

令和7年度大阪大学工業会賞 受賞者研究紹介

環境エネルギー工学専攻 エネルギー量子工学コース レーザー応用工学領域 猿倉研究室
赤部 勇午 希土類元素を用いたアップコンバージョン波長変換による赤外線検出技術

地球総合工学専攻 船舶海洋工学コース 船舶知能化領域 牧研究室
石丸 洸太郎 船舶に搭載したLiDARによる船速検出と幅寄せ自動操船の実現

応用化学専攻 物質機能化学コース 固体触媒化学領域 古川研究室
岡田 碧斗 表面反応場の最適化によるヒドロホルミル化固体触媒の開発と活性サイトの解明

マテリアル生産科学専攻 マテリアル科学コース 生体材料学領域 中野研究室
菊川 泰地 L-PBF法による多階層金属組織制御と高強度化

環境エネルギー工学専攻 環境工学コース 生物圏環境工学領域 池研究室
小島 翼 2種類の捕食性細菌を用いたウキクサマイクロバイーム改変に関する検討

ビジネスエンジニアリング専攻 テクノロジー創成連携領域 倉敷研究室
杉本 琢真 繊維強化複合材料の接着継手における熱硬化性樹脂接着剤への解体性付与と接着強度に関する研究

機械工学専攻 機械工学コース 精密加工学領域 榎本・杉原研究室
瀬口 悠太 シリコンウェーハの両面研磨加工におけるウェーハ回転挙動の解明

電気電子情報通信工学専攻 電気工学コース インテリジェントシステム領域 高井研究室
芹澤 和伸 深層学習を用いた信号時相論理仕様を満たす制御器設計に関する研究

電気電子情報通信工学専攻 量子情報エレクトロニクスコース 機能創製バイオマテリアル領域 丸山研究室
高橋 広登 リン酸カルシウム相転移に着目した尿路結石形成ダイナミクスの解明

生物工学専攻 生物工学コース 生命環境システム領域 渡邊研究室
杜 昊聡 オオミジンコにおける環境依存的性決定の分子制御機構解析

機械工学専攻 機械工学コース 機械動力学領域 石川研究室
陶 斯遠 霧環境におけるドローン視認性向上のための画像霧除去手法の開発

地球総合工学専攻 社会基盤工学コース 社会基盤マネジメント学領域 貝戸研究室
中崎 晴仁 人流軌跡データに基づく道路橋の重要度評価

応用化学専攻 分子創成化学コース 機能分子化学領域 鳶巣研究室
西岡 輝騎 原子状炭素等価体を用いた酸塩化物への炭素原子挿入反応

マテリアル生産科学専攻 生産科学コース プロセスインテグレーション領域 福本研究室
福井 涼太 階層構造化による傾斜変形能を活用したアルミニウム合金/炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)接合部の力学特性向上

電気電子情報通信工学専攻 情報通信工学コースメディア統合コミュニケーション工学領域 田中研究室
福原 伝博 頑健な連合学習のためのグラフ推定と信号復元の統合

物理学系専攻 精密工学コース ナノ表面界面工学領域 有馬研究室
村瀬 詩花 Si深溝構造底部の非破壊分光評価に関する研究

希土類元素を用いたアップコンバージョン波長変換による赤外線検出技術

環境エネルギー工学専攻 エネルギー量子工学コース
レーザー応用工学領域 猿倉研究室 赤部 勇午

1. 研究背景

近赤外光は、光通信、センシング、材料評価など幅広い分野で利用されている。一方で、この波長域の光は人の目では見ることができず、像として直接観測するには専用の検出器が必要となる。そのため、観測系は高価になりやすく、装置構成の自由度も限られる。特に1.5 μm 帯は通信で重要な波長域であるが、この波長を簡便に可視化する方法は多くない。そこで本研究では、エルビウム (Er^{3+}) を添加した CaF_2 結晶のアップコンバージョン発光に着目し、1510 nm の近赤外光を可視光へ変換して観測するイメージング手法に取り組んだ。近赤外光を一度見やすい波長に変換できれば、通常の可視光用検出器を用いて空間情報を像として読み出すことができる。これは、近赤外専用カメラに頼らずに「見えない光を見える形で扱う」ための新しい手段になると期待される。本研究では、 Er^{3+} のエネルギー準位構造を利用し、近赤外光の情報を保持したまま可視光へ変換できるかを検証した。さらに、単に発光を得るだけでなく、近赤外光の空間分布を失わずに可視像として読み出すシステムを実証した。

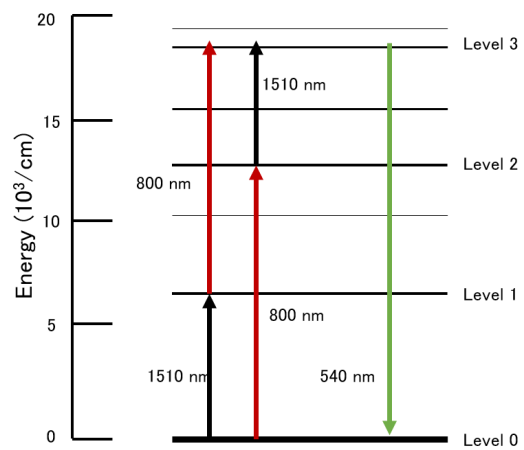


図1: Er^{3+} のエネルギー準位図

2. イメージングの原理

図1に、本研究で用いた Er^{3+} のエネルギー準位の概略を示す。 Er^{3+} イオンは、まず800 nmの光によって中間準位へ励起され、その後1510 nmの近赤外光を受けることでさらに高い準位へ遷移する。励起されたイオンはその後緩和し、540 nm付近の可視アップコンバージョン発光を生じる。すなわち本研究では、1510 nmの近赤外光を直接検出するのではなく、その情報を540 nm付近の可視発光として取り出している。この方法では、入射した近赤外光の分布に応じて発光の空間分布も変化するため、光の有無だけでなく、その形や強度分布も像として読み出せる。 Er^{3+} の多準位構造を利用したこの波長変換が、本研究の基本原理である。可視域に変換された信号は一般的なSi系検出器で扱いやすく、観測系を比較的簡便に構成できる点も利点である。

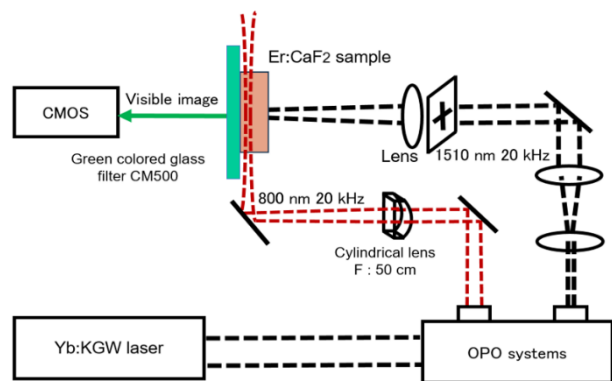


図2: 実験セットアップ

3. 実験方法

図2に実験セットアップの概略を示す。 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶に対して、800 nmの予備励起光と1510 nmの近赤外光を照射し、結晶中で生じたアップコンバージョン発光を可視光用の検出器で観測した。1510 nm光

の空間分布は光学系によって結晶面上へ導かれ、結晶内で可視発光へ変換される。ここで重要なのは、結晶が単なる発光体ではなく、近赤外像を可視像へ変換する波長変換媒体として機能している点である。実験では、2つの光が結晶内で適切に重なるように光学配置を調整し、発生した可視発光をカメラで記録した。本手法では、通常は近赤外専用カメラが必要な波長域に対して、可視域に感度を持つSi系検出器を利用できる可能性がある。

4. 結果

まず、波長変換が生じていることを確かめるため、分光器を用いて結晶からの発光スペクトルを測定した。図3に示すように、近赤外光の照射条件下で可視域に明瞭なアップコンバージョン発光が現れ、1510 nmの情報が可視光として取り出せることを確認した。特に540 nm付近の発光は、イメージングで利用する主要な信号である。この結果は、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶が1510 nm光に応答して観測可能な可視信号を生じることを示している。

次に図4に、取得したイメージング結果を示す。図4(a)～(d)では、1510 nmの近赤外光の形状や強度分布が、可視アップコンバージョン発光像として観測されている。

これは、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶を用いることで、通常はそのままでは見えない1510 nmの光を像として可視化できることを示している。また、得られた像からは、近赤外光の空間情報が保持されたまま読み出されていることが分かる。図4の各画像には明るさやコントラストの差が見られるが、いずれも対象の形状を反映した発光分布が得られており、本手法がイメージングとして機能していることが確認できた。

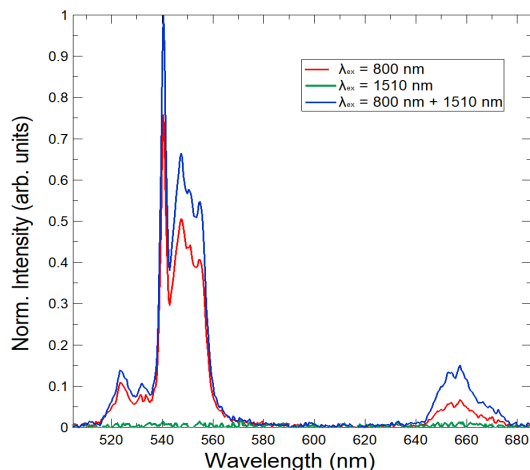


図3：発光スペクトル

5. まとめ

本研究では、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶のアップコンバージョン発光を利用し、1510 nmの近赤外光を可視光へ変換して観測するイメージング手法を示した。800 nmの予備励起と1510 nmの近赤外励起を組み合わせることで、近赤外光の情報を可視発光として取り出し、さらにその空間分布を像として読み出せることを確認した。本手法は、近赤外専用の高価な検出器に強く依存せず、可視光用の検出系で近赤外光を扱える可能性を持つ。今後、発光効率や空間分解能の向上が進めば、近赤外センシングや各種光計測への応用が期待される。

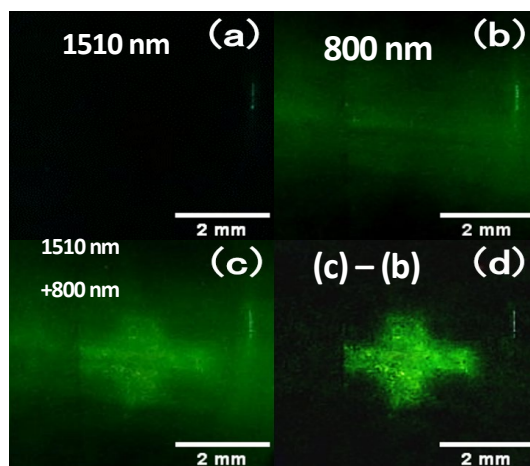


図4：UC イメージング結果

参考文献

- [1] Haase & Schäfer. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 50(26): 5808-5829, 2011.
- [2] Akabe, et al. *Opt. Lett.*, 49(14): 3998-4001, 2024.
- [3] Labbé, et al. *J. Lumin.*, 200: 74-80, 2018.
- [4] Elrafei, et al. *Opt. Express.*, 26(19): 25492-25506, 2018.
- [5] Ohashi, et al. *APL.*, 102(5): 051907, 2013.

船舶に搭載した LiDAR による船速検出と幅寄せ 自動操船の実現

地球総合工学専攻 船舶海洋工学コース
船舶知能化領域 牧研究室 石丸 洸太郎

1. 緒言

船員の高齢化や人手不足を背景に、船舶海洋分野では自動運航船の研究開発が進められている。しかし、離着岸操船は低速域で外乱の影響を受けやすく、さらに位置や速度等の許容される誤差が小さいことから自動化が困難な工程とされている。特に着岸の最終段階では接岸速度が安全性を支配する重要な物理量となると考えられる。しかし、速度に着目した研究は少なく、従来研究では GNSS(Global Navigation Satellite System) や GPS(Global Positioning System) ドップラーに依存した位置・速度推定が主流であり、他センサによる推定や制御系まで含めた検討は限定的である。そこで本研究では LiDAR(Light Detection And Ranging) による自己位置推定を用いた速度算出手法を構築し、さらに速度を明示的に考慮した制御系を設計することで、観測から制御までを一貫して検討することが目的である。

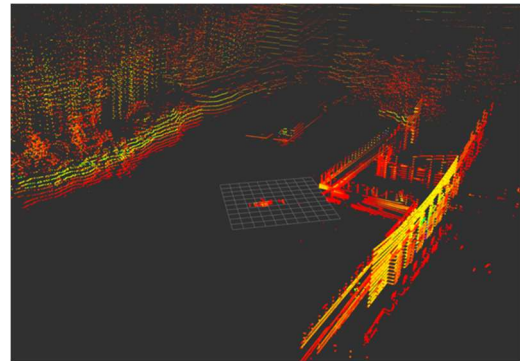


図1: LiDARによって取得した大阪大学実験池における点群データ

2. 速度の観測及び制御手法とその結果

LiDARによって取得した点群データを自動運転のために開発されたオープンソースソフトウェアである Autoware というソフトウェアを用いて処理し、自己位置を推定する。その後、数値微分により速度を算出することが可能であるが、この方法ではノイズの大きいデータになってしまう。そ

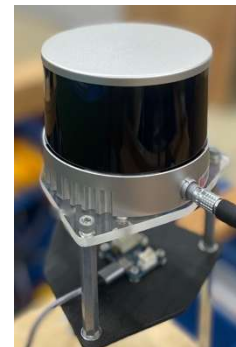


図2: LiDAR

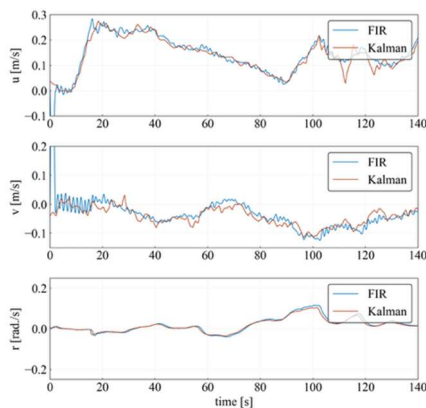


図3: 速度推定結果

こで本研究では、FIR (Finite Impulse Response) フィルタを用いたフィルタリングを行った。その結果を図3に示す。これより、GNSSをフィルタリングした値と同等の精度で観測が行えていることが確認できる。

また、制御則に関しては、先行研究ではPID制御が用いられていたが、これは位置に基づく制御であり、着岸においては十分ではないと考えられる。そこで本研究では、速度に基づく制御への拡張を行った。具体的には、速度型PID制御と呼ばれる手法を用いた。この手法では、偏差を速度として扱い、力の変化量を求め、それを過去の力に加算することで現在必要な力を算出することを特徴とする。これらのシステムを模型船に実装し実験を行った。その結果を図3に示す。

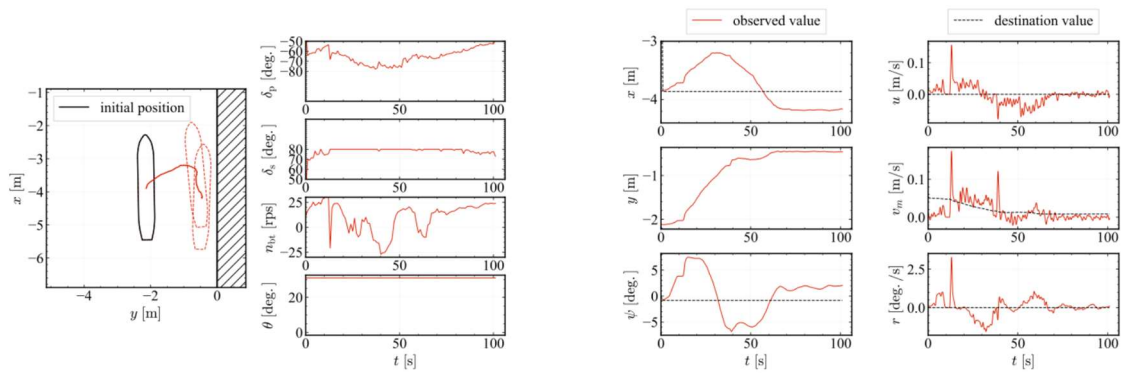


図4：模型船実験の軌跡・アクチュエータ・状態量の時系列プロット

3. 考察

速度を追従するような制御が概ね行われていることが確認できる。しかしながら、観測された速度が指示速度を上回る場合も見られた。この要因としては、PID制御のゲイン設定が十分に最適化されていない可能性が考えられる。また、速度を制約条件として明示的に扱うモデル予測制御を導入することも、有効な解決策の一つであると考え。さらに、速度が大きく上昇する外れ値が2回観測された。2回目の外れ値については、模型船が岸壁に衝突した際に値が急激に変化したことによる可能性が高い。一方で、1回目の外れ値は岸壁から離れた位置で発生しており、その発生要因は明らかではない。この点について今後の課題として原因の解明を行う必要がある。

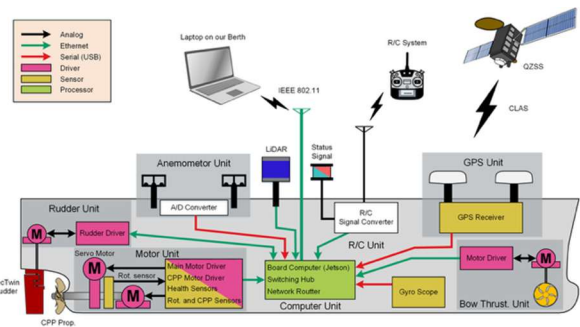


図5：模型船のシステム図



図6：使用模型船

4. 結言

本研究では、自動運航船の社会実装における重要課題である自動離着岸、特に最終段階における速度計測および制御手法について検討した。LiDARを用いた自己位置推定に基づく速度計測システムを構築し、数値微分とFIRフィルタを組み合わせることで、GNSSに依存しない高精度かつ安定した速度等が観測可能であることを示した。さらに、先行研究で提案されている制御則に速度制約を明示的に導入し、接岸時の

安全性向上に有効であることを模型船実験により確認した。

以上の結果から、本手法は港湾環境における高精度な速度計測と速度を考慮した制御を実現するものであり、自動離着岸システムの冗長性向上に寄与するものと結論づけられる。

参考文献

- 1) R. Sawada, K. Hirata: Mapping and localization for autonomous ship using lidar slam on the sea, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 28, No. 2, pp. 410-421, 2023.
- 2) D. M. Rachman, Y. Aoki, Y. Miyauchi, N. Umeda, A. Maki: Experimental low-speed positioning system with vectwin rudder for automatic docking (berthing), Journal of Marine Science and Technology, Vol. 28, No. 3, pp. 689-703, 2023.

