

ISSN 2185-7326

2022年度

特別教育・研究報告集



芝浦工業大學

SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

は じ め に

資源の乏しい日本が世界的な優位性を保持するためには、科学技術立国しかありません。

したがって、本学の建学の精神を現代に敷衍した「世界に学び世界に貢献するグローバル理工学人材育成」の実践はとても重要です。

この視点に立ち、「教育・研究・社会貢献の三位一体推進」を実現すべく、本学における研究活動及び教育活動の活性化を目的に、教育改革研究活動助成及びプロジェクト研究助成の充実をはかって参りました。

これら研究助成による成果を、1991年度より研究報告集のかたちで特別教育・研究報告集として発刊してきました。

今年も2022年度版を発行する運びになりました。本学が推進している教育・研究分野の成果が報じられております。ぜひ多くの方にご覧いただきたいと思います。

芝 浦 工 業 大 学

学 長 山 田 純

2023年5月

目 次

1. 特別教育研究

(1) 教育改革研究活動助成

地域志向

インバウンドビジネスを創出するグローバル・ローカリゼーションプロジェクト 2
工 学 部 電 子 工 学 科 村 上 嘉 代 子

地域高齢者を元気にするためのARスポーツの実践-HADOを用いた取り組み… 4
工 学 部 情 報 工 学 科 石 崎 聡 之

豊洲スマートシティ構想との産学官民連携…………… 6
工 学 部 先 進 国 際 課 程 坂 井 直 道

豊洲、大宮地区の車載センサを応用した交通安全対策活動…………… 9
システム理工学部 機械制御システム学科 伊 東 敏 夫

観光を起点とした関係人口創出のためのシステムデザイン：住民・観光客・ビジネスの三方よしを目指して……………11
システム理工学部 機械制御システム学科 長 谷 川 浩 志

地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントとSDGs達成に向けての地域課題解決策の実践……………13
システム理工学部 環境システム学科 増 田 幸 宏

社会システム科学のアプローチによる課題解決：課題解決のための最適手法の探索と適用……………15
システム理工学部 環境システム学科 市 川 学

都心の災害を考えるワークショップ実施と展覧会の開催……………17
デザイン工学部 デザイン工学科 橋 田 規 子

ロボット技術による見守り・健康支援等スマートタウン構築(地域連携の強化) 19
デザイン工学部 デザイン工学科 佐々木 毅

内部河川・運河の活用とコミュニティ強化……………21
建築学部 建築学科 志村 秀明

東京臨海地域における安心安全健康のまちづくり……………23
建築学部 建築学科 佐藤 宏亮

実践的教育

金属加工経験の乏しい学生へコンピュータ支援型加工方法を教授した際の教育
効果評価(CAD/CAMとNC加工を組み合わせた教育プログラムの実践)……………25
工学部 機械機能工学科 青木 孝史朗

AI実装の実習及びAIを導入した研究課題の設定と継続……………29
工学部 電子工学科 プレーマチャンドラ チンタカ

IoTとAIが溶け込んだ次世代教育環境の研究……………33
工学部 情報工学科 新熊 亮一

リカレント教育の提供に向けたグローバルサイエンスカフェの実施～知る喜び、
学ぶ楽しさを掘り起こす～……………37
工学部 先進国際課程 山本 文子

gPBLのアセスメントとイノベーション創出……………41
工学部 先進国際課程 吉久保 肇子

Improvement of Research-based Learning Style by Integrating IoT and Emotion
Sensing Technology……………45
工学部 先進国際課程 ラオハカンワンウィット ティポー

PBLにおける学生の協同学修プロセスの可視化・促進のためのEdTechシステム
の開発……………49
システム理工学部 電子情報システム学科 間野 一則

学修者の学びを担保する学修成果の把握・可視化・検討体制の構築.....	53
教育イノベーション推進センター	榊原 暢久

グローバル

Design and Implementation of Double Degree/Joint Degree Education Model for Doctoral students at SIT.....	57
工学部 先進国際課程	ミリアラ ムラリダ

Plus-DX

月島三丁目デジタルツイン・プロジェクト.....	61
建築学部 建築学科	岡崎 瑠美

2. 特別研究

(1) プロジェクト研究助成

着任時研究助成

巨大圧電性能を有する強誘電体薄膜のスパッタ成膜法の開発	66
工学部 機械機能工学科 吉田 慎哉	
英語学習を促す心理的要因の因果モデル構築	70
工学部 機械機能工学科 新谷 真由	
鋼の冷却促進に対する酸化スケールと表面粗さ利用の検討	74
工学部 材料工学科 遠藤 理恵	
本質的に無損耗なイオン推進機の開発	78
工学部 電気工学科 川嶋 嶺	
Production of Engineered Microplastics by Proton Beam Writing (PBW)	82
工学部 電気工学科 プッタラクサ ニティボン	
術後の心疾患検知のための蛍光免疫センサ	86
工学部 電子工学科 當麻 浩司	
IRS assisted OFDM system におけるセミブラインド伝搬路推定	90
工学部 情報通信工学科 菅 宣理	
複雑ネットワーク上の量子空間探索における普遍性の探究	94
工学部 情報工学科 渡部 昌平	
Development of a Learning-Based and Data-Driven Control Mechanism for Systems Under Uncertain Operating Conditions	98
工学部 先進国際課程 テチンカヤ アハメット	
Development of tools for in-depth study on the Uncanny Valley	102
工学部 先進国際課程 ガブリエレ トロヴァト	

Society 5.0のための個人・世帯データの生成.....106
システム理工学部 電子情報システム学科 原 田 拓 弥

サイバーセキュリティと国際関係.....110
システム理工学部 環境システム学科 持 永 大

ラティス構造の強度特性と数値解析の研究.....114
デザイン工学部 デザイン工学科 早 房 敬 祐

高機能心腔内超音波イメージング法の開発.....118
理工学研究科 電気電子情報工学専攻 椎 名 毅

科研費連動型

固液境界面近傍におけるコロイド流れの分散粒子の複雑流動に関する壁面漸近挙動の解明.....122
工 学 部 機 械 工 学 科 白 井 克 明

Synthesis of novel high entropy oxides and search for their functionalities as oxygen storage materials for oxygen generation.....126
工 学 部 機 械 機 能 工 学 科 アリチャ クリムコヴィッチ

イオン液体を用いた劣化溶媒に含まれる核種の分離回収.....130
工 学 部 材 料 工 学 科 新 井 剛

高性能Li空気電池の開発.....134
工 学 部 材 料 工 学 科 石 崎 貴 裕

水蒸気を用いた回収容易な遷移元素酸化物光触媒担体の創製および可視光応答化の実現.....138
工 学 部 材 料 工 学 科 芹 澤 愛

低濃度二酸化炭素固定化のための高効率膜反応器の開発.....142
工 学 部 応 用 化 学 科 野 村 幹 弘

元素置換濃度制御に基づく水素化物ペロブスカイトの機能性創出と新規学術分野の開拓.....146

工 学 部 応 用 化 学 科 大 口 裕 之

Leveraging human factors and video content for high QoE performance reinforcement learning-based adaptive bitrate selection..... 150

工 学 部 情 報 通 信 工 学 科 ファン スアン タン

教員養成での利用に向けたデジタルリスクマネジメント教材の開発..... 154

工 学 部 情 報 通 信 工 学 科 大 橋 裕 太 郎

需要消失する地域公共交通のサービス改善のための外部補助制度と需要創出策... 158

工 学 部 土 木 工 学 科 岩 倉 成 志

バルク超伝導体の強磁場を利用したプロファイル NMR の開発..... 162

工 学 部 先 進 国 際 課 程 坂 井 直 道

高齢者の転倒予防スキル習得法の提案: 歩行中の瞬時の姿勢制御能力向上を目指して..... 166

システム理工学部 生 命 科 学 科 赤 木 亮 太

動的状況下におけるアキレス腱力学特性の非侵襲計測システムの開発..... 170

システム理工学部 生 命 科 学 科 山 本 紳 一 郎

細胞の画像分類手法を用いたバイオマテリアルの炎症性予測..... 174

システム理工学部 生 命 科 学 科 中 村 奈 緒 子

繰り返し荷重を受けたマグネシウム合金管の腐食挙動..... 178

デザイン工学部 デザイン工学科 吉 原 正 一 郎

超砥粒ホイール砥粒層の弾性係数に基づく研削加工技術向上に向けたデータベースの構築..... 182

デザイン工学部 デザイン工学科 澤 武 一

新旧市街地から成る都心まちづくりの手法に関する研究..... 186

建 築 学 部 建 築 学 科 志 村 秀 明

種々構造形式における鉄筋コンクリート造パイルキャップの力学モデルと耐震性能評価.....190

建築学部 建築学科 岸田 慎司

「拡張された心」概念の導入によるメコン流域の物質世界の解明.....194

建築学部 建築学科 清水 郁郎

人口減少地域における建築遺産のデジタルアーカイブ化及びその活用に関する研究.....198

建築学部 建築学科 岡崎 瑠美

大学間連携

Application of Laser Biospeckles and Biospeckle Optical Coherence Tomography (OCT) in conjunction with deep learning algorithms for the speedy monitoring environmental effects on living things.....202

工学部 機械工学科 ウママヘスワリ ラジャゴパラン

多元ヘテロ元素ドーパカーボン系触媒材料の合成.....212

工学部 材料工学科 石崎 貴裕

切折紙をレザバーとする形態計算手法の開発.....216

工学部 電気工学科 重宗 宏毅

無機系廃棄物を再利用した地盤改良材の開発.....220

工学部 土木工学科 稲積 真哉

脳神経細胞を再生して脳機能を回復させる新規神経分化誘導剤の創製.....224

システム理工学部 生命科学科 須原 義智

歯周病予測のための機械学習による力学的性質データ解析の検討.....228

システム理工学部 生命科学科 中村 奈緒子

ビタミンKによる中枢神経再生機構の解明.....232

システム理工学部 生命科学科 廣田 佳久

➤ 所属学科等名は、2022年度中のものです。

特別教育研究

(1) 教育改革研究活動助成

「インバウンドビジネスを創出する グローバル・ローカリゼーション」プロジェクト

代表者	村上嘉代子【教授】(工学部 電子工学科)
構成員	長谷川 浩志(機械制御システム学科)／間野 一則(電子情報システム学科)／市川 学(環境システム学科)／渡邊 大(機械制御システム学科)／岡田 佳子(土木工学科)／中村 真吾(機械機能工学科)

■プロジェクトの概要

本プロジェクトでは地域と連携したPBL型授業や学部や修士研究において、企業や自治体、海外の大学とともに観光促進のためのサービスシステムを開発した。教育プログラムにおいては大学院授業における産学連携PBLにて、農業と観光サービスを関連付けた唐辛子温泉の提案、さいたま市の魅力を開拓するためのシェアサイクルサービスの普及のに向けたシステム提案、白馬岩岳マウンテンリゾートでの効率化を目指したマーケティング戦略の提案、さらには高齢者の移動手段の一つとして電動カートを用いた高齢者の観光を促進させる電動カート普及のビジネス提案を行った。研究においては、昨年度開発した日本料理写真の構図の比較分析のためのアンケートウェブサイトを利用し、日本人とタイ人にアンケート調査を行いその結果をまとめた。各プロジェクトや研究テーマは観光システム開発やサービスモデルの提案を促進させる取り組みにつながった。また、SDGsは自治体での観光振興にも広がっており、これらのプロジェクトを通して学生のSDGsと観光の理解を深めることにもつながった。さらに今年度は海外からの学生もPBLに参加できたため、留学生の視点を取り入れた提案も可能となり、インバウンドビジネス創出を意識づけることができた。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

大学院理工学研究科のシステム理工学専攻必修科目「システム工学特別演習」において28名、システム理工学専攻演習科目「クロスインベーションプロジェクト(CIP)」において8名、集中講義のCross-cultural Engineering Projectにおいて5名(日本人学生2名、海外からの短期留学生3名)、計41名が本プロジェクトに参加した。前期と後期と年間を通したプロジェクトは農業に携わる企業が抱える課題ということで、認知度を上げるため唐辛子風呂を考案し実施に至るまでの提案を行った。また白馬岩岳マウンテンリゾートにおける認知マーケティング戦略について提案を行っている。前期のみのテーマとしては、さいたま市のシェアサイクルの普及のためのシステム、電動カート普及のための提案として高齢者の観光手段としてのビジネスモデルを提案した。詳細は次ページからの主なピックスで紹介する。

【研究】

工学部卒業研究およびシステム理工学専攻修士研究として6名が地域社会に貢献できることを目的とした研究テーマにより学部・修士研究を行った。中でも2名はより有効なPR方法の検討について昨年度観光PRIに携わる団体から協力をいただき、ウェブサイトやSNSにおける写真の掲載に関するヒアリングにより日本料理の印象評価のためのアンケートウェブサイトを構築し、日本人77名とタイ人59名の計136名からのアンケート結果を基に分析を行い、日本人とタイ人による好印象の角度の違いや構図の違いによる日本料理に対する印象の違いを明らかにした。これらの研究を含めた学部と修士研究成果は9件の発表を行った(観光情報学会第1回かがのと観光情報学研究会、IEEE ProComm Japan、Japan-China Workshop、国際会議KES2022)。

【社会貢献】

PBLプログラムの提案については、合同会社十色、株式会社温泉道場、さいたま市産業創造財団、さいたま市自転車まちづくり推進課、株式会社岩岳リゾート、株式会社Q'sfix、株式会社NOAAの方々より指導をいただいた。これらの成果については3月のCOC学生成果報告会で発表を行う。また、研究成果については連携協定のある那須町やさいたま市への報告を行い、査読付き学術論文誌へ投稿予定である。



合同会社十色が栽培するとうがらしを使ったとうがらしアート



画像視聴



SD法アンケートの実施

日本料理5品を異なる角度や構図により撮影したものを使用した印象比較アンケートウェブサイト(日本語、タイ語)



タイのチェンマイにあるRajamangala University of Technology Lannaにおいて日本料理写真の印象評価を実施

主なトピックス

■ とうがらし風呂の提案

若者の農業離れが進み、農業に携わる企業にとっては深刻な問題である。とうがらしファームを営む合同会社十色の取り組みや認知度を上げてより若者に農業に興味を持ってもらいたいというところをスタート地点に、十色とうがらしファームの「出荷しない唐辛子は廃棄している」という背景もあり、唐辛子を使った温泉を提案することとなった。後期は生の唐辛子を温泉で活用するにはどうすべきかという点から様々な実験を行い、とうがらしアートを温泉に浮かべるといった提案に至った。また、株式会社温泉道場が運営する温浴施設の「おふるcafé utatane」(埼玉県さいたま市)、合同会社十色の「とうがらしファーム」(埼玉県さいたま市)と連携し、唐辛子を使ったトークショーイベントに参加した。



とうがらしを糸と接着剤により連結して作成したとうがらしアートを浮かべた温泉とカラフルなとうがらし

■ シェアサイクル普及のためのシステム

さいたま市はオープンストリート社と連携し、HELLO CYCLINGを用いたシェアサイクルを普及させてきたが、ポート数増加ではない方法で普及させるには新たなサービスの提案が必要になってきている。そこで、他社にはない、スポットやイベントを表示させずシステムの導入を提案した。スポット表示システムを導入することにより、もともと行きたかった場所に行った後に表示されたスポットに寄り道させることによる利用時間の増加、イベント表示により後日その場所に行く際にシェアサイクルを利用してもらうことによる利用回数の増加、イベント情報の表示によって地域イベント参加者が増加することによる地域活性化、広告料や利用時間・回数の増加に伴うシェアサイクルの収益の増加などが見込める。

ハローサイクリングのアプリ内に スポットやイベントを表示させる機能を追加



既存のアプリ内にスポットやイベントの情報を表示させる機能を追加することを提案

■ スノーリゾートでのマーケティング戦略

白馬岩岳は国内外問わず人気のスノーリゾートではあるが、スノーシーズンやグリーンシーズンを問わず入込数を増加させるための提案を行った。提案内容としては、レンタルカメラを利用して思い出を撮影しそれをLINEアカウントを通じて共有できるようにするものである。利用者がカメラをレンタルして取った写真をオンラインツアー上に新たにピンを追加して全体に共有できるような形を作り、共有できるようにする仕組みを提案した。さらに利用者が写真を各種SNSに投稿することで、白馬に訪れたい人向けにリゾートの全体像を理解できるようなサービスを提供することを提案した。



機能の再定義

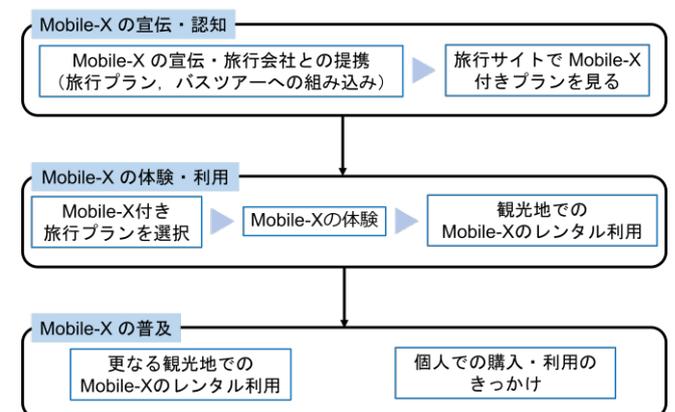
1. シャトルバス
2. マップ
3. カメラレンタル
4. イベント
5. リアルタイムカメラ(混雑)
6. オンラインツアー



公式LINEの作成と現地でのサポートとなるような機能を提案

■ 電動カートの普及方法

介護レベルが上がってしまう要因として運転免許の返納が関係していると考えられるため、このような要因を削減していくためにも高齢者向けの移動手段が必要である。電動カートMobile-Xは軽量で安全な設計であるため、高齢者への移動手段として更なる普及を目指すため、電動カートを利用した観光ルートや電動カートを持ち運びしないサービスの提案を行った。また、高齢者の周りにいる家族などへの電動カートの認知度を向上させる必要があるため、宣伝方法に関する提案も行っている。



提案システムの概要

「地域高齢者を元気にするための AR スポーツの実践 ～HADOを用いた取り組み～」プロジェクト

代表者	石崎聡之【教授】(工学部 情報工学科)
構成員	真鍋宏幸(工学部 情報工学科)／井尻敬(工学部 情報工学科)／浜野学(工学部 電子工学科)／深野真子(工学部 機械工学科)／

■プロジェクトの概要

我々のグループは2014年より高齢者の健康維持増進事業を推進し、大きな成果を上げてきた。さらに、2020年度からはCOVID-19を考慮してZoomを用いた遠隔型運動教室を開催し、体力向上に十分な効果があることを示した。特に、2021年の結果では参加者間の会話などの交流が運動継続の大きな要因とあることを明らかにした。従って、高齢者の活動を継続的に行うには十分な交流が含まれる内容であることが望ましい。本研究では、近年ARスポーツの代表格として知られるHADOを行い、会話をしながら楽しめる運動を実践し、その効果について通常の運動群・対照群と比較検討を行った。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

これまで本PJ代表者が実施してきた運動教室では、参加者からの“学生との交流”を要望する声が多かった。そのため、PJ実施のために数名の学生サポートを導入した(石崎研究室ゼミ生)。

本PJでは2名の男子学生を責任者として、参加者への連絡・説明などの準備に加え、オンライン運動教室のサポート、体力測定の実施、データのフィードバックなどに関わってもらった。さらに、体力測定時にはさらに2名の学生を追加し、万全の体制で高齢者のサポートを行った。学生自身の責任が明確になったことで、自発的にPJに参加することができ、学生の成長に繋げることができたと考えられる。



【キャプション】HADOのイメージ

【研究】

さいたま市内に在住の地域高齢者(59名、66-84歳)を対象として研究を行った。本PJではHADO群(H群)、通常運動群(Ex群)、対照群(CON群)を募集し、H群・Ex群は週2回の運動教室を全16回行った。両群とも最初の15分はストレッチを行い、その後、Ex群は筋力、持久力、柔軟性、バランス能力などを向上するための複合的な運動プログラムを実施し、H群は3VS3のHADOを3～5試合程度実施した。運動介入期間の前後に体力測定等を行い、定期的な運動実施の効果について検討した。CON群は通常の生活を行った。

その結果、H群・Ex群はともトレーニング期間後に有意な体力の向上が認められ、特に、H群では筋力の増加がEx群より大きかった。



【キャプション】担当学生が研究の概要を説明している様子

【社会貢献】

さいたま市の高齢化率は23.16%(令和4年)、65歳以上の高齢者 30万人を超えている。高齢者の割合は今後、さらに増えていくことが予想されており、医療費の大幅な増加が懸念される。これら支出を抑えるには健康寿命の延伸が不可欠である。その対策の1つに運動の実践が挙げられるが、運動継続の重要な要素である「より楽しく・効果のある運動」についてはまだまだ十分なエビデンスがあるわけではない。

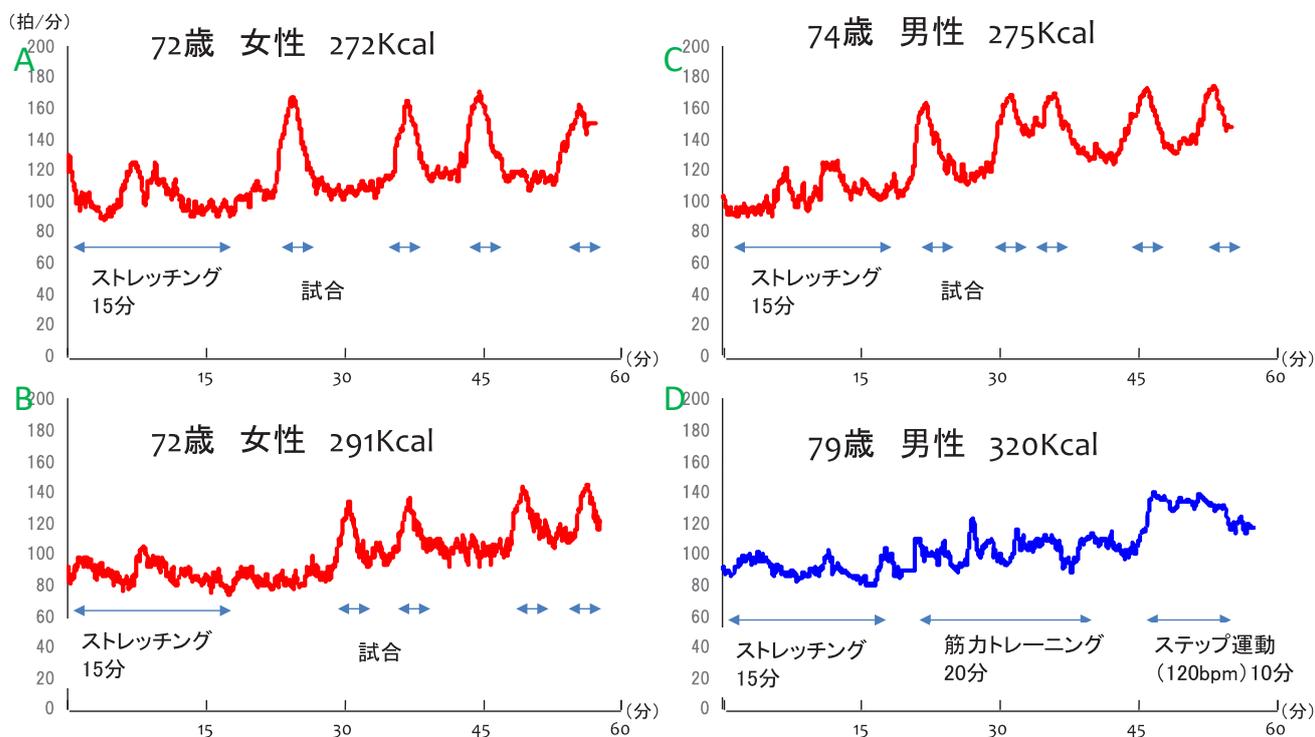
本PJでは、近年ARスポーツの代表格として知られるHADOを実践し、「運動を楽しみながら体力を向上させる！」ことを実践した。本研究にはゼミ学生も積極的にに関わり、世代間交流を通して地域貢献活動も実践することができた。



【キャプション】運動教室のトレーニング風景

主なトピックス

■HADO中の心拍数と消費カロリー（通常運動との比較）



HADOプレイ(3VS3)中の心拍数・カロリー消費の一例を示した(上図, A~C参照). 消費カロリーについてはストレッチング+HADO(4~5試合)で約300Kcal程度であった(分速約100mの歩行程度). 一方, 心拍数については, 特にゲーム中に約140~180拍/分に達する結果が示された. したがって, 参加者の平均年齢が74歳であったため, 最高心拍数の100%もしくはそれ以上であったことが明らかになった.



【キャプション】HADOプレイ中の様子(3VS3)

■ HADOが高齢者の体力に及ぼす効果

本PJの結果からHADOが通常の運動と同等以上の運動効果がえられることが明らかになった. 通常運動で行っていたようなスクワットの動作が, HADOをプレイしている中で相手の攻撃(エナジーボール)を“しゃがむ”, “よける”ことによって自然に行っていたと考えられる. したがって, 本PJの目的である「会話をしながら楽しめる運動」がHADOによって達成できていることが明らかになった. 一方, 試合数やメンバーの組み合わせなどまだまだ明らかにすべきことも多々あり, 今後も引き続きデータを取っていく必要がある. このようなか中で「スポーツのまち さいたまに」eスポーツの文化を定着させたい.



【キャプション】運動教室最後の集合写真

「豊洲スマートシティ構想との産学官民連携」プロジェクト

代表者	坂井 直道（工学部 先進国際課程 教授）
構成員	古瀬 利博(複合領域産学官民連携推進本部 副本部長、特任教授)／武田 貞生(複合領域産学官民連携推進本部 客員教授)／志村 秀明(建築学部 建築学科 教授)／新熊 亮一(工学部 情報工学科 教授)／大山 雄己(工学部 土木工学科 准教授)／伊東 敏夫 (システム理工学部 機械制御システム工学科 教授)／花房 昭彦(システム理工学部 生命工学科 教授)／市川 学(システム理工学部 環境システム学科 准教授)／佐々木 毅(デザイン工学部 デザイン工学科 准教授)／佐藤 宏亮(建築学部 建築学科 教授)／青島 啓太(SIT総研 客員准教授)／白石 美知子(研究推進室 次長)／杉野 博之(産学官連携コーディネーター)／高島 もも(産学官連携コーディネーター)

■プロジェクトの概要

「豊洲スマートシティ」は、2019年に全国の牽引役となる先駆的な取り組みを行うプロジェクトとして国土交通省スマートシティモデル事業先行モデルに採択、2020年度には「スマート東京」の実現に向けて先行的なモデルを構築する事業にも選定された。多様なステークホルダーが存在し、成長途上にある豊洲で、先進的技術と都市OS活用により様々な分野のサービス・ソリューションを提供、個々人のニーズ充足と満足度向上、まちの課題を解決するとともに多様な施設・個人が共存・共栄する「ミクストユース型未来都市」の実現を目指す。東京都・江東区や豊洲関連企業(IHI、清水建設、東京ガス不動産、三井不動産等)、技術提供企業と連携して豊洲の課題解決に取り組んでいる。豊洲地域の理工系大学として、研究ポテンシャルを活用し最先端のまちづくりを目指しながら連携・協働を行う産学官民連携事業である。

■今年度の動き

6月と7月に「2020年度本学活動報告」を豊洲スマートシティ連絡会・推進協議会(以下、連絡会、推進協議会)に向けて実施し、各教員プロジェクトと連絡会企業との意見交換会が実施されるなど、さらに連携の広がりがでてきた。協議会企業も関わる豊洲のイベントで「デジタルスタンプラリー」を実施し、デジタルマップ上に本学の研究室がこれまで培ってきた研究成果が活用されるなどの動きもみられた。また、豊洲以外の地域でも、今後豊洲エリアでの展開を視野にいれた実験等が活発に実施された。

今年度は来年度以降の行政や企業を含めた「豊洲スマートシティ」プロジェクト全体の推進体制を協議するため、学内事務局は連絡会・推進協議会のタスクフォース会議に参加、来年度以降の計画策定や法人組織のあり方について大学の観点から意見や提案を行った。2022年末の総会にて、任意団体から2023年度に一般社団法人への移行が決議された。

■主な活動の成果

【プロジェクト一覧】

PJ-1 「地元商店街と連動する賑わい創出のプラットフォーム整備に関する研究」	志村 秀明
PJ-2 「モビリティのためのデジタルツイン基盤」	新熊 亮一
PJ-3 「人中心に考えるスマートな都市空間設計」	大山 雄己
PJ-4 「ラストワンマイルにおけるシニアカーの自動運転に関する研究」	伊東 敏夫
PJ-5 「360度動画撮影による車いす(障がい者)アクセシビリティ研究」	花房 昭彦
PJ-6 「豊洲におけるシステム理工学的課題解決」	市川 学
PJ-7 「ロボットネットワークを活用した異業種・異職種間連携プラットフォームによる地域活性」	佐々木 毅
PJ-8 「ビッグデータを活用した避難者・帰宅困難者推計と災害時連携体制の構築」	佐藤 宏亮



PJ-8: 街歩きイベントで使用されたデジタル街歩きマップ

【社会貢献】

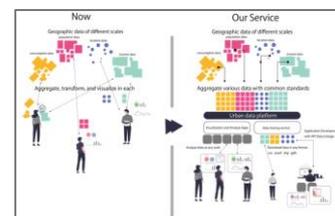
PJ-1では2年ぶりに「豊洲運河クルーズ」を開催、コロナ対策でオンラインによる事前予約制とした。PJ-4では高齢者や身体障がい者に向けた一般的な交通環境からショッピングモールへの自動移送サービスと非接触で指示が可能なHMIを目途付けた。PJ-5では車いすへのバリアフリー施策はユーザビリティ評価方法がないため打開策を検討した。PJ-6ではスマートシティの対象となる都市を理解すべく、取得可能なデータを用いてデータサイエンスのアプローチから都市の可視化を実現するシステムを検討した。PJ-7ではベイエリアロボティクスフォーラム2023を開催、ロボット連携技術やその重要性を広く社会に伝えた。

【教育】

PJ-2では点群データ処理や自律移動車両・ロボットのソフトウェアについて、学生へのチュートリアルを通じ、技術力を底上げする教育を実施した。PJ-4ではシステム構築において対象デバイスの知識のみならず社会背景ニーズの理解、実証実験により各種スキルが向上した。PJ-5ではデジタル技術活用により、建築・福祉を学ぶ学生が通常用いる教材では欠落しかねない「生の情報」を補完する機会を提供した。PJ-8ではデジタル技術を活用した街歩きのコンテンツ作成を通じ、まちづくりにおける今後のデジタル技術活用の可能性を考えた。

【研究】

PJ-1ではインターネットでの広報とチケット予約状況を比較、効果的な広報手段を明らかにした。PJ-2では「モビリティのためのデジタルツイン基盤」の成果をIEEE国際会議で発表した。PJ-3では公開空地のデザイン評価に向け、豊洲校舎の広場を対象にストリートファニチャーによる滞留行動変化の分析実験を実施した。PJ-4では従来のシニアカーだけの自動運転からインフラセンサー連携により死角を無くし、HMIも新たに顔向き検出による情報提供を開発した。PJ-6では地理情報システムを活用した都市の見える化に関する研究、人の行動を検知するための機械学習を活用した研究を行った。PJ-7ではIRIDシンポジウムやSI2022、SII2023にて遠隔操作プラットフォームの研究発表を行った。PJ-8では「バーチャル豊洲」を作成、VR空間での参加型街歩きの方法や有効性について研究を実施した。



PJ-6: 【都市の見える化システム】地理情報システムを活用した都市の見える化



PJ-5: 催事・イベントに車いすで参加すると物事がどう見えるのかを可視化する

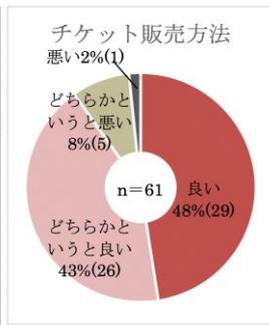
主なピックアップ

PJ-1 「地元商店街と連動する賑わい創出のプラットフォーム整備に関する研究」 志村 秀明

「豊洲運河クルーズ」チケットのオンライン事前予約システムを構築しただけではなく、広報と予約状況との関係を明らかにすることができた。インターネットのWebサイトとTwitterでの広報だけで、クルーズの第一便40席は完売した。その後の便の完売は、豊洲地区の朝刊折込のチラシ配付後であったが、インターネットでの広報が効果的だったと言える。

また、クルーズ乗船者へのアンケート調査結果からオンラインでの事前予約システムは高い評価を得たことも確認できた。今後は、オンラインでのチケット販売システムを構築したいと考えている。

日付	時間	内容
9/21	12:00	チケット販売開始
		水彩まつりwebサイト更新
	13:18	運河クルーズTwitter更新
	23:48	第一便完売
9/22	—	チラシ配布（朝刊）
	10:58	第二便完売
	12:58	第三便完売
	13:21	第四便完売
9/23	—	とよすと掲載



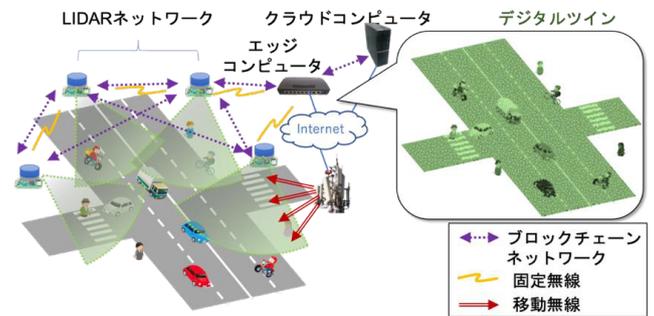
左表:「豊洲運河クルーズ」のインターネット等による広報と事前予約チケットの販売状況。

右グラフ:チケットの事前予約制の販売方法に対する評価。

PJ-2 「モビリティのためのデジタルツイン基盤」 新熊 亮一

多数同時の(=多重)自律マイクロモビリティを実現するハイパーデジタルツイン基盤の研究開発を行った。独自開発した
1) 数十台のLiDAR (Light Detection and Ranging) をリアルタイム集約可能な三次元センサネットワーク技術および
2) 自律マイクロモビリティ向けエッジ技術を融合し、エッジネットワーク上でデジタルツイン基盤を確立する。車載センサ・ネットワーク統合による三次元情報の二重化に加え、高次メタ特徴の抽出により死角などに起因するリスクの予測を行い、多数同時自律移動の安全性を飛躍的に向上する。

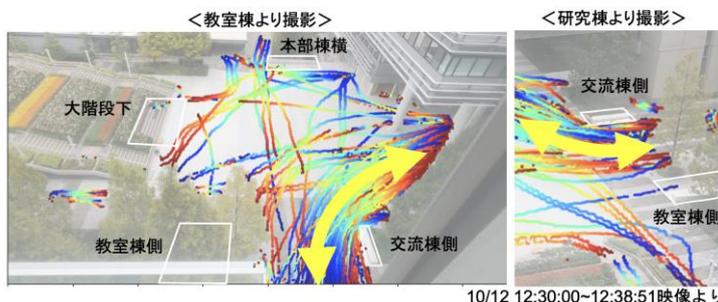
豊洲での展開も視野に入れながら、ベイエリアに位置する羽田イノベーションシティにおいて3次元情報を構築する社会実験を行った。その成果についてIEEEの国際会議で発表を行った。



【モビリティのためのデジタルツイン基盤】

PJ-3 「人中心に考えるスマートな都市空間設計」 大山 雄己

再開発などで生まれる公開空地のスマート・デザインに向けて、広場における滞留行動に関する実験を行った。豊洲キャンパスを対象に、4箇所の座り空間（下図）のそばに新たなベンチを素材・個数を変化させて1週間ごとに配置、その期間の来訪者滞留行動をカメラで録画した。録画データを深層学習手法等を用いて移動軌跡データ（下図）や滞在時間データに変換し、ベンチによる影響を確認した。特に、既存の座り空間が木に隠れて見えにくい教室棟側や動線から遠く高さの足りない大階段下では、ベンチ配置により滞在時間が大幅に増加した。今後は時空間移動軌跡データに基づいて歩行者行動のモデリングを行い、ストリートファニチャー配置に関するシミュレーション評価を実施する予定である。



10/12 12:30:00~12:38:51映像より

【対象とした座り空間4箇所と、観測により得られた移動軌跡図】

PJ-4 「ラストワンマイルにおけるシニアカーの自動運転に関する研究」 伊東 敏夫

豊洲ショッピングモールの雛形として、JRさいたま新都心駅からコクーンシティ内で一般市民に試乗いただく実証実験をさいたま市と片倉工業の協力で実施した。従来問題になった曲がり角等の死角で歩行者が見えない件は、インフラ側にもLiDARを設置して解決した。また、非接触HMIとして、利用者の顔向きを検知し、向いている側店舗の情報をディスプレイに表示するサービスを試行し好評を得た。アンケート結果では、シニアカーに+10万円の売価で需要することがわかった。豊洲地区での実証は豊洲キャンパスにて同内容を実施。次年度もコクーンシティ側は継続実施を希望している。



【インフラシステム連携】死角問題を解消

主なピックアップ

PJ-5 「360度動画撮影による車いす(障がい者)アクセシビリティ研究」 花房昭彦, 山口純, 青島啓太

施設・公共通路等のバリアフリー施策の効果検証において、障がい当事者や建築関係者が直接現場へ行かずとも評価検証を行える手法を確立するため、車いすユーザーによる移動の様子を360度カメラで撮影し、VR動画を作成・YouTubeでの共有を行った。本年度は①東京地下鉄：豊洲駅～新交通 ゆりかもめ：市場前駅間の経路、②豊洲場外マルシェ(ミチノテラス豊洲)、③市場駅前周辺エリアの三か所で検証・撮影を行った。②と③においては清水建設が開発したバリアフリーナビゲーションシステム「インクルーシブ・ナビ」を利用し有効性を検証した。プロジェクト終了時にはミチノテラス豊洲「ミチラボ」の大型ディスプレイを用いて撮影した360度VR映像を確認しながら関係者への報告会を実施した。

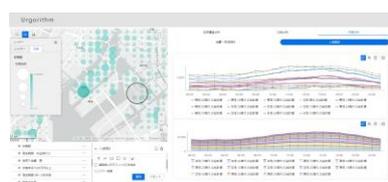


【360度VR映像を2次元化したもの(写真はミチノテラス豊洲で開催された豊洲場外マルシェを車いすで移動する様子)】

研究協力: (株)ヤマグチ 山口 純 (元SIT総研 客員研究員)

PJ-6「豊洲におけるシステム理工学的課題解決」市川 学

スマートシティ化される都市の特徴を捉えるべく、1. 地理情報システムを活用した都市データの見える化システムの構築と、2. 都市の住民の行動内容の把握を進めた。1. では、取得できる都市に関するデータを地図上で展開し、多角的に都市の特徴を捉えることを可能にするWebシステムを構築した。都市の任意の位置で、都市の特徴を把握する分析結果を得ることができる。2. では、都市で生活する住民の行動内容を検知すべく、研究室で撮影した学生の行動について、行動内容を分析するプログラムの試行を行った。



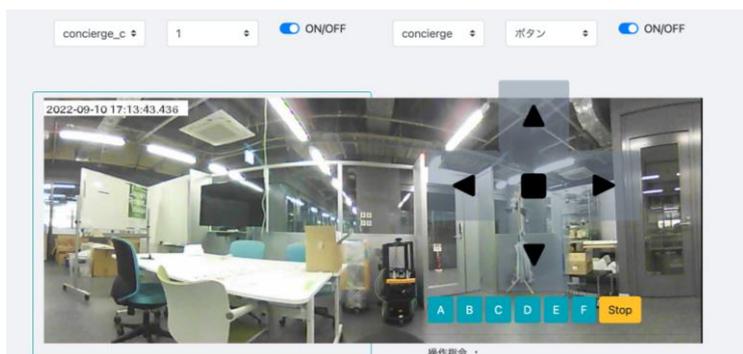
【都市の見える化システム】
豊洲駅付近を可視化した結果



【人の行動検知システム】
動画を解析し人の行動内容を分析する

PJ-7「ロボットネットワークを活用した異業種、異機種間連携プラットフォームによる地域活性」佐々木 毅

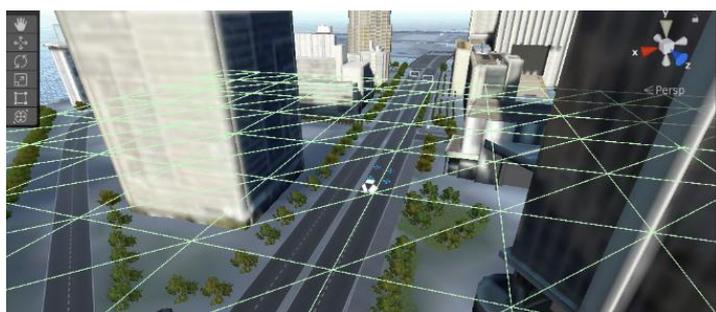
ロボットサービスのための共通通信インターフェースであるRSNP (Robot Service Network Protocol)を用いた遠隔操作プラットフォーム検証のため他環境(東京大学)へも同様のシステム導入する取り組みを行った。Japan Robot Week 2022では東京ビッグサイトから豊洲キャンパスのロボットを遠隔操作するデモンストレーションを実施した。また、昨年に続きベイエリアロボティクスフォーラム2023をオンライン開催し、サイバーフィジカルシステムとロボット技術をテーマとして6件の講演を行った。



【RSNPを用いた移動ロボットの遠隔操作インターフェース】

PJ-8 「ビッグデータを活用した避難者・帰宅困難者推計と災害時連携体制の構築」 佐藤 宏亮

江東デルタ地帯では、地震時に建物倒壊や火災の発生が予想される木造密集市街地や、水害時に浸水が予想されるエリアが広がっており、災害時における避難ルートの確保や帰宅困難者対策が重要となっている。このような災害時のシミュレーションを3次元で行うことで、よりリアリティのあるシミュレーションや意識啓発が可能となる。本研究ではその前段として、3次元空間を活用した参加型まちあるきの手法の検討を実施した。研究を発展させることで、水害時など様々な場面を想定した避難経路の検討などに活用していくことが期待できる。



【バーチャル空間として作成された豊洲】

「豊洲、大宮地区の車載センサを応用した交通安全対策活動」プロジェクト

代表者	伊東敏夫【教授】(システム理工学部 機械制御システム学科)
構成員	長谷川浩志(システム理工学部 機械制御システム学科)／飯塚浩二郎(システム理工学部 機械制御システム学科)／渡邊大(システム理工学部 機械制御システム学科)／廣瀬敏也(工学部 機械機能工学科)

プロジェクトの概要

近年、運転支援システム用にレーダーやLiDARを搭載した乗用車が公道を走るようになり、自動運転が普及し始めている。しかし、インフラを利用した交通安全技術は開発途中で実装はされていない。そこでインフラに車載用カメラとLiDARを設置し交通安全システムを検討する。検討したシステムは、事故が多い高齢者事故を防ぐため、免許不要で運転できるモビリティ(シニアカー)を自動運転化して交差点事故を防ぐことを目指したものである。モビリティには自動運転用センサは搭載せず、インフラからカメラとLiDARでモビリティ周辺を監視した情報を通信で提供する。

教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

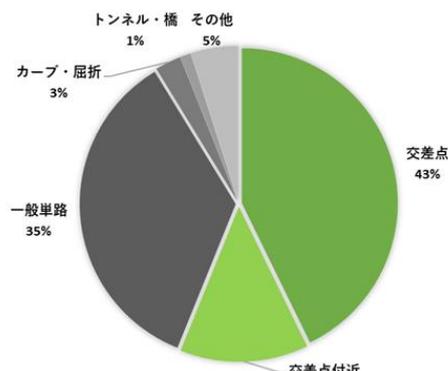
近年、高齢化社会の到来によりドライバの高齢化などが進み、安全運転に対する意識の高まりから、多くの運転支援システムが生み出され注目を集めている。そのような先進運転支援システムの中でレーダシステムは多く利用され、急速に普及している。学生がこれらレーダシステムの動作原理から応用にいたるまで、知識と理解を深めることができた。また、対象デバイスの知識だけでなく、それを必要とする社会背景や提案システムに必要な状況を調査して社会ニーズを解析できるようになった。そして、これらの調査研究をチームメンバーと協力企業との調整も行い活動することによって、コミュニケーション能力やチームマネジメント能力も向上した。

【研究】

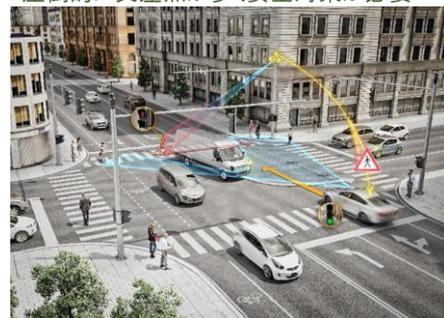
自動車それぞれに安全対策するのではなく、車載カメラとLiDARを交通インフラに設置し、社会全体が活用できるような高齢者保護システムの開発という視点で研究活動を推進した。従来の開発事例として、インフラと自動車の協調によりドライバへ車両周辺の危険要因を知らせ、交通事故の削減をはかるDriving Safety Support Systems (DSSS)がある。DSSSはインフラ設置の監視カメラにより通行車両を検知し、ドライバの認知・判断の遅れや誤りによる車々の交通事故を未然に防止することを目的とするシステムであるが普及には至っていない。そこで、本プロジェクトではインフラ側センサでシニアカーを自動運転化させ事故を防ぐシステムを提案した。

【社会貢献】

大宮地区において、狭路で交通量が多い地域で起こる歩行者事故の特徴を分析し、インフラからシニアカーを自動運転・自動制御することで事故を軽減するインフラ連携自動運転システムを提案した。これらは、より地域の交通安全に貢献するものである。大宮地区では事故特性の分析のため、交通事故発生状況マップからの事故発生場所の実地の調査を行った。調査で分かった、大宮地区での交差点では見づらい交差点が多く存在しており、他車両の認識に遅れ事故につながるということが考えられる。



【道路形状別事故発生状況】
圧倒的に交差点が多く安全対策が必要



【インテリジェント交差点】
共同研究先のコンチネンタル殿が目指す姿

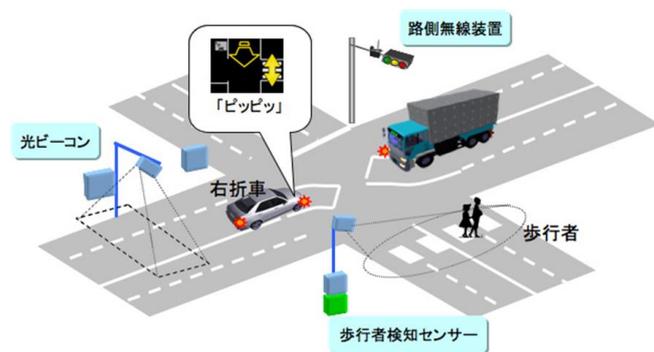


【シニアカーMobile-X】
共同研究先のNOAA殿の製品でこれを自動運転化

主なトピックス

■ 既存交差点安全システム調査結果

事故のない交通社会、ビジョン・ゼロの実現に向けてコンチネンタル社が提案する協調システムは、2019年からカリフォルニア州ウォルナットクリークの中心部において、センサ技術を活用したインテリジェント交差点の運用を開始している。交差点に接近中のドライバーに対し視界に入らない横断中の歩行者について警告を行うものである。トヨタ自動車では路車間通信システムの道路と車の通信により、対向車や歩行者情報、信号情報などを取得し、ドライバーに注意を促すDSSSの運用を開始した。

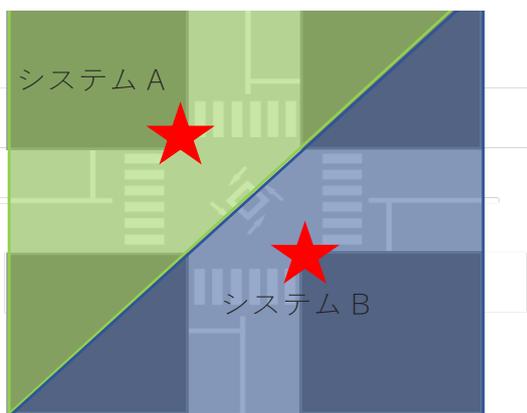


【トヨタの歩行者横断見落とし防止支援】

■ 提案システム

今後高齢者が自動車から小型モビリティ(シニアカー)に乗り換えた際、シニアカーでの事故が懸念されるため、インフラに設置したカメラとLiDARを用いて自動運転化したモビリティ(シニアカー)を提案する。このシステムはシニアカーが交差点に進入したとき、死角から人や自動車が出てくるのをインフラセンサで物体検知し、通信によってシニアカーを自動停止させる。センサはインフラ側で全て設置するため、小型モビリティにはセンサを取り付ける必要がなく導入コストを抑えることができる。交差点事故を防ぐという狙いに適用するかは実証実験を行う。

また、本インフラシステムの設置場所として交差点の対角線上に設置する。



【交差点におけるインフラ設置位置】

■ 実験システム製作

シニアカーMobile-Xのハンドルを操作はサーボモータによって行う。サーボモータの取り付け及び、ハンドルの操舵機構の実現のための設計し栄精機殿に製作いただいた。ハンドル制御は追加回路を接続して自動制御に対応させた。アクセル制御は、インフラからの指令を受信した際に、減速するために制御回路の電圧値を調節した。電圧調整にはデジタルポテンシオメータとリレーモジュールを用いた。ポテンシオメータで電圧を調節しモータへ流れる電流を調整した。これにより、Mobile-Xのメイン制御コンピュータが制御回路内の電圧値に応じたモータへの電圧値を出力するようになり、外部指令による制御が可能となった。



【シニアカーの改造】

モータ取り付け及びハンドル操作機構

■ 実証実験

実証実験は、実際に事故事例が多い出会い頭を想定して大宮キャンパス5号館の室内で行った。Mobile-Xが交差点に向かって走行中、歩行者が右方向から交差点に進入するが死角になりMobile-Xからは見えない状況を設定した。Mobile-Xが歩行者に接触する前に、インフラセンサがその状況を認識し、自動停止させることを確認する。実験結果として、Mobile-Xが交差点に進入時、歩行者がインフラセンサの物体検知エリアにいるため、自動ブレーキがかかり所期の目的を果たした。今回製作した提案システムは、シニアカーと歩行者の出会い頭事故を防ぐシステムになり得ると考えられる。しかし、実証実験を行って多くの課題がわかったため、今後も開発を継続して行きたい。



【実証実験の様子】

図中左上のインフラセンサが歩行者を検知しシニアカーを自動停止

「観光を起点とした関係人口創出のためのシステムデザイン:住民・観光客・ビジネスの三方よしを目指して」プロジェクト

代表者	長谷川浩志 (システム理工学部 機械制御システム学科)
構成員	渡邊大 (システム理工学部 機械制御システム学科) / 田中みなみ (システム理工学部 機械制御システム学科) / 後藤裕介 (システム理工学部 電子情報システム学科) / 市川学 (システム理工学部 環境システム学科) / 持永大 (システム理工学部 環境システム学科) / 村上嘉代子 (大学院 システム理工学専攻)

■プロジェクトの概要

観光活性化に関する連携協定を確実のものにするために、①課題解決型教育を活用した課題抽出とその解決、②研究・社会実装のための産学官連携、③知的創造の担い手となる人材育成のためのSTEAM教育を試行。①、②については、観光を起点とした関係人口創出のためのシステムデザイン(DX)、観光資源活用、地域住民・観光客・運営業者の三方よしのため便益配分シミュレータの開発。③については、那須町と学研スタディエの協働による学生主導のSTEAM教育のための教育プログラムを作成した。これらの成果物を適宜、地域へ還元した。

企画：産学官金連携プロジェクト
・システム工学特別演習, システム工学演習C

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

システム工学特別演習、Cross-Innovation Project(CIP)、Cross-cultural Engineering Project(CEP)、学部のシステム工学演習Cでプロジェクトを実施。観光活性化に関する連携協定項目を確実に進めて行くために、那須地区の基幹産業である観光サービス業(那須どうぶつ王国、塩原温泉観光協会、北温泉旅館)、さらに関係人口創出のためのトライとして、那須町ふるさと定住課の二拠点居住と学研スタディエのSTEAM教育の掛け合わせ、観光DXを実施。特別演習、CIP、CEP@SITをシームレスに組み合わせることで、企画から実証実験・プロトタイピング、海外学生との混成プロジェクトによるイノベーション創出、更なる実証実験・プロトタイピングを繰り返していく知的創造の担い手となる人材育成のための産学官連携スキームをデザインすることができた。

実証実験・プロトタイピング：産学官金連携プロジェクト

・Cross-Innovation Project (CIP)

多様性プロジェクト：海外学生と混成

・Cross-cultural Engineering Project (CEP)

- ・リスボン (FCT/UNL) : イノベーション
- ・バンコク (KMUTT) : グローカル
- ・大宮 (SIT) : 産学官連携 (海外学生40名, 日本人学生40名)

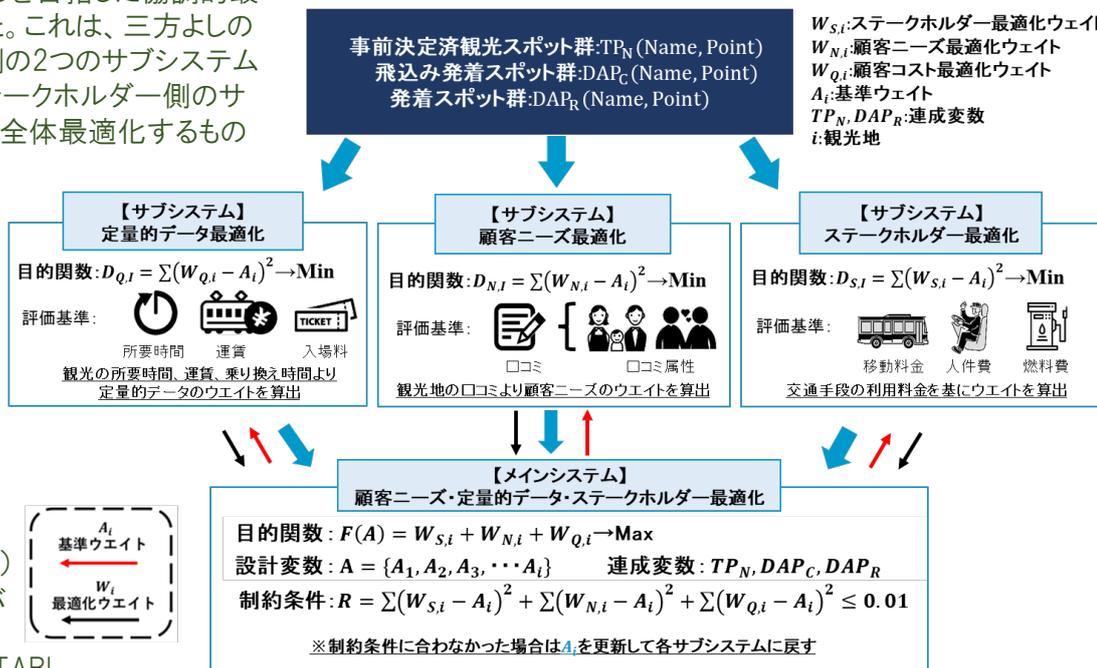
知的創造の担い手となる人材育成のための産学官連携スキーム

【研究】

住民・観光客・ビジネスの三方よしを目指した協調的最適化のシステムデザインを実施した。これは、三方よしの便益配分シミュレータで、利用者側の2つのサブシステム(顧客ニーズと定量的データ)とステークホルダー側のサブシステムのバランスを協調的に、全体最適化するものである。また、那須町のデマンドバスと路線バスの運営関係者と、シミュレータで得られた観光ルートを提示して妥当性確認のための意見交換を実施した。

【社会貢献】

那須地域の魅力を届ける観光支援サービスのデザイン(DX)、那須地域の二次交通改善を目指す新たなモビリティサービスのシステム提案を那須町ワーケーション(テレワーク)セミナー(2022.12.02)で講演。第5回プレゼンフェスティバルin那須(2023.2.4)では、観光起点のDX、タビマエプロジェクト、EmoTABIを発表した。このように、様々なタイミングで地域に成果物を還元していく。



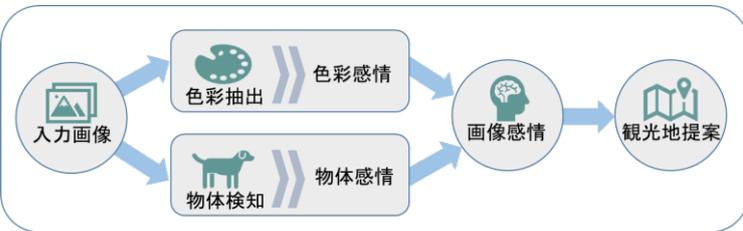
住民・観光客・ビジネスの三方よしを目指した協調的最適化のシステムデザイン

TOPへ戻る

主なトピックス

■ 観光起点のDX、タビマエプロジェクト

「行きたい観光地は？」と言われると悩んでしまう。一方で、Instagramに投稿された写真をみると惹かれるものがある。そうだ、出かけてみよう、感性に響くところへ。これがタビマエ。那須地区は、外から見ると様々な魅力があるエリア。沢山の感性に響くところを探そう、提案しよう。これこそが観光起点のDX。そうすれば、新たな魅力とともに若者も集まり、コミュニティができあがり、関係人口が増えるのではないのか。感性に響くところを探すためのAI。那須町の魅力を新たに届け、那須町の観光促進、コミュニティの創生、関係人口構築を実現するための方策、タビマエプロジェクト、EmoTABl。



タビマエの気持ち（精神価値）から観光地を創出。色彩、物体に関する修飾語による気づきと提案

■ サブカルチャーによる温泉地域の愛着形成

- 愛着：前向きな期待を抱く経験を繰り返したいと思うときに生じる感情
- 塩原温泉街の集客向上のため、愛着の湧くイベントを提案
- 「提灯型ホログラム投影機でのまち歩きイベント」
- 歩行時：提灯の様に使用
- 目的地到着時：ホログラム投影
- これは、愛着発生における「機能的要素」、「関係構築要素」、「面影・記念要素」に関連。旅行の記念として機能面で新たな体験が可能になる。
- 消費者タイプは、強い消費志向
- 地域創生プロジェクト「温泉むすめ」を活用（サブカルチャーは消費志向が高い消費者が多い）
- プロトタイプを作成し、体験会を現地で開催
- 参加者のリピート率は100%となり、今回のイベントを行うことで愛着形成できるのではないかと



ホログラム付き提灯

まち歩き経路

スポットでのホログラム投影

■ 関係人口創出のためのSTEAM教育

背景と課題について

- 中山間地域であり温泉街を持つ那須町
- 人口減少と市街の衰退が顕著
- 足を運んでくれる関係人口の目的の不足
- 本プロジェクトの目的
- 那須町の魅力のアピール
- 足を運ぶ目的を増やすこと



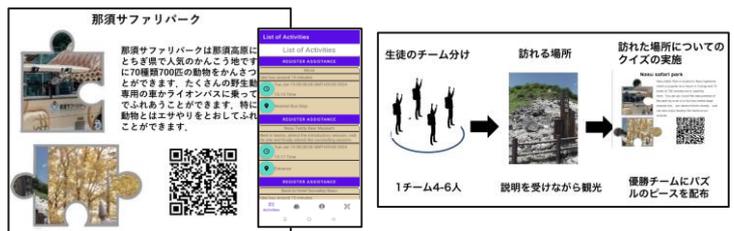
プログラム概要イメージ

体験プログラムと探究プログラム

- 体験できることに加えて、課題探究に絡めたテーマ教育の提示
- STEAM教育などとも連動可能

体験プログラムについて

- 地域・施設を選定し、体験できることをテーマ別に抽出。教育的な獲得項目と紐づける
- クイズ形式でグループワークで実行し、協働的活動とゲーム性を絡めた体験と探究の確保
- アプリケーションの連動によるLMS的な連動と、コンテンツのプラットフォーム化



探求・体験プログラムについて

探究プログラムの概要

- 小学生～高校生が同時に参加するプログラム
- 各学校世代ごとに達成目標と教材をそれぞれ提示
- それぞれの教材が教え合いによって成立する
- 那須町に対しての現状を勉強するための課題解決型授業を提案するためのプラットフォームになる



探求・体験プログラムの教材について

TOPへ戻る

「地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントとSDGs達成に向けての地域課題解決策の実践」プロジェクト

代表者	増田幸宏【教授】(システム理工学部 環境システム学科)
構成員	中口毅博 作山康 鈴木俊治 石川裕次 市川学 磐田朋子 小山友介 澤田英行 真保晶子 袖野玲子 田口博之 中村仁 松下希和 山崎一也 Yasmin Bhattacharya(システム理工学部 環境システム学科) / 君島真仁(システム理工学部 機械制御システム学科)

■プロジェクトの概要

これまで環境システム学科で取り組んできた以下4つのCOCプロジェクトの成果を踏まえ、学科カリキュラムにおける「地域志向活動型アクティブ・ラーニング」の確立と、全教員の参画と地域関係者の協力のもと、学科の総力を挙げて「国連と学科独自のSDGs達成に向けての地域課題解決策の実践」に取り組むものである。

- 1) 社会人基礎力向上を目指す地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントと教育アセスメント(代表: 澤田英行)
- 2) 公民学連携による高齢化社会対応まちづくり研究-サテライトラボ上尾の全世代型サードプレイスと地域教育研究拠点(代表: 作山康)
- 3) 学生主体のSDGs協働プロジェクトによる地域課題の解決策の実践(代表: 中口毅博)
- 4) 気候変動と地震災害に適応したレジリエントな地域環境システム(代表: 増田幸宏)

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】 環境システム学科は、ディプロマ・ポリシーとして国連の掲げるSDGsの達成を2017年の段階で明記し、カリキュラムの大幅改訂を行った。カリキュラム・ポリシーにおいては、学科独自のSDGs(S: サービスラーニング、D: デザイン思考、G: グリーンインフラエンジニアリング、s: システム思考)を定義し、SDGsの達成を核とした教育方針を掲げて教育研究と学生活動の基盤を整備してきた。本事業は正課教育や課外活動における学生主体の多様な地域貢献活動と国連SDGsの達成活動を実施し、その効果を社会人基礎力や社会貢献度によって評価・測定することで、新しい教育プログラム構築を目指すものである。特に、自治体、地域住民、事業者と連携したアクティブ・ラーニングを積極的に推進する。また、学生の大学院進学への動機付けとなるエンゲージメント向上への取り組みも図るものである。

【研究】 墨田区では学官連携拠点施設である「すみだテクノプラザ」、上尾市ではまちづくり拠点「サテライトラボ上尾」を積極的に活用して地域連携の研究活動を展開した。両拠点では地域課題に対応する実証的な研究と実践的な教育の実施を積み重ねてきており、地域との深い関係性が構築されている。その基盤をさらに発展させ、地域と連携してサービスラーニングを体現することを目指している。2017年以来、学科として特色ある問題解決型PBLやアクティブラーニングを実践してきたが、これを「協働実践型」「複数課題同時解決型」「地域横断型」へと進化させる。また、「1年: 体験→2年: 主体的参加→3年: 提案・実践→4年: 総合研究・実証→大学院」の段階的サイクルを確立することを目指しており、本事業では特徴ある段階的研究活動の範例を示すことを目的としている。地域課題を解決し、生活者の視点に立った地域環境システムを構築するプロセスは学術的にも先導的な取り組みである。

【社会貢献】 高度な専門性と学生の行動力を活かすことのできる地域の大学が地域の発展のために果たす役割は大きい。今年度は「高温化する夏季においても安全に、安心して歩けるまちの実現」と題して取り組んだテーマが、「第11回学生政策提案フォーラムinさいたま」にて優秀賞を受賞した。また、「スマートエネルギー・地域熱供給は街のカーボンニュートラルに貢献できるか?」とのテーマで学外機関との連携ワークショップを開催した。実務者及び芝浦工大卒業生をファシリテーターとしてお迎えし、実践的な内容についての議論と学び合いを行った。「環境システム応用演習A/B(3年)」においては、社会のニーズに実際に応え具体的な課題解決に繋がる学生主体の充実した成果をあげることができた。検討対象地域のSDGs達成にどの程度貢献したかを、ヒアリング調査や外部ゲストの講評を通じて明らかにしている。



第11回学生政策提案フォーラムinさいたまで優秀賞を受賞【発表題目】高温化する夏季においても安全に、安心して歩けるまちの実現



第一線で活躍の実務者と本学卒業生をファシリテーターとしてお迎えし学外機関との連携ワークショップを開催【テーマ】スマートエネルギー・地域熱供給は街のカーボンニュートラルに貢献できるか?



各地域の関係者の方々を交え、学科全教員が参加しての環境システム応用演習A/Bの最終発表会の様子(ハイブリッド形式での開催)

主なトピックス

■SDGsスタディツアーとボランティア活動

1年生対象の「環境フィールド体験」、2年生対象「環境フィールド実習」の両授業において、宮城県気仙沼市・南三陸町や福島県田村市といった東日本大震災の被災地を訪問し、SDGs達成や震災復興の活動現場を見学したり、ボランティア活動を行った。また、静岡県三島市においては、グランドワーク三島の水辺再生現場を見学するとともに、河畔林維持管理のための竹林伐採活動を行った。また川越市のイベントでSDGsすごろくやPCゲームのコーナーを設置した。



宮城県気仙沼市大谷海岸でのビーチクリーン活動



福島県田村市遊具制作と美山小学校との交流



川越市版SDGsすごろくの制作



川越市ユニクス川越におけるSDGs人間すごろくコーナー

■環境システム応用演習A/B

「環境システム応用演習A/B(3年)」は本キャンパスがあるさいたま市内4地区、さいたま市以外の県内2地区、東京都内1地区、栃木県内1地区、計9地区を対象として9チームを編成して実施した。本演習では各地域において現地調査や関係者ヒアリングを実施のうえ、建築・都市・環境の視点から地域課題を解決する提案作成を行った。

中間及び最終発表には各地区の関係者に出席いただき(オンライン)意見交換するなど、地域志向活動型アクティブ・ラーニングを実践するものとなっている。また履修学生へのアンケートを授業前・後に実施し、目標の達成度、および現地のSDGs達成にどの程度貢献できたかを把握した。



建築設計(意匠、構造)、プランニング、環境システムの各専門に分かれて分野融合型協働グループワークを行った。発表会では地域関係者も参加し提案と議論を行った。



全チームが建築設計、都市デザインに関する模型を作成し発表会で展示した。手を動かしてアイデアを具現化するとともに、空間イメージを相手に伝えるために模型は有効な手段であることを再確認した。

■「サテライトラボ上尾」を拠点とした活動

コロナ化の影響で約3年間休止していた実証実験を本格的に2022年6月から再開し、原市カフェや麻雀カフェなど、「サテライトラボ上尾」を拠点とした地域課題解決の取り組みを実施し、5つの卒業研究をまとめた。前年度に試行した小図書館を改善運営したところ、これまで参加していない住民参加や交流が確認され、さらに地元主体の運営になる成果が得られた。また男性高齢者の参加を促す麻雀カフェも好評で、地域コミュニティ活性化が確認でき地域に貢献した研究となった。



学生と高齢者の交流に関する研究の一環で、学生コーラスサークルの演奏会に多くの高齢者が参加し交流が図れ。



団地内に小図書館を設置し、古本のリサイクルと居住者の交流の場としての実証実験は、地元の本格運営となった

■「すみだテクノプラザ」を拠点とした活動

「すみだテクノプラザ」を拠点として、地域福祉や産業活性化と連携した防災まちづくり(地震火災、水害対策)などに関する研究と実践を、地域住民、事業者、福祉系・建築系専門家、墨田区防災まちづくり課、防災課、UR都市機構などと連携して実施した。科目「環境システム応用演習A/B」では、対象地域のひとつとして現地調査や検討を行い、「地蔵坂通り」とその周辺施設を核とした地域の再生策を検討した。研究面では、墨田区北部地域を対象とした大規模市街地火災に対する街路樹の延焼抑止効果の検証や、地域再生に向けた計画設計を学士論文としてまとめた。実践面では、学生プロジェクトと連携した地域活動を地域の関係主体と協働して実施した。



「地蔵坂通り」における歩行環境改善や、沿道の小学校、高校等と連携した広場空間の創出、防災力強化等による地域の拠点形成の検討



学生プロジェクトとの連携による、社会福祉系団体や企業、住民等と、地域の防災を学びながら防災拠点をめざす「防災遠征」を実施

「社会システム科学のアプローチによる課題解決 ：課題解決のための最適手法の探索と適用」 プロジェクト

代表者	市川学【准教授】(システム理工学部環境システム学科)
構成員	長谷川 浩志(システム理工学部/機械制御システム学科)／小山友介(システム理工学部/環境システム学科)／後藤裕介(システム理工学部/電子情報システム学科)／澤田英行(システム理工学部/環境システム学科)／村上嘉代子(工学部/電子工学科)

■プロジェクトの概要

社会に存在する課題に対して、データサイエンスやシミュレーション、さらにはセンサ類に代表されるハードウェアや建築計画・都市計画などの中から最適な手法もしくは複数の手法を組み合わせることで、解決することを目指した。事業の対象は、都道府県、市区町村、地域、地区、建物、企業など制限はせず、対象が抱える課題を活動対象とした。地域を支える信用金庫や地域を所管する市区町村や保健所、必要に応じて都道府県と連携することで、産官学金が連動した事業へと発展させた。対象地域の医療や都市計画（建て替え含む）、新規行政サービスやビジネスの創出などに関する課題解決を、学生はデータサイエンスやシミュレーションの技術を用いたエビデンスベースで試み、実現可能性の高い提案を行った。

■教育改革研究活動助成（地域志向）活動の成果

【教育】

活動対象となる地域、企業が抱える課題解決には、複数領域の知識や技術を連携させる必要がある。参画する学生は、システム理工学部及びシステム理工学専攻で学修するシステム思考に加え、データサイエンスやシミュレーションの技術を用いることで、エビデンスベースの提案が可能となった。また、必要に応じて自らデータを収集（アンケートやセンサ類）を行った。対象となる課題について、知識の獲得・データの収集・データの分析・シミュレーションによる予期予測・ドキュメント化の一連のプロセスを経験することで、「手が動くコンサルタント」として新規事業や企画時に活躍できる人材を目指した。

【研究】

活動対象が抱える課題は、介護予防や建築設計、ビジネスプランニング、交通事故解明、都市計画とさまざまであった。課題解決に当たっては、統計分析や地理情報分析、アンケート分析、人口流入シミュレーションとさまざまな手法を用いた。課題解決のために最新技術を含めた最適手法を選択して適用するプロセスは、他の課題にも応用可能である。違った課題を保有する他地域への新たな展開が期待され、課題解決を多く行うことで本学のブランディング効果へと繋がった。なお、課題解決型の活動を領域横断的に行い、その成果を公表していくことで、本学の領域横断に関する研究力のプレゼンスを示した。

【社会貢献】

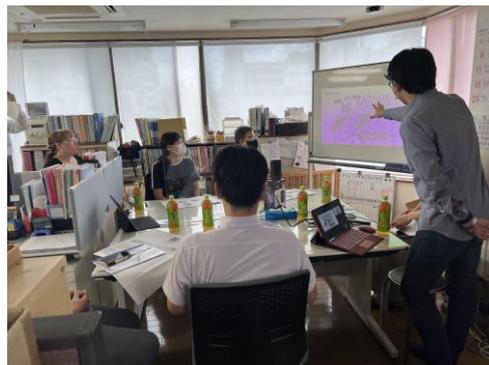
地域や地区、建物、企業が抱える課題を、データサイエンスやシミュレーションの技術を活用して解決しようとする取り組みは、エビデンスを基とした成果を地域へ還元できることから社会貢献へと繋がる。事業の対象は地域、地区、建物、企業など制限はせず、対象が抱える課題を活動対象とする。地域を支える信用金庫や地域を所管する市区町村や保健所、必要に応じて都道府県と連携することで、10もの事業を産官学金で実現した。学生がもつ柔軟なアイデアをエビデンスベースで提案することで、斬新なアイデアや実現性の高い解決策を提示することができた。各ステークホルダーおよび新しい地域での来年度の事業を計画している。



【事業の概要図】対象に合わせた手法をとり、問題解決をする



【ディスカッションの様子】ブレインストーミングによるアイデア出し



【銀座さとう様への提案様子】会社に訪問し、学生がプレゼンをした

主なトピックス

■東あられ

【事業戦略×POSデータ分析】

東京都墨田区両国にある、老舗米菓子店においてPOSデータを用いてポスティング戦略の効率化を提案した。セグメントや地理情報から購買行動を分析し、広告効果を可視化した。

■藤一【店舗売上向上×実証実験】

東京都豊島区巣鴨にある、老舗米菓子店において売上向上につながる提案を試験的に実施し検証した。システム思考・デザイン思考を用いて出したいくつかの提案に、実証実験を踏まえた効果を示すことで、実現可能性の高い提案を行った。

■クラフトビール

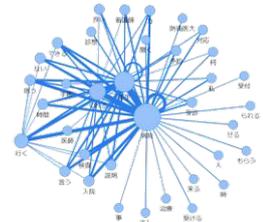
【赤字飲食店×ビジネスデザイン】

クラフトビールを提供する店舗において売上向上を目的に提案を検討した。ターゲット層が正しいか、地域特性をモバイル空間統計などを用いた調査や、実際に飲食をすることで、競合との違いや発見したことを共有・議論した。それにより、真の顧客ニーズを明らかにし、店内の雰囲気やメニュー、商品提供スタイルの改善案を示した。

■病院

【コンサルティング×アンケート分析】

病院において、周辺地域における病院へのニーズの分析・調査をした。周辺地域でのアンケート調査や、口コミや統計分析を用いて、該当病院の置かれている現状を分析し、経営改善のための方針を示唆した。



【共起ネットワーク図】
口コミの分析をした結果

■警視庁

【二輪事故×事故統計データ分析】

オープンデータ及び、交通関係のデータから東京都内の二輪交通事故の発生要因の分析をした。警視庁が公開するオープンデータの整理・可視化及び、事故発生地点の現地調査から仮説を導出し、地理情報分析、統計分析、因果推論といった手法で検証した。

	人対車両	車両相互	車両単独
切片	-2.13642	-0.78872	2.92519
季節_春	-0.17922	-0.00264	0.18186
季節_夏	-0.19522	0.08743	0.10779
季節_秋	-0.27473	0.08459	0.19013
昼	-0.71700	0.24811	0.46889
天気_良	-0.09079	0.33206	-0.24127
信号機_あり	-0.11767	0.16790	-0.05029
衝突地点_交差点あり	-0.12330	0.16205	-0.03875
ゾーン規制あり	0.08464	-0.32449	0.23985
中央分離あり	-0.30454	0.36543	-0.06090
年齢(当事者A)	-0.07582	0.07603	-0.00020
年齢(当事者B)	2.83232	2.61014	-5.44246
平日	0.13806	0.11567	-0.25373

【要因別の類型表】

データを用いた事故類型モデルの結果

■新井湯【介護予防×顧客データ分析】

東京都品川区にある、高齢者の健康増進のためのフィットネスジムにおいて、介護予防へのトレーニング方法などの業務の効率化に試みた。顧客の筋肉量やトレーニング内容など集計データの分析を行った。

■銀座さとう&電気湯

【建計×ビジネス×データサイエンス】

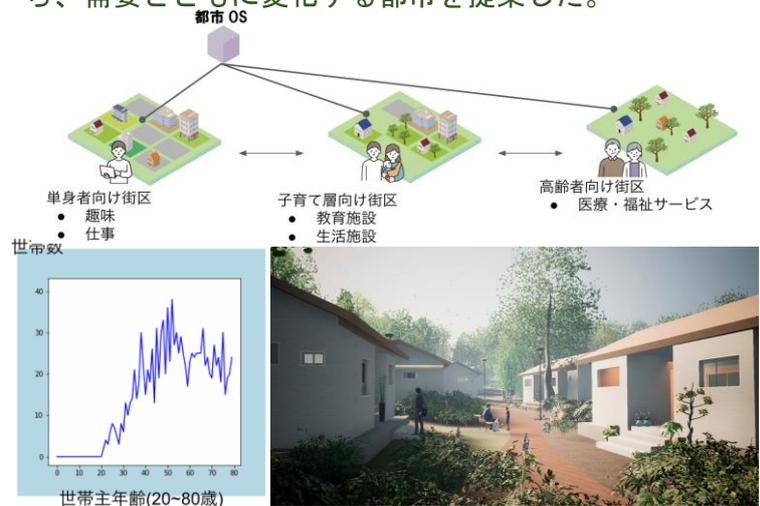
東京都中央区のビルおよび東京都墨田区にある銭湯において、システム工学手法を活かした、対象地に求められた建て替えを提案した。オーナーや顧客といった「内部要因」周辺地域や銭湯市場といった「外部要因」から対象分析から評価軸を設定し、提案を客観的に評価した。

■栃木県那須町黒田原地区&高久地区

【都市計画×シミュレーション】

【都市計画×ビジネスモデル】

栃木県那須町黒田原地区では、建築・都市計画・交通の側面から提案を行なった。現状分析とアンケート等のニーズ分析から、各領域でストーリー性のある都市計画を提案した。また、計画全体において収支計算をすることで、現実可能性の高い提示をした。新たに住宅開発が計画される高久地区については、既存市街地との差別化を図った都市計画の提案を行なった。都市OSにより、公共空間・住宅配置の最適化から、需要とともに変化する都市を提案した。



【高久地区構想】都市OSによる最適化された都市計画

■今後の展開

● All Japanが研究対象

(行政視点)

都道府県、都市圏、市区町村が抱える問題点を解決

(中小企業支援、業績改善、新規開発など)

地域の医療・産業・観光などを課題を解決

(生涯学習)

小中高大生・社会人・住民への教育、経験学習の提供

● 2024年度の展開予定

埼玉県：埼玉版FEMAの実現、保健医療福祉における

災害時対応／沖縄県石垣市：石垣をもっと元気にする

プロジェクト(上位版)／沖縄県南城市：防災対応、

久高島観光事業／栃木県那須町：那須町〇〇地区マス

タープラン(継続)／福島県大熊町：社会システム科学

実証実験／耕作放棄地の利活用：農業×教育

×Society5.0／など

「都心の災害を考えるワークショップ実施と展覧会の開催」プロジェクト

代表者	橋田規子【教授】(デザイン工学部 デザイン工学科)
構成員	蘆澤雄亮(デザイン工学部 デザイン工学科)／繁里光宏(デザイン工学部 デザイン工学科) デザイン工学科3年生 プロジェクト演習Q4履修者15名

■プロジェクトの概要

地球規模で地震や異常気象などによる災害が多発している。人々の関心は以前よりも高くなってはいるが、危機感をもって対策をしている人は少ない。本プロジェクトは、大きな災害を体験していない学生が、災害についてのワークショップを行い、災害の実態調査などから、対策グッズを提案することである。3年生後期のプロジェクト演習授業(履修者15人)で実施し、学生たちの課題解決能力とデザインスキルを鍛えることを目標にした。授業では、プロのデザイナーを講師として招き、アイデアのブラッシュアップを行った。展覧会は港区総合庁舎みなとパーク芝浦にて「防災とボランティア週間」(1月16日～20日)と同時に展覧会を行った。展覧会を行うことで地域の人々に防災について考えてもらう機会を作ることも目的である。また、後日でも興味ある方に見ていただくようHPに掲載を行った(<http://donou-project.com/>)。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】【研究】

プロジェクトを通して、デザイン思考の5段階を実践し、デザイン実践能力を高める。

(1) 共感: ユーザーの行動を理解し、寄り添い、何が問題なのかを見つける。
→ 都心部の災害を知るために書籍やインターネット調査、現地調査などを行った。防災意識を高める、災害現場対応、災害現場からの避難、避難所生活という4つのグループでそれぞれ調査とディスカッションを行った。

(2) 定義: ユーザーのニーズや問題点、自らが考えることをはっきりさせる。
→ 実際に体験したことのない災害の体験を、リアルに想像するために「ストーリー描写法」を用いてより具体的にアイデアが出せるようにした。

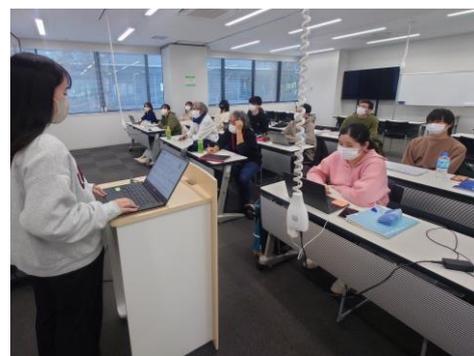
(3) 概念化: 仮説を立て、新しい解決方法となるアイデアを生み出す
→ 中間発表で各学生がアイデアを報告し、プロのデザイナーからアドバイスをいただいた。そのアイデアは製品化が可能なものか、普段はどのように置かれているか、生活の中でどのように存在すべきかを明確にすることができた。

(4) 試作: 問題に取組み具現化、プレゼンボードを作成する
→ アイデアをより分かりやすく伝えるための形態、素材、プレゼンテーションなど。

【社会貢献】

2023年1月16日～20日港区総合庁舎みなとパーク芝浦にて「防災とボランティア週間」と同時に展覧会を行った。展覧会を行うことで地域の人々に防災について考えてもらう機会を作ることも目的であり、今回も、多くの人が会場に訪れていた。ブルーシートや土のうを製作する会社から問い合わせがあり、現地で説明を行った。

展覧会と作品展示の様子は、後日に興味ある方に見ていただけるようHPに掲載を作成している(<http://donou-project.com/>)。



【中間発表会】各学生がアイデアを報告しプロのデザイナーにアドバイスをもらう



【最終発表会】展覧会会場で、デザイナーと作品についてディスカッションをおこなった



【展覧会】みなとパーク芝浦の「防災とボランティア週間」と同時に展覧会をおこなった

主なトピックス

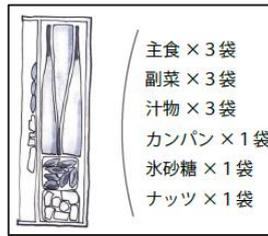
■ 日常の防災意識

問題：
防災備蓄を備えている人が少ない。
備えていても倉庫や棚の奥に保管されているため、いざという時にすぐに取り出せない。備蓄していることさえ忘れている。

対策：
Care Stockを壁に飾ることで日常的に目にするため、防災意識を高めることができる。パット手に取れるため避難時に持ち運びやすい。Care Stockは防災意識のある人が無い人に贈り、思いやりの輪が広がる。



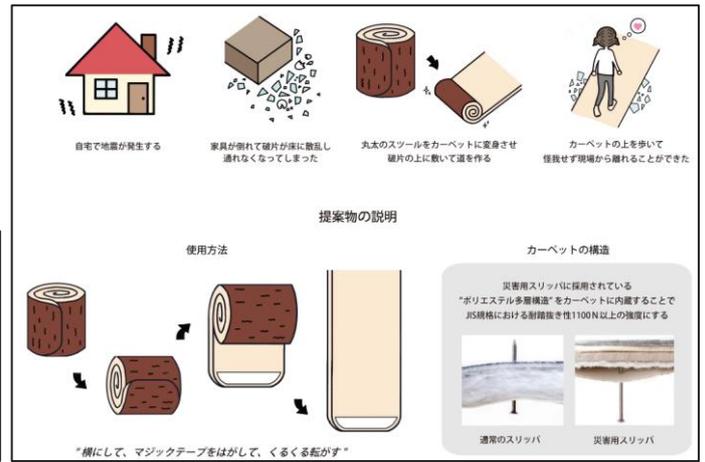
【狩野日菜子:Care Stock】



■ 災害現場

問題：
自宅地震が起きた際に、割れたガラスや食器によって非難ができなかったり、慌てて靴下で歩いてケガをすることも。

対策：
くるくるスツールをはがしてカーペット状にし、割れ硝子の上に敷くことで安全に現場から離れることができる。災害用スリッパに採用されているポリエステル多層構造をカーペットに内蔵することでJIS規格耐踏み抜き性強度を確保。



【宮崎結衣:くるくるまるた】

■ 災害現場からの避難対応

問題：
身長が低い子どもは災害弱者とされている。避難時に身長が低いと目立たず、迷子になる可能性が多い。また、突然の災害により、ショックを受けて心を閉ざしてしまう恐れがある。

対策：
避難時に身に付ける防災頭巾にウサギの耳を付けることで大人が子供を見失わないようにする。通常の防災頭巾より下の部分をマントのように長くし、体を包むようにすることで子供は安心感をもつことができる。



【鈴木佳乃:アニマル防災頭巾】



■ 避難所生活

問題：
避難所での貴重品の盗難問題。家族でエリアが分かれてはいるが完全にガードができないことが多い。特に就寝時は盗難被害を防ぐのが難しい。

対策：枕を金庫代わりにしたら、安心して眠りにつけるのでは。また、睡眠時以外はバッグとしての機能があり、日中も使うことができる。



【山西健介:Safety Pirrow】

「ロボット技術による見守り・健康支援等スマートタウン構築(地域連携の強化)」プロジェクト

代表者	佐々木毅【准教授】(デザイン工学部 デザイン工学科)
構成員	内村裕(工学部 機械工学科)／菅谷みどり(工学部 情報工学科)／伊東敏夫(システム理工学部機械制御システム学科)／安藤吉伸(工学部 電気工学科)／森野博章(工学部情報通信工学科)／吉見卓(工学部 電気工学科)／志村秀明(建築学部 建築学科)／新熊亮一(工学部 情報工学科)／中村真吾(工学部機械機能工学科)

■プロジェクトの概要

江東区、中央区などでは少子高齢化が進む一方で、人のつながりを大切にする地域でもある。このような地域では、災害対策やお年寄りの安否確認など健康管理、防犯は深刻な課題であり、本学が研究を地域と一体となって進めてきた共存型ロボット、遠隔ロボット技術や移動ロボットの技術を活かして、地域で活動し災害対策やお年寄りの安否・健康管理、見守りなどを実施できるシステムの構築を図り、地域のQOLの向上を図る。特にコロナ下、コロナ後の地域活性化についてロボット技術の応用を検討する。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

上尾看護専門学校にてロボット技術についての講話とデモンストレーションを行った。また、それを受けて看護学校の学生が看護現場でのロボット技術の利用について提案発表を行った。このカンファレンスには本学の学生も参加し、発表に対する質問や意見を述べた。LIDAR(Light Detection and Ranging)を複数用いた三次元センシングによる見守りシステムについては、研究室の学生はもちろん、学科の1～3年生や、高校生インターンに対して、原理やソフトウェアプログラムについてレクチャを行い、実機を用いた演習を行った。さらに、自動運転シニアカーの実証実験を通して、学生はシステム構築において対象デバイスの知識だけでなく、それを必要とする社会背景ニーズまで理解することができた。

【研究】

見守りシステムとして複数LIDARによる三次元センシングを行い、リアルタイム性を維持しながら空間情報を検出する技術の研究を行っている。また、人間の生活環境で活動可能なロボットを実現するため、ロボットが既存のインフラを利用するための技術の研究を行っている。具体的には、歩行者用信号機の検出やエレベーター搭乗のための計測、移動ロボットの並走制御技術进行研究している。さらに、人と関わるロボットの研究として、屋外自律移動移動車椅子の開発や生理指標を用いた感情推定技術により、リアルタイムにモビリティの乗り心地の評価やロボットのインタラクションを評価できる方法を研究している。さらに、高齢者や身体障害者に向けた一般的な交通環境からショッピングモールへの自動移送サービスと、非接触で指示が可能なHMI実現の目途を付けた。

【社会貢献】

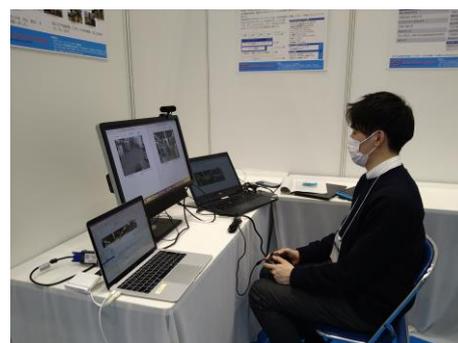
社会に広く技術を伝える様々な実験やデモンストレーションを実施した。京都のスマートシティ推進協議会の活動の一環として、京都リサーチパーク(京都市下京区)にて、LIDARネットワークを用いた自律移動ロボットによる搬送実験を行い、新聞に記事が掲載された。Japan Robot Weekでは会場である東京ビッグサイトから本学豊洲キャンパスのロボットを遠隔操作するデモを実施した。また、「豊洲スマートシティ構想との産学官民連携」プロジェクトとも連携し、ベイエリアロボティクスフォーラム2023を開催した。



上尾看護専門学校



さいたま新都心駅構内からコークーンシティ内
一般市民への自動運転試乗会風景



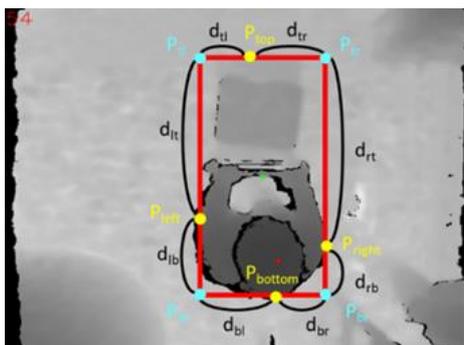
JRW2022でのロボット遠隔制御デモ展示

主なトピックス

■ ロボットが生活環境下で人と共に活動するための研究開発

【RGB-Dカメラを使った人のサイズ計測】

人とロボットがエレベーターに同乗することを想定し、RGB-Dカメラを用いてエレベーターに乗る人物のボリュームを計測し、エレベーター内の空間の占有率を予測する研究を行った。これにより、ロボットのエレベーターの搭乗の可・不可を判定する。占有率の計測のためには、背負っているザックや、運搬している荷物と共にボリュームを計測する必要がある。



深度情報による人と台車を含めたサイズの計測

【屋外自律移動車椅子の研究開発】

長距離の歩行が困難な高齢者、障害者のための屋外自律移動車椅子を開発している。目標値を設定すると自動で経路を生成し、障害物を回避しながら自律走行する。信号認識も行い、信号のある交差点を渡ることも可能である。



開発中の自律移動車椅子

■ LIDARを複数用いた三次元センシングによる見守りシステム

LIDAR(Light Detection and Ranging)を複数用いた三次元センシングによる見守りシステムについて研究開発を行った。複数のLIDARには空間的・時間的ズレがあるため、それらが取得したデータをリアルタイムに集約するのは困難であるが、その問題を解決し、空間情報を検出することに成功した。成

果について、IEEEの国際会議 NOMS, ICDCS, CCNCで論文発表を行った。この成果を応用し、京都のスマートシティ推進協議会の活動の一環として、京都リサーチパーク(京都市下京区)にて、自律移動ロボットによるテイクアウトフード搬送の社会実験を行い、新聞にその記事が掲載された。



自律移動ロボットによる搬送

■ 実証実験・デモの実施

自動運転シニアカー実証実験として、さいたま新都心駅構内からコクーンシティ内まで一般市民への自動運転試乗会を行った。シニアカーの自動運転化により、免許返納者へのモビリティ利用の機会を創出できることを確認できた。また、Japan Robot Week 2022ではロボットサービスイニシアチブと連携し、本学学生が中心となりロボットサービスの共通通信プロトコルであるRSNP(Robot Service Network Protocol)を用いて会場から豊洲キャンパスのロボットを遠隔制御するデモンストレーションを実施した。3月に大宮キャンパスにて行われる電子情報通信学会総合大会においても「特別企画:デモ展示 芝浦工業大学先端技術展示会」として構成員が本成果の一部を展示予定である。さらに、「豊洲スマートシティ構想との産学官民連携」プロジェクトとも連携し、ベイエリアロボティクスフォーラム2023を開催した。

■ 上尾看護専門学校との授業連携

上尾看護専門学校の授業の一環として、ロボット技術の現状と活用可能な領域についての講話とデモンストレーションを実施した。さらに、後日看護学校の学生が看護現場でのロボット技術の利用について提案発表を行った。講演を受け、ロボットそのものにとられないロボットに関連した技術全般を活用した、現場の課題を反映した様々な応用提案が行われた。このカンファレンスには本学の学生(ゼミ配属の3年生、および研究室の4年生)も参加し質疑が行われた。



看護学校学生によるロボット技術の看護現場での活用提案

「内部河川・運河の活用とコミュニティ強化」プロジェクト

代表者	志村秀明【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	郷田修身、原田真宏、篠崎道彦、桑田仁、佐藤宏亮、前田英寿(建築学部 建築学科)／岩倉成志(工学部 土木工学科)

■プロジェクトの概要

東京湾岸地域の地域課題である河川や運河の活用やコミュニティ強化をテーマとして、学生が市民やNPO、民間事業者、自治体と協働しながら、課題発見から解決方法の提示まで行い、教育効果を高め、先進的な研究を促進し、更に社会貢献まで同時に実現しようとするものである。

建築学科の基礎的な講義科目から、発展的な演習科目、更にゼミナール科目や卒業研究までを相互に関係させつつ連続的に展開させることで、教育・研究・社会貢献の質を段階的に高めようとしている。単なる教育や研究に終わらず、実際のまちづくりを向上させること、また国際的な交流を推進することで、教育・研究・社会貢献の新しい展開と本学の社会的評価向上も狙っている。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

学生は、講義科目で地域課題を理解し、PBLの形式をとるゼミナールや演習で地域課題の解決に取り組む。建築学科では、「都市地域計画」や「地域設計論」で地域課題を理解し、「プロジェクトゼミ」や「空間地域デザイン演習」で地域課題の解決に取り組んだ。また大学院では、「まちづくり特論」「都市計画総論」「Urban and Community Design」で地域課題を理解し、「建築学演習・都市地域デザイン」で地域課題の解決に取り組んだ。

特に「建築学演習・都市地域デザイン」では、江東区北砂を対象として、地域資源を活かした安全・安心なまちづくりを提案した。

【研究】

アクション・リサーチの手法に基づき、中央区月島では「月島長屋学校」を拠点として、佃島の旧魚問屋住宅である飯田家住宅の保存と活用に関する研究、指定管理者による子ども向けまちづくり模型講座に関する研究、PLATEAUを用いた江戸城紅葉山へのビスタと都市軸に関する研究、ポータルサイトの開設を通じた東京歴史文化まちづくり連携に関する研究、月島長屋学校を対象とするフォトグラメトリの3Dモデリングのデジタルアーカイブに関する研究が取り組まれた。

また日本建築学会で、東京湾岸地域に関する研究が4本発表され、SEATUC国際会議で、江東区の公園活用に関する研究が発表された。

【社会貢献】

江東区豊洲では、3年ぶりに「豊洲船カフェ」と「豊洲水彩まつり」が開催され、学生達は運河クルーズの企画と運営、船上からの見どころガイドを行った。船上ガイドでは、学生達は豊洲地区の地歴について学修し、乗船者に対して分かりやすく、また楽しくガイドを行い好評だった。

中央区月島では、学生が卒業研究を兼ねて、社会教育会館で指定管理者による子ども向けまちづくり模型講座のスタッフを務めた。

福島県南会津町館岩地区では、3年ぶりに「たのせふるさとまつり」が開催され、6名の学生が集落再生活動を支援した。



学生達が交代でガイドを務めた豊洲運河クルーズは、大好評だった。



「建築学演習・都市地域デザイン」では、防災空地で中間発表会を行った。



南会津町館岩地区で開催された「たのせふるさとまつり」では、学生達が特産品販売の手伝いなどで活躍した。

主なトピックス

プロジェクトゼミ 研究拠点「佃島学校」の部分的な施工作業

2013年に開設された「月島長屋学校」が、再開発のために取り壊されることになった。新しく開設される「佃島学校」の施工を、

- ①月島長屋学校の建具再利用のための障子張り
 - ②月島長屋学校の廃材を利用したテーブルの制作
 - ③佃島学校の窓格子制作
- などに8名の学生が取り組んだ。

これら一連の取り組みは、まちづくり活動拠点の新設に具体的に関わるだけでなく、建築を頭の中や図面、模型だけで考えるのではなく、身体的に学ぶことも目的とした。



障子張り:どうして建具の天地を逆にして障子を張るのか、障子紙は最後に霧吹きで水をかけるとなぜピンと張るのか、などについて、皆で議論してから作業に入った。3年生はコロナ禍でほとんどオンライン学修だった。体を動かしてのチームワークを必要とする作業は多いに刺激となった。



廃材を用いたテーブル天板の制作:月島長屋学校で棚板として使われていた廃材を用いて、テーブルの天板を制作した。ダボで接合することで、廃材を有効に活用できることを学んだ。またダボの強度など、実際に製作することで体験的に学ぶことができた。木材の表面をニスで塗装することで、見栄えが良くなること、また汚れを防ぐことになることも体験的に学んだ。



窓格子の制作:設計から材料の調達、道具を揃えるところから、8名で協力して作業した。学生達は、道具の使い方やチームワークの大切さを学んだ。

建築学演習・都市地域デザイン 地域資源を活かした安全・安心なまちづくり

20名の大学院生が、江東区北砂三・四・五丁目を対象として、江東区やUR都市機構、地元まちづくり協議会と連携して、安全安心なまちづくりを提案した。この地域には、下町情緒を残す砂町銀座商店街がある一方で、木造密集市街地の緊急整備地区に指定されている。そこで商店街沿道地区や防災空地を含む地区、砂町文化センター通り沿道地区などの5つの地区に分かれて、具体的なまちづくりを提案した。

10/19に開催した中間発表会と11/16に開催した最終発表会は、商店街沿いにある防災空地や文化センターで、市民の目に止まる状況の中で、地元まちづくり協議会の役員、江東区、URに対して行われた。

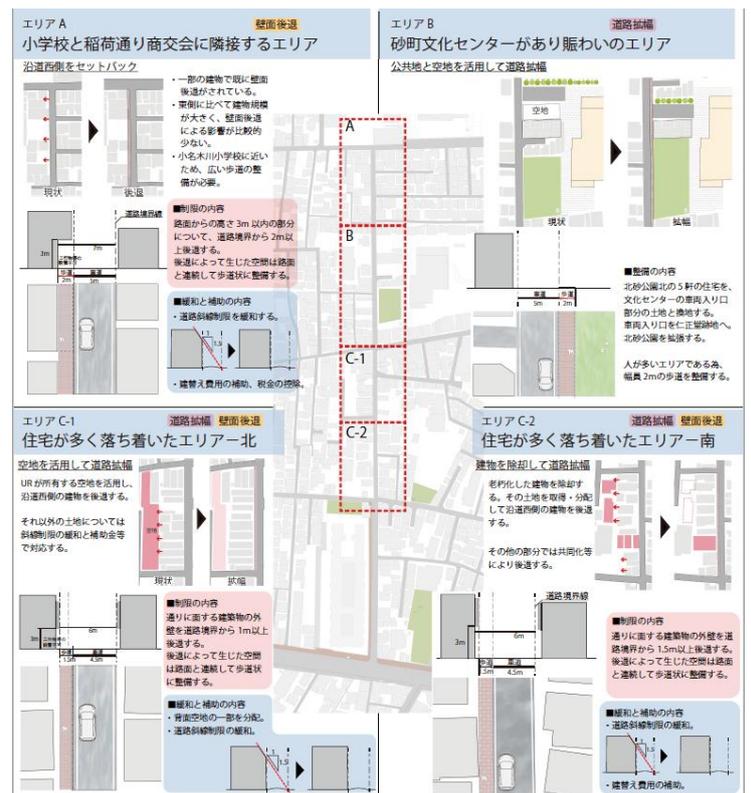
学生達は実際のまちづくりに貢献すると共に、まちづくりの現場から多くを学ぶことができた。

■フェーズ2

フェーズ2では、1での機能に加え、地面を再整備する。ベンチだけでなく、机・椅子を配置することで、商店街で買ったものを食べたり、休憩したりする場として用いる。簡易的な机・椅子とすることで、フェーズ1のように広場としても利用できるようにする。地面にラインを引くことで、さりげない境界を作り出し、休憩・通行を棲み分けする。



D班:商店街から砂町文化センターへ抜けられるような防災空地の活用をパースを描いてビジュアルに提示した。



E班 砂町文化センター通り沿道地区:地区の状況を踏まえて設定した4つの区間毎に、街路の拡幅と景観形成を提案した。

「東京臨海地域における安心安全健康のまちづくり」プロジェクト

代表者	佐藤宏亮【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	村上公哉(建築学部 建築学科)／秋元孝之(建築学部 建築学科)／清水郁朗(建築学部 建築学科)／桑田仁(建築学部 建築学科)

