ＩＳＳＮ ２１８５-７３２６

２０２３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２０２３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

２０２４年５月

２０２３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

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

ARスポーツを活用した地域高齢者活性化プロジェクト-“HADO”は世代間交流として効果的か?-･･ 4
工　学　部　情　報　工　学　科　石　﨑　聡　之

知的創造の担い手となる人材育成のための産学官連携スキームの開発･･･････ 6
システム理工学部　機械制御システム学科　長　谷　川　浩　志

SDGS マインドを持った人材育成のための地域連携・学校連携型合同授業・社会活動の実践･･10
システム理工学部　環境システム学科　中　口　毅　博

地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントとSDGS達成に向けての地域課題解決策の実践･････････････････････････････････12
システム理工学部　環境システム学科　増　田　幸　宏

社会システム科学のアプローチによる課題解決:最適手法の探索と適用2023･･14
システム理工学部　環境システム学科　市　川　学

地域に貢献できる大学パブリックスペースの提案･････････････････････････16
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････････････････････････････18
建　築　学　部　建　築　学　科　志　村　秀　明

「木のジャングルジム」を応用した伝統木造構法の現代的実践適用について･･･20
建　築　学　部　　建　築　学　科　　小　柏　　典　華

豊洲スマートシティ事業の産学官民連携による推進･･･････････････････････22
複合領域産学官民連携推進本部　　古　瀬　　利　博

実践的教育

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

gPBL に実装可能な被災者探索ロボット組立て教材の開発と製品化、およびその横展開を通した FD の取組み･･･29
工　学　部　　機械機能工学科　　長　澤　　純　人

AI 実装の実習及び AI を導入した研究課題の設定と継続･･･････････････････33
工　学　部　　電子工学科　　プレーマチャンドラ　チンタカ

IoT と AI が溶け込んだ次世代教育環境の研究･･･････････････････････････37
工　学　部　　情報工学科　　新　熊　　亮　一

リカレント教育の提供に向けたグローバルサイエンスカフェの実施-知る喜び、学ぶ楽しさを掘り起こす-･･･････････････････････････････････････38
工　学　部　　先進国際課程　　山　本　　文　子

The propose of research-based learning style by intergrating virtual reality and emotion sensing technology･･･････････････････････････42
工　学　部　　先進国際課程　　スリーピァン　ピーラヤー

Enhancing Student Performance in Research-based Learning through Group-based Activities on IoT Device Development･･･････････････46
工　学　部　　先進国際課程　　ラオハカンワンウィット　ティポーン

BOiCE(Bay Area Open Innovation Center)における起業プロセス支援ワークの実施-学生のインプット(学び)をとアウトプット(実践)に変えるために-･････50
デザイン工学部　　デザイン工学科　　加　藤　　恭　子

国際連携教育-ラモン・リュイ大学との「スクールメイト」プログラムの実施-・・54
建築学部　建築学科　小塙　芳秀

学修者の学びを担保するカリキュラムマネジメント支援と学修成果の可視化体制の構築・・・58
教育イノベーション推進センター　榊原　暢久

グローバル

Design and Implementation of Double Degree/Joint Degree Education Model for Doctoral students at SIT・・62
工学部　先進国際課程　ミリアラ　ムラリダ

gPBL の体系化と持続的イノベーションの創出・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
工学部　先進国際課程　吉久保　肇子

GLOBAL e-class 講義開発のための教材制作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・70
デザイン工学部　デザイン工学科　梁　元碩

教育研究の DX

人工知能を利用したデジタル採点支援システムによる記述試験問題の自動採点化の検討・・74
工学部　材料工学科　幡野　明彦

PBL 授業におけるプロトタイプ・デザイン及びチーム活動プロセスを支援するサイバーフィジカル EdTech システムの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・78
システム理工学部　電子情報システム学科　間野　一則

DX 推進に向けた情報セキュリティ管理体制強化研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・82
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

複雑乱流場における乱流拡散機構の解明・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
工　学　部　機　械　工　学　科　河　田　卓　也

多細胞による組織形態形成の数理モデル構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
工　学　部　機械機能工学科　亀　尾　佳　貴

生細胞の動的光散乱に向けた顕微鏡システム開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95
工　学　部　応　用　化　学　科　廣　井　卓　思

低温硝化処理における温室効果ガスの抑制手法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
工　学　部　応　用　化　学　科　李　沁　潼

計算可能性と計算複雑性に基づく創発現象の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・103
工　学　部　先　進　国　際　課　程　エイムズ　ジェリコ　ジミー

複合的環境情報による移動体の自律制御・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・106
システム理工学部　機械制御システム学科　桑　原　央　明

食品中微量成分の安定同位体比を用いた研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・110
システム理工学部　生　命　科　学　科　川　島　洋　人

極小表現に関連する解析・・・114
システム理工学部　数　理　科　学　科　田　森　宥　好

熟練販売員の接遇の理解と遠隔接客への応用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・118
デザイン工学部　デ ザ イ ン 工 学 科　益　子　宗

快適な長時間座位作業を実現するための時系列下肢むくみ予測モデルの構築・・122
デザイン工学部　デ ザ イ ン 工 学 科　平　尾　章　成

オンライン･メタバース弔い調査研究開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・126
デザイン工学部　デ ザ イ ン 工 学 科　瓜　生　大　輔

科研費連動型

完全閉鎖型モバイル細胞培養デバイスによるウイルス活性検査法‥‥‥‥130
工　学　部　機械工学科　二井　信行

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‥‥‥‥134
工　学　部　機械機能工学科　細矢　直基

生体吸収性マグネシウム合金のその場観察によるマイクロスケール腐食現象の解明‥‥‥‥138
工　学　部　機械機能工学科　吉原　正一郎

ヘテロエピタキシャル成長技術を用いた非熱平衡状態物質の創製と新規機能の付与‥‥‥‥142
工　学　部　機械機能工学科　吉田　慎哉

水蒸気を用いたアルミニウム合金の表面改質技術の開発と触媒担体としての応用‥‥‥‥146
工　学　部　材料工学科　芹澤　愛

高分子材料に対する集束電子線を用いた微細加工技術の開発‥‥‥‥150
工　学　部　材料工学科　下条　雅幸

分子インプリント高分子を用いたリアルタイム治療薬モニタリング用センサの開発‥‥‥‥154
工　学　部　応用化学科　吉見　靖男

元素置換に基づくペロブスカイト水素化物の機能性創出と新規な学術分野の開拓‥‥‥‥157
工　学　部　応用化学科　大口　裕之

鳴き声コンテンツのリアリティ再生システムの開発‥‥‥‥161
工　学　部　情報通信工学科　武藤　憲司

デジタル技術による事件事故防止に向けたリスクマネジメント教材の開発‥165

工　学　部　情報通信工学科　大橋　裕太郎

サテライトオフィスの多様な社会的効果の計測手法－男女共同参画の促進に向けて……169
工　学　部　土木工学科　岩倉　成志

セメント改良土の動的引張挙動の解明……173
工　学　部　土木工学科　並河　努

Study of ultra-performant thermoelectric thin films based on spinel ferrite crystal structure……177
工　学　部　先進国際課程　パオロ　メレ

Development of a system to evaluate the effect of microplastics on the mobility of zooplanktons……181
工　学　部　先進国際課程　ラジャゴパラン　ウママヘスワリ

ｇPBLの体系化とエンジニアリング教育における国際協働学修成果の可視化・189
工　学　部　先進国際課程　吉久保　肇子

Light Field Compression: Neural Radiance Field Approach……193
工　学　部　先進国際課程　ファン　スアン　タン

ナノポーラス構造の3次元細胞培養プラットフォームへの応用……197
工　学　部　先進国際課程　李　素潤

Study on Task-adaptive Emotion Classification Modeling for Emotion-aware Robot……201
工　学　部　先進国際課程　ラオハカンワンウィット　ティポーン

自己適応型Opportunistic Routing……205
システム理工学部　電子情報システム学科　山崎　託

ソーシャルメディアによるサイバー脅威分析と評価システムの開発……209
システム理工学部　環境システム学科　持永　大

神経幹細胞の活性化作用を有する抗新型コロナウイルス薬の開発研究……213
システム理工学部　生命科学科　須原　義智

動的状況時のアキレス腱力学特性の非侵襲簡易計測システムの開発……217
システム理工学部　生命科学科　山本　紳一郎

生細胞イメージング画像のAI分類によるマクロファージ表現型識別法の開発…221
システム理工学部　生命科学科　中村　奈緒子

Upper Limb Muscle Activation Estimation System using Assistive Device for Activities ofDaily Living……225
システム理工学部　生命科学科　シャルー ビン モハマドダン

過去・現在・未来を繋げる数値再現性の新展開……229
システム理工学部　数理科学科　尾崎　克久

軍艦島に残る歴史的建造物群の保全に向けた構造性能評価……233
建築学部　建築学科　椛山　健二

大学間連携

電炉スラグからの金属鉄回収プロセスの開発……237
工学部　材料工学科　遠藤　理恵

既存杭処理のためのグランドデザインの創造……241
工学部　土木工学科　稲積　真哉

Nanocomposite polymer/skutterudite thin films for enhanced thermoelectric conversion……245
工学部　先進国際課程　パオロ　メレ

ノルディックハムストリングの効果検証……249
システム理工学部　生命科学科　赤木　亮太

フェロトーシス関連ビタミンKの脳疾患応用……253
システム理工学部　生命科学科　廣田　佳久

- 所属学科等名は、2023 年度中のものです。

特 別 教 育 研 究

（１）教育改革研究活動助成

TOPへ戻る

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

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

■プロジェクトの概要

2020年から始まったコロナ禍も収束し，インバウンド観光振興が改めて注目されてきているが，一方で高齢化社会が深刻化しているため，インバウンド観光に加えウェルビーイングも含めた新しい観光の価値の創造へ向かう必要がある．また，観光のみならず少子高齢化に向けた施策が必要であり，同様の課題を抱えた外国人向けのビジネスにも展開できる可能性を探る必要がある．本プロジェクトでは地域と連携したPBL型授業や学部や修士研究において，企業や自治体と連携し観光促進のためのサービスシステムおよび高齢者へのサービスや未来を担う子供たちへの教育プログラムを開発した．(1)温泉施設の新たなサービスの提案，(2)地域におけるモビリティの活用方法の提案，(3)農業を軸にした教育プログラムの提案，(4)高齢者のウェルビーイングを目的としたVR観光や脳トレの提案である．大学院授業のシステム工学特別演習、Cross-innovation Project、Cross-cultural Engineering Projectを通じて，関連自治体や企業による学生への支援により，プロジェクトの成果は社会的に貢献度の高いものであった．Cross-cultural Engineering Programでは海外からの学生が多く参加し，相互の異文化理解の視点を取り入れた提案も行い，インバウンドビジネス創出を意識づけることができた。

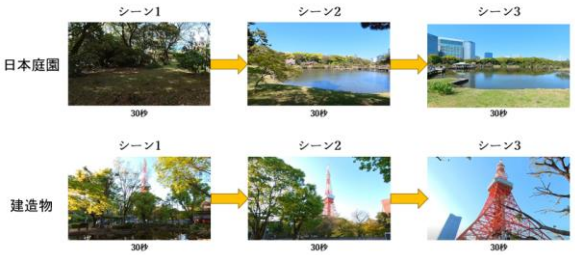
■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】
大学院理工学研究科のシステム理工学専攻必修科目「システム工学特別演習」において24名，システム理工専攻演習科目「クロスイノベーションプロジェクト(CIP)」において4名，集中講義の「Cross-cultural Engineering Project(CEP)」において8名(日本人学生3名、海外からの短期留学生5名)，計36名が本プロジェクトに参加した．前期のプロジェクトは温泉施設の新たなサービスの提案として，20代女性をターゲットに韓国式お風呂屋さんを株式会社温泉道場と企画開発し，実際にイベントを開催した．ほかには，地域におけるモビリティの活用方法の提案として，新しいシェアモビリティの提案を行うとともに，それを活用するサービスシステムの提案も行った．また，合同会社十色からの協力を得て，農地フィールドを活用した主体性を育む教育プログラムの提案を行った．

