られた。

実験データの解釈のため、反応分子動力学シミュレーションによるインクの全原子モデルを用い、MAXIC-S測定条件を考慮したコヒーレント回折パターンの数値シミュレーションを実施した。シミュレーションでは全構造だけでなく、触媒インクを構成するカーボン、アイオノマー、白金それぞれからのコヒーレント回折パターンも計算でき、詳細な考察が可能となる。さらに、触媒インクの粒子凝集体全原子モデルを作成し(図3)、コヒーレント回折パターンのシミュレーションを行った。

SACLA測定データと全原子モデルによるシミュレーションとの比較から、100ナノメートル局所領域ごとの散乱曲線の差異はアイオノマー被覆量の違いに起因することが判明した。このX線散乱曲線の特徴を「アイオノマースロープ」

と命名した。半世紀に及ぶX線散乱によるアイオノマー研究において、バルクアイオノマーは観察可能である一方、触媒インク表面を薄く覆うアイオノマーは検出不可能とされてきた。本研究は触媒インクを薄く被覆するアイオノマーをX線で捕捉した初の報告となる。また、シングルショットXFEL解析により、100ナノメートル局所領域ごとのアイオノマー被覆の不均一性を捉えることに成功した。本手法は、PEFC触媒性能の最適化において重要な知見を提供し、カソード触媒の利用効率向上に貢献することが期待される。

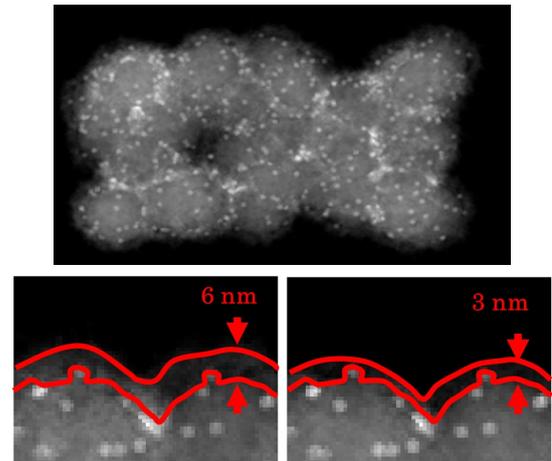


図3 アイオノマーの被覆厚を変えた触媒インクの粒子凝集体の全原子モデル。

### (c) 放射光X線を用いたフーリエタイコグラフィの構築

汎用的X線顕微鏡・顕微CTを拡張する、X線フーリエタイコグラフィの開発に着手した。X線顕微鏡は、(A)対物レンズを用いるタイプ(結像型透過X線顕微鏡(TXM)など)と、(B)コヒーレント回折データから位相回復計算により試料像を得るタイプ(コヒーレント回折イメージング(CDI)や走査型のタイコグラフィ)に大別される。(B)は高度な計測技術であるが、測定が煩雑で、試料像を得るには位相回復計算の手間が必要であるため、最初の報告から四半世紀が経つが、いまだ汎用的な手法とは言い難い。汎用性が求められる放射光施設では通常(A)が用いられている。近年、可視光分野で急速に発展しているフーリエタイコグラフィは(A)と(B)の中間に位置し、低倍率の安価な光学顕微鏡を用いて、高分解能な位相イメージングを実現した優れた手法である。フーリエタイコグラフィは、従来のタイコグラフィの実空間と逆空間を入れ替えた走査型的手法で、実空間の像を観察する。まず従来の結像型透過X線顕微鏡の像を見て、より分解能を高めたい、よりコントラストを高めたいというニーズがあれば、フーリエタイコグラフィ測定にそのまま移行できる。既存の放射光顕微鏡・顕微CTとの親和性が極めて高い、汎用的かつ高度な観察法である。

従来のコヒーレント回折イメージングは、微弱なスペックルをオーバーサンプリングしなければならないという原理上、短波長のX線ほど利用が難しく、X線の高い透過性の恩恵を十分に活用できていなかった。フーリエタイコグラフィでは、従来のコヒーレント回折イメージングでは困難であった、高い透過性を有する高エネルギーX線が利用できる。この特長により、分厚い試料内部の非破壊観察や、様々な環境下での観察に、幅広い応用が期待される。

大型放射光施設SPring-8 BL20XUのTXM装置を利用して、30 keVのX線を用いたフーリエタイコグラフィの構築

に着手した。まずは、テストチャートに対する測定およびデータ解析を行い、得られた試料像の位相の定量性の検証を進めている。

### 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。XFEL を用いて、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する。学術研究に加えて、燃料電池材料など産業界と連携した研究を今後さらに発展させる。また、今年度より開始した高エネルギー X 線によるフーリエタイコグラフィの構築に関しては、まずは手法の確立を目指し、将来的には金属基複合材料 (MMC) など産業上も重要な試料の観察に繋げる。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

該当なし

### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 山本雅貴, 松浦滉明, 吾郷日出夫, 熊坂崇, 馬場清喜, 長谷川和也, 鈴木明大, “固定ターゲットを軸とした生体高分子動的構造解析の新技术開拓”, 生体の科学, 医学書院, 75(3), 202-206 (2024).

### 4.4 著書

該当なし

### 4.5 特許

該当なし

### 4.6 講演

#### a. 招待講演 (国際学会)

該当なし

- 1) Y. Nishino, “Damage-free 100-nm-localized coherent SAXS analysis of fuel cell catalysts using X-ray free-electron lasers”, Cutting-Edge in Soft Matter Science 2024 (CeSMS 2024), Kitakyushu, Japan, October 31st, 2024.
- 2) A. Suzuki, “Single-particle Imaging with Nanofocused X-ray Free-electron Lasers”, 2024 RIES-CEFMS Symposium, Hsinchu, Taiwan, Japan, November 28th, 2024.
- 3) A. Suzuki, “Micro-liquid enclosure array for XFEL-based coherent diffractive imaging”, SACLA Users’ Meeting 2025, Sayo, Hyogo, Japan, March 4th, 2025.

#### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) 鈴木 明大, “集光 X 線レーザーによる生体分子イメージングへの挑戦”, 第 16 回 日本放射光学会 若手研究会, 神奈川県小田原市, 2024 年 9 月 3 日.

#### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) A. Suzuki, Y. Niida, Y. Joti, Y. Bessho, Y. Nishino, “Recent advances in femtosecond X-ray laser imaging at SACLA”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 10, 2024.

#### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 野崎 峻平, 新井田 雅学, 鈴木 明大, 城地 保昌, 別所 義隆, 西野 吉則, “X 線自由電子レーザーイメージングの効率化に向けた高集積溶液試料セルの開発”, 第 38 回日本放射光学会年会 放射光科学合同シンポジウム, 茨城県つくば市, 2025 年 1 月 12 日.
- 2) 生田 悠介, 新井田 雅学, 鈴木 明大, 城地 保昌, 別所 義隆, 西野 吉則, “XFEL100-nm 局所解析による燃料電池触媒インクのアイオノマー被膜構造の評価”, 第 38 回日本放射光学会年会 放射光科学合同シンポジウム, 茨城県つくば市, 2025 年 1 月 12 日.

#### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)

- 1) 西野 吉則, “プラットフォーム材料の解析及び解析技術の高度化の技術開発”, NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2024, ハイブリッド, 2024 年 7 月 19 日.
- 2) 西野 吉則, “担体構造・アイオノマー被覆状態の解析”, NEDO PEFC 評価・解析プラットフォーム第 8 回材料分析/解析 G 技術討論会, ハイブリッド, 2024 年 8 月 29 日.
- 3) 西野 吉則, “X 線自由電子レーザーを用いた燃料電池触媒インクのアイオノマー被覆構造の解析”, 先端的 X 線光学ワークショップ 2024, 北海道大学, 2024 年 9 月 12 日.
- 4) 鈴木 明大, “XFEL 単粒子イメージングによる固体電解質の無損傷ナノ分析”, 先端的 X 線光学ワークショップ 2024, 北海道大学, 2024 年 9 月 12 日.

### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) 先端的 X 線光学ワークショップ 2024, 北海道大学, 2024 年 9 月 12 日.

### 4.8 共同研究

#### a. 国内共同研究

- 1) 西野 吉則 (別所 義隆、東京大学)
- 2) 西野 吉則 (城地 保昌、高輝度光科学研究センター)
- 3) 西野 吉則 (松山 智至、名古屋大学)
- 4) 鈴木 明大 (松浦 滉明、理化学研究所)
- 5) 鈴木 明大 (山崎 憲慈、北海道大学)
- 6) 西野 吉則 (山田 純平、大阪大学)
- 7) 西野 吉則 (高澤 駿太郎、東北大学)

#### b. 国際共同研究

該当なし

#### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 鈴木 明大 (代表)、基盤研究 B、ナノ磁気構造観察に向けた高感度軟 X 線構造化照明顕微鏡の開発、2023~2025 年度
- 2) 鈴木 明大 (代表)、萌芽研究、単粒子 X 線レーザーイメージングの実現に向けたグラフェン溶液セル、2022~2024 年度

#### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 西野 吉則 (分担)、NEDO「担体構造・アイオノマー被覆状態の解析」、2020~2024 年度

#### c. 民間助成金

- 1) 鈴木明大 (代表)、日揮・実吉奨学会、“構造化軟 X 線ナノビームによる高分解能磁気イメージング”、2022 年 9 月~2024 年 8 月.

#### 4.10 受賞

- 1) 鈴木 明大：全学教育科目に係る授業アンケートにおけるエクセレント・ティーチャーズ「物理学 II」(北海道大学高等教育推進機構) 2024年09月

#### 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：SACLA ユーザー協同体 評議員 (2013年05月01日～現在)
- 3) 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：日本光学会 X線・EUV 結像光学研究グループ幹事 (2021年04月01日～現在)
- 2) 鈴木 明大：日本放射光学会 編集委員 (2023年10月01日～現在)
- 3) 鈴木 明大：日本放射光学会 プログラム委員 (2022年06月01日～2024年05月01日)

##### 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01日～現在)

##### d. 外国人研究者の招聘

該当なし

##### e. 北大での担当授業科目(対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 情報科学研究科、ナノイメージング特論、西野 吉則、2024年04月01日～2024年09月30日
- 2) 全学共通、物理学II、西野 吉則、2024年10月01日～2025年03月31日
- 3) 工学部、応用光学II、西野 吉則、2024年10月01日～2025年03月31日
- 4) 工学部、生体情報工学実験 I、鈴木 明大、2024年04月01日～2024年09月30日
- 5) 工学部、情報エレクトロニクス演習(電気回路)、鈴木 明大、2024年04月01日～2024年09月30日
- 6) 工学部、生体情報工学実験 II、鈴木 明大、2024年10月01日～2025年03月31日
- 7) 工学部、生体工学概論・生体医工学基礎、西野 吉則、2024年10月01日～2025年03月31日
- 8) 全学共通、一般教育演習(フレッシュマンセミナー)：身近な例で知る光と量子の世界、鈴木 明大、2024年04月01日～2024年09月30日
- 9) 全学共通、環境と人間「2030年エレクトロニクスの旅」、西野 吉則、2024年04月01日～2024年09月30日
- 10) 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、2024年04月01日～2024年09月30日
- 11) 工学部、科学技術英語演習、西野 吉則、2024年04月01日～2025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)

- 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、2024年04月25日

##### g. アウトリーチ活動

該当なし

##### h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

##### i. 客員教員・客員研究員など

該当なし

##### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0人

該当なし

博士学位：0人

該当なし

# 極微システム光操作研究分野

## スタッフ

教授 田中 嘉人 (博士(工学)、2023年4月1日着任)  
准教授 太田 竜一 (博士(工学)、2024年7月1日着任)  
助教 橋谷田 俊 (博士(理学)、2023年4月1日着任)  
事務補助員 木下 亜美

## 学生

学部 小野寺 真輝、横田 裕喜、渡邊 柊人、亀ヶ谷 篤、  
鈴木 秀弥、中村 健太

## 1. 研究目標

本研究分野では、先端微細加工技術、光計測制御技術、電磁場シミュレーション技術をベースに、プラズモニック構造、メタマテリアル・メタサーフェス、フォトニック結晶等の人工ナノ構造と光との相互作用の学理を光の運動量・角運動量の視点から攻究することで、幅広いサイエンスとテクノロジーにインパクトを与える革新的基盤技術、ナノ構造光圧アクチュエータという新たな価値の創造を目指している。これにより、光学浮上技術、それを用いた共振器オプトメカニクス、超高感度力センサ、非破壊光子検出、巨視的量子性の検証、さらには宇宙空間での超高速レーザー推進など様々な応用展開に挑戦する。

## 2. 研究成果

### 2-1 周辺屈折率に応じて光圧方向を制御するプラズモニック構造の実現

我々はこれまで、金属ナノ構造の局在プラズモン共鳴により散乱光の運動量を制御し、その反跳としてナノ構造に働く光圧よりマイクロマシンを駆動する、プラズモニックナノアクチュエータを世界に先駆けて創出してきた。この光圧はナノ構造の向きで力の方向を制御できるため、従来法のようにレーザービームの集光・操作を必要としない光駆動が可能である。これにより光マイクロマシンの小型化・集積化が期待されるが、Lab-on-a-chipの流体制御デバイスへの応用に向けては、流れてくる物質の種類に応じた動作の制御が求められる。そこで本研究は局在プラズモン共鳴の高感度センシング機能に着目し、周辺屈折率変化に応じた散乱光の運動量制御により自ら光圧の向きを変えるプラズモニックナノ構造を実現した。これにより周辺環境に応じて自律的に動作を制御する光マイクロマシンが可能になり従来にない全く新しい応用展開が期待される。

本研究で提案するナノ構造は長さの異なる金ナノロッドペアからなり、その片方は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に覆われている(図1(a))。この構造は、ナノロッド間のプラズモン振動の位相差により、左右の光散乱で非対称な干渉が生じ高い指向性の側方光散乱を示す。実験では試料の上方からレーザー光を照射し、その散乱パターンを油浸対物レンズ(NA:1.49)とCMOSカメラを用いてフーリエ像として測定した。図1(b)は大気中( $n=1.00$ )で測定した散乱光の強度分布であり、-1次方向に高い指向性を示すことがわかる。次に試料を水( $n=1.33$ )に浸し同様の実験を行ったところ、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  が覆われていない片方のロッドの共鳴波長のみが長波長シフトすることによりロッド間のプラズモン振動の位相差の符号が変化し、その結果散乱光の指向性は+1次方向に逆転した(図1(c))。図1(d)は

大気中と液中における±1次方向の散乱光の強度比の波長依存性であり、100nm程度の波長域で屈折率変化に応じて散乱光の運動量の方向、つまりその反跳光圧の方向が反転することが確かめられた。

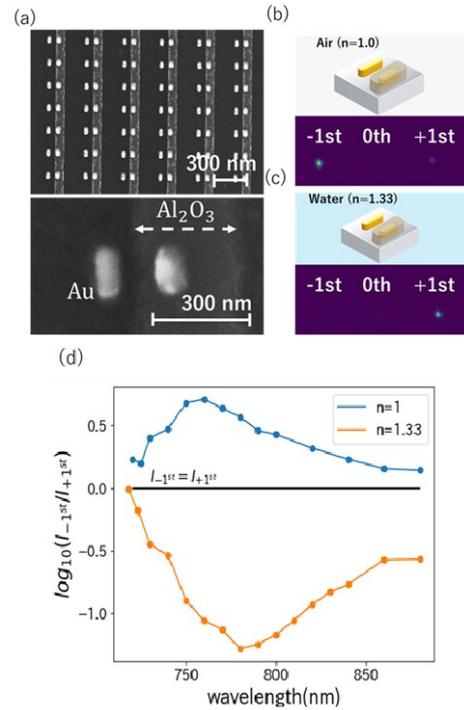


Figure 1. (a) Scanning electron microscope (SEM) images of gold nanorod pairs. The shorter rods are covered by  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Fourier space images of directional scatterings measured in air (b) and in water (b). (d) Wavelength dependence of the ratio of the light intensities in -1<sup>st</sup> direction ( $I_{-1}$ ) to those in +1 direction ( $I_{+1}$ ). The blue (orange) dots are measured in air (water) ambient conditions.

### 2-2 光駆動マイクロマシンを用いた単一プラズモニックナノ構造に働く光圧計測

我々はこれまで、人工ナノ構造による光伝搬制御を光の運動量変化という独自の視点から研究し、レーザービームを集光する従来のアプローチでは実現できない特徴の光圧が生み出せることを見出し、その光圧が働くナノ構造を物体表面に作製することで光ピンセットでは難しい光駆動を可能にする、ナノ構造光圧アクチュエータを世界に先駆けて提案してきた。しかし、異方性が高く複雑な人工ナノ構造に働く光圧・光トルクを既存の方法で計測評価することは難しいため、ナノ構造を中心に配置したマイクロプラットフォーム (MPF) を用いた全く新しいナノ光圧計測法を提案・開発してきた(図2)。今年度は、V字形の単一金ナノ構造に対して、光の伝搬方向であるz軸方向に働く光圧の波長依存性測定を行い、光圧計測によるナノ構造の共鳴スペクトル測定への応用可能性を検討した。

光の伝搬方向に働く光圧は、ナノ構造の光消滅断面積に比例することが理論的に知られている。そこで、光波長を変えながらナノ構造に働く光圧を測定したところ、図2で示すように、波長830nmのレーザーをナノ構造に照射した際に光圧が最も大きくなった。この光圧の波長依存性は、電磁場シミュレーションにより得られた光消滅断面積スペクトルと良く対応していることから、830nmに共鳴ピークを持つ構造であることがわかる。これにより、ナノ構造に働く光圧計測が共鳴スペクトル測定に有効であることを実証することができた。特に、今回の対象は単一ナノ構造であるこ

とから、従来の光消滅スペクトル計測よりも高いSN比で計測できる可能性を示唆する結果である。

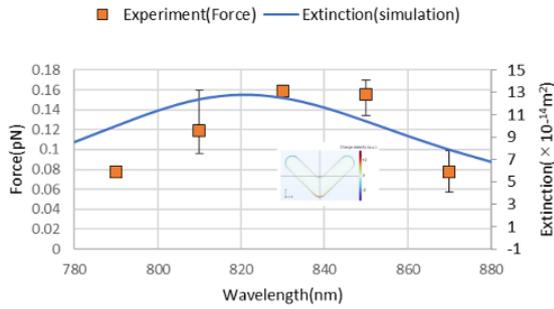


Figure 2. Wavelength dependences of optical pushing force acting on a single V-shaped nanostructure.

### 2-3 ねじれ金ナノロッド構造におけるキラリティと異方性由来の円偏光二色性の解析

円偏光状態の光とキララル物質との相互作用（キララル光学応答）は古くから研究され、物質の持つキラリティ判別法として広く利用されてきたが、自然界の物質のキララル光学応答は一般的に非常に小さいため、今なお十分に理解されているとは言えない。近年、キララル物質を模倣してデザインされた金属ナノ構造が、局在プラズモン共鳴より極めて大きなキララル光学応答を示すことから注目されている。我々はこれまで、3次元キララルナノ構造を構成する粒子間のプラズモンカップリングを精緻に制御することで、シンプルなねじれ金ナノロッド構造に対して巨大なキララル光学応答を示す事を見出してきた。しかしながら、現在判明しているのは、ナノ構造のキラリティと異方性の両方の影響が混在している、「巨視的なg値」である。そこで今年度は、ねじれナノロッド構造のストークスパラメータを測定することで円偏光基底のJones行列を求め、そのキララル光学応答を詳細に解析することにより、異方性による影響を取り除いたピュアなキラリティに由来するキララル光学応答（g値）を研究した。

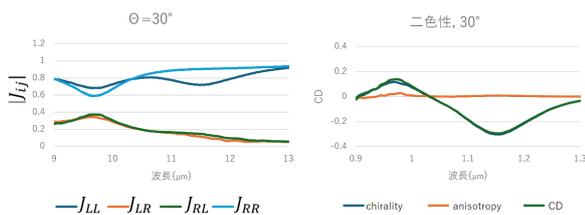


Figure 3. Wavelength dependences of Jones matrix and CD for twisted nanorod dimers.

Jones 行列は円偏光基底においては、次のように書ける。

$$\begin{bmatrix} E_{out,L} \\ E_{out,R} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_{in,L} \\ E_{in,R} \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_{LL} & J_{LR} \\ J_{RL} & J_{RR} \end{bmatrix}$$

左・右円偏光状態の光を、異方性を持つキララルナノ構造に入射した場合、キラリティにより左右で吸収の差が生じるだけでなく、異方性により入射偏光とは逆方向の円偏光成分が生じる。この応答は、Jones 行列において、対角項 ( $J_{LL}, J_{RR}$ )、非対角項 ( $J_{LR}, J_{RL}$ ) の性質に当てはまる。図3は、ねじれ角度が  $30^\circ$  の金ナノロッド構造に対して、実験的に Jones 行列を解析した結果を示す。図3(a)は Jones 行列の

スペクトルを、図3(b)はそこから得られる、キラリティ、異方性、およびそれらが混在した二色性についてのスペクトルを表す。図3(b)より、(キラリティによる影響) >> (異方性による影響) であり、この構造の大きなg値において、キラリティの寄与が支配的であるとわかる。

### 2-4 単一キララル金属ナノ構造をプローブとして用いた光の軌道角運動に基づく光学的キラリティの探究

物質のキラリティ（左右非対称性）は、別の左・右のキララルな物質もしくは場との非対称な相互作用を通じてのみ識別可能である。スピン角運動量 ( $s = \pm 1$ ) を有する円偏光はキララルな電磁場であり、古くからキララル物質との相互作用が研究されてきた。キララル物質は左・右円偏光に対して光吸収が異なる円偏光二色性 (CD) を示すが、これは主に電気双極子および磁気双極子モードといった低次の励起モードに起因するとされる。2010年には、キララル物質の低次モードに起因するCDの大きさが、励起光のスピン角運動量に基づくキラリティを表す物理パラメータ「optical chirality (スピンOC)」に依存することが明らかにされ、光の場をデザインすることでキララルな光と物質の相互作用を制御する新たな研究展開が拓かれた。

一方、我々は軌道角運動量 ( $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) を有するキララルな光渦に着目し、キララルなねじれ金ナノロッドダイマー (TND、図4左) との相互作用に関する研究を進めてきた。これまでの研究により、TNDが左右の光渦に対して異なる光吸収を示す螺旋光二色性 (HD) を持ち、そのHDが電気四重極子モードに起因することを電磁場計算によって明らかにしている。キララル物質の低次モードに起因するCDとスピンOCのアナロジーが、電気四重極子モードに起因するHDにも適用できるとすれば、軌道角運動量に基づくキラリティを表す新しい物理パラメータ「軌道OC」が存在する可能性が考えられる。

そこで本研究では、光渦ビームに対して単一のTNDを走査し、HD信号の空間分布を解析することで軌道OCの空間的特性を調べた。励起光に円偏光ガウスビーム ( $s = \pm 1, l = 0$ ) を用いた場合 (図4右上)、ガウスビームの構造を反映した波長に依存しない負のHD (CD) 信号が観測された。一方、円偏光光渦ビーム ( $s = \pm 1, l = \pm 1$ ) を用いた場合 (図4右下)、ドーナツビームの構造を反映した波長に依存しない負のHD信号に加え、スピンOCがゼロになるはずのビームの中心で異なる波長依存性を持つ信号が観測された。具体的には、波長800nmでは負、825nmではゼロ、850nmでは正のHD信号が観測された。これらの結果は、円偏光光渦ビームの中心で観測されたHD信号がスピンOCに依存せず、軌道OCに依存していることを示唆している。

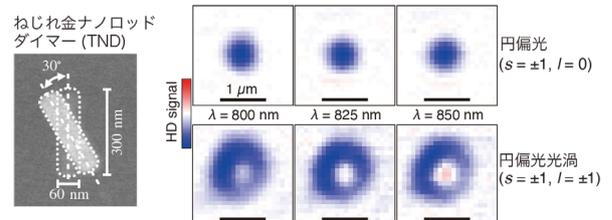


Figure 4. (left) Scanning electron micrograph of a single twisted nanorod dimer (TND). (Right) Experimentally obtained helical dichroism (HD) images of a single TND.

### 3. 今後の研究の展望

光圧研究については、我々が提案している光駆動マイクロマシンを用いたナノ光圧計測法を真空環境に展開していく。これにより、環境から孤立した超低散逸状態における量子光バネ振動子の実現を目指す。具体的には、メタサーフェスに働く光圧・光トルクにより円板ミラーの位置と姿勢をパッシブ制御する機構や、フォトニック結晶と希土類を組み合わせたレーザー冷却機構を開拓していく。キラル研究については、実績のあるねじれナノロッド構造をプローブとして、これまでに開発した光渦二色性顕微分光イメージング法を用いることにより、双極子遷移に限定されてきた従来の電磁場キラリティを多重極遷移へと拡張し、軌道角運動量に基づく電磁場キラリティを世界に先駆けて提唱する。また物質系と光渦とのサイズミスマッチを克服するナノ光渦プローブ顕微鏡を創出し、プラズモニックナノ構造だけでなく分子系に対しても同様の解析を展開する。

### 4. 資料

#### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) [S. Hashiyada\\*](#), [Y. Y. Tanaka\\*](#), Rapid modulation of left- and right-handed optical vortices for precise measurements of helical dichroism, *Rev. Sci. Instrum.* **95**, 053101 (2024). (DOI: 10.1063/5.0203715)
- 2) [R. Kumar\\*](#), [B. Trodden](#), [A. Klimash](#), [M. Bousquet](#), [S. K. Chaubey](#), [N. J. Fairbairn](#), [B. A. Russell](#), [K. Wynne](#), [A. S. Karimullah](#), [N. Gadegaard](#), [P. J. Skabara](#), [G. J. Hedley](#), [S. Hashiyada](#), [A. Movsesyan](#), [A. O. Govorov](#), [M. Kadodwala\\*](#), Electromagnetic Enantiomer: Chiral Nanophotonic Cavities for Inducing Chemical Asymmetry, *ACS Nano* **18**, 22220–22232 (2024). (DOI: 10.1021/acsnano.4c05861)
- 3) [S. Hao-Tse](#), [L. Shao-Yuan](#), [M. Fujii](#), [H. Sugimoto](#), [Y. Y. Tanaka](#), [T. Sugiyama\\*](#), Optical trapping-induced crystallization promoted by gold and silicon nanoparticles, *Photochem. Photobiol. Sci.* **23**, 1697–1707 (2024). (DOI: 10.1007/s43630-024-00622-6)
- 4) [S. Hao-Tse](#), [N. Hiromasa](#), [C. An-Chieh](#), [Y. Y. Tanaka](#), [K. Sasaki](#), [T. Sugiyama\\*](#), Enantioselectivity switch in chiral crystallization using optical trapping with gold nanoparticles, *Cell Rep. Phys. Sci.* **5**, 102310 (2024). (DOI: 10.1016/j.xcrp.2024.102310)
- 5) [T. Okajima](#), [R. Ohta\\*](#), [T. Sato](#), [Y. Tachizaki](#), [X. Xu](#), [H. Okamoto](#), [Y. Ota\\*](#), Transfer-printed nanophotonic waveguide on an erbium doped crystal towards hybrid photonic quantum devices, *Jpn. J. Appl. Phys.* **64**, 032001 (2025). (DOI: 10.35848/1347-4065/adb54e)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) [橋谷田 俊](#), [岡本 裕巳](#), キラル光学応答, 固体物理「物質科学におけるカイラリティ」 **59**, 79–94 (2024).

#### 4.4 著書

該当なし

#### 4.5 特許

- 1) [田中嘉人](#), [橋谷田俊](#), 「円偏光光渦照射器、分析装置および顕微鏡」, 特願 2024-199269, 2024年11月14日。

### 4.6 講演

#### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) [Y. Y. Tanaka](#), “Controlled radiation modes of second harmonic generation from plasmonic nanoantennas”, The 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2024), Toyama, Japan, July 16<sup>th</sup>, 2024.
- 2) [S. Hashiyada](#), [Y. Y. Tanaka](#), “Rapid modulation of left- and right-handed optical vortices for precise measurements of helical dichroism”, The 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2024), Toyama, Japan, July 16<sup>th</sup>, 2024.
- 3) [Y. Y. Tanaka](#), “Light-Powered Nanoactuators: Controlling Light Momentum with Metallic Optical Nanoelements”, iCANX Talks, Online, October 11<sup>th</sup>, 2024.

#### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) [田中 嘉人](#), “スピンや軌道の角運動量をもつ光と人工キラルナノ構造との相互作用”, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会, 東京大学山中寮内藤セミナーハウス, 山梨, 2024年11月7日。
- 2) [田中 嘉人](#), “人工ナノ構造が拓く新奇光圧アクチュエータ”, 第9回フォトニクスワークショップ, 沖縄県青年会館, 沖縄, 2024年11月14日。

#### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) [S. Hashiyada](#), [Y. Y. Tanaka](#), “Rapid modulation of the directions of handedness of optical vortices for precise measurements of helical dichroism”, The 11<sup>th</sup> Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC 2024), Yokohama Japan, April 24<sup>th</sup>, 2024.
- 2) [T. Okajima](#), [R. Ohta](#), [T. Sato](#), [Y. Tachizaki](#), [X. Xu](#), [H. Okamoto](#), [Y. Ota](#), “Transfer-printed Si waveguides on Er:YSO crystals toward efficient quantum media conversion”, CLEO-PR 2024, Incheon, Korea, August 6<sup>th</sup>, 2024.
- 3) [M. Konishi](#), [H. Okawa](#), [S. Hashiyada](#), [Y. Matsuzaki](#), [Q. Zhang](#), [K. Li](#), [Y. Y. Tanaka](#), [Y. Kawano](#), “Designing Bull’s eye structures for non-destructive inspection using GHz waves and carbon nanotube film”, 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024), Kuopio, Finland, August 7<sup>th</sup>, 2024.

#### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) [橋谷田 俊](#), [田中 嘉人](#), “物質による光のスピン・軌道角運動量の散逸”, 日本物理学会 第79回年次大会, 北海道大学, 札幌, 2024年9月16日。
- 2) [橋谷田 俊](#), [P. L. Lalaguna](#), [M. Kadodwala](#), [田中 嘉人](#), “軌道角運動量を持つ光渦に対するキラル金属ナノ構造の光学二色性”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2024, 電気通信大学, 東京, 2024年12月1日。
- 3) [橋谷田 俊](#), [田中 嘉人](#), “単一キラル金属ナノ構造をプローブとして用いた光の軌道角運動量に基づく光学的キラリティの探究”, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 千葉, 2025年3月14日。
- 4) [渡邊 終人](#), [太田 竜一](#), [片山 司](#), [田中 嘉人](#), “周辺屈折率に応じて光圧方向を制御するプラズモニック構造の実現”, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 千葉, 2025年3月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) [橋谷田 俊](#), [田中 嘉人](#), “スピンと軌道の角運動量を持つ光渦とキラルナノ物質との相互作用”, 国際光デー記念シンポジウム, 日本学術会議講堂, 東京, 2024年7月25日。
- 2) [R. Ohta](#), “Strain-induced opto-mechanical system with rare-earth ions”, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research "Luminescence induced optical force" Joint Seminar, Okinawa, Japan, October 21<sup>st</sup>, 2024.
- 3) [小西 優一](#), [西山 黎](#), [橋谷田 俊](#), [田中 嘉人](#), [河野 行雄](#), “キラルサブ波長構造体によるテラヘルツ円偏光近接場生成”, 第9回フォトニクスワークショップ「光

で探る多彩な未来図!」, 沖縄県青年会館, 那覇, 2024年11月14日.

- 4) R. Ohta, "Rare-earth Mediated Optomechanical Devices for Highly Coherent Photon-electron-phonon Hybrid Systems", 2024 RIES-CEFMS Symposium, NYCU, Taiwan, November 29<sup>th</sup>, 2024.
- 5) S. Hashiyada, Y. Y. Tanaka, "Conservation law for angular momentum based on optical field derivatives: Analysis of optical spin-orbit conversion", The 25<sup>th</sup> RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 6) R. Ohta, "Opto-electro-mechanical system with rare-earth ions", The 25<sup>th</sup> RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, December 10<sup>th</sup>, 2024.

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) S. Hashiyada (Co-organizer), The 1st International Symposium on Molecular Materials for Future, Tohoku University, Sendai, Sapporo, February 1<sup>st</sup>-2<sup>nd</sup>, 2025.

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 田中 嘉人 (岸根 順一郎, 放送大学), "光と物質の相互作用における角運動量転写機構の研究を行う。特に、光照射によって誘起されるトルクに焦点を当て、その理論的メカニズムと実験的検証を行う。具体的な研究項目は、「物質がある系での optical chirality の flux (光のスピ角運動量) の保存則と、これに由来する光のスピ角運動量転写機構」および「キラリ構造による光渦二色性とキラリ表面フォノンポラリトンの関連」である。"
- 2) 田中 嘉人 (岩本 敏, 東京大学), "周期構造中での光のバンド構造に現れるトポロジカルな性質を活用するトポロジカルフォトンクス、実空間で光の場を持つトポロジカルな性質を探索する特異点光学など、光が示す様々なトポロジカルな性質の探索とその応用を目指した研究が注目を集めている。光のトポロジカルな現象では、光のスピ角運動量や軌道角運動量が重要な役割を担っており、それらの深い理解と制御技術の確立により、新奇な光学現象の発現と新たな応用の可能性が拓かれる。本研究は、トポロジカルナノフォトンクスの研究を進めている申請者と金属ナノ構造における角運動量制御に関する研究を進める北海道大学・田中嘉人教授が共同し、フォトンニック結晶やプラズモニック構造などのフォトンニック構造を活用した光の角運動量の高度制御とそれに基づく新たなトポロジカル現象の発現・応用の可能性を探索することを目指すものである。具体的には、フォトンニックナノ構造中での光のスピ角運動量・軌道変換、スピ角運動量相互作用の物理を理論的に検討する。さらに、ナノ構造中で現れる光スピ角運動量を検討しそれを活用したスキルミオンビームやホブフィオンビームなどのトポロジカル光状態の生成可能性を議論する"
- 3) 田中 嘉人 (松本 伸之, 学習院大学), "熱雑音の小さな良質な機械プローブを実現すれば、ダークマター等の未知粒子の探索、地球重力場の測定による地下資源探索、巨視的量子力学の検証といった重要な研究課題の解決につながる可能性がある。しかし、一般的な機械プローブはクランプ機構により生じるロスのために熱雑音が大きい傾向がある。田中研究室で研究を進めている光圧駆動可能なナノデバイスと我々が開発を進めてきた精密変位測定・量子制御の技術を土台に、光学浮上された低熱雑音な新規デバイスを実現し、これを応用することで上述の課題解決につなげる"
- 4) 田中 嘉人 (河野 行雄, 中央大学), "光の中でも長波長側にあるテラヘルツ (THz) ~赤外光の光子エネルギー (数~数十 meV) は、様々な低・中・高分子の振動や分子間相互作用、水素結合や固体結晶中電子や格子の振動に対応する重要な領域であるため、THz・赤外計測はこれらを探索する強力なツールとしての期待が高い。ところが、光の中では波長が非常に長い (数十~数百  $\mu\text{m}$ ) ため、画像化計測の空間分解能が光の波長程度に制限される、いわゆる回折限界の問題

が顕在化する。そのため、サブ波長領域の THz・赤外物性研究は未成熟の新規開拓分野となっている。さらに計測の対象となる物質・分子科学の点からは、近年、材料やデバイスの幾何学的な性質が物性や機能に大きく関係することが見出されており、3次元空間での方向選択的な分析が求められている。本研究は、THz・赤外光の分布を、サブ波長空間分解能、3次元空間軸方向選択的にイメージングする技術を実現し、幾何学的特徴を有する物質 (有機・高分子や自己組織化物質、低次元量子材料、分子挿入材料など) へ適用する新規な試みである。以上を通して、マイクロ~メゾに至るマルチスケールでの結晶・電子物性の解明、新奇 THz・赤外光機能開拓・デバイス応用への展開を目的とする"

- 5) 田中 嘉人 (小西 優一, 中央大学), "テラヘルツ (THz) 波は水素結合や分子間相互作用に高い感度を持つことから、生体センシングやイメージングへの応用が期待されている。しかし、THz 波は 1THz で 300  $\mu\text{m}$  程度の波長を持ち、生体組織の微小な構造を画像化するためには波長が大きすぎる。そこで我々は、微小開口を持つ独自に設計した同心円型微細構造体に THz 波を入射することで THz 微小光源を生成し、分解能を向上させ生体組織の微小な構造体の超解像イメージングに成功した。高い空間分解能に加えて、偏光状態を利用した構造体の異方性や左右非対称性 (キラリティ) 検知することができれば、より高度なタンパク質の識別も可能になると期待される。近年、キラリな微細構造体にタンパク質を吸着させ、構造体を光励起することで、タンパク質のキラリティを高感度に検出できることが示された。原理的には THz 波でも実現できるはずである。本研究では、キラリなアルキメデスの螺旋型微小構造体を設計、製作し、THz 領域において分子のキラリティを検出し、生体組織のキラリティを考慮した超解像イメージングを可能にするデバイスを開発する。本デバイスは生体検査に用いられ、癌などの疾病の早期発見に寄与する可能性がある"
- 6) 田中 嘉人 (白幡 香太郎, 中央大学), "カイリティを持つ結晶において、らせん運動 (回転しながら伝播) するカイラルフォノンが発生することが近年理論的に見出され、また実験でも観測されている。これまでに白幡らは、近接場光学顕微鏡を用いてカイリティを持つ水晶表面で発生する表面フォノンポラリトンを実験で可視化することに成功している。本研究では、水晶におけるカイラル表面フォノンポラリトンの観測を試みる。一般に、左回りと右回りのカイラルフォノンの特性はほとんど同じであり、その差を観測することは困難である。そこで水晶表面にカイラル金属微細構造を作製し、微細構造に励起されるカイラルプラズモンと水晶に励起されるカイラル表面フォノンポラリトンを強く結合させることで、左回りと右回りのカイラル表面フォノンポラリトンの特性を大きく変調させることを考えた。これにより、左回りもしくは右回りのカイラル表面フォノンポラリトンの選択的な励起を達成する"

##### b. 国際共同研究

- 1) 田中 嘉人 (杉山 輝樹, 国立陽明交通大学), "局在表面プラズモンは回折限界を超えるナノメートルスケールの領域に光を強く閉じ込めることが可能である。特に、ギャップモードプラズモンは、ホットスポットと呼ばれる数~数 10 ナノメートル程度の高強度光局在場を生成する。このように、光子をナノ空間に閉じ込めることにより、分子クラスターの波動関数と光の波長との空間的ミスマッチングは解消され、光子はクラスターとより強く相互作用するようになる。本研究では、この金属ナノ粒子近傍に発生した局在プラズモンを用いて種々有機化合物の結晶多形制御を実現することを主目的としている。また、制御メカニズムに対する理論的な考察を行い、その結果を実験条件にフィードバックしながら、究極制御を実現するための実験条件の最適化を行う"
- 2) Y. Tanaka (Malcolm Kadodwala, University of Glasgow), "キラリ物質は左右のキラリな光に対して異なる光応答 (光学二色性) を示す。この現象は、光と物質の間で符号が逆の SAM や OAM が非対称にやりとりされることに起因すると考えられる。円二色性 (CD) は SAM を持つ円偏光に対するキラリ物質の光学二色性であり、これまでキラリ物質の検出・識別という観点

から広く研究されてきた。近年、らせん二色性 (HD) という光の SAM だけでなく OAM も考慮に入れた (CD を拡張した) 光学二色性がキラルな光と物質の相互作用をより包括的に説明する新しい概念として注目されている。本共同研究では、田中研が世界に先駆けて開発した超高精度 HD スペクトル計測法と精緻に作製されたプラズモニックナノ構造を用いて、HD のメカニズム解明を目指す。”

#### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 田中 嘉人 (分担), 学術変革領域研究(A), “超螺旋光によるキラル非線形光学応答”, 2023年6月~2027年3月.
- 2) 田中 嘉人 (代表), 基盤研究(A), “ナノ構造光圧アクチュエータの開拓と量子共振器光バネ振動子の創出”, 2024年4月~2027年3月.
- 3) 太田 竜一 (代表), 基盤研究(B), “高効率量子光メモリの創発へ向けた希土類イオン励起電子と機械振動の結合系の研究”, 2023年4月~2026年3月.
- 4) 橋谷田 俊 (代表), 基盤研究(C), “キラル縦偏光の創出と物質キラリティ検出”, 2023年4月~2026年3月.

#### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 田中 嘉人 (代表), JST 創発的研究支援事業, “ナノ構造が拓くマクロな物体の光マニピュレーション”, 2022年4月~2029年3月.

#### c. 民間助成金

該当なし

### 4.10 受賞

該当なし

### 4.11 社会教育活動

#### a. 公的機関の委員

該当なし

#### b. 国内外の学会の役職

- 1) 田中 嘉人、表彰担当運営委員 (日本光学会)、2024年度
- 2) 太田竜一、プログラム編集委員 (公益社団法人応用物理学会)、2019年9月~

#### c. 兼任・兼業

- 1) 田中 嘉人、講演者 (公益社団法人応用物理学会)、2024年11月
- 2) 橋谷田 俊、「固体物理」原稿執筆者 ((株) アグネ技術センター)、2024年7月

#### d. 外国人研究者の招聘

該当なし

#### e. 北大での担当授業科目 (対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 全学教育科目、環境と人間: ナノテクノロジーが拓く光・マテリアル革命、田中嘉人、1学期 (春ターム)
- 2) 全学教育科目、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 (キラリティの科学)、橋谷田俊、1学期
- 3) 工学部専門科目、情報エレクトロニクス演習 (電気回路)、橋谷田俊、通年
- 4) 工学部専門科目、応用電気回路、田中嘉人、太田竜一、1学期 (夏ターム)

- 5) 工学部専門科目、生体工学概論、田中嘉人、2学期 (冬ターム)

- 6) 工学部専門科目、生体情報工学実験II (テーマ8)、橋谷田俊、2学期

- 7) 情報科学院専門科目、ナノフォトリクス特論、田中嘉人、太田竜一、橋谷田俊、2学期 (秋ターム)

- f. 北大以外での非常勤講師 (対象、講義名、担当者、期間)

該当なし

- g. アウトリーチ活動

該当なし

- h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

- i. 客員教員・客員研究員など

- 1) Paula Laborda Lalaguna, 客員研究員, University of Glasgow, 2024年7月1日~2024年8月31日.
- 2) Shao-Yuan Liu, 客員研究員, 国立陽明交通大学応用科学科, 2024年9月24日~2024年10月14日

- j. 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:

該当なし



# 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やナノ材料の創製、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、無機ナノ材料の構造-組成-機能設計とデバイス展開、準安定物質合成や新規電子物性探索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。

## フォトリックナノ材料研究分野

### スタッフ

教授 BIJU Vasudevan Pillai (Ph.D.化学、2016年2月着任)

准教授 高野 勇太 (博士(理学)、2017年4月着任)

助教 岡本 拓也 (博士(理学)、2022年12月着任)

事務補助員 藤井 敦子

### 学生

博士課程 AKTER Rumana, 吉田和矢, KHATUN Most Farida, DASTIDAR Rahul Ghosh, WANG Tianci, ASWATHI Maladan, ZHOU Haichao, S. L. Aneesh, KHALDI Saadia  
 研究生 DIBYA Darshana Nayak

## 1. 研究目標

本研究分野は、半導体量子ドットと有機分子材料の新しい光学特性と量子効果を利用した有機・無機フォトリックナノ材料の開発、およびそれらを使用したレーザー光学技術と細胞工学向け応用技術の開発を推進している(図1)。

新しいフォトリック材料の創製とレーザー光学技術の開発達成により、高性能な発光材料や光発電材料、医療用光検知試薬や光治療薬、レーザー加工技術などの技術革新やブレイクスルーが期待される。

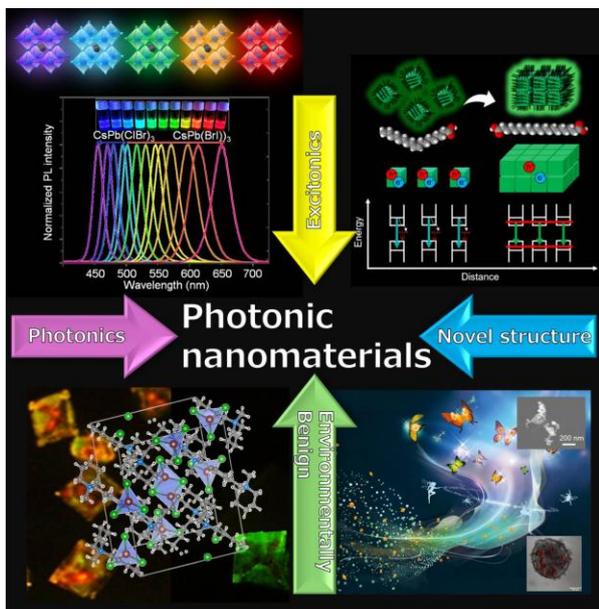


図1 本研究分野の研究概要。

## 2. 研究成果

2024年度は、ペロブスカイト光電材料の機構解明とデバイス応用、近赤外光活用技術の開発(光触媒・光熱治療薬)、およびバイオ触媒を利用したナノ粒子創製法の確立において顕著な進展を達成した。特に、FAPbI<sub>3</sub>ペロブスカイト量子ドット(PQD)の電子移動機構解明により太陽電池効率を10.4%に向上させたほか、非金属近赤外光触媒では酸素

非依存的反応を実現し、光熱治療薬では深部組織適用可能な分子設計に成功した。さらに、酵素駆動型ナノ粒子成形法(BNS)により有機・無機複合メソスコピック粒子の創製プラットフォームを確立した。

### ペロブスカイト材料の光電特性と応用

ホルムアミジニウム鉛ヨウ化物(FAPbI<sub>3</sub>)ペロブスカイト量子ドット(PQD)と有機電子受容体(TCNQ, TCNB)間の光誘起電子移動機構を解明した【資料4-1-6】(図2)。電気化学測定から得られた自由エネルギー変化(-0.79 eV for TCNQ, -0.67 eV for TCNB)は、熱力学的に電子移動が可能であることを示唆した。時間分解光ルミネッセンス測定により、TCNQ添加によりPQDのPL強度が顕著に低下(静的な電子移動)し、電子移動速度は $6.7 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ に達することを明らかにした。

太陽電池応用では、FAPbI<sub>3</sub> PQDとTCNQを組み合わせた太陽電池(構造: FTO/TiO<sub>2</sub>/TCNQ/FAPbI<sub>3</sub> PQD/PE-DOT:PSS/Au)では、10.4%のエネルギー変換効率(PCE)を達成した。特に開放電圧( $V_{oc} = 1.37 \text{ V}$ )と充填因子( $FF = 69\%$ )が向上し、従来のFAPbI<sub>3</sub>単独デバイス(PCE 6.6%)を大幅に上回り、高効率な光デバイス設計指針となる知見を提供した。

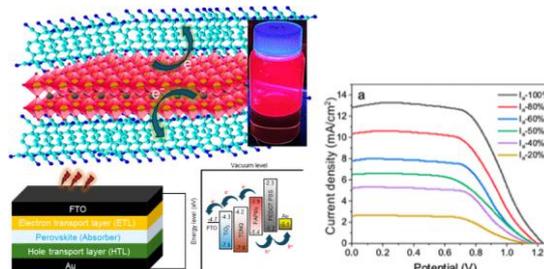


図2 FAPbI<sub>3</sub>-TCNQ太陽電池の電流概要(左)と電圧特性(右)。  
 【資料4-1-6】より転載。Copyright 2025 ACS。

### 非金属近赤外(NIR)有機光触媒の開発

芳香族スルホンを基盤とした非金属近赤外光触媒(3)を開発した【資料4-1-8】(図3)。触媒3は738 nm照射下で芳香族化合物の光酸化的臭素化を効率的に触媒し、酸素非依存的な反応機構を実現した。ターンオーバー数(TON)は2830に達し、従来の有機NIR光触媒を大幅に上回る光安定性を示した。反応機構は時間分解分光法とDFT計算により解明され、触媒の一重項励起状態から基質への電子移動が鍵過程であることを確認した。この触媒設計は、深部組織透過性を持つ持続可能な光触媒の開発指針となる。

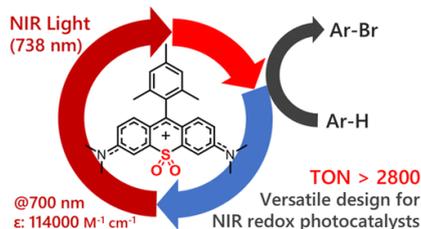


図3 高い光耐久性を示す触媒3による光酸化的臭素化反応。【資料4-1-8】より転載。Copyright 2025 ACS。

### 近赤外光活性化光熱がん治療薬の開発

スルホン含有芳香族化合物(スルホン-ロサミン化合物4)

を用いた効率的な近赤外光活性化光熱治療薬を開発した【資料 4-1-7】(図 4)。化合物 4 は 700 nm 付近に強い光吸収を示し、従来の近赤外色素分子 (Cy5.5) と比較して 35% 小さな分子サイズ (0.56 nm<sup>3</sup>/分子) を実現した。光励起後の非輻射緩和により顕著な光熱効果 (光熱変換効率 58.0%) を示し、HeLa 細胞、MDA-MB-231 細胞、PCI-55 細胞などの各種がん細胞株に対して効果的な細胞死を誘導することを確認した。この化合物は、高い光安定性と細胞膜透過性を兼ね備えており、深部組織への光治療応用に適している。

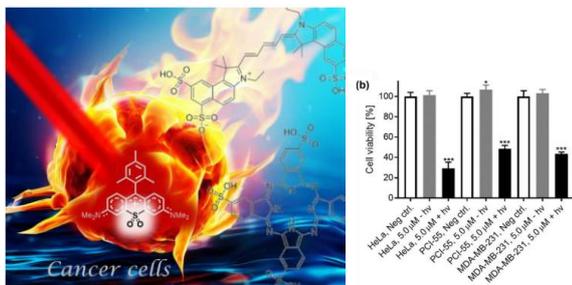


図 4 スルホン-ロサミン化合物 4 による光熱がん治療薬の概要図 (左) と、がん細胞殺傷効果 (右) 【資料 4-1-7】より転載。Copyright 2025 日本化学会。

### 近赤外光応答性 DDS 複合体による新規インプラント周囲炎治療材料の開発

近赤外光応答性 DDS (ドラッグデリバリーシステム) を用いた新規インプラント周囲炎治療材料の開発に成功した【資料 4-1-3】。ミノサイクリン(MC)、ヒアルロン酸(HA)、およびカーボンナノホーン(CNH) から構成される複合体 (MC/HA/CNH) は、CNH の高い生体適合性と優れた光熱変換能を活用し、近赤外光 (NIR) 照射下で著明な抗菌活性を示した(図 5)。MC/HA/CNH は NIR 照射によって CNH が発熱し、HA の構造変化を介して MC が効率的に放出されることで、インプラント周囲炎原因菌 (*Aggregatibacter actinomycetemcomitans*) に対する殺菌効果が著しく増強された。さらに、本複合体は 48 時間の透析処理後も抗菌効果を維持し、長期的な治療効果が期待できることを示した。細胞培養試験では、MC/HA/CNH の NIR 照射による光熱効果が線維芽細胞や骨芽細胞に対して大きな毒性を示さないことも確認され、生体適合性の高さが示唆された。これらの成果は、外科的処置と組み合わせることで深部組織における局所的かつ持続的な抗菌治療を実現する新たな DDS 材料設計指針を提供し、インプラント治療分野における臨床応用への展望を拓くものである。



図 5 カーボンナノホーンをベースにした、新規近赤外治療材料の概要図。【資料 4-1-3】より転載。Copyright 2024 RSC。

### バイオ触媒ナノ粒子成形法 (BNS) の開発

酵素を利用した新しいナノ粒子成形技術「バイオ触媒ナノ粒子成形法 (BNS)」を開発した【資料 4-1-1】(図 6)。トリプシンによるオリゴ-L-リジン鎖の制御的切断を利用し、量子ドット (QD) や有機分子 (TCPP) から成るメソスコピック粒子 (84 nm) を調製した。この手法は量子ドット集合

体のほか、ヒアルロニダーゼとヒアルロナンを用いたテトラキス(4-アミノフェニル)ポルフィリン (TAPP) の集合体形成にも応用可能である。調製した QD 集合体 (ms-QD) は単一粒子レベルでの発光を保持し、光機能性分子 (rTPA) との複合体 (rTPA@ms-QD) は HeLa 細胞スフェロイドにおいて近赤外光誘導がん細胞殺傷効果を示し(図 4)、DDS キャリアとしての有効性を実証した。

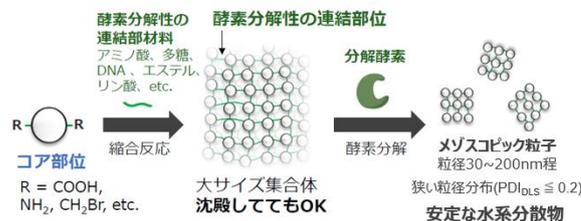


図 6 触媒 3 による光酸化的臭素化反応と反応機構。【資料 4-1-1】。

## 3. 今後の研究の展望

ペロブスカイト型結晶、半導体量子ドット、そして多様な有機分子について、革新的な合成手法の探求と基礎的特性の解明、さらには実用化に向けた包括的な研究を今後も推進していく。特に、これまでに得られた光エネルギー変換や生体医用材料、持続可能な触媒・センシング技術の成果を進展させ、材料設計から応用展開までの一貫した研究体制を強化する。新規発光物質の探索や細胞間相互作用の新たな理解を目指した先進的なプローブ材料の創出にも積極的に取り組み、医療や環境分野への応用技術の確立を目指す。また、国際共同研究や産業界との連携を通じて、ナノマテリアル、生体有機化学、光物理学といった多様な分野に適用可能な革新的光学分子材料の開発基盤を模索し、社会実装と学術的発展の両立を目指していく。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) R. Akter, N. Kirkwood, S. Zaman, B. Lu, T. Wang, S. Takakusagi, P. Mulvaney, V. Biju, and Y. Takano, "Biocatalytic nanoparticle shaping for preparing mesoscopic assemblies of semiconductor quantum dots and organic molecules," *Nanoscale Horiz.* **9**, 1128 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4NH00134F>
- 2) Amarjith V. Dev, Manasa G. Basavarajappa, Swapnil S. Deshpande, Poulomi Mukherjee, Avija Ajaykumar, Chinadurai Muthu, Takuya Okamoto, Sudip Chakraborty, D. D. Sarma, Vasudevanpillai Biju, Chakkooth Vijayakumar, Thermally Induced Reversible Fluorochromism by Self-Trapped Excitonic Emission in a Two-Dimensional Hybrid Copper(I)-Halide Single Crystal, *Chem. Mater.*, **36**, 12, 5912–5921 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c00045>
- 3) D. Konishi, E. Hirata, Y. Takano, Y. Maeda, N. Ushijima, M. Yudasaka, and A. Yokoyama, "Near-infrared light-booster antimicrobial activity of minocycline/hyaluronan/carbon nanohorn composite toward peri-implantitis treatments," *Nanoscale* **16**, 13425 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4NR01036A>
- 4) R. Joy, S. Chahal, V. Biju, P. Kumar, and S. Haridas, "Engineered 2D Boron Nitride Flexible Electrodes for Supercapacitors," *ACS Appl. Energy Mater.* **7**, 9766 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c01540>
- 5) P. V. Pham, T.-H. Mai, S. P. Dash, V. Biju, Y.-L. Chueh, D. Jariwala, and V. Tung, "Transfer of 2D Films: From Imperfection to Perfection," *ACS Nano* **18**, 14841

(2024). <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c00590>

- 6) K. Xu, P. Subramanyam, T. Okamoto, Ch. Subrahmanyam, and V. Biju, "Organic Electron Acceptors for FAPbI<sub>3</sub> Perovskites in Solutions and Solar Cells," *J. Phys. Chem. C* 129, 1569 (2025). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c05197>
- 7) K. Yoshida, T. Suzuki, Y. Osakada, M. Fujitsuka, Y. Miyatake, V. Biju, and Y. Takano, "Exploring photo-excited states of aromatic sulfones for efficient near-infrared-activated photothermal cancer therapy," *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 98, 1 (2025). <https://doi.org/10.1093/bulcsj/uoae137>
- 8) K. Yoshida, T. Suzuki, V. Biju, and Y. Takano, "Adaptable Blueprint for Non-metal Near-Infrared Organic Photocatalysts by Aromatic Sulfones," *ACS Appl. Mater. Interfaces* 17, 4813 (2025). <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c17410>

## 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

## 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 岡本拓也, ハロゲン化鉛ペロブスカイトの電場変調吸収分光, 日本分光学会, 分光研究 Journal of the Spectroscopical Society of Japan, 73 (1), 18-20 (2024)

## 4.4 著書

該当なし

## 4.5 特許

- 1) 高野勇太, "微粒子の製造方法、微粒子、微粒子分散液、及び複合粒子", PCT/JP2024/015035, 2024年4月15日.

## 4.6 講演

### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) Vasudevanpillai Biju, "Dynamic Excitons in Semiconductors", International Conference on Emerging Materials for Sustainable Development 2025, India, 2025年2月20日.
- 2) Vasudevanpillai Biju, "Nanobioconjugates for Molecular, Cellular, and In Vivo Imaging", International Conference on Recent Advances in Smart Materials and Molecular Imaging, Mar Ivanios College, Trivandrum, India, 2025年3月21日.
- 3) Yuta Takano, "Bio-enzymatic Nanoparticle Shaping (BNS) for Preparing Variety of Inorganic and Organic Materials", 2024 RIES-CEFMS Symposium, 台湾 NYCU, 台湾, 2024年.
- 4) Yuta Takano, "Bio-enzymatic shaping of inorganic and organic nanoparticles", MULTIDIM SYMPOSIUM Bi-dimensional carbon materials and beyond: synthesis, properties and biomedical applications, 岡山大学, 岡山, 2024年.
- 5) Yuta Takano, "Bio-catalytic Nanoparticle Shaping (BNS): A Novel Method for Synthesizing Diverse Inorganic and Organic Mesoscopic Particles.", 2024 International Conference on Advanced Nano-Micro Materials (ICNM2 2024), 北海道大学, 札幌, 2024年.
- 6) Takuya Okamoto, "Emission Modulation of Zero-Dimensional Hybrid Copper Halides", The 2024 RIES-CEFMS (Research Institute for Electronic Science-Center for Emergent Functional Matter Science) Joint International Symposium, Kyusyu, Japan, December 8th, 2024.
- 7) Takuya Okamoto, "Control of the Assembly and Optical Properties of Halide Perovskite Nanomaterials", The 105th CSJ Annual Meeting (2025) Asian International Symposium - Photochemistry -, Osaka, Japan, March 29th 2025.

### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) Vasudevanpillai Biju, "Blinking Suppression and Photoluminescence Enhancement in Semiconductor Quantum

Dots", 第52回日本光化学討論会, 九州大学 伊都キャンパス, 福岡, 2024年9月4日.

- 2) 岡本拓也, "ハロゲン化鉛ペロブスカイトの構造と光物性の制御", 2024年度日本分光学会北海道支部シンポジウム, 北海道大学, 札幌, 2025年3月6日.

### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) Tianci Wang, Lei Duan, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Ultrafast Photoluminescence Blinking of MAPbI<sub>3</sub> Quantum Dots Coupled with Au Nanorods Plasmon", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, 札幌, 2024年12月.
- 2) S L Aneesha, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Pi-Stacking-Induced Self-Assembly of CsPbBr<sub>3</sub> into Super-crystals", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, 札幌, 2024年12月.
- 3) Aswathi Maladan, Vasudevanpillai Biju, Asha Ramesh, Pravat Kumar Sahu, Suryakala Duvvuri, Ch Subrahmanyam, "Rod-Shaped Spinel Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Carbon Nitride Heterostructure Modified Fluorine-Doped Tin Oxide Electrodes as Electrochemical Transducers for Efficient Hydrazine Sensing", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, 札幌, 2024年12月.
- 4) Haichao Zhou, Takuya Okamoto, Kiyonori Takahashi, Yuta Takano, Vasudevanpillai Biju, "Defect-Assisted Emission from (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>N<sub>2</sub>)<sub>4</sub>In<sub>4</sub>Br<sub>20</sub> Crystals", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, 札幌, 2024年12月.
- 5) Xia Yifei, Most. Farida Khatun, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Controlling Anion Exchange in Lead Halide Perovskite Heterojunction", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, 北海道大学, 札幌, 2024年12月.

### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) Takuya Okamoto, Azusa Onishi, Xu Shi, Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno, Hiroaki Misawa, Vasudevanpillai Biju, "Energy Transfer from CdSe/ZnS Quantum Dots to a Plasmonic Fabry-Pérot Cavity", 第52回日本光化学討論会, 九州大学 伊都キャンパス, 福岡, 2024年9月3日.
- 2) Tianci Wang, Lei Duan, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Ultrafast Photoluminescence Blinking in MAPbI<sub>3</sub> Perovskite Quantum Dots on Gold Nanoparticles", 第52回日本光化学討論会, 九州大学 伊都キャンパス, 福岡, 2024年9月4日.
- 3) Kazuya Yoshida, Toshiyuki Kawabata, Tatsuo Nakagawa, Toshiaki Suzuki, Vasudevanpillai Biju, Yuta Takano, "Organic Molecular Near-Infrared Photocatalyst Based on Sulfone-rosamine", 第52回日本光化学討論会, 九州大学 伊都キャンパス, 福岡, 2024年9月5日.
- 4) 高野勇太, アクター ルマナ, カークウッド ニコラス, ザーマン サマンサ, ワン ティアンシー, マルヴァニ ポール, ビジュ ヴァスデヴァンピライ, "生体触媒ナノ粒子成形法による量子ドットおよびボルフィリン集合体の作製", 第52回日本光化学討論会, 九州大学 伊都キャンパス, 福岡, 2024年9月4日.
- 5) 小西大輔, 平田恵理, 高野勇太, 前田由佳利, 湯田坂 雅子, 横山敦郎, "インプラント周囲炎治療のための近赤外光応答性ミノサイクリン/カーボンナノホーン複合体の開発", 第14回ナノカーボンバイオサテライトシンポジウム, オンライン, 2024年9月.
- 6) Yifei Xia, Most. Farida Khatun, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Controlling anion exchange in lead perovskite heterojunctions", 日本化学会北海道支部 2024年夏季研究発表会, 北海道大学, 札幌, 2024年7月20日.
- 7) Aneesha S.L., Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Perovskite Nanocrystal Assembly Formation by  $\pi$ - $\pi$  Stacking Interaction of Ligands", 日本化学会第105回春季年会 (2025), 関西大学, 大阪, 2025年3月26日.
- 8) Yifei Xia, Most Farida Khatun, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Stabilization of Inter-halogen Interfaces in Heterojunction Halide Perovskites", 日本化学会第105

回春季年会 (2025), 関西大学, 大阪, 2025年3月26日.

- 9) Aswathi Maladan, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, Subrahmanyam Challapalli, Most Farida Khatun, Mohit Kumar, "Synthesis of Titanium Nitride Semiconductor Nanocrystals", 日本化学会第105回春季年会 (2025), 関西大学, 大阪, 2025年3月26日.

- 10) Haichao Zhou, Takuya Okamoto, Kiyonori Takahashi, Vasudevanpillai Biju, "Defect-Assisted Emission of Hybrid Indium Bromide Single Crystals", 日本化学会第105回春季年会 (2025), 関西大学, 大阪, 2025年3月26日.

e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど  
(学会以外)

- 1) Yifei Xia, Most. Farida Khatun, Takuya Okamoto, Vasudevanpillai Biju, "Controlling anion exchange in lead perovskite heterojunctions", 日本化学会北海道支部2024夏季研究発表会, 北海道大学, 札幌, 2024年7月20日.
- 2) Vasudevanpillai Biju, "Excitons in Semiconductor Quantum Dots", APJ Abdul Kalam Technological University Workshop Series, Kottayam, India, 2024年8月30日.
- 3) Vasudevanpillai Biju, "Exciton Recombination and Defect Control in Halide Perovskite Single Quantum Dots", 2024 RIES-CEMS Symposium, Taipei, Taiwan, 2024年11月28日.
- 4) Vasudevanpillai Biju, "Opportunities and Challenges for Indians in the Emerging Academic World", National Science Day Lecture, Kerala State Science and Technology Council, Trivandrum, India, 2025年2月28日.

4.7 シンポジウムの開催

該当なし

4.8 共同研究

a. 国内共同研究

- 1) ナノアセンブリ研究分野(高橋仁徳助教)との、新規半導体ナノ結晶のX線構造解析による新規開発半導体材料の構造解明
- 2) ナノ材料計測研究分野との、細胞間コミュニケーションの解明に向けた光機能的な材料開発と分光測定

b. 国際共同研究

- 1) インドIITのS. Challapalli教授と量子ドットを用いた新規材料開発。

c. 民間等との共同研究・委託研究

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) Vasudevan Pillai Biju, 基盤研究 B、Development of stable halide perovskite heterojunction supercrystals by photochemical assembly、2023~2026年度
- 2) 高野 勇太、基盤研究 B、高輝度安定型量子ドットと革新的マイクロ細胞組織による光治療薬開発と1分子動態解明、2021~2024年度

b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 高野勇太(代表), JST さきがけ, "酵素分解を利用した循環型メゾスコピック粒子材料", 2024年10月~2027年3月.
- 2) 高野勇太(代表), 2国間交流事業、先進的3D in vitroモデルを用いたがん光治療向け化合物の開発、2023

~2024年度

c. 民間助成金

該当なし

4.10 受賞

- 1) Aswathi Maladan (Synthesis of Titanium Nitride Semiconductor Nanocrystals), 日本化学会 第105回春季年会 (2025) 学生講演賞, 2025年.