表面反応場の最適化によるヒドロホルミル化 固体触媒の開発と活性サイトの解明

応用化学専攻 物質機能化学コース
固体触媒化学領域 古川研究室 岡田 碧斗

1. 緒言

アルケン、水素、CO からアルデヒドを合成する反応であるヒドロホルミル化 ($C_nH_{2n} + CO + H_2 \rightarrow C_nH_{2n+1}CHO$) は年間約 2400 万トン規模で行われている¹⁾。本反応の生成物であるアルデヒドはプラスチックや医薬品の製造に利用されており、高付加価値な基礎化学品である¹⁾。現在の工業プロセスでは主に Rh 均一系触媒が利用されているが、①触媒の分離・回収にコストがかかる、②配位子に含まれるリンが環境負荷の大きい廃棄物となる、という課題を抱えている。このような背景の下、前述の点に優れる不均一系触媒の研究が盛んに行われている¹⁾。

近年、均一系触媒に匹敵する触媒活性を示す不均一系触媒の報告例は増えつつある²⁾⁻³⁾。しかし、不均一系触媒を開発する上で不可欠な「どのようなアンサンブル（複数の隣接する金属から構成される活性サイト）が活性サイトなのか」は未解明であり、広く支持される触媒設計は確立されていない。この要因の1つに不均一系触媒における体系的な研究の不足が挙げられる。例えば、スチレンのヒドロホルミル化では土台となる担体や活性金属である Rh 粒子のサイズは論文によって様々である。すなわち、触媒の性能を重視した研究が盛んに行われる一方、活性点について調査した研究例は限られている。

そこで本研究では粒子サイズが 2 nm 未満のクラスター領域に注目した。クラスター領域ではわずかな粒子サイズの変化によってアンサンブルの幾何的構造が劇的に変化することから、ユニークな活性を有することが知られている。我々はクラスター領域でも粒子のサイズを精密に制御可能な触媒調製法を確立し、サイズのみ異なる一連の Rh/TiO₂ 触媒を合成した。これらの触媒を用いてスチレンのヒドロホルミル化反応を行い、最適な Rh 粒子サイズ (=最適なアンサンブル構造) を探索した。また速度論的検討と DFT 計算を用いて、ヒドロホルミル化反応の活性サイトの解明を試みた。

2. 結果と考察

a) スチレンのヒドロホルミル化における質量活性の Rh 粒子サイズ依存性

クラスター (<2 nm) およびナノ粒子 (≥ 2 nm) 触媒は尿素沈殿法を用いて、焼成・還元条件を変化させることでサイズ制御に成功した。また、金属が原子状に分散した単原子触媒 (single-atom: SA) は Strong Electrostatic Adsorption 法を用いて合成した⁴⁾。STEM 観察により評価した粒子サイズを元に、以下では各種触媒を xnm-Rh/TiO₂ (x = SA, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5, 2.1) と表記する。これらの触媒を用いてスチレンのヒドロホルミル化反応 (60°C, 4 MPa; H₂/CO=1/1, 16 h) を行った。活性は質量活性 (活性金属 1 g あたりのアルデヒド生成速度) を基に評価した。

反応の結果、Rh サイズに対する質量活性は火山型の傾向を示した (Fig. 1a)。特に、最適なサイズであった 1.2nm-Rh/TiO₂ 触媒では、110°C での反応において高い質量活性 (285 mol g_{Rh-total}⁻¹ h⁻¹) を達成した (Fig. 1b)。本研究は活性金属のサイズを最適化=表面反応場を最適化、というシンプルな方法によって既報触媒の活性を凌駕することに成功した。

次に、ナノ粒子触媒とクラスター触媒について速度論的検討を行った (Fig. 1c)。見かけの活性化障壁は同程度であったのに対し、CO の反応次数はナノ粒子で 0.57 となった一方、クラスターでは 0 へと低下した。この結果から、クラスター触媒は CO を強く吸着し、飽和吸着状態であることが示唆された。

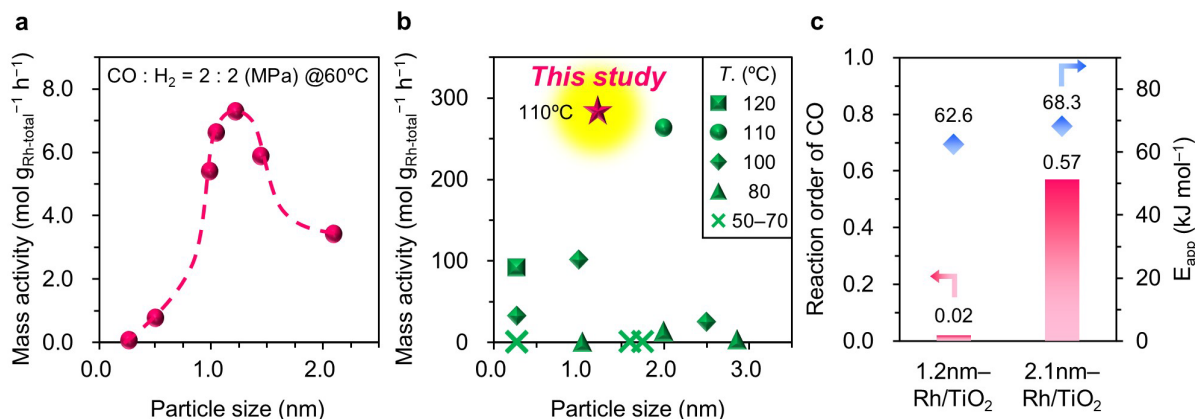


図1 (a) 60°Cのスチレンのヒドロホルミル化反応における粒子サイズに対する質量活性 (b) 先行研究との比較 (c) クラスタ触媒とナノ粒子触媒についてのCOの反応次数と見かけの活性化障壁

b) クラスタ触媒における高活性の要因と活性サイトの同定

最適な活性点を明確にするために、クラスタ表面上の各サイトについての基質吸着性に注目した。Rh₃₈ クラスタを用いてDFT計算を行ったところ (Fig. 2a)、低位配位数サイト (LCS)は浅いdバンド中心を持ち、強くCOを吸着することが確認された。一方で、スチレンを安定吸着するには高配位数サイト (HCS)が必要になることが示唆された。これはサイズの大きなスチレン分子を吸着するには広いRhアンサンブルが不可欠だからである。そこで、スチレンの安定吸着サイトであるHCSとCOの強い吸着サイトであるLCSについて、両者が隣接したHCS-LCSアンサンブルに着目した。この特異なアンサンブルの密度を粒子サイズに対してプロットしたところ、反応結果と一致する火山型のサイズ依存性を示した (Fig. 2b)。

以上の結果を踏まえ、スチレンのヒドロホルミル化がクラスタ領域において高い質量活性を示す要因について、以下のようなメカニズムを考察した。

- ① スチレンが吸着した際に、最適なサイズを有するクラスタ上では、芳香環はHCSに吸着し、ビニル基は隣接するLCSに吸着する事で活性化される。
- ② LCSは強いCOの吸着サイトとして機能する。
- ③ LCS上で活性化されたビニル基とCOが近接することによってCO挿入反応が速やかに進行する。

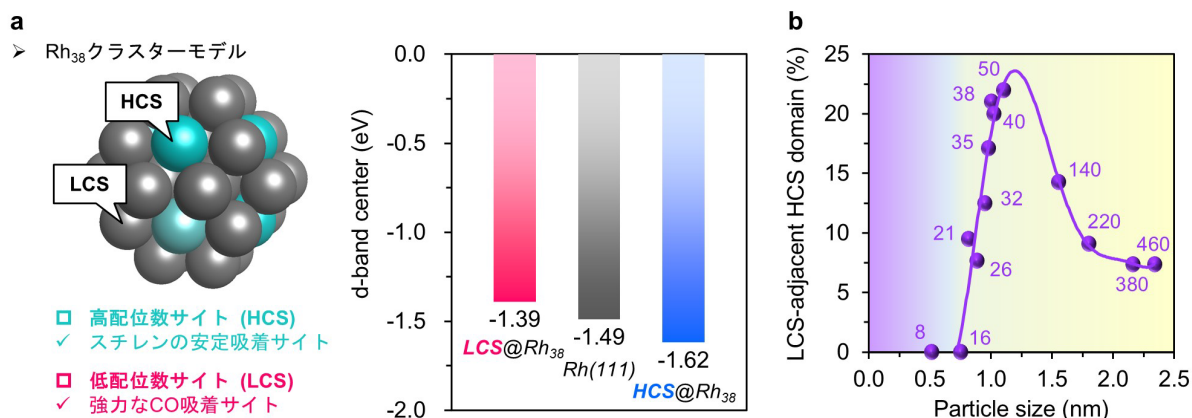


図2 (a) Rh₃₈ クラスタモデルと各サイトにおけるdバンド中心 (b)全原子中の活性アンサンブルの推定密度

参考文献

- 1) Liu, B.; Wang, T., *et al.*, *Chem* **2022**, 8, 2630-2658.
- 2) Liu, Y.; Xiao, F. S., *et al.*, *Nat. Commun.* **2023**, 14, 2531.
- 3) Shi, Y.; Huang, W., *et al.*, *New J. Chem.* **2020**, 44, 20-23.
- 4) Tan, T.; Philippe S., *et al.*, *Nat. Commun.* **2019**, 10, 4488

L-PBF 法による多階層金属組織制御と高強度化

マテリアル生産科学専攻 マテリアル科学コース
生体材料学領域 中野研究室 菊川 泰地

1. 緒言

金属積層造形法の一つであるL-PBF (Laser Powder Bed Fusion) 法は、複雑三次元形状を製造可能なプロセスとして注目されている。金属組織学的な観点では、高い冷却速度と溶融池内部の温度勾配により、セル組織をはじめとするL-PBF法特有の微細組織が形成される。さらに、下層の結晶方位を引き継ぐエピタキシャル成長と、結晶の回転対称性を考慮したレーザ走査方向の制御により、単結晶様組織を含む結晶集合組織の形成も可能であり、L-PBF法は階層的な微細組織を導入可能なプロセスと見なすことができる[1-2]。こうした階層性組織に基づいた力学特性への寄与を解明することで、従来プロセスでは実現不可能な積層造形ならではの高性能材料の創製が期待される。本研究では、L-PBF法特有の微細組織が力学特性に及ぼす影響を解明するため、Ni基超合金Inconel 718 (以下、In718)を対象とし、階層性組織の中でも、自己組織的に形成される結晶学的ラメラ組織 (CLM: Crystallographic Lamellar Microstructure) とセル組織に注目し、力学特性を定量的に解析した。

2. 実験方法

結晶学的ラメラ組織とセル組織は、L-PBF造形体内に共存する。そこで本研究では、2つのプロセス(1) スキャンストラテジー設計、(2) 熱処理を単独または組み合わせて適用し、結晶学的ラメラ組織とセル組織の有無を独立に制御した。レーザ出力360 W、走査速度1000 mm/sにおいて、 $\pm X_{SS}$ (図1(a))を用いて造形すると、結晶学的ラメラ組織が形成される[3]。微細組織を変化させずに結晶学的ラメラ組織を除去(単結晶様組織を形成)するため、同一のレーザ条件を用いて新たなスキャンストラテジーを設計した。セル組織の除去には、In718にて析出する可能性のある γ' 、 γ'' 、 δ 、Laves相のソルバス温度を超える1080°Cで1時間の熱処理を行った。この際、結晶学的ラメラ組織に及ぼす影響についても確認を行った。(1)および(2)を組

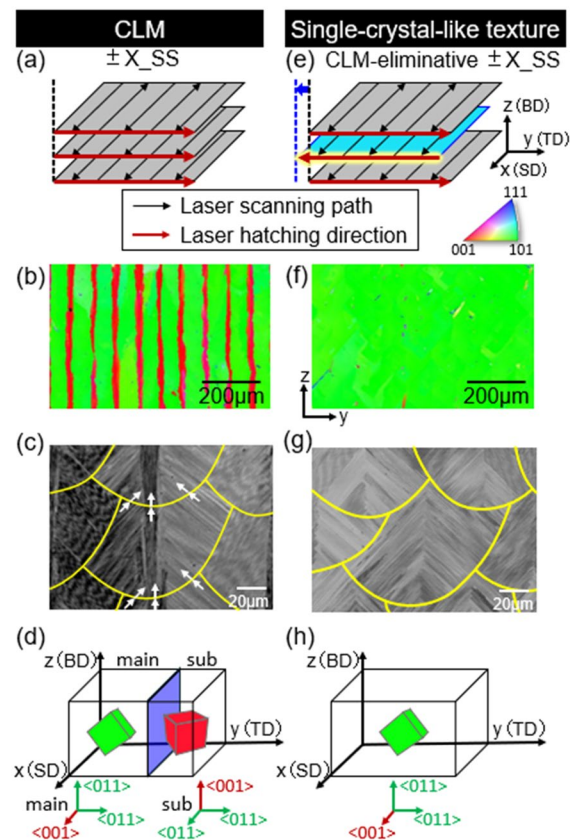


図1: (a) CLM, (e) 単結晶様集合組織形成のためのスキャンストラテジーの模式図、(b, f) 造形体の逆極点図 (IPF) マップ、(c, g) 造形体の反射電子像 (d, h) 結晶方位関係の模式図

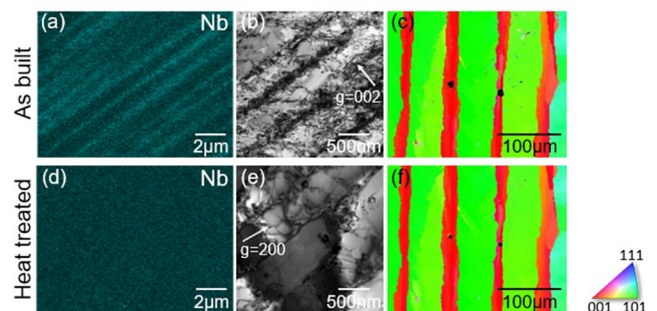


図2: (a, d) NbにおけるEDSマップ、(b, e) TEM明視野像、(c, f) IPFマップ、(a-c) 熱処理前、(d-f) 熱処理後

み合わせた4種類の試料に対して力学特性を解析した。

3. 結果と考察[4]

±X_SS では結晶学的ラメラ組織が形成された(図1(a), (b))。溶融池側面部からは造形方向へ<011>が、溶融池中央部からは造形方向へ<001>が優先配向した組織が、上下の溶融池を挟んでエピタキシャル成長した(図1(c), (d))。単結晶様組織の形成には、溶融池中央部での副層の形成を抑制する必要がある。そこで結晶のエピタキシャル成長の阻害を目的とし、上下層間でレーザ溶融位置を半分だけシフトさせた新規スキャンストラテジーを設計した(図1(e))。その結果、造形方向へ<011>のみが高配向化した単結晶様組織の獲得に成功した(図1(f))。

一方で、セル組織は熱処理により除去に成功した。セル組織の構成要素であるNb, Mo, Ti等の偏析と、偏析に沿った転位の集積構造が熱処理により消失した。さらに同処理によって結晶集合組織は変化せず、結晶学的ラメラ組織は維持された(図2)。

上述したプロセスを組み合わせることで、結晶学的ラメラ組織とセル組織を併せ持つCLM_AB、セル組織のみを有するSC_AB、結晶学的ラメラ組織のみを有するCLM_HT、いずれの組織も持たないSC_HTといった、微細組織の異なる4種類の造形体を作製した(AB: As-built, HT: Heat treated)。

図3に各造形体の降伏応力を示す。解析の結果、結晶学的ラメラ組織とセル組織はいずれも降伏応力を増大させることが明らかとなった。具体的には、セル組織の存在(AB材)によって、単結晶様組織では38%(453 MPaから627 MPaへ)、結晶学的ラメラ組織では42%(463 MPaから659 MPaへ)の大幅な強度上昇が認められた。また、結晶学的ラメラ組織の有無についても統計学的に有意な強度上昇への寄与が確認された(いずれも $P < 0.05$)。さらに結晶学的ラメラ組織とセル組織の間には相乗効果が認められた(表1)。

4. 結言

本研究では、L-PBF法において自己組織的に形成される、結晶学的ラメラ組織とセル組織について、それぞれをスキャンストラテジー制御と熱処理を活用することで各微細組織を単離する手法を確立した。さらに、それぞれが降伏応力に与える影響を定量的に解明し、セル組織が力学特性を大きく向上させ、階層性組織が相乗効果を有することを明らかにした。本研究結果に基づきL-PBF特有の階層性組織[5]を活用することで、従来の製造プロセスでは困難であった力学特性の自在な制御が期待される。

5. 参考文献

- [1] T. Ishimoto, T. Nakano, et al., *Acta Mater.* **2025**, *286*, 120709.
- [2] K. Cho, T. Kikukawa, H. Yasuda, et al., *Acta Mater.* **2026**, *303*, 121696.
- [3] O. Gokcekaya, T. Nakano, et al., *Acta Mater.* **2021**, *212*, 116876.
- [4] T. Kikukawa, T. Nakano, et al., *Mater. Res. Lett.* **2025**, *13*, 837-843.
- [5] T. Mayama, T. Kikukawa, T. Nakano, et al., *Addit. Manuf.* **2024**, *93*, 104412.

