ＩＳＳＮ ２１８５-７３２６

２０２４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系人材の育成」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２０２４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

２０２５年7月

２０２４年度　芝浦工業大学　特別教育研究　及び　特別研究

目　　次

１．　特　別　教　育　研　究

（１）　教育改革研究活動助成

地域志向

少子高齢化社会へ向けたインバウンドとウェルビーイングのプロモーションによるビジネス創出のためのローカリゼーションプロジェクト

工　　学　　部　　村 上　　嘉 代 子

「定期的な AR スポーツの実践は地域高齢者の体力を向上させるか?」プロジェクト

工　　学　　部　　石　崎　　聡　之

「産学官連携スキームによるアントレプレナーシップ教育の充実」プロジェクト

システム理工学部　　機械制御システム学科　　長 谷 川　　浩 志

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

システム理工学部　　環境システム学科　　市　　川　　学

「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」プロジェクト

システム理工学部　　環境システム学科　　鈴　　木　　俊　　治

「地域に貢献できる大学パブリックスペースの提案」プロジェクト

デザイン工学部　　デザイン工学科　　橋　　田　　規　　子

「江東内部河川・運河の活用とコミュニティ強化」プロジェクト

建　築　学　部　　建　　築　　学　　科　　志 村　　秀　明

「『木のジャングルジム』を使用した伝統木造構法の木育実践」プロジェクト

建　築　学　部　　建　　築　　学　　科　　小 柏　　典　華

「豊洲四丁目団地における安全・安心なコミュニティ形成」プロジェクト

建　築　学　部　　建　　築　　学　　科　　小　　菅　　瑠　　香

実践的教育

オリジナルロボット組立て教材のレスキューコンテストや グローバル PBL への FD 展開の取組み

工　　学　　部　　長　澤　　純　人

データマイニング・テキストマイニングを用いた国際学習プログラムの成果解析・グローバル技術者育成の研究

工　　学　　部　　木　村　　昌　臣

教育環境のリアルタイムデジタルツインの研究とその実証実験

工　　学　　部　　新　熊　　亮　一

リカレント教育の提供に向けた D&I サイエンスカフェの実施
～あらゆる人の知る喜び、学ぶ楽しさを掘り起こす～

工　　学　　部　　山　本　　文　子

Analyzing International Students' Written Output:Utilising CVLA To Compile an Engineering-focused ESP Corpus for Academics and Educators

工　　学　　部　　吉 久 保　　肇 子

第 4 期認証評価を見据えたカリキュラム評価への学生参画体制の構築

教育イノベーション推進センター　榊　　原　　暢　　久

教育研究の DX

採点作業を効率化する AI・DX システムの活用

工　　学　　部　　幡　野　　明　彦

電気電子課程におけるロボットアームを用いた DX、AI に対応可能な人材育成のカリキュラム構築

工　　学　　部　　小　池　　義　和

教育研究環境に仮想化技術を用いた EdTech 推進

システム理工学部　　環 境 シ ス テ ム 学 科　　持　　永　　大

２．　特　別　研　究

（１）プロジェクト研究助成

着任時研究助成

縮退した開殻電子状態計算のための理論開発

工　　学　　部　　土　持　　崇　嗣

超構造量子物質エレクトロニクスの推進

工　　学　　部　　中　野　　匡　規

ゴースト分光イメージング法の開発

工　　学　　部　　桑　　原　　彬

ナノカーボン複合体電極によるカルシウム金属蓄電池の開発

工　　学　　部　　木　須　　一　彰

物理モデルと深層展開による水中画像鮮明化

工　　学　　部　　前　田　　慶　博

走行中給電モビリティの電源技術革新

工　　学　　部　　畑　　勝　　裕

半導体量子コンピュータにおけるゲート分解

工　　学　　部　　金　尾　　太　郎

細胞加工を促進する細胞培養基板の探索

システム理工学部　　生　命　科　学　科　　髙　山　　祐　三

ロボット群を用いた VR 用エルゴノミック装置

システム理工学部　　電子情報システム学科　　高　嶋　　和　毅

人間型ロボット安定操縦手法の開発

システム理工学部　　機械制御システム学科　　大　谷　　拓　也

SDGs 達成に向けた変革への要因の研究

システム理工学部　　環 境 シ ス テ ム 学 科　　カトラミーズ・ターレク

建築空間と仮想空間のインターフェイス研究
システム理工学部　　環境システム学科　　片　岡　　誠

医療における認知人間工学アプローチの適用　-リスク認知技能の分析を対象に-
デザイン工学部　　デザイン工学科　　青　木　　洋　貴

室内空間の色温度に関した多面的評価の検討
デザイン工学部　　デザイン工学科　　中　島　　瑞　季

身体知デザイン技術の創出
デザイン工学部　　デザイン工学科　　奥　　貴　紀

科研費連動型

生体吸収性マグネシウム合金の腐食速度制御を目指した腐食機構の解明
工　学　部　　吉原　正一郎

Low-temperature fabrication of Ge thin films by metal-induced crystallization method
工　学　部　　Narin Sunthornpan

高速ヒドリド伝導性エピタキシャル薄膜の開発と その電気化学デバイス応用
工　学　部　　大口　裕之

高分子モノリスのクリスチャンセン効果を用いた温度応答性調光材料の開発
工　学　部　　永　直文

シニアのデジタルインクルージョンを志向したシニアのためのプログラミング教育実践
工　学　部　　大橋　裕太郎

無線・画像統合センシングによる動的ディジタルツインと無線通信の相互最適化
工　学　部　　菅　宣理

ハイパースペクトルカメラ搭載型被災者探索用 UAV の開発
工　学　部　　プレーマチャンドラ チンタカ

河川・海洋広域観測のための微粒子・微生物濃縮、検出技術の開拓

工　学　部　小　池　義　和

Upper Limb Muscle and Posture Evaluation System During Activities of Daily Living Using Musculoskeletal Model and Deep Learning Approach

工　学　部　Shahrol Mohamaddan

Development of Guidelines for Designing Kawaii Fashion using Deep Learning Model

工　学　部　Tipporn Laohakangvalvit

COVID-19 とその後遺症に対する治療効果を併せ持つ化合物の創製

システム理工学部　生　命　科　学　科　須　原　義　智

生体内血液循環の調節機序解明に向けた血液細胞の変形能の役割解明

システム理工学部　生　命　科　学　科　渡　邉　宣　夫

都市空間デジタルツインにおける実空間と仮想空間の 同期を効率化する適応型データ伝送技術

システム理工学部　電子情報システム学科　山　崎　託

加工状態を予測するインテリジェント骨加工デバイスの開発

システム理工学部　機械制御システム学科　桑　原　央　明

戦後日本の住宅およびライフスタイルの近代化における女性の役割

システム理工学部　環境システム学科　松　下　希　和

生成 AI の安全性と頑健性を高める手法の研究

システム理工学部　環境システム学科　持　永　大

記憶の哲学の構成主義的展開とエピソード記憶の共有　記憶共有の可能性

デザイン工学部　デザイン工学科　櫻　木　新

うつ病における脳の酸化ストレスと脳由来栄養因子との関係

SIT 総合研究所　中　村　朱　里

スマートグローブによる農畜産物の弾性率分布計測に基づく内部欠陥・熟成度評価
工　　学　　部　　細　矢　　直　基

骨格筋の量的 /質的評価に基づく不妊症患者の健康管理サポートシステム確立への挑戦
システム理工学部　　生　命　科　学　科　　赤　　木　　亮　　太

大学間連携

単結晶 PZT-MEMS アクチュエータ
工　　学　　部　　吉　田　　慎　哉

異種元素ドープカーボン系複合触媒材料の合成
工　　学　　部　　石　崎　　貴　裕

月レゴリスの熱物性と内部構造評価
工　　学　　部　　遠　藤　　理　恵

N2O 排出抑制と省エネに寄与できる新型硝化菌（コマモックス菌）を活性汚泥から集積する手法の検討
工　　学　　部　　李　　沁　　潼

船舶搭載 GNSS/LiDAR のコスト改善の可能性に関する調査研究
工　　学　　部　　中　川　　雅　史

➢　所属学科等名は、2024 年度中のものです。

少子高齢化社会へ向けた インバウンドとウェルビーイングのプロモーションによる ビジネス創出のための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)
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)／渡邉 大(機械制御システム学科)／岡田 佳子(工学部)／中村 真吾(工学部)

■プロジェクトの概要

本プロジェクトは，大学院および学部のPBL型授業や卒業･修士研究を通じて，観光活性化および高齢社会対応に向けたサービスシステムを開発することを目的としている．今年度の実施内容としては，地域活性化や産業支援，高齢者観光等を目的とした多様な取り組みを展開した．(1)「能登カリーノケール」プロジェクトでは，能登半島のケールの認知度向上と被災農家支援を目的に，特産品と組み合わせたイベントの提案とブランド化の推進を行った．(2)ホテル業界向けのVR英語トレーニングでは，生成AIを活用して実用的な学習環境を整え，訪日観光客対応力の向上を図った．(3)御殿場市の茅産業では「富士茅(FUJIKAYA)」ブランドの確立や体験イベントを通じて，担い手不足の解消と産業の持続性を高める施策を提案した．(4)「Knit for Peace」プロジェクトでは，温浴施設を活用した編み物イベントを企画し，若年層の関心を引きつけながら地域コミュニティの活性化を促進できることを目的とした．(5)高齢者観光活性プロジェクトでは，3Dホログラムを制作して，旅に出かけることが難しくなった高齢者に対して旅に出た感覚を得てもらうものであった．(1)のプロジェクト以外は海外の学生との連携による取り組みであり，グローバルな視点を持って取り組み，各地域の課題解決と新たな価値創出，関連団体との連携による産学官協働の強化ができた．

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

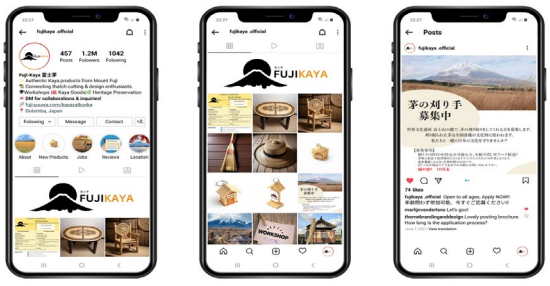
【教育】
大学院理工学研究科のシステム理工学専攻必修科目「システム工学特別演習」において6名，システム理工専攻集中講義の「Cross-cultural Engineering Project(CEP)」において24名(日本人学生9名、海外からの短期留学生15名)，工学部卒業研究2名，計32名が本プロジェクトに参加した．前期は，「能登カリーノケール」プロジェクトにより，震災のあった能登半島を支援するために，能登半島または石川県の特産品を用いた料理の提案を行った．集中講義のCEPは本学で行った授業ではVRを使いやすく身近にすることでトレーニングを容易にし，人材育成へ貢献する提案を行った．また，人材不足の産業へ若者を引き付けるための提案，温浴施設での若者を対象としたイベント開催の提案やタイの高齢者向けの観光ビジネスについて提案を行った．学生は実社会に存在する課題解決に取り組む機会を得ることができた．

【研究】
工学部卒業研究として，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，御殿場市を対象として，地域活性化を観光を通じて行うための課題の発見，イベントに参加することでの現状調査，アンケート調査によるニーズ分析，口コミサイトからの口コミ分析により御殿場の観光資源の再確認を行った．この取り組みは来年度も継続して行っていくこととなった．イベントへ参加し，追加のアンケート調査や御殿場市の観光資源への人の流れを調査した．今後はアウトレットを目的として訪れた観光者がほかの観光資源へも立ち寄るための二次交通や仕組みづくりを検討予定である．

【社会貢献】
PBLプログラムの提案については，前期はトキタ種苗株式会社，CEPでは，株式会社温泉道場，御殿場市DMO，有限会社富士勇和産業，デジタルハリウッド大学大学院より協力，ご指導をいただいた。海外からの留学生の参加が多く，フィールドワークを通して，日本の産業の魅力や観光資源の再発見が可能となり，グローバルな視点による提案と企業や自治体との議論ができたことは，産業へ貢献につながった．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。



御殿場市で行われた御殿場の特産品を使用した井祭りのイベントにおいてアンケート調査を行い，イベントによる観光活性化へ向けた調査を行った．




(CEP@SIT)御殿場市のフィールドワークでDMOの方々にご協力いただいた．日本人学生と短期留学生が協力して日本のかや産業への若者の認知や興味向上に向けた提案を行った．

主なトピックス

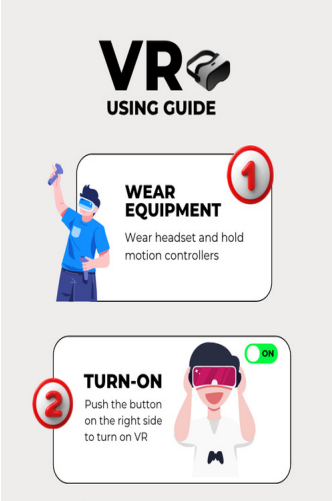
■「能登カリーノケール」プロジェクト

能登半島で栽培されるケールの認知度向上と消費拡大，さらに能登半島地震で被災した農家支援を目的としたプロジェクト．ケールの特性や能登での栽培状況を分析し，ターゲットを地域住民や健康意識の高い層に設定．具体的な施策としては石川県の特産品と組み合わせた「ミステリー鍋」イベントを企画し，参加者がランダムに選ばれた具材を使った鍋を楽しみながら能登ケールの魅力を体験できる仕組みを考案した．さらに、トキタ種苗株式会社が被災農家へ無償で苗を提供し，販売促進の支援を行うことも提案された．イベントを通じてケールのブランド化を進め能登地域の復興と持続的な農業発展を目指すことが提案された．



■VRトレーニング利用促進

多くのホテル従業員は十分な英語力を持っておらず，既存のVR学習システムは使いにくさやコンテンツの不快感が原因で敬遠されがちなため，本プロジェクトでは生成AIを活用してより柔軟な会話と詳細なフィードバックを提供し，ユーザーが直感的に操作できるチュートリアルを導入することで，VR学習の利用促進を図った．AIを統合したVR空間の開発やよりユーザーフレンドリーなデバイスの設計を進め，効果的かつ快適な英語トレーニング環境を実現できる提案を行った．





■ 若者ターゲットの「Knit for Peace」

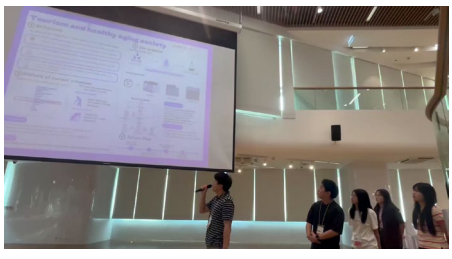
「Knit for Peace」は、温浴施設「Ofuro Café Utatane」を活用し，編み物を通じて地域コミュニティの活性化と若年層の関心を引くことを目的とた．フィンランド文化に着想を得て，リラックスできる環境の中で編み物を楽しめるイベントを企画．特に18～24歳の大学生をターゲットにSNSやTikTokのトレンド分析を活用し「自分のために編む」「Ofuro Caféの装飾として編む」「チャリティのために編む」という3つの選択肢を提供する提案．編み物を楽しむだけでなく社会貢献にもつながる仕組みを構築．無料または低価格で参加できるプログラムを設けることで誰もが気軽に参加できる環境を提案した．

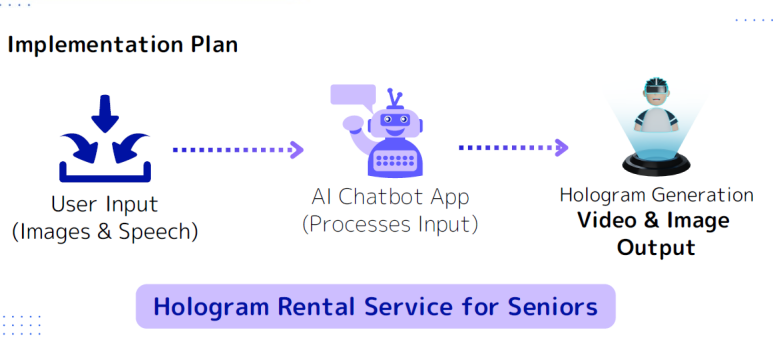


■ 高齢者向けの観光ビジネスの提案

高齢化が進む日本とタイの高齢化社会に向けての観光ビジネスモデルを構築．AIを利用して懐かしいと思う観光コンテンツを生成しそれを3Dホログラムを用いてより現実的な観光に近づけ，観光地の現地の特産物にもお金が落ちるような仕組みを考案．足腰が弱く移動が難しい高齢者をターゲットとし，ウェルビーイングな高齢者観光への提案を行った．







「定期的なARスポーツの実践は地域高齢者の体力を向上させるか？」プロジェクト

代表者	石﨑聡之【教授】(工学部 情報・通信課程情報工学コース)
構成員	真鍋宏幸(工学部 情報・通信工学課程情報工学コース)／井尻敬(工学部 情報・通信工学課程情報工学コース)／浜野学(工学部 電気電子工学課程先端電子工学コース)／深野真子(工学部 機械工学課程先進機械コース)

■プロジェクトの概要

本研究グループは2014年より地域高齢者の健康維持増進事業を推進し、継続的な運動教室の参加が高齢者の体力を向上させることを報告している。また、COVID-19の流行時には、Zoomを用いた遠隔型運動教室を開催したが、参加者へのアンケートから、参加者間の会話などの交流が運動継続の大きな要因であることが分かっている。本研究グループはCOVID-19流行後に高まった健康不安を解消するため、より楽しく会話のある運動として、近年ARスポーツとして注目されているHADOに注目した。HADOは競技性があるものの、体力差・体格差・性・運動歴などを考慮しなくても実施出来るインクルーシブスポーツとされている。本プロジェクトでは、HADOの定期的な効果について検証した。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

過去に本プロジェクト(PJ)代表者が実施してきた運動教室では、参加者(高齢者)からの“学生との交流”を要望する声が非常に多かった。そのため、PJ実施のために数名の学生サポートを導入してきた(石﨑研究室ゼミ生)。

本PJでは2名の男子学生を正副責任者として、参加者への連絡・説明などの準備を行って貰った。また、体力測定時に常時5～6名の男女学生が測定補助として関わった。正副責任者には教室実施に対する責任感が生まれ、測定補助学生には高齢者とのコミュニケーションの必要性が求められ、それぞれの学生にとって成長の場になったと考えられる。



【3VS3でHADOをプレーしている様子】

【研究】

さいたま市内に在住の地域高齢者(39名，65歳以上)を対象としてPJを実施した。参加者はHADOの効果を検討するため、週に1回HADOを週1回(HADO1群)もしくは2回行うグループ(HADO2群)に分け、また、比較対象のため通常の運動をする週1回(Ex1群)、週2回(Ex2群)実施するグループに分けた。両グループとも運動実施の冒頭にケガ予防のストレッチングを約15分行い，それからHADOもしくは通常の運動に分かれた。4週間の介入実験の結果、HADO・通常運動群とも柔軟性が向上していた。他の体力要素は変化が示されず、実施回数が影響したものと考えられる。一方で、HADOは運動強度が低いため体力に自信がなくても参加しやすく、コミュニケーションの機会が多いため、楽しく取り組めるスポーツとして、効果的である可能性が示唆された。



【通常運動群(Ex1群・Ex2群がトレーニングを行っている様子)】

【社会貢献】

さいたま市の高齢化率は23.3%(令和6年)、65歳以上の高齢者 31.4万人を超えた。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。この支出を抑制す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ない。

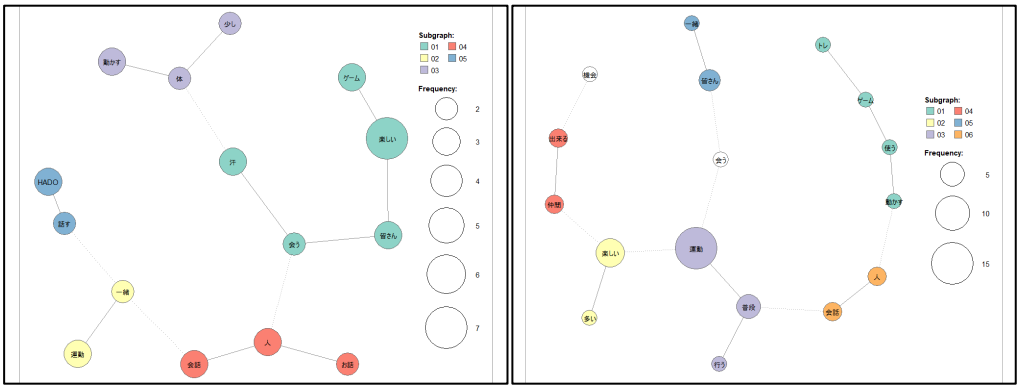
本PJでは，HADOの有効性について検討し、一定の効果が得られた。新しいスポーツの可能性を提示し続けることで、「スポーツのまち さいたま」の一端を担えるのではないかと考えている。



【体力測定の様子】

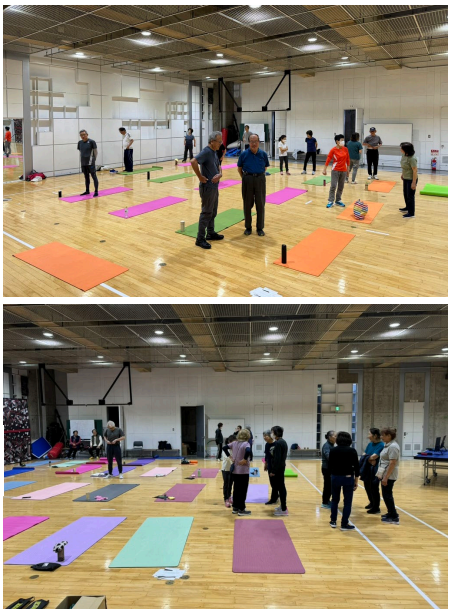
主なトピックス

運動協室参加者の共起ネットワーク



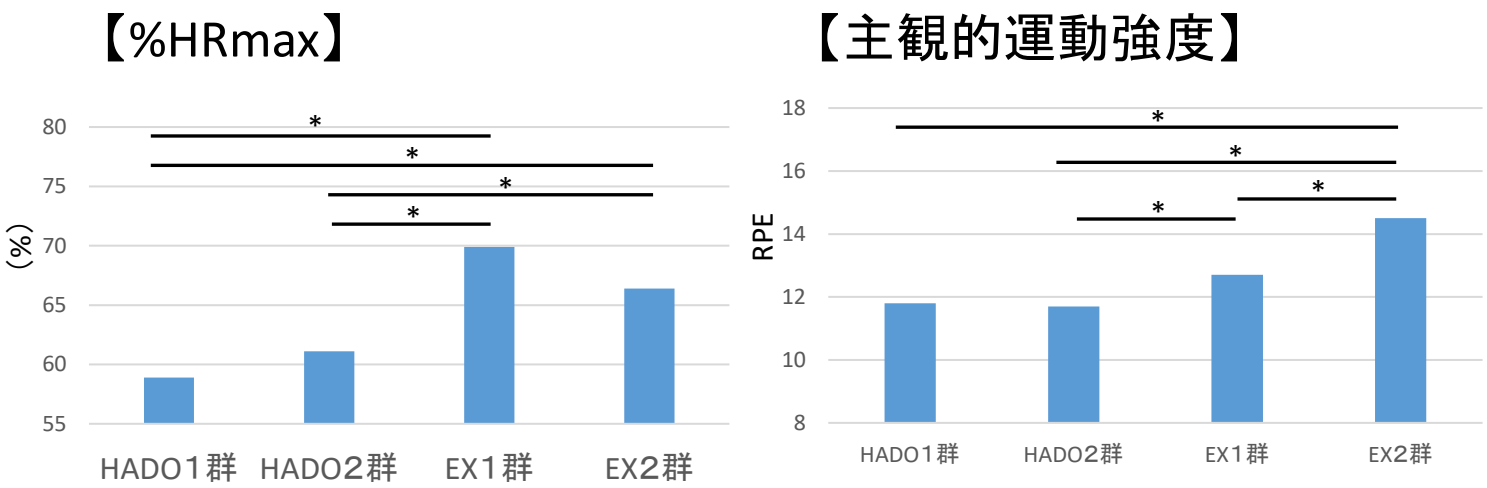
【「運動教室の楽しさ」に関するアンケート結果】
左：HADO群（HADO1・2群）、右：通常運動群（Ex1・2群）

HADOを行ったグループは「参加者の仲間と会えて楽しくゲームが出来る」という感想を持つ意見が多く、通常運動は「普段行っている運動を仲間と出来ることが楽しい」との回答が多かった。

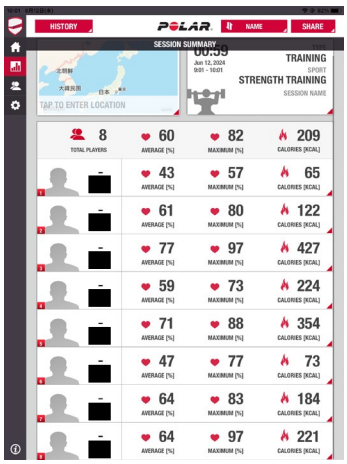


【キャプション】運動教室前のおしゃべりの様子

■HADO時の最大心拍数（%）と消費カロリー



【運動時の%HRmax（左）と主観的運動強度】



【運動時の心拍データと消費カロリー】

上図のように%HRmax（最大心拍数に対する相対的な負荷）はHADO群（1群・2群）に比べて通常運動群（Ex1・Ex2群）の方が有意に高い結果となった。また、主観的運動強度も通常運動群（Ex1・Ex2群）の方が高い傾向が示された。
このようなことから、HADOは「体力に自信がない高齢者や運動を始めようと考えている高齢者」に向いている可能性があり、通常運動は「体力に自信がある高齢者やしっかりと負荷をかけて運動を行いたい高齢者」に向いている可能性がある。
今回の取り組みでは1ヶ月と短期間の効果を検証したのみであるため、より長い実験期間で調査を行い、様々なデータを取っていく必要がある。

「産学官連携スキームによるアントレプレナーシップ教育の充実」プロジェクト

代表者	長谷川浩志【教授】(システム理工学部 機械制御システム学科)
構成員	渡邉大(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)/村上嘉代子(理工学研究科 システム理工学専攻)/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)/後藤裕介(システム理工学部 電子情報システム学科)

■プロジェクトの概要

昨年度に開発した産学官金連携スキームを拡大．①アイデアバンク：約20年間にわたる演習でのシステム企画提案をデータベース化．アイデアバンクとして整備．アントレプレナーシップ教育のプロジェクト拡充．②プロジェクト継承：新たにアイデアバンクの継承企画を演習に導入．③マネタイズ強化(収益化強化)：ビジネスモデルと収支計画書の導入．④プロジェクト支援：起業家メンターと金融機関の連携スキームを構築．本教育改革研究活動助成で得られた知見をシステム理工学部の課程制への移行，令和5年度大学・高専機能強化支援事業選定における特筆すべき内容と評価されたアントレプレナーシップ教育の充実のために教育プログラムへ反映させる．

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

EntreCompの広義のアントレプレナーシップ「アイデアをかたちにでき，行動できる能力」を学修到達目標と定め，各領域のコンピテンシーのスレッドに対して，システム工学教育プログラムの科目内容を分解，再構成．産学官金連携フレームワークと組み合わせ，システム工学教育をシステム思考の工学 Ver3.0にアップグレード．

システム工学特別演習の30プロジェクト中，6プロジェクトがアントレプレナーシップチーム．そのうちの「Morning Life PJ」が埼玉県学生向け起業伴走プログラム「CEOチャレンジ」に参加．中間ピッチで支援金10万円を授与(上位入賞)，最終ピッチで優勝受賞．「読者復興PJ」は，AKKODiSコンサルティングと志結舎主催の「第5回産学連携ビジネスコンペティション2024」に参加．大賞受賞．システム工学を応用した課題設定と総合的解決策をもとにしたビジネスモデルが高く評価．

【研究】

Creative and inventive Design Support System for DXを国際会議 TFC-TRAI2024にて発表．アイデアと機会のコンピテンシーである「1.2 創造性」を支援．イノベーション創出のための思考プロセスをCEP@Uminhoに導入．今後は，CDSSforDXと生成系AIの組み合わせを試みる．

【社会貢献】

埼玉県，さいたま市，那須町，姫路市，神戸市，富山市等の企業・自治体と産学官金連携．例えば，神戸市のオリバーソースPJでは，CIP，CEP@SITとCEP@KMUTTで実施．神戸ローカルのどろソースを海外展開に向けたマーケティングを企画．感香プロジェクトを継承した那須町のCandle House ChouChou PJでは，前期のシステム工学特別演習にて，「なすもリトリート」を提案．後期のCIPでは，リトリートの事前・事後体験となる蒸留体験と二次加工に焦点を当て，「なすのーと」を提案．2025年度に協働で蒸留をスタート．第7回那須プレゼンフェスティバルで，審査員特別賞を受賞．

システム理工学部課程制後のシステム思考の工学 Ver3.0
EUのアントレプレナーシップコンピテンシー EntreCompとの対応

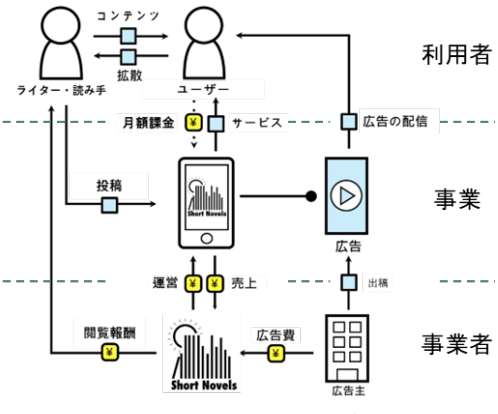
領域	コンピテンシー	スレッド	科目内容	科目 (演習で学ぶ)
1. アイデアと機会(チャンス)	1.1 機会の発掘	・機会を特定し，作り出し，掌握する ・チャレンジに焦点を当てる ・ニーズを掘り起こす ・背景を分析する	・目的展開 ・ニーズ展開 ・課題をシステムと捉える ・現状分析	1)システム理工学部 ・システム工学A(必修)
	1.2 創造性	・好奇心とオープンであること ・アイデアを練る ・問題を定義する ・価値をデザインする ・革新的であること	・発想法 ・ブレインストーミングと発想法 ・目的展開 ・品質機能展開と機能設計法 ・魅力的品質を展開 －感動品質展開 －発明的問題解決法(TRIZなど) －たちの悪い課題を探求(問題発見) －矛盾分析(問題発見，QFD＆TRIZ) ・既存の要素の新しい組合せ，代替案の組合せを設計	1)システム理工学部 ・システム工学A(必修) ・産学官金連携PBL 2)大学院システム理工学専攻 ・クロスカルチャーエンジニアリングプロジェクト(CEP) －CEP@Portugal(イノベーション創出) －CEP@SIT(産学官金連携) －CEP@KMUTT(グローカル課題)
	1.3 ビジョン	・イメージする ・戦略的に考える ・行動を導く	・V-modelによる問題解決プロセス ・ストーリーテリング －WorldCafé －Show me your value －共感図，シナリオグラフ ・リーンキャンバス(Lean Canvas) ・ビジネスモデル (ビジネスモデルキャンバス含む) ・A3資料(トヨタ式問題解決)	1)システム理工学部 ・システム工学A(必修) ・アントレプレナーシップA(必修) ・アントレプレナーシップB ・産学官金連携PBL 2)大学院システム理工学専攻 ・システム工学特別演習(必修) ・クロスイノベーションプロジェクト(CIP) ・CEP
	1.4 アイデアの価値評価	・アイデアの価値を認識する ・アイデアを共有，保持する	・検証と妥当性確認(V&V)による評価計画 ・代替案のシステム評価	1)システム理工学部 ・システム工学A(必修)
	1.5 倫理的で持続可能な思考	・倫理的に行動する ・サステナブルに考える ・影響を評価する ・説明責任を果たす	・システム思考 ・V-modelによる問題解決プロセス	システム工学教育プログラム
2. リソース	2.1 自己認識(セルフアウェアネス)と自信創出	・目的・目標(志)を貫く ・長所と短所を特定する ・能力を信じる ・未来を切り拓く	・演習を通じた学び	システム工学教育プログラムのPBL(演習) 1)システム理工学部 ・未来を創る1(キャリアデザイン) ・システム工学A(必修) ・システム工学B(必修) ・産学官金連携PBL 2)大学院システム理工学専攻 ・システム工学特別演習(必修) ・CIP ・CEP
	2.2 モチベーションの維持	・やる気を持ち続ける ・決意を固める ・モチベーションの維持を意識する ・タフであること ・あきらめない		
	2.3 リソースの動員	・責任をもって，リソースを管理，活用する ・時間を最大限に活用する ・支援を受ける		
	2.4 金融・経済リテラシー	・経済・金融の概念を理解する ・予算 ・資金調達 ・税制を理解する	・キャズム理論とイノベーションのジレンマ ・コスト見積と財務諸表 ・資金調達と管理 ・背景にある社会基盤(税制等)	1)システム理工学部 ・アントレプレナーシップA(必修) ・会計簿記
	2.5. 他者の動員	・インスピレーションを与え，刺激を受ける ・(ストーリーを)語る ・効果的なコミュニケーション ・メディアを効果的に使う	・パブリックナラティブ －Story of now ・コミュニティ・オーガナイジング	1)システム理工学部 ・アントレプレナーシップA(必修)
3. 行動に移す	3.1 イニシアティブをとる	・責任を取る ・自主的に動く ・行動を起こす	・パブリックナラティブ －Story of self ・コミュニティ・オーガナイジングによるリーダシップ	1)システム理工学部 ・アントレプレナーシップA(必修)
	3.2 計画とマネジメント	・目標を定義する ・計画と組織化する ・持続可能な事業計画の策定 ・優先順位を定義する ・進捗状況の確認 ・変化に柔軟に対応し，適応する	・目標設定 ・WBS(Work Breakdown Structure) ・スケジューリング ・クリティカルパス法(PDM法など) ・ガントチャート ・3点見積法	1)システム理工学部 ・システム工学A(必修) ・システム工学B(必修)
	3.3 不確実性、曖昧さ、リスクへの対処	・不確実性や曖昧さに対処する ・リスクを算出する ・リスクを管理する	・目標達成のための戦略計画 －Cross-SWOT －システムの方向性 －システムの費用対効果 ・評価計画 ・不確かさを考慮したV&Vによる質保証	1)システム理工学部 ・システム工学A(必修) ・システム工学B(必修)
	3.4 他者との協働	・多様性を受け入れる ・他者の感情を理解する能力を開発する ・傾聴する ・タッグを組む ・協働する ・ネットワークを広げる	・パブリックナラティブ －Story of us ・他学科混成のグループワーク ・多文化・多分野混成のグループワーク ・コミュニティ・オーガナイジング ・産学官金連携による人的ネットワーク形成	1)システム理工学部 ・アントレプレナーシップA(必修) システム工学教育プログラムのPBL(演習)
	3.5. 体験を通して学ぶ	・振り返る ・学びを学ぶ ・経験から学ぶ	・演習を通じた学び	システム工学教育プログラムのPBL(演習)

主なトピックス

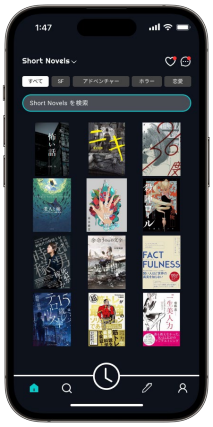
■ Morning Life

埼玉県起業伴走プロジェクト「CEOチャレンジ」
中間ピッチ 入賞(4位), 最終ピッチ 優勝受賞.

Short Novels は, 時間管理と読書体験を融合させた新感覚のSNS. 夜に物語の前半を読み, 指定した時間に起きることで後半を解放できるシステム. 早起きを促しながら, 物語の続きが気になるというモチベーションを活用した仕組み. ユーザーは短編小説を投稿・閲覧でき, 目覚めの習慣化をサポートする機能を提供. 小説を執筆するライターや, 物語に声を当てる声優としても活動でき, クリエイター育成の要素も含む. 文章だけでなく音声コンテンツの創作や発信の場としても機能し, 多様な形で物語を楽しめる環境を提供. 生活習慣の改善とエンタメを融合させた新たな読書体験を提供.



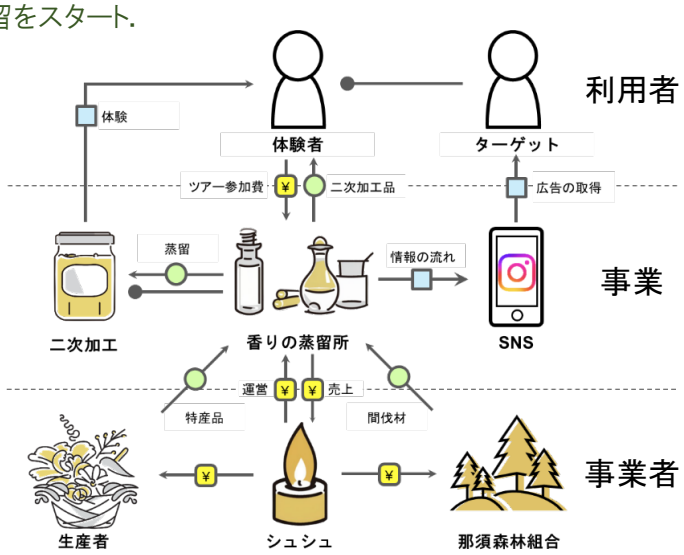
Moring Lifeのビジネスモデル



Short Novelsのホーム画面

■ 那須の香りの調香(ノート)体験「なすのーと」

オリジナルの那須の香りのノート体験と香りの蒸留所でのハンドクリーム製作体験(二次加工)を組み合わせた香りの蒸留所ツアープログラム. 数値化できない"那須の香り"のイメージを, 蒸留時にお客様の手で調香(ノート). 蒸留した香りを思い出の記録(ノート)として二次加工. 香りのベースは, 那須地区の特産品や那須森林組合からの間伐材. キャンドルハウスシュシュの運営するSNSにて宣伝を行うことにより, ターゲット層への認知, 体験へと導く. 2025年度に協働で蒸留をスタート.



香りの蒸留所のビジネスモデル

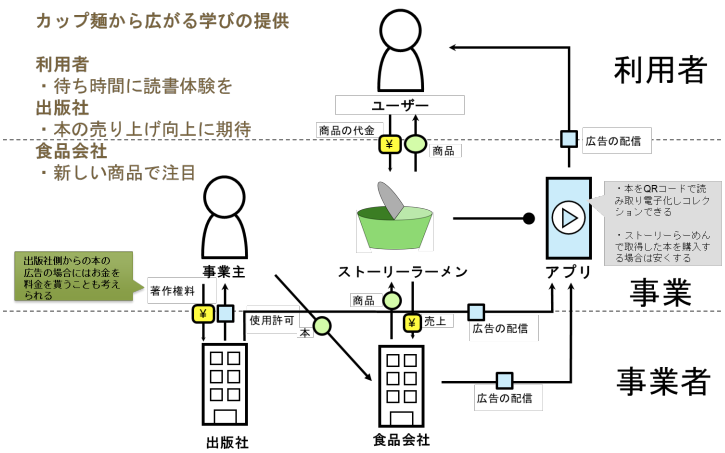
■ カップめんの調理時間に読書のきっかけを

第5回産学連携ビジネスコンペティション2024大賞受賞.

読書時間「0分」は, 年齢が上がるにつれて増加. 読書離れ, スマホ時間が急増. 一方, 即席カップめんを月に数回以上食べる人の割合は半数超え(学内アンケート). 即席カップめんに短編小説や小説の冒頭を掲載した冊子をつけて販売. 「待ち時間を味わう, 読書の贅沢」をビジネスモデルに変換.



大学生協での販売の様子



カップめんの調理時間に読書のきっかけ, ビジネスモデルに変換

■ 海外企業連携:Boon Rawd Brewery, タイ

Singha, Leoなどのビールや飲料を展開. CEP@SITへの海外からの初課題提供. 第1位. このPJでは, マーケティング戦略として, タイと日本の文化を掛け合わせることで, Singha Beerを日本市場に浸透させる企画を提案. タイの獅子と日本の狛犬からインスパイアされた新たなパッケージを立案. さらに, SINGHA TRAVELアプリのプロトタイプを作成. いつでも, どこでも, Singhaを飲める店舗にたどり着ける.



Singha Beerプロジェクト

「社会システム科学のアプローチによる課題解決最適手法の探索と適応」プロジェクト

代表者	市川学【教授】(システム理工学部学部 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(理工学研究科システム理工学専攻)／

■プロジェクトの概要

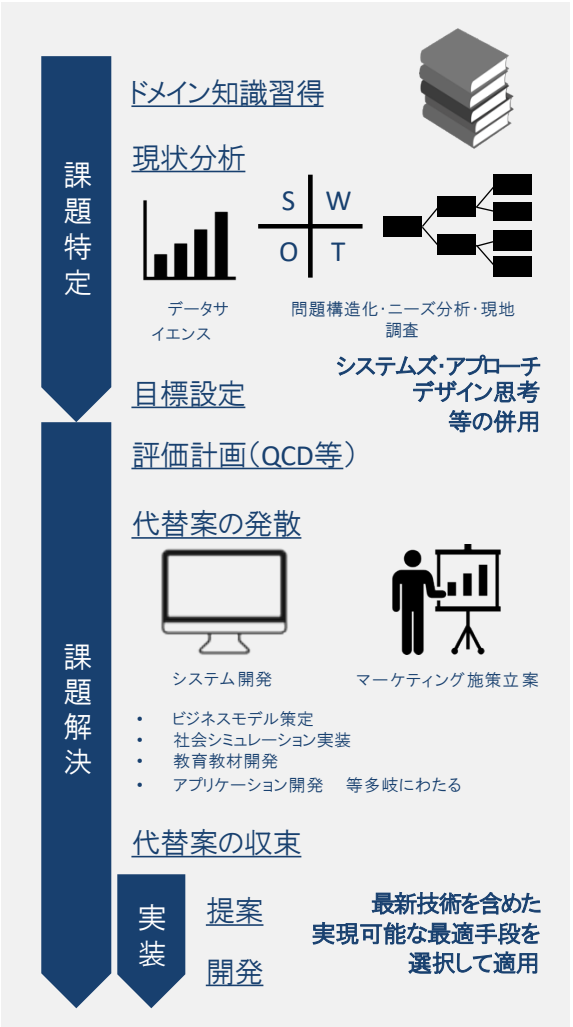
社会に存在する課題に対して、問題の構造化や現地調査などの課題特定手法や、データサイエンスやシミュレーション、センサ類を用いたハードウェア開発、建築計画、教育ツールなどの課題解決手法から、最適な手法もしくは複数の手法を組み合わせて用いることで、解決することを目指した。事業の対象は、都道府県、地域、市区町村、地区、建物、企業などの制限はせず、対象が抱える課題を活動対象とした。地域を支える信用金庫や地区を所管する行政、保健所、企業と連携することで、産官学金が連動した事業へと発展させた。今年度は昨年度よりもプロジェクト数を増やし、合計13個の事業を遂行し、その全てにおいて、システムズ・アプローチやデザイン思考をベースにしながら、ワンストップで柔軟な思考プロセスで課題発見、解決を行った。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】
都道府県や市区町村、地域や地区、建物、企業などが抱える課題解決には、論理的思考力や技術力を駆使して、複数領域の知識や技術を連携させる必要がある。座学だけではなく、実際に社会に存在する課題に対して、知識獲得・データ収集・データ分析・シミュレーション分析による予期予測、解決策の提案、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】
各課題が持つ特徴は異なり、解決手法も統一されない。各課題と向き合い理解するためには、関係する知識や技術の習得、課題提供者との密な関係構築も求められる。解決のために最新技術を含めた実現可能な最適手法を選択して適用するプロセスは、他課題にも応用可能である。新たな課題への展開が期待され、課題解決を数多く行うことでブランディング効果も期待される。
今年度は合計13個の事業を遂行した。中でも特筆すべきものについては、具体的な事業内容を後述の主なトピックスにて報告する。全ての事業において、社会システム科学のアプローチを用いて、特定の方法にとらわれずに、ワンストップで課題解決を行った。

【社会貢献】
行政、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用いて解決する取り組みは、プログラミング教育/Society5.0が注目される現代において重要であり、エビデンス付きの成果を地域へ還元することで地域貢献にも繋がる。
今年度は全13個の事業において、解決策の提案にとどまらず、その実施あるいは実施に向けた検討段階に進んでいる。地域を支える信用金庫や地域を所管する市区町村等と連携したこと、学生がもつ柔軟なアイデアをエビデンスベースで提案したことが結実した。中には、地域との連携を通して共同研究に発展した事例も存在する。来年度も継続して貢献するため、事業計画を進めている。

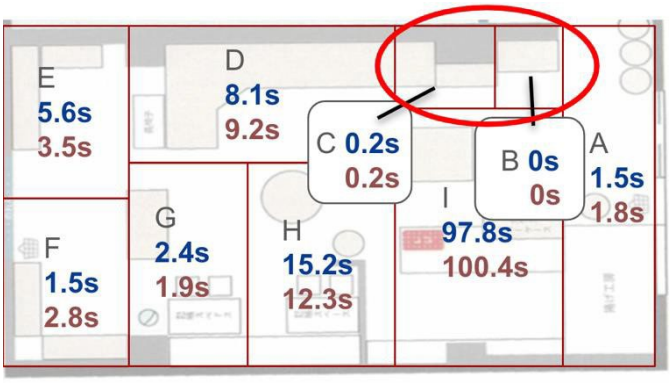


「手が動くコンサルタント」の課題解決ロー

主なトピックス

■東京東信用金庫との協働による経営・地域課題解決施策の提案

【社会システム科学による経営課題解決提案】
　東あられ本舗　両国本店において、センシング・データサイエンス・エンジニアリングによる「客単価向上」に向けた経営課題の発見と解決を行った。
　顧客行動を追跡するカメラを開発・設置し、行動データと POS データを連携した分析を通して「店舗手前部の滞在時間」という課題を特定した。関係者との協議を通して多様な代替案を検討し、店舗内デジタルサイネージの提案・プロトタイプ作成を行った。



これまでにない「滞在時間」という視点で経営課題を特定

【国際的な視点による観光振興】
　インドネシアのバンドン工科大学とのgPBL（2024年9月で、システム工学のアプローチを用いて企業プランを構築。東京信用金庫の審査員から高評価を得た2案を統合し、システムを実装した。
　イスラム教徒が日本で旅行する際、礼拝所やハラルフードの確保が難しいという課題に対し、現状分析やニーズ分析を行い、必要な機能を展開した上でアプリケーションを提案した。



観光情報、旅行計画、デジタルマップを一元化したシステム提案

■新潟県・妙高市における社会課題の解決に向けた提案

【文献調査・現地視察による定性分析】
　対象地域のプロファイリングおよび現地視察を通じて、対象地域の理解と課題の特定を行った。
　プロファイリングでは、公式資料、新聞記事、SNSなど多様な情報源から、妙高市の体系的な理解を行なった。現地視察では、道の駅のステークホルダーへのヒアリング、訪問者視点での地域の観察を通じて、理解の整合性の確認、新たな課題の検討を行った。
　一連の調査を踏まえ、道の駅や中心市街地の理想像や構造化された利用者ニーズを把握した。

【データを活用した定量分析】
　道の駅の売上向上および中心市街地の活性化に向けた示唆を得るために、データを用いた分析を行った。
　道の駅については「来訪者を増やす」「客単価を上げる」の両軸から訪問者の分析し、競合する道の駅と特徴を比較した。中心市街地については、計画されている新設図書館の需要をシミュレーションにより実施し、都市施策における EBPMの支援を行った。

【中心市街地での展示会＆イベント開催】
　市民参画のプラットフォーム基盤構築のため、道の駅あらいにて市民との交流イベントを開催した。
　建築模型展示、人口構成・人流分析結果の展示、市民によるアイデアソンを通して、参加者に地域の現状と将来の展望を検討する機会を提供した。



当日は約50名が来訪
イベントを通じ、学生と地域住民が交流した

■その他のプロジェクト

i. 東大宮の小学生を対象とした探究型学習の実践
ii. 東大宮の活性化のための学生アンケートの実 施
iii. 那須地域でのリノベーション提案・アプリ開 発
iv. 新井湯でのデータによるトレーニング効果の検証
v. さいたま市における緑地保全の企画提案

■今後の展開

　中小企業への取り組みはDX、AI、データサイエンスをキーワードに売り揚げ向上狙う。
　自治体支援については、都市計画、医療計画、にぎわい創出、教育など幅広い分野での連携を模索して、活動を行う。

「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」プロジェクト

代表者	鈴木俊治【教授】(システム理工学部 環境システム学科)
構成員	作山康(システム理工学部 環境システム学科)／松下希和(同)／市川学(同)／増田幸宏(同)／山嵜一也(同)／石川裕次(同)／田口博之(同)／ターレク・カトラミーズ(同)／袖野玲子(同) 吉岡剛(同)／片岡誠(同)／水谷晃啓(同)　他に外部講師計6名

■プロジェクトの概要

本プロジェクトは、環境システム学科3年生必修科目である「環境システム応用演習A」（建築士試験指定科目①・建築系）および「環境システム応用演習B」（建築士試験指定科目⑩都市系、環境系、社会システム系）を通して行われた。

本演習は開講された2017年以降、地域との協働・貢献を大前提として実施しており、2024年度はさいたま市内2地域、埼玉県内4地域、東京都区部3地域、千葉県内1地域、栃木県内2地域の計12地域を対象として実施した。地域活性化、都市再生・再開発、緑化、モビリティ、防災、福祉、少子高齢化対策などの課題に複合的に取り組み、その成果を評価した。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

本科目の履修学生数は110名であり、専門分野別では建築設計(A-1)39名、構造設計(A-2)3名、設備設計(A-3)3名、都市計画・設計(B-1)36名、環境計画(B-2)26名、情報システム計画(B-3)3名であった。男女別では男子88名、女子22名であった。

各分野の学生数ができるだけ均等になるよう12のチームを編成し、各チームが異なる地域を対象として建築、都市、環境の包括的視点から各種の調査を行い、それに基づいて提案を作成した。そのプロセスは学生主体であり、学生相互の討議に基づいて模型や図面、計算書などを作成した。教員は、学期前半は本プロジェクトを進めるために必要な講義およびチーム指導、後半はチーム指導及び専門分野別の指導を行った。専門分野については建築、環境分野の実務者6名が非常勤講師として、専任教員とともに学生の指導に当たった。



最終発表会
12の地域関係者の参加を得て大宮キャンパス)及びオンラインで実施

【研究】

学部教育の柱である「システム工学による分野横断的な実践的課題解決型学修」をもとに、学生それぞれが専門分野における研究を実践した。担当地域の課題や市民生活に目を配りつつ、学修中の技術や方法を適用し、建築、都市(街路、公園緑地等)、環境改善(エネルギー、廃棄物、水循環等)に関する企画立案、設計提案を行った。





建築専門分野の学生が作成した計画イメージパース

【社会貢献】

本科目は2017年度に創設して以来発展的に継続し、8年間の実績を積んできた。対象地域の学外協力者（行政、各種NPO、自治会、地元企業など）から、調査、学生との協議、中間・最終発表会への参加・講評などの積極的な支援をいただいている。今年度は12のすべての地域から中間、最終発表会への参加があり、その延べ人数は100名を超えた。また、学内発表後には多くのチームが地元報告会を行った。学生が地域に関心を持って入り、地元の方々と交流しながら調査や提案発表を行うことは大いに地域貢献になったと考えられる。



地元市役所の方によるご説明の後、現地にて行動調査、交通量調査などを実施

主なトピックス

■カリキュラムマネジメント

本演習は環境システム学科の領域である環境、都市、建築の3分野を包括した必修科目であり、さまざまに異なる専門領域や技量を持った学生達がひとつのチームに入って討議、制作などを協働で行う点が大きな特徴である。教員も学科教員のほぼ全員に加え、各専門分野の非常勤講師も加わり延べ約20名が指導にあたった。また地元自治体や自治会などから多数のご参加をいただいた。



地元市役所ロビーでのマルシェの場において、市民意向を把握するためのアンケート実施

これだけ多人数が関わる演習プロジェクトは少ないと思われ、マネジメントには工夫を要した。主な点を以下に記す。

1) 授業とプロジェクトの両立

学生にとっては学修の機会であると同時に、地域に対しては一定レベルの成果報告が求められる。そのためカリキュラムとしては　①演習に必要な知識やスキルの修得を目的とした講義、小演習　②各チームにおける学生とチーム担当教員、TAによる基本方針の討議 ③分野別・少人数での専門的指導（専門分野エスキス）の３段階を設けた。

2) 外部協力者の協力と発表・講評会への参加

各チームで現地訪問・調査を行った際の現地案内、ヒアリングやアンケートなどで協力を得たほか、中間及び最終発表会に対面（大宮キャンパス）あるいはオンラインで参加、講評いただいた。

3) 地域からの要望と演習科目としての達成度の調整

地元から特定の要望が出されるケースがあり、それに対応することはプロジェクトとしては良いが、一方その点に過度な比重が置かれると演習科目としての達成度にアンバランスが生じる。地元の要望等についても事前把握が必要で、今後の課題である。



模型は計画内容を伝える有効な手段。最終発表・講評会では全チームが模型を作成、展示。

■教育アセスメント

本プロジェクトの効果を把握するため、学生及び教員に対して事前、事後にアンケート調査を行った。回答数は、学生：事前110事後109、教員：事前17事後17であった。

【学生アンケート結果の要点】

1) 事前の期待と事後の満足度

事前の期待として①自身の専門的スキルの向上　②他分野の学生との協働による成果のまとめ　③リーダーシップの発揮　④自身の主張の貫徹　⑤チーム内での協調　⑥自身の専門的スキルの供与　⑦地域貢献　を挙げ、それぞれについて事後の達成度を自己評価した。その結果として③以外は全て「ある程度達成できた」と「十分に達成できた」の合計が80%以上となり、学生の自己満足度は高いといえる。

2) 演習の運営方法について

肯定的な意見もあったが様々な改善要望もあった。主な問題点としてチーム指導については　①チームによって対象地や課題内容に差異があること　②チーム担当教員の指導が十分でないと感じられた場合がある　等である。専門分野エスキスについては、①時間配分及びスケジュール　②個々の教員の指導方法　③教員間の意見の差異　④チーム作業と個人作業のバランスが困難　等があった。

■プロジェクトの評価と改善方向性

総括として、アンケート結果を踏まえた本プロジェクト（＝環境システム応用演習）の評価と改善の方向性について記す。

1) 地域志向活動型アクティブ・ラーニングについて

複数地域を対象として地元の参加・支援を得て演習を実施したことは教員、学生ともに高く評価した。地域の関係者からも高評価を得ており、今後ともこの方針は堅持続したい。

2) カリキュラムマネジメントについて

本演習は開講以来学生、教員、地域関係者から概ね高い評価を得てきたが、今年度の評価を踏まえ、改善を検討していきたい。その方向は以下のとおり。

① チームによる演習課題の相違や教員間の意思疎通問題の解消のため、専門分野の異なる複数教員による基礎調査やコンセプトメイキングを中心としたチーム指導を行う。

② 専門分野エスキスも複数教員が複数学生を対象としてローテーションにより対応する。また、科目履修の必須事項（例えば建築図面作成　等）を着実に完成するよう指導する。

④ 上記遂行のためにもスケジュールおよび進行時間管理が重要になる。エスキス時間が不足という意見は教員、学生からも多く出ている一方、授業時間や非常勤講師の勤務時間は限られているという課題は残される。





鉄道の高架化に伴い、駅舎と駅周辺施設の都市・建築デザインを行ったチームの模型

「地域に貢献できる大学パブリックスペースの提案」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	新熊亮一(工学部　情報工学科)/　繁里光宏(デザイン工学部 デザイン工学科)

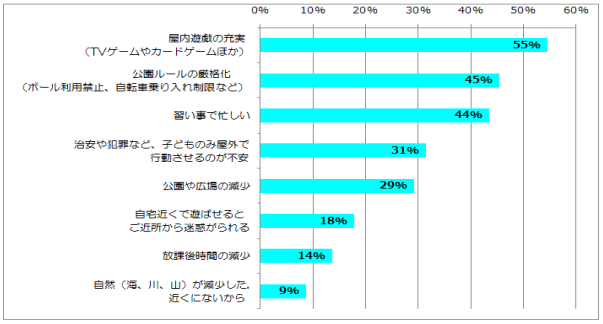
■プロジェクトの概要

豊洲は、住居エリアとビジネスエリアが密接した環境である。比較的若いファミリー層が住み、子供も多くみられるが、小さな子供が遊べる公園は少ない。こうした中で、芝浦工業大学豊洲校舎キッズパークは、子どもの遊び場として非常に好評であり、にぎわう場所となっている。昨年より、この場所に置く遊具の提案を行っているが、子どもや保護者へのヒアリングでは、さらに多くの遊具を希望する意見が多い。一方で、小学生高学年がベンチを積み上げてその上に登るといった危険な遊びをするという現状がある。本プロジェクトでは、安全性を確保した魅力ある遊具を提供し、小さな子供から小学生、大学生、保護者も楽しく遊べる公園づくりに貢献したいと考える。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】【研究】
本研究は、総合プロジェクトのテーマとして設定し、デザイン実践能力を高める。

a.子供の外遊びの現状調査
近年、カードゲームやタブレットゲームなどの屋内遊びの充実により、外で遊ばない子供が増えている。公園のルールの厳格化や公園自体の減少も理由にあげられている(図1)。

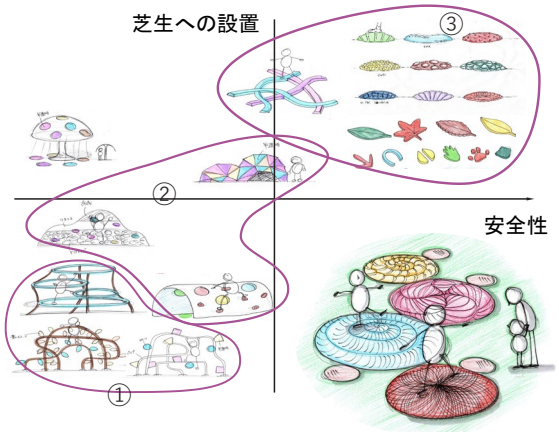


【図1. 屋外での遊びが減少した要因は何だと思いますか？(3つまで) N=287
https://coerver.co.jp/magazine/survey/457/　調査2017年】

b.キッズパークでのヒアリング調査:
キッズパークの利用状況を観察し、評価点と課題点を抽出した。
評価点としては、人工芝が敷いてあり転んでも安全なこと、上に屋根があることで雨に濡れないこと、熱中症にならないこと、きれいに管理されていること、1～3歳の小さな子供でも遊べることである。
課題点としては、小学生も多く見られ、ベンチを動かして滑り台にして遊ぶなど危険な遊びをすること。遊具の数が足らないこと、海に面しているため風が強いので、それに耐えられる遊具が必要。また、施設課から遊具設置に関しては芝生にアンカーを打たずに自立する安全なものにしてほしいと要望があった。

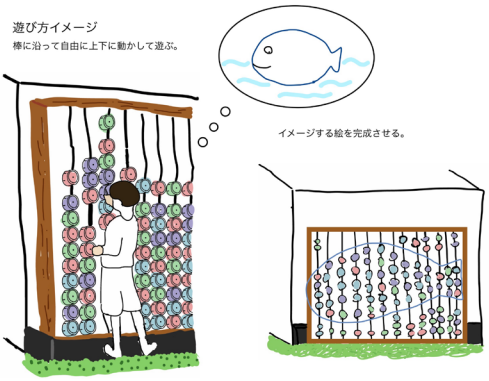
c.子どものための遊びのアイデア:
1～3歳を対象とするが小学生でも楽しく遊べるものとした。昨年の通気口壁面のルーレットは遊び方がわからないという意見があったので、一目で遊び方がわかり、遊び方の自由度があるアイデアを検討した。

c-1. 床設置提案モデルの検討:「足で感じるデコボコラセン」
複数のアイデアについて安全性や強度の確保の面で評価し、③のフロアタイプに決定した(図2)。具体的には、床に置く安定性のある物体でそれに乗って足の感触を楽しむ遊具の発想にたどり着いた。
①ジャングルジムタイプ→ ×設置が大掛かり、×落下の危険性
②ドーム･トンネルタイプ→ ×設置が困難。×安全性に乏しい、×破損の心配
③フロアタイプ→〇転倒、転落の危険性が低い〇置くだけで設置可能



【図2.アイデアだし床面設置タイプ】

c-2.壁設置提案モデルの検討:「動かして描く玉壁画」
はじめは、用意された絵を完成させるスライドパズルを検討したが、自由度や創造性に欠けると判断し、そろばんのように棒に通した玉を移動させて、好きな絵を描くという遊びを考えた(図3)。



【図3.アイデアだし壁面設置タイプ】

【社会貢献】
通気口BOXの壁面設置遊具として、「動かして描く玉壁画」と、床面設置遊具として、「足で感じるデコボコラセン」という2つの新しい遊具を提案した。実際に制作した遊具を設置したところ、設置と同時に楽しく遊んでもらえ、遊び方が分かり易く自由度があるということを検証できた。

提案遊具の紹介

■ 足で感じるデコボコラセン　ポリウレア塗装を使ったカラフルで安全性の高い遊具

・**足底の感覚を刺激**（ジャンプ・飛び移る等）し、運動・バランス力を向上
・**螺旋遊具をきっかけに自然の法則性**に興味を持ち、探求心を持ってもらいたい



モチーフの選定
①パークを楽しい雰囲気にするビジュアル
②踏んだ時の凹凸を感じられるモチーフ
③ポリウレア塗装で美しく表現できる
④モチーフ同士の意匠の区別化



・発泡スチロールにカッターで造形を施し、上からポリウレア塗装を施す。ポリウレアは、ゴム質の塗装で滑りにくく、ケガをしにくい。造形物全体の耐久性が増すので、遊具に相応しい。
・安全対策として、突風に飛ばされたり、子供が持ち上げて移動しないように、内部にブロックを入れて重量を増し、さらに裏側を紐で留める。

想定した遊び方をしてくれる姿が多数。飛び石遊びのようにジャンプしたり、腰掛けたり、様々な　スタイルで遊んでくれた。





・中にスポンジを入れた柔らかな感触のものもあり、乗った時の感触を楽しんでくれた。しかし、設置後、一部が破損したので、塗装の厚み付けに注意が必要。
・年齢の違う子どもが遊べるので、幼児と小学生が衝突する危険性もある。

■ 動かして描く玉壁画　ペットボトル廃材を使った子供の創造性を発揮させる絵描き遊具

・**公共の場で大きな絵を描く楽しさを味わってほしい。**
・**自由な落書きでなく、玉を動かして描くという制限のある中で工夫して表現することを体験してほしい。**
・マジックなどの消耗品を準備しなくても表現でき、管理が楽。





設計条件
①1歳から8歳の平均身長を考慮し腕や膝を使って遊べる寸法を設定。幅1240mm、高さ1240mmで製作
②動かす玉は大学で多く廃棄されるペットボトルを使用。破損しても費用が掛からない。全体の半分をペットボトルで埋める（1列 8個）
③黄色と白色に塗る　子どもの好きな色は原色とし、（昨年度の調査結果）玉を回転させることで、色がわかり、形や文字を表現できるようにした。色の変化は小さな子どもでも視覚的に楽しめると考えた。

色がカラフルで丸くてかわいい、動かすことが楽しい、ペットボトルの底の柄が意外に面白い、という肯定的な意見が75％であった。



・ヒアリングでは、壊れやすそう、たくさん動かすのが疲れるという意見もあった。
・数日間の設置の中で、沢山動かす間に、破損が発生した。棒が外れやすいことが原因。外れないように金属棒などの素材を検討する。



「江東内部河川・運河の活用とコミュニティ強化」プロジェクト

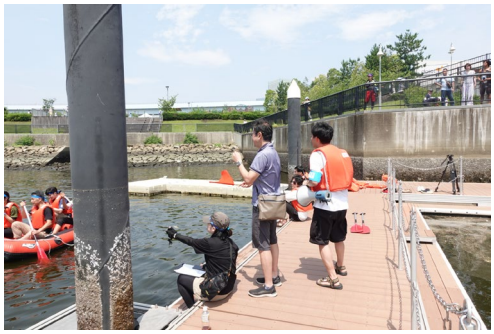
代表者	志村秀明【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	原田真宏、篠崎道彦、桑田仁、佐藤宏亮、前田英寿(建築学部 建築学科)／岩倉成志(工学部 土木工学科)／佐々木毅(デザイン工学部デザイン工学科)

■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。本学の社会的評価向上にも貢献する。各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で、教育・研究・社会貢献の新しい展開も狙っている。「豊洲地区運河ルネサンス協議会」や地下鉄8号線沿線まちづくりとも連携することで、最先端のまちづくりと教育、研究に取り組む。

■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」で江東区や中央区の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、江東区千石地区を対象として、地域資源を活かした持続可能なまちづくりを提案した。



豊洲水彩まつりでの町内対抗ゴムボートレース。学生たちがレースを取り仕切った

【研究】
アクション・リサーチの手法にもとづき、中央区佃のタワーマンション地区の地域コミュニティに関する研究、月島のもんじゃストリートのテーマパーク化に関する研究、中央区・江東区の書店と地域との関係に関する研究、江東区の地下鉄新駅開業に関する研究、東京湾岸地域の水上交通の普及方策に関する研究、人工砂浜の整備経緯と利用状況に関する研究、市街地の更新状況の把握と3Dシミュレーションによる評価方法に関する研究が取り組まれた。
更に日本建築学会大会で、東京湾岸地域に関する研究が5本、福島県南会津町に関する研究が1本、SEATUC国際会議で、中央区佃にある歴史的家屋の保存・活用に関する研究が発表された。



「建築学演習・都市地域デザイン」の最終発表会。江東区や区民等が参加した。

【社会貢献】
江東区豊洲では、「豊洲水彩まつり」を7月に、「豊洲船カフェ」を9月に開催し、学生たちはその企画補助とスタッフを務めた。特にその中の「町内対抗ゴムボートレース」では、8チームによるレースを取り仕切った。また「運河クルーズ」では、東京湾岸地域の地歴について学修した上で、船上からの風景について分かりやすく、また楽しくガイドを行い好評だった。
更に福島県南会津町舘岩地区の歴史的建築物で町の文化財に指定されている「湯の花舞台」の保存と活用方法について、地元の方々と意見交換を行った。また集落再生活動である「たのせふるさとまつり」の支援活動に11名の学生が従事した。



南会津町湯の花集落の湯の花舞台の視察。どう活用するか意見交換した。

主なトピックス

プロジェクトゼミ　近隣商店街の再生デザイン

　建築学科3年生9名が、江東区にある「大島中の橋商店街（サンロード中の橋）」の再生方法について提案した。この商店街は、ミニ戸建て住宅開発などによって店舗数が減少しており、商店街としての賑わいが危うい状況にある。危機感をもつ商店街振興組合と連携してゼミナールを行った。

　まず商店街のイベントを手伝いながら現地調査を確実に行い、①商店街北側の賑わいが不足していること、②子どもの遊び場が少ないこと、③若い世代にとっての魅力が少ないこと、といった課題を把握し、これらの課題を解決する提案を作成した。

【提案1】商店街北にある中の橋周辺の高架下空間をコミュニティガーデンやスポーツパークとして活用

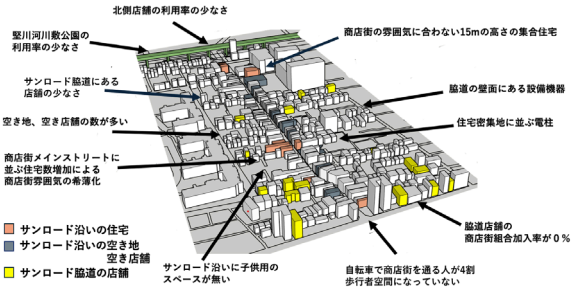
【提案2】商店街北側にある空き店舗ビルを、チャレンジショップや子育て支援施設などとして活用

【提案3】商店街に住宅が増えないように、街並み誘導型地区計画を策定して街並み整備を行う提案

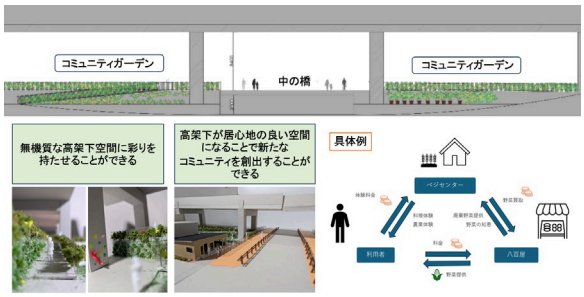
　以上の作成した提案を、商店街振興組合の役員に対してプレゼンテーションして意見交換を行った。



【提案2】
商店街北側にある空き店舗ビルのリノベーションの提案



商店街の課題をまとめた俯瞰図：商店街の状況と課題がわかりやすくまとめられた。



【提案1】中の橋周辺高架下活用の提案



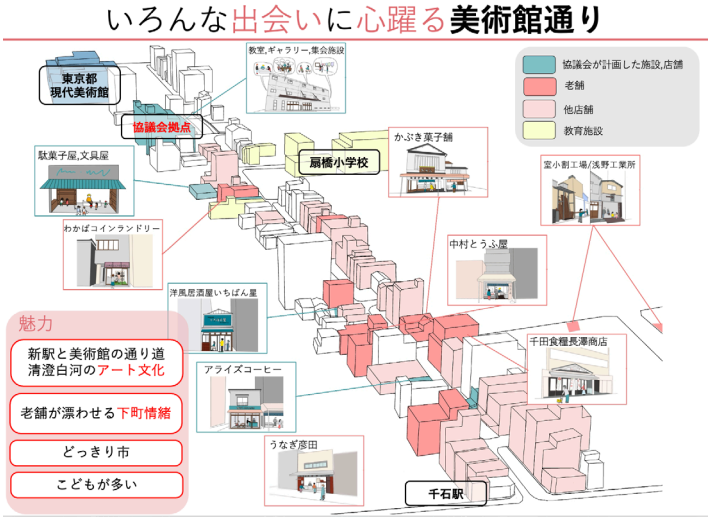
商店街振興組合役員に対する発表。まちづくりに貢献するだけではなく、学修効果を高められた。

建築学演習・都市地域デザイン　地域資源を活かした持続可能なまちづくり

18名の大学院生が、地下鉄8号線新駅ができる（仮称）千石駅周辺地区を対象として、江東区や都市計画コンサルタント・URリンケージ、地元まちづくり協議会と連携しながら持続可能なまちづくりを提案した。

地区の中で特に重要といえる「美術館通り沿い」「四ツ目通り沿い」「横十間川親水公園沿い」「仙台堀川北側」の4地区で提案した。

提案した内容は11月に、地元住民や江東区、URリンケージに対して発表し、高い評価を得た。その後12月には、地元まちづくり協議会でも発表し、やはり高い評価を得た。学生たちの授業満足度も高かったことから、教育効果を高めつつ、実際のまちづくりと連動して地域に貢献する高度な内容をともなった演習が実施できたと言える。



東京都現代美術館に通じる商店街である「美術館通り」を、地区のコミュニティの核にするための提案



地下鉄新駅の出入り口ができる四ツ目通り沿いの魅力を高めようとする提案

「『木のジャングルジム』を使用した伝統木造構法の木育実践」プロジェクト

代表者	小柏 典華【准教授】（建築学部 建築学科）
構成員	志村秀明【教授】（建築学部 建築学科）

■プロジェクトの概要

伝統木造建築は、幾つもの部材が緻密に重なり組み上げられ、人々から愛される美しい姿を作り出しています。その美しさを表現するためには、表層的なデザイン・意匠性のみでなく、構造・架構の理解が重要な要素といえます。しかし、伝統技法を適切に理解することは、その複雑さから建築学を学ぶ者でも難物です。

そこで本活動は、伝統構法の代表作「懸造」（かけづくり）を木のジャングルジム「くむんだー」に代替することで、その技法に実際にふれてもらい、日本の伝統的な建築構法を体感するきっかけとなる木育に着目しました。柱・貫・楔の単純明快な部材と木槌で木のジャングルジム「くむんだー」を組立・解体する過程は、伝統構法の魅力をシンプルに伝えることが可能となります。

木の家ネット・埼玉、UR都市機構の協力のもと、芝浦工業大学建築学部小柏研究室が主催となって、現代における伝統構法の実践的なあり方を究明しながら、現代の子どもたちに伝統構法を広く知ってもらうきっかけを創出することが、本活動の主な目的です。

■教育改革研究活動助成（地域志向）活動の成果

【教育】

本研究は、豊洲地域の幼年教育に貢献できる木育活動の可能性に、教育的成果があるといえます。芝浦工業大学建築学部は、江東区豊洲周辺の、教育に熱心な世帯が多く居住する湾岸エリアに所在します。この豊かな環境を利用し、全国「くむんだー®」 木のジャングルジム協会が運営している木のジャングルジム「くむんだー」を展開することで、幼年期からの「建築学」への興味を育み、伝統木造構法にふれ合ってもらいました【Fig.1】。

また、イベント実施計画段階からの学部生の参画、告知ポスターの作成【Fig.2】、当日の運営の各段階において学生の構想力やコミュニケーションスキルを育てることにも役立ち、社会の中での実践的活動としてその成果が大きく期待できるものとなりました。



【Fig.1】2024年10月のイベント実施の様子。参加者と保護者が共同して組み立てをしてくれました。



【Fig.2】2024年度 木のジャングルジム「くむんだー」の実施告知ポスター

【調査】

木のジャングルジム「くむんだー」を構成している柱や貫の伝統構法は、日本の山岳建築を支えた技法である「懸造」の建築によくみるものです。イベント実施に参加した学生を中心に、懸造建築の技法を間近で見学し、伝統構法の現代的実践を検討するための重要な学びの機会としました。対象地域は、現存最古の懸造「三徳山三仏寺投入堂」が所在する鳥取県エリアとしました。

実際の伝統構法を間近で見学することで、シンプルな部材の中にも、材の幅や太さ、長さに多様な工夫がなされていることを理解できました。木のジャングルジムを発展させる知見を得ました。

【社会貢献】

木育活動を通して、子供たちが実際に木材・建設技術に触れる機会を設け、日本の伝統建築と大工の技術への理解を育みました。

また大学の所在する豊洲エリアへの地域貢献の一環として、地域と共同する大切さを学生たちが実体験する機会を創出しました。

主なトピックス

木のジャングルジム「くむんだー」イベント 実施報告①

２０２４年１０月１９日(土)２０日(日)に、UR豊洲4丁目団地広場にて木のジャングルジム「くむんだー」の組立て・解体イベントを計4回開催しました。

「くむんだー」は、柱・貫・楔の３つの部材を使用した木のジャングルジムを皆で組み上げるもので、大工さんのお仕事体験を通した、木造建築の普及および、木育を目的としています【Fig.3】【Fig.4】。

当日は各回で２０名以上のご参加を頂き、満員御礼のイベントとなりました【Fig.5】。

子どもたちが積極的に組み立ててくれたのはもちろんのこと、保護者の皆さまも一緒にサポートして下さり、立派な木のジャングルジムが組み上がりました。

[参考サイト] 芝浦工業大学HP ニュース　https://surl.jp/y9JeKbc2
小柏研究室HP 実施報告　https://surl.jp/yGF6wsJS



【Fig.3】参加者とスタッフによる、貫の差込みの様子。



【Fig.4】参加者による、楔を打ち込む様子。



【Fig.5】組立て後の集合写真。背景には、団地のマンションが建並び、都心ならではの風景。

実施報告②

くむんだー開催期間中、常時参加可能な巨大ジグソーパズルを、広場に設置しました【Fig.6】。

貫構法を用いた２つの建物の写真を使用し、くむんだー参加者や通行人に伝統建築や技術への関心を向けてもらうこと、さらに親しみを持ってもらうことを目的としています。

当日は、くむんだー未参加者を含む約３０名が参加し、個人または複数で取り組む姿が見られました。



【Fig.6】参加者による、パズルの様子。多くの参加者が集まったため、競争形式で実施しました。

研究報告　鳥取県調査

２０２４年５月に、鳥取県に所在する三徳山三仏寺の懸造建築(投入堂・地蔵堂・文殊堂)の調査を行いました【Fig.7】。それら3つの伝統建築は、国宝もしくは重要文化財に指定されています。

建築の足元は、土台を整形せず、自然に形成されの岩壁や隆起を支持体としてそのまま利用して柱を建てるのが特徴です。崖や岩上に垂直に建つ安定感と、自然と調和した造形美に、深く感銘を受けました。また、修験道のように険しい道のりを進み、懸造建築を目の当たりにした経験は、信仰の厳しさや特別な意味を持つことを実感し、自然・信仰・建築が融合した存在であるということを深く感じることができました【Fig.8】。

くむんだーと同様に、柱と貫、楔を用いることで構造を強固にしていることを確認できました。



【Fig.7】三仏寺投入堂
所在地：鳥取県東伯郡三朝町



【Fig.8】 三仏寺での調査
所在地：鳥取県東伯郡三朝町

「豊洲四丁目団地における安全・安心なコミュニティ形成」プロジェクト

代表者	小菅 瑠香【教授】（建築学部 建築学科）
構成員	山本 創太【教授】（デザイン工学部 デザイン工学科）

■プロジェクトの概要

少子高齢化や近所づきあいの希薄化によって、高経年団地のコミュニティの欠如は深刻な問題となっており、居住者が抱える孤立・孤独問題の解消は喫緊の課題となっている。本プロジェクトでは建築学部とデザイン工学部の学生たちが異分野合同でゼミナールを重ね、UR都市機構および豊洲四丁目団地居住者の方々のご協力を得ながら、効果的なコミュニティの形成方法を提案するものである。本プロジェクトは提案のみでなく、問題の背景を深く知り、関係する人々とよく話し合い、得られた情報から解決策を引き出し、ものづくりにつなげていくプロセス自体に焦点をあてている。

■教育改革研究活動助成（地域志向）活動の成果

【教育】

建築学部小菅瑠香研究室とデザイン工学部山本創太研究室の合同ゼミは、4月23日、5月14日、5月28日、6月11日、7月2日の5回に分けて行われた。研究室混合の複数のグループに分かれて、現地調査、昨年度までの団地アンケートの結果の学習、ブレインストーミング、UR都市機構の方々へのプレゼンテーション、制作といった作業を行い、各班の提案をまとめた。

7月27日に豊洲四丁目団地にて、これらの提案を居住者の方々に見て体験していただくイベントを開催した。12月16日には団地の生活支援アドバイザーの方に、団地内コミュニティについてのヒアリング調査を実施した。

一連の作業によって、学生は提案を行うまでのプロセスや課題を整理するスキルを身に着けた。



【建築学部とデザイン工学部の合同ゼミ】

【研究】

UR都市機構と連携して行う団地コミュニティについての研究は、さらに一年前より開始しており、既に居住者の方々の属性別のライフスタイルなどの回答がそろっている状態であった。今回はこのデータをもとに提案を検討し、団地にて提案イベントを開催しながら、通りかかる人々のイベントへの関心の示し方もあわせて調査を行った。記録の分析により、年代や性別などの属性ごとに、イベントに対する関わり方に傾向があることが明らかになった。この成果は今後のさらなるコミュニティ形成の提案の際に、大いに役立つものと考えている。



【団地模型を使ったアイディアの検討】

【社会貢献】

小菅瑠香研究室・山本創太研究室では2023年度から「とよよんマルシェ」などの豊洲四丁目団地開催のイベントに参加して、居住者の方々の生活の様子を学びながら研究調査を進めてきた。7月27日に豊洲四丁目団地にて開催したコミュニティ形成のための提案イベントでは、団地のピロティにそれぞれの提案ボードを掲示し、居住者の意見を聞くために、ボードにシールを貼っていただいた。またボードだけでなく、その場で各提案を簡単に体験していただけるコーナーを設営した。こどもから大人まで、楽しんでいただきながら提案に意見をいただくことが出来た。

また12月16日には団地の生活支援アドバイザーの方へのヒアリングでは、具体的にコミュニティ形成にどのような課題が発生しているのかをお聞きすることが出来た。これをもとに、学生たちは集会室の魅力的な改修提案の検討に着手している。



【コミュニティ活性化の提案イベント】

主なトピックス

■ 団地におけるコミュニティ活性化の提案イベント

7月27日に豊洲四丁目団地にて提案したイベントは、①ボードゲーム、②集会室の改修、③散歩とスポーツ、④植物とベンチ、の4点である。これらの提案は2023年度の居住者へのライフスタイルアンケート結果および合同ゼミでのUR都市機構の方々へのプレゼンテーションでのコメントを受けてブラッシュアップされた。①は特に屋外で麻雀などのボードゲームを行い、通りかかる人が見入ってコミュニティが拡大する効果、②は安心してこどもや高齢者が屋内でくつろいで交流する環境、③は日課とレクリエーションの合体による健康増進、④は植物が一体化したベンチを設置することでの水やりと休憩の際のコミュニケーションの発生を期待するものである。実際にイベントの場においてベンチの制作を行った。



【提案1】 ボードゲーム



【提案2】 集会室の改修



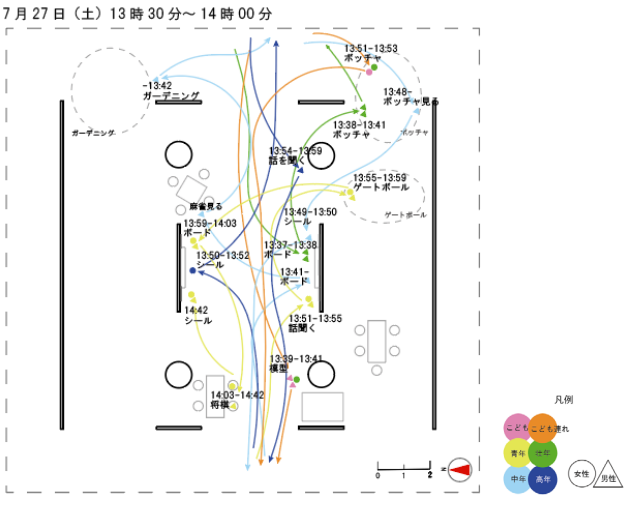
【提案3】 散歩とスポーツ



【提案4】 植物とベンチ

■ 属性別に見たイベントへの関わり方の特徴

上記イベント開催中に、会場となるピロティを通りかかる人々の関心の様子を図面にプロットした。子どもを連れた人がボッチャやゲートボールなどのミニスポーツイベントで足を止めて参加するケースは多く、また屋外ボードゲームでは海外からの居住者の方が参加して新たなコミュニケーションが発生した。高齢の方は団地の建築模型を見たり、麻雀で遊ぶ人々の後ろに立って意見するなど、直接活動はしないが遠巻きに参加してくださる方の姿が目立った。年齢や性別といった属性によってイベントへの関心の示し方に特徴がみられたため、今後のコミュニティ形成提案の参考とする。





【イベントを開催した団地のピロティ空間】
10時00分～15時00分の5時間に亘り、319組の通行があった







■ 団地生活支援アドバイザーへのヒアリング

上記イベントでは4つの提案を行ったが、イベント後にあらためて検討を重ね、まずは集会室の改修に提案を絞ってプロジェクトをさらに進めていくこととした。

居住者の方々の生活やイベントへの参加の様子について、より理解を深めるために、12月16日に団地生活支援アドバイザーの方へヒアリングを行った。アドバイザーの方のほか、UR都市機構、芝浦工業大学で総勢18名が同席した。

ヒアリングでは高齢者や子育て世帯、海外からの居住者など様々な人の生活についてお話を聞くことができた。

学生からは集会室のより良い使われ方が新たに複数提案されており、次年度に向けて活動を続けていく予定である。

オリジナルロボット組立て教材のレスキューコンテストやグローバル PBL への FD 展開の取組み

機械機能工学科　　長澤 純人

共同研究者
先進国際課程　　吉久保 肇子

１．はじめに

本研究は，工学系学生の段階的な学習深化を支援する教育教材として，小型移動ロボットの組立てキットの開発・改良を進め，実践的教育活動と教育プログラムへの実装を通じて評価を行うことを目的とする．本ロボット教材は，レスキューロボットコンテスト，グローバル PBL，公開講座，高大連携事業などの用途に適用され，幅広い応用が可能であることを実証する．2023 年度の本助成で試作したロボット教材キットをベースに，対象学習者の多様化（小・中・高校生～大学学部・大学院生，生涯学習）および学習形態の多様化（講義やグローバル PBL だけでなく，公開講座や高大連携，レスキューロボットコンテストなど）に柔軟に対応させて幅広いFD展開に取り組む．

さらに，本教材は単なる教育用キットとしてだけでなく，災害時利用を想定した実践的ロボットプラットフォームとしての利用も想定している（ASEE2023 発表）．ロボット教材は導入コストを抑えるために安価であることが強く要求されるが，その一方で，災害時利用のためには高い信頼性が求められる．近年の ROS2 リリースで導入された XRCE-DDS (eXtremely Resource Constrained Environments - Data Distribution Service) を採用することで，安価なコンピュータでも高信頼性通信システムのノードとなることができ，高い通信信頼性が確保される．XRCE-DDS は新技術なので，実装パフォーマンス評価の報告も少なく，ロボットロボット分野の研究としての意義も高い．

２．研究計画と進行状況

（1）ロボット教材の多様な学習形態への対応

本研究では，2023 年度に開発した小型移動ロボット教材キットを基盤とし，対象とする学習者層を小・中・高校生から大学学部生・大学院生，さらに社会人の生涯学習者まで拡張することを目指して教材の改良を行った．特に，学習レベルや演習目的に応じて異なる組込コンピュータ（Arduino，ESP32，Raspberry Pi など）を柔軟に搭載可能とするために，筐体構造のマウント設計と電源・通信接続などのシステムインタフェースを拡張した．また，学習マニュアルを学習レベルにあわせて作成し，センサ・アクチュエータのモジュール構成の最適化を図ることで，多様な学習形態の教育プログラムへのFD展開を実現した．

（2）レスキューロボットコンテストでの実証

ロボット教材の教育応用と信頼性向上を両立させる取り組みとして，2024 年度もレスキューロボットコンテストに継続参加した．本研究チームは2年連続で予選を突破し，本選に出場するとともに，**2年連続で「アイデア賞（レスコンメモリアルプライズ）」を受賞** [1] した（図1は参加チーム）．



図１ レスコンでは２年連続アイデア賞を受賞．

今年度は，複数のロボットが ROS2 ネットワーク上で情報を共有・連携するシステム構成を構築し，その信頼性と柔軟性を検証した．特に，XRCE-DDS を用いた軽量 ROS2 通信の安定動作を安価な組込コンピュータ上で達成し，実災害対応を想定したネットワーク構成においても実用的な通信性能を確認した．また，本選用に量産試作したロボット機体においては，教育現場からのフィードバックを設計に反映させ，組立てや操作の安定性・再現性が向上した．

（3）gPBL・高大連携・公開講座などへの展開

改善されたロボット教材は，図2に示すグローバル PBL プログラム（KMUTT-SIT Global PBL AY2024 Summer [24]［2024 年 9 月］および Winter [21]［2025 年 3 月］），芝浦工業大学柏中学高等学校における高大連携プログラム [19]（出張講座：2025 年 4 月），および地域連携・生涯学習センター公開講座 [22]（2025 年 2 月）など，国内外の多様な教育場面において導入・活用された．KMUTT との gPBL では，タイ側教員が独自開発した ESP32 組込コンピュータボードを教材に組み込んだ演習を展開し，設計の拡張性が国際協働教育にも有効であることを確認した．また，教材は研究室内の研究活動にも用いられ，移動ロボット制御，センサ融合，マルチエージェント協調制御等の複数テーマにおいて実験プラットフォームとして活用された[4-6], [2-18]．教育・研究の両面における応用性を通じて，教材の改善と内容拡充の相互的促進が達成された．



図2 gPBL 上段：派遣（タイ），下段：受入（日本）

3．おわりに

本研究では，小型移動ロボット教材を活用した段階的な学習支援体制の整備と，その教材の教育・研究両面における応用可能性の検証を行った．2024 年度は，教材のマウント構造の工夫やシステムインタフェース拡張により，複数の組込コンピュータへの対応性を高め，多様な対象学習者や学習形態に適応可能な構成に改良できた．さらに，教材の設計改善は，学生が自らのコンセプトや目標に応じて柔軟に拡張・再構成できるよう意図されており，実際の gPBL や高大連携プログラムでもその有効性が確認された（図3参照）．

特に本教材をグローバル PBL（KMUTT-SIT），高大連携（中高出張講座・SSH 事業），地域連携（公開講座），学内外の研究・演習といった多様な学習形態の教育プログラムに適用できたことは大きな成果である．各教育プログラムにおいて，教材の拡張性やカリキュラム難易度に応じた柔軟な設計が有効に機能し，学習者の主体的な探究活動を促進した．これらの成果はジャーナル論文[1-2]や国際・国内学会で発表予定である[1-3]．

また，レスキューロボットコンテストでは，2年連続の本選出場とアイデア賞の受賞を果たし，教材の実用性・拡張性に加え，複数ロボット間の情報共有・連携を可能とする高信頼ネットワーク構成（XRCE-DDS を活用した ROS2 ベース通信）の有効性を確認した．この成果は，単なる教材開発にとどまらず，実災害対応を想定した応用技術として，論文投稿や2025年度のレスキューロボ

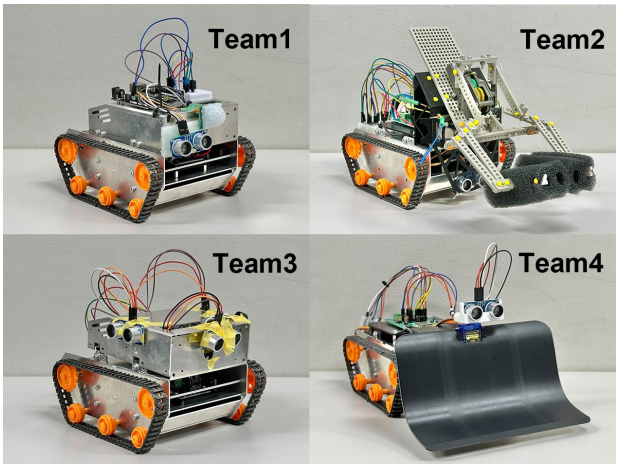


図3 コンセプト拡張されたカスタムロボット例．

ットコンテストに展開していく予定である.

本教材は, 研究室内の移動ロボット研究のプラットフォームとしても活用されており, 教育実践と技術開発の成果が相互にフィードバックされる好循環が生まれている. 今後は, 得られた成果をもとに, 教材のさらなる製品化と展開を進めるとともに, ロボティクス教育の高度化と社会課題への応用の橋渡しとなる教育モデルの構築を目指す.

４．今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

本研究では学内倫理規定に基づき，個人情報や告知に十分注意して教育研究を遂行した. 2024 年度の研究成果として，ジャーナル論文･査読付国際学会 2 件, 国際学会発表 3 件, 国内学会発表 17 件，講演・競技会表彰等 8 件を以下のリストに示す.

今後も本研究でのデータを基に積極的に英文ジャーナル論文出版，国際学会発表などを実施する．すでに ASEE2025（Montreal, Canada）でも３件の発表が採択されている[1-3].

◆ジャーナル論文・査読付国際学会

(1) Sumito Nagasawa, Hatsuko Yoshikubo, “Cost-Effective Research Platform for Child-Robot Interaction Studies Using a Smartphone-Based Humanoid Robot with Double Gesture Arms,” 2024 ASEE Annual Conference & Exposition, Portland, Oregon, USA, Jun. 23-26, 2024, DOI: 10.18260/1-2--47081.

(2) Leo Kimura, Yujiro Iwata, Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, “Enhancing Student Participation in Online Global Project-Based Learnings (gPBLs) Through a Slack-Based Evaluation: A Student Perspective,” 2024 ASEE Annual Conference & Exposition, Portland, Oregon, USA, Jun. 23-26, 2024, DOI: 10.18260/1-2--47318.

◆国際学会発表

[1] Sumito Nagasawa, Hatsuko Yoshikubo, “Introducing Angle Sensors into Robot Block Teaching Kits Using Non-Contact Magnetic Rotary Encoder,” 2025 ASEE Annual Conference Paper, #46646, Montreal, Quebec, Canada, Jun. 22-25, 2025 (Accepted).

[2] Leo Kimura, Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, “Enhancing Assessment of Student Engagement in Face-to-Face Global Project-Based Learnings (gPBLs): Adding Peer Assessment to Improve Slack-based Evaluation,” 2025 ASEE Annual Conference Paper, #46576, Montreal, Quebec, Canada, Jun. 22-25, 2025 (Accepted).