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) Vasudevan Pillai Biju: Deputy Editor, J. Photochem. Photobiol. C (2024~)
- 2) Vasudevan Pillai Biju: Associate Editor, NPG Asia Mater. (2015~)
- 3) 高野 勇太: 日本化学会北海道支部幹事
- 4) 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
- 5) 岡本 拓也: 日本化学会北海道支部幹事

c. 兼任・兼業

- 1) Vasudevan Pillai Biju :IITハイデラバード客員教授 2023年3月~現在

d. 外国人研究者の招聘

- 1) Dr. Alberto Bianco、フランス、CNRS, 2025年3月19日~22日.
- 2) Kushal Gowda、インド、2025年2月16日~2024年2月21日

e. 北大での担当授業科目(対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 環境科学院、環境物質科学基礎論II、高野 勇太、2024年10月1日~2025年3月31日
- 2) 環境科学院、光電子科学特論I、Vasudevan Pillai Biju、高野 勇太、2024年10月1日~2025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. アウトリーチ活動

該当なし

h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

i. 客員教員・客員研究員など

該当なし

j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位: 1人

- 1) 夏 一菲, 環境科学院, 修士(環境科学), Interfacial anion exchange control in halide perovskite

博士学位: 3人

- 1) AKTER Rumana, 環境科学院, 博士(環境科学), Investigation of photoinduced electron transfer from CdSe-CdS and FAPbBr<sub>3</sub> nanocrystal assemblies to molecular acceptors
- 2) 吉田和矢, 環境科学院, 博士(環境科学), スルホンロサミン誘導体による近赤外光機能的有機分子の開拓
- 3) KHATUN Most Farida, 環境科学院, 博士(環境科学), Exploring exciton recombination, migration, and transfer in halide perovskite systems

## スマート分子材料研究分野

### スタッフ

教授 玉置 信之 (博士 (工学)、2008 年 10 月 1 日着任、2025 年 3 月 31 日 定年退職)

助教 P.K.Hashim (博士 (理学)、2021 年 9 月 1 日着任)

助教 Ammathnadu S. Amrutha (博士 (生命科学)、2022 年 7 月 1 日着任)

博士研究員 Saugata Sahu (博士 (化学) 2022 年 5 月 1 日着任、2024 年 12 月 31 日転出)

### 学生

博士課程 齊嘉俊、Thuluvanchery Salim Fazil、

許楚晗、Shifa Ahmad

## 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变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、物理的キラリティ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) 新規ヘテロアゾ光スイッチ分子の開発

近年、生体機能を光によって動的に制御するための光分子スイッチに関する研究が盛んに行われている。しかし、その多くはアゾベンゼン誘導体を光応答性部位として用いるものであり、その紫外域応答性は、生体にとって紫外線が本質的に毒であることを考慮すると、大きな問題点である。そのため、応答波長域がより長波長の可視域にある光分子スイッチを開発することが望まれている。これまでに当研究室ではフェニルアゾチアゾールが、可視光応答性の優れた光分子スイッチであることを明らかにしている。今回は、アゾベンゼンの 1 または 2 つのフェニル基をチアゾール、イソチアゾール、チアジアゾール、イソチアジアゾールに置き換えたヘテロアゾ化合物に着目し、分子構造と光スイッチ特性の関係について合成化学および光化学的に研究した。光分子スイッチには、長波長光感受性とスイッチされる 2 状態の熱的安定性が求められる。従来から 2 つのフェニル基を有するアゾベンゼンが光分子スイッチの親骨格として研究されてきたが、置換基導入によって、より長波長光に感受性をもたせようとする、一方の状態を担うシス異性体の熱安定性が低下するという補償関係が成り立ち、長波長光感受性とスイッチされる 2 状態の熱的安定

性を両立することが困難であった。今回新規に合成したヘテロアゾ化合物 8 種類 (図 1) の中で、イソチアゾールを 2 つ有する化合物 7 やイソチアゾールとチアゾールをそれぞれ一つずつ有する化合物 8 は、トランス体の吸収極大 ( $\pi$ - $\pi^*$ 遷移) が 400 nm 以上の長波長にあるにもかかわらず、シス体の寿命は、比較的長寿命であった (表 1)。特に 8 は、470 nm 以上の可視光に光感受性を示した。この成果は、イソチアゾールやチアゾールといったヘテロ環を導入したアゾ化合物という新物質群が光分子スイッチとしてユニークで有用な特性を有することを示すもので、光スイッチ研究において重要なマイルストーンとなる。

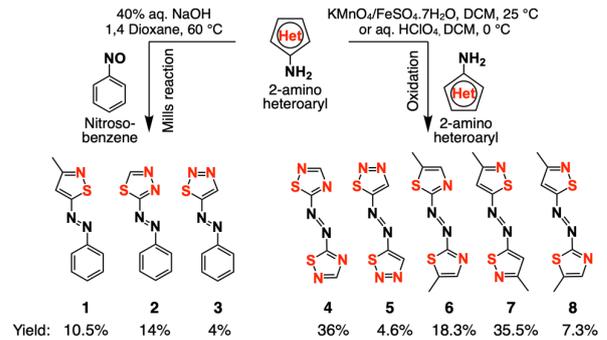


図 1 ヘテロアゾ光分子スイッチの合成方法、合成した化合物の構造及び合成収率。

表 1 光分子スイッチの吸収ピーク波長、光定常状態での異性化率およびシス体の熱異性化による半減期。

Photo-switches	$(\pi-\pi^*)$ (E)	$(\pi-\pi^*)$ (E)	$(n-\pi^*)$ (E)	$(n-\pi^*)$ (Z)	Conversion (%)		$t_{1/2}$ (h, 25 °C)
	$\lambda_{max}$ cal.	$\lambda_{max}$	$\lambda_{max}$	$\lambda_{max}$	E-Z	Z-E	
1	377	332	448	448	94 (365 nm)	61 (430 nm)	45.2
2	366	334	448	448	90 (365 nm)	87 (430 nm)	29.4
3	377	345	453	458	93 (365 nm)	74 (430 nm)	24.3
4	404	362	483	484	>58 (405 nm)	>95 (525 nm)	-
5	427	343	450	450	>70 (365 nm)	>77 (470 nm)	3 min
6	459	429	-	535	>70 (430 nm)	>93 (568 nm)	-
7	404	338	463	460	81 (405 nm)	74 (470 nm)	2.9
8	431	399	-	-	>73 (430 nm) >66 (450 nm) >47 (470 nm)	>83 (525 nm)	2.7 min

### (b) Wnt シグナル伝達経路を制御するヘテロアゾ光スイッチ分子の開発

これまでに、生体のシグナル伝達経路である TGF- $\beta$  シグナル伝達経路に働く光分子スイッチを開発してきた。今回は、細胞の分化などの過程で重要な役割を果たしている Wnt シグナル伝達経路に働く新しい光分子スイッチの開発とその細胞への働きについて調べた。

今回の研究では、光応答性のない Wnt アゴニストとして知られていた BML-284 の分子構造を元にして、BML-284 中の -NH-CH<sub>2</sub>-部位を -N=N- で置き換えたヘテロアゾアレーン 1, 2 (図 2) を合成した。

得られた化合物を細胞に添加すると Wnt シグナル伝達経路が 405 nm 照射後に生じるシス体でのみ活性化されることを、ルシフェラーゼアッセイ法により確かめた (図 3)。さらに、多数の細胞を含む 1 つのウェル内で部分的に光照

射したとき、光照射部の細胞のみで Wnt シグナル伝達経路が活性化されることを確認した。すなわち、多数の細胞からなる生体において部位選択的に Wnt シグナル伝達経路を光制御することが原理的に可能であることを明らかにした。

以上の成果は、生体内のシグナル伝達経路に働くスマート分子スイッチとしてヘテロアゾアレーンの有用性を示すものである。

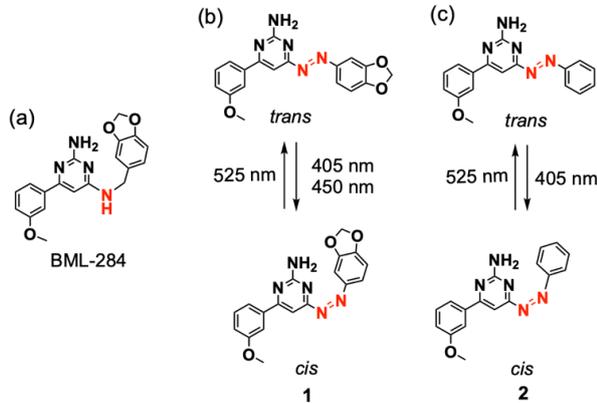


図2 BML-284 の分子構造と光応答性 Wnt アゴニスト 1 と 2 の光異性化挙動。

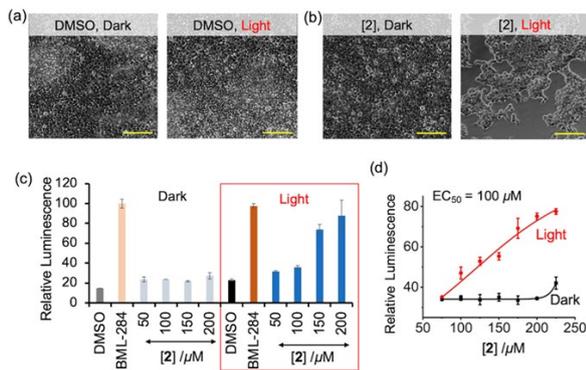


図3 293T 細胞を DMSO (0.4%) または光応答性アゴニスト 2 を含む培養液中で 24 時間インキュベートした後の顕微鏡画像 (a, b)。(スケールバー: 500  $\mu\text{m}$ )。バーグラフ (c) および非線形フィット曲線 (d) は、DMSO (0.4%)、非光応答性アゴニスト BML-284、および光応答性アゴニスト 2 を暗所または光照射条件下で処理した後に測定された相対化学発光を示す。

### 3. 今後の研究の展望

ヘテロ環を含むアゾ系フォトスイッチは、ベンゼンからなるアゾベンゼンにはない特徴を示す可能性がある。今回の研究で、無置換で長波長に感応性を示す化合物が得られたが、フォトスイッチとして利用する際には、生体認識部位をさらに導入する必要があるため、小さな母骨格だけで長波長に応答する特性は重要である。今後は一層の長波長化を目指して Se や Te などを含むヘテロアゾアレーンを合成してフォトスイッチ特性を調べる必要があると考える。シグナル伝達経路の光スイッチに関しては、ERK などほかの経路を制御できるフォトスイッチを開発し、時系列で複数のシグナル伝達経路を光でオン・オフさせることで、幹細胞の分化をはじめとする様々な細胞動態への影響を明ら

かにすることに興味もたれる。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) K. Matsuo\*, R. Uehara, T. Kikukawa, T. Waku, A. Kobori, N. Tamaoki\*, Spatiotemporal Regulation of CENP-E-guided Chromosomes Using A Fast-relaxing Arylazopyrazole Photoswitch, *Chem. Commun.*, 60, 6611-6614(2024) (DOI:10.1039/D4CC01922A)
- 2) H. Fukushima, K. Miyagishi, K. Mori, Y. Sagara, K. Kokado, N. Tamaoki, T. Nakamura, H. Nakano\*, Novel Solid-State Fluorophores, a Series of Cyanostilbene-Based Amorphous Molecular Materials, *ChemPhotoChem*, 8(11), e202400169 (2024) (DOI:10.1002/cptc.202400169)
- 3) J. Qi, A. S. Amrutha, S. Ishida-Ishihara, H. M. Dokainish, P. K. Hashim, R. Miyazaki, M. Tsuda, S. Tanaka, N. Tamaoki\*, Caging Bioactive Triarylimidazoles: An Approach to Create Visible Light-Activatable Drugs, *J. Am. Chem. Soc.*, 46(26), 18002-18010 (2024). (DOI:10.1021/jacs.4c04468)
- 4) S. Sahu, K. Yoshizawa, T. Yamamoto, R. Uehara, N. Tamaoki\*, Photoswitchable Auxin-Inducible Degron System for Conditional Protein Degradation with Spatiotemporal Resolution, *J. Am. Chem. Soc.*, 146(31), 21203-21207 (2024). (DOI: 10.1021/jacs.4c05135)
- 5) K. Matsuo\*, T. Kikukawa, T. Waku, A. Kobori, N. Tamaoki\*, A photoswitchable CENP-E inhibitor with single blue-green light to control chromosome positioning in mitotic cells, *RSC Med. Chem.*, 15, 3795-3799 (2024). (DOI:10.1039/D4MD00458B)
- 6) F. S. Thuluvanchery, N. Tamaoki, Y. Sagara\*, Complete suppression of fluorescence from a 9,10-bis(phenylethynyl)anthracene-based ring upon [2]catenane formation, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 97, uoae135 (2024). (DOI: 10.1093/bulcsj/uoae135)
- 7) 【電子研内共著】 N. M. Cheruthu, P. K. Hashim, S. Sahu, K. Takahashi, T. Nakamura, H. Mitomo, K. Ijio, N. Tamaoki\*, Azophotoswitches containing thiazole, isothiazole, thiadiazole, and isothiadiazole, *Org. Biomol. Chem.*, 23, 207-212 (2025). (DOI:10.1039/D4OB01573H)
- 8) P. K. Hashim\*, S. Ahmad, N. M. Cheruthu, S. Sahu, N. Tamaoki\*, Near-Neutral pH Sensing by Azoheteroarene Dyes, *Chem. Eur. J.*, 31, e202403897 (2025). (DOI: 10.1002/chem.202403897)
- 9) S. Ahmad, P. K. Hashim, M. Imajo, N. M. Cheruthu, K. Takahashi, S. Tanaka, T. Nakamura, N. Tamaoki\*, Photoswitchable agonists for visible-light activation of the Wnt signaling pathway, *Org. Biomol. Chem.*, 23, 4240-4245 (2025). (DOI: 10.1039/D4OB01827C)

### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) S. Sahu, A. S. Amrutha, N. Tamaoki\*, Controlling Protein Functionalities with Temporal and Cellular/Subcellular Dimensions of Spatial Resolution with Molecular Photoswitches, *Med. Res. Rev.*, 45, 1142-1162 (2025). (DOI:10.1002/med.22106)

### 4.4 著書

該当なし

### 4.5 特許

該当なし

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

該当なし

##### b. 招待講演 (国内学会)

該当なし

##### c. 一般講演 (国際学会)

該当なし

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) Shifa AHMAD, Hashim P. K., Imajo MASAMACHI, Nussaiba MADAPPURAM CHERUTHU, Nobuyuki TAMAOKI, Photoswitchable agonists for visible-light activation of Wnt-signaling pathway, 2024 年光化学討論会, 九州大学伊都キャンパス, 福岡市, 2024 年 9 月.
- 2) Nusaiba MADAPPURAM CHERUTHU, Saugata SAHU, P. K HASHIM, Hideyuki MITOMO, Kuniharu IJIRO, Nobuyuki TAMAOKI, Azophotoswitches containing thiadiazole, isothiadiazole, oxazole, isoxazole and isothiazole, 2024 年光化学討論会, 九州大学伊都キャンパス, 福岡市, 2024 年 9 月.
- 3) Saugata SAHU, Ryota UEHARA, Nobuyuki TAMAOKI, Conditional protein degradation with spatiotemporal resolution, 2024 年光化学討論会, 九州大学伊都キャンパス, 福岡市, 2024 年 9 月.
- 4) Qi JIAJUN, Ammathnadu S AMRUTHA, Nobuyuki TAMAOKI, Caging Bioactive Triarylimidazoles: a Photopharmacological Approach to Achieve Spatiotemporal Control over Anticancer Treatment, 2024 年光化学討論会, 九州大学伊都キャンパス, 福岡市, 2024 年 9 月.
- 5) 宮脇朋也, 玉置信之, 青木健一, 関淳志, L-アラニンエステルを末端に有するジアセチレンジアミドゲル化剤の合成および特性評価, 第 14 回 CSJ 化学フェスタ, タワーホール船堀, 江戸川区, 2024 年 10 月.
- 6) 石丸真次, Ammathnadu S. Amrutha, 玉置信之, 中野英之, アゾチアゾール骨格を有するフォトクロミックアモルファス分子材料の合成とフォトメカニカル挙動, 第 59 回高分子学会北海道支部発表会, 北海道大学, 札幌, 2025 年 1 月.
- 7) 宮崎龍, 津田真寿美, 齊嘉俊, 玉置信之, 田中伸哉, 乳がんおよび脳腫瘍細胞における光応答性 TGF- $\beta$  受容体 (ALK-5) 阻害薬の評価, 第 47 回日本分子生物学会年会, 福岡国際会議場, 福岡市, 2024 年 11 月.

##### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)

該当なし

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 玉置信之 (高橋仁徳, 北海道大学), "光分子スイッチの X 線結晶構造解析に関する共同研究"

##### b. 国際共同研究

該当なし

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 玉置信之 (代表), 基盤研究 B, "新世代分子スイッチによる ATP システムの完全制御", 2022 年 4 月~2025 年 3 月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

該当なし

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

該当なし

##### b. 国内外の学会の役職

該当なし

##### c. 兼任・兼業

該当なし

##### d. 外国人研究者の招聘

該当なし

##### e. 北大での担当授業科目 (対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 全学教育、化学 II、玉置信之、前期
- 2) 生命科学学院、生命融合科学概論、玉置信之、2024 年 5 月
- 3) 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、2024 年 4 月
- 4) 生命科学学院、生命物質科学特論 (分子組織科学)、玉置信之、2024 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. アウトリーチ活動

該当なし

##### h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

##### i. 客員教員・客員研究員など

該当なし

##### j. 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: 3 人

- 1) Jiajun Qi, 生命科学学院, 博士 (生命科学), A Study on a New Caging Method Aimed at Visible Light-Activable Anticancer Drugs
- 2) Nusaiba Madappuram Cheruthu, 生命科学学院, 博士 (生命科学), Study on Azophotoswitches containing thiazole, isothiazole, thiadiazole and isothiadiazole
- 3) Fazil Thuluvanchery Salim, 生命科学学院, 博士 (生命科学), Development of Catenane-based Supramolecular Mechanophores

# インタラクシオン機能材料研究分野

## スタッフ

教授 長島 一樹 (博士 (工学)、2023年4月1日着任)  
准教授 蓬田 陽平 (博士 (理学)、2024年4月1日着任)  
助教 岡 紗雪 (博士 (環境科学)、2024年4月1日着任)  
事務補助員 浦田 絵美

## 学生

修士課程 風間 勇汰、松村 竜之介、深澤 香奈、  
安 梓萌、趙 弈茗  
学部生 草野 史智夏  
研究生 姚 鴻運

## 1. 研究目標

我々の身の回りに存在する分子群がもつ化学情報は、熱・力・光・音などの物理情報と比較して膨大な情報量を誇り、情報化社会やエネルギー社会の次なる発展へ向けてその有効利用への期待が高まっている。これまで我々の社会を支えてきたエレクトロニクス材料・デバイスは、環境中での劣化を防止するために優れた封止技術によって外界から切り離されてきたが、人や環境から分子情報を収集し、利活用するための材料・デバイスは外界と積極的に相互作用する必要がある。当研究分野では、堅牢性や分子認識能を兼ね備えた機能性材料を原子・分子レベルで設計し、人や環境と触れ合うことで活きるインタラクティブな電子デバイスを創製すると共に、マテリアル-デバイス-データに跨る融合サイエンスを展開し、分子情報に基づく新しい科学技術の創出と価値の創造を目指している。

## 2. 研究成果

### Sub-1 nm 厚みを有する極薄金属酸化物ナノシートの完全選択合成と高速 UV センシングデバイスの創製

二次元金属酸化物ナノシートは、金属酸化物の機能物性や二次元結晶の柔軟性、原子層制限空間などの構造特性を併せ持つ魅力的なナノ材料であり、中でもワイドバンドギャップ、半導体電子輸送特性、圧電特性を有する酸化亜鉛 (ZnO) ナノシートはナノエレクトロニクスやフォトンクス分野で注目を集めている。油水界面に配列した界面活性剤分子層をテンプレートとして利用するイオン層エピタキシー法 (ILE 法) は、簡便性と多彩な材料への展開性から有望な金属酸化物ナノシートの形成手法として有望である。ILE 法では他の手法と比較して薄いナノシートの形成が報告されていることから、ナノシートの極薄膜化に起因する各種センサ特性の向上効果が期待される。そこで本研究では、核形成・結晶成長理論に基づき、ILE 法における ZnO ナノシートの極薄膜化限界探索を行うと共に、得られた ZnO ナノシートを用いてナノシートの極薄膜化に伴う UV センサ特性への影響について検証することを目指した。

昨年実施した研究において、ILE 成長では高 Zn 濃度条件下において ZnO ナノロッドが副生成物として形成されること、加えて油水界面における Zn 分布の局在化を促進することで ZnO ナノシートの選択合成が可能となることを見

出している。本研究では、ZnO ナノシートの選択合成条件下において膜厚方向の結晶成長を抑制するために Zn 濃度を精密に制御した。その結果、従来研究よりも薄い sub-1nm の膜厚を有する ZnO ナノシートの合成に成功した。サンプルの微細構造を透過電子顕微鏡観察により評価した結果、得られた ZnO ナノシートは多結晶化していることが分かった。ZnO ナノシートは規定された三角形構造を有することから、単結晶体として合成されたナノシートがその後のプロセスにおいて多結晶化したものと考えられるが、多結晶化メカニズムの解明は今後の課題とする。ZnO ナノシートの極薄膜化に伴う UV センシング特性への影響を検証するために、単一ナノシートデバイスを構築して UV センシング特性を評価した結果、センシング感度については  $3.1 \times 10^2 \text{ A/W}@5\text{V}$  と従来研究と比較して顕著な特性向上は見られなかったが、応答/回復速度は 12.3ms/24.7ms と従来よりも 10 倍以上高速化されることが分かった。

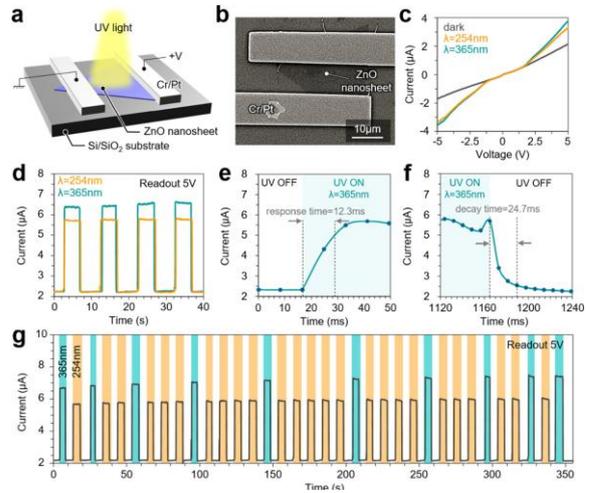


Fig.1 (a) Schematic illustration and (b) FESEM image of a UV photodetector constructed with a single ZnO nanosheet. (c) I-V curves of the ZnO nanosheet device measured under dark condition and UV irradiations with wavelengths of 256 nm and 365 nm (green). (d) Cycled photoresponses, (e) rise response profile, (f) recovery response profile, and (g) successive photoresponses of the ZnO nanosheet device. The photoresponses were measured at a readout voltage of 5 V.

### 金属酸化物ナノワイヤアレイの表面積限界の打破と高感度分子センサの創製

基板上にナノワイヤが自立した構造を有する金属酸化物ナノワイヤアレイは、巨大比表面積および電極に対して良好な電気的接触界面を備えており、化学センサや創エネルギーデバイス、バイオ分析など多岐の分野に渡り優れたデバイス特性を示してきた。ナノワイヤの表面積はナノワイヤアレイデバイスの特性を支配する最も重要なパラメータであり、表面積増加へ向けた数々の取り組みがなされてきたが、結晶面に由来する平滑な表面構造をもつ従来の金属酸化物ナノワイヤアレイでは、ナノワイヤの直径・長さ・数密度によって決定される表面積には実質的な限界が存在していた。本研究では、金属酸化物ナノワイヤにおいて最も精力的に研究がなされてきた酸化亜鉛 (ZnO) ナノワイヤを取り上げ、ナノワイヤの平滑な表面に数nmスケールの微細な凹凸構造を導入するアプローチにより、ナノワイヤアレイにおける従来の表面積増大限界の打破を目指した。

ZnO ナノワイヤアレイ構造体は、基板上にゾルゲル法またはスパッタ法により ZnO シード層を堆積した後に、Zn 原

料を含む95°Cの水溶液中に上記基板を浸漬させることにより作製した。昨年実施した研究において、長時間且つ過剰アンモニア添加条件においてナノワイヤ成長を行った際に微細凹凸構造を有するナノワイヤ構造体の形成を見出している。今年度は微細凹凸構造の形成メカニズムを解明することを目的として、より詳細なサンプル評価を行った。ナノワイヤ直径方向の断面試料を集束イオンビーム(FIB)により作製し、走査型透過電子顕微鏡(STEM)観察による微細構造解析およびエネルギー分散型X線分光(EDS)による面内組成分析を行った結果、上記微細凹凸構造は、単結晶ZnOナノワイヤ表面上に形成されたアモルファスZn-Si-Oナノ構造体であることが示唆された。加えて1000°CでアニールしたサンプルをX線構造解析(XRD)およびSTEM観察を用いて評価した結果、ナノワイヤ表面凹凸構造が結晶化してZn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>が形成された。ZnOナノワイヤの表面凹凸構造形成に資するSi原料の発生源を詳細に追跡した所、過剰アンモニア添加によりガラスビーカーから合成溶液へと溶出したSiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>イオンであることに加えて、Zn-Si-Oの臨界核形成Zn濃度はZnOよりも低く、ZnOナノワイヤの成長時に合成溶液中からZn原料が消費された状況下においても成長可能であることを明らかにした。

本研究で明らかにした表面微細凹凸構造形成メカニズムでは、ガラスビーカーの溶出により発生した溶液内SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>イオン濃度をZn-Si-Oの臨界核形成濃度まで上昇させる必要がある。そこで、予めSiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>イオン濃度を上昇させた溶液にたいして平滑表面を有するZnOナノワイヤアレイを浸漬させることで、ナノワイヤの長さや表面凹凸構造の形成をそれぞれ独立に制御可能であることを見出した。表面凹凸構造の形成によるナノワイヤアレイの面積拡大効果を検証するために、ナノワイヤアレイを水晶振動子マイクロバランス(QCM)チップ上に形成し、分子センシング特性評価を行った。本研究で取り扱う2つの平滑表面・凹凸表面では化学組成が異なることから、ナノワイヤ表面を原子層堆積法により無機薄膜で被覆し、同組成を有する表面間での比較を行った。その結果、表面凹凸構造を有するナノワイヤアレイでは平滑表面サンプルと比較して3-10倍高いエタノールセンシング感度が得られた。以上の結果は、当該表面凹凸構造がナノワイヤアレイの面積増加限界を本質的に打破するための有効なアプローチであることを示している。

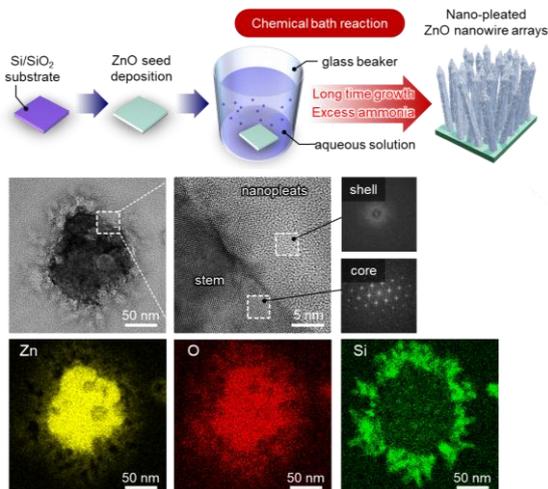


Fig.2 Schematic illustration for the growth process of surface roughened nanowire array (upper). STEM images and FFT patterns of cross-sectional surface roughened nanowire (middle). EDS elemental mapping of cross-sectional surface rough-

## 高分子-カーボンブラックナノコンポジット分子センサの高感度化設計指針の構築

身の回りの揮発性分子群を情報源として化学情報の収集を目指す人工嗅覚センサは、次世代IoTの中核技術として近年注目を集めている。絶縁性ポリマーと導電性ナノカーボン材料の混合物から成るナノコンポジットセンサは、室温動作性やポリマーの分子設計性、印刷技術による異種センサ集積化の点でセンサ素子の有力候補であるが、混合物に由来する複雑な組成・界面構造のため、各種センサ特性(感度・堅牢性・応答速度など)を向上させるための体系的な設計指針が欠如している。そこで本研究では、ナノコンポジットセンサにおける構造的特徴がセンサ特性へ与える影響について明らかにすると共に機能変調へ向けた設計指針を創製することを目的とした。

ポリエチレングリコール(PEG)を用いたナノコンポジットセンサのインクジェット印刷形成プロセスにおいて、PEGと同種の官能基を有する分散剤 Triton X-100 を添加した結果、カーボン粒子のミクロスケール分散性が向上し、デバイス電気抵抗のばらつきが低減する結果を得た。ナノコンポジットセンサの断面構造評価を行った所、インクジェット印刷プロセスにおいてコーヒーリング効果が生じており、センサの中心部と外周部においてカーボン粒子の不均一分布が発生することでデバイス抵抗値のばらつきを増加させることを見出した。そこでインク塗布時の基板温度を変調した所、コーヒーリング効果が劇的に低減され、電気抵抗値ばらつきが劇的に低減する効果を得た。当該ナノコンポジットセンサ膜において、デバイス電極の幅・ギャップサイズを変調してデバイスの電気抵抗値を評価した結果、30-40μm スケールにおいて導電パスネットワークが切れ、導電パスの不均一分布が発生することを明らかにした。上記ナノコンポジットセンサの構造的特徴が及ぼす分子センシングへの影響を検証した結果、分散性・構造均一性の改善に伴い、肺がんマーカーであるノナンールに対する分子センシング感度が5倍以上に向上することを見出した。本研究で得られた一連の成果は、ナノコンポジットセンサのセンサ感度上昇へ向けた体系的設計指針を構築する上で極めて重要な知見であり、多様なポリマー種を利用した高

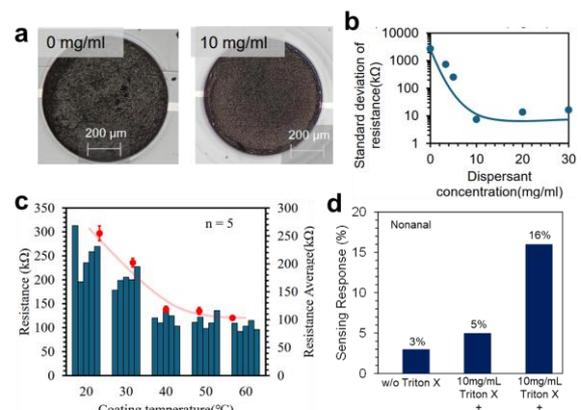


Fig.3 (a) Optical microscopy image of PEG-carbon black nanocomposite sensor with dispersant mixing ratio of 0 mg/ml and 10 mg/ml. (b) Dispersant concentration dependence and (c) inkjet coating temperature dependence on standard deviation of device resistance. (d) Nonanal sensing response of nanocomposite sensors fabricated under various conditions.

感度ナノコンポジットセンサへの展開が期待される。

### 長尺単一構造単層カーボンナノチューブの分離精製技術の開発

単層カーボンナノチューブ (CNT) は、カイラル指数(n,m)で定義される構造に応じて、その性質が金属型から半導体型まで大きく変化する、構造に敏感な材料である。一方、合成された CNT 試料は、通常様々な構造の CNT を含むため、応用の観点で均質な試料を得るためには CNT の分離精製が必要である。水系のゲルクロマトグラフィーを用いた CNT の分離精製は、CNT とその分散剤である界面活性剤の相互作用を活かして、CNT の高精度分離が可能な画期的な技術である。しかしこれまでの研究では、分離前工程として超音波分散が用いられており、超音波により切断され CNT が短尺になる問題があった。多くの用途において CNT は長尺の方が有利であり、超音波フリーな工程が求められる。そこで本研究では、ナノ材料の非破壊分散として実績のある高せん断力ミキサーを CNT の水系に適用し、CNT を長尺のまま分散し、分離精製する技術の開発を行った。

強力な超音波分散では、界面活性剤の種類によらず CNT の分散が可能一方で、高せん断力分散では、界面活性剤の種類で CNT の分散が大きく異なる結果が得られた。界面活性剤を、CNT とより相互作用する疎水性の高いデオキシコール酸ナトリウムにしたところ、4 倍以上高い収率で CNT を分散できることがわかった。得られた CNT 分散液をゲルクロマトグラフィーにより分離したところ、複数の種類の単一構造 CNT の分離に成功した。分離された単一構造 CNT を基板上に塗布し、AFM 測定によりその平均長さが  $1 \mu\text{m}$  以上であることを実証した。これまでの分離 CNT の長さが  $300 \text{ nm}$  程度だったことを考えると、大幅な長尺化を達成している。これらの成果は、分離 CNT は短尺であるというこれまでの分野の常識を覆す成果であり、長尺 CNT を用いたデバイス応用への展開が期待される。また、水系で長尺分離を実現したことにより、他の手法では難しい複数種類の CNT の分離やエナンチオマー分離等も可能であり、CNT の分離手法としてもさらなる発展が見込める。

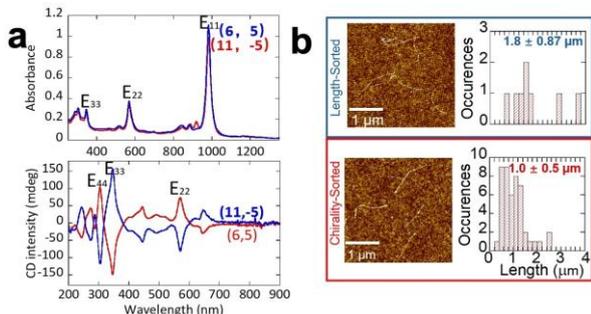


Fig.4 (a) Optical absorption and CD spectra of separated single-chirality single-wall carbon nanotubes (CNTs). (b) AFM images and length histogram of separated long-length CNTs.

### 遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブの均一合成法の開発

遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブ (TMDCNT) は、構造によらず半導体型のナノチューブであり、半導体

の特徴を活かした光電子機能や光触媒機能が注目されている。特に TMDCNT では、円筒構造における曲率(歪み)効果に由来して、バンド変調等の 2 次元 TMDC には無い機能が報告されている。このような TMDCNT の機能は小径の試料でより顕著になると考えられるが、そのような小径 TMDCNT の研究は、大量合成の課題によりほとんど明らかになっていない。そこで本研究では、これまで開発してきた小径 TMDCNT の化学気相合成法のスケールアップを目指して、小径 TMDCNT を基板上に均一に合成する技術の開発を行った。

TMDCNT は、典型的には前駆体である遷移金属オキサイドナノワイヤをカルコゲン化することによって合成される。カルコゲン化では、前駆体の構造を反映したナノチューブが得られるため、構造が制御された TMDCNT を均一に合成するためには、まずは構造が制御された前駆体を均一に合成する必要がある。前駆体の構造や密度は、合成温度の精密制御によって決定される。ここでは、ステンレス製の治具に基板を固定し、合成炉内での基板の温度が均一になるように工夫した。結果として、基板全面に前駆体を同様の密度で成長させ、カルコゲン化により基板全面に  $\text{WS}_2\text{NT}$  等の TMDCNT を得た。合成された TMDCNT は、前駆体の構造を反映して、直径や長さ等の構造の均一性も高く、また直径は  $10 \text{ nm}$  程度とこれまでの最小値と遜色ない値が得られた。これは、均一合成と構造制御合成の両立に成功していることを意味する。本手法は原理的にはスケールアップ可能であり、今後 2 インチ等のウェーハ合成に拡張することにより、小径 TMDCNT の大量合成と大面積のデバイスや光触媒への展開を行う。

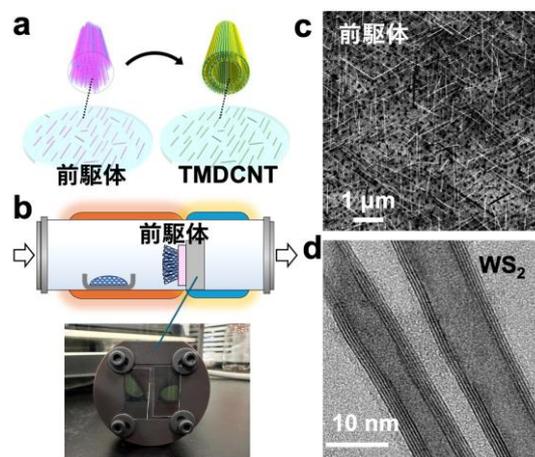


Fig.5 (a) Schematic image of synthesis of transition metal dichalcogenide nanotubes (TMDCNTs) (b) Image of chemical vapor deposition system and home maid holder for TMDCNT synthesis. (c) SEM image of synthesized tungsten oxide nanowires (precursors) (d) TEM image of synthesized TMDCNTs..

### 分子認識無機ナノ構造電極の創製とタンパク質センシング

タンパク質センシングは、がんなどの疾病診断、食中毒やアレルギーの未然防止を目的とした食品衛生管理、さらには細胞活動のモニタリングなど、多岐にわたる応用が期待されるセンシング技術である。中でも電気化学的センシング法は、高速性や高感度、既存の電子デバイスとの統合が容易である点から近年注目を集めており、精力的な研究

が進められている。しかしながら、タンパク質の吸着能の低さや、夾雑物質による非特異的吸着に起因する分子選択性・特異性の不足、さらには分子修飾法に依存した電極の長期安定性や堅牢性の欠如など、本質的な技術的課題が存在しており、その応用範囲はいまだ限定的である。タンパク質センシングの高性能化には、複雑な立体構造や多数の官能基を有する巨大分子であるタンパク質に対し、その形状や官能基の空間配置を高精度に認識し、高効率かつ高選択的に吸着させることが可能な電極構造の構築が不可欠である。本研究では、熱的・化学的に安定な無機材料を用い、分子認識を可能とする立体的足場構造を電極表面に形成することで、高い分子選択性・吸着能・長期安定性を兼ね備えたタンパク質センシング用無機ナノ構造電極の創製を目指した。具体的には、シード支援水熱合成法により酸化亜鉛 (ZnO) ナノワイヤを選択的に成長させた電極を作製した。この構造体にモデルタンパク質としてタンパク質を吸着させた後、酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) によりシェル層を形成し、タンパク質を除去することで、タンパク質に対応した立体的足場構造を有する電極を作製した。

立体足場電極上において電流応答を測定したところ、立体構造の効果によりタンパク質の酸化還元電流密度が増幅されることが明らかとなった。さらに、赤外分光法を用いてタンパク質吸着に対する構造効果を検討した結果、平面電極と比較して、タンパク質の配向が異なる可能性が示唆された。これらの結果は、電極表面に形成された立体構造がタンパク質の高感度かつ高選択的なセンシングに有効であることを示しており、本手法がタンパク質センシング技術の高感度化に貢献し得ることを示唆している。

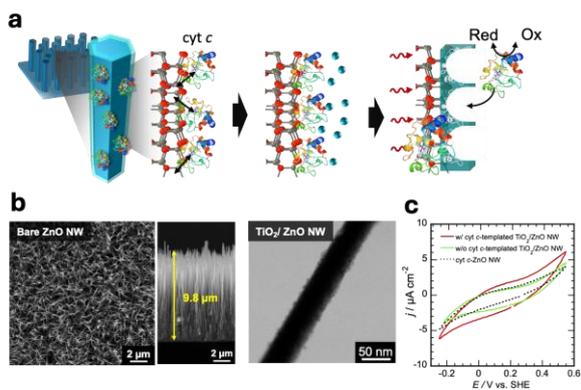


Fig.6 (a) Schematic representation of protein-templated TiO<sub>2</sub>-shelled ZnO nanowires. (b) Images of bare ZnO nanowires and ZnO wires coated with a TiO<sub>2</sub>-shell. (c) Redox responses of redox-protein on TiO<sub>2</sub>/ZnO nanowire electrodes with and without protein-templated structures.

### 無機キラルらせん構造体による可視光応答型光水分解への展開

現在、クリーンエネルギーとしての水素の需要が高まっている。多くの水素燃料は化石燃料の改質によって製造されているため、化石燃料に依存しない水素製造法の開発が求められている。その中でも、太陽光という自然エネルギーを利用可能な可視光応答型光電気化学的水素発生デバイスは、持続可能な水素社会の構築に向けて精力的に研究されている。このような光水分解デバイスの性能は、陽極に

おける酸素発生反応活性により大きく支配されることが知られており、従来は金属酸化物の表面構造や化学組成に着目した光電極の開発が行われてきた。一方、近年ではキラリティ誘起スピン選択 (CISS: Chirality-Induced Spin Selectivity) 効果を利用した革新的なアプローチが注目されている。キラルな電極構造に基づいてスピン選択的な電子移動を制御することで、常磁性分子である酸素の電極反応を、従来のスピン非偏極状態よりも低いエネルギーで進行させることが期待されている。これまでに、有機キラル分子によってスピンフィルター効果が発現することが報告されているが、有機材料は導電性の面で制限がある。そこで本研究では、有機分子に代えて導電性に優れた無機材料を用い、右巻き/左巻きのキラルらせん構造電極を作製し、そのスピン偏極率を評価した。さらに、同一電極を可視光応答型光水分解に適用し、スピン偏極の有効性を検証した。

その結果、らせん長さ 500 nm の無機キラルらせん構造体は、分子系キラル材料 (スピン偏極率 約 15%) の約 3 倍に相当する高いスピン偏極率を示した。また、WO<sub>3</sub> ナノらせん電極を用いて磁場を印加しながら水分解を行った結果、スピン偏極による触媒効果の存在が示唆された。さらに、磁場を印加しない条件下でも、同一長さのアキラル構造と比較して、右巻きキラル構造体では、キラリティと磁場の向きの相乗効果により光電流応答が増幅されることが明らかとなった。これらの成果は、無機キラル構造体がスピン偏極を通じて光電気化学的酸化反応を促進し得ることを示している。

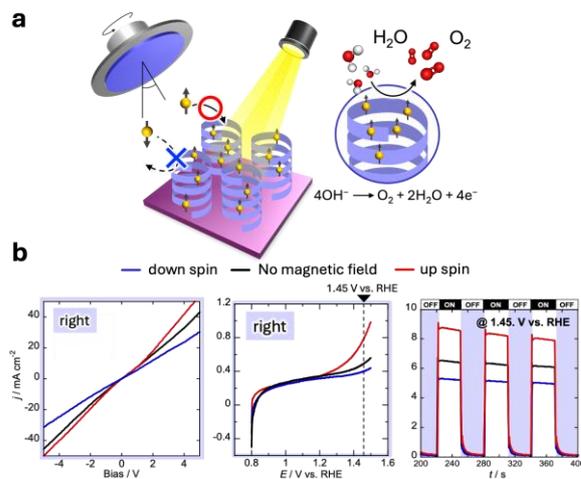


Fig.7 (a) Schematic representation of the preparation of a chiral helical-structured electrode capable of electron spin control. (b) Current-voltage characteristics (left), linear sweep voltammogram under visible light (center), and photocurrent response during water splitting (right), all measured on the right-handed helical structure under applied magnetic field.

### 3. 今後の研究の展望

本年度作製した ZnO ナノシートは規定された三角形の構造を有するにも関わらず微細結晶構造観察の結果からは多結晶体と同定された。今後は多結晶体形成メカニズムを解明すると共に、単結晶金属酸化物ナノシートの創製とそのデバイス応用に取り組む予定である。金属酸化物ナノワイヤアレイの研究では、本年度表面積増加限界の打破に成

功したアプローチに基づき、コアシェル構造を利用して巨大表面積を有する多様な金属酸化物ナノワイヤアレイデバイスを作製し、各種センサ・電極触媒の性能向上を目指す。高分子-カーボンブラックナノコンポジットセンサにおいては、本年度に見出した構造均一性がセンサ感度に与える影響を多様なポリマー材料を用いて検証する他、応答速度や堅牢性を向上させる構造因子の解明にも取り組み、高性能異種センサが集積された人工嗅覚センサの創製を目指す。

CNTの研究では、単一構造CNTのさらなる高純度化が求められており、単一構造CNTの分離精製技術をさらに開発するとともに、得られたCNT試料を配向させ、その伝導特性解明やトランジスタ応用につなげる。TMDCNTの研究では、WS<sub>2</sub>NTの均一合成が実現したことを踏まえ、合成装置をスケールアップし、MoS<sub>2</sub>NT様々な組成のTMDCNTの合成を大面積ウェーハ上に展開できる技術に拡張し、大面積触媒等の機能開拓につなげることを目指す。

分子認識無機ナノ構造電極におけるタンパク質センシングでは、タンパク質の立体足場がタンパク質の吸着、酸化還元電流応答に対して、有効であることが示されたことを踏まえて、シェル層厚み等の条件探索、複数のタンパク質・酵素を含む夾雑物質中での分子認識能を評価する。無機キラルらせん構造体による水電解を可能とする光電極開発では、キラル構造・磁場印加によって光水電解への適用したところ、触媒活性の向上が見込まれたことから、らせん構造パラメーター（らせん長・ピッチ等）に対するスピン偏極率を評価した後、その最適構造での光水電解へのスピン偏極効果を検討する。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文（査読あり）

- 1) K. Chattrairat\*, A. Yokoi\*, M. Zhang, M. Iida, K. Yoshida, M. Kitagawa, A. Niwa, M. Maeki, T. Hasegawa, T. Yokoyama, Y. Tanaka, Y. Miyazaki, W. Shinoda, M. Tokeshi, K. Nagashima, T. Yanagida, H. Kajiyama, Y. Baba\*, and T. Yasui\*, Discrimination of extracellular miRNA sources for the identification of tumor-related functions based on nanowire thermofluidics, *Device* **2**, 100363 (2024). (DOI: 10.1016/j.device.2024.100363)
- 2) M. Zhang\*, M. Ono, S. Kawaguchi, M. Iida, K. Chattrairat, Z. Zhu, K. Nagashima, T. Yanagida, J. Yamaguchi, H. Nishikawa, A. Natsume, Y. Baba\*, and T. Yasui\*, On-Site Stimulation of Dendritic Cells by Cancer-Derived Extracellular Vesicles on a Core-Shell Nanowire Platform, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16**, 29570-29580 (2024). (DOI: 10.1021/acsami.4c00283)
- 3) A. Ahad, Y. Yomogida, Md A. Rahman, A. Ihara, Y. Miyata, Y. Hirose, K. Shinokita, K. Matsuda, Z. Liu, and K. Yanagi\*, Synthesis of Arrayed Tungsten Disulfide Nanotubes, *Nano Lett.* **24**, 14286-14292 (2024). (DOI: 10.1021/acs.nanolett.4c03895)
- 4) T. Yasui\*, A. Natsume\*, T. Yanagida\*, K. Nagashima, T. Washio, Y. Ichikawa, K. Chattrairat, T. Naganawa, M. Iida, Y. Kitano, K. Aoki, M. Mizunuma, T. Shimada, K. Takayama, T. Ochiya, T. Kawai, and Y. Baba\*, Early Cancer Detection via Multi-microRNA Profiling of Urinary Exosomes Captured by Nanowires, *Anal. Chem.* **96**, 17145-17153 (2024). (DOI: 10.1021/acs.analchem.4c02488)
- 5) M. Fujioka\*, K. Zagarusem, S. Iwasaki, A. Sharma, K. Watanabe, R. Nakayama, M. Momai, Y. Yamaguchi, H. Shimada, K. Nomura, Y. Mizutani, H. Sumi, M. Tanaka, M. Jeem, M. Hattori, H. Saitoh, T. Ozaki, M. Nagao, and K. Nagashima, Hydrogen-Assisted Mg Intercalation into 2H-TaS<sub>2</sub>, *J. Am. Chem. Soc.* **146**, 34324-34332 (2024). (DOI: 10.1021/jacs.4c07294)
- 6) H. Hashimoto\*, K. Minehisa, K. Nakama, K. Watanabe, K. Nagashima, T. Yanagida, and F. Ishikawa\*, Rolled-Up Membranes from GaAs/AIO<sub>x</sub> Core-Shell Nanowire Ensembles Through Natural Oxidation, *Adv. Opt. Mater.* **13**, 2401968 (2025). (DOI: 10.1002/adom.202401968)
- 7) P. Parisrisarn, K. Chattrairat\*, Y. Nakamura, K. Nagashima, T. Yanagida, Y. Baba\*, and T. Yasui\*, Non-toxic core-shell nanowires for in vitro extracellular vesicle scavenging, *Chem. Commun.* **61**, 2269-2272 (2025). (DOI: 10.1039/d4cc03767g)
- 8) 【電子研内共著】 R. Matsumura, Y. Kazama, H. Saito, T. Yasui, Y. Matsuo, A. Nasu, H. Kobayashi, S. Oka, N. Khemasiri, Y. Yomogida, and K. Nagashima\*, Selective Growth of ZnO Nanosheets via Ionic Layer Epitaxy for UV Photodetection Application, *ACS Appl. Nano Mater.* **8**, 2623-2631 (2025). (DOI: 10.1021/acsanm.4c07224)
- 9) Y. H. Koo, Y. Tsutsui\*, M. Omoto, Y. Yomogida, K. Yanagi\*, Y. K. Kato, M. A. Hermosilla-Palacios, J. L. Blackburn\*, and S. Seki\*, Circularly Polarized Light-Induced Microwave Conductivity Measurement: Rapid Screening Technique of Electronic Conductivity in Chiral Molecular Materials, *J. Phys. Chem. Lett.* **16**, 3232-3239 (2025). (DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5c00370)

### 4.2 学術論文（査読なし）

該当なし

### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 長島一樹, 風間勇汰, 趙弈茗, 金属酸化物ナノワイヤアレイを用いた分子センサ固体表面上の分子挙動解析と分子フィルタリングデバイス, *Chemical Sensors* **41**, 14-22 (2025)

### 4.4 著書

- 1) F. Ishikawa, K. Nagashima, T. Yanagida, R. D. Richards, and I. A. Buyanova, "Microtexture and Polymorphism Observed During the Molecular-Beam Epitaxy Growth of Group III-V Semiconductor Nanostructures", *Engineering Crystal Habit -Applications of Polymorphism and Microtexture Learning from Nature-*, Chapter 7, 109-142, Springer (2025). (ISBN: 978-981-96-0265-0)

### 4.5 特許

- 1) 蓬田陽平, 長島一樹, 安梓萌, "カーボンナノチューブの精製方法", 特願 2025-031766, 2025年2月28日

### 4.6 講演

#### a. 招待講演（国際学会）

- 1) Y. Yomogida, "Synthesis, characterization, and properties of structure-controlled nanotubes", The fifth edition of the Nanoscience Summer School @ Yachay Tech 2024 (NSSY 2024), Puerto Ayora Galapagos Islands, Ecuador, May 22<sup>nd</sup>, 2024
- 2) K. Nagashima, "Odor Digitization Technology and Value Creation", International Conference on Electro-physics & Information Technology Applications 2024 (ICEP-ITA2024), online, June 24<sup>th</sup>, 2024
- 3) K. Nagashima, "Nanowire-based molecular selective filtration device", Korea University (MSE) & Hokkaido University Joint Workshop, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Hokkaido, July 22<sup>nd</sup>, 2024

- 4) Y. Yomogida, “Synthesis and properties of structure-controlled transition metal dichalcogenide nanotubes”, 2024 International Forum on Functional Materials (IFFM 2024), Shinwa World Jeju, Korea, August 20<sup>th</sup>, 2024
  - 5) Y. Yomogida, “Synthesis and functionalization of transition metal dichalcogenide nanotubes”, JUNCTION 2024, Yokohama Port Opening Memorial Hall, Kanagawa, September 10<sup>th</sup>, 2024
  - 6) K. Nagashima, “Metal Oxide Nanowire Array to Overcome Odor Sensing Limits”, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRiME) 2024, Hawaii Convention Center, USA, October 11<sup>th</sup>, 2024
  - 7) Y. Yomogida, “Synthesis and properties of transition metal dichalcogenide nanotubes with strain effect”, The 2024 RIES-CEFMS Joint International Symposium, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan, November 28<sup>th</sup>, 2024
  - 8) K. Nagashima, “Challenge for Odor Digitization using Inkjet-Printable Artificial Olfactory Sensor”, The 31st International Display Workshops (IDW'24), Sapporo Convention Center, Hokkaido, December 4<sup>th</sup>, 2024
- b. 招待講演 (国内学会)**
- 1) 長島一樹, “匂いのデジタル化と価値創造”, 情報センシング研究会, 北海道大学情報教育館, 北海道, 2024年8月5日
  - 2) 蓬田陽平, “無機ナノチューブの構造制御と物性研究”, フラレン・ナノチューブ・グラフェン若手研究会, 高知工科大学, 高知, 2024年8月31日
  - 3) 長島一樹, “仮想匂いを介した匂いのデジタル化と価値創造”, 第85回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, 2024年9月16日
  - 4) 長島一樹, “においの情報的価値を創出する分子認識材料・センサデバイス”, 薄膜デバイス研究会第21回研究集会, 龍谷大学成就館, 京都, 2024年11月28日
  - 5) 長島一樹, “核形成・結晶成長で設計する金属酸化物ナノ構造体の化学合成”, 日本表面真空学会東北北海道支部令和6年度学術講演会, TKP 札幌ビジネスセンター赤レンガ前, 北海道, 2025年3月10日
  - 6) 松村竜之介, 風間勇汰, 斉藤光, 安井隆雄, 松尾保孝, 奈須滉, 小林弘明, 岡紗雪, Narathon Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “二次元 ZnO ナノシートの完全選択合成と高速紫外光センシング特性”, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学, 千葉, 2025年3月16日
- c. 一般講演 (国際学会)**
- 1) R. Matsumura, Y. Kazama, N. Khemasiri, and K. Nagashima, “Selective Synthesis of ZnO Nanosheet in Ionic Layer Epitaxy for Molecular Sensing Application”, International Union of Material Research Societies-18th International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM2024), City University of Hong Kong, Hong Kong, May 18<sup>th</sup>, 2024 (Oral)
  - 2) Y. Kazama, R. Matsumura, S. Oka, H. Yoshida, N. Khemasiri, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Breaking The Surface Area Limit of Metal Oxide Nanowire Arrays by Competitive Interplay of Crystal Growth and Chemical Etching”, 37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2024), Kyoto Brighton Hotel, Kyoto, Japan, November 15<sup>th</sup>, 2024 (Oral)
  - 3) S. Oka, M. Horprathum, M. Kato, I. Yagi, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Photoelectrocatalytic reactions depending on magnetic field on inorganic nanohelical structured electrodes”, The 25th RIES-Hokudai International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster)
  - 4) Y. Kazama, R. Matsumura, S. Oka, H. Yoshida, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Drastic Sensitivity Enhancement of ZnO Nanowire-Incorporated QCM Molecular Sensors by Surface Roughening Approach”, The 25th RIES-Hokudai International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster)
  - 5) R. Matsumura, Y. Kazama, H. Saito, Y. Matsuo, S. Oka, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Sub-1 nm-thick ZnO Nanosheet UV Photodetector”, The 25th RIES-Hokudai International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster)
  - 6) K. Fukazawa, J. Chaiyanut, Y. Kazama, S. Oka, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Direct Visualization of Chemo-Marker Features in Odors by Machine Learning-based Image Analysis of 2D GC-MS Data”, The 25th RIES-Hokudai International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster)
  - 7) R. Matsumura, Y. Kazama, H. Saito, Y. Matsuo, S. Oka, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Designed Synthesis of Sub-1 nm-Thick ZnO Nanosheet Towards High-Speed UV Photodetection”, ISAJ Hokkaido 2024 Symposium on Collaborative Solutions for a Sustainable World, Creative Research Institute, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, December 13<sup>th</sup>, 2024 (Poster)
  - 8) K. Fukazawa, J. Chaiyanut, Y. Kazama, S. Oka, Y. Yomogida, and K. Nagashima, “Multiple Chemo-Markers Identification in Odor Analysis by Combining Pixel-Segmented Image Analysis and Machine Learning”, ISAJ Hokkaido 2024 Symposium on Collaborative Solutions for a Sustainable World, Creative Research Institute, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, December 13<sup>th</sup>, 2024 (Poster)
- d. 一般講演 (国内学会)**
- 1) 松村竜之介, 風間勇汰, 斉藤光, 松尾保孝, 奈須滉, 小林弘明, 岡紗雪, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “気液界面を利用した1nm厚みを有する金属酸化物ナノシートの合成”, 第10回北大部局横断シンポジウム, 北海道大学, 北海道医学部フラテホール 2024年9月6日 (ポスター発表)
  - 2) 風間勇汰, 松村竜之介, 岡紗雪, 吉田秀人, 石川史太郎, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “金属酸化物ナノワイヤアレイデバイスの高性能化へ向けた表面積拡大アプローチ”, 第10回北大部局横断シンポジウム, 北海道大学, 北海道医学部フラテホール 2024年9月6日 (ポスター発表)
  - 3) 風間勇汰, 松村竜之介, 岡紗雪, 吉田秀人, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “ZnO ナノワイヤアレイにおける表面積の限界打破と分子センサデバイス応用”, 第85回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟 2024年9月16日 (口頭発表)
  - 4) 松村竜之介, 風間勇汰, 斉藤光, 松尾保孝, 奈須滉, 小林弘明, 岡紗雪, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “金属イオンの界面局在化による二次元 ZnO ナノシートの完全選択合成”, 第85回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟 2024年9月16日 (口頭発表)
  - 5) 風間勇汰, 松村竜之介, 岡紗雪, 吉田秀人, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “結晶成長と化学エッチングの局所的協奏作用に基づく巨大表面酸化物ナノワイヤの創製と分子センシング応用”, 第14回CSJ化学フェスタ, タワーホール船堀, 東京 2024年10月23日 (ポスター発表)

- 6) 松村竜之介, 風間勇汰, 斉藤光, 松尾保孝, 奈須滉, 小林弘明, 岡紗雪, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “二次元 ZnO ナノシートの選択成長を実現する “Concentration Window” の探索”, 第 14 回 CSJ 化学フェスタ, タワーホール船堀, 東京 2024 年 10 月 23 日 (ポスター発表)
- 7) 松村竜之介, 風間勇汰, 斉藤光, 松尾保孝, 奈須滉, 小林弘明, 岡紗雪, N. Khemasiri, 蓬田陽平, 長島一樹, “サブ 1nm 厚みを有する ZnO ナノシートの合成と高速紫外光センシング特性”, 化学系学協会北海道支部 2025 年冬季研究発表会, 北海道大学学術交流会館, 北海道 2025 年 1 月 21 日 (口頭発表)
- 8) 風間勇汰, 松村竜之介, 岡紗雪, 吉田秀人, 蓬田陽平, 長島一樹, “金属酸化物ナノワイヤの新奇表面構造設計と劇的な分子センシング特性の向上”, 化学系学協会北海道支部 2025 年冬季研究発表会, 北海道大学学術交流会館, 北海道 2025 年 1 月 22 日 (ポスター発表)
- 9) Z. An, S. Oka, K. Nagashima, and Y. Yomogida, “Large-scale separation of micrometer-long single-chirality single-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant systems”, 第 68 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2025 年 3 月 4 日 (ポスター発表)
- 10) 岡紗雪, Mati Horprathum, 加藤優, 八木一三, 蓬田陽平, 長島一樹, “無機らせん構造電極における光電気化学水酸化反応”, 分子研研究会「キラリティが関連する動的現象」, 2025 年 3 月 10 日 (ポスター発表)

#### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)

- 1) 長島一樹, “単結晶金属酸化物ナノワイヤ構造体の自在設計と新奇デバイス機能開拓に関する研究”, 公益財団法人本多記念会第 45 回本多記念研究奨励賞受賞記念講演, 学士会館, 東京, 2024.5.24 (招待講演)
- 2) 長島一樹, “空間選択性の無機ナノ材料化学が生み出す新機能材料・デバイステクノロジー”, 日本分析化学会北海道支部 2024 年公開セミナー, 旭川高等専門学校, 北海道, 2024 年 12 月 3 日

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 長島一樹 (藤岡正弥, 産総研), 物質・デバイス領域共同研究, *J. Am. Chem. Soc.* **146**, 34324-34332 (2024)
- 2) 長島一樹 (安井隆雄, 東京科学大), 物質・デバイス領域共同研究, *Device* **2**, 100363 (2024) / *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16**, 29570-29580 (2024) / *Anal. Chem.* **96**, 17145-17153 (2024) / *Chem. Commun.* **61**, 2269-2272 (2025) / *ACS Appl. Nano Mater.* **8**, 2623-2631 (2025)
- 3) 長島一樹 (石川史太郎, 北大量子集積エレクトロニクス研究センター), *Adv. Opt. Mater.* **13**, 2401968 (2025)
- 4) 長島一樹 (仁科勇太, 岡山大), 物質・デバイス領域共同研究
- 5) 長島一樹 (劉江洋, 東大), 物質・デバイス領域共同研究
- 6) 長島一樹 (八乙女彩子, 北海道医療大), 物質・デバイス領域共同研究
- 7) 長島一樹 (殿元裕介, 東大), 物質・デバイス領域共同研究

- 8) 長島一樹 (斉藤光, 九大先導研), *Cross-Barrier Ionics*, *ACS Appl. Nano Mater.* **8**, 2623-2631 (2025)
- 9) 長島一樹 (小林弘明/奈須滉, 北大理), 北大部局横断, *ACS Appl. Nano Mater.* **8**, 2623-2631 (2025)

##### b. 国際共同研究

- 1) K. Nagashima (N. Khemasiri, NANOTEC), *ACS Appl. Nano Mater.* **8**, 2623-2631 (2025)

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 長島一樹 (代表), 基盤研究(B), “生体の匂い情報処理システムを模倣した新しい原理の人工嗅覚センサ”, 2022 年 4 月~2025 年 3 月
- 2) 長島一樹 (分担), 基盤研究(A), “融合型電子材料ナノワイヤのマクロスケール機能開拓”, 2023 年 4 月~2027 年 3 月
- 3) 蓬田陽平 (代表), 基盤研究(B), “小径無機ナノチューブの大量合成技術の開発とその応用”, 2022 年 4 月~2025 年 3 月
- 4) 岡紗雪 (代表), 研究活動スタート支援, “電位印加によるタンパク質吸着構造制御と分子認識無機ナノ構造電極の創製”, 2024 年 8 月~2026 年 3 月

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 長島一樹 (代表), JST AIP 加速課題, “難発見性婦人科系疾患の無侵襲検出・早期治療へ向けた人工嗅覚センサシステムの構築”, 2023 年 4 月~2026 年 3 月
- 2) 長島一樹 (代表), JST さくらサイエンスプログラム, “人工嗅覚センサ材料・システムに関する日中研究交流”, 2024 年 8 月
- 3) 長島一樹 (代表), NEDO 官民による若手研究者発掘支援事業(マッチングサポートフェーズ), “アクティブ制御型除湿デバイスによる変動湿度環境下の安定な匂いセンシング”, 2024 年 10 月~2027 年 3 月
- 4) 蓬田陽平 (代表), JST 創発的研究支援事業, “完全半導体ナノチューブアレイの創成と機能開拓”, 2024 年 10 月~2028 年 3 月

##### c. 民間助成金

- 1) 長島一樹 (代表), ロッテ財団 (奨励研究助成), “匂いセンシングの網羅的データマイニングに基づく食後ヘルスマニタリング技術の開発”, 2024 年 3 月~2026 年 3 月
- 2) 長島一樹 (代表), R&T コラボプロジェクト, “分子輸送制御機構を備えた分子センシングシステムの開発”, 2025 年 1 月~2026 年 3 月
- 3) 蓬田陽平(代表), 池谷科学技術振興財団 (単年度研究助成), “光学活性単層カーボンナノチューブを用いた近赤外円偏光発光材料の研究”, 2024 年 4 月~2025 年 3 月
- 4) 蓬田陽平(代表), コニカミノルタ画像科学奨励賞 (助成金), “光学活性単層カーボンナノチューブを用いた近赤外円偏光発光材料の研究”, 2024 年 4 月~2027 年 3 月
- 5) 岡紗雪 (代表), ノーステック財団, “無機ナノ構造電極表面の立体足場形成によるタンパク質センシング”, 2024 年 9 月~2025 年 3 月

#### 4.10 受賞

- 1) 長島一樹 (単結晶金属酸化物ナノワイヤ構造体の自在設計と新奇デバイス機能開拓に関する研究), 公益財団法人本多記念会 第 45 回本多記念研究奨励賞,

2024年5月24日

- 2) 岡紗雪 (高スピン偏極可能な無機ナノキラルらせん構造電極の創製と新規電極触媒開発プラットフォームの開拓), 第10回北大大局横断シンポジウム研究助成銅賞, 2024年9月6日.
- 3) 松村竜之介 (気液界面を利用した 1nm 厚みを有する金属酸化物ナノシートの合成), 第10回北大大局横断シンポジウムベストポスター賞, 2024年9月6日.
- 4) 松村竜之介 (二次元 ZnO ナノシートの選択成長を実現する “Concentration Window”の探索), 第14回 CSJ 化学フェスタ 2024 優秀ポスター発表賞, 2024年11月29日.
- 5) K. Fukazawa (Direct Visualization of Chemo-Marker Features in Odors by Machine Learning-based Image Analysis of 2D GC-MS Data), The 25th RIES-Hokudai International Symposium Best Poster Award, 2024.12.10.
- 6) R. Matsumura (Sub-1 nm-thick ZnO Nanosheet UV Photodetector), The 25th RIES-Hokudai International Symposium Poster Award, 2024.12.10.
- 7) 風間勇汰 (金属酸化物ナノワイヤの新奇表面構造設計と劇的な分子センシング特性の向上), 化学系学協会北海道支部 2025 年冬季研究発表会 最優秀講演賞 (ポスター発表部門), 2025年1月31日.
- 8) 松村竜之介 (サブ 1nm 厚みを有する ZnO ナノシートの合成と高速紫外光センシング特性), 化学系学協会北海道支部 2025 年冬季研究発表会 優秀講演賞(口頭発表部門), 2025年1月31日.
- 9) 松村竜之介 (金属イオンの界面局在化による二次元 ZnO ナノシートの完全選択合成), 公益財団法人応用物理学会 第 57 回応用物理学会講演奨励賞, 2025年3月14日.

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

- 1) 長島一樹, 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, 2023年10月25日~2024年10月24日.
- 2) 長島一樹, 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, 2024年10月22日~2025年10月21日.

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) K. Nagashima, International Advising Committee (18<sup>th</sup> International Conference on Electronic Materials 2024 (IUMRS-ICEM2024)), 2023年7月4日~2024年5月20日
- 2) K. Nagashima, Program Committee Member 2-3: Nanofabrication (37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2024)), 2024年4月17日~2024年12月31日

##### c. 兼任・兼業

- 1) 長島一樹, 兼務教員 (北海道大学電子科学研究所 附属社会創造数学研究センター), 2024年4月1日~2025年3月31日.

##### d. 外国人研究者の招聘

- 1) Prof. Guozhu Zhang, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9日.
- 2) Zeyu Wang, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9日.
- 3) Rui Gao, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9日.

- 4) Chao Zhang, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9日.
- 5) Chengze Gao, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9日.
- 6) Ke Chen, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9日.
- 7) Jiangfei Shi, East China University of Science And Technology, 2024年8月5日~9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, 長島一樹, 蓬田陽平, 春夏ターム
- 2) 全学共通, 環境と人間, 長島一樹, 夏ターム
- 3) 全学共通, 化学のフロントランナーII, 長島一樹, 秋冬ターム
- 4) 大学院共通, ナノデバイス材料特論, 長島一樹, 蓬田陽平, 夏ターム

##### f. 北大以外での非常勤講師 (対象、講義名、担当者、期間)

該当なし

##### g. アウトリーチ活動

- 1) 長島一樹, 日本化学会北海道支部主催 夢・化学-21 北海道大学化学系への二日体験入学 特別講義「情報の宝庫である匂いのデータ化と利活用」, 北海道大学, 2024年8月1日
- 2) 長島一樹, 分析化学会公開セミナー「無機ナノ結晶の空間選択成長が生み出す新機能材料・デバイステクノロジー」, 旭川工業高等専門学校, 2024年12月3日

##### h. 新聞・テレビ等の報道

- 1) “暗がりに白い花々”, 読売新聞みんなのカガク Snapshot (夕刊 4面), 2024年5月2日.

##### i. 客員教員・客員研究員など

- 1) 藤岡正弥, 客員研究員(リサーチフェロー称号付与), 産業技術総合研究所, 2024年4月1日~2025年3月31日.
- 2) Chaiyanut Jirayupat, 客員研究員, MI-6/東京大学, 2024年4月1日~2025年3月31日.
- 3) Yiming Zhao, 客員研究員, 2024年10月1日~2025年2月28日.

##### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位: 0人

該当なし

博士学位: 0人

該当なし

# 電子物性材料創成研究分野

## スタッフ

教授 小林 夏野 (博士 (工学)、2024 年 4 月 1 日着任)

准教授 近藤 憲治 (博士 (工学)、2003 年 4 月 1 日着任)

事務補助員 石田 真美

## 学生

博士課程 該当なし

修士課程 該当なし

学部 該当なし

## 1. 研究目標

本研究分野は電子相関から現れる超伝導や磁性を中心とした新奇な電子状態を実現する物質開発を目指している。多様な電子状態を実現する電子材料物質は多くの相互作用が同程度のエネルギースケールで競合する舞台であることから、興味を集めてきた。このような電子材料を対象とし系統的に変化させた新規物質を合成することによって、電子状態における相互作用の解明や新奇電子状態の実現が可能となる。このような目的から、本研究分野においては特に超伝導に着目し新規物質の開発を目指している。

## 2. 研究成果

### (a) 層状物質における超伝導体の探索

カルコゲナイドのうち、層状構造を取るカルコゲナイドを対象として様々な新規超伝導体探索を行っている。そのうちの積層構造のポリタイプによって変化する超伝導体を見出し、その結果として超伝導転移温度が大きく上昇することを明らかにした。

TaSe<sub>2</sub>は、通常図 1 のように 2 枚がユニットとなる結晶構造を持つ。Ta を中心とした三角柱が連なった層状構造を持ち、Ta が三角形の中心からずれた位置にあることから 1 層を取り出すと反転対称性が破れた配置であることが知られている。この中心位置が鏡映対称になるように隣接層が位置すると、ちょうど 2 枚がユニットとなるような構造になり、グローバルな結晶構造としては反転対称性を持つことになる。

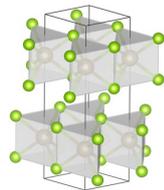


図 1 2H-TaS<sub>2</sub> の結晶構造

同じ積層要素を持つが、3 層が積層ユニットとなる 3R-TaSe<sub>2</sub> は構造の報告のみがありその詳細は不明であった。この積層構造の合成を安定した条件で合成することに成功し、その超伝導転移温度や超伝導特性を測定することに成功した。この構造変化に伴い、超伝導転移温度は 0.4 K (2H-TaSe<sub>2</sub>) から 3.8 K (3R-TaSe<sub>2</sub>) に大幅に上昇し、その超伝導が

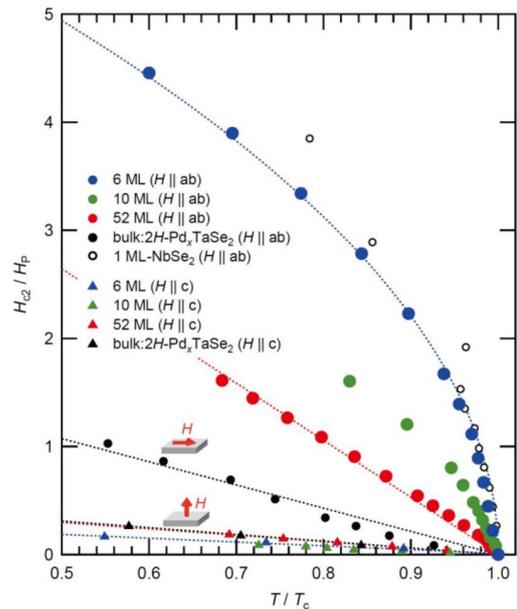


図 2 3R-TaSe<sub>2</sub>における積層数による上部臨界磁場の変化

磁場によって壊される上部臨界磁場に大きな変化がみられることを明らかにした。

超伝導は 2 電子が何らかの形で引力を感じてクーパー対を形成することにより凝縮系となった状態であるが、このときの電子対は通常電子スピンの反対の符号を持ち、運動量も反対の符号を持つ電子が組むことが知られている。これは、電子対を組むことが出来る電子数を最大にするためである。超伝導状態にある電子対に磁場を印可すると、ある程度の強さになったところで電子対を形成することが出来なくなることから、磁場を印可したときに超伝導が破壊される磁場の強さを求めることが出来る。超伝導が完全に壊れる上部臨界磁場は、超伝導が壊れる温度(超伝導に転位する温度) $T_c$ と強く関連することが知られている。

反転対称性を持たない結晶構造を持つ超伝導体では、電子対を形成する電子状態に変調が起こることが知られている。そのため、TaSe<sub>2</sub>において反転対称性がある結晶構造からない結晶構造に変化したときに、超伝導転移温度以外にも変化がみられることが期待される。特に対象物質は積層構造を持つために、磁場印加方向を超伝導面に垂直な方向と平行な方向で異なる振る舞いが見られる。3R-TaSe<sub>2</sub>では、超伝導面に平行に磁場を印可したときには、通常予測される上部臨界磁場(パウリリミット  $H_p$ )に比べて大きく上昇することが確認された(図 2)。

### (b) カルコゲナイド超伝導体における局所構造の重要性

超伝導が発現するためには通常クローン反発力が働く電子間に何らかの機構で引力が働く必要がある。金属超伝導体などを対象に提唱された BCS 理論においてはフォノンを経ることによって電子間に引力が働く機構が説明された。このとき、電子とフォノンの相互作用の大きさは直接測定することが難しく、超伝導発現もしくは超伝導転移温度の見積りが困難である一つの要因となっている。

カルコゲナイド超伝導体 PdTe は、図 3 のように Pd の代わりに Te が六面体配位し、さらに 3 次元的にネットワークを組んだ 3 次元的な結晶構造を持つ。

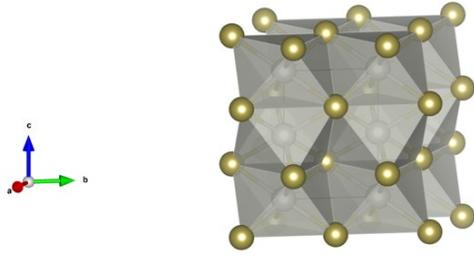


図3 PdTeの結晶構造

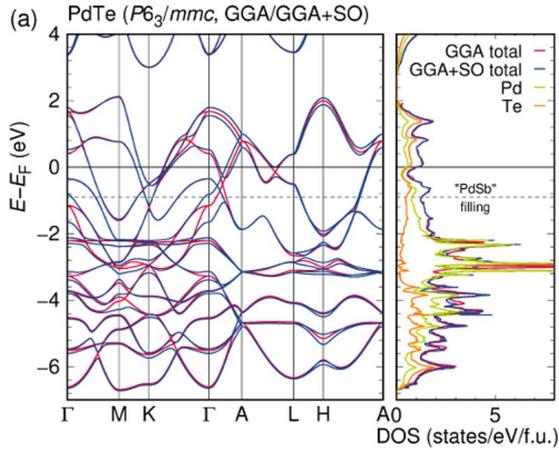


図4 PdTeの電子構造

図4のように第一原理計算で得られた電子構造を見ると、フェルミエネルギー付近はPd/Te両方からの寄与があり、金属的な特徴を持つことがわかる。フェルミエネルギーにかかるバンドは複数あり、キャリア数が多い金属的な特徴を持つ超伝導体であることがわかる。構造的に類似の鉄系超伝導体において化学圧力による超伝導発現があったことから、同様の効果を期待してPd欠損試料とTeに微量のSbを置換することによって格子定数を系統的に変化させることを試みた。その結果として超伝導転移温度は系統的に変化したが、その二つの変化を格子定数の圧力変化だけでは説明することが出来なかった。そのため、Pd-Teの局所構造に着目し、図5に示すように中心にあるPdからそれを取り囲むPd-Te間距離 $d_{\text{Pd-Te}}$ とTe-Pd-Teの角度 $\theta$ を定義して、超伝導転移温度との関係を調べた(図6)。その結果、距離に対しては単調に変化するのとは比べ、ある角度で超伝導転移温度がピークを持つことがわかった。これは、通常は考慮されていない電子格子相互作用の詳細が超伝導に対して強い効果を持つことを示す初めての結果である。

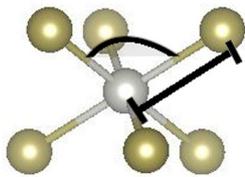


図5 PdTe6におけるTe-Pd-Te角度とPd-Te間距離

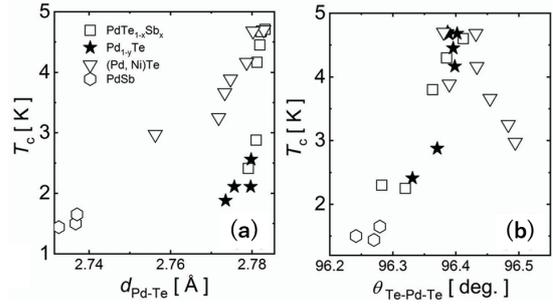


図6 (a)Pd-Te距離と(b)Te-Pd-Te角度と超伝導転移温度 $T_c$ の関係

### 3. 今後の研究の展望

超伝導に関する研究は既に長い歴史があり、多くの超伝導体が知られている。しかし、その一般的な超伝導発現機構は新しい超伝導物質の発見と共に、より解明が困難になっている。本研究分野では、新規超伝導体の開発を通して超伝導発現機構を明らかにし、より高温・一般的な環境で利用できる超伝導体の開発を目指す。

### 4. 資料

#### 4.1 学術論文 (査読あり)

該当なし

#### 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

該当なし

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

1) [Kaya Kobayashi](#), “The Superconductivity and Stacking Sequence Modulations in Layered Chalcogenides”, 2024 RIES-CEFMS Symposium, NYCU, Taiwan, 2024年11月28日.

##### b. 招待講演 (国内学会)

1) [小林夏野](#), “The superconductivity and stacking sequence modulations in layered chalcogenides”, 第34回日本MRS年次大会, 波止場会館, 横浜市, 2024年12月16日.

##### c. 一般講演 (国際学会)

該当なし

##### d. 一般講演 (国内学会)

1) [村上博信](#), [松下智裕](#), [橋本由介](#), [小林夏野](#), [有岡幸一郎](#) “光電子ホログラフィーによる $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$ の積層構造解析”, 日本物理学会 2025年春季大会, オンライン, 2025年3月20日.

2) [村松春紀](#), [三石夏樹](#), [上野哲平](#), [小澤健一](#), [小林夏野](#), [石坂香子](#) “顕微ARPESによるミスフィット層状化合物 $(\text{PbSe})_{1.16}(\text{TiSe}_2)_2$ の微細電子状態の観測” 日本物理学会 2025年春季大会, オンライン, 2025年3月20日

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) 小林夏野, “反転対称性の破れた積層超伝導体の探索”, 令和6年度 アシンメトリ量子 領域全体会議・公募研究キックオフ会議, 東広島芸術文化ホール(くらら)小ホール, 広島県東広島市, 2024年5月30日
- 2) 小林夏野, “Superconductivity in intercalated semiconductors”, 「北の大地で物質科学の将来を語る」研究会, 北海道大学電子科学研究所, 北海道, 2024年5月10日(招待講演).
- 3) 小林夏野, “層の重なりと電子状態”, ISSP Women's Week 2024 研究交流会, 東京大学物性研究所, 千葉県, 2024年12月3日(招待講演).
- 4) 小林夏野, “元素反応法を用いた非整合積層構造薄膜について”, 学術変革(A) アシンメトリ量子トピカルミーティング「精密計測×アシンメトリ量子物質:アシンメトリ量子物性の深化に向けて」, JAEA, 東海村, 2025年2月10日(招待講演).
- 5) Kaya Kobayashi, “The superconductivity and stacking sequence modulations in layered chalcogenides”, The 25th RIES-Hokudai International Symposium 緯[i], クラーク会館, 北海道大学, 札幌市, 2024年12月10日(招待講演).
- 6) 村上博信, 松下智裕, 橋本由介, 小林夏野, 有岡幸一郎 “光電子ホログラフイーによる $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$ の積層構造解析”, 超秩序構造科学第9回報告会, 名古屋工業大学, 名古屋市, 2025年3月8日.