【研究】
工学部卒業研究およびシステム理工専攻修士研究として5名が地域社会に貢献できることを目的とした研究テーマにより学部・修士研究を行った。高齢化社会へ貢献するため，ウェルビーイングを目的として健康上の理由で旅行に行けない高齢者でも楽しめるバーチュアル観光を提案し，有用なコンテンツやより利用しやすい視聴機器について調査するため若者との比較実験を行った．高齢者は使い慣れているスマホで視聴しても十分に楽しむことができた．これらの研究を含めた学部と修士研究成果は以下のとおりである．査読付き学術誌論文1件，国際会議2件，国内発表7件(Journal of Global Tourism Research，国際会議KES2023，観光情報学会第1回かがのと観光情報学研究会、IEEE ProComm Japan、Japan-China Workshop)。

【社会貢献】
PBLプログラムの提案については、株式会社温泉道場、さいたま市都市総務課，さいたま市自転車まちづくり推進課、合同会社十色の方々より指導をいただいた。これらの成果については3月のCOC学生成果報告会で発表を行う。ウェルビーイングの研究では，株式会社カサリスより協力を得た．研究成果については連携協定のある那須町やさいたま市への報告を行い、査読付き学術論文誌へ投稿予定である。

20代女性の集客を目的とした「韓国式お風呂屋さん」を企画するため，マッコリ風呂の濃度や汗蒸幕に近い素材を使用するための実験を行い，イベントを実施した．



高齢者向けのバーチュアル観光コンテンツとVRグラスとスマートフォンを比較して視聴機器の検討を行った．

(CEP@SIT)日本人学生と外国人学生がさいたま市役所を訪問しヒアリングを行った．実際のシェアモビリティを体験しそれらを踏まえてシェアモビリティの新しい活用方法の提案を行った．

主なトピックス

■韓国式お風呂屋さんの企画･実施

コロナウイルス感染拡大以前の客足を取り戻すため，株式会社温泉道場が運営する温浴施設の「おふろcafé utatane」(埼玉県さいたま市）と連携し，20代女性をターゲットに韓国式お風呂屋さんを企画･実施した．マッコリ風呂の濃度の検証，日本で入手可能な素材による汗蒸幕実現のための検証を行った．

秋のシーズン企画の１つとして、韓国式おふろ屋さんを提供

開催期間：約2週間（9/16～9/30）
制約条件：
お風呂の中：お金よりも**クオリティーを重視**
お風呂の外：エントランス・ロビーのみ装飾可
お客様の出入りがあるため、**簡単にできるもの**

■シェアモビリティと新システムの提案

①後期授業CIPでは，新しい既存とは異なるシェアモビリティ（電動カートや折り畳みキックスケーター）を提案し，それらのモビリティを利用する際の危険地帯の情報も入れた，聖地巡礼ができるナビゲーションアプリ（下図）を開発した．モビリティの特性を考慮した危険地帯のアラート機能は新規性が高い．

②集中講義CEP@SITでは，さいたま市のシェアモビリティの新しい活用方法として，終電や終バスを逃したユーザーがシェアサイクルを利用して帰宅できるアプリの提案を行った．

“support late night terminal-to-station travel”

~Allows travel from the terminal station to the nearest station after the last train~

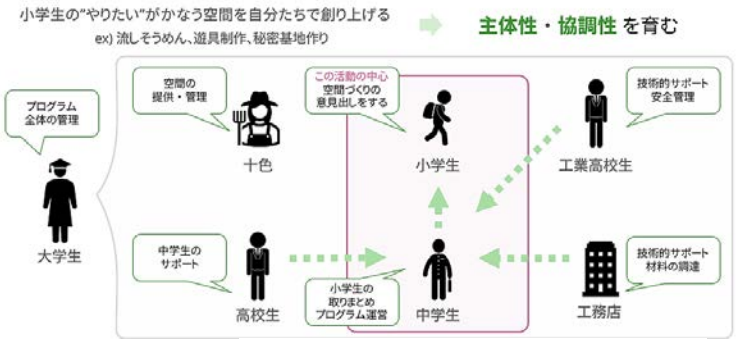
Add more stations near terminal stations.

Introduce an App that seamlessly proposes multi-mobility and transfer information.

Introduce special late-night package fares

■ Grow Farm･農地を活用した教育プログラム

合同会社十色は，見沼田んぼを使用し，とうがらし，里芋，豆類などを生産し，年間を通した田んぼ体験などのイベントを開催している．このような農業フィールドを用いて，小中高生が自らが考える体験を創出し，主体性を育むことができる教育プログラムを提供することを目的とした．『Grow Farm』は，農地を活用し，小中高生のグループワークを通じて遊び場（空間）を創造することで「子供の成長」「空間の成長」「農地の成長」を目指すものである．大学生が運営管理を行う役割を担う．活動の例として竹を使った流しそうめん作りや竹トンボなどの遊具制作、秘密基地作りなどが考えられる。農業が身近にない都心に住む子供たちにとっては，学校教育との連携または独立した組織によるプログラムにより主体性や協調性を育むことが望まれる．



提案programの内容

■ 高齢者のウェルビーイングを目的とした研究

①健康上の理由で旅行に行けない高齢者にも観光を楽しんでもらうためのバーチャル観光コンテンツ（180度と360度どちらの動画がより効果的か）とVRグラスとスマートフォンのどちらがよりコンテンツを楽しめるかといった比較検証を行い，高齢者はスマートフォンのほうがリラックスしてバーチャルコンテンツを楽しめる可能性を示した．

②高齢者の認知症予防に有効な脳トレの開発を行った．回想法プログラムをヒントに，昭和の茶の間と現代のリビングの背景を用いて，消えたアイテムを探すゲームを行ったところ，昭和時代の背景のほうが正答率が高く，懐かしいものを利用した脳トレは有効である可能性を示した．

昭和の茶の間

現代の

ARスポーツを活用した地域高齢者活性化プロジェクト
- “HADO”は世代間交流として効果的か？ -

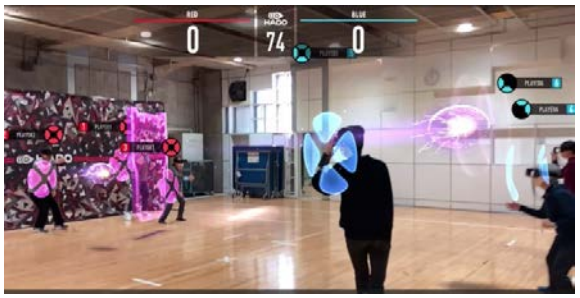
代表者	石﨑聡之【教授】(工学部 情報工学科)
構成員	真鍋 宏幸(工学部 情報工学科)／井尻 敬(工学部 情報工学科)／浜野 学(工学部 電子工学科)／深野 真子(工学部 機械工学科)

■プロジェクトの概要

我々のグループは2014年より地域高齢者の健康維持増進事業を推進し，大きな成果を上げてきた．新型コロナウイルスが流行した2020年度からは，安全性を考慮してZoomを用いた遠隔型運動教室を開催し，体力向上に十分な効果があることを示した．特に，2021年の結果では参加者間の会話などの交流が運動継続の大きな要因とあることを明らかにした．従って，高齢者の活動を継続的に行うには十分な交流が含まれることが重要である．一方，高齢者と学生が交流しながら運動することの効果についてはエビデンスがない．そこで本研究では，近年インクルーシブなスポーツとして注目されているARスポーツ(HADO)が，高齢者と学生との交流に効果的なツールとなり得るか検証する．

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】
これまで本プロジェクト(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名の男子学生を責任者として，参加者への連絡・説明などの準備はもちろん，HADO(ARスポーツ)の実施には12名の学生に協力を依頼し，HADO教室の実施に関わってもらった．高齢者と学生が同じチームでHADOをすることで学生自身の協調性が育まれ，学生の成長に繋げることができたと考えられる．



【キャプション】HADO教室の様子

【研究】
さいたま市内に在住の地域高齢者(12名，66-81歳)を対象としてPJを実施した．参加者はHADO教室に参加するため，芝浦工業大学大宮キャンパスに週2回，8週間(計16回)通って貰った．HADOを実施する前にはケガ予防のストレッチングを15分行い，それからHADOのゲームを行う方法とした．HADOは1試合80秒のゲームであるが，これを毎回3～5試合程度実施した．試合の方式は3VS3とし，高齢者2名+学生1名を1グループとし(学生は合計12名)，毎回グループメンバーは変えるようにした．運動介入期間の前後には体力測定やアンケート調査も行い，HADOを8週間行った期間後には筋力(上肢・下肢)，歩行能力，柔軟性が有意に向上していた．