■プロジェクトの概要

江東区、墨田区、川崎市などを含む東京臨海地域は土地利用の転換が進み、インフラの整備や新産業の拠点形成などが進められている。海外からのビジネスマンや観光客の増加も見込まれ、多様性に富む地域となりつつある。しかし、新しい都市づくりが進められる一方で、高密度居住に起因する災害時のLCP(Life continuity planning)の確保、子供の安全な遊び場環境の創出、高齢者が安心して外出できる環境の充実、多様な主体によるコミュニティ形成など、新都市ならではの課題が山積している。本プロジェクトは、地域の防災力や災害対応能力の育成、安心して暮らすことのできる生活環境のマネジメントの方法などを検討し、地域と大学とが協力しながら安心安全健康のまちづくりを推進していくことを目的としている。

■FDSD(地域志向)活動の成果

【教育】

本プロジェクトには都市計画や建築計画を専攻している学部学生、大学院学生が参加している。東京臨海地域は災害対応や安心して住まい続けることのできる環境づくりなど、最先端の都市計画や建築計画が進められている地域であり、生きた学びの環境を提供してくれる。

本年度は、墨田区の木造密集市街地を対象とした防災まちづくりの提案、川崎市臨海部の新産業拠点形成にともなう土地利用更新の提案など、現代都市が抱える重要な課題をテーマに研究、教育に取り組んだ。著しく変化する都市の変化や戦略的な都市計画など最先端のまちづくりに触れながら、都市防災や多文化共生への取り組みなど多様な側面から都市を眺める視座を養うことができた。

【研究】

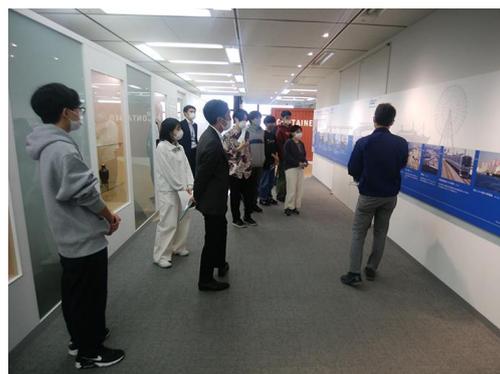
バーチャル空間を活用した街歩きをまちづくりの場面に活用していくために、「バーチャル豊洲」を作成し、VR空間での参加型街歩きの方法や有効性について研究を実施した。本年度は卒業研究の一環として実施され、被験者実験をもとにバーチャルまち歩きの可能性や課題について分析した。現実空間とは異なり、高さを自由に移動することができる点や、離れた場所からもオンラインで参加することが可能であることなどが特徴である。水害時などの設定のもとにまち歩きを実施することも可能であり、将来的には様々なまちづくりの場面への応用が期待される。

【社会貢献】

豊洲スマートシティ協議会が主催した「豊洲場外マルシェ」の企画の一つとして実施された「豊洲イベントマップ」のコンテンツ制作に協力した。このデジタルマップは豊洲スマートシティ協議会が制作しているものであり、スマートフォンなどのデバイスを活用することで、自分の位置を確認しながら豊洲地区の地域資源や景観資源などを解説を読みながら体験していくことができることが特徴である。「豊洲場外マルシェ」の実施期間に実際にweb上で公開され、イベントに訪れた方々に体験していただいた。このようなデジタルマップをさらに発展させて、豊洲エリアのまちづくりの場面や住民参加の場面などに活用していくために活動を継続していく予定である。



豊洲地区の景観分析



江東区職員の案内による現地視察



バーチャル空間を活用したまち歩き

主なトピックス

■ デジタルまち歩きマップ制作への協力

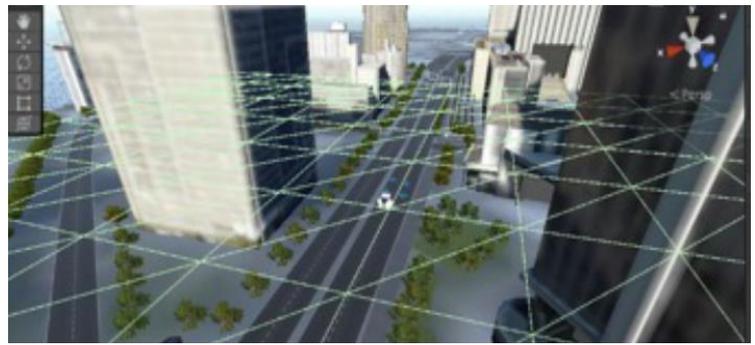
豊洲地区は東京臨海部に位置し、大規模な公園や親水空間を有し、特に広い空や水辺の景観など魅力的な公共空間を有している。このような魅力を実際に歩いて体験してもらうことを目標に、豊洲スマートシティ協議会ではデジタルまち歩きマップを制作した。本プロジェクトではこのデジタルまち歩きマップの制作に協力した。天空率や可視領域などの都市分析技術を活用しながら、データにもとづく公共空間の魅力デジタルコンテンツとして制作した。



制作に協力したデジタルまち歩きマップ

■ バーチャル空間まち歩きの実証実験

江東デルタ地帯では、地震時に建物倒壊や火災の発生が予想される木造密集市街地や、水害時に浸水が予想されるエリアが広がっており、災害時における避難ルートの確保や帰宅困難者対策が重要になっている。このような災害時のシミュレーションを3次元で行うことにより、よりリアリティのあるシミュレーションや意識啓発が可能になる。本研究ではその前段として、3次元空間を活用した参加型まちあるきの手法の検討を実施した。研究を発展させることで、水害時など様々な場面を想定した避難経路の検討などに活用していくことが期待できる。



バーチャル空間として作成された豊洲

■ 木造密集市街地の集合住宅の提案

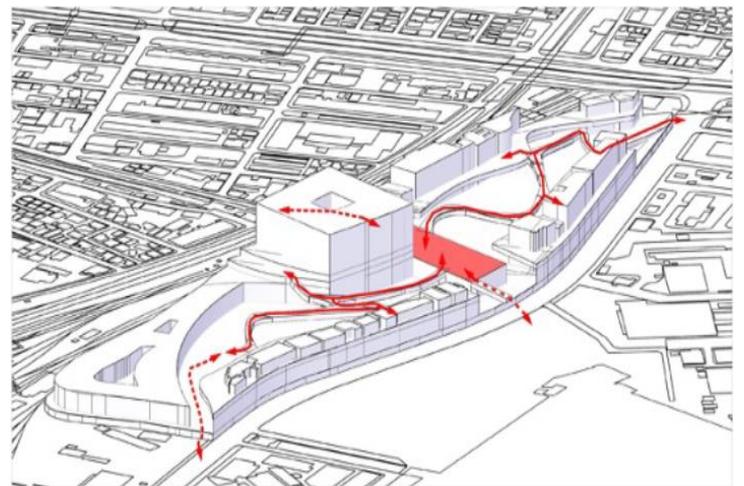
学部3年生の授業として、江東デルタ地区に位置する墨田区の木造密集市街地を対象に、災害に強いまちづくりや建築計画の提案を行った。木造密集市街地は地震時には家屋の倒壊や火災の発生により被害が拡大する可能性があり、地震に強い建物への更新が求められる一方で、昔ながらの街並みやコミュニティが残るため、開発と保全のバランスのとれたまちづくりが必要になっている。この授業では、フィールドワークを通して密集市街地の都市分析を行うとともに、防災まちづくりの体制づくりや空間づくりについても検討を行いながら、災害に強い集合住宅の設計提案を行なった。



木造密集市街地に建つ集合住宅の提案

■ 土地利用転換にともなう都市更新提案

川崎市臨海部は、大規模工場の跡地を活用した新産業拠点の形成が進んでおり、大規模な再開発の計画が進められている。将来的には、外国人観光客や居住者が増加していくことも予想され、コミュニティの形成や住環境の形成に向けた取り組みが必要になっている。本研究では、新しい土地利用として新産業拠点の形成に着目し、海外における先端産業拠点としての都市デザイン事例の分析、産業転換に伴う都市更新の方法の検討などを行った。また、外国人居住者の増加、新しいライフスタイルの形成などを念頭におき、多様な人々が共生する都市デザインの提案をとりまとめた。



川崎臨海部における都市更新の提案

金属加工経験の乏しい学生へコンピュータ支援型加工方法を教授した際の教育効果評価 (CAD/CAM と NC 加工を組み合わせた教育プログラムの実践)

機械機能工学科 青木 孝史朗

1. はじめに

3D プリンタなど一部の製造用工作機械では各装置に最適化された付属のソフトウェアを使うケースもあるが、一般的に今日的なものづくりは設計時に Computer Aided Drawing; CAD を、製造時にコンピュータ制御された Numerical Control; NC 機械により実施するのが一般的である。故に CAD データを NC 機械用の製造データに変換する仕組みを理解することは、工作機械によるものづくりを理解するのと同義と言える。

機械機能工学科では 2, 3 年次に汎用工作機械を、3 年次に NC 工作機械を用いたものづくり教育を実践していたが、ものづくりセンターの運営方針変更や授業数削減化のため、これらの実習実施を取り止めた。しかし、ものを設計し具現化するには加工の知識・経験は必要であり、技術者教育として欠かす事はできないと著者は考えている。

そこで金属加工経験の乏しい機械系学生のみならず、設計したものを造りたいと望む全ての学生を対象に、比較的安全に運用できるコンピュータ支援を用いた金属加工法を教授し、どの程度の習熟が可能かと云う情報を把握しておくことは、ものづくり教育の具体的な教授法や課題の設定などを考えるうえで重要な知見となる。本研究の目的は上述した内容の情報を収集し、現状に即した教授方法を

考案することを目的としている。

2. 2022 年度の実施内容

2-1 実践方針と対象となる学生達の状況

実践の対象科目は、創成ゼミナール 1 (3 年生対象, 3Q 開講 (1 コマ×6 週) 必修科目) とした。この科目は、8 人程度の専任教員が同時に担当しており、学生は事前に決められた教員の元で、教員毎に異なった内容を受講することになっている。

当初予定していた、CAD→Computer Aided Manufacturing; CAM→NC 工作機械という一連の工程が昨年度に続き諸事情により実施できなくなった。そこで昨年度の実施形態を踏襲した。具体的には、履修者を 5 つのグループに分け、以下に示す様に実施した。

100×100mm の平面を持つアルミニウムブロックを共通課題の供試材とし、外周 4 辺を外周から 10mm、深さ 3mm で削り、残った 80×80mm の表面に深さ 3mm、溝幅 6mm かなる任意形状をマシニングセンタ ; MC で製作する。その後、3mm 厚の黄銅板材から、MC で作製した形状に嵌る部品をワイヤー放電加工機 ; W-EDM で切り出し、2 つの部品を組み合わせた。

この実施内容の特徴は、①2 種類の NC 工作機械を利用して G コード (NC 用の加工プログラム) を見比べることができる、② W-EDM に CAM が内蔵されているので別途

CAM ソフトウェアの説明を丁寧にする必要がない、③色の異なるアルミニウムと黄銅と云う2つの金属から自身の設計した部品同士を嵌め合わせると云うパズルに似たイメージを学生達に容易に理解させられる、の3つである。アルミニウムブロック外周を削る際、4つの角は2つが直角、残りが面取り・円弧と設定し、Gコードも提供することで具体的な切削工程を理解してもらうヒントにした。

受講したの16名であった。これら学生達の加工関係の履修履歴としては、1,2年生で設計や加工に関する講義およびドラフターを用いた製図(CADは教えていない)であり、前述の様に加工の実習など実際にものを製作する授業はなく、ほとんどの学生が趣味やサークル活動でのDIY経験程度である。

2-2 具体的な実施方法

6回の授業は昨年と同様以下の構成とした。

・第1回(講義):CAD/CAMシステムおよびNC工作機械との連携の説明と班分け。

・第2回(実習):100×100mmのアルミニウムブロック表面へ作製する模様のデザインおよび形状に応じたGコードの作成、NCViewer(Gコードによる加工シミュレーションソフト)を用いた加工形状確認、各グループ内で実際に加工する形状(1つ)の選択。

・第3回(実習):(スタッフによるGコードの確認・修正後)アルミニウムブロックへMCによる深さ3mmのフライス(溝)加工。

・第4回(実習):ブロック平面上に作製した形状の寸法測定と当初図面との差異確認およびW-EDM用の図面作成。

・第5回(実習):W-EDMの実演と作製物同士の嵌め合い確認。

・第6回(学生による成果発表):自身のグループの作製物に対する図面・実寸法・Gコードの対応関係に関する考察のプレゼンテーションおよび教員による講評。

プレゼンテーション終了から1週間後に、自身が最初に作成したGコードの解説、グループで採用した図面と実際の製作物に対する詳細な考察を行ったレポートを提出させた。

2-3 教育効果などの測定方法

成績評価はグループ評価と個人評価に分けた。グループ評価は2つの部品の嵌合状態や最終レポートの考察内容、個人評価はレポートの内容とした。

授業における教育効果は上記の評価とは別に、第1回目の最初と第6回の最後に同一設問のテスト(100点満点)を記名式で実施し、受講前後での得点状況で測定した。各問には、用語の理解、Gコードへの理解、システムとしての理解、NC機械の具体的な機能、と云った項目を確認する意味を持たせた。なお、このテストの結果は成績評価には組み込んでおらず、これは学生達にも周知している。設問は以下の通りである。

(問1)[配点20点]「CAD」、「CAM」、「CAE」、「NC工作機械」についてそれぞれ説明してください。(どのようなものであり、役割は何であるか等)

(問2)[配点14点]設問1で示した4つの用語を用いてもものづくりの基本的な流れを説明してください。(図やフローチャートを使用してもよい)

(問3)[配点16点]製造データ(Gコード)で知っているコードや指令をできるだけ書いてください。(例 G91:インクリメンタル指示, M05:主軸停止など)

(問4)[配点15点]ものづくりの現場にCAD/CAM/NC工作機械システムを導入することのメリットを挙げてください。

(問5)[配点15点]NC加工を想定し、CAD/CAMでモデリングを行う際、どのようなことに気を付けなければならないか挙げてください。

(問6)[配点20点]NC工作機械である「ワイヤー放電加工機」と「マシニングセンタ」は、それぞれどのようなものを製作する際に用いるべきか説明してください。(どんな材料をどのような形状に加工するのか等)

2-4 授業評価アンケート

テストの他、第6回授業後に授業評価アンケートを実施した。質問項目は以下の通りで

ある。

- ①講義についてお聞きします。講義に参加して全体的に満足していますか。
- ②講義に使用したテキストは理解しやすかったですか。
- ③講義に使用したテキストは必要十分な内容でしたか。
- ④講義で学んだことはものづくりの理解に役立ちますか。
- ⑤本ゼミは楽しかったですか。
- ⑥講師についてお聞きします。講師の説明は理解しやすかったですか。
- ⑦講師は適切な時間管理の下、効果的に講義を運営していましたか。
- ⑧講師は受講者の求めに適切な対応をしていましたか。
- ⑨グループワークについてお聞きします。班の分け方に問題はありませんでしたか。
- ⑩班に課せられた内容の量は適当でしたか。
- ⑪班活動は概ね全員が協力して活動できたと言えますか。
- ⑫加工学や創成設計など、今までの授業内容を本ゼミで生かすことができましたか。
- ⑬(問12で回答したものに対して) そう思った理由を教えてください。

①～⑫番までは、そう思う・ややそう思う・あまりそう思わない・そう思わない、の4択とし、良い評価から4・3・2・1点として数値化した。⑬番のみ自由記述とした。

3. 実施結果

3-1 授業実施の状況

5グループの製作した物は、3グループはピクトグラムなど比較的単純形状を、2グループは比較的複雑な模様を選択した。2グループが対象を浮かせて周りを削り落とす形状を選択した。

授業内でCADの操作方法などを教授することはなかったが、CADが利用できるなら図面作成が容易であり、またDXFフォーマットで形状をファイルへ書き出せるのであればW-EDMへの入力が可能であることから、利

用を推奨した。

MC加工に関しては形状から考案したGコードをスタッフ側で若干修正する程度で大きな問題は生じなかった。

MC加工終了後、W-EDM特有の工具オフセットや公差の考え方、即ちダイモード(空いた穴に寸法を合わせる)・パンチモード(抜いた部品に寸法を合わせる)を説明した。MCで削った形状とW-EDMで切り出した板がぴったりと嵌る事を学生達に求めたが、それ故にEDM用の修正図面において公差を大きく取り、形状の座標位置が分かりにくくなるグループが続出した。結果的にW-EDMに形状を入力する際かなりの時間を要することとなった。幸い大学祭の期間が利用できたので、作業時間には猶予はあった。

結局、4グループでMC・W-EDM双方で作成した部品が嵌った。最終的な学生達の製作物の写真を図1に示す。嵌った場合でも部品間に目視で認識できるほど隙間の生じたのが2グループ(図1の右上と右下)あった。



図1 学生達が設計・製作した製品の外観

3-2 テスト結果による教育効果の測定

2-3で示したテストでは2人が回答不十分であり14人のデータを採用した。平均点は以下の様になった。()内に示した値は昨年度のものである。なおテストの評価基準は昨年度と同一である。

授業開始時：(1)3.9, (2)1.5, (3)0.0, (4)3.0, (5)0.0, (6)0.0, 合計 8.4点 (26.4点)。正答率は(1)19%, (2)11%, (3)0%, (4)20%, (5)0%, (6)0%。

授業終了時：(1)18.9, (2)11.3, (3)15.7, (4)12.7, (5)6.4, (6)11.1, 合計 76.1点 (53.6点)。正答率

は(1)94%, (2)81%, (3)98%, (4)85%, (5)43%, (6)55%となった。

授業前後における正答率の差は、(1)+75%, (2)+70%, (3)+98%, (4)+65%, (5)+43%, (6)+55%となった。全ての設問で上昇し、総合点は値として約9倍(昨年は約2倍)となった。

問1~4において得点率の伸びは高く、教育効果はあったと認められる。問5,6は昨年度も得点率の伸びがやや低かった。この要因としては、CAD/CAM-NCと云うシステム全体を利用するには教授内容も不足しており知識が不十分であること、実際にNC工作機械の操作を学生自ら行っていないため理解が深まらなかった事などが考えられる。

本年度の結果は昨年度より伸びが大きかった。今年度の受講者はコロナ禍により出校が抑制され様々な体験が不足気味であった故に伸び代が大きかった事も要因の一つであったと思われる。

これらの結果から、CADがある程度使える状況を前提としてCAMと連携させ、自身で作成したGコードを使ってNCを稼働させると、より理解度が上がると推測される。当初予定していた、CAD/CAM+NC工作機械の一連の流れを教授した場合と比較すると興味深い結果が得られると考えられる。

3-3 アンケート結果による学生の主観的感想

アンケート結果を集計・換算すると、以下の通りとなった。①3.9, ②3.1, ③3.4, ④3.9, ⑤3.9, ⑥3.8, ⑦3.6, ⑧3.8, ⑨3.9, ⑩3.6, ⑪3.8, ⑫3.2。

②,③,⑫以外は3.5以上を示した。テキストの内容も教授内容も昨年度と変更していないが、②で-0.4、③で-0.3となった。⑫は昨年度と異なり自己評価についてコメントする人はいなかったが、授業内容が難しい・他の科目との連携が感じにくかった、として低めの点を付けたようである。その他の項目においては3.5以上を示し、学生たちにとっては満足度の高い内容であったことが窺える。3.9となった④や⑤に関しては、これまでの本学科の

開講科目で加工らしいことを殆ど行ってこなかった事を鑑みれば当然の結果と言えよう。

⑬で回答されたコメントの一部を示す。コメントからは今回の授業計画の意図はほぼ達成できたことが窺える。

- ・CAD・CAM・CAE等、聞いたことのある単語を正しく理解することができた。また切削加工を実際に目で見る事ができた。
- ・加工学で学んだ切削や削り代等の知識が理解を助けたと思ったため。
- ・加工学で学んでいたエンドミルなどの工具の加工の様子を実際に見ることによってイメージが付き理解が深まった。
- ・エンドミルやワイヤー放電加工といった加工法は加工学で既に学んでいたが、Gコードなど実際の切削に関する知識は初めて知ることができたため。
- ・実際に加工される様子や加工物の仕上がりを見て、文面で習った事を体験そして知ることができた。
- ・図面や計算上の数字だけで考えると実際は金属の変形が工具のたわみで誤差が生まれることを理解した。
- ・加工学で習ったことを、実際にNC工作機械などを使う事により実践できたため良かったです。
- ・加工についての基礎知識とグループワークの経験を生かすことができた。

4. おわりに(今年度の総括と来年度の展望)

昨年度に続き、金属加工経験の乏しい学生へ簡単なCAD/CAMの解説・GコードによるNC加工などを教授し、どの程度の教育効果が得られるのか調査した。実際にものに触れる経験は教育効果に有効であることを改めて確認した。

来年度こそは、当初予定していたCAD/CAM+NC工作機械の一連の流れを教授したい、と考えている。今年度得られた結果と比較し、どの様な内容であれば学生のレベルに応じて効率よくものづくり教育が可能なのか、更に検討を続けたいと考えている。

AI 実装の実習及び AI を導入した研究課題の設定と継続

工学部電子工学科 プレーマチャンドラ チンタカ

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

理工学系の技術開発において AI 導入が徐々に拡大されてきている。そして、卒業生にとって AI の実装の経験が大変重要だと考えており、今回、まず研究室に在籍する電子工学ゼミナールを受ける全ての学生に AI 実装の基礎体験させ、さらに、AI の導入が必要な研究課題を各学生に考えさせ、それを卒業研究及び大学院の研究として取り組んでもらい、その研究成果を国際会議又は国際学術雑誌で公開することを目的とする。そして、2022 年度では、研究室の学生全員に AI を経験させ、さらに AI と関わった多くの研究テーマを設定し、学生に研究を進めてもらった。主な研究テーマについて詳細を以下述べる。

2. 研究計画

2022 年度は、研究室の学生に AI の基礎を指導を行い、主に以下の研究テーマを設定し、研究を進めてもらった。

① AI による擬似プロペラ音声画像と機体に搭載したマイクで取得した音声画像を用いた UAV による被害者探索手法の提案

② 次元削減後の凹凸地面情報を用いたクラスタリングによる地面の同一性判定及び凹凸度合い推定による UAV の緊急着陸

③ 白色矩形領域群の Hough 空間上の角度解析に基づいた横断歩道の自動検出

3. 計画の進行状況

上述の主な研究テーマの背景と進捗を以下、上記の番号順に述べる。

① 近年、自然災害における被害状況の調査や捜索・救助活動に無人航空機 (UAV) が導入され、学術的にも大きな注目を集めている。自然災害発生時、倒壊した家屋や瓦礫の中から被災者を捜索するためには、早期発見と的確な対応が必要である。そして、UAV に搭載したカメラを用いた捜索・救助活動は、救助隊が到達しにくい場所でも容易に被災者を捜索できるため非常に有用である。しかし、それでも瓦礫の下にいる被災者やカメラの死角にいる被災者を捜索することは不可能である。

その対策として、UAV に搭載された音声処理システムを用いた探索方法が提案されている。このシステムは、UAV に搭載されたマイクとスピーカーを利用する。具体的には、スピーカーから被災地に向けて音声メッセージを発信し、マイクから被災地の状況を取得する。すなわち、その音声メッセージを聞いた被災者の応答をマイクで取得し、被災者の存在を確認する方法である。しかし、この方法では、取得した音声に環境音や UAV のプロペラ音などが混在し、被災者の音声を抽出するのが難しいという課題が出てくる。

以上のことから、本論文では、UAV 搭載のマイクで取得した混合音声をスペクトログラム画像に変換し、可視化することで人の音声の有無を判定する方法を提案する。これは、UAV 搭載のマイクで取得した音声をスペ

クトログラム画像に変換し、このスペクトログラム画像とプロペラ音の擬似スペクトログラム画像との差を求め、最終的に UAV 搭載のマイクで取得した音声に人の音声が含まれているかを判定するものである。人の音声が混じっていることを確認することは、そのまま被害者の存在を示唆することになる。本研究では、条件付き GAN (CGAN) を拡張した Pix2Pix に基づくプロペラ音擬似スペクトログラム画像の生成方法を提案する。

さらに、本論文では、生成されたプロペラ音の擬似スペクトログラム画像を、スペクトログラム画像の R, G, B の 3 要素の 2 次元配列として扱うことにした。さらに、RGB の 2 次元配列の各要素に情報を与えるカラーマップを新たに提案する。

本研究では、提案手法の有効性を検討するため、複数の実験を行った。その結果、提案手法は 95.00% の精度を示し、その高い有用性を確認することができた。

② 近年、無人航空機 (UAV : Unmanned Aircraft Vehicle) は、防衛産業や商業産業において重要な役割を果たしており、地図の作成や測量、気象状況の把握や物品運搬などに利用されている。そういった様々な用途に適応した UAV が開発され、その市場は拡大しているが、高度なシステムが搭載されている UAV に対して人間の監視は必要不可欠であり、自律的な飛行までは至っていない。現在開発されている自律型 UAV は GPS を用いて飛行軌道を制御したり、機体の前後左右にセンサを取り付けることで、障害物を避けたり物体の追跡といった柔軟な航行が可能である。しかし、自動着陸の技術に関しては、RGB カメラを用いた画像処理技術によって、既に床に設置された着陸地点を認識し、着陸するといったものが主流である。こういった方法では、着陸地点の設置されていない場所での着陸が困難である。例えば、GPS が切断されてしま

った場合、飛行の継続が困難になるため、着陸地点を探索し、緊急着陸する必要性がある。こういった問題を解決するために UAV が独自に安全な場所を探索し、設置された着陸地点以外の場所に着陸できるシステムの構築も重要である。

UAV が緊急自動着陸を達成するためには地面状況を把握できるセンサが必要不可欠である。また、UAV の緊急着陸の場合、機体への影響が少ない安全な着陸可能領域を地面の凹凸度合い及び溝による分断領域の同一性を推定することが重要である。そこで、UAV から広範囲の深度情報を正確に把握できる深度カメラ (RealSense depth camera D435i ; RealSense) を用いる。

今回平面への着陸ではなく、UAV が着陸できる凹凸地面ということで、平面検出手法である RANSAC 法の導入は困難である。そこで、本研究では、UAV に深度カメラを搭載し、深度カメラで取得した深度情報を機械学習及び統計処理を用いて地面の凹凸度合い及び分断領域の同一性を推定する新たな手法を提案する。

最初に深度カメラより取得される深度情報の平均を計算する。深度情報の平均値に対し主成分分析 (principal component analysis; PCA) を行い、次元を削減する。次に教師なし機械学習手法である DBSCAN を用いて次元削減された 2 次元情報にクラスタリングを行うことで、着陸可能な凹凸地面のみならず、取得深度画像内に溝が存在した場合でも、着陸可能領域の推定を可能とした。

③ 障害者を支援することは世界的に重要な目標となっている。特に、視覚障害者は、視覚情報を得ることが困難であることから、車との衝突や、高所からの落下などの事故に発展することが想定される。現状は盲導犬による歩行支援を行っているが、将来的には視覚障害者数の増加に伴い、盲導犬不足になると考えられる。特に 2020 年から 2030 年に増加

量が大幅に大きくなることから、これからの10年で迅速な対応が必要となるといえる。

上述の盲導犬の普及が難しい理由は3点ある。まず、歩行環境の差異である。欧米では歩道の幅が広く、歩車道の境界が明確である。それと比較して、日本は歩道の幅が狭く、歩車道の境界が不鮮明な場合や自動車の交通量が過多であることなど、視覚障害者にとって歩行の妨げとなる要因が多いことが挙げられる。

次に、盲導犬の育成技術の差異である。産まれた子犬が盲導犬になるかは、各個体の性格に依存する。つまり、繁殖の質を向上させれば、盲導犬育成の効率も高くなる。しかし、優秀な繁殖犬の確保は大きな課題であり、現状の日本では難しい。

横断歩道での視覚障害者の事故は絶えない。この原因として2点挙げられる。まず、音響式信号機は夜の騒音の配慮によって夜から朝にかけて音が出ないことである。次に、エスコートゾーンは劣化によって凹凸が削れることである。このようなことから、現状の外部のデバイスに依存しない自己完結型の横断歩道案内について検討を行った。

横断歩道の検出に関する従来研究を分類すると車載カメラ型と現場固定型、歩行者装着型の3種類が存在する。その内、車載カメラ型と現場固定型のタイプは横断歩道上の歩行者を検出することを最終目標としているため、歩行案内には不向きである。

そこで、歩行者装着型のタイプに注目した。しかし、歩行者装着型のタイプは、条件が限られている点が課題である。例を挙げると、昼間の実験が多く、撮影された横断歩道は歩行者等で隠れていないものが多い。また、リアルタイム性について考慮しているものは少ない。そこで本研究では、上記の課題を解決する歩行者装着型の横断歩道検出手法を提案した。さらに、利用者が簡単に携帯可能な小型軽量ハードウェアを用いた実装を視野に入

れながら、研究を進めた。

提案する手法は横断歩道が白色矩形の連続で構成されているという特徴に注目し、その輪郭をHough変換によって強調し、検出を行うという方法である。

このような特徴を持つことから提案手法は夜間で照明が異なる場合をはじめ、横断歩道の一部が隠れている場合にも上述の従来手法の課題を解決することが可能である。さらに、計算コストを抑えていることから、リアルタイム性も非常に高い。

また、比較検証として、近年注目を浴びている学習済みモデル(VGG16、VGG19、ResNet50、InceptionV3)を用いた転移学習による横断歩道の識別を行った。さらに、歩行者装着型の従来手法との比較を行った。

提案したHough変換による横断歩道検出のAccuracyは98.47%という高い正解率を得た。この結果は転移学習による手法の結果と比較して1.22%から3.97%高い。さらに、転移学習より高速処理が行えることを示した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

2022年度提案してきた上述AIと関わる研究テーマはもちろんの他にも複数のテーマが現在も継続している。

そして2022年度中、研究成果で以下の論文「学術雑誌論文4件、国際会議論文4件」の公開を行った。更に、現在投稿済（現在査読中）の際学術雑誌論文4件がある。

- [1] T. Witchuda, A. Wiranata, S. Maeda, and Chinthaka Premachandra, "Reservoir Computing Model for Human Hand Locomotion Signal Classification," IEEE Access, Vol. 11, pp. 19591-19601, Feb. 2023
- [2] I. Diddeniya, I. Wanniarachchi, H. Gunasinghe, Chinthaka Premachandra, and H. Kawanaka, "Human-Robot

- Communication System for an Isolated Environment," IEEE Access, Vol. 10, pp. 63258 - 63269, June 2022.
- [3] H. Matsumura and Chinthaka Premachandra, "Deep-learning-based Stair Detection Using 3D Point Cloud Data for Preventing Walking Accidents of the Visually Impaired," IEEE Access , Vol. 10, pp. 56249 - 56255, May, 2022.
- [4] S. Thenuwara, Chinthaka Premachandra, and H. Kawanaka, "A multi-agent based enhancement for multimodal biometric system at border control," Array (Elsevier), Vol. 14 (6):100171, July 2022.
- [5] W. Thongking, A. Wiranata, S. Maeda, and Chinthaka Premachandra, "Implementation of Reservoir Computing Algorithm in Stretchable Sensor," Proc. of 33rd 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science for Wearable Device (MHS2022), Nov. 2022.
- [6] R. Nakazawa, Chinthaka Premachandra, "AI Based Biometrics Recognition with a Hyperspectral Image Sensor," 2022 2nd International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence (RAAI), Dec. 2022.
- [7] T. Yoshikawa, Chinthaka Premachandra, "Pedestrian Crossing Detection by VGG16 for Visually-impaired Walking Assistance System," 2022 2nd International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence (RAAI), Dec. 2022.
- [8] D. D. Wijesundara, L. Gunawardena, Chinthaka Premachandra, "Human Recognition from High-altitude UAV Camera Images by AI based Body Region Detection," 2022 Joint 12th International

Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 23rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS), Nov. 2022.

IoT と AI が溶け込んだ次世代教育環境の研究

工学部情報工学科 新熊 亮一

共同研究者

デザイン工学部 デザイン工学科 橋田 規子
システム理工学部 機械制御システム学科 伊東 敏夫
システム理工学部 生命科学科 中村 奈緒子
建築学部 建築学科 蟹澤 宏剛

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

教育環境を総括的・継続的に把握し環境にフィードバックする、これを本学は今後も継続させる必要がある。アンケートには回答コストと主観バイアスの問題があるが、防犯カメラでのトラッキングは個々の学生の監視やプライバシーの問題につながる。そこで、IoT(モノのインターネット)とAIを教育環境に溶け込ませ、教室周辺、自習スペース、図書館といった一定範囲の空間ごとの特徴から、教育環境の質指標(=快適性、生産性、活気)を推定可能なシステムを実装する。実験により、質が向上する空間特徴を抽出し、実際の教育環境にフィードバックするフレームワークも構築する。

これまで、教育環境(講義、自習、交流)の品質は、アンケートによる主観評価や成績による客観評価の結果で事後に行われてきた。この結果が実際の環境にフィードバックされるのは半年・1年以上遅れになってしまう。本研究により、IoTとAIが溶け込んだ次世代教育環境が確立されれば、AIが深層学習により教育環境の質の変化を即座に検出したり予測したりできる。本研究により抽出された質向上のための特徴を教員だけでなく職員にも共有し、本学の教職員一丸となって教育環境

の質向上に努める。

2. 研究計画

各種教育環境の空間を網羅的にカバーできるよう多数のセンサ(3次元のLIDAR: Light Detection and Ranging)を配置し、数百~千人規模で学生の学習や交流の状態のセンサデータを取得する。AIによる深層学習を行い、取得データから時間(時期、時間帯、曜日)・空間(密度、移動)特徴をとらえる。また、イノベーションセンター一室に次世代教育環境をプロトタイプ実装する。実験により、教育環境における質指標(=快適性、生産性、活気など)を向上させる教育環境の空間特徴を抽出する。具体的には、人の密度と流れ、机、椅子、観葉植物の配置や利用状況といった特徴が質指標に作用するという仮説を立てる。実験結果を教育環境にフィードバックしPDCAを繰り返す。

3. 計画の進行状況

3.1 3次元センサによる生産性の推定 [1]

LIDARは空間の3次元情報を5~10ミリ秒間隔のフレームごとに取得できる3次元センサである。図1のように、複数のLIDARを教育環境に設置し、生産性を推定するシステムを

構築した。図 2 に、LIDAR で取得した学習中の人の 3 次元イメージの例を示す。図 3 に、LIDAR により生産性を推定するシステムの構成を示す。図 4 に 3 次元イメージの時間変化を示す。右図は左図の 10 ミリ秒後のフレームである。フレーム間の差分から変化を抽出し、変化に基づいて生産性を推定する。



図 1: 教育環境への LIDAR の設置



図 2: LIDAR で取得した学習中の人の 3 次元イメージ

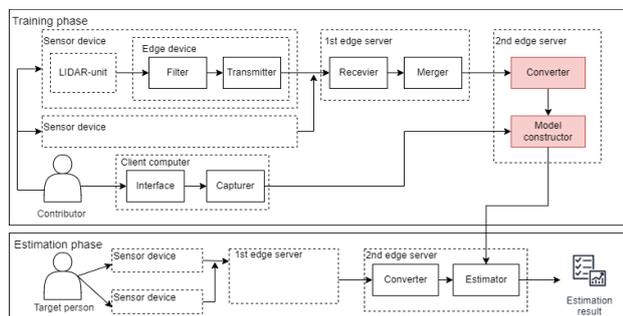


図 3: LIDAR により生産性を推定するシステムの構成



図 4: 3 次元イメージの時間変化 (右図は左図の 10 ミリ秒後のフレーム)

本システムの有効性を示すための実験を実施した。作業を行う PC のキーボードに対し、図 5 のとおり 2 台の LIDAR を設置した。4 名の実験協力者に対し、実験を行なった。図 6 に、実験協力者 A の結果を示す。横軸は LIDAR フレーム間の差分を示す ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) である。値が大きいほど、フレーム間の相関が高い、つまり、差分が小さい。縦軸はタイピングされた文字の数である。ここでは、文字数を生産性の指標として用いた。高さ方向 (z 方向) を用いない x-y 平面の結果が、ZNCC と文字数の正の相関関係を最も強く示していた。そこで、図 7 に残り 3 名の実験協力者 (実験協力者 B、C、D) の x-y 平面での結果を示す。B、D では A と同様、正の相関関係を示した。しかし、C は負の相関関係を示した。タイピングの熟練度などの個人差が影響した可能性があり、さらなる検討が必要である。

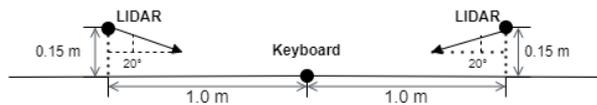


図 5: 実験での 2 台の LIDAR の設置

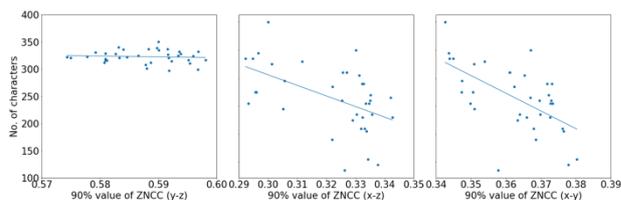


図 6: 実験協力者 A の結果

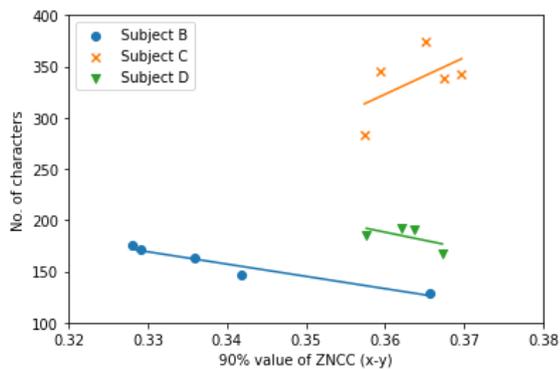


図 7: 実験協力者 B、C、D の結果

3.2 3次元センサによる学習状態の推定 [2]

教育環境に設置した LIDAR により、学習状態を推定するシステムを構築した。図 8 にシステム構成を示す。図 2 の LIDAR の未加工のデータでは学習状態の特徴を捉えづらい。そこで、図 9 のように、二次特徴を 3 次元イメージに付与する。二次特徴は、例えば、点群から面を推定することで得られる法線ベクトルなどである。

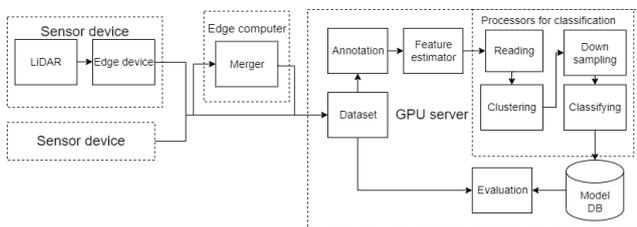


図 8: LIDAR により学習状態を推定するシステムの構成

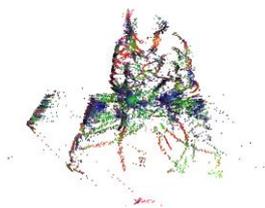


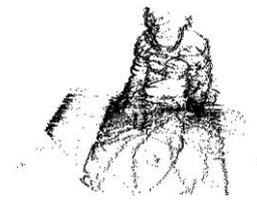
図 9: 二次特徴を付与した 3 次元イメージ

本システムの有効性を示すため、実験を行った。実験では、図 5 のとおり、2 台の LIDAR を設置し、1 名の実験協力者から図 10 に示されるタイピング、マウス操作、作業なし、パッド操作の 4 つの状態での 3 次元データを取

得し、深層 AI のモデルの学習を行なった。同じく、図 5 のとおり LIDAR を設置し、2 人目の実験協力者から 4 つの状態での 3 次元データを取得した。表 1 に推定精度の結果を示す。LIDAR の点群データをクラスタリングする 3 手法、二次特徴を付与する 4 手法を比較した。表 1 のとおり、手法の組み合わせによっては、0.95 以上の高い精度が得られた。クラスタリングを行わないと、精度がより高い傾向が見られた。特徴としては FPFH (Fast Point Feature Histograms) が有効であった。また、右側の LIDAR のデータを用いると精度が劣化する傾向が見られた。これはマウス操作が右側で行われたため、右側の LIDAR とマウスの距離が近すぎてデータが取得できず、マウス操作で誤検知が多数生じたためであった。LIDAR の設置位置の見直しが必要である。



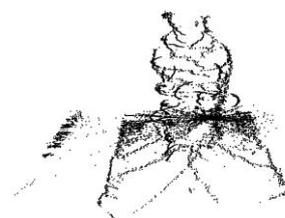
(a) タイピング



(b) マウス操作



(c) 操作なし



(d) パッド操作

図 10: 4 つの作業状態

表 1: 実験結果

(a) 左側の LIDAR のみ

左LIDAR	法線	TDF	TPV	FPFH
クラスタリングなし	0.97	0.97	0.96	0.97
DBSCAN	0.95	0.96	0.97	0.97
k-means	0.90	0.93	0.93	0.91

(b) 右側の LIDAR のみ

右LIDAR	法線	TDF	TPV	FPFH
クラスタリングなし	0.95	0.96	0.96	0.92
DBSCAN	0.97	0.97	0.92	0.86
k-means	0.93	0.94	0.95	0.80

(c) 両側の LIDAR

両方	法線	TDF	TPV	FPFH
クラスタリングなし	0.87	0.94	0.94	0.94
DBSCAN	0.88	0.93	0.96	0.95
k-means	0.86	0.88	0.89	0.90

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

2022年度は電子情報通信学会での発表1件 [2]、IEEE の国際会議での発表1件（査読あり）を行なった。

今後の計画は以下のとおりである。

研究項目 1. 3次元データからの習得度推定: 2022年度開発した習得度を推定する深層 AI を改良し、3次元データから学習中の状態を自動分類し操作や体の傾きなどを特徴としてとらえる精度を向上する。講義や演習など実際の教育環境に適用し、習得度の推定精度を評価し改良を繰り返す。実用レベルを目指す。

研究項目 2. 習得度への寄与ファクタの特定: 操作や体の傾きなど深層 AI がとらえた特徴に対して習得度の寄与度を推定し、寄与度の高い特徴を特定する。データが寄与度の高いファクタを分解能高く捉えられるよう、

センサの配置、深層 AI モデルの再設計を行う。

研究項目 3. 環境に溶け込むデザイン: 2022年度に試作したセンサスタンドを実際の教育環境に導入し、アンケートによる主観評価と人の行動データに基づく客観評価から、デザインの有効性の評価を行い、改良のための試作を繰り返す。実際の教育環境への導入を行う。

以下に今後のスケジュールを示す。

1. 実際の教育環境での実験と評価
2. 方式の改良と再実験による評価
3. 国際学会での成果発表、連携企業との合同プレスリリース発信により、プレゼンス向上につなげる
4. 実際の教育環境への導入、学生や、教職員、連携先の民間企業からフィードバックを得て PDCA につなげる

[1] Koki Kizawa, Ryoichi Shinkuma, and Gabriele Trovato, "Estimation of physical activities of people in offices from time-series point-cloud data" IEEE CCNC 2023, Jan. 2023.

[2] Jumpei Watanabe, Ryoichi Shinkuma, and Gabriele Trovato, "Classification of human posture from 3D point-cloud data in office environment," IEICE Technical Report, SeMI2022-110, Feb. 2023.

リカレント教育の提供に向けたグローバルサイエンス カフェの実施～知る喜び、学ぶ楽しさを掘り起こす～

工学部先進国際課程 山本 文子

共同研究者

工学部先進国際課程 (IGP) イザベラ ジェズニチカ、パオロ メレ、ディタ サリ

工学部機械工学科 石井 康之

大学院地球環境システム 平田 貞代

お茶の水女子大学サイエンス&エデュケーションセンター 大崎 章弘

1. はじめに

2019年度から2021年度まで、グローバルな視点をもった研究紹介や異分野間交流事業として学内及び学外向けに、「グローバルサイエンス&エンジニアリングカフェ（以下、GSカフェ）や海外の高校生に向けたグローバルオープンセミナー」をを実施してきた。2022年度の活動はこれらのノウハウを生かしてさらに発展させるものである。

本活動は、「参加者が本学の学部及び大学院教育の何に興味を持ち、何を知りたいと思ひ、何を学びたいかを掘り起こすこと」が目的である。そして、ここで得た知見を今後のリカレント教育のプログラム提案につなげたい。現在、高等教育のあり方が、従来の若年層に限らず、一度就業した人々が社会と大学で繰り返し学ぶ（リカレント）形へと変化していく中、学内、学外（海外を含む）の学生、教職員、一般市民に本学の研究の幅広さや将来性を知ってもらふことは非常に重要だと考える。特にSDGsに掲げられた地球規模の問題解決に向けて、大学院生や教員が自分の研究やその基礎となる学問分野の魅力を日本語および英語で参加者の興味やレベルに合わせて発信し、講師と参加者、参加者同士が双方向コミュニケーションをとることを目指す。

本活動では（1）実施する学生の企画力、コミュニケーション能力の向上、（2）教員のコミュニケーション能力、指導力の向上、（3）参加者が最先端科学技術を知ることによる学習意欲の向上（特に学部1、2年生）（4）普段研究内容に踏み込む機会の少ない職員への理工学系の大学で働いているという意識付け、（5）学内外の教員の異分野交流が始まるきっかけ、が期待される。

2. 研究計画

GSカフェは、「科学コミュニケーション学」の実習として、大宮および豊洲のオープンキャンパス（または大宮祭、芝浦祭）での実施を予定している。オープンキャンパスでは、一部屋を借りてブースを設け、国際理工学専攻、SIT総研の外国人教員およびその研究室の学生の参加も交えて実施したい。これとは別に（あるいは連携して）、必ずしも科学技術を専門としない本学内の事務職員（契約やパート、外部委託の職員も含む）を対象にGSカフェを行いたい。

この活動は、3年間の継続を予定しており、本年度は初回で会場は学内中心となるが、2年目以降は、地域のコミュニティーセンターや駅近くなど、学外の一般市民がより参加しや

すい場所で展開していきたい。

この GSE カフェを通して、学内の学生や教員が広い視野と興味を持てる様な環境を整える。学部生から大学院生に加え教員から職員までを対象とし、その専門にかかわらず最先端の科学技術や長年継承されてきた技術を専門家(教員や院生)が直接、わかりやすく生き生きと伝えることで、幅広い学習のモチベーションを得る機会を提供する。また、本学の入学希望者にも研究の魅力を伝える。今回、レクチャーやセミナーと言った形式ではなく、サイエンスカフェといった双方向コミュニケーションの手法を用いることでより理解度や満足度の高い事業を目指す。

3. 計画の進行状況

本年度は、「科学コミュニケーション学」では Zoom を用いたオンラインと大宮祭での対面形式での GS カフェを実施した。これに加え、豊洲キャンパスの SIT Global Caffe empowered by Segafredo にて大学職員や地域住民など科学や技術を専門としない成人を対象としたサイエンスカフェを実施した。

3.1 GS カフェ (4/30, 5/22)

(1)場所:

(4/30) Zoom ブレイクルーム機能使用
各自、大学または自宅からアクセス
(5/22) 大宮祭

(2)実施者:

山本、大崎、大学院共通科目科学コミュニケーション学履修生 33 名(中国の留学生 3 名含む)

(3)対象者:

(4/30) 受講生 33 名、受講生以外 20 名(履修生の家族、友人、知人、学内の院生他、お客様アンケート回答 16 名)
(5/22) 受講生 33 名、受講生以外 40 名前後(地域住民、受験志望の高校生とその保護者、学内の学生、院生、留学生)

(4) プログラム:

(4/30, 5/22 共通)

A 班: 斜め上の街づくり?

クルマの位置を知るにはどうすればいい? / え? 電車賃が安くなるんですか! ? / 捨てたプラごみはどこへ行くの?

B 班: 10 年後の技術はどうなるの?

電気の流れをコントロールする物凄く薄いスイッチとは / 家からライブに参加できる? / ちっちゃいレンズの作り方

C 班: 作る?送る?受け取る?

電気を飛ばして充電? / 電気はどうやって発電されるの? パワー=電気?! / どうやって GPS は電波を受信しているの?

D 班: 世の中センサー?

ゴミの分別、正しくできていますか? / 再生する服の手助け?

E 班: 「口技」とはなに? (中国語対応可)

貴方には見えますか? / 今オンライン授業の反響は? / 依存症対策システムの発展歴史は?

F 班: センシン、アンシン...?

害者でも災害の時逃げられるの? / あなたを運ぶ未来のクルマとは? / 金属よりも軽くて強い材料?

後半 (14:50-15:50)

G 班: SF が現実に!?

なぜ画像認識技術を使わないのか / どうやってルーターを選ぶ? / 学び続ける人工知能~人間の様な AI に必要なこととは~

H 班: 未来の生活に役立つ技術とは?

これからのものづくり技術とは? / ロボットが家に来る未来とは? / 新しい機械の心臓?

I 班: より快適な生活環境とは?

タクシーに乗ったことはありますか? / 地域の野良猫がそんなに問題になっているか? / 広い部屋ほどなまけやすい?

J 班: ストレスフリーな生活を実現?

冷蔵庫がしゃべる? / 植物は必要ない? / コロナウイルスの新検査法とは?

K班：お財布と地球にやさしい電気の「」

アオコからガソリン？/水素で電気をつくる
ってどういうこと？/勉強がゲームにな
る！？

工夫したところ：班内にファシリテータを置き場
を盛り上げ、発表者を盛り立てる役割を果た
すようにした。また、Scombを通じて全学的にも
広報した。

苦労したところ：オンラインでは顔が見えないた
め、話がどの程度理解されているかを判断で
きない。そのため質問を引き出しにくかった。
反対に、対面では、相手の意図を汲み取るこ
とができ、十分に質問に答えることができた。
住民の方でも科学技術に大変詳しい方が、鋭
い質問をくださった。

実施の様子：

参加者には、外国人（留学生の母国の家族や
友人）や発表者の家族や知人、本学学生など
多様な人が集うサイエンスカフェとなった。

外部参加者の感想：

- 引き込まれる説明だった。既存の概念を
超えたアイデアがあると、業界が活発に
なりそうだったと思った。
- 体内で溶ける金属。抜糸不要の縫合技術
の進化を思い浮かべました。これは是非
実現して頂きたい研究です。

3.2 サイエンスカフェ@豊洲キャンパス

場所：SIT Global Caffè empowered by
Segafredo

実施者：教員4名山本、石井、メレ、イザベ
ラ、院生学部生アシスタント6名（山本研）、
外部講師1名

対象者：事務系職員（15名）、地域住民（3名）

内容：参加者は4,5人ずつに分かれて以下の
4トピックのうちの2トピックに参加した。

1. おいしいコーヒーの科学

Paolo Mele 芝浦工業大学教授



図1 大宮祭でのサイエンスカフェの実
施風景、多くの住民や留学生が来訪

2. 色の不思議

Izabela Rzeznicka 芝浦工業大学教授

3. 天然ダイヤモンドはどっち？

山本文子 芝浦工業大学教授

4. 週末は宇宙旅行へ 根本雅人

(株)ダイモン エンジニアリングリーダー

工夫したところ：一般の人が対象ということ
なるべくカジュアルにして、サイエンスカ
フェへの敷居を下げてもらいたいということか
ら、学内の教室ではなく新棟一階のカフェを
貸切って会場として利用した。また、トーク
は班ごとですが、全体のプログラムを知って
もらうために始めと最後に全員対象のセッシ
ョンを設けた。図2参照

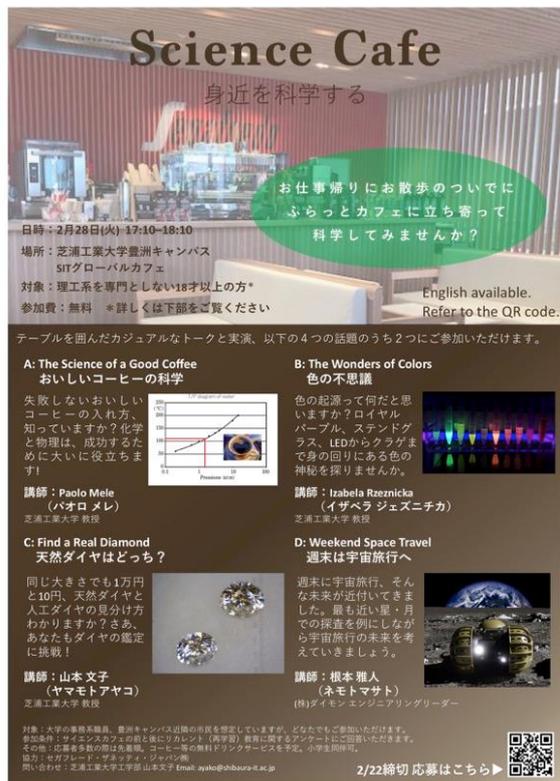


図2 大学職員、地域住民を対象としたサイエンスカフェの広報ポスター



図3 一般向けサイエンスカフェの様子

実施の様子：図3参照

今回、実際のカフェで行ったということもあって、終始和やかな雰囲気が進められたことが今までのサイエンスカフェと違ってよかったと感じた。

参加者の感想：

事後アンケートでは 42%が非常に満足、50%が満足と答え、また、100%がまた同様のプログラムに参加したいと回答した。例を示す。

「工科系大学に勤務しているのでサイエンスに触れる機会が今後もあるといいなと思いました。」

リカレントニーズ調査：

回答した14名のうち79%の人がリカレント教育を聞いたことがあり、そのうち、受けてみたいと思っている人は86%に達した。その理由(複数可)は教養を身に付けたい(75%)、仕事に役立てたい(26%)などであった。一方で、

学び直しに障害があるとすればと尋ねたところ「自由になる時間がない」(61%)「費用の面で心配」(61%)との回答があった。実際、どのような形学び直したいかについては、多くの人(70%以上)は、単発の講座を希望した一方、修士課程への入学や科目聴講生を希望する人(21%)もいて、リカレント教育へのニーズの高さを実感した。86%の人はこのようなサイエンスカフェがきっかけになると回答した。

4. まとめと今後の計画

2022年度は、コロナ禍も落ち着きを見せ、オンラインに加え、対面でのサイエンスカフェを複数回実施できたことは、実施者(学生や講師)としても、また、参加者(学生、職員、地域住民)にとっても大きな収穫となった。本事業の経験を生かし、リカレント教育を目指して、一般市民に向けたサイエンスカフェを継続していきたい

gPBL のアセスメントとイノベーション創出

先進国際課程 吉久保 肇子

共同研究者

環境システム学科 中村 仁
電気工学科 藤田 吾郎
電子情報システム学科 三好 匠
機械機能工学科 長澤 純人
先進国際課程 橘 雅彦
マレーシアオフィス 石崎 浩之
国際部 猪田 政彦
国際部 古屋 雄高
国際部 仙波 亮典
国際部 影山 礼子
国際部 宮坂 勇也

1. 序論

本学では国際社会の多様性を理解し異なる文化的背景をもつ人々と協調して仕事ができる能力として、「コミュニケーション能力」、「問題発見解決能力」、「メタナショナル能力」、「技術経営能力」の育成を目的に、数多くのgPBLを開発・実施している。本プロジェクトで課題とする専門分野を問わないgPBL用の評価ツールの開発と分析、及びgPBLを実施するためのノウハウの発信は、国内外の大学間との共同教育連携事業や本学の教育モデルの共有化へのステップとなる。

2. 研究計画

以下の5項目を研究目標として設定した。

(1) 定量的分析

gPBL担当教員に協力を仰ぎ、プログラム参加者を対象に異文化コンピテンシー調査票MGUDS-Sを用いたgPBLの効果測定調査を実施する(定量的分析)。調査票への回答については、国際部と連携して、各プログラム参加学生にメールで依頼する。

(2) 定性的分析

gPBL担当教員および実務部分を担当する国際部職員にヒアリング調査を行うことで、gPBLの体系化と実施ノウハウの構築、プログラムの課題の抽出、改善案、および質保証等、PDCAに繋げる。

(3) 国内外のジャーナルや学会で成果を発表。

(4) 学内共有

研究成果をSGU推進本部会議や国際交流センター会議等、学内各種会議で共有する。

(5) 学外共有

国際部SGU推進課主催の「グローバルPBLプログラム研究会」等で、事例紹介を行うことで、効果的にgPBLを運営するためのノウハウを共有する。

3. 計画の進行状況

2022年度は、徐々にではあるがコロナとの共存が進み、本研究もその流れの中で、オンラインと対面プログラムの両方で、観察および効果測定を行うことで、下記成果とgPBLの潜在的な課題を抽出することができた。

(1) How to design successful gPBLs

共同研究者が担当するgPBLの観察、及び

gPBL 担当教員と実務担当の国際部職員を対象に、ヒアリングを実施し、下記リストを作成した。

Table 1: How to design successful gPBLs

i. Finding a partner university: If your university has an alumnus who is working at an overseas university, this can often be the easiest way to start the process of partnering with them to run a gPBL.
ii. Making agreements and partnerships if there is no already-existing Memorandum of Understanding (MOU) between your institution and the partner university.
iii. Designing the content and preparing for the launch of the gPBL with the partner university.
iv. Recruitment of participants for the program.
v. Implementation of the gPBL.
vi. Conducting a follow-up survey with participants, faculty members, and staff.
vii. Program Evaluation.
viii. Publicising the program and its results, for example by submitting papers and giving presentations at international conferences.
ix. Sharing your gPBL know-how within your university, in order to allow for the expansion of future programs.
x. Ongoing implementation of the gPBL, such as making proposals for changes to subsequent programs, scheduling, and having continued communication with the partner university.

(2) Student Satisfaction Questionnaire

本学では、2019 年度より本学で実施する全ての海外プログラムの効果測定ツールとして、①コロンビア大学 Prof. Miville が開発した

異文化コンピテンシー調査票、②IR コンソーシアム版 CEFR Can-Do list、及び③本学で作成した Student satisfaction questionnaire の3点で構成される独自のアセスメントツールを用いている。吉久保が 2022 年度に参加した対面・オンライン gPBL 内で、プログラムに参加した海外協定校の学生より student satisfaction questionnaire の英語設問文が解りづらいとの指摘があったため、補足説明を追加した更新版を作成した（下記参照）。

Table 2:

SIT' s Student Satisfaction Questionnaire

i. Are you satisfied with the study abroad program, in terms of the support you have received from university faculty and staff?
ii. Are you satisfied with the study abroad program, in terms of the opportunities for collaboration delivered by the course format, and the other students' willingness to collaborate?
iii. Are you satisfied with the study abroad program, in terms of the facilities offered for online learning?
iv. Are you satisfied with the study abroad program, in terms of the course length and how well the length of the course matched the amount of content covered?
v. Are you satisfied with the study abroad program as a whole?
vi. Please describe in your own words your opinions and impressions regarding the study abroad program you have taken part in. In particular, please feel free to mention any thoughts or feelings you had about the program which are not covered in the questions above.

(3) Systematic Issues with Online gPBLs

本研究プロジェクトに先立ち、2021 年度に

本学で実施したオンライン短期語学研修及び、オンライン gPBL の効果測定を行った結果、オンライン短期語学研修についてはグローバル・コンピテンシー (MGUDS) のスコアが、事前と事後で大きく伸びたのに対し、グローバル PBL は統計的に有意な効果を認められない結果が得られた(科研 20K02947)。CERF-Can Do List や Student Satisfaction questionnaire においても、オンライン gPBL よりもオンライン短期語学研修の方が良い結果が出ており、オンライン gPBL の文脈における潜在的な課題を示唆している (Figure 1)。

この結果を踏まえて、機械機能工学科の長澤純人教授が担当する「学部・学科横断型オンラインロボティクスワークショップ」内で、長澤教授の協力のもと、①ワークショップの観察、②課題抽出、③改善案の検証、④改善案追加後のプログラム効果測定を行った。

gPBL には、工学知識、英語コミュニケーション、異文化への適応と幅広い学習目標が含まれるため、学生は複数の課題を抱えてプログラムに参加することになる。特に、ロボティクスワークショップのような、学部・学部横断型のプログラムを実施する場合、参加者一人ひとりの学修目標を確実に達成するためにより綿密なシステム計画が必要である。観察の結果、gPBL における体系的問題は以下の3種類に分類することが出来ることが分かった。

- i. 参加者の教科知識の不足に起因するもの。
- ii. 参加者の英語力の不足や異文化環境での学習への適応の難しさなど、「文化的」な要因によるもの。
- iii. オンライン gPBL におけるグループプロジェクトの性質に起因するもの。

4. 今後の計画及び学会、論文投稿・発表状況【今後の研究計画】

本研究によって明らかとなった課題は、オンライン gPBL に共通する潜在的な課題であることを示唆している。上記課題 i と ii については、既に改善案の具体化とプログラム効果測定を行い、国際学会やジャーナルで発表を行っている。

2023 年度芝浦工業大学教育改革研究活動助成に、研究課題「gPBL の体系化と持続的イノベーションの創出」が採択されており、iii 「グループプロジェクトの性質に起因する課題」の解決を中心に、効果的なオンライン gPBL を設計するためのヒントを抽出したい。

【学会、論文等投稿・発表状況】

(1) Journals

- i. Journal of Japanese Society for

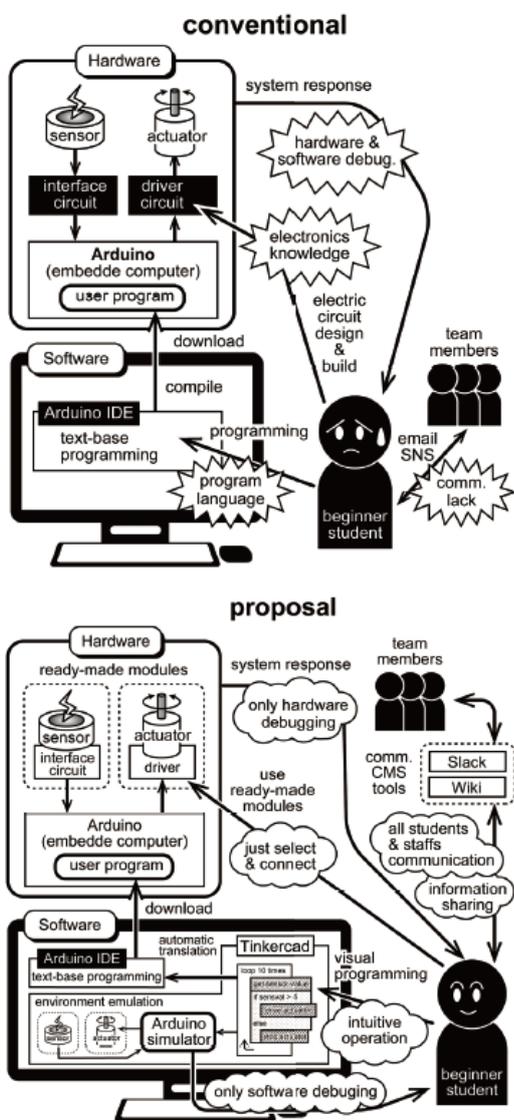


Figure 1: Common ‘Obstacles’ in ‘Online Robotics Workshop and ‘Innovations’ applied to the workshop

©Created by Sumito Nagasawa 2022

Engineering Education: Special Issue 71-1
(2023年1月)

Title: Interdisciplinary Online Robotics
Workshop: Pedagogical Issues and
Innovations

Authors: Hatsuko Yoshikubo, Sumito
Nagasawa, Nabilah Ibrahim, Hiroyuki
Ishizaki, Masahiko Tachibana

ii. Journal of Japanese Society for
Engineering Education: Special Issue 71-1
(2023年1月)

Title: Assessment of Online Study Abroad
Programs from the Students' Perspectives
Authors: Hatsuko Yoshikubo, Aihara
Soichiro, Masahiro Inoue, Atsuko Yamazaki,
Ned Loader, Hiroyuki Ishizaki, Masahiko
Tachibana

(2) Conference Papers

iii. The 2023 American Society for
Engineering Education (ASEE) Annual
Conference & Exposition (2023年6月)

Title: Creating Innovation for
Interdisciplinary Robotics Workshops:
Solving Systematic Issues in the Online
Project-Based Learnings in Engineering
Education

Authors: Hatsuko Yoshikubo, Sumito
Nagasawa, Hiroyuki Ishizaki

iv. The 2023 American Society for
Engineering Education (ASEE) Annual
Conference & Exposition (2023年6月)

Title: Fostering Global Engineers through
the Study of the Humanities: Assessment of
the Course 'Science and Religion in Japan'
from a Racial Equity Perspective

Authors: Hatsuko Yoshikubo, Gabriele
Trovato, Hiroyuki Ishizaki

v. The 2023 American Society for
Engineering Education (ASEE) Annual
Conference & Exposition (2023年6月)

Title: Affordable robotics toolkits for
equitable and interdisciplinary education,
transformable to searching nodes for
disaster onsite investigations

Authors: Hiroyuki Ishizaki, Sumito
Nagasawa, Hatsuko Yoshikubo, Hitoshi
Nakamura

(3) Conference Proceedings

vi. The Asia-Pacific Association for
International Education (APAIE)
Conference and Exhibition 2023 (2023年3
月)

Title: Creating Innovation: Designing
Formats for Sustainable Global
Project-Based Learning Programs
Authors: Hatsuko Yoshikubo

vii. AY 2022 Annual Joint Conference of the
Kansai and Central Japan Chapters, Japan
Association for Global Competence
Education (2023年2月)

Title: Issues with Online Project-Based
Learning Programs: A Student Perspective
Authors: Hatsuko Yoshikubo, Soichiro
Aihara, Masahiro Inoue, Tachibana Masahiko,
Atsuko Yamazaki, Ned Loader, Hiroyuki
Ishizaki

viii. World Education Research Association
(WERA) 2022 Focal Meeting (2022年4月)

Title: Virtual Asia Exploration - Online
interdisciplinary program for equitable
educational opportunities throughout Asia
Authors: Hiroyuki Ishizaki, Hatsuko
Yoshikubo, Takumi Miyoshi, Maria
Anityasari, Peng Yong Hoo, Mohammad Tareq

Improvement of Research-based Learning Style by Integrating IoT and Emotion Sensing Technology

Innovative Global Program Tipporn LAOHAKANGVALVIT

1. Paper introduction

The field of education is constantly evolving to meet the changing needs of students and the demands of the workforce. Research-based learning (RBL) has emerged as a popular teaching approach that emphasizes the use of research as a means of learning. RBL encourages students to actively engage with course content, develop critical thinking skills, and apply their knowledge to real-world problems. In addition, teachers and students in the class can actively communicate, collaborate, and discuss domain-specific knowledge.

Despite the potential benefits of RBL, the learning environment has been forced to change due to the COVID-19 pandemic. There are certain differences between face-to-face and online RBL styles that must be clarified to provide an effective learning experience to students. This research integrates IoT and emotion sensing technology as the RBL workshop content, which requires the students to actively participate in activities rather than passively attend the lectures alone. Thus, it is necessary to evaluate and improve this teaching approach to ensure its effectiveness. The evaluation results

will be used to improve RBL teaching/learning style, which contributes to a better education in the Innovative Global Program (IGP).

2. Research program

We targeted students who have no or little experience in conducting research. Thus, we recruited those who belong to IGP, which is an undergraduate RBL program of the Shibaura Institute of Technology.

We held RBL workshops to perform research activities and collect RBL evaluation results from students. The workshop is divided into the following steps:

- (1) Faculty gives lectures on basic knowledge in IoT and emotion sensing technology to get students ready with the same background knowledge (Figure 1).
- (2) Students implement individual and group projects aiming at building both technical and soft skills.
- (3) Students present and discuss their projects. Then, they evaluate the overall experience by the questionnaire (Table 1).

Week	Topic
Part 1: IoT	
1	Introduction to IoT and embedded system
2	Circuit and sensor basics
3	LED + Sensor (Part 1)
4	LED + Sensor (Part 2)
5	CG + Sensor + Programming with Processing (Part 1)
6	CG + Sensor + Programming with Processing (Part 2)
Part 2: Emotion Sensing Technology	
7	Introduction to emotion estimation technology
8	Biological sensor basics
9	Pulse sensor tutorial
10	Brainwave sensor tutorial
11	Biological sensor with circuit
12	Design of experiment, Data Visualization and Analysis

Figure 1: Lecture outline

Table 1: List of questionnaire items

No.	Question
Q1	Rate overall satisfaction of this course when you joined {online/face-to-face} (5-point scale: 5=Excellent, 1=Very poor)
Q2	Which style do you prefer for this course? (2 Choices between online and face-to-face)
Q3	Please give ratings on the following points when you joined the classes {online/face-to-face}. If you absolutely have no experience or no idea, please select "I don't know." (5-point scale: 5=Strongly agree, 1=Strongly disagree, 0=Do not know)
Q3.1	I understand the lectures clearly.
Q3.2	I understand the demonstration or explanation that involves IoT components, brainwave and pulse sensors, software usage, etc.
Q3.3	I can ask questions or discuss them easily with the lecturer during class.
Q3.4	I can ask questions or discuss them easily with classmates during class.
Q3.5	I can collaborate easily and smoothly with classmates during group projects.
Q3.6	I can work easily and smoothly with individual projects.
Q3.7	I can make group presentations easily and smoothly.
Q3.8	I can make individual

	presentations easily and smoothly.
Q3.9	I can make group project demonstrations easily and smoothly.
Q3.10	I can make individual project demonstrations easily and smoothly.
Q3.11	As a result of taking this course, I am confident that I can adapt the knowledge and experience from this course to my future applications.

3. Status of progress

We recruited a total of 6 students (5 males, 1 female), who are in the first year of IGP, to participate in the workshops.

During the workshops, the students designed and developed their projects based on the basic knowledge obtained from the lectures. There was no restriction for the project theme, however, they were encouraged to utilize the knowledge as much as possible.

The students have developed IoT devices for their projects such as automatic dispenser using ultrasonic sensor, a low-cost pupil computer interface, traffic light simulator, door lock system, and dog snack shooter (Figure 2).



Figure 2: IoT device development projects

In addition, they employed emotion sensing technology to perform experiments for their projects such as:

- Study of emotion synchronization method for robot facial expression
- The effect of different genres of music on physical exercise and driving simulation
- pNN50 estimation from facial videos using a spatiotemporal representation with convolutional neural networks
- The effect of sleeping position on pulse data

After completing the projects, the students evaluated the experience on participating in the workshops. The evaluation results are described as follows:

- There is no large difference in the overall satisfaction between online and face-to-face RBL styles for both IoT device development and emotion sensing technology workshops. However, the face-to-face style shows larger standard deviations. (Figure 3)
- For the preference in learning, the number of students who selected online and face-to-face styles is equal (Figure 4). Though the result is inconclusive, we need to further consider the tendency of students who prefer online learning style due to the effect of long-term learning from home due to the COVID-19 pandemic.
- For the result of experience ratings for both workshops, the online style shows higher ratings while the face-to-face style shows lower ratings with larger standard deviations for all question

items. The results indicate that the face-to-face style may have large individual differences, and thus, further investigation is necessary.

Based on these questionnaire results, we found that the students tend to prefer and had a better experience with online learning. Though it is known that face-to-face communication gives better outcomes for the learning style that require a lot of interaction like RBL, the recent trend may have changed, and it is necessary to consider what kind of activities do not require the real presence of people. The time that could be reduced may be able to contribute to other productivity.

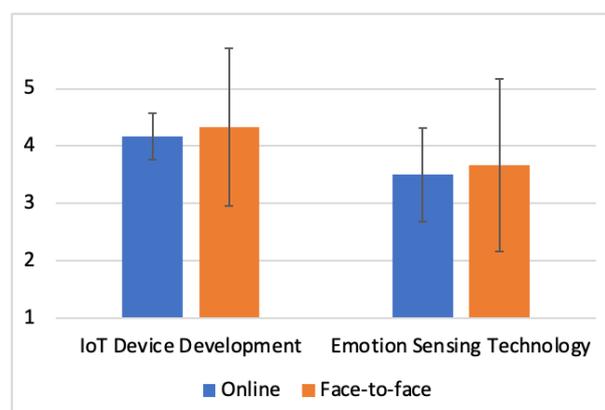


Figure 3: Overall satisfaction rating (Q1)

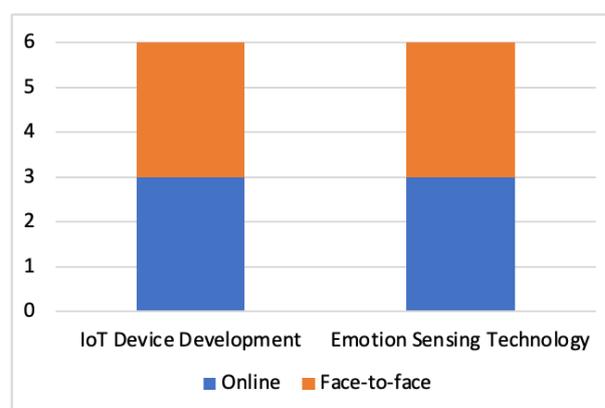


Figure 4: Preference in learning styles (Q2)

4. Future program, paper submission and results briefing

In this research, we aim to improve the RBL style by considering online and face-to-face communication and collaboration. We conducted workshops on project-based IoT device development and emotion sensing technology with IGP students and evaluated the experience with the workshops.

We found that the students prefer the online RBL style. However, there is a possibility that it could be the bias of the recent trend of studying from home due to the COVID-19 situation. Therefore, we plan to continue observing and evaluating students' preferences as well as performance in the long term in order to provide the best practice for the RBL.

Through this research, the participating students have gained technical skills, especially in IoT device development. They further applied the knowledge to develop IoT-based robots and published these works as research papers in an on-site poster session of an international conference, Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS2022), as follows:

- U. Pradhan, C. Feng, T. Laohakangvalvit, P. Sripian, M. Sugaya., Development of Real-time Controlling of Zumo Robot Movement using Brainwave Sensor.
- A. Suksai, C. Feng, T. Laohakangvalvit, P. Sripian, M. Sugaya., Line-tracing Zumo Robot for Automatic Plant Watering.
- L. Chen, C. Feng, T. Laohakangvalvit, P. Sripian, M. Sugaya., Path Finding and Traffic Simulation with Zumo Robot.

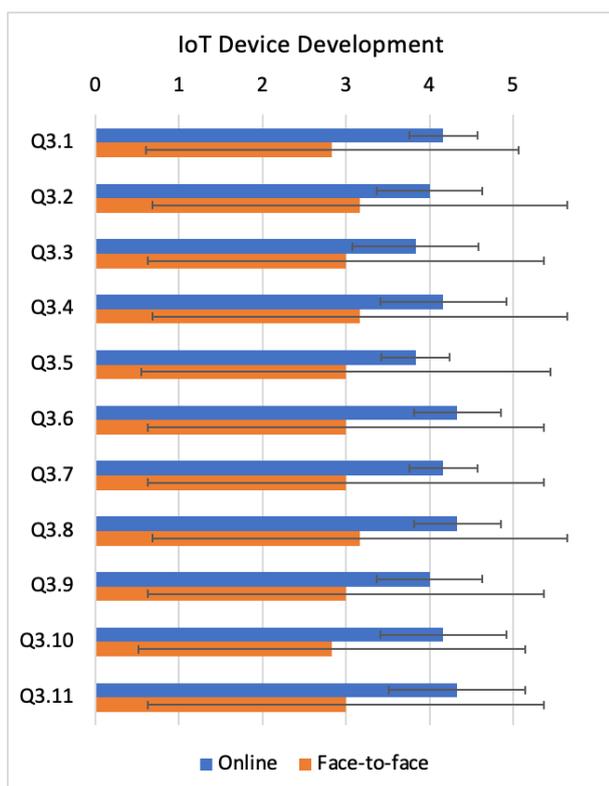


Figure 5: Experience rating for IoT device development workshop (Q3)

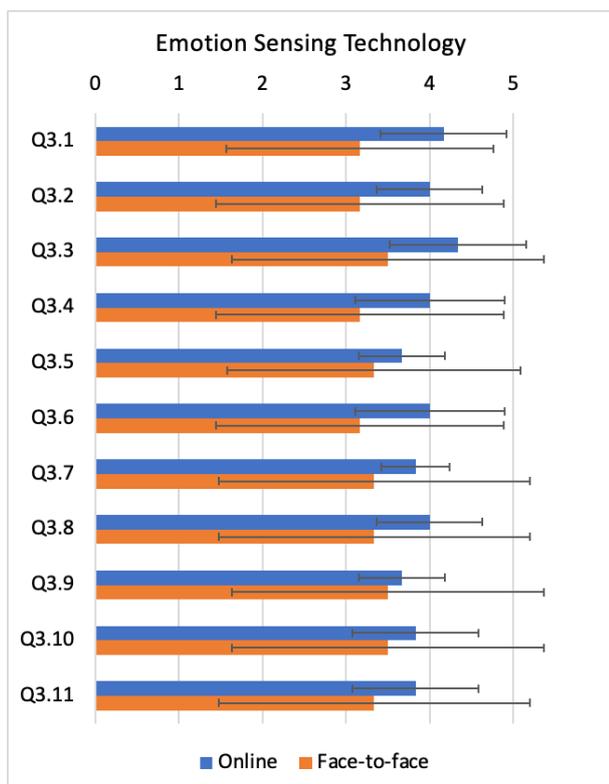


Figure 6: Experience rating for emotion sensing technology workshop (Q3)

P B Lにおける学生の協同学修プロセスの可視化・促進 のためのE d T e c hシステムの開発

電子情報システム学科 間野 一則

共同研究者

機械制御システム学科	長谷川 浩志
電子工学科	村上 嘉代子
情報工学科	中島 毅

1. はじめに

本研究では、2020年度よりPBL活動そのものの高度化を目指したEdTech技術の開発を目標として開発を進めている。大学における教育改革として、大学が「何を教えたか」ではなく、「学生が何を学んだか」といった観点での学修成果が重要視されてきている。学生主体のPBLにおいては、さらに、「学生がどう学んだか」といった点が重要である。グループによる学生の協同学修プロセスに関するデータ取得・可視化により、各学生のプロジェクトへの貢献度、チーム全体としてのプロジェクトの進め方、成果物（プロダクト）の評価が開発すべきEdTechシステムへの大きな期待である。本研究の概要は以下のとおり。

1.1 対象となる授業

大学院システム理工学専攻システム工学特別演習(必修; 演習 C(選択)合同), クロスイノベーション・プロジェクト(CIP; 選択), クロスカルチャー・エンジニアリングプロジェクト(GEP; 選択, 大宮グローバルPBLを含む), や電子情報システム学科のICT Systems Design(選択), テクニカルセミナー(選択)でのPBL科目, 総合研究 I・

IIでの適用を想定している。

1.2 目的

PBL教育では、各人の専門知識をもとに、社会における問題の発見と課題解決のための科学的リテラシー、プロジェクト遂行・リーダーシップ等の総合的能力の育成が期待されている。しかしその評価においては、従来、事前・事後の振り返りと成果物の評価、PROGテストが主であり、実際のプロジェクト活動中のデータに基づく分析評価の反映は少ない。本研究では、各人及びチームとしてのプロジェクトへの貢献度、プロジェクト促進度を把握するために、PBL遂行中の学生およびそのチームの行動を音声・映像等のデータを取得し、学びの促進、プロセスの可視化システムを開発し、従来のアセスメントとの関連性、さらには、活動中の学生へのリアルタイムフィードバックを行うEdTechシステムの開発をめざす。

2. 研究計画

2.1 実施計画

対象授業等での学生のディスカッションのデータをもとに、EdTechシステムの設計・開発・評価を行う。

(1) PBL における各学生の行動データの取得（音声・映像，タッチ入力等.）

(2) 行動データに対して，属性を付与した非構造化データベースの構築

・話者ダイアライゼーション（いつ，だれが，どのように活動（発声）しているか）.

・クラウド上でのデータベース化，行動記述（アノテーション）.

(3) PBL 時のリアルタイム活動予測モデルと，EdTech システムによる学生へのフィードバックによる学びの促進.

(4) PBL 時の活動から，事前・事後，成果物，PROG スコアを予測する（可能性）.

2.2 学科・学部・専攻等の FD・SD 活動との関連，教育改革への貢献

EdTech 関連技術は，AI，IoT，データサイエンスに関連しており，システム理工学専攻，電子情報システム学科の専門技術でもある．一方 PBL では，個々の専門技術の知識をもった学生らが PBL を実施することにより，問題を発見し，課題解決を図る科学リテラシーの向上が期待される．

FD・SD 活動として，PBL の指導法やアセスメントについては，今後もその有効性の検証，新たな PBL 活動手法，PBL における学生へのリアルタイムのフィードバックなど，高度化に貢献が期待されている．今後，リアセックの PROG スコアとの関連性を明らかにできないか，注目している．

2.3 教育において期待される効果

「学生が何を学んだか」，「学生がどう学んだか」には，学んだ知識と，それを活用するための科学的リテラシー&コンピテンシー（課題を設定し，解決していく能力）の2つがある．前者は，試験や成果物でその教育効果を評価できるが，後者は，評価が難しい．この研究では，PBL 中の学生の行動データから，PBL の事前・事後の振返

り，成果物評価，PROG スコアとの関係予測，学修を支援する EdTech システムを提案する．それにより，PBL 活動のリアルタイムでのフィードバック，PBL 活動と成果物との関係を定量的な関係づけを可能とする．

3. 計画の進行状況

2022 年度は，以下のシステム提案・研究を実施した．

3.1 発言内容と進行状況の可視化によるチーム型学習支援 [1]

この研究では，議論内容の分析をリアルタイムで行い，学生側と教師側の両面からサポートできるディスカッションの可視化システムを構築し，以下の支援を目指している．

○学生側：

- ・各人の発言力の向上．
- ・ディスカッション情報の把握．
- ・時間内での議論の収束．

○教師側：

- ・学生の議論状況の把握．
- ・学生個人，及びグループの評価．

(1) システム概要

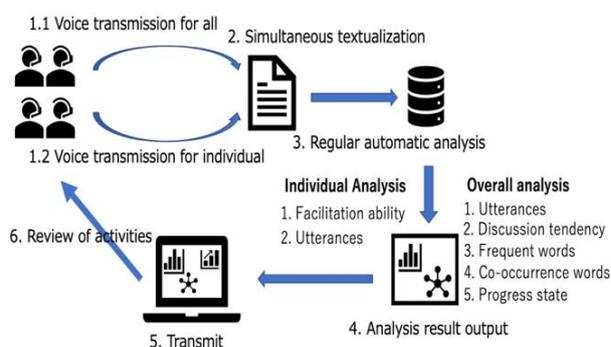


図1 システム概要図

図1に提案システムを示す．ディスカッション音声(1.1, 1.2)を Google 音声認識 API によりリアルタイムで議論音声のテキスト化を行い(2.)，取得テキストを KH Coder(3.)と機械学習(4.)により分析する．その結果を即時にブラウザに表示し(5.)，ユーザが議論状況を確認できるようにしている．機械学習では，新たに，個人の発言分析

と議論状況推定技術を検討した。

(2) 個人の発言分析に基づくファシリテーション力の評価

学生の発言意欲の向上や個人評価に役立たせるために、本システムを用いて、発言内容の単語からファシリテーション力の推定を試みた。事前にファシリテーション力に該当する単語やフレーズを特性語としてグループ登録し、発言データの中から登録単語と一致する単語を抽出し、その発言回数を各個人のファシリテーション力と定義した。

簡単な実験として、話者ダイアライゼーションの精度がまだ低いため、手動で話者のアノテーションを付与し、3～4人の15分単位のデータを処理した。実験結果の例を図2に示す。実験データに対する事前の主観評価を実施し、speaker2が一番優れたとの結果が出ており、提案システムで算出されたファシリテーション力の結果と一致していることがわかった。

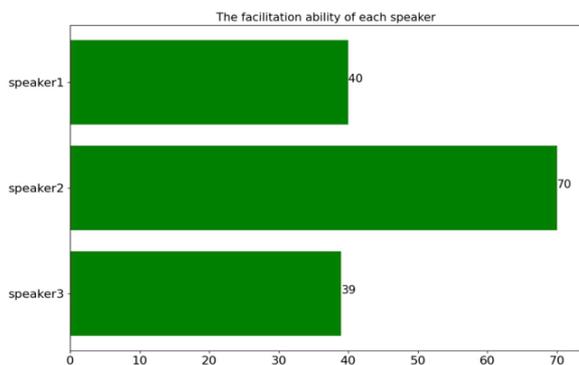


図2 ファシリテーション力について

(3) 議論状況の推定

PBLの議論のプロセスはアイデア出しからテーマ決定、要求条件やシステム設計など複数ある。そこで、議論の進行状況が現在どの段階であるかといった議論状況推定ができるとよい。そこで、PBLの一般的な議論の進め方に基づき、①役割分担、②現状確認、③アイデア出し、④まとめの4種類に進行状況を分類することとした。推定にはナイーブベ

イズ分類器を実装し、5分ごとに推定を行った。

議論状況推定の評価実験を行った。学習データは15～20分の議論データ13個から分類器を学習した。実験用データは、同等の時間長で4～6人の5個の異なる議論データを用いた。表1に示すように、音声認識による誤認識を含むデータ(5分単位)と、手動による文字起こしによるデータ(3分と5分単位)について、議論状態推定を実施した。実験データによる変動はあるが、5分程度のデータから全体的に議論状況推定の正解率70%以上となることが分かった。今後データや進行状況のカテゴリーを増やして実験を重ねていく。

表1 議論状況推定の正解率

実験データ	音声認識	手動で文字起こし	
	5min	3min	5min
1	80%	/	100%
2	71.40%	71.40%	100%
3	83.30%	83.30%	75%
4	50.00%	80%	100%
5	85.70%	66.70%	100%
平均	74%	75%	95%

3.2 ディスカッションにおける音声応答の意図抽出

ディスカッションにおいて、「うん」「ああ」といった応答には発話者の肯定や疑問といった意図が含まれており、それらを認識できれば、ディスカッションのより詳細の把握が可能となる。意図情報は、発話者音声の異なる韻律的特徴量で把握できると考える。ここでは、「うん」や「うーん」などの「うん系」の音声応答に注目した。収集データから音響分析による複数の韻律的特徴の組み合わせによる機械学習技術を用いて、「肯定」、「疑問」、「保留」の意図抽出を試みた。

機械学習には、基本的な分類問題を解くSupport Vector Machine (SVM)を用いた。特徴量として、音の高さ(最高、最低、平均、

ピッチ範囲)[Hz], 音の強さ(最高, 最低, 平均, パワー範囲)[dB], 発話速度[mora/s], 発話時間[s]の10項目を用いた. 2対毎の特徴量の調査の結果, 各意図の分類に有効である韻律的特徴を表2に示す.

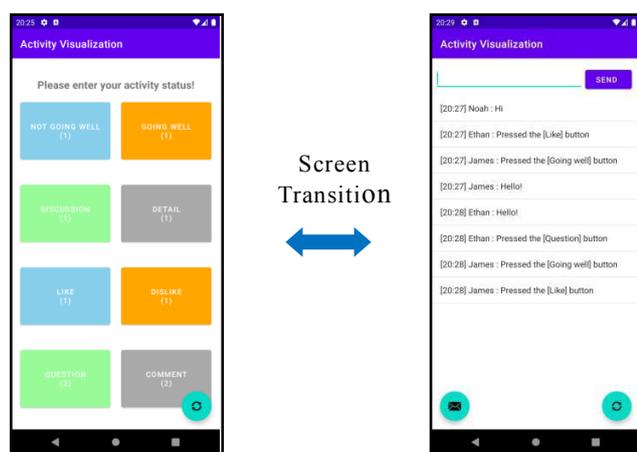
表2 有効であると考えられる韻律的特徴

意図	韻律的特徴
肯定	最高周波数、パワー範囲、発話速度、発話時間
保留	周波数範囲、発話速度、発話時間
疑問	最高周波数、周波数範囲、発話速度

肯定—保留については, さらに複数の識別特徴量を用いた分類器として, 最高周波数, 周波数範囲, パワー範囲, 発話速度, 発話時間の5つの特徴量を結合した多次元特徴量による識別を行い, 識別率 97%であった.

3.3 スマートホンアプリケーションによる活動可視化支援[2]

PBL等のアクティブラーニングの支援ツールにスマートホンを用いて活動状況の可視化を試みた. 図において, DiscussionやQuestionのボタンをボタン画面に配置してアプリ利用者の状況や反応をワンタップ情報共有可能にした. チャット画面では, 通常のチャット機能に加えて, 「誰が何のボタンを押したのか」といった情報も表示される.



Button Screen

Chat Screen

図3 活動状況可視化スマホアプリ

PBLのプロセスとして, ①事前問題の提示, ②グループ内討論, ③自己学習, ④グループ内共有, ⑤発表振り返り, ⑥評価の6工程に分類できるが, その④グループ内共有までを実験対象とした. 実験後のアンケートでは, 操作性において, 「ボタンをワンタップすることで反応や状況報告が行えるため便利」という意見が多く挙げられた.

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

将来的に課程制移行となり, 特に情報・メディア系では, プロトタイプ・デザインを対象にしたサイバーフィジカル EdTech を利用した PBL 教育が重要と考える. 2023 年度は, PBL 授業において, VR 等を利用したプロトタイプ・デザインを対象として, そのチーム活動プロセスを支援するサイバーフィジカル EdTech システムの開発を目指す.

学会, 論文等投稿・発表状況

[1] Yin Mu, Kazunori Mano, "Development of Discussion and Progress State Visualization System to Support Project-based Learning," The 17th SEATUC Symp. 2023, IS-03, (2023-03).

[2] Ryuga Higashiyama, Kazunori Mano, "A Smartphone Application to Visualize Activity Status to Support Active Learning," The 17th SEATUC Symp. 2023, IS-03, (2023-03).

[3] 間野一則, 牟瀛(ムエイ), 東山龍雅, "発言内容と進行状況の可視化によるPBL学習支援," 日本工学教育協会・年次大会講演 (2023年度発表予定).

謝辞: 本研究に関連して, 間野研究室の修士研究・総合研究の一部として実験協力をいただいた, 牟瀛(ムエイ), 東山龍雅, 河野優太各氏に感謝する.

以上

学修者の学びを担保する

学修成果の把握・可視化・検討体制の構築

教育イノベーション推進センター 榊原 暢久

共同研究者

工学部機械工学科	角田 和巳	
教育イノベーション推進センター	相原 総一郎	
システム理工学部生命科学科	奥田 宏志	
建築学部	恒安 眞佐	
大宮学事部	鈴木 洋	
豊洲学事部	久保 ひとみ	
豊洲学事部・大学企画課	小倉 佑介	
大宮学事部・学生課	荻田 忠伸	
就職・キャリア支援部	キャリアサポート課	星野 励
豊洲学事部・学生課	茂木 亜貴子	
学事本部・課程制設置準備室	宇佐美優里・古川祐輔	
教育イノベーション推進センター事務課	星 由華・山本 郷子・逸見信子	

1. はじめに

本学・教育イノベーション推進センターでこれまで開発・実施してきた新任教職員研修プログラムや理工学教育共同利用拠点プログラムは、教員個人の教育活動における能力開発や、研究・管理能力開発支援という意図をもったミクロレベルのFDプログラムが主であった(図1参照)。一方、中教審・教学マネジメント指針にある教学マネジメントを支える基盤としての「三つの方針を通じた学修目標の具体化」「授業科目・教育課程の編成・実施」「学修成果・教育成果の把握・可視化」が継続的に実施・修正されていくためには、適切なカリキュラムマネジメント体制の構築が急務である。

第4期認証評価を見据えた、学修者の学びを担保するカリキュラムマネジメント実現のためには、各学科等において、学生の入学年

度ごとに、

- (1) 学修・教育到達目標(mDP)ごとの学修成果の可視化
- (2) 可視化された情報を分析
- (3) 優先的な検討課題の決定
- (4) 課題の共有と改善

を継続的に実施することが必要である。この活動の目的は、(1)～(4)を継続的に実施・修正できるようなラインの明確化と支援体制を構築することにある。また、それらの実現のために、カリキュラムマネジメントに関わる教職員に必要な資質向上の機会を主導する教職員を充実させることにある。

2. 準備段階及び研究計画

準備段階：本学ではこれまで、DPを詳細化

した mDP を学科ごとに設定、WEB シラバスの充実、学生ごとの e ポートフォリオが稼働している。カリキュラムの整合性整備に関し、昨年度までは以下の点を実施してきた。

- (ア) mDP と開講全科目の対応表を整備
- (イ) mDP 達成可視化のための主要科目の設定
- (ウ) 全 17 学科への整合性整備支援

ここに至る過程で、榊原、角田、奥田、久保、荻田、星野、鈴木、星、他 5 名が日本高等教育開発協会主催のカリキュラムコーディネーター養成講座を、榊原、鈴木、星、他 6 名が愛媛大学主催の SD コーディネーター研修を既に受講し、この課題を実施する際の素地が出来ている。理工学教育共同利用拠点として既に 6 年間の活動実績があり、学生スタッフの 1 つである SCOT プログラムも既に構築されている。

2022 年度：各学科等において、目的に掲げた

(1) ～ (4) の実施ができるようなラインの明確化と支援体制を構築する。また、カリキュラムマネジメントに関わる能力開発を主導する教職員に必要な SD コーディネーター養成講座およびカリキュラムコーディネーター養成講座受講者を、本申請の分担者を中心に増やす。これらを実施する過程では、国内外の FDer 集団と情報交換を行い、最新の状況変化に備えるとともに、適切な助言を得る。

3. 計画の進行状況

2022 年度入学生のカリキュラムについて、年度当初に各学科の mDP と開講全科目の対応表を整備し、学修成果を可視化するための主要科目の設定を行った。この過程で、必要に応じて学科と懇談を行い、整合性整備の支援を行った。具体的には、2022 年度入学生のカリキュラムに関し、

- 各学科の mDP と開講全科目の対応表をもとに、すべての mDP について、対応する科目単位を 1 単位以上取得して卒業する設定になっていることの確認
- 各学科の mDP と開講全科目の対応表で、すべての mDP について、目標到達の根拠づけ科目（主要科目）の確認
- 各学科のカリキュラムツリーにおいて、主要科目が適切に表示されているかの確認

を行った。ここまでは昨年度も実施したことが、今年度はさらに以下を実施した。

- 主要科目のシラバスに掲げる到達目標と mDP の整合性チェック
- 学生ごとの mDP の達成度を e ポートフォリオ上で可視化する作業
- mDP の見直し、カリキュラムの整合性確認、学修成果の可視化等を継続的に実施できるようなラインの明確化

これらにより、ここまで実施したことを継続的に実施する体制、および教育イノベーション推進センター・カリキュラムマネジメント部門としての支援体制が固まりつつある。

また、2024 年度以降のカリキュラム大幅改訂にむけて、各学部執行部からの要請に従い支援を行った。具体的には、工学部の課程制カリキュラム設計に関し、各課程・コースの 3 ポリシーと mDP の整合性の最終確認を、課程制設置準備室と協働で実施した。また、システム理工学部の課程制カリキュラム設計に関連し、学生の学修を支援する体制について意見交換を行った。

カリキュラムマネジメントに関わる教職員の能力開発を進めることは、カリキュラムマネジメントを持続的に進めるために必須である。このため、愛媛大学と本学主催のカリキュラム・コーディネーター養成講座初級編を

3名の教職員が、日本高等教育開発協会主催のカリキュラム・コーディネーター養成講座中級編と学習支援コーディネーターに関する講座をそれぞれ2名、1名の学内教職員が、(株) ビズアップ総研主催の教学マネジメント推進者養成講座とIRに関する講座をそれぞれ5名、1名の学内教職員が受講し、基盤のさらなる強化を行った。これらの受講費用を本助成により支出した。また、鈴木がSDコーディネーターとして愛媛大学から認定された。

4. 今後の計画と課題

ここまでの取組で、学修成果の可視化に必要な仕組みの整備を終えつつある。mDPと全授業科目が科目コードで関連付けられたことにより、mDPごとにその達成度を学生個人レベル・学科レベルで可視化することができる。学生個人レベルでいえば、可視化情報をもとにディプロマサブリメントを提供することが可能である。学科レベルでいえば、可視化情報をもとにカリキュラム評価・改善につなげることができる。

次年度以降、教育イノベーション推進センター・IR部門およびIR担当者と連携をしながら、以下の点を進めていく。

- mDPごとのキーになる学修成果の特定と可視化
- 可視化された情報の分析・議論
- 組織として、各学科・課程で分析・議論した結果を共有する機会の設定
- 組織として、定常的な教育改革や教育改善サイクルにつなげる

5. 学会等発表状況

- 榊原暢久：教学マネジメントによる内部質保証、私学工科系大学教務事務研修会、2022年8月。
- 榊原暢久：効果的な教育のための授業時間・学事暦の多様化を実現する方略と課題、宮城大学FSDS研修会、2022年8月。
- 榊原暢久：ミドルマネージャー教員としての実践とミドルマネージャー教員の育成支援について、リーダーシップ研究会、2023年2月。
- 榊原暢久・角田和巳・鈴木洋・相原総一郎：芝浦工業大学におけるカリキュラムの整合性整備の進展状況と課題、第29回大学教育研究フォーラム、2023年3月。

6. 参考情報

- 愛媛大学教育・学生支援機構教育企画室(教職員能力開発拠点)、芝浦工業大学教育イノベーション推進センター(理工学教育共同利用拠点)：カリキュラムコーディネーター養成講座初級編、2022。
<https://www.jaedweb.org/cc3>
- 日本高等教育開発協会：カリキュラムコーディネーター養成研修会中級編、2022。
<https://www.jaedweb.org/cc3>
- 日本高等教育開発協会：第1回学習支援コーディネーター養成研修会、2022。
- 中井俊樹：教学マネジメント推進者養成講座、2022。
https://www.bmc-net.jp/univ_fd_sd/
- 森 雅生 他：大学IRプロフェッショナル養成講座、2022。
https://www.bmc-net.jp/univ_ir/

「理工学教育共同利用拠点」2022年度実施 31プログラム

教育能力開発(ED: Educational Development)プログラム

- (1) プレFD、入職から3年以内の教員を主たる対象とした教育能力開発
 - ・大学教育開発論(プレFD) ・詳細シラバスの書き方WS ・授業デザインWS
 - ・学生主体の授業運営手法WS、実践編 ・ティーチングポートフォリオ(TP)作成・完成WS
- (2) 理工系教育に関わる教員の基礎的・共通的な能力開発
 - ・ルーブリック評価入門WS ・理工系科目の評価について考えるWS ・英語による授業のためのWS
 - ・英語による授業のためのスキルアップ研修 ・LMS使用法入門(学内) ・障がい学生への対応(学内)
- (3) 理工系教育に関わる教員のさらなる能力開発
 - ・研究室指導に必要なコーチング技能入門WS ・アカデミックアドバイジング入門WS
 - ・反転授業入門WS ・PBL授業設計入門 ・デザイン能力を育成する授業設計入門
 - ・グローバルPBL参加 ・SCOT研修見学

研究能力開発(RD: Research Development)プログラム

- ・研究内容を分かりやすい言葉で伝えるためのWS ・教育成果を可視化するための統計手法入門
- ・高等教育開発セミナー
- ・外部資金獲得支援(学内のみ) ・研究者倫理について理解する研修(学内のみ)

マネジメント能力開発(MD: Management Development)プログラム

- ・ミドルマネジメントについて考えるWS ・産学連携の知的財産マネジメント研修
- ・大学におけるダイバーシティについて理解する研修 ・アカデミックポートフォリオ作成・完成WS
- ・ファカルティデベロッパー養成講座 ・カリキュラムコーディネーター養成講座
- ・SDコーディネーター養成講座 ・安全衛生・危機管理に関する研修(学内のみ)

Design and Implementation of Double Degree/Joint Degree Education Model for Doctoral students at SIT

先進国際課程 ミリアラ ムラリダ

1. Introduction

University branding plays a crucial role in attracting students and ensuring a sustainable future for the institution. In recent years, academic rankings have become the focal point of the education sector, with various factors such as international educational programs, research work, publications, and collaborations serving as key determinants of a university's global recognition. Joint Degree (JD) and Dual Degree (DD) programs have gained significant importance worldwide, as they encompass many of these factors and are being implemented by universities across the globe. Previously, creating JD programs posed challenges due to differences in curriculum among universities. However, universities now utilize specially designed courses with predefined timelines, and standardization of syllabi has simplified the implementation of JD programs among partner universities. Similarly, DD programs offer students the opportunity to obtain two degrees within the same timeframe, enabling them to not only acquire a diverse education but also develop an understanding of cultural differences in both countries. Moreover, participating in DD programs enhances students' job prospects twofold. Consequently, in recent years, DD programs have become increasingly appealing to both local and international students.