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 小林夏野 (石坂香子、東京大学工学部) “ミスフィット層状カルコゲナイドの電子状態”.
- 2) 小林夏野 (小濱芳允、東京大学物性研究所) “ミスフィット層状カルコゲナイドの電子状態”.
- 3) 小林夏野 (板橋勇輝、理化学研究所) “ミスフィット層状カルコゲナイドの電子状態”.
- 4) 小林夏野 (松岡秀樹、東京大学生産技術研究所) “ミスフィット層状カルコゲナイドの電子状態”.
- 5) 小林夏野 (松下智裕、奈良先端科学技術大学院大学) “ミスフィット層状カルコゲナイドの積層構造”.
- 6) 小林夏野 (幸坂祐生、京都大学) “ミスフィット層状カルコゲナイドの電子状態”.

##### b. 国際共同研究

- 1) Kaya Kobayashi (Christophe Marcenat, Neel 研究所, フランス) “FFLO 超伝導候補物質の強磁場下における比熱測定”
- 2) Kaya Kobayashi (Marie-aude Measson, Neel 研究所, フランス) “NbSe<sub>2</sub> 派生超伝導体における電荷密度波と超伝導”
- 3) Kaya Kobayashi (T. Samuely, Pavol Jozef Šafárik University, Slovakia) “TaS<sub>2</sub> misfit layered materials and condensations at low temperatures”
- 4) Kaya Kobayashi (T. M. McQueen, Johns Hopkins University) “Misfit layered chalcogenides and their variations”

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

該当なし

#### 4.9 予算獲得状況(研究代表者、分類、研究課題、期間)

##### a. 科学研究費補助金

- 1) 小林夏野(分担), 学術変革領域研究(A), “アシンメトリ量子物質の深化”, 2023年6月-2028年3月.
- 2) 小林夏野(分担), 学術変革領域研究(A), “アシンメト

リが彩る量子物質の可視化・設計・創出 総括班”, 2023年6月-2028年3月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

該当なし

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

該当なし

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 小林夏野, ダイバーシティ推進委員会委員長(日本物理学会), 2024年4月-2025年3月.
- 2) 小林夏野, 日本物理学会第79回年次大会(2024年)現地実行委員会委員(日本物理学会), 2024年9月.
- 3) 小林夏野, 第5回大規模アンケート(科学技術系専門職の男女共同参画実態調査) 解析 WG メンバー(男女共同参画学協会), 2024年4月-2025年3月.
- 4) 小林夏野, 第6回大規模アンケート(科学技術系専門職の男女共同参画実態調査) 準備 WG メンバー(男女共同参画学協会), 2024年4月-2025年3月.

##### c. 兼任・兼業

- 1) 小林夏野, ダイバーシティ推進委員会委員長(日本物理学会), 2024年4月-2025年3月.

##### 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, 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), 小林夏野, 2024年5月14日
- 2) 理学院専門科目, 現代物理学入門(分担), 小林夏野, 2024年5月14日
- 3) 全学教育科目(主題別科目), 科学・技術の世界(分担), 小林夏野, 2024年7月29日
- 4) 大学院共通, トポロジー理工学特別講義(分担), 小林夏野, 2024年11月22日
- 5) 理学院, 電子物性物理学, 小林夏野, 2024年10月1日~2025年3月31日
- 6) 理学部, 物理学外国語文献講読 I (分担), 小林夏野, 2024年10月1日~2025年3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. アウトリーチ活動

該当なし

##### h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

##### i. 客員教員・客員研究員など

該当なし

##### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位: 0人

該当なし

博士学位: 0人

該当なし



# 生命科学部

## 研究目的

本研究部では、高速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がります。

## 生体分子デバイス研究分野

### スタッフ

教授 居城 邦治（工学博士）、1994年4月1日着任）  
准教授 三友 秀之（博士（工学）、2011年4月1日着任）  
准教授 佐藤 譲（博士（学術）、2020年4月1日着任）  
助教 与那嶺 雄介（博士（工学）、2018年4月1日着任）  
特任助教 中村 聡（博士（理学）、2022年12月1日着任、2024年6月30日転出）  
日本学術振興会特別研究員（PD）  
谷地 赳拓（博士（学術）、2023年4月1日着任）  
博士研究員 Lin Han（博士（理学）、2024年4月1日着任）  
学術研究員 竹内智恵、奥原亜季

### 学生

博士課程 Melda Taspika、楊婧妍、石雅麗、杉山亮、Wei Wenting、何芷毓、木桜棋、高天旭、KAIYUM Md Abdul、張皓然、張冬雨、Madappuram Cheruthu Nusaiba  
修士課程 渡邊ほのか、池水友紀、中村美緒、荻原帆乃、Huayan Chen、小島瑛貴、宍倉憂哉、Alex Maleknia  
学部 栗元衿佳、玉木心、矢野太一  
研究生 張佩傑

## 1. 研究目標

自然界には、アミノ酸、糖、脂質、タンパク質、核酸といった多様な分子が相互に作用し合い、自己組織化によって高度な複合体を形成し、その結果として種々の機能を創発させる現象が随所に見られる。近年、この創発現象を活用したボトムアップ型の微細加工技術は、最小限のエネルギー投入でナノスケールの複雑構造を自在に構築できる方法として大きな注目を集めている。当研究分野では、プラズモン共鳴に基づく蛍光増強やラマン散乱増強を示す金ナノ粒子の精緻な自己組織化制御法を開発し、これを足がかりに革新的な光学物理現象の発見とその多角的応用を目指している。

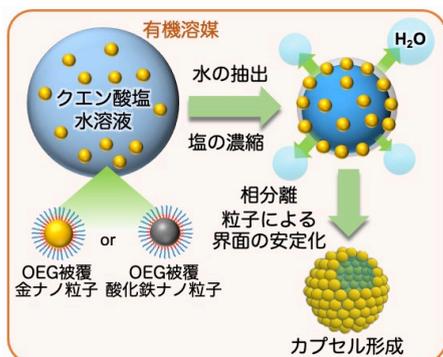


図 1. OEG 被覆ナノ粒子による液-液相分離界面の安定化を利用したナノ粒子カプセル構造形成のメカニズム

令和 6 年度においては、以下の四つの研究課題で顕著な成果を得た：(a) 薬剤送達キャリアを志向したナノ粒子カプセルの開発、(b) キラルな構造を活用した金銀バイメタ

ル型高感度硫化物センサーの開発、(c) DNA 修飾金ナノディスクの 1 次元集合によるプラズモン活性の制御、(d) 非線形確率現象における確率カオスと間欠性の研究

以上、自己組織化現象を微細加工技術に応用する研究を通じてナノ光学・センサー技術の発展に顕著な成果をあげたので報告する。

## 2. 研究成果

### (a) 薬剤送達キャリアを志向したナノ粒子カプセルの開発

金は化学的に安定で、生体に対して不活性な材料である。また、ナノサイズの金（金ナノ粒子）は、局在表面プラズモン共鳴（LSPR）と呼ばれる光学特性を示し、光を効率よく吸収して熱に変換する「光熱変換能」を持つ。これにより、金ナノ粒子は生体内で機能する光応答型ナノデバイスへの応用も期待されている。我々の研究室では、生体適合性に優れたオリゴエチレングリコール(OEG)系分子で表面を被覆した金ナノ粒子を基盤としたナノ材料の開発に取り組んできた。その中で、ナノ粒子が自律的に集合して中空のナノカプセル構造体を形成できることを見いだしている。これは薬剤を内包し、外部からの光刺激によって放出する「新しい薬剤送達キャリア」としての応用が期待された。そこで本研究では、ナノ粒子カプセルの形成メカニズムの解明と、応用に向けた薬剤の内包効率の評価を行った。

形成メカニズムについて調べた結果、水と混和する有機溶媒（THF や Dioxane）とクエン酸を溶解した水溶液を混合すると、水分子が有機溶媒側に抽出され、クエン酸が濃縮されることで、液-液相分離が誘起されることが確認された。この際、OEG 分子で被覆したナノ粒子が存在すると、それらが液-液界面に集まり、カプセル構造を形成することが明らかになった（図 1）。この水の抽出に伴う液滴の縮小現象により、クエン酸水溶液を混合するだけで、薬剤送達キャリアとして適した 100 nm 程度の大きさのカプセルを、容易かつ高い再現性で形成できることが示された。

次に、薬剤の内包について評価を行った。ここでは、蛍光分子を修飾したオリゴ DNA をモデル分子として用いた（図 2）。クエン酸水溶液中にオリゴ DNA を共存させた状態でカプセルを形成すると、少なくとも 80%以上の DNA

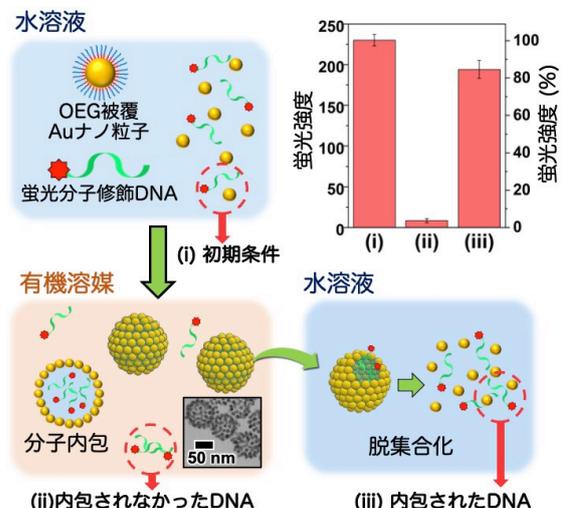


図 2. 金ナノ粒子カプセルへの蛍光分子修飾 DNA の内包と各段階での蛍光強度の比較による分子内包評価

が内包されることが確認された。さらに、カプセル形成過程における水の抽出によって、内包物が 2000 倍以上に濃縮されながら高効率よく取り込まれることも明らかになった。本成果は、Wiley 社の Small 誌に掲載され、Inside Cover にも選出された (Small, 2025, 21, 2502573)。

本手法は、核酸医薬のような水溶性の高い薬剤を高濃度で封入し、目的の組織において狙ったタイミングで放出する薬剤送達システムへの応用が期待される。今後は、粒子間に化学架橋などを導入することで水中での安定性を付与し、薬剤送達キャリアとしての実用化に向けたさらなる検討を進める予定である。

### (b) キラルな構造を活用した金銀バイメタル型高感度硫化物センサーの開発

金や銀などのナノ構造体が発現する局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) 現象は、物質を検出するためのセンサー技術への応用においても重要である。なかでも、硫化物イオン ( $S^{2-}$ ) は、生体内でのシグナル伝達や環境中での汚染物質として重要視されており、高感度かつ高選択的な検出が求められている。このような背景から、銀ナノ粒子を用いたプラズモニックセンサーの開発が進められてきた。銀ナノ粒子は硫化物と反応して  $Ag_2S$  を形成し、この際に LSPR が大きく変化するため、有望なセンシング手法として注目されている。しかしながら、従来のプラズモン吸収スペクトルに基づく検出手法では、反応に伴う共鳴ピークの線幅の広がり (ブロードニング) によって感度や精度が十分でないという課題があった。本研究では、キラル構造を有する金ナノ粒子 (c-Au NP) を薄い銀のシェルで覆ったバイメタル構造体 (c-Au@Ag NPs) を設計し、円偏光二色性 (CD) スペクトルを利用することで、この課題を克服する高感度な硫化物センサー「キラル・プラズモニックセンサー」を開発した (図 3)。

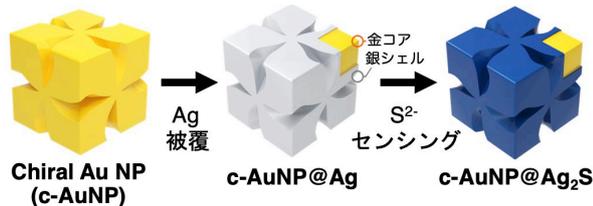


図 3. キラル金コア銀シェルナノ粒子を用いた  $S^{2-}$  のセンシングの概要図

このセンサーにおいても、従来と同様に吸収スペクトルによる検出を行うと、明らかなピークのブロードニングが観察された (図 4a)。一方で、CD スペクトルを用いると、キラルな金コアによる強い光学異方性 (CD シグナル) が観察され、銀シェルが硫化物と反応して  $Ag_2S$  を形成することで、スペクトルのシフトが誘起された (図 4b)。CD スペクトルでもピークのブロードニングは確認されたが、分析への影響は軽微なものだった。注目すべき点は、CD 強度がゼロとなるゼロクロスングポイント ( $\lambda_0$ ) の変化量 ( $\Delta\lambda_0$ ) が、ピークトップ位置の変化 ( $\Delta\lambda_m$ ) よりも大きく、5  $\mu M$  の硫化物濃度において  $\Delta\lambda_0$  は 170 nm に達し、最大で 208 nm におよぶ大きなスペクトルシフトが記録されたことである。また、可視～近赤外領域において強い CD シグナルを示す物質は自然界にほぼ存在しないため、プラズモン由来の CD 測定は、夾雑物によるバックグラウンドの影響を

受けにくく、極めて有効な分析手法といえる。さらに、本構造は干渉イオンに対する高い選択性も示し、従来よりも高感度かつ高精度な硫化物検出が可能であることが実証された。本成果は、米国化学会 (ACS) の学術誌 Chemistry of Materials に掲載された (Chem. Mater. 2025, 37, 1221)。

本研究は、従来のプラズモニックセンサーの限界を超える新たなセンシングプラットフォームを提示するものであり、生体内の低濃度硫化物の検出、環境モニタリング、疾患診断などへの応用が期待される。将来的には、機械学習やマルチシグナル検出との統合により、さらに信頼性の高いセンシング技術へと展開していく。

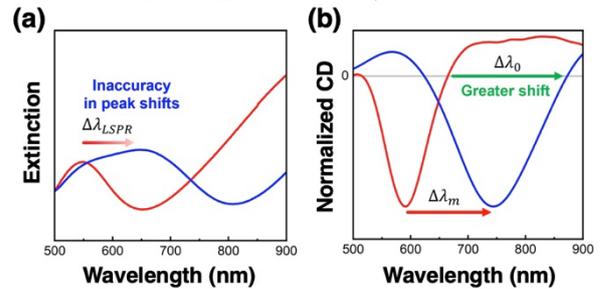


図 4. キラル金コア銀シェルナノ粒子を用いた  $S^{2-}$  のセンシングのスペクトルデータ。(a) 消光スペクトル (b) CD スペクトル

### (c) DNA 修飾金ナノディスクの1次元集合によるプラズモン活性の制御

金ナノ粒子 (AuNPs) はサイズや形状に特有の局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) を示す。さらに AuNPs 同士が近接することでプラズモンカップリングが起こり電磁場が強化されるため、プラズモニック材料への応用に有用である。そのため AuNPs の集合構造や粒子間距離を制御する手法はプラズモンカップリングを調整するのに重要である。また AuNPs の形状も集合構造の制御に大きな影響を与える。特にプレート状の AuNPs は平面を有し、面と面で結合した集合が優先的に起こるため秩序だった1次元構造が形成される。さらに AuNPs の集合制御に DNA を利用することで、特異的な相補鎖形成を利用した正確な空間配置が可能となる。本研究ではディスク状金ナノ粒子 (AuNDs) を、互いに相補的な短い DNA リガンド (+)-DNA および (-)-DNA で修飾し、DNA の二本鎖形成による AuNDs の1次元集合とプラズモン活性の制御を行った (図5)。具体的には (+)-DNA-AuNDs と (-)-DNA-AuNDs の混合比や塩強度を変えることで多量化度を制御し、さらに AuND 集合体の粒子間距離を DNA 長 (8, 11, 20塩基) で調整することでプラズモンカップリングの強度を制御した。

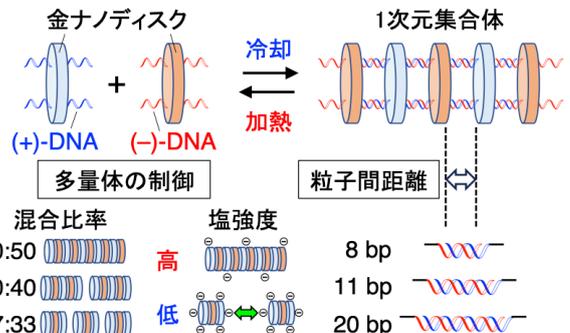


図5. DNA で修飾された金ナノディスクの集合制御。混合比率・塩強度により多量化度を制御し、DNA 鎖長の調整により粒子間距離を変えプラズモンカップリングを制御した。

まず AuNDs (直径90 nm・厚み14 nm) をチオール基導入 DNA ((+)-DNA および(-)-DNA ; 互いに相補的な配列、11塩基) で修飾した。これらの(+)-DNA-AuNDs と(-)-DNA-AuNDs を等量 (mol 比 50:50) 混合し、緩衝液中 (150 mM NaCl 含有) で加熱後、25 °Cまで徐々に冷却した。その結果、DNA の二本鎖形成によって AuNDs が集し、消光スペクトルでは大きな低波長シフト ( $\Delta\lambda$ : 115 nm) がみられた (図6a)。これは短い粒子間距離によってプラズモンカップリングが誘起されたためと考えられる。動的分散 (DLS) 測定の結果、混合した AuNDs のサイズが増加しており溶液中で集合体を形成していることが示された (図6b)。さらに電子顕微鏡画像 (SEM, cryo-TEM) から AuNDs が積層した円柱状構造体の形成が確認された (図6c,d)。AuNDs の粒子間距離は約5.7 nm であり、最大で39量体が観察された。続いて(+)-DNA-AuNDs と(-)-DNA-AuNDs の混合比率を変えて集合化させたところ (50:50, 67:33, 60:40) 、(+)-DNA-AuNDs の比率が上がるにつれて多量化度が顕著に低下し、消光スペクトルのシフト度も低下した。また(+)-DNA-AuNDs と(-)-DNA-AuNDs を50:50の比率で混合し、NaCl 濃度を0–200 mM に変化させて集合化させた結果、NaCl 濃度が 0 mM の場合には集合が全く進行しない一方で、NaCl 濃度を増加させるとプラズモンピークが徐々に低波長シフトした。DLS 測定の結果からサイズが増加し、SEM 観察の結果から多量化度が増加したことが確認された。これらの結果から AuNDs の混合比率や溶液の塩強度を調整することで AuNDs 集合体の多量化度が制御できることが分かった。最後に DNA の長さを変えた (8, 11, 20塩基) DNA-AuNDs を調製し集合化させたところ、低波長シフトの程度は DNA 鎖が短くなる (粒子間距離が短くなる) につれて大きくなった。以上の結果から、DNA のハイブリダイゼーションを利用して AuNDs の集合を行うことで、多量化度と粒子間距離の制御が可能となり、プラズモンカップリングの強度を調整できることが分かった。

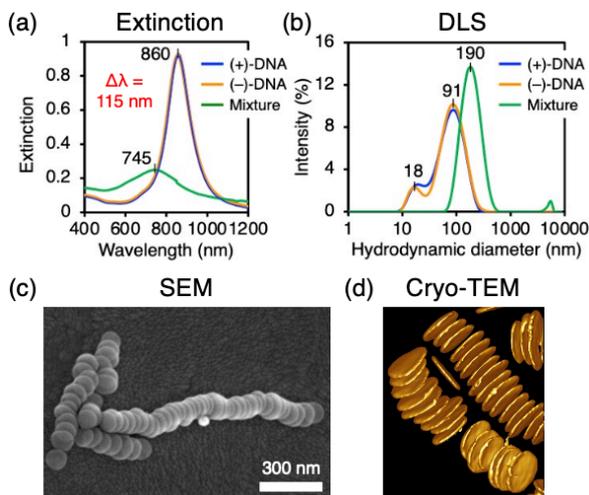


図6. 11塩基の (+)-DNA-AuNDs と(-)-DNA-AuNDs を等量 (mol 比 50:50) 混合し集合化させた構造体の評価。(a,b) (+)-DNA-AuND (青)、(-)-DNA-AuNDs (橙)、および混合サンプル (緑) の (a) 消光スペクトルと (b) 動的分散 (DLS) 測定の結果。(c) SEM 画像。(d) Cryo-TEM による3D 構造解析画像。

#### (d) 非線形確率現象における確率カオスと間欠性の研究

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、定式化する。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様々な系に普遍的に存在する。今年度はランダム力学系における雑

音誘起間欠性の研究、大規模データのモデリングと制御の研究を行った。

### 3. 今後の研究の展望

当研究分野においては、生体や生体分子の自己組織化原理を精緻に模倣し、新規電子デバイス・光学素子・医療素子の創出を究極の目標としている。近年は、金ナノ粒子の表面修飾を基軸とした界面制御技術に加え、ナノ粒子形状そのものを緻密に設計する手法やキラルプラズモンに関する先端的研究に注力している。今後は、こうして得られた自己組織化集合体の機能をシミュレーションと実験の両面から一層厳密に検証し、金ナノ粒子特有のプラズモン活性を最大限に引き出す階層的構造体を構築していく。具体的には、単分子ラマン散乱センサーやキラルセンシング、高度細胞工学への応用展開を追究し、ナノ光学・バイオインターフェース分野に新たな地平を拓くことをめざしていく。併せて、確率カオスを示すランダム力学系における確率カオスという新しい定常状態の概念を、実験データ解析に基づいて気象、社会系、機械学習系で生じる複雑現象に見出し、予測制御への応用を探究する。

### 4. 資料

#### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 【電子研内共著】J. Yang, Y. Sekizawa, X. Shi, K. Ijiro\*, H. Mitomo\*, Assembly/Disassembly Control of Gold Nanorods with Uniform Orientation on Anionic Polymer Brush Substrates, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **97**(7), uoae073 (2024). Selected Paper, (DOI: 10.1093/bulcsj/uoae073)
- 【電子研内共著】H. Yin, Q. Zhang, S. Hu, X. Sun, L. Peng, H. Zhao, Q. Kong\*, H. Mitomo\*, Y. Matsuo, K. Ijiro, and G. Wang\*, Hierarchical Au Nanoflowers Formed in an Ionic Liquid/Water System for Bacterial Inhibition, *ACS Appl. Nano Mater.*, **7**, 16998-17008 (2024). (DOI: 10.1021/acsanm.4c03100)
- 【電子研内共著】K. Xiong, M. Nagayama, K. Ijiro, H. Mitomo\*, Fair surface modification with mixed alkanethiols on gold nanoparticles through minimal unfair ligand exchange, *Nanoscale Adv.*, **6**, 4583-4590 (2024). Inside Front Cover, (DOI: 10.1039/D4NA00270A)
- J. Wei\*, Y. Liu, Z. Miao, L. Zhang, Z. Li\*, Y. Chen\*, K. Ijiro, Z. Zhang, Influence of Solvophobicity of Biphenol-Derived Small Surface Ligands on the Formation of Size-Controllable Gold Nanoparticle Vesicles, *Langmuir*, **40**, 16783-16790 (2024). (DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c01149)
- 【電子研内共著】T. Gao, T. Yachi, X. Shi, R. Sato, C. Sato, Y. Yonamine, K. Kanie, H. Misawa, K. Ijiro\*, H. Mitomo\*, An Ultra-sensitive Surface-Enhanced Raman Scattering Platform for Protein Detection via Active Delivery to Nanogaps as a Hotspot, *ACS Nano*, **18**, 21593-21606 (2024). (DOI: 10.1021/acs.nano.4c09578)
- Y. Shi, S. Nakamura\*, H. Mitomo, Y. Yonamine, G. Wang, K. Ijiro\*, Plasmonic circular dichroism-based metal ion detection using gold nanorod DNA complexes, *Chem. Commun.*, **60**, 11794-11797 (2024). (DOI: 10.1039/d4cc04017a)
- 【電子研内共著】N. M. Cheruthu, P. K. Hashim, S. Sahu, K. Takahashi, T. Nakamura, H. Mitomo, K. Ijiro, N. Tamaoki\*, Azophotoswitches containing thiazole, isothiazole, thiadiazole, and isothiadiazole, *Org. Biomol. Chem.*, **23**, 207-212 (2025). (DOI: 10.1039/D4OB01573H)
- Y. Saito, D. Sun, H. Kanai, Y. Ishida, H. Mitomo, K. Ijiro, K. Konishi\*, Charge-dependent hierarchical self-assembly of fluorinated gold clusters, *Chem. Commun.*, **61**, 1383-1386 (2025). (DOI: 10.1039/D4CC04786A)

- 9) H. Lin, K. Ijio, H. Mitomo\*, Chiral Shape Engineering Combined with Bimetallic Nanostructures for High-Performance Plasmonic Sulfide Sensors, *Chemistry of Materials*, **37**, 1221-1230 (2025). (DOI: 10.1021/acs.chemmater.4c03150)
- 1 0) F. Nakamura, T. Ikemizu, M. Murao, T. Isoshima, D. Kobayashi, H. Mitomo, K. Ijio, H. Kimura-Suda\*, Evaluation Method for Proteoglycans Using Near-infrared Spectroscopy, *Analytical Sciences*, **41**, 395-401 (2025). (DOI: 10.1007/s44211-025-00715-x)
- 1 1) Q. Zhang, X. Leng, L. Peng, H. Lin, G. Xuan\*, W. Zhang, H. Mitomo, K. Ijio, G. Wang\*, Streamlining Bacterial Gene Regulation via Nucleic Acid Delivery with Gold Nanoclusters, *Small*, **21**, 2411723 (2025). (DOI: 10.1002/sml.11723)
- 1 2) N. Hiraiwa, M. Bando, I. Nisoli, and Y. Sato, Designing robust trajectories by lobe dynamics in low-dimensional Hamiltonian systems, *Phys. Rev. Res.*, **6**, L022046, (2024). (DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.L022046)
- 1 3) Y. Sato, and M. U. Kobayashi, Minimal model for reservoir computing, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **470**, 134360, (2024). (DOI: 10.1016/j.physd.2024.134360)
- 1 4) C. C. Maiocchi, V. Lucarini, A. Gritsun, Y. Sato, Heterogeneity of the attractor of the Lorenz '96 model: Lyapunov analysis, unstable periodic orbits, and shadowing properties, *Physica D*, **457**, 133970, (2024). (DOI: 10.1016/j.physd.2023.133970)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 高天旭, 三友秀之, 金ナノ粒子自己組織化膜とハイドロゲルを複合化した新奇基板を用いた超高感度ラマン検出法の開発, *The Bulletin of the Nano Science and Technology* (ナノ学会会誌), **23** (2), 33-39 (2025).

#### 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. Ijio, "Stimuli-responsive Plasmonic Nanostructure for Surface Enhanced Raman Scattering", NISE 2024, University of Granada, Spain, 2024/11/20-22.
- 2) Y. Sato, "Noise-induced phenomena in high dimensions", DinAmicI in Rio, IMPA, Rio De Janeiro, Brazil, 2024/9/2-6.
- 3) K. Ijio, "Biomimetic Plasmonic Nanostructures for Ultra-Sensitive Surface Enhanced Raman Scattering", The 1st Taiwan-Japan International Mini-Symposium, National Yang Ming Chiao Tung University (NYCU), Hsinchu, Taiwan, 2025/1/13-14.

##### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) 三友秀之, "異方性金ナノ粒子の自己組織化と高分子を利用した動的構造制御", ナノ学会第 22 回大会, 東北大学, 仙台市, 2024/5/22-24.
- 2) 三友秀之, "金ナノ粒子自己組織化膜を利用したタンパク質高感度検出システムの開発", 第 4 回 マテリアル・計測ハイブリッド研究センター若手フォーラム, 東北大学, 仙台市, 2024/11/5-6.

##### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) T. Gao, X. Shi, Y. Yonamine, T. Yachi, H. Misawa, K. Ijio,

H. Mitomo, "Gel Filter Trapping to Actively Deliver Analytes into Nanostructures for Ultra-sensitive Molecular Detection", 14th International Gel Symposium, Bankoku Shinryokan, Nago, 2024/11/17-21.

- 2) H. Mitomo, J. Yang, K. Ijio, "Assembly/Disassembly of Gold Nanorods in the Polymer Brush", 14th International Gel Symposium, Bankoku Shinryokan, Nago, 2024/11/17-21.
- 3) Y. Yonamine, M. J. Chidiebere, Y. Miyata, K. Hiramatsu, Y. Hoshino, H. Mitomo, K. Ijio, "Raman probes for multicolor detection using an algal carotenoid", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, 2024/12/10.
- 4) D. Zhang, T. Yachi, K. Ijio, H. Mitomo, "NIR light-responsive plasmonic nanoparticle vesicles from mini-Au NR self-assembly", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, 2024/12/10.
- 5) W. Wenting, H. Lin, K. Ijio, H. Mitomo, "Bipedal DNA Walker-Based Ratiometric Fluorescence Sensor for miRNA Detection", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, 2024/12/10.
- 6) M. Taspika, Y. Yonamine, H. Mitomo, and K. Ijio, "Controlled Assembly of Gold Nanodiscs (AuNDs) by DNA Hybridization to Tune Plasmon Coupling", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, 2024/12/10.

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 谷地起拓, 渡邊ほのか, 宍戸峯仁, 杉山亮, 三友秀之, 居城邦治 "オリゴエチレングリコール修飾無機ナノ粒子の液液界面での自己組織化によるベシクル形成とその制御", ナノ学会第 22 回大会, 東北大学, 仙台市, 2024/5/22-24.
- 2) T. Gao, X. Shi, Y. Yonamine, H. Misawa, K. Ijio and H. Mitomo, "Development of Molecule Trapping Technique Using Hydrogels for Single-protein SERS Detection", ナノ学会第 22 回大会, 東北大学, 仙台市, 2024/5/22-24.
- 3) Y. Shi, S. Nakamura, H. Mitomo, Y. Yonamine, and K. Ijio, "Conformation-Dependent Chiroptical Activity in Nanorod-DNA Polyion Complexes", ナノ学会第 22 回大会, 東北大学, 仙台市, 2024/5/22-24.
- 4) H. Mitomo, Y. Sekizawa, Y. Hasegawa, Y. Yonamine, K. Ijio, "Reversible Changes in Gold Nanorod Orientation on Polymer Brush Substrates via Their Thickness Changes", 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台国際センター, 仙台市, 2024/6/5-7.
- 5) 与那嶺雄介, C. W. Jie, 池水友紀, 三友秀之, 居城邦治, "金ナノ粒子でリプレッサーを模倣した RNA 合成酵素のローリングサークル転写制御", 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台国際センター, 仙台市, 2024/6/5-7.
- 6) J. Yang, H. Mitomo, Y. Seikizaw, Y. Yonamine, K. Ijio, "Control of Temperature-Responsive Gold Nanorod Assembly with Uniform Orientation on dsDNA Brush Substrate", 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台国際センター, 仙台市, 2024/6/5-7.
- 7) 三友秀之, 楊婧妍, 居城邦治, "高分子ブラシ基板上で垂直配向した金ナノロッドの可逆的な集合制御", 第 75 回コロイドおよび界面化学討論会, 東北大学, 仙台市, 2024/9/17-20.
- 8) 谷地起拓, 渡邊ほのか, 杉山亮, 三友秀之, 居城邦治, "オリゴエチレングリコール修飾ナノ粒子の自己組織化によるカプセル構造形成・制御および内部への物質内包", 第 75 回コロイドおよび界面化学討論会, 東北大学, 仙台市, 2024/9/17-20.
- 9) 中村美緒, 三友秀之, 居城邦治, "オリゴエチレングリコール系分子修飾金ナノ粒子の温度に応答した表面電位の変化", 第 75 回コロイドおよび界面化学討論会, 東北大学, 仙台市, 2024/9/17-20.
- 1 0) 渡邊ほのか, 谷地起拓, 杉山亮, 三友秀之, 居城邦治, "アミノ基導入金ナノ粒子による pH 応答性自己組織化カプセルの作製", 第 75 回コロイドおよび界面化学討論会, 東北大学, 仙台市, 2024/9/17-20.
- 1 1) 三友秀之, 楊婧妍, 居城邦治, "DNA ブラシ内に配向固定化された金ナノロッドの集合化制御", 第 73 回高分子討論会, 新潟大学, 新潟市, 2024/9/25-27.

- 1 2) 与那嶺雄介, 池水友紀, C. W. Jie, 三友秀之, 居城邦治, “金ナノ粒子を用いた siRNA 転写制御のための鋳型 DNA 設計”, 日本化学会第 105 春季年会, 関西大学, 吹田市, 2025/3/26-29.
- 1 3) 谷地起拓, 渡邊ほのか, 居城邦治, 三友秀之, “オリゴエチレングリコール修飾ナノ粒子の自己組織化によるナノ粒子カプセル形成と物質の濃縮内包”, 日本化学会第 105 春季年会, 関西大学, 吹田市, 2025/3/26-29.
- 1 4) W. Wei, H. Lin, K. Ijio, H. Mitomo, “Nanoparticle-Delivered Bipedal DNA Walker Ratiometric Fluorescence Sensor for miRNA-21 Detection in Cells”, 日本化学会第 105 春季年会, 関西大学, 吹田市, 2025/3/26-29.
- 1 5) T. Meruda, Y. Yonamine, H. Mitomo, K. Ijio, “One-dimensional assembly of gold nanodiscs controlled by DNA hybridization for tunable plasmon coupling”, 日本化学会第 105 春季年会, 関西大学, 吹田市, 2025/3/26-29.
- 1 6) D. Zhang, T. Yachi, H. Mitomo, K. Ijio, “NIR-absorbable plasmonic nanoparticle capsule from mini-AuNR self-assembly”, 日本化学会第 105 春季年会, 関西大学, 吹田市, 2025/3/26-29.

#### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)

- 1) 木桜棋, “Surface Modification of an Algal Cell with Elongated DNA strands for Coating with Functional Materials to Expand Cellular Function”, 第 35 回 生体機能関連化学部会 若手の会 サマースクール, JMS アステールプラザ, 広島市, 2024/7/8-9.
- 2) 三友秀之, 高天旭, 石旭, 居城邦治, “金ナノ粒子自己組織化膜複合ゲルを用いた超高感度タンパク質検出法の開発”, 第 34 回 バイオ・高分子シンポジウム, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都, 2024/8/1-2.
- 3) 木桜棋, “Surface Modification of an Algal Cell with Elongated DNA strands for Coating with Functional Materials to Expand Cellular Function”, 第 11 回 バイオ関連化学シンポジウム若手フォーラム, つくば国際会議場, つくば市, 2024/9/11.
- 4) Y. Mu, Y. Yonamine, H. Mitomo, K. Ijio, “Surface Modification of an Algal Cell with Elongated DNA Strands to Control Loading and Releasing of Cationic Materials”, 第 18 回 バイオ関連化学シンポジウム, つくば国際会議場, つくば市, 2024/9/11.
- 5) Y. Sato, “Noise-induced phenomena in random dynamical systems”, EDAL, UFRJ, Rio De Janeiro, Brazil, 2024/9/13.
- 6) T. Gao, T. Yachi, Y. Yonamine, K. Ijio, H. Mitomo, “Hydrogel Filter Trapping to Actively Deliver Analytes into Nanogap Structures as Molecular Signal Amplification Fields for Sensitive Protein Detection”, 39th Summer University in Hokkaido & 2024 年北海道高分子若手研究会, ルスツリゾートホテル&コンベンション, 留寿都村, 2024/9/13-14.
- 7) 荻原帆乃, 与那嶺雄介, 三友秀之, 居城邦治, “温度応答性金ナノ粒子を架橋したコア-サテライト構造の形成”, 39th Summer University in Hokkaido & 2024 年北海道高分子若手研究会, ルスツリゾートホテル&コンベンション, 留寿都村, 2024/9/13-14.
- 8) 高天旭, “ハイドロゲルを利用したプラズモニクナノ構造の制御技術の開発と生体分子検出デバイスへの応用 Development of Gap-tunable Plasmonic Nanostructures Using Hydrogels and Their Application in Biomolecule Detection Devices”, 第 5 回 次世代プラズモニク化学への挑戦, オンライン, 2025/3/7.

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) Organizer, Conference on "Random Dynamical Systems Theory and Its Applications", RIMS, Kyoto, Japan, August, 2024.
- 2) Dynamics days Sapporo 2024, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 6-12, 2024.

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 三友秀之, 居城邦治 (西野吉則, 鈴木明大, コヒーレ

ント光研究分野) “金ナノ粒子集合体の構造解析”

- 2) 居城邦治 (穂積篤, 産業技術総合研究所), “滑水性に優れた高親水性表面を活用した自己組織化による 3 次元微細構造の構築”
- 3) 居城邦治 (納谷昌之, 納谷ラボ), “フォトニックマイクロ液滴ロボットの基礎研究”
- 4) 居城邦治 (木村・須田廣美, 公立千歳科学技術大学), “魚類の生育環境が骨形成に及ぼす影響”
- 5) 居城邦治 (佐野健一, 日本工業大学), “ナノ構造体を利用した細胞透過性DDS担体の開発”
- 6) 居城邦治 (江原靖人, 神戸大学), “新興・再興感染症ウイルスを高感度で検出するデバイスの作製”
- 7) 三友秀之 (斎木敏治, 慶應義塾大学), “アルキル鎖/生体分子を介した金ナノ粒子融合体におけるラマンホットスポットの制御”
- 8) 三友秀之 (渡邊智久, 北海道大学), “環状ポリエチレングリコールの金ナノ粒子への吸着特性の解明”

##### b. 国際共同研究

- 1) K. Ijio (Newcastle University(GBR), UK), “Development of Conducting DNA”
- 2) K. Ijio (National Chiao Tung University, Taiwan(TWN), ROC), “Development of Nanoparticle Devices”
- 3) 居城邦治 (王国慶, 中国海洋大学(CHN)), “金ナノワイヤーで覆われた金ナノプレートの表面増強ラマン散乱による細胞イメージングと光熱療法”
- 4) 居城邦治 (王国慶, 中国海洋大学(CHN)), “Inhibition of bacterial pathogen infection by Aunanocluster-mediated gene silencing”
- 5) 佐藤讓 (Isaia Nisoli, Brazil UFRJ), ランダム力学系の計算機援用証明に関する共同研究

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 居城邦治 (㈱エスケーエレクトロニクス), “再生医療向け細胞培養基材としてのノウハウ提供, 基板設計, および細胞培養に関する可能性検討”

#### 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) 居城邦治 (代表), 基盤研究(B), “光免疫療法のための近赤外線照射で活性化する界面活性ヤヌス型ナノ粒子の創製”, 2024 年 4 月~2028 年 3 月.
- 2) 三友秀之 (代表), 基盤研究(B), “標的物質の高効率取込機構を持つ超高感度バイオセンシング技術の創成”, 2024 年 4 月~2027 年 3 月.
- 3) 三友秀之 (代表), 萌芽研究, “金ナノ粒子の表面デザインを駆使したプロテインコロナの光制御法の開発”, 2022 年 4 月~2025 年 3 月.
- 4) 与那嶺雄介 (代表), 基盤研究(C), “藻類色素に安定同位体を導入して多色化した高感度ラマン検出剤の開発”, 2023 年 4 月~2026 年 3 月.
- 5) 谷地起拓 (代表), 特別研究員奨励費, “液晶配向に基づく基板上で金ナノロッド自在配列制御技術の開発と機能性材料への展開”, 2023 年 4 月~2026 年 3 月.
- 6) 佐藤讓 (代表), 基盤研究(B), “非線形確率微分方程式系における確率カオスの定量解析とその応用”, 2021~2025 年度
- 7) 佐藤讓 (分担), 基盤研究(B), “ランダム力学系・非自励力学系, 写像半群の力学系とフラクタル幾何学の研究”, 2024~2029 年度

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 佐藤讓, JST CREST 調査課題, 小惑星(ラブルパイル)の制御論の予備検討, 2024 年度

##### c. 民間助成金

- 2) 三友秀之 (代表), 上原記念生命科学財団研究助成金,

“タンパク質を1分子から定量的に見分ける検出システム”、2025年2月～2026年4月。

- 3) 与那嶺雄介(代表)、光科学技術研究振興財団研究助成金、“藻類色素を利用した高感度マルチカラー・ラマン検出剤の開発”、2025年1月～2026年12月。

#### 4.10 受賞

- 1) Dongyu Zhang (NIR light-responsive plasmonic nanoparticle vesicles from mini-Au NR self-assembly), The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium Poster award, 2024.12.10.
- 2) 高天旭(ハイドロゲルを利用したプラズモニックナノ構造の制御技術の開発と生体分子検出デバイスへの応用 Development of Gap-tunable Plasmonic Nanostructures Using Hydrogels and Their Application in Biomolecule Detection Devices), 第5回次世代プラズモニック化学への挑戦(オンライン) 学生奨励賞, 2025.3.7.

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

- 1) 居城邦治、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業領域中間評価専門委員、2024年10月1日～2025年3月31日。
- 2) 三友秀之、日本学術振興会科学研究費委員会専門委員、2022年11月1日～2025年10月24日。
- 3) 与那嶺雄介、文部科学省科学技術・学術政策研究所 専門調査員、2024年4月1日～2025年3月31日。

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 居城邦治、公益社団法人高分子学会バイオ・高分子研究会運営委員(2002年4月1日～2024年3月31日)
- 2) 居城邦治、公益社団法人高分子学会北海道支部幹事(2004年4月1日～現在)
- 3) 居城邦治、運営委員(公益社団法人高分子学会バイオミメティクス研究会)、2024年4月～2026年3月。
- 4) 居城邦治、副支部長(2025年度日本化学会北海道支部)、2025年3月1日～2026年2月28日。
- 5) 三友秀之、委員(公益社団法人高分子学会第37期広報委員会)、2024年6月12日～2026年6月11日。
- 6) 三友秀之、庶務幹事(2025年度日本化学会北海道支部)、2025年3月1日～2026年2月28日。
- 7) 三友秀之、公益社団法人高分子学会バイオ・高分子研究会運営委員(2024年4月1日～2026年3月31日)
- 8) 三友秀之、委員(ナノ学会編集委員会)(2023年4月1日～2025年3月31日)

##### c. 兼任・兼業

- 1) 居城邦治、客員教授(国立陽明交通大学(台湾))、2022年8月～現在。
- 2) 三友秀之、客員准教授(国立陽明交通大学(台湾))、2022年8月～現在。
- 3) 三友秀之、准教授(東北大学多元物質科学研究所授(クロスアポイントメント))、2024年8月～2025年3月。
- 4) 三友秀之、講演者(ナノ学会第22回大会)、2024年5月23日。
- 5) 三友秀之、Examiner (The University of Melbourne), 2024.7.26-9.12.
- 6) Y. Sato, External Fellow (London Mathematical Laboratory)、2014年～現在

##### d. 外国人研究者の招聘

- 1) Prof. Sanghyuk Woo, Chung-Ang University, 2024年11月2日～12月1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、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、春ターム
- 2) 全学共通、環境と人間 ナノテクノロジーが拓く数理・

バイオサイエンスの新潮流、居城邦治、夏ターム

- 3) 全学共通、生体高分子物性論、春ターム
- 4) 理学部生物科学科(高分子機能学専修)、生物系の統計学、三友秀之、春ターム
- 5) 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、夏ターム
- 6) 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、秋ターム
- 7) 生物科学科(高分子機能学専修分野)、高分子機能学文献購読、居城邦治、三友秀之、与那嶺雄介、通年
- 8) 生物科学科(高分子機能学専修分野)、高分子機能学卒業研究、居城邦治、三友秀之、与那嶺雄介、通年
- 9) 生命科学院、ソフトマター科学研究、居城邦治、通年
- 10) 生命科学院、ソフトマター科学実習、居城邦治、通年
- 11) 生命科学院、ソフトマター科学論文購読I、居城邦治、通年
- 12) 生命科学院、ソフトマター科学論文購読II、居城邦治、通年
- 13) 生命科学院、ソフトマター科学特別研究、居城邦治、通年
- 14) 全学共通、微分積分学II、佐藤讓、2学期
- 15) 理学部/理学院、数理科学概説「カオスと複雑性」、佐藤讓、1学期
- 16) 理学部、数学総合講義I「機械学習の基礎」、佐藤讓、1学期
- 17) 理学部、数理解析額特別講義「機械学習の基礎」、佐藤讓、1学期
- 18) 理学部/理学院 Hokkaido Summer Institute 「Computational methods in dynamical systems」、佐藤讓、1学期

##### f. 北大以外での非常勤講師(対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 千歳科学技術大学、応用化学生物学実験B、与那嶺雄介、2024年4月1日～2024年9月26日。
- 2) 千歳科学技術大学、幾何学I、佐藤讓、(2024年4月1日～2024年9月30日)
- 3) 千歳科学技術大学、幾何学I演習、佐藤讓、(2024年4月1日～2024年9月30日)
- 4) 千歳科学技術大学、数値計算概論、佐藤讓、(2024年10月1日～2025年3月31日)

##### g. アウトリーチ活動

該当なし

##### h. 新聞・テレビ等の報道

- 1) “カオス軌道を用いた地球-月系における探査機の軌道設計に成功”、北海道大学プレスリリース、2024年5月31日。
- 2) “北大と東北大など、タンパク質を超高感度で検出する新技術を開発”、日本経済新聞、2024年8月5日。
- 3) “北大、ラマン散乱分光法でタンパク質を高感度検出”、Optronics online、2024年8月6日。
- 4) “北大、タンパク質を超高感度検出、新技術開発”、ケムネット東京、2024年8月6日。
- 5) “北海道大学、タンパク質を超高感度で検出 生体センシング技術の進展に期待”、電波新聞、2024年8月14日。
- 6) “2025年の高感度バイオマーカー検出装束最新技術と市場動向：イムノセンスやSH-SAWが切り開く未来”、Reinforz Insight、2024年10月16日

##### i. 客員教員・客員研究員など

- 1) 金城政孝、客員研究員、北海道大学名誉教授、2024年8月1日～2025年7月31日。
- 2) 萩原恭二、客員研究員、一般社団法人人間科学工学研究所、2024年12月1日～2025年11月30日。

##### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：4人

- 1) 池水友紀、生命科学院ソフトマター専攻、修士(ソフトマター科学)、金ナノ粒子を用いた siRNA 転写制御のための鋳型 DNA 設計
- 2) 中村美緒、生命科学院ソフトマター専攻、修士(ソフトマター科学)、オリゴエチレングリコール被覆金ナノ粒子の温度に応じた親疎水性と表面電位の変化に関する研究
- 3) 渡邊ほのか、生命科学院ソフトマター専攻、修士(ソフトマター科学)、アミノ基導入による pH 応答性金ナノ粒子ベシクルの創製
- 4) Huayan Chen, 理学院数学専攻, Noise-induced phenomena in high-dimensional dynamical systems

博士学位：2人

- 1) Yang Jingyan, 生命科学院ソフトマター専攻、博士(ソフトマター科学)、Stimulate Responsive Assembly of Gold Nanorods with Uniform Orientation in Polymer Brush Substrates.
- 2) Shi Yali, 生命科学院ソフトマター専攻、博士(ソフトマター科学)、Chiroptical Activity of Nanorod-DNA Polymion-Complexes [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review].

## 光情報生命科学研究分野

### スタッフ

教授 三上 秀治 (博士 (理学)、2020 年 6 月 1 日着任)

准教授 澁川 敦史 (博士 (情報科学)、2021 年 4 月 1 日着任)

助教 石島 歩 (博士 (工学)、2022 年 9 月 1 日着任)

特任助教 富菜 雄介 (博士 (生命科学)、2021 年 1 月 1 日着任)

博士研究員 Giang Tran (Ph. D、2024 年 4 月 1 日着任)

事務補佐員 藤原 由美恵

### 学生

博士課程 米山 裕貴

修士課程 高橋 瑛介、孫 孝政、宍戸 耀、椋本 一輝、

奥山 亮

学部 内海 良太、計良 拓海、白土 澄香

## 1. 研究目標

当研究分野では、光技術と情報技術を融合した新技術を創出して生命科学の新たな展開を生み出すことを目標としており、さらに研究成果の実用化・事業化を通じた社会還元も目指している。特に、生体試料の観察に欠かせない蛍光顕微鏡などのバイオイメージング手法や生体を光で操作する光遺伝学のための高速光制御技術、さらに撮像データから情報を最大限に引き出すデータ解析技術を開拓することにより、これまでは捉えることが困難であったさまざまな生命活動のダイナミクスを捉え、生命科学の進展に貢献することに注力する。

## 2. 研究成果

### 1) 高速ライトシート顕微鏡による生体機能解析

生体内のダイナミックな機能変化をリアルタイムかつ高空間分解能で観察することは、生命現象の理解に不可欠である。特に、光毒性の低さと高い時空間分解能を兼ね備えたライトシート顕微鏡 (LSM) は、発生生物学や神経科学など多様な分野で活用されてきたが、その 3 次元撮像速度の限界は、迅速な生理学的変化や行動との関連を捉える上で大きな制約であった。本研究では、既存の LSM に画像走査を組み込むことで、装置の複雑化や光子損失を最小限に抑えつつ、体積撮像速度を飛躍的に向上させる技術を開発し、3 種類の生物試料に適用した。

まず、自由行動中の線虫 (*C. elegans*) の脳内神経細胞の活動を対象に、tdTomato および GCaMP6f を全神経細胞核に発現させた個体を用いて、50 volumes/sec で 200 秒間の二色 3D カルシウムイメージングを実施した。撮像中は、自作の駆動追従ステージにより常に頭部を視野中心に保持した。tdTomato 画像から 90 個以上の神経細胞を検出・追跡、GCaMP シグナルの輝度変化から活動を定量化した。得られた神経活動時系列と明視野画像から抽出した行動状態 (前進・後退など) との相関を評価した結果、複数の細胞が特定の行動と相関を示すことが明らかとなった。さらに、頭部の姿勢ベクトルの独立成分解析から抽出された、首振

り運動と関連する行動モチーフとの対応付けも行い、特定の神経活動と行動様式の相関性を明示した。また、従来法に近い 5 vps 相当のデータに対して同様の追跡を行ったところ、細胞検出・追跡精度が著しく低下し、特に頭部運動が高速な場面で顕著なエラー増加が見られた。

次に、クマムシ (*Hypsibius exemplaris*) の歩行中の筋活動を対象として、筋繊維に mCherry および GCaMP6s を発現させ、10 volumes/sec で 65 秒間の二色体積イメージングを行った。任意の筋繊維を選択し、両端の座標を追跡することで収縮に伴う長さ変化を定量化した。また、GCaMP/mCherry 比からカルシウム依存性収縮を反映する比率を算出したところ、筋長とカルシウムシグナルとの間に有意な負の相関が確認され、筋活動の定量指標として機能することが示された。

さらに、微細藻類クラミドモナス (*Chlamydomonas reinhardtii*) の高速遊泳運動を対象に、1000 volumes/sec という高速 3D 撮像を達成した。自家蛍光を示す葉緑体と核の二色画像から、軌道運動や回転方向の定量、さらには流速 1 cm/s を超える条件でも像の歪みなく細胞を追跡することができた。

### 2) 縮重性を備えた神経回路網の動的制御機構の解明

複雑な神経回路網の動的制御機構を理解するための一つの視点が、神経回路の縮重性 (異なる性質をもつ神経細胞群が、状況に応じて同一の機能を発揮する性質) である。ヒル (*Hirudo verbana*) は縮重性をもつ神経回路の研究に適した特性を兼ね備えた神経系をもつ実験動物である。本研究では、データ駆動型のアプローチを採用し、分子・シナプス接続・神経生理学に関する実データを収集する探索的実験とそれに基づいてヒルの神経回路モデルを構築する理論的研究に分かれる。今年度は、探索的実験の準備として、特に神経突起の分子生理学的基盤の解析に向けた分子生物学的解析について取り組んだ。

神経突起の分子生理学的基盤の解析: 個々のニューロンの膜特性や応答性の分子基盤を明らかにするため、scRNA-seq を活用する計画を進めている。本年度は、基礎生物学研究所の統合ゲノミクス共同利用研究制度を活用して、基礎生物学研究所の重信秀治教授と総合研究大学院大学の渡邊崇之助教授らとの共同研究を開始した。まず世界初となる本種のゲノム解読を進めており、複数個体のサンプルを提供して次世代シーケンサーによるシーケンス・アセンブリを開始し、Hi-Fi 解析が完了した (図 1)。現在、Hi-C 解析と遺伝子アノテーションを実行中であり、また細胞レベルに先立って神経節レベルでの RNA-seq 実験も進行中である。

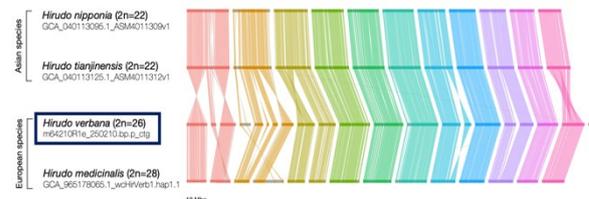


図 1 *Hirudo verbana* ゲノムデータの特徴づけの例。今回解読したヒルの Hi-Fi リードアセンブリデータ (3 段目) と先行研究における他の *Hirudo* 属のゲノム解読結果を比較した。色で区別された 1 組のアセンブリは、染色体に相当する構造を示す。*H. verbana* 含むヨーロッパ種と、アジア種の間でのゲノム/染色体構造の相違からも、本種の全ゲノムの特徴づけが可能となる。

### 3) 全光学的神経系観察法の開発

自由行動する動物の脳神経系の包括的な理解を目指し、高速3D蛍光撮像、リアルタイム画像処理、3次元光刺激を統合した全光学的神経系記録・操作法を開発している。本年度は、線虫への応用を念頭に、10細胞の追跡と数細胞への3次元光刺激を100msの閉ループ時定数で実行することを目標とし、昨年度に開発した要素技術を統合した実験システムを構築した。そのシステムを用い、神経細胞を模した蛍光ビーズを用いたリアルタイム標的照射実験を実施し、追跡対象の位置の特定から標的光刺激までの一連の動作確認を行った。具体的には、10  $\mu\text{m}/\text{s}$  で移動する直径10  $\mu\text{m}$  の蛍光ビーズに対し標的光刺激を行い、画像取得から光刺激まで53.2msの時定数で動作することを確認した(図2)。

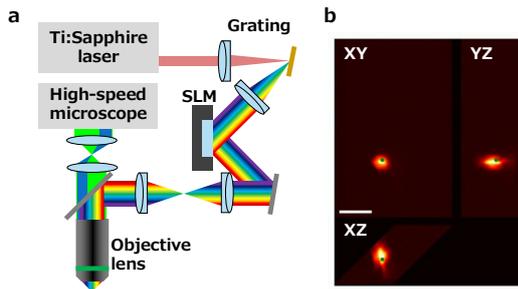


図2 リアルタイム3次元標的光刺激実験。(a) 光学系。(b) 蛍光ビーズへの標的光照射。SLM: 空間光変調器。スケールバー: 20  $\mu\text{m}$ 。

### 4) 高速ブリルアン散乱顕微鏡の開発

生体試料の粘弾性の変化と生命現象の包括的な理解を目指し、生体の粘弾性特性を三次元的に1分以内に撮像する高速ブリルアン散乱顕微鏡を開発している。本年度は、昨年度に原理検証を行った4f波形整形器をブリルアン散乱顕微鏡に統合するとともに、ライトシート照明系を導入し、さらなる高速化を図った。これにより、従来の点照明によるラインスキャン方式から脱却し、空間走査を伴わずに二次元のブリルアン画像を一括取得するブリルアン散乱顕微鏡が実現される。本システムに搭載した4f波形整形器では、従来のスペクトル整形に加え、空間強度分布の平坦化を可能とする二次元波形整形技術を実装した。これにより、イメージセンサの各画素に入射する光子数を飽和電荷量まで引き上げることで、ショットノイズに対する信号光の比率を大幅に向上した。ガラス試料を用いたブリルアン振動計測では、波形整形により計測感度が3.6倍向上することを確認し、平均化回数の削減による撮像時間の短縮に寄与する結果が得られた(図3)。この結果から、ライトシート照明系と光波形整形を組み合わせることで、平均化回数を最大で2桁程度低減できることが示唆された。

### 5) 高速・大規模多光子励起蛍光顕微鏡法の開発

本研究では、生きたマウスの脳神経活動の測定などに用いられる多光子励起蛍光顕微鏡の計測の高速化およびそれに伴う大規模化を目指している。提案する高速多光子顕微鏡では、蛍光分子を励起する励起レーザー光の集光位置を通常のラスタースキャンのように網羅的に走査するのではなく、計測対象(神経細胞)にのみ励起レーザー光を走査

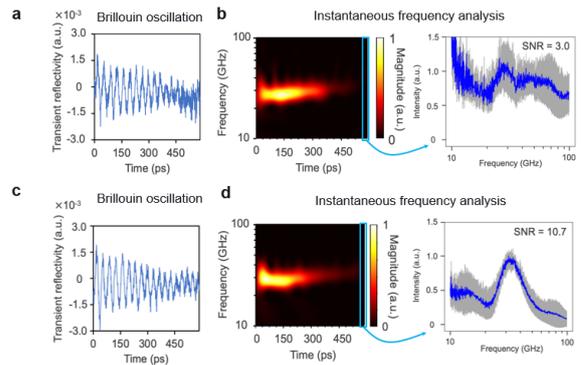


図3 光波形整形結果。(a)プローブ光を整形しない場合の過渡反射率の時間変化と(b)その瞬時周波数解析結果。(c)と(d)はプローブ光を整形した場合における結果。

することで、不要な計測を省略して高速化を図る。今年度は、まず、高速蛍光顕微鏡の光学系、および、顕微鏡システム制御のためのエレクトロニクスを設計した。また、マウス脳内の神経細胞に対するインビボイメージングに向けて、頭蓋骨の切除および脳表面への透明ウィンドウの埋め込みに関する手術手技を習得した。さらに、開発顕微鏡を基盤として、高速光計測、リアルタイム情報処理、高速光操作(光刺激)からなる閉ループ制御システムの構築に向けた検討を開始した。具体的には、アナログ入力ボードとアナログ出力ボードで構成される閉ループ処理の時間を計測した。例えば、1kHzで1000個の神経細胞の膜電位を高速・大規模計測するシナリオを想定した場合、サブミリ秒オーダーでの閉ループ処理が可能であるという見通しを得た。

### 6) 広視野二光子励起蛍光顕微鏡の開発

広視野なカスタム顕微鏡は、収差のないフラットな像面をもつ対物レンズをカスタマイズすることで、従来実現されてきた。一方の本研究では、空間光変調器(SLM)を用いた高解像度な波面収差補正を行うことを前提に、補正可能な収差を許容した対物レンズをカスタム設計した[図4(a)-(b)]。本研究では、この従来とは異なるアプローチによって、0.7  $\mu\text{m}$ の空間分解能(開口数0.5)とマウス脳皮質全体をカバーできる超広視野(10mm)とを兼ね備えた二光子励起蛍光顕微鏡を開発した。今年度は、開発した広視野二光子励起蛍光顕微鏡の視野と空間分解能を評価した。深さ範囲100  $\mu\text{m}$  ~ 500  $\mu\text{m}$ 、視野範囲-5mm ~ 5mmにおいて、点

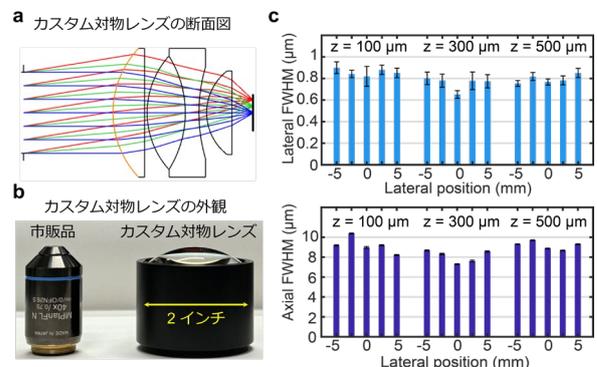


図4 カスタム対物レンズを用いた広視野二光子励起顕微鏡。(a)-(b)カスタム対物レンズの断面図と写真。(c)空間分解能評価リアルタイム3次元標的光刺激実験。(a) 光学系。(b) 蛍光ビーズへの標的光照射。SLM: 空間光、スケールバー: 20  $\mu\text{m}$ 。

像分布関数の半値全幅 (FWHM) が横方向  $0.8 \mu\text{m}$ 、深さ方向  $9 \mu\text{m}$  となった[図 4 (c)]. 以上の結果から、視野  $10\text{mm}$  にわたって、実効開口数  $0.45$  を達成することができた。また、本研究で開発した広視野顕微鏡を用いて、蛍光ビーズの二光子イメージングを実施し、動作確認を完了した。

### 3. 今後の研究の展望

#### 1) 高速ライトシート顕微鏡による生体機能解析

高速 3D 撮像技術の応用展開として、別の生物種にも適用し、多様な生命科学研究への貢献を目指す。

#### 2) 縮重性を備えた神経回路網の動的制御機構の解明

次年度以降、基礎生物学研究所の新規モデル生物開発制度による技術サポートを利用して、これまでに得られた完全ゲノム解読結果を活用し、同定細胞の single cell RNA-seq による分子生理学的解析、およびヒルの神経細胞突起に膜電位インジケータなどの蛍光タンパク質を発現させるための実験系の開発を目指す。

#### 3) 全光学的神経系観察法の開発

今後は、線虫などの生体試料を用いたリアルタイム標的の光刺激実験を進めていく予定である。このために、蛍光撮像に伴う褪色による蛍光輝度低下が追跡精度に与える影響を評価し、撮像速度や励起光強度の最適化、標的光刺激時の最適な露光条件について検討を進める。その後、操作と計測をフィードバックループさせることで、所望の行動や神経活動パターンを誘起することを目指す。本システムが発展することで、さまざまなタイムスケールで生じる生命現象を大規模かつ高精度に捉え、そして操作することが可能となり、生命科学の進展に大きな駆動力をもたらすと期待される。

#### 4) 高速ブリルアン散乱顕微鏡の開発

今後は、開発したライトシートブリルアン散乱顕微鏡を用いた生体試料計測へと移行する。まずは、溶液中に固定化した細胞を対象に、三次元ブリルアン振動計測を行い、システム全体としての原理検証を実施する予定である。さらに、ブリルアン画像と細胞構造との関連性を明確にするため、蛍光イメージング系との統合によるマルチモーダル化を実施する。

#### 5) 高速・大規模多光子励起蛍光顕微鏡法の開発

開発する高速蛍光顕微鏡を用いて、マウス脳の皮質領域での高速かつ大規模な神経活動計測を実施する。例えば、開発する顕微鏡の高速性・大規模性を生かして、1000個の神経細胞の膜電位を  $1\text{kHz}$  の速度で同時計測することで、高速かつ大規模な神経活動計測を実証する。

#### 6) マウス脳皮質全体をカバーする広視野二光子蛍光顕微鏡の開発

今後は、開発した広視野二光子顕微鏡を用いて、マウス脳皮質での神経細胞の広視野インビボイメージングを実施する。特に、距離  $8\text{mm}$  ほど離れた左右の一次視覚野において、同時イメージングを実施し、両視覚野での神経活動の同期を観察したい。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) Hiroshi Kanno\*, Kotaro Hiramatsu, Hideharu Mikami, Atsushi Nakayashiki, Shota Yamashita, Arata Nagai,

Kohki Okabe, Fan Li, Fei Yin, Keita Tominaga, Omer Faruk Bicer, Ryohei Noma, Bahareh Kiani, Olga Efa, Martin Büscher, Tetsuichi Wazawa, Masahiro Sonoshita, Hirofumi Shintaku, Takeharu Nagai, Sigurd Braun, Jessica P Houston, Sherif Rashad, Kuniyasu Niizuma, Keisuke Goda\* "High-throughput fluorescence lifetime imaging flow cytometry" Nature Communications 15, 7376 (2024). (DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51125-y>)

- 2) Atsushi Shibukawa, Ryota Higuchi, Gookho Song, Hideharu Mikami\*, Yuki Sudo\* and Mooseok Jang\* "Large-volume focus control at 10 MHz refresh rate via fast line-scanning amplitude-encoded scattering-assisted holography" Nature Communications 15, 2926 (2024). (DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47009-w>)

### 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

該当なし

### 4.6 講演

#### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) Atsushi Shibukawa, Yuki Sudo, Hideharu Mikami, Mooseok Jang, "Wavefront shaping at 10 MHz refresh rate by exploiting the scan speed of a resonant scanner", CLEO-PR2024, Incheon, Republic of Korea, August 4<sup>th</sup>, 2024

#### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) 三上秀治, "脳神経回路の謎に光を照らす: 光・情報融合技術で挑む", 日本化学会秋季事業 第 14 回 CSJ 化学フェスタ 2024, タワーホール船堀, 東京, 2024 年 10 月 24 日
- 2) 三上秀治, "顕微鏡の未来", 第 76 回日本細胞生物学会大会特別企画ワークショップ (つくば国際会議場, つくば市, 2024 年 7 月 19 日)

#### c. 一般講演 (国際学会)

該当なし

#### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 高橋 瑛介, 石島 歩, 宍戸 耀, 広岡 隆, 米山 裕貴, 笠置 歩, 瀧 雅人, 富菜 雄介, 渋川 敦史, 三上 秀治, "ホログラフィック時空間集光によるリアルタイム 3 次元標的光刺激", Optics & Photonics Japan 2024, 電気通信大学, 東京, 2024 年 12 月 1 日
- 2) 石島 歩, 奥山 亮, 三上 秀治, "細胞のリアルタイム粘弾性計測に向けた分散コヒーレントブリルアン散乱分光法の高感度化", 第 60 回 応用物理学会北海道支部, 第 21 回 日本光学会北海道支部合同学術講演会 (釧路市生涯学習センターまなぼつと幣舞, 釧路, 2024 年 11 月 2 日)
- 3) Yusuke Tomina, Yu Toyoshima, Kazuki Mukumoto, Hikaru Shishido, Chentao Wen, Manami Kanamori, Koyo Kuze, Yuko Murakami, Suzu Oe, Takeshi Ishihara, Shuichi Onami, Yuichi Iino, Hideharu Mikami, "Real-time volumetric neural recoding of the whole brain in naturally behaving nematode worms by high-speed light-sheet microscopy", 日本比較生理生化学会第 46 回大会 (JSCPB2024), 名古屋大学東山キャンパス, 名古屋市, 2024 年 9 月 30 日
- 4) 椋本 一輝, 富菜 雄介, 豊島 有, 宍戸 耀, Wen Chentao, 金森 真奈美, 久世 晃暢, 村上 悠子, 大江 紗, 石原 健, 大浪 修一, 飯野 雄一, 三上 秀治, "深

層学習による自由行動下線虫の全脳神経活動解析", 第33回日本バイオイメーキング学会学術集会, 東京理科大学 葛飾キャンパス, 東京, 2024年9月29日

- 5) 空戸 耀, 富菜 雄介, 豊島 有, 金森 真奈美, 久世 晃暢, 村上 悠子, 大江 紗, 石原 健, 飯野 雄一, 三上 秀治, "自由行動線虫の全脳神経活動計測における自動追跡システムの開発", 第33回日本バイオイメーキング学会学術集会, 東京理科大学 葛飾キャンパス, 東京, 2024年9月29日
- 6) 奥山 亮, 石島 歩, 三上 秀治, "4f 波形整形器による分散コヒーレントブリルアン散乱分光法の高感度化", 第59回応用物理学会北海道支部・第20回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道大学, 札幌, 2024年1月6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) Hyojeong Shon, Atsushi Shibukawa and Hideharu Mikami, "Wavefront shaping-assisted multisite two-photon microscopy for recording distributed neuronal activity across the mouse cortex", 映像情報メディア学会 マルチメディアストレージ研究会, 北海道大学 札幌市, 2025年2月19日
- 2) Hideharu Mikami, "High-speed fluorescence microscopy and beyond: a new approach to collecting big data from life", ABiS International Symposium 2024, Okazaki Conference Center, Aichi, Oct.28.2024

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

a. 国内共同研究

- 1) 澁川 敦史(立教大学(笠置 歩)): 「高速撮像顕微鏡への機械学習解析の適用による生命神経活動ループ計測の実現」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究
- 2) 三上 秀治(慶應義塾大学(堀田 耕司)): 「ホヤの運動神経回路発生過程のイメージング」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究
- 3) 三上 秀治(慶應義塾大学(吉野 桜子)): 「ホヤ幼生における神経伝達物質のリアルタイムイメージング」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 次世代若手共同研究
- 4) 三上 秀治(自然科学研究機構生理学研究所(堤 元佐)): 「先端光学顕微鏡の遠隔観察支援ネットワークの確立」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 クロスオーバー共同研究
- 5) 澁川 敦史(九州工業大学(高林 正典)): 「DMDを用いた高速光電子融合型深層ニューラルネットワークハードウェア」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究
- 6) 澁川 敦史(岡山大学(小島 慧一)): 「様々なGPCRシグナリングを駆動できるオプシンの探索と開発」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究
- 7) 石島歩(東京大学(中川 桂一)): 「超高速音響光技術開発」、2024年度、物質・デバイス領域共同研究 基盤共同研究

b. 国際共同研究

該当なし

c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 石島 歩, 基盤研究 B、新奇分光手法による高速高感度バイオイメーキング、2022~2024年度

- 2) 石島 歩, 萌芽研究、バイオイメーキングのための超音波時空間制御法と高感度検出手法の開発、2023~2024年度
- 3) 富菜雄介, 若手研究、ヒル神経系の大規模な機能的コネクトームを利用した多機能性回路ネットワークの解析、2021~2026年度

b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 澁川 敦史(科学技術振興機構・創発的研究支援事業): 「世界最速光波面シェイピングによる光散乱との共生」、2021年度~
- 2) 三上 秀治(科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業CREST): 「高速・高次元閉ループ光計測技術の確立と神経科学への応用」、2022~2028年度
- 3) 富菜 雄介(科学技術振興機構・創発的研究支援事業): 「縮重性を備えた神経回路網の動的制御機構の解明」、2023年度~

c. 民間助成金

- 1) 石島 歩(公益財団法人 村田学術振興財団): 「コヒーレント音響フォノンの時空間多重化計測で切り拓く細胞力学ダイナミクス」、2023~2024年度
- 2) 石島 歩(公益財団法人 住友財団): 「コヒーレント音響フォノンによる力学特性の高速バイオイメーキング」、2023~2024年

#### 4.10 受賞

- 1) 空戸 耀(Development of a real-time tracking system for measuring whole brain neuronal activity of C. elegans exhibiting natural behavior), 2024 電子研国際シンポジウム ポスター賞, 2024年12月10日
- 2) 高橋 瑛介(ホログラフィック時空間集光によるリアルタイム3次元標的的刺激), 第10回OPJ優秀講演賞(一般社団法人 日本光学会, 2024年12月2日)

#### 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) 工学部、情報エレクトロニクス演習、石島 歩、2024年04月01日~2024年09月30日
- 2) 情報科学研究科、脳神経科学特論、三上 秀治、澁川 敦史、富菜 雄介、2024年04月01日~2024年09月30日
- 3) 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、三上 秀治、2024年04月01日~2023年09月30日
- 4) 全学共通、一般教育演習フレッシュマンセミナー 科学を通して見る世界、石島 歩、2024年04月01日~2023年09月30日
- 5) 工学部、量子力学、三上 秀治、澁川 敦史、2024年04月01日~2024年09月30日
- 6) 工学部、生体情報工学実験Ⅰ、石島 歩、2024年04月01日~2024年09月30日
- 7) 工学部、生体情報工学実験Ⅱ、石島 歩、2024年10月01日~2025年03月31日
- 8) 工学部、生体工学概論、三上 秀治、2024年12月01日~2025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. アウトリーチ活動**

該当なし

**h. 新聞・テレビ等の報道**

該当なし

**i. 客員教員・客員研究員など**

該当なし

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位：3人

- 1) 高橋 瑛介、情報科学院生体情報工学コース:修士(情報科学)、ホログラフィック時空間集光によるリアルタイム3次元標的光刺激
- 2) 宍戸 耀、情報科学院生体情報工学コース:修士(情報科学)、生体内リアルタイム3次元標的光刺激に向けた行動追跡システムおよび多細胞追跡アルゴリズムの開発
- 3) 椋本 一輝、情報科学院生体情報工学コース:修士(情報科学)、深層学習アルゴリズムを用いた自由行動下線虫の全脳神経活動解析

博士学位：0人

該当なし



# 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、幅広いナノテクノロジー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、高効率な熱電変換システム、生物を模倣した構造による低摩擦表面創製などの省エネルギー創出につながるデバイス開発、さらには、有機合成を始点とした分子集合体の機能開拓などのグリーンナノテクノロジー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。

## 薄膜機能材料研究分野

### スタッフ

教授 太田 裕道 (博士 (工学)、2012年9月1日着任)

准教授 片山 司 (博士 (工学)、2021年4月1日着任)

助教 曲 勇作 (博士 (理学)、2022年9月1日着任、2025年3月31日転出)

博士研究員 Ahnong Jeong (博士 (工学)、2023年4月1日着任)

事務補助員 ターディフ 恭子 (2024年6月1日着任、2025年2月28日退職)、丸岡 直生 (2025年3月1日着任)

