



# 目 次

「2025 年度研究成果報告書」の刊行にあたって	1
研究成果等概要	
—2023 年 4 月 1 日～2026 年 3 月 31 日（3 年間）—	
◆ 研究代表者：須賀 良介 理工学部准教授 「高周波ノイズの低減に関する研究」	3
◆ 研究代表者：前田 智弘 理工学部助教 「環境変動にロバストな定量光位相イメージング技術の開発」	7
—2024 年 4 月 1 日～2026 年 3 月 31 日（2 年間）—	
◆ 研究代表者：武内 亮 理工学部教授 「立体選択的合成反応の開発」	11
—2024 年 4 月 1 日～2027 年 3 月 31 日（3 年間）—	
◆ 研究代表者：坂本 貴紀 理工学部教授 「重力波源の電磁波対応天体探査のための宇宙広視野 X 線モニターの開発 III」	15
◆ 研究代表者：下山 淳一 理工学部教授 「実用高温超伝導材料機能開拓プロジェクト」	18
◆ 研究代表者：古川 信夫 理工学部教授 「トポロジカル材料系における特異な電磁場応答の研究」	22
◆ 研究代表者：前田 はるか 理工学部教授 「冷却 Rb Rydberg 原子が自発的に形成する分子状態の検出 及び分子生成のためのマイクロアトムトラップの導入」	25
◆ 研究代表者：三井 敏之 理工学部教授 「ナノポアやナノスリットと高分子の相互作用と心筋細胞のダイナミクス」	29
◆ 研究代表者：重里 有三 理工学部教授 「無機薄膜の高次構造制御による高度な機能の発現」	32
◆ 研究代表者：平田 普三 理工学部教授 「動物を用いた高次生体機能の解析」	44

◆ 研究代表者：石河 泰明 理工学部教授 「屋内環境用高効率ペロブスカイト太陽電池の開発」	----- 48
◆ 研究代表者：黄 晋二 理工学部教授 「ナノカーボン材料を用いた新規デバイスの開発」	----- 51
◆ 研究代表者：松本 洋和 理工学部教授 「マルチフェーズワイヤレス送電システムの発展研究」	----- 58
◆ 研究代表者：熊野 寛之 理工学部教授 「糖アルコールスラリーの伝熱特性および結晶成長速度の評価」	----- 60
◆ 研究代表者：長 秀雄 理工学部教授 「機械学習を用いた AE 波形分類と損傷挙動の推定」	----- 64
◆ 研究代表者：米山 聡 理工学部教授 「画像計測と数値解析のハイブリッド技術を用いた先進材料の マルチスケール応力・ひずみ解析技術の開発」	----- 69
◆ 研究代表者：田崎 良佑 理工学部准教授 「高速 3D 造形のマルチモーダルセンシングとロボットモーションコントロール」	----- 73
—2025 年 4 月 1 日～2028 年 3 月 31 日（3 年間）—	
◆ 研究代表者：北野 晴久 理工学部教授 「微小超伝導体の精密物性測定と量子計測への応用」	----- 79
◆ 研究代表者：山中 卓 理工学部准教授 「データの偏りに対して頑健な信用スコアリング手法の開発」	----- 83
◆ 研究代表者：麓 耕二 理工学部教授 「革新的熱輸送デバイスによるサーマルマネジメント技術の構築」	----- 85
◆ 研究代表者：蓮沼 将太 理工学部准教授 「X線回折法を用いた局所応力評価に基づく材料強度評価手法の開発」	----- 88
CAT 支援による若手研究者出張報告	----- 92
成果報告会について	----- 97

## 「2025年度研究成果報告書」の刊行にあたって

理工学部附置先端技術研究開発センター所長 北野 晴久

青山学院大学理工学部附置先端技術研究開発センター（Center for Advanced Technology: CAT）の2025年度研究成果報告書を刊行いたします。

CATは、私立大学学術研究高度化推進事業（私立大学ハイテク・リサーチセンター整備事業）の第1期選定（1996年度、旧文部省）を受け、1998年度に本学理工学部附置されました。「世界をリードする研究」と「外部に開かれた研究」を基本理念に置き、当初は物質科学関連領域の発展を見据え、理工学研究科の研究教育環境整備と世界的研究拠点形成を目指しました。相模原キャンパスの開学後（2003年度）、理工学部附置機器分析センターと共に相模原キャンパスのK棟に設置され、理工学研究科の改組（2004年度）を経て、研究科内の領域横断的研究教育の推進拠点と位置付けられ、現在までに多数の研究プロジェクトを実施しております。

相模原キャンパスK棟内のCATプロジェクト研究実験室は、3期15年（1997年度～2011年度）にわたる私立大学ハイテク・リサーチセンター整備事業に参加した物質科学関連の研究プロジェクトだけでなく、様々な外部研究資金による研究プロジェクトの展開基盤として機能を果たしてきました。さらに、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（文部科学省）に同時採択された2件の研究プロジェクトー「細胞膜の異質界面における分子理解と新機能創成基盤の形成」と「炭素材料科学の新展開 ～希少元素フリーで環境に優しい次世代炭素材料の開発～」（2013～2017年度）ーを実施した際には、両プロジェクトの拠点機能をCATが担いました。その後も私立大学ブランディング事業（文部科学省）に採択された「次世代ウェルビーイング ～個別適合をめざした統合的人間計測・モデル化技術の構築～」研究プロジェクト（2016～2020年度）をCATプロジェクトとして実施しました。

今年度は、CAT研究プロジェクト選考委員会で審査、選定された21件のCATプロジェクトを実施し、CAT実験室使用料によるCAT実験室の機能持続に向けた取り組みも2年目を迎えました。さらに、CATプロジェクトに参画する若手研究者による外部資金研究プロジェクトとして、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の先端研究プログラム/未踏チャレンジや文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業が実施されました。

今後もCATを拠点とする研究プロジェクトの精力的遂行を通じ、我が国の科学技術政策や社会的・経済的ニーズを捉えた研究や国際的高水準な先駆的研究への展開を目指します。また、幅広い研究領域を包括する拠点研究センターとして理工学部・理工学研究科の研究教育を活性化させる役割を担うと共に、私立大学等経常費補助金の継続的獲得が重要となる中、CATプロジェクトに参画する助教・助手の若手出張旅費補助やオンライン開催される成果報告会での学生ポスター発表の表彰を通じ、積極的に若手支援を先導していく考えです。2018年設置の理工学部附置先端情報技術研究センター（CAIR）や2022年設置の理工学部附置ライフサイエンス研究センター（LSC）とも連携し、今後の青山学院大学理工学部・大学院理工学研究科における研究教育をより充実させていきたいと思っております。



---

## 研究成果等概要

---



# 高周波ノイズの低減に関する研究

研究代表者 電気電子工学科 准教授 須賀良介

## 1.1 研究目的

一層型電波吸収体の設計手法として無反射条件[1] が知られており，この条件を満足するよう誘電損失材料の複素比誘電率とその厚みを設計する．設計した電波吸収体の吸収可能な周波数帯域は，用いた誘電体の誘電正接によって概ね決定され，比較的狭帯域となることが知られている．これまでに我々は，厚みを固定した電波吸収体を広帯域整合させるために周期的に配置した誘電体の実効複素比誘電率の周波数特性の制御について検討してきた[2]．本研究ではその電波吸収体の実現可能性を実験的に評価した．

## 1.2 進捗状況及び成果

本研究では誘電体として炭素含有セラミクスを使用する．図1にレンズ法[3]を用いて測定した3枚の炭素含有セラミクス平板の複素比誘電率の周波数特性を示す．なお，同一平板サンプルの複素比誘電率を同色で示している．同図より，3枚の平板の複素比誘電率は周波数特性をもち，実部12~15.5，誘電正接0.3~0.6程度であることがわかる．各周波数における3枚の平板の複素比誘電率の平均値を用いて，ミリ波帯において周期的に配置した誘電体の実効複素比誘電率の周波数特性が無反射条件を広帯域に満足するよう，平板を波長より小さな立方体片に加工し，銅板上に周期的に配置した．図2に試作した電波吸収体を示す．同図に示すように，100 mm角の銅板上に2.6 mm角に加工した立方体形状の誘電体片を1.6 mm間隔で銀ペーストを用いて接着した．この電波吸収体の垂直入射における反射特性を測定した．

図3に測定した反射特性振幅を示す．比較のために，電磁界解析により計算した本電波吸収体の反射特性と動作中心周波数が同一となるように設計した厚さ2.6 mm，比誘電率1.9，誘電正接0.79の一層型電波吸収体の反射特性を示す．同図より，本構造の反射特性には2つのピークが生じており，中心周波数23.4GHz，-15 dB比帯域幅42%と広帯域な吸収特性となることがわかる．また，一層型電波吸収体の比帯域幅33%と比較し，提案構造により9%の広帯域化を実現した．このことから，提案手法を用いた電波吸収体の有効性を確認した．

### 1.3 総括

本研究では、一層型電波吸収体の広帯域化を目的とし、誘電体を周期配列して実効複素比誘電率の周波数特性を制御する手法の有効性を実験的に検証した。炭素含有セラミクスを波長より小さな立方体片 (2.6mm 角) に加工し、銅板上に周期的に配置した吸収体を試作した。反射特性の測定結果、位相回りは解析値と概ね一致し、設計通りの製作が確認された。また、中心周波数 23.4GHz において -15dB 比帯域幅 42% を達成した。これは、同条件で設計した一般的な一層型吸収体の帯域幅 (33%) に対し 9% の拡大であり、提案構造による広帯域化の有効性を実証した。

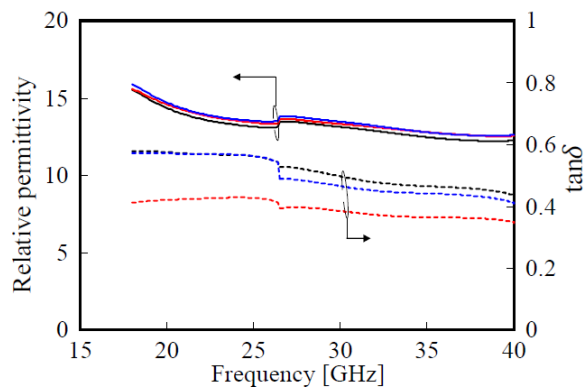


図 1 炭素含有セラミクスの複素比誘電率

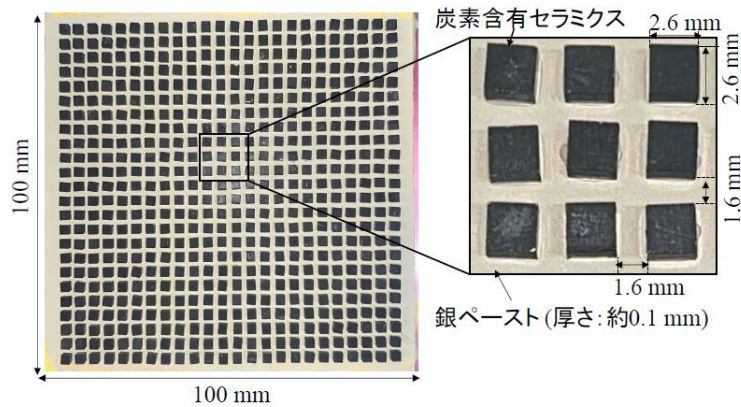


図 2 試作した電波吸収体

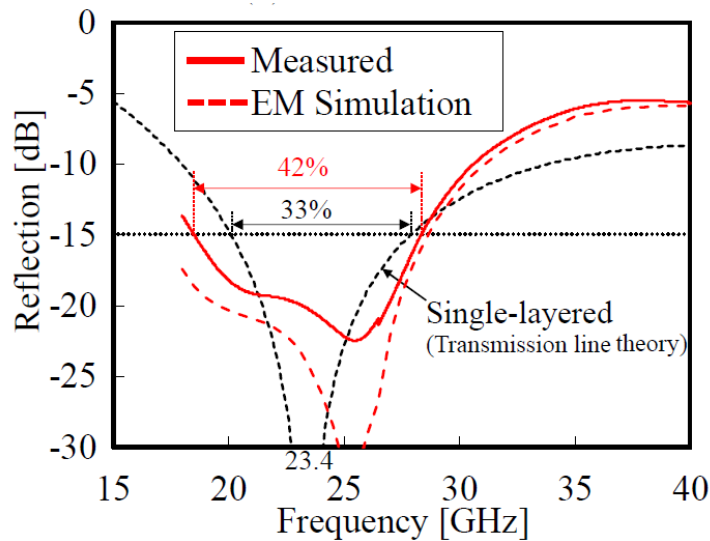


図 3 電波吸収体の反射特性

#### 参考文献

- [1] 橋本修, “電波吸収体入門,” 森北出版, 第4章, 第2節, pp. 29-31, Oct. 1997.
- [2] Y. Hashimoto et al., 2025 Asia-Pacific Microw. Conf., P2-057, pp. 1285-1287, Dec. 2025.
- [3] 橋本修, “高周波領域における材料定数測定法,” 森北出版, 第7章, pp. 154-166, Aug. 2003.

#### 論文リスト

##### 1. 原著論文

- [1] 増子佑基, 遠藤哲夫, 山口晃治, 橋本修, 須賀良介, “24 GHz 帯における自由空間法による建築用ガラスの特性評価,” 日本建築学会環境系論文集 第90巻 第835号, 412-418, 2025年9月.
- [2] 遠藤哲夫, 山口晃治, 花澤理宏, 林俊光, 本間幸洋, 須賀良介, 橋本修, “空間伝送型ワイヤレス電力伝送における建築部材の電波特性データベースを用いた電波伝搬推定に関する検討 —事務所モデルの実建築物に対するシミュレーション精度の検証—,” 信学論 C, vol. J109-C, no. 7, pp. XXX-XXX, July 2026.
- [3] 竹内陽人, 田山 紘介, 尼野理, 國田麻衣子, 須賀良介, “バイオプラスチックを用いたミリ波帯電波吸収体,” 信学論 C, vol. J109-C, no. 7, pp. XXX-XXX, July 2026.
- [4] A. Tsuchiya, Y. Yamaguchi, R. Suga, M. Takeda, E. Inami, H. Sugama, and O. Hashimoto, “Balanced Microstrip Line with Defected Ground Structure on Thin Flexible Substrate Film,” IEICE Commun. Express (to be published).

## 2. 国際会議プロシーディング

- [1] Ryota Okuda, Kazuhiko Niwano, Naoto Oota, Kosei Tomizawa, Yamato Shinada, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe and Shinji Koh "Electromagnetic Interference Shielding Property of Carrier-Doped Transparent Graphene," 2025 Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 1571102818, May 2025.
- [2] Yuma Morohoshi, Rasyidah Hanan, Ryosuke Suga, and Tomoaki Nagaoka, "Frequency Bandwidth Analysis of Low-loss Phantom for Absorbed Power Density Assessment in 28/40 GHz Bands," BioEM 2025, PA/FA-11, June 2025.
- [3] K. Tomizawa, R. Okuda, Y. Hashimoto, T. Watanabe, R. Suga and S. Koh, "Electromagnetic interference shielding property of p-type doped three-layer stacked graphene on PET," Microprocesses and Nanotechnology Conference 2025, Nov. 2025.
- [4] Tatsuya Ohwada, Shota Yamazaki, Maya Mizuno, Ryosuke Suga, and Tomoaki Nagaoka, "Development of Epidermis-equivalent Phantom in THz Frequency Region for Exposure Assessment," International Conference on Emerging Technologies for Communications 2025, P1-12, Nov. 2025.
- [5] Yasunari Hashimoto, Yoshitoshi Maeda, Temma Sasaki, Ryosuke Suga, "Novel Design of a Broadband Radio Wave Absorber Using Periodic Dielectric Cuboid Arrays," Asia-Pasific Microwave Conference 2025, P2-057, pp.1285-1287, Dec. 2025.
- [6] Tatsuya Yamazaki, Ryosuke Suga, "A Study on Boiling Process Detection of Water Using 24 GHz FMCW Radar," Asia-Pasific Microwave Conference 2025, TF4-3, pp.512-514, Dec. 2025.
- [7] Taisei Watanabe, Ryosuke Suga, "Improvement of Dynamic Range Applying the Brewster Angle for Corrosion Evaluation on Rebar Using Doppler Sensors at 10 GHz," Asia-Pasific Microwave Conference 2025, WG1-5, pp.88-90, Dec. 2025.

# 環境変動にロバストな定量光位相イメージング技術の開発

研究代表者 電気電子工学科 助教 前田智弘  
研究分担者 電気電子工学科 教授 外林秀之

## 1.1 研究目的

光波は辿ってきた経路によって位相が変化するため、光波の空間的な位相分布を計測することにより、光路上に配置された物体の奥行きや屈折率の分布を知ることができる。光波の位相分布を可視化する技術としては、位相差顕微鏡や微分干渉顕微鏡が代表的であるが、近年では位相分布を定量的に取得することができる位相シフトデジタルホログラフィ (PSDH) が生体組織の診断や工業製品の検査などの分野で注目を集めている。

PSDH では、計測対象を透過あるいは反射した光波 (物体光) に対して、強度・位相分布ともに均一な平面波 (参照光) を別途用意し、2 光波の干渉により生じる干渉縞の強度分布を利用する。このとき、物体光の位相分布を算出するためには、2 光波間に位相シフトを与えながら取得した複数の干渉縞画像が必要となる。位相シフトを与える方式としては、ピエゾミラーなどを用いて参照光の光路長を逐次的に変化させて複数回の撮像により干渉縞を取得する時間領域位相シフト法が一般的である。これに対して、位相シフトアレイデバイスを用いて参照光の空間位置ごとに異なる量の位相シフトを与えることにより、シングルショットでの計測を実現する並列位相シフト法も提案されている。しかしながら、並列位相シフト法では位相シフトアレイデバイスと撮像素子との間に緻密な光学調整が要求されるため、振動などの環境変動に対する耐性に課題を有する。そこで我々は、シングルショットかつ環境変動に対してロバストな位相シフト方式として、市松模様回折格子による光波面複製効果を利用した新たな方式を提案している。

## 1.2 進捗状況及び成果

提案手法では、市松模様回折格子の回折光間に生じる位相差を PSDH における位相シフトとして利用している。位相分布の算出には位相シフト量の値が必要となるが、提案手法で与えられる位相シフト量は回折格子の位置に依存するため、振動などの影響により変動してしまう。そこで本年度は、取得した干渉縞画像から位相シフト量を推定する手法について検討し、原理実証実験によってその効果を評価した。

まず、提案手法において複製間に位相シフトが生じる原理について述べる。図 1 に示すように、周期  $\Lambda$  の市松模様回折格子の  $\pm 1$  次回折光には、キャリア空間周波数  $\nu = \pm 1/\Lambda$  が与えられる。この回折格子の後方にレンズを配置すると、レンズの 2 次元フーリエ変換効果によって空間周波数シフトが結像位置の変位に変換されて光波面の複製

が生じる．このとき，回折格子の面内方向の位置が $\Delta x$ 変化すると，フーリエ変換のシフト則により空間周波数ドメインにおいて線形な位相変化 $\exp(i2\pi\nu\Delta x)$ が生じる．すなわち，キャリア空間周波数 $\nu = \pm 1/\Lambda$ の $\pm 1$  次回折光の間には $4\pi\Delta x/\Lambda$ の位相差が現れる．同じことが  $y$  軸に対してもいえるため，市松模様回折格子によって四方に生じる一次回折光の間には位相シフトが与えられることになる．複製間に与えられる位相シフト量は回折格子の位置によって決定される．そのため，回折格子の位置を高精度に検出できれば，位相シフト量を算出することができる．しかし，検出には追加の機器を要するうえ，回折格子の位置とは光軸からの変位量であり検出精度の保証が難しい．そこで本研究では，回折格子の位置検出ではなく，取得される干渉縞画像から位相シフト量の推定を目指す．

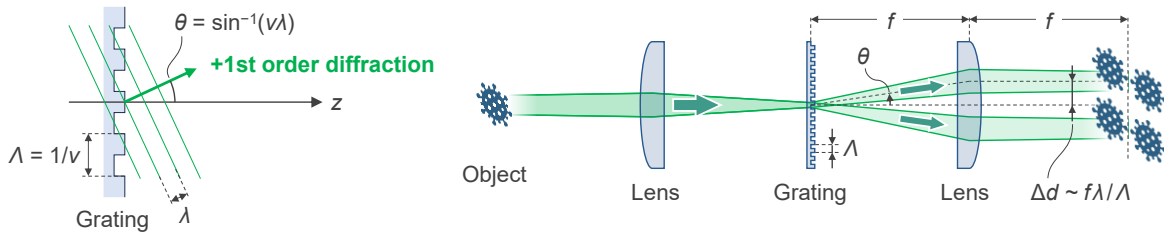


図 1 市松模様回折格子による光波面複製の原理

実験系を図 2 に示す．計算機合成ホログラム (CGH) を表示した空間光変調器 (SLM) に波長 532 nm のレーザ光を照射し，複素振幅分布を光波に付与した．この光波を物体光とし，市松模様回折格子を通過させて参照光（物体光とコヒーレントな平面波）とビームスプリッタ (BS2) で合波した．2 光波の干渉により生じる干渉縞は CMOS カメラによって取得した．市松模様回折格子については，SiO<sub>2</sub> 基板に対して CF<sub>4</sub> ガスを用いた誘導結合プラズマ (ICP) エッチングにより周期 120 μm，深さ 577 nm の周期的な凹凸を与えることで作製した．

図 3(a) に示すように，物体光の近傍 2 個所に  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  の位相値を有したマーカを付与した．実験で得られたマーカ付き物体光の強度分布を図 3(b) に示す．マーカは物体光とともに回折格子を通過し，図 3(c) に示すように回折格子による光波面複製効果が与えられる．図 3(d) からわかるように，マーカに与えた位相値ごとに異なる干渉強度が得られる．このとき，図中の左右と上下に現れるマーカはそれぞれ左右と上下に分かれる複製に由来するため，下式の 4 ステップアルゴリズムにより各マーカの位相値  $\phi$  を求めることで，左右間と上下間の複製に与えられた位相シフト量を推定することができる．

$$\exp(i\phi) \propto H_0 - H_\pi + i(H_{3\pi/2} - H_{\pi/2})$$

ここで， $H_\theta$  ( $\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) は，対応する位相値を与えた領域のマーカ干渉強度を表す．

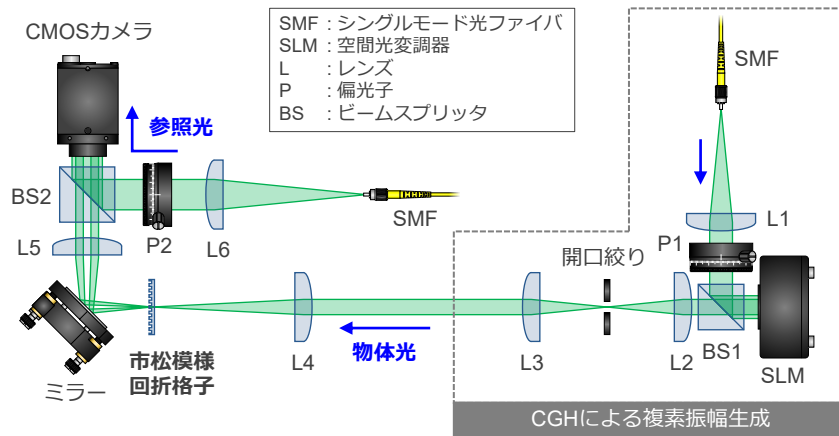


図 2 実験系

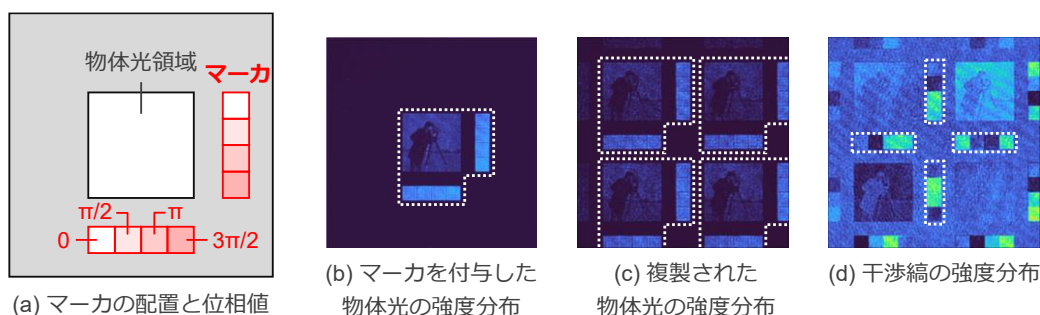


図 3 物体光に付与したマーカーを用いた位相シフト量の推定

実験ではまず、市松模様回折格子の位置を電動ステージで移動させて複製間の位相シフト量を変化させ、マーカーの干渉強度から位相シフト量の推定が可能であることを確認した。回折格子を  $x$  軸方向に  $2\lambda$  ( $240 \mu\text{m}$ ) 移動させた際の位相シフト量の推定結果を図 4 に示す。図より、左右の複製間の位相シフト量について、推定値が線形に変化したことがわかる。得られた結果を線形近似した結果の傾きが移動量から算出される理論値とほぼ一致したことから、位相シフト量の推定が正しく機能したことが実証された。

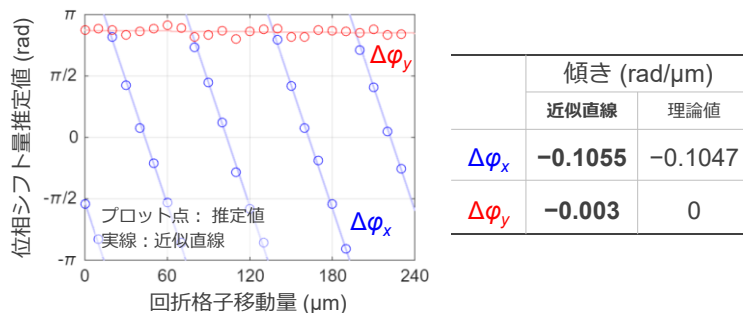


図 4 位相シフト量の推定結果

次に、推定された位相シフト量を用いて定量位相イメージング実験を行った。CGH により物体光の位相分布に 2 次元画像を与え、計測精度は PSNR により評価した。比較のため、従来手法である時間領域位相シフト法による計測も実施した。提案手法お

よび従来手法のそれぞれで得られた位相分布を図 5 に示す。複数回の撮像が必要となる従来法では干渉状態の時間的な変動の影響を受けたため、間隔 0.5 秒で 60 秒間連続的に撮像し、PSNR が最高値と最低値をとったときの結果を示している。一方で、提案手法はシングルショットでの計測が可能であり、従来手法と異なり干渉状態の変動の影響を受けない。提案手法による計測結果の PSNR は 21.43 dB と、従来手法における最高値と同等の値を示したことから、高精度での計測が安定的に実現可能であることが示された。

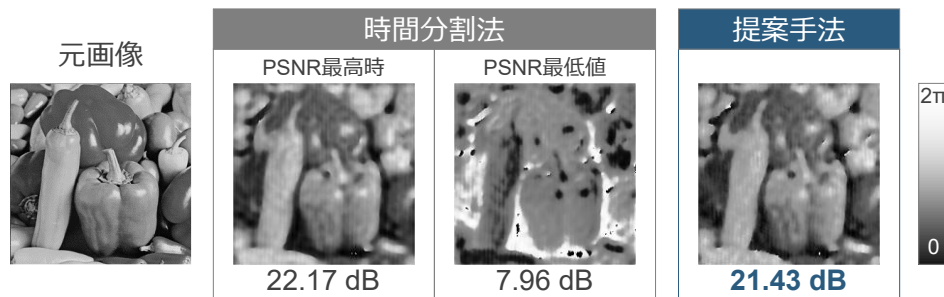


図 5 実験結果

### 1.3 総括

本プロジェクトでは、特殊な構造を有した回折格子を用いることで、環境変動にロバストな定量位相イメージングの実現を目指した。1 年目は、試作した市松模様回折格子の寸法精度や光学特性を評価し、光波面複製効果を実証した。2 年目は、複製間に与えられる位相シフト量を推定するアルゴリズムを開発し、数値解析により位相シフト量推定の実証と計測精度の評価を行った。プロジェクト最終年にあたる 3 年目は、改良した位相シフト量推定アルゴリズムの動作を実験実証し、位相計測性能を実験的に評価した。以上より、提案手法が従来手法と同等の精度で定量位相イメージングを実現でき、かつ環境変動により光学素子間の位置ずれが生じた場合でも計測精度が劣化しないロバスト性を有することを実証することができた。

### 論文リスト

#### 1. 原著論文

該当なし

#### 2. 国際会議プロシーディング

Tomohiro Maeda, Satoshi Yanase, Hideyuki Sotobayashi, and Kouichi Akahane, “Estimation of Phase-Shift in Phase-Shifting Digital Holography Using Checkerboard Diffraction Grating,” IEEE Photonics Conference 2025 (IPC 2025), TuG4.2, Singapore, Singapore, Nov. 2025.

