

目 次

「2024 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	
—2022 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日（3 年間）—	
◆ 研究代表者：北野 晴久 理工学部教授 「超伝導微細加工素子を用いた精密物性測定と量子デバイスへの応用」	3
◆ 研究代表者：麓 耕二 理工学部教授 「多機能性を有する熱流体の伝熱・流動メカニズム解明と それによる革新的熱エネルギー輸送システムの構築」	8
◆ 研究代表者：蓮沼 将太 理工学部准教授 「X線回折法を用いた新たな材料強度評価法の開発」	12
—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開発」	19
◆ 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」	23
—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」	27
—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索のための宇宙広視野 X 線モニターの開発 III」	30
◆ 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」	33
◆ 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」	37

◆ 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」	----- 40
◆ 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」	----- 43
◆ 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」	----- 45
◆ 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」	----- 50
◆ 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」	----- 54
◆ 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」	----- 58
◆ 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」	----- 62
◆ 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」	----- 64
◆ 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」	----- 68
◆ 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」	----- 74
◆ 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」	----- 79
CAT 支援による若手研究者出張報告	----- 84
成果報告会について	----- 87

「2024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

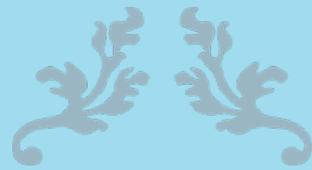
青山学院大学理工学部附置先端技術研究開発センター（Center for Advanced Technology: CAT）の2024年度研究成果報告書を刊行いたします。

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され、選定された20件のCATプロジェクトが実施されると共に、CAT実験室を使用するCATプロジェクト代表者から研究装置の専有面積に応じた使用料徴取を開始し、CAT実験室の持続的機能化に向けた体制を整えました。さらに、科学技術振興機構（JST）の「さきがけ」プログラムや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）の先導研究プログラム/未踏チャレンジに各々1件ずつ、CATプロジェクトに参画する若手研究者が採択され、CATを拠点とする外部資金研究プロジェクトの精力的な遂行を通じ、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を展開しております。

近年では、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い、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おります。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の一層の発展に貢献していきたいと考えています。



研究成果等概要



超伝導微細加工素子を用いた精密物性測定と 量子デバイスへの応用

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、超伝導の応用分野では2つの新たな動きが活発化している。1つは、量子コンピューターの動作原理を実現するジョセフソン量子ビットを実装する超伝導量子回路の開発であり、もう1つは、超伝導転移における非線形な応答特性や半導体バンドギャップよりも小さい超伝導ギャップを用いて高エネルギー分解性能を実現する高感度超伝導センサーの開発である。いずれの場合も従来のBCS超伝導体薄膜の微細加工素子が用いられる。一方、物質科学の分野では、半世紀以上前に確立したBCS理論では想定されてなかった新しく多様な超伝導状態が様々な物質系で実現され、特に際立つ物性としてトポロジカル超伝導やマヨラナ準粒子束縛状態に関する新たな物理とその応用が活発に議論されている。

本研究プロジェクトでは、従来超伝導体を基本とする現在の超伝導素子の性能を大きく上回るだけでなく、トポロジカル量子物性などの新たな物理を量子デバイスにも応用し得る有力候補として、強相関電子系の銅酸化物超伝導体と鉄系超伝導体に着目する。我々が得意とする高品質単結晶試料への微細加工技術を駆使しつつ、超伝導素子の形状や特性を活かした精密物性測定により未知の量子物性を解明し、新たな量子デバイスの開発を目指す。

1.2 進捗状況及び成果

最終年度となる今年度は、鉄系超伝導体単結晶から作製される微細加工素子を用いた対破壊電流密度測定に関して2つの大きな成果が得られた。以下で詳しく述べる。

(1) Ba122 単結晶の微小ブリッジ素子における面間対破壊電流密度

本プロジェクト開始前の2021年度から取り組んできた鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ (以下、P-doped Ba122 と略記) 単結晶の微細加工素子を用いた研究において、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で昨年度までに得られた成果を米国物理学会の学術雑誌に発表した(2024年9月)。P-doped Ba122 は、As サイトの P 置換に伴う化学圧力の変化により、母物質の反強磁性秩序が破れて高温超伝導が出現し、銅酸化物超伝導体の電子相図解明につながる系として精力的に研究

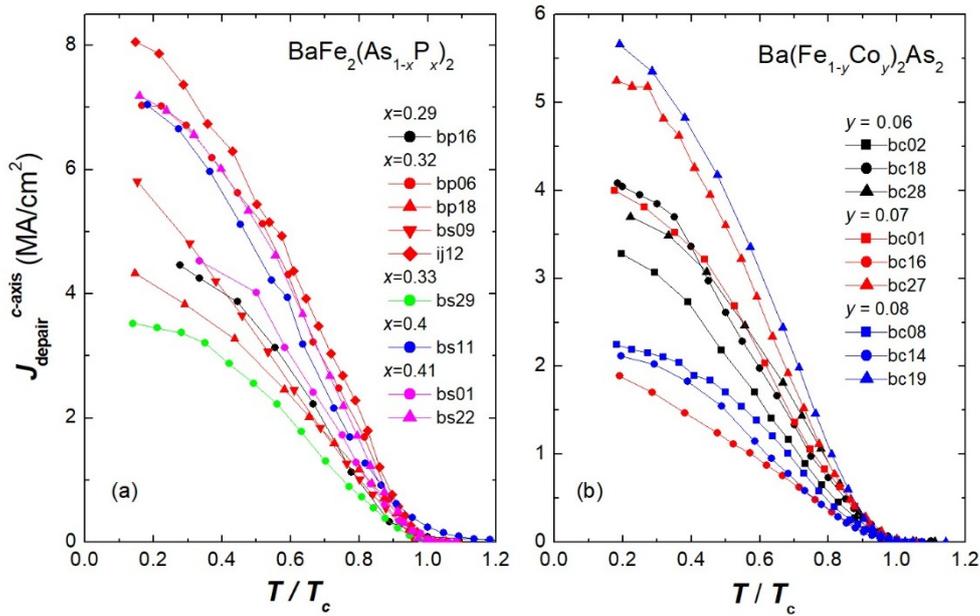


図1 (a) P-doped Ba122 および(b) Co-doped Ba122 の微小ブリッジ素子を用いて測定された面間対測電流密度の温度依存性

されてきた。現在までに反強磁性秩序と超伝導秩序の量子臨界点近傍で有効質量の特異な増大を示唆する磁場侵入長の挙動や磁束フローに起因するデピニング臨界電流密度の特異な増大が報告されている。

今年度は、昨年度までの研究をより広い組成範囲 ($x=0.27-0.41$) に広げると共に、関連する別の鉄系超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)_2\text{As}_2$ (以下、Co-doped Ba122 と略記) の最適ドープ領域近傍 ($y=0.06-0.08$) に拡大し、2つの物質系で得られる面間対破壊電流密度のキャリア濃度依存性を詳しく調べた(図1)。ここで、各素子の P 濃度および Co 濃度は、単結晶への微細加工で得られる微小ブリッジ部分に対する SEM-EDX 解析から評価した。このような微小領域の EDX 解析は初めての試みであったため、まず、Co-doped Ba122 に対する微小ブリッジ部分の評価結果がバルク試料と定量的に一致することを確認した。この検証で得られた手法を基に P-doped Ba122 に対する EDX 解析から、FIB 微細加工に伴う微量な P 欠損の発生を発見した。これは、不足ドープ組成領域の P-doped Ba122 微小ブリッジ素子における常伝導特性や超伝導特性の変化を定性的に説明する。Co-doped Ba122 に対する研究成果を 2025 年 2 月開催の鉄系超伝導体国際ワークショップ (IBS2app 2925) で口頭発表し、参加者からの強い関心を得た。現在、過去の理論研究に立ち戻り、対破壊電流密度の支配因子を再吟味すると共に、得られたキャリア濃度依存性から得られる物理描像を考察し、Ba122 系電子相図で報告された異常挙動との関連を調査中である。得られた知見を来年度夏に開催予定の低温物理国際会議 (LT30) で発表すると共に、学術論文として投稿する予定である。

(2) 剥離法で得られる $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$ 単結晶フレークの作製と面内対破壊電流密度

鉄カルコゲナイド超伝導体 $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$ は、トポロジカル超伝導体の有力候補物質であ

るだけでなく、圧力印加や化学的インターカレーションなどにより、超伝導転移温度が約 10 K から約 40 K まで比較的容易に急上昇する。したがって、応用上最も重要な鉄系超伝導体である。我々は、上述の Ba122 単結晶微小ブリッジ素子を用いた面間対破壊電流密度測定に成功する以前に、同様な手法で $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2-0.4$) 単結晶の面間対破壊電流密度測定に成功した後、直ちに面内方向の対破壊電流密度測定に着手した。しかしながら、層状結晶構造に起因する異方的特性のため、面間よりも面内の方がさらに断面積の小さい微小ブリッジ素子の作製が求められ、我々が得意とする集束イオンビーム (FIB) 微細加工だけで作製すると、ブリッジ断面積が $1\mu\text{m}^2$ 以下の微小面内素子では加工ダメージに伴う超伝導特性の劣化が著しく、対破壊電流極限に到達しないことが 2020 年度末までに判明した。

この限界を超えるべく、本研究プロジェクトではグラフェンの作製手法に着目し、粘着テープで結晶表面を機械的に剥離し、厚さが数十 nm～数百 nm 且つ一辺が数十 μm

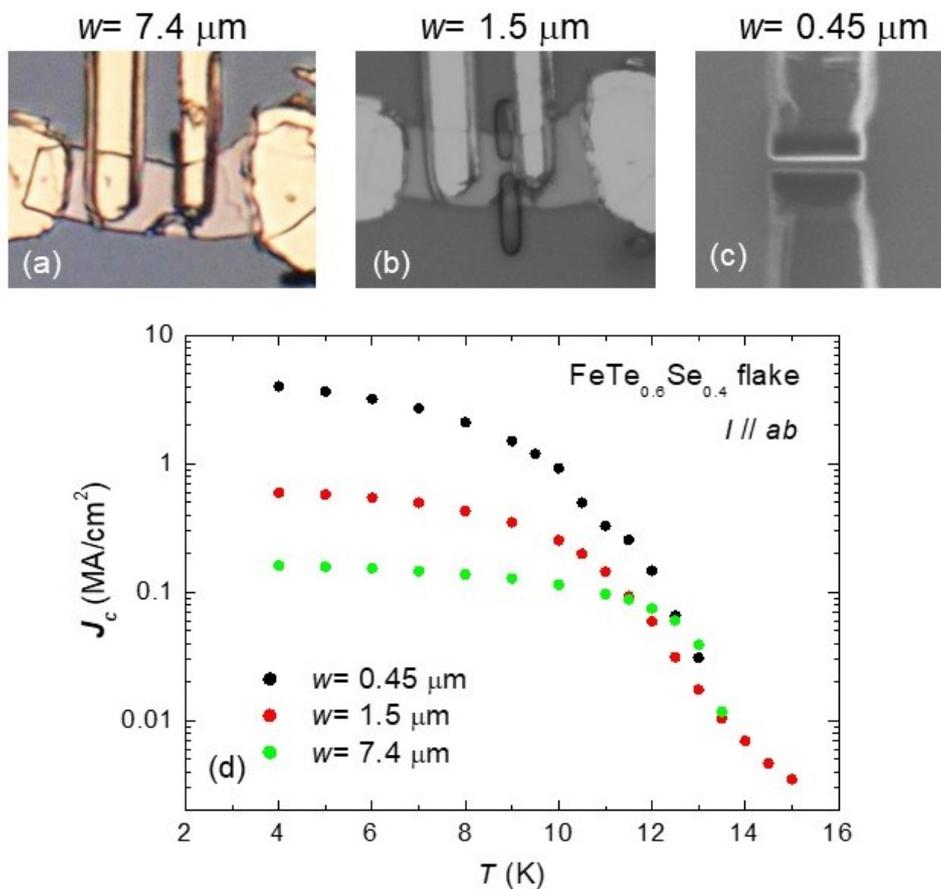


図 2 (a) $\text{FeTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 微小フレイク素子 (試料幅 $7.4\mu\text{m}$ 、膜厚 115nm) (b) Ar ミリング後の微小ブリッジ素子 (ブリッジ幅 $1.5\mu\text{m}$) (c) FIB 追加工後の微小ブリッジ素子 (ブリッジ幅 $0.45\mu\text{m}$) (d) 3 つの素子に対する面内臨界電流密度の温度依存性

の微小単結晶フレーク試料を作製すると共に、その微細加工による面内微小ブリッジ素子の臨界電流密度測定に取り組んできた。昨年度までに、マスクレス LED 露光法による微小フレーク試料への微小電極作製と FIB 追加工による面内微小ブリッジ素子の作製を達成したが、電流電圧特性から測定される臨界電流密度は対破壊極限に到達していなかった。今年度は、まず、探針型段差計やレーザー顕微鏡よりも膜厚測定における空間分解能に優れた原子間力顕微鏡 (AFM) による微小フレーク試料の膜厚測定に取り組み、AFM 測定時の困難が微小フレークの位置特定と微小電極の形成に由来する巨大段差の影響にあることを突き止めた。この問題を回避すべく、フレーク試料上の微小電極作製手順を見直した結果、4 端子測定用の微小電極を一度に作製せず、初めに試料両端の電流電極と試料位置の特定に利用可能な周辺電極を作製してから AFM 測定することで、上記の困難を解決し高精度な膜厚測定を達成した。さらに、AFM 測定後、内側の電圧端子を 1 つずつ 2 回に分けて作製することでリフトオフ時の微小電圧端子の連結事故を避けることに成功した。これにより、微小フレーク試料への電極作製における歩留まりが 26% から 50% に向上すると共に、電圧端子の電極幅を $10.5\ \mu\text{m}$ から $3.4\ \mu\text{m}$ まで縮小することに成功した (図 2 (a))。

一方、微小ブリッジ加工について、従来の FIB 加工から Ar ミリング加工への変更を検討した。これは、前者に比べて後者は、イオン加速電圧が 1 桁小さく、化学的不活性なイオンを照射するため、ブリッジ加工に伴う超伝導特性の劣化を最小限に抑えられると期待されるからである。マスクレス LED 露光法を用いて保護用レジスト膜を作製し、加速電圧 4 kV、照射時間 10 分で Ar ミリングし、幅 $1.5\ \mu\text{m}$ の面内ブリッジ素子を作製した結果 (図 2 (b))、初めてフレーク試料の臨界電流密度を上回る面内臨界電流密度が得られた。さらに、Ar ミリング時の保護レジスト膜を残したまま FIB 追加工することにより、約 $0.45\ \mu\text{m}$ までブリッジ幅を小さくした結果 (図 2 (c))、初めて面間の対破壊電流密度を数倍上回る面内臨界電流密度 (約 $4\ \text{MA}/\text{cm}^2 @ 4\ \text{K}$) の測定に成功した (図 2 (d))。これは、従来の FIB 加工では保護されてなかった微小ブリッジ表面がレジスト膜で保護された効果と考えられる。臨界電流密度の温度依存性を対破壊電流密度の微視的理論計算 (KL 理論) と比べると、 $T=0.3\ T_c$ から $T=0.5\ T_c$ の低温領域で定量的に一致する結果を得た。また、現象論 (GL 理論) との解析から得られる見積値が、別測定から評価された値と同程度であると確かめられ、遂に Fe(Te,Se) 超伝導体の面内対破壊極限に到達したことが強く示唆された。今後、再現性を検証し、学術論文への投稿を準備すると共に、フレーク試料の膜厚に応じた Ar ミリング加工条件の最適化を目指す予定である。

1.3 総括

本研究プロジェクトでは、鉄系超伝導体単結晶の微細加工素子を用いた対破壊電流密度測定において、当初の予想を上回る大きな成果を得ることが出来た。従来の対破壊電流密度測定では、人工的に作製された超伝導薄膜試料の微細加工に立脚せざるを得ず、薄膜作製時に導入される乱れに強く影響された結果しか得られなかった。また、

Kupriyanov と Lukichev による微視的数値計算 (KL 理論) との定量的な一致に関する議論もごく一部の報告に限られ、対破壊電流領域における非平衡超伝導の詳細は未解明のままであった。これに対し、我々が得た成果は、乱れの影響が格段に小さい高品質単結晶をベースとし、層状超伝導体の異方的特性や結晶のへき開性を巧みに活かして低温領域まで KL 理論との一致を議論できる対破壊電流密度の測定に成功しており、非常に画期的である。

今後の展望として、まず、現在取り組んでいる Ba122 鉄系超伝導体における詳細なキャリア濃度依存性の議論から対破壊電流密度を決める微視的パラメーターの変化を追跡することで、鉄系超伝導体の超伝導発現機構に関する新たな知見が得られる可能性が期待される。次に、Fe(Te,Se)単結晶フレークの作製手法を FeSe 単結晶に適用すると共に、原子層物質研究で多用される PDMS 接着技術と組み合わせた薄膜化の推進により、面内対破壊電流密度の測定精度向上だけでなく、ファンデルワールス接合を含む新たな超伝導微小接合素子を用いた新奇物性探索が期待される。来年度から着手する新プロジェクトでは、上記に加え、準結晶系微小試料の基礎物性評価に本研究で培われた微細加工技術を駆使していく予定であり、すでに予備的成果を得ている。

本研究プロジェクトにおいて、当初の予想よりも進展しなかった内容のうち、最重要と思われる Fe(Te,Se)超伝導体で期待されるトポロジカル超伝導の発現に関しては、Fe サイトを Co 置換した電子ドーパ試料の高品質化を目指したが、Co 置換試料の過剰鉄除去で困難に直面した。今後は、FIB ピックアップ法で得られる Co 置換試料の微小結晶片および原子層レベルまで薄膜化した Co フリー単結晶フレークへの電界キャリア注入に的を絞り、引き続きトポロジカル超伝導発現に挑戦する。トポロジカル超伝導の量子物性探索では、現在 (約 4 K) よりさらに低温領域 (2 K 以下) の実験実施が必須と予想されるため、2025 年度中にヘリウムガス循環システムを導入し、今年度導入した新規冷凍機と組み合わせた極低温測定環境を整備していく予定である。

論文リスト

1. 原著論文

[1] Y. Mizukoshi, K. Jimbo, A. Park, Y. Sun, T. Tamegai, H. Kitano, “Normal-state resistivity and the depairing current density of BaFe₂(As,P)₂ nanobridges along the *c* axis”, PHYSICAL REVIEW B **110**, 104501 (2024).

2. 国際会議発表

[1] S. Suzuki¹, Y. Mizukoshi¹, S. Ishida, H. Eisaki, Haruhisa Kitano, “Depairing current density in the *c*-axis microbridge devices of Co-doped BaFe₂As₂ single crystals”, Iron-based Superconductors: Advances towards applications 2025 (IBS2app 2025), CO-09 (2025 年 2 月)

3. 受賞等

なし

多機能性を有する熱流体の伝熱・流動メカニズム解明と それによる革新的熱エネルギー輸送システムの構築

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

近年の情報化・ネットワーク社会の進展に伴い、各種デバイスに対する革新的なサーマルマネジメント技術（主に放熱・排熱技術）の開発が進められている。加えて、昨今の地球温暖化をはじめとする環境問題に起因するエネルギー問題の一助として熱制御の高度化および更なる進展が望まれている。このような背景を踏まえて本研究では主に多機能性を有する熱媒体の開発に取り組んでいる。多機能性媒体に関しては、感温磁性流体をマイクロカプセル化し、水中に懸濁させた磁性流体（Microencapsulated Temperature-sensitive Magnetic Fluid, 以下 MTMF）および相変化物質を液中に懸濁させたエマルジョン型蓄熱材は、従来の顕熱を利用した熱輸送媒体に代わる、高効率な熱輸送媒体として期待されている。これらの機能性熱流体は、液中に分散質となる磁性マイクロカプセルあるいは相変化物質を分散させているため、分散質の磁化の温度依存性や、融解・凝固に伴う密度変化により、非常に複雑な対流場が形成される。このため、いずれの機能性流体においても、伝熱特性や流れ場についての十分な知見が得られていないのが現状である。

本研究プロジェクトでは、多機能性を有する媒体の熱伝達伝熱・流動特性を実験的・解析的に解明することを目的とする。具体的には冷媒がカプセルを含むスラリー状となることを想定し、相変化物質(Phase Change Material, 以下 PCM)カプセルの高性能化に着目した。本年度は、磁性粒子を含有した多機能カプセルの作成方法を確立し、多機能カプセルスラリーの熱伝達率を評価することを目的とし研究を進めた。

そのために、カプセル化に及ぼす PCM と磁性粒子の体積比の影響を明らかにし、作成した多機能カプセルの融解点や凝固点を測定することで磁性粒子の封入による蓄熱性能への影響を調査した。また、多機能カプセルを含むスラリーの自然対流下での伝熱特性および磁場印加による熱伝達率の改善率を評価した。

1.2 進捗状況及び成果

PCM と磁性粒子の体積比が 100:0.5, 100:1, 100:2 になるように調整して走査電子顕微鏡でカプセルの外観を観察した結果を図 1 に示す。体積比 100:0.5, 100:1 の時にはナノスケールで球形をしたカプセルが観察され、体積比 100:2 では、球形ではない粒子同士が凝集した大きな物体が多く観察された。これは粒子の濃度が増加することでカ

プセル調整時の分散性が低下したことが原因として考えられる。また、示差走査熱量計 (Differential Scanning Calorimetry : DSC) を用いた相変化温度測定を行った結果を図 2 に示す。体積比 100:1 のとき、凝固点と融解点が PCM と有意な差が生じていないことがわかった。よって、カプセル内に磁性粒子を含有させたときの蓄熱性能への影響は小さいといえる。これらの結果から、球形でナノサイズであることでスラリー化した時に流動性の低下を抑制できる上に磁性粒子の含有率が多いほど外部磁場による対流促進を期待できることから、PCM と磁性粒子の体積比は 100:1 が適するといえる。

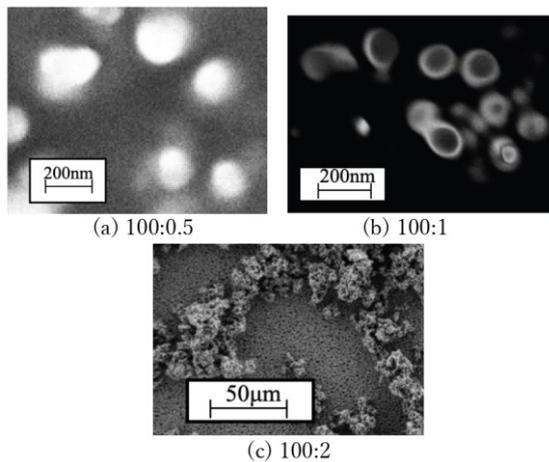


図 1 多機能カプセルの外観

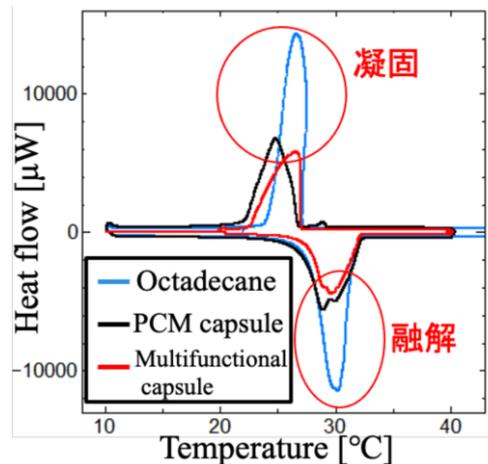


図 2 DSC 曲線の比較

次に、多機能カプセル濃度が 0, 1, 5, 8 vol.% のスラリーについてヒーターからの熱流束を変化させて伝熱評価を行い、0 vol.% の場合に対するヌセルト数の増加率を算出した。その結果、5, 8 vol.% のスラリーではいずれの熱流束においてもヌセルト数は増加し、8 vol.% の時に最大で 8.3% の増加が確認された。また、熱流束が増加するにつれてヌセルト数は増加した。これは、加熱壁の温度が増加することで、より多くのカプセルが融解して伝熱が促進したためと考えられる。一方、1 vol.% においてはカプセルの濃度が薄いため、顕著な伝熱促進の効果が見られなかった。さらに、追実験として PCM の融点以上の環境で同様の測定を行った結果、ヌセルト数の増加は見られなかった。よって、ヌセルト数が増加した要因が PCM の相変化によるものであることを確認できた。

最後に、カプセルの体積濃度が 8 vol.% の多機能カプセルスラリーの磁場印加状況下での伝熱特性を評価した。その結果、磁場を印加すると加熱壁と冷却壁の温度差が増大し、熱交換が劣化した。これは磁気モーメントの相互作用で鎖状クラスターが形成されたことによる見かけの粘度が増加したことが原因として考えられる。ただし、磁石の位置によって伝熱特性が変化することも明らかになっており、磁場の形状を最適化することで伝熱性能を向上できる可能性が示唆された。

1.3 総括

本プロジェクトでは、高効率な熱輸送媒体として期待されている、多機能性を有するマイクロカプセルの伝熱・流動特性の解明に取り組んできた。結果として、相変化物質である PCM と磁性粒子を含有する多機能カプセルの合成に成功した。また、その熱物性値や潜熱を測定し、磁性粒子を混合した場合も PCM カプセルと同様に高い伝熱性能を有することを明らかにした。さらに、多機能カプセルから作成したスラリーに外部から磁場を印加することで、多機能カプセル内の磁性粒子が磁場の影響を受け、伝熱性能が変化することを示した。よって、磁場の形状を変えることで、多機能カプセルの伝熱性能を外部からコントロールできると考えられる。これらは昨今のエネルギー問題を解決する熱制御技術の発展に資する知見である。

論文リスト

1. 原著論文

- ① Enhanced thermal conductivity of fluids by percolating high-concentration few-layer graphene, K. Ishii, T. Ogiyama, K. Fumoto, Y. Nishina, *Applied Physics Letters* 125(2) 2024.
- ② 磁気ハイパーサーミアにおける生体等価寒天ファントム内部温度評価, 久保田竜平, 麓耕二, 日本機械学会論文集, Vol. 90, No. 931, 13 p., 2024.
- ③ 低封入率型自励振動ヒートパイプの熱輸送性能に関する基礎的研究 (設置姿勢が熱輸送性能に及ぼす影響), 堤内駿介, 石井慶子, 麓耕二, 日本機械学会論文集, Vol. 90, No. 930, p. 13, 2024.