Shibaura Institute of Technology (SIT) is at the forefront of embracing the modern wave of globalization by

implementing innovative JD and DD programs. Over the past few years, SIT has diligently gathered insights on how leading universities worldwide are successfully integrating these programs, facing challenges head-on, and reaping remarkable outcomes. With a focus on excellence, SIT has closely studied universities with exceptional world rankings, strategic locations, and diverse fields of interest. The ultimate objective of this research is to forge robust partnerships with universities across the globe, establishing top-tier DD/JD programs for doctoral students and taking concrete strides towards this vision. SIT has set forth key objectives that encompass a multifaceted approach to elevate its global standing and ranking. By expanding research activities, fostering innovation and entrepreneurship, nurturing international collaborations, and enriching the quality of education and teaching, SIT aims to attain unparalleled growth. Collaboration with esteemed international institutions serves as an invaluable gateway to fresh research ideas and approaches, resource sharing, and bolstering the impact and quality of research output. Furthermore, an increase in the enrollment of PhD students fuels a continuous flow of talented researchers who contribute to SIT's research agenda, fortify the quality of research endeavors, and solidify SIT's reputation as a research-intensive university.

SIT places great emphasis on cultivating a diverse and inclusive campus environment,

which welcomes students from around the world and nurtures cross-cultural interactions. By fostering global leaders and enhancing students' intercultural competence, SIT envisions an environment where various cultural exchange programs, enriching study tours, and impactful community engagement projects thrive. Remarkably, these initiatives can be implemented with minimal financial burden, ensuring a cost-effective and sustainable approach to long-term growth and success. By leveraging its existing resources and forging strategic partnerships, SIT is poised to create an innovative and dynamic learning environment that magnetizes and retains the brightest talents globally. As a result, SIT's reputation will soar to unprecedented heights, solidifying its position as a beacon of academic excellence.

2. Research Activity / Plan

In the past, SIT has successfully implemented the DD/JD program, which has led to fruitful collaborations and positive outcomes. For instance, SIT collaborated with the University of Caen (France) and facilitated the enrollment of a doctoral student from the University Putra Malaysia for a year of joint supervision at SIT. Furthermore, SIT has expanded its collaborative efforts with several universities, including IITM (India), KMUTT (Thailand), UPM (Malaysia), and the University of Caen (France). Recently, SIT has initiated discussions with Directors, Vice Chancellors, and Deans from prominent Indian universities through the Japan-India Universities forum organized by JST. These discussions have opened up exciting possibilities for the establishment of DD/JD programs and research exchange initiatives with Indian Institute of Technology Kanpur (IITK), Indian Institute of Technology Hyderabad

(IITH), and Guru Gobind Singh Indraprastha University (GGSIU).

During the fiscal year 2022, SIT carried out various research initiatives that resulted in successful collaborations with other universities. An outstanding accomplishment was the completion of Ms. Yiteng Xing's PhD as a dual degree candidate, earning her degrees from both SIT and the University of Caen in France. This achievement further strengthened the research partnership between the institutions. Additionally, SIT welcomed a doctoral candidate from UPM for a year-long research exchange and joint supervision, enhancing the cross-institutional collaboration. Notably, SIT facilitated student and faculty exchanges with IITM in India and UPM in Malaysia during the aPBL program held in December 2022. These exchanges provided an opportunity for discussions on the DD/JD program and fostered research exchange activities.

IITM, a prestigious institution in India renowned for its global standing, is seeking a partnership with SIT to establish a JD program. This collaboration would greatly enhance SIT's reputation and recognition. Currently, SIT is in the final stages of the process, which involves joint supervision of students. In the near future, they will develop a DD/JD Memorandum of Understanding (MoU) with IITM. UPM is already a strong collaborative partner with SIT, and they currently have a PhD student who is jointly supervised by both institutions. In the upcoming year, SIT will focus on establishing an MoU for a PhD-level JD/DD program and identifying suitable candidates. Additionally, SIT is in discussions with other esteemed Indian universities such as IITH, IITK, and GGSIU for potential research collaborations. SIT aims to create a DD/JD program at the PhD

level with these universities, fostering sustainable collaboration between them.

3. Program

During my visit to the University Putra Malaysia (UPM) on March 13, 2023 I had the privilege of attending a presidential meeting with esteemed representatives. Vice-President Prof. Dr. Ismi Arif Ismail, Director Prof. Dr. Abdul Mua'ti`Zamri Bin Ahmad, Deputy Dean Prof. Siti Hasana Sapar, Prof. Chen Soo Kien, Assistant Registrar Ms. Nur Nadjla Ahmad Razei, and HMS Ms. Nadia Zawani Hussin were all present. The primary topic of discussion was the potential establishment of a double degree program for PhD students, specifically between SIT and UPM. Following fruitful deliberations, a meeting was scheduled for the next day with President Prof. Dr. Mohd Roslan bin Sulaiman, during which further progress on the implementation of the double degree programs between both universities was assured.

The proposed program is anticipated to have a significant impact by enhancing both the quality and quantity of research endeavors between the two universities. Not only will it benefit the students by providing them with the opportunity to earn degrees from both institutions, but it will also foster a stronger relationship between SIT and UPM. This collaborative program will serve as a platform for the universities to join forces and address complex research problems that necessitate interdisciplinary approaches. Following the meeting, there was an agreement to proceed with the development of a model for a DD/JD program between SIT and UPM. This accomplishment demonstrates the commitment of both universities to promoting academic excellence and cultivating collaborations that extend beyond their individual campuses.

On January 12, 2023, I embarked on a captivating visit to the prestigious Guru Gobind Singh Indraprastha University. There, I had the privilege of engaging in a truly fruitful meeting with esteemed university heads, brilliant professors, dedicated research staff, and aspiring research scholars at GGSIU. An exceptional individual, Prof. Dr. Neeleshwar from the esteemed Department of Physics, shared an unwavering passion for pioneering a groundbreaking double degree program for PhD students. The ensuing discussions on the development of this extraordinary DD/JD program have begun with a palpable sense of optimism for a truly remarkable outcome.

The professors and Dean of GGSIU have demonstrated their keenness for research collaborations and facilitating student exchanges with SIT, thereby amplifying the potential of this partnership. This reciprocal program will unquestionably offer students from both institutions an outstanding opportunity to acquire global exposure and learn from esteemed experts in their respective domains.

On October 27, 2022, an extraordinary event unfolded at Dillard University in the United States, igniting an atmosphere of anticipation and intellectual fervor. Esteemed figures, including the visionary President Prof. Rochelle L. Ford, the accomplished Senior Vice President Prof. Mablene Krueger, and the distinguished Prof. Dr. Darwish, graced the occasion with their presence. This grand gathering was a melting pot of groundbreaking ideas, as renowned minds converged to unlock the doors of research collaboration and engage in thought-provoking discussions that promised to shape the future. During the meeting, an extraordinary breakthrough was made in expanding the

student and staff exchange program, marking a remarkable achievement for both parties involved. Additionally, in-depth discussions were held regarding the implementation of the JD/DD program, student exchanges, and research collaborations, setting the stage for its actualization.

In February 2023, a momentous occasion took place as President Prof. Rochelle L. Ford from Dillard University visited SIT to actively participate in the gPBL Program. This visit provided a valuable opportunity for further dialogues, specifically focused on meticulously planning and executing the JD and DD program, with a particular emphasis on identifying and overcoming potential obstacles. Notably, fruitful discussions were held with the Chairman of the Board of Directors, exploring future collaborations, particularly in the realms of research exchange and DD programs. These discussions signify a pivotal advancement in strengthening the partnership between our institutions and hold immense potential for fostering numerous collaborative opportunities in the times to come. It is important to highlight that all these meetings and discussions were centered around the DD program and student exchanges, underscoring their significance.

4. Future Plan, academic societies, submissions/presentation status of papers, etc.,

Join us in our program as we embark on an exciting quest to discover universities that perfectly complement SIT's research areas. Our goal is to foster long-term partnerships with these exceptional institutions, opening doors to extraordinary opportunities such as

Memorandum of Understanding (MoU) for Joint Degree (JD) or Double Degree (DD) programs.

We're thrilled to announce that SIT has successfully secured MoUs with UPM, granting students the chance to pursue a double degree from two prestigious universities. This one-of-a-kind opportunity guarantees an exceptional educational journey, unlike any other.

Moreover, SIT is actively working towards the establishment of a PhD-level JD/DD program with UPM. We anticipate that two students from UPM will join us in the upcoming fiscal year, pending the successful completion of the MoU for the DD/JD programs.

Furthermore, we are actively seeking fruitful research collaborations with esteemed universities like IITH, IITK, and GGSIU. Together, we aim to identify shared areas of interest and explore the possibilities of joint research projects, faculty exchanges, and student exchanges.

As we approach the end of August 2023, we eagerly anticipate discussions regarding the potential inclusion of new Ph.D. students in the JD/DD program at the University of Caen (France). The prospect of this partnership is truly promising.

In September 2023, as part of the gPBL program, we will welcome students and delegates from IITH. During their visit, we plan to engage in meaningful conversations regarding the signing of an MoU between IITH and SIT, with a specific focus on research collaborations. This will pave the way for an exciting Double Degree program between our esteemed institutions.

月島三丁目デジタルツイン・プロジェクト

建築学科 岡崎瑠美

共同研究者

建築学科 志村秀明, 志手一哉, 山代悟, 秋元孝之

1. 序論

本プロジェクトは月島三丁目北地区第一種市街地再開発事業の対象となったエリアのデジタルツイン化を進めることを目標に進められた。対象エリアは2022年3月より仮囲い始まり、4月より徐々に取壊しが開始された。建物内部の取り壊し作業が行われている間に建物外部及び街路の撮影を研究チームが行った。

月島は本学の豊洲キャンパスから近く、その利点を生かし対象エリアが取り壊される前に都市のデジタルアーカイブを作成すると同時に教員や学生のデジタル技術習得の機会とした。

2. 研究対象地

対象地は2026年の竣工を目指し地下2階、地上58階建てのタワーマンションの建設が計画されている。本学建築学部・志村秀明研究室が長年運営してきた月島長屋学校も再開発の範囲に含まれ閉校が惜しまれた。

月島ではこれまでも大規模な再開発が行われてきており、今後も加速することが見込まれる。昔からある月島らしい街区や路地、コミュニティが失われることが各方面から指摘されるが再開発の波は収まる様子がない。近年都内では数多くの大規模再開発の計画が進められており、そのほとんどは記録が行われないうまま広範囲の街区が取り壊されている。



[図1] 赤い線で囲まれた部分が月島三丁目北地区第一種市街地再開発事業の対象エリアの一部、解体前の航空写真, google map

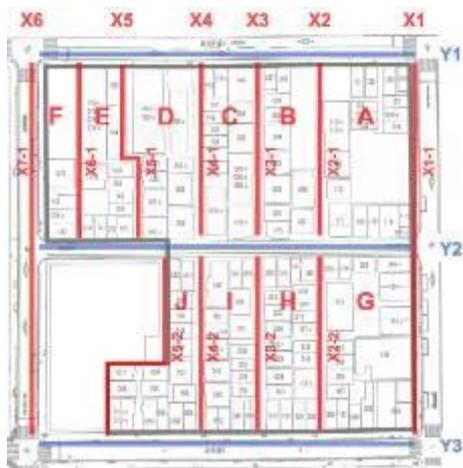
4. フォトグラメトリーによる3Dモデルの作成

4-1. 撮影の概要

本プロジェクトは芝浦工業大学建築学部の教員5名、学生24名、株式会社ワールドスキャンプロジェクト6名で行われた。

撮影は2022年3月14日～7月12日の期間、18回に分けて行われた。撮影対象範囲はA～Jの10ブロック及びY1～3, X1-1～X7-1の14本の街路(路地含む)とした。建物の数は150軒である。

データの収集はブロックごと及び街路ごとの2通りを検討した結果街路ごとの撮影を行った。撮影対象エリアは狭い街路空間が魅力の一つであるため、3Dデータを閲覧する際にその魅力が十分に伝わるものとするために街路ごとの撮影方法を採用した。[図2]



〔図 2〕 撮影対象範囲。プロジェクトメンバーでブロックや街路の情報を共有するために記号を振った。

4-2. 使用機材

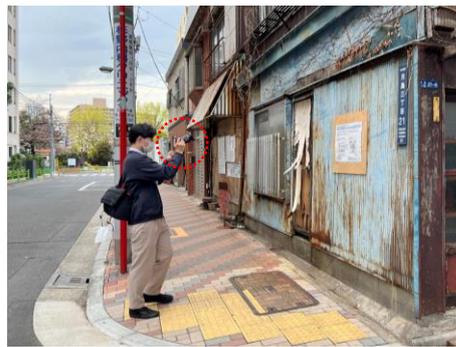
3D モデルを作成するために使用した機材はアクションカメラ、DSLR、ドローンの 3 種類である。

地上からの撮影は芝浦工業大学の学生及び教員が行った。地上からの高所の撮影は最大 11.5m の高さまで伸びる棒にアクションカメラを取り付け、電線やその他障害物に注意を払いながら行った。

撮影と並行して電線の撤去や街路に並ぶ植木鉢の撤去が行われたため、可能な限りそれらが撤去される前に撮影を行った。B ブロックの一部は取り壊し前の撮影が間に合わず、ドローンで撮影した写真のみとなった。取壊しのスケジュールが流動的であったため予測不能な事態が何回か発生した。



〔図 3〕アクションカメラでの撮影。安全のため 2 名又は 3 名 1 組で撮影を行った。



〔図 4〕 DSLR での撮影

ドローンを使用した空中からの撮影は株式会社ワールドスキャンプロジェクトに所属するプロのカメラマンが行った。ドローンの撮影は関係者への確認及び警察署への届出を行い実施した。ドローンの離発着は旧コインパーキングの敷地から行い、一部目視外飛行の撮影も行われた。1 回目の撮影は 1 時間、操縦者 1 名、見張り 2 名の体制で行った。2 回目の撮影はより広範囲を対象とし、撮影時間 2 時間、操縦者 1 名、3 名が見張りを行った。電線が多かったことから高度を高めにとり撮影を行った。合計撮影枚数は 1,117 枚と地上から撮影した枚数との比較では少ないが、街区全体を俯瞰するような 3D モデルが十分に作成することができた。



〔図 5〕ドローンでの撮影

4-3. 撮影枚数

〔表 1〕に 3D モデル作成のために本プロジェクトで撮影した画像の枚数を示す。モデルを作成する際にはより少ない枚数の画像を使用した。撮影は街区の解体と並行して行われたためできるだけ多くのデータを収集するようにした。

[表 1] 画像の撮影枚数

使用機材	撮影枚数
アクションカメラ	228,377
DSLR	148,335
ドローン	1,117

4-4. 3D モデル

3D モデルは Agisoft Metashape を利用して作成した。データ量が多いため、今後は 3D モデルの活用や公開方法について検討し、それに合わせた最適なモデルを作成する予定である。



[図 6] 地上から撮影した写真で作成した 3D モデルの例

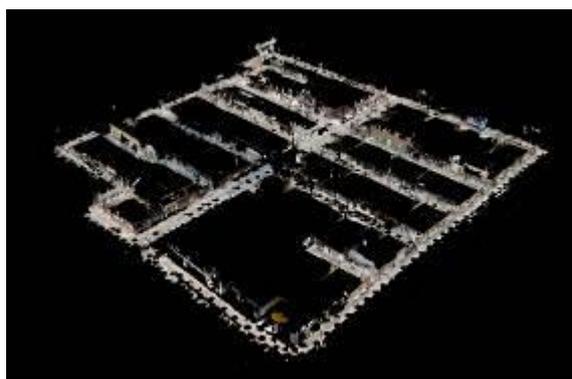
5. ウォークスルー画像の作成

ウォークスルー画像の作成には matterport 社の Pro2 3D カメラを使用した。ウォークスルー画像作成のために 3D カメラで撮影できる回数は 200 回以下であるためその上限を超えないよう予め撮影する場所を地図にプロットして決定した。撮影は 2 日間に分けて 4 名で行い、23 人工をかけてデータが完成した。Pro2 3D カメラは赤外線を利用して撮影するため屋外の 3D データの作成には適していないが、街路のウォークスルー画像は完成できた。しかし matterport 社がオンラインで提供するアドイン機能を利用した自動平面図の作成はエラーが出たため作成ができなかった。

[図 2] に示す Y1~3, X1, X6 の車道は google map で street view が公開されているが、その他の路地は street view が提供されていない。



[図 7] 3D カメラでの撮影



[図 8] 3D カメラで撮影した街路

6. 点群データ

レーザースキャナーの撮影は実施しなかったが、一部の街路で iPhone の LiDAR を使用して点群データを収集した。



[図 9] iPhone の LiDAR で撮影した月島三丁目の路地の点群データ

7. 月島長屋学校

本プロジェクトで内観の写真が撮影できたのは月島長屋学校のみである。志村研究室の学生が中心となり撮影を行い、その後 3D データが作成された。

白い壁面が多く、写真の合成が上手くいかない箇所もあったが、内部の雰囲気を感じることができるデータが作成された。3D データは sketchfab にアップロードされ、sketchup のリンクが月島長屋学校のウェブサイトで公開された。撮影から公開までのプロセス及び公開後に関するユーザーアンケートの結果は修士論文としてまとめられた。



[図 10] sketchfab にアップロードされた月島長屋学校の 3D モデル(月島長屋学校ウェブサイトで公開)

8. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

現時点における研究の発表状況は以下のとおりである。

- ・ 岩間康樹, フォトグラメトリによる 3D モデリングの制作とデジタルアーカイブに関する研究—月島長屋学校を対象として—, 2022 年度 芝浦工業大学大学院理工学研究科修士論文
- ・ 野呂祐輔, 志村秀明, 岡崎瑠美, フォトグラメトリによる 3D モデリングの制作とデジタルアーカイブに関する研究, 月島長屋学校を対象として, 2023 年度日本建築学会大会(近畿) 学術講演会, 2023 年 9 月
メディア報道では以下の番組で研究の取り組みが紹介された。
- ・ 東京 湾岸アートラン, NHK ふらっとあの街 旅ラン 10 キロ, 初回放送日 2022 年 5 月 6 日(番組中のプロジェクト紹介)
本プロジェクトの概要は本学建築学部の学部

及び大学院の授業で紹介された。授業後のアンケートより月島の再開発プロジェクト

デジタルアーカイブに関する本プロジェクトで得られたノウハウは参加した研究室の他のプロジェクトにも適用された。

海外の建築系の大学では 3D デジタルアーカイブの手法を授業で教えるところも多いが、日本ではまだ限定的である。日本の建築系の大学は一級建築士の資格取得を目指すカリキュラムを組む必要があり、3D 関連の授業を組み込むことが難しい事情がある。今後技術の進歩と共に 3D データを扱うニーズも増加することが見込まれるため、建築教育としてどのように組み込むかが今後の課題として挙げられる。

参考文献, URL

- ・ 志村秀明, 月島再発見学, アニカ, 2013 年
- ・ 月島長屋学校ウェブサイト
https://www.tsukishima.arc.shibaura-it.ac.jp/?page_id=1852

謝辞

本研究を進めるにあたり株式会社ワールドスキャンプロジェクトの皆様には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

特 別 研 究

(1) プロジェクト研究助成

巨大圧電性能を有する強誘電体薄膜の スパッタ成膜法の開発

機械機能工学科 吉田 慎哉

1. 序論 (はじめに, まえがき, 目的)

現在, 圧電微小電気機械システム (MEMS) アクチュエータは, 我々の生活の中で様々なところで使われている. 例えば, マイクロスピーカ, インクジェットプリンタヘッド, 可変焦点レンズ, 走査型ミラーなどが挙げられる.

圧電 MEMS アクチュエータの一般的な構造は, Si 弾性板上に圧電材料薄膜が形成された積層構造である. この圧電薄膜に駆動電圧を印加することで歪みを発生させ, 変位を発生させる. 現在, アクチュエータ用として主に使われている圧電材料は, チタン酸ジルコル酸鉛 (PZT) である. しかし PZT 薄膜の圧電定数 $|e_{31,f}|$ は, 約 $18[C/m^2]$ で頭打ちとなっている. より大きな変位が必要, あるいは低い駆動電

圧が必要なデバイスにとっては, その性能では不足である. 図 2 は, 圧電 MEMS ミラーデバイスであるが, 圧電膜の性能不足ゆえに, 蛇行させたアクチュエータ部を形成せざるを得なくなっている. これは様々な弊害を生む.

そこで, PZT を超える圧電性能を持つ鉛含有リラクサ系強誘電体単結晶が近年注目されている. 例えば, マグネシウム酸ニオブ酸チタン酸鉛 (PMN-PT) のバルク単結晶の圧電定数 $d_{33}[pC/N]$ は, PZT を大きく上回る. さらに, Sm を添加した Sm-PMN-PT 単結晶は, 世界最高の圧電定数に達する^[1]. この Sm-PMN-PT 単結晶を, スパッタ法などによって Si 基板の上にエピタキシャル成長させて単結晶薄膜化できれば, 圧電 MEMS アクチュエ

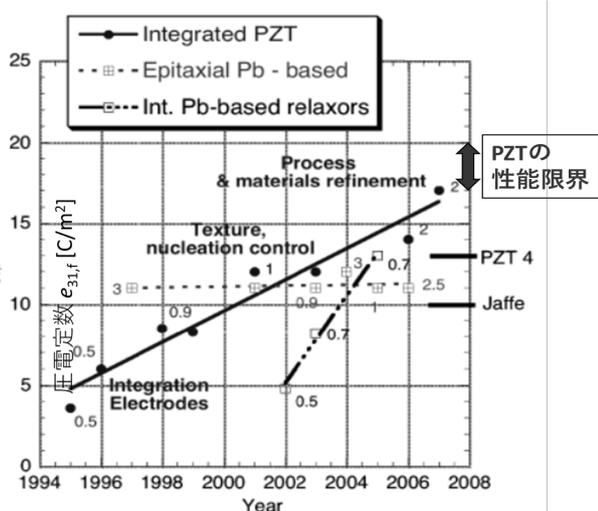
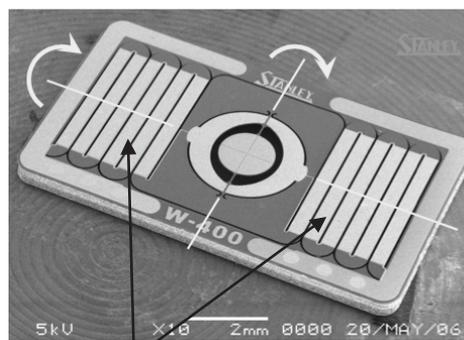


図 1. PZT の圧電定数 $|e_{31,f}|$ の推移. $17 \sim 20 C/m^2$ で 10 年以上飽和している. [J. Am. Ceram. Soc., 91[5] 1385-1396 (2008)]



変位を増加させるために長く蛇行させた PZT アクチュエータ部. デバイス仕様に対し PZT の圧電性能が不十分であることが原因. これによりチップサイズが大きくなり, コストも増大. 衝撃にも弱くなる.

図 2. PZT マイクロミラーデバイスの一例

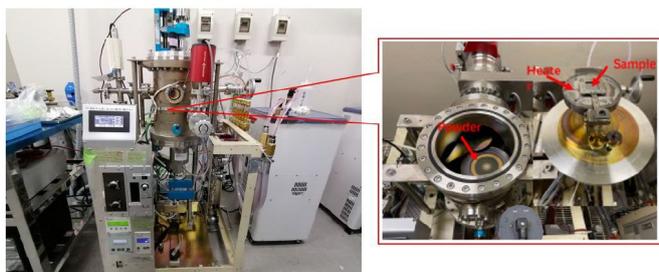


図 3. 本研究で準備したスパッタ成膜装置. 2cm 角の基板を搭載可能.

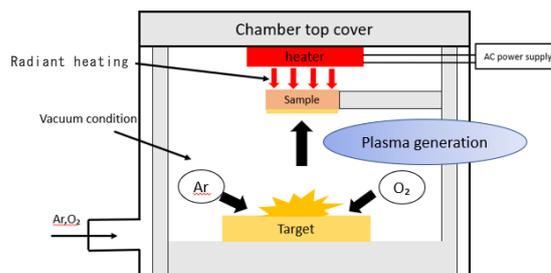


図 4. スパッタ成膜装置の概略図

一タの性能限界を打破できる可能性がある.

先行研究では, **Sm-PMN-PT** 単結晶薄膜のスパッタ成膜が試みられた^[2]. しかし, その $|e_{31,f}|$ は約 $12[C/m^2]$ であり, 期待されたほど圧電性能は高くなかった. 組成比や結晶配向性が最適ではなく, 材料本来の圧電性能が発揮されなかった可能性がある. また, **PMN-PT** 系薄膜の形成における問題の一つは, **PZT** と比較して, 純ペロブスカイト相の膜を得ることが難しいことである. 圧電性に寄与しないパイロクロア相の発生をいかに抑えるかが, 実用化を目指すための課題の一つである.

本研究では **PZT** を超える高性能な圧電薄膜を創出に向けて, まずスパッタ成膜装置を構築する. 次に, 成膜実験を通じて, 鉛含有リラクサ系強誘電体単結晶薄膜の探索を行う.

2. 研究計画

これまでの実績を活かし, 探索材料を **Sm-PMN-PT** に定める. まずは, スパッタ装置の立ち上げを行う. 次に, エピタキシャルバッファ層を成膜した **Si** 基板上に **Sm-PMN-PT** をスパッタ成膜する. 試行錯誤することで, 最も圧電性能を発揮する結晶相や配向性を持つ薄膜を得られる条件を見出す.

薄膜の配向性や結晶性, 組成などは, X線回折(XRD)や透過型電子顕微鏡, 蛍光X線元素分析法などの材料科学的手法を利用して詳しく調査する. 膜本来の圧電特性や誘電率, そしてキュリー点などの特性を評価する. キュリー点は, 誘電率や残留分極値, 結晶構造の

温度依存性を測定して多角的に評価する. そして, 世界最高の圧電特性を有し, かつキュリー点の高い, 鉛含有リラクサ系単結晶薄膜を見出す.

3. 計画の進行状況

①スパッタ装置の立ち上げと **PZT** のテスト成膜

まず, 材料探索用のマグネトロンスパッタ装置を立ち上げた(図3). この装置は, 直径4インチのスパッタターゲットを設置でき, 最大 **500W** まで高周波電力を印可できる. また, 基板温度は推定 **700°C** まで加熱できる仕様となっている. 図4のように, 成膜室内にサンプルとターゲットを設置し, 成膜室内を真空状態にさせ, **Ar** と **O₂** を成膜室内に流入しサンプルを **Pt** ヒーターで任意の設定温度で熱する. 次に, 成膜室内にプラズマを発生させて, **Ar** と **O₂** の原子をターゲットに衝突させる. 結果, ターゲットから原子がはじき出され, 上に設置したサンプルにターゲットが成膜される. 加熱温度と成膜速度を調整することで, 基板上にターゲット材料をエピタキシャル成長させる.

装置を立ち上げ後, 予備実験として, 比較的エピタキシャル成長をさせやすい **PZT** のテスト成膜を行った. ターゲットには, 粉末ターゲットを使用し, 正方晶組成となるように調整した. 次に, バッファ層が積層された **Si** 基板上に **PZT** をスパッタ成膜した. バッファ層の構成は, $(100)SrRuO_3(SRO)/(100)Pt/$

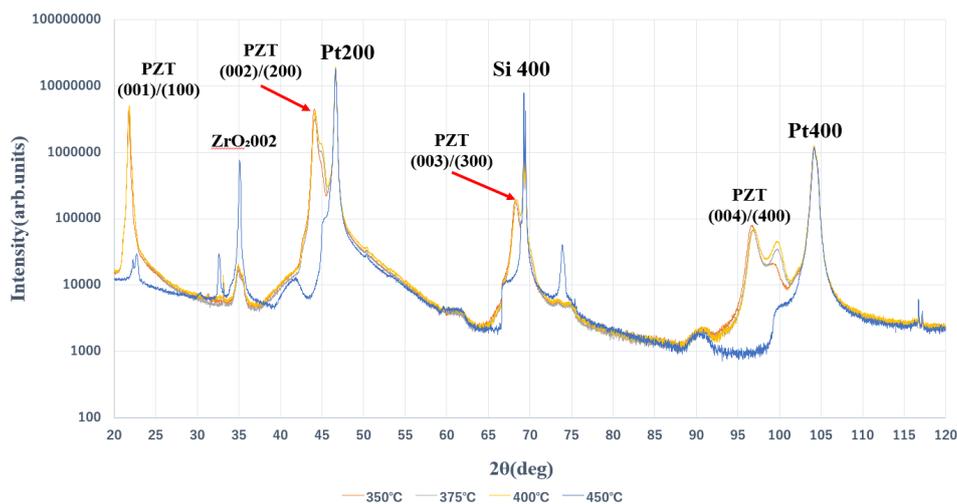


図 5. スパッタ成膜による正方晶組成 PZT のエピタキシャル成長

(100)ZrO₂である。成膜温度を 350°C, 375°C, 400°C, 450°C に設定し実験を行った。成膜圧力, 高周波電力, 成膜時間はそれぞれ, 0.4Pa, 100W, 2 時間とした。成膜雰囲気は, Ar と O₂ の流量比を 5sccm:0.1sccm として調整した。

図 5 は, 成膜した PZT 薄膜の X 線回折 (XRD) パターンである。成膜温度を 350°C, 375°C, 400°C とした時, PZT (100)/(001) 配向のピークが計測された。また, パイロクロア相は観察されなかった。しかし, 450°C としたとき, PZT のピーク強度は激減した。高温になりすぎたために熱分解が発生したと思われる。よって, 設定温度 350~400°C にて, PZT をエピタキシャル成長させられることが確認された。これにより, 準備したスパッタ装置は, 鉛複合酸化物のエピタキシャル成長に使用できることを確認した。

②Sm-PMN-PT のスパッタ堆積実験

(1) 成膜圧力の Sm-PMN-PT 薄膜への影響の調査

次に, PZT のテスト成膜の際に使用したバッファ層堆積基板上的 Sm-PMN-PT 薄膜のエピタキシャル成長実験を試みた。粉末ターゲットの準備は以下の通りである。まず 0.67PMN-0.33PT 混合物を用意し, それに対して 2.5%の Sm を添加した。さらに, 全体に対

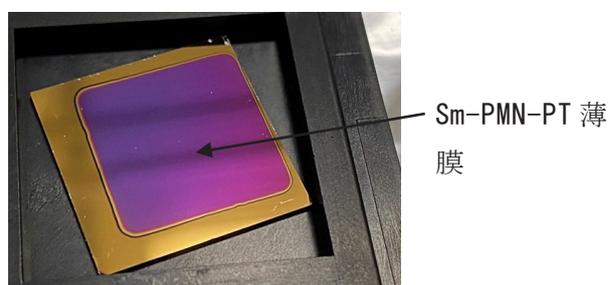


図 6. スパッタ成膜による Sm-PMN-PT 薄膜の写真

して 25%過剰に PbO を添加した。これは, 高温成膜中の薄膜内の Pb の蒸発を補償するためである。この実験では, 成膜温度, 高周波電力, 成膜時間をそれぞれ 375°C, 100W, 2 時間とした。Ar と O₂ の流量比は 5:0.1 とした。成膜圧力を 0.4Pa もしくは 2Pa として成膜を行い, 成膜圧力の Sm-PMN-PT 薄膜への影響をまずは調査した。なお, 圧力をこれ以上低くすると, プラズマが安定しなかった。

図 6 は得られた Sm-PMN-PT 薄膜試料の一例である。薄膜は鏡面であった。図 7 に XRD による分析結果を示す。両圧力条件において, パイロクロア相が発生した。また, 2Pa と比較して, 0.4Pa の方が Sm-PMN-PT ペロブスカイト相 (001)/(100) のピークは高かった。

(2) 成膜温度の影響の調査

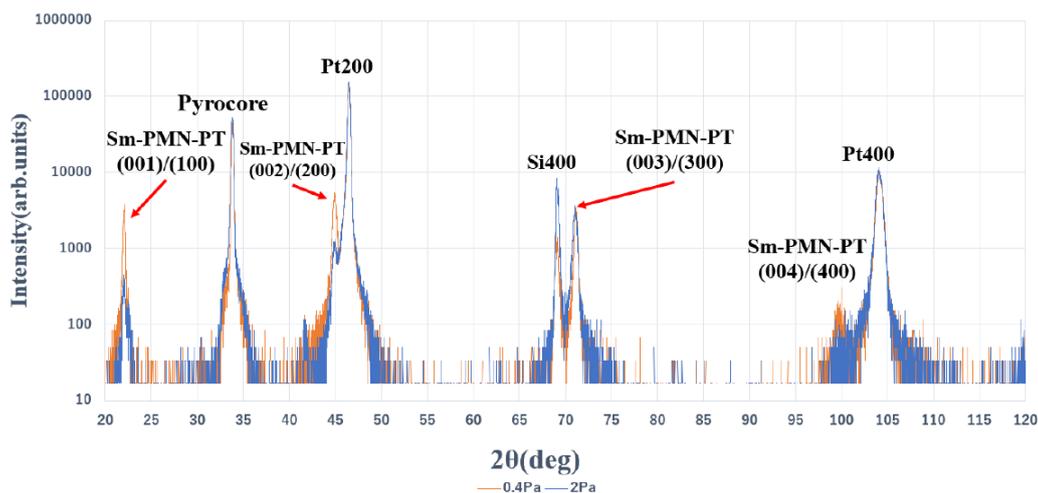


図 7. 成膜圧力を変えて成膜した Sm-PMN-PT 薄膜の XRD パターン

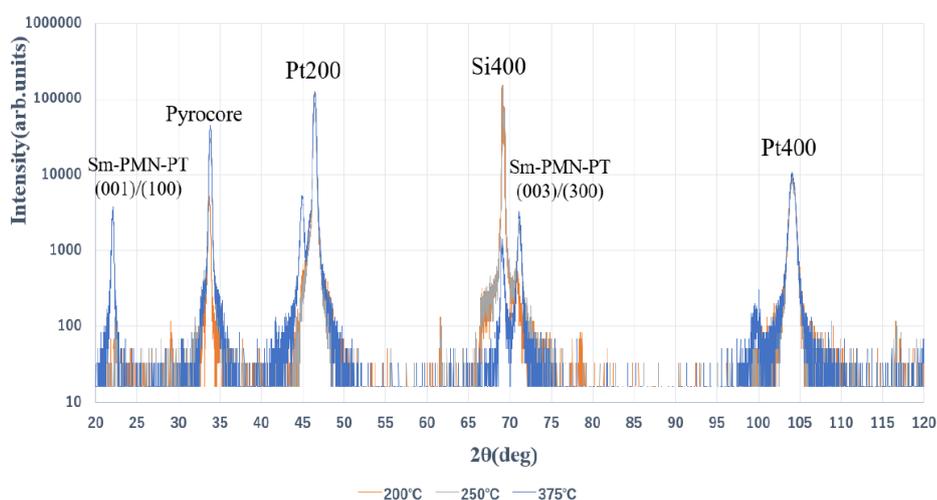


図 8 成膜温度を変えて成膜した Sm-PMN-PT 薄膜の XRD パターン

前述の実験では、0.4Pa、2Pa とともに、パイロクロア相が発生した。通常、この主な原因は、薄膜内の鉛含有量の不足である。そこで、成膜温度を下げることでパイロクロア相の抑制を試みた。成膜圧力は 0.4Pa とし、設定成膜温度は 200°C、250°C、375°C とした。他の成膜条件は前述と同様として実験を行った。

図 8 に XRD 分析結果を示す。結果として、200°C、250°C、375°C のいずれの条件においてもパイロクロア相が発生した。200°C という低温の方がパイロクロア相のピークが低くなったが、圧電性に寄与するペロブスカイト相 (001)/(100) のピークも低下してしまった。これは、成膜温度が低くなりすぎたため、結晶性が低下してしまったことが原因の一つと考えられる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

2022 年度において、成膜装置を準備し、Sm-PMN-PT の成膜を行う環境を整えることができた。今後、純ペロブスカイト相を得るための条件を探索する。そして、得られた膜の圧電特性や誘電率、そしてキュリー点などの特性を評価し、学会などに発表していく予定である。

参考文献

- [1] F. Li et al., Science (80-.), vol. 364, no. 6437, pp. 264-268, Apr. 2019
- [2] 福士 海伊, 東北大学工学部 卒業論文, 巨大な圧電性を有するリラクサ系圧電単結晶薄膜のスパッタ成膜法の研究(令和 4 年 3 月)

英語学習を促す心理的要因の 因果モデル構築

機械機能工学科 新谷 真由

共同研究者

文京学院大学経営学部 藤田 邦彦

慶應義塾大学文学部 縣 由衣子

1. 序論

1.1 はじめに

2003年に文部科学省により告示された『英語が使える日本人』の育成のための行動計画」では、日本人の英語技能として「大学を卒業したら仕事で英語が使える」ことが目標として掲げられた。言い換えると、大学に入学した全ての学生は卒業時にはビジネスレベル、すなわち CEFR（ヨーロッパ言語共通参照枠）でいうところの B1 程度（TOEIC 550 点以上）の英語技能を備えていることが英語習熟度の目標値として設定されている。その一方、同じく文部科学省から 2022 年に告示された「英語教育・日本人の対外発信力の改善に向けて（アクションプラン）」では、「初等中等教育を通じて培い、受験準備でも伸長を求めた英語力が、大学入学後の教育で必ずしも十分に伸ばせていない実態」がある現状を指摘しながらも、大学には「総合的な英語力の育成」を期待している。このひずみは、児童英語教育と大学英語教育を比べることでより顕著になる。小学校教育においては 2020 年度に改訂された新学習指導要領の導入に伴い、より早期の英語教育が開始されるようになった一方で、大学英語教育においては、大学レベルの英語能力に達していない大学生

を対象にリメディアル教育が実施されている現状がある。このため、大学入学時に英語習熟度が CEFR B1 レベルに達していない、習熟度の比較的低い大学生の英語技能を向上させることは喫緊の課題と言える。

他方、英語教育学分野の主要な研究テーマに、学習者の英語学習行動を先導するのは動機付けであるという「動機付け理論 (motivation theory)」がある。近年この理論的枠組みでは、動機付けを喚起するのは国際的志向性や自己効力感などといった他の心理的諸要因であり、これらの間には相関性があるとの指摘がされてきた。一方で、英語習熟度の違いがこの関係にもたらす影響については殆ど研究がされてこなかった。申請者と共同研究者の研究グループは、2021 年の調査において、英語習熟度の高い大学生と低い大学生の心理的諸要因の関連性には歴然とした相違があることを明らかにした。このことは、大学の英語教育現場において、適切な心理的アプローチに基づく教育的介入が必要であることを意味する。すなわち、習熟度の低い大学生の英語技能向上には、単に教材の難易度を調整するだけでは不十分であり、習熟度に対応する心理的機序を考慮した教育的介入が必要になる。特に、どのように心理的諸要因に働き

かければ最終的に動機付けを活性化できるかが、問題となる。今回申請した研究課題によって、習熟度の高い大学生と低い大学生の心理的諸要因の関連性を比較し、その相違がより明らかになれば、この問題に答えることができる。より一般的な学生の英語学習に向かう心理状態を明らかにしようとするこの研究は、日本の大学生全体の英語技能の底上げへの寄与が期待できる。

1.2 目的

本研究の目的は、日本の大学生における、非英語専攻学生の英語習熟度別の心理的諸要因の因果モデルを構築することである。

申請者及び共同研究者の研究グループがこれまで行なった研究では、調査協力者の多くは社会科学系と工学系の大学生であり、また、習熟度も CEFR で A1～A2 に収まる範囲 (TOEIC 200 点～550 点未満) が大半であった。このため、日本の一般的な大学生の英語習熟度と心理的諸要因の因果関係の全体的な解明には、他分野の専攻学生や、習熟度上位層である CEFR B1～B2 (TOEIC 550 点以上) を広く調査する必要がある。今回申請した課題では、調査協力者の幅を広げ、英語習熟度と心理的諸要因の関連性を示す、より汎用的な因果モデルを構築し、日本の一般的な大学生の持つ英語学習に向かう心理状態の解明を目指した。

本研究の独創的な点は、大学における習熟度別の一般英語教育の場に、心理的アプローチに基づく教育的介入を可能にすることである。近年、大学の教養英語教育において、習熟度別クラス編成を採用する機関が多いが、上位クラスと下位クラスの教育的介入方法としては、扱うテキストの難易度に傾斜をつける以外の選択がないに等しい。このため、習熟度別の、英語学習に向かう心理的諸要因の因果モデルが解明されると、各習熟度別学習者の心理状態を加味

した課題設定や授業内活動の指針を打ち立てることができる。英語教員が授業内容を設定するための新たな基準を提供できることは、この研究の大きな利点である。

2. 研究計画

2022 年度の研究計画は以下の表のとおりである。2022 年度は各大会の開催および論文誌の μ 切に合わせて研究課題を 3 つ設定し (課題①～③)、応募と成果報告を行った。課題の詳細はセクション 3 で述べる。

(研究計画)

年度	4～7月	8～11月	12月～3月
2022 年度	1. 先行研究のレビュー 2. 質問紙調査とデータ集計 (課題①) 3. 2022年日本教育工学会秋季全国大会へ応募 (課題①)	4. 3の全国大会で成果報告 (課題①) 5. 質問紙調査とデータ集計 (課題②と③) 6. International Convention of Psychological Science (国際会議 ICPS 2023) へ応募 (課題②) 7. 2023年日本教育工学会春季全国大会へ応募 (課題③)	8. 6の国際会議で成果報告 (課題②) 9. 7の全国大会で成果報告 (課題③) 10. 4と8と9の成果を踏まえ、日本教育工学会発行の論文誌へ論文投稿 (課題①②③: 査読中)

3. 計画の進行状況

2022 年度に行った研究課題とその成果は以下の通りである。課題番号①～③は、セクション 2 の表に対応している。

課題①：2022 年 4 月中に、関東の 3 大学に属する社会系、人文系、理系学部の 1～3 年生、計 491 人に調査協力を依頼した。調査協力者を TOEIC の得点の高低別に 2 群に分け (TOEIC 200 点～550 点未満の習熟度下位群、TOEIC 550 点以上の習熟度上位群)、4 つの心理測定尺度、すなわち、国際的志向性尺度、自己効力感尺度、英語不安尺度、英語学習への動機付け尺度を用いた質問紙を用い、英語学習に関する心理状態を測定した。本課題では、英語の習熟度が高いほど心理的要因の相互を繋ぐ因果性が強くなると仮説を立て、2 群のデータを t 検定で比較し、また、パス解析で各群の心理状態の因果関係を探っ

た。

t 検定とパス解析の結果から導き出せる点は3つである。(1) 英語習熟度上位群は下位群に比べ、心理的諸要因の因果関係が整っており、英語学習へ向かう動機付けへのプロセスが明確である。(2) 上位群は英語学習の不安の低さが他の心理的要因に良い影響を与えており、英語に対する自信の高さ、国際性への関心の高さ、学習の動機付けの高さに繋がっている。これら2点については仮説に合致している。他方、仮説に反し、(3) 国際性から動機付けへの影響は、下位群でより強かった。動機付けに与える影響は、国際性よりも不安のほうがより大きいと言えるものの、原因の解明については今後の課題とした。動機付けを高めるには、不安と他の心理的要因の因果性を高める教育的介入の模索が必要であることが示唆された。

なお、本課題の成果は日本教育工学会 2022 年秋季全国大会（第 41 回大会）で発表した。

課題②：2022 年 10 月中に、関東の 3 大学に属する社会系、人文系、理系学部の 1~3 年生、計 176 人に調査協力を依頼した。調査協力者を TOEIC の得点の高低別に 2 群に分け (TOEIC 200 点~550 点未満の習熟度下位群、TOEIC 550 点以上の習熟度上位群)、課題①で用いた 4 つの心理測定尺度に加え、学習者の動機付けに影響すると考えられる、自身の英語能力観を問う暗黙理論尺度を用い、英語学習へ向かう心理状態を測定した。本課題では、2 群のデータを t 検定で比較し、また、パス解析で各群の心理状態の因果関係を探った。

t 検定とパス解析の考察から導き出せる点は3つである。(1) 課題①の研究結果と同様に、習熟度上位群の方が下位群に比べ、心理的な学習機序が整っていることが分かった。(2) 上位群のパス図では暗黙理論がどの心理的要因にも有意な影響がない一方、下位群のパス図では英語不安と自己効力感に弱い影響があった。(3) 上位群がより増加理論 (自身の能力は努力によって変わると捉える傾向) を持つ一方、下位群はより実体理論 (自身の能力は努力によって変わることはない) と捉える傾向) を持つことが分かった。今回の調査から次のことが言える。すなわち、高習熟度

の学生は、自身の能力観と英語学習に関する心理状態に関連性がない。低習熟度の学生は、英語の習熟度の低さは自身の能力が固定的であるからと考える傾向があり、固定的な能力観は高い不安を呼び起こし、また自信も低下させることが分かった。英語は学習時間と習熟度が比例する学問であり、また、高習熟度の学生は増加理論的な傾向が強い。したがって、教育的介入としては「努力することに意味がない」のような考え方を払拭し、増加理論的な能力観を持つように導くのが良いであろう。このことは、不安を解消し、また自信も高め、最終的に動機付けの向上をもたらすかもしれない。

なお、本課題の成果は International Convention of Psychological Science 2023 in Belgium (ICPS 2023) で発表した。

課題③：2022 年 11 月末日に、関東の私立大学に属する社会系学部の 1 年生、計 159 人に調査協力を依頼した。調査協力者全員に TOEIC Bridge を受験してもらった結果、全ての協力者が TOEIC に換算すると 200 点~550 点未満の習熟度下位層に属することが分かった。調査協力者には課題①で用いた 4 つの心理測定尺度、ならびに課題②で用いた暗黙理論尺度に加え、学習方略に影響すると考えられるメタ認知尺度を用いた質問紙に回答してもらった。今回メタ認知能力尺度を用いたのは、動機付けをはじめとした心理状態との因果関係を詳細に明らかにすることで、学習者の学習意欲の向上と行動の改善により確な教育介入が可能になるものと考えからである。各心理測定尺度で得られたデータをパス解析し、心理状態の因果関係を探った。

パス解析の結果から導き出せる点は2つである。(1) 動機付けが学習方略的メタ認知に影響を与えることが分かった。(2) 自己効力感から学習方略的メタ認知への影響は直接的な影響は弱いと言えるが、動機付けを介した間接効果は中程度となりその影響が増大することが指摘できる。上記の結果から言えるのは、学習者の自己効力感を改善することは直接的には学習方略的メタ認知能力を向上させ

ないものの、動機付けと自己効力感に共にアプローチをすることで動機付けからメタ認知能力への影響力をより強化させるものとなることである。言い換えると、英語に対する自信があればこそ、学習により戦略的に取り組むことが可能になるという機序の存在を示唆するものである。今回は調査協力者が低習熟度層に限られたため、高習熟度層のメタ認知の状態は明らかにすることができなかった。今後は対象者を広げ、今回の結果と比較することで、英語習熟度が学習方略的メタ認知に与える影響の違いを検討したい。

なお、本課題の成果は日本教育工学会 2023 年春季全国大会（第 42 回大会）で発表した。

現在、課題①②③の調査で得たデータを集約して分析しなおした研究成果は、日本教育工学会の論文誌（2023 年 4 月 2 日発行）に投稿し、現在査読中である。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

4.1 今後の研究計画

2022 年度に得た研究成果をもとに、科研費に応募したところ、2023 年度～2026 年度にかけて基盤研究(C)が受給されることになった（課題番号：23K00660、研究課題名「非英語専攻学生の英語習熟度に着目した心理的諸要因のパス解析による因果モデル構築」、研究代表者：新谷真由（本課題の申請者））。

2022 年度の研究過程（課題①②③）で、心理状態を測定する際の質問紙で用いてきた心理測定尺度の適切性についての疑問が生じた。非英語専攻学生を対象とした調査を行なった際に、調査結果を統計分析したところ、信頼性係数に十分な高さが見られなかった項目が多くあったからである。一般的にこれらの心理測定尺度は英語を専門とする大学生をサンプルに作成されてきたものであった。このため、教養科目として英語を学ぶ一般的な大学生には、同様の心理測定尺度で心理状態を測定する際に、より適切な質問項目の設定の必要性があることが明らかとなった。これが、科研費の申請をするに至った経緯である。今

後は、調査協力者から自由記述にて英語学習に対する考えを書いてもらい、データをテキストマイニングすることで、非英語専攻学生に適切な心理測定尺度を作成し、心理状態の因果関係を適正に測定する手段の構築を目指したい。

4.2 これまでの論文投稿・発表状況

【口頭発表と講演論文】

1. 新谷真由，藤田邦彦，縣由衣子 「英語習熟度に着目した心理的諸要因の因果関係の解明—自己効力感，不安，国際的志向性，動機付けの連関をパス解析で探る—」日本教育工学会 2022 年秋季全国大会（第 41 回大会），2022 年 9 月 11 日，講演論文集 pp.159-160（課題①）。
2. Mayu Janssens-Shintani, Yuiko Agata, Kunihiro Fujita “Japan’s low-proficient English learners convinced of having fixed abilities: source of high anxiety and low confidence,” International Convention of Psychological Science 2023, Brussels Convention Centre, 2023 年 3 月 11 日（課題②）。
3. 縣由衣子，藤田邦彦，新谷真由「非英語専攻学生の英語学習に関する心理的機序とメタ認知能力の因果性を探る」日本教育工学会 2023 年春季全国大会（第 42 回大会），2023 年 3 月 26 日，講演論文集 pp.541-542（課題③）。

【投稿論文】

1. 新谷真由，縣由衣子，藤田邦彦（2023）「マインドセットに着目した心理的諸要因と英語習熟度の因果関係の解明」日本教育工学会論文誌 vol.47 Suppl.（2023 年 4 月 3 日受理，査読中）。

鋼の冷却促進に対する酸化スケールと表面粗さ利用の検討

材料工学科 遠藤理恵

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

鉄鋼製造の熱間圧延工程では、加熱炉において約 1200°Cに加熱された鋼(スラブ)が高温下で圧延されていく。熱間圧延工程の概略図を図 1 に示す。粗圧延、仕上げ圧延を経て、鋼板は水冷却され、厚板やコイルなどの鋼製品となる。

仕上げ圧延後の鋼板は約 900°Cであり、水冷却では、900°C程度の高温の鋼板に冷却水をかけている。水冷却はじめの高温では、鋼板上には水蒸気膜が形成される。鋼からの熱は水蒸気膜を介して逃げていく。一方で温度が低くなると、鋼と水が直接接触し、水の蒸発熱として鋼から熱が奪われ、鋼は冷却される。この高温と低温での冷却を比較すると、高温では膜沸騰で鋼の冷却速度は遅く、低温では核沸騰となり、鋼は急速に冷却される。膜沸騰から核沸騰へ遷移する温度をクエンチ点と呼び、クエンチ点において鋼は急速に冷却されるようになる。鋼板の水冷却中にクエンチ点を通過する場合、鋼の温度制御が難しくなり、鋼製品の均質性にも影響を及ぼす。このような背景から、冷却工程の初期の高温でクエンチ点を通過するような鋼の温度制御技術が求められている。

鋼板の冷却速度には、鋼板表面に形成する酸化膜(酸化スケール)が影響を与えることが知られている。酸化スケールの熱伝導率は鋼よりも小さいため、断熱効果により酸化スケール表面のみ温度低下させることができ、冷却水と酸化スケールが直接接触すると鋼はク

エンチされる。クエンチ温度を変化させるための条件としては、酸化スケールの断熱性に着目すると、その厚さや表面粗さが挙げられる。報告者らは、鋼の冷却に対する酸化スケール厚さの影響を評価するために、酸化スケールの熱物性値の評価および加熱鋼板の冷却実験を行ってきた¹⁻⁴⁾。冷却に関する研究においては、850°Cに加熱・酸化スケールを形成した鋼板を電気炉より取り出し、所定量の水を滴下し、鋼板の温度変化を計測した。この時の水の質量変化も計測して、冷却時の熱流束を計算した。クエンチ点と酸化スケール厚さの関係を調べたところ、クエンチ点温度はスケール厚さに対して増加する傾向がみられたが、相関関係は不明瞭であった。この理由として、鋼板に滴下できる水の量が 3 g と限られていたことが挙げられる。すなわち、酸化スケールに着目した鋼の冷却実験を行うためには、十分な冷却水の量が必要であることがわかった。このためには、冷却水の量が十分なプール沸騰冷却の実験が適している。また、酸化スケールの表面粗さと断熱性に着目した研究は未だ実施されていない。酸化スケールの断熱性をさらに高めるためには、表面を粗くし、水蒸気との混合層とすることが挙げられる⁵⁾。

以上より、本研究の目的は、プール沸騰冷却実験により、加熱した鋼の温度変化と沸騰状態を同時に観測する手法の確立し、酸化スケールと表面粗さを利用した鋼の水冷却時の熱伝達促進を実証することを目的とする。そ

の第一歩として、本年度は、室温の鋼球を液体窒素中に冷却し、その温度と沸騰状態を同時に観測する実験手法を確立することを目的とした。

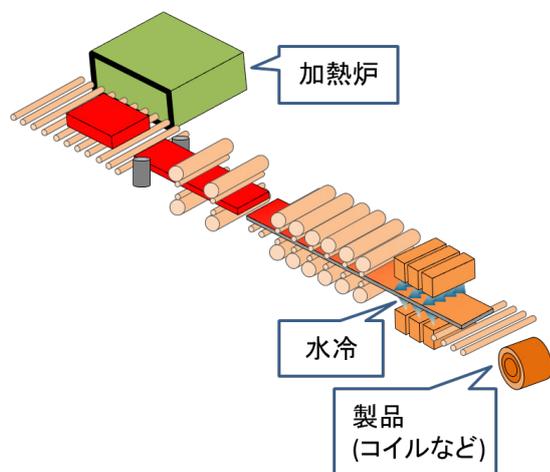


図1 鉄鋼製造の熱間圧延工程の模式図

2. 研究計画

実験方法の確立のために、室温のステンレス鋼球を液体窒素中に浸漬する実験を行った。この組み合わせとすることで、加熱鋼板と水の組み合わせよりも実験装置を簡便に作製でき、繰り返し実験が容易になる。また、ステンレス鋼球上の断熱層として酸化スケールではなく、霜層(氷と空気の混合層)を利用した。

供試材として直径 20 mm のステンレス鋼球 (SUS304) および直径 25 mm の銅球を用いた。球の中心まで直径 1 mm の穴をあけ、K 型熱

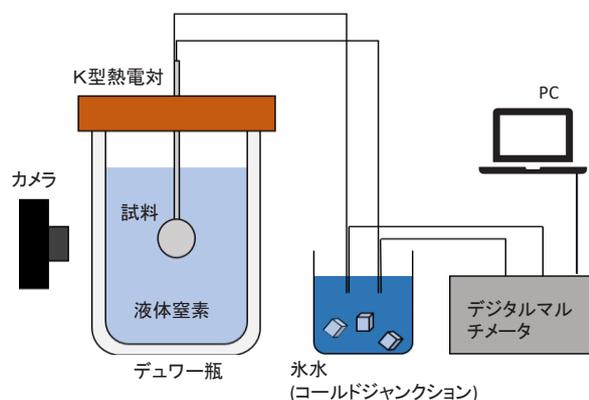


図2 冷却実験の模式図

電対を挿入し、固定した。鋼表面の酸化スケールに替えて、熱伝導率の低い霜層をステンレス鋼球および銅球の表面に形成させた⁵⁾。霜層は次の手順で作製した。液体窒素表面近くにステンレス鋼球を保持して、鋼球温度を -40°C とした。これを室温・空気中に取り出し 6 min 保持した。この操作により、空気中の水蒸気がステンレス鋼球上に凝縮し、霜層を形成する。図2に実験の概略図を示す。冷却実験ではステンレス球を液体窒素液槽に入れて冷却した。冷却時の温度履歴は、挿入した K 型熱電対の熱起電力をデジタルマルチメータを用いて計測した。併せて沸騰の様子をビデオカメラ (60fps) で撮影した。比較として、霜層がない場合の冷却実験も同様に行った。

表1に用いた物質の熱伝導率を示す。霜層の熱伝導率はステンレス鋼の $1/100$ 、銅の $1/2000$ であり、同じ厚さの酸化スケールと比較して断熱性が高いことがわかる。銅球は鋼よりも熱伝導率が高い。このため、集中熱容量モデルを適用でき、測定された球中心の温度は、銅表面の温度に一致すると考えられる。

3. 計画の進行状況

図3に霜層がついていない銅球を液体窒素に浸漬したときの温度変化と概観写真を示す。バックライトとして LED パネル光源を用い、青色のクリアホルダにより減光している。図3の温度変化を見ると、銅球を液体窒素に浸漬すると、緩やかに温度が低下するが、浸漬後約 193 s において温度が急激に低下していることがわかる。図3の下の写真は、特徴的な時間における球の様子を示している。浸漬後 151.4 s では、銅球の周りに波状の蒸気膜が形成している。蒸気膜は上部に移動していった。この状態は膜沸騰であると判断できる。浸漬後 193.1-196.7 s の間では、蒸気の形成の様子が急激に変化した。まず、193.1 s に見られるように、蒸気泡の大きさが大きくなり、

表 1 用いた金属と断熱層の熱伝導率

物質	熱伝導率[$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	備考
銅	421-386 (100-300 K)	White & Minges ⁶⁾
ステンレス鋼	16.2 (373 K)	Shiokawa et al. ⁷⁾
霜	0.07-0.22 (233-263 K)	密度によって異なる値 関ら ⁸⁾
鉄	56.4 - 28.3 (573 - 1200 K)	Ho et al. ⁹⁾
FeO スケール	2.2 (300 - 1200 K)	Li et al. ²⁾

激しく大量の泡が形成された。その後、196.7 s に見られるように細かい泡が形成され、一部の泡は球から離れて上昇していった。この状態は核沸騰であると判断できる。同様の泡の形成は 196.7 s 以降も観察された。このように、銅球中心部の温度変化は銅球の蒸気膜・気泡の形成と一致しており、温度から沸騰状態を判断できることがわかった。

同様の実験を霜層をつけた銅球についても実施したところ、霜層付き銅球を液体窒素に浸漬後約 7 s において急激な温度低下が観測できた。霜層をつけることで、クエンチするまでの時間が大幅に短縮され、また、クエンチ温度も上昇することが確認できた。

ステンレス鋼球の場合の温度変化から判断したクエンチ開始時間は、霜層なしで浸漬後約 133 s、霜層を付けた場合には約 30 s であった。しかしながら、蒸気膜および気泡の形成と温度変化は合致していなかった。これは、ステンレス鋼の熱伝導率が低いため、球表面の温度と球中心部の温度が一致しないことが理由として挙げられる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況 【今後の計画】

沸騰熱伝達の観点からは、クエンチ点や冷却の熱流束を変化させるために、被冷却材側

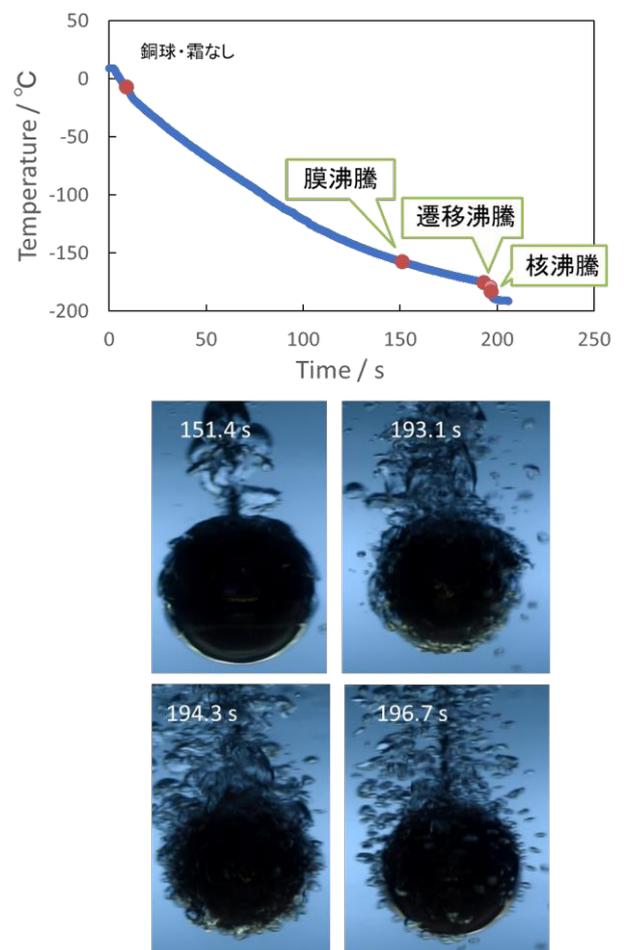


図 3 液体窒素中に銅球(霜層なし)を浸漬したときの中心部の温度変化および代表的な時間における外観の写真

の因子として、表面粗さが挙げられる。例えば、銅球上に生成した霜層(氷と空気の混合層)については、霜層の割合が増えるほど、表面の断熱性が高くなり、クエンチ点が上昇することが報告されている¹⁾。この現象を加熱鋼板に対して利用することで鋼板を高温から素早く冷却できると考えている。

2022年度は、ステンレス球および銅球を用い、断熱層として霜層を形成させ、プール沸騰実験を行いその温度変化と概観の変化を観察した。その結果、表面断熱層が金属球の冷却に対して影響することを観察できた。一方で、プール沸騰実験によって、金属球の冷却に対する表面断熱層の影響を評価するためには、以下のような問題点が挙げられた。

- ・ステンレス鋼表面の温度と中心部の温度は必ずしも一致しない。これは、鋼の熱伝導率が低いために、集中熱容量モデルが適用できないためである。今後は、複数の熱電対を適切な位置に挿入して、熱電対の温度から表面温度を逆算できるようにする必要がある。

- ・霜層の厚さが評価できていないため、測定装置を導入する必要がある。

また、上に加えて今後の解析の課題として、以下の点が挙げられる。

- ・表面の熱流束・熱伝達係数の変化を計算する。

- ・高速度カメラを用いて、核沸騰の始まりをより詳細に観察する。

今後は上の課題を解決し、当初の目的を達成していく。

【学会発表状況】

○遠藤理恵: “酸化スケールの熱伝導率と熱抵抗の評価”, (社)日本鉄鋼協会 創形創質工学部会冷却フォーラム 第2回講演会「ROT冷却研究の進展」 2023年3月15日

○武藤直士, 大久保英敏, 遠藤理恵: “ステンレス鋼球と銅球の液体窒素を用いた冷却時の温度と沸騰状態の観察”, 日本鉄鋼協会 評

価・分析・解析部会 高温における最適な材料プロセス制御を目指した材料特性評価フォーラム シンポジウム 2023年2月9日

○武藤直士, 大久保英敏, 遠藤理恵: “ステンレス鋼球の冷却における温度および沸騰状態の同時観察～酸化スケールを用いた鋼の加速冷却を目指して～ホットストリップ法による熱伝導率/熱浸透率測定の高温化に対する検討”, 一般社団法人日本鉄鋼協会 第184回秋季講演大会 学生ポスターセッション 2022年9月22日

参考文献

- 1) R. Endo, T. Yagi, M. Ueda and M. Susa: *ISIJ Int.*, **54**(2014), 2084.
- 2) M. Li, R. Endo, M. Akoshima and M. Susa: *ISIJ Int.*, **57**(2017), 2097.
- 3) Y. Yang, H. Watanabe, M. Ueda, M. Hayashi, M. Susa and R. Endo: *ISIJ Int.*, **58**(2018), 2186.
- 4) 大杉祐人, 上田光敏, 遠藤理恵, 須佐匡裕: 鉄と鋼, **104** (2018) 72.
- 5)大久保英敏: 伝熱, **57** (2018), 26.
- 6) G.K. White, M.L. Minges, Thermophysical Properties of Some Key Solids: An update. *Int J Thermophys*, **18** (1997), 1269.
- 7) T. Shiokawa, Y. Yazawa, S. Okada: JFE TECHNICAL REPORT, (2008),45.
- 8)関光雄, 大久保英敏, 下村信雄, 山上野雅之: 日本冷凍空調学会論文集, **126**, (2009),25.
- 9) C. Y. Ho, R. W. Powell, P. E. Liley; *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **1** (1972), 279.

本質的に無損耗なイオン推進機の開発

電気工学科 川嶋 嶺

共同研究者

テキサス A&M 大学 航空宇宙工学専攻 Junhwi Bak

1. 序論

近年の宇宙開発は活況を呈しており、Space X 社の Starlink による 3000 基以上のコンステレーション達成、JAXA のはやぶさ 2 による小惑星サンプルリターンなど宇宙利用の可能性が拡大している。これらの衛星では宇宙航行や軌道制御のための推進機を搭載するが、特にイオン推進機と呼ばれる電気のエネルギーを利用するシステムを搭載している。今後の宇宙開発においては、ミッションの規模を問わず高性能かつ長寿命なイオン推進機が重要な開発課題となっている。

従来の多くのイオン推進機はキセノンガスを利用しており、電離により生じるキセノンイオンを加速、排出することにより推進力を得るシステムであった。しかしながら、この

システムでは以下の様な問題点がある。

- 1) 地球上でのキセノンの年間生産量は限られており、今後宇宙利用における消費量を賄えない。
- 2) 加速したイオンの一部が推進機の壁面部材に衝突することでその部材を損耗させ、このことが推進機寿命を制限する。

これらの問題点を解決するため、現在様々なキセノンを代替する推進剤の研究や、壁面損耗を低減する推進機設計法の研究などが行われている状況にある。

本研究では、先述のイオン推進機における問題点を解決するため、固体推進剤をイオン生成部に直接供給するイオン推進機の開発を行う。この推進機の模式図を図 1 に示す。キセノンの代替推進剤として固体推進剤を用い

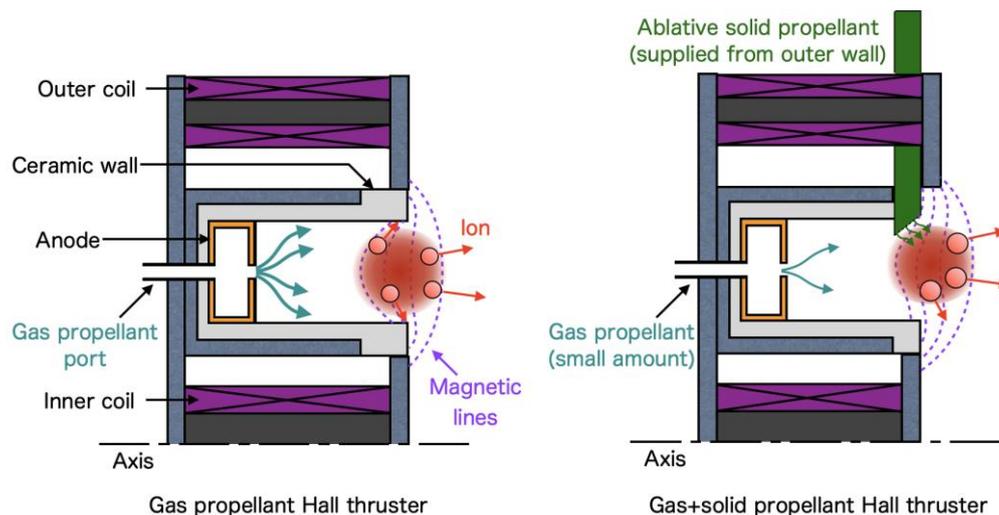


図 1 ホールスラスタのチャンネル断面におけるイオン生成の模式図。(左) 従来のガス推進剤供給の場合、(右) 固体推進剤を壁面から直接供給する場合。

る研究は過去に提案されているものの、イオン生成部に直接固体を供給する方式は過去に例のない新しい試みとなる。また特に損耗が著しい放電室壁面部を固体推進剤に置き換え、推進剤を連続供給することによって、壁面無損耗を実現しようとするものである。

今年度は固体推進剤をイオン推進機のプラズマ生成部に直接供給した際の、推進剤消費量（下記では流量と表現する）の算出法を確立することを目標として研究を行った。プラズマ流解析、推進機熱解析、そして推進機作動実験を組み合わせるアプローチを取っており、今年度はその研究方式の妥当性を確かめる。イオン推進機としては、日本において研究が続けられてきたアノードレイヤ型ホールスラストを検討し、固体推進剤ではパルス型プラズマスラストと呼ばれる電気推進システムで利用実績が多数ある poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE, テフロン)を使用する。

2. 研究計画

固体推進剤 PTFE の流量算出法の確立へ向け、今年度実施した内容は以下の3点である。

A. ホールスラストの1次元プラズマ解析

ホールスラストプラズマから固体推進剤表面へ流入するエネルギー流束を算出するため、1次元プラズマ解析を行う。PTFE は昇華性を持っており、プラズマからの入熱によって固体表面が高温となり、昇華によって推進剤が供給される。イオンと中性粒子を粒子として、電子を流体として扱うハイブリッドモデルを用いた放電プラズマ解析を行う。

B. 固体推進剤ホールスラストの熱解析

固体推進剤 PTFE の表面温度を予想するため、固体推進剤を持つホールスラストの熱伝導・放射解析を行う。3次元熱解析には商用ソフトである Autodesk Inventor Nastran を用いる。プラズマ入熱量と熱解析を連成させることで、PTFE の熱分解に消費されるエネルギーを算出し、PTFE の流量を算出する。

C. ホールスラストプラズマに接触する PTFE の温度計測実験

固体推進剤の直接供給における流量算出モデルを確立する上で、モデル妥当性検証のための実験を行う必要がある。今年度はプラズマ入熱量解析の妥当性検証のため、作動中のホールスラストプラズマに PTFE 片を挿入し、PTFE 内部の温度上昇を計測する。PTFE の過剰な供給と固体の表面付着によって推進機が汚染されることを懸念し、数分程度の推進機作動における温度上昇計測を実施した。

3. 計画の進行状況

A. 1次元プラズマ解析による入熱量算出

1次元ハイブリッドモデルによって固体推進剤表面へのエネルギー流束を算出した。プラズマ解析モデルは作動ガスキセノンにおいて開発されてきたが、本解析では代替推進剤であるアルゴンにおける作動を解析した。アルゴンにおける衝突断面積データなどから化学反応モデルを実装し、実験で用いる推進機作動条件においてプラズマ解析を行った。

アルゴン作動における推進機のプラズマ維持を数値シミュレーションにより確認した。プラズマからの推進機壁面加熱は主にイオン衝突によるエネルギー交換により行われる。プラズマと壁面の間にはシースと呼ばれる領域があり、壁面へ向かって大きな電圧降下が起こる。この電圧降下で加速されたイオンのエネルギーが熱として壁面表面へと伝わる。本解析では推進機の放電電圧を 200 V, 250 V, 300 V と変化させて壁面熱流束を評価しており、それぞれ 124 kW/m^2 , 396 kW/m^2 , 394 kW/m^2 となった。放電電圧を 200 V から 250 V に上昇させた際は、推進剤のイオン化が促進されたため、壁面へ衝突するイオン数の上昇に伴い熱流束も増加した。一方 250 V の時点で推進剤はほぼ完全電離となっていたため、放電電圧 250 V と 300 V の間での熱流束はほぼ変わらなかった。

B. 固体推進剤を含む推進機の熱解析と固体推進剤供給量算出

PTFE の昇華による推進剤供給量を見積もるため、PTFE 及び推進機内部での熱解析を行った。熱解析には 3 次元の熱伝導解析ソフトである Autodesk Inventor Nastran を用いた。推進機の壁面はステンレスであるが、これを固体推進剤 PTFE に置き換えた場合の解析を実施した。

放電電力 780 W で推進機を作動させた際の壁面熱流束は 42.3 kW/m^2 であり、この際の PTFE 表面温度は 880 K となった。PTFE の昇華温度は 600 K から 650 K 程度であるため、プラズマからの熱流入によって PTFE が昇華温度以上に温められることが確認された。次に壁面熱流束を 15 kW/m^2 と設定した場合の推進機温度分布を図 1 に示す。このとき PTFE の表面温度は 600 K 程度となったため、PTFE 表面において、熱分解によってエネルギー消費が起きている状況を再現している。すなわち、プラズマからの熱流束 42.3 kW/m^2 から壁面温度 600 K を維持するのに必要な熱流束 15 kW/m^2 を差し引いた 27.3 kW/m^2 が PTFE 熱分解によって消費される熱量であると見積もられる。PTFE の単位質量あたりでの熱分解に必要なエネルギーはおよそ $1.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$ であるため、単位面積あたりの PTFE 昇華量は $1.8 \times 10^{-2} \text{ kg/(s m}^2)$ となった。推進機 RAIJIN66 の外側壁面が PTFE であったとすると、固体推進剤流量は 7.6 mg/s と見積もられる。推進機のキセノン作動における流量が 3.4 mg/s であるため、固体推進剤の供給量はガス供給量を上回っており、図 1 に示した様な少量のガス推進剤と多量の固体推進剤を組み合わせたハイブリッド推進剤による推進機作動が期待できることが分かった。

PTFE の昇華によって消費するエネルギーは 11 W となった。プラズマからの推進機壁面への熱流が 105 W であったため、固体推進剤の利用によって、壁面熱流束の 1 割程度をア

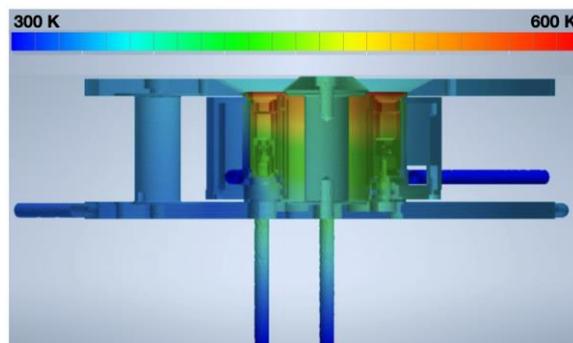


図 2 3 次元熱解析で得られたホールスラスト実験機の温度分布。チャンネル壁面をなす PTFE の位置において PTFE の昇華温度 600 K となっている。

ブレーション冷却する効果があることが分かった。すなわち、ガス推進剤と比較して固体推進剤の昇華にエネルギーが必要であることはデメリットではなく、むしろ壁面冷却に貢献する効果があることが分かった。

C. ホールスラストプラズマに接触する PTFE 部材の温度計測実験

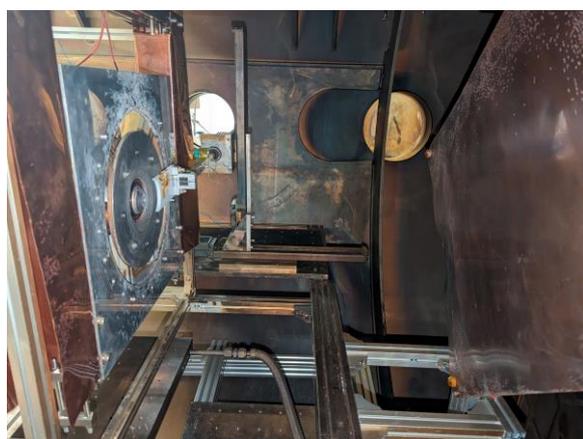
ホールスラストの 1 次元数値シミュレーションで壁面へのエネルギー流束を算出したが、この妥当性を検証する実験を行った。既存のホールスラスト実験機 RAIJIN66 の側面から PTFE 部材を挿入し、PTFE の温度を計測することでプラズマからの熱流束を求める。実験の外観を図 3 に示す。PTFE 片は $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ であり、50 mm の辺を RAIJIN66 のチャンネル外径である 66 mm の曲率に加工してある。PTFE 片では熱電対によって温度計測を行うが、厚み方向の温度勾配は無視する。

PTFE 片を挿入した状態でのホールスラストの作動の様子を図 4 に示す。作動中は PTFE 片の温度とともに推進機各部の温度も上昇した。今回の実験では、PTFE の急激な昇華による推進機汚染を懸念し、PTFE 温度が昇華温度である 600 K に至る前に推進機を停止させた。

推進機作動中の PTFE 片はプラズマからの熱によって温度上昇した。実験前後では PTFE の質量変化は観測されず、推進剤昇華が起き



(a) 正面



(b) 側面

図 3 ホールスラスタ実験機と挿入時の PTFE 片との位置関係。

る前に推進機を停止できていることが確認された。温度の上昇率から、PTFE 片にプラズマから入熱する熱流を見積もったところ、39 W 程度となった。PTFE 表面へ流入する熱流に関する実験と数値解析の比較を図 5 に示す。今回の実験では推進機に放電電圧である 200 V が正しく印加されていなかった可能性があり、横軸放電電圧の位置が実験と数値解析で食い違っている。推進機の放電回路を改善して再実験を行いたい。しかしながら、熱流について実験と数値解析の間でオーダー程度の一致は期待できる結果となっており、プラズマ流解析を利用した熱流束算出の妥当性が確認された。

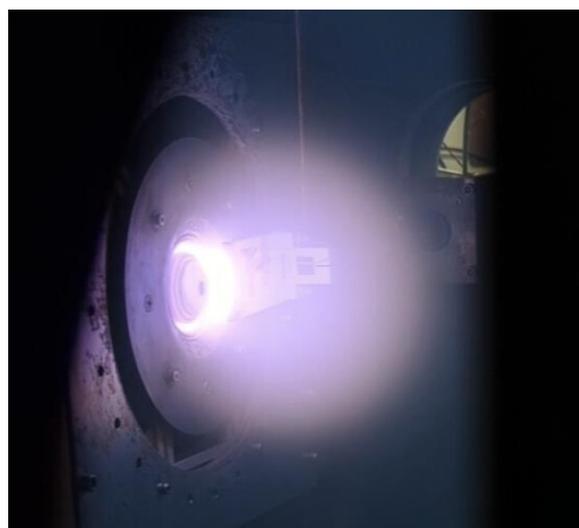


図 4 アルゴンにおいて作動中のホールスラスタに PTFE 片を挿入した様子。

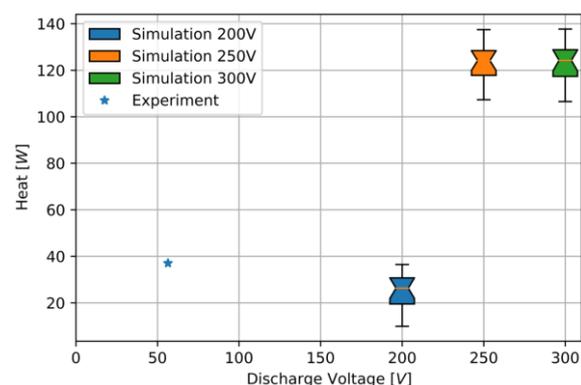


図 5 PTFE 片の表面熱流に関する実験と数値解析の比較。

4. 今後の計画

固体推進剤を利用し本質的に無損耗となるイオン推進機の実現に向けて、今後は以下の項目に関する研究を実施する予定である。

- 1) 推進剤供給量と表面熱流束の算出法確立
- 2) 固体推進剤によるイオンビーム電流計測
- 3) 固体推進剤を含む新型推進機の開発

論文発表について、今年度の成果及び上記 1), 2) の項目の成果を元に論文としたい。2022 年度はホールスラスタの研究について、国際会議論文 7 件（代表者主著 5 件、内 2 件招待講演、代表者共著 2 件）の発表を行った。

今回の研究は東京大学小紫研究室の D. Satpathy 氏, N. Barth 氏の協力のもと行われた。ここに謝辞を表す。

Production of Engineered Microplastics by Proton Beam Writing (PBW)

電気工学科 Puttaraksa Nitipon

Research colleagues
電気工学科 Prof. NISHIKAWA Hiroyuki

SIT Research Laboratories Assoc. Prof. SEKI Hironori

1. Paper introduction

This report provides the progress of SIT Project for Research Grant (Start-up in FY2022).

Nowadays, it has been recognized that our world has faced the problems of microplastics, in which the plastic size is less than 5 mm [1]. As published by the Japan Times on July 3, 2022, microplastics can be found everywhere, such as in oceans, air, and human organs [2]. As a result, it is essential for researchers around the world to tackle and solve the current microplastic issues.



Figure 1: An image of microplastics. Image credit: Oregon State University, obtained from Wikimedia Commons under CC-BY-SA-2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/deed.en>).

Figure 1 demonstrates an example of microplastics that have been a concern in global environments. Typically, the shapes of microplastics can be classified as microbeads, resin pellets, fragments, foams, films, and lines/fibers [3]. Due to the different microplastic shapes, detecting microplastics in various shapes is still challenging. Thus, engineered microplastics are needed as the model plastics to develop a standard analytical tool for identifying and monitoring environmental microplastics.

This research project aims to utilize a proton beam writing (PBW) technique for producing SU-8 engineered microplastics, as shown in Fig.2, for future environmental research.

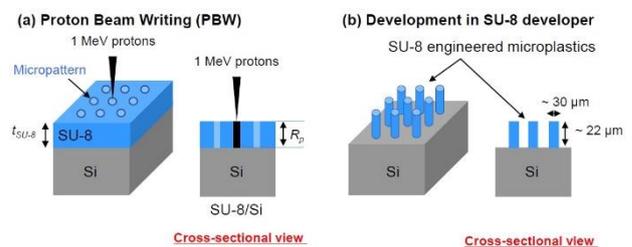


Figure 2: Schematic drawing of fabricating engineered microplastics in SU-8 by (a) proton beam writing (PBW) and (b) after development in SU-8 developer.

2. Research program

This research project employed the equipment, i.e., a spin coater, a hot plate, a 1 MeV proton beam writer, an optical microscope, and a confocal laser microscope, as shown in Fig.3. The processes for making the SU-8 engineered microplastics by the PBW method are as follows:

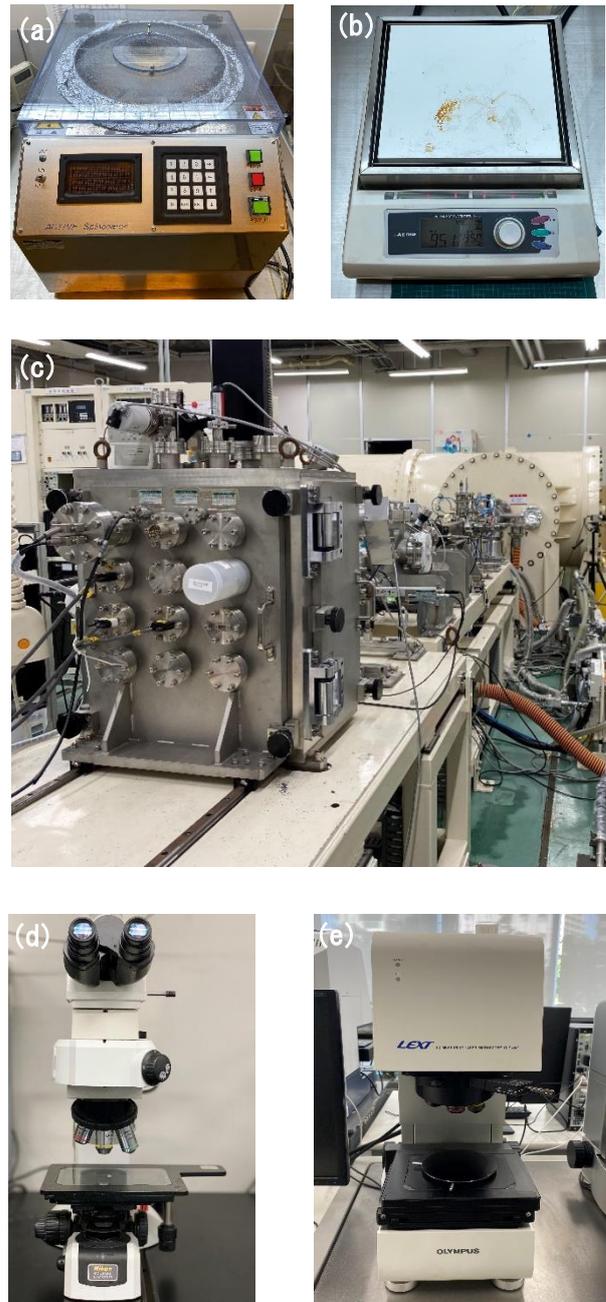
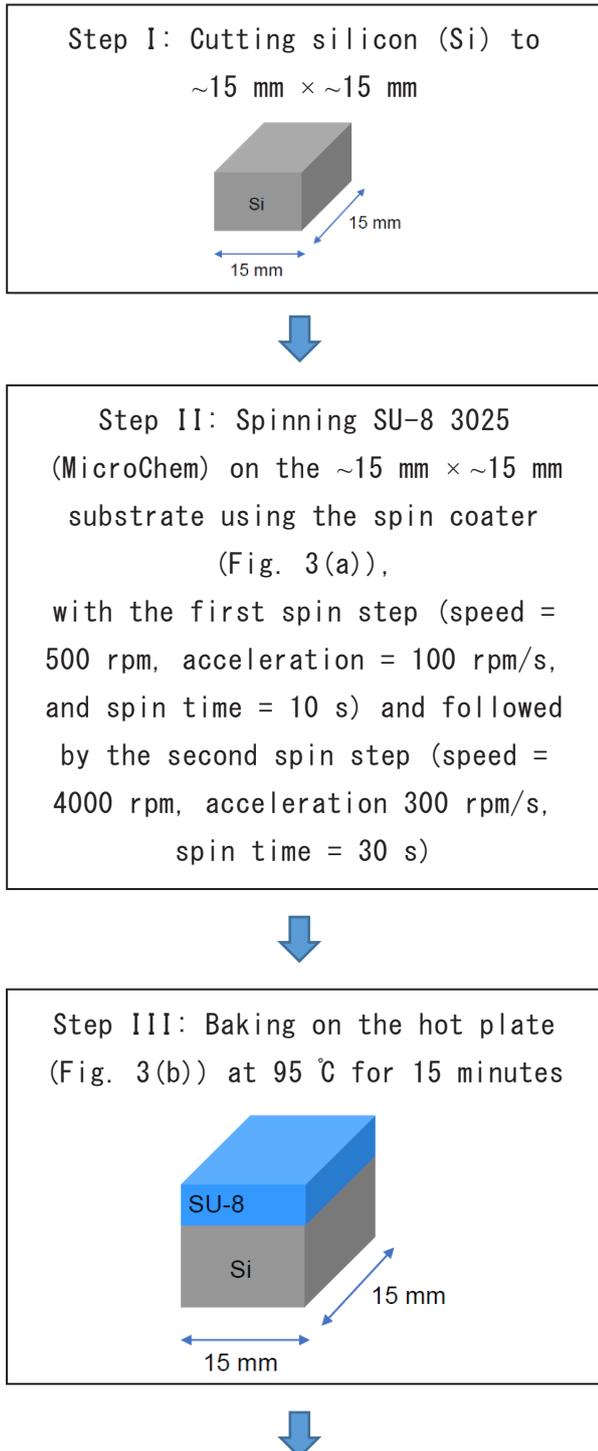
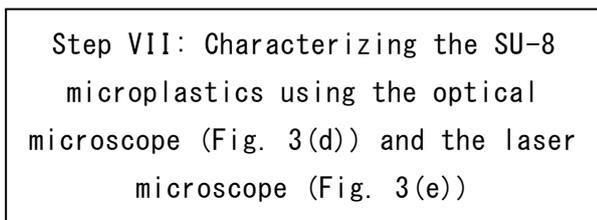
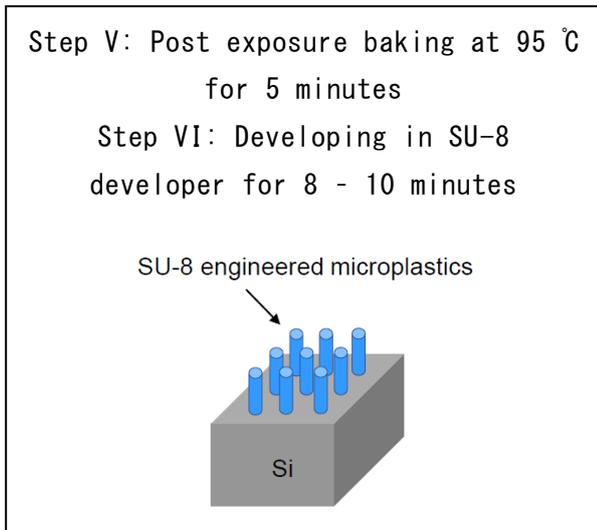
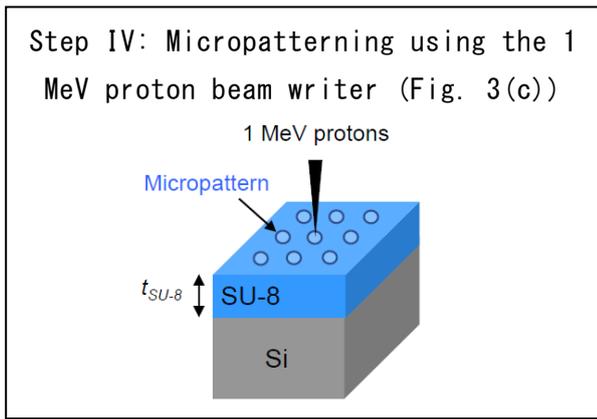


Figure 3: The main equipment used to produce SU-8 engineered microplastics in this research project. (a) A spin coater, (b) A hot plate, and (c) A 1 MeV proton beam writer, at a shared equipment and facility center, Omiya campus. (d) A Nikon LV100 optical microscope at Prof. Nishikawa's laboratory, and (e) An Olympus LEXT OLS4000 confocal laser microscope at Techno Plaza, Toyosu campus.

4. Future program, paper submission and results briefing

Micropattern in this report for producing the SU-8 microplastics by the PBW was designed with the circles of 30 μm in diameters, as shown in Fig. 4. The writing field for the PBW was 200 μm x 200 μm .



3. State of progress

This research project has successfully utilized the PBW technique to produce the SU-8 engineered microplastics on Si substrates. The results of this work could further be applied as the model natural microplastics that could be used in the future environmental research.

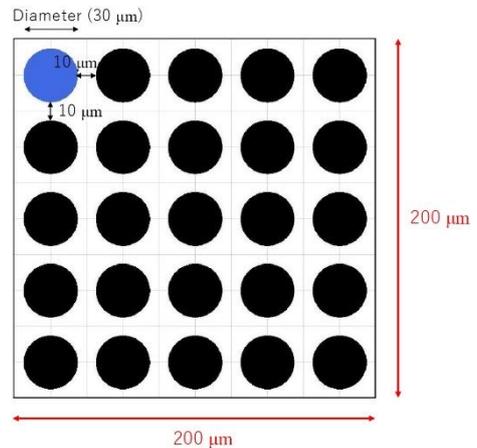


Figure 4: The micropatterning design of the circles with a diameter of 30 μm for the PBW to fabricate the SU-8 engineered microplastics.

Figure 5 (a) and (b) illustrate some SU-8 microplastics that were fabricated by the PBW technique after developing in the SU-8 developer. The results show the smooth surface of the SU-8 microplastics, which is one of the advantages of using the PBW for fabricating engineered microplastics.

Experimental result also demonstrates that the SU-8 microplastics were floated from the Si substrate during the developing process. Some SU-8 microplastics were still aligned as the design (see Fig. 5(a)). However, some SU-8 microplastics were moved and aligned in the new arrangement, as seen in Fig. 5(b). This result offers the benefit of collecting the SU-8 microplastics on the Si substrate and can be detached from the substrate when required for the future application.

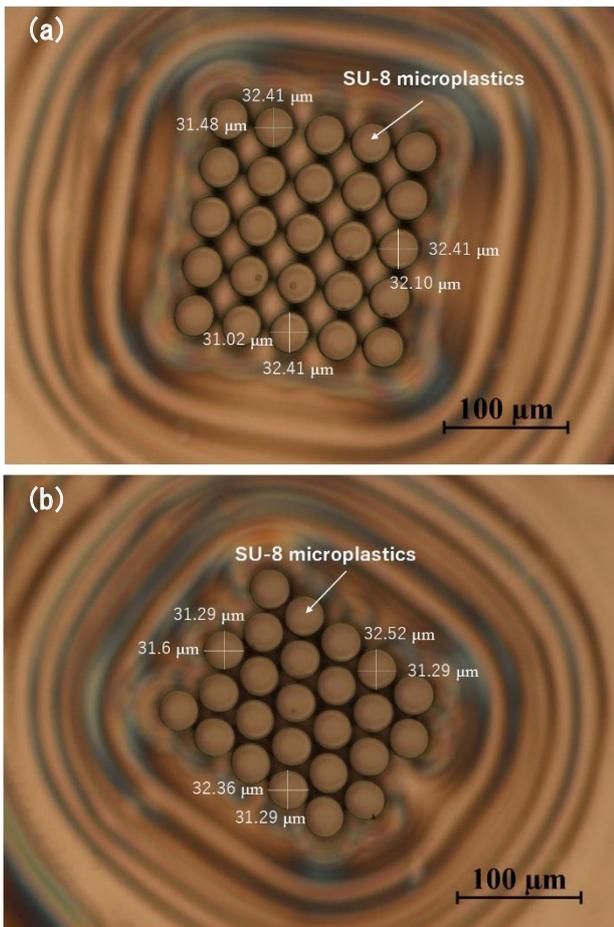


Figure 5: Optical images of the fabricated SU-8 microplastics by the PBW after developing in SU-8 developer, taken by the microscope (Fig. 3d). In the development, the SU-8 microplastics were floated from the substrate and aligned with (a) same arrangement as the design in Fig. 4 and (b) new arrangement.

Generally, the height of the SU-8 microplastics is determined by the thickness of SU-8 film. Figure 6 depicts a confocal laser microscope image of the SU-8 microplastics with the scanning line to measure the height of the SU-8 microplastics. The result indicates that the SU-8 microplastic height was $\sim 22.4 \mu\text{m}$, which is in an agreement of the thickness of SU-8 ($\sim 20 \mu\text{m}$) at the spin speed of 4000 rpm from the data sheet provided by the MicroChem [4].



Figure 6: A confocal laser microscope image of the SU-8 microplastics with a scanning line.

This research project will further develop by coating metals on the SU-8 engineered microplastics. Consequently, the ion beam analysis techniques will be applied to characterize the metals on the engineered microplastics.

This future work is expected to be presented at the IBA & PIXE 2023 conference in October 2023 and published in a conference proceeding.

For FY 2022 activity, I presented the related PBW topic as the invited talk in the title of “Microfabricated Dielectric Structures by Proton Beam Writing for Photonic Nanojets” at the 32nd Annual Meeting of MRS-J (5 - 7 December, 2022).

References:

- [1] G. Kutralam-Muniasamy et al., Journal of Hazardous Materials 415 (2021) 125755.
- [2] <https://www.japantimes.co.jp/news/2022/07/03/world/science-health-world/microplastics-oceans-air-human-body/>
- [3] H.Nagano et al., Marine Pollution Bulletin 162 (2021) 111887.
- [4] <https://kayakuam.com/wp-content/uploads/2020/07/KAM-SU-8-3000-Datasheet-7.10-final.pdf>

術後の心疾患検知のための 蛍光免疫センサ

電子工学科 當麻 浩司

1. 序論

手術は患者にとって侵襲的であるため、様々な合併症によって手術後 30 日以内に毎年約 100 万人が死亡している (Weiser et al. 2008; Iglesias 2014)。このうち心臓病が術後死亡者数の 30% を占めており、「術後心筋梗塞 (PMI)」が大きな問題であると報告・指摘されている (Boersma et al. 2005)。PMI は、非心臓手術後でも患者の約 5~18% で起こる急性の心筋梗塞であり、30 日以内の死亡率は約 4~12% である (Devereaux 2011)。このため、早期発見と治療が必要であるが、術後のため心電図の異常や虚血の症状が現れにくい。その中で心臓トロポニン (cTn) は、心筋梗塞に高い特異性を持つため、PMI の早期発見に有効であることが報告されている。また、ほとんどの PMI は手術後 48 時間以内に発生し、血中 cTn レベルは発症後約 12~24 時間でピークに達する (Landesberg et al. 2009)。現在、chemiluminescent enzyme immunoassay などの既存の検査法があるが、バッチ式であり、一度の測定にしか使用できない。cTnI の半連続的な測定を実現するためには、同じセンサを使用した迅速かつ繰り返し可能な免疫測定が有効であると考えられる。そこで本研究の目的は PMI の早期発見や予防に資する、蛍光バイオセンサを利用した周術期血中心筋マーカーモニタリングシ

テムの要素技術を開発することであった。

2. 研究計画

2022 年度は将来の周術期心筋マーカーモニタリングシステムの構築を見据え、(I) 表面プラズモン増強蛍光 (SPF) センサシステムの構築、(II) 蛍光溶液による SPF センサシステムの評価を行うこととした。

(I) SPF センサシステムの構築

心筋マーカーを高感度に測定するため、表面プラズモンポラリトン (SPPs) の増強された電場により高効率な蛍光励起を実現する SPF センサシステムを構築する。励起光源と表面プラズモンを共鳴励起させるためのプリズム、そしてプラズモンにより励起された蛍光出力を検出するための高感度光検出器により構成され、サンプルはフローセルから送液し、感応部へと負荷される。また本システムの制御・データ取得のため、LabVIEW にてソフトウェア開発も行う。

(II) 蛍光溶液による SPF センサシステムの評価

I において構築した SPF センサシステムの性能を評価するために、濃度の異なる蛍光分子溶液をフローセルから送液する。送液後に増加すると予想される蛍光出力の安定値とベースラインの差分をセンサ出力として、種々の濃度の蛍光分子溶液を測定する。得られた

蛍光分子の濃度とセンサ出力の関係から、バルクの蛍光分子に対するセンサ感度を評価し、蛍光による心筋マーカー測定の可能性を検証する。

3. 計画の進行状況

(I) SPF センサシステムの構築

図1にSPF用チップの概要図を示す。本チップはガラス基板上に接着層であるTi薄膜を挟むようにAu薄膜が成膜されている。TiおよびAu薄膜の膜厚はそれぞれ、約5nmと47nmとした。このセンサチップに波長633nmの励起光をガラス側から表面プラズモン共鳴条件を満たす角度で入射をすると、Au表面から液相ならびにAu側にSPPsが染み出すように発生する。実際に蛍光分子の励起に使用するSPPsは液相側のものだけになるが、SPPsは入射した励起光に比べ数十倍の電場強度を示すため、SPPsの範囲内に到達した蛍光分子は数十倍大きい蛍光を放出する。

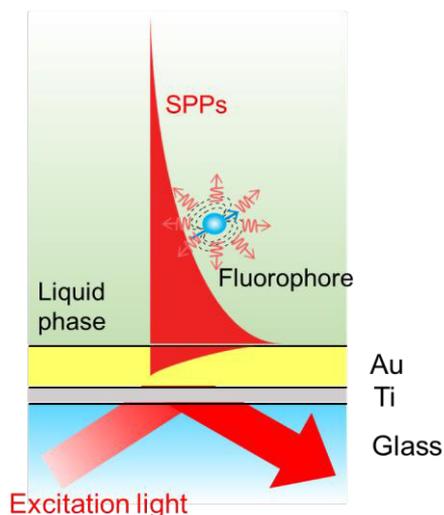


図1 SPFを利用した心筋マーカー用センサの概念図

SPF用チップの作製では、ガラス基板の洗浄の後、スパッタリング法によってTiとAuの順で先述の膜厚になるように成膜した。

SPFセンサシステムの構築では励起光源で

あるHeNeレーザー、直角ガラスプリズム、反射したレーザー光を検出するためのフォトダイオード検出器、蛍光を検出するためのMulti-Pixel Photon Counter、サンプル溶液をセンサ表面に送液するためのライトパイプ型フローセルにて構築した。

(II) 蛍光溶液によるSPFセンサシステムの評価

Iで構築したSPFセンサシステムについて、サンプル溶液の送液と蛍光捕集効率の向上を図るために作製したライトパイプ型フローセルの評価を行った。ライトパイプ型フローセルは、アクリル樹脂製のフレネルレンズと同じく円筒形のアクリル樹脂を、光学接着剤によって接合して作製した。その際、フレネルレンズの争点が円筒部の下面にくる送液部に一致することで、蛍光の全反射を抑制し、効率的に集光を行う。しかしながら空気中で設計されたフレネルレンズの焦点距離はアクリル樹脂中で変化することから、理論的に計算し、実験で確かめた。実験では15~23mmと長さの異なる円筒形アクリル樹脂を用意し、それぞれにフレネルレンズを接合した。その後、円筒形下面にLEDを設置し、そこからフレネルレンズによって集光した光について、追加で設置したレンズによってフォトダイオード検出器に集光し、強度測定した。図2にその結果を示す。円筒形アクリル樹脂の長さを長くすると光強度が大きくなり、長さ20mmの時に最大値を迎え、その後は減少に転じた。これは円筒形アクリル樹脂の長さが20mmの時に、LEDからの光がフレネルレンズによってコリメートされ、その後のレンズで最も効率的にフォトダイオード検出器に集光されたためだと考えられる。以上の結果から以降の実験では、長さ20mmの円筒形アクリル樹脂を用いて作製したライトパイプ型フローセルを使用することとした。

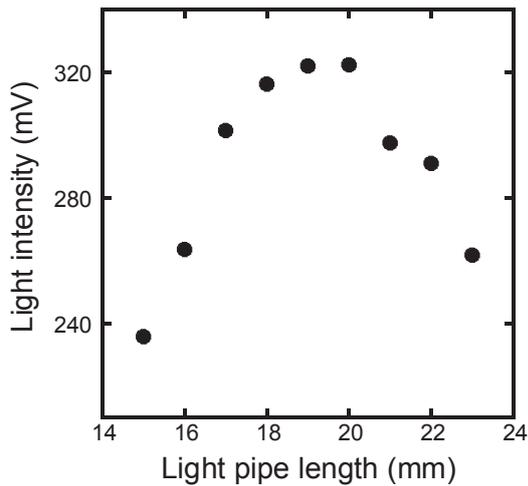


図2 アクリル製ライトパイプの長さ
と集光された光強度

次に、本フローセルの有効性を評価するため、ライトパイプの図2は濃度の異なる蛍光分子溶液をフローセルが有る場合と無い場合でそれぞれ $1 \mu\text{M}$ の蛍光溶液を送液し、その蛍光出力を比較した (図3)。

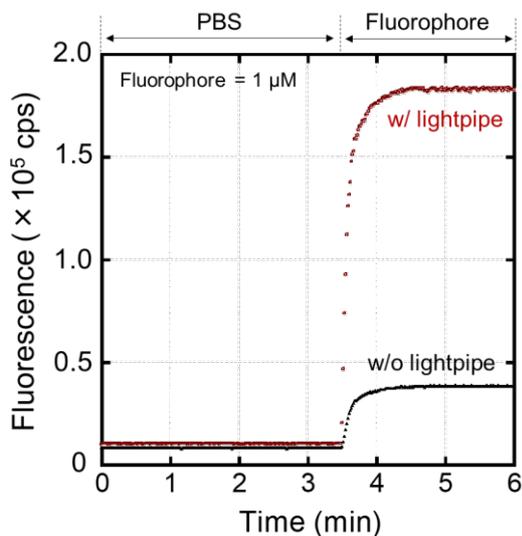


図3 アクリル樹脂製ライトパイプ有
り (赤) と、無し (黒) の場合の蛍光溶
液に対する蛍光強度変化

初めにリン酸緩衝生理食塩水 (PBS) でベースラインを取得した後、蛍光溶液へと送液する溶液を交換したところ、センサ表面に到達するとともに蛍光強度の増加と、その後の安

定値が観察された。ベースラインと安定値との差を出力と定義して比較したところ、ライトパイプ型フローセルを導入することで、蛍光出力が約5倍増加したことが示された。本結果から、ライトパイプ型フローセルの高い有効性が確認された。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況 【今後の計画】

当初予定していた (III) 緩衝液中の心筋マーカーによるセンサの評価を行うについて、2022 年度に着手することができなかったため、以下の様に 2023 年度以降に引き続き行っていく。

(III) 緩衝液中の心筋マーカーによるセンサの評価

周術期モニタリングシステムを実現するために、免疫測定の中で抗体・抗原の結合・解離を高い再現性で繰り返し行えるセンサ表面をもった、SPF バイオセンサを構築する。検討方法としては、金薄膜で覆われたセンサ表面を polyethylene glycol (PEG) チオールと ORLA protein の自己組織化単分子膜にて修飾する。PEG は非特異吸着を阻害し、ORLA protein は繰り返し再生できる表面の構築に寄与することが期待される。そして、ORLA protein に融合している protein G へ捕捉抗体を結合、固定化することでセンサチップを作製する。作製したセンサチップをシステムへ装着し、緩衝液で調製した心筋マーカー溶液を負荷し、捕捉抗体へ結合させた後、蛍光標識された検出抗体を送液し、心筋マーカーへ結合させる。これら抗体は心筋マーカーに特異的に結合するため、心筋マーカーから選択的に蛍光出力が得られると考えられる。

【論文投稿】

1. Toma K, Oishi K, Iitani K, Arakawa T, Mitsubayashi K. Surface plasmon-enhanced fluorescence

immunosensor for monitoring cardiac troponin I. *Sensors Actuators B Chem* 2022;368:132132.