#### 3. 受賞等

該当なし

# 立体選択的合成反応の開発

研究代表者 化学・生命科学科 教授 武内 亮

## 1.1 研究目的

本研究では、有機分子の三次元の立体構造を選択的に作る立体選択的合成に重点を置く。立体構造制御のために、遷移金属錯体の新たな触媒機能を開発する。本研究では研究代表者が独自に見出したはイリジウム触媒とルイス酸またはブレンステッド酸との協働作用を用いた光学活性化合物の効率的合成法の確立を行う。

有機分子は三次元の形を持っている。このことから、炭素原子に結合している 4 つの結合がすべて異なる場合、その分子と鏡に映ったその分子は重ね合わせることができない。実像と鏡像が重ね合わせることができない右手と左手の関係になる。実像と重ね合わせることができない鏡像を鏡像異性体という。鏡像異性体が存在する分子を光学活性分子という。鏡像異性体の片方だけを高度の選択性を持って合成することは難しく、合成化学者へ与えられた最大の難問である。有機化学の歴史は立体化学の歴史とも言える。1874年に van't Hoff と Le Bel が炭素原子の四面体構造を明らかにして以来、有機化学者は鏡像異性体の研究に取り組んできた。鏡像異性体の入手は容易ではなく、鏡像異性体の分離（光学分割という）は困難であった。たとえ分離で来たとしても、所望の鏡像異性体の最高収率は 50%であった。触媒的不斉合成は少量の不斉触媒から所望の鏡像異性体が得られる理想的方法である。

複素環化合物は医薬品の基本構造として極めて重要である。光学活性芳香族複素環化合物は、軸不斉を有する化合物も存在するが、一般的に標的分子となるものは芳香族複素環の隣接位や近傍に点不斉を有している。これらの化合物の合成においては、合成の最終段階で点不斉を構築する合成法よりも、芳香族複素環の隣接位や近傍に点不斉を構築し、さらに炭素鎖伸長や官能基変換が行える合成法の方が汎用性に優れる。不斉中心の構築と変換可能な官能基の導入を同時に行える反応が望ましい。本研究では、このような反応を開発し、光学活性芳香族複素環化合物の合成を行うことを目的とする。また、これらの研究と並行して、有用なビルディングブロックとなるような光学活性多官能性化合物の合成も行う。

## 1.2 進捗状況及び成果

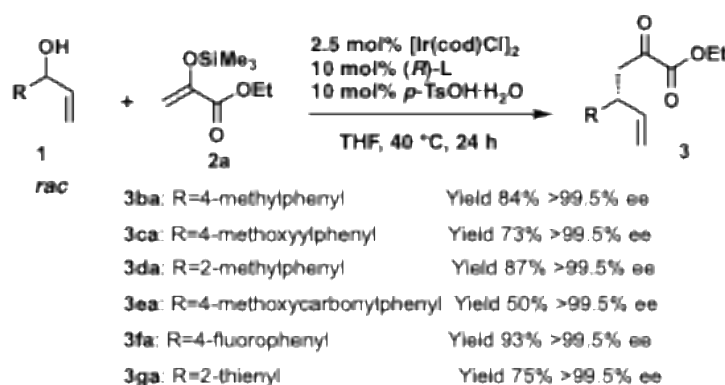
### 複素環化合物合成に有用な光学活性多官能性ビルディングブロックの合成

#### $\alpha$ -ケトエステルおよび $\alpha$ -ジケトンの不斉アリル化反応

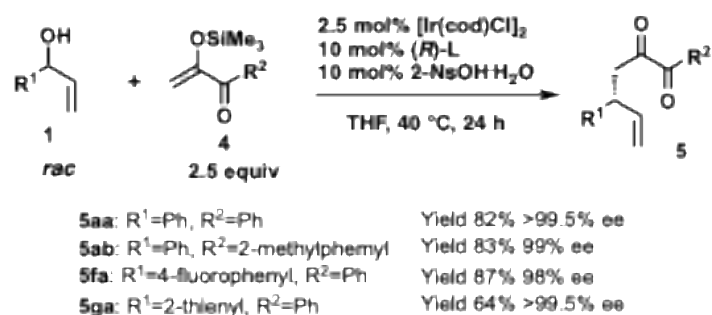
$\alpha$ -ケトエステルは  $\alpha$ -ヒドロキシ酸や  $\alpha$ -アミノ酸などの有用な化合物合成への出発物質となる重要な化合物である。 $\alpha$ -ケトエステルや  $\alpha$ -ジケトンを用いた不斉アリ

ル化は未だ達成されていない。本不斉反応は、光学活性芳香族複素環化合物へ導くことができる光学活性ビルディングブロックの効率的合成法として開拓が望まれていた。本触媒系により  $\alpha$ -ケトエステルおよび  $\alpha$ -ジケトンの不斉アリル化が進行することを見出した。

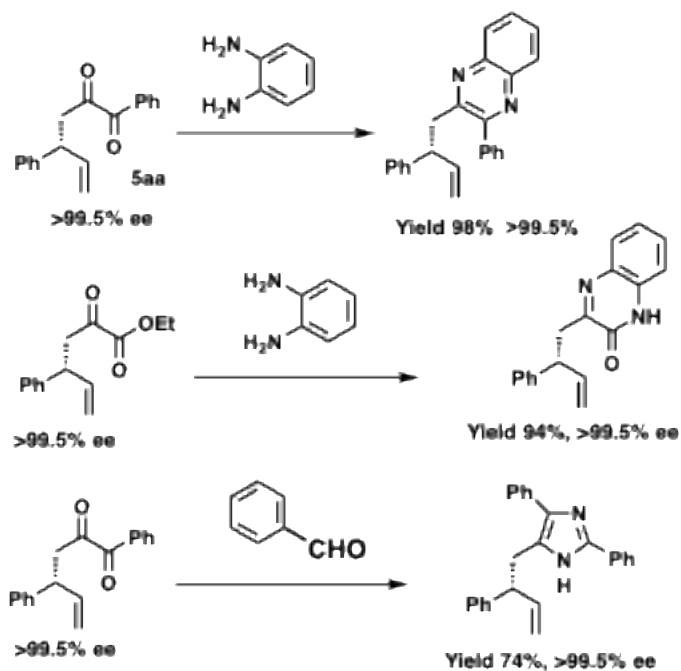
アリルアルコール **1** の適用範囲を検討した。MeO 基を有する **1c** の反応では、**3ca** が収率 73% で得られた。立体的に嵩高いアリルアルコール **1d** も反応に用いることができ、**3da** が収率 87% で得られた。エステル基や F 基は反応条件下で共存することができ、生成物 **3ea** と **3fa** がいずれも高エナンチオ選択的に得られた。チオフェン環を有するアリルアルコール (**1g**) から良好に反応が進行した。



$\alpha$ -ジケトン由来のシリルエノールエーテルの不斉アリル化は、酸触媒として 2-NsOH を用いることによって良好に進行し、高エナンチオ選択的に生成物が得られた。

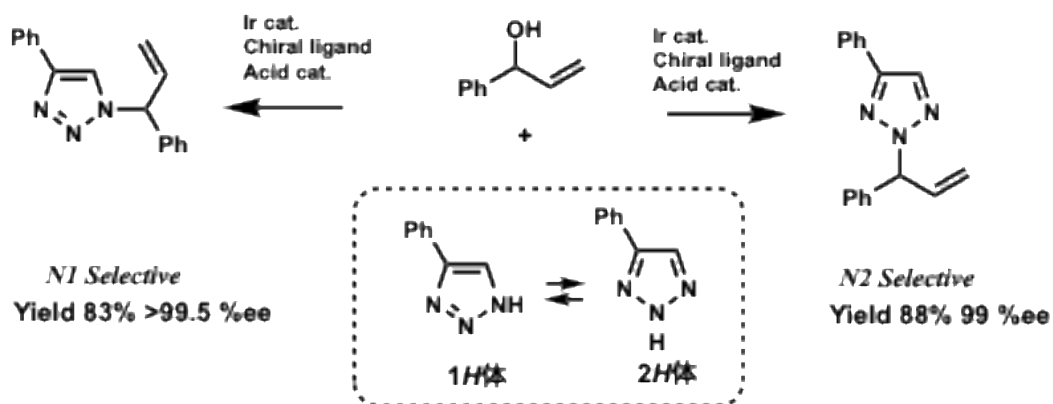


得られた生成物の分子変換反応を試みた。o-フェニレンジアミンとの反応により、キノキサリンやキノキサリノンが高収率で得られた。また、ベンズアルデヒドとの反応によりイミダゾールが得られた。これらの変換反応の過程でラセミ化は全く進行せず、ここで得られる生成物が光学活性ビルディングブロックとして有用であることが明らかとなった。



### トリアゾールの regiodivergent なエナンチオ選択的 *N*-アリル化反応

トリアゾールは様々な生理活性物質の基本骨格に見られる重要な化合物である。また、アルキンとアジドの click 反応により、種々の置換基を有するトリアゾール環が容易に構築できることから、その光学活性体への展開が期待されている。トリアゾールは環内に複数の窒素原子を有するため、互変異性体が存在する。それぞれの窒素原子上での regiodivergent な結合形成反応の開発が望まれている。本研究では、イリジウム/キラルホスホラアミダイト触媒と酸触媒にとの協働作用によって、ラセミ体の第2級アリルアルコールをアリル化剤として用いたトリアゾールの regiodivergent なエナンチオ選択的 *N*-アリル化反応を見出した。反応条件を選択することによって N1 体と N2 体それぞれが高収率かつ高エナンチオ選択的に得られることを見出した。



### 1.3 総括

当研究室で独自に開発したイリジウム触媒が種々の有用な有機分子の立体選択的合成に有効であることがわかった。容易に入手できる有機分子から医薬品の原料となりうるような光学活性複素環化合物の効率的合成を可能とする触媒を実現した。

### 論文リスト

#### 1. 原著論文

Takahiro Sawano, Natsuki Suzuki, Kana Takahashi, Yuta Goto, Kazunori Miyashita, Ryo Takeuchi

Iridium-Catalyzed Asymmetric Allylation of Silyl Enol Ether Derived from  $\alpha$ -Ketoesters and  $\alpha$ -Diketones with Allyl Alcohols

*Organic Letters*, 2025, **27**, 2389-2394.

DOI: 10.1021/acs.orglett.5c00244

Takahiro Sawano, Ami Iwasawa, Ayumi Sugiyama, Kengo Honda, Ryo Takeuchi

Iridium-Catalyzed Regioselective Hydroalkylation of Terminal Allenes with Malonic Amides

*Tetrahedron Letters*, 2025, **169**, 155759.

DOI: 10.1016/j.tetlet.2025.155759

#### 2. 国際会議プロシーディング

Ryo Takeuchi, Takeshi Matsui, Yuki Yasumura, Manami Kobayashi, Natsuki Suzuki, Takahiro Sawano

PA-044

Iridium-Catalyzed Enantioselective Allylation and Allenylation

22nd IUPAC International Symposium on Organometallic Chemistry directed towards Organic Synthesis, September 1-5, Kyoto, Japan

#### 3. 受賞等

なし

# 重力波源の電磁波対応天体探索のための

## 宇宙広視野 X 線モニターの開発 III

研究代表者 物理科学科 教授 坂本貴紀  
研究分担者 物理科学科 助教 芹野素子

### 1.1 研究目的

2017年8月17日、中性子星同士の合体に伴った重力波からの電磁波対応天体が発見され、いよいよ重力波天文学の幕開けとなった。我々は、今後、地上重力波検出器 LIGO、Virgo、そして KAGRA が最高感度で天体からの重力波を検出する時代を迎えるにあたり、その電磁波対応天体を探索できる、超小型衛星を用いた広視野軟 X 線モニターの検討、および開発を進める。重力波検出器で決定される重力波の到来方向の精度は数 10-100 平方度であり、一度に大きな空の領域を高い感度で観測できる観測装置が必須である。我々は、この目的を達成するために、Miro Pore Optics (MPO) という X 線光学系と CMOS イメージセンサーを組み合わせた高感度広視野 X 線望遠鏡、そして、重力波イベントの検出を受けて、即座に追観測を実行できるように民間衛星通信を用いた衛星と地上との常時通信の宇宙実証を行う。

### 1.2 進捗状況及び成果

#### (a) 6U キューブサット SEAGULL

重力波源の電磁波対応天体探索を主目的とした 6U キューブサット (10 cm x 20 cm x 30 cm) のミッション部の検討に進める上で必要となる X 線ビームラインの整備を完了した。昨年度、新たな X 線発生装置を導入し、今年度は、X 線ビームを絞るためのスリットの設置を行った。本スリットの導入により、測定に必要な平行度をもつ X 線を MPO へ照射することが可能となった。今後、本格的な MPO の X 線性能測定を整備が完了した X 線ビームラインを用いて進めていく。焦点面検出器である CMOS イメージセンサーにおいては、SEAGULL の要求である、0.4-4 keV の観測帯域を実現するための最適な設定値の決定を行った。また、MPO そして、CMOS イメージセンサーのシミュレータ開発を行い、MPO および、CMOS イメージセンサーの実験結果をほぼ再現できるものが作成できた。今後、このシミュレータを発展させ、実際の SEAGULL での観測の様子をシミュレートできる所まで完成度を高めていくことで、SEAGULL による観測実現性の検討を開発したシミュレータを用いて進めていく。今回開発したシミュレータの成果は来年度のデンマーク、コペンハーゲンで開催される国際会議 SPIE にて発表予定である。

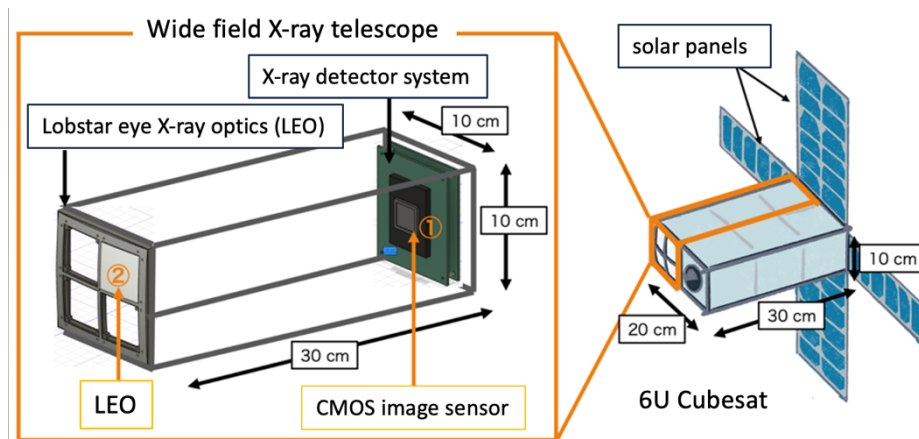
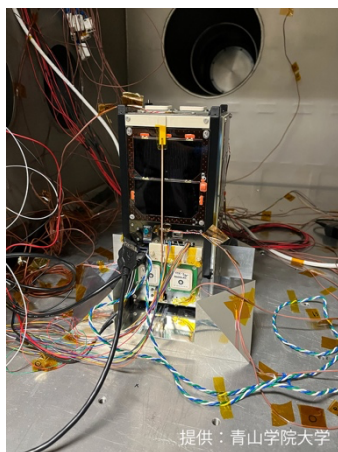


図 1 6U キューブサット SEAGULL

(b) 速報実証衛星 ARICA-2

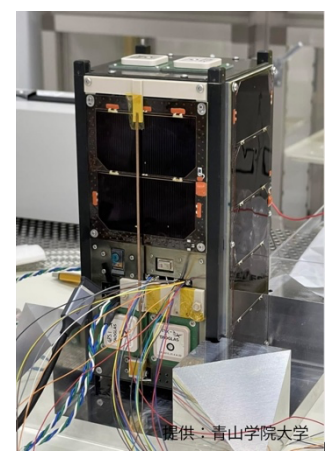
民間衛星通信を用いた、突発天体の速報システムの実証を目的とした、2U ARICA-2 衛星は、フライトモデルが完成し、熱真空試験、そして、振動試験を実施し、想定される宇宙環境、およびロケット等による振動レベルにも十分な耐久性を持っている事を確認した。今後、JAXA への衛星引き渡しの後、衛星を打ち上げ場であるニュージーランドへ輸送し、ニュージーランドでのロケット側への衛星引き渡し作業後、2026 年に打ち上げられる予定である。



(a) 熱真空試験



(b) 振動試験



(c) フライトモデル

図 2 ARICA-2 衛星の開発の様子

### 1.3 今後の課題

SEAGULL 衛星は、次期重力波観測 05 が開始される 2029-2030 年に間に合うように打ち上げる事で科学的な成果を最大化したい。そのためには、本格的な衛星開発を早急にスタートさせる必要があり、衛星開発に必要な開発費の獲得を急ぐ必要がある。開発資金の獲得ができれば、X 線望遠鏡部の試作、そして、衛星バス部の検討など具体的な開発フェーズへと進みたい。

ARICA-2 は打ち上げ後の運用を見据えた準備を進めていく必要がある。特にアマチュア無線家向けのアマチュアミッションでは、しっかりと情報開示を行っていく必要がある、まだまだ不十分である。運用に向けた準備を加速させる。

### 論文リスト

#### 1. 原著論文

特になし

#### 2. 国際会議プロシーディング

特になし

#### 3. 受賞等

特になし

# 実用高温超伝導材料機能開拓プロジェクト

研究代表者 物理科学科 教授 下山 淳一

研究分担者 物理科学科 助教 元木 貴則

## 1.1 研究目的

銅酸化物や二ホウ化マグネシウムなどの高温超伝導材料は線材、バルク、薄膜の形で、送電ケーブル、電磁石、バルク磁石、SQUID 素子など様々な用途に実用され始め徐々に普及している。従来の超伝導材料が液体ヘリウムで冷却されていたのに対し、これらの応用は液体窒素や小型冷凍機による冷却であるため、本来、普及力が大きく、エネルギー・環境問題への対応や先端科学技術、高度医療の発展に貢献できるポテンシャルを持つ。しかしながら、高温超伝導技術の普及は速やかではなく、その原因として、材料が高価であること、材料特性が“使えるレベル”に達しただけであること、超伝導接合技術など周辺技術が未熟であること、などが挙げられる。すなわち、普及力を高め、用途を広げるにはこれらの課題を解決する必要がある、材料特性の向上による高機能化を目指した研究が直接的な手段となる。具体的には材料特性向上は工程が同じであれば低コスト化に、“使えるレベル”以上の性能による装置、機器の小型化や運転条件の拡大につながり、さらに、特性向上は材料の均質性や超伝導体表面状態の改善を伴うことから超伝導接合形成が可能になり、銅酸化物超伝導材料では極めて困難と考えられてきた永久電流回路の開発・実用化が見通せる。一方、前プロジェクトとして実施した 2021～2023 年度の企業との共同研究の成果として、材料の焼成前後に行う熱処理過程の導入が材料特性を大きく改善することを見出した。これにより、従来、あまり重視されなかった焼成前後の熱処理過程の最適化こそが短期間での材料高機能化に有効であることが明らかになった。以上の背景のもと、2024 年度より始めた本プロジェクトでは RE123 系(RE は希土類元素)および Bi 系銅酸化物材料、 $MgB_2$  材料について、それぞれの材料用途の拡張を目的とし、焼成条件、出発原料調製、前熱処理、後熱処理の最適化による材料機能改善を目指した基礎研究を中心に実施した。RE123 系ではティーイーピー社と住友電工社および JST 未来社会創造プロジェクト、 $MgB_2$  材料開発では東ソー社の協力を得て研究を実施した。Bi 系については住友電工社が 2024 年度より事業撤退し、2024 年度は経産省の「**経済安全保障の維持・強化に資する重要技術の適切な管理実現のための試験・評価・研究事業**」の支援を受けて実施したが、2025 年度はその延長として基礎的な研究を行った。

## 1.2 進捗状況及び成果

RE123 系溶融凝固バルク(以後 REBCO バルクと称する)は、 $REBa_2Cu_3O_7$ (RE123)と  $REBaCuO_5$ (RE211)の混合ペレットを RE123 の包晶温度( $T_p$ )以上に昇温し部分溶融状態とした後、徐冷することで  $T_p$  の高い Nd123 単結晶などを核として得られる大型の疑似

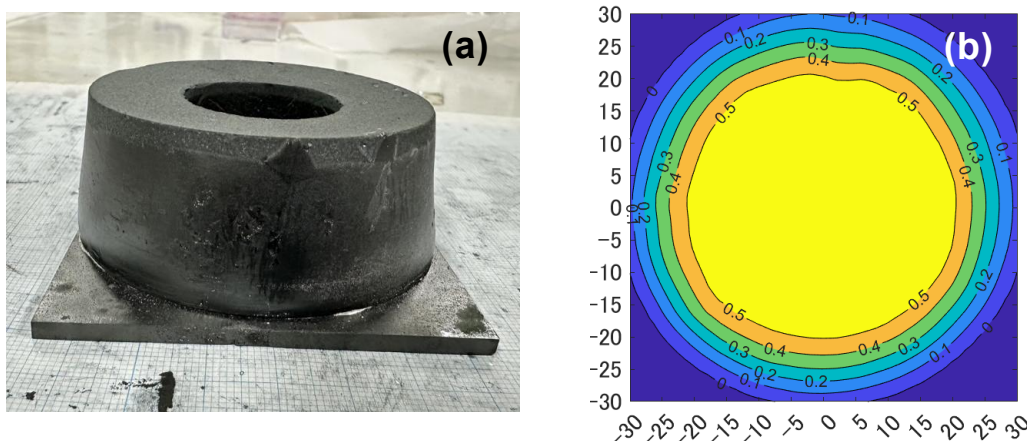


図 1. 外径 80 mm の成型体から 4 枚のシードプレート上に育成した YBCO 熔融凝固バルクの外観 (a)、77 K におけるリングバルク表面の捕捉磁場分布

単結晶である。バルク全体を超伝導電流が周回するため、永久磁石を超える高磁場を捕捉することが可能である。我々は希土類の違いによる  $T_p$  の差に着目し、 $T_p$  の高い既製の REBCO バルクを切り出してシードプレートとし、その上に  $T_p$  の低い REBCO を用いた無配向焼結体を乗せ鉛直方向のみに熔融成長させる手法 (Single-Direction Melt Growth, SDMG 法) を 2019 年度に開発し、従来法である材料の表面中央に小さい種結晶を置いて結晶成長する Top Seeded Melt-Growth 法に代わる新規高機能バルク材料作製法として提案している。この方法ではシードプレート表面とのバルクが界面全体で密着していれば、確実に均質なバルク材料が得られる。2025 年度の研究ではさらなるバルクの大型化を目指し、複数枚のシードプレート上に大型の結晶育成を試みた。図 1(a) に示すように 4 枚のシードプレート上に外径 80 mm の成型体からの ring 形状のバルクの育成に成功した。この大型バルクの 77 K における捕捉磁場分布は図 1(b) に示したように同心円状であり均質性が高いことがわかった。なお、このバルクは様々な試作を経て得られたもので、このような良質のバルク育成にはシードプレート境界の結晶方位のずれを小さくすることが極めて重要であることがわかった。この大型バルク育成の成功は、原理的にどのような大型バルクも同じ熱処理時間で育成できることを実証したものであり、今後の大型かつ均質な超伝導バルク開発の道が拓けたといえる。2026 年度以降はこのような大型のリング形状バルクを積層し、卓上 NMR への実装を目指す。

Bi2223 線材の開発に関する研究は、共同研究を実施していた住友電工社が 2024 年度途中に事業撤退したため、2024 年度下期からは積層厚膜型の新規材料の開発に着手している。2024 年度には 4 層の積層導体において液体窒素温度下での臨界電流密度が  $15,000 \text{ A/cm}^2$  に達したが、2025 年度に実施した Pb 濃度を高めた積層導体開発ではこの特性を超えることがなかった。Bi2223 層と銀の層の厚さ、およびの比率が良好な界面近傍の緻密かつ高度に  $c$  軸配向した組織の形成に重要な因子となることから、2026 年度は積層厚膜の構成を系統的に制御した材料の開発に取り組む。Bi2223 線材の技術を

後継する材料開発に手応えを得た。

MgB<sub>2</sub> 多結晶体の材料高機能化研究では、MgB<sub>2</sub> 結晶の微細化と緻密な組織形成が臨界電流特性改善に有効な指針となる。2023 年度に B 過剰組成から合成した MgB<sub>2</sub> を前駆体への Mg の拡散反応によって安価なホウ素原料を用いても 20 K の臨界電流密度が 10<sup>6</sup> A cm<sup>-2</sup> を超える試料の作製に成功したが、磁場中の臨界電流特性が改善のために 2024 年度はホウ素サイトへの炭素置換を行い、ホウ素の 2%程度を炭素で置換することにより 15~20 K の臨界電流特性が改善することを見出した。一方、2022 年度から、新規な微細ホウ素原料の開発を東ソー社と共同で始め、2023 年度以降、試作 B 原料を用いた MgB<sub>2</sub> バルク作製を進めているが、B 原料中の不純物、表面に吸着した水分の除去が課題となっていた。2025 年度の主な成果としては、B 原料の前処理に有機溶媒洗浄の工程を加えたことで、これによって本焼成前に低温熱処理過程 (700°C, 48 h) を加えることによって、吸着水が除去でき、結果的に MgB<sub>2</sub> バルクに共存する MgO を大幅に減らせることを見出した。この方法で C 添加、または TiB<sub>2</sub> 添加 MgB<sub>2</sub> バルクを作製したところ、再現性良く 15 K、低磁場下で 10<sup>6</sup> A cm<sup>-2</sup> 以上、同 3 T で 10<sup>5</sup> A cm<sup>-2</sup> 程度のバルク試料が得られるようになった。この臨界電流特性は MgB<sub>2</sub> バルクとしてトップクラスのもので、比較的低価格の B 原料を用いて実現できたことの意義は大きい。今後は日立社で開発中の医療用 MRI 用線材にこの技術を応用していく。

### 1.3 今後の課題

RE123 系溶融凝固バルクの新作製法 (SDMG 法) は、開発後 6 年経った今もなお結晶育成プロセスや後熱処理過程の最適化によって、臨界電流特性、捕捉磁場特性、および均質性が着実に向上しており、大型化技術も蓄積されつつあるなか、工業技術とするための歩留まりを高める工程の確立が求められている。今後も、従来法 (TSMG 法) で実績ある日本製鉄社、セラミックスメーカーであるティーイーピー社の協力を得て、原料や工程の検討を重ねていく予定である。さらに、本方法の RE123 バルクにおける有効なピンニングセンター導入による臨界電流密度の向上を通じた小型強力磁石の開発も依然としてインパクトの大きな研究課題である。2025 年度に微量 Ga ドープによって小型バルクで捕捉磁場特性の改善が認められたことから、大型バルク試料においてもピンニング力の強化に取り組み、液体窒素温度での捕捉磁場の記録(3 T)の更新にも挑戦したい。

Bi2223 積層厚膜型材料開発では、線材構成、熱処理過程の検討を通じて、Bi2223 多芯線材の性能に追いつくことが課題である。短尺線材での高臨界電流特性化が実現できれば、次に Bi2223 材料再興のきっかけとなる長尺積層厚膜型線材の創製を目指す。

MgB<sub>2</sub> に関しては、東ソー社と共同で 2026 年度以降も新規 B 原料の開発を継続して行い、実用材料への適用に向けて、臨界電流特性を指標とした高品質化を進める。C および TiB<sub>2</sub> 共添加や TiB<sub>2</sub> の微細化が有望な戦略であり、実用線材製造の条件である焼成温度の低温化(~600°C)に向けた Ag 添加も進めていく。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

- T. Motoki, T. Kii and J. Shimoyama, "Temperature-Dependent Trapped Magnetic Fields for REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE : Y, Dy) Melt-Textured Bulks Prepared Using the Single-Direction Melt Growth Method", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **35** (2025) 6800305
- Y. Takeda, G. Nishijima T. Motoki, J. Shimoyama and H. Kitaguchi, " Temperature, magnetic field, and field angular dependence of critical current of REBCO intermediate grown superconducting joint", *Supercond. Sci. Technol.* **38** (2025) 125003.