2. 国際会議プロシーディング

- ① Hatamoto, A., Fumoto, K., Nishida, H., “Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator in External Flow”, *AIAA SciTech 2025 Forum*, AIAA- 2025-2702, Jan. 2025.
- ② K. Fumoto, K. Okubo, S. Oshima, A. Hatamoto, K. Kurita, I. Harayama and H. Iikura, “Visualization Study of a Unique Heat Transfer Mechanism in an Ultra-Low Fill Rate Heat Pipe with a Single Serpentine Channel Resembling Pulsating Heat Pipes”, *Joint 22st International Heat Pipe Conference and 16th International Heat Pipe Symposium*, Nakhon pathom, Thailand, 24-28th, Nov. 2024.
- ③ A. Shiokawa, A. Hatamoto and K. Fumoto, “Evaluation of Heat Transfer Characteristics in Pulsating Heat Pipes under Ultralow Filling Ratios: Effect of the Working Fluid Type”, *Joint 22st International Heat Pipe Conference and 16th International Heat Pipe Symposium*, Nakhon pathom, Thailand, 24-28th, Nov. 2024.
- ④ E. Yazaki, Koji Fumoto, “Effect of Heat Exchange Ratio on Heat Transport Performance of Miniatured Low Filling Ratio Heat Pipe”, *The Third Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS 2024)*, Jun 2024.

- ⑤ Y. Kaneko, Koji Fumoto, “Evaluation of Affected Area Temperature Considering Blood Flow in Magnetic Fluid Hyperthermia”, The Third Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS 2024), 23-27 Jun 2024.
- ⑥ H. Hanada, K. Ishii, Koji Fumoto, “Synthesis and Evaluating Characteristics of Multifunctional Capsule”, The Third Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS 2024), 23-27 Jun 2024.

3. 受賞等
なし

X線回折法を用いた新たな材料強度評価法の開発

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

ショットピーニングや溶射などの表面改質層では力学特性や X 線弾性定数が母材と異なっている。しかし、表面改質層の厚さは数 $10\mu\text{m}$ と薄く、従来の手法では力学特性や X 線弾性定数を把握できない。それを可能にするには、表面から約 $10\mu\text{m}$ 程度の局所的な応力を材料試験中に測定することが必要である。また、疲労破壊は応力集中部から発生するため、応力集中部に発生する局所的な応力を高精度で評価することが安全のために重要である。しかし、塑性変形が繰り返され、繰返し硬化が発生した場合、引張試験によって得られた応力ひずみ関係から局所的な応力を高精度に評価することは困難である。そのため、応力集中部の局所的な応力を測定することが求められる。X 線回折法は X 線の回折から応力を測定する手法であり、表面改質層や応力集中部の局所的な応力を測定することが可能であると考えられる。

そこで、本研究では X 線回折法を用いた新たな材料強度評価法を開発することを目的とする。材料試験中に X 線回折法を用いた応力測定を行う手法を開発し、それにより、表面改質層の力学特性評価や X 線弾性定数評価、応力集中部の局所応力評価を可能にする。

1.2 成果

1.2.1 溶射被膜の X 線弾性定数評価

気孔率や粒子の密着度合いの異なる材料に対して X 線弾性定数を測定し、X 線弾性定数に及ぼす熱処理の影響を明らかにした。すなわち、熱処理前後で気孔率を変化させた材料や成膜方法は異なるものの溶射皮膜同様、積層粒子構造を有する積層造形材を比較し、気孔率や溶射粒子のすべり変形の影響を評価した。また、酸化物のある APS 溶射を用いた BC と酸化の少ない HVOF 溶射を用いた BC を比較し、酸化の影響を評価した。この際、局所的なすべり変形に依存しない多点移動測定を用いて測定した。また、TBC-基材一体型の試験し、TBC 表面の格子ひずみと機械的ひずみを用いて TBC のポアソン効果の発現メカニズムを検討した。

始めに、X 線弾性定数を測定した。4 点曲げ試験機で曲げ応力を与えている試験片に対し、X 線回折法によって格子ひずみを測定した。ここでは、APS 溶射材と酸化の少なく粒子間結合力の強い HVOF 溶射材を比較した。図 1 に APS, HVOF それぞれで溶射された試験片の X 線弾性定数測定結果を示す。HVOF によって溶射された BC の X 線弾性定数は APS のものよりも小さくなり、機械的弾性定数との差も減少した。

これは溶射時に溶射粒子が高速で衝突するため付着までの滞留時間が短く、緻密な皮膜が得られたことで、溶射粒子特有のスプラット粒子のすべり変形が減少したためであると考えられる。また、粒子速度が速いことからフレーム中への大気の混入も少なく、酸化が少ないことも影響していることが示唆された。

次に、As-sprayed 材と熱処理材を用いて熱処理の影響を評価した。APS と HVOF およびその熱処理材すべてにおいて X 線弾性定数が機械的弾性定数を上回っていた。これは、前述した溶射粒子（スプラット粒子）の変形を含むひずみと応力を比較しているのに対し、X 線弾性定数は負荷応力に対してスプラット粒子の変形を含まない結晶の回折格子面のひずみから求められるためと考えられる。また、機械的弾性定数が組織が不均一な APS では熱処理により X 線弾性定数と機械的弾性定数との差が減少した。これは、APS においては熱処理に伴う焼結・拡散が生じたうえ、酸化物が増加したことで粒子間結合力が増加し、スプラット粒子のすべり変形が減少したためだと考えられる。一方、均質な組織である HVOF では As-sprayed 材と熱処理材で組織に大きな変化がなく、き裂や溶射粒子の粒界もあまり見られないことから、As-sprayed 材の時点で十分に溶射粒子の結合力が高いためだと考えられる。

次に、2 軸方向の格子ひずみを機械的ひずみと比較した。変形前後の二枚の測定対象表面画像から表面変位を測定することができる画像相関法は、得られた変位を微分することにより機械的なひずみを算出することができる。本研究では引張試験により、引張ひずみを付与し、その際の TBC 表面のひずみ分布を DIC により測定した。機械的ひずみは、格子ひずみとスプラット粒子のすべり変形が重畳した値として生じると考えられる。

図 2 に得られたひずみ分布の一部を示す。図には、SEM を用いて撮影した試験片の表面画像も重ねて示している。図からは局所的にひずみが高い箇所が点在しており、負荷強度の上昇に伴い既存のひずみが成長することが分かる。本試験で与えられた荷重は均一な短軸引張であるが、引張方向の皮膜表面のひずみ分布はこのように不均一であることから、積層粒子内の気孔により荷重が分散され、表面ひずみ分布にも影響を与えていることが推測される。直交方向でも同様の傾向が見られ、直交方向側にはすべり積層粒子のすべりが発生しないことからポアソン効果による変形の他に負荷による気孔の開口によりこのような変形が発生していることが考えられる。負荷時の引張方向側右下に残留粒子すべりが確認できる。この地点での気孔率は 14.3%と、全体の平均気孔率である 12.7% よりもやや高い数値となった。逆に大きなひずみが存在しない画像左下付近は 7.8%と気孔率が低く、表面気孔が表面皮膜ひずみの増加の影響を与えることが示唆された。DIC により取得した両軸ひずみの比を取ることでポアソン比を取得することができるが、X 線回折法で測定したポアソン比の 0.35 と比較すると、DIC で得られたポアソン比およそ 0.2 となり小さくなった。直交方向側のひずみ取得制度が十分ではないが、DIC で測定を行った機械的ひずみが粒子すべりを含んでいることから、粒子すべりがポアソン比を小さくさせるポアソン効果に対する定性的な影響が分かった。

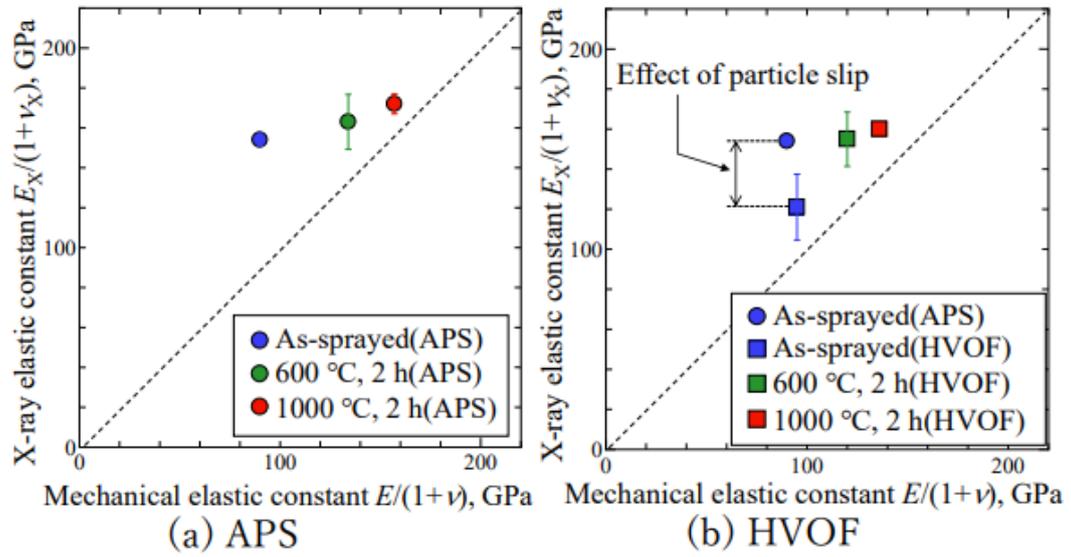


Fig.1 X-ray elastic modulus of porous APSed BC and dense HVOF BC.

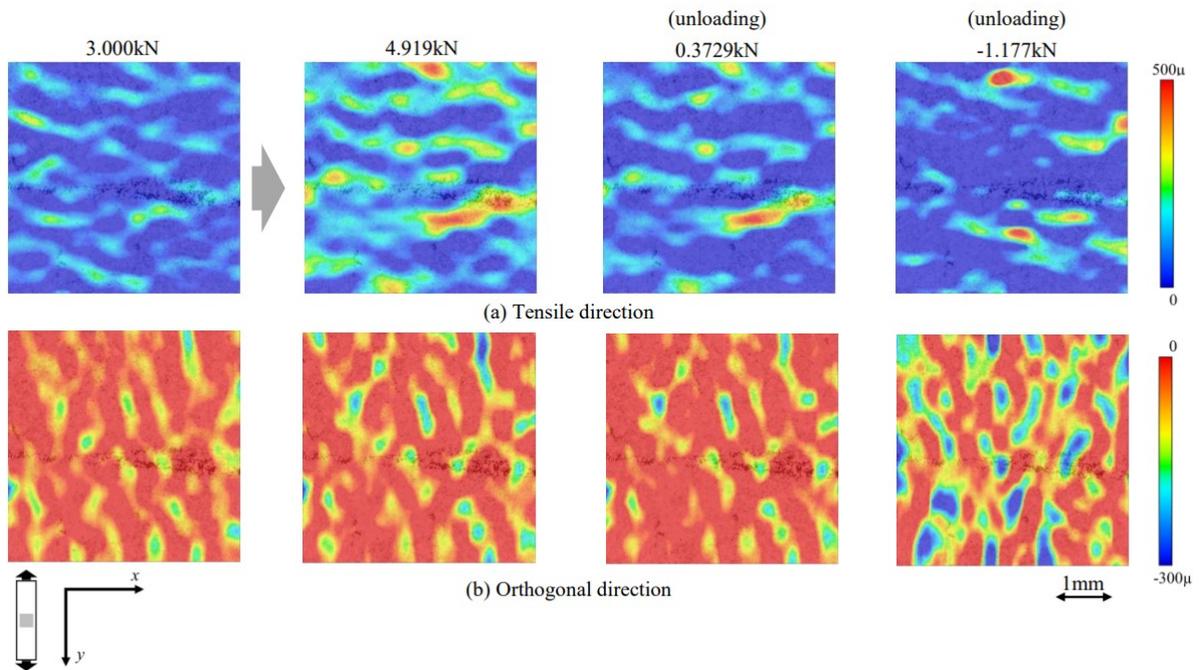


Fig.2 Strain distribution obtained by DIC.

1.2.2 表面加工層の力学特性評価

X線回折法を用いて構造用材料 SUS316L の表面近傍に形成された表面加工層の局所力学特性の評価を行い，加工条件が表面改質層の力学特性に及ぼす影響を明らかにした。

SUS316L について，任意の荷重で除荷し，その都度 X線回折法を用いて測定された表面加工層の軸および周方向残留応力，軸方向及び周方向残留応力から評価した相当応力-ひずみ関係を図 3 に示す．縦軸は応力，横軸はひずみを示しており，得られた応力-ひずみ関係を二段階直線効果で近似した場合も点線で示している．周方向応力を反映した表面加工層の相当応力-ひずみ関係を見ると，母材層と比べて高強度になっている．これは，圧縮残留応力に加え，結晶粒界の増加による転位の移動の阻害頻度の増加や加工硬化によるためと考えられる．相当応力の最大値は残留応力の影響を除いた微粒化や加工硬化による強度上昇を示していると考えられる．ECAP 法により強塑性加工を施した微細粒材の引張強さは約 800-1300 MPa であり，微粒化や加工硬化による強度上昇量は本研究とほぼ一致していた．このように，表面加工層の微粒化による高強度化を評価できた．次に，切削速度が異なる材料の結果を比較すると，切削速度が低いものほど高強度となっている．これは表面近傍の結晶粒径と対応しており，結晶粒が微細化しているものほど高強度となっている．また，切削速度が速いものでは，表面加工層のうち，微細粒層が薄く形成されるため，下層の塑性変形層および遷移領域の応力の影響が大きくなり，評価される応力も低くなると考えられる．微細粒層の厚さの違いによる影響は，切削速度が速いものほど降伏後の塑性域における傾きが大きくなっていることから確認できる．このように，表面加工層の力学特性および切削速度の影響を評価できた．

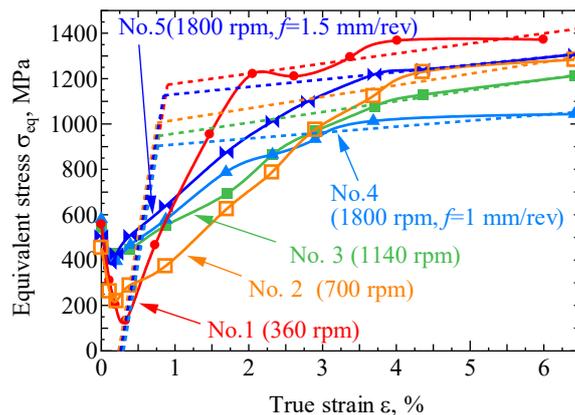


Fig. 3 Comparison between total axial stress and equivalent stress of machined surface layer evaluated with axial and circumferential residual stress for various cutting speed.

1.2.3 応力集中部の応力およびひずみ分布評価

曲げ試験を対象とし、応力分布とひずみ分布を同時に測定する方法を検討した。応力分布の測定には X 線回折法(XRD)を用いた。ひずみ分布の測定には、ひずみゲージを用いた。試験片の一方の面にひずみゲージを複数枚貼付し、もう一方の面に XRD を行った。

供試材にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いた。本研究では、圧延加工のままの SUS304 を用いた。そのため、加工硬化が生じるとともに、 -190 MPa の残留応力が生じている。試験片には、長さ 66 mm 、幅 8 mm 、厚さ 3 mm の短冊形試験片を用いた。本研究では 3 点曲げ試験を行った。図 4 に示す自作の治具を作成し、ねじにより静的な荷重を負荷した。負荷条件を図 5 に示す。片面にひずみゲージを複数枚はりひずみ測定を行った。もう一方の面に XRD を用いて応力分布を測定した。図 5 の赤線上の応力とひずみを測定し、それにより、2 次元での分布測定を行った。図 5 中の青丸におけるひずみ値が $3000\text{ }\mu$ となるように負荷をした。なお、XRD と画像相関法(DIC)を試験片の同一面に行うことも試みたが測定できなかった。

図 6 に応力とひずみの二次元分布を示す。また、図 7 に同じ x における応力およびひずみ分布を示す。同じ x で比較した場合、 y が小さいほど応力やひずみは小さくなっている。また、同じ y で比較した場合、 x が大きくなるほど応力やひずみは小さくなっている。ひずみと y の関係は直線関係であるが、応力分布は、応力が -500 MPa 以下になると直線関係から逸脱している。塑性変形が生じたためだと考えられる。以上の実験結果は、弾塑性曲げの応力分布、ひずみ分布として妥当である。

以上のことから、本研究の手法を用いることで応力分布とひずみ分布を同時に測定することが可能である。特に塑性変形が生じていても応力を測定できていることから、応力—ひずみ関係が未知の材料や構成則が複雑な材料でも応力分布を測定できると言える。今後の課題は、応力分布とひずみ分布を同一面上で測定できるようにすることである。XRD を用いた応力測定領域と DIC を用いたひずみ測定領域を交互に配置することで、応力分布とひずみ分布を同一面上で測定できる可能性がある。



Fig. 4 Photo of jig.

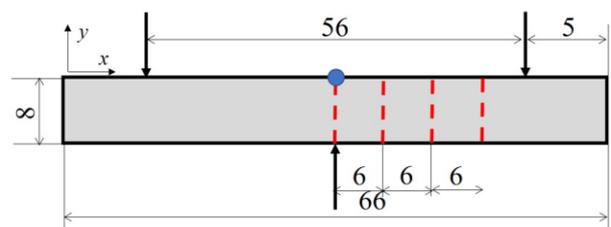


Fig. 5 Illustration of loading condition.

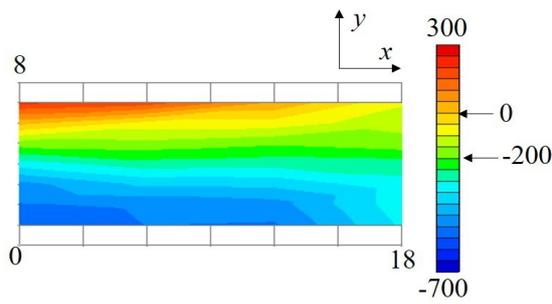


Fig. 6 Stress distribution.

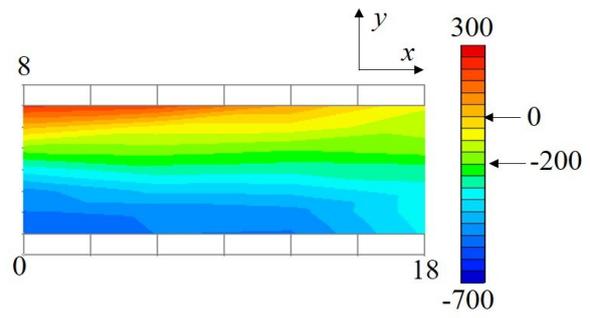
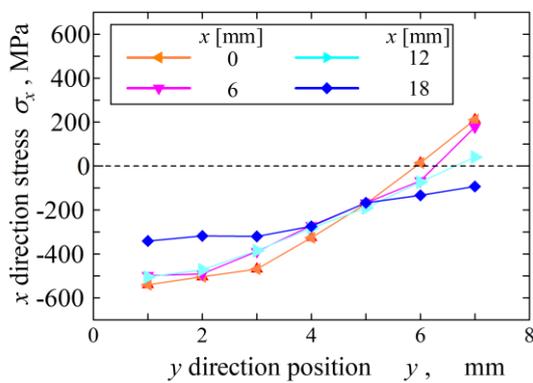
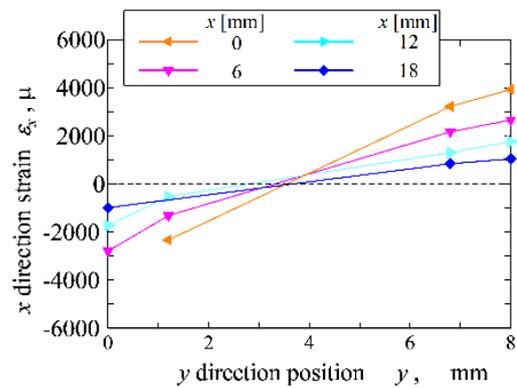


Fig. 7 Strain distribution.



(a) Stress distribution



(b) Strain distribution

Fig. 8 Stress and strain distribution at same x position.

1.3 総括

本研究では、X線回折法を用いた新たな材料強度評価法を検討した。溶射被膜のX線弾性定数評価については、溶射被膜のX線弾性定数を評価可能にし、気孔率やすべり変形の影響を明らかにした。表面加工層の応力ひずみ関係評価では、表面改質層の応力ひずみ関係の評価を可能にし、切削速度の影響を明らかにした。応力分布測定については、応力分布とひずみ分布を同時に測定することができた。以上のように、本研究で開発した手法を用いることで、今まで評価できなかった材料特性を評価することができる。

論文リスト

1. 原著論文

- (1)早瀬知行, 浮津直紀, 蓮沼将太, X線回折法を用いたオーステナイト系ステンレス鋼の表面加工層の力学特性評価法の検討, 材料, Vol.72, No.11, pp. 813-820, (2023).

(2)Tomoyuki Hayase, Hiroto Sasaya, Shota Hasunuma, and Hiroyuki Waki, Relationship between X-Ray and Mechanical Elastic Constants of CoNiCrAlY Coating, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Accepted.

2. 国際会議プロシーディング

- (1)T. Hayase, H. Sasaya, C. Aoki, S. Hasunuma, and H. Waki, Effect of Thermal Exposure on X-Ray Elastic Constants of Thermal Barrier Coatings Evaluated by Bending of a Three-Layered Specimen, The book of abstracts of the 17th Asia-Pacific Conference on Failure and Strength and the 13th Conference on Integrity and Failure, Adelaide, Australia,(2022-12).
- (2)T. Hayase, N.Ukitsu, S.Hasunuma, Evaluation of Strength of Surface Modifying Layer of Austenitic Stainless Steel Using X-Ray Diffraction Method, Int. Conf. on Advanced Technology of Experimental Mechanics 2023, Fukui, Japan, 04-A48, (2023-10).
- (3)T. Hayase, N. Sakaguchi, H. Sasaya and S. Hasunuma, Evaluation of X-ray Elastic Modulus of Additive Manufactured Aluminum Alloy, APCFS2024 Extended Abstract book, Shimane, Japan(2024-11).

3. 受賞等

- (1)酒井良銘, 日本材料学会関東支部, 2023 学生研究交流会 支部長賞(2023)
- (2)古島颯大, 日本材料学会関東支部, 2024 学生研究交流会 優秀講演発表賞(2024)

高周波ノイズの低減に関する研究開発

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

これまでに波長と比較して極めて薄い円形パッチ配列電波吸収体が提案されており,重ね合わせの原理に基づいて所望の吸収特性を設計可能であることが示されている[1].一方で吸収帯域が狭帯域であるという課題に対し,パッチの積層による広帯域化手法が報告されているが,具体的な設計手法は明らかになっていない[2].そこで本研究では,2層型円形パッチ配列電波吸収体の設計に向けて,重ね合わせの原理に基づいて反射係数をモデリングし,妥当性を確認した.

1.2 進捗状況及び成果

図1に文献[2]にて報告されている5GHz帯2層型円形パッチ配列電波吸収体の電磁界解析モデルを示す.半径8.40mmの内層パッチと半径8.19mmの表層パッチを裏面をグラウンド板とした厚さ0.2mm及び0.6mmの基板上に周期18.8mmで配列した.また,xz及びyz面の境界には周期境界条件を与え,入出力ポートからy方向電界を持つ平面波をz方向に垂直入射する.