[3] Saki Taguchi, Kasumi Hoshino, Yutaro Tsuchida, Sogo Fujita, Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, “Investigating the Usefulness of Robots as Educational Resources in High School Science: Aiding Students to Obtain Measurement Data That Are Easy to Examine Using the Kalman Filter,” 2025 ASEE Annual Conference Paper, #46621, Montreal, Quebec, Canada, Jun. 22-25, 2025 (Accepted).

[4] Chikaaki Honda, Sumito Nagasawa, “Flexible Joint Control of Insect-Inspired Robots Using Origami Structures and Compliant Hinges,” The 10th International Conference on BioSensors, BioElectronics, BioMedical Devices, BioMEMS/NEMS & Applications (Bio4Apps2024), OR-6A, Toyama, Japan, Dec. 2-4, 2024.

[5] Ryota Hiratsuka, Sumito Nagasawa, “Design Method for Sleeve of McKibben-Type Actuator for Customized Deformation,” Digest of 37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2024), 15P-1-55, Kyoto, Japan, Nov. 12-15, 2024.

[6] Tomoki Sakurai and Sumito Nagasawa, “Measurement Method of Surrounding Information Using 1D ToF Sensor for Micro-Hexapod fabricated with MEMS Origami Frame,” Digest of 37th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2024), 15P-1-58, Kyoto, Japan, Nov. 12-15, 2024.

◆国内学会発表・講演・競技会表彰等

1) **アイデア賞（レスキューコンテスト 2024 競技会本選レスコンメモリアルプライズ）**, チーム QoQ (芝浦工業大学 機械機能工学科/機械工学専攻 マイクロロボティクス研究室), 矢島由稀, 山本郁弥, 平塚亮太, 外山龍之介, 櫻井智基, 木村玲雄, 五十嵐崇幸, 西田智郁, 常賀莞人, 田口早紀, 星野香澄, 土田裕太郎, レスキューロボットコンテスト 2024 競技会本選, 2024 年 8 月.

2) 外山 龍之介, 長澤 純人, “STEAM 教材のための遺伝的アルゴリズムによるロボットの自動歩行パターン生成シミュレーション,” 日本機械学会関東支部第 31 期総会･講演会, 03B01, さいたま市, Mar. 3-4, 2025.

3) 山本 郁弥, 長澤 純人, “小型インターフェースロボットのためのジェスチャー用双腕アーム機構,” 日本機械学会関東支部第 31 期総会･講演会, 04B19, さいたま市, Mar. 3-4, 2025.

4) 矢島 由稀, 長澤 純人, “環境データ収集のための落下体の散布範囲制御,” 日本機械学会関東支部第 31 期総会・講演会, 04G20, さいたま市, Mar. 3-4, 2025.
5) 吉田 悠太郎, 長澤 純人, “SMA ワイヤーの取り付け方による初期値状態のばらつきの補正方法,” 日本機械学会関東支部第 31 期総会・講演会, 04G21, さいたま市, Mar. 3-4, 2025.
6) 伊藤 翔真, 長澤 純人, “小型移動ロボットのオドメトリ法と音源定位によるハイブリッド自己位置推定,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1013, Mar. 3, さいたま市, 2025.
7) 土田 裕太郎, 長澤 純人, “小型ロボットハンドのためのコンプライアントヒンジを用いた変位拡大機構,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1021, Mar. 3, さいたま市, 2025.
8) 酒井 泰完, 長澤 純人, “SMA 変位拡大機構を使用したねじれ駆動モジュール,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1022, Mar. 3, さいたま市, 2025.
9) 藤田 一寿, 長澤 純人, “水中ロボットに搭載する海洋マイクロプラスチック捕集用の取水流量測定システム,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1023, Mar. 3, さいたま市, 2025.
10) 堀尾 優太郎, 長澤 純人, “STEM 教育のための組立容易なシート構造 6 脚ロボット,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1032, Mar. 3, さいたま市, 2025.
11) 藤田 聡悟, 長澤 純人, “ロボットアームのエンドエフェクタ先端に装備した PMUT による把持対象物形状の認識,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1041, Mar. 3, さいたま市, 2025.
12) 李 旻浩, 長澤 純人, “小型平行二輪レスキューロボットの質量移動による揺動制御システム開発,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1023, Mar. 3, さいたま市, 2025.
13) 由井 優作, 長澤 純人, “シミュレーションによるロボットのコントロールモーメントジャイロ姿勢制御の最適パラメータ推定,” 日本機械学会関東学生会 第 64 回学生員卒業研究発表講演会, 1313, Mar. 3, さいたま市, 2025.
14) 本田 親彬, 長澤 純人, “折り紙構造によるひずみゲージを備えたマイクロ 6 脚ロボット脚部の設計, Walking Mechanism of Micro Hexapod Robot Using Origami Structure Equipped with Strain Guage” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-O05, 宇都宮市, May. 29 - June 1, 2024.
15) 山本 郁弥, 大木 颯人, 長澤 純人, “小型インターフェースロボットのための双腕 SMA アーム, Dual-SMA-Arm for Small Scale Interface Robots” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-D06, 宇都宮市, May. 29 - June 1, 2024.
16) 山内 秀馬, 長澤 純人, “海洋マイクロプラスチックの船上ラマン分光検査のための振動補償手法, Vibration Compensation Method for Onsite Raman Spectroscopy of Marine Microplastics” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-D10, 宇都宮市, May. 29 - June 1, 2024.
17) 外山 龍之介, 長澤 純人, “STEM 教材のための遺伝的アルゴリズムによるロボットの自動歩行パターン生成シミュレーション, Simulation of Automatic Robot Walking Pattern Generation Using Genetic Algorithm for STEM Teaching Materials” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-M02, 宇都宮市, May. 29 - June 1, 2024.
18) 吉田 悠太郎, 長澤 純人, “形状記憶合金実装の再現性を考慮した抵抗値フィードバックによる任意角度制御手法, Arbitrary Angle Control Method with Resistance Feedback for Reproducibility of Shape Memory Alloy Mounting” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-M01, 宇都宮市, May. 29 - June 1, 2024.
19) 長澤純人, “センサで測る！ロボットプログラミング入門 ～動いているロボットからデータを記録して解析しよう！～,” 芝浦工業大学柏中学高等学校 出張講座, 柏市, 2025 年 4 月 8-9 日.
20) 長澤純人, “ライトニングトーク さきがけ時代の私と今,” 「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」を振り返るシンポジウム「続・表現の未来へ」, 文京区, 2025 年 3 月 18 日.
21) 長澤純人, 吉原正一郎, Danai Phaoharuhansa, Tanagorn Jennawasin, Witchuda Thongking, KMUTT-SIT Global PBL AY2024 Win. (受入型), 江東区, 2025 年 3 月 3-10 日.
22) 長澤純人, “センサで測る！ロボットプログラミング入門 ～動いているロボットからデータを記録して解析しよう！～”, 地域連携・生涯学習センター公開講座, 24b402, 江東区, 2025 年 2 月 15 日.
23) 麻生彩羽, 長澤純人, “高大連携（SSCIII）”, 芝浦工業大学柏中学高等学校 スーパーサイエンススクール事業第 III 期事業, 2024 年 11 月 18 日-2025 年 2 月 15 日.
24) 長澤純人, 吉原正一郎, Danai Phaoharuhansa, Tanagorn Jennawasin, Witchuda Thongking, KMUTT-SIT Global PBL AY2024 Sum. (派遣型), Bangkok, Thailand, 2024 年 9 月 13-20 日.
25) 山﨑愛真, 長澤純人, “芝浦工業大学サマー・インターンシップ 2024,” 芝浦工業大学入試課, 2024 年 8 月 1-8 日.

データマイニング・テキストマイニングを用いた国際学習プログラムの成果解析・グローバル技術者育成の研究

工学部（情報・通信工学課程　情報工学コース担当）　　木村　昌臣

共同研究者
マレーシアオフィス　　石崎 浩之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

グローバルプロジェクトベースドラーニング（グローバル PBL）プログラム、および短期留学プログラムは本学学生にとって語学の成長を促すとともに国際的に通用するエンジニアになるために必要な基礎的な素養を身につけるために重要である。特にグローバル PBL は、問題を発見し解決するためのチームワークを養うために設計された、学生中心の学修活動プログラムであり、多くの場合、国際的および学際的な協力が必要であり、学生は複雑な問題の解決策について話し合うことになる。このような連携は、学生のモチベーションを高めるだけでなく、多様性への理解を深めることにもつながる。

効果的なグローバル PBL プログラムを設計するために、教員は通常、テーマ設定を行い、講義、ディスカッション活動、プレゼンテーションを含むスケジュールの編成を行う。しかし、これらのプログラムを評価して継続的な改善を促進することは、重要であるにもかかわらず、参加学生の学修プロセスそのものを元にして改善を行うことは依然として困難である。この困難は、学習が自発的で個別化されたプロセスであるため、プログラム設計中に生徒の思考経路を追跡したり、教育者が予想したものと比較したりすることが困難であることに起因する。

本研究では、参加学生の学修プロセスそのものを元にした改善の材料を提供する手法として、学生自らの学修中のログの定量的・定性的解析手法の検討を行った。国際的な技術者教育の実質的同等性を相互承認するワシントン協定(WA)における Graduate Attribute Profiles (GAP) 11 項目の基準は、学生が卒業するまでに身につけるべきスキルをまとめたものであるが、これには工学知識、問題分析、解決策の設計/開発、調査力、最新ツール、エンジニアと世界、倫理、個人とチームワーク、コミュニケーション、プロジェクトマネジメントとファイナンス、生涯学習と、ノンテクニカルスキルが数多く含まれており、これらの基準も直接定量分析に用いるには適していない。そこで、グローバル PBL 中の学生の思考プロセスへの洞察を得るために、参加者が日々の学習成果を記録する TWIL(That's what I learnt)というワークシートを活用した[1]。これは本学の協定校であるスラバヤ工科大学でのグローバル PBL で既に用いられたワークシートフォーマットである。これを本研究で開発するデータマイニング・テキストマイニング手法により分析し、当該プログラムでは学生の思考経路がどのようなものであったかを把握可能とすることを目的とする。

これにより、WA11GAP に則して、とくにノンテクニカルスキルの項目についてどのような学修成果があったか、どの内容がどの項目の学修成果に結びついたかの因果関係が把握できるようになることが期待される。

２．研究計画

テキストマイニングのベースとなる分析手法は 2023 年度に開発済みであった。これは、旧来のテキストマイニング手法の考え方に倣ったものであり、グローバル PBL で用いた TWIL フォーマットのデータに対して単語出現頻度およびその係り受け（主語述語関係や修飾被修飾関係など）の頻度を抽出することにより、どのようなトピックを扱ったのかを知る手法であった。

2024 年度の研究計画はこの手法と連動することでより高い学修効果が見込めるグローバル PBL を設計した上で、その実施を通してデータの収集を行い、本研究で開発した手法により実際の効果測定を行うというものであった。具体的には、その対象は ITS とのグローバル PBL（渡航 1 件、受入 2 件の予定)、および ITS キャンパスで開催される HAx であった。

また FD･SD 活動を通して学内で共有すると共に、2025 年 2-3 月にグローバル PBL を実施予定の他の教員に関心を示してもらえる場合には、そちらにも導入する予定であった。

３．計画の進行状況

序論でも述べたように学生の思考プロセスへの洞察を得るために、参加者が日々の学修成果を記録するワークシート TWIL を活用し、これらのレコードから意味のあるパターンを抽出するための、テキストマイニング技術を開発した。

従来、テキストマイニングは、自然言語処理手法を使用した単語ベースの分析が中心であったが、ディープラーニングの進歩により、文や文書レベルでの分析が可能となった。単にキーワードを特定するだけでは学生の思考経路を理解するには不十分であり、ディープラーニングを用いて TWIL ワークシートに記載されたグローバル PBL 参加者の記述を、定量的に扱うために必要なベクトルに変換した。このためにセンテンス BERT を利用した。

一般的には、このような目的のためにはディープラーニング手法として Transformer モデルを用いることが多いが、PBL 参加者数や記述量は限られているため、大規模言語モデルなどのように大量のデータがある状況ではないので Transformer モデルが得意とする状況と異なる。また、得られた結果を解釈するために必要な情報を得るための手法も確立されておらず、これを Transformer モデルでは難しい。

関連する先行研究では、Araujo らは、長短期記憶モデル（LSTM）を教育分野のデータに対しテキストマイニングとして適用し、教育文書で用いられている主要なトピックを特定するために用いた。しかしながら、著者らの知る限り、ディープラーニングを用いたグローバル PBL データを分析するためのテキストマイニング手法は開発されてこなかった。本研究では計算効率向上のためもあり LSTM などの再帰型モデルに頼らない注意機構を採用した。

TWIL ワークシートにグローバル PBL 参加者が記述する項目は以下の通りである。

- 関心を持った点
- 持った関心に関係する事実や情報
- 特定された問題やニーズ
- さらに調査すべきデータまたは情報
- グループメンバーとの討論すべき点
- フィージビリティスタディのためのさらなる疑問点

これらの項目は、活動に対する参加者の認識と考察の因果関係に沿ったものになっている。

本研究の目的である学生の思考経路の抽出のためには、各項目に記述された内容を要約

するだけでなく、それらの内容の間に認められる関係を見つけることも重要である。そのような関係を見つけるために、同一参加者の隣接する項目の記述内容の間に 1 対 1 の関係があると仮定した。これは、TWIL フォーマット自体、記述の因果関係を前提としているためである。たとえば、ある参加者があるトピックに関心を持っている場合、そのトピックに関連する事実や情報を調査するだろうことが考えられ、これらの記述に1 対 1 の関係があると考えてよいであろう。

これを前提として、以下、開発した手法の具体的な内容について説明を行う。

- センテンス BERT の適用
  センテンス BERT を使用することで、参加者が記述した文をその内容を成分に反映したベクトルに変換する。これにより記述内の各文を定量データに変換することができる。さらに次元を調整するために多層パーセプトロンにこれを入力し、その結果得られたベクトルを文埋め込みベクトルと呼ぶ。
- 注意機構による記述エンコード
  各記述においてどの文が記述間の因果関係のなかで重要な意味を持っているかを定量評価しこれを解析に反映するため、注意機構を用いて文埋め込みベクトルに乗算する重みを計算する。本研究での注意機構は参加者が対象とする項目に含まれる複数の文に対応する文埋め込みベクトルを連結したものを入力とし、文の数に等しい重みの値を出力する多層パーセプトロンである。重み付けされた文埋め込みベクトルを、記述ベクトルと呼ぶ。また、重みは、説明ごとに代表的な文を選択するために使用する。
- 関数型マッピング
  記述ベクトル間に 1 対 1 の関係があるという仮説を元に、ある項目の記述ベクトルを多層パーセプトロンに入力することによりもう一方の項目の記述ベクトルが出力される関数を学習により実現する。そのために全参加者の記述を利用する。また、ニューラルネットワークの学習中に、注意機構のニューラルネットワークも学習される。
- クラスタリングと視覚化
  学習済みの注意機構を用い、各項目の記述ベクトルを改めて計算する。これにより、各項目の記述ベクトルの具体的な値を求めることができ、これを用いることで全参加者の記述において類似した内容の記述をグルーピングすることができる。また、重みの値が大きい文を特定することで記述ベクトルのなかでの寄与が大きい文を特定することができ、記述内容の把握を容易にする。類似した内容の記述をグルーピングするために、記述ベクトルに対し、次元削減手法である UMAP を適用し二次元空間にデータを配置したうえでクラスタリング手法のひとつである DBSCAN を利用してデータのクラスタを求めた。これにより、各項目で全参加者の記述をクラスタとして分類し、同一参加者の各項目での記述の対応関係をもとに項目ごとの記述のクラスタの関連を見つけ出す。1 人の参加者の記述は項目間で 1 対 1 の関係にあると仮定したが、全参加者の記述を対象とすれば多対多の関係が見いだされる可能性がある。このクラスタ間の関係性を二者グラフとして可視化する。

例として、以上の手法を環境工学分野のグローバル PBL の TWIL フォーマットデータに適用した結果を示す。参加者は、芝浦工業大学学生とスラバヤ工科大学の学生であり、合計で総勢 64 名であった。このデモンストレーションでは、「関心を持った点」「持った関心に関係する事実や情報」の二つの項目を使用した。これは、好奇心が事実や情報を探索す

る動機になると考えたためである。

結果として、「関心を持った点」には、クリーンエネルギー、バイオマス製品、環境汚染、企業の製品、交通システム等のクラスタが見受けられ、「持った関心に関係する事実や情報」についてはゼロエミッションに関する情報やバイオマスに関する情報、インドネシアの環境に関する情報、廃棄物から電力への変換に関する情報、廃棄物埋立地会社に関する情報などについてのクラスタが見受けられた。

図 1はこれらのクラスタ間に見られる二部グラフを示している[2]。これにより、バイオマス製品についての関心はゼロエミッションやインドネシアの環境についての情報の調査の動機になっており、廃棄物・大気汚染・政策についての関心が廃棄物から電力への変換に関する情報についての調査の動機になってい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

以上の研究成果は、ベトナム・ハノイにて2025 年 2 月 20 日から 23 日まで実施された国際会議 2025 10th International Conference on Intelligent Information Technology (ICIIT2025)にて発表を行った[2]。

今後は、本研究を全項目対象とする手法に拡張すること、継続的にスラバヤ工科大学（ITS）と実施を予定しているグローバル PBL 等でテスト実施すること、また、他のグローバル PBL への応用展開を検討する。

参考文献

[1] H. Ishizaki, M. Anityasari, M. Kimura, H. Nakamura, T. Iwata, M. Iqbal, I. Mukhlash, F. Agustin: Text Mining Analysis for Assessing Washington Accord Graduate Attribute Profiles through Techno-Socio Project-Based Learning Program: 2024 ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2024.

[2] M. Kimura, H. Ishizaki, H. Nakamura, T. Iwata, M. Anityasari, I. Mukhlash, M. Iqbal: Deep Learning Based Text mining on global PBL Description Data, Proceedings of ICIIT2025, Hanoi, Vietnam, 2025 (to be published).

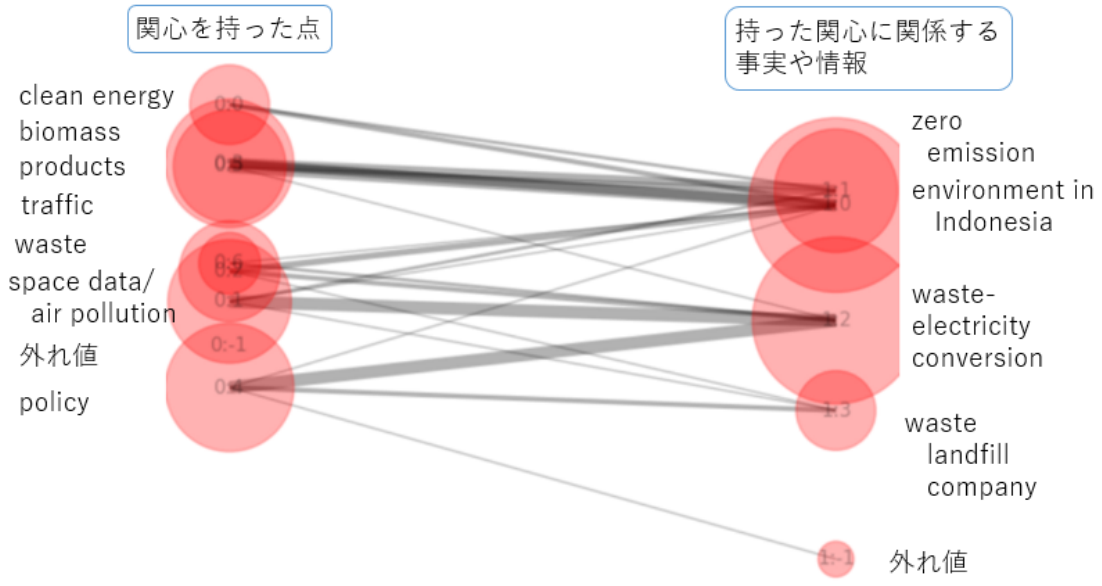


図 1　本研究で開発した手法によるサンプルデータから得られた二部グラフ。文献[2]の図を一部改変して作成した。

教育環境のリアルタイムデジタルツインの研究とその実証実験

工学部情報・通信工学課程　新熊 亮一

共同研究者
建築学部建築学科　蟹澤 宏剛
システム理工学部生命科学科　中村 奈緒子
工学部機械工学課程　廣瀬 敏也
デザイン工学部デザイン工学科　橋田 規子

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

デジタルツインとは、現実空間のデジタル上のコピーである。しかし、それは単なるコピーではなく、現実空間とリンクしている点が重要である。特に、リアルタイムデジタルツインにおいては、現実空間の変化に応じてデジタル空間がリアルタイムにアップデートされる。これにより、教育環境（例えば授業中の教室）に設置されたセンサーによってデータが収集され、リアルタイムにデジタル空間が可視化されるのみならず、AI（人工知能）を用いてその空間の特徴が抽出される。例えば、学修者の集中度や習得度、生産性を推定することが可能となる。これらが推定されれば、現実空間では捉えきれなかった潜在情報の抽出・可視化に成功したということであり、デジタルツインの第一の目的が達成される。さらに、現実空間に対し集中度や習得度、生産性が向上するためのフィードバックを行うことが第二の目的である。これを達成するため、集中度などが低い授業と高い授業両方の空間特徴を AI に学習させることで、AI が自動的に差分を抽出し、集中度などが低い授業にフィードバックを行う。

従来、講義に対する学修者の状態を講義中にリアルタイムに知ることは不可能であった。しかし、本研究により、教育環境の現実空間のデジタルコピー（デジタルツイン）が実現すれば、学修者の集中度や習得度、生産性をリアルタイムに推定し可視化できるようになる。講師は授業中であっても、「サーモグラフィー」のように学修者の状態を確認できるようになり、これは究極の FD（ファカルティ・ディベロップメント）教材とも言える。また、集中度などが高い講義と低い講義の特徴の差異を定量化することで、授業設計や講師と学修者とのインタラクションの効果との相関も明らかにできる。こういった可視化や定量化が、学生課や教務委員会、カリキュラム委員会での授業設計の改善へと繋がる。

教育環境のデジタルツインが実現することで、学習状態の情報化や特徴抽出が可能となり、学修者の集中度などが定量化される。これらと、学修者自身の実際の課題提出状況や得点との相関を分析することで、AI の精度を向上することができ、講師だけではなく、学修者自身にフィードバックを行うことが可能となる。具体的には、集中度が低くなりやすい科目や時間帯の傾向を学修者自身にフィードバックすることで、学修の質を改善させることができる。このデジタルツインによるフィードバックが将来的には、講師の授業の質

改善と学修者の学修の質改善の標準的なフレームワークとして確立されることが期待される。

２．研究計画

本研究は、上記の構成員が実施する授業を主な対象とする。また、本部棟 4 階や、教室棟、図書館などの自習スペースも対象とする。現実空間の情報をリアルタイムに取り込み、そのコピーであるデジタル空間を生成するために、主に LiDAR (Light Detection and Ranging)と呼ばれる三次元センサーを用いる。教室内にいる学修者の動きや姿勢は、そのデジタル空間にリアルタイムに反映される。

我々のこれまでの研究において、代表者の担当講義、本部棟 4 階の自習スペース、研究棟の廊下、大階段上キッズパークなどでデータ取得を完了している。また、大学構内において、LiDAR と AI 搭載コンピューターを格納可能な屋内設置用ボックスの常設を進めている（図 1 は本部棟 4 階を示す)。本部棟 4 階の自習スペースや研究棟の廊下などにおいては、既に三次元データを取得済みである。LiDAR で取得された三次元の生データ(図 2(a))から、図 2(b)に示すような実空間のデジタルコピー、すなわちデジタルツインを形成することに成功している。図 2(b)において、歩いている人が赤く表示されているように、壁やフロアといった静的空間特徴と動的特徴を自動判別する AI の開発にも成功し、IEEE の国際会議で Best Poster 賞に選ばれるなど国際的な評価を得ている。これらのデジタルツインと AI の組み合わせにより、教育環境における学修者の動きの特徴を推定し、集中度など学習効果に繋がる要因を定量的に推定することが可能となる。

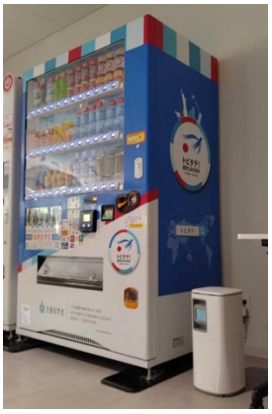
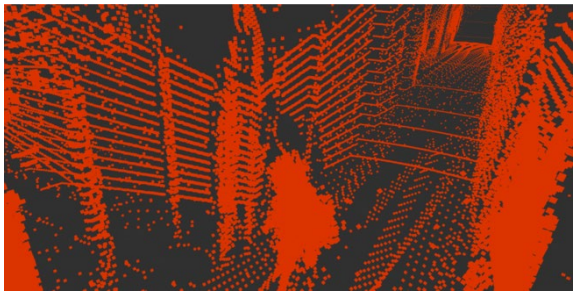


図 1: 本部棟 4 階での設置



(a) 生データ



(b) デジタルツイン化された情報

図 2: LiDAR の三次元データの可視化

研究課題は以下のとおりである。

- 教室など教育環境への LiDAR、AI 搭載コンピューターの設置
- 学習環境のデジタルツインのリアルタイム形成
- デジタルツインにおいて、学修者を自動検知し、動きの特徴を抽出する AI の開発
- 学修者の視線や姿勢から、集中度や、習得度、生産性を推定するアルゴリズムの開発
- 実際の学習環境での推定結果に基づく本研究で開発したシステムの有効性の

実証

- 集中度などが低い授業へのフィードバック

３．計画の進行状況

複数 LiDAR センサーネットワークを用いた顔向き推定システムを構築した。本システムは、三次元点群データから人間の顔向きを推定し、色情報に頼ることなく、おおよその視線推定を可能にするものである。

芝浦工業大学豊洲キャンパス内において実験を実施した。本実験は、生命工学研究倫理審査委員会の承認を得て行った。

LiDAR ユニットとして Livox Avia、エッジデバイスとして NVIDIA Jetson Nano、エッジサーバーとして NVIDIA Jetson Orin Nano を使用した。図 3 は、機器の配置と実験協力者の着席位置を示している。4 つの LiDAR ユニットをそれぞれ高さ 1.0 メートルに固定し、水平に配置した。実験には 1 名の協力者が着席した。実験協力者の正面には机が置かれ、机の上には頭部動作の指示が示された PowerPoint スライドを表示するモニターを設置した。

本実験では、モニターに表示される指示に従い、着席した実験協力者から頭部動作データを取得した。スライドは、正面からの上方への動きと正面からの下方への動きの 2 種類の頭部動作指示で構成されていた。各着席位置でのデータ取得は、以下の手順で実施した。1) フレーム長 110 ミリ秒でデータ取得を開始すると同時にスライドを再生する。2) 実験協力者は指示に従って頭部を動かす。3) スライドが終了したらデータ取得を終了する。各着席位置において、上方および下方への動きの両方について約 50 フレームを取得した。

各着席位置で取得された 3D 点群データを 2D 画像に投影した。2D 投影は、顔の左側面図から行った。図 4 と図 5 はそれぞれ、頭部が上下に動いた際の 3D 点群データと対応する 2D 画像を示している。これらの画像を用いて、各着席位置における頭部動作の動画を作成した。画像の生成と動画の作成には、Python の OpenCV[1]を使用した。各動画からオプティカルフローを計算した。オプティカルフローの計算に使用する特徴点を検出するために、Shi-Tomasi 法[2]を使用した。検出された特徴点の追跡とオプティカルフローの計算には、Lucas-Kanade 法[3]を使用した。

各動画から、正面からの上方への頭部動作と下方への頭部動作の 2 種類のオプティカルフローベクトルを抽出し、動きの方向が期待される方向と一致するフレームの割合を評価した。図 6 は、図 3 の着席位置 2 におけるこれらのオプティカルフローベクトルの分布を示している。ベクトル成分は、上方および下方への動きの両方において増加していることがわかる。同様の結果が他の着席位置でも観察された。表 I は、各着席位置において、頭部の動き（正面からの上方および下方）が顔の向きと一致したフレームの割合を示している。4 つの位置すべてにおいて、90%以上のオプティカルフローベクトルが顔の向きに対応していた。

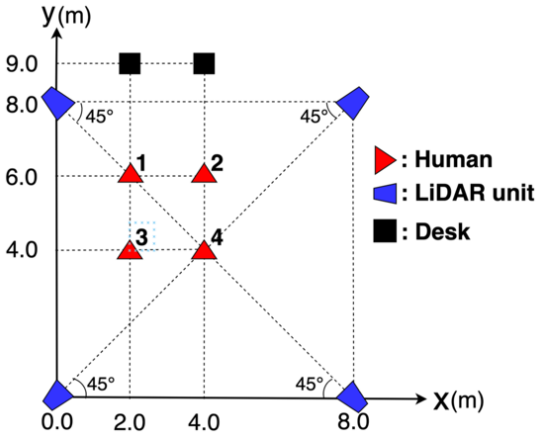


図 3: LiDAR と座席、モニタの配置



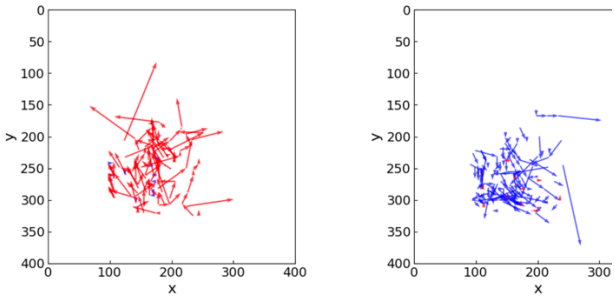
(a) 上向き　　(b) 下向き

図 4: 上下方向動作の点群データ



(a) 上向き　　(b) 下向き

図 5: 2 次元化した画像



(a) 上向き　　(b) 下向き

図 6: オプティカルフローのベクトル分布
（赤: 上方向、青: 下方向）

表 I: 上向き、下向き動作時の上方向、下方向のオプティカルフローのベクトル割合

Position	Upward		Downward	
	Up (%)	Down (%)	Up (%)	Down (%)
Position 1	99.6	0.04	0.24	97.6
Position 2	96.6	0.34	0.51	94.9
Position 3	99.4	0.06	0.46	95.4
Position 4	91.3	0.87	0.46	95.4

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の計画として、上に示した教室などの教育環境への LiDAR および AI 搭載コンピューターの設置、学習環境のデジタルツインのリアルタイム形成、学修者の視線や姿勢からの集中度、習得度、生産性を推定するアルゴリズムの開発を推進する。さらに、実際の学習環境における推定結果に基づき、本研究で開発したシステムの有効性を実証し、集中度などが低い授業へのフィードバックを実現していく。

研究成果については、IEEE の国際会議に論文を投稿済みであり、採録されれば 2025 年度中に発表可能である。また、IEEE の学術論文誌への投稿も予定している。

参考文献:

[1] G. Bradski, “The opencv library.” Dr. Dobb’s Journal: Software Tools for the Professional Programmer, vol. 25, no. 11, pp. 120-123, 2000.

[2] J. Shi et al., “Good features to track,” in 1994 Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition. IEEE, 1994, pp. 593-600.

[3] B. D. Lucas and T. Kanade, “An iterative image registration technique with an application to stereo vision,” in IJCAI’81: 7th international joint conference on Artificial intelligence, vol. 2, 1981, pp. 674-679.

リカレント教育の提供に向けたD&Iサイエンスカフェの実施 ～あらゆる人の知る喜び、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、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
システム理工学部　ニコデムス ラディアン、田中みなみ
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」を実施してきた。2022―2024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、何を知りたいと思い、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う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、さらに多様性を受容し（D&I）幸福感の高い社会の形成に向けて、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（４）普段研究内容に踏み込む機会の少ない職員や地域住民といった多様な人々を巻き込む取り組み（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、大宮祭での実施を予定している（大学院共通科目で 1Q 実施のため)。大宮祭では、事前に教室展示をエントリーして実施する。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や小学生を含む地域住民を対象に 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、まず、豊洲、大宮の両キャンパスで実施し、可能であれば、地域のコミュニティーセンターなど、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 GS カフェを通して、学内の学生や教員

が広い視野と興味が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。年齢やジェンダー、また、これまでの経験や知識にかかわらず、多くの人に単身でもらえるよう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、豊洲キャンパスの大学職員や地域住民など科学や技術を専門としない未就学児から成人、高齢者まで幅広い対象としたサイエンスカフェを実施した。

3.1 サイエンスカカフェ～D&I 多様性需要社会にむけて～（5/6, 5/19）

(1)場所：

（5/6）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
（5/19）大宮祭 2 号館 2401 教室

(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 40 名(中国の留学生 4 名含む)

(3)対象者：

(5/6)受講生 40 名、受講生以外 25 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 14 名）
(5/19) 受講生 42 名、受講生以外約 300 名（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：

(5/6, 5/19 グループとテーマは共通)

A 班:#未来の生活＃新たな常識＃念力

自動運転の車どうデザインする？/見えない熱を見える形に?!/ 体を動かさずにどこかに行きたくない？

B 班:「できない」を「できる」にする

AI を使ってロボットを遠隔操作/ 鉄に食パンの耳のような皮ができる?/自分の好きなものを何でも作れるなら何をつくりますか?/光ファイバで生活を見守る?

C 班:「見えないもの」が「見える」ようになっちゃう!?技術

「脳の活動」でスマホのロックを解除?/体育館ではいくつのスポーツが行われるか/スイカとミカンはどうやって野菜と果物に分ける?/ボードゲームは教育に使えるか?

D 班:理系女子（リケジョ）による、まちづくり講座

『まち』の個性を守るには? /『まち』によって友達の作り方が変わる!? / どんな『まち』にも賑わいが戻るかも!?

E 班:細かな変化からわかること

機械に気持ちを伝えたい!/材料の試験をしたことありますか？/明日体が動かせなくなったらどうする？

F 班:10 年後のあなたの部屋

壁画が何千年も残ってるの凄くない?/すぐわからないセンサって、不良品?/一家に一台 3D プリンタ時代へ!!/宇宙の中をどうやって進む?

G 班:令和生まれ？おじさんじゃん w

え、今時まだ手なんですか?/そんなところの監視カメラ!?/ロボットとテレビを見る時代が来る!?/あの人も、この人も、みんな同じ量？

H 班:風と木の力

お風呂に入れない世界に光を/CatchTheWind ～風をあつめて発電～/みんな、盲導犬はご存知でしょうか？

I 班：リアルアントマン～極小スケールから世界を救う～

なぜレジ袋が有料になってしまったのか/微生物は酸素を使って呼吸する？/光の反射で薬剤濃度がわかっちゃう?

J 班：広がる VR の世界、VR と組み合わせるとこんなことができる!?

未来のカウンセリングってどうなるの?/感情をカタチにしてみよう/自由に自分のお家を作ってみませんか?/振動を使って感覚を拡張できる?

K 班：できたらいいなこんなコト

Free Wi-Fi のリスクを知っていますか？/野球のデータで観戦が更に楽しめたら凄いと思わない?/遊びを極めし者たちを知ってますか?/あなたにぴったりな椅子の形は？か？/脳波から消費者の無意識を解き明かせる？/未来の体育館って？/海のプラスチックごみをどうやって集める？/コンクリートってどうやって作るか知っていますか？

工夫したところ：発表者間の質疑応答などを行い、質問が少ないときでも盛り立てる役割を果たようした。大学院課の協力を得て全学的にも広報した結果、学内メールがきっかけで参加したくれた教職員が複数いた。

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。大宮祭では、科学には必ずしも詳しくない住民の方にも理解できるように丁寧に説明した。

実施の様子：（図１）

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。







図１　大宮祭でのサイエンスカフェの実施風景、多くの周辺住民や高校生とその保護者が来訪。参加者からコメントをいただいた。

3.2 サイエンスカフェ@豊洲キャンパス

場所：芝浦工業大学豊洲キャンパス

日時：2025 年 2 月 17 日（月曜） 13:30-20:30（休憩含）

第１部　キッズサイエンス

13:30- 15:00 有元史郎記念校友会館交流プラザ

第２部　グローバルサイエンス

15:00- 16:30 有元史郎記念校友会館交流プラザ

第３部　サイエンスカフェ

17:00- 18:30 SIT グローバルカフェ セガフレード

第４部　サイエンスワークショップ

18:45- 20:30 銀座シシリア豊洲店

実施者：教員７名（敬称略）山本、田中、菅谷、磐田、中川、村上、藤田、外部講師 根本氏、青山氏、院生学部生アシスタント 5 名（山本研、ウマ研、ニコデムス研）

対象者：未就学児、小学生、本学職員、一般地域住民



図２　一般向けサイエンスカフェポスター

工夫したところ：今回、チャレンジングではあったが、地域の未就学者、小学生を含んだ全年齢に対してサイエンスカフェを行った。

実施の様子：図３参照

第１部では保護者を含めた小学生の参加は予想以上で、サイエンス遊びを本当に楽しんでいた。

第 2 部では大学院生が研究で使っている自作ロボットや電子回路などを持ち込んで説明をしてくれた。最先端の研究の話を直接本人から聞くことのできる機会となった。

第３部では、学内のカフェで、テーマ別のレクチャーがあり、和やかな雰囲気の中で実際のものを手に取りながら進め、満足度が大変高かった。

第４部では、飲食を行いながら、くつろいだ雰囲気で、かつ専門家の先生方がうまく進行して下

さることによって、活発な議論が進んだ。







図３　一般向けサイエンスカフェの様子

４．まとめと今後の計画

2024 年度は、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してきたことは、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）に取っても大きな収穫となった。本事業の経験を生かし、誰でも参加できる多様性を保ったサイエンスカフェを継続していきたい。

Analyzing International Students' Written Output: Utilising CVLA To Compile an Engineering-focused ESP Corpus for Academics and Educators

工学部先進国際課程　　吉久保　肇子

共同研究者
工学部情報・通信工学課程　　上岡　英史
工学部先進国際課程　　Ahmet Ceinkaya
工学部先進国際課程　　Gabriele Trovato
工学部先進国際課程　　Peeraya Sripian
専修大学国際コミュニケーション学部　　池尾　玲子

１．序論

本研究は、日本の工学系大学教育においてEMI（英語開講科目：English-Medium Instruction）が国際学生に与える教育的影響、とりわけ英語ライティング能力の変化に焦点を当てて検証を行うものである。2024年度研究の主対象となった人文科目「日本の歴史」モジュールは、芝浦工業大学工学部の先進国際課程（IGP）におけるEMIで実施されており、主に海外からの留学生を受け入れている。

近年、日本の工学プログラムに進学する国際学生は増加しているが、この進路選択が学生に与える教育的影響、とりわけ英語運用能力の観点からの実証研究は極めて限られている。本研究は、日本で学ぶ国際工学系学生の英語ライティング能力の変化に注目し、このギャップを埋めることを目的とする。

さらに、本研究では、IGP学生および外国人留学生が履修する英語開講科目（EMI）において、課題として生成・提出された英文データを収集し、語彙分析を通じて学生の言語使用傾向を明らかにすることを目指している。今後は、数年間にわたりこうしたデータを継続的に蓄積し、Engineering-focused ESP（English for Specific Purposes）Corpusの構築を進める予定である。このコーパスには、コンピュータサイエンス、数学、人文学といった複数分野の教材資料や学生作文を統合し、分野別の語彙特性を可視化・分析可能なデータベースを形成する。最終的には、このコーパスを教育実践と学習分析の両面で活用し、工学系における英語教育の質的向上に貢献することを目的としている。

２．研究計画

IGPでは、すべての科目がEMIで開講されている。本研究では以下の4点を主な研究目標とした。

1) IGP科目を履修しているIGP学生および工学を専門とする外国人留学生の英語ライティング（summary and response paper）をCEFR-based Vocabulary Level Analyzer（CVLA）を用いて語彙レベル分析する。
2) 学生の英文データおよびIGP開講のEMIの授業教材を収集し、活用して

Engineering-focused ESP Corpus を構築する。

3) CVLA および Corpus による語彙分析の結果と、成績評価や異文化コンピテンス（MGUDS-S）の変化との相関を検証する。

4) 得られた成果は国際学会や学術誌で発信するとともに、構築したコーパスを工学系ライティング教育のツールとして共有し、教育実践への応用を図る。

３．計画の進行状況

1) EMI プログラムにおける課題（Issues）

数年間にわたる国際工学系学生への指導経験から、以下のような課題が繰り返し確認されている：

- 英語力の初期レベルの差：CEFR の B1〜C2 まで幅がある。
- スピーキングとライティングのギャップ：口頭での表現はできても、文章の明瞭さにばらつきがある。
- Summary and response paper の負荷：この課題が成績の約 40%を占めるため、ライティング力の差が成果に直結する。
- 短期間での英文作成：一定数の国際工学系学生にとって、期限内に継続的に英語ライティングをこなすことが大きな負担である。

こうした背景から、学生の語彙力に応じた講義設計の必要性が明らかになった。

2) 研究課題（Research Questions）

2024 年度は以下の 3 点を中心に調査を実施：

- 語彙力の向上：14 週のモジュールを通じて、学生の語彙レベルはどの程度向上するのか？
- 課題の効果：定期的なライティング課題が語彙力向上に与える影響は？
- 講義資料の語彙レベル：講義スライドの CEFR レベル調整は学生の理解にどのように貢献するのか？

3) 方法論（Methodology）

本研究では、CVLA（九州大学 内田教授開発）を使用し、東野教授の CEFR-J 語彙リストに基づく語彙分析を行った。

CVLA の特徴：

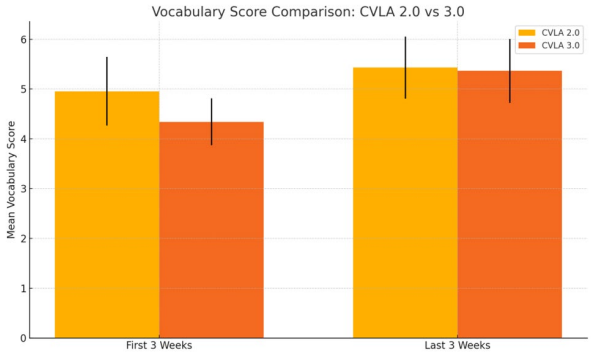
- 12 段階の CEFR-J 準拠レベル評価
- 数値化により統計処理が可能

CVLA v2.0 および v3.0 の両バージョンを用いて、以下を分析：

- 対象：2022 年度履修学生 22 名の summary and response papers
- 手法：同一データに対して CVLA v2.0 および v3.0 の両バージョンを適用し、結果を比較

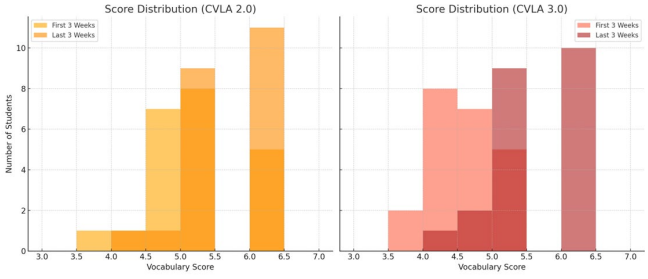
4) 結果（Results）

CEFR スコアの平均値の上昇



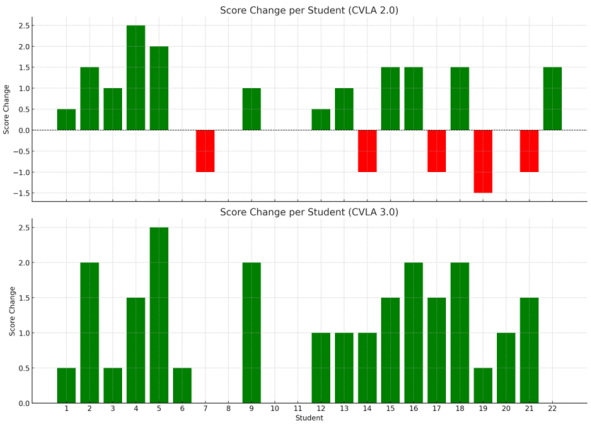
- 最初の 3 週と最後の 3 週で比較
- CVLA 3.0 の方が顕著なスコア改善を示した

スコア分布の変化



- CVLA 3.0 では CEFR-J の C2 レベル（スコア 6.0 付近）への集中が見られた。
- 右（CVLA 3.0）: 最初の 3 週間と比べて、最後の 3 週間ではスコアが大きく向上しており、CEFR-J の C2 レベルに相当する
- スコア 6.0 付近に明確な集中が見られ

学生別スコアの変化



- 緑：語彙力が向上した学生
- 赤：語彙力が低下した学生
- CVLA 3.0 はより一貫した向上傾向を可視化した

5) 調査結果のまとめ（Summary of Findings）

本研究により、EMI 歴史モジュールにおいて国際工学学生の語彙力が顕著に向上したことが確認された。CVLA による定量的評価は、語彙指導の効果を可視化する有効な手段であると示された。

6) 本研究の意義

2022 年度のデータは、生成 AI の介入がない「純粋な語彙発達」を捉えた信頼性の高い基礎データである。今後の比較研究において「プレ AI 時代のベースライン」として重要な価値を持つ。

４．今後の計画

1) AI 非使用世代 vs AI 使用世代の比較研究

今後、生成 AI 導入以降（2023 年度以降）の学生ライティングを分析対象に加え、「AI 非使用世代」と「AI 使用世代」の語彙使用の違いを比較する。

2) 講義スライドの語彙レベル調整と段階的設計

2024 年度の調査結果より、一部の学生が講義資料の内容についていけず、「取り残される」リスクがあることが示唆された。講義スライドの語彙レベルを CEFR-J に準拠して調整し、学生の語彙力に合わせて段階的に難易度を上げることで、理解度と語彙発達を支援する。

3) 非人文系 EMI との比較研究

2024 年度の研究調査結果は、今後の語彙指導法のモデルとなる可能性を持つ。今後、工学・情報科学・数学などの非人文系 EMI 科目の語彙分析データと本研究のデータを比較し、分野ごとの語彙発達特性を明らかにする。

4) AI ツールによる語彙レベルの自動推定の検証

教育現場での応用を視野に、AI アプリケーション（例：ChatGPT、文法・語彙チェッカーなど）による英文の CEFR レベル自動推定の精度・信頼性の検証も行う予定である。CVLA との結果比較を通じて、AI 支援型語彙評価の教育的可能性を探る。

5) Engineering-focused ESP コーパスの本格的構築

本年度は当初予定していた以下の作業には着手できなかったが、今後の最重要課題のひとつとして以下を進める予定である。

- 数年間にわたりデータを収集し、Engineering-focused ESP（English for Specific Purposes）Corpus を構築する。

このコーパスには、コンピュータサイエンス、数学、人文学といった分野ごとの教材資料、学生作文、ならびに履修成果などの多様なデータを統合し、言語教育と学修分析のた

めの基盤データベースとして活用する。完成後は、教育実践および教材開発への応用を目指す。

５．学会，論文投稿・発表状況【学会，論文等投稿・発表状況：2024-2025】

本プロジェクトの成果は以下の通り発表・報告された（予定も含む）：

- 国際学会発表：6 件
- 学術誌論文（査読付き）：2 件
- テクニカルレポート：1 件（本報告書）

合計：9 件の研究成果に繋がった。

1. Journal papers

[1] H. Yoshikubo, S. Nagasawa, L. Kimura, and Y. Iwata, “Measuring student engagement in group work using Slack-based evaluation: Solving issues in global project-based learnings,” Journal of JSEE, vol. 72, no. 3, May 2024.

[2] H. Yoshikubo and G. Trovato, “The value of humanities components in engineering curricula: Evaluating a Japanese history course in the context of SIT's Innovative Global Program,” Journal of JSEE, vol. 72, no. 3, May 2024.

2. International Conference Papers and Others

[3] Y. Iwata, L. Kimura, H. Yoshikubo, and S. Nagasawa, “Enhancing student participation in online global project-based learnings (gPBLs) through a Slack based evaluation: A student perspective,” in Proc. 2024 ASEE Annu. Conf. & Expo., Portland, USA, Jun. 2024.

[4] S. Nagasawa and H. Yoshikubo, “Cost-effective research platform for child-robot interaction studies using a smartphone-based humanoid robot with double gesture arms,” in Proc. 2024 ASEE Annu. Conf. & Expo., Portland, USA, Jun. 2024.

[5] H. Yoshikubo, D. P. Sari, G. Trovato, E. Kamioka, and D. Darminto, “Global competence scores among Indonesian undergraduate physicists: A preliminary study towards the implementation of a new COIL,” in Proc. WERA 2024, Manchester, UK, Sep. 2024.

[6] H. Yoshikubo, “Enhancing English writing skills in a 'History of Japan' module at Shibaura Institute of Technology: A study of engineering international students' progression and CEFR-J analysis,” in Proc. CEFR-J2025 Int. Symp., Mar. 25, 2025.

[7] H. Yoshikubo, D. P. Sari, G. Trovato, E. Kamioka, and D. Darminto, “Exploring the impact of COIL programs on global competence and English proficiency: A study of Indonesian physics undergraduates,” in Proc. 2025 ASEE Annu. Conf. & Expo., Jun. 22–25, 2025.

[8] L. Kimura, H. Yoshikubo, and S. Nagasawa, “Enhancing assessment of student engagement in face-to-face global project-based learnings (gPBLs): Adding peer assessment to improve Slack-based evaluation,” in Proc. 2025 ASEE Annu. Conf. & Expo., Jun. 2025.

第 4 期認証評価を見据えた
カリキュラム評価への学生参画体制の構築

教育イノベーション推進センター　　榊原　暢久

共同研究者
工学部機械工学課程　　角田　和巳
教育イノベーション推進センター　　相原　総一郎
情報イノベーション部　　鈴木　洋
教育イノベーション課　　小倉　佑介
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
学事本部・大学企画課　　宇佐美　優里・柳下　規子・古川 祐輔・澤　虹之介
教育イノベーション課　　星　由華・山本　郷子・逸見信子

１．はじめに

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」が定常的かつ適切に実施されるためには、カリキュラムマネジメントに対する支援体制の構築が急務である。

本学は 2025 年度に第 4 期機関別認証評価を受審するが､第 4 期機関別認証評価では｢学生の意見を取り入れた評価」がより強化されることが明らかになっている。本学ではこれまで、機関レベルでは学生自治会と教学執行部の定期的な意見交換・施策への反映、プログラムレベルでは卒業時アンケート実施やプログラム改訂への反映、授業科目レベルでは自己評価アンケートの実施や授業改善への反映、といった各レベルでの学生参画の場面が設定されているが、これに加えてカリキュラム評価への学生参画を実施し、プログラムレベルでの PDCA の実質化を進めていく。

具体的には、学科・入学年度ごと、

（１）　卒業時アンケートによる学修・教育到達目標(mDP)達成度の可視化
（２）　達成が不十分とした mDP についての自由記述まとめ
（３）　内部進学した卒業生に対するインタビュー
（４）　各学科等へ課題を共有
（５）　課題に対する回答を依頼

というカリキュラム評価に学生が参画するしくみを構築する。また、（１）～（５）を継続的に実施できるような支援体制を構築する。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職員や、カリキュラム・コーディネーター等のカリキュラムマネジメントに精通した教職員を充実させる。

２．研究計画

準備段階：本学ではこれまで、DP を詳細化した mDP を学科等ごとに設定、WEB シラバスの充実、学生ごとの e ポートフォリオが稼働

してきた。ここに至る過程で、榊原、角田、奥田、恒安、鈴木、星、他 13 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。また、理工学教育共同利用拠点として既に 8 年間の活動実績がある。

2024 年度：先に掲げた（１）（２）を 2023 年度末から実施し、その後、各学科等の内部進学した学生数名に対し、（３）のインタビューを実施する。これらを取りまとめて（４）（５）の改善サイクルを進める。また、（１）～（５）の実施ができるような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カリキュラム・コーディネーター養成講座受講者を増やす。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

先に掲げた（１）（２）を 2023 年度末から実施し、学科ごとに mDP 達成度に関する自由記述をまとめた。その後、2024 年 3 月卒業生のいる全 16 学科について、学科ごとに内部進学した学生 3~4 名に対し、インタビュー前に事前課題を課し、卒業した学科のカリキュラムツリーに単位取得した科目を明示してもらった。そのうえで、

- 学科カリキュラムのメリット･デメリット
- 修得が弱いと感じられる mDP
- その理由や、可能なら改善案

についてインタビューを実施した。先にあげた自由記述とインタビュー結果を取りまとめて、（４）（５）を実施した（【表 1】参照）。

加えて、以下の項目についても実施した。

【2024 年度入学生のカリキュラムについて】

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

【2022 年度入学生の mDP 達成状況について】

- 学科等ごとの取得単位数平均が 2 単位以下となっている mDP について、今後の単位取得見込みや履修指導の予定、あるいは 2 単位以下の取得で mDP に到達できるとする理由の確認

【2021 年度入学生の卒業研究について】

- 卒業研究に対応する mDP に掲げる各能力を卒業研究において確認・評価していることを示すエビデンスを確認

また、各学科等に対し 2023 年度に確認･報告された事項について、その後の状況を確認した。

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、2025 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、システム理工学部、デザイン工学部の新カリキュラム設計に関し、3 ポリシーと mDP の整合性の最終確認等を、大学企画課と協働で実施した。

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、日本高等教育開発協会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 4 名の教職員が受講し、基盤のさらなる強化を行った。

４．今後の計画と課題

ここまでの取組で、機関レベルでは学生自治会と教学執行部の定期的な意見交換・施策への反映、プログラムレベルでは卒業時アンケートや学生インタビュー結果のカリキュラム改訂への反映、授業科目レベルでは自己評価アンケートの実施や授業改善への反映、といった各レベルでの学生参画の場面が設定され、それに基づき改善サイクルが回りつつある。一方、機関レベルの意思決定に関わる学生参画はまだ見通しが立たない。大学基準協会での議論を注視しつつ、教育イノベーション推進センター・IR 部門、FDSD 推進部門、カリキュラムマネジメント部門担当者と連携をしながら、検討と改善を進めていく。

５．学会等発表状況

- 榊原暢久:学修成果の検証とその可視化:芝浦工業大学の事例から、岩手県立大学盛岡短期大学部 FD セミナー、2024 年 8 月.
- 榊原暢久：芝浦工業大学における学生参画～授業・カリキュラム・全学の 3 視点から～、関西大学教育改革実践フォーラム、2025 年 3 月.

６．参考情報

日本高等教育開発協会・芝浦工業大学（2024）カリキュラム・コーディネーター養成研修会初級編.
https://www.jaedweb.org/cc1

【表 1】卒業時アンケートの自由記述および内部進学した卒業生に対するインタビュー結果まとめ（抜粋）

メリット
4年間の学習を通じて＊＊について深く知ることができました。修士に進学するため、より深い知識をつけられるように励みたいです
ゼミなどを通して様々な＊＊の知識を組み合わせて応用することに習熟できたと感じているから。
主に学部四年度の卒業研究において、＊＊の一連の流れを達成できたと思う。
講義で学んだ内容に興味を持ち、自己学習に取り組む習慣をつけることができたから。
社会を支える＊＊などが環境に与える影響を理解し持続可能な社会を目指すための課題を考えることができた.
研究や授業を通して専門分野を多く学ぶことができた
「＊＊」を1年次に受講することで、＊＊を最初に知る機会としてはすごく良かった。導入としてとてもいい始まりで、そこからだんだん専門性が深まっていった。
１年生で広い分野の力学や計算に関して多く学ぶことで、卒業研究や＊＊ゼミナールで自分がどの分野に興味があるのかとか、どの分野を勉強していきたいかっていうのを考える猶予が与えられ、2年生で興味のある分野にたどり着けた
卒業研究の最初から、研究者として研究するにあたっての倫理みたいなのを非常に時間をかけて教えていただいた
＊＊は力学的に現象を紐解いていくような分野なので、最初に微積、線形、基礎力学といった＊＊の根本になるような分野をしっかりと学ぶことができたのは、今でもすごく役立っている

デメリット
学んだことについて、いくつか応用実践をする機会があったが学んだ量にくらべると一部の知識になる。今後も実用の度に学び直す必要がある。
未達成，高度な達成をしていない
英語を用いた基礎的なコミュニケーションを行う機会がそもそもなかったということに加え，自身でそのような環境を構築しようとしなかったことが未達成の原因であると考えています.
物事に対する，数式を利用した，理論的なアプローチで定量的な評価をする能力はまだ乏しいと考えている.
実際の＊＊の設計・製作・加工について触れる機会が少なかったため，もう少し実習が欲しかった.
私の入学したタイミングはコロナもあり海外渡航が困難な期間があったが，留学がカリキュラム的にも難しく改善すべきだと感じた.
科目や，選択必修科目を通して，基礎的な力学について学ぶことができたが，それぞれ，それ以上に理解を深めることはあまりなかった.
留学プログラムについて，＊＊からのプログラムはなかったので，まずは＊＊主体のプログラムを設立し留学先の大学や留学先で取り組む授業やテーマの幅を他分野に広げていくべきだと感じた.
英語にすごく力を入れている大学だなというふうに感じるが、第2外国語の科目がない
三年生から受けられる＊＊や＊＊などをもう少し早い段階で履修できればよい
＊＊を学ぶときに、最初は日本語でも学べるようにしてほしかった
自分が学んでいることが、実際にどのように社会とか会社で使われているかっていうのを詳しく知れる機会があるといい
理系の大学で不足しがちなコミュニケーション能力やチームワーク力を養う科目がうちの学科は少ない
英語を使って研究室の留学生とコミュニケーションを行ったり、情報交換を行ったりする能力の修得は自分的には一番弱い
何か社会的な技術的な問題があったときに、それに対して自分が問題解決・問題提起する力とか、何が問題だからどういうふうに考えていかなきゃいけないかなっていうことをする技能っていうのがまだ身につけられなかった
英語でのコミュニケーションっていう面ではスキルが不足しているかなっていうふうに感じています。学科の授業で、もう少しできたらいい
一番最初にグループワックを本格的にやったのは＊＊ですが、卒業研究で他の人と協力して計画を立てたりコミュニケーションを取ったりして 研究することが当たり前の研究室と、そうでない研究室がある

採点作業を効率化するAI・DXシステムの活用

工学部（物質化学課程　環境・物質工学コース）　　幡野　明彦

共同研究者
工学部物質化学課程化学・生命工学コース　北川　理
システム理工学部生命科学科　福井　浩二

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

人間が行っている仕事が人工知能，すなわちAIに取って代わる･･･と言われて久しい。このような言葉に身構える業種・分野がある反面，ぜひともAIに変わって欲しいと思う仕事も多々あるのではなかろうか。その一つが，テストの採点業務であると感じている。採点は目視による記号や文字，数字，化学構造式，グラフの様な幾何学図形などの正誤判定，文章のロジックや内容の正確さの判断など，精度を保ちながらスピードが求められる業務内容である。

試験の採点の方法も教員によってまちまちであり，１）一つの問題ごと，全員分，例えば100 人分を採点し，次の問題に移る方法がある。また，２）学生１人分のすべての問題について採点し，次の学生の答案の採点を行う方法など，その他いくつかのパターンが存在する。どの方法がストレス無く，精度を維持した状態で採点できるのだろうか。

例えば，１）の方法では一つの問題を採点したら次の学生の同一問題を採点するため，紙をめくると言う作業が必要となる。本手法は同一問題を一機に採点するため基準のブレや採点ミスは少ない。しかし，一枚一枚の答案をめくると言う物理的な操作が，100 枚等の答案を採点している時は意外と労力を使う。また，模範解答はあるものの，記述問題などでは，解答パターンが山ほど有り，文章内容を読んで理解し，キーワードが入っているか，文章ロジックは正しいかなどの正誤判定を行って行くことになり，採点２）の方法では基準がブレてしまうことが多々あった。それではマークシート式問題にすれば良いと考えるのが通常であろうが，マークシート式問題では，問題の問い方が限定されてしまう。五者択一などの選択問題では，何も分からなくても正答率は20%に成ってしまう。計算結果で得た数字を答えさせる問題にする必要があるが，文章記述や化学構造式，化学反応式などの問題を出題するのは困難である。

これらのような悩みを改善する採点システムとして，人工知能型デジタル採点システム（AI･DX採点システム）が近年注目されている。AIの画像認識により学生の答案を読み取り文字や図形を認識し，自動的に○×をつけてくれ･･･様な夢の採点システムは，まだ課題がありそうである。画像認識が不十分であり，簡単なアルファベットやひらがなは判別ができるが，精度が 100 %という訳では無い。しかし，デジタルで採点を行う，という方法に十分なメリットを感じる。それは，一括採点ができる，集計・分析もソフトが担当してくれるからである。

本研究では，AI・DX採点システムによる１）採点業務の効率化（短時間化，省力化），２）採点方法とヒューマンエラーの関係（採点ミス）を調査する。また，

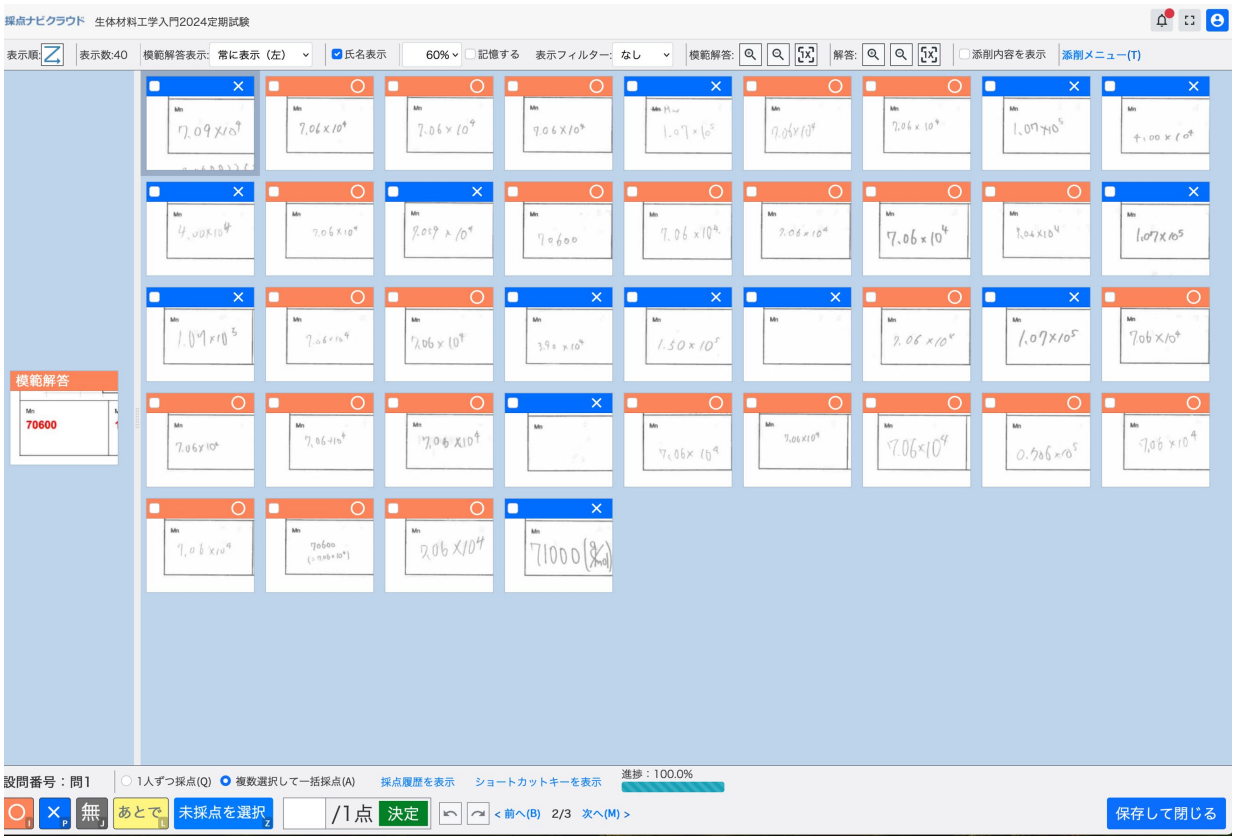


図１　デジタル採点システム「採点ナビ」での採点画面。受験者全員の解答を並べて採点が可能である。左側には模範解答が提示される。

3）本学の学習管理システムである ScombZ と連動させて試験問題を返却し，復習させるフィードバックも行い，教員の省力化と学修効率の向上を検討した。

2．研究計画

工学部の材料工学科の専門科目である生体材料工学入門（材料工学科２年生，113 名，後期）を対象とし，設問数が比較的多い期末試験を対象として調査を行った。調査は以下の２つの条件で行った。一つは通常の手動による採点であり，もう一報は AI デジタル採点ソフトの「採点ナビ」（株式会社教育ソフト）を用いた。なお，採点調査は，2024 年度後期，すでに成績として結果がでた後の答案用紙を匿名化し，５名の別々の人間で採点を行った。デジタル採点は 113 名全員分を１人で行ったのに対し，手採点では，おおよそ四つ 22 名分から 31 名分にわけて，別々の人間が採点をした。理由は，手採点を一名で行うのは，非常に労力のかかる仕事であるからである。

１）手採点：113 名の答案を，模範解答を確認しながら，赤いサインペンで○と×をつけた。セカンドチェックとして，採点を行っていない人物が確認して，ミスの個数をカウントした。

２）AI デジタル採点ソフトの「採点ナビ」：113 名の答案をスキャナーで読み取り，「採点ナビ」によるデータ取込み，マウスによるクリックで採点を行った。採点後，セカンドチェックとして異なる人物が採点のミスをカウントした。採点ナビの採点時の画面は図１の通りで有り，同一問題を一機に採点できる強みがある。しかしデジタル採点システムは，準備に 30 分程度の時間がかかってしまうという欠点もあるが，トータルで見ると十分利点がある。まず，集めた答案を出席番号順に並べる作業がある。本作業は，ScombZ の履修者名簿に対応した順番にする必要がある．これをしないと，採点した得点データを記載する時に，コ

表１　デジタル採点と手動採点のかかる時間と精度

	DX 採点	手採点合計	手採点 A	手採点 B	手採点 C	手採点 D
時間	82 分 53 秒	182 分 20 秒	51 分 01 秒	53 分 26 秒	31 分 15 秒	45 分 46 秒
枚数	113	113	30	31	22	30
ミス	43	97	8	34	41	14
問題数	3955	3955	1050	1085	770	1050
割合/%	1.09	2.45	0.76	3.13	5.32	1.33

ピー＆ペーストが利用できなくなり，転記ミスが発生する。特に，過年度生の位置には注意を払う必要がある。本作業は１人でも可能であるが，ティーチングアシスタントの力を借りてダブルチェックする必要がある。

次に，答案用紙をスキャナーで読み取り，電子ファイルにする。大学の複合機を利用すると高速スキャンが可能になり解像度も設定できるため便利である（300dpi×300dpi)。あまり解像度を大きく上げてしまうと，データ量が多くなってしまうため，上記程度の解像度が適切である。本電子ファイル（PDF）を確認し，「採点ナビクラウド」に読み取らせて採点作業を行う。ここまでの作業で 30 分程度である。

３．計画の進行状況

3-1　DX 採点と手採点でのエラー発生率の調査

今回のデジタル採点では，表１の様な結果になった。デジタル採点システムである「採点ナビ」での採点時間は 82 分 53 秒となり，全問題に対するミスの割合は 1.09%となった。手採点の合計は 182 分 20 秒となり，約 2.2 倍の時間がかかった。また，ミスの割合は 2.45%であり，2.2 倍の悪さであった。手採点は個人差がでていて，スピードが速い場合は 22 人分を 31 分で採点をしているものの，ミスも多かった（5.3%)。また，31 枚と採点数が多くなるとミスの割合も増加することが示唆された（3.1%)。しかし，30 枚の採点でもミスの発生率が 0.76%のケースも有り，個人差によるものと考えられる。

ヒューマンエラーの発生確率を調べた吉村らの研究では，単純なタイプミス 0.03～0.62%，指示に従わないミス 0.11～7.89%，読み間違い 0.05～0.10%であったことを報告している（吉村治正，小久保温，澁谷泰秀，渡部諭，青森大学付属総合研究所紀要，1-5，15，2014)。こちらの研究は，作業員がコード表を見ながらデータを入力するという比較的単純作業であり，テストの採点作業とは異なる。テストの採点では，解答を見て○×を判断するという思考過程が入るため，難しさが伴いヒューマンエラーの発生確率が向上したものと思われる。

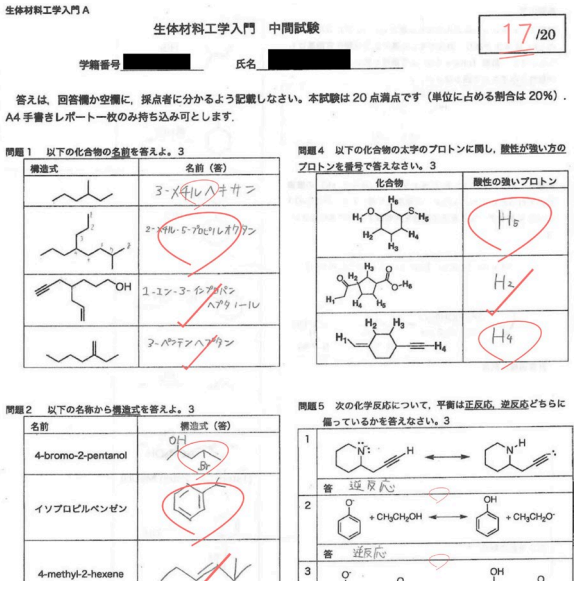


図２　採点された答案用紙。○や×はデジタルでつけられている。PDF ファイルでの出力により，個別に返却可能。

3-2　ScombZ による答案の返却

試験は内容理解度や到達度を測定する方法の一つであるが，解きっぱなしでは演習としての効果は薄くなる。そのため，DX 採点した答案を PDB 化して各学生に返却し，学生に採点ミス等を指摘させることで，試験問題の復習をうながした。

方法であるが，「採点ナビ」では採点した結果を個々人の PDF ファイルとしてダウンロードできる仕組みがある。手動になってしまうが，このファイルを ScombZ の「課題」から課題のタイトルの「提出状況確認」をクリックし，「編集」から各学生の「課題 フィードバック登録/編集」からフィードバックファイルとして返却した。その結果 113 名中 14 名から連絡があり，内 12 件が採点ミスを指摘するものであり，2 件は問題の答えがなぜこうなるのか？という疑問に関する質問であった。学生からのコンタクトは，電子メールで直接連絡をとってきたケースが 12 件，ScombZ のコメント欄で質問してきたケースが 2 件であった。採点のヒューマンエラー発生率は 0.30%であった。

学生諸君は返却した答案をしっかり見ているようで，採点ミスの指摘や自分の解答と模範解答の違いを細かく質問してくる学生もいた。非常に良く考えているな（採点ミスを探すのに必死に成っているだけなのかもしれないが，それが復習に成れば良い）・・・と感じた。

表 2　フィードバック後のコンタクト

コンタクト数	ScombZ	メール	合計
ミス指摘	2	10	12
相談	0	2	2
計	2	12	14



図 3　ScombZ での学生からのコメント例

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

AI 画像認識はまだ完全では無く，認識エラーも多い。試験の採点での文字や記号，構造式の正誤判定は，まだまだである。しかし，AI にすべてを任してしまうのでは無く，AI の力を借りて労力を軽減し，人間の力で精度を高くすることで仕事の質を向上しつつ，労力も軽減するのが現段階なのであろう。そのための AI デジタル採点システムは，教員の時間確保には大きな力を発揮するものと思われる。

本調査研究では，株式会社教育ソフトウエアのデジタル採点システム「採点ナビ」と本学の LMS である ScombZ を連携させて，試験答案の採点の効率化と学生の復習をうながす試みを行った。デジタル採点は有意にミスの発生率が低く，かつ採点スピードが向上した。学生への復習をうながす効果であるが，こちらは全員が返却された答案を確認したがどうかを調べることができないため何とも言えないが，模範解答を確認して自分の答案と比較する作業をうながすことはでき，復習に繋がる動機つけを与えることができた。

学会，論文等投稿・発表状況

無し

電気電子課程におけるロボットアームを用いたDX、AIに対応可能な人材育成のカリキュラム構築

工学部（電気電子工学課程）　　小池　義和

共同研究者
工学部電気電子工学課程　　石川　博康
工学部電気電子工学課程　　プレマーチャンドラ・チンタカ
工学部電気電子工学課程　　吉見　卓
工学部電気電子工学課程　　安藤　吉伸

１．はじめに

電気電子工学課程において、プログラムとハード、そして情報を融合させたカリキュラムの開発が求められている。その中で、DX、AI につながる実践教育を履修者が主体となるプロジェクトベースの実習関連科目は重要である。本研究では、これまで培ってきた床走行のロボットを用いた先端電子工学コースの実習科目に、さらにロボットアームを導入してカリキュラム設計、構築を行う事でDX、AI につながるカリキュラムの実現が目的である。プロジェクトでは大学、高専で使用実績のあるロボットアームを準備し、他の科目への連携を含めて、さらに課程制での各コースが定めるディプロマポリシーを満たす人材の育成を目指す科目へと発展させる。

２．研究計画

2-1 教材用ロボットアームの選定

以下にロボットアーム導入までの経過を示す。2023 年 8 月に電子工学製作実習の科目担当となっている石川博康教授から、お掃除ロボット・ルンバ®に変わるロボット教材の準備が提案される。その時にロボットアームの導入が提案され、候補があげられる。また、グローバル PBL(gPBL)でドローンの導入経験があるプレマーチャンドラ・チンタカ教授も加わってもらい、検討を進める。その結果、金額、及び教材の発展性、耐久性から Dobot Magician®（株式会社アフレルが代理店）を第一候補とした。

2023 年 9 月から電気工学科でロボットを専門とする吉見卓教授、安藤吉伸教授に最初はメールで、その後、打ち合わせで Dobot Magician®の導入について打ち合わせを行う。その内容は 2023 年 10 月の電気工学科の学科会議で報告される。

2024 年 1 月初旬に gPBL の経験を吉見先生に伺い、デモ機で運用した結果、目的を達成する課題の設定が可能なことを確認する。

2024 年 1 月に株式会社アフレルの営業担当者から全国の高等機関での使用事例などの説明を受ける。2024 年 4 月から、これまで先端電子工学コースで開講されている電子工学製作実習後半において、お掃除ロボット・ルンバ®に加えて、Dobot Magicain®に用いることを決定する。

前年度までに用いたルンバ®を用いた教材と比較して、目的としている AI、DX 対応に必要なプログラミングの基礎知識、スキルの取得についての向上度合いの確認を、授業の中の各チームの最終発表をみて、教員間で行

うことした。その後、電気電子課程でグローバル PBL やオンライン PBL、他の科目との関連を結びつける関連について検討を進めていくこととした。

2-2 授業計画

ロボットアーム教材として検討している Dobot Magician®を導入する電子工学製作実習は電子工学科の専門科目で単位区分は選択必修である。2017 年度開講からルンバ®を教材として導入しており、履修者数は 90 名前後であり、前半は個人でのプログラミング技術を高める内容となっており、後半がグループワークで作業する内容となっている。グループワークは履修者数に依存するが、2024 年度は 1 班 5〜6 名の 18 班に分けて実施している。授業全体のスケジュールを表 1 に示す。今回、Dobot Magician®を 9 台導入することができたため、これまで利用したルンバ®もグループワークの実習に取り入れて、9 チームがルンバ®による実習で、9 チームが Dobot Magicain®による実習としている。

表 1　授業全体のスケジュール（2024 年度）

回	授業計画	実習形態
1〜7	プログラミング課題	個人
8	シリアル通信を用いたプログラミング	ペア
9	計画書の作成	グループ
10	計画書の提出・閲覧作業の実施	グループ
11〜12	ロボット制御プログラムの作成	グループ
13〜14	最終報告・発表	グループ

各班は最終ゴールを設定し、ロボットを制御し、シミュレートするプログラムを作成するが、その時に役割分担が設定しやすいように以下の指示（Mission）を与えている。

Mission 1: PC よりロボットの遠隔操作を実現するプログラムと、操作時に同時に同じ動作を別の PC の画面上に描画で表示するシミュレータの実現

Mission 2: 複雑な動きをするロボットの制御プログラムの実現（ここでは複雑な動きを「最終目標」と呼ぶ。「最終目標」は全員の議論により決定する。）

Mission 3: 複雑な動き（Mission 2 の動き）を PC 上で再現するシミュレーションプログラムの実現

以上の指示に従い、計画書には以下を記載して作成するように指示をしている。

1.最終目標（ロボットに実行させる動作の決定）ロボットの動作は図で示す。
2.必要な作業列挙（必要な作業の洗い出し）
3.作業の役割分担
4.作業スケジュール

また、最終発表では各班、質問を入れて 15 分の発表時間（発表 7 分＋質問、講評 7 分、班の交替 1 分）で行っている。発表会のスライドの指示は以下である。

1: 表紙（班番号，メンバ，必要があれば独自のタイトルをつける）
2: 最終ゴールについての説明
3: スケジュール、役割分担
4: Mission 1：遠隔制御，動画，説明
5: Mission 2：最終ゴールの動きのシミュレーション動画、説明
6: Mission 3：最終ゴールの動画、説明
7: 強調ポイント（工夫した点，難しかったところ）
8: 総括（達成状況、班内の協力状況、感想）

さらに、以下の 2 つについても伝えてある。

1.ルンバ®や Dobot Magicain®の実際の動きは必ず動画を撮影し、スライドで示す。シミュレーションも動画で説明する。
2.発表以外の班は，発表終了後に質問をすること（質問も評価の対象）

電子工学製作実習は電子工学科 1 年前期に開講する電子工学一般（専門・選択必修）と関連している。2024 年度の電子工学製作実習の履修学生は 2023 年度の電子工学一般では、プ

ログラミング言語として JAVA のサブセットである Processing を学んでいる。しかし、Dobot Magicain®は Python による制御が取り組みやすいため、今回の取り組みでは、どの言語で Dobot Magician®に取り組んでもらうかが課題であった。最初は、Processing が JAVA のサブセット言語であるところから、JAVA による開発環境が用意されているところに期待していた。しかし、導入後に開発元から JAVA による開発環境の提供がなくなったため、言語の準備について再考せざるを得なくなっている。

2024 年 4 月に着任した前田慶博准教授が電子工学一般の科目担当となったため、電子工学製作実習の Dobot Magician®導入に合わせて電子工学一般で使用するプログラミング言語について検討を依頼した。前任校で Python の講義を持っていた経験から、今後、電子工学一般で Python を導入することとした。工学部基礎・教養科目「情報科目」のデータサイエンスでも Python が採用されており、今後、科目間の接続性が高まることが期待される。

ただ、2024 年度、及び、2025 年度は電子工学一般ではプログラミング言語 Processing に取り組んでおり、Dobot Magician®の制御をどの言語にするかは依然、課題であった。結果として、2024 年度は、用意したテキストにあるサンプルプログラムを少し拡張するレベルで、実習プロジェクトのテーマを決定させ、グループワークに取り組ませることとした。

３．計画の進行状況

3-1 ルンバ®を用いた実習との比較

ルンバ®はバンパなどを備えていて、障害物との接触状況が分かるセンサを備えている。授業では進行方向の制御に関するコマンドとロボット本体からの接触状態に関する情報の取得に関するコマンドを解説している。赤外センサなどの使用も可能であるが、学生の意欲に任せて、必要な場合は準備されているドキュメントを参考にするようにと伝えている。

2024 年度に各班が設定したルンバ®制御班の最終ゴールを表 2 に示す。ルンバ®制御班となった多くの班はバンパからの情報をフィードバックさせた最終ゴールに決めている。

表 2　ルンバ®制御班の最終ゴール設定（2024 年度、9 班）

障害物を探知すると、ライトの色を変え、方向転換して移動
波をうって設定された経路を壁にぶつかりながら移動
通常走行時右方向に曲がりながら回転の軌跡を描く走行
発音状態で直進、壁衝突時に音楽が流れ、LED が点灯・1 秒間後退、方向転換
ジグザグに設定され段上の障害物を衝突しながら移動。脱輪時に音を出して停止
ランダムに加減速、方向転換、2 種類の音を発生しながら移動
方向転換、ジグザグ走行、螺旋運動の 3 種類の動作を障害物衝突時にランダムに選択
衝突回数を計数し、奇数時、偶数時で点灯、発音を変える。衝突位置でも動作を変化
ルンバと通信をしながら走行に合わせてマッピングして障害物の位置を特定

これに対して、表 3 に Dobot Magicain®制御班の最終ゴールを示す。今回導入した Dobot Magicain®では、テキストにあるサンプルプログラムに基づいて最終ゴールを決めた班が多く見られた。購入した教材には、ロボットアーム本体の他に、吸引モジュール、ペンホルダー、空気圧グリッパー、エアポンプなどが用意されている。さらにロードセルセンサなどを用いるためには別売りのセンサーモジュールキットを購入する必要があり、今回は購入を見合わせている。そのため、ルンバ®制御班と比較して学生にフィードバックを用いた拡張プログラムを作成させるためには、さらに授業でコマンドの解説の必要がある。

表 3　Dobot Magicain®制御班の最終ゴール設定（2024 年度、9 班）

吸引器を使用した積み木の移動
吸引器を使用したピンポン球の移動
吸引器を使用したピンポン球の移動
吸引器を使用した消しゴムの移動
キーボードの入力
キーボードの入力
箒を用いた消しゴムかすの回収
ペンを用いた時間の記入
吸引器を用いたカードの配布

今回は、Dobot Magician ®は Python による制御と決定したため、フィードバックについて十分な解説を Dobot Magician ®制御班に与えることができていなかった。そのた、各班で作成したプログラムは、最終ゴール設定に合わせたロボットアームの移動を中心としたシーケンス制御的なプログラムになっている。こちらが期待したフィードバックを与える条件分岐を用いたプログラムがほとんどなかった。前半が Processing によるプログラミングが中心であったことも大きく影響しており、2026 年度以降の履修学生がフィードバックを積極的に取り入れるようになると考えている。

2025 年度はロボットアームから座標が取得できるため、ロボットアームの位置による条件分岐を必須とした課題設定により、フィードバックを備えた制御の実現を求める予定としている。

４．今後の計画

4-1 Python における個人課題の検討

これまで、採用していた Processing は Arduino との親和性が高く、「簡単に視覚的なプログラムが作れる」、「ハードも動かせる」、「Windows 以外でも動く」などの特徴を持つ。今後、電子工学製作実習で Python を採用した場合、授業全体のスケジュールを見直す必要もあるが、個人課題の見直しも必要と考えている。Python で Processing を採用していた時の課題をそのまま設定することも可能であるが、グラフの作成などは、Python では matplot などのライブラリが充実していることから、見直しが必須と考えており、差分法による微分方程式の解法など、数値計算に関連した課題への移行が考えられる。ただ、描画課題によるプログラミングに対する教育効果も確認できていることから、Turtle Graphics の利用も検討することにしている。

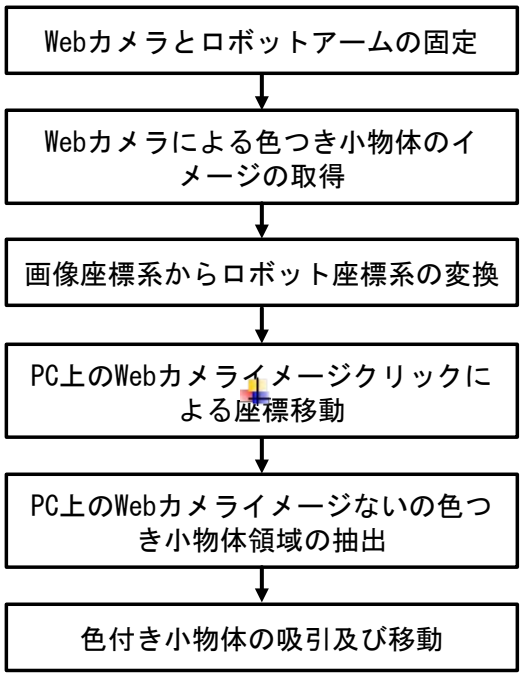


図 1　Web カメラを用いたロボットアームの制御プログラムの構成

4-2 Web カメラによる画像処理の検討

ロボットアームにフィードバックのプログラミング環境を持たせるために、センサモジュールの代わりに Web カメラによる画像処理を組み合わせた課題を検討した。図 1 にその課題のための制御プログラムの構成を示す。電子工学一般担当の前田准教授が作成した Web カメラを用いた画像処理は入門者用ではあるが、OpenCV などの画像処理ライブラリに慣れる必要がある。また、図 1 に示すように Web カメラとロボットアームを固定する必要があり、その方法について検討を行う必要がある。また、そのためにホモグラフィ変換などの画像処理について知識を深める必要があるため、課題設定の精査が必要である。

教育研究環境に仮想化技術を用いたEdTech推進

システム理工学部環境システム学科　　持永　大、市川　学

１．序論

本活動の目的は教職学協働の取組として仮想化技術を用いたEdTechを推進することによる教育研究のDXである。具体的な活動として、情報処理等の講義演習においてクラウド環境を試験的に導入し、教育プログラムを構築する。本学は学生のBYODによりPCが普及しているが、限られた時間で実践的なデータサイエンス、AI、サイバーセキュリティ教育を行うにはソフトウェアやデータを予め準備した専用環境の構築や仮想的なネットワークの構築が必要である。

そこで、仮想化技術を利用することで、サーバー、ストレージ、ネットワーク、クライアントPCなどのハードウェアリソースを、ソフトウェアを用いて統合・分割できるクラウド環境を利用しEdTechやブレンデッドラーニングのプログラムを構築する。

本研究活動は、全学的なDX促進の向上を目指す活動である。クラウド環境は、オンラインでコンピュータやネットワークを構築することが可能である。これは、ポスト／ウィズコロナを見据えたDXの活用であり、学生にとっては実機なしで独自の環境を構築する手段を学べるだけでなく、教員にとっても仮想化環境の調査によって学修状況を評価することが可能となる。そのため、本課題は学生の学習環境の改善だけでなく、教員にとってラーニングアナリティクスを提供する手段でもある。

本研究の期待される効果は、EdTechとしての教育全般での情報技術の活用と本学教育の対外的な評価の向上である。データサイエンス、AI、サイバーセキュリティは、社会全体の課題であり、自治体や産業界との連携に欠かせない。教育効果の評価は、構築したクラウド上に構築したシステムの習熟度と学修評価の自動化の可否によって評価する。また、クラウドサービスを利用した拡張性を検討し、全学の教育に展開できるかを検証する。

２．研究計画

2024年度上半期にクラウド技術を用いて、学生が利用できる情報処理環境を構築する。環境構築に当たって、構成員はサーバ上に複数のコンピュータから構成されるネットワークを構築した。

2024年度下半期データサイエンス、AI、サイバーセキュリティ教育において仮想化環境を利用した教育研究を実施した。具体的にはクラウド環境に仮想マシンを構築することで、学生が演習時に様々なシステムを実装できるようにする。これらの計画に基づき、PDCAによる学生からの評価を実施した。

３．計画の進行状況

３．１　クラウド技術による情報処理環境構築の要件策定

クラウド環境を用いた情報処理環境を実現するために、マイクロソフト社のAzureを使った情報処理環境を構築した。構築にあたって、必要となる要件を次の通り定めた。

- 100名程度が同時参加すること
- 大学一年生向けの講義・演習を実施す

ること

- Webブラウザによる環境構築が可能
- 管理者が学生の環境を管理することが可能
- 学生のクラウド利用料を請求書により支払うことが可能

本研究では、大学1年生向けに開講している情報処理の講義・演習においてクラウド技術を用いた情報処理環境構築を実施した。対象講義・演習の選定理由は、クラウド技術が現在の情報処理の基幹を担っていることと、卒業研究の選択肢が広がることにある。現在社会で利用されているシステムの多くは、クラウド技術を利用している。クラウド技術の採用理由は、運用の効率化やコストの最適化にある。そのため、学生が卒業研究に着手するまでの間にクラウド技術を利用した環境構築ができるようになれば、卒業研究時にクラウド技術を含む様々なシステムを構築する際の選択肢を広げることができる。

Web ブラウザによる構築環境は、学生が導入段階でクラウド技術を視覚的に理解するのに役立つとともに、システム構築の容易性にある。まず、視覚的な理解の観点からみると、クラウド基盤では予め定めた要件を満たすようにWebブラウザを使ってオプションを選択することでシステムを構築することができる。これは、従来のコマンドラインによる構築方法に比べて、間違った構成をした場合のエラーを直感的に理解できるほか、視覚的に要件を確認することが出来る利点がある。

次に、システム構築の容易さについてみれば、Web サーバ等のアプリケーションをコンピュータ上で実行するためには、物理的なコンピュータの構成、OS、ミドルウェアといった周辺知識を獲得する必要がある。一方、クラウド基盤上に、仮想的なサーバやOSを構築することで、物理的なシステムやOS自身の周辺知識を一定程度省略することができる。これはシステムの利用に着目した学修に役立つ。

管理者が学生の環境を管理することは、学修状況だけでなく予算の管理において必須の条件である。まず、初めて学生がクラウド環境を利用する際、課題の進行状況をリソースの管理を通じて把握することができる。例えば、ウェブサーバの構築を課題として課したとき、教員は各学生によるリソース利用状況を監視することで、各学生の学修状況を把握することができる。

そして、予算の管理について、クラウド利用料による予算超過を防ぐために必須である。例えば、クラウド上にWebサーバを2台構築し、それらをロードバランサで負荷分散させるシステムを構築したとき、1ヶ月間の利用料金は1万3000円程度である。これを100人の学生が稼働させたとすれば、1ヶ月間のクラウド利用料金は130万円となる。そのため、管理者が講義・演習時にシステムを停止する権限を保有する必要がある。

最後に、学生のクラウド利用料金は請求書による支払が可能であることが必要である。クラウド環境の利用料金は、利用量に応じた従量課金である。そのため、事前に費用の見積もりが難しく、高額な場合もあるため請求書による支払が適している。

３．２　クラウド基盤の検討

教育プログラム提供のためのインフラ検討

教育環境を構築するにあたって、複数のクラウドサービスを比較検討した。クラウドサービスの選定において、管理の用意さを重視した。本学ではマイクロソフトによる各種サービスが利用可能であったため、アカウント付与や管理の簡便さからクラウド環境をマイクロソフトのAzureを選定した。

Azure は、本学の情報システムとの整合性や通信ネットワーク制限において、円滑に運用可能と結論した。本学の学生は、Office 365のアカウントを有しており、アカウントへの権限付与が行いやすい。また、通信ネットワークの制限においても、本学が利用するシス

テムごとに設定されたセキュリティや複数のIDを統合管理しやすいと判断した。

３．３　座学教育プログラムの構築

本研究では、仮想化を用いたEdTech推進として、クラウド環境における教育プログラムを検討した。開発した教育プログラムは、クラウドの構成要素や概念を理解するための座学と、各学生がクラウド上にシステムを実装する演習から構成される。

クラウドの構成要素や概念を理解するための座学では、クラウド技術によるシステムと自組織が保有するオンプレミスのシステムの違いを理解する事を目標とした。この座学は、クラウドの物理的構成、オンプレミスでのシステムの課題、クラウドによる課題の解決、クラウドの拡張性、負荷分散、仮想化、コンテナ、サービスレベル目標（SLO)、連続稼働時間、平均故障間隔（MTBF)、クラウドのセキュリティ、利用料金の概算見積もりについて解説を行った。これらの項目は、実習時にクラウド上にシステムを構築する際のパラメータの設定に関連したものとなっている。また、身の回りにあるクラウドを利用したシステムを調べることを事前学修として課した。これによって、日常生活で利用するシステムが、クラウドに依存していることを、学生が実感できるようにプログラムを構成することが出来た。

本研究は、クラウド利用における概算料金見積もりを、システム工学に関連する演習課題として教育プログラムに組み込んだ。概算料金見積もりは、システム設計時に行うプロセスのひとつである。本学の特徴である、統合的解決策を追求する「システム思考」、目標達成の機能を作る「システム手法」、および問題解決の人・知識・技術を統合する「システムマネジメント」を修得する過程においても、費用見積もりは欠かせないプロセスである。

概算料金見積もりのプログラムは、マイクロソフトが提供する料金見積もりプログラムを用いた。このプログラムは、クラウドの地域、容量、可用性レベル等のパラメータを設定したうえで、1ヶ月あたりの利用料金を算出することができる。学生は、このプログラムを用いて、リージョンを東日本エリアに設定したWebサーバ2台とロードバランサの1ヶ月分の利用料金を算出した。これによって、自身が利用するシステムの費用見積もりができるだけでなく、今後学生が卒業研究等でクラウドを利用したシステムを構築する際に、コストを意識した研究活動が出来るようになることを目指した。

３．４　演習教育プログラムの構築

クラウド上でシステムを実装する演習では、Webサーバの構築とロードバランサーの設置、セキュリティ機構の実装を行った。まず、高可用性を備えたWebサーバーとロードバランサーの構築方法を教育プログラムとして提供した。ここでは、基盤となる仮想ネットワークを作成し、アドレス空間を定義した上で、Web サーバーを配置するためのサブネットを作成した。

この仮想ネットワークはクラウド基盤上でプライベートネットワークを構成するための基本サービスであり、仮想マシンや他のリソース間の通信基盤として機能する。サブネットの設計においては、セキュリティや運用性を考慮し、トラフィック制御の単位となるネットワークセキュリティグループ（NSG）をサブネット単位で適用する構成を採用した。これによって、学生がクラウド基盤上にセキュリティ機構を備えたWebサーバとロードバランサーを実装できるようになる。

次に、作成したNSGに受信ルールを追加し、サブネットに関連付けた。ここでは、学内のネットワークのセキュリティ上の制限から、一般的なリモートデスクトップに加えて、ブラウザからWebサーバにアクセスするためプライベートIPアドレスを介して仮想マシンに安全に接続する機構を実装した。これによ

り、外部からのアクセス制御が一元的に行えるようになり、安全かつ効率的な通信管理が実現された。

仮想マシンの可用性を高めるために、可用性セットを作成した。可用性セットでは、障害ドメインと更新ドメインを使って仮想マシンを分散配置することで、物理的な障害や定期メンテナンスによる影響を最小限に抑えることが可能となる。

さらに、仮想マシンのブート診断データを保存するためにストレージアカウントを作成した。ストレージアカウントは主に診断データの保存先として使用し、ローカル冗長ストレージによって同一リージョン内でのデータ保全を行うようにした。

Webサーバとしての機能を確認するために、仮想マシンに対して IIS をインストールし、簡単な HTML ページを配置した。この環境に対して、 ロードバランサーを構成し、フロントエンド IP アドレスとバックエンドプールを設定した。

さらに、各仮想マシンに対してインバウンドNAT規則を追加し、異なるポート番号でリモートデスクトップ接続が可能となるように設定した。これにより、1つのロードバランサー経由で複数の仮想マシンに接続できる仕組みを整えた。

負荷分散の動作確認として、実際にブラウザからロードバランサーの IP アドレスにアクセスし、2 台の仮想マシンへの振り分けが動作しているかを検証した。IIS を一時的に停止し、正常性プローブによって切り離される様子や、再起動後の復帰も確認できた。ロードバランサーの振り分け方式が FIVE タプルに基づくハッシュ値であることを確認した。

以上の一連の手順を通して、クラウド基盤上で可用性と拡張性を備えた Web サーバー環境を構築し、仮想化されたインフラにおける設計・運用の基本を実践的に学ぶ教育プログラムを構築した。

これらを100名程度の学生向けのプログラムとして2025年1月に提供した。その結果、多くの学生が実習を通じてクラウドの構築体験をすることが出来た。

３．4　課題と改善策の検討

本研究を通じて、本学におけるクラウド環境を用いた教育プログラムを実施する上での課題は、クラウド事業者との契約、アカウント設定、費用、及び学生評価にある。

クラウド事業者との契約について、今次契約は、情報イノベーション部との連携しつつパートナー企業への見積もり依頼から契約まで3ヶ月以上の期間を要した。そのため、短期間での契約を行えるような方法が必要である。また、アカウント設定において管理者がTAや学生のアカウントに手作業で権限付与することは、セキュリティ上の確認が難しい状況であった。一方、同じマイクロソフトの基盤を利用したことから容易な部分もあったため、スクリプトや典型的な学生用アカウント設定方法を検討することで改善できる。そして、クラウド利用に係る費用では、学生一人あたり約3週間の講義演習において、一人あたり2600円であった。そのため、講義演習においてクラウド環境を利用するためには上記の予算措置が必要である。

講義演習の効果測定について、今次教育プログラムでは、サーバの構築・動作確認をもって到達度を計測していた。学生数が増える場合、人手による動作確認は難しく、効果測定を自動化する方法を検討したい。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の計画として、上記で挙げた課題の解決に向けた教育プログラムの実施マニュアルの作成、アカウントのセキュリティ設定、本学とクラウドサービス事業者との契約等を実施する。また、これらの改良後の教育プログラムを学内で実施することで効果測定を実施し、その結果を発表したい。

特　別　研　究

（１）プロジェクト研究助成

縮退した開殻電子状態計算のための理論開発

工学部（物質化学課程）　　土持　崇嗣

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

化合物の物性や反応性の多くは、内包する電子の振る舞いや光学的な応答によって決定される。こうした電子の状態を追跡し、その物理的な側面を数値的に解明する量子化学計算、近年のコンピュータ技術の進歩により、現代の物質科学分野において中心的な役割を果たしている。その中でも特に密度汎関数理論（DFT）は盛んに用いられる計算手法であり、実験科学と機械学習とを組み合わせることで、加速度的なマテリアルデザインも実現可能となっている。しかし、それでも量子化学計算には多くの課題が残されている。例えば次世代機能性物質として期待されるジラジカル化合物のような開殻電子構造や、光エネルギー変換技術における非断熱反応においては、最高占有軌道 (HOMO) と最低非占有軌道（LUMO）が縮退した電子状態を取り扱うためのDFTを基盤とした理論的枠組みの発展がとりわけて未成熟であるという問題がある。また、DFT では自己相互作用と呼ばれる本質的な問題により、電荷移動状態や内殻励起状態を正確に記述することができないことが知られている。そのため、このような開殻した電子状態の物性が重要となる次世代材料のさらなる領域開拓のためには、信頼性の高い実践的計算技術の発展が強く望まれる。以上の背景を踏まえ、本研究では、縮退系を含めたこうした課題を解決できる革新的な理論を提案し、これを実在系に展開することを目的とする。また、提案手法を世界中で広く利用されている計算パッケージ『Q-Chem』上で開発することにより、多くの研究者が容易に実行可能なツールとして社会実装も目指す。

２．研究計画

本研究では以下の 2 つのテーマについて取り組む：

A. 縮退状態の記述に対する DFT の拡張
B. 電荷移動励起･内殻励起を精度良く記述する低コスト配置間相互作用法 (CI) の開発

いずれも主に二段階励起過程をモデル化した新しい視点によって DFT, CI 理論をそれぞれ開発し、その解決を試みる。また、スピン射影演算子を組み合わせることによって縮退状態を記述することも計画している。多体効果を持つスピン射影演算子は、これまで一電子描像を持つ DFT には適用できないと考えられていたが、これを打破するブレイクスルーを目指す。本研究では、それぞれの理論について枠組みを整えたのち、作業方程式を導出し、量子化学計算パッケージ QChem へのプログラム化を行う。これを用いて縮退した一重項-三重項状態のエネルギー差計算・円錐交差・電荷移動励起に対して適用し、手法の優位性を検証する。

３．計画の進行状況

紙面の関係上、ここでは課題 B について報告する。CIS は基底状態 Hartree-Fock 波動関数$|\Phi_0\rangle$から出発する最も基礎的な励起状態計算手法であり、すべての一電子励起の線形結合を取ったものである。その波動関数は

$$|\Psi_{\mathrm{CIS}}\rangle = \sum_{ai} c_{ai} a_a^\dagger a_i |\Phi_0\rangle = \sum_{ai} c_{ai} |\Phi_i^a\rangle$$

で表され、ここで、$i,j,\ldots$は占有軌道を、$a,b,\ldots$は非占有軌道を表し、$|\Phi_i^a\rangle$は$|\Phi_0\rangle$に対して$i\to a$の電子励起をした行列式として定義される。CIS はその単純さ故に非常に様々に研究されてきており、その上で電荷移動励起を系統的に過大評価することが知られている。そこで課題 B ではまずこの問題の解決にあたった。

CIS が電荷移動励起を過大評価する理由は図 1 に図示される通り 2 つある：1 つは平均場近似であるため、電子相関が無視されていることであり、もう一つは軌道緩和の効果が含まれていないことである。電荷移動励起状態では電子が空間的に遠い領域に移動するため、基底状態とは全く異なる平均場を持っていると考えられる。しかしながら、CIS で用いる軌道は基底状態 (HF) に対して変分的に最適化されており、これによって HF に対して大きなバイアスを生んでいる。そこで、CIS に対しても軌道最適化することによって、電子相関が同程度であると仮定すれば、励起エネルギーの誤差は大きく改善するはずであると考えられる。

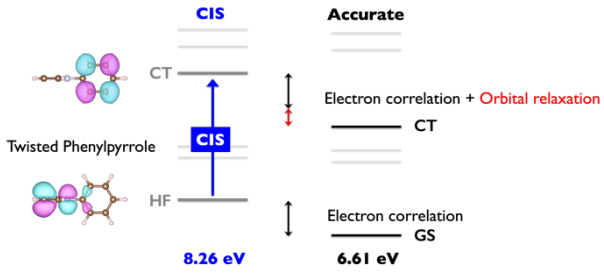


図 1. CIS の過大評価の原因（ねじれフェニルピロールの電荷移動励起）.