【発表】

1. Koji Toma, Koki Oishi, Kenta Iitani, Takahiro Arakawa, Kohji Mitsubayashi, Surface plasmon-enhanced fluorescence immunosensor with a regeneratable surface for monitoring cardiac markers, The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), 2022. 9. 11-9. 16, ハイブリッド開催 (Hokkaido, Japan).
2. 當麻 浩司, 表面プラズモンによる生体の連続バイオセンシング, 電子情報通信学会 2023 年総合大会シンポジウム(最先端光計測とバイオ・医療応用), 2023. 3. 8-3. 8, 埼玉県.
3. Koji Toma, Surface plasmon polaritons for label-free bioimaging and continuous biosensing, *Nano and Photonics 2023*, 2023. 3. 15-3. 17, Mauterndorf Salzburg, Austria.

5. 参考文献

1. Boersma E, Kertai MD, Schouten O, et al (2005) Perioperative cardiovascular mortality in noncardiac surgery: Validation of the Lee cardiac risk index. *Am J Med* 118:1134-1141. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2005.01.064>
2. Devereaux PJ (2011) Characteristics and Short-Term Prognosis of Perioperative Myocardial Infarction in Patients Undergoing Noncardiac Surgery. *Ann Intern Med* 154:523.

<https://doi.org/10.7326/0003-4819-154-8-201104190-00003>

3. Iglesias PP (2014) Myocardial Injury After Noncardiac Surgery in miocardica tras la cirugía a no cardiaca a c on behalf of the VISION study. *67:794-796*. <https://doi.org/10.1016/j.rec.2014.05.011>
4. Landesberg G, Beattie WS, Mosseri M, et al (2009) Perioperative Myocardial Infarction. *Circulation* 119:2936-2944. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.828228>
5. Weiser TG, Regenbogen SE, Thompson KD, et al (2008) An estimation of the global volume of surgery: a modelling strategy based on available data. *Lancet* 372:139-144. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)60878-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60878-8)

IRS assisted OFDM system における セミブラインド伝搬路推定

情報通信工学科 菅 宣理

共同研究者
なし

1. 序論 (はじめに, まえがき, 目的)

次世代通信システムでは、ミリ波帯やテラヘルツ帯などの高周波数帯の利用が盛んに検討されている。しかしながら、高周波帯の電波は回折特性が悪く、NLOS (Non-Line of Sight) での通信が不安定になるという課題がある。この問題を解決するために、IRS (Intelligent reflecting surface) あるいは RIS (reconfigurable intelligent surface) と呼ばれる電磁波反射板の利用が盛んに研究されている (図 1)。IRS は、反射特性を動的に制御できる複数の受動的な反射素子で構成されており、各素子の反射特性を適切に調整することで、NLOS 環境下でも受信機までの複数の経路を形成することができる。しかし、IRS を用いた無線通信システムでは、全素子の反射係数を最適化するために、膨大な数の伝搬路を推定する必要がある。通常、伝搬路推定は送受信で既知の信号であるトレーニング信号を通信の冒頭で送信し、その信号の変化を見ることで伝搬路の影響を推定 (伝搬路推定) するが可能になる。

一方、通信効率の観点からは、トレーニング信号は情報を運ばない冗長な信号であるため、この伝搬路推定のオーバーヘッドを制限する必要がある。また、従来の研究では、無線フレームのプリアンブルに既知のトレーニ

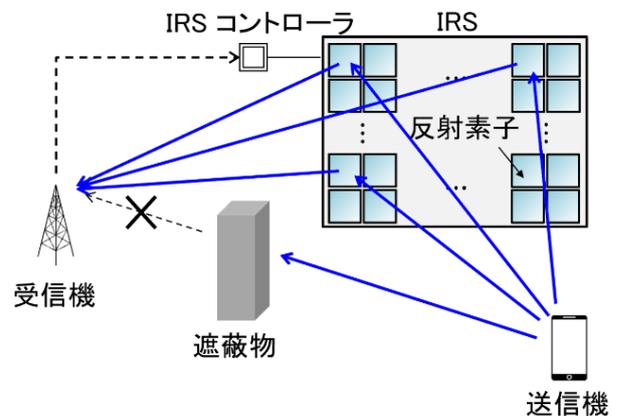


図 1 IRS を用いる無線通信システム

ングシンボルを付加し、データ部分に続くことを前提としているため、データ部分の送信前に伝搬路推定と IRS 制御 (反射位相の決定とフィードバック) を完了する必要がある。そのため、IRS の文献では、限られたトレーニング信号を用いて伝搬路を正確に推定するための伝搬路推定問題が議論されてきた。

トレーニング信号を用いない伝搬路推定技術としてブラインド伝搬路推定という技術が知られている。ブラインド伝搬路推定は、符号分割多重アクセス (CDMA: code division multiple access)、直交周波数分割多重 (OFDM: orthogonal frequency division multiplexing)、多入力多出力 (MIMO: multi-input multi-output) システム、シングルキャリア周波数領域等化 (SC-FDE:

single carrier frequency domain equalization) などの幅広い無線通信システムにおいて広く研究されている。ブラインド伝搬路推定には様々な方法が提案されている。最も代表的なブラインド伝搬路推定技術として、部分空間法に基づく方法が知られている。部分空間法に基づくブラインド伝搬路推定では、受信信号から伝搬路のインパルス応答 (CIR: channel impulse response) または伝搬路の周波数応答 (CFR: channel frequency response) が含まれる信号空間を受信信号の統計量から抽出することでトレーニング信号を用いずに伝搬路推定を実現する。

本研究では、部分空間法に基づくブラインド伝搬路推定技術を IRS が存在する環境における OFDM システムに対して適用し、トレーニング信号の送信を大幅に削減する伝搬路推定を実現することを目指す。IRS を想定した従来の伝搬路推定方法と同様に、無線フレームの最初に一定数のトレーニングシンボルを送信し、その後データシンボルを送信すると仮定する。IRS はデータ送信期間中、SNR (signal to noise ratio) を最大化するために IRS 上の各要素の反射特性を固定する。しかしながら、反射特性を固定することで、部分空間法による推定解の一意性が保たれないという問題点がある。そこで、本検討では、部分空間法による一意の推定を求めるのではなく、CIR が属する空間の情報を抽出し、トレーニング信号を用いる伝搬路推定で発生する推定誤差を抑圧するために、部分空間法から得られた空間情報を利用することを考える。具体的には空間情報から射影行列を構成し、トレーニング信号により得られた推定解を信号空間に射影することで推定誤差の抑圧を行う。このように、トレーニングに基づく伝搬路推定とブラインド伝搬路推定の両方を利用するセミブラインド伝搬路推定を提案し、その有効性を確認することを研究目的とする。

2. 研究計画

【研究計画の概要】

本課題では、セミブラインド手法により伝搬路空間を抽出し、少量のトレーニング信号により得られた粗い伝搬路推定値を伝搬路空間へ射影することで推定誤差を抑圧する。伝搬路空間を抽出するための具体的なアルゴリズムについて主要なブラインド手法である部分空間法をベースに机上検討を行い、シミュレーション評価により推定誤差が抑圧できることを確認する。

3. 計画の進行状況

比較手法となる Zheng, et al., IEEE Wirel. Commun. letters, 2020) の結果をシミュレーションにより再現し、かつブラインド伝搬路推定に関する基礎検討に取り組んだ。シミュレーションを行い Zheng の手法の再現ができることを確認した。また、ブラインド伝搬路推定に関する基礎検討では、まず、代表的なブラインド推定技術である、部分空間法に基づく手法、線形プリコーディングに基づく手法、最尤推定に基づく手法等のサーベイ・IRS を想定した最新のセミブラインド手法についてサーベイを行った。IRS を想定した無線通信システムの場合、推定対象となる伝搬路は反射素子数倍に増加するため、計算コストの増加に留意する必要がある。そのため、受信信号が観測されるたびに、推定値を更新することで低演算量な推定が可能である部分空間法に基づくブラインド伝搬路推定手法をベースとなるアルゴリズムとして採用することとした。

セミブラインド伝搬路推定による推定誤差抑圧について

当初の予定の通り、パイロット信号によるラフな伝搬路推定値に対して、部分空間法による推定誤差の抑圧手法について検討を行った。部分空間法は、送信側から送られた信号が受信側で観測された際の信号の空間に注目

し、その空間を構成する固有ベクトルを利用して伝搬路推定を実現するものであるが、IRSを用いる通信システムを想定すると、各反射素子を經由する伝搬路が受信側で合成されるため、個々の伝搬路の推定が困難にある。そこで、本検討では各伝搬路の合成された空間を部分空間法により抽出し、その空間の情報を用いて信号空間に数学的な射影を行うことで推定誤差の抑圧を行うことを検討した。

提案したセミブラインド伝搬路推定による推定誤差抑圧手法の推定精度に関するシミュレーション結果を図2に示す(提案手法:○、Zhengの手法:+)。シミュレーション結果から、パイロット信号を用いた伝搬路推定に対して提案手法はより高精度な推定が実現できていることが確認できる。提案手法により信号対雑音電力で約5 dB程度の改善が見込めることが明らかとなった。

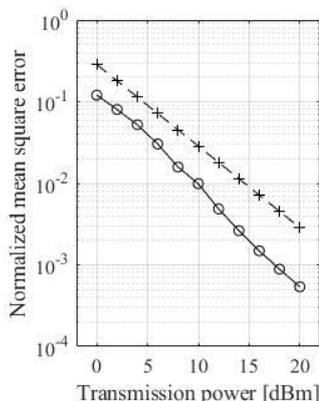


図2 セミブラインド伝搬路推定による推定誤差の抑圧効果

反射係数を切り替えるブラインド推定について

前節で述べた部分空間法を用いるセミブラインド推定による推定誤差抑圧手法の検討において、各反射素子を經由する伝搬路が受信側で合成されることに起因して各伝搬路の推定が困難であることが明らかになった。そこで、本検討では、合成された信号から各伝搬

路を推定するために受信信号に対して統計量を算出する際に、反射係数を切り替えることによりパイロット信号を用いずに各伝搬路を推定するブラインド(セミブラインドではない)推定手法について検討を行った。ブラインド推定はトレーニング信号を用いないため、トレーニング信号を用いる伝搬路推定手法と比較してより効率的なアプローチである。

図3に本検討の推定精度に関するシミュレーション結果を示す。図中の青線が部分空間法によるブラインド伝搬路推定(提案手法)、赤線がパイロット信号による伝搬路推定である。提案手法では低い送信電力の場合、パイロット信号による推定と推定精度の大きな隔たりがあるが送信電力が大きくなるにつれてその差が小さくことが確認できる。また、IRSを想定した無線通信システムにおいてはパイロット信号を用いる推定が多く検討されており、完全なブラインド推定は実現されなかった。そのため、本検討により世界先駆けてパイロット信号を用いずにIRS制御を実現できる可能性が示唆された。

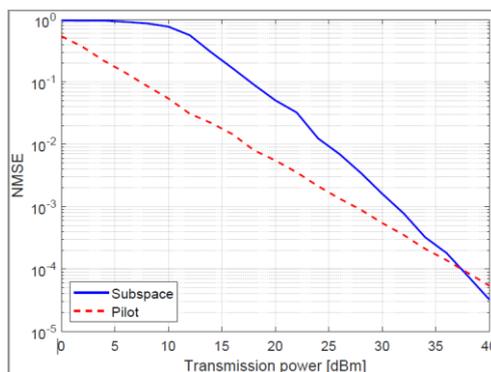


図3 部分空間法に基づくブラインド推定

深層学習を使ったIRS制御について

前節までの検討は、IRSが完全にパッシブな状況(伝搬路推定のための高周波回路を持たない状況)を想定して検討を行った。本検討では、IRSがいくつかの素子に高周波回路を持ち(アクティブ素子と呼ぶ)部分的には伝

搬路推定を行うことができる状況を想定した検討を行った。IRS 制御では、素子の反射係数として取りうる値の組み合わせで構成される反射パターンを列挙したコードブック中から適切なパターンを選択することで制御を行う。アクティブ素子の推定値からコードブックの各制御パターンでのスペクトル効率

(bps/Hz) を予測するようにデータセットを作成し学習・予測を行う。既存の深層学習を用いる IRS 制御手法は、ある時点での伝搬路推定値のみから予測を行っているが、無線端末は地理的に連続に移動するため、無線端末の移動速度によっては、近い過去にアクティブ素子で観測した伝搬路推定値にも各制御パターンのスペクトル効率に関する情報が含まれていると考えられる。そこで、過去の地点でのアクティブ素子の推定値を含めた時系列構造の入力値を持つデータセットを作成し、時系列を考慮できるモデルである Long Short-Term Memory (LSTM) で予測を行うことを提案した。また、動き方が予測精度に影響を与えると考えられるため、実際に想定される移動パターンに合わせたデータセットを作成し提案手法の性能を評価した。図 4 に深層学習を用いた IRS 制御手法の評価結果を示す。評価尺度はスペクトル効率 (achievable rate [bps/Hz]) である。既存手法 (Taha, et al., IEEE Access, 2021) と比較して移動パターンを考慮したデータセットを作成し、学習を行った結果、より適切な IRS 制御が実現できることが明らかとなった。

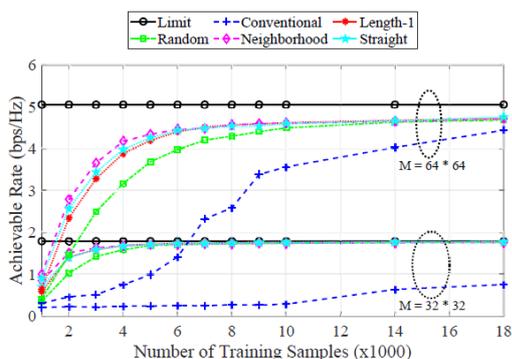


図 4 深層学習による IRS 制御の効果

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究では、少量のトレーニング信号あるいはトレーニング信号を用いずに受信信号のみから伝搬路推定を行う技術を検討した。(セミ) ブラインド処理は一般的に、アルゴリズム中に固有値分解の処理が含まれるため、大きな演算量 (反射素子数×送信アンテナ数×受信アンテナ数の 3 乗オーダー) が必要となる。スマートホンや IoT デバイスのように十分な計算資源を持たない端末での処理を想定すると、伝搬路推定アルゴリズムの低演算量化は必須の検討課題である。また、無線伝搬路は送受信端末の位置関係により変動するため、端末移動による伝搬路変動に追従可能なアルゴリズムの検討も行う必要がある。また、本助成により行った検討から派生して、伝搬路推定間隔を動的に制御する方式や信号対雑音電力が低く同期が正しく行えないような状況でどのように IRS を制御するか等の新たな学術的課題も明らかとなった。

発表状況

[1] Y. Tsuchiya, N. Suga, K. Uruma, M. Fujisawa, "IRS Reflection Pattern Prediction Considering Receiver's Moving Speed," Journal of Signal Processing (accepted).

[2] Y. Tsuchiya, N. Suga, K. Uruma, and M. Fujisawa, "LSTM-based Spectral Efficiency Prediction by Capturing Wireless Terminal Movement in IRS-Assisted Systems," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Helsinki, Finland, Jun. 2022.

複雑ネットワーク上の量子空間探索における普遍性の探究

工学部 情報工学科 渡部 昌平

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

量子コンピュータは数十年前から基礎的な研究が行われているが、現在、基礎研究だけでなく集積化など量子エンジニアリングとしての側面でも精力的に研究がされている。実際、米国 Google により量子超越性が示されただけでなく、中国も量子暗号通信技術を持つ人工衛星によって量子もつれの配信に成功した。また、量子計算機だけでなく、それらを使った量子インターネットなど量子情報社会に向けた研究も精力的になされている。量子コンピュータ・量子情報技術は、量子力学特有の重ね合わせ・干渉効果・量子もつれを賢く使う次世代情報技術である。

一方、ネットワーク科学は 21 世紀の新しい科学と呼ばれている。その守備範囲は神経ネットワーク・社会ネットワーク・通信ネットワーク・電力網など多岐に渡り、学理だけでなく経済・健康・セキュリティ・感染症などをはじめとして社会的にインパクトを与えている。このネットワーク科学は、現代の高度情報化社会において World-Wide-Web や移動体通信ネットワークがスケールフリー性・スモールワールド性などいくつかの普遍的なクラスを構成していることを明らかにしてきた。

次世代情報化社会では量子力学的優位性を用いた量子コンピュータ・量子通信・量子暗号・量子センサなどが融合し、高度な量子複雑ネットワークを構成することが予想される。本研究目的は量子系と複雑ネットワークの境界領域が生み出す学理を構築し、その普遍性と特異性を予見する基礎を構築することである。反対に、本研究では、量子コンピュータの

チップ上に量子ビットを配置した際の特性や、狙った量子アルゴリズムのゲートの掛け方といった特定の構造に対する特性の探究はターゲットから外れる。

量子コンピュータは、量子的な性質により、スーパーコンピュータなど古典コンピュータでは扱えない大規模な計算リソース・計算時間を必要とする計算処理に有用である。そのため、スーパーコンピュータなどの古典コンピュータを用いて、大規模な量子複雑ネットワークをシミュレーションすることは、その計算能力の限界により不可能である。そこで、量子複雑ネットワークに対して、完全な答え、厳密な波動関数を求めるのではなく、普遍的な性質や、系のサイズが大きくなった際にどのようにスケールするかというスケラビリティの問題が重要になる。

そのような視点で、本研究では複雑なネットワーク上の量子システムの特徴・普遍性を明らかにしたい。ここで、どのように複雑ネットワークと量子系を融合させるかという問題がある。量子計算のアルゴリズムの 1 つに、データベース探索に関連する Grover のアルゴリズムが広く知られており、本研究ではこれに着目する。

Grover のアルゴリズムは、データベースのデータ点数 N に対して計算量が $O(\sqrt{N})$ でスケールすることが知られている。これは古典的な線形探索の計算量 $O(N)$ よりも優れているアルゴリズムである。量子空間探索とは、こ

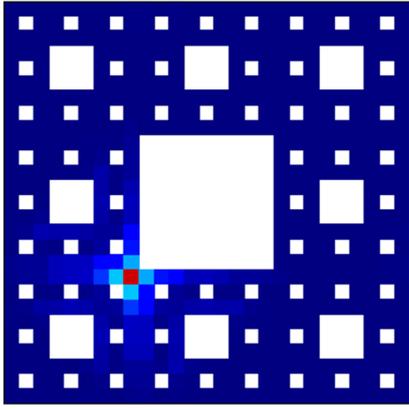


図 1. フラクタルネットワーク (Sierpinski carpet) 上の量子空間探索 [Phys. Rev. A 101, 022312 (2020)].

の Grover アルゴリズムを多様なネットワーク上に拡張したものである。

複雑ネットワーク上の量子空間探索に対しては, Erdos-Renyi ランダムグラフ [Phys. Rev. Lett, 116, 100501 (2016)], Bollobas スケールフリーネットワーク [Phys. Rev. A, 101, 022310 (2020)] 上の量子空間探索の研究が行われ, Sierpinski gasket などのフラクタル格子に関しては筆者たちの先行研究も含めて文献 [Phys. Rev. A, 86, 012332 (2012), Phys. Rev. A, 98 012320 (2018), J. Phys. Soc. Jpn. 87, 085003 (2018), Phys. Rev. A 101, 022312 (2020)] などがあ (図 1, 2)。

筆者たちは, この量子空間探索の有効的な計算時間について, フラクタルネットワーク上に現れるスケーリング仮説を提案している [J. Phys. Soc. Jpn. 87, 085003 (2018), Phys. Rev. A 101, 022312 (2020)]. この仮説は, 格子点数に対して有効的な計算時間がべき関数になり, その指数がフラクタル図形の特徴量 (次元など) の組み合わせによって, 数値誤差の範囲内で高精度に与えられるものである。

このようにさまざまなネットワークに対して, 量子空間探索の特徴的なスケーリング則が解明されつつある。しかしながら, これら

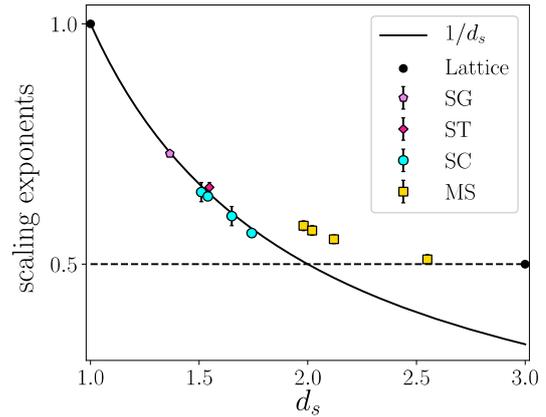


図 2. 周期 Q に対する要素数 N の指数とスペクトル次元の関係 [Phys. Rev. A 101, 022312 (2020)].

の研究を通じて, 各ケースに対するスケーリング則は明らかになったものの, フラクタル性・スモールワールド性・スケールフリー性・ランダム性に対して, より統一的な視点での普遍性は明らかになっていない。本研究では, 複雑なネットワーク上に配置されたデータを量子空間探索し, ターゲットを発見する際の普遍性を明らかにする。それにより, ネットワークが大規模化した際の指標を提案するのが狙いとなる。

2. 研究計画

実在する複雑ネットワークの中には, ランダム性・スケールフリー性・スモールワールド性・クラスター性・フラクタル性を持つネ

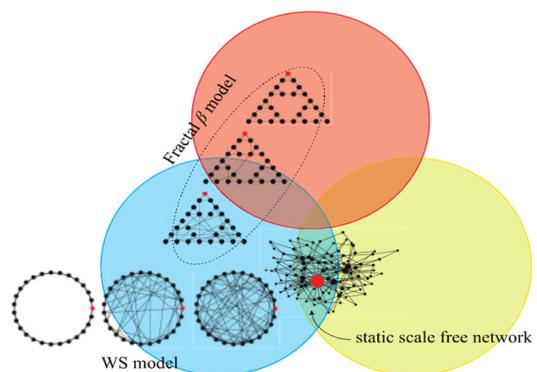


図 3. 研究対象のモデル

ネットワークが報告されている。

本研究では、(1)ランダム性、(2)スケールフリー性、(3)スモールワールド性、(4)フラクタル性に着目した複雑ネットワークに対して、量子空間探索を行いその普遍性を見つけ出すことが計画である(図3)。

ランダム性は Erdos-Renyi モデルで、スケールフリー性は Barabasi-Albert モデルで、スモールワールド性は Watts-Strogatz モデルで生成することができる。これらのモデルで量子空間探索を行い、それぞれの複雑ネットワーク上のノード数に応じて、量子空間探索の計算時間などがどのようにスケールするかを見出す。そのデータを元に普遍性を明らかにする。

複雑なネットワークを生成する際には、ある確率分布を使い基準となるネットワークにランダム性を加える。このネットワークのエッジの張り替え確率を徐々に大きくしていくと、生成されるネットワークは秩序だったネットワークから、例えばスケールフリーネットワーク、ランダムネットワークへと変化していく。乱数を使ったネットワークの張り替えを行うので、複雑ネットワークが生成されるたびにネットワーク構造は異なるものになる。

このように個々の形の異なる複雑ネットワーク上での量子空間探索に対して、個々のネットワークの形状にはよらない普遍性があるのではないかという仮説のもと、その普遍性の探索を行う。

3. 計画の進行状況

量子空間探索のスケールリングは、通常、量子探索の最大発見確率 P とそれが現れる周期 Q について、格子点数 N のべき関数を仮定してスケールリングを調べる。今回は連続時間アルゴリズムを採用したので、データの発見確率に関する結合定数 γ も最適化を行い、その際のスケールリング則も解析した。

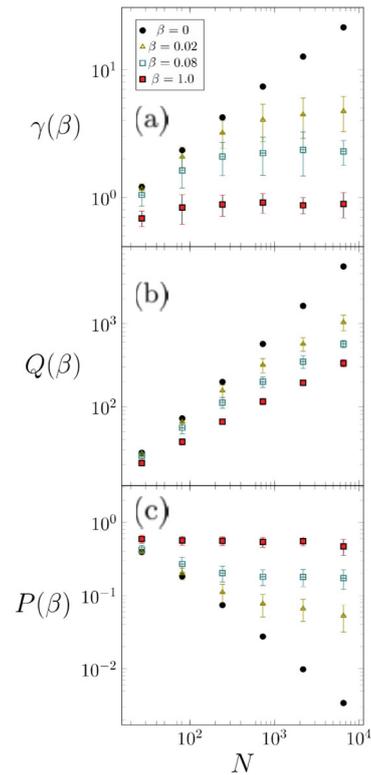


図 4. フラクタル β モデルに対する結合定数 γ 、周期 Q 、最大発見確率 P の格子点数 N 依存性

フラクタル性とスモールワールド性を併せ持つモデルにフラクタル β モデルがある。このモデルは、張り替え率 β を増加させることで、フラクタルネットワークからスモールワールドネットワーク、ランダムネットワークを生成可能である。格子点数 N に対して解析を行ったところ、各ネットワークに対して、張り替え率 β に依存するスケールリング則が見出され、統一的な視点を見出すことは困難であった(図4)。

一方、ネットワーク科学には、ネットワークの性質を決める指標として、パス長、クラスタ係数など複数の特徴量が存在する。量子空間探索に対して、さまざまな指標を試行錯誤しデータ解析したところ、平均パス長比を使うことで、さまざまな複雑ネットワーク上の量子空間探索のデータが、同じ冪指数をもってプロットできることがわかった(図5)。

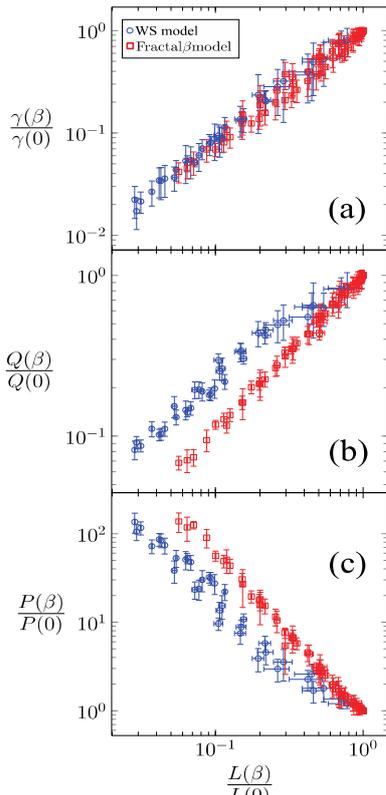


図 5. フラクタル B モデルに対する結合定数 γ , 周期 Q , 最大発見確率 P の平均パス長 L 依存性

ークだけでなく、スケールフリーネットワークに対しても、関数系は異なるが同じように平均パス長で異なる張り替え率のデータを統一的にプロット可能であることがわかった。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究では、複雑ネットワーク上の量子空間探索において、従来の格子点数ではなく、複雑ネットワークの特徴量である平均パス長を導入することで普遍的振る舞いが現れることを新たに発見した。当該研究成果は論文投稿準備中である。

なぜパス長が良い指標になるのかは現在のところ明確にはわかっていない。経路積分などの枠組みを使って、今回の量子空間探索とパス長の関係を与えることはできたが、本研究のスケリングの結果を直接的に説明するまでには至っていない。この点が残された課

題である。

また、本研究の共同研究者(東京理科大学二国徹郎教授と東京理科大学・KDDI 佐藤嶺氏)とは、本研究を通じて、ネットワーク科学や離散数学の視点、量子コンピュータの視点、アルゴリズム的な視点からさまざまな議論を行ってきた。これらを踏まえ、現在、巡回セールスマン問題の最短経路問題に対して、量子ゲートを用いた Grover アルゴリズムの効率的計算手法を開発している。特に、分割統治法を用いた効率化を行っている。

量子複雑ネットワークの研究が萌芽的段階にあり、ネットワーク科学が 21 世紀の科学であることも相まって、当該研究は次世代量子複雑ネットワークについて重要な知見になることが期待される。

学会発表等

- 佐藤嶺, 二国徹郎, Giorgio Salani, 野原佳代子, 渡部昌平,
“複雑ネットワーク上の量子空間探索”
日本物理学会 秋季大会 (2023 年),
2023 年 9 月 10 日 (東工大), 10pS5-13
(口頭).
- Shohei Watabe,
“Quantum Spatial Search on Complex Network”
The Virtual QBIC Workshop 2022
Oct. 12 2022, (ZOOM) (Oral) **[招待講演]**
- Shohei Watabe,
“Quantum Spatial Search on Complex Network”
OIST Center for Quantum Technologies Mini Symposium
Nov. 9, 2022 (OIST). **[招待講演]**
- 渡部昌平
複雑ネットワーク上の量子空間探索
2023 年 2 月 22 日 (online) セミナー
(三重大学) **[招待講演]**

Development of a Learning-Based and Data-Driven Control Mechanism for Systems Under Uncertain Operating Conditions

先進国際課程 Cetinkaya Ahmet

1. Paper introduction

As a brief introduction to the research project, first we provide the background on learning-based approaches, then we state the motivation, purpose, and unique points of the project.

Background: Designing control strategies for nonlinear systems can be a challenging task, especially when there are uncertainties present in the system's dynamics or environment. In recent years, deep neural network-based learning techniques have demonstrated remarkable success across various application domains. This success can be attributed, in part, to novel methods that enable the use of graphical processing units (GPUs) for training large-scale neural networks. Moreover, the success of deep learning has reignited interest in learning-based control. While there exist several types of learning-based control methods and problem settings, most research in this area can be divided into two categories: (1) neural network-based control approaches and (2) data-driven control approaches that rely on classical control theory such as system identification and the concept of persistency of excitation.

Motivation: However, the existing learning-based control methods assume that the equilibrium to be stabilized is known, even if the nonlinear system model is unavailable. There is a

lack of control-theoretic learning-based approaches that can stabilize uncertain equilibria.

Purpose and unique points: The principal investigator (Cetinkaya) has recently proposed a new learning-based data-driven control method that introduces switching and delay components to the system, enabling the replacement of signals corresponding to "difference from equilibrium" with signals corresponding to "difference from a delayed state." This method has rigorous mathematical guarantees for stabilizing uncertain equilibria or periodic orbits of a nonlinear system. This proposed research project was proposed with the purpose of developing new data collection algorithms and data-driven control. The unique idea in this project is that switching and delay components are intentionally introduced in system dynamics (see Figure 1). Normally such components may degrade the control performance, but in this setting they help.

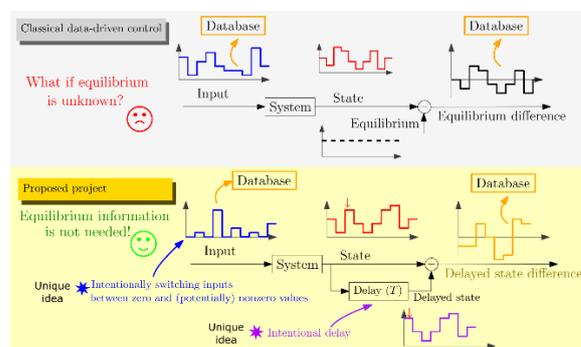


Figure 1. Unique components in the approach

2. Research program

In the following, we explain goals and targets of the research project and discuss the main phases of the research project.

Goals: The main goal of this project is to provide mathematical guarantees for stabilizing uncertain equilibria or periodic orbits of a wide range of nonlinear systems. In addition to this main goal, another goal is to apply learning-based approaches to

- 1) security and transportation-related problems in game-theory and control systems
- 2) testing of automated driving systems

Targets: This project has two key targets:

- 1) to develop advanced scientific theories and publish articles in top journals of control and learning theory
- 2) to create software libraries that can be used in practical systems such as robotic arms and vehicle platoons where uncertain equilibria may exist

Phases of the research project: The project had two main phases: I) Theoretical development phase and II) Practical development phase.

I) Theoretical development phase: The primary investigator started the theoretical phase of this project in his recent work that was presented in IEEE Conference on Decision and Control (Cetinkaya & Kishida, IEEE CDC 2021). The theoretical development phase is to further extend this recent work to handle a larger class of systems. This requires stability analysis and analysis of input-output data size requirements. In addition, the tolerance of the proposed approach against noise needs to be addressed. Furthermore, making the approach more suitable to a large class

of systems, a two-layer data-driven control scheme needs to be developed (see Figure 2).

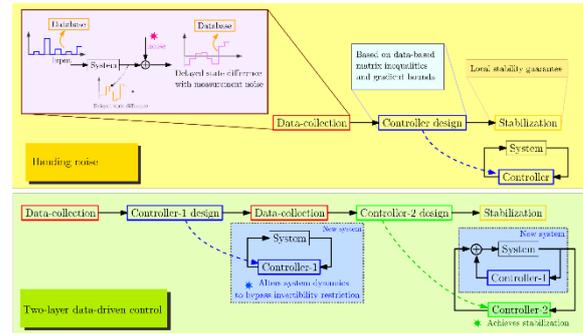


Figure 2. Two-layer data-driven control

II) Practical demonstration phase: This phase includes demonstration of the proposed approach in various domains such as game-theoretic decision making in the context of vehicle platoons and secure networked control systems, self-balancing robots, and testing of automated driving systems.

3. State of progress

The state of progress of the research project is explained in two parts that correspond to theoretical and practical development phases.

1) Analysis of data-driven approaches (theoretical phase):

The research project targeted stabilizing unstable periodic orbits of nonlinear systems with uncertain information. As a result, we put forward a data-driven feedback design approach for a Pyragas-type delayed feedback controller. By converting the problem of stabilizing periodic orbits into an equilibrium stabilization problem, we were able to obtain a feedback gain that stabilizes the periodic orbit using a set of matrix inequalities that solely depend on the available input and state data. These theoretical findings were submitted in September 2022 for possible publication to IEEE

Transactions on Automatic Control. The manuscript received reviews, and it is currently under revision [1].

2) Game-theoretic analysis of vehicle-platoons

(theoretical progress): One of the goals of this project is to apply the data-driven approach to game-theory problems. While this is a practical goal, together with Adrianto Ravi Ibrahim and Masako Kishida from National Institute of Informatics, started the theoretical research as a basis of this goal. In particular, we investigated the platoon matching problem in terms of complexity and efficiency. We analyzed a noncooperative game among vehicles that decide whether or not to form a platoon on a single road. To determine the computational complexity of calculating Nash equilibria in this game, we established an overall upper bound for the length of any best response sequence. When the vehicles were interchangeable, we completely characterized the Nash equilibrium. We discovered that platooning games can be highly inefficient in the worst case, with a potential zero price of anarchy even when vehicles have identical cost functions. Our results are published in the proceedings of IEEE Conference on Decision and Control [2].

3) Testing automated driving systems (practical phase)

The primary investigator noticed that data-driven and learning-based approaches can also be useful in the testing of automated driving systems. To this end, together with Paolo Arcaini from National Institute of Informatics, we presented CRAG, a generator of road scenarios based on combinatorial testing, which we submitted to participate in the Cyber-physical systems testing competition at SBFT 2023 [3]. Our objective was to create roads that an

autonomous driving agent would navigate outside of the driving lane, also known as an "out-of-bound episode." To achieve this, CRAG utilized combinatorial testing to investigate various road configurations, defined by lengths and curvatures in the Frenet frame representation. The primary concept behind this is to train the model to generate novel and increasingly difficult road scenarios using an initial set of random roads. While this particular use case falls outside the control domain, it serves as an instance of a data-driven approach.

4) Data-driven approaches in security-related problems (practical progress)

The primary investigator co-authored three publications that involved security problems and data-based approaches in their simulation.

First, together with researchers from National Institute of Informatics and Advanced Institute of Science and Technology, the primary investigator developed a spatio-temporal logic, which enabled us to define topological properties of networks of communicating agents. We showcased the logic's usefulness through an example, where we monitored a complex property that ensured resilient consensus in a security problem. Our results were published in the proceedings of IEEE Conference on Decision and Control [4].

Secondly, together with researchers from University of Seville and CentraleSupélec, we proposed a stochastic Model Predictive Control (MPC) scheme to handle packet losses and external disturbances in a networked control system simultaneously. We compared the algorithm performance through simulations with other MPC alternatives and a feedback control law. Our results were published in the proceedings of

IFAC Workshop on Control Applications of Optimization [5].

Finally, with researchers from Tokyo Institute of Technology and the New York University, we developed a two-player game-theoretic problem on agent networks, in which an attacker was capable of disabling network edges by emitting jamming signals to divide agents into clusters. The defender, on the other hand, recovered some of the edges. We derived several theoretical findings to describe the properties of the two-player game under specific conditions of the agents' communication network and the players' energy parameters. Our results were published in the European Journal of Control [6].

Publications:

[1] A. Cetinkaya, M. Kishida, "Data-Driven Control of Nonlinear Systems with Uncertain Periodic Orbits", submitted to IEEE Transactions on Automatic Control, 2023.

[2] A. R. Ibrahim, A. Cetinkaya, M. Kishida, "Complexity and Efficiency of Nash Equilibria in Noncooperative Simple Platoon Games", Proc. IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4449-4454, 2022.

[3] P. Arcaini and A. Cetinkaya, "CRAG at the SBFT 2023 tool competition-Cyber-physical systems track," in 16th IEEE/ACM International Workshop on Search-Based and Fuzz Testing, SBFT 2023.

[4] C. Eberhart, J. Haydon, J. Dubut, A. Cetinkaya, S. Pruekprasert, "Logic for Timed Agent Network Topologies", Proc. IEEE Conference on Decision

and Control, pp. 2870-2877, 2022.

[5] T. Arauz, J. M. Maestre, A. Cetinkaya, C. Stoica Maniu, "A Tree-Based Multi-Scenario Approach to Networked MPC under Packet Losses and Disturbances", Proc. 18th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, pp. 296-301, 2022.

[6] Y. Nugraha, A. Cetinkaya, T. Hayakawa, H. Ishii, Q. Zhu, "Rolling horizon games of resilient networks with non-uniform horizons", European Journal of Control, vol. 68, article no. 100693, 2022.

4. Future program, paper submission and results briefing

The primary investigator is planning to continue this research in two main directions. The first direction is to expand the current project to the case where the state information is subject to measurement noise. When measurements are noisy the learned controller may not be guaranteed to stabilize the system. However, it may be possible to obtain certain probabilistic guarantees.

Secondly, the current approach of the project has some restrictions on the systems that can be considered: a certain function related to system dynamics is required to be locally invertible. To bypass this invertibility restriction, there is a need to develop a two-layer control system with two controllers, one of which will be used to modify the dynamics of the original system to obtain a new system that bypasses invertibility restrictions and the second one will be used for stabilizing the new system. Self-balancing robots will be considered as an application platform.

Development of tools for in-depth study on the Uncanny Valley

先進国際課程 Trovato Gabriele

Research colleagues

Jordi Vallverdu, UAB (Barcelona, Spain)

Lionel Obadia (University Lyon 2, France)

1. Paper introduction

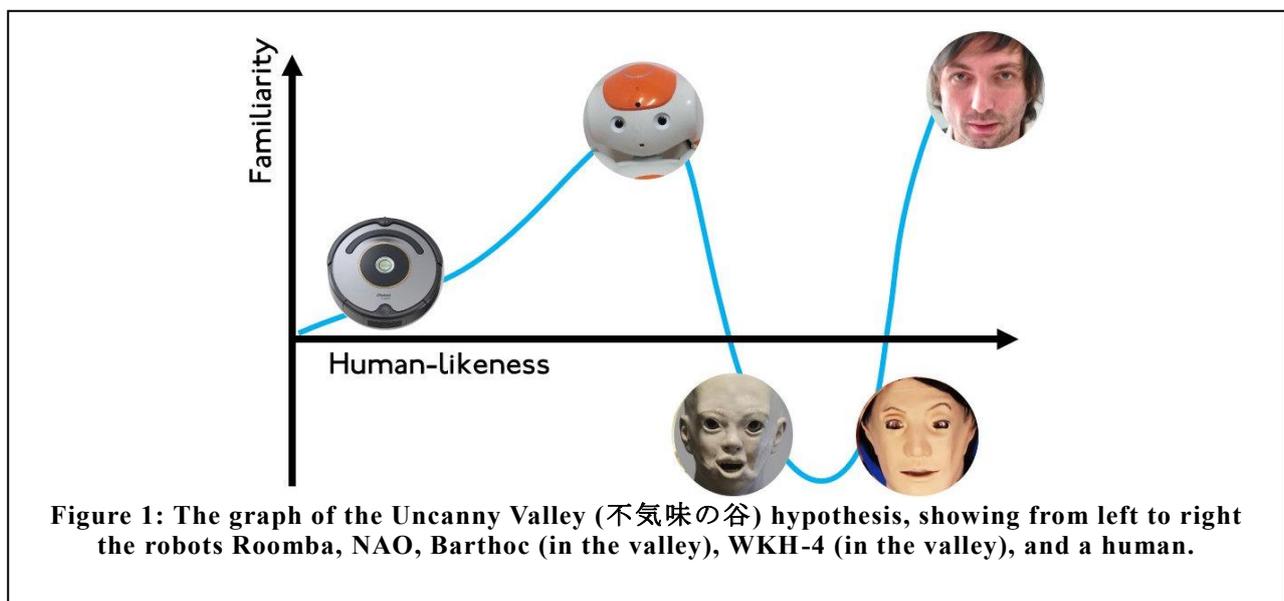
One of the main problems in the acceptance of robots is their appearance. The “Uncanny Valley (不気味の谷) hypothesis” was introduced by Prof. Masahito Mori. He stated, as in Figure 1, that familiarity towards robots increase as they are more human-like, but that there is a “valley”, in which users have a negative feeling (robots are defined “creepy”, “scary”).

It is still necessary to investigate the valley, in order to understand

exactly which types of design causes negative feelings, and use these findings to make guidelines for robot head design.

The vision of this research is broad, because the Uncanny Valley is a fascinating topic that did not have a concrete development since the 1970s.

I already started developing a model that extends that of the Uncanny Valley. It is necessary to develop tools to validate this model.



2. Research program

The plan was formulated in 3 steps:

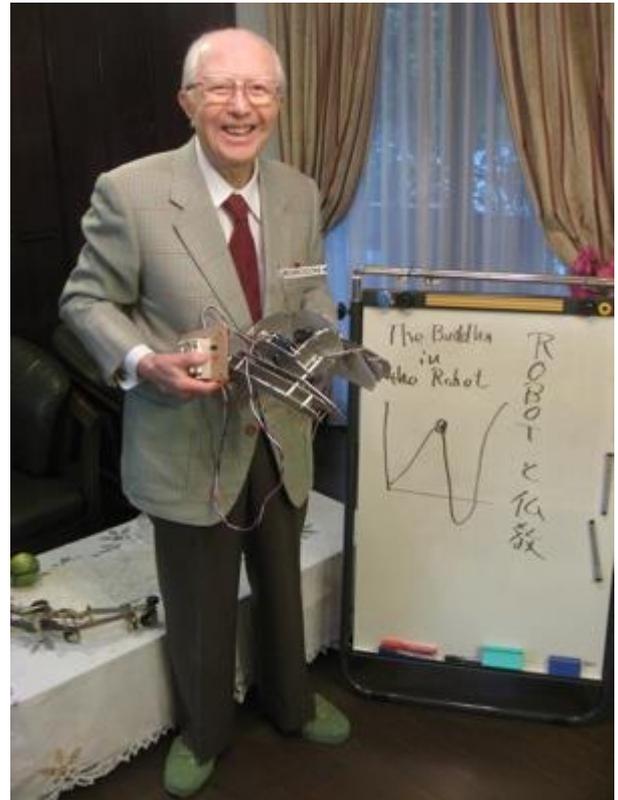
1. Formalisation of the mathematical model of the curve representing the valley.
2. Online questionnaire that should define the parameters of the equation of the curve.
3. Creation of a “modular head” . Having a robotic head would be necessary, as it can be a tool to validate the mathematical model, and explore different combinations of design.

In addition to the three above points, the theoretical discussion based on the ongoing research performed in other projects (such as the SCOPE project “e-ViTA) is also critical for exploring the field and produce new insights.

3. State of progress

In this academic year (2022), the study on the theoretical grounds was started, data for the model was acquired (1-2), and I could proceed with the acquisition of the tools (3).

Regarding the theoretical ground, a very unique chance has happened. Through Prof. Vallverdu, mentioned here as “research colleague”, it was possible to reach Prof. Mori himself, the inventor of the concept of the Uncanny Valley (photo below, from the Japan Times).



Together with Prof. Vallverdu and Prof. Abadia, we carried out a series of meetings in which we elaborated a list of questions to be asked to Prof. Mori. Of this list, we shortlisted 7 questions.

1. Is there something in common between the fear of God and the fear of AI and robots? As both in the sense of “unknown”.
2. Can the uncanny be considered relevant for the feeling of “sacredness” or are the two concepts independent?
3. What do you think about the Kannon robot held in Kyoto? Does it have a soul?
4. Can we design robots that are spiritual, but not directly related to an established religion?
5. We attribute “high energy” or “sacredness” to certain objects or

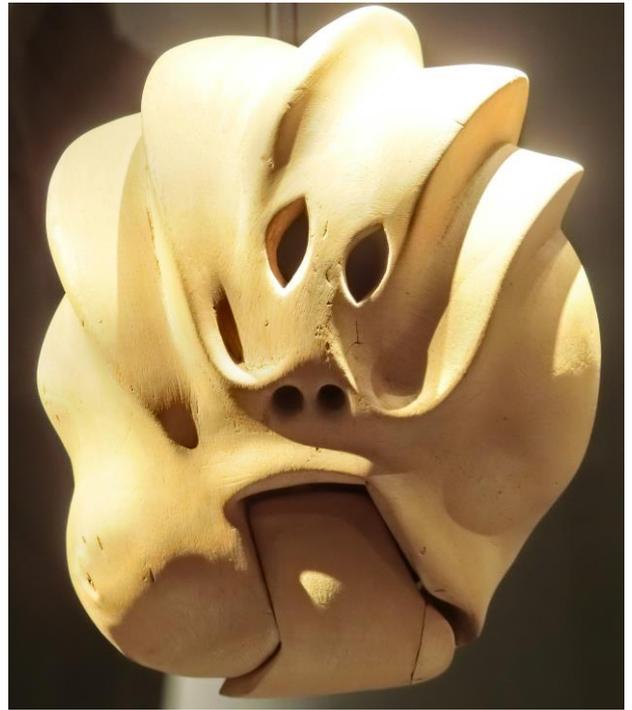
places. What can a roboticist do to make some robots be perceived similarly?

6. Roboticists often use the “Wizard-of-Oz” technique, which consists in teleoperating a robot and pretending that it is autonomous. What can be done next to stop roboticists from being “illusionists” and make robots really conscious and autonomous?
7. The concept of “magical thinking” is sometimes mentioned in the field of AI. Do you think that “magic” can be relevant in robotics?

We recently received the answer.

In a parallel activity during a business trip to Siegen University, in Germany, I stopped by Rautenstrauch-Joest-Museum Köln, the anthropology museum in Cologne, Germany.

Within the exhibits, there was a section about world mask (see images below).



The study of these reproductions of distortion of the human face is critical for the revision of the mathematical model and for the materials to be used in the questionnaires (points 1-2).

Regarding point 3, I first contacted two companies for the production of android heads. The Japanese company Kokoro, and a Chinese company based in Dalian. Unfortunately, the budget requested for the production was exceeding my availabilities.

I bought a laptop computer and other

tools to start the activity in my new laboratory. The lab is now equipped with Prusa 3D printers, and has wide availability of filaments. The skin colour (as in image below) will be useful to print human-like robotic heads.

Regarding the other points in the programme, as soon as students interested in this topic are available, the works on the questionnaire and the finalization of the model will proceed



With the new computer, I started coding the updated mathematical model in MATLAB.

4. Future program, paper submission and results briefing

Currently, with the colleagues from abroad we are discussing on the answers we received from Prof. Mori. The idea is to write a paper as a commentary on the top of these answers.

The submission could be sent to IEEE conferences such as Humanoids, or to the next Robophilosophy. In alternative, if the material is more than enough, we may opt directly for a journal submission.

Society 5.0 のための個人・世帯データの生成

電子情報システム学科 原田 拓弥

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

第5期科学技術基本計画において、我が国が目指す未来社会として、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたサイバーフィジカルシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する Society 5.0 が提唱されている。続く第6期科学技術・イノベーション基本計画においても Society 5.0 を実現するために、サイバー空間とフィジカル空間の融合が挙げられている。

このサイバー空間では仮想空間上に社会を再現することが目的とされている。そのためのデータとして、動的データ、静的データ、地理空間データの整備が進められている。その中でも人に関するデータの整備は難航している。政府や行政が収集している戸籍や納税のデータを用いることができれば、高精度なサイバー空間の構築が可能である。しかし、これらの市民のデータは個人情報保護やプライバシーの観点から利活用が困難である。

このような状況から、著者は政府統計をはじめとする利用可能な統計情報から仮想的な属性を持つ個人で構成される個人・世帯データの生成（以下、合成人口データ）に関する研究を進めてきた。著者が生成した合成人口データの例を図1に示す。図1の合成人口データでは、年齢、性別、世帯内の役割、就業に関する属性、住所属性を保持している。これらの属性を生成するために著者は実在する個人から調査・集計された実統計表とコンピュータ上に生成した個人から実統計表と同じように集計した合成統計表の統計量の差の最小化

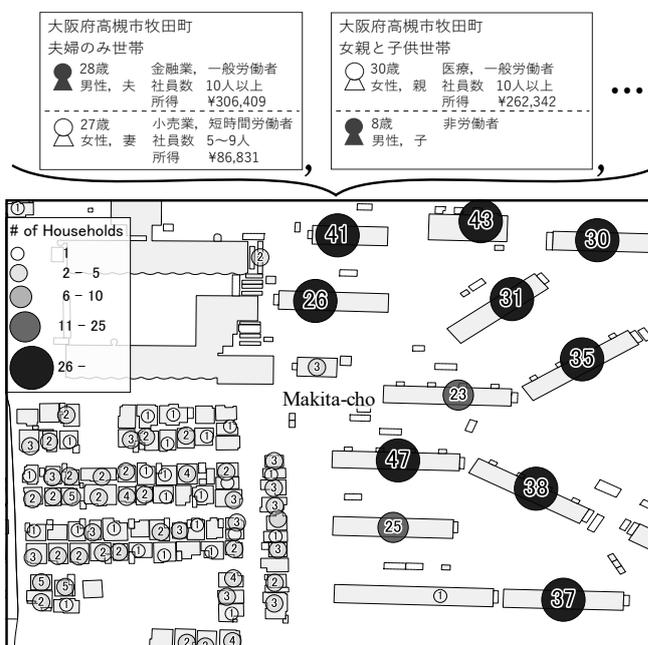


図1 合成人口データの例

（この地図には国土地理院の基盤地図情報を用いた。）

を目的とした離散最適化を用いて合成人口データの生成に取り組んでいる。

しかしながら、図1の合成人口データがもつ属性の数が少なく、サイバー空間上で展開できるデータ分析、シミュレーションに限りがある。また、合成人口データを組み込んだサイバー空間を用いて政策の検討や評価をするためには合成人口データの精度を高めなければならない。

そこで本研究では、合成人口データの精度向上のために市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の合成に関する研究、合成人口データの精度評価に関する研究に加え、合成人口データへ日常行動を合成するために従業地属性の合成の3つに取り組む。

2. 研究計画

2. 1. 市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の合成

従来手法[1]では都道府県単位を対象として合成手法が開発されていた。一方で合成人口データへ居住地を割り当てる手法[2]や所得属性を追加する手法[3]では、居住地の粒度が市区町村レベルの合成人口データが必要となる。このデータを合成するためには、人口分布の推計が必要である。人口分布の推計では、5歳階級の人口分布を1歳階級へ推計して合算した後、都道府県の実統計表と比較すると相違が発生していた。これにより、所得属性の追加時に個票データ内のある年齢の人口が労働者数を下回ることがあり、年齢別労働者数の統計表を個票データに合わせて変更する必要があった。

そこで、ある都道府県に属するすべての市区町村の人口を同時に合成する手法を開発する。従来手法[1]では、市区町村単位の合成人口データを生成する際に都道府県単位でしか得られない統計表を縮小して対応していたため、珍しい属性をもつ少数の世帯が合成できないという課題があった。提案手法では、あ

る都道府県に属するすべての市区町村の人口を合成対象とする(図2)。これにより、合成人口データ内の家族類型別、男女別、1歳階級の人口が実統計表と一致し、合成手法が用いる統計表である父子年齢差、母子年齢差、夫婦年齢差の統計表の縮小を可能な限り避けることで、珍しい属性をもつ少数の世帯を含めて合成することが可能な手法を提案する。

2. 2. 合成人口データの精度評価

著者が取り組んできた合成人口データに関する研究では、統計表と合成された合成人口データから生成する統計表との差(以下、統計表との誤差)により合成人口データを評価している。これは、統計表の利活用は可能であるものの、実個票データの利活用は困難であるため、統計表との誤差により評価されていた。そのため、現実の集団と合成された合成人口データが同じ統計的特徴をもつ集団と言及することはできるが、現実の個々の世帯とどの程度類似しているか評価できない。

そこで、合成された集団と合成対象の集団の類似度を評価する手法を開発する。従来の評価手法では、実個票データの利活用は困難

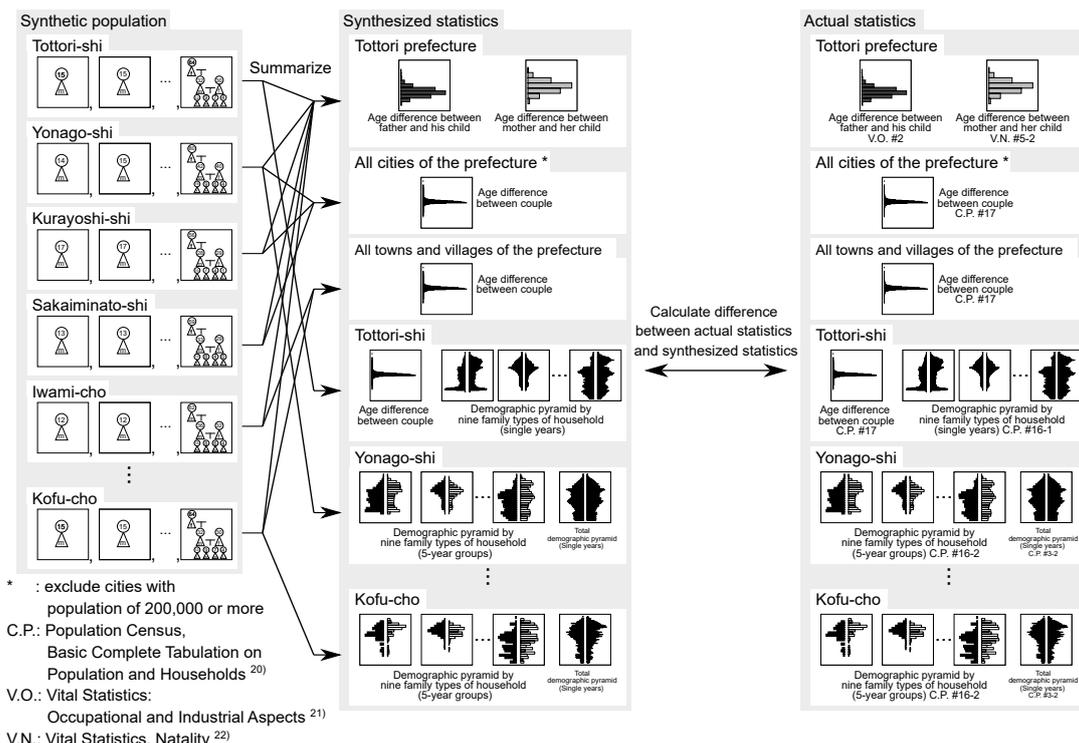


図2 市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の合成

であるため、実統計表と、合成人口データから集計される統計表（この統計表を合成統計表と呼ぶ）の各統計量の差を用いて、合成人口データを評価していた。提案手法では、まず、実統計表から仮想都市の人口（仮想都市における個票データ、以下、仮想個票データ）を作成し、仮想個票データを用いて統計表を集計する。この仮想個票データから集計された統計表（以下、仮想統計表）を用いて人口合成することで、従来の評価手法である統計量の差に基づく評価ができるとともに、合成された個票データと仮想個票データを比較することができる。

2. 3. 従業地属性の合成

従来手法[1-3]では常在地の人口（いわゆる夜間人口）を対象に合成している。モビリティ、感染症などの政策を検討する際にはサイバー空間上に日常行動と非日常行動からなる昼間人口を再現する必要がある。日常行動は通勤、通学など日常的に行う行動である。非日常行動は旅行などの行動である。本研究では、日常行動の中でも通勤に着目し、従業場所を合成する方法を開発する。

従業に関する属性として、従来手法[3]では、従業先企業の産業分類、企業規模、就労形態、月給を合成している。一方で、常在地に関する属性として、従来手法[1]では都道府県、もしくは、市区町村、従来手法[2]では居住する家屋の住所を合成している。この常在地と従業場所をつなぐために、合成手法が主として用いる国勢調査と異なる年度かつ集計対象である経済センサスを用いる手法を提案する。提案手法では、まず、常在地から従業地の市区町村を割り当てる。次に、従業地の市区町村を用いて、従業市区町村内の町丁目を割り当てている。なお、常在地が人口20万人以上か、人口20万人未満かによって公開されている統計表が異なるため、常在地の人口規模に応じて処理を変更する必要がある。

3. 計画の進行状況

3. 1. 市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の合成

本研究では、鳥取県を対象に提案手法と従来手法[1]の比較実験を行った。比較実験では、従来手法[1]を用い、都道府県単位で合成する手法（合成された各世帯は市区町村属性をもたない）、従来手法[1]を用い、都道府県下のすべての市区町村を個別に合成し、統合する手法、提案手法を用いて都道府県を一度に合成する手法の3つの手法を比較する。これらの3つの手法では、それぞれ用いる統計表やその数が異なる。本論文では、これらの手法を比較するために、それぞれの手法において合成終了後に、鳥取県を集計対象とする父子年齢差、母子年齢差、夫婦年齢差、家族類型別、男女別1歳階級の人口分布を用いて評価を行った。

鳥取県を調査対象とする統計表と合成データから作成する合成統計表の絶対誤差の総和を表1に示す。総探索回数は44,557,800,000回とした。なお、試行回数は10回であり、は平均値を示している。表1の探索回数1人あたり100,000回の誤差を人口で割った1人あたりの誤差は、都道府県単位で合成する手法は0.000016、市区町村単位で合成する手法は0.045493、提案手法で合成する手法は0.000324である。これはそれぞれ60,780人に1人、22人に1人、3,084人に1人、年齢に誤りがあることを意味する。したがって、市区町村単位のデータが必要な場合は提案手法を用いることで従来手法[1]より現実と整合する合成人口データを得ることができる。

表1 統計表との誤差の総和（10回平均）

		Total	St. dev.
Previous method [1]	Prefecture	8.2	2.6
	Local government	22,673.8	18.4
Proposed method		161.6	10.8

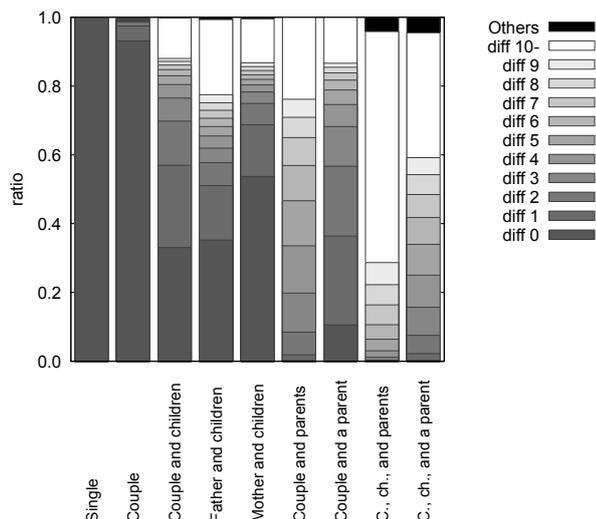


図3 精度評価結果（10回平均）

3. 2. 合成人口データの精度評価

本研究では、合成人口データと仮想個票データの一致度を比較するために、まず、仮想都市を生成し、仮想統計表を集計する。次に、各手法により合成された合成人口データと仮想個票データを比較する。仮想都市の生成では、平成27年度国勢調査と2015年の人口動態職業・産業別集計における東京都の統計表を用いた。なお、生成する世帯数は $H = 500,000$ とし、999,032人の仮想都市から各合成手法で用いる統計表を集計し、人口を合成する。

家族類型別、世帯間の差別の一致割合を図3に示す。図3のOthersは比較不可能な世帯の割合である。比較不可能な世帯を集計している理由は、世帯の家族類型、世帯人員数、ひとり親・子供の性別の内訳が異なる世帯やこれらの数が異なる場合があるからである。図3から、合成人口データと仮想個票データにおいて完全に一致する世帯の割合は78.28%であった。

3. 3. 従業地属性の合成

本研究では、大阪府高槻市の合成人口データを用いて従業地を合成した。その結果を図4に示す。図4から京都市と大阪市のベッドタウンである高槻市の特徴を反映した従業地合成ができたことがわかる。

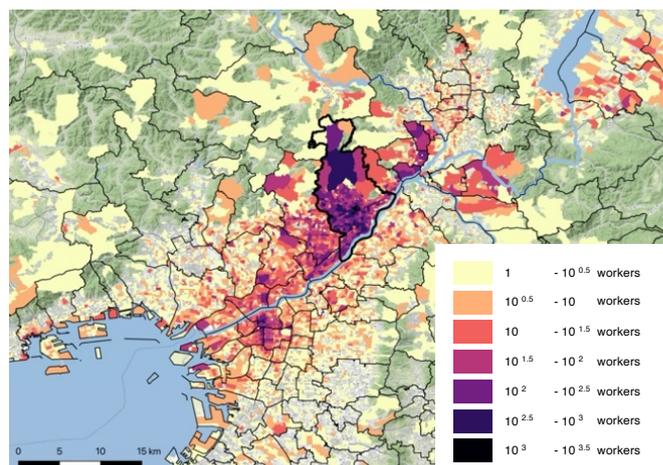


図4 従業地の合成結果

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究では、合成人口データの精度向上のために市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の合成に関する研究、合成人口データの精度評価に関する研究に加え、合成人口データへ日常行動を合成するために従業地属性の合成の3つに取り組んだ。それぞれ計測自動制御学会論文集[4, 5]、IEEE Transaction on Computational Social Systems[6]に採択された。今後、これらの手法を用いて日本全国の合成人口データの生成を計画している。

参考文献

- [1] T. Murata, T. Harada, and D. Masui: Comparing Transition Procedures in Modified Simulated Annealing-Based Synthetic Reconstruction Method Without Samples, *SICE JCMSI*, 10-6, pp. 513–519, 2017.
- [2] T. Harada and T. Murata: Projecting Households of Synthetic Population on Buildings Using Fundamental Geospatial Data, *SICE JCMSI*, 10-6, pp. 505–512, 2017.
- [3] 杉浦, 村田, 原田: 賃金構造基本統計調査に基づく合成世帯集団の労働者への所得の割当て, システム制御情報学会論文誌, 32-2, pp. 70–79, 2019.
- [4] 原田, 村田: 市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の人口個票の合成, 計測自動制御学会論文誌, 58-6, pp. 281–289, 2022.
- [5] 原田, 村田, 高橋: 市区町村の統計表を考慮した都道府県単位の人口個票の合成, 計測自動制御学会論文誌, 58-7, pp. 343–353, 2022.
- [6] T. Murata, D. Iwase, and T. Harada: Workplace Assignment to Workers in Synthetic Populations in Japan, *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 10 pages, 2022.

サイバーセキュリティと国際関係

環境システム学科 持永 大

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

本研究は、異なる専門分野を領域横断的に見直すことで、国家・市場の権力構造を分析する研究である。具体的には、情報通信技術による社会と政治経済環境の変化を考慮することで国家・市場の権力構造を明らかにする。そして研究成果としてサイバー空間と市場の権力構造に関して国家、企業、個人が今後直面する課題と選択肢を提示する。

通信と情報処理技術は、社会経済の構造を変え、国家・企業・個人の関係は変わった。しかし、情報通信技術が与えた権力構造の変化に関する研究は、政治経済、公共政策、技術に跨がる領域横断的な研究が必要であり、困難である。そこで本研究は従来の学術的な枠組みを超えた領域横断的なアプローチからサイバー空間が社会に与えた影響を分析する。

本研究の特色・独創的な点は、情報通信分野の発展を政治経済学の理論から見直すことである。情報通信技術が社会に与えた影響は、国際政治経済における権力構造を変えている。しかし、情報通信と政治経済分野に跨がる研究の蓄積は少ない。

時間発展の観点から見ると、情報通信技術は数年単位で世代交代が起こる。一方、政治経済分野は、十年程度の事象や環境変化を研究している。そのため、19世紀以降の政治経済理論は情報通信技術の重要性を指摘しているが、情報通信技術の権力構造への影響に関する研究は発展途上である。そこで、この両

者をつなぐ領域横断的研究を実施し、サイバー空間が国家・市場の権力構造に与える影響を明らかにする。

2. 研究計画

本研究は、情報通信技術の発展から国家・市場の権力構造の変化を分析するにあたって、次のような分析アプローチに基づき計画する。本研究における分析のアプローチは、情報通信分野の発展を政治経済学の理論から見直すことである。これにより基本的価値である安全保障・富・自由・公正をめぐる国際的体系の側面を明らかにする。研究対象事例は、情報通信技術をめぐる国家間の価値の違いに着目するため、インターネットの発展、米中関係、中国のデジタルシルクロード、自由で開かれたインド太平洋等とする。

研究計画に関して、年度前半では理論的な研究と既存研究の整理を実施する。その後、研究結果をとりまとめ、海外における研究発表を実施する。

この研究は情報通信と政治経済をあわせて研究することで新たな研究領域を確立し、海外での研究発表を行うことで、世界的な知の発展に貢献する事が可能である。現在の社会において、政治的権力や経済的権力の行使・維持において情報通信は不可欠である。それと同時に情報通信技術は、政治的・経済的安定が無ければ、利用不可能である。そのため、この新たな領域の活性化を通じて、専門外の多様な研究者の参入を促し、知の発展に貢献

することが可能である。

例えば、情報通信と政治経済を跨ぐ研究や研究者の少なさは文献数に表れている。国立情報学研究所の学術情報データベース CiNii によると、「情報通信」「政治経済」に関する文献はそれぞれ 457,647 件、24,892 件ある。一方、両分野に跨がる「情報通信」と「政治経済」の両方を含む文献は 57 件であり、同分野の研究が発展途上であることを示している。

3. 計画の進行状況

3.1 情報通信分野の発展見直し

本研究は、国際政治におけるパワーの概念を基に影響力を分析することで、その戦略的な目的を明らかにした。この国際政治におけるパワーの概念は、中国の戦略、研究開発の促進、企業の海外展開、技術標準の獲得、投資の回収といった個別の事例を結び、デジタルシルクロードの全体像を浮き上がらせることが可能である。本書では国際政治学で利用されるパワーの概念として、ナイ (Joseph S. Nye Jr.) のソフトパワーやストレンジ (Susan Strange) の構造的パワーの概念を活用する。ストレンジは、国際政治経済の動態を、直接相手に影響力を行使する関係的パワーと、政治経済構造を作り決定する構造的パワーの概念を用いて説明することで、国家、企業、専門家の影響力を分析した。この 2 つのパワーの概念はデジタルシルクロードにおける各事例を関係付け、デジタルシルクロードが経済的支援として関係パワーの強化に寄与し、金融や国際的なルール作りとして構造的パワーを強化しているという理解を与える。この 2 つのパワーは、技術を通じてインド・太平洋の経済・安全保障に影響を与えており、中国が用いているツールが違ってもわかる。関係パワーは一带一路の道路、鉄道、港湾、通信ケーブル等の物理的なインフラに沿って展開しており、中国の地政学的な連結性を高めている。一方、構造的パワーは関係的パワー

を補完し、中国の影響力を高めている。具体的な事例には、オンライン決済や電子商取引等のデジタルプラットフォーム、データ保護やサイバー空間における規範等の世界的なルール作りがある。

3.2 国際政治理論と情報革命

国際政治経済における理論は情報革命をどう理解するか、学術的な議論を振り返る。学術的な議論において、情報革命と国家間の関係に関する研究を蓄積してきたのは国際関係論の分野である。国際関係論は、国家間の関係を理論的に説明することで国際関係システムを理解しようとする分野である。現在の世界における国際関係システムの特徴は、それぞれの国が主権を有し、それを超越するような世界政府がない無政府状態 (アナーキー) なことである。このアナーキーな状況を理解すべく、国際関係論では現実主義 (リアリズム)、多元主義 (リベラリズム)、または構成主義 (コンストラクティヴィズム) 等の観点から国家間の関係を記述する理論が発展した。

主権国家が国益を追求する現実主義の考え方に立てば、情報革命は国家の要素の強化に役立ち、基本的に世界の政治スタイルは変わらないとみる。現実主義の考え方においては、国家が国際関係における主役であり、国家は利益を追求するために合理的に振る舞い、政治的権力と安全保障が核心的な価値を有する。そのため、現実主義は情報革命を軍事力における RMA や経済的利益を追求することに寄与するものとして取り扱い、サイバー戦という新しい領域が生まれたことも認めるが、従来 of 安全保障や利益追求の一部であると考える。

また、国際法や国際制度が国際秩序を形成するとする多元主義の考え方に立てば、情報革命は国家が取り組むべき領域を増やしたとみる。多元主義は、国際関係における主体が多様であること、国家の対外政策における国内政策の重要性、国際法や国際制度における

国際機関の役割を強調する。ナイは、リベラリズムによる情報革命の見方について、「情報革命は民主主義的な諸国の役割を増大させ、そのことによってカント的な民主平和が究極的に実現する見込みを増大させる」と指摘している。

国際関係の重要な側面が思想や規範によって影響を受ける構成主義の考え方からすれば、情報革命は国家がこれまで作り上げてきた構造を変えるものである。トフラー夫妻 (Heidi Toffler, Alvin Toffler) やドラッカー (Peter Drucker) は情報革命が産業革命の時代を特徴付けた階層的な官僚機構の終焉をもたらすと指摘した。その理由は、インターネット上の分権的な組織や共同体が独自の発展をもたらし、これまでになかった統治のパターンを作り出すためである。このように、いずれの立場も情報通信技術が国際政治経済に影響を与えていることを示している。そのため、国家は技術による自国の優位性を確保するための取組を続けている。

3.3 中国のデジタルシルクロード

中国のデジタル・シルクロードは、インド太平洋地域で積極的に拡大している。そこで、中国共産党が推進する技術導入への関与とその価値という観点からデジタルシルクロードを分析した。また、サイバー領域における中華人民共和国の戦略的狙い、インド太平洋地域におけるデジタルシルクロードの影響、日本の反応について研究した。

中国は、一帯一路を通じて世界中の国々に影響力を拡大している。一帯一路デジタル経済国際協力イニシアチブ (デジタルシルクロード) は、一帯一路の情報通信分野における構想である。これに対して米国等は、安全保障上の懸念、知財の窃取、およびプライバシーの面において中国由来の技術は潜在的に高いリスクを抱えていると指摘している。しかし、これらの指摘は中国による影響力拡大の

目的を理解するのに不十分である。例えば、なぜ多くの国がこれらの技術を受け入れるのか、低コスト機器に付随するリスクは何か、または中国の技術を通じた影響力はどのように効果を上げるのかといった問いには十分答えられない。

3.4 アジアにおけるパワーバランス

そこで本研究は、デジタルシルクロードについて、国際政治におけるパワーをフレームワークとして、経済、安全保障、及び技術という要素、インド・太平洋という地域の地政学からその目的と影響力を明らかにする。日本を含む中国周辺のインド・太平洋地域の諸国は、中国の台頭に伴う経済・安全保障のバランスの変化に適応しようとしている。経済のバランスについて、白石らの指摘するように、中国周辺諸国の経済のバランスは、中国・米国・中国以外の国々の3者によるから構成される。例えばASEAN諸国は、この3者を利用し自国の発展を進めてきた。その一方で、中国周辺諸国の安全保障政策は、米国を中心とした同盟関係に対する認識、中国に対する脅威認識によって異なる。安全保障面で対称的な立ち位置にいるのはベトナムとタイである。ベトナムは、米国の軍事力を所与のものとすることはできず、中国と南シナ海を巡って領土問題を抱えており、米・豪・日・印・露との経済・安全保障上の協力関係をもとにバランスをとっている。タイは米国と安全保障上の協力関係にあり中国と国境を接していないことから中国に対する脅威認識は異なる。

技術は、この経済・安全保障のバランスを変える要素であり、デジタルエコノミー、情報通信技術、新興技術 (人工知能、バイオテクノロジー等) といった次世代のパワーバランスを形作るには欠かせない。なかでも情報通信技術は、メッセージングアプリやオンラインショッピングといった身近な道具から、重要インフラや国際金融を支えており、先進

国だけでなく途上国の経済発展を支えている。国連統計委員会のデータによると、国際貿易においてオンラインで提供される金融サービス等の輸出額は、2019年時点で約3兆1926億ドルである。この金額は、全世界の輸出額の約52%となっており、2010年からの10年間に1.7倍になった。

また、情報通信技術は安全保障分野において、決定的な影響を与えるものとなった。米軍は1991年の湾岸戦争以来、情報通信技術による軍事における革命によって圧倒的な勝利を得ている。情報通信技術は、統合情報システムという形で軍に実装され、組織横断の相互運用性を高めた。これによって戦場の情報をリアルタイムに共有することが可能となった。この米軍の指揮・統制・通信・インテリジェンスを統合する統合情報システムは、日本を含む同盟国が導入するシステムの模範となり、システム間の連携による情報共有は米国との安全保障協力の礎を成している。

本研究はデジタルシルクロードの形成を振り返るとともに、国際政治におけるパワーの概念を基に影響力を分析することで、その戦略的な目的を明らかにする。この国際政治におけるパワーの概念は、中国の戦略、研究開発の促進、企業の海外展開、技術標準の獲得、投資の回収といった個別の事例を結び、デジタルシルクロードの全体像を浮き上がらせることが可能である。スーザン・ストレンジは、国際政治経済の動態を、直接相手に影響力を行使する関係パワーと、政治経済構造を作り決定する構造パワーの概念を用いて説明することで、国家、企業、専門家の影響力を分析した。この2つのパワーの概念は各事例を関係付け、デジタルシルクロードが経済的支援として関係パワーの強化に寄与し、金融や国際的なルール作りとして構造パワーを強化しているという理解を与える。この2つのパワーは、技術を通じてインド・太平洋の経済・安全保障に影響を与えており、中国が用いて

いるツールが違うこともわかる。関係パワーは一带一路の道路、鉄道、港湾、通信ケーブル等の物理的なインフラに沿って展開しており、中国の地政学的な連結性を高めている。一方、構造パワーは関係パワーを補完し、中国のソフトパワーとしてその影響力を高めている。具体的には、オンライン決済や電子商取引等のデジタルプラットフォーム、データ保護やサイバー空間における規範等の世界的なルール作りが挙げられる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究では、中国の動向について研究し、論文投稿を1件、国際会議での発表を2件、国内会議での発表を2件、国内企業団体における講演を4件行った。論文投稿については、欧州連合の政府間機関であり、ヨーロッパ研究、特にEU研究において、世界最高峰の教育・研究機関として名高い欧州大学院が発行する論文誌に投稿を行い、論文が掲載された[1]。また、マレーシアやインドネシアにおいて、本研究の成果発表として、研究・イノベーション学会、第3回光海底ネットワークシンポジウム、Chung-Hua Institution for Economic Research、Institute of Strategic and International Studies Malaysiaにて発表を実施した。また、企業講演に関して、内閣サイバーセキュリティセンター、公益社団法人日本経済研究センター、福島県中小企業同友会、富士山会合ヤングフォーラムにて研究内容に関する講演を実施した。

参考文献

- [1] D. Mochinaga, "China's Digital Silk Road and its influence in the Indo-Pacific," European University Institute, San Domenico di Fiesole, 2022.

ラティス構造の強度特性と数値解析の研究

デザイン工学科 早房 敬祐

1. 序論

3D プリンタは従来の製造方法では困難であった周期セル構造体を造形することが可能であり、SLS 方式や SLA 方式の 3D プリンタによって、靴のインソールやヘルメットなどが製品化されている。一方、家庭用 3D プリンタとして普及が進んでいる FDM 方式は、製造装置および素材が低コストであり安全性も高いものの、周期セル構造体の造形は比較的困難とされている。そこで本研究では軽量かつクッション性を有する製品をターゲットとして、FDM 方式の 3D プリンタによって周期セル構造体を造形し、周期セル構造体の構造や密度に対する造形精度および圧縮剛性について調査を行った。

2. 実験方法

2. 1. 試験片作成

周期セル構造体は密度や構造を変化させることで剛性の操作が可能である。ここでは周期セル構造のユニットパターン、ライン太さ、単位ユニット長さをパラメータとし、それらに対する試験片の圧縮剛性を求めた。ユニットパターンは図 1 に示す Type A~I の 9 種類 (A~E はオープンセル構造、F~I はクローズドセル構造) とした。図 2 は本研究で作成した試験片の一例を示しており、1 辺 20mm の立方体に対しライン太さを 0.5, 1.0, 2.0 mm の 3 通り、単位ユニット長さ (格子間隔) を 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 mm の 5 通りに変化させた。試験片を作成する 3D プリンタは

Anycubic 社製の Mega X を使用した。フィラメント素材について、本研究ではクッション性を有する製品をターゲットとしていることから軟質材である TPU (熱可塑性ポリウレタン: Sain SMART 社製) を採用した。造形データの作成に使用するスライサーとして Ultimaker Cura を用い、ソフト上で周期セル構造体のユニットパターン、ライン太さ、単位ユニット長さの設定を行った。ノズル温度やベースプレート温度は使用したフィラメントの推奨値 (それぞれ 210°C, 50°C) とした。

2. 2. 造形精度の評価

造形不能と見なす状況として、途中で形状が崩壊するケースと造形は完了したもののその形状の精度が低いケースがある。前者は目視で判定できるが、後者の判定は容易ではない。Ravari らは周期セル構造体のライン太さを計測することによって造形物のばらつきを評価している。本研究ではユニット長さについて、マイクロスコップにより観察された計測値と Ultimaker Cura での設定値を比較し、その誤差で評価を行った。

2. 3. 圧縮試験

高精度で造形が完了した周期セル構造体に対して圧縮試験を行い、応力ひずみ曲線およびヤング率を求めた。卓上型引張圧縮試験機 MCT-1150 を用いてストローク制御により試験片を 10 mm (ひずみに換算すると 50%) まで圧縮した (図 3)。試験速度は 0.1 mm/s, 荷重は 500N を上限とした。そして、計測した応力ひずみ曲線から周期セル構造体の各種パラ

メータが剛性に与える影響について考察を行った。

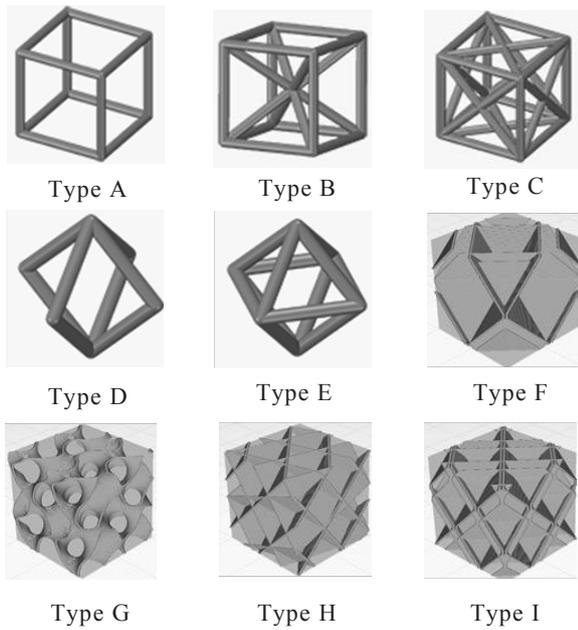


Fig. 1 Nine types of unit patterns.

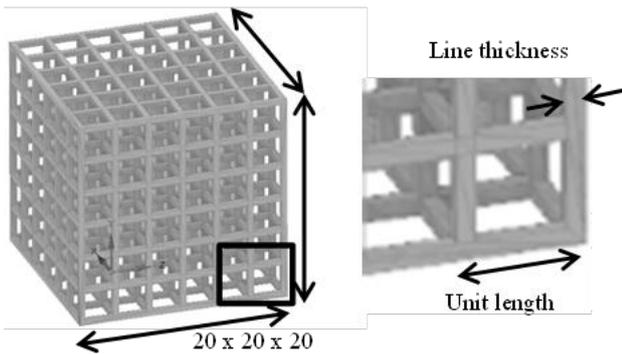


Fig. 2 Unit length and line thickness of periodic cell structure

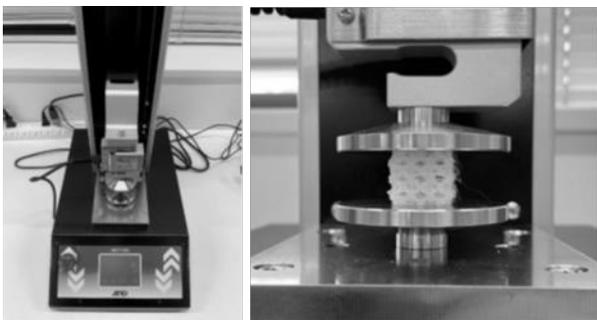


Fig. 3 Test equipment and compression test

3. 試験結果

3. 1. 試験片の観察

ライン太さ 0.5mm で作成した試験片の一例を

図 4 に示す. この条件ではユニットパターンやユニット長さに関わらず全てが造形不能となった. 3D プリンタに使用しているノズルの径は 0.4mm であるがライン太さ 0.5mm では細すぎるため, 周期セル構造体を造形することは不可能と判断し以降は評価から除外した. 図 5 は Type A~I, ライン太さ 2mm として造形した試験片であり, マイクロスコープで撮影した写真と STL データに基づいて描いた図を示している. これより, Type A, E, F, G, H, I は STL データと同様の構造を確認できるが, Type B, C は構造のすきまに樹脂が浸入しており, 正確に造形できていない. また, Type B, C, D の試験片においてライン太さやユニット長さを変えて造形を行ったが, いずれも造形精度は著しく低下した. これらのユニットパターンは FDM での製造が困難であると判断し, 以下では評価から除外した.