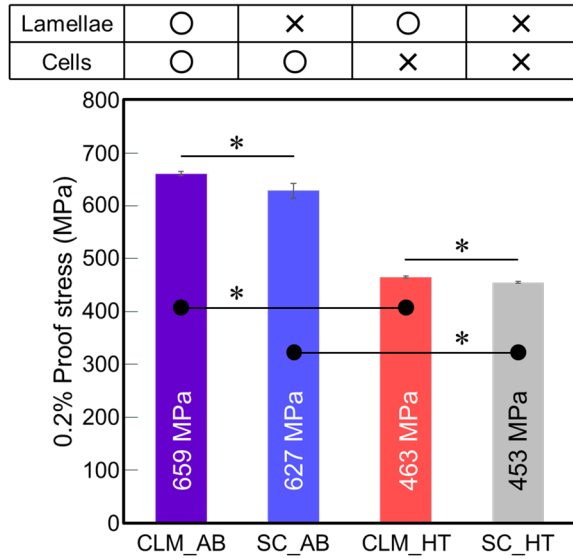


図3: CLMとセル組織の有無による降伏応力の差異

表1: 力学特性に対するCLM, セル組織, およびその相互作用の有意性(P値)。

Factor	Effect of lamellae	Effect of cells	Interaction
P-value	0.0011	9.2×10^{-11}	0.030

2種類の捕食性細菌を用いた ウキクサマイクロバイーム改変に関する検討

環境エネルギー工学専攻 環境工学コース
生物圏環境工学領域 池研究室 小島 翼

1. はじめに

水生植物であるウキクサは、有望なバイオマス資源として注目されており、排水処理とバイオマス生産を両立する技術への適用が期待されている。他方、ウキクサの生理活性には、その表層に存在する多様な細菌から構成される細菌群集（マイクロバイーム）が重大な影響を与えることが知られている。そこで我々は、ウキクサマイクロバイームの制御因子として、ほかの生きた細菌を捕食して増殖する捕食性細菌に着目した。捕食性細菌が持つ“特定の細菌種を排除する”能力を適切に活用することで、ウキクサマイクロバイームを人為的に改変し、ひいてはウキクサの成長や健康状態を好適に制御することも可能であると考えられる（図1）。一方で、捕食性細菌の特性に応じたウキクサマイクロバイーム改変効果の差異や、複数の捕食性細菌を同時に導入した際の効果増強の可能性については未解明であり、知見の蓄積が必要である。そこで本研究では、2種類の捕食性細菌を用い、ウキクサマイクロバイームに対して単独導入または併用する一連の実験的検討を実施し、捕食性細菌の種類および導入方法が、ウキクサマイクロバイームの群集構造ならびにウキクサの成長に及ぼす改変効果を明らかにすることを目的とした。

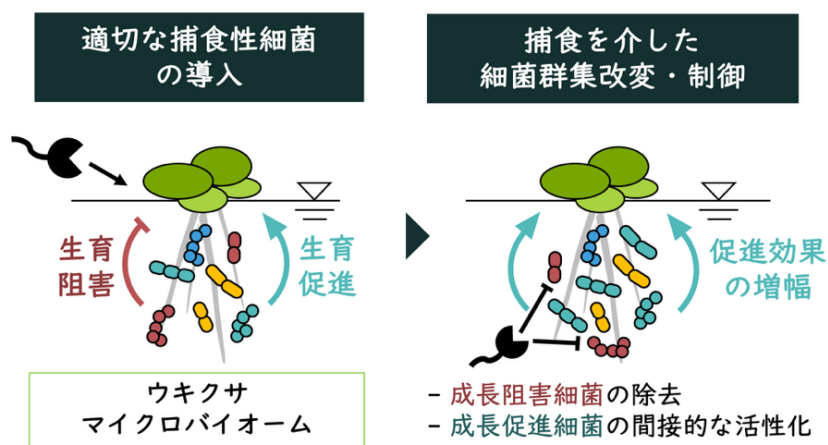


図1 捕食性細菌を用いたウキクサマイクロバイーム改変・制御の概念図

2. 実験方法

供試植物にはコウキクサ (*Lemna minor*) を用い、複数の池水由来の細菌群集をそれぞれ懸濁させた MH 培地で 8 日間共栽培し、ウキクサマイクロバイームを構築した。また、供試菌株として、代表的な捕食性細菌群である BALOs (*Bdellovibrio* and like organisms) に分類される、*Bdellovibrio* sp. BIS2^[1] および *Bacteriovorax* sp. HI3^[2] を用いた。コウキクサを初期葉数が 10 枚となるように新たな培地に植栽し、BIS2 株と HI3 株をそれぞれ単独で導入する系 (BIS2 系、HI3 系) および各菌株を併用する系 (MIX 系) を設定し、捕食性細菌を植種しない対照系も作成した。栽培温度は 28℃ (通常条件) および 32℃ (高温ストレス条件) の 2 条件とし、5 日ごとにコウキクサ 10 枚を新たな培地に継代する計 3 バッチの共栽培試験を行った。各バッチ終了後、コウキクサ葉状体数を計測し、相対成長速度 (RGR; Relative Growth Rate) を算出した。また、定量 PCR により、コウキクサ表層に付着した細菌群および BIS2 株と HI3 株の菌体量を定量した。さらに、16S rRNA 遺伝子を対象としたアンプリコンシーケンスにより、細菌群集構造の解析ならびに細菌間相互作用の推定を目的とした共起ネットワーク解析を実施した。

3. 結果・考察

複数の微生物源に由来するウキクサマイクロバイームに対し、2種類の捕食性細菌（BIS2株、HI3株）を単独または同時に導入したところ、一部の系において細菌群集構造の顕著なシフトが観察された（図2）。特に、対照系およびBIS2系ではBurkholderiaceae科が高い相対存在比（24.7–56.9%）で優占したのに対し、HI3株を含む導入系（HI3系、MIX系）では同科が著しく減少した（<1.4%）。他方、共起ネットワーク解析において、任意の細菌間のつながりの中での重要度を示す指標として、媒介中心性（Betweenness Centrality）を算出した結果、BIS2株は649.7という高い値を示し、HI3株（150.9）を大きく上回った。これらの結果から、HI3株とBIS2株は群集内で互いに異なる生態学的役割を担うことが示唆された。すなわち、HI3株は特定の優占種を主な標的として局所的に作用し、群集構造を直接的に改変する役割を担う一方、BIS2株は広範な細菌への捕食、あるいは捕食を介した間接的な波及効果によってネットワーク構造に影響を及ぼすことで、高い媒介中心性を示したキーストーン種のような役割を持つ可能性が示唆された。さらに、Rhodocyclaceae科やMethylophilaceae科は単独導入系では試験開始から第3バッチまで残存していた一方、MIX系においてのみ検出限界未満となった。加えて、その減少開始時期も単独導入系より早かったことから、2種類の捕食性細菌の併用は単独導入では達成できない相乗的な改変効果をもたらすことが示された。

なお、通常条件では細菌群集構造の改変に伴う一貫したウキクサの成長促進効果は確認されなかったが、対照的に、ストレス条件下ではMIX系においてRGRが32℃対照系および単独導入系よりも高く、バッチ進行に伴い通常条件に近い水準まで回復する傾向が認められた（図3）。以上より、捕食性細菌導入の効果は、特にストレス条件下では、2種類の捕食性細菌の異なる作用を介した群集改変の結果として、成長促進というよりも成長抑制の緩和として宿主に現れる可能性が示唆された。

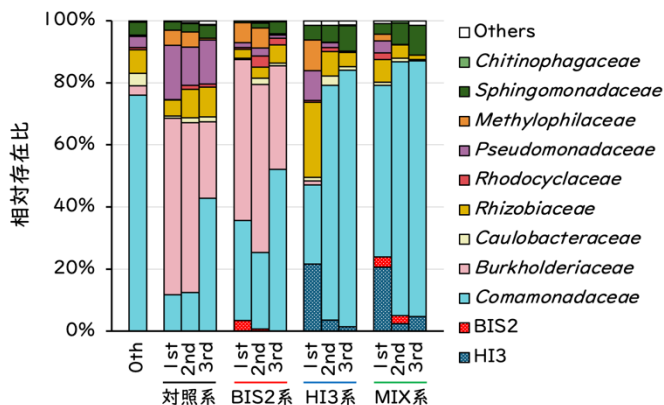


図2 捕食性細菌の導入に伴う細菌群集構造の推移

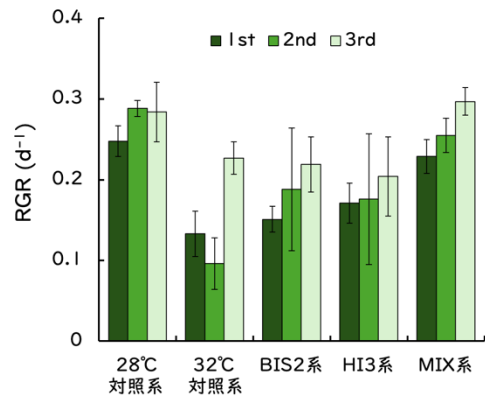


図3 ストレス条件での相対成長速度の比較

4. 結論

捕食特性の異なる2種類の捕食性細菌（BIS2株・HI3株）を用い、ウキクサマイクロバイームへの単独導入および併用が群集構造に及ぼす影響を解析した一連の検討を実施した。その結果、導入する捕食性細菌の種類や組み合わせによって異なる群集改変効果をもたらすことが示され、さらに、この群集改変はウキクサの成長促進にも波及し、ストレス条件下において成長抑制の緩和に寄与し得る可能性が示唆された。今後、適切な捕食性細菌の導入条件を検討することにより、マイクロバイームを意図的に改変させることで、ウキクサ生産性向上技術の確立につながるものと期待される。

参考文献

- [1] T. Sugiyama *et al.*, *Environ. Microbiol.*, Vol.28, No.1, e70243, 2026.
- [2] D. Inoue *et al.*, *Microbes Environ.*, Vol.38, No.3, ME23040, 2023.

繊維強化複合材料の接着継手における熱硬化性樹脂接着剤への解体性付与と接着強度に関する研究

ビジネスエンジニアリング専攻
テクノロジー創成連携領域 倉敷研究室 杉本 琢真

1. 研究背景と目的

近年、繊維強化複合材料や革新鋼板などの軽量・高強度材料を適材適所に組み合わせるマルチマテリアル化による、構造物の高機能化および軽量化する研究開発が活発に進められている。この際、異種材料を接合する技術として、ボルトなどの機械的締結や接着剤による接着接合があり、中でも接着接合への注目が高まっている。接着接合は、構造物の接合に求められる接着強度を担保できる接合技術である。また、機械的締結と比較して応力集中を生じにくく、被着体を損傷しにくいという特徴を有する。さらに、構造部材の削減により軽量化にも寄与する。一方、製品使用後には再資源化のために構造物を解体する必要があるが、強固に接着された被着体の分離は困難であり、リサイクルにおける大きな課題となっている。

そこで本研究では、構造用途で要求される接着強度を有しつつ、使用後には解体可能な、「高い接着強度」と「容易な解体」を両立する易解体性接着剤の開発を目的とした。

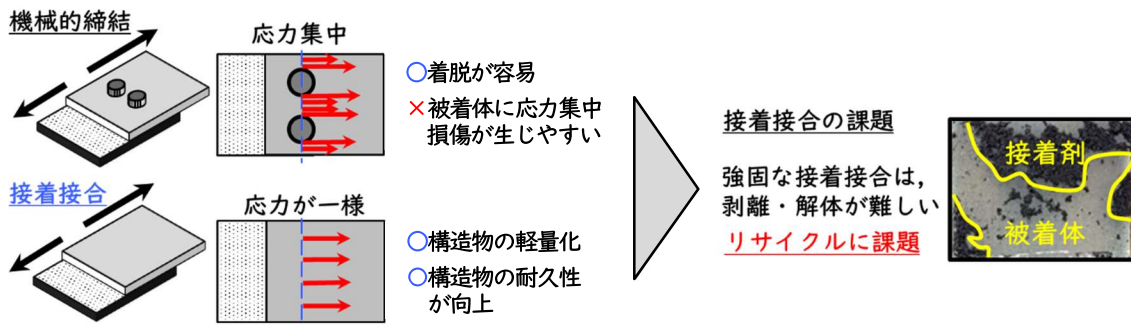


図1: 接着接合の利点とその課題

2. 実験方法

接着剤の解体は本研究室で考案された、マイクロ波照射により接着剤中に添加したフィラーを昇温させて接着層の内部から加熱することで熱分解を誘起し、解体する手法を用いた。従来の加熱炉による被着体全体を加熱する、外部からの加熱法では被着体全体が昇温して熱劣化が生じる課題があるのに対し、本手法では接着層を選択的に加熱できるため、被着体の熱劣化を最小化できる点に特徴がある(図2)。

供試材には被着体として、軽量構造部材として広く用いられ、リサイクル性向上が求められているガラス繊維強化プラスチックを用いた。解体対象とする接着剤には熱硬化性エポキシ樹脂系接着剤(2082C, 株式会社スリーボンド社製)を選定した。

エポキシ樹脂は、優れた機械特性と高い接着強度を有する代表的な熱硬化性樹脂であるが、架橋による分子拘束により一度硬化すると解体が困難である。本研究では、この難解体性を前提条件とし、エポキシ樹脂を対象材料とした。また、母材であるエポキシ樹脂の熱分解温度まで昇温するためのフィラーには、

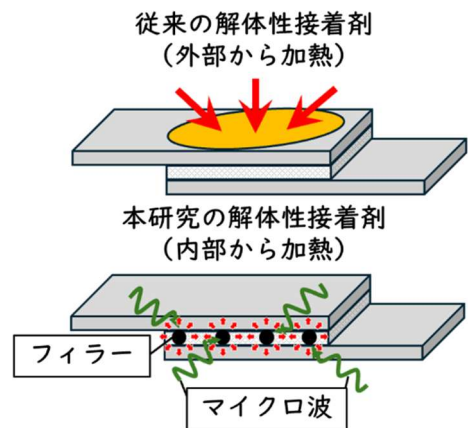


図2: 本研究の解体性接着剤の特徴

マイクロ波電磁場下での昇温に支配的な因子である高い誘電損失および導電性を示す材料として、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) (TUBALL™, OCSiAl 社製) を選定し、接着剤中に添加した。SWCNT はナノファイバーとしてき裂進展抑制による機械特性向上をもたらすと同時に、マイクロ波照射下で優れた昇温特性を示すことが期待される。

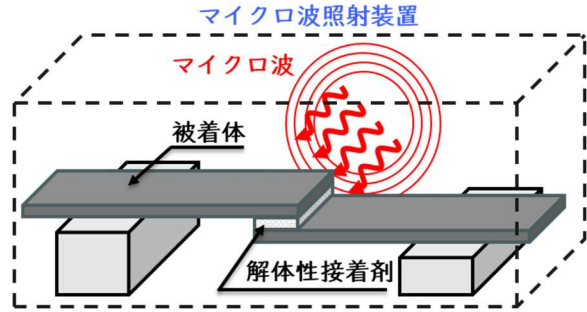


図3：マイクロ波照射による解体時の概念図

次に実験方法について述べる。接着強度は、JIS K 6850 に準拠した引張せん断試験により評価し、最大せん断応力を接着強度と定義した。また、解体にはマイクロ波照射装置 (μ Reactor Ex, 株式会社四国計測社製) を用い、周波数 2.45 GHz, 出力 1000 W, 照射モードはシングルモードの条件でマイクロ波を照射した (図3)。マイクロ波照射による昇温特性の評価には高解像度サーモグラフィ (Xi-400, オプテックス・エフエー株式会社製) を用いた。

3. 実験結果

SWCNT を 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 および 1.0 wt% 添加した試料における、最大 120 秒間のマイクロ波照射による温度変化の推移を図4に示す。SWCNT の添加によりマイクロ波照射に対する昇温特性が著しく向上することが明らかとなった。特に顕著な昇温特性の向上を示した条件は、0.6 wt%, 0.8 wt% および 1.0 wt% 添加試料であり、最大到達温度はそれぞれ 349°C, 373°C および 364°C であった。以上より、SWCNT を 0.6 wt% 以上添加することで、本エポキシ樹脂の熱分解温度である 260°C 以上に昇温可能であることが確認された。