### 2. 国際会議プロシーディング

該当なし

### 3. 受賞等

- 相楽 和豊 低温工学・超電導学会 優良発表賞 (2025.5)
- 遠藤 淳 PASREG 2025 Best Presentation Award (2025.11)
- 國本 慧太 PASREG 2025 Best Presentation Award (2025.11)
- 浅古 諒 セラミックフェスタ in 神奈川 優秀賞 (2025.12)
- 元木 貴則, 仙波 実怜, 下山 淳一 応用物理学会 超伝導分科会論文賞 (2026.3)

# トポロジカル材料系における特異な電磁場応答の研究

研究代表者 物理科学科 教授 古川 信夫  
研究分担者 物理科学科 助教 廣澤 智紀

## 1.1 研究目的

本研究では、トポロジカル材料系における特異な電磁波応答の解明を行う。トポロジカル材料系とは、波動関数や磁気構造などにトポロジ数を実験的に定義することができる系において、熱平衡状態または励起状態において非自明なトポロジ数を取り得るものを指しており、量子ホール系、キタエフスピン液体系やスカーミオン系などがその代表例である。これらの系において、トポロジ構造に由来する電磁場応答の理論を発展させ、磁気光学応答や非従来型の非線形応答（巨大応答）の予言・発見を目指す。トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体のエッジ状態に対する局所電磁波応答を調べ、量子状態の検知や制御手法の確立を目指す。さらに、電磁波による周期的変調が生み出すフロケ状態を生成することによって、新規トポロジカル相転移・トポロジカル非平衡定常状態を作成し、これらの系における電磁波により誘起された諸物性を理論的に明らかにする。

## 1.2 進捗状況及び成果

### 1) スピン系におけるトポロジカル欠陥と外場応答に関する研究

スピン系の励起状態としてよく知られているのはスピン波状態であるが、これとは別にトポロジ数を伴った励起（トポロジカルに保護された励起）もいくつか存在する。本研究ではこれらの磁気構造についての外場応答に関する研究を行った。

- 1次元量子スピン系におけるドメイン壁の数値解析を行った。このような系のドメイン壁はトポロジによって保護された励起として理解でき、トポロジカル欠陥とも呼ばれる。本研究ではドメイン壁の動的応答について、特にカイラリティ自由度を用いた量子ビットのゲート操作への応用を研究した。磁場によるドメイン壁の量子状態制御によって1量子ゲートが実装できること、さらに並列したスピン鎖にそれぞれドメイン壁をおき、さらにこれらの間の交換相互作用を導入することによって2量子ゲートを実装できることを示した。これによって、擬1次元量子スピン系を用いた量子コンピュータ作成の可能性が示唆された。
- 三角格子反強磁性体の基底状態の一つである正四面体構造は熱的に励起されることでZ2渦と呼ばれるトポロジカル欠陥を作ることが知られている。この系にさらにスピン軌道相互作用に由来するジャロシンスキー・守谷相互作用を導入すると、基底状態としてZ2渦が周期的に並んだ結晶相（Z2渦結晶）が安定化することを

我々は示した。さらに結晶相の特徴を調べるために外場応答や励起構造を調べた。その結果、トポロジカルに非自明なマグノンのバンド分散や、分数の電荷が  $Z_2$  渦に束縛されることが示された。

## 2) トポロジカル電子系における外場応答に関する研究

Brillouin ゾーン上に定義される電子系のバンド構造が非自明なトポロジ数を持つ場合があり、これによってバルク状態やエッジ状態などがトポロジカルに保護された性質を示す。本研究ではこれらの電子構造についての研究を行った。

- Rice-Mele 模型を取り上げ、そのトポロジカル電荷ポンピングの周波数依存性を調べた。Rice-Mele 模型は単位胞内のホッピング、単位胞間のホッピング、およびオンサイトポテンシャル差でパラメトライズされる模型である。この系を特徴付けるトポロジ数は Chern 数である。この系における電荷ポンピングとは、これらのパラメータを周期的に時間変化させることによって電荷を移動させることができることを示す。パラメータ変化 1 周期あたりの電荷移動量をポンプ電荷  $D$  とすると、擬断熱極限（パラメータ変化の周波数  $\Omega \rightarrow 0$ ）において  $D$  は系のトポロジ数（Chern 数）と一致することが知られている。一方で、高周波極限（ $\Omega \rightarrow \infty$ ）では  $D=0$  となる。

本研究では時間依存シュレディンガー方程式や量子マスター方程式を用いて有限の  $\Omega$  に対するポンプ電荷  $D$  を数値的に求めた。その結果、ある閾値  $\Omega_c$  までは  $D$  はトポロジ数に一致する（一定値を取る）振る舞いが見られ、また  $\Omega_c$  を超えると緩やかに 0 に近づく振る舞いが見られた。系の交流外場に対する応答が、Drude 則のような緩やかに  $\Omega$  に対して減少するようなものではなく、ある程度の大きさの  $\Omega$  までは  $D$  の値がまったく変わらないのは、変調場に対する応答がトポロジカルに保護されていると考えて良いことがわかった。

- グラフェン（六方格子）はトポロジカル電子系の宝庫である。よく知られた例がグラフェンにスピン軌道相互作用を導入した Kane-Mele 模型で、量子スピンホール効果を示すエッジ状態が生じ、Chern 数がこの系を特徴付けるトポロジ数となる。一方、元のグラフェンにおいてはジグザグエッジ方向にフラットバンドが形成されることが藤田-若林-中田(1996)によって示されたが、近年これは 1 次元ワインディング数によって特徴付けられたトポロジカル状態に生じるエッジ状態とも見なされている。

本研究では、スピン軌道相互作用を導入したグラフェンに強磁場を加えることによって、ワインディング数によって特徴付けられたさまざまなトポロジカル相が生成されることを見いだした。その結果、元のジグザグエッジとは異なる様々なエッジ状態が誘起されることがわかった。

この結果は、グラフェンのトポロジカルエンジニアリングの手法のひとつとして、電子デバイス等に応用されることが期待される。

### 1.3 今後の課題

長期的な課題としては、これらの得られた結果からトポロジカル系の普遍性を抽出し、一般のトポロジカル系に対する包括的な解析をおこなうこと、トポロジカルに守られた状態の検出・同定・制御技術を解明することである。これによって、様々なトポロジカル系に波及可能な基盤研究の確立のみならず、電子光学素子・量子演算素子などに応用可能なロバストな素子の創生が期待される。

### 1. 原著論文

Guanxiong Qu, Ji Zou, Daniel Loss, and Tomoki Hirose, "Density Matrix Renormalization Group Study of Domain Wall Qubits", Phys. Rev. B **112**, 054432 (2025).

Tomoki Hirose, Alexander Mook, Maria Azhar, "Z<sub>2</sub> Vortex Crystals in tetrahedral antiferromagnets: Fractional charges and topological magnons", Phys. Rev. B **113**, L020413(2026).

### 2. 国際会議プロシーディング

### 3. 受賞等

T. Hirose, "Z<sub>2</sub> vortex crystals in tetrahedral antiferromagnets: Fractional charges and topological magnons", Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025) 優秀ポスター賞 (金賞)

# 冷却 Rb Rydberg 原子が自発的に形成する分子状態の検出 及び分子生成のためのマイクロアトムトラップの導入

研究代表者 物理科学科 教授 前田はるか

## 1.1 研究目的

近年、極低温 ( $\sim 150 \mu\text{K}$ ) かつ高密度 ( $\sim 10^{11} \text{ atoms/cm}^3$ ) に冷却された原子ガスを主量子数  $n$  が大きい Rydberg (リュードベリ) 状態に励起した、いわゆる冷却 Rydberg 原子ガス系 [1,2] を対象に、 $n^4$  に比例して生じる巨大な双極子-双極子 ( $d-d$ ) 相互作用に起因した物理現象に関する様々な理論・実験研究が報告されている。例えば、Rydberg Blockade 効果、即ち  $d-d$  相互作用による Rydberg 原子のエネルギーシフトを利用した CNOT ゲートの実験的検証 [3,4]、Rydberg 原子と基底原子の電子の散乱に起因してできるチョウ型或いは三葉虫型の波動関数を持つ巨大冷却 Rydberg 分子 [5,6]、冷却 Rydberg 原子ガスが Coulomb Explosion に類似の現象を起こす van der Waals (vdW) Explosion [7] などがその例であった。その中で、冷却 Rydberg 原子ガスに顕著に現れる量子多体効果の一例である、自発生成分子・クラスター構造を実験的に検出し、ひいては自発生成のメカニズムを理解する実験研究例は限られており [7-13]、本現象を十分に理解するに足るデータの蓄積は有意義な実験課題の一つである。

この様な背景の下、我々は分子・クラスター状態を生成・検出し背後にある物理的メカニズムを理解すること、或いは生成条件を精密制御するための実験システム、いわゆるマイクロアトムトラップ (或いは光ピンセットトラップ等) [14,15] を導入すること、等を目指したプロジェクト研究を行ってきた。また、原子間に働く相互作用に基づく非線形多体量子効果の理解を、冷却原子とは真逆の条件下にあるホットセル中にて容易に生じる超放射現象 [16] を対象に、相補的実験研究も行っている。既に述べたように、コールドアトムガス系では個々の「静止」した原子間に働く相互作用が様々な多体効果として観測される。一方個々の原子が激しく「運動」しているホットアトムガス系では、ガス中の原子密度をコールドアトムガス系の密度の  $10^4$  程度増やすことが容易であるため、状況によっては原子間に働く遠距離相互作用が系の物理を支配することが起こり得る。その典型例が超放射 (超蛍光) 現象であり、コールドとホットの双方の実験研究を行うことが本プロジェクト研究の一つの特徴である。

## 1.2 進捗状況及び成果

前プロジェクト、本プロジェクト研究において、分子・クラスター状態を生成（以下簡単のため分子生成と呼ぶ）し検出する場合、いわゆる Förster 共鳴エネルギー移行 (FRET) 現象に基づいた分子生成を利用することを行ってきた [17]。本年度ではこれまでに行ってきたいわゆる MW-assisted FRET に関し、二原子分子間のマイクロ波 (MW) 遷移 (図 1) という解釈に基づき、始状態  $42d_{5/2}42d_{5/2}$  に周波数  $\sim 27$  GHz のマイクロ波を照射し、その波長を掃引することで  $43d_{3/2}40f_{7/2}$  及び  $43d_{5/2}40f_{7/2}$  への MW 遷移を観測した (図 2(a))。このスペクトルは以前にも行った [16] Floquet モデルに基づいて理解でき (図 2(b) 参照)、実際、実験で観測された二つの遷移スペクトルの周波数と Floquet モデルに基づいて計算したエネルギー準位図に出現している二つの avoided crossing の位置がほぼ一致している。

そもそも図 2(b) の Floquet 準位図は照射するマイクロ波の周波数をチャープ (高速掃引) した場合、断熱高速 (Landau-Zenner) 遷移が図中の avoided crossing を利用することで誘起されることを示唆している。このことを実験的に確かめるため、周波数チャープマイクロ波を  $42d_{5/2}42d_{5/2}$  分子に照射する実験を行った。

そもそも図 2(b) の Floquet 準位図は照射するマイクロ波の周波数をチャープ (高速掃引) した場合、断熱高速 (Landau-Zenner) 遷移が図中の avoided crossing を利用することで誘起されることを示唆している。このことを実験的に確かめるため、周波数チャープマイクロ波を  $42d_{5/2}42d_{5/2}$  分子に照射する予備的な実験を行い、断熱高速遷移の観測に成功した。

一方、MOT 中に冷却・トラップされた中性 Rb 原子を任意配列するために、我々は Nogrette らの論文 [14] を参考に装置の作成を行っている。装置は大別して MOT、

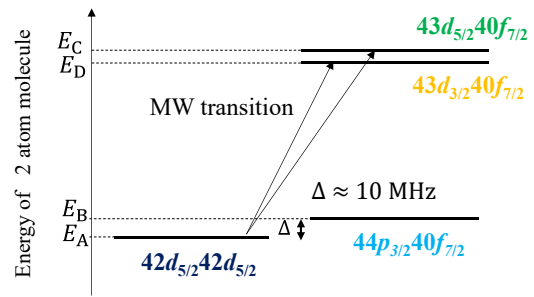


図 1 冷却 2 原子分子  $42d_{5/2}42d_{5/2}$  と  $43d_{3/2,5/2}40f_{7/2}$  との間のマイクロ波遷移の模式図。 $42d_{5/2}42d_{5/2}$  は近傍にある  $44p_{3/2}40f_{7/2}$  と強い電子配置間相互作用をする。

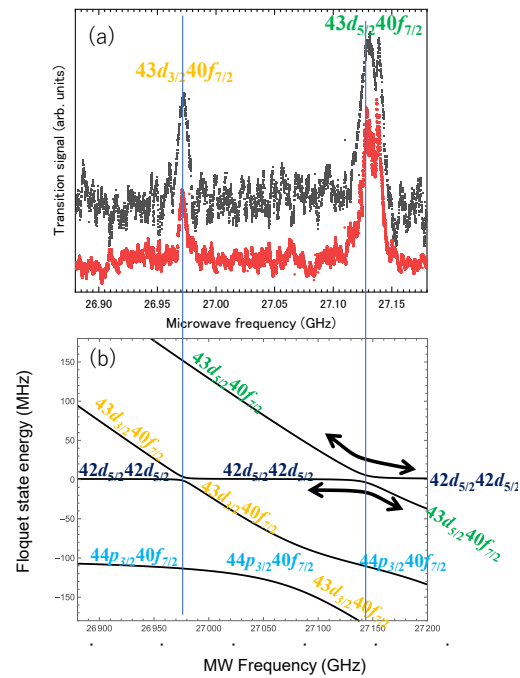


図 2 (a) 観測された MW スペクトル及び (b) Floquet エネルギー準位構造。両矢印は断熱高速 (Landau-Zenner) 遷移の可能性を示す。

Spatial Light Modulator (SLM: Hamamatsu Photonics, LCOS-SLM X15213-12), 高出力 960 nm ダイオードレーザーシステム、及び超高感度カメラ (Hamamatsu Photonics, qCOMS C15550-22UP)、それらを結合する光学系から成る。今年度は SLM セットアップのブラッシュアップを図ると同時に、SLM を駆動するために必要な計算機プログラムを作成するための Gerchberg-Saxton (GS) アルゴリズムの作成及びその改良を試みた [17]。特に、マイクロアトムトラップ中に 6 個の冷却原子を互いに 30 $\mu\text{m}$  の間隔で配置するための位相マップ (計算機プログラム) の計算を試み、位相マップを生成した。

更に、220  $^{\circ}\text{C}$  に加熱したガラスセル中の Rb ガスを高励起準位へとレーザー励起することで誘起される超蛍光現象の観測実験を行った。特に今年度は高い励起状態 (7p 状態) からのカスケード超蛍光の観測を試みた結果、7p 状態を始状態とする複雑なカスケード遷移に伴う新しい超蛍光データの取得に成功した [18]。その他、数年にわたり行ってきた CW レーザーをシード光としてカスケード超蛍光の遷移確率を制御する実験の成果がまとめられ、有意義な研究結果がえられた [19]。

### 1.3 今後の課題

本年度初めて行ったチャープマイクロ波による二原子分子の断熱高速遷移実験ではポジティブデータを得ることができた。今後はチャープ条件を系統的に変えることにより、より精密な実験を行う必要がある。

計算機プログラム生成のための GS プログラムは、アルゴリズム自体がシンプルであるため改良の余地が山積する。今後の課題である。また、マイクロアトムトラップのいわば心臓部である SLM システムについて、ハードの面から精密な光学設計を行う必要が残されている。

超蛍光実験では、単純に、より高い Rb の励起状態からの観測が興味深い。その場合、放出される赤外 $\sim$ THz 光のシステムティックな観測は、低周波波長域の「共振器の無い」コヒーレント光源としての利用の可能性を切り開くであろう興味深い課題である。

- [1] W. R. Anderson, J. R. Veale, and T. F. Gallagher, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 24 (1998).
- [2] I. Mourachko *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 253 (1998).
- [3] M. D. Lukin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 037901 (2001).
- [4] M. Saffman *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 2313 (2010).
- [5] Thomas Niederprüm *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 12820 (2016).
- [6] A. S. Dickinson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2458 (2000).
- [7] R. Faoro *et al.*, *Phys. Rev. A* **93**, 030701(R) (2016).
- [8] J. Lee and T. F. Gallagher, *Phys. Rev. A* **93**, 062509 (2016).
- [9] J. Lee *et al.*, *Phys. Rev. A* **96**, 012507 (2017).
- [10] R. Faoro *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 8173 (2015).
- [11] D. B. Tretyakov *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 173402 (2017).
- [12] I. I. Ryabtsev *et al.*, *Phys. Rev. A* **98**, 052703 (2018).
- [13] C. H. Greene, A. S. Dickinson, and H. R. Sadeghpour, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2458 (2000); V. Bendkowsky, B. Butscher, J. Nipper, J. P. Shaffer, R. Low, and T. Pfau, *Nature (London)* **458**, 1005 (2009); J. Tallant, S. T. Rittenhouse, D. Booth, H. R. Sadeghpour, and J. P. Shaffer, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 173202 (2012); D. A. Tate and T. F. Gallagher, *Phys. Rev. A* **97**, 033410 (2018)

- [14] F. Nogrette, H. Labuhn, S. Ravets, D. Barredo, L. Béguin, A. Vernier, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Phys. Rev. X* **4**, 021034 (2014).
- [15] Woojun Lee, Hyosub Kim, and Jaewook Ahn, *Opt. Express* **24**, 9816 (2016).
- [15] K. Kitano and H. Maeda, *Opt. Lett.* **48**, 69 (2023).
- [16] 稲村堅介, 2025 年度青山学院大学 大学院理工研究科 (基礎科学コース) 修士論文.
- [17] 平井風光, 2025 年度青山学院大学 大学院理工研究科 (基礎科学コース) 修士論文.
- [18] 大池泉美, 2025 年度青山学院大学 理工学部 物理科学科 卒業論文; 丸子 鈴, 2025 年度青山学院大学 理工学部 物理科学科 卒業論文.
- [19] K. Kitano, T. Kobayashi, and H. Maeda, *Phys. Rev. A* **112**, 013701 (2025).

## 論文リスト

### 1. 原著論文

K. Kitano, T. Kobayashi, and H. Maeda, Controlling the polarization of superfluorescence in a degenerate system using a continuous resonant laser field, *Phys. Rev. A* **112**, (2025), 013701.

# ナノポアやナノスリットと高分子の相互作用と

## 心筋細胞のダイナミクス

研究代表者 物理科学科 教授 三井 敏之

研究代表者 物理科学科 助教 守山 裕大

### 1.1 研究目的

本研究は、半導体ベースのナノポアを用いた DNA 一分子検出における精度向上と応用可能性の探究を目的とする。特に、ポア形状、DNA と半導体材料表面との相互作用、イオン溶液種による DNA ダイナミクスの差異、さらに溶液粘性が DNA 進入速度に及ぼす影響を体系的に解析する。これらの要因をナノスケール環境における DNA の動態として定量的に評価することで、高性能ナノポアセンサーの実用化に向けた基盤の構築を目指す。

加えて、細胞研究においては、ソフトマテリアルを用いた細胞培養系を構築し、物理的刺激が心筋細胞のダイナミクスに及ぼす影響を解析する。さらに、OCT (Optical Coherence Tomography) を用いた胚発生過程の直接観測により、心臓の形態変化を経時的に記録することを試みる。これらの研究を通じて、再生医療の発展および心臓疾患の発症メカニズムの解明に寄与することを目的とする。

### 1.2 進捗状況及び成果

本研究では、ナノポア通過時における DNA の物理的ダイナミクスを蛍光顕微鏡により可視化し、また、有限要素法 (FEM) による数値シミュレーションと比較することで、SiN 表面の電荷や DNA の電荷などといった、通常は直接測定が困難なパラメータの推定を試みた。CAT 研究プロジェクトの一環として、日立ハイテク 3050FIB を用いたナノポアの作製を進め、円筒形ポアに加えてアスペクト比 1:1 から 1:20 のスリット状ポアを作製し、幾何形状の違いが DNA の泳動挙動に及ぼす影響を体系的に評価した。

特に本年度は、PEG の分子量および濃度を調整することで電解液の粘性を制御し、DNA のポアおよびスリット通過速度の制御を検討した。その結果、粘性の増大により DNA のポア詰まりの発生頻度が減少する傾向が見られ、DNA がポア進入直前に形成するコンフォメーションが詰まりの発生と関係することが明らかとなった。これらの知見は、ナノポアデバイスの安定動作や高分解能計測に向けた設計指針として有用であり、実用化に向けた重要な基盤的成果となる。

細胞研究においては、心筋細胞と線維芽細胞の共培養系を用い、細胞が基板表面の sub mm 程度の細胞が出られない程度の溝内において一次元的な集合体を形成する過程を実験的に再現した。さらに、この集合体形成ダイナミクスを機械学習により予測するモデルを構築し、細胞の自発的な位置移動パターンの推定に成功した。また、線維芽細胞が溝方向に平行に配向しコンフルエントな状態に至る現象について、その配向が揃うメカニズムの詳細な解析を進めた。

さらに本年度は、心筋細胞と線維芽細胞が形成する一次元的な細胞集合体に対し、フィードバック制御を付加したメカニカル刺激を行い、その応答特性および自律拍動リズムの変化を評価した。昨年度まで標準的な 400 kPa の PDMS 基板を用いていたのに対し、本年度は 80 kPa のより柔軟な基板を採用し、in vivo に近い力学環境での検証を実施した。長期刺激の結果、拍動間隔が短縮し、外部刺激によるペーシングが可能であることが示された。さらに、心臓発生過程において、心筋組織の硬さと形態変化に相関が存在することも確認した。

鶏胚の OCT (Optical Coherence Tomography) によるトモグラフィー観測では、殻外培養系を用いて心臓形成過程を非侵襲的に経時観測した。観察した胚は自然発生と同程度の割合で成長を遂げ、OCT 計測が胚発生に大きな影響を与えないことを確認した。また、エタノールおよび超音波刺激が胚発生および心臓形成に及ぼす影響を検討し、これらが先天性心疾患に類似する心奇形を誘発する可能性を見出した。

### 1.3 今後の課題

次年度は、PEG により調整した高粘性環境下における DNA のナノポア通過挙動を多角的に検討する。具体的には、DNA 通過時のポア詰まり発生確率の定量化と、詰まりに寄与する DNA 形状・コンフォメーションの解析を進めるとともに、分子動力学 (MD) シミュレーションを導入し、実験結果との比較検証を行う予定である。また、ポア形状のさらなる最適化や電解液環境の調整を進め、ナノポア通過ダイナミクスを高精度に制御するための設計指針の確立を目指す。

細胞配向制御の研究では、線維芽細胞と心筋細胞の比率を調整し、心筋細胞の割合を高めることで、拍動がより顕著に観察される培養系の構築を行う。加えて、この細胞集合体に対し、機械的フィードバック制御を組み合わせたメカニカル刺激を付加し、拍動応答やリズム変調の詳細な評価を行う。

OCT を用いた心臓胚発生の三次元観察においては、エタノール添加や超音波照射が心臓形態および動態に与える影響を定量的に解析する。取得した時系列データに対しては、機械学習による三次元セグメンテーションと流体解析を適用し、心臓の立体運動とそれに伴う血流パターンを推定する予定である。さらに、超音波照射に対する感受性が形成過程のどの時点で高まるのかを明らかにし、その結果を先天性心疾患の発生メカニズムとの関連性の観点から検討する。

将来的には、得られた知見を基盤として、超音波を利用した心疾患治療法の可能性についても理論的・実験的観点から発展させることを目標とする。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

S. Matsuki, Y. Inoue, R. Watanabe, T. Mitsui, and Y. Moriyama, “Extracellular stiffness regulates cell fate determination and drives the emergence of evolutionary novelty in the teleost heart,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 123(8), e2511871123 (2026). <https://doi.org/10.1073/pnas.2511871123>

Y. Fuji, Y. Nojiri, Y. Moriyama, and T. Mitsui, “DNA relaxation dynamics in crowded environments: Influence of PEG molecular weight and viscosity,” *J. Chem. Phys.* 162(17), 174901 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0257786>

### 2. 国際会議プロシーディング

なし

### 3. 受賞等

なし

## 無機薄膜の高次構造制御による高度な機能の発現

研究代表者 機能物質創成コース 教授 重里 有三  
研究分担者 化学・生命科学科 助教 金 旻爽  
博士前期課程 2 年 高橋 七瀬

反応性スパッタで成膜した Pd 担持水素化ガドリニウム ( $GdH_x$ ) 薄膜の電気化学的な水素化・脱水素化反応に伴う熱特性変化

### Thermal property changes with electrochemical hydro-/dehydrogenations for Pd-catalyzed $GdH_x$ thin films deposited by reactive sputtering

○高橋七瀬 (青学大) 山下雄一郎 (産総研, 青学大) キムミンソク (青学大) 小口有希 (青学大)  
八木貴志 (産総研, 青学大) 竹歳尚之 (産総研, 青学大) 重里有三 (青学大)

○Nanase TAKAHASHI\*, Yuichiro YAMASHITA\*\*, Minseok KIM\*, Yuki OGUCHI\*\*\*,  
Takashi YAGI\*\*, Naoyuki TAKETOSHI\*\*, and Yuzo SHIGESATO\*

\* Graduate school of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, Sagamihara, 252-5258, Japan.

\*\* National Metrology Institute of Japan (NMIJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan

\*\*\* Center for Instrumental Analysis, College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, Sagamihara, 252-5258, Japan.

Corresponding authors: Yuichiro YAMASHITA, Email: [yuichiro-yamashita@aist.go.jp](mailto:yuichiro-yamashita@aist.go.jp)

Yuzo SHIGESATO, E-mail: [yuzo@chem.aoyama.ac.jp](mailto:yuzo@chem.aoyama.ac.jp)

Thermal switching devices that can control thermal conductance have attracted much interest. Here, we focus on switchable mirror materials as a candidate of thermal switch materials, which can reversibly change between insulator and metal states using hydrogenation and dehydrogenation reactions. In this study, we electrochemically controlled hydro-/dehydrogenations of a Pd-catalyzed  $GdH_x$  thin film and clarified the change in their thermal conductivity. A Pd/ $GdH_x$ /Cr three-layered film was fabricated on a quartz glass substrate using dc magnetron sputtering. For the deposition of the  $GdH_x$  layer, a mixture of Ar + H<sub>2</sub> (5 %) gases was used as a reactive gas. The hydrogenation/dehydrogenation states of the  $GdH_x$  layer were controlled by applying electrical potential in the 1 mol L<sup>-1</sup> KOH aqueous solution. Thermal conductivity was measured in the hydrogenated and dehydrogenated states using the in-situ rear-heating / rear-detection type picosecond pulsed light heating thermoreflectance apparatus. The thermoreflectance signals show large difference between the hydrogenated and the other states, where the thermal conductivities of the  $GdH_x$  were  $6.2 \pm 1.1$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> and  $8.1 \pm 1.1$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> in the as-depo. and dehydrogenated states, respectively.

## 1. 緒言

近年熱を制御する技術の1つとして、電圧や磁場など外部からの駆動力によって熱伝導率が大幅に変化する熱伝導率スイッチ[1,2]が注目されている。そこで本研究では熱伝導率スイッチの候補として、水素化(半導体)状態と脱水素化(金属)状態可逆的に制御できる調光ミラー薄膜[3]に着目した。金属状態の熱輸送は自由電子が支配的であるのに対し、半導体状態ではフォノンによる熱伝導が支配的であることから、調光ミラー薄膜は熱伝導率スイッチへの応用が期待できる[4-6]。

調光ミラー材料の一つである Gd は、Gd(金属)で六方最密構造(hcp)と面心立方構造(fcc)が存在し、基本的には hcp をとる。水素化すると蛍石型構造の  $GdH_2$ (金属)になり、さらに水素化が進むと六方晶( $Na_3As$ 型)または立方晶( $HoH_3$ 型[7])の  $GdH_3$ (半導体)となる。また、Gd から水素化する際は約 23 %の体積膨張が生じる。平田らは反応性スパッタ(水素流量比 5%)により水素化時の体積膨張を抑えた  $GdH_x$  薄膜を作製し、 $N_2+H_2(3\%)$ 混合ガスを用いたガスクロミック(GC)方式で水素化・脱水素反応に伴って熱伝導率が 5.4 倍変化することを報告している[6]。

熱伝導率スイッチの実用化に向けて、電氣的に制御可能な全固体型熱制御デバイスの開発が進められており、 $PbZrO_3$ [8]や  $SrCoO_x$ [9]を用いた全固体型熱伝導率スイッチの報告がある。また調光ミラー薄膜を用いた全固体型熱伝導率スイッチは、電位を制御することで電気化学的な方式で水素化・脱水素化状態を切り替えるエレクトロクロミック(EC)方式で熱伝導率を変化させる機構である。本研究では全固体型熱伝導率スイッチへの応用を見据え、 $GdH_x$  薄膜の電気化学的な水素化・脱水素化に伴う熱伝導率変化を明らかにすることを目的とした。

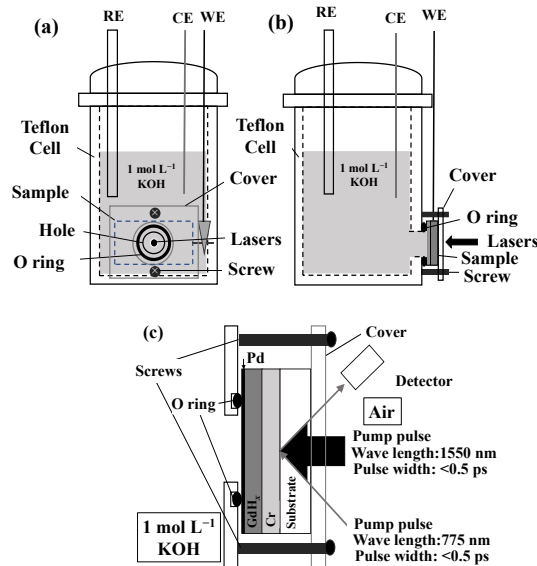


Figure 1. Schematic diagram of (a) front view and (b) side view of the Teflon cell. (c) enlarge view of specimen holder for a rear-heating/rear-detection type pulsed light heating thermoreflectance measurement.

## 2. 実験

### 2.1 試料作製

熱物性評価用として Pd/GdH<sub>x</sub>/Cr の 3 層膜試料を以下の手順で作製した。まず合成石英ガラス基板上に、Cr 薄膜を dc マグネトロンスパッタにより 100 nm 成膜し、大気中で電極となる部分のマスキングを行った。次に、水素ガス（流量比 5 %）を導入した反応性スパッタにより GdH<sub>x</sub> 薄膜 200 nm を積層し、最表面には Pd 薄膜を 5 nm 積層した。成膜条件を表 1 に示す。

Table 1 Deposition conditions for GdH<sub>x</sub>, Pd and Cr layers.