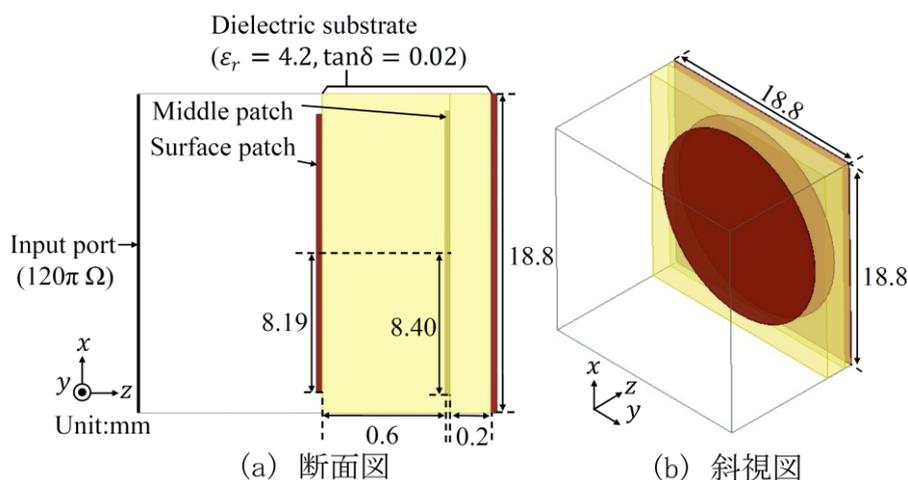


図1 二層パッチ配列電波吸収体の電磁界解析モデル

図2に重ね合わせの原理による反射係数モデルを示す. J_B 及び J_C は内層及び表層パッチ表面に流れる実効電流, Z_A は両パッチが存在しない場合の電波吸収体の入力インピーダンス, Z_B は内層パッチ後方を, Z_C は表層パッチ後方を, Z'_B は内層パッチ前方をそれぞれ見込んだ入力インピーダンスである.同図に示すように,本吸収体に

平面波が入射すると両パッチ及びグラウンド板に電流が誘起され、各電流により散乱波が再放射される。重ね合わせの原理より、本吸収体の反射係数 Γ は Γ_A 、 Γ_B 及び Γ_C の和で求めることができると仮定した。また、先行研究における単層円形パッチ配列電波吸収体の設計手法[1]より、各反射係数は自由空間の波動インピーダンス Z_0 、入射磁界 H 、内層パッチ及び表層パッチに流れる実効電流の位相 θ_B 及び θ_C を用いて次式により算出できると考えられる。

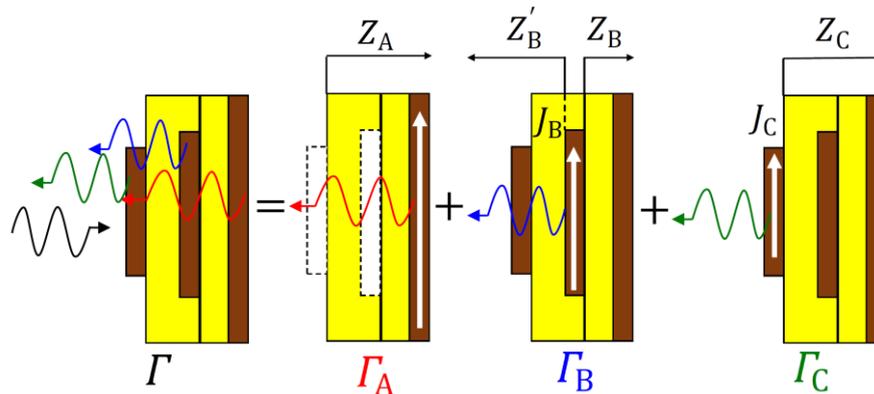


図2 重ね合わせの原理による反射係数モデル

$$\Gamma_A = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}$$

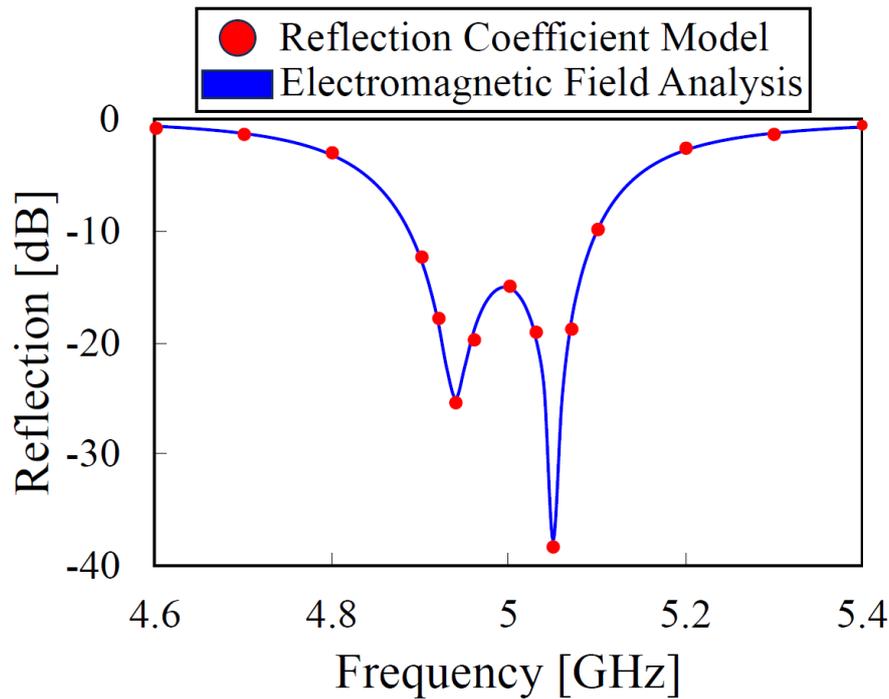
$$\Gamma_B = \frac{\frac{Z_B}{Z_B + Z'_B} J_B e^{j\theta_B}}{H}$$

$$\Gamma_C = \frac{\frac{Z_C}{Z_C + Z_0} J_C e^{j\theta_C}}{H}$$

図3に反射係数モデル及び3次元電磁界シミュレーションを用いて算出した2層型円形パッチ配列電波吸収体の反射係数を示す。同図より、両者は最大0.7dBの差異で良好に一致していることから、仮定した反射係数モデルの妥当性を示した。

1.3 今後の課題

今後は反射係数の位相のモデリングと斜め入射に対する設計理論について検討していく予定である。



参考文献

- [1] 高橋友朗, 松本壮太, 荒木純道, 橋本修, 須賀良介, “円形パッチ配列電波吸収体の配列周期設計,” 信学技報, MW2022-79, pp. 57-61, Sep. 2022.
- [2] 芳泉浩史, 須賀良介, 荒木純道, 橋本修, “積層による円形パッチ配列電波吸収体の広帯域化およびその動作周波数の設計に関する検討,” 信学技報, MW2016-115, pp. 137-140, Oct. 2016.

論文リスト

1. 原著論文

- [1] Ryo Kumagai, Ryosuke Suga, and Tomoki Uwano, “Single-Layer Circular Polarizer for Linear Polarized Horn Antenna,” *IEICE Trans. C*, vol. E107-C, no. 11, pp. 479-485, Nov. 2024.
- [2] Daisuke Nishihara, Kensuke Sasaki, Rasyidah Hanan Binti Mohd Baharin, Tomoaki Nagaoka, Osamu Hashimoto, and Ryosuke Suga, “Development of measurement phantom for absorbed power density assessment by human exposure at 28 GHz band,” *IEEE Journal of Electromagnetics, RF, and Microwaves in Medicine and Biology*, DOI: 10.1109/JERM.2024.3419026.
- [3] Sho Kuromatsu, Takeshi Watanabe, Yoshiyuki Nonoguchi, Ryosuke Suga and Shinji Koh, “Single-wall carbon nanotubes-based flexible monopole antenna with high radiation efficiency,” *Engineering Research Express*, 6, 045367, Dec. 2024.

2. 国際会議プロシーディング

- [1] Yuki Masuko, Tetsuo Endo, Koji Yamaguchi, Osamu Hashimoto, and Ryosuke Suga, “Characterization of Architectural Glasses by Free-Space Method in 24 GHz Band,” *EMC Japan/APEMC Okinawa 2024*, TueAM1A.2, May 2024.
- [2] Kohei Hasegawa, Haruki Sasaki, and Ryosuke Suga, “Study on Influence of Leakage Flux Dependence on Winding Position of Common-mode Choke Coil Using Toroidal Core,” *EMC Japan/APEMC Okinawa 2024*, ThuAM2B.3, May 2024.
- [3] Taisei Watanabe, Ryosuke Suga, “A Study on Detectable Conditions for Rusted Reinforcing Bar in Concrete Structure Using a 24-GHz Doppler Sensor,” *EMC Japan/APEMC Okinawa 2024*, TuePMPo.3, May 2024.
- [4] Masahiro Hanazawa, Sonshu Sakihara, Koji Yamaguchi, Tetsuo Endo, Yuki Matsuko, Ryosuke Suga and Osamu Hashimoto, “Database construction and its method of building materials for coexistence study of beam type wireless power transfer systems,” *13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, PS1-6, Nov. 2024.
- [5] Yasunari Hashimoto, Yoshitoshi Maeda, Temma Sasaki, and Ryosuke Suga, “Design of Two-Layered Radio Wave Absorber Using Perforated Ceramics Surface Layer in Millimeter-Wave Band,” *Asia-Pacific Microwave Conference 2024*, 1571046916, Nov. 2024.

3. 受賞等

- [1] 竹内陽人, 2024年 電気学会 電子・情報・システム部門 技術委員会奨励賞.

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、数値解析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 A の市松模様回折格子の ± 1 次回折光には、キャリア空間周波数 $\nu = \pm 1/A$ 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 Δx 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 ± 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．

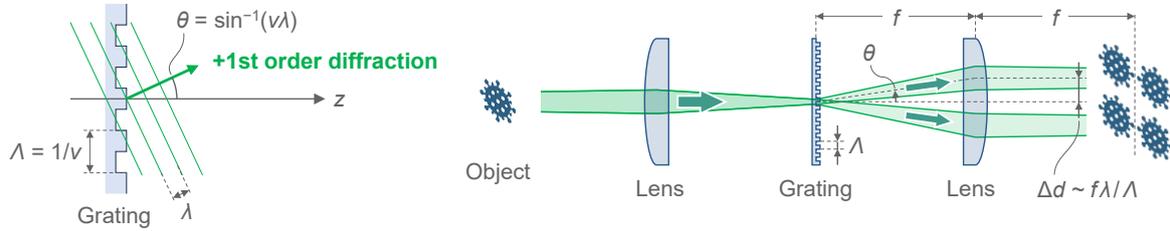


図 1 市松模様回折格子による光波面複製の原理

先で述べたように，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 2(a) に示すように，物体光の近傍 2 個所に $\pi/2$ の位相差を有したマーカを付与しておく．マーカは物体光とともに回折格子を通過し，図 2(b) 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．このとき，各複製が受ける位相シフト量は図中に示す通りとなる．ここで， $\Delta x = \Delta y = 0$ のときに光軸がちょうど市松模様構造の境界部にあるとして， π の初期位相を図中右上と左下の複製に与えている．光軸から見て上下左右に現れるマーカの複製はそれぞれ異なる位相シフトを受けており，上下左右のマーカに対して参照光との干渉強度はそれぞれ以下の通り表すことができる．

$$\begin{aligned} \text{上} : H_t &= I_r + I_m + 2\sqrt{I_r I_m} \cos \Delta\phi_2 & \text{左} : H_l &= I_r + I_m + 2\sqrt{I_r I_m} \sin \Delta\phi_2 \\ \text{下} : H_b &= I_r + I_m - 2\sqrt{I_r I_m} \cos \Delta\phi_1 & \text{右} : H_r &= I_r + I_m + 2\sqrt{I_r I_m} \sin \Delta\phi_1 \end{aligned}$$

ここで， I_r および I_m はそれぞれ参照光とマーカの強度である．また，回折格子の移動量 Δx ， Δy に対して $\Delta\phi_1 = 2\pi(\Delta x + \Delta y)/\Lambda$ ， $\Delta\phi_2 = 2\pi(\Delta x - \Delta y)/\Lambda$ とした．すなわち，参照光との干渉強度分布（図 2(c)）からマーカ部を抽出して，上記の 4 式を解くことで， $\Delta\phi_1$ および $\Delta\phi_2$ はそれぞれ以下の通り導くことができる．

$$\begin{aligned} \exp(i\Delta\phi_1) &= \frac{-H_b + (I_r + I_m) + i\{H_r - (I_r + I_m)\}}{2\sqrt{I_r I_m}} \\ \exp(i\Delta\phi_2) &= \frac{H_t - (I_r + I_m) + i\{H_l - (I_r + I_m)\}}{2\sqrt{I_r I_m}} \end{aligned}$$

これらの式から，左右の上下の複製間に与えられる位相差をそれぞれ $\Delta\phi_x = 4\pi\Delta x/\Lambda = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2$ ， $\Delta\phi_y = 4\pi\Delta y/\Lambda = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$ と求めることができる．

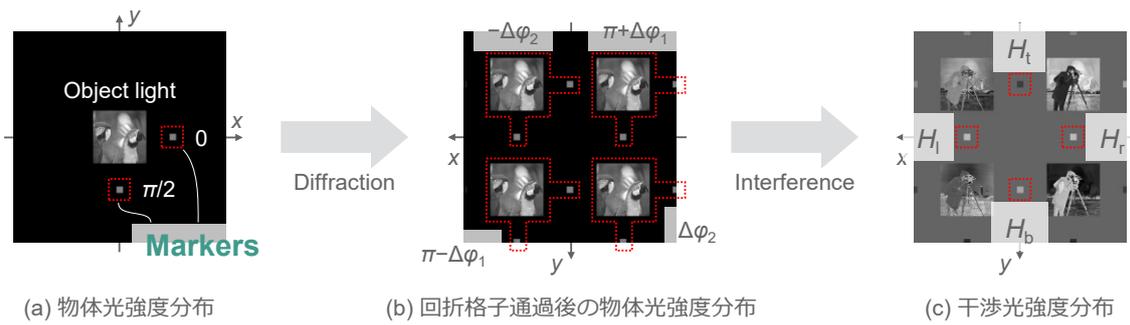


図2 マーカ付き物体光の回折（レンズによる2回のフーリエ変換の結果，回折後の像は座標軸が反転している）

数値解析ではまず，マーカ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．解析では干渉縞の強度分布を8bit分解能の撮像素子で取得するとし，その他については理想的な条件とした．回折格子の位置 Δx と Δy をそれぞれ0から1まで変化させ，得られた $\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_2$ の推定値をプロットした結果を図3に示す．いずれの場合についても，位置の変化に対して位相シフト量の推定値は線形に変化した．推定値の理論値との誤差はいずれの場合も ± 0.02 rad程度に抑えられており，高い精度での位相シフト量推定が可能であることがわかった．

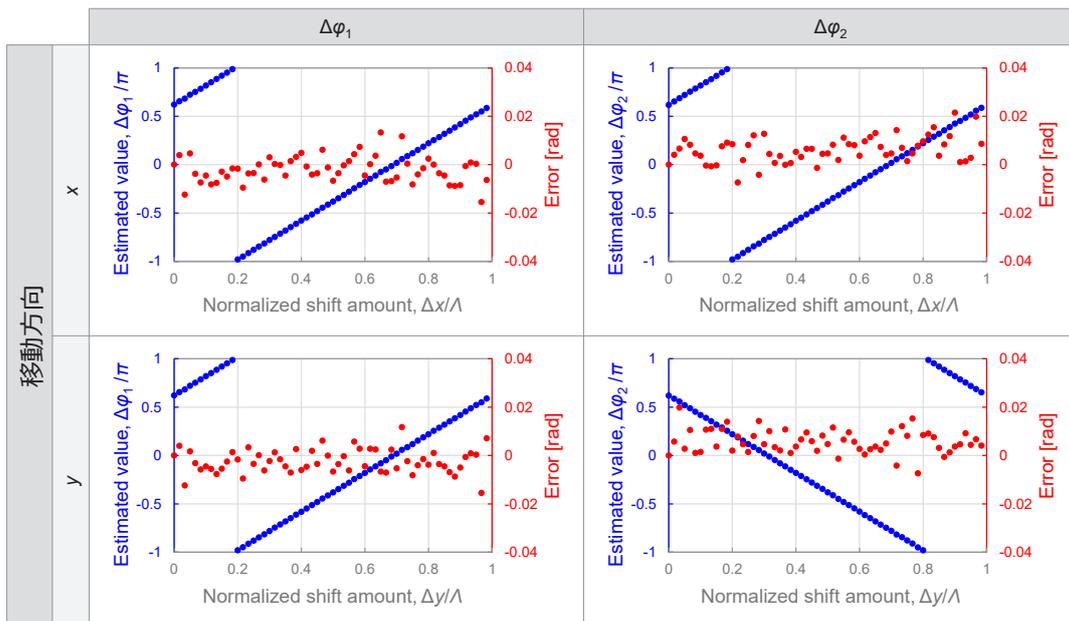


図3 回折格子の移動量と位相シフト量推定値との関係（青色），および理論値からの誤差（赤色）

次に，物体光の強度分布と位相分布としてそれぞれ2次元画像を与えて提案手法による位相分布計測をシミュレーションし，計測精度を評価した．評価指標はPSNRおよびSSIMとし，比較のために従来手法である時間領域位相シフト法による計測のシミュレーションも実施した．提案手法および従来手法のそれぞれで得られた強度分布と位相分布を図4に示す．シミュレーション結果の強度分布をみると，位相分布が急峻に

変化する座標位置において強度が欠落していることがわかる。これは解析中に含まれる複素数配列のリサイズ処理による影響であり、計測の過程で生じたものではない。位相分布については元画像との差はほとんど無く、いずれの指標をみても従来手法と全く同等の精度での位相計測が可能であることが示された。

Original images	Simulation results		
	Proposed	Conventional	
			Intensity 1 0
PSNR [dB]	19.9	19.9	
SSIM	0.66	0.66	
			Phase π $-\pi$
PSNR [dB]	27.7	27.7	
SSIM	0.91	0.91	

図 4 提案手法と従来手法での計測精度の比較

1.3 今後の課題

今回は撮像素子による光強度の量子化以外は理想的な条件下での解析であったが、今後は撮像素子のショットノイズなどの影響も考慮して、より現実的な条件下で解析を進める必要がある。また、ノイズを含んだ取得画像からのマーカ干渉強度の求め方や、マーカの大きさや時間的なゆらぎの影響などについても検討する必要がある。

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

該当なし

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。

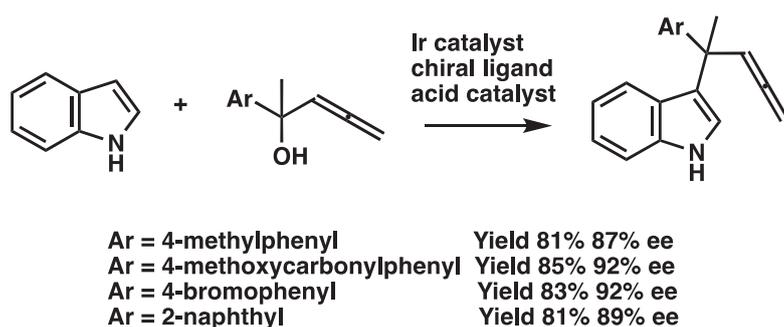
有機分子は三次元の形を持っている。このことから、炭素原子に結合している 4 つの結合がすべて異なる場合、その分子と鏡に映ったその分子は重ね合わせることができない。実像と鏡像が重ね合わせることができない右手と左手の関係になる。実像と重ね合わせることのできない鏡像を鏡像異性体という。鏡像異性体が存在する分子を光学活性分子という。鏡像異性体の片方だけを高度の選択性を持って合成することは難しく、合成化学者へ与えられた最大の難問である。有機化学の歴史は立体化学の歴史とも言える。1874 年に van' t Hoff と Le Bel が炭素原子の四面体構造を明らかにして以来、有機化学者は鏡像異性体の研究に取り組んできた。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。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。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。

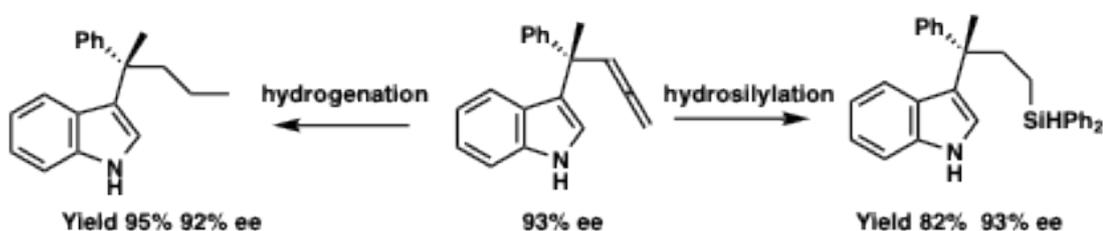
1.2 進捗状況及び成果

インドールは、多くの生物活性物質中に存在する重要な骨格である。医薬品などにも見られる。それらの中でアレンが置換した光学活性体のインドールは、知る限りでは得られていない。研究代表者が開発した触媒を用いてインドールとアレニルアルコ

ールから光学活性なアレン置換インドールを高収率かつ高エナンチオ選択的に得ることに成功した。副生成物は水だけである環境調和合成を達成した。本反応ではラセミ体のアルコールの両方のエナンチオマーから光学活性体が高エナンチオ選択的に得られることを示している。生成物中の末端アレンは様々な分子変換が可能であった。水素化やヒドロシリル化により高収率で生成物が得られた。この分子変換においてラセミ化は全く進行せず光学純度は保持された。このように、本不斉アレニル化で得られる生成物は、有用な光学活性ビルディングブロックであることが示された。



生成物であるアレン置換光学活性インドールの分子変換反応



1.3 今後の課題

本研究課題では、容易に入手できる第2級アリルアルコールや第2級アレニルアルコールを用いて、温和な条件で不斉アリル化や不斉アレニル化を検討する予定である。インダゾール、テトラゾール、トリアゾール、イミダゾピリジン、アズレン、2-ナフトールなどの芳香族複素環化合物及び芳香族化合物や α -ケトエステル、 α -ジケトンから100%に近いエナンチオマー過剰率で生成物を得ることを目指す。窒素原子が複数あるインダゾール、トリアゾールやテトラゾールにおいて、位置選択性を制御できる regiodivergent な不斉アリル化を開発することを目指す。これらの不斉反応は副生成物が水だけの環境調和型合成であることから、これらの研究成果はSDGsの推進に大きく貢献できる。

論文リスト

1. 原著論文

Takahiro Sawano, Manami Kobayashi, Momoko Ishikawa, Eri Ishikawa, Ryo Takeuchi
Iridium-Catalyzed Asymmetric Allenylic Substitution of Tertiary Racemic
Allenlic Alcohols with Indoles
Organic Chemistry Frontiers, 2025, **12**, 1080-1085.

Takahiro Sawano, Kazuki Urasawa, Ryouyusuke Sugiura, Kaito Aoyama, Koito Tanaka,
Hiromi Hosaka, Masami Kaneko, Yuzo Yoshida, Eri Ishikawa, Takeshi Yamamoto,
Ken Sakata, Ryo Takeuchi
Iridium-Catalyzed [2+2+2] Cycloaddition of Bithiophene Linked Dienes with
Nitriles:
Scope and Mechanistic Study with Quantum Chemical Calculation
J. Org. Chem., 2024, **89**, 9473-9487.