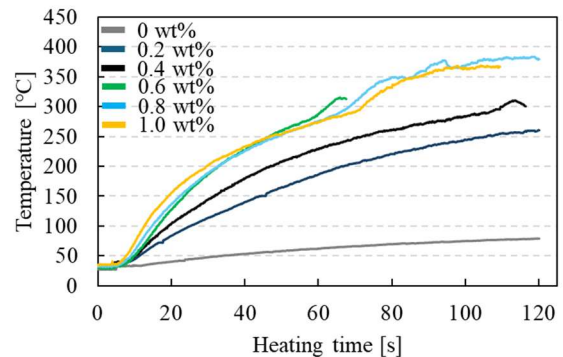


図4：マイクロ波照射時の昇温特性

次に、マイクロ波照射前後での接着強度を図5に示す。マイクロ波未照射においては、SWCNT を添加することで接着強度の向上が確認された。特に 0.2~0.6 wt% の添加において、未添加試料と比較して最大 57% の顕著な接着強度向上が認められた。一方、0.8 wt% および 1.0 wt% 添加試料では、未添加試料と比較して高い接着強度を維持しているものの、0.2~0.6 wt% 添加試料と比べて低下した。

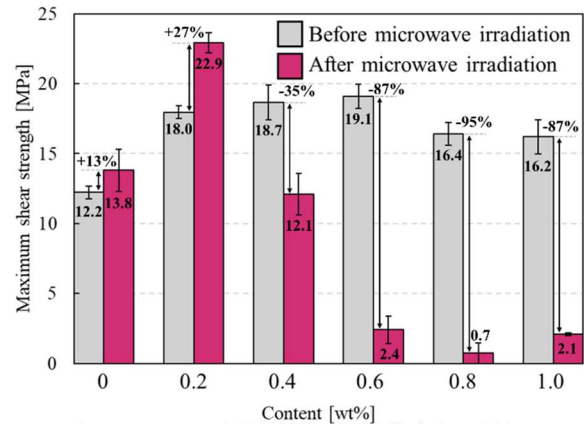


図5：マイクロ波照射前後での接着強度の比較

マイクロ波照射後においては、SWCNT の添加により昇温特性が向上した 0.4 wt%~1.0 wt% 添加試料で接着強度の低下、「解溶性」が確認された。

4. まとめ

本研究では、「高い接着強度」と「容易な解体」を両立する易解体性接着剤の開発を目的とした。SWCNT を 0.6 wt% 添加した試料において未照射時に 19.1 MPa の接着強度を有しつつ、マイクロ波照射により 87% の接着強度の低下が確認された。本研究により、マイクロ波照射と SWCNT の組み合わせが接着強度と解体性の両立に寄与することが示され、構造用途の接合における易解体性接着剤の適用に向けて着実な進展が得られたといえる。今後は、易解体性接着剤の特性向上を目指すだけでなく、マイクロ波照射による解体に適した接着剤の塗布方法やマイクロ波照射装置などの周辺技術についても研究を進める。なお、本研究の遂行に際し、指導教員である倉敷哲生教授 (阪大)、また、村山達哉氏 (元阪大)、西村壮真氏 (阪大)、向山和孝助教 (阪大) に深く感謝申し上げます。生活を支えてくださった家族にも深く感謝申し上げます。

シリコンウェーハの両面研磨加工における ウェーハ回転挙動の解明

機械工学専攻 機械工学コース

精密加工学領域 榎本・杉原研究室 瀬口 悠太

1. 緒言

両面研磨加工（図1）は、互いに逆方向に回転する上下の研磨パッドで工作物を挟み込み、一定の圧力を加えながら相対運動させることで研磨液によって工作物表面を磨く加工法である。本加工法は、効率よく高平滑な鏡面を得ることができるため、半導体デバイスの基板材料であるシリコンウェーハ（以降、ウェーハ）の表面仕上げ工程で使用されている。半導体デバイスの高集積化および高生産性化に対する要求にともない、ウェーハにはさらなる平坦性の向上が求められており、両面研磨加工においてウェーハの平坦性を悪化させないことが重要な課題となっている。

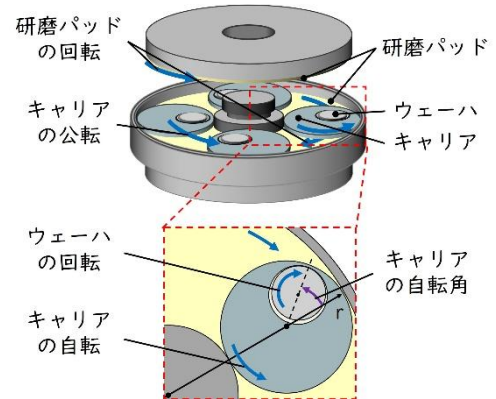
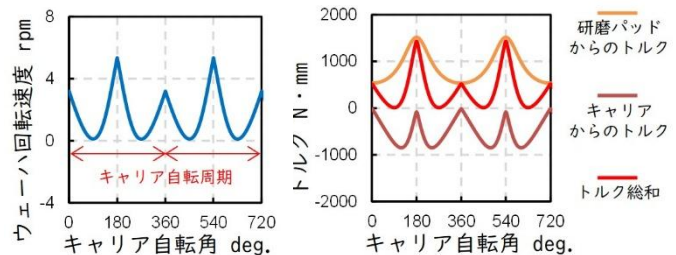


図1：両面研磨加工

しかし、両面研磨加工では加工後にウェーハがテーパ形状となり平坦性が悪化することが知られており、テーパ形状は加工中にキャリアと呼ばれる保持具の穴の中でウェーハの回転がスムーズに起こらない場合に形成される。そのため、加工後のウェーハのテーパ形状抑制には「加工中のキャリアの穴の中でのウェーハ回転挙動」（以降、ウェーハ回転挙動）の理解が不可欠である。これまでに数理モデルを用いた研究が行われているが、加工は非常に狭い空間で行われるため直接観察することが困難であり、ウェーハ回転挙動には不明な点が多い。本研究では、ウェーハ回転挙動の運動力学的分析を行うとともに連続的に観察可能な手法を構築することにより、ウェーハ回転挙動を特徴づける要因を検討した[1]。

2. ウェーハ回転挙動の運動力学的分析

ウェーハ回転挙動を理解するために、加工中にウェーハが受ける力およびトルクについて検討する。ウェーハは上下の研磨パッドおよびキャリアから摩擦力を受けており、上下の研磨パッドからの摩擦力によるトルクはウェーハの回転を促す方向、キャリアからの摩擦力によるトルクはウェーハの回転を妨げる方向に作用する。ウェーハの回転速度はこれらのトルクの和から計算でき、図2に一般的な加工条件におけるキャリアの自転に対するウェーハの回転速度と、各トルクの計算結果を示す。なお、研磨パッドからのトルクはウェーハ面内および上下の合計である。図2(a)からウェーハ回転速度は周期的に変化しており、その周期はキャリアの自転周期と一致することがわかる。また、図2(b)からウェーハ回転速度の推移はウェーハが受けるトルクの総和の推移と概ね一致しており、研磨パッドからのトルクの大きさがキャリアからのトルクの大きさより大きい場合にウェーハが回転するといえる。



(a) ウェーハ回転速度

(b) トルク

図2：ウェーハ回転速度およびトルクの計算結果

図3から、研磨パッドから受ける摩擦力の作用方向はウェーハ面内および上下で異なる

ることがわかる。また、研磨パッドから受ける摩擦力の作用方向はキャリアの自転によって変化する。ここで、研磨パッドからのトルクの大きさは、主にウェーハ面内における研磨パッドから受ける摩擦力によるトルクの打ち消し合いの程度に依存していると考えられる。一方、キャリアからのトルクの大きさは、上下の研磨パッドから受ける摩擦力の総和の大きさに比例するため、主にウェーハの上下における研磨パッドから受ける摩擦力の打ち消し合いの程度に依存していると考えられる。

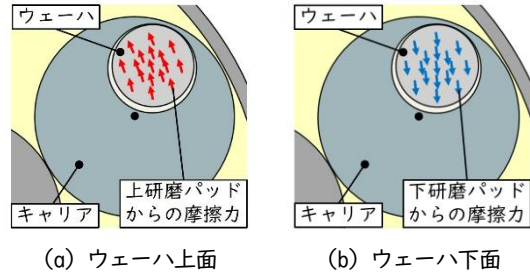


図3：研磨パッドから受ける摩擦力の作用方向

3. ウェーハ回転挙動の観察実験

ウェーハが研磨パッドから受ける摩擦力のウェーハ面内および上下における打ち消し合いの程度がウェーハ回転挙動に与える影響を確認するために、ウェーハの上下でウェーハ-研磨パッド間の摩擦係数が同じ条件と異なる条件の2種類の条件でウェーハ回転挙動の観察実験を行った。本研究では、2枚の単結晶シリコン製円形プレートの上に硬質アクリル発泡体を挟んだ模擬ウェーハを作製し、側面につけたマークの動きを追跡することでウェーハ回転挙動の観察を行った。また、ウェーハの上下でウェーハ-研磨パッド間の摩擦係数が異なる条件では、ウェーハ-研磨パッド間の摩擦係数の異なる2種類の研磨パッドをそれぞれ上研磨パッドおよび下研磨パッドとして使用した。実験のセットアップを図4に、実験結果を図5に示す。

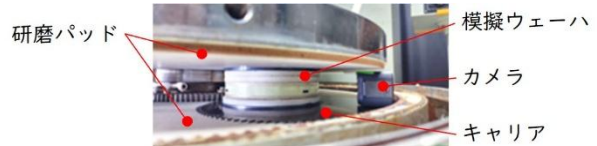


図4：ウェーハ回転挙動の観察実験

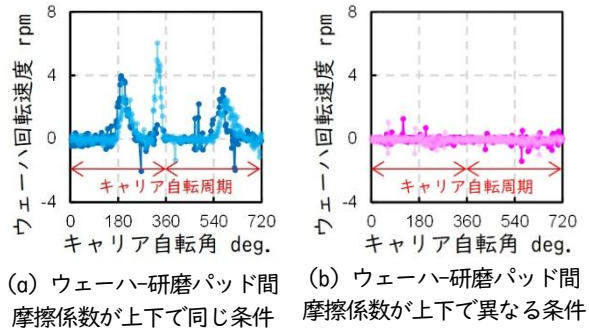


図5：ウェーハ回転挙動の観察結果

図5(a)からウェーハ回転速度が周期的に変化しており、その周期はキャリアの自転周期と一致することが確認できる。これはウェーハ回転挙動の運動力学的分析と合致しており、本観察手法はウェーハ回転挙動を適切に評価できているといえる。また、図5(b)からウェーハの上下でウェーハ-研磨パッド間の摩擦係数が異なる条件ではウェーハが全く回転していないことが確認できる。これは、ウェーハ面内における研磨パッドから受ける摩擦力によるトルクの打ち消し合いの程度は相対的に変化しないが、ウェーハの上下における研磨パッドから受ける摩擦力の打ち消し合いの程度が相対的に小さくなったことにより、キャリアからのトルクの大きさが常に研磨パッドからのトルクの大きさより大きくなったためだと考えられる。したがって、ウェーハ回転挙動はウェーハが研磨パッドから受ける摩擦力のウェーハ面内および上下における打ち消し合いの程度に依存していることが確認された。

4. 結言

両面研磨加工において加工後のウェーハのテーパ形状抑制のために、ウェーハ回転挙動の運動力学的分析を行うとともに連続的に観察可能な手法を構築することにより、ウェーハ回転挙動を特徴づける要因を検討した。その結果、ウェーハ回転挙動はウェーハが研磨パッドから受ける摩擦力のウェーハ面内および上下における打ち消し合いの程度により特徴づけられることを明らかにした。

参考文献

- [1] Satake U, Seguchi Y, Enomoto T, Kinetic analysis of workpiece rotation behavior during double-sided polishing, CIRP Annals, Vol.74, pp.435-439, 2025.

深層学習を用いた信号時相論理仕様を満たす 制御器設計に関する研究

電気電子情報通信工学専攻 電気工学コース
インテリジェントシステム領域 高井研究室 芹澤 和伸

1. はじめに

サイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical Systems: CPS) とは、サイバー空間における情報処理とフィジカル (現実) 空間における制御対象の動作が密接に結び付いたシステムである。図1にCPSの概念図を示す。このようなシステムでは、フィジカル空間でセンシングされた情報に基づいて、サイバー空間で制御対象に与える入力を高速に計算することが求められる。近年、深層学習 (Deep Learning) を用いた学習型の制御器は、高速に制御入力を計算する有力な手法として注目されている。



図1: CPSの概念図

他方で、従来の深層学習では教師データとの誤差に基づく損失関数が用いられることが多く、「常に障害物領域を避ける」や「指定時間以内に目標領域へ到達する」といった時間的・空間的な仕様を直接扱うことは困難であった。そこで本稿では、深層学習を用いた学習型制御器の概要と、複雑な仕様を満たすように学習させるための信号時相論理 (Signal Temporal Logic: STL) に基づく損失関数の設計について説明する。

2. 深層学習を用いた学習型制御器の概要

本研究では、制御対象のダイナミクスを以下の離散時間非線形システムで定義する。

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k).$$

ここで、 $x_k \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^{n_x}$ と $u_k \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^{n_u}$ はそれぞれ時間ステップ $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ における状態

と制御入力を表し、 \mathcal{X} と \mathcal{U} は状態空間と制御入力空間を表す。制御入力は、状態を入力として制御入力を出力する深層ニューラルネットワーク (DNN) により、 $u_k = \pi(x_k; W)$ と与えられる。ここで、 W は制御器パラメータである。初期状態 x_0 は初期状態空間 $\mathcal{X}_0 \subset \mathcal{X}$ から確率分布 $p_0(\cdot)$ に従って与えられるものとする。初期状態 x_0 および制御入力列 $u_{0:T-1} = (u_0, u_1, \dots, u_{T-1})$ が与えられると、対応する状態列 $x_{1:T} = (x_1, x_2, \dots, x_T)$ がダイナミクスに従って生成される。本研究では、状態列 $x_{0:T} = (x_0, x_1, \dots, x_T)$ を「軌道」と呼ぶ。図2は、学習型制御器による軌道生成の流れを示している。

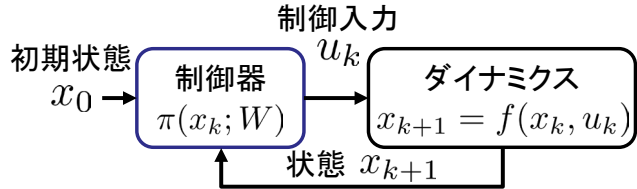


図2: 学習型制御器による軌道生成の流れ

ニューラルネットワークの学習では、「モデルの良さ」を損失関数で定式化し、その値が小さくなるようにパラメータ W を更新する。例えば、教師データとして制御入力 $u_k^{(i), \text{ref}}$ が与えられた場合には、教師データとニューラルネットワークの出力との平均二乗誤差に基づいて、以下のような損失関数を定義できる。

$$J(W) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{T-1} \left\| \pi(x_k^{(i)}; W) - u_k^{(i), \text{ref}} \right\|^2 \quad \text{s.t.} \quad x_{k+1}^{(i)} = f(x_k^{(i)}, u_k^{(i)}), \quad u_k^{(i)} = \pi(x_k^{(i)}; W).$$

ここで、 N は学習データ数である。このような平均二乗誤差で定義される損失関数は、値が小さいほど、教師データとニューラルネットワークの出力との一致度が高いことを表すものである。そのため、この損失関数を最小化するように学習することで、すなわち最小化するようにパラメータ W を更新することで、ニューラルネットワークは教師データに近い制御入力を生成するように学習される。

3. 信号時相論理仕様に基づく損失関数の設計

前章で説明した平均二乗誤差に基づく損失関数は、教師データとの近さを評価する指標であるため、先述した時間的・空間的な仕様を直接扱うことは困難である。そこで、仕様そのものを損失関数に反映するために、信号時相論理 (STL) に基づいた定量的指標を導入する。時相論理とは、命題論理で

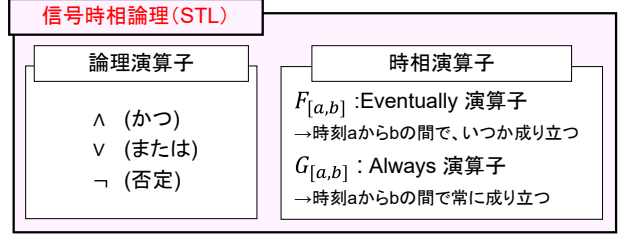


図3: 信号時相論理で用いられる演算子の一例

用いられる論理演算子に時相演算子を追加した論理体系である。例えば「論理式 ϕ が真になるまで、論理式 ψ が真である」は、until 演算子 U を用いて、 $\psi U \phi$ と表される。信号時相論理 (STL) は、時相論理を実数値信号に拡張したものであり、軌道が満たすべき時間的・空間的仕様を記述できる。STL は原子命題、論理演算子、時相演算子を用いて再帰的に構成され、そのシンタックスは以下のように与えられる[1]。

$$\varphi ::= \mu \mid \top \mid \neg \varphi \mid \varphi_1 \wedge \varphi_2 \mid \varphi_1 \vee \varphi_2 \mid \varphi_1 U_I \varphi_2.$$

ここで、 $\mu: \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{B}$ は述語であり、関数 $h: \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}$ の符号に基づいて定義される。より具体的には、 $h(x) > 0$ のとき μ は真であり、その他は偽である。時相演算子 U_I は、時間区間 $I = [a, b]$ に対する until 演算子を表す。図3に示した eventually 演算子 F_I および always 演算子 G_I は、until 演算子を用いて、それぞれ $F_I \phi := \top U_I \phi$ および $G_I \phi := \neg F_I \neg \phi$ と表される。