Layer	Gd	Pd	Cr
Sputtering method	dc magnetron		
Target	Gd (99.99 %)	Pd (99.99 %)	Cr (99.95 %)
Sputtering gas	Ar		
Reactive gas	H <sub>2</sub>	-	-
H <sub>2</sub> flow ratios, %	5	-	-
Total gas pressure, Pa	1.0	0.5	1.0
Back pressure, Pa	4.0×10 <sup>-4</sup>		
Nominal thickness, nm	200	5	100
Substrate temperature	Room temperature		
Power, W	50	10	50

### 2.2 結晶構造と膜厚評価

薄膜の結晶構造は X 線回折装置 (XRD-6000, SHIMAZU) を用いて  $\theta$ - $2\theta$  法で評価し、膜厚は触針式段差計 (DektakXT, BRUKER) または透過型電子顕微鏡 (JEM-2100, JEOL) で測定した。

### 2.3 in-situ サーモリフレクタンス測定

熱伝導評価には電解液中で電位制御が可能なセルを導入した裏面加熱・裏面測温型 (RR 型) in-situ サーモリフレクタンス計測システムを用いた。装置の概要を図 1 に示す。電気化学測定にはポテンショスタット・ガルバノスタット

(HA-151 および HZ-5000, HOKUTODENKO) を用いた。サーモリフレクタンス測定では、まず大気中で as-depo. 状態を測定した。次に 1 mol L<sup>-1</sup> KOH 水溶液に接触させた状態で as-depo 状態を測定し、水素化状態となる還元電位を決定するために 8 mVs<sup>-1</sup> の走査速度で印加電位 -1.2 V ~ 0 V の範囲において Cyclic voltammogram (CV) 測定を 3 サイクル行った。還元電位を決定し、還元電位を印加した状態で水素化状態を測定した。最後に酸化電位である 0 V の電位を印加し、脱水素化状態を測定した。

## 3. 実験及び考察

### 3.1 TEM による断面観察

図 2 にサーモリフレクタンス測定前 (as-depo.) と測定後 (脱水素化状態) の断面 TEM 暗視野像を示す。as-depo. 状態及び脱水素化状態で界面での剥離や表面への析出は見られず、どちらの状態も多結晶であり、水素化・脱水素化反応を経て表面粗さが増大した。また、GdH<sub>x</sub> 層の厚さは 8.5 % (16 nm) 増加した。格子定数から見積もった GdH<sub>2</sub> から GdH<sub>3</sub> への 1 次元方向の伸びは約 3 % であるため、見積もりより膜厚が大幅に増大している。これは、as-depo. 状態と脱水素化状態で TEM による観察を行った位置が異なり、脱水素化状態では、比較的膜厚が大きい個所を測定した可能性と、脱水素化状態では水素が抜けきっていない可能性が示唆される。

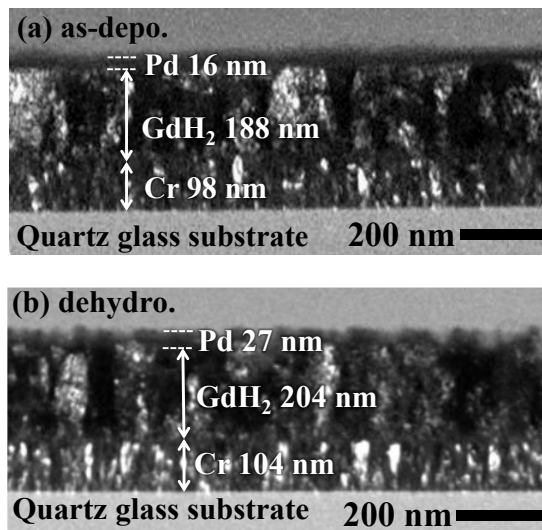


Figure 2. TEM cross-sectional dark-field images of (a) as-depo. state and (b) dehydrogenated state.

### 3.2 熱特性

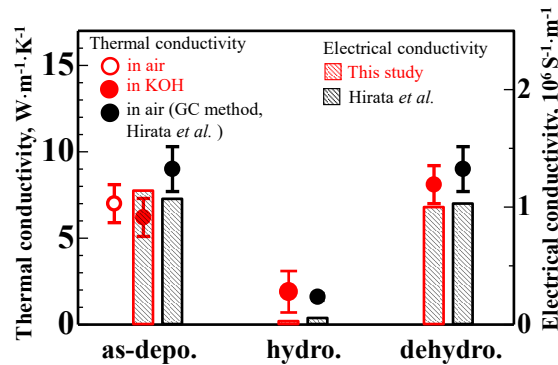


Figure 4. Thermal and electrical conductivity of the  $GdH_x$  film at as-depo, hydrogenated and dehydrogenated states. Hydrogenation and dehydrogenation were conducted by the EC method in  $1 \text{ mol L}^{-1}$  KOH aqueous solution.

CV測定より水素化状態及び脱水素化状態の電位はそれぞれ $-1.18 \text{ V}$ 及び $0 \text{ V}$ であった。図3に各状態のサーモフレクタンス位相信号を示す。それぞれの状態で、レーザー加熱後の温度の減少に対応した信号を得た。as-depo.状態と脱水素化状態の信号は全時間範囲でほとんど重なったが、水素化状態と脱水素化状態ではサーモフレクタンス位相信号に明らかな違いが生じた。サーモフレクタンス位相信号の解析は、非定常1次元熱伝導と両側半無限遠基板を仮定した位相信号の解析法を用いた[10]。解析の際、石英ガラス基板およびKOH水溶液の熱浸透率には、それぞれの比熱容量と熱伝導率を用いて $1488 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ [11]、 $1601 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ [12,13]を用いた。これらは加熱レーザーによる温度上昇を加味した $316 \text{ K}$ における値である。また、Crの熱拡散率は、Cr単層膜を裏面加熱・表面

測温型ピコ秒サーモリフレクタンス法で測定した値を用いた。Cr単層膜の解析には、分光エリプソメータで測定した波長1550 nmの吸収係数 $2.9 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ を用いた。Crの体積熱容量については、文献値のモル比熱[14]とXRR (SmartLab, Rigaku)による密度測定から算出した。表2に解析に使用した物性値を示す。GdH<sub>x</sub>層の熱拡散率と体積熱容量に加えて、合成石英ガラス基板/Cr層界面、Cr層/GdH<sub>x</sub>層界面およびPd層/KOH水溶液界面の熱抵抗をフリーパラメータとして解析した。

GdH<sub>x</sub> 薄膜の熱伝導率は大気中 as-depo.状態、溶液中 as-depo.状態及び溶液中脱水素化状態でそれぞれ  $7.0 \pm 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $6.2 \pm 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $8.1 \pm 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  となった。水素化状態では熱拡散率及び体積熱容量に解析感度が無く、熱伝導率が決まらなかったが、想定し得る物性値の範囲を検討した結果  $3.1$

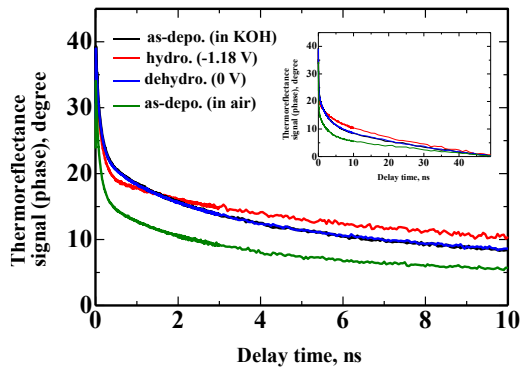


Figure 3. Thermoreflectance signals of the Pd/GdH<sub>x</sub>/Cr three-layered film at as-depo (in air and in KOH), hydrogenated, and dehydrogenated states up to delay time of 10 ns. The insert shows the

$3.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  以下であった。図4に、水素化・脱水素化反応に伴う電気伝導率と熱伝導率を示す。ここで電気特性は、熱物性評価試料と同様の条件で合成石英ガラス基板上に作成したPd/GdH<sub>x</sub> 2層膜について、平田ら[6]と同様にGC方式でホール効果測定装置を用いて測定した。本研究のGdH<sub>x</sub> 薄膜試料は水素化反応に伴って熱伝導率および電気伝導率は減少し、脱水素化反応に伴って、熱伝導率および電気伝導率は増加した。これより熱輸送キ

Table 2. Parameters used for calculation.

Layer	Volumetric heat capacity, $\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	Thermal diffusivity, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
Pd	$2.9 \times 10^6$ [11]	$1.2 \times 10^{-5}$ [11]

ャリアである自由電子の生成/消滅に伴って、熱伝導率が変化することが示唆される。またこの熱キャリアの変化はGC方式を用いた先行研究[6]と同様である。ただし、本研究の熱伝導率測定はEC方式、電気伝導率測定はGC方式と水素化方法が異なるため、それぞれの試料でどの程度水素化されているか、定量的に評価した上での議論が必要である。

#### 4. 結言

本実験では反応性dcマグネトロンスパッタ法により作製したGdH<sub>x</sub>薄膜について、電気化学的な水素化・脱水素化反応に伴う結晶構造変化及び熱特性解析を行った。熱特性について、一定の電位を印加して水素化・脱水素化反応を制御しながら裏面加熱・裏面測温型in-situサーモリフレクタンス測定を行った。溶液中 as-depo.状態及び溶液中脱水素化状態の熱伝導率は  $6.2 \pm 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  および  $8.1 \pm 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  であった。また水素化状態は  $3.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  以下であると考えられる。また電気伝導率変化からは、水素化・脱水素化反応に伴う熱伝導率変化は、自由電子の生成/消滅が寄与していると考えられる。

#### 謝辞

本研究はJSPS科研費23H01362の助成を受けたものです。

## REFERENCES

- [1] G. Wehmeyer et al., *Appl. Phys. Rev.* 4, 041304 (2017).
- [2] J. Jia, et al., *Adv. Func. Mater.* 34, 2406667 (2024).
- [3] K. Yoshimura, *J. Vac. Soc. Jpn.* 57, 3, 84–90 (2014).
- [4] Y. Yamashita et al., *Appl. Phys. Lett.* 123, 232201 (2023).
- [5] H. Yagi et al., *Appl. Phys. Express* 16, 095503 (2023).
- [6] R. Hirata et al., *Int. J. Thermophys.* 45, 43 (2024).
- [7] E. Shalaan et al., *J. Mater. Sci.* 41, 7454–7458 (2006).
- [8] K. Aryana et al., *Nat. Commun.* 13, 1573 (2022).
- [9] Q. Yang et al., *Adv. Funct. Mater.* 33, 2214939 (2023).
- [10] T. Yagi and K. Kobayashi, *Proc. 35th Japan. Symp. on Thermophys. Prop.* (2014), B102.
- [11] A. Nagashima et al., “New Edition of Thermophysical Properties Handbook”, Japan Society of Thermophysical Properties (2008), Tokyo.
- [12] V. Parker, “Thermal properties of aqueous uni-univalent electrolytes”, National Institute of Standards and Technology (1965), Gaithersburg, MD, [online] (Accessed July 22, 2024).
- [13] Z. Losenicky, *J. Phys. Chem.* 73(2), 451–452 (1969).
- [14] M. O. Steinitz, *J. Magn. Mater.* 60, 137–144 (1986).

## 2025 年度, 重里研研究業績リスト

### 1. 原著論文

“Transient Pauli blocking in a InN film as a mechanism for broadband ultrafast optical switching”,  
Junjun Jia, Minseok Kim, Yuzo Shigesato, Ryotaro Nakazawa, Keisuke Fukutani, Satoshi Kera,  
Toshiki Makimoto, Takashi Yagi

*Physical Review B*, 113, 045203, 2026 – Published 20 January, 2026

Related DOI: <https://doi.org/10.1103/1cww-zn61>

“Impact of Nitrogen Doping on Leakage Current of p-Type Cu<sub>2</sub>O-Based pn Junctions for Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Power Device Applications”

Minseok Kim, Daichi Miyagi, Isao Tamai, Yusuke Maeyama, Yuki Oguchi, Shiun Inoue,  
Ryotaro Nakazawa, Junjun Jia, Hisao Ishii, and Yuzo Shigesato

*Phys. Status Solidi RRL* 2025, 2400396 2400396 (1 of 6).

The ORCID identification number(s) for the author(s) of this article can be found under  
<https://doi.org/10.1002/pssr.202400396>.

“Fabrication of all-solid-state thin-film thermal switching devices using Y-Mg thin-film as the thermal switching layer”, Makoto Kashiwagi, Ryuto Nishimura, Y. Oguchi, and Yuzo Shigesato, Accepted for the publication for J. Appl. Phys., (2026).

“Ultralow uniaxial stress engineering of metal–insulator transition in VO<sub>2</sub> films”, Junjun Jia, Shun Ando, Yuzo, Shigesato, submitted to Thin Solid Films, (2026).

“Temperature dependence of the hydro-/dehydrogenation reaction kinetics on SmH<sub>2</sub> films”, Kaiwen Zhu, Tadashi Suzuki, Minseok Kim, and Yuzo Shigesato, Submitted to Jpn. J. Appl. Phys. (2026).

“Evaluation on barrier properties against oxygen or water vapor for Zn-Sn-O and SiN<sub>x</sub> films using Transparent Conductive Oxide films”, Minseok Kim, Keisuke Tsushima, and Yuzo Shigesato, Submitted to Thin Solid Films, (2026).

“Structural control of molybdenum oxide by post-treatment processes”  
Makoto Kashiwagi, Shota Chomei, Takehiko Yokomori, Yuki Oguchi, Yuzo Shigesato  
Submitted to Appl Phys. Lett., (2026).

“Thermal conductivity changes of Pd-catalyzed Sm and SmH<sub>x</sub> films by gasochromic hydro- and dehydrogenations”,  
Yuzo Shigesato, Miki Ueno, Takashi Yagi, Yuichiro Yamashita, Minseok Kim, Yuki Oguchi, Satoshi Takeya, and Naoyuki Taketoshi  
Submitted to APEX, (2026).

## 2. 学会発表等

(招待講演)

“Study on Switchable Mirror Films controlled by electrochemical H<sup>+</sup> injection aiming at the all-solid-state thin-film thermal devices”, Y. Shigesato, The 35th Annual Meeting of MRS-J, November 10-12, 2025, Kitakyushu, Japan (invited lecture).

「調光ミラー薄膜の水素化／脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御」重里有三, 第93回電気化学会\_特別講演(電気化学会クロモジェニック研究会, 2026年3月18日(東京理大学、野田キャンパス)).

(国際会議)

“New evaluation method on various gas barrier performances using functional oxide films (1); O<sub>2</sub> or H<sub>2</sub>O barrier properties”, M. Kim, K. Tsushima, T. Kurihara, Y. Asanuma, Y. Oguchi and

Y. Shigesato, the 10th International Symposium on Transparent Conductive Materials & 14th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TCM-TOEO 2025), October 19-23, 2025, Crete, Greece.

“New evaluation methods on various gas barrier performances using functional oxide films (2); Hydrogen gas barrier properties”, T. Kurihara, M. Suzuki, M. Kim, K. Yamada, H. Machinaga and Y. Shigesato, the 10th International Symposium on Transparent Conductive Materials & 14th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TCM-TOEO 2025), October 19-23, 2025, Crete, Greece.

“Hydrogen gas barrier properties of amorphous  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films evaluated using gasochromism of Pd loaded amorphous  $\text{WO}_3$  films”, Taiga Kurihara, Mao Suzuki, Minseok Kim, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Structural Changes of Y-Mg Alloy and Sm Hydride Thin Films during Gasochromic Hydrogenation Reaction Studied by In-Situ XRD/XRR”, Tetsuroh Shirasawa, Yuichiro Yamashita, Takashi Yagi, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Carrier generation in p-type NiO films deposited by RF magnetron sputtering using a NiO target”, Mana Shibata, Minseok Kim, Isao Tamai, Yusuke Maeyama, Yuki Oguchi, Junjun Jia, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“In-situ thermophysical analysis on metal or insulator states of  $\text{GdH}_x$  thin films controlled by reversible electrochemical hydro-/dehydrogenations”, Nanase Takahashi, Yuichiro Yamashita, Minseok Kim, Yuki Oguchi, Takashi Yagi, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Thermal conductivity control of  $\text{SmH}_x$  and Sm-Mg films by electrochemical hydro/dehydrogenations in KOH solution”, Kota Yamada, Yuichiro Yamashita, Minseok Kim, Yuki Oguchi, Takashi Yagi, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Changes in electrical, optical and thermal properties of rf sputter-deposited  $\text{NdNiO}_3$  films induced by electrochemical hydro-/dehydrogenations”, An Okamoto, Kaho Ikeda, Yuichiro Yamashita,

Takashi Yagi, Yuki Oguchi, Minseok Kim, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“In-situ thermal and optical analyses of Pd-catalyzed Y–Mg alloy thin films during electrochemical hydro/dehydrogenations in KOH solution”, Shusei Nagane, Hina Saito, Yuichiro Yamashita, Takashi Yagi, Yuki Oguchi, Minseok Kim, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Influence of attained vacuum pressure and N<sub>2</sub> Introduction in the rf magnetron sputtering process to deposit p-type Cu<sub>2</sub>O films”, Daichi Miyagi, Minseok Kim, Isao Tamai, Yusuke Maeyama, Yuki Oguchi, Junjun Jia, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“In-situ electrical, optical and thermal analyses on Pd catalyzed T<sub>x</sub>-Mg<sub>1-x</sub> alloy films under gasochromic hydro-/dehydrogenations”, Miyu Aoyama, Yuichiro Yamashita, Takashi Yagi, Yuki Oguchi, Minseok Kim, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“All solid-state thermal switchable devices consist of multilayer thin films including the Y-Mg alloy film controlled by hydro-/dehydrogenations”, Yuzo Shigesato, Ryuto Nishimura, Yuki Oguchi, Makoto Kashiwagi, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Approaches to fabricate the high-performance all-solid state electrochromic windows”, Toranosuke Okubo, Minseok Kim, Yuki Oguchi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Temperature dependence of the hydro-/dehydrogenation reaction kinetics on switchable mirror Y-Mg and YMgH<sub>x</sub> films”, Akihiro Murakami, Kaiwen Zhu, Minseok Kim, Tadashi Suzuki, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Temperature dependence of the hydro-/dehydrogenation reaction processes of switchable mirror Ni-Mg films”, Masaru Mino, Kaiwen Zhu, Minseok Kim, Tadashi Suzuki, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Optical and structural properties of TiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> thin films deposited by High-Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS)”, Minseok Kim, Yuta Asano, Kaisei Oku, Masayoshi Katagiri, Hironobu Machinaga, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Differentiating the Wavefunctions of Valence and In-Gap States in p-type Semiconductors using Constant-Initial-State Photoelectron Yield Spectroscopy”, Shiun Inoue, Manato Tateno, Ryotaro Nakazawa, Daichi Miyagi, Mana Shibata, Minseok Kim, Junjun Jia, Yuzo Shigesato, Hisao Ishii, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Tuning the Transition Temperature of VO<sub>2</sub> Films via Applied Stress”, Junjun Jia, Shyun Ando, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

“Thermal Conductivity of Amorphous Metal Oxide thin films from Vibron Transport Viewpoint”, Makoto Kashiwagi, Naoki Noda, Riku Shimaura, Yuichiro, Yamashita, Takashi Yagi, Yuki Oguchi, Naoyuki Taketoshi, Yuzo Shigesato, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

(国内学会発表)

「WO<sub>3</sub> 薄膜の透過率変化を用いた水素バリア膜の性能評価(2): 水素透過流束を用いた定量評価」栗原大芽, 鈴木舞乙, 金 咬爽, 山田恭太郎, 待永広宣, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(1): 透明導電膜の電気・熱伝導から熱スイッチの開発まで」重里 有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(2): SmH<sub>2</sub> 薄膜における反応速度の温度依存性解析」シュー・ガイブン, キム・ミンソク, 鈴木正, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(3): YMgH<sub>x</sub> 薄膜における反応速度の温度依存性解析」村上彰啓, シューガイブン, キムミンソク, 鈴木正, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(4): NiMgHx 薄膜における反応速度の温度依存性解析」三野大, シュー・ガイブン, キム・ミンソク, 鈴木正, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(5): 水素化ガドリニウム薄膜の熱伝導率制御」高橋 七瀬, 平田 璃子, 山下 雄一郎, キムミンソク, 小口 有希, 八木 貴志, 竹歳 尚之, 重里 有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(6): 水素化サマリウム薄膜の熱伝導率」山田皓太, 山下雄一郎, 上野美紀, キムミンソク, 小口有希, 八木貴志, 竹歳尚之, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(7): ガスクロミック方式による Pd 担持 Ti-Mg 合金薄膜の熱物性制御」青山実夢, 山下雄一郎, 八木貴志, キムミンソク, 小口有希, 竹歳尚之, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(8): Pd を担持した Mg 並びに Y-Mg 合金の電気化学的操作による水素化/脱水素化反応」長根周星, キムミンソク, 小口有希, 重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

「水素化/脱水素化反応にともなう金属-半導体相変化による光・電気・熱物性制御薄膜の開発(9): NiO, NdNiO<sub>3</sub> 薄膜の電気化学的手法による物性制御」岡本 晏, 池田果歩, キム・ミンソク, 小口有希, \*重里有三、第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月9日、名城大学・天白キャンパス.

### 3. 学会賞等の受賞

※TM4OE Best Presentation Award Gold : Nanase Takahashi (M2),

“In-situ thermophysical analysis on metal or insulator states of GdHx thin films controlled by reversible electrochemical hydro-/dehydrogenations”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

※TM4OE Best Presentation Award Silver : Miyu Aoyama (M1),

“In-situ electrical, optical and thermal analyses on Pd catalyzed  $Ti_x-Mg_{1-x}$  alloy films under gasochromic hydro-/dehydrogenations”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

※TM4OE Encouragement Award : Mana Shibata (M1),

“Carrier generation in p-type NiO films deposited by RF magnetron sputtering using a NiO target”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

※TM4OE Encouragement Award : Akihiro Murakami (M1),

“Temperature dependence of the hydro-/dehydrogenation reaction kinetics on switchable mirror Y-Mg and  $YMgH_x$  films”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

※MRM2025 Poster Award: Minseok Kim,

“Optical and structural properties of  $TiO_xNy$  thin films deposited by high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS)”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), Symposium G-4, December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

※MRM2025 Poster Award: Nanase Takahashi (M2),

“In-situ thermophysical analysis on metal or insulator states of  $GdH_x$  thin films controlled by reversible electrochemical hydro-/dehydrogenations”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), Symposium G-4, December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

※MRM2025 Poster Award: Kaiwen Zhu (M2)

“Temperature dependence of the hydro-/dehydrogenation reaction kinetics on Sm,  $SmH_2$  and  $SmH_3$  films.”, Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), Symposium H-3, December 8-13, 2025, Yokohama, Japan.

# 動物を用いた高次生体機能の解析

研究代表者 化学・生命科学科 教授 平田 普三  
研究分担者 化学・生命科学科 助教 和田 清二

## 1.1 研究目的

医薬品、農薬、工業化学物質などの安全性評価において、発生毒性試験はヒトの健康と次世代への影響を予測するうえで極めて重要な位置を占めている。一方で、哺乳類を用いた従来の発生毒性試験は、時間・費用・動物倫理の観点から大きな制約を伴い、試験の効率化と代替・補完法の確立が国際的な課題となっている。こうした背景のもと、ゼブラフィッシュ胚は、発生過程の可視性、遺伝学的操作性、高い保存性を有する分子機構、ならびにハイスループット試験への適合性から、次世代の発生毒性評価モデルとして強く期待されている。しかし、ゼブラフィッシュを発生毒性評価や規制科学に本格的に活用するためには、いくつかの未解決課題が存在する。使用するゼブラフィッシュ系統の違いが、化学物質に対する感受性や奇形表現型の再現性にどの程度影響するのかについて、体系的かつ分子レベルでの検証が十分になされてこなかった。化学物質誘発奇形の分類や記載方法について、研究者間・研究分野間で用語や判断基準にばらつきがあり、国際比較や規制利用の妨げとなっていた。国際的に共有可能な基準系統や評価基盤の整備が不十分であり、得られた知見をガイドラインや国際標準へと接続するための基盤が必ずしも確立されていなかった。さらに、これらの課題を解決するためには、個別研究にとどまらず、国際的な研究ネットワークの中で合意形成と情報共有を進めることが不可欠である。本研究の目的は、以上の課題を統合的に解決し、ゼブラフィッシュ胚を用いた発生毒性評価系を研究ツールの段階から国際標準に耐えうる評価基盤へと発展させることである。

## 1.2 進捗状況及び成果

複数のゼブラフィッシュ系統を用いて、代表的な催奇形性化学物質による形態異常と遺伝子発現変動を比較解析した。その結果、外表奇形の発現頻度や感受性には一定のばらつきが認められるものの、主要な発生毒性エンドポイントにおいては系統間で本質的な差異は小さいことが示された。また、遺伝子発現解析により、共通して影響を受ける発生・器官形成関連経路が同定され、ゼブラフィッシュ胚を用いた発生毒性試験の再現性と信頼性が分子レベルでも裏付けられた。

ICH S5 (R3) ガイドラインへの対応を念頭に、化学物質誘発ゼブラフィッシュ奇形の多様性を体系的に整理し、分類・定義したアトラスを構築した。本研究は、従来研究者間で用語や判断基準にばらつきがあった奇形表現型を標準化し、評価の客観性と国際的整合性を大きく向上させた点に重要な意義がある。この成果は、ゼブラフィッシ

ユを規制毒性試験に活用する際の共通言語を提供し、非臨床安全性評価への実装を加速する基盤となる。

新規ゼブラフィッシュ RW 系統を樹立し、その遺伝的背景と表現型特性を詳細に解析した。RW 系統は、遺伝的均一性と実験再現性に優れ、発生・行動・毒性試験における基準系統としての利用が期待される。本成果は、系統差という実験変動要因を適切に制御し、国際比較可能なデータ創出を可能にする点で、前述の系統間比較研究や奇形分類研究とも強く関連している。

日本・京都において世界最大規模のゼブラフィッシュ国際会議が開催し、その報告を論文にした。本会議では、発生生物学、神経科学、毒性学、老化研究、創薬応用など多岐にわたる分野の最新成果が共有され、特にアジア地域からの研究発信力の高まりが顕著であった。若手研究者や学生の積極的参加、産学連携セッションの充実は、ゼブラフィッシュ研究が基礎から応用・規制科学へと拡張している現状を象徴しており、日本発の研究が国際標準形成に貢献する基盤が整いつつあることを示した。

上記の①発生毒性評価の再現性・信頼性の実証、②奇形評価の標準化、③基盤系統の整備、④国際的研究ネットワークの中核形成という一連の成果は相互に補完し合い、ゼブラフィッシュを用いた発生毒性学研究を「研究ツール」から「国際標準に耐えうる評価系」へと押し上げるものである。これらは創薬・化学物質安全性評価・規制科学への応用のみならず、日本発の科学的知見が国際ガイドライン形成に直接貢献するモデルケースとして、今後の生命科学研究の方向性を示すものとなる。

### 1.3 今後の課題

本研究により、ゼブラフィッシュ胚を用いた発生毒性評価において、系統間差の影響が限定的であることの実証、奇形表現型の体系的分類と標準化、さらに基準となり得る新規系統の整備といった重要な成果が得られた。これらは、ゼブラフィッシュを研究用途にとどまらず、規制科学や安全性評価へと展開するうえでの基盤を大きく前進させるものである。一方で、国際標準として持続的に活用していくためには、今後取り組むべき課題も明確になっている。第一の課題は評価対象とする化学物質の多様化である。本研究では代表的な催奇形性物質を中心に解析を行ったが、実際の安全性評価では、作用機序や曝露条件が大きく異なる膨大な数の化学物質が対象となる。今後は、医薬品候補化合物、環境汚染物質、内分泌かく乱化学物質、ナノ材料などを含め、より広範な化学空間に対して本評価系の適用可能性と限界を検証する必要がある。第二に形態異常中心の評価から、機能的エンドポイントを統合した評価系への発展が求められる。発生毒性は外表奇形だけでなく、神経行動異常、代謝機能障害、内分泌系の攪乱など、出生後や成長過程で顕在化する影響を含む。したがって、行動解析、ライブイメージング、生理機能評価を組み合わせた多層的解析により、発生期曝露の長期的影響を捉える枠組みを構築することが重要である。第三の課題は遺伝子発現変動と表現型異常との因果関係の解明である。本研究で同定された共通の分子経路が、どの段階で、どの細胞種において毒性発現に寄与するのかを明らかにするためには、遺伝子

改変系統や時空間特異的操作を用いた機能解析が不可欠である。これにより、単なる相関解析を超えた機序理解と予測毒性評価への展開が可能となる。第四の課題は奇形分類アトラスおよび基準系統を国際的に維持・発展させるための運用体制の確立である。研究者間での継続的な合意形成、データ共有プラットフォームの整備、評価基準の定期的更新を通じて、国際的な信頼性を担保する必要がある。また、規制当局や産業界との対話を深化させ、実際の非臨床試験やガイドライン改訂への反映を進めることが、研究成果の社会実装に直結する課題である。今後はこれらの課題に取り組みたい。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

1. Hirata, H., Ishitani, T. and Okamoto, H. (2025) Swimming into future breakthroughs from Kyoto, Japan: Report of the 18th International Zebrafish Conference (IZFC2024). *Genes Cells* 30 (1): e13193.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gtc.13193>
2. Taya, C., Ujibe, K., Shimodaira, S., Sakamoto, A., Wada, S., Kashima, H. and Hirata, H. (2025) Comparative analysis of teratogen-induced malformations and gene expression across zebrafish strains in early development. *Toxicol. Rep.* 15: 102117.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214750025002367>
3. Mori, K., Aoki, Y., Hayashi, M., Sugimoto, W., Ono, M., Umekita, S., Niino, T., Ebata, T., Mikashima, F., Maki, K., Tanaka, T., Hirata, H. and Kojima, H. (2025) Variation and classification of chemically-induced zebrafish malformations for the ICH S5 (R3) guideline: an atlas for zebrafish teratogenesis. *J. Toxicol. Sci.* 50(8): 431-444.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jts/50/8/50\\_431/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jts/50/8/50_431/_article)
4. Sadamitsu, K., Kashima, M., Wada, S., Ishioka, A., Nakayama, S., Nakayama, R., Okamoto, H.\* and Hirata, H. (2025) Establishment and genetic characterization of zebrafish RW line. *Sci. Rep.* 15: 14512.  
<https://www.nature.com/articles/s41598-025-98674-w>
5. Matsuzawa, R., Kawahara, D., Kashima, M., Hirata, H. and Ozaki, H. (2025) tomoseqr: a Bioconductor package for spatial reconstruction and visualization of 3D gene expression patterns based on RNA tomography. *PLoS One.* 20 (1): e0311296.  
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0311296>
6. Ujibe, K., Kashima, M., Kataoka, M., Shimada, R., Okamoto, M., Kobayashi, I., Wada, S., Matsuda, H., Sakamoto, S. and Hirata, H. (2025) Deficiency of Werner RecQ-type DNA helicase causes premature malnutrition in zebrafish. *iScience.* In-press.

### 2. 国際会議プロシーディング

7. Hirata, H., Sadamitsu, K., Kashima, M., Wada, S., Ishioka, A., Nakayama, S., Nakayama, R. and Okamoto, H. Establishment and genetic

characterization of zebrafish RW line. The 19th International Zebrafish Conference (IZFC2025). Memorial Union, Madison, WI, USA. July 12<sup>th</sup>, 2025.