2. 国際会議プロシーディング なし

3. 受賞等

青山学院学術賞 「イリジウム触媒による有機合成反応の体系的研究」

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、日本独自の飛翔体観測機器を用いた広視野軟 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、「ロブスターアイ」という光学系と X 線撮像素子を用いた高感度広視野 X 線望遠鏡の実現を目指す。

1.2 進捗状況及び成果

(a) JAXA 公募型小型候補ミッション HiZ-GUNDAM

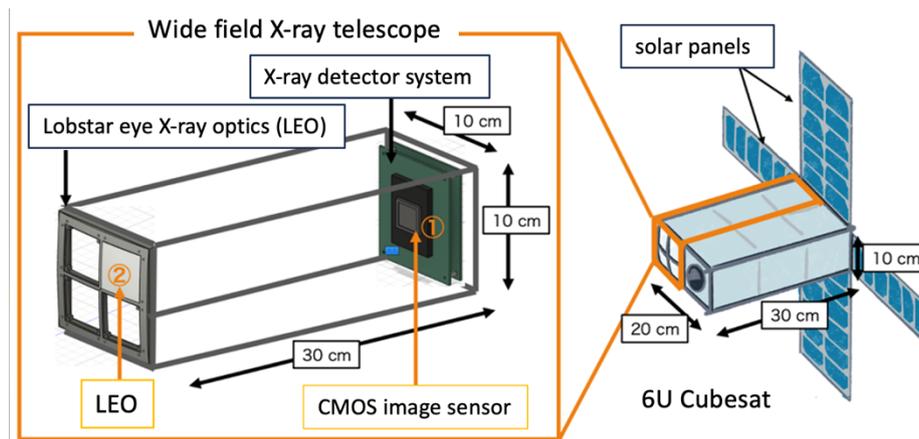
JAXA の公募型小型の候補ミッションとして選定されているに日本独自の突発天体探査衛星 HiZ-GUNDAM の広視野 X 線モニター EAGLE の基礎開発を継続して行った。EAGLE で利用する X 線集光系であるロブスターアイ光学系 (Lobster Eye Optics; 以後 LEO) については、宇宙科学研究所の 30 m X 線ビームラインを用いて、2 枚の LEO をフレームの固着した状態で X 線集光性能実験を行った。その結果、2 枚の LEO をまたいだ形で X 線が入射した場合であっても、要求される集光性能を満足する形でアライメントできている事が確認できた。また、焦点面検出器については、pnCCD センサーを動作させ、データを読み出すための基板第 2 弾が完成し、それらの基板の動作確認を行い、全ての機能に問題ない事が確認された。

(b) 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) の検討を行った。4 cm 角の LEO を 2 x 2 の 4 枚使用する事で、 $8^{\circ} \times 8^{\circ}$ の空の領域を一度で観測でき、焦点面検出器には 3.6 cm 角の大面積 CMOS

イメージセンサーを使用する。LEO は非常に軽量な光学素子であり、また、その焦点距離 30 cm であるため、バス部の大きさを考慮しても 6U キューブサットの大きさに十分収まる。本格的な検討は来年度以降となるが、青学の機械工作室の協力の下、LEO 4 枚をアライメントし、固定するフレームの設計、および試作、そして、大面積 CMOS イメージセンサ GSENSE4040BSI の入手、データ読み出し基板の設計や基板で使用する FPGA の入手などが進められた。

図 1 6U キューブサット SEAGULL



(c) ARICA-2 のフライトモデルの開発

今年度の前半は、エンジニアリングモデルの振動・衝撃試験、および熱真空試験を実施し、エンジニアリングモデルの設計に対する構造的な健全性を確認する事ができた。8 月には詳細設計審査会を実施し、衛星の姿勢制御や運用方法に対して審査員の方々から様々な有益なコメントを頂き、これらのコメントに対する回答を行う場として、再審査会を 10 月に開催し、審査員からの承認を得た上で、フライトモデルの製作を開始した。今年度中のフライトモデルの組み上げを完了させ、来年度、フライトモデルの機械環境試験を実施し、衛星の引渡しを完了する。



図 2 ARICA-2 の CAD (左) とエンジニアリングモデル (右)

1.3 今後の課題

HiZ-GUNDAM 衛星においては、ミッション選定のダウンセレクション審査が 2 年後に再設定され、その審査に向けてのミッション機器の基礎開発を行った。宇宙科学研究所の X 線ビームラインを用いた LEO の集光実験や焦点面検出器の pnCCD の駆動、およびデータ読み出し基板の製作を行い、その動作について問題ないことを確認した。ミッション選定に向けた、ひとつでも多くの課題をクリアできるように活動を続けていく必要がある。

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 SEAGULL のコンセプト検討を行った。LEO を固定するフレームの設計や CMOS イメージセンサーの読み出し基板の製作に向けて動き出した。今後はより具体的な衛星設計、およびミッション部開発を進めていく。

ARICA-2 は、エンジニアリングモデルの機械環境試験の実施などを得て、本年度内のフライトモデルの製作を目指す。

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

T. Sakamoto et al., Development and performance of the engineering model of ARICA-2, Conference proceeding of Small Satellite Conference, SSC24-WIII-07, 2024

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り、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 材料開発では日立製作所と東ソー社の協力を得て研究を行った。Bi 系については住友電工社が 2024 年度より事業撤退したため、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」の支援を受けてこれまでの知見、経験を生かした新規構成の材料開発に取り組んだ。

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

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



図1. 外径 80 mm の成型体から育成した YBCO 熔融凝固バルクの外観 (左: disk 形状、右: ring 形状)

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。この方法で作製されるバルク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。2024 年度の研究ではさらなるバルクの大型化を進め、図 1 に示すように外径 80 mm の成型体からの disk, ring 形状のバルクの再現性の良い育成に成功している。これは、市販品で入手可能な最大サイズのものと同様である。このような大型バルクの結晶成長には、従来法では一か月程度を要するのに対し、本手法は約一週間での育成が可能であり、大幅な製造プロセスの短縮を実現している。現在、このような大型のリング形状バルクを積層した卓上 NMR への実装を目指している。

この結晶育成法は 2021 年 11 月の国際会議の招待講演で報告した後よりにわかに注目を集め、2022 年度には欧州のトップメーカーが本手法をバルク製品製造に採用しており、私共も国内メーカーとの共同開発を進めている。

Bi2223 線材の開発に関する研究は、2024 年度から共同研究を実施していた住友電工社が事業撤退したため、最後に実施していた線材断面サイズが異なる線材の大気圧下 2 次焼成による臨界電流特性向上に関する研究と、線材内フィラメントの通電特性評価を上期に実施した段階で中断した。線材断面サイズが異なる線材の研究からは、Bi2223 フィラメントが小さい、つまり断面積が小さい線材ほど、銀を含めた断面積当たりの臨界電流密度が高くなること、フィラメントの通電特性評価からは Pb 濃度が高いほど磁場中での転移が鋭くなることがわかった。一方、新規構成の Bi2223 線材開発を経産省の公募事業に提案し、これに採択されたため下期は積層厚膜型の新規材料の開発を進めた。この事業の期間はわずか 4 ヶ月の短いものであったが、図 2 に示すような 4 層の積層導体が臨界電流密度 15,000 A/cm² を記録するなど、Bi2223

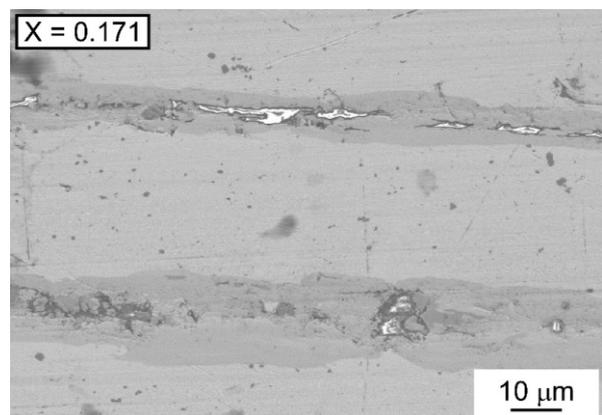


図2. Bi2223/銀箔 4 層積層線材の断面の一部。濃い灰色が Bi2223 層である。

線材の技術を後継する材料開発に手応えを得た。

Bi2223 線材間の超伝導接合開発は JST の未来社会創造プロジェクトのもとで進めていたが、住友電工社の事業撤退に応じて開発中の 1.3 GHz 磁石に Bi2223 線材は使われなくなったことから、高強度線材ではなく、補強のない線材の接合を行い、接合の学理研究に適した接合試料を作製した。しかし、多芯線材の接合では、フィラメントごとの接合の様子を調べるのが困難であることから、途中から Bi2223 厚膜間の接合作製に切り替えた。現在は厚膜試料の開発段階である。しかし、Bi2223 多芯線材間接合の作製では Bi2223 仮筮粉末を含むスラリーの溶媒にエタノールと水を用いる方法により、77 K で接合臨界電流 120 A 以上の接合体が容易に得られるようになった。この方法は上述の積層厚膜開発にも生かした。エタノールと水を溶媒としたスラリーは、銀箔や線材上に塗布した場合、密着性が良く乾燥時に割れが生じにくいこと、ディップコート法に適していることなどの点で従来のアルコール類のみを溶媒としたスラリーより優れている。

MgB₂ 多結晶体の材料高機能化研究では、MgB₂ 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 MgB₂ 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 10⁶ A cm⁻² 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、高純度、低酸素含有量の B 原料を用いた MgB₂ バルク作製を進めている。2024 年度の主な成果としては、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、共存 MgO の形態や分布が変化し、磁場中の臨界電流密度が向上することの発見が挙げられる。この方法で得られた MgB₂ バルクは 15 K で 3 T まで 10⁵ A cm⁻² 以上の臨界電流密度を示し、これは日立社で開発中の医療用 MRI に求められる材料特性を満たすものである。このほか TiB₂ を添加した MgB₂ バルクの作製も行い、TiB₂ 添加による系統的な臨界電流特性の改善を認めた。

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 5 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り、次年度以降捕捉磁場の記録にも挑戦したい。

Bi2223 積層厚膜型材料開発は取り組み始めたばかりであるが、早期に Bi2223 多芯線材の性能に追いつくことによって、Bi2223 材料再興のきっかけとなる高機能材料創製を目指す。

MgB₂ に関しては、東ソー社と共同で 2025 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。また、低温熱処理過程が微細組織に劇的な影響を与えていることから、そのメカニズムの解明と臨界電流特性改善に向けた熱処理プロセスの最適化を進める必要がある。前熱処理粉末は長尺線材の原料としての利用も可能であるため、線材作製および線材としての臨界電流特性の評価も進めていきたい。

論文リスト

1. 原著論文

- J. Shimoyama and T. Motoki, "Current Status of High Temperature Superconducting Materials and their Various Applications," *IEEJ Trans. Electrical & Electronic Eng.* **19** (2024) 292-304.
- M. Dogruer, T. Motoki, M. Semba, S. Nakamura, J. Shimoyama, "Mechanical properties of Ag-added DyBa₂Cu₃O_y superconducting melt-textured bulks prepared by the single-direction melt growth method," *Mater. Today Commun.* **39** (2024) 108605.
- T. Motoki and J. Shimoyama, "Excellent field-trapping properties of large ring-shaped REBCO melt-textured bulks fabricated by the single-direction melt growth (SDMG) method", *Supercond. Sci. Technol.* **37** (2024) 115019.

2. 国際会議プロシーディング

- T. Motoki, T. Kii, J. Shimoyama, "Temperature-Dependent Trapped Magnetic Fields for REBa₂Cu₃O_y (RE : Y, Dy) Melt-Textured Bulks Prepared Using the Single-Direction Melt Growth Method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **35** (2025) 6800305.

3. 受賞等

- 元木 貴則 低温工学・超電導学会 令和 6 年度奨励賞 (2024.5)
- 岩崎 響 低温工学・超電導学会 優良発表賞 (2024.5)
- 松下哲哉 電気学会 A 部門研究会 優秀論文発表賞 (2024.10)
- 千野好輝 セラミックフェスタ in 神奈川 優秀賞 (2024.12)

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ー数を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ー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、トポロジー構造に由来する電磁場応答の理論を進展させ、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) 密度行列の置換不変部分が持つ量子情報量についての数値手法の開発および量子相の調査

波動関数の持つトポロジー数で定義される量子状態は、波動関数が直接観測できないものであるがため、観測可能量による間接的な指標で区別せざるを得ないなどの問題があった。近年、このような量子状態は観測可能量である密度行列で表せる点に注目し、電磁場応答などの実験的手段で密度行列を測定する量子状態トモグラフィについて盛んに研究が為されている。さらに、この密度行列から導かれる量子情報量（フォンノイマンエントロピーなど）を指標に量子相を識別しようという試みが提案されている。

このような量子情報量をトポロジカル物質系に対して適用する上での問題点は、その計算量（実験系で実測する上では測定回数）が系のサイズに対して指数関数的に増大してしまう点にある。本研究では、密度行列の置換不変部分 $\Pi(\rho)$ に着目し、これを元に比較的少ない計算コストによって量子情報量を求める計算手法を開発した。この手法を用いて、この量が様々な量子相においてどのような振る舞いを見せるかを調べ、またこの置換不変部分の持つ量子情報量の性質そのものについても解明を行った。この研究をきっかけとして量子物性論と量子情報理論の融合からもたらされる様々な可能性について、多方面から学際的な関心が持たれている。

2) 電磁波による磁気スカーミオンの駆動

磁性体におけるスカーミオンはトポロジカルに保護された磁気構造であるため、熱・磁場揺らぎなどの外部擾乱に対してロバストであり、ナノスケールの磁気メモリとしての応用が期待されている。実際にデバイスとして使用するためには、スカーミオンの生成および消滅（データ書き込み）、スカーミオンの移動および計測（データ読み出し）の技術が必要である。本研究ではスカーミオンの移動についての研究を行った。

従来は、スピントルクを用いた電流による駆動が提案されていたが、本研究では電磁波によってスカーミオンを動かすことについての研究を行った。リボン状の磁性体中にスカーミオンを置き、電磁波（振動磁場）を加えるとリボンの両端を節とするスピン波の定在波が誘起され、これとの相互作用によってスカーミオンを駆動することが出来ることを発見した。

3) ハニカム格子上の電子系におけるレーザー駆動トポロジカル相転移の発現

グラフェンに代表されるハニカム格子上の電子系は、ディラックコーン状のバンドを持つためトポロジカル相転移を研究する上での格好の舞台である。たとえば、この系に空間的に一様で時間的には周期性を持つ外場を加えるとバンドギャップが開くと同時にチャーン数によって定義されるトポロジカル相へと転移することが知られており、これはグラフェンに適切な強度および振動数を持つレーザーを照射することに対応する。

本研究では、空間的にも変調された周期的外場を加えた場合についてフロケ理論を用いて解析を行った。この周期的外場によってバンドの半分にだけギャップが生じるためにトポロジカル相転移の臨界点直上を保ちながら状態を変化させることが見いだされた。このため、この系はさらなる外場印可によってトポロジカル相転移を完成させることが期待され、これに伴う特異な電場・磁場応答が発現することが予想される。

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。

論文リスト

1. 原著論文

[1] Yuki Miyazaki, Giacomo Marmorini, Nobuo Furukawa, and Daisuke Yamamoto, “Rényi entropy of the permutationally invariant part of the ground state across a quantum phase transition”, *Physical Review A*, Volume 110, 052422 (2024).

[2] Guanxiong Qu, Ji Zou, Daniel Loss, Tomoki Hirose, “Density Matrix Renormalization Group Study of Domain Wall Qubits”, arXiv:2412.11585

2. 国際会議プロシーディング

3. 受賞等

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・数理学科 教授 前田はるか
研究分担者 物理科学科 助教 北野 健太

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。

前 CAT プロジェクト研究「冷却 Rb 原子ガス中に生成される分子状態の検出」では、特に、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・クラスター構造に着目した。具体的には分子・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ことを目指して行われ、いくつかの新しいデータを系統的に取得することができた。にもかかわらず、この類の実験研究例は、我々が知る限り例えば Gallagher らによる原子対 (2 原子分子) を形成する冷却 Rydberg 原子のマイクロ波検出実験 [8,9]、Pillet らによる Stark 効果を利用した 3 原子 Rydberg 分子検出実験 [10-12] などの数例が挙げられる状況であり、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、前 CAT プロジェクト研究を更に発展させ、同時に分子・クラスター状態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) [13,14] を導入することを目的として行う。前者では、これまでに得られたデータに見出された物理的に興味深い点を更に追及する。具体的には、隣接する Rydberg 原子同士に共鳴条件が満たされた場合、 $d-d$ 相互作用に基づき原子間に非放射エネルギー移動が誘起される、いわゆる Förster 共鳴エネルギー移行 (FRET) 現象 [1,2] に着目し、その更なる系統的観測を重点課題としている。付加的に、多体量子効果が極めて特徴的に発現する Rb 原子ガスセルを用いた実験も並行して行うことで、双方から多体量子系に発現する多体量子物理の理解を目指した。

一方後者では、一つ一つの冷却 Rydberg 原子を超高真空中に配列させ、それにより分子生成条件を精密制御するための装置、いわゆるマイクロアトムトラップの作成を目論む。この種の実験装置は精密量子制御実験において非常に強力であることが知られており、本研究への導入を目指している。

1.2 進捗状況及び成果

Förster 共鳴エネルギー移行 (FRET) 現象の観測実験の一環として、前プロジェクト研究にて残された課題の一つであった、Stark 電場とマイクロ波 (MW) の双方を利用することで、極めて高い角運動量をもつ (*high-l*) Rydberg 状態が関与していると考えられる MW 吸収スペクトルの観測を系統的に行った。*high-l* Rydberg 原子は新奇な分子状態の生成に積極的に関与することが示唆されている [15]。目下、得られたデータの解析を行っている最中である。その他、いくつかの条件下で Rb 原子ガスセルに $6p \rightarrow 6s \rightarrow 5p \rightarrow 5s$ 超蛍光カスケードを誘起し、 $6s \rightarrow 5p$ 超蛍光の偏光特性を重点的に、その他種々の光学パラメタの精密測定を行った。

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 [13] を参考に装置の作成を開始した。装置は大別して MOT、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 及び qCMOS カメラの動作特性や検出感度等を調べた [16, 17]。また、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 アルゴリズムの実装を試みた [17]。

本実験では Rb 原子の冷却・リポンプを 780 nm のダイオードレーザーを用いて行い、*well-defined* な Rydberg 状態への励起には高スペクトル分解能 480 nm レーザーを利用する。480 nm を基本波として発振するレーザーダイオードは市販されていないため、本実験では 960 nm 外部共振器型ダイオードレーザーの出力をテーパアンプにて増幅して取り出し、SHG 結晶を利用することで 480 nm 光を生成することを行っている。ただし、この様にして生成された 480 nm 光のパワーは Rydberg 原子生成には足りず、480 nm 光の増幅システムの構築を試みた [18]。

1.3 今後の課題

Stark 電場及び MW を利用して誘起される FRET 現象は、*high-l* 状態を選択的に励起する可能性のある方法として興味深い方法であり、今後の実験課題である。その先には、 $l = |m| = n - 1$ である様な状態、いわゆる Circular (或いは Giant) Rydberg 状態に原子を励起する新しい手法を開発することを念頭におく。この特異な状態は量子情報処理や量子シミュレーションに重要な役割を果たすことが知られている [19]。これらを遂行するためには *well-defined* な Rydberg 状態を励起する必要がある、このためには高出力 480-nm の開発が喫緊の課題である。

また、その遷移確率がおおよそ原子間距離の 3 乗に逆比例する FRET では、原子を任意配列することが実験的に重要な鍵を握る。今後、Micro atom trap を出来るだけ速やかに立ち上げることも今後の課題である。

ガスセル中に閉じ込められた Rb 原子の超放射実験について、これまでセル中に励起していた始状態 ($6p$ 状態) を、他の np ($n \geq 7$) 始状態にした場合の観測を試みる。多体量子系物理の理解を進める他、近赤外から中赤外に渡る波長領域におけるコヒーレント光源としての可能性を検討する。

- [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] F. Nogrette, H. Labuhn, S. Ravets, D. Barredo, L. Béguin, A. Vernier, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Phys. Rev. X* **4**, 021034 (2014).
- [14] Woojun Lee, Hyosub Kim, and Jaewook Ahn, *Opt. Express* **24**, 9816 (2016).
- [15] 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)
- [16] 川上天誠, 2024 年度 青山学院大学 理工学部 物理科学科 卒業論文.
- [17] 金井祐太, 2024 年度 青山学院大学 理工学部 物理科学科 卒業論文.
- [18] 山下弘将, 2024 年度 青山学院大学 理工学部 物理科学科 卒業論文.
- [19] Xiaoling Wu *et al.*, *Chinese Phys. B* **30** 020305 (2021).

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 の一分子検出の精度向上と応用可能性の探求を目的としている。特に、ポアの形状、DNA と半導体材料表面の相互作用、イオン溶液種による DNA ダイナミクスの違い、および粘性による DNA の進入速度の変化を解明し、ナノスケール環境における DNA の動態を定量的に解析することで、ナノポアセンサーの実用化に向けた基盤を築く。

また、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の構築と、物理的刺激が心筋細胞のダイナミクスに及ぼす影響の解析を行う。さらに、OCT を用いた胚発生 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目指す。これらの研究成果を通じて、再生医療や心臓疾患のメカニズム解明に貢献することを目的とする。

1.2 進捗状況及び成果

ナノポアを通過する DNA の物理的ダイナミクスを蛍光顕微鏡で観測し、その動態を有限要素法によるシミュレーションと比較することで、SiN 表面の電荷特性や DNA の正味の電荷量といった、通常は直接測定が困難なパラメータを評価することを目的としている。これまでに、CAT 研究プロジェクトの一環として、日立ハイテクの 3050FIB を用いたナノポアの作製を進め、円筒形のポアに加え、アスペクト比 1:1 から 1:20 のスリット状ポアを作成し、それらの構造が DNA の泳動に与える影響を解析した。特に本年度の研究では、PEG の分子量や濃度を変化させることで電解液の粘性を制御し、DNA のポアやスリット通過速度の低下を試みた。その結果、観測された時間スケールでは統計的に有意な速度変化は確認されなかったものの、副次的な効果として、DNA のポア詰まりの確率が低下する傾向が見られた。この結果は、ナノポアの実用化において重要な知見となる可能性がある。

心筋細胞の研究では、心筋細胞と線維芽細胞の共培養系を用いて、細胞が表面の溝内で集合体を形成する過程を実験的に再現した。線維芽細胞がパイロット細胞として先に表面を埋め、その後、拍動する心筋細胞がその上を覆うことで、拍動の同期化が観測された。また、心筋細胞と線維芽細胞による一次元的な細胞集合体にメカニカル刺

激を与え、応答と自律拍動のリズムの変化を観測する実験では、フィードバック機構を付加することで、刺激のタイミングを自律拍動の位相に基づいて制御することに成功した。さらに、長期間の刺激によって細胞集合体に生物学的な変化が生じることも明らかとなった。その結果、刺激を用いた集合体内のペースメーカー位置の人為的変更が可能であることがわかった。

鶏胚の OCT によるトモグラフィ観測では、鶏胚の殻外観測により、心臓の形成過程の観測に成功した。観察した胚は、自然発生と同程度の確率で成長を遂げた。さらに、エタノールや超音波が胚発生および心臓形成過程に与える影響を調査し、これらの要因が心臓の拍動間隔、胚発生、心臓の形態形成に影響を及ぼすことを確認した。

1.3 今後の課題

次年度は、PEG による粘性環境下での DNA のポア通過について統計的解析を進め、ポア詰まりの確率低減に関する定量的評価を行う。また、ポア形状のさらなる最適化や電解液環境の調整を行い、DNA 通過ダイナミクスの制御手法の確立を目指す。

細胞研究に関しては、人為的に形成された細胞集合体について、異種細胞の比率や細胞の特性を生命科学的に解析する。また、OCT を用いた心臓胚の成長観察において、エタノール添加による心臓の動態変化を三次元的に解析する予定である。さらに、超音波照射が心臓形成に及ぼす影響について、形成過程における超音波に対する感受性の時期と心疾患発生との関連性を調査する。将来的には、超音波を用いた心疾患治療の可能性についても検討を進める。

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

- Yunosuke Fuji, Shin Tkano, Takuma Yoshinaga, Yuuta Moriyama, Toshiyuki Mitsui, Direct observation of a single DNA molecule responding for the AC electric field and different physical environment, the 21st IUPAB (International Union of Pure and Applied Biophysics) June 24-28, 2024 | Kyoto, 27P-113
- Arata Nagai, Kaito Kojima, Hiromu Kuwabara, Yuuta Moriyama, Toshiyuki Mitsui, The mechanical properties of fibroblasts in co-culture system, the 21st IUPAB (International Union of Pure and Applied Biophysics) June 24-28, 2024 | Kyoto, 27P-118

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 旼奭

(1) p-type Cu₂O films deposited by RF sputtering using Cu or Cu₂O targets

Copper(I) oxide (Cu₂O) is a promising candidate as a non-toxic and abundantly available natural p-type oxide semiconductor with a direct band gap. In this study, Cu₂O thin films were deposited by RF magnetron sputtering using Cu metal or Cu₂O targets, aiming to develop the oxide *pn* junction, where their electrical and optical properties were analyzed in detail.

At first Cu₂O films were deposited on alkali free glass (AN100) by reactive RF magnetron sputtering using a Cu metal target. Ar, O₂ and N₂ gases were used as sputtering and reactive gases. In the case of using a Cu metal target, the oxygen flow ratio {*f*_{O₂} : O₂/(O₂+Ar)} was varied from 0 % to 30 % to deposit CuO_{*x*} films. As for *N*-doped Cu₂O depositions, additionally N₂ gas was introduced with flowed ratio varied from 2 to 5 %, where the reproducibility of the electrical properties of the films were found to correlate strongly with the attained vacuum pressure.

Figures 1, 2 and 3 show the XRD, Raman scattering, and optical band gap (E_{opt}), respectively, for the films deposited with *f*_{O₂} of 0-30%. The XRD peaks corresponding to Cu₂O are observed at *f*_{O₂} of 10-13 %, whereas Raman spectra of the films at *f*_{O₂} of 9-10% showed Cu₂O. E_{opt} for the films of *f*_{O₂} of 9-15 % are in good agreement with the Cu₂O band gap energy of 2.5 eV. The *N*-doped Cu₂O were deposited at around *F*_{O₂} of 10% with the optimized N₂ introduction. The Cu₂O films were also deposited using a Cu₂O target. The structural, electrical, and device properties were investigated in detail.

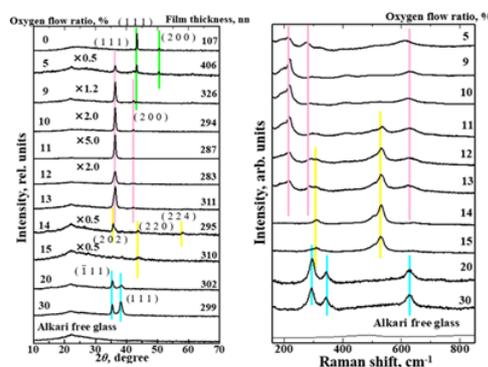


Fig. 1. XRD patterns for the deposited CuO_{*x*} films. Fig. 2. Raman spectrum for the deposited CuO_{*x*} films.

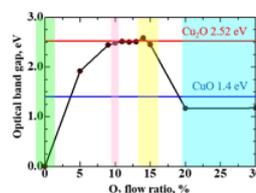


Fig. 3. Optical band gaps for the deposited CuO_{*x*} films.