### 学生

博士課程 吳 宇璋、卞 志平、Kungwan Kang、周 璋琨、Hyeonjun Kong

修士課程 吉村 充生、丸野内 洸、定平 光、陳 荻文、三津谷 怜

学部 赤塚 翔天、久保田 拓真、村木 理恩、西田 一輝、笠井 優輝、竹田 大翔、織茂 怜央

## 1. 研究目標

従来セラミックスとして扱われてきた機能性酸化物を素材として、原子レベルで平坦な表面を有する高品質薄膜を作製し、機能性酸化物の持つ真のポテンシャルを最大限引き出し、世の中で役に立つデバイスの開発を目指している。具体的には、「熱電変換材料」、「透明酸化物薄膜トランジスタ」、「マルチフェロイック材料」、「フレキシブル酸化物薄膜」の開発を行っている。

### (a) 熱電変換材料の開発

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

### (b) 透明酸化物薄膜トランジスタの開発

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

### (c) マルチフェロイック材料の開発

外部磁場により N 極/S 極が反転する強磁性材料や、電場により電気分極の向きをスイッチできる強誘電材料はメモリやセンサーなど様々な分野で活用されている。近年、その両方の強制的秩序を併せ持つマルチフェロイック材料の開発も広く行われている。マルチフェロイック材料では電場 (磁場) による磁化 (電気分極) の制御も可能となり、省エネルギーメモリ等の新たな応用が期待される。しかしながら、強誘電秩序と磁気秩序の両立は難しく、マルチフェロイック材料の報告例は限られている。特に室温で強誘電分極や自発磁化を有する材料がほとんどなく、新たな材料系の探索が求められている。当研究室では単結晶基板上に薄膜を合成することで、単結晶基板からの応力を利用し、最安定構造でない新しい準安定相のマルチフェロイック材料の創出を目指している。

### (d) フレキシブル酸化物薄膜の開発

金属酸化物は強誘電や光触媒などの多種多様な機能を示す。近年、これらの酸化物材料を単結晶酸化物シートとして得ることが可能になった。単結晶酸化物シート合成では、まず単結晶基板上に水溶性膜と酸化物膜のヘテロ構造を作製し、その後、水に浸けて水溶性膜を溶かすことで酸化物膜を剝離し、単結晶酸化物シートを得る。この合成手法は (1) 容易であること、(2) ほとんどの酸化物に適用できること、(3) フレキシブル市場に参入できること、(4) 高価な単結晶基板が再利用可能なこと、などの期待から高い注目を集めている。しかし応用という観点からは課題も多い。その最大の課題は、大面積シートの合成が難しいという点にある。当研究室では、大面積シートを得る手法の開発を目的に研究を進めている。

## 2. 研究成果

### (a) 熱トランジスタの高性能化に成功

電氣的に電流の流れやすさを切替える電界効果トランジスタのように、電氣的に熱流の流れやすさを切替える熱トランジスタが、熱制御技術の一つとして近年注目されている。電子や光のように、熱を自在に操ることができるになれば、解決すべきエネルギー問題の一つである廃熱の有効利用が可能になる。当研究グループは、2023年2月に世界初の全固体熱トランジスタを実現したが、熱伝導率制御幅 (= オンの熱伝導率 3.8 W/mK - オフの熱伝導率 0.95 W/mK) が狭く (2.85 W/mK)、幅広い熱流制御には適していなかった。

当研究グループは、2023年5月に電気を良く通す物質が熱も良く通し、熱伝導率制御幅の拡大に有効であることを見出したが [Z. Bian ら、ACS Applied Materials & Interfaces 15, 23512 (2023)]、なかなか候補物質を見つけることができなかった。その後、電気を良く通す性質を示す  $\text{LaNiO}_3$  が、熱トランジスタの活性層としてポテンシャルが高いことを見出した [Hao-Bo Li ら、Applied Physics Letters 124, 191901 (2024)]。そこで、本研究では  $\text{LaNiO}_3$  を活性層とする熱トランジスタを作製し、電気化学的にオン状態 (酸化状態) とオフ状態 (還元状態) に切替えて熱伝導率の変化を調べた。

最初に電気化学的に還元・酸化した後の  $\text{LaNiO}_3$  の結晶格子変化を調べたところ、酸化状態 (結晶格子の大きさ: 0.3844 nm) から還元すると徐々に結晶が膨張し (0.3868 nm)、その後酸化すると元の結晶格子の大きさ (0.3844 nm) に戻ることが分かった。この還元・酸化操作を7回繰り返した

が、結晶格子の大きさが可逆的に変化して、結晶構造が壊れることはなかった。次に、酸化状態と還元状態の熱伝導率を計測したところ、酸化状態では平均 6.0 W/mK、還元状態では平均 1.7 W/mK であることが分かった。熱伝導率の変化も可逆的であり、うまく切替えができていけると言える。熱伝導率制御幅は 4.3 W/mK であった。全固体熱トランジスタの熱伝導率制御幅として、SrCoO<sub>x</sub> を活性層として用いた従来の熱トランジスタと比較して 1.5 倍の熱伝導率制御幅が得られることが分かった(図 1)。[Zhiping Bian et al., *Advanced Science* (2024)] (北大・阪大共同プレスリリース)

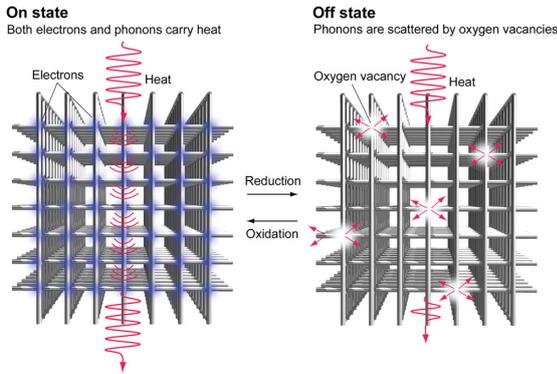


図 1. 熱トランジスタの動作イメージ。電気的に、熱伝導率 6.0 W/mK のオン状態から、熱伝導率 1.7 W/mK のオフ状態に切替える。良く電気を通す物質を採用することにより、オン状態とオフ状態の差 (=熱伝導率制御幅) を従来比 1.5 倍の 4.3 W/mK に拡大することに成功した。

### (b) 従来比 10 倍の性能を示す酸化物薄膜トランジスタを実現

現在商品化されている、有機 EL テレビやスマートフォンの画面を駆動するための薄膜トランジスタ (TFT) 用の活性層材料として、酸化物半導体であるアモルファス InGaZnO<sub>4</sub> (a-IGZO) が使用されている。IGZO-TFT の電子移動度は 5~10 cm<sup>2</sup>/Vs 程度だが、有機 EL テレビなどの超大型化・超高精細化が進められており、次世代 8K ディスプレイを開発するためには、70 cm<sup>2</sup>/Vs 以上の電子移動度を示す TFT が必要不可欠とされている。この問題に対し、曲らは、酸化インジウム (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 薄膜を活性層とすることで電子移動度 140 cm<sup>2</sup>/Vs を示す TFT を実現したが[Y. Magariら, *Nature Communications* 13, 1078 (2022)], 実用化のために必要な安定性 (信頼性) が悪いという大きな欠点があった。一般に、活性層である薄膜表面に吸着した空気中の気体が、電圧の印加により脱離 (または吸着) することが原因であると考えられている。

本研究では、活性層薄膜の表面を保護膜で覆うことにより、空気中の気体が吸着しないように TFT を作製した。保護膜として、酸化インジウムと同じ結晶構造をもつ酸化イットリウムや酸化エルビウムを含む希土類酸化物を中心に検討し、比較として一般的に用いられている酸化アルミニウムなどの保護膜も試した。酸化ハフニウムや酸化アルミニウムを保護膜として用いた TFT では安定性の向上が全く見られなかった。一方、酸化イットリウムと酸化エルビウムを保護膜にした TFT は極めて安定性が高いことが分かった。その電子移動度は 78 cm<sup>2</sup>/Vs であり、次世代 8K ディスプレイの要求を満たす。電子顕微鏡で原子配列を観察したところ、酸化インジウムと酸化イットリウムは原子レベルでピッタリ結合 (ヘテロエピタキシャル成長) することが分かった。一方、安定性が悪かった他の TFT では、酸化インジウムと保護膜の界面はアモルファスになることが分かった。以上の結果から、酸化インジウム表面を原子レ

ベルでピッタリ保護することで、気体の吸着・脱離を抑制し、高い電子移動度 (78 cm<sup>2</sup>/Vs) を保ったまま安定性を大きく改良することに成功した(図 2)。[Prashant Ghediya et al., *Small Methods* (2024)] (北大・高知工科大学共同プレスリリース)

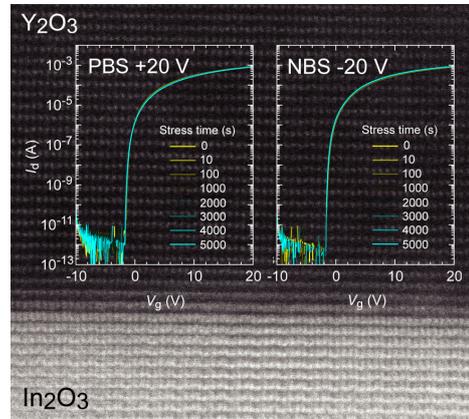


図 2. 現在の 4K 有機 EL テレビの画面には移動度 5 ~ 10 cm<sup>2</sup>/Vs 程度の IGZO-TFT が使用されている。本研究では、次世代 8K 有機 EL テレビの画面に必要な酸化物 TFT (移動度 78 cm<sup>2</sup>/Vs) の開発に成功。±20 V を 1.5 時間印加し続けても特性変化せず、安定に使用できる。

### (c) ありふれた材料で超高性能熱スイッチを実現

研究グループは、2023 年 2 月に世界初の全固体熱スイッチを発表し、2024 年 7 月にはより高性能な全固体熱スイッチを実現したが、リチウムイオン電池用正極活性物質材料として大量に使用され、枯渇が懸念されているコバルトやニッケルなどの金属を主成分とする材料を活性層として用いる必要があった。

本研究では、活性層材料として酸化セリウムを選択した。酸化セリウムはガラスの磨き粉として市販されていることから分かるように、比較的資源が豊富で、安価な材料である。酸化セリウムの結晶構造は単純な蛍石型構造であり、同じ蛍石型構造の固体電解質基板である YSZ 上にエピタキシャル成長することが知られている。また、酸化・還元も可能で、酸化状態では室温で 14 W/mK の比較的高い熱伝導率を示すことが知られている。このような理由から、本研究では、酸化セリウムを活性層とする全固体熱スイッチを作製した。作製した熱スイッチを、空气中、280°C に加熱した状態で通電し、電気化学的にオン状態 (酸化状態) とオフ状態 (還元状態) に切替えて熱伝導率の変化を調べた。

酸化セリウム薄膜を一度還元し (オフ状態)、次に酸化すると (オン状態)、熱伝導率は最も還元された状態で約 2.2 W/mK となり、酸化とともに熱伝導率は 12.5 W/mK (オン状態) まで増加した。この還元 (オフ状態) /酸化 (オン状態) サイクルを 100 回繰り返したところ、熱伝導率の平均値は還元後 (オフ状態) で 2.2 W/mK、酸化後 (オン状態) で 12.5 W/mK であった。酸化セリウム熱スイッチの動作は非常に安定しており、オン/オフ熱伝導率比は 5.8 であった。また、熱伝導率切替幅は 10.3 W/mK であり、従来の SrCoO<sub>x</sub> や LaNiO<sub>x</sub> 薄膜を活性層とする熱スイッチの熱伝導率切替幅 (SrCoO<sub>x</sub>: 2.85 W/mK、LaNiO<sub>x</sub>: 4.3 W/mK) を 2 倍以上も上回る値である。以上のように、本研究では比較的資源が豊富で、安価な酸化セリウムを活性層とする超高性能熱スイッチを実現した(図 3)。

本研究成果は将来の熱制御デバイスの実用化に向けた開発を加速するものであり、特許を出願済である。今後は微細構造を制御するなどして更に性能向上を目指すとともに、熱の伝わり方を赤外線カメラで可視化することが可能な「熱ディスプレイ」を試作、デモンストレーションすることで技術を普及させたいと考えている [Ahrong Jeong, Mitsuki Yoshimura et al., *Science Advances* (2025)] (北大プレスリリース)

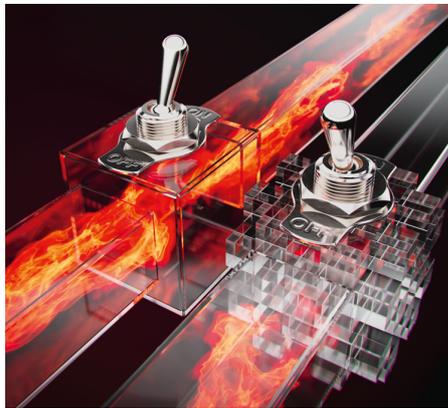


図 3. 本研究の熱スイッチの動作イメージ。電気化学的に、高熱伝導率(12.5 W/mK)の ON 状態 (左) から、低熱伝導率(2.2 W/mK)の OFF 状態 (右) に切替える。

#### (d) 剥離を利用した光アクチュエータ

光駆動アクチュエータは、光エネルギーを物理的運動に変換する素子であり、電源や配線を必要とせず遠隔操作が可能のため、従来の電圧駆動型アクチュエータと比較して 10 万分の 1 以下のサイズに小型化できるという利点がある。これまで主に有機材料が用いられてきたが、有機材料は光異性化を利用して動作するため、異なる波長の 2 つの光源が必要であり、1 サイクルに約 50 秒かかるなど、繰り返し動作の速度や効率に課題があった。これに対し、実用化に向けては高速かつ信頼性の高い繰り返し動作が求められている。

近年は、光による熱変化で構造相転移を誘起する  $\text{VO}_2$  や、光照射による電荷変調と逆圧電効果を利用する強誘電体を使ったアプローチも試みられているが、いずれも変位量が小さく、応答速度が遅いなどの課題が残っていた。

本研究では、強誘電体  $\text{BaTiO}_3$  (BTO) のフリースタANDING 単結晶シートを用いることで、これらの課題を解決した。作製した BTO シートは、 $\text{AlO}_x$  ガラス保護層の利用によって高品質かつ大面積 (ミリメートルサイズ)、かつクラックのない構造を実現し、優れた強誘電性 (残留分極  $23 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) と圧電性 ( $d_{33} = 600 \text{ pm}/\text{V}$ ) を示した。この結果、連続波紫外レーザー (10–200  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) の単一光源で、変位長比最大 3.7% を達成し、応答時間はわずか 120  $\mu\text{s}$  と、有機材料ベースの光駆動アクチュエータよりも  $10^4$  倍高速である。さらに、生理食塩水中でも動作可能であることが確認され、マイクロ流体チップや遠隔制御型小型アクチュエータなど、幅広い応用が期待される成果となっている。 [L. Gong et al., *ACS Appl. Mater. & Interfaces*. (2024).]

#### (e) 六方晶希土類鉄酸化物マルチフェロイック材料の探索

強磁性や強誘電性などの強制的秩序を有する材料での相転移現象は、低消費電力デバイスや高密度記録デバイスに応用可能であることから注目を集めている。例えば、強誘電相 (FE) から常誘電相への相転移から生じる巨大誘電率は、

コンデンサやアンテナなどのデバイスに応用されている。一方、強磁性相 (FM) から常磁性相への相転移を利用することで、室温での電界誘起磁化制御も実現している。従来の相転移では、強制的秩序 (フェロ相) から常誘電や常磁性等のパラ相への遷移が一般的であり、温度上昇とともに自発分極や自発磁化が低下し、相転移温度以上でそれらが消失する。一方、最近発見された反フェロ相からフェロ相への遷移では、自発分極や磁化が、温度上昇により相転移温度を超えることで急激に増加する。反強誘電相 (AFE) から強誘電相 (FE) への相転移材料の例には、 $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ 、 $\text{PbZrO}_3$ 、 $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$  ( $R$  は希土類元素)、六方晶 ( $h$ -)  $\text{RMnO}_3$ 、一方、反強磁性から強磁性への相転移材料の例には、 $\text{FeRh}$ 、 $\text{Sr}_x\text{R}_{1-x}\text{MnO}_3$ 、 $\text{RBaCo}_2\text{O}_{5.5}$  等がある。これらの相転移は、室温付近での電場印加による制御可能な大きな焦電効果および電気熱量効果、そして巨大磁気抵抗、磁気容量の符号変化、および電流印加相転移などの独自の特性を示す。しかしながら、反フェロ相からフェロ相への相転移を示す材料は限られており、新しい材料系の発見が求められていた。

当研究室では強誘電秩序と磁気秩序を同時に示す  $h$ - $\text{RFeO}_3$  材料を対象に研究を進めた。 $h$ - $\text{RFeO}_3$  の強誘電分極は、 $\text{FeO}_5$  パイラミッドの傾斜と、それに対応する希土類イオンの変位に由来する。この傾きは格子定数に関係しているため、強誘電特性は格子定数を変更することで調整できると考えた。特に  $h$ - $\text{HoFeO}_3$  においては、反強磁性–強磁性相転移、そして反強誘電–強誘電相転移の両方を見出すことに成功し、それに伴う磁場印加による大きな強誘電特性の変調も観測された。 [Y. Liu et al., *ACS Appl. Mater. & Interfaces*. (2024).]

### 3. 今後の研究の展望

全固体電気化学熱トランジスタについては、低温動作をオン/オフ比や熱伝導率制御幅を向上させるための材料探索を引き続き行う予定である。透明酸化物薄膜トランジスタの研究では、熱電能電界変調法により高電界効果移動度化するためのヒントを導き出す研究を今後も続けて行う予定である。熱電変換材料の研究については、 $\text{Ba}_{1/2}\text{CoO}_2$  の熱的安定性などを調査する予定である。また、機能性酸化物にフレキシブル性を付加することで、さらなる特性向上を狙う。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) Y. Liu, B. Chen, Y. Hamasaki, L. Gong, H. Ohta, and T. Katayama\*, Magnetic Phase Transition-Induced Modulation of Ferroelectric Properties in Hexagonal  $\text{RFeO}_3$  ( $R = \text{Tb}$  and  $\text{Ho}$ ), *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 17832–17837 (2024). (DOI: 10.1021/acsami.4c02475)
- 2) K. Marunouchi, L. Gong, H. Ohta, and T. Katayama\*, High-concentration doping effects of aliovalent Al and Ga on ferroelectric properties of  $\text{BaTiO}_3$  Films, *Thin Solid Films* 796, 140339 (2024). (DOI: 10.1016/j.tsf.2024.140339)
- 3) L. Gong, K. Marunouchi, A. Chikamatsu, H. Ohta, and T. Katayama\*, Large tensile-strained  $\text{BaTiO}_3$  films grown on lattice-mismatched La-doped  $\text{BaSnO}_3$  bottom electrode, *CrystEngComm* 26, 2765 (2024). (DOI: 10.1039/D4CE00197D)
- 4) H. -B. Li\*, Z. Bian, M. Yoshimura, K. Shimoyama, C. Zhong, K. Shimoda, A. N. Hattori, K. Yamauchi, I.

Hamada, H. Ohta\*, and H. Tanaka\*, Wide-range thermal conductivity modulation based on protonated nickelate perovskite oxides, Appl. Phys. Lett. 124, 191901 (2024). (DOI: 10.1063/5.0201268)

- 5) 【電子研内共著】 Z. Bian, M. Yoshimura, A. Jeong, H. Li, T. Endo, Y. Matsuo, Y. Magari, H. Tanaka, and H. Ohta\*, Solid-State Electrochemical Thermal Switches with Large Thermal Conductivity Switching Widths, Adv. Sci. 11, 2401331 (2024). (DOI: 10.1002/advs.202401331)
- 6) 【電子研内共著】 Y. Wu, Y. Magari\*, P. Ghediya, Y. Zhang, Y. Matsuo, and H. Ohta\*, High-mobility and High-reliability Coexistence in Zn-incorporated Amorphous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based Thin-Film Transistors, Jpn. J. Appl. Phys. 63, 076504 (2024). (DOI: 10.35848/1347-4065/ad5ee6)
- 7) 【電子研内共著】 P. R. Ghediya, Y. Magari\*, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, Y. Zhang, Y. Matsuo, and H. Ohta\*, Reliable operation in high-mobility indium oxide thin film transistors, Small Methods 9, 2400578 (2025). (DOI: 10.1002/smt.202400578)
- 8) 【電子研内共著】 L. Gong, A. Taguchi, W. Zhou, R. Mitsuya, H. Ohta, and T. Katayama\*, Ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> Freestanding Sheets for Ultra-High-Speed Light-Driven Actuator, ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 54146-54153 (2024). (DOI: 10.1021/acsami.4c10044)
- 9) B. Chen, J. Lin, B. Feng, Y. Ikuhara, H. Ohta, and T. Katayama\*, Unusual crystal orientation in hexagonal Ho-FeO<sub>3</sub> multiferroic films and the effect on magnetism, Cryst. Growth Des. 24, 8439-8444 (2024). (DOI: 10.1021/acs.cgd.4c00930)
- 1 0) 【電子研内共著】 Y. Wu, P. R. Ghediya, Y. Zhang, Y. Matsuo, H. Ohta\*, and Y. Magari\*, Thermopower Modulation Analyses of Effective Channel Thickness for Zn-incorporated In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based Thin-Film Transistors, Jpn. J. Appl. Phys. 63, 126501 (2024). (DOI: 10.35848/1347-4065/ad971b)
- 1 1) W. Zhou, L. Gong, R. Mitsuya, D. Chen, H. Ohta, and T. Katayama\*, Water-soluble CaO sacrificial layer heteroepitaxially grown on yttria-stabilized zirconia substrate for large ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> sheets, J. Mater. Chem. C 13, 3424-3429 (2025). (DOI: 10.1039/D4TC04585H)
- 1 2) 【電子研内共著】 A. Jeong, M. Yoshimura, H. Kong, Z. Bian, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, T. Endo, Y. Matsuo, and H. Ohta\*, High-performance solid-state electrochemical thermal switches with earth-abundant cerium oxide, Science Adv. 11, eads6137 (2025). (DOI: 10.1126/sciadv.ads6137)
- 1 3) S. Ito, H. Tanaka, Y. Oshima, K. Kanahashi, H. Ito, B. Chen, H. Ohta, and T. Takenobu\*, Systematic Investigation of Charge Transport and Thermoelectric Properties in Semicrystalline Polymers: Electrochemical Doping Effects on Doping Level and Temperature Dependence Using One Sample, Appl. Phys. Express 18, 021002 (2025). (DOI: 10.35848/1882-0786/adb23e)
- 1 4) H. -B. Li\*, S. Kobayashi, W. Yan, B. Chen, T. Zhu, M. Namba, Y. Kotani, H. Takatsu, T. Terashima, K. Nakayama, A. Kuwabara, A. N. Hattori, W. -H. Wan, H. Ohta, H. Tanaka\*, and H. Kageyama\*, Epitaxial growth of triple-layered brownmillerite cobalt oxide Sr<sub>4</sub>Co<sub>3</sub>O<sub>9</sub>, Inorg. Chem. 64, 6589-6596 (2025). (DOI: 10.1021/acs.inorgchem.4c05507)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 太田裕道, 寺崎一郎, 陳 亨泰, “TECHNICAL REPORT テクニカルレポート 実用的な熱電材料の単

結晶化に成功 — 毒性元素を使わない熱電変換の実現に向けて大きく前進—”, クリーンエネルギー 33, No. 7, 10-13 (2024).

#### 4.4 著書

該当なし

#### 4.5 特許

- 1) 太田裕道, 曲 勇作, ゲディア ブラシヤント ラマニクラル, 定平 光, コン ヒョンジュン, “水素化酸化インジウム膜形成用のセラミックターゲットとその製造方法、およびセラミックターゲットを用いた薄膜トランジスタの製造方法”, 特願 2024-150613, 2024 年 9 月 2 日.
- 2) 太田裕道, 曲 勇作, ジョンアロン, 卞 志平, 吉村充生, “熱トランジスタ”, PCT/JP2025/002559 国際出願 (指定国: すべて), 2025 年 1 月 28 日.

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) H. Ohta, “Solid-State Electrochemical Thermal Transistor based on Oxygen Sponge SrCoO<sub>x</sub> (2 < x < 3)”, 2024 MRS Spring Meeting, Seattle, WN, April 22-26<sup>th</sup>, 2024.
- 2) H. Ohta, “Solid-State Electrochemical Thermal Transistors”, Department Colloquium at Institut für Physik & IRIS Adlershof, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany, June 11<sup>th</sup>, 2024.
- 3) H. Ohta, “Solid-State Electrochemical Thermal Transistors”, UNIST Special Seminar: Future Materials, UNIST, Korea, June 28<sup>th</sup>, 2024.
- 4) H. Ohta, “Oxide-based Solid-State Electrochemical Thermal Transistors”, NANO KOREA 2024, KINTEX, Korea, July 3-5<sup>th</sup>, 2024.
- 5) H. Ohta, “Solid-State Electrochemical Thermal Transistors”, Sakura Science Program, RIES, Hokkaido Univ., September 9<sup>th</sup>, 2024.
- 6) A. Jeong, “High-Performance Solid-State Electrochemical Thermal Transistor with Cerium Oxide Epitaxial Films”, BK21 Material Innovation Leading Platform Education and Research Group Overseas Expert Invitation Seminar hosted by Prof. Soonil Lee, Changwon National University, Changwon, Korea, September 24<sup>th</sup>, 2024.
- 7) H. Ohta, “Oxide-based solid-state electrochemical thermal transistors”, Mini crossover seminar on functional materials 2024 ‘Haobo II’ -2024 Joint seminar of Tanaka-Lab, Kageyama-Lab, Ohta-Lab-, SANKEN, Osaka Univ., September 26<sup>th</sup>, 2024.
- 8) A. Jeong, and H. Ohta, “High-performance solid-state electrochemical thermal switches with abundant cerium oxide”, 2024 IEEE IRDS and International Nano devices and Computing Conference (INC), Virtual, September 26<sup>th</sup>, 2024.
- 9) H. Ohta, “Development of Oxide-based Solid-State Electrochemical Thermal Transistors”, The 8th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2024), Jeju Shinhwa World, Jeju, Korea, November 24-27<sup>th</sup>, 2024.
- 1 0) P. R. Ghediya, Y. Magari, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, Y. Zhang, Y. Matsuo, and H. Ohta, “Improvement in the Reliability for Polycrystalline Indium Oxide based Thin-Film Transistors by Epitaxial Passivation Layers”, The 31st International Display Workshops (IDW '24), Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, December 4-6<sup>th</sup>, 2024.
- 1 1) A. Jeong, M. Yoshimura, H. Kong, Z. Bian, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, T. Endo, Y. Matsuo, and H. Ohta, “High-

Performance Solid-State Electrochemical Thermal Switches with Earth-Abundant Cerium Oxide”, Seminar on Inviting International Experts hosted by Dr. Byungki Ryu, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Changwon, Korea, December 26<sup>th</sup>, 2024.

- 1) H. Ohta, “Solid-state electrochemical thermal transistors”, 2nd RPI-HU Joint Seminar on Advanced Semiconductor and Related Technologies for Future Communication and Computing, February 14<sup>th</sup>, 2025.

b. 招待講演 (国内学会)

- 1) 曲 勇作, “高移動度酸化物 TFT に関する最新の展開”, 一般財団法人 総合研究奨励会 透明酸化物光・電子材料研究会 第 8 回研究会「半導体・構造・電子状態の評価」(2024 年 4 月 19 日: 2024 年度第 1 回), 東京大学および Zoom, 2024 年 4 月 19 日.
- 2) ジョンアロン, 吉村充生, 卞志平, コンヒョンジュン, Jason Tam, Bin Feng, 幾原雄一, 曲勇作, 遠堂敬史, 松尾保孝, 太田裕道, “酸化セリウム薄膜の電気化学酸化還元を利用した高性能熱トランジスタの開発”, 日本固体イオニクス学会 第 18 回 固体イオニクスセミナー, 茨城県つくば市 筑波山ホテル青木屋, 2024 年 9 月 2 日-4 日.
- 3) 片山 司, “高配向ペロブスカイト酸化物自立膜の合成と機能”, 日本セラミックス協会 第 37 回 秋季シンポジウム, 名古屋大学, 2024 年 09 月 10 日-12 日.
- 4) 太田裕道, “機能性酸化物の「機能」を引き出す薄膜成長とデバイス応用の可能性”, 応用物理学会 2024 年(令和 6 年)秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場(新潟県新潟市), 2024 年 9 月 16 日-20 日.
- 5) 太田裕道, “全固体電気化学熱トランジスタの開発”, 金属学会 2024 年秋期(第 175 回)講演大会, 大阪大学豊中キャンパス (大阪), 2024 年 9 月 17 日-20 日.
- 6) 曲 勇作, 太田裕道, “次世代 FPD の要求を満たす高移動度を示す安定な酸化物薄膜トランジスタ”, 2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 2025 年 3 月 14 日-17 日.

c. 一般講演 (国際学会)

- 1) A. Jeong, Z. Bian, M. Yoshimura, B. Feng, Y. Ikuhara, Y. Magari, and H. Ohta, “Solid-State Electrochemical Thermal Transistors with Large Thermal Conductivity Switching Width”, 2024 MRS Spring Meeting, Seattle, WN, April 22-26<sup>th</sup>, 2024. (Onsite Oral)
- 2) S.-I. Ito, K. Kanahashi, H. Tanaka, B. Chen, H. Ohta, and T. Takenobu, “Charge transport properties in electrochemically-doped conducting polymer PBTTT”, 26th International Conference on Science and Technology of Synthetic Electronic Materials, Dresden, Germany, June 23-28<sup>th</sup>, 2024.
- 3) S. Ito, K. Kanahashi, H. Tanaka, B. Chen, H. Ohta, and T. Takenobu, “Temperature Dependence of Thermoelectric Properties in Electrochemically-Doped Conducting Polymer PBTTT”, 40th International & 20th European Conference on Thermoelectrics, Krakow, Poland, June 30<sup>th</sup>-July 4<sup>th</sup>, 2024.
- 4) A. Jeong, M. Yoshimura, Z. Bian, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, Y. Magari, T. Endo, Y. Matsuo, and H. Ohta, “Solid-State Thermal Transistors with Switching Width of 9.5 W/mK”, NANO KOREA 2024, KINTEX, Korea, July 3-5<sup>th</sup>, 2024. (Oral)
- 5) P. Ghediya, Y. Magari, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, Y. Zhang, Y. Matsuo, and H. Ohta, “High-Mobility Indium Oxide Thin Film Transistors with High Reliability”, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRiME 2024), Honolulu, HI, October 6-11<sup>th</sup>, 2024.

- 6) H. Chung, J. Jeong, Y. Mun, A. Jeong, H. Kong, M. Yoshimura, H. Ohta, and H. Jeon, “Physical properties of oxygen-deficient and oxygen-rich PrBaCo<sub>2</sub>O<sub>5+δ</sub> thin films for thermal transistor applications”, 2024 KPS Fall Meeting, Yeosu Expo Convention Center, October 22-26<sup>th</sup>, 2024.

- 7) J. Jeong, H. Chung, A. Jeong, H. Kong, M. Yoshimura, H. Ohta, and H. Jeon, “Creation of three different phases in SrFe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub>”, 2024 KPS Fall Meeting, Yeosu Expo Convention Center, October 22-26<sup>th</sup>, 2024.

- 8) A. Jeong, Z. Bian, M. Yoshimura, H. Kong, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, Y. Magari, T. Endo, Y. Matsuo, and H. Ohta, “Large Thermal Conductivity Reduction of Electrochemically Reduced Cerium Oxide – A Good Candidate Active Material for Solid-State Thermal Transistors”, The 8th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2024), Jeju Shinhwa World, Jeju, Korea, November 24-27<sup>th</sup>, 2024.

- 9) N. Otani, and H. Ohta, “AI Estimation of Active Materials for Solid-state Thermal Transistors – How to Select Good Active Materials with Large Thermal Conductivity Switching Width -”, The 8th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2024), Jeju Shinhwa World, Jeju, Korea, November 24-27<sup>th</sup>, 2024.

d. 一般講演 (国内学会)

- 1) ジョンアロン, 吉村充生, 卞志平, コンヒョンジュン, Jason Tam, Bin Feng, 幾原雄一, 曲勇作, 遠堂敬史, 松尾保孝, 太田裕道, “酸化セリウム薄膜の電気化学酸化還元を利用した高性能熱トランジスタの開発”, 日本固体イオニクス学会 第 18 回 固体イオニクスセミナー, 茨城県つくば市 筑波山ホテル青木屋, 2024 年 9 月 2 日-4 日. (ポスター)

- 2) 吉村充生, Ahrong Jeong, Jason Tam, 卞志平, Hyeonjun Kong, 久保田拓真, 曲勇作, Bin Feng, 幾原雄一, 大谷紀子, Jaekwang Lee, 太田裕道, “希土類酸化物薄膜の電気化学酸化還元による熱伝導率変調”, 日本固体イオニクス学会 第 18 回 固体イオニクスセミナー, 茨城県つくば市 筑波山ホテル青木屋, 2024 年 9 月 2 日-4 日.

- 3) 吉村充生, 卞志平, コンヒョンジュン, ジョンアロン, 曲 勇作, 太田裕道, “熱の伝わりやすさを制御する熱トランジスタ – ありふれた酸化セリウムが優れた活性層になる原因 -”, 第 10 回 北大部局横断シンポジウム, 北海道大学, オンライン, 2024 年 9 月 6 日.

- 4) 定平 光, プラシヤントゲディア, 太田裕道, 曲 勇作, “高移動度酸化物薄膜トランジスタに向けた水酸化インジウム PLD ターゲットの開発”, 第 10 回 北大部局横断シンポジウム, 北海道大学, オンライン, 2024 年 9 月 6 日.

- 5) 定平 光, プラシヤントゲディア, 太田裕道, 曲勇作, “In(OH)<sub>3</sub> を PLD ターゲットとした In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜トランジスタの作製”, 第 85 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場, オンライン, 2024 年 9 月 16 日-20 日.

- 6) ジョンアロン, 卞志平, 吉村充生, コンヒョンジュン, 曲 勇作, 太田裕道, “CeO<sub>2</sub> 電気化学熱トランジスタ: 熱伝導率の CeO<sub>2</sub> 膜厚依存性”, 第 85 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場, オンライン, 2024 年 9 月 16 日-20 日.

- 7) Hyeonjun Kong, Jason Tam, Zhiping Bian, Mitsuki Yoshimura, Ahrong Jeong, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, Yusaku Magari, Hiromichi Ohta, “Effect of Capping Layers on CeO<sub>2</sub>-based Electrochemical Thermal Transistors”, 第 85 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2

会場, オンライン, 2024年9月16日-20日.

- 8) 吉村充生, タムジェイソン, 卞志平, コンヒョンジュン, ジョンアロン, フウビン, 幾原雄一, 曲勇作, 太田裕道, “希土類酸化物  $LnO_2$  ( $Ln = Ce, Pr, Tb$ )を用いた全固体熱トランジスタの特性評価”, 第85回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか2会場, オンライン, 2024年9月16日-20日.
  - 9) Weikun Zhou, Atsushi Taguchi, Ren Mitsuya, Diwen Chen, Hiromichi Ohta, Tsukasa Katayama, “Preparation and light-induced actuator properties of ferroelectric PLZT freestanding sheet”, 第60回応用物理学会北海道支部/第21回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道釧路市, 2024年11月2日-3日.
  - 10) 丸野内洗, 新津甲大, 近松彰, 太田裕道, 片山司, “強誘電酸フッ化物  $Pb_2FeO_3F$  薄膜”, 第60回応用物理学会北海道支部/第21回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道釧路市, 2024年11月2日-3日.
  - 11) 三津谷 怜, 周瑋琨, 田口敦清, 太田裕道, 片山司, “光で大きく速く繰り返し変形する  $BiFeO_3$  自立膜”, 第60回応用物理学会北海道支部/第21回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道釧路市, 2024年11月2日-3日.
  - 12) Diwen Chen, Weikun Zhou, Ren Mitsuya, Hiromichi Ohta, Tsukasa Katayama, “Preparation of  $BaTiO_3$  ferroelectric sheets using CaO sacrificial layer and  $Al_2O_3$  substrate”, 第60回応用物理学会北海道支部/第21回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道釧路市, 2024年11月2日-3日.
  - 13) 定平光, プラシヤントゲディア, コンヒョンジュン, 三浦章, 太田裕道, 曲勇作, “高移動度薄膜トランジスタ用  $In(OH)_3$  焼結体ターゲット”, 第60回応用物理学会北海道支部/第21回日本光学会北海道支部合同学術講演会, 北海道釧路市, 2024年11月2日-3日.
  - 14) 定平光, プラシヤントゲディア, コンヒョンジュン, 三浦章, 太田裕道, 曲勇作, “高移動度薄膜トランジスタ作製用  $In(OH)_3$  焼結体ターゲットの開発”, 令和6年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会, 札幌コンベンションセンター, 2024年11月11日-12日.(口頭)
  - 15) 三津谷 怜, 周瑋琨, 田口敦清, 太田裕道, 片山司, “光で大きく速く繰り返し変形する  $BiFeO_3$  自立膜”, 令和6年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会, 札幌コンベンションセンター, 2024年11月11日-12日.(ポスター)
  - 16) 久保田拓真, 吉村充生, コンヒョンジュン, ジョンアロン, 太田裕道, “Ce-Tb-O系固溶体薄膜を活性層とする全固体電気化学熱トランジスタの作製と評価”, 令和6年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会, 札幌コンベンションセンター, 2024年11月11日-12日.(ポスター)
  - 17) ジョンアロン, 吉村充生, コンヒョンジュン, 卞志平, Jason Tam, Bin Feng, 幾原雄一, 遠堂敬史, 松尾保孝, 太田裕道, “地球上に豊富に存在する酸化セリウムを使用した高性能固体電気化学熱スイッチ”, 第50回固体イオニクス討論会, 千里ライフサイエンスセンター(大阪府豊中市), 2024年12月9日-11日.
  - 18) 太田裕道, ジョンアロン, 楊倩, 卞志平, 吉村充生, コンヒョンジュン, 李好博, 田中秀和, フウビン, 幾原雄一, “全固体電気化学熱トランジスタの創製”, 日本セラミックス協会2025年年会, 静岡大学浜松キャンパス, 2025年3月5日-7日.
  - 19) ジョンアロン, 吉村充生, コンヒョンジュン, 卞志平, Jason Tam, Bin Feng, 幾原雄一, 遠堂敬史, 松尾保孝, 太田裕道, “高性能  $CeO_2$  全固体電気化学熱トランジスタ”, 日本セラミックス協会2025年年会, 静岡大学浜松キャンパス, 2025年3月5日-7日.
  - 20) 吉村充生, ジョンアロン, コンヒョンジュン, 卞志平, 寺崎一郎, タムジェイソン, フウビン, 幾原雄一, パクファンホン, イジェガン, 太田裕道, “化学結合に関与しない希土類酸化物の非対称4f軌道による熱伝導率抑制”, 日本セラミックス協会2025年年会, 静岡大学浜松キャンパス, 2025年3月5日-7日.
  - 21) Hyeonjun Kong, Ahrong Jeong, Mitsuki Yoshimura, Jason Tam, Bin Feng, Yuichi Ikuhara, and Hiromichi Ohta, “Improvement of Electrochemical Reduction Efficiency for  $CeO_2$ -based Thermal Transistors by using  $SrCoO_x$  Capping Layers”, 日本セラミックス協会2025年年会, 静岡大学浜松キャンパス, 2025年3月5日-7日.
  - 22) 中澤遼太郎, 曲勇作, 太田裕道, 解良聡, “ $In_2O_3:H$  のギャップ内状態密度分布の直接観察と薄膜トランジスタ不安定性の起源”, 2025年第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 2025年3月14日-17日.
  - 23) Diwen Chen, Weikun Zhou, Ren Mitsuya, Hiromichi Ohta, Tsukasa Katayama, “Preparation of  $BaTiO_3$  ferroelectric sheets using CaO sacrificial layer and  $Al_2O_3$  substrate”, 2025年第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 2025年3月14日-17日.
  - 24) 三津谷 怜, 周瑋琨, 田口敦清, 太田裕道, 片山司, “光で大きく速く繰り返し変形する  $BiFeO_3$  自立膜”, 2025年第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 2025年3月14日-17日.
  - 25) Weikun Zhou, Diwen Chen, Ren Mitsuya, Hiromichi Ohta, Tsukasa Katayama, “Water-soluble CaO sacrificial layer heteroepitaxially grown on yttria-stabilized zirconia substrate for large ferroelectric  $BaTiO_3$  sheets”, 2025年第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 2025年3月14日-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) W. Zhou, A. Taguchi, R. Mitsuya, D. Chen, H. Ohta, and T. Katayama, “Preparation and light-induced actuator properties of ferroelectric PLZT freestanding sheet”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024. (Poster)
  - 2) D. Chen, W. Zhou, R. Mitsuya, H. Ohta, and T. Katayama, “Preparation of  $BaTiO_3$  ferroelectric sheets using CaO sacrificial layer and  $Al_2O_3$  substrate”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024. (Poster)
  - 3) K. Kang, D. Chen, C. Yang, Y. Zhang, Y. Magari, T. Endo, B. Feng, Y. Matsuo, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Origin of Thermal Instability for Thermoelectric  $Ba_{1/3}CoO_2$ : Thermal Decomposition into Metallic Phase and Insulator Phase”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024. (Poster)
  - 4) H. Sadahira, Y. Magari, P. Ghediya, H. Kong, A. Miura, Y. Matsuo, and H. Ohta, “Development of Indium Hydroxide Ceramic Target for High-Mobility Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors -Stepped Closer to Practical Application for Next Generation Displays-”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024.

(Poster) Poster Award

- 5) H. Kong, A. Jeong, M. Yoshimura, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, and H. Ohta, "Electrochemical Reduction of an Oxide Ion Conductor, Gd-doped CeO<sub>2</sub> using an Oxygen Protection Electrode", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024. (Poster)
- 6) K. Marunouchi, K. Niitsu, A. Chikamatsu, H. Ohta, and T. Katayama, "Synthesis and properties of Pb<sub>2</sub>FeO<sub>3</sub>F Thin Films", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024. (Poster)
- 7) R. Mitsuya, W. Zhou, A. Taguchi, H. Ohta, and T. Katayama, "BiFeO<sub>3</sub> Freestanding Film Under Light Irradiation", The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium 緯[i], Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024. (Poster)

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 松尾教授との共同研究成果が **Advanced Science** 誌に掲載された (2024.6.25)。
- 2) 松尾教授との共同研究成果が **Jpn. J. Appl. Phys.**誌に掲載された (2024.7.25)。
- 3) 松尾教授との共同研究成果が **Small Methods** 誌に掲載された (2024.8.3)。
- 4) 田口准教授との共同研究成果が **ACS Appl. Mater. Interfaces** 誌に掲載された (2024.9.27)。
- 5) 松尾教授との共同研究成果が **Jpn. J. Appl. Phys.**誌に掲載された (2024.12.16)。
- 6) 松尾教授との共同研究成果が **Science Adv.**誌に掲載された (2025.1.1)。

##### b. 国際共同研究

- 1) 中国・江蘇大学の Yuqiao Zhang 教授との共同研究成果が **Small Methods** 誌に掲載された(2024.8.3)。
- 2) 中国・江蘇大学の Yuqiao Zhang 教授との共同研究成果が **Jpn. J. Appl. Phys.**誌に掲載された(2024.7.25)。
- 3) 中国・江蘇大学の Yuqiao Zhang 教授との共同研究成果が **Jpn. J. Appl. Phys.**誌に掲載された(2024.12.16)。
- 4) 中国・武漢大学の Lithikun Gong 博士との共同研究成果が **J. Mater. Chem. C** 誌に掲載された(2024.12.19)。

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 太田裕道 (三井金属鉱業), "熱トランジスタに関する共同研究".

#### 4.9 予算獲得状況 (研究代表者、分類、研究課題、期間)

##### a. 科学研究費補助金

- 1) 太田裕道 (代表), 基盤研究(A), "全固体熱トランジスタの創製", 2022年4月~2026年3月.
- 2) 曲勇作 (代表), 若手研究, "半導体レーザーによる酸化半導体の単結晶帯成長と高性能フレキシブルデバイスの創出", 2022年4月~2026年3月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 片山司 (代表), JST さきがけ, "誘電・光学応用に向けた新奇酸フッ化物材料の創出", 2021年10月~2025年3月.

- 2) 片山司 (代表), JST A-STEP, "独自合成技術で拓く光アクチュエータの進歩と応用", 2024年12月~2027年3月.
- 3) 曲勇作 (代表), JST A-STEP, "酸化半導体の低温固相結晶化技術による高速・低消費電力デバイスの開発", 2024年12月~2027年3月.

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

- 1) ジョン アロン(酸化セリウム薄膜の電気化学酸化還元を利用した高性能熱トランジスタの開発), 優秀ポスター賞, 第18回固体イオニクスセミナー 日本固体イオニクス学会, 2024年9月4日.
- 2) Hikaru Sadahira (Development of Indium Hydroxide Ceramic Target for High-Mobility Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors – Stepped Closer to Practical Application for Next Generation Displays –), Poster Award, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Hokkaido University, December 10<sup>th</sup>, 2024.

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

- 1) 太田裕道, さきがけ領域アドバイザー「物質探索空間の拡大による未来材料の創製」(研究総括: 陰山洋、京都大学 教授) 2021年10月~.

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 太田裕道, 評議員 (日本熱電学会), 2018年9月~.
- 2) 太田裕道, 幹事 (日本セラミックス協会東北・北海道支部), 令和5年度.
- 3) 太田裕道, 組織委員 (薄膜材料デバイス研究会), 2025年3月31日.

##### c. 兼任・兼業

- 1) 太田裕道, 領域アドバイザー(JST さきがけ陰山領域), 2021年10月~.
- 2) 太田裕道, 審査意見書作成 (文部科学省研究振興局).
- 3) 太田裕道, 科学研究費委員会専門委員 (日本学術振興会).

##### 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) 工学部情報エレクトロニクス学科, 電子デバイス工学, 太田裕道, 2024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演習, 片山司, 2024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, 曲勇作, 2024年4月~8月.
- 4) 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), 片山司, 2024年10月~2024年2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, 2024年5月24日.
- 6) 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), 片山司, 曲勇作, 2024年10月~2024年2月.
- 7) 工学部情報エレクトロニクス学科電気電子工学コース, 科学技術英語演習, 太田裕道, 2024年11月~2025

- 年3月.
- 8) 大学院, 電子材料学特論 (分担), 太田裕道, 片山 司, 2024年12月~2025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. アウトリーチ活動  
該当なし
- h. 新聞・テレビ等の報道
- 1) “全固体熱トランジスタの制御幅3.5倍...北大、廃熱の高高度利用用提案”, 日刊工業新聞, 2024年7月4日.
- 2) “全固体熱トランジスタの制御幅3.5倍...北大、廃熱の高高度利用用提案”, ニュースイッチ by 日刊工業新聞, 2024年7月4日.
- 3) “全固体熱トランジスタの制御幅3.5倍...北大、廃熱の高高度利用用提案”, 日刊工業新聞電子版, 2024年7月4日.
- 4) “全固体熱トランジスタの制御幅3.5倍...北大、廃熱の高高度利用提案”, Yahoo!ニュース, 2024年7月5日.
- 5) “北海道大学ら、熱トランジスタの高性能化に成功”, EE Times Japan, 2024年7月5日.
- 6) “北大など、熱伝導率制御幅を従来比1.5倍にした「熱トランジスタ」を開発”, マイナビニュース, 2024年7月3日.
- 7) “全固体熱トランジスタの制御幅3.5倍...北大、廃熱の高高度利用提案”, gooニュース, 2024年7月5日.
- 8) “北大など、熱伝導率制御幅を従来比1.5倍にした「熱トランジスタ」を開発”, BIGLOBEニュース, 2024年7月3日.
- 9) “北大など、熱伝導率制御幅を従来比1.5倍にした「熱トランジスタ」を開発”, exciteニュース, 2024年7月5日.
- 10) “北大など、熱伝導率制御幅を従来比1.5倍にした「熱トランジスタ」を開発”, マピオン, 2024年7月3日.
- 11) “全固体熱トランジスタの制御幅3.5倍...北大、廃熱の高高度利用提案”, dmenuニュース, 2024年7月5日.
- 12) “北大など、熱伝導率制御幅を従来比1.5倍にした「熱トランジスタ」を開発”, Rakuten Infoseek News, 2024年7月5日.
- 13) “北大など、高性能な全固体熱トランジスタ 廃熱利用に”, NIKKEI Tech Foresight, 2024年7月17日.
- 14) “熱の伝わりやすさを制御”, 日本経済新聞, 2024年7月30日.
- 15) “熱の伝わりやすさを制御、廃熱利用目指す 北大など”, 日本経済新聞オンライン, 2024年7月30日.
- 16) “平和な用途に”, 日刊工業新聞, 2024年7月8日.
- 17) “8K有機EL TV画面を駆動可能 高電子移動度の酸化物TFT”, EE Times Japan, 2024年8月9日.
- 18) “北大ら、安定性の高い酸化物薄膜トランジスタを実現”, オプトロニクスオンライン, 2024年8月8日.
- 19) “実用レベルの酸化物薄膜トランジスタを発表——超大型8K有機ELテレビ開発を後押し 北海道大学と高知工科大学”, Fabcross for エンジニア, 2024年8月8日.
- 20) “性能が従来比10倍の酸化物薄膜トランジスタ〜次世代の超大型有機ELテレビに〜”, アドコム・メディア, 2024年8月7日.
- 21) “北大、TFTの電子移動度を10倍に向上 8K有機ディスプレイ向け”, 日刊工業新聞 電子版, 2024年8月14日.
- 22) “TFTの電子移動度10倍に 北大、8K有機ELディスプレイ向け”, 日刊工業新聞 21面, 2024年8月14日.
- 23) “北大、従来比10倍の性能を示す酸化物薄膜トランジスタを実現”, 半導体Times, 2024年8月7日.
- 24) “「薄膜トランジスタ」電子移動度10倍に、北大などが成功した意義”, Yahoo!ニュース, 2024年8月18日.
- 25) “「薄膜トランジスタ」電子移動度10倍に、北大などが成功した意義”, 日刊工業新聞 ニュースイッチ, 2024年8月18日.
- 26) “8K有機EL TV画面を駆動可能 高電子移動度の酸化物TFT”, EE Times Japan, 2024年8月9日.
- 27) “「薄膜トランジスタ」電子移動度10倍に、北大などが成功した意義”, Gooニュース, 2024年8月18日.
- 28) “北大と高知工科大が従来比10倍の性能の実用レベルのTFT 次世代超大型8K有機ELテレビ開発を加速”, 電波新聞, 2024年8月23日.
- 29) “北大など、電子移動度が10倍の酸化物TFT 大型OLEDに”, NIKKEI Tech Foresight, 2024年8月28日.
- 30) “Development of oxide thin-film transistors (TFTs) with ten times higher performance than current TFTs — Stability improvement while maintaining high electron mobility”, Science Japan (JST), 2024年10月29日.
- 31) 客観日本, 2024年10月3日.
- 32) “北大、安価で普遍的な材料で超高性能熱スイッチ実現”, OPTRONICS ONLINE, 2025年1月6日.
- 33) “酸化セリウムを使った高性能熱スイッチを開発——熱伝導率切り替え幅が倍増 北海道大学”, fabcross for エンジニア, 2025年1月7日.
- 34) “北大、安価な材料で従来の2倍以上も高性能な「熱スイッチ」を開発”, マイナビニュース, 2025年1月7日.
- 35) “北大、安価な材料で従来の2倍以上も高性能な「熱スイッチ」を開発”, Mapionニュース, 2025年1月7日.
- 36) “北大、安価な材料で従来の2倍以上も高性能な「熱スイッチ」を開発”, Biglobeニュース, 2025年1月7日.
- 37) “酸化セリウムを活用し超高性能熱スイッチを開発 今後は「熱ディスプレイ」を試作”, MONOist, 2025年1月8日.
- 38) “Hokkaido University Develops Cerium Oxide Thermal Switches”, Asia Education Review, 2025年1月3日.
- 39) “Japanese Scientists Innovate Thermal Switches with Sustainable New Material”, SLSV Sustainability Solutions Network, 2025年1月2日.
- 40) “Japanese scientists use novel material to make thermal switches efficient, sustainable”, Interesting Engineering, 2025年1月1日.
- 41) “Cerium Oxide Switches Boost Heat Management”, Mirage, 2025年1月2日.
- 42) “Cerium Oxide Switches Transform Heat Management”, Mirage, 2025年1月2日.
- 43) “Transforming Thermal Control: Breakthrough Cerium Oxide Thermal Switches Set New Standards in Heat Management”, Scienmag, 2025年1月1日.
- 44) “Transforming Thermal Control: Breakthrough Cerium Oxide Thermal Switches Set New Standards in Heat Management”, Bioengineer, 2025年1月1日.
- 45) “Sustainable and Efficient Thermal Switching with Cerium

Oxide Thin Films”, AZO materials, 2025年1月2日.

- 4 6) “Durable, Efficient, Sustainable: The Rise of Cerium Oxide Thermal Switches”, Innovations Report (January 2, 2025)
- 4 7) “Langlebig, Effizient, Nachhaltig: Der Aufstieg von Ceriumoxid-Thermoschaltern”, Innovations Report, 2025年1月2日.
- 4 8) “High-performance cerium oxide thermal switches improve heat flow control”, Tech Xplore, 2025年1月2日.
- 4 9) “Advancements In Cerium Oxide Thermal Switches”, Electronics For You (January 3, 2025)
- 5 0) “Les switches thermiques au cérium établissent de nouveaux records de performance”, Enerzine, 2025年1月5日.
- 5 1) “Revolutionizing Heat Management with High-Performance Cerium Oxide Thermal Switches”, Asia Research News, 2025年1月1日.
- 5 2) “Japanese Scientists Innovate Thermal Switches with Sustainable New Material”, Indian Defense Review, 2025年1月1日.
- 5 3) “Game-Changing Thermal Switches Boost Energy Efficiency”, SciTechDaily, 2025年1月2日.
- 5 4) “Revolutionary Thermal Switches: The Future of Energy Efficiency! Is Your Energy Going to Waste?”, Naseba (January 1, 2025)
- 5 5) “High-performance cerium oxide thermal switches improve heat flow control”, GROUND News, 2025年1月3日.
- 5 6) “Revolutionary Cerium Oxide Thermal Switches Pave the Way for Sustainable Energy Efficiency”, Innovation Laboratories, 2025年1月3日.
- 5 7) “Japanese Researchers Introduce Thermal Switches Using Eco-Friendly Cerium Oxide”, Industry Tap, 2025年1月6日.
- 5 8) “北大、全固体熱スイッチの切り換え幅2倍 酸化セリウムで熱伝導性増減”, 日刊工業新聞, 2025年1月13日.
- 5 9) “熱ディスプレイ実現へ…北大、全固体熱スイッチの切り換え幅2倍”, ニューススイッチ (日刊工業新聞), 2025年1月14日.
- 6 0) “熱ディスプレイ実現へ…北大、全固体熱スイッチの切り換え幅2倍”, Yahoo! JAPANニュース, 2025年1月14日.
- 6 1) “熱ディスプレイ実現へ…北大、全固体熱スイッチの切り換え幅2倍”, gooニュース, 2025年1月14日.
- 6 2) “熱ディスプレイ実現へ…北大、全固体熱スイッチの切り換え幅2倍”, dmenuニュース, 2025年1月14日.
- 6 3) “ありふれた材料で「高性能熱スイッチ」を開発 熱制御デバイスの実用化に弾み”, EE Times Japan, 2025年1月15日.
- 6 4) “北大など、市販材料で高性能熱スイッチ 希少金属不要”, NIKKEI Tech Foresight, 2025年1月21日.
- 6 5) “北海道大学の研究、熱スイッチ技術の革新で未来の製造業を照らす”, newji 製造業トピック, 2025年1月22日.

#### i. 客員教員・客員研究員など

- 1) Ahrong Jeong, 科研費基盤 A ポスドク.
- 2) Miguel Ángel Tenaguillo Arrese-Igor, 客員研究員, スペイン・CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC), 2024年3月26日～5月2日.

#### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：2人

- 1) 丸野内洗, 情報科学院, 修士 (情報科学), 強誘電  $\text{Pb}_2\text{FeO}_3\text{F}$  酸フッ化物薄膜.
- 2) 吉村充生, 情報科学院, 修士 (情報科学), 金属酸化物薄膜を活性層とする全固体電気化学熱トランジスタの作製と評価.

博士学位：2人

- 1) 卞志平, 情報科学院, 博士 (工学), Study on the Solid-State Electrochemical Thermal Transistors with High Electrical Conductivity Active Layers.
- 2) 呉宇璋, 情報科学院, 博士 (工学), Effect of zinc incorporation on electron transport properties of indium oxide thin-film transistors.

# 光電子ナノ材料研究分野

## スタッフ

教授 松尾 保孝 (博士 (工学)、2004年8月1日着任)

准教授 石 旭 (博士 (情報)、2016年4月1日着任)

## 学生

博士課程 辻岡 一真

修士課程 香田 明里、藤井 優祐

## 1. 研究目標

当研究分野では、微細加工技術を用いたナノ・マイクロ構造の作製により機能性表面を創出する研究に取り組んでいる。特に、光との相互作用、物理化学的機能を増強する表面・界面を創出することで多様な応用デバイス開発に焦点を当てている。また、表面の創出に当たっては自然界の生物や自然現象由来のパターンを活用することによる省エネルギーなプロセス構築にも注目をしている。さらに、ナノ・マイクロデバイスにおいて表面修飾技術が非常に重要であることから、その材料・プロセス開発にも力を入れている。

本稿では、生物模倣を取り入れた新規低摩擦表面の創出と機能解明、ナノ薄膜技術である原子層堆積法のプロセス開発、光還元システムに関する研究成果を紹介する。

## 2. 研究成果

### 2.1 生物模倣表面による低摩擦表面の創製

生物の中には nm- $\mu$ m スケールの表面微細構造によって優れた機能を発現する種が存在する。これらの表面微細構造機能は時に人間の抱える問題解決の糸口になる場合があるため、新たな構造機能を見出しその原理を解明することは機能性材料創出のために重要である。我々の研究グループは森林などに生息している昆虫のシテムシ (オオヒラタシテムシ) に着目した。オオヒラタシテムシは鞘翅 (前翅、クチクラで硬質) の表面に非常に微細な凹凸構造、特にマイクロメートルオーダーの凹凸構造表面にさらに微細な凹凸を持つ階層構造であり、他の昆虫には見られない構造であった。具体的にこの構造が生態に及ぼす効果は明らかとなっていないが、オオヒラタシテムシの生息環境を考えると摩擦に影響すること推察された。これまで、凹凸構造に関する摩擦の先行研究ではマイクロメートルオーダーの単一構造に関する内容が中心であったことから、階層構造での摩擦特性について検討を行った。

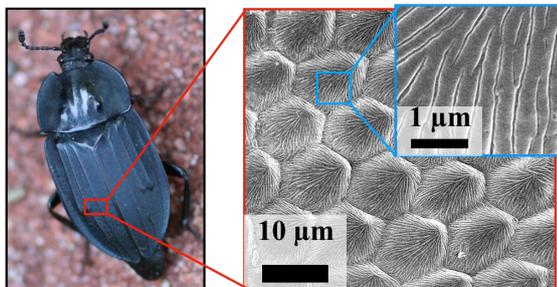


図1. オオヒラタシテムシ (左) と上翅のSEM像 (右)。

本研究では、ポリジメチルシロキサン (PDMS) にマイクロメートルオーダーのドーム状構造とその表面上に数百ナノメートルサイズのしわ構造を作製し、それをポリスチレン

へ転写することで階層模倣構造の作製を行った (図2左)。この構造へ一定負荷をかけて摩擦試験を行ったところ、階層構造を持つ構造で最も摩擦力の低減が示された (図2右)。この結果は、負荷をかける圧子と表面のナノスケール構造が接触面積減少を担い、摩擦を生じる加重が階層構造全体で適度に分散することによる応力分散機能から生じていることをシミュレーション結果と合わせることで示した。

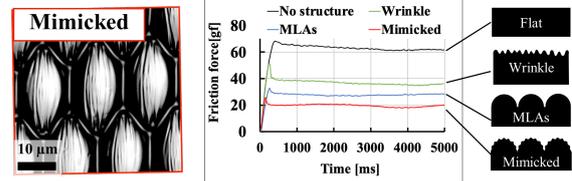


図2. 模倣構造のSEM像 (左) と摩擦試験結果。

### 2.2 2成分原子層堆積成膜プロセスの開発

原子層堆積 (ALD) 法は化学気相成長法の一つである。基本原理は 1970 年代に考案されて以降、少しずつ利用の幅を広げ、現在では最先端半導体デバイスにおいてなくてはならない成膜手法となっている。プロセスとしては①被覆材料の原料となる金属錯体を気化、②被覆したい材料・デバイス表面への金属錯体輸送と吸着、③表面で化学反応を誘起する反応剤の供給、④不要な原料や反応剤、副生成物の除去、以上を繰り返すことによりモノレイヤーレベルで表面を被覆していく成膜手法である。成膜精度が非常に高い一方で、成膜スピードは遅くなることや2成分混合の酸化物混合体の作製を効率的に行うことは難しい。

本研究では強誘電体として知られているハフニウム酸化物とジルコニア酸化物の混合材料である HZO 膜の作製方法について検討を行った。一般的に ALD プロセスで混合膜を作製する場合には、2種類の材料を個別に用意して、1層ずつ交互に成膜することが一般的である。しかしながら、プロセス時間が非常に長くなることから効率的な成膜とはいえないことや、必ずしも適切な混合比率の成膜にならない。そこで分子構造がほぼ同じ新たな Hf と Zr の金属錯体分子 (Hf(dmap)<sub>4</sub> など) の液体原料を合成した。この分子は蒸気圧がほぼ同じであり、混合しても長期間安定な材料であった。等モルで混合した原料を約 320°C 以上で 10nm 程度成膜して TEM 断面および元素分析を行った結果、1:1 の組成比で成膜されていた (図3)。強誘電性が確認され、適切な材料設計により、混合原料から2成分酸化物を効率よく ALD 成膜できることを示した。

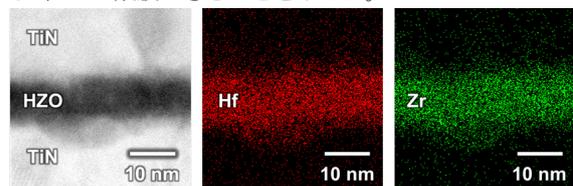


図3. HZO膜の断面TEMおよびEDS測定結果。

### 2.3 p型半導体光電極を用いた光化学還元システム構築

金ナノ粒子を担持した n 型酸化チタン半導体電極を用いて、金ナノ粒子の局在プラズモンを可視光で励起することにより、金ナノ粒子表面にホットキャリア、すなわち励起熱電子-正孔対が生成し、金ナノ粒子/半導体界面における電荷分離を誘起することで、光電変換や水の酸化が生じることが報告されてきた。しかし、n 型半導体電極における、金ナノ粒子表面に生成したホット電子が n 型半導体電極の伝導帯に注入されて正孔と電荷分離する過程において、ホット電子のエネルギーが損失していることが明らかとなった。そこで、ホット電子エネルギーを効率的に利用するた

め、p型半導体に金ナノ粒子を担持した光電極を用いて、金ナノ粒子表面に生成したホットホールがp型半導体電極の価電子帯に注入することで、生成した高いエネルギーを持つホット電子が直接的な化学還元反応を促進させることが期待できる。

本研究では酸化ニッケルやシリコンなどのp型半導体を用いて、そこに金属ナノ微粒子を担持することで可視光エネルギーによる水の化学還元反応による分解から水素を製造することや二酸化炭素還元反応による酸化炭素、メタンなどエネルギーを持つ資源物を合成する研究を行った。これまで、スパッタ法において約100nmの酸化ニッケル薄膜を作製し、その表面に3nm程度の金を成膜、窒素でアニーリングして金ナノ粒子を担持したp型酸化ニッケル電極の作製に成功した。図4(a)に作製した金ナノ粒子を担持した酸化ニッケル電極の写真を示す。図4(b)は電極表面の走査電子顕微鏡の写真であり、担持した金ナノ粒子の大きさは20nmである。図4(c)は金ナノ粒子の消光スペクトルであり、金ナノ粒子のプラズモン共鳴波長は590nmである。可視領域の光電変換効率として、金ナノ粒子を担持した酸化ニッケル電極は金ナノ粒子を担持しない酸化ニッケル電極より、大きな増強を示した(図4(d))。今後、酸化ニッケルと金ナノ粒子界面を最適化し、水分解により生成する水素を測定する。

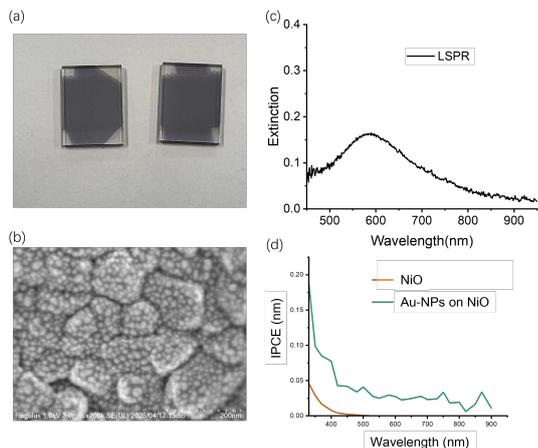


図4. デバイス外観写真(左上)、SEM拡大写真(左下)、デバイスの消光スペクトル(右上)、光電変換効率測定結果(右下)。

### 3. 今後の研究の展望

表面・界面は異なる物質の境界面であり、特異な物理的・化学的現象を生み出す場となっている。その場に新しいナノ・マイクロ加工技術を用いた機能的構造を構築することにより、表面/界面での現象を増強させることができると考えられる。今年度の研究では表面に創出する構造設計の部分に生物模倣の観点を取り込むこと、表面に存在させる酸化ニッケル材料とプロセスの創出、作り出した表面構造が生み出す新しい光機能と表面に対して、3つの視点からのアプローチを試みることで一定の成果を得た。今後は材料については分子設計のみでなく低コストで行えるプロセスにつながる部分と計算科学による効率化の検討、設計については有限要素法などのシミュレーション技術による実験効率化といった計算科学を取り入れた研究の推進と、応用に直結するデバイス表面創製では短期間で成果をえるための共同研究を推進する予定である。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文(査読あり)

- 1) D. Zhang, Y. Hirai, K. Nakamura, K. Ito, Y. Matsuo, K. Ishibashi, Y. Hashimoto, H. Yabu\*, and H. Li\*, Benchmarking pH-field coupled microkinetic modeling against oxygen reduction in large-scale Fe-azaphthalocyanine catalysts, *Chem. Sci.* 15, 5123–5132 (2024). (DOI: 10.1039/d4sc00473f)
- 2) 【電子研内共著】YZ. Wu, Y. Magari, PR. Ghediya, YQ. Zhang, Y. Matsuo, and H. Ohta, High-mobility and high-reliability Zn-incorporated amorphous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based thin-film transistors, *J. J. Appl. Phys.* 63, 076504 (2024) (DOI:10.35848/1347-4065/ad5ee6)
- 3) 【電子研内共著】HL. Yin, QS. Zhang, SC. Hu, X. Sun, L. Peng, HJ. Zhao, Q. Kong, H. Mitomo, Y. Matsuo, K. Iijiro, and GQ. Wang, Hierarchical Au Nanoflowers Formed in an Ionic Liquid/Water System for Bacterial Inhibition, *ACS Appl. Nano Mater.* 7, 16998–17008 (2024). (DOI:10.1021/acsnano.4c03100)
- 4) 【電子研内共著】PR. Ghediya, Y. Magari, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, YQ. Zhang, Y. Matsuo, and H. Ohta\*, Reliable Operation in High-Mobility Indium Oxide Thin Film Transistors, *Small Methods* 9, 2400578 (2025). (DOI: 10.1002/smt.202400578)
- 5) K. Tsujioka, A. Koda, Y. Hirai, M. Shimomura, and Y. Matsuo\*, Friction Reduction Effect Caused by Microcontact and Load Dispersion on the Moth-Eye Structure, *Adv. Eng. Mater.* 26, 2401405 (2024). (DOI: 10.1002/adem.202401405)
- 6) K. Tsujioka, Y. Hirai, M. Shimomura, and Y. Matsuo\*, Friction-reduction effect of the hierarchical surface microstructure of carrion beetle by controlling the real contact area, *Nanoscale* 16, 21021–21030 (2024). (DOI: 10.1039/d4nr02892a)
- 7) 【電子研内共著】YZ. Wu, PR. Ghediya, YQ. Zhang, Y. Matsuo, H. Ohta, and Y. Magari, Thermopower modulation analyses of effective channel thickness for Zn-incorporated In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based thin-film transistors, *J. J. Appl. Phys.* 63, 126501 (2024). (DOI:10.35848/1347-4065/ad971b)
- 8) T. Oshikiri, Y. Matsuo, H. Niinomi, and M. Nakagawa, Chiroptical response of an array of isotropic plasmonic particles having a chiral arrangement under coherent interaction, *Photochem. Photobiol. Sci.* 24, 13-21 (2025). (DOI : 10.1007/s43630-024-00667-7)
- 9) 【電子研内共著】R. Matsumura, Y. Kazama, H. Saito, T. Yasui, Y. Matsuo, A. Nasu, H. Kobayashi, S. Oka, N. Khemasiri, Y. Yomogida, and K. Nagashima\*, Selective Growth of ZnO Nanosheets via Ionic Layer Epitaxy for UV Photodetection Application, *ACS Appl. Nano Mater.* 8, 2623–2631 (2025). (DOI:10.1021/acsnano.4c07224)
- 10) 【電子研内共著】E. Cao, X. Shi, H. Inoue, T. Oshikiri, Y. Liu, and H. Misawa\*, Activation Energy in the Electron Transfer Process and Water Oxidation Intermediate Generation under Plasmon–Nanocavity Strong Coupling, *J. Phys. Chem. C* 129, 1590–1597 (2025). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c07398)
- 11) 【電子研内共著】T. Gao, T. Yachi, X. Shi, R. Sato, C. Sato, Y. Yonamine, K. Kanie, H. Misawa, K. Iijiro\*, and H. Mitomo\*, Ultrasensitive Surface-Enhanced Raman Scattering Platform for Protein Detection via Active Delivery to Nanogaps as a Hotspot, *ACS Nano* 18, 21593–21606 (2024). (DOI:10.1021/acsnano.4c09578)
- 12) 【電子研内共著】J. Yang, Y. Sekizawa, X. Shi, K. Iijiro\*, and H. Mitomo\*, Assembly/disassembly control of gold nanorods with uniform orientation on anionic polymer brush substrates, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 97, uoae073 (2024). (DOI:10.1093/bulcsj/uoae073)
- 13) 【電子研内共著】A. Nishida\*, T. Katayama, T. Endo, and Y. Matsuo\*, Atomic Layer Deposition of Hafnium–Zirconium-Oxide Films Using a Liquid Cocktail Pre-cursor Containing Hf(dmap)<sub>4</sub> and Zr(dmap)<sub>4</sub> for Ferro-electric Devices, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 17, 11036–11044 (2025). (DOI: 10.1021/acsnano.4c21964)

- 1 4) 【電子研内共著】 A. Jeong, M. Yoshimura, H. Kong, Z. Bian, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, T. Endo, Y. Matsuo, and H. Ohta\*, High-performance solid-state electrochemical thermal switches with earth-abundant cerium oxide, *Sci. Adv.* 11, eads6137 (2025). (DOI: 10.1126/sciadv.ads6137)

#### 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

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) 松尾保孝, 西田章浩, “ALD による高誘電酸化物薄膜作製への化学的アプローチ”, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学, 埼玉, 2025 年 3 月 16 日.

##### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) K. Tsujikoka, Y. Matsuo et. al., “Friction reduction by load dispersion effects learning from the hierarchical surface micro-structure of carrion beetle”, Third International Conference on Nature Inspired Surface Engineering (NISE 2024), Granada Spain, Nov. 24<sup>th</sup>, 2024.