このような背景から、本研究では CIS の軌道を最適化する手法を提案することとした。そのためには、CIS の波動関数に対して軌道回転演算子を作用させ

$$|\Psi_{\mathrm{CIS}}\rangle = e^{-\hat{\kappa}}\sum_{ai} c_{ai}|\Phi_i^a\rangle$$

$$\hat{\kappa} = \sum_{ai}\kappa_{ai}\left(a_a^\dagger a_i - a_i^\dagger a_a\right)$$

（ただし$a_a^\dagger$, a_iは生成・消滅演算子）変分パラメータκ_{ai}, c_{ai}についてエネルギー期待値$E_{\mathrm{CIS}}[\boldsymbol{\kappa},\mathbf{c}]$が最小になるように同時最適化すればよい。すなわち 2 種類のエネルギー微分${}^{\mathrm{o}}\mathbf{g} = \partial E_{\mathrm{CIS}}/\partial\boldsymbol{\kappa}$と${}^{\mathrm{c}}\mathbf{g} = \partial E_{\mathrm{CIS}}/\partial\mathbf{c}$をゼロにすればよい。しかしながらこうした問題設定は、鞍点の最適化問題となることと、E_{CIS}が$\boldsymbol{\kappa}$の非線形関数であることにより、実際には数値的に不安定であり、二次微分が重要な役割を果たす。そこで本研究では CIS のヘシアンを世界で初めて導出することに成功した。これによって基底状態・励起状態を含む多状態を同時に最適化する状態平均 CIS 法を開発した。[1]

状態平均 CIS は従来法にくらべ、次のような利点があることがわかった：(1) CIS の ansatz が複数行列式を含むため、縮退系を記述できる。(2) 遷移双極子モーメントなど、状態間の実験物理量を容易に計算することができる。その一方で、価電子励起よりもはるかに高いエネルギーを持つ電荷移動励起や内殻励起に対しては、ヘシアンが負の固有値を持つために適用が困難である。そこでこうした問題を払拭するため、新たな理論である二重 CIS 法（Double CIS あるいは DCIS）を提案した。[2] DCIS では非線形な$e^{-\hat{\kappa}}$を一次まで展開し、さらに CI 係数に対する応答も考慮しており、その波動関数は以下のように定義される：

$$|\Psi_{\mathrm{DCIS}}\rangle = \sum_{ai} d_{ai}a_a^\dagger a_i|\Psi_{\mathrm{CIS}}\rangle + \bar{d}_0|\Phi_0\rangle + \sum_{ai}\bar{d}_{ai}|\Phi_i^a\rangle$$

DCIS では CIS のようにエネルギーが係数$\mathbf{d},\bar{\mathbf{d}}$の二次関数となるため、これらを変分的に求めることで安定的な計算を保証している。その支配方程式は次のような一般化固有値問題に帰着されることを示した：

$$\begin{pmatrix} {}^{\mathrm{oo}}\mathbf{A} & {}^{\mathrm{oc}}\mathbf{A} \\ {}^{\mathrm{co}}\mathbf{A} & {}^{\mathrm{cc}}\mathbf{A}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\mathbf{d}\\ \bar{\mathbf{d}}\end{pmatrix} = \omega\begin{pmatrix} {}^{\mathrm{oo}}\mathbf{S} & {}^{\mathrm{oc}}\mathbf{S} \\ {}^{\mathrm{co}}\mathbf{S} & {}^{\mathrm{cc}}\mathbf{S}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\mathbf{d}\\ \bar{\mathbf{d}}\end{pmatrix}$$

ただし、$\mathbf{A}$は CIS のヘシアンに現れる行列であり、$\mathbf{S}$はメトリック（重なり行列）、またωは緩和エネルギー

$$\omega = E_{\mathrm{DCIS}} - E_{\mathrm{CIS}}$$

である。

ここで、二重 CIS の名前の由来は、DCIS そのものが CIS に対して一電子励起（つまり CIS）をすることに対応している。すなわち我々は”本当の意味での二重 CIS”に対応する

$$\sum_{pq} t_{pq} a_p^\dagger a_q |\Psi_{\mathrm{CIS}}\rangle$$

のような ansatz が、上式で表される$|\Psi_{\mathrm{DCIS}}\rangle$と全く同じ変分空間を持つことを解析的および数値的に証明した。そのうえで、メトリック**S**は一般に正定値行列であり、解ωは数値的に非常に安定であることを見出した。

DCIS の概念を図 2 に示す。興味深いことに、DCIS では CIS 励起状態を緩和するだけでなく、解の一つとして基底状態も同時に記述可能である。これによって遷移双極子モーメントなども簡単に求めることができる。

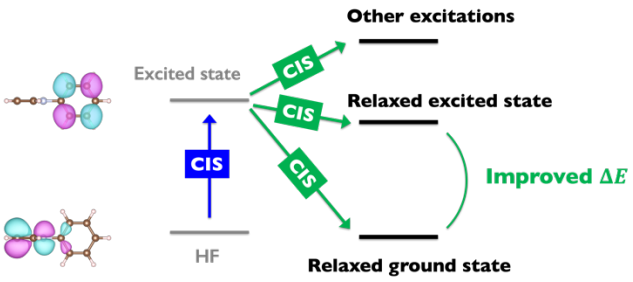


図 2. DCIS の概念図.

しかしながら、I番目の CIS 状態$|\Psi_{\mathrm{CIS}}^I\rangle$に対する DCIS の緩和状態$|\Psi_{\mathrm{DCIS}}^I\rangle$は、一般的に$I+1$番目にエネルギーが低い状態として得られることが明らかになった（通常は1番低い状態$|\Psi_{\mathrm{DCIS}}^1\rangle$が基底状態に対応する）。すなわち、変分的な Block Davidson 対角化法などを用いると、求めたい解よりもエネルギー的に低いI個の解$|\Psi_{\mathrm{DCIS}}^k\rangle(k=1,2,\cdots,I)$も求める必要があるため、計算コストは$I$の値に比例する。各解を求めるのに必要なコストは CIS に比べて 5 倍であるため、このコストを削減するため新たな Maximum Overlap Davidson アルゴリズムを提案した。本手法では、目的の CIS をターゲットにすえ、効率的にアップデートして解を探索することで大幅なコスト削減が達成され、大規模な系に対して実用的な計算が可能となった（図 3）。

続いて、種々の有機化合物に対して電荷移動励起が CIS からどの程度改善されるか、ベンチマークを取った。図 4 は 19 分子 30 励起状態について、非常に高精度（高コスト）な結合クラスター法からの誤差を取ったものを表示しており、結果は $^{\mathrm{o}}\mathbf{g}$が大きくなる順番に並べてある。すなわち右に行くほど HF 軌道が CIS 励起状態に対して不適格であることを示す。 $^{\mathrm{o}}\mathbf{g}$が大きくなるほど、CIS は大きな誤差

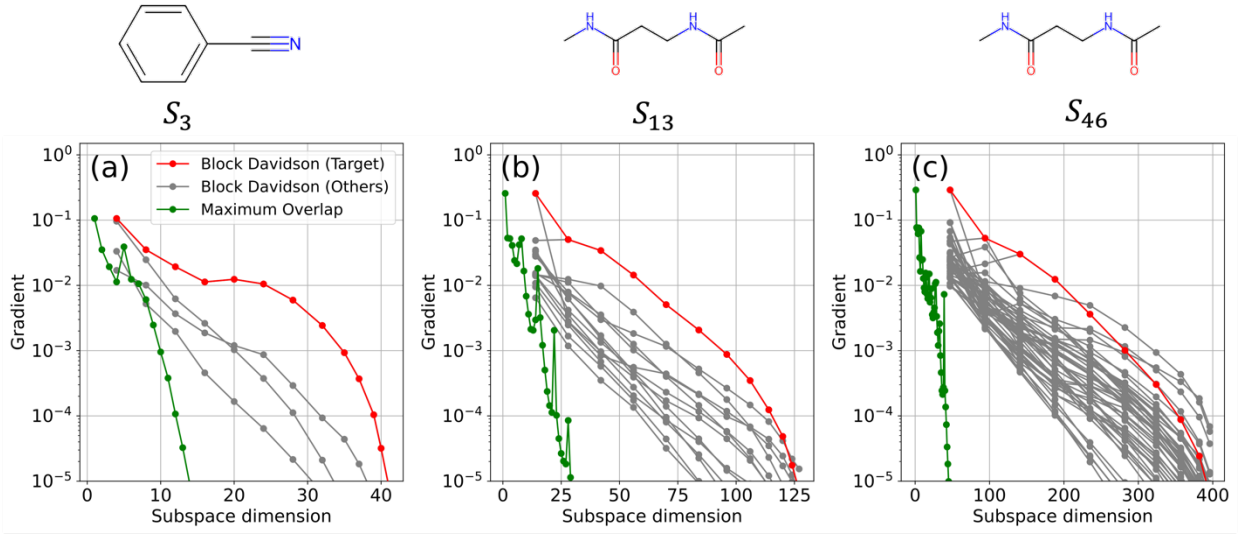


図 3. Block Davidson 法と Maximum Overalp Davidson 法の計算コストの比較

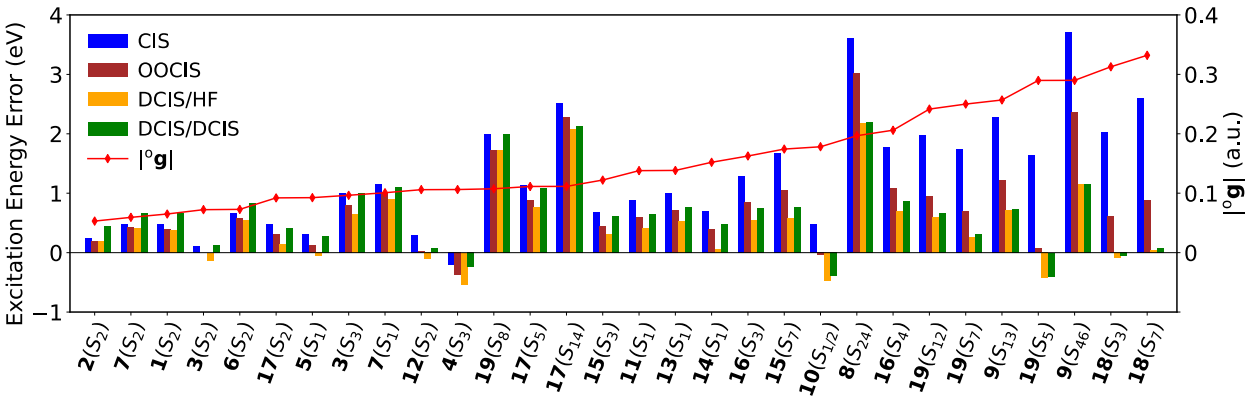


図 4. 電荷移動励起における各計算手法の励起エネルギー誤差.

を示し、DCIS はそれに対して大幅に改善することが示された。

また、DCIS は縮退系についてもある程度記述が可能である。これは波動関数が CISD のように展開でき、2 電子励起配置を含むためである：

$$|\Psi_{\mathrm{DCIS}}\rangle = \bar{d}_0|\Phi_0\rangle + \sum_a^{\mathrm{vir}}\sum_i^{\mathrm{occ}} \bar{d}_{ai}|\Phi_i^a\rangle + \sum_{ab}^{\mathrm{vir}}\sum_{ij}^{\mathrm{occ}} d_{ai}c_{bj}|\Phi_{ij}^{ab}\rangle$$

このため、結合性-反結合性軌道間の励起を CIS で記述し、そこから DCIS によって脱励起を行うことで、結合解離に伴う縮退効果を取り扱うことができる。図 5 は HF 分子と F_2 分子に対して結合解離曲線をプロットしたものである。通常の単配置理論である HF は結合解離に伴う縮退を記述できず、厳密解（FCI）に対して大きなエラーをうむが、DCIS は解離曲線をよく再現できている。特に、通常用いられる CASSCF 法と比較すると、DCIS の曲線は FCI のものと並行であり、DCIS によって良質なポテンシャル曲面を再現できる可能性があることが明らかとなった。

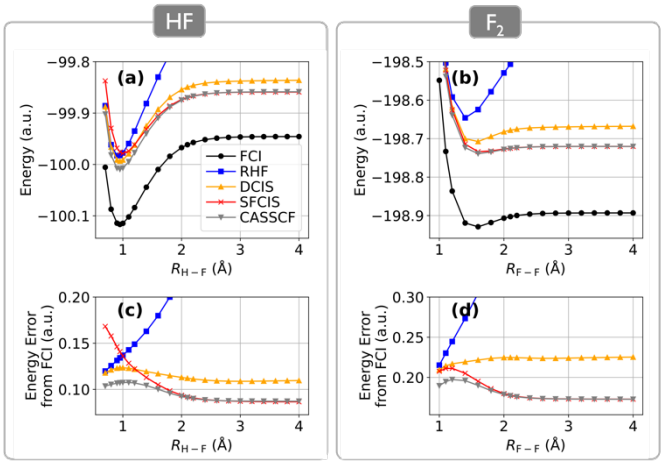


図 5. (a, b) HF と F_2 の結合解離曲線.
(c, d) それぞれの厳密解 FCI からの誤差.

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

本研究では DCIS 法を提案することによって、開殻した状態、特に電荷励起状態と縮退状態を低コストに記述することに成功した。今後は DCIS を内殻励起状態に適用することを計画している。また、摂動理論と組み合わせることでより高精度な手法へと昇華させる。そのために、現在 QChem へ DCIS 法を実装中である。さらに、DFT を同様に拡張させる、あるいはスピン射影演算子と組み合わせることによって、同様の目的を DCIS とは異なる観点から達成することを目指す。

文献

[1] T. Tsuchimochi & B. Mokhtar, in preparation.
[2] T. Tsuchimochi, J. Chem. Phys. **161**, 241102 (2024).

学会発表

APATCC-11, Kobe, Japan, 2025 (招待講演).
慶應義塾大学量子コンピューティングセンター (招待セミナー)

超構造量子物質エレクトロニクスの推進

工学部（電子工学科）　　中野　匡規

１．序論

固体結晶を対象とする物質科学研究の究極の目的は、天然には存在しない構造や組成を持つ物質系を人工的に合成し、新しい物性や機能性を創出することであろう。そのような目的を実現するための物質プラットフォームとして、本研究ではわずか一層でも特筆すべき量子物性を発現する**二次元量子物質**に注目する。そして、固体化学に立脚した**薄膜エピタキシー技術**と半導体工学に立脚した**電界効果デバイス技術**をベースに、天然には存在しない超構造や電子状態を薄膜・界面・デバイス上で実現することにより、前人未踏の創発量子物性や革新量子機能の創出を目指す。その上で、**放射光施設における先端分光計測**や**計算科学に基づく物質・構造設計**などにより、物性発現機構の解明やさらなる高機能化への道筋を明らかにすることで、二次元量子物質超構造を対象とした新技術『**超構造量子物質エレクトロニクス**』を推進する。

２．研究計画

【研究室の立ち上げ】

まずは研究室の立ち上げに注力する。居室および実験室の環境整備に加えて、実験装置（主要なものとして、薄膜作製用超高真空装置 3 台、薄膜用 X 線回折装置 1 台、原子間力顕微鏡 1 台、低温プローバ 1 台、4 K 冷凍機 1 台）の移設・立ち上げに注力し、なるべく前期のうちに実験環境（特に薄膜作製条件などの製膜環境）を異動前の状態まで戻せるように全力を注ぐ。その上で、後期からは以下の方針で研究に取り組む。

【研究の方針】

I. MBE による二次元量子物質超構造の構築

我々のグループでこれまでに確立してきた分子線エピタキシー（MBE）法による試料作製技術を基に、様々な物性を示す二次元量子物質を構成要素とする二次元量子物質超構造の構築に取り組む。その際には、様々な物質を様々なパターンで積層させる従来のアプローチ（**積層配列制御**）のみならず、層間ギャップ中に様々なイオンを導入・配列させるような我々独自のアプローチ（**層間配列制御**）も取り入れて、多様な周期構造を持つ超構造を構築し、従来の物質系では得られない創発量子物性や革新量子機能の創出を目指す。

II. イオンゲート法による二次元量子物質超構造の電子状態制御

I で作製した二次元量子物質超構造に対してイオンゲート法を適用し、電気的なキャリア数制御による新奇量子物性・量子機能の創出を目指す。その際には、電解質溶液中のイオンを試料表面に配列させる従来のアプローチ（**静電的キャリア蓄積**）のみならず、層間ギャップ中にイオンを導入・配列させるような我々独自のアプローチ（**電気化学的インターカレーション**）も取り入れて、より多くの物質系における電子状態制御と新奇量子物性・量子機能の創出を目指す。

３．計画の進行状況

【研究室の立ち上げ】

まずは研究室の立ち上げに注力した。前期のうちに居室と実験室の環境整備を行い、実験装置の移設を完了した（図 1）。その上で、後期から製膜装置の立ち上げに取り組んだ。その過程で、超高真空用の真空ポンプや電子線蒸着用の高圧電源、電子線回折用の電子銃の故障などのトラブルに直面したものの、これらに対処し、異動前と同程度の品質の薄膜が得られる状態にまで復旧させた（図 2）。

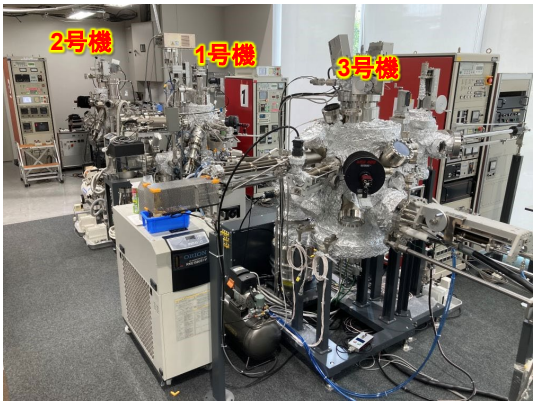


図 1: 移設した製膜装置の写真

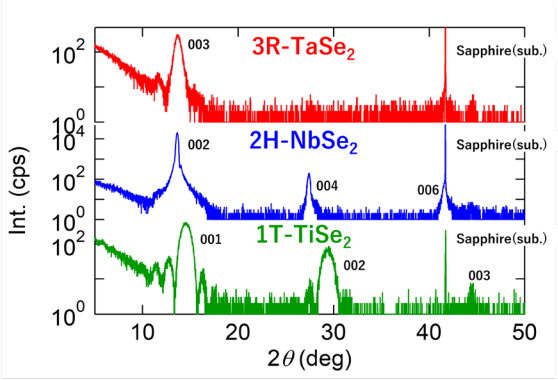


図 2: 作製した薄膜の X 線回折パターン

【超構造量子物質エレクトロニクスの推進】

研究室の立ち上げと並行して、後期からは当初の予定通り『**I. MBE による二次元量子物質超構造の構築**』および『**II. イオンゲート法による二次元量子物質超構造の電子状態制御**』にも着手した。特に II では、イオンゲート法の一種である電気化学的インターカレーション技術を利用して、層状強磁性半金属である Cr_3Te_4 や層状反強磁性金属である $Cr_{1/4}NbSe_2$ および $Cr_{1/4}TaSe_2$ などを対象とした電子状態制御に取り組んだ。そして、特に $Cr_{1/4}TaSe_2$ を対象とした実験において、ゲート誘起反強磁性-強磁性転移を実現することに成功した。以下ではその詳細について報告する。

■実験内容■

図 3 に $Cr_{1/4}TaSe_2$ の結晶構造を示す。$Cr_{1/4}TaSe_2$ は層状超伝導体である $TaSe_2$ の層間に Cr がインターカレートされた物質系の一種であり、我々自身の研究から基底状態が面内 120° スピン構造を持つ遍歴反強磁性体であることが明らかになりつつある。この物質の薄膜試料に対してイオンゲートデバイスを作製し、ゲート電圧（V_G）を変化させながら電気抵抗の温度依存性や磁性がどのように変化するのかを詳細に調べた。

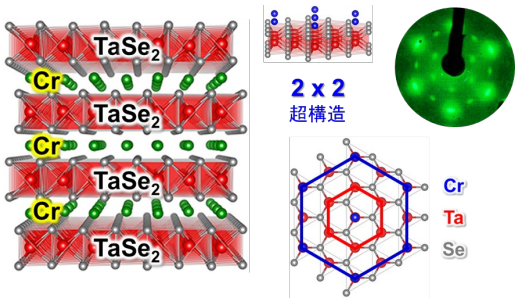


図 3: $Cr_{1/4}TaSe_2$ の結晶構造

■結果と考察■

図 4 に $Cr_{1/4}TaSe_2$ に対するゲート効果を示す。V_G = 0 V では 100 K 近傍に電気抵抗の折れ曲がり（キンク構造）が見られるが、これが反強磁性転移温度に対応する。V_G が 3 V を超えた辺りでキンク構造が消失し、全体として絶縁体的な振る舞いに変化することがわかった。また、最低温で行ったホール効果測定の結果から、V_G = 3.35 V において正常ホール効果の符号が反転すると共に強磁性的な異常ホール効果のシグナルが出現し、V_G = 3.9 V で正常ホール効果の符号が元に戻ると共に強磁性シグナルも消失することがわかった。

図 5 に一連のイオンゲート実験で明らかになった $Cr_{1/4}TaSe_2$ の電子相図を示す。正常ホール効果の符号反転と異常ホール効果の出現が一対一対応しており、電子ドーピングに伴う何らかの電子状態の劇的な変化が強磁性の発現を誘起していることが強く示唆される。

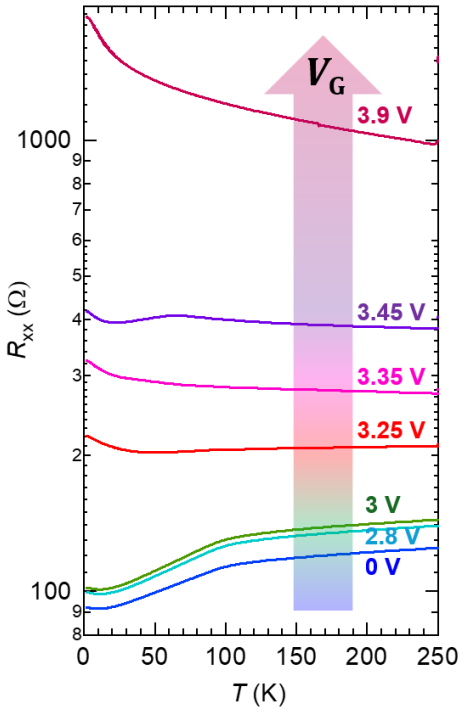


図 4: $Cr_{1/4}TaSe_2$ に対するゲート効果

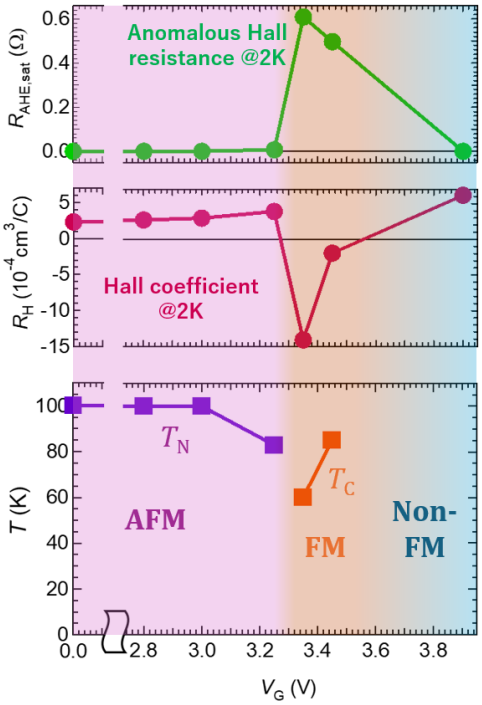


図 5: $Cr_{1/4}TaSe_2$ の電子相図

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

【今後の計画】

来年度以降も I および II の方針に沿って研究に取り組み、『超構造量子物質エレクトロニクス』を推進するが、それらに加えて以下の取り組みにも新たに着手する。

III. 先端分光計測による物性発現機構の解明とさらなる高機能化に向けた取り組み

I で作製した二次元量子物質超構造で得られた新奇物性の微視的な起源を解明するために、SPring-8 や KEK、ナノテラスなどの**放射光施設における先端分光計測**に取り組む。MBE 法で作製する試料は数 mm スケールと非常に大面積であるため、従来の劈開法によるアプローチでは試料サイズの制約で行えなかった各種先端分光計測を行うことが可能である。それらの取り組みを通して、二次元量子物質超構造の創発量子物性に対する知見を深める。また、**計算科学に基づく物質・構造設計**にも着手する。特に、AI による機械学習とロボットによる自動操作を組み合わせることで、実現可能な超構造のバリエーションを格段に増大させ、さらなる高機能化を目指す。それらの取り組みを通して、二次元物質研究の枠に留まらず、広く物質科学分野全般に対するイノベーションの創出に繋げたい。

【学会、論文等投稿・発表状況】

■学会発表■

[1] 中野匡規, "イオンゲートによる層状ファンデルワールス物質の磁性制御", 日本物理学会 2025 年春季大会、オンライン（2025 年 3 月 21 日）**【招待講演】**

[2] K. Endo, H. Matsuoka, Y. Iwasa, M. Nakano, "Unconventional magneto-transport properties of Cr_3Te_4 and their gate modulation", Joint March Meeting and April Meeting 2025 of the American Physical Society, Anaheim, USA, March 20, 2025.

[3] X. Huang, B. Saika, Y. Itahashi, H. Matsuoka, Y. Settai, M. Sakano, S. Seki, Y. Iwasa, K. Ishizaka, M. Nakano, "Detailed transport studies on a triangular-lattice layered van der Waals magnet $Cr_{1/4}NbSe_2$: from bulk to a few layers", Joint March Meeting and April Meeting 2025 of the American Physical Society, Anaheim, USA, March 18, 2025.

[4] 遠藤幹大, 松岡秀樹, 岩佐義宏, 中野匡規, "バンド交差点を持つ強磁性体 Cr_3Te_4 の特異な輸送特性とそのゲート制御", 第 16 回低温科学研究センター研究交流会、東京大学（2025 年 2 月 17 日）**【ベスト・ポスター・アワード受賞】**

[5] X. S.W. Huang, B. K. Saika, Y. M. Itahashi, H. Matsuoka, Y. Settai, M. Sakano, S. Seki, Y. Iwasa, K. Ishizaka, M. Nakano, "Transport properties of $Cr_{1/4}NbSe_2$: from bulk to ultra-thin film", 第 16 回 低温科学研究センター研究交流会、東京大学（2025 年 2 月 17 日）

[6] 小口尚志, 遠藤幹大, 黄驤, Bruno Kenichi Saika, 松岡秀樹, 石坂香子, 岩佐義宏, 中野匡規, "層状磁性金属 Cr_xTaSe_2 エピタキシャル薄膜の磁性制御", 第 16 回 低温科学研究センター研究交流会、東京大学（2025 年 2 月 17 日）

[7] M. Nakano, "Ion intercalation as another knob for 2D materials research", International Workshop on Iontronics 2024, Nagano, Japan, Oct. 31, 2024. **[Invited talk]**

[8] 中野匡規, "MBE で切り拓く二次元物質科学", 日本学術振興会 R025 先進薄膜界面機能創成委員会 第 21 回研究会、京都テルサ（2024 年 10 月 23 日）**【招待講演】**

[9] 遠藤幹大, 松岡秀樹, 岩佐義宏, 中野匡規, "層状磁性半金属 Cr_3Te_4 におけるトポロジカルホール効果のゲート制御", 日本物理学会 第 79 回年次大会（2024 年）、北海道大学（札幌キャンパス）（2024 年 9 月 17 日）**【日本物理学会学生優秀発表賞受賞】**

[10] K. Endo, H. Matsuoka, Y. Iwasa, M. Nakano, "Gate-control of Magnetism in a Van Der Waals Magnetic Semimetal Cr_3Te_4", The 23rd International Conference on Molecular-Beam Epitaxy, Matsue, Japan, Sep. 12, 2024.

[11] H. Matsuoka, S. Kajihara, T. Nomoto, Y. Wang, M. Hirayama, R. Arita, Y. Iwasa, M. Nakano, "Magneto-transport properties and gate-tunability of a van der Waals magnetic semimetal Cr_3Te_4", The 23rd International Conference on Molecular-Beam Epitaxy, Matsue, Japan, Sep. 12, 2024.

■論文発表（すべて査読付き）■

[1] H. Matsuoka, S. Kajihara, K. Endo, Y. Wang, Y. Iwasa, M. Nakano, "Spontaneous topological Hall effect at room temperature in a van der Waals magnetic semimetal", *submitted*.

[2] U. Narusaka, N. Yoshikawa, H. Matsuoka, Y. Tanaka, M. Musashi, M. Nakano, Y. Iwasa, R. Shimano, "Intense terahertz pulse induced nonthermal melting of charge density wave order in a thin film of $3R$-$Ta_{1+x}Se_2$", *Physical Review B* **111**, 045146 (2025).

[3] B. K. Saika, S. Yoshida, M. Pardo-Almanza, N. Mitsuishi, M. Sakano, Y. Fujisawa, Y. Wang, Y. Iwasa, H. Matsuoka, H. Takahashi, S. Ishiwata, Y. Okada, M. Nakano, K. Ishizaka, "Dimensionality-driven power-law gap in the bilayer $TaTe_2$ grown by molecular-beam epitaxy", *APL Materials* **12**, 071105 (2024).

[4] H. Matsuoka, S. Kajihara, T. Nomoto, Y. Wang, M. Hirayama, R. Arita, Y. Iwasa, M. Nakano, "Band-driven switching of magnetism in a van der Waals magnetic semimetal", *Science Advances* **10**, eadk1415 (2024).

ゴースト分光イメージング法の開発

工学部（機械工学課程先進機械コース）　　桑原　彬

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

エッチング，成膜等のプロセスプラズマ等の高度な制御，均一化，大面積化，さらには新たなプロセス開発には，ガス温度，電子密度，任意の化学種の数密度，特にそれらの空間分解計測が不可欠である．半導体レーザー吸収分光法は，スペクトル形状からこれらの物理量を取得できる有用なツールとして発展してきたが，一般的に空間情報を得るにはレーザー光源・検出器の空間的な走査，数学的な変換処理が必要となり，精度が低下するとともに計測に時間を要している．

本研究では，情報学のゴーストイメージングを半導体レーザー吸収分光に応用した“ゴースト分光イメージング”を開発する．ゴーストイメージングには，拡散板を用いてスペックルパターンを生成しマルチピクセルカメラでパターンを撮影する古典的ゴーストイメージング，空間位相変調器等で任意のパターンを生成する計算機ゴーストイメージングに大別される．本研究では，前者の古典的ゴーストイメージングから着手する．スペックルパターンを持つレーザー光を参照光とプローブ光に分岐し，参照光を直接 CCD カメラで検出する．一方，プローブ光を測定対象（一般に物体）に照射した後，集光してシングルピクセル検出器で検出する．最終的には，両データの相関からイメージング像を復元できる．申請者は，光源に半導体レーザーを適用し，波長と空間情報を持つデータ群のスペクトル解析から，プラズマの空間情報取得を目指す．

２．研究計画

ゴースト分光イメージング法の開発のため，以下 2 つのフェーズに分け，段階的に実施する．

第 1 フェーズでは，測定対象を物体として半導体レーザーによる従来のゴーストイメージングを試みる．実証後，波長可変半導体レーザーに移行する計画である．測定対象を物体として，レーザー波長を約 1 Hz で掃引しながら従来のゴーストイメージングを行い，各波長のデータ群から同一の像が復元されることを実証する．この時，レーザー波長，CCD カメラ，シングルピクセル検出を同一のトリガー信号にて時間同期しておく．さらに，レーザー波長掃引の施行回数と吸収率のコントラスト比の関係を明らかにする．事前に実施したモンテカルロ法による数値計算では，従来のレーザー吸収分光の検出感度を得るには，10^3 回の施行回数が必要であることが分かっている．なお，スペックルパターン生成には，拡散板と回転式マウントを用いる．

第 2 フェーズでは，測定対象をプラズマとして“ゴースト分光イメージング”を実証する．低圧 Ar グロー放電プラズマに対し，第 1 フェーズで実証済みの波長掃引型のゴースト分光イメージング（Ar I 794 nm 又は 826 nm）を実施する．統計処理されたイメージング結果をピクセル毎にフォークト関数にてスペクトル解析し，ピクセル毎のガス温度，Ar 原子数密度を可視化する．これらの可視化結果を従来の空間走査及びアーベル変換から得られ

た半径方向の空間分布と比較することでゴースト分光イメージングの妥当性を明らかにする．

３．計画の進行状況

＜数値計算による事前検討＞

Python を用いたゴーストイメージングのデモンストレーションを行った．図 1 にターゲット像（SIT）を示す．数値計算では，光源側ではピクセル毎に 2 値化したランダムパターンをターゲットに照射し，その透過率を得るものである．ターゲット像は読み込み時に任意の画素数で 2 値化される．ランダムパターンを変更しながら，10^5 回分のデータを処理した．再構成式は以下のとおりである．

$$G(x,y) = \langle \Delta I_n(x,y) \Delta B_n \rangle \qquad (1)$$

ここで，〈〉はアンサンブル平均を、Δ は揺らぎを表す．また，以下の再構成式を用いる例もある．

$$G(x,y) = \langle B I_n(x,y) \rangle - \langle B \rangle \langle I_n(x,y) \rangle \qquad (2)$$

一般に式 2 を用いた方が照射回数が少なくなるため，実験において式 2 を利用した．

図 2(a)に 5×10^3 回照射時の再構成画像，図 2(b)にランダムパターンの照射回数に対するピクセル毎の平均二乗誤差（MSE）を示す．MSE の計算式は以下のとおりである．

$$MSE = \frac{1}{N_h N_w} \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{j=1}^{N_w} (t_{i,j} - \tilde{t}_{i,j})^2 \qquad (3)$$

計算結果より，10^3 回を超えるとターゲット像を目視にて認識できることが確認された．MSE については，照射回数が 10^4 回を超えると MSE が 0.1 を下回る．MSE は 0 から 1 までの値を取り 0 に近いほど画像が鮮明に再構成されていると判断できる．MSE が 0.1 を下回ると，各ピクセルでの誤差が±0.316 以下になり，平均すると画像全体の 60%から 70%の輝度が正確に再現できていると言える．これらの結果を踏まえ，以降の実験では 10^3 回を照射回数として設定した．

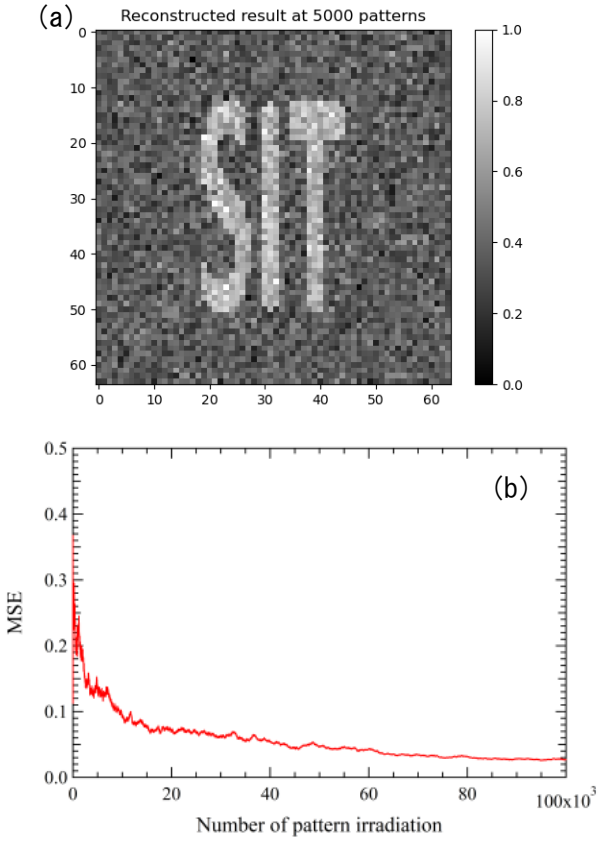


図 1(a) 5×10^3 回照射時の再構成画像，(b)照射回数に対するピクセル毎の平均二乗誤差

＜古典的ゴーストイメージングの実証＞

2024 年度は，第 1 フェーズを主に実施し，古典的ゴーストイメージングのシステムを構築することができた．図 2 に新たに構築したシステムの概要を示す．光源には DPSS レーザー（532nm Green DPSS Laser，CivilLasers），スペックルパターン生成には拡散板（#54-492，Edmund），パターン撮影には CCD カメラ（CS130-C，松電舎）を用いた．拡散板は二軸ステージ上の回転式マウントに取り付け，パターンを時間変化できるようにした．

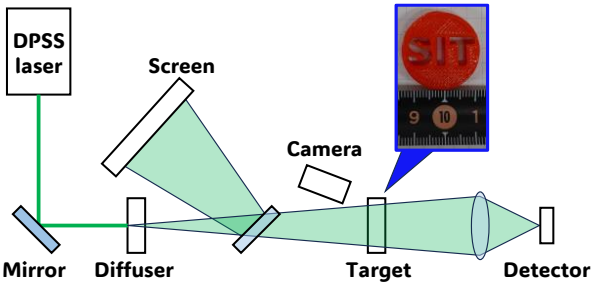


図 2　古典的ゴーストイメージングのシステム概要図

図 3 にスペックルパターンの代表例を示す．着手当初はスペクトルパターンを直接 CCD カメラに入射していたが，拡散板表面における強い散乱光を除去することができなかったため，最終的にスクリーン（EDU-VS2/M，Thorlabs）に投影し，間接的に撮影する手法を採用した．

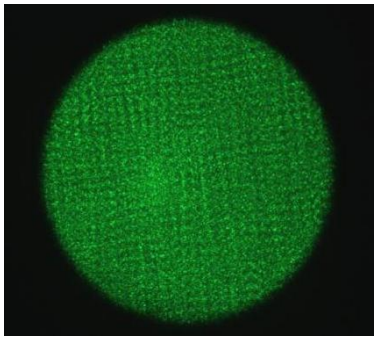


図 3　スペックルパターンの代表例

図 4 に 10^3 回の照射結果から実際に再構成された像を示す．この画像では，ノイズ低減を目的に 15×15 のピクセルにてスムージングを行った後の像である．結果から，左右反転した状態で「SIT」の像が浮かび上がったことから，DPSS レーザーを用いた古典的ゴーストイメージングの実証に成功したと言える．ターゲットが検出された際のコントラスト比（ターゲット検出部／非透過部）は約 12 であった．今後は「T」については，光学系 1 インチの有効径に干渉している可能性が高く，ターゲットサイズに応じて光学素子のサイズ選定が必要となることが示唆された．

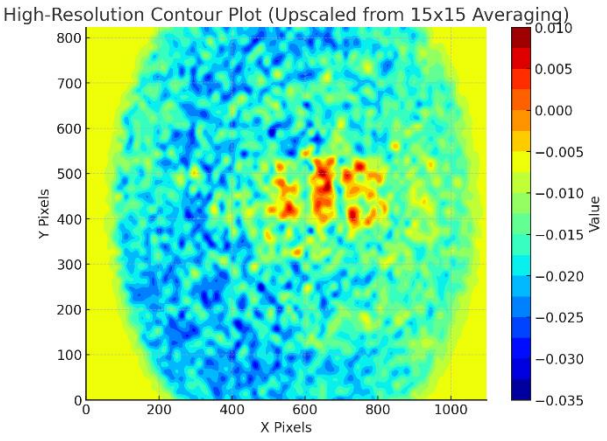


図 4　10^3 回照射時の再構成画像

今回の実験では，従来とは異なる体系にて実施している．1 点目は，スペックルパターンの時間変化について，2 軸ステージ及び回転ステージを手動で動かした点である．2 点目は，スクリーンに投影した像を CCD カメラで撮影した点である．実験当初は，自動ステージの導入，あるいは回転マウントのみの手動での回転を試みたが，拡散板の特定部分の凹凸が常に同じ散乱を生成しており，最終的に各ピクセルのアンサンブル平均$\langle I_n(x,y)\rangle$について，円周状の軌跡（明暗）を生成してしまうこととなった．ゴーストイメージングのスペックルパターンは，理論上各ピクセルの$\langle I_n(x,y)\rangle$が互いに独立している必要があり，これにより再構成式からターゲットを復元することができる．したがって，周囲のピクセルと関連付けられた規則性のあるパターンは致命的な問題であった．

2024 年度の研究より得られた課題 5 点を以下のとおり整理する．共通する主な原因は，各条件が最適化されていないことである．

1）前述のとおり，スクリーンでの間接撮影となった．これについては，スクリーン表面性状がスペックルパターンの撮影を妨害する可能性が懸念される．

2）前述のとおり，手動でスペックルパターンを時間変化指せることで，ランダム性が行われている可能性が懸念される．

3）手動での時間変化は，露光時間中に 2 軸ステージ及び回転マウントが移動している可能性が非常に高く，画像に軌跡が生じることが懸念される．また，マイクロメータ等を高速で調整することは困難であり，フレームレートは 1 Hz 又は 2 Hz に制限されてしまう．

4）図 4 で見られるとおり，全体の撮影画角のうち，ターゲットを通過しているビーム部分は一部である．したがって，空間分解能を十分に生かしているとは言えない状況である．

5）今回は画像解析を実験後に実施したが，

全ての画像処理に 3, 4 時間を要することとなった. 原因は 1000 個の csv ファイルへの出力，読み込みを都度行っていたことである.

４．今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

＜今後の計画＞

2024 年度の大きな進捗として，本助成により研究に着手できたことで，企業との共同研究（公募型）へ採択いただくことができた. 2025 年度～2027 年度（予定）で実施予定の当共同研究の計画概要を次に述べる.

次 3 か年において，①波長可変半導体レーザーを光源としたゴースト分光イメージングの開発，②空間位相変調器を用いた計算機ゴーストイメージングへの応用，③深層学習を用いたゴースト分光イメージングの高速化，の 3 つのサブテーマについて段階的に取り組む.

まず，①では古典的ゴーストイメージングを軸にプラズマへの応用を実証する. プラズマによる吸収率を空間的に識別することになるが, ターゲットが物体の場合（透過・非透過の 2 値）と異なり, 識別可能な吸収率変化（コントラスト）をどこまで実現できるかが議論となる. ②ではレーザー光路に空間位相変調器（デジタルミラーデバイスを想定）を設置し，任意のパターンを時間変化させながらゴースト分光イメージングを行う. 空間位相変調器では 4f 光学系によりレーザー光軸方向の分布を取得できる可能性があり，このサブテーマ内で 3 次元計測の実現性について言及したい. ③では学外の研究者と連携し，深層学習を併用した画像処理方法を開発する. ここでは, 時間分解能の向上を目的としている. 一般に 10^3 回のパターン照射が必要だとすると, 1 kHz の照射でも情報を得るために 1 s が必要である. このサブテーマでは，再構成式の出力後に画像の高解像度化アルゴリズムを導入し，処理時間を半分程度まで短縮することを目指す.

＜学会・論文投稿等の状況＞

ここまでに該当するものはないが，学生と連携しながら今後積極的に実施していく予定である.

ナノカーボン複合体電極によるカルシウム金属蓄電池の開発

工学部　　木須 一彰

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年、再生可能エネルギーの普及や電動モビリティの拡大に伴い、より持続可能で高性能な蓄電池の開発が強く求められている。現行のリチウムイオン電池は高いエネルギー密度と安定したサイクル特性を有するものの、リチウム資源の偏在性や将来的な供給不安、コスト上昇の懸念といった課題を抱えている。そのため、リチウムに代わる次世代電池システムとして、地殻中に豊富に存在し、より安価で安全性の高い元素を用いた蓄電池の研究が活発に進められている。

カルシウム（Ca）は、地殻中存在量が 5 番目に多い元素であり、資源的に非常に優れている上、還元電位も−2.87 V（標準水素電極基準)とリチウムに匹敵する低さを示す(図 1)。また、1 立方センチメートルあたりの理論容量も高く、エネルギー密度の観点からも有望である。さらに、カルシウムイオンは２価であるにもかかわらず、マグネシウムや亜鉛と比べて電荷密度が低く、イオン移動性や電解液中での溶媒和構造の面でも優れた性質を示す。これらの特徴から、カルシウム金属蓄電池は高エネルギー密度と資源持続性の両立を図る次世代電池として注目を集めている [1)]。

一方で、カルシウム金属蓄電池の実用化には、負極としての Ca 金属の安定な析出・溶解を実現する電解液の開発や、Ca イオンの可逆的な挿入・脱離が可能な正極材料の設計など、多くの技術的課題が存在する。特に、二価カチオンである Ca イオンはその大きな水和半径や反応性の高さから、既存の電解液や正極材料との適合性が低く、長寿命化や高出力化を妨げる要因となっている。

本研究では、キノン構造を有する高分子材料である poly(anthraquinone glycidyl ether)（PQGE）と、ナノ構造を持つカーボン材料との複合体（PQGE/C）を正極とし、カルシウム

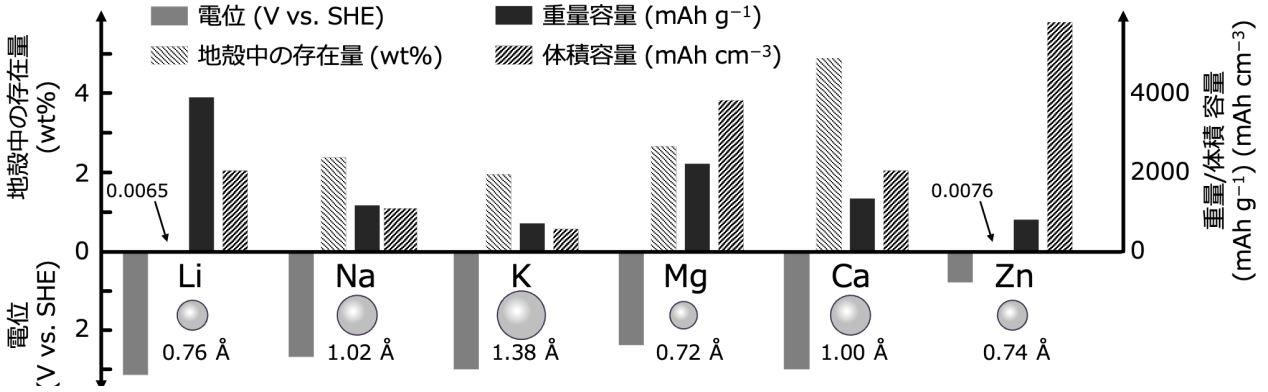


図 1. キャリアカチオンの標準電極電位，地殻中の存在量，
金属負極としての重量・体積容量，イオン半径。

金属を負極に用いた二極式セルの蓄電池を構築した（図 2）。PQGE は、Li や Na といった一価イオンだけでなく、Ca、Mg、Al などの多価イオンをも可逆的に脱挿入できる特性を持ち、高い電解液親和性と柔軟な加工性により、蓄電池用電極への応用が期待されている。[2] 本研究ではこの PQGE/C を正極に用いることで、Ca 金属蓄電池の性能向上を図るとともに、補助的に電解液構成の工夫として、$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ と LiBr の二種類の塩を用いたデュアルソルト系の有効性も検討した。

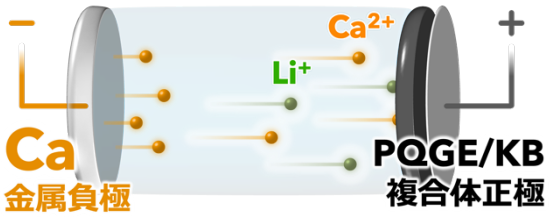


図 2. カルシウム金属負極、PQGE/C 正極、デュアルソルト系電解液を用いたカルシウム金属蓄電池の模式図

２．研究計画

２−１．実験の目的と方針

本研究では、カルシウム金属を負極、PQGE とナノカーボン材料の複合体（PQGE/C）を正極とする二電極型蓄電池を構築し、その電特性を評価した。目的は、PQGE/C 複合材料が多価カチオンの受容体として機能しうるかを検証するとともに、電解液の組成が電池性能に与える影響を明らかにすることである。特に、$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ と LiBr からなるデュアルソルト電解液の有効性について補足的に検討した。

２−２．PQGE の合成と複合電極の作製

液相合成によって合成した PQGE と Ketjen Black（KB）、PVDF を混合し、N-メチルピロリドンを溶媒としたスラリーを調製した。スラリーはアルミニウム箔に塗布後、80 ℃で真空乾燥し、複合電極とした。PQGE と KB の質量比は 50/50 または 67/33 とした。

２−３．電解液の調製

電解液は、$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ を塩とし、LiBr を加えたデュアルソルト系を主として使用した。比較のため、$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ 単独の電解液も調製した。[3] 両者とも、THF と DME の混合溶媒中に 0.3M になるように溶解させ、すべての操作はアルゴン雰囲気下のグローブボックス内で実施した。

２−４．電池セルの構築と測定条件

二極式セルは、ステンレス製セルホルダー内にて、PQGE/C 複合電極（正極）、カルシウム金属板（負極）、セパレーター、80 マイクロリットルの電解液を順に重ねて構成した。電気化学測定は室温下で行い、電流密度 100 mA g^{-1} および 500 mA g^{-1} で充放電特性を評価した。

２−５．電解液特性に関する評価

電解液中の Ca イオンの溶媒和構造の評価には ^{43}Ca、^{1}H、^{17}O NMR を用い、SEI 構成の分析には X 線光電子分光（XPS）を使用した。これにより、電池性能との相関を補足的に明らかにした。

３．計画の進行状況

本研究では、PQGE とナノカーボンの複合体（PQGE/C）を正極とし、カルシウム金属を負極とする二電極型セルを構築し、その蓄電池特性を評価した。まず、比較対象として $Ca(CB_{11}H_{12})_2$ 単独の電解液と、LiBr を加えたデュアルソルト電解液を用いた。正極材料の PQGE/C は、複合比率（PQGE:KB）を 50:50 および 67:33 とし、どちらの組成においても比較的高い電極性能が得られた。

$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ 単独電解液を用いたセルでは、初回サイクルにおける放電容量は約 40 mAh g^{-1} と小さい値を示したが、サイクルを重ねるごとに容量が増加し、5 サイクル目には約 100 mAh g^{-1} に達した（図 3 上）。これは、初期段階における電解液の電極内部への浸透や、電

極界面の安定化が進んだためと考えられる。しかしながら、10 サイクル目以降には、放電開始時の電圧降下が顕著となり、サイクルの進行とともに電圧差が増大した。これは、負極であるカルシウム金属上の Ca 剥離反応の過電圧増大に起因するものであり、電解液の分解生成物による SEI の不安定性が原因と推察された。最終的に、27 サイクル目以降では容量が急減し、50 サイクル時点での放電容量は約 48 mAh g^{-1} に低下、容量保持率は約 46%であった。

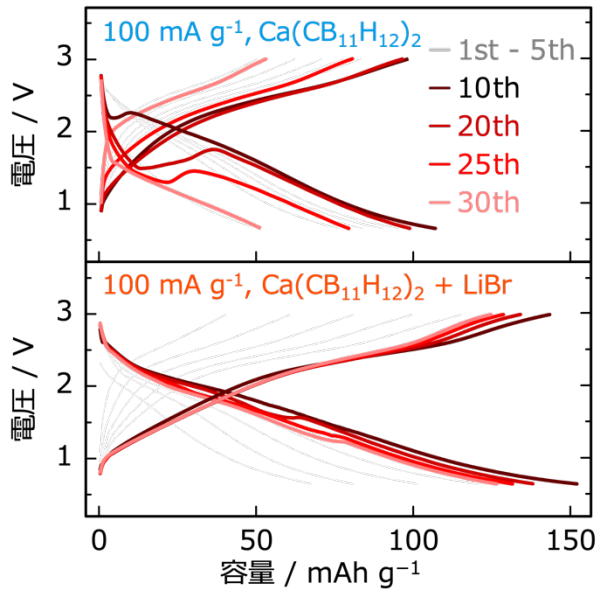


図 3. 電流密度 100 mA g^{-1}、室温、電圧範囲 3.0〜0.5 V において測定した各サイクルにおける充放電特性（上段：$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ 単独電解液使用時、下段：デュアルソルト電解液使用時）

一方、デュアルソルト電解液を用いたセルでは、初期活性化後の放電容量が約 150 mAh g^{-1} に達し、$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ 単独電解液と比較して高い可逆容量が得られた（図 3 下）。また、10 サイクル目以降においても電圧降下は観測されず、安定した充放電挙動が継続した。特に注目すべきは、PQGE/C 比率を 67:33 としたような低炭素含有電極においても、十分なイオン輸送と反応が達成された点である。PQGE の膨潤性および Li イオンの電極内拡散性の向上が、これに寄与したと考えられる。50 サイクル終了時の容量は約 105 mAh g^{-1} であり、10 サイクル時点との比較で 75%の容量保持率を示した。

さらに、500 mA g^{-1} という高い電流密度条件下においても、デュアルソルト電解液使用セルでは高い充放電効率が維持され、20 サイクル以降はクーロン効率がほぼ 100%で安定した（図 4a）。この結果は、Ca 金属負極の可逆性が高く、PQGE/C 複合体が高出力条件でも安定に動作することを示している。200 サイクル後の容量保持率は 75%に達し、これまで報告されている有機正極材料を用いたカルシウム金属電池の中で、最も高いサイクル安定性を示した例の一つである（図 4b）。

電解液の構造的理解のために、NMR および XPS 測定も補足的に行った。NMR により、LiBr の添加が Ca イオンの溶媒和構造に顕著な変化をもたらすことが明らかとなった。特に、Br アニオンの添加により、Ca イオンの第一溶媒和シェルにおける溶媒分子数が減少し、脱溶媒和エネルギーの低下と界面反応の改善が促進された。また、XPS の結果からは、デュアルソルト電解液使用時の SEI 層において $CaCO_3$ の生成が抑制され、代わりに $CaBr_2$ や有機ポリマー成分を含む安定な SEI が形成されていることが確認された。これらの知見は、LiBr 添加によるデュアルソルト戦略が、Ca 金属電池の長期安定化に有効であることを裏付けるものである。

現在までに、PQGE/C 複合正極の合成から電池組み立て、100〜200 サイクルにわたる蓄電特性評価、および関連する電解液解析を完了しており、研究計画の大半は順調に進行している。今後は、より実用的な電池構成（高電位系正極材料、高濃度電解液、低温特性など）への拡張や、他の有機電極材料との比較評価も予定しており、さらなる高性能 Ca 金属電池の設計指針の確立を目指している。

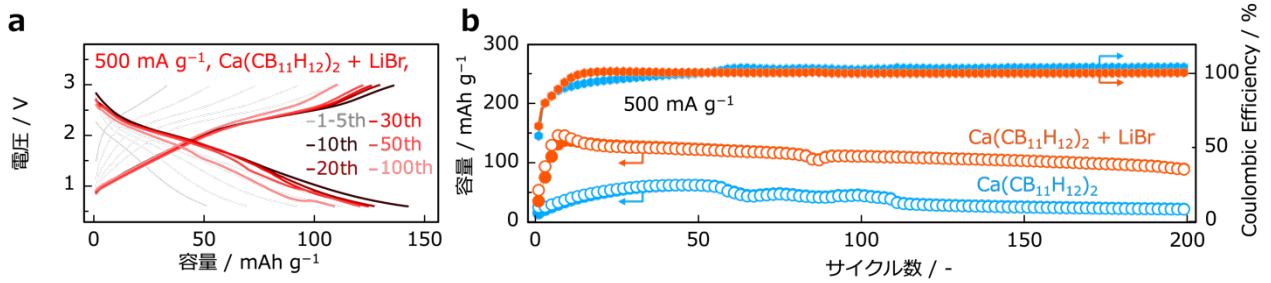


図 4.（a）電流密度 500 mA g^{-1} において、$Ca(CB_{11}H_{12})_2$+LiBr 電解液を用いて測定した Ca/PQGE 電池の充放電プロファイル、（b）$Ca(CB_{11}H_{12})_2$ 電解液又は $Ca(CB_{11}H_{12})_2$+LiBr 電解液を用いたサイクル性能。

４．今後の計画

本研究により、PQGE とナノカーボンの複合正極（PQGE/C）とデュアルソルト電解液の組み合わせが、カルシウム金属蓄電池において優れた充放電特性と長期安定性を示すことが明らかとなった。今後は、より実用的な電池構成の実現に向けて、以下の項目に取り組む予定である。まず、高エネルギー密度化を目指し、高電位系正極材料への展開および電極構造の最適化を進める。また、低温環境下での動作評価を行い、実使用条件における安定性を検証する。さらに、他のキノン系または多電子反応が可能な有機電極材料との比較検討を通じて、Ca 金属電池に適した正極設計の指針を確立し、次世代の高性能・高信頼性蓄電池の実現を目指す。

５．学会、論文等投稿・発表状況

発表実績

[1] 第 52 回電池討論会、“水素化物電解液を用いたカルシウム蓄電池用正極 $NaTi_2(PO_4)_3$ の電気化学評価”、渋谷航平、木須一彰、篠原宝来、石橋孝介、藪浩、折茂慎一、国立京都国際会館（2024 年 11 月）

[2] 電気化学会第 92 回大会、“酸化安定性を向上させた錯体水素化物カルシウムポリマー電解質の合成と電気化学評価”、篠原宝来、木須一彰、古川翔一、図子田健司、折茂慎一、東京農工大学（2025 年 3 月）

[3] 表面技術協会 第 151 回講演大会、“カルシウム金属電析に向けたカルボラン系電解液の開発と蓄電池応用”、木須一彰、東京都市大学（2025 年 3 月）

論文実績

[1] **K. Kisu***, A. Dorai, K. Hatakeyama-Sato, T. Takano, S. Takagi, K. Oyaizu, S. Orimo, Enhanced Durability of Ca Metal Battery with Dual Salt: Synergistic Effect on Solid Electrolyte Interphase and Solvation Structure for Improved Electrodeposition, ACS Appl. Mater. Interfaces, 17 (2025) 1322-1331.

[2] T. Shinohara, **K. Kisu***, A. Dorai, K. Zushida, H. Yabu, S. Takagi, S. Orimo, Complex Hydride-Based Gel Polymer Electrolytes for Rechargeable Ca-Metal Batteries, Advanced Science, (2024) e2308318.

[3] T. Shinohara, **K. Kisu***, S. Takagi, S. Orimo, Investigating the ion conductivity and synthesis conditions of calcium monocarborane solid-state electrolytes, Energy Advances, 3 (2024) 2758-2763.

参考文献

(1) L. Wang, S. Riedel, Z. Zhao-Karger, , Adv. Energy Mater., 14 (2024) 2402157.

(2) K. Oyaizu, W. Choi, H. Nishide, Polym. Adv. Technol., 22 (2011) 1242-1247.

(3) K. Kisu, S. Kim, T. Shinohara, K. Zhao, A. Zuttel, S. Orimo, Sci. Rep., 11 (2021) 7563.

物理モデルと深層展開による水中画像鮮明化

工学部　　前田　慶博

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年，水中の鉱物資源探査，海洋生物の分析，海底捜索や救助活動まで様々な場面において自立型水中探査ロボットなどの活用が注目されている．これらのロボットの正確な動作には鮮明な水中画像の取得が必要不可欠である．しかし，水中画像は特殊な環境で撮影されるため，視認性の悪さ，コントラストの低下，カラーキャストなどによって画質が損なわれることが多く，水中調査に悪影響を及ぼす．このような劣化の主な原因は，水中を透過する光の波長依存性の吸収と散乱による不安定な減衰である．また，水中環境の微小な浮遊粒子の存在も，光の散乱や多重散乱を引き起こし，コントラスト低下や画像全体のボケを引き起こす．したがって，これらの劣化を取り除き鮮明な水中画像を取得することは重要なタスクである．

従来の水中画像の鮮明化では，グレースケールホワイトバランス[1]，ヒストグラム均等化[2]などの単に画素を操作して視覚的に優れた復元結果を得る手法が主流であった．これらの操作はシンプルで効率的である一方，水中画像の特性を考慮しておらず複雑な水中シーンの劣化を改善することは難しい．そこで，水中での光の伝播の物理的な特性を定式化し，逆問題として復元画像を得るモデルベースの手法[3,4]が提案された．モデルベースの手法では光の散乱，吸収などに関していくつかの仮定をもとに水中画像に関して包括的に定式化する．そのため，画素操作による手法よりも頑健性を維持しつつ，それぞれのパラメータの意味を解釈しやすいという利点がある．一方で，水中での複雑な光の伝播を単純な式で表すことは難しく，いくつかのシーンに対しては十分な性能を発揮できないことがある．

近年では，深層学習を用いた学習ベースの水中画像再構成が注目されている[5,6]．深層学習による手法は複雑なモデルを膨大なパラメータで表現するため，幅広いシーンに対して効果的な性能を発揮できるという利点がある．しかし，その内部がブラックボックス化されるためそれぞれのパラメータの意味を解釈しづらく，分析性に乏しいという欠点を持つ．

そこで，従来のモデルベースの手法の反復アルゴリズムの中に学習可能なパラメータを組み込みループ展開し，訓練データによって最適なパラメータを学習する深層展開[7]という手法が注目されている．深層展開は前提知識によって定式化されたモデルを最適化問題として反復アルゴリズムによって解くため，モデルを分析，解釈することが可能である．また，実際のデータを用いて学習可能なパラメータを調整するため，幅広いシーンに対応する柔軟性を併せ持つ．

従来の水中画像を扱う深層展開手法では，水中画像の劣化モデルを最適化問題として扱い，補助変数を Convolutional Neural

Network(CNN)によって求める．しかし，この手法では CNN 部分において水の吸光特性により赤色に近い波長ほど減衰しやすいという特性を考慮できていないという問題がある．

本稿では，深層展開を活用した水中画像鮮明化手法において，水の吸光特性を考慮した手法の構築を目指す．そして，深層展開と水の吸光特性を陽に活用することで，高度な水中画像の鮮明化を実現することを目的とする．

２．研究計画

本研究課題は，(1) 水の波長毎の特性を考慮した水中画像の鮮明化手法の検討，(2) 包括的な物理モデルによる水中画像鮮明化手法の検討を行う．

(1) 水の波長毎の特性を考慮した水中画像の鮮明化手法の検討

水の吸光特性は波長毎に異なり赤色に近い波長ほど，より吸収されることが知られている．これにより，水中画像は，青色は画像全体で強く存在するが，赤色はエッジ領域など局所領域にしか強く現れない．しかし，従来研究では，RGB の波長毎に異なる特性を持つ物理モデルは用いられてこなかった．これは，前述の通り，不良設定問題であるため，この事前知識を導入すると問題を解くことが困難であったためである．

本項目では，深層展開というフレームワークを用いることで水の波長毎の吸光特性の違いを導入した物理モデルによる水中画像鮮明化手法を実現する．具体的には，RGB の色毎に異なる注目範囲を設定した物理モデリングを行う．そして，これを深層展開における Convolutional Neural Network 部分にて表現することで実現する．本項目は，一部，検討が進んでおり，水の波長毎の吸光特性を導入することで性能改善することが確認できている．

(2) 包括的な物理モデルによる水中画像鮮明化手法の検討

水中画像においては，水の波長毎の吸光特性の違いによる劣化だけではなく，細かな粒子による光の散乱現象による劣化も発生する．光散乱による劣化は，大気から光の強度や透過率によっても強度が大きく変わる．従来研究では，これを詳細に表現すると最適化問題として解くことができないため，大気光の強度や透過率などを仮定することで，物理モデルを簡略化していた．

本項目では，(1) での検討に加えて，細かな粒子による光散乱の影響も詳細にモデリングすることで，包括的な水中での劣化要因を考慮した水中画像鮮明化手法の検討を行う．これは，これらの現象を表現する物理モデルを構築し，深層展開というフレームワークへの適用方法を検討することで実現する．

３．計画の進行状況

前述の通り，本研究課題では，水中画像鮮明化というタスクに対して，水の吸光係数等の物理モデルを明示的に導入する．そして，深層展開というアプローチを用いることで，これの実現を目指すものである．

本章では，これの検討結果として，考案した手法（以下，提案手法）とその実験結果について報告する．

3.1.　提案手法の概要

提案手法の概要を図 1 に示す．水中劣化画像Iに対して透過マップt_0, A_0を算出する．これらを初期値として各ステージブロックでは以下の処理が行われる．まず，k番目のステージブロックに入力された中間変数J^{k-1}に対して，Color Loss 補正を行う．次に，補正された中間変数に対してモデルベースに基づく反復式による更新を行う．最後に，得られた中間変数を CNN に入力し補助変数の更新を行い，中間変数J^kおよび補助変数 $\tilde{J}^k, \tilde{t}^k$を，$k+1$番目のステージブロックへと渡す．

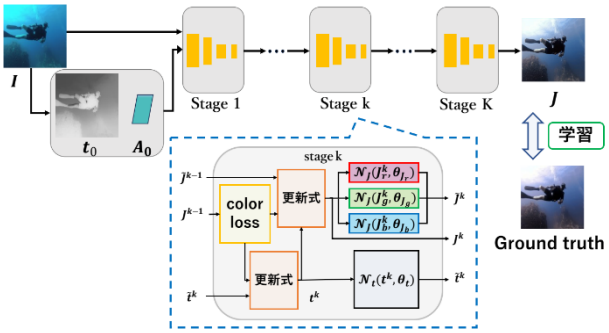


図 1 提案手法の概要

3.2. 定式化

水中劣化画像をI，潜在的な鮮明画像をJとすると$c(\in\{\mathrm{R},\mathrm{G},\mathrm{B}\})$チャンネルの画素位置$p$における水中画像の劣化モデルは以下のように定式化される．

$$I_c(p)=J_c(p)t_c(p)+A_c(p)\big(1-t_c(p)\big), \qquad (1)$$

なお，$t_c(p),A_c(p)$はそれぞれcチャンネルの画素位置pにおける透過マップと大気光である．

式(1)は最適化問題として以下のように定式化される．

$$\min_{J,t}\mathcal{F}(I_A,(J-A)t)+\mu_t\mathcal{F}(t,\tilde{t})+\mu_J\mathcal{F}(J,\tilde{J}) +\psi(\tilde{t})+\phi(\tilde{J})+\mathcal{G}(J), \qquad (2)$$

なお，$\mathcal{F}(x,y)=1/2\,\|x-y\|_2^2, I_A=I-A$である．また，$\tilde{J},\tilde{t}$および$\psi(\tilde{t}),\phi(\tilde{J})$は補助変数及びそれに対する正則化項であり，$\mu_t,\mu_J$はパラメータである．更に，$\mathcal{G}(J)$は Color Loss と呼ばれる正則化項である．

3.3. 中間変数の更新

式(2)より得られる更新式を用いて，最適化を行う：

$$t^{k+1}=\frac{I_A\big(J'^{(k)}-A\big)+\mu_t^{(k)}\tilde{t}^{(k)}}{\big(J'^{(k)}-A\big)\big(J'^{(k)}-A\big)+\mu_t^{(k)}}, \qquad (3)$$

$$J^{k+1}=\frac{\big(I_A+At^{(k+1)}\big)t^{k+1}+\mu_J^{(k)}\tilde{J}^{(k)}}{t^{(k+1)}t^{(k+1)}+\mu_J^k}, \qquad (4)$$

$$\big(\mu_J^{(k+1)},\mu_t^{(k+1)}\big)=\big(\eta_J\mu_J^{(k)},\eta_t\mu_t^{(k)}\big),\ \text{with}\ \eta_J,\eta_t>1, \qquad (5)$$

なお，kは反復回数を表し，η_J,η_tおよびμ_J,μ_tは学習可能なパラメータである．

3.4. CNN による補助変数の更新

式(3)，(4)によって得られた値を用いて，

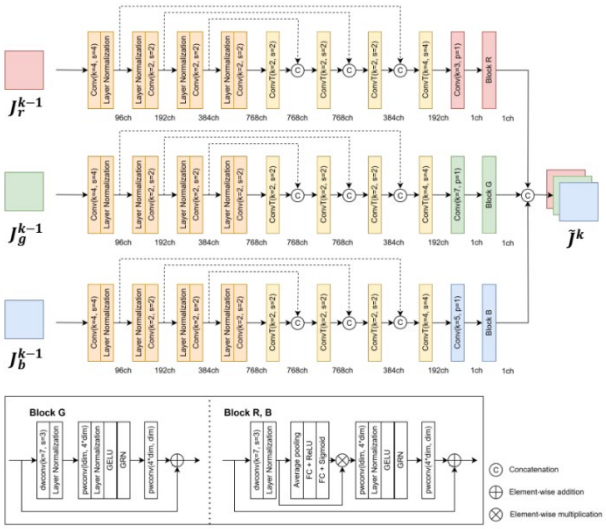


図 2 提案手法のネットワーク構造

次式により補助変数を求める．

$$\tilde{J}_c^{(k+1)}=J_c^{(k+1)}-\mathcal{N}_J\big(J_c^{(k+1)},\theta_{J_c}\big), \qquad (6)$$

$$\tilde{t}^{(k+1)}=t^{(k+1)}-\mathcal{N}_t\big(t^{(k+1)},\theta_t\big), \qquad (7)$$

なお，$\mathcal{N}_{J_c}$と$\mathcal{N}_t$は，それぞれ学習可能なパラメータθ_{J_c}とθ_tを持つ CNN を表す．ネットワーク構造は図 2 に示す．水中画像では吸収されやすい赤色は小さな構造物に現れやすく，吸収されにくい青色は画像全体に現れやすいことが知られている．そのため，提案手法では，これを表現するためにチャネルごとに異なる受容野を設定する．また，最後の畳み込み層では平均値プーリングを用いて Weight Map を算出し，画素ごとに重み付けすることにより RGB ごとに特徴的な領域に注意を向けさせる．

3.5. 評価実験

- 実験環境

学習には実際の水中画像と鮮明化された正解画像 890 組から構成される UIEB データセットから 800 枚を学習用，90 枚を評価用として使用した．学習用の画像は 512×512 にリサイズしており，バッチサイズは 2，エポック数 100，ステージブロックの繰り返し回数を$K=5$とした．最適化アルゴリズムを AdamW，学習率を 0.0002，損失関数には L1 損失を用いて学習を行った．

表 1： 数値評価結果

Method	従来手法 [1]	提案手法
PSNR↑[dB]	17.85	**20.90**
SSIM↑	**0.82**	0.80
UIQM↑	2.67	**3.09**

定量評価には構造的な類似性を評価する PSNR, SSIM および水中画像の評価に一般的に用いられる UIQM を採用した． UIQM は彩度，鮮明さ，コントラストを数値化する非参照の水中画像評価指標である． 実験環境として CPU は Intel Corei7-11700， GPU は NVIDIA GeForce RTX 3090 を使用し， Pytorch で実装した．

● 実験結果

表 1 にテスト用の画像 90 枚に対して PSNR, SSIM, UIQM を測定した平均値を示す．表 1 より， 提案手法が PSNR, UIQM において従来手法を上回っていることが確認できる．

図 3 にテスト用の画像に対して従来手法及び提案手法によって鮮明化を行った画像を示す． 図 3 より， 従来手法では全体的に赤や緑に偏った復元結果であった画像に対して， 提案手法ではより自然な色合いの復元が可能になっている様子が確認できる．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後は，さらなる性能向上を目指して以下の点について検討を進めていく予定である．第一に，深層展開ネットワークにおける構造の最適化を行い，より複雑な水中環境に対しても高い再現性能を維持できる汎化能力の高いモデルの設計を目指す．第二に，現行モデルで導入している正則化項の選定とその重み付けの最適化についても検討を行い，復元画像の自然性および定量評価指標 (PSNR, SSIM, UIQM) のさらなる改善を図る．また，同様のフレームワークで実現可能な，霞除去や雨筋除去への適用を検討する．学会，論文等投稿・発表状況は，次の通りである．

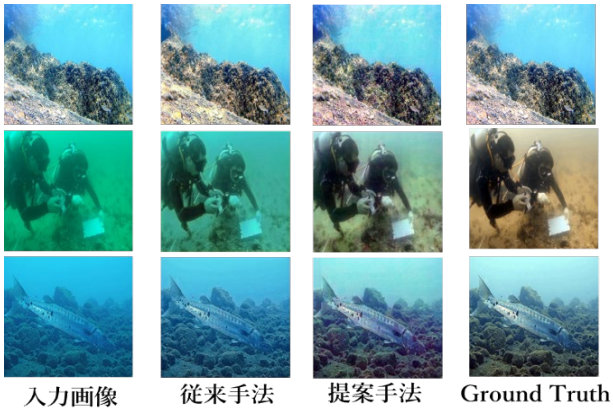


図 3 視覚評価

【発表文献】

1. 水野辰彦，前田慶博，栗原康佑，浜本隆之，“水の吸光特性を考慮した深層展開による水中画像鮮明化，” 映像情報メディア学会年次大会 2024，12A-2，2024.

（その他，投稿準備中：1 編）

参考文献

[1] K. Iqbal *et al.*, “Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method,” in Proc. IEEE SMC, 2010.

[2] M. S. Hitam *et al.*, “Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement,” in Proc. ICCAT, 2013.

[3] Y. Schechner and N. Karpel, “Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005.

[4] K. He *et al.*, “Single image haze removal using dark channel prior,” in Proc. IEEE/CVF CVPR, 2009.

[5] C. Li *et al.*, “An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond,” IEEE TIP, 2020.

[6] C. Li *et al.*, “Underwater scene prior inspired deep underwater image and video enhancement,” Pattern Recognit., 2020.

[7] R. Liu *et al.*, “Compounded layer-prior unrolling: A unified transmission-based image enhancement framework,” in Proc. IEEE ICME, 2019.

走行中給電モビリティの電源技術革新

工学部　　畑　勝裕

共同研究者
東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻　　増田　祐一

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

脱炭素社会実現に向けて、各種モビリティの電動化が注目されるが、電池性能の限界により、EV 普及は停滞期に入りつつある。昨今の電動モビリティは電池搭載量と航続距離が強く結びつき、高性能電池と急速充電技術の開発が急務とされるが、本研究では、高性能電池の大量生産と大量消費に頼るモビリティ社会像とは異なる、真に持続可能なモビリティ社会の実現に向けた将来の研究開発の道筋を示すことを目標に掲げている。

本研究では、走行中の EV に電力インフラから直接エネルギー供給を行う「走行中ワイヤレス給電技術」をキー技術として、電車のように、大きなエネルギーの持ち運びが不要なモビリティ社会を目指す。当該技術はすでに世界各国で公道実証実験が行われている状況にあるが、大規模インフラ構築が必要であることから、個々のシステム最適化はまだ課題が残っている。本研究では、走行中ワイヤレス給電による高頻度給電に対応した電源システム開発に取り組み、将来モビリティの電源技術革新につなげる。

当初計画では、走行中ワイヤレス給電システムに関する回路設計と制御開発のみを行う予定であったが、当研究室に配属された学部３年生が積極的に研究開発に取り組んだ結果、以下に示す３つの成果が得られたため、各成果の概要について報告する。

２．85 kHz 帯の導波路方式ワイヤレス給電（発表実績 1，3）

ワイヤレス給電技術は電気自動車（EV）や携帯端末、医療機器などの多様な用途で活用が期待されている。特に EV 分野では、走行中のエネルギー供給が可能な走行中ワイヤレス給電技術が注目されている。しかし、従来の磁界方式は給電範囲の拡大や漏洩磁界の抑制などに課題が存在する。

先行研究では、従来方式と異なる導波路を用いたワイヤレス給電を提案し、長手方向の給電範囲拡大が容易、かつ、漏洩磁界が少ない走行中給電に適した導波路方式を実現した。しかし、MHz 帯で試作した導波路の伝搬損失が課題となっており、周波数最適化による損失低減が不可欠である。

本研究では EV 応用を想定し、動作周波数を 85 kHz とした導波路を試作し、その伝搬損失と給電効率を測定した。また、得られた結果に基づいて kHz 帯の導波路方式ワイヤレス給電の実用性を検討した。

導波路方式のワイヤレス給電では、群速度が劇的に遅い伝搬特性を持つ導波路に電磁波を閉じ込め伝搬させながら、受電コイルとの磁気結合によって電力を吸い出すことで電力伝送を行う。伝搬/結合/終端の３つの領域で構成され、導波路を延長しても結合強度を維持できるため、給電範囲拡大と高効率給電の両立が期待できる。

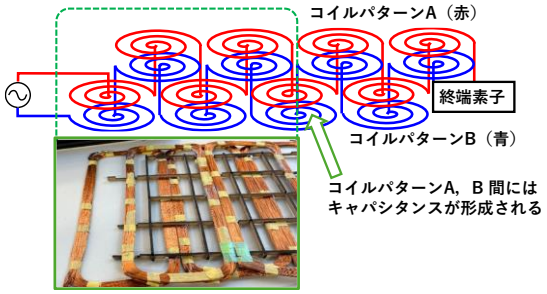


図１　試作した導波路

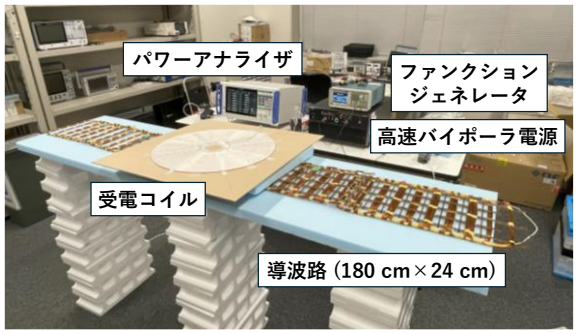


図２　導波路方式ワイヤレス給電の実験風景

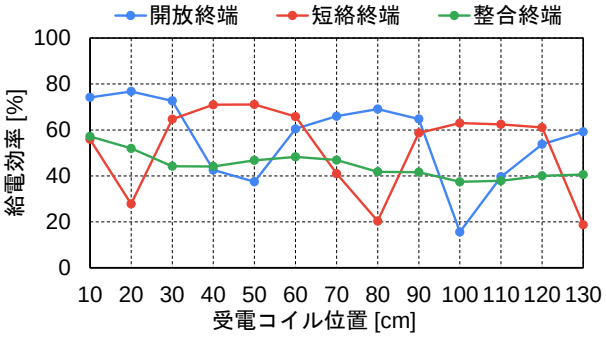


図３　各条件における給電効率の測定結果

本研究において試作した導波路の構造を図１に示す。コイルパターン A，B は波長短縮に十分なインダクタンス、キャパシタンスを有し、低周波の電磁波伝搬を可能にする。また、電磁波伝搬に伴う磁場形成によって受電コイルとの磁気結合およびワイヤレス給電を実現する。測定風景を図２に示す。ファンクションジェネレータと高速バイポーラ電源を用いて交流電源を構成し、パワーアナライザを用いて伝搬損失および給電効率を測定した。

測定結果より、動作周波数の低周波化によって伝搬損失を低減できるが、給電効率は負荷抵抗や終端条件、受電コイル位置に応じて変化することが確認された（図３）。

今後は導波路の Q 値改善などによる給電効率の向上、基礎理論の構築と設計手法の明確化に取り組む計画である。

３．パラメータ変動時の効率特性の検証（発表実績 2，5）

電気自動車の一充電当たりの航続距離の短さや充電時間の長さといった課題を解決するため、磁界共振結合方式による走行中ワイヤレス給電(Dynamic Wireless Power Transfer：DWPT）が注目されている。

磁界共振結合ワイヤレス給電は、送電側と受電側の共振周波数を電源周波数に一致させることで、高効率かつ位置ずれに強い特性を有する。しかし、この技術を DWPT に応用する際、温度変化や製造誤差などによって素子のパラメータが変動し、送電側および受電側の共振周波数がずれ、電源周波数と一致しなくなる可能性がある。このように共振ずれが生じると、効率を含む電気的特性に悪影響を及ぼす恐れがある。

先行研究では、共振ずれ時の効率特性に関して、理論解析やシミュレーションによる検証、計測器を用いたパラメータ測定は行われているが、電源を用いた電力伝送実験や効率測定は行われていない。そのため、本研究では電源を用いたワイヤレス電力伝送実験を行い、共振ずれ時の効率特性に対する理論解析の妥当性を検証する。

実験に使用した送受電コイルを図４に示す。送電側の共振周波数は EV 用途の 85 kHz 帯の下限付近である約 81 kHz となるように設計した。また，受電側の共振周波数は静電容量が異なるキャパシタ回路によって，共振ずれの程度を５段階で表現した。

実験機のセットアップを図５に示す。電源はファンクションジェネレータと高速バイポーラ電源を組み合わせ、交流電源として使用した。動作周波数は送電側の共振周波数と等しい 81.4 kHz、振幅は 5 V の正弦波電圧とした。負荷は無誘導抵抗を使用し、給電効率は電源端と負荷端に電圧プローブおよび電流センサを接続し、パワーアナライザを用いて測定した。



図４　試作した送受電コイル

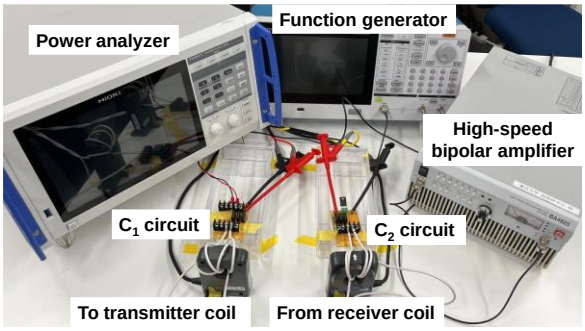


図５　磁界共振結合ワイヤレス給電の実験機

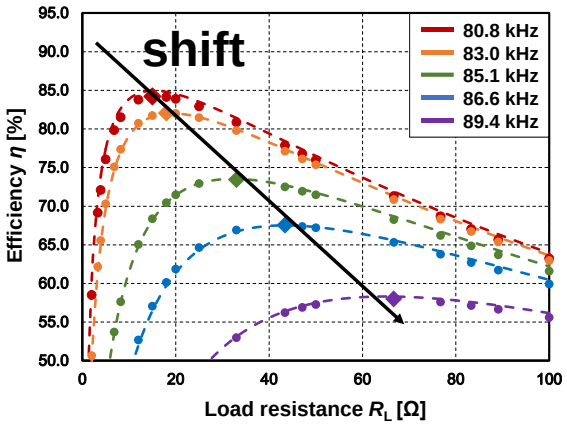


図６　パラメータ変動時の効率測定

共振ずれ時の効率特性の測定結果を図６に示す。点線は理論値、点は実験での実測値である。いずれの条件でも、負荷抵抗の変化に応じて効率ピークが存在し、共振ずれの程度が大きくなるにつれ最大効率を与える負荷抵抗は大きくなった。この結果は理論解析と十分に一致しており、今回の実験により先行研究の理論解析の妥当性が示された。

以上の結果より、理論解析に基づく負荷抵抗の最適化が有効であり、共振ずれの程度に応じて負荷側の振る舞いを制御することで効率を向上できることを確認した。

４．受電側電力変換によるリプル特性の検証（発表実績 4，6）

ワイヤレス給電のアプリケーションの一例として、電気自動車や電子機器のバッテリー充電が挙げられる。充電制御のために DC-DC コンバータを接続する場合、そのスイッチング周波数はワイヤレス給電の電源周波数と一致させる必要はなく、任意に設計できる。

しかし、両周波数の差であるビート周波数は電圧や電流に振動を生じさせるため、周波数設計には注意が必要である。また、電圧安定化およびリプル低減のために用いられる平滑キャパシタは、静電容量が大きいほど平滑作用も大きくなるが、素子の大きさとのトレードオフを有しており、仕様に応じて適切に設計されるべきである。

本研究では、受電側における適切なスイッチング周波数設計と回路の小型化・高効率化を目的として、ビート周波数および平滑キャパシタ容量の違いによるリプル特性の変化について、実験を通して明らかにする。

本研究で検討するシステムの構成例を図７に示す。ワイヤレス給電には磁界共振結合方式を採用し、送受電器はそれぞれの共振周波数が電源周波数に一致するように決定した。送電側回路では、ハーフブリッジインバータで直流-交流変換を行い、ワイヤレス給電回路に交流電圧を印加した。受電側回路では、ダイオードフルブリッジ整流回路で交流-直流変換を行い、DC-DC コンバータを介して負荷に電力供給を行った。整流回路と DC-DC コンバータの間には平滑キャパシタを接続した。

実験の様子を図８に示す。電源電圧は 6 V，電源周波数は 84.6 kHz とし，矩形波電圧をワイヤレス給電回路に印加した。DC-DC コンバータのデューティ比は 50 %，負荷は 50 Ω の無誘導抵抗を使用した。整流後の平滑キャパシタ容量は 1 μF と 100 μF の 2 通り，スイッチング周波数は電源周波数の 1/6 である 14.1 kHz から 98.7 kHz の間で変化させた。

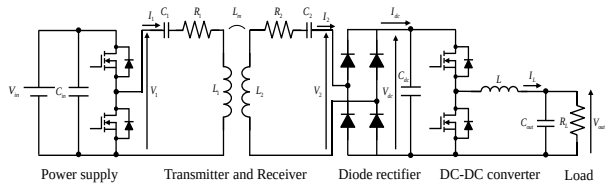


図７　ワイヤレス給電システムの回路構成

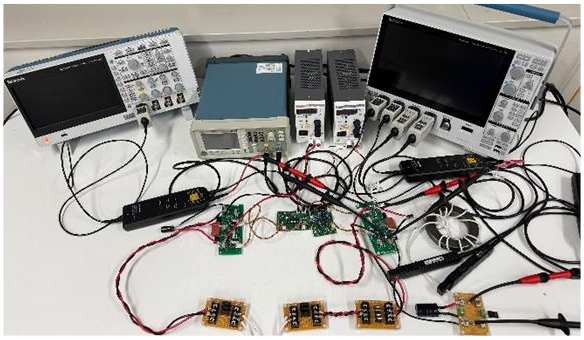


図８　ワイヤレス給電システムの実験風景

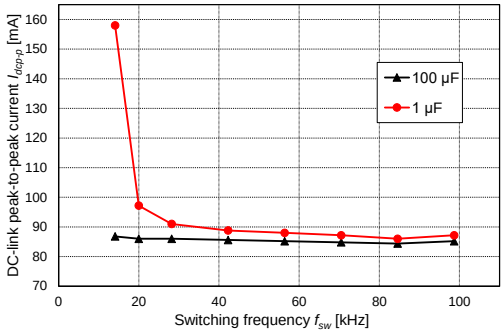


図９　周波数変化に対するリプル電流特性

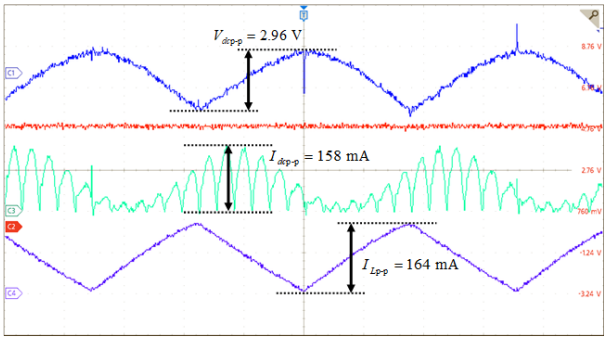


図１０　リプル波形の測定結果

スイッチング周波数とリプル電流の関係を図９に示す。平滑キャパシタの静電容量が小さく、さらにスイッチング周波数が電源周波数の 1/5 を下回った場合、整流回路から流れる電流の peak-to-peak 値が顕著に悪化した。また、図１０に示す通り、整流回路から流れる電流の振幅が時間的に変化し、その包絡線はスイッチング周波数と同じ周期で変動していたが、他の波形とは位相が異なっていた。

今後はこの現象の理論化と受電回路小型化に向けた周波数設計に取り組む。

５．発表実績

(1) Yuichi Masuda, Naoya Takahashi, Katsuhiro Hata, and Hiroyuki Shinoda, “A Waveguide Power Transfer for Electric Vehicles in Motion,” 7th International Electric Vehicle Technology Conference 2025 (EVTeC 2025), Yokohama, Japan, May 2025. (5p) (to be presented)

(2) 廣田英治，畑勝裕,「磁界共振結合ワイヤレス給電の共振周波数ずれ時における効率特性の実験検証」令和７年電気学会全国大会，4-072，pp. 115-116，東京，2025 年 3 月.