8. Hirata, H. and Taya, C. Comparative analysis of teratogen-induced malformations and gene expression across zebrafish strains in early development. The 11th Strategic Conference of Zebrafish Investigators (SCZI2026). Shaw Foundation Alumni House of the National University of Singapore, Singapore. January 15<sup>th</sup>, 2026.

### 3. 受賞等

9. 2025年度日本毒性学会田邊賞. 2025年7月.

# 屋内環境用高効率ペロブスカイト太陽電池の開発

研究代表者 電気電子工学科 教授 石河 泰明

研究分担者 電気電子工学科 助教 來福 至

## 1.1 研究目的

太陽光発電の普及が益々進んでいるが、従来の結晶シリコン太陽電池が設置困難な場所にも設置可能なペロブスカイト太陽電池が、次世代太陽電池として注目を集めている。ペロブスカイト太陽電池は、軽量・フレキシブル性から注目されているが、屋内光のような低照度環境においても高効率で光電変換できる素子としても研究が進んでいる。本研究では、屋内環境下での高効率化に向けた個別材料・素子構造研究を進めている。

屋内光スペクトルに適したバンドギャップに光吸収層を調整すると、相分離といわれる劣化現象が発生するが、これまでの研究により、相分離を大幅に抑制する組成を見出すことができた。本年は、開発した本光吸収層を用いた太陽電池化を進めるとともに、屋内環境下での高効率化・長期安定化を目指し、特に性能安定性に資する電子輸送層・正孔輸送層の開発を進めた。

## 1.2 進捗状況及び成果

光照射による相分離を抑制した光吸収層の作製過程で、再結合の要因となる  $\text{PbI}_2$  相の析出が見られた。熱処理条件を再度検討することで、 $\text{PbI}_2$  析出の抑制を図った。検討の結果、 $\text{PbI}_2$  の低下は限定的であったものの、変換効率向上に効果のある大粒形成がなされた。更に、本熱処理条件であっても相分離が抑制できることを確認した。

本光吸収層を用いて太陽電池を作製し評価した。疑似太陽光スペクトル AM1.5G ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) 照射下では、最大 11.9% の変換効率となったが、白色 LED 光 ( $0.305 \text{ mW/cm}^2$ ,  $1,000 \text{ lx}$ ) 照射下では最大 31.1% の変換効率を記録する太陽電池が得られた。本太陽電池に 1 時間連続で白色 LED 照射したが、変換効率は初期値の 94% を維持した。検討した相分離抑制技術が太陽電池特性においても効果があることが示唆された。尚、本成果は学術論文 Nanotechnology に掲載された。

電子輸送層として  $\text{SnO}_2$  の利用が低照度特性向上に効果的であることがこれまでの研究で判明している。一方で、 $\text{SnO}_2$  内に含まれる酸素空孔などの欠陥が素子特性を低下させることも懸念された。そこで、数値解析において、光吸収層/電子輸送層界面における酸素空孔低減が界面再結合割合を低減させることを確認した。更に、酸素空孔低減を目指した光吸収層/電子輸送層界面処理を行った。その結果、出力、及び安定性向上に成功した。

正孔輸送層として一般的に用いられている有機材料は出力安定性に課題を有する。そこで安定性に優位性のある  $\text{NiO}_x$  に注目し、高出力化および安定化に資する作製方法

および作製条件の検討を行った。その結果、抵抗線加熱蒸着法により形成した Ni 金属薄膜を熱酸化させる手法により安定な太陽電池出力が期待できる  $\text{NiO}_x$  膜が形成できることを見出した。

### 1.3 今後の課題

今年度の研究により、白色 LED 光下での変換効率 31.1%を実現したが、他機関からは 42%を超える変換効率が報告されており、更なる高効率化を進めなければならない。光吸収層と電荷輸送層界面に対するパッシベーション処理やバンドアライメント調整を今後進める予定である。

## 1. 原著論文

- [1]. Hideya Sugimoto, Nanaka Takahashi, Itaru Raifuku, and Yasuaki Ishikawa, "Suppressing phase segregation in Bromide-containing perovskite films via compositional engineering for indoor applications", *Nanotechnol.* **36** (2025) 475201(1-8).

## 2. 国際会議

- [1]. Itaru Raifuku, "Characterization of perovskite solar cells using imaging methods", International Symposium on Solar Energy, 2025 (ISSE 2025) (23-24, Jull. 2025, Fukuoka).
- [2]. Itaru Raifuku, Ryo Ishizuka, Ryo Washiashi, Yasuaki Ishikawa, "Pulsed voltage-driven electroluminescence imaging method for perovskite solar cells", The 36th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-36) (9-14, Nov. 2025, Bangkok, Thailand) 5Mo 0.11.4.
- [3]. Daigo Ogawa, Itaru Raifuku, Yasuaki Ishikawa, "Design and Optimization of Electron Transport Layer in Indoor Perovskite Solar Cells via Two-Dimensional Device Simulations", The 14th Aseanian Conference on Nano Hybrid Solar Cells (NHSC-14) (23-25, Nov. 2025, Hsinchu, Taiwan) P-6.
- [4]. Hideya Sugimoto, Nanaka Takahashi, Itaru Raifuku, Yasuaki Ishikawa, "Phase segregation-suppressed triple-cation/triple-halide wide bandgap perovskite solar cells for indoor light harvesting", The 14th Aseanian Conference on Nano Hybrid Solar Cells (NHSC-14) (23-25, Nov. 2025, Hsinchu, Taiwan) P-12.
- [5]. Itaru Raifuku, Koki Kimura, Ryo Ishizuka, Ryo Washiashi, Yushin Akagawa, Moeka Kishi, Yasuaki Ishikawa, "Electrical and Optical Imaging Methods for Characterization of Perovskite Solar Cells", The 14th Aseanian Conference on Nano Hybrid Solar Cells (NHSC-14) (23-25, Nov. 2025, Hsinchu, Taiwan) P-15.

- [6]. Moe Hayakawa, Itaru Raifuku, Yasuaki Ishikawa, "Effect of Annealing Temperature on the Properties of NiO<sub>x</sub> Prepared by Resistive Thermal Evapoation in Inverted Perovskite Solar Cells", The 14th Aseanian Conference on Nano Hybrid Solar Cells (NHSC-14) (23-25, Nov. 2025, Hsinchu, Taiwan) P-22.

### 3. 国内会議

- [1]. 早川 萌瑛, 來福 至, 宮澤 徹也, 越智 元隆, 後藤 裕史, 石河 泰明, "NiO<sub>x</sub> への金属ドーピングがペロブスカイト太陽電池特性に与える影響", 第22回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (第5回日本太陽光発電学会学術講演会) (3-4, Jul. 2025, Tokyo) PB-12.
- [2]. 尾川 大悟, 松枝 息吹, 浅田 智樹, 來福 至, 石河 泰明, "SnO<sub>2</sub>の酸素欠損がペロブスカイト太陽電池の低照度特性に及ぼす影響", 第7回 フロンティア太陽電池セミナー (9-10, Oct. 2025, Ise) P3.

### 4. 受賞等

- [1]. <Best Oral Presentation Award> Itaru Raifuku, Ryo Ishizuka, Ryo Washiashi, Yasuaki Ishikawa, "Pulsed voltage-driven electroluminescence imaging method for perovskite solar cells", The 36th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-36) (9-14, Nov. 2025, Bangkok, Thailand) 5Mo 0.11.4.

# ナノカーボン材料を用いた新規デバイスの開発

研究代表者 電気電子工学科 教授 黄 晋二  
研究分担者 電気電子工学科 助教 渡辺 剛志

## 1.1 研究目的

グラフェン、カーボンナノチューブなどのナノカーボン材料は、特異な物性を有することから、その発見から今日まで精力的な研究が展開されてきている。しかしながら、現状でナノカーボン材料を用いたデバイスの実用化には至っていない。本研究では、これらのナノカーボン材料の薄膜に注目し、実用的なデバイスに応用可能な特性を持つ薄膜を作製するための技術（CVD 成長及びインク印刷）を確立することを目的としている。また、これらのナノカーボン薄膜を用いて作製したデバイスの動作実証と特性評価を通して、各デバイス応用に適した薄膜材料の性質を明らかにし、デバイス性能を最大限に高めることを目的としている。

## 1.2 進捗状況及び成果

以下、研究項目に分けて進捗状況を報告する。

### 研究項目 1：グラフェンをベースとする透明導電膜の開発とデバイス応用

グラフェンをベースとする新しい透明導電膜の作製に取り組んだ。本研究では、銀薄膜をグラフェンでサンドイッチすることで、銀のプラズモン吸収ピークが消滅し透明化する現象を見出し、これを活用した透明導電膜を実験実証した。このグラフェン／銀／グラフェン構造（図 1）では、銀薄膜が電気伝導を担うため、グラフェン単体では達成し得ない低抵抗化が可能であり、かつ高い透明性を維持できるため、様々な透明導電膜の応用のブレークスルーとなり得る技術であると考えている。

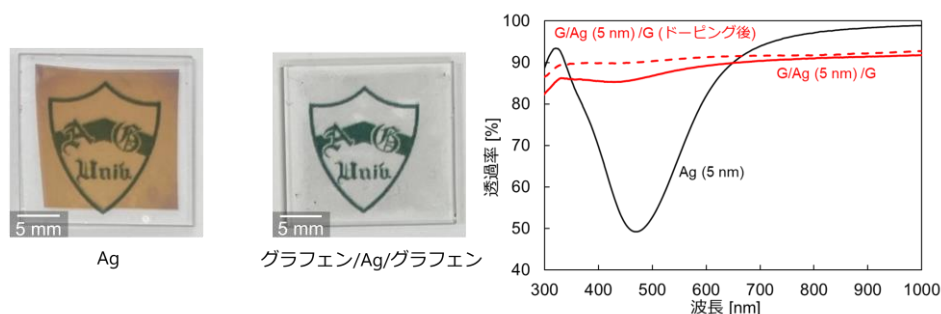


図 1：グラフェン／銀／グラフェン構造を用いた透明導電膜とその透過率スペクト

グラフェンをベースとする TCF (transparent conductive film) としての種々のデバイス応用の検討に取り組んでいる。積層やキャリアドーピングにより、透明性を維持して導電性を向上させたグラフェンを用いて、マイクロ波・ミリ波帯における EMI (electromagnetic interference) シールド応用の可能性を探索した。3層積層とドーピングを用いて低抵抗化したグラフェン (図 2) では、光学的透過率 85%を維持しながら電波透過率を 6%まで低減する EMI 特性を実証した。

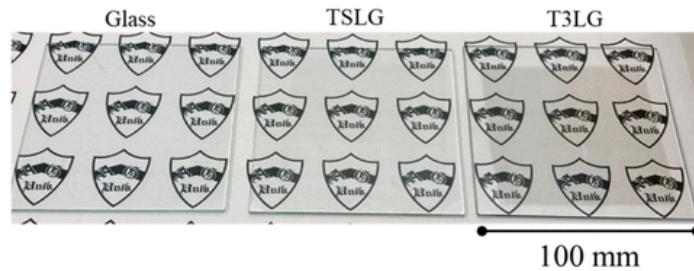


図 2：グラフェンを用いた透明な EMI シールドデバイス

### 研究項目 2：単層カーボンナノチューブ/シルク複合導電性繊維材料の開発

電氣的機能とフレキシブル性を兼ね備えたエレクトロニックテキスタイルは、次世代フレキシブル・ウェアラブルデバイス材料として注目されている。本研究では、軽量で高い引張強度および優れた生分解性を有するシルク繊維を基材として用い、導電性フィラーとして高い電気伝導性・熱伝導性・柔軟性を有する単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を適用した。ポリドーパミン (PDA) を介した Dip-and-dry 法により複合化し、電気・熱・機械的特性を高いレベルで両立する導電性繊維材料の開発を目指した (図 3)。シルク特有の前処理である精練の度合 (精練度) を制御した結果、精練度の変化により電気抵抗が大きく変化することが明らかとなった (図 4)。さらに、PDA による SWCNT 付着の向上によって導電ネットワーク形成が促進され、25 wt%精練において 315 S/cm の高い電気伝導率を達成した。またこのとき、150 MPa の引張強度および 6.3 W/mK の熱伝導率を有することが実験から明らかになった。以上より、電気・熱・機械的特性を高いレベルで両立した導電性繊維材料の開発に成功した。本成果は、持続可能かつ高性能な次世代フレキシブル・ウェアラブルデバイス材料の実現に寄与するものであり、導電性繊維材料の応用範囲を大きく拡張することが期待される。



図 3：複合繊維の作製手法および繊維表面変化

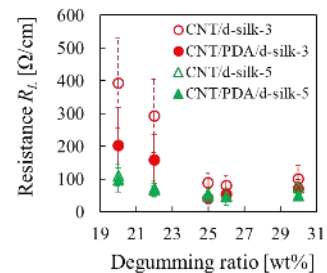


図 4：精練度に対する電気抵抗変化

### 研究項目 3 : グラフェン透明電極の電気化学発光分析応用

近年、迅速かつ簡便に検査可能な臨床検査デバイスとして、イムノクロマト法を原理とする迅速簡易検査キットが広く普及している。しかし、その感度の低さが課題とされている。本研究では、高感度な発光検出法の一つである電気化学発光法 (ECL) に着目し、グラフェンを透明電極として利用することで、その応用可能性を探った。特に、抗体担持層としてニトロセルロース膜を積層したグラフェン電極を用いたバイオチップの開発を試みた。これまで、グラフェン電極を用いた ECL 測定では、導通用電極に金蒸着膜、対極に白金電極を用いていた。しかし、迅速簡易検査バイオチップへの応用を見据え、本研究では導通用電極および対極をアルミニウムに変更し、ワンチップでの ECL 測定を実施した。その結果、従来の測定結果と遜色ない応答が得られ、本手法の実用化に向けた有望性が示された。

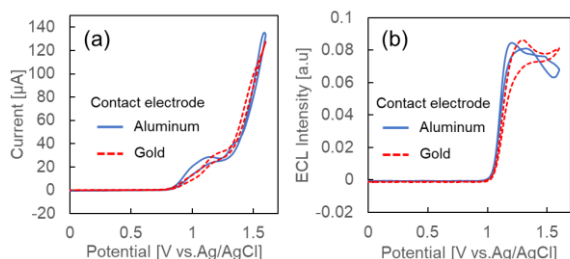


図 4 : セルロース/グラフェン電極の測定結果  
(a) CV 曲線 (b) ECL 強度-電位曲線

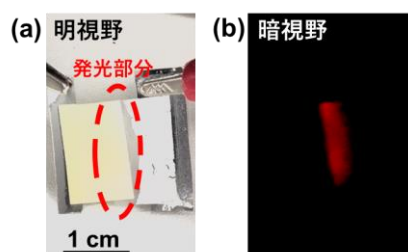


図 5 : 作製したチップ電極の写真  
電極間電圧: (a) 0 V (b) 4.3 V

### 研究項目 4 : グラフェンを用いたフィルム型エレクトロクロミックデバイスの開発

スマートウィンドウは、調光機能を備えた次世代の窓として注目されている。特に、フィルム型のエレクトロクロミック (EC) デバイスを作製できれば、既存のガラスに貼り付けるだけで簡単に調光機能を付与できる。本研究では、グラフェンとプルシアブルー (PB) を組み合わせたフィルム型 EC デバイスの開発を行った。

乱層積層した二層グラフェンを PET 基板上に転写し、その上に PB を電着して EC 電極を作製した。また、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) 膜を支持材としグラフェンを転写後、PVDF 膜を通してグラフェン表面に Ag を電着し、対向電極とした。さらに、PVDF 膜をグリセリン/水混合液に含浸させることで透明化を図った。これら二つのグラフェン電極を光学透明接着 (OCA) フィルムで貼り合わせることで、フィルム型 EC デバイスを作製した (図 6)。作製したデバイスに 1.3 V および -1.4 V の電圧を印加すると、PB の酸化・還元により可逆的な色変化が確認された。また、700 nm 付近に現れる吸収ピークが脱色時には消失し、吸光度のサイクル試験においても劣化は見られなかった (図 7)。これにより、本デバイスが安定した透明導電膜として機能し、高い耐久性を有することが示された。

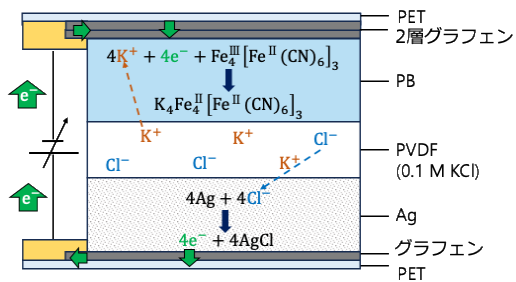


図 6：作製した EC デバイスの模式図

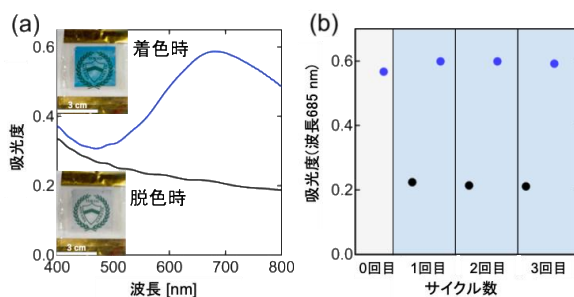


図 7：(a) 着色/脱色時の可視吸収スペクトル  
(b) 吸収中心波長における吸光度サイクル

### 1.3 今後の課題

2025 年度には、各研究項目について進展を得ることができたが、特に、グラフェン／銀／グラフェン構造を用いた透明導電膜技術は様々なデバイス応用におけるブレークスルーになり得ると考えており、2026 年度には、これを用いた透明アンテナ、透明電波シールドなどのデバイス応用へと研究を展開し、その有用性を実験的に実証していきたいと考えている。引き続き、得られた成果の研究発表や論文投稿を積極的に進めて行く方針である。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

- [1] Yuito Horita, Mayumi Mizutani, Aghnia Dinan Maulani Heriyanto, Takeshi Watanabe, Masakazu Nakamura, Hironari Kamikubo, Shinji Koh,  
"Electrical and thermal conductivity and tensile strength of degummed silk fibers coated with carbon nanotubes using a polydopamine-assisted dip-and-dry method,"  
Materials & Design **260**, 115007 (2025). OPEN ACCESS
- [2] Ren Kojima, Shiguma Aoki, Kintaro Nakazawa, Takeshi Watanabe, and Shinji Koh, "Plasmon-Enhanced Optical Transparency in Graphene/Ag/Graphene Composite Thin Films," Appl. Phys. Lett. **127**, 183101 (2025).
- [3] Mayano, Yamanouchi, Yasufumi Yokoshiki, Masakazu Dohi, Takashi Tokuda, Shinji Koh, Takeshi Watanabe,  
"Machine Learning-Integrated Electrochemical Sensor for Accurate and Continuous Free Chlorine Monitoring,"  
ACS Sensors **10**, 8743-8753 (2025).
- [4] Gen Shinozaki, Makoto Nakamura, Junya Fukasaku, Masayuki Tsutsumi, Takeshi Watanabe and Shinji Koh,  
"Three-Layer-Stacked Graphene-Based Flexible Transparent Heater on a High-Heat Resistance Transparent Polyimide Substrate,"  
Journal of Electronic Materials **54**, 9198-9208 (2025). OPEN ACCESS
- [5] Hibiki Kisaka, Yuito Horita, Sho Kuromatsu, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
"SWCNT/PEDOT:PSS/DMSO Aqueous Inks for Screen-Printing on Paper Substrates,"  
Carbon Reports **4**, 228-233 (2025). OPEN ACCESS
- [6] Yamato Shinada, Makoto Nakamura, Ren Kojima, Masayuki Tsutsumi, Takeshi Watanabe and Shinji Koh,  
"Characterization of flexible transparent conductive films fabricated using CVD graphene on heat-resistant transparent polyimide films,"  
Nanotechnology **36**, 175702 (2025).
- [7] Ryota Okuda, Kazuhiko Niwano, Naoto Oota, Kosei Tomizawa, Yamato Shinada, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
"Electromagnetic Interference Shielding Property of p-doped Graphene with Large Area and High Optical Transparency Characterized Through Free Space Measurement,"  
ACS Applied Engineering Materials **3**, 857-866 (2025).

### 2. 国際会議プロシーディング

- [1] Rion Ikoma, Hyoga Kasatani, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
"Electrochemical covalent modification of graphene for electrical property engineering"

- The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025 (Pacifichem 2025), Board 060 (poster presentation), Hawaii Convention Center, Hawaii, Dec. 16 (2025)
- [2] Toa Ishizuka, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
 "Electrochemiluminescence Immunoassay Platform Using a Graphene-Cellulose Ester Porous Membrane Layered Electrode for Point-of-Care Testing"  
 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025 (Pacifichem 2025), Board 061 (poster presentation), Hawaii Convention Center, Hawaii, Dec. 16 (2025)
- [3] Kousei Tomizawa, Ryota Okuda, Yasunari Hashimoto, Takeshi Watanabe, Ryosuke Suga and Shinji Koh,  
 "Electromagnetic interference shielding property of p-type doped three-layer stacked graphene on PET"  
 The 38th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2025), 19P-1-9 (poster presentation), KFC Hall, Ryogoku, Japan, Nov 19 (2025)
- [4] Yuito Horita, Mayumi Mizutani, Aghnia Dinan Maulani Heriyanto, Takeshi Watanabe, Hironari Kamikubo, Masakazu Nakamura, Shinji Koh,  
 "Electrical and thermal conductivity of single-wall carbon nanotube/degummed silk composite fibers"  
 The 69th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, 1p-3 (poster presentation), National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, Sep 24 (2025)
- [5] Rikuto Kaya, Kazuyuki Watanabe, Jun Sakata, Kazuha Sakai, Yuito Horita, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
 "Investigation of protective coating of single-wall carbon nanotube conductive fabric using PMMA"  
 The 69th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, 1P-33 (poster presentation), National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, Sep 24 (2025)
- [6] Ryota Okuda, Kazuhiko Niwano, Naoto Oota, Kosei Tomizawa, Yamato Shinada, Ryosuke Suga, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
 "Electromagnetic Interference Shielding Property of Carrier-Doped Transparent Graphene"  
 2025 Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 1571102818 (poster presentation), Taipei International Convention Center, Taipei, May 22 (2025)
- [7] Ren Kojima, Shinguma Aoki, Takeshi Watanabe, Shinji Koh,  
 "Plasmon-Induced Optical Transparency in Graphene/Ag/Graphene Films"  
 18th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2025), II-09-2 (oral presentation), Beppu B-Con Plaza, Japan, May 15 (2025)

- [8] Shinpei Miura, Takeshi Watanabe, Toa Ishizuka, Shinji Koh,  
"Graphene Transfer Using a Porous Cellulose Layer with Reduced Tensile Stress,"  
18th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2025), C41  
(poster presentation), Beppu B-Con Plaza, Japan, May 12-13 (2025)

3. 受賞等

- [1] 第 39 回ダイヤモンドシンポジウム 学生奨励ポスター賞受賞：山下幹裕  
[2] 第 52 回炭素材料学会年会 学生優秀ポスター賞受：中澤金太郎

# マルチフェーズワイヤレス送電システムの発展研究

研究代表者 電気電子工学科 教授 松本 洋和

研究分担者 電気電子工学科 助教 佐藤 佑樹

## 1.1 研究目的

ワイヤレス送電技術は、ケーブルを接続することなく電子機器へ電力を供給できる技術であり、充電の利便性の高さから携帯電話をはじめとする各種電子機器の充電手段として広く普及しつつある。現在、より高い汎用性を有するワイヤレス送電技術の実現を目指し、さまざまな企業や研究機関において研究開発が進められている。しかしながら、送電側と受電側のコイル間に位置ずれが生じた場合、送電電力や送電効率が大きく低下するという課題が存在する。

この課題に対する解決策として、複数の送電コイルを用いるマルチフェーズワイヤレス送電システムが提案されているが、これまで安定した送電動作を維持しつつ、高効率に送電を行うための有効な制御手法は確立されていなかった。

マルチ送電コイル最適制御 (Multi-Coil Transmitter Optimal Control : MTOC) は、当研究室において提案されたマルチフェーズワイヤレス送電システム向けの制御手法である。本制御手法を用いることで、受電コイルの位置に依存することなく、高精度な定電力送電を最大効率で実現することが可能となる。本研究では、MTOC を平面型ワイヤレス送電システムおよび球体型ワイヤレス送電システムに適用し、その動作検証を行うことを目的とする。

## 1.2 進捗状況及び成果

球体型ワイヤレス送電システムは、3つの円形送電コイルを球体表面上に互いに  $90^\circ$  の角度を持たせて配置した構造である。本システムに MTOC を適用することで、受電コイルの位置や姿勢に依存せず、安定した電力送電が可能となる。本年度は、送電距離の延長および送電効率の向上を目的として、以下の3つの取り組みを行った。

### A. 受電部同期整流器の開発

これまでの研究により、受電部における交流 - 直流変換用整流器での損失が送電効率低下の大きな要因の一つであることが確認されている。そこで、従来使用していたダイオード整流器に代えて、低オン抵抗のスイッチング素子を用いた同期整流方式を採用し、効率改善を図った。回路設計、整流タイミングの同期制御実装、および各種パラメータ調整を行い、スイッチング素子を用いた同期整流器を完成させ

た。実験の結果、本同期整流器の導入により、送電効率を約 3%向上できることを確認した。

#### B. 送電部の高周波化とインバータ素子の変更

送電部における損失の主な要因は、送電コイルの抵抗損およびインバータでの導通損失である。駆動周波数を高周波化することで、所要送電電流を低減でき、送電コイルの抵抗損を抑制することが可能となる。そこで、高周波動作に対応したインバータを新たに開発し、高速動作が可能で低オン抵抗なスイッチング素子を採用した。本高周波インバータを用いることで、従来比で約 5%の送電効率向上と送電距離の延長を実現した。

#### C.送電コイルの AI を使った最適設計

従来の送電コイル構造では、受電コイルの位置や向きによって送電距離が大きく変動する問題があった。特に、受電コイルが送電コイルのいずれか一つの相コイルに正対する場合、他の方向と比較して送電距離が著しく短くなる傾向が確認されていた。そこで、送電コイル構造の再設計を実施した。従来の試行錯誤的な設計手法では設計に長時間を要するが、AI 技術を用いることで短時間で最適な設計解を得ることが可能となった。得られた設計結果を基にシミュレーションを行った結果、受電コイルの位置方向による送電距離のばらつきを抑制できることを確認した。

### 1.3 今後の予定

今後は、AI 技術により得られた設計結果を基に送電コイルを実際に製作し、実機による性能評価を行う予定である。また、さらなる送電効率の向上および送電距離の延長を目指し、送電部のさらなる高周波化に取り組む。そのために、新たな送電回路構成の検討を行うとともに、電流または電圧のセンシング手法の改善を進める予定である。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

なし

### 2. 国際会議プロシーディング

なし

### 3. 受賞等

なし

# 糖アルコールスラリーの伝熱特性

## および結晶成長速度の評価

研究代表者 機械創造工学科 教授 熊野 寛之  
研究分担者 機械創造工学科 助教 森本 崇志  
研究分担者 熱工学研究室・修士課程 2年 松本 侑樹  
研究分担者 熱工学研究室・修士課程 2年 森田 孝紀

### 1.1 研究目的

近年、工場排熱や太陽熱などの中低温未利用熱の有効活用は、省エネのみならず、脱炭素社会実現に向けた重要課題となっている。しかしながら、これらの熱エネルギーは温度水準が比較的 low、発電用途には適さないため、熱としての直接利用が求められる。その際に重要となるのが、「高効率に熱を輸送できる媒体」の開発である。

潜熱蓄熱材を固液二相流体として利用するスラリー熱媒体は、顕熱輸送に比べて大きなエネルギー密度を有し、同一体積条件下でより多くの熱を輸送できる可能性を持つ。その中でも糖アルコールを分散させた糖アルコールスラリーは、化学的安定性が高い、比較的大きな融解潜熱を有する、共融混合によって融点制御が可能といった利点を有し、20~90℃の広い温度帯で利用可能な潜熱媒体として極めて有望である。

しかしながら、糖アルコール水溶液は過冷却を伴うため、結晶生成までに長時間を要するという課題を抱えている。また、生成されたスラリーを配管内で流動させる際には、粒子沈降、不均質流れ、圧力損失増大といった流動上の問題も発生する。

したがって本研究では、糖アルコールの核生成・結晶成長機構の解明水平円管内における流動様相および圧力損失特性の評価、ポンプ動力を考慮した実用的熱輸送性能の定量化、伝熱特性を統合的に実施し、「生成—輸送—利用」までを見据えた基礎データの体系化を目的とした。本年度は、晶析機構の解明、流動様相の評価を実施した。

### 1.2 進捗状況及び成果

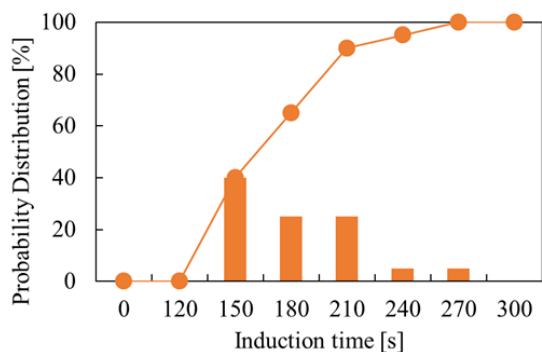
#### (1) 糖アルコールの晶析特性の解明

2025年度は糖アルコールの晶析特性について、一次核生成と二次核生成のそれぞれの観点で研究を進めた。

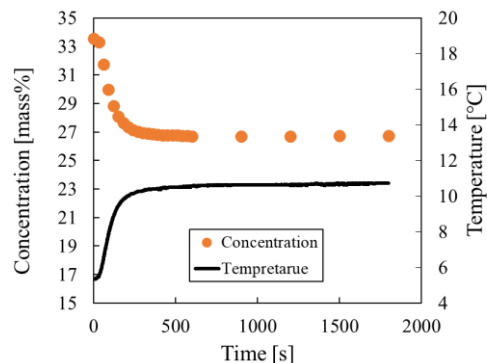
##### ①一次核生成（誘導時間）の評価

一次核生成は二次核生成が生じるまでの晶析過程であり、溶液中からの自発的な核生成によって結晶が析出する。実験では、断熱容器内に充填した過飽和状態の糖アルコールをスターラーで攪拌し始めてからの温度推移を計測することで、一次核生成を評価した。核生成に伴う析出熱による温度上昇が確認された時刻を誘導時間と定義し、その確率分布を取得した。【図1】にエリスリトールを溶質とする水溶液（濃度 26.6 mass%、過飽和度 10 K）の誘導時間の分布を示す。同一条件下では誘導時間の分布幅が