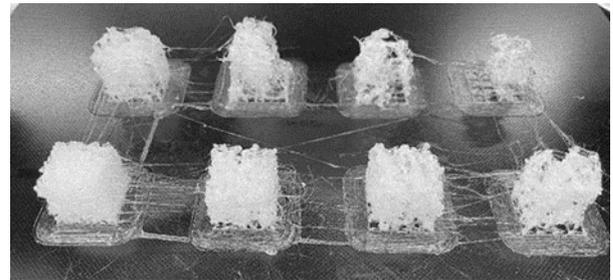


Fig. 4 Test piece made with a line thickness of 0.5 mm

3. 2. 画像による造形精度の評価

製作した周期セル構造体の試験片に対して密度を測定し, 2.2 節の方法で算出したユニット長さの誤差との関係について, オープンセル構造である Type A, E を図 6 (a), クローズドセル構造である Type F~I を図 6 (b) に示す. 全般的な傾向として, 密度が低い領域や高い領域では誤差が増大しており, 密度が 20~80% の間で比較的造形が安定する傾向が見られた. また, Type A と E は多くの条件で誤差 10% を超過しているのに対し, Type F~I はほとんどの条件に対して誤差 10% 以下とな

っており、広範囲の密度に対して造形が安定していた。中でも Type I は密度 39~75% の範囲のほとんどのケースで誤差 0.8% 以内に収まっており、広範囲の密度に対して造形精度の高い結果となった。

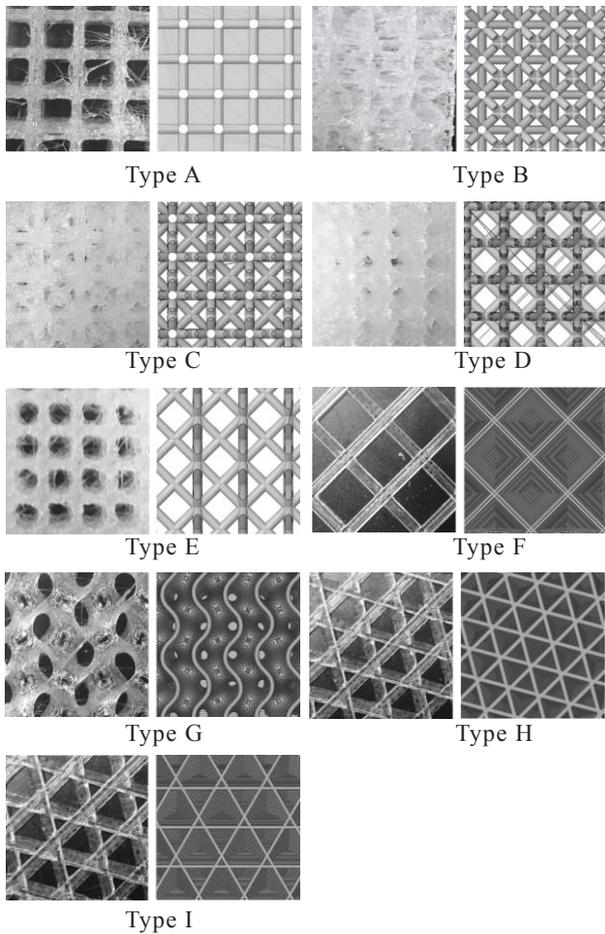
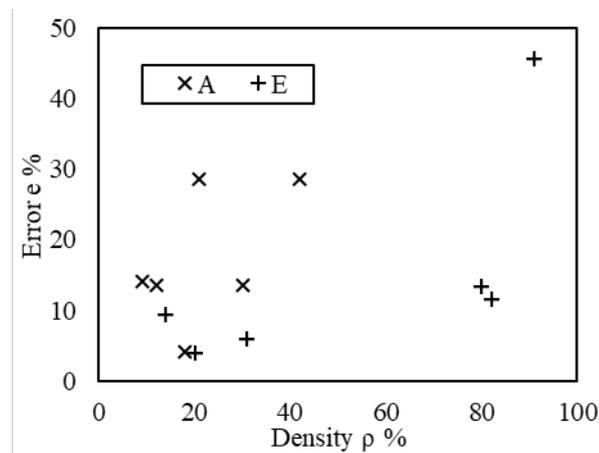
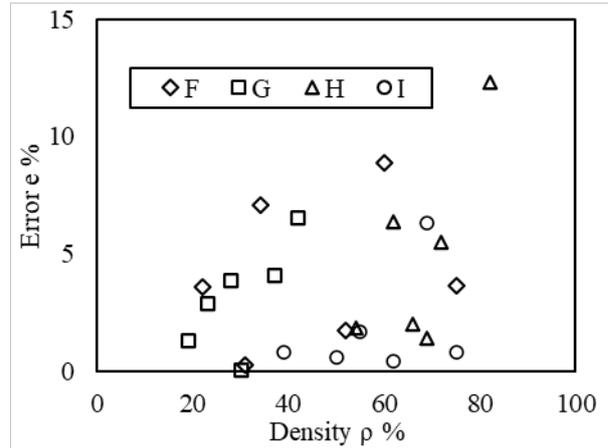


Fig. 5 Unit pattern with a line thickness of 2 mm (right: photo, left: STL data)



(a) Open cell structure



(b) Closed cell structure

Fig. 6 Unit length error for density

3. 3. 圧縮試験結果

密度が約 60% の Type A, E, F, G, H, I 試験片について圧縮試験を行い、得られた応力ひずみ曲線を図 7 に示す。これらの試験片の密度はおおよそ同じであるが、ユニットパターン、ライン太さ、単位ユニット長はそれぞれ異なっている。これより、密度が同じにもかかわらず、応力ひずみ挙動はユニットパターンの違いによって大きく異なっていることが分かる。剛性が高いのは F, H、剛性が低いのは A, E であった。また、A については応力ひずみ曲線にピークが存在しており、荷重の増加に対する変形挙動が不安定であった。このような特性を持つ周期セル構造体のクッションへの適用は不適切である。

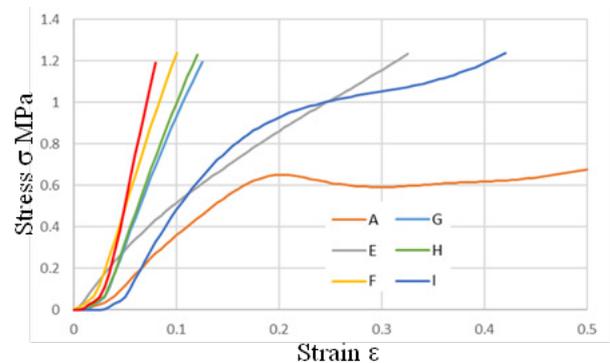


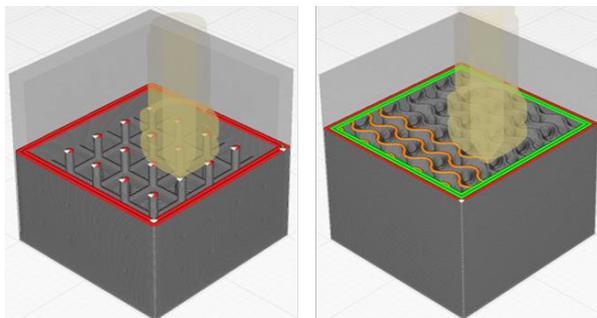
Fig. 7 Stress-strain curve at 60% density

4. 考察

4. 1. 造形精度の評価

図 6 において、密度 20%以下の造形精度が低下する理由を以下に示す。本研究で周期セル構造体を造形する場合、その微細な構造のためにサポート材を設置しない設定としている。そのため、天井部の造形に対応できないことが精度低下の要因と考えられる。

次に造形精度について、Type A, E が低く、G, I は高い理由を以下に示す。A, E は隣のセルと空間が繋がっているオープンセル構造であるため、造形時に飛び石動作が頻発する。飛び石動作とは造形時にノズルが別の離れた場所へ移動する動作であり、フィラメントの糸引きの発生原因となる。特に TPU の場合はその現象が顕著に現れ、図 4 に示すように造形精度が著しく低下する。一方、G, I はクローズドセル構造であり、隣のセルの間に壁が存在する。図 8(a), (b) はそれぞれ Type A と G の造形時の各層のノズルの動きを示しており、着色部分が造形された箇所である。図 8(a) に示すようにセル間に壁が存在しない場合、出力される樹脂は飛び石状になっているが、図 8(b) に示すようにセル間に壁が存在する場合は連続して出力されている。すなわち、クローズドセル構造を採用することで、飛び石動作が減少するため、造形精度が向上したと考えられる。



(a) Type A

(b) Type G

Fig. 8 Changes in molding behavior due to differences in cell structure

4. 2. 圧縮試験

図 7 より圧縮剛性が高い構造は F, H, G, I (比剛性 19.9, 18.8, 17.7, 11.2) の順であり、いずれもクローズドセル構造であった。これらはモノコック構造であり、セル間の壁が外力を分散するため高い剛性が得られたと考えられる。一方、A, E は柱と梁からなるラーメン構造であり、圧縮荷重の増加に伴い、柱や梁に曲げや座屈が生じていた (図 9)。図 7 の Type A の応力ひずみ曲線に着目すると、曲線のピークから応力が低下するタイミングで座屈が生じていた。よって、本研究の対象としているクッション製品ではこのような大規模な座屈現象は生じないことから、これらの構造は不適当と判断した。

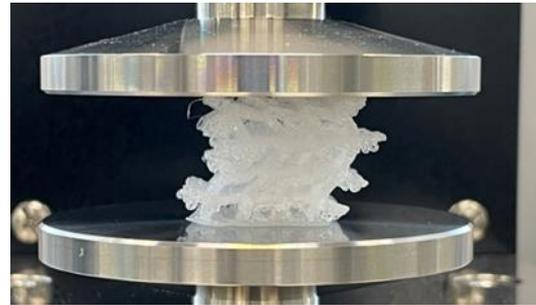


Fig. 9 Buckling caused by compression test

5. 研究計画と進行状況

- ・樹脂用 3D プリンタ (300mm 程度) の購入・立ち上げ ⇒ 完了
- ・樹脂材試験片試作: PLA (標準材: ポリ乳酸), TPU (軟質材: 熱可塑性ポリウレタン) のラティス試験片を造形 ⇒ 完了
- ・応力ひずみ曲線を取得 ⇒ 完了
- ・ターゲット製品の決定, 製品設計, 製品の造形・評価 ⇒ 完了 (ラティス構造のクッションを作成)

6. 学会, 論文等投稿・発表状況

- ・日本材料学会第 72 期通常総会・学術講演会にて発表予定 (2023 年 5 月 29 日)。
- ・日本材料学会誌に投稿予定 (執筆中)

高機能心腔内超音波イメージング法の開発

理工学研究科 電気電子情報工学専攻 椎名 毅

共同研究者

SIT 総合研究所 山川 誠

SIT 総合研究所 浪田 健

1. はじめに

不整脈の中でも頻度の多い心房細動は、心筋内に異常な電氣的興奮や回路が生じることが原因であるが、血栓を生じて脳梗塞や認知症、心不全のリスクが高くなる。罹患者数は、加齢とともに増加するが、日本では人口の 1% 以上の 100 万人超と推定されている。心房細動の治療では、カテーテルの先端に電極を付けて高周波電流を流して心筋の異常部位を焼灼して不整脈の発生を止める、カテーテルアブレーション（心筋焼灼術）が、低侵襲で効果が期待できるため、急速に普及している。

一方で、心筋焼灼の結果の判定は電気刺激で確認する方法が用いられるが、焼灼の程度や範囲を正確に得られないため、焼灼が不適切な場合、再発や周辺組織の障害など生じる点が課題となっている。近年、超音波カテーテルで焼灼部位を画像化する方法が試みられているが硬化部位を正確に把握するのは限界がある。

超音波エラストグラフィは組織の硬化を可視化する技術として開発され、乳がん、肝炎等の治療に用いられている。アブレーションにより熱変性した組織は硬化することが予想されるため、その評価にエラストグラフィが利用できる可能性がある。

本研究は、超音波カテーテルにエラストグラフィを適用して、心腔内から焼灼の程度と

範囲をリアルタイムで計測可能とするイメージング法を開発を目指して、組織サンプルを用いた基礎実験による原理検証と、*in vitro*での動物実験より有効性の評価を行う。

2. 研究計画

2. 1 心腔内超音波エラストグラフィの原理検証

心筋の主成分であるタンパク質は、焼灼による熱変性で硬さが変化することが予想されるが、治療上、必要なレベルのアブレーションにおいて、どの程度の硬度が変化するかは未知数である。このため、ヒトに近い豚の心筋組織に対して、様々なレベルでのアブレーションを行った焼灼心筋モデルを作成し、超音波像およびエラストグラフィを得て、焼灼程度と範囲、分解能について評価し、焼灼部位の可視化の原理検証を行う。

2. 2 豚心筋組織での *in vitro* 計測による焼灼部可視化の有効性評価

臨床で心筋アブレーションを行う際の超音波エラストグラフィの計測では、心臓の拍動が大きく影響することが予想される。このため、豚を用いた *in vitro*での動物実験において、アブレーションと超音波エラストグラフィの

計測を行い、焼灼程度の評価の可能性を検証する。

なお、研究の実施に必要な機器の提供および動物実験設備の利用等については、共同研究を行っている企業の協力を得た。

3. 計画の進行状況

3. 1 心腔内超音波エラストグラフィの原理検証

心筋のアブレーション装置は、企業より提供を受けた。また、超音波エラストグラフィの計測には、研究室に現有の装置（HIVISION Ascendus（日立））とリニアアレイプローブ EUP-L75(8-15MHz)を用いた。

豚心筋の組織切片に対し、アブレーション装置にて、様々な強度にて焼灼部のサンプル作成した。焼灼部は、目視では白く変色が認められたが、超音波像では焼灼部の境界は不鮮明で、識別は難しかった。一方、エラストグラフィでは、一部、焼灼の強度が大きいものに対しては、硬化した部位として青くなることが確認できた。しかし、実際の臨床で使うレベルに近い焼灼の強度では、エラストグラフィでも検出が困難であった。

実際、手で触れた場合の硬さは、非焼灼部では予想よりも硬く触知され、焼灼部との差が小さく感じられたことと対応していた。

これは、心筋組織を一旦冷蔵したことが原因と思われ、実際の生体に近い条件でのアブレーションでの硬さの変化を再現するには、*in vitro*での計測が必要なことが示された。

3. 2 豚心筋組織での *in vitro* 計測による焼灼部可視化の有効性評価

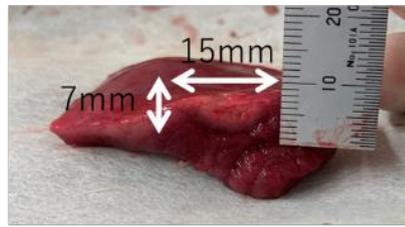
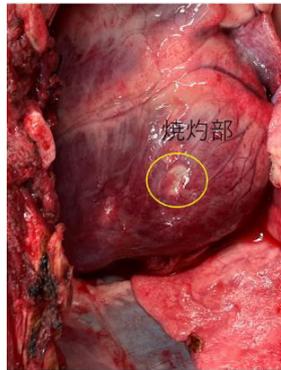
豚の心筋を用いた *in-vitro* の実験は、専用の動物実験施設を用いて共同研究の企業の管理のもとで実施された。

アブレーションの装置は（1）と同様で、超音波装置は、今回は原理検証の段階になるため、臨床で乳腺などの体表計測で用いられている装置を用いた。

最初に、拍動した状態で心外膜にアブレーション電極を当てて焼灼部を形成した後、その部位に超音波装置で超音波像およびエラストグラフィの計測を行った。図1(a)は、焼灼時間を 30W で 45 秒と長くして強めにアブレーションした場合の直後の写真で、中央の丸で囲んだ部分が焼灼部で、白く変色しているのが分かる。図1(b)は焼灼部の付近の組織を摘出したもので、焼灼領域のサイズは幅 15mm、深さ 7mm であった。一方で、拍動した状態では組織の 3 次元的な動きのため、超音波のスライス面のずれが大きくなり、何れの場合でも、エラストグラフィの計測は困難であることが確認された。

図2は、心筋組織を摘出後に、焼灼部の断面を計測した、超音波像とエラストグラフィである。上部の表面近くに焼灼部があり、超音波像では、焼灼部と周囲組織との境界が明確でないが、エラストグラフィでは、硬化部は青く表示され、焼灼部が明確に描出できている。またそのサイズは、幅 15mm、深さ 8 mm で、図1の摘出組織の断面での計測値とほぼ一致していることが、確認された。

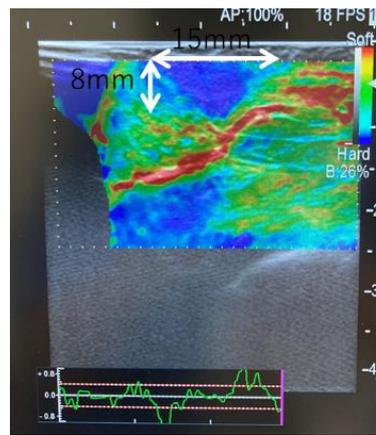
図3は、焼灼時間を 40W で 15 秒と、弱めに焼灼した場合の結果である。写真では同様に焼灼部は、白く表示されているが、焼灼部が図2よりも小さめとなっている。また、焼灼部のエラストグラフィでは、上端に青く表示されている部分は硬化した部位として明確に表示されている。一方、超音波像では、焼灼部の輝度が周囲と僅かに異なっているが、エラストグラフィに比較して識別は難しい。



(a) 焼灼部の写真

(b) 摘出組織（焼灼部断面）

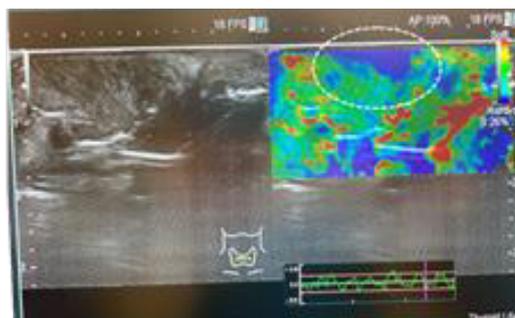
図1 豚心筋の *in vitro* の計測結果（焼灼条件 30W 45s）



(a) 超音波像

(b) エラストグラフィ

図2 図1の焼灼部の断面の超音波像とエラストグラフィ



(a) 焼灼部の断面の写真

(b) 超音波像

(c) エラストグラフィ

図3 豚心筋の *in vitro* の計測結果（焼灼条件 40W 15s）

また、心臓摘出後に焼灼部を観察すると、焼灼部の中心は、白く変色しているが、その周囲は、少し濃い赤に変色した 2 領域があることが分かった。これは焼灼時の到達温度が影響していると考えられる。また、手で触知した場合には非焼灼部は、焼灼部と比べて、かなり柔らかく感じられた。これは、3. 1 で非焼灼部でも硬く感じられたことと、大きく異なっており、*in vitro* での実験の必要性が確認にされた。

4. 今後の計画

今回は、超音波装置は体表計測用のリニアプローブを用いたため、心臓の大きな拍動による組織の動きがある対象には追従できず、エラストグラフィの計測は困難であった。今後、カテーテルプローブなどで、心筋に固定して計測できるような方法の開発が必要と思われる。

一方で、適切な条件で計測できれば、超音波像よりも、エラストグラフィでは、アブレーションによる硬化部の描出が明瞭に識別できる可能性が示された。今後は、この点について再度、実験を行い、一定の成果が確認できれば、装置開発を検討する計画である。

また、焼灼部は白く変色することから、光の吸収特性が変化する可能性があり、光超音波でのアブレーション検出の可能性も示唆されたので、今後、エラストグラフィとともに光超音波を用いた、アブレーションの評価の可能性についても、検討を進める予定である。

以上

固液境界面近傍におけるコロイド流れの 分散粒子の複雑流動に関する壁面漸近挙動の解明

機械工学科 白井 克明

1. はじめに

液体に不溶性の粒子が分散したコロイドは様々な場面で用いられ、その応用範囲は塗料から熱輸送まで広範囲に及ぶ。粒子間の斥力が引力を上回る限り、粒子は安定して分散して周囲流体の流れに追従して流れ、粒径 $1\ \mu\text{m}$ 以下の場合、流れとともに個々の粒子はブラウン運動を伴う。ブラウン運動は粒径の微小化と周囲温度の上昇に伴い活発化し、バルクでは等方的に無秩序な運動を呈する。応用に際してコロイドは固体壁面と接して固液境界を伴う場面が想定される。例えば熱輸送媒体として有望なコロイドのナノ流体は固液間での伝熱を伴い、コロイダル・リソグラフィではコロイド粒子の固体壁面への沈着を利用する。固液境界近傍ではマクロな視点からは粒子は周囲流体とともに流れるが、ミクロな視点からは個々の粒子はブラウン運動を伴う。そのうえ壁面に近づくにつれ、ブラウン運動は非等方性を含む複雑挙動を示すため、固液境界を伴い現象では粒子挙動が重要となる。ブラウン運動の非等方性に関して理論モデルが提唱され、実験での検証も実施されたが、分散粒子の粒径と同程度（サブミクロン）の空間分解能が必要とされることから、一般にその検証は困難を伴う。また、ブラウン運動は粒径と周囲温度の影響を受けることから、その影響検証も求められる。そこで、本研究では固液境界近傍のコロイド分散粒子に関して、粒径と温度の影響を含めたブラウン運動

の非等方挙動の検証を研究目的とする。そのため、再現性の高い試験コロイドの定常流れを用いて固体壁からコロイド側に僅かに染み出すエバネッセント(EW)光による粒子速度の高分解能・三次元計測システムを構築し、計測に適用する。本研究を通じて固体壁近傍で粒子の非等方性挙動が解明されれば、流体力学分野の学問的発展とコロイド応用場面での粒子挙動の制御に繋がると期待される。

2. 研究計画

本研究は3年計画で取り組む。初年度には試験流路の構築と評価、計測システムの確立を予定する。以降2~3年目には初年度に構築した流路とシステムを用いて本格的な計測を推進し、研究目的のブラウン運動の非等方性と漸近挙動、粒径と温度の影響に着目して実験による検証を進める。

初年度は試験流路を構築し計測システムを確立する。試験流路に高アスペクト比の二次元流路断面を有する矩形流路を採用し、圧力駆動による層流流れを形成し、計測地点での流れの完全発達を検証する。分散粒子は試験部で完全発達した層流の平均流速分布に追従して流れるとともに、個々の粒子はブラウン運動を呈する。ブラウン運動は一般に不規則で等方的な運動だが、固体壁近くで非等方性を有する。粒子の計測には、試験流路壁面をガラスで作成し、ガラス/試験流体の境界面に臨界角を超える角度でレーザー光を入射し、

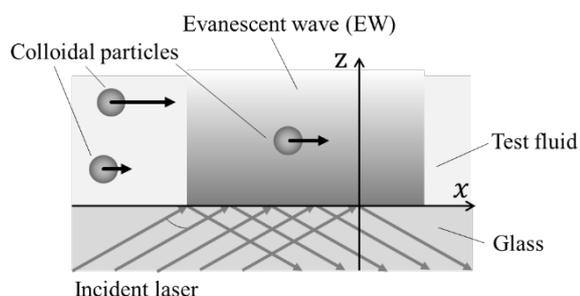


図1 ガラス壁面と試験流体の固液境界面での全反射で発生するエバネッセント光の模式図

全反射により生じるエバネッセント(EW)光を用いる。EW光は図1のように壁面からの距離に応じて指数関数的に減衰し、壁面垂直方向に高空間分解能を実現できる。研究では周波数計測のEWLVDV(=EW Laser-Doppler Velocimetry)と、画像計測のEWPTV(=EW Particle Tracking Velocimetry)の2種類を構築し粒子速度を計測する。現状で両手法とも壁面垂直方向の粒子通過位置 z の特定が難しい。本研究でそれを実現し、壁面近傍での計測で完全発達流との比較から計測性能を検証する。

2年目から本格的な計測を開始し、EWLVDVとEWPTVの両手法を用いて試験流路の壁面近傍での粒子速度を計測する。試験コロイドには蛍光または非蛍光粒子を水に分散させ、圧力駆動の二次元完全発達層流試験流路に流して計測する。数種類の異なる粒径粒子で計測して粒径の影響を調べる。EWLVDVでは主に流れ方向の流速に特化した計測を実現し、EWPTVでは流れ方向とスパン方向の計測を実現し、両手法の計測結果を比較検証する。

2年目後半から3年目には、試験部を加熱し試験コロイドの温度条件を変化させることでブラウン運動への影響を検証する。これにより、ブラウン運動の非等方性挙動に関して、粒径と温度による影響を系統的に調べられる。特にEW光を用いた計測で壁面からの位置特定を実現することにより、三次元計測を実現でき、これまで提案された非等方性モデルの壁面漸近挙動を検証できる。そして、3年目には研究成果をまとめて論文発表する。

3. 計画の進行状況

本年度は主にEWLVDV計測での信号処理の高度化およびEWPTV計測での粒子通過高さの特定を推進した。また、温度制御した試験流路の流動状態を実計測で確認した。

EWLVDV計測の信号処理では計測体積内をランダムに通過する非蛍光粒子による散乱光からのドップラー周波数の推定を必要とする。壁面近傍では粒子からの散乱光よりも壁面の散乱の割合が増え、粒子からの散乱信号のSNR(=Signal-to-Noise Ratio)が低下し、粒径約 $1\mu\text{m}$ 未満で粒子速度の算出が難しかった。試験流路での流体流れと壁面近傍のブラウン運動の非等方性を考慮して、図2に典型例を示す粒子運動の軌跡を模擬し、SNRに基づくノイズを付加した模擬信号を生成した。信号処理では粒子信号の時間周波数推定でモデル関数の中心位置を周波数軸上で並行移動して重み付けし最小自乗近似する手法を提案した。粒子による散乱信号は、ブラウン運動による速度変動と直流成分、ノイズを含む。図3(a)に示す時間信号から、周波数スペクトル上で(b)モデル関数の最小自乗近似を通じて(c)直流成分を除去して(d)ドップラー周波数の推定を可能にする手法を提案した。各SNRでの模擬信号の生成と上記の信号処理を繰り返す数値解析を実施し、統計信号処理理論のCRLB(=Cramér-Rao Lower Bound)下限界との比較に基づき検証した。その結果、図4に

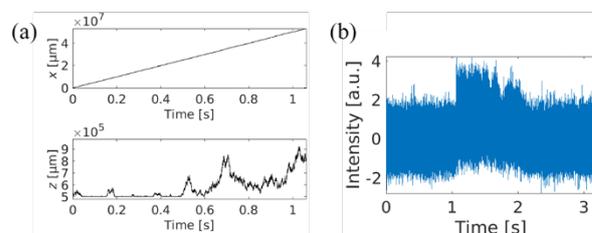


図2 EWLVDVにおける模擬信号の生成例 (a) 流れ方向(x 軸)とスパン方向(z 軸)での粒子運動の軌跡, (b) 粒子の軌跡とSNRに基づき生成した時間信号

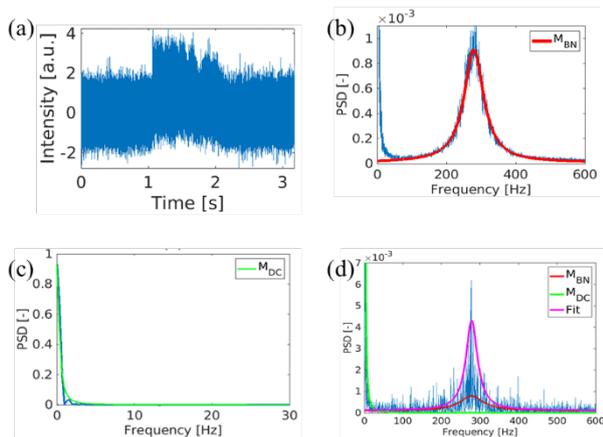


図3 EWLVDVでのドップラー周波数推定の模式図 (a) 模擬信号(SNR10 dB), (b) モデル関数近似, (c) 直流成分除去, (d) 周波数推定

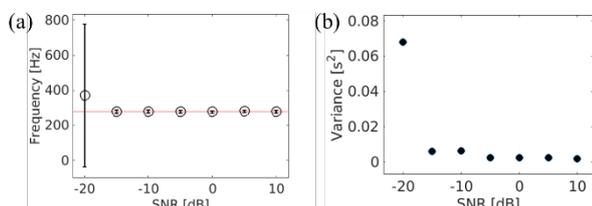


図4 EWLVDVでの信号処理でのノイズ耐性の調査結果, (a) 最大相関の周波数軸上での位置ずれ, (b) 最大相関値の時間軸上の分散

示すように最低SNRが-15 dBまでは提案手法がノイズ耐性を有することが示された。今後は実際の計測による検証が必要であり、今回の解析では直流成分の除去が十分でない場合もあり、信号処理の改良が望まれる。

EWPTV計測では、計測に用いる蛍光粒子径による影響調査と、壁面からの粒子通過高さの推定を推進した。粒径の減少に応じて顕著なブラウン運動が観察される反面、蛍光強度が低下し、観察がより難しくなることが予想された。実験でこれまでの粒径500 nmに加え400 nmと300 nmを試した結果、粒径300 nm程度までは計測可能と分かった。図5に粒径400 nmと500 nmの場合の典型的な計測画像を示す。粒子通過位置の推定に関して、EW光の強度は図1のように全反射界面からの距離に対し指数関数的に減少する特性が知られる。壁面に付着して動かない粒子が観測され、それらの蛍光強度が高いことが分かった。壁面

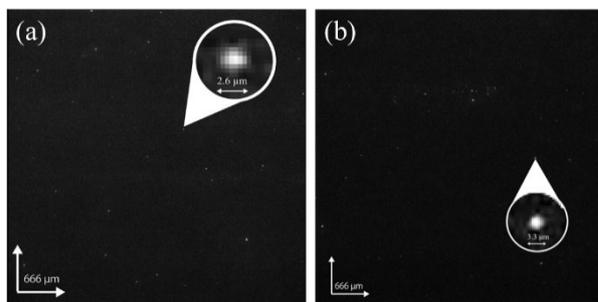


図5 EWPTVによる典型的な蛍光粒子画像 (a) 粒径400 nm, (b) 粒径500 nmの各場合

に付着した静止粒子の輝度値を界面でのEW光強度と仮定して、他の粒子蛍光強度を指数関数で近似し、壁面との相対距離 z を算出する手法を提案した。だが、壁面からの絶対距離の算出が困難であり、今後解決が必要である。

温度制御試験流路での計測では、圧力駆動による片面加熱され矩形流路で実験を進めた。流路は主にPDMS (=Poly-Di-Methyl-Siloxane) で作り、片側をITO (=Indium Titanium Oxide) 導電薄膜付ガラスとした。ITO膜は電流印加でジュール加熱され、設定温度に制御した。試験部断面は図6(a)のように流れの二次元性確保のためアスペクト比1:10以上の0.8 mm × 10 mmとし、流れの完全発達を考慮し試験部流路長さは40 mmとした。作動流体には粒径0.5 μmの蛍光粒子を分散させた水を使用し、試験部にチューブ接続してシリンジポンプの圧力駆動による一定流量で流した。座標系は流れ方向、スパン方向、高さ方向に x , y , z 軸を設定した。流路は倒立型蛍光顕微鏡に対し水平に設置し、加熱面を鉛直方向下側に完全発達した二次元層流流れを実現した。図6(b)に示すように加熱ガラス面側を通じて観察し、

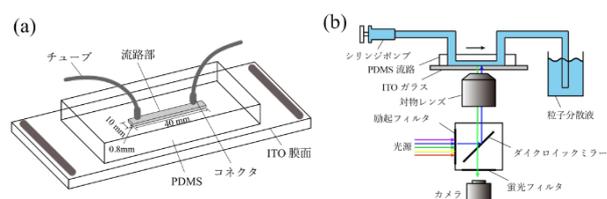


図6 (a) 片面加熱型試験流路と(b) 倒立型蛍光顕微鏡によるマイクロPTV計測の模式図

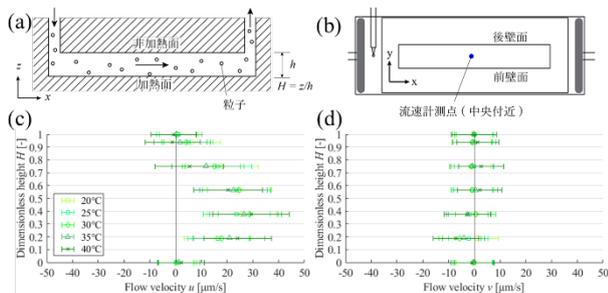


図 7 マイクロ PTV 計測による平均流速の分布結果. (a) 計測位置 (高さ方向), (b) 計測位置 (スパン方向: $y = 0$), (c) 流れ方向流速 u の分布, (d) スパン方向流速 v の分布

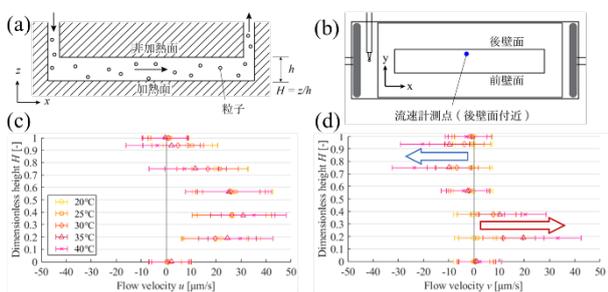


図 8 マイクロ PTV 計測による平均流速の分布結果. (a) 計測位置 (高さ), (b) 計測位置 (スパン方向: $y = +3$ [mm]), (c) 流れ方向流速 u の分布, (d) スパン方向流速 v の分布

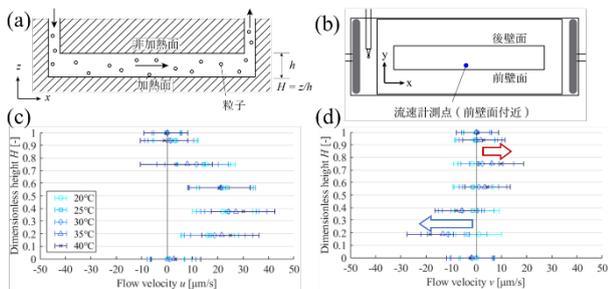


図 9 マイクロ PTV 計測による平均流速の分布結果. (a) 計測位置 (高さ), (b) 計測位置 (スパン方向: $y = -3$ [mm]), (c) 流れ方向流速 u の分布, (d) スパン方向流速 v の分布

マイクロ PTV 手法により、高さ方向の各平面における面内流速分布(u, v)を計測した。平均流速分布の結果を図 7~9 に示す。図 7~9 の違いはスパン方向の計測地点であり、図 7 は流路中央の $y = 0$ [mm]、図 8 はスパン正方向 $y = 3$ [mm]、図 9 はスパン負方向 $y = -3$ [mm] の地点である。結果から、加熱条件によって

複雑な三次元性を有する対流が観察された。この対流の原因として、レイリー・ベナール対流やマランゴニ対流が考えられたが、各種検証に基づき、そうではないことが分かった。むしろ加熱面で暖められた流体の粘性が低下し流動しやすくなったことで流れ方向へ加速が生じ、質量保存を満たすべく両スパン方向から流路中央部下面に流体が供給された結果、 $x-z$ 平面で S 字型の軌跡を描く複雑な三次元対流が形成されたと推測される。三次元対流挙動に関しては数値解析による検証が必要と考えられる。また、実験中に温度制御による急激な流速変化が生じて計測が乱れる問題が生じた。今後はこれらの影響を考慮した試験部の構築と計測条件の確保が必要と考える。

4. 今後の計画及び学会論文等投稿・発表状況

学会発表では、EWPTVに関する成果を2022年8月に開催された国際会議 MIPE2022にて報告した(発表文献1)。また、片面加熱試験流路での三次元流動の計測に関して、2023年3月に福岡で開催された日本機械学会 IIP 2023 講演会にて報告した(発表文献2)。

現在は EWLDV 計測への提案した処理手法の適用を推進し、EWPTV 計測では壁面垂直方向の粒子通過位置の特定手法の開発を推進している。試験流路の構築に加え、数値解析に基づく流れ特性の検証を推進し、2023年度の国際会議で発表予定である。

発表文献

1. M. Yajima, K. Hirai, H. Kato, K. Shirai (2022) "Visualization of complex motions of fluorescence particles with different diameters in the near-wall region of a solid wall using evanescent light field", 2022 JSME-IIP/ASME - ISPS Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2022), Aug 28-31st, Nagoya, Japan.
2. 長谷川達也, 白井克明(2023)「圧力駆動される片面加熱矩形流路での対流挙動に関するマイクロ PIV 計測に基づく考察」, 日本機械学会 IIP2023 情報・知能・精密機器(IIP)部門講演会, 2023年3月6~7日, 九州工業大学・戸畑キャンパス, IIPA-6-4, pp. 7-12.

Synthesis of novel high entropy oxides and search for their functionalities as oxygen storage materials for oxygen generation

機械機能工学科 Alicja Klimkowicz

Research colleague

機械機能工学科 Takasaki Akito

1. Paper introduction

Oxygen is essential for breathing and combustion. Oxygen cylinders are used underwater and in outer space to sustain life and as an oxidizer for fuel. Oxygen is also necessary for industrial processes such as steelmaking, welding, sterilizing, water purification, etc. Oxygen is indispensable, but to be used, it must be concentrated from the air or obtained via water splitting. There are currently two means of production. The first large-scale method is cryogenic distillation. In this method, the air is cooled to separate air constituents because different gases have different boiling/condensation points. For example, oxygen condensates at $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$, argon at $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$, and nitrogen at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Since this method requires cooling to low temperatures, it is costly. For economic and practical reasons, it is only valuable for large-scale production. An alternative group of methods rely on selective absorption or adsorption of gas in the material bulk or on the surface. The pressure or temperature change

controls the sorption/desorption. For example, zeolites are adsorbents, and pressurized air is applied to force nitrogen adsorption. Nitrogen-depleted air is, at the same time, oxygen-rich air. Later, the pressure is lowered to regenerate the adsorber, and the material desorbs adsorbed nitrogen. However, such a method of concentrating oxygen is inefficient, and effective oxygen adsorbents or absorbers are needed. Oxygen storage materials (OSM) that can reversibly absorb large amounts of oxygen are attracting attention. An interesting new group of OSM materials is high entropy oxides. In 2014, high-entropy materials (HEMs) were first introduced [1, 2]. The HEMs exhibit unique properties due to complex chemical composition and yet simple crystal structure. The concept of the HEM is shown in Fig. 1. A large amount of the elements that can be combined opens the possibility of preparing vastly different materials exhibiting various properties. According to Cantor, there are almost 20 trillion local clusters in a 5-component material. The key, however,

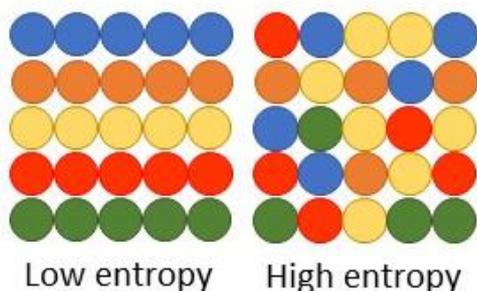


Fig. 1. Figure of merit visualizing the difference between low entropy and high entropy materials. Colors represent different atoms.

is to design materials and determine their properties before sintering. For that, a better understanding of the high entropy systems is necessary.

In this work, the authors focus on high entropy oxides that can exhibit oxygen nonstoichiometric [3]. Until now, there is minimal reporting in the literature regarding High Entropy Oxides for oxygen storage. The first trials are introduced in this report.

2. Research program

The presented research focused on obtaining new single-phase high-entropy materials. Two series of materials were under investigation: $n(\text{Re}_{1/n})\text{O}_{2-\delta}$, $n = 9-12$, Re = rare earth elements, and $1/5(\text{CeLaPrYA})\text{O}_{2-\delta}$, A = Alkaline earth metal. All cations were in equiatomic proportions. The sol-gel method was used for precursor preparation. The obtained powder was pressed into pellets and sintered in airflow at 1100 °C for 8 or 10 hours. The X-ray diffraction (XRD) technique was used for the structural investigation of the prepared samples. A Rietveld refinement was conducted for the single-phase samples to calculate the unit cell parameters. The microstructure

Research progress report (Form. 1) of the obtained materials was evaluated using Scanning Electron Microscope (SEM). Elemental analysis (EDX) was also conducted to ensure the even distribution of the elements within the sample and exclude the presence of impurities. However, the resolution of the measurement does not allow for quantitative calculation of the material's composition. The oxygen production and storage properties were evaluated using a thermogravimetric device (TG). The effect of the temperature and pressure on the oxygen content in the materials was a subject of investigation. The tests were conducted in various temperatures and oxygen partial pressure ranges (different atmospheres over the sample).

The XRD (Rigaku smart lab), SEM (JEOL / JSM-7100F), and TG (TA Instruments TGA 5500) devices used in this work were available in techno plaza in SIT.

3. State of progress

Due to the space limitation, only selected results are presented in this report. The presented data were gathered by the PI and two undergraduate students as part of their graduation research under PI's supervision:

- Ikuta Asahi 幾田旭 High entropy oxides $(\text{Ce}_{1/5}\text{La}_{1/5}\text{Pr}_{1/5}\text{Y}_{1/5}\text{A}_{1/5})\text{O}_{2-\delta}$, (A : Alkaline earth metals) as potential oxygen storage materials.
- Tago Hekima 田子碧馬 Oxygen Storage Properties of High Entropy Oxides- $x\text{Re}_{1/x}\text{O}_{2-\delta}$, $x = 9$ to 12, Re: different rare earth elements -

After sintering, all samples were examined using XRD, and the results were analyzed using a database to index the peaks and identify crystal symmetry. The results are gathered in Table. 1.

Table. 1 XRD analysis results of the prepared samples, sintered at 1000°C

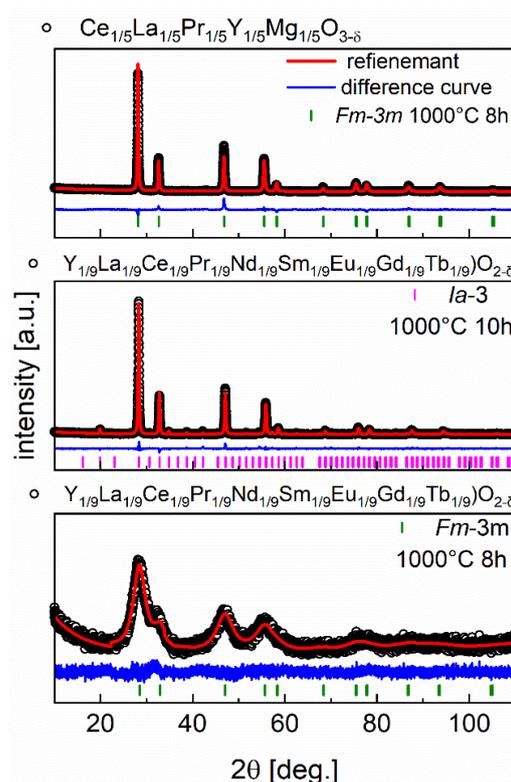
Samples	t [h]	Space group
1/9 (YLaCePrNdSm)	8	<i>Fm-3m</i>
EuGdTb)O _{2-δ}	10	<i>Ia-3</i>
1/10 (YLaCePrNdSm)	8	<i>Ia-3</i>
EuGdTbDy)O _{2-δ}	10	<i>Ia-3</i>
1/11 (YLaCePrNdSm)	8	<i>Ia-3</i>
EuGdTbDyHo)O _{2-δ}	10	<i>Ia-3</i>
1/12 (YLaCePrNdSm)	8	<i>Fm-3m</i>
EuGdTbDyHoEr)O _{2-δ}	10	<i>Ia-3</i>
1/5 (CeLaPrYCa)O _{2-δ}	8	<i>Fm-3m</i>
1/5 (CeLaPrYMg)O _{2-δ}	8	<i>Fm-3m</i>
1/5 (CeLaPrYBa)O _{2-δ}	8	<i>Fm-3m Pm-3</i>
1/5 (CeLaPrYSr)O _{2-δ}	8	<i>Fm-3m Pbam</i>

The data was also analyzed using Rietveld refinement to calculate unit cell parameters. The data are gathered in Tab. 2. The XRD data and refinement are plotted in Fig. 2.

Table. 2 Unit cell parameters (*a*, *V*) for 1/9(YLaCePrNdSmEuGdTb)O_{2-δ} 1) sintered for 8h, using *Fm-3m*; 2) sintered for 10h using *Ia-3*; 3) 1/5(CeLaPrYMg)O_{2-δ} using *Fm-3m* (χ^2 = goodness of fit).

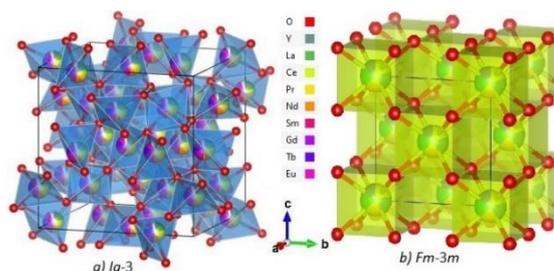
	<i>a</i> [Å]	<i>V</i> [Å ³]	χ^2
1	5.5325 (6)	169.34 (6)	2.445
2	5.3534 (1)	1295.50 (3)	1.528
3	5.4923 (1)	165.68 (1)	3.435

All of the samples crystallized in single-phased structures, either *Fm-3m* or *Ia-3*. Fig 3. Shows visualization of the obtained materials. In the case of n(Re1/n)O_{2-δ}, better results were obtained after sintering for ab



1 Fig. 2. XRD data with Rietveld refinement of selected samples, sintered at 1000°C in air.

extended period of time (10 hours instead of the usual 8 hours). The microstructure of all studied samples is similar, and therefore other results can be compared. Exemplary morphology for the studied samples is shown in Fig. 3. Further, the elemental distribution was even, and no impurities were found, as can be seen in Fig. 4. The analysis of the thermogravimetric data showed that HEO materials exhibit little change in the oxygen content under the studied conditions.



2 Fig. 3 Visualizations of the a) *Ia-3*, b) *Fm-3m*. Atoms not to scale.

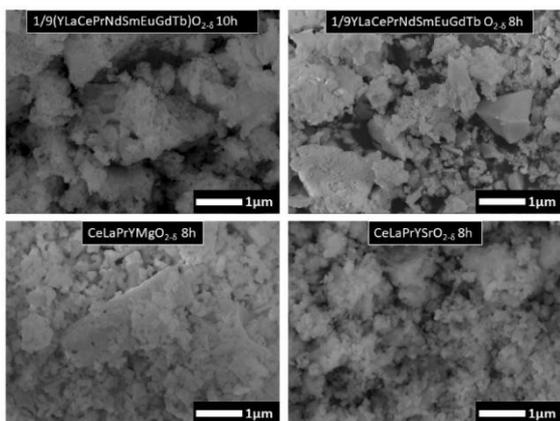


Fig. 3. SEM images of studied samples

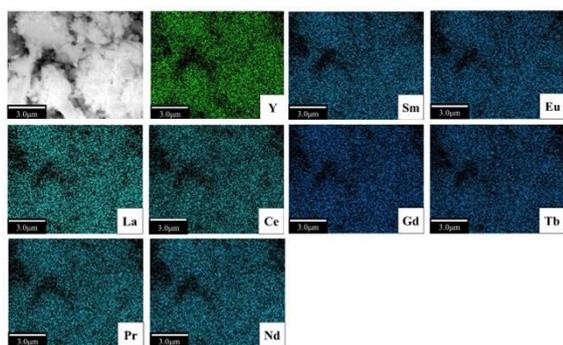


Fig. 4. Elemental analysis for $1/9(YLaCePrNdSmEuGdTb)O_{2-\delta}$

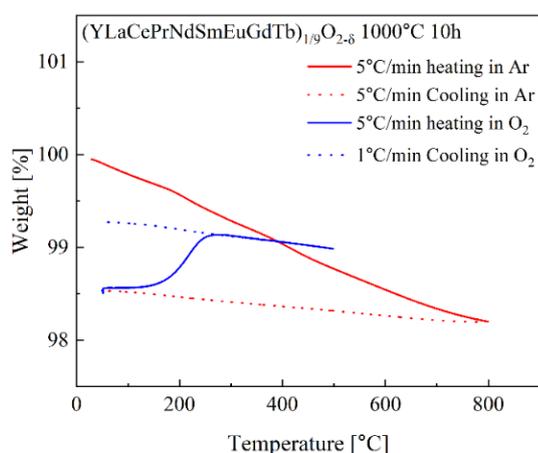


Fig. 5. Temperature dependence of the oxygen content registered for $1/9(YLaCePrNdSmEuGdTb)O_{2-\delta}$.

During the course of this project, several new compounds were obtained and tested for the first time. The outcomes are very interesting, however from the viewpoint of the oxygen storage, the obtained capacity is not high enough to make it possible for commercial application.

4. Future program, paper submission and results briefing

Some of the obtained results were presented during the following conferences:

- XXX International Materials Research Congress, in Cancun in August 14 - 19, 2022. The oral presentation was entitled "Rare-earth manganese oxides used for Temperature and/or Pressure Swing Absorption for oxygen generation" by A. Klimkowitz, et al.

- Solid State Ionics SSI-23 on July 17 - 22, 2022 in Boston, poster presentation entitled "Novel high entropy oxides for oxygen storage and generation", A. Klimkowitz, et al.

International Symposium on Thermofluids of Energy Systems and Materials (ISTESM 2022) - Series III - 16 November 2022. Keynote presentation entitled "Oxygen storage materials - OSM" A. Klimkowitz

The research on HEO will be continued. However low-capacity problem needs to be overcome. Therefore, the focus will be placed on the use of transition metals, that can possibly deliver higher capacity. If the results are proven to be satisfactory, they will be published in an impact factor journal, possibly in an open-access mode.

References

- [1] J. Yeh, et. al, Adv. Eng. Mater., 2004, 6, 299-303.
- [2] B. Cantor, et. al, Mater. Sci. Eng., A, 2004, 375-377, 213-218.
- [3] A. Sarkar, et. al, Dalt. Trans., 2017, 46, 12167-12176.

イオン液体を用いた劣化溶媒に含まれる核種の分離回収

材料工学科 新井 剛

1. 序論

放射性物質を取り扱う施設では、核物質や放射性核種等を抽出した抽出剤や分析溶媒が保管されている。特に使用済核燃料再処理である PUREX 法では、抽出剤としてリン酸トリブチル (TBP) が用いられており、これらの劣化物であるリン酸ジブチル (DBP) やリン酸モノブチル (MBP) が U 等の放射性核種と錯体を形成するため、従来の逆抽出による回収が困難となることが報告されている。これらの放射性核種を抽出した劣化溶媒はレガシー廃液として原子力施設等で貯槽されており、今後も増加が懸念される。しかし、劣化した有機溶媒に含まれる核種は極めて強固な錯体を形成しており、分配の差を利用した通常の逆抽出操作では回収することが困難である。そこで本提案研究では、有機溶媒との相分離性および金属イオンの抽出特性に優れたイオン液体に着目した。これまでに提案者らは、水溶液中における金属イオンのイオン液体による抽出挙動について詳細に検討しており、白金族元素や Co(II), Ni(II)等のレアメタルを良好に分離・回収できることを明らかにしている。また、イオン液体に抽出剤を添加することで、協同抽出効果により特異的な吸着特性を示すことも確認している。さらに、提案者らは、これまでに複数のイオン液体の合成方法についても確立している。本研究では、これらの水溶液中における金属イオンの抽出試験結果を基にイオン液体による劣化溶媒に

含まれる核種の抽出特性について明らかにし、イオン液体を用いた劣化溶媒からの効率的な核種分離プロセスの構築を目的にイオン液体の核種回収挙動の基礎検討を行った。

2. 研究計画

本研究では、① イオン液体の合成及び② 模擬劣化溶媒を用いたイオン液体による模擬核種の分離回収挙動について検討することとした。①の研究項目では、候補となるイオン液体を合成し、NMR による構造解析並びにそれらが所定の金属イオンの抽出特性を示すかを確認する。さらに、有機溶媒との相分離性についても検討する。②の研究項目では、模擬核種を抽出した模擬劣化溶媒を用いてイオン液体による模擬核種の分離回収について評価する。

3. 計画の進行状況

(1) [Hbet][Tf₂N]の合成

Fig. 1 に[Hbet][Tf₂N]の合成スキームを示す。Fig. 1 より、Betaine hydrochloride (東京化成工業株式会社製)と、Lithium bis(trifluoromethane-sulfonyl)imide (関東化学工業株式会社製)を等モル比となるように秤量し、蒸留水に溶解させて混合した。この混合物を 298 K で 1 時間攪拌することで[Hbet][Tf₂N]を得た。さらに、下相の[Hbet][Tf₂N]から LiCl 等の不純物を除去するために蒸留水による洗浄及びデカンテーションを数回行った後、上部の水相を除去

し残渣を水飽和[Hbet][Tf₂N]として回収した。

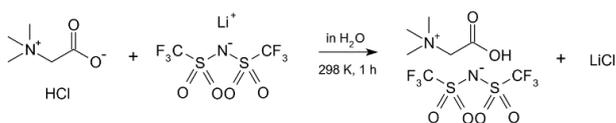


Fig. 1 [Hbet][Tf₂N]の合成スキーム

(2) [Hbet][Tf₂N]の評価

得られた[Hbet][Tf₂N]の評価は、核磁気共鳴装置(JNM-ECS400：日本電子株式会社製)を用いて既知の¹H-NMRスペクトルと比較することで評価した。[Hbet][Tf₂N]の測定は、20 μdm³の[Hbet][Tf₂N]を540 μdm³のジメチルスルホキシド(DMSO-d₆ 99.9 atom%D, 0.03 %TMS)に溶解し、NMRサンプル管に封入した。Fig. 2に[Hbet][Tf₂N]の¹H-NMRスペクトルの測定値を示す。

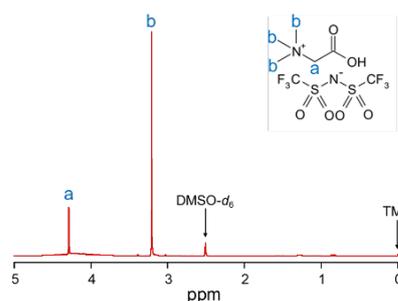


Fig. 2 [Hbet][Tf₂N]の¹H-NMRスペクトル
¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆, δ / ppm vs. TMS) 3.21(s, 9H, 3CH₃), 4.29(s, 2H, CH₂)

(3) 模擬劣化溶媒の調製

TBP及びDBPをドデカンに溶解し、模擬劣化PUREX溶媒DSP-n (**D**egraded **S**olvent for **P**UREX)を調製した。なお、nはTBP-DBPからなる抽出相におけるDBPの存在比を示す。DSP-nは体積比によってnの値を決定した。本試験で使用する溶媒の組成をTable 1に示す。本研究ではこれらの模擬劣化溶媒にZr(IV)を抽出させ、Zr抽出済み模擬劣化溶媒とした。Zr抽出済み模擬劣化溶媒は、DSP-nについてそれぞれZrP-nと表す。

Table 1 DSP-nの組成

	TBP [vol.%]	DBP [vol.%]	n-dodecane [vol.%]
DSP-0	30	0	70
DSP-10	27	3	70
DSP-30	21	9	70
DSP-100	0	30	70

(4) [Hbet][Tf₂N]によるZrP-nからのZr回収試験

[Hbet][Tf₂N]によるZrP-nからのZr回収挙動を検討した。[Hbet][Tf₂N]によるZrP-nからのZr回収試験条件をTable 2に示す。

Table 2 Zr回収試験試験条件

Target elements	Zr(IV)
Target solvent	ZrP-10, ZrP-30
Volume ratio	1 : 1
Temperature [K]	298
Contact time [min]	1, 5, 10, 30, 60
Shaking conditions	Speed : 160 r · min ⁻¹ , Width : 40 mm

ZrP-nは、Zr(IV)が20 mMとなるようにオキシ硝酸ジルコニウム二水和物を3 M硝酸に溶解させた溶液とDSP-10及びDSP-30をそれぞれ同体積ずつスクリー管瓶に封入し、298 Kに設定した恒温振とう槽で60分振とうして調製した。イオン液体には、カルボキシ基により単体でも金属抽出能を有する[Hbet][Tf₂N]を選定した。[Hbet][Tf₂N]とZrP-nを同体積ずつスクリー管瓶に封入し、298 Kに設定した恒温振とう槽で振とうした。また、有機相中の金属濃度は、卓上蛍光X線分析装置(X-ray Fluorescence analysis : XRF)によって測定した。XRFによる測定では、事前に誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-OES)を用いてZrP-n調製の際の水相のZr濃度変化を測定し、有機相の初期濃度を決定することで検量線を作成した。また、模擬劣化溶媒とイオン液体との振とう後の各溶液相は¹H-NMR分析を行った。

Fig. 3に試験後のZrP-n中におけるZr濃度

の経時変化を示す。また、Fig. 4 に試験後の試験溶液の外観写真を示す。Fig. 3 より試験後の金属濃度はいずれの溶媒の組成でも振とう時間によらずマイナスの値を示した。また、Fig. 4 より ZrP-10 と振とうした[Hbet][Tf₂N]相には白色物の生成、ZrP-30 と振とうした[Hbet][Tf₂N]相は白濁することが観察された。また、何れの溶媒も有機相の体積減少が確認された。XRF 測定では、溶液の組成変化やそれに伴う金属の錯体形状の違いによって検量線が変化するため、白色物の生成により有機相の組成が変化したことでマイナスの値を示したと考えられる。本試験結果から[Hbet][Tf₂N]と接触させることで ZrP-n の Zr は極めて少なくなることが示唆され、ZrP-n から模擬核種である Zr が除去されたと考えられる。

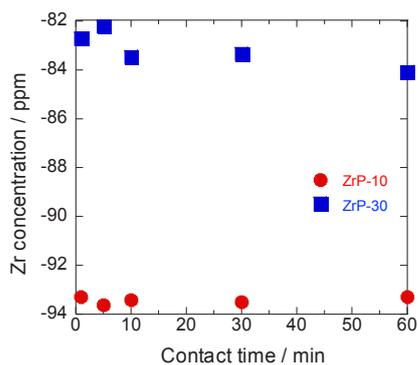


Fig. 3 ZrP-n 中における Zr 濃度の経時変化

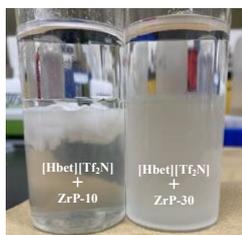


Fig. 4 試験後の試験溶液の外観写真

試験後の各相の ¹H-NMR スペクトルを Fig. 5~Fig. 7 にそれぞれ示す。白色物が生成した ZrP-10 と振とうした[Hbet][Tf₂N]相は、白色物を含んで測定した場合と白色物を含めず測定した場合のそれぞれを示す。また、比較のため Zr(IV)の抽出前の DSP-10, DSP-30 単体の

分析結果を Fig. 8 に示す。

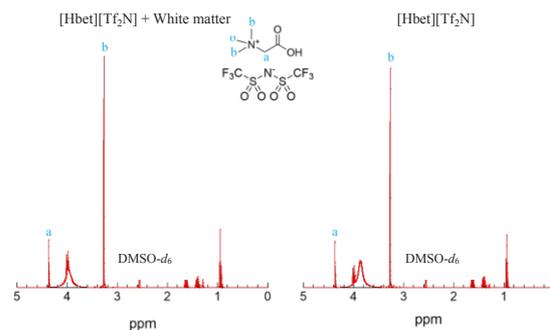


Fig. 5 ZrP-10 と接触後の[Hbet][Tf₂N]の ¹H-NMR スペクトル

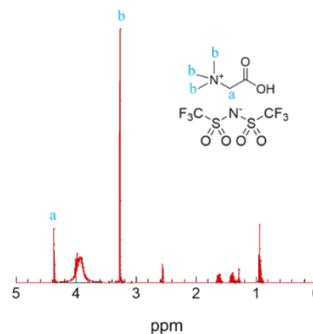


Fig. 6 ZrP-30 と接触後の[Hbet][Tf₂N]の ¹H-NMR スペクトル

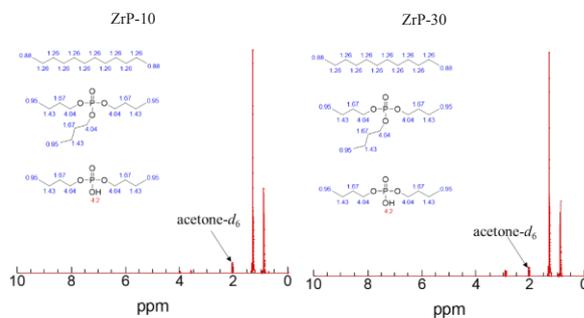


Fig. 7 [Hbet][Tf₂N]と接触後の ZrP-10 および ZrP-30 の ¹H-NMR スペクトル

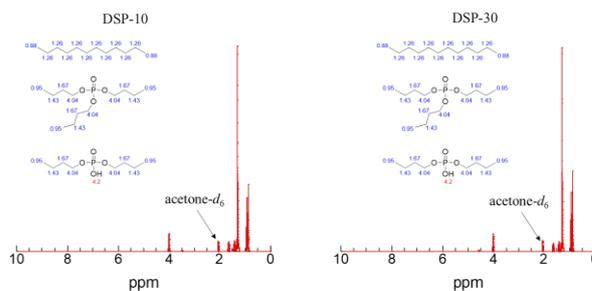


Fig. 8 DSP-10 および DSP-30 の ¹H-NMR スペクトル

Fig. 5 より白色物の生成の有無に依らずケミカルシフト値に大きな変化は確認されなかった。このことから、有機物の構造自体には変化がないと考えられる。また、Fig. 5, Fig. 6 より [Hbet][Tf₂N]には含まれないピークが確認され、TBP 若しくは DBP に帰属するものと推定される。また、白色物を含まない相にもこれらのピークが確認されたことから、一部の TBP 及び DBP が [Hbet][Tf₂N]相に溶解しているものと考えられる。

また、Fig. 7, Fig. 8 から ZrP-n と DSP-n の振とう前後の ¹H-NMR スペクトルを比較すると、振とう後は TBP, DBP と考えられるピークが消失し、ドデカンと考えられるピークのみが確認された。これにより劣化溶媒中の抽出剤成分である TBP と DBP は、全量白色物の生成に寄与したか或いは [Hbet][Tf₂N]に溶解していると考えられる。[Hbet][Tf₂N]の Zr 濃度が極めて低い値となった点と抽出剤成分が有機相から消失した点から、[Hbet][Tf₂N]と劣化溶媒の接触により [Hbet][Tf₂N]相に抽出剤ごと Zr が回収されたと考えられる。

(5) ZrP-100 からの Zr 回収試験

長期間の放射線暴露によって劣化が進行したことを想定し、[Hbet][Tf₂N]による ZrP-100 からの Zr 回収試験を行った。最初に DSP-100 を用いて ZrP-100 を調製した際、Fig. 9 に示すように第三相の生成が観察された。

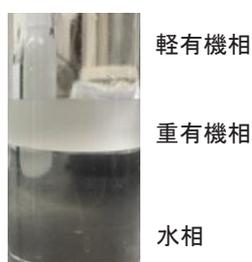


Fig. 9 抽出後の DSP-100 の外観

ここで振とう後の溶液の上相（軽有機相）を ¹H-NMR 分析を行った。Fig. 10 に軽有機相の ¹H-NMR スペクトルを示す。Fig. 10 より軽

有機相はドデカンのみが検出され、TBP, DBP 及び Zr(IV)は第三相（重有機相）に存在していると考えられる。そのため、本試験では重有機相を ZrP-100 として用いた。

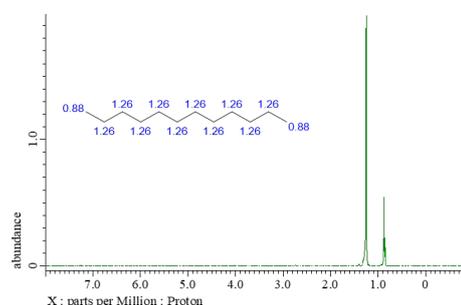


Fig. 10 軽有機相の ¹H-NMR スペクトル

振とう後の試料の外観を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、重有機相は [Hbet][Tf₂N]に溶解することが観察された。ZrP-10, ZrP-30 を用いた試験から、DBP は [Hbet][Tf₂N]に溶解することが示されており、予め軽有機相と重有機相に分かれることでドデカンと分離されている ZrP-100 はイオン液体に溶解したのと考えられる。また、静置に伴い僅かに相分離されており、上澄みに新たな有機相の生成が観察された。¹H-NMR 分析結果から新たに生成された有機相はドデカンであることが確認された。これは、重有機相中に含まれていたドデカンと考えられる。これらの結果から ZrP-100 に対して [Hbet][Tf₂N]が溶媒として機能することが示された。



Fig. 11 ZrP-100 接触後の [Hbet][Tf₂N]の外観

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後、本研究の成果を纏め、日本原子力学会等での口頭発表並びに論文化を行う予定である。他の研究機関と共に公募型研究等への提案に挑戦していく予定である。

高性能 Li 空気電池の開発

材料工学科 石崎 貴裕

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

Li 空気電池(LAB: Li-air battery)は、Li イオン電池の 10 倍以上のエネルギー密度を示し、ガソリンに匹敵するエネルギー密度を有する¹⁾。実用化すれば、次世代型の電気自動車(EV)の動力源として活用できるため、低炭素社会の構築に向けて必要不可欠な二酸化炭素排出量の抑制技術になる。しかし、LAB を実用化させるためには、酸素の酸化反応(OER)・還元反応(ORR)が遅い、繰り返し充放電時に発生するデンドライト成長によるサイクル数の低下、長期間使用する際の電解液の揮発性等、様々な課題がある²⁾⁻⁴⁾。これらの中でも酸素の酸化・還元反応の高効率化(充放電過電圧の低下)と長寿命化(充放電サイクル数の向上)が大きい課題として考えられており、これらの課題解決に向けた研究開発が進められている。具体的には、ヘテロ元素ドーパや貴金属を担持したカーボン系材料や遷移金属酸化物等を正極触媒に用いる研究開発がメインテーマとして進められており¹⁾⁻⁴⁾、電解液には Li 塩(1M LiTFSI)を溶解させたテトラエチレングリコールジメチルエーテル(TEGDME)を、バインダーにはポリフッ化ビニリデン(PVDF)やポリテトラフルオロエチレン(PTFE)を用いることが定説となっている。新しい正極触媒材料の開発や電解液中への反応触媒となる Redox mediator(RM)の利用により、電池性能は徐々に向上しているが⁴⁾、Li 空気電池を実用化させるためには、正極触媒材料の開発に加えて、正極材を集電体に固定化するバインダーの開発や電解液側からのア

プローチも重要になるはずである。これは、バインダーや電解液が充放電反応で重要な Li_2O_2 の生成と溶解反応に直接関与し影響を与えるためである。しかし、バインダーや電解液に関する研究開発はほとんど着手されていない。

そこで、我々のグループでは、新しい電解液として深共晶溶媒(DES: Deep eutectic solvent)に着目した。DES は、2 種類の固体を混ぜ加熱することで得られる液体であり、イオン液体と同様の物理化学的特性を有し、その製造コストは安価である。また、室温近傍で液体であり、イオン伝導性を有し、イオン液体より安全性が高く、揮発性が低い。DES はバイオ医療やナノ材料分野で利用可能な新しい溶媒として、近年注目されている。しかし、DES は 21 世紀初頭に注目され始めたためその研究歴史が浅く、特性の詳細については不明点が多い。ごく最近、申請者らの研究により、特定の DES を溶媒に用いることで充電過電圧が大きく低下することがわかり、DES が Li 空気電池に資する酸素の酸化反応の触媒として機能することを世界で初めて発見した。しかし、その触媒機能の発現原理は現時点において不明であり、この点の解明が急務である。

電解液に加えて、正極材の開発も LAB の実用化に向けて必要不可欠である。近年、電解液にイオン液体を用いることで、高速(60s)で充放電が可能であり、サイクル特性の優れた AI イオン電池が開発された⁵⁾。この電池では、正極材の 3 次元構造のカーボンと電解

液のイオン液体が電池の高機能化に重要な役割を果たした。この電池のキーポイントは、カーボン構造の3次元化（反応活性サイトの増加）と、イオン液体と3次元カーボン材料のシナジー効果の発現を実現させたことにある。すなわち、 Li_2O_2 の形成に有効な反応活性サイトを増加させる3次元カーボン材料を創製し、その材料特性を最大限に引き出すバインダーおよび電解液の組み合わせを探索すれば、LABの性能を大きく向上できる。Li空気電池の性能を向上させるための3次元構造のカーボン材料の一つとしてヘテロ元素ドーブマクロポーラスカーボンが挙げられる。マクロポーラスカーボン(MPC)は、直径が100～1000 nm程度の球径を有するカーボン材料であり、表面積が大きいことや、放電容量の向上に関連する Li_2O_2 の生成量を増加させることができる空間体積を有する。また、MPCにヘテロ元素をドーブすることで、ORRの活性サイトを増加させることができる。このため、ヘテロ元素ドーブMPC(HMPC)を用いることで、ORRの高活性化を実現できると考えられるが、LABへの応用例はほとんどない。MPCの課題として、導電性が低いことが挙げられるが、CNTとの複合化により改善できる考えられる。さらに、OER活性を高める酸化物ナノ粒子やORR活性を高めるナノメタル(Pt、Co、Ni等)をこのカーボンに担持させることで、より優れた正極触媒材料を創出可能と考えられるが、そのような報告例は皆無である。

以上のことを踏まえ、本研究では、新規カーボン系正極触媒の開発とDESの最適化を行い、これらのマルチ触媒を利用することで、LABの高性能化をめざす。

2. 研究計画

(1) 新規カーボン系正極触媒の開発

リチウム空気電池では正極電極で起こる酸素還元反応(ORR)によって電気エネルギーを得る。放電電圧を高くするために高い酸素還

元特性を持つ触媒の開発が必要不可欠である。ORRに有効な触媒としてFe-N-C系触媒が非白金触媒として注目されている⁶⁾。本研究では低コストかつ高い酸素還元特性を有する触媒として金属有機錯体(Metal Organic Framework:MOF)を前駆体とした炭素系材料を合成し、その材料の特性を評価した。

(2) 電解液としてのDESの最適化

本研究では、イオン液体と物理化学的性質が類似し、かつ無毒性、安価という特性をもつ深共晶溶媒に着目し、深共晶溶媒を用いたリチウム空気電池の開発の検討を行った。

3. 計画の進行状況

(1) 新規カーボン系正極触媒の開発

3D構造を有する触媒を作製するため直径300 nmのpolystyrene sphere(PSS)をテンプレートとして用意した。硝酸亜鉛六水和物と硝酸鉄(III)九水和物をFe原子濃度が100%、90%、80%、合計で27.3 mmolになるように秤量し、15 mlのメタノールに溶解させた。4,5-Dicyanoimidazole 82.2 mmolをメタノール30 mlに溶解させ、上記の溶液を静かに加え混合した。調製した溶液に作製したテンプレートを1時間含浸させた後、脱ガス処理を行った。次に、アンモニア水とメタノールを体積比1:1で混合させた混合溶媒にテンプレート浸漬させ、5分間脱ガス処理を行った後、50°Cの電気炉で24時間放置し、その後、吸引ろ過し得られたテンプレートを室温で数時間乾燥させた。乾燥したテンプレートをテトラヒドロフランに浸漬させた後、吸引ろ過により回収した試料を110°Cの電気炉で一晩乾燥させ、MOF_Xを得た。Xは溶液中のFe濃度を示す。MOF_Xを管状雰囲気炉に導入し、Ar雰囲気下で5°C/minの昇温速度で900°Cまで上昇させ、2時間保持することで熱処理を行った。熱処理後、0.5 M硫酸水溶液中で80°C、24時間加熱攪拌し酸洗浄を行った。酸洗浄後の試料を吸引濾過し、その後、

純水で洗浄し、110℃で乾燥させ C_MOF_X (マクロポーラスカーボン) を得た。

SEM 像の観察結果から、いずれの C_MOF_X も直径約 300 nm のテンプレート由来のマクロポーラス構造を有していることがわかった。この結果から、合成したカーボンがマクロポーラス構造を有していることが明らかになった。次に、合成したカーボン中の Fe-N-C 結合の存在を調査した。Fig.1 に C_MOF_X の XPS 測定による N 1s スペクトル、表 1 に波形分離から得られた窒素結合状態の結合種の割合を示す。Fig.1 の N 1s スペクトルの波形分離の結果から、全ての C_MOF_X には、Pyridinic-N(398.4-398.6), Fe-N(約 399.3 eV), Pyrrolic-N(400.1-400.3 eV), Graphinic-N(401.1-401.5 eV), Oxide-N(403.3-403.7 eV)由来の結合種が存在していた。

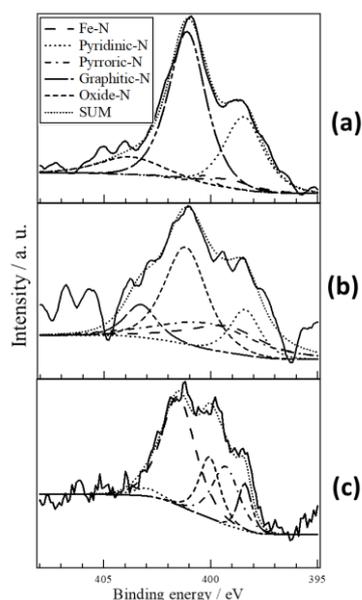


Fig.1 XPS N 1s スペクトル (a) C_MOF_100, (b) C_MOF_90, and (c) C_MOF_80.

Fig.2 に C_MOF_100、90、80 のフル充放電試験の結果を示す。C_MOF_100、C_MOF_90、C_MOF_80 の放電容量はそれぞれ 1795 mAh/g、2638 mAh/g、3295 mAh/g となっており、Zn の添加量を増加させることにより放電容量が増加した。C_MOF_100、C_MOF_90、C_MOF_80 の表面積や細孔径の

分布に大きな違いが見られなかったことから、C_MOF_X に存在する結合種の存在割合の違いが放電容量に影響を与えていることが推察される。Table 1 の窒素結合状態の割合から、ORR 活性を示す Fe-N 結合の割合は C_MOF_100 (4.5%)、C_MOF_90 (18.0%)、C_MOF_80 (21.0%) であり放電容量との相関関係が確認できる。活性サイトの均一な分布がリチウム空気電池の正極材料の性能を向上させることが報告されていることから、Zn 添加による Fe-N-C 結合種の存在割合が増加したことで、C_MOF_80 が最も高い放電容量を示したことが考えられる。

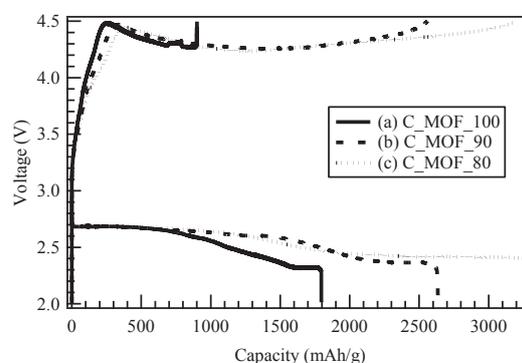


Fig. 2 充放電曲線 (a) C_MOF_100, (b) C_MOF_90, and (c) C_MOF_80.

Table 1 各サンプルの窒素結合状態の割合

Binding	Peak position (eV)	Relative percentage (%)		
		C_MOF_100	C_MOF_90	C_MOF_80
Pyridinic-N	398.4-398.6	28.5	12.7	8.6
Fe-N	around 399.3	4.5	18.0	21.0
Pyrrolic-N	400.1-400.3	1.5	21.3	17.3
Graphinic-N	401.1-401.5	55.2	38.5	50.3
Oxide-N	403.3-403.7	10.3	9.4	2.8

(2)電解液として使用可能な DES の探索

正極材にケッチェンブラック EC600JD(KB)、負極材に Li 箔、セパレーターにガラスフィルター(Whatman GF/A)、電解液に深共晶溶媒を用いた。リチウムビス(トリフルオロメタンスルホニル)イミド(LiTFSI)あるいは硝酸リチウム(LiNO₃)と N-メチルア

セトアミド(NMA)を特定のモル比率で混合し、深共晶溶媒を得た。その深共晶溶媒を電解液としてリチウム空気電池に組み込み、充放電試験を行った(電流値 100 mA/g)。

Fig.3 に LiTFSI-NMA を電解液として用いて構築したリチウム空気電池の充放電曲線を示す。NMA のモル比率が増加するほど放電および充電の容量が増加し、放電および充電の過電圧が減少する傾向が見られた。

NMA のモル比率が増加するほど、電解液の粘性が減少し、Li イオンの拡散性が向上したため、 Li_2O_2 の生成・分解が促進され電池性能が向上したと考えられる⁷⁾。また、深共晶溶媒の導伝率の向上に伴い、放電および充電の過電圧が減少したと推察される。

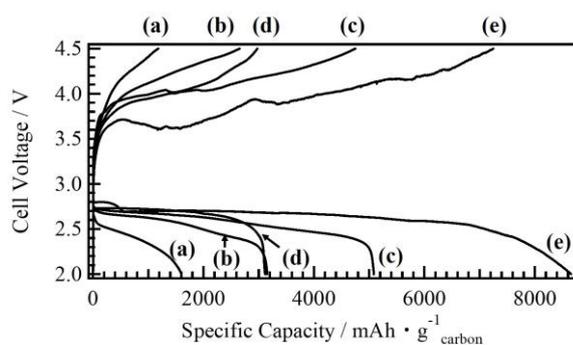


Fig. 3 LiTFSI と NMA を(a)1:3, (b)1:4, (c)1:5, (d)1:7, (e)1:9 のモル比率で作製した深共晶溶媒を電解液として用いたリチウム空気電池の充放電曲線。

これらの結果から、LiTFSI と NMA を 1:9 のモル比率で混合した深共晶溶媒が、最大の放電容量と最小の充放電過電圧を示したことから、Li 空気電池の電解液として最も適していることを明らかにした。

これらの結果から、本研究で用いた DES は Li 空気電池の電解液として使用可能であることがわかった。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、Li 空気電池の性能を向上させるために、マクロポーラスカーボン材料を含むカーボン系の複合触媒材料の合成および DES

の最適化を引き続き行っていく予定である。

論文(1) T. Ishizaki et al., Effect of Surface Modification for Carbon Cathode Materials on Charge-Discharge Performance of Li-Air Batteries, *Materials*, 15, 3270 (2022).

(2) T. Ishizaki et al., Recent progress of carbon-based electrocatalytic materials in Lithium-based Battery, *Sustain. Mater. Technol.*, 32, July, e00384 (2022).

(3) T. Ishizaki et al., Cattail leaf-derived nitrogen-doped carbons via hydrothermal ammonia treatment for electrocatalytic oxygen reduction in an alkaline electrolyte, *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, 24738-24749 (2022).

(4) 石崎貴裕ら, Fe-N-C 結合を有する二元機能マクロポーラスカーボン触媒材料の作製とリチウム空気電池への応用, 74, 118-124, 表面技術 (2023).

参考文献

1) G. Girishkumar, et al., Lithium-Air Battery: Promise and Challenges, *J. Phys. Chem. Lett.* 1, 2193 (2010).

2) Daniel Sharon et. al., Catalytic Behavior of Lithium Nitrate in Li-O₂ Cells, *ACS Appl. Mater. Interface*, 7, (2015), 16590.

3) Zhuojian Liang et. al., Critical Role of Redox Mediator in Suppressing Charging Instabilities of Lithium-Oxygen Batteries, *J. Am. Chem. Soc.*, 138, 7574 (2016).

4) Sina Rastegar et. al., High-Rate Long Cycle-Life Li-Air Battery Aided by Bifunctional InX₃ (X = I and Br) Redox Mediators, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 4915, (2021).

5) Lin. et al., An ultrafast rechargeable aluminium-ion battery, *Nature*, 520, 7547 (2016).

6) L. Yang, et al. Boron-Doped Carbon Nanotubes as Metal-Free Electrocatalysts for the Oxygen Reduction Reaction, *Angew. Chem Int. Ed.* 50, 7132 (2011).

水蒸気を用いた回収容易な遷移元素酸化物光触媒担体の創製および可視光応答化の実現

材料工学科 芹澤 愛

共同研究者
なし

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

触媒は比表面積を大きくすると反応速度が高まるため、主に粉体で用いられる。しかし、有害物質を分解する光触媒粉末を污水处理に用いた後、水中から粉末を完全に分離することが非常に困難である。そこで、光触媒特性を持つ粒子が担体に担持されていれば、污水处理への利用がさらに加速することが期待される。すなわち、粉末の光触媒を用いた污水处理を実用化するために、光触媒粉末を担持可能な基板が必要になる。

光触媒の作製に用いた Wet Corrosion Process（以下、WCP と呼称）は、アルカリ溶液を用いて金属を処理し、表面にナノ構造を作製する方法である¹⁾。用いるアルカリ溶液の濃度によって作製されるナノ構造が異なる、処理方法が非常に簡易で再現性が高い、熱処理が不要などの特徴がある。本研究では、アルカリ溶液に水酸化カリウム溶液を選択し、

光触媒としてカリウムを添加した酸化チタン、 KTiO_{x_s} 粉末を作製した。

担体の作製には、Al 合金上に水蒸気プロセスを施し、多数の OH 基を有する $\text{AlO}(\text{OH})$ を作製した。この手法は、高温高压下でアルミニウムと水蒸気を反応させる新規表面処理技術で、低環境負荷、高耐食性が得られるばかりか、表面形状を自在に制御できる点に優位性がある。 $\text{AlO}(\text{OH})$ の表面形状や比表面積は、処理条件を変えることで制御できる。さらに、 $\text{AlO}(\text{OH})$ の OH 基は官能基とイオン結合を形成できるため、 KTiO_{x_s} の K^+ イオンと $\text{AlO}(\text{OH})$ の OH 基のイオン結合の形成による光触媒の担持が期待される²⁾。

本研究では、光触媒にカリウムを添加した酸化チタン、 KTiO_{x_s} 粉末を選択し、担体に耐食性に優れ、表面に多数の OH 基が存在する $\text{AlO}(\text{OH})$ を選択した。 $\text{AlO}(\text{OH})$ 表面に生成された OH 基は官能基とイオン結合を形成でき

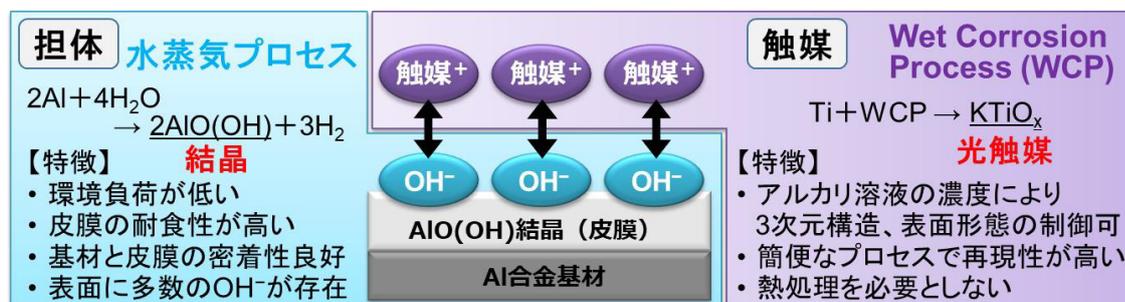


図 1 本研究で用いる触媒および担体作製のためのストラテジー

るため、 KTiO_xs の K^+ イオンと $\text{AlO}(\text{OH})$ の OH 基のイオン結合形成による $\text{KTiO}_x\text{s} / \text{AlO}(\text{OH})$ 複合体の形成が期待される。本研究では、汚水処理に応用可能である KTiO_xs 粉末および $\text{KTiO}_x\text{s} / \text{AlO}(\text{OH})$ 複合体を作製し、最適条件を明らかにすることを目的とした。また、可視光に対する性能の可能性についても検討した。以上のことから、本研究の目的は、分離・再利用が可能で汚水処理に応用が期待される光触媒である KTiO_xs 粉末および $\text{KTiO}_x\text{s} / \text{AlO}(\text{OH})$ 複合体を作製し、可視光に対する光触媒性能を評価することとした。

2. 研究計画

本研究に用いる、光触媒ならびに担体の作成指針として、下記の手法を用いることとした。

光触媒である KTiO_xs の作製には、純 Ti 粉末（純度 99.7%）を利用した。WCP には、純 Ti 粉末 1.0 g に対して 1, 5, 10, 15, 20 M の KOH 溶液 10 ml を混合させ、室温でデジタルシェイカーを用いて 800 rpm で 24 h 攪拌し反応させた。担体である $\text{AlO}(\text{OH})$ の作製には、20 mm × 20 mm × 1.5 mm の Al-Mg-Si 合金を基板として使用した。オートクレーブ内に 10 ml の超純水を加え、180 および 290°C で 24 h 水蒸気プロセスを施し、複合体の作製には、 $\text{AlO}(\text{OH})$ 皮膜を被覆させた Al 基板上に 2.0 g の KTiO_xs を 4 ml の超純水とともに加え、デジタルシェイカーを用いて 100 rpm で 72 h 攪拌を行った。複合体の作製方法を図 2 に示す。

作製した KTiO_xs 粉末および複合体の光触媒特性評価は、以下の手順の通り行った。メチレンブルーと混合させ、暗幕を用いて周囲の光が入らないようにした上で、可視光域の波長を持つ LED ライトを用いて最大 120 min 照射した。その後、UV-Vis-NIR を用いてメチレンブルーの吸光度を測定し、光触媒特性を評価した。

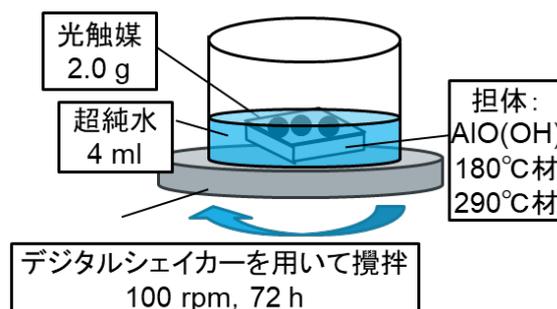


図 2 本研究で用いた光触媒／担体複合体の作製方法

3. 計画の進行状況

水蒸気プロセスで作製した $\text{AlO}(\text{OH})$ 表面の FE-SEM 観察結果と AFM 観察結果、比表面積測定結果および結晶構造解析結果を、それぞれ図 3、図 4 および図 5 に示す。図 3 より、180°C で作製した試料表面は、薄片状およびブロック状の結晶が混在しているのに対し、290°C で作製した試料表面は、ブロック状の結晶が観察された。また、図 4 より、水蒸気プロセスによって形成した皮膜は、 $\text{AlO}(\text{OH})$ 単相であることを確認した。

未処理の Al 基板の表面積に対し、180°C および 290°C で作製した試料の比表面積はそれぞれ 1.15 倍および 1.31 倍であり、290°C で作製した表面積が最も大きくなった（図 5）。この結果、高温で処理することで結晶のサイズおよび比表面積がいずれも大きくなることがわかった。

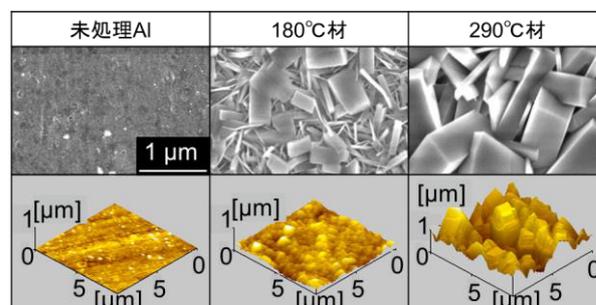


図 3 担体作製のための基板として用いた未処理の Al 合金表面および水蒸気プロセスで Al 合金基板上に作製した $\text{AlO}(\text{OH})$ 表面の表面観察結果（上段：FE-SEM 像，下段：AFM 像）

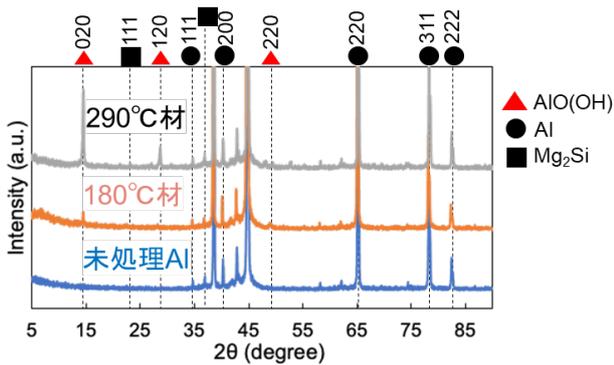


図 4 未処理の Al 合金および水蒸気プロセスで Al 合金基板上に作製した AlO(OH)の X 線プロファイル

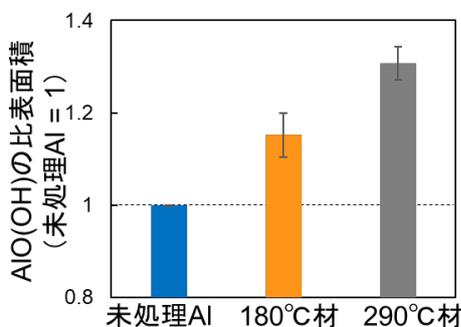


図 5 各温度で水蒸気プロセスを施して作製した Al 合金表面の未処理の Al 合金基板に対する比表面

WCPにより作製した KTiO_{x_s} の表面観察結果を図 6 に示す。15 M 以下の濃度で処理した場合は、試料表面が KOH 溶液によりエッチングされナノワイヤーが形成されたのに対し、20 M で処理した場合には、試料表面にポーラス構造が形成された。KOH 溶液の濃度により、 KTiO_{x_s} の表面に形成されるナノワイヤーの直径と長さが変化し、10 M で処理した試料のナノワイヤーが最も長く直径が最小であった。

複合体の可視光応答性評価後のメチレンブルーの外観写真と吸光度を図 7 に示す。メチレンブルーは透明に近づくほど光触媒としての性能が高いことを示し、10 M で処理した KTiO_{x_s} および 180°C で作製した AlO(OH) の組み合わせで作製した複合体は、62.6%のメチ

レンブルーを分解でき、10 M で処理した KTiO_{x_s} および 290°C で作製した AlO(OH) の組み合わせで作製した複合体より高い性能を示した。

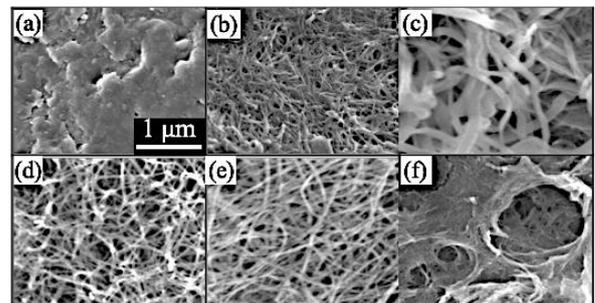


図 6 KOH 溶液濃度別の光触媒 KTiO_{x_s} の FE-SEM による表面観察結果

(a) 未処理 Ti, (b) 1 M, (c) 5 M, (d) 10 M, (e) 15 M および (f) 20 M

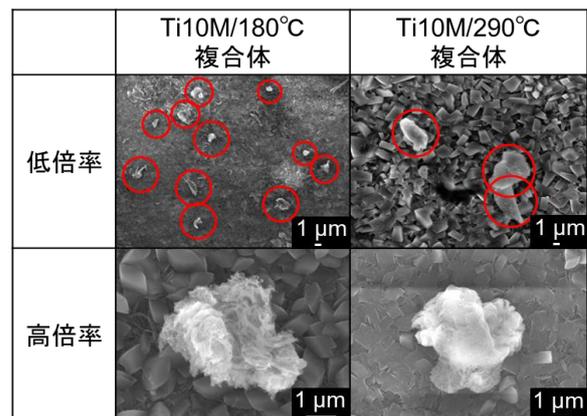


図 7 KOH 溶液 10 M で処理した光触媒 KTiO_{x_s} および 180°C 材あるいは 290°C 材との KTiO_{x_s} / AlO(OH) 複合体の FE-SEM による表面観察結果 (赤い丸内に光触媒の存在が確認できる)

以上のことから、汚水処理に応用可能な光触媒粉末を水中で容易に分離するために、水蒸気プロセスで作製した AlO(OH) 表面に生成された OH 基と KTiO_{x_s} の K^+ イオンとの化学的吸着により作製した KTiO_{x_s} / AlO(OH) 複合体の可視光応答性を評価した結果、以下の知見を得た。

1. 10 M で処理したナノワイヤーの平均直径が最も小さくなり、それにより比表面積も最

も大きくなった。また、AlO(OH)との結合で

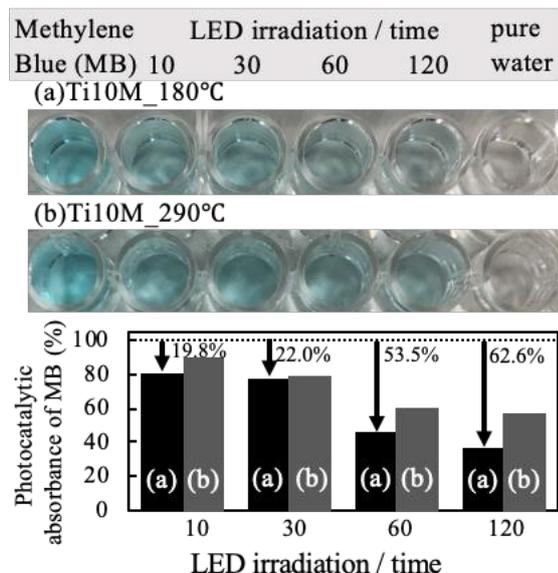


図 8 KOH 溶液 10 M で処理した光触媒 KTiO_{x_s} および 180°C 材あるいは 290°C 材との KTiO_{x_s} / AlO(OH) 複合体の UV 照射後のメチレンブルーの外観写真（上段）および吸光度（下段）

必要な Ti-O-K のピークが最も大きくなったことから、光触媒性能および担体と担持する量においても、本条件が光触媒として最良の条件であるとわかった。

2. 180°C で作製した水蒸気プロセス材の試料表面は、薄片状およびブロック状の結晶が混在しているのに対し、290°C で作製した試料表面は、一様なブロック状の結晶が観察された。表面積に関しても、290°C で作製した試料の方が大きく、これにより高温で処理することで結晶のサイズおよび比表面積がいずれも大きくなることがわかった。

3. 可視光応答性を評価した結果、いずれ条件で処理した試料ともメチレンブルーの分解を確認することができ、可視光に反応することがわかり、中でも 10 M で処理した試料が最も高い性能を示した。この試料に対し LED を 120 min 照射した際のメチレンブルー分解率は 98.6% であり、一般的な可視光応答型光触媒粉末と比較しても同等以上の性能を示し

たため、実用可能であることを示した。

4. 10 M で処理した試料と 180°C あるいは 290°C 材との複合はいずれも可視光に反応することが確認でき、その中でも 180°C 材との複合体の方が高い性能を示したことを明らかにした。本試料に LED を 120 min 照射した際のメチレンブルー分解率は 62.6% であった。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況 今後の研究計画

本研究は、分離・再利用が可能で汚水処理に応用が期待される光触媒である KTiO_{x_s} 粉末および KTiO_{x_s} / AlO(OH) 複合体を作製するための技術開発を図るものである。本研究の副次的な知見として、AlO(OH) の (101) 面では水酸化物イオンがアルミニウムに直接配位し、結晶化した際にアルミノール基として (101) 面表面に露出することを見出している。本研究で AlO(OH) の作製に用いた水蒸気プロセスは、処理温度や処理時間だけでなく、超純水に化学物質を加えることでも結晶成長を制御できることがわかっている。したがって、今後は、(101) 面を大きく生成させることができれば、 KTiO_{x_s} 光触媒が担持する量が増え、 KTiO_{x_s} / AlO(OH) 複合体の性能が向上すると考えられる。

本研究に関連した論文等投稿状況

- [1] 芹澤愛*: 水蒸気のみで実現するアルミニウム合金の多機能化, 応用物理, 92 (2023) 230-233.
- [2] S.Y. Lee, D. Numata, A. Serizawa*, K. Sasaki, K. Fukushima, X. Hu, T. Ishizaki: Systematic Study of Effective Hydrothermal Synthesis to Fabricate Nb-Incorporated TiO_2 for Oxygen Reduction Reaction, Materials, 15 (2022) 1633-1644.
- [3] N. Itano, S.Y. Lee, A. Serizawa*: Effect of Ammonia Addition on the Growth of an AlO(OH) Film during Steam Coating Process, Coatings, 12 (2022) 262-273.

低濃度二酸化炭素固定化のための高効率膜反応器の開発

応用化学科 野村 幹弘

1. 序論

2050年カーボンニュートラル社会の実現を見据え、小規模燃焼系からの低濃度二酸化炭素の回収に注目した。例えば、現在利用されている貫流小型ボイラの燃焼効率は非常に高いので、燃焼効率改善による二酸化炭素の排出量削減は難しい。そこで、本研究では、水素による二酸化炭素の還元反応を利用した二酸化炭素固定メタン化用膜反応器に注目した。

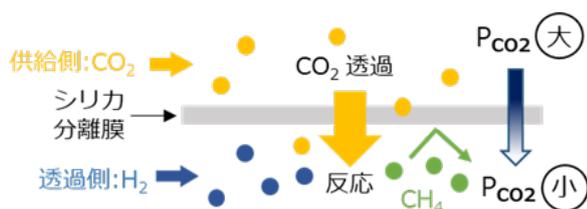


Fig. 1 分配型二酸化炭素膜反応器のイメージ図。

Fig.1に膜反応器の模式図を示す。この膜反応器では、膜を透過した二酸化炭素を、膜の透過側に導入した水素により、メタンとする分配型である。膜の二酸化炭素透過側でメタン化を行うことで、透過した二酸化炭素分圧が減少するので、膜の二酸化炭素の透過性の向上も期待できる。得られたメタンは、メタノールなどを介して様々な化成品として利用できる。膜反応器は、反応系より選択的に生成物を分離する抽出型、膜透過中に反応が進行する接触型とこの分配型に分類できる。これまでは、水素生成法の一つである水蒸気改質

反応に水素選択透過膜を適用するなど抽出型の膜反応器の検討が主であった。しかし、分配型膜反応器の検討は、これまでほとんど行われておらず、研究分野としても新規である。また、二酸化炭素分離膜の開発も必要である。今回提案する膜反応器に有効な分離膜に必要な機能は、水素のような非常に小さな分子は透過せずに二酸化炭素のみが透過することが望ましい。そこで、想定反応温度である300℃～400℃程度で二酸化炭素を選択的に吸着する無機物を膜素材として探索する。

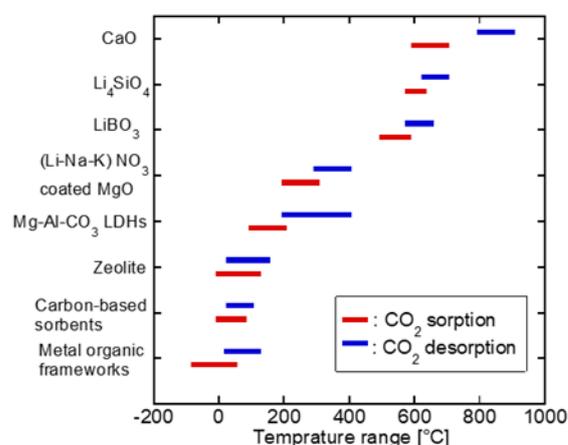


Fig.2 二酸化炭素吸収材の吸収・脱離温度の一覧^{1~6)}

Fig.2に二酸化炭素吸収材の吸収・脱離温度の一覧を示す。メタン化反応などが進行する300～400℃ではマグネシウム系のアルカリセラミックが注目される。これまで、アルカリセラミックを用いた分離膜開発として、Li₄SiO₄系の膜開発が報告⁷⁾されている。

Li₄SiO₄ 膜は、580℃にて、水素透過率 $3.58 \times 10^{-10} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、二酸化炭素透過率 $3.93 \times 10^{-10} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ と二酸化炭素選択透過性を示した。

以上を踏まえ、本研究の目的は、供給型膜反応器にて、二酸化炭素をメタン化するコンセプトの実証および高温二酸化炭素吸収膜素材の探求とする。

2. 研究計画

本年度の目標は、①アルカリセラミック系粉末材料のスクリーニングおよび②シリカ膜を用い、膜反応によりメタンの生成を確認することの2点である。二酸化炭素選択吸収用アルカリセラミックスの調査に注力する。この時、膜反応器の反応温度である 250℃から 350℃での二酸化炭素脱離挙動および多孔質セラミック基材へのコーティング状況を調査し、膜素材の可能性を検討する。並行して、分配型膜反応器にて、二酸化炭素をメタン化するコンセプトの実証を行う。膜反応器に用いるシリカ膜は、対向拡散化学蒸着 (CVD) 法にて製膜した。対向拡散 CVD 法とは、チューブ状アルミナ基材の両側からそれぞれシリカ前駆体と反応助剤である酸化剤を供給し、アルミナ基材細孔内部にシリカ分離層を蒸着させる方法である。

3. 計画の進行状況

実験方法

3.1 層状化合物を用いた製膜

層状化合物として SWF、SWN、SA、ST(クニミネ工業製)を用いた。層状化合物を 1 wt% になるようにスラリーを作製し、アルミナ基材である 0.1u (φ12mm、細孔径 0.1μm、岩尾磁器製)、または、スプレーコート 2TC(φ12mm、細孔径 0.134μm、岩尾磁器製)にディップコーティング法にて製膜した。その後、500℃にて焼成を行った。

3.2 酸化マグネシウムを用いた製膜

まず、基材の前処理として TMOS(Tetramethyl Orthosilicate)をアルミナ基材(φ12mm、岩尾磁器製)に含侵させ、80℃、5min 乾燥させた。その後、H₂O:TMOS:EtOH:MgO:NH₄OH=2:1:1:0.1121:0.001 のモル比で混合したゾルをディップコーティング法し、450℃、4h 焼成を行った。その後、硝酸塩 (LiNO₃:NaNO₃:KNO₃=0.30:0.18:0.52)を含侵させ、450℃、4h 焼成を行った。

3.3 膜反応器試験

ニッケル粉末 (富士フィルム和光純薬製) と α-アルミナ粉末 (住友化学製) を 50wt% で混合し、7.0g を基材内部に充填した。触媒の還元処理は、500℃、水素 100mL min⁻¹にて1時間行った。膜反応試験は、膜外側に二酸化炭素を 100mL min⁻¹、内側に水素を 10~100mL min⁻¹ で供給して行った。CO₂、H₂、CH₄ は四重極型質量分析計で分析した。

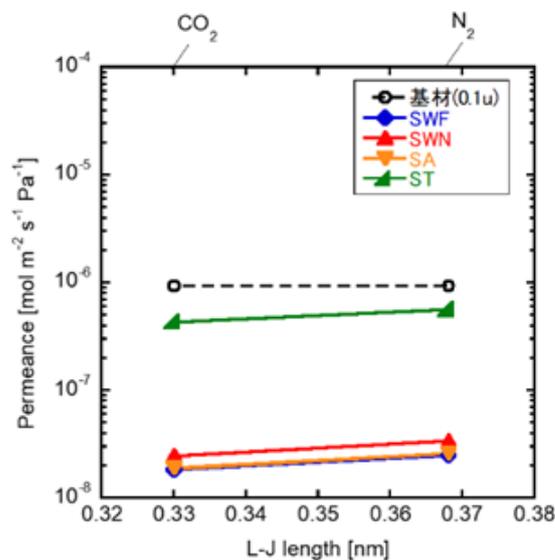


Fig.3 Na 型スメクタイト膜単成分ガス透過試験結果(0.1u 基材、室温)

結果と考察

3.4 層状化合物を用いた製膜

Fig.3、Fig.4 に、0.1u 基材、スプレーコート 2TC 基材にそれぞれスメクタイトの製膜結果である。いずれの基材においても透過率

の減少が見られた。コーティングにより層状化合物が多孔質基材上に配置されたことが分かる。透過性の変化より、層状化合物 ST のコーティング量は他の層状化合物と比較して少なかったことが分かる。ST の 4% 分散液の粘度は $1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ と他の層状化合物分散液の $1/4$ 以下である。コーティング量は分散液の粘度に対応した。

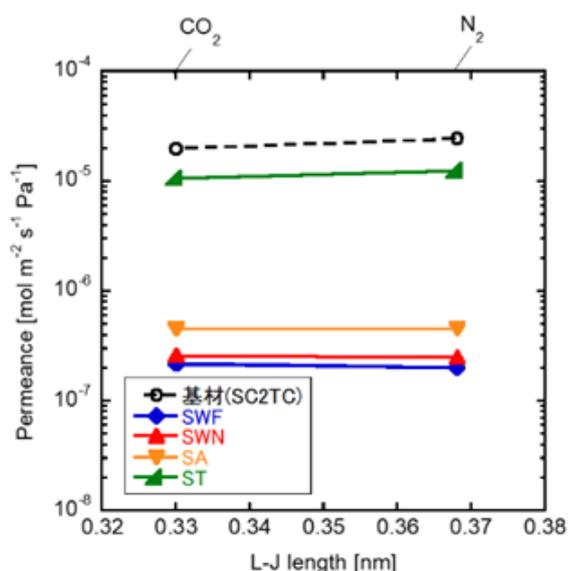


Fig.4 Na型スメクタイト膜単成分ガス透過試験結果(SC2TC 基材、室温)

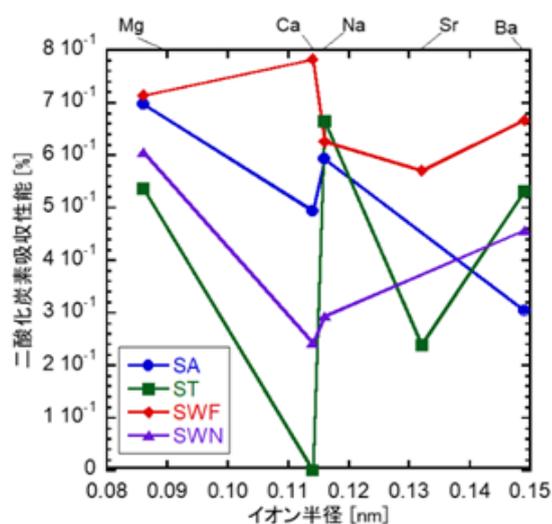


Fig.5 200~400℃の昇降温に伴うスメクタイト粉末 二酸化炭素吸収性能

Fig.5 にイオン交換を施したスメクタイトの熱重量測定結果を示す。二酸化炭素吸収性能がないことが示唆された。これは、スメク

タイトに含まれる Mg 含有量が少ないことに起因すると考えられる。コーティングは容易であったので、高温での二酸化炭素選択透過性を得るために、Mg 量の増強が求められる。

3.5 メタン化膜反応器の開発

Fig.6 に、アルミナ基材を用いた場合の、二酸化炭素のメタン化反応器試験の結果を示す。アルミナ基材の透過は Knudsen 機構であり、CO₂/CH₄ 透過率比は 0.6 である。横軸は反応温度、縦軸は二酸化炭素転化率もしくはカーボンバランスを示す。転化率は、温度の上昇と共に増加した。最も反応温度の高い 400℃で 54.6%の転化率を得た。二酸化炭素のメタン化反応は発熱反応で、平衡転化率は温度の上昇と共に低下する。本反応結果は、触媒の反応律速と推測される。この様に、供給型膜反応器によって、膜を透過した二酸化炭素がメタンとして得られることを実証できた。一方、カーボンバランスは、若干であるが温度上昇に対して減少した。325℃では 64.2%であった。生成物として一酸化炭素は検出されおらず、試験後の基材表面が黒色となっていた。以上より、反応温度の上昇に伴って転化率が向上したことで、副反応である炭素析出が進行したと考えられる。この様な炭素析出の析出機構 1) は不明瞭であるが、膜反応器でのメタン化においても、粉末の触媒と同様の対策が必要な可能性がある。

次に、シリカ膜の評価を行った。Fig.7 に単成分ガス透過試験結果を示す。横軸に透過分子の分子サイズ、縦軸に透過分子の透過率を示す。触媒非担持基材上では CO₂ 透過率 $1.38 \times 10^{-9} \text{ mol Pa}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、CO₂/CH₄ 透過率比 2.19 を示した。それに対して触媒担持基材上では CO₂ 透過率 $8.00 \times 10^{-11} \text{ mol Pa}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、CO₂/CH₄ 透過率比 10.1 の性能を示した。触媒担持の有無に係わらず同質なシリカ膜が得られたことより、蒸着における触媒担持の影響は小さい。

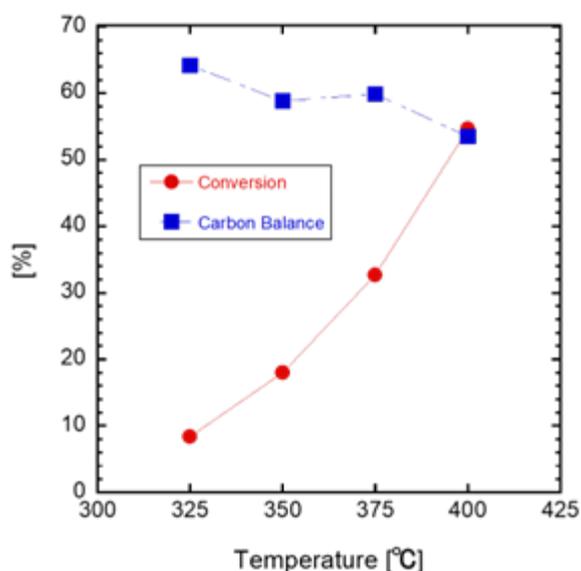


Fig.6 円筒形アルミナ多孔質基材による反応

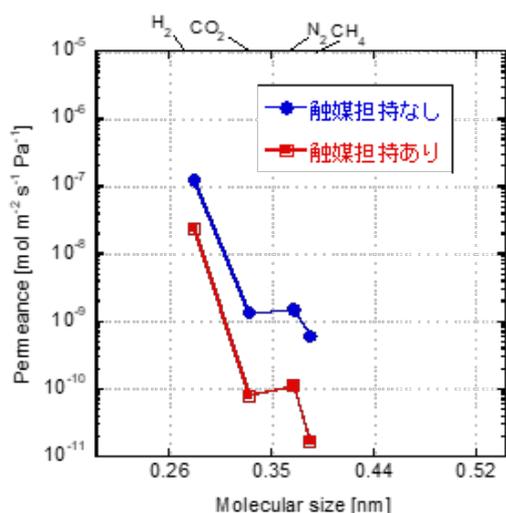


Fig.7 HTMOS 膜単成分ガス透過試験結果

4. 今後の予定及び学会,論文等投稿・発表状況

今後は 300~400°Cにて二酸化炭素選択吸着性をもつアルカリ素材を多孔質セラミックにコーティングし、二酸化炭素選択透過膜を作製する。この時、セラミックとアルカリ素材の反応性に注目する。二酸化炭素吸着性はアルカリ度に関連するが、アルミナなどのセラミックはアルカリ成分と複合化する。そのため、セラミック基材とアルカリ成分の反応性を調査する。反応性が高い場合は、アルカリ成分を増加させるなどの対処を行う。さら

に、二酸化炭素透過型膜反応器に関しては、実験的検討と並行し、シミュレーション検討を行う。シミュレーションでは、流体シミュレーションソフトを用い、膜透過部分に境界条件を導入することで、透過性、選択性を定める。シミュレーション評価により、分配型膜反応器の実験条件を効率的に定める予定である。この実験条件をベースに分配型膜反応器の実証を行う。

発表 (予定)

1. “二酸化炭素資源化用分配型膜反応器の開発”, 箭内大樹, 佐藤友哉, 野村幹弘, 日本膜学会第44年会, P-107S, 2022年6月9日
2. “高温二酸化炭素分離膜素材の探索”, 箭内大樹, 佐藤友哉, Michael Schwierz, 野村幹弘, 第25回化学工学会学生発表会, D10, 2023年3月4日
3. “高温二酸化炭素分離膜素材の探索”, 箭内大樹, 佐藤友哉, 露木大翔, 野村幹弘, 第27回JPIJS若手研究者のためのポスターセッション, P52, 2023年5月29日

参考文献

- 1) M. T. Dunstan et al., Chem. Rev., 121, 12681-12745 (2021)
- 2) M. K. Ram Reddy et al., Ind. Eng. Chem. Res, 45, 7504-7509 (2006)
- 3) T. Harada et al., Chem. Mater., 27, 1943-1949, (2015)
- 4) T. Harada et al., J. Mater. Chem. A, 5, 22224 (2017)
- 5) R. B. Khomane et al., Chem. Eng. Sci., 61, 3415-3418 (2006)
- 6) T. Shimizu et al., Chem. Eng. Res., 77, 62-68 (1999)
- 7) M. Nomura et al., Energy Procedia, 37, 1004-1011 (2013)

元素置換濃度制御に基づく水素化物ペロブスカイトの機能性創出と新規学術分野の開拓

工学部応用化学科 大口 裕之

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

水素化物は魅惑の材料である。なぜなら、主要構成元素として水素を含む水素化物は、水素由来の特殊な物性を示し得るため、革新的なエレクトロニクス・イオニクスや室温超伝導分野を創成できる潜在能力を秘めているからである。そして近年、デバイス作製に必須でありながら水素化物に対しては未成熟であったエピタキシャル薄膜成長技術が申請者により確立されたことで、水素化物による新分野創生が俄かに現実味を帯びてきた。次に取り組むべきは、イオン伝導相や電子相といった機能相の創出である。しかしそのためには、ほとんどがイオンのおよび電子的に不活性な水素化物に何らかの手を加えなければならない。