STL の Boolean セマンティクスは、軌道 $x_{t:T} = (x_t, x_{t+1}, \dots, x_T)$ に対して以下のように定義される。

$$\begin{aligned} x_{t:T} \models \mu &\iff h(x_t) > 0, & x_{t:T} \models \neg \mu &\iff \neg(x_{t:T} \models \mu), \\ x_{t:T} \models \varphi_1 \wedge \varphi_2 &\iff x_{t:T} \models \varphi_1 \wedge x_{t:T} \models \varphi_2, & x_{t:T} \models \varphi_1 \vee \varphi_2 &\iff x_{t:T} \models \varphi_1 \vee x_{t:T} \models \varphi_2, \\ x_{t:T} \models \varphi_1 U_I \varphi_2 &\iff \exists t_1 \in t + I = \{t + k \in \mathbb{Z}_{>0} : k \in I\} \text{ s.t. } x_{t_1:T} \models \varphi_2 \wedge \forall t_2 \in [t, t_1], x_{t_2:T} \models \varphi_1. \end{aligned}$$

STL では、この Boolean セマンティクスを拡張して、定量的なセマンティクスである Robustness score が定義される[2]。Robustness score $\rho^\varphi(x_{t:T})$ は、「軌道 $x_{t:T}$ が STL 仕様 φ をどの程度余裕を持って満たすか」を表す指標であり、以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \rho^\mu(x_{t:T}) &= h(x_t), & \rho^{\neg \mu}(x_{t:T}) &= -h(x_t) \\ \rho^{\varphi_1 \wedge \varphi_2}(x_{t:T}) &= \min(\rho^{\varphi_1}(x_{t:T}), \rho^{\varphi_2}(x_{t:T})), & \rho^{\varphi_1 \vee \varphi_2}(x_{t:T}) &= \max(\rho^{\varphi_1}(x_{t:T}), \rho^{\varphi_2}(x_{t:T})), \\ \rho^{\varphi_1 U_I \varphi_2}(x_{t:T}) &= \max_{t_1 \in t+I} \left(\min(\rho^{\varphi_2}(x_{t_1:T}), \min_{t_2 \in [t, t_1]} \rho^{\varphi_1}(x_{t_2:T})) \right). \end{aligned}$$

ここで、 $\rho^\varphi(x_{t:T}) > 0$ であれば軌道 $x_{t:T}$ は STL 仕様 φ を満たし、さらに大きいほど余裕を持って仕様を満たすことを意味する。本研究では、Robustness score を用いて以下のような損失関数を定義する。

$$J(W) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(-\rho^\varphi(x_{0:T}^{(i)}) + \gamma \sum_{k=0}^{T-1} g(x_k^{(i)}, u_k^{(i)}) \right) \quad \text{s.t.} \quad x_{k+1}^{(i)} = f(x_k^{(i)}, u_k^{(i)}), \quad u_k^{(i)} = \pi(x_k^{(i)}; W).$$

ここで、 $g(\cdot)$ は制御コストを表し、過度に保守的な軌道が生成されることを防ぐ正則化項である。 γ は、Robustness score と制御コストの重みを調整する係数である。このような損失関数を最小化するようにパラメータ W を更新することで、制御器は STL 仕様を満たすような制御入力を生成するように学習される。

4. まとめ

本稿では、深層学習を用いた学習型制御器に関する概要と、信号時相論理仕様に基づく損失関数の設計について説明した。本研究に関する実験結果等については、文献[3]を参照されたい。

5. 参考文献

- [1] N. Mehdipour, et al., “Arithmetic-Geometric Mean Robustness for Control from Signal Temporal Logic Specifications,” 2019 Annual American Control Conference (ACC).
- [2] K. Leung, et al., “Semi-Supervised Trajectory-Feedback Controller Synthesis for Signal Temporal Logic Specifications,” 2022 American Control Conference (ACC).
- [3] K. Serizawa, et al., “Clustering-based Recurrent Neural Network Controller Synthesis under Signal Temporal Logic Specifications,” arXiv:2504.19846.

リン酸カルシウム相転移に着目した 尿路結石形成ダイナミクスの解明

電気電子情報通信工学専攻 量子情報エレクトロニクスコース
機能創製バイオマテリアル領域 丸山研究室 高橋 広登

1. 研究背景および目的

尿路結石とは、生体内で形成される結晶であるバイオミネラルの一種であり、尿管を閉塞することにより激しい痛みを伴う。男性の7人に1人、女性の15人に1人が生涯に経験する尿路結石は、再発率が50%以上と非常に高い[1]。そのため、多くの人々が長期間にわたり苦しみ、患者のQOLは著しく低下する。また、尿路結石症の年間罹患率は増加傾向にあるため、適切な治療法や予防法が必要とされている。しかし、現在でもその予防法として多量の飲水が最も有効とされており、未だに予防法が確立されていないことが課題である。我々の研究グループは、尿路結石の形成機序を解明することでその形成を阻害し得る因子を明らかにし、最終的には尿路結石症の新たな予防法、治療法を確立することを目的に研究を行っている。

尿路結石形成を促進する要因の1つとして、結晶相転移という現象が挙げられる[2]。結晶相転移とは、結晶の溶解と再結晶により成長速度が大きく不安定な結晶相から、成長速度が小さく安定な結晶相へと変化する現象のことで、強固な組織を素早く形成させるために利用される。そこで本研究では、尿路結石の中でも特に形成が速いとされるリン酸カルシウム(CaP)結石を詳細分析し、生体内を模擬した環境におけるリン酸カルシウム結晶の成長・相転移を観察することで、結石急速形成の要因を調査した。

2. ステント CaP 結石の成分分析

分析を行った結石の詳細を以下に示す。本結石は、尿管ステントに約90日間という非常に短い期間で形成したことが分かっている。尿管ステントとは、主に尿路結石症の手術後に尿の通りをよくするために尿管に挿入される管であり、通常は一定期間経過後に抜去するものである。本症例ではステント抜去を行う際に結石の形成が明らかとなった。樹脂包埋法[3]を用いて結石成分を保持した状態で厚さ20-30 μm の薄片を作成し(図1-a)、ラマン分光法を用いた結晶成分のマッピングを行った。分析の結果、本結石にはCaPの準安定相である第二リン酸カルシウム(Brushite)、リン酸八カルシウム(OCP)と安定相であるアパタイト(Ap)が共存した、2層の構造を持つことが明らかとなった。さらに、第2層においてBrushiteからOCPへ相転移した形跡が確認された(図1-b)。ここで、本結石患者の尿pHは経時的に変化したことが分かっている(図4-a)。CaPの溶解度はpHによって大きく変化するため、結石内部に複数の結晶相が存在した原因、さらには結石が急速に成長した原因として尿pHの変化が大きく関わっているのではないかと考えた。

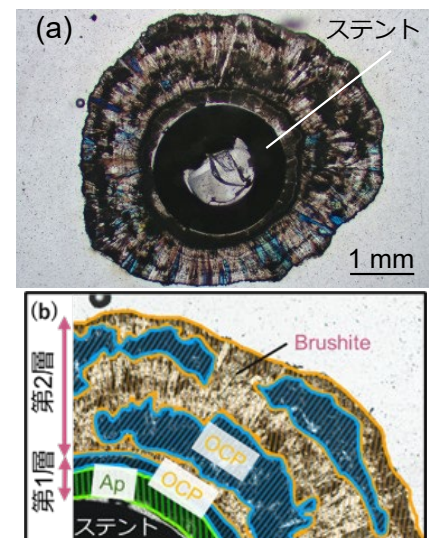


図1: ステント結石の薄片(a)、結晶相の分布(b)。

3. CaP 結晶相転移・結晶成長のpH依存性調査

CaP相転移のpH依存性を調査するため、リン酸イオン、カルシウムイオンをそれぞれ2 mM 含み、pHを5または6に調製した溶液にBrushite粉末を添加し、攪拌を行いながら特定の時間でサンプリング、乾燥

を行った。攪拌時の温度として、体温 (37°C) では反応が非常に緩慢に進行するため 45°C にて実験を行った。ラマン分光分析、粉末 X 線回折法による結晶相同定を行った結果、pH6 の場合、Brushite は OCP を経由して Ap へ相転移したことが明らかとなった(図 2-a)。また、同様の条件で Brushite 結晶表面をその場観察し、Brushite 結晶表面の溶解と OCP 微結晶の核形成を捉えることに成功した。しかし、pH5 のとき、結晶相転移は確認されなかった(図 2-b)。

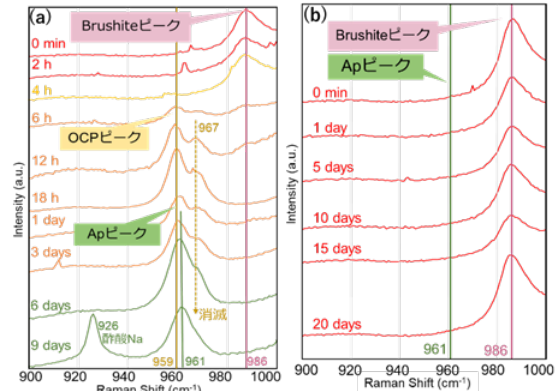


図 2: ラマンスペクトルの変化。(a)pH6、(b)pH5。

続いて、尿中における CaP 結晶成長の pH 依存性を調査した。CaP が核形成した尿のサンプリングを行い、HCl, NaOH を用いて pH を調整した。つづいて各 pH の尿に対してフィルタリングを行ったものとそうでないものを作成し、4°C 静置した状態で結晶の観察を行った。倒立顕微鏡を用いた観察の結果、尿 pH を 6.5 程度に保った場合、Brushite のサイズにほとんど変化が無かった。pH を 5 程度まで低下させたところ、Brushite はその直後から溶解を開始し、50 分程度で視野内のすべてが溶解した(図 3-a, b)。これに対しフィルタリングして Brushite 結晶を一度除去した尿の pH を 8 程度まで上昇させると、CaP が新たに核形成し、約 60 μm/h の速さで成長する様子が確認された(図 3-c, d)。

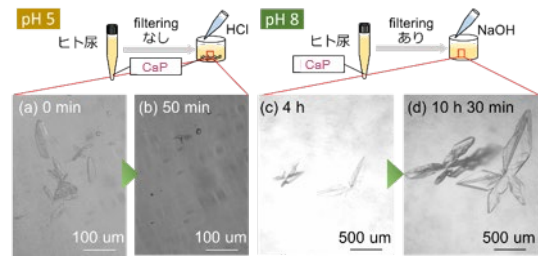


図 3: 結晶外形の時間変化。(a, b)pH5、(c, d)pH8。

以上より、pH の低下は Brushite の相転移速度を低下させ、尿中結晶の溶解を引き起こす可能性があること、また pH の上昇により尿 CaP の成長が加速されることが明らかとなった。ここで、先ほどの結石についてその形成機序を考察する(図 4-b)。薄片の結晶成分同定より、本結石は 2 層の構造を持つことが明らかとなった。まず 1 層目について、成長実験より高 pH は Brushite の成長に有利な環境であるため、ステントを足場に Brushite が成長する。pH の低下により Brushite の成長は停止するが、相転移実験より pH6 付近では Brushite の相転移が起こるため、OCP、さらに Ap へと相転移が進行し、1 層目が形成された。2 層目に関して、再度 pH の上昇により 1 層目を覆うように Brushite が成長した。時間の経過による pH 低下に伴って Brushite から OCP へ相転移が進行し、ステント抜去となったため本症例のような構造を持つ結石が得られたと考える。

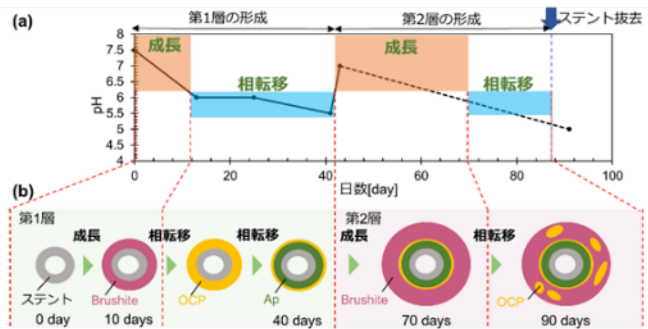


図 4: (a)患者の尿 pH 推移、(b)結石形成機序の仮説

4. 結論

本研究では、尿路結石の中でも特に形成が速いとされる CaP 結石に対し薄片化を用いた結晶成分の分析を行い、結石内部において複数の CaP 結晶相が共存する様子を確認した。また、生体内を模擬した環境におけるリン酸カルシウム結晶の成長・相転移の観察を行い、尿 pH の変化が CaP 結石の相転移及び成長に影響を与えることを示した。本研究成果は生体内における尿路結石形成機序を解明する上で重要な知見になると考えられる。

参考文献

- (1) 日本尿路結石症学会, 尿路結石のすべて, 17-19 (2010).
- (2) M. Sivaguru *et al.*, *Sci. Rep.*, **8**, 13731 (2018).
- (3) 田尻理恵 ら, *日本動物分類学会誌*, **35**, 24-34 (2013).

オオミジンコにおける環境依存的性決定の 分子制御機構解析

生物学専攻 生物学コース
生命環境システム領域 渡邊研究室 杜 昊聡

1. 研究背景および目的

性決定は、個体の発生運命を規定する基本的な生命現象であり、その機構は遺伝的性決定 (GSD) と環境依存的性決定 (ESD) に大別される。なかでも ESD は、外部環境入力が生体内シグナルに変換され、最終的に遺伝子発現のオン/オフとして出力される生体制御系と捉えることができる。しかし、その分子機構には未解明な点が多い。

淡水性甲殻類オオミジンコ *Daphnia magna* は ESD のモデル生物であり、良好な環境では単為生殖によりメスを産生し、環境ストレス下ではオスを産む [1]。この性決定には幼若ホルモン (juvenile hormone; JH) が関与し、排卵前 4-10 時間の卵母細胞に作用して、オス化に必須な転写因子 *doublesex1* (*dsx1*) の発現を胚発生過程で誘導する [2]。

興味深いことに、胚発生初期では、産卵後 0-6 時間には *dsx1* 転写産物が雌雄胚の双方で検出され、産卵後 9 時間以降にオス胚で特異的な発現上昇が生じる [2]。この JH の作用と *dsx1* 発現の時間差は、*dsx1* は JH の直接の標的ではなく JH シグナルから *dsx1* のオス特異的な発現に至るまでの間に未知の制御カスケードが存在することを示唆する。そこで本研究では、この制御過程を担う因子を探索し、環境入力から性決定遺伝子の二値的発現制御へ至る分子機構の解明を目的とした。

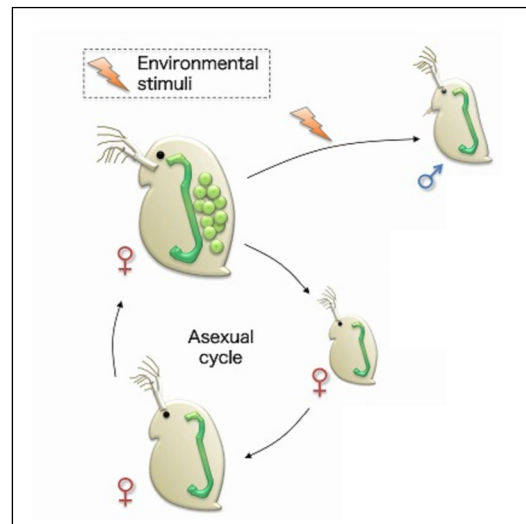


図1: ミジンコにおける生活環

2. 結論および今後の展望

本研究では、産卵後 0 時間および 6 時間胚の RNA-seq データに着目し、解析を行った。OmicsBox によりリードの品質評価を行い、STAR を用いて *D. magna* 参照ゲノムへマッピングした後、遺伝子ごとのカウントデータを取得し、edgeR により差次的発現解析を実施した。

その結果、0 時間胚で 210 遺伝子、6 時間胚で 195 遺伝子の性差発現遺伝子を同定した。オスで発現量の高い遺伝子として *Scratch* (*Scrt2*) および機能未注釈遺伝子 *UG1*, *UG2*, *UG3* を、メスで発現量の高い遺伝子として *DAZ-associated protein 2*, *extensin-2-like*, *histone H1 gonadal* を候補として選抜した。各候補遺伝子に対する siRNA を設計し、産卵後 0 時間の *dsx1* レポーターミジンコにマイクロインジェクションを行った。本系では mCherry 蛍光強度を *dsx1* プロモーター活性の指標として ImageJ で定量した。

Scrt2 または *UG1* をノックダウンした胚では、インジェクション 24 時間後のオス胚における mCherry 蛍光強度が約 20% 低下した。一方、他の候補遺伝子を標的とした条件では有意な変化は認められなかった。以上より、*UG1* および *Scrt2* は *dsx1* 発現を正に制御し、JH シグナルからオス特異的 *dsx1* 発現へ至る制御カスケードを構成する候補因子であることが示唆された。