(2) Independent control of the valence band maximum and conduction band minimum of amorphous Cd–In–Ga–O thin film by adjustment of Cd and Ga concentration

The development of heterojunction semiconductor devices requires a comprehensive understanding and precise control of their band gap, electrical properties, and band structure, among others. In this study, we aim to control the valence band maximum (VBM) and conduction band minimum (CBM) of amorphous oxide semiconductors (AOSs) independently by using the amorphous Cd-In-Ga-O (a-CIGO) system. n-Type a-CIGO thin films were fabricated by RF magnetron sputtering on silica glass substrates at room

temperature. The ionization potential (I_P) and electron affinity (E_A) of these films were systematically investigated using a combination of ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS) and inverse photoelectron spectroscopy (IPES). By varying the CdO:In₂O₃ molar ratio in the sputtering targets, precise control of the VBM was achieved without shifting the CBM, resulting in an upshift of the VBM with increasing Cd concentration as shown in Fig. 1(a). In addition, modulation of the CBM without the VBM shift was achieved by adjusting the In₂O₃:Ga₂O₃ molar ratio, as shown in Fig. 1(b). These results contribute to a deeper understanding of the electronic

properties of not only of a-CIGO thin films, but also of any other AOSs. Also, Optical band gap, mobilities, and carrier concentrations are ~ 3.1 eV, ~ 10 cm²V⁻¹s⁻¹, and $\sim 10^{20}$ cm⁻³, respectively. This study facilitates the design and optimization of oxide semiconductor devices for various applications.

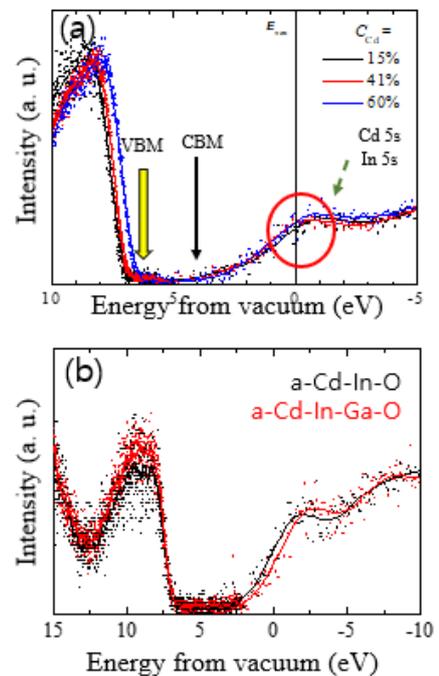


Fig. 1 (a) The UPS-IPES spectra of a-CIO films with different Cd concentrations. (b) Comparison of a-CIO and a-CIGO films.

論文リスト

1. 原著論文

“Thermal conduction in polycrystalline or amorphous transparent conductive oxide films”, J. Jia, Y. Shigesato, Submitted to *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 271 (2024) 112872.

“Thermal transport and topological analyses of the heat-carrying modes and their relevant local structures in variously dense amorphous alumina”, T. Shiga, E. Minamitani, Y. Yamashita, T. Yagi, N. Taketoshi, Y. Shigesato, M. Kashiwagi, *Appl. Phys. Lett.* 125, 012201 (2024); doi: 10.1063/5.0200729.

“Density of States around the Valence Top Region of Cu₂O Thin Films Observed with Constant-Initial-State and Constant-Final-State Photoelectron Yield Spectroscopy”,

S. Inoue, M. Tateno, R. Nakazawa, D. Miyagi, M. Kim, J. Jia, Y. Shigesato, H. Ishii, *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*

First published: 10 February 2025. <https://doi.org/10.1002/pssr.202400403>

2. 欧文誌でのレビュー (Review Article)

“Emerging solid-state thermal switching materials”, Junjun Jia, Shuchen Li, Xi Chen, Yuzo Shigesato, *Advanced Functional Materials*, 20 July (2024) 2406667.

DOI: 10.1002/adfm.202406667.

3. 学会発表等

(国際会議)

Plenary Lecture : Yuzo Shigesato, “Various functional oxide films with high performances deposited by reactive sputtering”, Chinese Materials Conference 2024 and World Materials Conference 2024 (CMC2024 & WMC2024), 7-10 July, 2024 in Guangzhou, Guangdong Province, China.

Yuzo Shigesato, “High-performance very-thin thermochromic VO₂ films deposited by magnetron sputtering”, FC02 International Forum on Frontiers of Energy Materials and Interdisciplinary Materials, Chinese Materials Conference 2024 and World Materials Conference 2024 (CMC2024 & WMC2024), 7-10 July, 2024 in Guangzhou, Guangdong Province, China.

Jia Junjun, Yuzo Shigesato, “Emerging Thermal Switching Materials”, Chinese Materials Conference 2024 and World Materials Conference 2024 (CMC2024 & WMC2024), 7-10 July, 2024 in Guangzhou, Guangdong Province, China.

M. Kim, Y. Shigesato, H. Yanagi Independent control of the valence band maximum and

conduction band minimum of amorphous Cd-In-Ga-O thin film by adjustment of Cd and Ga concentration Transparent Conductive Oxides–Fundamentals and Applications (TCO2024), Germany, Leipzig TCO2024 (2024.09.23-27).

D. Miyagi, M. Kim, Y. Nohara, Y. Oguchi, S. Inoue, R. Nakazawa, I. Tamai, Y. Maeyama, H. Ishii, Y. Shigesato p-type Cu_2O films deposited by RF sputtering using Cu or Cu_2O targets Transparent Conductive Oxides–Fundamentals and Applications (TCO2024), Germany, Leipzig (2024.09.23-27).

S. Inoue, M. Tateno, R. Nakazawa, D. Miyagi, M. Kim, J. Jia, Y. Shigesato, H. Ishii Observation of in-gap state in Cu_2O thin films using constant initial and final states yield spectroscopy Transparent Conductive Oxides–Fundamentals and Applications (TCO2024), Germany, Leipzig (2024.09.23-27)

(国内学会発表)

・「調光ミラー薄膜の水素化・脱水素化反応による熱スイッチの開発」、重里有三、水素化学技術連携研究会前期研究会（水素化学技術連携研究会）、2024. 6. 26-28（6/26）、山梨県立図書館。

・「高圧における水素化マグネシウム系固体水素貯蔵材の第一原理熱伝導解析」、志賀拓磨、藤久裕司、重里有三、八木貴志、B211, 第 45 回日本熱物性シンポジウム (The 45th Japan Symposium on Thermophysical Properties) , October 28-30, 2024, Nagaoka.

・「 N_2 -3% H_2 ガスによる Sm 膜の水素化および脱水素化制御と電気伝導率および熱伝導率の変化 (II) 水素導入反応性スパッタによる SmHx 膜の直接成膜」、上野美紀、山下雄一郎、八木貴志、キムミンソク、小口有希、竹谷敏、岡島敏浩、竹歳尚之、重里有三、B213, 第 45 回日本熱物性シンポジウム (The 45th Japan Symposium on Thermophysical Properties) , October 28-30, 2024, Nagaoka.

・「 KOH 電解液中で電気化学的に水素化・脱水素化を制御した Pd 担持水素化サマリウム (Pd/SmHx) 薄膜のその場熱伝導率計測」、山田皓太、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、B221, 第 45 回日本熱物性シンポジウム (The 45th Japan Symposium on Thermophysical Properties) , October 28-30, 2024, Nagaoka.

・「反応性スパッタで成膜した Pd 担持水素化ガドリニウム (GdHx) 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」、高橋七瀬、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、B222, 第 45 回日本熱物性シンポジウム (The 45th Japan Symposium on Thermophysical Properties) , October 28-30, 2024, Nagaoka.

・「Pd 触媒担持 MgHx 薄膜の N₂-3%H₂ ガス中での in-situ サーモリフレクタンス法による熱伝導率解析」、中野宏樹、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、B223, 第 45 回日本熱物性シンポジウム (The 45th Japan Symposium on Thermophysical Properties) ,October 28-30,2024,Nagaoka.

上野美紀、重里有三、「ガスクロミズムによる Sm 薄膜の水素化／脱水素化反応による熱スイッチの開発」、一般財団法人・総合研究奨励会・第 11 回透明酸化物光・電子材料研究会、2025 年 1 月 24 日、東京大学・本郷キャンパス.

栗原 大芽、鈴木 舞乙、金 昉爽、山田 恭太郎、待永 広宣、重里 有三、「WO₃ 薄膜の透過率変化を用いた水素バリア膜の性能評価」2025 年 第 72 回 応用物理学会 春季学術講演会、2025 年 3 月 16 日、東京理科大学 野田キャンパス (千葉県野田市) & オンライン.

Minseok Kim, Daichi Miyagi, Isao Tamai, Yusuke Maeyama, Yuki Oguchi, Junjun Jia, Yuzo Shigesato. 「Investigation on N-doped Cu₂O Thin Films for High-Performance Cu₂O/Ga₂O₃ p-n Junction Power Devices」 2025 年 第 72 回 応用物理学会 春季学術講演会、2025 年 3 月 17 日、東京理科大学 野田キャンパス (千葉県野田市) & オンライン.

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

てんかんは慢性的な脳の疾患であり、日本国内で約 100 万人、全世界では 5,000 万人もの患者がいると推定されている。主な症状は「てんかん発作」と総称されるもので、突然の意識消失や筋肉の不随意的収縮・弛緩がみられ、これにより日常生活に支障をきたすことが少なくない。発症の根本的な原因は、大脳にある神経細胞の異常な興奮状態にある。どの脳領域で異常な神経活動が発生するか、また発症時期や症状の違いによって、てんかんは多くの種類に分類される。てんかんは、その発症要因により大きく遺伝性と孤発性に分けられる。遺伝性てんかんの中には、発症の原因となる特定の遺伝子が明らかになり、発症メカニズムが解明されているものがある。しかし一方で、遺伝性であると考えられていても、その原因がまだ特定されていないケースも少なくない。治療法としては、電位依存性ナトリウムチャンネル阻害剤や GABA 受容体作動薬など、神経活動を抑制する抗てんかん薬が使用されることが一般的である。しかし、すべての患者に有効なわけではなく、既存の薬では発作を抑えられないタイプのてんかんも存在する。特に難治性てんかんと呼ばれる種類は、治療が困難だけでなく、重篤な知的障害や運動障害を伴い、その影響が生涯続くケースもある。こうした背景から、現在もてんかんの病態解明と治療法開発に向けた研究が進められている。その一環として、研究チームは、K-Cl cotransporter 2 (KCC2) という塩化物イオン輸送体をコードする SLC12A5 遺伝子が、「遊走性焦点発作を伴う乳児てんかん」の原因遺伝子であることを明らかにした。そして、神経細胞内の塩化物イオン濃度の異常な上昇がてんかん発作を引き起こすという新たな発症メカニズムを提唱した (Stöberg et al. Nat. Commun. 2015)。この SLC12A5 遺伝子は、脊椎動物の間で高度に保存されている。

「遊走性焦点発作を伴う乳児てんかん」の研究のために、SLC12A5 遺伝子を欠損させたマウス (ノックアウトマウス) が作製されたが、これらの個体は出生直後に呼吸不全で死亡してしまい、疾患モデルとしての活用が困難だった。そこで研究チームは、別のアプローチとして、硬骨魚類に注目した。硬骨魚類は、進化の過程で遺伝子重複が起こった結果、SLC12A5 遺伝子を 2 つ (slc12a5a, slc12a5b) 持っている。この特性を活かし、CRISPR/Cas9 技術を用いたゲノム編集によって、それぞれの遺伝子を破壊したゼブラフィッシュ変異体 (slc12a5a KO, slc12a5b KO) を作製した。その結果、どちらの遺伝子を欠損してもゼブラフィッシュは成魚まで成長したが、slc12a5b KO の個体に強い光刺激を与えると、てんかん発作を起こすことが発見された。これは、魚類の成体において初めて確立されたてんかんモデルであり、今後の研究に大きく貢献すると期待されている。

1.2 進捗状況及び成果

ゼブラフィッシュ仔魚に赤色光の点滅を照射し、てんかん発作を誘導する実験を用いて全脳活動イメージングを活用し、発作の発生状況を評価した。光点滅の前後における脳活動を GCaMP の緑色蛍光の変化として動画撮影し、その映像に退色補正を適用した上で、脳領域ごとに各フレームのシグナル強度を定量化し、時間経過に沿って解析する方法を採用し、赤色光点滅の前後での脳活動の変化を、脳領域ごとに評価している。slc12a5 変異体（正確には slc12a5a-slc12a5b 二重変異体）の脳活動は振幅が高く、長時間持続するが、scn11a 変異体（正確には scn11aa-scn11ab 二重変異体）は振幅が小さく、持続時間も短い傾向が見られた。

ゼブラフィッシュは遺伝的な純系あるいは近交系として使いやすいものがなかったので、AB 由来系統で近交系を作出する研究に参画し、最終的に 50 世代以上の兄妹交配で得られた M-AB のゲノム解析を行った。M-AB のゲノムは高度にホモ化されており、兄妹交配が確かに繰り返されたことが確認された。ゲノムに残るヘテロ領域はいくつかの領域で集中したが、それは致死バリエーションや致死までいかなくとも生存に影響するバリエーションが対立染色体間で交互に存在する可能性を示唆している。M-AB 系統の 3 個体に共通してホモ化されたゲノム領域で、かつ遺伝子破壊になりうる SNP をリストアップしたところ、いくつかの遺伝子が M-AB で破壊されている可能性が示唆され、これらの変異の部位とタイプを明らかにした。また、M-AB はアンチセンスモルフォリノのインジェクションや CRISPR によるゲノム編集、また To12 トランスポゾンを用いた遺伝子組換え系統の作出において生存率が低くないことが確認され、極めて有用な近交系となることがわかった。

神経発達に障害のある日本人患者で新規の PIG-K 遺伝子バリエーションが見つかり、このバリエーションが疾患の原因であることを示すため、ゼブラフィッシュ PIGK 変異体を用いたレスキュー実験を行った。ゼブラフィッシュ PIGK 変異体にヒト正常型 PIG-K mRNA をインジェクションして正常型 PIG-K を発現させると、PIGK 変異体に特徴的な感覚運動の異常は低下した。一方、ゼブラフィッシュ PIGK 変異体に当該患者で発見されたバリエーションをもつヒト変異型 PIG-K mRNA をインジェクションして変異型 PIG-K を発現させると、感覚運動の異常が確認された。このことから、日本人患者で新規に発見された PIG-K 遺伝子のバリエーションは疾患の原因変異であることがわかった。また、ゼブラフィッシュ PIGK 変異体を用いた解析から、電位依存性ナトリウムチャネルの機能が低下していることがわかり、PIG-K 異常が神経発達障害を引き起こす過程で電位依存性ナトリウムチャネルの機能低下が起きている可能性が示唆された。これらの結果は全身の細胞でユビキタスに機能する GPI アンカータンパク質の生合成酵素のサブユニットの 1 つである PIG-K が神経障害という特異的な病態を引き起こす機序を説明するものである。

1.3 今後の課題

野生型ゼブラフィッシュを含め、変異体仔魚の行動における波長応答性を調べる研究から、多くの異なる波長の光に対してゼブラフィッシュの行動量が変化するという知見を得ており、光に対する応答には光受容分子の関与が不可欠であるが、これらの分子メカニズムを明らかにするための研究を進める予定である。

論文リスト

1. 原著論文

1. Hirata, H., Ishitani, T. and Okamoto, H. (2024) 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. Sadamitsu, K., Yanagi, K., Hasegawa, Y., Murakami, Y., Low, S.E., Ooshima, D., Matsubara, Y., Okamoto, N., Kaname, T. and Hirata, H. (2024) A novel homozygous variant of the PIGK gene caused by paternal disomy in a patient with neurodevelopmental disorder, cerebellar atrophy, and seizures. *J. Hum. Genet.* 69: 553–563.
<https://www.nature.com/articles/s10038-024-01264-3>
3. Sadamitsu, K., Velilla, F., Shinya, M., Kashima, M., Imai, Y., Kawasaki, T., Watai, K., Hosaka, M., Hirata, H. and Sakai, N. (2024) Establishment of a zebrafish inbred strain, M-AB, capable of regular breeding and genetic manipulation. *Sci. Rep.* 14(1): 7455.
<https://www.nature.com/articles/s41598-024-57699-3>
4. Watai, K., Sadamitsu, K., Wada, S., Kashima, M. and Hirata, H. (2024) Zebrafish *trpm7* mutants show reduced motility in free movement. *Dev. Growth Differ.* 66 (6): 349–356.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/dgd.12937>
5. Kashima, M., Komura, R., Sato, Y., Hashimoto, C. and Hirata, H. (2024) A resource of single cell gene expression profiles in a planarian *Dugesia japonica*. *Dev. Growth Differ.* 66(1): 43–55.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/dgd.12893>
6. Mori, K., Aoki, Y., Mikashima, F., Maki, K., Tanaka, T., Hayashi, M., Sugimoto, W., Ono, M., Umekita, S., Niino, T., Fujiwara, M., Ebata, T., Hirata, H. and Kojima, H. (2024) Validation of a new protocol for a zebrafish MEFL (malformation or embryo-fetal lethality) test method that conforms to the ICH S5 (R3) guideline. *J. Tox. Sci.* 49(8): 337–348.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jts/49/8/49_337/_html/-char/en
7. 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>

8. Omata, K., Kashima, M., Ohkido-Yamamoto, M., Murai, N., Ishikawa, K., Hirata, H. and Kato, T. (2024) Canonical and non-canonical functions of erythropoietin and its receptor in mature nucleated erythrocytes of western clawed frog, *Xenopus tropicalis*. *Zoolog. Sci.* 41(4): 329-341.
<https://bioone.org/journals/zoological-science/volume-41/issue-4/zs240004/Canonical-and-Non-Canonical-Functions-of-Erythropoietin-and-Its-Receptor/10.2108/zs240004.short>
 9. Takeuchi, I., Tanase-Nakao, K., Ogawa, A., Sugawara, T., Migita, O., Kashima, M., Yamazaki, T., Iguchi, A., Naiki, Y., Uchiyama, T., Tamaoki, J., Maeda, H., Shimizu, H., Kawai, T., Taniguchi, K., Hirata, H., Kobayashi, M., Matsumoto, K., Naruse, K., Hata, K., Akutsu, H., Kato, T., Narumi, S., Arai, K. and Ishiguro, A. (2024) Congenital anaemia associated with loss-of-function variants in DNA polymerase epsilon 1. *J. Med. Genet.* 61 (3): 239-243.
<https://jmg.bmj.com/content/61/3/239>
 10. Hirata, H., Tezuka, T. and Ujibe, K. (2024) Aging and Senescence Studies in Human and Zebrafish. *Gerontology as an Interdisciplinary Science* (Current Topics in Environmental Health and Preventive Medicine). Springer. ISBN 978-9819727117. 2024年7月23日。
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-2712-4_1
2. 国際会議プロシーディング
11. Hirata, H. Plasticity of glycinergic synapses and escape behavior in zebrafish. CNU Conference of Advanced Technology 2024. Chungnam National University, Daejeon, Korea. 2024年11月14日。(国際シンポジウム招待講演)
3. 受賞等
なし

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

太陽光発電は世界的に普及が進んでおり、最も安く電気を生み出すことができる技術・産業に発展してきている。再生可能エネルギーの中でも太陽光発電は基幹エネルギーとして成長してきており、今後、基幹エネルギーとしての役割を果たすための技術開発が重要となっている。一方、メガソーラーなどの大規模な太陽光発電の発展だけでなく、設置面積の限られている環境に設置を目指す高効率太陽電池の開発や、屋外ではなく屋内光を有効利用する太陽電池の開発など、様々な用途に合わせた太陽電池の開発が展開されている。

屋内光の有効利用は IoT デバイスの電源としても利用でき横展開が期待できることから、高い注目を集めているが、屋内環境は照射強度が屋外に比べて数百分の1程度と低く、また光スペクトルも屋外光と異なるため、屋外用途と同様な材料・太陽電池構造では高効率化が困難であり、屋内環境下での高効率化に向けた個別材料・素子構造研究が重要である。本研究では、屋内環境で利用することを目的としたペロブスカイト太陽電池の材料および素子構造を設計し、実証を目指す。

1.2 進捗状況及び成果

ペロブスカイト太陽電池を構成する電子輸送層および正孔輸送層において、屋内環境のような低照度条件下での電子物性が素子特性に与える影響が強いことがこれまでの研究で判明している。そこで、まず電子輸送層に注目し、低照度環境下での特性変化を検討した。

屋外環境用として開発されているペロブスカイト太陽電池の電子輸送層には、 TiO_2 や SnO_2 が利用されている。当研究においても同程度の膜厚で上記材料による電子輸送層を形成し太陽電池を作製したところ、屋外環境下での特性に顕著

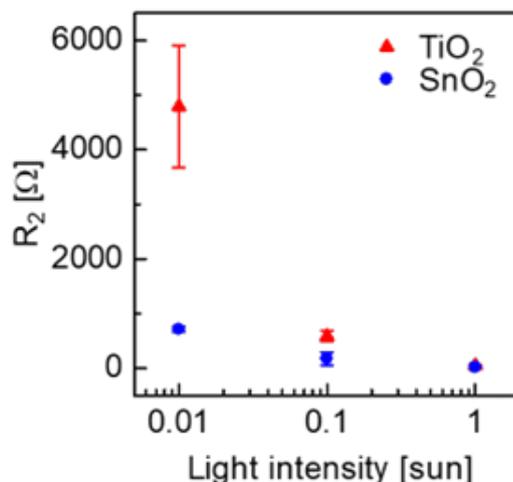


図 1 光照射強度が電子輸送層のキャリア輸送抵抗に与える影響

な違いは見られなかった。しかし、低照度環境では、素子特性の大きな違いが表れた。そこで、電子輸送層のキャリア輸送抵抗を評価した。図 1 に評価結果を示す。縦軸の R_2 は、太陽電池のインピーダンス測定から推定される電子輸送層のキャリア輸送抵抗を示している。光照射強度を低下させると、 TiO_2 を用いた太陽電池では急激な抵抗増加が確認された。一方、 SnO_2 を用いた太陽電池では抵抗値の増加が大きく抑制された。本抵抗は、素子に対して直列接続される成分となるため、低い抵抗値が望ましい。即ち、低照度環境下では SnO_2 を電子輸送層として利用した方が高効率となることが判明した。

ペロブスカイト太陽電池では、正孔輸送層として Spiro-OMeTAD のような有機半導体が一般的には利用されているが、高価であり、また水分などの影響により特性劣化しやすい。そのため、無機半導体への代替による安定性向上が注目されている。正孔輸送する P 型の無機半導体として NiO_x が広く検討されているが、低照度環境下での検証はされていない。そこで NiO_x の低照度環境下での影響を検討するべく、 NiO_x 薄膜形成を試みた。

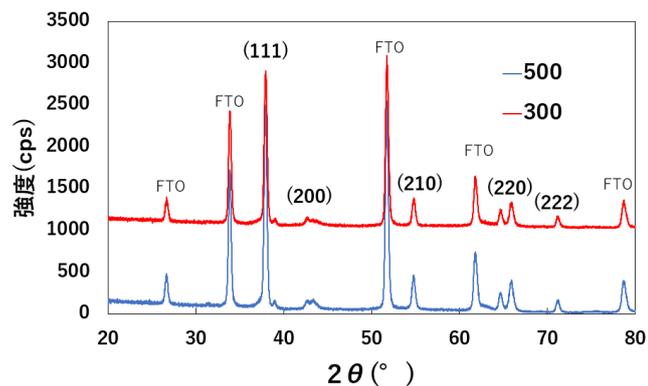


図 2 焼成温度が NiO_x 薄膜の結晶性に与える影響

FTO (F-doped Tin Oxide) をコーティングしたガラス基板上に NiO_x を形成した。形成する際の焼成温度を変更し、 NiO_x としての結晶性変化を X 線回折測定 ($\theta - 2\theta$ 法) で検証した。図 2 に焼成温度が NiO_x 薄膜の結晶性に与える影響を示す。300°C および 500°C で焼成しても結晶性に大きな影響は見られなかった。XRD パターンだけでなく半値幅も大きな変化はなく、300°C の焼成においても結晶性 NiO_x 薄膜が形成できることが判明した。今後、ペロブスカイト太陽電池に実装し素子特性評価を試みる。

1.3 今後の課題

屋内環境に適した電子輸送層材料を用いたペロブスカイト太陽電池の作製を試み、現在のところ、30%程度の変換効率が実現している。今後、電子輸送層材料の物性条件を更に検証することで、より高効率な太陽電池特性を目指す。また、今回開発した NiO_x を用いたペロブスカイト太陽電池の評価を進め、屋内環境下で利用可能か検証する。加えて、屋内環境光に適したバンドギャップを有するペロブスカイト光吸収層の開発、およびその材料に適合する電子輸送層の伝導帯エネルギー準位調整が必要であり、今後検討を進める予定である。

論文リスト

1. 原著論文

- [1]. Tomoki Asada, Itaru Raifuku, Fumihiro Murata, Kazuya Hayashi, Hiroaki Sugiyama, and Yasuaki Ishikawa, "Influence of the electron transport layer on the performance of perovskite solar cells under low illuminance conditions", ACS Omega 9 (2024) pp. 32893-32900.
- [2]. 來福 至, 石河 泰明, "屋内応用へ向けたペロブスカイト太陽電池の高効率化に関する取り組み", Journal of Japan Solar Energy Society, 特集「ペロブスカイト太陽電池の研究開発と物性の理解」 2024, vol.50, pp.36-41.