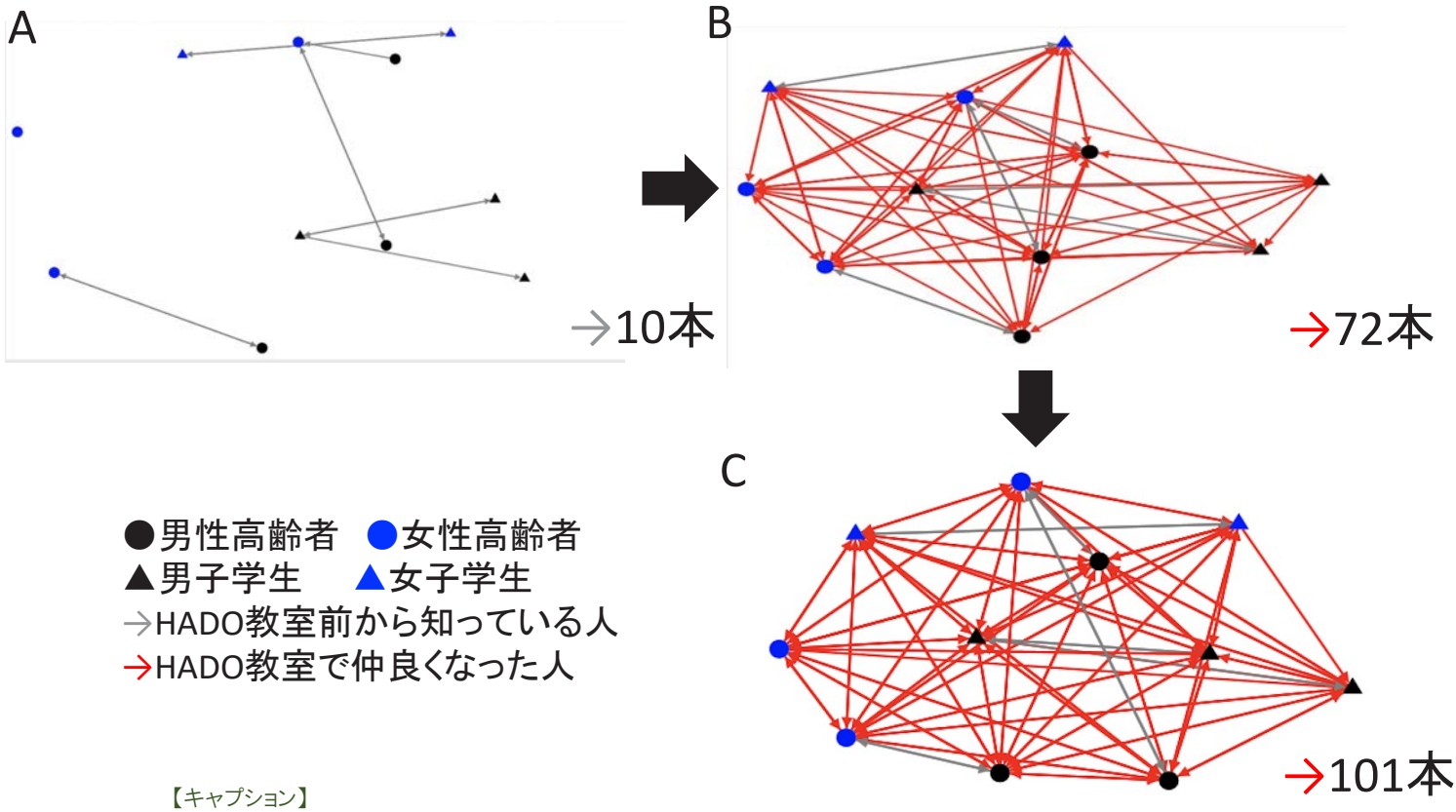
【キャプション】研究説明会の様子

【社会貢献】
さいたま市の高齢化率は23.21%(令和5年)，65歳以上の高齢者 31万人を超えている．高齢者の割合は今後，さらに増えていくことが予想されており，医療費の大幅な増加が懸念される．これら支出を抑えるには健康寿命の延伸が不可欠である．その対策の1つに運動の実践が挙げられるが，運動継続の重要な要素である「より楽しく・効果のある運動」についてはまだまだ十分なエビデンスがあるわけではない．
　本PJでは，近年ARスポーツの代表格として知られるHADOを学生と共に実践し，「学生と一緒に運動を楽しみながら体力を向上させる！」ことを実践した．本研究にはゼミ学生・学生有志も積極的に関わり，世代間交流を通して地域貢献活動も実践することができた．

【キャプション】HADO教室後に仲良く自宅に帰っていく参加者達

主なトピックス

■HADOを通した地域高齢者と学生の交流は効果的だったか？



【キャプション】
ネットワーク分析による2ヶ月間の経時的な変化（12名分）

本PJでは，参加者間にどの程度交流があったかを調べるためにネットワーク分析を行った．上の図は研究前（A），4週間後（B），8週間後（C）の変化を示している．線が繋がっていればいるほど「〇〇さんを知っている」ことを示している．最初（A）は殆ど線がなかったが，4週間後（B），8週間後（C）とそれぞれの参加者と線が繋がっており，交流が促進されていたことが伺える．
実際のコメントでも，
高齢者：***学生さんが丁寧に教えてくれるのは楽しい***
学生：***普段,関わり合うことのない世代の方とHADOを通して交流することができ,新鮮で楽しかった***
などポジティブな内容が非常に多かった．

HADOが世代間交流に及ぼす効果

本PJの結果からHADOが世代間交流を促す運動として非常に効果的であることが明らかになった．HADOは年齢・体力・性・運動歴が影響しない“インクルーシブ”なスポーツとして考えられているが，世代を問わず参加者の全てが楽しめるスポーツであることが立証された．今回のPJでは高齢者と大学生のの参加者でみあったが，今後「孫+祖父祖母」，「親+子」などの組合せも検証していくことでより詳細なデータを取ることが可能となると考えられる．このような継続的な活動により「スポーツのまち　さいたま」のスポーツ文化を定着させたいと考えている．

【キャプション】HADOプレー中の様子

【キャプション】HADO教室後の和気藹々とした集合写真

「知的創造の担い手となる人材育成のための産学官連携スキームの開発」プロジェクト

代表者	長谷川浩志(システム理工学部 機械制御システム学科)
構成員	渡邉大(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(大学院 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)

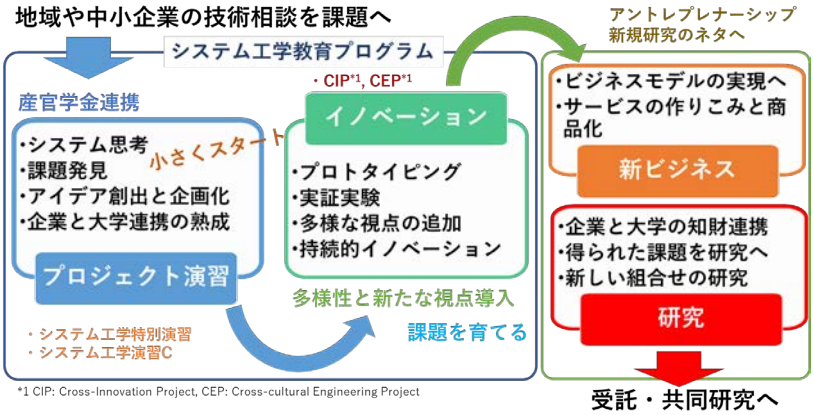
■プロジェクトの概要

システム理工学部と大学院システム理工学専攻では，産官学連携型の教育プログラムを約20年にわたって実施してきた．しかしながら，企業側の意識は「敷居が高い」「産官学連携を考えたこともない」であった．これは，一般的な産学官連携スキームに，何か不具合が発生しているのではないかと考えた．本プロジェクトでは，企業の業務課題や新規事業開発を研究課題とするのではなく，プロジェクト課題として導入し，①システム思考に基づく企画立案，②実証実験とプロトタイピング，③多様な視点の導入によるイノベーションの創出を行った．ここで得られた成果物から新ビジネスや研究要素を抽出，受託・共同研究へと導く新たな産学官連携スキームを開発，実施した．

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

システム工学特別演習＆システム工学演習C（SE2），Cross-Innovation Project （CIP），Cross-cultural Engineering Project （CEP)を，シームレスに組み合わせて新たな産学官連携スキームを開発，実施．SE2の26プロジェクトのうち11プロジェクトをCIPで実施．CIPのPJに，多様性と新たな視点の導入によるイノベーションを創出するために，CEP@FCT/UNLとCEP@SITで実施．アントレプレナーシップ教育PJの那須地区創生PJでは，課題発見からスタートし，那須での実証実験を経て，第4回ビジネスコンペティション（経営学部主体．一橋大学を含む8大学29チーム)にて第3位となった．兵庫県中小企業家同友会チームIT神戸関連のANXA PJでは，SE2の企画提案「データに基づく狩猟補助システム」に，多様性と新たな視点を導入した結果，想像もしなかった「シリアスゲームによるペーパーハンター活性化」のプロトタイプ作成に至った．さいしんコラボ産学官PJでは，第7回「開放特許を活用した学生アイデア発表会in埼玉」にて審査委員特別賞を受賞した．



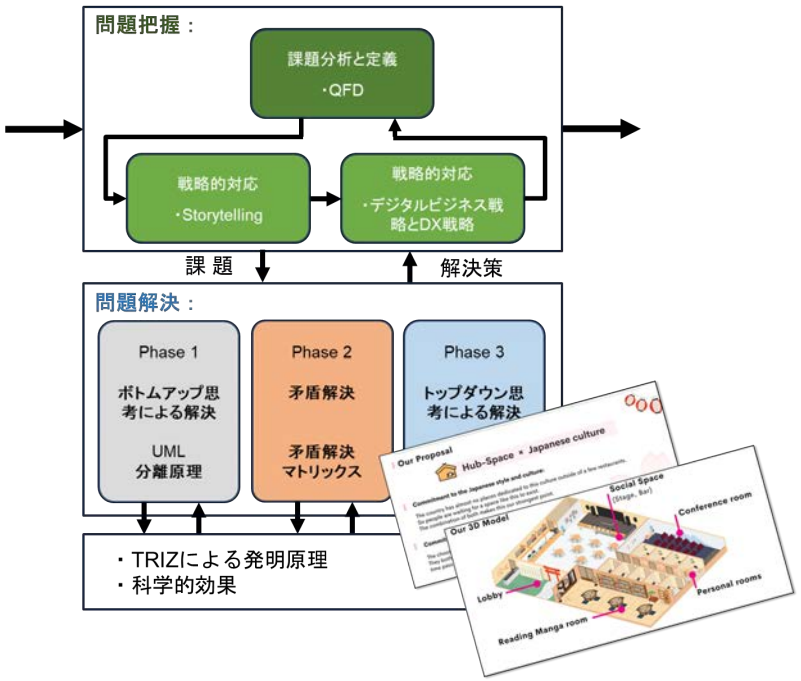
知的創造の担い手となる人材育成のための産学官連携スキーム

【研究】

ソフトウェアやサービス分野でのイノベーションを創出するために，Creative and inventive Design Support System for DX(CDSSforDX)を開発．この支援プロセスをCEP@FCT/UNLに導入．問題把握のタイミングで戦略的対応を考慮することで，アイデアを創造的なものに変換する．この研究成果を日本工学教育へ投稿，採択済みである．

【社会貢献】

那須地域の各種実証実験は，下野新聞に2回掲載，CEP@SITで実施したワークショップは，Mapbox Japanのブログで活動内容が広報された．第6回プレゼンフェスティバルin那須(2024.2.3)では，那須地区創生PJの成果「感香」を発表．那須町教育関係者や地域の方々から好評を得た．また，NOAA×埼玉県PJの成果を，彩の国ビジネスアリーナ2024で公開．埼玉発のマイクロモビリティ実現に向けて，シェアモビリティ研究会の企業と共同開発を進めていく．



DXのための創造的・発明問題解決支援プロセス，CDSSforDX

主なトピックス

■「感香」～那須地区における周遊的な観光～

第4回ビジネスコンペティション第3位の那須地区創生PJは，那須町の観光地から作られた香り(アロマ)を技術で再現することで，那須を回遊させる「感香(かんこう)」サービス．

次世代に那須の魅力を発信．香りのガチャガチャの景品は，全て那須の天然資源・廃棄物から作成，サスティナブルな提案．観光客が楽しむことはもちろん，回遊先の那須の事業者も潤う，そして那須町役場を通じて那須全体が盛り上がる三方良しを実現．このプロジェクトにより，那須の観光産業のさらなる発展・新たなる価値創生を図った．

那須町の香りがするガチャガチャ:
那須の香りで観光地に行ってみよう！

企業主催
ビジコン
3位

11月中旬の2日間にわたり，「感香」PJの実証実験を行った．那須の強みである温泉，自然，コーヒーの3つをテーマに全部で6地点の観光地を提案．ガチャガチャの景品を240個用意した．また，下野新聞の取材，那須事業者のSNS，ポスターなどによる告知もあり，240個のすべてを2日間で配布することができた．

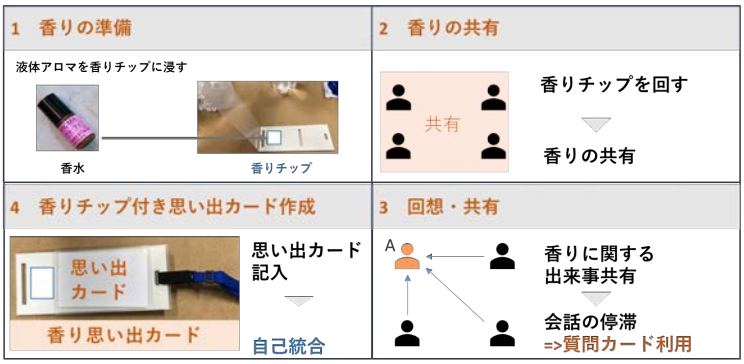
実証実験の結果から「感香」という五感を活用した新たな観光サービスの有用性を示すことができた．一方，アンケートの集計結果から，景品の改善点が見つかった．実証実験を通して得た知見を活かし，今後の那須町の観光産業の発展に貢献していく予定である．