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 藤井優祐, 古谷浩志, 大須賀潤一, 豊田岐聡, 松尾保孝, “Si 微細加工基板の光励起ソフトイオン化における構造サイズ依存性”, 第 72 回質量分析総合討論会, つくば国際会議場, つくば, 2024 年 6 月 12 日
- 2) E. Cao, X. Shi, T. Oshikiri, Y. Liu, H. Inoue, H. Misawa, “Activation Energy in the Electron Transfer Process of Electrons Injected into TiO<sub>2</sub> under Modal Strong Coupling Conditions”, 2024 年光化学討論会, 九州大学 伊都キャンパス, 福岡, 2024 年 9 月 3 日.
- 3) 辻岡一眞, 平井悠司, 松尾保孝, “オオヒラタシデムシ階層表面微細構造が示す摩擦低減効果の原理解明”, 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台国際センター, 仙台, 2024 年 6 月 7 日.
- 4) 香田明里, 辻岡一眞, 平井悠司, 下村政嗣, 松尾保孝, “モスアイ構造の摩擦低減効果”, 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台国際センター, 仙台, 2024 年 6 月 7 日.
- 5) 辻岡一眞, 平井悠司, 下村政嗣, 松尾保孝, “摩擦低減効果を持つ堅固なシデムシ表面微細構造の柔軟な弾性変形材料への展開”, 第 73 回高分子討論会, 新潟大学, 新潟, 2024 年 9 月 27 日.
- 6) 香田明里, 辻岡一眞, 平井悠司, 松尾保孝, “荷重分散効果による表面微細構造の変形抑制と摩擦低減の関係性”, 第 73 回高分子討論会, 新潟大学, 新潟, 2024 年 9 月 27 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) 辻岡一眞, 平井悠司, 松尾保孝, “オオヒラタシデムシの階層的な表面微細構造が示す荷重分散効果による摩擦低減”, 2024 年第 2 回ナノインプリント技術研究会, KFC Hall & Rooms, 東京, 2024 年 5 月 22 日.
- 2) 辻岡一眞, 平井悠司, 松尾保孝, “シデムシ科の上翅に見られる表面微細構造のもつ機能と原理の調査”,

2024 年北海道高分子若手研究会, ルスツリゾート, 北海道, 2024 年 9 月 13 日.

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 石 旭 (三友 秀之, 北海道大学; 押切 友也, 東北大学; 小澤 祐市, 東北大学), “精密ナノ構造作製技術と新奇光・環境制御を融合したメタサイトの高次制御”.
- 2) 石 旭 (近藤 敏彰, 愛知工科大学), “ナノピラー光電極の作製”.
- 3) 松尾保孝 (福田昭, 兵庫県立医大), “磁気共鳴のための 2 次元電子系ナノ構造デバイス作製”.
- 4) 松尾保孝 (柴田浩行, 北見工業大学), “超伝導単一光子検出器のナノ細線クライオトロン読み出し”.
- 5) 松尾保孝 (藪浩, 東北大学), “炭素一錯体分子複合体電気化学触媒の電子状態観察”.
- 6) 松尾保孝 (西島喜明, 横浜国立大学), “大面積放射制御メタ表面の構築と中赤外エネルギーハーベスティング”.
- 7) 松尾保孝 (浅野祥大, 公立千歳科学技術大学), “OH 基表面の連続性がフジツボ幼生の探索行動に与える影響の調査”.
- 8) 松尾保孝 (伊藤 圭希, 徳島大学), “酸化チタン被覆金ナノ粒子配列体薄膜における活性酸素”.
- 9) 松尾保孝 (土屋 千祐, 北見工業大学), “窒化モリブデン超伝導ナノ細線クライオトロンの作製”.
- 1 0) 松尾保孝 (辻本隆文, 東北大学), “エネルギー分解型 X 線透視システム用イメージセンサの低ノイズ化に関する研究”.
- 1 1) 松尾保孝 (菊池洋平, 東北大学), “量子ビーム制御/計測技術に基づく生体深部のマイクロ現象の時空間的操作とマクロな機能イメージングの融合”.

##### b. 国際共同研究

- 1) X. Shi (Kuang-Li Lee, National Chi Nan University), “Development of Nano-Plasmonic Sensing Technology”.

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 松尾保孝 (日産自動車, ミツミ電機) .

#### 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) 石 旭 (代表), 基盤研究(C), “Development of a novel photocathode under strong coupling conditions for carbon dioxide reduction”, 2023 年 4 月~2026 年 3 月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

- 1) 辻岡一眞(オオヒラタシデムシの階層的な表面微細構造が示す荷重分散効果による摩擦低減), Student Poster Award, 2024 年第 2 回ナノインプリント技術研究会, 2024 年 5 月 22 日.

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

該当なし

**b. 国内外の学会の役職**

該当なし

**c. 兼任・兼業**

該当なし

**d. 外国人研究者の招聘**

該当なし

**e. 北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）**

- 1) 全学共通、自然科学実験、石 旭、夏ターム
- 2) 全学共通、環境と人間、松尾保孝、春ターム
- 3) 理学部、ナノ物性化学、松尾保孝、小松崎民樹、長島一樹、1学期
- 4) 総合化学院、物質化学（ナノデバイス材料特論）、松尾保孝、長島一樹、夏ターム

**f. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）**

- 1) 千歳科学技術大学、ナノテクノロジー、松尾保孝、10月

**g. アウトリーチ活動**

- 1) 日本化学会北海道支部、夢化学 21 高校生研究体験、「不思議なはたらきをする生物表面」。

**h. 新聞・テレビ等の報道**

該当なし

**i. 客員教員・客員研究員など**

- 1) 藤原英樹, 客員研究員, 北海学園大学, 2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日.
- 2) 酒井恭輔, 客員研究員, フロー株式会社, 2024 年 5 月 1 日～2025 年 3 月 31 日.
- 3) 小方透子, 客員研究員, 2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日.
- 4) 西田章浩, 客員研究員, (株) ADEKA, 2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日.
- 5) 宇田川麗透, 客員協力員, 千歳科学技術大学, 2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日.

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位：1人

- 1) 香田明里, 総合化学院, 修士(理学), ナノスケールにおける微細構造変形抑制による摩擦低減.

博士学位：1人

- 1) 辻岡一眞, 総合化学院, 博士(理学), Study on new adhesion and friction by hierarchical surface microstructure based on knowledge of organisms (生物の知見に基づく階層的表面微細構造による新たな接着・摩擦に関する研究).

# ナノアセンブリ材料研究分野

## スタッフ

教授 中村 貴義 (理学博士、1997年8月1日着任、2025年3月31日退職)

助教 高橋 仁徳 (博士(工学)、2017年8月1日着任、2025年3月31日転出)、黄 瑞康 (博士(理学)、2020年12月16日着任)、薛 晨 (博士(工学)、2020年12月16日着任、2025年1月15日転出)、呉 佳冰 (博士(環境科学)、2023年4月1日着任、2025年3月31日転出)

事務補助員 野口 絵美

## 学生

博士課程 金丸 和矢、羽田 将人

## 1. 研究目標

分子が発見する機能は多岐にわたり、光・電子機能性、生理活性など、様々な特性を持っている。これらの分子はエレクトロニクス・材料・医療など幅広い分野で応用されている。また、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、新たな機能が発見することがある。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」に着目し研究が進めている。分子の自己集積過程を設計・制御することで、新奇なナノアセンブリ構造を実現し、集合体における協同現象を積極的に利用することで、単一分子では実現できない機能を目指している。我々の研究目標は、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である。

## 2. 研究成果

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、分子・イオン輸送構造等の設計とその機能開拓を行っている。

当研究分野ではこれまでに、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)<sub>2</sub>]<sup>-</sup>と組み合わせることで、超分子カチオン構造に基づく新奇な電子的・磁氣的機能の開拓を行ってきた。例えば、*m*-fluoroanilinium<sup>+</sup> (*m*-FAni<sup>+</sup>) 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<sup>+</sup>)(dibenzo[18]crown-6)[Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> では、*m*-FAni<sup>+</sup> が結晶内で回転可能であり、*m*-FAni<sup>+</sup> 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。超分子アプローチに基づく固相内分子運動と、それと連動した電気・磁気物性を示す物質系の開拓は、新奇な物性開拓を実現する独自アプローチである。

### (a) 分子運動モードの変化に伴う一軸性負の熱膨張の3段階変化

材料は通常、温度上昇とともに膨張する正の熱膨張 (PTE) を示すが、これは構成分子の非調和振動に起因する。特に有機材料の線熱膨張係数 (CLTE) は高く、デバイスの損傷

につながるため、熱膨張の制御が重要である。負の熱膨張 (NTE) 材料は、この問題解決の一策として注目されており、NTE と PTE 材料の複合化により、ゼロ熱膨張 (ZTE) 材料の構築も可能となる。分子材料における NTE のメカニズムは、熱振動、分子の再配列、配位環境の歪みなど多様な要因が絡むため、十分に理解されていない。エントロピーの増加が NTE の要因となることから、分子運動の利用が NTE 達成の強力な手段とされるが、密な結晶中での分子運動実現は困難を伴う。

本研究グループはこれまで、結晶中の分子運動を利用した超分子戦略による NTE の有効性を報告してきた。先行研究では、ピリダジニウムイオンの回転に伴う NTE の増強や、NTE と同時に磁氣的挙動やリラクサー強誘電性を示す材料の発見があった。これらの知見に基づき、本研究では、[18]crown-6 と (<sup>+</sup>H<sub>3</sub>N-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>2</sub>O からなる車軸型超分子カチオンを設計し、これを [Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> 結晶に導入することで、NTE の段階的な増強と強磁性挙動を同時に発現させることを目的とした。

化合物((<sup>+</sup>H<sub>3</sub>N-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>2</sub>O)([18]crown-6)<sub>2</sub>([Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup>)<sub>2</sub> (**1**) は、[Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> アニオンと車軸型超分子カチオン((<sup>+</sup>H<sub>3</sub>N-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>2</sub>O)([18]crown-6)<sub>2</sub> から構成される三斜晶系 (空間群 *P1*bar) の結晶である。結晶内では、(<sup>+</sup>H<sub>3</sub>N-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>2</sub>O が「車軸」、[18]crown-6 分子の **CE1** と **CE2** が「車輪」とみなすことができる (図 1a)。特に **CE2** は 2 つの異なるサイト (**CE2A** と **CE2B**) で無秩序を示す。(<sup>+</sup>H<sub>3</sub>N-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>2</sub>O の末端 NH<sub>3</sub><sup>+</sup> 基と [18]crown-6 の N-H...O 水素結合により車軸型超分子カチオンが形成され、これらが [111] 方向に積層して一次元鎖を形成する (図 1a)。[Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> アニオンは、超分子鎖の周囲に配置され、[Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> **A** と **B** は (001) 面に平行なハニカム状の二次元 (2D) 格子を形成し、その層間に [Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> **C** が位置する (図 1b)。超分子カチオンの鎖は、[Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> によって形成された三次元ハニカム格子のチャンネル内に整列している。

**CE2A** の占有率の温度依存性から、結晶構造は 3 つの温度領域に分けられた。

**Phase I** (113-133 K): **CE2** は静的な無秩序状態を保つ。

**Phase II** (143-193 K): **CE2** は面内分子回転を開始し、動的な無秩序状態に移行する。誘電率測定から活性化エネルギー 9.58 kJ mol<sup>-1</sup> の Debye 型緩和が観測された。

**Phase III** (213-293 K): **CE2** の面外無秩序も加わり、より複

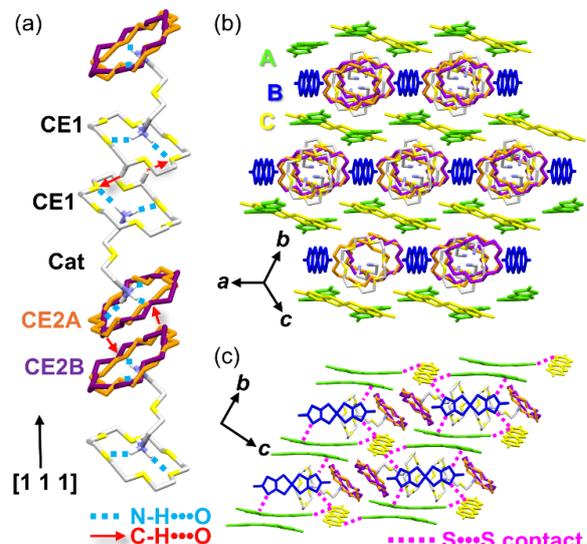


図 1. (a) 超分子カチオンの一次元鎖構造。(b) [111] 方向から見たパッキング構造。(c) a 軸方向に見たパッキング構造。

雑な分子運動を示す。

これらの相転移は DSC では検出されなかったが、X 線回折のピーク変化や占有率の温度依存性によって確認された。

化合物 **1** の熱膨張は、三斜晶系の主軸  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  の長さの温度依存性に基づいて解析された。 $X_2$  と  $X_3$  は PTE を示したが、 $X_1$  は NTE を示した (図 2b)。NTE が観測された  $X_1$  方向では、CE2 が静的であった Phase I (113-133 K) において、CLTE は  $-18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  と比較的小さかった。Phase II (143-193 K) では、CE2 が回転を開始すると、NTE の CLTE は大きく増加し、 $-74 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  となった。さらに、[18]crown-6 の面外運動も関与する Phase III (213-293 K) では、NTE は大きく、 $-105 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  の値を示した。特に Phase III では、これまでに報告された  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  塩の中で最大の NTE を示した。

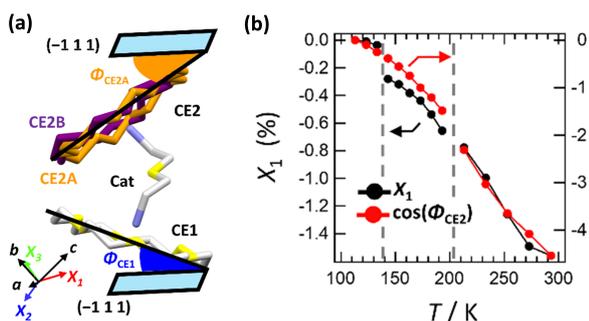


図 2. (a) 113 K における超分子カチオンの一次元鎖構造。CE1、CE2A または CE2B の平均面と、(1 1 1) 面 (113 - 193 K) または (-1 1 1) 面 (213 - 293 K) との間の角度を、それぞれ  $\phi_{\text{CE1}}$ 、 $\phi_{\text{CE2A}}$  および  $\phi_{\text{CE2B}}$  と定義する。主軸  $X_1$  の長さ、および依存性。  $\cos(\phi_{\text{CE2A}})$  と  $\cos(\phi_{\text{CE2B}})$  の平均値  $\cos(\phi_{\text{CE2}})$  の温度依存性。

( $(\text{H}_3\text{N}-\text{C}_2\text{H}_4)_2\text{O}$  カチオンは温度範囲全体で剛体の車軸として振る舞い、構造変化はほとんどない。NTE は主に、[18]crown-6 (CE2) の分子運動に起因する。 $X_1$  方向の NTE は、[18]crown-6 分子の一次元鎖に対する傾斜が原因である。温度上昇に伴い CE2 の傾斜角が変化し、特に CE2 の無秩序状態が静的から面内回転、さらに面外運動へと変化することによって、この傾斜の変化が大きくなり、NTE が促進される (図 2a)。 $X_2$  と  $X_3$  方向の PTE は、それぞれ CE1 と CE2 の平均面にほぼ直交しており、これらの [18]crown-6 分子間の層間距離によって決定される。CE1 間の層間距離は単調に増加し、 $X_2$  の PTE 挙動を再現した。CE2 間の層間距離も温度とともに増加し、 $X_3$  の PTE に寄与した。[18]crown-6 は芳香環を持たず分子間相互作用が弱いため、分子の再配列が大きく、結果として大きな NTE が実現したと考えられる。

モル磁化率の温度依存性測定により、化合物 **1** が強磁性的な結合を示すことが確認された。キュリー定数  $0.813 \text{ cm}^3 \text{ K mol}^{-1}$ 、ワイス温度 ( $\theta$ )  $+1.41 \text{ K}$  のキュリー・ワイス則で再現され、 $\theta$  の正の値は  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  アニオンが強磁性的に結合していることを示す。これは、 $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  の単一占有分子軌道が隣接する  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  の軌道とほぼ直交していることに起因する。

### (b) スイスチーズ構造を有する超分子結晶の分子運動

分子結晶は通常、密に充填されており、結晶中での分子運動の実現は容易ではない。充填分子のサイズや形状の不均衡により密な構造が得にくい場合、多くの場合溶媒分子が残りの空間に入り込み、結晶構造が維持される。しかし、一般的な分子結晶は金属有機構造体のような強固な骨格を持たないため、加熱などの処理により溶媒分子が除去され

ると、結晶構造はほぼ崩壊する。もし溶媒脱着後も結晶性が維持されれば、その空間を結晶内での分子運動の実現に利用でき、分子運動に由来する多様な機能性の開発の可能性を開く。逆に、結晶内での分子運動による結晶空孔の動的な充填によって単結晶性が維持される可能性がある。例えば、 $[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{o-NTrz})_5(\text{NCS})_4] \cdot 3\text{CH}_3\text{OH}$  ( $\text{o-NTrz}=4\text{-}(o\text{-nitrobenzyl})\text{imino-1,2,4-triazole}$ ) 結晶では、組成あたり 3 分子の  $\text{CH}_3\text{OH}$  が除去されても単結晶性が維持される。溶媒分子が存在する場合、全ての  $\text{o-NTrz}$  配位子は秩序立っているが、溶媒分子が除去されると、 $\text{C}_2$  軸の中心に位置する  $\mu_{1,2}$ -架橋配位子の一つが二つの等価なサイトで無秩序化し、動的に空間を埋める。

これまでに我々は、固相中で分子運動を実現するための超分子アプローチを提案し、様々な電氣的・磁氣的機能を発展させてきた。本研究では、dibenzo[18]crown-6 (DB18C6) と分岐鎖アルキルアンモニウムである isobutylammonium ( $\text{iBA}^+$ ) からなる超分子カチオンを  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  塩に導入した。その結果得られた  $(\text{iBA}^+)(\text{DB18C6})[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^- \cdot 0.4\text{CH}_3\text{CN} (2 \cdot 0.4\text{CH}_3\text{CN})$  は、結晶内の欠陥に隣接する  $\text{iBA}^+$  カチオンの動的な挙動により、60% の  $\text{CH}_3\text{CN}$  サイトが  $\text{CH}_3\text{CN}$  フリーの空孔であるにもかかわらず、単結晶性を維持した。結晶中の空孔サイトはスイスチーズのようにランダムに配置されている。

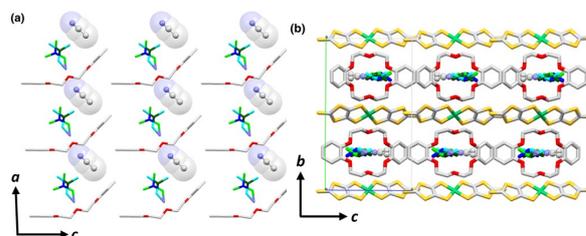


図 3. 200 K における  $2 \cdot 0.4\text{CH}_3\text{CN}$  の結晶構造。CH<sub>3</sub>CN は ball and stick model で、その他は stick model で描かれている。a) b 軸方向に見た超分子カチオン層。b) a 軸方向に見たパッキング構造。

結晶  $2 \cdot 0.4\text{CH}_3\text{CN}$  の構造は 200 K で単斜晶系、空間群  $P2_1/m$  である (図 3)。結晶中では、 $\text{iBA}^+$  と  $\text{CH}_3\text{CN}$  がそれぞれ 1 分子 ( $\text{CH}_3\text{CN}$  の占有率は約 0.4)、DB18C6 と  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  がそれぞれ半構造で結晶学的に独立している。成長したままの結晶は 340 K まで安定であり、430 K で分解する前に 1.9 wt% の重量減少を示した。この重量は結晶組成あたり 0.4 分子の  $\text{CH}_3\text{CN}$  (1.8 wt%) に相当する。 $\text{iBA}^+$  と DB18C6 は  $\text{N-H} \cdots \text{O}$  水素結合を形成し、組成比 1:1 の超分子カチオンを形成する。超分子カチオンと  $\text{CH}_3\text{CN}$  は  $a$  軸に沿って交互に積層され、一次元 (1D) 鎖を形成している。1D 鎖は  $bc$  軸方向の隣接する 1D 鎖と平行に整列し、 $ac$  面に平行な平面上に二次元 (2D) 層を形成する (図 3a)。超分子カチオン間にはファンデルワールス半径以下の分子接触はない。 $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  は、最も近い硫黄原子間距離が  $3.380(2) \text{ \AA}$  で隣接する  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  とサイドバイサイドで密に接触し、 $ac$  面に平行な平面上に 2D 層を形成する。超分子カチオンと  $\text{CH}_3\text{CN}$  からなる 2D 層は、 $b$  軸に沿って  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]^-$  からなる 2D 層と交互に配置されている (図 3b)。

結晶  $2 \cdot 0.4\text{CH}_3\text{CN}$  の無秩序サイトの構造は、 $\text{iBA}^+$  が 4 つのサイトで無秩序化しており、そのうち 2 つのサイトが結晶学的に独立している。200 K における  $\text{iBA}^+$  の占有率が 0.396(9) と 0.104(9) のサイトをそれぞれ **A** と **B** とし、**A** と **B** に結晶学的に等価なサイトを **A'** と **B'** とする。 $\text{CH}_3\text{CN}$  分子は結晶学的鏡面を横切って配置されているため、結晶組成あたりの  $\text{CH}_3\text{CN}$  の組成は約 0.4 である。 $\text{CH}_3\text{CN}$  と  $\text{iBA}^+$  の

**B** または **B'** サイトとの間の最近接炭素…炭素原子間距離は 2.39(6) Å であり、CH<sub>3</sub>CN と iBA<sup>+</sup> の **B** および **B'** サイトが 2 つの炭素原子のファンデルワールス半径の合計 (3.4 Å) よりも約 1 Å 近いことを示している。したがって、CH<sub>3</sub>CN と **B** サイトの iBA<sup>+</sup> の間の立体障害により、CH<sub>3</sub>CN と iBA<sup>+</sup> の **B** および **B'** サイトは同時に存在できない。CH<sub>3</sub>CN に隣接する iBA<sup>+</sup> は常に **A** または **A'** サイトに位置する。結晶中では、CH<sub>3</sub>CN が割り当てられたサイトの約 40% が占有され、60% が空孔である。CH<sub>3</sub>CN に隣接する iBA<sup>+</sup> の **A** および **A'** の占有率は両方とも約 0.2 である。60% の空孔サイトに隣接する iBA<sup>+</sup> も **B** および **B'** サイトを占有できる。200 K における **B** サイトの占有率は 0.106(9) である。空孔サイトに隣接する **A** サイトの占有率は約 0.2 と見なせる。言い換えれば、CH<sub>3</sub>CN に隣接する iBA<sup>+</sup> の 40% が **A** サイトにあり、空孔サイトに隣接する 60% の 40% が **A** サイトにある。残りの 20% は、CH<sub>3</sub>CN の欠損穴を埋めるために **B** サイトに存在する。

結晶溶媒を含む分子結晶は、通常、結晶溶媒が脱離する際に分子の再配列により単結晶性を維持することが困難である。結晶 2•0.4CH<sub>3</sub>CN では、60% の溶媒フリー欠陥サイトが存在するにもかかわらず、iBA<sup>+</sup> が 4 つのサイト間で無秩序化し、空間を埋めるため、単結晶性が維持される。無秩序化した iBA<sup>+</sup> が占有する分子体積を評価するため、CH<sub>3</sub>CN を除去したモデル結晶において、iBA<sup>+</sup> が **A** サイトのみに存在する場合と、iBA<sup>+</sup> が全てのサイトで無秩序化している場合の空孔のサイズを比較した。iBA<sup>+</sup> が結晶の **A** サイトにのみ存在する場合、空孔のサイズは結晶組成あたり 77.36 Å<sup>3</sup> であり、単位格子の 7.6% に相当する (図 4a)。対照的に、iBA<sup>+</sup> が 4 つのサイトで無秩序化しているモデルでは、空孔は結晶組成あたり 38.89 Å<sup>3</sup> であり、単位格子の 3.8% に相当する (図 4b)。無秩序化した iBA<sup>+</sup> は約 40 Å<sup>3</sup> の余分な空間を占有し、欠陥サイトの安定化に重要な役割を果たす。

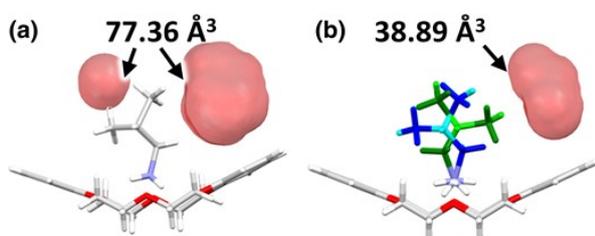


図 4. CH<sub>3</sub>CN を除去したモデル結晶の空孔。a) iBA<sup>+</sup> が秩序化した超分子カチオンモデル。空孔は 77.36 Å<sup>3</sup>/formula である。b) 4 つの位置に乱れた iBA<sup>+</sup> を持つモデルでは、空孔は 38.89 Å<sup>3</sup>/formula である。

iBA<sup>+</sup> の分子運動を評価するため、2•0.4CH<sub>3</sub>CN の単結晶 X 線構造解析が 200 K から 293 K まで 25 K ごとに実行された。**A** および **B** サイトの占有率の結果は、225 K 以下ではほぼ一定であったが、225 K 以上では **B** サイトの占有率が徐々に増加し、293 K で 0.139(5) に達した。225 K 以上で温度上昇に伴い占有率が変化することは、iBA<sup>+</sup> が少なくとも 225 K 以上で運動していることを示唆している。分子運動は、誘電率の温度依存性測定によっても裏付けられた。誘電率の実部 ( $\epsilon'$ ) は 230 K 付近から急激に増加し、これは iBA<sup>+</sup> の占有率の温度依存性と一致する。この結果は、結晶中の分子がこの温度以上で運動していることを示している。注目すべきは、 $\epsilon'$  が通常の Debye 型緩和とは異なり、270 K 付近にピークを持つことである。これらのピークは、結晶内のナノメートルサイズの分極ドメインに由来するリラクサー様誘電挙動を強く示唆している。結晶中の空孔がランダムに分布しているため、スイスチーズのような空孔

ドメインが結晶中に存在すると考えられる。これらのドメイン内の iBA<sup>+</sup> カチオンが協同的に運動すれば、ナノサイズの分極ドメインが形成されるはずである。

2•0.4CH<sub>3</sub>CN のモル磁化率 ( $\chi_m$ ) の温度依存性は、1.8 K から 300 K の範囲で 1 T の静磁場下で測定された。低温で  $\chi_m T$  の値が減少することは、[Ni(dmit)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> 間の反強磁性相互作用を示唆する。実際、 $\chi_m T$  の温度依存性は、キュリー定数 0.392(1) cm<sup>3</sup> K mol<sup>-1</sup>、ワイス温度 -4.96(9) K のキュリー・ワイス則に従った。

### (c) 2 in 1 超分子ケージに内包したオタマジャクシ状の極性分子の分子運動・相転移と強誘電性

分子を内包する閉鎖型ケージ化合物は、外部から隔離された環境下での分子運動研究のための独自のプラットフォームを提供する。理論的には、高対称性を持つ閉鎖型ケージは、内包された成分が複数の安定なサイトに存在することを可能にし、単一原子または単一分子の分極を切り替える可能性をもたらす。これは、サブナノレベルでの堅牢かつ高密度なメモリデバイスの開発に特に有望である。これまで、最も有名な閉鎖型分子ケージの 1 つに C<sub>60</sub> などのフラーレンがある。しかし、フラーレンを用いる「分子外科手術」と呼ばれる合成法は、高価な試薬と労働集約的な多段階合成を必要とする。これらの欠点を回避するため、デュアル半ケージの簡便なワンポット自己集合により、サイズ適合性のゲスト分子を内包し、2 in 1 超分子ケージ複合体を形成するアプローチがより便利であると考えられる。

*p*-tert-ブチルカリックス[4]アレーン (BC) は、このような半ケージとして理想的な候補である。これまでの研究では、(BC)<sub>2</sub> を基盤とする超分子ケージ複合体が様々な中型有機分子を捕捉することが報告されているが、ケージに閉じ込められた分子運動の複雑な詳細は未だ十分に探求されていない。特に、ケージ内に閉じ込められた個々の分子の分極を調整するこのような構造の可能性は、まだ調査されていない。本研究は、これらの課題に対処するため、タドポール型極性分子である 1-プロピル-1H-イミダゾール (PIm) を、ツーインワン超分子(BC)<sub>2</sub> ケージに組み込み、ケージ状包接化合物 PIm(a)(BC)<sub>2</sub> を合成し、そのケージに閉じ込められた PIm の運動と強誘電性相転移を詳細に研究することを目的としている。合成された化合物 **3** は、PIm と BC の自己集合により板状結晶として得られた。熱重量分析により、化合物 **3** が約 160°C まで安定であることが示された。示差走査熱量測定 (DSC) 曲線は、加熱/冷却サイクルにおいて一対の吸熱/発熱ピークを示し、化合物 **3** が可逆的な構造相転移を経ることを示唆している。本論文では、低温・高温相をそれぞれ  $\alpha$  相と  $\beta$  相と呼んでいる。室温から冷却する際に化合物 **3** は強誘電性相転移を起こす。様々な分子強誘電体が近年研究されているが、化合物 **3** は分子内包型超分子ケージを特徴とするクラレート分子強誘電体の初例である。可変温度 SHG (第二次高調波発生) によって、相転移中の空間群が極性から中心対称へと変化することが確認された。このテストでは、 $\beta$  相で SHG 信号が消失することが示されている。DSC 測定から推定された相転移のエントロピー変化 ( $\Delta S$ ) は 11.2 J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup> であった。ボルツマン方程式 ( $\Delta S = R \ln(N)$ ) から計算された  $N$  は 3.8 であり、理論値の 4 に非常に近い値であった。

単結晶 X 線回折分析により、化合物 **3** は  $\alpha$  相では *P2**nm*、 $\beta$  相では *P4*/*mnc* の空間群で結晶化することが明らかになった (図 5)。化合物 **3** では、各 PIm 分子は 2 つの頭合わせカップ状 BC によって形成された超分子ケージに内包されている (図 5a)。相転移後、超分子ケージ内の 2 つの BC は相対的な変位を起こし、ケージ対称性の変化をもたらす。注目すべきは、各ケージ内の PIm が  $\alpha$  相では 2 分の 1、 $\beta$  相では 8 分の 1 の無秩序状態にあることであり、これは両相における幾何学的に識別可能な配向の数 ( $N$ ) の比が 4 で

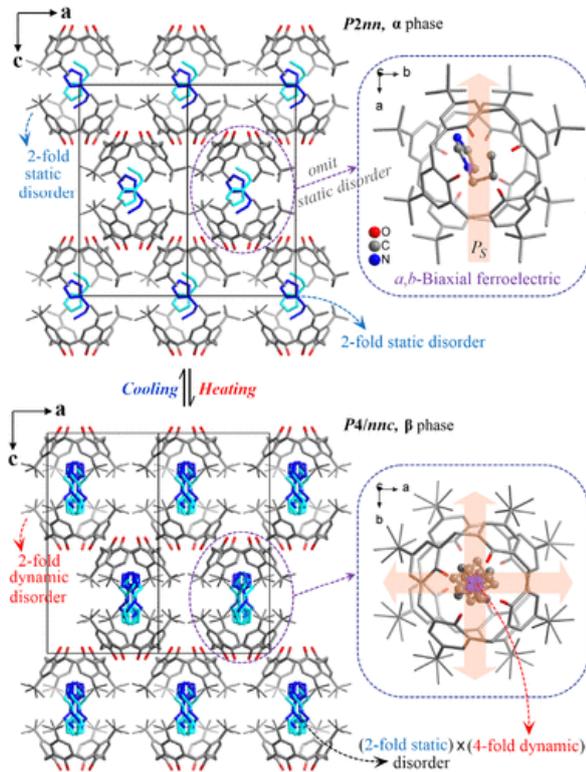


図 5. 結晶 3 の  $\alpha, \beta$  相の X 線構造。無秩序な PIm 分子は強調表示され、無秩序な BC の tert-ブチル基は細い線で表されている。

あることを示唆している。さらに、BC の 4 つの tert-ブチル基のうち 1 つは  $\alpha$  相で 2 分の 1 無秩序状態であるが (図 5a)、 $\beta$  相では 4 つ全ての tert-ブチル基が 2 分の 1 無秩序状態になる (図 5b)。 $\alpha$  相では、デュアド BC とケージ内の PIm の 2 つの無秩序状態は  $b$  軸に平行な  $C_2$  回転軸によって関連付けられている。一方、 $\beta$  相では、2 つの BC と PIm の 8 つの無秩序状態は  $D_4$  対称によって関連付けられている。 $\alpha \rightarrow \beta$  相転移の駆動力は、前述の PIm および tert-ブチル基の「静的から動的への秩序」の転移に起因すると考えられる。

ケージに閉じ込められた分子の動力学 (MD) をさらに理解するため、両相のアニーリング最適化構造に対して MD シミュレーションが実行された。298 K における  $\beta$  相の MD シミュレーション中のポテンシャルエネルギーの進化が調査された。比較的低いポテンシャルエネルギーを持つ 10 個の構造が選択され、DFT ベースの幾何学的最適化が施された。これらの最適化された構造の特定の PIm のねじれ角  $\theta_{C-N-C-C}$  と  $\theta_{N-C-C-C}$  が計算され、両方のねじれ角に双安定性が存在することが明らかになった。これら 2 組の双安定状態の組み合わせにより、4 つの配座が出現する。これらの最適化された構造の全エネルギー差は 0.03 eV 未満であり、これらの 4 つの異なる配座が閉じ込められた超分子ケージ内で熱力学的に同等であることを意味する。MD シミュレーションはまた、PIm のイミダゾール環が一方の半ケージからもう一方の半ケージへは反転できないことを示している。これは主に、大きな反転エネルギー障壁によるものである。

$\beta \rightarrow \alpha$  相転移は、Aizu 記法「4/mmmFmm2」により理論的に強誘電性であると考えられている。その強誘電性と PIm のケージに閉じ込められた分子動力学の詳細を調査するため、誘電率の温度一周波数依存性測定を行った (図 6a)。加熱時、広い測定周波数で、相転移温度 ( $T_C$ ) で複素誘電率の実部 ( $\epsilon'$ ) が極大値を示した。全ての測定周波数にお

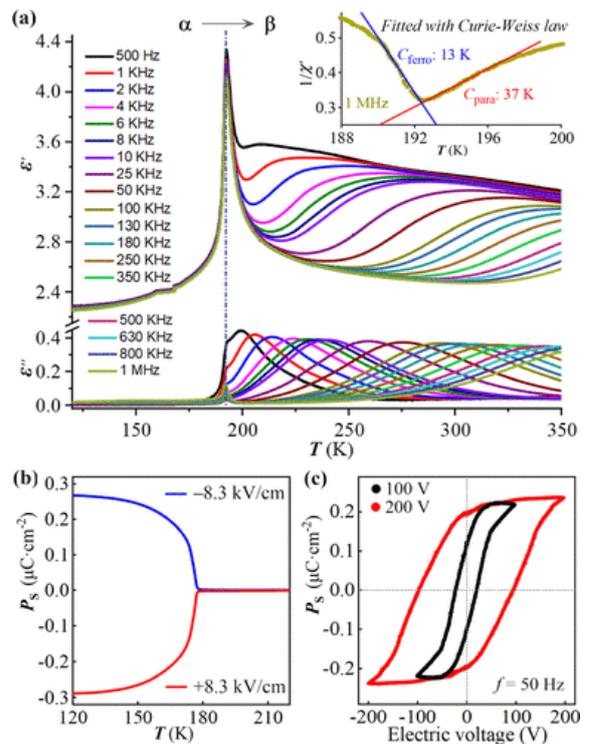


図 6. (a) 様々な交流周波数における 3 の粉末プレス試料の温度依存  $\epsilon'$  と  $\epsilon''$ 。挿入図はキュリー・ワイス則へのフィッティングを示している。(b) 単結晶  $b$  軸にほぼ平行に反転電場を印可した際に観測された焦電電流の積分に基づく結晶 3 の自発分極。(c) 単結晶  $b$  軸にほぼ平行に電場を印可した際の結晶 3 の電場依存強誘電ヒステリシスループ (測定温度 103 K)。

る  $\epsilon'$  の温度依存性は、 $T_C$  付近で  $\lambda$  型の誘電異常を示し、これは強誘電体相転移の典型的な特徴である。 $T_C$  以上では、PIm の配向分極により広い温度範囲で顕著な誘電緩和が観察された。強誘電体相転移は、逆電場下での温度依存性焦電電流によって示される可逆的な電気分極によってさらに裏付けられた。図 6b に示すように、電場を印加するポーリング処理後に測定した焦電電流は、220 K でのほぼ 0 から 135 K での約  $0.28 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$  に変化した。さらに、逆電場のポーリング処理後には  $\alpha$  相で分極の反転が達成され、電場による可逆的な自発分極、すなわち強誘電性が確認された。 $\alpha$  相の強誘電性は、ソーヤ・タワー回路で測定された様々な電場下での矩形に近い  $P-E$  (分極対電場) ヒステリシスループによって最終的に確認された (図 6c)。これらの測定は、試料結晶の  $b$  軸にほぼ平行に行われた。強誘電体相転移のメカニズムは、前述のケージに閉じ込められた PIm の「静的から動的への秩序」転移に起因すると考えられる。

### 3. 今後の研究の展望

ナノアセンブリ材料として、(1) 分子運動モードの変化に伴う一軸性負の熱膨張の 3 段階変化、(2) スイスチーズ構造を有する超分子結晶の分子運動、(3) 2 in 1 超分子ケージに内包したオタマジャクシ状の極性分子に関する分子運動・相転移と強誘電性の検討を進めてきた。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

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。これまで我々が進めてきた分子集合体の特徴を生かした材料開発の見解は、次世代の材料開発に役立つと信じている。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) X. Chen\*, M. Fujibayashi, H. Huang, C. Kato, K. Ichihashi, J. Manabe, S. Nishihara\*, X.-M. Ren, and T. Nakamura\*, Enhanced Electromechanical Response in 1D Hybrid Perovskites: Coexistence of Normal and Relaxor Ferroelectric Phases, *Adv. Funct. Mater.* In press (2025). (DOI: 10.1002/adfm.202501299)
- 2) 【電子研内共著】N. M. Cheruthu, P. K. Hashim\*, S. Sahu, K. Takahashi, T. Nakamura, H. Mitomo, K. Ijro, and N. Tamaoki\*, Azophotoswitches containing thiazole, isothiazole, thiadiazole, and isothiadiazole, *Org. Biomol. Chem.* 23, 207-212 (2025). (DOI: 10.1039/D4OB01573H)
- 3) 【電子研内共著】I. Sasaki, K. Takahashi, F. Taemaitree, T. Nakamura, J. A. Hutchison, H. Uji-i, and K. Hirai\*, Optical Cavity Enhancement of Visible Light-Driven Photochemical Reaction in the Crystalline State, *Chem. Commun.* 61, 2766-2769 (2025). (DOI: 10.1039/d4cc05598e)
- 4) Z.-Y. Du\*, M. Xie, W. Qiu, D.-C. Han, S.-Y. Zhang, Y. Zeng, W. Cai\*, T. Nakamura, R.-K. Huang\*, C.-T. He, Spiro-Driven Ferroelectric Coordination Polymer Exhibiting Distinct Phase Transitions Under Thermal and Pressure Stimuli, *Angew. Chem. Int. Ed.* (2025). (DOI: 10.1002/anie.202500027)
- 5) M. Ito, J. Manabe, K. Inoue, Y. Qian, X.-M. Ren, T. Akutagawa, T. Nakamura, S. Nishihara\*, Solid-State Ion Exchange of Organic Ammonium Cations in Molecular Crystals, *Eur. J. Inorg. Chem.* 28, e202400675 (2025). (DOI: 10.1002/ejic.202400675)
- 6) M. Ito, J. Manabe, K. Inoue, T. Hirao, T. Haino, T. Akutagawa, K. Takahashi, T. Nakamura, and S. Nishihara\*, Single-crystal-to-single-crystal transformation based on ionophore-like transport, *Chem. Lett.* 54, upae252 (2025). (DOI: 10.1093/chemle/upae252)
- 7) Y. Kyoya, K. Takahashi\*, W. Kosaka, R.-K. Huang, X. Chen, J. Wu, H. Miyasaka, and T. Nakamura\*, Unlocking single molecule magnetism: a supramolecular strategy for isolating neutral MnIII salen-type dimer in crystalline environments, *Dalton Trans.* 53, 7517-7521 (2024). (DOI: 10.1039/D4DT00323C)
- 8) Y. Chabatake, T. Tanigawa, Y. Hirayama, R. Taniguchi, A. Ito, K. Takahashi, S. Noro, T. Akutagawa, T. Nakamura, M. Izumi, and R. Ochi\*, 15-Crown-5-ether-based supramolecular hydrogel with selection ability for potassium cation via gelation and colour change, *Soft Matter* 20, 8170-8173 (2024). (DOI: 10.1039/D4SM00906A)
- 9) Y. Zhang, X. Zheng, Y. Saito, T. Takeda, N. Hoshino, K. Takahashi, T. Nakamura, T. Akutagawa\*, and S. Noro\*, Solution State-Like Reactivity of a Flexible Crystalline Werner-Type Metal Complex, *Angew. Chem. Int. Ed.* 63, e202407924 (2024). (DOI: 10.1002/anie.202407924)
- 1 0) J. Manabe\*, M. Ito, K. Ichihashi, K. Inoue, Y. Qian, X.-M. Ren, R. Tsunashima, T. Akutagawa, T. Nakamura, and S. Nishihara\*, Shrinkable muscular crystal with chemical logic gates driven by external ion environment, *Commun. Mater.* 5, 230 (2024). (DOI: 10.1038/s43246-024-00674-2)
- 1 1) M. Haneda, K. Takahashi\*, R. Huang, C. Xue, J. Wu, S. Noro, and T. Nakamura\*, Three-Step Change in Uniaxial Negative Thermal Expansion by Switching Supramolecular Motion Modes in Ferromagnetically-Coupled Nickel Dithiolate Lattice, *J. Mater. Chem. C* 12, 19398-19403 (2024). (DOI: 10.1039/D4TC03992K)
- 1 2) K. Kanamaru, K. Takahashi\*, R. Huang, C. Xue, J. Wu, S. Noro, and T. Nakamura\*, Molecular Motion in Supramolecular Ionic Crystal of Swiss Cheese Structure, *Chem. Lett.*

53, 11, upae206 (2024). (DOI: 10.1093/chemle/upae206)

- 1 3) L. Y. Sheng, D. C. Han, R. Huang\*, L. M. Cao, C. T. He, Z. Y. Du\*, and T. Nakamura, Tadpole-Like Polar Molecule Encapsulated in a Two-in-One Supramolecular Cage: Molecular Motion, Phase Transition and Ferroelectricity, *J. Am. Chem. Soc.* 146, 22893-22898 (2024). (DOI: 10.1021/jacs.4c06859)
- 1 4) 【電子研内共著】H. Fukushima, K. Miyagishi, K. Mori, Y. Sagara, K. Kokado, N. Tamaoki, T. Nakamura, and H. Nakano, Novel Solid-state Fluorophores, a Series of Cyanostilbene-based Amorphous Molecular Materials, *ChemPhotoChem* 8, e202400169 (2024). (DOI: 10.1002/cptc.202400169)
- 1 5) C. Sato, S. Dekura, H. Sato, K. Sambe, T. Takeda, T. Kurihara, M. Mizuno, T. Taniguchi, J. Wu, T. Nakamura, and T. Akutagawa\*, Proton Conduction in Chiral Molecular Assemblies of Azolium-Camphorsulfonate Salts, *J. Am. Chem. Soc.* 146, 22699-22710 (2024). (DOI: 10.1021/jacs.4c07429)

### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 高橋仁徳\*, 黄瑞康, 中村貴義, 超分子イオン結晶における負の熱膨張と電気・磁気物性, *日本結晶学会誌* 66, 3, 189-193 (2024). (DOI: 10.5940/jcrsj.66.189)

### 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) T. Nakamura “Supramolecular Approach to Multiferroics”, International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC), Ulaanbaatar, Mongolia, August 28<sup>th</sup>, 2024.
- 2) T. Nakamura “Supramolecular Strategy to Multiferroics”, XIII International Symposium on Nano & Supramolecular Chemistry (ISNSC2024), Sardinia, Italy, October 7<sup>th</sup>, 2024.
- 3) T. Nakamura “Supramolecular Approach for Novel Ferroelectric Materials and Multiferroic”, The 6th China-French Symposium on Advanced Materials (CFSAM-6), Shanghai, China, October 29<sup>th</sup>, 2024.
- 4) K. Takahashi, “Physical and electronic properties triggered by dynamic motion in molecular ionic crystals with supramolecular cations”, ISAJ Hokkaido 2024 Symposium on Collaborative Solutions for a Sustainable World, 札幌市, 2024年12月13日.

#### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) 高橋仁徳, “超分子カチオンを導入した分子性イオン結晶の CH<sub>3</sub>CN 吸脱着に伴う可逆な構造と磁性の変化”, 第60回熱測定討論会, 京都市, 2024年9月27日.
- 2) 高橋仁徳, “超分子カチオンを導入した分子性イオン結晶における負の熱膨張と電気・磁気物性”, 令和6(2024)年度日本結晶学会年会, 名古屋市, 2024年11月9日.
- 3) 高橋仁徳, “超分子形成と分子運動を利用した分子結晶の機能開拓”, 2024年度「日本化学会北海道支部奨励賞」受賞講演会, 札幌市, 2025年2月14日.

#### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) M. Haneda, K. Takahashi, N. Hasuo, R. Huang, J. Wu, C. Xue, and T. Nakamura, “Three-step change in negative

thermal expansion of molecular ionic crystal triggered by molecular motions”, ISAJ Hokkaido 2024 Symposium on Collaborative Solutions for a Sustainable World, 札幌市, 2024年12月13日.

#### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 近藤温菜, 佐藤久子, 茶島悠汰, 高橋仁徳, 芥川智行, 中村貴義, 和泉雅之, 越智里香, “カリウムイオンに  
応答して色調変化を示すキラル型超分子ヒドロゲル  
のキラリティ測定”, 第21回ホストゲスト超分子化  
学シンポジウム, 京都市, 2024年6月1日.
- 2) 近藤温菜, 佐藤久子, 茶島悠汰, 高橋仁徳, 芥川智行,  
中村貴義, 和泉雅之, 越智里香, “アルカリ金属イ  
オンに  
応答して色調変化を示すキラル型超分子ヒドロ  
ゲルの構造拡張と物性評価”, 高知化学シンポジウム,  
高知市, 2024年6月29日.
- 3) 長友里央菜, 伊藤 みづき, 眞邊 潤, 加藤 智佐都, 藤  
林 将, Cosquer Goulven, 井上 克也, 芥川 智行, 高橋  
仁徳, 中村 貴義, 西原 禎文, “ $\text{Li}_2([\text{18}]\text{crown-6})_3[\text{Ni}(\text{dmit})_2](\text{H}_2\text{O})_4$  結晶へのリシンの導入と結晶内  
ペプチド重合の試み”, 応用物理学会中四国支部大会,  
徳島市, 2024年7月28日.
- 4) 望月 理美, 原 圭志朗, 出倉 駿, 高橋 仁徳, 井上  
僚, 芥川 智行, 中村 貴義, 森 健彦, 吾郷 友宏, 久  
保 和也, “電解酸化法により得られた非対称パラジ  
ウム(II)ジチオレン錯体結晶における分子配列と電子  
状態への対アニオン効果”, 第18回分子科学討論会  
2024 京都, 京都市, 2024年9月19日.
- 5) 羽田 将人, 高橋 仁徳, 蓮尾 直洋, 黄 瑞康, 吳 佳冰,  
薛 晨, 中村 貴義, “2,2'-Oxybis(ethane-1-aminium)と  
[18]crown-6 誘導体からなる超分子カチオンを利用し  
た結晶の熱膨張制御”, 第18回分子科学討論会 2024  
京都, 京都市, 2024年9月21日.
- 6) 眞邊 潤, 伊藤 みづき, 市橋 克哉, 井上 克也, 芥川  
智行, 中村 貴義, 西原 禎文, “化学論理ゲートによ  
り駆動する分子性結晶システムの構築”, 第18回分  
子科学討論会 2024 京都, 京都市, 2024年9月21日.
- 7) 永田 翔, 加藤 智佐都, 眞邊 潤, 藤林 将, Cosquer  
Goulven, 井上 克也, 芥川 智行, 高橋 仁徳, 中村 貴  
義, 西原 禎文, “ $\text{Na}(\text{dibenzo}[18]\text{crown-6})[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$  結  
晶を用いた水溶液中のイオン捕捉と物性評価”, 第18  
回分子科学討論会 2024 京都, 京都市, 2024年9月21  
日.
- 8) 長友 里央菜, 伊藤 みづき, 加藤 智佐都, 眞邊 潤,  
藤林 将, Cosquer Goulven, 井上 克也, 芥川 智行, 高  
橋 仁徳, 中村 貴義, 西原 禎文, “イオンチャネル構  
造を有する  $\text{Li}_2([\text{18}]\text{crown-6})_3[\text{Ni}(\text{dmit})_2](\text{H}_2\text{O})_4$  結晶  
を用いたアミノ酸への固相イオン交換とペプチド形成  
への試み”, 第18回分子科学討論会 2024 京都, 京都  
市, 2024年9月21日.
- 9) 石川 大輔, 眞邊 潤, 加藤 智佐都, 藤林 将, Cosquer  
Goulven, 井上 克也, 芥川 智行, 高橋 仁徳, 中村 貴  
義, 西原 禎文, “クラウンエーテルからなるイオンチ  
ャネル構造を有する導電性  $\text{Ni}(\text{dmit})_2$  錯体の構造と物  
性”, 第18回分子科学討論会 2024 京都, 京都市, 2024  
年9月21日.
- 10) 伊藤 みづき, 眞邊 潤, 市橋 克哉, 加藤 智佐都, 藤  
林 将, Cosquer Goulven, 井上 克也, 平尾 岳大, 灰野  
岳晴, 芥川 智行, 高橋 仁徳, 中村 貴義, 西原 禎文,  
“外部環境刺激によって選択的に有機アンモニウム  
カチオンに交換する結晶”, 第18回分子科学討論会  
2024 京都, 京都市, 2024年9月21日.
- 11) 金丸 和矢, 高橋 仁徳, 黄 瑞康, 薛 晨, 吳 佳冰, 中  
村 貴義, “結晶溶媒を含む  $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$  塩における溶媒  
脱離に伴う構造変化と熱膨張の多段階変化”, 第32  
回有機結晶シンポジウム, 目黒区, 2024年10月26日.
- 12) 近藤温菜, 佐藤久子, 茶島悠汰, 高橋仁徳, 芥川智行,  
中村貴義, 和泉雅之, 越智里香, “振動円二色性分光  
法によるキラル型超分子ヒドロゲルのキラリティ解  
析”, 第39回中国四国地区高分子若手研究会, 鳥取  
市, 2024年11月12日.
- 13) 長友里央菜, 伊藤 みづき, 眞邊 潤, 加藤 智佐都, 藤  
林 将, Cosquer Goulven, 井上 克也, 芥川 智行, 高橋  
仁徳, 中村 貴義, 西原 禎文, “イオンチャネル構造

を有する  $\text{Li}_2([\text{18}]\text{crown-6})_3[\text{Ni}(\text{dmit})_2](\text{H}_2\text{O})_4$  結晶への  
アミノ酸の導入と結晶内ペプチド合成”, 日本化学会  
中四国支部大会, 岡山市, 2024年11月16日.

- 14) 望月理美, 出倉駿, 高橋仁徳, 田原圭志朗, 中村唯我,  
松本一彦, 井上僚, 芥川智行, 森健彦, 吾郷友宏, 久  
保和也, “電解酸化により得られる非対称型パラジ  
ウム(II)ジチオレン錯体結晶の構造と伝導挙動”, 化学  
系学協会北海道支部 2025 年冬季研究発表会, 札幌市,  
2025年1月21日.
- 15) 茶島 悠汰, 谷川 智樹, 平山 湧人, 谷口 涼, 伊藤 亮  
孝, 高橋 仁徳, 野呂 真一郎, 芥川 智行, 中村 貴義,  
和泉 雅之, 越智 里香, “カリウムイオンに  
応答して  
ゲル形成ならびに色調変化を示す 15-クラウン-5-エ  
ーテル含有超分子ヒドロゲル”, 日本化学会第105春  
季年会(2025), 吹田市, 2025年3月26日.
- 16) 望月 理美, 高橋 仁徳, 出倉 駿, 田原 圭志朗, 中村  
唯我, 松本 一彦, 井上 僚, 芥川 智行, 中村 貴義,  
森 健彦, 吾郷 友宏, 久保 和也, “非対称型パラジ  
ウム(II)ジチオレン錯体の電解酸化によって得られる  
分子性結晶の構造相転移”, 日本化学会第105春季年  
会(2025), 吹田市, 2025年3月26日.
- 17) 石川 大輔, 加藤 智佐都, 眞邊 潤, Goulven Cosquer,  
藤林 将, 井上 克也, 芥川 智行, 高橋 仁徳, 中村 貴  
義, 西原 禎文, “多価金属イオンを用いた導電性  
 $\text{Ni}(\text{dmit})_2$  結晶の固相イオン交換と電子状態”, 日本化  
学会第105春季年会(2025), 吹田市, 2025年3月26日.
- 18) 陳 ユン, 齋藤 結大, 鄭 キン, 高橋 仁徳, 中村 貴義,  
野呂 真一郎, “プロモスチリルピリジン  
を有するウ  
ェルナー型金属錯体の合成と光反応性”, 日本化学会  
第105春季年会(2025), 吹田市, 2025年3月26日.
- 19) 近藤温菜, 佐藤久子, 茶島悠汰, 高橋仁徳, 芥川智行,  
中村貴義, 和泉雅之, 越智里香, “振動円二色性分光  
法による超分子ヒドロゲルのキラリティ解析”, 日本  
化学会第105春季年会(2025), 吹田市, 2025年3月26  
日.
- 20) 秋山 雄貴, 久保本 莉湖, 網島 亮, 南 豪, 西原 禎文,  
芥川 智行, 中村 貴義, 帯刀 陽子, “ $(R,S)\text{-TTF-4UM}(\text{F}_4\text{TCNQ})$  錯体からなる分子性ナノコイルの構  
造、電磁特性評価”, 日本化学会第105春季年会(2025),  
吹田市, 2025年3月26日.
- 21) 南部 友梨子, 西原 禎文, 芥川 智行, 中村 貴義, 南  
豪, 帯刀 陽子, “ヒスタミンの検知を目指した 10,12-  
ノナコサジン酸ナノ結晶の作製”, 日本化学会第  
105春季年会(2025), 吹田市, 2025年3月26日.

#### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)

- 1) 高橋仁徳, “超分子アプローチに基づく Mn サレン 2  
量体の磁気的隔離”, 動的分子を機序にした分子固体  
化学の探究 第4回研究会, 熊本市, 2024年9月3日.
- 2) 羽田将人, “輪軸型超分子カチオンの結晶内分子運動  
と負の熱膨張”, 動的分子を機序にした分子固体化学  
の探究 第4回研究会, 熊本市, 2024年9月3日.
- 3) R. Huang, “Novel supramolecular ferroelectric based in  
2-in-1 calixarene cage compounds”, 「動的分子を機序に  
した分子個体化学の探求」第4回研究会, 熊本市,  
2024年9月3日.
- 4) C. Xue, “Ferroelectric property in 1D organic-inorganic  
hybrid perovskite”, 「動的分子を機序にした分子個体  
化学の探求」第4回研究会, 熊本市, 2024年9月3日.
- 5) R. Huang, “Inorganic-organic Supramolecular Crystals:  
From Molecular Motions to Multiferroicity”, 2024 Global  
Young Scholar's Forum, November 1st, 2024.
- 6) J. Wu, “Supramolecular approach towards molecular mul  
tiferroics”, The 6th China-France Symposium on Ad  
vanced Materials (CFSAM-6), Shanghai, China, October  
29th, 2024.

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 中村貴義 (芥川智行, 東北大多元研), “分子固体の動的性質に関する研究”.
- 2) 中村貴義, 高橋仁徳 (野呂真一郎, 北大院地球環境), “配位高分子錯体の結晶構造に関する研究”.
- 3) 中村貴義, 高橋仁徳 (宮坂等, 高坂亘, 東北大金研), “単分子磁石の交流磁化に関する研究”.
- 4) 中村貴義, 高橋仁徳 (西原禎文, 広島大院理工), “分子結晶の固液界面でのイオン交換に関する研究”.
- 5) 中村貴義, 高橋仁徳 (久保和也, 兵庫県大院理), “電荷移動錯体の誘電応答に関する研究”.
- 6) 中村貴義, 高橋仁徳 (中野英之, 室蘭工大院工), “発光性分子結晶の結晶構造解析に関する研究”.

##### b. 国際共同研究

- 1) T. Nakamura, R. Huang (Zi-Yi Du, Jiangxi Normal University), “分子強誘電体に関する研究”.

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

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) 中村貴義 (代表), 基盤研究(A), “低次元分極配列に基づくリラクサーおよび新奇磁気電気効果の開拓”, 2022年4月~2025年3月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 高橋仁徳 (代表), JST ACT-X, “スケラブル分子強誘電体の開拓と理解”, 2023年10月~2026年3月.

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

- 1) 高橋仁徳 (超分子形成と分子運動を利用した分子結晶の機能開拓), 2024年度「日本化学会北海道支部奨励賞」, 2024年2月14日.

#### 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) 高橋仁徳, 学会誌拡大編集委員 (日本熱測定学会), 2023年11月~現在.
- 2) 高橋仁徳, 北海道・東北支部世話人代表 (錯体化学若手の会), 2023年4月~2025年3月.

##### c. 兼任・兼業

該当なし

##### d. 外国人研究者の招聘

該当なし

##### e. 北大での担当授業科目 (対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 全学教育、結晶の中の超分子、中村貴義、2025年4月26日
- 2) 環境科学院、光電子科学特論 II、中村貴義、2024年6月12日~7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)

- 1) 東京大学工学部、化学生命工学特論第2、中村貴義、2024年10月~2025年3月

##### g. アウトリーチ活動

該当なし

##### h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

##### i. 客員教員・客員研究員など

該当なし

##### j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位: 0人

該当なし

博士学位: 2人

- 1) 金丸和矢, 環境科学院, 博士 (環境科学), ゲスト分子離脱を利用した分子結晶の機能開拓.
- 2) 羽田将人, 環境科学院, 博士 (環境科学), 超分子カチオン構造を利用した結晶の熱膨張制御.

# ナノテク協働研究分野

## スタッフ

准教授 押切 友也 (博士 (理学)、2022 年 10 月 1 日着任、2025 年 3 月 31 日任期満了)

## 1. 研究目標

全国の 5 つの国立大学法人の研究所が、各々の得意分野で相互に連携・ネットワークを組み相補的・協力的な体制を取る「人と知と物質で未来を創るクロスオーバーアライアンス」では、異なる研究領域のグループ間で人と知をクロスオーバーさせ、「人」を中心とした安全安心・健康・地球環境保全・創&省エネルギー・持続可能社会を実現するための社会課題解決型のプロジェクトを実施している。プロジェクトの目的を達成させるために、クロスアポイントメント制度を活用した研究所間を跨る「CORE<sup>2</sup>-A ラボ (Cross Over collaborative REsearch & CORE (中核) - Alliance ラボ)」を設置し、人材の流動化により促進される異分野連携研究を通じて社会課題解決に資する共同研究を進展させている。押切はプロジェクト「精密ナノ構造作製技術と新奇光・環境刺激を融合したメタサイトの高次制御」に参画し、研究を推進している。

## 2. 研究成果

2024 年度は、精密ナノ構造作製技術を駆使した光応答性メタサイトとして、プラズモンと平面型光共振器とのモード結合から成る光カソードに注目し、特にカソード層として機能する p 型半導体である酸化ニッケル (NiOx) 層の結晶性および緻密製がホール輸送能に与える影響について理解し、効率的な光カソード作製のための指針を得ることを目的として研究を行った。

一般的に用いられる湿式ゾルゲル法による NiOx(w-NiOx)層は、結晶粒子間の空隙が大きく、ホール輸送を阻害すると考えられる。そこで本研究では、空隙を埋める手法として、導電性ガラスの上に成膜した w-NiOx に、気相成長法であるプラズマ増強原子層堆積法 (PE-ALD) による追加成膜を実施した (w-a-NiOx)。また、希釈前駆体溶液を用いた湿式法による追加成膜 (w2-NiOx) においても、同様に空隙低減効果が認められた。こうして得られた w-a-NiOx、w2-NiOx は共に w-NiOx よりも高いホール輸送能を示し、また、電気化学インピーダンス計測から、複数種の NiOx 層がホール輸送パスとして機能することが示唆された (図 1)。

上記 w2-NiOx 層を、プラチナ薄膜の上に成膜してファブリ・ペロー (FP) 共振器とし、その上に金ナノ粒子を担持することで Au-NPs/NiOx/Pt-film 光カソードを作製した。Au-NPs/NiOx/Pt-film 光カソードは、プラズモン共鳴と FP 共振器とのモード結合形成に伴い、光吸収スペクトルの広帯域、高効率化が観測された (図 2)。また、これを作用電極とした三電極系での光電気化学計測を行ったところ、Au-NPs/w2-NiOx/Pt-film は Au-NPs/w2-NiOx や w2-NiOx/Pt-film と比較して著しい入射高電流変換効率 (IPCE) の増大を示し、600 nm での IPCE は 0.16%に達した。

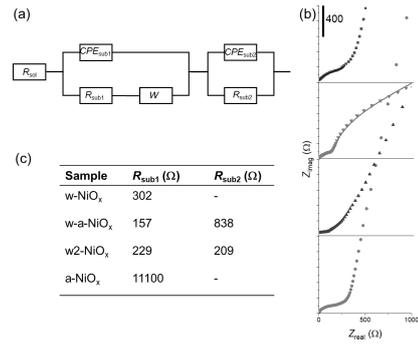


図 1. (a) 電気化学インピーダンスフィッティングに用いた等価回路。Rsol: 溶液抵抗。Rsub1: 1 層目の NiOx の抵抗。Rsub2: 2 層目の NiOx の抵抗。(b) ナインキスとプロット。上から w-NiOx、w-a-NiOx、a-NiOx、w2-NiOx。各 NiOx 層の抵抗一覧。

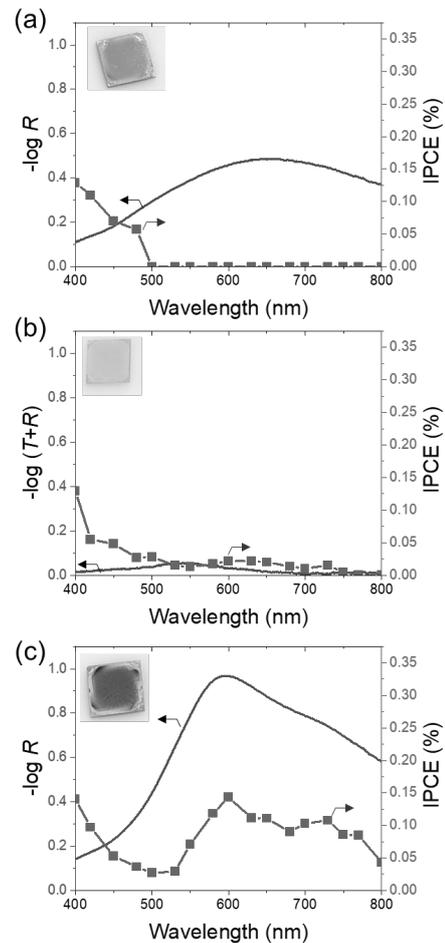


図 2. 各基板の吸収スペクトルおよび IPCE 作用スペクトル。(a) w2-NiOx/Pt-film。(b) Au-NPs/w2-NiOx。(c) Au-NPs/w2-NiOx/Pt-film。挿入図は光学写真。

以上の研究結果から、プラズモン-FP 共振器モード結合下において、p 型半導体層のホール輸送能が重要な役割を果たし、結晶性および緻密性で制御可能であることを明らかにした。また、モード結合下では Au-NP から半導体層へのホール注入効率も大きく向上するため、これらを組み合わせることで従来のプラズモン型カソードを大きく超克可能な効率を有する新規可視光応答型光カソードの構築に向

けた設計指針を得た。今後は、ホットホール生成・移動メカニズムに関するさらなる理解を深めるために、超高速分光技術をはじめとした素過程の速度論的計測を行う。

本研究成果は北大電子研准教授、松尾教授、三澤教授らとの共同研究に基づくものである。

### 3. 今後の研究の展望

「精密ナノ構造作製技術と新奇光・環境刺激を融合したメタサイトの高次制御」のプロジェクトは 2024 年度をもって終了したが、引き続き北大電子研の研究メンバーとの緊密な連携を行い、共同研究を推進する。本プロジェクトを通して、大学間、研究所間、アライアンスグループ間の研究内容、人材、保有技術、設備の共通理解、交流が促進され、大型プロジェクトや最先端学際領域の開拓に繋がるものと期待される。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) 【電子研内共著】E. Cao, X. Shi, H. Inoue, T. Oshikiri, Y. -E. Liu, H. Misawa\*, Activation energy in the electron transfer process and water oxidation intermediate generation under plasmon–nanocavity strong coupling, *J. Phys. Chem. C* 129, 1590–1597 (2025). (DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c07398>)
- 2) 【電子研内共著】T. Oshikiri\*, Y. Matsuo, H. Niinomi, M. Nakagawa, Chiroptical response of an array of isotopic plasmonic particles having a chiral arrangement under coherent interaction, *Photochem. Photobiol. Sci.* 24, 13–21 (2025). (DOI: [10.1007/s43630-024-00667-7](https://doi.org/10.1007/s43630-024-00667-7))
- 3) H. Niinomi\*, H. Nada, T. Yamzaki, T. Hama, A. Kouchi, T. Oshikiri, M. Nakagawa, Y. Kimura, Dependence of homomiscible water dynamics on overpressure at the interface between water and the basal plane of single-crystal Ice I<sub>h</sub>, *J. Phys. Chem. C* 128, 15649–15656 (2024). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.4c04187](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c04187))
- 4) H. Niinomi\*, H. Y. Yoshikawa, R. Kawamura, T. Yamazaki, T. Oshikiri, M. Nakagawa, In-situ observation of DL-alanine crystallization from a laser-trapped dense liquid droplet as a heterogeneous nucleation site, *Chem. Lett.* 53, upae100 (2024). (DOI: [10.1093/chemle/upae100](https://doi.org/10.1093/chemle/upae100))

### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 押切友也, 中川勝, ナノサイズの光捕集パラボラアンテナ, *クリーンエネルギー* 33, 8, 20–25 (2024).

### 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) T. Oshikiri, “Design of near field for the novel photochemical reaction on plasmonic structure under modal coupling regime”, the 12th Singapore International Chemistry Conference, Singapore, Singapore, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 2) T. Oshikiri, “Visible light active photocathode under

modal coupling regime”, IPS-24/ICARP2024, Hiroshima, Japan, July 31<sup>st</sup>, 2024.

- 3) T. Oshikiri, “Optical properties of chiral plasmonic nanostructures coupled with nanocavity”, META 2024, Toyama, Japan, July 17<sup>th</sup>, 2024.

#### b. 招待講演 (国内学会)

該当なし

#### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) T. Oshikiri, T. Hayakawa, H. Niinomi, M. Nakagawa, “Light-harvesting antenna of parabolic nanoresonator array coupled with plasmons”, 37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Kyoto, Japan, November 15<sup>th</sup>, 2024.
- 2) T. Oshikiri, Y. Matsuo, H. Niinomi, K. Sasaki, H. Minowa, M. Nakagawa, “Near-field properties generated by circularly polarized light irradiation on metal nanostructure”, The 11th Optical Manipulation and Structured Materials Conference, Yokohama, Japan, April 24<sup>th</sup>, 2024.

#### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 押切友也, 松尾保孝, 新家寛正, 中川勝, “キラル配列を有する等方性金ナノディスクが示すキラル光学応答”, 第72回応用物理学学会春季学術講演会, 東京理科大学, 東京, 2025年3月14日
- 2) 押切友也, 新家寛正, 中川勝, “キラル配列を有するプラズモニックアレイの薄膜共振器との相互作用”, 2024年光化学討論会, 九州大学, 福岡, 2024年9月3日

#### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど

(学会以外)

該当なし

### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

### 4.8 共同研究

#### a. 国内共同研究

該当なし

#### b. 国際共同研究

該当なし

#### c. 民間等との共同研究・委託研究

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

該当なし

#### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

#### c. 民間助成金

該当なし

### 4.10 受賞

該当なし

### 4.11 社会教育活動

#### a. 公的機関の委員

該当なし

#### b. 国内外の学会の役職

該当なし

c. 兼任・兼業

該当なし

d. 外国人研究者の招聘

該当なし

e. 北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

f. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）

該当なし

g. アウトリーチ活動

該当なし

h. 新聞・テレビ等の報道

該当なし

i. 客員教員・客員研究員など

該当なし

j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0人

該当なし

博士学位：0人

該当なし

# 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」の側面も有している数学は、普遍性の高い学問であると同時に、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、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する新しい研究手法の枠組みの中で実験事実在即した概念の創出を目指します。そして、数学・数理科学と周辺学問領域との「組織的な協働と出会い・議論の場」である“知のオープンファシリティ”を展開し、数学・数理科学者と異分野研究者間の個別連携から「複数の異分野の協働を基盤とする」全体連携を加速することで、北海道大学における数理連携の中心拠点を形成します。

## 人間数理研究分野

### スタッフ

教授 長山 雅晴（博士（数理科学）、2012年4月1日着任）

助教 西野 浩史（博士（理学）、2015年4月1日着任）

助教 石井 宙志（博士（理学）、2023年11月1日着任）

特任助教 EOM Junyong（博士（数学）、2023年10月着任、2025年2月28日転出）

特任助教 香川 溪一郎（博士（理学）、2023年10月着任）

特任助教 上田 祐暉（博士（数理科学）、2023年10月着任）

特任助教 内海 晋弥（博士（理学）、2023年10月着任）

学術研究員 堂前 愛、富澤 ゆかり

### 学生

博士課程 成田 雅昭、森 篤志

修士課程 野田 裕真、本橋 樹、Li Yiwei、魚川 柊悟、

徳岡 奏里、長山 ゆい、渡邊 陸

学部 糸井 颯汰、伊藤 優作、井上 勝貴、草間 晶、

納谷 敬介、三浦 拓也、宮川 遼大、Hong Minjia

## 1. 研究目標

### 生命現象や社会科学の数理解析

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解析ではなく、数理解析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解析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。

また、社会問題への数理科学の応用を考える。この研究では医学や社会科学の分野と共同研究を進め、社会実装・社会貢献を目指した数理解析モデリング研究を展開していく。

### 昆虫をモデルとした感覚情報処理機構の解明と応用

近年、持続可能な開発目標（SDGs）を見据えた取り組み

のひとつとして、環境低負荷型の害虫防除が注目されており、種特異的なシグナル（フェロモン、光、振動等）を用いた選択的防除の領域で神経生物学との緊密な連携が進みつつある。また、速い情報処理を発達させている昆虫の構造や機能を工学的に模倣（生物模倣学）しようという機運も高まっている。

本研究では、昆虫の五感の神経レベルでの情報処理様式の解明を主軸としつつ、得られた知見を環境低負荷型のペストコントロールや生物模倣などの応用指向の研究へと発展させていくことを目標とする。

### 非局所項を持つ数理解析モデルの数理解析

近年、自分自身からの距離に応じて強さや働きが異なる相互作用が、細胞や生物などで報告されている。このような相互作用がどのように現象の時間変化に作用するかを考察するために、物質間の距離に応じた働きを表現する積分核との畳み込み積分で記述される、非局所項を持つ数理解析モデルが提案されている。非局所項を持つ数理解析モデルは生物の拡散・増殖過程、感染症の流行、磁性体の相転移、神経場の発火現象など、様々な分野の現象を理論解析するために提案されている。

非局所性を持つ数理解析モデルでは、シンプルな方程式であっても多様な時空間パターンが生成されることが数値計算により確認されている。その一方、非局所性により解析手法が限られてしまい、解挙動における積分核形状の影響の数理的な理解は十分に進んでいないのが現状である。そのため本研究では、非局所性を持つ数理解析モデルに対する解析手法の構築を進めることで、非局所性を用いたモデリング手法の拡充・深化を目指している。

## 2. 研究成果

### 数理解析皮膚科学

今年度も昨年に引き続き、毛包形成モデルの構築を行った。実験から提唱されているテレスコープモデルを支持するような数値計算結果が、どのような仮定の下で得られるか調べた。陥入現象は、プラコード部での基底膜と真皮の物理的特性が局所的に変化すること（局所的な軟化）、およびプラコード上の基底細胞の分裂抑制が主要因であることが示唆された。さらに、基底細胞の基底膜への接着がある程度以上強い場合、陥入後のシリンダー構造が形成されることを示唆した。また、毛包形成時はプラコード下部に線維芽細胞の塊の移動がみられるが、線維芽細胞間の接着を弱くすると、毛包形成時に塊が離散し、全く別の器官のような（乳腺のような）構造が形成された。これにより、毛包形成時にその直下になる線維芽細胞が集団で動くことの重要性が示唆された（長山）。

### 糖代謝数理解析モデリング

昨年度に引き続きムーンショットプロジェクトの中で糖代謝モデルの構築を東北大学の藤原寛教授らと行った。肝臓内で起こっている糖代謝の詳細なモデルと臓器間ネットワークとしての血流体循環を相互作用とした9コンパートメントのグルコース・インスリン・C-ペプチドダイナミクスの数理解析モデルを構築した。このモデルを用いてヒトにおいて糖尿病の超早期段階を予測できるか検討を行った。大迫コホートのヒトOGTTの経時データを用いた。このデータには複数回の試験結果を有する被験者の正常糖耐能（NGT）と糖耐能異常（IGT）、糖尿病（DM）のデータが残っている。同一被験者の経時データで、NGTのままであったNGTデータ（NGT1）とNGT→DMと遷移したNGTデータ（NGT2）にして

クラス分けが可能か調べた。現時点ではNGT1とNGT2, DMのデータは分類できており、数理モデルを用いたデータ解析から糖尿病の超早期段階を予測できる可能性を示唆した(長山)。

### 自己駆動系の数理学

昨年度は、 $L^2$ 勾配流から導出されるPhase-Field型の自己駆動体表現モデルを用いて、形状変形する液滴運動から形状変化しない固体運動までを1パラメータで表現できる反応拡散型の自己駆動数理モデルの構築に成功したが、今年度は、このモデルを拡張することによって、回転運動を伴う楕円形やダンベル形の自己駆動体運動の数理モデルを構築することに成功した。そして、楕円形自己駆動体やダンベル形自己駆動体の分岐現象を調べることによって、長軸方向への並進運動から短軸方向への並進運動に遷移すること、およびその遷移過程で公転運動が生じることを見つけた(長山)。

### 社会創造数学研究の展開

今年度は、昨年度行ったライフプランを支援するためのプラン最適化問題を実装することができた。仮想「振り返りデータベース」を実装し、「プラン最適化問題」を動かした。概ね正しく動くことを確認した(長山)。

### 家屋害虫の性フェロモンの処理様式の解明

ゴキブリ属のゴキブリは、そのほとんどが家屋害虫という悪名高いグループである。このグループではメスがペリプラノンという特殊な化学構造を持つ性フェロモンを放出し、オスがそこに誘引されることで、交尾が成立する。本研究ではクロゴキブリの触角(嗅覚器)に、性フェロモンを提示し、これに強く応答する神経を探索することで、性行動を介在する神経の生理学的・形態学的特定に成功した。その結果、嗅覚中枢を構成する210個の糸球体(1個1個が特定の匂いに応じる)のうち、最大の糸球体から出力する神経がペリプラノンDに対して強い興奮性応答を示すこと、近接する別の糸球体は近縁種の性フェロモンに応答することが分かった。各神経において、最も強い応答をもたらすフェロモン以外の成分が少しでも混ざると応答の減弱が起こった。そのため、クロゴキブリの性行動を司る神経系は単一のフェロモン成分を処理するために最適化されていることが分かった。(西野)

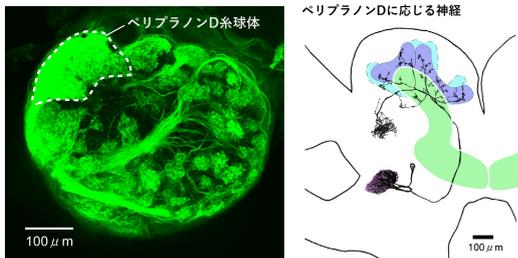


図1. クロゴキブリの一次嗅覚中枢(左)。最大の糸球体から出力する神経(右)はペリプラノンDに応じる。

### 飛翔昆虫の光源定位行動解析

森林面積が7割を占める北海道では、大型の蛾(クスサンやマイマイガ)の大発生が10年おきに起きる。幼虫は森林吸収に寄与する針広混交林を広く食害することで甚大な被害を与える一方、おびただしい数の成虫が8~9月に人工光源に集まり、周囲の美観を損なうことで、観光業にも打撃を与える。本研究では、「昆虫がいかに光源に誘引され、定着に至るのか」という観点から、低出力光源の物理的性質(属性)や背景色を緻密に変化させたときの蛾の定位行

動を記録・解析することで、大型の蛾の誘引/非誘引光源開発に反映させる。2024年9月に実施したフィールド試験により、クスサンの光源定位は「接近」と「定着」という2つのフェーズから構成されることが、画像解析により初めて明らかとなった。クスサンは点光源に対し、直線的な飛翔軌跡を示し、光源手前50 cmほどで、急速にスピードを落としてから背景に定着しようとする。この定位傾向は、個体(図2左)でも集団(図2右)でも同様で、定位行動中に背光反応は示さない。このことは、クスサンは明確な正の光源定位を示すとともに、背景など周囲の照明環境を定着の判断に利用することを如実に示すものである。(西野)

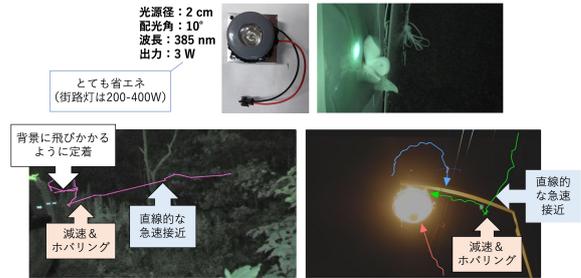


図2. クスサンの光源への定位軌跡

### 空間非局所項の偏微分方程式近似

非局所項が数理解析を困難にする問題点の1つとして、積分項の数値計算コストの高さが挙げられる。この問題を解消するために、今年度はまず空間非局所項を考え、数値計算がより早く実行可能な偏微分表示を用いて、積分項を近似的に書き直す方法論の構築を目指した。

研究成果として、これまでは空間1次元までしか得られていなかった空間非局所項の偏微分方程式のシステムによる近似手法を、空間高次元でも適用可能な形で拡張した。また、積分核によって決定する偏微分方程式のシステムのパラメータを具体的に与えることで、近似誤差を陽に与えることに成功した。本研究成果により空間高次元であっても望んだ近似精度で、積分核の情報を持つモデルパラメータ付きの偏微分方程式のシステムによる空間非局所項の近似が可能となった。本手法を適用することで、空間非局所項を直接扱うよりもコストの低い数値計算ができる。(石井)

### 時間非局所項を持つ数理モデルに現れる伝播現象の特徴づけ

時間非局所項は通常の拡散よりも遅い異常拡散現象を記述する際によく用いられる。このような異常拡散下で、粒子の増殖や飽和を記述する数理モデルが導出されている。解が空間的に広がる速さを解析することは、数理モデルが記述する異常拡散の効果を考察する上で重要な観点である。本研究成果では最終的な解が伝播する速さを特徴づける方法論を提案し、具体的に時間非局所項と速度の関係性を明らかにした。(石井)

## 3. 今後の研究の展望

### 数理皮膚科学

次年度以降は、今年度予定していたが、進めることが出来なかった研究を推進する。毛包シリンダー形状に基底細胞の分化区画が生じる仕組みについて数理モデリングによる仮説提唱を目指す。細胞接着力の違いによる細胞選別等を仮定することで、テレスコープモデルに必要な条件を明らかにする。また、成長に伴い表皮も伸張し、同時に毛包発生場所(プラコード)も徐々に増えていくが、このプラ

コードが形成される場所（毛包ブレパターンの）形成過程を数理モデル化する。毛包ブレパターンの形成はチューリングパターンだと提唱されているが、表皮の伸張に伴い毛包ブレパターンのように形成されていくか数理モデルから明らかにし、毛包ブレパターン形成に対する理論を展開する（長山）。

#### 自己駆動系の数理科学

次年度以降は、反応拡散型自己駆動体運動モデルから形式的に導出された特異極限自由境界方程式の数学的正当性を示す。さらに、その自由境界問題に対する解の大域的存在性について調べ、自由境界問題に対する特殊解として、円盤定常解、楕円定常解の存在や進行波解の存在を明らかにする。また、空間1次元に問題を制限することで、反応拡散型自己駆動体モデルに対する定常解や進行波解の存在、定常解から進行波解への分岐現象を特異摂動法およびSLEPを用いて数学的に示す。さらに回転を伴う固体運動を記述する自己駆動体運動モデルの分岐構造を数値計算によって明らかにする（長山）。

#### 糖代謝数理モデリング

次年度以降は、大迫コフォートデータに対するデータ解析をより一層すすめる。NGT1とNGT2を分類する主要因がまだ明らかになっていないため、感度解析手法等を用いてNGT2データの特徴をデータ解析から明らかにする研究を進め、糖尿病超早期段階での原因因子とその指標を明らかにする。また、今年度得られた結果を成果としてまとめ発表する（長山）。

#### 社会創造数学研究の展開

次年度以降は、「振り返りデータベース」を作るために必要なアンケート項目を確定させ、アンケートを数千人規模で実施する。その後アンケートに基づいた「振り返りデータベース」を構築し、今年度実装した「プラン最適化数理モデル」を運用する。運用結果の検証を行い、「振り返りデータベース」のアップデートおよびプラン最適化数理モデルのアップデートを検討する（長山）。

#### 家屋性ゴキブリの性フェロモン処理系の機能構築の解明

クロゴキブリに代表される *Periplaneta* 属のゴキブリはそのほとんどが家屋害虫化している稀有なグループであるが、配偶者識別、ひいては種分化に重要な役割を果たす性フェロモンの主成分は多くの種において特定されていない。ゴキブリではメスが性フェロモンを放出し、オスがそこに誘引されることで、交尾が成立する。本研究では *Periplaneta* 属のゴキブリ 13 種を対象とし、性フェロモン処理に特化した介在ニューロンの形態や応答特性を機能解剖学と *in vivo* 細胞内記録により精査する。この情報を行動アッセイと照合し、各種がどのフェロモンを主成分として利用しているのかを特定する。また、フェロモン成分と系統樹や種特異的な性質との機能的リンクを探ることで、家屋のような閉鎖環境に適応した昆虫の配偶システムの進化を紐解くことを目標とする（西野）。

#### 飛来虫の光源定位様式の解明

道内では幼虫の生態調査により、2025 年から 11 年ぶりのマイマイガの大発生が起こることが確実視されている。ひとたび大発生がおこると、そのトレンドは 2~3 年持続する。マイマイガの大発生時には光源の仕様を変化させたときの定位行動を短期間で定量的に評価することが容易となる（Komatsu et al. 2020）。この機を逃さず、8~9月

に札幌市郊外でフィールド試験を実施し、光源波長、背景色を変化させたときの定位行動を暗視野ビデオカメラによって撮影する。その飛翔軌跡を解析することで、光源のどのような物理的属性がマイマイガの誘引/定着を引き起こすのかを明らかにし、その知見を逆用することで、風力発電のブレードや建物の外壁などへの昆虫の定着を防ぐ仕様を解明することを目標とする（西野）。

#### 非局所項を持つ数理モデルの数理解析

今後引き続き、非局所項を持つ数理モデルに対する解析手法の構築を進めていく。解の時空間ダイナミクスに注目して、曲面上のパターンの挙動、分岐の観点から見た解構造と非局所項の関係性、時間非局所性における初期状態と漸近形の対応づけなど、理解が十分に進んでいない話題を取り上げて解析を進める。まずは、具体的なモデル解析を通じて、非局所項が解の時空間ダイナミクスに与える影響を明らかにすることを旨とする。これらの解析結果を通じて、統一的な視点を与えられないかを考察していく。（石井）

## 4. 資料

### 4.1 学術論文（査読あり）

- 1) T. Nohara, J. Kumamoto, Y. Mai, M. Shimano, S. Kato, H. Kitahata, H. Nakamura, S. Takashima, M. Watanabe, M. Nagayama, T. Oikawa, H. Ujiie, and K. Natsuga, Spatial confinement induces reciprocating migration of epidermal keratinocytes and forms triphasic epithelia, *eLife* 14, RP105192 (2025). (DOI: 10.7554/eLife.105192.1)
- 2) 【電子研内共著】K. Xiong\*, M. Nagayama, K. Ijiro and H. Mitomo, Fair surface modification with mixed alkane thiols on gold nanoparticles through minimal unfair ligand exchange, *Nanoscale Adv.* 6, 4583-4590 (2024). (DOI: 10.1039/D4NA00270A)
- 3) H. Ishii\*, Propagating front solutions in a time-fractional Fisher-KPP equation, *Discrete and Continuous Dynamical Systems Series B* 30, 2460-2482 (2024). (DOI: 10.3934/dcdsb.2024173)
- 4) H. Ishii\*, Asymptotic profiles of zero points of solutions to the heat equation, *Proceedings of The American Mathematical Society* 152, 4451-4461 (2024). (DOI: 10.1090/proc/16934)
- 5) J. Eom\*, W. -K. Park, Real-time detection of small objects in transverse electric polarization: Evaluations on synthetic and experimental datasets, *AIMS Mathematics* 9(8), 22665-22670 (2024). (DOI: 10.3934/math.20241104)
- 6) K. Kagawa\*, Y. Yamazaki, Critical slowing down for relaxation in the Cahn-Hilliard equation with dynamic boundary conditions, *JSIAM Letters* 16, 73-76 (2024). (DOI: 10.14495/jsiaml.16.73)
- 7) S. Uchiyumi\*, A finite element/polynomial spectral mixed approximation for the Stokes problem, *Results in Applied Mathematics* 25, 100550 (2025). (DOI: 10.1016/j.rinam.2025.100550)
- 8) H. Itou\*, V. A. Kovtunencko, G. Nakamura, Forward and inverse problems for creep models in viscoelasticity, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 382, 20230295 (2024). (DOI: 10.1098/rsta.2023.0295)
- 9) E. Avalos\*, T. Teramoto, Y. Hirai, H. Yabu, Y. Nishiura, Controlling the Formation of Polyhedral Block Copolymer Nanoparticles: Insights from Process Variables and Dynamic Modeling, *ACS Omega* 9, 17276-17288 (2024). (DOI: 10.1021/acsomega.3c10302)
- 10) S. Rahman, K. Terao, K. Hashimoto, and M. Mizunami\*, Independent operations of appetitive and aversive conditioning systems lead to simultaneous production of conflicting memories in an insect, *Proc. R. Soc. B* 291, 20241273 (2024). (DOI: 10.1098/rspb.2024.1273)

- 1 1) 【電子研内共著】 K. Tateishi, T. Watanabe, M. Domae, A. Ugajin, H. Nishino, H. Nakagawa, M. Mizunami, and H. Watanabe\*, Interactive parallel sex pheromone circuits that promote and suppress courtship behaviors in the cockroach, *PNAS Nexus* 3, 162 (2024). (DOI: 10.1093/pnasnexus/pgae162)
- 1 2) Y. Matsumoto\*, C. S. Matsumoto, M. Mizunami, Critical roles of nicotinic acetylcholine receptors on olfactory memory formation and retrieval in crickets, *Front. Physiol.* 15, 1345397 (2024). (DOI: 10.3389/fphys.2024.1345397)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

- 1) Eom Junyong, 内海晋弥, 上田祐暉, Gao Yueyuan, 中岡慎治, 水藤寛, 久米真司, 片桐秀樹, 長山雅晴, “Parameter estimation and analysis of 9-compartment mathematical model for glucose-insulin dynamics”, 計算工学講演会論文集, 29 (2024).
- 2) 香川溪一郎, 奥村真善美, 小林康明, Duligengaowa Wuergezhen, 森田梨津子, 藤原裕展, 長山雅晴, “線維芽細胞に注目した毛包形態形成の数理モデル”, 計算工学講演会論文集, 29 (2024).

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 長山雅晴, 香川溪一郎, 細胞と ECM を統合した毛包形態形成の数理モデル, 月刊「細胞」, 57(3), 23-26 (2025).
- 2) M. Mizunami\*, and N. Yamagata, Editorial overview: Aroma nudges in bugs: Sensory perception and memory in insects, *Curr. Opin. Insect Sci.* 62, 101165 (2024). (DOI: 10.1016/j.cois.2024.101165)

#### 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) G. Nakamura, “Relaxation tensor for extended Burgers models”, Days on Diffraction 2024, Mini-symposium “Inverse Problems”, St. Petersburg, Russia, June 11<sup>th</sup>, 2024.
- 2) Y. Nishiura, “Annihilation tongue”, Equadiff 2024, MS8: Dynamics of localized patterns -the interplay between intrinsic and extrinsic instabilities, Karlstad, Sweden, June 13<sup>th</sup>, 2024.
- 3) G. Nakamura, “Spring-dashpot models and Boltzmann-type viscoelastic systems”, Colloquium Talk at CIME Summer School “Inverse Problems and Controllability for PDE into the direction of nonlocal operators”, Montecatini Terme, Italy, June 21<sup>st</sup>, 2024.
- 4) M. Nagayama, “Reaction-diffusion type modeling of the self-propelled object motion”, The 14th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications, Abu Dhabi, UAE, December 18<sup>th</sup>, 2024.
- 5) H. Ishij, “Propagating front solutions to Fisher-KPP equation with time-fractional derivative”, The 14th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications, Abu Dhabi, UAE, December 18<sup>th</sup>, 2024.
- 6) M. Mizunami, “Principles of Pavlovian learning in crickets: Their conservation to mammals”, 2<sup>nd</sup>-NTrAMS, (The 2<sup>nd</sup> Non-Traditional Arthropod Motor Systems), Tokyo, August 22<sup>nd</sup>, 2024.

##### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) K. Kagawa, “Exploration of the mechanism of hair follicle morphogenesis based on a mathematical model integrating ECM and multicellularity”, The 56th Annual Meeting of

the Japanese Society for Matrix Biology and Medicine (第56回日本結合組織学会学術大会), つくば国際会議場, 茨城県筑波市, 2024年6月16日.

- 2) 西浦廉政, “数理モデルがもたらす新たな世界観”, 日本応用数理学会 2024 年度年会, 京都大学, 京都府京都市, 2024年9月15日.

##### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) S. Uchiumi, “A finite element / spectral mixed approximation for the Stokes problem”, EASIAM 2024, Macau, China, June 30<sup>th</sup>, 2024.
- 2) K. Terao, B. Alvarez, S. Fujimaki, Y. Kosaki, Y. Matsumoto, M. Mizunami, “Extinction and underlying mechanisms in classical conditioning in an insect”, ICE, Kyoto, August 27<sup>th</sup>, 2024.
- 3) H. Watanabe, K. Tateishi, T. Watanabe, A. Ugajin, H. Nishino, M. Mizunami, “Interactive parallel sex pheromone circuits that promote and suppress courtship behaviors in the cockroach”, 2<sup>nd</sup>-NTrAMS, (The 2<sup>nd</sup> Non-Traditional Arthropod Motor Systems), Tokyo, August 23<sup>rd</sup>, 2024.

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 香川溪一郎, 奥村真善美, 小林康明, Duligengaowa Wuergezhen, 森田梨津子, 藤原裕展, 長山雅晴, “線維芽細胞に注目した毛包形態形成の数理モデル”, 第29回計算工学講演会, 神戸国際会議場, 兵庫県神戸市, 2024年6月10日.
- 2) Eom Junyong, 内海晋弥, 上田祐暉, Gao Yueyuan, 中岡慎治, 水藤寛, 久米真司, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース・インスリンダイナミクスを記述する体循環数理モデルとパラメータ推定及び解析”, 第29回計算工学講演会, 神戸国際会議場, 兵庫県神戸市, 2024年6月10日.
- 3) 内海晋弥, “Stokes 問題の有限要素/スペクトル混合近似に現れる inf-sup 定数について”, 第29回計算工学講演会, 神戸国際会議場, 兵庫県神戸市, 2024年6月12日.
- 4) 長山雅晴, Junyong Eom, 上田祐暉, 内海晋弥, Yueyuan Gao, 水藤寛, 片桐秀樹, “データから未病にアプローチする数理科学—グルコース・インスリン体循環数理モデリングとデータ解析—”, 第45回日本炎症・再生医学会, 福岡国際会議場, 福岡県福岡市, 2024年7月17日.
- 5) Junyong Eom, Shuli Chen, 中村玄, 西村吾朗, “Approximation peak time to time-domain fluorescence diffuse optical tomography for finite fluorescence lifetime”, 日本数学会 2024 年度秋季総合分科会, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2024年9月5日.
- 6) 上田祐暉, Eom Junyong, 内海晋弥, Yueyuan Gao, 水藤寛, 久米真司, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース・インスリン代謝動態モデルの構築とパラメータ推定”, 日本数学会 2024 年度秋季総合分科会, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2024年9月5日.
- 7) 石井宙志, “非整数階時間微分を持つ Fisher-KPP 方程式の進行波解について”, 日本数学会 2024 年度秋季総合分科会, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2024年9月6日.
- 8) 香川溪一郎, 奥村真善美, 小林康明, Duligengaowa Wuergezhen, 森田梨津子, 藤原裕展, 長山雅晴, “細胞周期と細胞外環境を制御する数値シミュレーションに基づく毛包形態形成の再現”, 日本応用数理学会 2024 年度年会, 京都大学, 京都府京都市, 2024年9月14日.
- 9) Eom Junyong, 長山雅晴, 内海晋弥, 上田祐暉, 中岡慎治, 水藤寛, 片桐秀樹, “9-コンパートメントグルコース・インスリン体循環数理モデルを用いた時系列マウスデータ解析”, 日本応用数理学会 2024 年度年会, 京都大学, 京都府京都市, 2024年9月14日.
- 1 0) 内海晋弥, Eom Junyong, 上田祐暉, Yueyuan Gao, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “9-コンパートメントグルコース・インスリン体循環数理モデルのパラメータ推定及び関連する医学的知見の考察”, 日本応用数理学会 2024 年度年会, 京都大学, 京都府京都市, 2024年9月14日.

- 1 1) 内海晋弥, 上田祐暉, Eom Junyong, 野田裕真, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “事前情報を用いるグルコース-インスリン代謝動態モデルのパラメータ推定とその安定性”, 日本応用数学会 第21回研究部会連合発表会, 岡山大学 (岡山大学), 2025年3月5日.
  - 1 2) Eom Junyong, 内海晋弥, 上田祐暉, 野田裕真, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース・インスリンダイナミクスを記述する数理モデルとパラメータ推定”, 2025年度日本数学会秋季総合分科会, 早稲田大学, 東京都, 2025年3月20日.
  - 1 3) 内海晋弥, “粗なメッシュ上の高次圧力近似空間を用いる Stokes 問題のための混合 Galerkin 法”, 2025年度日本数学会秋季総合分科会, 早稲田大学, 東京都, 2025年3月21日.
  - 1 4) 香川溪一郎, 渡辺毅, 西浦廉政, “連立 Cahn-Hilliard 方程式系の自由エネルギー風景の大域的探索”, 日本数学会 2025年度年会, 早稲田大学, 東京都, 2025年3月21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) Y. Ueda, Y. Giga, “Time periodic profile on a diffusion equation model to describe a bubble cluster with rupture”, Hokudai-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Yang-Ming Chiao-Tung University, Hsinchu, Taiwan, April 11th, 2024.
  - 2) S. Uchiumi, “A finite element / spectral mixed approximation for the Stokes problem”, Hokudai-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Yang Ming Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, April 11th, 2024.
  - 3) K. Kagawa, M. Okumura, Y. Kobayashi, D. Wuergezhzen, R. Morita, H. Fujiwara, M. Nagayama, “Mathematical model of hair follicle morphogenesis focusing on fibroblasts”, Hokudai-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Yang Ming Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, April 12th, 2024.
  - 4) H. Ishij, “On the propagation of solutions to Fisher-KPP type equation with time-fractional derivative”, Hokudai-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Yang Ming Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, April 12th, 2024.
  - 5) H. Ishij, “Pattern Formation in Mathematical Models Including Neuronal Interaction Effects”, Digital Brain seminar - 2nd seminar, Zoom, April 22nd, 2024.
  - 6) Y. Giga, Y. Ueda, “Time periodic profile on a diffusion equation model to describe a bubble cluster with rupture”, PDE seminar, Hokkaido University, Sapporo, Japan, May 31st, 2024.
  - 7) G. Nakamura, “Analysis for viscoelastic models”, Minisymposium “Inverse Problem Theory for Innovation of Detection Methods”, IPMS2024, Malta, May 28th, 2024.
  - 8) Y. Ueda, Y. Giga, “Numerical computation for 4th order total variation flow”, The 81st Fujihara Seminar: Mathematical Aspects for Interfaces and Free Boundaries 2024, Hilton Niseko Village, Niseko, Hokkaido, June 5th, 2024.
  - 9) 長山雅晴, Junyong Eom, 上田祐暉, 内海晋弥, Yueyuan Gao, 水藤寛, 片桐秀樹, “グルコース・インスリン体循環数理モデルを用いた OGTT データ解析”, 第1回プロジェクト横断型 数理連携研究会, 東京大学鉄門記念講堂, 東京都文京区, June 12th, 2024.
  - 1 0) S. Uchiumi, “A finite element / spectral mixed approximation for the Stokes problem”, Workshop on Numerical Methods and Analysis for PDEs, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China, June 27th, 2024.
  - 1 1) Y. Ueda, Y. Giga, “Time periodic profile on a diffusion equation model to describe a bubble cluster with rupture”, Workshop on Numerical Methods and Analysis for PDEs, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China, June 27th, 2024.
  - 1 2) 石井宙志, “非局所反応拡散方程式の解の時空間ダイナミクスにおける積分核形状の影響”, 北海道大学理学研究院数学部門談話会, 北海道大学理学部, 北海道札幌市, 2024年7月4日.
  - 1 3) 内海晋弥, “流体問題の混合ガレルキン近似と関連する連立一次方程式の反復解法”, 第153回 HMMC セミナー, 北海道大学電子科学研究所, 北海道札幌市, 2024年7月10日.
  - 1 4) 上田祐暉, 儀我美一, “泡の破裂を表現する簡易モデルの時間周期的な挙動について”, 社会連携講座「冷媒熱流体の数理」公開シンポジウム, 東京大学大学院数理科学研究科 (東京都), 2024年7月18日.
  - 1 5) 西野浩史, “昆虫の光源定位の原理に根ざした誘引 (非誘引) 光源の開発”, 大学見本市 2024~イノベーション・ジャパン, 東京ビッグサイト(東京都), 2024年8月22日.
  - 1 6) 石井宙志, “時間非整数階微分を持つ Fisher-KPP 型方程式の解の伝播について”, 第1回北見数理科学研究会, 北見工業大学, 北海道北見市, 2024年8月26日.
  - 1 7) 野田裕真, 上田祐暉, Eom Junyong, 内海晋弥, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース・インスリンダイナミクスを記述する体循環数理モデル”, 札幌非線形現象研究会 2024, 北海道大学電子科学研究所, 北海道札幌市, 2024年8月21日.
  - 1 8) 本橋樹, 長山雅晴, “反応拡散系による自己駆動体運動モデル”, 札幌非線形現象研究会 2024, 北海道大学電子科学研究所, 北海道札幌市, 2024年8月20日.
  - 1 9) Y. Ueda, J. Eom, S. Uchiumi, Y. Noda, H. Suito, S. Kume, H. Katagiri, M. Nagayama, “Mathematical modeling and parameter estimation of Glucose-Insulin metabolism dynamics”, Finland-Japan workshop in industrial and applied mathematics, University of Helsinki, Helsinki, Finland, August 26th, 2024 (Poster).
  - 2 0) K. Kagawa, M. Okumura, Y. Kobayashi, D. Wuergezhzen, R. Morita, H. Fujiwara, M. Nagayama, “Reproduction of hair follicle morphogenesis based on numerical simulation controlling cell cycle and extracellular matrix”, Finland-Japan workshop in industrial and applied mathematics, University of Helsinki, Helsinki, Finland, August 26th, 2024 (Poster).
  - 2 1) S. Uchiumi, J. Eom, Y. Ueda, Y. Noda, S. Nakaoka, H. Suito, H. Katagiri, M. Nagayama, “Time series analysis of glucose-insulin data from mice fed high-fat diet by 9-compartment model”, Finland-Japan workshop in industrial and applied mathematics, University of Helsinki, Helsinki, Finland, August 26th, 2024 (Poster).
  - 2 2) J. Eom, S. Chen, G. Nakamura, G. Nishimura, “Approximation peak time to time-domain fluorescence diffuse optical tomography for finite fluorescence lifetime”, 7th Joint Conference of A3 Foresight Program on Computational and Applied Mathematics, East Lake International Conference Center (Wuchang District, Wuhan, China), August 30th, 2024 (Poster).
  - 2 3) 内海晋弥, Eom Junyong, 上田祐暉, 野田裕真, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “9 コンパートメントモデルによるグルコース・インスリン代謝の解析”, 第2回 MfIP 連携探索ワークショップ, 大阪公立大学 学術情報総合センター, 大阪府大阪市, 2024年9月17日 (Poster).
  - 2 4) 香川溪一郎, “細胞と細胞外環境を統合した数理モデルに基づく毛包形態形成メカニズムの探究”, 2024年度バイオメカニクス研究会, 角館駅近貸会議室, 秋田県仙北市, 2024年9月19日.
  - 2 5) 香川溪一郎, 奥村真善美, 小林康明, Duligengaowa Wuergezhzen, 森田梨津子, 藤原裕展, 長山雅晴, “毛包形態形成を再現する数理モデル”, 第18回応用数理研究会, 休暇村能登千里浜, 石川県羽咋市, 2024年9月26日.
  - 2 6) 上田祐暉, Eom Junyong, 内海晋弥, Yueyuan Gao, 水藤寛, 久米真司, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース-インスリン代謝動態モデルのパラメータ推定”, 第18回応用数理研究会, 休暇村能登千里浜, 石川県羽咋市, 2024年9月26日.
  - 2 7) Li Yiwei, 長山雅晴, “排除体積効果を持つ自己駆動体モデルを用いた Catch & Release 現象の再現”, 第18回応用数理研究会, 休暇村能登千里浜, 石川県羽咋市, 2024年9月26日.

- 2 8) 本橋樹, 長山雅晴, “反応拡散系による自己駆動体運動モデル”, 第 18 回応用数理研究会, 休暇村能登千里浜, 石川県羽咋市, 2024 年 9 月 27 日.
- 2 9) 野田裕真, 上田祐暉, Eom Junyong, 内海晋弥, 水藤寛, 片桐秀樹, “グルコース, インスリン, C ペプチドを記述する体循環数理モデル”, 第 18 回応用数理研究会, 休暇村能登千里浜, 石川県羽咋市, 2024 年 9 月 27 日.
- 3 0) 西浦廉政, “プラトン立体とナノ微粒子”, 数学と材料科学 2024, 東北大学, 宮城県仙台市, 2024 年 9 月 27 日.
- 3 1) 石井宙志, “非整数階時間微分を持つ Fisher-KPP 方程式の進行波解について”, 第 115 回京都駅前セミナー, キャンパスプラザ京都, 京都府京都市, 2024 年 10 月 11 日.
- 3 2) Eom Junyong, 長山雅晴, 内海晋弥, 上田祐暉, 中岡慎治, 久米真司, 水藤寛, 片桐秀樹, “グルコースインスリン多臓器循環モデルに対するパラメータ推定及び解析”, RIMS 研究集会「研究計算科学に資する数値解析学の展開」, 京都大学数理解析研究所, 京都府京都市, 2024 年 10 月 24 日.
- 3 3) 石井宙志, “非整数階時間微分を持つ Fisher-KPP 方程式の進行波解について”, Okayama Workshop on Partial Differential Equations, 岡山大学理学部, 岡山県岡山市, 2024 年 10 月 26 日.
- 3 4) M. Nagayama, “Reaction-diffusion type modeling of the self-propelled object motion”, RIMS conference "Integration of theory and application for a deeper understanding of nonlinear phenomena", Kyoto University, Kyoto, Japan, October 31<sup>st</sup>, 2024.
- 3 5) Eom Junyong, “蛍光拡散トモグラフィにおける近似ピークタイムとその応用”, 第 18 回岡山応用数学セミナー, 岡山理科大学, 岡山県岡山市, 2024 年 11 月 22 日.
- 3 6) 長山雅晴, “グルコース・インスリン・C-ペプチド動態体循環モデルと数理モデルを用いた経口糖負荷試験データ解析”, データ計算科学セミナー, 兵庫県立大学神戸情報科学キャンパス, 兵庫県神戸市, 2024 年 11 月 27 日.
- 3 7) 長山雅晴, 榎原航也, 物部治徳, 中村健一, 小林康明, 北畑裕之, “自己駆動体運動の反応拡散系モデル”, 現象と数理のモデル 2024, ANA クラウンプラザホテル松山, 愛媛県松山市, 2024 年 12 月 2 日.
- 3 8) 野田裕真, Eom Junyong, 内海晋弥, 上田祐暉, 中岡慎治, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース・インスリン・C-ペプチド動態を記述する体循環数理モデルを用いたデータ解析”, 2024 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 滋賀県大津市, 2024 年 12 月 5 日.
- 3 9) 内海晋弥, “Stokes 問題の粗密メッシュ混合 Galerkin 近似”, 2024 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 滋賀県大津市, 2024 年 12 月 5 日.
- 4 0) 香川溪一郎, 奥村真善美, 小林康明, Duligengaowa Wuergezhen, 森田梨津子, 藤原裕展, 長山雅晴, “数理皮膚科学の展開—器官形成(毛包)—”, 2024 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 滋賀県大津市, 2024 年 12 月 6 日.
- 4 1) 長山雅晴, “数理皮膚科学の展開”, 2024 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 滋賀県大津市, 2024 年 12 月 6 日.
- 4 2) 上田祐暉, Eom Junyong, 内海晋弥, 野田裕真, 水藤寛, 片桐秀樹, 長山雅晴, “グルコース-インスリン代謝動態モデルの構築とパラメータ推定”, 2024 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 滋賀県大津市, 2024 年 12 月 6 日.
- 4 3) Eom Junyong, 中村玄, 西村吾朗, Chen Shuli, “蛍光拡散トモグラフィにおけるピークタイムとその応用”, 2024 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 滋賀県大津市, 2024 年 12 月 5 日.
- 4 4) Y. Nishiura, “Annihilation tongue”, Dynamics Days Sapporo 2024, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, December 9<sup>th</sup>, 2024.
- 4 5) Y. Ueda, J. Eom, S. Uchiumi, Y. Noda, H. Suito, H. Katagiri, M. Nagayama, “Mathematical Modeling of Glucose-Insulin Metabolism Dynamics and a Bayesian Approach”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium [緯], Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster).
- 4 6) S. Uchiumi, “Galerkin approximation of the Stokes problem using coarse and dense meshes”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium [緯], Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster).
- 4 7) N. Motohashi, M. Nagayama, H. Kitahata, S. Nakata, K. Sakakibara, K. Takasao, T. Fujino, H. Monobe, K. Nakamura, “Toward a More General Model of a Self-Propelled System”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium [緯], Hokkaido University Sapporo, Hokkaido, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster).
- 4 8) J. Eom, S. Chen, G. Nakamura, G. Nishimura, “Approximate peak time to time-domain fluorescence diffuse optical tomography”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium [緯], Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster).
- 4 9) K. Kagawa, M. Okumura, Y. Kobayashi, D. Wuergezhen, R. Morita, H. Fujiwara, M. Nagayama, “A mathematical model reproducing hair follicle morphogenesis and its application”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium [緯], Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, December 10<sup>th</sup>, 2024 (Poster).
- 5 0) K. Kagawa, M. Okumura, Y. Kobayashi, D. Wuergezhen, R. Morita, H. Fujiwara, M. Nagayama, “A mathematical model reproducing hair follicle morphogenesis and its application”, CREST 多細胞領域第 6 回領域会議, プラサヴェルデ, 静岡県沼津市 2024 年 12 月 17 日 (Poster).
- 5 1) Y. Nishiura, “High-index saddles and hidden singularities”, International Active Matter Workshop 2025, Meiji University, Tokyo, January 9<sup>th</sup>, 2025.
- 5 2) 香川溪一郎, “毛包の形態形成に対する数理モデルからのアプローチ”, マルチモデル ECM 若手の会 2025, パナソニックリゾート大阪, 大阪府吹田市, 2025 年 1 月 9 日.
- 5 3) Y. Ueda, “Survey and Application of Bayesian Inference to Inverse Problem”, International Workshop on Multi-phase Flows: Analysis, Modelling and Numerics, Waseda University, Tokyo, January 10<sup>th</sup>, 2025.
- 5 4) 石井宙志, “非局所反応拡散方程式のパターン形成問題”, 応用数学研究交流会 2025 (冬), 北海道大学, 北海道札幌市, 2025 年 2 月 5 日.
- 5 5) 長山雅晴, “数理モデルの社会応用”, 応用数学研究交流会 2025 (冬), 北海道大学, 北海道札幌市, 2025 年 2 月 8 日.
- 5 6) 長山雅晴, “自己駆動体運動の反応拡散系モデリング”, 北陸応用数理研究会 2025, 石川県しいのき迎賓館, 石川県金沢市, 2025 年 2 月 22 日.
- 5 7) 西浦廉政, “隠れた不安定性と数理モデル”, 大阪公立大学 2024 年度 FD 研修会「科学計算と数学」, 大阪公立大学, 大阪府大阪市, 2025 年 3 月 7 日.
- 5 8) 渡邊陸, 石井宙志, “楕円体上の神経場方程式に現れるスポット解の挙動”, 第 3 回 MfP 連携探索ワークショップ, 武蔵野大学, 東京都, 2025 年 3 月 14 日 (ポスター).
- 5 9) 香川溪一郎, 渡辺毅, 西浦廉政, “Cahn-Hilliard 方程式系の自由エネルギー風景の大域的探索”, 数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会 2025, JST 東京本部別館, 東京都, 2025 年 3 月 16 日 (ポスター).
- 6 0) 本橋樹, “表面張力差で駆動する変形しない自己駆動系の反応拡散・界面モデルによる数値解析”, 数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会 2025, JST 東京本部別館, 東京都, 2025 年 3 月 16 日 (ポスター).

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) Hokudai-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Yang-Ming Chiao-Tung University, Taipei, Taiwan, April 11-12<sup>th</sup>, 2024.
- 2) 応用数学交流研究会, 北海道大学電子科学研究所, 北海道札幌市 (日本), 2024 年 5 月 31 日~6 月 1 日.

- 3) 札幌非線形現象研究 2024, 北海道大学電子科学研究所, 北海道札幌市 (日本), 2024年8月20日~22日.
- 4) 応用数学交流研究会 2025 (冬), 北海道大学電子科学研究所, 北海道札幌市 (日本), 2025年2月5日~8日.
- 5) 北陸応用数理研究会, 石川県政記念しいのき迎賓館, 石川県金沢市 (日本), 2025年2月20日~22日.
- 6) 非線形現象の数値シミュレーションと解析 2025, 北海道大学理学部, 北海道札幌市 (日本), 2025年3月3日~4日.

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 長山雅晴 (中田 聡, 広島大学) “外場に特徴的に応答する自己駆動体の構築”.
- 2) 長山雅晴 (小谷野 由紀, 神戸大学) “流動と拡散の共同現象”.
- 3) 長山雅晴 (物部 治徳, 大阪公立大学) “準面積保存する自由境界問題とスポットパターン”.
- 4) 長山雅晴 (三浦 岳, 九州大学) “腎臓足細胞のパターン形成の数理モデリング”.
- 5) 長山雅晴 (佐藤 純, 金沢大学) “粒子モデルによる細胞接着の理論解析および実験的検証”.
- 6) 長山雅晴 (北畑 裕之, 千葉大学) “応力分布を考慮した液滴・細胞運動の数理モデルの構築および解析”.
- 7) 長山雅晴 (藤原 裕展, 理化学研究所) “毛包形成メカニズムの数理モデルによる解明”.

##### b. 国際共同研究

- 1) M. Mizunami (B. Alvarez, University of Oviedo, Spain), “Learning in insects”.

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 長山雅晴, 株式会社資生堂, “皮膚数理モデルの視覚的改良”.
- 2) 西野浩史, アース製薬, “細胞内記録による昆虫行動制御物質の探索と応用利用”, 2024年4月~2026年3月 (予定).
- 3) 西野浩史, Nanosuit 株式会社, “昆虫視覚行動とスペクトルの関連の研究”, 2024年11月~2025年3月.

#### 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), 学術変革領域研究 (A), “多細胞-ECMの統合的な三次元力学動態の構築”, 2023年4月~2028年3月.
- 2) 長山雅晴 (代表), 基盤研究 (B), “自己駆動体の集団運動に対する数理モデリングと数理解析”, 2021年4月~2025年3月.
- 3) 長山雅晴 (分担), 基盤研究 (B) 代表: 北畑裕之 (千葉大学), “濃度場を通して相互作用する自己駆動体粒子系モデルの構築と解析”, 2021年3月~2025年3月.
- 4) 長山雅晴 (分担), 基盤研究 (B) 代表: 夏賀健 (北海道大学), “表皮水疱症の創傷治癒遅延因子の同定とその克服”, 2023年4月~2026年3月.
- 5) 長山雅晴 (分担), 学術変革領域研究 (A) 代表: 藤原裕展 (理化学研究所), “領域研究「細胞外情報を統御するマルチモーダル ECM」との統括と運営”, 2023年4月~2028年3月.
- 6) 西野浩史 (代表), 基盤研究 (C), “比較神経行動学によるゴキブリの性ホルモン処理系の機能構築の

解明”, 2023年4月~2026年3月.

- 7) 石井宙志 (代表), 若手研究, “非局所反応拡散方程式のパターン形成における積分核形状の影響の解析”, 2023年4月~2028年3月.
- 8) 石井宙志 (分担), 基盤研究 (A) 代表: 村川秀樹 (龍谷大学), “細胞選別現象の数理解析”, 2024年4月~2029年3月.
- 9) EOM Junyong (代表), 研究活動スタート支援, “蛍光拡散トモグラフィに於ける短時間漸近解析とその応用”, 2023年8月~2025年3月.
- 10) 香川溪一郎 (代表), 研究活動スタート支援, “境界での時間発展を考慮した Cahn-Hilliard 方程式の解のダイナミクス探索”, 2023年8月~2025年3月.
- 11) 上田祐暉 (代表), 若手研究, “流体問題の数値計算手法におけるパラメータの選択について”, 2021年4月~2027年3月.
- 12) 内海晋弥 (代表), 若手研究, “高レイノルズ数流れに頑強で領域に柔軟な有限要素/スペクトル法とその解の品質評価”, 2021年4月~2025年3月.
- 13) 中村玄 (代表), 基盤研究 (C), “粘・弾性方程式の逆問題解析の研究”, 2022年4月~2025年3月.
- 14) 西浦廉政 (代表), 挑戦的研究 (萌芽), “最不安定解から見るポテンシャル風景と時定数問題”, 2023年6月~2025年3月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 長山雅晴, JST CREST, “体表多様性を創発する上皮一層充織相互作用の動的制御機構の解明”, 2019年10月~2025年3月.
- 2) 長山雅晴, JST ムーンショット型研究開発事業, “恒常性の理解と制御による糖尿病および併発疾患の克服”, 2020年~2026年3月.
- 3) 長山雅晴, JST 研究成果展開事業 共創の場形成支援プログラム, “こころとカラダのライフデザイン共創拠点”, 2021年11月~2031年3月.

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

- 1) 香川溪一郎, 毛包の形態形成に対する数理モデルからのアプローチ, マルチモーダル ECM 若手の会 2025 優秀発表賞 (ポストドク部門), 2025年1月9日.

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

- 1) 長山雅晴, 専門調査員, 文部科学省 科学技術・学術制作研究所 科学技術予測センター, 2014年4月~.
- 2) 石井宙志, 専門調査員, 文部科学省 科学技術・学術制作研究所 科学技術予測センター, 2024年4月~.

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 長山雅晴, 学術委員会委員 (日本応用数理学会), 2024年4月~
- 2) 西野浩史, 編集長 (日本比較生理生化学会), 2024年1月~.
- 3) 西野浩史, 評議員 (日本比較生理生化学会), 2023年1月~.
- 4) 西野浩史, 寄付委員 (日本動物学会), 2021年7月~.
- 5) 石井宙志, 総務委員会委員 (日本応用数理学会), 2024年10月~.
- 6) M. Mizunami, Zoological Science, (The Zoological Society of Japan) Advisory Board Member.

**c. 兼任・兼業**

- 1) 長山雅晴, 産業創出事業 北の社会イノベーション部門 兼務教員 (北海道大学 産学・地域協働推進機構) 2023年4月~2025年3月.
- 2) 長山雅晴, 明治大学共同利用・共同研究拠点「現象数理学研究拠点」運営委員 (明治大学先端数理科学員ステイチュート), 2024年4月~.
- 3) 長山雅晴, 兼務教員 (北海道大学 人間知・脳・AI 研究教育センター), 2023年4月~.
- 4) 西野浩史, 科学技術・学術政策専門調査員 (文部科学省), 2021年5月~2025年3月.

**d. 外国人研究者の招聘**

- 1) Prof. Ching-Lung Lin, 台湾成功大学, 2024年7月2日~16日.
- 2) Prof. Mamohan Vashisth, Indian Institute of Technology, 2024年7月13日~23日.
- 3) Prof. Roland Pottgast, University of Reading/ドイツ気象局, 2025年2月22日~3月5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, 環境と人間, 長山雅晴, 夏ターム
- 2) 理学部3年生, 数理学A, 長山雅晴, 2学期
- 3) 大学院生, 行動システム制御科学特論, 西野浩史 (分担), 2024年度前期
- 4) 全学共通, 微積分学I, 石井宙志, 1学期
- 5) 理学部3年生, 数理学演習, 石井宙志, 2学期
- 6) 全学共通, 線形代数学I, 内海晋弥, 1学期
- 7) 全学共通, 微積分学I, Eom Junyong, 1学期
- 8) 全学共通, 微積分学I, 香川溪一郎, 1学期
- 9) 全学共通, 線形代数学I, 上田祐暉, 1学期

**f. 北大以外での非常勤講師 (対象、講義名、担当者、期間)**

該当なし

**g. アウトリーチ活動**

- 1) 長山雅晴, 国民との科学・技術対話事業アカデミックファンタジスタ2024 見学講義(北海道高等学校), 2025年1月31日.
- 2) 水波誠, “昆虫の学習と微小脳”, 春日部高校スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 授業, 2024年6月18日.

**h. 新聞・テレビ等の報道**

- 1) 堂前愛, 西野浩史, “道内ではなじみ薄いけど...ゴキブリ研究、北大に最前線”, 北海道新聞, 2025年03月18日.

**i. 客員教員・客員研究員など**

- 1) 中村 玄, 客員研究員, 北海道大学名誉教授, 2021年10月~.
- 2) 西浦 廉政, 客員研究員, 北海道大学名誉教授, 2021年10月~.
- 3) 水波 誠, 客員研究員, 北海道大学名誉教授, 2023年4月~.
- 4) Eom Junyong, 客員研究員, 2025年3月~.

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位: 2人

- 1) 野田 裕真, 理学研究院, 修士(理学), グルコース・インスリン・C-ペプチド動態を記述する体循環数理解モデル.
- 2) 本橋 樹, 理学研究院, 修士(理学), 自己駆動体運動の反応拡散系モデル.

博士学位: 0人

該当なし

## データ数理研究分野

### スタッフ

教授 小松崎 民樹 (博士 (理学)、2007年10月着任)  
准教授 田畑 公次 (博士 (情報科学)、2022年1月着任)

助教 水野 雄太 (博士 (学術)、2019年8月着任、  
2025年3月31日転出)、西村 吾朗 (博士 (理学)、2007  
年10月着任)

特任助教 Mikhail Tsitsvero (Ph.D (DIET)、2019年10  
月着任、2024年9月転出)、Jean-Emmanuel Clement (Ph.D  
(Physics)、2021年1月着任、2024年11月転出)

博士研究員 松村 祥宏 (博士 (工学)、2022年4月着  
任)、Zannatul Ferdous (博士 (生命)、2023年4月着任、  
2024年11月転出)、Hasan MD Al Mehedi (Ph. D (Engi-  
neering)、2024年4月18日着任)、Umer Umair (Ph.D  
(Chemical Physics)、2024年12月着任)

学術研究員 高見 亮佑、Kabir MD Humaun

事務補佐員 小井田 まつ枝

### 学生

博士課程 Abedin MD Menhazul、Mohammad Ali、  
Mohiuddin MD、近藤 僚哉、田中 綾一

修士課程 野永 竣太、菊池 健太、瀧川 颯士、野村 祐  
介

学 部 北野 颯志

## 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、マイクロレベルでの“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) 教師付き次元縮約を用いた化学反応における反応性クラスの次元縮約

遷移状態理論は多くの化学反応の速度をよく予測することができるが、一方でその理論が依拠する局所平衡仮定と非再交差仮定という二つの仮定を満たさないために、予測とは大きく異なる性質を示す反応も存在する。力学系理論は相空間内部に存在するチューブ状の構造の存在についての数学的な根拠を与え、そのチューブ状の構造によって前述の遷移状態理論の仮定に依らずに反応の運命を議論することができるが、多自由度系での計算は依然として大きな課題となっている。本研究では、高次元相空間に存在する島状の構造(反応島構造と呼ぶ)を低次元空間で示すための次元縮約手法を提案した。本研究の要点は、反応島構造が相空間座標と反応の運命(これを反応性ラベルと定義する)の依存関係であることに注目し、縮約された次元においてもこの依存関係ができる限り保たれるような次元縮約を見つけるという形で定式化し、これを教師付き次元縮約問題として解くという手法の提案である。提案した手法を、よく知られた2自由度モデルである Hénon-Heiles 系を拡張した  $n$  自由度モデルに適用した。本手法による結果は、naive に次元縮約した結果に対し、定性的・定量的に高次元の反応島構造を低次元によく反映したものであることが確かめられた。本研究の結果は *Journal of Chemical Physics* 誌上で出版された。

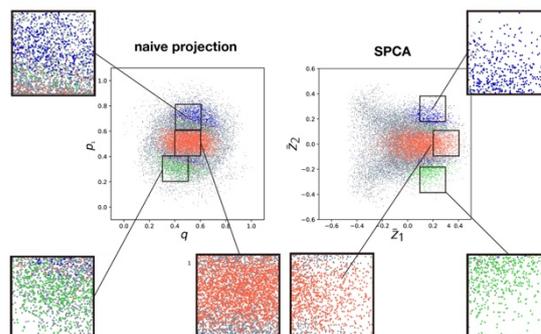


図 1. 自由度拡張 Hénon-Heiles 系における次元縮約の結果。右図が本手法、左図が比較対象である naive な次元縮約の結果である。本提案手法の方が、少数次元の空間においてラベルの混ざりのない少数次元の空間を取り出せていることがわかる。

### (2) テンソルネットワークを用いたリウヴィル方程式の数値計算法

従来の化学反応動力学では、統計力学的な確率分布から原子の位置や運動量のアンサンブルを生成し、それぞれの状態の時間発展をハミルトン系の運動方程式に基づいて計算し、その軌道の統計解析を行うトラジェクトリ計算が一般的であった。しかし、サンプル数が十分かどうかの不安や、稀にしか起こらない動力学的反応パターンを見逃すリ

スクが存在する。

これに対し、古典リウヴィル方程式 (Classical Liouville Equation, CLE) は確率分布そのものを初期条件として、その時間発展をハミルトン系として直接計算する手法である。もし CLE を正確に解くことができれば、トラジェクトリ計算での問題点を回避できる。

しかし、自由度が  $2N$  の系に対して CLE を有限差分法で解く場合、 $2N$  次元の確率分布関数と  $4N$  次元の時間発展演算子を扱う必要があり、次元数の増加に伴い計算コストが指数関数的に膨れ上がるため、実際に解くのは非常に困難である。

この課題を克服するため、テンソルトレイン分解によるデータ圧縮を用いて CLE を数値的に解いた。ポテンシャルとしては、2自由度の異性化反応モデルである De Leon-Berne ポテンシャルを採用した。CLE には運動量に関わる移流項と保存力に関わる移流項の二種類が存在するが、中心差分法を適用した場合、数値的な振動により解が不安定になる問題があった。

そこで、移流方程式の数値安定性に優れるとされる風上差分法を用いることで、解の安定性が改善された (図2)。さらに、従来のトラジェクトリ計算との比較においても、 $L^2$ ノルムの観点から風上差分法の方が中心差分法よりも高い精度を示すことが確認された。

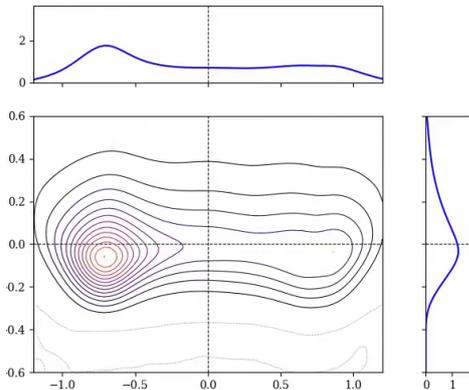


図2. 自由度系時間発展のスナップショット (等高線プロット: 二次元の位置に対する周辺分布、ジョイントプロット: 対応する一次元周辺分布)。

### (3) 量子動的モード分解アルゴリズム

我々は、量子コンピュータ上でシミュレートされた時系列データを解析する汎用量子アルゴリズムを開発した (図3)。水や空気の流れ、化学反応をはじめとする分子の運動、さらには感染症の流行などの動的現象は、微分方程式で記述される。微分方程式の数値シミュレーションは量子コンピュータの応用先としても期待されており、微分方程式を量子コンピュータ上で解くアルゴリズムの研究は多くある。それらの量子アルゴリズムは微分方程式の解 (i.e., 時系列データ) の情報を埋め込んだ量子状態を量子コンピュータ上で生成する。この量子状態に埋め込まれた時系列データの全部を古典コンピュータ上のデータとして取り出そうとすると、膨大な時間がかかることがこれまで問題とされてきた。本研究では、量子コンピュータ上でシミュレートされた時系列データに対して、量子コンピュータ上で動的モード分解とよばれる汎用量子解析法を適用し、動的現象の理解に本質的な情報を古典コンピュータ上に取り出す汎用アルゴリズムの開発に成功した。動的モード分解は、時系列データを、正弦的振動や指数関数的減衰、あるいはそれらを合わせた減衰振動といった基本的な時系列パターンの和に分解する。この時系列解析法は、流体力学や分子動

力学などの多くの分野で有効性が示されているほか、動的現象の本質を表す縮約モデルの構築とそれに基づく現象予測や制御への応用可能性も示されている。我々が提案した量子動的モード分解 (qDMD) アルゴリズムは、時系列データの次元  $N$  に対して、計算量が  $\log N$  の多項式程度である。一方で、既知の古典アルゴリズムでは、少なくとも  $N$  程度の計算量が必要になる。つまり、我々の量子アルゴリズムはこの点において指数加速を実現している。この研究成果により、流体力学や分子動力学などの大規模動的システム解析への量子コンピュータ応用の進展が期待される。本研究の成果は、アメリカ物理学会の『Physical Review Research』誌に掲載された [Phys. Rev. Research 6, 043031 (2024)]。

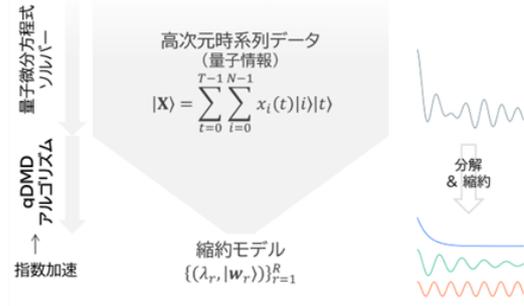


図3. 量子動的モード分解アルゴリズムの概念図。

### (4) イジング計算機を用いた列挙アルゴリズム

我々は、イジング計算機を用いて組合せ問題の解の全列挙をおこなうアルゴリズムを開発した。組合せ最適化問題や制約充足問題といった組合せ問題は、科学技術のさまざまな分野における意思決定において現れる。現実の応用では、最適解や制約充足解が複数存在する場合、それらすべてを列挙することが望ましいことが多く、これは意思決定の柔軟性を高めることにつながる。しかし、組合せ問題およびその列挙版は、組合せ爆発のために膨大な計算時間を要する問題であることが多い。これらの計算上の困難に対処するために、本研究では、イジング計算機を用いた組合せ最適化問題および制約充足問題のための列挙アルゴリズムを提案した。イジング計算機は、組合せ問題を効率的に解くように設計された専用計算機であり、一般に低コスト解 (i.e., 近似解) を確率的にサンプリングする。我々の列挙アルゴリズムは、望ましい解をすべて集めるために、解を繰り返しサンプリングする。提案するアルゴリズムの要点は、確率論に基づいて導かれるサンプリングの停止基準にある。特に、提案アルゴリズムは、低コストの解がより頻繁に、かつ同じコストの解が等確率でサンプリングされる場合に、列挙の失敗確率がユーザ指定の値以下に抑えられるという理論的保証を持つ。多くの物理ベースのイジング計算機は、これらの条件を (おおよそ) 満たすと期待される。実証として、我々はシミュレーテッドアニーリングを用いて、ランダムグラフ上の最大クリークの列挙に本アルゴリズムを適用した。その結果、提案アルゴリズムは、最大クリーク列挙専用設計された従来の分枝限定法よりも、大規模かつ密なグラフにおいて高速にすべての最大クリークを列挙することができた。これは、我々の提案手法の有望な可能性を示すものである。なお、本研究で提案したイジング計算機を用いた組合せ最適化問題のための列挙アルゴリズムは、次項で紹介する「イジング計算を用いた原子マッピング」を実現する要素技術として応用されている。本研究の成果は、プレプリントサーバーarXivにて公開されている [arXiv:2412.00284 (2024)]。

### (5) イジング計算を用いた原子マッピング

我々は、イジング計算を用いて原子マッピングをおこなう計算法を開発した(図4)。原子マッピングとは、与えられた化学反応式に対して反応物と生成物の原子の対応関係を求めることをいう。原子マッピング問題は化学反応のパターンを抽出することにもつながり、化学情報学における基本的問題である。しかし、原子マッピング問題を正確かつ高速に解くことは難しく、数学的に正確に解こうとすると組合せ爆発により計算量が急激に増大し、既知のデータから構築された反応ルールや機械学習モデルを利用した場合には正確さが低下することが知られている。そこで我々は、既存の化学反応データセットに依存せずに、原子マッピングを正確かつ高速に求めることを目的とし、「反応中で切断及び生成された結合の数を最小化する原子間対応(=反応物・生成物の原子の組合せ)」を求める組合せ最適化問題として、原子マッピング問題を定式化した。このように定式化された原子マッピング問題には、(1) 既存アルゴリズムを用いると計算量が原子数に対して急激に増大して実用的な計算ができないこと、(2) 最適解がしばしば複数存在するために化学的に正しい原子間対応を取りこぼさないためには最適解の全列挙が必要であること、という二つの計算上の課題があった。我々は、前項で紹介したイジング計算機を用いた組合せ最適化問題のための列挙アルゴリズムを適用することで、この課題を解決した。シミュレーテッドアニーリングを採用した提案法を実装し、原子マッピングのベンチマーク問題 241 反応に適用したところ、提案法は既存の組合せ最適化問題の列挙アルゴリズムよりも高速に解の全列挙に成功し(図5)、かつ全ての問題において化学的に正しい解を見つけることに成功した。将来的には、イジング計算機(実機)や量子コンピュータといった次世代計算機の適用や、化学反応データベースにおける正確・高速な検索や逆合成解析などへの応用が期待される。本研究の成果は、学術論文(査読あり)4として発表した。

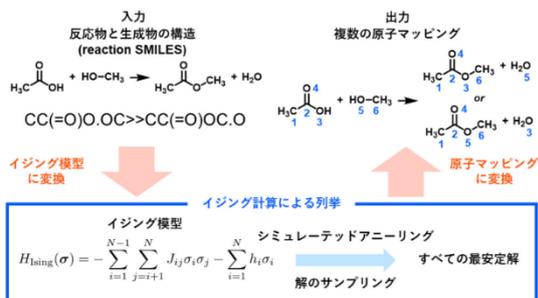


図4. イジング計算を用いた原子マッピングの概念図。

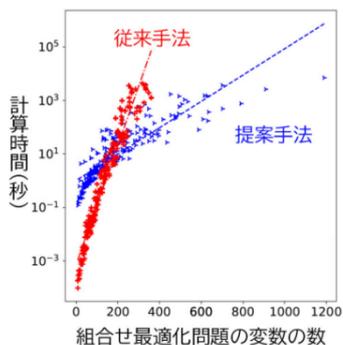


図5. 原子マッピング問題に対応する組合せ最適化問題を解くための計算時間の比較。

### (6) 化学情報と空間情報を統合したラマン画像の情報理論的解析

ラマン画像はラマンスpekトルの空間分布を提供し、画像診断への応用が期待されている。細胞や組織は空間的に不均一な構造を持ち、化学種の空間分布にパターンがある。しかし、空間分布を考慮したラマン画像解析法の研究は少ない。これまでの多くの研究では、空間情報を無視した単なるラマンスpekトルの集合としてラマン画像を解析したり、同一細胞内のpekトルを平均化して解析したりすることで、空間情報が失われてしまっていた。そこで本研究では、化学情報と空間情報を統合したデータ解析法の開発を目指した。

空間情報を取り入れるために、近接した化学的微小環境に着目した。各計測点(ピクセル)のラマンスpekトルとその周辺で計測されたpekトルとの差異をユークリッド距離で表し、空間不均一性と定義した。画像全体の不均一性を把握するために、Information Bottleneck法と呼ばれる教師なし学習を用いて空間不均一性に基づくピクセル分類をおこなうアルゴリズムを開発した。この提案アルゴリズムを、組織形態異常に基づいて診断・解析される非アルコール性脂肪性肝疾患(NAFLD)に適用した。従来、NAFLDは病態がほぼ進行しないNAFLと急速に進行するNASHに分類される。提案手法による分類の結果、正常な組織の不均一性は高く、NASHと診断された組織の不均一性は低かった。NAFLと診断された組織は不均一性の大小で正常に近い画像とNASHに近い画像の2種類に分類され、従来の標準的な画像診断法である染色画像では識別・予測できない病態識別が可能であることを見いだした。

さらに、上記の提案手法と従来の化学情報のみを考慮したクラスタリングによる分類を統合した解析を行った。各ピクセルに対して、本研究の提案手法と従来手法によるクラス分g類のペアを計算できる。各画像でこのペアの頻度比率を計算したところ、同じ病態でも他と異なる傾向を有するものが見いだされた。この異常を手がかりに、その画像に特に多く含まれている化学種を検知することができた。さらに、生体内の環境に特定の化学種が分布しているという想定的人工データを作成し、他の化学種を含めて空間的に均一な化学環境や不均一な化学環境下における化学種の検出能やその限界について推定した。本研究は現在ジャーナルに投稿中である。

上記に関連する研究テーマとして、ラマン画像からの固有な情報を定量する情報理論的解析法の開発を行っている。ラマン画像は染色画像よりも多くの化学情報を持っていると期待される。しかし、実際にラマン画像がHE染色画像をはじめとする他の画像よりも多くの情報を与えるか否かを定量的に判断する研究はない。そこで、各計測方法から得られる情報を情報理論的に定量化し、病態や診断目的に応じて適切な計測法を選ぶ参考基準を確立するための計算法を提案することを目的として現在研究を進めている。

### (7) 電力需給最適化のための行動予測モデルの設計

現在、電力需給を取り巻く事情はCO2排出量規制や電力需要の増大、再生可能エネルギーの利用や電力グリッドの複雑化など年々複雑になってきている。特に、再生可能エネルギーは供給量のコントロールが難しく、また、蓄電や送電を行うにもインフラを整備するコストが余計にかかるなどの理由により、過剰に生産された分は消費しきれず無駄になる場合が多い。このような余剰電力を活用して、電力需給の問題を解決する取り組みは現在期待されている。

そこで、本研究では、価格調整による電力需給最適化の取り組みの第一歩として、一般社団法人環境共創イニシアチブが行ったダイナミックプライシングによる電動車の充電シフト実証事業の実証データを用いて、電気料金に対す

る充電行動の応答を見るための検証実験を行った。このデータは、3事業者による被験者約900件分のデータを含み、事前に通知された電力料金の単価、電気使用量やEVへの充電量などのデータが30分刻みで記録されている。

このデータをもとに電力料金の単価の変更による電力需要の変化を予測する Long-Term Short Memory(LSTM)を用いた機械学習モデルを開発した。このモデルは入力として、日付のデータ(年、月、日、曜日)、および一日あたりの電力使用量と電気自動車への充電量などをそれぞれ 48 コマ分の計 100 次元のベクトルを入力とし、翌日の電力使用量の 30 分毎の予測値を 48 次元のベクトルとして返す。実証事業を行った事業者ごとにデータのフォーマットが違うために、まずは 16 名の被験者に対して実験を行ったデータのみを用いた学習を行った。図 6 はある固定ユーザーに対し、ほかのユーザーを訓練データとして用いて学習を行ったモデルで、翌日の電気使用量を予測した結果を示したものである。予測モデルによる推定値は実際の使用量に対してある程度近似した結果を示すことが確認された。

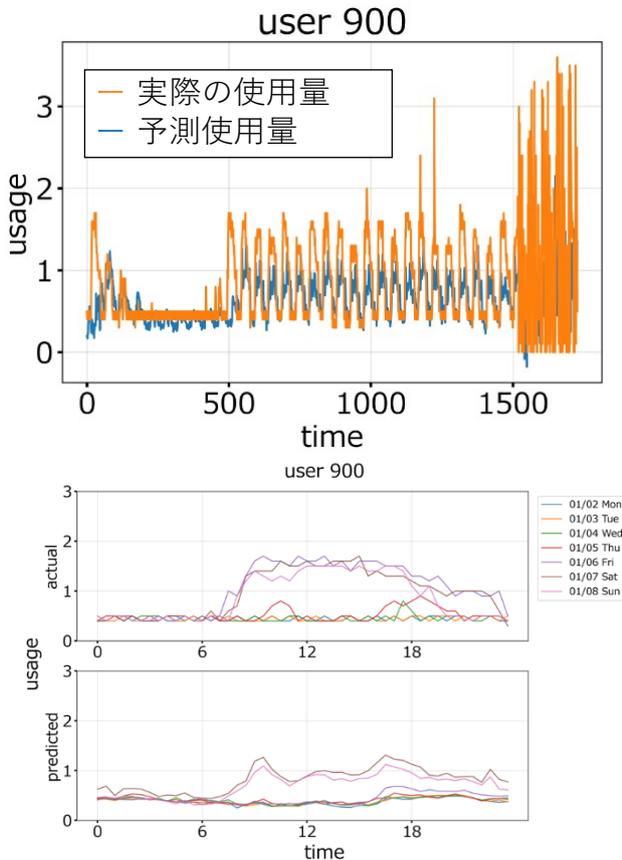


図 6. あるユーザーの電力使用の予測と実際の使用量と電力使用の比較(上)。一週間の実際の使用量の 24 時間での推移(下・上段)と予測の推移(下・下段)。

### (8) ショウジョウバエの 3D 画像を用いた腫瘍および薬剤スクリーニングのための転移学習ベース深層畳み込みニューラルネットワークモデル

癌は、さまざまな遺伝的変異、エピジェネティックな変化、代謝の変化、環境要因が複合的に関与して腫瘍を形成する複雑な疾患である。一般的なショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) は、さまざまな種類のヒト癌研究において貴重なモデルとなってきた。数十年にわたる基礎研究により、ハエとヒトの間で共有される主要な遺伝子やシグナル伝達経路の進化的保存性が明らかにされている [1]。これらの遺伝的および分子的類似性により、ショウ

ジョウバエは癌研究における薬剤スクリーニングの発展に重要な役割を果たしている。

本研究の目的は、ショウジョウバエモデルを用いて膵臓がん (PDAC) のための薬剤スクリーニングシステムを構築することである。薬剤スクリーニングにおいては、薬剤によって引き起こされる細胞変化を観察し、有効な薬剤を候補の中から見つけ出すことが重要なステップである。しかし、網羅的なスクリーニングは大きな労力を要し、個体ごとの遺伝的および環境的ばらつきの中で微細な生物学的効果を検出するのに必要な十分なサンプル数を得ることが困難である。さらに、組織観察のためのショウジョウバエの手術解剖は時間がかかり、専門的な技術を要するため、スクリーニングの拡張性と精度の両方を制限している [2]。

これらの課題に対処するために、本研究では、ショウジョウバエ幼虫の 3 次元蛍光画像を活用した自動化された画像駆動型薬剤スクリーニングを支援する、深層学習ベースのフレームワークを提案する (図 7 参照)。本研究ではまず、ショウジョウバエモデルにおける遺伝的変異によって生じる細胞変化を識別するために、効率的な腫瘍スクリーニングを目的とした転移学習ベースの深層畳み込みニューラルネットワークを開発した。その後、薬剤投与した幼虫に対して、これらの訓練済みモデルを用いてアンサンブルベースの薬剤スクリーニングを行った。

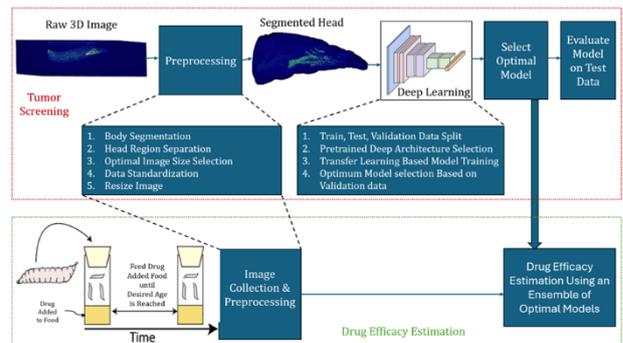


図 7. 提案システムのワークフロー：腫瘍スクリーニングと薬効評価。

本年度、幼虫発育の最終段階であり解剖学的構造が完全に発達している第 3 齢幼虫 (L3) の 3D 蛍光トモグラムを用いて薬剤スクリーニングを行った。Flow Zoometry [3] を用いて、以下の 2 つの群の 3D トモグラフ画像を収集した。

- (1) 形態変化を引き起こす遺伝子を含まないコントロール群 [ptc-GAL4, UAS-mCherry (略記: ptc>mCherry)]
- (2) 未処理および薬剤処理された腫瘍誘導型遺伝子型 [ptc-GAL4, UAS-mCherry, UAS-4-hit (略記: ptc>mCherry 4-hit)]

まず、統計および画像処理に基づくアプローチを用いて、生の 3D 画像から全身をセグメンテーションし、さらに体の領域を 2 つに分けることで頭部領域を抽出した。その後、転移学習ベースの深層畳み込みニューラルネットワークを利用し、健康な幼虫および未処理の腫瘍性幼虫から収集した画像を用いて、腫瘍性か非腫瘍性かを判別し、その確率を返す分類器を、3D 頭部画像を用いて開発した。

腫瘍スクリーニングの性能は、収集日が異なる 23 日分の画像に対して、日付除外交差検証 (date-out cross-validation) によって評価し、平均 89.6%、標準偏差 6.1%の精度を達成した。この交差検証によって得られたすべての腫瘍スクリーニングモデルをもとに、各薬剤投与サンプル画像に対して平均確率スコアを算出するアンサンブルベースのアプローチを開発した。この平均確率スコアは、その画像が腫瘍性表現型である可能性を示し、薬効を間接的に測定する指

標として機能する。各薬剤に対して、すべてのサンプルにおける腫瘍確率の分布を図8に示した。膵臓がん(PDAC)薬剤スクリーニングの一環として、DMSO(コントロール)を含む4種類の薬剤を幼虫に投与した。Trametinib+C9の組み合わせは、他の治療法と比較して腫瘍確率分布が低く、最も顕著な腫瘍抑制効果を示した。

これらの結果は、既存の文献[4]との比較によってさらに検証され、私たちのアンサンブルベースの手法の有用性が確認された。これらの結果は、本システムが薬剤スクリーニングに活用できる可能性を示しており、がん生物学、創薬、薬理学における今後の応用につながる事が期待される。

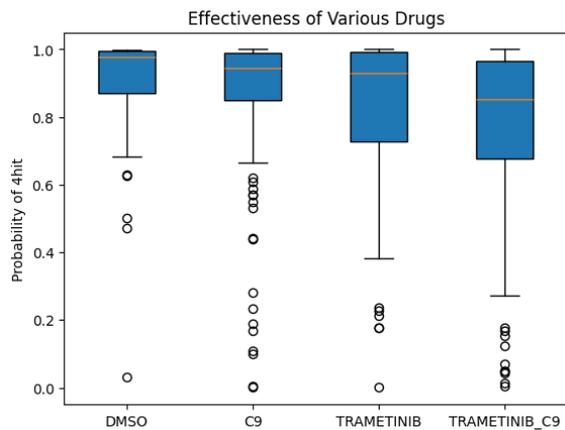


図8. 薬剤効果の比較。

References:

1. C. Munnik, M. P. Xaba, S. T. Malindisa, B. L. Russell, S. A. Sooklal, *Front. Genet.*, 2022, 13, 949241.
2. A. K. Yadav, S. Srikrishna, S. C. Gupta, *Trends Pharmacol. Sci.*, 2016, 37, 789–806.
3. T. L. Turner, A. D. Stewart, A. T. Fields, W. R. Rice, A. M. Tarone, *PLoS Genet.*, 2011, 7(3), e1001336.
4. W. Peterson et al., *bioRxiv*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1101/2024.04.04.588032>.