(3) 高橋直也，畑勝裕，増田祐一,「85 kHz 帯の導波路方式ワイヤレス給電における効率測定」令和７年電気学会全国大会，4-076，pp. 123-124，東京，2025 年 3 月.

(4) 古川啓太，畑勝裕,「ワイヤレス給電システムにおけるビート周波数と平滑キャパシタ容量に起因するリプル特性の検証」令和７年電気学会全国大会，4-102，pp. 165-166，東京，2025 年 3 月.

(5) Eiji Hirota and Katsuhiro Hata, “Experimental Verification of Wireless Power Transfer Efficiency with Coupling Coefficient Change under Resonance Frequency Mismatch,” 2024 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2024), Taichung, Taiwan, Dec. 2024. (4p)

(6) Keita Furukawa and Katsuhiro Hata, “Evaluation of Characteristic Changes Based on the Relationship Between Power Supply Frequency and Switching Frequency of the Receiving-side DC-DC Converter in Wireless Power Transfer,” 2024 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT 2024), Taichung, Taiwan, Dec. 2024. (4p)

半導体量子コンピュータにおけるゲート分解

工学部 情報・通信工学課程 情報工学コース　金尾 太郎

共同研究者
帝京大学 理工学部 情報電子工学科　棚本 哲史

１．序論

量子コンピュータのハードウェアの候補の 1 つとして半導体を用いたものが研究されている．半導体量子コンピュータは，従来の半導体チップの製造技術を応用して大規模化できる可能性があると期待されている．現状では 10 量子ビット規模であるが，その理由は，一つには，半導体量子ビットのサイズが小さく，実験室レベルでは作製が難しいためと考えられる．最先端の半導体製造設備を備える企業の参入により今後大規模化が進むと期待される．こうした背景のもと，本研究では多数の半導体量子ビットを有効に活用する方法の構築を目的とした．

半導体量子コンピュータの量子コンピュータとしての動作の研究は始まったばかりであると言える．量子コンピュータとして動作させるためには，抽象的な量子計算の操作を，ハードウェアで実行可能なゲート操作などの具体的操作に分解する必要がある．そこで本研究の課題名を「半導体量子コンピュータにおけるゲート分解」とした．現状のハードウェアではノイズの影響が避けられず，コンピュータとしての動作を研究する上でもそうした影響を考慮する必要がある．本研究では，ハードウェアの物理的実体に踏み込み，ノイズの影響を取り入れた．

本研究では具体的な内容として以下の 2 つを計画した．

1. 半導体量子コンピュータにおける高精度な多量子ビット操作の構成方法
2. 半導体量子ビットアレイを用いたリザバー計算

このうち，学外において発表することができた 2 番目の計画について以下では報告する．この研究は帝京大学の棚本哲史教授と大学院生の御船詩音氏との共同研究である［論文発表 1，学会発表 1，2］．

リザバー計算は，ハードウェアにおいて実行可能な操作を有効利用してハードウェアの計算能力を引き出す方法であり，機械学習に応用される．すなわちリザバー計算は物理システムをニューラルネットワークとして用いた機械学習手法である．主に時系列データ処理に応用される．時系列データ処理に用いられる一般的なリカレントニューラルネットワークと比較して，リザバー計算では高速に学習ができるという長所がある．これは，一般のリカレントネットワークではネットワークの内部結合の重みを学習する際に複雑な計算が必要になる一方，リザバー計算では出力部分の重みのみを学習するため線形回帰のみで済むためである．物理システムをそのままネットワークとして利用できるため様々な提案がなされている．

量子系を用いたリザバー計算はまず核磁気共鳴系において提案され，それが有効であることが示された［参考文献 1］．そこで本研究

では現状の 10 量子ビット規模の半導体量子ビット系をそのままリザバー計算に応用できないかを明らかにすることを目的とした．

2．研究方法

半導体量子コンピュータにおいて量子ビットを実現するには様々な方法があるが，本研究では半導体量子ドットに閉じ込められた電子のスピン角運動量が生じる 2 準位系を量子ビットとして用いる．これをスピン量子ビットと呼ぶ．図 1 に本研究でのスピン量子ビットの配置を示す．円形がスピン量子ビットを表す．現状の実験的報告に従い，1 次元的な配置としている．直線状に並んだ場合（Linear）と環状の場合（Ring）を検討した．量子ビット数を$N_q = 6$とし，全てをリザバーとして用いる．図 1 の量子ビット同士を結ぶ線は，それらの量子ビット同士に相互作用があることを示す．本研究では相互作用を次式のハミルトニアンで表されるハイゼンベルク相互作用とした．

$$H_{\mathrm{int}} = \sum_{i,j}^{N_q} J_{ij}\left(X_i X_j + Y_i Y_j + Z_i Z_j\right).$$

ここで，X_i, Y_i, Z_iはパウリ行列を，J_{ij}は相互作用の強さを表す．スピン量子ビットに対しては，この相互作用を交換相互作用により自然に実現することができる．

1 番目の量子ビットにのみ入力信号を加える．本研究では入力信号をパルス磁場の値として与えた．これは先行研究［参考文献 1］と大きく異なる点のうちの一つである．先行研究では入力信号は量子ビットの状態の一種のリセットとして与えられた．その場合には量子ビットの測定とフィードバックが必要とされる．本研究の磁場による入力は先行研究に比べて半導体量子ビットにおいてより実現しやすいと期待される．パルス磁場により次式の，量子ビットの回転が引き起こされる．

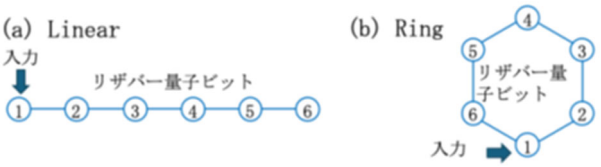


図 1. スピン量子ビットの配置．(a) 直線状．(b) 環状．

$$R_X(s_k) = \exp\left(\frac{i\pi s_k}{2} X_1\right).$$

ここで，s_kは入力信号を表す．

各スピン量子ビットからの測定値を，Z方向のスピンの期待値$\langle Z_i \rangle$とする．各時間ステップkにおける$\langle Z_i \rangle$をx_{ki}と置き，重みw_iをかけて足し合わせることでリザバー計算の出力y_kとする．その際，以下の 2 通りの方法を用いた．

Type I

$$y_k^I = \sum_{i=0}^{N_q} x_{ki} w_i.$$

Type II

$$y_k^{II} = x_0 w_0 + \frac{w_1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} x_{ki}.$$

ここで，$x_{k0} = 1$が定数項として追加されている．学習ステップの間に理想的な出力$\bar{y}_k$との誤差が小さくなるように重みw_iを定める．その際最小二乗法を用いる．

ここまで述べた方法によりリザバー計算が可能かどうかを試みたところ，そのままではリザバー計算ができないことが明らかになった．その原因として，系の時間発展が可逆なために，現在の出力が遠い過去の入力に依存してしまい一貫した計算結果を出力できないことが考えられた．そこで次式により表される散逸を取り入れることとした．

$$\rho_{k+1} = U_k \rho_k U_k^{\dagger} + \gamma |0, \cdots, 0\rangle\langle 0, \cdots, 0|.$$

ここで，ρ_kは系の状態を表す密度演算子，U_kはステップkにおける時間発展演算子，γは減衰率を表す．この散逸モデルは振幅減衰モデルと呼ばれ，確率γで全てのスピンがアップ状

態なり最低エネルギー状態に落ち込むという状況を意味する．現実のスピン量子ビットでは個別にスピンが反転するなどの過程を経るが，本研究ではまずはシンプルな上記モデルにより散逸があること自体の影響を調べた．

ある系においてリザバー計算が可能であるためには，その系は短期記憶能力と非線形性を持つ必要がある．そこで，本研究の系のリザバーとしての能力を評価するために，短期記憶タスクと非線形自己回帰移動平均（nonlinear autoregressive moving average, NARMA）タスクを用いた．短期記憶タスクでは目標出力 $\bar{y}_k$を数ステップ前の入力値とする．

$$\bar{y}_k = s_{k-\tau_B}.$$

ここで，τ_Bは遅延時間（ステップ数）である．

NARMA タスクでは，目標出力は以下の漸化式によって与えられる．

NARMA2：

$$\bar{y}_{k+1} = 0.4\bar{y}_k + 0.4\bar{y}_k\bar{y}_{k-1} + 0.6s_k^3 + 0.1.$$

NARMA n：

$$\bar{y}_{k+1} = a\bar{y}_k + b\bar{y}_k\left(\sum_{j=0}^{n-1}\bar{y}_{k-j}\right) + cs_{k-n+1}s_k + d.$$

次数nが大きいとき，より遠い過去の記憶が必要とされる．a,b,c,dはある値を持ったパラメータである．

３．研究結果

まず，短期記憶タスクの結果を図 2 に示す．相関係数の二乗（縦軸）が大きいほど短期記憶能力が大きいことを示す．図 2 より Type I，$\gamma = 0.1$のとき特に短期記憶能力が大きいことがわかる．すなわち，まず本研究の系は短期記憶能力を持つことが示された．また，$\gamma = 0.1$の場合の方が$\gamma = 0.01$の場合より短期記憶能力が大きいことから散逸が重要であることがわかる．直線状と環状の比較では，環状の方が短期記憶能力は大きかった．

次に，NARMA タスクの結果を図 3，4 に示す．図 3 は直線状の場合，図 4 は環状の場合である．ここで，Type I より Type II の方がやや

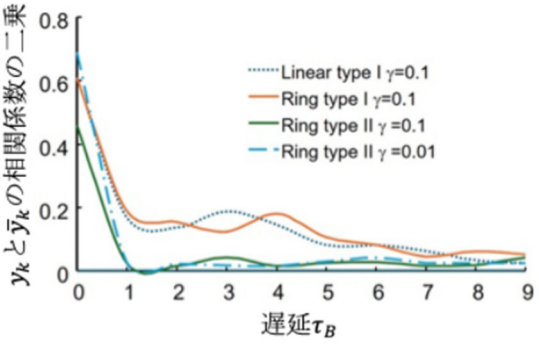


図 2．短期記憶タスクの結果．

結果が良かったため，Type II の場合を示している．図中の青色の線が目標出力を表し，オレンジ色の線がリザバーの出力を表す．これら 2 つの線がより一致しているほどリザバーの性能が高いことを示す．

図 3，4 の両方において，γがより大きい場合に，目標出力により近い波形が得られていることがわかる．したがってこのタスクにおいても散逸が大きい方が性能が良いことが明らかになった．このことはy_kと$\bar{y}_k$の平均二乗誤差を用いた定量的比較によっても確かめられた．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今回の研究により，半導体スピン量子ビットアレイにおいて，散逸があることによりリザバー計算が可能になることがわかった．今後の課題として，散逸のモデルをより現実的なものにした場合の性能の評価が挙げられる．リザバー計算以外にも，半導体量子ビットを有効に活用する方法を検討していく．

学会発表

1. Shion Mifune, Taro Kanao, and Tetsufumi Tanamoto, The effects of dissipation in reservoir computing using spin qubit array, 2024 International Conference on Solid State Devices and Materials

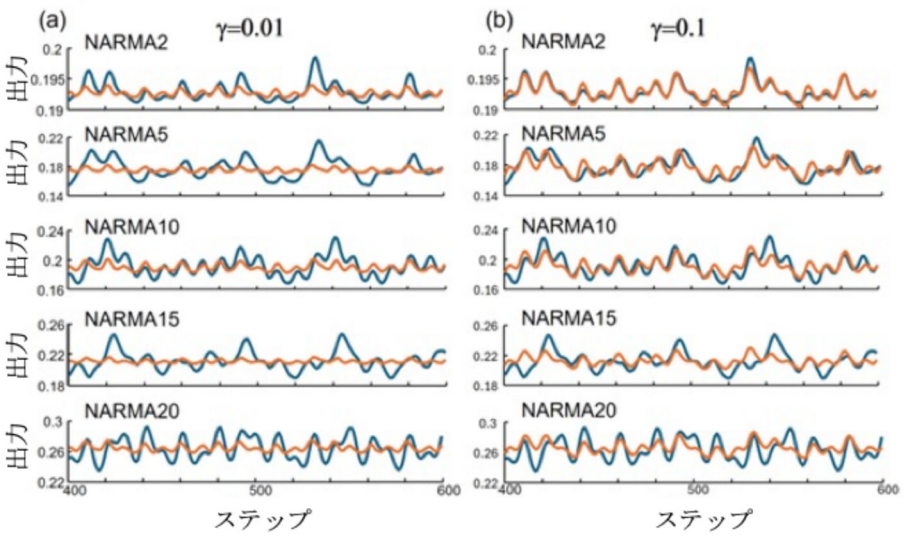


図 3. NARMA タスクにおいて得られた典型的な出力波形.直線状の場合を示す. (a) $\gamma = 0.01$. (b) $\gamma = 0.1$.

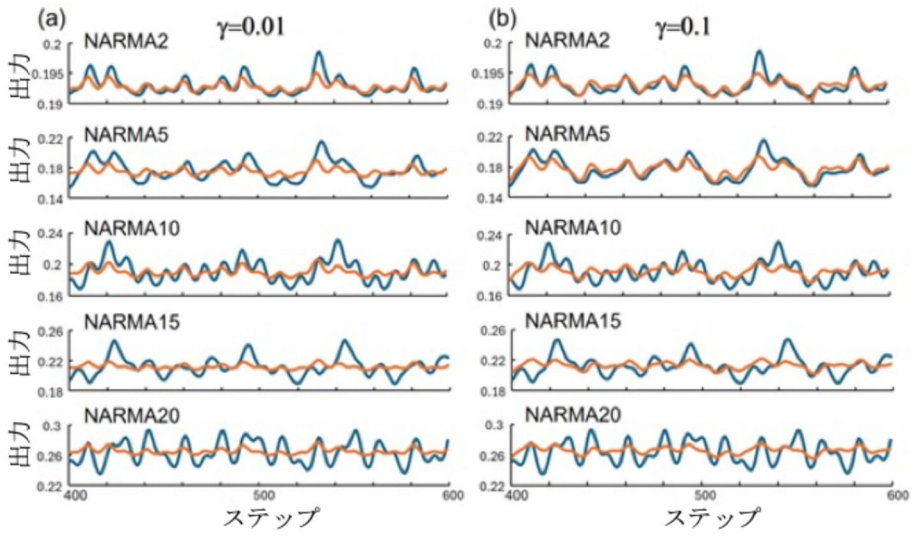


図 **4.** 環状の場合. その他の設定は図 3 と同じである.

(SSDM2024), Himeji, Hyogo, Japan, 2024/9/1-4, Poster presentation, PS-09-01.

2. 御船詩音, 金尾太郎, 棚本哲史, スピン量子ビットアレイを使用したリザバーコンピューティングにおける散逸の影響, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025/3/18-21, 申請者による口頭発表, 21aD1-2.

論文発表

1. Shion Mifune, Taro Kanao, and Tetsufumi Tanamoto, Effects of dissipation in reservoir computing using spin qubit array, Japanese Journal of Applied Physics, **64**, 04SP08, 2025/4/2.

参考文献

1. Keisuke Fujii and Kohei Nakajima, Harnessing Disordered-Ensemble Quantum Dynamics for Machine Learning, Physical Review Applied, **8**, 024030, 2017.

細胞加工を促進する細胞培養基板の探索

システム理工学部（生命科学科）　　髙山　祐三

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

ヒト人工多能性幹細胞（iPS 細胞）をはじめとする多能性幹細胞から、神経細胞や心筋細胞など非増殖性の機能的細胞を作製する技術開発は、疾患モデル構築、創薬研究、さらには再生医療の実現に向けて、極めて重要な基盤技術として世界的に注目されている。しかしながら、ヒト iPS 細胞から目的とする細胞への誘導は、多段階かつ長期間にわたる培養工程が必要であり、培養操作の煩雑さや、成長因子をはじめとする高価な試薬の継続的な使用によるコスト高が課題となっている。これらの問題は、基礎研究レベルでは許容されても、臨床応用や産業利用を目指したスケールアップを考えた際には極めて重大な障害となりうる。

近年、このような課題に対する画期的な解決策として、「ダイレクトリプログラミング（直接細胞誘導）」技術が注目されている[(1)]。ダイレクトリプログラミングとは、iPS 細胞等の中間段階を経ずに、皮膚などの体細胞から目的とする細胞種へと直接転換を図る技術である。特に従来の遺伝子導入による方法では、導入遺伝子のゲノムへの組み込みによるがん化リスクが問題となっていたが、申請者はこれまで低分子化合物群の添加のみで、遺伝子導入を行わずにヒト皮膚および脂肪由来細胞から末梢神経系細胞へのダイレクトリプログラミングに成功してきた[(2,3)]。本法は細胞加工の低侵襲性および安全性の高さが優位性となっている。

しかし一方で、このダイレクトリプログラミング技術には、細胞転換効率が～1%程度と著しく低いという重大な課題が残されている。効率が低いため、得られた目的細胞をスクリーニングに使用する場合でも、多数の初期細胞が必要となり、依然としてコストと時間の問題を完全に解決することは難しい。したがって、この技術の臨床および実用的展開のためには、効率を劇的に改善する新規技術の導入が急務となっている。

本研究は、申請者が独自に開発した低分子化合物ベースのダイレクトリプログラミング技術の効率を向上させることを目的とし、これまで十分に検討されてこなかった細胞培養基板の力学特性（基質硬さ：stiffness）や表面パターンといった工学的視点からの新規アプローチを取り入れたものである。細胞はその周囲環境の物理的性質を感知し、細胞運命を決定する機能を有していることが近年の研究により明らかとなっているが、ダイレクトリプログラミングの効率化という視点からこの特性を積極的に利用する研究例は世界的にも少ない。本研究の特色および独創性は、細胞生物学的な細胞誘導技術と工学的アプローチを融合させ、申請者がこれまでに蓄積してきた知見と技術基盤を最大限に活用し、世界でも類例のない新たな細胞加工技術を提示する点にある。本報告書では、これらの目的を踏まえ、本研究で取り組んだ基質硬さによる細胞加工への影響変化をまとめる。

２．研究計画

2.1 細胞培養基板の作製

剛性の異なる培養基板の作製は汎用的なポリスチレンディッシュ（ビオラモ細胞培養ディッシュ: VTC-D35N）上に、生体適合性を有するシリコンゴム材料である PDMS（ポリジメチルシロキサン: Silpot 184; DuPont Toray Specialty Materials)を用いて行った。PDMS ベースに添加する硬化剤の割合を一般的に用いられる 10:1 及び 50:1 の 2 種と PDMS 無しの培養ディッシュを準備することで、剛性の異なる培養基板を 3 種作製した。ベースと硬化剤を混合したポリマーは 250 μl 程度の量をマイクロピペットを用いてφ35mm ディッシュに滴下し、気泡を除去後、70℃のホットプレート上で 1 hour ベークすることで硬化させた。PDMS は細胞培養前に UV 下にて 1 hour 静置し滅菌を行った。全ての培養基板は 0.1% ポリエチレンイミン溶液(594-09773; 富士フィルム和光)にて 1 hour インキュベーター内にてコーティングを行い、蒸留水にて 3 回 wash を行った。その後、0.1%ゼラチン溶液(GLS250; 富士フィルム和光)にて 20 min コーティングを行った後に細胞培養を行った。

必要の場合には培養ディッシュを卓上真空プラズマ装置 (YHS-R;魁半導体)を用いて、120 秒間のプラズマ処理を行った。

2.2 細胞培養と化合物添加

培養細胞にはヒト胎児肺由来の線維芽細胞である IMR-90 を JCRB 細胞バンク(JCRB0519)より購入して使用した。IMR-90 は DMEM (high glucose: 044-29765; 富士フィルム和光)に 10% ウシ胎児血清 (FBS: 552-54845; 富士フィルム和光)、1% MEM 非必須アミノ酸溶液(NEAA: 139-15651; 富士フィルム和光)、1% ペニシリン-ストレプトマイシン溶液 (P/S: 168-23191; 富士フィルム和光)を加えた培養液にて増殖を行い、継代を行ったもしくは冷凍保存しや IMR-90 細胞を、2.1 にて準備した培養ディッシュに播種を行った。

培養ディッシュ上にて 1-2 日間、上記の DMEM ベースの培養液にて培養を行った後、先行研究[3]の手法の則り、神経系へのダイレクトリプログラミングのための化合物添加実験を行った。低分子化合物群は以下のものを指定の濃度にて使用した: 1.5 μM CHIR99021 (CHIR: 034-23103; 富士フィルム和光)、0.5 μM RepSox (E-616452; S7223; Selleck)、5 μM Forskolin (FSK: 067-02191; 富士フィルム和光)、20 μM ISX-9 (S7914; Selleck)、2.5 μM Dorsomorphin (DM: 040-33753; 富士フィルム和光)、2.5 μM SB431542 (SB: 192-16541; 富士フィルム和光)、20 ng/ml 線維芽細胞成長因子 (bFGF: 064-04541; 富士フィルム和光)。以上の化合物は、D-MEM/Ham's F-12 (048-29785; 富士フィルム和光)と Neurobasal medium (21103049; Thermo Fisher Scientific)を 1:1 で混合した基礎培地に 1% B-27 supplement (17504044; Thermo Fisher Scientific)、0.5% N2 supplement (141-09041; 富士フィルム和光)、1% NEAA、1% P/S を添加した培養液 (NIM: Neuronal Induction Medium)に添加した。先行研究に則り低分子化合物群は計 6 日間添加を行い、最初の 4 日間は CHIR、E-616452、FSK、ISX-9、bFGF の組合せ、次の 2 日間は CHIR、E-616452、FSK、ISX-9、DM、SB、bFGF の組合せで行った。化合物添加後は、NIM に 10 μM FSK、50 μg/ml Ascorbic acid (AA: 013-12061; 富士フィルム和光)、10 ng/ml 脳由来神経栄養因子(BDNF: 029-19801; 富士フィルム和光)、10 ng/ml グリア細胞株由来神経栄養因子(GDNF: 070-06881; 富士フィルム和光)を加えた培養液にて細胞を維持した。

３．計画の進行状況

培養ディッシュを PEI 及びゼラチンを用いてコーティングした表面上に IMR-90 を播種

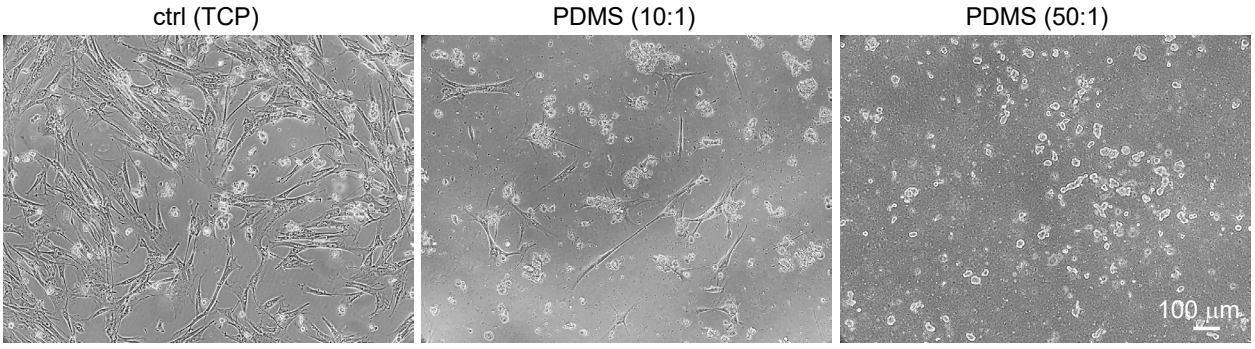


図 1 コントロールサンプル(ポリスチレン培養ディッシュ)と PDMS 基板上への IMR-90 細胞の播種翌日の位相差画像

したサンプルの様子を図 1 に示す。線維芽細胞が接着し扁平状に伸展しているコントロールサンプルに対し、PDMS 上の線維芽細胞は細胞が塊状で一部接着している状態であり基板への接着が阻害されている様子が見て取れる。この状態では線維芽細胞の増殖や成熟が阻害され以後の化合物添加実験に支障が予測されるため、PDMS 上への細胞接着の改善を行った。このために PDMS を硬化した培養ディッシュについてはプラズマ処理を行い、PDMS 表面を親水化することでコーティング用のタンパク質等の吸着を促進させた。図 2 に示す通り、プラズマ処理によって PDMS 上で線維芽細胞をコントロールサンプル同様に接着・伸展させることが可能となった。

次に、コントロールサンプル及び PDMS 上での線維芽細胞に対して低分子化合物を計 6 日間添加する実験を行った。低分子化合物は先行研究において末梢神経系への細胞加工を行うことがわかっている化合物群を用いた。なお、PDMS (50:1)のサンプルについては培養途中に細胞がコンフルエント状態となり基板表面より剥がれるという現象が起こったことより、以下はコントロールサンプルと PDMS(10:1)基板との比較データを示す。図 3 は化合物添加 6 日目における各基板上での線維芽細胞の様子を示したものである。両者とも初期の線維芽細胞の形態より、神経系に近い突起状の形態を示している様子が見て取れる。一方で、コントロールサンプルでは細胞体の膨化、不均一化や細胞断片と見られる顆粒状のデブリが確認される。これに対して PDMS 上での細胞は神経突起様構造が明確に見られ、デブリが少ない。この結果より、PDMS 上での剛性の低い基板上では低分子化合物群添加よる細胞加工による細胞障害性が低くなるという、これまでに無い知見が得られた。ポリスチレン等の剛性の高いディッシュ表面

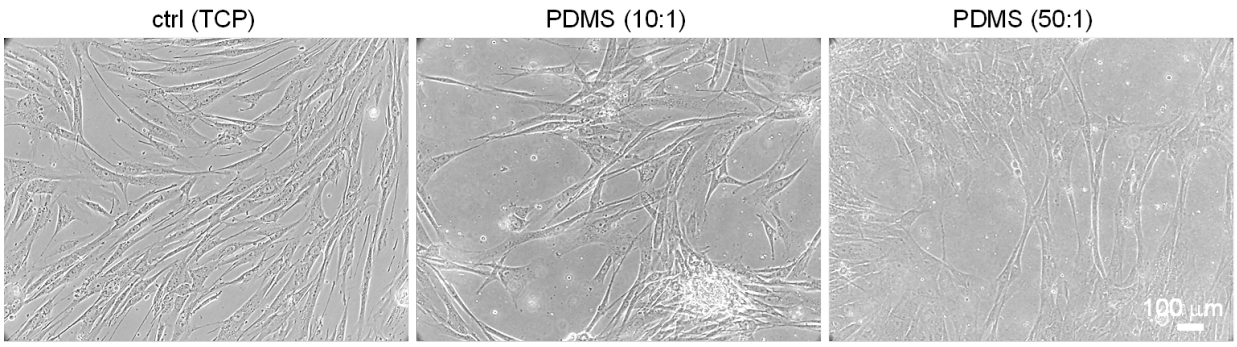


図 2　プラズマ処理による細胞接着促進

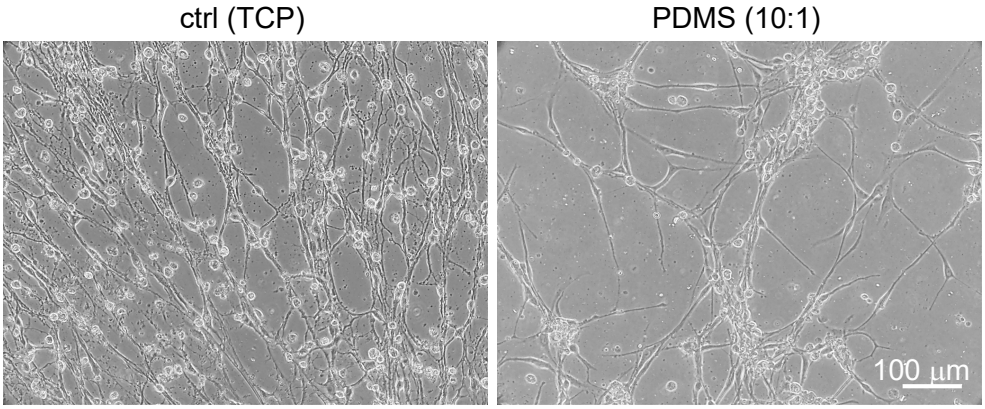


図 3　低分子化合物処理による IMR-90 細胞の神経系転換結果

と比較して生体内の剛性に近い柔軟基板上において神経細胞の成熟や分化が促進されるという先行研究[4,5]を踏まえると、PDMS という柔軟基板上で培養を行うことで、低分子化合物群による神経系へのダイレクトリプログラミングの効率性が促進される可能性が十分期待できる。

一方で現時点では低分子化合物群添加後の神経様細胞における機能性や遺伝子発現変化の解析までは行うことができておらず、柔軟基板によるダイレクトリプログラミング効率性の確認については不十分な点があるため、今後の追加実験が必要であると考えている。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

【今後の計画】

上述の通り、本研究の更なる発展のためには柔軟基板上でのダイレクトリプログラミングによる機能発現を確認するために、化合物添加後の細胞におけるカルシウムイメージングによる細胞活動の変化の解析を行う必要がある。また、併せて細胞における遺伝子発現変化を網羅的に捉えるための RNA-seq 等の解析を行うことで、化合物添加の作用と効率を併せて進める。これらのデータと併せた上での論文投稿準備へと進む予定である。

【学会発表】

1. 髙山祐三，“自律神経系の生体外再構築に迫る”，LIFE2024，東京，2024.9.

【参考文献】

(1) J. Xu, Y. Du, H. Deng, Direct lineage reprogramming: strategies, mechanisms, and applications. Cell Stem Cell, 16, pp. 119-134, (2015).

(2) Y. Takayama, T. Wakabayashi, H. Kushige, Y. Saito, Y. Shibuya, S. Shibata, W. Akamatsu, H. Okano, Y.S. Kida, Brief exposure to small molecules allows induction of mouse embryonic fibroblasts into neural crest-like precursors, FEBS Lett., 591, pp. 590-602, (2017).

(3) Y. Takayama, Y. Akagi, Y. Shibuya, Y.S. Kida, Exposure to small molecule cocktails allows induction of neural crest lineage cells from human adipose-derived mesenchymal stem cells, PLoS ONE, 15, e0241125, (2020).

(4) A.I. Teixeira, S. Iikhanizadeh, J.A. Wigenius, J.K. Duckworth, O. Inganäs, O. Hermanson, The promotion of neuronal maturation on soft substrates, Biomaterials, 30, pp. 4567-4572, (2009).

(5) N.D. Leipzig, M.S. Shoichet, The effect of substrate stiffness on adult neural stem cell behavior, Biomaterials, 30, pp. 6867-6878, (2009).

ロボット群を用いたVR用エルゴノミック装置

システム理工学部（電子情報システム学科）　　高嶋　和毅

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

ルームスケールVR環境では，ユーザが歩行する際や，立位でコンテンツを操作する際の姿勢が不安定になりやすいため，腕をはじめ身体に疲労が蓄積しやすく，操作の精度も悪くなる．本研究では，ユーザが常に快適にVRコンテンツを操作できる新たなエルゴノミックVRワークスペースを提案し，それを実現する方法を探求する．具体的には，VRユーザが作業に必要な姿勢を安定して取るための身体安定化デバイスを設計・開発する．ここでは，申請者のこれまでの研究成果を応用して，強度と自由度が高い自走変形型のロボット群を開発し，様々なVRアプリケーションやシナリオに対応できる身体安定化の方法について理解を深める．最終的には，個別デバイスの効果検証を総合して，ルームスケールVR内の姿勢安定に向けた人間工学的指針を策定するとともに，それを実践したエルゴノミックVRワークスペースの例をいくつか実装しその効果や性能を明らかにする．

２．研究計画

本研究では，HMD（頭部搭載立体ディスプレイ）を装着したユーザが部屋サイズの計測可能（トラッキング）範囲を歩き，空中に配置されたVRコンテンツを操作する際にロボット群を自動的に配置し，ユーザの不安定箇所を絶妙に安定・土台化するシステムの開発である．申請者は，VRユーザと連携するロボットの基本的なプラットフォームをこれまでの研究歴で構築済みであり，これを応用し，図１に示すように，ロボットデバイスに鉛直水平の両軸に伸縮可能な機構を導入する．また，将来的にはそれらを複数台準備してモジュールとして連携してお互いに接続と分離できる機能を導入することで，多様な姿勢安定化の環境をVRユーザ付近に即座に作るシステムを構築する．例えば，複数のモジュールを適宜，接続・分離し，高さや幅を調整することで，VRユーザに対して，タッチ支持面，キャンバス面，または臨時の机面，手すり，椅子，背もたれなど，活動に不可欠な身体支持環境を即座に構築することができる．本研究項目では，身体の部位ごとに姿勢安定化ロボットデバイスの設計，開発，運用システムを実装し，個別のデバイスの効果をまず明らかにする．実験の際，オフィスユーザだけではなく，筋骨格系に課題を抱えている方（リハビリ中の方や高齢者）に対する効果検証も考慮し，本研究で提案する身体安定化エルゴノミックデバイスがどのようにVRオフィスユーザ以外のユーザ層へ波及可能かも確認する．

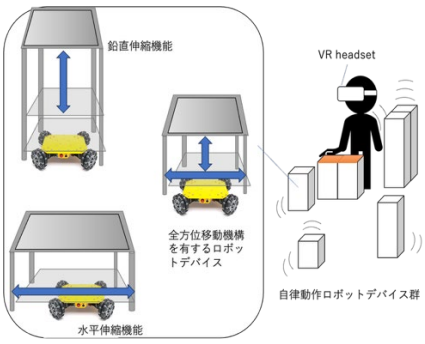


図１．VRユーザ周囲を稼働するロボット

３．計画の進行状況

本年度では，目的を達成するための一つの重要なロボットの形態として，単一の「ロボティックスタンド」を提案し検証した．本システムでは，ユーザの姿勢やコンテンツなどに合わせて様々な位置や向き，高さで支持面を提供することができる．例えば，ユーザはこれに腕をよりかけることにより，空中インタラクション時の腕の負荷や無駄な疲労を軽減することができたり，またその機構からのフォースフィードバックを得て，安定した運動や操作を VR 内で実践することができる．本年度は，提案するロボティックスタンドのプロトタイプを開発し，有望と考える複数の使用例を実装し，その動作結果から有用性や応用可能性を考察した．

ロボティックスタンドの設計と実装

本研究で提案するロボティックスタンドのプロトタイプを図 2 に示す．ルームスケール VR における空中インタラクションは，ユーザがその場に留まらず，３次元空間を移動しながら行う場合が多い．このため，ロボティックスタンドはユーザの移動に追従し，必要な位置に動的に配置される必要がある．

ロボットを３次元空間で適切に配置するためには，平面面方向および鉛直方向への移動機能が重要である．平面方向の移動では，ユーザの前後左右の移動に即座に応答できる全方向移動機構が求められる．また，鉛直方向の移動では，ユーザの腕の高さに応じてロボットの高さを適切に調整する昇降機能が必要である．これらの機能を実現するため，全方位移動可能な 4 輪駆動の小型オムニホイールロボット「Nexus Robot」，上に 80～150cm の範囲で昇降可能なリニアアクチュエータを設置した．Nexus Robot は 360 度全方位に自由に移動でき，リニアアクチュエータはその長さ（ここでは高さに相当）を連続的かつ精密に調節可能である．

本システムは，総重量 20.5kg であり，水平方向に約 55N，垂直方向に 300N 以上の力を出力できることを確認済みである．

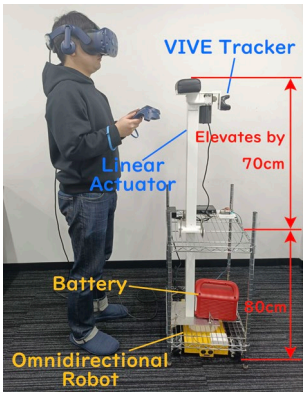


図２　ロボティックスタンドの外観と寸法

システムの動作原理

本システムの利用には，VR システムとして VIVE Pro Eye HMD および対応するコントローラーを使用する．また，ルームスケール XR の環境を構築するため，3 台の SteamVR Base Station 2.0 を部屋内に設置して，約 5.5m×6.5m のトラッキングエリアを確保した．

システムの開発には Unity エンジンを使用し，ロボティックスタンドの位置情報をリアルタイムで取得するために VIVE Tracker 3.0 を採用した．Unity 上で取得したロボットの現在位置とユーザが指定する目標地点の差分を基に，PID 制御アルゴリズムを用いて適切な移動および昇降コマンドが随時生成される．生成されたコマンドはロボティックスタンドに送信され，ロボットは目標地点へ移動する．このように，本システムでは，ユーザが指定する位置（ユーザが指定または事前に指定）にロボットが常に追従する形で運用することになる．さらに，VR ユーザ側から見ると，VR 中でロボティックスタンドの現在位置，目標位置，高さの情報を視覚的に確認できるため，ロボットを安全に利用することができる．

アプリケーションシナリオ

本研究では，ルームスケール VR で発生する様々な空中インタラクションの代表的な課題を複数抽出し，それらに対して，本システムがどのように利用可能かを実際にアプリケーションを実装して議論する．図 3 にその概要と実装例を示す．

Posture-based Adaptive Armrest：空中インタラクションを長時間行うことは，腕を常に持ち上げた状態を維持する必要があり，疲労の蓄積を引き起こす．特にペインティングや 3D モデリングのような作業では，ユーザは細かな動作を長時間繰り返すため，腕の負担が大きい．本システムは，関節や関節間を物理的に支持するアームレストのような働きをすることができる．支持面の高さや位置もユーザが調節可能であり，作業環境や操作スタイルに合わせたカスタマイズが可能である（図 3-A）．ルームスケール VR では工場やデータ可視化等，空間にデータやコンテンツが散りばめられている状況が多い．このような環境では，ユーザの姿勢が様々に変化する．本シナリオでは，ユーザが腕を水平方向（図 3-B）や垂直方向（図 3-C）に動かす基本姿勢だけでなく，上を見上げた姿勢（図 3-D）などの複雑な姿勢においても，ロボティックスタンドが効果的に支持できることを確認した．

Kinesthetic Force Feedback：空中インタラクションでは，ユーザが空中に浮いたオブジェクトを操作する際，腕を空中に固定して動かすことになる．この時にオブジェクトからの反力がないため正確な運動を計画できず，腕が疲労するという問題が指摘されている．これに対処するために，触覚およびフォースフィードバックを提供する研究が進められてきた．本システムでは，昇降機能を用いた上下のインタラクションを含む触覚・フォースフィードバックを実装し，正確な運動制御が可能かを検証した．図 3-E に示すように，本シナリオでは，オブジェクトが動作・停止した際に生じる抵抗や反発をフィードバックとして表現するレバー操作を実装した．また，オブジェクトの重さや摩擦力を力として再現するシナリオとして，ドアの開閉（図 3-F）を設定した．本システムの重量および力覚提示能力によって，これらのシナリオにおいて必要な力覚を十分にフィードバックできることは確認できた．

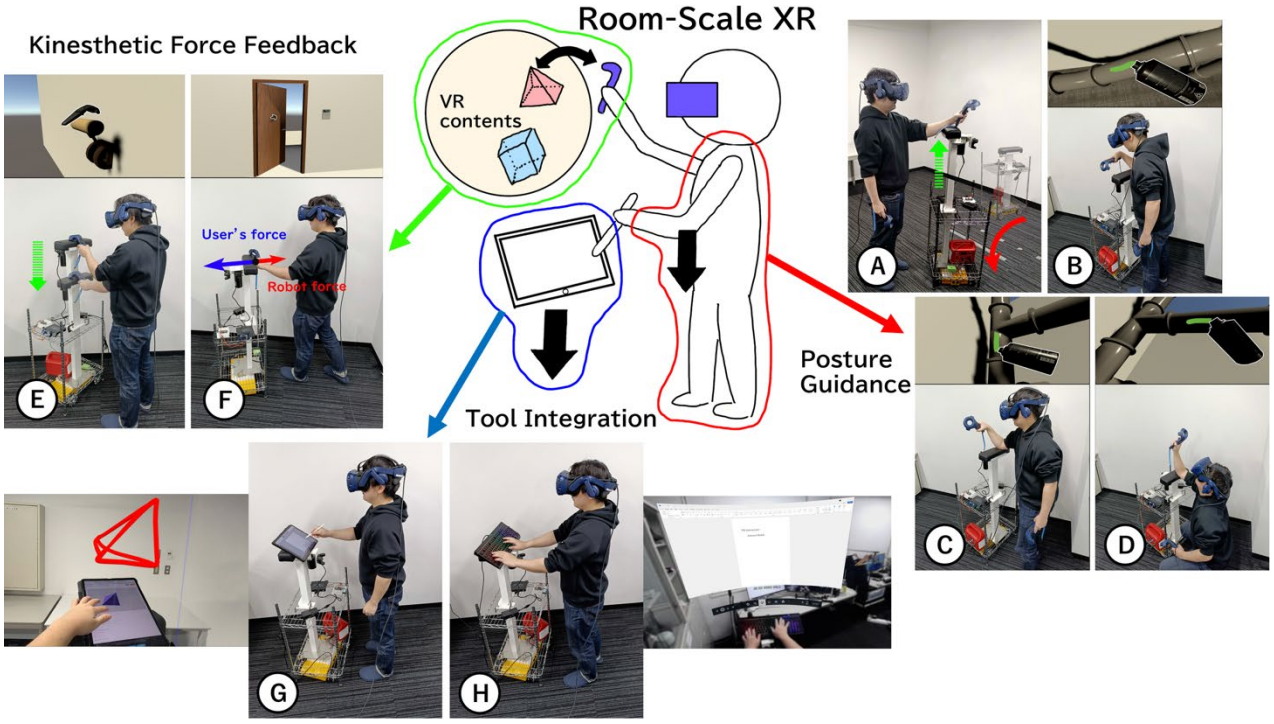


図 3　アプリケーション例

このような力覚提示により，ユーザは動作中に受ける力の変化をリアルタイムで感じることが可能となり，臨場感の向上に加えて，無駄な入力を抑え，安定した力制御を実現できる．

Ad-hoc Real-world Tools Station: ルームスケール VR 内では，デスクトップ型の VR とは異なり，VR コントローラなどのデバイスだけでは完結せず，現実世界で使用される様々なオブジェクトや機材，例えば，マウス，キーボード，タブレットなどの入出力デバイスを併用することがある．しかしながら，当然通常のルームスケール VR では，このようなデバイスを空中に設置することは難しく，現実世界のツールを VR 環境に導入することは難しかった．VR 環境下において，コントローラを用いたメモやタイピング作業は，非常に疲れやすいことが知られている．また，別システムを VR 環境にリンクする手間がかかるため，現実世界の周辺機器を簡単にルームスケール VR にドッキングさせるツールステーションとしての応用可能性を検証した．本シナリオでは，HMD のパススルー機能を活用し，タブレット（図 3-G）やキーボード（図 3-H）を空間内に自在に配置し，それをユーザがルームスケール VR 内で自由に操作する状況を実装した．これにより，VR における作業においてもウィンドウズやタブレットなど現実空間で慣れ親しんだインタラクション形態を導入することができ，長時間の作業や細かい入力操作においても高い安定性とユーザの負荷軽減に寄与する．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

図３で示した様々なアプリケーションの中でも，本研究課題において最も中心的な課題である VR 内での空中インタラクションの精度向上を目的として，現在ユーザスタディを計画中である．倫理審査申請書を提出済みであり，審査通過後速やかに実験を開始する予定である．図 4 に示すように，提案手法を用いて VR コンテンツに対してどの程度精密な処理をどのような快適姿勢で実現できるか定量的および定性的に評価する．



図４　予備実験の様子



図５　予備実験で VR 内での筆記精度（上，ロボティックスタンドなし，下，ロボティックスタンドあり．）

図５には，予備実験で検証中である VR 内での筆記パフォーマンスの例を示す．図上と図下はそれぞれ，ロボティックスタンドなしとありの結果を示しており，支持無しでは，空中に浮いた手で詳細な筆記は困難であること，およびロボティックスタンドを併用することで様々な箇所での VR 筆記パフォーマンスが向上する傾向を確認した．

学会発表は，国内研究会にて，これまでの研究内容を２０２５年６月に口頭発表予定であり，その後，実験データを追加して，秋頃にバーチャルリアリティ関連の国際会議に登校予定である．

人間型ロボット安定操縦手法の開発

システム理工学部（機械制御システム学科）　　大谷　拓也

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年，バーチャルリアリティ（VR）体験やロボティクスの進展において，身体の安定性感覚は重要な研究テーマとなっている．特に，人間の身体の基本機能である安定性感覚は，VR 体験のリアリティ向上や脚型ロボットの遠隔操作に大きく寄与することが期待されている．身体の安定性感覚の提示には，視覚や前庭感覚など複数の情報が活用されている．足裏感覚がその中でも重要であり，特に足裏の力触覚は高齢者の安定維持能力の指標としても注目されている．

人間が様々な感覚情報により全身を用いて状況に適応した安定動作を行っていることから，人間の操縦者が人間型ロボットの感覚情報を感じ取り人間型ロボットの安定動作をリアルタイムに生成することで，人間型ロボットの運動時の安定性を大きく向上させられるという仮説を立てた．足の動作を用いるヒューマノイドロボットの操縦システムでは，足の操縦をあくまでも動作提示に用いるものとし，安定化に関する制御はロボットの運動学による計算で実現している．このアプローチでは操縦者とロボットの感覚や動作が必ずしも一致ではないため，安定能力はロボットの制御性能に依存する．そこで本研究では，地面反力や地面形状・視覚などの安定性推定に重要な感覚を操縦者に提示し，操縦者とロボットの身体差を補正する安定制御により操縦者の運動意図に忠実な人間型ロボット全身安定操縦を実現する．

２．研究計画

操縦には，人間の全身各部の位置・角度を計測しロボットを人間と同じように運動させるマスタースレーブ制御システムを用いる．具体的には，人間型ロボットと操縦者の身体パラメータの違いを補正するため，操縦者の身体各部の長さや重量・慣性モーメントなどの影響を受ける，身体各部の運動の勢いを表す運動量を指標とする．操縦者の運動計測には全身型のモーションキャプチャシステムを用い，事前に計測した操縦者の身長や体重から身体各部の長さ・重量・慣性モーメントを概算し，各部運動量を算出し補正を行う．さらに，最適化計算を組み合わせることで，ロボットと操縦者の身体のずれを補正する．実験用の小型人型ロボットはこれまでに開発を進めており実験に用いる（図 1,2）．

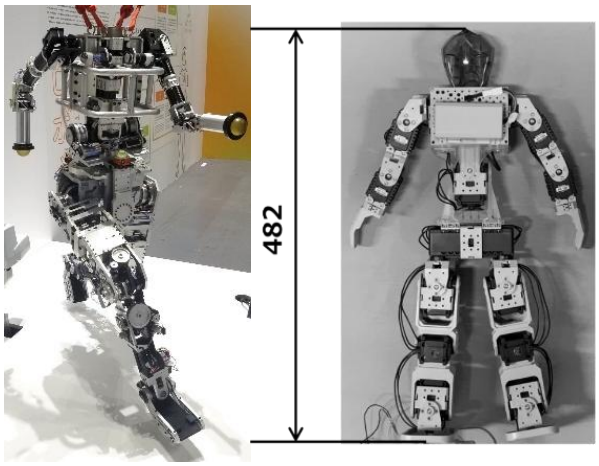


図 1 本研究で用いるロボット

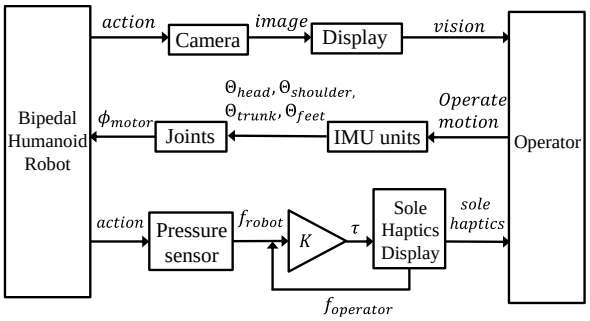


図2　操縦システムの構成図

ロボットから操縦者への感覚フィードバックを増やすためこれまでに開発した足裏反力フィードバック装置と組み合わせることで，人型ロボットの足裏力覚情報を操縦者に提示することによる安定操作技術を検討する．特に，人間は足裏の力覚情報から自身の重心位置を認識しバランス運動を行うことから，これをロボット操縦に活用する．これまでに足裏感覚再現によりロボットの重心位置を高い精度で認識できることを確認しているため，この装置を使用しながらロボットの安定操縦を行う（図 3）．



図 3 足裏反力再現装置

また装置の改良として，力覚再現点数の増加や，軽量化による装着性の向上を実験と並行して進める．

３．計画の進行状況

本研究では足部においてバイラテラル制御系を適応し，位置制御と力覚制御を行う．バイラテラル制御方式には, 対称型, 力逆送型, 力帰還型の三つの制御方法がある．力帰還型はマスター，スレーブともに機構に力が加わっても直ちに変位に反映されにくい場合に用いられる．直動機構にはボールねじによる減速をしており，ロボット足でもモータとケース間の摩擦が大きいため，本制御方法に適していると考えられる．

力帰還型のバイラテラル操縦システムを構築した（図 4）．ロボットの足から感じられる圧力を足裏刺激装置より操縦者に提示し，その一方で操縦者が自身の安定感覚により足や体の姿勢を調整し，その角度を位置制御によりロボットの足やほかの関節に取り付けられるモータに出力して操縦する．

1. まず，直動機構とロボットのシューズに内蔵する圧力センサを用いて足裏の親指・母指球・小指球・踵の4箇所にて圧力を測定する．直動機構側の圧力センサの測定結果をf_m，ロボットシューズ側の圧力センサの測定結果をf_sとする．
2. 次に, 各箇所における測定された圧力f_sにロボットと人間の体重比ゲイン値をかけた値を目標圧力として，人間側で実際に測定された圧力から偏差値eを計算する．

$$e = G \cdot f_s - f_m \tag{1}$$

※ゲインGはロボット体重と人間体重の比である．

3. トルク値τをPD制御により直動機構のモータを出力する．

$$\tau = K_p \cdot e + K_d \cdot T_d \frac{de}{dt} \tag{2}$$

ここで, K_pを比例ゲイン, K_dを積分ゲイン，T_Dを微分時間0.1[s]とする．

※K_p，K_dは人間の体重と足裏感度の大きさによってチューニングする．

4. 直動機構が動き，与圧部の先端にある突起により操縦者の足裏を刺激する．

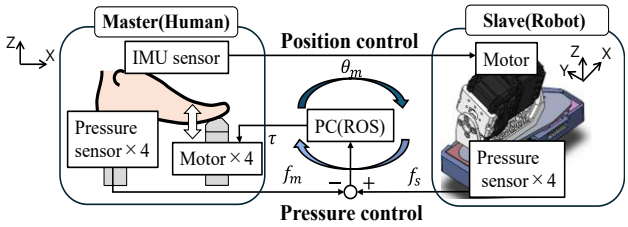


図4 バイラテラル制御による足部のシステム図

ロボットを安定操縦するためには，人間が立位時にバランスを取る際に主に行う，足首を動かすアンクルストラテジー，股関節を動かすヒップストラテジーを行うだけでなく，さらにバランスを崩した際に足を出すことで安定を行うステップストラテジーが有効とされる．これまでの足裏反力再現装置は床に設置されその上に操縦者の足を置く方式であったため，操縦者の足を自由に動かすことはできなかった．操縦者の足を動かし操縦を可能とするため，ウェアラブルな足裏反力再現装置を開発した（図 5）．3D プリンタを用いて作成したシューズ型基部に対して，圧力提示を行う直動機構を搭載することで，ウェアラブル化を実現した．

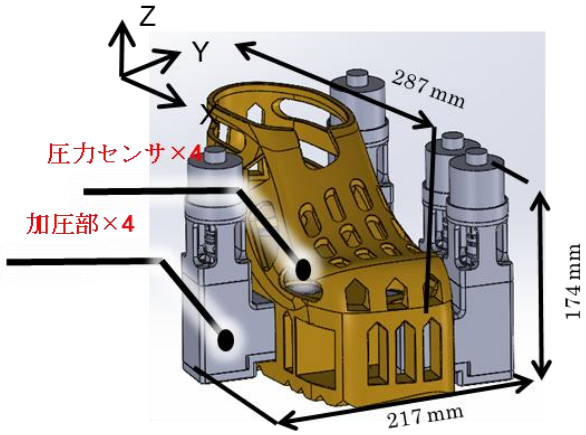


図5 開発したウェアラブル足裏反力再現装置

全身関節を用いた操縦に外乱が加わる際にバイラテラル制御システムの有効性の検証，ならびにフィードバック感覚，外乱における関係性を調査した．操縦者には足裏刺激装置上に立った状態で，ロボット頭部に搭載したカメラ映像を映したディスプレイを見ながら，足と腰と腕を用いて操縦を行う．

実験時の様子を図 6 に，実験結果を表 1，図 7 に示す．実験結果から，外乱を受ける際に，視覚情報のみの場合は転倒率が高くなったことに対して，足裏感覚の共有の場合は転倒率が低くなった．これにより，外力が働く際に足裏感覚の共有が有用であると考える．

外乱の種類に関しても，特に重みの場合，

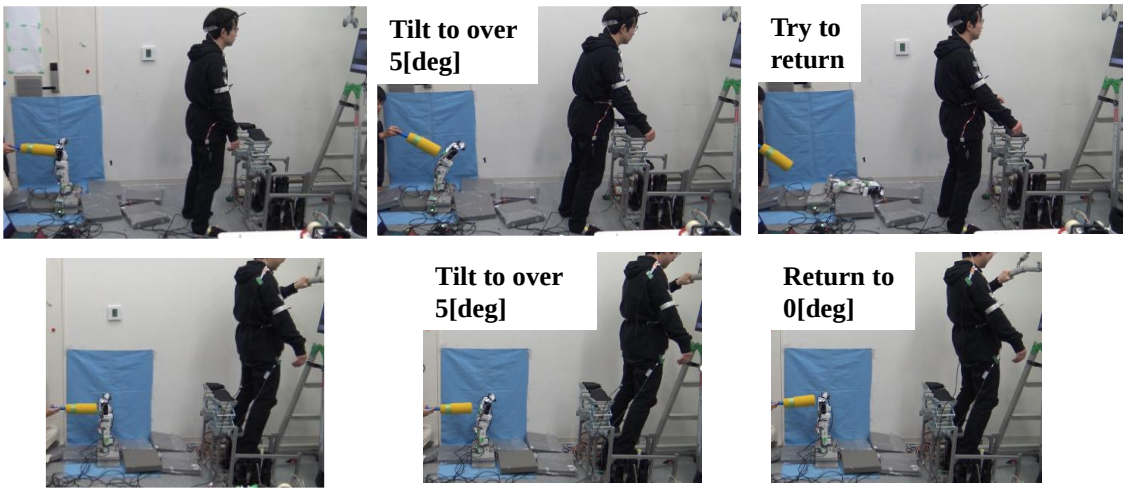


図 6 外力を加わった操縦実験の様子
（上：視覚情報の共有のみ，下：視覚情報と足裏感覚の共有）

表1　外力が加わった際の操縦実験の実験結果

Condition	Without Disturbances		Impact		Payload	
Feedback sensation	V.O.	V.S.	V.O.	V.S.	V.O.	V.S.
Average fall rate %	19.1	70.4 (-268)	22.7	7.8 (+65.6)	60.0	26.0 (+56.7)
Pressure on big toe of robot N	7.22 (100%)		9.25 (128%)		10.7 (149%)	

安定性の差が大きいことから足裏感覚共有の効果が大きかった．

外力や重みが加わった際に足裏感覚の共有が操縦に対する効果が著しくなった．特に重みが加わった際に，モーメントによる重心移動の変化が大きくなり，極限まで傾けても倒れないように繊細な制御ができた．

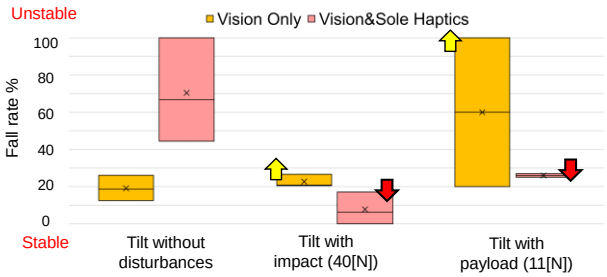


図 7 転倒率の結果（全身関節）

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

立位時の安定操縦について，ロボット分野のトップカンファレンスである IROS2024 にて発表を行った[1]．さらに，ウェアラブル足裏反力再現装置を用いてロボット操縦実験を進め（図 8），2025 年度での学会発表，論文投稿を行う．

研究の発展として，等身大の人間型ロボットの安定操縦や実作業の評価を進めるとともに，スポーツトレーニングへの活用の検討を進める．ロボットを操縦するシステムを応用することで，ロボットだけでなく他者の運動時の感覚を感じ取ることが可能となるため，スポーツ上級者の運動時の感覚を自身で感じ取り，それを目標に自身の運動を修正していくという新たなスポーツトレーニングに繋がる．

[1] Shen, Yang and Kanazawa, Masanobu and Mori, Kazuki and Isono, Ryu and Nakazawa, Yuri and Takanishi, Atsuo and Otani, Takuya, "Development of a Bilateral Control Teleoperation System for Bipedal Humanoid Robot Utilizing Foot Sole Haptics Feedback *," 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, pp. 12170-12175

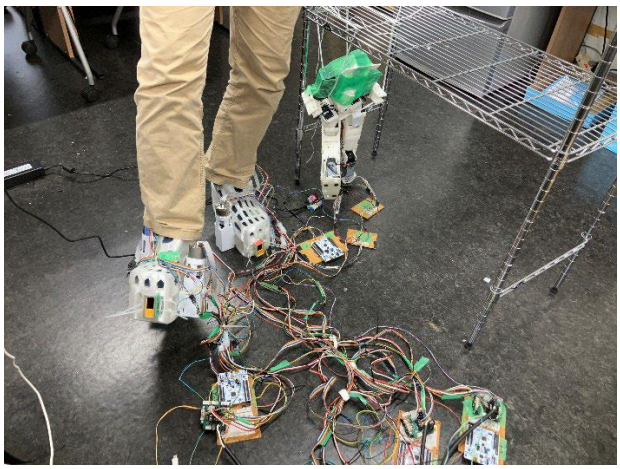


図 8 新しく開発したウェアラブル足裏感覚再現装置による操縦実験

SDGs 達成に向けた変革への要因の研究

システム理工学部環境システム学科　カトラミーズ・ターレク

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究は、持続可能な開発目標（SDGs）の達成に向けた制度的・社会的変革の要因を明らかにすることを目的とし、特に SDGs ターゲット間に生じるシナジー（相乗効果）とトレードオフ（相反関係）を実証的に分析する。また、気候変動政策――とりわけ脱炭素化や循環経済――との連携の中で、SDGs がいかに統合的に実施されうるかを、地方自治体の政策実践を通じて検討する。

本研究の理論的背景には、都市や地域における「変革力（transformative capacity)」の概念（Wolfram, 2016）があり、自治体が持つ制度的・学習的・協働的資源が、持続可能な都市変革を推進する鍵とされる。また、近年の研究（Cohen et al., 2021; Halsnæs et al., 2024）は、気候変動対策と他の SDGs の目標との間に生じる相互作用を体系的に捉える必要性を指摘しており、政策間の整合性（policy coherence）や公正性（equity）をめぐる課題も含まれる。さらに、Rockström et al.（2023）や Bai et al.（2024）による「安全かつ公正な地球システムの限界（safe and just Earth system boundaries)」の議論を踏まえ、グローバルな環境基準をローカルな実施へと翻訳する視点も導入している。

２．研究計画

2024 年度は、主に理論的・方法論的な基盤構築とネットワーキングの形成に注力する計画であった。まず、SDGs 間の統合的実施、政策トレードオフ、脱炭素と持続可能性の連関などに関する最新の国内外の学術文献のレビューを通じて、分析の枠組みを設計することを起点とした。その際、「都市の変革力」や「持続可能な制度移行」、「公正な環境限界」といった概念の統合的な整理と、日本の自治体レベルにおける応用可能性について検討した。

並行して、国内外の研究機関・政策関係者との協働体制の強化を進めた。特に慶應義塾大学および国連大学（UNU-IAS）との協働のもと、研究全体の仮説構造や調査設計についての検討が進められた。これにより、研究成果がアカデミックな枠を超えて、実務的にも活用可能となるような分析視角が共有された。

さらに、研究の国際的展開の一環として、サステナビリティ・トランスフォーメーションをテーマとするワークショップが米国ハワイにて開催され、研究代表者も登壇し、他国の研究者・実務家との知見共有を行った。このワークショップは、理論と実践の橋渡しを意識した国際対話の場となり、本研究が目指す統合的ガバナンスへの関心の高さを再確認する機会となった。また、翌年度に実施を予定している全国規模の自治体調査に向けて、調査票の設計、調査倫理手続き、実施体制の検討など、準備的な活動もこの段階で開始された。調査対象は主に市区町村の SDGs 推進部署や環境政策部門であり、SDGs と気候変動政策の連携状況、シナジー・トレードオフの

認識と対応、ポスト2030目標への戦略的姿勢などを把握することを目的としている。

３．計画の進行状況

研究初年度である2024年度は、当初の計画に沿って、理論的整理、連携体制の強化、国際発信、大規模調査の設計という4つの軸で成果が得られた。まず、SDGsと気候変動政策に関する文献レビューにおいては、Cohen et al.（2021）やGSDR（2023）を含む国際文献を踏まえながら、目標間の統合や整合性に焦点を当てた視点を体系的に整理した。特に、Wolfram（2016）が提示する「都市の変革力」の構成要素――制度的柔軟性、社会的学習、多主体協働――を、日本の地方自治体における政策事例に適用できる可能性が確認された。この理論的知見を踏まえた上で、研究体制の整備も着実に進んだ。慶應義塾大学および国連大学との研究会合では、分析視角の調整や国内外での比較可能性について意見交換が行われ、アンケート設計や事例抽出の方針について実践的な示唆が得られた。
また、国際連携の面では、2025年3月にハワイ大学で開催されたSustainability Transformationを巡るワークショップにおいて、本研究の初期成果を発表し、国際的なフィードバックを得た。特に、SDGsとパリ協定の制度的接続に対する関心が高く、今後の国際的比較研究への布石となった。さらに、全国自治体を対象とした大規模アンケート調査に向けて、具体的な設問案の設計に着手した。調査では、自治体におけるSDGs・気候政策の統合度、シナジーやトレードオフの認識・対応、国際枠組み（パリ協定やポスト2030議論）への準備状況などを多角的に把握することを目指している。対象者としては、環境・脱炭素政策部署、SDGs推進部署を予定しており、統計的分析と事例選定の両面で活用可能な設計となるよう調整を進めている。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の主な計画

2025年度は、調査研究の本格実施と成果の理論的統合に向けた重要なステージである。まず、全国の市区町村を対象としたアンケート調査を2025年中盤に実施し、SDGsと気候政策の連携状況、課題、成功要因を明らかにする。これに基づいて、優良な自治体を選定し、質的調査（ヒアリング）を行うことで、変革の条件や地域特性に関する洞察を得ることを目指す。調査結果と理論的フレームワークを統合し、自治体が活用可能な政策統合のための評価ツールの検証を行う予定である。このツールは、SDGs間のシナジー強化やトレードオフ低減に向けた意思決定支援を目的とし、フィードバックを通じて改善を重ねる。発表と発信の面では、国際会議（SDGs and Climate Synergiesなど）への参加を通じて、研究成果の国際的共有と政策提言の強化を図る。

参考文献

Wolfram, M. (2016). Conceptualizing urban transformative capacity: A framework for research and policy. Cities, 51, 121-130.

Cohen, M., et al. (2021). Synergies and trade-offs between SDGs in the context of climate policies. Nature Sustainability, 4, 123-130.

Rockström, J., et al. (2023). Safe and just Earth system boundaries. Nature, 619, 27-39.

GSDR (2023). Global Sustainable Development Report. United Nations.

Bai, X., et al. (2024). Operationalizing planetary boundaries at sub-national scales. Environmental Research Letters.
Halsnæs, K., et al. (2024). Governance and equity in climate-SDG policy integration. Climate Policy.

建築空間と仮想空間のインターフェイス研究

システム理工学部（環境システム学科）　　片岡　誠

１．はじめに

建築製図が本格的にCADを使って行われるようになったのは30年ほど前であるが，単なる図形処理を脱して属性を持つオブジェクトを扱えるようになったのは比較的最近である。モデルの標準化や商用アプリケーションの普及にともなってオブジェクトの分類がなされ，BIM（Building Information Modeling）の考え方が建築業界に定着した。

現時点では建築物のデータを編集し，プレゼンテーション等に使用される技術であるが，コンピューター内に構築された空間に入り込み，人の動作にモデルが応答するしくみを作ることができれば，プロジェクトにかかわる人たち（発注者，設計者，施工計画者，施工技術者等）の視点で建築物を評価しやすくなろう。さらに仮想空間を現実空間に「投影」できれば，実物の建築物と仮想空間との境界を緩やかにつなぐ新しい建築生産環境が可能になると考えられる。

そこで本学での教育研究活動に着手するにあたり，実空間と仮想空間との間をつなぐための技術的な検証を行うことを計画した。建築モデルの操作やソフトウェアを開発するにあたり，外部サービスとの間の通信上の制約を把握し，過去に作成したソフトウェア資産をアップデートし，今後研究に取り組む学生がみずからの開発に使用しやすいプログラミング基盤を整備する。

２．研究計画

研究室を設置した直後であり，今後の研究を推進するための準備として，プログラミング環境を整備する必要があった。建築情報を施工計画や施工現場支援に利用するためには，建築関連の情報を対象分野に応じて処理しなくてはならい。また，建築物を評価するにもモデルの操作手法を確立しておかなくてはならない。これまでの研究分野および今後の研究テーマを見越して次のような計画を立てた。

２．１　力学教育ツールの製作を通した入力・計算・描画ライブラリの整備

ここでは建築構造力学学習ツール開発向けの構造計算機能とユーザーインターフェイスを整備する。配属された学生が取り組む総合研究の目標として，荷重の位置・大きさをタッチパネルモニターに触れて入力したときの部材応力状態をリアルタイムに表示する構造力学教育プログラムを作成することを設定した。この実装を通して，計算処理，図形描画処理，ユーザー動作の取得処理など，今後の総合研究に共通して必要となる機能を整備する。対象構造形式は，未知数（応力が未定の部材数と反力数の合計）と連立方程式の数が等しい「静定トラス構造」とする。システム理工学部の低学年で学んだ行列演算，グラフ理論，オブジェクト指向分析などを用いるため，総合研究としてまとめやすいと思われた。開発は，Windows環境でC#言語を用いて実施する。

２.２ BIM ソフトを基盤とした自然言語処理サーバーとの通信・入出力機能の確認

BIM ソフト（オートデスク社 Revit）で作成された建築物の属性や部材情報を取り出す機能，およびこれらを編集する機能を実現する。このなかで外部サーバーを使用する手法を確認する。BIM ソフトの操作を容易に行うことができるよう，建築生産研究における要件を整理しておく。今後予定している建築基準法適合判定や施工計画自動化・最適化に関する問題解決など，自然言語処理を応用する研究のために必須であり，次年度以降の学生の研究が始まるまでに準備したい。

２.３ ヘッドマウントディスプレイの通信機能の検証

ヘッドマウントディスプレイは頭の姿勢を取得するという性質上その機器単独で使用されることが多い。こうした使用環境において，さまざまなデバイスからの入力をどう受け取り，どのように応答することができるのかを検証する。インターネットを通して情報を入出力する手法を試行する。新しいツールを提案・開発していく活動にとって基礎となる知見を得ることになる。

３. 計画の進行状況

本テーマに配分された研究費はおもにプログラミング用のコンピューターに使用した。以下，作成したプログラムなどについて述べる。

３.１ 数学（幾何学）ライブラリ

建築情報を扱う上で図形情報，幾何情報を処理する場面が多い。そこで，３次元幾何を処理する関数群を C#で作成した。これは，３次元図形から条件を満たす座標を求めるなどのベクトル操作が中心となる。

また，BIM モデルから取得したオブジェクトの情報をもとにさまざまな属性を算出するときに必要となる数式処理関数を作成した。通常の中置記法で記述されたテキスト表記の数式文字列を逆ポーランド記法に変換し，その後これを読み取りながら計算を実行するものである。ユーザーが入力した計算式を柔軟に処理するためのものである。

これらの関数ライブラリには幾何学の計算をそのまま実装したものが多いが，数学上の厳密解が求められない場合のために，実務上許容される近似解を得るものも用意した。たとえば，建築躯体では柱と梁が格子状に組み合わされるが，それらの中心線（部材芯）は，いわゆる「ねじれの位置」にあるため格子を構成できない。そのため，柱と梁が接続しているかどうかを部材芯の交点の有無で判定することはできない。そこで，２つの直線が「交差」するかどうかは，交点を持つかどうかでなく，２直線の最も近接する２点を求め，それらの距離がある値（柱と梁なら数十センチメートル程度）よりも小さい場合を「交差」する（すなわち構造的な支持関係がある）と判断するなどの工夫をした。

３.２ 連立一次方程式の求解関数

構造力学アプリの開発に取り組んだ総合研究では，静定トラスを構成する多数の部材の応力状態を同時に求める必要があった。公開されている数学ライブラリもあり，そのひとつ Math.NET Numerics を試してもみた。たとえば多数の一次方程式の係数行列 A と右辺のベクトル b を入力して，Ax=b の式を解く関数がある。しかしこれは必ずしも期待した動作をしなかった。本来０となる cos(π/2)のような式がコンピューター内部で極めて小さな値をもつことがあり，これを要素に含む行列に対しては逆行列や解ベクトルを正しく求めることができないケースがあった。そのため，計算過程で生じる極めて小さい絶対値を０とみなす処理を施したガウスの消去法を実行する関数を自作した。

３.３ 避難経路探索および二方向避難における重複距離の判定関数

建築物の法規チェックにおいて，避難距離

を求めることがある。そこでまず歩行可能な空間にメッシュ状のネットワークを生成し，あるノードから避難階段（直通階段）までの最短経路の長さを求める。これが法規で定める条件を満たしていることを確認する必要があるわけだ。ネットワーク内の２点間の最短経路を求めるアルゴリズムは知られており，本研究でもそのひとつであるダイクストラ法を実装した。

課題となるのは，建築基準法で要求される，複数の直通階段までの経路の重複距離が所定の数値以下になることを確認することである。同じ廊下を使って，その先にある複数の直通階段に向う場合，同一経路の歩行距離に制限がかけられているわけである。細かいメッシュ状のネットワークで歩行可能空間を表現し，あるスタート地点から複数のゴール地点をダイクストラ法などの最短経路問題として解いた場合，同じ廊下を歩行したとしても，廊下の左右どちら側を歩行するかが異なることが頻繁に生じる。しかしながら，法規上はこれらを同一の経路とみなさなければならない。ネットワーク計算上は異なる経路でありながら，建築空間としては同一経路とみなさなければならない状況で，いかに重複経路と判断するかが課題となる。

これを解決するために，スタート地点 S から２つのゴール地点 G1/G2 を想定したときに，S から G1 までの最短経路を構成するエッジのうち，それを辿る過程で G2 にも近づいていると見なされるエッジを重複経路とみなすことにした。これに従えば S，G1，G2 がおおむね直線上に配置されている場合は，S から G1 までが重複とみなされる。避難経路の途中で G1，G2 への経路が分岐する場合は，一般的な建築計画であれば，S から分岐点までが重複経路として算出されることになる。重複経路は２つの経路上にそれぞれ求められるので，これらの長さを求め，いずれも法規が定める数値を満たしているかどうかをチェックするわけである。

居室（避難のスタート地点）から直通階段までには壁で仕切られた廊下やホールなどがあるため，重複区間はおおむねこれらの空間に沿った形で求められることになる。このアルゴリズムを建築基準法上の二方向避難に関する適合判定を実行するための関数とすることが可能であると考えているが，多様な平面計画について正しく判定を行うことができるかどうかについては今後多数の建築物に適用して確認する予定である。

３．４　BIM ソフトウェアで大規模言語モデルを使うための準備

今後進めていく研究テーマのひとつに建築基準適合判定を自動化するものがある。著しい発展が期待できる大規模言語モデルと，建築業界で使用される BIM ソフトウェアを使って，設計データが建築基準法をはじめとするさまざまな建築基準を満足するかどうかを判定するものである。BIM ソフトウェアとして使用するオートデスク社の Revit には自作のプログラム（アドインソフトウェア）を組み込む開発環境が提供されている。大きく２つの方法，C#で記述し DLL（Dynamic Link Library）ファイルを作成して組み込む方法と，Python で記述しインタプリターで処理する方法がある。前者はオートデスク社が提供する Revit API を使用するが，開発環境である.NET のバージョンとの組み合わせが限定される。また，大規模言語モデルとして OpenAI 社の ChatGPT を採用する予定であるが，この API にも.NET のバージョンに制約がある。そして，これらの対応関係に不一致があることがわかった。そのため，いくつかの組み合わせを試みて，確実に動作する組み合わせを明らかにした。

C#で DLL を作成する場合は，Revit 2024 とこれに対応する Revit API，さらにこのバージョンに対応する.NET Framework 4.8 を使用する。しかしながら OpenAI API はこの.NET に

対応しないため，ChatGPT との通信には HTTPS プロトコル（POST メソッド）を使って行うことにした。外部サーバーとの通信は非同期で行われるため，これを処理する関数を作成し，Revit アドインが ChatGPT にプロンプトを送り，回答を得ることを確認した。

Python を使用する場合は，Revit のアドインである pyRevit（Revit を Python でカスタマイズするもの）を介して行う。Revit 2024 と pyRevit 4.8.16 を組み合わせて実装するが，その場合，処理系には CPython 3.8.5 か IronPython 2.7.11 を選択することになる。IronPython を使って Revit のオブジェクトにアクセスすることができることを確認し，また CPython を使って OpenAI のライブラリ（openai）経由で ChatGPT との通信を行い，応答が得られることを確認した。HTTPS プロトコルは汎用の通信規格なので，当然これを使用することもできる。

３月末時点の Revit の最新バージョンは 2025 であるが，この場合 C#によるカスタマイズと Python によるカスタマイズの開発環境を同時に成立させるのが困難なようであったため，次年度の研究には取り組む学生の適性に応じて開発環境を選択する。バージョンの組み合わせの選択にやや手間取ったが，今後はプログラムの実装に重心を移していく。

４．今後の計画及び投稿・発表状況

４．１ 学会発表状況

上で記載したように，建築物の平面図をもとに歩行可能空間をメッシュ状のネットワークで覆い，複数の直通階段（避難階段）までの最短経路を求め，これらの重複距離を求めるアルゴリズムを検討，更新した。これを 2024 年度建築学会年次大会にて発表した。

構造力学の学習ツール製作において，方程式の処理プログラム，ユーザーインターフェイスの処理プログラムを整備し，マウスやタッチパネルでの操作に応じたリアルタイム処理のプログラムを作成した。この成果は 2025 年度建築学会年次大会に投稿済みであり，口頭発表する予定である。

４．２ 研究助成金の獲得

建築基準適合判定に関する研究については今後大規模言語モデルを利用した新しい手法を開発する予定である。この計画を民間財団の研究助成に応募したところ採用された。

また，今年度の総合研究の応用として，地下工事における山留め・支保工の応力状態をリアルタイムに表示し，かつ計画した支保工の部材構成を VR で表示する計画アプリケーションの開発を目標として民間財団の研究助成に応募したところ，採用された。

４．３ 今後の研究計画

助成金を獲得した２件の開発，すなわち，BIM と LLM を利用した建築基準適合判定の自動化，および山留め・支保工の計画アプリケーションの開発について優先的に取り組む。助成期間の１年後に一定の成果を出す。

建築基準適合判定の基盤機能が呼び出す個々の判定機能のプログラムを用意する必要もある。そこで二方向避難の重複距離の判定について，BIM からデータを抽出し，判定する関数を作成する。また，このアルゴリズムが正しく判定するかどうかを多数の建築物の図面を使って検証する。

構造力学教育ツールについては，複雑形状の静定構造物の構成部材のせん断力図，曲げモーメント図をリアルタイムに描画するものを製作する。また，進捗状況に応じて VR 環境に移植することで，学習効果を高める工夫をしたい。

当初計画し今年度は十分に実施できなかったヘッドマウントディスプレイ（HMD）の活用も進める。これまでに HMD を装着して音声で指示を与える手法を実装したが，音声認識とともに姿勢トラッキング技術を併用したインターフェイスを開発するつもりである。

医療における認知人間工学アプローチの適用
-リスク認知技能の分析を対象に-

デザイン工学部（デザイン工学科）　　青木　洋貴

共同研究者
東京科学大学医学部医学科　　森下　幸治

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究では，救命救急室（ER 室）における医療従事者のリスク認知に着目する．ER 室では，重篤でありかつ激しく状態が変化する患者に対して，医療従事者が適切な救命措置を施している．ここでは見落とし，勘違いといったヒューマンエラーが重大な事故に結びつく可能性があることから，これらを未然に防ぐために，リスク・ハザードを適切に知覚し，重大な事象に結び付く前に対処することが重要となっている．一般に，リスク認知を含む高度な認知技能は意識下に潜った状態で実施されており，他者が聞き出すことが困難であるという根源的な性質を持っている．本研究ではこの困難性に対処するために，以下の報告者のアイディアを活用していく．眼球運動は多くの場合，被験者の注意の分配傾向を明らかにするために用いられる．本研究ではこれにとどまらず，無意識下にある被験者の技能（リスク認知のための工夫，方略）を陽に引き出すためのツールとしても活用していく．具体的には，リスク・ハザードを探索する際の自身の眼球運動を被験者にフィードバックすることを通して，自らの工夫や方略を認識させ，それを言語化させるというアイディアを実装していく．

本研究では，共同研究者の持つ救命救急の知識ならびに提供可能なリソース（救急災害医学分野の医師および看護師の被験者，実験素材）を活用し，申請者が専門とする認知人間工学的な技法に基づき，医療従事者（医師，看護師）の持つリスク・ハザードの認知に関する技能を明らかにすることを目的とする．すなわち，医工連携チームとして，問題にチャレンジしていく．この研究目的の達成のために，ER 室における典型的な状況を撮影した写真について，そこに潜むリスク・ハザードを探索する実験を実施する．この実験では主に経営工学の実践分野で発展してきた KYT（危険予知トレーニング）の方法を援用した手順を踏むとともに，リスク探索時の眼球運動およびそれを利用したインタビューにより得られるデータを獲得する．

２．研究計画

本研究は，これまで報告者が実施してきた研究を発展させるものである．これまでの成果に基づき，2024 年度は医療従事者を被験者としたリスク・ハザード探索実験を実施する．

2024 年度の４月より，リスク・ハザード探索実験のデータ分析方法の検討と開発を実施する．これまで複数の医療従事者を被験者としたパイロットスタディを実施しており，その中でデータを獲得している．被験者の技能に密接に関連する工夫や認知的方略を，インタビューおよび眼球運動のデータから抽出し

ていくための具体的な手順（データ処理，記述，解釈方法とその基準）について，すでに手元にあるデータを用いて検討・開発する．

加えて，リスク・ハザード探索実験を実施し，データを獲得する．5 月-11 月の間に，臨床経験の異なる医療従事者（救命救急科の医師４名）を被験者とした用いた実験を，共同研究者の所属病院で実施する．この実験で得られるデータは，膨大なインタビューおよび眼球運動データである．前段で開発した手順に従い，処理を施し，リスク・ハザード認知の特徴に関する情報をデータから解釈していく．

３．計画の進行状況

２章で述べた 2024 年度の計画のうち，実験は終了している．現時点では得られたデータ分析を実施している．以下に現時点で得られた成果について説明する．実験の概要を説明する．本年度の実施分を含め，被験者は救急災害医学分野の医師 15 名と看護師 14 名である．医師は専門医師群 11 名と臨床医群に分けられ，看護師は熟練群 3 名，専門群 5 名および初心者群 6 名に分けられる．各被験者に対して，ER 室および救急外来の病棟で見られるシーンを示した６種類の写真がディスプレイ上に示され，リスク・ハザードと知覚できるものは何か同定するように指示をされる．このとき同定し口頭によって報告されるリスク・ハザードと，同定時の眼球運動データが記録される．6 種類の写真の概要を表１に示し，実験環境を図１に示す．

表１　写真の概要

Photo ID	Scene depicted	Salient risks/hazards predicted by authors
1	An aged male patient who is mechanically ventilated is lying in a bed in an ICU room. He is under restrained.	An unusually equipped tube. Inappropriate restraint.
2	An aged male patient's position is changed by two nurses in an ICU room. He is mechanically ventilated.	Accidental decannulation.
3	An aged male patient seems to sit up in bed. He is equipped a urinary catheter.	Accidental decannulation/decatheterization. Falls.
4	A patient equipped an extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) in a bed is moved by doctors and a clinical engineer	Accidental decannulation.
5	A group of doctors and nurses are performing an emergency surgery (operation for a thoracotomy) in an ER.	High workload and time-pressure caused by a patient's severe condition.
6	A room for initial care is shown.	N/A



図１　実験環境（写真 ID4 を提示）

現時点で得られている結果について，例を示す．得られたデータに対する分析の１つとして，リスク・ハザード認知実験時の注視データを用い，経験および職域が異なる被験者群について，特に注意を向けている要素は何かについて，パレート分析を適用し明らかにすることを試みている．表２は，実験で用いた写真 ID1 に着目し，各被験者群の注視時間の和が大きい順に注視対象を示したものである．ここでは上位 8 つの対象のみを抜粋している．表においてパーセントで示されているものは，全注視時間に対する累積注視時間の割合を示している．ここでは，累積注視時間の 80%を占める注視対象を，特に注意を振り向けていたものと判断し，それらについてイタリック体で表現している．

職域の違い（医師および看護師）に着目すると，医師に比べると看護師のほうが，特に注意を振り向けた注視対象の数が多い傾向にある．これは，看護師のほうが，より多くのものに注意を向ける傾向があると解釈できる．医師と看護師それぞれについて特に注意を向けられた対象の性質に着目すると，医師の場合は患者の容体に関するものが多いが，看護師はそれに加えて患者の生活の質に関するもの（たとえば着衣の乱れや姿勢）についても注意を向ける傾向があると解釈できる．

それぞれの職域について，熟練度による違いに着目すると，熟練している群のほうが，より多くのものに注意を向ける傾向があると解釈できる．初心者においては，患者の容体に関するクリティカルな情報，あるいはリスク認知において確実に確認すべき情報に注意が集中しているように読み取れる．熟練群については，これに加えてその他の対象にも注意を振り向ける傾向があるようである．

このほか，リスク・ハザード認知における第一発声（初めの気づき），および眼球運動をきっかけとしたインタビューによりリスク・ハザード認知のための方略についても，分析を実施している．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本年度の実施内容の一部について，以下に示す国際会議論文として発表を予定している．

Hirotaka Aoki, Koji Morishita, Takanori Urano, Tomohiro Adachi, Mai Kinoshita and Atsushi Kudo: Elicitation of Risk Perception Strategies in Emergency Rooms Based on KYT Technique and Eye Tracking Stimulated Retrospections: Comparisons between Doctors and Nurses, *Proceedings of the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Florida, USA, 2025 (to appear).