■ 香りをキッカケとした回想レクリエーション

第7回「開放特許を活用した学生アイデア発表会in埼玉」にて審査委員特別賞を受賞したさいしんコラボ産学官PJ．

このPJでは，富士通(株)の開放特許「芳香発散技術」を活用した商品アイデア『香りをキッカケとした回想レクリエーション』を企画・提案した．これは，特有の香りチップ(例えば，ポマードの香り)をキッカケとして，自身を振り返り(これまでの生活で自身が経験した出来事に関する自伝的記憶を回想)，香りを共有．香りチップ付き思い出カードに記入，香りをきっかけに会話をしていくレクリエーション．ビジネスモデルの作成には，ターゲットの介護施設への訪問，コスト積算を行った．

香りを共有し回想



1~4を人数セット実施=>全員が主人公になる場の提供

香りをキッカケとした回想レクリエーションの概要

■ シリアスゲーム：ペーパーハンター活性化

兵庫県中小企業家同友会チームIT神戸のANXAPJでは，ゲームで社会課題の解決．罠狩猟IoTとゲームを掛け合わせたシリアスゲームを提案．ペーパーハンターの活性化機会を創出．このシリアスゲームは，現実世界で行うベテランハンターゲーム，仮想世界で行うハンタートレーニングゲーム，一般ユーザ向けのイノシシ捕獲ゲームの三相構造で構築．現実世界のベテランハンターゲーム(罠狩猟IoTを用いた狩猟)では，罠の見回り負担軽減と実力可視化による承認要求の充足，仮想世界のハンタートレーニングゲームでは，トレーニング機会，応援，狩猟活動の進出機会と罠譲受，一般ユーザは，社会貢献としてのイノシシ捕獲ゲームにより，ポイント数によるジビエの譲受とハンターの推し活ができる．

ペーパーハンター活性化のための3つのゲームの概要

PROJECT 07

連携エリア：さいたま市、埼玉県、川口市中小企業など

「低炭素パーソナルモビリティと移動情報ネットワークサービスの開発」プロジェクト

代表者	古川修【教授】(大学院理工学研究科)
構成員	長谷川浩志、伊東敏夫(システム理工学部機械制御システム学科)／渡邊宣夫(システム理工学部生命科学科)／山崎敦子(工学部共通学群)

プロジェクトの概要

①自転車の転倒防止制御システムの開発
ジャイロ効果を利用して自転車の転倒防止制御を行うシステムを開発し、高齢者などの交通弱者が安心安全に市街地を移動できる低炭素社会の移動手段を提供する。さいたま市及び川口市の機械加工・溶接メーカーの株式会社栄精機製作所と連携して、次世代自動車・スマートエネルギー特区での社会実証実験を目指す。
②移動情報ネットワークサービスの開発
コミュニティサイクルを情報ネットワーク化して、付加価値の高い情報を適切に伝達することにより、街の賑わい創出に貢献する。さいたま市と連携して、社会実証実験を目指す。

COC活動の成果

■自転車の転倒防止制御システムの開発

川口市の中小企業である株式会社栄精機製作所と連携してプロト1号機を設計・製作し、組立・調整を行い、電動アシスト自転車に搭載して走行制御が行えるレベルに仕上げることができた。

スマートコミュニケーションJAPAN2016でさいたま市のブースに実機を展示し、プロジェクト活動成果をさいたま市「パーソナルモビリティ普及研究会」で報告した。

研究成果を2017年9月に奈良市で開催予定の交通予防安全技術に関する国際シンポジウムFAST-zero' 17での発表を予定している。

プロト1号機が完成

■移動情報ネットワークサービス前期成果

グループの検討結果として、ロゲイニングという自転車を用いていかに多くのチェックポイントを通過するかを競うゲームをコミュニティサイクルに適用し、情報ネットワーク化して、地域の賑わいを創出し、コミュニティサイクルの利用を促すサービスが提案された。

このサービスアイディアをさいたま市ニュービジネス大賞2016の学生部門に応募し、最終選考の決勝に進出する成果を挙げた。

■移動情報ネットワークサービス後期成果／PJ15と連携

「産学・地域連携PBL」でさいたま市と連携するPBL授業を行い、プロジェクト15「インバウンドビジネスを創出するグローバル・ローカリゼーション」と共同のテーマとして、コミュニティサイクルを用いた海外渡航者の観光ビジネスの検討を学生グループが行った。

留学生が半数以上を占めるプロジェクトグループ構成で検討が行われ、ポートの位置をグーグルマップ上にプロットし、QRコード化してわかりやすくする、走行距離のランキングに応じて上位者に商品を発送する、プロモデルの自転車の導入などの、海外渡航者からのコミュニティサイクル認知度を向上させる提案がなされた。

ロゲイニング×コミュニティサイクル×情報通信のアイディア

どこまで走るかランキングをつけて認知度を向上させる

主なトピックス >>

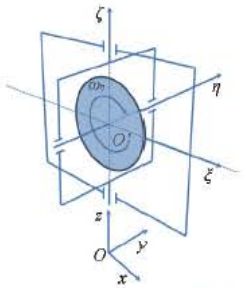
低炭素パーソナルモビリティ

2輪車転倒防止システムの基本コンセプト

対象とする2輪車は、一般的な電動アシスト自転車とする。また、転倒防止システムを後輪荷台部へ後付可能とすることで装置の使用を容易なものとし2輪車の安全性を効率的に向上させる。転倒防止システムには、自転回転体としてフライホイール(以下、FW)を用い、第二軸によって触れ回すことで2輪車のロール方向にモーメントを発生させる。

装置のξ軸周りに発生するジャイロモーメントを下に示す。また、その時の算出式を示す。ただし$I_{\eta\eta}$をFWのη軸方向の慣性モーメント、$I_{\zeta\zeta}$をFWのζ軸方向の慣性モーメント、ω_ηをFWの自転角速度、ω_ζをFWのζ軸方向の角速度、ϕを2輪車のロール角とする。

$$T = \dot{\theta}\cos\theta\left(I_{\eta\eta}\omega_\eta - I_{\eta\eta}\dot{\phi}\sin\theta + 2I_{\zeta\zeta}\dot{\phi}\sin\theta\right)$$



2輪車に対するジャイロ効果の影響

2輪車転倒防止システムにおける研究概要

プロト1号機の製作を行い、下に示すように組立てが完了した。今後は、システム単体機能の確認、アシスト自転車に搭載した際の転倒防止機能の実証を行うための、制御系設計と装置へのインプリメントが残されている。

制御系の設計プロセスとしては、2輪車シミュレーションソフトウェア「BikeSim」と計測装置を搭載した自転車によって計測した実測データから制御系の最適化を行っている。

転倒防止システムにより転倒防止を実現させる為に、FWの振れまわし角を制御し、最適なロール方向のモーメントを発生させる。本制御方法ではライダーが傾けたいと考えているロール角を目標値として算出し、その値に追従するよう制御を行う。この制御方法を用い装置を動作させることで、スリップ事故防止・悪路走行時の走行安定性向上・停車時の直立可能など様々な効果が挙げられることがシミュレーションで確認された。また、本装置によってハンドル操作によるロール角の応答性が上昇することで小回りの利く運転が可能になり不意に障害物が現れた際にも安全に回避が可能となる。

今後は、さらに人間の操縦特性とのマッチング、本装置付加による不安全事象の確認と対策も合わせたシステムの最適化を行っていく予定である。

2輪車転倒防止装置

TOPへ戻る

参考：プロジェクト名・連携先地域（コピペ用）

PJ No	氏名	研究課題	連携先地域
2301	長谷川浩志	知的創造の担い手となる人材育成のための産学官連携スキームの開発	埼玉県，さいたま市，川口市，那須町・那須地区，姫路市，神戸市
2302	志村秀明	江東内部河川・運河の活用とコミュニティ強化	東京都江東区・中央区、福島県南会津町
2303	橋田規子	地域に貢献できる大学パブリックスペースの提案	江東区
2304	小柏典華	「木のジャングルジム」を応用した伝統木造構法の現代的実践適用について	豊洲
2305	増田幸宏	地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントとSDGs達成に向けての地域課題解決策の実践	墨田区、上尾市、さいたま市
2306	石﨑聡之	ARスポーツを活用した地域高齢者活性化プロジェクト	さいたま市
2307	中口 毅博	SDGsマインドを持った人材育成のための地域連携・学校連携型合同授業・社会活動の実践	埼玉県、東京都など
2308	市川学	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用	栃木県那須町、福島県大熊町、沖縄県南城市
2309	村上嘉代子	インバウンドビジネスを創出するグローバル・ローカリゼーションプロジェクト	さいたま市、那須エリア、関東中心部から北関東における各主要地域

SDGsマインドを持った人材育成のための地域連携・学校連携型合同授業・社会活動の実践

代表者	中口 毅博【教授】(システム理工学部環境システム学科)
構成員	磐田 朋子(システム理工学部環境システム学科)／田邉 匡生(デザイン工学部)／間野 一則(システム理工学部電子情報システム学科)／君島 真仁(システム理工学部機械制御システム学科)／渡邉 大(システム理工学部機械制御システム学科)／越阪部 奈緒美(システム理工学部生命科学科)

■プロジェクトの概要

学習指導要領では個別最適な学びと協働的な学びの一体的な充実が求められている。個人の興味に即したテーマ設定や多様な世代や多様な地域間の交流・連携による探求学習や社会活動を実践することで、個人の資質能力やキャリア意識が向上し、地域の持続可能性も高める必要がある。

そこで本プロジェクトでは、複数の学科教員が市民団体、企業、行政とも連携し、中高生も参加できる合同授業や現地見学・社会貢献活動などの実践を通じて、SDGsマインドを持った人材が育つ場や機会を提供することを目的とする。具体的には合同授業やワークショップ、現地見学・社会活動体験・交流、デジタルコンテンツ協働製作などを学科横断、学部横断、さらには小中学校・高校など合同で行った。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】合同授業・合同見学

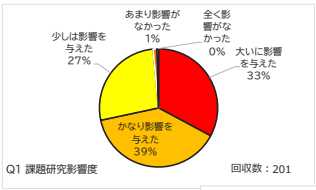
大学院システム理工学専攻「地域環境教育特論」において杉並区立西田小学校6年生と、システム理工学部総合科目「SDGs入門」においては芝浦工業大学柏高校や付属高校2年生と、システム理工学部システム情報科目「創る」にいては八重山商工高校3年生との合同授業を行った。

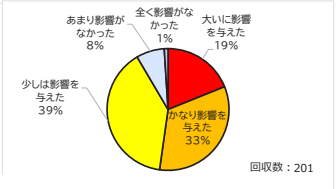
またシステム理工学部システム情報科目「SDGsマネジメント論」や「SDGs入門」においては、中高生とともに企業見学等を行い、環境システム学科専門科目「環境フィールド実習・体験」においては関東や現地の中高生と合同実習を行い、「SDGsマネジメント実習」においては幼稚園・保育園・小学生向けのSDGsイベントを「次世代SDGs月間」において実施した。

杉並区立西田小学校にて芝浦工大生が訪問し地球温暖化問題について合同学習(2023.5.17)

【研究】

参加者の主体的学習態度を「人生・社会への応用率」として捉え、プログラム参加直後の参加者アンケートにより、課題研究影響度、キャリアデザイン影響度、社会貢献意識、他校生との会話、リピート意思の5項目について、学校・学年別、プログラム別に把握した。その結果、課題研究影響度、社会貢献意識、他校生との会話、リピート意思については「大いに･･･」と「かなり･･･」の和が80%程度と高かったのに対し、キャリアデザイン影響度は50%程度にとどまった。このことから、今後、キャリアサポートと結びついた学びの支援を強化する必要があると言える。