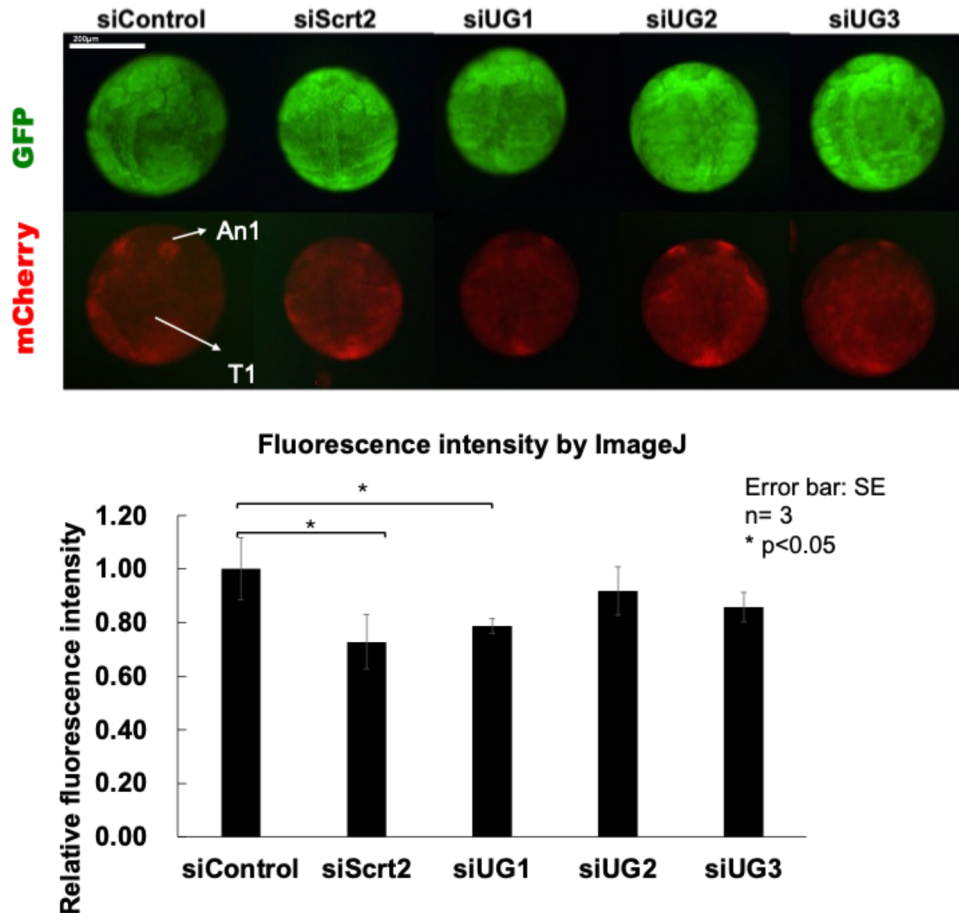


図2：オスにインジェクションし、24時間後観察した結果。GFP（上段）およびmCherry（下段）の代表的な蛍光像を示す。下図はmCherry 蛍光強度の定量結果を示しており、蛍光強度は control 群を1とした相対値として算出した。スケールバー：200 μm。*は $p < 0.05$ 。

3. 結論および今後の展望

本研究では、JH シグナルと *dsx1* のオス特異的発現をつなぐ新規候補因子として *UG1* および *Scrt2* を同定した。今後は、これら因子の作用順序、相互作用、ならびに上流・下流因子を明らかにし、環境入力が発生運命の決定へ変換される分子制御ネットワークの全体像解明を進める。これらの知見は、甲殻類等における性比制御や単性生産に向けた基盤情報となるとともに、環境刺激を二値的な遺伝子発現へ変換する分子スイッチの作動原理として、合成生物学における遺伝子スイッチ設計への展開も期待される。

4. 参考文献

- [1] Hebert, P. D. N. (1978). The population biology of *Daphnia* (Crustacea, Daphnidae). *Biological Reviews*, 53, 387–426.
- [2] Mohamad Ishak, N. S., Nong, Q. D., Matsuura, T., Kato, Y., & Watanabe, H. (2017). Co-option of the bZIP transcription factor Vrille as the activator of Doublesex1 in environmental sex determination of the crustacean *Daphnia magna*. *PLoS Genetics*, 13(11), e1006953.

霧環境におけるドローン視認性向上のための 画像霧除去手法の開発

機械工学専攻 機械工学コース
機械動力学領域 石川研究室 陶 斯遠

1. 緒言

地震、山火事などの災害現場では、迅速かつ正確な被害状況の把握や捜索救助活動が求められる。ドローンは広範囲を効率的に監視し、危険区域への人員投入を回避する手段として有効であるが、濃霧や煙といった視界不良要因により、カメラを用いた視覚ベースの自律走行性能が著しく低下し、安全性が損なわれる恐れがある。そこで本研究では、災害現場における視認性向上を想定した霧除去システムの開発を目的とする。とくに、二次元画像を三次元点群データへと変換し、三次元空間において軽量かつ高精度に霧除去を行なう霧除去フレームワーク LightDefogGS を提案した。これにより、従来困難であった濃霧環境を三次元空間に拡張することで、精度とリアルタイム性能を両立した霧除去を実現した。

2. なぜ三次元データ復元に着目したか

これまでの二次元画像に基づく霧除去手法は、大きく二つに分類される。一つは、霧の性質に関する人手設計の仮説に基づく事前知識ベース手法であり、もう一つは、霧の現象をブラックボックスとして扱う深層学習ベース手法である。前者は高速だが濃霧環境で精度に限界があり、後者は高精度である一方、モデルが大規模化し処理時間が長いという課題がある。これらの根本的な要因は、本来三次元である霧現象を二次元平面へ圧縮することによる情報損失にある。そこで本研究では、霧を三次元の枠組みで直接解析することで、精度とリアルタイム性の両立が可能になると考えた。

三次元の枠組みで解析するための基盤技術が、三次元データ復元である。とくに、2023年に提案された3D Gaussian Splatting(3DGS)[1]は、高品質な三次元シーン再構成とリアルタイム描画を同時に実現した。従来手法と比べて精度とリアルタイム性を大幅に向上させ、三次元ガウス分布を用いて空間構造を明示的に表現できる。そのため、本来三次元で存在する霧現象を三次元のまま解析するという本研究の方針と高い親和性を有しており、三次元空間における霧除去の実現可能性を大きく高める技術であると考えた。

3. 三次元データ復元を活用した霧除去

3.1. LightDefogGS の概要

LightDefogGS は、本研究で提案した 3DGS に二値分類を統合した軽量な三次元霧除去フレームワークである。本手法では、霧除去の処理を、霧を表わすガウス分布群と、霧以外の物体を表わすガウス分布群を判定する二値分類問題として再定式化し、三次元ガウス分布と空気中の霧粒子の類似性を活用する。図1に示すように、3DGS モジュールの後段に二値分類器を直接接続したフィードフォワード型の構成を採用しており、計算コストを抑えながら効率的な処理を実現する。さらに、モジュール化された設計により、各モジュールを柔軟に置き換え・拡張できる点も特徴である。分類器には既存手法である LightGBM[2]を採用しており、霧を表わすガウス分布群をリアルタイムかつ高精度に識別し、シーン全体にわたる高精度な霧除去を可能にしている。

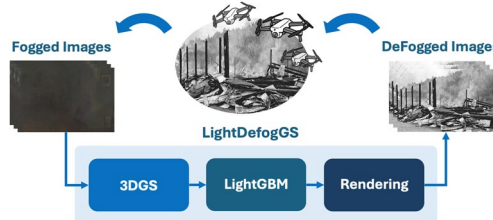


図1: LightDefogGS の概要

3.2. LightDefogGS による霧除去

図2は、さまざまな霧環境における定性的な霧除去結果を示している。図2に示すように、濃霧条件下では、CLAHEのような画像ベースの霧除去手法は、霧によって完全に隠された背景情報の復元が困難である。一方、三次元点群に基づく既存手法 GS-W[3]は可視情報を改善するものの、霧成分が大きく残存している。これに対し、提案手法である LightDefogGS は、三次元空間にお

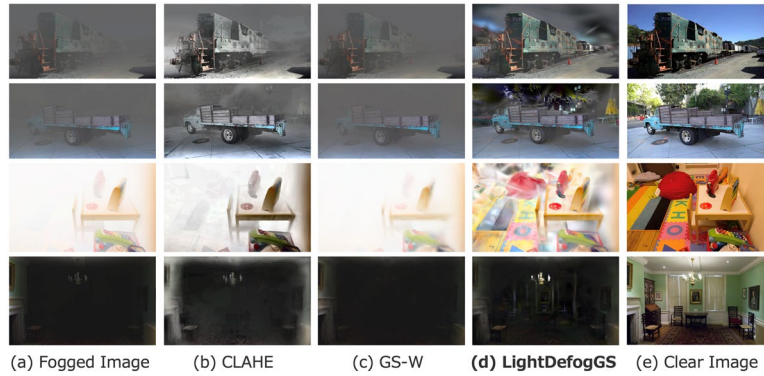


図2：霧除去精度の定性的評価

ける霧成分の除去により、単一視点で失われた視覚情報を効果的に復元できる。このとき、画素値には霧と非霧の情報が混在するのに対し、三次元空間の点は空間的に独立した要素を表わすため、霧を点群内で明示的に表現できる。その結果、三次元空間への拡張により、霧領域と非霧領域の分離性が向上する。

表1：霧除去精度の定量的評価

Metric	PSNR \uparrow	SSIM \uparrow	LPIPS \downarrow
CLAHE	11.35 \pm 0.59	0.69 \pm 0.02	0.58 \pm 0.03
3DGS	10.75 \pm 0.70	0.67 \pm 0.02	0.57 \pm 0.04
GS-W	10.70 \pm 0.70	0.66 \pm 0.02	0.59 \pm 0.03
Ours	11.68 \pm 0.69	0.70 \pm 0.02	0.51 \pm 0.03

また、表1には従来手法および提案手法の霧除去性能を比較した結果を示す。霧全体に対する除去性能を定量的に評価するため、各結果には標準正規分布近似に基づく95%信頼区間を用いた。また、評価指標としては、画素値の再現度を示すPSNR（高いほど良い）、構造的類似性を示すSSIM（高いほど良い）、および人間の知覚に基づく見た目の近さを示すLPIPS[4]（低いほど良い）の三指標を用いた。表1により、GS-Wは濃霧条件下において著しい性能低下を示し、PSNRが低くLPIPSが高いことから、視覚的な歪みが大きいことが確認できる。一方、提案手法であるLightDefogGSは、霧環境において三つの指標すべてで既存手法を上回っており、先行研究と比較して視認性が大幅に向上していることが確認できる。さらに、GS-Wの再構築処理（3DGSの約3.84倍の時間を要する）に対して、LightDefogGSの推論時間は3DGSの学習コストと比べて無視できるほど短い（50,000点あたり31.7 \pm 0.8ms）ため、リアルタイム性能の大幅な向上も実現している。

4. 結言

本研究では、3DGSに基づいた軽量な三次元霧除去フレームワークLightDefogGSを提案した。三次元データ生成モジュールである3DGSと霧分類器であるLightGBMを組み合わせることで、霧成分と非霧成分を効果的に分離し、軽量かつ高精度な霧除去を実現した。実験の結果、既存手法と比較して大幅な霧除去性能の向上を達成するとともに、50,000点あたり31.7 \pm 0.8msという高いリアルタイム性能を実現した。

参考文献

- [1] B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkuhler, and G. Drettakis, “3D gaussian splatting for real-time radiance field rendering”, ACM Trans. Graph., vol. 42, no. 4, pp.1-14, 2023.
- [2] G. Ke, Q. Meng, T. Finley, T. Wang, W. Chen, W. Ma, Q. Ye, T. Y. Liu, “LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree”, in Proceedings of NeurIPS, vol. 30, 2017.
- [3] J. Kulhanek, S. Peng, Z. Kukulova, M. Pollefeys, and T. Sattler, “WildGaussians: 3D Gaussian Splatting in the Wild”, in Proceedings of NeurIPS, 2024.
- [4] R. Zhang, P. Isola, A. A. Efros, E. Shechtman, and O. Wang, “The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric”, in Proceedings of CVPR, pp. 586-595, 2018.

人流軌跡データに基づく道路橋の重要度評価

地球総合工学専攻 社会基盤工学コース
社会基盤マネジメント学領域 貝戸研究室 中崎 晴仁

1. はじめに

我が国の道路橋の過半数は2030年に建設から50年を迎える見込みであり、老朽化の加速が懸念される。2024年度までの定期点検結果によれば、全体の約7%の道路橋は5年以内の修繕等の措置が必要であり、適切な維持管理施策の立案が急務といえる。安全性の確保を前提としつつ、限られた資源のもとで管理する上では、道路橋の必要性の判断や措置の優先順位決定のための客観的根拠が不可欠である。優先順位の検討に際しては、構造的な健全性のみならず、道路橋の機能不全が道路ネットワークへ及ぼす影響を評価する必要があるものの、その評価手法が十分に発展してきたとはいえない。例えば、道路橋が途絶した場合の代替経路の評価が限定的であることや、自動車による移動のみを想定している点に課題が残された。そこで本研究では、様々な手段による交通ネットワーク上の移動を高精度かつ網羅的に捕捉できる人流軌跡データを利用し、移動経路および手段の多様性を考慮した道路橋の重要度評価の枠組みを提案する。

2. 人流軌跡データの概要

計測技術の進歩や計算機の性能向上に伴い、人々の移動や集積を把握できる人流データの収集および活用が進められている。移動中の位置情報の点列として取得される人流軌跡データは空間的な解像度が高く、交通ネットワークと組み合わせた精緻な分析を可能にする。本研究では、スマートフォン向けのポイントアプリユーザーを対象に、端末のGPSセンサを通じて収集された位置情報データを利用した。具体的には、大阪都市圏で2024年10月の1ヶ月間に収集された約42万ユーザーの約7億点の位置情報を分析した。図1にデータの一部を可視化した結果を示す。なお、位置情報はデータの収集に同意したユーザーのみを対象として取得されたものであり、個人が特定できない形に秘匿化されている。

3. 重要度評価の方法

道路橋の重要度を平常時の利用交通量と途絶時の空間的な到達可能性の損失の2軸で評価する。道路橋の利用状況を把握するために、人流軌跡データから得られる位置情報の点列を時間的な連続性に基づいて分割し、移動の最小単位であるトリップに整理した上で分析する。位置情報の観測点に基づいて道路ネットワーク上の移動経路を推定するマップマッチングにより、道路橋を通行するトリップの把握が可能となる。本研究ではFast Map Matching¹⁾を用いて移動経路を推定した。途絶時の到達可能性の損失は、トリップにおいて潜在的に到達できる空間的領域を示す「潜在経路域²⁾」の変化に基づいて定量化する。潜在経路域は、個人が利用可能な時間の中で最大移動速度が与えられた際



図1：大阪都市圏における人流軌跡データの可視化

に到達できる時空間上の範囲を空間平面上に投影した領域であり、トリップ中に選択可能な経路の範囲を示す指標と位置付けられる。図2に道路橋の途絶によってトリップの潜在経路域が減少する状況の一例を示す。途絶に伴う迂回が生じることにより、同一条件下で到達可能な範囲は平常時と比較して減少することが確認できる。重要度の評価には、潜在経路域の損失を時間的な価値に換算した「時間換算損失率」を導入する。ただし、速度域の異なる3段階の移動モードを想定して評価するものとし、道路種別ごとに推定した移動速度分布に基づいて、個別のトリップの移動モードを同定した結果を用いる。

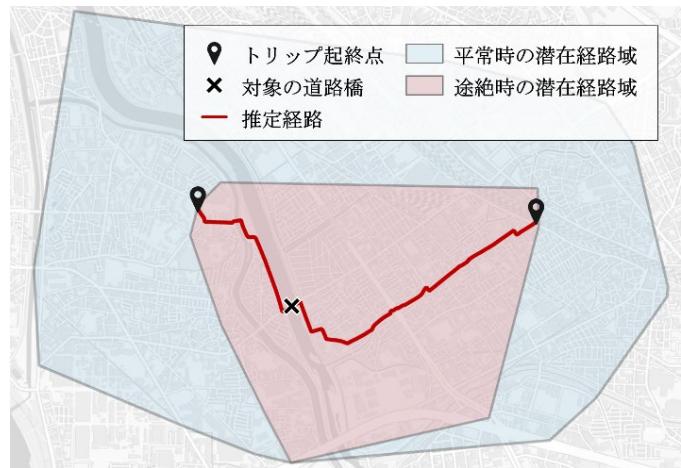


図2：道路橋の途絶による潜在経路域の減少

4. 重要度評価の結果

大阪府内の国道、府道、市町村道の道路橋を対象として重要度評価を適用する。定期点検結果から早期の措置が必要と判定された道路橋のうち、橋長10m以上等の諸条件を満たす108橋を分析対象とした。なお、分析の基盤となる道路ネットワークは、日本デジタル道路地図協会が提供するデータベース(DRM-DB)に基づいて構築し、鉄道および高速道路を利用するトリップは事前に除去した。図3に重要度評価の結果を示す。横軸を経路推定に基づく道路橋の利用トリップ数、縦軸を途絶時の時間換算損失率として、道路

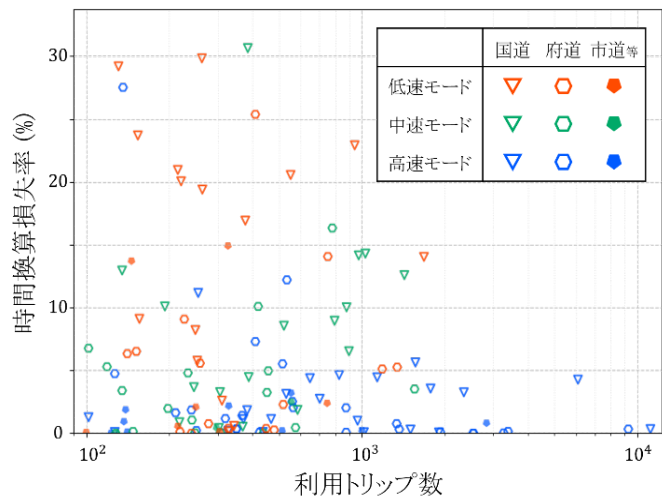


図3：道路種別・移動モード別の道路橋重要度

種別および移動モード別に道路橋をプロットしている。すなわち、図3の右上方に位置するほど相対的な重要性は高まると解釈できる。いずれの道路種別においても高速モードは時間換算損失率が小さい値に留まる一方、特に国道橋を通行する低速および中速モードは途絶の影響を大きく受ける傾向が確認できる。長距離移動を前提とした自動車等による移動では、道路橋の途絶がトリップ全体に及ぼす影響は限定的である一方で、徒歩や自転車等による移動に対しては、途絶が直接的な影響を及ぼし得ることが示された。道路の種別や移動モード別に比較することにより、道路橋の措置優先順位を定めることが可能となる。

5. おわりに

本研究では、人流軌跡データに基づく道路橋の重要度評価の枠組みを提案した。自動車交通のみに着目した従来の評価手法では見過ごされてきた低速の移動体への影響を評価するとともに、交通ネットワークにおける道路橋の重要性を考慮して修繕等の措置優先順位を決定するための客観的根拠を示した。

参考文献

- 1) C. Yang, G. Gidofalvi: Fast map matching, an algorithm integrating hidden Markov model with precomputation, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.32, No.3, pp.547-570, 2018.
- 2) H.J. Miller: A measurement theory for time geography, *Geographical analysis*, Vol.37, No.1, pp.17-45, 2005.