本年度の研究では，リスク・ハザード認知の技能を臨床経験と比較検討することで，経験および職域による特徴が明らかになること

表２　各被験者群における累積注視時間が長い注視対象とその割合

Dr.				Ns.					
Specialist		Resident		Expert		Senior		Junior	
Vital sign monitor	17.3%	*Patient's face*	22.3%	*Patient's face*	12.1%	*Ventilator*	8.5%	*Patient's face*	21.3%
Ventilator	33.7%	*Eternal nutrient*	40.4%	*Breathing tube*	22.5%	*Bed side guard*	17.1%	*Breathing tube*	34.1%
Patient's face	46.8%	*Vital sign monitor*	58.5%	*Ventilator*	31.3%	*Eternal nutrient*	24.9%	*Eternal nutrient*	41.3%
Eternal nutrient	57.6%	*Ventilator*	70.5%	*Vital sign monitor*	39.5%	*Vital sign monitor*	32.5%	*Bed side guard*	47.8%
Bed side guard	63.5%	*Breathing tube*	76.6%	*Eternal nutrient*	46.5%	*Patient's face*	40.0%	*Foot pump (left leg)*	52.4%
Breathing tube	67.3%	Tracheotomy tube	80.6%	*Bed side guard*	53.2%	*Foot pump (left leg)*	45.0%	*Vital sign monitor*	56.8%
IV drip	70.1%	Foot pump (left leg)	84.1%	*IV drip*	56.1%	*Breathing tube*	49.4%	*Ventilator*	61.0%
Foot pump (left leg)	72.8%	Bed side guard	85.2%	*Foot pump (left leg)*	58.9%	*IV drip*	52.0%	*Tubes (cuff pressure)*	63.3%

が見込まれる．まずは特徴の明確化に取り組む．さらに，KYT で期待される他者のリスク・ハザード認知の理解を，簡便にかつ迅速に実現するために，経験および職域による特徴を可視化し，これを医療安全の教育ツールへと展開していくことを継続研究として実施していくことを計画している．なお，本研究は人を対象とした研究に該当している．本研究は，芝浦工業大学生命工学研究に関する倫理審査，東京工業大学人を対象とする研究倫理審査委員会，ならびに東京医科歯科大学医学部倫理審査委員会よりそれぞれ承認を受け，適切に実施していることを付記する． （承認番号は 24-010，2023227 および M2023-216)

室内空間の色温度に関した多面的評価の検討

デザイン工学部（デザイン工学科）　　中島　瑞季

１．序論

住空間における照明の色温度は，使用目的の生活シーンに対して，使用者がふさわしいと感じることで価値が定まると考える．

このふさわしさの評価へ影響を与えるデザイン要素として，高色温度光は興奮を促し，低色温度光は安静を促すといった，人の自律神経へ影響を与える「生理的な作用」と，赤は温かく青は冷たく感じるといった「色味の印象」が挙げられる．

つまり「生理的な作用」と「色味の印象」から影響される評価が，生活シーンに対する色温度の価値を定めると考えることができる．

また人は日常的に光の効果を意識しながら生活しておらず，明確な心的反応を自覚していないもしくは言語化していないことが考えられる．

そこで悟性が働く前の心的反応，すなわち人の感性を，従来行われてきた主観評価に加えて，脳血流量や心拍の変化，視線や瞳孔の反応などを目的に合わせて構成した上で，客観的に観察する多面的な評価より取得する必要があると考えた．

以上より本研究は「生理的な作用」と「色味の印象」が評価に与える影響及び，生活シーンによってその関係は異なるのかについて，脳血流計測と心拍計測を対象に多面的な評価の有効性も含めて明らかにすることを目的とする．

２．研究計画

2.1 評価方法

本研究においては,「生理的な作用」と「色味の印象」から影響された評価を取得する必要がある.「生理的な作用」に関しては 1 日の時間帯変化に着目した．色温度光は外界の時間変化を視覚的に感じるとともに，人の概日リズムに影響を与えることがわかっている[1]．人の概日リズムは約 24 時間周期で[2]睡眠・覚醒状態や体温などの変化が見られるもので，色温度の影響は前述のとおりである．そこで評価の時間帯を日中と日没後の同日２回設定することで，その影響を観察する．

次に「色味の印象」においては，提示する空間の印象や受ける感情について言語を用いた主観評価より取得する．なぜならば色は暖色や寒色といった温度に紐づく印象に加えて，例えば青色であれば具体的に水，抽象的に清涼感、赤色であれば具体的に火，抽象的に情熱といったような連想が生じることが知られ，照明の評価については，光源からの直接光だけでなく，空間内の反射光もふくめて判断するためである．

またこの評価は感性の働きより導き出されたものであることが望ましいため，直感的な心的反応を捉えることが必要である．そのため評価構造を考慮した複数の抽象語を用いて推定するが，評価者が意図しない調整をして印象評価を行う可能性に加えて，光に対する心的反応を自覚しておらず，言語化した評価

に現れないことも考えられる．そこで客観的に評価者の状態を観察する，すなわち調整できない反応を捉えることを試みる．本研究においては光の「生理的な作用」として，興奮や安静状態を確認することが望ましいため，心拍変動の周波数解析によって得られる LF/HF を指標とする．LF/HF は自律神経の交感神経と副交感神経のバランスを数値化するもので，LF は低周波成分で主に交感神経の活動を反映し，HF は高周波成分で副交換神経の活動を反映するとされる．また交感神経が優位の場合は活動的な状態（緊張・興奮）を示し，副交感神経が優位の場合は静的な状態(リラックス・休息)を示す．計測については，非侵襲的で装着が簡便かつ高精度な計測が可能な，電気信号を検出する心拍センサを用いる．

次に言語化されないもしくは曖昧な評価については脳血流計測を用いる．神経活動が活発になると局所的に酸素の消費量が増えるため，それに対する反応として血流が増加し，結果的に酸素化の変化が生じる．脳血流計測はこの酸素化の変化を捉えるもので，神経活動を間接的に評価する指標になる．つまり言語に現れない反応や時系列での反応を観察できる可能性が考えられる．なお脳血流計測には心拍センサと同様に非侵襲的で装着が勘弁かつ，自然な姿勢で計測が可能な NIRS（近赤外線分光法）を用いる．

2.2 評価対象

空間に想定される使用シーンに対してふさわしいと感じる色温度を設定してもらった上で，その空間に対する印象評価を取得する．空間は色温度の変化が視覚的に判断しやすく，眩しさなどの不快感を与えないように，反射の少ない素材でベージュ色の壁面で構成する．

2.3 実験計画

本研究の目的を明らかにするために図１に示すとおり実験計画を設定した．

実験１は住環境における使用シーンと時間帯の関係を明確に確認するために，高・低色温度に対してふさわしさが定まりやすい使用シーンを抽出する．

実験２はふさわしい色温度の設定方法と各評価の実験デザインを検討する．

実験３は実験１、２の結果をもとに，生活シーンにふさわしい色温度と空間の印象評価及び時間帯が与える影響について検討する．

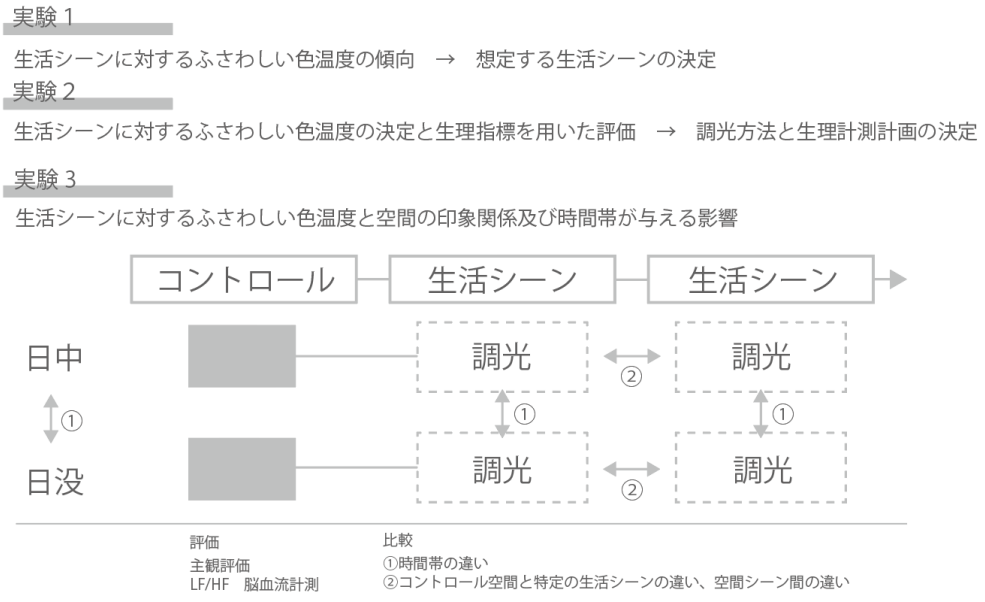


図１　実験概念図

３．計画の進行状況

3.1 実験１：生活シーンに対するふさわしい色温度の傾向

①使用シーンの設定

一般的な分類として JIS Z 9125:2023 屋内照明基準[3]の内，照明の個別要求事項，屋内作業場の照明における住宅を参考に部屋の分類を抽出した．次に部屋で想定される行為と異なる時間帯での使用を考慮し，表１に示すとおり１７の生活シーンを設定した．

表１　生活シーン

○玄関(屋内) 自室(くつろぐ) リビング(他者と)	○浴室 自室(勉強) リビング(一人で)	○洗面所 自室(他者と遊ぶ)	○トイレ 自室(一人で遊ぶ)	△ダイニング(食事)
○：朝と夜の時間帯		△：朝と昼と夜の時間帯		

②色温度の設定

本実験は住空間を想定しているため，JIS Z 9110:2024 照明基準総則[4]の内，照明の一般要求事項，光色及び演色における光色の５つの分類を参考に，自然光に近い昼白色を基準に、色の差を視覚的に明確に判別できるように電球色と昼光色の３つを設定した．評価の際は３つの色温度をそれぞれ写真で提示する．

③評価方法

各使用シーンに対してふさわしいと感じる色温度を１つ選択してもらう．なお使用シーンはランダムな順番で提示した．

④実験協力者

実験協力者は 111 名（平均年齢：20 歳　男：性：65 名　女性：46 名）であった．なお実験は，内容に関する説明をした後に同意を得た上で行った．

⑤結果

縦軸を回答者数として，結果を図２に示す．同一の生活シーンにおける朝と夜を比べると夜に電球色が選ばれやすくなるため，目的は同じでも外界の光変化に同調するようにふさわしいと感じる色温度も変化することがわかる．次に同一の部屋で複数の生活シーンを比較すると，視作業やにぎやかな集まりが想定される場合は昼白・光色が選ばれる傾向にあり，くつろぎの場合は電球色が選ばれる傾向にある．つまり生活シーンによって，機能性もしくは雰囲気の演出が選択に与える影響が異なる可能性が考えられる．また浴室と洗面所においては朝の時間帯に昼白・光色が選ばれ，夜は電球色がやや増える傾向にある．洗面所は身だしなみを整える目的があるため，機能性が求められていることが考えられるが，浴室においては覚醒とリラックスといった状態変化が求められたことでふさわしい色温度が変わった可能性が考えられる．以上より色温度の選択は外界の光変化に影響されるが，

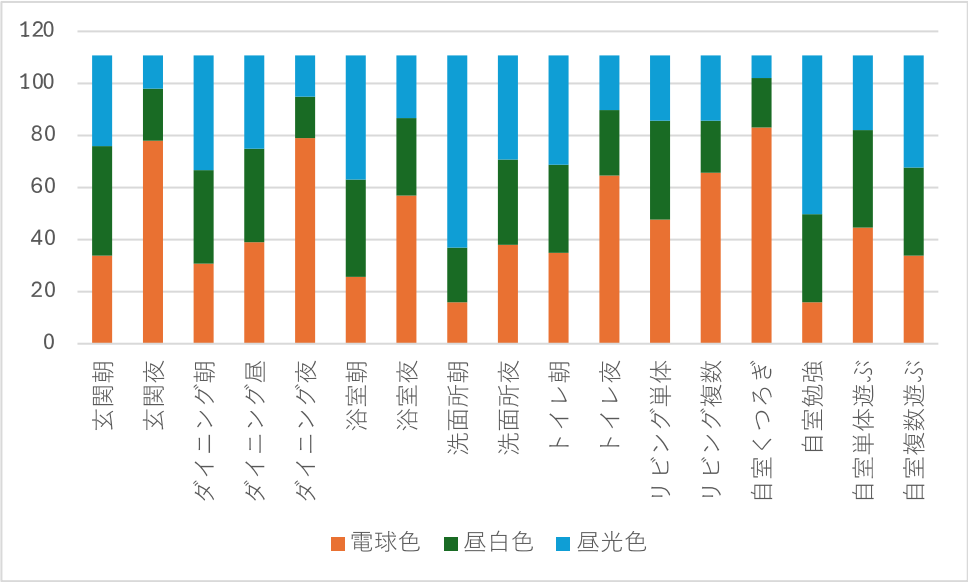


図２　生活シーンに対するふさわしい色温度の回答結果

ふさわしさは生活シーンにおける主目的に応じて異なる理由で決定される可能性があることがわかった．そこで本研究で使用する生活シーンは洗面所(機能性)，リビング(雰囲気)，就寝前の自室(状態)を取り上げる．

3.2 実験２：生活シーンに対するふさわしい色温度の決定と生理指標を用いた評価

①光源の設定

タブレットの画面上操作で約 2200K から 6500K まで(電球色から昼光色相当まで)無段階で調整できる Philips 社の Hue[5]を用いる．

②実験環境

視界全域が空間で占有されるように，十分な高さと幅をもったパーテションで正面と左・右側面の３面を囲い，まわりを見ながら色温度の調整を行う．

③評価方法と手順

心拍変動は UNION TOOL 社のウェアラブル心拍センサ WHS-1[6]を用い，脳血流は NeU 社の HOT-2000 携帯型脳活動計測装置[7]を用いて計測した．手順は，安静 30 秒後にコントロール(6500K)を 60 秒観察し，提示した使用シーンにふさわしいと感じる色温度に調整してもらった後にその空間を 90 秒観察してもらうことを，使用シーン毎に繰り返した．

④実験協力者

実験協力者は３名（平均年齢：22 歳　男：性：3 名）であった．実験１と同様に同意を得た上で行った．

⑤結果

色温度の調整結果の例を図３に示す．

生活シーンによって色温度のまとまりやすさが異なったため，主目的を明確化した上で協力者の解釈を評価後に取得する必要があることがわかった．また電球色が選ばれにくい傾向にあったが，これはコントロールの色温度を 6500K 相当にしたため，電球色の赤みを感じやすかったことと，空間の広さが影響を与えている可能性が考えられる．また生理計測においては個人間ではあるが異なる傾向を示したため，評価を得られる可能性があることがわかったが，十分な反応の取得と比較を可能にするため実験ブロックの時間を再設定する必要がある．



図３　調整結果例

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

実験３の実施を進めているため,終了次第,国際会議での発表及び論文発表を行う予定である．

参考文献

[1] Brainard G.C. et al ： Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, Journal of Neurosience, 21,16, pp.6405-6412, 2001

[2] Czeisler C.A, Duffy J.F et al ： Stability, Precision, and Near-24-Hour Priod of the Human Circadian Pacemaker, Science VOL 284, pp.2177-2181, 1999

[3] JIS Z 9125:2023「屋内照明基準」日本規格協会，pp.28-30, 2023

[4] JIS Z 9110:2024「照明基準総則」日本規格協会，p.8, 2024

[5] Philips 社 Hue, https://www.philips-hue.com/ja-jp（訪問日：2025 年 5 月 6 日）

[6] UNION TOOL 社ウェアラブル心拍センサ WHS-1, https://www.uniontool.co.jp/product/sensor/whs1.html（訪問日：2025 年 5 月 6 日）

[7] NeU 社 HOT-2000 携帯型脳活動計測装置, https://neu-brains.co.jp/solution/nirs/hot-2000/（訪問日：2025 年 5 月 6 日）

身体知デザイン技術の創出

デザイン工学部（デザイン工学科）　　奥　貴紀

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

人工知能（AI）技術の発展に伴い，文書作成やプログラミングといった，ヒトの認知的な営みが定式化され，コンピュータによる置き換えが進んでいる．その一方で，ヒトのように器用な動きの出来るロボット・人工知能が未だ開発されていないことからも分かるように，ヒトの知覚・運動については，認知的な領域と比較して理解が進んでいない．ヒトの巧緻な運動技能は，外科手術や伝統工芸の職人など，現代の社会を支える基盤となっている．また，ヒトの営みのコンピュータへの置き換えが進む中で，スポーツや楽器演奏など，身体性を伴う喜びや創造的活動はその重要性を増すと考えられる．しかし，熟練者の巧緻な運動技能を実現する「身体知」に関する脳神経的なメカニズムは，十分に明らかになっておらず，その身体知を獲得するための訓練法なども確立されていない．そのため，技能伝達が上手くいかずに伝統技能が喪失したり，技能熟達に時間がかかりすぎるため，スポーツや楽器演奏などの技能の習得を半ばで断念してしまったりといった問題がある．

本研究では，物事の本質を分析し理解した上で，多面的なアプローチにより問題解決を図るという，デザイン工学的な考え方に則り，熟練者の身体知について解明し，身体知獲得のための技術開発を行う「身体知デザイン」の概念を提案し，それを用いた巧緻身体技能の獲得支援を行う．

２．　研究計画

「身体知デザイン」技術開発のアプローチとして，ヒトとAIの協調による技能獲得訓練法の個人最適化，及び神経科学の知見に基づいた技能獲得支援の2通りの方法に基づく研究を行う．以下にそれぞれのアプローチについて述べる．

①ヒトと AI の協調によるピアノ演奏の技能獲得訓練法の個人最適化

近年のAI技術の発展に伴い，ヒトとAIが協調してタスクに取り組み双方の能力を拡張する，ヒトとAIの共進化の概念が着目されている．例えば囲碁においては，AIが人間のチャンピオンを打ち破った後，人間の新たな定石が急激に増加している．また，大規模言語モデルを利用したChat GPTは，ヒトの評価を用いるヒューマンインザループ(HITL)を用いた学習により自然な対話を実現している．しかし，こうしたヒトとAIの共進化は主にヒトの認知の領域を対象としており，感覚・運動の領域については，未だ途上である．

本研究では，ピアノ演奏を対象として，ヒトとAIの協調により，運動技能訓練法の個人最適化法を開発する．ピアノ演奏はスポーツと異なり体格・筋力による著しい不利が生じにくいため，熟練者内の体格・筋力の個人差が大きい，そのため，運動の訓練の際に単純に目標とする熟練者の動きを模倣しただけでは，演奏者と目標の個人差により上手く行かない可能性が大きい．本研究では，体格・筋力

の異なる多数の熟練ピアニストの演奏を計測することで，体格・筋力に応じて適切な運動パターンを提案する生成モデルを作成する．提案された運動パターンをピアニストが実際に模倣することでパフォーマンスが向上するかを検証し，検証結果によって生成モデルを更新する，HITL の運動技能獲得訓練を行う．

②神経科学の知見に基づく，ダーツ投擲の支援デバイスの開発

神経科学の領域において，心拍・呼吸などの内的受容感覚と，触覚・体性感覚などの外的な感覚処理能力との関連が注目を集めている．事実，心臓の拡張期では指先への触覚刺激に対して鈍感になる，刺激への反応速度が遅れるなど，心拍のタイミングに関連して，外部からの感覚入力に関する処理能力が変化することが報告されている．しかし，これらの研究は，ボタン押し課題などの研究室環境でのタスクを対象としており，複雑な実環境タスクにおける，心拍と運動技能との関係は十分明らかになっていない．

本研究では，指先の感覚を用いた繊細な姿勢制御とタイミング制御が要求される，ダーツ投げタスクを対象とする．心電図測定を行いながら熟練者にダーツ投擲を行ってもらい，心拍に関連した投擲タイミングと，投擲の成功率の関連を調査し，研究室環境で心拍のタイミングと感覚処理能力の関連性が報告されているように，実環境タスクでも心拍のタイミングの技能への影響が見られるかを検証する．関連性が見られた場合，心臓の収縮期のタイミングを音や振動でフィードバックするデバイスを開発し，収縮期に投擲するように指示することで，投擲の成功率を向上させられるか検証する．

３．計画の進行状況

①ヒトと AI の協調によるピアノ演奏の技能獲得訓練法の個人最適化

本年度では，主に研究実施のための環境整備や，ソフトウェア開発などの下準備に主に取り組んだ．

環境整備

本研究では，熟練のピアニストを計測の対象とするため，グランドピアノと近いタッチを持つ木製鍵盤の電子ピアノ（KAWAI: VPC1）と，私が開発に携わった鍵盤移動量の計測センサ(Oku and Furuya, 2022)を用いてピアノ演奏の計測を行う（図 1）．当該の鍵盤移動量センサは，ピアノ内部の全 88 鍵盤下に設置され，光学センサのフォトリフレクタを用いることで，打鍵のタッチに影響を与えないよう，非接触で演奏の計測を行うことが出来る．また，時間分解能 1 ミリ秒，空間分解能 0.01 ミリメートルの高時空間分解能を有するため，既存の楽器演奏研究で頻用される MIDI では捉えきれない細かな鍵盤の動きを計測出来る．

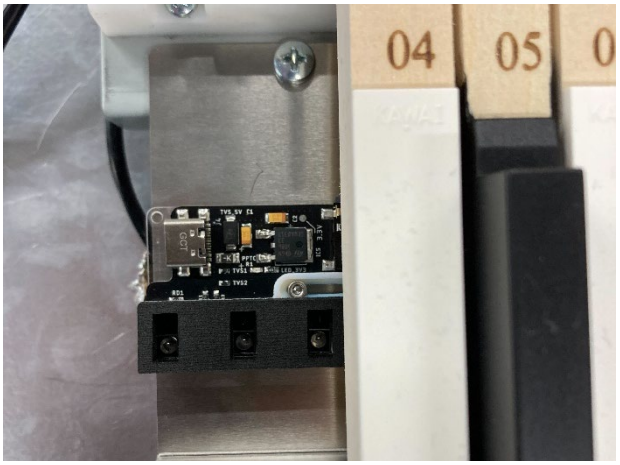


図 1．鍵盤移動量センサ

ソフトウェア開発

本研究は適切なピアノ演奏の運動パターンを提案することを目的としているため，鍵盤の移動量以外にも，演奏時の身体の使い方についても計測し，分析する必要がある．そのため，ピアノ鍵盤移動量センサと同期して，深度カメラ（Orbbec: Femto Bolt）と，複数台の USB ウェブカメラ（Logicool: BRIO）の計測が行える計測システムを開発した．

深度カメラの計測した深度カメラ画像から，Microsoft 社提供の Azure Kinect Body

Tracking SDK を用いて，頭・肩・肘など，全身の関節位置の三次元位置を取得する．また，ピアノ演奏時の手元を撮影した複数台の USB ウェブカメラから，オープンソースの機械学習ライブラリである MediaPipe の Hand Landmarks Detection 機能を用いて，手指の各特徴点の三次元位置を取得する．運動時の動作計測には，身体に再帰反射性の光学マーカを取り付けて計測を行うマーカーベースのモーションキャプチャが頻用されるが，これらのセンサは着用が被計測者の負担になる他，演奏動作の妨げとなるため，手指の計測には適用が難しい．本研究では深度カメラ・ウェブカメラと機械学習ベースのマーカレスモーションキャプチャにより，演奏者の妨げとならない計測システムの構築を目指した．

これらの計測系を用いた，ピアノ演奏の計測・可視化システムを開発した（図 2）．当該システムは，演奏のビデオ映像，ピアノの鍵盤移動量，手指姿勢，全身姿勢を同期して計測し，可視化する．また，手指姿勢・身体姿勢については三次元位置の推定を行っているため，3D の CG を用いて立体的に可視化され，視点を移動して様々な角度からの可視化が可能である．本システムは各センサ情報を同期して提示出来るため，「音に問題があるこの個所では，手指の使い方にこのような問題が見られる」といった課題の発見など，ピアノ演奏指導などへの応用も期待できる．

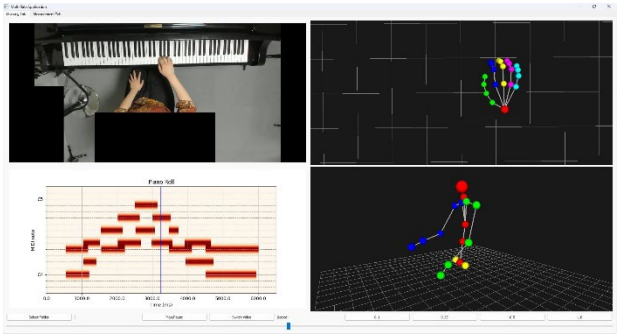


図 2. ピアノ演奏の計測・可視化システム

②神経科学の知見に基づく，ダーツ投擲の支援デバイスの開発

本年度では，主に研究実施のためのハードウェア設計や，ソフトウェア開発などの下準備に主に取り組んだ．

ハードウェア設計

実際のダーツの投擲実験の前段階として，フォースセンサを用いた，2 次元のダーツを模した力制御タスクを行うためのセンサ・ソフトウェア開発を行った．

実験用のハードウェアは，3 つのロードセル（Sparkfun:TAL221）の組み合わせで構成され，センサ頂上のハンドルに加わった押下方向，前後・左右方向の三次元方向の力を計測することが可能である（図 3）．

ロードセルは AD コンバータモジュールに接続され，マイコン（Arduino Uno R4）を介して，PC 側にリアルタイムでセンサ値を出力する．

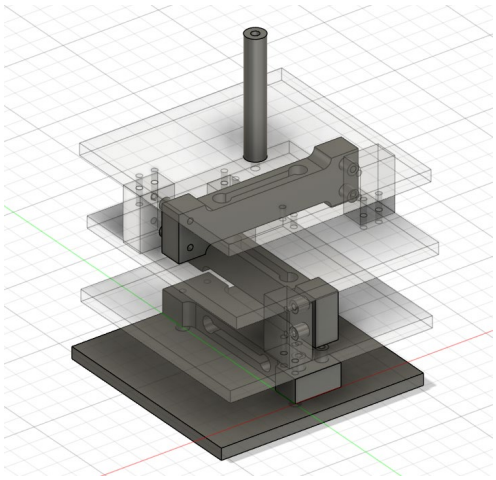


図 3. 三次元力計測センサ

ソフトウェア開発

実際のダーツ投擲実験の前段階として，より実験条件の統制が取りやすい，三次元力センサを用いた二次元でのダーツ様のタスクを行うためのソフトウェアを開発した．被験者はセンサ頂上のハンドルを拇指，示指，中指の三指で把持し，正面のモニタ上のカーソルを操作する．カーソルは水平面内への発揮力と連動して，画面内の上下・左右方向へと移動する．0.1 秒ごとの時間間隔においての力積が一定の値以下の場合は，発揮力に比例し

て，原点から離れた位置へとカーソルが移動し，発揮力を取り除くと原点へカーソルが復帰する．反対に，力積が一定の値以上となった場合は，力積の大きさに応じて，カーソルが力の加わった方向へと，カーリングのストーンのように放出される．このとき押下方向への力は，画面上のカーソルに対して摩擦力のようにはたらき，カーソルの動きを妨げる．

被験者は，心電図センサ（Plux: biosignalsplux）を付けた状態で，ハンドルに向かって力を加えることで，画面上の表示されたターゲットに向かってカーソルを放出し，ターゲット中央に静止させるような，ダーツを模したタスクを行う（図 4）．被験者が十分に訓練を積んだ後に，投擲タイミングと成功率の関連を調べることで，心拍リズムが指先の感覚のみならず，運動技能にも関連するかを検証する．

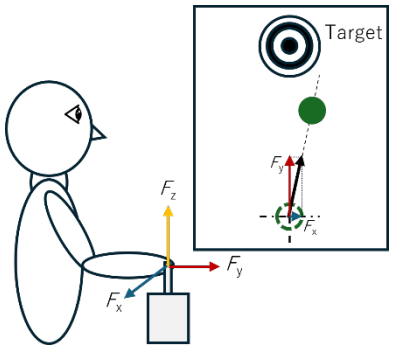


図 4. 実験概要

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本年度では，実験実施に必要な環境整備，システム開発を主に行った．今後は開発したシステムを用いて，被験者を募り，ピアノ演奏の計測実験，ダーツ投擲実験を実施する．

具体的には，①のヒトと AI の協調によるピアノ演奏の技能獲得訓練法の個人最適化について，ピアノ教本やピアノ指導者へのヒアリングによって，指導の現場では，どのような演奏上の問題・身体の使い方の問題についてどのような指導が行われているかについてデータベース化する．また，計測システムのセンサデータを用いて，そのような演奏上・身体上の問題を定式化し，問題のある運動パターン（関節運動・筋活動の協調）と，適切な運動パターンを同定する．このことにより，ピアノ学習者に対して，演奏が完了するとシステムがアドバイスと，適切な運動パターンを提案するシステムを開発する．多数の学習者の手の大きさや筋力などの身体的・生理的なパラメータと，学習者へのアドバイス内容とそれによる問題改善のログを取ることで，被験者の身体・生理的な特性に応じて適切な提案ができるシステムの開発を目指す．

②の神経科学の知見に基づくダーツ投擲の支援デバイスの開発については，被験者数を増やして，心拍リズムと運動技能との関連についての結果の信頼性を高めると共に，学習段階でも被験者に心拍リズムを提示し，特定の位相タイミングで投擲させることによる，運動技能学習における心拍リズムの関係や，被験者に与える報酬を操作して，緊張状態に置かれた状態では，この心拍リズムと運動技能との関連が変化するのかなど，心拍リズムと運動技能の関連についての神経学的な知見を増やすことを目指す．

生体吸収性マグネシウム合金の腐食速度制御を目指した腐食機構の解明

工学部（機械工学課程先進機械コース）　　吉原　正一郎

１．序論

医療用インプラント材料にはステンレス鋼やチタン合金が用いられてきた．これらの材料は患部治癒後に摘出手術が必要であり患者の経済的，体力的な負担となっている．そこで生体適合性，生分解性，および人の骨と同程度の機械的特性を持つマグネシウムが生体吸収性のインプラント材料として有望視されている．しかしマグネシウムはその急速な腐食速度から，組織が治癒する前に機械的完全性を失う可能性がある[1)]．そのため耐食性向上を目的として表面処理や結晶組織の制御など数多くの研究がなされている[2)]．加工やステントを埋め込む際に生じる塑性変形の際，マグネシウムは六方最密構造であり，すべり面が少ないことから室温ではすべり変形よりも双晶変形が優位に起こることが考えられる[3)]．また，先行研究より，結晶方位によって耐食性が異なることが分かっている[4)]．そして，双晶が活性化すると元の結晶配向から約86°の方位差が生じ，結晶組織が変化するため初期配向材料の腐食異方性を変化させる可能性がある[5)]．そのため塑性変形の際の結晶構造の変化と耐食性に与える影響を解明する必要がある．そこで本研究の目的はマグネシウム合金の耐食性向上を目指し，双晶量の変化が耐食性に及ぼす影響を明らかにすることとした．そのため，ひずみの量を変化させて耐食性を調査した．

２．研究計画

2.1　試験片

図１に試験片の形状を示す．試験片は ZM21 マグネシウム合金と AZ31 マグネシウム合金(以下 ZM21 および AZ31)の Φ6 ㎜押し出し丸棒材をダイヤモンドカッターで長さ約 15 ㎜に切断し作製した．その後結晶粒均一化のため熱処理を行った．1 時間で 673K まで上昇，6 時間保持した後，炉冷した．炉冷した後に万能試験機（オートグラフ：島津製作所，AG-20kN)で，3，6 および 9%の圧縮予ひずみを加えた．その後，試験片端面を研磨紙(粒度 #2000)で研磨した．

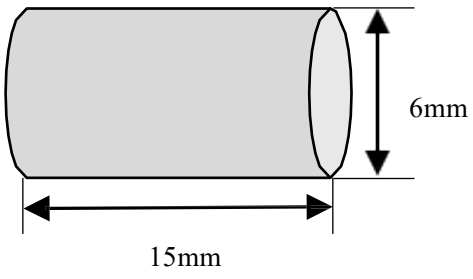


Fig. 1　Diagram of test specimen

2.2　腐食試験

各材料で異なる 4 つの予ひずみ(0, 3, 6, 9%)が付された試験片を用いた. 腐食環境は 9wt%NaCl 溶液で 72 時間浸漬した.経過を得るため腐食開始から 1, 3, 5, 24, 48, 72 時間後に観察と質量測定を行い, 次式(1)で質量損失量(Mass Loss:ML)を算出した.

$$ML = \frac{W_0 - W}{S} \qquad (1)$$

M_L：質量損失量

W_0 ：腐食前試験片質量[mg]

W ：腐食後試験片質量[mg]

S ：試験片表面積[mm²]

2.3　組織観察

図 2 に観察方法の簡略図を示す. 予ひずみを加えた試験片を導電性樹脂に埋め込んだ. 作製したサンプルについて自動回転研磨機を用いて研磨紙#400, 800, 2000 の順で研磨した. その後ルーブリカントを用いて 6μm, 1μm の順で研磨を行い, 電子顕微鏡(JEOL, JSM-7100F)で結晶組織を観察した. 観察視野は中間部とした.

3. 計画の進行状況

3.1　光学顕微鏡観察結果および考察

図 3 に 光学顕微鏡で撮影した AZ31 の IPF マップを示す. ひずみ 0%の試験片では, 表面付近は全体的に基底面配向であるのに対し断面は寒色系方位が目立つ. ひずみ 3%の試験片では, 表面付近は寒色系方位の双晶, 断面では基底面に近い色の双晶 が観察された. 6%, 9%とひずみを増やすにつれて双晶の割合が徐々に増加し, 粒全体に広がることで全体的な方位の逆転が生じた. 双晶の発現が腐食異方性を生じさせることが示唆された.

ひずみ 0%の観察結果から圧縮していない試験片の結晶の c 軸の多くは図 4 のように半

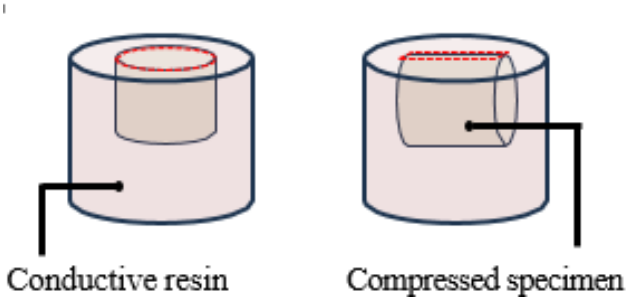


Fig. 2　Resin filling

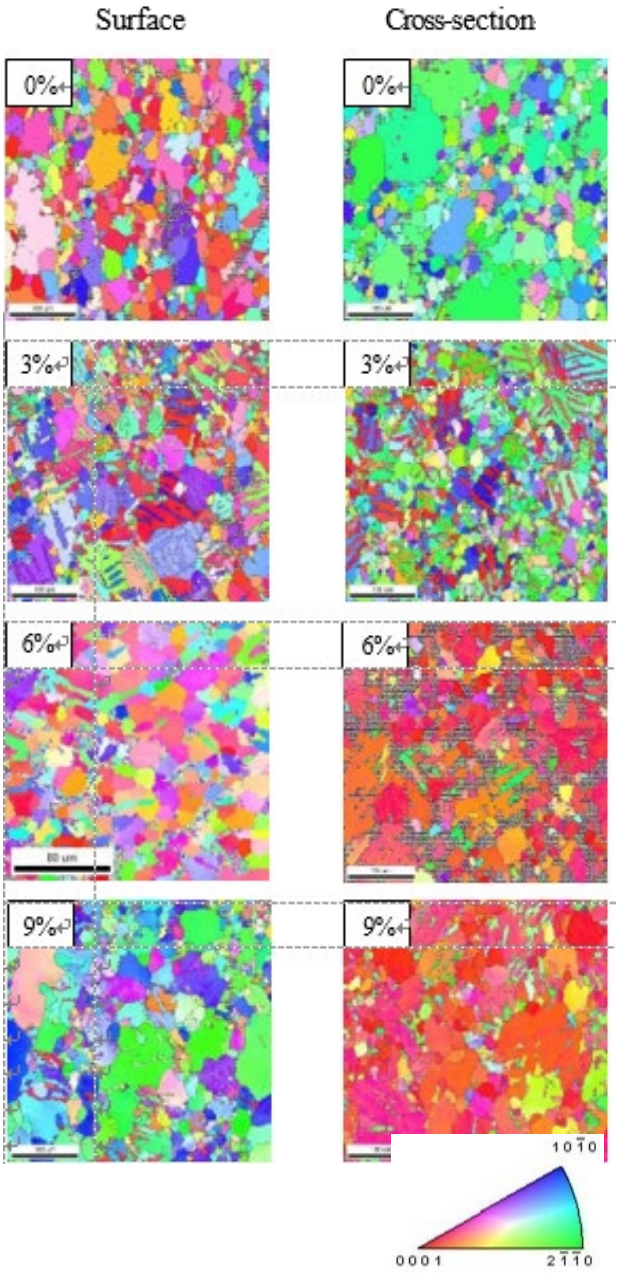


Fig.3 IPF map of AZ31 with 0% to 9% strain assigned

径方向に規則的に配列していることが示唆された．また，このように規則的に配列している試験片を図 4 の方向に圧縮したため観察された双晶は c 軸方向に引張力が加わった際に発現する(10-12)引張双晶であると推察した．

3.2　腐食試験結果および考察

図 5 に質量損失量のグラフを示す．上が AZ31,下が ZM2 である.グラフの傾向として，ZM21 は浸漬開始から 24h までは質量が増加しその後減少した．AZ31 は 72h まで質量増加傾向にあるが傾きが穏やかになっていることから，この先質量が減少すると考えられる．浸漬開始直後から質量が増える理由は腐食生成物によるものである．腐食生成物は金属表面をコーティングし，腐食から守る役割を持つ.そのため質量減少に早く向かう ZM21 と比べて AZ31 の腐食生成物の安定性の高さが示唆された．

図 6 に浸漬初期の試験片観察写真を示す．AZ31 および ZM21 ともに，0%と 9%の試験片は角部付近での腐食が目立つ．これは表面付近と断面の代表的な方位の差が生じさせるガルバニック腐食だと考えた．一方，3%や 6%の試験片では面部での腐食が観察される．これは双晶の存在による双晶と非双晶領域でのガルバニック腐食だと考えた． 3%や 6%は全面でのガルバニック腐食が起きることから，耐食性の低さが示唆された．

４．結言

本研究では異なるひずみを加えたマグネシウム合金の双晶量の変化と耐食性に及ぼす影響について調査した．重要な結果は以下のとおりである．

(1)　ひずみを加えることにより双晶が発現し，さらなるひずみの増加に伴い方位の逆転が生じた．結晶方位により耐食性の違いが生じることから,双晶の発現が腐食異方性を生じさせることが示唆された．

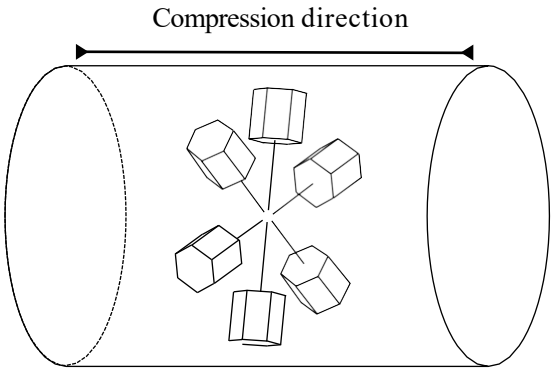
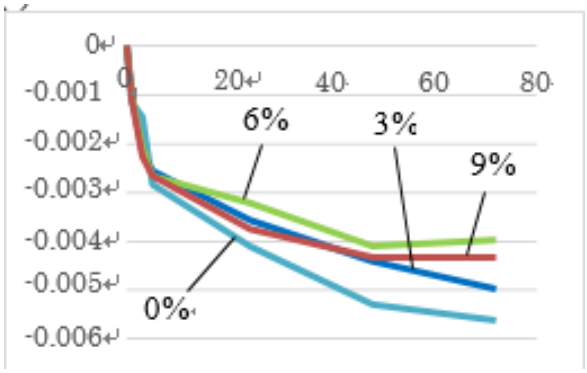
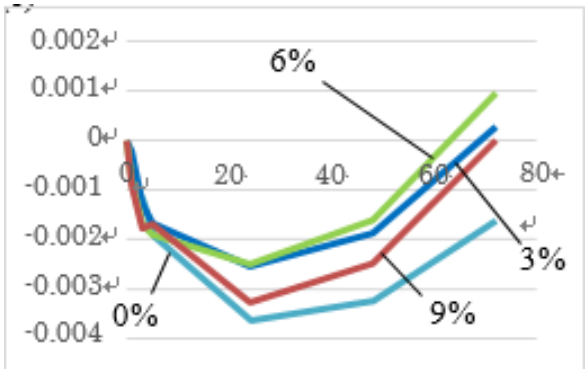


Fig.4　Originally crystal orientation



(a)AZ31



(b)ZM21

Fig.5　Graph of Mass Loss

(2)　質量損失量の算出により，AZ31 の腐食生成物層の相対的な安定性が示された．

(3)　初期腐食の観察から，3%と 6%の試験片において全面での腐食が観察された．これは双晶領域と非双晶領域でのガルバニック腐食だと推察され，双晶は全面に発現していることから，3%および 6%の試験片の耐食性の低さが示唆された．

参考文献

1)　廣本祥子，“生体用マグネシウム合金の腐食挙動”，材料と環境，63 巻，pp371-377(2014).

2)　Zhenyu Lai, Jiawei Chen, Yunpeng Yu, Min Luo, Haifeng Li, “Effect of magnesium hydroxide on the properties of fireproof coatings for steel structure based on magnesium phosphate cement”, Case Studies in Construction Materials, vol.21, 2024.

3)　石田智広，渋谷慎兵，加藤準治，寺田賢二郎，

京谷孝史，安藤大輔，小池淳一，“六方晶金属の結晶塑性・変形双晶構成モデル”，Transactions of JSCES, No.20120014.

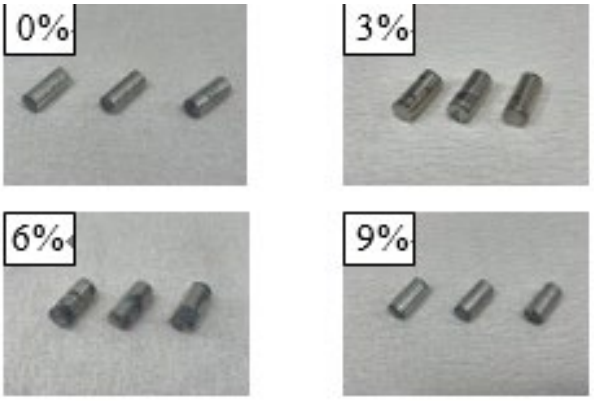
4)　花山環，“生体吸収性ステント用マグネシウムの腐食挙動に及ぼす結晶組織の影響”，2023 年度卒修士論文.

5)　Ying Xiong, Tao Zhu, Jie Yang, Yi Yu, Xinghua Gong, “Effect of Twin-Induced Texture Evolution on Corrosion Resistance of Extruded ZK60 Magnesium Alloy in Simulated Body Fluid”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.29, pages 5710-5717, (2020).

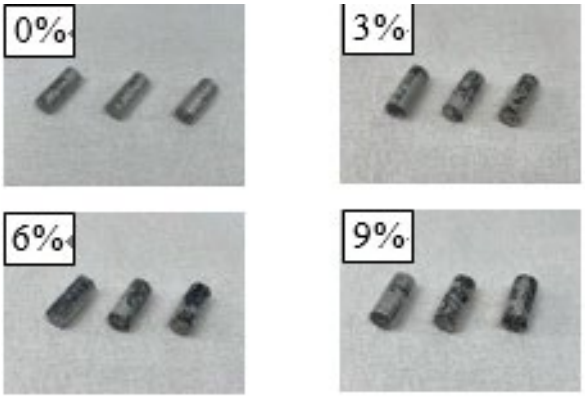
５．今後の研究計画及び学会,論文等投稿・発表状況

5.1　今後の研究計画

腐食挙動に影響を及ぼす内部因子として，双晶について検討したが，今後は，高強度を保持したまま高い延性を維持できる結晶構造である倍モーダル構造に着目したい．すなわち，粒径の違いに起因する粒界密度による電位差によって腐食が促進し低耐食になったという報告があり，このようにバイモーダル構造の耐食性に関しては腐食挙動が未解明である．そこで，今後は，結晶構造の粒径分布の違いが腐食特性に与える影響を解明したい．



(a)AZ31



(b)ZM21

Fig.6　Corroded test specimen

5.2　学会論文，投稿

2025 年 7 月にフランス，Tours 市で開催される「International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials Processing, fabrication, Properties, Applications」通称 THERMEC2025 の国際会議で，「Effects of Changes in Crystal Structure by Plastic Deformation on Corrosion Resistance of Magnesium Alloys」の題目で発表する予定である．

上記の国際会議で，発表後，査読付き論文に投稿を予定している．

最後に，プロ研（科研費連動型）の助成を受けましたこと，心より感謝いたします．

Low-temperature fabrication of Ge thin films by metal-induced crystallization method

工学部 物質化学課程 環境・物質工学コース　Narin Sunthornpan

１. Paper introduction

The advancement of thin-film semiconductors on flexible substrates offers significant potential for various electronic applications, including high-speed transistors, optical devices, and solar cells. Semiconductor materials include elements like silicon (Si) and germanium (Ge), as well as compounds such as gallium arsenide (GaAs). Among group IV semiconductors, Si remains the most widely utilized due to its cost-effectiveness and availability. However, Ge is gaining attention as a next-generation material for electronic applications, thanks to its superior carrier mobility, smaller bandgap, and enhanced compatibility with III-V compound semiconductors. Ge is particularly advantageous in the lower layers of multijunction solar cells for improving infrared absorption. For flexible substrate applications, a low-temperature process is necessary for the efficient deposition of Ge thin films.

Metal-induced crystallization (MIC) has emerged as an effective technique for crystallizing amorphous Ge (a-Ge) at substantially lower temperatures compared to solid-phase crystallization, offering simplicity and scalability for large-area applications. Metals such as aluminum (Al), silver (Ag), and gold (Au) are commonly used as catalysts in MIC. Among them, Au is especially effective in lowering the crystallization temperature of a-Ge thin films to below 300 ° C, enabling the fabrication of high-quality crystalline Ge (c-Ge) thin films on flexible substrates like polyimide. Notably, crystallization temperatures as low as 125 ° C have been achieved by combining MIC with ion bombardment.

While a stabilizing insert layer is typically employed between Au and a-Ge layers to prevent diffusion and optimize crystallization at around 250 ° C, high-quality Ge films with atomically smooth surfaces and hole mobility of approximately 100 cm^2/Vs have been produced at ~170 ° C without such layers. Nonetheless, enhancing the grain size of Ge remains a challenge. Since Au triple grain boundaries are potential nucleation sites for Ge crystals, controlling the size of Au grains offers a pathway to increase Ge grain size. This study confirms that pre-annealing to enlarge Au grain size improves Ge grain size, resulting in enhanced hole mobility reaching nearly 150 cm^2/Vs. Additionally, evidence of a recrystallization mechanism

was identified, suggesting an additional factor contributing to the growth of c-Ge grains.

2. Research program

In this experiment, Au film served as a catalyst for Ge thin-film crystallization. Au/a-Ge bilayer films were fabricated on Si wafers with a 100-nm SiO_2 layer using RF magnetron sputtering. Si substrates were ultrasonically cleaned with acetone and ethanol before deposition. Au films (10 nm thick, 99.99% purity) were deposited at 0.67 nm/s and pre-annealed at 100-200 °C under ~10^{-6} torr. Subsequently, a-Ge films (21 nm thick, 99.999% purity) were deposited at 0.36 nm/s. Crystallization was achieved via annealing at 200 °C in an N_2 ambient with a 0.2 °C/min heating rate.

During crystallization, Ge atoms diffuse into Au to form an alloy, followed by c-Ge nucleation and lateral growth, leading to a layer exchange where the c-Ge layer follows the original Au layer thickness.

X-ray diffraction (XRD) and in-situ XRD analyzed crystallization. SEM and EBSD examined surface morphology and crystal orientation after Au removal, while Hall effect measurements assessed electrical properties using a Greek cross structure with a perpendicular magnetic field.

3. State of progress

The EBSD images of Au films (Figs. 1(a)-(c)) show improved (111) orientation as the pre-annealing temperature increases, confirmed by the stronger Au(111) XRD peak (Fig. 1(d)) and smaller FWHM values, indicating enhanced crystallinity. Grain size analysis suggests the growth of (111)-oriented grains at the expense of others, reducing grain boundaries, including triple grain boundaries that act as nucleation sites for Ge crystals in the MIC process.

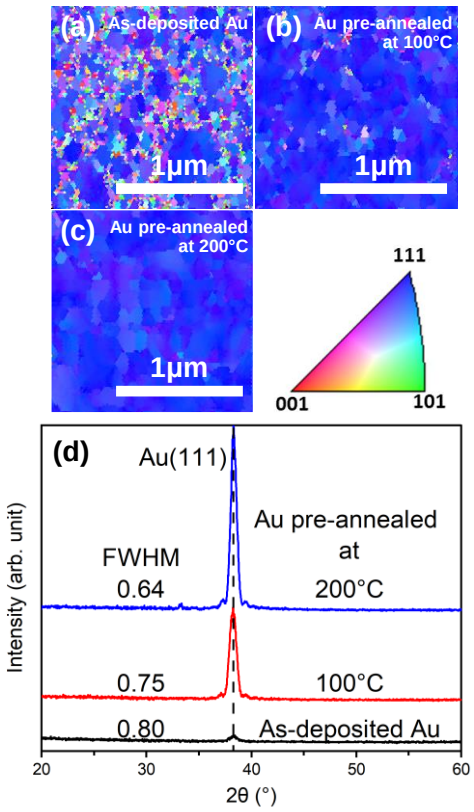


Fig. 1 (a)-(c) EBSD mapping images and (d)XRD profiles for different pre-annealing conditions of Au films. In the EBSD measurements shown in (a)-(c), the observation is normal to the film plane.

SEM micrographs (Figs. 2(a)-(c)) reveal smooth Ge thin-film surfaces after annealing at 200 °C for 1 hour, with samples pre-annealed at higher temperatures showing narrower orientation distributions (Figs. 2(g)-(i)) derived from EBSD measurement (Figs. 2(d)-(f)) and larger Ge grains. XRD data (Fig. 3(a)) further confirm increased Ge(111)

diffraction intensity, and grain size analysis (Fig. 3(b)) shows a significant increase in Ge grain size (~10 μm) with pre-annealed Au. This suggests that grain growth dominates over nucleation, reducing triple grain boundaries and improving recrystallization efficiency. In-situ XRD profiles during MIC annealing show Ge crystallization begins at ~160 ° C, with pre-annealed Au layers showing higher initial crystallinity compared to as-deposited Au.

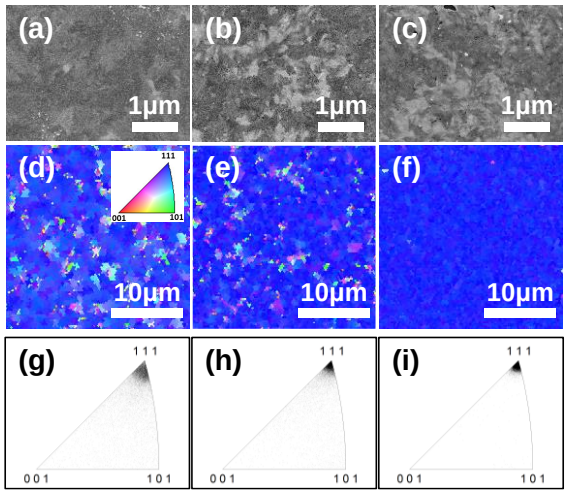


Fig. 2 (a)-(c) SEM micrographs, (d)-(f) EBSD mapping images, and (g)-(i) orientation distribution plots of Ge thin films obtained after annealing at 200 ° C for 1 hour. Ge films are obtained by MIC with (a), (d), (g) as-deposited Au, (b), (e), (h) Au pre-annealed at 100 ° C, and (c), (f), (i) Au pre-annealed at 200 ° C.

Enhanced crystallinity led to improved hole mobility (~150 cm^2/Vs) in Ge films crystallized with pre-annealed Au (Fig. 3(e)), although slightly higher hole density (Fig. 3(f)) suggests some structural defects. The larger Ge grain size indicates fewer nucleation sites and highlights the role of recrystallization during growth. Early-stage observations at 165 ° C (Figs. 5(a)-(d)) show pre-annealed Au promotes compact Ge clusters with smoother edges and larger (111)-oriented grains, supporting grain growth dominance due to the reduced number of nucleation sites.

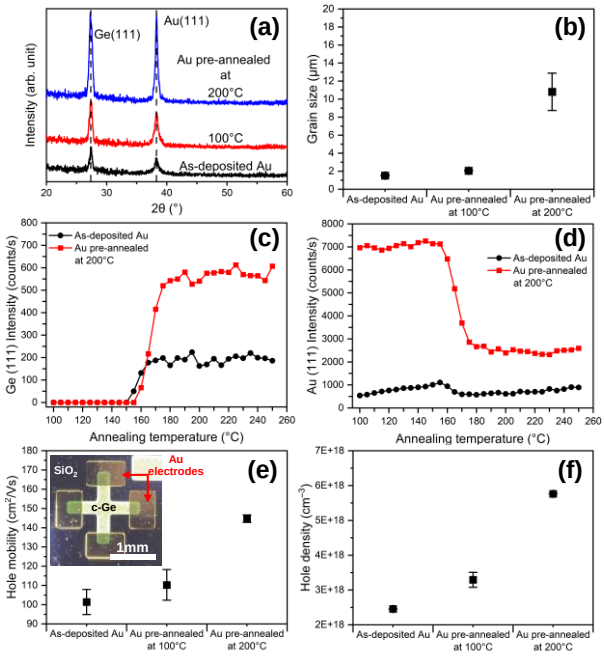


FIG. 3 (a) XRD profiles and (b) grain size of Ge thin films obtained by MIC with different pre-annealing conditions. Evolution of the (c) Ge(111) and (d) Au(111) diffraction intensities during in-situ XRD measurement with different pre-annealing conditions. (e) Hole mobility and (f) hole density of Ge thin films obtained by MIC with different pre-annealing conditions.

To get an insight into the growth behavior, the initial stage of crystallization was also observed. The initial state was obtained by crystallization at 165° C without a holding time. That is the temperature is immediately reduced as soon as it reaches 165° C. Figs. 4(a) and (c) show an SEM

image and EBSD image, respectively, of the initial state of c-Ge cluster obtained by MIC using an as-deposited Au. The cluster shape is dendritic which is composed of several crystal grains. On the other hand, the c-Ge cluster obtained by MIC using pre-annealed Au (Figs. 4(b) and (d)) is more compact with a smoother edge and has a larger (111)-oriented crystal grain, which is also reflected in the orientation distribution plots in Figs.4(e) and (f). This result shows that grain growth is more dominant than nucleation in the MIC using pre-annealed Au probably due in part to the reduced number of nucleation sites by the pre-annealing process.

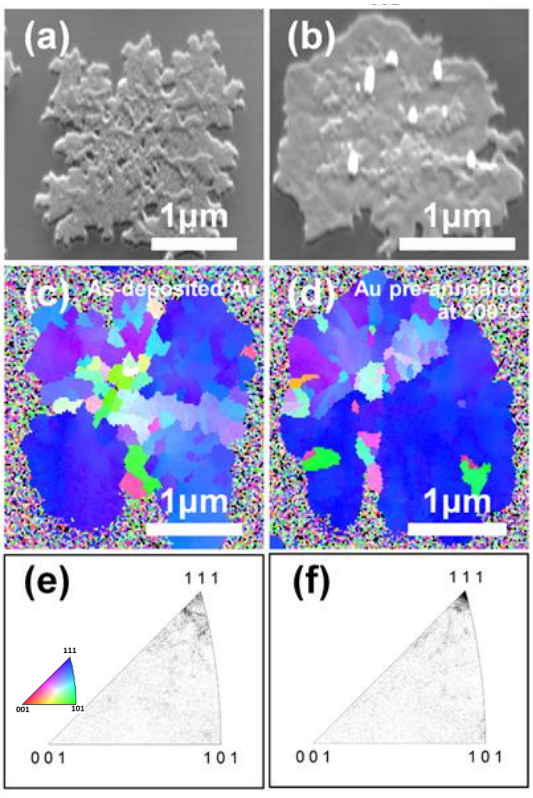


Fig. 4 (a),(b) SEM micrographs, (c),(d) corresponding EBSD mapping images and (e),(f) orientation distribution plots of Ge thin films annealed up to 165 °C without a holding time. The Ge films are crystallized by MIC with (a),(c),(e) as-deposited Au and (b),(d),(f) Au pre-annealed at 200 °C. The EBSD observation is normal to the film plane.

The MIC process likely involves reversible Ge transport between c-Ge and surrounding Au, driven by recrystallization. Pre-annealed Au, with larger grains and fewer grain boundaries, enhances recrystallization and facilitates (111) grain growth. The fluid behavior of the AuGe alloy at low temperatures, observed in TEM studies, likely contributes to Ge crystallinity by acting as a solution-like growth for Ge transport. This fluidity, linked to dislocation mobility in pre-annealed Au, aids recrystallization and leads to high-quality Ge films with dominant (111) orientation, as seen in the final state (Fig. 2). The findings highlight the critical role of pre-annealing in optimizing crystallinity and grain growth during the MIC process.

４. Future program, paper submission and results briefing

Additional experiments will be conducted to further understand the impact of pre-annealing temperature on the MIC process, focusing on optimizing grain size and orientation for improved electrical properties, especially the improvement of career density which is crucial for reduce on/off ratio. These findings have been published in Journal of Alloys and Compounds (N. Sunthornpan, K. Kyuno, Journal of Alloys and Compounds 1007 (2024) 176428.).

高速ヒドリド伝導性エピタキシャル薄膜の開発と その電気化学デバイス応用

工学学部物質化学課程化学・生命工学コース　　大口　裕之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年ヒドリド伝導が新規なイオン伝導現象として注目されている。H_{1s}軌道に 2 つの電子が入った電子構造を持つヒドリドは、酸化物イオンやフッ化物イオンと同程度の半径(約 1.6 Å)を持つ大きなイオンである(図 1)。この

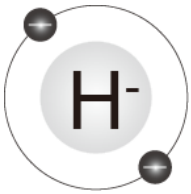


図 1 ヒドリドの模式図。

大きな体積中に電子が 2 つしかなく、その電子雲は容易に形を変えられる(つまり分極率が大きい)ため、隙間の少ない固体中であっても軟体動物のようにすり抜けることができる。したがって、イオンが固体中を素早く移動する高速ヒドリド伝導体が開発可能であり、その先に、ヒドリド伝導を応用した新型電池や燃料電池やセンサなどの開発が期待される。しかもヒドリドは、Mg 並みの負の大きな酸化還元電位(-2.25 V vs SHE)を示し、なおかつ最軽量元素である水素のイオンであるため、前述の蓄電・発電デバイスは従来型より高エネルギー密度になり、センサは高感度化できるのである。ただし、デバイスの室温動作に必要とされる室温伝導率 10^{-2} S cm^{-1} 以上の超高速ヒドリド伝導は実現困難であり、この要求を満たした材料はこれまでに LaH_3 のみである[*Nature* 616 (2023), 73.]。しかも、LaH_3 も 100 ℃以上で水素抜けを起こす実用上の欠点を抱えている。このような現状と、デバイス開発時には電極などとの相性に合わせて複数のヒドリド伝導体を用意しておくべきであることを考慮すると、高速ヒドリド伝導体の汎用的開発指針の確立が必要である。

汎用的開発指針を構築する研究対象として申請者が目を付けたのがペロブスカイト水素化物 MLiH$_3$ (M = Ca, Sr, Ba)のエピタキシャル薄膜である(図 2)。

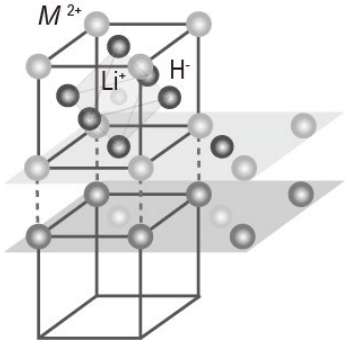


図 2 単結晶基板上に成長した MLiH$_3$ エピタキシャル薄膜。

ペロブスカイト水素化物は Na を置換すると室温で 10^{-5} S cm^{-1} 程度の伝導率を示す優れたヒドリド伝導体となる。しかも格子変形や組成揺らぎを受容する能力の高いペロブスカイト構造を取るため、材料設計を施しやすい材料である。

また、エピタキシャル薄膜も高い材料設計能力を有している。エピタキシャル薄膜は単結晶基板上に成長した単結晶性薄膜であり、

基板と膜の界面でお互いの原子が向き合って整列しているため、原子間のトータルの相互作用が強くなる。そのため、この相互作用を上手く使えば特定の結晶構造をピン止めできるほか、基板材料の原子間隔と薄膜材料の原子間隔を一致させて薄膜格子を歪ませることもできる。また、格子整合度の異なる基板と膜の組み合わせにするとピン止め効果(構造安定化効果)や歪みの度合いを変えられることから、格子操作の有効性を系統的に調査可能である。

ペロブスカイト水素化物にエピタキシャル薄膜を使って材料設計を施すにはエピタキシャル薄膜が必要だが、その合成には誰も成功したことがなかった。ところが申請者は、申請者の持つ世界で最も進んだ水素化物エピタキシャル薄膜合成技術を駆使して、昨年度ついに、$SrLiH_3$ と $BaLiH_3$ のエピタキシャル薄膜合成に成功した[*ACS Appl. Energy Mater.* 7, 2810−2815 (2024).]。しかも、申請者の研究室で並行して行っている他の水素化物研究で、エピタキシャル薄膜を使った格子安定化および歪み導入の実証にも成功している[2024 応用物理学会春 21p-D903-3]。

２．研究計画

2024 年度には本学より支援を受けて測定環境を構築し、それを用いて、基盤研究 B の研究課題として 2025 年度より開始することが決まっている高速ヒドリド伝導体開発を加速させる。基盤 B 研究では、ヒドリド伝導を示す代表的ペロブスカイト水素化物である $CaLiH_3$ に対して、エピタキシャル薄膜でしかできない格子操作を施し、段階的に伝導率を増大させて、最終的に室温で伝導率が 10^{-2} S cm^{-1} 以上の超高速ヒドリド伝導を実現する計画である。

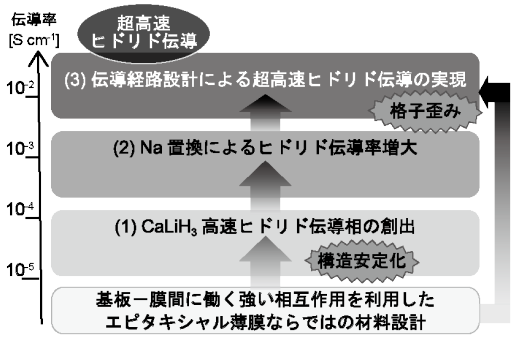


図 3 本研究の概略図

３．計画の進行状況

2024 年度研究は、結晶を多面的に評価できる計測環境を整備した。また、高いレベルで水素化物薄膜を合成・評価できる専門人材の育成にも注力した。

結晶評価手法

・弾性反跳検出分析(ERDA)とラザフォード後方散乱分析(RBS)

高エネルギーの酸素イオンビームを試料に照射した際に、前方に飛び出す軽元素(H や Li など)を検出する手法が ERDA であり、Mg 以上の重元素によって後方散乱された酸素イオンを検出することで間接的に重元素を検出する手法が RBS である。これらを同時に行うことで軽元素から重元素までを一度に定量評価できる組成分析手法となっている。多くの組成分析法が苦手とする水素の検出をできるうえに、水素の定量法として一般的な中性子散乱のように試料体積を大きくする必要がないため、薄膜の評価に適している。本測定は京都大学量子理工学教育研究センターにおいて実施した。

・放射光光電子分光を用いた電子構造観察

高輝度な放射光を用いて行う光電子分光法であり、通常の光電子分光よりも解像度良く電子構造を観察可能である。また、使用する装置が大気非暴露試料搬送機構を備えており、わずかな湿気で変質する水素化物の評価に適している。本測定は高エネルギー加速器研究機構において実施した。

・X 線逆格子マッピング

X 線回折逆格子スポットの周辺を走査して２次元マップを作成する手法である。結晶の

格子定数を決定できるほか、基板と膜が界面で連続性を保って成長しているかや、どの程度結晶が歪んでいるかなどを定量的に評価できる。本測定は本学工学部先端電子工学コースの中野匡規教授研究室や、物質材料研究機構の原田尚之主任研究員研究室において実施した。

以上の評価手法を新規に習得したことにより、我々がこれまでできておらず、また結晶操作による物性開発に欠かすことのできない、膜組成の決定、水素化物電子構造の変化の観察、結晶歪みの定量的評価が可能となった。

人材育成

博士学生 1 名と修士学生 4 名が水素化物エピタキシャル薄膜合成を習得した。博士学生 1 名と修士学生 2 名が ERDA&RBS 測定を習得した。博士学生 1 名が放射光光電子分光測定と X 線逆格子マッピングを習得した。

博士学生 1 名はメリーランド大学(World University Ranking 112 位)の Takeuchi 研究室において 4 か月間の研究留学を行った。

4．今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

今後の計画

今年度は、今年度に整備を行った評価環境を活用しつつ、水素化物エピタキシャル薄膜を用いた結晶操作によりヒドリド伝導率の高い $CaLiH_3$ の合成に取り組む。またここでは紙面の都合上割愛するが、次年度以降は、$CaLiH_3$ に対して、エピタキシャル薄膜でしかできない格子操作を施し、段階的に伝導率を増大させて、最終的に室温で伝導率が 10^{-2} S cm^{-1} 以上の超高速ヒドリド伝導を実現する。以下に研究の詳細を記す。

(1) $CaLiH_3$ 高速ヒドリド伝導相の創出

ペロブスカイト水素化物 $MLiH_3$(M = Ca, Sr, Ba)では M のイオン半径が小さいほどヒドリド伝導率が高くなり、$CaLiH_3$ において伝導率が最高になると知られている[*ACS Appl. Energy Mater.* 5, 2968 (2022).]。そして、$CaLiH_3$ の室温伝導率を伝導活性化エネルギーから見積もると 10^{-4} S cm^{-1} 程度にもなる。しかし $CaLiH_3$ は、M と Li のイオン半径比により決まるペロブスカイト安定領域の外に存在する化合物であり合成には誰も成功していない(図4)。そこで本研究では、エピタキシャル薄膜の構造安定化効果によりペロブスカイト安定領域を拡張し $CaLiH_3$ 相を創出する。

薄膜合成は、申請者独自のラジカル水素反応性赤外レーザー蒸着法を用いて、実績豊富

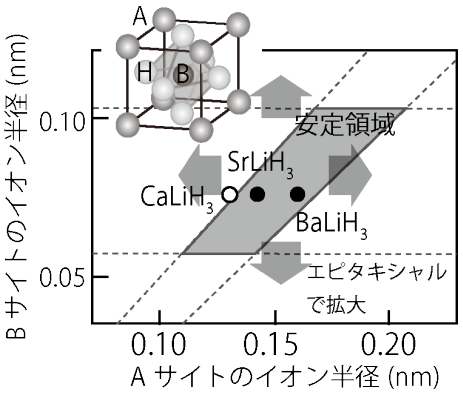


図 4 ペロブスカイト水素化物の安定領域。

な $SrLiH_3$ エピタキシャル薄膜の合成手法を模して行う。合成の際には、出発原料には CaH_2-LiH の 2 種類の混合ペレットを使用する。そしてこの原料を赤外レーザーにより加熱する。ラジカル水素は薄膜が十分に水素を取り込み量論比のペロブスカイトとなることを助ける。基板には $SrLiH_3$ 研究で実績のある $MgAl_2O_3$ 単結晶や、格子定数が $CaLiH_3$ (3.63 Å)と近く高い構造安定化効果が期待される $NdCaAlO_4$ (3.69 Å) 単結晶などを使用する。薄膜成長温度は、水素化物相が十分結晶化し、なおかつ水素抜けによる分解が起こらない 100℃から 300℃程度を予定している。$CaLiH_3$ 相の成長および配向性・結晶性の評価は X 線回折法(XRD)により、また組成は ERDA&RBS により決定する。

学会

第 71 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッ

セほか （2024 年 9 月）

1. 電池応用を目指した LiBH4 薄膜の評価
   ○福士 英里香、戸澤 拓海、大口 裕之
2. エピタキシャル薄膜を用いた LiH 物性制御
   ○大脇 一眞、宗房 幸太、原田 尚之、大口 裕之
3. MgH2 薄膜の高品質化をもたらすラジカル水素供給条件の検討
   ○下萬 祐暉、宗房 幸太、磯田 洋介、間嶋 拓也、菅 大介、原田 尚之、大口 裕之
4. 高品質 BaH2 薄膜の合成に適したラジカル水素供給条件の探索
   ○多田 希、市岡 俊樹、福士 英里香、大口 裕之
5. BaH2 薄膜のヒドリド伝導率における La ドープの影響調査
   ○春日井 若菜、多田 希、大口 裕之

第 72 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学 野田キャンパス （2025 年 3 月）

1. 高結晶性 MgH2 エピタキシャル薄膜の合成と基礎物性評価
   〇下萬 祐暉、間嶋 拓也、松木 伸行、原田 尚之、中野 匡規、大口 裕之
2. SrLiH3 エピタキシャル薄膜の組成調査
   〇石橋 悠磨、福士 英里香、下萬 祐暉、間嶋 拓也、原田 尚之、大口 裕之
3. 赤外レーザー蒸着法を用いた高品質 SrH2 薄膜の合成
   〇河原 幸生、中野 匡規、原田 尚之、大口 裕之

論文

1. H-Radical Reactive Infrared Laser Deposition of LiH: A Method for Growing High-Quality Metal Hydride Epitaxial Films
   ○K. Munefusa, E. Fukushi, T. Harada, H. Oguchi
   ACS Appl. Inorg. Chem. 0(-), - (2025)
   [DOI: 10.1021/acs.inorgchem.4c05449]

高分子モノリスのクリスチャンセン効果を用いた温度応答性調光材料の開発

工学部（物質化学課程 化学・生命工学コース担当）　永　直文

１．序論

調光機能を有する「スマートガラス」はプライバシー確保を主目的として、建物の外壁の窓、自動車等のルーフ、室内パーティションなど様々な箇所で使われるようになってきている。現在用いられているスマートガラスはその光透過性を「電圧の印加」により調整するタイプのものが主流である。また、「物質の温度相転移」を用いた温度応答性調光ガラスも検討されており、建物の冷暖房、照明に要するエネルギー消費を効果的に低減することができる地球にやさしい技術として注目されている。これらの調光ガラスでは、相転移温度を境界として on-off 状態が切り替わるが、状況によっては温度に応じた on-off の中間状態をとり得るグラジエントも好ましいと考えられる(Fig. 1)。また、「スマートガラス」の普及の課題となっているコスト、メインテナンスの観点から、特殊な材料を用いないよりシンプルな設計が理想的である。

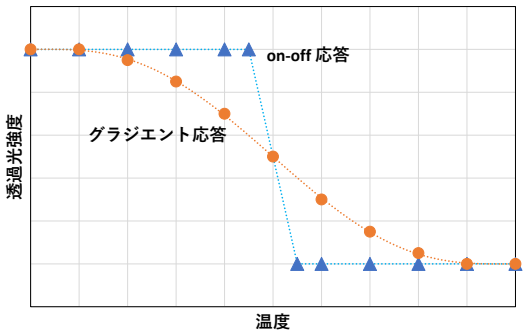


Fig.1 温度応答性調光ガラスの応答モデル

本研究では、温度に応答して光透過性を調整することができる「グラジエント温度応答性調光材料」の開発を目的に、「溶媒を含浸した高分子モノリス」の「クリスチャンセン効果」を用いて（可逆的に）低温時には光透過性が高く、温度の上昇に伴い光透過性が徐々に低下し、高温時には光を通さなくなる温度応答性材料の開発とスマートガラスへの応用の可能性について検討した。

２．研究計画

（１）高分子モノリスの合成

3 官能アクリレートの Trimethylolpropane propoxylate triacrylate (TPT)とα,ω－ジアミンとの Dimethyl sulfoxide (DMSO) 溶媒中での aza-Michael 付加反応により高分子モノリスを合成した(Fig. 2)。以下に TPT-ODA 反応系([NH]/[acrylate] = 1.0 mol/mol、モノマー濃度 15 wt%)における高分子モノリスの合成方法を記す。スクリュー管に TPT (0.413 g, 0.64 mmol)、ODA (0.0692 g, 0.48 mmol)、DMSO (2.73 g)を加えて撹拌し、反応溶液を調製した。この反応溶液を 10 mL アンプル管に移した後、45 ℃の恒温槽で 48 時間加熱した。得られたサンプルをアンプル管から取り出し、多量の Methanol に浸漬させて洗浄した後、風乾し、室温で 6 時間減圧乾燥した。得られた高分子モノリスについて、赤外吸収(FT-IR)スペクトルによる分子構造解析、走査型電子顕微鏡(SEM)による表面構造観察を行った。DMSO 中での呈色が確認された TPT-ODA (Octamethylenediamine)高分子モノリスについては、紫外可視分光法(UV-Vis)による光学的

特性解析を行った。

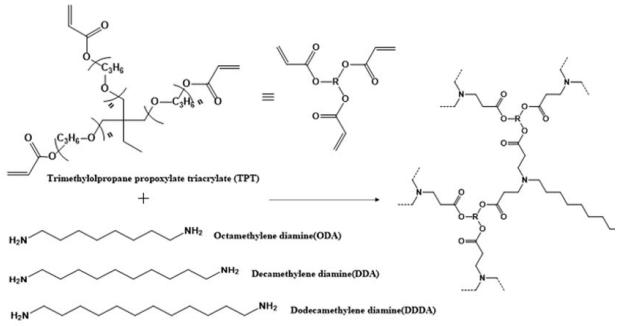


Fig. 2. Synthesis of porous polymers by addition reaction of TPP and α,ω-alkane diamine.

３．計画の進行状況

Fig. 3 に TPT-ODA 反応系(モノマー濃度 15 wt%、[NH]/[acrylate] = 1.0 mol/mol)の FT-IR スペクトルを示す。TPT のスペクトルにおいて確認された 1640 cm^{-1} 付近の C=C 由来のピーク、および ODA のスペクトルにおいて確認された 3350 cm^{-1}、1560 cm^{-1} 付近の第一級アミンに由来するピークが、反応後の高分子モノリスのスペクトルにおいては減少したことから、aza-Michael 付加反応の進行が確認された。

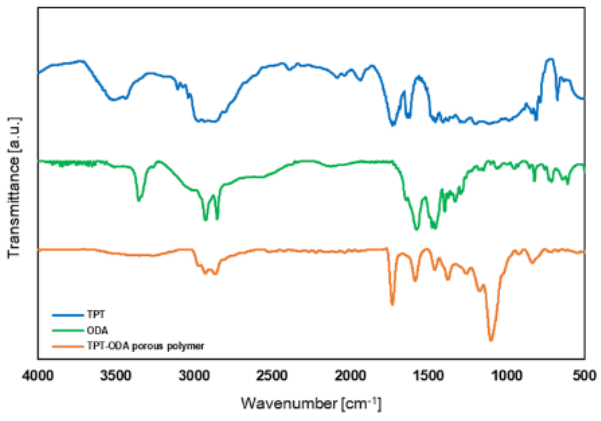


Fig. 3. FT-IR spectra of TPT-ODA system, TPT, ODA, and TPT-DETA porous polymer.

Fig. 4 に示す TPT-ODA 高分子モノリス表面の SEM 画像には平均粒子径が 8.36 μm の一次粒子が連結して形成された多孔構造が観察された。同構造はスピノーダル分解型重合誘起相分離によって形成されたものと考えられる。同メカニズムによる相分離においては、相分離の初期には共連続構造が形成され、相分離の進行に伴いその後期では界面張力による粒子構造が形成される(Fig. 5)。高分子モノリスのモルフォロジーは相分離のどの段階で反応系が固定化されるかにより決まる。SEM 画像から同高分子モノリスは相分離の後期過程での構造の固定化により形成されたものと考えられる。

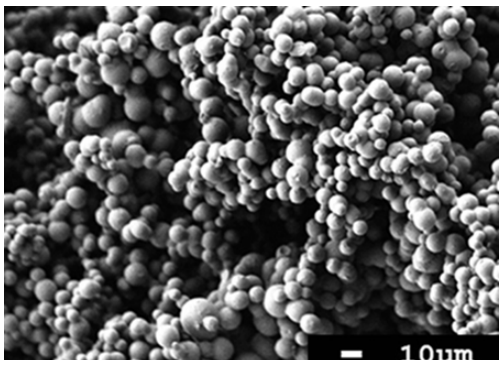


Fig. 4. SEM image of TPT-ODA porous polymer, monomer concentration: 15 wt%, [NH]/[acrylate] = 1.0 mol/mol, magnification: ×500.

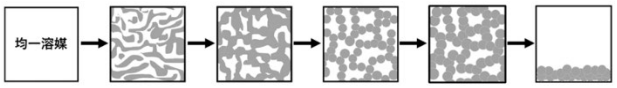


Fig. 5. A model of polymerization induced phase separation via spinodal decomposition process.

Fig. 6 に DMSO に浸漬させた TPT-ODA 高分子モノリスの 23 ℃から 85 ℃への昇温過程における透過スペクトルと観察された色の変遷について自然光(LED 照明不使用)、LED 照明下で撮影した画像を示す。透過スペクトルの最大ピークは 23 ℃では 455 nm に、85 ℃ では 390 nm に現れ、温度の上昇に伴い短波長側にシフトする傾向が見られた。また、サンプルは 23 ℃で橙色を示し、温度上昇に伴って徐々に色が黄色に近づき、85 ℃では白色に近い色を示した。この呈色は、以下に概説するクリスチャンセン効果に由来するものである。

光の速度は通過する物質により異なるため、屈折率も物質ごとに異なる。また、同じ物質

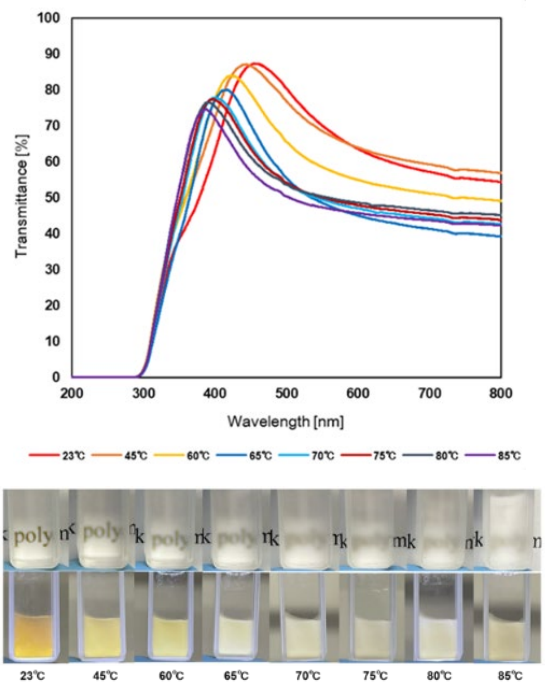


Fig. 6. Transmission spectra and photos (top: without LED lighting, bottom: with LED lighting) of TPT-ODA porous polymer in DMSO, monomer concentration: 15 wt%, [NH]/[acrylate] = 1.0 mol/mol, reaction temperature: 45 ℃, observation temperature: 23 ℃, 45 ℃, 60 ℃, 65 ℃, 70 ℃, 75 ℃, 80 ℃, and 85 ℃.

でも光の波長により物質内を通過する光の速度に差があるため、物質の屈折率には波長依存性がある。つまり、波長が短いほど屈折率は大きくなる傾向があるため、横軸に波長、縦軸に屈折率をプロットすると右下がりの曲線を描く。また、屈折率は温度によっても変化し（温度依存性）、温度が高いほど低下する傾向がある。

ここで分散媒と分散質からなる二成分系の屈折率の波長依存性について考える。屈折率の波長依存性は、いずれの物質にも観察されるが、分散媒と分散質でその度合い（分散性）が異なると、これらの屈折率の波長依存性をプロットした場合、Fig. 7 に示すように両曲線は交差する。この交差する近傍で光の透過率が増大する現象（クリスチャンセン効果）が知られており、交点が可視光領域内にある場合、交点の波長を中心とする光が透過し、散乱されたそれ以外の光が補色として観察される。一方、これらの曲線が可視光領域内で交差しない場合は、全可視光波長領域で光が散乱されるため、光を透過しない。

溶媒（分散媒）を吸収した高分子モノリス（分散質）から成る二成分系においては、屈折率の波長依存性（分散性）は高分子モノリスに比べて溶媒の方が大きいため、短波長領域では溶媒の屈折率の方が高くなるが、長波長領域では逆に高分子モノリス（ポリマー）の方が高くなるため両成分の屈折率曲線が交差する（Fig. 7 上）。また、屈折率の温度依存性については、高分子モノリス（ポリマー固体）は極めて小さいが、溶媒（液体）は温度の上昇に伴い低下するため、屈折率曲線の交点は短波長側にシフトする（Fig. 7「昇温」）。

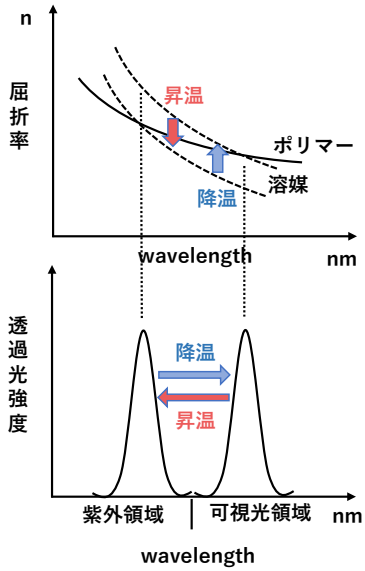


Fig. 7 高分子モノリス／溶媒系のクリスチャンセン効果と透過光波長制御

DMSO よりも屈折率の低い EtOH を用いて混合溶媒を調製し、クリスチャンセン効果に与える影響を調査した(Fig. 8)。混合溶媒中の EtOH の混合比の増加に伴い、透過スペクトル最大ピークは短波長側にシフトし、透過率が低下することが確認された。また、DMSO のみで観察された橙色の呈色は EtOH の増加に伴い徐々に白くなり透明性が低下した。これは、高分子モノリスの屈折率の交点が短波長側にシフトし、可視光領域外に遷移したことでクリスチャンセン効果が可視光領域では観察されなくなったものと考えられる。

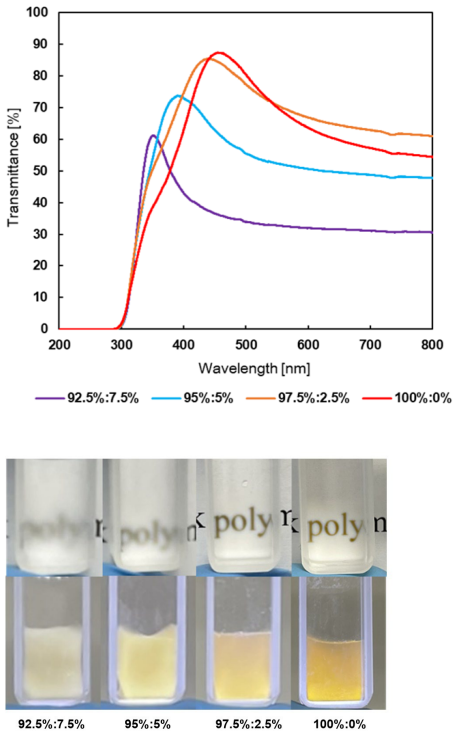


Fig. 8. Transmission spectra and photos (top: without LED lighting, bottom: with LED lighting) of TPT-ODA porous polymer in DMSO/EtOH mixed solvent: DMSO: EtOH = 92.5 % : 7.5 %, 95 % : 5 %, 97.5 % : 2.5 %, 100 % : 0 % (vol. : vol.), observation temperature: 23 ℃.

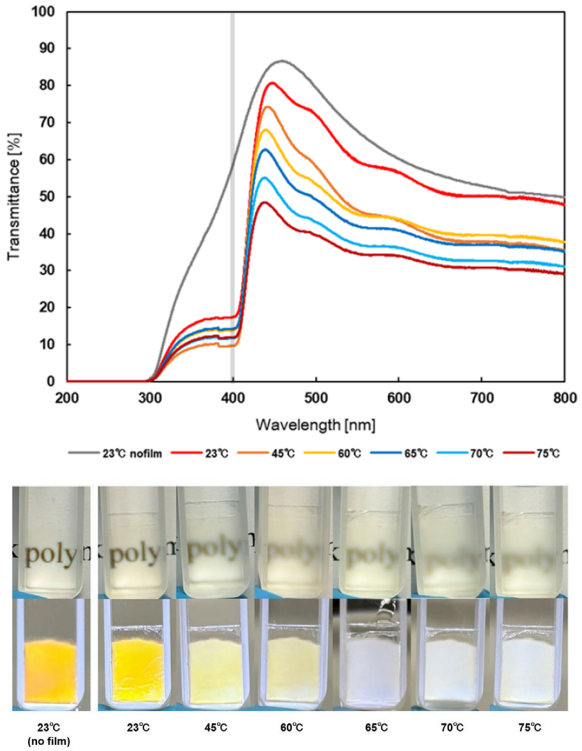


Fig. 9. Transmission spectra and photos (top: without LED lighting, bottom: with LED lighting) of TPT-ODA porous polymer in DMSO with UV cut film, monomer concentration: 15 wt%, [NH]/[acrylate] = 1.0 mol/mol, reaction temperature: 45 ℃, observation temperature: 23 ℃, 45 ℃, 60 ℃, 65 ℃, 70 ℃, and 75 ℃, 80 ℃.