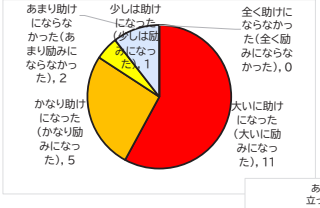


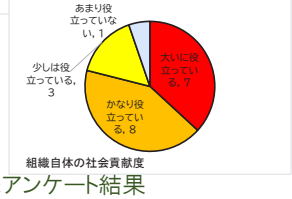


参加者アンケート結果

【社会貢献】

一方、受け入れ側に対して、「今回参加した中高生や大学生は、貴組織の活動の助けにどの程度なったか」を尋ねたところ、19組織中16組織が「大いに助けになった」と「かなり助けになった」と答えた。また「貴組織が実施された活動がどの程度社会課題解決役立っているか」を尋ねたところ、15組織が「大いに役立っている」「かなり役立っている」と答えた。これらのことから、中高大学生の社会活動への参加が、社会貢献に繋がったといえる。





受け入れ先アンケート結果

TOPへ戻る

主なトピックス

■（株)明治坂戸工場見学　2023.8.1

明治なるほどファクトリー坂戸の工場見学を行いました。芝浦工業大学をはじめ、芝浦工業大学柏中学校、筑波大学付属坂戸高校、渋谷教育学園渋谷高校の学生・生徒計16名が参加しました。はじめに、企業案内ビデオの視聴を通じて、坂戸工場ではチョコレートをはじめ、ビスケット・グミキャンデー等を生産していることを知りました。工場見学では、板チョコレートの製造ラインやツインクルの包装ラインを見せて頂きました。工場見学の後は、Meiji Cocoa SupportやTANPACTなど、社会課題の解決を見据えたSDGsの取り組みをしていることを知り、感銘を受けました。最後にグループワークで意見を交わした後、質問に回答してもらいました。

サステナビリティ推進部企画グループ長の山下さんから明治のSDGsの取り組みなどについてレクチャーを受けている様子

■石垣島SDGsスタディーツアー　2023.8.23-24, 9.11-12

初日は、石垣市役所や名蔵アンパル見学、川平湾グラスボートでサンゴ礁観察、宮良殿内などを回り、夕方にはユーグレナモールにて街灯アンケートを実施しました。翌日は石垣市公営塾に参加する八重山高校生5名と共に、ビーチクリーン活動をしました。朝日がとてもきれいで感動的であったのと対称に、海岸は多くのゴミが散乱していました。その後国際サンゴ礁研究・モニタリングセンターでサンゴの白化現象や白化の原因であるオニヒトデの駆除方法を学びました。さらに、車内から石垣島駐屯地、八重山戦争マラリア犠牲者慰霊之碑を視察し、午後はサンゴの白化原因の一つである赤土流出対策現場に行きました。

右上：川平湾グラスボート
左下：高校生とのビーチクリーン活動

■ 宮城県震災復興スタディツアー　2023.11.3-5

芝浦工大生7名に加え、成蹊大学生・教員4名、芝浦工大柏高校生・保護者6名、筑波大坂戸高校生2名、大宮国際中等教育学校の高校生2名が参加しました。初日は気仙沼市内湾地区の復興まちづくりの話を聴き、防潮堤や舞根湾の自然再生現場をみて気仙沼大島に宿泊しました。2日目は魚市場を見てから、気仙沼向洋高校生のガイドで東日本大震災遺構・伝承館を見学し、午後から気仙沼高校生の大谷海岸アート化計画の話を聴いてから一緒にビーチクリーン活動をしました。3日目は南三陸歌津地区の復興支援活動の話を聴いた後、復興住宅や旧防災庁舎を見て、旧戸倉小学校や石巻市旧大川小学校を訪ね、元校長先生やご遺族のお話を聴きました。

右上：東日本大震災遺構・伝承館見学のようす
左中：大谷海岸でのビーチクリーン活動
右下：内湾地区の防潮堤見学のようす

■ 芝浦工大付属柏中SDGs企画　2023.12.9

芝浦工業大学付属柏中学校にて1年生約200名を対象に「環境教育・市民活動論」「SDGsマネジメント実習」履修生が「八幡平SDGsすごろく」の他に「生物多様性クイズ」「SDGsごみクイズ」「防災クロスロードゲーム」「SDGs伝言ゲーム」を行いました。10:25から、グリーンホールで中口教授によるSDGsのお話を聞いた後、各教室に帰り、11:00からゲームやクイズを行いました。例えば、優秀な個人には防災備蓄米が配られました。

右上：「八幡平SDGsすごろく」実施のようす
左下：「生物多様性クイズ」実施のようす

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

代表者	増田幸宏【教授】(システム理工学部 環境システム学科)
構成員	作山康 鈴木俊治 石川裕次 市川学 磐田朋子 小山友介 澤田英行 真保晶子 袖野玲子 田口博之 中村仁 松下希和中口毅博 山嵜一也 持永大(システム理工学部 環境システム学科)

■プロジェクトの概要

これまで環境システム学科で取り組んできた以下3つのCOCプロジェクトの成果を踏まえ、学科カリキュラムにおける「地域志向活動型アクティブ・ラーニング」の確立と、全教員の参画と地域関係者の協力のもと、学科の総力を挙げて「国連と学科独自のSDGs達成に向けての地域課題解決策の実践」に取り組むものである。
1)社会人基礎力向上を目指す地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントと教育アセスメント(代表:澤田英行)　2)公民学連携による高齢化社会対応まちづくり研究-サテライトラボ上尾の全世代型サードプレイスと地域教育研究拠点(代表:作山康)　3) 気候変動と地震災害に適応したレジリエントな地域環境システム(代表:増田幸宏)

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

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

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

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

埼玉県のSDGs官民連携プラットフォームに研究室として参画し、「大宮公園七夕Night」の企画運営等に学生が主体となって参画した。

【社会貢献】 高度な専門性と学生の行動力を活かすことのできる地元の大学が地域の発展のために果たす役割は大きい。今年度も学生主体にて、さいたま市「第22回さいたま市環境フォーラム」への出展や、埼玉県のSDGs官民連携プラットフォームに参画し、都市公園における熱環境と利用状況の実態に関する研究、都市公園の防災活用に関する研究、産官学民連携による大宮公園のリノベーションに関する研究等に実証的に取り組んだ。また、学科の中核となる演習科目「環境システム応用演習A/B(3年)」においては、学生主体で、社会ニーズを踏まえ、短期～長期的な視点で課題解決を図る提案が作成され、充実した成果が挙げられた。検討対象地域のSDGs達成にどの程度貢献したか、ヒアリング調査や外部ゲストの講評を通じて明らかにした。

第22回さいたま市環境フォーラムに出展し、学生主体で地域住民や地域関係者との交流を実施

主なトピックス

■SDGs官民連携プラットフォームへの参画

埼玉県のSDGs官民連携プラットフォーム「都市公園の持続可能な利活用と環境保全に関する検討部会/次世代につなぐ大宮公園検討グループ」に研究室として参画し、学生が実行委員等として主体的な活動を行った。「大宮公園七夕Night」、「第一回大宮公園防災車中泊＆キャンプFes」の企画運営に参画した。各種調査や大宮公園独自の防災ガイドブックとして周辺の地域住民に配布するリーフレットの作成等も学生主体に実施した。

大宮公園防災車中泊＆キャンプFes実行委員集合写真

■環境システム応用演習A/B

「環境システム応用演習A/B(3年)」は本キャンパスがあるさいたま市内2地区、さいたま市以外の県内3地区、東京都内2地区、千葉県及び栃木県内各1地区、計9地区を対象として9チーム編成で実施した。各地域において現地調査や関係者ヒアリングを実施し、建築・都市・環境の視点から地域課題を解決する提案を作成した。

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

学生は建築設計(意匠、構造)、都市計画・設計、環境システム、情報システムの専門分野に分かれ、分野融合でグループワークを行った。発表会では地域関係者も多数参加し、提案と意見交換を行った。

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

■「サテライトラボ上尾」を拠点とした活動

「サテライトラボ上尾」を拠点とした地域課題解決の取組みを実施し、4つの卒業研究をまとめた。

小図書館を本格運営するとともに、芝浦工業大学大宮図書館員のアドバイスにより図書の分類や廃棄本を譲受するなど大学図書館との連携を図った。新たに団地内DIYのニーズ調査研究や団地内英語教室としてのサードプレイスの実証実験など新しい取り組みを住民協力のもとに実施し、地域コミュニティの活動が高いレベルで展開しつつある地域貢献研究となっている。

本を分類するとともに、本棚のリノベーションと不足分類本を大学図書館廃棄本から補充。

義務化された小学校の英語に親しめない子供たちに対し、住民ボランティアが英語を楽しく学ぶ教室を開催

■「すみだテクノプラザ」を拠点とした活動

「すみだテクノプラザ」を拠点として、地域福祉や産業活性化と連携した防災まちづくり(地震火災、水害対策)などに関する研究と実践を、地域住民、事業者、福祉系・まちづくり系の団体や専門家、墨田区などと連携して実施した。科目「環境システム応用演習」では、東向島二丁目地区を対象として現地調査や検討を重ね、地域の再生策を立案した。研究面では、墨田区北部地域を対象とした大規模な市街地火災時の避難における延焼遮断帯の有効性や課題を検証し、学士論文としてまとめた。実践面では、学生団体が地域の関係主体と協働して多数の防災プログラムを実施したほか、地元商工業者と連携しながら“ものづくり”による地域の活性化に向けた取り組みへの参加と議論を重ねた。

応用演習では、建物が密集する駅周辺部を対象に、交流促進を軸とした都市の空間・機能の高度化や地区運営の理念と体制を立案した。

学生が主体となり、社会福祉系団体や住民等と、地域の防災を学びながら防災拠点を目指す「防災遠足」を実施、132名が参加した。

「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用」プロジェクト

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

■プロジェクトの概要

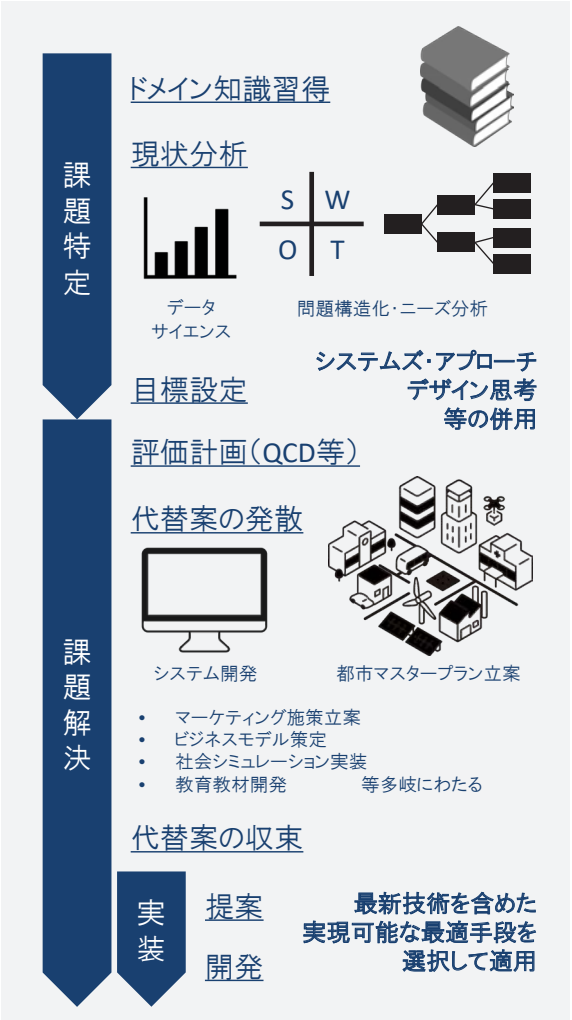
社会に存在する課題に対して、データサイエンスやシミュレーション、センサ類に代表されるハードウェア(VR含む)や建築計画、教育ツールなどの中から実現可能性を考慮して、最適な手法もしくは複数の手法を組み合わせて用いることで、解決することを目指した。事業の対象は、都道府県、地域、市区町村、地区、建物、企業などの制限はせず、対象が抱える課題を活動対象とした。地域を支える信用金庫や地区を所管する市区町村、保健所、都道府県と連携することで、産官学金が連動した事業へと発展させた。合計10個の事業を遂行し、その全てにおいて、システムズ･アプローチやデザイン思考をベースにしながらも、特定の方法論にとらわれずに、ワンストップで課題解決を行った。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】
事業の対象である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･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、関係する知識の習得と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10個の事業を遂行した。具体的な事業内容は、主なトピックスにて報告する。全ての事業において、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も、特定の方法論にとらわれずに、ワンストップで課題解決を行った。