(9) 個別の時系列ペア間における隠れた媒介者の存在検出

集団内の協調的な行動は、個々の間に存在する直接的および間接的な相互作用の複雑なネットワークから生じる。ペア間の相互作用は集団ダイナミクスを理解するうえの根源的なものであるが、各エージェントの過去の軌跡が因果推論に影響を及ぼすこともあるため、直接的な相互作用と隠れた仲介者による間接的な相互作用を区別することは困難となる。本研究では、「観測可能な2個体の追跡データのみから、その相互作用が直接的なものか、それとも見えない第3の個体を介した間接的なものかを判断できるか？」という問いに取り組む。我々は、隠れた仲介者の存在を検出するため、遅延時間にわたる改良型移動エントロピー解析に基づくフレームワークを提案した。直接的な相互作用では、遅延時間の増加に伴い修正転送エントロピーが一貫して減少するが、間接的な相互作用ではこの傾向が当てはまらないという明確な特徴を明らかにした。この方法は、複雑系における隠れた構造を明らかにするための、シンプルかつ多用途なツールを提供し、生物学的・社会的・人工的なネットワークダイナミクスに広く応用できる可能性を示すものである。

本研究では、3体または6体のエージェント間における、直接的/間接的な相互作用を含む単方向/双方向の模式的な相互作用ネットワークを検討する[図9]。直接相互作用

ペアおよび間接相互作用ペアに対して、時間遅延( $\tau$ )にわたる因果的影響を推定するために、Vicsekモデル[1]を用いてシミュレーションした時系列データに標準的な転送エントロピー(TE)および改良型移動エントロピー(MT)[2]を適用した。

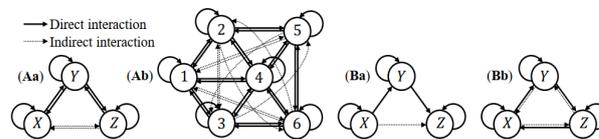


図9. 3体または6体のエージェント間における、単方向/双方向かつ直接/間接の相互作用の模式的な相互作用ネットワーク。

図10は、相互作用ネットワーク図9(Ba)における直接相互作用ペア(X,Y)、(Y,Z)と、間接相互作用ペア(X,Z)に対するTEおよびMTの挙動を、異なる3つのノイズ値 $\eta=0.5\pi, 0.7\pi, 0.9\pi$ および結合強度 $w=0.8$ の条件で示したものである。注目すべきは、MTが直接相互作用ペア(X,Y)、(Y,Z)に対しては時間遅延 $\tau$ にわたって単調減少の傾向を示す一方で、間接相互作用ペア(X,Z)に対しては非単調な傾向を示す点である(図10(d-f))。これに対し、TEは低ノイズ( $\eta=0.5\pi, 0.7\pi$ )下において、直接相互作用ペアに対して単調減少の傾向を示さない(図10(a-b))。したがって、MTは時間遅延 $\tau$ における因果的影響の傾向に基づいて、直接的/間接的な相互作用をより効果的に識別できることがわかる。

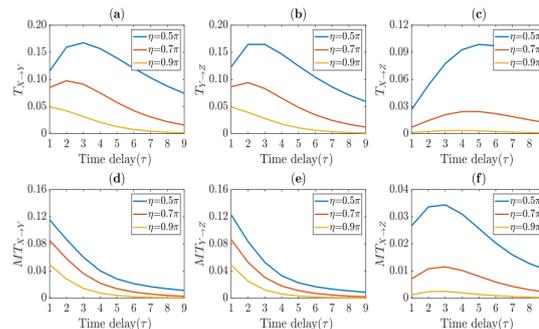


図10. 相互作用ネットワーク図9(Ba)におけるエージェントのペア間の時間遅延 $\tau$ に対するTEおよびMTの関数としての挙動。

References:

1. Sattari, S., Basak, U. S., James, R. G., Perrin, L. W., Crutchfield, J. P., & Komatsuzaki, T. (2022). Modes of information flow in collective cohesion. *Science advances*, 8(6), eabj1720.
3. Shu, Y., & Zhao, J. (2013). Data-driven causal inference based on a modified transfer entropy. *Computers & Chem. Eng.*, 57, 173-180.

(10) 薬剤スクリーニング迅速化のための多目的最適化型多腕バンディット手法の開発

薬剤スクリーニングは、新規薬物候補がどれだけ効果的かを調べる過程を指す。複数の薬剤候補のうち効果的な薬剤を効率的に発見するには、「探索」と「知識利用」のバランスを取ったスクリーニングを行うことが求められる。「探索」は全ての候補薬を広範に調べる過程で、「知識利用」は既存の知見に基づいて最も有望な薬を絞り込む過程である。この二つのアプローチはトレードオフの関係にある。

そこで我々は強化学習の一種である多腕バンディット(MAB)[1]手法を用い、探索と知識利用のトレードオフを

考慮したアルゴリズムを開発した。令和6年度は、リスク指標として昨年度用いていた分散に代わり、平均一分散 (mean-variance, MV) [2]に基づくリスク評価を導入した。これは、単に分散が小さい薬剤を好むだけでなく、平均薬効が低いものを除外する性質を持ち、多様なユーザーや応用目的に対応できる柔軟な枠組みである。また、MVを用いることで、平均が低く分散が小さいだけの薬剤が誤って選ばれるリスクを排除できる利点がある。

さらに、実際の応用ではスクリーニングに使用できるサンプル数が限られる場合が多く、探索予算が制限されることを考慮する必要がある。そこで本研究では、固定予算設定においても平均とMVの評価に基づいて重要度の高い薬剤候補を効率的に同定するアルゴリズムを設計した。具体的には、平均とMVの信頼区間をHoeffding型不等式により構成し、Lower and Upper Confidence Bound (LUCB) [3]法を拡張する形で、予算内での選定精度を最大化する方策を検討した。図11にシミュレーション実験結果の一例を示す。

今後は、東京大学理学部合田教授と合同で進めているFlow Zoometry (疾患モデルの透明化ハエ幼虫をキャピラリーに自動的に流しライトシート顕微鏡で計測する装置)により得られた疾患モデルハエ幼虫の翅原基の3D蛍光画像から深層学習により評価される薬効指標に対して、本アルゴリズムの実適用を行い、性能の検証とさらなる改善を進めていく予定である。

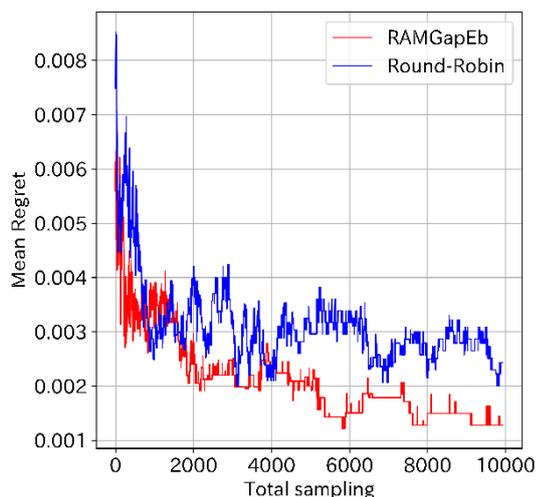


図 11. サンプル取得に伴う間違い確率 (平均リグレット) 収束の様子。縦軸: 平均リグレット、横軸: サンプル数。提案手法 (RAMGapEb) が比較手法 (Round-Robin) よりも早く平均リグレットが収束している。

参考文献:

- [1] Lattimore, Tor, and Csaba Szepesvári. Bandit algorithms. Cambridge University Press, 2020.
- [2] Sani, Amir, Alessandro Lazaric, and Rémi Munos. "Risk-aversion in multi-armed bandits." Advances in neural information processing systems 25 (2012).
- [3] S. Kalyanakrishnan, A. Tewari, P. Auer, and P. Stone, "PAC subset selection in stochastic multi-armed bandits," in Proc. 29th Int. Conf. Mach. Learn., 2012, pp. 227–234.

#### (11) 溶液内における MOF による芳香族ゲスト分子の内包現象の機械学習

溶液中において金属有機構造体 (MOF) がゲスト分子を内包する現象は、結晶スポンジ法のような MOF 機能発現の重要な要素である (図 12)。しかし、どの程度内包する

か (内包量) を化学的な直観によって予測するのは容易ではない。本研究では、特定の MOF に対する様々な芳香族ゲスト分子の内包量実験データを利用して機械学習モデル

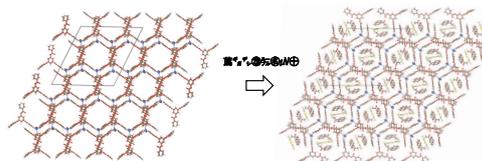


図 12. MOF への芳香族ゲスト分子の内包現象。

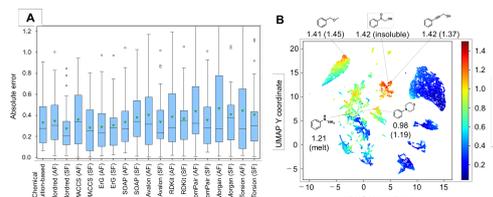


図 13. (A) 様々な特徴量セットの LOOCV 検証。SF: Boruta 特徴量選択、AF: 全ての特徴量。(B) 機械学習モデルによる~19000 候補分子のスクリーニングの結果、2次元マッピング。実験的検証を行った5つの分子の隣に予測値 (実測値) を示している。

を構築した。様々な特徴量セットを検証することで最適なモデルを選択し (図 13A)、~19000 個の候補分子に対して機械学習モデルスクリーニングを行った (図 13B)。内包量の予測値が高い分子を実験で確かめ、続いて、結晶スポンジ法が見通しよく実証された (1.41, MOF ligand 1 個あたりの数比, の分子に対して)。

#### 化学反応経路ネットワーク探索の強化学習

計算機の発展とともに数千以上の局所安定構造とそれらをつなぐ遷移状態からなる化学反応経路ネットワークが計算可能となってきている。しかし、比較的小きな化学反応系であっても反応経路を網羅的に調べるのは困難である。本研究では、反応系と生成系が予めわかっている条件下で両者をつなぐ重要な (速度論的に起こりうる) 経路を反応系からスタートしていかに早く見つけるかという問題に対する強化学習アルゴリズムを開発した (図 14 右)。各ステップでそれまでに見つかった局所安定構造から1つ選んで反応経路を1つサンプリングすることをゴール (生成系) までの重要な経路が見つかるまで繰り返す。各局所安定構造の期待値スコアは生成系との距離をそして既に見つかった反応経路で隣接した構造群のスコアを反映させて決定し、期待値スコアが高い構造とスコアは低いはまだ十分に選択されていない構造をバランス良く選択する様々な探索方針 (UCB, etc.) を導入し、性能を比較検証した (図 14 左)。研究成果は学術論文として出版されている。

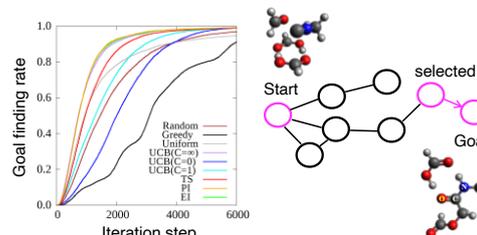


図 14. 各探索ステップまでにゴール (生成系の局所安定構造に繋がる経路) を特定した割合 (左, Passerini 反応の例)。本研究の問題・探索のイメージ (右)。この他、6 例で解析を行い、各探索方針の性能を調べている。

## (12) 予算制約によって選択可能性が定義された動的アーム集合に対するバンディットアルゴリズム

多腕バンディット問題は、逐次意思決定問題がもつ探索と活用のトレードオフに対処する枠組みであり、そのアルゴリズムは、オンライン広告、推薦システムなど様々な分野に応用されている。しかし、古典的な問題設定は選択肢が常に選択可能であることを前提にしており、これは特に EC サイトの推薦システムへの応用とはギャップがある。

本研究はそのギャップを埋めるために時間予算と行動予算という2つの制約を問題設定に加え定式化し、それに適したアルゴリズム“DCRB”の開発を行った。アルゴリズムは、後述する最適化問題をサブルーチンとして解き、その最適解をもとにトンプソンサンプリングをベースに選択するものである。サブルーチンとして解いている最適化問題は、各アームの選択すべき回数を上述した2つの制約下で最適に割り当てる定式化になっている。この最適化問題を解くサブルーチンは、アーム集合の要素数を  $K$  としたときに  $O(K \log K)$  で解くことができる。数値シミュレーションによる結果を図15に示す。100シミュレーションの結果を箱ひげ図にまとめたもので、縦軸が得られた収益なので提案手法が比較手法より優れた性能を示すことが確認できた。

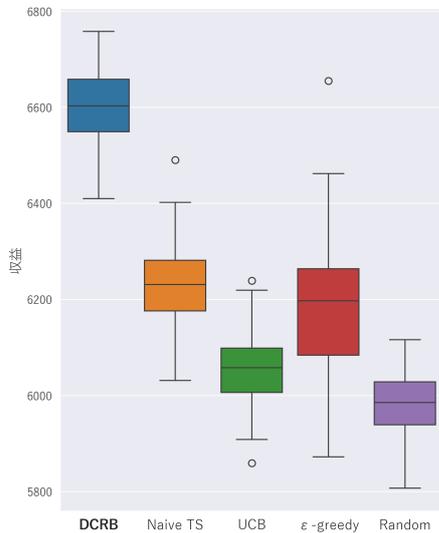


図 15. 収益によるアルゴリズムの性能比較。

## (13) 線形バンディットを用いた高次元ベイズ最適化アルゴリズムの開発

ベイズ最適化は効率的な探索手法ですが、高次元では計算コストが増大する課題があります。しかし実際の多くの場合、目的関数に影響するのは一部の次元のみです。本研究ではこの性質を利用し、線形バンディットで有望な探索方

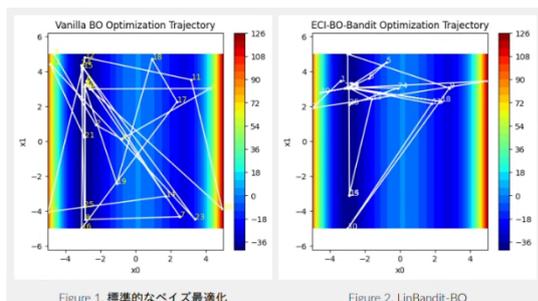


図 16. 2次元探索軌跡の比較。(a)標準的なベイズ最適化、(b)提案手法 LinBandit-BO。関数値は横軸(x0)方向にのみ変化。LinBandit-BOは有効な横軸に探索を集中。

向を自動学習し、その方向に沿って1次元ベイズ最適化を行う新手法「LinBandit-BO」を開発しました。

図16に示すように、関数値が横軸(x0)方向にのみ変化する2次元問題において、従来手法(a)が縦横双方を探索するのにに対し、LinBandit-BO(b)は有効な横軸に探索を集中させ、無駄を省きます。さらに、20次元ベンチマーク関数(有効5次元)での実験では、LinBandit-BOが既存手法より高速に最適解へ収束し、かつ自動的に有効次元を特定して探索資源を集中させることを確認しました。

この結果は、本手法が高次元問題においても効率的に有望な探索方向を学習し、最適解を発見できることを示しています。

## (14) Tracking アルゴリズムによるバンディットオンラインクラスタリング

バンディットオンラインクラスタリングとは、類似特性を持つ複数の arm から、多次元のフィードバックを逐次受け取りながら最小限の試行回数でグループ分けを正確に行うことを目的とする。正確なグループ分けとは、各 arm の期待報酬が既知のときと同じグループ分けを行うことである。

従来研究では、各クラスタ内の真値がすべて等しいという制約のもとで固定信頼度のクラスタリングアルゴリズムが提案されている。しかし、応用ではクラスタ内の真値が別々である場合も多い。そこで本研究では Garivier らが開発した Tracking アルゴリズム[1]にない標本複雑度の下界から求まる腕選択の最適割合を導出し、一般化尤度比検定による停止規則を用いるアプローチを取った。具体的には、標本複雑度の下界から各 arm を選ぶ最適な割合を導出し、その確率に従って arm を選択する。数値実験の結果の1つを図17に示す。図17から、どのクラスタに属するか判断しづらい arm を適切な割合で選択し、効率的なクラスタリングを行っていることが分かる。

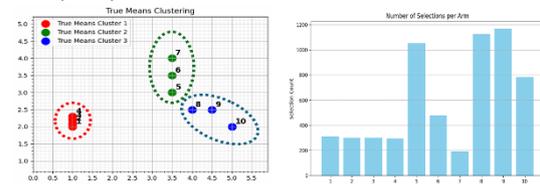


図 17. 真値の分布と各 arm の選択回数。

参考文献 : Garivier, A. and Kaufmann, E.: Optimal best arm identification with fixed confidence, in Conference on Learning Theory, pp.998–1027PMLR (2016).

## (15) スペクトル法による高精度な高次ポテンシャルエネルギー曲面 (PES) 導関数: HCN 反応における比較研究

強い非調和性や回転-振動-電子相互作用を伴う系では、遷移状態理論 (TST) が破綻することがあり、ポテンシャルエネルギー曲面 (PES) の高次導関数の高精度な算出が遷移状態の解析に不可欠である。本研究では、HCN 反応系に対して5次までの導関数を数値的に計算する枠組みを提示する。解析のために、有限差分法 (FD) による等間隔格子での手法、およびチェビシェフ節点上での標準的なチェビシェフスペクトル微分法など、複数の微分手法を実装・比較した。導関数は臨界点周辺の領域で評価され、正確な記号的導関数と比較してベンチマークを行った。誤差分布は、格子点の分布や対数確率プロットを用いて統計的・視覚的に分析される。標準的なチェビシェフ法は全ての導関数の次数において最高の精度を示したが、高次数かつステップサイズが小さい場合には性能が低下する傾向が見られた。これらの結果は、量子力学的ダイナミクスや分子シミュレ

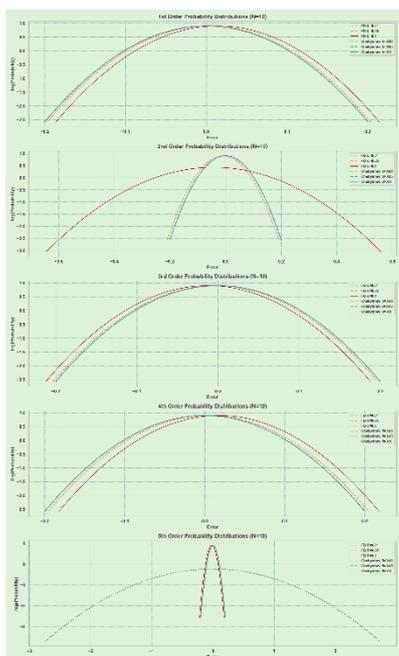


図 18. HCN 反応における有限差分法 (FD) とチェビシェフスペクトル法の高次導関数の対数確率スケールでの比較。

一シオンにおける PES の表現へのスペクトル法の応用に對する指針を与える。

### (16) 一次反応ネットワークにおける時間スケール階層の包括的表現

異性化反応などを記述する、一次反応ネットワークは一連の一次の微分方程式で表され、例えば電子状態計算と反応経路探索により得られた詳細なエネルギー地形から構築されます。しかし、分子の自由度が増すにつれてノード数が組み合わせ爆発を生じるため、特定の観測時間スケールで得られる一見単純な反応過程との対応付けが困難になります。したがって、(観測によって定まる) 時空間解像度が一次反応ネットワークをどのように粗視化するのか解明することは、解釈するうえで極めて重要です。特に様々な近似理論が前提とする時間スケールの分離が保証されない場合に観測を解釈する場合に必要となります。

私たちは、観測解像度に依存した区別不可能な部分ネットワークの階層的可視化法と(量的関係や必要な時定数を変えていない)射影理論としての厳密な粗視化法を開発しました。各粗視化表現は、時間スケールの分離や局所平衡の仮定に依存することなく、元のネットワークに存在する遅い特性時間スケールを確実に保存することを保証します。

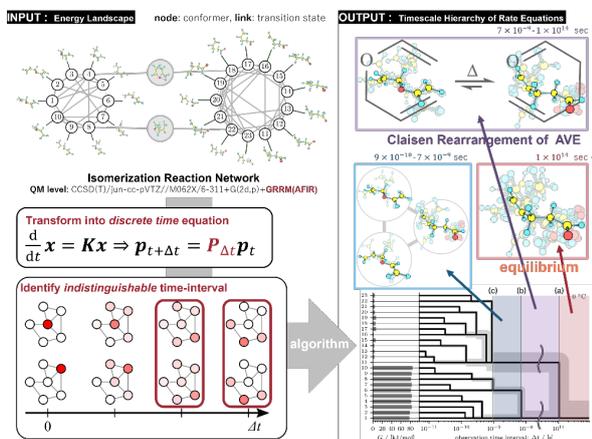


図 19. 一次反応ネットワークの区別不可能性をを用いた粗視化。

観測時間解像度 $\Delta t$ に対して一次反応ネットワークの各配位異性体が、区別不可能かを表すダイアグラム(図 19 右下)は、観測系の時間解像度 $\Delta t$ が与えられた際の粗視化の程度を表します。横軸が観測時間間隔(解像度) $\Delta t$ を表しています。観測時間間隔が最も長い場合、単一の熱平衡状態が得られます。観測時間間隔を短くしていくと、系は反応物と生成物の2つの状態に分離されます。さらに観測時間間隔を短くすると、生成物系がさらに2つの状態に分割され、反応物系は1つの状態のままとなります。加えて、観測時間間隔をさらに短くすることで、より複雑な副状態や副-副状態を高精度で評価することが可能となります。このように、定まった粗視化の程度に対して、厳密ランピング(exact lumping)を用いることで、理論上誤差のない粗視化が可能となります。この厳密ランピングによる粗視化は、必要な時定数、濃度の総和、濃度の長時間間隔における変化が粗視化前と同一であることを数学的に証明しています。

### (17) 散乱体内部に埋め込まれた蛍光ターゲットの位置の同定に関する基礎検討

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蛍光プローブなど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)と呼ばれ、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。本年度は、蛍光の時間応答関数に関して検討を加えた。

一般的に散乱体中の蛍光体を定量する場合FDOTと呼ばれる逆問題を解く必要がある。すなわち界面上で計測された蛍光データを用い、蛍光の伝搬モデルと比較し位置などを推定する。ここでデータとして光強度の時間応答関数に注目すると、散乱体を伝搬する光の場合時間軸は光の伝搬した距離に対応する。そのため、散乱により失われた空間情報を補足する情報が与えられるため、位置などの情報を復元するのに有利であると考えられる。ここでさらに、時間応答関数のピークの時間位置に注目すると、そこは最も多くの光が伝搬する経路の距離に対応する。ピーク時間の測定は実験的には最もS/Nが良い測定であるため有利である特徴がある。蛍光物質が局在する場合、励起光が蛍光体に至り、あに蛍光体から検出されるまでの経路長さに依存することから、もし蛍光体が大きさを持たない点と近似できる場合、ピーク時間を用いると位置がわかるはずである。

今回は、これを数学的に確かめるために、蛍光体を点とし、蛍光の時間応答関数の解析解から距離とピーク時間の関係を漸近解析から求めることに成功した。特に、実際の時間応答関数には蛍光寿命もかかわるため、先に述べた単純な距離と時間の関係にはならないが、数学的に精査すると距離に対して比例に近い関係を導くことができた。その結果から、3点の独立したデータから蛍光体の位置が決めることが可能となった。今回の検討は反復処理による最適化を用いた位置を決める従来法とは異なった考え方を提示したことになる[文献4-2-2、投稿中]。今後は、蛍光体が点でなく大きさを持つ場合に拡張し展開する予定である。

### 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 ( $\sim kBT$ ) 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) [M. M. Abedin, K. Tabata, Y. Matsumura, and T. Komatsuzaki](#), Multi-armed bandit algorithm for sequential experiments of molecular properties with dynamic feature selection, *J. Chem. Phys.* 161(1), 014115 (2024). (DOI: 10.1063/5.0206042)
- 2) [Y. Mizuno, and T. Komatsuzaki](#), Quantum algorithm for dynamic mode decomposition integrated with a quantum differential equation solver, *Phys. Rev. Research* 6, 043031-1–043031-6 (2024). (DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.043031)
- 3) [T. Ryoichi, Y. Mizuno, T. Tsutsumi, M. Toda, T. Taketsugu, and T. Komatsuzaki](#), Low-dimensional projection of reactivity classes in chemical reaction dynamics using supervised dimensionality reduction, *J. Chem. Phys.* 161(15), 154103-1–154103-12 (2024). (DOI: 10.1063/5.0230618)
- 4) [M. Ali, Y. Mizuno, Y. Nagata, and T. Komatsuzaki](#), Enumeration Approach to Atom-to-Atom Mapping Accelerated by Ising Computing, *J. Chem. Inf. Model.* 65, 1901–1910 (2025). (DOI: 10.1021/acs.jcim.4c01871)
- 5) [Y. Nagahata, M. Kobayashi, M. Toda, S. Maeda, T. Taketsugu, and T. Komatsuzaki](#), An encompassed representation of timescale hierarchies in first-order reaction network, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 121(21), e2317781121–(2024). (DOI: 10.1073/pnas.2317781121)
- 6) [G. Nishimura, T. Suzuki, Y. Yamada, H. Niwa, and T. Koike](#), Depth detection limit of a fluorescent object in tissue-like medium with background emission in continuous-wave measurements: a phantom study, *J. Biomed. Opt.* 29, 097001 (2024). (DOI: 10.1117/1.JBO.29.9.097001)

### 4.2 学術論文 (査読なし)

- 1) [T. Komatsuzaki](#), On-the-fly Raman microscopy guaranteeing the accuracy of discrimination, *Proc. SPIE 13006, Biomedical Spectroscopy, Microscopy, and Imaging III*, 13006: 1300602 (2024).
- 2) [Y. Mizuno, M. Ali, and T. Komatsuzaki](#), Enumeration algorithms for combinatorial problems using Ising machines, *arXiv:2412.00284* (2024). (DOI: 10.48550/arXiv.2412.00284)

- 3) [S. Chen, J. Eom, G. Nakamura, and G. Nishimura](#), Approximate peak time to time-domain fluorescence diffuse optical tomography for nonzero fluorescence lifetime, *arXiv:2411.15698* (2024). (DOI: 10.48550/arXiv.2411.15698)
- 4) [S. Chen, J. Eom, G. Nakamura, and G. Nishimura](#), Direct inversion scheme of time-domain fluorescence diffuse optical tomography by asymptotic analysis of peak time”. *arXiv:2502.01037* (2025). (DOI: 10.48550/arXiv.2502.01037)

### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) [T. Komatsuzaki](#), An attempt of Seibutsu-Butsuri in Kyoto IUPAB Congress 2024, *Biophysical Reviews* 16(5), 509–510 (2024). (DOI: 10.1007/s12551-024-)
- 2) [K. Hayashi, G. Hummer, J. A. Joseph, R. Li, T. Nagai, S. Onami, \(Eds by\) A. Kitamura, Y. Togashi, A. Kakugo, I. Fujiwara, and T. Komatsuzaki](#), A round table at IUPAB Congress in Kyoto 2024: Dreaming the next 50 years in our biophysics, *Biophysics and Physicobiology* 21(Supplemental2) (2025). (DOI: 10.2142/biophysico.bppb-v21.e2012)
- 3) [林久美子, G. Hummer, J. A. Joseph, R. Li, 永井健治, 大浪修一, \(編集\)北村朗, 富樫祐一, 角五彰, 藤原郁子, 小松崎民樹](#), 「IUPAB 京都 2024 年会議における座談会: 我々の生物物理学の次の 50 年を夢見て (前半)」, *生物物理* 65(1), 35-46 (2025). (DOI: 10.2142/biophys.65.35)
- 4) [林久美子, G. Hummer, J. A. Joseph, R. Li, 永井健治, 大浪修一, \(編集\)北村朗, 富樫祐一, 角五彰, 藤原郁子, 小松崎民樹](#), 「IUPAB 京都 2024 年会議における座談会: 我々の生物物理学の次の 50 年を夢見て (後半)」, *生物物理* 65(2), 101-112 (2025). (DOI: 10.2142/biophys.65.101)

### 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) [T. Komatsuzaki](#), “On-the-fly Raman microscopy guaranteeing the accuracy of discrimination”, *SPIE Photonics Europe, Strasbourg, France, April 2024*.
- 2) [T. Komatsuzaki](#), “On-the-Fly Raman Microscopy Guaranteeing the Accuracy of Discrimination”, *28th International Conference on Raman Spectroscopy – ICORS 2024, Rome, Italy, July-August 2024*.
- 3) [Y. Mizuno](#), “Quantum Computing for Discrete Chemical Reaction Theory”, *Hokudai-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Yang Ming Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, April 2024*.
- 4) [Y. Mizuno](#), “Quantum Computing for Complex Chemical Systems Analysis”, *The 8th Japan-Czech-Slovakia (JCS) International Symposium on Theoretical Chemistry, Hokkaido University, Sapporo, June 2024*.
- 5) [G. Nishimura](#), “Fluorescence diffuse optical tomography - ideal and reality of an inverse problem”, *7th Joint Conference of A3 Foresight Program on Computational and Applied Mathematics, East Lake International Conference Center, Wuhan, China, August 2024*.

#### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) [水野雄太](#), “複雑化学反応システムの解析のための量子・イジング計算技術—生命の理解に向けて—”, *量子生命科学 第 6 回大会, 早稲田大学国際会議場 東京都, 2024 年 5 月 31 日*.

- 2) 西村 吾朗, “拡散光計測—その解釈は正しいのか?”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2024 (OPJ2024) シンポジウム「光診断・治療法開発におけるブレイクスルーを求めて:次世代へのメッセージ」, 2024年12月1日.

c. 一般講演 (国際学会)

- 1) J.E. Clement, “Accelerated spontaneous Raman measurement for biomedical applications”, COMPLEXBIODYN 2024 (COMPLEX KINETICS AND DYNAMICS FROM SINGLE MOLECULE TO CELLS), Hotel Mercure Dijon, Dijon, France, June 2024.
- 2) R. Kondo, “Quantification of mutual information between Raman images and HE stained images depend on disease states”, COMPLEXBIODYN 2024 (COMPLEX KINETICS AND DYNAMICS FROM SINGLE MOLECULE TO CELLS), Hotel Mercure Dijon, Dijon, France, June 2024.
- 3) T. Komatsuzaki, “Reinforcement learning to accelerate Raman imaging and reaction discovery”, COMPLEXBIODYN 2024 (COMPLEX KINETICS AND DYNAMICS FROM SINGLE MOLECULE TO CELLS), Hotel Mercure Dijon, Dijon, France, June 2024.
- 4) S. Hashiba, T. Kitano, K. Tabata, Y. Matsumura, K. Terayama, and T. Komatsuzaki, “Bayesian Optimization for Efficient Exploration of Highly Enantioselective Reaction by Dynamic Feature Selection”, 39th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Shizuoka, Japan, June 2024.
- 5) S. Nonaga, K. Tabata, and T. Komatsuzaki, “Framework for efficient drug selection using machine learning”, IUPAB2024, Kyoto, Japan, June 2024.
- 6) M. Mohiuddin, S. Sattari, U. S. Basak, and T. Komatsuzaki, “Identifying direct and indirect interactions among collectively moving individuals using pairwise information flow metric”, IUPAB2024, Kyoto, Japan, June 2024.
- 7) R. Takami, K. Tabata, Y. Wada, M. Sonoshita, and T. Komatsuzaki, “Development of an Efficient Estimation Method for Maximum Tolerated Dose by Reinforcement Learning”, IUPAB2024, Kyoto, Japan, June 2024.
- 8) Z. Ferdous, J. Clément, J. P. Gong, S. Tanaka, M. Tsuda and T. Komatsuzaki, “Morphological Difference in Hydrogel Induced Cancer Stem Cell in Synovial Sarcoma Model Cells”, IUPAB2024, Kyoto, Japan, June 2024.
- 9) R. Kondo, Y. Mizuno, J. Clement, K. Mochizuki, K. Fujita, Y. Harada, and T. Komatsuzaki, “Extraction of dependent spatial or spectral features from different disease states in Raman images”, IUPAB2024, Kyoto, Japan, June 2024.
- 1 0) R. Kondo, Y. Mizuno, J. Clement, K. Mochizuki, K. Fujita, Y. Harada, and T. Komatsuzaki, “Quantification of Spatial and Spectral Information Dependent on Measurement Methods and Disease States in Raman Images”, IUPAB2024, Kyoto, Japan, June 2024.
- 1 1) Z. Ferdous, J. Clement, M. Tsuda, K. Fujita, Y. Kumamoto, W. Lei, M. Li, T. Bocklitz, J. P. Gong, S. Tanaka, and T. Komatsuzaki, “Raman Imaging Algorithm for Analysing Therapy-Resistant Cancer Cells”, 28th International Conference on Raman Spectroscopy – ICORS 2024, Rome, Italy, July-August 2024.
- 1 2) R. Tanaka, Y. Mizuno, T. Tsutsumi, M. Toda, T. Taketsugu, and T. Komatsuzaki, “Can Phase Space Structures Explain Dynamical Selectivity of Products in a Chemical Reaction?”, Energy Landscape 2024, Lovran, Croatia, August 2024.

d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 田中 綾一, 水野 雄太, 堤 拓朗, 戸田 幹人, 武次 徹也, 小松崎 民樹, “相空間構造の低次元化による化学反応動力学の解析”, 第 26 回理論化学討論会, つくば市, 2024 年 5 月.
- 2) 田畑 公次, 川越 寛之, Taylor James Nicholas, 望月 健太郎, 久保 俊貴, Clement Jean-Emmanuel, 熊本 康昭, 原田 義規, 中村 篤祥, 藤田 克昌, 小松崎 民樹, “逐次ラマン計測による迅速診断”, 2024 年度人工知能学会全国大会 (第 38 回), アクトシティ浜松+オンライン

イン, 2024 年 5 月.

- 3) 田中 綾一, 水野 雄太, 堤 拓朗, 戸田 幹人, 武次 徹也, 小松崎 民樹, “実在分子系における化学反応動力学の相空間構造の理論的研究”, 第 18 回分子科学討論会, 京都市, 2024 年 9 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) M. Mohiuddin, U. S. Basak, S. Sattari, and T. Komatsuzaki, “Inferring direct and indirect interactions in collective motion from a pair of individual time series”, 15th CSE Summer School and 12th ALP International Symposium, Shinshinotsu, Hokkaido, Japan, August 2024.
- 2) S. Nonaga, K. Tabata, Y. Mizuno, and T. Komatsuzaki, “Risk-Averse drug selection using Machine Learning”, 15th CSE Summer School and 12th ALP International Symposium, Shinshinotsu, Hokkaido, Japan, August 2024.
- 3) R. Tanaka, Y. Mizuno, T. Tsutsumi, M. Toda, T. Taketsugu, and T. Komatsuzaki, “An Analysis of Chemical Reaction Dynamics in Phase Space by Dimensionality Reduction Method”, 3rd PhD. Students Workshop Strasbourg Hokkaido, Strasbourg, France, October 2024.
- 4) R. Kondo, Y. Mizuno, N. J. Taylor, J. Clement, K. Fujita, Y. Harada, and T. Komatsuzaki, “Raman histology with information theoretic assessments based on chemo-spatial information”, Biomedical Raman Imaging (BRI) Workshop 2024, Osaka University, Japan, November 2024.
- 5) M. Mohiuddin, U. S. Basak, S. Sattari, and T. Komatsuzaki, “Detecting existence of a hidden mediator between a pair of individual time series”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 6) S. Nonaga, K. Tabata, Y. Mizuno, and T. Komatsuzaki, “The Method for Finding Optimal Drugs While Reducing Risk”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 7) R. Takami, U. S. Basak, K. Tabata, Y. Wada, M. Sonoshita, and T. Komatsuzaki, “Efficient Maximum Tolerated Dose Estimation Using a Bandit Algorithm”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 8) M. Ali, Y. Mizuno, S. Akiyama, Y. Nagata, and T. Komatsuzaki, “Enumeration Approach to Atom-to-Atom Mapping Accelerated by Ising Computing”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 9) M. A. Hasan, J. Clement, W. Peterson, T. Kobayashi, S. Hata, T. Otsuka, M. Sonoshita, K. Goda, and T. Komatsuzaki, “Transfer Learning Based Deep Convolution Neural Network Model for Tumor Screening Using 3D Images of Drosophila”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 1 0) S. Hashiba, T. Kitano, K. Tabata, Y. Mizuno, Y. Matsumura, K. Terayama, and T. Komatsuzaki, “Application of Dynamic Feature Selection for Efficient and Systematic Exploration of Highly Enantioselective Reaction”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 1 1) R. Kondo, Y. Mizuno, N. J. Taylor, J. Clement, K. Mochizuki, K. Fujita, Y. Harada, and T. Komatsuzaki, “Spatial-Chemical information for Raman Histology Using an Information Theoretical Analysis”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 1 2) S. Takikawa, K. Tabata, and T. Komatsuzaki, “Title Clustering Problems under Bandit Feedback”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 1 3) Y. Nomura, K. Tabata, and T. Komatsuzaki, “Using the Bandit Algorithm Investigation of efficiency of high-dimensional Bayesian optimization”, 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.
- 1 4) K. Kikuchi, K. Tabata, and T. Komatsuzaki, “Mortal Multi-Armed Bandits with Inventory Constraints”, 25th RIES-

HOKUDAI International Symposium, Sapporo, Japan, December 2024.

- 1 5) G. Nishimura, T. Suzuki, K. Tashiro, K. Wakamatsu, T. Koike, Y. Yamada, H. Niwa, Y. Michiwaki, "Near - infrared fluorescence detection for assessment of aspiration risk", THE Third Britton Chance International Symposium on Metabolic Imaging & Spectroscopy, Smilow Center for Translational Research, Philadelphia, USA, July 17<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>, 2024.
- 1 6) 田中 綾一, "相空間幾何学による化学反応ダイナミクスの解析", 第 63 回分子科学若手の会 夏の学校、岡崎コンファレンスセンター, 岡崎市, 2024 年 8 月.
- 1 7) 小松崎 民樹, "個体差を反映した薬物迅速スクリーニングと異なる種間の情報接続", 2024 年度日本神経回路学会時限研究会, 札幌市, 2024 年 9 月.
- 1 8) 小松崎 民樹, "化学反応ネットワークの縮約理論か非アルコール性脂肪肝疾患分光画像解析", 研究会「理論と実験」2024, 東広島市, 2024 年 10 月.
- 1 9) 菊池 健太, 田畑 公次, 小松崎 民樹, "動的商品カタログを持つ EC サイトのための寿命型バンディットアルゴリズム", 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2024), さいたま市, 2024 年 11 月.
- 2 0) 野村 祐介, 田畑 公次, 小松崎 民樹, "バンディットアルゴリズムを用いた高次元ベイズ最適化の効率化の検討", 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2024), さいたま市, 2024 年 11 月.
- 2 1) 瀧川 颯志, 田畑 公次, 小松崎 民樹, "バンディットフィードバック下でのクラスタリング問題", 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2024), さいたま市, 2024 年 11 月.
- 2 2) 野永 竣太, 田畑 公次, 小松崎 民樹, "固定予算及び固定信頼度設定下でのリスク回避型多目的バンディット", 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2024), さいたま市, 2024 年 11 月.
- 2 3) 近藤 僚哉, 水野 雄太, Clement Jean Emmanuel, 望月 健太郎, 原田 義規, 藤田 克昌, 小松崎 民樹, "化学空間情報に基づく情報理論的病態評価によるラマン分光組織学", 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2024), さいたま市, 2024 年 11 月.
- 2 4) 北野 鵬志, 水野 雄太, 小松崎 民樹, "分子動力学における時間発展演算子のテンソルネットワークによる縮約", 第 47 回 ケモインフォマティクス討論会, 金沢市, 2024 年 12 月.

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) 2024 年度日本神経回路学会時限研究会 (小松崎 民樹, 鈴木 芳代, 園下 将大, 坂内 博子), 北海道大学, 札幌市, 2024 年 09 月 13 日.
- 2) 人工知能学会シンポジウム 2024 年度人工知能学会全国大会 (第 38 回) オーガナイズドセッション「サイバー世界とリアル世界を架ける AI」(鷲尾 隆, 西山直樹, 吉岡 琢, 小松崎 民樹, 山崎 啓介, 窪澤 駿平), アクトシティ浜松, 浜松市, 2024 年 05 月 28 日.

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

該当なし

##### b. 国際共同研究

- 1) J.N. Taylor, 小松崎民樹 (T. Bocklitz 博士, Leibniz Inst. Photonic Tech., ドイツ), "ラマン分光計測における標準化手法の統一とオンライン計測".

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 小松崎民樹 (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 (2016-2024 年度)".

#### 4.9 予算獲得状況 (研究代表者、分類、研究課題、期間)

##### a. 科学研究費補助金

- 1) 田畑 公次 (代表), 基盤研究 (C), "純粋探索問題の実応用に向けた多腕バンディット手法の構築", 2024 年 4 月~2027 年 3 月.
- 2) 松村 祥宏 (代表), 若手研究, "溶液中の MOF 結晶内における分子秩序化過程の微視的原理探究と結晶スポンジ法への応用", 2024 年 4 月~2027 年 3 月.
- 3) Ferdous Zannatul (代表), 若手研究, "Integrating Raman Microscopy and Hydrogel Platforms for Metabolic Analysis of Cancer Stem Cells", 2024 年 4 月~2026 年 3 月.
- 4) 西村 吾朗 (代表), 学術変革領域研究 (A) (公募研究), "多重散乱体での光渦の伝搬解析と拡散蛍光イメージングへの応用", 2023 年 4 月~2025 年 3 月.

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

- 1) 小松崎 民樹 (代表), 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 年 4 月~2025 年 3 月.
- 2) 水野 雄太 (代表), JST さきがけ, "作用素論的力学系解析のための量子計算技術", 2024 年 10 月~2028 年 3 月.
- 3) 小松崎 民樹 (分担), JST-AMED, "強化学習駆動型のショウジョウバエ表現型スクリーニングによる抗腫瘍天然物の開発", 2021 年 10 月~2024 年 3 月.
- 4) 小松崎 民樹 (分担), JST-AMED, "代謝制御因子を標的とする新規膵がん治療法の開発", 2023 年 10 月~2024 年 3 月.
- 5) 小松崎 民樹 (代表), JST-CREST, "個体差を活かしたオンライン最適化による迅速スクリーニング計測基盤の開発", 2023 年 10 月~2029 年 3 月.

##### c. 民間助成金

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) 小松崎 民樹, Editorial Board "Scientific Reports" Division of Chemical Physics, 2017 年 2 月~現在.
- 2) 小松崎 民樹, 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, 2018 年 1 月~現在.
- 3) 小松崎 民樹, 情報計測オンラインセミナー運営委員会委員, 2023 年 4 月~現在.

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 小松崎 民樹, 編集委員 (生物物理学会刊行「Biophysics and Physicobiology」), 2013 年 1 月~現在.
- 2) 小松崎 民樹, 副編集委員長 (生物物理学会刊行「Biophysics and Physicobiology」), 2020 年 1 月~現在.
- 3) 小松崎 民樹, 北海道支部幹事 (日本生物物理学会), 2020 年~現在.
- 4) 小松崎 民樹, 北海道支部賞選考委員 (日本化学会), 2020 年~現在.
- 5) 小松崎 民樹, Organizing Committee (SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS23)), 2022 年 4 月~現在.
- 6) 小松崎 民樹, 代議員 (日本化学会), 2022 年 10 月~現在.

- 7) 小松崎 民樹, 「生物物理」編集委員長 (生物物理学会), 2024年1月~現在.
- 8) 小松崎 民樹, 分野別専門委員 (非線形・カオス・複雑系) (生物物理学会), 2024年1月~現在.
- 9) 小松崎 民樹: 日本化学会学術賞・進歩賞 副選考委員長 (2024.4-2025.3)
- 10) 西村吾朗, Optics and Photonics Japan 2024 (日本光学会年次学術講演会) 実行委員 (日本光学会), 2024年1月~12月.

**c. 兼任・兼業**

- 1) 小松崎 民樹, 領域アドバイザー (JST さきがけ量子情報処理), 2019年6月~2025年3月.
- 2) 小松崎 民樹, 特任教授 (大阪大学産業科学研究所), 2022年7月~2025年3月.
- 3) 小松崎 民樹, アドバイザー (JST 創発), 2023年10月~現在.
- 4) 小松崎 民樹, 外部アドバイザー (学術変革領域 B「嫉妬の科学」), 2022年4月~現在.
- 5) 小松崎 民樹, 招へい教授 (大阪大学 先導的学際研究機構 超次元ライフイメージング研究部門), 2022年4月~現在.
- 6) 小松崎 民樹: 東京大学 客員共同研究員 (2021年11月~現在)
- 7) 小松崎 民樹, 技術アドバイザー (株式会社 Flyworks), 2024年10月1日~2025年9月31日.

**d. 外国人研究者の招聘**

- 1) Prof. David J. Wales, University of Cambridge, 2024年11月11日~26日.

**e. 北大での担当授業科目 (対象、講義名、担当者、期間)**

- 1) 理学研究院数学専攻、数学総合講義 I 「化学反応の相空間幾何構造・反応デザインと化学反応ネットワーク理論の数理」、小松崎民樹・田畑公次・水野雄太、期間 2024 年度後期
- 2) 総合化学院、物質化学 (現代化学反応理論)、小松崎民樹、田畑公次、水野雄太、2024 年度後期
- 3) 理学部化学科、ナノ物性化学、小松崎民樹 (分担)、水野雄太 (分担)、2024 年度前期
- 4) 全学教育科目、一般教育演習 (フレッシュマンセミナー)、水野雄太 (分担、責任教員)、2024 年度前期
- 5) 全学教育科目、自然科学実験 (化学) 西村 吾朗 (分担)、2024 年度前期

**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. アウトリーチ活動**

- 1) 日本化学会北海道支部、夢・化学-21 化学への招待 北海道大学化学系への二日体験入学「近未来のコンピュータ「量子コンピュータ」で遊んでみよう」水野雄太

**h. 新聞・テレビ等の報道**

該当なし

**i. 客員教員・客員研究員など**

該当なし

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位: 1人

- 1) 野永 竣太, 総合化学院, 修士 (総合化学), リスクを考慮した効率的な薬剤スクリーニング手法の開発.

博士学位: 1人

- 1) Md. Mehazul Abedin, 総合化学院, 博士 (総合化学), Study on Multi-armed Bandit Algorithm for Sequential Experiments to Predict the Best Molecule with Dynamic Feature Selection.

## 知能数理研究分野

### スタッフ

教授 中垣 俊之（博士（学術）、2013年10月1日着任）

准教授 西上 幸範（博士（理学）、2018年9月16日着任）

助教 大村 拓也（博士（理学）、2024年8月1日着任）

特任助教 越後谷 駿（博士（ソフトマター科学）、2024年4月1日着任）

博士研究員 谷口 篤史（博士（理学）、2022年4月1日着任）、Charles Fosseprez（Ph. D (Frontiers of life)、2022年5月16日着任）、Alid Al-Asmar（Ph. D (Ecology, Biodiversity and Evolution)、2025年2月1日着任）、Bernd Langer（Ph. D (plasma physics)、2020年4月1日着任）

事務補助員 佐藤 美加

### 学生

博士課程 石浦 卓也、神田 幸輝、高橋 奏太、釜屋 憲彦

修士課程 王 茜、米田 翼、山岸 柊哉、対馬 舞、生形 綾音

学部 寺内 理音、高橋 柊央

## 1. 研究目標

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続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住環境・生活スタイルの設計応用も期待できる。

当研究室は、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。あらゆる生物の共通の最小構成単位である細胞という特質を活かして、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。

具体的には以下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）マイクロ流体力学を基軸とした微生物生態における力学機構の定量化。

## 2. 研究成果

### 繊毛虫ソライロラップムシの固着場所選択行動

視覚情報を持つ動物は、自然界にありふれた地形や構造物の幾何構造をランドマークとして利用し空間把握を行っている。構造物の一見抽象的な形状は空間ナビゲーションにおいて重要な役割を果たす。一方、視覚情報を持っていない単細胞生物の空間把握方法の関しては、従来まで光や化学物質、重力などに対する走性行動としてその生物物理学的なメカニズムが研究されてきた。一方単細胞生物のミクロな棲息環境にも幾何的に多様な構造物が存在している。ミクロ形状が単細胞生物の行動に与える影響について、生物周囲の形状に応じた行動変化に関してはあまり理解が進んでいない。

そこで、淡水環境中で遊泳と固着を周囲の環境に応じて切り替える繊毛虫ソライロラップムシの固着行動に着目し、遊泳アリーナの外形を様々に変え、細胞周囲の幾何形状が固着行動にどのような影響を与えるか調査した。その結果、ソライロラップムシは構造物と容器の壁によって形成された「すみっこ」に固着する傾向がわかり、狭空間を構成する幾何的な性質に対する選好性が明らかになった。また周囲に構造物がある環境では、遊泳アリーナ全体を泳ぎまわっていた細胞が、固着前に構造物の表面を探索するモードに切り替わることが分かった。この切り替えは細胞内Ca<sup>2+</sup>イオンの濃度によって制御されていることが示唆された。これらの結果から生態系のミクロな堆積物によって構成される幾何形状は単細胞生物の棲息場所の決定に影響を与えていると考えられる。

### 繊毛虫ラップムシのすみっこ探索を実現するシンプルな物理学的メカニズム

淡水中を自由遊泳するラップムシはすみっこに好んで固着する傾向がある。固着前にラップムシは細胞形状を変化させ壁沿いを移動していることが明らかになった。一方で視覚情報を持っていないラップムシがどのように壁を認識して壁に沿って移動しているのか、そのメカニズムはわかっていない。

そこで壁沿いを移動する際に細胞形状が変形することを考慮してラップムシの推進力の分布と形状を反映させた流体力学的な行動シミュレーションを実施した。その結果、壁沿いの移動はラップムシの非対称的な形状変化によって実現されることが明らかになった。この結果は視覚情報なしに壁沿いを移動することのできるシンプルなメカニズムであることが示唆される。

### 粘菌における管ネットワークを介した物質の全体内送達と循環

生物の全身を覆う輸送ネットワークは、機能的なシステムを実現し、栄養素やシグナルの分布を促進する重要なインフラストラクチャである。大型のアメーバ状生物である*Physarum polycephalum*は、目に見える迅速に適應する管ネットワーク構造を特徴とするため、生物学的輸送ネットワークの研究における有用なモデルとして注目されている。粒子追跡速度測定法を用いて、*Physarum*の変形体が複雑な管ネットワークを発達させる過程で、全身にわたる原形質の流れの速度を測定した。これらの測定結果に基づき、原形質が体全体でどのように輸送され混合されるかを推定した。私たちの結果は、静脈ネットワークが原形質の体全体での効果的な混合を大幅に促進することを示唆しており、栄養分配やシグナル伝達に重要な生理学的意義を持つ可能性がある。

## 往復せん断刺激下で駆動するマイクロ液滴クラスターの発見

回転粘度計（レオメータ）は通常、ソフトマターの変形応答を測定して粘弾性を算出するためのレオロジー測定機器として使用されている。他方、その機構に着目すると、サンプルに対して非常に精密に一定速度・周波数のせん断刺激を与える装置として扱うことが可能である。レオメータと光学顕微鏡を物理的に組み合わせた装置を使って、油中水滴懸濁液に往復せん断刺激を与えると、液滴がクラスター化して一方向に動き出す現象を発見した。往復刺激を与えられている物体が凝集して一方向に動き出すその力学機構は自明ではなく、物理学におけるアクティブマター現象として非常に興味深い。また、マイクロ流体工学技術として微小粒子の輸送やソーティングなどへの応用も考えられる。

本研究ではまず、どのような状況で液滴クラスターの一方向運動が発生するのかを実験で調べた。微小粒子の種類、クラスター内粒子の個数、粒子サイズ比、往復刺激の周波数を変えて実験を行った結果、大小の液滴が凝集している非対称形状のクラスターが、重心の偏っている方向に向かって動いていることが明らかになった。加えて、力学機構を明らかにするため、液滴間の摩擦を考えた1次元力学モデルと流体相互作用を考えた2次元粘性流体モデルを使って、理論的な検証も行った。結果として、液滴が凝集するメカニズムは流体相互作用によって説明できることが分かった。

## 被殻アメーバ *Arcella* のユニークな運動メカニズムの解明

接着性真核細胞は一般的にアメーバ様運動により移動する。この運動機構にはアクチン重合駆動型とブレブ駆動型の二つが存在すると考えられている。しかし、多様な自由生活型アメーバの中にはこのような運動には分類されない運動を行うものが存在する。その一例としては *Arcella* が挙げられる。この細胞は細胞質が殻によっておおわれているが腹側にある単一の開口部から複数の仮足を伸ばし、その殻を引っ張って移動する。また *Arcella* は泥炭地や淡水など様々な環境で一般的に見られるため、異なる基質に適応して移動していると考えられる。そこで、接着性基質の違いと運動におけるその影響を調べるために、ガラスおよびゲル基質上での *Arcella* の詳細な運動を画像解析により特徴づけた。結果としては、ゲル基質上ではガラス基質上よりも運動のランダム性が高く、この行動は仮足の伸長方向と関連していた。さらに運動メカニズムを詳しく調べるため、運動方向と細胞が発揮する牽引応力の関係を調べた。その結果、牽引応力場の双極子モーメントが細胞の運動軸を決定すること、また四極子モーメントの要素が前方および側方への運動と関連していることを発見した。

## 3. 今後の研究の展望

### 固着場所選択を行う織毛虫ラップムシの生物物理学的なメカニズムの解明

織毛虫ラップムシの「すみっこ」固着行動は構造物の存在する複雑な形状において壁沿いを移動することが分かっている。幾何的に複雑な環境では細胞と構造物の接触が頻繁に引き起こされるため、今後は細胞への機械刺激の強さや頻度に焦点を当て、遊泳から固着への行動遷移を引き起こす要因の詳細を生物物理学的に明らかにしていく予定である。

またラップムシなどの原生物の棲息環境は時空間的に変化が富んでいる。そのため今後はダイナミックに変化するミクロな環境において生まれるラップムシの適応的な行

動について調査して生きたい。

## 往復せん断刺激下で駆動するマイクロ液滴クラスターの力学機構の解明

研究成果において発見した往復せん断刺激によって駆動するマイクロ液滴クラスターの力学機構をより深く検証する。現段階においては摩擦モデル、流体モデルの2つの力学モデルが提案されているが、そのどちらを用いても実験で見られているクラスター駆動を系統的に説明することはできていない。要因として考えられるのは、モデル内に仮定に基づくパラメータが多いため、実験条件を精密に再現できていない可能性が高い。そこで、各モデルにおいて不明なパラメータを実験的に定量し、実測値を組み込んだ力学モデルを構築することを目指す。具体的には、実験として液滴-基板間と液滴-液滴間の摩擦係数の推定、液滴周りに形成されている四重極子型の流れ場の液滴サイズ・周波数依存性を測定する予定である。

## 被殻アメーバ運動メカニズムの一般化

有殻アメーバは淡水中でしばしば発見され、バクテリアを餌とし、自身より大型の生物の餌となることでエネルギーや物質循環に大きく貢献していると考えられている。有殻アメーバは主にアメーバ運動によって移動すると考えられるが、主要なバクテリアフィーダーとして有殻アメーバの移動は環境に多大な影響を与える可能性がある。そこで今後は、様々な有殻アメーバの運動や行動を定量化し、それらの一般化を試みる予定である。

## 4. 資料

### 4.1 学術論文（査読あり）

- 1) [Y. Sato, C. Fosseprez, Y. Nishigami, K. Sato, H. Orihara, and T. Nakagaki\\*](#), Measurement of protoplasmic streaming over the entire body of *Physarum plasmodium*, and estimation of the transport and mixing of protoplasm through the intricate vein network, *Biophysics and Physicobiology* 22, e220002 (2025). (DOI: 10.2142/biophysicsico.bppb-v22.0002)
- 2) R. Yanase, K. Pruzinova, B. O. Owino, E. Rea, F. Moreira-Leite, [A. Taniguchi](#), S. Nonaka, J. Sádlová, B. Vojtkova, P. Volf, and J. D. Sunter\*, Discovery of essential kinetoplastid-insect adhesion proteins and their function in *Leishmania-sand fly* interactions, *Nat. Commun.* 15, 6960 (2024). (DOI: 10.1038/s41467-024-51291-z)
- 3) A. Fajar\*, [H. Orihara](#), Linear and Nonlinear Electro-optic Response of MHPOCBC, *J. Math. Fund. Sci.* 55, 222-238 (2024). (DOI: 10.5614/j.math.fund.sci.2024.55.3.2)
- 4) Y. Takikawa\*, T. Tamehiro, M. Iwata, [H. Orihara](#), Soft Mode Behavior Near the Critical Endpoint of a Nematic Liquid Crystal with Positive Dielectric Anisotropy, *J. Phys. Soc. Jpn.* 93, 064004 (2024). (DOI: 10.7566/jpsj.93.064004)
- 5) K. Iijima, [H. Orihara](#), H. Okabe, K. Hara, Y. Hidaka\*, Dynamical Nonlinearity in Relaxation of Spatiotemporal Chaos, *J. Phys. Soc. Jpn.* 93, 104005 (2024). (DOI: 10.7566/jpsj.93.104005)
- 6) H. Tsujisaki, M. Hosokawa, Y. Takasaki, Y. Yamagata, Y. Kawabata, D. Tatsumi, S. Seno, K. Miyamoto, T. Isono, T. Yamamoto, H. Tani, T. Satoh, [H. Orihara](#), K. Tajima\*, Detailed structural analyses and viscoelastic properties of nano-fibrillated bacterial celluloses, *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* 8, 100565-100565 (2024). (DOI: 10.1016/j.carpta.2024.100565)
- 7) Y. Takikawa\*, K. Yoshihara, M. Iwata, [H. Orihara](#), Transient Response of Shear Stress to a Step Electric Field in a Nematic Liquid Crystal, *J. Phys. Soc. Jpn.* 94, 024802 (2025). (DOI: 10.7566/jpsj.94.024802)

- 8) C. Okimura\*, S. Akiyama, Y. Nishigami, R. Zaitso, T. Sakurai, Y. Iwadate\*, Linear contraction of stress fibers generates cell body rotation, Cell Reports Physical Science 6, 102429 (2025). (DOI: 10.1016/j.xcrp.2025.102429)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 中垣俊之, “細胞から始まる知の物語”, 東京大学出版会 PR 誌 UP, pp. 38–43, 2024 年 4 月号.

#### 4.4 著書

- 1) 谷口篤史, 第一部 第二章 第二節「顕微鏡の光学理論の基礎」, 実験医学別冊 正しい結果を得るためのイメージング&画像解析実践テキスト あなたの目的にあった顕微鏡の選択と撮像, 定量解析フローの組み立て, 羊土社 (2024). (ISBN: 978-4-7581-2271-9)
- 2) 谷口篤史, 第一部 第二章 第三節「明視野顕微鏡法の種類」, 実験医学別冊 正しい結果を得るためのイメージング&画像解析実践テキスト あなたの目的にあった顕微鏡の選択と撮像, 定量解析フローの組み立て, 羊土社 (2024). (ISBN: 978-4-7581-2271-9)
- 3) 谷口篤史, 附録「F 値」, 散乱, 実験医学別冊 正しい結果を得るためのイメージング&画像解析実践テキスト あなたの目的にあった顕微鏡の選択と撮像, 定量解析フローの組み立て, 羊土社 (2024). (ISBN: 978-4-7581-2271-9)
- 4) 谷口篤史, 附録「散乱」, 実験医学別冊 正しい結果を得るためのイメージング&画像解析実践テキスト あなたの目的にあった顕微鏡の選択と撮像, 定量解析フローの組み立て, 羊土社 (2024). (ISBN: 978-4-7581-2271-9)
- 5) 釜屋憲彦, 「ユクスキュルの環世界論と物理学」, 佐々真一, 今野真二, 谷口義明, 釜屋憲彦, ハラルド・クマレ, 井元信之, 伊藤憲二, 佐藤悠大, 佐藤文隆, 川島禎子 (著), 高木隆司 (表紙画), 細谷暁夫 (裏表紙画) 編『窮理 第 26 号』, 31-41 頁, 窮理舎 (2024). (ISBN: 9784908941450)

#### 4.5 特許

該当なし

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) T. Nakagaki, “Remodeling of transport network, well-adaptive to environmental complexity, in slime mold”, Banff International Research SWS: Formation of Looping Networks: from Nature to Model, Banff, Canada, July 2024.
- 2) T. Nakagaki, “Adaptable network of veins to environmental complexity in an huge amoeboid organism of Physarum plasmodium”, International Soft matter Conference 2024 at Raleigh Convention Center, NC, USA, Raleigh, NC, USA, July 2024
- 3) T. Nakagaki, “Mechanics of forward-backward switching in crawling locomotion of limbless and legged organisms”, IUTAM Symposium on Mechanics of Soft materials and Soft Robots at Univ Tokyo, Tokyo, Japan, May 2024.
- 4) T. Nakagaki, “Smart Heuristics of a single-celled organism- Mathematical Ethology of an Amoeba -”, iTHEMS Colloquium at Okochi Hall, RIKEN Wako Campus, Wako, Japan, March 2025.
- 5) T. Nakagaki, “Remodeling of biological form driven by load-induced local modulation of growth rate: vessel, bone, tree”, International Active Matter WS 2025 at Meiji University (Nakano Campus), Tokyo, Japan, January 2025.
- 6) Y. Nishigami, “Behaviors and locomotion of single-celled eukaryotic microorganisms”, The Joint Symposium of the

Taiwan Biophysical Society and International Network of Protein Engineering Centers, Hsinchu, Taiwan, May 2024.

##### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) T. Ohmura, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “Spatial Correlation between Biofilm Material Property and Extracellular Matrix Component”, 第 47 回日本分子生物学会年会, 福岡国際会議場, 福岡, 2024 年 11 月 27 日.
- 2) 越後谷駿, “細胞周囲の幾何形状が遊泳単細胞生物ラッパムシの固着行動に与える影響”, 日本機械学会第 36 回バイオエンジニアリング講演会, 名古屋工業大学, 名古屋, 2024 年 5 月 12 日.
- 3) 石浦卓也, 中垣俊之, 佐藤勝彦, 西上幸範, “真正粘菌の水上浮遊・水面移動行動に関して、細胞表面の構造変化に着目した行動研究”, 日本動物学会 第 95 回長崎大会, 長崎大学, 長崎, 2024 年 9 月 12 日.

##### c. 一般講演 (国際学会)

- 1) T. Ohmura, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “Heterogeneous mechanical property inside 3D bacterial biofilms”, APS Global Physics Summit, Anaheim, United States of America, March 19th, 2025.
- 2) S. Echigoya, K. Sato, T. Nakagaki, Y. Nishigami, “Swimming ciliate, *Stentor* selects anchoring sites accompanied by extracellular geometries”, 21st International Union for Pure and Applied Biophysics and 62nd Biophysics Society of Japan (IUPAB 2024), Kyoto, Japan, June 26th, 2024.
- 3) Y. Nishigami, “Locomotion mechanism of the shelled amoeba *Arcella* sp.”, Asian Pacific Congress of Protistology 2024 (APCOP-V 2024), UQ Brisbane, Australia, November 4th, 2024.
- 4) G. Matsumoto, K. Sato, T. Nakagaki, Y. Nishigami, “Characteristics and mechanics of the crawling of the tested amoeba *Arcella* sp.”, 21st International Union for Pure and Applied Biophysics and 62nd Biophysics Society of Japan (IUPAB 2024), Kyoto, Japan, June 28th, 2024.
- 5) H. Ebata, Y. Nishigami, H. Fujiwara, S. Kidoaki, M. Ichikawa, “Shape coupled bifurcation of an amoeba cell brings ballistic movement in amoeboid migration”, 21st International Union for Pure and Applied Biophysics and 62nd Biophysics Society of Japan (IUPAB 2024), Kyoto, Japan, June 28th, 2024.
- 6) C. Okimura, S. Akiyama, Y. Nishigami, T. Sakurai, Y. Iwadate, “Conversion from Linear Contraction to Rotation of Stress Fibers in Migrating Keratocytes”, 21st International Union for Pure and Applied Biophysics and 62nd Biophysics Society of Japan (IUPAB 2024), Kyoto, Japan, June 25th, 2024.
- 7) Y. Nishigami, “Behavior of ciliates in response to extracellular stimuli”, The 2nd Taiwan-Japan International Workshop on Applied Mathematics Hsinchu, Taiwan, April 2024.

##### d. 一般講演 (国内学会)

- 1) 大村拓也, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “3次元バクテリアバイオフィルムの構造力学”, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 札幌, 2024 年 9 月 17 日.
- 2) 越後谷駿, 佐藤勝彦, 中垣俊之, 西上幸範, “遊泳繊毛虫ラッパムシの固着遷移行動における機械刺激の影響”, 日本動物学会 第 95 回長崎大会, 長崎大学文教キャンパス, 長崎, 2024 年 9 月 12 日.
- 3) 越後谷駿, 佐藤勝彦, 岸田治, 中垣俊之, 西上幸範, “構造物存在下におけるツライロラッパムシの固着前行動”, 第 57 回日本原生生物学会大会, KDDI 維新ホール, 山口, 2024 年 11 月 23 日.
- 4) 瀧川佳紀, 芳原晃旗, 岩田真, 折原宏, “ステップ電場に対するネマチック液晶の応力の過渡応答”, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 札幌, 2024 年 9 月 18 日.
- 5) 長屋智之, 米良天翔, 武田純, 氏家誠司, 小林史明, 折原宏, “三環フッ素系液晶における電場下での自発流れと負の粘性”, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 札幌, 2024 年 9 月 18 日.

- 6) 瀧川佳紀, 山本悠太, 佐々木裕司, 岩田真, 折原宏, “DC電場下における誘電異方性が負のネマチック液晶のソフトモード”, 2024年日本液晶学会討論会, 富山大学, 富山, 2024年9月13日.
- 7) 折原宏, 長屋智之, “液晶における電場誘起乱流と負性粘度のシミュレーション”, 2024年日本液晶学会討論会, 富山大学, 富山, 2024年9月13日.
- 8) 米良天翔, 武田純, 折原宏, 氏家誠司, 長屋智之, “三環フッ素系液晶の負の粘性状態における平均流の特性”, 日本物理学会 2025年春季大会, オンライン, 2025年3月19日.
- 9) 神田幸輝, 西上幸範, 佐藤勝彦, 中垣俊之, “繊毛虫ハルテリアの捕食者からの逃避行動”, 日本動物学会第95回長崎大会, 長崎大学文教キャンパス, 長崎, 2024年9月12日.
- 10) 石浦卓也, 中垣俊之, 佐藤勝彦, 西上幸範, “水環境における変形菌の生存戦略”, 第57回日本原生生物学会, KDDI 維新ホール, 山口, 2024年11月23日.
- 11) 釜屋憲彦, 谷口篤史, 西上幸範, 中垣俊之, 「ウズボカマリのチリモ摂取過程とワムシ付着による移動行動の報告」, 第43回日本動物行動学会大会, 帝京科学大学, 上野原, 2024年11月4日.
- 12) 釜屋憲彦, 中垣俊之, 谷口篤史, 西上幸範, 「ウズボカマリの餌環境依存的な探索行動と仮足動態変化」, 第57回日本原生生物学会大会, KDDI 維新ホール, 山口, 2024年11月23日.
- e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)
- 1) 大村拓也, “バクテリアバイオフィーム内部における力学的物性の空間分布”, 第10回北大・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, 札幌, 2024年9月6日.
- 2) T. Ohmura, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “Spatial Distribution of Material Property inside Bacterial Biofilm”, 第6回ジオラマ行動力学領域全体会議, 北海道大学クラーク会館, 札幌, 2024年9月20日.
- 3) T. Ohmura, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “生きたバクテリアバイオフィーム内部の3次元弾性・塑性応答測定”, ジオラマ行動力学勉強会 in 広島, 広島大学ミライクリエ, 東広島, 2024年10月11日.
- 4) T. Ohmura, “Heterogeneous Mechanical Property within 3D Bacterial Biofilm”, The 21st Young Scientist Seminar, online (Yamaguchi University), November 24<sup>th</sup>, 2024.
- 5) T. Ohmura, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “Microrheological Measurement for Spatial Mechanical Property inside 3D Bacterial Biofilms”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 6) 大村拓也, “せん断流れと細胞追跡を用いたバイオフィーム内部の3次元物性測定”, 第28回 Young Soft Webinar, オンライン, 2025年2月13日.
- 7) 大村拓也, D.J. Skinner, K. Neuhaus, G.P.T. Choi, J. Dunkel, K. Drescher, “3次元バクテリアバイオフィームのマイクロレオロジー測定”, 2024年度日本生物物理学会北海道支部-東北支部合同例会, オンライン, 2025年2月21日.
- 8) S. Echigoya, K. Sato, O. Kishida, T. Nakagaki, Y. Nishigami, “Thigmotaxis before selecting behaviour of anchoring in the swimming ciliate, *Stentor coeruleus*”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 9) R. Terauchi, S. Echigoya, T. Ohmura, Y. Nishigami, T. Nakagaki, “Dynamic patterns of focal adhesions and traction force in crawling Amoeba proteus”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 10) 神田幸輝, 西上幸範, 佐藤勝彦, 中垣俊之, “繊毛虫ハルテリアの高速遊泳解析”, Spring School for Theoretical Biology 2025, 広島大学東広島キャンパス, 東広島, 2025年2月21日.
- 11) M. Tsushima, S. Echigoya, T. Ohmura, T. Nakagaki and Y. Nishigami, “Bio-convective patterns of low-density solution of *Tetrahymena* in deep chamber with slant bottom”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 12) A. Ubukata, T. Nakagaki, Y. Nishigami, K. Sato, “Helical Swimming and Chemotaxis”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 13) T. Yamagishi, Y. Nishigami, T. Ohmura and T. Nakagaki, “Dispersal behavior of a giant ciliate, *Homalozoon vermiculare*”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 14) 山岸悠哉, 西上幸範, 大村拓也, 中垣俊之, “繊毛虫 *Homalozoon vermiculare* の分散行動”, 生体運動研究合同班会議 2025, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」11階 会議ホール・風, 静岡, 2025年1月7日.
- 15) 山岸悠哉, 谷口篤史, 越後谷駿, 中垣俊之, 西上幸範, “繊毛虫 *Homalozoon vermiculare* の拡散行動”, 2024年度生物物理学会北海道支部-東北支部合同例会, オンライン, 2025年2月21日.
- 16) 山岸悠哉, 西上幸範, 中垣俊之, “繊毛虫 *Homalozoon vermiculare* の分散運動”, 第6回ジオラマ行動力学領域全体会議, 北海道大学クラーク会館, 札幌, 2024年9月20日.
- 17) 山岸悠哉, 谷口篤史, 越後谷駿, 中垣俊之, 西上幸範, “繊毛虫 *Homalozoon vermiculare* の首振り運動と探索行動”, 第7回ジオラマ行動力学領域全体会議, 東北大学片平キャンパス片平さくらホール, 仙台, 2025年3月20日.
- 18) 石浦卓也, 中垣俊之, 佐藤勝彦, 西上幸範, “モジホコリの水に対する生存戦略”, 第6回ジオラマ行動力学領域全体会議, 北海道大学クラーク会館, 札幌, 2024年9月20日.
- 19) T. Ishiura, T. Nakagaki, Y. Nishigami, K. Sato, “Crawling movement on the water surface in a large amoeboid organism of *Physarum polycephalum*”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 20) N. Kamaya, T. Nakagaki, A. Taniguchi, Y. Nishigami, “Food-Dependent Exploratory Behavior and Pseudopodial Dynamics in *Lesquereusia spiralis*”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 21) 米田翼, 西上幸範, 佐藤勝彦, 折原宏, 中垣俊之, “ソフトマターが見せる往復シヤ駆動非対称運動の機構解明”, 第64回生物物理若手の会 夏の学校, 定山万世閣 ホテルミリオーネ, 札幌, 2024年8月26~29日.
- 22) T. Yoneda, T. Ohmura, Y. Nishigami, K. Sato, H. Orihara and T. Nakagaki, “Unidirectional motion of clustered microdroplets under symmetric oscillatory shear flow”, The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024.
- 23) 中垣俊之, “原生生物から探るもう一つの知-複雑環境における粘菌の賢い行動-”, 東邦大学生命科学シンポジウム, 2024年10月.
- 24) 中垣俊之, “生き物の知性を探る旅-複雑環境における粘菌の賢い行動-”, 中部大学創発学術院セミナー, 2024年5月.

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 1) 学術変革領域研究(A) ジオラマ環境で覚醒する原生知能を定式化する細胞行動力学 第6回領域全体会議, 北海道大学クラーク会館, 札幌, 2024年9月26日.

- 2) 日学術変革領域研究(A)ジオラマ環境で覚醒する原生知能を定式化する細胞行動力学 第7回領域全体会議, 東北大学片平さくらホール, 仙台, 2025年3月20-21日.
- 3) The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, December 10<sup>th</sup>, 2024
- 4) 「原生生物」の巧みな行動戦略に迫る!, 長崎大学文芸キャンパス, 長崎, 2024年9月12日.
- 5) 第2回ジオラマ行動力学・散乱透視学会合同ワークショップ, 電気通信大学創立80周年記念会館, 東京, 2024年10月25日.
- 6) 国際ワークショップ Behavior and Physiology of Protists -Experiments and Models-, Paris, France, September 13<sup>th</sup>, 2024.
- 7) Hokkaido-NYCU Joint Workshop on Applied Mathematics, National Ynag Ming Chiao Tung University, Taiwan, April 11-12<sup>th</sup>, 2024.