温度応答性遮光材料としての機能向上のため、UV カットフィルムを併用した効果を調査した。同フィルムにより透過率は低下し、最大ピーク波長は短波長側へとシフトした(Fig. 9)。これは、400 nm 以下の光がカットされ、当該波長の光が透過しにくくなったことによるものと考えられる。この結果から、本温度応答性材料に UV カットフィルムを併用することによって、温度上昇時のサンプルの透過率を低下させる効果があることが確認された。

紙製の箱(10.7 cm×12.8 cm×11.0 cm)に 1 cm×1 cm の正方形の穴を開け、DMSO に浸漬した TPT-ODA 高分子モノリス/DMSO および DMSO のみを入れたガラスセルを貼り付けて太陽光を 30 分間照射したときの内側と外側の表面温度の変化についてサーモグラフィーカメラを使用して測定した。以下の Table に示すように、箱内部の温度ついて比較すると、DMSO に含浸した高分子モノリスを入れたガラスセルの場合太陽光照射前(B)と太陽光照射後(D)の温度差は 0.1 ℃、DMSO のみを入れたガラスセルの太陽光照射前(F)と太陽光照射後(H)の温度差は 2.0 ℃であった。以上の結果から、DMSO に浸漬した高分子モノリスに由来するクリスチャンセン効果が太陽光を入射を阻止し箱内部の温度上昇を抑制したものと考えられれる。この結果から、DMSO に浸漬した TPT-ODA 高分子モノリスは原理的にスマートウィンドウとして有効であることが確認された。

	Sample	Observation plane/time	Surface temperature [℃]
A	TPT-ODA porous polymer	outside/0 min	20.7
B	TPT-ODA porous polymer	inside/0 min	20.6
C	TPT-ODA porous polymer	outside/30 min	22.2
D	TPT-ODA porous polymer	inside/30 min	20.7
E	DMSO	outside/0 min	21.7
F	DMSO	inside/0 min	22.1
G	DMSO	outside/30 min	24.5
H	DMSO	inside/30 min	24.1

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本検討の知見，技術を用いて高分子モノリスのナノテク化粧品への応用を検討する。また、本研究成果については専門誌へ投稿する。

シニアのデジタルインクルージョンを志向したシニアのためのプログラミング教育実践

工学部（情報通信工学コース）　　大橋　裕太郎

１．序論

日本の労働市場は労働人口の減少、低い労働生産性、地方と都市部間、デジタル格差、過去 30 年間横ばいの賃金水準などの課題を抱えており、人の価値を高める上でリスキリングが欠かせないと言われている[1]。リスキリングとは「現在の職務の延長線上では身に付けることが困難な時代のニーズに即した能力・スキルを身に付けること」[2]などと定義される。なお、類似する言葉にリカレント教育やアップスキリングなどがあるが、文部科学省によれば以下のような違いがある。

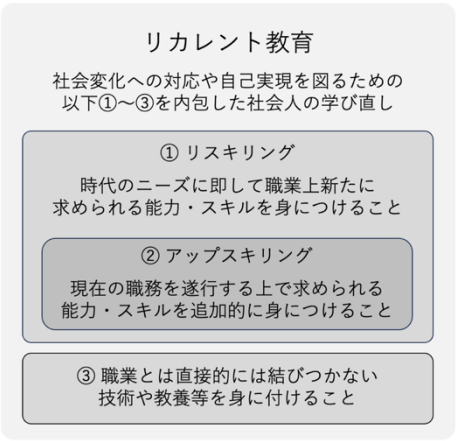


図 1　リカレント教育、リスキリング、アップスキリングの関係性（[3]より筆者作成）

この他、「生涯にわたり行うあらゆる学習で、学校教育や社会教育、さらには文化活動、スポーツ活動、ボランティア活動や趣味など仕事に無関係なことや「生きがい」に通じる内容も学習の対象」に含む生涯学習[4]や、「以前に学んだものをもう一度学ぶこと。特に、社会人が、学校教育で学ぶ内容の知識を勉強しなおすこと」を意味する学び直しなどがある[5]。海外では、大手企業が次々と社員のリスキリングに力を入れ始めている[6]。国内では、内閣官房が新しい政策課題として「新しい資本主義」を掲げた[7]。この中で、リスキリングによる能力向上支援は、ジョブ型人事の導入と労働移動の円滑化とともに「三位一体の労働市場改革」のひとつとして位置づけられている。岸田首相（当時）が個人のリスキリングの支援に５年で１兆円を投じると表明したことにも注目が集まった[8]。

本稿では、ミドルシニア（30 歳から 54 歳）とシニア層（55 歳以上）がリスキリングについてどのような意識を抱いているか、特に情報分野の内容に焦点を置いて全国を対象としたオンライン調査を実施した。

２．研究計画

オンライン上で仕事取引ができるクラウドソーシングサービス Lancers（ランサーズ）を介してオンライン質問紙（アンケート）調査をおこなった。社会人経験のある 20 歳以上を対象とし、回答者には報酬として 100 円を支払った。目標作業件数は 1000 件とした。質問項目は以下の計 19 問である。質問項目の作成に際して、内閣府がおこなった「生涯学習に関する世論調査」の質問項目を参考にした[9]。Q14 の分野に関しては、動画学習サービス

gacco[10]の講座一覧の分類を参考にしつつ、特にデジタル分野や趣味に関する分野の選択肢を追加して作成した。

Q1：年齢をお答えください

Q2：あなたの性別をお答えください

Q3：現在お住まいの地域をお答えください

Q4：現在、就業していますか？

Q5：就業している場合の雇用の種類

Q6：就業している場合の仕事の内容

Q7：あなたの最終学歴をお答えください。

Q8：あなたの貯蓄額をお答えください

Q9：スマートフォンの有無

Q10：あなたが利用する情報源は何ですか？(複数選択可)

Q11：学校を出て一度社会人となった後、大学や公開講座などで学んだことがありますか。

Q12：Q11で、「学んだことがある」、「学び直しをしてみたい」を選択した方に質問です。その理由はなんですか。(複数選択可)

Q13：Q11で、「学んだことがある」を選択した方に質問です。学んだ内容に対してどのようにお考えですか。(複数選択可)

Q14：これから学習するとした場合、どのような方法で学ぶことに興味がありますか？(複数選択可)

Q15：オンライン上で講義の動画を視聴して学ぶことができるJmoocやgaccoといったサービスで学んだことがありますか？

Q16：これから学習するとした場合、どのような分野を学習したいですか？(複数選択可)

Q17：リスキリング、スキルアップや学び直しに対する心配や不安があれば教えてください(複数選択可)

Q18：教育訓練給付金などの補助制度や求職者支援制度、自治体の無料講座等をご存知ですか？

Q19：リスキリング、スキルアップや学び直し全般に対する期待や心配、要望などをお書きください。(自由記述)

３．計画の進行状況

3.1 基本属性

回答者の年齢の最頻値は、男性40～44歳(男性の20.3%)、女性35～39歳（女性の19.9%）であった。

就業状態について、就業していると回答した男性は91.5%、女性は78.4%となり、1%未満（$p < 0.01$）で有意差が見られた。

年代別に見ると、就業に年代間の有意差は見られなかったが、就業希望（$p = 0.030$）と就業予定なし（$p < 0.01$）には有意差が見られた。なお、70代は人数が少なかったため(N=8)これ以降の分析には含めないこととする。

雇用の形態について、正規雇用の男性64.4%に対して、女性は正規雇用33.3%、非正規雇用30.2%、フリーランス・その他36.5%となり、女性の方が正規雇用に就く人が有意に少なく、非正規雇用に就く人が有意に多かった。

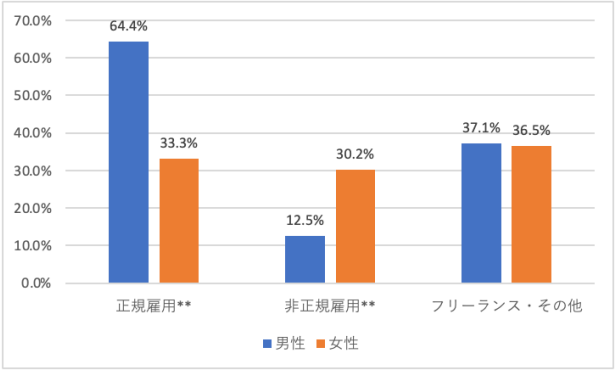


図２　雇用形態の男女差

年代別に見ると、正規雇用に就く人とフリーランス・その他に有意差が見られた。

職種については、販売・サービスをのぞく全ての職種で、男女間で１％未満の有意差が見られた。年代別に見ると、ばらつきはあるものの年代間の有意差は認められなかった。

3.2 リスキリングについて

「社会人になった後に正規課程で学んだことがある、または現在学んでいる」と回答した女性は男性よりも有意に多かった（$p = 0.010$）。

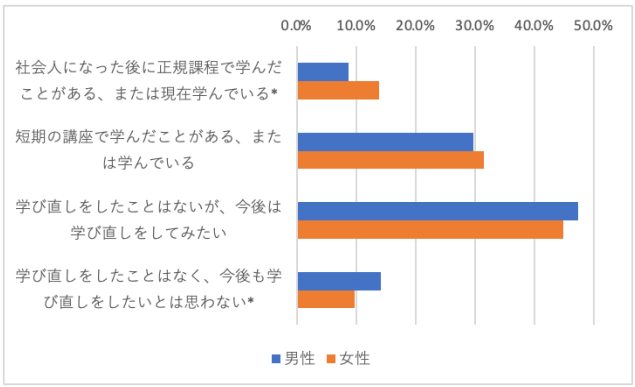


図３　リスキリング経験の男女差

年代別に見ると、年齢が上がるほど「公開講座や市民講座、社会人対象の学習プログラムなど短期の講座で学んだことがある、または学んでいる」という回答が有意に多く、反対に若い世代ほど「学び直しをしたことはないが、今後は学び直しをしてみたい」と回答した（ともに p < 0.01）。

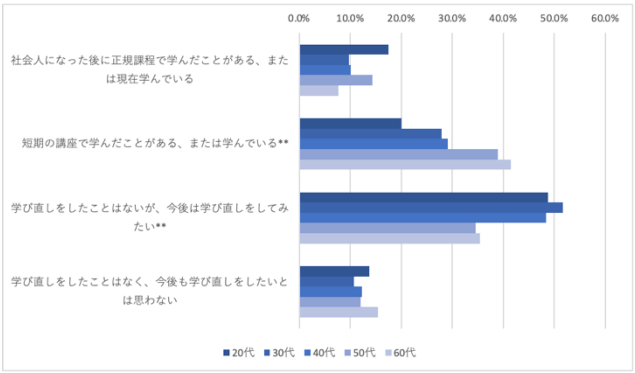


図４　リスキリング経験の年代差

リスキリング経験がある人のみを対象に、リスキリングに取り組んだ理由について尋ねた質問では、その理由として「教養を深めるため」、次いで「人生を豊かにするため」という回答が多かった。「就職や転職のために必要性を感じたため」と回答した女性は男性よりも有意に多かった（p < 0.01）。

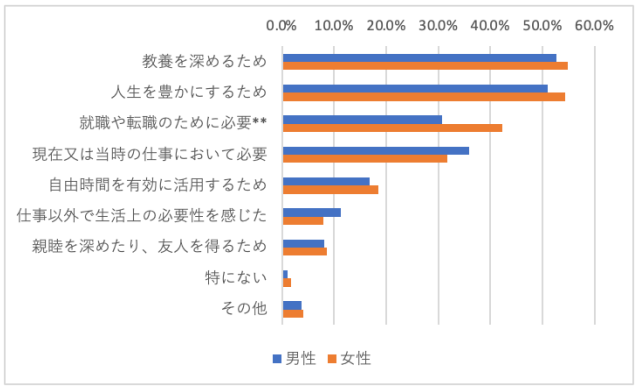


図５　リスキリングの理由の男女差

Q16 の学びたい分野に関して、男女で回答が大きく分かれた。男性は「プログラミング」「インターネット関連」「AI」「ビジネスと経営」「コンピュータ科学」「DX」「社会科学」「統計・数学」「工学」「理工系基礎」を有意に多く選択した。一方女性は「外国語」「試験・資格対策」「人文科学」「アート・デザイン」「健康や医療、スポーツ」「音楽や美術、レクリエーション」「料理や裁縫などの家庭生活」「教育研修講座」を有意に多く選択した。大まかに言えば、男性は主に理系分野、女性は文系分野、趣味や生活に関する分野を選択した。

年代別に見ると、「人文科学」「音楽や美術、レクリエーション」は年齢が高くなるほど、「ビジネスと経営」「資格・試験対策」は年齢が低くなるほど選ばれたが、男女間ほどの差は見られなかった。

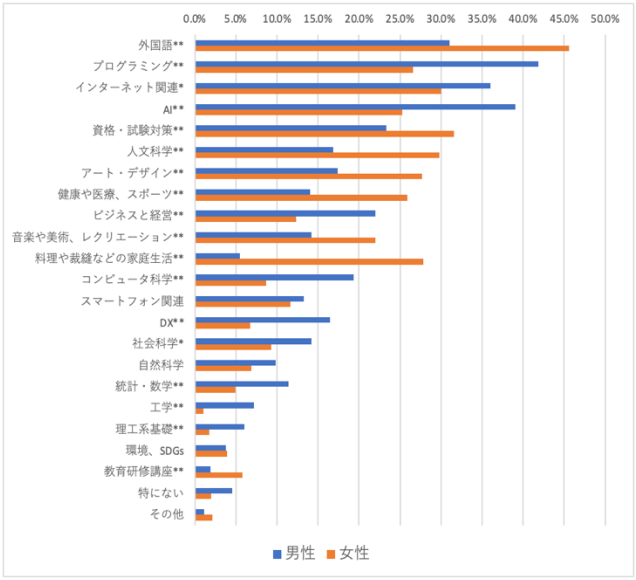


図６　希望する分野の男女差

Q17 の心配や不安に関して、最も多かったのが「費用」であった（男性 74.2%、女性 83.6%）。女性の方が「費用」（$p < 0.01$）、「何をどう始めればよいか」（$p = 0.011$）、「収入として取り戻すことができるか」（$p = 0.016$）、「身近なところに学べる場所がない」（$p < 0.01$）、「毎回行くことができるか」（$p < 0.01$）、「仲間や友達を作ることができるか」（$p = 0.030$）に関して心配や不安を感じていた。総じて男性よりも女性の方が心配や不安を感じ、リスキリングに対してシビアな見方をしている可能性があることが分かった。

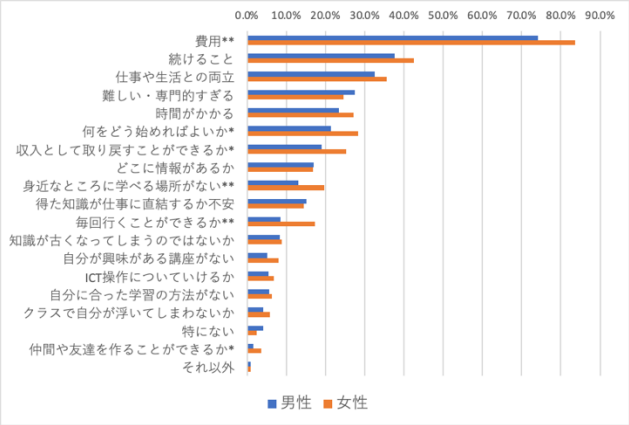


図７　不安や心配の男女差

学歴とリスキリング経験・興味の差を比較すると、有意にばらつきが見られた（$p < 0.01$）。学歴が上がるほど正規課程もしくは公開講座や市民講座で学んだ経験が増加し、反対に学び直しに対する興味が薄れる傾向があることが分かった。

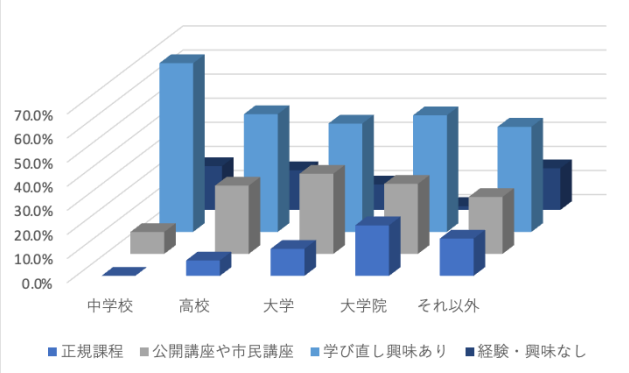


図８　学歴とリスキリング経験・興味の差

４．結果と考察

今回の結果で筆者が特に注目したのが、年代差よりも男女差が大きかった点である。就業状態や学びたい分野は、年代間よりも男女間で大きく異なった。情報技術分野に関心を持つ女性は男性よりも少なかったものの、4 人に 1 人は関心を示した。女性活躍推進が叫ばれる中、IT 人材確保のためにはこうした層に働きかけることが不可欠であると考えられる。

また興味深いことに、20 代と 30 代、あるいは 30 代と 40 代で考え方に若干の違いが出る場合があることが分かった。

５．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

・情報処理学会論文紙　Journal of Information Processing（JIP）

・日本工学教育協会第 73 回年次大会

参考文献

[1] 世界経済フォーラムの取り組み リスキリングで、人を中心に据えた変革を https://jp.weforum.org/stories/2023/01/jp-reskilling-japan-future-of-work-davos-2023/

[2] 文部科学省, “第 11 期中央教育審議会生涯学習分科会における議論の整理（本文）” https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo2/toushin/1330378_00002.htm

[3] 文部科学省, “リカレント教育の推進に関する文部科学省の取組について” https://www.mhlw.go.jp/content/11801000/001198657.pdf

[4] 政府広報オンライン, “「学び」に遅すぎはない！　社会人の学び直し「リカレント教育」” https://www.gov-online.go.jp/useful/article/202108/1.html#c1

[5] コトバンク（https://kotobank.jp/）

[6] 石原直子, “リスキリングとは―DX 時代の人材戦略と世界の潮流―” https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_jinzai/pdf/002_02_02.pdf

[7] 内閣府, “新しい資本主義の グランドデザイン及び実行計画 2024 年改訂版 （案）” https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon//kaigi/minutes/2024/0621/shiryo_01.pdf

[8] 日経新聞, “リスキリング支援「5 年で 1 兆円」　岸田首相が所信表明” https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA30ACD0Q2A930C2000000/

[9] 内閣府, “生涯学習に関する世論調査” https://survey.gov-online.go.jp/r04/r04-gakushu/gairyaku.pdf

[10] gacco https://gacco.org/

無線・画像統合センシングによる動的ディジタルツインと無線通信の相互最適化

工学部（情報通信工学科）　　菅　宣理

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

電波の用途には、5G や無線 LAN 等のデータ通信と、反射波のセンシングにより人や物を検知する無線センシングがある。現状、これらのシステムは別々に運用され、周波数資源を個々に消費している。近年、この 2 つを同時に行うことで、周波数の有効利用と両機能の相補的な性質による性能向上を狙った ISAC（Integrated Sensing and Communications）の実現が期待されている。センシング情報を活用することで、ビームフォーミング等の物理層技術やリソース制御等の MAC 層技術の性能向上が期待できる。

ISAC では、送受信間の電波伝搬特性を推定する伝搬路推定が必須であり、その精度がシステム性能を大きく左右する。推定値は、通信機能に対し遅延波抑圧やビームフォーミング、センシング機能に対し無線端末や障害物位置の推定、のように活用され、低い精度の伝搬路推定はセンシングエラーやそれを活用する通信処理にも波及してしまう。

ISAC の伝搬路推定において、大規模観測データを活用した機械学習によるブレイクスルーが期待されている。古典的には最小二乗法を用いた回帰分析のような方式が適用可能だが、複数の伝搬経路の合成や見通しの有無等に由来する場所固有の非線形性を加味できず、結果的に ISAC のシステム性能も頭打ちとなる。これに対し、構造物や通信距離、遅延波の分布等を学習した非線形回帰による伝搬路推定の超高精度化が複数報告されている。

一方で、学習器の実現には、個々の無線環境のデータセットを環境変化に応じて動的に取得する機能が必要という課題がある。学習には、膨大な学習パラメータと質・量を兼ね備えた無線環境データセットの事前準備が必要となるが、実際には他端末からの干渉や無線通信の法的制約により、屋内外様々な環境での実験データの事前観測は実現性が極めて低い。加えて、人・物の移動やアンテナの指向性制御により伝搬特性が変動するため学習データセットの動的な更新が必要という、ISAC における学習ベースの処理を阻む障壁がある。

無線環境を仮想的に再現した無線環境ディジタルツインは学習データセットの課題を克服する糸口になりうる。近年の研究では、携帯端末にも内蔵されるカメラや LiDAR センサ等の光学的センシングにより、壁や床、障害物といった構造情報を取得し、得られた情報をもとに電波伝搬計算を行うことで、当該環境の伝搬特性を仮想的に取得する、無線環境のディジタルツイン（以下、無線 DT）というコンセプトが提唱されている。無線 DT は、場所固有の伝搬特性を万遍なくサンプリングでき、質・量を担保した学習データセットを自在に生成できる。

さらに、ISAC で逐次的にセンシングする動的な構造物情報は光学的センシングによる無線 DT の弱点である動的環境の追従を可能にするという親和性の高さもある。したがって、

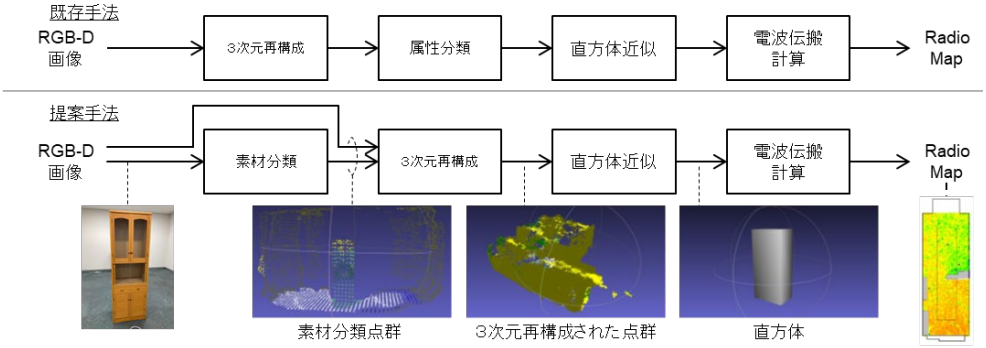


図 1 既存手法および提案手法の処理フロー

ISAC・無線 DT は一方の性能向上がもう一方の性能向上につながる相補的な関係にある。

２．研究計画

本研究の最終目的は「動的無線 DT 生成」と「ISAC の最適化」を相互に行うフレームワークの確立による動的な無線 DT 構築と個別環境を学習した高速・高精度な ISAC の実現である。具体的には、カメラ・LiDAR による高精度な環境推定と無線センシングによる環境変化の捕捉・推定により動的無線 DT を生成し、得られた無線 DT から仮想的無線情報に基づく学習を行うことで、ISAC の伝搬路推定やそれに続く各種信号処理性能を向上させる。さらに、両者を相互に繰り返すことで ISAC と無線 DT の統合による相乗効果を最大化する。本研究目的を達成するための土台として、今年度は光学的なセンシングに基づく高精度な無線 DT の構築について取り組んだ。

３．計画の進行状況

今年度は、光学的センシングに基づく高精度な無線 DT 構築に向け、その基盤となる技術動向の調査と既存手法の課題抽出を行った。特に、カメラや LiDAR、RGB-D センサを用いた環境モデリング技術および無線伝搬計算への応用手法について重点的に整理を進めるとともに、既存手法の課題を解決するために素材分類を用いたより高精度な無線 DT の構築手法の検討も併せて実施した。

３．１　関連研究の調査・課題の整理

近年のコンピュータビジョン技術を無線通信に応用する取り組みとして、LiDAR や RGB-D センサを活用した伝搬損失予測[1]や遮蔽物検出[2]に関する報告が多数なされていることを確認した。特に LiDAR センサは、点群データを取得することで環境情報のモデリング精度を高めると同時に、レイトレーシングに要する計算コストの削減にも寄与する点が注目されている。

さらに、RGB-D 画像を用いた無線伝搬計算の研究動向についても調査を行った。[3]では、電波伝搬に関わる物体の色付き点群を抽出し、深層学習により伝搬路を推定する手法が提案されている。また、[4]および[5]では、RGB-D 画像から得られる色付き点群に対してセマンティックセグメンテーションを適用し、机・椅子・棚などの室内物体属性ごとに素材を割り当て、電波伝播計算を行うアプローチが報告されている。しかし、既存の RGB-D センサを用いる手法では、各物体属性に対して単一の素材しか割り当てない設計となっており、実際の室内環境では木材と金属など複数素材で構成される物体が多いことから、伝搬計算精度の低下が避けられないという課題が確認された。

そこで本研究では、無線 DT の高精度化のため、RGB-D センサを用いた電波伝搬計算手法に素材情報の関連付け機構を導入する手法を検討した。これまでにも RGB-D 画像を用いた素材分類手法は報告されているが[5]、従来手法では RGB-D 画像から得られる色情報など、素材特性に強く関わる特徴量が十分に活用されていない点が問題であった。

３．２　素材分類による高精度な無線 DT 生成

以上の課題を踏まえ、本研究では RGB-D 画像から素材分類を行うアーキテクチャを新たに導入し、得られた素材分類情報を計算に組み込むことで、無線伝搬計算の高精度化を図るフレームワークの構築に取り組んだ。提案手法の有効性を評価し、素材分類を取り入れることで従来手法に比べて無線環境の推定精度が向上することを確認した。

まず、従来手法 [5] について説明する。図 1(上)に示すように、従来手法は取得した RGB-D 画像に対して 3 次元再構成処理[6]を行い、その後 PointNet++[7]による統合色付き点群のセマンティックセグメンテーションを実施し、例えば「机」「本棚」などの属性ラベルを各点群に付与する。その後、ラベルごとに立方体近似を行い、相互作用面を決定し、無線伝搬計算を行う構成となっている。

しかしながら、従来手法では無線伝搬環境の変化を大きく左右する素材の違いを考慮していない。たとえば本棚が金属製か木製かで伝搬特性は異なるが、いずれも「本棚」ラベルとして統一され、素材情報もそのラベルに固定で関連付けられるため、素材差を反映できず、伝搬計算精度が低下する課題がある。

これを解決するため、本研究では属性分類の代わりに素材分類を導入する手法(図 1(下))を提案した。素材分類はこれまで主に RGB 画像向けに研究されてきたが、点群データへの応用は進んでいない。そこで本手法では、まず画像に対して素材分類用のセマンティックセグメンテーションを行い、素材ラベル付き点群を生成し、その後、従来手法と同様の 3 次元再構成を行う構成とした。

３．３　評価

図 2 に実験で使用した部屋のレイアウト、設置物、および送受信機の配置を示す。部屋の天井高は 2.81m であり、受信点は x-軸、y-軸方向にそれぞれ 0.7m 間隔で 12×7 点をグリッド状に配置した。中央には木製の障害物を

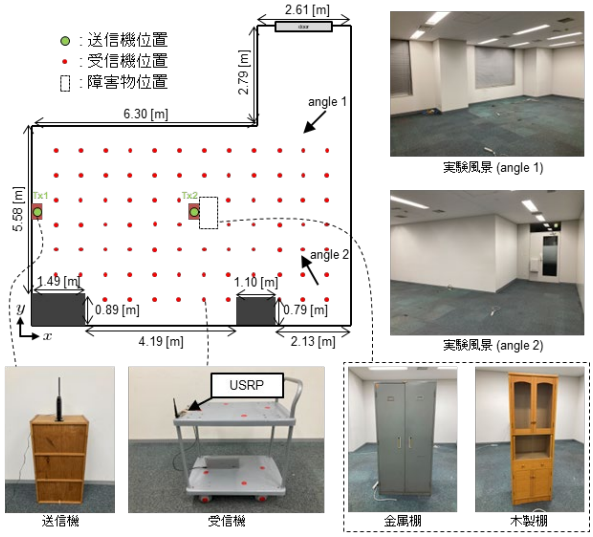


図 2　実験環境

配置し、送信機は障害物近傍(Tx2)に設置し、見通し内領域と見通し外領域を確保し受信電力を測定した。対象物の素材分類は、対象障害物を撮影した画像に対してのみ実施し、天井・床・壁などの建築物部分については一様に石膏ボード(drywalling)として扱い、室内障害物素材の影響を明確化した。

送信機には、Buffalo 製 WXR-1750DHP を使用し、幅 0.47m、奥行き 0.29m、高さ 0.89m の棚上に設置した。周波数は 5560MHz、帯域幅は 20MHz とした。受信機は Universal Software Radio Peripheral (USRP) B205mini-i であり、0.68m 高のカート上にノート PC とともに設置し、GNU Radio を用いてビーコン信号の受信電力を測定した。室内の RGB-D 画像取得には、Intel Realsense D455 を使用し、部屋全体を撮影した。無線伝搬計算には、電波伝搬解析ソフトウェア Wireless InSite を用い、X3D 伝搬モデルを適用した。計算条件として、最大反射回数 6 回、透過回数 2 回、回折回数 1 回とした。素材分類学習データセットと学習条件素材分類には、MINC データセット(Materials in Context Dataset)を使用し、1798 枚の画像と対応するラベルを用いた。

木製障害物を用いたシナリオにおける Tx2 での測定値と推定値、およびその差異を図 3 に示す。従来のフレームワーク(図 3(b)参照)

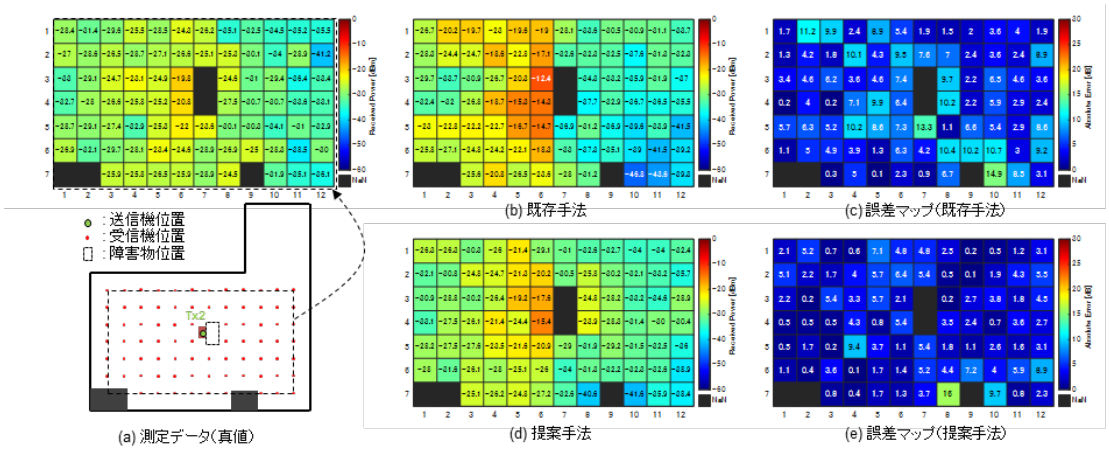


図 3　受信電力マップの推定例

では、障害物の左側領域で比較的高い受信電力が推定されているが、この手法は障害物を金属として誤認識していたためである。一方、提案したフレームワーク(図3(d)参照)では、障害物に対して適切に素材(この場合は木材)が割り当てられている。その結果、木製の障害物に対しては、無線波が木材を透過できるため、障害物の右側領域に比較的高い受信電力環境が形成されていることが図3(d)に示されている。さらに、提案手法を使用した推定無線マップは、測定値に近づくことが確認できる。いくつかの受信点では、従来の方法が小さな誤差を示すが、これは平均化によって完全には除去できなかったフェージングの残留効果によるものである。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後は、今回の検討で得られた高精度な無線 DT を活用した学習手法や無線センシングとの統合センシング等の理論検討を実施する。その後、得られた無線 DT での学習効果の検証を実際の無線環境での受信電力や伝搬路の測定実験による測定データにより実施する。

参考文献

[1] M. Sun et al., “Multi-Modal Sensing Data-Based Real-Time Path Loss Prediction for 6G UAV-to-Ground Communications,” IEEE WCL, vol. 13, no. 9, pp. 2462-2466, 2024.

[2] M. Nerini and B. Clerckx, “Overhead-Free Blockage Detection and Precoding Through Physics-Based Graph Neural Networks: LIDAR Data Meets Ray Tracing,” IEEE WCL, vol. 12, no. 3, pp. 565-569, 2023.

[3] Y. Wang et al., “Channel Knowledge Maps Construction Based on Point Cloud Environment Information,” Proc. IEEE VTC2024-Fall, pp. 1-5, 2024.

[4] F. Zhang et al., “A Radio Wave Propagation Modeling Method Based on High-Precision 3-D Mapping in Urban Scenarios,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, no. 3, pp. 2712-2722, 2024.

[5] N. Suga et al., “Indoor Radio Map Construction via Ray Tracing With RGB-D Sensor-Based 3D Reconstruction: Concept and Experiments in WLAN Systems,” IEEE Access, vol. 11, pp. 24863-24874, 2023.

[6] K. S. Arun, et al., “Least-squares fitting of two 3-D point sets,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-9, no. 5, pp. 698-700, 1987.

[7] C. R. Qi, et al., “PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space,” Proc. NIPS, pp. 1-10, 2017.

ハイパースペクトルカメラ搭載型被災者探索用UAVの開発

工学部（電気電子工学課程）　　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）

災害発生時における被災者の捜索は、非常に重要かつ緊急性の高い活動である。特に、瓦礫などが広範囲に散乱した状況下では、迅速な対応が求められる。統計によると、発災から72時間を過ぎると、生存率は急激に低下する。実際、今年発生した最大震度7の能登半島地震においても、多くの捜索活動が人力に依存しており、その非効率性が課題として顕在化した。

こうした背景のもと、被災者捜索の効率化を目的とした自動化技術の研究が進められているが、現時点で実用化に至った事例は少なく、今後の飛躍的な技術発展が期待されている。効率的な捜索を実現するためにはロボット技術の導入が不可欠であるが、地上移動型の災害対応ロボットは、災害によってインフラが損壊した場合、被災地への到達が困難となる。このような制約を回避するためには、地形の影響を受けずに空中からアプローチできるUAV（ドローン）の活用が極めて有効である。

本研究の代表者はこれまで、科研費の支援を受けつつ、UAVに搭載されたカメラ映像を用いた画像解析、およびスピーカーとマイクを用いた音声処理を組み合わせた自動被災者検出技術の開発に取り組んできた。これらの取り組みはすでに多くの学術論文として成果を発表しており、実用化を見据えて企業との連携も進行中である。

しかしながら、これまでに開発されてきた画像および音声ベースの捜索手法には、以下のような制約が存在する。画像を用いた方法では、UAV搭載の一般的なRGBカメラ映像に人物認識を適用するが、瓦礫などの影に隠れた被災者を検出することが困難である。また音声を用いた方法では、UAVのスピーカーで呼びかけ、マイクで音を拾って人の声を識別するが、声を発することができない被災者には対応できないという課題がある。

これらの問題を解決する新たなアプローチとして、本研究では、RGBカメラや音声に依存せず、UAVに搭載されたハイパースペクトルカメラによる多次元画像の解析により、革新的かつ高精度な被災者検出アルゴリズムの開発を目指す。ここでの学術的な問いは、「UAV搭載のハイパースペクトルカメラによって、従来の方法を超える新たな救助支援手法が実現できるのか」という点である。

図1に示すように、一般的なRGBカメラは人間の可視領域（赤・緑・青）の3バンドしか記録できない。一方、ハイパースペクトルカメラは赤外線や紫外線など、非可視光を含む数十（50バンド以上）のスペクトル情報を同時に取得することが可能である。この技術により、物体が持つ微細なスペクトル的特徴を識別でき、人体の特異なスペクトル情報も精密に捉えることができる。

その結果、瓦礫と人体が混在するような複雑な被災環境であっても、上空から取得した

ハイパースペクトル画像には、人体特有の情報が反映される。これにより、従来の RGB カメラによる画像解析に比べて、被災者の検出精度が格段に向上することが期待される。

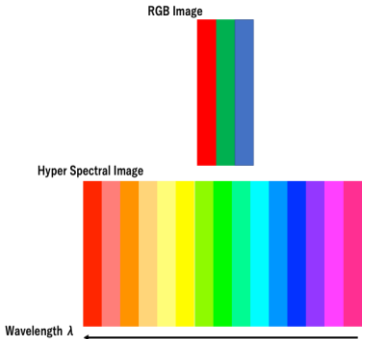


図１：ハイパースペクトル撮影と RGB 撮影の

従来の音声を用いた被災者捜索では、UAV に搭載したマイクで被災現場の音を収集し、人の声を検出することでその存在を特定していた。しかし、被災者が衰弱して声を発することができない状態にある場合、この手法では捜索が不可能となる。一方、本研究で提案するハイパースペクトル画像を活用したアプローチでは、音声による応答が不可能な被災者であっても、人体が持つ独自のスペクトル的特徴が画像として捉えられる可能性がある。そのため、本手法を導入することで、捜索精度の大幅な向上が期待される。

ただし、現実の災害現場では、被災者が瓦礫などの周囲環境と視覚的に混在しており、その中から上空撮影した画像のみを用いて人体を識別するのは、極めて困難な課題である。こうした課題に挑むため、本研究では、ハイパースペクトルカメラで撮影した多次元画像を入力データとして、AI 技術（統計処理・機械学習・深層学習）を活用した新たな画像解析手法の開発を行う。

ハイパースペクトル画像は非常に多くのスペクトルバンド（次元）を含むため、データ量が膨大になり、そのまま AI モデルに入力すると処理負荷が高く、実用的な運用が困難となる。そこで本研究では、以下の 2 点に焦点を当てた効率的な被災者検出手法を提案する：

1) 人体の特徴を保持しつつ、次元を効果的に削減する手法の開発

2) 次元削減後のデータを用いて、AI により人体を効率的かつ高精度に抽出する手法の確立

具体的には、複数の次元削減アルゴリズムを適用しながら、対象となる人体の特徴を強調して残す方法を設計する。次に、それらの次元削減後に得られた複数のデータセットを、それぞれ異なる構造を持つ AI モデルに学習させることで、多角的な解析を可能とする。そして、各モデルの判定結果を統合して最終的な被災者の有無を判断する、新たな高性能AI 学習フレームワークを構築することを目指す。

このアプローチにより、空中から取得されたハイパースペクトル画像を用いて、環境に埋もれた被災者の存在を高精度かつ確実に把握できる技術の実現が期待される。

２．研究計画

本研究で使用する UAV 搭載ハイパースペクトルカメラは、164 バンド（次元）からなる高次元画像データを取得することが可能である。しかしながら、これらのデータをそのまま AIモデルに学習させると、計算負荷と学習時間が膨大となり、実用性に欠ける。そのため、学習前に次元を適切に削減する処理が極めて重要である。

これまでの研究では、ハイパースペクトル画像の次元削減手法として主に 2 つの方法が提案されている。ひとつは全てのスペクトルバンドの画素値を平均化し、単一の 2 次元画像に変換する方法であり、もう一つは、検出対象に不要とされる類似性の高い次元を除外した後、残った画像群の画素値を平均化する方法である。しかしながら、いずれの手法も人体の特徴量を希釈または消失させてしまう

可能性が高く、検出精度の低下を招くことが指摘されている。

また、統計的手法として広く用いられる主成分分析（PCA）についても、各スペクトルバンドの情報を一括して圧縮するため、人体以外の物体情報も混在したまま縮約されてしまい、人体の特徴を選択的に強調することは難しい。このように、従来の次元削減技術では、AIモデルにおける高精度な人体検出には不十分である。

そこで本研究では、まずハイパースペクトル画像に含まれる人体のスペクトル特徴を統計的に抽出・強調するために、正規分布および混合ガウス分布に基づく手法を適用する。その後、人体の特徴を保持した状態で高次元データを3次元空間へと縮約するため、主成分分析やスペクトル間の相関構造を活用した複数（m個）の次元削減アルゴリズムを開発・選定する。

得られたm種類の次元削減後データセットに対し、本研究ではさらに構造の異なる複数（n種類）のAIモデルを設計し、これらを用いてそれぞれ学習を行う。最終的には、m×n通りの学習器を生成し、テスト時にはその出力結果に基づいて多数決判定を行うことで、ハイパースペクトル画像上の人体の有無を高精度に推定する。この手法は、次元削減の段階で検出対象である人体の特徴を意図的に強調し、それに適した構成の学習モデルを組み合わせるという点で、従来にない新規性と強力さを有するAI学習アーキテクチャである。

本研究においては、人体が瓦礫などと視覚的に混在していない比較的単純な環境下であれば、従来のAIモデル（機械学習や深層学習モデル）でも高精度な検出が可能であると考えられる。

しかし、実際の災害現場のように複雑な背景下では、瓦礫や建材のスペクトル特徴が人体と類似する場合も多く、従来モデルでは誤検出や検出漏れが生じやすい。この課題に対し、代表者および分担者はいずれも過去にAIを用いた画像処理・検出プロジェクトに携わっており、その知見を活かしながら、複雑な災害環境下でも高精度に人体を抽出可能なAI手法の構築に挑む。

最終的に、本研究の成果は災害時における実用的な被災者探索支援システムとしての応用を見据えている。図4に示す将来構想では、UAVに搭載されたハイパースペクトルカメラが上空から被災者の存在を検出し、その位置情報（GPS）を無線通信を通じてレスキューチームに即時通知することが可能となる。このようなシステムにより、被災直後の迅速な初動対応が実現し、救助活動の効率と精度を飛躍的に向上させると確信している。

３．計画の進行状況

本研究ではこれまで、研究を遂行する上で必要な基礎的な情報収集を進めてきた。特に、ハイパースペクトル画像に関する既存研究を幅広く調査し、本研究に応用可能な文献の整理・分析を行ってきた。また、ハイパースペクトルカメラによるデータ撮影の方法や、取得した多次元データの効率的な次元削減手法についても、理論的検討を重ねてきたところである。

今後は、これまでに検討してきた次元削減手法に関して、実際のハイパースペクトル画像データを用いた実験を本格的に進めていく予定である。次元削減の実験的検証を経た後は、得られた縮約データをもとに、人体の自動検出アルゴリズムの構築・検証に着手する計画である。

さらに、本研究におけるこれまでの調査・検討成果を基盤として、科研費・基盤研究(B)に申請を行い、無事に2024年度採択の内定を得ることができた。これは本年度の大きな成果のひとつである。今後は、当該科研費による予算を最大限に活用しながら、本研究の加速と更なる成果の創出に向けて、引き続き尽

力していく所存である。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

2025年度中に国際会議論文1件と国際学術雑誌論文を1件の公開を目指す。

また、関連研究分野で外部資金の申請を行う予定である。

河川・海洋広域観測のための微粒子・微生物濃縮、検出技術の開拓

工学部（電気電子工学課程）　　小池　義和

共同研究者
工学部機械工学課程　　二井　信行
工学部電気電子工学課程　　當麻　浩司
東京海洋大学　　荒川　久幸

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究では、これまでの研究で開発された要素技術を発展させ河川から海底までの広域な水圏微粒子・生態系のモニタリングための要素技術とシステムの開発を目的とする。現在までに、河川から海洋の微粒子の拡散をモニタリングするために海洋に浮遊するマイクロプラスチック（MP）及び微粒子をフィルタと逆洗が自動で可能となる金属メッシュを用いたファインウェッジフィルタ®を利用して、河川、及び海洋に浮遊する微粒子を回収するシステムを構築している。このシステムをさらにナイルレッドなどにより染色し蛍光観察により、プラスチックの種類を判定し、MP のみを抽出し、顕微ラマン顕微鏡で観測可能になるマイクロ流路及びデバイスの開発を試みている。（Y. Kurosaki, μTAS 2022)

本研究では、ファイルンウェッジフィルタ®と呼ばれる逆洗可能な金属フィルタを組み合わせた MP 観測システムを構築し、ナイルレッド(NR)染色を組み合わせて夾雑物中の MP の簡易検出を目指す。構築を目指す濃縮システムは、海水をポンプで給水し、金属フィルタで通した後、捕捉された MP を逆洗により濃縮する方式を取っている。また、本研究ではNR蛍光染色について、顕微鏡およびLED、光学フィルタで構成された簡素な蛍光観察システムを用いて検討を行う。NR 蛍光染色はプラスチック検出の低コストのアプローチとして注目されている。本研究で構築を目指す濃縮システムで得られるサンプルには MP と共に夾雑物が含まれる。NR 染色を使用した簡単な光学検出法を使用して、異物中の海洋 MP 識別の迅速化に対する有効性を検討する。

２．研究計画

2-1 MP 観測用システム全体の構成

Fig.1 に本研究で目指すシステム全体の流れを示す。システムでは、ポンプで海水を汲み上げ、フィルタにより粒子をフィルタ内に集める。その後、集めた粒子を分析器に送り、MP の判別と個数の計測を行う。給水時、流量計により汲み上げ量を計測することで、汲み上げ量に対する MP の数を分布として割り出すことができる。

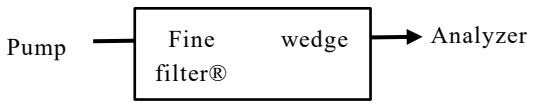


Fig. 1 Overall system flow

2-2 濃縮システムの構成

Fig.2 にファインウェッジフィルタの構造と濃縮原理を示す。フィルタリング時は、汲み上げた海水をフィルタ外から内に流す。フ

ィルタ外側に粒子が溜まったら、逆洗に切り替える。水を内から外へ流して、フィルタを洗い(以下「逆洗」)、溜まった粒子を回収し、分析器に送る。逆洗に使う水の量を減らすことが、フィルタによる濃縮の精度向上に繋がり、システム全体の効率化にも繋がる。「ファインウェッジフィルタによる濃縮」は、ポンプの給水量より分析器で分析する量を少なくするために行っている。ファインウェッジフィルタとは、何度でも洗って再使用できる金属製フィルタである。断面が三角形のワイヤーが筒状に巻かれた構造をしており、辺がフィルタの外側、尖った頂点が内側を向いているため、外側から内側に固形物が通る際、接触点が少なく詰まりにくく、詰まったとしても逆洗効果が高い。このフィルタは、円柱形の筐体に挟み込むように使用し、筒状の側面で筐体内の領域を二分するように設置する。

船上に設置するだけで、装置を運用できるように、濾過と逆洗作業を自動で行う濃縮装置を作製した。Fig.3 に濃縮動作を示す。フィルタリングと逆洗は、電磁弁による流路制御で行う。Fig.3 に示すアルファベットがつけられている電磁弁のうち、フィルタリング時には F 字の電磁弁が開き、R 字の弁は閉じている。これに対して、逆洗時には R 字の電磁弁が開き、F 字の電磁弁が閉じる。フィルタリング時は、電磁弁 F を開き、黒い矢印に沿って、フィルタリングが行われる。逆洗時は、電磁弁 R が開き、赤い矢印に沿って逆洗され、濃縮されたサンプルの回収が可能となる。流路の切り替えは流量計の値からマイクロコンピュータで制御する。

2-3 MP 検出の迅速化に対するナイルレッド染色の有効性の評価

MPs の識別の迅速化に向けてナイルレッド染色の有効性について調査するための実験を行った。前述の濃縮システムでは十分な濃縮サンプルを得ることができてないため、今回は豊洲運河において海水を採取し、吸引濾過

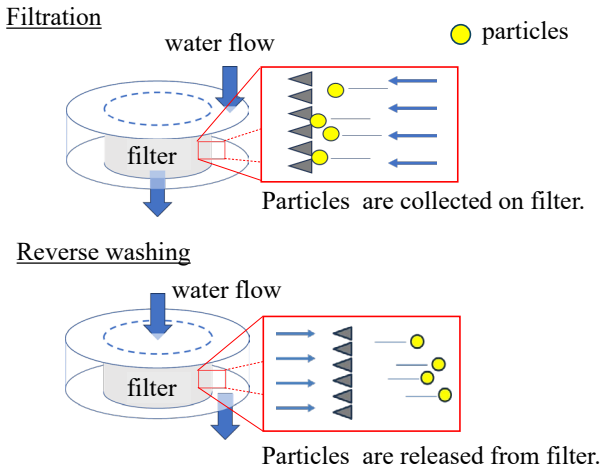


Fig.2 Principle of concentration using a fine wedge filter

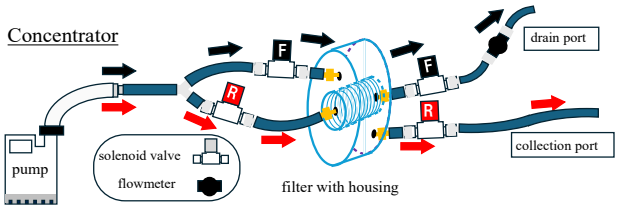


Fig. 3 Concentration process using a backwash device

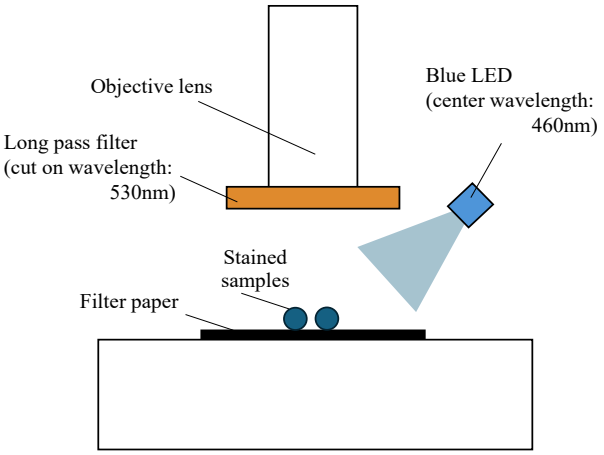


Fig.4 Fluorescence observation device configuration diagram

を行い夾雑物の蛍光観察を行っている。本研究のもう一つの目的が夾雑物中の MPs の検出の可能性の検討である。実際に採取したサンプルに MPs が必ず含まれるとは限らないため、今回は夾雑物と標準粒子の MPs との蛍光観察の比較で検討することにした。

実験構成を Fig.4 に示す。海水を濾過して作成したサンプルについて染色する。また、前

述のようにサンプルのうち一つには標準粒子を添加して観察を行っている。蛍光観察は顕微鏡に対して光学フィルタとLEDを取り付けた簡易的な蛍光観察装置を用いて行った。この際、光学フィルタのカットオン波長および励起光源の波長はPrasad et al.(2024)を参考に決定した。また、Won et al.(2016)によって蛍光観察を行う際に、背景の濾紙と粒子とのコントラストを高めるために黒色の濾紙を使用する事が提案されている。本研究では、黒色濾紙を使用する事が困難であったため墨汁で染色した濾紙を使用した。

標準粒子として、粒子径が300μm程度のポリエチレン標準粒子(Cospheic 社製)を利用した。染色には、蛍光色素ナイルレッド(Nile red, Targetmol 社製）のアセトン溶液（10 μg/mL）を用いた。

実験装置として、試料の明視野観察および蛍光観察に、デジタルマイクロスコープVHX-1000 (KEYENCE 社製)を用い、対物レンズは100倍を使用した。蛍光観察においては、顕微鏡の対物レンズに対してカットオン周波数530 nmのロングパスフィルタ（SCHOTT 社製）を装着し、中心波長 460 nm の青色 LED（Hi-Field 社製）を励起光源として用いて、簡易的な蛍光観察を行った。海水サンプルの濾過には墨汁で黒色に染色した濾紙を用いた。

以下に実験手順を説明する。

(1) 海水の採取

豊洲運河において海水6Lを採水した。

(2) サンプルの濾過

採取した海水について、吸引濾過器を用いて濾過しサンプルを作成した。上記の海水の採取・濾過プロセスを6回繰り返し、合計6つの濾過サンプルを作成した。

(3) NR 染色

作成したサンプルのうち一つについて、標準粒子を添加した。そして、作成したサンプル全てについて、サンプルが十分に浸る程度に NR を添加したのち、サンプルを自然乾燥させた。

(4) 蛍光観察

顕微鏡を用いて、対物レンズに対してロングパスフィルタを装着し、サンプルに対してLEDを照射して簡易的に蛍光観察を行った。

３．計画の進行状況

3-1 濃縮システムの動作結果

Fig.5にシステムの動作結果を示す。電磁弁Rが開いている時の瞬時逆洗流量（Washing time）に対する電磁弁Fが開いている瞬時順流量の割合から濃縮率を求めている。逆洗時間が短いほど濃縮率は高く、逆洗1秒では濃縮率60%程度を示した。ただ、逆洗時間が短くなると十分なフィルタの洗浄が行われなくなるため、稼働時間とともに瞬時順時の流速が低下する。また、濃縮率60%は十分な値ではない。今後、二段にして逆洗時の流速を早くし、濃縮率も確保できる構成を検討していく。

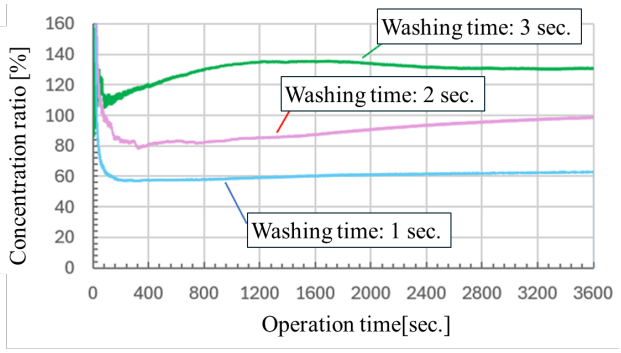


Fig.5 Concentration ratio against inverse washing time

Fig.6、7 に露光時間を変更して標準粒子を撮影した画像を示す。また、Fig.8 に夾雑物の撮影画像を示す。また、Fig.9 に標準粒子を観察した画像について、粒子領域全体が含まれるように明度閾値を設定し、二値化処理を行った画像を示す。画像処理は Image J を用いて行い、明度閾値は 30 に設定した。また、Fig.10 に夾雑物の蛍光観察画像について、同様の閾値で二値化を行った画像を示す。Fig.6、7 より、染色によってプラスチック粒子の視認性が高まることが確認できる。しかし、Fig.8 から、夾雑物についてもプラスチック粒子と

同程度の呈色を示すことが確認できる。従って、NR 染色単体で MP 識別を行うことは誤識別の可能性の観点から適切ではないと考えられる。蛍光染色によって夾雑物の大部分は呈色を示さないことは、他の高精度分析手法を行うにあたり、密度分離や有機物分解等長時間の前処理工程を省略する可能性があると考えられる。

2 値画像から分かるように夾雑物と MP が同時に存在して、重なった場合により区別が困難なことが予想される。そのため、画像処理に合わせて、蛍光観察に用いるフィルタについても再検討が必要と考えられる。

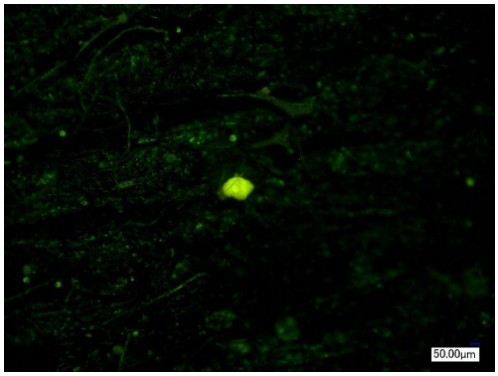


Fig.6 Fluorescence observation image of standard particles (exposure time 1s)

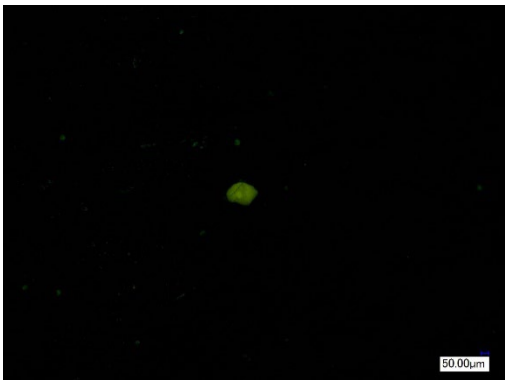


Fig.7 Fluorescence observation image of standard particles (exposure time 0.2s)

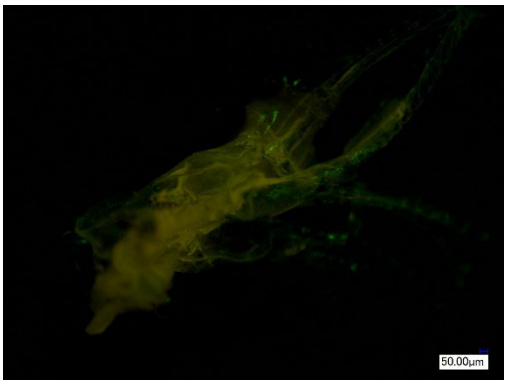


Fig.8 Fluorescence observation image of a foreign sample (exposure time 0.2s)

４．今後の計画

今後、濃縮率の向上を多段構成で目指し、FTIR やラマン分光で連続観測可能となるシステムの実現を目指す。

５．学会，論文等投稿・発表状況

[1] Atsumi, T.; Shin, Y.; Ishiyama, T.; Furuya, M.; Hayashi, Y.; Koike, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.13, 2025, 294. https://doi.org/10.3390/jmse13020294

[2] Yang Z., Nagashima H., Hasegawa N., Futai N., Koike Y., Arakawa H., Marine Pollution Bulletin, Vol.212, 2025, 117588. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117588

[3] 石橋巧実, 渥美太晴, 椎屋陸, 塩澤雅能, 小池義和, ラジャパランウママヘスワリ, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-2-03, 2024 年 9 月

[4] 嶺大空、石山巧実、小池義和、鈴木雄大、二井信行、荒川久幸、第 31 回海洋工学シンポジウム、OES31-A0028、2025 年 3 月

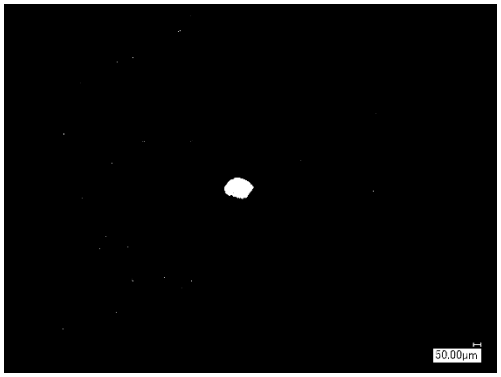


Fig.9 Binary image of standard particle

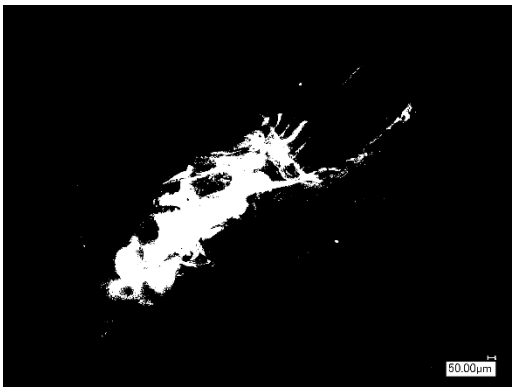


Fig.10 Binary image of the foreign sample

Upper Limb Muscle and Posture Evaluation System During Activities of Daily Living Using Musculoskeletal Model and Deep Learning Approach

Innovative Global Program　Shahrol Mohamaddan

Research colleagues
College of System Engineering　Motoki Takagi
Universiti Kebangsaan Malaysia　Nasharuddin Zainal

１. Paper introduction

The upper limb is an important part of the human body. However, due to health conditions or accidents, most people cannot perform the activities of daily living (ADLs). Assistive devices are an example of technology available to support these disabilities.

In this research, two systems were developed to understand and support human upper limb and posture movement. The first system focused on developing the virtual reality (VR) task for telerehabilitation system for upper limb and the second system focused on human posture monitoring based on artificial intelligence (AI).

The overall objectives of these two research may differ from the initial objective of this grant, but the achievement from this two research is important to support the overall research activities. These two resesarch also have good future potential.

２. Research program

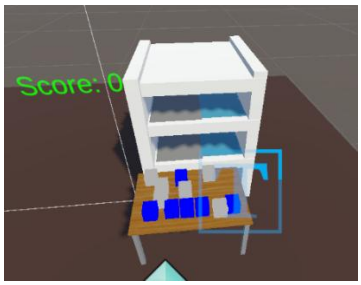
2.1 Development of VR Task for Telerehabilitation System

The objective of this research is to develop a VR task for telerehabilitation system for the upper limb disabilities. The aims were to propose new solutions and to keep patients engaged and motivated throughout the rehabilitation process.

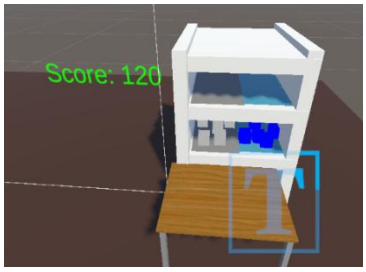
For this research, the Meta Quest 2 headset is used for VR development. The pick and place task as shown in Fig. 1 was developed using Unity software where the participant needs to place the blocks according to their respective colors inside the cupboard in the VR environment. Besides developing the VR task, the research also attempted to obtain the hand's palm trajectory from the screen recording of the task.

In order to perform the task, the participant needs to put on the headset, observe hands in the scene, use the pinch

hand movement to pick the block, and place the respective color blocks on the respective planes as shown in Fig. 2.

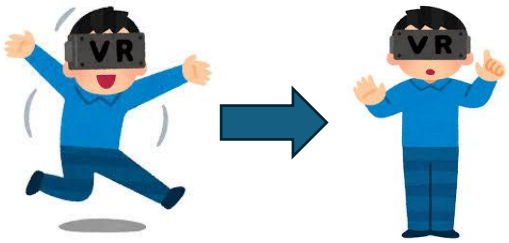


(a) Before performing the task (the block is scattered on the table)

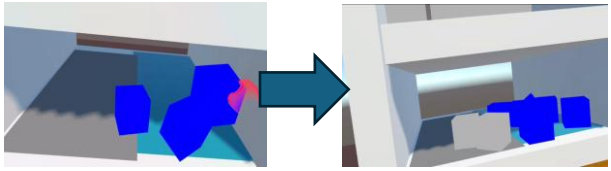


(b) After performing the task (the block is arranged according to the colors)

Fig. 1 Overview of developed tasks in the VR using Unity software



(a) Put on the headset and observe hands in the scene



(b) Use the pinch hand movement to pick block and place the blocks

Fig. 2 The step-by-step process to perform the task in the VR environment

2.2 Human Posture Monitoring based on AI System

The objective of this research is to monitor human posture while performing the ADLs using AI system. MediaPipe pose was applied for the monitoring process. 32 body landmarks as shown in Fig. 3 were used with 0.5 confidence threshold for detection. ±10 degrees margin around average angles were set to differentiate the good and bad posture.

For the initial study, 4 key angles; left/right shoulder and left/right neck were monitored. Automatic message was sent to the user's Telegram account when bad posture persisted beyond 1 minute threshold. Different color coding was used to differentiate the good and bad posture.

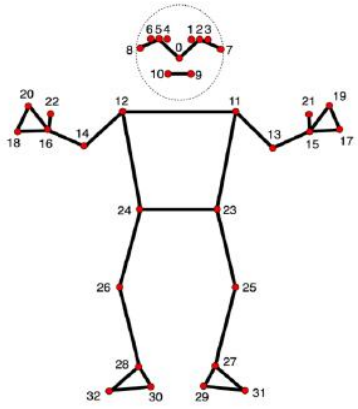


Fig. 3 Selected landmarks [1]

3. State of progress

3.1 Development of VR Task for Telerehabilitation System

Fig.4 to 6 shows examples of results from the hand's palm movement while performing the task in the VR environment. Fig. 4 is the initial testing where the participant wears the VR headset and starts rotating the hand. The start pointed at the (0,0) coordinate. From the

start point, participant performed one circle movement downward and completed the movement on the right side. Next, the back-and-forth movement was conducted a few times. Lastly, the rehabilitation exercises; pick and place boxes in the VR environment as mentioned in Section 3 were performed.



Fig. 4 Hand trajectory while performing the simple circle movement

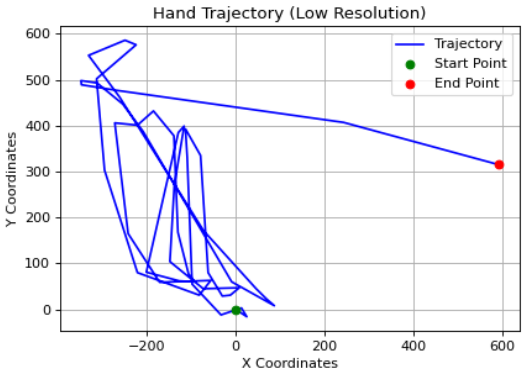


Fig. 5 Hand trajectory while performing back-and-forth movement



Fig. 6 Hand trajectory while performing the rehabilitation task

In general, the developed task in the VR environment can display a pattern of hand trajectories based on the palm movement. The movement also can be represented by a graph in x and y axis. However, there is a need to find other methods that can quantitatively analyze the movement since the current representation of x and y is still not sufficient.

3.2 Human Posture Monitoring Based on AI System

Fig. 7 and 8 shows the example of good and bad posture results from the developed system. The system operated at approximately 30 FPS (frame per second) allowing smooth and responsive posture detection. The system detected deviations from calibrated angles, identifying good and bad posture scenarios. Participants can receive Telegram alerts within 1 minute and encourage immediate corrective action.

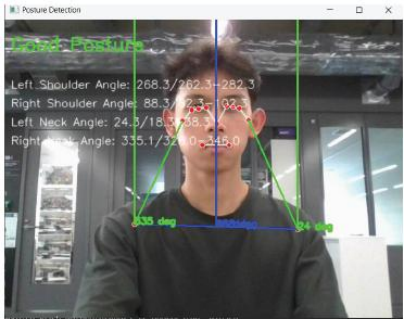


Fig. 7 Example of good posture

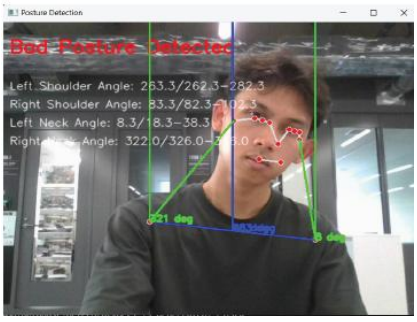


Fig. 8 Example of bad posture

The on-screen display provided clear and immediate feedback, enhancing user awareness of their posture. However, the current system is limited to the human head area.

４. Future program, paper submission and results briefing

4.1 Development of VR Task for Telerehabilitation System

The research successfully demonstrates the VR task and environment developed using the Unity software. The system able to visualize the hand's palm trajectory while performing the simple task (simple circle and back-and forth movement) and rehabilitation task (pick and place the boxes).

For future directions, the research will focus on different approaches to analyze the hand's palm trajectory results especially for more complex movement related to rehabilitation exercises. For example, applying sensors such as the inertial measurement unit (IMU) or 3D motion capture. The combination of VR and sensors will make sure the system is more reliable in providing angle parameters during rehabilitation process.

One poster already submitted for this research. The detail of the poster is given below;

A. Ashok, S. Mohamaddan, A. Hanafusa, M. Takagi, and J. Annisa, "Development of an Upper Limb Telerehabilitation System for Stroke Patients: A Study on VR Environment", Malaysia-Japan Visionaries Conference 2024

4.2 Human Posture Monitoring Based on AI System

The research successfully demonstrated a real-time posture detection system using MediaPipe and OpenCV. Real-time feedback promotes better posture habits and shows promising results in enhancing ergonomics and prevents posture related issues. For future directions, the research will focus on expanding the real-time assessment for full body area that is able to replace manual assessment in ergonomics such as REBA (Rapid Entire Body Assessment) and RULA (Rapid Upper Limb Assessment).

One poster already submitted for this research. The detail of the poster is given below;

M. A. Haqimi, S. Mohamaddan, and M. J. Homam, "Human Posture Monitoring Based on AI System", Malaysia-Japan Visionaries Conference 2024

Finally, for both research there is a need to apply for the ethical approval since it required human for the testing. Besides, the final analysis can be compiled for conference paper submission.

References

[1] A. Vij, "Push-Ups with Python! (MediaPipe + OpenCV) - Aryan Vij - Medium," Medium, Feb. 14, 2022.

Development of Guidelines for Designing Kawaii Fashion using Deep Learning Model

Innovative Global Program Tipporn Laohakangvalvit

1. Paper Introduction

Kawaii is a Japanese cultural uniqueness that attracts attention around the world. It has been considered an important value that enhances the emotional appeal of various products, such as Hello Kitty by Sanrio. Since 2017, we have conducted research on kawaii fashion trends in Japan from multiple perspectives, including the application of deep learning techniques [1].

Using a deep learning approach, specifically a Deep Convolutional Neural Network (CNN) algorithm, we analyzed kawaii fashion images to identify visual characteristics. Initially, we developed a deep learning model to classify five different kawaii fashion styles [2]. We then applied this model to examine the positioning of luxury fashion brands within the kawaii fashion space and proposed "kawaii map" as a method to visualize the degree of kawaii expression in a two-dimensional space: traditional vs. modern kawaii" [3].

To advance the development of practical and internationally adaptable design guidelines for kawaii fashion, it is essential to situate kawaii styles within the broader landscape of global fashion. Among the most influential segments of this landscape is luxury fashion, which not only reflects the prevailing standards of aesthetics and innovation, but also serves as a global benchmark for design excellence. By mapping kawaii fashion into the space of luxury fashion, we can more effectively evaluate its stylistic features in relation to internationally recognized visual and structural elements such as silhouette, balance, material use, and brand identity.

This integration serves two purposes. First, it enables a more generalized and scalable approach to constructing design guidelines that are not confined to local or niche markets. Second, it allows the deep learning model to learn from and adapt to broader fashion design standards, increasing its ability to provide useful, culturally relevant, and globally informed design suggestions. By leveraging luxury fashion space as a comparative framework, we aim to create design guidelines that help kawaii fashion evolve from a culturally specific style into a globally viable designs.

Accordingly, the goal of our research is to clarify the positioning of kawaii fashion styles within the context of luxury fashion. To achieve this, we previously constructed a multi-class classification model of seven luxury fashion brands using the Deep CNN algorithm [4]. The current

study builds on this model by applying it to classify images from our 5-style kawaii fashion dataset and uses the classification outcomes to analyze the similarities and differences of kawaii fashion within luxury fashion space. These results are used as a foundation for developing robust and internationally adaptable guidelines for designing kawaii fashion.

2. Research Program

2.1Dataset

The dataset was constructed in our previous study [5] and is used as input to the model in this study. It contains a total of 505 images of the 5 kawaii fashion styles as follows: Classic Retro Doll (101 images), Harajuku-type Kawaii (104 images), Lolita (100 images), Orthodox pretty and cute (100 images), and Street Kawaii (100 images).

2.2 Classification Model

We utilize a multi-classification Deep CNN model, previously constructed in our study [4], to classify images into 7 luxury fashion brands (i.e., Anna Sui, Christian Dior, Dolce&Gabbana, Gucci, Moschino, Tomo Koizumi, and Vivienne Westwood). These classification probabilities indicate the level of similarity between the input image and each respective brand.

2.3 Classification Procedure (Figure 1)

Firstly, we input one image from the dataset (Section 2.1) into the classification model (Section 2.2). Then, the model processes the image and outputs the classification probabilities of the 7 luxury fashion brands. These steps are repeated for all images in the dataset.

Figure 2 shows an example of the classification procedure using an image from "classic" as kawaii fashion style as input to the model. The output show that the classification probability of "Vivienne Westwood" is 99.8% while almost 0% for others, indicating a high level of similarity between "classic" style and "Vivienne Westwood" brand.

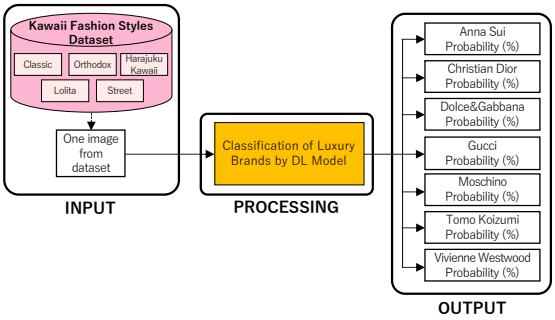


Figure 1. Classification procedure

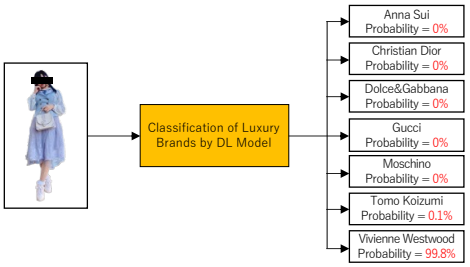


Figure 2. Example of the classification of an image from "Classic" as kawaii fashion style (*The image is from "Axes Femme" brand of IGA Co., Ltd.)

Then, we use the results from the above classification procedure to calculate average classification probability of each of the luxury fashion brands across all images within the same kawaii fashion style, which forms the distribution that indicate the positioning of each kawaii fashion style within the 7-dimensional luxury fashion space.

Finally, we analyze the similarities and differences among the 5 kawaii fashion styles in relation to luxury fashion brands by using the distributions to calculate the similarity using two similarity measures: Euclidean distance and cosine similarity.

3. State of progress

We derived the distribution of average classification probabilities for the 5 kawaii fashion styles as shown in Figure 3. The x-axis shows 5 groups of kawaii fashion styles, and the y-axis shows the average classification probabilities into the 7 luxury fashion brands calculated from the classification output of all images in the same kawaii fashion style.

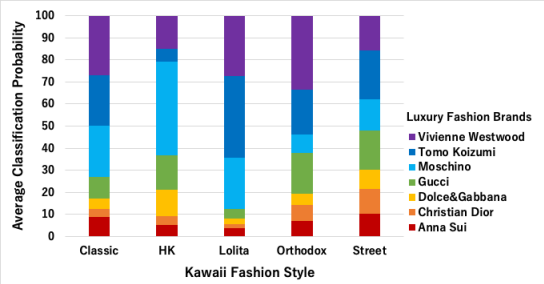


Figure 3. Distribution of average classification probabilities for each of the kawaii fashion styles

Next, we performed similarity analysis to quantitatively compare the similarities and differences of the distributions among the 5 kawaii fashion styles using Euclidean distance (Figure 4) and cosine similarity (Figure 5). We represent the results from the two similarity measures using heatmap displaying the similarity measure between each pair of kawaii fashion styles, with a color gradient from green (high similarity) to red (low similarity).

Euclidean Distance

	Classic	HK	Lolita	Orthodox	Street
Classic	0.0	30.2	16.3	19.3	19.0
HK	30.2	0.0	41.8	42.6	34.6
Lolita	16.3	41.8	0.0	28.2	28.2
Orthodox	19.3	42.6	28.2	0.0	19.8
Street	19.0	34.6	28.2	19.8	0.0

Similar ⟷ Dissimilar

Figure 4. Euclidean distance heatmap

Cosine Similarity

	Classic	HK	Lolita	Orthodox	Street
Classic	1.00	0.80	0.95	0.91	0.91
HK	0.80	1.00	0.67	0.61	0.73
Lolita	0.95	0.67	1.00	0.84	0.85
Orthodox	0.91	0.61	0.84	1.00	0.90
Street	0.91	0.73	0.85	0.90	1.00

Similar ⟷ Dissimilar

Figure 5. Cosine similarity heatmap

As a result, the tendencies observed in both Euclidean distance (Figure 4) and cosine similarity (Figure 5) are consistent. Based on this result, we interpret and discuss key findings in relation to the fashion aspects as follows:

- Classic and Lolita styles are most similar, indicating that they share many characteristics and are perceived similarly within the luxury fashion space. This result is reasonable because both styles have a girlish doll-like look inspired by the European's antique fashion.
- Classic, Lolita, and Orthodox styles are moderately or closely similar. While Classic and Lolita styles have similar positioning, Orthodox style tends to be somewhat different. This result is reasonable because the characteristic of Orthodox style—beautiful, gentle, feminine, and soft—differ from the other two styles.
- Street style is similar to Classic and Orthodox styles, indicating that they share certain characteristics. These 3 styles, especially Street, are considered to be easily influenced by fashion trends at that time. As a result, they may change in similar directions due to popular trends at the time, leading to their similarity.
- The HK style is least similar to all other styles, indicating a distinct positioning from all other styles in the luxury fashion space. This result is reasonable and supports the fact that HK originated from a unique Japanese culture, and is well-

perceived as a representative of Japanese kawaii fashion, while other kawaii fashion styles, especially Classic and Orthodox, are inspired by European fashion tastes.

In our previous work [5], HK and Lolita were grouped as “modern kawaii” based on expert judgment. However, the current study using a deep learning model trained on luxury fashion data shows that HK differs from all other kawaii styles, including Lolita. This suggests HK has distinct visual features that set it apart.

These results highlight the value of data-driven analysis in refining style categories. Understanding such distinctions is crucial for building adaptable design guidelines. Future work will explore these unique features further and compare kawaii styles with luxury fashion to support the development of globally relevant guidelines.

4. Future program, paper submission and results briefing

Our analysis results reveal the similarities and differences among kawaii fashion styles, highlighting the distinct positioning of HK. These findings enhance the understanding of kawaii fashion within luxury fashion space and offer the valuable insights for future research direction. Our future work will also integrate eye-tracking analysis to verify the features contributing to kawaii fashion perception.

As part of this research, we have published the following scientific papers:

- T. Laohakangvalvit, K. Miyatake, P. Sripian and M. Ohkura, Study on Style of Kawaii Fashion (27th report): Positioning of Kawaii Fashion Styles within Luxury Fashion Space Using Deep Learning Model, The 26th Annual Meeting of JSKE, 1D01-02, 2024.
- T. Laohakangvalvit, K. Miyatake, P. Sripian and M. Ohkura, Study on Style of Kawaii Fashion (29th Report): Positioning of Kawaii Fashion Styles and Luxury Fashion Brands within Luxury Fashion Space Using Deep Learning Model, The 20th Spring Annual Meeting of JSKE, 1C02-02, 2025.

References

1. T. Laohakangvalvit, K. Miyatake, P. Sripian and M. Ohkura; Study on Style of Kawaii Fashion (14th report): Construction of Harajuku-type Kawaii Fashion Model by Deep Learning, The 23rd Annual Meeting of Japan Society of Kansei Engineering, 1C01-06-05, 2021.
2. T. Laohakangvalvit, P. Sripian, K. Miyatake and M. Ohkura; A Proposal of Classification Model for Kawaii Fashion Styles in Japan Using Deep Learning, In: Kurosu, M. (eds) Human-Computer Interaction (HCII2022), pp. 450-461, 2022.
3. T. Laohakangvalvit, K. Miyatake, P. Sripian and M. Ohkura; Study on Style of Kawaii Fashion (22nd report): Luxury Brand Positioning in Kawaiiness based on Classification by Deep Learning Model, The 18th Spring Annual Meeting of Japan Society of Kansei Engineering, 2E01-03, 2023.
4. T. Laohakangvalvit, P. Sripian, K. Miyatake, and M. Ohkura; Study on Style of Kawaii Fashion (25th report): Construction of Luxury Fashion Model by Deep Learning, The 19th Spring Annual Meeting of Japan Society of Kansei Engineering, 2C01-02, 2024.
5. K. Miyatake, P. Sripian, T. Laohakangvalvit and M. Ohkura; Research on cute and kawaii fashion (17th report) -Kawaii design in luxury brands-, The 24th Annual Meeting of Japan Society of Kansei Engineering, 1B-1-02, 2022. (in Japanese)

COVID-19 とその後遺症に対する治療効果を併せ持つ化合物の創製

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）

COVID-19 は発熱、呼吸障害以外にも血栓症が高頻度で起こるため、様々な合併症を引き起こす。中でも脳梗塞合併症は感染者の約１％に発症し、COVID-19 による死亡原因のひとつになっており、重篤な後遺症を引き起こすことから大きな問題となっている。本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、「抗 SARS-CoV-2 活性が高く、COVID-19 が引き起こす脳梗塞血栓症に有効な新薬開発」という点にある。既に我々は、作用はまだ十分でないものの、神経幹細胞をニューロンに分化させる作用と抗 SARS-CoV-2 活性を併せ持つ幾つかのビタミン K 誘導体を見出している。また、それらの作用の標的分子は、それぞれ代謝型グルタミン酸受容体(mGluR)および RNA 依存性 RNA ポリメラーゼ(RdRp)であることを確かめている。さらに、ビタミン K の側鎖末端部分を脂溶性の置換基で修飾すると、それらの作用を強化できることもわかった。ビタミン K 誘導体は血液脳関門を通過することが確認されており、脳をはじめとした中枢に作用する可能性も示されている。COVID-19 による脳梗塞血栓症のメカニズムは明らかにされていないが、ウイルスの脳への移行に起因することも考えられる。このため、脳内でも抗ウイルス作用を示しつつ、神経幹細胞をニューロンに分化させる働きのある化合物は、脳梗塞によって失ってしまったニューロンを新生して、脳を再生させることができる可能性がある（図１）。以上から COVID-19 が引き起こす脳梗塞後遺症に対して治療効果を有する「次世代の新規抗 SARS-CoV-2 薬」の創出は十分可能であると考えている。

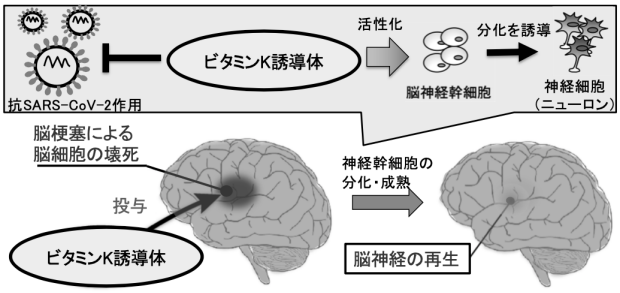


図１．抗ウイルス作用と神経幹細胞の活性化作用を併せ持つ新規ビタミンＫ誘導体の創製

本研究の目的

COVID-19 の治療薬は、自宅療養患者が増加している現在、自宅で服用でき、かつ治療効果の高い経口薬が求められている。最近になって SARS-CoV-2 に特化した経口薬が開発されてきてはいるが、いずれも治療効果は限定的である。また、COVID-19 が引き起こす後遺症は、味覚障害や筋力低下、頭痛など多岐に及んでおり、現時点では確立された治療法がないため、症状に応じた対症療法が基本となっている。このような背景の中、本研究グループは前述のように、天然のビタミン K が神経幹細胞をニューロンに分化させる作用を持つことを見出した。さらに、側鎖末端部分を様々な置換基で修飾した誘導体を合成して化

合物ライブラリーを構築し、その中から神経幹細胞を活性化してニューロンへの分化を誘導する作用が天然より強い化合物 **1 - 5** を見出した （図２） [*J Med Chem,* **2015**]。これらニューロンへの分化誘導作用を示す化合物は、COVID-19 の重篤な後遺症である脳梗塞血栓症の症状を改善できる可能性がある。一方で、ビタミン K_3 が SARS-CoV-2 の増殖に必須の酵素を阻害することが報告されたため、上記の化合物ライブラリーから抗 SARS-CoV-2 活性を示す化合物を調べた。その結果、**1- 3** が SARS-CoV-2 を感染させた細胞の細胞死を濃度依存的に抑制し、現在臨床で使用されている「レムデシビル」の約 1/10 の抗 SARS-CoV-2 活性を示すことを明らかにした [*ACS Omega*, 2023]。このように、化合物 1-3 は分化誘導作用と抗ウイルス活性の両方の機能を有するバイファンクショナル (bifunctional) な化合物であることを見出した。またこれらの誘導体が両方の活性を有する鍵は、標的分子との結合部位と考えられる側鎖と側鎖末端部分の構造と分子の脂溶性度であることがわかった。そこで以上の予備的な研究成果を踏まえ神経幹細胞の活性化作用を併せ持ち、より有効性や安全性に優れた新規抗 SARS-CoV-2 薬の候補化合物を創製することを目的とした。

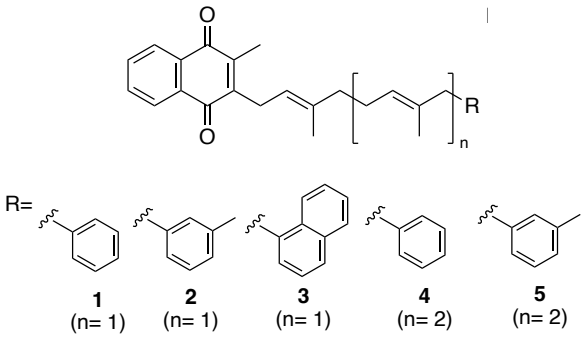


図２　新規ビタミンK誘導体の構造式

２．研究計画

研究計画の流れは次の通りである。１）先行研究で得られた化合物と標的分子の結合状態を in silico 解析により分析し、両方の標的分子にさらに強く作用する化合物をデザイン・合成して、化合物ライブラリーを構築する。２）in vitro アッセイにより抗 SARS-CoV-2 活性と神経幹細胞に対する作用を調べる。３）両方に活性を示した化合物について構造活性相関を検討し、さらに１)、２）の操作を繰り返してスーパーアナログを見出す。４）in vivo 試験を行い、効果や安全性を検討する。具体的には以下の研究計画に従って研究を進める。

【2024 年度の計画】：1) -A In silico 解析による標的分子に強く結合するリガンドの設計

先行研究で高活性を示したビタミン K 誘導体と標的分子の結合状態を、計算化学の手法を用いた in silico 解析により分析し、標的タンパク質に強く作用する可能性の高い化合物を設計する。我々は、化合物の抗 SARS-CoV-2 作用の標的分子は RdRp であり、神経分化誘導作用の標的は mGluR であることを明らかにしている。PDB (Protein Data Bank) に収載されているそれらの X 線結晶構造を基にして、リガンド結合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、結合ポケットとの結合エネルギーなどを検討し、標的分子に強く作用する化合物を設計する（図３）。

１）-B 合成展開による化合物ライブラリーの構築　先行研究の結果を基にして 1) -A で設計したビタミン K 誘導体について合成展開を行い化合物ライブラリーを構築する。

2）-A 抗 SARS-CoV-2 効果を有する新規ビタミン K 誘導体の同定と化学構造の最適化

上記 1)-B で構築した化合物ライブラリーについて、本研究グループが樹立した in vitro アッセイにより抗 SARS-CoV-2 活性を判定し、活性化合物を選別する。具体的には、まず SARS-CoV-2 に対し高い感受性を有する VeroE6/ TMPRSS2 細胞に SARS-CoV-2 を感染させると同時に化合物を添加する。さらに３日間培養後、細胞の生存率を色素法で測定し、死滅していた場合は SARS-CoV-2 に対する効果なし、生存していた場合は効果ありと判断

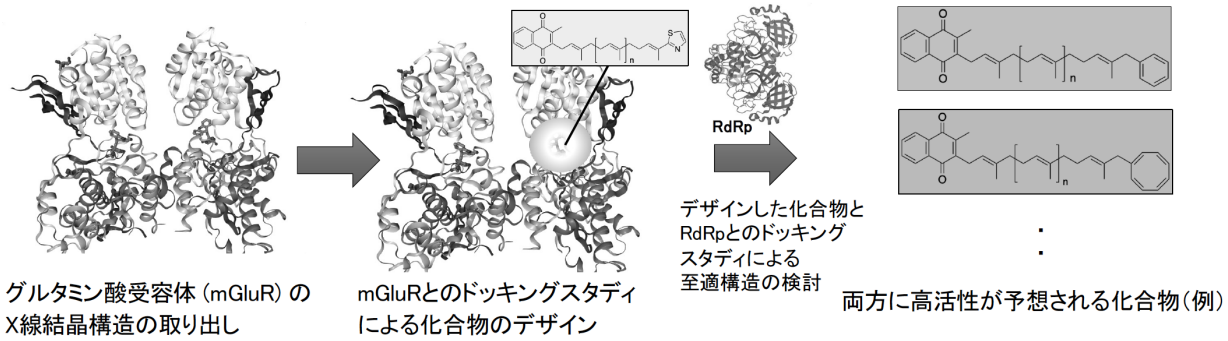


図３　作用タンパク質に強く作用する化合物の設計

する。効果が強かった化合物については、さらに強い作用を目指して化学構造の最適化を行う予定である（図４）。

2）-B　神経幹細胞のニューロンへの分化誘導活性を有する新規ビタミン K 誘導体の選別

2)-A で選別した化合物について、本研究グループが開発した高効率な ハイスループット・スクリーニング 法により神経分化誘導活性を持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、市販の株化されているヒトの脳神経幹細胞を用いる。具体的な評価方法として、化合物添加により神経幹細胞から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（Microtubule-Associated Protein 2）の mRNA 発現量を PCR によって定量し発現量の高かった化合物を抽出する。

【2025 年度の計画】：３）上記１）、２）の操作を繰り返して、スーパーアナログを見出す　上記１）および２）による検討を繰り返して、より強い抗 SARS-CoV-2 作用を持ち、かつ強い神経分化誘導作用を有するスーパーアナログの創出を目指す。抗 SARS-CoV-2 作用については、同じ RdRp 阻害作用を示すレムデシビルと同等かそれ以上の活性をもつ化合物を見出す。

【2026 年度の計画】：　４）　In vivo 試験の検討　上記の in vitro 試験により有望な候補化合物が見つかった場合は、COVID-19 の動物モデルとして hACE2 トランスジェニックマウスなどを用いた動物試験により、効果や安全性を検討する。

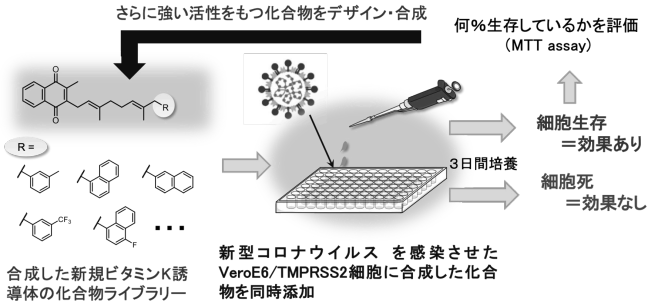


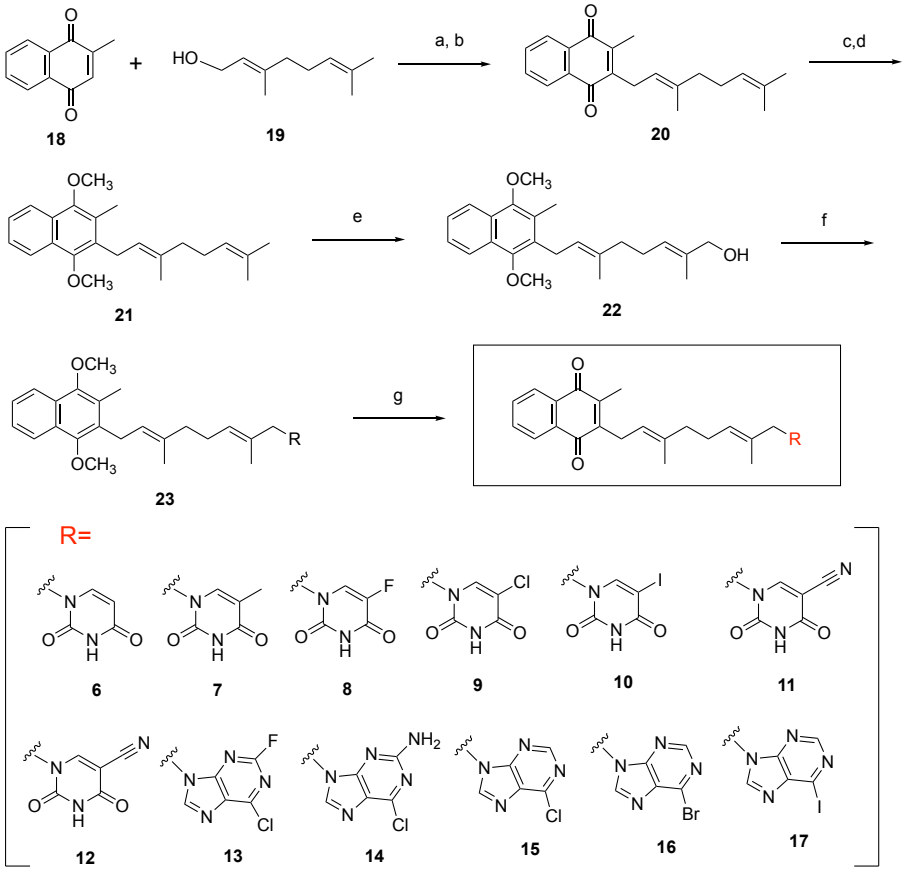
図４　化合物の抗 SARS-CoV-2 効果の判定および最適化の手法

３．計画の進行状況

メナジオン(**18**)とゲラニオール(**19**)を出発原料として、**18** を $Na_2S_2O_4$ でヒドロキノンに還元後、BF_3•Et_2O をルイス酸として用いて側鎖 **19** をカップリングして、MK-2 (**20**)を得た。次いで、**20** のキノンを還元してヒドロキノンのジメチル体(**21**)とした後、側鎖末端を二酸化セレンによって酸化してアルコール(**22**)を得た。この **22** を共通中間体として、光延反応によって側鎖末端に様々なピリミジン誘導体およびプリン誘導体を 3- 42%の収率で結合させることができた。最後に CAN によりジメチル基を脱保護することで、目的とする 6 種類のピリミジン骨格、6 種類のプリン骨格を有するビタミン K 誘導体 **6-17** を得ることに成功した（スキーム 1)。この他にもチミン骨格を側鎖末端に導入した化合物も低収率ではあるが合成することができた。

得られた誘導体の化学的安定性は良好であったが、ヨウ素を含むハロゲン化合物については、長期間の保存は困難である可能性が考えられたため、-78℃で凍結保存した。次に

スキーム１　ビタミンＫ誘導体の合成



Reagents and conditions: (a) $Na_2S_2O_4$, Et_2O, r.t., and 1 h; (b) $BF_3{\cdot}OEt_2$, AcOEt/1,4-dioxane = 1:2, 70 °C, 3 h, and 39%; (c) Bu_4NI, $Na_2S_2O_4$, 2M KOH aq, and THF; (d) $(CH_3)_2SO_4$ THF/H_2O, r.t., 7 h, and 74%; (e) SeO_2, salicylic acid, 70% TBHP, CH_2Cl_2, r.t.,20 h, and 36%; (f) Ph_3P, secondary cyclic amine, DIAD, DMF, r.t., 1 h, and 33–42%; and (g) CAN, CH_3CN/water, r.t., 0.5 h, and 48–84%.