【社会貢献】
都道府県や市区町村、地域や地区、建物、企業が抱える課題を、データサイエンスやシミュレーションの技術を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10個の事業のうち7個の事業が、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。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」の課題解決フロー

TOPへ戻る

主なトピックス

■東京東信用金庫が出資する中小企業における売上向上施策の提案

【データドリブンな施策立案システム】
　東あられ本舗両国本店では、店舗内での顧客行動を、定量的に把握することができていなかった。
　これに対して、AIカメラによる映像分析を行い、その結果をPOSデータと会員証データに紐づけ、顧客の行動を定量的かつ自動的に取得、そしてGPT等で施策立案を補助するシステムを提案した。また、プロトタイプの開発を行い、現在では、店舗にプロトタイプを設置して、実証実験を行っている。

顧客が長時間滞在した場所をサーモグラフィックに可視化

【外国人へのお土産を通じた新顧客体験の創出】
　雷神堂巣鴨本店は、外国人観光客が多く訪れる商店街の中に位置しながらも、彼らを顧客層に上手く取り込むことができていなかった。
　これに対して、ボトルネックであった言語の壁を解消する施策を提案した。視覚的に味を理解しやすいメニュー表と、選択式のパッケージデザインを利用した新たな顧客体験を創出する施策である。

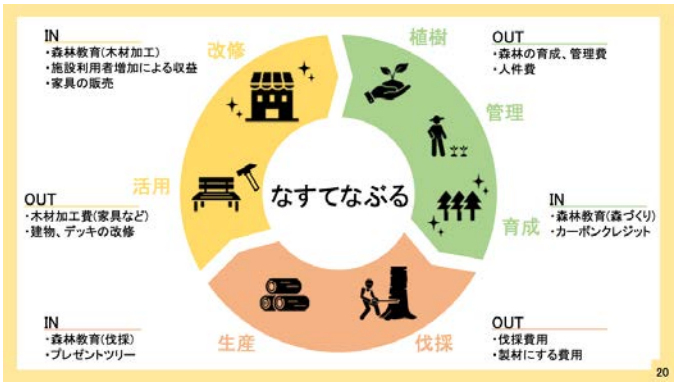
開発したメニュー表とパッケージ(QRコードより閲覧可)

■那須町における社会課題の解決に向けた提案

【X Minutes City】
　町中心部の高久地区の課題は、都心からの交通アクセス性が高いにもかかわらず、地区内部でのアクセシビリティが低いことと特定された。
　これに対して、全てのコンテンツへ10分以内に辿り着ける仕掛けを施した都市計画を提案した。建築設計から教育施策、エネルギー施策、都市OSの組み込みなど、多岐にわたって実現可能性のある詳細な計画を提案した。現在では、この計画の実現のために、用地買収に向けて動き始めている。

【那須町子育てフレキシブルライフ】
　町全体の課題は、人口減少が著しく、より一層魅力のある都市となる必要性があることと特定された。
　これに対して、自然豊かな町の強みを活かした二拠点居住の促進を行うことを提案した。具体的には、町北東部の寺子丙と町東部の伊王野を計画地とし、高所得子育て世帯をターゲットとした住宅建設を中心に据えた都市計画を提案した。

【なすてなぶる】
　町北西部に位置する大丸温泉周辺の課題は、来訪者のニーズにマッチした機能が無いことと特定された。
　これに対して、まちに必要な機能を加えつつも、カーボンクレジット等を利用して自然資源を守り、持続的に都市を支える仕組みを提案した。



当地区最大の強みとも言える
自然資源を守るための仕組みを考案

■その他のプロジェクト

i. 雷神堂とのコラボレーション商品企画
ii. 大熊町における地域課題発見プロジェクト
iii. 東大宮地区の小学生への探究学習プログラムの実施
iv. 第12回学生政策提案フォーラムinさいたまへの参加
v. 新井湯でのトレーニングのデータを用いた効果検証

■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) 機械工学専攻M1　1名/　デザイン工学科4年生　1名

■プロジェクトの概要

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地域の方々に開放している。しかし、利用者にとって快適な空間であるか未調査である。また、この場にある通気口のガラス箱の素材感がキッズパークに相応しくないという意見がある。撤去が困難なこの物体について、これを活用した子供の遊びを提案できないか、求められている。本プロジェクトでは、キッズパークを「地域に貢献できる大学パブリックスペース」とするため、ヒアリング調査と観察により、利用状況や、メリットデメリットなどの特徴を見い出す。また、それらの調査結果をもとに、子どもたちの情操教育に良い遊びの提案を行う。

■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.キッズパークでのヒアリング調査:

利用状況を把握するため、キッズパークに遊びに来た子連れの親89人にヒアリング調査を実施した。結果、遊びに来る子どもの年齢は1～3歳が多く、これは、キッズパークの空間に、幼児の遊び始めに適した遊具が設置されているためである。好評な点は「人工芝」「屋外で日陰」などの点で、一般的な公園にはない要素が挙げられた。実験日の利用者は、初めての訪問が全体の3割で、SNSを見て知ったという方が多く、SNSを多用する親世代に存在が広まっていると考える。懸念事項として、小学生がベンチを積んで危険な遊びをしている状況が見られた。また他の遊具も導入してほしいという要望もあった。

【キッズパークガラス箱】壁に模様を貼っての実験

b.子どものための遊びのアイデア:

aの調査をもとに、デザイン要件の設定を行った。提案する遊具は、遊んでいる子供で最も多かった1～3歳を対象とし、ガラスの箱を用いた壁面遊具とする。遊具を増やしてほしいという意見もある一方で、開放感のある空間が好評であり、ガラスの箱を活用することで、広さを保ったまま新たな遊具を配置できると考えた。

【危険な遊び方】小学生は遊具を動かして危ない遊び方をしている

c. 提案モデルの制作:

アイデア展開より、最終提案をルーレット型のお題遊び「なりきりルーレット」とした。遊び方は、子どもは、動きと動物の書かれた二重のルーレットをそれぞれ回転させ、止まったところにあるイラストの動物になりきって、指示された動きをするというものである。幼児が行うと成長に効果的な動きと、子どもが真似できるような鳴き声やジェスチャーがある動物を採用、文字が読めないことを想定し、ピクトグラムを用いた。

d. 提案モデルの検証 ヒアリング調査・観察:

全体としては外観と絵柄に高評価を得ることができた。1回目は直径を800mmとしたが、対象年齢の子供には大きく、操作ができなかった。また強度不足が判明した。修正を経て直径600mmのモデルでは、サイズ感もよく、強度があることで、全力で遊んでもらうことができた。遊び方に関しては、「動物当てゲーム」「回してなにが出るか」といったように、絵に注目して遊んでもらうことができた。

【提案モデルの実験】子供が実際に遊んでくれるか現場に設置して観察を行った。

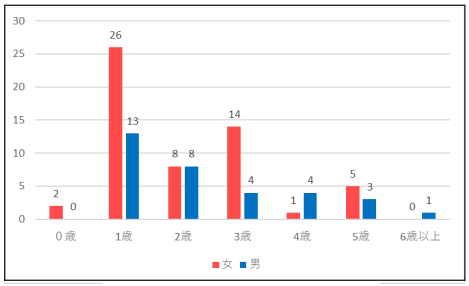
【社会貢献】

製作したモデルについて、キッズパークで遊ぶ子供から大人まで、楽しんで遊んでもらえることが確認できた。この遊びは年齢制限がないため、世代間のコミュニケーションを促すことができ、地域の活性化に繋がるのではないか。ルーレットの絵や背景の模様を差し替えることにより、飽きずに楽しめるのではないかと考える。

主なトピックス

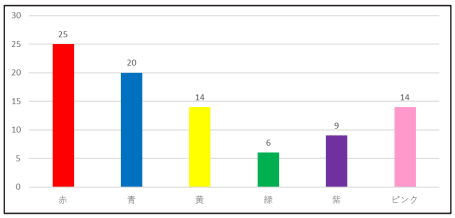
■ キッズパークの調査　子連れの親89人にヒアリング調査を実施

① 遊びに来る子供は、1～3歳が多い
・設置されている遊具が幼児向け。
・下が人工芝で、幼児が転んでも怪我の心配が少ない。



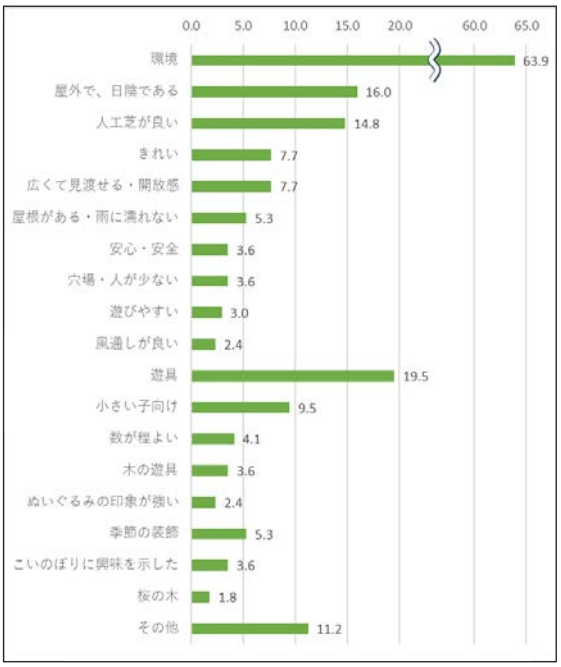
【来場する子供の年齢】

③子供の色の好みを調査
・赤、青、黄、ピンクが人気。明確な色に興味を示す。



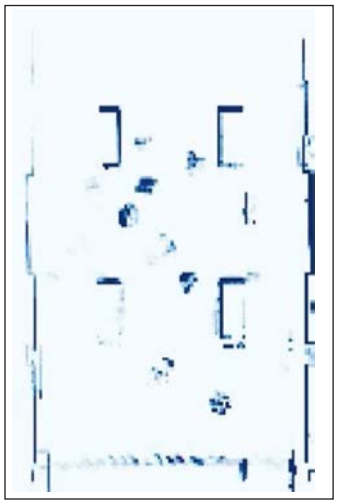
【子どもの好きな色の調査】

②一般的な公園にはない要素が好評
・屋外で、日陰である　／　人口芝が良い
・小さい子向けの遊具がある　／　きれい
・広くて見渡せる　／　開放感



【キッズパークの評価できる点：複数回答】

④Liderによる人流の測定
・遊具周辺に多くの子供が集まっていることがわかった。
・ガラス箱に、赤、青、黄色、緑などの色布を日を変えて貼り、子どもの行動を測定してみたが、特に色別に異なる行動は現れなかった。