水素由来のイオン伝導相や電子相を創出しようとするとき、ペロブスカイト水素化物は格好的となる。というのも、一般に化学式 ABX_3 で表されるペロブスカイトは、元素置換により、イオン・電気伝導性や誘電性、磁性、光学特性などを示す材料であり、ペロブスカイト水素化物においても多様な機能性の発現が期待されるからである。実際に最近、ペロブスカイト水素化物 $SrLiH_3$ へのアルカリ金属置換によってヒドリド伝導が増大すると報告されている [*ACS Appl. Energy Mater.* 5, 2968 (2022)]。ただし、この報告での置換濃度は 10% 程度にとどまっていた。また、この報告を除くと、原子置換によるペロブスカイト水素化物のイオン相や電子相の創出・制御はこれまで皆無であった。おそらくその一因は、一般に水素化物の生成ギブスエネルギーの絶対値

が酸化物やハロゲン化物に比べて小さいために (MgO : -569 kJ/mol, MgI_2 : -358 kJ/mol, MgH_2 : -35.9 kJ/mol)、構造が不安定であり、特別なケース以外では元素置換が困難であったためであろう。

昨年度には、ペロブスカイト水素化物として世界初となる $BaLiH_3$ エピタキシャル薄膜の合成に成功した[第 69 回応用物理学会 25p-F307-7]。この成功は、ペロブスカイト水素化物の機能性創出・制御にとって大きな一歩である。なぜなら、エピタキシャル薄膜では基板との相互作用により構造が安定化されるため、本来起こらないような元素置換が高濃度まで実現し、イオン相や電子相を創出・制御できる可能性が高まるからである。ただし、これまでに得られた $BaLiH_3$ エピタキシャル薄膜は部分的に水素化が不十分で金属が析出したものであったため、元素置換に基づく高度な材料設計を展開する前に、完全に水素化された高品質膜に仕上げる必要があった。

そこで本研究では、初めに完全に水素化された高品質膜の合成に挑む。その後で、エピタキシャル薄膜による構造安定化を利用してペロブスカイト水素化物への元素置換を行い、格子制御や欠陥生成などを引き起こして、水素由来の機能性を引き出すことをめざす。

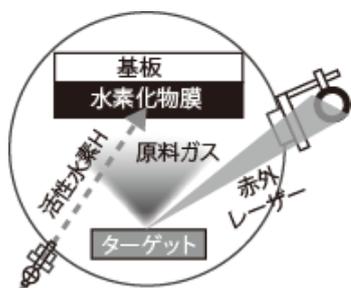
2. 研究計画

本研究では、はじめに、「A. 研究の土台となる膜合成」において $MLiH_3$ エピタキシャル

膜(M : Sr, Ba)を合成する。そして次に、得られた膜に高濃度元素置換を施すことで、「B. 高速ヒドリド伝導の創出」を展開する。

A. 研究の土台となる膜合成

本研究では、水素化物薄膜合成に高い効力を発揮する、申請者独自の、活性水素 (反応性の高い原子状の水素ラジカル) ガス雰囲気下における赤外レーザー蒸着法(図 2)を用いる。そして、A-1) BaLiH₃ エピタキシャル膜の膜質向上と、A-2) BaLiH₃ よりも伝導率の高い SrLiH₃ エピタキシャル薄膜の新規合成を行う。



ヒドリド欠損と伝導。

図 1

これらの研究では、これまでの BaLiH₃ 膜合成経験に照らして、薄膜成長時の基板温度は 100 °C から 300 °C 程度、また活性水素ガス圧は 1×10^{-4} Torr から 1×10^{-2} Torr 程度とする。基板には BaLiH₃ エピタキシャル薄膜合成で実績のある MgAl₂O₄ (100) 単結晶や MgO (100) 単結晶などを使用する。出発原料であるターゲットには MH₂ (M : Sr, Ba) と LiH の粉体を 1:1 のモル比で混合して圧粉した (MH₂-LiH) ペレットを使用する。膜の評価は、相の同定はラマン分光法、結晶構造は X 線回折法 (XRD)、組成は高周波誘導結合プラズマ (ICP) 分光法などによりそれぞれ実施する。

A-1) BaLiH₃ エピタキシャル膜の膜質向上

これまでの BaLiH₃ エピタキシャル薄膜中には Ba や Li が析出しており、成膜時の水素化が完全ではないことが分かっていた。そこで本研究では、活性水素発生装置に組み込まれている、水素分子の結合を切断するフィラメントの温度を、これまでの 1500 °C 程度から 2500 °C 程度に引き上げる。それによって活性水素発生量を増やし、完

全に水素化された BaLiH₃ エピタキシャル薄膜を合成する。

A-2) SrLiH₃ エピタキシャル薄膜の新規合成

合成条件は BaLiH₃ の場合と基本的に同じとする。ターゲットは、SrLiH₃ 膜合成の場合には (SrH₂-LiH) ペレットを使用する。

B. 高速ヒドリド伝導の創出

初めてヒドリド伝導が報告された BaH₂ の室温伝導率は 1×10^{-7} S cm⁻¹ 程度であったが、その後研究されたペロブスカイト水素化物 MLiH₃ では、アルカリ金属 A を最大 10 % まで置換 (M_{1-x}A_xLiH₃) して、 1×10^{-5} S cm⁻¹ 程度の値を達成している [ACS Appl. Energy Mater. 5, 2968 (2022)]。伝導率が増大したのは、2 価 M を 1 価 M' で置換したために、電荷バランスを補償するようにヒドリド欠損が導入されて、ホッピング可能なヒドリドの数が増えたためである(図 3)。本研究では、エピタキシャル薄膜による構造安定化を利用して、10 % より高濃度にアルカリ金属 A (Li, Na, K など) を置換し、伝導率の最高値を更新する。伝導率はインピーダンス測定により決定する。

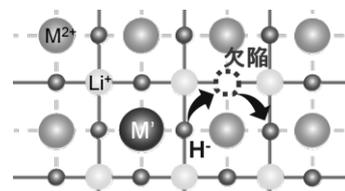


図 2

3. 計画の進行状況

A. 研究の土台となる膜合成

A-1) BaLiH₃ エピタキシャル膜の膜質向上

図 3 には、(a) 従来研究と (b) 本研究で得られた BaLiH₃ 膜の光学顕微鏡像を示す。後者は前者に見られた金属部分が消滅し、透明かつ平坦であった。これらの膜質改善は、高濃度の活性水素によって水素化が促進されたために起こったと考えられる。図 3(c) には本研究膜の XRD 2θ/θ 回折パターンを示す。従来膜では {100} 面以外にも {110} 面や {101} 面からの回

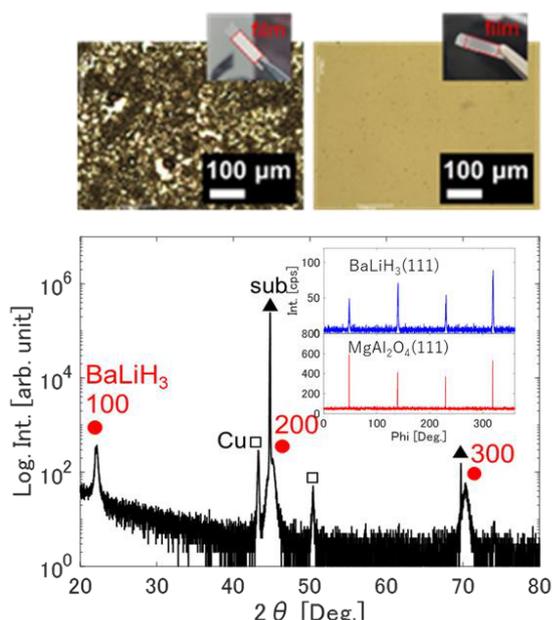


図 3 BaLiH₃ 膜の(a), (b)光学顕微鏡像と、(c) 2θ/θ XRD 回折パターン。

折ピークが観察されたが、本研究膜では{100}面からの回折ピークしか観察されず、完全に

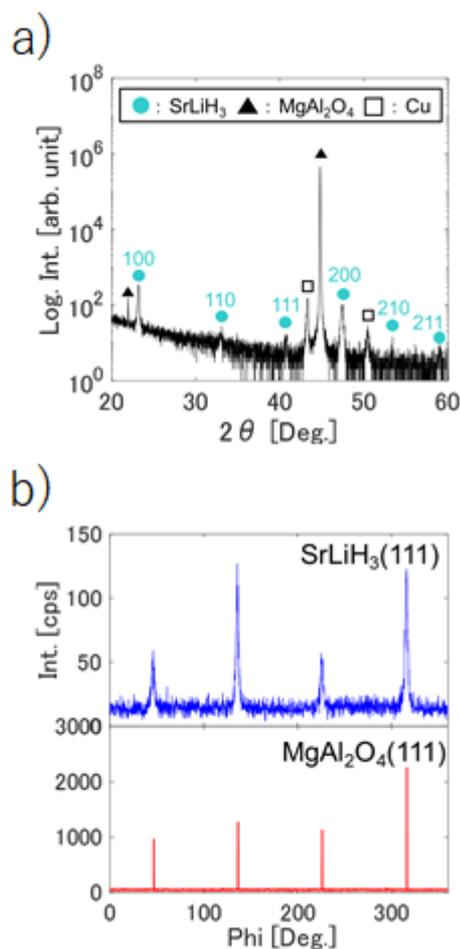


図 4 SrLiH₃ 膜の(a) 2θ/θ XRD 回折パターンと(b) φ スキャンパターン。

(100)配向した BaLiH₃ エピタキシャル薄膜の成長に成功したことが分かった。以上の結果より、活性水素濃度を高くすることで水素化が促進され、さらに配向性が改善すると分かった。

A-2) SrLiH₃ エピタキシャル薄膜の新規合成

図 4(a)に、最近の BaLiH₃ エピタキシャル薄膜合成研究で決定した成膜条件を用いて合成した SrLiH₃ 膜の 2θ/θ XRD 回折パターンを示す。SrLiH₃ 由来のピークが観察され、また、それ以外には基板及び Cu 表面保護層由来のピークしか観察されなかったことから、SrLiH₃ 膜の合成に成功したことが分かった。(100)配向性が強いことも確認された。SrLiH₃ 薄膜と MgAl₂O₄ 基板それぞれの 111 回折ピークの φ スキャンパターンからは、エピタキシャル成長していることも分かった(図 4(b))。また、光学顕微鏡像には金属析出はほとんどみられず、活性水素によって膜の水素化が十分進行したことが示唆された(図は省略)。

B. 高速ヒドリド伝導の創出

今回の実験では、三種類のエピタキシャル薄膜(KI を置換した BaLiH₃、純粋な SrLiH₃、NaH を置換した SrLiH₃)に対してインピーダンス測定を行いヒドリド伝導率の評価を実施した。純粋な BaLiH₃ に対しても測定を試みたが、インピーダンスが高すぎ(伝導率が小さすぎ)たために、使用した測定装置のシグナル検出能力外であったためデータが得られなかった。

得られたインピーダンスプロットを図 5(a)に示す。図中に示した元素置換量は、ターゲットに入れた置換元素の量であり、必ずしも薄膜の中に取り込まれた置換元素量とは一致しないが、ここでは便宜上ターゲット組成で試料を識別する。三種類の薄膜すべてに対して、結晶粒内抵抗を示す半円が現れた。高品質なエピタキシャル薄膜を用いたことで、イオン伝導の全体に占める結晶が崩れた粒界の寄与が無視できるようになり、より本質的な

伝導を観察できることが分かった。そこでインピーダンスプロットに半円フィッティングを行い、そこで得られた抵抗値を用いて伝導率を算出した。

そうして得られた伝導率のアレニウスプロットが図 5(b)である。図には BaLiH₃ のバルクに対して報告されている伝導率も併記した(黄色の点線)。純粋な BaLiH₃ と SrLiH₃ を比較すると、バルクで知られる通り、エピタキシャル薄膜においても、SrLiH₃ の方が一桁以上高い伝導率を示した。元素置換を施した試料は、純粋なものに比べて伝導率が向上していた。ただしその向上の度合いは期待したほど大きくなかった。その理由はおそらく、薄膜の中に取り込まれた置換元素量が相当少なかったことであると推測される。この点について現在調査中である。

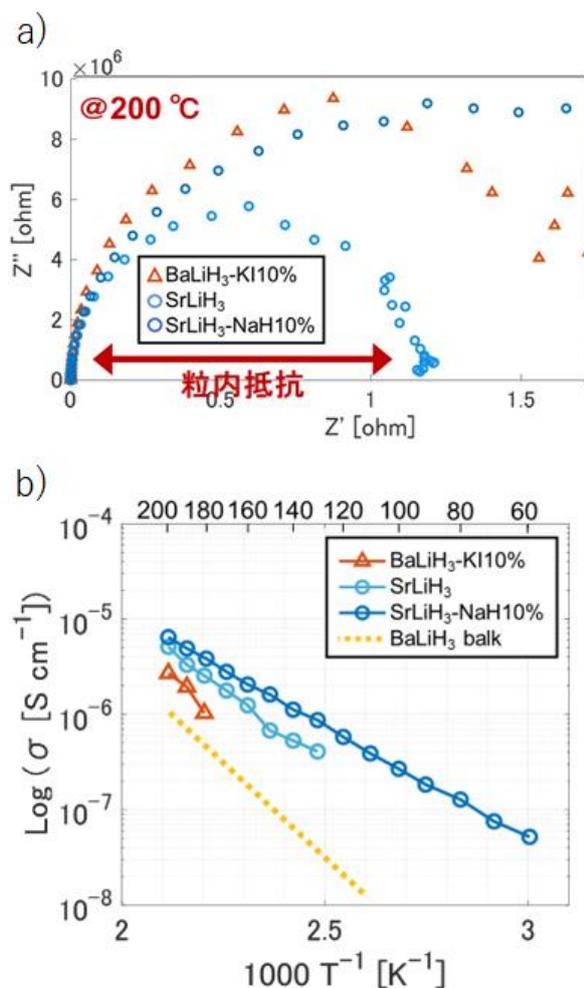


図 5 (a) インピーダンスプロットと(b)ヒドリド伝導率のアレニウスプロット。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後の計画：

元素置換によって室温で 10^{-5} S cm⁻¹ を超えるこれまでに最も高い伝導率を実現するために、10%を超える元素置換が可能となるように、薄膜合成手法を改良中である。そしてすでに、目視での粗い判断はあるが、相当量の元素置換が実現していると思われる結果を得つつある。今後は、組成分析と並行して、伝導率評価を繰り返し、できるだけ早く目標を達成したいと考えている。

発表状況：

昨年度は本研究に関連して以下 5 件の学会発表を行った。

1. 富士英里香ほか、応用物理学会秋季大会、20p-c302-9 (口頭)
2. 富士英里香ほか、応用物理学会秋季大会、20p-c302-10 (口頭)
3. 森史弥ほか、応用物理学会春季大会、16p-PA09-4 (ポスター)
4. 市岡俊樹ほか、応用物理学会春季大会、16p-PA09-1~18 (ポスター)
5. 富士英里香ほか、応用物理学会春季大会、17p-D419-1-15 (口頭)

現在論文原稿を準備中であり、6月中に ACS Applied Electronic Materials (IF: 4.494) に投稿予定である。

Leveraging human factors and video content for high QoE performance reinforcement learning-based adaptive bitrate selection

情報通信工学科 PHAN XUAN TAN

Research colleagues

○○affiliated institution Name

1. Paper introduction

Online video has increasingly become the most dominant applications on the Internet. According to recent study and forecast, global Internet video traffic will grow threefold between 2016 and 2021. Since small degradation in the perceived video quality can significantly influence the acceptance of service, video streaming services have high requirements on quality of experience (QoE). In order to increase the revenue, it is necessary for video service providers to mark QoE enhancement as high priority. Recently, adaptive bitrate (ABR) streaming has been widely adopted to provide smooth experiences to the users. The core of this technology is bitrate adaption algorithm which adapts bitrate selection to network condition. Nevertheless, the presence of 3D videos, 360 videos and the rapidly growing number of subscribers and high-resolution mobile devices, cause the bandwidth starvation and unstable network condition, putting more challenges on performing rate adaption. In such situation, the development of

reinforcement learning (RL) provides a new efficient and feasible solution for rate adaption algorithm. In general reinforcement learning algorithm, the agent observes the state from the environment and triggers the appropriate action. The environment then changes to the next state and provides corresponding reward to the agent for optimizing the next action decision. In RL-based ABR approaches, the main purpose is to decide the appropriate bitrate (as the action) to maximize the perceived video quality, in other words, QoE (as the reward). Typically, only by accurately defining input state and reward function can the well-trained agent by reinforcement learning take advantage in selecting the optimal bitrate for the improvement of subjective QoE. However, the state-of-the-art RL-based ABR frameworks commonly leverage system-based information (or technical factors) to characterize the input state and reward function, while completely ignoring the human factors. Therefore, in this study, we aim to integrate human factors, for examples,

human memory, human interactions, into novel RL-based ABR.

2. Research program

There two main parts will be taken into account in our proposed RL-based ABR: learning process and input state of the agent.

In learning process, QoE model plays a crucial role as the prototype of reward function. The existing studies often establish this model based on technical factors (e.g., bitrate switching, QoS parameters, initial delay, stalling, etc). The retrospective QoE, however, is also significantly influenced by the memory effect and degree of interest. In human memory, the primacy and recency effects determine the memory influence of impairments occurring at the beginning and the end of streaming session, respectively. Besides, the memory impact of impairments can be represented by an exponential deterioration of memory retention in time (defined by forgetting curve) for infrequent events or by repetition for the repeated impairments. Degree of interest (DoI), on the other hand, stands for the human interestingness of the video pre-rated by other users. Psychologically, if the video is interesting, the user is willing to accept some impairments without degrading the perceived video quality

The input state of the agent simply includes of the previous selected bitrate, previous network bandwidth and the current buffer occupancy which are technical factors. However, these

parameters insufficiently reflect the dynamic characteristic of the streaming environment. Human behavior and video interestingness, on the other hand, reflect the user reactions during streaming session, potentially providing another aspect of a dynamic environment. Human behaviors such as pause, skip, forward, backward, and mouse activities are the user interactions to video player during a streaming session. In hypothesis, when either a user focuses on the video or the video content is interesting or the video quality is guaranteed, none of such interactions will occur. Meanwhile, video interestingness represents the individual user interest on specific video content type. Not all of segments of video draw the same attention from the user. In fact, a user will be attracted by some parts of video (e.g., dancing scene, street fighting scene) that match with his/her interest. By considering this factor, more intelligent bitrate selection will be performed.

As the consequence, there is high possibility of failure of the trained agent in maximizing QoE reward in actual applications, resulting in the deterioration of subjective QoE. In order to mitigate this problem, it is necessary to additionally integrate human factors into the characterization of reward function and streaming environment for maximizing QoE in video streaming services. Therefore, in this study, we integrate human factors into both streaming environment and reward function in RL-based ABR framework. More

concretely, we focus on answering the following questions:

- How can the appropriate dataset for training both the QoE model and the reinforcement learning agent be established?
- What are the contributions of human factors to the QoE model and the dynamic of streaming environment?
- How to integrate both enhanced QoE model and streaming environment into final RL-based ABR framework?

By successfully answering these questions, the proposed RL-based ABR potentially outperforms the state-of-the-art methods in terms of QoE performance.

3. State of progress

In the first research phase, we attempt to study the available public datasets before bringing them into our main targeted research. Accordingly, the following datasets were carefully investigated:

- LFOVIA Video QoE database. It consists of 36 distorted video sequences of 120 seconds duration. The databases are divided into different train-test sets. In each train-test sets, there is only one video in the testing set, whereas the training set includes the videos that do not have the same content and playout pattern as the test video.
- LIVE Netflix Video QoE Database. There are 112 train-test sets corresponding to each of the videos in

this database. In each train-test set, the training set consists of 91 videos out of a total of 112 videos in the database (excludes 14 with the same playout pattern and 7 with the same content).

In the second research phase, we work on investigation of human factors to QoE model. This time a new direction which is a little bit different from original proposal is focused, that is to say, human field of view (FoV). This human factor is very important in omnidirectional videos since it allow us to predict where user is going to look at in a head screen. Therefore, RL-ABR model when applied to omnidirectional video can provide higher bitrate for FoV regions while adopt lower bitrate for non-FoV regions. As the result, not only high video QoE is ensured, but also the required bandwidth is saved. In this study, we proposed a method to predict FoV in omnidirectional video based on text information taken from video subtitle. The navigation information of subtitle support better performance of FoV prediction. This open a new “research door” for RL-based ABR.

4. Future program, paper submission and results briefing

The investigation of appropriate datasets was started before the submission of grant linked Kakenhi FY2020. As the result, a journal paper with title: “Convolutional Neural Networks for Continuous QoE Prediction in Video Streaming Services” was successfully published in IEEE Access.

Meanwhile, we are currently working on the study of FoV prediction in omnidirectional videos. The experiments are being conducted and the paper will be written down and submitted to a journal soon.

教員養成での利用に向けたデジタルリスキュマネジメント 教材の開発

情報通信工学科 大橋 裕太郎

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

2022年度は、国内でのプログラミング教育の現状の把握に焦点を当てて調査を行った。

世界的には、プログラミング（あるいはコーディング）が子供たちの思考に影響を与えるという考えはすでに広く共有されている[1]。モデルカリキュラムも世界中で様々なものが利用可能になっている[2][3]。各国では、必修科目を小学校から高等学校までの系統的な教科として位置付けていたり、選択科目の中で実施したり、あるいはカリキュラムにプログラミング教育が規定されていなかったりするなど、科目の位置付け（必修・選択か、独立した科目かなど）や、開始学年など、その実施方法は各国で様々である。

日本では、2020年度から小学校でのプログラミング教育が必修化された。日本で目指されているプログラミング教育とは、子供たちに、コンピュータに意図した処理を行うよう指示することができるということを体験させながら、将来どのような職業に就くとしても、時代を超えて普遍的に求められる力としての「プログラミング的思考」などを育むことを目指しており、コーディングを覚えることが必ずしも目的ではない[4]。

プログラミング教育が必修化され3年を経とうとしている現在（執筆時）、プログラミング教育はどれほど浸透し、どの程度実施されているのだろうか。筆者は、プログラミング教育必修化以前の2017年、日本の小学校教員

がどの程度プログラミング教育への準備ができていたかを調査した。全国の小学校教員に対して質問紙調査を実施し、結果を量的・質的観点から分析した。その結果、ICTは教育現場で十分に活用されておらず、多くの教員がICTの活用に自信や不安を抱えていることが分かった。実施への具体的な障壁として、「授業でのICT活用の少なさ」「計画に対する懐疑的見方」「従来の教授法の使用」「教員の仕事量」の4つが明らかになった。全体として、教師はプログラミング教育の導入に対して技術的・精神的な準備ができていないことがわかった[5]。

この5年前（執筆時点）の調査から、状況は大きく様変わりしている。ひとつは、COVID-19の感染拡大が挙げられる。プログラミング教育が必修化された2020年には、感染拡大に伴う学校の休校が全国規模で実施され、一部の教育現場ではプログラミング教育が十分に実施できる体制を確保することが難しい状況に見舞われた。COVID-19の感染拡大は十分な学びの機会を得られなかった子どもたちにとって大きな打撃となったが、一方でGIGAスクール構想の1人1台PCの導入が前倒しされた結果、プログラミング教育の普及を推し進めることにもつながった。こうした複雑な状況を経た現在、COVID-19も落ち着きを見せ始め、今一度プログラミング教育の現場レベルでの実施状況を振り返る必要があるのではないかと筆者は考える。

2. 研究計画

以下のリサーチクエスチョンに基づいて調査を実施した。

- (1) 校務や授業での ICT 利用はどのように変化したのか？
- (2) プログラミング教育はどの程度普及したのか？
- (3) 教員の ICT 利用およびプログラミングを教えることに対する自信はどのように変化したか？
- (4) プログラミング教育への教員の意識はどのように変化したか？

インターネット調査会社の協力のもと、調査会社にモニター登録する小学校教員に対して筆者が作成した質問票が送付された。質問項目は 2017 年に実施した項目と基本的に同一のものとした（今回の調査に新たに加えた選択肢の項目に＊を記載している）。

分析方法は、2017 年調査と比較してカイ二乗検定を用いて統計的有意差を検証した。以下に質問と選択肢を示す。

Q1 小学校教員として何年間働かれていますか。

「10 年未満」「10 年～19 年」「20 年～29 年」「30 年～39 年」「40 年以上」

Q2 授業とは別に、校務でどの程度 ICT（コンピュータ、タブレット PC、電子黒板など）を利用していますか。

「ほぼ毎日」「週 4～5 日」「週 2～3 日」「週 1 日」「ほとんど使わない」

Q3 Q2 で、校務で ICT を利用していると回答した方にお聞きします。どのような用途で利用していますか。（複数選択）

「授業のための資料作成」「調べ物」「児童の成績やデータの管理」「報告書等の文書作成」「プレゼン等の資料作成」「メールや校内イントラネット等でのやりとり」「部活動やクラブ活動のための作業」

「オンライン授業＊」「オンラインでの会議」「その他（ ）」

Q4 授業で ICT を利用していますか。

「ほぼ毎日」「週 4～5 日」「週 2～3 日」「週 1 日」「ほとんど使わない」

Q5 Q4 で、授業で ICT を利用していると回答した方にお聞きします。どのような用途で利用していますか。（複数選択）

「児童が調べ物をする」「児童が自己紹介や調べたことの発表のために資料作成する」「児童がタイピングを練習する」「児童が教育用ソフトウェアを利用する」「先生が教材を提示する」「児童が電子教科書を使って学習する＊」「オンラインで授業をおこなう＊」「プログラミング」「その他（ ）」

Q6 校務や授業で ICT を利用することに自信がありますか。

「自信がある」「少し自信がある」「どちらでもない」「あまり自信がない」「自信がない」

Q7 小学校段階でのプログラミング教育は必要だと思いますか。

「必要だと思う」「ある程度は必要だと思う」「どちらでもない」「あまり必要だと思わない」「必要だと思わない」

Q8 小学校の授業の中で児童にプログラミングを教えたことがありますか。

「ある」「ない」

Q9 Q8 で「ある」と回答された方に質問です。何のプログラミング言語や開発環境を使用しましたか？

Q10 プログラミングについて教えることに自信がありますか。

「自信がある」「少し自信がある」「どちらでもない」「あまり自信がない」「自信がない」

Q11 小学校でプログラミングについて教える上で必要だと考えるものをすべてお選びください。（複数選択）

「サポート要員などの学校への訪問」「電話やメール等で質問をすることができるヘルプデスク」「教え方についての教科書や資料、副教

材等」「プログラミング教育に関するポータルサイト」「研修や訓練」「研究や練習のための時間」「コンピュータ」「タブレット PC」「校内無線 LAN」「その他（ ）」

Q12 プログラミング教育に何を期待しますか。（複数選択）

「論理的思考力の育成」「数学的思考力の育成」「創造力の育成」「将来必要となる知識や技術を身につけること」「最新技術に触れること」「将来の職業を考えるきっかけになること」「楽しみながら学ぶこと」「教員がコンピュータに慣れること」「他教科との連携」「プログラミングを通じて学校や勉強が好きになること」「特に期待していない」「その他（ ）」

Q13 その他、ICT 利用やプログラミング教育について要望やご意見がありましたらお書きください。（自由記述）

3. 計画の進行状況

全国の319名から回答を得た(男性184名、女性135名、平均年齢49歳)。回答率は31%であった。なお2017年の調査は309名(男性153名、女性156名、平均年齢45歳)であった。以下、前述のリサーチクエスションの順に結果を述べる。

(1) 校務や授業での ICT 利用はどのように変化したのか？

校務での教員の ICT 利用頻度は5%水準で ($p = .0221$)、授業での ICT 利用頻度は1%水準で増加した ($p < .01$)。その内容としては、「授業のための資料作成」が1%水準、「報告書等の文書作成」が5%水準で有意に減少し、「メールや校内イントラネット等でのやりとり」が5%水準で有意に増加した。

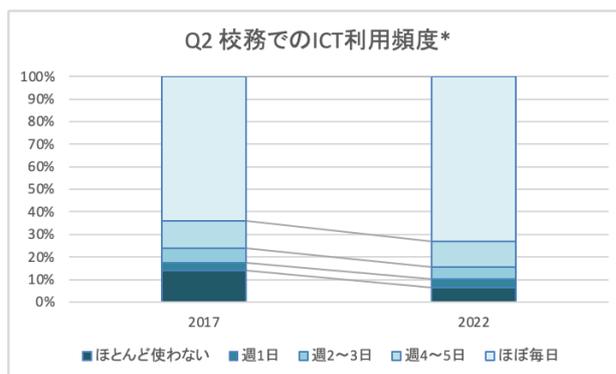


図1 校務での ICT 利用頻度

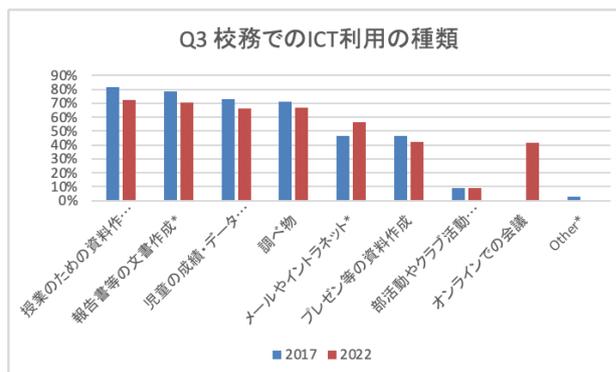


図2 校務での ICT 利用の種類

授業での ICT 利用の種類については、「先生が教材を提示する」が1%水準で有意に減少し、「児童が教育ソフト・アプリを利用する」「児童が発表する」「児童がタイピングを練習する」「児童がプログラミングをする」が1%水準で有意に増加した。

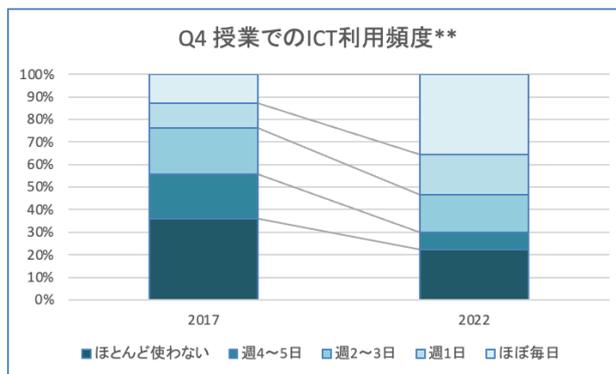


図3 授業での ICT 利用頻度

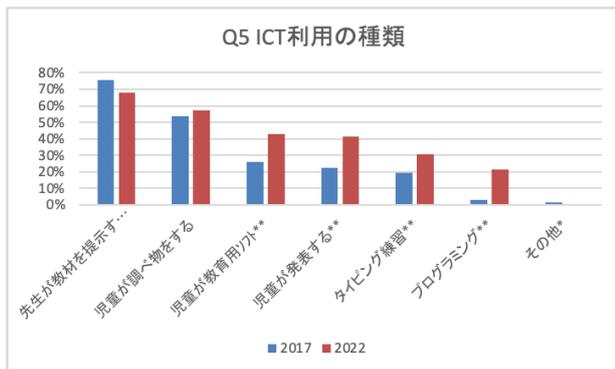


図 4 ICT 利用の種類

(2) プログラミング教育はどの程度普及したのか？

プログラミングを教えた経験があると回答したのは2017年の15%から49%に大きく増加したものの、いまだに半数以上が経験がないと回答した。プログラミング教育は必要と考える割合は1%水準で有意に増加したが、2割以上はいまだにプログラミング教育に対して否定的な見方を示した。



図 5 教員のプログラミングを教えた経験

(3) 教員の ICT 利用およびプログラミングを教えることに対する自信はどのように変化したか？

意外なことに、ICT を校務や授業で利用することに自信があると回答した人の割合は、2017年と比較して5%水準で有意に減少した ($p = .0108$)。一方、プログラミングを教える自信は1%水準で有意に上昇した ($p = .0098$)。

以降、分析を継続して行う。

参考文献

- [1] Wing, J. M. (2006) : Computational Thinking, Communications of the ACM, Vol. 49, No. 3, pp. 33–35.
- [2] Computing at Schools <https://www.computingatschool.org.uk/>
- [3] Hour of Code <https://hourofcode.com/>
- [4] 文部科学省 小学校段階におけるプログラミング教育の在り方について（議論の取りまとめ） https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/cho usa/shotou/122/attach/1372525.htm
- [5] Ohashi, Y. (2017). Preparedness of Japan's Elementary School Teachers for the Introduction of Computer Programming Education. In: Dagienė, V., Hellas, A. (eds) Informatics in Schools: Focus on Learning Programming. ISSEP 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10696. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71483-7_11

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

- Journal of Information Processing (JIP) Special issue of "Computers in Education for Creative Learning" (投稿済)
- 2023 PCカンファレンス (投稿予定)

需要消失する地域公共交通のサービス改善のための 外部補助制度と需要創出策

土木工学科 岩倉 成志

1. 序論

地域公共交通とのネットワーク効果を持ち、多くの優秀な人材を擁す JR などの大手鉄道事業者が、地域公共交通のサービス改善をコンサルティングし、そのサービス改善による大手事業者の増益範囲で地域交通事業者のサービス改善への営業補助や資本費補助を契約し、地域公共交通の単なる存続からサービス改善を成し得る成長経営へ転換する可能性を交通需要推計モデルで定量化すること、ならびに SNS ネットワーク効果に着目した需要創出策を研究することが本研究の目的である。

地域公共交通の技術革新（高頻度運行、ダイヤ改善、バスタ、MaaS、鉄道やバスの自動運転化による低運賃化など）と SNS 需要創出によって、観光や業務トリップで新幹線の収益増が推計できた場合に、その増益の範囲内で地域公共交通のサービス改善策の選定を行う。実際の改善によって地域公共交通沿線の居住者の利便性をも改善できた場合、地域内の通学、私事、通勤、業務の需要回復に寄与して地域公共交通事業者の経営を安定させ、成長軌道に乗せられる可能性があると考えられる。

地域公共交通のサービス改善と沿線地域の SNS マーケティングが、新幹線需要をどの程度向上させ、新幹線と地域公共交通の収益をどの程度改善させるのかを見極めることを目

的とした研究は存在しない。本研究では、新幹線と地域公共交通とを乗り継ぐ利用者の交通行動および、地域公共交通の運行本数の改善などサービス改善と沿線地域の SNS マーケティングによって新幹線利用者と地域居住者の活動パターンが変化するメカニズムを数理的に解明する。

2. 研究計画

科研採択を目指し、以下の研究計画を準備した。

①地域公共交通のサービス改善が、幹線交通の需要と収益増加にどの程度寄与するのか、逆にサービス悪化がどのくらい需要と収益を低下させるのか。(2023-2025)

②沿線地域の SNS マーケティングが幹線交通の需要と収益増加にどの程度寄与するのかを携帯電話位置データと SNS データとによって明らかにする。(2023-2025)

③地域居住者が希望する一日の活動パターンはどのようなものか。地域公共交通の高頻度運行や、運行時間帯を拡大した場合に居住者の生活はどのように改善できるのか。(2024-2026)

④幹線交通と地域公共交通との連動性を高め、地域公共交通サービスを改善できる海外の先端事例としてどのような対策や技術革新

が存在するのか。(2025-2026)

⑤大手交通事業者から地域交通事業者への外部補助（交通事業者間の拡大内部補助）を導入する際の合意形成や制度策定の問題点はどうのようなものか。(2025-2026)

3. 計画の進行状況

今年度は研究計画のうち①と②をおこなったので、以下に報告する。

3.1. 研究計画①

地方交通のサービス水準の変化による新幹線需要への影響を分析することを念頭に、新幹線と地方交通を乗り継ぐトリップを表現する経路選択モデルを構築し、地方交通のサービス水準が新幹線利用者の効用に与える影響を分析した。

3.1.1. データ概要

2015年幹線旅客純流動調査における平日の鉄道トリップデータ 285135 サンプルを扱う。このデータから研究目的と整合したデータを以下の4つの観点から抽出した。また、対象とする発着地は全国とする。

- ・新幹線降車後、降車駅とは異なる生活圏に移動したトリップ
- ・幹線交通区間で新幹線を利用したトリップ
- ・新幹線駅アクセス、新幹線駅イグレス区間において鉄道(在来線)を利用したトリップ
- ・新幹線駅アクセス、イグレス区間における利用交通機関が鉄道(在来線)を除き1種類のみ(自動車、徒歩、タクシー、高速バス、市内バスのいずれか)のトリップ

以上の観点から抽出した結果、5390 サンプルの OD ペアが抽出された。

LOS データは、NAVITIME API と駅すばあと API の 2 つを用いてデータは、所要時間、費用、待ち時間を取得する。

3.1.2 経路選択モデルの構築

地方交通間の競合が激しいと考えられる250 サンプルを選択し、ロジットモデルによって経路選択モデルを構築する。推定された

表 1 都市間経路選択モデルの推定結果

説明変数	パラメータ	t値	時間価値(円/分)
AT: アクセス時間(h)	-1.279	-2.716	** 40
AC: アクセス費用(千円)	-0.532	-2.942	**
AWT: アクセス待ち時間(h)	-1.205	-0.739	38
HT: ラインホール時間(h)	-2.611	-4.117	** 188
HC: ラインホール費用(千円)	-0.231	-2.491	**
HWT: ラインホール待ち時間(h)	-2.887	-2.127	** 208
ET: イグレス時間(h)	-1.880	-4.259	** 32
EC: イグレス費用(千円)	-0.976	-4.500	**
EWT: イグレス待ち時間(h)	-3.183	-2.005	** 54
初期尤度	-240.713		
最終尤度	-170.423		
調整済み尤度比	0.255		

**：t値5%有意

効用関数を表 1 に示す。

利用者は、新幹線利用といった都市間を跨ぐ長距離移動の際は、スムーズな移動が可能である経路、そして交通手段の選択をしていることが考えられる。

このモデルを使用して地方鉄道が廃止された場合の効用の低下と新幹線料金で補ってサービス改善した場合の効用水準を評価する。

ケーススタディとして取り上げたのは、三重県内の赤字路線である伊賀上野駅から伊賀神戸駅を結ぶ伊賀鉄道である。

伊賀鉄道廃止による1トリップ当たりの効用低下を貨幣換算すると-673円/トリップ、並走する高速バスを廃止すると-1464円/トリップとなり、伊賀鉄道よりも高速バスを廃止する方が効用低下が大きいことが明らかになった。なお、新幹線料金の1341円値上げすると伊賀鉄道のサービス改善が可能になることがわかった。

3.2. 研究計画②

近年急激に普及・発展している SNS マーケティングを行うことにより鉄道需要の創出につながるのではないかと考えた。

本研究では四国の観光地に関する SNS 投稿の増加に伴い、付近の公共交通機関の利用者が増加するという仮説を立て、観光地に関する SNS 投稿と観光地付近の駅利用者数の相関性を分析することを目的とした。

表 3 SNS 投稿数が鉄道需要に与える影響を推定する SARIMAX モデル

		丸亀駅	栗林公園北口	大歩危駅	観音寺駅	詫間駅	琴平駅	鳴門駅	下灘駅	伊野駅
外 生 変 数	日照時間	0.047	0.033	0.038	-0.004	0.032	0.022	0.005	0.071	0.029
	緊急事態宣言	-0.158	-0.101	0.003	-0.092	-0.183	-0.182	-0.111	-0.053	-0.229
	蔓延防止策①	0.015	-0.056	-0.027	-0.036	-0.046	-0.019	-0.061	-0.038	-0.053
	蔓延防止策②	-0.01	-0.186	-0.043	-0.015	-0.033	-0.05	-0.043	-0.005	-0.108
	SNS投稿数(P値)	0.152(0.001)	0.245(0.001)	0.166(0.000)	0.103(0.008)	0.222(0.000)	0.065(0.235)	0.178(0.002)	0.227(0.232)	0.065(0.498)
内 生 変 数	ar.L1	-1.047	—	—	—	—	-0.644	0.237	—	—
	ar.L2	-0.347	—	—	—	—	-0.383	—	—	—
	ma.L1	0.843	-0.64	-0.496	-0.267	-0.354	—	-0.848	-0.797	-0.746
	ma.L2	—	—	—	—	-0.309	—	—	0.196	—
	ar.S.L52	-0.253	-0.506	-0.239	-0.268	-0.365	-0.986	—	-0.417	-0.626
	ma.S.L52	—	—	—	—	—	0.886	—	—	—
	sigma	0.213	0.623	0.234	0.233	0.37	0.437	0.65	0.627	0.768
	R ²	0.741	0.247	0.683	0.711	0.526	0.437	0.021	-0.063	-0.046

3.2.1.データ概要

四国の観光地から徒歩またはバスで移動できる最寄り駅を対象とし、丸亀駅・栗林公園北口駅・大歩危駅・観音寺駅・詫間駅・琴平駅・鳴門駅・下灘駅・伊野駅の 9 地点の day-to-day 定期外乗降者数データを用いた。対象期間は 2019 年 4 月 3 日から 2022 年 7 月 31 日である。

SNS 投稿数は表-1 に示すキーワードを含む投稿を Twitter API より抽出し、週別に集計したものを用いる。なお、本研究では投稿内容について解析していないため、投稿内容のネガティブ、ポジティブに左右されてしまう可能性のあるリツイートやリプライによる投稿は SNS 投稿数に含まず分析することとした。

表 2 観光地に関する SNS 抽出キーワード

駅名	丸亀駅	栗林公園北口	大歩危駅	観音寺駅	
キーワード	丸亀城	栗林公園	祖谷のかずら橋	高屋神社	
			かずら橋	観音寺	
駅名	詫間駅	琴平駅	鳴門駅	下灘駅	伊野駅
キーワード	父母ヶ浜	金刀比羅宮	大塚国際美術館	下灘駅	仁淀川
					仁淀ブルー

3.2.2.分析手法

駅乗降者数と SNS 投稿数の相関性を分析するため、乗降者数を目的変数とした時系列モデルを推定する際、外生変数に SNS 投稿数を入れ、パラメータの統計的有意性を確認する手法である。

駅乗降者数データのような時系列を分析するためには 1 年を周期とする季節変動を考慮したモデルを扱う必要がある。そのため、時

系列モデルの中でも季節変動成分やトレンド成分，外部変数 X を考慮できる次式の SARIMAX モデルによってモデル推定を行う。

$$y_n = \beta exog_n + \sum_{i=1}^p a_i x_{n-i} + \sum_{i=0}^q b_i \varepsilon_{n-i} + c + \sum_{j=1}^P A_j \sum_{i=1}^p a_i x_{n-sj-i} + \sum_{j=1}^Q B_j \sum_{i=1}^q b_i \varepsilon_{n-sj-i}$$

ここで p は自己回帰モデルの次数，q は移動平均モデルの次数，P，Q はそれぞれ季節自己回帰モデル，季節移動平均モデルの次数である。また，β は外生変数のパラメータ，exog_n は外生変数，A, a, B, b は内生変数のパラメータ，ε_n は誤差，c は定数項を示す。本研究では週別データ系列を扱うので，周期 s は 52 となる。

モデルの選定方法は，各次数の組み合わせ当てはめたモデルを複数作り，赤池情報量基準 (AIC) の値が最小となるモデルを選んだ。

また，日照時間，緊急事態宣言，第 1 回蔓延防止策，第 2 回蔓延防止策が SNS 以外の乗降者数に寄与する要因として挙げられるため，外生変数としてパラメータを推定する。

3.2.3.モデルの推定結果

SARIMAX モデルの係数を表-2 に，丸亀駅の推定モデルを例にモデルの再現性を図-2 に示す。

丸亀駅，大歩危駅，観音寺駅，詫間駅の 4 駅は決定係数が 0.5 を超え，モデルの精度は悪くない。さらに SNS 投稿数の p 値は 4 駅とも 0.05 を下回り，有意な値となったことから，

この4駅は駅乗降者数に SNS 投稿数が寄与していると言える。

一方で、栗林公園北口駅、琴平駅、鳴門駅、下灘駅、伊野駅は決定係数が 0.5 を下回りモデル精度が良くない結果となった。考えられる要因として、SNS 投稿数データにはネットニュースに伴う投稿も含まれているため、ニュースの内容や投稿内容によって鉄道需要に負の影響を与えている可能性がある。

図-3 に丸亀駅 SARIMAX モデルの SNS 投稿数を 0 から 500 まで増加させた際の乗降者数の感度分析結果を示す(上図 SNS 投稿数 0 件, 下図 SNS 投稿数 500 件)。SNS 投稿数の増加に伴い、乗降者数が増加していることが分かる。さらに、SNS 投稿数が 1 件増加した際の丸亀駅駅降車客数は 2.29 人、大歩危駅、観音寺駅、詫間駅はそれぞれ 0.28 人、0.27 人、0.13 人増加することが分かった。

4. 今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の研究計画として、まず、今年度の研究過程の成果を踏まえて、2023 年度科学研究費挑戦的研究(萌芽)に「異常検知技術を応用したローカル鉄道の需要対策効果の XAI 計測」として申請をおこなったが、残念ながら不採択となった。2024 年度も研究蓄積を踏まえて採択を目指したい。

研究計画②は、推定結果で SNS 投稿数のパラメータが有意とならなかった琴平駅や栗林公園北口駅では JR の他に琴電やその他の路線が競合している。そのため、競合路線数も考慮する。また、SNS 投稿数と乗降者数の相関性について分析を行ったが、SNS の投稿内容により乗降者数にプラスの影響を与えない可能性がある。したがって、投稿内容の感情分析を行い、投稿内容がポジティブな投稿数、ネガティブな投稿数を分離して評価する必要がある。

このほか、地方鉄道の現状をつぶさに分析するために、鉄道廃線後の代替バスの運行状況の時系列推移の分析やサービス水準の変遷、

土地利用や人口の変化などの分析を進めている。

学会、論文等投稿・発表状況としては、研究計画②の研究成果と鉄道廃線後の交通サービス水準の時系列変化の研究成果とを土木学会第 78 回年次学術講演会に投稿済みである。このほか今秋の土木学会土木計画学秋大会など各種学会にて適宜発表を行っていく。

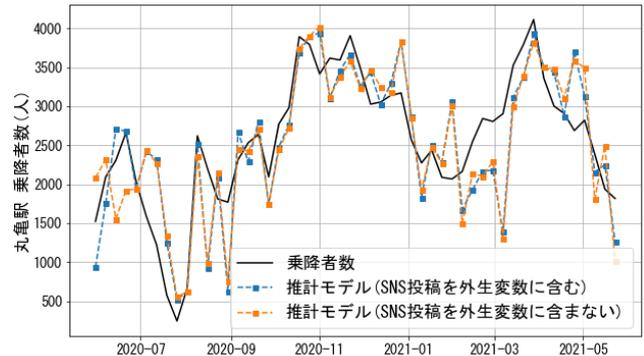


図1 丸亀駅の時系列需要の再現性

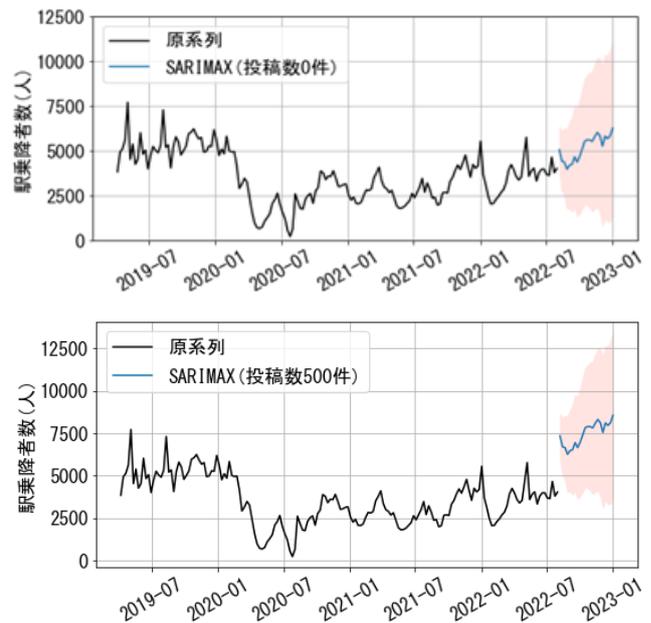


図2 丸亀駅周辺観光地の SNS 投稿の増加が丸亀駅需要に与える影響(上図 SNS 投稿数 0 件, 下図 SNS 投稿数 500 件)

バルク超伝導体の強磁場を利用したプロファイルNMRの開発

工学部先進国際課程 坂井 直道

共同研究者

理化学研究所 岡 徹雄
理化学研究所 高橋 雅人
理化学研究所 仲村 高志

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

超伝導とは極低温に冷却した際にある温度以下で電気抵抗がゼロとなる現象を指し、中でも液体窒素温度（77 K: -196 °C）等 25 K 以上でも超伝導を示す物質を高温超伝導 (HTS: High Temperature Superconductor) 体と呼ぶ。本研究ではバルク (塊) 状の HTS バルク磁石を用いた。HTS バルク磁石は小型の極低温冷凍機で運用することが可能であり、装置の小型化を図りながらも強力に安定した磁場を発生させることができる。バルク超伝導磁石の応用先の一つに小型可搬型 NMR 装置がある。

NMR (Nuclear Magnetic Resonance: 核磁気共鳴) とは、磁場中で核スピンの固有周波数の電磁波によって共鳴を起こす現象であり、有機化合物の構造解析等に広く用いられている。一般的な NMR 装置には強力な均一磁場を発生させるために超伝導線材コイルを用いた電磁石が用いられており、コイル磁石のボア内部に試料を挿入して測定を行う。したがって、必然的に測定可能な試料はボア径よりも小さいものに限られてしまう。

一方、永久磁石表面に生じる磁場で測定を行う片側 NMR 装置も開発されている。磁極表面に試料をあてて測定を行うため、試料サイズや形状に制限がなくなり、非破壊・非侵襲

での測定が可能となる。HTS バルク磁石は永久磁石よりも強力な磁場を発生させることができるため、より高感度な測定が可能となる。しかし磁極表面には常に強力な磁場勾配が生じており、高い磁場均一度が要求される化学シフトを観測することは不可能であるため構造解析には利用できない。一方で NMR 信号を検出することができれば、緩和時間や自己拡散係数などの分子の運動性を調べることが可能である。我々は、バルク超伝導体の強磁場を利用して分子の運動性などの違いから、深さ方向の成分分布や分子挙動の変化を調べることが可能なプロファイル NMR の開発を進めている。今年度は主に自己拡散係数を調べる装置の開発を行った。

NMR で拡散測定を行う方法として、パルス磁場勾配 (PFG: Pulse Field Gradient) NMR 法が普及している。PFG-NMR 法の利点は必要なタイミングのみに磁場勾配を発生させるため、NMR 信号を取得する際には磁場均一度が高い状態で化学シフトを観測できる。一方本研究で開発した片側 NMR では HTS バルク磁石表面に定常的に生じている勾配磁場を利用して測定を行うため、磁場勾配の有無を切り替えることができない。しかし、PFG よりも強力な勾配磁場を利用することができるため、短い拡散待ち時間で測定を行うことができる。そ

のため、緩和の影響を受けやすい横緩和時間の短い試料や自己拡散係数の小さな試料を測定対象とすることができる。また、勾配方向に対して高い空間分解能を得ることができる。拡散測定はリチウムイオン電池の電解質の分析にも利用されており、本装置では強い勾配により、リチウムイオンの微細な動きの観測が可能であると期待できる。

以上のことから、リチウムイオン電池の電解質の分析に向けて、HTS バルク磁石表面に生じる強い静磁場勾配を生かした拡散測定用の片側 NMR 装置の開発を行った。開発した片側 NMR 磁極を Fig. 1 に示す。

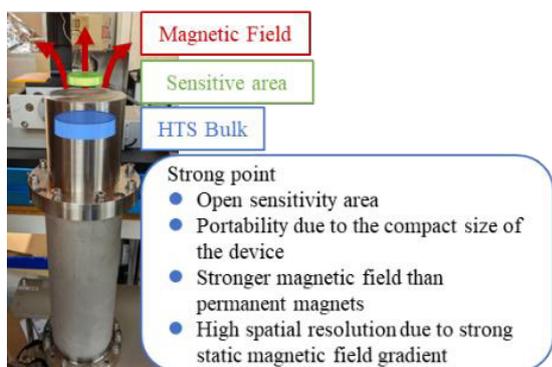


Fig. 1 single-sided magnetic pole using HTS bulk

2. 研究計画

静磁場勾配による拡散測定で使用される代表的なパルスシーケンスの一つにスピンエコー (SE) Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 法がある。Fig. 2 にスピンエコー CPMG の概略図を示す。

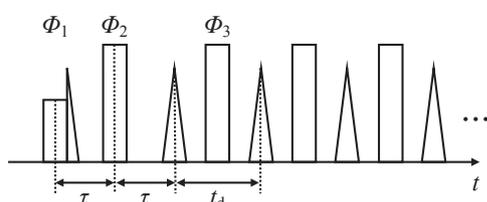


Fig. 2 Pulse sequences of SE-CPMG

τ はスピンエコーの待ち時間、 t_d は CPMG の待ち時間を示す。

本研究では拡散測定を行う際、待ち時間 τ を変化させ、信号が減衰する様子を確認し自己拡散係数を調べた。スピンエコー法に

より拡散測定を行った際の信号強度比は式 (1) のように与えられる。

$$\ln\left(\frac{S(\tau)}{S(0)}\right) = -\frac{2}{3}\gamma^2 G_0^2 \tau^3 D - \frac{2\tau}{T_2} \quad (1)$$

$S(t)$ は待ち時間 t における NMR 信号強度、 γ は磁気回転比、 G_0 は静磁場勾配、 D は自己拡散係数、 T_2 は横緩和時間を示す。

グリセロール (^1H) と 15、10.7、4.5 M (mol/L) の塩化リチウム水溶液 (^7Li) の拡散測定を行った。グリセロールは周波数 53.8 MHz、磁場勾配 72.1 T/m、CPMG 繰り返し回数 100 回、積算回数 4 回、待ち時間 125~1250 μs (間隔 125 μs 、計 10 点) で $2.0 \times 2.0 \times 0.59 \text{ mm}$ の感度領域から測定を行った。また、15 および 10.7 M 塩化リチウム水溶液は周波数 21.5 MHz、磁場勾配 72.1 T/m、CPMG 繰り返し回数 100 回、積算回数 32 回、待ち時間 50~500 μs (間隔 50 μs 、計 10 点) で測定、4.5 M 塩化リチウム水溶液は周波数 21.5 MHz、磁場勾配 72.1 T/m、CPMG 繰り返し回数 100 回、積算回数 1024 回、待ち時間 50~400 μs (間隔 50 μs 、計 8 点) で $2.0 \times 2.0 \times 0.59 \text{ mm}$ の感度領域から測定を行った。

3. 計画の進行状況

グリセロールの拡散測定結果を Fig. 3 に示す。

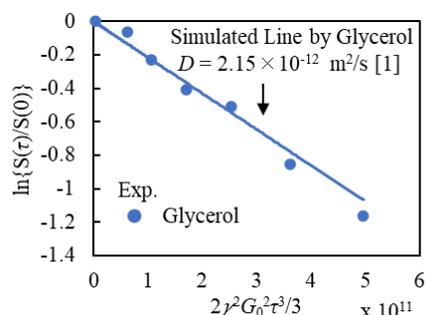


Fig.3 Diffusion measurements of glycerol

文献値では $2.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ [1] であるのに対して測定結果からは拡散係数が $2.34 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ であると求められた。このことから、粘性が高く拡散係数の小さな試料の拡散測定を行うことが可能である。

次に塩化リチウム水溶液の拡散測定結果を Fig. 4 に示す。

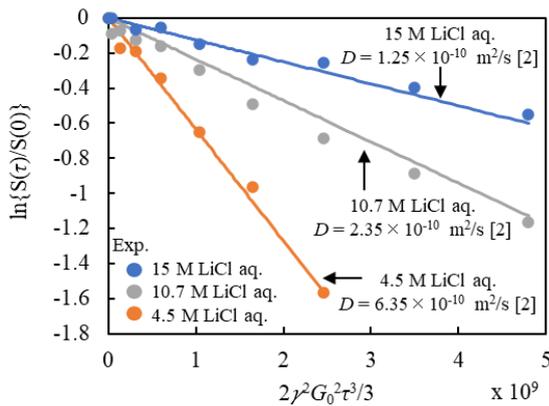


Fig.4 Diffusion measurements of 15、 10.7、 4.5 M LiCl aqueous solutions。

15、 10.7、 4.5 M 塩化リチウム水溶液の拡散係数の文献値がそれぞれ $1.25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $6.35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ [2] であるのに対して、測定結果からは拡散係数が $1.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.62 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $6.36 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ と求められた。このことから、濃度の違いにより生じる拡散係数の違いを識別することができた。

全固体リチウム電池用の固体電解質の拡散測定として、LLTO (Li イオン伝導性固体電解質セラミックス: リチウム・ランタン・チタン酸化物) の拡散測定結果を Fig. 5 に示す

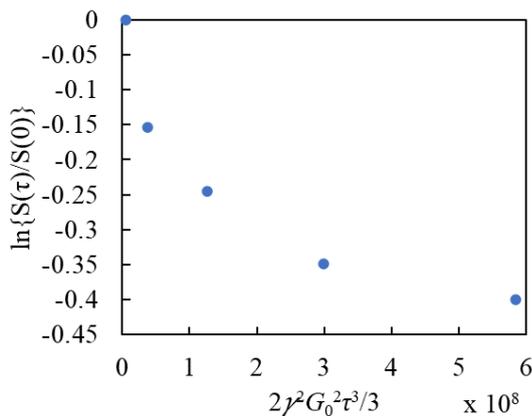


Fig.5 Diffusion measurements of LLTS

Fig. 5 から拡散測定結果が砂糖水などの拡散測定結果のように曲線系となった。これは、結晶の異方性から移動方向によりイオン伝導の速度が異なるためこのような結果が得られたので

はないかと考える。なお、最も傾きの大きい 50 ~ 100 間の傾きは 4.69×10^{-9} であり、最も傾きの小さい 200 ~ 250 間の傾きは 1.78×10^{-10} となった。

電解質中の拡散係数とイオン伝導の関係式である Nernst-Einstein (NE) 式を基にこれらの自己拡散係数とイオン伝導度を比較する。NE 式を式 (2) に示す。

$$\sigma_{\text{Li}} = \frac{Ne^2}{kT} \sigma_{\text{Li}} \quad (2)$$

式 (2) の σ_{Li} は Li のイオン伝導度、N はキャリア数、e は電気素量、k はボルツマン定数、T は温度を示す。式 (2) より、50 ~ 100 間のイオン伝導度は $4.10 \times 10^{-1} \text{ S/cm}$ 、200 ~ 250 間のイオン伝導度は $1.56 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ と求められた。室温における LLTO のイオン伝導度は 10^{-3} オーダー程度であると報告されているため、報告された値よりもイオン伝導度が大きくなったしまった。固体電解質の測定に関しては今後さらなる詳細検討が必要である。

4. 結果のまとめ、今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

超伝導バルク磁石を用いた片側磁極および拡散測定用のプローブを作製し、SFG-NMG 法による拡散測定を行った。その結果、拡散待ち時間 τ に応じた信号強度が減衰する様子を確認することができた。これにより水のような拡散速度の速い試料であれば拡散測定が可能であることが分かった。一方で、拡散速度の遅い試料は報告されていた自己拡散係数とのズレが生じてしまった。また、砂糖水の拡散測定により、拡散係数の異なる成分を含む混合試料でも各成分の自己拡散係数を求めることが原理上可能であることが分かった。拡散速度の遅い試料の測定結果が報告されている自己拡散係数の値よりも大きくなってしまった原因は GM 冷凍機から伝わる振動ではないかと考えた。

振動の影響を抑制するための機構を追加し

た磁極を作成し、SFG-NMG 法による拡散測定を行った。その結果、報告されている自己拡散係数とはズレが生じてしまった 10^{-12} オーダーと拡散の遅い試料でも、報告されている自己拡散係数の値とかなり近い結果を得ることに成功した。したがって、自己拡散係数の値が 10^{-12} オーダーと拡散の遅い試料の拡散測定にも対応することができるようになった。

また、磁極表面で塩化リチウム水溶液に含まれる ^7Li の NMR 信号の検出に成功した。片側 NMR での ^7Li の NMR 信号の検出は世界で初めてとなる。また、拡散待ち時間 τ に応じて信号強度比が減衰していく様子を確認することにも成功した。本実験の塩化リチウム水溶液の拡散測定結果に関しては既に報告されている自己拡散係数の値とのズレがほぼ見られない結果を得ることができた。また、塩化リチウムの濃度による拡散係数の変化を正確に追うことができた。これらのことから本装置はリチウムイオン電池の電解質に含まれる ^7Li の分析に用いることが可能であると考えられる。一方で、実際の電解液については本実験で使用したものよりもリチウムの濃度が低いいため、感度の向上が電解液の分析装置としての実用化に向けた課題になると考えている。

さらに、全固体リチウム電池の固体電解質の一つである LLTO からの NMR 信号の検出と信号強度の減衰を確認することができた。しかし測定結果から求めたイオン伝導度の値は報告されているものとずれた値となってしまった。そのため、固体電解質の測定に関しては今後さらなる詳細検討が必要である。全固体電池の研究に関しては今後さらなる発展が期待されるため、本研究で開発した片側磁極が発展への一端を担うことを期待している。

今後の計画として、固体 Li の拡散挙動評価や Li イオン電池用セパレータの性能評価等への適用可能性を調べるために、固体 Li の拡散係数測定に影響する因子の検討やセパレータ

を模擬したフィルターの解析を本装置を用いて実施することを計画している。この際、着磁不法に改良を加えることで、磁場強度および磁場勾配を会場させることで、より信号強度が高く、空間分解能を高めた装置の開発を行う。これにより、より高精度の測定が可能になることが期待できる。また、 t_2 を測定することにより、材料合成や劣化評価における時間的な変化を評価可能かどうかを検討する。

学会、論文等投稿・発表状況としては、これまでに、以下に示す国内および国際会議での報告および論文発表を行った。

Unique Magnetic Field Generators of Cryocooled Superconducting Bulk Magnets and Their Industrial Application; 35th International Symposium on Superconductivity

高温超伝導バルク磁石表面勾配磁場を用いた拡散 NMR 測定装置の開発—リチウムイオン電池開発に適合する測定装置を目指して; 第 61 回 NMR 討論会

First NMR Relaxometry using Outer Field of Single-sided HTS Bulk Magnet activated by Pulsed Field, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2022, DOI10.1109/TASC.2022.3161247

また、本学学生が、2023 年 5 月末に開催される春季低温工学・超電導学会において、本件の成果に関し報告することになっている。

さらに、予算獲得への応募や想定ユーザーとの共同研究に向けた予備検討などを進めている。

参考文献

[1] M. Klein et al.、Journal of Magnetic Resonance 164 (2003) 317

[2] B. M. Braun et. Al.、The Journal of Physical Chemistry、Vol. 92、No. 5 (1988) 1343

高齢者の転倒予防スキル習得法の提案： 歩行中の瞬時の姿勢制御能力向上を目指して

生命科学科 赤木 亮太

共同研究者

芝浦工業大学システム理工学部生命科学科 山本 紳一郎

早稲田大学スポーツ科学学術院 平田 浩祐

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

現在、世界中で高齢化が進み、今後多くの国が超高齢社会（高齢化率 21%以上）を迎える。一足早く超高齢社会に突入した我が国では、多くの高齢者が、日々、健康を意識して活動しているものの、要支援・要介護認定者の高齢者は、2000年4月末の218万人から、2017年4月末には633万人まで増えている（2.9倍）（厚生労働省、2018）。このことは、元気な高齢者を増やし、就業率を高める上で、また、働き盛り世代が就労に注力する上で、大きな足枷となっている。

高齢者が救急搬送された近年の事故の内、転倒・転落による事故は全体の80%をも占める。とりわけ、高齢者の転倒は歩行中に頻発している（Mademli and Arampatzis, 2014）。転倒経験は、身体的な障害の発生や転倒に対する恐怖感の増幅をもたらし、身体活動量を著しく制限してしまい、要介護の主要因となる（川上ら、2006）。こうして、高齢者の虚弱が加速してしまうことに鑑みれば、高齢者の歩行中の転倒リスクを低減することが喫緊の課題となる。

歩行中の転倒を想定すると（図1）、①歩行中の状況把握（例：段差で躓く/強い風に煽られバランスを崩す可能性がある）により、転

倒の危険を未然に察知して回避することが求められる。この①の観点からの転倒予防の研究は、多くのグループが認知・記憶機能の面から進めている（例：Chantanachai et al., 2022）。しかし、実際には、転倒の危険に晒される状況を未然に察知・予測できない場面も多く存在する（例：夜道で歩道の凍結が判別できない、人や物に遮られ足元が見えない）ことから、②歩行中に転倒しかけた際、瞬時に適切な姿勢に戻して、なおかつ、自身の体を支え、転倒を防ぐ能力を高めることがより重要となる。

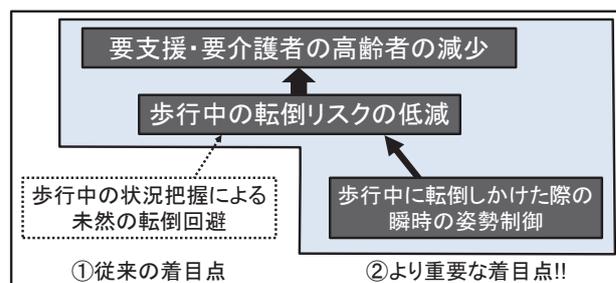


図1 歩行中の転倒リスクの低減に関するモデル

本研究では、関節位置覚、関節角度変化を伴う素早い力発揮能力及び素早い関節角度調整能力に着目し、高齢者の歩行中の瞬時の姿勢制御能力向上策の確立に向けた基盤を構築することを目的とする。将来的に、当該姿勢

制御能力が衰え始める年代以上を対象とした、画期的な転倒予防スキル習得法の提案につなげ、要支援・要介護者の高齢者数の減少を目指す。

2. 研究計画

検出力分析ソフト G*Power3.1.9.7 を用いて効果量：0.50， α エラー：0.05，検定力：0.80 として相関分析に必要なサンプルサイズを算出した結果、26 となった。その結果を踏まえ、神経疾患や筋骨格系疾患のない 21.1 ± 1.9 歳（18 - 25 歳）の男性 28 名を研究対象者とした（身長： 173.2 ± 5.6 [cm]，体重： 63.9 ± 8.4 [kg]）。対象者全員に、測定前に本研究に関して十分な説明をした後、各対象者から実験参加への同意を書面で得た。本実験は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会より承認を受けた上で実施された。

本実験では、対象者の非利き足側の脚を測定した。利き足の判定には改訂版ウォーターリー利き足質問紙（Waterloo Footedness Questionnaire - Revised：WFQ-R）（大久保ら 2022）を用いた。対象者は、測定前に WFQ-R に記載されている全 10 項目の質問に、いつも左、たいてい左、どちらも同じくらい、たいてい右、いつも右のいずれかで回答した。回答の配点については、いつも左：-2 点、たいてい左：-1 点、どちらも同じくらい：0 点、たいてい右：1 点、いつも右：2 点とし、全 10 項目から得られる点数の合計を算出した。-20 点から 20 点の範囲のうち、合計点数が-5 点以下を左利き、5 点以上を右利きとし、対象者の利き足を判定した。

2022 年度は、基本的な歩行よりは複雑で、実際に転倒する前の歩行ということで、障害物横断歩行を対象とした。図 2 の通り、一定の高さにアルミニウム製の直径 15 [mm] の丸棒をバーとして置き、そのバーをギリギリ越えるよう、対象者には指示した。

まず、対象者を立位の状態で静止させ、地

面から外果中心までの高さをメジャーで測定した。次に、障害物の高さを設定する試行に移った。本実験では、高さを自在に設定できる障害物として走高跳スタンドを用いた。はじめに、対象者は、3 歩目でスタンドを横断するための適切なスタート位置を決定した。

本実験における対象者の歩行は、1 歩目は非利き足、2 歩目は利き

足、3 歩目は非利き足を先導肢とした。続いて、対象者は、スタート位置からスタンド位置までを 3 歩で可能な限り高く先導肢の足をあげて歩く試行を行った。3 歩目の足が最も高く上がった時に、対象者をその状態で静止させ、先導肢の外果の中心の高さまでスタンドのバーを上げて固定した。その時の地面からバーまでの高さをステンレス製の定規で測定した。以上の試行を 10 回行った。障害物の高さは、静止立位時の地面から外果の中心までの高さを s 、 i 試行目で 3 歩目の足が最も高く上がった時の地面から外果の中心までの高さを w_i とし、以下の式 (1) より算出した値とした。

$$\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{4}{10} (w_i - s) + s \quad (1)$$

そして、算出した値になるようにバーの高さを調節した。

障害物の高さを設定し終えた後、障害物横断歩行のパフォーマンス測定を実施した。対象者には、3 歩目で先導肢の足をバーの高さに可能な限り近づけて横断するよう指示した。この時、100 [bpm] でメトロノームを再生し、対象者の歩くテンポを統一させた。さらに、対象者は視野の下半分が見えないゴーグルを装着した。ビデオカメラ（iPad Air, Apple）を

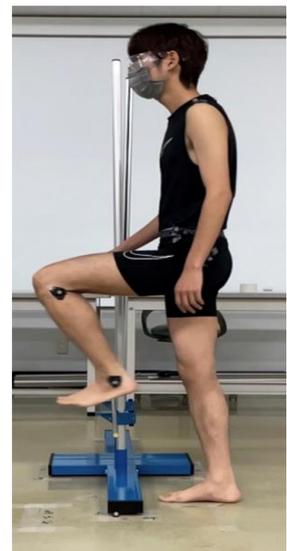


図 2 障害物横断歩行

用いて、歩行中の動作をフレームレート 240 [fps] で撮影した。最初の 10 回は練習試行とし、各試行が終わる毎に、棒の真上を通過した瞬間の先行肢の外果の位置を対象者に画面で提示した。その後、本番試行を 10 回行った。評価値は、動画内のバーとその真上を通過した瞬間の先行肢の外果との高さの誤差を、下肢長で補正したものとした。

関節位置覚の評価には、筋力計 (Con-Trex MJ, Physiomed) を用いた。関節位置覚の評価に関しては、動的な評価、及び、素早く関節角度を調整する能力の評価の 2 つを用いた。本実験では、股関節屈曲を対象とした。

まず、対象者を筋力計のシート上に仰臥位で固定した。固定後、素早く関節角度を調整する能力を評価する際の負荷を設定するために、股関節屈曲の等尺性最大随意収縮トルクを測定した。

続いて、動的な関節位置覚を測定した。対象者は、障害物横断歩行時と同様に、視野の下半分が見えないゴーグルを装着し、股関節が受動的に 100 [deg/s] で屈曲していく中で、80 [deg] (解剖学的正位を 0 [deg], 屈曲方向を + とする) に達したと感じた瞬間に Enter キーを押す試行を実施した。最初の 3 回は練習試行とし、その後、本番試行を 10 回行った。評価値は、Enter キーを押した瞬間の角度と目標角度との絶対誤差の 10 回分の平均値とした。

最後に、素早い角度調整能力の測定を行った。対象者には、股関節を能動的に屈曲し、80 [deg] で止めるよう指示した。この際、負荷は最大随意収縮トルクの 10% とした。最初の 3 回は練習試行とした。その後、本番試行

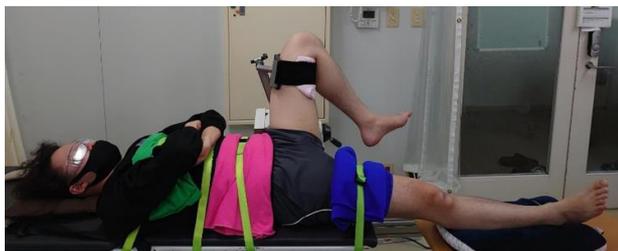


図 3 関節位置覚測定

を 10 回実施した。評価値は、止めた時の角度と目標角度との絶対誤差の 10 回分の平均値とした。測定の様子は図 3 の通りである。

3. 計画の進行状況

現時点では、上述の通り、各パラメータに関して本番 10 試行分をすべて採用し、その平均値を評価値としている。障害物横断歩行時の評価値は 0.21 ± 0.05 [a.u.] (0.13 - 0.33 [a.u.]), 動的な関節位置覚の誤差は 23.78 ± 8.16 [deg] (9.02 - 46.88 [deg]), 素早い関節角度調整能力の誤差は 6.28 ± 2.04 [deg] (2.76 - 11.80 [deg]) であった。各パラメータの正規性を Shapiro-Wilk 検定を用いて確認したところ、いずれのパラメータにも正規性が確認された。その結果を踏まえ、障害物横断歩行時の評価値と各々の誤差との間の相関関係を、ピアソンの相関分析により算出したところ、障害物横断歩行時の評価値は、動的な関節位置覚評価時の誤差 (図 4) ($r = 0.269, P = 0.166$), 素早い関節角度調整能力評価時の誤差 (図 5) ($r = 0.153, P = 0.438$), どちらとも有意な相関関係は見られなかった。

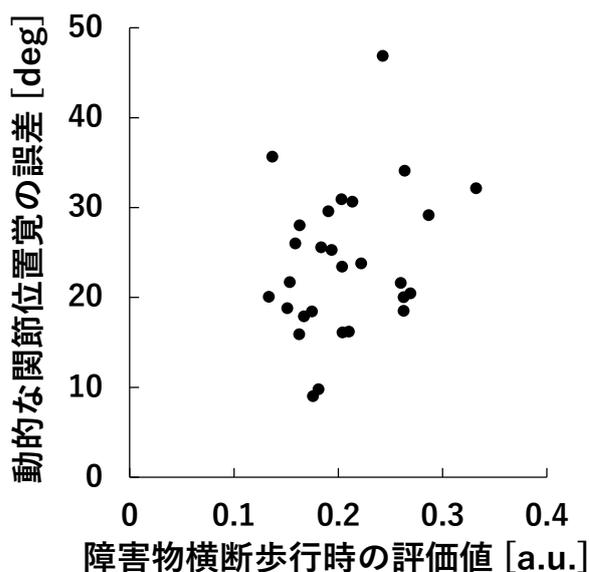


図 4 障害物横断歩行時の評価値と動的な関節位置覚の誤差の散布図

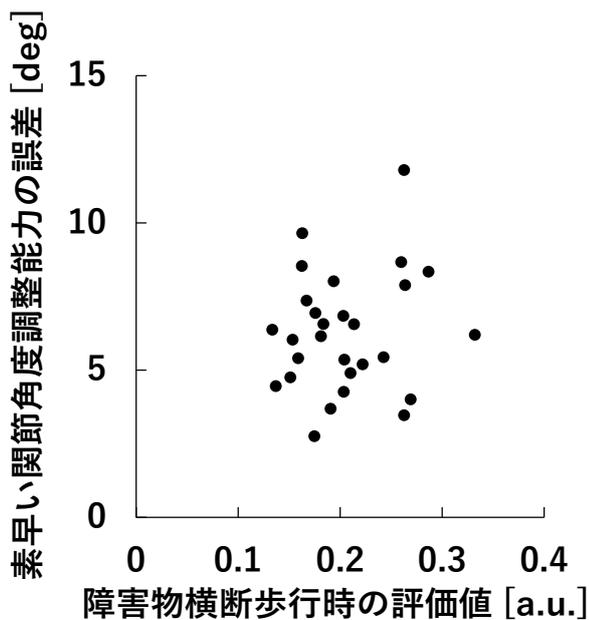


図5 障害物横断歩行時の評価値と素早い関節角度調整能力の誤差の散布図

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

現時点では、上述の通り、本番試行 10 試行分をすべて採用して、評価値としている。その結果、2 つの相関関係は、いずれも有意ではなかった。対象者本人としては失敗したと思われる試行であっても、そこも含めて評価することで、その対象者の正確性等を総合的に評価できるのではないか、という考えに基づき、現時点ではこのようなアプローチを取っている。しかしながら、10 試行分の平均値として考えた場合に、1 回の失敗試行を含めるか含めないかは、それなりの影響を持つことを意味する。とりわけ、失敗の幅・大きさによっては、平均値に対する影響が非常に大きくなってしまいうリスクが存在する。これらのメリット・デメリットを踏まえ、まずは、何回分の平均値を評価値として採用するのが妥当か、データに基づいて再度検討する。そして、採用する試行数が変わった時に、今回報告した結果とどのように変わるか確認する。その際、結果を恣意的に解釈するのではなく、客観的に「失敗試行」と見なすための統計手法を用いるよう留意する。

最終的に得られた結果に関しては、国内学会大会での発表を予定している。また、その結果に左右される部分もあるが、国際学術誌への掲載可能性を見出すことができれば、投稿に向け、論文執筆を進める。

【参考文献】

- ・厚生労働省 (2018). 公的介護保険制度の現状と今後の役割. <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-12300000-Roukenkyoku/0000213177.pdf>.
- ・Mademli, L., & Arampatzis, A. (2014). Lower safety factor for old adults during walking at preferred velocity. *Age*, 36, 1359-1365.
- ・川上治, 加藤雄一郎, & 太田壽城. (2006). 高齢者における転倒・骨折の疫学と予防. *日本老年医学会雑誌*, 43(1), 7-18.
- ・Chantanachai, T., Taylor, M. E., Lord, S. R., Menant, J., Delbaere, K., Sachdev, P. S., ... & Sturnieks, D. L. (2022). Risk factors for falls in community-dwelling older people with mild cognitive impairment: a prospective one-year study. *PeerJ*, 10, e13484.
- ・大久保街亜, 田中嘉彦, 鳥山理恵, & 石川健太. (2022). 日本語版ウォータールー利き足質問紙の作成. *心理学研究*, 93(3), 240-248.

動的状況下におけるアキレス腱力学特性の非侵襲計測システムの開発

生命科学科 山本 紳一郎

共同研究者

生命科学科 赤木 亮太

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

脊髄損傷者(以下,脊損者)の歩行機能回復訓練には股関節可動域増大と下肢求心性入力(アキレス腱等からの反射中枢入力)が重要な要素であると提唱されている(Dietz ら, J. Appl Physiol 2004). 股関節可動域は容易に計測可能であるが, アキレス腱力学特性は簡易的には計測できない. なぜならアキレス腱は力発揮により複雑に形状変化し, 力学特性が単純でないため, 容易に計測できないのである. もし安価で非侵襲かつ簡易的にアキレス腱力学特性を歩行や立位姿勢訓練や歩行訓練等の動的な状態で評価できれば, 様々な運動機能障害者の訓練時の免荷量や強度を処方するための有益な計測が可能となり, 画期的な研究となる. まさに挑戦的研究といえる. 一方, 一般にアキレス腱断裂が中高年に多発するのは加齢によるアキレス腱および下腿三頭筋の力学特性, 神経生理学的特性の変化が原因とされる. しかし, その予見や予防対策の研究は少なく, アキレス腱力学特性と伸張反射感受性が簡易計測できれば, アキレス腱断裂への予防対策の一助になる.

筆者らは, これまで基盤研究Bで進めてきた免荷式歩行訓練システムの開発を行ってきた. 本研究課題の挑戦が成功すればそのシステムを発展させる内容である. 免荷式歩行訓練の処方決定する指標となるアキレス腱力学特性を簡易的に計測できるデバイスの開発が最終目標である. しかしながら, アキレス腱の

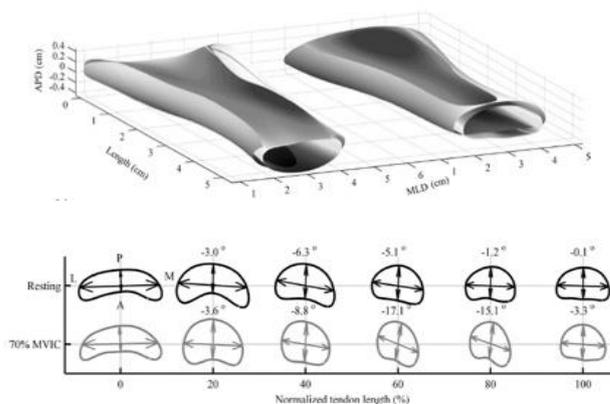


図1 力発揮時のアキレス腱の形状変化 Obst et al(J Appl Physiol 2014)

力学特性計測には困難な問題が多く, 他の研究グループの先行研究もほとんどないのが現状である(唯一 1990 年代 Komi らのみ). アキレス腱にセンサを埋め込んだ侵襲的研究は 1990 年代に Komi らが提案した. 彼らは皮膚表面からの簡易的計測デバイスの開発も試みたが, 結果として実用化できていない. したがって, 申請者が提案する非侵襲かつ簡易的にアキレス腱の力学的特性を高い精度で計測できるデバイスは, 未だに実用できておらず, 極めて新規性が高く, 挑戦的・萌芽的な研究課題であるといえる. 軟組織の皮膚表面から腱の力学特性をどの程度正確に推定できるかという点が挑戦的課題であると思われる. そこで本研究課題では, 最新の超音波画像診断装置における計測と動的シミュレーションである有限要素解析を用いてアキレス腱長変位や硬度等の較正值を精密に推定計測できるよ

うにすることから、張力、縦弾性係数(ヤング率)、横弾性係数、スティフネスやポアソン比等のアキレス腱力学特性を推定できる簡易的非侵襲計測デバイスの開発が可能なのではないかと考えた。また、筆者らは免荷式歩行訓練システムの開発を進めている経緯から、このアキレス腱力学特性計測デバイスを開発中の免荷式歩行訓練システム(図2)に組み込むことを最終的な挑戦目標としたい。



図2 基盤研究 B で開発を進めてきた免荷式歩行訓練システム

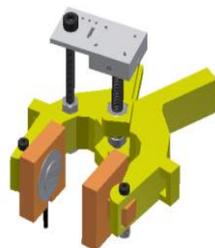


図3 アキレス腱力学的特性計測デバイス全体図(当初案)

2. 研究計画

初年度にはアキレス腱力学特性計測デバイスの詳細設計と強度評価を実施し、試作機を製作する。アキレス腱は運動時にはほぼ常に力発揮され、前頁図1のように複雑な形状変化を呈している。そのため力学特性を詳細に推定するには困難を極める。簡易的にアキレス腱を皮膚表面から挟み、微小な腱幅変化や反力を計測するデバイスを製作し(図3:当初案)、それらのパラメータから力学的特性を推定することを試みる。

初年度前期の動的シミュレーション結果による検討からアクチュエータ配置案をもとに詳細設計し、装具部製作に着手し、初年度後半には試作機を完成させる。次年度後半には、歩行訓練システムにアキレス腱力学特性計測デバイスを組み込み、健常若年者で安全性を十分に確認した後、アキレス腱断裂の恐れがある力学特性が異なる中高年者に対する臨床評価実験を実施したい。将来的には脊損者や片麻痺者等の運動機能障害者への適用を目指したい。

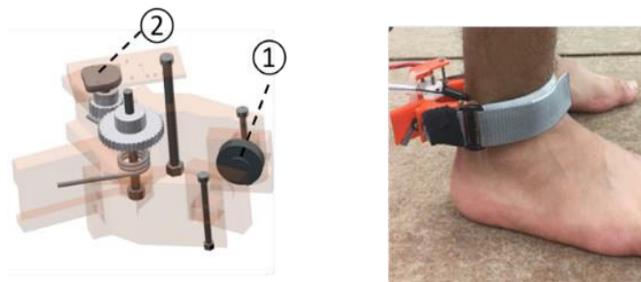


図4 試作したアキレス腱機械的特性計測デバイス

3. 計画の進行状況と今後の計画

本研究課題は、科研費(挑戦的研究(萌芽))に応募した内容であり、2年間の研究期間で申請している。本プロジェクト研究課題では、研究としての見通しを得るために、初年度に計画されていた内容をあらかじめ進めた。そこで、まずはアキレス腱力学特性計測デバイスの詳細設計と強度評価を実施し、試作機を製作した。製作した試作機を図4に示した。

試作機の評価実験を実施した。対象者はアキレス腱に疾患歴のない健常成人男性11名(年齢: 22.1[year], 身長 169.5±6.8[cm], 体重 67.5±10.0[kg])であった。開発した計測デバイスをアキレス腱遊離腱部に装着し、歩行、歩行路上に設置された路上に設置された3枚のフォースプレートフォースプレートを各々1歩ずつ踏むように指示した。被検者の歩行動作を計測するために、左右の第三中足骨、外顆、踵骨隆起、膝関節のために、左右の第三中足骨、外顆、踵骨隆起、膝関節中心に

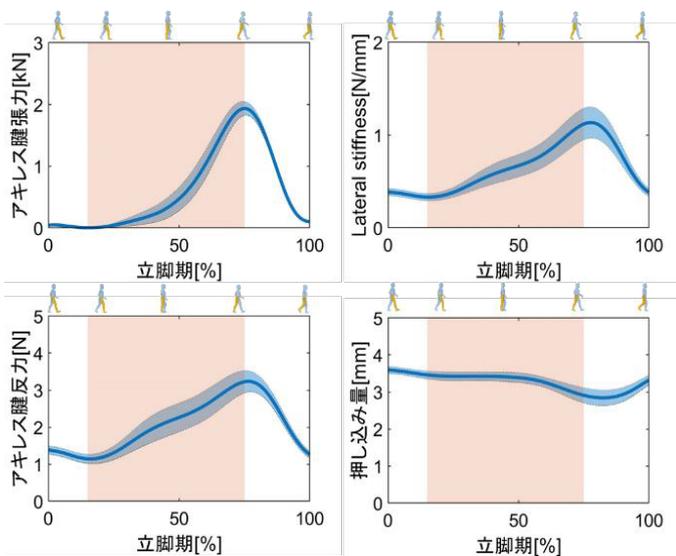


図5 各計測パラメータの典型波形

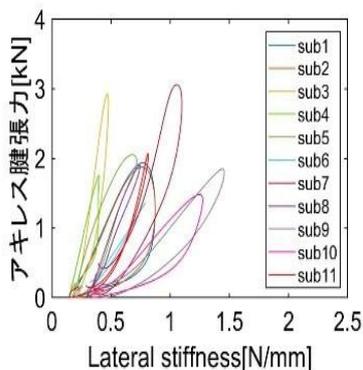


図6 計測デバイスから得られた Lateral Stiffness と ATF との関係

中心に計測 8 個の個の反射マーカを配置し、3次元動作解析システム（MAC3D, MotionAnalysis社）によって計測した。

本計測では、立脚期のアキレス腱の張力（ATF）、横弾性係数（Lateral stiffness）、反力、押し込み量を計測した（図5）。蹴り出し期において、全パラメータでピーク値に到達した。立脚期中期の範囲（薄橙色）において、ATFは増加した。それに伴い、非侵襲型計測デバイスで計測した反力は増加、押し込み量は減少した。反力と押し込み量の変化の影響を受けたことから Lateral stiffness は増加した。これらは、ATF と Lateral stiffness の関係性において材料力学的性質の考えである幾何剛性を示唆する結果となった。

図6には全対象者の ATF-Lateral stiffness の単回帰分析の結果を示した。対象者ごとの線形回帰式を求め、算出した決定係数は $r^2=0.899 \pm 0.114$ (Range : 0.603 ~ 0.987) と高い決定係数を示した。しかし、対象者間において回帰式のばらつきがみられた。ATF-Lateral stiffness には時計回りのヒステリシスループが存在し、アキレス腱が粘弾性という先行研究を支持する結果となった。

今後の展望として、科研費・挑戦的研究（萌芽）採択に向けたアプローチを検討する必要がある。試作した計測デバイスでは、個人間のバラツキが非常に大きいため、汎用性のあるデバイスとしては使用できないことが判明した。したがって、どのように汎用性のある計測デバイスとして成立させるか何らかのブレークスルーが今後の大きな課題である。ブレークスルーできる見込みのある提案をできれば挑戦的研究として魅力ある申請ができるのではないかとと思われる。また、これまでは脊損者等の障害者の歩行訓練システムの開発の一環として提案してきたが、さらに多くのニーズが見込まれる中高年者のアキレス腱断裂の予防対策という切り口で提案していくことも今後の一つの取り組みであると思われる。したがって、今後は中高年者のアキレス腱断裂対策を踏まえて、アキレス腱断裂を起こしやすい年齢層と若年層との比較検討を実施していきたい。

4. 学会、論文等投稿・発表状況

- 1) 宮田朋実, 山本紳一郎：非侵襲型アキレス腱張力計測デバイスの開発：第31回ライフサポート学会フロンティア講演会：東京大学 本郷キャンパス：2022.3.7-8
- 2) 吉崎文崇, 赤木亮太, 山本紳一郎：非侵襲型計測デバイスを用いた歩行中におけるアキレス腱力学的特性の推定：第30回ライフサポート学会フロンティア講演会：東京都市大学 世田谷キャンパス：

2021. 3. 9

- 3) Fumitaka Yoshizaki, Shin-ichiroh Yamamoto:
Development of Achilles tendon force
measurement device -Lateral mechanical
properties of the Achilles tendon-, 42th
Annual International Conference of the IEEE
Engineering in Medicine and Biology
Society, Montreal, Canada, 2020.7.21
- 4) Fumitaka Yoshizaki, Yoshiyuki Shibata,
Shin-ichiroh Yamamoto,: Study on
Morphological Change of Achilles Tendon
for Development of Achilles Tendon Force
Measuring Device ,The 14th South East
Asian Technical University Consortium
(SEATUC) Symposium, Thailand, 2020.2.27
- 5) 吉崎文崇, 赤木亮太, 山本紳一郎：非侵襲型計測デバイスを用いた歩行中におけるアキレス腱力学的特性の推定：第30回ライフサポート学会フロンティア講演会：東京都市大学 世田谷キャンパス：2020. 3. 9
- 6) 吉崎文崇, 山本紳一郎：非侵襲計測デバイスを用いた歩行中のアキレス腱張力の推定：日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2020：芝浦工業大学 大宮キャンパス：2020. 12. 12

細胞の画像分類手法を用いた バイオマテリアルの炎症性予測

生命科学科 中村 奈緒子

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

炎症反応には免疫細胞の一つであるマクロファージが関わっている。これまでに、マクロファージは炎症促進型の M1 型、炎症抑制型の M2 型の表現型に可逆的に分極することが明らかになっている¹⁾。これは微小環境が発生する様々なシグナルがマクロファージに伝達し表現型を決定させると考えられている。マクロファージの分極の評価には免疫染色や PCR 法などが用いられているが、いずれも侵襲的であり、同サンプルでの経時的な観察は不可能である。一方、各表現型は形状が異なることが報告²⁾されており、形状の違いによって表現型の識別が可能であると考えられるが、細胞面積や円周などは細胞間のばらつきが大きく、識別するための閾値を設定することは困難である。そこで、特徴量を検出できる AI 技術の導入により各表現型の画像分類ができると考えた。非侵襲的な細胞画像の取得法としては、位相差顕微鏡が最も一般的である。本研究では、細胞の位相差画像データセットによる機械学習を行い、マクロファージの新たな分極評価法を開発することを目的とした。

2. 研究計画

細胞の画像分類手法を用いたバイオマテリアルの炎症性予測の確立のため、以下の①②

の検討項目を実施した。研究協力者として修士 2 年生 1 名が本研究の一部に参画し、修士論文のための研究テーマとした。

① マクロファージの分極

マクロファージ J774A.1 を DMEM 培地で培養した。分極誘導因子として、LPS を 100 ng/mL と IFN- γ を 20 ng/mL を加えて M1 型に、IL-4 を 20 ng/mL 加えて M2 型に分極誘導した。RT-PCR 法および免疫染色にて分極を評価した。RT-PCR のプライマーには M1 型マーカーとして IL-1 β 、iNOS を、M2 マーカーとして Arg-1、MRC-1 を用い、ハウスキーピング遺伝子には GAPDH を使用した。免疫染色には抗 iNOS 抗体および抗 CD206 抗体を用いた。位相差顕微鏡を使用して対物レンズ 20 倍の位相差画像を取得した。

② データセットの作成と機械学習

個々の細胞を輪郭でトリミングして 150 pixel の正方形の別画像に張り付けることで、機械学習のデータセットに使用する画像を作成した。別画像は細胞輪郭周辺の輝度値を元に選択した(Figure 1)。AI はニューラルネットワークの 1 つである Alexnet を採用した。すべての細胞が分極誘導通りに分極したと仮定してデータセットを作成した。

初めにトリミングした細胞画像データ全てを使用し機械学習を行った。次に、データセ

ットに使用する細胞画像を選抜して再度機械学習を行った。本研究では、形状変化を伴う細胞分裂の影響を除くため、真円度 0.8 未満、面積 1500 pixel 以上の細胞画像を選抜しデータセットを作成し、機械学習を行い、正解率を評価した。このシステムの有用性の評価のため、M1/M2 への分極因子添加後のマクロファージの表現型を経時的に評価した。2 時間ごとに計 20 時間、ランダムに選んだ細胞 5 つを手動で追跡し、表現型の識別及び予測値を評価した。

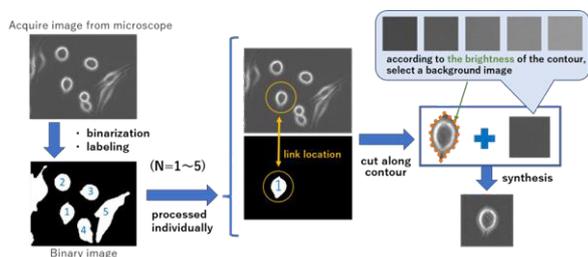


Figure 1 Flow of cell contour trimming by labeling

3. 計画の進行状況

① マクロファージの分極

各表現型に分極誘導した細胞の画像では、細胞画像では M1 型がやや円形状、M2 型はやや紡錘型の形状をしていた (Figure 2). RT-PCR では各表現型のマーカー遺伝子が各表現型に特異的に発現していた (Figure 3). この結果は先行研究の結果と一致しており、M1/M2 型に分極誘導できていることが確認できた³⁾. 免疫染色では、M1 型マーカーである iNOS は M1 で強く発現していることを確認できた。一方、CD206 は、すべての条件で染色されていたことから非特異的な反応が起きていたと考えられた (Figure 4)。

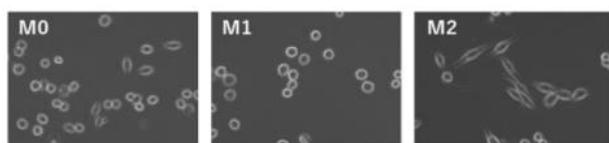


Figure 2 Phase contrast images of each phenotype

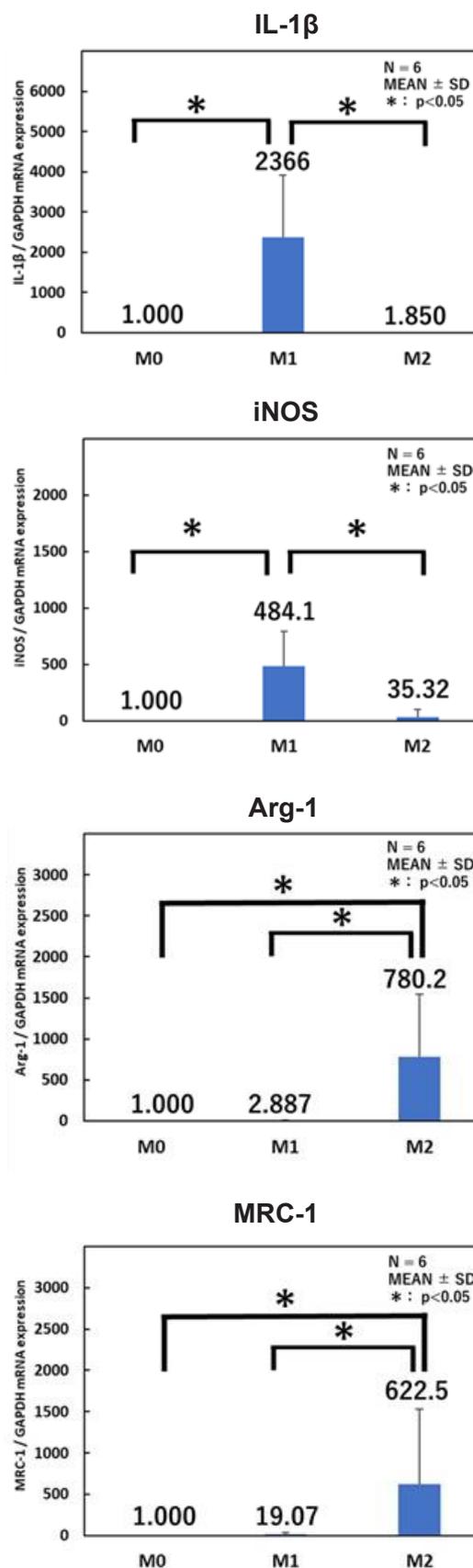


Figure 3 Expression of M1 and M2-type genetic markers

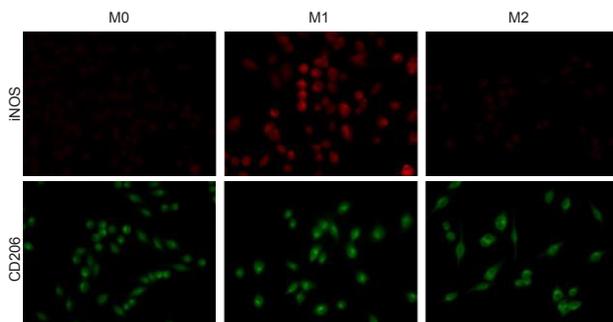


Figure 4 Immunofluorescent staining

② データセットの作成と機械学習

全ての細胞画像を使用したデータセットでは正解率が平均 60 % に対し、細胞分裂前後の画像を除くと正解率は平均 82 % に向上した (Table 1). 正解率の内訳は M1/M2 型の組み合わせでは高かったが、M0 型を含む場合はやや低かった。これは、分極誘導していない M0 型が活発な形状変化をしていることが原因だと考えられる (Figure 5).