「スーパーアナログ（高活性誘導体）」の創出を目指し、in vitro 試験により候補化合物を選定した。その結果、プリン骨格を有する **14** および **15** が抗 SARS-CoV-2 活性をもつことが明らかとなった（図５）。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後はさらに化合物ライブラリーの拡充をはかり、より強力な抗ウイルス活性と神経分化誘導活性の両方を有する候補化合物の選定を目指す予定である。

＜学会発表＞日本薬学会第 145 年会：SARS-CoV-2 増殖抑制効果の向上を目指した新規ビタミン K 誘導体の創製

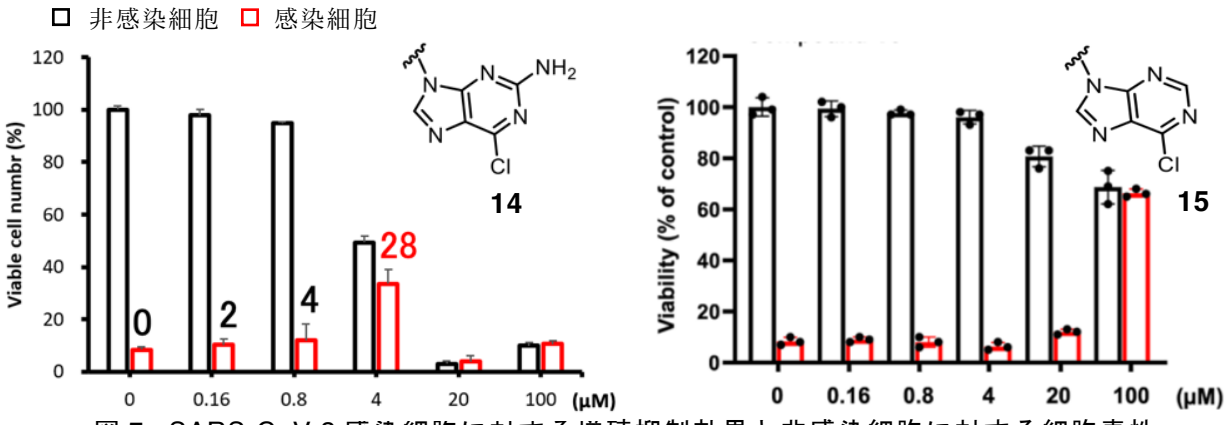


図５．SARS-CoV-2 感染細胞に対する増殖抑制効果と非感染細胞に対する細胞毒性

生体内血液循環の調節機序解明に向けた血液細胞の変形能の役割解明

システム理工学部（生命科学科）　　渡邉　宣夫

共同研究者
芝浦工業大学システム理工学部生命学科　　福井　浩二
芝浦工業大学システム理工学部生命学科　　吉村　建二郎

研究協力者
ドイツ・シュトットガルト大学・Institute of Biomedical Engineering　Giorgio Cattaneo
東京科学大学病院血液浄化部　内藤省太郎　＆　大久保淳

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究室においては、これまでの血液関係の研究成果が広がりつつあり、赤血球変形能の研究、血液凝固機序を解明する為の研究、せん断流れ発生装置を利用した赤血球膜酸化についての研究や、クラミドモナス細胞の観察研究といったように広がりが出つつある。また、ドイツ・シュトットガルト大学との共同研究も広がりが出つつある。以下に、それぞれの研究課題毎に研究目標を述べる。

1.1 赤血球変形能の健康範囲を明らかにする。加えて、医療機関と協力し、血液浄化医療の前後での赤血球変形能を評価する事で、血液浄化医療が変形能に与える影響を解明する。

1.2 赤血球変形能から、より大きなスケールとしての血液循環における変化を考察する。豪州医学系研究者らと共に、赤血球膜タンパク質の種類と、その動的な機能との関係性を解明する。

1.3 クラミドモナス細胞について、本学生命科学科生命科学コース吉村建二郎教授と協力し、流れ下でのせん断応答性とその細胞機能の関係性を解明する基礎研究を実施する。

1.4 本学生命科学コース福井浩二教授と協力し、赤血球細胞の物理刺激応答性と加齢現象と膜酸化現象そして物理的な損傷との関係性を解明する研究に取り組む。

1.5 ドイツ・シュトットガルト大学 Cattaneo 教授と協力し、ステント近くの血栓形成機序を解明するための知見を得る。

上記の血液循環に関する機序に関して、新しい知見を獲得し、それを新しい医療技術に応用する研究を展開する。生体内血流の分配機序を解明する。

２．研究計画

2025 年度：計画①申請者の構築した実験装置とそのオリジナルな方法で、赤血球変形能の健康範囲を解明する。計画②東京医科歯科大学病院血液浄化部と協力し、血液浄化医療レオカーナ法の前後での赤血球変形能の詳細を検証する実験を実施する事で、レオカーナ法による血液浄化医療の赤血球変形能に与える影響を調査する。計画③ドイツ・シュ

トットガルト大学 Cattaneo 教授と協力し、ステント周りの流れを実験的に再現する実験装置を構築し、それを用いてステントサイズが、血小板の活性反応や粘着挙動に与える影響を検証する。計画④安静時の毛細血管血流の不安定な流動現象を定量的に数値で表現できるような血流撮影実験に取り組む。2026 年度：東京医科歯科大学病院血液浄化部と協力し、血液浄化医療レオカーナ医療が赤血球変形能に与える影響を解明する。計画⑤生理的な運動時の血流量調節のダイナミックな反応が定量的にどのように行われているのか、小動物血流観察実験にて明らかにする。計画⑥ドイツ・シュトットガルト大学 Cattaneo 教授と協力し、内皮細胞環境下ステント周りの流れの可視化実験装置を構築する。

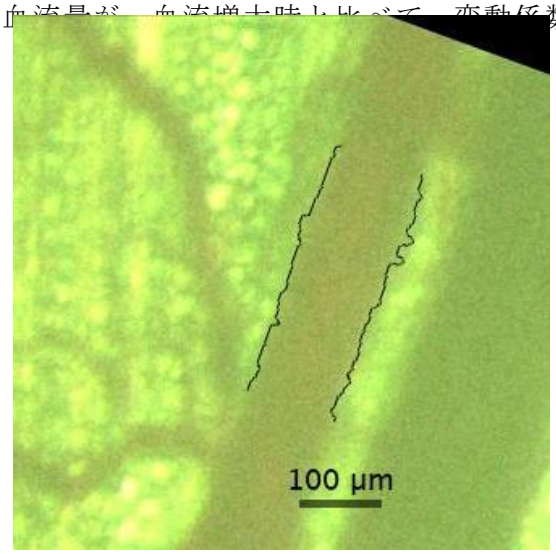
３．計画の進行状況と今後の予定

計画①の状況：先行研究（参考文献１）で示したせん断装置を改良し、健常者を研究協力者とした採血を行い、赤血球変形能の密度別の評価方法を検討した（国内学会発表実績３）。学術誌に投稿するには、データを増やす必要があると考えており、引き続き研究を進める予定である。

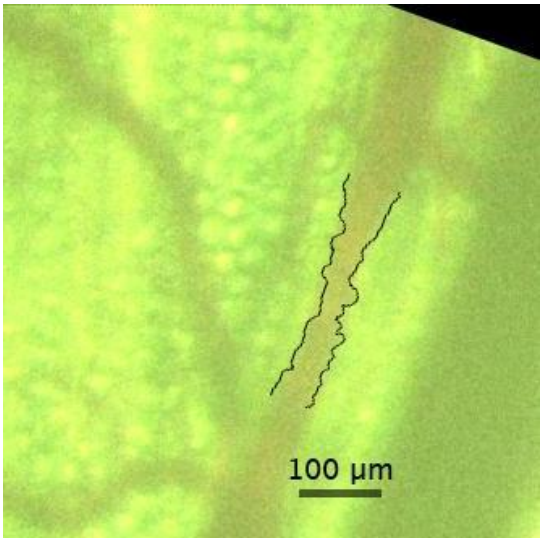
計画②の状況：東京科学大学と本学とで共同研究契約を締結し、東京科学大学病院血液浄化部における血液透析術であるレオカーナ治療と赤血球変形能の関係性を検証する実験がスタートした所である。レオカーナ治療は、比較的稀な症状の患者を対象とする為、データの蓄積に予想以上に時間がかかっている。引き続きデータを蓄積してデータ解析を行う予定である。

計画③の状況：ステント周りの流れを実験的に再現する実験装置を構築する事ができた。また、それを用いて実験を進めた結果、ステントサイズ増大が血小板活性に与える影響の増大につながる結果を得た（学会発表済（学会発表４）、論文投稿準備中）。現在、研究代表者研究室博士課程大和田君が中心となって、若干の流路構造改良とステント材料の条件設定を可能にするよう改良した実験装置を構築した所である。この装置を用いて実験データを蓄積している状況である。さらに、2025 年度後期には、研究室から 2 名の留学、およびドイツからも 2 名の研究留学生を受け入れ予定として計画を進めている。

計画④の状況：動物実験委員会にて承認された上で、小動物の安静時の毛細血管血流を可視化する実験を行った。その結果、安静時の血流量が、血流増大時と比べて、変動係数



(１A)



(１B)

図1:大気環境（１A）および高酸素暴露直後（１B）の細動脈観察写真

で見た不安定さが増大する傾向を得た（学会発表実績６、学術論文準備中）。また、血液循環制御機序に関して血管反応に着目した実験を引き続き行っている。直近の情報として、局所的な血管収縮反応の可視化に成功した（学会発表実績２）。図１は大気環境（1A）と高酸素環境（1B）に暴露した直後のラット僧帽筋内の細動脈の顕微鏡画像である。視覚的に分かりやすくする為、血管壁を黒線で一部上書きして示してある。このような局所的な血管収縮反応が、常に同条件で生じるのか、またどこまで局所的に血管収縮反応が生じるのか検証する為、引き続きデータを蓄積する実験を重ねていく。

４．学会，論文等投稿・発表状況

4.1 学会発表済（2024 - 2025 年 5 月現在）

1. **Nobuo Watanabe**, Masataka Inoue, Masahiro Ohwada, In vitro methods through the prototyped shear chamber to investigate the impact of flow on blood cells, Organized session “Biomaterials for biomedical applications 1”, 58th DGBMT Annual Conference on Biomedical Engineering, University of Stuttgart, Vaihingen Campus, Stuttgart Germany 18-20.Sept 2024.
2. 廣野陽、古沢宙紀、渡邉宣夫、骨格筋酸素消費に応じた細動脈拡張反応理解のための実験系構築、第 34 回ライフサポート学会フロンティア講演会、2025 年 3 月 10 日
3. 澤　萌花、渡邉宣夫、流れ場の安定化を目指した赤血球変形能評価実験システムの改良と流れの可視化実験による妥当性評価、日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2024、筑波大学2024年11月30日、
4. 三浦千代子、Evelin Racz、Desirée Spaich、Daniela Sánchez、井上雅喬、Giorgio Cattaneo、渡邉宣夫、ステントストラットサイズと周辺を流れる血小板活性化の関係性検証、第62回日本人工臓器学会大会、ライトキューブ宇都宮、２０２４年１１月１５日、一般ポスター発表
5. 井上雅喬、渡邉宣夫、血小板に対する rt-PA の導入および血栓溶解効果の検証、第 65 回 日本脈管学会学術総会、2024 年 10 月 24－25 日、
6. 古沢宙紀、廣野　陽、木賀田　哲人、迫田　大輔、渡邉　宣夫、心拍上昇と骨格筋毛細血管血行動態の関係性検証、第７２回レオロジー討論会、２０２４年１０月１７日、山形テレサ　口頭発表
7. 澤萌花、渡邉宣夫、変動せん断暴露下の密度別単一赤血球の形状変化モニタリング、LIFE２０２４、東京大学本郷キャンパス２０２４年９月１４日、オーガナイズドセッションロ頭発表.
8. 井上雅喬、渡邉宣夫、Drug delivery System への応用を目指した血小板の物質取り込み能力についての流れ依存性の検証と血栓治療への応用可能性の検討、LIFE２０２４、東京大学本郷キャンパス２０２４年９月１４日、オーガナイズドセッションロ頭発表.
9. 井上雅喬，阿曽聖也，大和田将弘，渡邉宣夫，せん断応力および ADP 刺激による血小板の活性化が血液凝固能に与える影響，第 47 回日本バイオレオロジー学会年会，2024 年 6 月 8－9 日（東京都早稲田大学）
10. 大和田将広、渡邉宣夫、組織修復研究への応用を目指した局所溶存酸素量調整装置の構築、第 63 回日本生体医工学会大会、２０２４年５月２４日（鹿児島県カクイックス交流センター）

4.2 論文等投稿状況

4.2.1 採択済の論文（血流研究成果等）

11. Chikia Esternessa Edwin, Kriengsak

Masnok, Moeka Sawa, Mohd Danial Ibrahim, Lidyana Roslan, Nobuo Watanabe, Comparison between Actual and Theoretical Ellipsoidal Shape of Human Erythrocyte in Modulated Shear Flow, *Journal of Biorheology 2025(Just accepted on 22nd March 2025) Ranking (Q4)*

12. Masataka Inoue, Seiya Aso, Masahiro Ohwada, Teruhiko Negishi, Nobuo Watanabe, Shear stress-induced platelet activation enhances blood coagulation more than adenosine diphosphate-induced activation, *Journal of Biorheology* (Just accepted on 10th Jan 2025) *Ranking (Q4)*
13. Masahiro Ohwada, Nobuo Watanabe, Assessment of tissue repair rates and angiogenesis during repair process of injured tissue with different wound sizes, ライフサポート学会誌ライフサポート(LSE, the official journal of the Society of Life Support Engineering 2024) Vol.36,No.4,122-128. (2024 年 11 月採択, 2025 年 1 月発行)

4.2.2 現在投稿中の論文

・血小板の物質取り込みを利用した DDS 機能の検証研究成果で、現在学術論文誌 Experimental Hematology に投稿中である。
・クラミドモナス細胞の流れ環境下での観察結果を吉村教授が中心となってまとめた論文が学術論文誌 iScience に投稿中である。

4.2.3 今後投稿予定の論文原稿

・ドイツ・シュトットガルト大学との共同研究成果として、ステントストラット形状と血小板活性との関係性を検証したデータで学術論文投稿を検討している。
・赤血球変形能についての研究成果を現在まとめており、赤血球密度がその変形能といかに関係しているか、これを定量化した内容で投稿予定である。

4.3 著書

14. Michael J. Simmonds, Nobuo Watanabe, Antony P. McNamee, Johanna C. Clauser, Blood-Device Interaction, Chapter20 of Mechanical Circulatory and Resporatory Support 2nd Edition 2025, Pages 611-640, Publisher: Academic Press. (https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22148-4.00020-4)

4.4 他論文への引用

・研究代表者の 2024 年の Citation は 56 件であった（Scopus 情報）。

5.参考文献

1. Kriengsak Masnok, Masataka Inoue, and Nobuo Watanabe, Direct observation of deformation of individual red blood cells in oscillatory fluid flow produced using a generator of precise sinusoidal shear flow. AIP Advances 12, 095020 (2022);https://doi.org/10.1063/5.0113873

都市空間デジタルツインにおける実空間と仮想空間の同期を効率化する適応型データ伝送技術

システム理工学部電子情報システム学科　　山崎　託

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

スマートシティでは，様々な都市サービスを包括的に実現するため，実空間をセンシングして仮想空間に投影し，仮想空間上で様々なタスクを包括的に処理し実空間にフィードバックする，デジタルツインの利活用が期待されている．

昨今では，様々なセンサを搭載した高性能な組込端末による多種多様な情報のセンシングや，それらに基づいた都市空間の見守りや監視，様々な事象の検知や予測を行うAIタスク，及びタスク連携に基づく高度な都市サービスが期待される．したがって，都市デジタルツインの構築や維持，その利活用には，実空間と仮想空間の双方向的な連携が必須であり，これを実現するには，センシング技術やAI技術に加え，それらを支える都市の通信インフラも重要な要素となる（参考文献[1]）．

都市デジタルツインの一例として，世界的には，シンガポールではVirtual Singapore，フィンランドではHelsinki 3D，日本ではPLATEAUがある．しかし，これらは事前に収集した静的な3次元地理空間情報の提供に留まっている．そのため，実空間と仮想空間の双方向的な連携，デジタルツインの維持や更新についての検討は十分でなく，上述した高度なスマートシティの実現には，それらへの対応が必須であると考えられる．

そのような中，スマートシティ構想を推進している東京都では，総務省統計局の国勢調査によると多くの地域で人口密度が10,000人/km^2を超えている．将来的に，都市空間をセンシングする端末に加え，市民がもつ携帯端末，車両，ドローン，自律ロボットなどがスマートシティの要素として参加することが考えられ，その端末数は膨大なものとなると考えられる．Beyond5G/6G時代の到来により，通信インフラの容量拡大が期待される一方，デジタルツインを支えるための多様な情報をセンシングすることや，スマートシティのサービスを成すために必要な端末間での様々な自律的連携を実現するためには，膨大な通信資源が必要となると考えられる．

本研究では，このような都市空間のデジタルツインを実現するために必要なセンシング及びそのデータの伝送技術に着目する．

２．研究内容

本研究では，上述した背景のもと，都市で流通されるデータ，及びその伝送技術に着目し，以下の検討を実施した．

- 都市空間において地上だけでなく，空からの情報収集や物流などを実現できるUAV（Unmanned Aerial Vehicle）において，その情報収集とデータの伝送を効率化するためのUAV間ミリ波伝送技術
- 都市空間を仮想空間上でデジタルツインとして形作る際に必要となる点群データの収集・集約技術，及びそのデータの特性解析
- データがもつ意味情報に着目した生成型のデータ伝送技術

まず，60GHz 帯を用いたミリ波通信規格である IEEE 802.11ay を活用した UAV 間データ伝送を模擬した研究を実施した（発表文献[1][2]）．本研究では，都市環境においてミリ波無線メッシュネットワークを構築するために用いられる通信機器である MLTG-CN をミリ波通信端末として用いる．本実験では，上述した機器を当研究室で研究開発している自立スマートポールに搭載し，距離に応じたスループット特性を検証した．図 1 は，本研究で用いているスマートポールの動作例である．ポール上に様々な実験機器を搭載することで，低空域で浮動する UAV を再現可能である．

本学で実験して得られたスループットの推移を図 2 に示す．結果，多くの場合において，十分なスループットが得られている一方，ポールの揺らぎにより，通信が断続的なものとなっている．つまり，十分に高速な通信を達成できる一方，このような断続性を考慮したプロトコルが必要となると考えられる．

また，ミリ波を応用した他の実験として，IEEE 802.11ay を用いたミリ波マルチホップ通信実験の例とローカル 5G 環境における固定基地局と自立スマートポール上の端末との通信実験の例を図3に示す．このように都市低空域を想定し，都市のデジタルツインを支えるような通信技術を応用することで，より実態に即したデータ伝送技術の検討が可能であると考えられる．現状は動作検証のみであり，今後は詳細な解析が必要である．

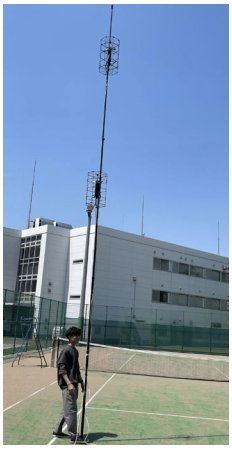
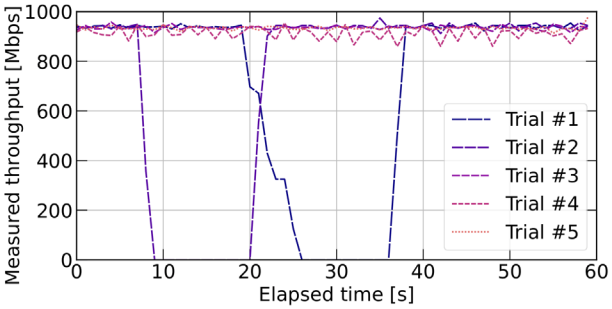
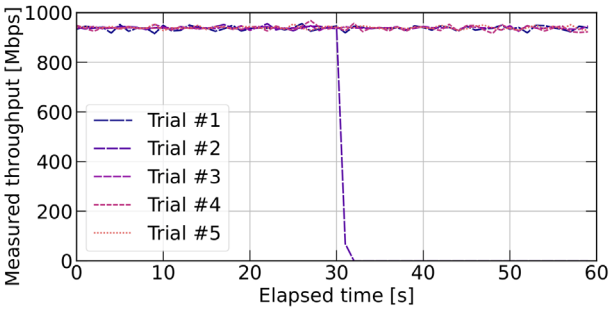


図 1　自立スマートポールの動作例．ポール上に通信機器を搭載することで UAV 間通信を模擬．（発表文献[1]）

次に，デジタルツインの 3 次元空間を構成するための点群データを収集するための研究を実施した（発表文献[3]）．本研究では，都市環境において，モバイルクラウドセンシングを通じて，点群データを収集する際の手法と収集した点群データの集約と削減，及びそのデータ量の解析を行った．



(a) スマートポール間の距離が 20m の場合



(b) スマートポール間の距離が 40m の場合

図 2　自立スマートポールによって UAV 間ミリ波通信を模擬した際に計測したスループットの時間推移．（発表文献[1]）

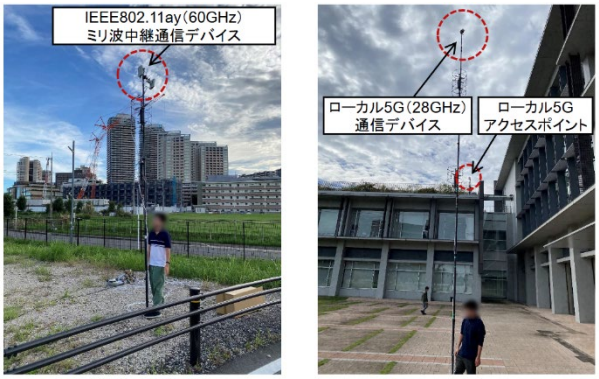


図 3　自立スマートポールによって UAV 間ミリ波通信を模擬した際に計測したスループットの時間推移．（発表文献[2]）

表 1 と図 4 にその解析結果を示す．本クラウドセンシングモデルにおいては，点群データに加え，付随するセンサ情報を定期的に収集している．したがって，その情報を必要に応じて取捨選択することで，そのデータ量を削減できると考えられる．また，収集した点群データには，信頼性と計測した際の深度情報が含まれており，これらの値に応じて，利用するに足る妥当な点群のみを抽出することが可能であると考えられ，またデータ量を削減する個 t も可能であることが分かった．

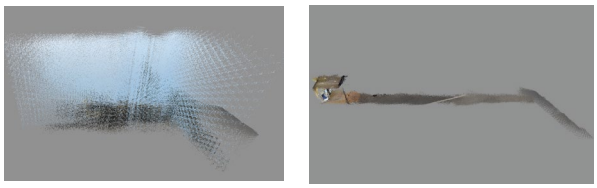
表 1　モバイルクラウドセンシングにより収集したセンシングデータのデータ量及びその内訳と，信頼性及び深度情報を用いた点群データに対するデータ量削減効果の検証．（発表文献[3]）

(a)　センシングデータとそのデータ種別に基づくデータ量の内訳．

	Data size [MB]
Coordinates	11.83
RGBA	3.94
Confidence	3.94
Depth	3.94
Sensors	35.50
Total	59.16

(b)　点群データに対する信頼性と深度情報を用いた点群データの削減とその効果．

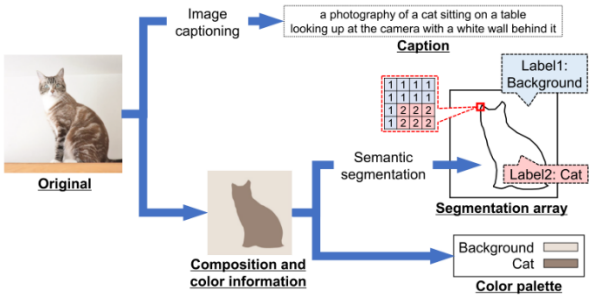
	#points	Text [MB]	Binary [MB]
Raw	1,033,942	165.4	59.1
Confidence	708,784	113.4	40.6
Depth	303,283	48.6	17.4
Both	202,334	32.5	11.6



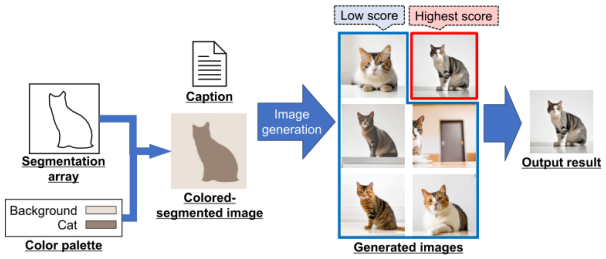
(a) 処理前　　(b) 処理後

図 4　点群データに対する信頼性と深度情報を用いたデータ削減処理．信頼性が低い不要な点群を削除することができている．

最後に，画像に含まれる意味情報に着目したデータの圧縮伝送技術の研究を実施した（発表文献[4]）．本研究では，送信者側で画像からの説明的な情報と構図的な情報を抽出し，それを伝送することで，既存の圧縮伝送では十分な圧縮率が達成できず，伝送が難しい状況においても適用が可能な手法を提案している．受信者側では，得られた説明的な情報と構図的な情報に基づいて画像生成アルゴリズムを用いることで，元となる画像に対して，受信者が必要とする意味情報に着目して画像を生成することで伝送を成立させる．



(a)　送信者側の動作アルゴリズム．元画像に対し，キャプショニングアルゴリズムを用いて説明的な情報を抽出し，セマンティックセグメンテーションアルゴリズムを用いて構図的な情報を抽出し，それらを伝送する．



(b)　受信者側の動作アルゴリズム．受信した説明的な情報と構図的な情報に基づき，画像生成アルゴリズムを用いて意図する意味情報を含む画像を生成する．この際，類似度等を計算して用いることで，高い評価値の画像を選択し，より意味的に正しい画像を伝送する．

図 5　意味情報を用いた画像伝送アルゴリズムの構成とその動作例．（発表文献[4]）

意味情報を用いたデータ伝送の動作例を図5 に，結果の一例を図 6 と表 2 に示す．結果より，本手法を用いることで元の画像とは異なるものの，元の画像から抽出したい意味情報に基づいて元の画像がもつ意味情報に基づいて再現された画像が生成できた．また，表2より，既存の圧縮アルゴリズムに比べ，十分に高い圧縮率を達成できることが分かった．

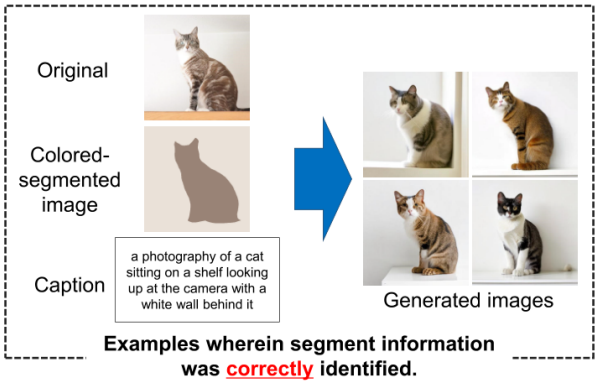


図 6　伝送結果の一例．元となる画像に対する説明的な情報と構図的な情報に基づいて，類似した画像が生成できていることが分かる．（発表文献[4]）

表 2　圧縮前後のデータ量の比較．無圧縮場合だけでなく，既存の圧縮アルゴリズムと比較しても十分に小さいデータ量を達成できていることが分かる．（発表文献[4]）

Uncompressed	JPEG	Caption	Caption + color palette + segmentation array
786 [KB]	41.8 [KB]	0.0998 [KB]	2.90 [KB]

４．今後の計画及び論文等投稿発表状況

本研究では，都市空間のデジタルツインにおける実空間と仮想空間の効率的な同期に向けたデータ伝送技術に着目し研究を実施した．

本研究では外部発表成果として，1 件の査読付学会解説論文，1 件の査読付論文誌論文発表，3 件の査読付国際会議発表（うち 1 件受賞），その他国内研究会及び大会での発表を実施した．

今後の計画として，国際会議発表において受賞した論文の拡張版の投稿勧奨を受けており，国際学会における雑誌論文誌への投稿を予定している．

参考文献

[1] M. Groshev, C. Guimarães, J. Martín-Pérez, and A. de la Oliva, “Toward Intelligent Cyber-Physical Systems: Digital Twin Meets Artificial Intelligence,” IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 8, pp. 14-20, Sept. 2021.

発表文献（一部抜粋）

[1] T. Yamazaki, D. Sasaki, T. Yamaguchi, J. Sato, T. Miyoshi, S. Miyata, and H. Imamura, “60GHz Millimeter Wave Communication Experiment for Unmanned Aerial Vehicles in Low Altitude Airspace,” The 16th Int. W. Inform. Netw. Design (WIND 2024), pp. 473-483, Asan, South Korea, Sept. 2024.

[2] 山崎　託，三好　匠“災害時対応を想定した UAV 飛行経路制御と自立スマートポールによる低空域無線ネットワーク，”電子情報通信学会誌，vol. 108, no. 5, pp. 440-448, May 2025.

[3] K. Watanabe, T. Miyoshi, and T. Yamazaki, “Preliminary Experiment on Point Cloud Collection Through 3D Mobile Crowdsensing,” 2025 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (IEEE ICCE 2025), pp. 1-4, Las Vegas, United States, Jan. 2025.

[4] E. Hosonuma, T. Yamazaki, T. Miyoshi, A. Taya, Y. Nishiyama, and K. Sezaki, “Image Generative Semantic Communication with Multi-Modal Similarity Estimation for Resource-Limited Networks,” IEICE Trans. Commun., vol. E108-B, no. 3, pp. 260-273, March 2025.

加工状態を予測するインテリジェント骨加工デバイスの開発

システム理工学部（機械制御システム学科）　　桑原　央明

共同研究者
慶應義塾大学ハプティクス研究センター　大西公平，
横浜国立大学理工学部　下野誠通，
岩井医療財団　岩井宏樹，
慶應義塾大学医学部　中村雅也

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

少子高齢化が進む日本社会において，外科医療の分野では人材の高齢化と若手医師の育成困難が社会的課題となっている．特に，熟練医による外科手術における技能，すなわち手術スキルの伝承（スキルトランスファ）は，長年の実地経験によって培われるものであり，その技能の継承には極めて高い困難が伴う．中でも脊椎外科手術では，硬組織である骨の加工を精密に行う必要があり，医師はノミとハンマを用いて手術器具を操作する中で，視覚情報のみならず，打撃時の音響情報や器具を通じた触覚・力覚情報を手がかりに骨の状態を把握し，加工の進行度を判断している（図１）．

従来のスキルトランスファに関する研究では，主に視覚と力覚に依存しており，仮想空間やモーションプラットフォームを活用する Virtual Reality (VR)システムが多く提案されてきた．しかし，音響を含む三感覚（視覚・聴覚・力覚）の統合提示を実現する訓練環境は未開拓であり，手術現場で実際に使用されている判断基準を十分に再現できていなかった．特に骨を対象とした加工では，打撃音の変化や手ごたえの微細な違いが，骨質や硬度の識別，加工深度の評価などに直結する重要な情報源である．

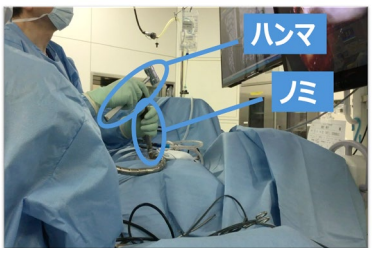


図１．脊椎外科手術の様子

本研究では，Mixed Reality（MR）を用いた視覚提示技術，ハプティックデバイスを用いた力覚提示技術，ならびに高感度マイクロフォンと音響解析を用いた聴覚提示技術を統合したスキルトランスファシステムの構築を目指す．さらに，機械学習を用いて打撃操作に対する骨の応答挙動（変位やインピーダンス）を予測し，MR 空間上の仮想骨モデルに反映することで，より自然な操作感と没入感を実現する．これにより，熟練者の技能を感覚的かつ構造的に捉え，若手医師に対する効果的な技能伝承が可能となる訓練環境を提供する．

２．研究計画

本研究は，以下の 4 つの研究要素を主軸として構成する．

(1) ハプティックデバイスとバイラテラル制御の開発

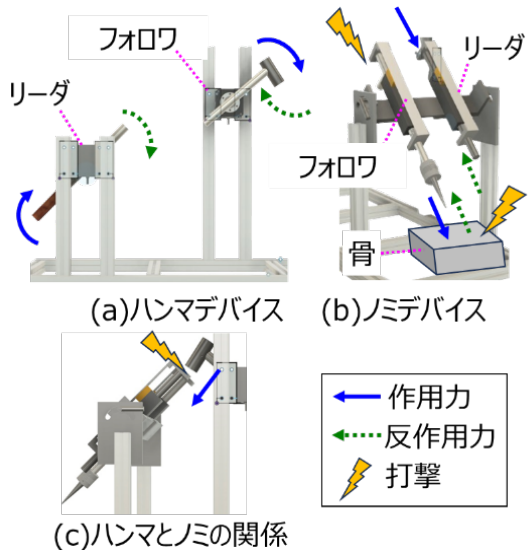


図２．骨加工デバイス

図２に示すノミおよびハンマデバイスを設計・試作し，モータを用いたアクチュエーションを実装し，必要な駆動構成を整備する（骨加工）．これらをリーダ・フォロワ構成により接続し，加速度ベースのバイラテラル制御を介して操作者の入力動作（位置，速度，力）をフォロワ側に伝達し，さらにフォロワ側からの反力や環境応答をリーダ側にフィードバックする．外乱オブザーバと反力推定オブザーバを併用し，高精度な反力推定とロバストな制御性能を実現する．

（2）MR 空間における仮想骨モデルの構築

Unity を用いて，仮想骨モデルの 3D レンダリングと物理シミュレーションを実現し，操作対象となる仮想環境の基盤を整える．Meta Quest 3 などのヘッドマウントディスプレイを活用して，操作者の視野内に仮想骨をリアルタイムに提示し，骨形状や質感，変形挙動を直感的に理解可能な視覚情報として提供する．変位の程度に応じたカラー変化や表面構造の変化も含めた表現が可能な環境設計を行う．

（3）打撃音解析と聴覚提示系の構築

ノミの先端部に MEMS マイクを取り付け，打撃時に発生する音情報を高サンプリングで取得．これらの信号に対して FFT による周波数解析を行い，音のスペクトル情報を抽出．音響信号の特徴量を抽出し，仮想空間内に配置されたスピーカーシステムにより空間的に再提示する．さらに，音の時間遅延や反射を含めた空間音響合成技術を導入し，臨場感ある聴覚環境を構築する．

（4）機械学習による骨変形応答の予測

ノミデバイスに加えられた力およびその瞬時の速度，変位履歴を入力として用い，FNN，RNN，LSTM を比較・適用したニューラルネットワークによって，骨の局所的な変形や反力変化を予測する処理を検証する．この手法により，仮想空間における骨の物性変化をリアルタイムに可視化する．

これらの要素を統合した三感覚提示システムを構築し，医療訓練への適用を目指す．

３．計画の進行状況

（1）ハードウェアの構築

ハンマデバイスおよびノミデバイスの試作を完了した（図３）．DC モータとリニアモータを対向配置した構成をとり，さらに，エンコーダとベアリングを工夫した構造により，打撃時の衝撃にも耐える堅牢性を確保している．各制御系には加速度制御系を実装した AbcCore（Acceleration-based-control Core）を用い，リーダ・フォロワ間のバイラテラル制御系を構築した．バイラテラル制御系により，リーダ・フォロワ間の位置追従と作用・反作用力の関係の成立を同時に実現している．

予備実験により，バイラテラル制御が安定動作することを確認した（図４）．バイラテラル制御系により，骨からノミデバイスへの反

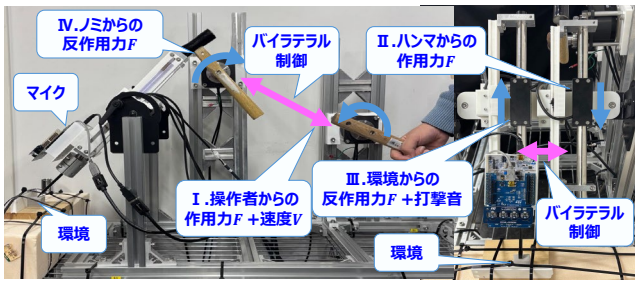


図３．開発した骨加工デバイス

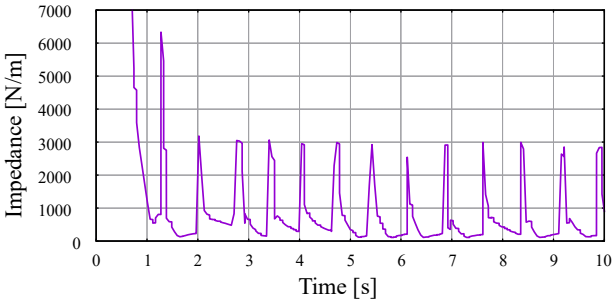
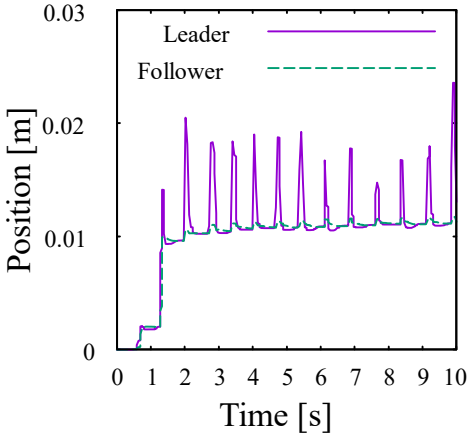
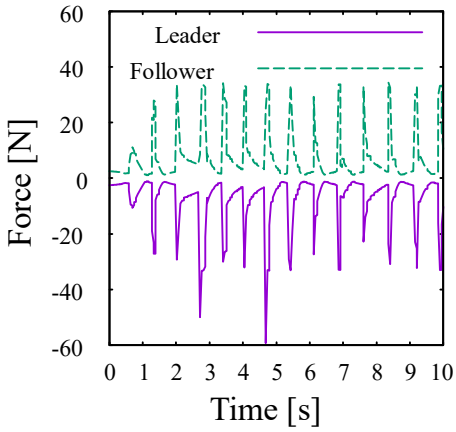


図５．インピーダンスの推移



(a) 位置応答



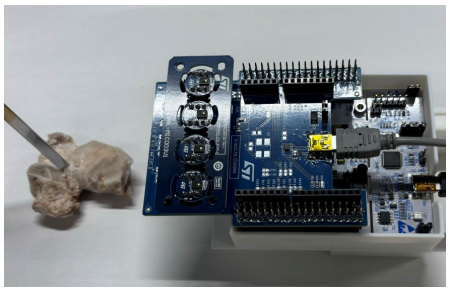
(b) 力応答

図４．バイラテラル制御系の検証

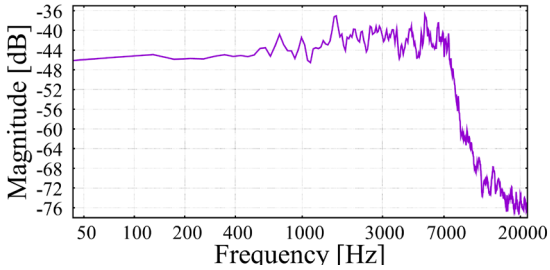
作用力とノミデバイスの位置が得られることから，機械インピーダンスモデルフィッティングとその変位を確認できる（図５）．打撃に応じて機械インピーダンスが減少していることからも，加工の進捗度が予測できる見込みが得られた．

(2) 音響情報の取得と解析

実験環境下で豚骨をノミで打撃し，音情報



(a) 骨打撃実験



(b) 音の周波数特性

図６．骨加工時の音情報の取得

を収録した（図６）．FFT 解析の結果，1000Hz 以下の領域において打撃音の顕著なピークが観測された．これにより，提示すべき聴覚帯域が明確化され，聴覚フィードバック系の設計に反映した．今後は骨の状態変化に対応する音響パターンの分類精度向上を図る．

(3) MR モデルの構築： Unity 上にて仮想骨モデルの開発を完了した．仮想骨は物理エンジンを内包し，外力に応じた表面変形を可視化可能．変形アルゴリズムと機械学習モデルを接続し，操作デバイスの入力と仮想変

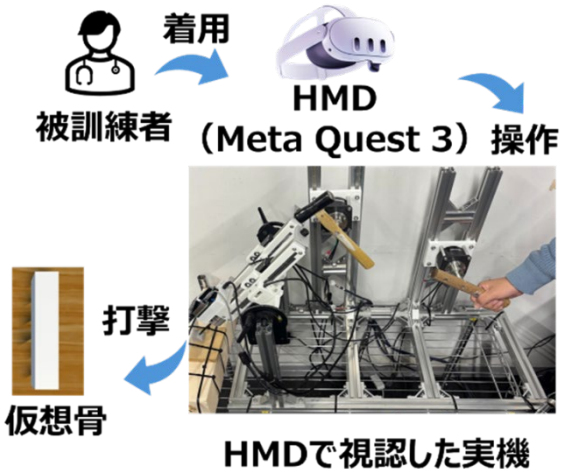
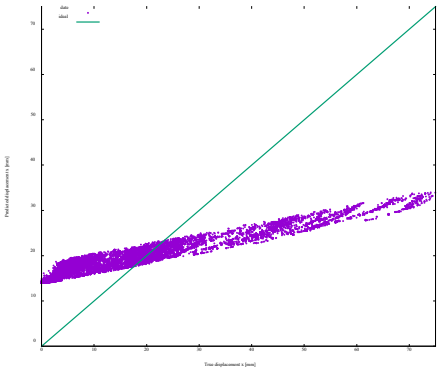


図７．MR 環境の構築

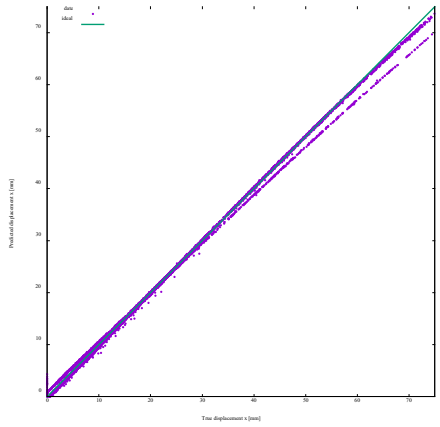
位を連携するインタフェース（図７）の構築を進めている．

（4）機械学習モデルの学習と評価

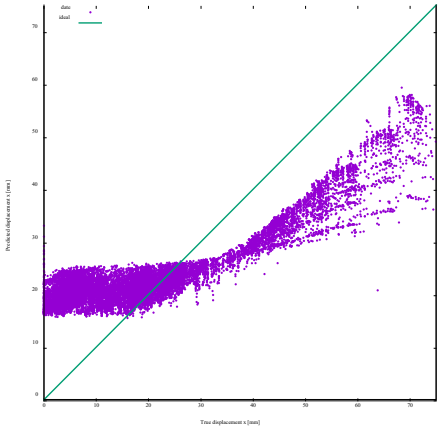
FNN，RNN，LSTM を比較した予測実験では，RNN が最も優れた変位予測精度を示した（図８）．特に短時間データに対しては RMSE



(a)FNN



(b)RNN



(c)LSTM

図８．機械学習モデルの学習と評価

が他モデルより顕著に低く，決定係数も高い結果を得た．現在，複雑形状対応や多軸変位推定に向けたモデル拡張を進めている

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の研究展開は以下のとおりである：

・実骨試料を用いた環境インピーダンスの忠実性検証

・視覚・聴覚提示の時間遅延の補償アルゴリズムの開発

・LSTM ベースのマルチモーダル予測モデルの拡張と実装

・仮想骨の多自由度変形と実際の力学特性との相関評価 ・ハプティックデバイスの量産対応設計と耐久試験の実施

・熟練度指標の定義と訓練履歴に基づく定量評価の導入

また，大学附属病院や臨床教育機関との共同研究を計画しており，開発中システムの実運用に向けた評価を進める予定である．本研究は，熟練技能の再現・継承を支援する実践的な訓練環境を構築するものであり，将来的には外科手術教育の標準モデルとなることを目指す．

これまでの成果をまとめて，以下の内容で学会発表を完了している．今後の計画遂行により，実用的なスキルトランスファシステムの実現を目指す．

湯田耀介，横山稜，楠鈴香，鎌田泰栄，岩井宏樹，中村雅也，下野誠通，大西公平，桑原央明，“複合感覚統合による脊椎手術スキルトランスファシステムの開発”，令和 7 年電気学会全国大会予稿集，pp. 229-230, 2025.

戦後日本の住宅およびライフスタイルの近代化における女性の役割

システム理工学部（環境システム学科）　　松下　希和

共同研究者
神奈川大学　　田中　厚子
大妻女子大学　家政学部ライフデザイン学科　准教授　　赤澤　真理
ギャラリーエークワッド　館長　　岡部　三知代

１．はじめに

本研究は、これまで近代住宅史であまり注目されてこなかった、住宅の近代化における女性の役割・影響を明らかにする研究の一環である。筆者らは近年、戦間期において、主体的な個としてのライフスタイルを実践する場としての住宅を考えた女性の施主やそれを実現した設計者がいたことを明らかにした[i]。当時の国策である国民の生産・育成を主目的とする家族の器の枠組みを超えた住宅は、希少な例ではあったが、婦人雑誌などのメディアを通して、女性の主体的な住まいへの意識を推し進めた。

その成果をもとに、1945 年から 1950 年代までの期間を中心に、男女同権が制定された新憲法のもとで国際的な意識を持った女性たちが、どのような住まいを考え、それを実現し、メディアに発表したかに着目する。本稿では、戦後になって活動が現れ始めた女性設計者の一例として、ノエミ・レーモンド（1889-1981, Noémi Pernessin Raymond, 以下、NPR）の住宅設計を中心に、彼女が推進したモダンリビングとその発信のされ方を明らかにすることを目的とする。

これまで、NPR のデザイナーとしての功績を発掘するさまざまな研究が行われている[ii]。夫であるアントニン・レーモンド（1888-1976, Antonin Raymond, 以下、AR）の事務所の作品の中で、建築意匠とインテリアは一体的に空間を作り上げており、戦前から NPR はインテリアデザインを担当する協働設計者として、認識されていた。

戦後はその役割分担に変化がみられ、AR が自伝で「山下邸（1954）、西園寺邸（1955）、ヒョース邸（1956）、ケステンバウム邸（1959）をはじめとして現在に至るまで、その後の住宅はほとんどノエミがデザインしたものといっても偽りではない[iii]」と記し、NPR が住宅設計を設計していたことを認めている。しかし、夫婦で設計事務所を営む場合、近年までは、それぞれの貢献がすべて夫の功績とされるケースが多かった。また女性建築家に対する偏見も根強かったため、AR の言説にもかかわらず、レーモンド夫妻においても、建築はほぼ全て AR の作品とされてきた。そのため、これまで建築設計者としての NPR の仕事やその特徴についての研究は少ない。

２．研究計画

レーモンド事務所が設計した戦後の住宅の図面[iv]を確認したが、NPR のサインやイニシャルなどはなく[v]、一例以外は NPR が描いたと思われる図面を特定できなかった[vi]。

そこで、戦後の彼女の活動を探り、建築設計への関与を明らかにするため、以下の調査を行う。

① 戦後レーモンド事務所が発表した住宅作品が建築専門誌などに掲載された記事を収集し、その中でNPRが設計者として発表されている住宅を特定する。また、NPR が住宅やライフスタイルについて執筆している文章を分析する。

② 戦後NPRが来日した1949年から1956年までに書かれた家族宛の書簡を確認し、その間の活動を明らかにする。

３．計画の進行状況

① 戦後のレーモンド住宅の掲載誌

レーモンド夫妻が 1948 年に事務所を再開、1973 年に引退するまで、国内で建設された住宅は 80 件以上ある [vii]。その期間中に住宅作品が掲載された建築専門誌や住宅雑誌の記事を収集したところ、86 編あった [viii]。取り上げられた住宅数は 38 件であった。

一般に設計事務所が作品を雑誌に掲載する場合、代表者か設計事務所の名前が設計者として表記される。また作品についての説明文は主に設計を担当していた人物が書くことが多い。レーモンド事務所の場合は、「レーモンド建築設計事務所」または「アントニン・レーモンド」という表記が多いが、戦前からその下に実際の担当者の名が記載されているケースもある。

雑誌に発表された38件のうち、住宅設計者としてNPRの名が記載されている住宅は10件あった [ix]。他に設計は「レーモンド建築設計事務所」や「アントニン・レーモンド」とあるが、説明文を NPR が書いている住宅は３件あり、説明文の中に NPR が設計したと記載している住宅が１件あった（表１）。

特筆すべきは『モダンリビング』である。拙稿で戦前の婦人雑誌は建築家が読者に先駆的な住まいのあり方や住宅案を伝えるメディアとして機能したことを明らかにしたが [x]、『婦人画報』の別冊として 1951 年に創刊された『モダンリビング』もその系譜に連なるものといえる。本誌は戦後初めて NPR を単独の住宅設計者として紹介し [xi]、建築専門誌では事務所名のみが記載されている住宅でも、本誌では NPR 設計として発表されている住宅もあった。また、『モダンリビング』は NPR の寄稿も多く掲載していた。読者層の多くは主婦も含めた一般消費者であり、創刊当時はまだ 20 代前半の山田雅子（林雅子）や中原暢子の住

表１：雑誌記事においてNPRが設計者または文章執筆者として記名された住宅

	住宅名	竣工年	場所	延床面積(m2)	構造	設計者名	解説文執筆者	厨房	備考
1	カミングハム邸	1953	港区西麻布	85	木造２階	国建：アントニン・レーモンド建築設計事務所設計 Mrs. Noemi P. Raymond, designer ML：ノエミ・レーモンド 建文：レーモンド建築設計事務所			施主のカミングハム女史はNPRの友人
2	ドーランス邸	1953	港区元麻布１	148	木造２階	建文：レーモンド建築設計事務所 国建：アントニン・レーモンド建築設計事務所	建文：NPR	南面	
3	Bハウス	1954	港区西麻布	131	木造１階（地下RC）	建文：レーモンド建築設計事務所	建文：NPR		
4	原田邸	1954	港区麻布	77	木造２階	建文：レーモンド建築設計事務所 ML：ノエミ・レーモンド	ML：NPR※１	南面	文献11に原田夫人はNPRの友人でNPRの設計との記載
5	ベーシックハウス	1954	東京	54	木造１階	ML：アントニン・レーモンド	ML：NPR	南面	
6	山下邸	1955	港区麻布笄町78	60	木造１階	ML：ノエミ・レーモンド		南面	ARが自伝でNPRの設計と言及
7	伊藤 鈴三郎邸	1957	港区白金三光町464	191	RC １階	JI，ML，建文：アントニン・レーモンド、ノエミ・レーモンド	JI：AR		展開図※２にNPRの指示の書き込みあり
8	山下豊郎邸	1959	港区高輪	105	木造２階（地下RC）	ML：ノエミ・レーモンド　担当　田辺博司			
9	ケステンバウム邸	1959	目黒区	251	木造２階	建文，ML：ノエミ・レーモンド　担当　松岡保夫	建文：松岡保夫		ARが自伝でNPRの設計と言及
10	川崎邸	1959	目黒区		木造２階				ML記事にレーモンド夫人の計画と記載
11	白石俊多邸	1961	世田谷区砧町320	177	木造２階	ML：N. レーモンド　担当　松岡保夫	ML：NPR		
12	伊藤邸	1962	大田区雪が谷		木造２階（地下RC）	建文：レーモンド建築設計事務所　ノエミ・レーモンド	建文：NPR	南面	
13	足立別邸	1965	長野県軽井沢	240	木造１階	新建：アントニン・レーモンド、ノエミ・レーモンド　担当　松岡保夫 建築：レーモンド建築設計事務所　担当　ノエミ・レーモンド，松岡保夫 ML：レーモンド夫妻	新建：NPR	南面	ARが自伝でNPRの設計と言及 足立夫人はNPRの友人
14	立教高校教員住宅No4	1965	埼玉県新座	83	木造１階	新建：レーモンド建築設計事務所　ノエミ　P. レーモンド　担当　北沢興一	新建：北沢興一		

建文：「建築文化」，国建：「国際建築」，新建：「新建築」，建築：「建築」，ML：「モダンリビング」，JI：「ジャパンインテリア」

※１　記事に執筆者名の記載はないが、Raymond Firmにおいて NPR の英文原稿が確認された。　※２　レーモンド設計事務所にて実施図面を確認した。

宅を掲載するなど、女性設計者を積極的に取り上げようとする方針がうかがわれた。

雑誌記事の設計者名や文章執筆者名、その他文献[xii]によると、表1に記載の14件の住宅はNPRが全面的に設計した可能性が高い[xiii]。また、これら住宅の記事の他に、NPRの単独インタビューや寄稿した文章は戦前の1編を含めて10編あった。

NPRが設計に深く関与したと考えられる住宅は木造が多く、特に1950年代のものは事務所の他の住宅と比較して規模が小さい。リビング・ダイニングと暖炉、南面の「芯外し」のガラス窓、深い軒、丸太あらわしの梁など、典型的なレーモンド住宅の特徴がみられ、明らかなNPRの独自性はみられない。ARが「ノエミは、どんな小さな仕事でも自分の手をつけ（た）[xiv]」と述べているように、NPRの影響は事務所の作品全般に及んでいたと考えられる。

NPRのプランニングの傾向としては、南向きの厨房が挙げられる。NPRは住宅設計において二番目に大事な点として「台所を含めて全ての部屋をできる限り南側にする事[xv]」と述べているが、これは戦前のレーモンド住宅にはほぼみられず[xvi]、ペンシルバニアのニューホープの家（1940）、戦前の笄町の自邸（1951）など自邸では実現されている。NPRが深く関与したと考えられる住宅の中では、6件の厨房が南面しており、事務所の他の住宅と比較して頻度が高い。

NPRが住宅について寄稿した文章[xvii]を分析すると、特に強調している点は、住まい手の生活重視と、それを理解するために設計者が施主と信頼関係を構築する重要性である。流暢な日本語を話すことができたNPRは、日本人の施主とも対等な関係を築き、彼らの細かな要望を汲み取ることに注力したことがうかがわれる。NPRの住宅作品の説明分には使い勝手、素材、設備など実用的な記述が多いが、戦後日本の限られた面積・コストの中で、衛生や収納、家事の効率化などを通して生活の質の向上を目指す姿勢があらわれている。

② NPRの書簡にみる戦後の住宅設計を含む活動について

上記の調査では、メディアに発信されたNPRの住宅を明らかにしたが、NPRの視点から彼女の活動や設計への関与を明らかにするため、NPRの家族宛の書簡[xviii]を調査した。戦後NPRが来日した1949年12月から1956年末までに書かれた約190通の手紙のうち、現時点において98通[xix]を確認した。

NPRが関与した設計プロジェクトについての記述を確認したところ、1950年代初頭は従来の定説のとおり、主にインテリアや家具のデザインを担当していたことが記されている。建築の計画について記述している初期の手紙は1953年9月30日のカニンハム邸（1954）についてであり、原田邸（1954）についても1954年の書簡に記述がある。両住宅は前章のメディア調査でNPRが設計者として発表されており、手紙の内容と一致する。ただし、発表時のクレジットがなくても、NPRが設計した住宅があった可能性もある。1955年の手紙には森村邸（1955）の設計に携わっていたことが記述されているが、同住宅が発表された際に、NPRはクレジットされていない。

書簡の記述からNPRはインテリアに限らず事務所の仕事全般に関与していたことが示唆されている。1953年ごろ、事務所の仕事量は増大し、NPRが一部の住宅の設計を担うようになったと考えられる。施主とのやりとりを含めて、NPRが対応していたことが記述されている。

また設計以外に、日本の伝統工芸の技術を守る活動をしていたことが明らかになった。既往研究[xx]により、ARとNPRが戦後欧米の市場で粗悪な日本的なモノが流行することにより、伝統的な日本の工芸や技術が失われることを危惧し、それらを担う人々への経済的支援のため、ニューヨーク近代美術館やリーダ

ースダイジェスト東京支社で、陶磁器の展覧会を企画していたことが明らかになっている。しかし、今回家族宛の書簡の確認とヒアリング[xxi]により、上記の展覧会だけでなく、日本工芸品を自分たちで輸出し、米国で販売する「Japan Artisans」という名前の店を持っていたことがわかった[xxii]。NPR はこの店のための物品の調達に多くの時間を割いており、事務所の設計活動と並行したもうひとつの仕事と言える。しかし、物品調達の際にインテリアに使用する材料を見つけるなど、NPR の設計と工芸品の収集の仕事は密接に関連していた。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

書簡調査の研究については、まだ約半数の手紙の確認が終わっておらず、それらを確認することで、より詳細な時系列の NPR の設計などの活動が明らかになると考える。

本研究は、日本建築学会学術講演会で 2024 年 9 月に発表しており[xxiii]、さらに 2025 年 9 月に発表予定[xxiv]である。また、2025 年 5 月に開催された米国建築史会でも発表し[xxv]、海外の研究者からも関心を持たれている。女性建築家の開拓者として、国際的に NPR の活動を位置付ける必要がある。また、今後調査がまとまった時点で、日本建築学会計画系論文集に投稿する予定であり、デザイナー、建築設計者、社会活動家としての総合的な NPR の功績を掘り起こす展覧会を企画している。

---

[i] 拙稿「戦間期日本の女性を施主とする住宅に関する研究―住まいの近代化と憧れを中心に―」住総研研究論文・実践研究報告集　No. 48, 2022 年 3 月, pp.1-12, 一般財団法人住総研　研究・実践推奨　受賞

[ii] Kurt G. F. Helfrich, Mari Sakamoto Nakahara, “Rediscovering Antonin and Noémi Raymond” *Crafting Modern World*, Princeton Architectural Press, 2006 他

[iii] アントニン・レーモンド『自伝　アントニン・レーモンド［新装版］』三沢浩訳　鹿島出版会　2007 年 p. 280

[iv] 株式会社レーモンド設計事務所に保管されている。

[v] 三沢浩は「(NPR) は住宅の場合も、木造小住宅は平面図も立面図もこなした。助手に描かせることもあったが、自分でも手を出した。」と記している。『A・レーモンドの建築詳細』彰国社　2005 年 4 月 p. 211

[vi] 伊藤鈴三郎邸の展開図に NPR の手書きの指示が書き込まれていた。

[vii] 上掲の Crafting Modern World, “List of Buildings and Projects”と「アントニン・レーモンド主要建築作品譜」三沢浩『アントニン・レーモンドの建築』鹿島出版会　2007 年 pp. 221-227 を参照。

[viii] 該当する作品ごとに記事数をカウントした。モダンリビング 37 巻（1962）には 7 件、「アントニン・レーモンド近作住宅集」（新建築 28 巻 1953 年 7 月）には 7 件、「アントニン・レーモンド　木造建築集」（建築　1962 年 4 月）には 14 件の住宅が含まれている。

[ix] 上掲「アントニン・レーモンド小住宅特集-the small houses by Mr. & Mrs. Raymond」（モダンリビング 37 巻 1962 年）は特集のタイトルに NPR が含まれているが、個々の住宅の設計者として記載されていないので省いた。

[x] 拙稿「戦間期の婦人雑誌にみる建築家の住宅改良に関する言説とその特徴」日本建築学会大会学術講演会 2021 年 7 月 pp. 653-654

[xi] 「カニンガム嬢のすまい」モダンリビング 8 巻 1954 年 pp. 48-51

[xii] 三沢浩『A・レーモンドの住宅物語』建築資料研究社　1999 年

[xiii] この 14 件は上述の AR の記述と一致しないものがある。

[xiv] レーモンド『自伝』p. 296

[xv] ノエミ・レーモンド「モダンリビングのために」モダンリビング 37 巻 1962 年 p. 164

[xvi] ケラー邸（1935）の厨房は南向きである。

[xvii] ノエミ・P・レーモンド「住宅について」インテリア 1962 年 5 月号 p. 39

[xviii] 米国ペンシルバニア州のレーモンド・ファームに保管されている。

[xix] 現時点で 1950 年 1 月から 1955 年 7 月までの手紙のうち、断続的に 98 通を確認した。そのうち、43 通は書かれた年が明記されておらず、文面から推測した。

[xx] 辻泰岳「占領下のアントニン・アンド・ノエミレーモンド：「Japanese Household Objects」展と文化の外交」文化資源学　第 18 号 2020 年 p. 1-16

[xxi] 2025 年 3 月 16 日に NPR の孫の Charlotte Raymond, Christina Raymond, Leslie Raymond Doran からヒアリングをした。

[xxii] レーモンド『自伝』にも「戦争直後、私たちは彼ら（陶芸家）の作品をアメリカで売って援助しようとした。」とある。P. 300

[xxiii] 拙稿「ノエミ・レーモンドが戦後に設計した住宅に関する研究―住宅の近代化における女性の役割・影響の研究(4)」日本建築学会大会学術講演会 2024 年 8 月 pp.481-482

[xxiv] 拙稿「ノエミ・レーモンドの書簡にみる戦後の住宅設計を含む活動について―住宅の近代化における女性の役割・影響の研究（５）」日本建築学会大会学術講演会 2025 年 9 月

[xxv] Kiwa Matsushita, Atsuko Tanaka “Uncovering Noémi Raymond as an Architect” Society of Architectural Historians, Atlanta, 78th Annual International Conference April 30-May 4, 2025（査読付）

生成 AI の安全性と頑健性を高める手法の研究

システム理工学部（環境システム学科）　　持永　大

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

生成 AI の安全性と頑健性の改善手法を研究する。本研究は、機械学習モデル、入出力、保護策を分析・評価し、モデルの脆弱性の悪用や、攻撃者が企図した内容の出力、出力制限の回避、または学習段階で取り込んだ知識の抽出といった手法への対抗策を研究することで安全性と頑健性の向上を目指す。本研究の最終目標は生成 AI の安全性や堅牢性を高める手法のメカニズムと効果を検証することである。

本研究の学術的「問い」は、「大規模言語モデルを利用した生成 AI の安全性や堅牢性を高める手法のメカニズムと効果は何か？」である。大規模言語モデルを利用した生成人工知能（生成 AI）は、ユーザーからの入力に応答してテキスト、画像、または他のメディアを生成することができる人工知能システムの一種である。なかでも大規模言語モデルを利用した生成 AI は、文章の質問に対して、その意味や目的を理解し、返答する会話サービスを実現した。

例えば、OpenAI による Generative Pre-trained Transformer を利用した生成 AI システムである ChatGPT は、膨大なテキストデータの学習によるベースモデルと、人間からのフィードバックをもとに強化学習を行う手法（RLHF：Reinforcement Learning from Human Feedback)を採り入れたモデルを利用し、社会に大きな影響を与えている。

一方、機械学習を利用したシステムは、サイバー攻撃の標的となっている。攻撃が成功したとき、これらのシステムは攻撃者の意図した不正・非道得な出力を行うことが可能となり、システム全体の安全性・頑健性が低下する。また、機械学習システムに対する攻撃は、攻撃側優位の状況にあり、日々様々な攻撃手法が研究されている。

本研究の目的は、システム統合段階の保護機能強化による生成 AI の安全性や頑健性の強化である。具体的には、モデルの限界、敵対的入力、保護策回避に対するシステム統合段階での対抗策を検討し、頑健性や安全性を向上する。

本研究の学術的独自性と創造性は、事前学習やファインチューニングしたモデルだけでなく、攻撃者による悪意のある入力や保護策回避を想定し、システム統合段階で安全性と頑健性高める方法に着目した点にある。生成 AI の脆弱性には、機械学習モデルのデータ収集から学習までの段階での脆弱性とモデルに対する入力・出力に関する脆弱性等がある。そのため、攻撃者は、入力となるプロンプトを工夫することで生成 AI システムが備える保護機能を回避が可能である。また、AI システムの性能は学習段階でのモデルサイズと計算能力に依存するが、大規模なモデルになるほどデータセットの改良や解析は難しくなる。そこで、本研究は、モデル自身に脆弱性があったとしても保護する機能の実装に焦点を当

て、システム統合段階での対策において、頑健性・安全性向上を目指すものであり、他に類を見ない。

モデル自身の脆弱性を悪用するために、攻撃者はモデルの限界の悪用や敵対的入力を行う。ここでのモデルの限界とは、事前学習における学習データの問題、モデルのバイアス、文章のコンテキストに関する意味づけの不十分さ、過剰な一般化等により生成 AI が抱える脆弱性である。また、敵対的入力は、大規模言語モデルなどの訓練済み機械学習モデルの脆弱性、偏り、限界を突いて、不正・非道得な出力を出させるために意図的に作られた入力を用いることである。攻撃者は敵対的入力によってモデルの動作を操作し、その脆弱性を悪用できる。

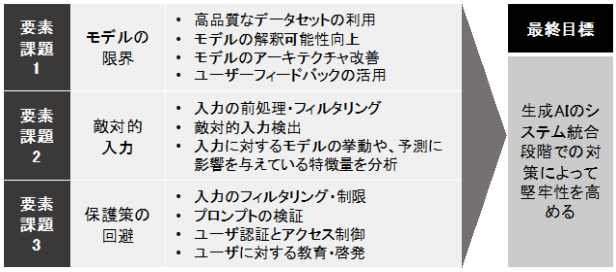


図 1 本研究の最終目標と要素課題

敵対的入力と保護策の回避は、大規模言語モデルの振る舞いを操作するものだが、その目的は異なる。敵対的入力は、モデルの弱点を突いて不正な出力を生成し、モデルのアーキテクチャや訓練データの脆弱性を悪用する方法である。一方、保護策の回避は、生成 AI に組み込まれた制限や保護手段を回避して、モデルを悪用する方法である。

大規模言語モデルを利用したサービスは、悪用防止の保護策を備えている。この保護策は、モデルや機能への不正アクセスを意図した入力や、有害または不適切なコンテンツといった利用ガイドラインに反する出力をフィルタリング等により防ぐものである。しかし、この安全性や倫理的な運用を保証するために導入された保護機構の回避も、プロンプトの工夫等により可能である。

そこで、モデルの限界と敵対的入力を前提として、システム統合段階で保護策の回避を防止する機構をフィルタリングだけでなく、プロンプトの検証、ユーザ認証とアクセス制御、またはユーザに対する教育・啓発といった観点から強化できれば、生成 AI の頑健性・安全性を向上することができる。

２．研究計画

本研究は、生成AIのシステム統合における実装可能な保護策の効果を高める手法のメカニズムと効果を検証することを最終目標とする。この最終目標に対して、モデルや入力に対する脆弱性を検討する課題を3つ設定し、システム統合段階でこれらに対する保護が可能かを検証する。本研究ではこれらの課題を、生成AIを利用するシステムの脅威とみなし、対処することでリスクの低減をめざす。

要素課題1：モデルの限界

本研究では、モデルが有する限界が脆弱性にどの程度影響を与えているかを研究する。生成型AIが利用するモデルは、世界観の欠如や文字レベルでの情報欠如等の限界がある。これらの限界の要因には、高品質なデータセットが入手困難であること、汎化・特化性能のバランスが難しいこと、モデルの複雑さ、及びモデルの解釈可能性が低いことがある。

まず、データセットについて、生成型AIモデルの事前学習やファインチューニングにおいて、高品質なデータセットを利用することができれば、モデルがもつ脆弱性を緩和することができる。また、高品質で多様な情報を含むデータセットは、AIモデルに様々なパターン、言語構造、概念を学習させることを可能とし、未知のデータへの対処をしやすくする。しかしながら、一般に高品質で多様な情報を含むデータセット

の入手は難しい。また、一般的な知識のための事前学習と特定のタスクのためのファインチューニングのバランスについて、一方を重視しすぎると、他分野でのパフォーマンス低下、過学習、または未学習の原因となる。また、不正・非道得な出力をしてしまう場合、モデルが学習データに存在するバイアスや偏見を引き継いだり、増幅させたりする。

大規模な言語モデルは、モデル自身が複雑で計算コストが高い。これにより、モデルを効果的に学習、微調整、解釈することが難しくなり、脆弱性対応が困難になる。また、モデルの意思決定プロセスを理解することは難しく、モデルの解釈可能性を向上させることが安全性・頑健性向上に寄与する。

そこで事前学習やファインチューニング時に高品質なデータセットを利用することや、モデルの解釈可能性を向上させることで、頑健性・安全性向上に向けた対策を検討する。

要素課題2：敵対的入力

敵対的な入力に対する生成型AIの脆弱性を検証する。脆弱性の検証にあたって、ホワイトボックス攻撃とブラックボックス攻撃を検討する（図 3）。敵対的入力によって攻撃を成功させる際の課題は、モデルの規模や複雑さによって、効果的な敵対的入力の作成が難しくなる点である。また、攻撃者は、モデルの学習データの多様性や、敵対的な入力の摂動に対するモデルの頑健性などの要素を考慮する必要がある。

ホワイトボックス攻撃は、AIモデルのアーキテクチャ、パラメータ、およびトレーニングデータに関する完全な知識を前提とした攻撃の種類である。攻撃者は、モデルが有する脆弱性を悪用する敵対的入力を正確に作成することができる。ホワイトボックス攻撃において、攻撃者は、モデルの挙動を操作する摂動を見つける必要がある。

ブラックボックス攻撃は、AIモデルの内部構造に関する知識を一部のみまたは、全く持っていないことを前提とした攻撃の種類である。攻撃者は、モデルへの入力とそれに対する出力を観測し、その挙動を推測して敵対的入力を作成する。この攻撃は、ホワイトボックス攻撃と比較して効率性と効果が劣るが、実際に攻撃者がモデルの内部に完全にアクセスできることはほとんどないことから、現実的なシナリオである。

要素課題3：保護策の回避

保護策の回避は、生成型AIが利用する言語モデルの潜在的な脆弱性を利用した不正アクセスやシステムの操作のひとつである。本研究は、保護策の回避メカニズムを解明することで、生成型AIが持つ潜在的なセキュリティ上の弱点を特定し、モデルの堅牢性向上につなげる。

本課題の難しさは、脆弱性の特定、入力のフィルタリングにある。保護機能を回避できる脆弱性を特定するとき、攻撃者は大規模言語モデルが有する保護機構を分析し、脆弱性を特定、プロンプトを作成する必要がある。しかし、保護策の詳細は公開されていないため、関連ドキュメントの調査、リバースエンジニアリング、またはペネトレーションテストなどを実施する必要がある。また、入力のフィルタリングの難しさについて、生成型AIへの入力はデータとコードの区別がないため、過度なフィルタリングは正常な動作を阻害してしまうことが挙げられる。

- ドキュメント調査： 言語モデルのセキュリティ対策について、入手可能なあらゆる文書を確認する。ホワイトペーパー、技術仕様書、またはユーザーマニュアル等を基に、言語モデルの意

図するユースケースと設計目標を理解し、セキュリティ機構を分析する。

- リバースエンジニアリング:言語モデルのソフトウェアやハードウェアのコンポーネントを分析し、コードの逆コンパイル、ネットワークトラフィックの分析、システムのメモリレイアウトから脆弱性を検討する。
- ペネトレーションテスト:バッファオーバーフローや SQL インジェクションなどの一般的な脆弱性のスキャンや、ネットワークトラフィックを分析して悪用可能な脆弱性を検討する。

プロンプトを利用した攻撃には、複数のキャラクターや複雑なバックストーリー、テキストの翻訳、アウトプットを生成するためのコーディングの要素などを組み合わせることで、保護策を回避する方法がある。例えば、ChatGPTに組み込まれた保護策を回避する方法のひとつであるtext continuationは、主人公が悪役に捕まり、プロンプトが悪役の計画を説明し続けるよう入力を続けることで、保護策を回避することに成功している。例えば、ChatGPTはマルウェアのコード生成等の倫理的な問題を持つ回答を出力しないよう保護策がとられているが、バックストーリーをプロンプトとして入力することで、保護策を回避できる

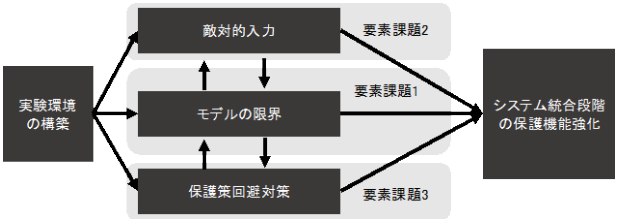


図 2　要素課題と研究目的間の関係

３．計画の進行状況

人工知能の動作におけるセキュリティ上の脅威・攻撃手法、防護策に関する研究状況を調査した。調査の結果を、AI が動作するフェーズ毎の脆弱性と対策をマッピングし、システムの脆弱性に係る全体象を把握した(図 3)。また、本研究で利用する大規模言語モデルに関する調査を実施し、2023 年以降に発表された生成 AI のシステム統合に関する脅威の研究を精査している。

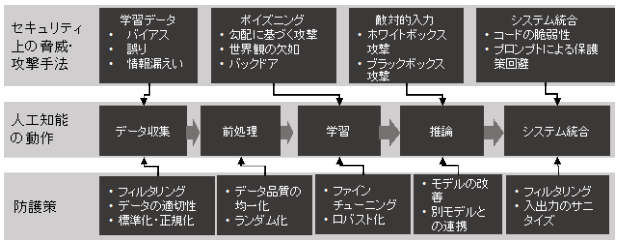


図 3 セキュリティ上の脅威、人工知能の動作、防御策の関係

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後は、セキュリティ上の脅威・攻撃手法、人工知能の動作、防護策をそれぞれ検証し、学会等にて論文等を投稿していく予定である。

記憶の哲学の構成主義的展開とエピソード記憶の共有
記憶共有の可能性

デザイン工学部（デザイン工学科）　　櫻木　新

共同研究者
広島大学大学院人間社会科学研究科 稲荷森輝一
東京大学　　川本　隆史
中央学院大学現代教養学部　　齋藤　暢人
茨城大学教育学部　　佐藤　邦政
北海道大学大学院文学研究院　　宮園　賢吾

１．はじめに

本研究の中心課題は記憶の共有である。記録や科学的知見など、知識としての記憶が社会やグループで共有されるのは当然であるが、本研究の関心はいわゆる知識の共有一般にではなく、心理学ではエピソード記憶と呼ばれる、個人的な経験の記憶の共有である。

我々は「我々」や「彼ら」といった複数形の代名詞の他、「日本人」のような不特定多数を指し示す名詞を主語にした記憶状態（「彼らはそのことをよく覚えていた」「日本人はヒロシマ・ナガサキを決して忘れない」）について様々な仕方で語る。その一方で、これらの集合的な記憶帰属文が厳密に言ってどのような意味で用いられているのかについての研究は、進んでいるとは言いがたい。

多くの記憶帰属文はいわゆる意味記憶、命題的な内容を有する知識などの共有の意味で用いられる一方（「学生は皆、試験日を覚えていた」）、エピソード記憶の共有を意味すると考えられる用例は特に珍しいものではない（「我々はその時の悔しさを決して忘れない」）。知識の共有は近年、分析社会認識論において様々な角度から論じられているが、エピソード記憶の共有についての研究は端緒についたばかりである。発展めざましい記憶の哲学においても、集合記憶一般、特にエピソード記憶の共有についての議論は一部の例外を除いてほとんど見ることが出来ない。

本研究の焦点と新奇性はエピソード記憶の共有とその社会倫理学的な役割の解明に存する。社会集団によるそのメンバー個人の過去の経験の受容・共有という集団記憶は、その社会集団の存立に大きな役割を果たすがゆえに、集団自体に課された倫理的な義務と深く関係している。例えば沖縄戦における個々の戦争被害の記憶は、個々の経験のナラティブを通じて地域に共有され、その地域のアイデンティティの一部を構成する。このとき共有されるべきもっとも重要な記憶内容は、事実の報告のような意味内容ではなく、悲しみや怒りといった個人的な経験そのものである。しかしそのような個々の経験の語りを無視し、被害を矮小化するような言説がまかり通る事態を看過するなら、その集団が果たすべき倫理的義務を遂行しているとは言いがたい。本研究はエピソード記憶の共有に焦点を絞ることで、個々の経験の記憶が社会集団の存立に

果たす役割やその倫理的義務の解明を目指す.

２．研究計画

本研究の手法は主として分析哲学の伝統に則った思弁的議論（思考実験等）と歴史（文献）研究である。これに加え、経験的な調査手法（オンライン・アンケートの国際比較などの社会科学的な手法、英語や日本語の大規模オンラインコーパスの活用、インタビューや談話分析の統計的な手法を用いた分析等）も積極的に活用する。

研究は以下４つの異なるテーマに沿ってそれぞれ平行して進められるが、それぞれのテーマは個別に切りはなすことが出来るものではなく、それぞれが不可分に結びついている。したがって、各テーマ毎の研究ミーティングの他に、研究グループ全体に対する各テーマ毎の研究成果を毎年１回報告することとする。このように他のテーマの報告をそれぞれのテーマにフィードバックすることで、全体として４つのテーマが有機的に関係しながら、全体としてエピソード記憶の共有のあり方をそれぞれの視点から解明することを意図している。

・テーマ①集団への記憶帰属の種類の検討

組織や構造を持たない集団のような異なる種類のグループに対して、集合記憶は異なる仕方で帰属されることが一般的である。この研究テーマでは、記憶の個人への帰属条件の分類の検討から、異なる種類の集合記憶のあり方を明らかにすることを目指す。方法としては集合的意図や社会存在論の先行研究を踏まえたグループの存在論の検討、事例を通じた概念分析の他に、アンケート等の経験的調査による一般的な日本語／英語話者の記憶帰属の条件の検討を行う。

・テーマ②集合記憶の社会認識論上の役割の検討

エピソード記憶の共有が社会集団に対して有する意味と役割・重要性を検討する。一般に、被害者証言の共有は言語行為を通じて共有されるため、意味記憶の共有と考えられがちである。他方で、①の帰属条件の検討から明らかにされる様に、同一の出来事を経験したグループのメンバー間では、互いが同一の出来事のエピソード記憶を共有していると考える時、しばしば一人称の複数形（我々／we）を主語としたエピソード記憶の帰属が行われる。本テーマでは被害者証言の共有のような意味記憶の背景にあるエピソード記憶の役割の解明を通じて、社会認識論上のエピソード記憶の位置づけを検討する。

・テーマ③集合的エピソード記憶の不正義と記憶のケアの検討

②で検討されるエピソード記憶の共有をグループにおける「共同行為」と位置づけ、その社会倫理学上の重要性を明らかにする。記憶証言の共有には証言する側の伝える行為だけでは無く、受け入れる側の受容が必要である。一方的に説明するだけの証言は、意味内容が社会で共有されたとしても、その背景にある感情のようなエピソード記憶の内容を構成する重要な要素の共有が欠落している。本テーマではグループの側での証言の受容という観点から、記憶証言におけるエピソード記憶の共有と、その失敗としての証言的不正義が成立する条件を明らかすることを目指す。また被害者証言の受容がもつケアという側面に光を当て、認識的不正義をただす記憶のケアという方法論を理論的に検討・提案する。

・テーマ④20 世紀哲学における集合記憶の位置づけの検討

集合記憶は 20 世紀以降の社会科学においては大きなテーマを構成するが。現代哲学においてはほぼ無視されてきた。本研究テーマでは 20 世紀初頭に遡り、集合記憶を巡る分析哲学と Halbwachs に遡る社会科学の断絶の理由を探求する。特に現象学運動における記憶研究（Carr の歴史の現象学研究、Zahavi の相互主観性研究、Casey の記憶論、想像論、空間・

場所論）などに光を当てることで、分析哲学を中心とする現代の記憶の哲学における集合記憶の取り扱いと社会科学上の議論の断絶の調停を試みる。

３．計画の進行状況

2024-5年度はそれぞれのテーマを分担する担当者から以下の三件の報告が行われた（すべて記憶の哲学NETWORK JAPAN定例ミーティング）。

(1)櫻木「集合記憶とエピソード記憶の共有」(2024/9)

集合的エピソード記憶の帰属には、エピソード記憶の本質的な特徴である、主観的な経験表象の共有をどう考えるかという明らかな問題が存在する。本発表ではこのエピソード記憶の集合への帰属を、グループのあり方と個的な記憶内容との関係の区別から以下の 4つに分類し、個的なエピソード記憶に還元できない集合的エピソード記憶帰属のあり方を指摘する。

(1) 還元的・特定：特定のメンバーの各自に同じ出来事のエピソード記憶（例：同じ景色の記憶）を帰属するケース

(2) 還元的・非特定：不特定多数の人々に同じエピソード記憶を帰属するケース

(3) 非還元的・特定：特定のメンバーがそれぞれ異なる記憶を有することで、グループ全体にエピソード記憶が帰属されるケース

(4) 非還元的・非特定：不特定多数がそれぞれ別のエピソード記憶を有することで、全体に一つのエピソード記憶が帰属されるケース

これらの分類から、集合的エピソード記憶の表象のあり方は以下3つに分類される。

(a) 総和的表象：個人の記憶の集積として集合記憶が成り立つ。(b) 独立的集合記憶：個人の記憶に依存しない複数のエピソード記憶の集積としての集合記憶のあり方。(c) 代表者による記憶：特定の代表者がグループを代表して記憶することが集合記憶となる。

(2) 稲荷森・宮園「記憶の哲学と実験哲学」(2024/9) および「エピソード記憶の実験哲学:因果説は直観的か」(2025/3)

本研究は、グルノーブル大学の大学院生Juan F. Álvarez氏を中心としたグループが英語話者を対象に実施した、記憶の因果理論（Causal Theory of Memory: CTM）と人々の直観との整合性に関する調査を基礎とし、それと同様の実験を日本語話者を対象に実施したものである。その結果、日本語話者においても英語話者と同様に、全体としてCTMと整合する傾向が確認された。なお補足として、日本における実験を担当した稲荷森は、2024年7月にグルノーブル大学で開催されたESPPに参加し、本研究に関連するKourken Michaelian教授をはじめとする研究者たちと意見交換を行っている。

(3) 稲荷森・宮園「エピソード記憶の実験哲学:因果説は直観的か」(2025/3)

2025年3月の研究会では9月の発表を踏まえて実施した新たな実験の進捗について報告が行われた。前回の実験結果をもとに、前述のÁlvarez氏を中心とする実験哲学グループと協議を重ね、既存の実験設計における課題を検討した上で、新たに作成した実験シナリオを用いて再度、日本語話者を対象にCTMとエピソード記憶の帰属に関する直観の整合性を調査した。その結果、従来の実験で指摘されていた参加者によるシナリオ理解の問題が改善されたほか、CTMと直観の整合性を示す傾向がより明確に見られた。現在、こうした成果をふまえて、ヨーロッパの研究グループと論文投稿に向けた国際共同研究を進めている。

上記の三件の発表の他に、以下二件は記憶の哲学 NETWORK JAPAN3月定例ミーティングでの発表を予定していたが、事情によりキャンセルされた。

・佐藤「Narrative Testimony and Its Evidential Power」

ナラティブの証言の特徴とその認識的不正義の形態について発表し、語り手のパースペクティブの特徴の定式化やナラティブに対する認識的不正義概念について検討した。個々での踏まえた成果は以下の通りである。(1)「「日本人」特権に起因する無知：日本人性に関する社会科学と無知の認識論の学際研究」.（鶴田想人・塚原東吾（編）『無知学への招待：〈知らないこと〉を問い直す』(pp. 221-245). 明石書店.）（2）Kunimasa Sato (2025). “Institutional Testimonial Injustice: A Thickly Described Case Study of Japan’s Mass Media Companies,” Episteme. (4月6日アクセプト)

・齋藤「記憶の現象学」

現象学の祖フッサールには記憶に関する研究が多くあることが知られている。それら膨大な研究成果は遺稿として没後に出版されており、徐々にではあるが現在研究がすすめられている。近年では、フッサールの記憶論を、彼が師事したブレンターノの記憶論と対照させつつ分析する研究が進展している。記憶の現象学をその先行研究の文脈を踏まえつつ理解しようとする試みである。ブレンターノ及び同時代の心理学者シュテルンの議論の理解は、フッサールの時間意識の分析を理解するためには不可欠である。彼らのあいだには根本的な意見の相違がみられる。ブレンターノが記憶を想像とみなすのに対し、フッサールは記憶を独特の知覚であるとみなすのである。この意見の相違は、そのままアリストテレス記憶論の解釈・評価へとつながってゆくことは明らかであろう。つまり、記憶の現象学は記憶論の正当な研究の一手法であり、分析哲学において議論が進展した今日においてこそ比較検討、再評価が可能になったと言える。

テーマ③に関して、川本は秦恒雄氏（1910～1979年）が書き残したユニークな被爆地ドキュメント『ひろひと天皇年代記』(1980年に『原爆と一兵士』と改題のうえ旺史社より刊行）の復刊に取り組み（2025年6月に琥珀書房より復刊の予定)、同書の巻末に「脱＝被爆ナショナリズム・記憶のケア・オートエスノグラフィー―『ひろひと天皇年代記』に寄せて」を寄稿した。この論考において、秦氏の作品を「記憶のケア」の実践の試みとして読み解いている。

また、本課題のテーマ②および③に関する国際会議 "Trajectories of Epistemic Injustice: Local and Global Perspectives" が2024年12月に佐藤のコーディネートで開催された。認識的不正義の著者 Miranda Fricker 氏の他、海外研究者10名程度、日本人研究者5名程度を招聘し、東京大学(本郷)、および国際ワークショップを立命館大学で主催した。佐藤は、ナラティブの証言の特徴とその認識的不正義の形態について発表した（成果は Rowman & Littlefield 社から刊行予定の Testimony and Responsibility for Becoming Transformative Agents（査読中）に反映)。2025 年に予定される同書の出版後に Mona Simion 教授、Amandine Catala 教授など国内外の研究者と合評会の開催を予定しており、その後にナラティブの証言に関する認識的不正義をテーマとした国際研究拠点を構築する予定である。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

2025年度は記憶の哲学 NETWORK JAPAN の定例ミーティングで各テーマについての報告を行う。その他一部のテーマについては、記憶の哲学の国際会議（第2回 Eurasian Memory Meeting や第5回 Issues in Philosophy of Memory）での発表、それぞれのテーマを主題とした国内外でのワークショップや国際会議を開催し、外部からのフィードバックを得て、論文執筆に取り組むことを計画している。

うつ病における脳の酸化ストレスと脳由来栄養因子との関係

SIT 総合研究所　　中村　朱里

1. 序論(はじめに, まえがき, 目的)

うつ病や不安症などの精神疾患は, 個人の生活の質を著しく低下させるだけではなく, 国内外の経済的な損失にもつながる社会的にも深刻な疾患である.

一方で, 何故うつ病が発症するのか, うつ病の成因についてはほとんど明らかにされていない. ゆえに, うつ病の客観的評価指標やバイオマーカーについても同定されていないのが現状である.

近年の研究において, うつ病患者のビタミン E やコエンザイム Q などといった抗酸化物質濃度が大幅に低下していることが報告されている. 抗酸化物質が減少は, 生体内の酸化還元バランスが崩壊し, 酸化ストレスの原因となる. つまり, うつ病患者では酸化ストレスが亢進し, 神経変性が起きている可能性が示唆されている (Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry. 2011 Apr 29;35(3):676-92.).

神経栄養因子(NT)は, ニューロンとグリアの成長, 生存, 生理学的機能をサポートする小さなタンパク質ファミリーのメンバーである. 最近の多くの前臨床研および臨床研究では, NT の一つである脳由来栄養因子(BDNF)とその受容体の TrkB の シグナル伝達とうつ病性障害との関連が示唆されている (Clin. Sci. (Lond.), 131 (2017), pp. 13-23). さらにうつ病患者では, 血清および血漿中の成熟 BDNF の末梢減少が報告されている (J. Psychiatr. Res., 46 (2012), pp. 285-289).

しかしうつ病でなぜ血漿中の抗酸化物質濃度が低下し――言い換えれば, 酸化ストレスが亢進し――BDNF 量が減少しているのかは不明である. そこで本研究では, うつ病様症状を呈したモデルマウスの酸化ストレスと BDNF 量を測定し, うつ病様体形成時に酸化ストレスが発生するメカニズムおよび BDNF が減少するメカニズムについて解明することを最終目的とした.

2. 研究計画

前述のとおり, 本研究の最終到達点はうつ病モデルマウスにおける酸化ストレスと脳由来栄養因子との関係である. しかし, うつ病モデルマウスの作成には時間と技術を要する. そこで, うつ病と同様に酸化ストレスの亢進が関与すると考えられ, かつ神経機能への影響が研究されている「加齢」現象に着目した. 加齢マウスへの抗酸化物質投与が行動や脳内因子に与える影響をまず評価することで, 酸化ストレスと脳機能の関係性に関する基礎的な知見を得る. さらに, 行動試験等の実験手技の習熟を図ることとした. これは, 将来的にうつ病モデルマウスを用いた研究を進める上での重要なステップである.

加齢はがん, 心臓病, 糖尿病, 腎臓病, 神経変性疾患など様々な疾患の発症リスクを増加させる (Cell. 2013 Jun 6;153(6):1194-217.). 中でも脳は, 行動欠陥, 健忘症, 認知症などのさまざまな病気と関連している (J Gerontol A Biol Sci Med Sci 2016, 71 (1), 13-20.)(Trends Cogn Sci 2012, 16 (5), 292-305.). さらに

は老化も生体内酸化の亢進によって促進され，生体内酸化の蓄積は様々な疾患の発症リスクを亢進させることが明らかとなっている（Neurochem Res 2009, 34 (4), 670-678.）．これらのことから，本研究ではまず，週齢の高いマウスを用い，酸化ストレスの影響を評価する．さらに行動試験の精度を向上させるための手技習得も兼ね研究を実施した．

実験方法は次のとおりである．49 週齢のマウスを用い，Control (C)群とビタミン C やコエンザイム Q などの抗酸化物質が数種類配合されたサプリメント投与群 (T)に分け飼育した．サプリメントは水へ溶かし，自由飲水による投与を行った．投与は 1 か月間行い，投与期間中は週に 1 度体重測定を行った．飼育スケジュールを図 1 に示す．

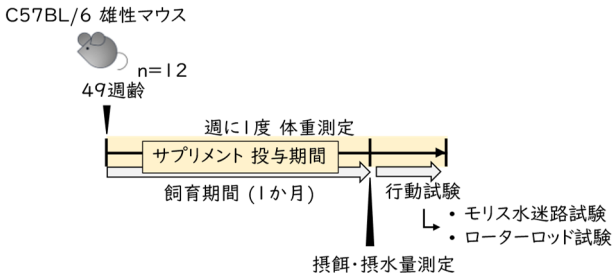


図 1 飼育スケジュール

サプリメントの投与から1か月後の時点で摂餌摂水量を測定した．サプリメント投与期間終了後，モリス水迷路装置（図 2)を用いて認知機能を，ローターロッド装置（図 3)を用いて協調性運動能を測定した．

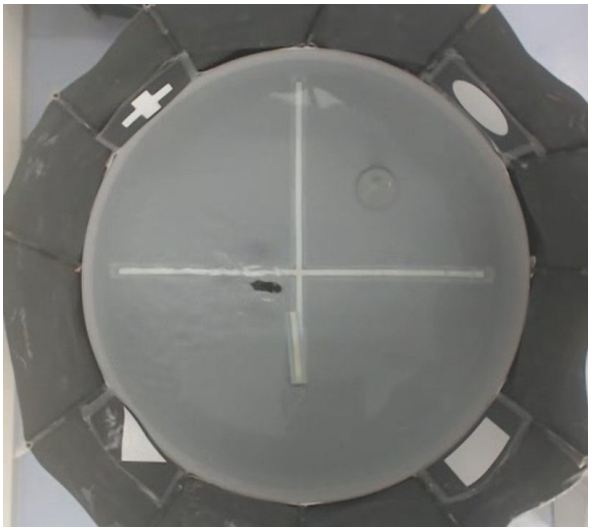


図 2 モリス水迷路装置



図 3 ローターロッド装置

行動試験終了後，マウスを麻酔にかけてから頸椎脱臼を行い安楽死させ，大脳皮質，海馬，血清を採取した．採取した臓器や血清は実験に使用するまで -80℃で保存した．

3. 計画の進行状況

図 4 に示すように，C 群と T 群において体重，摂餌・摂水量に有意差は認められなかった．

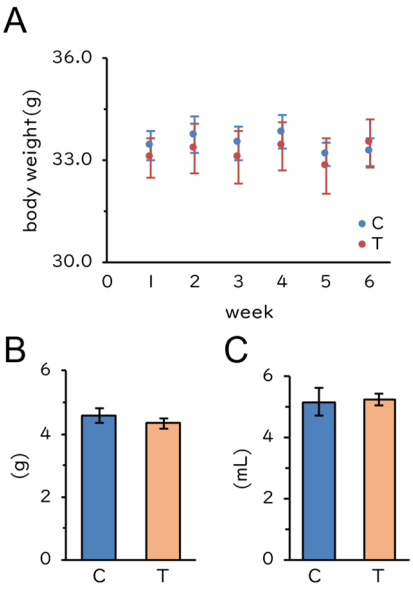


図 4 体重(A)，摂餌量(B)，摂水量(C)．Mean±SE(n=12)．

水迷路試験では，4 日目のみ，T 群でゴールまでの到達時間が C 群よりも有意に早く，学習率も有意に高かったが，1 日目から 3 日目，5 日目は C 群との間に有意な差は認められなかった(図 5).

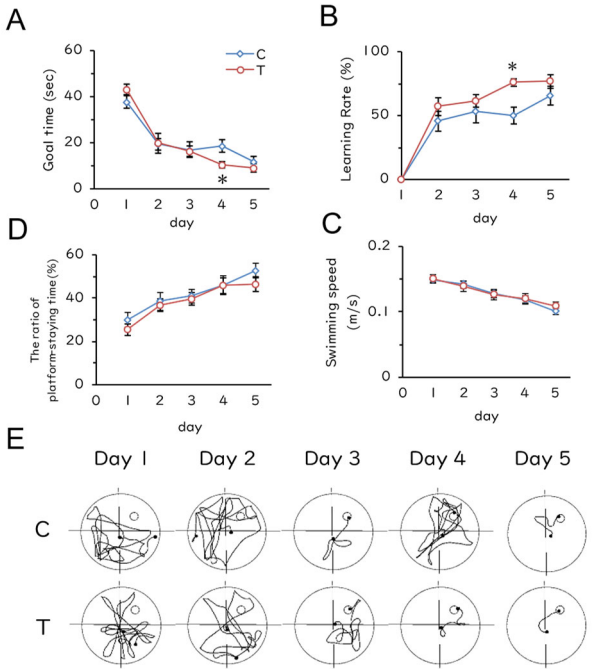


図 5 水迷路試験結果. A:ゴール到達時間，B:学習率，C:遊泳速度，D:プラットフォームエリアにいた時間の割合 E:移動軌跡. Mean±SE (n=12(C), n=11(T)), Student's-t test *p<0.05.

ローターロッド試験では T 群のほうが C 群よりも，落下時のロッド回転数が有意に速く，またロッドから落ちるまでの時間が有意に遅かった(図 6).

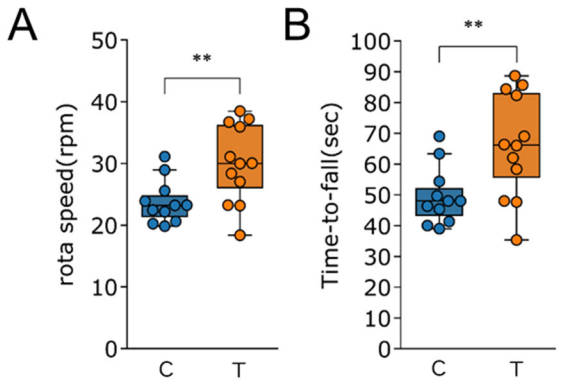


図 6 ローターロッド試験結果. A: 落下時のロッド回転数，B:落下までの時間. n=12(C), n=11(T). Student's-t test **p<0.01.

これらの結果から，抗酸化物質が含まれたサプリメントの投与により，高齢マウスの協調性運動能は有意に向上することが示された. 一方，認知機能(水迷路試験)については，学習期間の一部(4 日目)においてゴール到達時間の短縮と学習率の向上が見られたものの，試験期間全体を通して一貫した改善効果は限定的であった(図 5). これらの行動変化の背景にある分子メカニズムを明らかにするために，大脳皮質と海馬の BDNF や NGF の神経栄養因子とそれらの同族受容体(それぞれ TrkB と TrkA)の脳内レベルを測定した(図 7). しかし，T 群の大脳皮質および海馬における神経栄養因子およびこれらの受容体のタンパク質量は C 群と有意な差は認められなかった.

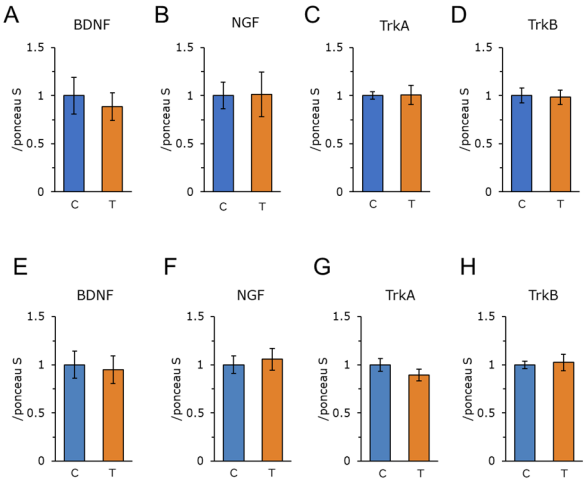


図 7 ウェスタンブロットの結果. 大脳皮質の BDNF, NGF, TrkA, TrkB (パネル A～D)，海馬の BDNF, NGF, TrkA, TrkB (パネル E～F). mean±SE (n=12).

4. 今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本実験により，抗酸化物質の投与が老齢マウスの運動機能は改善したが，脳内栄養因子およびそれらの受容体のタンパク質量には変化が見られなかった.