【Liderによる人流の測定】

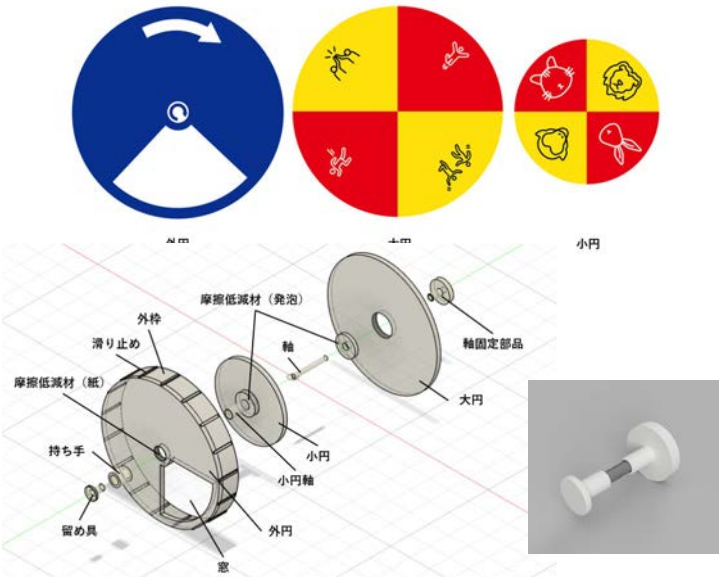
■ アイデアだし

子どもが1人で遊ぶのではなく、年齢の違う子ども同士や、親と子など、身体の大きさの違いを利用して一緒に遊べるような仕掛けを目指した。また、壁面全体に模様を施し、遠くからでも、楽しい雰囲気を出すことも心掛けた。もっとも注意すべき点は安全性と考え、アイデアの絞り込みを行った。

【アイデアだし】上2つは全体が傾いて球を目的場所まで転がすというものであるが、全体に稼働させることが危険を伴うため採用しなかった。設置状態で壊れにくいことも重要であると考えた。

■ 提案物の評価　ヒアリング対象は親と子の6ペア

〇外観が目立っていたため、興味をもってもらえた。
〇幼児も理解できる絵柄・色であることが確認できた。
〇強度upにより、全力で回すことができる。
×説明無しに遊び方を理解してもらえない。
×2つのルーレットの回転できる部分が異なったことで、その理解に時間がかかることがわかった。



【最終提案物】上直径600mm

「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

本学キャンパスが位置する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、また国際的な交流を推進することで、教育・研究・社会貢献の新しい展開も狙っている。地下鉄8号線沿線まちづくり構想や豊洲スマートシティプロジェクト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」で中央区佃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、江東区北砂を対象として、地域資源を活かした安全・安心なまちづくりを提案した。

豊洲運河クルーズでは、学生たちが交代で見どころをガイドした。

【研究】
アクション・リサーチの手法にもとづき、中央区佃では「佃島学校」を拠点として、歴史的家屋である旧飯田家住宅の保存・活用に関する研究、佃の街並み保全に関する研究、高架道路下空間の活用に関する提案、中央区月島では木造長屋活用に関する研究、再開発によるコミュニティの変化に関する研究、江東区豊洲では運河クルーズの促進に関する研究が取り組まれた。また、東京湾岸地域のプレーパークの普及に関する研究と埋め立て形成に関する研究、既存建物の活用に関する研究、「こどものまちイベント」に関する研究が取り組まれた。
更に日本建築学会で、東京湾岸地域に関する研究が4本、SEATUC国際会議で、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」の最終発表会風景。多くの外部ゲストが参加した。

【社会貢献】
江東区豊洲では、「豊洲水彩まつり夏」を7月に、「豊洲水彩まつり秋」を10月に開催し、学生たちはその企画作成とスタッフを務めた。特にその中の「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。
また豊洲では、学生が修士研究を兼ねて、本学の地域貢献施設を利用した「こどものまちイベント」を開催し好評だった。
更に福島県南会津町舘岩地区の集落再生活動である「たのせふるさとまつり」の支援活動を、11名の学生が行なった。

「たのせふるさとまつり」では、学生たちが特産品の販売を手伝った。

主なトピックス

プロジェクトゼミ　佃島旧飯田家住宅の保存と活用

中央区佃一丁目にある「旧飯田家住宅」の保存と活用に関する支援活動に、建築学科3年生の学生8名が取り組んだ。旧飯田家住宅は、関東大震災以前の建築で築100年を超える歴史的な木造建築である。また、佃島の歴史と文化、生業を色濃く伝える漁師住宅の形式を継承する旧魚問屋住宅であり、国の登録有形文化財への指定を目指している。

保存に関する取り組みでは、建物内部の掃除や障子の張り替え、床や柱、梁の雑巾掛けなどを行った。

しばらく空き家になっていたため、床の雑巾掛けといった掃除や、障子の張り替え作業が必要だった。障子の張り替え作業では、地域の子供たちが集まってきて交流が生まれた。

11月5日に開催された中央区の「まるごとミュージアム2023」では、旧飯田家住宅の見学会が開催された。学生たちは、来場者に対して、旧飯田家住宅の見どころを解説した。定員を超える140名もの来場者があり好評だった。またアンケート調査を行った結果、来場者はこの建物が資料館として活用されることを望んでいることなどが分かった。

「まるごとミュージアム・旧飯田家住宅見学会」の様子。旧魚問屋住宅の特徴として、広い土間がある（右側の入り口）。
そのほかにも、敷居が外せるといった特徴がある。

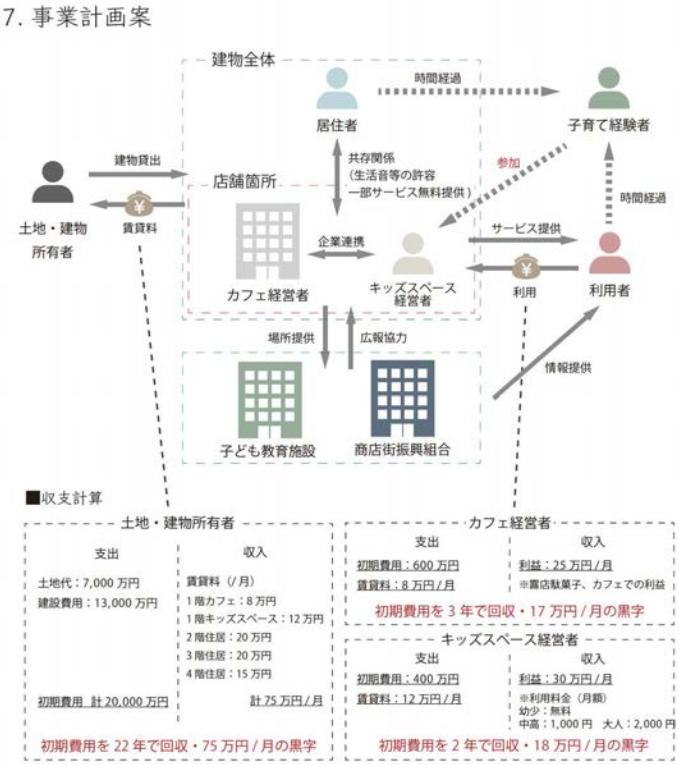
建築学演習・都市地域デザイン　地域資源を活かした安全・安心なまちづくり

24名の大学院生が、江東区北砂三・四・五丁目を対象として、江東区やUR都市機構、URリンケージ、地元まちづくり協議会と連携しながら、安全安心なまちづくりを提案した。この地区の中心である「砂町銀座商店街」は、下町の風情を残し、いまだに活気があるが、幅4mほどの細街路なので、緊急車両の通行に支障がある。その商店街沿いの5区画を取り上げ、建て替えや改修のあり方を、縮尺1/50模型を制作するなどして提案した。

模型写真は、この地区の「まちづくり提案書」にも盛り込まれ、大いに貢献した。

商店街と文化センターの敷地をつなぐ空地を広場として、その広場に面する建物を提案した。オープンカフェなど、地区の新しい魅力とコミュニティの核となることを狙った。

商店街の道路が狭いため、建物をセットバックさせて、道路に面する空間をカウンター形式の飲食店と、テーブルと椅子を並べたオープンカフェとすることを提案した。



学生たちは、提案した建物を実現するための事業計画も合わせて作成した。作業は5つのグループに分かれて行われた。

TOPへ戻る

「「木のジャングルジム」を応用した伝統木造構法の現代的実践適用について」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）／鎌田真聡（建築学部 建築学科）／塩田真央（建築学部 建築学科）／森万佑子（理工学研究科 建築学専攻）／横溝将也（理工学研究科 建築学専攻）／小坂田裕之（建築学部 建築学科）／後藤千汰（建築学建築学部科）／藤崎朋輝（建築学部 建築学科）／中島桃（建築学部 建築学科）／金子涼（建築学部 建築学科）／松島凛花（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のみで組み上げる木のジャングルジム「くむんだー」は、伝統構法の魅力をシンプルに伝えることが可能です。

芝浦工業大学建築学部小柏研究室の有志が中心となって、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、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・大学院生の参画、告知ポスターの作成【Fig.2】、当日の運営やデモンストレーション、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】2023年12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】2023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

【研究】

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、全国の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機会としました。対象地域は、鳥取県・奈良県・山形県の山岳建築が多く残るエリアとしました。

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

２０２３年１２月２日(土)に、芝浦工業大学豊洲キャンパスの大階段前にて木のジャングルジム「くむんだー」の組立て・解体イベントを開催しました。

「くむんだー」は、柱・貫・クサビの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】。

当日は午前の部・午後の部とも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://x.gd/Cc0Te
小柏研究室HP 実施報告　https://x.gd/QJqJI

【Fig.3】参加者とサポーターによる、貫の差込みの様子。

【Fig.4】参加者による、柱を立てる様子。

【Fig.5】組立て後の集合写真。背景には、研究棟・有元史郎記念校友会館・高層タワーが建並び、都心ならではの風景です。

研究報告①　鳥取県調査

2024年2月初頭に鳥取県に所在する懸造建築である不動院岩屋堂【Fig.6】、打吹山長谷寺本堂の調査を行いました【Fig.7】。

懸造の建築は、山岳信仰の特性から自然の中に建てられます。建築の足元は基礎を整形するのではなく、自然に形成された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。そのため舞台束の根元は腐朽が進み、腐食部分を根継ぎする修理が多数確認できました。

長谷寺本堂には、再建過程を示す痕跡が多数確認出来ました。歴史的変遷を検討する上で重要な要素である、新材と旧材の継ぎ方を間近で見学したことで、建築の復原方法を検討する良い機会となりました。地域の歴史や文化遺産の理解を深める上で重要なものであると考えられます。

研究報告②　奈良県調査

2024年2月末に奈良県の懸造建築(東大寺二月堂,室生寺奥之院,長谷寺金堂)を調査しました【Fig.8】。

全て国宝指定を受ける懸造の建築で、斜面に巨大な建築が垂直に建つ圧倒的な存在感に、感銘を受けました。東大寺二月堂は舞台造りとなっており、腰組には、肘木も用いた大仏様の意匠がみられます。また、床材には凹凸があり、無垢材が用いられていることも確認できました。