2. 国際会議

- [1]. Koki Kimura, Tatsuro Kawamura, Itaru Raifuku, and Yasuaki ishikawa, "Defects evaluation of perovskite solar cells using electrical and optical characterization methods", The 35th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-35) (10-15, Nov. 2024, Numazu) Th2-P51-04.
- [2]. Yasuaki Ishikawa, "Perovskite-based photovoltaics toward indoor and outdoor applications", International Symposium on Solar Energy (22-23, Jul. 2024, Fukuoka) (invited).

3. 国内会議

- [1]. 杉本 英哉, 高橋 菜々花, 來福 至, 石河 泰明, "3ハライド型ワイドバンドギャップペロブスカイト太陽電池のモフォロジー改善", 第72回 応用物理学会 春季学術講演会 (14-17, Mar. 2025, Chiba) 17a-K405-7.
- [2]. 仁平 真一郎, 來福 至, 石河 泰明, "水溶液プロセスにより作製した酸化チタン薄膜を用いたプラナー型ペロブスカイト太陽電池の作製および評価", 第72回 応用物理学会 春季学術講演会 (14-17, Mar. 2025, Chiba) 14p-P08-24.
- [3]. 早川 萌瑛, 來福 至, 石河 泰明, "熱蒸着 Ni 薄膜を前駆体とした NiO_xを用いた逆構造型ペロブスカイト太陽電池の作製および評価", 第72回 応用物理学会 春季学術講演会 (14-17, Mar. 2025, Chiba) 14p-P08-23.
- [4]. 尾川 大悟, 松枝 息吹, 來福 至, 石河 泰明, "電子輸送層の材料物性がペロブスカイト太陽電池の低照度特性に与える影響", 第72回 応用物理学会 春季学術講演会 (14-17, Mar. 2025, Chiba) 14p-P08-4.
- [5]. 來福 至, 石塚 凌, 木村 公紀, 鷲足 涼, 石河 泰明, "エレクトロルミネッセンス法によるペロブスカイト太陽電池の評価に関する検討", 電気学会電子材料研究会「電気学会電子材料研究会「エコシステム材料の合成・プロセスと次世代デバイス応用への展開」 (28-29, Nov. 2024, Osaka) EFM-24-001(invited).

- [6]. 松枝 息吹, Nguyen Chung Dong, 來福 至, 石河 泰明, “2次元デバイスシミュレーションによる屋内用途ペロブスカイト太陽電池の特性解析”, 第85回応用物理学会 秋季学術講演会 (16-20, Sept. 2024, Niigata) 18p-P09-48.
- [7]. 青木 智沙, 來福 至, 石河 泰明, “臭素含有ペロブスカイト薄膜の相分離に対する光照射条件の影響”, 第21回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (第4回日本太陽光発電学会学術講演会) (11-12, Jul. 2024, Hiroshima) PB-12.
- [8]. 木村 公紀, 河村 達朗, 來福 至, 石河 泰明, “電気的および光学的評価手法を用いたペロブスカイト太陽電池の欠陥評価”, 第21回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (第4回日本太陽光発電学会学術講演会) (11-12, Jul. 2024, Hiroshima) PB-11.

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：グラフェン透明導電膜のマイクロ波帯デバイスへの応用

優れた導電性と高い透明性を持つグラフェンについて、TCF (transparent conductive film) としての種々の応用検討が行われている。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、ミリ波帯における伝送線路^[1]やアンテナの放射素子としての性能評価を行った。本研究では、種々グラフェンの電波透過特性を評価することで、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では、光学的透過率 90%を維持しながら電波透過率を 20%まで低減する EMI 特性を実証した。

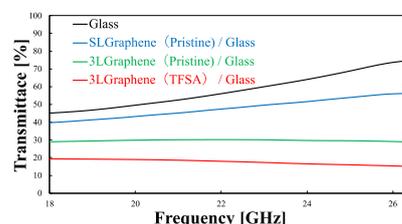
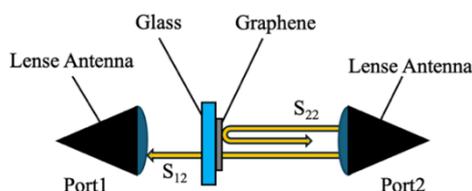


図 1：自由空間法を用いた EMI 測定系の概略図 図 2：電波透過スペクトル

研究項目 2 : ナノカーボン材料インクを用いた印刷エレクトロニクス

IoT (モノのインターネット) 機器に代表される次世代電気デバイスの普及に伴い、フレキシブルなアンテナの需要が高まっている。電気伝導度やフレキシブル性、耐久性、軽量性で優れた特性を有する SWCNT (単層カーボンナノチューブ) を導電性フィラーとして用いたインクを印刷することで、簡便かつ再現性良くフレキシブルなアンテナを作製し、そのアンテナ特性を評価した。本研究では、フレキシブル基板として一般的に用いられる PET (polyethylene terephthalate) 基板上に SWCNT アンテナを作製し、フレキシブルアンテナが実際に使用される際と同等の湾曲条件で、放射パターンと Wheeler cap 法を用いた放射効率の測定を行った。SWCNT アンテナは湾曲の有無に関わらず、金属 (Cu) アンテナに近い放射パターンを描き、入力した電力と放射した電力の比で表される放射効率は、実用可能レベルと言われる 80%以上を達成した。

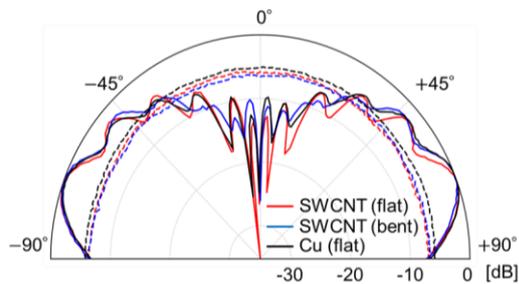


図 3 : アンテナの放射パターン

Antenna type	Radiation resistance [Ω]	Conductor loss [Ω]	Radiation efficiency [%]
Flat SWCNT	12.8	3.3	80.0
Bent SWCNT	11.5	2.2	83.7
Cu	10.3	1.5	87.3

表 1 : アンテナの放射効率

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、免疫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。

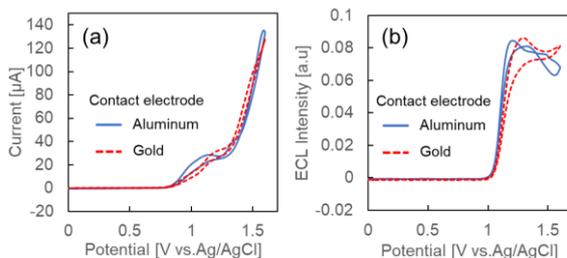


図 4 : セルロース/グラフェン電極の測定結果
(a) CV 曲線 (b) ECL 強度-電位曲線

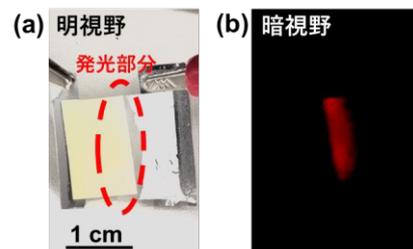


図 5 : 作製したチップ電極の写真
電極間電圧: (a) 0 V (b) 4.3 V

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ンブルー（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。

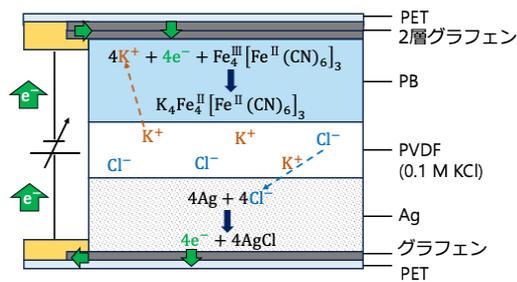


図 6：作製した EC デバイスの模式図

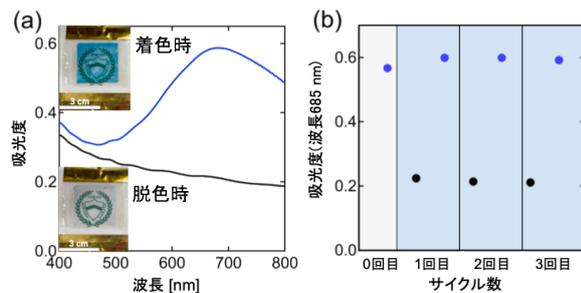


図 7：(a) 着色/脱色時の可視吸収スペクトル
(b) 吸収中心波長における吸光度サイクル

1.3 今後の課題

2024 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、グラフェン透明導電膜については、透明アンテナや透明電波シールドへの応用において更なる低抵抗化が必須であり、2025 年度には、新規に導入している h-BN 膜や金属薄膜とのハイブリッド化などのアプローチから低抵抗化を実現させていきたい。併せて、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] Sho Kuromatsu, Takeshi Watanabe, Yoshiyuki Nonoguchi, Ryosuke Suga and Shinji Koh, "Single-wall carbon nanotubes-based flexible monopole antenna with high radiation efficiency," *Engineering Research Express* **6**, 045367 (2024).
- [2] Ryota Okuda, Kei Kokubu, Kaname Hatada, Eli Hashimoto, Yamato Shinada, Takeshi Watanabe, Shinji Koh, "Conductive three-layer-stacked polycrystalline graphene intercalated with FeCl₃," *Diamond Related Materials* **148**, 111469 (2024). OPEN ACCESS
- [3] Masato Sugawara, Takeshi Watanabe, Yasuaki Einaga, Shinji Koh, "Impact of Gate Electrode on Free Chlorine Sensing Performance in Solution-Gated Graphene Field-Effect Transistors," *RSC Advances* **14**, 7867-7876 (2024). OPEN ACCESS
- [4] Yuito Horita, Taiki Fukase, Hibiki Kisaka, Sho Kuromatsu, Yusuke Sato, Kazuyuki Endo, Takeshi Watanabe, Suga Ryosuke and Shinji Koh, "Fabrication of highly conductive polyester fabrics using single-wall carbon nanotubes inks for EMI shielding," *Jpn J. Appl. Phys.* **63**, 04SP01 (2024).

2. 国際会議プロシーディング

- [1] Miki Fukuzawa, Takeshi Watanabe, Sho Kuromatsu, Shinji Koh, "Fabrication and Characterization of Electrochromic Devices Utilizing CVD Graphene"
PRiME 2024, Z01-4559, Hawaii Convention Center, October 8 (2024)
- [2] Mayano Yamanouchi, Takeshi Watanabe, Masakazu Dohi, Yasufumi Yokoshiki, Nobuyuki Sanari, Isao Hiyama, Yasuyuki Takazawa, Takanori Enomoto, Takashi Tokuda, Shinji Koh, "Neural Network-Based Electrochemical Sensors for Free Chlorine Detection"
PRiME 2024, Z01-4776, Hawaii Convention Center, October 8 (2024)

3. 受賞等

- [1] 分子研 UVSOR シンポジウム 2024 最優秀学生発表賞：橋本恵里
- [2] 炭素材料学会優秀ポスター賞：笠谷 彪雅
笠谷 彪雅、生駒 璃音、小島 怜、渡辺 剛志、黄 晋二
「乱層積層 CVD グラフェンへの分子修飾と電気的特性」
第 51 回炭素材料学会 103p-2P39、九州大学筑紫キャンパス 2024 年 11 月 28 日

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、電子機器を充電することができる技術である。充電が簡便に行えるため、携帯電話の充電器として普及が進んでいる。さまざまな企業や研究機関でより汎用性の高いワイヤレス送電技術の研究が進められているが、送受電間のコイルの位置ずれによる送電電力低下や効率低下の解消が課題となっている。この課題に対応するため、複数の送電コイルからなるシステム(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、安定した送電動作で効率よく送電できる制御手法がこれまでなかった。

マルチ送電コイル最適制御(Multi-Coil Transmitter Optimal Control, MTOC)は当研究室で提案されたマルチフェーズワイヤレス送電システムのための制御手法である。本制御を用いることにより、受電コイルの位置に依らず、より高い精度の定電力を最大効率で送電することが可能である。本研究ではこれを平面型ワイヤレス送電システムと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している。

1.2 進捗状況及び成果

1.2.1 平面型ワイヤレス送電システム

平面型ワイヤレス送電システムは、送電部が複数のコイルを平面上に密に並べた構造を有する。この構造により、受電コイルの位置に依らず、ある程度安定した電力を送電することが可能であるが、受電コイルが傾いたり、垂直方向に位置ずれした場合は送電電力の変動は避けられない。本年度は先行研究に引き続き MTOC を使用し、上記のケースでも安定した電力の送電を実現できること、また高い送電効率で動作できることを確認した。その一方でコイルに電力を供給するインバータの大型化・高コスト化の課題がある。そこでインバータとコイル間に安価な切替スイッチを挿入することでこの問題を解消することを図った。また同時に受電コイルの位置検出方法や位置追従方法を提案した。実験による動作検証の結果、これら提案手法は期待通り動作し、コストや設置面積の縮小の他、効率改善や動作の汎用性の拡大などが確認された。

1.2.2 球体型ワイヤレス送電システム

球体型ワイヤレス送電システムは3つの円形コイル球体の表面に互いに 90° の角度

を持たせて設置したものである。本コイルに MTOC を適用することで、位置や角度に寄らず安定した電力を受電コイルに送電することができる。本年度はまずシミュレーションで所望の送電特性を得られることを確認し、その後、実験にて動作検証を行った。実験では、受電コイルが送電コイルの近傍にある場合は良好な動作が得られたが、距離が離れると動作が不安定となった。これはインバータのスイッチング速度や制御安定性の問題、受電制御方式に起因していると考えられる。

1.3 今後の課題

1.3.1 球体型ワイヤレス送電システム

実験で確認された不安定動作を解消するため、高速なスイッチングを行えるインバータの開発や、MTOC を適用したシステムのモデル化と安定性の解析、そして受電部の制御アルゴリズムの開発を行う予定である。

論文リスト

1. 原著論文

K. Matsumura, A. Hata, H. Matsumoto and Y. Sato, "Optimal System for a Free-Positioning Wireless Power Transmitter with Coils Arranged in a Square Pattern," IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 13, no. 5, pp. 503-511 (2024. 5)

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 1 年		松本	侑樹
研究分担者	熱工学研究室・修士課程 1 年		森田	孝紀

1.1 研究目的

相変化スラリーの一種である糖アルコールスラリーは、幅広い温度範囲に適用可能なスラリーとして注目されている。相変化スラリーの適用可能温度は、分散させる蓄熱材と溶液の相平衡温度に依存するが、糖アルコールは溶質の種類が豊富であり、さらに共融混合物を作成できるため、様々な相平衡温度に調整可能である。このため、糖アルコールスラリーは 20～90 °C 程度の温度範囲に適用可能であり、太陽光集熱システムなどにおける蓄熱・熱輸送媒体としての利用が期待される。

しかしながら、糖アルコール水溶液では、結晶の生成速度が極めて遅く、一定時間内に予測した量の結晶を得られないことが示唆されている。本研究では、糖アルコールを対象とし、水溶液からの結晶生成を(1)溶液からの結晶の析出 および(2)溶液からの結晶成長の二つの側面に分け、過飽和度と粘度がそれぞれの結晶生成速度にどのような影響を及ぼすのかを検討する。これにより、水溶液中での結晶生成メカニズムを解明することを目的とする。

さらに、得られた知見を基に、水溶液中の溶質の生成量を推算できるモデルの提案を目指す。また、糖アルコールスラリーを配管内で流動させた際の熱伝達係数を測定し、その伝熱特性を明らかにすることにも取り組む。

1.2 進捗状況及び成果

本年度は(1)溶液からの結晶の析出に関する研究を進め、キシリトール水溶液を対象に、冷却系および断熱系での晶析実験を実施した。

冷却系の実験では、過飽和状態のキシリトール水溶液を調製し、所定の過飽和度を維持しながら晶析を進行させ、固相率の時間変化を測定した。一方、断熱系の実験では、冷却系と同様に過飽和状態のキシリトール水溶液を調製した後、断熱容器内に移し替えて晶析を行い、晶析に伴う温度上昇および固相率の時間変化を測定した。

冷却系の実験結果の一例を図 1 に示す．過飽和度を一定に保ちながら冷却を行ったが，晶析に伴う析出熱の影響により，わずかに温度上昇が見られた．また，晶析速度に着目すると，結晶析出開始後に時間を経てから晶析速度がピークに達し，その後，減少に転じることが確認された．さらに，固相率が予測される最終固相率に近づくにつれ，晶析速度がほぼゼロとなることが分かった．図 2 には，それぞれ初期過飽和度および初期水溶液濃度を変化させた際の晶析速度を示す．これらの結果から，過飽和度が大きい場合，および初期水溶液濃度が高い場合に，晶析速度が増加することが分かった．

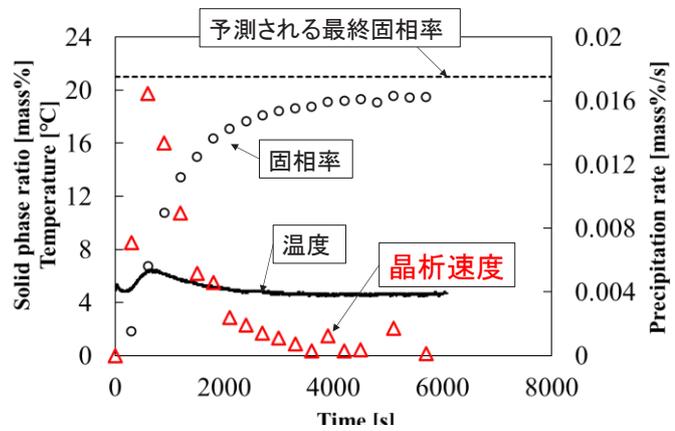


図 1 晶析速度の計測結果

初期水溶液濃度: 61 mass%, 過飽和度: 15K

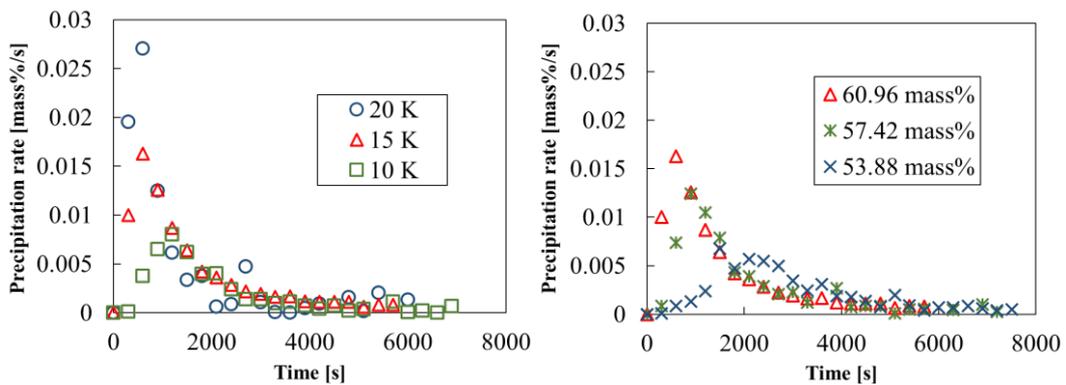


図 2 冷却条件下における晶析速度の推移

(左: 初期水溶液濃度 61 mass%, 右: 過飽和度: 15 K)

以上の知見を基に，キシリトール水溶液からの結晶析出速度の予測式を式(1)として提案した．

$$\frac{d\phi}{dt} = A \times \phi \times (\phi_{\text{fin}} - \phi)^2 \times \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (1)$$

図 3 は冷却系および断熱系における実験結果と，式(1)に基づいて算出した晶析速度の予測値との比較結果である．係数 A は過飽和度および初期濃度に応じて変化するパラメータとし，係数 B はすべての条件において 200 に固定した．図から，すべての実験条件において，式(1)で算出した値が実験結果と良好に一致することが確認された．これにより，キシリトール水溶液中のキシリトール晶析速度は，現在の固相率，およびその時の溶液濃度と初期濃度に基づいて算出される最終固相率に大きく依存している

ことが明らかとなった。

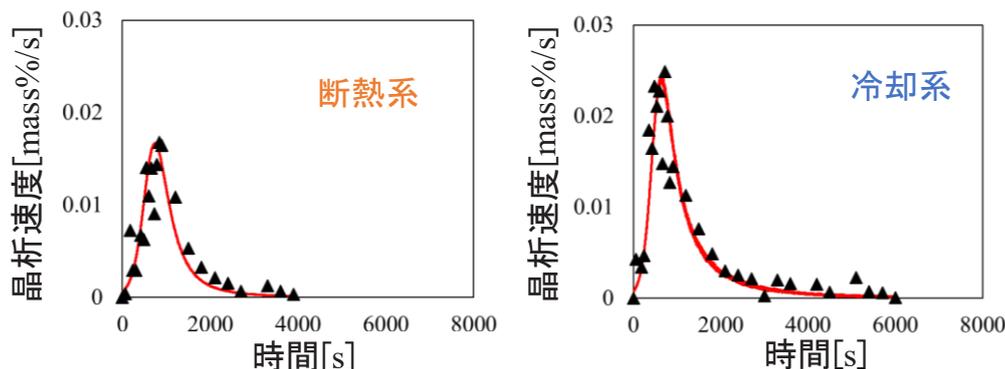


図3 晶析速度の比較結果
(初期水溶液濃度 57.4 mass%, 過飽和度:20 K)

1.3 今後の課題

今年度はキシリトールを対象として晶析実験を実施した。しかし、糖アルコールには融点本年度は、キシリトールを対象とした晶析実験を実施した。しかし、糖アルコールには融点の異なる複数の種類が存在し、実用上は使用温度域に近い融点を持つ糖アルコールの利用が想定される。このため、今後は他の糖アルコール、例えば エリスリトールやマンニトール に対して、今回得られた予測式の適用可能性を検討する。また、糖アルコールが 2 種類以上溶解した水溶液における晶析特性についても明らかにする。さらに、溶液からの糖アルコール結晶の成長特性の解明にも取り組む予定である。

論文リスト

1. 原著論文

1. Takashi Morimoto, Ryo Sasaki, Yoshikazu Teraoka, Hiroyuki Kumano, Study on growth characteristics of TBAB clathrate hydrate from flowing TBAB solution in a rectangular channel, International Journal of Refrigeration, Vol. 170, 2025, pp.19-30.
2. Hiroyuki Kumano, Takashi Morimoto, Shu Mikami, Hirotaka, Ishii, Study on effects of anti-freeze protein and polyvinyl alcohol on the production and flow behavior of ice slurry, International Journal of Refrigeration, Vol. 167, 2024, pp. 23-34.
3. Hiroyuki Kumano, Takashi Morimoto, Kohta Tanaka, Toshie Koyama, Masayuki Tanino, Effects of solutes and additives on ice growth prevention in ice slurry production, International Journal of Refrigeration, Vol. 168, 2024, pp. 389-398.

2. 国際会議プロシーディング

1. Takashi Morimoto, Toshikazu Esaki, Takato Kimura, Hiroyuki Kumano, Heat transfer characteristics of water oil plug flow in a horizontal circular tube, 10th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Rhodes Island, Greece, 2024/8, No. 19.

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 西宮 康治朗

1.1 研究目的

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、高強度、軽量、低熱膨張率など優れた特性を持つため、近年では航空宇宙やスポーツ分野など幅広い利用が進められている。一方、CFRP は樹脂割れ、層間はく離、繊維破断などの様々な損傷形態があり、これらを分類できれば CFRP の健全性診断に有効であり、AE 法はその可能性を有している。AE 波は破壊源の特徴 (損傷モードや規模、速さなど) を含むため、その振幅や周波数特性などの特徴量に基づいた分類が試みられ、AE 波の周波数特性と CFRP の損傷形態との関連性が報告されている⁽¹⁾。しかし、CFRP 中を伝搬する波動は母材である高分子や繊維の影響を受けて減衰し、その挙動は周波数に依存するうえ、CFRP は異方性材料であるため伝搬方向にも依存する。また、CFRP は薄板として利用されるため AE 波はラム波として伝搬し、減衰はラム波の伝搬モードによっても異なる。そのため、同一損傷であっても AE 波の伝搬経路によって波形の特徴が異なり、正確な損傷分類を難しくしている。そこで、本研究の目的は CFRP の損傷時に発生する AE 波から特定のラム波伝搬モードを抽出し、予め求めた減衰係数を用いて補正することで確度の高い損傷分類を行うことである。

1.2 進捗状況及び成果

ラム波の伝搬特性は伝搬媒体の弾性的性質、厚さ、密度によって決定されるため、最初に本研究で使用した一方向 CFRP 板 ([0]₁₁, 厚さ: 2.7 mm, 密度: 1515 kg/m³) を伝搬するラム波の各モードの速度分散曲線を求めた。Table 1. に計算に用いた弾性特性を示す。添え字の 1, 2, 3 はそれぞれ繊維方向, 繊維と直交方向, 厚さ方向である。これらの値は引張試験及び厚さ方向の縦波, 横波速度から実験的に求めた。

Table 1. Elastic properties of unidirectional CFRP plate.