自発運動量は，健康状態や精神状態を評価するために広く使用されている指標である（J Pharmacol Sci. 2022 Jun;149(2):46-52.）

本研究における老齢マウスでの結果は，酸化ストレスの軽減が必ずしも BDNF 量の変化に直結しない可能性，あるいは加齢とうつ病様状態とでは酸化ストレスや BDNF の関与メカニズムが異なる可能性を示唆する．すなわち，抗酸化物質が加齢に伴う運動機能低下の一部は改善するものの，BDNF 経路を介さないメカニズムが主である可能性や，うつ病の病態における BDNF 減少には，加齢とは異なる，より特異的な要因(例えば，ストレス応答系の異常など)が関与している可能性が考えられる．したがって，本研究の最終目的であるうつ病の成因解明のためには，加齢マウスでの結果を踏まえつつも，うつ病モデル動物を用いて，ストレス負荷条件下での酸化ストレスと BDNF 変動，および両者の相互作用を直接的に検証することが不可欠である．

今後はこれらの知見を踏まえ，うつ病モデルマウスを用いた解析を行っていく．

慢性軽度ストレスモデルなどを用いてうつ病様症状を呈するマウスを確立し，今回の加齢マウス実験で見られた協調運動能の変化に加え，健康状態や精神状態の指標として広く用いられる自発運動量なども含めたオープンフィールド試験などの行動評価を行う．その後うつ病との関連が深い海馬などの脳部位において，酸化ストレスマーカーと BDNF およびその受容体 TrkB の発現量を測定する．これにより，うつ病様状態形成時における酸化ストレス発生メカニズムと BDNF 減少メカニズム，そして両者の相互作用の解明を目指す．

【学会発表】

- 高齢マウスに対するマルチ抗酸化サプリメントの脳機能への効果
  中村 朱里，楊 馥華，犬房 春彦，吉川 敏一，福井 浩二
  第 78 回日本栄養・食糧学会大会　2024 年 4 月

- Mixed antioxidant supplement improved the coordination ability of aged mice
  Akari Nakamura, Fukka You, Haruhiko Inufusa, Toshikazu Yoshikawa, Koji Fukui
  第 47 回日本基礎老化学会大会 2024 年 6 月 15 日

スマートグローブによる農畜産物の弾性率分布計測に基づく内部欠陥・熟成度評価

工学部　　細矢　直基

1. 緒　　論

従来のロボットは素材の剛性が高く，適応が制限されることから近年では柔軟性に優れたソフトロボットに関する研究が盛んに行われている．誘電エラストマーアクチュエータ（Dielectric Elastomer Actuator : DEA）は外部からの電圧によって大きな変形を引き起こし，高エネルギー密度[1，2]，低弾性率[3，4]，軽量[5, 6], 低コストなどの特徴から人工筋肉として注目されている．これらの DEA の特徴を活かしハプティックデバイス[7, 8]やポンプ[9, 10]，フレキシブルモーター[11]，歩行ロボット[12]など様々な適用例が検討されている．DEA は予ひずみを加えることで動的不安定性を解消し，性能が向上することがわかっている[13]．予ひずみは機械的な治具を用いて面内方向へ引き伸ばす方法[14，15]が一般的だが，専用の治具を製作する必要がある．別の方法として空気圧や水圧などの流体圧力を用いた面外方向への変形が挙げられる．この方法は DEA の振動面が変形することからスピーカーなどの用途で用いられる．この方法は DEA の振動面が変形することからスピーカーなどの用途で用いられる．Hosoya らは空気圧によって DEA の表面積を増加させ，無指向性のバルーン DEA スピーカーを実現した[16]．空気圧を用いることで比較的容易に大きい変形量が得ることができ，DEA の性能も向上することから加振デバイスに適していると言える．

DEA は農業分野への応用が期待されている．青果物の硬さを定量的に評価する手法としては硬度計を用いた貫入試験が一般的だったが，貫入試験は破壊的であるため検査した青果物を消費者に供給することは難しく，全数検査ができないといった課題があった．レーザーによる加振試験[17]や低質量の振り子を用いた音響振動試験[18]によって非破壊でも硬さの評価が可能であることを示した．また，Hiruta らはりんごの表面に DEA を貼り付け，駆動することでりんごを加振し，加振されたりんごの振動応答及びモード形状を計測することで青果物の成熟度の一つである硬さの推移を得た[19]．DEA を用いることで実験システムの小型化に成功したが，これまでに報告されている DEA 加振デバイスは青果物に接着剤や粘着テープで貼り付ける必要があった．検査対象から DEA を剥がす際に層間で剥離を引き起こす可能性があり，残存した接着剤によって検査対象にも衛生面で悪影響を及ぼす恐れがある．

DEA を搭載したスマートグローブを人間が装着すれば，DEA は伸長する．したがって，DEA をどの程度伸長させることが可能か，そして伸長した際の電気特性を調べることで，DEA の駆動性能を事前に評価する必要がある．本研究では，DEA を均等に伸長させるために空気で加圧される DEA（加圧型 DEA）を製作する．そして，この加圧型 DEA に作用させる空気圧を変化させ，そのときの変形量，電気

特性を調べる．

2. 加圧型 DEA

2.1 DEA の駆動原理

図 1 に DEA の駆動原理を示す．DEA は，エラストマー膜が柔軟電極によって挟まれたキャパシタ構造を有しており，柔軟電極に電圧を印加することによって電極間に発生した静電気力により，エラストマー膜は，面外方向に伸長し，面内方向に伸長する．厚み方向に発生する応力はマクスウェル応力であり，式(1)のように表される．

$$p = \varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{V}{t}\right)^2 \quad (1)$$

ここで，pはマクスウェル応力，ε_rは比誘電率，ε_0は真空誘電率，Vは印加電圧，tはエラストマーの膜厚である．

2.2 加圧型 DEA

図 2 に，加圧型 DEA の構造を示す．加圧型 DEA はアクリル製チャンバーの上部に DEA が固定されている構造をしており，チャンバー下部に接続したチューブフィッティングから加圧することで上部の DEA が面外方向に膨張する．本研究ではエラストマーにシリコーンゴム，柔軟電極にはカーボンナノチューブ（Carbon Nanotube: CNT）を使用した．

3. 加圧型 DEA の性能評価

3.1 空気圧による変形量

本実験では，変形後の様子を撮影し，画像解析することで空気圧による変形量を計測した．図 3 に各空気圧における変位量を混合比で比較した結果を示す．また，シリコーンゴムは主剤と硬化剤の混合比（図 3 においては，主剤 : 硬化剤と表記）を変化させることで，硬さを変化させた．主剤の混合比が大きいほど柔らかくなるため変形量が大きくなり，最大で 30 mm 程度の変形することがわかった．

3.2 変形時の電気特性

加圧型 DEA の静電容量及び抵抗値を測定した．図 4 に静電容量の周波数特性を混合比で比較した結果を，図 5 に各空気圧でのインピーダンスを混合比で比較した結果をそれぞれ示す．図 4 から主剤の混合比が大きくなり柔らかくなるに従い，加圧型 DEA の静電容量の増加に寄与することがわかった．これは図

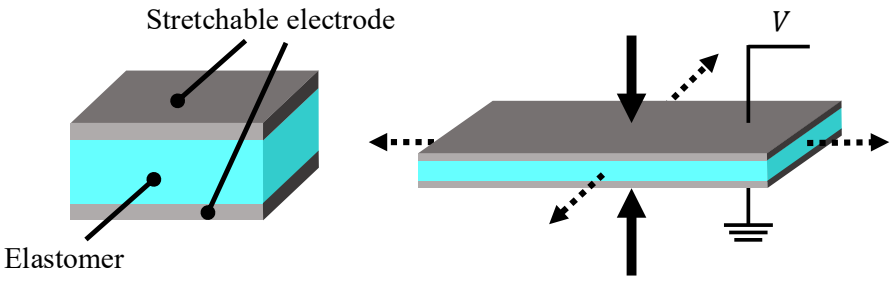


図 1　DEA の駆動原理

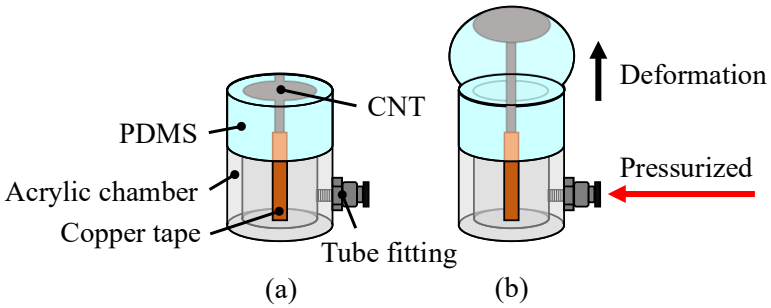


図 2　加圧型 DEA

5 の初期状態（0 kPa 時）より，20:1 の方が導電性に優れていることからも主剤の混合比が大きい膜ほど表面の粘着性が上がり，CNT の粉末電極が付着しやすくなるためであると考えられる．また，図 5 より空気圧の増加に伴ってインピーダンスが増加していることが確認できる．特に 20:1 は 10:1 に比べ増加率が大きく，6 kPa 付近で大小関係が入れ替わることがわかる．これは 20:1 のほうが空気圧による変形量が大きく，電極形状の変形によって粉末電極同士が離れてしまうことでネットワークが低下したことが原因として挙げられる．

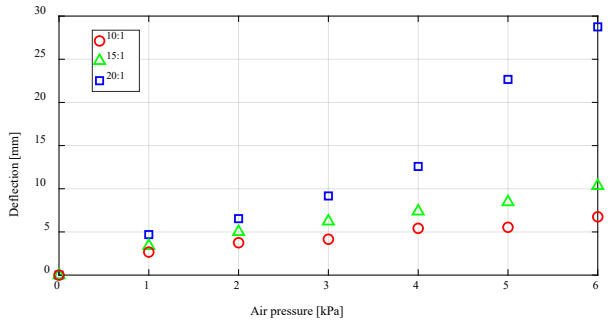


図 3　加圧型 DEA に作用させる空気圧と変形量の関係

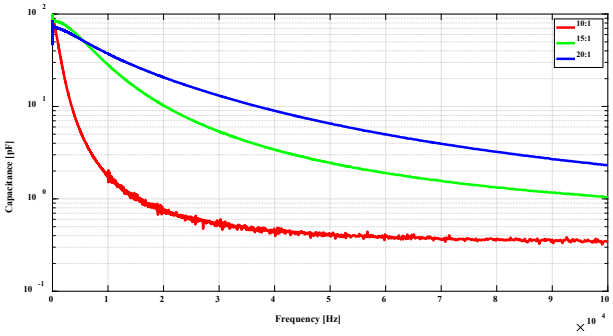


図 4　加圧型 DEA の周波数に対する静電容量変化

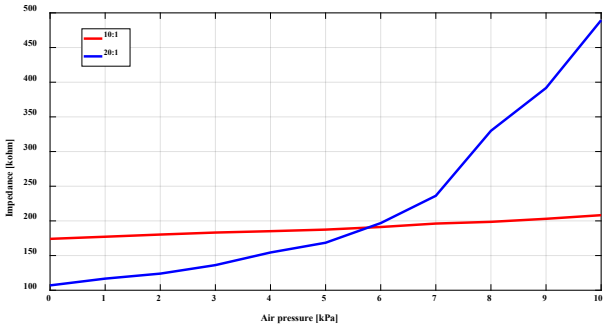


図 5　加圧型 DEA に空気圧を作用させて膨らませた際のインピーダンス変化

4.　今後の計画

2025 年度は，本システムを青果物の振動試験に適用し，硬さ評価を行う．そして，2025 年度末までには，学術論文投稿を目指す．

文　　献

[1] Mihai Duduta, Ehsan Hajiesmaili, Huichan Zhao, David R. Clarke, “Realizing the potential of dielectric elastomer artificial muscles”, PNAS, 116, 2018, pp.2476–2481.

[2] G. Kovacs, L. During, S. Michel, G. Terrasi, “Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission”, Sensors and Actuators A: Physical, 155, 2009, pp.299–307.

[3] Ardi Wiranata, Makoto Kanno, Naoki Chiya, Hozume Okube, Tatsuhiro Horii, Toshinori Fujie, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, “High-Frequency, Low-voltage oscillations of dielectric elastomer actuators”, Applied Physics Express, 15, 2022, 011002.

[4] Chao Zhang, Wei Wei, Huajun Sun, Quanyao Zhu, “Study on the properties of different dielectric elastomers applying to actuators”, Sensors and Actuators A: Physical, 329, 2021, 112806.

[5] Samuel Rosset, Herbert R. Shea, “Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators”, Applied Physics A, 110, 2013, pp.281–307.

[6] Oluwaseum A. Araromi, Irina Gavrilovich, Jun Shintake, Samuel Rosset, Muriel Richard, Volker Gass, Herbert R. Shea,“Rollable Multisegment Dielectric Elastomer Minimum Energy Structures for a Deployable Microsatellite Gripper”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20, 2015, pp.438–446.

[7] Yong Hae Heo, Seok Hun Lee, In Kwon Lee, Sang-Youn Kim, “Enhanced flexible vibrotactile actuator based on dielectric elastomer with propylene carbonate”, Intelligent Service Robotics, 17, 2024, pp.67–74.

[8] Ankit, Terence Yan King Ho, Amoolya Nirmal, Mohit Rameshchandra Kulkarni, Dino Accoto, Nripan Mathews, “Soft Actuator Materials for Electrically Driven Haptic Interfaces”, Advanced Intelligent Systems, 4, 2021, 2100061.

[9] Farah Afiqa Mohd Ghazali, Che Ken Mah, Alaa AbuZaiter, Pei Song Chee, Mohamed Sultan Mohamed Ali, “Soft dielectric elastomer actuator micropump”, Sensers and Actuators A, 263, 2017, pp.276–284.

[10] Guoyong Mao, Lei Wu, Yimou Fu, Zhe Chen, Shreyam Natani, Zhe Gou, Xiaodong Ruan, Shaoxing Qu, “Design and Characterization of a Soft Dielectric Elastomer Peristaltic Pump Driven by Electromechanical Load”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 23, 2018, pp.2132–2143.

[11] Ayato Minaminosono, Hiroki Shigemune, Yuto Okuno, Tsubasa Katsumata, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, “A Deformable Motor Driven by Dielectric Elastomer Actuators and Flexible Mechanisms”, Frontiers in Robotics and AI, 6, 2019.

[12] Canh Toan Nguyen, Hoa Phung, Phi Tien Hoang, Tien Dat Nguyen, Hosang Jung, Hyungpil Moon, Ja Choon, Koo, Hyouk Ryeol Choi, “A novel bioinspired hexapod robot developed by soft dielectric elastomer actuators”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017, pp.24–28.

[13] Zhipeng Wang, Bin He, Yanmin Zhou, Runjie Shen, Gang Li, “Effects of pre-stretch on the oscillation and stability of dielectric elastomers”, International Journal of Mechanical Sciences, 185, 2020, 105879.

[14] Shamsul Zakaria, Liyun Yu, Guggi Kofod, Anne Ladegaard Skov, “The influence of static pre-stretching on the mechanical ageing of filled silicone rubbers for dielectric elastomer applications”, Materials Today Communications, 4, 2015, pp.204–213.

[15] Alessandro Iannarelli, Mohamad Ghaffarian Niasar, Rob Ross, “The effects of static pre-stretching on the short and long-term reliability of dielectric elastomer actuators”, Smart Materials and Structures, 28, 2019, 125014.

[16] Naoki Hosoya, Hiroaki Masuda, Shingo Maeda, “Balloon dielectric elastomer actuator speaker”, Applied Acoustics, 148, 2019, pp.238–245.

[17] Naoki Hosoya, Michiru Mishima, Itsuro Kajiwara, Shingo Maeda, “Non-destructive firmness assessment of apples using a non-contact laser excitation system based on a laser-induced plasma shock wave”, Postharvest Biology and Technology, 128, 2017, pp.11–17.

[18] Zahed Fathizadeh, Mohammad Aboonajmi, Seyed Reza Hassan-Beygi, “Nondestructive methods for determining the firmness of apple fruit flesh”, Information Processing in Agriculture, 8, 2021, pp.515–527.

[19] Toshiki Hiruta, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, Itsuro Kajiwara, “Experimental evaluation of frequency response and firmness of apples based on an excitation technique using a dielectric elastomer actuator”, Sensors and Actuators A: Physical, 330, 2021, 112830.

骨格筋の量的/質的評価に基づく不妊症患者の健康管理サポートシステム確立への挑戦

システム理工学部（生命科学科）　　赤木　亮太

共同研究者
自治医科大学産科婦人科　　左　勝則

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

日本では少子高齢化問題が深刻化している．人口動態に着目すると，2008 年の 1 億 2808 万人をピークに年々減少しており，2050 年には 1 億人を下回ると推定されている．この人口減少を引き起こしている要因の一つに不妊問題が挙げられる．この問題に関して，約 2.6 組に 1 組の夫婦が不妊を心配し，約 4.4 組に 1 組の夫婦が不妊の検査や治療を受けている．これは，0～14 歳の人口が 11.8%という世界で最も少子化が進んでいる状況とも関連している．それ故，不妊問題の解決が少子化問題拡大を解決するうえで重要である．

これまで不妊を引き起こす大きな原因の 1 つに BMI の高値，すなわち，肥満が挙げられている．不妊治療を受けていない女性を対象にした身体測定値と妊娠までの期間（TTP）を調査した研究では，過体重（BMI:25～29 kg/m^2）および肥満（BMI:30～34 kg/m^2）の女性の TTP が長くなる傾向が示されている [1]．さらに，不妊症の直接的な原因の 1 つである排卵障害を引き起こす多嚢胞性卵巣症候群（PCOS）に関する研究では，BMI によって定義された一部の肥満集団における PCOS の有病率が高くなるという研究結果が出ており，減量や身体活動，食事の改善による不妊症の改善が示唆されている [2]．このように，女性不妊における肥満評価として BMI を用いることは臨床の現場においても一般化されており，BMI 値に応じて治療がなされているのが現状である．

上記に示した研究は，いずれも BMI を肥満の指標として不妊症との関連を研究しており，不妊治療に活用している [1~4]．しかし，BMI と肥満の関連については不確実な要素が指摘されており，体脂肪率測定での肥満と BMI で定義された肥満に大きな違いがあることが示唆されている [5]．BMI の増加によって PCOS の発症率及び不妊治療を受けている女性の出生率の低下，早期流産の発症率の増加に関連し得ることがわかっている一方で，BMI と移植胚の着床率，または BMI と妊娠率との間に有意な関連性がないことも同時に判明している [6]．これらのことから，BMI を肥満指標としているが故に，不妊問題が解消されていない可能性が示唆されている．

一方，いくつかの研究では，不妊症の改善には身体活動も関連する可能性が示唆されている [7~8]．これらの研究では，週に 3～5 時間の中程度の身体活動（ウォーキングやガーデニングなど）は，BMI 値に関わらずすべての女性に対して生殖能力の向上につながることが認められている．それ故，適度な身体活動と不妊症の改善には何らかの関係性があると推察される．しかし，アスリートなどの過度

な身体活動は無月経など不妊につながる可能性が示されており [9]，肥満ではない女性には不妊の危険因子になるという事例もある [7]．これらのことから，BMI を考慮しない身体活動量とホルモン値の関係性についての調査も不妊改善に不可欠なアプローチと考えられる．

以上のことを考慮すると，不妊症に関する肥満の定義に BMI を用いることは正確性に欠け，不妊との直接的な関係性を見出すことは難しい．さらには，BMI による肥満の定義に当てはまらない女性にも多く見られる PCOS が不妊症の一因となっている [10]ことから，BMI によって定義された肥満そのものに再考の余地があることは明らかである．

本研究では，肥満の尺度となっている BMI や体脂肪率に留まらない体組成に着目した．体組成については，体脂肪率の他に骨格筋率があり両者の間には負の関係がある [11]．さらに，骨格筋はホルモンバランスを維持するうえで重要な役割を担っており [12]，ホルモンバランスの安定によって生殖機能の向上につながる．よって骨格筋と不妊症には密接な関係があると推測できる．以上のことを踏まえ，不妊と肥満の問題は単に体重や BMI を減らすだけの問題ではなく，体組成全体や身体活動量を考慮に入れたアプローチが必要と言える．特に，骨格筋率を重視した新たな視点からのアプローチが，今後の不妊治療における重要な鍵となる可能性がある．

従来からあるヒトの骨格筋量を測定する方法として，核磁気共鳴画像法，X 線コンピュータ断層撮影，二重エネルギーX 線吸収測定法などの方法がある．しかし，これらの方法で測定された骨格筋量は身体機能との関連性が低いことが示されている [13~14]．さらに，これまでの従来の方法で測定される骨格筋量と実際の骨格筋細胞量（平均線維サイズ×線維数）には測定結果に違いが生じることが明らかになっており，骨格筋量の測定には精度に限界がある [15]．以上のことから，骨格筋量そのものを測るのではなく，骨格筋細胞量を測定することの重要性が示唆されているといえる．

この骨格筋細胞量を測定する方法として，部位別多周波生体電気インピーダンス分光法（S-BIS）が挙げられ，近年になり局所的な骨格筋量や細胞内液量（ICW），細胞外液量（ECW）などを推定することが可能となった．骨格筋組織は大量の水分を保持しており，その水分は細胞内液（ICW）と細胞外液（ECW）から成っていることも明らかになっている．さらに，ICW は骨格筋細胞量と同等であることが判明しており，ICW と体内水分量（TW）の比率（ICW/TW）は筋肉全体の筋細胞の割合を表している．それ故，ICW と ECW を S-BIS 法で測定することで，骨格筋量と骨格筋の質の評価が可能である．

さらに，S-BIS 法によって測定される抵抗とリアクタンスから算出される位相角（PA）は ICW と TW の比率に関与する指標であることがわかっている．この PA に着目することで，骨格筋の質や機能を評価できることが示唆されている．

以上のことを踏まえ，本研究の目的は，不妊治療における BMI の妥当性を再検証すること，女性不妊に関するホルモン値と S-BIS 法による骨格筋の電気的特性・身体活動量の関係を検討することとした．

２．研究計画

2024 年度終了時点で，ひとまずデータを整理できたのは，女性の不妊症患者 37 名（年齢：34 ± 6 歳，身長：158.5 ± 6.0 cm，体重：62.0 ± 17.0 kg；平均 ± 標準偏差）であった．医師の診察後，国際標準化身体活動質問票による身体活動量の調査およびマルチ周波数体組成計（MC-780A-N，タニタ社製）を用いた右脚と左脚の ICW，TW，BMI，体脂肪率及び PA（右下肢，左下肢，両脚，右腕，左腕，右半身，左半身）の測定に参加した．その後，各患者の月経周期に合わせて血中ホルモン値検査を実施

した．検査項目は黄体ホルモン（LH），卵胞刺激ホルモン（FSH），エストラジオール（E2），甲状腺刺激ホルモン（TSH），フリーサイロキシン（F-T4），抗ミュラー管ホルモン（AMH）であり，月経開始 2～5 日の間に採血を実施した．

３．計画の進行状況

有意水準を $p<0.05$ とし，各血中ホルモン値と骨格筋評価値・身体活動量を対象とした 2 変数相関分析を行った．ただし，血中ホルモン値に関しては，必ずしも，全患者が全てのホルモン値を評価しているわけではないことから，以下で示す相関関係の n 数は，項目間によりまちまちであった．

まず，BMI 及び体脂肪率は，各血中ホルモン値との間に有意な相関関係が見られなかった．一方，ホルモン値と骨格筋の電気的特性との関係については，F-T4 と各 PA（右下肢，左下肢，両脚，右腕，左腕，右半身，左半身）の間に，有意な負の相関が確認できた（$r \leq -0.399$，$P \leq 0.035$）．一例として，右半身の PA と F-T4 との関係を図 1 に示す．また，国際標準化身体活動質問票を通じて評価した身体活動量と血中ホルモン値との間に有意な相関は見られなかった．

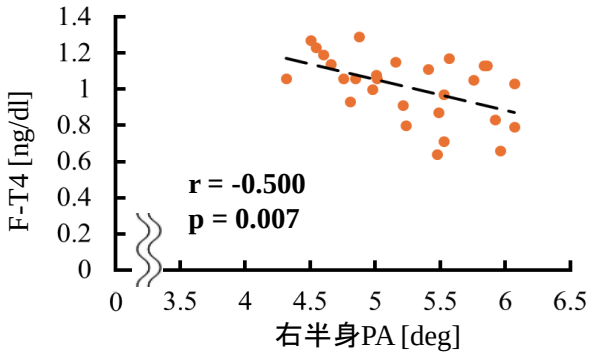


図 1　右半身の位相角（PA）とフリーサイロキシン（F-T4）との関係（n = 28）

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

相関関係を検討する際，効果量を中程度（r = 0.30）と見なして，サンプルサイズを計算すると，n = 82 が求められる．今後，この人数まではデータを蓄積したい．また，2024 年度は，主に女性の不妊症患者を対象として，データ収集に努めたが，男性の不妊症患者に関しても，同様のアプローチで研究を進めることを検討している．また，今回データ収集をした患者の内，後に妊娠を経験した患者とそうでない患者とに分けることで，データをより詳細に検討したい．身体活動量に関しては，実際に 2 週間近く，身体活動量計を着用した患者も半数近くいる．これらのデータ分析を今後進めつつ，実際の着用者を今後さらに増やすことを計画している．

最終的に得られた結果に関しては，国内学会大会あるいは国際会議での発表を予定している．並行して，国際学術誌への投稿に向け，論文執筆を進める．

【参考文献】

1) Wise LA, Rothman KJ, Mikkelsen EM, Sørensen HT, Riis A, Hatch EE. An internet-based prospective study of body size and time-to-pregnancy. Hum Reprod. 2010 Jan;25(1):253-264. doi: 10.1093/humrep/dep360.

2) Broughton DE, Moley KH. Obesity and female infertility: potential mediators of obesity's impact. Fertil Steril. 2017 Apr;107(4):840-847. doi: 10.1016/j.fertnstert.2017.01.017.

3) Rittenberg V, Seshadri S, Sunkara SK, Sobaleva S, Oteng-Ntim E, El-Toukhy T. Effect of body mass index on IVF treatment outcome: an updated systematic review and meta-analysis. Reprod Biomed Online. 2011 Oct;23(4):421-439. doi: 10.1016/j.rbmo.2011.06.018.

4) Clinical Guidelines on the Identification, Evaluation, and Treatment of Overweight and

Obesity in Adults--The Evidence Report. National Institutes of Health. Obes Res. 1998 Sep;6 Suppl 2:51S-209S. Erratum in: Obes Res 1998 Nov;6(6):464.

5) Romero-Corral A, Somers VK, Sierra-Johnson J, Thomas RJ, Collazo-Clavell ML, Korinek J, Allison TG, Batsis JA, Sert-Kuniyoshi FH, Lopez-Jimenez F. Accuracy of body mass index in diagnosing obesity in the adult general population. Int J Obes (Lond). 2008 Jun;32(6):959-966. doi: 10.1038/ijo.2008.11.

6) Fedorcsák P, Dale PO, Storeng R, Ertzeid G, Bjercke S, Oldereid N, Omland AK, Abyholm T, Tanbo T. Impact of overweight and underweight on assisted reproduction treatment. Hum Reprod. 2004 Nov;19(11):2523-2528. doi: 10.1093/humrep/deh485.

7) McKinnon CJ, Hatch EE, Rothman KJ, Mikkelsen EM, Wesselink AK, Hahn KA, Wise LA. Body mass index, physical activity and fecundability in a North American preconception cohort study. Fertil Steril. 2016 Aug;106(2):451-459. doi: 10.1016/j.fertnstert.2016.04.011.

8) Wise LA, Rothman KJ, Mikkelsen EM, Sørensen HT, Riis AH, Hatch EE. A prospective cohort study of physical activity and time to pregnancy. Fertil Steril. 2012 May;97(5):1136-1142.e1-4. doi: 10.1016/j.fertnstert.2012.02.025.

9) Goodarzi MO, Dumesic DA, Chazenbalk G, Azziz R. Polycystic ovary syndrome: etiology, pathogenesis and diagnosis. Nat Rev Endocrinol. 2011 Apr;7(4):219-231. doi: 10.1038/nrendo.2010.217.

10) Frisch RE, Gotz-Welbergen AV, McArthur JW, Albright T, Witschi J, Bullen B, Birnholz J, Reed RB, Hermann H. Delayed menarche and amenorrhea of college athletes in relation to age of onset of training. JAMA. 1981 Oct 2;246(14):1559-1563.

11) Bahadur A, Mundhra R, Kashibhatla J, Rajput R, Verma N, Kumawat M. Prevalence of metabolic syndrome among women with different PCOS phenotypes - a prospective study. Gynecol Endocrinol. 2021 Jan;37(1):21-25. doi: 10.1080/09513590.2020.1775193.

12) Kraemer WJ, Ratamess NA, Hymer WC, Nindl BC, Fragala MS. Growth Hormone(s), Testosterone, Insulin-Like Growth Factors, and Cortisol: Roles and Integration for Cellular Development and Growth With Exercise. Front Endocrinol (Lausanne). 2020 Feb 25;11:33. doi: 10.3389/fendo.2020.00033.

13) Newman AB, Kupelian V, Visser M, Simonsick EM, Goodpaster BH, Kritchevsky SB, Tylavsky FA, Rubin SM, Harris TB. Strength, but not muscle mass, is associated with mortality in the health, aging and body composition study cohort. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2006 Jan;61(1):72-77. doi: 10.1093/gerona/61.1.72.

14) Visser M, Deeg DJ, Lips P, Harris TB, Bouter LM. Skeletal muscle mass and muscle strength in relation to lower-extremity performance in older men and women. J Am Geriatr Soc. 2000 Apr;48(4):381-386. doi: 10.1111/j.1532-5415.2000.tb04694.x.

15) Lexell J, Taylor CC, Sjöström M. What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. J Neurol Sci. 1988 Apr;84(2-3):275-294. doi: 10.1016/0022-510x(88)90132-3.

単結晶 PZT-MEMS アクチュエータ

工学部（機械機能工学科）　　吉田　慎哉

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

圧電アクチュエータは変位精度，応答速度，発生力に優れており，現在産業分野の機械装置から，携帯電話などの小型電子機器まで広く応用されている．MicroElectro Mechanical Systems (MEMS)の分野においても，圧電薄膜を搭載したアクチュエータは，低電圧かつ比較的大きな駆動力を発生でき，インクジェットプリンターヘッド，走査型ミラーデバイス，デフォーマブルレンズ，マイクロスピーカー，半導体チップ冷却器などに用いられている．

現在，圧電 MEMS アクチュエータには，大きな圧電性能を有するモルフォトロピック相境界組成のチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)多結晶薄膜が主に用いられている．しかし，駆動電圧に対する変位の非線形性があるという欠点がある．特に大きな駆動電圧を印可したとき，これが顕著となる．

一方，正方晶 PZT 単結晶薄膜は，良好な線形性を示すことが報告されている．したがって，これを組み込めば線形性のよい圧電 MEMS アクチュエータを実現できる．しかし，単結晶薄膜の圧電性能は，多結晶の 60～70%と小さい．ゆえに，単位駆動電圧に対するアクチュエータの絶対的な変位量は小さくなってしまう．これは，外因性要因の電場誘起歪みが，正方晶の PZT 単結晶薄膜では小さいことに起因する．

そこで本研究では，大変位・良線形性を持つ圧電 MEMS アクチュエータの実現を目指し，

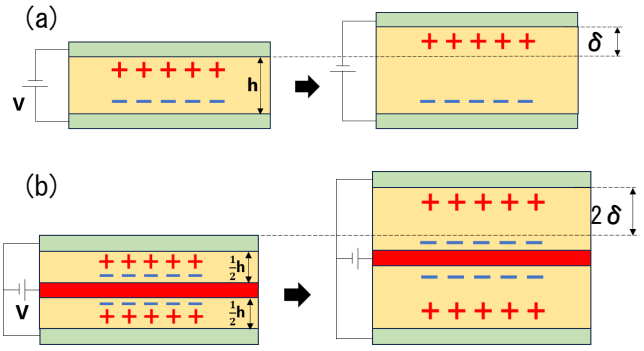


図 1　積層型圧電アクチュエータの原理の概略図 (a)圧電体単層に駆動電圧 V を印加した際の変位 δ．(b) 圧電体二層構造に電圧を印加した場合．

中間電極層を介した PZT 単結晶薄膜の積層アクチュエータを提案する．その原理を以下に記す．圧電アクチュエータは，電圧を印加することで印加した電圧に応じて圧電体が歪む逆圧電効果を用いているが，そのひずみ量 S は，圧電定数を d[m/V]，電界強度[V/m]を E とすると次の式(1)で表される．

$$S = d \times E \qquad (1)$$

式(1)から，駆動電圧が一定のとき，圧電薄膜の厚さは全体の変位量に影響を与えないことがわかる．図 1(a)のように，厚さ h の圧電薄膜に対して駆動電圧 V を印加した場合，変位 δ は，次式となる．

$$\delta = d \times V \qquad (2)$$

両辺を h で除すると

$$\delta / h = d \times V/h \qquad (3)$$

となり，(1)と一致する．

ここで図 1(b)のように，中間電極層を介して圧電体を積層化し，中間層を基準に上下方

向に分極させるとする．ただし，全体の厚さは図 1(a)と等しくする．ここで駆動電圧 V を印加すると，原理的には，図 1(a)の変位量の二倍にできる．この多層薄膜構造を Si などの弾性板の上に形成すれば，圧電 MEMS アクチュエータとなる．このアイデアは，多結晶 PZT を用いた研究において実証されている[1,2]．

我々は，この積層される圧電体を PZT 単結晶にすることで，大変位を達成できるだけでなく，線形駆動性もよい革新的な圧電 MEMS アクチュエータが実現できると考えた．研究責任者の知る限り，単結晶 PZT を積層した例はない．本研究ではその実現に挑戦する．

２．研究計画

(1) 単結晶 PZT/中間電極/単結晶 PZT 積層構造の作製と分析

まずは，単結晶 PZT と中間電極の積層プロセスを開発する．その手順は以下のとおりである．

①$SrRuO_3$ (SRO)(100)，Pt(100)，ZrO_2 (100)のバッファ層が堆積された Si 基板を用意する。I-PEX 社の Krystal wafer®を用いる予定である。このバッファ層は、単結晶 PZT の成膜に適している。

②スパッタ法を用いて PZT をエピタキシャル成長させる。組成は、c 軸配向させた際に線形駆動性に優れる正方晶組成とする。

③中間電極層をエピタキシャル成長させる。材料には $LaNiO_3$(LNO)，成膜法には化学溶液法をそれぞれ用いる。LNO は導電性酸化物であり、PZT と同じペロブスカイト型結晶構造と同程度の格子定数を持つ。ゆえに、エピタキシャル成長させられるはずである。

④再び、スパッタ法を用いて PZT をエピタキシャル成長させる。

全ての層が単結晶構造になっているかは、X 線回折や透過型電子顕微鏡などの分析的手法を用いて確かめる。

さらに、上部電極も形成して、一層目と二層目の単結晶 PZT の電気的特性や強誘電体特性など差異を評価する。

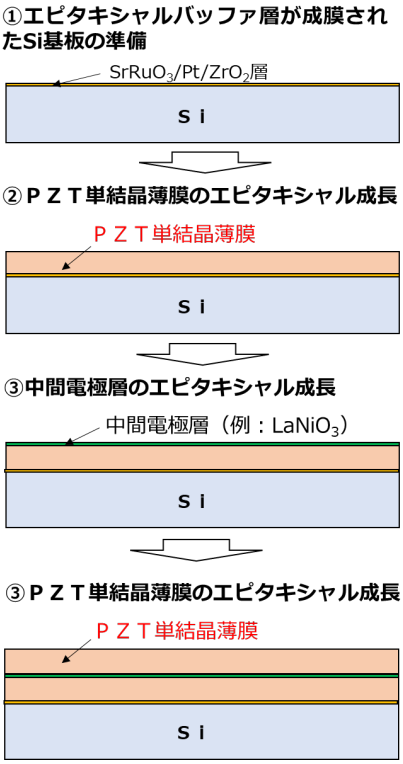


図 2. 単結晶 PZT/中間電極/単結晶 PZT 積層構造の作製

(2) マルチモルフアクチュエータの試作と性能評価

成膜プロセスの開発が首尾よく進んだ場合は，カンチレバー型アクチュエータを試作し、その駆動特性を評価する。そして、本積層構造によって、線形駆動性と大圧電性を両立する圧電 MEMS アクチュエータを実現できることを実証する。

３．計画の進行状況

３．１　圧電薄膜の成膜

Krystal wafer®上に，高周波マグネトロンスパッタ法を用いて PZT を 200nm 堆積させた．スパッターゲットの組成は，$0.06Pb(Mn_{1/3},Nb_{2/3})O_3$-$0.94Pb(Zr_{0.5},Ti_{0.5})O_3$ とした．Ar ガス流量 5sccm，O_2 ガス流量 0.09sccm とし，圧力 0.4Pa でプリスパッタを 30 分間行った．次にシャッターを開けて本スパッタを実施し，200nm の PZT 薄膜を堆積させた．成膜

温度は 600℃とした．成膜が完了した後，チャンバを開き基板を急速冷却した．

３．２　中間電極薄膜の成膜

次に，一層目の PZT 薄膜上に LNO を成膜した．まず，前駆体溶液を基板に 80μL 滴下し，4000rpm で 20 秒間スピンコートを行った．次に高温ホットプレートを用いて 400℃で 3 分間仮焼成を行った．この際，あらかじめ加熱したホットプレートに基板を置くことで，急速に熱を与え薄膜の亀裂や剥離を抑えた．仮焼成が終了したら，一度基板を冷やし，最後に赤外線ランプ加熱装置を用いて，酸素雰囲気化にて 700℃で 1 分間本焼成を行った．その際の昇温速度は 10℃/s とした．

３．３　圧電薄膜の積層

最後に，LNO 薄膜上に再び PZT を堆積した．成膜条件は，３．１と同様とした．

４．　実験結果

４.１　X 線回折による結晶性の解析

試作した PZT/LNO/PZT 積層膜の各層における X 線回折(XRD)パターンを図 3 に示す．まず，一層目 PZT においては，PZT（001）に相当するピークが検出された．圧電性能をもたないパイロクロア相の成分や，PZT(001)以外の結晶面に相当するピークは検出されなかった．

LNO 中間層を堆積した後の XRD パターンにおいては，LNO 由来のピークは確認されなかった．これは，LNO 薄膜が PZT 薄膜よりも圧倒的に薄いゆえに，PZT のピークに隠れてしまっているためだと考えられる．

二層目の PZT を LNO 上に堆積させた試料の分析結果においては，PZT(110)に相当するピークがわずかに検出された．これは，二層目の PZT の結晶性は，一層目よりも若干低いことを示唆している．しかし，そのピークは微小であるため，PZT 両層は(001)に優先配向し

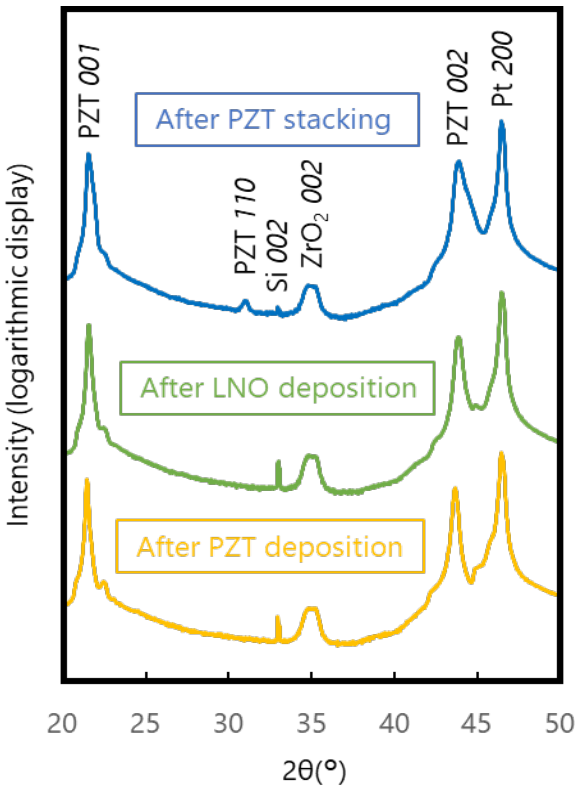


図 3．積層工程毎に取得した XRD 回折パターン

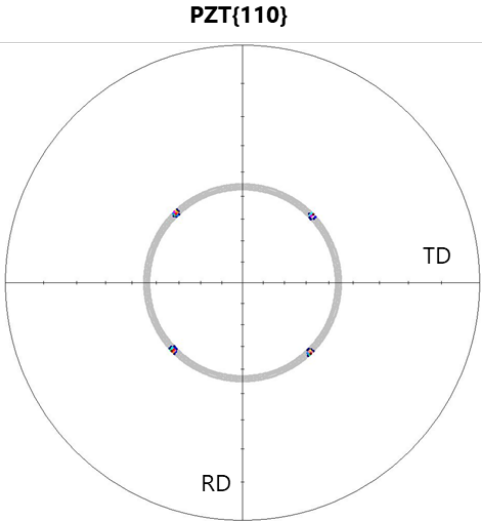


図 4．PZT/LNO/PZT 積層膜の極点図測定

ているといえる．このことから，LNO 中間層も(001)に優先配向していると考えられる．

続いて，試作した PZT/LNO/PZT 積層膜における面内方向の配向性を評価するために極点測定を行った(図 4)．測定回折面は PZT{110}，試料のあおり角度 α は 45~47° とした．測定結果より，４つの回折スポットが検出された．これは，PZT 上下層はともに面内方向に配向

している，つまり単結晶性を有することを示している．

４．２　透過型電子顕微鏡(TEM)による評価

図５に，試料の断面 TEM 像，および各層に対する電子線回折像を示す．PZT 上下層はともに 200nm の膜が成膜されており，XRD では確認できなかった LNO 中間層も，厚さ 20nm の極薄膜が成膜されていることが確認された．PZT 両層には，結晶粒界は観察されなかった．また，電子回折像には，PZT 下層，LNO 中間層，PZT 上層すべてにおいて，格子状の明瞭なスポットが得られた．これは，すべての層が単結晶化していることを示唆している．

以上の分析結果より，提案した成膜法を用いて，単結晶 PZT/LNO/単結晶 PZT 積層構造を形成できることが実証された．また，PZT 両層は，圧電定数の高い(001)に優先配向していることが実証された．この成果は，単結晶 PZT と単結晶電極からなる圧電マルチモルフ MEMS アクチュエータを実現するための大きな一歩となる．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

中間電極層として LNO 薄膜を介すことで，PZT 薄膜を単結晶かつ(001)配向した PZT/LNO/PZT 積層構造を作製することができた．今後は，この積層法を用いてアクチュエータを作製する．そして，「単結晶 PZT 積層アクチュエータは高性能かつ線形駆動性がよい」ことを実証する．

今回は前駆的実験ということもあり，PZT 薄膜の膜厚はやや薄くした．しかし，アクチュエータとして機能させるには，各 PZT 層の膜厚は少なくとも１μｍを確保したい．この場合は残留応力が大きくなり，亀裂が発生しやすくなることが予想される．ゆえに，低応力の PZT 堆積を実現できる成膜条件の探索も行っていく予定である．

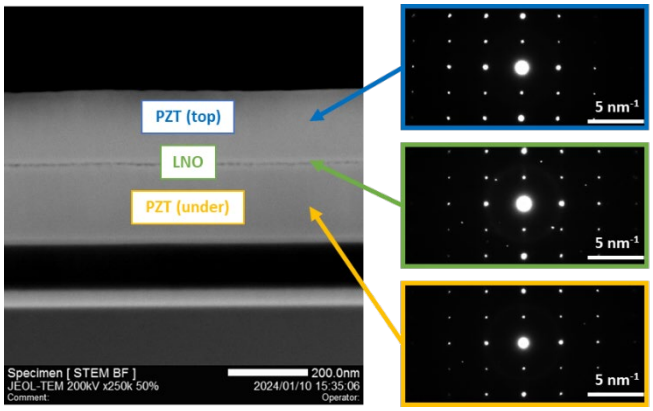


図 5．試料の断面 TEM 像と各層の電子線回折像

本成果は以下の国際会議にて口頭発表した．

2024 Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium, 2024 年 9 月 22 日-9 月 26 日, “Fabrication of PZT/LaNiO3/PZT Epitaxial Multilayer Structure for Application to Piezoelectric MEMS Actuators” Sokichi Kato, Akihiko Teshigahara, Shinya Yoshida

今後，さらに研究データを蓄積した後，学術論文を投稿する．

参考文献

[1] 森山雅昭，川合祐輔，田中秀治，江刺正喜．”RF-MEMS スイッチのための低電圧駆動薄膜 PZT 積層アクチュエータ.”，電気学会論文誌 E 132(9) 282-287 (2012)

[2] R. Sano, J-I. Inoue, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka, “Fabrication of multilayer Pb(Zr,Ti)O_3 thin film by sputtering deposition for MEMS actuator applications”, Japanese Journal of Applied Physics, 54(10S), 10ND03-10ND03 (2015)

異種元素ドープカーボン系複合触媒材料の合成

工学部（材料工学科）　　石崎　貴裕

共同研究者
Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Gasidit Panomsuwan

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

二酸化炭素排出量の削減を実現でき，化石燃料資源を利用しないエネルギー源として燃料電池や蓄電池が注目を集めており，これらのエネルギー源を高機能化するための研究開発が行われている。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ー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，ヘテロ原子をドープ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，ヘテロ原子のドープ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 をドープすることで表面の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 をドープすることで，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プ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プ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，一晩撹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 μs，周波数を 50 もしくは 200 kHz，電極には遷移金属である Fe を選択し，カーボン系材料を作製した（試料(d)）。さらに，試料(d)を Ar 雰囲気下の炉にて，950℃，2h で熱処理したサンプルも作製した（試料(e)）。また，アンモニア系の溶液を用いて同様の処理でカーボン材料の合成も試みた（試料(f)とする）。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℃で 12 時間乾燥させ，乳鉢で粉砕して回収した。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，作製した試料の正極触媒としての性能の評価するために充放電試験を行った。

３．計画の進行状況

本研究では，SP により，Fe ナノ粒子，N，P をドープしたカーボン材料を合成し，合成したカーボン材料の特性を評価するとともに，これらを電極活物質に用いた Li 空気電池の性能を評価した。

合成したカーボン表面はアモルファス状の不規則な形をしていることが確認された。熱処理したカーボン材料には，様々な場所に小さな空隙が見られた。これは，焼成により N 及び P がガスとして脱離した事で，メソ孔やマクロ孔が形成されたことが原因であると推察される。しかし，全体的に見ると，凹凸の少ない滑らかな構造のカーボンが多く見られた。また，様々な場所で金属粒子の存在を確認できたことから，Fe が多く含有されていることが確認された。粒径は様々であるが，500 nm 程度の粒子が確認できることから，本合成で

はある程度粒径を制御できることがわかった。アンモニア水を用いて合成したカーボン材料において，非常に多くの Fe 粒子が確認できた。この要因は SP 処理用溶媒をエタノール，水，アンモニアにしたことにより，カーボンの合成が制御され，Fe 粒子の存在量が増加したと推察される。さらに，このカーボンには、非常に多くの空隙が発見された。この空隙は SP 処理の際に Fe 電極からスパッタされた Fe 粒子がカーボン表面と衝突し生成した空隙であると考える。

合成したカーボン材料の組成を XPS を用いて評価した。XPS の測定結果より得られたカーボン材料の各元素スペクトル割合を表 1 に示す。C 1s の波形分離の結果から，全ての試料において sp^2-C の割合が最も大きく，中でも焼成したカーボンの sp^2-C が最も大きかった。これは，焼成したことにより最表面の結晶性が向上したことに由来すると推察される。N 1s は NMP 由来の Pyrrolic-N が大きくなった。N 及び P の含有量はその他の試料に比べ少ない割合となった。これは，焼成により N 及び P が脱離してしまったことが原因である。P $2p_{3/2}$ は PA の P-O 由来のピークが大部分を占めていた。P-C 結合の割合が少ないこと，C-N 及び C-P 結合を比較して C-N 結合の方が高い割合を占めていることは，P は N よりもカーボンの構造に導入することが難しい事を示している。P は C よりも原子半径が大きいため，C と原子半径が近い N よりも導入されにくくなるためと考えられる。次に，合成したカーボン材料のリニアスイープボルタンメトリー(LSV)による触媒性能評価を行った。得られた LSV カーブを図 1 に示す。全ての試料で -0.75～-0.8V 付近で酸素還元反応(ORR)による電流密度の増加が確認されたが，その開始電位に大きな違いは認められなかった。また，限界電流密度の値に注目すると，アンモニア水で処理したものの値が最も大きくなることがわかった。これは，アンモニア水で処理したことにより，限界電流密度の増加に寄与する pyridinic-N 結合種の存在割合が増加したためと推察される。

	C	N	P	O	Si	Fe
(d)	40.2%	1.2%	12.8%	37.5%	8.3%	0.1%
(e)	92.2%	0.9%	0.9%	5.4%	0.5%	0.1%
(f)	72.5%	2.7%	3.5%	18.4%	2.7%	0.2%

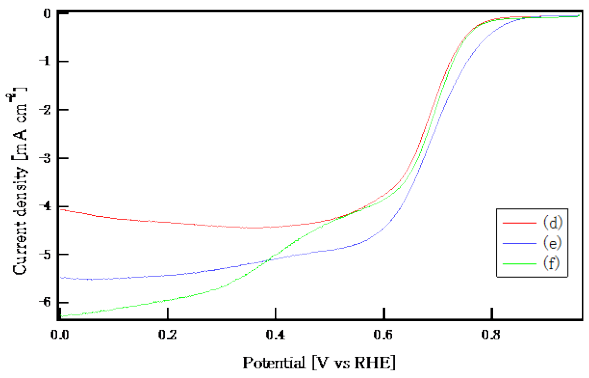


図 1 : 合成したカーボン材料の LSV カーブ

最後に、合成したカーボン材料を正極活物質に用いた Li 空気電池を構築し，その充放電性能を調査した。図 2 に合成したカーボン材料の充放電曲線を示す。

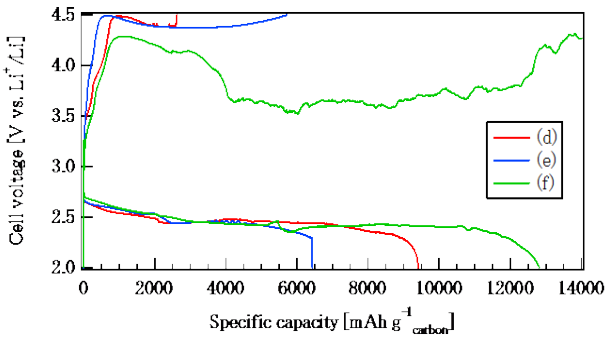


図 2 : 合成したカーボン材料の充放電曲線

(d), (e), (f) の放電容量はそれぞれ約 9400, 6400, 13000 mAh / g となり，(f)が最も大きい放電容量を示した。(d), (e), (f) の充電容量は，それぞれ約 3000、6500、14000 mAh / g となり，(e)の放電容量は(d)より低い値を示したが，これは N 及び P が焼成した際に脱ガスし，酸素吸着に有効な活性サイトが減少したためと推察される。(f) が最も高い放電容量を示したのは，N 及び P がドープされ，さらに，Fe 粒子が多く含有されていたためと考えられる。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の計画：

今後は合成したカーボン材料中に含まれる異種元素濃度を高めるために有効な原料を探索するとともに,異種元素濃度とORR性能の関係性を調査する。さらに，合成したカーボン材料中の異種元素とカーボンの結合状態の詳細を解明するとともに，ORR性能の向上に有効な元素種およびその濃度，結合種との関連性を調査していく。また、ORR性能と電池性能の相関性についても調査を行って行く予定である。

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。

<u>投稿論文</u>

(1) S.W. Chae, A. Shio, T. Kishida, K. Furutono, Y. Kojima, G. Panomsuwan, T. Ishizaki, Synthesis of High-Entropy Perovskite Hydroxides as Bifunctional Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction and Oxygen Reduction Reaction, Materials, 17, 2963 (2024).

<u>学会発表</u>

(1) Synergistic effects of soluble and solid catalysts on the performance of lithium-air batteries，A. Shio, Y. Kojima, T. Imamura, Y. Fujiwara, T. Ishizaki, International Conference on Sustainable Energy and Environmental Technology for Circular Economy (SEECE-2024), Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2024年9月

(2) リチウム酸素電池用正極材としての複合金属酸化物とカーボンからなる複合材料の合成と評価，塩彰仁，今村雄登，藤原由奈，石﨑貴裕，表面技術協会第151回講演大会,2025年3月

(3) ソリューションプラズマによるFeナノ粒子含有N,Pドープカーボンの合成とリチウム空気電池への応用，今村雄登，塩彰仁，藤原由奈，石﨑貴裕，表面技術協会第151回講演大会,2025年3月

(4) ソリューションプラズマを利用したハイエントロピー酸化物とカーボンからなる複合材料の作製と評価，岩藤俊輝，今村雄登，上杉明勢，塩彰仁，石﨑貴裕，表面技術協会第151回講演大会,2025年3月

(5) ソリューションプラズマ法を用いたCo-N結合を有するカーボン系複合材料の作製と評価，山本弘樹，上杉明勢、冨田航平、塩彰仁、今村雄登、石﨑貴裕，表面技術協会第151回講演大会,2025年3月

参考文献

1) D. U. Lee, H. W. Park, D. Higgins, L. Nazar, and Z. Chen, J. Electrochem. Soc., 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).

月レゴリスの熱物性と内部構造評価

工学部　　遠藤　理恵

共同研究者
茨城大学　大学院理工学研究科（工学野）物質科学工学領域　　西　剛史

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

現在、宇宙探査はかつてない勢いで進展しており、特に米国 NASA が主導するアルテミス計画では、人類を再び月面に送り込み、月面における持続的な人類活動拠点の構築が目指されている。このような長期滞在型ミッションを安全かつ確実に遂行するためには、月面環境の詳細な理解が不可欠であり、とりわけ月表層を覆うレゴリスの物性に関する高精度なデータが求められている。

レゴリスは、隕石衝突や宇宙線によって粉砕された粒子から成る堆積物であり、その物理的性質は地球上の土壌や岩石とは大きく異なる[1]。これまで、アポロ計画で持ち帰られた月試料を用いて多くの物性測定が行われ、特に熱物性（熱伝導率、熱拡散率、熱慣性）に関する知見が蓄積されてきた[2-6]。Cheng らはアポロ 17 号のレゴリス試料 70161 を用い、ミリメートルスケール粒子の熱拡散率をロックインサーモグラフィーにより測定し、従来より詳細な熱特性データを提供している[6]。彼らの測定値は、粒子内に存在する微細な亀裂や空隙、すなわち粒界の影響を含んでおり、レゴリス層全体の熱応答特性を理解するうえで貴重な基礎データとなっている。しかし、レゴリス粒子の熱物性は構成相の種類と粒界の影響が複雑に絡み合って決定されており、粒界の影響を含む測定だけでは材料固有の物性値を正確に把握することは困難である。このため、粒界の影響を排除した単一相内の熱物性の把握が強く求められている。特に熱慣性は、惑星表面の熱的応答を決定する主要パラメータであり、月面の温度変動解析や探査機・構造物の熱設計において極めて重要である。

遠藤らはこれまで、熱物性顕微鏡という 10 μm スケールの微小領域における熱伝導率測定が可能な手法を開発・適用し、模擬月砂（シミュラント）粒子の切断面の熱浸透率（熱慣性に相当）および熱伝導率の分布を測定してきた[7]。図 1 にその測定例を示す。さらに、測定した粒子を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、熱物性分布と鉱物相の対応関係を明らかにするとともに、粒界が熱物性に及ぼす影響を定量的に評価した。これらの成果を基に、NASA から提供されたアポロ 15 号および 17 号の月レゴリス粒子について、粒界の影響

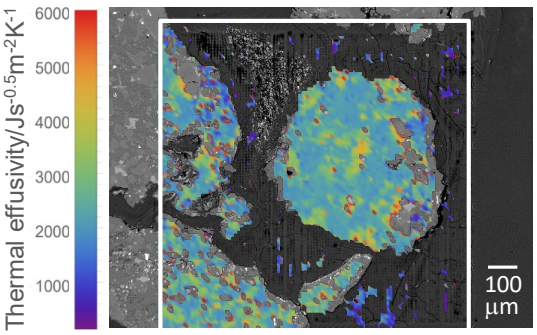


図 1　熱物性顕微鏡による測定例

を排除した単一相領域の熱慣性を世界で初めて測定することを試みている。

本研究では、これらの成果をさらに発展させ、アポロ月試料のレゴリス粒子を対象に、単一相の熱物性データと粒界を含む実粒子の熱物性データの両方を比較・体系化することを目的とする。このアプローチにより、レゴリス粒子内のミクロな構造因子（鉱物相、粒界、亀裂、空隙）が熱物性に及ぼす影響を定量化し、将来の月面活動における熱設計基盤データの整備を目指す。

２．研究計画

【試料】

アポロ 15 号および 17 号のリターンサンプルを用いる。粒径 1 mm 程度の粒子をそれぞれ 5 粒選別する。

【試料の内部構造分析】

マイクロ X 線コンピュータトモグラフィ(CT)および SPring-8 を用いて試料の内部構造を分析する。マイクロ X 線 CT のボクセルサイズは約 3 μm, SPring-8 のボクセルサイズは約 1 μm である。

【熱物性顕微鏡による熱浸透率分布測定】

熱物性顕微鏡では、平面方向の測定が可能である。このため、レゴリス粒子 1 粒を樹脂に埋め込み、鏡面仕上げまで研磨する。樹脂埋めの際には、標準試料として溶融石英を同時に埋め込む。研磨後、試料表面に Mo を 100 nm コーティングし、熱物性顕微鏡による測定に供する。測定は 5 μm 間隔で行い、熱浸透率の分布を取得する。図 2 に熱物性顕微鏡の測定概略図を示す。試料表面を強度を偏重した加熱レーザで加熱し、その温度応答を検出レーザの強度変化として検出する。加熱レーザと検出レーザの位相差から、試料の熱物性値として熱浸透率（熱慣性）を算出する。

【試料分析】

熱物性顕微鏡で測定した面について、走査型電子顕微鏡（SEM）およびエネルギー分散型 X 線分光法（EDS）により組織を観察し、組成

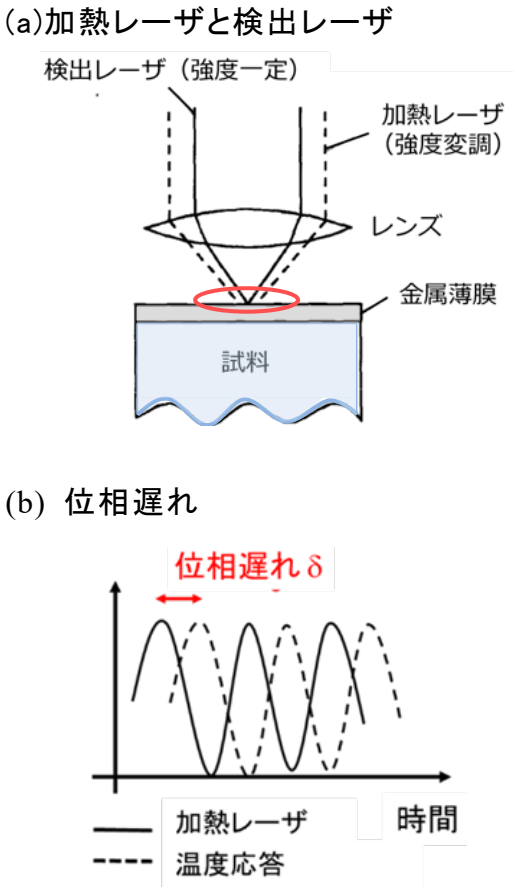


図 2 熱物性顕微鏡の測定概略図: (a)加熱レーザとと検出レーザおよび(b)位相遅れ

を分析する。また、微小領域 X 線回折装置を用いて、測定面に存在する相を分析する。

【試料の内部構造と熱物性の対応】

従来は、図 1 に示すように、相と熱物性の対応を定性的に比較するにとどまっていた。熱物性顕微鏡で得られた測定結果は、測定面および熱拡散距離内の内部構造の影響を受ける。本研究では、詳細な分析結果を総合し、測定された熱浸透率を（i）相に基づく値、（ii）粒界の影響を受けた値に分類する。これにより、レゴリス粒子 1 粒の熱伝導率を決定し、その値の起源を明確にする。

【熱物性顕微鏡の測定値に対する検討】

熱物性顕微鏡による測定では、図 1 のように面内の熱浸透率の分布を得る。粒子内には複数の鉱物相が含まれ、そのサイズは熱物性顕

微鏡の測定面積よりも小さい場合がある。このような場合の測定値に対する粒界の影響についても検討する必要がある。本研究では、有限要素法（FEM）を用いて熱物性顕微鏡の測定値に対する粒界の影響を解析した。計算には COMSOL Multiphysics 6.2 を使用し、図 3 にそのシミュレーションモデルを示す。

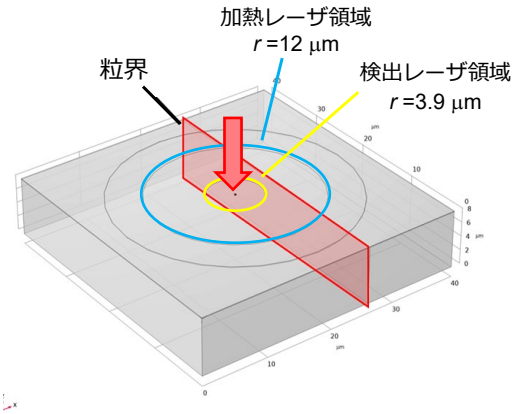


図 3 熱物性顕微鏡のシミュレーションモデル

３．計画の進行状況

【試料分析】

アポロ 17 号のリターンサンプルから 1 粒の試料を選定した。

まず、試料の内部構造をマイクロ X 線 CT により分析した。その結果、粒子内には 10 μm 程度の微細相が多数存在し、空隙も含まれていることが確認された。これまでに分析を行ってきた月土壌シミュラント FJS-1 および JSC-1A と比較したところ、本試料は特に空隙を含む点において JSC-1A に類似していることがわかった[7,8]。

次に、試料を樹脂に埋め込み、鏡面仕上げまで研磨した。研磨面を光学顕微鏡で観察したところ、他の相より明るく観察される相が認められ、これが金属鉄であると考えられた。さらに、同研磨面に対して微小領域 X 線回折（μ-XRD）を実施した結果、金属鉄、斜長石（plagioclase）、かんらん石（olivine）などの鉱物相が含まれていることが明らかになった。

【熱物性顕微鏡の測定に対する粒界の影響】

熱物性顕微鏡による測定値への粒界の影響を検討するため、有限要素法（FEM）を用いたシミュレーションを実施した。試料は石英ガラスをモデルとし、粒界の界面熱抵抗を 1×10^{-8} $K\cdot m^2\cdot W^{-1}$と設定した。測定面に垂直に粒界を導入し、熱物性顕微鏡の検出領域（3.9 μm）内に粒界が存在する場合の影響を評価した。その結果、粒界が測定値に与える影響は無視できることが示された。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

【今後の計画】

今後、熱物性顕微鏡を用いた測定を継続して実施する。測定後の試料については走査型電子顕微鏡（SEM）による組成分析を行い、XRD（X 線回折）結果と併せて解析を進める。得られた鉱物相と熱物性値との対応付けは、OpenCV を用いて画像解析を行う。同様の測定・分析を、他のアポロ 17 号リターンサンプルおよびアポロ 15 号リターンサンプルについても実施する予定である。

論文投稿については、以下の 3 報を計画している。

【学会発表状況】

- 渡辺 俊介, 工藤 直人, 中山 由菜, 丹下 学, 西 剛史, 太田 弘道, 遠藤 理恵: “模擬月砂(FJS-1)の熱浸透率分布と相分布の対応性評価”, 第 45 回日本熱物性シンポジウム, 日本, 2024 年 10 月 29 日.

- Takei, K., Watanabe, S., Kudo, N., Nakayama, Y., Chiu, W.-T., Tange, M., Nishi, T., Ohta, H., Hosoda, H., Tachikawa, S., and Endo, R., *Characterization of thermal properties of mineral phases in lunar regolith simulant via image analysis*, The 9th International Symposium on Biomedical Engineering (ISBE2024), Singapore, December 3–4, 2024.

【論文発表状況】

- Kudo, N., Watanabe, S., Nishi, T., Ohta, H., Tachikawa, S., and Endo, R., *Thermal conductivity of lunar regolith simulant using a thermal microscope*, High Temperature Materials and Processes 44, (2025), doi:10.1515/htmp-2024-0068.
- 中山由菜, 工藤直人, 黒岩直輝, 遠藤理恵, 太田弘道, 西剛史: “温度変調型示差走査熱量計を用いた模擬月砂の比熱測定”, 実験力学 25 (2025), 14–17.

謝辞

本研究の遂行にあたり、芝浦工業大学 2024 年度 プロジェクト研究助成（大学間連携）の支援を受けました。ここに心より感謝申し上げます。また、マイクロ X 線回折装置および微小領域 X 線回折装置については、東京科学大学の設備を使用いたしました。測定に際しご協力いただいた総合研究院の細田秀樹教授、物質理工学院の邱琬婷准教授、総合研究院の野平直希助教に深く感謝申し上げます。

参考文献

[1] Heiken, G. H., Vaniman, D. T., and French, B. M., *Lunar Source Book*, Cambridge University Press, Cambridge (1991).

[2] Horai, K., and Fujii, N., *Thermophysical properties of lunar material returned by Apollo missions*, Moon 4(3–4), 447–475 (1972).

[3] Horai, K., and Winkler, J. L., *Thermal diffusivity of four Apollo 17 rock samples*, Proc. Lunar Sci. Conf. 7, 3183–3204 (1976).

[4] Cremers, C. J., *Density, pressure, and temperature effects on heat transfer in Apollo 11 fines*, AIAA J. 9(11), 2180–2183 (1971).

[5] Cremers, C. J., *Thermophysical properties of Apollo 12 fines*, Icarus 18(2), 294–303 (1973).

[6] Cheng, F., Alasli, A., Fujita, R., Ueno, A., Nagano, H., Ishizaki, T., Sakatani, N., Tanaka, S., Endo, R., Arakawa, S., Nishi, T., Kondo, A., Matsumura, S., Kobayashi, T., and Tsuchiyama, A., *Thermal diffusivity, thermal conductivity and thermal inertia of individual lunar regolith grains: Case study of sample 70161 from Apollo 17*, Int. J. Thermophys., (2025) (Accepted).

[7] Endo, R., Suganuma, Y., Endo, K., Nishi, T., Ohta, H., and Tachikawa, S., *Determination of thermal effusivity of lunar regolith simulant particle using thermal microscopy*, Int. J. Thermophys. 43, 103 (2022).

[8] Kudo, N., Watanabe, S., Nishi, T., Ohta, H., Tachikawa, S., and Endo, R., *Thermal conductivity of lunar regolith simulant using a thermal microscope*, High Temperature Materials and Processes 44, (2025), doi:10.1515/htmp-2024-0068.

N_2O 排出抑制と省エネに寄与できる新型硝化菌（コマモックス菌）を活性汚泥から集積する手法の検討

工学部　物質化学課程・化学生命工学コース　李沁潼

共同研究者
東洋大学生命科学部生命科学科　　清水和哉

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

アンモニア等窒素成分を生活排水から除去するために、最も経済的で有効なのは硝化処理と呼ばれる生物処理である。しかし、硝化処理の副産物として強力な温室効果ガスである N_2O が放出されており、日本の年間下水を処理する際はおおよそ 1.10×10^6kg（2.9×10^8kg の CO_2 に相当）の排出が見積もられている。さらに、処理水質を維持するためのエアレーション（曝気）は、処理施設全体の約 1/3 と大量な電力を消費している。そのため、水処理においての省エネと脱炭素は重要な課題とされている。近年、新型硝化菌（コマモックス菌）が発見された（Kits *et al.*, 2017)。コマモックス菌は低い溶存酸素酸素濃度でも硝化を駆動することができ、N_2O の放出も従来の硝化菌と比べて低減傾向にあるため、水処理での応用性が高い。本研究は、水処理においての N_2O 排出量削減と省エネ化を目指し、新型硝化菌であるコマモックス菌を集積培養する方法を探索することを目的とした。

２．研究計画

本研究室ではこれまでコマモックス菌を 0.1%未満から、5%程度まで集積させることに成功している。コマモックス菌を含む担体を用いた場合、既往の硝化菌担体より N_2O の転換率が大幅に低減したことが確認された。しかし、この集積手法は、現在の主流である標準活性汚泥法の活性汚泥から再現できるかについてはまだ検証されていない。

実工場での実用化に向け、現地施設の既存汚泥から集積が可能か、また、集積が可能な場合は活性が得られるまで担体内の微生物叢は運転条件によってどう変化しているか、を本研究で解明していく。

具体的には、稼働中の下水処理施設 A の標準活性汚泥法の返送汚泥を用い、2 種類の保持方法を用いて、新たなリアクターを立ち上げて検証実験を行う。

・担体付着法：新品のアイオン製 PVA スポンジ(5mm 角)をリアクター内で無機合成排水と活性汚泥を共に回分式運転により、スポンジに微生物を付着させる。

・包括固定化法：活性汚泥をポリエチレングリコール(PEG)に固定化させ、5mm 角に切断したものを用いる。

また、以下の項目を定期的に解析する予定である。

・水質項目：原水及び処理水を週 3 回採取し、水中の NH_4^+-N（インドフェノール青法)、NO_3^--N、NO_2^--N(イオンクロマトグラフィー法)を分析する。サンプリング日にリアクター内の水温、pH、DO を測定する。

・微生物解析：生物担体を週 1 回採取し、DNA 抽出を行い、リアルタイム PCR を用いて担体内の微生物変化を明らかにしていく。

本研究は、硝化処理の省エネ化及び温室効果ガスの排出抑制において将来性が高い新規硝化菌（コマモックス菌）に注目し、前述の研究計画を実施することで具体的に以下のこと明らかにすることを目標としている。

①当研究室の成功例に基づき、コマモックス菌は標準活性汚泥法の返送汚泥を用いてどの程度集積培養できるかを検証する。

②アンモニウム以外の窒素源添加はコマモックス菌を集積するために有効かどうかを検証する。

３．計画の進行状況

①の結果と考察

本研究は 2 種類の供試担体を使い、下水処理場の返送汚泥を種菌として馴養実験に用いた。付着法には、新品のアイオン製 PVA スポンジ(5 mm 角)をリアクター内で無機合成排水と活性汚泥をともに回分式運転により、スポンジに微生物を付着させた。包括法には活性汚泥をポリエチレングリコール(PEG)に固定化させ、5 mm 角に切断したものを用いた。

無機合成排水を NH4-N 40 mg/L を供試した。無機合成排水及び処理水は週 3 回採取し、0.45 μm フィルターでろ過したろ液を水質分析に用いた。アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素濃度はそれぞれ、インドフェノール青吸光光度法、エチレンジアミン法、イオンクロマトグラフ(ICS-1600)で測定した。また、DO、pH、水温、滞留時間を週 3 回測定した。担体中の硝化細菌の存在量は、DNA 抽出した上 qPCR を用いて定量した。水温 25 ℃、曝気量 1 L/min の条件下で、馴養開始から 2 日間は回分式、その後は連続式で運転した。連続式では、初期に 24 時間の滞留時間で 95%以上の硝化率を得た後、滞留時間を 12 時間に短縮した。

その結果、滞留時間 24 時間及び 12 時間条件下での処理性能評価において、両方式間に顕著な差異が観察された。付着法では馴養開始後 7 日以内に硝化率 95%以上を達成したのに対し、包括法では 21 日を要した。さらに、滞留時間を 12 時間に短縮した際、付着法では良好なアンモニア処理率を維持したのに対し、包括法では処理水中のアンモニアが 20 mg/L 程度まで上昇し、95%以上の硝化率回復までに 9 日を要した。なお、両方式とも処理水中の亜硝酸性窒素濃度は極めて低く、処理水中には硝酸性窒素が主要な無機窒素成分として検出されたことから、硝酸型硝化であることが確認された（図 1)。

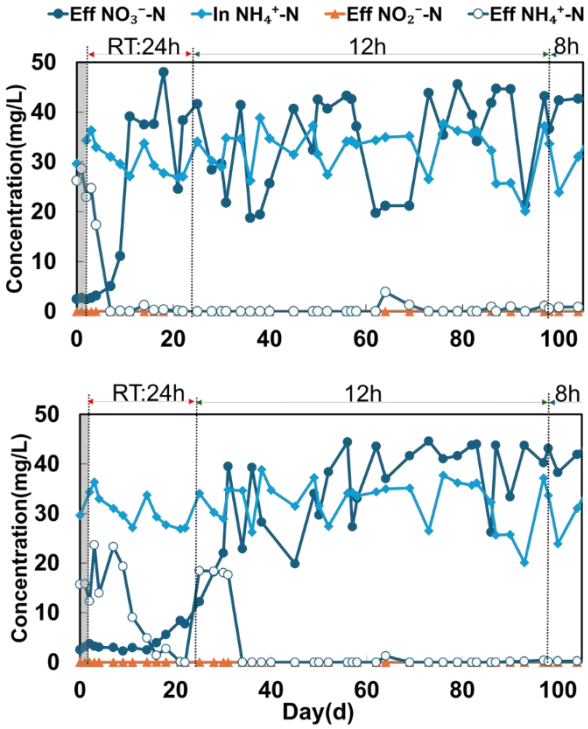


図1. 異なる微生物固定方法を用いた馴養期間における水質推移(上：付着法、下：包括法)

また、微生物群集解析の結果、AOB は両方式とも全期間において優占種として検出されたが、comammox 菌は全期間を通して AOB と比較して存在量が極めて低く、希少種として確認された。運転方式を回分式から連続式（滞留時間 24 時間）へ移行する期間(3 日目から 24 日目)において、AOB に急速な増加が確認された。その後は付着法、包括法ともに安定した存在量を維持した。両担体における微生物量

を比較したところ、いずれも 108 copy/g 担体程度と安定しており、担体の種類による微生物保持量に顕著な差は認められなかった（図 2）。

②の結果と考察

本研究は下水中によく含まれる窒素成分であるアンモニアと尿素を一定割合に調整し、窒素源変化が硝化担体内の菌叢に与える変化を解明することを目的とした。連続運転実験では 5 段階を設け、アンモニア態窒素は各段階 40→35→30→25→20mg/L にそれぞれ供試し、尿素態窒素は 0→5→10→15→20mg/L に調製した。

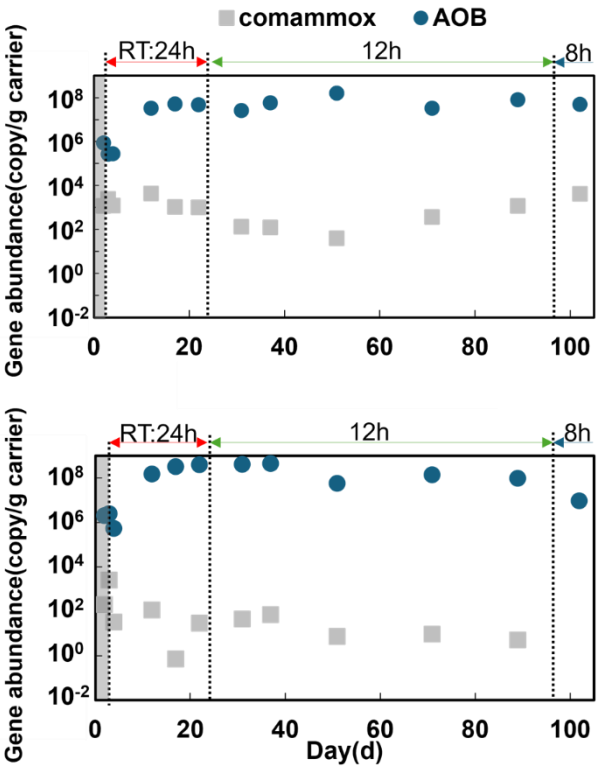


図2. 異なる微生物固定方法を用いた馴養期間における硝化菌の現存量推移(上:付着法、下:包括法)

各段階の水質結果を図 3 に示す。NH_4^+-N 25 mg/L、Urea-N 15 mg/L の期間まで、NH_4^+/Urea-N が硝酸塩まで変換されていることが確認され、良好な処理率が得ていた。しかし、Urea-N の供試濃度が 20 mg/L 上昇した際に、処理水中に Urea-N が残留していることが確認され、この段階での NH_4^+/Urea-N の除去が不完全であることが分かった。

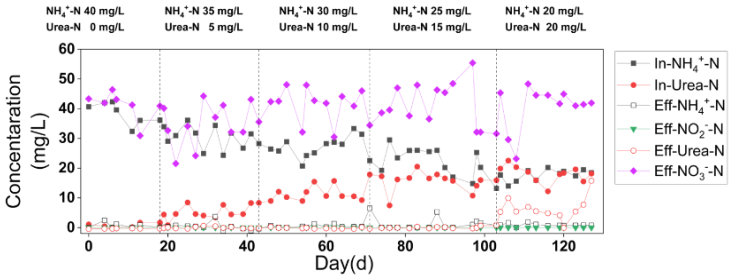


図3. 窒素源検討における水質推移

運転期間内の担体から DNA を抽出し、各種硝化菌（AOB やコマモックス菌）を定量した結果を図 4 に示す。その結果、すべての段階において AOB の現存量が大幅にコマモックス菌を超えており、担体内の主要な硝化菌であることが分かった。また、コマモックス菌は最初の 4 つの段階において僅かに検出されていたが、Urea-N の供試濃度が 20 mg/L 上昇した際に、検出下限以下となった。

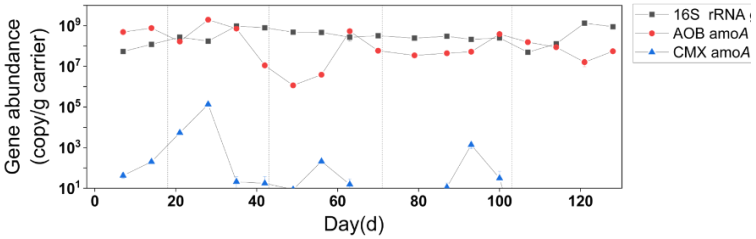


図4. 窒素源検討における硝化菌の現存量推移

運転期間中の窒素（アンモニアまたは尿素）濃度と担体内の主要硝化菌である AOB の現存量をプロットした結果（図 5）、AOB は原水中のアンモニア濃度にやや正の相関が、尿素濃度にやや負の相関が確認された。このことから、AOB は窒素源として、尿素よりアンモニアに対する嗜好性を持つ可能性が示唆された。

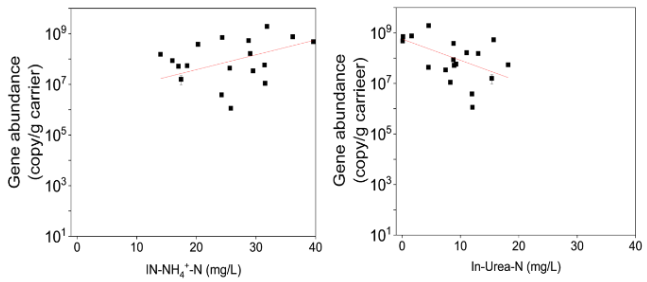


図5. 硝化菌と窒素源濃度の関係(左:アンモニア濃度、右:尿素濃度)

AOB の多くのは尿素加水分解酵素を持たない

ことから、原水中の尿素濃度上昇は AOB の生存に不利を与えると想定されていたが、実際実験した結果では、AOB は尿素態窒素が原水中の窒素成分の半分占める場合でも高い現存量を維持できることが分かった。また、尿素態窒素の濃度増加に伴い、処理水中の尿素態窒素の分解が不十分となっていたことから、尿素分解能を持つ AOB は一部のみに限ることは一般論と一致している。

コマモックス菌に関しては、尿素加水分解遺伝子を所持していることから、尿素濃度の上昇はコマモックス菌に有利な環境となると想定されたが、実験した結果では全期間で AOB より劣勢となっていたことが分かった。このことから、窒素源が尿素なのかアンモニアなのかはコマモックス菌と AOB の消長を決める主要な要因ではないと示唆された。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後はコマモックス菌と AOB の競争メカニズムを窒素源の組成と pH 条件等を組み合わせて検討を行い、新規な微生物保持方法の開発にも試み、コマモックス菌を担体内に集積する手法を継続的に探索していきたいと考えている。

2024 年度の業績（学会発表 7 件）

・金野愛花、大塚柾人、清水和哉、角野立夫、李沁潼、廃水処理における低温耐性硝化菌群の N_2O 放出特性評価、化学工学会第 90 年会 2025 年 3 月

・稲葉涼太、衣川綾香、佐々木啓人、李沁潼、東京湾河口域における硝化過程の周期変化、化学工学会第 90 年会 2025 年 3 月

・矢野翔也、坂口瑠唯、横山知佳、吉岡健、Nguyen Thi Khanh Huyen、内海真生、李沁潼、富栄養湖堆積物におけるメタン酸化微生物の分布特性、化学工学会第 90 年会 2025 年 3 月

・坂口瑠唯、矢野翔也、横山知佳、吉岡健、Nguyen Thi Khanh Huyen、内海真生、李沁潼、化学工学会第 90 年会 2025 年 3 月

・ Ryosuke Hoshikawa, Qintong Li, A bioreactor for simultaneous removal of ammonia and urea, The 19th SEATUC Symposium, Mar 2025

・ Shoya Yano, Qintong Li, Ecological Characteristics of Methane-oxidizing Bacteria in the Sediment of a Eutrophic Freshwater Lake in Japan, The 19th SEATUC Symposium, Mar 2025

・Nguyen Thi Khanh Huyen, Shoya Yano, Qintong Li, Motoo Utsumi, The Abundance of Aerobic Methanotrophic Bacteria in Lake Kasumigaura, 第 60 回日本水環境学会年会 2025 年 3 月

2024 年度の業績（論文査読あり 3 件）

・Yu Gao, Jiaxing Li, Qintong Li, Rui Sun, Wenxin Hua, Chengze Wang, Jianliang Xue, Ping Chen, Banana peel fermentation broth as a viable alternative carbon source for biological sulfate reduction in acid mine drainage, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Feb 2025

・Qintong Li, Mikoto Takahashi, Katsuhiro Enobi, Kazuya Shimizu, Kotaro Shinozaki, Shinichiro Wakahara, Tatsuo Sumino, Comammox Nitrospira was the dominant ammonia oxidizer in an acidic biofilm reactor at pH 5.5 and pH 5, Applied Microbiology and Biotechnology, Oct 2024

・Yunyun Zhang, Jin Gao, Qintong Li, Jingjing Yang, Yu Gao, Jianliang Xue, Lin Li, Yiting Ji, Biosurfactant production by Bacillus cereus GX7 utilizing organic waste and its application in the remediation of hydrocarbon-contaminated environments, World Journal of Microbiology and Biotechnology, Oct 2024

（その他、投稿準備中、2 件）

船舶搭載 GNSS/LiDAR のコスト改善の可能性に関する調査研究

工学部（土木工学課程）　　中川　雅史

共同研究者
東京海洋大学学術研究院　　清水　悦郎，久保　信明

１．はじめに

都市のデジタルツインに関わる SDG11（住み続けられるまちづくり）などからのバックキャストにおいては，防災や環境，都市計画が大きく関連する都市河川を，自律型船舶の実用化によって，より高度に利用できる可能性に着目できる．また，都市のデジタルツインにおけるデータサイクルにおいて，都市の面的変化観測や自律型船舶の運用にも活用できる点群にも着目できる．

本研究は，文部科学省・宇宙航空科学技術推進委託費（2021～2023 年度）で実施したプロジェクト（研究課題：都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための水上屋内外シームレス測位）で構築した船舶搭載型 3D 計測装置のコスト改善の可能性検討に主眼をおいたものである．期待される研究成果には，船舶搭載型 3D 計測装置への低価格な LiDAR（Light Detection and Ranging）適用の基礎データ蓄積，LiDAR を用いる Simultaneous Localization and Mapping（LiDAR-SLAM）を主とする GNSS/非 GNSS 測位のコスト改善，オープン 3D 都市モデルの高頻度更新の実現可能性の向上，船舶版ダイナミックマップ（自動運転向け地図の船舶版）のユースケース提案がある．

本研究の目的は，自律型船舶の航行に適した 3D 地図構造および地図参照の方法論を明らかにする研究において，MEMS-LiDAR（Micro Electro Mechanical Systems 方式の LiDAR）の利用可能性を探ることである．測位環境が劣悪な都市河川での自律型船舶航行を実現するため，GNSS/非 GNSS 環境における 3D 都市モデルと船舶版ダイナミックマップの作成，GNSS/LiDAR-SLAM 手法の開発，みちびき利用の GNSS 測位補強の適用検証，マルチビームソナー測深による水中地図の作成の課題整理などを実施してきた．

これらの成果を都市インフラの観測システムとして社会実装していくには，高密度・高精度計測用の測量船と，低コスト・高頻度計測用の公共交通プラットフォーム搭載型測量システムの組み合わせが有効である可能性が高い．本研究では低コスト・高頻度計測を主眼とし，低価格な MEMS-LiDAR のうち，広域測域が可能な LiDAR に関する利用可能性を探った．

２．研究計画

研究計画を下記(1)～(3)で構成した．

(1) MEMS-LiDAR 選定のための基礎調査（2024/6～2024/7）
(2) 神田川・日本橋川での船舶計測実験（2024/9～2024/11）
(3) GNSS/LiDAR-SLAM 処理におけるスキャンマッチング比較検証 （2024/10～2024/12）

(1) MEMS-LiDAR 選定のための基礎調査

測量分野では，長距離計測用の水平リニア走査型 LiDAR が普及しているが，メカニカル方式であるために高価格である．LiDAR として，時刻同時性や製造コストに優位性のある Flash LiDAR や SPAD LiDAR なども次世代 LiDAR として着目しているが，これらは近距離計測用であり測量用 LiDAR として不適当である．これらの観点で，安価かつ長距離測域できる MEMS-LiDAR を選定する．事前調査において，共振ミラー制御に課題のある機種をおおむね排除済みである．本研究では，リサージュ走査型および非反復走査型の MEMS-LiDAR を選定する．

(2) 神田川・日本橋川での計測実験

東京海洋大学で所有する電池推進船（らいちょう I）に LiDAR 等のセンサを艤装し，実験実績のある神田川・日本橋川・隅田川・豊洲/塩浜運河周辺・東京湾のうち，GNSS/非 GNSS 環境における基礎データを蓄積している神田川・日本橋川を選定する．実験装置を搭載した船舶が橋梁を通過できることが制約条件であるため，潮位が低い日にちを選定し，MEMS-LiDAR を用いた GNSS/LiDAR-SLAM の検証実験を実施する．神田川・日本橋川でのサンプルデータ取得実績を根拠とし，路線長 10km 分，もしくは，20 億点程度の点群取得を目標値とする．

(3) GNSS/LiDAR-SLAM 処理におけるスキャンマッチング比較検証

すでに得ている研究成果として，3D 都市モデル生成のための LiDAR 点群の統合および船舶位置姿勢推定を GNSS/LiDAR-SLAM 処理があるが，この処理における要素技術であるスキャンマッチングに MEMS-LiDAR を適用できるかを数値評価するため，長距離計測用の回転式 LiDAR と比較検証する．各 LiDAR の測距精度（数 cm）と同等のスキャンマッチング精度を目標値とする．

３．計画の進行状況

測量用 LiDAR と比較して低性能な MEMS-LiDAR を GNSS/LiDAR-SLAM 処理に適用する場合，GNSS/LiDAR-SLAM 処理におけるスキャンマッチング性能が大幅に低下することを確認したため，このスキャンマッチング性能を向上させる手法構築が必要であることを明らかにした．特に，計測対象に複数平面が含まれないシーンであってもロバストに LiDAR-SLAM 処理を実行する必要性に着目した．そこで，非反復走査型全方向 LiDAR 向けの point-to-point によるスキャンマッチング処理として，イメージベースドスキャンマッチングを提案した．さらに，船舶に搭載した非反復走査型全方向 LiDAR で計測したデータを用いて，提案手法を適用した LiDAR-SLAM 処理が可能であるかを検証した．

３．１ 提案手法

提案手法であるイメージベースドスキャンマッチングは，従来の LiDAR-SLAM と同じく，シーン間の剛体変換を扱う処理であるが，ボクセル空間などでの処理ではなく，視野にもとづくスキャンマッチングを適用する点が異なる（図 1）．

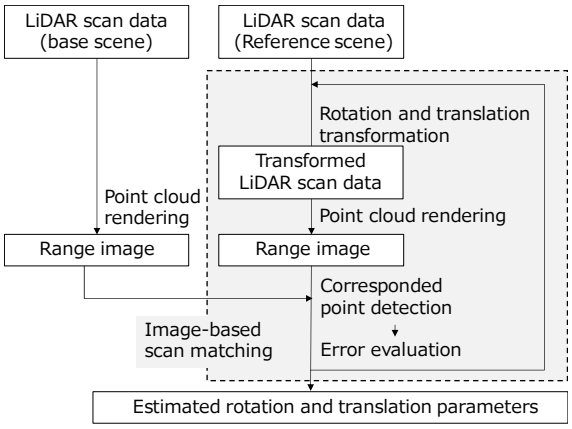


図 1. 提案手法

イメージベースドスキャンマッチングでは，基準シーンの点群と，参照シーンの点群のずれを最小化する回転・並進推定において，水平角を横軸，鉛直角を縦軸とした FOV 空間へ点群を投影する処理を中間処理に含めている．イメージベースド

スキャンマッチングの一部として，基準シーンの点群を FOV 空間へ投影したものと，参照シーンの点群を回転・並進変換後に FOV 空間へ投影したもの，および，これらを重畳後に近傍点群の抽出した例を図 2 に示す．

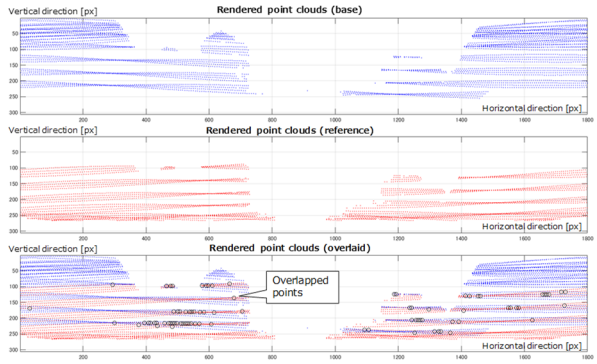


図 2. イメージベースドスキャンマッチングの一部

イメージベースドスキャンマッチングでは，FOV 空間へ投影した点群を任意の角度分解能でラスタライズ（点群をレンダリング）することで，近傍点の直接参照による近傍点探索の高速化を図る．この処理は，広域を計測した点群を対象とするボクセル空間上での近傍点探索においてボクセル空間が肥大化する問題を回避できるものである．また，対応する点がほぼ存在しない点群を扱う点で，kd 木を利用する近傍点探索よりも処理効率を向上できる．

３．２ 実験

日本橋川および神田川を実験対象とし，2024 年 9 月 30 日に点群取得を実施した．非反復走査型全方向 LiDAR（MID-360, Livox）を船舶のルーフデッキ上に搭載し，4〜6 knot での往復航行で，約 720,000 フレーム（7,200 秒）分の点群を取得した（図 3）．

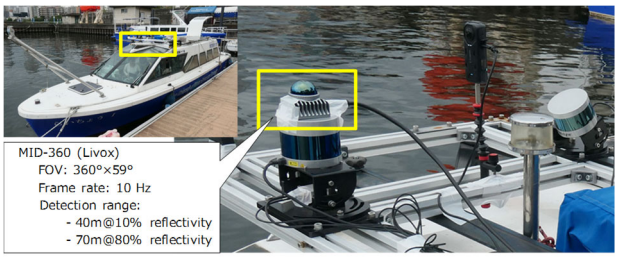


図 3. 船舶搭載した 3D-LiDAR

取得データは，LVX2 書式として記録された約 1440,000 フレーム（7200 秒）分として扱い，片道区間を任意選択し，各 1200 フレーム分を処理した．LiDAR-SLAM 処理結果である LiDAR-SLAM 点群の生成例を図 4 に示す．



図 4. LiDAR-SLAM 点群

LiDAR-SLAM 処理時間をまとめた結果を表 1 に示す．上記の結果によって，提案手法が実用的な処理時間で LiDAR-SLAM 処理が可能であることを確認できた．

表 1. LiDAR-SLAM 処理パラメータと処理時間

対象区間	フレーム数	近傍点探索レンダリング分解能	処理時間
日本橋川・江戸橋JCT	1200	0.2°	339.7 秒
神田川・水道橋	1200	0.2°	340.7 秒
神田川・聖橋	1200	0.2°	376.6 秒

４．今後の計画（学会発表状況など）

本研究で得た成果は，「都市河川における自律型船舶向け 3D 地図構造化設計と点群地図参照法の構築と検証（科研費・2024～2026）」や，2023 年度以降で実施している「準天頂衛星システム（みちびき）利用促進のためのインフラ施設管理用測位と性能評価に関する国際標準化」，船舶搭載型 3D 計測装置の量産化に向けた研究プロジェクトにおいて利用する．これらの成果によって，従来型船舶やドローンでは困難であった社会インフラの日常点検の無人化が可能になり，陸空水域統合型の 3D 計測によるインフラ点検の高度化・効率化や，空水域統合型 MaaS を実現に向けた水上 MaaS の基盤構築に寄与する．

船舶搭載型 3D 計測装置の量産化に向けた研究プロジェクトにおいては，GNSS 測位が不安定または測位困難な都市河川における自律型船舶の安定運用や，従来型船舶との混在環境下での安全航行支援を実現することを目標としている．MEMS センサを活用した GNSS/非 GNSS シームレス測位技術，船舶用 3D マップを活用した測位補強技術，および，混在運航を前提とした協調航行支援技術の 3 つの独自技術シーズを統合的に開発する試みである（図 5）．

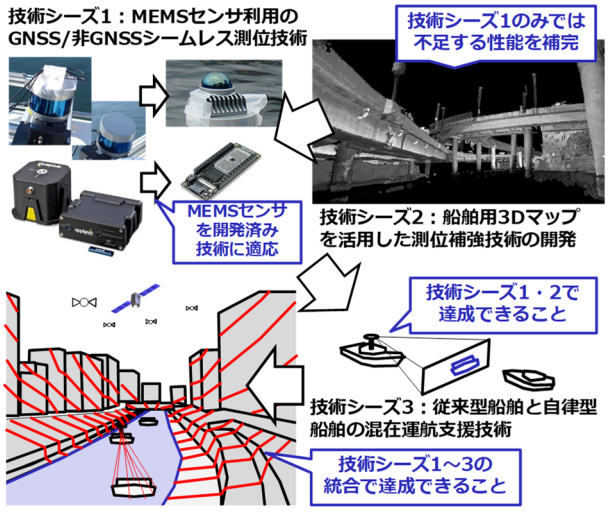


図 5. 船舶搭載型 3D 計測装置の量産化に向けた研究プロジェクトの一部

本研究の提案手法は移動計測全般に適用できる方法論であり，自律型船舶だけでなく，ドローンや自動運転，月面・火星開発分野の高度化（国プロ「月面の 3 次元地質地盤図を作成するための測量・地盤調査法」で実施中）へも展開可能である．

船舶搭載型 3D 計測に関する学会発表については，2024 年度においては，国際会議発表 6 件，国内会議発表 13 件を実施した．2025 年度においては，下記の発表を予定している．

1. 大平和輝・山口哲・中川雅史・久保信明・清水悦郎，都市河川における船舶搭載 LiDAR によるモデルベース物体認識，測位航法学会・2025 年度全国大会（2025 年 5 月に発表予定）
2. 中川雅史・山本拳士朗・山口哲・久保信明・清水悦郎，非反復走査型全方向 LiDAR におけるスキャンマッチング，日本写真測量学会・令和 7 年度年次学術講演会（2025 年 6 月に発表予定）
3. 大平和輝・山口哲・中川雅史・久保信明・清水悦郎，都市河川における水上 LiDAR 計測によるモデルベース船舶認識，日本写真測量学会・令和 7 年度年次学術講演会（2025 年 6 月に発表予定）
4. 金井歓太郎・山口哲・中川雅史・久保信明・清水悦郎，船舶 MMS 点群を用いた都市河川空間の CityGML 記述における LOD 検討，日本写真測量学会・令和 7 年度年次学術講演会（2025 年 6 月に発表予定）
5. 永岡拓斗・野田京吾・山口哲・中川雅史・久保信明・清水悦郎，衛星 SAR を用いた都市河川周辺の GNSS 測位環境の面的推定と船舶搭載 MMS による検証，日本写真測量学会・令和 7 年度年次学術講演会（2025 年 6 月に発表予定）

芝浦工業大学　　２０２４年度特別教育・研究報告集

発行年月日　　２０２５年７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
研究推進部　研究企画課

ISSN 2185-7326

無断複写・転載を禁ず