限定され、再現性を持つことが確認された。また、溶質濃度または過飽和度の増加と共に、誘導時間が短縮される傾向も確認できた、溶質種による比較では、エリスリトール < マンニトール < キシリトールの順で誘導時間が延長された。これは分子構造や水和構造の違いが核生成自由エネルギー障壁に影響を与えている可能性を示唆している。



【図 1】 一次核生成の誘導時間分布

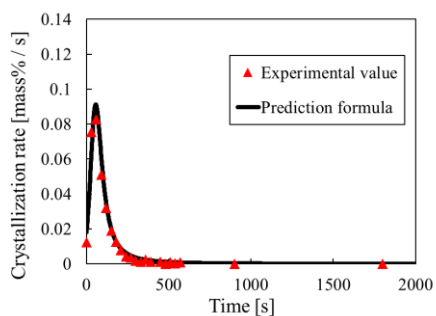


【図 2】 晶析実験における濃度温度履歴

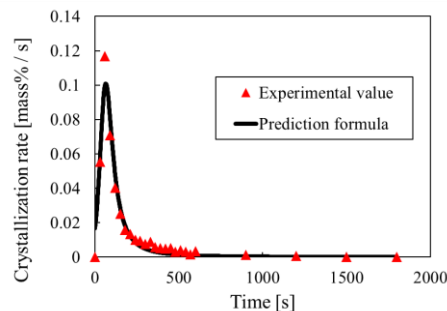
## ② 二次核生成の評価

代表的な条件（溶質：エリスリトール，濃度 33.7 mass%，過飽和度：15 K）における温度履歴および固相率履歴を【図 2】に示す。種結晶添加後，固相率は単調に増加するのではなく，初期の緩慢な増加，急激な析出速度の増大，平衡固相率への漸近という三段階挙動を示した。この傾向はキシリトール，エリスリトール，マンニトールすべてに共通して確認された。

析出速度は明確なピークを持ち，その後急減することから，晶析過程は「析出駆動力の増大」と「溶質枯渇および平衡接近による抑制効果」の競合現象として解釈できる。本研究では，晶析速度を現在の固相率，最終平衡固相率（過飽和度に依存），温度依存性（アレニウス型項）の関数として表現する予測式を構築した。【図 3，4】は代表的な条件（溶質：エリスリトール，濃度 33.7 mass%，過飽和度：15 K）における実験値と予測式の比較結果であり，断熱条件【図 3】で決定した係数を冷却条件【図 4】にも適用した結果，良好な一致が得られ，モデルの汎用性が示された。この結果は，糖アルコールの二次核生成速度が，「現在状態と平衡状態との差」によって本質的に支配されていることを明確に示すものである。



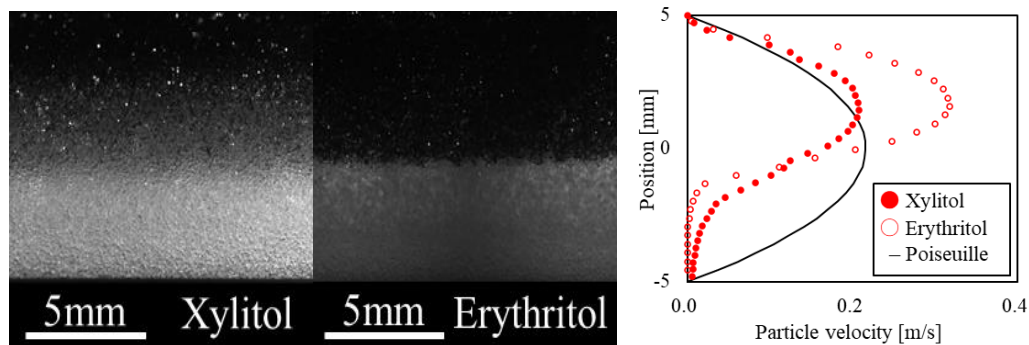
【図 3】 晶析速度の比較（断熱条件）



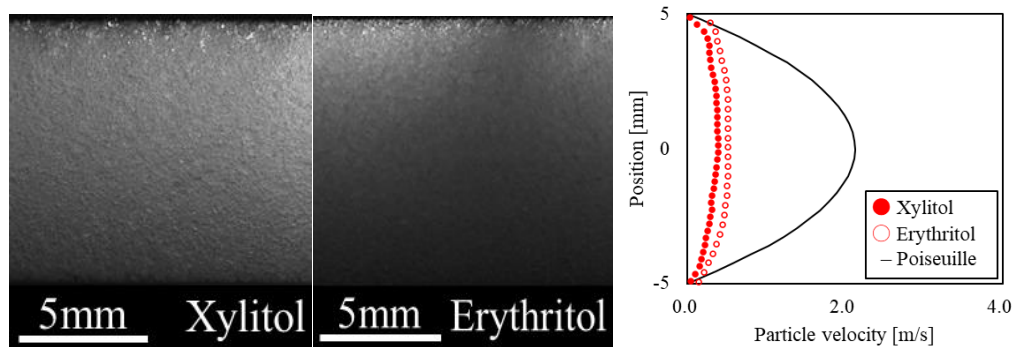
【図 4】 晶析速度の比較（冷却条件）

## (2) 水平円管内流動特性

糖アルコールスラリーの流動特性を検討するため、流動様相の観察を実施した。従来、固液二相流の流動様相は、観察者の目視による主観的な分類がなされており、共通の指標による分類ができていなかった。そこで、本研究では、糖アルコール粒子をトレーサー粒子とした PIV 計測による流動様相の分類を試みた。代表的な低流速および高流速条件における流動様相の観察画像と PIV 計測結果を【図 4, 5】に示す。低流速では粒子沈降により管底部に高濃度層が形成され、二層構造を示す不均質流れ【図 4】となる。一方、流速増加に伴い粒子は再懸濁され、速度分布は上下対称形状へと遷移した【図 5】。速度分布の形状は理論式からかけ離れており、速度の絶対値の計測には課題が残るものの、速度分布の概形は凡そ捉えられていると考えられる。このため、流動様相と速度分布には相関があるものと考え、速度分布から流動様相を分類した。流動様相の分類の結果、キシリトール、エリスリトールを溶質とする糖アルコールスラリーそれぞれにおいて、固相率は不均質流れから均質流れへ遷移する流速に大きな影響を及ぼさないものの、キシリトールの場合に均質流れへ遷移する流速が小さくなることわかった。これはキシリトールを溶質とする糖アルコールスラリーの溶液の粘度の方が高いため、粒子の沈降が抑制されたためと考えられる。



【図 4】不均質流れにおける流動様相と粒子速度分布



【図 5】均質流れにおける流動様相と粒子速度分布

### 1.3 今後の課題

ここまでの検討で、糖アルコールスラリーの生成に必要な晶析特性について明らかにすることができた。また、流動様相についても、PIV計測によって流動様相を分類できる可能性が示され、不均質流れから均質流れへ遷移する流速の条件を明らかにすることができた。今後は、糖アルコールスラリーの熱輸送特性について評価し、熱輸送媒体としての利用可能性を総合的に検討する必要がある。

### 論文リスト

#### 1. 原著論文

1. Takashi Morimoto, Yuta Komiya, Takumi Ishigaki, Toshie Koyama, Masayuki Tanino, Hiroyuki Kumano, Experimental investigation of the effects of solute concentration on flow patterns and rheological properties of ice slurry, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 181, 2026, pp.23-32.
2. Takashi Morimoto, Yukio Shibata, Tatsunori Asaoka, Hiroyuki Kumano, Experimental study on flow and rheological characteristics of xylitol-based sugar alcohol slurries in a horizontal pipe, *Progress in Engineering Science*, Vol. 2, No. 4, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100135>.

#### 2. 国際会議プロシーディング

1. Yuki Matsumoto, Ayumu Nagahori, Takashi Morimoto, Hiroyuki Kumano, Crystallization characteristics of sugar alcohol crystals from supersaturated aqueous solutions, The 11th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2025, Okinawa, JK-TFEC11-1328.

#### 3. 受賞等

なし

# 機械学習を用いた AE 波形分類と損傷挙動の推定

研究代表者 機械創造工学科 教授 長 秀雄  
研究分担者 機械創造工学科 助教 門倉 美幸

## 1.1 研究目的

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)は軽量かつ高比強度、高比剛性であるため幅広い用途で用いられているが、樹脂内に強化繊維が存在する構造のため最終破断に至るまでに様々な破壊過程を経る。そのため、これらの破壊過程を検出・分類できれば、事故につながる最終破断を未然に検出できる可能性がある。従来から AE 法を用いて CFRP の損傷過程を機械学習によって分類する研究が多く行われているが、そのほとんどは教師なし分類であり、その場合、分類結果と損傷形態の対応は検査者が行う必要がある。一方、予め損傷形態に対応した AE 波形が既知であれば教師あり学習も可能となり、損傷形態との対応も自動で行える。そこで本報告では CFRP 内で発生する様々な損傷を人工的に形態別に発生させ、AE 波形の特徴を評価することを目的としている。本研究では、CFRP のモード I 型およびモード II 型の層間剥離に伴う AE 波形の分類を目的とし、主成分分析 (PCA) によって各モードに特有な波形特徴の抽出を試みた。具体的には、モード I 型層間剥離を生じさせる Double Cantilever Beam (DCB) 試験、およびモード II 型層間剥離を生じさせる Three-Point Short-Beam (SB) 試験を実施し、それぞれの AE 波形を取得した。さらに、層間剥離以外の損傷による AE 波形を明確に区別するため、引張試験および支点間距離を広げた三点曲げ試験も実施し、それぞれの AE 波形を取得した。これにより、DCB および SB 試験から得られる AE 波形のうち、層間剥離に固有な特徴を抽出することを目指した。

## 1.2 進捗状況及び成果

Fig.1 に DCB 試験を模式的に示す。本試験では、 $100\text{ mm}^L \times 25\text{ mm}^W \times 2.0\text{ mm}^T$  の試験片を用いた。Fig.1 に示すように試験片左端部にはダイヤモンドカッターを用いて長さ  $15\text{ mm} \sim 20\text{ mm}$  のノッチを導入し、負荷用ピンを取り付けるための矩形ブロックは図のように上下に接着した。この際、CFRP の表面を #80 の研磨紙で粗面化したのちに取り付けた。試験は変位速度  $0.005\text{ mm/min}$  で行った。また、AE センサは荷重点から  $80\text{ mm}$  離れた位置に設置した。Fig.2 に 3 点曲げショートビーム試験を模式的に示す。試験片の大きさは  $50\text{ mm}^L \times 25\text{ mm}^W \times 2.0\text{ mm}^T$ 、支点(曲率半径  $2\text{ mm}$ )間距離は  $10\text{ mm}$ 、荷重は曲率半径が  $5\text{ mm}$  の圧子を変位速度  $0.005\text{ mm/min}$  で下げることで与えた。また、AE センサは荷重点から  $20\text{ mm}$  離れた位置に設置した。Fig.3 に引張試験を模式的に示す。試験片の大きさは  $190\text{ mm}^L \times 20\text{ mm}^W \times 2.0\text{ mm}^T$  であり、試験片の両端面に  $20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  の GFRP タブを取り付けた。試験は速度  $0.005\text{ mm/min}$  で行った。

Fig. 4 に支点間ショートビーム試験より広げた 3 点曲げ試験を模式的に示す. 試験片の大きさは  $110\text{ mm}^L \times 25\text{ mm}^W \times 2.0\text{ mm}^T$ , 支点間距離は  $30\text{ mm}$ , 変位速度  $0.005\text{ mm/min}$  で行った. また, AE センサは荷重点から  $20\text{ mm}$  離れた位置に設置した.

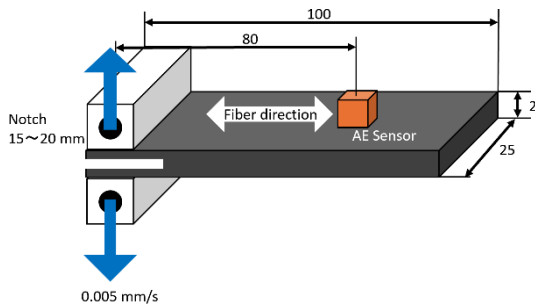


Fig.1. Double cantilever beam test and AE sensor

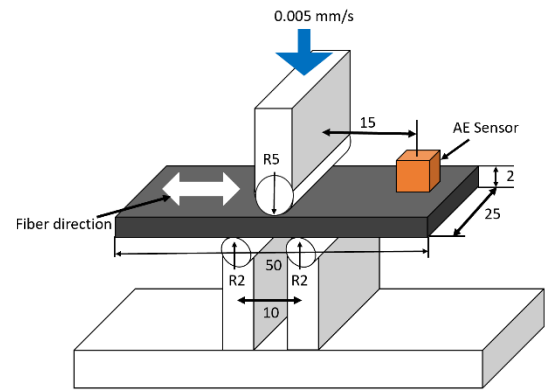


Fig.2. Three-point short-beam test and AE sensor

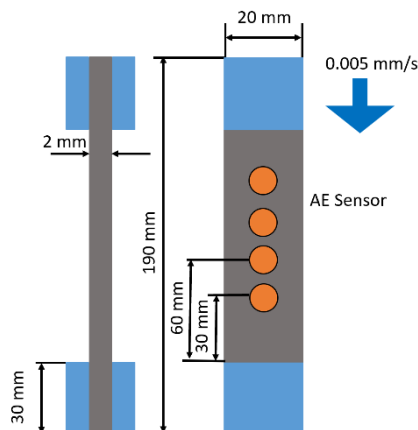


Fig.3. Tension test and AE sensor

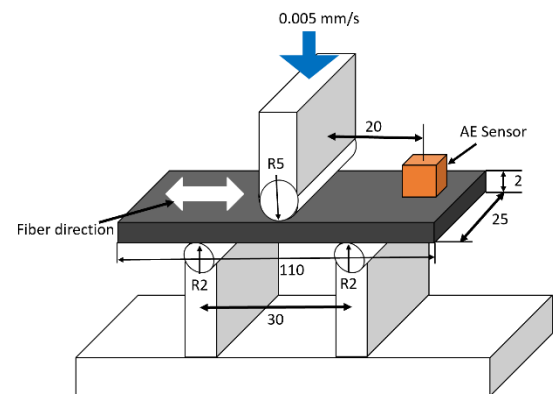


Fig.4. Three-point test and AE sensor

また, 今回用いた CFRP 材は, 直交積層材 CP ( $[0_2^{\circ} / 90_2^{\circ}]_{\text{sym}}$ , 繊維含有率 67%), 疑似等方材 QI ( $[0^{\circ} / 45^{\circ} / 90^{\circ} / -45^{\circ}]_{\text{sym}}$ , 繊維含有率 67%), 一方向積層材 UD (58 層, 繊維含有率 67%) である. なお, 炭素繊維はいずれも PAN 系 24ton グレードである.

Fig.6 に DCB 試験時の荷重 (実線) および累積 AE 数 (点線) の経時変化を示す. なお, 線の色は積層構造を示している. いずれの試験片でも, AE 数は特定の荷重から急増した. AE が急増したタイミングでノッチ先端から亀裂が進展したことから急増後に取得された AE 波形にモード I 型層間剥離が多く含まれていると推定される.

次に, Fig.7 に SB 試験の荷重 (実線) および累積 AE 数 (点線) の経時変化を示す. 図中の縦の点線は, 最大荷重のタイミングを示している. AE 数は最大荷重後に急増した. そこで, この急増前に試験を中止し, 断面観察を行った.

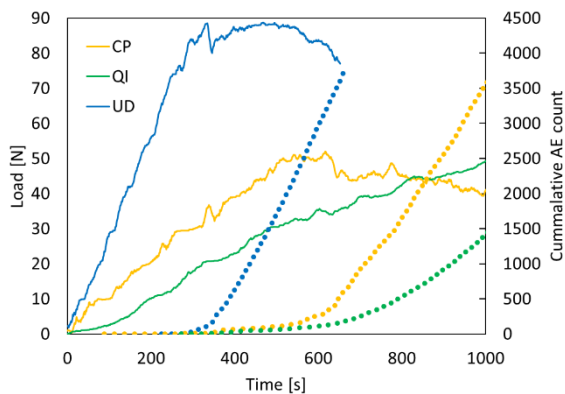


Fig.6. Load history and Cumulative AE count during DCB test for CP, QI, and UD CFRP samples

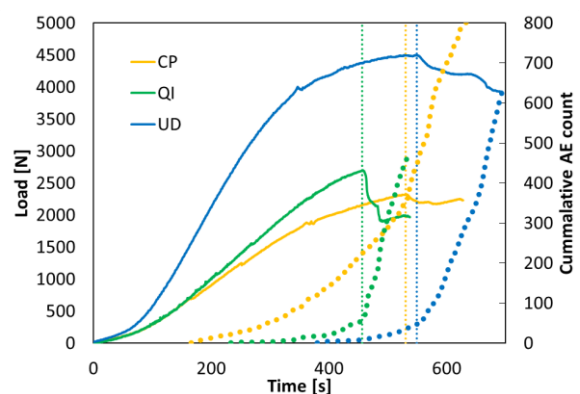
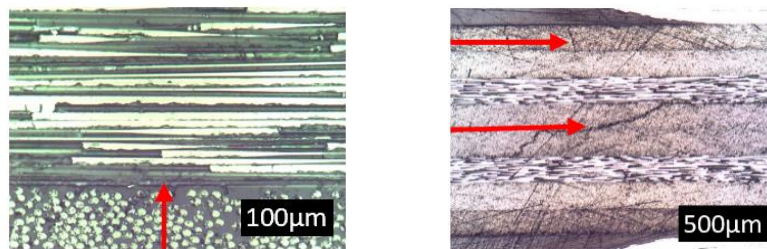


Fig.7. Load history and Cumulative AE count during SB test for CP, QI, and UD CFRP samples

Fig.8にQI材の3点曲げショートビーム試験において最大荷重前（1236N）に試験を中断した後の試験片の断面と最大荷重後の断面観察結果を示す。最大荷重前(a)では小さな層間剥離が観察され、最大荷重後(b)はトランスバースクラックなどの損傷が発生していた。つまり、最大荷重前の主な損傷は層間剥離と考えられる。また、この結果はCP材、UD材でも同様であった。



(a). Before maximum load (b). After maximum load

Fig.8. Cross-section of Quasi-Isotropic CFRP before and after maximum load

DCB試験およびSB試験では、それぞれAE数の急増後にモードI型、最大荷重前にモードII型の損傷が主に生じるとされており、各試験から得られたAE波形には、対応する損傷モードに特徴的な波形が多く含まれていると考えられる。しかし、これらの波形にはマトリックスクラックなどの他の破壊も含まれていると予想される。一方で、引張試験や通常の3点曲げ試験（支点間距離を広げた3点曲げ試験）ではマトリックスクラックのAEが多く含まれる。そこで本研究では、DCB、SB、引張および通常の3点曲げ試験のAE波形の特徴量を主成分分析（Principal Component Analysis: PCA）を用いてDCB試験でのモードI型層間剥離、SB試験でのモードII型の層間剥離のAE波形のみの抽出を試みた。今回、Fig.9に示す時間領域および周波数領域における3つの特徴量（Energy、Centroid frequency、Weighted peak frequency）と時間領域の波形の不規則性を示すAE entropyの4つの特徴量を用いた。

なお、振幅に関連する特徴量を除外したのは、振幅は破壊の規模に関連しており、DCB 試験でのモード I 型層間剥離の規模は SB 試験でのモード II 型の層間剥離よりも大きかったためである。

Table.1 に第 1 主成分および第 2 主成分の寄与率を、Table.2 にそれぞれの主成分に対する各特徴量の重み（固有ベクトル）を示している。また、Fig.10 には第 1 主成分および第 2 主成分のスコアを示している。第 2 主成分までの累積寄与率は約 83% であり、第 2 主成分までに多くの情報が含まれている。また、第 1 主成分には Centroid frequency（係数：-0.658）および Weighted peak frequency（係数：-0.572）が大きく寄与しており、主に AE の周波数領域の特徴を反映している。一方で、第 2 主成分には Energy（係数：0.644）および AE entropy（係数：0.581）が大きく寄与しており、波形の強度や不規則性に関連していた。

Fig.10 に第 1 主成分および第 2 主成分のスコアを示す。DCB（橙）試験と SB（黄）試験の AE が存在する領域は重複しておらず、異なるクラスタを形成している。一方、はく離以外の損傷が主である通常の三点曲げ（灰）試験および引張（青）試験の AE は、DCB 試験と SB 試験の AE の領域と重複するものも存在する。これらの領域の DCB および SB 試験の AE は、それぞれの試験で発生したマトリックスクラックの可能性が高い。つまり、これら引張および三点曲げ試験の AE の領域と重なる領域の DCB 試験および SB 試験の AE を除去することで DCB 試験でのモード I 型はく離、SB 試験でのモード II 型はく離の AE を抽出できると考えている。

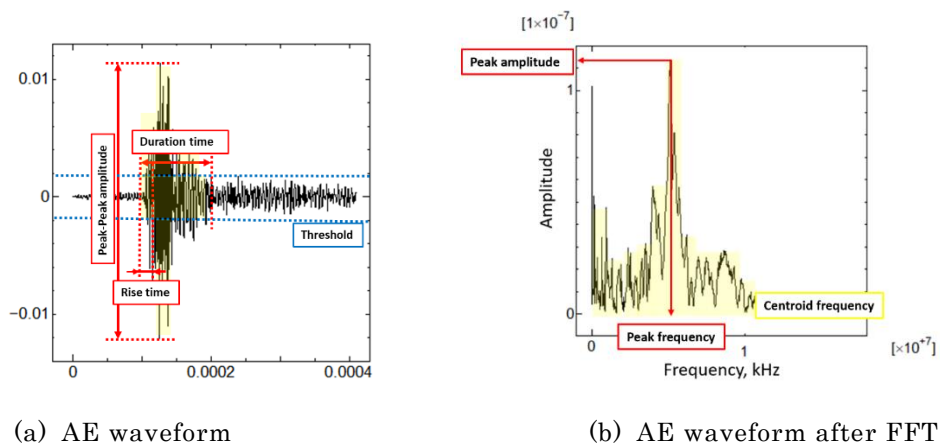


Fig.9. Illustration of AE parameters used in this study.

Table.1. Contributinal ratio

Table.2. Contribution of AE features to principal components

	Contribution ratio		Energy	AE entropy	Centroid frequency	Weighted peak frequency
PCA1	46.20 %	PCA1	0.281	0.402	-0.658	-0.572
PCA2	37.50 %	PCA2	0.644	0.581	0.259	0.426
Cumulative contributinal ratio	83.70 %					

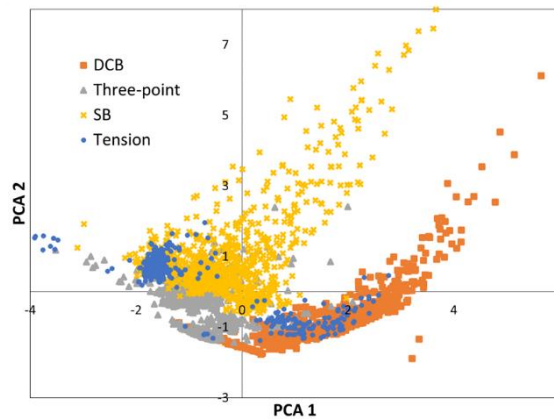


Fig.10. Scatter Plot of PCA Scores

### 1.3 今後の課題

本研究では、モード I 型はく離が発生する DCB 試験，モード II 型はく離が発生する SB 試験，マトリックスクラックが主に発生する引張試験と 3 点曲げ試験から得られた AE 波形の 4 つの特徴量 (Energy、AE entropy、Centroid frequency、Weighted peak frequency) を用いて主成分分析 (PCA) を行った。特徴に基づいた分類は可能であったが、十分に分類ができていない部分もあるので引き続き、特徴量と分類手段の検討を行う。

### 学会発表

梅本舜也，長秀雄，門倉美幸，CFRP における様々な損傷形態に対する AE 波形の特徴の評価，日本機械学会年次大会講演論文集 (CD-ROM)，Vol.2025 Page. ROMBUNNO. J041p-18 (2025)

# 画像計測と数値解析のハイブリッド技術を用いた先進材料 のマルチスケール応力・ひずみ解析技術の開発

研究代表者 機械創造工学科 教授 米山 聡

## 1.1 研究目的

自動車や航空機など各種機械・構造物の軽量化のため、マルチマテリアル化が進み、炭素繊維強化樹脂（CFRP）や高張力鋼の利用が増加している。これらのさらなる軽量化のためには、これらの材料の変形および破壊のメカニズムの明らかにするとともに、高精度な破断予測を可能とする必要がある。そこで本プロジェクトでは、DIC および DVC などの画像測定技術と、FEM などの数値解析技術のハイブリッド技術を確立し、高張力鋼や CFRP のひずみを様々なスケールで測定する技術を開発するとともに、その測定結果を利用して材料特性や応力分布を評価する技術を開発する。その中で、本報では、画像相関法を用いた変位・ひずみ分布を入力として、構成則に依存しないデータ駆動型の材料特性同定方法について報告する。

## 1.2 進捗状況及び成果

データ駆動型手法を用いて、くびれ後を含む弾塑性材料やゴムなど非線形弾性材料の応力-ひずみ関係を DDI により同定方法を開発する。そのために有限変形論に基づいた定式化を行い、さらに複数の荷重に対する測定値を入力として応力-ひずみ関係を同定する。提案する方法をシミュレーションデータに適用し有効性や問題点を検証する。

ひずみとそれに対応する応力の組を、距離最小化関数に基づいて同定する。本研究では、大変形を伴う状態を対象とするため、ひずみの評価には対数ひずみを用い、応力のつり合い条件は変形後の座標系に基づいて評価する。測定対象物体の一部領域について有限要素モデルを構築し、各節点には測定により得られた変位を与える。また、境界節点には測定により得られた荷重を与える。節点変位から要素内部のひずみ成分は算出可能であるが、材料特性および応力成分は未知量として扱う。

距離最小化関数の概念を図 1 に示す。まず、複数の機械状態（要素データ）を仮に複数のグループに分類する。次に、各グループ内のデータを平均することで材料状態を算出する。すべての要素データについて、距離が最小となる材料状態と同一のグループに割り当てられているかを確認し、割り当てが適切でない場合にはグループ分けを修正する。修正後のグループに対して再度平均データを算出し、すべての要素データが距離最小となる材料状態に割り当てられるまで、この操作を繰り返す。距離最小化は、ひずみエネルギー密度とコンプリメンタリーひずみエネルギー密度の関係を表す空

間上で実施される。手順は以下の通りである。

1. 測定により得られた変位分布からひずみ分布を算出する。
2. ひずみをグループに分け、各グループの重心ひずみを算出する。
3. ラグランジュの未定乗数法を用いて重心応力を算出する（最初の計算では構成則を仮定する）。
4. 重心応力とつり合い式から応力を算出する。
5. 距離最小化関数を用いてひずみと対応する応力を修正する。
6. 2 から 5 を収束するまで繰り返す。

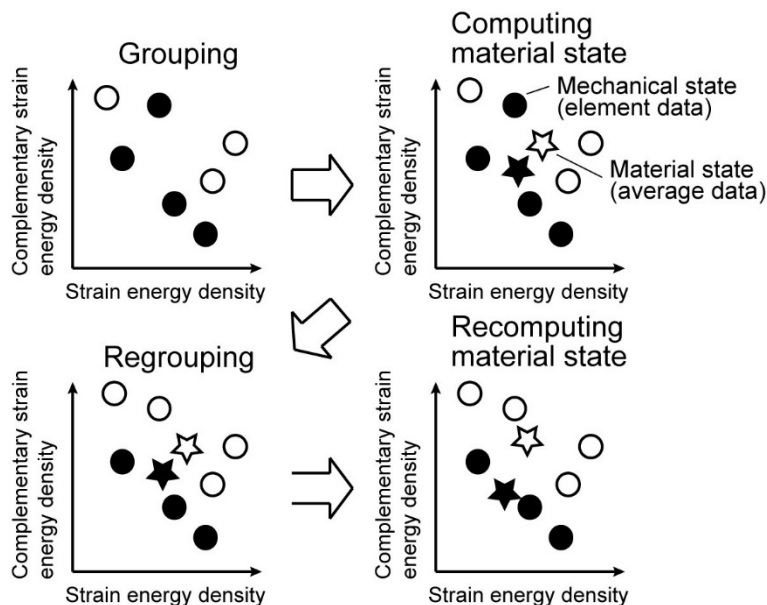


図 1 距離最小化手順

有限要素解析結果を入力としてデータ駆動型手法による応力-ひずみ関係の同定を行い、提案手法の有効性を検証した。図 2 は有限要素解析により得られた試験片端部に与えた変位と荷重の関係である。最大荷重に達したのち、荷重は低下した。図のプロットは後の DDI による解析の際の入力データの荷重と変位に対応する。データ A は負荷開始から最大変位 2.1 mm に至るまでを等分したデータである。データ B は変位 1.05 mm 以上を等分したデータ、データ C は変位 1.72 mm 以上を等分したデータである。いずれの場合もデータ数は 10 である。

図 3 は荷重値の異なる 10 種類のデータを入力とし、グループ分けの数を種々変更して得られた応力-ひずみ関係である。結果はグループ分け数には依存しないことがわかる。また、全ての結果が正しい応力-ひずみ関係よりも低い応力の値となっている。その一方で、各グループでひずみの値が最大の場合には応力の値が高くなっている。このように、データ駆動型手法により同定した応力-ひずみ線図は正解値に近い値が得られているが、まだまだ改善の余地を残している。

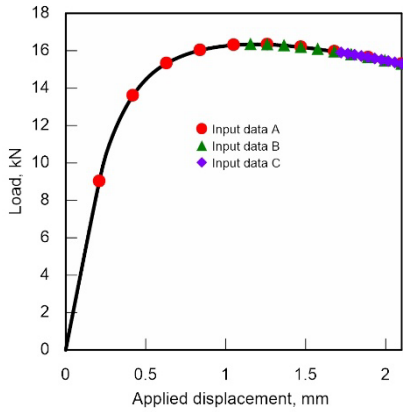


図2 変位－荷重関係

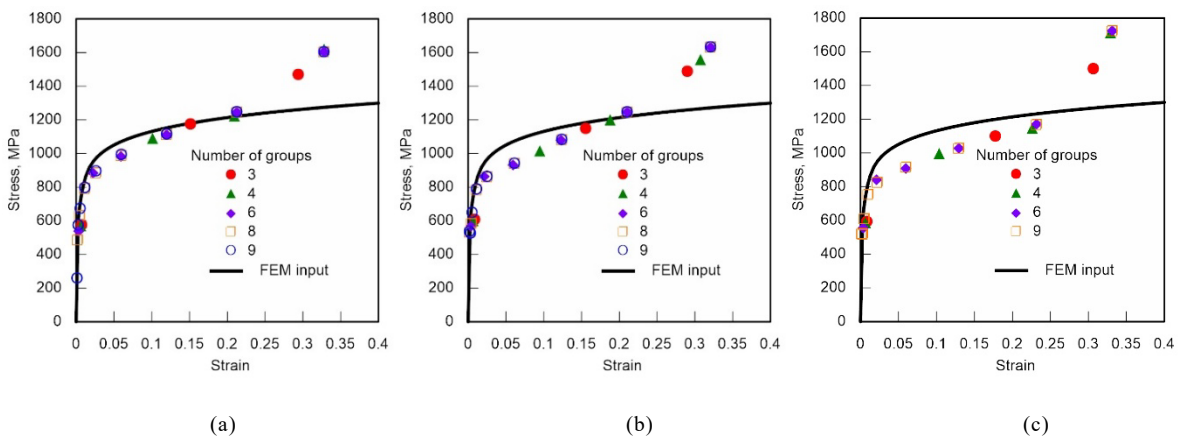


図3 複数データ入力により得られた応力－ひずみ関係: (a) 入力データ A; (b) 入力データ B; (c) 入力データ C

### 1.3 今後の課題

本文得られた結果は応力－ひずみ製図をおおむね正しく同定できることが確認できたが、必ずしも正しい結果が得られているとは言えず、改善の余地がある。そのためアルゴリズムの見直しを行う必要がある。

### 論文リスト

#### 1. 原著論文

1. Fukuda, C., Iizuka, K., Sakaue, K. and Yoneyama, S., Crack Identification and Strain Evaluation from Displacement Fields Measured Using Digital Image Correlation, *Advanced Experimental Mechanics*, **10**, 33–39 (2025).
2. Sun, D., Taguchi, S., Niki, I., Iizuka, K. and Yoneyama, S., The Virtual Fields Method for Identifying Viscoelastic Properties Based on Stress Sensitivity Virtual Fields, *Mechanics of Time-dependent Materials*, **29**(2), #43 (2025).
3. Tsujii, Y., Iketa, N., Iizuka, K. and Yoneyama, S., A Method for Measuring Displacements

and Strains near Interface of Dissimilar Materials by Finite Element Global Digital Image Correlation, *Materials System*, **42**, 21–26 (2025).