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12} [-]	ν_{23} [-]
120	8.26	4.07	0.309	0.211

Fig. 1. に繊維方向 (0°) と繊維と直交方向 (90°) でのラム波の群速度分散曲線を示す。伝搬方向によって分散曲線は大きく異なる。また、200 kHz 以降の周波数帯では基本モード (A_0 , S_0 モード) だけではなく高次モードが存在し、同一周波数帯に複数のモードが存在する。本研究では、周波数領域でのスペクトルの特徴を用いるため、すべての周波数成分を含んでいる A_0 モードの抽出を行った。

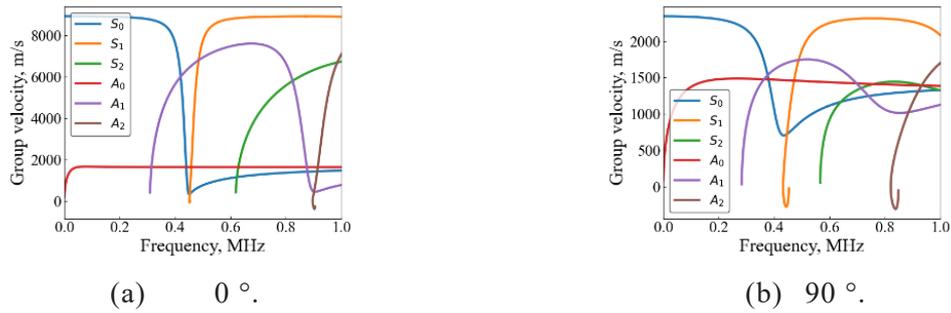


Fig. 1. Lamb wave group velocity dispersion curves for 0° and 90° propagation

伝搬距離 x におけるラム波の振幅値 P は、減衰係数 α を用いて、広がり損失を考慮した式(1)で表される。

$$P(x, f) = P(0, f) \frac{1}{\sqrt{x}} \exp(-\alpha(f, \theta)x) \quad (1)$$

ここで f は周波数、 θ は伝搬角度である。本研究では AE 波の減衰補正を行うため、レーザ超音波法を用いて A_0 モードの減衰係数 $\alpha(f, \theta)$ を求めた。Fig. 2 に測定した各伝搬方向の A_0 モードの減衰係数の周波数依存性を示す。 A_0 モードの減衰係数は周波数とともに線形的に増加していたため、原点を通る一次関数で近似を行った。各伝搬方向の近似直線の傾きを Fig. 3. に示す。傾きは角度とともに増加する傾向があり、伝搬角度が 90° に近づくにつれて同じ周波数でも減衰が大きい。これは CFRP の粘弾性的性質も炭素繊維の影響によって異方性を有する⁽²⁾ためと考えられる。そのため一方向 CFRP の対称性を考慮して、90°方向を極値とする 2 次関数で近似した。この式に基づいて各伝搬角度の A_0 モードの減衰係数を求めた。

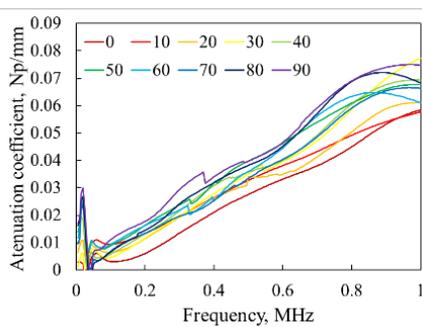


Fig. 2. Attenuation coefficient of A_0 mode.

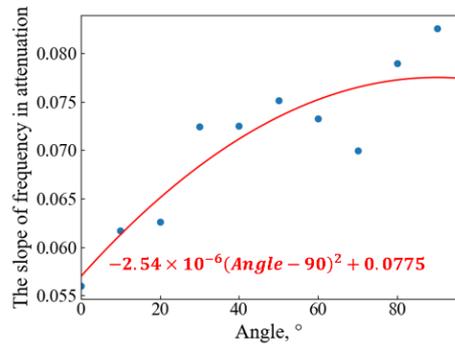


Fig. 3. Anisotropy of A_0 mode attenuation.

Fig. 4 に今回行った三点曲げ試験の試験片およびセンサ配置を示す。この試験片では AE センサ (AE-900M, 直径: 5 mm) は試験片中心から半径 60 mm の円周上に繊維方向 (0°) に対して 0°, 30°, 60°, 90°方向に設置した。また、この破壊源位置を限定する

ためにノッチを施した．三点曲げ試験は SHIMADZU 社製サーボパルサを用いて荷重点変位速度を 3.0×10^{-3} mm/s, 支点間距離を 100 mm で行った．また，今回対象とした AE は AE-900M センサ（黄色丸）で検出されたものである．

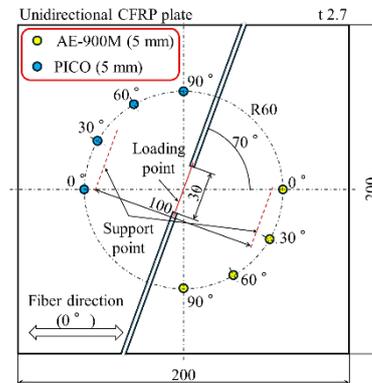


Fig. 4. Specimen dimensions and sensor layout.

Fig. 5 に試験時の荷重（赤線）と累積 AE 数（青線）の経時変化を示す．荷重は時間とともにほぼ直線的に増加したのち 1450 N で破断した．AE は 6844 イベント検出された．位置標定は各 AE センサへのラム波 A_0 モードの到達時間差と A_0 モードの群速度を用いて行った．位置標定結果を Fig. 6 に示す．また，図中にノッチ位置も示す．AE は応力が集中するノッチ部先端付近から発生していた．また，試験片は青破線で破断しており，破断部近傍にも集中していた．今回，解析対象とする AE イベントは Fig. 6 の赤枠内とした．これは AE 音源位置-センサ間にノッチが存在する場合，AE はノッチで回折して伝搬するため，AE の伝搬距離は AE 音源位置-センサ間の直線距離よりも長くなり，その分減衰が大きくなることが予測される．そのため，解析対象にする AE をノッチ部の X 軸正方向側に限定した．

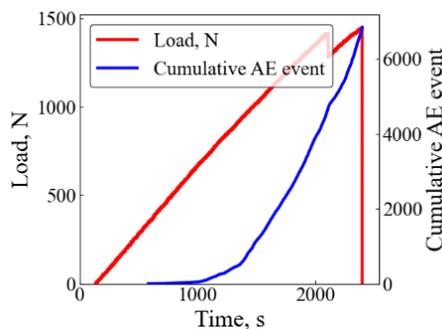


Fig. 5. Change in stress and cumulative AE event with time during the three-point bending test.

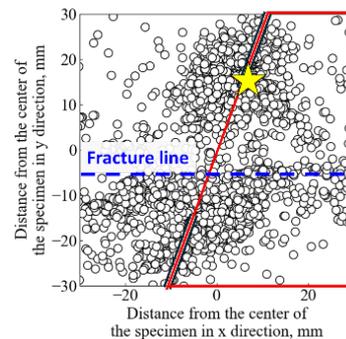


Fig. 6. Estimated AE locations for each sample during three-point bending testing.

次に流域変換を用いた A_0 モードの抽出を行った．流域変換⁽³⁾は画像の濃淡を地形の標高として考え，標高が低い谷の部分流域として，各流域の境界を決定する方法である．今回は，流域変換をウェーブレット変換による時間-周波数平面上のエネルギー分

布に適用し A_0 モードの抽出を行った. Fig. 7 に S_0 で検出された AE (Fig. 6 の黄色シンボル) の波形 (黒) と抽出した A_0 モード (赤), Fig. 8 に Fig. 7 の AE 波形のウェーブレット変換結果を示す. また, 図中の白線は流域変換による境界線であり, 赤破線は音源位置から得られた A_0 モードの到達時間である. 流域変換は高エネルギーが低地, 低エネルギーが高地になるようにエネルギー分布を反転させてから行った. A_0 モードの抽出は, A_0 モードのエネルギーが存在する領域範囲上の Wavelet 係数を逆変換することで行った. その結果, 抽出された A_0 モードは 125 μs 付近のパルス状の波形であった.

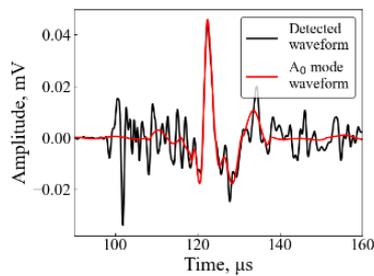


Fig. 7. A_0 mode waveform extracted from the original waveform.

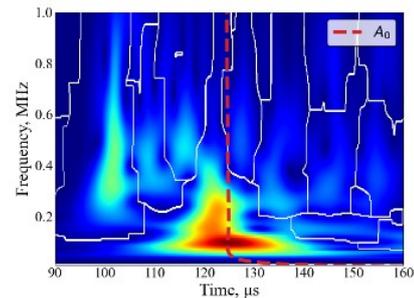


Fig. 8. Wavelet transform results, watershed boundaries, and group velocity dispersion curves.

Fig. 9. に減衰補正前後の A_0 モードの周波数スペクトルを示す. 抽出された A_0 モードの減衰補正は, 補正前の周波数領域の振幅 $P(x, f)$ (Fig. 9.(a)) に対して, AE 音源位置から求めた伝搬距離 x と伝搬角度 θ に基づき, 予め測定した減衰係数 $\alpha(f, \theta)$ を用いて式 (1) における初期振幅 $P(0, f)$ を求めることで行った. 補正後の周波数スペクトル (Fig. 9.(b)) では 200 kHz 以降の周波数帯で振幅が大きくなっている. 次に, 補正の効果を確認するため周波数スペクトルからエネルギー ($\sum P(f)$) を求め, 補正前後で比較した. Fig. 10 に異なる角度に設置したセンサで検出された同一 AE イベントのエネルギー差 (0~200 kHz) の頻度分布を示す. 図中の赤棒は補正前, 青棒は補正後である. この周波数帯はラム波の基本モードのみが存在する周波数帯でもある. それぞれの試験片で補正の効果が確認された場合 (a) と確認できなかった場合 (b) を示す. また, 横軸は, エネルギー差の比で, 0 に近いほど同じエネルギーであることを示し, 補正が十分に行われていることを意味している. 縦軸の頻度は, 解析対象の全 AE 数に対する割合である. 図中の黄色の網掛けは, エネルギー差が $\pm 20\%$ の範囲であり, この領域であれば補正が十分に行われたと考えている. 補正前ではエネルギー差の最頻値は $\pm 20\%$ 領域外であり, 減衰の影響が確認できる. 補正後 (Fig. 10.(a)) の最頻値は $\pm 20\%$ 以内に存在し, その領域内の割合は Fig. 10.(a) では 23.9% であり, これらの AE イベントでは補正が効果的に行われたと考えている. 一方, Fig. 10.(b) に示したように補正したにも関わらず最頻値が $\pm 20\%$ の外側に存在した場合もあった. この原因として損傷による付加的な減衰の影響が考えられる. Fig. 11. に Fig. 10.(a) で示した S_{30} - S_0 で検出した AE 波形の 0~200 kHz でのエネルギー差の経時変化を示す. エネルギー差が大きい AE イベントが 1000 s 以

降から確認され、1500 s 以降ではその差が AE 数の増加に伴って大きくなっていった。これは、AE 源とセンサ間にはく離などの損傷が存在することで AE 波が付加的な減衰（散乱）を受けたためと推測される。また、この損傷による付加的な減衰は、損傷の種類や規模に依存すると考えられ、AE の発生位置やタイミングによってその減衰量も異なると予想される。そのため、エネルギーの差は損傷の規模が大きくなる試験後半でばらつきが大きくなっていると考えられる。したがって、AE 波形の補正を行うためには伝搬媒体固有の減衰だけでなく損傷による付加的な減衰の補正も同時に行う必要がある。

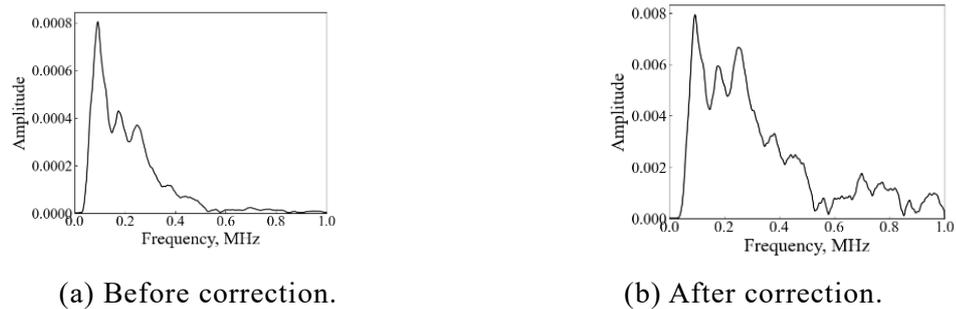


Fig. 9. Frequency spectra of A_0 mode before and after correction.

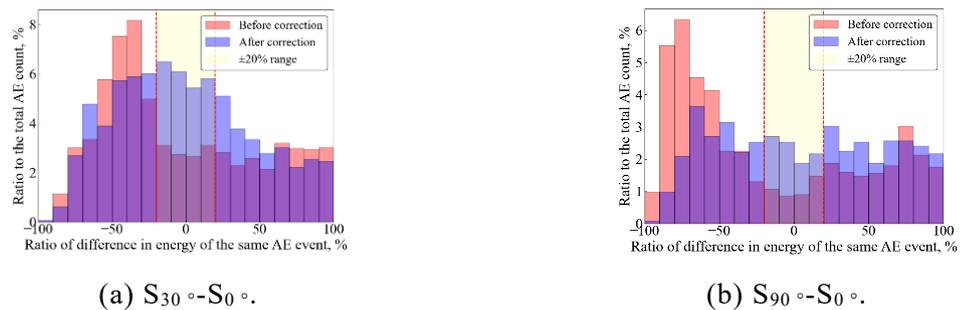


Fig. 10. Frequency distribution of energy (0~200 kHz) difference for the same AE event before and after correction. (The direction sample)

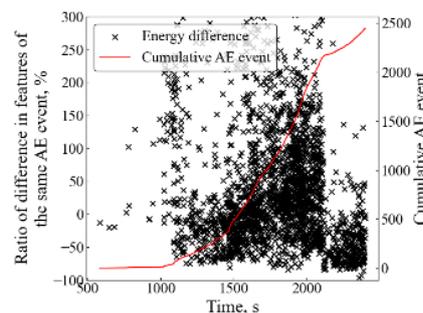


Fig. 11. Change overtime in energy difference ($S_{30^\circ}-S_{0^\circ}$) for the same AE event.

1.3 今後の課題

一方向積層 CFRP を用いて伝搬角度の異なる AE 波形の時間-周波数平面上のエネルギー分布から流域変換を用いてから A_0 モードを抽出した。そして、予め測定した A_0 モードの減衰係数を用いて減衰の補正を行った。その結果、以下のことがわかった。

測定された A_0 モードの減衰係数は、周波数とともに線形的に増加していた。また、減衰は、伝搬方向と繊維との角度が大きくなるにつれて増加しており、減衰も異方性があった。

AE 波形の A_0 モードの減衰補正を行った結果、0~200 kHz の基本モードのみが存在する周波数帯では、試験前半の AE イベントで補正の効果が確認された。一方で試験後半に検出される AE では補正の効果が確認できなかった。これは損傷による付加的な減衰の影響と考えられる。そのため、材料固有の減衰だけではなく損傷による付加的な減衰も補正する必要がある。

参考文献

- (1) Sause, M.G.R., and Horn S., Simulation of acoustic emission in planar carbon fiber reinforced plastic specimens, *Journal of Nondestruct Eval*, Vol.29 (2010), pp. 123-142.
- (2) 曾我部雄次, 都築正之, 岸田敬三, 衝撃を受ける CFRP の粘弾性特性に及ぼす繊維配向角の影響, 材料 42 巻 476 号 (1993), pp. 536-541.
- (3) Jos B.T.M. Roerdink, and Arnold Meijster, The watershed transform: denitions, algorithms and parallelization strategies, *Fundamenta Informaticae*, Vol.41(2001), pp. 187-228.

論文リスト

1. 山下遊眞、西宮康治朗、長秀雄, 一方向 CFRP 板の三点曲げ負荷中に放出されたラム波 AE のモード分離と各モードの特徴量に基づいた損傷分類, 第 24 回アコースティック・エミッション総合カンファレンス, 2024 年 9 月 (佐賀大学)
2. 田中 寛人, 西宮 康治朗, 長 秀雄, 接着層及びその近傍を伝搬する波動の伝搬挙動の評価, 2024 年度日本機械学会年次大会, J041p-17, 2024 年 9 月 (愛媛大学)
3. 成瀬 慎一郎, 長 秀雄, 西宮 康治朗, レーザスポレーション法によって誘起した CFRP の層間はく離とそこを透過した弾性波の歪みとの関係, 2024 年度日本機械学会年次大会, J041p-13, 2024 年 9 月 (愛媛大学)
4. 鶴田 拓夢, 西宮 康治朗, 長 秀雄, 光弾性法を用いた接着部での群速度 0 のラム波の伝播挙動の評価, 2024 年度日本機械学会年次大会, J041p-09, 2024 年 9 月 (愛媛大学)
5. 橋本 栄亮、長 秀雄、西宮 康治朗, 画像相関法と AE 法によるラップジョイント型試験片の引張せん断試験中の破壊挙動の評価, 2024 年度日本機械学会年次大会, J041p-04, (愛媛大学)

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
研究分担者 機械創造工学科 助教 飯塚啓輔

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 3D プリントしたラティス構造の変形挙動を評価した結果について報告を行う。

1.2 進捗状況及び成果

Fig. 1 に示すようなラティス構造を 3D プリントし、圧縮試験を実施した。Fig. 1 (b) の赤枠部をセル一つ分であり、1 辺 20mm ではりの厚さを 1mm としている。材料は TPU を使用し、FFF 方式の 3D プリンタ (Mark Two, Markforged) を用いて作製した。Fig. 2 に圧縮試験結果である応力ひずみ線図を示す。

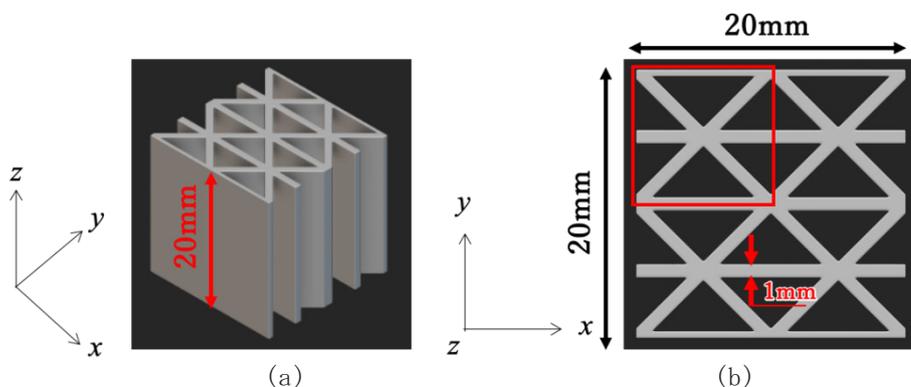


Fig. 1. Specimen geometry (a) oblique view, (b) front view.

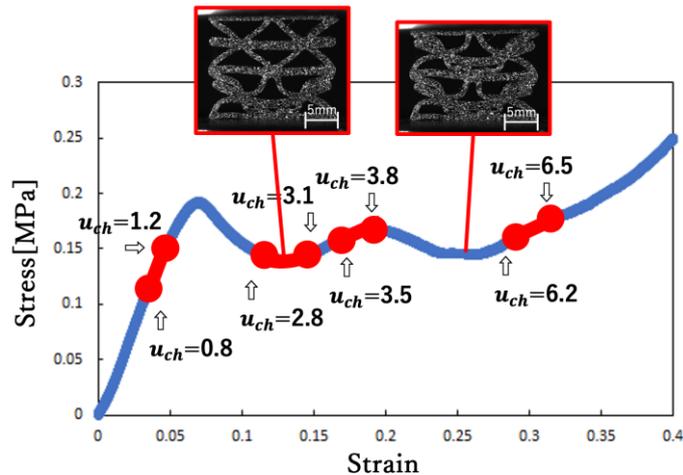


Fig. 2. Stress strain curve on compression test.

応力はロードセルで計測した荷重値を試験片の投影面積で除したものとし、ひずみはクロスヘッド変位量を試験片の高さ寸法で除したものとした。塑性域で応力ひずみ関係が波打つような関係となっている。これは、Fig. 2の実験時の試験片の変形様相画像にあるように、下層部のはりが座屈し、応力が低下するが、セルが潰れていくと高密度化を起こして応力が上昇する。その後、ほかのセルでも同様の減少が生じることで波打つ応力ひずみ関係となる。この現象の理解を深めるために、FEMによる解析結果と実験での変位、ひずみ分布の比較を行う。解析には有限要素解析ソフトウェア（Mark Mentat 2020）を用い、弾塑性解析を行った。試験片のモデル上下に治具を模擬した剛体要素を設定した。メッシュは1要素1辺0.4mmの2次要素6面体メッシュを定義し、3次元解析を行った。境界条件は1/2モデルを使用するために、対称面の z 方向の節点変位を0とし、下部の剛体要素の y 方向変位を0、中央節点のみ x 方向変位を0として拘束した。自重たわみを考慮するために、すべての節点に重力加速度をかけた。また、上部の剛体要素に強制変位を加えることで変位制御での圧縮試験を模擬した解析とした。材料の物性値は弾性率を67MPa、ポアソン比を0.49として、引張試験より得られた応力ひずみ関係から相当応力、相当塑性ひずみ関係を入力した。

Fig. 3に、解析より得られた応力ひずみ関係と実験結果の応力ひずみ関係を示す。塑性域は一致していることが確認でき、塑性域においては波打つ応力ひずみ関係を示しており、定性的に一致することを確認できた。しかしながら、実験結果の方が解析結果と比較して応力が低いことからやや大きな変形量を示す傾向が見られた。この差異は、実験に用いた試験片に微細な初期欠陥が存在していることが影響していると考えられる。特に、3Dプリンタでの製造工程における内部欠陥や形状の不均一性が塑性変形の開始や進展に影響を与え、理想的なモデルを使用した解析結果よりも辺気が大きくなった可能性がある。実験時に撮影した画像を用いてグローバルDICによる変位、ひずみの算出を行った。この結果とFEMの変位をFig. 4、ひずみ分布をFig. 5に示す。このとき、実験による変位、ひずみ測定は従来のグローバルDICでは大変形を測定するこ

とができない。これは、変形が大きくなると画像の相関が取れなくなるためである。このため、基準画像を更新していく必要があるが、更新するたびに喜寿運画像に対する有限要素メッシュを作成しなければならない。そこで本研究では、節点座標の変位が算出されるグローバル DIC の利点を利用し、算出された変位を基準画像に対して、作成したメッシュの節点座標に足し合わせることで、新たな基準画像のメッシュを作成し更新していく基準画像更新型グローバル DIC を用いた。

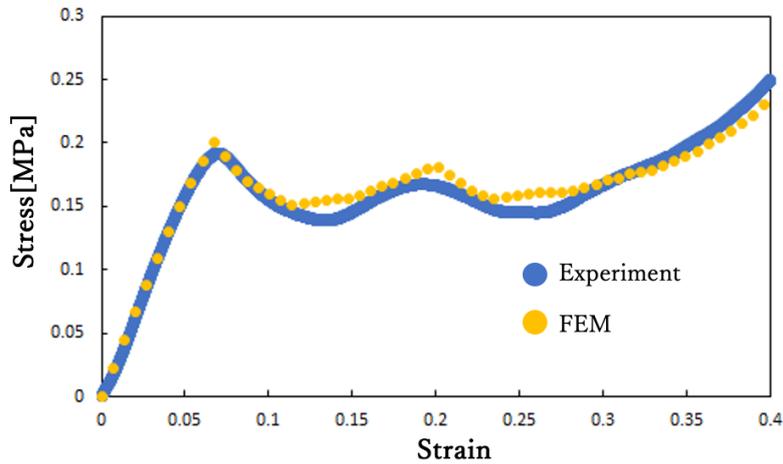


Fig. 3. Comparison of experimental and FEM stress strain curves.

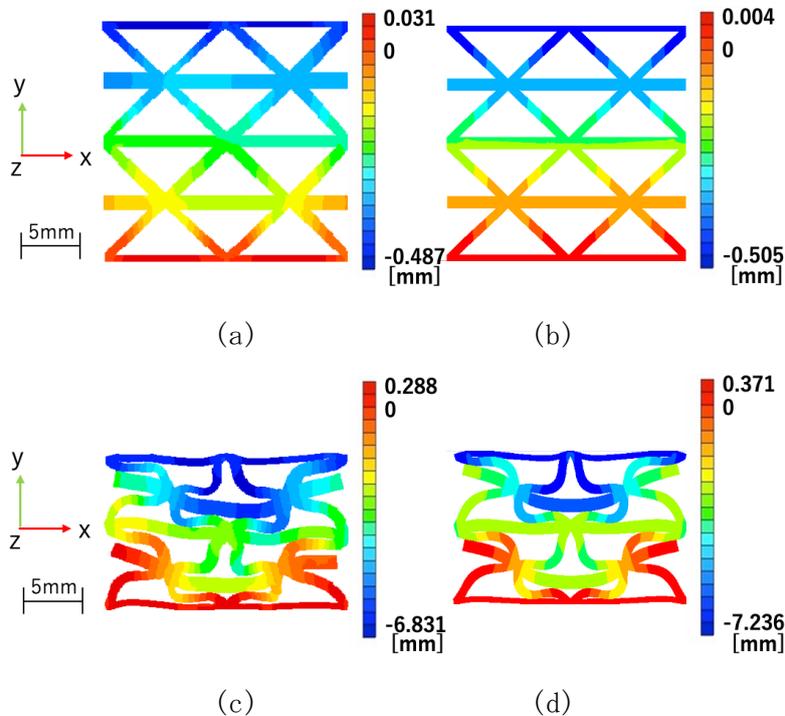


Fig. 4. y -directional displacement (a) u_y at $u_{ch}=0.5\text{mm}$ on experiment, (b) u_y at $u_{ch}=0.5\text{mm}$ on FEM, (c) u_y at $u_{ch}=6.5\text{mm}$ on experiment, (d) u_y at $u_{ch}=6.5\text{mm}$ on FEM.