Table 1 Accuracy

	N	1	2	3	Average
Accuracy [%]	All cells	63	65	53	60
	selected cells	86	80	81	82

上記で作成したシステムを利用して表現型の経時的評価を行った。M1/M2 の分極因子添加細胞は、20 時間後には高い予測値で分極誘導通りの表現型であると識別された。しかし、全ての分極誘導条件において分裂期の細胞を M1 型マクロファージと誤識別してしまった。これは同様の円形細胞として同カテゴリーと識別したと考えられる。そのため、M1 型マクロファージと分裂期の細胞を区別するため、分裂期の細胞も 1 つのカテゴリーとしてデータセットを作成し、再度機械学習を行った (Figure 6). その結果、分裂期の細胞は高精度で識別出来ていた。

データセット作成の際に、画像データの増加に伴う精度向上は見込めなかったが、面積と真円度データを元にデータセットから分裂

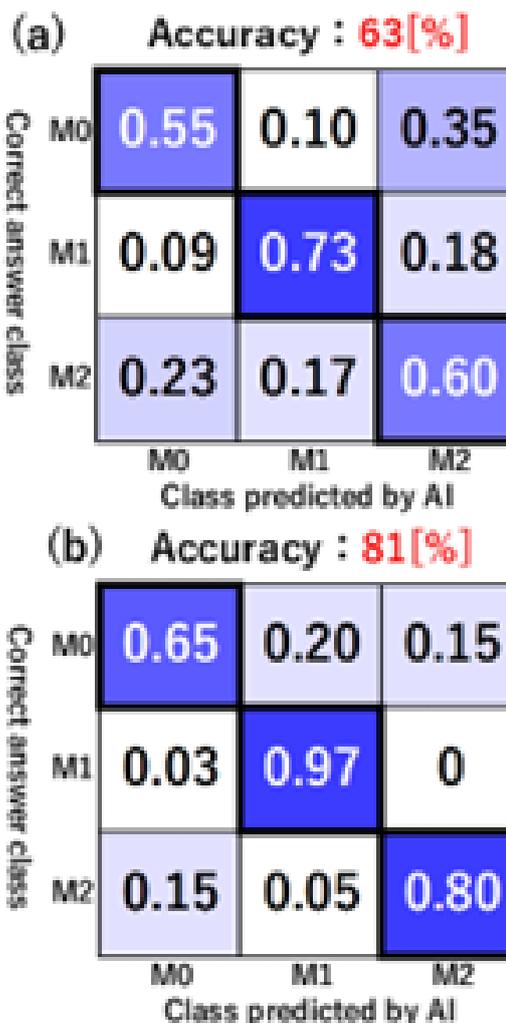


Figure 5 Matrix illustration (a) Before removal of mitotic cells (b) After removal of mitotic cells

前後 1 時間の細胞除去することで、表現型の識別精度が向上した。有用性評価においても、M1/M2 型のマクロファージ及び分裂期の細胞は高精度で識別出来ていた。本研究で構築したシステムでマクロファージの分極を経時的に評価をできることが示唆された。

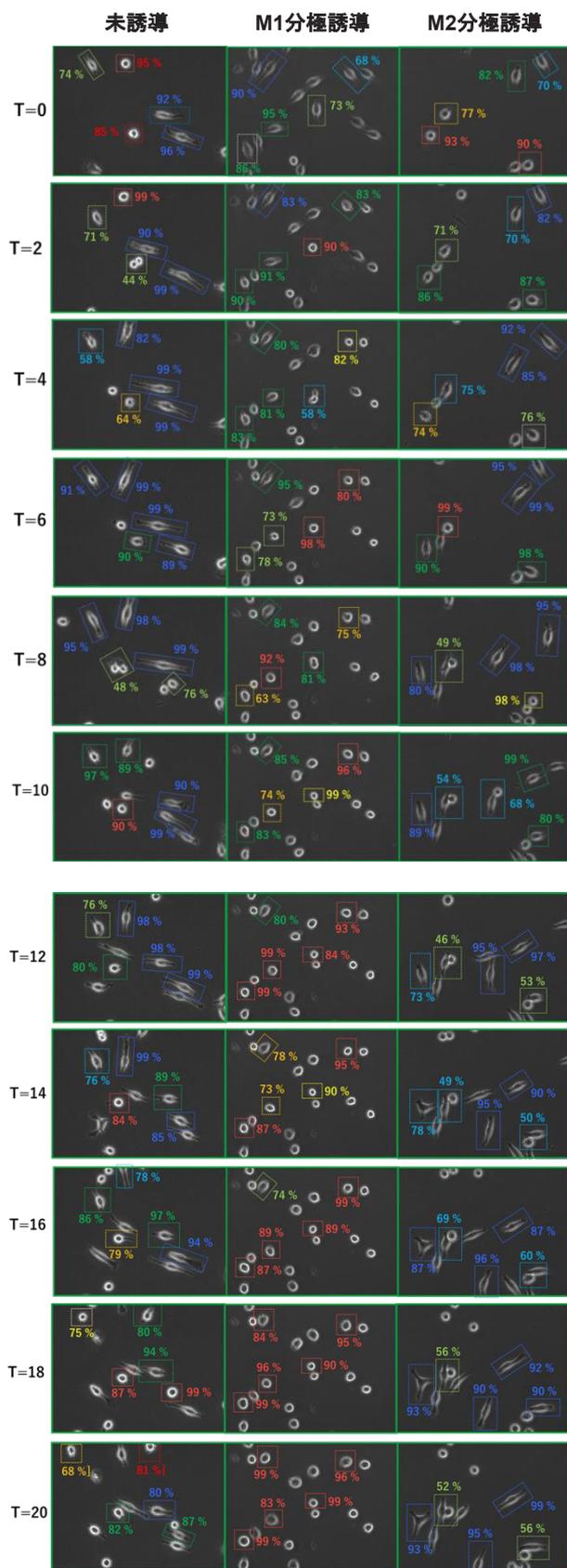


Figure 6 System usefulness evaluation

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

4-1. 今後の計画

本成果について論文投稿を行う。また、細胞の動きの情報である移動軌跡データを取得し、データセットとして用いて機械学習を実施する。これにより細胞の動き情報からの表現型の分類を試みる。

4-2. 学会発表状況

- 樋口亮平, 木村剛, 中村奈緒子, 細胞形状によるマクロファージの分極評価法の開発, 第 61 回日本生体医工学会大会, 6 月 28-30 日, 2022 (口頭)
- 中村奈緒子, 樋口亮平, 木村剛, 機械学習による位相差顕微鏡画像を用いたマクロファージの表現型識別, 第 60 回日本人工臓器学会大会, 11 月 3-5 日, 2022 (ポスター)
- 樋口亮平, 木村剛, 中村奈緒子, 細胞画像を用いた経時的なマクロファージの分極評価法の開発, 第 44 回日本バイオマテリアル学会大会, 11 月 21-22 日, 2022 (ポスター)
- Ryohei HIGUCHI, Tsuyoshi KIMURA, Naoko NAKAMURA, Evaluation of macrophage phenotypes over time by image based machine learning, The 7th International Symposium on Biomedical Engineering (ISBE2022), 11 月 25 日, 2022 (口頭)

参考文献

- Sica, A. et al, Cellular and Molecular Life Sciences, 2015, 72(21), 4111-4126.
- Rostam, H. et al, Cell, 2016, 400, 500
- Kartikasari, N, et al. Acta Biomaterialia, 2022, 137, 316-330.

繰り返し荷重を受けたマグネシウム合金管の腐食挙動

デザイン工学科 吉原 正一郎

1. はじめに

現在、医療業界でマグネシウムは生体への優れた適合性や分解性から、生体吸収性ステントの材料として期待されている。生体吸収性金属材料には、患部の治療速度に合わせて安全に劣化する腐食速度が求められる¹⁾。しかし、マグネシウムは耐食性に劣るため、腐食挙動を調査する必要がある¹⁾。また、生体内で留置された後、心臓の拍動、呼吸、歩行などの日常生活に伴う繰返し応力が負荷される。そこで、本研究ではひずみを付与しない試験片および引張-圧縮繰返し応力を付与した純マグネシウム試験片の腐食浸漬試験を行い、質量損失量の算出および材料の組織観察から腐食挙動を調査した。

さらに、腐食の抑制には各々の腐食因子を考慮した材料の機能向上やステントの形状設計が必要である。実際にステント形状において、腐食促進の要因となり得る液体の流動による壁面せん断応力(Wall Shear Stress:WSS)、およびステント拡張時に生じる応力・ひずみに着目した。WSSの低減を目指したステント形状において、解析と実験の比較を行うことによって、流体解析を用いた形状設計の有用性を評価した。また、WSSの抑制を目指したモデルからストラット形状を変化させることにより、ステント拡張時の応力・ひずみの低減を検討した。

2. 研究計画・研究進行状況

以下に、2項目、繰り返し荷重を受けたマグネシウム合金の腐食試験の結果と流動腐食試験の結果を示す。

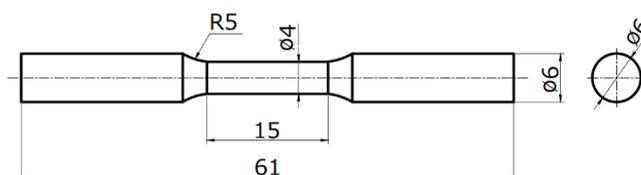


Fig. 1 Pure magnesium test material

2.1 繰り返し荷重を受けたマグネシウム合金管の腐食

2.1.1 実験装置および実験条件

(1) 供試材

Fig. 1 に繰返し試験の試験片寸法を示す。比較対象として、ひずみを与えず、熱処理加工のみを施した試験片を用意した。本稿では、これを「無加工材」と呼称する。ø6[mm]の純マグネシウム熱間押出丸棒に対し、旋盤加工を用いて加工を施した。その後、試験片の平行部を耐水研磨紙で2000番まで研磨した。

(2) 熱処理試験

Table 1 に熱処理加工時に設定した温度6条件を示す。試験片を電気炉に入れて、所定の温度まで急速に上昇させ、所定の温度を1時間保持した後、炉冷した。

(3) 材料試験

Table 2 に繰返し応力を付与した試験の試験条件を示す。荷重の大きさには、圧縮降伏応力の値を基に20[MPa]を設定した。

(4) 腐食浸漬試験

前段階として腐食浸漬試験前の試験片を秤量した後、腐食液として0.9(mass%)NaCl水溶液を作成し、24時間浸漬させた。腐食浸漬試験後は乾燥させ再度秤量した。上記の手順で、全ての試験片の腐食浸漬試験前後の質量を計

測し、質量損失量を以下の式を用いて算出した。

$$\text{Mass loss} = (W_0 - W) / S \quad (1)$$

ここで、 W_0 は試験片の初期質量、 W は浸漬後の質量、 S は腐食前の試験片の表面積である。

(5) 組織観察

無加工材および繰返し応力を付与した試験片の円柱側面部を鏡面磨きした後、光学顕微鏡を用いて結晶粒の観察を行った。

Table 1 Annealing conditions for pure magnesium.

Annealing time[h]	0	1				
Temperature[K]	Without annealing proces	473	513	573	613	673

Table 2 Tension-Compression cyclic stress conditions.

Stress ratio	-1
Environment	atmosphere
Frequency[Hz]	20
Number of times	2×10^6
Tensile stress[MPa]	20
Compressive stress[MPa]	20

2.1.2 腐食浸漬試験結果

Fig. 2に無加工材および繰返し応力を付与した試験片の質量損失量を示す。熱処理なしおよび513Kを除いた熱処理温度において、無加工材よりも繰返し応力を付与した試験片の方が、質量損失量が減少した。熱処理温度別で比較すると、無加工材および繰返し応力を付与した試験片は、熱処理なしおよび513Kで質量損失量が最も減少し、673Kで最も増加した。また、573K以上において急激な増加傾向を示した。熱処理に伴う回復-再結晶-粒成

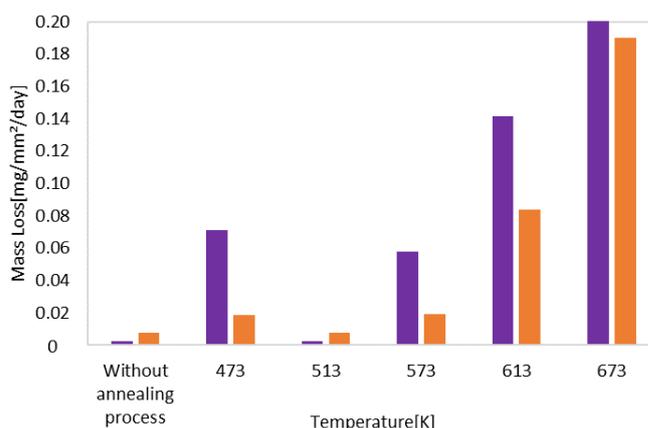


Fig. 2 Mass loss of pure magnesium with cyclic stress and unprocessed after 24[h] immersion test.

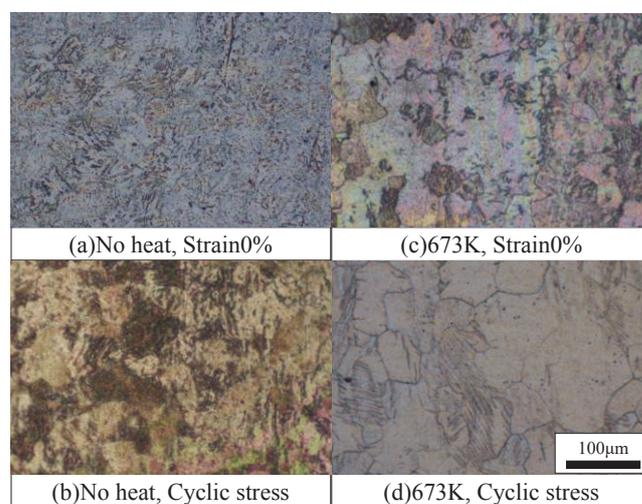


Fig. 3 Observation of pure magnesium.

長や繰返し応力の付与により結晶粒径が変化する。以下、結晶粒径が耐食性に影響を及ぼす要因の一つであると推察し、組織観察結果から比較検討を行った。

(1) 引張-圧縮繰返し応力を付与した試験片の腐食挙動

Fig. 3に熱処理なしと673Kで熱処理を施した、無加工材および繰返し応力を付与した試験片の組織を示す。

(2) 繰返し応力付与による腐食挙動

Fig. 3より、熱処理なしの(a)無加工材と(b)繰返し応力、熱処理温度673Kの(c)無加工材と(d)繰返し応力をそれぞれ比較した。繰返し応力を付与した場合には粒内の一部にレンズ状の変形双晶のような模様が見られた。本

研究で使用したマグネシウムは最密六方構造であり、常温付近では底面すべりが最も生じやすく、次に双晶変形が活動しやすい。従って、繰返し応力下において、変形初期は底面すべりが生じる。しかし、隣接する結晶粒から変形の拘束を受けるために部分的に応力集中が発生する²⁾。大橋らによって、最密六方構造を有する金属材料では発生した応力集中部を緩和するために、双晶変形が生じると報告されている³⁾。以上より、繰返し応力を付与した試験片には一部に変形双晶が見られたと考えられる。双晶変形が生じた材料は、変形時に双晶変形された領域とされなかった領域の結晶方位が大きく異なり、その領域間の境が粒界と同等の働きを持つため、結晶粒が微細化される⁴⁾。従って、繰返し応力を付与した試験片は、無加工材と比較して結晶粒が微細化されたため、耐食性が向上したと考えられる。

(3) 熱処理による腐食挙動

Fig. 3 より、無加工材の(a)熱処理なしと(c)673K、繰返し応力を付与した試験片の(b)熱処理なしと(d)673K をそれぞれ比較した。無加工材および繰返し応力において、673Kで結晶粒が粗大化した。これは、高温領域での熱処理により粒成長が生じたためと考えられる。前節の腐食浸漬試験結果より、粒成長が生じたとされる温度では、熱処理による結晶粒の粗大化が耐食性に大きく影響を与えた可能性があると思われる。一方で、熱処理なしの結晶粒径は形状にばらつきがあるが非常に細かい。また、513Kでは再結晶が起こったことで、小径な結晶粒が増加したと考えられる。従って、熱処理なしおよび513Kでは結晶粒が微細化したために、耐食性が向上した可能性があると思われる。

2.2 流動腐食試験

2.2.1 実験装置および実験条件

Fig. 4 にステント供試材の形状および実験

装置を、Table 3 に実験条件を示す。供試材はZM21 マグネシウム合金管材(外径 $\phi 2.0\text{mm}$ 、内径 $\phi 1.6\text{mm}$) からレーザー加工により形状を得た。Model (a)は比較的単純な網目状の形状、Model (b)は流体解析によりWSS低減を目指して設計された形状である。チューブ内において、バルーンカテーテルを用いてステントの外径を初期外径 $\phi 2.0\text{mm}$ からチューブ内径 $\phi 2.38\text{mm}$ となるまで拡張し、留置した。腐食液はヒトの冠状動脈における血液を考慮した条件値とし、送液用ポンプにより一定の流速で流動させた。腐食後、ステント表面を観察し、流体解析におけるWSS分布との比較を行った。

2.2.2 実験結果および考察

Fig. 5 に表面観察の箇所を、Fig. 6 に流体解析におけるWSS分布とステントの腐食面を示す。流体解析では、WSS分布は流入口において[A]の領域で高い値を示し、流出口では流入口に比べて低い値を示した。ステントの腐食面では、流入口において[B]に示す箇所で腐食生成物の剥離が見られたが、流出口では特にModel (b)において金属表面の露出は見られず、全体が腐食生成物に覆われていた。流入口における[A]と[B]の箇所は類似しており、流動する腐食液により生じたWSSが腐食生成物の剥離に寄与したと考えられる。腐食生成物は腐食液に対する防護被膜として機能するため、その剥離はマグネシウムの腐食を促進させる。流体解析を用いてWSSを低減させるステント形状を設計することは、腐食の抑制に対して有効な手法であることが示唆された。

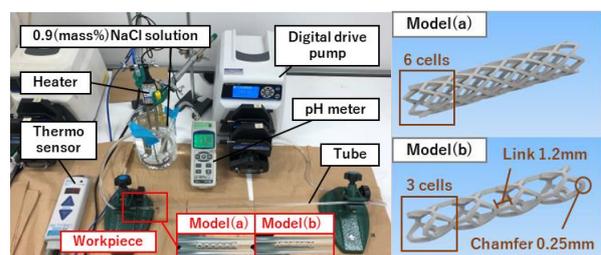


Fig.4 Stent models and flow

Table 3 Experimental conditions on flow area.

Solvent solution	0.9(mass%) NaCl solution
Temperature [°C]	37
Fluid volume [mL]	1000
Viscosity [mPa · s]	2.9
Flow velocity [m/s]	1.32
Time [h]	1.0



Fig. 5 Observation area of each stent models.

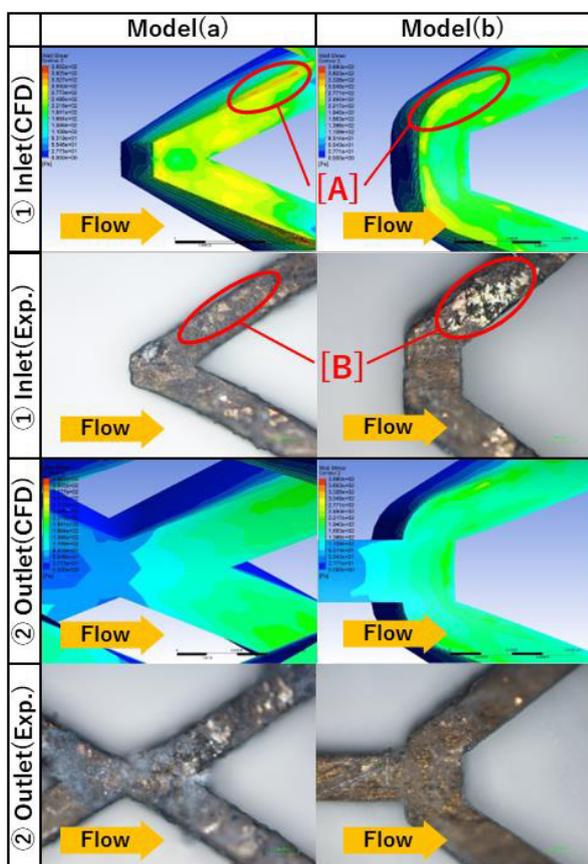


Fig. 6 CFD analysis results and corroded surface of Model (a) and Model (b).

3. まとめ

(1) 繰返し応力を付与した試験片では、レンズ状の変形双晶が見られたため耐食性が向上した。

(2) 熱処理なし及び 513K の熱処理温度において、結晶粒の微細化により耐食性が向上し

た。

(3) 熱処理温度 673K で結晶粒が粗大化し、熱処理の影響を大きく受けたため、耐食性が低下した。

(4) ステント形状において WSS の分布と腐食生成物の付着状態には相関が見られ、流体解析による形状設計は腐食の抑制に対して有用な手法であると考えられる。

(5) Model(c) が有する曲線形状のストラットは、ステント拡張時に生じる応力・ひずみを低減および等分布化させることが可能である。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

当該プロジェクトに関する研究成果発表として、国内会議として軽金属学会主催の講演会で 3 件、国際会議として日本機械学会主催の講演会 1 件、査読付き論文として、*Metals* に下記の題目で 1 件投稿中、「Influence of both shear stress in flow and tensile stress by expanding on corrosion state of magnesium alloy mesh tubes」、また、同雑誌に 1 件投稿準備中、「Influence of stress and annealing conditions on corrosion behavior of pure magnesium」である。今後の研究計画として、材料の結晶方位による腐食挙動について研究を進める予定であり、1 件の国際会議を予定している。

謝 辞

本研究は本学プロジェクト研究助成を受けて遂行でき、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 廣本祥子：まてりあ, 56-2, (2017), 62-69.
- 2) 小池淳一, 宮村剛夫：軽金属, 54-11, (2004), 460-464.
- 3) 大橋鉄也, 深尾亮太, 伊藤陽介, 眞山剛：日本機械学会論文集 A 編, 76-764, (2010), 367-369.
- 4) 吉永日出男：軽金属, 59-8, (2009), 450-457.

超砥粒ホイール砥粒層の弾性係数に基づく 研削加工技術向上に向けたデータベースの構築

デザイン工学科 澤 武一

1. はじめに

次世代パワーデバイス材料(ダイヤモンド, SiC, GaN など)をはじめ航空機・自動車・エネルギー関連の構造材料は一層難削化する一方, 需要増と国際競争力強化のための加工能率向上と加工コスト低減は国内製造業の大きな課題である. このような背景のもと, 研削加工においては WA 砥石や GC 砥石の普通研削砥石から耐摩耗性と高熱伝導率が優位な CBN やダイヤモンドを砥粒とする超砥粒ホイールへの移行が望ましい. しかし, 超砥粒ホイールはツルージング, ドレッシングが難しいこと, 砥粒層の機械的性質(特に弾性係数)と研削性能の関係が明確でないこと, 砥粒層の品質が安定していないこと(砥粒が均一分散でなく偏りがあること)などを主因として発売されて久しいが十分に普及しているとはいえない. ツルージング・ドレッシングに着目した場合, 放電やレーザ, 超音波など様々な方法が考案・開発されているが, 一般的に多用されているのは普通砥石を使用した方法である. 普通砥石を用いたツルージング・ドレッシングは原始的な方法である一方, 手軽で汎用性が高い. しかし, 生産現場では経験則に基づいた条件で行われているのが実情で, ツルージング・ドレッシング能率や精度が高いとは言えず, 超砥粒ホイールの普及を阻害している要因の一つといえる. そして, これは普通砥石の機械的性質(特に巨視的硬さ)と超砥粒ホイール砥粒層の機械的性質と

の関係に基づいたツルージング・ドレッシング特性に関する報告がなく, 両者の基本的性質に基づいた体系的な研究報告とデータベースが構築されていないことに起因している. そこで本研究では段取り時間(非加工時間)短縮による加工コスト低減およびドレッシングインターバル, 加工品質の安定化を目的として, 超砥粒ホイールのツルージング・ドレッシングに着目し, ツルージング・ドレッシング砥石の巨視的硬さおよび機械的性質と超砥粒ホイール砥粒層の機械的性質の関係について実験的に検討し, 超砥粒ホイールのツルージング・ドレッシングの適正化を図ることを目指す.

2. 砥粒層の縦弾性係数の導出

試作した表面波計測装置を超砥粒ホイールの砥粒層に取り付け, 砥粒層の縦弾性係数の導出を試みた. 本実験に供したホイールは SDC140N100B, CB140N125B, MD140N50M の3種類である. ビトリファイドボンドは有気孔であるためポアソン比および密度の算出が困難であったため, 本実験では無気孔の砥粒層について検討した. なお, 縦弾性係数の導出には砥粒層のポアソン比と密度が必要であるが, ポアソン比は便宜上, レジノイド砥粒層は 0.2, メタルボンド砥粒層は 0.3 とした. 密度は超砥粒はダイヤモンドと CBN の値を, 結合剤はレジノイドボンドはベークライトの値, メタルボンドは青銅の値をそれぞれ

れ使用し、無気孔なので超砥粒と結合剤のコンセンレーション（有率割合）から比例計算して求めた。表 1 に、実験で使用したホイールの砥粒層のポアソン比と密度を示す。

図 1 に、表面波から導出した縦弾性係数を示す。図に示すように、表面波から導出した縦弾性係数は SDC140N100B では 43GPa、CB140N125B では 55Gpa、MD140N50M では 631GPa であった。一般に、レジノイドボンドホイール砥粒層の縦弾性係数は約 20~50Gpa、メタルボンドホイール砥粒層の縦弾性係数は約 100~150GPa といわれている。このため、今回表面波から導出した縦弾性係数はダイヤモンド、CBN とともにレジノイドボンドホイールでは妥当な値といえるが、メタルボンドホイールでは一般的な値と大きな差異が生じた。これはメタルボンドホイールの砥粒層の密度が適当な値ではなかったことが主因と考えられる。本手法によって超砥粒ホイールの砥粒層の正しい縦弾性係数を導出するためには砥粒層のポアソン比と密度を既知にすることが必要であり、この点においては今後の課題である。

3. ツルーイング実験

図 2 に立形ロータリツルーイング法の概略図を、表 2 にツルーイング条件を示す。本実験では横軸角テーブル形平面研削盤を使用し、CBN ホイールのツルーイングを行った。ツルーイング砥石として 6 種類の普通砥石を用意し、4 種類は粒度以外の結合度、集中度、結合剤を統一した。本実験は各 2 回実施し、再現性を確認している。

図 3 に、各種ツルーイング砥石によるツルーイング能率の違いを示す。図から、WA および GC とともに粒度が小さい # 80 においてツルーイング能率が高いことがわかる。そして、WA80G7V と GC80G7V を比較すると、WA80G7V が GC80G7V よりも若干ではある

表 1 砥粒層のポアソン比と密度

	Poisson's ratio	Density kg/cm ³
SDC140N100B	0.2	1.85
CBN140N125B	0.2	1.98
MD140N50M	0.3	8.28

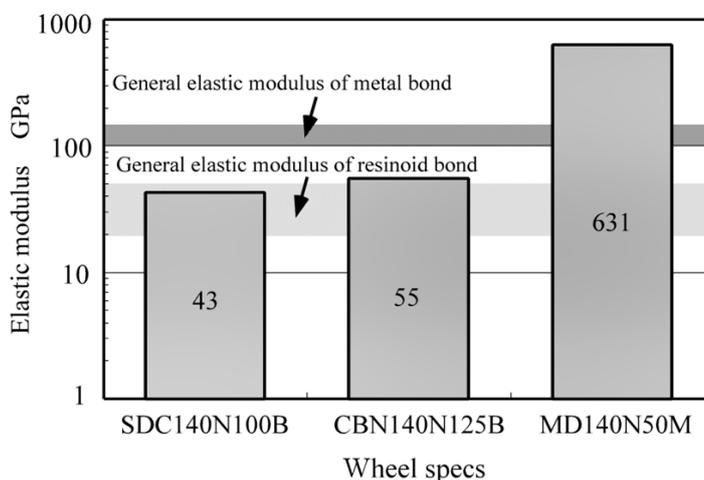


図 1 表面波から導出した縦弾性係数

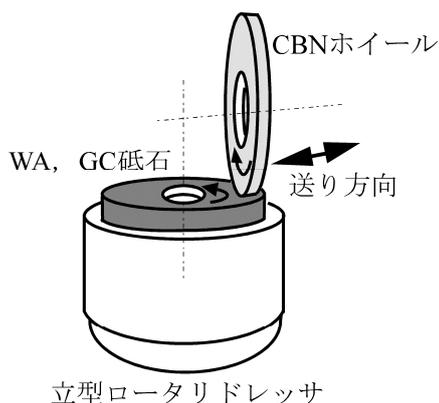


図 2 立形ロータリドレッシングの概略図

表 2 ツルーイング条件

超砥粒ホイール	CBN200N100B
ツルーイング用研削砥石	WA80G7V
	WA220G7V
	GC80G7V
	GC220G7V
	WA240H9V
	C280G9V
ホイール, 研削砥石周速	20m/s
1パスあたりの切込み深さ	5μm
切込み条件	片端切込み
送り速度	969mm/min
研削油剤	ソリューブルタイプ 40倍希釈
流量	0.7ℓ/min

がツルーイング能率が高いことがわかる。つまり、粒度が低い砥石では、砥粒が軟らかいWAがツルーイング能率が高いといえる。

次に、WA220G7VとGC220G7Vを比較すると、GC220G7VがWA220G7Vよりもツルーイング能率が高いことがわかる。すなわち、粒度が高い砥石では、砥粒が硬いGCがツルーイング能率が高いといえる。これらの結果から、粒度によってGCとWAのツルーイング能率が逆転し、ツルーイング能率が砥粒の硬さのみに起因するのではないことが確認できる。従来、普通砥石を使用したツルーイング能率は砥粒の硬さに依存すると言われており、GCがWAよりも高いと言われていたが本実験結果から一概にそうではないことが確認できる。また、参考として実施したWA240H9VとC280G9Vを比較すると、WAがツルーイング能率がわずかに高くなっている。

図4に、キスラー動力計を用いてツルーイング中の抵抗を測定した結果を、図4に研削盤の主軸モータに接続した微小電流計によってツルーイング中の消費電力を測定した結果をそれぞれ示す。本図から、法線抵抗はツルーイング砥石の除去体積が増加すると全体的に上昇することがわかる。これはツルーイングが進行するとともにCBNホイールが真円になるため、CBNホイールとツルーイング砥石の接触が大きくなることに起因すると考えられる。また、図3に示したツルーイング能率の結果と比較すると、法線抵抗が大きいほどツルーイング能率が高

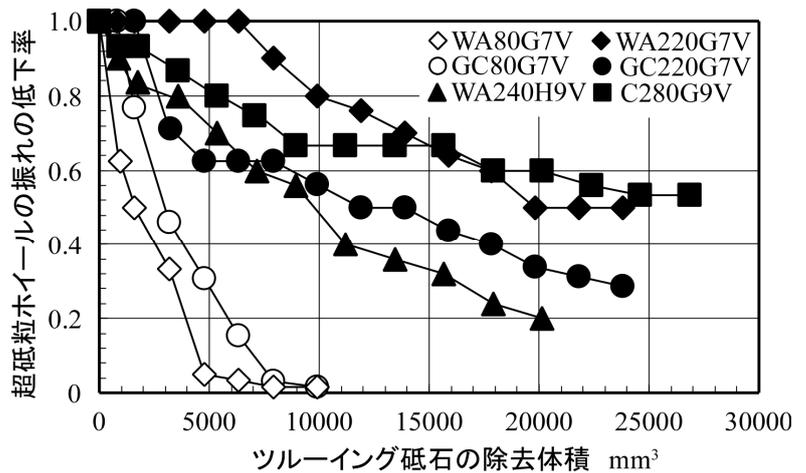


図3 各種ツルーイング砥石によるツルーイング能率の違い

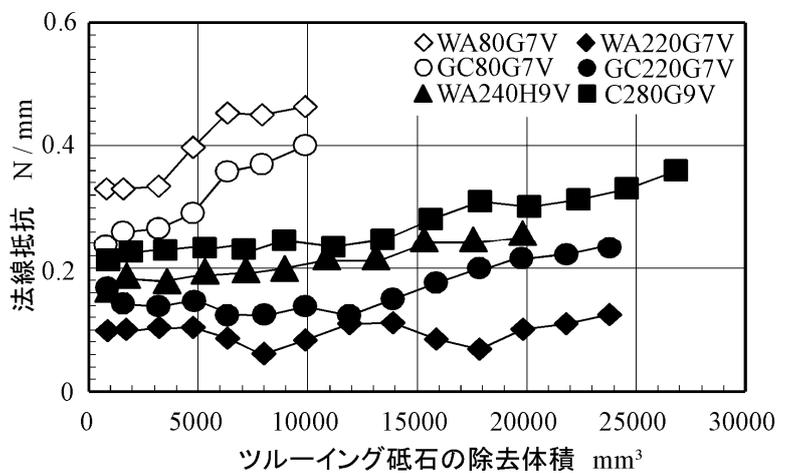


図4 各種ツルーイング砥石による法線抵抗の違い

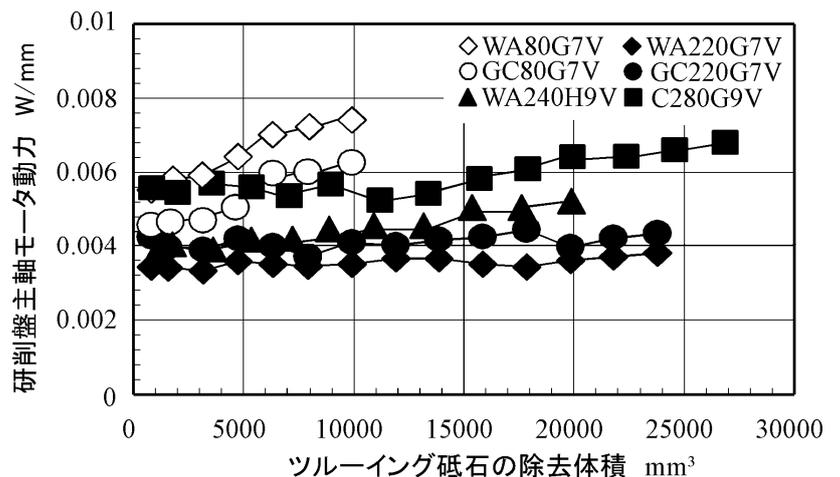


図5 各種ツルーイング砥石による主軸モータ動力の違い

くなる傾向にあることがわかる。また、図5に示す研削盤主軸モータ動力計も図3と同じように、研削盤主軸モータ動力が大きいほど

ツルーイング能率が高い傾向を示すことが確認できる。ただし、本実験では普通研削砥石の巨視的な硬さとの関係性については言及できていない。

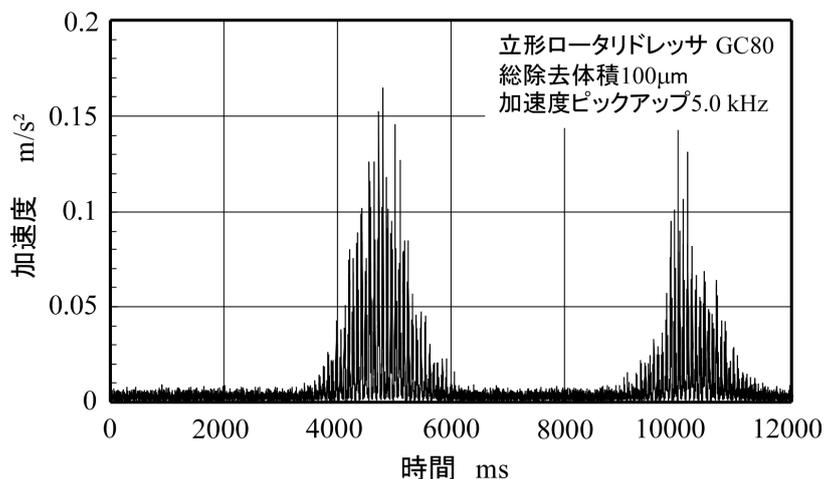
立形ロータリドレッサを使用した場合のツルーイング能率を考えた場合、普通砥石の砥粒の硬さだけでなく、曲げ強さ（粘り強さ）や縦弾性係数などの機械的性質に基づく検討が必要であり、さらに言えば、超砥粒ホイール砥粒層の機械的性質とも関連して体系的に調査することが重要と考える。超砥粒ホイールのツルーイング・ドレッシングの適正化を図るため今後引き続き研究を進めたいと考えている。が困難であるため、比較対象以外の仕様を同一にできていない場合があるが本実験の主目的は表面波の特性を知ることであるためこの点は予了承いたきたい。

4. ツルーイング作業完了の新しい判別手法の検討

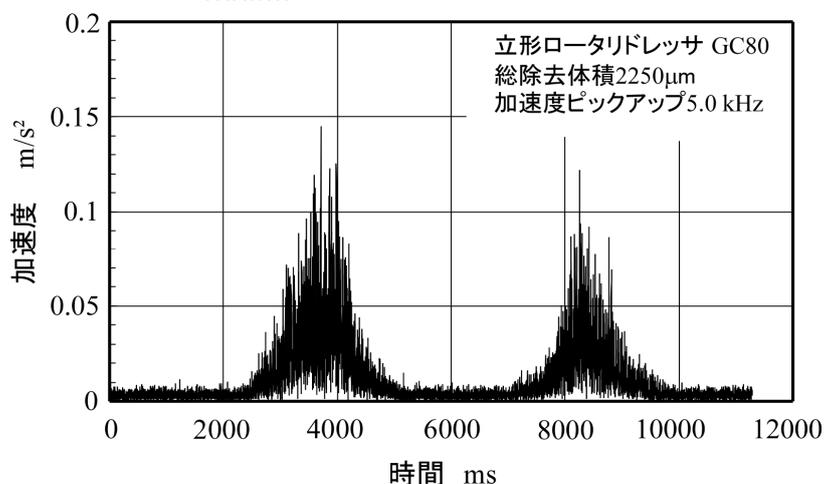
図 6 に、ツルーイング初期と終期における加速度センサの測定結果を短時間フーリエ変換 (STFT) したものを示す。加速度センサは研削盤の主軸頭上部に取り付けた。図中、山になっている箇所が CBN ホイールと普通砥石が接触していることを示している。図から、ツルーイング初期と終期では加速度信号の密度が異なることがわかる。本実験結果は一例であり、今後詳細な検討が必要であるが、このように加速度をはじめとする各種信号を計測・解析することにより、ツルーイング作業完了の判別ができる可能性があるといえる。

5. おわりに

本研究では、超砥粒ホイールのツルーイング・ドレッシングの適正化を図ることを目的



(a) ツルーイング初期：総研削量 100μm



(b) ツルーイング終期：総研削量 2250μm

図 6 ツルーイング初期と終期における 加速度ピックアップの STFT

として、CBN ホイールを各種普通砥石でツルーイングした場合の各種信号を計測した。以下に得られた結果を示す。

(1) ツルーイング用研削砥石の粒度が低い場合は砥粒が軟らかい WA が、粒度が高い場合は砥粒が硬い GC がツルーイング能率が高くなる。

(2) ツルーイング中の研削抵抗、研削盤主軸のモータ動力とツルーイング能率には一定の関係性がある。ただし、本実験では普通研削砥石の巨視的な硬さとの関係性については言及できていない。

(3) ツルーイング作業完了は主軸頭に取り付けた加速度センサの短時間フーリエ変換 (STFT) で判定できる可能性がある。

新旧市街地から成る都心まちづくりの手法に関する研究

建築学科 志村 秀明

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

東京といった大都市は、「都市再生緊急整備地域」の指定などにより、市街地再開発が進んでいるが、戦前の街並みを残す歴史的市街地はまだ僅かに残っている。そのような歴史的市街地では、歴史や文化的価値、近隣コミュニティの存在といったことから保全を求める声が高まっている。またこれらの市街地は観光といった観点からも価値があるとされ、また未来に向けた環境や人に優しい持続的なまちづくりの実現のためにも貴重だとされている。しかしながら、規制緩和を中心とする都市計画などにより、特に都心部ではタワーマンションなどへの再開発が各所で進んで深刻な状況であり、市民と自治体、専門家、NPO、民間企業が連携するまちづくりの方法は見出されていない。

ところで研究代表者は、都心の中央区佃や月島、また江東区豊洲、墨田区向島などのまちづくりに深く関わり、また各地で活動している研究者や市民と「東京歴史文化まちづくり連携」(以下:まちづくり連携)を立ち上げ、市民と自治体、専門家、NPO、民間企業が連携する活動を進めている。

そこで本研究では、中央区佃や月島、また江東区豊洲、墨田区向島、さらに台東区谷中や千代田区神田、新宿区神楽坂、葛飾区柴又、北区千住などを研究対象地区として、市民と自治体、専門家、NPO、民間企業などと連携しながら、新旧市街地から成る都心まちづくり

の手法を構築することを目的とする。

2. 研究計画

東京といった「世界都市」では、地区に着目したきめ細かい研究に加えて、グローバルな視点に基づいて、海外でのまちづくりの状況についても明らかにし、両者を比較して考察することが必要である。そこで以下の2つから研究を進める。

① まちづくり連携のポータルサイトの開設

まちづくり連携の状況及び連携地区・団体の状況を、ヒアリング調査と文献調査により把握する。次に更に実際に開設したまちづくり連携のポータルサイトとアクセス状況を提示し、最後にポータルサイトの影響について明らかにする。

② ジェントリフィケーションの実態把握

東京都心部で見られるような歴史的市街地における再開発は、ジェントリフィケーション Gentrification（高級化）と呼ばれ、米国の大都市では、1990年代後半から見られる現象である。それがインターネットの普及等によるグローバル経済の活性化により、世界中の大都市でジェントリフィケーションが進んでいる。そこで典型的なジェントリフィケーションが進んでいる米国カリフォルニア州のロサンゼルスとサンタアナ都心部におけるジェントリフィケーションとまちづくりについて現地に赴き実態を把握する。

3. 計画の進行状況

3-1 まちづくり連携ポータルサイトの開設

1) 東京歴史文化まちづくり連携の状況

まちづくり連携の経緯を図1に示す。まちづくり連携は、2020年に開催された「キックオフフォーラム」を契機に発足した。東京都区部での歴史文化まちづくりが直面している課題を共有・整理し、解決策を共に検討・提案することを目的とした「弱い関係」からなるパートナーシップである。

次に連携地区・団体の一覧を表1に、位置を図2示す。まちづくり連携には、15地区、21団体が参加している。またまちづくり連携には組織の規約や会費がなく、コアメンバーの了承によって入会・退会が決定する。コアメンバーは、O.M.氏、S.A.氏、T.M.氏の3名であり、いずれもまちづくり連携の発足に関わった。

まちづくり連携は、コロナ禍に発足したため、オンラインでの活動が中心であり活動実績も少ない。ヒアリング調査の結果、以下の課題があることが分かった。

- ・課題1 連携活動を共有できていない
- ・課題2 連携の存在をアピールできていない
- ・課題3 連携内のつながりが少ない
- ・課題4 具体的な連携活動が少ない

また、ウェブサイトやFacebookを開設している団体は、21団体中20団体であることも分かった。

2) ポータルサイトの開設とアクセス数

ポータルサイトのトップページの構成を図3に示す。まちづくり連携が「弱い関係」であることを考慮し、トップページのみで簡素な構成とした。団体名をクリックすると、各団体のウェブサイトやFacebookへとぶ。

<https://www.machizukuri.arc.shibaura-it.ac.jp/>

表1 連携地区・団体

No.	連携地区	自治体	連携団体
1	神保町	千代田区	①千代田学・神保町研究会
2	月島・佃島	中央区	②月島長屋学校 ③佃島・月島百景
3	神楽坂	新宿区	④NPO法人 粋なまちづくり倶楽部
4	本郷	文京区	⑤認定NPO法人 街ing本郷 ⑥本郷のキオクの未来
5	根津	台東区	⑦根津まちづくりの会
6	千駄木	台東区	⑧谷根千工房
7	谷中	台東区	⑩NPO法人 たいとう歴史都市研究会
8	向島	墨田区	⑫NPO法人 向島学会 ⑬八島花文化財団 (すみだ向島EXPO)
9	品川宿	品川区	⑭旅するうなぎのねどこ
10	雑司ヶ谷	豊島区	⑮雑司ヶ谷未来遺産推進協議会
11	上池袋	豊島区	⑯かみいけ木質文化ネットワーク
12	日暮里	荒川区	⑰日暮里富士見坂を守る会
13	板橋宿	板橋区	⑱板五米店
14	千住宿	足立区	⑲千住いえまち
15	柴又	葛飾区	⑳柴又まちなみ協議会 ㉑全国路地のまち連絡協議会



図1 まちづくり連携の経緯

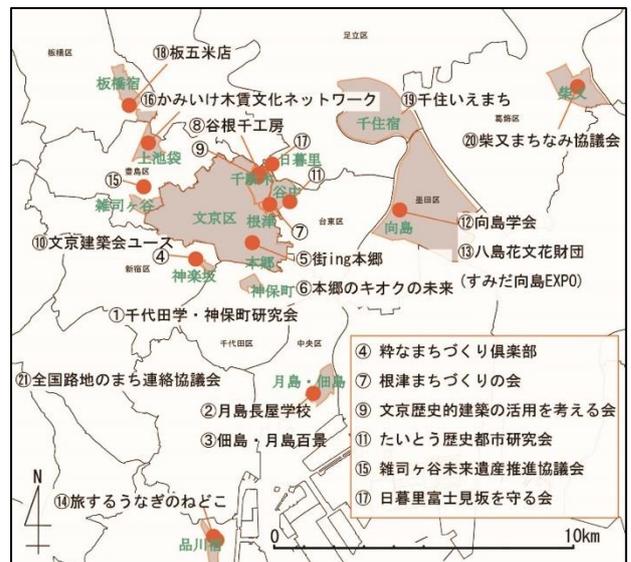


図2 連携地区・団体の位置

ポータルサイト公開日の 2022 年 11 月 5 日からの 5 週間で、総アクセス数は 272 回で、検索エンジンからのアクセスは 22 回、8%であった。ポータルサイトは、少しずつではあるが、まちづくり連携の存在を周知させつつあると言える。「課題 1 連携活動を共有できていない」を解決しつつあると言える。

3) ポータルサイトの影響

ポータルサイトの影響を図 3 に示す。

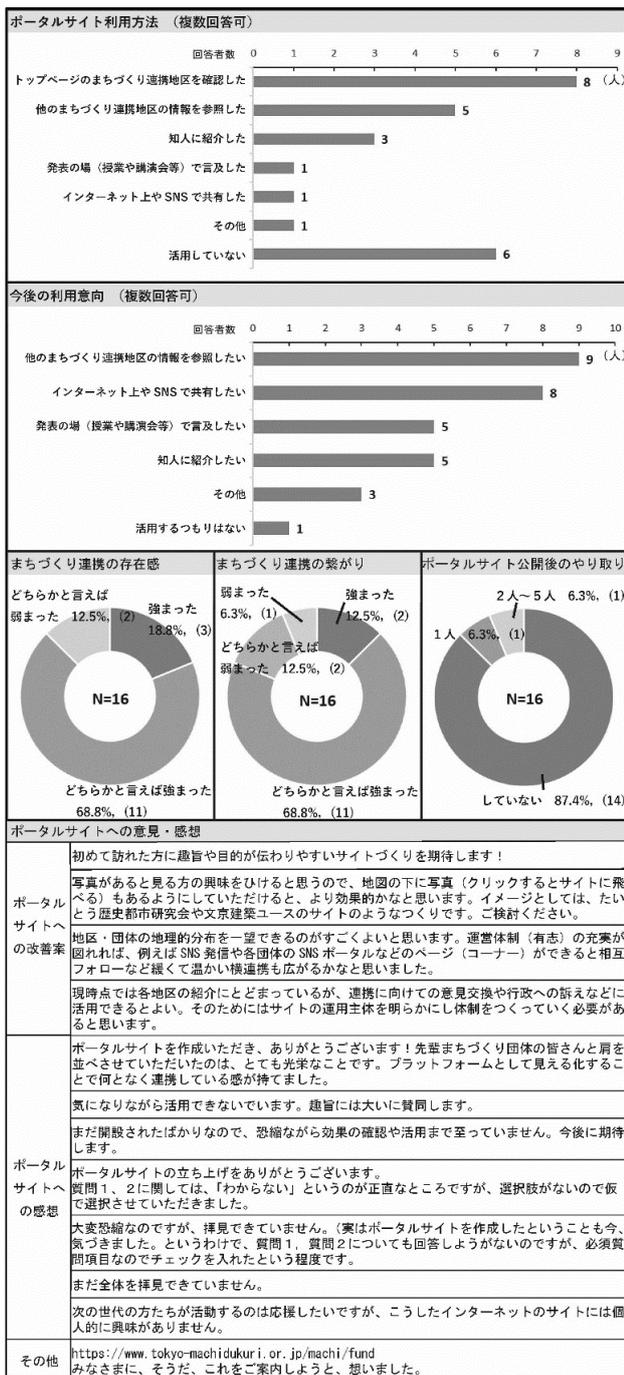


図 3 ポータルサイトの影響

ポータルサイトの利用方法では、「トップページのまちづくり連携地区を確認した」が 8 名ともっとも多く、次いで「他のまちづくり連携地区の情報を参照した」が 5 名と多かった。

今後の利用意向では、「他のまちづくり連携地区の情報を参照したい」が 9 名と最も多く、次いで「インターネット上や SNS で共有したい」が 8 名と多かった。

まちづくり連携の存在感では、「強まった」が約 2 割、「どちらかといえば強まった」が約 7 割と多かった。「課題 2 連携の存在をアピールできていない」を解決しつつあると言える。

まちづくり連携のつながりでは、「強まった」が約 1 割、「どちらかといえば強まった」が約 7 割と多かった。「課題 3 連携内のつながりが少ない」を解決しつつあると言える。

3-2 ジェントリフィケーションの実態把握

米国ロサンゼルス市の Little Tokyo とサンタアナ市ダウンタウンの現地調査とインタビュー調査を行った。

1) ロサンゼルス市 Little Tokyo

リトルトーキョーは、ユニオン駅から徒歩 15 分ほどの市中心部にありシビックセンターに隣接している。歴史的建築物が多く、日本文化を発信する店舗が集まっている (写真 1)。

インタビュー調査の結果を図 4 に示す。主な地域組織として、日本のまちづくり協議会にあたる「コミュニティ評議会 (Community Council)」に加えて、「地域開発公社 (Service Center)」がある。地域開発公社は多くの不動産を所有しており力をもっている。他にも、



LA Little Tokyo 一番街北側が、



Little Tokyo Far East Lounge は、Historic District に指定されている。Little Tokyo Service Center が所有。

写真 1 ロサンゼルス市 Little Tokyo

「歴史協会」といった3つの地域組織が存在し、相互に連携している。

一番街北側の National Historic District は、シビックセンターからの開発の波を避けるために、1986年に指定された。指定にあたり、アドボカシー団体等の支援があった。

2023年春に Metro が開業し、ユニオン駅まで一駅で行けるようになる。そのためディベロッパーが大規模再開発を計画している。

Los Angeles, Little Tokyo	
調査概要	
調査日	2023年3月2日(木)13:30~15:30, 3月4日(土)メール追加調査(Bill Watanabe)
場所	Little Tokyo Far East Lounge
対象者	Kristin Fukushima (Little Tokyo Community Council 代表) Philip Hirose (レストラン2代目) Mark Masaoka (Nikkei Progressives代表) Carrie Morita, Nikkei (Progressivesのメンバー) Bill Watanabe (Little Tokyo Community Impact Fund代表)3/4メール調査
調査結果	
Little Tokyoの主要団体	
	・Little Tokyo Community Council (リトルトーキョーコミュニティ評議会) 日本のまちづくり協議会に該当
	・Little Tokyo Service Center (LTSC) 非営利の地域開発公社(GDC)。不動産を多く所有しており、老人の孤立を避ける施設になっているFar East Loungeも所有している。歴史的建造物を改修・管理し、将来の営利目的の開発のために取り壊されないようにすることに非常に長けている。
	・Nikkei Progressives grassroots community organization ・Little Tokyo Historical Society (Little Tokyo歴史協会) ・Little Tokyo Service Center Community Impact Fund
National Historic District指定の経緯	
	シビックセンターからの開発の波を避けるために運動をして指定を得た。Los Angeles Conservancy and Community Redevelopment Agency (CRA、すでに解散)が共同で行った。Los Angeles Conservancyは、ロサンゼルス市における歴史的建築物の保存に関する強力なアドボカシー団体。CRAは、荒廃した都市部の再開発を支援するために設立され、古い建物の代替となる新築や公共スペースの建設に資金を提供する「税収増ドル」というツールを使用した。当時、Little Tokyoの人々にとって歴史的な保護活動はまだ馴染みがなかったため、このプロジェクトのほとんどは、Little Tokyoのコミュニティを代表してこの2つのグループが実施したものだ。その後、Little Tokyoコミュニティは、Little Tokyo歴史協会やLittle Tokyoコミュニティ評議会などを通じて、歴史的な保護活動により精通していった。
過去の開発との戦い	
	Little Tokyo Towersは、住民が自ら資金を出し合い、ディベロッパーによる建て替えを阻止した。Little Tokyo Community Councilも資金を出して協力した。
直面している開発	
	路面電車が開通した2003年頃に開発ラッシュがあった。日本のバブル崩壊で放置されていた空地の駐車場にApartmentがたくさん建った。路面電車Gold Lineが廃止になり、2023年春にMetroが開業する予定。Metro開通に向けて、ディベロッパーが開発しようとしている。

図4 Little Tokyo インタビュー調査結果



メキシカン向け店舗が連なっている4th StにLRTの整備が進む。4th St沿いと周辺では、高級アパートメントの建設が進む。

写真2 サンタアナ市ダウンタウン

2) サンタアナ市ダウンタウン (写真1)

ダウンタウンは、白人が郊外へ転出した跡に、移民として入ってきたメキシカンのまちとなった。LRTの整備によって、メキシカン以外を対象とする店舗が建ち並び、高級アパートメントの建設も進んでいる。サンタアナ・テナント連合会等が強力な市民活動を展開している。(図5)

3-3 まとめ

「弱い関係」からなる連携と、まちづくり協議会や地域開発公社等からなる強力な市民組織の連動が必要である。Historic Districtも市民活動が元になって指定された。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

研究はほぼ完了したため、2023年の日本建築学会大会で研究発表を行う予定である。

Santa Ana Downtown 4th Street周辺	
調査概要	
日時	2023年3月3日(金)10:30~12:30 Café Cultura (カフェ・コトラ)
場所	Idaria Rios (Tenants United Santa Ana 代表)
対象者	3月3日(金)14:00~14:30 オンライン(ZOOM) Ana Urzua (Cooperacion Santa Ana 代表) 3月3日(金)19:00~21:30 まち歩き+タコス店 Prof. Erualdo R. Gonzales (UC Irvine)
調査結果	
歴史	成立 20世紀のはじめに、ビジネスで集まった白人が建物を建てていった。1950年代から白人が郊外へでていき、ダウンタウンは空洞化した。1970年代に、空いたところにメキシコからの移民が入るようになり、メキシカンのまちができた。ダウンタウンでは、レイシーといった移民の住宅地ができていった。4th St沿いには、メキシカンドレス店等、移民のための店が建ち並びようになった。1980年代から東地区では、大地主達がメキシカンのマーケットプレイスを開発した。大地主達は、その後も主要な建物を取得して開発しようとしている。4th Stを中心としてHistoric Districtに指定されている。
近況	4th Stの南にあるArtist Villegelは、RフロリダのCreative Class論から全米各地にできていった。4th St全体で2010年代に、BID (Business Improve District) のDowntown Inc.が設立され、東地区も西地区も商業的な開発が進んでいる。しかし一部の地主に利益が集まっているとの不満から、BIDは2022年12月に解散した。大地主達は、東地区をメキシカン以外を対象とする店舗へと入れ替えようとしている。同時期から、市長がSanta Ana駅とダウンタウンを結ぶLRT(路面電車)計画を推進し始めた。
現況	4th St沿道とその周辺 LRTの整備が進んでいる。同時に、New urbanizmの考え方で、4th Stの道路空間の改善が進んでいる。Downtownでは、高級アパートメントの建設といった再開発(Forced Gentrification)が進んでいる。
レイシー(Lacy)地区等	サンタアナ・テナント連合会(Tenants United Santa Ana)は、移民が住めるようなアフォーダブル住宅を増やそうとしている。レイシー5th Stで計画されていたアパートメントでは、元々8割がアフォーダブル住宅の計画だったが、ディベロッパーと交渉して、全てをアフォーダブル住宅にすることができた。移民を大切にす革新的な市議会議員を増やしてきたことで、Grassroots movementが盛り上がり、正当な理由がなければ住民を退居させられない法制度が整備された。住民参加型の公園(Mariposa Park)づくりから、市との信頼関係ができたが、その後市の担当者から裏切られた。
その他の移民支援	サンタアナ労働協同組合(Cooperacion Santa Ana)は2018年に設立された。移民が職をもてるように、また子どもの修学を支援している。労働協同組合は、メキシコ文化センター(El Centro Cultural de Mexico = Mexico Culture Center)の活動から組織化が進んだ。

図5 Santa Ana インタビュー調査結果

種々構造形式における鉄筋コンクリート造パイルキャップの力学モデルと耐震性能評価

建築学科 岸田 慎司

1. 序論

大地震時における建築物の耐震性能は、現行の耐震基準において確保されているが、地震後の継続使用を確保する対策については確立されていない。そのため、「建築物の地震後の継続使用性」を確保した性能指向型耐震設計を構築することが必要とされている。背景として、2011年の東日本大震災において杭頭部・パイルキャップの損傷により防災拠点施設の継続使用が出来なくなった事例が挙げられる。原因として、杭頭部・パイルキャップの損傷が建物に対し軸方向変形に影響を及ぼし建物に傾斜を発生させたことが考えられる。そのため、現行基準で求められる構造性能を上回る設計や損傷を軽減できる杭基礎の開発が必要である。

既往の研究では、まだ実験の事例が少ない場所打ち杭を用いたパイルキャップの破壊性状について、および上部構造と基礎構造の接合部架構としての破壊性状について検討するため、場所打ちコンクリート杭を有したト形架構の初めての実験を行った。その際にパイルキャップ曲げ終局強度式の妥当性を確認したが、実験結果では、基礎梁の降伏に伴いパイルキャップのせん断耐力が計算値を下回り、パイルキャップが脆性的な破壊を起こしたためパイルキャップ曲げ破壊のメカニズムに関して明確ではない点が多かった。

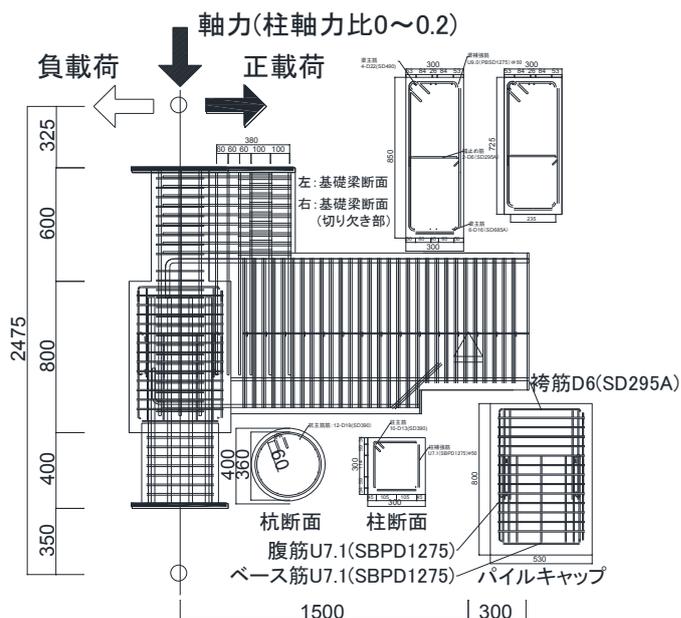


図-1 試験体 ER-1 概要

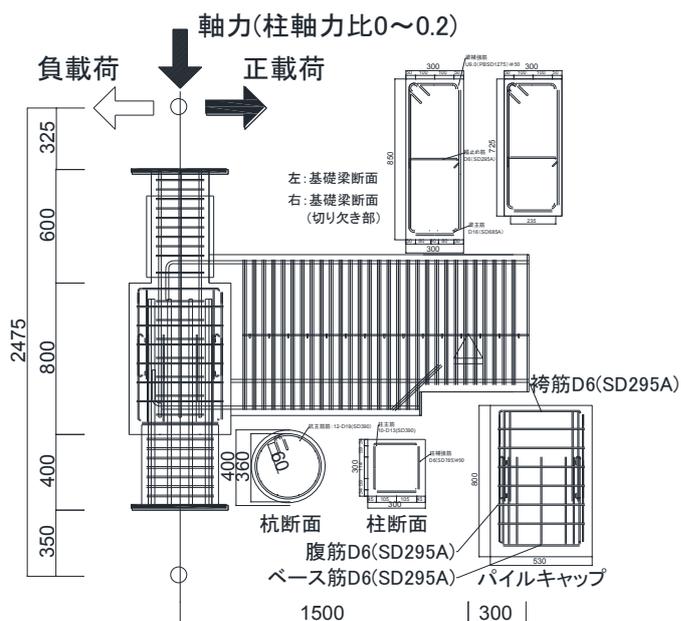


図-2 過去試験体 E-1 概要

そこで本研究では、場所打ちコンクリート杭を用いたパイルキャップの最終破壊形態が曲げ破壊となるためにモデルの再設計を行い、実験によって理論式の整合性を再検討し、場所打ち杭が杭基礎構造に与える影響を明らかにすることが目的である。

2. 研究計画

2.1 試験体概要

試験体は既往研究の試験体を参考に1体のみ作成した。図-1 に作成した試験体 ER-1 の概要を、図-2 に既往の研究で実施した試験体 E-1 の概要を示す。

試験体 ER-1 と試験体 E-1 の諸元比較を表-1 に示す。地上3階建ての鉄筋コンクリート造の側柱下におけるト形部分架構を想定して設計を行い、パイルキャップ(530×530×800mm)、基礎梁(300×850mm)、柱(300×300mm)、袖壁(150×450mm)、杭($\phi=400$)により構成された1/3スケールの試験体とした。

試験体 E-1 で起きたパイルキャップ内せん断破壊を防ぐため、試験体 ER-1 ではパイルキャップ内と柱の補強筋量を増やし鉄筋の強度も上げた。また、試験体 E-1 では柱の圧壊を防ぐために柱に鋼板を巻くことで強度を上げていたが、試験体 ER-1 では柱の曲げ強度を上げるために加え、一般的な形式である袖壁付き柱(450×150mm)とした。過去の試験体 E-1 で発生した基礎梁の降伏を防ぐために、基礎梁上端主筋を D16 から D22 へと変更し、配筋量を増やした。

表-2、表-3 に試験体 ER-1 の鉄筋とコンクリートの材料特性をそれぞれ示す。コンクリートは杭、梁とパイルキャップ、柱と袖壁の3回に分けて打設した。

2.2 载荷方法

写真-1 に加力装置を示す。加力方法は、基礎梁端をピンローラー支持、柱頭および杭脚をピン支持とし、軸力および水平力は柱頭から導入し、柱頭位置の変位における層間変形角にて制御を行い、正負交番繰り返し载荷

表-1 試験体諸元

試験体名		E-1	ER-1
想定破壊モード		(正) パイルキャップせん断破壊 (負) パイルキャップ曲げ破壊	(正) パイルキャップ曲げ破壊 (負) パイルキャップ曲げ破壊
柱軸力比		0~0.2	
コンクリート強度	柱、袖壁	60N/mm ²	50N/mm ²
	パイルキャップ、梁	30N/mm ²	
杭	杭	40N/mm ²	36N/mm ²
	$B_c \times D_c$	300×300	
柱	主筋	10-D13(SD390)	
	補強筋	D6(SD785)@50	U7.1(SBPD1275)@50
	補強筋(パイルキャップ内)	D6(SD490)@100	U7.1(SBPD1275)@50
	帯筋比 ρ_{ov}	0.42%	0.53%
袖壁	$B_w \times D_w$	450×150	
	主筋	拘束域: 4-D13(SD390) 拘束域以外: 8-D10(SD390)	
	補強筋	D10@50(SD390)	
	帯筋比 ρ_{sw}	3.80%	
基礎梁	$B_b \times D_b$	850×300	
	主筋	上端: 3-D16(SD685) 下端: 4-D16(SD685)	上端: 4-D22(SD490) 下端: 4-D16(SD685)
	補強筋	U9.0(SBPD1275)@50	
	帯筋比 ρ_{sw}	0.45%	
杭	径	$\phi 400$	
	主筋	12-D19(SD390)	
	補強筋	U9.0(SBPD1275)@50	
	帯筋比 ρ_w	0.72%	
パイルキャップ	幅×せい×高さ	530×530×800	
	筒筋	U7.1(SBPD1275)	
	ベース筋	U7.1(SBPD1275)	
	補強筋・腹筋	D6(SD295A)@100	U7.1(SBPD1275)@50
帯筋比 ρ_w	0.12%	0.30%	

表-2 鉄筋材料特性

使用部材	降伏応力度(N/mm ²)	降伏ひずみ(μ)	ヤング係数($\times 10^5$ N/mm ²)	弾性限界ひずみ(μ)	
D10(SD390) 袖壁	主筋拘束域外	424.34	2448	1.89	-
	補強筋				
D13(SD390) 柱	主筋拘束域内	410.45	2267	1.87	-
	主筋				
D16(SD685) 基礎梁	下端主筋	739.92	3649	2.10	-
D19(SD390) 杭	主筋	427.18	2601	1.79	-
D22(SD490) 基礎梁	上端主筋	549.77	3044	1.84	-
	主筋				
U7.1(SBPD1275) パイルキャップ	筒筋	1274.58	8730	1.89	6730
	ベース筋				
	補強筋				
U9.0(SBPD1275) 基礎梁	補強筋	1231.19	8804	1.81	6804
	補強筋				

表-3 コンクリート材料特性

	スランプ、フロー値(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)	外気温度(°C)	圧縮強度(N/mm ²)
杭	16.5	5.0	12.0	9.0	38.5
梁	20.0	3.2	16.0	11.0	44.0
パイルキャップ	48.0×48.0	2.9	16.0	12.0	80.7

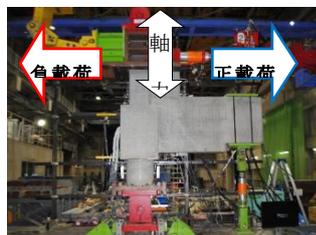


写真-1 载荷装置

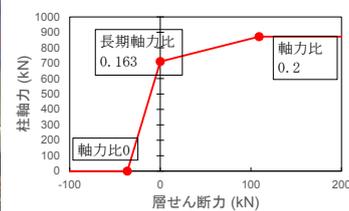


図-3 変動軸力载荷ルール

表-4 部材耐力計算結果

	軸力比	終局強度(kN)							
		袖壁付き柱		パイルキャップ		基礎梁		杭	
		曲げ	せん断	曲げ	せん断	曲げ	せん断	曲げ	せん断
正载荷	0	249.6	1143.6	72.8	199.4	173.1	594.8	202.1	426.5
負载荷	0.163	202.9	365.2	199.1	222.2	250.7	620.1	455.7	511.6
	0.2	225.6	381.8	218.1	222.2	250.7	620.1	484.4	511.6

を行った。柱と杭の反曲点位置は 2475mm, パイルキャップ芯から基礎梁反曲点位置は 1500mm である。加力時に柱頭から軸力を導入して実験を行った。軸力比は過去試験体と同様に 0~0.2 の範囲で変動させて加力を行った。図-3 に試験体 ER-1 の変動軸力载荷ルールを示す。層間変形角 R は柱頭の水平変位を柱頭加力点から杭脚支持点までの距離で除した値とした。

表-4 に試験体設計時の部材耐力計算結果を示す。軸力変動時に部材が降伏しないよう、全部材の終局強度のうちの最小値において目標軸力に達するよう、層せん断力と軸力を制御して実験を行った。軸力は軸力加圧ロードセルより測定し、層せん断力は基礎梁せん断力からモーメントの釣り合いより算出した。

3. 計画の進行状況

3.1 層せん断力—層間変形角関係

図-4 に試験体 ER-1 の層せん断力 Q—層間変形角 R の関係を表すグラフを、比較対象として図-5 に試験体 E-1 の Q-R の関係を表すグラフを示す。

試験体 ER-1 は初めに R=0.9%付近で杭の主筋が降伏した。続いて梁の下端主筋が R=1.2%で降伏し、その後 R=1.9%で正側の最大耐力に達した。次に負荷荷中 R=-1.3%で梁の上端主筋が降伏し、その後 R=-1.6%で袖壁の主筋が降伏した。次に 2 回目の R=1.5%で柱主筋が降伏し、その後負荷荷中 R=-2.5%で袖壁の補強筋が降伏し、R=-2.9%で負側の最大耐力に達した。パイルキャップにおいては袴筋、ベース筋、腹筋ともに鉄筋の降伏は見られなかった。軸力を変動させていること、ト形試験体であることから正側と負側の最大耐力が大きく異なる結果となった。

また試験体の最大耐力を過去試験体と比較すると試験体 E-1 は正側で 199.4kN, 負側で 80.5kN であるのに対し試験体 ER-1 は正側で 230.5kN, 負側で 374.3kN と耐力が大きく上昇している。既往の研究で基礎梁の上端主筋が

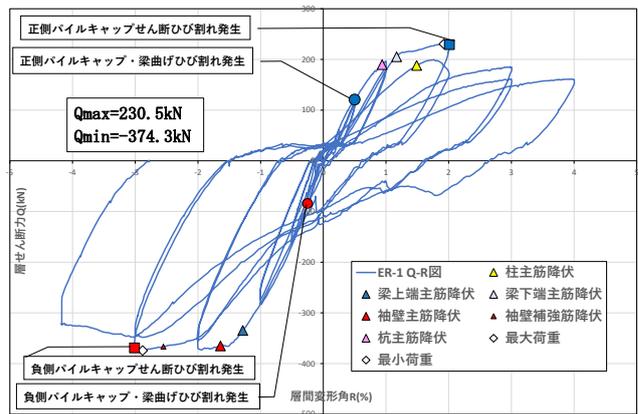


図-4 試験体 ER-1 層せん断力—層間変形角関係

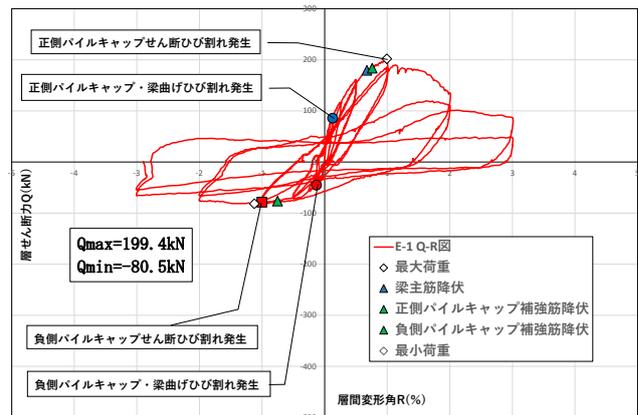


図-5 試験体 E-1 層せん断力—層間変形角関係



写真-2 最終破壊形状 (左: 基礎梁 右: 袖壁)

早期に降伏したことがパイルキャップの耐力低下に寄与したことがわかったが、上端主筋の断面を大きくし配筋量を増やしたことで、負荷荷時に基礎梁上端主筋の降伏後も層せん断力は下がることなく保持された。

また梁上端主筋降伏後に袖壁主筋が降伏し、その後の繰り返し載荷で袖壁補強筋が降伏した後に最大耐力に達していることから、試験体 E-1 と比較すると梁主筋の降伏後も袖壁が耐力を担保していたことで最大耐力が大きく

「拡張された心」概念の導入による メコン流域の物質世界の解明

建築学科 清水 郁郎

共同研究者

筑波大学大学院人間総合科学研究群 上北 恭史

東京学芸大学人文社会科学系人文科学講座 橋村 修

筑波大学芸術系 山田 協太

愛知淑徳大学交流文化学部 中村 真里絵

1. はじめに

人間が所与の自然から構築した今日のニッチ(生態的地位)の中核には、自然資源によって生み出された道具や生活財、住居がある。従来、これらの物質文化について技術的側面や物質的特性は研究されてきたが、長期に渡り人間の心性と複雑な影響を及ぼし合うという側面は十分に探求されてこなかった。

これに対して、本研究は、心や認識が身体を超えて物と接合する「拡張された心 extended mind」の作用により物と人間の不可分な関係が生まれたと仮定し、心により生み出され、心を生み出す物の世界「物質世界」として、東南アジア大陸部メコン川流域文化圏の物質文化を再構築する。

心や認識が身体を超えて物と接合する「拡張された心」に関する議論は、哲学、認知科学、考古学、人類学をまたいで進む。その議論を先導する物質関与論(MET) [Malafouris, L. How Things Shape the Mind, 2013] によれば、身体の延長として知覚される石器等の製作や使用を通して人間の思考や心は段階的に発達した。人間の思考や知覚が脳内に限定されないことは、言語や視覚能力が未完成的な乳幼児が与えられたおもちゃを通して周囲の世

界を認識しはじめることや、重い記憶障害を持った人がメモを頻繁に取りそれを見返すことで健常者に匹敵する記憶能力を持つことからわかる。また、初期人類が各地に建造した大規模モニュメントや建造物も自然への畏敬や畏怖を具現化したものであり、その後の都市化や社会の複雑化、階層化の起点には心と物の段階的な作用があったといえる。

メコン川流域社会の特徴は、河川と強く結びついた生活と多種の物、水上・杭上・高床住居、それらが構成する景観、そこで編成される屋敷地共住集団、水をめぐる信仰や儀礼である。従来の研究では、個別社会の居住文化や物質文化、生態環境の特徴は多く研究されてきたが、物と心がどう関わり、そこで河川がどのような役目を担



図 1 研究対象地の位置

ったのかという課題が残された。また、生物の生存に適した環境は所与ではなく、生物自体が生きる過程で自然と不断に関係する中で構築されることから [Ingold, T. The Perception of the Environment, 2011]、現代の心や物の変化がニッチ構築の新たな局面を引き起こしている可能性がある。

2. 研究計画



図 2 中洲島の典型的な空間構成

本研究は、研究対象地をラオス・カンボジア国境地帯に広がるメコン川の中洲多島エリア、通称シーパンドンに設定する。メコン川は東南アジア最大の国際河川で、ラオスでは隣国タイとの国境線となっている。また、ラオス最南部のカンボジアと国境を接するあたりでは川幅が百メートル以上にもなり、中洲の島には古来、多くの人々が住み着いた。河川（船着場）－集落を貫くミチー集落－森－水田という空間の構成は共通しており、その住まい方も含めて特徴的な居住文化と景観が

ある。本研究では、シーパンドンで最大の島、コーン島を中心として以下の諸点に着目しながら、研究を実施する。

- ・ 人間がいかに流域の自然資源を使い水域と親和した物質世界を生み出したか、物や住居が人間の心がいかに働きかけたのか
- ・ 「物質関与論」の対象は初期人類段階の簡単な道具類で、認知の発達の解明に重点が置かれている。そのため、住居のような大型かつ複雑な部材の集合体で、長期に渡って人間の心や世界の見方（世界観）にまで関与する物にも適用できる理論を構築する。
- ・ 河川を介した物質世界のネットワーク、流域社会の複雑化や階層化との関係、グローバル経済が浸透している現在の状況における物質世界の実態を明らかにする。

研究期間は、2023年度から数年間を予定しており、悉皆的かつ広域調査を実施する予定である。

3. 計画の進行状況

本研究課題について、2022年度は、物質世界を把握するために、ドローン、フォトグラメトリ作成用のカメラ類等を整備し、また、2023年3月9日から18日まで現地調査を実施し、現在までに以下の諸点を明らかにした。

① 物質世界の組織



図 3 メコン川流域の集落全図 (HS 村)

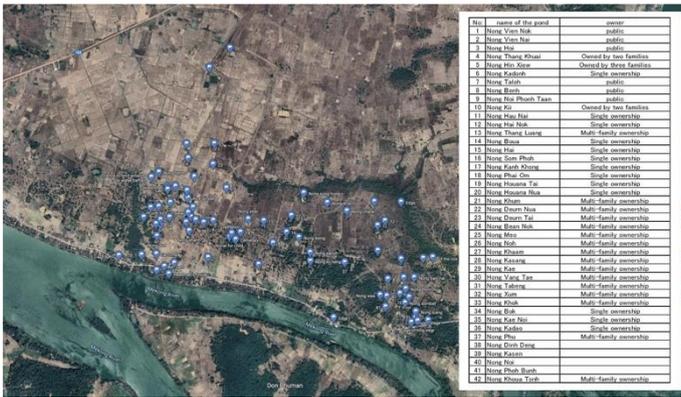


図 4 陸地に散在する池とその所有権の事例(HS村)

- ・ 河川水利用が創出する景観：もともと天水のみで農業を行っていた同地域では、水田は産米林(林の中にある水田)となっており、砂糖ヤシの森と合わせて、独特の景観を生み出している。
- ・ 自然環境と物質文化：毎年 8 月頃になるとメコン川が冠水する。人々はこの自然現象に順応するために高床式住居を建設する。河から溢れた冠水は、高床式住居の床下を流れ、内陸部の水田へと至る。水田には自然のため池が 40 以上あり、そこに河川水が留まることで、十分な水量を持つ水源となり、同時に水牛や牛の飼育場になる。河川水は地下に滞留し、乾季には人々の水源になる。
- ・ 屋敷地共有集団：資産の継承を含めた社会構造は母系で、人々は母系親族を中心とする屋敷地共住集団を形成する。この集団は、農耕や家屋建設等で協働する。
- ・ サオ・クワン(魂の柱)とメー・ナーン・

トラニー(土地神)への信仰:住居は棟を川の流れに沿って建てられるが、新築する際に最初に立てる柱サオクワンは、通常、川側の中心に位置する。この柱の足もとは石が置かれ、その場所が土地神メー・ナーン・トラニーを祀る場となる。人々は、菓子類、花(白色)、米、ろうそく、線香、水を供え、折々、ここで祈りを捧げる。

② 浄化儀礼を手掛かりとした物質世界と心の結びつきの解明

人は、生態環境との複雑な関わりに基づいて固有の世界観あるいは宇宙論的全体性に生きる。いっぽう、物質世界も、生存のための資源である生態環境から組織される。この物質世界を創出し、再生産する動力は多様だが、人間が抱き、集団で共有される宗教的概念もそのひとつである。

本研究では、このような観点から、対象地域の物質世界の組織と編成を、ピーポプ(「ポープの霊」phi pop、以下ポープ)と呼ばれる、人に災厄をなす霊的存在をめぐる諸実践に基づいて探究している。その探究の中心地は集落 N で、はじめに、N におけるポープをめぐる実践を民族誌的資料をもとに明らかにする。

総戸数 456、人口 2118 の N は、古来、ポープに憑依された人々を受容し、浄化することでその災厄を祓うことができる唯一の集落である。N には、近郊やラオス各地、首都ビエンチャンや北部のルアンパバーン、同じ文化的背景を持つ東北タイからポープに取り憑かれた人々が浄化に訪れ、そのまま帰村せずに住み着き、拡大してきたという経緯がある。

この N において、ポープという特異な霊的現象が人々にどのように認識、解釈されるのかを明らかにし、それが人々に一定の心的傾向を生じさせる様態、また、そうした認識や解釈がどのように空間的、物質的実態として

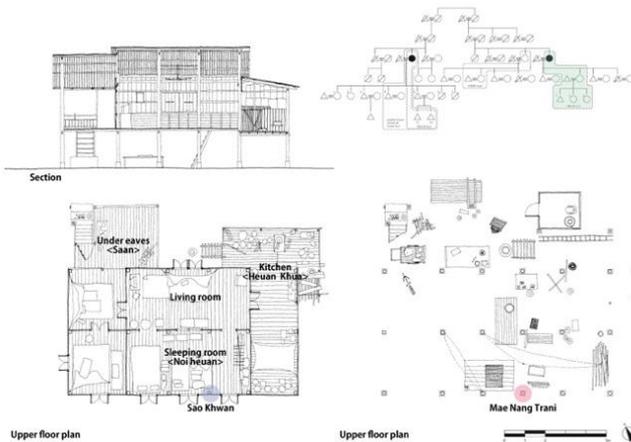


図 5 典型的な高床住居と家族構成

顕在化するのかを把握する。その上で、人々の日々の暮らしと物質世界が政治経済的諸条件と同等あるいはそれ以上にポーブの存在をめぐって組織されていることを示す。

つぎに、多島海全域の広域調査を実施し、ポーブの浄化をめぐって組織される固有の物質世界と居住空間の全体がどのように物質性と精神性を混淆しながら創出されるのかを探求する。

現在までの進捗は、ポーブの儀礼をめぐって創出される物質文化、すなわち儀礼小屋、池、メコン川、霊媒小屋や自然景観を把握し、物質文化についてはそれらの実測を行い、物質としての特性を把握した。また、霊媒と住民へのインタビュー、中洲に立地する複数の島におけるポーブに関わる場所の広域調査を実施し、儀礼的浄化行為が古来、多島エリア全域で行われており、その役職を担う霊媒が時代ごとに各島で広く出現したこと、また、浄化に関わる特定の池や島の場所が多島エリア全体に広く及んでいることを明らかにした。

これらから、多島エリア全体は同じ信仰体系によってひとつの閉じた物質世界を持っていると推察できる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、引き続き、実証的研究として科研基盤 A または B、新規理論的探究として挑戦的等にチャレンジする。また、研究成果は、日本建築学会の英文論文集、ASIAN HISTORY & CULTURE 等に投稿し、さらに 2024 年開催予定の第 15 回国際タイ学会において研究成果を報告する。

本研究の主な成果は以下になる。

論文

- 1). Patiphol Yodsurang, Yasufumi Uekita & Ikuro Shimizu. (2022). Water-Based Settlement and the Loss of Community Water Resilience. *Interiority*, Vol. 5, No. 2: 179–196.

- 2). Ikuro SHIMIZU. (2022). The New Normal in Peripheral Societies in Southeast Asia, An Attempt to Extend the Range of Focus in Architecture. *Proceedings of the 13th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA)*: 515-519.

発表

- 3). Pranom Tansukanun, Wittaya Duangthima and Ikuro Shimizu. (2022). Stronger together: The cultural landscape sustainability through the social bonds of the Mae Chaem Muang Fai system. *14th International Conference on Thai Studies*, April 29 – May 1, Kyoto
- 4). Patiphol Yodsurang, Yasufumi Uekita and Ikuro Shimizu. (2022). The Changing of Flood and Flow: River flow changing and the loss of resilient-ability in Ayutthaya, Thailand. *14th International Conference on Thai Studies*, April 29 – May 1, Kyoto
- 5). Ikuro SHIMIZU, Yasufumi UEKITA and Phisith SIHALARTH. (2022). Rethinking the Cultural Landscape after the Changes in Livelihoods. Case in Waterfront Villages in Luang Prabang and Pakse, Lao PDR. *14th International Conference on Thai Studies*, April 29 – May 1, Kyoto
- 6). Marie Nakamura, Ikuro Shimizu, Sitthixai Insisiengmay. (2022). An anthropological study of the Phi Pop purification rites and cultural landscape of a waterfront village in Southern Laos. *14th International Conference on Thai Studies*, April 29 – May 1, Kyoto
- 7). 清水郁郎. (2022). 文化的景観から霊的景観へ 水辺集落の景観研究から. 第3回景観考古学・人類学研究会景観人類学(新学術領域研究(研究領域提案型)出ユーラシアの統合的人類史学 - 文明創出メカニズムの解明). 東京都立大学

人口減少地域における建築遺産の デジタルアーカイブ化及びその活用に関する研究

建築学科 岡崎 瑠美

1. 序論

本研究は都市の衰退により人口が減少し、空家率の増加により建築遺産が解体される地域を対象に調査を行う。全ての建築遺産を維持保存することには膨大な費用や労力が伴うため限りがあるが、それらの遺産が解体される前に記録を残しデジタルアーカイブとして後世のために保存することには意義がある。

これまでは実測調査による図面の作成や写真及び映像の撮影による2次元のデータが中心に収集されてきたが、機器の低価格化や技術の発展により今後は3次元の記録も容易となる。本プロジェクトは建築を学ぶ大学生と共に低価格の機材を利用した建築遺産の3Dアーカイブ化を目指しその活用方法について検討する。

2. 研究対象地

人口減少地域の研究対象として人口は18,000人（令和2年国勢調査）の北海道余市町を選定する。平成22年から令和2年までの10年間で、人口が3,258人、割合では-15.3%と大きく減少している。空家率は全国及び北海道平均を上回り、17.1%である。[表1]

余市町は江戸時代から現在に至るまで各時代の建築遺産が残存し、中には重要文化財や史跡として登録されているものもある。その他に鯉漁で街が栄えた時代に建てられたものが残るが、近年は空家率の増加や建物の老朽化と共に解体の危機に晒されている。

[表1] 空家率の比較

対象	空家率
全国	約 13.6%
北海道	約 13.5%
余市町	約 17.1%

3. 研究の概要

本研究チームは2020年より余市町における建築遺産の調査を進めており、これまでに都市史や建築史に関する調査を行いながら残存する建築遺産を地図にプロットしてきた。

本研究では前年度までに作成したリストの中から特に重要であり調査の許可が得られた4つの建物[表2]を選定し、詳細の調査を行いながらデジタルアーカイブの作成を試みた。これらの建物は町民に詳しく知られていないものも含まれ、アーカイブを作成して可視化することにより人々に建築遺産を広く周知するとともに解体の危機に直面している状況を発信することを目的とする。

4. デジタルアーカイブの作成手法

建築遺産の調査を行うにあたり実測、インタビュー調査、写真撮影、ドローンや一眼レフカメラ、アクションカメラを利用した写真測量による3Dモデルの作成、3Dカメラの撮影、360度カメラによる撮影を行った。特に北海道における調査は雪の時期（10～4月）を避けて撮影日が選定された。人口密集地のためドローンの飛行が難しい場合は撮影棒を

〔表2〕 詳細調査対象の建造物概要

建造物名	建設年	選定理由
旧日進館	明治初期	明治期の会津藩の学校として使われ、現在も当時の部材を残している。
旧今邸	大正8年頃	余市町に現存する唯一の漁業事業家による邸宅
旧猪俣農場事務所	大正中頃	農業事務所のうち、唯一現存し、余市の実業家である猪俣家が所有した。
旧荒木家石蔵	昭和初期	漁場で使われていた石蔵が当時のまま残っているものはこの石蔵のみ。



〔図1〕旧日進館, 3Dモデル



〔図2〕旧今邸, 3Dモデル



〔図3〕旧猪俣農場事務所, 3Dモデル



〔図4〕旧荒木家石蔵, 3Dモデル

利用して建物の外観を撮影した。

空家の撮影においては建物周辺の雑草、蜂の巣、野生動物の建物内への侵入、建物の劣化、建物内の物の多さが調査を阻害する要因となった。それらを可能な限り避け調査を行った。

選定した4つの建物の3Dモデルを〔図1-4〕に示す。3Dモデルは建物のテクスチャを記録することができるため、建材の劣化状況や特徴を記録するために有効である。本研究で対象とした建物の中では石蔵のテクスチャが軟石の特徴を把握するために役立った。また旧今邸は雪の影響で一部屋根が崩壊したため、その損傷状況を正確に記録するために3Dモデルが利用された。

5. 3Dモデルを用いた図面の作成

建物外観の3Dモデルより立面図と屋根伏図を作成した。複雑な屋根の形状は地上からの実測が難しく、ドローンで撮影した写真を用いて3Dモデルを作成し、図面を作成した。調査期間が限られていたため、短時間で3Dモデルを作成するための写真を撮影し、後日研究室で3Dモデルからトレースしながら図面を作成することにより実測や図面作成に要する時間を大幅に短縮することができる。作成した図面の例として〔図5-6〕を示す。



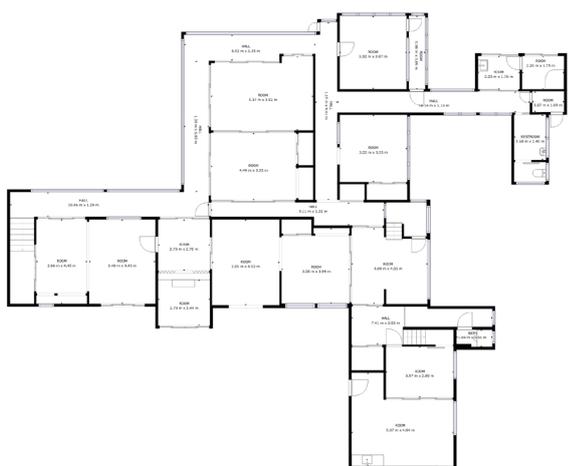
[図 5] 旧今邸, 3D モデルから作成した立面図



[図 6] 旧今邸, 3D モデルをトレースして作成した CAD の立面図



[図 7] 旧今邸, 3D カメラで建物内部を撮影



[図 8] 旧今邸, 3D カメラで撮影したデータより自動生成された平面図



[図 9] 開放記念碑, 3D モデル

6. 3D カメラによる平面図の作成

3D カメラ (Matterport Pro2 3D camera) を利用して建物内観のウォークスルー画像を作成し [図 7]、そのデータを利用して matterport 社のサービスを介して平面図を自動生成した [図 8]。自動生成された図面は襖の数が合わない等実際の空間と異なる箇所もあったが、大まかな図面を作成することができた。実測した寸法と比較したところ、数センチのずれが見られる箇所もあり、ミリ単位の精度が求められる図面を作成する場合には不向きであることが明らかとなった。

7. 3D データのプラットフォームへのアップロード

選定した 4 つの建築の 3D モデルを建築空間オンラインプラットフォームである Comony にアップロードした。[図 10] またアップロードしたデータを基に、3D アーカイブの活用に関する効果と課題について検証した。建物所有者や関係者に保存活用の現状、空間データの表現や再現度、情報公開の範囲等についてのアンケート調査を行った。結果概要を [表 3] に示す。

[表 3] アンケート結果概要

1. 建造物の保存活用の現状と意向
・ 建造物に関しては経済面や人手不足によって維持管理が難しい状況にあるという意見が多くあった。
・ 各建造物に関して歴史的価値は概ね高いと

それらを記録保存する方法についても検討が望まれる。

5. 学会、論文等投稿・発表状況

1. Kentaro Nishiyama, Yusuke Yamane, Rumi Okazaki, Creating 3D Archives of Historical Buildings: Case of Yoichi, Hokkaido, The 17th South East Asian Technical University Consortium, Feb. 2023
2. 西山健太郎, 山根祐介, 土田智也, 岡崎瑠美, 北海道余市町における建築調査 その1, 歴史的建造物の3Dアーカイブ作成, 2023年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会 2023年9月発表予定
3. 土田智也, 西山健太郎, 山根祐介, 岡崎瑠美, 北海道余市町における旧会津藩・日進館に関する研究, 2023年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会 2023年9月発表予定

6. 参考文献, URL

1. 余市町, 余市町空家等対策計画, 令和5年(2023年)3月改定
2. 余市町史編さん室, 余市町史 通史編(1~6), 余市町, 2016-2017年
3. 北海道教育委員会, 建造物緊急保存調査報告書, 1972年
4. 余市郷土史編集委員会, 余市自治発達史, 余市町教育研究所, 1993
5. 余市郷土史編集委員会, 余市農業発達史. 余市町教育研究所, 1968
6. 余市郷土史編集委員会, 余市漁業発達史, 余市町教育研究所, 1966
7. Comony (<https://comony.net/spaces>)

<p>いう意見であった。また各建造物の所有者、関係者全員が建造物は取り壊しせず、受け継ぐまた維持していきたいという意見であった。</p>
<p>2. 空間データの再現度、表現方法について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建造物の再現度は高いという評価を多く得た。 ・ 表現に関しては、周辺の植栽やモニュメントを含めたものがあると良い、また建造物だけでなく地域の歴史文化がデータ内でわかるような表現があると良いとの意見があった。
<p>3. 3Dアーカイブの情報発信、公開について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建造物の価値や現況について情報発信する意義は全体を通じて概ね高いという意見だった。 ・ 一方で私有の建造物は図面や立地を特定できる情報等は公開できないというプライバシーの問題に関する指摘もあった。



[図 10]3D 建築プラットフォーム comony のインターフェース。旧荒木家石蔵を訪問した様子。

8. 今後の計画

建築遺産の取り壊しは人口減少地域のみならず、人口が増加する都市部でも多い。都内では大型再開発プロジェクトのために街区レベルで解体される例も少なくない。建築遺産の記録はこれまで主に専門家が専門的な業務を遂行するために作成してきた側面が大きい。今後は様々な技術の台頭により多くの人々が記録を行うことができるようになり、データの利用も多様化する。新たな建築のデジタルアーカイブの作成と利用について今後も研究を継続していきたい考えである。今後は3D デジタルアーカイブの作成方法や公開方法、特にプライバシーや著作権に関する配慮について検討が必要である。

国内で空家率が増加する中、空家対策が進行するが、中には建築遺産として貴重なものも少なくない。

Application of Laser Biospeckles and Biospeckle Optical Coherence Tomography (OCT) in conjunction with deep learning algorithms for the speedy monitoring environmental effects on living things

機械工学科 Rajagopalan Umamaheswari

Hibiki Igarashi*^a, Kairi Takemura^a,
Takahiro Kono^a, Hirofumi Kadono^b, Jun Yamada^a

^aShibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, Japan

^bSaitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan

ABSTRACT

While artificial cultivation is gaining prominence due to rapid climate change, lighting costs remain challenging. Therefore, research is needed to cultivate plants more efficiently. At the same time, it has been found that a mixture of far-red light (FR) and red light (R) also promotes growth through the action of phytochrome, a photoreceptor in the plant body. However, these studies require time and damage of the plant to measure the dry mass and area of leaves, and immediate effects have not been investigated so far. Therefore, in this study, we propose laser biospeckle method to evaluate the relationship between plant growth duration and FR response. Laser biospeckles are formed by light scattered from organelles in plant tissues by laser irradiation. The intensity of these speckles changes with time, and by examining these changes, the activity inside the plant can be evaluated. Biospeckles of arugula leaves were obtained by irradiating the leaves with laser light of wavelength 852 nm and simultaneously with LED light of wavelength 735 nm (FR) and 630 nm (R). Biospeckle movies under FR and non-irradiation were recorded by a CMOS camera at 15 frames/sec for 20 seconds. From the movie, the correlation between the first frame and the subsequent frames was calculated. Experimental results showed that arugula at 1-month after seed planting showed an immediate FR response, while those at 3-month showed a sustained response. The relationship between biospeckle movement and plant growth behaviour is under investigation.

Keywords: Laser biospeckle, plant grow, photoreceptor, far red

1 INTRODUCTION

Environmental stress such as global warming, increased CO₂, drought, and acid rain are known to have a significant impact on plant growth^[1-4]. With such climate change on the rise, sustainable agriculture is expected to become difficult in terms of plant resources and food security, which is a major problem^{[5][6]}. In addition, the problem of the food supply is expected to accelerate further as the land available to grow plants safely is decreasing due to declining water supply, population growth, and climate change^[7-9].

Vertical farms (plant factories), in which plants are grown in high-rise buildings with complete control of the surrounding environment, including light, temperature, and water, have attracted attention for their ability to significantly increase

plant productivity^[10-12]. However, the cost of maintaining the environment is enormous, especially the cost related to lighting, which is one of the issues that must be solved in order to popularize vertical farms^{[13][14]}.

Currently, research is being conducted on fertilizers, improved lighting, and genetic improvement for efficient plant growth^[15-17]. Among these, research on irradiating plants with far-red light (FR) to improve growth efficiency through the action of photoreceptors has recently attracted much attention^[18-20]. However, it has been reported that the effect is higher when FR and red light are mixed than when FR alone is used due to the Emerson reaction^[21]. For example, Jin et al. reported that the addition of FR light to red and blue LEDs used in lettuce cultivation increased dry leaf weight and leaf area^[22]. Kalaitzoglou et al. reported that when FR treatments were added during tomato cultivation, mixing FR/R at a rate greater than natural light had a negative effect on growth at a young age^[23].

Since these experiments were conducted with both red and blue light, the effects of irradiating FR alone could not be verified, and since FR was irradiated while the plants were growing, immediate responses could not be observed. Furthermore, growth evaluation is based on the measurement of plant growth in terms of grass height, leaf size, and weight of cut and dried leaves, but it is difficult to observe plants in a living state, and it takes a very long time until they grow to a size that can be measured^[24].

In contrast, laser biospeckle method is a technology that enables nondestructive and non-contact evaluation of the structure of a biological objects^{[25][26]}. In the agricultural field, it has been used to evaluate the quality of fruits and vegetables^[27-29], but few studies have focused on the plant growth evaluation and environment^[30]. In fact, Hirai et al. demonstrated that the response of plants to different sound frequencies could be rapidly evaluated by laser biospeckle^[31], indicating the potential of laser biospeckles in plant monitoring studies.

In this study, we propose the use of laser biospeckle method to evaluate the effects of far-red light on arugula plants and investigate the applicability of laser speckles and also the effects of FR on the age of the plants.

2 EXPERIMENTAL

Plant samples

Arugula was used as the sample^[31-33]. They were all grown in a custom-made growth chamber with a temperature and humidity controller (APISTE, PAU-300S) at a temperature of 23 °C, a humidity of 40 % , and a photon density (PFD) 54-105 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (fluorescent light (SMILE, XFX2-20W) and plant light (HUIKURA, KY-08W-SC)) at an intensity of 12 hours/day^[34]. Figure 1 shows a picture of the growing chamber. Fertilizers OAT Agrio Co. Ltd., OAT house No.1 and No.2 were used as the nutrients^{[31][32]}. The mixing ratio was 1.5 g of fertilizer (OAT house No.1) and 1.0 g of fertilizer (OAT house No. 2) dissolved in approximately 20 L of water and further diluted with water to achieve an electrical conductivity of 1.0 ds/m, as measured by a water quality meter (FUSO Co., Ltd., Model-7200).



Figure 1. A custom-made growth chamber (left) with the temperature and humidity controller (right).

Arugula was grown from seed according to the following procedure^{[31][32]}: First, seeds stored in a refrigerator were soaked in oxindole for 10 minutes to disinfect them, then rinsed and washed twice with water. Then, a cutter was used to make a cross-shaped cut on the top surface of a hydroponic rockwool (W30 × D30 × H40), and three disinfected seeds were buried in the cut, spaced enough apart. The rockwool was placed in a plastic cup (100 ml) with a hole punched in the bottom, thoroughly wetted with ultrapure water, and placed in a tray in the growing chamber. In our experiments, we used plants that were 1-month and 3-month old after planting^[35].

Experimental system

Figure 2 shows a schematic diagram of the experimental system. Two types of LEDs one Red (ASTER, BT-9C-R, wavelength: 630 nm, 186 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) and the other far-red (ASTER, BT-9C-FR, wavelength: 735 nm, 141 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) were used for plant stimulation^[23]. In order to detect speckles, a laser beam (THORAB, USA, CPS850S, wavelength: 852.0 nm) illuminated a leaf of the plant in vivo, and the biospeckles originating as a result of the interference of the scattered light were acquired by a CMOS camera (THORLAB, USA, DCC1545M-GL, pixels: 1024 × 1280)^{[31][32]}. In this case, the distance between the sample and the laser was 150 mm, and the distance between the sample and the CMOS camera was 150 mm^[32]. A sharp-cut filter (FUJIFILM, Japan, IR82, cutoff wavelength: 820 nm or less) was placed between the CMOS camera and the plant sample to block the red and far red lights illuminating the plant and to collect only the laser light used. Moreover, the entire experimental system was placed in a dark box to block unwanted lights other than the laser light.

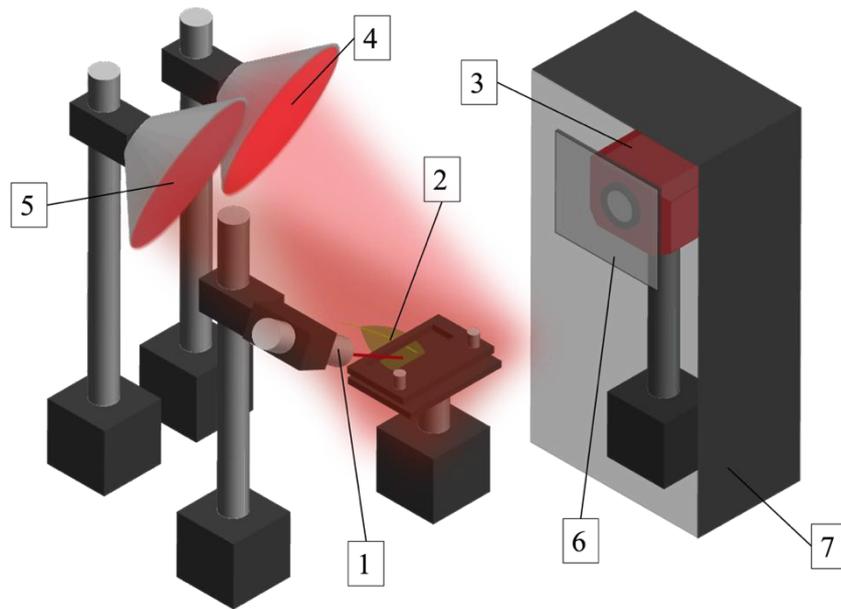


Figure 2. A schematic of the experimental system with parts indicated as 1.LD (852 nm); 2.Sample; 3.CMOS camera; 4.LED (630 nm); 5. LED (735 nm);6.Sharp-cut filter (820 nm cut-off); 7. Ambient light blocking enclosure.

FR exposure protocol

Figure 3 shows the protocol used in the study. First, before the start of the experiments, arugula plants were placed in a sound free, dark environment for 10 minutes to eliminate the effects of ambient noise and light stimuli such as lighting on the leaves^[32]. The plant was then placed in the experimental system with leaf lightly hold by a custom-made holder apparatus. Biospeckles were captured at a frame rate of 15 fps first, before illuminating FR, for a period of 1 minute followed by illuminating FR and Red irradiation for 2 minutes, and finally again for a period of 1 minute under the absence of FR cum Red lights. Although the video was acquired for a minute, only the initial portion of 0-20 s for the pre FR+R and post FR+R were used for the analysis^[32]. Two different growth stages, namely 1-month and 3-month were used in measurements with eight plants replicates for each. Each of the plant sample was measured once. Photographs of the samples are shown in Figure 4. For comparison, dead leaves that had fallen off the plant were also used in the measurement.