原子状炭素等価体を用いた酸塩化物への 炭素原子挿入反応

応用化学専攻 分子創成化学コース
機能分子化学領域 鷲巣研究室 西岡 輝騎

1. 緒言

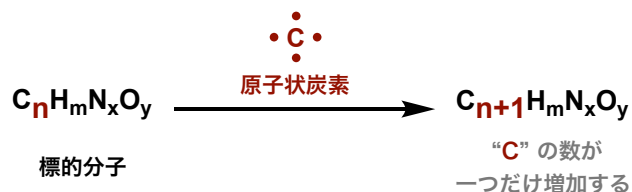
原子状炭素は結合を持たない炭素種であり、一度の反応で4本の共有結合を形成可能な魅力的な反応中間体である。原子状炭素を利用することによって可能になる反応の一つとして、標的分子に炭素原子を挿入する反応（炭素原子挿入反応）が知られている(Fig. 1a)¹。しかし、原子状炭素はアーク放電などの物理的手法によって発生させる必要があり²、特殊な装置の使用や原子状炭素の寿命の短さといった問題から、選択的な炭素原子挿入反応の実現は困難であった³。また、化学的手法による原子状炭素の発生法として、ジアゾテトラゾール⁴などの前駆体の利用が報告されているが、選択的な炭素原子挿入反応の実現は達成されていなかった。一方、当研究室では*N*-ヘテロ環状カルベン(NHC)が原子状炭素の合成等価体として機能し、 α, β -不飽和アミドに対して、炭素原子挿入反応が進行することを見出した(Fig. 1b)⁵。しかし、本反応で形成される4本の結合のうち、2本はC-H結合に限定される。そのため、4つの異なる置換基を形成し、立体中心を構築可能な炭素原子挿入反応は達成できていなかった。

本研究では、*N*-イソシアノイミノトリフェニルホスホラン (PINC) が原子状炭素等価体として機能し、酸塩化物に対して炭素原子挿入反応が進行することを見出した(Fig. 1c)⁶。本反応で挿入される炭素原子には、4つの異なる置換基が結合しており、炭素原子挿入反応により立体中心を構築することに成功した。

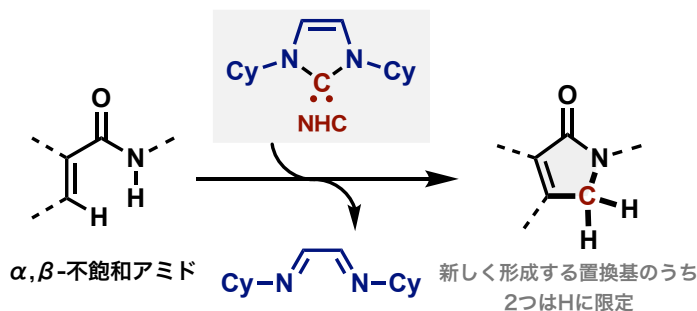
2. 実験結果

酸塩化物 I と PINC を THF 溶媒中、室温で1時間反応させた後、THF を Xylene に置換し、 $\text{Rh}_2(\text{OAc})_4$ 触媒存在下、140 °C で18時間反応させたところ、炭素原子が挿入した α -クロロケトンが得られた。本反応

(a) 原子状炭素による炭素原子挿入反応



(b) 原子状炭素等価体による炭素原子挿入反応（当研究室の先行研究）



(c) 本研究

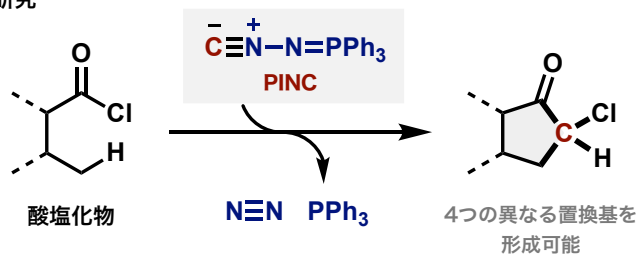


Fig. 1 原子状炭素および原子状炭素等価体を利用した炭素原子挿入反応

は安息香酸誘導体だけではなく、ヘテロ芳香環や脂肪族の酸塩化物などの幅広い基質に対して適用可能であった (Fig. 2)。

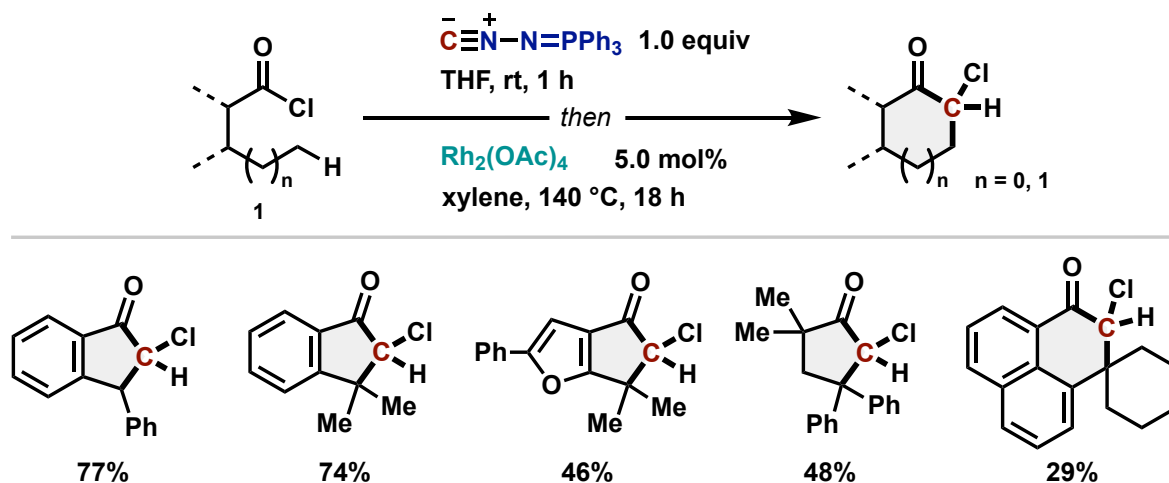


Fig. 2 本反応の基質適用範囲

本反応の反応機構を示す (Fig. 3)。まず、酸塩化物の C-Cl 結合に PNC が挿入し、ホスファジン中間体 A を与える。次に、ロジウム触媒存在下、A からの窒素とホスフィンの脱離によってロジウムカルベン錯体 B が形成される。最後に、分子内の C-H 結合にカルベン炭素が挿入することで、最終生成物である α -クロロケトンが得られる。

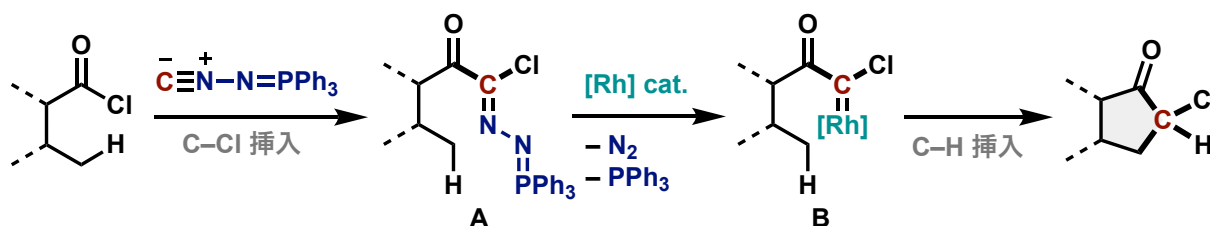


Fig. 3 本反応の推定反応機構

3. まとめ

本研究では、PNC を原子状炭素の合成等価体として利用することによって、酸塩化物に対する炭素原子挿入反応を開発した。本反応により挿入される炭素原子には、新しく 4 つの異なる置換基が形成されており、これまでには達成されていなかった立体中心を構築可能な炭素原子挿入反応を達成した。今後は、PNC を用いた新形式の炭素原子挿入反応の開発、および新規原子状炭素等価体の探索に取り組む。

4. 参考文献

- 1) Fujimoto, H.; Tobisu, M. *ChemistryEurope* **2024**, *2*, e202400005.
- 2) (a) Skell, P. S.; Havel, J. J.; McGlinchey, M. J. *Acc. Chem. Res.* **1973**, *6*, 97–105. (b) Mackay, C.; Wolfgang, R. *Science* **1965**, *148*, 899–907.
- 3) (a) Armstrong, B. M.; Zheng, F. Shevlin, P. B. *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 6007–6011. (b) Rose, T.; Mackay, C.; Wolfgang, R. *J. Am. Chem. Soc.* **1967**, *89*, 1529–1530. (c) Skell, P. S.; Harris, R. F. *J. Am. Chem. Soc.* **1969**, *91*, 4440–4445. (d) Emanuel, C. J.; Shevlin, P. B. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116*, 5991–5992. (e) Pan, W.; Shevlin, P. B. *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, *118*, 10004–10005.
- 4) Shevlin, P. B. *J. Am. Chem. Soc.* **1972**, *94*, 1379–1380.
- 5) (a) Kamitani, M.; Nakayasu, B.; Fujimoto, H.; Yasui, K.; Kodama, T.; Tobisu, M. *Science* **2023**, *379*, 484–488. (b) Fujimoto, H.; Nakayasu, B.; Tobisu, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 19518–19522.
- 6) Fujimoto, H.; Nishioka, T.; Imachi, K.; Nishimura, R.; Tobisu, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, *147*, 8138–8144.

階層構造化による傾斜変形能を活用したアルミニウム合金/ 炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) 接合部の力学特性向上

マテリアル生産科学専攻 生産科学コース
プロセスインテグレーション領域 福本研究室 福井 涼太

1. 緒言

アルミニウム合金と炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic) は、軽量化、高機能化の観点から輸送機器や産業構造部材への適用が進められており、両材料からなる異種材料接合部の力学特性向上が求められている。一方で、アルミニウム合金/CFRTP 接合は両材料の物性差に起因して接合界面に応力集中が生じやすく、界面強度に依存した脆性的破壊が継手特性を支配するという課題がある。従来研究では、アルミニウム合金表面への機械的・化学的結合付与を目的とした表面処理により、ナノ・マイクロスケールで界面構造を制御し、力学特性改善を図る試みが多く報告されてきた¹⁾。しかし、これらの研究は基本的に界面そのものの強化を主眼としており、界面近傍に生じる応力集中や破壊経路を本質的に制御することは困難である。一方、空隙が界面近傍の応力集中を緩和し、ひずみ場の形成を通じてき裂進展挙動に影響を及ぼす可能性が示唆されている^{2,3)}。そこで本研究では、ナノ・マイクロスケールでの界面構造制御とは異なる設計思想として、界面から一定距離を有する CFRTP 内部領域 (非界面部) へ意図的に空隙を導入し、非界面部に変形能の高いポーラス構造を形成することで、界面に集中する応力および変形を非界面部へと緩和・分担させるという界面特性への依存から脱却した破壊制御手法を着想した。この接合構造は、緻密な界面近傍領域とポーラス構造を導入した内部領域からなる階層構造として設計され、空間的に傾斜した変形能を有する点に特徴がある。以上より本研究では、階層構造化による傾斜変形能を活用したアルミニウム合金/CFRTP 接合部の力学特性向上を目的とした。

2. 実験方法

被接合材料として、アルミニウム合金には板厚 1.6 mm の A6061-T6, CFRTP には板厚 3.0 mm の熱可塑性樹脂 PA6 (Polyamide 6) 中に炭素繊維が 40%含有するものを用いた。アルミニウム合金表面にはアンカー効果による機械的結合力の強化を目的としてマイクロ凹凸形状を付与した⁴⁾。接合には熱圧着を用い、接合時の温度履歴および圧力履歴を制御することで、

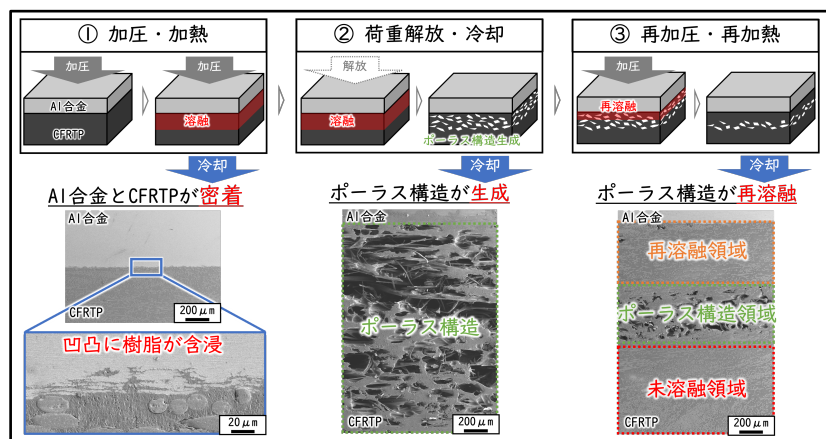


図1 接合部へのポーラス構造導入方法

CFRTP の熔融時に生じる膨張挙動を利用して CFRTP 内部にポーラス構造を形成した。図1に熱圧着接合におけるポーラス構造導入に基づく接合部構造制御手法を示す。これにより、ポーラス構造の存在領域および空隙率を制御した接合部を作製した。得られた構造化接合体に対して、引張せん断試験および十字引張試験を実施し、接合特性を評価した。さらに、本接合設計の既存接合プロセスへの適用可能性を評価するため、ポーラス構造を導入した CFRTP を用いて摩擦攪拌点接合プロセスに応用した。

3. 実験結果

図2にアルミニウム合金/CFRTP 継手において構造制御の有無が引張せん断強度、および十字引張強度に及ぼす影響を示す。いずれの試験においても、CFRTP 内部にポーラス構造を導入した構造制御継手は、非構造制御継手と比較して高い強度を示した。また、非構造制御継手では界面での破断を呈したのに対して、CFRTP 内にポーラス構造を含む構造制御継手では CFRTP 内での破断が確認された。すなわち、ポーラス構造により界面から CFRTP 内への破断形態の移行が認められた。これはポーラス構造での変形が優先的に発生し、界面に作用する応力が緩和されたためと考えられる。

以上より、アルミニウム合金/CFRTP 継手において、ポーラス構造を活用した構造制御は継手強度の向上および破断経路制御に有効であることが明らかとなった。この結果に加え、継手強度が接合端部の局所特性の影響を受けることに着目し、環状接合ツールを用いた摩擦攪拌点接合プロセスを検討した。図3に応用プロセスにおける構造制御の有無が十字引張強度に及ぼす影響を示す。十分な溶融量が確保される接合時間 0.5 s 以上の条件において、非界面領域へのポーラス構造導入により接合強度が増加する傾向を示した。この結果は、ポーラス構造を導入した CFRTP を材料として適用することで、新たな接合プロセスや特殊設備に依存することなく、既存の接合プロセスへ展開可能であることを示している。すなわち、本研究の成果は、材料側の構造設計を通じて異種材料接合の自由度を拡張し、既存設備を活用した実用的な接合設計を可能とする点で、工業的に有用な知見を提供するものである。

4. 結言

本研究では、アルミニウム合金/CFRTP 接合部における界面破断に起因する脆性的破壊という本質的課題に対し、界面強度の単純な向上に依存しない新たな接合部設計概念として階層構造化による傾斜変形能を活用した接合設計を提案した。その結果、ポーラス構造を利用した構造制御は、継手強度向上と破壊挙動の制御を両立する接合設計指針として有用であることが示された。

参考文献

- 1) X. Bi, et al., “Femtosecond laser fabricated micro/nano interfacial structures to strengthen CFRPEEK/A6061-T6 FLJ hybrid joints”, *Composites Part B*, Vol. 231 (2022), 109540.
- 2) S. Kumar, et al., “Strength and Performance Enhancement of Bonded Joints by Spatial Tailoring of Adhesive Compliance via 3D Printing”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 9 (2017), pp. 884-891.
- 3) M. Mehdikhani, et al., “The effect of voids on matrix cracking in composite laminates as revealed by combined computations at the micro- and meso- scales”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 117 (2019), pp. 180-192.
- 4) E. Ota, et al., “Friction stir spot welding of aluminum and carbon fiber reinforced thermoplastic using hybrid surface treatment improving interfacial properties”, *Materials & Design*, Vol. 212 (2021), 110221.