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 西上幸範 (伊藤 弘明, 千葉大学), “アメーバ運動における細胞膜ダイナミクス”.
- 2) 西上幸範 (片岡 研介, 基礎生物学研究所), “テトラヒメナの接合時の行動ダイナミクス”.
- 3) 西上幸範 (林 健太郎, 基礎生物学研究所), “細胞外微細構造物と原生生物の行動ダイナミクス”.
- 4) 西上幸範 (市川 正敏, 京都大学), “気液界面におけるテトラヒメナの集団行動”.

##### b. 国際共同研究

- 1) Y. Nishigami (Rieu, Jean-Paul, Université de Lyon), “Traction stress in amoeboid locomotion”.

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 中垣俊之, 佐藤勝彦, 西上幸範, 佐藤譲 (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 (2019~2024年度, 3,000千円)”.

#### 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) 越後谷駿 (代表), 研究活動スタート支援, “水環境中のミクロな「形状」が単細胞生物の棲息場所選択に与える影響”, 2024年7月~2026年3月.
- 2) 神田幸輝 (代表), JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (北海道大学 EXEX 博士課程人材フェローシップ), “繊毛虫ハルテリアにおける跳躍行動の包括的理解”, 2024年4月~2027年3月.
- 3) 石浦卓也 (代表), JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (北海道大学 EXEX 博士課程人材フェローシップ), “変形菌の浮上機構の解明”, 2023年4月~2026年3月.
- 4) 釜屋憲彦 (代表), JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (北海道大学 EXEX 博士課程人材フェローシップ), “有殻アメーバおよびトビケラ類幼虫の能動的ニッチ構築に関わる適応行動のアルゴリズム”, 2024年4月~2027年3月.
- 5) 高橋奏太 (代表), JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (北海道大学 EXEX 博士課程人材フェローシップ), “変形菌が子実体形成時に立体空間で発揮する行動戦略の数理的解明”, 2023年10月~2026年9月.
- 6) 中垣俊之 (代表), 学術変革領域研究(A), “ジオラマ環境で覚醒する原生知能を定式化する細胞行動力学 (No.21H05303)”, 2021年4月~2026年3月.
- 7) 中垣俊之 (代表), 学術変革領域研究(A), “繊毛虫・アメーバの集団的空間探査と空間活用のアルゴリズムの解明 (No. 21H05310)”, 2021年4月~2026年3月.
- 8) 西上幸範 (代表), 基盤研究(C), “Karenia 属赤潮原

因藻の遊泳および接着機構の解明”, 2024年4月~2027年3月

- 9) 西上幸範 (分担), 学術変革領域(A), “環境連成力学を基盤とした微生物行動シミュレータの開発”, 2021年9月~2026年3月

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

##### c. 民間助成金

- 1) 越後谷駿 (代表), 住友財団 2023年度 基礎科学研究助成, “細胞とのインタラクションを通じた単細胞生物の外空間認識方法の解明”, 2023年11月~2024年11月.
- 2) 高橋奏太 (代表), 笹川研究助成, “変形菌の子実体形成時における「賢い」胞子散布戦略を解き明かす: 受動的拡散の基礎研究”, 2024年4月~2025年3月.

#### 4.10 受賞

- 1) Ayane Ubukata (Helical Swimming and Chemotaxis), The 25th RIES-HOKUDAI International Symposium Poster Award, December 10<sup>th</sup>, 2024.

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

- 1) 西上幸範, 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測・政策基盤調査研究センター, 科学技術専門家ネットワーク・専門調査員, 2023年5月~現在.
- 2) 西上幸範, 第五期ナショナルバイオリソースプロジェクト ゾウリムシ, 運営委員会委員, 2022年4月~現在.

##### b. 国内外の学会の役職

- 1) 越後谷駿, ネットワーク委員会 委員 (日本原生生物学会), 2022年2月~現在.
- 2) 越後谷駿, 学会活性化委員会 委員 (日本原生生物学会), 2024年11月~現在.
- 3) 神田幸輝, 夏の学校会計チーフ (生物物理若手の会), 2024年1月~12月.
- 4) 神田幸輝, 監事 (生物物理若手の会), 2025年1月~現在.
- 5) 西上幸範, ネットワーク委員会 委員長 (日本原生生物学会), 2020年11月~現在.
- 6) 西上幸範, 学会活性化委員会 委員 (日本原生生物学会), 2021年10月~現在.
- 7) 西上幸範, 編集委員 委員 (日本原生生物学会), 2014年11月~現在.
- 8) 西上幸範, 評議委員 (日本原生生物学会), 2021年10月~2024年11月.
- 9) 西上幸範, 分野別専門委員 細胞形態形成 (日本生物物理学会), 2025年1月~現在.

##### c. 兼任・兼業

- 1) 中垣俊之, 理事 (公立はこだて未来大学、非常勤), 2022年4月~.
- 2) 中垣俊之, スーパーサイエンスハイスクール運営委員 (北海道立啓成高等学校)
- 3) 中垣俊之, 客員教授 (中部大学創発学術院), 2024年4月~.
- 4) 中垣俊之, ゲスト教授 (台湾国立陽明交通大学応用数学科)

##### d. 外国人研究者の招聘

該当なし

##### e. 北大での担当授業科目 (対象、講義名、担当者、期間)

- 1) 全学共通、一般教育演習(フレッシュマニター) 暮らしの中のサイエンス、西上幸範、1学期

- 2) 理学部専門、生物系のための物理学、中垣俊之・西上幸範、1学期
- 3) 生命科学院専門、生命機能制御科学特論、中垣俊之・西上幸範、冬ターム
- 4) 生命科学院専門、ソフトマター物理学特論、中垣俊之・西上幸範、冬ターム
- 5) 理学部専門、数学総合講義 I、中垣俊之・西上幸範、2学期

**f. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）**

- 1) NHK 文化センター講座（オンライン）、「ユクスキユル『生物から見た世界』～環世界の散策～」、釜屋憲彦、2024年2月~7月
- 2) 公立はこだて未来大学、物質の科学、中垣俊之、2025年2月

**g. アウトリーチ活動**

- 1) 日本動物学会 第95回長崎大会一般向けイベント「動物学ひろば」にて企画出展「すみっこ大好き単細胞 ソライロラップムシ」
- 2) LIP フェスティバルにて講演「コバントビケラ幼虫はいかに葉布団をつくるのか～水辺の虫の建築学～」  
（講師：釜屋憲彦、主催：東川町教育委員会、2024年7月20日）
- 3) 森フェス in 遠野 にて講演「森を奏でる多様な環世界」  
（講師：釜屋憲彦、主催：特定非営利活動法人 遠野エコネット、2024年9月15日）
- 4) 生命科学 DOKI DOKI 研究室 これから研究の話をしよう 第23回（講師：西上幸範、主催：公益財団法人テルモ生命科学振興財団、2024年10月15日）

**h. 新聞・テレビ等の報道**

- 1) “Episode 4 : Le temps des grandes découvertes”, フランス国営 TV, France 2, 2024年5月13日.

**i. 客員教員・客員研究員など**

- 1) 落合 廣、客員研究員、北海道大学名誉教授、2021年4月1日～2025年3月31日.
- 2) 折原 宏、客員研究員、北海道大学名誉教授、2023年4月1日～2025年3月31日.
- 3) 丹田 聡、客員研究員、北海道大学名誉教授、2024年4月1日～2025年3月31日.
- 4) 佐藤 耀、客員研究員、2024年4月1日～2025年3月31日.

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位：4人

- 1) 王 茜, 生命科学院, 修士 (ソフトマター科学), Rethinking WX + Bias: Exploring the benefits of dual-weight comparison methods for learning.
- 2) 米田 翼, 生命科学院, 修士 (ソフトマター科学), 細胞スケールのソフトマターが対称往復シア下で生じる非対称性運動-現象の発見と機構の解明-.
- 3) 山岸 柊哉, 生命科学院, 修士 (ソフトマター科学), 繊毛虫 *Homalozoon vermiculare* の拡散行動.
- 4) 対馬 舞, 生命科学院, 修士 (ソフトマター科学), 遊泳空間形状依存的なテトラヒメナ生物対流パターンの形成.

博士学位：0人

該当なし

## 数理科学協働研究分野

スタッフ

教授 永井 健治 (博士 (医学)、2022年4月1日着任、2025年3月31日任期満了)

### 1. 研究目標

「生命とは何か？」この素朴で、しかし深遠なテーマに迫るために、私たちの研究室では生きた細胞の中で起こる現象を観て理解する研究を行っています。生命の理解に役立つ蛍光タンパク質や生物発光タンパク質を用いたバイオセンサーや、トランススケールスコープ等の他に類例を見ないイメージング技術を開発するだけでなく、これまで見過ごされてきた外れ値的特徴量を有する極めて少数の細胞が生起する生命システムの臨界的状態変化を解明する「シンギュラリティ生物学」を展開し、新たなパラダイムの創出を目指しています。また、次世代の超省エネルギー社会の実現に向けて、電力を必要とせず二酸化炭素も排出しない次世代の照明デバイスとして自発光植物の開発も進めています。

### 2. 研究成果

### 3. 今後の研究の展望

### 4. 資料

#### 4.1 学術論文 (査読あり)

- 1) K. Temma, R. Oketani, T. Kubo, K. Bando, S. Maeda, K. Sugiura, T. Matsuda, R. Heintzmann, T. Kaminishi, K. Fukuda, M. Hamasaki, T. Nagai, and K. Fujita\*, Selective-plane-activation structured illumination microscopy, *Nat. Method* 21, 889-896 (2024) (DOI: 10.1038/s41592-024-02236-3)
- 2) S. Fukushima, T. Wazawa, K. Sugiura, and T. Nagai\*, Extremely Sensitive Genetically Encoded Temperature Indicator Enabling Measurement at the Organelle Level, *ACS Sens.* 9, 3889-3897 (2024). (DOI: 10.1021/acssensors.3c02658)
- 3) S. H. Kusuma, T. Kakizuka, M. Hattori, and T. Nagai\*, Autonomous multicolor bioluminescence imaging in bacteria, mammalian, and plant hosts, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 121, e2406358121 (2024). (DOI: 10.1073/pnas.2406358121)
- 4) T. Ichimura\*, T. Kakizuka, Y. Taniguchi, S. Ejima, Y. Sato, K. Itano, K. Seiriki, H. Hashimoto, K. Sugawara, H. Itoga, S. Onami, and T. Nagai\*, Volumetric trans-scale imaging of massive quantity of heterogeneous cell populations in centimeter-wide tissue and embryo, *eLife* 13:RP93633 (2024). (DOI: 10.7554/eLife.93633.2.sa3)
- 5) R. Tanaka, K. Sugino, K. Osabe, M. Hattori, and T. Nagai\*, Genetically encoded bioluminescent glucose indicator for biological research, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 742, 151092 (2025). (DOI: 10.1016/j.bbrc.2024.151092)
- 6) T. Wu, M. N. Hossain, M. Hattori, and T. Nagai\*, Ratiometric bioluminescent detection of Cu(II) ion based on differences in enzymatic reaction kinetics of two luciferase variants, *Talanta* 287, 127576 (2025). (DOI: 10.1016/j.talanta.2025.127576)

- 7) M. Hattori, T. Wazawa, M. Orioka, Y. Hiruta, and T. Nagai\*, Creating coveted bioluminescence colors for simultaneous multi-color bioimaging, *Sci. Adv.* 11, eadp4750 (2025). (DOI: 10.1126/sciadv.adp4750)
- 8) R. Ozaki-Noma, T. Wazawa, T. Kakizuka, H. Shidara, K. Takemoto, and T. Nagai\*, Positive-Type Reversibly Photoswitching Red Fluorescent Protein for Dual-Color Super-resolution Imaging with Single Light Exposure for Off-Switching, *ACS Nano* 19, 7188-7201 (2025). (DOI: 10.1021/acsnano.4c16847)

#### 4.2 学術論文 (査読なし)

該当なし

#### 4.3 総説・解説・評論等

- 1) 林久美子, G. Hummer, J. A. Joseph, R. Li, 永井健治, 大浪修一, F. Zhang, 北村朗, 富樫祐一, 角五彰, 藤原郁子, 小松崎民樹, IUPAB京都2024年会議における座談会: 我々の生物物理学の次の50年を夢見て (前半), *生物物理*, 65, 35-46 (2025). (DOI: 10.2142/biophys.65.35)
- 2) K. Goda\*, T. Igaki, B. Kuhn, N. Mizushima, T. Nagai, A. Nakagawa, N. Osumi, A. Q. Shen, M. Sonoshita, and M. Yanagisawa, Japan can be a science heavyweight once more — if it rethinks funding, *Nature* 638, 318-320 (2025). (DOI: 10.1038/d41586-025-00394-8)

#### 4.4 著書

- 1) 杉浦一徳, 永井健治, 正しい結果を得るためのイメージング&画像解析実践テキスト, 実験医学別冊, p.87-88, 羊土社 (2024). (ISBN 978-4-7581-2271-9)
- 2) 服部 満, 永井健治, 正しい結果を得るためのイメージング&画像解析実践テキスト, 実験医学別冊, p.88-89, 羊土社 (2024). (ISBN 978-4-7581-2271-9)

#### 4.5 特許

該当なし

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演 (国際学会)

- 1) T. Nagai, “Millions of single live cell analysis with automated trans-scale-scope "AMATERAS"” IUMPAB 2024, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, June 21<sup>st</sup>, 2024
- 2) T. Nagai, “Automated trans-scale opens up a new horizon in life science research” IUMPAB 2024, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, June 25<sup>th</sup> 2024.
- 3) T. Nagai, “Trans-scale scope opens up a new horizon in life science research”, NanoBioCoM2024, ICISE, Quy Nhon, Binh Dinh province, Vietnam, September 26<sup>th</sup>, 2024.
- 4) T. Nagai, “Toward enhancing bioluminescence in engineering plants using quantum beams for sustainable bioimaging and lighting application”, Q-BASIS2024, Osaka University, Osaka, Japan, November 12<sup>th</sup>, 2024.

##### b. 招待講演 (国内学会)

- 1) 永井健治, “発光酵素の高光度化と多色化”, 酵素工学会研究会第 91 回講演会, 京都大学益川ホール, 京都, 2024 年 4 月 26 日.
- 2) 永井健治, “自発的生物発光を利用したマルチプレックスバイオイメージング法の開発”, 日本顕微鏡学会

第 80 回学術講演会, 幕張メッセ, 千葉, 2024 年 6 月 3 日.

- 3) 永井健治, “空間階層の限界を超える AMATERAS で誰も捉えることができなかった細胞を見出す”, 第 14 回 CSJ 化学フェスタ 2024, タワーホール船橋, 千葉, 2024 年 10 月 24 日.
- 4) 永井健治, “「外れ値」の探求序章—トランススケールスコープの開発と生命科学研究への応用”, CMX workshop Emergence Conference バイオイメージング最前線～新たな技術開発と生物学への応用～, 神戸大学神緑館記念ホール, 兵庫, 2024 年 11 月 18 日.
- 5) 永井健治, “自発光植物による持続可能な社会の実現に向けて”, 第 80 回産研学術講演会, 大阪大学産業科学研究所, 大阪, 2024 年 11 月 22 日.
- 6) 永井健治, “遺伝子にコードされた蛍光バイオプローブの汎用デザイン”, 先端的バイオ計測研究会, 新富良野プリンスホテル, 北海道, 2024 年 12 月 26 日.
- 7) 永井健治, “『外れ値』の探求序章—トランススケールスコープの開発と生命科学研究への応用”, 日本小児心血管分子医学研究会, 東京医科大学, 東京, 2025 年 2 月 6 日.
- 8) 永井健治, “ディープテックスタートアップの課題”, 第 24 回関西ベンチャー学会年次大会「大学発ベンチャーの可能性」, 関西学院大学大阪梅田キャンパス, 大阪, 2025 年 3 月 8 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) 永井健治, “「外れ値」の探求序章—トランススケールスコープの開発と生命科学研究への応用”, 東京都立大学セミナー, 東京都立大学, 東京, 2024 年 10 月 11 日.

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

a. 国内共同研究

該当なし

b. 国際共同研究

該当なし

c. 民間等との共同研究・委託研究

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

該当なし

b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

- 1) 永井健治, (蛍光/生物発光計測技術の開発による生命機能の解明研究), 第 44 回 (2024 年度) 島津賞, 公益財団法人島津科学技術振興財団, 2025 年 2 月 18 日.

#### 4.11 社会教育活動

a. 公的機関の委員

- 1) 永井健治, 連携会員 (日本学術会議), 2014 年 10 月~.
- 2) 永井健治, 生物物理学分科会委員 (日本学術会議), 2014 年 10 月~.
- 3) 永井健治, IUPAB 分科会委員 (日本学術会議), 2014 年 10 月~.
- 4) 永井健治, 遺伝子材料検討委員会 (理化学研究所バイオリソースセンター), 2019 年 4 月~.
- 5) 永井健治, アドバイザー (JST さきがけ「多細胞」), 2020 年 4 月~.
- 6) 永井健治, 先端光科学研究分野教授会議構成員 (自然科学研究機構新分野創成センター), 2020 年 6 月~.
- 7) 永井健治, 評議員 (公益財団法人東洋紡バイオテクノロジー研究財団), 2022 年 4 月~.
- 8) 永井健治, アドバイザー (JST 創発「岡田パネル」), 2023 年 10 月~.
- 9) 永井健治, 総合工学委員会総合工学企画分科会委員 (日本学術会議), 2024 年 1 月~.
- 10) 永井健治, アドバイザー (JST CREST「生命力」), 2024 年 4 月~.
- 11) 永井健治, 運営諮問会議委員 (徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所), 2024 年 11 月~.
- 12) 永井健治, アドバイザー (JST ACT-X「生体機能の理解とデザイン」), 2025 年 4 月~.

b. 国内外の学会の役職

- 1) 永井健治, 理事 (日本生物物理学会), 理事, 2014 年 1 月~.
- 2) T. Nagai, Associate Editor (Biophysics and Physicobiology), 2013 年 5 月~.
- 3) 永井健治, 理事 (日本バイオイメージング学会), 2017 年 4 月~.
- 4) T. Nagai, Editorial Advisory Board (ACS Sensors), 2013 年 5 月~.
- 5) 永井健治, 理事 (日本マグネシウム学会), 2024 年 12 月~.

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) 徳島大学学部生講義、発光するタンパク質が拓く科学と産業、永井健治、2024 年 11 月 1 日.

**g. アウトリーチ活動**

該当なし

**h. 新聞・テレビ等の報道**

- 1) “阪大など、生体内部を高解像で観察できる「超解像顕微鏡法」を開発”, マイナビニュース他 2024年4月5日.
- 2) “光る植物”, ラジオ関西 寺谷一紀のまいど! まいど! 2024年4月19日.
- 3) “大学発スタートアップ、阪大や北大が躍進 23年度調査”, 日本経済新聞 2024年5月15日.
- 4) “浮く靴や光る植物 大阪万博、中小・新興400社が未来技術”, 日本経済新聞 2024年5月15日.
- 5) 永井健治, “ABC「辛坊治郎の万博ラジオ」”, 2024年6月29日, 7月6日.
- 6) “生体分子を光で効率よく不活性化できる技術を開発”, 日本の研究.com 2024年8月7日.
- 7) “大阪・関西万博100日前 SP 未来のタネ”, テレビ東京 2025年1月3日.
- 8) “大阪・関西万博で初公開される光る植物の未来的な可能性”, サードニュース 2025年1月16日.
- 9) “万博で『光る植物』が初公開! 展示コンセプトは“未来の侘び寂び” 街灯などの照明として実用化される未来も?”, 毎日放送 5時ニュース 2025年1月22日.
- 10) “植物が照明がわりになる未来が来る!?! 「光る植物」が大阪・関西万博で一般初公開へ!”, Link with SDGs 2025年1月22日.
- 11) “「光る植物」電気の代用に”, 読売新聞 2025年3月14日.

**i. 客員教員・客員研究員など**

該当なし

**j. 修士学位及び博士学位の取得状況**

修士学位: 0人

該当なし

博士学位: 0人

該当なし

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

### スタッフ

教授 三上 秀治（博士（理学）、2020年6月1日着任）、松尾 保孝（博士（工学）、2007年8月1日着任）

客員教授 根本 知己（博士（理学）、2012年3月1日着任）

特任助教 富菜 雄介（博士（生命科学）、2021年1月1日着任）

技術職員 小林 健太郎（北大院、博士（理学）、2012年3月1日着任）、中野 和佳子（2021年4月1日着任）

### 1. 研究目標

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年にニコンインテック社（現ニコンソリューションズ社）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、現在は共創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が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・「学術変革領域研究（学術研究支援基盤形成）」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ェ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や、遠隔地から実際に機器操作も可能とするリモート利用支援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。更には本学と顕微鏡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鏡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. 研究成果

### (a) 利用実績

令和6年度の延べ利用人数・利用時間は、634人・2328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。

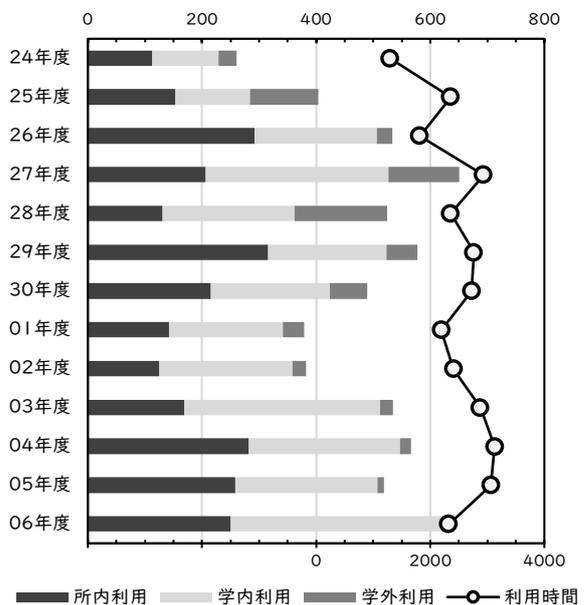


図1

利用者の所属ごとの年間利用延べ人数は棒グラフ（上部の第1軸）で、年間総利用時間は折線グラフ（下部の第2軸）で表示する。年間利用時間は減少しているが、長時間観察を行う利用が少なかったことが理由と考えられる。一方で年間利用延べ人数は600回を超えており、十分に研究者への設備提供が行われていることを示している。

この利用者所属の詳細を、図2のグラフで示す。当研究所内の利用が約39%、医学系研究者の利用が約27%となっている。

また令和6年度は、当センターの利用者が著した12報の論文が学術誌に掲載された。

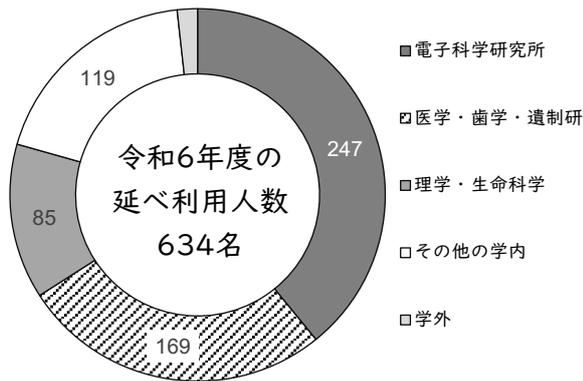
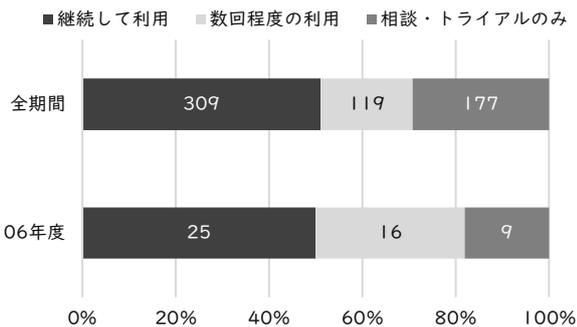


図 2

(b) イメージングに関連する知識と技術の普及

当センターの各顕微鏡の利用を希望する研究者には、顕微鏡やソフトウェアの操作指導を行っている。令和6年度は、18件の新規の利用相談が寄せられ、計55名の研究者に操作指導を行った。利用相談が寄せられた案件について、実際の利用動向を図3に示す。半数程度は継続して当センターを利用しているものの、継続的な利用には至らなかった事例も少なからず存在するため、一層のサポート体制の充実が課題である。



平成24年度の研究所の改組以降、ニコンソリューションズ社をはじめとした協賛企業等とともにシンポジウムを積極的に開催し、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6年度は5月30日に「第11回 蛍光イメージング・ミニシンポジウム」をオンライン形式で開催した。参加者（最大接続数）が140名となり、全国から多くの研究者が聴講して盛況となった。また11月25日に「北海道大学ニコンイメージングセンター学術講演会」を当研究所で開催した。学外から3名の研究者を招聘して、最新の研究動向を講演するとともに、協賛企業の最新の製品情報等のアピールの場も提供した。こちらは参加者が32名となり、オンサイト開催となったため多くの質疑応答も寄せられ、研究者と直接交流する機会となった。

また令和6年度は、光学顕微鏡の知識と技術の普及を目的としたトレーニングコース「OPT北海道2025札幌」を、2025年3月5日～6日に開催した。座学講義をオンデマンド形式で受講した後に、実際に光学顕微鏡の構築を行う形式で、全国から参加希望者があり、選考の後に8名が受講した。また、受講生に向けて、光学顕微鏡を利用した研究内容の紹介として、富葉がセミナーを行った。実習の世話人として主にABiSに参画するメンバーが集い、受講生らと交流を深めた。

### 3. 今後の研究の展望

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。今後は、画像解析の支援も積極的に手掛けていく予定である。また協賛企業と連携した新型光学顕微鏡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）

該当なし

#### 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

該当なし

#### 4.6 講演

##### a. 招待講演（国際学会）

該当なし

##### b. 招待講演（国内学会）

該当なし

##### c. 一般講演（国際学会）

該当なし

##### d. 一般講演（国内学会）

該当なし

##### e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど（学会以外）

- 小林健太郎, 中野和佳子, 富葉雄介, 松尾保孝, 三上秀治, “ニコンイメージングセンターの活動紹介”, 第9回北大局横断シンポジウム, 北海道大学, 札幌, 2024年.

#### 4.7 シンポジウムの開催

- 第11回 蛍光イメージング・ミニシンポジウム（オンライン開催）, 主催: 北海道大学ニコンイメージングセンター, 共催: 株式会社ニコンソリューションズ, 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 (ABiS), 参加者140名, オンライン形式での開催, 2024年5月30日.
- 北海道大学ニコンイメージングセンター学術講演会, 主催: 北海道大学ニコンイメージングセンター, 共催: 株式会社ニコンソリューションズ, 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 (ABiS), 参加者32名, 北海道大学, 札幌, 2024年11月25日.
- 光学顕微鏡のトレーニングコース OP北海道2025札幌, 共催: 株式会社ニコンソリューションズ, 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 (ABiS), 受講者8名, 北海道大学, 札幌, 2025年3月5日～6日.

#### 4.8 共同研究

- a. 国内共同研究  
該当なし
- b. 国際共同研究  
該当なし
- c. 民間等との共同研究・委託研究  
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) 三上秀治（文旦），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”，2022年4月~2028年3月.
- b. 大型プロジェクト・受託研究  
該当なし
- c. 民間助成金  
該当なし

#### 4.10 受賞

該当なし

#### 4.11 社会教育活動

- a. 公的機関の委員  
該当なし
- b. 国内外の学会の役職  
該当なし
- c. 兼任・兼業  
該当なし
- d. 外国人研究者の招聘  
該当なし
- e. 北大での担当授業科目（対象、講義名、担当者、期間）  
該当なし
- f. 北大以外での非常勤講師（対象、講義名、担当者、期間）  
該当なし
- g. アウトリーチ活動  
該当なし
- h. 新聞・テレビ等の報道  
該当なし
- i. 客員教員・客員研究員など  
該当なし
- j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0人

該当なし

博士学位：0人

該当なし

## 国際連携推進室

### スタッフ

室長：教授 Biju Vasudevan Pillai (Ph. D. (Chemistry)、

2016年2月1日着任)

副室長：准教授 高野 勇太 (博士 (理学)、2017年4月1日着任)

教授 小松崎 民樹 (博士 (理学)、2007年10月1日着任)、太田 裕道 (博士 (工学)、2012年9月1日着任)、雲林院 宏 (博士 (理学)、2015年7月1日着任)

事務補助員 藤井 敦子

## 1. 研究目標

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・助言の役割を担うとともに、電子科学研究所が国際研究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、欧米やアジア各国の研究所・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、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

2024年度は、例年に続き国内外の研究ネットワークのさらなる強化と新たな連携の創出に注力した。各研究分野が国際連携戦略を効果的に展開できるよう、準備補佐やイベント運営を実施した。

### (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

オンライン会議システムなどを利用して、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。

また室長を主要メンバーとしてJICA FRIENDSHIPプロジェクトによる、IITハイデラバード (インド) との国際連携を強化し、人的交流と共同研究の推進に寄与した(2022~2028年度)。

### (b) 世界的トップランナー達との研究・教育における協働体制の構築

国際的に活躍する人材の育成と共同研究の推進を通じてグローバル協働体制を強化し、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」の実現に向けた活動を展開した。各国のトップ研究者を招聘し、国際交流や講義を実施することで、若手研究者や学生のグローバル人材育成を推進した。今後も本学本部の支援を受けながら、研究のトップランナーの招へいと、それに基づく教育活動を実施した。

### (c) 第25回RIES-HOKUDAI国際シンポジウム「緯」開催のサポート

本シンポジウムは北大・電子科学研究所が毎年主催し、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る。電子科学研究所の関係機関と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。本年は2024年12月10日に対面形式で開催した。本学をはじめ国内外の大学から総勢130人

を超える大学院生、ポスドク、研究者らが参加し、あわせて66件の口頭・ポスター発表をもとにした研究議論が行われた。今回のシンポジウムは、分野横断的な研究交流と若手研究者の育成に大きく貢献し、国内外の研究機関との連携強化にも資する場となった。



### (d) 2024 International Symposium of RIES & Center for Emergent Functional Matter Science (CEFMS) の開催

11月28日から29日にかけて、台湾国立陽明交通大学 (NYCU) にて、RIES (北海道大学電子科学研究所) と CEFMS (Center for Emergent Functional Matter Science, NYCU) による国際合同シンポジウム「2024 RIES-CEFMS Symposium」を開催した。本シンポジウムを通じて、電子科学研究所と CEFMS の間で新たな共同研究テーマの創出や、若手研究者の国際的育成、分野横断的なネットワークの拡大を行った。今後も両機関は、国際連携を基盤とした先端研究の推進とグローバル人材育成に向けて、継続的な交流と協働を深めていく予定である。

## 3. 今後の研究の展望

今後は、電子科学研究所がこれまでに培ってきた国内外の研究機関との強固なネットワークを基盤とし、学際的かつ先端的な共同研究をさらに発展させることを目指す。計算科学、分子・材料科学、ナノサイエンス、バイオデバイスなど多様な分野で新たな研究テーマの創出と人材育成を推進する。また、欧米の主要研究機関との連携強化にも注力し、グローバルな視点での研究展開と次世代研究者の国際的育成を図る。今後も産学連携や社会実装を意識した研究活動を推進し、電子科学研究所が世界の科学技術の発展と社会課題の解決に貢献する中核拠点となることを目指す。

# ナノテク DX センター

## スタッフ

教授 松尾保孝（博士（工学）、2007年8月1日着任）  
准教授 石 旭（博士（情報）、2016年3月1日着任）  
特任助教 王 永明（博士（工学）、2023年10月1日着任）、  
ピョー・テンダー・テン（博士（情報）、2022年4月1日着任）、  
遠堂敬史（博士（理学）、2022年8月1日着任）、  
工藤遠堂敬史（博士（情報）、2024年11月1日着任）  
博士研究員 佐々木 仁（博士（工学）、2019年4月1日着任、  
2025年3月31日退職）、中村 圭佑（博士（情報）、2022年4月1日着任）  
学術研究員 福本 愛、細井 浩貴、山崎 郁乃

## 1. 研究目標

ナノテク DX センター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研究設備を有し、かつ運用するための知識と経験が無くてはならないが、近年の装置の高額化やシステムの高度化により単独の研究室や研究者だけでそれらを実現することは困難になりつつある。そこで、ナノテク DX センター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、日本が強みを持つ材料領域でのデータ駆動型研究を先導する材料 DX プラットフォーム（統合イノベーション戦略 2020）構想が打ちだされ、それを実現する文部科学省「材料先端リサーチインフラ事業（ARIM）」によるデータを基軸とする研究推進への参画を令和3年度から行っている。本事業の参画機関は7つの重要領域のいずれかに属し、本学は「量子・電子制御により革新的な機能を発現する材料」領域スポーク機関として活動する。本事業前身である「ナノテクノロジープラットフォーム」事業を引き継ぎ、創成研究機構・ナノテクノロジー連携研究推進室が事業全体の運営を担い、電子科学研究所ナノテク DX センターはその主たる業務実施者である工学研究院（ナノ・マイクロ材料分析研究室、光電子分光分析研究室、超高压電子顕微鏡室）、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2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、超高压透過型電子顕微鏡、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・表面分析支援まで幅広く行っている。

## 2. 研究成果

### (a) 利用実績（令和6年4月～令和7年3月）

令和6年度の支援状況について記載する。全支援件数は177件（内学外利用82件）であった。また、自主事業として43件の支援を行っている。装置平均稼働率は45%（日数ベース）、装置利用日数の内で37%が外部共用となっており、北海道外の多くのユーザーに活用されている。

### (b) マテリアル先端リサーチインフラ事業活動（ARIM）

ARIM では、重要技術領域である「量子・電子を制御により革新的な機能を発現する材料」のスポーク機関として、ハブ機関（NIMS）、スポーク機関（産総研、東工大、量子科学技術研究開発機構）と連携し、装置共用のみならず、領域で必要となるデータ収集に努め利活用が可能な研究開発支援を行っている。今年度は、ARIM 装置として登録した60台のうち、55台のデータセットテンプレートを運用レベルでの準備を完了した。また、ARIM 事業内に半導体基盤プラットフォームが構築されることとなり、補正予算装置として全自動真空蒸着装置および FIB-SEM 装置の導入が認められた。

装置共用に関する点においては、継続して、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継続して実施した。

### (c) 設備運用状況

令和6年度は、電子科学研究所へ大型試料室を有する紫外可視近赤外分光光度計、量子収率測定が可能な蛍光分光光度計が導入された。さらに、GFC から顕微 FT-IR を移設し、ラマン・紫外可視顕微鏡分光装置と合わせて分光分析の設備増強を行った。

## 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「材料先端リサーチインフラ事業（ARIM）」を核として研究支援活動を行っていく予定である。ARIM 事業を統括するセンターハブ・ハブ機関（物質・材料研究機構）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、データ駆動型研究の先鞭となる共用機器から生み出される膨大なデータの利活用が実現できる環境の構築を進める。これにより、政府成長戦略の一つの柱となっている材料 DX の実現に向けた支援活動を実施する。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) 【電子研内共著】[A. Nishida\\*](#), [T. Katayama](#), [T. Endo](#), [Y. Matsuo\\*](#), Atomic Layer Deposition of Hafnium-Zirconium-Oxide Films Using a Liquid Cocktail Precursor Containing Hf(dmap)<sub>4</sub> and Zr(dmap)<sub>4</sub> for Ferroelectric Devices, ACS Appl. Mater. Interfaces, 17,11036-11044 (2025). (DOI: 10.1021/acsmi.4c21964)

- 2) 【電子研内共著】 A. Jeong, M. Yoshimura, H. Kong, Z. Bian, J. Tam, B. Feng, Y. Ikuhara, T. Endo, Y. Matsuo, H. Ohta\*, High- performance solid- state electrochemical thermal switches with earth- abundant cerium oxide, *Sci. Adv.* 11, eads6137 (2025). (DOI: 10.1126/sciadv.ads6137)
- 3) 【電子研内共著】 P. R. Ghediya, Y. Magari, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, Y. Zhang, Y. Matsuo, H. Ohta, High-Mobility Indium Oxide Thin Film Transistors with High Reliability, *Meet. Abstr.* MA2024-02 2386(2024). (DOI: 10.1149/MA2024-02342386mtgabs)
- 4) R. Muto, M. Kondo, T. Endo, R. Nishio, T. Tanaka, Growth of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer involving abnormal oxides in FeCrAl alloy tube fabricated by WEDM process and electrical insulating performance in fusion reactor blanket, *Surface & Coatings Technology* 493 (2024). (DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131250)
- 5) 【電子研内共著】 P. R. Ghediya, Y. Magari\*, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, Y. Zhang, Y. Matsuo, H. Ohta\*, Reliable Operation in High-Mobility Indium Oxide Thin Film Transistors, *Small Methods*, 9, 2400578 (2024) (DOI: /10.1002/smt.202400578)
- 6) 【電子研内共著】 Z. Bian, M. Yoshimura, A. Jeong, H. Li, T. Endo, Y. Matsuo, Y. Magari, H. Tanaka, H. Ohta\*, Solid-State Electrochemical Thermal Switches with Large Thermal Conductivity Switching Widths, *Adv. Sci.*, 11, 2401331(2024) ( DOI: 10.1002/advs.202401331)

#### 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

該当なし

#### 4.6 講演

- a. 招待講演 (国際学会)  
該当なし
- b. 招待講演 (国内学会)  
該当なし
- c. 一般講演 (国際学会)  
該当なし
- d. 一般講演 (国内学会)
  - 1) 千葉爽人, 遠堂敬史, 高瀬舞, 古川慎吾, 兵野篤, 銀クラスタとポリスチレン粒子による任意点ラマン増強プローブ, 化学系学協会北海道支部冬季研究発表会, 北海道大学, 札幌, 2025年1月22日.
  - 2) 遠堂敬史, 松波 成行, マテリアル先端リサーチインフラ事業 (ARIM) における SEM のデータ構造化の取り組みについて, 日本顕微鏡学会 第 67 回シンポジウム, 北海道大学, 札幌 2024 年 11 月 2 日.
- e. 研究会・シンポジウム・ワークショップなど (学会以外)  
該当なし

#### 4.7 シンポジウムの開催

該当なし

#### 4.8 共同研究

##### a. 国内共同研究

- 1) 遠堂敬史 (武藤龍平、東京工業大学), “核融合炉の液体金属ブランケットにおける MHD 圧力損失低減を目指した FeCrAl 合金製円管内壁の酸化処理最適化に関する研究”.

##### b. 国際共同研究

該当なし

##### c. 民間等との共同研究・委託研究

- 1) 遠堂敬史 (日東電工株式会社) .

#### 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

該当なし

##### b. 大型プロジェクト・受託研究

該当なし

##### c. 民間助成金

該当なし

#### 4.10 受賞

該当なし

#### 4.11 社会教育活動

##### a. 公的機関の委員

該当なし

##### b. 国内外の学会の役職

該当なし

##### c. 兼任・兼業

該当なし

##### d. 外国人研究者の招聘

該当なし

##### e. 北大での担当授業科目 (対象、講義名、担当者、期間)

該当なし

##### f. 北大以外での非常勤講師 (対象、講義名、担当者、期間)

該当なし

##### g. アウトリーチ活動

- 1) 北洋銀行ものづくりサステナフェア 2024 にて展示ブースを出展, 2024 年 7 月 24 日.
- 2) 第 85 回 応用物理学会秋季学術講演会にてランチョンセミナーを実施, 2024 年 9 月 18 日.
- 3) 日本物理学会/第 79 回年次大会にて展示ブースを出展, 2024 年 9 月 16 日~18 日.
- 4) 日本顕微鏡学会 第 67 回シンポジウムにてランチョンセミナーを実施, 2024 年 11 月 2 日.
- 5) 2024 年度第 2 回 ARIM 量子・電子マテリアル領域セミナー『電子ビーム描画装置 CAD 変換技術』をオンライン・共催にて実施, 2024 年 11 月 21 日.
- 6) 2024 年度 第 3 回 ARIM 量子・電子マテリアル領域セミナー『マスクレスリソグラフィ技術』をオンライン・共催にて実施, 2025 年 2 月 28 日.
- 7) 第 2 回 ARIM マテリアル循環 - 量子・電子制御領域合同計測セミナーをオンライン・共催にて実施, 2025 年 3 月 10 日.

##### h. 新聞・テレビ等の報道

- 1) 核融合炉液体金属ブランケットの電磁ブレーキ効果の抑制へ - 保護性  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜が異常酸化現象を克服-, 東工大・北大・核融合研 共同プレスリリース, 2024 年 9 月 18 日.

i. 客員教員・客員研究員など

- 1) 三澤弘明, 客員研究員, 岡山大学, 2024年4月1日～2025年3月31日.
- 2) 山口由美子, 客員研究員, 岡山大学, 2024年4月1日～2025年3月31日.
- 3) 山田美和, 客員協力員, 岡山大学, 2024年4月1日～2025年3月31日.
- 4) QIAO LIN, 客員研究員, 岡山大学, 2024年4月1日～2025年3月31日.
- 5) Li Yaolong, 客員研究員, 北京大学, 2024年10月1日～2025年9月30日.

j. 修士学位及び博士学位の取得状況

修士学位：0人

該当なし

博士学位：0人

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			
		令和3年	令和4年	令和5年	令和6年
光科学 研究部門	欧 文	11(8)	12(10)	17(17)	22(21)
	邦 文	0	0	0	0
物質科学 研究部門	欧 文	40(37)	23(23)	22(22)	26(26)
	邦 文	0	0	0	0
生命科学 研究分野	欧 文	9(9)	10(10)	8(8)	15(15)
	邦 文	0	1(0)	1(1)	0
附属社会創造 数学研究センター	欧 文	32(31)	17(17)	39(39)	38(33)
	邦 文	2(0)	6(4)	0	1(0)
附属グリーンテクノロジー 研究センター	欧 文	25(25)	23(23)	25(25)	36(36)
	邦 文	0	0	0	0
共創研究支援部	欧 文	4(4)	2(2)	5(5)	2(2)
	邦 文	0	0	0	0
計	欧 文	121(114)	87(85)	116(116)	139(133)
	邦 文	2(0)	7(4)	1(1)	1(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。  
※令和2年度より共創研究支援部  
の集計開始。

### 2. 総覧、解説、評論等及び著書数

部門等		年度			
		令和3年	令和4年	令和5年	令和6年
光科学 研究部門	総説等	2(0)	1(0)	5(1)	3(0)
	著 書	0	0	0	3(3)
物質科学 研究部門	総説等	5(3)	8(5)	5(3)	3(1)
	著 書	2(1)	1(1)	2(0)	1(1)
生命科学 研究部門	総説等	3(1)	1(0)	1(0)	1(0)
	著 書	1(0)	0	1(1)	0
附属社会創造 数学研究センター	総説等	5(1)	3(1)	5(0)	9(4)
	著 書	3(1)	2(0)	6(1)	7(0)
附属グリーンテクノロジー 研究センター	総説等	1(1)	2(1)	3(1)	2(0)
	著 書	2(1)	0	0	0
共創研究支援部	総説等	0	1(0)	0	0
	著 書	0	0	0	0
計	総説等	16(6)	16(7)	19(5)	18(5)
	著 書	8(3)	3(1)	9(2)	11(4)

( )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。  
※令和2年度より共創研究支援  
部の集計開始。

### 3. 国際学会・国内学会発表件数

部門等	年度		令和3年	令和4年	令和5年	令和6年
	国際	国内				
光科学研究部門	国際		25(10)	20(6)	18(11)	16(11)
	国内		20(5)	17(5)	19(9)	16(4)
物質科学研究部門	国際		31(14)	29(9)	27(9)	29(16)
	国内		56(9)	52(0)	19(3)	38(9)
生命科学研究部門	国際		11(6)	13(9)	18(7)	10(4)
	国内		16(3)	26(3)	19(2)	26(4)
附属社会創造数学研究センター	国際		19(4)	38(17)	49(30)	43(21)
	国内		30(8)	25(2)	30(12)	44(15)
附属グリーンテクノロジー研究センター	国際		23(3)	23(6)	50(12)	30(19)
	国内		51(3)	21(3)	45(5)	64(10)
共創研究支援部	国際		0	1(0)	1(0)	0
	国内		2(2)	3(2)	1(0)	2(0)
計	国際		109(77)	124(47)	163(69)	128(71)
	国内		175(30)	144(15)	133(31)	190(42)

( )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。  
 ※令和2年度より共創研究支援部の集計開始。

## II-2. 予算

### II-2-1) 全体の予算

(単位：千円)

内訳	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
業務費	195,716	173,668	173,757	153,053
科学研究費補助金	317,330(83)	355,618(79)	351,317(99)	282,634(69)
その他の補助金	40(1)	0(0)	500(2)	400(1)
寄附金	28,475(16)	22,800(13)	14,360(10)	20,200(9)
受託事業等経費	185,207(34)	166,515(23)	334,135(34)	273,264(43)
(受託研究費)	163,452(27)	143,091(17)	300,979(25)	248,658(33)
(共同研究費)	21,755(7)	23,424(6)	33,156(9)	24,606(10)
合計	726,768(134)	718,601(115)	874,069(145)	729,556(123)

( )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	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
光科学研究部門	科学研究費補助金	55,150(15)	76,200(17)	138,877(27)	132,074(23)
	その他の補助金	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅰ	2,000(1)	8,300(5)	0(0)	500(1)
	寄附金Ⅱ	570(1)	0(0)	0(0)	10,000(1)
	受託事業等経費	37,104(5)	22,339(3)	15,626(1)	6,871(2)
	(受託研究費)	36,335(4)	21,954(2)	15,626(1)	6,429(1)
	(共同研究費)	769(1)	385(1)	0(0)	442(1)
	小計	94,824(22)	106,839(25)	154,503(28)	149,445(27)
物質科学研究部門	科学研究費補助金	38,555(10)	55,200(11)	52,277(14)	16,900(8)
	その他の補助金	0(0)	0(0)	500(2)	400(1)
	寄附金Ⅰ	2,730(4)	2,250(2)	2,000(2)	0(0)
	寄附金Ⅱ	0(0)	650(1)	1,350(2)	2,500(3)
	受託事業等経費	7,996(7)	32,796(4)	39,725(3)	39,003(12)
	(受託研究費)	4,150(6)	28,950(3)	39,000(1)	39,003(12)
	(共同研究費)	3,846(1)	3,846(1)	725(2)	0(0)
	小計	49,281(21)	90,896(18)	95,852(23)	58,803(24)
生命科学研究部門	科学研究費補助金	45,275(13)	43,706(14)	26,450(17)	25,700(8)
	その他の補助金	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅰ	16,500(5)	8,000(2)	8,600(3)	0(0)
	寄附金Ⅱ	0(0)	0(0)	0(0)	6,300(3)
	受託事業等経費	12,250(2)	24,087(3)	90,590(5)	73,241(7)
	(受託研究費)	12,250(2)	24,087(3)	87,535(4)	68,411(5)
	(共同研究費)	0(0)	0(0)	3,055(1)	4,830(2)
	小計	74,025(20)	75,793(19)	125,640(25)	105,241(18)
附属社会創造数学研究センター	科学研究費補助金	68,213(28)	77,900(23)	87,205(28)	73,000(21)
	その他の補助金	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅰ	0(0)	0(0)	880(1)	0(0)
	寄附金Ⅱ	0(0)	0(0)	1,530(2)	900(1)
	受託事業等経費	97,960(12)	60,327(8)	135,647(16)	110,559(12)
	(受託研究費)	85,900(9)	44,000(5)	111,144(12)	98,746(8)
	(共同研究費)	12,060(3)	16,327(3)	24,503(4)	11,813(4)
	小計	166,173(40)	138,227(31)	225,262(47)	184,459(34)

部門等	研究費	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
附属 グリーン ナノテク ロジー 研究 センター	科学研究費補助金	108,537(16)	102,312(13)	46,008(12)	28,910(7)
	その他の補助金	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅰ	3,700(2)	3,600(3)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅱ	475(1)	0(0)	0(0)	0(0)
	受託事業等経費	21,463(7)	15,507(3)	25,152(6)	36,331(8)
	(受託研究費)	16,383(5)	12,640(2)	20,279(4)	31,469(6)
	(共同研究費)	5,080(2)	2,867(1)	4,873(2)	4,862(2)
	小計	134,175(26)	120,879(18)	71,160(18)	65,241(15)
その他	科学研究費補助金	1,600(1)	300(1)	500(1)	6,050(2)
	その他の補助金	40(1)	0(0)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅰ	2,500(2)	0(0)	0(0)	0(0)
	寄附金Ⅱ	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	受託事業等経費	8,434(1)	11,460(2)	27,395(3)	7,259(2)
	(受託研究費)	8,434(1)	11,460(2)	27,395(3)	4,600(1)
	(共同研究費)	0(0)	0(0)	0(0)	2,659(1)
	小計	12,574(5)	11,760(3)	27,895(4)	13,309(4)

( ) 内の数は受け入れ件数。 寄附金Ⅰ：申請による財団等からの研究補助金。 寄附金Ⅱ：Ⅰ以外のもの。

### II-3. 外国人研究者の受入(招へい)状況

#### a. 年度別統計表

部門等	年			
	令和3年	令和4年	令和5年	令和6年
光科学研究部門	0	3	0	1
物質科学研究部門	0	0	2	9
生命科学研究部門	0	1	3	1
附属社会創造数学研究センター	0	1	4	4
附属グリーンナノテクノロジー 研究センター	0	0	0	0
計	0	5	9	15

## II-4. 修士学位及び博士学位の取得状況

### II-4-1) 令和6年度 修士学位

#### 情報科学院

- 尾川 功起 : 多光子吸収を活用した深紫外マスクレスリソグラフィ
- 永岡 太一 : ドリフト補正システムを搭載した高安定クライオ分光顕微鏡の構築
- 大森 健司 : 光熱刺激に伴うがん細胞の ERK 活性モニタリング
- 石田 郁巳 : 抗体結合ナノ薬剤の作製および抗がん活性評価
- 河内 遥輝 : ナノ DDS のための生体内の環境を模倣した3次元培養モデルの作製
- 熊谷 怜士 : 走査型プローブ顕微鏡による修飾グラフェンの分析
- 長阪 雄介 : 一酸化窒素による単一ヒト大動脈平滑筋細胞の弛緩の観察
- 吉岡 跳生 : 分子集合体を利用したポラリトン形成
- 高橋 瑛介 : ホログラフィック時空間集光によるリアルタイム3次元標的光刺激
- 穴戸 耀 : 生体内リアルタイム3次元標的光刺激に向けた行動追跡システムおよび多細胞追跡アルゴリズムの開発
- 椋本 一輝 : 深層学習アルゴリズムを用いた自由行動下線虫の全脳神経活動解析
- 丸野内 洸 : 強誘電  $\text{Pb}_2\text{FeO}_3\text{F}$  酸フッ化物薄膜
- 吉村 充生 : 金属酸化物薄膜を活性層とする全固体電気化学熱トランジスタの作製と評価

#### 環境科学院

- 夏 一菲 : Interfacial anion exchange control in halide perovskite

#### 生命科学院

- 池水 友紀 : 金ナノ粒子を用いた siRNA 転写制御のための鋳型 DNA 設計
- 中村 美緒 : オリゴエチレングリコール被覆金ナノ粒子の温度に応じた親疎水性と表面電位の変化に関する研究
- 渡邊 ほのか : アミノ基導入による pH 応答性金ナノ粒子ベシクルの創製
- 王 茜 : Rethinking WX + Bias: Exploring the benefits of dual-weight comparison methods for learning
- 米田 翼 : 細胞スケールのソフトマターが対称往復シア下で生じる非対称性運動-現象の発見と機構の解明-
- 山岸 終哉 : 繊毛虫 *Homalozoon vermiculare* の拡散行動
- 対馬 舞 : 遊泳空間形状依存的なテトラヒメナ生物対流パターンの形成

#### 総合化学院

- 香田 明里 : ナノスケールにおける微細構造変形抑制による摩擦低減
- 野永 竣太 : リスクを考慮した効率的な薬剤スクリーニング手法の開発

#### 理学院

- Huayan Chen : Noise-induced phenomena in high-dimensional dynamical systems
- 野田 裕真 : グルコース・インスリン・C-ペプチド動態を記述する体循環数理モデル
- 本橋 樹 : 自己駆動体運動の反応拡散系モデル

### II-4-2) 令和6年度 博士学位

#### 情報科学研究院

- 卞 志平 : Study on the Solid-State Electrochemical Thermal Transistors with High Electrical Conductivity Active Layers
- 呉 宇璋 : Effect of zinc incorporation on electron transport properties of indium oxide thin-film transistors

## 環境科学院

- AKTER Rumana : Investigation of photoinduced electron transfer from CdSe-CdS and FAPbBr<sub>3</sub> nanocrystal assemblies to molecular acceptors
- 吉田 和矢 : スルホンロサミン誘導体による近赤外光機能性有機分子の開拓
- KHATUN Most Farida : Exploring exciton recombination, migration, and transfer in halide perovskite systems
- 金丸 和矢 : ゲスト分子離脱を利用した分子結晶の機能開拓
- 羽田 将人 : 超分子カチオン構造を利用した結晶の熱膨張制御

## 生命科学院

- Jiajun Qi : A Study on a New Caging Method Aimed at Visible Light-Activable Anticancer Drugs
- Nusaiba Madappuram Cheruthu : Study on Azophotoswitches containing thiazole, isothiazole, thiadiazole and isothiadiazole
- Fazil Thuluvanchery Salim : Development of Catenane-based Supramolecular Mechanophores
- Yang Jingyan : Stimulate Responsive Assembly of Gold Nanorods with Uniform Orientation in Polymer Brush Substrates
- Shi Yali : Chiroptical Activity of Nanorod-DNA Polyion-Complexes [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]

## 総合化学院

- 辻岡 一真 : Study on new adhesion and friction by hierarchical surface microstructure based on knowledge of organisms (生物の知見に基づく階層的表面微細構造による新たな接着・摩擦に関する研究)
- Md. Mehazul Abedin : Study on Multi-armed Bandit Algorithm for Sequential Experiments to Predict the Best Molecule with Dynamic Feature Selection

## II-4-3) 大学院生在籍数

研究科名	年	修士			博士		
		令和4年	令和5年	令和6年	令和4年	令和5年	令和6年
理 学 院		16	11	3	2	2	0
環 境 科 学 院		6	7	1	14	11	5
情 報 科 学 院		19	21	13	17	10	2
生 命 科 学 院		17	14	7	21	20	5
総 合 化 学 院		7	7	2	4	8	2
計		65	60	26	58	51	14



### 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、令和六年度現在では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、以下の三つのグループで構成されている。

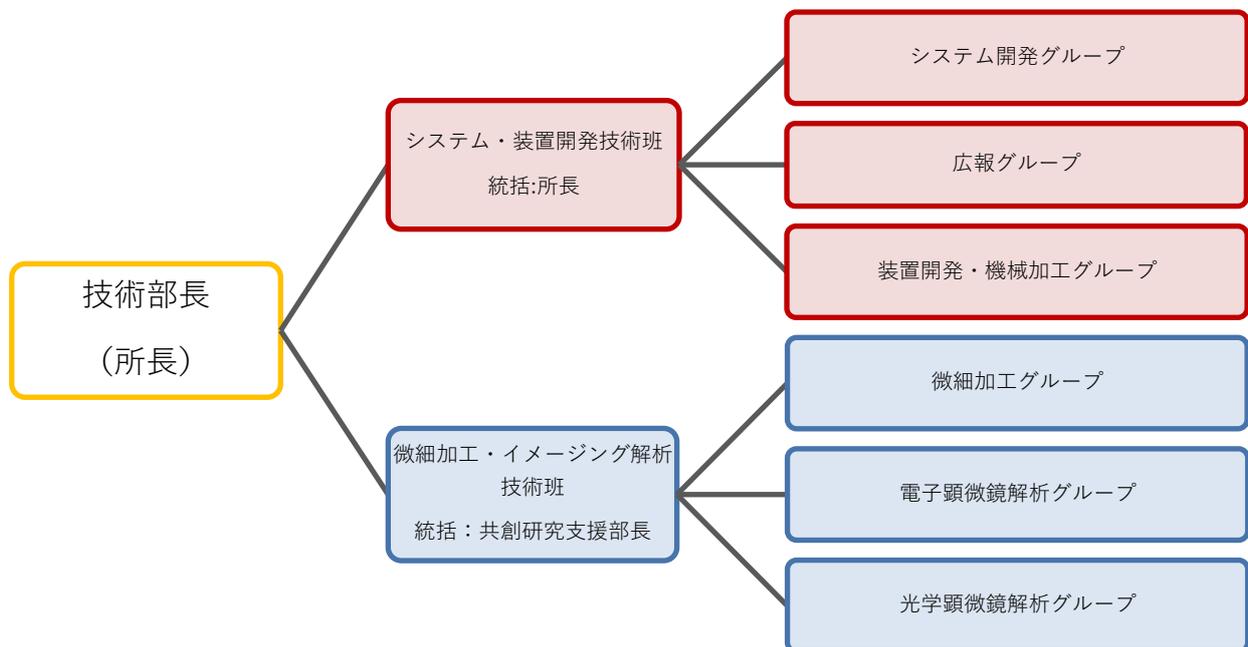
一つは、情報、ネットワーク、およびIoT技術を活用したシステム開発等を担当する「システム開発グループ」である。次に、電子科学研究所の広報、研究所のWebサイトの管理運営等を担当する「広報グループ」である。そして各種工作機械や3D CADシステム、3Dプリンタ等を用い、市販されていない研究機器などの製作にあたる「装置開発・機械加工グループ」である。近年は、シングルボードコンピュータを用いた装置制御の需要にも対応しており、数多くの研究機器の開発・製作を行っている。

微細加工・イメージング解析技術班は、以下の三つのグループで構成されている。

一つは、クリーンルームおよび微細加工装置を活用し、微細構造の形成や加工支援を担当する「微細加工グループ」である。次に、透過型電子顕微鏡や走査型電子顕微鏡などを用いた観察・解析を担当する「電子顕微鏡解析グループ」である。そして光学顕微鏡による観察や撮影、画像処理・解析支援などを担当する「光学顕微鏡解析グループ」である。

各グループでは、これらの最先端共用設備の維持・管理、装置の利用に関する指導、ならびに技術相談の対応などを通じて、研究活動を技術面から支援している。

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。また、研究所の教職員、学生は北キャンパス図書室以外にも、附属図書館本館・北図書館をはじめ大学の各部局図書室からも図書の貸出を受けることができる。

#### 1. 蔵書冊数

年 度	令和3年*	令和4年*	令和5年*	令和6年*
和 書	5,489	5,444	5,434	5,447
洋 書	17,301	17,288	17,307	17,314
計	22,790	22,732	22,741	22,761

#### 2. 所蔵雑誌種類数

年 度	令和3年*	令和4年*	令和5年*	令和6年*
和雑誌	109	110	107	107
洋雑誌	385	387	387	387
計	494	497	494	494

#### 3. 雑誌受入種類数

年 度	令和3年*	令和4年*	令和5年*	令和6年*
和雑誌	31	26	23	18
洋雑誌	7	5	5	3
計	38	31	28	21

#### 4. 学外文献複写数

年 度	令和3年*	令和4年*	令和5年*	令和6年*
依 頼	19	10	5	11
受 付	29	31	9	12

\* 北キャンパス図書室全体としての数字

### b. 電子ジャーナルやデータベースの利用

図書室内には無線LAN (HINES-WLANとeduroam) が整備されており、所属学生の自習等に活用されている。

学内のLAN (HINES-WLAN) に接続することで、本学が契約する約20,000タイトル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” や “CAS 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。これらの学術情報は、附属図書館が提供するリモートアクセスサービスにログインすることにより、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。なお、学外の研究者は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。

近年では、“CAS SciFinder-n” や “Reaxys” といったデータベースの利用方法を解説する講習会が、学生や教員向けにオンラインで実施されている。



## IV. 資料

## IV-1. 沿革

### 超短波研究所

- 昭和16. 1 超短波研究室が設置される
  - 18. 1 超短波研究所に昇格  
第二部門、第四部門、第六部門、第七部門開設
  - 18. 3 第三部門開設
  - 19. 1 第一部門、第五部門開設
  - 20. 1 第八部門開設

### 応用電気研究所

- 21. 3 応用電気研究所と改称する  
部門構成：電気第一部門、電気第二部門、物理第一部門、物理第二部門、化学部門、  
医学及び生理第一部門、医学及び生理第二部門、数学部門
- 24. 5 北海道大学附置研究所となる
- 36. 4 メディカルエレクトロニクス部門新設
- 37. 4 電子機器分析部門新設
- 38. 4 メディカルトランスデューサ部門新設
- 39. 2 研究部門は一部名称変更等により次のとおりとなる(昭和38年4月1日適用)  
電子回路部門、電波応用部門、物理部門、化学部門、生理部門、生体物理部門、  
応用数学部門、メディカルエレクトロニクス部門、電子機器分析部門、メディカルトランスデューサ  
部門
- 39. 4 メディカルテレメータ部門新設
- 42. 6 強誘電体部門新設
- 46. 4 生体制御部門新設
- 48. 4 附属電子計測開発施設新設
- 50. 4 光計測部門新設(10年時限)
- 53. 4 感覚情報工学部門新設
- 60. 3 光計測部門廃止(時限到来)
- 60. 4 光システム工学部門新設(10年時限)

### 電子科学研究所

- 平成4. 4 研究所改組により電子科学研究所となる
  - 14. 4 附属電子計測開発施設を附属ナノテクノロジー研究センターに改組転換
  - 15. 5 電子情報処理研究部門感覚情報研究分野を廃止
  - 17. 4 電子計測制御研究部門適応制御研究分野を廃止  
電子計測制御研究部門ナノシステム生理学研究分野を新設
  - 17. 10 電子材料物性研究部門光材料研究分野をナノ光高機能材料研究分野に名称変更  
電子情報処理研究部門信号処理研究分野を極限フォトンプロセス研究分野に名称変更  
電子情報処理研究部門計算論的生命科学研究分野を新設  
寄附研究部門「ニコンバイオイメージングセンター研究部門」を新設(開設期間3年)  
英国・ニューカッスル大学ナノスケール科学技術研究所との学術交流協定締結(22. 10 協定終了)
  - 19. 4 附属ナノテクノロジー研究センターの「10年時限」撤廃
  - 19. 10 電子材料物性研究部門相転移物性研究分野を量子情報フォトン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
- 28. 6 産業創出分野「新概念コンピューティング産業創出分野」を新設（設置期間2年10月）
- 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連携研究分野を新設
- 31. 4 産業創出分野「新概念コンピューティング産業創出分野」設置期間更新（更新期間3年）
- 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
  - 2. 3 連携研究部門人間知・脳・AI 研究教育センターを新設
  - 2. 9 中国・香港城市大学理学部との学術交流協定締結  
 中国・香港城市大学工学部との学術交流協定締結
  - 3. 2 台湾・国立陽明交通大学理学院との学術交流協定締結
  - 3. 4 附属グリーンナノテクノロジー研究センターにエキゾティック反応場研究分野を新設
  - 3.10 連携研究部門理研連携研究分野を廃止  
 連携研究部門台湾国立交通大学理学院連携研究分野を台湾国立陽明交通大学理学院連携研究分野に名称変更  
 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ンクス研究分野及びナノ光機能材料研究分野を廃止

- 3.12 共創研究支援部数理連携推進室を廃止  
共創研究支援部に北海道大学電子科学研究所・台湾国立陽明交通大学理学院共同教育研究センターを新設
- 4.4 産業創出分野「新概念コンピューティング産業創出分野」設置期間更新（更新期間1年）
- 5.4 附属グリーンナノテクノロジー研究センターエキゾチック反応場研究分野を廃止  
光科学研究部門極微システム光操作研究分野、物質科学研究部門インタラクション機能材料研究分野、附属グリーンナノテクノロジー研究センターナノテク協働研究分野、附属グリーンナノテクノロジー研究センター物質・デバイス研究戦略室及び社会創造数学研究センター数理科学協働研究分野を新設  
物質科学研究分野分子フォトンクス研究分野をフォトニックナノ材料研究分野に、共創研究支援部ナノテク連携推進室をナノテク DX センターに名称変更、薄膜機能材料研究分野を物質科学研究部門から附属グリーンナノテクノロジー研究センターへ部門移動  
産業創出分野「新概念コンピューティング産業創出分野」設置期間更新（更新期間1年）
- 6.3 韓国・釜山大学校自然科学大学物理学科との学術交流協定締結
- 6.4 物質科学研究部門電子物性材料創成研究分野を新設  
産業創出分野「新概念コンピューティング産業創出分野」設置期間更新（更新期間1年）

[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～令和3年3月31日		中垣 俊之	
令和3年4月1日～令和7年3月31日		居城 邦治	

[名誉教授]

昭和32年4月	(故) 蓑島 高	令和5年4月	西井 準治
昭和37年4月	(故) 淺見 義弘	令和6年4月	笹木 敬司
昭和43年4月	(故) 東 健一		石橋 晃
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		
令和3年4月	三澤 弘明		

## 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 m <sup>2</sup>	延面積 m <sup>2</sup>	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（令和6年度）

（3月末日現在）

職名	人数
教授	15(15)
准教授	14(1)
講師	0
助教	17
特任教授	1
特任准教授	0
特任講師	0
特任助教	7
教員小計	54(16)
技術部	11
合計	65(16)

（ ）内の数字は客員で外教

#### IV-4. 教員の異動状況（令和6年度）

##### ○転入状況

所属部門	職名	氏名	採用年月日	前職
物質科学研究	教授	小林 夏野	R6. 4. 1	岡山大学准教授
物質科学研究	准教授	蓬田 陽平	R6. 4. 1	東京都立大学助教
物質科学研究	助教	岡 紗雪	R6. 4. 1	(北海道大学博士課程)
社会創造数学研究センター	特任助教	越後谷 駿	R6. 4. 1	(北海道大学博士課程)
光科学研究	准教授	太田 竜一	R6. 7. 1	日本電信電話株式会社研究員
連携研究	准教授	押切 友也	R6. 8. 1	(クロアボ開始、本籍：東北大学准教授)
社会創造数学研究センター	助教	大村 拓也	R6. 8. 1	バーゼル大学ポスドク

##### ○転出状況

所属部門	職名	氏名	退職年月日	転出先
生命科学研究	特任助教	中村 聡	R6. 6. 30	山形大学助教
グリーンテクノロジー研究センター	助教	薛 晨	R7. 1. 10	南京工業大学教授
社会創造数学研究センター	特任助教	EOM JUNYONG	R7. 2. 28	誠信女子大学ポスドク
物質科学研究	教授	玉置 信之	R7. 3. 31	(定年退職)
連携研究	教授	永井 健治	R7. 3. 31	(クロアボ終了、本籍：大阪大学教授)
グリーンテクノロジー研究センター	特任教授	中村 貴義	R7. 3. 31	(再雇用任期満了退職)
連携研究	准教授	押切 友也	R7. 3. 31	(クロアボ終了、本籍：東北大学准教授)
グリーンテクノロジー研究センター	助教	曲 勇作	R7. 3. 31	高知工科大学講師
グリーンテクノロジー研究センター	助教	高橋 仁徳	R7. 3. 31	熊本大学准教授
グリーンテクノロジー研究センター	助教	WU JIABING	R7. 3. 31	グラスゴー大学 Research Associate
社会創造数学研究センター	助教	水野 雄太	R7. 3. 31	産業技術総合研究所主任研究員

(R7. 3. 31)

#### IV-5. 構成員 (令和6年度)

所長	居城邦治	客員准教授	西島喜明 (横浜国立大学)
光科学研究部門		新概念コンピューティング産業研究分野	
光システム物理研究分野		客員教授	山岡雅直 (株)日立製作所
准教授	田口敦清	客員教授	竹本享史 (株)日立製作所
ナノ材料光計測研究分野		客員教授	橋本貴之 (株)日立製作所
教授	雲林院 宏	客員教授	湊真一 (京都大学)
准教授	平井健二		
助教	TAEMAITREE FARSAI		
コヒーレント光研究分野		人間知・脳・AI研究教育センター連携研究分野	
教授	西野吉則		
准教授	鈴木明大		
極微システム光操作研究分野		台湾国立陽明交通大学理学院連携研究分野	
教授	田中嘉人	客員教授	Yuan-Pern Lee
准教授	太田竜一	客員教授	Chain-Shu Hsu
助教	橋谷田 俊	客員教授	Yaw-Kuen Li
		客員教授	Jiunn-Yuan Lin
		客員教授	Jiun-Tai Chen
		客員教授	Yu-Miin Sheu
物質科学研究部門		附属グリーンナノテクノロジー研究センター	
フォトリックナノ材料研究分野		センター長(兼)	松尾保孝
教授	BIJU VASUDEVAN PILLAI	薄膜機能材料研究分野	
准教授	高野勇太	教授	太田裕道
助教	岡本拓也	准教授	片山司
スマート分子材料研究分野		助教	曲勇作
教授	玉置信之	光電子ナノ材料研究分野	
助教	PADINHARE KAYAKALI HASHIM	教授	松尾保孝
助教	AMMATHNADU SUDHAKAR AMRUTHA	ナノアセンブリ材料研究分野	
電子物性材料創成研究分野		特任教授	中村貴義
教授	小林夏野	助教	高橋仁徳
准教授	近藤憲治	助教	黄瑞康
インタラクション機能材料研究分野		助教	WU JIABING
教授	長島一樹	物質・デバイス研究戦略室	
准教授	蓬田陽平	ナノテク協働研究分野	
助教	岡紗雪		
生命科学部門		附属社会創造数学研究センター	
生体分子デバイス研究分野		センター長(兼)	長山雅晴
教授	居城邦治	人間数理研究分野	
准教授	三友秀之	教授	長山雅晴
准教授	佐藤 譲	助教	西野浩史
助教	与那嶺 雄介	助教	石井宙志
光情報生命科学研究分野		特任助教	香川 溪一郎
教授	三上秀治	特任助教	内海 晋弥
准教授	澁川敦史	特任助教	上田 祐暉
助教	石島 歩	データ数理研究分野	
連携研究部門		教授	小松崎 民樹
社会連携客員研究分野		准教授	田畑 公次
客員教授	菅沼克昭 (公財) 泉科学技術振興財団	助教	水野 雄太
客員教授	江端 新吾 (東京工業大学)	助教	西村 吾朗
客員教授	西 崑 一 泰 (日本海テレビジョン放送(株))	知能数理研究分野	
客員教授	坪井 裕	教授	中垣 俊之
拠点アライアンス連携研究分野		准教授	西上 幸範
教授	永井健治	助教	大村 拓也
准教授	押切友也	特任助教	越後谷 駿
客員教授	根本 知己 (自然科学研究機構)	実験数理研究分野	
		数理科学協働研究分野	
		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） 三上秀治  
 特任助教 富菜雄介  
 国際連携推進室  
 室長（兼） BIJU VASUDEVAN PILLAI  
 ナノテクDXセンター  
 教授（兼） 松尾保孝  
 特任助教 遠堂敬史  
 特任助教 PHYO THANDAR THANT  
 北海道大学電子科学研究所・台湾国立陽明交通大学理学  
 院共同教育研究センター

〃  
 技術補助員

野口絵美  
 齊藤奈穂子

(令和7年3月末日現在)

技術部

技術部長（兼） 居城邦治  
 システム・装置開発技術班  
 統括（兼） 居城邦治  
 班長 武井将志  
 技術専門員（主任） 遠藤礼暁  
 技術専門職員 楠崎真央  
 技術専門職員 大西広  
 技術専門職員 今村逸子  
 技術職員 富樫綾  
 微細加工・イメージング解析技術班  
 統括（兼） 松尾保孝  
 班長 小林健太郎  
 技術専門職員 中野和佳子  
 技術専門職員（主任） 平井直美  
 技術専門職員 森有子  
 特定専門職員 小島俊哉

契約職員・短時間勤務職員

博士研究員 L I N H A N  
 〃 TRAN NHAN GIANG  
 〃 JEONG AHRONG  
 〃 中村圭佑  
 〃 HANAN MD AL MEHEDI  
 〃 谷口篤史  
 〃 FOSSEPREZ CHARLES CLAUDE D  
 J S P S 特別研究員 谷地赳拓  
 学術研究員 新井田雅学  
 〃 竹内智恵  
 〃 奥原亜希  
 〃 堂前愛  
 〃 富澤ゆかり  
 〃 MD HUMAUN KABIR  
 〃 笹木敬司  
 研究支援推進員 沢田弥生  
 〃 大滝希志子  
 〃 佐々木眞美  
 事務補佐員 藤原由美恵  
 〃 小井田まつ枝  
 〃 佐藤美加  
 〃 湯川文  
 〃 小林梨江  
 〃 岡内啓子  
 事務補助員 石田真美  
 〃 大西安奈  
 〃 木下亜美  
 〃 藤井敦子  
 〃 浦田絵美  
 〃 丸岡直生



北海道大学電子科学研究所

〒001-0020 札幌市北区北20条西10丁目  
TEL (011)706-9102 FAX (011)706-9110

URL <https://www.es.hokudai.ac.jp/>