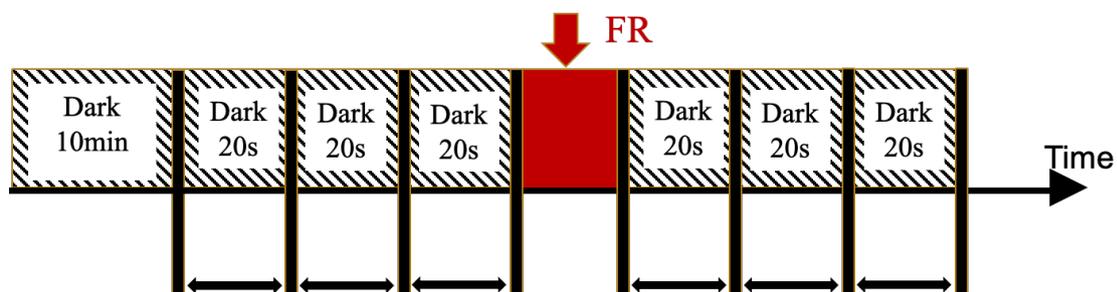


Figure 3. A schematic of the protocol used in the experiment with the plant being kept in a dark sound free environment for 10 min before the start of the experiment followed by 1 min recording of biospeckles followed by FR illumination of 2 min and again recording of biospeckles after illumination for a period of 1min.

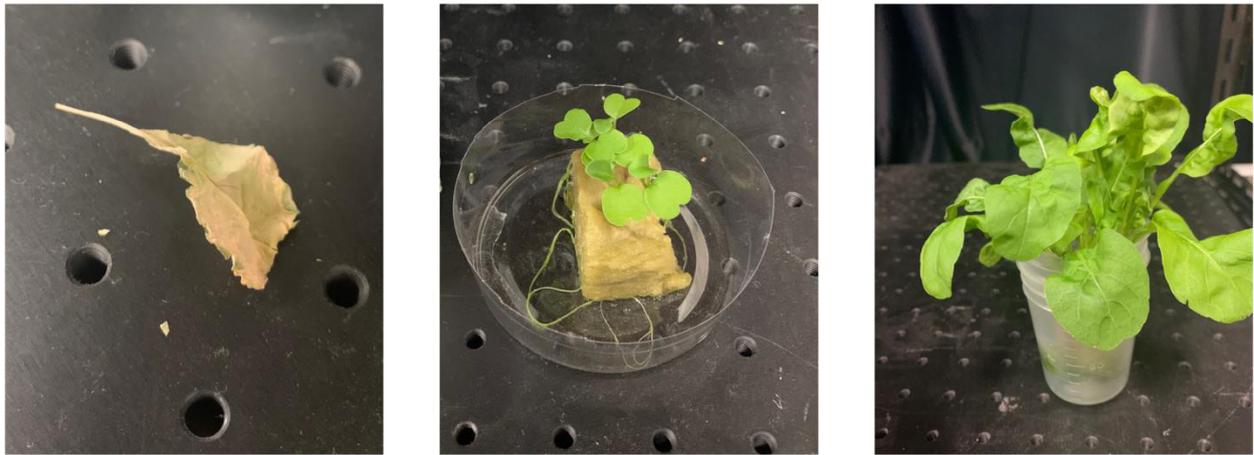


Figure 4. Plant samples used in the experiment with a dead leaf(left), 1-month old plant (middle) and a 3-month old plant (right).

3 BIOSPECKLE ANALYSIS

Laser biospeckle and evaluation

When a laser beam is irradiated onto a rough surface object, scattered light generated on the surface interferes to form an irregular pattern of light and dark patches at the observation surface or the camera surface called a speckle pattern. Similarly, when a laser beam is irradiated onto a plant leaf, a speckle pattern is formed by scattered light from the leaf's surface and internal organelles. Since the speckle pattern is caused by biological tissue, it is called biospeckle^[36]. The intensity of the biospeckle changes randomly according to the movement of organelles within the biological tissue. By investigating the dynamic changes of the biospeckles, we can learn about the activities within the biological tissue^[30]. Figure 5 shows a typical biospeckle speckle image taken from the leaf of a 3-month old plant.

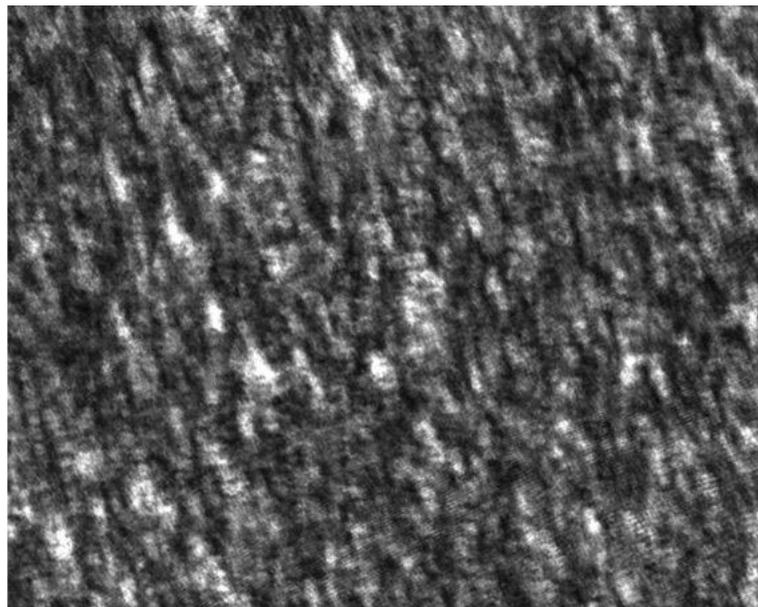


Figure 5. A typical speckle pattern obtained from a leaf of a 3-month old plant.

Cross correlation Analysis

To analyze the biospeckle images, correlation coefficient between biospeckles frames of the recorded movie was calculated. Specifically, correlation was calculated between the first and the subsequent frames as given by the equation (Eq.1) where r being the correlation coefficient, A being the reference first frame, and B being the second and subsequent frames. The integers m and n specify the pixel number in the frame, and A_{mn} and B_{mn} denote the luminance values at that location ^{[31][32]}. Correlation analysis calculations were done by Matlab (version 2020). In this study, a quantity, Biospeckle Activity (BA) given by Eq. (2) defined as the correlation coefficient deducted from unity was evaluated and used as a measure to investigate the effect of FR radiation and the age of the plant. For a stationary object, because correlation is one at all times, BA becomes zero. On the other hand, when r is smaller than one and BA becomes larger than 0 and this indicates sustained correlated activity within the sample. When correlation r becomes zero, BA becomes closer to one. Such a case indicates the absence of any correlated activity.

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left\{ \sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2 \right\} \left\{ \sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2 \right\}}} \quad (1)$$

$$BA = 1 - r \quad (2)$$

4 RESULTS AND DISCUSSION

Results of Biospeckle imaging

Figure 6 shows BA for two different aged plants with left obtained 1-month after planting and the right one obtained 3-month after planting under the absence and presence of FR. The vertical axis of the graph represents the value of BA and the horizontal axis represents time. As can be seen, depending on the age of the plant the sustained correlation is largely different. 3-month old plant shows sustained correlation for both under no FR and FR conditions. On the other hand, the 1-month sample shows steeper increase of BA and much larger fluctuations in comparison to the 3-month old. There are two possible reasons for this with one being they were small and the other difficulty in holding the lead and they were not fixed to any holder to avoid damage. Within small observation times, the leaf itself moved resulting in a large signal variance. In order to minimize the variations, the whole system was kept in an enclosure.

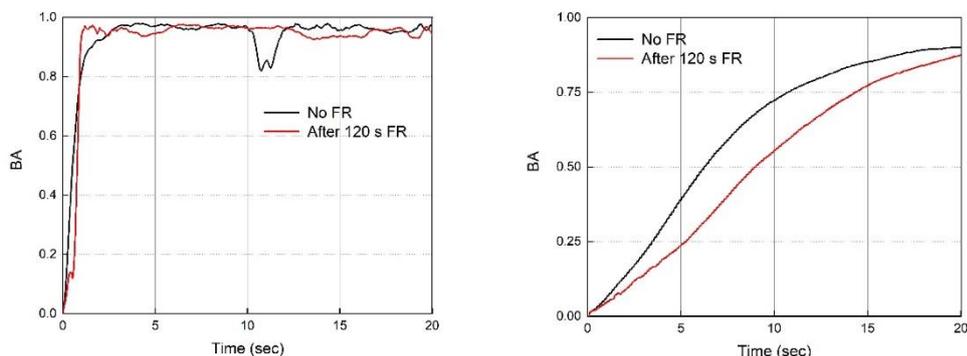


Figure 6. BA as a function of time in sec under no FR and after a 2min exposure to FR for 1-month old (left) and 3-month old (right) after planting.

In order to minimize the variations, average of BA across 8 samples under each of the conditions was calculated and shown in Figure.7. As can be seen from Fig.7, there is a clear difference between the 3-month old and 1-month old plants. While for the 1-month old, the variation of BA near zero is steep compared to that for the 3-month old. For the 3-month old, the variation is more monotonous indicating the presence of sustained correlations. This is true irrespective of the presence or the absence of FR. Further comparison with the dead leaf revealed that the correlation for dead leaf was not flat, i.e., not zero but has a finite BA value. This suggests the presence of some sustained correlation in the activity of the plant despite being cut off from the original plant indicating some life processes still going on.

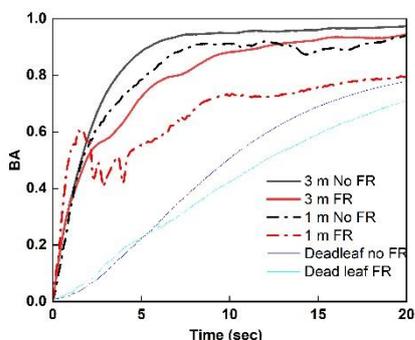


Figure 7. Average BA as a function of time in sec under no FR and after a 2min exposure to FR for 1-month old and 3-month old after planting.

Here different colors indicate different conditions. For reference BA measured with a dead leaf is also shown. Here, note that the dead leaf has some significant correlation and is not zero as expected. Moreover, 1-month old leaf because of the difficulty in holding, the calculated BA has large variance and is largely varying under FR indicating possible heat-related effects from FR illumination by young plants.

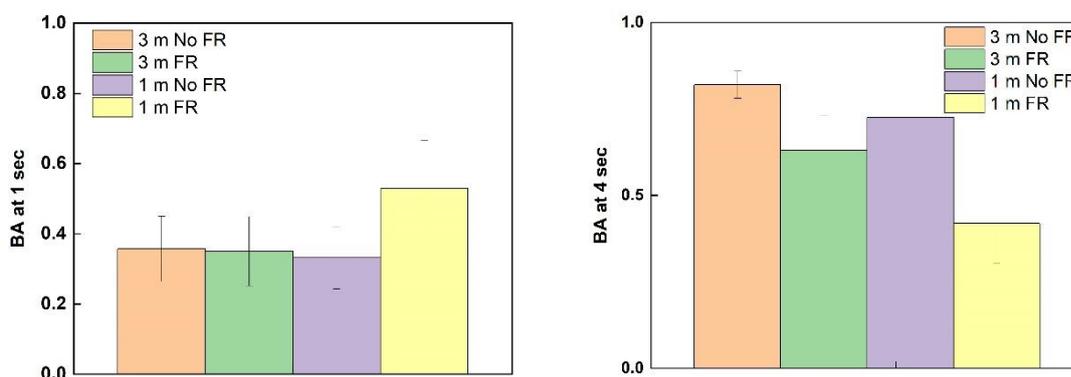


Figure 8. A bar plot showing the value of BA under different conditions obtained at 1 sec (left) and at 4 sec (right) for 1-month old and 3-month (right) old plants under the presence and absence of FR.

In order to quantify the slope of the variations, difference in BA values at two different time points namely 1 sec and 4 sec were considered, one rapid response and the other just before reaching plateau for different ages and also different illumination conditions of FR. For BA at 1 sec shown on left of Fig.10, except for FR illumination the BA values are almost the same. At 4 sec shown on right in Fig.10, the point of reaching plateau, there are differences depending on the age as well as the illumination conditions. For both 1-month and 3-month old plants, the value of BA at 4 sec under the absence of FR was lower than that of under FR. This indicates that FR has the effect of slowing down the activity of the plants. Further, 1-month has smaller BA in comparison to 3-month old plants.

5. CONCLUSION

In this study, we proposed to our knowledge for the first time the usage of laser biospeckle to investigate the transient /the immediate response of the plants to FR. As plants arugula were used and two different age groups were compared, namely 1-month after planting and 3-month after planting. From the recorded movies of the biospeckles, cross-correlation between the initial frame and the rest of the frames was evaluated under the condition of presence and absence of FR as well as age. The results revealed the following points:

- (1) Correlation largely differed between the ages, with 1-month having a sharp transient response while the 3-month old showed a rather monotonous response indicating the presence of correlated activity in the latter. Comparing the correlation at an earlier time point and a later time point indicated a clear difference.
- (2) Apart from the age the presence of FR largely influences the response of the plants, with them being active in response to FR immediately after FR irradiation as compared to non-FR.

Currently, we are investigating the long-term behavior plants by laser biospeckles under FR to investigate the effects in real time and within a short time in a non-destructive and non-contact way as compared to the existing techniques of measuring biomass or measuring physics parameters such as leaf area.

6. REFERENCES

- [1] PVV. Prasad, et al., “Effects of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)”, *Global Change Biology*, 8(8), 710-721(2002).
- [2] Wong, S. C., “Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth”, *Oecologia* 44(1), 68-74 (1979).
- [3] Xu, Z., Guangsheng, Z., and Hideyuki S., “Plant responses to drought and rewatering”, *Plant signaling & behavior* 5(6), 649-654(2010).
- [4] DeHayes, D. H., et al., “Acid rain impacts on calcium nutrition and forest health: alteration of membrane-associated calcium leads to membrane destabilization and foliar injury in red spruce”, *BioScience*, 49(10), 789-800(1999).
- [5] Flannigan, M. D., Brian J. S., and Wotton, B. M., “Climate change and forest fires”, *Science of the total environment*, 262(3), 221-229(2000).
- [6] Gregory, P. J., John. SI. I., and Michael B., “Climate change and food security” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2139-2148(2005).
- [7] Huang, W, Weili, D., and Yaning C., “Unravelling lake water storage change in Central Asia: Rapid decrease in tail-end lakes and increasing risks to water supply” *Journal of Hydrology* 614, 128546(2022).
- [8] Yansui, L., Fang, F., Yuheng, L., “Key issues of and use in China and implications for policy making”, *Land Use Policy*, 40, 6-12(2014).
- [9] Craufurd, P. Q., and Tisha R. W., “Climate change and the flowering time of annual crops”, *Journal of Experimental botany*, 60(9), 2529-2539(2009).
- [10] Benke, K., and Bruce T., “Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture” *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26(2017).
- [11] Thomaier, S., et al., “Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming)” *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(1), 43-54(2015).
- [12] Despommier, D., “The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations”, *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 6(2), 233-236(2011).
- [13] Rajan, P., Rajasekaran R. L., and Mason T. M., “Advancement in indoor vertical farming for microgreen production”, *American Journal of Plant Sciences*, 10(08), 1397(2019).
- [14] Hoenecke, M. E., R. J. Bula, and T. W. Tibbitts., “Importance of 'Blue' Photon Levels for Lettuce Seedlings Grown under Red-light-emitting Diodes”, *Hort Science*, 27(5), 427-430(1992).
- [15] Richardson, A. E., et al., “Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture”, *Plant and soil*, 349(1), 121-156(2011).
- [16] Paradiso, R., and Simona P., “Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems”, *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(2), 742-780(2022).
- [17] Doerner, P., et al., “Control of root growth and development by cyclin expression”, *Nature*, 380(6574), 520-523(1996).
- [18] Islam, M. A., et al., “Impact of end-of-day red and far-red light on plant morphology and hormone physiology of poinsettia”, *Scientia Horticulturae*, 174, 77-86(2014).
- [19] Tan, T., et al., “Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity”, *The Crop Journal*, 10(2), 300-309(2022).
- [20] Demotes-Mainard, S., et al., “Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture”, *Environmental and experimental Botany*, 121, 4-21(2016).

- [21] Emerson, R., Ruth, C., and Carl C., “Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(1), 133-143(1957).
- [22] Jin, W., et al., “Adding far-red to red-blue light-emitting diode light promotes yield of lettuce at different planting densities”, *Frontiers in plant science*, 11, 609977(2021).
- [23] Kalaitzoglou, P. et al., “Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production”, *Frontiers in Plant Science*, 10, 322(2019).
- [24] Yadava, U. L., “A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves”, *Hort Science*, 21(6), 1449-1450(1986).
- [25] Braga, R. A., et al., “Live biospeckle laser imaging of root tissues”, *European Biophysics Journal*, 38(5), 679-686(2009).
- [26] Pandiselvam, R., et al., “Biospeckle laser technique—A novel non-destructive approach for food quality and safety detection”, *Trends in Food Science & Technology*, 97, 1-13(2020).
- [27] Zdunek, A., and Justyna C., “Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples”, *Sensors*, 11(6), 6317-6327(2011).
- [28] Singh, P., et al., “Application of laser biospeckle analysis for assessment of seed priming treatments”, *Computers and electronics in agriculture*, 169, 105212(2020).
- [29] Retheesh, R., et al., “Use of laser biospeckle for the evaluation of fruit ripening”, *Journal of Pure Applied and Industrial Physics*, 6(5), 65-70(2016).
- [30] Y. S. K. De. Silva, et al., “Positive and negative phenotyping of increasing Zn concentrations by Biospeckle Optical Coherence Tomography in speedy monitoring on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth”, *Plant Stress*, 2, 100041(2021).
- [31] Hirai, M., et al., “Laser biospeckle metrology in investigating plant-sound interactions”, *Optical Interactions with Tissue and Cells XXXI*, 11238, SPIE(2020).
- [32] Rajagopalan, U. M., et al., “Demonstration of laser biospeckle method for speedy in vivo evaluation of plant-sound interactions with arugula”, *PloS one*, 16(10), e0258973(2021).
- [33] Gonome, H., et al., “A simple adaptive difference algorithm with CO₂ measurements for evaluating plant growth under environmental fluctuations”, *BMC research notes*, 15(1), 1-6(2022).
- [34] He, J., et al., “Effects of root-zone temperature on photosynthesis, productivity and nutritional quality of aeroponically grown salad rocket (*Eruca sativa*) vegetable”, *American Journal of Plant Sciences*, 7(14), 1993-2005(2016).
- [35] Morales, M., and Jules, J., “Arugula: A promising specialty leaf vegetable”. Reprinted from: *Trends in new crops and new uses*, (2002).
- [36] Aizu, Y., and T. Asakura., “Bio-speckles. A. Consortini, editor”, *Trends in Optics*, 1st ed. san diego: Academic Press, 27-49(1996).

多元ヘテロ元素ドーブカーボン系触媒材料の合成

材料工学科 石崎 貴裕

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

二酸化炭素排出や化石燃料資源の枯渇などの問題が議論されて久しく、それらを解決するエネルギー源として燃料電池や蓄電池が注目を集め続け、その研究開発が活発に続けられている。これらの利点としては、環境負荷物質のゼロ排出、高いエネルギー変換効率などがもたらす「グリーン・イノベーション」のみならず、国家エネルギー戦略としても燃料供給源の多様化によるリスク分散、自動車や電機など今後の産業競争力への広範な基盤強化になるなどが挙げられる。現在、これらのエネルギー源は自動車用や家庭用電源として一般市場に導入され始めたが、本格的な普及には、まだ多くの克服すべき点がある。

燃料電池や金属空気電池では、空気極における酸素還元反応 (ORR) が重要である。この ORR には 4 電子反応と 2 電子反応があるが、4 電子反応が起こらずに 2 電子反応が起きると電池性能のボトルネックとなる。そのため、一般的に空気極の ORR 触媒には ORR 活性の高さから Pt が用いられてきた。しかし、Pt はその資源の希少性やアクセサリ類等の需要による高コスト化や、メタノールによる一酸化炭素吸着に起因する被毒により触媒活性の長期安定性に欠けるという欠点を抱えている¹⁾⁴⁾。このため、Pt 代替触媒材料の開発が求められている。

しかし、現在、金属-空気電池の実用化はほとんど進んでいない。実用化させるためには、高い酸素還元反応 (ORR) 活性を示し、安価で持続可能な正極材の開発が必要である。

金属-空気電池の正極材に有望な ORR 触媒として、白金が挙げられる。しかし、白金は高価で埋蔵量が極めて少ないため、代替材料が求められている。

グラフェンは非常に大きな表面積と高導電性を有する 2 次元構造のカーボンで、ORR 活性を示すことが報告されている⁴⁾。特に、ヘテロ原子をドーブしたカーボン材料が、代替材料として期待されている。カーボン材料は、安価で存在量も多く、ヘテロ原子のドーブにより白金に匹敵する ORR 性能が報告されている²⁾。特に、構造中に N をドーブすることで表面の π 電子雲に分極が生じ、ORR 活性が高まることが報告されており、その試みが多くなされている⁵⁾⁷⁾。しかし、従来法ではアンモニア雰囲気中でグラフェンに熱処理を行う等、複雑な装置構成や高温処理が必要であり、高コストになること等が課題である。最近、窒素-リン共ドーピング等の複数のヘテロ原子の導入は、豊富な活性部位をもたらす結合種同士の相乗効果により、ORR 活性を更に改善することができることが報告されている⁸⁾。また、遷移金属のドーピングは、ORR 活性部位の形成に有効であり、触媒性能を大幅に改善できる⁹⁾。また、P をドーブすることで、C と P の電気陰性度や電子半径の違いに起因して電子密度の状態が変化するため、ORR 活性が向上することが報告されている。このため、多元ヘテロ元素ドーブカーボンを合成するための手法の確立が求められている。

ソリューションプラズマ (SP) は液中で発生する低温非平衡のプラズマであり、気相プ

ラズマよりも分子密度が高いため反応速度が速い。さらに、大気圧プロセスであるため、装置構成が簡易、低コスト等の特長がある。最近、SPにより結晶性のカーボン材料が合成可能であることが報告されている¹⁰⁾。このため、SPは新規カーボン合成法として近年注目を集めているプロセスである。このSPプロセスを利用し、溶液の種類を自由に組み合わせることでモノマーから直接的にカーボンを合成することが可能であるため、カーボン中への窒素ドーピングを従来プロセスより効率的かつ低コストに行うことが期待できる¹¹⁾。

2. 研究計画

本研究では、『レアメタルフリーで、簡単に入手可能なカーボン系のヘテロ元素を含有する複数種類の有機原料を利用して、巧みな分子構造設計と溶液中の低温非平衡プラズマを利用した合成技術によりカーボン系触媒材料合成技術の確立』をめざした。具体的には、以下の項目について研究を進めた。

(1)液中プラズマによる多元ヘテロ原子含有カーボン材料の創製と評価

窒素およびリンのヘテロ元素を含有する2種類の有機材料(モノマー等)を原料に用い、溶液中のプラズマ生成条件を精密に制御することで、有機材料を精密にアセンブリングするための技術開発を行った(条件最適化)。具体的には、窒素源であるN-メチル-2-ピロリジノン(NMP) 80 mLとリン源である50%フィチン酸(Phy)溶液 20 mLを混合し、一晚攪拌して得られた溶液にSP処理を行った。SP条件は、電極間距離を1 mm、パルス幅を1 μ s、周波数を50もしくは200 kHz、電極には遷移金属である銅、鉄、タングステンを選択し、カーボン系材料を作製した。合成したカーボンは吸引濾過で水、エタノール、アセトンによる洗浄後、電気炉において100°Cで12時間乾燥させ、乳鉢で粉碎して回収した。合成したヘテロ元素含有カーボンの組成、結晶性、化学

結合状態をXRD, SEM, TEM, ラマン分光, XPS等を用いて評価した。

(2)合成したカーボン材料の酸素還元反応に対する触媒活性評価

作製したカーボン材料の触媒性能の評価には、0.1 M KOH溶液中でサイクリックボルタンメトリー(CV)およびリニアスイープボルタントメリー(LSV)を用いた。サイクリックボルタンメトリーにより、カーボン材料の触媒性と触媒活性を評価した。また、回転電極を用いたLSVの評価により、酸素還元反応の反応電子数を算出した。

3. 計画の進行状況

TEMで作製した試料の形態観察を行った結果、全ての試料で球状粒子が合成されていることがわかった。これは、TEM-EDSの結果より、SP処理時に電極がスパッタされて形成したと考えられる。遷移金属球状粒子は、10 nm程度のカーボン層に包まれて存在していた。また、TEMにおけるEDS観察を行った。EDSの結果より、全ての球状粒子は、遷移金属電極由来であることがわかった。SP処理により、遷移金属電極がスパッタされ、カーボン材料に含有されたと考えられる

XPSで作製した試料の元素組成及び結合状態を調査した。Cu_50kHz, Cu_200kHz, Fe_50kHz, Fe_200kHz, W_50kHz, W_200kHzの窒素含有率は、それぞれ2.25, 2.52, 2.81, 2.32, 2.80, 1.82 at.%であった。リン含有率は、3.83, 4.01, 4.71, 5.94, 4.33, 3.21 at.%であった。本研究で作製した試料では、窒素よりリンの方が多く含まれることがわかった。一方、遷移金属含有率は、0.79, 0.86, 0.81, 1.03, 1.61, 0.42 at.%と全ての試料で少量であった。TEM及びXPSの結果より、遷移金属粒子はカーボン材料に内包されているため、触媒活性に大きく寄与しないと考えられる。また、XPSより算出したN 1sスペクトルの各種結合状態の存在割合を表1に、P 2pスペクトル

の各種結合状態の存在割合を表 2 に示す。Pyridinic-N を N-1, Amino-N を N-2, Pyrrolic-N を N-3, Graphitic-N を N-4, Oxidized-N を N-5 と示す。Graphitic-N 及び P-C 結合種は、4 電子反応を促進するとの報告がある^{5)・6)}。表 1 より、銅電極で作製した試料の Graphitic-N 結合種の存在比が他の電極で作製した試料より大きかった。また、表 2 より、W_50kHz の P-C 結合種の存在比が 47.1 % と他の試料と比較して大きいことがわかった。

表 1 N 1s スペクトルの波形分離より得られた各結合種の存在割合 [%]

試料名	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5
Cu_50kHz	5.81	25.6	35.5	27.9	5.15
Cu_200kHz	4.96	11.4	49.3	30.7	3.62
Fe_50kHz	3.26	18.1	57.7	17.5	3.39
Fe_200kHz	3.59	15.5	56.3	17.6	7.02
W_50kHz	5.53	11.8	56.4	17.7	8.49
W_200kHz	5.01	14.9	64.0	7.68	8.43

表 2 P 2p スペクトルの波形分離より得られた各結合種の存在割合 [%]

試料名	P-C	P-O
Cu_50kHz	37.8	62.2
Cu_200kHz	28.1	71.9
Fe_50kHz	23.7	76.3
Fe_200kHz	27.1	72.9
W_50kHz	47.1	52.9
W_200kHz	39.4	60.6

LSV で作製した試料の ORR に対する評価を行った。Cu_50kHz, Cu_200kHz, Fe_50kHz, Fe_200kHz, W_50kHz, W_200kHz の反応電子数は、それぞれ 2.67, 2.57, 2.32, 2.61, 2.79, 2.34 であった。W_50kHz が 4 電子反応を最も進行させたことがわかった。反応電子数と XPS で得られた結合種濃度の相関性を調査した。4 電子反応を促進すると報告されている Graphitic-N 及び P-C の結合種濃度と反応電子数の関係をまとめたものを図 1 に示す。図 1 より、Graphitic-N 及び P-C 結合種濃度が増加

すると、反応電子数が増加する傾向がみられた。この結果から、これらの結合種の存在が反応電子数の向上に関連すると推察される。遷移金属のドーピングは、活性部位の追加形成に有益であり、触媒性能を大幅に改善すると報告されている¹²⁾。しかし、本研究で合成した試料の TEM 観察結果及び XPS による結合状態評価より、遷移金属濃度と ORR 開始電位や限界電流密度に相関性が無かったことから、触媒性能に影響を及ぼさなかったと考えられる。

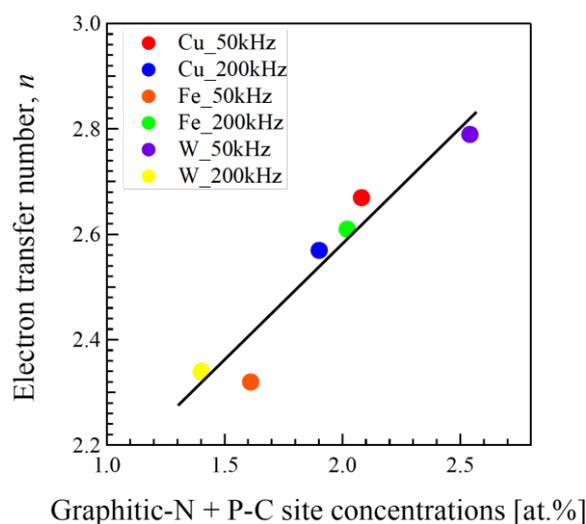


図 1 結合種濃度と反応電子数の関係

NMP と 50% Phy 溶液を原料として、SP 処理によって窒素-リン及び遷移金属共ドーピングカーボン系材料を合成した。カーボン中のリン含有率は約 3.2 - 6.0 at.% であり、約 1.8 - 2.8 at.% の窒素含有率より多く含まれていた。遷移金属含有率は、1.0 at.% 前後と小さかった。窒素及びリンの結合種である Graphitic-N 及び P-C 結合種濃度を増加させることにより、ORR の 4 電子反応を促進できることを明らかにした。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、ORR に対する触媒性能をさらに向上させるための研究開発を進めていく予定である。具体的には、異種元素および遷移金属のドーピング量を増加させるために必要な原料の

選定，プラズマ条件の最適化を図っていく。
また，触媒性能の向上に有効な因子を解明するための研究も実施していく予定である。さらに，その他の異種元素（例えば，B等）のドーピングを実現させ，触媒性能の向上をめざしていく予定である。

以下に本研究で得られた研究業績（投稿論文および学会発表）をまとめる。

投稿論文

- (1) T. Ishizaki et al., Effect of Surface Modification for Carbon Cathode Materials on Charge-Discharge Performance of Li-Air Batteries, *Materials*, 15, 3270 (2022).
- (2) T. Ishizaki et al., Recent progress of carbon-based electrocatalytic materials in Lithium-based Battery, *Sustain. Mater. Technol.*, 32, July, e00384 (2022).
- (3) T. Ishizaki et al., Cattail leaf-derived nitrogen-doped carbons via hydrothermal ammonia treatment for electrocatalytic oxygen reduction in an alkaline electrolyte, *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, 24738-24749 (2022).
- (4) 石崎貴裕ら，Fe-N-C結合を有する二元機能マクロポーラスカーボン触媒材料の作製とリチウム空気電池への応用，74, 118-124, 表面技術 (2023).

学会発表

- (1) カーボンナノチューブの酸素還元活性に及ぼすソリューションプラズマ処理の効果，佐々木滉大，奈良原柁，平峠由佳，田中健一，安藤総一郎，石崎貴裕，表面技術協会第146回講演大会，埼玉工業大学，2022年9月
- (2) Solution plasma synthesis of electrocatalytic carbon composite materials for oxygen reduction reaction, Takahiro Ishizaki, Kaito Fukushima, Kenichi Tanaka, Koudai Sasaki, Sangwoo Chae, World conference on Science and Nanotechnology, Bangkok, Thailand, 2022年11

月

- (3) Solution plasma synthesis of electrocatalytic carbon-based composite materials for oxygen reduction reaction, Takahiro Ishizaki, Kaito Fukushima, Kenichi Tanaka, Soichiro Ando, Koudai Sasaki, Sangwoo Chae, Composites 2023, Bangkok, Thailand, 2023年2月

参考文献

- 1) D. U. Lee, H. W. Park, D. Higgins, L. Nazar, and Z. Chen, *Journal of the Electrochemical Society*, 160, F910 (2013).
- 2) Z. Jin, H. Nie, Z. Yang, J. Zhang, Z. Liu, X. Xu, and S. Huang, *Nanoscale*, 4, 6455 (2012).
- 3) J.-S. Lee, K. Jo, T. Lee, T. Yun, J. Cho, and B.-S. Kim, *J. Mater. Chem. A.*, 1, 9603 (2013).
- 4) Z. Mo, R. Zheng, H. Peng, H. Liang, S. Liao, *L. J. Power Sources*, 245, 801 (2014).
- 5) Z. Mo, R. Zheng, H. Peng, H. Liang, S. Liao, *L. J. Power Sources*, 245, 802 (2014).
- 6) D. Wei, Y. Liu, H. Zhang, L. Huang, and G. Yu, *Nano Lett.*, 9, 1752 (2009).
- 7) D. Geng, Y. Chen, Y. Li, R. Li, X. Sun, S. Ye, and S. Knights, *Energy Environ. Sci.*, 4, 760 (2011).
- 8) X. Mao et al.: *Int. J. Hydrogen Energy*, 43, (2018), 10341-10350.
- 9) Y. Li et al.: *J. Colloid Interface Sci.*, 602 (2021) 376-383.
- 10) J. Kang, O. L. Li, N. Saito, *Carbon*, 60, 292 (2013).
- 11) M. Matsushima, M. Noda, T. Yoshida, H. Kato, G. Kalita, T. Kizuki, H. Uchida, M. Umeno, and K. Wakita, *J. Appl. Phys*, 113, 114304-1 (2013).
- 12) Yanan Li, Zhilong Xu, Xiaohuan Sun, Jie Han, Rong Guo: Fe, P, N- and FeP, N-doped carbon hollow nanospheres: A comparison study toward oxygen reduction reaction electrocatalysts, *J. Colloid Interface Sci.*, 602, 376-383 (2021).

切折紙をレザバーとする形態計算手法の開発

電気工学科 重宗 宏毅

共同研究者

早稲田大学先進理工学部応用物理学科 澤田 秀之

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

近年、ビッグデータ社会となり、あらゆる種類のデータの収集が容易になっている。ビッグデータを活用した学習手法であるディープラーニングは、データ予測、音声認識、自動運転などの分野で注目されている。しかし、少量のデータでの学習には不向きであり、多量のデータを使用し、学習時間の長さに伴う大きな消費電力が課題となっている。レザバーコンピューティングは、この問題を解決する方法の一つである。

レザバーコンピューティングは、リカレントニューラルネットワーク (RNN) の一種であり、時系列データを学習できる。この手法は、中間層の重みを固定し、読み出しの重みのみを調節することで、計算コストが少なく済む特徴がある。また、物理体によって中間層であるレザバー部を実装する方法が提案され、これを物理レザバーコンピューティングと呼ぶ。この手法を用いることで、柔軟な物理系を計算資源として活用できる。力学系のダイナミクス自体が中間層としての役割を担うため、少ないコストで高精度の学習ができる可能性がある。たこ足[1]、人工筋肉[2]、テンセグリティ構造[3]など、様々な力学系がレザバーとして試されている。

本稿では、「切紙構造」を計算資源として考えることに焦点を当てる。切紙構造の応力-ひずみ線図は非線形特性を持ち、その長さや

切込の密度を変えることで、剛性を変えられる[4]。また、切紙構造は面外方向に3次元的な変形を利用して大きく伸びる。この性質は、太陽の方向に常に向かう太陽電池などにも応用されている[5]。これらの特異な力学特性から、レザバーコンピューティングの中間層として、切紙構造を計算資源として使用できると想定した。

過去には、レザバーコンピューティングにシート材料を適用する研究が行われており、その中には Priyanka による三浦折りをを用いた研究が含まれる[6]。彼らは、三浦折りを動的トラスフレームによるシミュレーションでモデル化し、レザバーとして機能することを示した。本稿では、三浦折りの代替として切紙のレザバーとしての計算性能を調査する。切紙をバネマスによるトラス構造としてモデル化し、シミュレーションによる検討を行った。バネマスモデルが複雑な非線形演算を実現できることは、中嶋らによって示されている[7]。入力関数は入力点に対する加重として使用し、バネの長さをレザバーの状態ベクトルとして用いることで、コンプライアンスボディを用いた機械学習の枠組みを構築した。しかし、実際の力学系では、質点の変位が小さいテンセグリティ構造を除いて、入力を荷重として正確に加えることは難しいため、本稿では、入力を座標変化とする提案を行った。

本報告では、切折紙のレザバーとしての学

習性能をシミュレーションと実機の双方から調査する。シミュレーションではバネマスをを用いて切紙の動きを再現するために、バネ定数・減衰係数をパラメータとして実機に近い動きを構築する。また、実機では切紙にボルトナット級数を動きとして入力可能な実験系を構築する。最終的に、シミュレーションと実機の両方でレザバーコンピューティングを実施し、切紙の学習性能を評価する。

2. 研究計画

研究計画としては、切紙を使用したレザバーコンピューティングについて提案し、シミュレーションと実験による設計と議論を行うための要素実験を行う。まず、バネマスモデルを使用して切紙モデルを構築する。実際の切紙の動きを再現するため、切紙の引張試験を実施し、座標変化と応力の情報からバネ定数を設定する。さらに、このバネ質量モデルをレザバーコンピューティングのレザバー層として使用して、時系列データの学習を行う。切紙モデルが学習性能に与える影響を検討するため、モデル構造、減衰係数、入力の大さき、およびノイズを変更して学習を試みる。最後に、実機によるレザバーコンピューティング切紙においてレザバーとしての学習性能があることを示す。以下に具体的な研究計画を示す。

2022年6～8月

物理レザバーコンピューティングのデバイス応用について先行研究調査

切折紙構造力学特性計測用実験系構築

2022年7～9月

レザバー向け切折紙構造力学特性のデータ計測

切折紙構造をレザバーとしたニューラルネットワークの構築

2022年10月

切折紙構造をレザバーとしたコンピューティングの実装

2022年11月～2023年2月

切折紙構造の力学特性とレザバー計算性能の調査実験

切折紙構造をレザバーとする力学シミュレータの開発

2023年2月

切折紙構造をレザバーとする折紙デバイスの開発

3. 計画の進行状況

計画は順調に進行している。図1にシミュレーションで使用する切紙バネマスモデルを示す。5種類のバネマスモデルを比較し最も切紙らしい動きをするモデルが図1であった。切紙は縦方向の荷重に対して縦方向に大きく変形し、横方向に縮む。図1のモデルでは斜めに接続したバネによって縦方向の動きが再現される。図1のモデルのバネ定数と減衰係数を変数とし、図2に示す実機切紙と動作を比較することで切紙モデルを構築した。

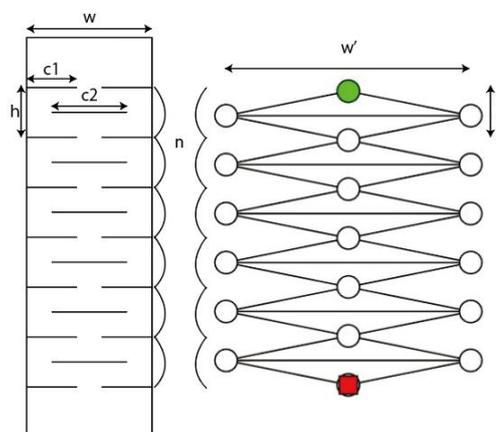


図1. 切紙バネマスモデル

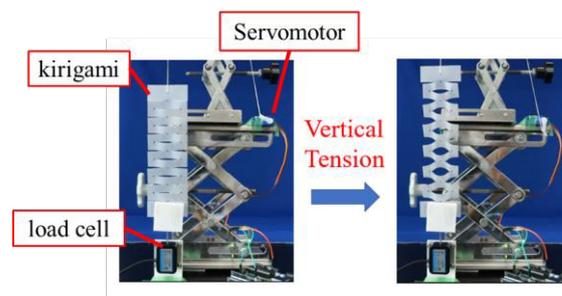


図2. 動作比較実験系

切紙モデルでは入力を座標変化とした。入力点の各タイムステップの座標 $\mathbf{P}(t)$ は次式で表される。

$$\mathbf{P}_{in}(t) = \mathbf{P}_{in}(0) + w_{in}u(t)\mathbf{j}$$

入力点は入力 $u(t)$ によって位置が決められ、バネの力や減衰力による影響はない。固定点(図1 赤点)はバネの力や減衰力による影響の影響を受けず、同じ座標にとどまる。それ以外の一般の質点の位置は、以下の式で表す。

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t - \Delta t) + \Delta t \mathbf{v}(t - \Delta t)$$

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(t - \Delta t) + \Delta t \mathbf{F}(t)$$

$\mathbf{F}(t)$ は質点に繋がる全てのバネから受ける \mathbf{F}_k と \mathbf{F}_d によって表される。

$$\mathbf{F}(t) = \sum -(\mathbf{F}_k^i(t) + \mathbf{F}_d^i(t))\mathbf{n}$$

ここで $\mathbf{n} = [n_x^i(t), n_y^i(t)]$ は、 i 番目のバネにおいて、力を受ける質点の側へもう片側から向かう方向ベクトルを正規化したものである。

図3に y 方向の動作比較実験結果を示す。バネ定数200以上でMSEが小さくなり、動作誤差が小さくなった。変位拡大係数を600~2200まで変化した場合の結果があるが、変位計拡大係数の値によって誤差の小さい最適なバネ定数が異なることがわかった。使用時の条件によってバネ定数を適切に設定する必要がある。図4に y 方向の動作を比較した結果を示す。シミュレーションと実機の変位データについて一致性が高く、考案した切紙モデルは適切だったと考えられる。

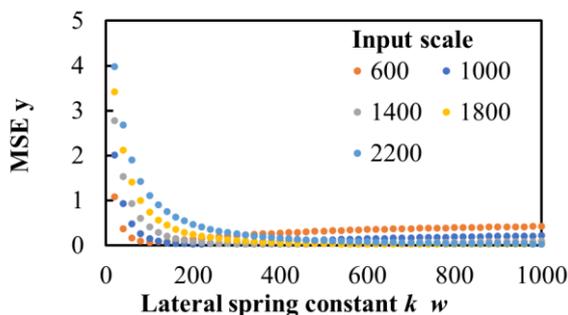


図3. y 方向動作比較

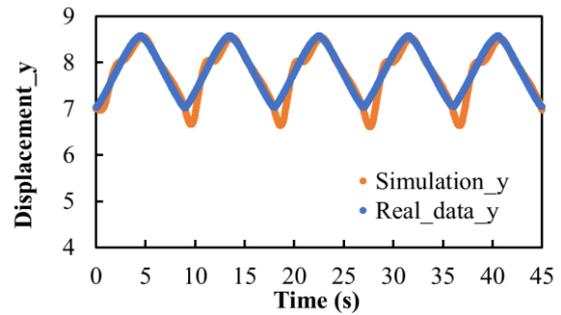


図4. y 方向時系列動作比較

図1のバネマスモデルをレザバーコンピューティングに実装した。入力と同時に切紙モデルから全てのバネ長さ \mathbf{L} の読み出しを行う。学習フェーズでは全てのタイムステップを用いるため、行をタイムステップ、列を各バネ長さとして行列化する。そして目標出力 \mathbf{O}_T と比較し、次の式によって出力重み \mathbf{w}_{out} を求める。

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{w}_{out} = \mathbf{O}_T$$

テストフェーズでは、各タイムステップの読み出し \mathbf{l} に学習した重み \mathbf{w}_{out} が単調に掛けられることによって出力を計算する。

$$\mathbf{O}(t) = \mathbf{l} \cdot \mathbf{w}_{out}$$

出力 $\mathbf{O}(t)$ の精度は目標出力 \mathbf{O}_T と比較することで評価する。誤差はMSE (Mean Squared error) によって決定する。

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (\mathbf{O}_T(t) - \mathbf{O}(t))^2$$

ここで m はテストフェーズにおける総タイムステップ数である。図5に計算結果を示す。

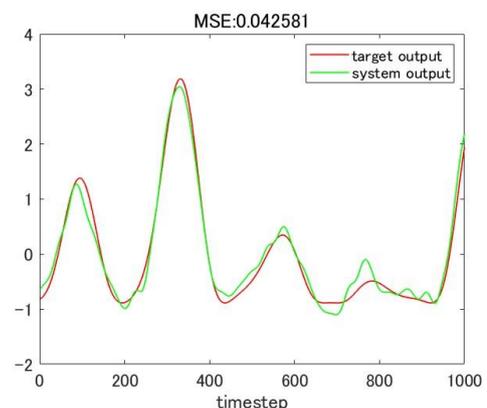


図5. シミュレーションレザバー計算結果

図5に示す通り構築した切紙モデルをレザバーとして学習に成功した。ターゲットデータは、レザバーに記憶性能があることを確認できる以下式で表されるボルテラ級数とした。

$$O_T(t) = \iint_0^{0.2} h_2(\tau_1, \tau_2) u(t - \tau_1) u(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2$$

$$h_2(\tau_1, \tau_2) = \exp\left(-\left(\frac{(\tau_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(\tau_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right)\right)$$

$\sigma_1 = \sigma_2 = 0.05$, $\mu_1 = \mu_2 = 0.1$ とした。

現在は図6に示すように実機切紙をモーショントラッキングすることで同様なレザバー計算が可能かを実証している。



図6. 実機レザバー計算実験系

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後の計画は、切紙構造が十分な学習性能を有することが確認できたため、レザバーコンピューティングを用いた切紙デバイス開発を進める。現在開発しているレザバーコンピューティングを用いた切紙デバイスの開発を達成し、英文学術論文誌・国際学会等で発表する。本稿で報告した内容を拡張した論文についてはロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023 にて発表予定である。デバイス構造自体が学習資源となり、計算速度の速さを活かした瞬時データ解析可能な分散型エッジデバイスの開発を目指して引き続き研究開発を

進める。

- [1] 青柳潤、星野大地、山下翔嗣、山田賢杜、重宗宏毅、カーボンニュートラルに向けた紙を計算資源とした機械学習方法の提案、ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023 (発表予定)

参考文献

- [1] Kohei Nakajima, Helmut Hauser, Tao Li and Rolf Pfeifer. Information processing via physical soft body. *Sci Rep*, Vol.5, No.1, 10487, 2015.
- [2] Ryo Sakurai, Mitsuhiro Nishida, Taketmo Jo, Yasumichi Wakao, Kohei Nakajima. Durable Pneumatic Artificial Muscles with Electric Conductivity for Reliable Physical Reservoir Computing. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.34,2, p. 224-230, 2022.
- [3] Ken Caluwaerts, Jérémie Despraz, Atıl Işçen, Andrew P. Sabelhaus, Jonathan Bruce, Benjamin Schrauwen, Vytas SunSpiral. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation. *J. R. Soc. Interface.*, Vol.11, 20140520, 2014.
- [4] Hiroki Taniyama and Eiji Iwase. Design of Rigidity and Breaking Strain for a Kirigami Structure with Non-Uniform Deformed Regions. *Micromachines*, Vol.10,395, p. 224-230, 2019.
- [5] Aaron Lamoureux, Kyusang Lee, Matthew Shlian, Stephen R. Forrest and Max Shtein. Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking. *Nature Communications* Vol.6,2015
- [6] Priyanka Bhowad and Suyi Li. Physical reservoir computing with origami and its application to robotic crawling scientific reports, Article number: 13002, 2021.
- [7] Helmut Hauser, Auke J. Ijspeert, Rudolf M. Fuchsli, Rolf Pfeifer and Wolfgang Maass. Towards a theoretical foundation for morphological computation with compliant bodies. *Biol Cybern*, Vol.105, pp.355–370, 2011.

無機系廃棄物を再利用した地盤改良材の開発

土木工学科 稲積 真哉

共同研究者

Kasetsart University	Faculty of Engineering	Nontananandh Supakij
Kasetsart University	Faculty of Engineering	Chaiprakaikeow Susit
Kasetsart University	Faculty of Engineering	Jotisankasa Apiniti

1. 序論

土地の再利用における原状回復では、構造物の解体撤去に加えて地中の基礎杭も引抜きによる撤去が求められる。基礎杭が残存した状態では地中障害物となるため、基礎杭の引抜きを行い、その後に杭引抜き孔への埋戻しを行うまでが杭抜き工事とされる。しかし、この埋戻しが低品質なものであると抜き跡の陥没をはじめ、周辺地盤の沈下や隣接構造物の傾斜や倒壊といった問題をもたらす恐れがあることから適切に埋め戻す必要があるが、最適な埋戻し材料の基準や埋戻し孔の検証方法に関する標準がまだ確立されていないという課題がある。

また、基礎杭が施工される地盤は一般的に軟弱なものと考えられることから、埋戻し材に求められる強度としては上記したように周辺地盤に影響しない現地盤以上の強度であり、加えてその後の施工において、杭の再打設を行う際に阻害しない硬質粘土程度までの強度であることが望ましいと考えられる。

杭抜き工事の主な工法では、既存杭にケーシングをかぶせながら掘削する際に、水を吐出してケーシング内外を泥水化する方法、またはセメントミルク等を吐出してケーシング内外をソイルセメント化する方法によって既存杭が自由に動くようにして引抜きが行われ

る。ここで埋戻し材について考えると、水を吐出して泥水化する方法では、杭引抜き後に孔内に残る泥水と固化材を混合して適度な強度に固化できれば埋戻し材となる。一方で、セメントミルク等を吐出する方法では、ケーシング内外におけるソイルセメント化したものが埋戻し材となる。

一般的に埋戻し材として用いられるものは、流動化処理土、砂、セメントベントナイト液等があげられ、上記の泥水と固化材を混合した埋戻し材や、ソイルセメント化したものは流動化処理土に分類されるものと考えた。以上のことを踏まえて、最適な埋戻し材となる流動化処理土を研究する上で地盤改良用添加材として開発した「シリカ系混和材」の適用性を試みることにした。

シリカ系混和材は、廃棄物の再利用およびCO₂ 排出削減に寄与することを目的として開発したもので、ガラス粉末を原料としたシリカ系地盤改良用添加材である。主な使用方法は、高炉水砕スラグを微粉化した高炉スラグ微粉末に少量添加し、併せたそれらを混合固化材として用いるものである。

シリカ系混和材を含む混合固化材を流動化処理土の固化材として用いることの利点としては、以下のものがあげられる。

① シリカ系混和材は六価クロム溶出の懸念

がない。

- ② 高炉スラグの一部を、カルシウム成分を含む材料に置換することで速やかな硬化発現にも対応可能となる 1-3)。
- ③ スラリー配合における粘性土との地盤改良において、セメント系固化材使用時以上に高い流動性を得られる 1-3) ことから、充填性向上や粘性土地盤での均質な混合が見込める。

以上の特長を持つ混合固化材を用いて流動化処理土への活用を考えるにあたり、泥水を対象とすることや、杭引抜き後の孔内への充填を考慮し、増粘剤の添加を図ることとした。

増粘剤を添加する目的としては、固化材はスラリー状で用いることを想定し、混練水と固化材からなるスラリー、またはスラリーと泥水を混合した際に、材料分離から生じるブリーディングが想定されることや、充填する孔内において地下水等で湧水が懸念される条件下での、部分的な希釈を軽減できることがあげられる。孔内への湧水が生じる条件下においても、流動化処理土が増粘剤の添加による粘性の付与によって湧水と混ざり合わない性状になれば、埋戻し材の品質が保持できると考えた。

添加する増粘剤は、界面活性剤型液体増粘剤ビスコトップ 500K(花王株式会社製、以下、ビスコトップ)を用いた。ビスコトップは、セメント系固化材に添加した際に、優れた水中不分離性を持ちながら、セルローズ系増粘剤とは異なる独自の増粘作用を付与することで高い流動性を保持できる 4) ことから、杭引抜き孔に対し、空隙なく埋戻し材を充填できることを期待した。

これらの材料を用いて杭引抜き孔埋戻し材の適用を図るため、スラリーおよび流動化処理土それぞれの配合で各種試験を行い、適用性を検証した。

2. 研究計画

無機系廃棄物を出発原料とするシリカ系混和材を配合した高炉スラグによる改良体(土)の流動性、強度特性、遅延効果に着目し、シリカ系混和材を配合した高炉スラグの地盤改良材としての適用性を確認するため、諸々の室内力学試験を行い、同時に粒子法 CAE 解析の適用によるシリカ系混和材を配合した高炉スラグによる地盤改良に関する設計・施工法の確立を目指している。さらに、シリカ系混和材を配合した高炉スラグの硬化メカニズムを X 線回折、蛍光 X 線分析および ICP 定性分析により化学的観点から明らかにするとともに、シリカ系混和材を配合した高炉スラグもしくは製鋼スラグの環境安全性を各種溶出試験により明らかにする。

シリカ系混和材を配合した高炉スラグにおけるシリカ系混和材は、フライアッシュ原料ならびに廃ガラス原料の両者を検討することを予定しており、およそ SiO_2 含有量が約 50% の白色粉末状であり、密度が $2.56\text{g}/\text{cm}^3$ 、粒度が $20\sim 100\mu\text{m}$ 、比表面積が $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ 程度である(試作において確認済み)。同時にシリカ系混和材を配合した高炉スラグにおける高炉スラグは、二水石膏無添加の高炉スラグ微粉末であり、およそ密度が $2.91\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積が $4,440\text{cm}^2/\text{g}$ 、ガラス化率が 99% のものを使用する予定である。ただし、製鋼スラグについても、シリカ系混和材を配合した製鋼スラグとしての可能性を検討する予定である。さらに、シリカ系混和材を配合した高炉スラグもしくは製鋼スラグによる改良の対象地盤は、含水比調整を行った砂質土(豊浦珪砂)ならびに粘性土(トチクレ)を予定している。

3. 計画の進行状況

(1) 配合試験・配合条件

試験は、固化材(B)と練混ぜ水(W)を混合して、固化材溶液にしてから泥水と混合することで疑似的な流動化処理土として扱い、そ

れぞれの配合による性状を検証することにある。なお、固化材溶液は質量%で配合し、W/B=150%、200%のそれぞれを作製する。

使用する固化材は、前述したシリカ系混和材 ($\rho_s=2.58\text{g/cm}^3$) および高炉スラグ微粉末 ($\rho_s=2.91\text{g/cm}^3$) からなる混合固化材と、比較用に JIS 規格品の普通ポルトランドセメント ($\rho_s=3.14\text{g/cm}^3$ 以下、普通セメント) とする。混合固化材は、W/B の高い配合の場合、初期強度の立ち上がりが遅い傾向があるが、高炉スラグの一部を普通セメント等のカルシウム成分を含む材料に置換して使用することで、早期の硬化を可能とすることが既往の研究1) で判明している。

このことから、混合固化材中のシリカ系混和材 (ES) と高炉スラグ (SL) の比率は、ES/SL=10 を基準として、高炉スラグから普通セメント (C) への置換率を 10%、20%、30% と変化させた、それぞれの配合で性状を比較する。

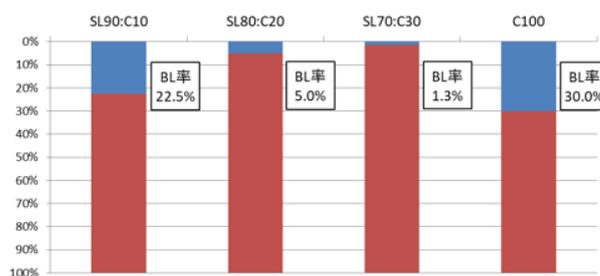
一方で、増粘剤のビスコトップは、固化材溶液中の混練り水に対して、一律 2% の添加とした。

固化の対象となる泥水は、トチクレー (関東化成株式会社製、 $\rho_s=2.65\sim 2.70\text{g/cm}^3$) を水道水と混合し、模擬泥水 ($\rho=1.30\text{g/cm}^3$) として調整したものを用いた。模擬泥水は調整後、12 時間以上の静置を行った後、試験時には再度攪拌してから使用した。なお、固化材溶液と模擬泥水の混合比は体積比で 1:1 の一律で行った。

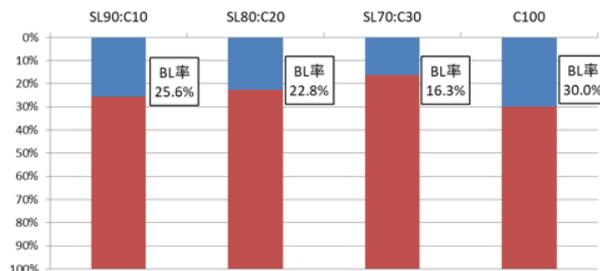
(2) ブリーディング率測定試験

模擬泥水は、静置後、数時間～十数時間のうちに細粒土粒子は沈殿し、ブリーディング (以下、BL) 率はおよそ体積の 6 割以上にもなるため、やはり増粘剤の添加は必要と考えられる。

こういった性状の模擬泥水と固化材溶液を混合し、流動化処理土とした時に、それぞれの配合における BL 率の違いを試験にて測定



(a) 固化材溶液W/B = 150%の流動化処理土



(b) 固化材溶液W/B = 200%の流動化処理土

図-1 流動化処理土のブリーディング率測定結果

した。試験方法は、土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法 (ポリエチレン袋方法)」(JSCE F 522) に準じて行った。この試験結果の 24 時間後の BL 率を図-1 に示す。

結果としては、W/B=150%の、混合固化材の普通セメント 20%、30%置換した配合では、ビスコトップ添加による BL の抑制効果が見受けられ、中でも 30%置換の配合は、BL が微小な値となっており良好な性状となっている。

その一方で、W/B=150%の混合固化材から普通セメントへ 10%置換した配合や、W/B = 200%のそれぞれの配合では、著しい BL 抑制効果は見受けられなかった。

(3) 一軸圧縮試験

埋戻し材として、流動化処理土を用いるにあたり、BL 率に加えて発現強度も、材料としての重要な評価項目となる。埋戻し材は、硬質粘性程度までの強度が望ましいため、一つの目安として $100\sim 500\text{kN/m}^2$ を目標とした。また、施工時の管理も加えて考慮すると、初期強度の立ち上がりが早く、その後、最終強度には早期に到達して、そのまま一定の強度

となるのが最も理想的である。これらの条件を満たす配合を「土の一軸圧縮試験方法」(JIS A 1216)に準じて試験を行い、検証した。

供試体の作製は、 $\phi 50\text{mm} \times H100\text{mm}$ の円筒容器モールドにて必要数作製し、自立が可能となった材齢を初期強度として、 $\sigma 7$, $\sigma 14$, そして最終強度とした $\sigma 28$ のそれぞれにおいて試験を行った。その結果を図-2に示す。

試験の結果では、W/B が違うそれぞれの配合で、普通セメントが $\sigma 28$ で、基準とした強度に相当しているが、BL 率が多い点の課題は残っている。その他の配合をみると、W/B=150%では初期強度の立ち上がりは早いですが、その後の強度発現が高すぎると言った点があり、W/B = 200%では、何れの配合も初期強度の立ち上がりが遅いこと等、今一度それぞれの配合を見直す必要がある結果であった。

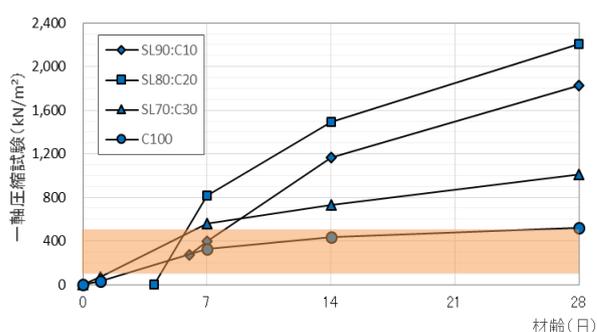
4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

(1) 今後の計画

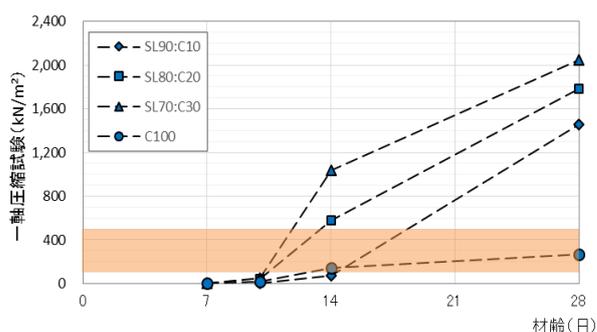
今回の、流動化処理土としての実験は、一部の配合での、一部の試験のみにとどまったが、各配合が有する特徴を若干ながら見て取れる結果を得られた。

試験結果においては、W/B=200%の配合はBL率や、初期強度の立ち上がりの遅さといった課題から、全体の配合をもう一度見直す必要がある内容となった。一方で、W/B = 150%における混合固化材の普通セメント 20%, 30%置換配合では、強度発現がやや高い結果ではあるものの、BL 率が良好な値であるため、若干の配合調整で基準を満足する配合となりえるものであった。

今回の結果を踏まえ、W/B や増粘剤添加率といった配合の見直しを行った上で、これらの試験に加えて、流動性や、水中不分離性といった性状の検証も実施して、流動化処理土の適切な配合を探っていきたいと考えている。



(a) 固化材溶液W/B = 150%の流動化処理土



(b) 固化材溶液W/B = 200%の流動化処理土

図-2 各材齢での流動化処理土の一軸圧縮強度 (着色領域は目標強度)

(2) 学会、論文等投稿・発表状況

- [1] Kowsura, S., Chaiprakaikeow, S., Jotisankasa, A., Malaikrisanachalee, S., Nontananandh, S., Nusit, K., Sawangsuriya, A. and Inazumi, S.: Properties and performances of soil cement modified with concentrated para-rubber, International Journal of GEOMATE: Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol. 24, No. 102, pp. 42-49, 2023-2.
- [2] Inazumi, S., Shakya, S., Chio, C., Kobayashi, H. and Nontananandh, S.: Time-series prediction of long-term sustainability of grounds improved by chemical grouting, Applied Sciences, Vol. 13, Issue 3, 2023-1.
- [3] Semmad, S., Jotisankasa, A., Mahannopkul, K. and Inazumi, S.: A coupled simulation of lateral erosion, unsaturated seepage and bank instability due to prolonged high flow, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 32, 100301, 2022-12.
- [4] Shakya, S., Inazumi, S. and Nontananandh, S.: Potential of computer-aided engineering in the design of ground improvement technologies, Applied Sciences, Vol. 12, Issue 19, 9675, 2022-10.
- [5] Nontananandh, S., Kuwahara, S., Shishido, K. and Inazumi, S.: Influence of perforated soils on installation of new piles, Applied Sciences, Vol. 12, Issue 15, 7712, 2022-7.

脳神経細胞を再生して脳機能を回復させる 新規神経分化誘導剤の創製

生命科学科 須原 義智

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

我が国の脳梗塞を含む脳血管疾患の患者数は118万人に達し、その治療・介護にかかる年間医療費は1兆7730億円にもものぼることが報告されている。これらの疾患により引き起こされるマヒや失語症、記憶障害などの脳機能の障害は、脳神経の壊死が原因であり、元の状態に回復させる有効な治療法は見つかっていない。また現在、人工多能性幹細胞（iPS細胞）による神経再生の研究が国内外で行われているが、遺伝子導入によるがん化などの副作用が課題で、病気の治療に使うには10年以上かかるとされている [Nakagawa, M et al. *Nat Biotech*, 2008]。

我々は遺伝子導入によらず、化合物による神経再生を目指している。現在までに体内で神経再生を可能とする化合物は見つかっていない。しかし、iPS細胞から心筋細胞や特定の細胞に分化させることができる「レチノイン酸」などの化合物がわずかであるが発見されており、本研究で見出す化合物によって神経再生は可能であると考えている。

本研究は、最近益々注目されている「再生医療」の観点から、「失われた脳神経の再生」を目指しつつ、「脳を正常な状態に戻す」ための新たな治療法の開発を目標に基礎研究を行うものである。我々は脳神経の素となる脳神経幹細胞から脳神経細胞（ニューロン）への分化を、従来の遺伝子導入によらず、安全性の高い低分子の神経分化誘導物質によって誘

導し、脳神経を修復・再生することを目指している（図1）。脳神経幹細胞は成人にも存在することが確認されている。そのため、このような化合物を創製できれば、成人の脳神経をも再生させることが可能であり、脳梗塞やパーキンソン病をはじめとした各種の脳機能の障害に対する治療法に応用できると考えている。

我々は「ビタミン K」がマウス胎仔大脳由来の脳神経幹細胞をニューロンへ分化させる作用をもつことを見出し、誘導体化により活性の向上を果たした [J Med Chem, 2015]。しかし、EC₅₀値は数～数十 μM であり、一般に医薬品のシーズになりうる nM レベルに引き上げるには、活性をさらに100倍以上向上させる必要がある。また細胞レベルのみならず、個体（動物）レベルにおいても有効な化合物を創出する必要がある。

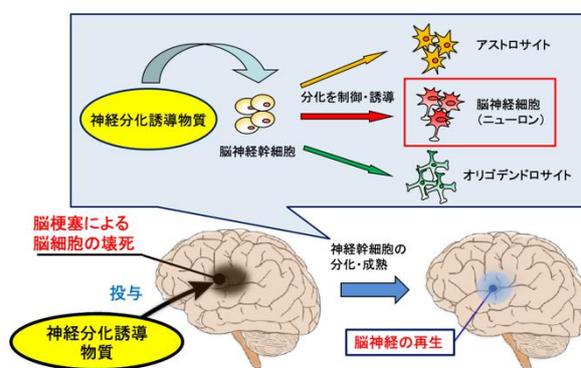


図1. 脳神経の再生・修復を促す神経分化誘導物質の創製

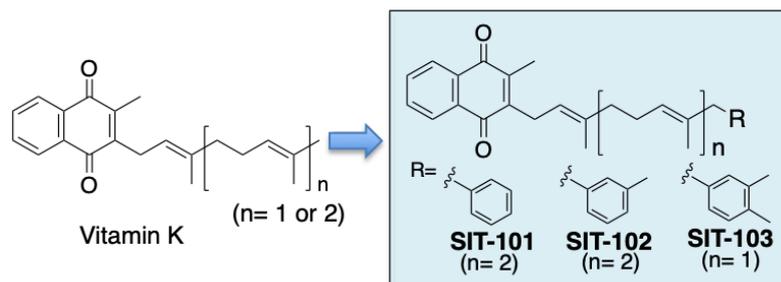


図 2. 我々が見出した神経分化誘導作用をもつビタミン K 誘導体

最近我々はトランスクリプトーム解析や阻害剤を用いた実験により、ビタミン K の神経分化誘導作用に関係する標的タンパク質は、脳内の代謝型グルタミン酸受容体 (mGluR1) であることを突き止めた。代謝型グルタミン酸受容体は脳神経系に広く発現し、記憶や学習に関連しており、精神疾患の治療薬の標的分子としても注目されている。そこで、mGluR1 に強く作用する化合物の創製を目的に研究を行うことにした。

現在までに、ニューロンへの分化を誘導する化合物は、国内外でほとんど見つからない。我々は、ビタミン K の側鎖末端部に様々な置換基を導入した誘導体を 50 種類以上合成し、1.0 μM の濃度で天然のビタミン K と比較して、細胞毒性が無く、神経幹細胞を約 1.3 倍多くニューロンへ分化させる作用をもつ誘導体 SIT-101 および SIT-102 を得ることに成功した (図 2) [*J Med Chem*, 2015]。一方興

味深いことに、SIT-103 は反対に分化誘導を抑える作用を有していた [*Bioorg Med Chem Lett*, 2017]。ビタミン K は血液脳関門を通過して脳内に移行することが明らかにされている。したがって、これらの活性をさらに強力にしたビタミン K 誘導体を創製して、脳神経を再生させる神経分化誘導物質へと展開する。

また一方で、ビタミン K の標的タンパク質は代謝型グルタミン酸受容体 (mGluR1) であり、精神疾患治療薬の標的分子としても注目されていることから、精神疾患治療への貢献の可能性など、本研究のより広い波及効果が期待できる。

2. 研究計画

研究計画の流れは次の通りである。(1) 計算化学と (2) コンビナトリアル合成の方法によって化合物ライブラリーを構築し、(3) さらに

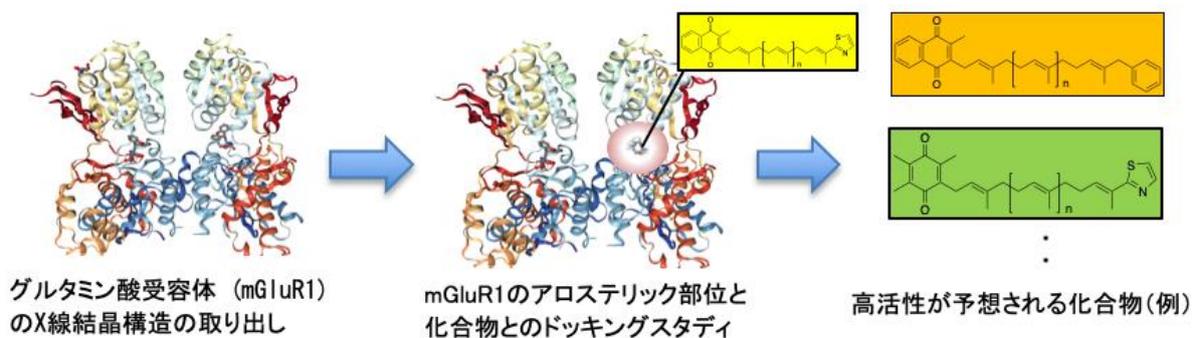


図 3. 作用タンパク質に強く作用する化合物の設計

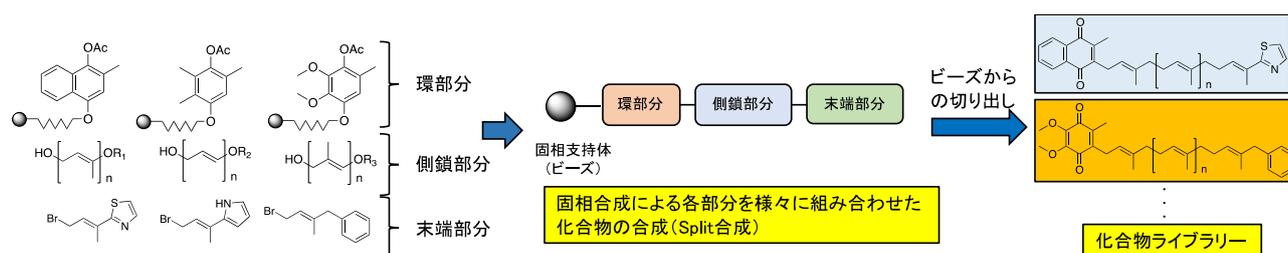


図 4. コンビナトリアル合成による多種多様な誘導体の合成

にライブラリーの構築を加速させ、(4) 活性化化合物を選別する。具体的には以下の研究計画に従って研究を進める。

(1) 計算化学による標的タンパク質に強く結合するリガンドの設計：ビタミン K の構造を基に、標的タンパク質である代謝型グルタミン酸受容体 (mGluR1) に強く作用するリガンドを計算化学の手法を用いて設計する。すなわち、PDB (Protein Data Bank) に収載されている mGluR1 の X 線結晶構造を基に、このアロステリック部位に結合する化合物の至適コンフォメーションやファーマコフォア、結合ポケットの疎水性、結合エネルギーなどを検討し、いくつかの候補化合物を設計する(図 3)。

(2) コンビナトリアル合成による化合物ライブラリーの構築：さらに活性向上の精度を上げるため、上記(1)での結果を基にその周辺化合物を合成する。その合成方法は「コンビナトリアルケミストリー」の手法を応用して、ビタミン K の構造を基本に、官能基や立体構造の一部を変えた多種多様の化合物を合成し化合物ライブラリーを構築する(図 4)。

(3) 低分子化合物ライブラリー構築の加速：上記で確立した手法(1)と(2)を用いて、さらに低分子化合物ライブラリーの構築を加速させる。

(4) In vitro 試験による活性化化合物の選別と in vivo 試験への展開：上記(1)~(3)

で構築した化合物ライブラリーの mGluR1 への結合親和性を等温滴定型カロリメトリー (ITC) により評価する方法を検討する。さらに当研究室で開発した高効率な High-Throughput Screening 法により神経分化誘導活性をもつ化合物を選別する。このとき細胞は取扱いが簡単で再現性の高い、市販の株化された脳神経幹細胞を用いる。具体的な評価方法として、分化したニューロンの表面に特異的に発現するタンパク質 (MAP2: Microtubule-Associated Protein 2) を蛍光免疫染色することで、化合物がどのくらい分化を促進したのかを細胞表面の蛍光強度によって測定する。得られた結果から高活性化合物を抽出し、それらが脳障害や脳神経変性疾患の病態モデルマウスに対してどのくらい有効に作用するのかを調べ、有効性を示す化合物を見出す。

(5) より高活性を示す化合物を得るための考察と検証：上記(4)で得られた結果から、化合物のどの部分が生物活性に重要なのかを、「ファーマコフォア解析」により考察する。次に、化合物の三次元構造と電子配置の関係を表す「ファーマコフォアモデル」を計算化学の手法により構築する。その情報を基にして新たな誘導体を設計し、さらに強い分化誘導活性を有する化合物を目指す。

3. 計画の進行状況

今年度はコンビナトリアル合成による方法の検討と並行して、新規化合物となる、メナキノンの側鎖末端に第二級アミンを介して主にシクロアルカンを結合させた化合物と上記の SIT-102 のベンゼン環に結合したメチル基をオクチル基まで伸長した化合物を合成した。シクロアルカンを導入した化合物の合成方法は、メナキノンを2を出発原料として、側鎖末端を二酸化セレンによりアルコールに変換し、さらに二酸化マンガンによりアルデヒドに酸化したものを共通中間体とした。このアルデヒド中間体にシクロアルキルアミンを還元的アミノ化反応によりカップリングさせて、目的とする化合物を得ることができた。シクロアルカンは、三員環のシクロプロピル基、四員環のシクロブチル基、五員環のシクロペンチル基、六員環のシクロヘキシル基、及びフェニル基の合計5種類を導入することに成功した。一方、SIT-102 の側鎖末端のアルキル基を伸長した誘導体は、*n*-ブチル基、*n*-ヘキシル基、*n*-オクチル基をグリニャール反応によって導入し合成することができた。

これら合成した化合物のうちシクロアルカンを持つ誘導体について、マウス胎仔大脳由来の神経肝細胞を用いてニューロンへの分化誘導作用を調べた。その結果、いずれの化合物も天然のビタミン K 同族体である MK-2 や MK-3 より約2倍ほど活性が高く、フェニル、シクロプロパン、シクロブタン、シクロペンタン、シクロヘキサンの順に活性が増加することが明らかになった(論文作成中)。これは当研究室でこれまで合成してきた誘導体の中で最も活性が高い化合物であった。もう一方のアルキル基を伸長した誘導体の分化誘導活性については現在検討中である。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後の計画

今後はシクロアルカンやアルキル基以外に、さらに側鎖末端の脂溶性や電子の偏りなどの化学的性質を変化させたビタミン K 誘導体をデザイン・合成し、神経幹細胞のニューロンへの分化誘導活性を検討する予定である。

また、我々が予想している代謝型グルタミン酸受容体 (mGluR1) を介した作用発現について、さらに詳細に調べると共に、mGluR1 に強く作用するリガンドを計算化学の手法を用いて設計することを計画している。

それらの情報や知見を総合して、脳疾患のモデル動物にも効果のある化合物を見出したい。

学会発表

・須原義智「ビタミン K の誘導体合成による新規生理活性物質の創製」日本農芸化学会関東支部 イソプレノイド研究会シンポジウム「脂溶性ビタミン研究の最前線」2022年9月22日

論文投稿

・SUHARA, Y. et al. Synthesis of new vitamin K derivatives with a ketone group at the C-1' position of the side chain and their conversion to menaquinone-4. *J. Mol. Struct.* 1276, 134614, 2023.

歯周病予測のための機械学習による 力学的性質データ解析の検討

生命科学科 中村 奈緒子

共同研究者

東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 岸田 晶夫

東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 木村 剛

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

近年、歯科領域では予防歯科が注目され、一定の成果が得られている。歯周病は歯垢によって引き起こされる炎症性疾患であり、歯周病は30代以上の3人に2人が罹患している。歯周組織の炎症によって歯槽骨の吸収が起こると、歯を支えられなくなり、歯は揺れるようになる。定期検診では、歯周病を未然に防ぐため、動揺度検査、プロービング検査、X線検査などで歯肉や歯根膜などの口腔内ソフトマテリアルの状態を評価している。先行研究では、動揺度検査では歯科医や歯科衛生士によって診断結果に差が出る可能性があることが報告されている。また、動揺度検査における各診断指標の動揺時に得られる荷重は異なることが報告されている。本研究では、歯科医師や歯科衛生士の技量によらず、定量的に口腔内ソフトマテリアルの状態を評価でき、さらに健康から疾病の連続状態（未病）を定義し、将来的な発病を予測可能なシステムの開発を目指している。本研究課題では、口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（組成、構造、力学的性質）と特性（細胞の被感染性）の関係を表す実験データを集積し、機械学習による予測モデルの構築を目指す。これまでに特徴パラメータ（組成）に関して検討を行

っており、本年度は昨年度に引き続き、口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（力学的性質）に関して、機械学習による解析方法の確立を目指した。昨年度はラットの歯周病誘発と力学的データの取得を行ったが、未処理の歯周組織と歯周病誘発した歯周組織のデータそれぞれに大きなばらつきが生じ、歯周病の判別は困難であった。この原因として、力学試験で用いたサンプルと歯周病誘発評価を行ったサンプルが異なっていたこと、正確に力学試験が行われていない可能性が考えられた。本研究では、昨年度の問題点を改善しつつ、ラットの歯周組織を用いた力学試験による荷重と移動量の連続的なデータを取得し、連続的な力学データを用いた歯周病の判別の可能性を明らかにすることを目的とする。

歯科領域において、「口腔ソフトマテリアルの特徴（組成・構造・力学的性質）」と「細胞との相互作用」と「特性（細胞の被感染性）」という三者の相関についての研究はなく、本研究の学術的独自性といえる。また、これらを実験的に定量化することは、インフォマティクスを活用した健康—疾病の連続状態（未病）の定義と予測モデルの構築につながる基盤的技術確立に繋がり、創造性の高い研究といえる。本研究の提案手法は、歯科医療のみ

ならず広範な医療への応用に展開できる可能性を有する。

近年のインフォマティクスの進展に伴い、医療・歯科医療への活用が期待され、特に、個別医療や疾患を予測・予防する先制医療に対するインフォマティクスの活用が強く期待されている。多くの場合、これまでに得られた疫学的データを駆使する方法論が取られ、疾患状態を診断する手法である。一方で、発病に至らない未病の状態でのケアの重要性が説かれ、インフォマティクスの活用が試みられているものの、健康-発病の連続状態（未病）の定義・予測は疾患毎に対応する必要がある。本研究課題では、口腔内ソフトマテリアルの健康-発病の連続状態（未病）の特徴パラメータ（組成・構造）のデータを集積し、それらの機械学習による画像解析方法の確立を目指している。口腔ソフトマテリアルと細胞の被感染性の定量化とインフォマティクスの活用は、これまでにない融合領域である。本研究で構築する予測モデルは、健康—発病の連続状態（未病）を定義できるものであり、予測に基づく介入により口腔健康の寿命を延ばす可能性を有し、国民のQOLの向上につながる。また、本研究の提案手法は、歯科医療のみならず広範な医療への応用に展開できる可能性を有する。

2. 研究計画

口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（力学的性質）の機械学習による解析方法の確立のため、以下の①-③の検討項目を実施した。研究協力者として修士1年生1名が本研究の一部に参画し、修士論文のための研究テーマとした。

① 歯周病誘発の検討

Wistar ラット（オス、6週齢）の右側の下顎の第一臼歯を5-0縫合糸で結紮し、2週間後に、歯周病誘発の評価を行った。健常な状態である歯周組織として未処理状態の左側の下

顎を使用した。昨年実施した microCT 撮像画像を用いた歯槽骨退行を指標とする歯周病誘発評価は、時間的な制約により力学試験で使用するサンプルとは異なるものであったため、力学試験で使ったサンプルが本当に歯周病誘発されていたか確認できなかった。本年は歯槽骨の退行および歯根の露出を短時間で評価可能なメチレンブルー染色を行うことで、歯周病誘発されたことを確認したサンプルで力学試験を実施した。

② 異なる特徴パラメータ（力学的性質）を有する口腔内ソフトマテリアルの力学的性質データ取得

正常モデルおよび歯周病モデルの歯の押し込み試験を行い、歯根膜の力学的性質データを取得する。動揺度検査の診断方法と同じ向きである、歯列に対して垂直方向に押し込み試験を行い、移動量と荷重のデータを収集する。力学試験の様子を動画で撮影し、異常なデータが検出された場合は動画で確認した。

③ 口腔内ソフトマテリアルの力学的性質データの解析

②で取得した力学的性質データから、未処理の荷重よりも歯周病誘発の荷重が小さいことを報告した先行研究の結果に合致するデータを選別した。選別された未処理の力学的データと歯周病誘発の力学的データの判別の可能性の検証を行った。評価方法として、まず近似式 $y = a_2x^2 + a_1x + b$ の係数 a_2 の比較を実施し、次に、荷重量約 0.1 N の時の荷重のデータの比較を行った。また、Python ライブラリーのニューラルネットワークを用いて、機械学習による連続的なデータの比較も行った。ニューラルネットワークの隠れ層は3つのものを用いた。学習用のデータセットとして、荷重と移動量の2つのパラメータのものと、連続的なデータから得られる傾きを荷重と移動量に加えた3つのパラメータのものを用いて行った。

3. 計画の進行状況

① 歯周病誘発の検討

外観より、歯周病誘発サンプルでは未処理と比べ、歯肉の損傷が起こっていることが観察された。メチレンブルー染色によって、歯周病誘発サンプルでは、結紮処理を行った臼歯の周囲の歯槽骨の吸収と退行によって外部に露出した臼歯の歯根膜が青く染まっていることが観察された (Fig. 1)。歯周病を患ったことによって、歯根を支えている歯槽骨の吸収が発生していることが考えられる。歯周病の誘発が確認されたサンプルを力学試験に用いた。

② 力学試験データの評価

得られた力学的データ (Fig. 2) の一部から、未処理よりも歯周病誘発の荷重のほうが常に大きくなっているサンプルがあることがわかった (Fig. 3)。これは、歯周病の有無によって得られる荷重に差があるとされている先行研究と矛盾が生じている。このような結果となったのは、ラットの臼歯が小さすぎたことで、押す向きや歯周組織の内部構造を考慮できなかったため、正確なデータを検出することができなかったと考えられる。

③ 係数や荷重の比較と機械学習による評価

未処理と処理済みのものから得られた近似式の係数 a_2 のグラフを Fig. 4 に、荷重量約 0.1 N の時の移動量のグラフを Fig. 5 に示す。これらの結果では有意差がなかった。データの選別を行っても、係数や荷重 0.1 N の時の移動量では判別できなかった。

機械学習による判別では、2 つのパラメータの時の精度は約 75 %、3 つのパラメータの時の精度は、約 85 % の精度が得られた (Table 1, Fig. 6)。以上の結果から、パラメータに傾きを含むことによって歯周病の判別を高精度で行うことができたと考えられる。

以上の結果より、ラットの臼歯では正確な力学的データを検出することは難しいという

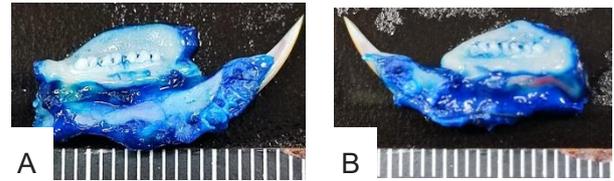


Fig. 1 メチレンブルー染色得られた画像
A : 未処理, B : 結紮処理

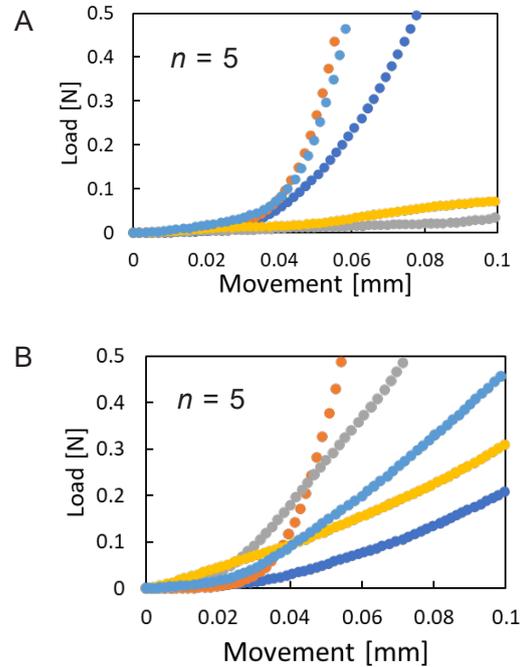


Fig. 2 力学試験から得た荷重と移動量の関係
A : 未処理, B : 歯周病誘発

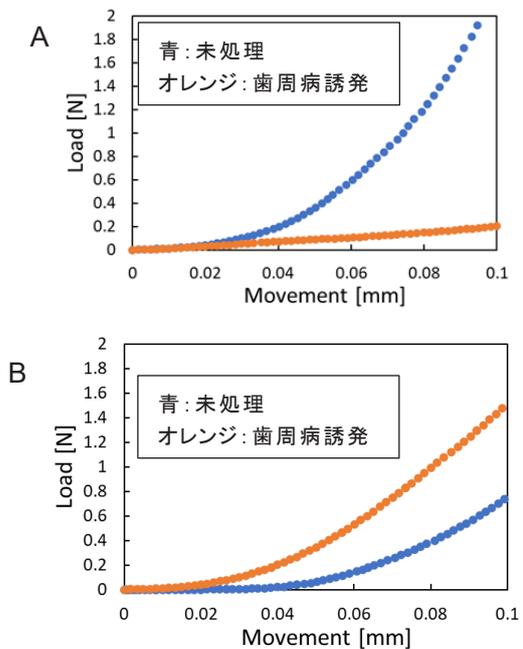


Fig. 3 力学試験で得られた一部のデータ
A : 先行研究に合ったデータ,
B : 先行研究に反したデータ

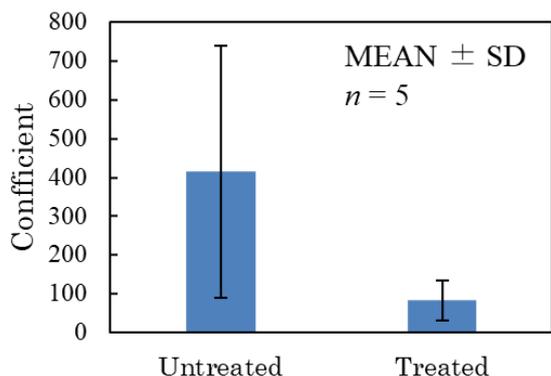


Fig. 4 近似式の係数

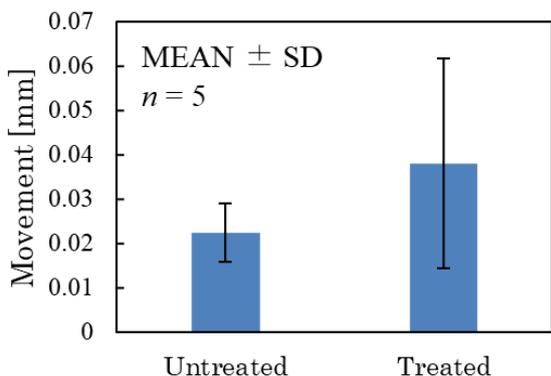


Fig. 5 荷重約 0.1 N の時の移動量

Table 1 機械学習に用いたパラメータ

A : 移動量と荷重のパラメータ,
B : 移動量と荷重と傾きのパラメータ

A			B			
	Movement [mm]	Load [N]		Movement [mm]	Load [N]	TILT
1	0	0	1	0	0	0
2	0.000333	0.000519	2	0.000333	0.000519	1.56
3	0.000667	0.00106	3	0.000667	0.00106	1.62
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
662			662			

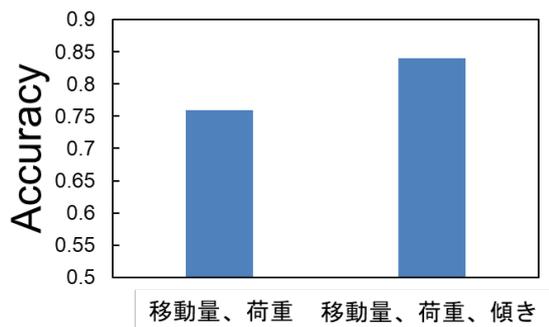


Fig. 6 機械学習によって得られた精度

ことがわかった。明らかに力学的データに差があるものについては、傾きを含んだ力学的データの解析によって、未処理と歯周病誘発の臼歯を判別することができることが示唆された。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

4-1. 今後の計画

経時的に測定可能となるような簡易かつ小型の圧縮試験機の作製を行う。

4-2. 学会発表状況

1. 秋山翔太, 中村奈緒子, 歯周組織にかかる力学的データを用いた新規歯周病診断法の開発, ライフサポート学会第 31 回フロンティア講演会, 東京, 3 月 7-8 日, 2022 年(口頭)
2. 新規歯周病診断法の開発を目指した歯周組織の力学的データ解析, ライフサポート学会第 32 回フロンティア講演会, 東京, 3 月 13-14 日, 2023 年(口頭)

参考文献

- 1) Pihlstrom BL.et al, Periodontal diseases. The Lancet (British edition) 2005; 366(9499): 1809-1820.
- 2) 土田有宏, 長島節志. 動揺歯の荷重量に関する研究. 日本歯周病学会会誌. 1992;34(4):810-819.

ビタミンKによる中枢神経再生機構の解明

生命科学科 廣田 佳久

共同研究者

神戸薬科大学 薬学部 薬学科 竹内 敦子

神戸薬科大学 薬学部 薬学科 都出 千里

神戸薬科大学 薬学部 薬学科 鎌尾 まや

芝浦工業大学 システム理工学部 生命科学科 須原 義智

1. 序論（はじめに，まえがき，目的）

ビタミン K は栄養素として広く認知され、緑黄色野菜に含まれるビタミン K₁ (PK) や発酵食品に含まれるビタミン K₂ (MK-n : n=1~14) に分類される。ビタミン K は血液凝固や骨形成作用に重要な役割を担うことが報告されており、血液凝固薬や骨粗鬆症治療薬として広く利用されている。我々は、ビタミン K の標的組織である肝臓や骨と比較して、ヒトやマウスの脳内ビタミン K 量が非常に多く存在することを見出している。また、PK から MK-4 への変換を担うビタミン K 変換酵素 (UBIAD1) を脳神経特異的に欠損させたマウスによって世界で初めて脳内ビタミン K が存在しないマウスの作出に成功し、脳の形態異常や認知機能低下などの脳変性疾患様の表現型を示した。さらに、東京都健康長寿医療センター村山先生との共同研究により、脳変性疾患患者の脳内ビタミン K 濃度が著しく低下していたことが分かった。興味深いことに、ビタミン K 製剤を服用したヒト脳検体では、脳内のビタミン K 濃度が 100 倍以上上昇した。このようなことから、ビタミン K は脳内において重要な役割を持つことが示唆されるが、脳内におけるビタミン K の役割は明らかではない。

我々は近年、脳内に存在するビタミン K が脳神経幹細胞をニューロンへ選択的に分化誘導することを報告した。しかし、ビタミン K によるニューロン分化誘導機構は明らかではない。これまでに、トランスクリプトーム解析を用いてニューロン分化に関与する遺伝子を網羅的に探索した結果、重要な遺伝子を見出した。また、ビタミン K 同族体の中でもっとも活性の高い MK-4 が損傷した中枢神経を修復できることが分かった。これらの結果は、脳梗塞などの脳血管障害に対して、食事から摂取できる栄養素ビタミン K が、損傷を受けた「脳神経細胞の再生」を促すと考えられ、ビタミン K 誘導体を用いることで治療に応用できる可能性が示唆されている (図 1)。

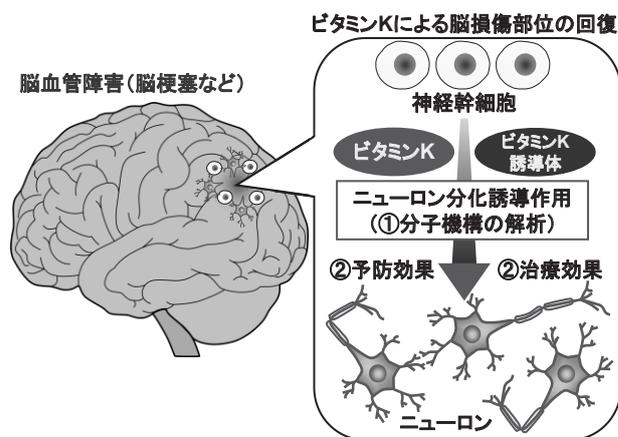


図 1 脳内におけるビタミン K の予想される役割

そこで本研究では、「ビタミン K は脳内においてどのような役割を担っているか?」の一端を解明するため、本研究課題ではビタミン K とその誘導体を用いて「中枢神経再生を目指した神経幹細胞からニューロンへの分化を誘導する分子機構の解明」を目指した。

2. 研究計画

① ビタミン K による L 型 Ca²⁺チャネルを介したニューロン分化機構

我々は、トランスクリプトーム解析により L 型 Ca²⁺チャネルを同定した。L 型 Ca²⁺チャネルは、Cav1.1~Cav1.4 の 4 つのサブユニットが存在するが、脳内に特異的に発現する Cav1.2 と Cav1.3 が関与することを事前に見出している。そこで、L 型 Ca²⁺チャネル阻害剤：Verapamil を用いて神経幹細胞内の Ca²⁺流入が抑制されていることを確認し、ビタミン K によるニューロン分化が抑制されるかを検討した。

② ビタミン K による代謝型グルタミン酸受容体を介したニューロン分化機構

トランスクリプトーム解析から、代謝型グルタミン酸受容体 (mGluR) がビタミン K によるニューロン分化に関与することが分かった。代謝型グルタミン酸受容体は 8 種類 (mGluR1~8) 存在し、3 つのグループ (G1~3) に分類される。トランスクリプトーム解析では、7 種類の mGluR が優位に変動したため各グループの阻害剤 (G1 阻害剤: PHCCC、G2 阻害剤: APICA、G3 阻害剤: CPPG) を使用し、どの mGluR グループがもっとも神経分化に寄与するかを評価する。また、該当するグループに含まれる mGluR に対する阻害剤を用いることで、もっとも重要な mGluR を明らかにした。

3. 計画の進行状況

① ビタミン K による L 型 Ca²⁺チャネルを介したニューロン分化機構

ビタミン K による L 型 Ca²⁺チャネルを介したニューロン分化誘導作用を検討した。はじめに、L 型 Ca²⁺チャネルを特異的に阻害する Verapamil の阻害効率を測定するために、細胞内への Ca²⁺流入量を測定した。その結果、MK-4 処理した細胞において、細胞内への Ca²⁺流入量が上昇し、Verapamil を処理することで Ca²⁺流入量が約 100 % 阻害された。さらに、MK-4 が L 型 Ca²⁺チャネル発現量を上昇させるか検討するために、脳に発現する L 型 Ca²⁺チャネル (Cav1.2、Cav1.3) の mRNA 発現量を real-time PCR 法を用いて定量した。その結果、MK-4 を処理した細胞では、Cav1.2 および Cav1.3 ともに mRNA 発現量が上昇した。また、MK-4 および Verapamil を処理した細胞では、mRNA 発現量の減少は認められなかった。次に、MK-4 によるニューロン分化誘導活性を評価するために、ニューロン特異的に発現する Map2 の抗体を用いて蛍光免疫染色を行うとともに、Map2 の mRNA 発現量を定量した。その結果、MK-4 処理によって、ニューロン分化誘導活性が上昇し、Verapamil を処理することでニューロン分化誘導活性が約 20 % 減少した。また、他にもニューロン特異的に発現する Gap43、NeuroD、Nf200、Ngn1、Mash1、Tuj1 の mRNA 発現量を測定した。その結果、Gap43、Mash1、Tuj1 では Map2 と同様の結果が得られた。NeuroD では MK-4 処理した細胞において有意な発現量の上昇が認められた。しかし、Nf200 では、mRNA 発現量の差は認められず、Ngn1 では、MK-4 処理によって mRNA 発現量の低下が認められた。

以上より、ビタミン K が L 型 Ca²⁺チャネルの発現量を上昇させ、細胞内への Ca²⁺流入量を上昇させることでニューロンへの分化を誘導していることが明らかになった。

②ビタミン K による代謝型グルタミン酸受容体を介したニューロン分化機構

トランスクリプトーム解析を用いてニューロン分化誘導機構に関与する遺伝子を解析した。その結果、MK-4 を処理した細胞において大脳に発現する 48,441 種の遺伝子発現変動のうち、MK-4 処理によって 3,780 種の遺伝子発現量が有意に変動した。その中でも MAPK シグナルに関与する遺伝子が最も多く変動しており、特にグルタミン酸受容体 (mGluR) の発現量が顕著に上昇していた。そこで、Real-time PCR でも同様の結果が得られるか調べるために、real-time PCR を用いて *mGluR1* の発現量を測定した。その結果、MK-4 処理によって *mGluR1* の mRNA 発現量が 5 倍以上上昇していた。そこで、mGluR Group 1, 2, 3 阻害剤を用いて MK-4 によるニューロン分化誘導機構に対する mGluR の関与を検討した。その結果、mGluR Group 1 阻害剤を処理した細胞において MK-4 によるニューロン分化誘導活性の減少が認められた。また、トランスクリプトーム解析から *mGluR2* の発現量が最も上昇していることに着目し、mGluR Group1 に属する *mGluR1*, 5 および *mGluR2* 特異的な阻害剤を用いて MK-4 によるニューロン分化誘導活性に対する影響を評価した。その結果、*mGluR1* 阻害剤を処理した細胞において MK-4 によるニューロン分化誘導活性の減少が認められた。

このことから、MK-4 は mGluR を介してニューロンへの分化を誘導することが新たに示唆され、その中でも *mGluR1* の関与が強く示唆された。

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

本研究より、ビタミン K がヒトやマウスの脳神経幹細胞をニューロンへ分化誘導する作用タンパク質を明らかに出来れば、脳内におけるビタミン K の新たな役割を分子レベ

ルで明らかにすることが可能になる。これまでに幹細胞から分化誘導された神経細胞を、神経疾患モデル動物に移植して神経を再生させると、症状の改善が認められることが報告されている。また、我々はビタミン K が血液脳関門を通過することを明らかにしている。したがって、ビタミン K を基にした神経分化誘導物質は、経口投与で効果を示す神経再生物質として、再生医療研究へ将来的に応用できる可能性がある。本研究が完成した暁には将来的なビジョンとして、治療は不可能と考えられていた脳梗塞をはじめとした脳血管障害患者の脳機能回復に応用を考えている。

[論文等投稿] (計 3 件)

1. Ikeda Y, Hirayama A, Kofuji S, **Hirota Y**, Kamata R, Osaka N, Fujii Y, Sasaki M, Ikeda S, Smith EP, Bachoo R, Soga T, Sasaki AT. SI-MOIRAI: A new method to identify and quantify the metabolic fate of nucleotides. *J. Biochem.*, **170**, 699-711 (2022)
2. Furukawa N, Chen X, Asano S, Matsumoto M, Wu Y, Murata K, Takeuchi A, Tode C, Homma T, Koharazawa R, Usami K, Tie JK, **Hirota Y**, Suhara Y. Synthesis of new vitamin K derivatives with a ketone group at the C-1' position of the side chain and their conversion to menaquinone-4. *J. Mol. Struct.*, **1276**, 134614 (2023)
3. **Hirota Y**. Elucidation of physiological functions of vitamin K in the brain and development of new derivatives for neuroregeneration. *Yakugaku Zasshi*, **143**, 199-203 (2023)

[学会発表] (計 30 件 : 筆頭・責任)

1. Kohei Murata, Satoshi Asano, Shintaro Tagami, Maya Kamao, Miyuu Nishikawa, Shinichi Ikushiro, Yoshitomo Suhara, **Yoshihisa Hirota**

EASURING THE AMOUNT OF VITAMIN K IN THE BODY FROM PRECISE QUANTIFICATION OF VITAMIN K₃ IN URINE.

17 th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2023), Suranari, Thailand (2023)

2. Yuxin Wu, Yuri Maitani, Mayu Hayakawa, Yoshitomo Suhara, **Yoshihisa Hirota**

MK-4 PROMOTES NEURONAL DIFFERENTIATION VIA METABOTROPIC GLUTAMATE RECEPTORS.

17 th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2023), Suranari, Thailand (2023)

それ以外に国際学会における発表が 1 件、国内学会における発表が 27 件

芝浦工業大学 2022年度特別教育・研究報告集

発行年月日 2023年5月31日

発行所 〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5
TEL 03(5859)7180 FAX 03(5859)7181

発行部署 芝浦工業大学
研究推進室 研究企画課

製作所 株式会社 エスアイテック

ISSN 2185-7326

無断複写・転載を禁ず