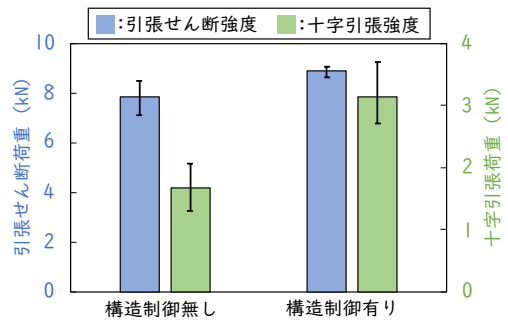


図2 構造制御の有無が継手強度に及ぼす影響

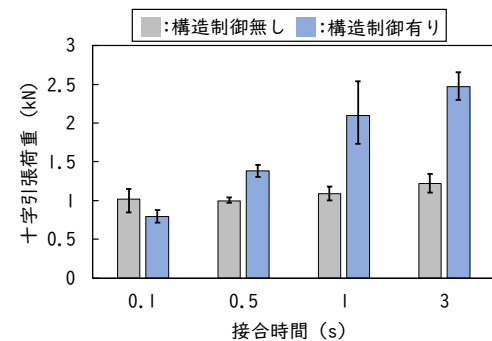


図3 応用プロセスにおける強度評価試験結果

頑健な連合学習のための グラフ推定と信号復元の統合

電気電子情報通信工学専攻 情報通信工学コース
メディア統合コミュニケーション工学領域 田中研究室 福原 伝博

1. 研究背景および目的

連合学習(Federated Learning; FL)は、機械学習における分散学習の代表的な枠組みである[1]。図1に示すFLでは、ネットワーク内の各端末が独立して局所的推論モデル(オートエンコーダ等)を学習し、得られたモデルパラメータのみを中央サーバ側へ送信する。サーバ側では送信されたパラメータ群を統合することでモデルを更新し、各端末にフィードバックを行う。この一連の学習を繰り返すことで、データそのものを集約することなく、高精度なモデルを分散的に学習できる。

FLは、データ集約に伴う通信コストの削減およびプライバシー保護を同時に実現可能な分散型機械学習手法として、医療や金融をはじめとした幅広い分野への応用が期待されている[2]。一方で、実環境下では、通信路劣化によるパケット落ちや通信量削減を目的とした量子化・圧縮等に起因して、各端末から送信されるモデルパラメータにはノイズや欠損による劣化が発生する[2]。このような劣化は、モデル精度を大きく低下させるため、モデルパラメータの劣化に対して頑健な統合手法の構築はFLの主要課題である。

代表的な統合手法として、モデルパラメータの平均値を計算する方法が挙げられる[1, 3]。この平均統合はモデルパラメータに含まれる劣化の影響を一定程度低減できる一方で、パラメータを過度に平滑化してしまう。結果として、統合後のモデルパラメータは各端末の学習データの差異を反映できないため、学習後のモデル精度が低下し得る。この問題に対して、端末間の関係性を表す端末間グラフをパラメータの類似度から推定し、推定した端末間グラフを用いてグラフ低域通過フィルタリング(GLPF)により統合を行う、グラフベース統合手法が提案されている [4-6]。GLPFは、グラフを利用して、グラフ信号(ここではモデルパラメータ)のグラフ低周波成分のみを通過させ、グラフ高周波成分を減衰することで、局所的な類似度を反映した平滑化が可能なフィルタリング手法である[7]。しかしながら、モデルパラメータ自体が劣化している場合、推定される端末間グラフが歪むため、GLPFによる平滑化が適切に機能しない。従って、モデルパラメータの劣化に対して頑健なグラフベース統合手法の開発が要請される。

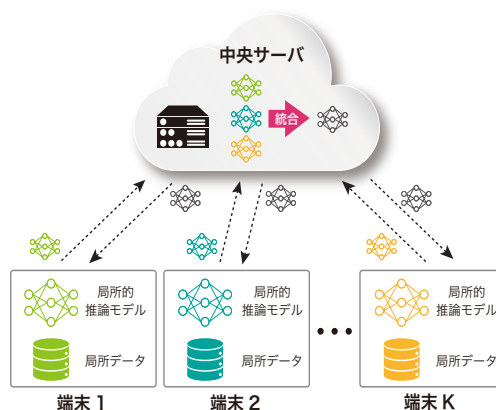


図1: 連合学習(FL)の概要

2. 手法

本研究では、モデルパラメータの劣化に対して頑健なグラフベース統合手法を提案する。具体的には、サーバ側の統合時に、グラフ推定とGLPFを同時に行うことでモデルパラメータの劣化による影響を低減する。提案手法の概要を図2に示す。提案手法では、まず初めに、統合後モデルパラメータが端末間グラフ上で滑らかに変動する、すなわちグラフスムーズネス[7]を満たすものと仮定する。この仮定の下で、端末間グラフと統合後モデルパラメータを同

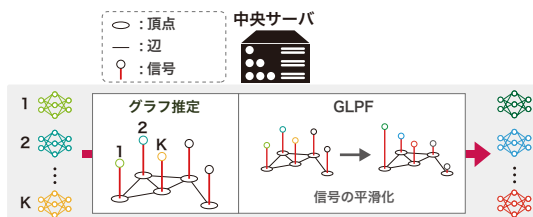


図2: 提案手法の概要

時に推定する最適化問題を定式化する。この問題は本質的に非凸最適化問題であるため、一般的に有限回の反復で大域最適解へ収束させることは困難である。そこで、本手法では、当該問題を等価な凸差(DC)最適化問題として再度定式化し、近接DC アルゴリズム(PDCA)[8]により解を求める。PDCA を適用することにより、少なくとも問題の局所解への収束が保証され、安定的なFLの実現に資する性質が得られる。

3. 実験

提案手法の有効性を検証するために、CIFAR-10 データセットを用いた画像分類実験を行う。データセットは Dirichlet 分布に従い分割し、各端末に割り当てる局所データセットを作成する。実環境におけるモデルパラメータの劣化を模擬するために、各学習ラウンドにおいて、端末から送信されるモデルパラメータに加法性白色ガウスノイズを付加する。各端末の局所推論モデルには畳み込みニューラルネットワークを用いる。本実験では、端末数:20, 学習ラウンド数:30, と設定する。10回の独立な試行を行い、全端末・試行で平均したテスト精度を評価する。提案手法と5つの従来手法[1,4-7]の各学習ラウンドにおける平均予測精度を図3に示す。図3が示す通り、提案手法が従来手法に比べ学習全体を通して安定して高い予測精度を示すことを確認した。

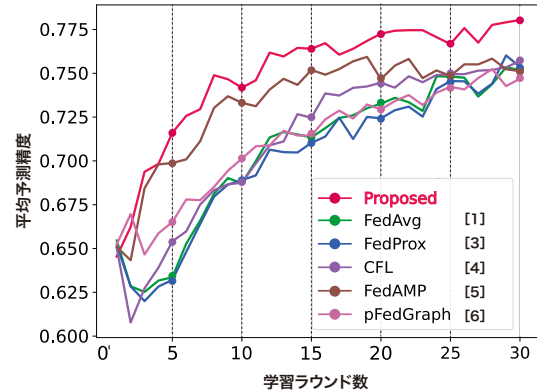


図3: 画像分類実験における平均予測精度

4. まとめ

本研究では、ローカルモデルパラメータに劣化に対して頑健なグラフベース統合手法を提案した。提案した統合手法では、はじめに統合後のモデルパラメータが端末間グラフ上で滑らかに変動するものと仮定する。この仮定に基づき、グラフと統合後モデルパラメータを同時に最適化する問題を DC 最適化問題として定式化し、PDCA を適用することで解を導出する。CIFAR-10 を用いた画像分類実験において、モデルパラメータの劣化に対して提案手法が従来手法に比べ、頑健であることを確認した。なお、本研究に関する内容は IEEE Machine Learning for Signal Processing (MLSP) 2025 において発表済みである。

参考文献

- [1] B. McMahan et al., "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data," in AISTATS, pp. 1273-1282, PMLR, 2017.
- [2] T. Gafni et al., "Federated learning: A signal processing perspective," IEEE Signal Process. Mag., vol. 39, no. 3, pp. 14-41, 2022.
- [3] T. Li et al., "Federated optimization in heterogeneous networks," Proc. Mach. Learn. Syst., vol. 2, pp. 429-450, 2020.
- [4] A. Ghosh et al., "An efficient framework for clustered federated learning," NeurIPS, vol. 33, pp. 19586-19597, 2020.
- [5] Y. Huang et al., "Personalized cross-silo federated learning on non-iid data," in AAAI Conf. Artif. Intell., vol. 35, pp. 7865-7873, 2021.
- [6] R. Ye et al., "Personalized federated learning with inferred collaboration graphs," in ICML, pp. 39801-39817, PMLR, 2023.
- [7] A. Ortega et al., "Graph Signal Processing: Overview, Challenges, and Applications," Proc. IEEE, vol. 106, no. 5, pp. 808-828, 2018.
- [8] J. y. Gotoh et al., "DC formulations and algorithms for sparse optimization problems," Math. Program., vol. 169, pp. 141-176, 2018.

Si 深溝構造底部の非破壊分光評価に関する研究

物理学系専攻 精密工学コース
ナノ表面界面工学領域 有馬研究室 村瀬 詩花

1. 緒言

近年、AI を活用したスマート社会、自動運転などの発展に伴い、それらを支える半導体素子では、構造の三次元化が進んでいる。これらのデバイスには共通して、幅に対する深さの比（アスペクト比）が大きな溝や孔が導入されており、近い将来、このアスペクト比はますます増加していくと予想されている（図1）。このような三次元構造を持つデバイスを高い歩留まりで量産するためには、深い溝や孔の奥まった底部や角に対して厳しい清浄度が求められる[3]。特に、最も一般的な半導体材料であるシリコン(Si)構造体内部における汚染評価は極めて重要である。現在、平坦な試料表面に対する洗浄やその評価に関する報告は数多くあり、技術的にも成熟している。しかしながら、三次元構造の内部、とりわけ奥深い底部における汚染濃度やその除去特性を評価した事例は報告されていない。

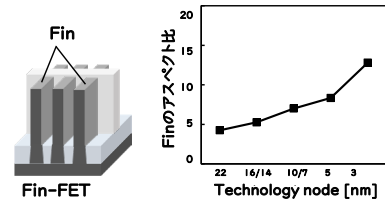
本研究では、最も汚染が残留しやすく制御が困難である、三次元シリコン(Si)構造体の底部に存在する汚染物質や酸化物の種類及び濃度を非破壊で評価できる手法の確立を目標とした。

2. 三次元構造体底部の非破壊分光評価法

図2に、本研究で提案する底部評価手法の概略図を示す。本研究では、底部評価に適した表面分析法として、X線光電子分光法(X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS)に着目した。XPSは試料にX線を照射し、表面から放出される光電子を検出することで、試料最表面の組成や化学結合状態を非破壊で評価できる手法である。しかし、溝や孔が深い構造では、奥まった部分から放出された光電子の多くが側壁に衝突してしまうため、底部からの光電子を検出することは容易ではない。そのため、溝や孔の内部を直進して開口部まで到達する光電子を正確に捉える必要がある。

そこで我々は、深溝・深孔構造の底部に異なる元素を埋め込む試料作製技術を活用し[4]、底部からの光電子を取得する手法を考案した。まず、密に配列した深溝・深孔構造の一部の底部に、溝や孔を構成する元素とは異なる既知の物質を堆積し、これを目印として底部由来の光電子が取得可能な検出角度を調整する。その後、最適化した検出角度で評価領域を測定することで、底部からの光電子を確実に捉えることが可能となる。さらに、検出方向や角度を変えることで、上面、側壁、底部といった異なる領域の情報を選

・ 電界効果トランジスタ(FET)[1]



・ 3D-NAND フラッシュメモリ[2]

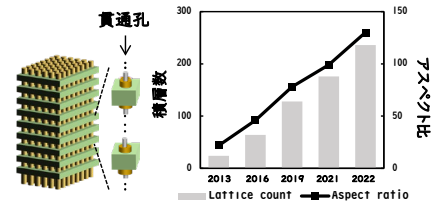


図1：半導体素子の三次元化

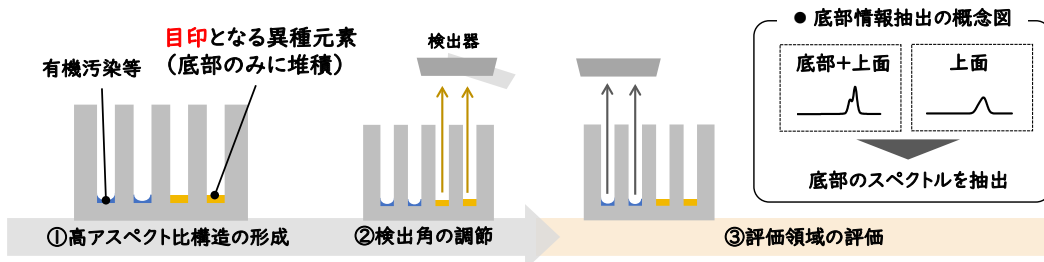


図2：提案する底部評価手法の概略図

択的に評価できると考えている。

3. Si 深溝構造底部からの光電子検出

私はこれまで、底部に金属を埋め込むユニークなウェットエッチング技術を用いて、Siの深溝構造を製作し、上記手法の有効性を検証してきた(図3)。手法の検証にあたり、本研究ではまず、上面・側壁・底部の三面すべてが同一元素(Si)からなる深溝構造において、溝の底部から放出される光電子を分離して検出することを目標とした。

図4に、底部の金属を除去した後のSi深溝構造から得られたSiのスペクトルの解析結果を示す。解析の結果、最も低エネルギー側に現れるピークが底部Siに由来する成分であることが明らかとなった[5]。これは、トレンチ形成の過程において、底部とそれ以外の面(上面および側壁)とで表面の化学結合状態がわずかに異なるためである。その違いがXPSでは異なる結合エネルギー位置のピークとして観測されることから、底部Siからの光電子を分離して検出できることが示された。

この結果により、底部に堆積した汚染を二次的な処理を加えることなく、選択的に検出できる可能性を見出した。さらに、最表面の状態をより詳細に評価するため、トレンチ構造に対して二方向から光電子を検出して解析する手法の導入も進めている。

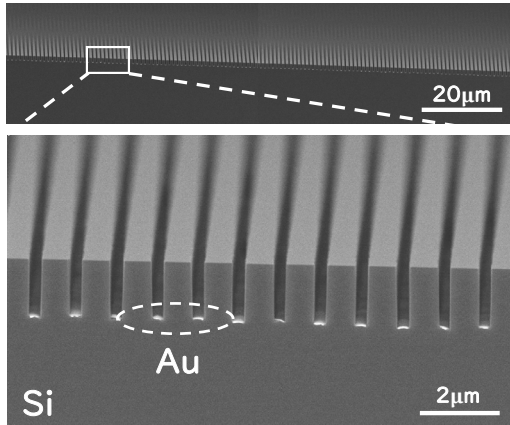


図3: 作製したSi深溝構造

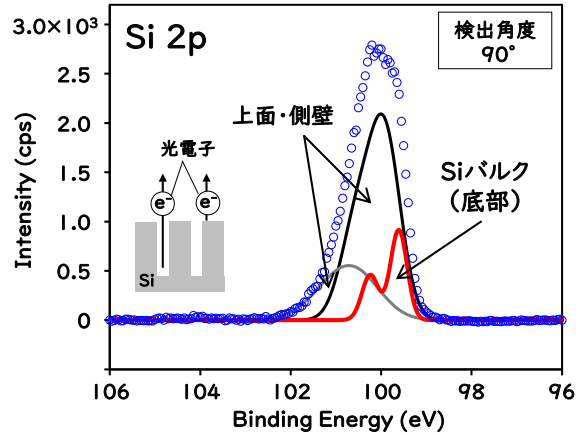


図4: 底部金属除去後のSi深溝構造におけるSiスペクトル

4. 国内外における研究発表

本研究での成果は、応用物理学会主催の学術講演会(図5)をはじめとする国内の関連学会、および米国AVS学会主催の国際会議において発表した[6]。また、その一部は、米国化学会(ACS)発行の雑誌に掲載されている[5]。

5. 謝辞

この度は、このような栄えある賞を賜り、誠に光栄に存じます。日頃よりご指導を賜りました、物理学系専攻の有馬健太教授、稲垣耕司助教をはじめ、諸先生方に心より深く感謝申し上げます。

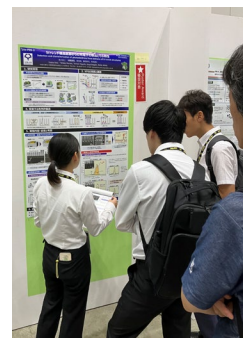


図5: 国内学会での発表風景

6. 参考文献

- [1] International Roadmap for Devices and Systems 2016, 2018, 2021, 2023.
- [2] S. S. Kim et al. Adv. Mater. 35, 2200659 (2022).
- [3] M. Graef, in Proc. IEEE Int. Roadmap Devices Syst. Outbriefs, 1-47 (2021).
- [4] Z. Huang et al. Adv. Mater. 23 285-308 (2011).
- [5] S. Murase et al. J. Phys. Chem. C 130, 1, 728-735 (2026).
- [6] S. Murase et al. 51st Conference on the PCSI, PCSI-TuM2-31, p13 (2026).