## 2. 国際会議プロシーディング

1. Horio, K., Iizuka, K. and Yoneyama, S., Carbon Fiber Network Strain Sensor Utilizing Localized Conductivity by Laser Processing, International Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researchers 2025 (IWAEM'25), #O015 (Higashi Osaka, November 29-30, 2025).
2. Ohno, A., Iizuka, K., Yoneyama, S. and Todoroki, A., A Study of Reconstruction Filters in Back Projection for Improving DVC Accuracy, International Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researchers 2025 (IWAEM'25), #O024 (Higashi Osaka, November 29-30, 2025).
3. Yoneyama, S., Combined Experimental-numerical Stress Analysis Based on the Principle of Superposition, International Symposium on Experimental Mechanics (SEM2025), (Taichung, October 26-30, 2028).
4. Yoneyama, S. and Iizuka, K., Evaluating Thermal Stresses from Measured In-plane Displacements Based on the Principle of Superposition, 19th International Conference on Advances in Experimental Mechanics, (London, September 2-4, 2025).
5. Onozuka, K., Iizuka, K. and Yoneyama, S., Observation of Bending Fracture Behavior of CFRTP Laminates with Fiber Discontinuity Using DIC, 24th International Conference on Composite Materials, (Baltimore, August 4-8, 2025).
6. Kudo, M., Iizuka, K. and Yoneyama, S., Identifying Semiconductor Wafer Warpage and Residual Stress by Surface Profile Measurement, JSEM International Conference on Experimental Mechanics, #24212 (Tokyo, July 21-25, 2025).
7. Iizuka, K., Yamaguchi, Y. and Yoneyama, S., Evaluation of Deformation Behavior of 3D Printed Lattice Structures Using Digital Image Correlation, JSEM International Conference on Experimental Mechanics, #24213 (Tokyo, July 21-25, 2025).
8. Iizuka, K. and Yoneyama, S., Effect of Surface Layer for Tensile Properties of 3D Printed CFRP, The 14th Canada-Japan Workshop on Composites, #20 (Hiroshima, June 11-13, 2025).
9. Yoneyama, S., Iizuka, K. and Kudo, M., Residual Stress Evaluation in Silicon Wafer Based on the Principle of Superposition and Full-field Warpage Measurement, 2025 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, #19461 (Milwaukee WI, June 2-5, 2025).

# 高速 3D 造形のマルチモーダルセンシングと

## ロボットモーションコントロール

研究代表者	機械創造工学科	准教授	田崎良佑
研究分担者	理工学部機械創造コース	博士後期課程 2 年	重本竜声
研究分担者	理工学部機械創造コース	学士課程 4 年	本間 蓮

### 1.1 研究目的

本研究は、人の適応能力や順応性に匹敵する技能獲得を可能とするロボットシステムの構築を目的とし、多様な材料、環境、対象に対して適切に動作可能な制御理論の確立を目指す。従来のロボットシステムは、あらかじめ設計された動作や経路に基づく実行を前提としているが、対象の状態変化や環境の不確実性に対して十分に適応できないという課題がある。特に、材料の変形や接触状態の変動、あるいは群衆のような動的かつ非定常な環境においては、事前計画に基づく制御のみでは安定かつ高精度な動作の実現が困難である。

本プロジェクトでは、この課題に対し、マルチモーダルセンシングにより対象の状態をリアルタイムで取得し、その情報に基づいてロボットモーションを逐次更新する適応制御系の構築を行う。すなわち、力覚や視覚などの複数の情報を統合することで対象状態を定量的に把握し、その変化に応じて運動を調整することで、人のような柔軟な作業実行を可能とする。2025 年度は、この枠組みを異なる対象に適用することでその有効性を検証するために、高速 3D 造形プロセスおよび群衆環境下の移動ロボットを対象とした。前者では材料接触というミクロな物理現象を扱い、後者では人流というマクロな動的構造を対象とすることで、適応的モーション制御の適用範囲と一般性の検証を行った。本研究により、対象依存の事前設計型制御から、状態認識に基づく適応的制御への転換を図り、複雑環境下においても安定に動作可能なロボットシステムの基盤技術の確立を目指す。

### 1.2 積層造形における接触力フィードバックに基づく適応制御

材料押出型 3D プリンティングでは、ノズルと造形面との接触状態が造形品質に大きく影響する。しかし従来は、事前に設計された経路に基づく開ループ制御が中心であり、造形中に生じる誤差や欠陥をその場で補正することが困難であった。本研究では、ノズルに作用する反力をリアルタイムで計測し、これをフィードバックすることで造形プロセスを適応的に補償する手法を提案した。図 1 に示すように、ノズルに複数のロードセルを配置し、接触状態を合力として取得する構成とした。

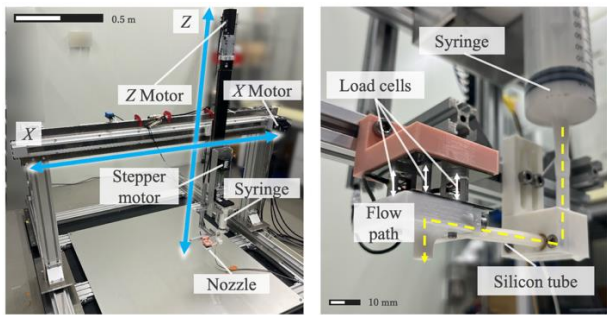


図1 高速3Dプリント装置と反力計測機構

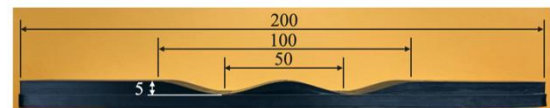


図2 凹凸形状を有する基板の外観

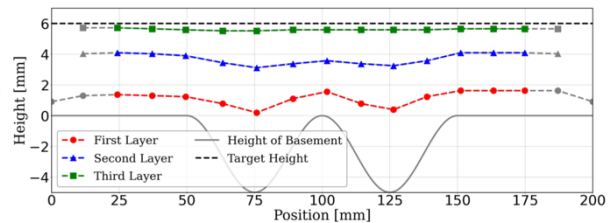


図3 積層による表面平滑化結果の比較

非平面基板を対象とした実験では、図2に示す凹凸形状を有する基板上で造形を実行して提案手法の有効性を検証した。その結果、送り速度制御を導入することで、造形物の高さが目標値付近で均一化し、表面の平滑化が達成されることが確認された。これは、接触力に応じて材料堆積量を調整することで、局所的な凹凸を補正できることを示している。さらに、多層積層実験においては、図3に示すように層の進行に伴って造形物の凹凸が段階的に低減されることが確認された。特に、初層と比較して上層では凹凸振幅が大幅に減少しており、本手法が逐次補正型の造形プロセスとして有効であることが示された。一方で、材料の変形やノズル高さ推定誤差に起因する形状誤差の残存が確認され、センシング精度および制御パラメータ設計の重要性が明確となった。以上より、接触力フィードバックに基づく制御により、従来の事前計画型造形に対して、動的な適応補正を可能とする枠組みを示した。

### 1.3 群衆流れ場に基づく移動ロボットの経路生成

群衆環境における移動ロボットの運用では、多数の歩行者との相互作用により進路が不安定化し、停止や振動が発生する問題がある。本研究では、人間が群衆内で自然に形成される流れを利用して移動している点に着目し、人流構造に基づく経路生成手法を提案した。図4に示すように、本手法では群衆内の歩行者をクラスタとして捉え、複数の流れを同時に認識する。ロボットはこれらの流れの中から、自身の目的地に適した流れを選択し、合流・追従することで移動する。

クラスタリングには、人間の視覚的注意特性を考慮したモデルを導入した。図5に示すように、進行方向に対する中心視と周辺視野を区別し、重要度の高い対象を優先的に抽出することで、計算量を抑えつつ流れの本質的構造を捉えることが可能となる。さらに、方向・速度・距離に基づく行動類似度により歩行者間の関係性を評価し、グラフ構造として人流を表現する。その結果、図6に示すように、流れが交差・変化する状況においても、人流を安定して分離でき、ロボットが適切な流れを選択して追従することが可能となった。これにより、従来手法で問題となっていた停止現象を回避し、効率的な移動が実現されることが確認された。

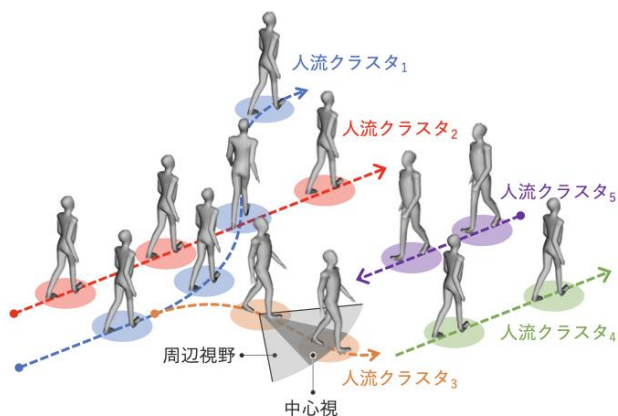


図 4 群衆流れのクラスタリング手法の概略

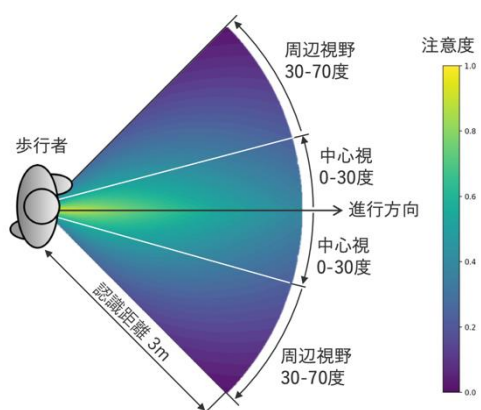


図 5 視覚的注意モデルの構成

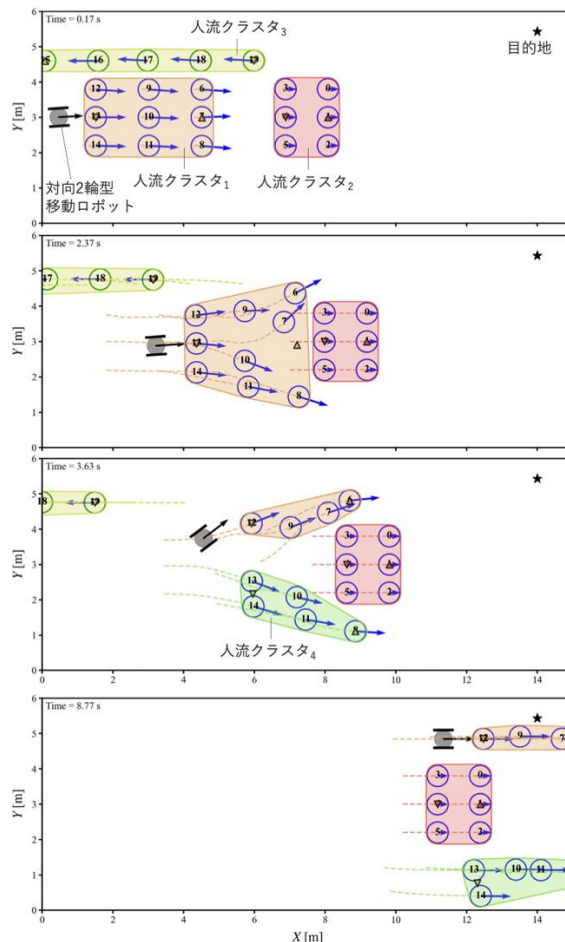


図 6 流れ追従ナビゲーションの結果

#### 1.4 今後の課題

本年度の研究により、接触力や人流構造といった対象の状態をリアルタイムで取得し、それに基づいてロボットの運動を更新する適応制御の有効性が確認された。

一方で、3D 造形においては、ノズル高さ推定の精度向上および材料特性を考慮したモデル化が重要な課題である。特に、積層過程における変形の蓄積に対応するためには、目標反力の動的更新を含む制御設計が必要である。

また、移動ロボットにおいては、クラスタリングパラメータの環境依存性を低減し、多様な群衆条件に対して安定に適用可能な手法への拡張が求められる。加えて、実機環境におけるセンサノイズや視野制約を考慮した検証も不可欠である。

今後は、これらの課題に取り組むとともに、異なる対象に共通して適用可能な適応制御の枠組みを整理し、汎用的なロボットモーションコントロールの確立を目指す。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

- Naoya Harada, Nozomu Harato, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, “Design and Evaluation of a Physically Synchronized Virtual Therapist Avatar to Improve Trust in a Single-Arm Massage Robot Incorporating Skilled Massage Techniques,” IEEE Access, Vol. 14, pp. 16831-16847, 2026
- Ryusei Shigemoto, Ryosuke Tasaki, “Merging and Following Control System by Mobile Robot Based on Nonuniform Pedestrian Flow Model,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 37, No. 6, Rb25-0070, 2025
- Ryusei Shigemoto, Shohei Saida, Ryosuke Tasaki, “Human-Inspired Flow-Crossing Navigation for Nonholonomic Mobile Robots in Dynamic Pedestrian Environments,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 37, No. 6, Rb25-0077, 2025
- Shinichi Ishikawa, Ryosuke Tasaki, “High-Sensitivity Interlayer Force Measurement and Multi-Layer Smoothing Control for 3D Printing on Uneven Surfaces,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2025
- Shinichi Ishikawa, Ryosuke Tasaki, “Real-Time Vision-Based Path Planning Approach for Shape Error Minimization in 3D Printing of Cylindrical Structures,” International Journal of Automation Technology, Vol. 19, No. 4, pp. 667-677, 2025
- Naoya Harada, Ryosuke Tasaki, “Muscle Knot State Measurement Using Multi-Axis Kneading Reaction Force in Physical Massage Robot System,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2025
- Ryuji Nakagawa, Masakazu Fujimoto, Ryosuke Tasaki, “Precision-Enhanced Deburring Using Machining Force Feedback Control for Various Casting Materials,” Mechanical Engineering Journal, Article ID: 24-00425, 2025
- Naoya Harada, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, “Physical Therapy Massage Robot System with Human Motion Tracking and Finger-Pressing Force Control,” Advanced Robotics, Vol. 39, No. 5, pp. 223-242, 2025

### 2. 国際会議プロシーディング

- Naoya Harada, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, “Multi-Robot Stimulation for Immersive Robotic Massage with Virtual Therapists,” in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2026), pp. 476-479, Mar. 2026
- Hiroki Kimura, Che-Kang Hsu, Takeru Ito, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, “Conversational Force Adaptation for Robotic Massage Using Recipient Speech,”

in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2026 Companion), pp. 1085-1088, Mar. 2026

• Ryusei Shigemoto, Hiroki Kimura, Ryosuke Tasaki, “Dynamic Pedestrian Flow Guidance through Multi-Robot Interaction along Human Crowd Boundaries,” in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2026), pp. 421-424, Mar. 2026

• Ryuji Nakagawa, Hiroki Kimura, Ryosuke Tasaki, “Gradient-Guided Prediction of High Manipulability Configurations for Potential Field Surface-Following Path Planning,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2026), Mar. 2026

• Leon Ueshima, Shinichi Ishikawa, Wakana Tsuru, Ryosuke Tasaki, “Continuous Helical Motion Control for High-Speed Cylindrical 3D Printing Using Material Extrusion,” in Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), OS11-18, Dec. 2025

• Shinichi Ishikawa, Ryo Yamada, Wakana Tsuru, Ryosuke Tasaki, “Pressing Force Regulation in Robotic 3D Printing via CFD-Aided Nozzle Posture Control,” in Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2025), Oct. 2025

• Ryuji Nakagawa, Ryosuke Tasaki, “Manipulability Maximization of a Liquid-Handling Manipulator for Sloshing Suppression via Container Tilting,” in Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2025), Oct. 2025

• Tsubasa Okada, Shunpei Kawasaki, Naoya Harada, Ryosuke Tasaki, “Contact Force Estimation and Control for Accurate Robotic Eyebrow Drawing on Viscoelastic Surfaces,” in SICE Festival 2025 (SICE FES 2025), Sep. 2025

• Takeru Ito, Naoya Harada, Ryosuke Tasaki, “Muscle Center Localization Using Multiaxial Force Sensing for Adaptive Robotic Acupressure Control,” in SICE Festival 2025 (SICE FES 2025), Sep. 2025

• Munehiro Nakayama, Shinichi Ishikawa, Takumi Nishiwaki, Ryunoshin Oba, Akihide Kimura, Ryosuke Tasaki, “Skill-Informed Putty Coating with a Force-Controlled Robot Arm on Cast-Like Surfaces,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2025), pp. 285-290, Aug. 2025

• Naoya Harada, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, “Kneading-Motion-Based Tactile Feedback for Personalized Robotic Massage Using VR Avatars,” in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2025), Mar. 2025

• Ryusei Shigemoto, Ryosuke Tasaki, “Dynamic Pedestrian Flow Control Using a

Flow-Robot Interaction Model of Mobile Robots and Human Crowds,” in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2025), Mar. 2025

### 3. 受賞等

• Late Breaking Report Runner-Up, Ryusei Shigemoto, Hiroki Kimura, Ryosuke Tasaki, “Dynamic Pedestrian Flow Guidance through Multi-robot Interaction along Human Crowd Boundaries,” The 21st edition of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2026)

• Late Breaking Report Honorable Mention, Naoya Harada, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, “Kneading-Motion-Based Tactile Feedback for Personalized Robotic Massage Using VR Avatars,” The 20th IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2025)

# 微小超伝導体の精密物性測定と量子計測への応用

研究代表者 物理科学科 教授 北野 晴久  
研究分担者 物理科学科 助教 鈴木慎太郎

## 1.1 研究目的

近年、超伝導接合をキーデバイスとする量子回路の開発や、超伝導転移の非線形性と非常に小さい超伝導ギャップに起因する、超高速応答と高エネルギー分解能を活かす量子センサーの開発が、金属系超伝導薄膜の微細加工を中心に精力的に進められている。一方、物質科学分野では、BCS 理論で示された従来の超伝導発現機構の概念を凌駕する多様な電子対形成が様々な物質系で発見され、トポロジカル超伝導やマヨラナ準粒子などの新概念の提唱と実証が活発化している。加えて、永らく結晶と非晶質だけで論じられてきた固体物理の概念を打ち破り、並進対称性はなくとも結晶では実現しない特異な回転対称性を持つ準結晶系において、最近、強磁性や超伝導などの長距離秩序形成が発見され、その特異な発現機構の解明が急がれている。

本研究プロジェクトでは、我々が培ってきた超伝導体単結晶への微細加工技術と組み合わせて作製される微小超伝導体の精密物性測定と量子計測への応用を目指す。その特色は、我々が開拓してきた集束イオンビーム (FIB) などの微細加工を駆使した精密物性測定の適用範囲を、準結晶関連物質や微細配線が不要な非接触測定に拡張することである。さらに、量子計測分野への応用を見据え、鉄系超伝導体の微小ブリッジ素子による単一光子検出に挑戦し、光量子計算や光量子テレポーテーションで鍵となる超伝導単一光子検出の物理機構解明と飛躍的な性能向上を目指す。

## 1.2 進捗状況及び成果

プロジェクト初年度となる今年度は、機械剥離した微小単結晶薄膜を積み重ねるためのスタンピング装置の開発や微小ブリッジ素子への光照射実験用プローブの設計など、微小超伝導体の精密物性測定と量子計測応用に向けた準備を進めると共に、これまでに得られた成果が原著論文や国際会議プロシーディングの形で発表されるなど結実した。以下で詳細を述べる。

### (1) Ba122 鉄系超伝導体の面間微小ブリッジにおける対破壊電流と位相スリップ

2021 年度から取り組んできた鉄系超伝導体  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  単結晶の微細加工素子を用いた研究において、昨年度発表した最適ドープ領域近傍の組成 ( $x=0.29-0.32$ ) に対する電気抵抗率の異方性評価と面間対破壊電流密度測定の学術論文 (Phys. Rev. B 誌、2024 年 9 月) に続き、より広い組成範囲 ( $x=0.27-0.41$ ) の面間対破壊電流密度の組成依存性と対破壊電流極限近傍で観測される位相スリップ挙動を国際会議 (IBS2app 2025) プロシーディング論文とし

て発表した(Supercond. Sci. and Technol.誌、2025年12月)。対破壊電流密度に関する現象論と微視的理論を精査し、得られた組成依存性に量子相転移的な異常を反映し得る伝導電子有効質量の影響が含まれないことを再確認すると共に、対破壊電流極限への到達を阻害し得る要因として、電流電圧特性の定量的解析で判明した位相スリップ挙動が避けられないことを議論した。興味深いことに別の鉄系超伝導体  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)_2\text{As}_2$  の最適ドーピング領域近傍 ( $y=0.06-0.08$ ) の対破壊電流密度測定では位相スリップ挙動が観測されていない。Pドーピング系とCoドーピング系では元素置換に伴う超伝導層への乱れの影響が大きく異なるため、両者の系で新たに単結晶試料を作製し、位相スリップ挙動の起源をさらに探求する予定である。さらに、超伝導電流の時空間変化の追跡でよく用いられる TDGL 方程式の有限要素数値解析に着手し、COMSOL 社 Multiphysics を用いた超伝導ブリッジ内の超伝導秩序変数の時空間変化数値解析を試みた。

#### (2) FIBピックアップ法で作製された FeSe 面内微小ブリッジ素子の対破壊電流密度

前助教の孫悦博士(現中国東南大教授)が本学在籍時に FIBピックアップ法で作製した鉄系超伝導体 FeSe 微小ブリッジ素子における磁場中面内対破壊電流密度測定と磁束侵入排除に関する研究成果を学術論文(Phys. Rev. B 誌)に発表した。2021年度に得ていた実験結果をベースに超伝導ストリップ線路への磁束侵入磁場(下部臨界磁場)のサイズ依存性数値計算を新たに加え、FeSe 微小ブリッジ素子の面内対破壊電流密度が約 0.1 T までの面平行磁場に対してほとんど減衰しないことを発見した。類似する鉄系超伝導体 Fe(Te,Se)に対しても同様な挙動を示すかどうかを検証すべく、現在、FIBピックアップ法による微小ブリッジ素子の作製準備中である。

#### (3) FIBピックアップ法で作製された Fe(Te,Se)ラメラに対するパルス強磁場測定

FIBピックアップ法を用いて作製された  $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  単結晶ラメラに対する磁場中面間電流応答に対する研究成果を学術論文(Phys. Rev. B 誌)として投稿し、今年2月に出版された。この成果は、2020年度から取り組んできた京都大学(掛谷准教授)、大阪大学(鳴海准教授)、中国東南大(孫教授)との共同研究成果であり、従来のバルク単結晶試料の実験では困難であった面間電流応答による上部臨界磁場の決定に成功し、鉄カルコゲナイド超伝導体で示唆されていたパウリ常磁性対破壊効果が磁場方向に依らないことを初めて見出した。さらに、FIBピックアップ法で得られるラメラ試料への FIB アシスト配線技術の問題点を丁寧な実験で検証し、常伝導状態の物性評価には影響するものの、超伝導のゼロ抵抗状態から破れの検知には全く問題がないことを確立した。

#### (4) Co 置換 $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 単結晶における過剰鉄除去

FeSe の Se サイトを Te で置換した Fe(Te,Se)は、Te 置換に伴うスピン軌道相互作用の増強により、トポロジカルバンドが形成されることが角度分解光電子分光から確認されており、バルクで発現するトポロジカル超伝導(以下、TSC と略記)の有力候補物質と考えられている。このうち、トポロジカルディラック半金属(以下、TDS と略記)バンドで TSC を発現させるには、電子ドーピングによるフェルミ準位シフトが簡便であり、電子ドーピングに有効な Co 置換  $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  単結晶が作製された。しかしながら、初期の先行研究では結晶作製時に混入する過剰鉄の除去が徹

底されず、電子ドーピングに伴うトポロジカル物性の発現は未解明のままであった。我々は、2019年度より Co 置換  $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  単結晶の作製と過剰鉄除去に取り組んできたが、今年度は新たに SEM/EDX 解析を用いて、過剰鉄除去用アニールの前後における Fe/Co 濃度変化を詳細に追跡した。その結果、Co フリーの  $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  単結晶に対する過剰鉄除去で確立された酸素アニール条件をベースとする酸素分圧制御だけでは、Co 置換試料の過剰鉄を完全に除去することができないことを見出した。さらに、従来よりもアニール時間を1桁増やした実験から、表面に形成される酸化鉄が過去に報告された  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ではなく、化学的安定性の高い  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  であることを突き止めた。これにより、従来のアニール条件を拡張し、酸素アニールによる酸化物形成と物理的/化学的エッチングによる酸化物除去を繰り返すスキーム確立が、Co 置換  $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  単結晶の過剰鉄除去に有効であるとの見通しが得られた。

#### (5) Au-SM-La 系近似結晶の単結晶育成

準結晶は、5回対称や10回対称などの特異な回転対称性を有する正多面体クラスターの多重殻構造を取る場合が多く、準結晶と同じ正多面体クラスターを持ちながら完全な並進対称性を示す近似結晶における物性解明が準結晶の物性を解明する際の重要なカギとなる。しかしながら、従来の準結晶研究では溶融させた原料の急冷で得られる多結晶試料の測定が大半であり、一般の物性研究では標準的な単結晶試料の育成があまり実施されていなかった。我々は、Au-SM-La (SM=Al,Ge)系の近似結晶に着目し、その単結晶育成に一部成功した。しかしながら、Au-Ge-La 系では 1/1 近似結晶とは別の平板状結晶が第2相として得られることが判明し、両者の成長条件を詳しく調べた結果、結晶成長後の急冷温度が高い方が近似結晶を得る確率が高いことを突き止めた。一方、Au-Al-La 系では第2相の成長は起こらず、1/1 近似結晶のみが得られることが判明した。

### 1.3 今後の課題

まず、今年度末導入予定のヘリウム循環システムを昨年度導入した新規冷凍機に接続し、絶対温度 1.5 K ベースの極低温測定環境を整備する。超伝導微小ブリッジ素子の対破壊電流密度測定において、新たに作製する P ドープ系と Co ドープ系  $\text{Ba}_{122}$  単結晶から面間微小ブリッジ素子を作製し、極低温領域までの電流電圧特性を調べると共に、FIB ピックアップ法で作製される  $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$  微小ブリッジ素子の対破壊電流密度を磁場中で測定する。さらに、低温環境でコプラナー型マイクロ波共振器の共振特性を調べる専用プローブを開発し、FIB ピックアップ法で得られるラメラ試料への非接触物性測定の可能性を探る。

次に、Co 置換  $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  単結晶の過剰鉄除去に向け、上記 1.2 (4) で述べたスキーム確立に向け、除去がより容易な  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  酸化膜の形成条件と微小試料に対する物理的/化学的エッチング条件の探索を系統的に行う。さらに、開発した機械剥離式スタンピング装置を用いて  $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$  単結晶の極薄膜試料を作製し、電気化学的手法による電子ドーピングの可能性を探る。

最後に、超伝導ブリッジ素子への光照射実験を開始し、単一光子検出に向けた技術課題を検証する。

## 業績リスト

### 1. 原著論文

- [1] Yue Sun, Yuling Xiang, Zhixiagn Shi, Tsuyoshi Tamegai, and Haruhisa Kitano, "Depairing critical current density and the vortex-free state in FeSe nanobridges", *PHYSICAL REVIEW B* **112**, 184503 (2025).
- [2] H. Kitano, A. Ohira, Y. Motoyama, M. Nawata, Y. Narumi, H. Taira, K. Kindo, M. Hagiwara, Y. Sun, and I. Kakeya, "Pauli pair-breaking effects in the interlayer charge transport of Fe(Te,Se) single crystals", *PHYSICAL REVIEW B* **113**, 064513 (2026).