Fig. 4(a)と(b)は弾性域の変位分布であり，変位の最大値と最小値，上下方向に連続的な変位分布が得られ，同様の傾向となった．また，Fig. 4(c)と(d)は塑性域変位分布であり，セルがつぶれて高密度化を起こして応力が上昇する位置である．変形形状を比較すると，FEMの変形は左右対称であるが，実験の変形は左右非対称になっている．Fig. 5に示すひずみ分布では，実験のひずみ分布は局所的なひずみ集中が確認できるのに対し，解析結果では滑らかなひずみ分布となっている．また，はりの座屈部において引張と圧縮のひずみが解析結果から確認できるが，実験のひずみ分布では確認できない．これは実験では要素内一定のひずみを算出しているため，引張と圧縮のひずみが混在している要素では平均化され，一方のひずみしか算出されないためである．これらの実験結果と解析結果による誤差は試験片作製時に生じる微細な初期欠陥や形状の不均一性，実験の際に試験片に加わる荷重や境界条件の不均一性が影響を与えており，解析に使用した理想的なモデルはこれらを考慮していないために生じていると考えられる．以上の結果から，製品の作製プロセスで生じる可能性のある微細な欠陥や不均一性の影響を十分に考慮した設計および解析が必要であることが示唆された．また，変位，ひずみ分布の結果から，欠陥が製品の機械的特性や変形挙動に及ぼす影響を無視できないことが明らかになった．このような欠陥を考慮した製品設計は，実際の使用環境下での信頼性向上に寄与するものだと考えられる．

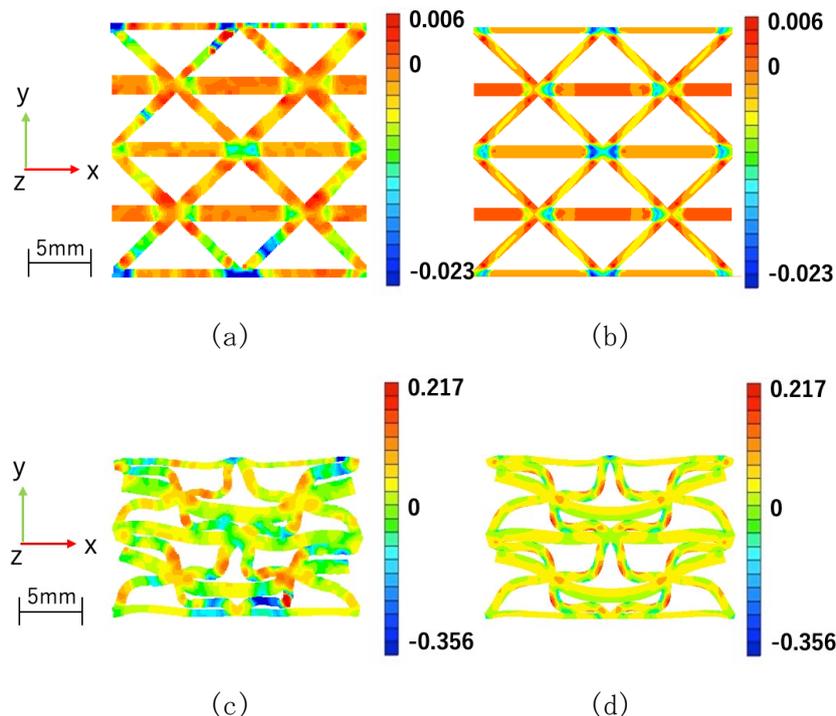


Fig. 5. y -directional strain (a) ϵ_y at $u_{ch}=0.5\text{mm}$ on experiment, (b) ϵ_y at $u_{ch}=0.5\text{mm}$ on FEM, (c) ϵ_y at $u_{ch}=6.5\text{mm}$ on experiment, (d) ϵ_y at $u_{ch}=6.5\text{mm}$ on FEM.

1.3 今後の課題

今回用いた基準画像更新型グローバル DIC では、基準画像の更新頻度や要素サイズの最適化が必要となる。基準画像を更新する頻度が増せば、その分誤差の蓄積につながる可能性がある。また、基準画像の更新頻度を変更すれば測定誤差の積み重ねにも影響を与えるため、一概に頻度を多くすればよいとも限らない。要素サイズを小さくすると、画像の相関をとることが困難になるが、はりの座屈が生じているような箇所では、引張と圧縮のひずみが計測される場合には、要素サイズを細かくする必要がある。しかしながら、要素サイズを細かくすると、画像の相関が取れなくなってしまうため、画像の更新頻度と同様、最適化をする必要がある。

1. 原著論文

1. 雷友里恵, 飯塚啓輔, 米山聡, 重ね合わせの原理に基づく DIC-FEM ハイブリッド法による粘弾性体の応力解析, 実験力学, **24**, 3(2024), pp. 105-111.
2. K. Fujita, K. Iizuka, S. Yoneyama, K. Ushijima and S. Chinzei, Stress Distribution Evaluation at Localized Necking Area Using the Virtual Fields Method with Digital Image Correlation, Mechanical Engineering Journal, **11**, 6(2024), 24-00243-24-00243.
3. A. Nakachi, S. Yokoyama, K. Iizuka, S. Yoneyama, A DIC-FEM hybrid method for measuring strains near fiber-matrix interface of CFRP cross section, Optics and Lasers in Engineering, 184, 1(2025), ISSN 0143-8166.
4. K. Iizuka, T. Ito, S. Yoneyama, Effects of initial defects on strain measurement and elastic modulus of 3D-printed CFRP, Mechanical Engineering Journal, **11**, 6(2024), 24-00133-24-00133.

2. 国際会議プロシーディング

1. Yamaguchi, Y., Iizuka, K. and Yoneyama, S. Deformation Behavior Analysis of Honeycomb Structure Under In-plane Compression Using Global DIC, Photomechanics & iDICs Conference, p. 29 (Clermont-Ferrand, October 29-31, 2024).
2. Oomori, T., Iizuka, K. and Yoneyama, S. Investigation of Relationship between Crack Tip Shape and Crack Growth Behavior of Rubber under High Speed Crack Growth, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2024, A216. (JPN)
3. Fujita, K., Iizuka, K., Yoneyama, S., Ushijima, K. and Chinzei, S. Evaluation of Material Properties at a Localized Neck by Data Driven Identification, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2024, A222. (JPN)

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	石川慎一
研究分担者	理工学部機械創造コース	博士後期課程 2 年	原田直弥
研究分担者	理工学部機械創造コース	博士後期課程 1 年	重本竜声
研究分担者	理工学部機械創造コース	博士前期課程 2 年	山田 遼

1 研究目的

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開発を目的とし、多様な材料、環境、道具に対して適切に対応可能な制御理論の構築を目指す。従来の産業用ロボットや自動制御装置は、あらかじめ設定された動作パターンに依存しており、製造工程における変動要因への適応が困難であった。本研究では、マルチモーダルセンシングとロボットモーション制御を統合したリアルタイム制御系を設計・実装して、複雑な物理環境に対する柔軟な適応動作システムの構築を実現する。

本研究は、(1)センシングとモーション制御の高次統合、(2)物理シミュレーションを活用した予測制御の適用、(3)実機実験によるフィードバック最適化という三つの軸に基づいている。マルチモーダルセンシングを活用することで、対象物との接触時の力覚フィードバックや視力覚情報を統合し、動作中の環境変化をリアルタイムで評価する。このセンシング情報を基に、適応的なモーション制御を実行することで、ロボットシステムの柔軟性と適応性を向上させる。また、数値流体力学 (CFD) 解析を応用した 3D プリンティングの塗布圧力制御、および、指先圧力センシングを利用したロボットの適応的接触制御に関する検討を行う。これにより、精密な物理操作を必要とする製造工程や医療・福祉分野における自律制御ロボットの高度化に寄与する。

2 ノズル姿勢変化をともなう 3D プリンティングにおける流体力学解析と塗布圧力制御

積層造形技術において、高品質な造形を実現するためにはノズルからの材料押し出し圧力を適切に制御する必要がある。3D プリンティングにおける塗布圧力の最適制御に関し、ノズルの姿勢変化が造形品質に及ぼす影響を流体力学的視点から解析し、センシングを活用した適応制御手法を提案する。数値シミュレーションを用いて、ノズル姿勢の変化が押し出し圧力に及ぼす影響を解析した結果、ノズルの回転角度と押し出し圧力の変動に強い相関があることが確認された。特に、クリアランスが変化する際の流体の挙動が、吐出材料の分布に与える影響が大きく、単純な圧力制御では造形精度

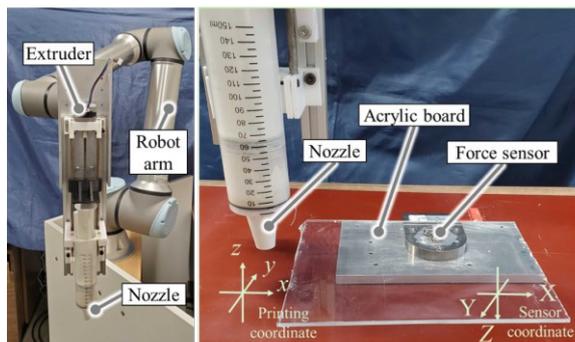


Fig. 1 3D printing system with robot arm

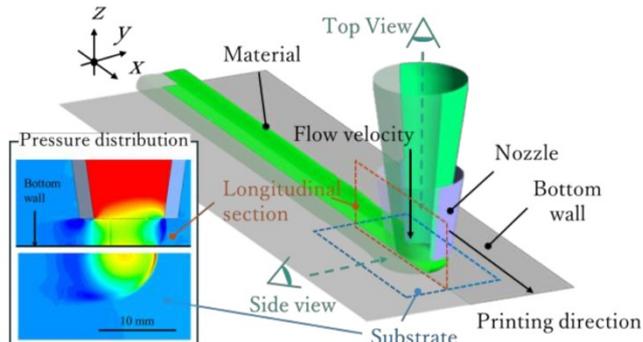
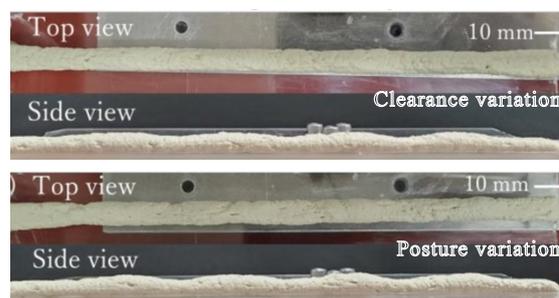
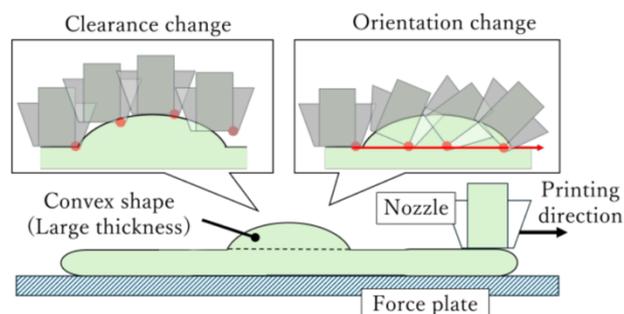


Fig. 2 CFD calculation condition for printing



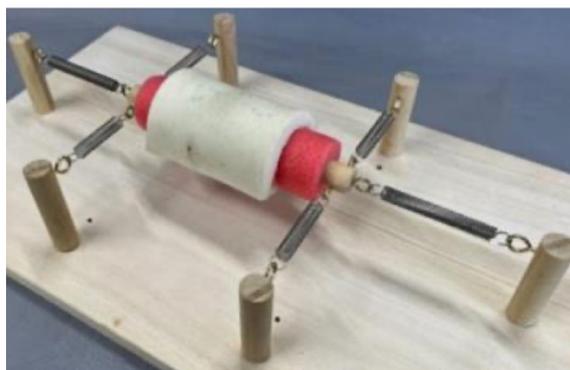
(a) Convex shape printing by clearance and orientation (b) Photos of motion control result

Fig. 3 Experimental evaluation of robotic-motion-control printing with nozzle posture variation

の向上が困難であることが示された。そこで、本研究では、ロボットアームに取り付けた力覚センサを活用し、リアルタイムでノズル姿勢と押付け圧力をフィードバック制御するシステムを構築した。図 1 に示す実験システムを用いて、ノズル姿勢制御を適用することで押付け圧力の低下が抑えられ、造形品質が向上することが明らかとなった。また、図 2 の流体シミュレーション結果から、ノズル姿勢変化による圧力変動の特性を定量的に把握し、それを最適化する制御モデルを構築した。さらに、図 3 の実験結果では、リアルタイム制御により、造形中の動的な変動に適応し、より均一な塗布を実現できることが確認された。

3 指先圧力センシングと視覚統合フィードバックを活用したロボットの接触制御

ロボティックマッサージなどの物理的接触を伴う動作では、ロボットが対象物の動的な状態を適切に認識し、それに基づいて接触圧力を調整することが求められる。本研究では、指先圧力センシングと視覚統合フィードバックを活用し、リアルタイムでの適応的接触制御を実現する手法を提案する。まず、図 4 に示すように、フィジカルケアロボットシステムの実験装置と模擬筋肉モデルを用いて、ロボットによる指圧動作の精度を評価した。従来の制御手法では、接触対象の形状変化に適応できず、指圧の強度が均一でない問題があった。そこで、本研究では、センシング情報を統合し、リアルタイムで最適な接触圧力を維持する制御手法を提案した。実験結果として、



(a) Physical care robot system

(b) Photos of a polyethylene foam muscle model

Fig. 4 Robotic care system and muscle model for evaluating adaptive contact motion control

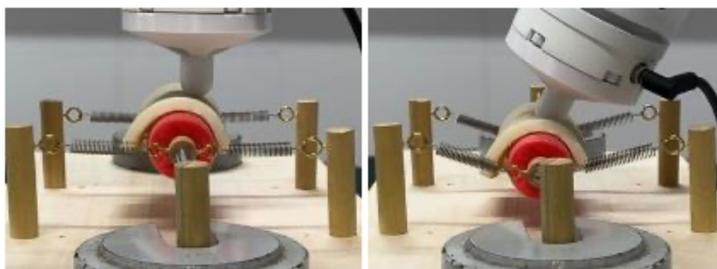
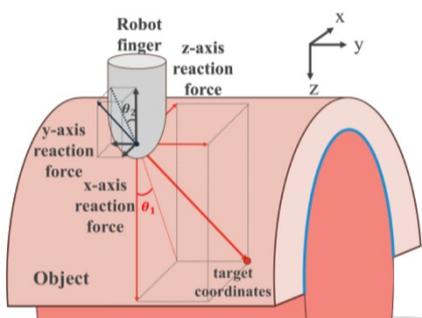


Fig. 5 3D-shape tracking-control

Fig. 6 Pressing force control in muscle center direction

図 5 に示すように、指先圧力センシングを利用することで、接触圧力のばらつきを低減し、均一な押圧を実現できることが確認された。また、視覚情報を統合することで、対象の動的変形をリアルタイムで認識し、適応的かつ連続的な力調整を実現している (図 6)。これにより、接触対象の個別特性に応じた最適な接触制御を実行できる。

4. まとめと今後の展望

本研究では、マルチモーダルセンシングとロボットモーション制御を統合したリアルタイム適応制御システムを設計して機械実装に取り組み、積層造形法および物理接触動作における制御性能の向上を実証した。3D プリンティングにおける塗布圧力制御では、流体力学解析とセンシング技術を組み合わせることで、造形精度を向上させることが可能であることを示した。一方、ロボティックマッサージでは、指先の圧力センシングと視覚情報を統合することで、対象に応じた適応的な押圧制御を実現できることを確認した。今後の展望としては、より多様な環境条件下での適用性を高めるために、制御アルゴリズムの高度化を進める。また、産業応用を視野に入れた実機レベルでの評価を行い、実装可能なロボットシステムの開発を目指す。特に、複数のセンシングデータのリアルタイム統合処理を向上させて、より高度な適応制御を可能にし、柔軟性を有するロボットシステムの実用性を高めることを目標とする。

論文リスト

1. 原著論文

1. Naoya Harada, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, Physical Therapy Massage. Robot System with Human Motion Tracking and Finger-pressing Force Control, Advanced Robotics, Accepted for publication, 2025
2. Ryuji Nakagawa, Masakazu Fujimoto, Ryosuke Tasaki, Precision-enhanced Deburring Using Machining Force Feedback Control for Various Casting Materials, Mechanical Engineering Journal, Accepted for publication, 2025
3. Shinichi Ishikawa, Takahito Yamashita, Ryosuke Tasaki, Vision-based Monitoring and Control for 3D Printing Process with Dynamic ROI and Path Modification Algorithm, Journal of Advances in Information Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 1443-1449, 2023

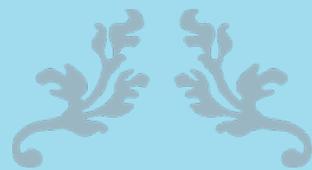
2. 国際会議プロシーディング

1. Naoya Harada, Michiteru Kitazaki, Ryosuke Tasaki, Kneading-Motion-Based. Tactile Feedback for Personalized Robotic Massage Using VR Avatars, the 20th edition of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2025)
2. Ryusei Sigemoto, Ryosuke Tasaki, Dynamic Pedestrian Flow Control Using. Flow-Robot Interaction Model of Mobile Robot and Human Crowd”, the 20th edition of the IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2025)
3. Ryuji Nakagawa, Ryunosuke Taguchi, Masaru Ohkubo, Akiyuki Kohgetsu, Ryosuke. Tasaki, Robotic Cooking: Adaptive and Precise Cutting System Based on Food Outer Shape and Internal Flexibility, The 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2025), pp.1375-1380, 2025/1/24
4. Shinichi Ishikawa, Ryosuke Tasaki: “Inter-layer Pressure Control Based on Nozzle Reaction Force Sensing for 3D Printing on Uneven Surfaces”, 21th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO2024), 2024/11/20
5. Naoya Harada, Ryosuke Tasaki: “Localization of Muscle Knots by Kneading Technique for Physical Therapy Massage Robot”, 21st. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO2024), 2024/11/20
6. Shinichi Ishikawa, Ryosuke Tasaki: “Feedback Control of Printing Nozzle by Force Sensing Device with High-accuracy Load Cell”, 2024 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon2024), 2024/11/5

7. Ryusei Shigemoto, Ryosuke Tasaki: “Motion Planning of a Human-aware Mobile Robot Merging into Dynamic Pedestrian Flow”, 2024 9th International Conference on Control and Robotics Engineering, CRE24-2248, 2024/5/11
8. Yui Chiba, Takahito Yamashita, Ryosuke Tasaki: “Three-finger Robot Hand that Mimics Human Fingertip Movements in Precision Assembly Work”, 2024 9th International Conference on Control and Robotics Engineering, CRE24-2468, 2024/5/11

3. 受賞等

1. 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2024), 優秀講演賞, 伊東武琉, 原田直弥, 田崎良佑, フィジカルケアロボットにおける筋滑走性を考慮した指圧制御, 2024/12/20
2. 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2024), 優秀講演賞, 済田祥平, 重本竜声, 田崎良佑, 歩行者流の動的変化を伴う走行環境における自律移動ロボットの横断経路計画, 2024/12/18
3. 公益社団法人日本鋳造工学会 日下賞, 鋳造ロボットシステムの知技能実装に関する研究, 田崎良佑, 2024/5/25



CAT支援による若手研究者出張報告



2nd International Summit on Lasers, Optics and Photonics (ISLOP2024) 参加報告

電気電子工学科 助教 前田 智弘

1. 日程：2024年4月20日～26日

2. 行先：ミュンヘン，ドイツ

3. 報告・成果等

2024年4月22日から4月24日にかけてドイツのミュンヘンで開催された国際会議 International Summit on Lasers, Optics and Photonics (ISLOP2024) に参加し、これまでに取り組んできた光波面制御技術に関する招待講演を行った。ISLOP は比較的新しい会議であり、今回が第2回目の開催であった。そのため、参加者数は多くはなかったが、その分参加者同士の距離が近く、活発な議論がなされる会議であった。

自身初の招待講演ということもあり、準備段階から資料構成に苦慮し、発表でも準備不足が露呈することとなった。しかし、質疑ではこれまでの研究活動や背景技術に対して数多くの質問があがり、幅広い分野の研究者と議論することができたことは非常に良い経験となった。また、今回は知り合いがいない環境での参加であり不安が多かったが、現地で知り合った日本企業の研究者や中国の大学教授の方々に助けられ、有意義な交流を持つことができた。

滞在期間中のほとんどが曇りか雨模様で肌寒い日が続いた。朝方には雪が降ることもあり、海外での街歩きを楽しみにしている私にしてみれば、若干の未練が残る滞在であった。しかし、最終日には一時的に晴れ間が覗き、ミュンヘン市内の大規模な公園である Englischer Garten の景観を楽しむことができた(図2)。

今回の招待講演は私自身の業績によるものではなく、研究室主催の外林教授に届いた基調講演の話が私に招待講演として割り当てられたものです。このような貴重な経験をいただけたこと、この場を借りて外林教授に深く感謝申し上げます。最後に、CATの若手出張旅費支援制度のおかげで、発表準備や現地での活動に集中することができました。深く感謝申し上げます。



図1 ミュンヘンでの食事



図2 Englischer Garten のパノラマ景観

10th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics
and Thermodynamics 参加報告

機械創造工学科 助教 森本崇志

1. 日程：2024年8月26日～30日

2. 行先：Rhodes Palace, Iraklidon Avenue (Trianton), Ixia, 85100 Rhodes, Greece

3. 報告・成果等

熱流体系の国際会議である「10th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics」に、自身の研究成果の発表および情報収集を目的に参加した。本会議は、熱流体に関する研究の中でも、実験を主軸とした研究発表が多く行われる場である。学会は口頭発表とポスター発表のセッションに分かれており、自身は「Heat transfer characteristics of water-oil plug flow in a horizontal circular tube」という題目でポスター発表を行った（図1）。発表では、不親和な二流体によって形成される液液プラグ流の熱伝達および圧力損失に対する、液体塊の長さや流速の影響について報告した。

液液プラグ流れは、世界的にもまだ広く研究されている分野ではなく、気液二相流に関する研究が主流である。しかし、気液二相流を専門とする研究者から多くの質問やコメントをいただき、本発表を通じて液液二相流に対する関心を持ってもらえたと感じた。また、気液二相流の視点から多くの意見を得られたことで、その後の研究をより深める契機となった。

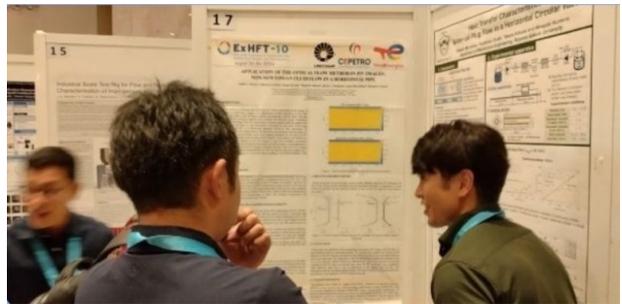
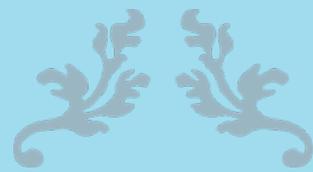


図1 研究発表の様子

自身の発表以外にも、私の研究分野の一つである相変化物質に関する研究発表や、数多くの基調講演を聴講し、世界における熱流体研究の最新動向を把握することができた。さらに、他国の研究者との直接交流を通じ、新たなネットワークを築くこともできた。こうした経験は国際会議ならではのものであり、本会議への参加を通じて多くの収穫を得ることができた。

最後に、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なかった。本制度による支援に深く感謝申し上げる。



成果報告会について



「2024 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

2024 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 32 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 5 名が 2024 年度 CAT 優秀研究報告賞に選出された。

☆ 國本 慧太

不純物ドーブによる REBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性の向上

☆ 宮崎 優希

The analysis of quantum many-body systems using quantum information stored in the permutationally invariant part of the density matrix

☆ 荻原 春菜

無機薄膜の高次構造制御による高度な機能の発現
(Ni-Mg 合金薄膜を用いた全固体型熱スイッチの開発)

☆ 松枝 息吹

屋内および屋外用ペロブスカイト太陽電池のデバイスシミュレーションおよび逆解析による物性値予測

☆ 大島 章太郎

蛇行流路を有する低封入率型ヒートパイプにおける内部流動の可視化

青山学院大学工学部附置先端技術研究開発センター

2024年度研究成果報告書

2025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
印刷所 株式会社創志