### 2. 国際会議プロシーディング

- [1] Shintaro Suzuki, Yuki Mizukoshi, Kotaro Jimbo, Yue Sun, Tsuyoshi Tamegai, and Haruhisa Kitano, "Depairing in the current-carrying nanobridges of  $\text{BaFe}_2(\text{As,P})_2$  single crystals", *Supercond. Sci. Technol.* **38**, 125010 (2025).

### 3. 国際会議発表

- [1] H. Kitano, Y. Mizukoshi, S. Suzuki, Y. Sun, T. Tamegai, S. Ishida, H. Eisaki, "Doping-dependent Depairing Current Density of  $\text{BaFe}_2(\text{As,P})_2$  and  $\text{Ba}(\text{Fe,Co})_2\text{As}_2$  nanobridges along the c axis", The 30th International Conference on Low Temperature Physics (LT30) (2025年8月), P24-08-Aug
- [2] H. Kitano, "Access to Depairing Regime in Supercurrent Transport of Single-Crystal Nanobridges Made of Iron Based Superconductors", The 38th International Superconductivity Symposium (ISS2025) (2025年12月), PC8-03-INV (invited)
- [3] A. Hoshi, Y. Kawada, N. Okabe, Y. Fukayama, A. Kato, S. Suzuki, H. Kitano, "Influence of Interstitial Fe and Superconductivity in Electron-doped  $\text{Fe}_{1+y-x}\text{Co}_x\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  Single Crystals", Materials Research Meeting 2025 (MRM2025) (2025年12月), A4-P403-04
- [4] Rio Mihara, Shintaro Suzuki, Haruhisa Kitano, "Investigation of Method for Single Crystal Growth of Au-SM-La Tsai-type Quasicrystal Approximants (SM = Al, Ge)", Materials Research Meeting 2025 (MRM2025) (2025年12月), A4-P403-09
- [5] H. Kitano, "Access to Depairing Limit in Fe(Te,Se) Nanobridges", International Workshop on Intrinsic Josephson Junctions and Nanostructured Superconducting Physics (nanoIJJ2025) (2025年12月), talk7

# データの偏りに対して頑健な信用スコアリング手法の開発

研究代表者 数理サイエンス学科 准教授 山中 卓  
研究分担者 基礎科学コース 修士課程1年 岡本 悠太  
研究分担者 近畿大学理工学部 非常勤講師 小船 幹生

## 1.1 研究目的

金融機関や一般企業が取引先企業の選定やモニタリングを行うための信用スコアリング手法は、取引先企業の業種や企業規模といった企業属性のカテゴリに応じて構築され、経営管理に活用されてきた。信用スコアリング手法の構築は企業評価値を出力する関数としての統計モデルや機械学習モデルの推定に帰着される。モデルの推定には倒産企業と非倒産企業のデータを共に用いるが、両者のサンプル数が大きく偏ったデータ不均衡が存在することがモデル推定における困難の一つであった。また、企業属性のカテゴリによってはモデルを構築するために十分なサンプル数を確保できないという意味でのデータの偏りもモデル推定に困難をもたらしていた。本研究では、そのようなデータの偏りに対処するモデル推定手法を調査・開発し、従来よりも頑健な信用スコアリング手法の実現を目指している。

## 1.2 進捗状況及び成果

### 〈研究基盤の整備〉

研究の基盤となる企業データベースの整備を実施した。本研究の遂行に必要な倒産・非倒産企業サンプルからなる中小企業データベースを、原データの所有者である株式会社帝国データバンクの許諾の下で、整備した。また、上場企業の財務データおよび信用格付データを株式会社 Quick から購入し、上場企業の信用リスク評価用データベースを構築した。

### 〈モデリング手法の調査〉

ロジスティック回帰やサポートベクターマシン等の基本的な分類モデルに対して、倒産・非倒産のサンプル数が不均衡である状況に対処する学習手法を調査した。ロジスティック回帰については、非対称ロジスティック回帰と呼ばれる手法を実装した。その中小企業の倒産判別における有効性を検証したところ、若干の判別精度の向上が認められた。この成果を日本金融・証券計量・工学学会にて公表した。また、ファジイ SVM と呼ばれるサポートベクターマシンベースの判別器を実装し、倒産判別分析を試みた。

データ不均衡を解消するためのデータ生成技術についても調査を実施した。生成モデルの一種である拡散モデルの実装を行い、企業データの生成を試みた。

### 〈新たな信用スコアリングモデルの提案〉

Transformer をベースとした判別器をモデルコアとしてもつ信用スコアリング手法の提案を行った。上場企業の信用格付データの予測を，財務時系列情報を入力として実施し，提案手法が既存のスコアリングモデルよりも高い予測精度を示す実証結果を得た。同成果と過年度の成果をまとめた学術論文[1]が出版された。

#### 1.3 今後の課題

25 年度にデータ不均衡を解消する手段として調査を行った拡散モデルについて，それを用いた企業データの生成を行う。生成されたデータの特徴について，主にデータに異常がないかどうかという観点から，確認を行う。生成されたデータを用いた信用スコアリングモデル推定の可能性についても検証を進めたい。

### 論文リスト

#### 1. 原著論文

[1] M. Kofune, K. Monden, S. Yamanaka, Enhancing accuracy and interpretability in corporate credit rating classification with the transformer-LSTM model, Neurocomputing, Vol. 676, 2026, 133026.

#### 2. 国際会議プロシーディング

該当なし

#### 3. 受賞等

該当なし

# 革新的熱輸送デバイスによる サーマルマネージメント技術の構築

研究代表者 機械創造工学科 教授 麓 耕二  
研究分担者 機械創造工学科 助教 畑本 明彩未

## 1.1 研究目的

近年、地球温暖化や環境問題への対応が国際的課題となり、2050年カーボンニュートラル達成に向けてエネルギー効率向上とCO<sub>2</sub>排出削減を実現する技術革新が求められている。中でもサーマルマネージメントは、熱エネルギーの高効率利用を通じて温室効果ガス削減に貢献する重要分野であり、モビリティ、情報通信、電子機器、エネルギー、宇宙、医療など幅広い分野で高度化が期待されている。代表的な熱輸送デバイスであるヒートパイプは、蒸発・凝縮による潜熱輸送を利用し、小さな温度差で大量の熱を輸送できる軽量・高性能な装置として広く活用されている。

このような背景のもと、筆者は2023年に新たな熱輸送メカニズムを有する蛇行型低充填ヒートパイプ（Meander-LowFill Heat Pipe：MLFHP）を発明した。MLFHPは従来の自励振動型ヒートパイプ（PHP）と同様の形状を有しながら、流路表面処理により、従来はドライアウトが生じると考えられていた極低充填率でも安定した熱輸送を可能とする点に特徴がある。一方、大型機器への長距離熱輸送にはループヒートパイプ（LHP）が有望であるが、起動信頼性などの課題を有する。

そこで本研究では、MLFHPやLHPにプラズマアクチュエータやEHDポンプといった流体制御デバイスを組み込み、作動流体や周囲流れを電氣的に制御することで、可制御性を備えた新たな熱輸送デバイスの実現を目指す。これにより、熱エネルギー利用の高効率化と省エネルギー技術の発展に貢献し、多分野への展開を図る。

## 1.2 進捗状況及び成果

これまで、MLFHPに関しては、熱輸送性能に及ぼす充填率、作動流体など各種パラメータの影響が明らかになっている。一方、流路形状に関する検討は行われていない。そこで本年度は、流路幅を変更したMLFHPを対象に熱輸送特性を明らかにすることを目的に研究を行った。具体的には、流路幅が3.0 mm, 1.26 mmの2種類のMLFHPを用いて性能評価を行った。

図1に流路幅3.0 mm, 1.26 mmのMLFHPにおいて加熱量を段階的に変化させたときの時系列温度変化を示す。図1より、加熱部温度が約60°Cの時、幅3.0 mmの方が加熱部と冷却部の温度差が小さくなった。これは流路幅が大きくなることによって圧力損失が小さくなり、冷却部への熱輸送量が増加したためと考えられる。

さらに、加熱部温度が約  $60^{\circ}\text{C}$  を超えると加熱部と冷却部の温度差は縮小した。これは、内部圧力の上昇に伴い、蒸発・凝縮の相変化がより活発に進行することで、加熱部から冷却部への熱輸送が促進され、熱輸送効率が向上したためと考えられる。流路幅  $1.26\text{ mm}$  の MLFHP では、加熱部と冷却部の温度差が拡大するドライアウト現象が確認された。一方、流路幅  $3.0\text{ mm}$  の MLFHP では、加熱部温度が  $120^{\circ}\text{C}$  に達しても安定した温度挙動を示した。これは MLFHP の寸法が大きくなることで、同じ充填率でも液体の絶対量が増加することに加え、熱容量が大きくなるため液体や蒸気の温度変化が緩やかになる。そのため急激な圧力変動が起こりにくく、蒸発、凝縮が安定的に行われ、加熱部への液体供給が安定していると考えられる。

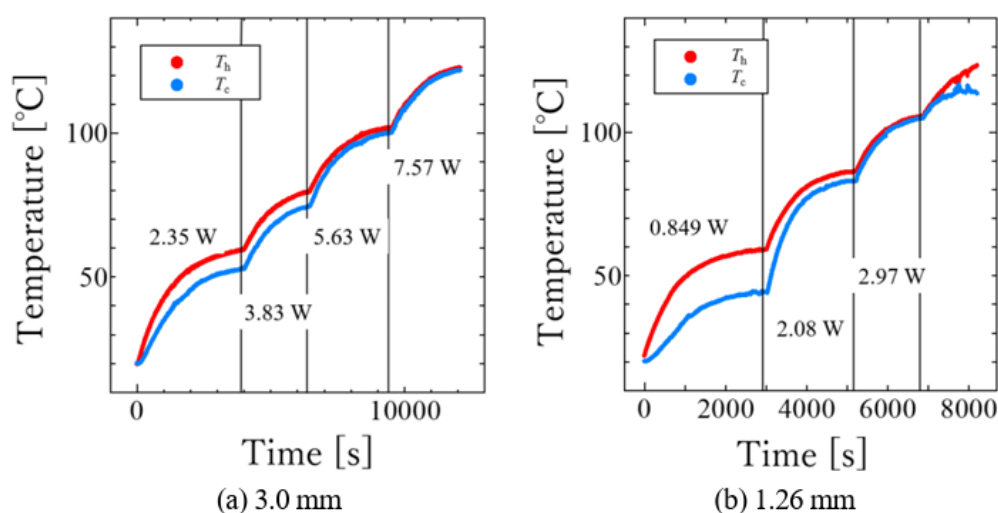


Fig.1 Temperature history.

さらに、MLFHP 内部のさらなる流動挙動の把握を目的として、中性子ラジオグラフィを用いて MLFHP の可視化を行った。MLFHP における流動現象のうち、加熱部への作動流体の還流は未解明であり、先行研究における可視化により液スラグによる還流は生じていないことが示唆されている。そこで本研究では先行研究と比較し、より高分解能なカメラを用い詳細な可視化画像を取得し画像解析を行った。

結果として、液スラグ上昇後にも液膜が流路内に残存している様子が確認できた。また、流路中央部では液膜が映らず、壁面近傍で濃く映っており、液膜は流路の角部に多く存在していると考えられる。本実験で確認された液膜は、重力によって流下し、これが、加熱部への還流の一部を担っていると考えられる。

また、加熱部下部には液が存在しており、時間経過とともに液量が増加した。液量が間壁に達した瞬間、液はスラグ状となって右側の流路へと排出された。この現象は周期的に繰り返されており、高入力熱量において周期は短くなる傾向が見られた。このことから、流路が液体によって一時的に閉塞されることで、圧力の低い方向に液体が吸い上げられていると考えられる。

この周期的な液スラグの動きによって流路壁面に液膜が形成され、蒸発が促進されることで、熱輸送が効率的に行われていると推察される。また、液膜が形成され流下することで還流の一部の役割を担っていると考えられる。

### 1.3 今後の課題

本年度は MLFHP の流路幅が熱輸送性能に与える影響や、作動流体の還流メカニズムについて明らかにした。しかし、本知見は MLFHP を重力方向に垂直に設置した場合のものである。今後は設置姿勢を変更し、重力方向が性能に与える影響を調査する。また、未発表の EHD ポンプやプラズマアクチュエータに関する研究成果を発表することに加えて、更なる性能向上に向けた研究に取り組む。

## 論文リスト

### 1. 原著論文

- ① Shiokawa, Atsushi, Asami Hatamoto, and Koji Fumoto. "Effect of working fluid on heat transfer characteristics of meander-shaped low-fill heat pipe." *Journal of Thermal Science and Technology* 20.2 (2025): 25-00165.
- ② Fumoto, Koji, et al. "Experimental visualization of liquid slug dynamics in a meander-shaped low-fill heat pipe using neutron radiography." *Journal of Visualization* (2025): 1-12.
- ③ Yazaki, Eiji, Asami Hatamoto, and Koji Fumoto. "Effect of Cooling Conditions on Heat Transport Performance of a Meander-Shaped Low-Fill Heat Pipe." *Journal Name: Journal of Fluid Flow* 12 (2025).

### 2. 国際会議プロシーディング

なし

### 3. 受賞等

なし

# X線回折法を用いた局所応力評価に基づく

## 材料強度評価手法の開発

研究代表者 機械創造工学科 准教授 蓮沼将太  
研究分担者 機械創造工学科 助教 早瀬知行

### 1.1 研究目的

材料強度を評価するうえで局所的に生じている応力を評価することは重要である。例えば、機器の破壊は応力集中部から発生するため、応力集中部に生じている局所的な応力を評価することが求められる。また、ショットピーニング(SP)や浸炭焼入れ、溶射などは、材料表面の特性を変化させることで材料の強度を向上させる処理である。このような表面改質層の力学特性や残留応力を把握することは重要である。しかし、応力集中部や改質層などの局所的な応力を測定することはできない。そこで、本研究ではX線回折法に注目した。X線回折法はX線を材料に照射し、そのX線の回折から格子ひずみを測定する手法である。この格子ひずみにX線弾性定数を乗ずることで応力を求めることができる。X線の照射範囲は2mm以下であり、侵入深さは数 $\mu\text{m}$ と浅い。そのため、X線回折法を用いることで応力集中部の局所的応力、表面改質層の応力ひずみ関係を測定可能だと考えられる。

本研究ではX線回折法を用いた局所応力評価により、材料強度評価を高精度にすることを目的にした。X線回折画像相関ハイブリット法による応力—ひずみ同時測定法を用いた応力分布ひずみ分布同時測定、X線回折法を用いた表面改質層の応力ひずみ関係評価、溶射被膜のX線弾性定数評価法の開発を通じて材料強度評価の高精度化を目指す。2025年度はX線回折法を用いた表面改質層の応力ひずみ関係評価手法の検討を行ったので、その結果について報告する。

### 1.2 進捗状況及び成果

供試材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L を用い、試験片には板材を用いた。試験片形状を図1に示す。曲げ試験片には、66mm×6mmの面のうち向かい合う2面にSPを施したほか、レーザーピーニング(LP)を施した試験片も作製した。以後、LP材と呼ぶ。

実験装置の概略図を図2に示す。図に示すようにボルトの締結力で試験片に4点曲げを行う。その際、SP層に引張ひずみが生じるように試験片を設置する。また、圧縮側表面にひずみゲージを貼付し、4点曲げ中の表面ひずみを測定する。測定した表面ひずみは圧縮側であるが、上下対称であるため引張側(X線照射面)と絶対値がおおよそ等しいひずみが得られる。本研究では、所定のひずみにて負荷中に途中止めし、各ひず

みにおける離散的な表面改質層の引張側表面の応力を X 線回折法によりその場測定する。これらの測定点に対する近似曲線を得ることで表面改質層の応力ひずみ関係を評価する。残留応力の測定には、X 線回折装置を用いた。

図 3 に SP 材と LP 材の試験結果の比較を示す。縦軸は X 線回折装置で計測した長手方向の残留応力、横軸はひずみを表している。SP 材でも LP 材でも荷重負荷前には圧縮の応力が生じている。表面改質によって生じた圧縮残留応力の影響だと考えられる。応力が小さい場合、応力とひずみの関係は直線関係であった。表面改質層が弾性変形の範囲であるためであると考えられる。その後、応力が 500 MPa 程度になると応力ひずみ関係の傾きが変化した。負荷した応力が表面改質層の降伏応力に達し、塑性変形が生じたためだと考えられる。このような特徴は、一般的な金属材料の応力ひずみ関係の特徴と一致している。

本研究と同じオーステナイト系ステンレスである SUS316L に対し切削加工を行い、表面加工層の応力ひずみ関係を推定した結果を図 4 に示す。SP 材や LP 材の応力ひずみ関係は母材層の応力ひずみ関係と比べ高強度側であった。表面改質による硬化の影響だと考えられる。また、塑性変形層の応力ひずみ関係は SP 材や LP 材の応力ひずみ関係とほぼ一致している。SP や LP は材料に塑性変形を発生させる表面改質であるため、本研究の結果は塑性変形層の応力ひずみ関係と一致したと考えられる。一方で、微細粒層の応力ひずみ関係は SP 材や LP 材の応力ひずみ関係よりも高強度側であった。一般的に、微細粒化による高強度化の方が塑性変形の加工硬化による高強度化よりも効果があると言われており、その傾向が表れていると考えられる。

以上のように、本研究で測定した SP 層および LP 層の応力ひずみ関係の特徴は一般的な金属材料の特徴と一致していた。また、SP 層および LP 層の応力ひずみ関係は塑性変形層の応力ひずみ関係と一致していた。一方で、微細粒層の応力ひずみ関係は SP 材や LP 材の応力ひずみ関係よりも高強度側であり、一般的な傾向と一致している。以上のことから本研究の提案手法は妥当であると言える。

### 1.3 今後の課題

提案手法から求めた応力ひずみ関係を、インデンテーション試験から求めた応力ひずみ関係と比較することで、提案手法の妥当性をさらに検証する。また、本研究では長手方向応力しか測定していなかったが、材料の降伏現象には幅方向応力も影響する。そのため、幅方向応力を測定した上で相当応力を用いて応力ひずみ関係を評価するのが今後の課題である。

以上のような表面改質層の応力ひずみ関係評価手法の検討に加え、X 線回折画像相関ハイブリット法による応力-ひずみ同時測定法を用いた応力分布ひずみ分布同時測定、溶射被膜の X 線弾性定数評価法の開発も進めていく予定である。

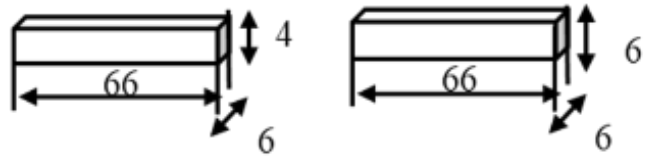


Fig. 1. Specimen shape.

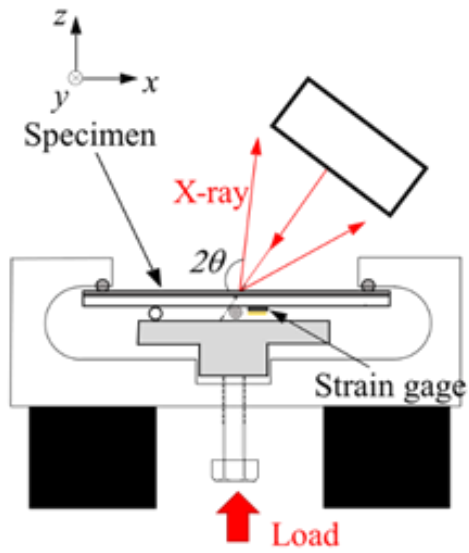


Fig. 2. Illustration of four-point bending test.

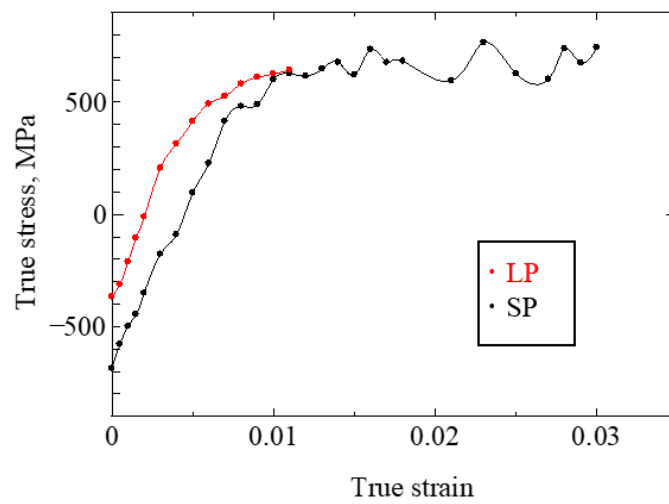


Fig. 3 Stress-strain relationship obtained by proposed method.

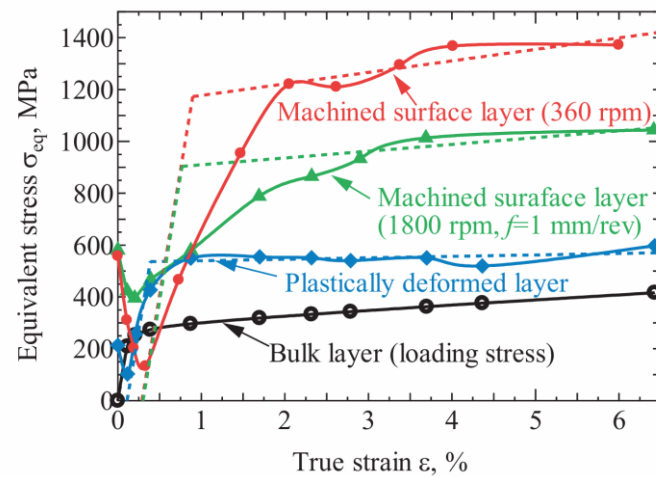


Fig. 4 Stress-strain relationship of machined surface layer.

## 論文リスト

### 1. 原著論文

(1) Tomoyuki Hayase, Shota Hasunuma and Hiroyuki Waki, Influence of thermal treatment on relationship between X ray and mechanical elastic constants in thermal barrier coatings, Journal of the Society of Material Science, Japan, accepted.

### 2. 国際会議プロシーディング

なし

### 3. 受賞等

なし



---

## CAT支援による若手研究者出張報告

---



## 25th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2025) 参加報告

理工学部電気電子工学科 助教 佐藤 佑樹

1. 日程：2025年6月22日～6月26日

2. 行先：ナポリ・イタリア

3. 報告・成果等

2025年6月22日から6月26日にかけて、IEEE Magnetics Society主催の25th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2025)に参加した。本会議は、電磁界解析分野における世界最高峰の国際会議の一つであり、欧州・米国・アジアをはじめとする世界各国から研究者・技術者が一堂に会し、最新の研究成果について発表および討論が行われる国際的な学术交流の場である。

本会議では、私および学生2名の計3件について発表を行った。いずれもパワーエレクトロニクス回路で使用される磁気部品の高精度モデリング技術、設計技術に関する研究である。発表では、私および学生の発表ともに終始多くの聴講者に恵まれ、途切れることなく活発な質疑応答が続いた。本研究の国際的な関心の高さを実感するとともに、今後の研究展開に向けた有益な示唆を多数得ることができた。

本会議期間中には、Galileo Ferraris Contest と呼ばれる機械学習コンテストが開催された。本コンテストは、モータの特性予測を機械学習によりどのように高精度に実現するかを競う国際大会であり、海外から約20チームが参加した。私は本コンテストにもエントリーし、その結果、アカデミア部門 (Novelty Category) において優勝することができた。授賞式にも出席し、本研究の新規性および学術的貢献が国際的に評価されたことは、大きな成果であると考えている。

開催地であるイタリア・ナポリは、歴史と文化に富んだ都市であり、特に本場のナポリピザは非常に印象的であった。会場は地中海を望む立地にあり、学会終了後には学生や研究者と海沿いを散策しながら研究議論を継続する機会にも恵まれた。こうした非公式の交流は、共同研究の萌芽形成や将来的な連携構築において極めて重要であり、非常に有意義な経験となった。

本出張は、CAT 若手出張支援制度のご支援により実現したものである。本制度がなければ、本国際会議へ参加することは困難であったと考える。ここに、貴重なご支援を賜りました関係各位に対し、深く感謝申し上げます。



図 1 学会会場の前の地中海



図 2 D1 学生によるポスター発表

TCM-TOEO 2025 Conference (10<sup>th</sup> International Symposium on Transparent Conductive Materials & 14<sup>th</sup> International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics) 参加報告

化学・生命科学科 助教 キム ミンソク

1. 日程：2025年10月19日～23日

2. 行先：クレタ島 レティムノ、ギリシャ

3. 報告・成果等

透明酸化物半導体 TCM-TOEO 2025 Conference の国際会議は、2025年10月19日から10月23日までギリシャのクレタ島レティムノで開催され、研究成果の発表、情報収集、海外研究者との意見交流を目的に参加しました。

この学会は透明電極、機能性酸化物、酸化物半導体などに関連して多くの研究者が集まって発表をしています。この学会で私は機能性酸化物薄膜を利用した酸素並びに水蒸気のバリアー性能の新規測定方法に関する発表を行いました。研究に関して、種々の薄膜における気体分子の拡散や機能性酸化物薄膜の物性に関する様々な質問があり、異なる分野の研究者とも機能性酸化物について議論することができました。この発表を通じて論文に投稿できるだけの成果を示し、論文を作成できる機会を得ました。

また、以前から存じ上げていた国内外の大学教授の方々と、多様で新しい研究分野に関するコラボレーション等の有意義な交流を持つことができました。

飛行機に乗る時から発表前日まで緊張していましたが、緊張を緩めることなく無事に発表を終えることができました。クレタ島はヨーロッパ文明発祥の地とされていますが、現在はヨーロッパの人たちがリゾート地としてリラックスしに来るところなので、治安が比較的良かったですし、研究に関するディスカッションに集中できる良い環境だと思いました。天気も晴れて発表が終わった後の夕方に会議場の周辺を簡単に歩き回ることができました。「神々の愛でし海」であるエーゲ海に沈んでいく夕陽を眺めながら本会議に参加することで多くの収穫を得ることができたことを実感しました。

CAT 若手出張旅費支援の制度がなければ本会議への参加は実現しませんでした。本制度によるご支援に厚く御礼申し上げます。



図1 学会バンケットの風景



図2 別の口頭発表を行った院生



図3 TCM-TOEO 2025 Conference の国際会議 団体写真



---

## 成果報告会について

---



## 「2025 年度 CAT 研究成果報告会」開催報告

理工学部附置先端技術研究開発センター所長 北野 晴久

2025 年度は、コースパワー上で「CAT 研究成果報告会」を開催した。

コースパワーには、今年度の研究成果をまとめた 34 件のポスターを掲示し、理工学部全教員に公開された。

また、学生が作成したポスターについて CAT 運営委員で評価をおこない、以下の 6 名が 2025 年度 CAT 優秀研究報告賞に選出された。

☆ 堀田 唯音

カーボンナノチューブ/シルク複合繊維の引張強度および電気・熱伝導性

☆ 野尻 将太

B 過剰プリカーサを用いた拡散法による高臨界電流特性 MgB<sub>2</sub> バルクの作製

☆ 青木 一浩

細胞は空間を認識するか？マイクロ溝パターンでの細胞の挙動解析と相互相関による空間応答の定量化

☆ 大久保 虎之介

Approaches to fabricate the high-performance all-solid-state electrochromic windows

☆ 宮城 太一

Influence of sputtering pressure on the properties of Cs<sub>2</sub>O films N<sub>2</sub> Introduction in the rf magnetron sputtering process to deposit type Cs<sub>2</sub>O films

☆ 山下 幹裕

CVD グラフェンを利用したフレキシブルなエレクトロクロミックデバイスの作製と評価

青山学院大学工学部附置先端技術研究開発センター

2025年度研究成果報告書

2026年3月 発行

発行所 青山学院大学工学部附置先端技術研究開発センター  
〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺5-10-1  
Tel 042-759-6056 (ダイヤルイン)  
Fax 042-759-6042