【Fig.6】不動院岩屋堂
所在地：鳥取県八頭郡若桜町岩屋堂

【Fig.7】 長谷寺本堂での調査
所在地：鳥取県倉吉市仲ノ町

【Fig.8】東大寺二月堂
所在地：奈良県奈良市雑司町

「豊洲スマートシティ事業の産学官民連携による推進」プロジェクト

代表者	古瀬利博(複合領域産学官民連携推進本部　副本部長)
構成員	志村　秀明(建築学部 建築学科　教授)／　廣瀬　敏也(工学部 機械機能工学科　教授／新熊　亮一(工学部　情報工学科)／大山　雄己(工学部　土木工学科　准教授)／市川　学(システム理工学部　環境システム学科　教授)／花房　昭彦(システム理工学部　生命科学科　教授)／佐々木　毅(デザイン工学部　デザイン工学科 教授)／佐藤　宏亮(建築学部 建築学科　教授)／小菅　瑠香(建築学部　建築学科　准教授)青島 啓太(SIT総研　客員准教授)／白石　美知子(研究推進部長)／小泉匡由(研究推進部　研究企画課長)／杉野博之(産学官連携コーディネーター)／高島もも(産学官連携コーディネーター)

■プロジェクトの概要

「豊洲スマートシティ」は、多様なステークホルダーが存在し、成長途上にある豊洲で、先進的技術と都市OS活用により様々な分野のサービス・ソリューションを提供、個々人のニーズ充足と満足度向上、まちの課題を解決するとともに多様な施設・個人が共存・共栄する「ミクストユース型未来都市」の実現を目指す。東京都・江東区や豊洲関連企業(IHI、清水建設、東京ガス不動産、三井不動産等)、技術提供企業と連携して豊洲の課題解決に取り組んでいる。本学は豊洲地域の理工系大学として、研究ポテンシャルを活用し最先端のまちづくりを目指しながら連携・協働を行う産学官民連携事業である。

■今年度の動き

昨年度、豊洲スマートシティ推進協議会は任意団体から一般社団法人への移行が決議され、今年度6月に一般社団法人豊洲スマートシティ推進協議会6月と7月に「2020年度本学活動報告」を豊洲スマートシティ連絡会・推進協議会(以下、連絡会、推進協議会)に向けて実施し、各教員プロジェクトと連絡会企業との意見交換会が実施されるなど、さらに連携の広がりがでてきた。協議会企業も関わる豊洲のイベントで「デジタルスタンプラリー」を実施し、デジタルマップ上に本学の研究室がこれまで培ってきた研究成果が活用されるなどの動きもみられた。また、豊洲以外の地域でも、今後豊洲エリアでの展開を視野にいれた実験等が活発に実施された。

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

■主な活動の成果

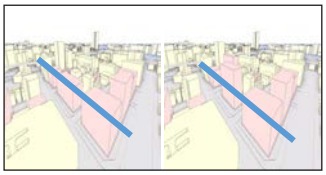
【プロジェクト一覧】

PJ-1「地元まちづくり組織と連動する賑わい創出のプラットフォーム整備に関する研究」	志村 秀明
PJ-2「ラストワンマイルにおけるシニアカーの自動走行に関する研究」	廣瀬 敏也
PJ-3「モビリティのためのデジタルツイン基盤」	新熊 亮一
PJ-4「スマートシティにおけるシステム理工学的課題解決」	市川 学
PJ-5「360度動画撮影による車いす(障がい者)アクセシビリティ研究」	花房 昭彦
PJ-6「ロボットネットワークを活用した異業種、異機種間連携プラットフォームによる地域活性」	佐々木 毅
PJ-7「3次元都市データを活用した住民参加型まちづくりの方法に関する研究」	佐藤 宏亮

【社会貢献】

PJ-1では「豊洲運河クルーズ」で238名が乗船、豊洲の魅力「運河と水辺の風景」を伝えた。PJ-2では高齢者や身体障がい者に向けた市街地での移動支援と安全・安心な自動運転サービスの提供に取り組んだ。PJ-3では実証実験を豊洲校舎内で成功させ、成果を羽田や京都のスマートシティに展開した。PJ-4では取得可能なデータを用いてデータサイエンスのアプローチから都市の可視化を実現するシステムを検討。PJ-5では車いすに取付けたカメラで店舗等のアクセシビリティを記録、被験者の行動体験をもとに調査対象者と意見交換を行い、現場の対応改善策を検討した。PJ-6では「2023国際ロボット展(iREX)」にて会場と豊洲校舎で遠隔操作デモを実施、ロボット連携技術やその重要性を広く社会に伝えた。PJ-7では豊洲スマートシティ推進協議会主催の観光ワークショップに学生が参加、企業メンバーに加わり学生の視点から豊洲エリアの地域資源について議論した。

PJ-6：複数カメラ表示・切替UIの外観



PJ-7：枝川地区における3次元都市空間での都市更新のシミュレーション

【教育】

PJ1では「運河クルーズ」の運営において、デジタルの活用と並行して地元情報サイト運営者等との連携の大切さを学んだ。PJ-2では自動運転システムの構築から評価までを実施、対象システムの幅広い知識の習得、実験を通じ社会ニーズまで理解できた。PJ-3では本学認定ベンチャーと共同で研究と社会実装を行い、学生のイノベーション、起業マインド育成に繋がった。PJ-4では多種多様のデータから都市や住民の特徴を捉えるための分析手法および分析した結果の可視化に関する力を養った。PJ-5では調査員の学生が自ら対象施設の現場の声を聞き、生の動画や音声の記録整理から客観的な情報分析に繋げていく手法を学んだ。PJ-6では国際ロボット展での案内及びデモを学生が実施、遠隔操作時の操作性を改善する機能実装を卒業研究として取り組んだ。PJ-7 では枝川地区の新駅開業に伴うまちづくりに参加し、都市計画の専門的視点から分析、提案を行った。成果発表では専門家に求められるプレゼンテーション能力を修得した。

PJ-5：360度カメラによる動画撮影で商店街の通りや店舗のアクセシビリティを記録

【研究】

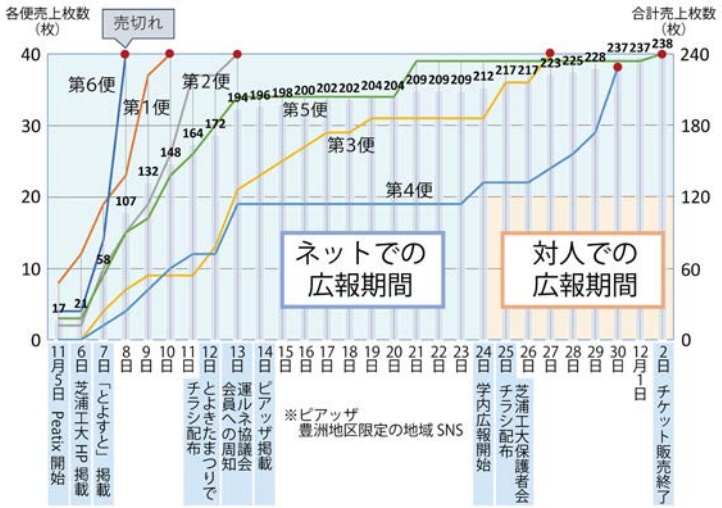
PJ1ではデジタル化により「豊洲運河クルーズ」を効率化した開催する手法を確立できた。PJ-2では自動走行時における制御精度の新たな評価法を導入、制御手法を変更した際の制御精度を評価することができた。PJ-3では実験を豊洲校舎で実施、環境に設置した通信・計算インフラによるロボット・小型車両の自律走行に成功した。PJ-4では地理情報システムを用いた都市の見える化の研究を行った。PJ-5では複数の地域で記録した公共空間のアクセシビリティ情報を整理、施設種別等により環境整備の特徴や留意点を導出していく。PJ-6ではIFAC 2023, SII2024, ROBOMECH2023等にて遠隔操作プラットフォームについての研究発表を行った。PJ-7では枝川地区の新駅開業に伴うまちづくりの検討、都市更新のシミュレーションを3次元都市空間で実施した。

TOPへ戻る

主なトピックス

PJ-1 地元まちづくり組織と連動する賑わい創出のプラットフォーム整備に関する研究　志村 秀明

「豊洲運河クルーズ」は、実験的にインターネット上での広報と販売のみとして進めた。本学のウェブサイトと地域情報発信サイト「とよすと」への掲載によって、チケットの売れ行きが急増した。特に「とよすと」の影響力が大きいと言える。238席のうち、インターネットのみの広報で212席と、8割以上販売することができた。その後は対人での広報も開始して、全てのチケットが完売した。運河クルーズはインターネットで効率的に開催できることを明らかにした。



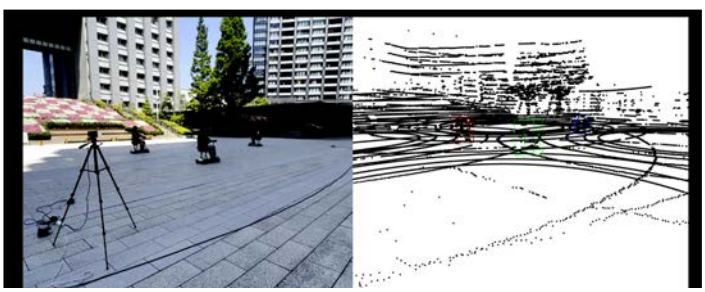
広報手段とチケットの売れ行き状況

PJ-2 「ラストワンマイルにおけるシニアカーの自動運転に関する研究」　廣瀬 敏也

豊洲エリアにて移動支援として，シニアカーの自動運転に関する研究開発を行った．研究開発では，外部環境をシニアカーに搭載したセンサにより検知する自律検知型の自動運転システムおよび外部にセンサを設置して通信により情報を取得して自動運転を行うシステムを対象としている．研究では，自動走行時の制御精度を評価するために動的時間伸縮法(DTW)による評価法を導入し，自動運転の制御手法を変更した際の制御精度の評価を行った．また，豊洲ショッピングモールでの自動運転を想定して，さいたま新都心駅に隣接している商業施設にて一般市民を対象に試乗を含めた実証実験を実施した．

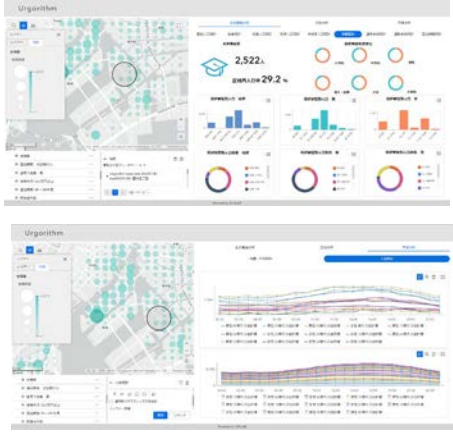
PJ-3 「モビリティのためのデジタルツイン基盤」　新熊亮一

従来の自律走行は、車載のセンサーとコンピューターを前提としていた。小型の車両やロボットでは、車載できる機器の容量に制限があったり、費用を抑えるため高価な機器を搭載できなかったり、センサーの設置位置が低いため死角が多かったり、といった多くの問題があった。そこで、環境にセンサーとコンピューターインフラを設置し、実空間のコピーであるデジタルツインを形成し、仮想空間で交通規制を行うことで、車両・ロボットが人混みを避けたり、横切る歩行者や一般車に対しあらかじめ停止したり、といったことが可能になる。豊洲キャンパス大階段前で行った実験により有効性を実証した。羽田や京都のスマートシティに展開し、CES2024@ラスベガスでの出展を行った。来年度は豊洲でより過酷な条件で、多数の車両・ロボットを同時自律走行させる実験に取り組む。


3台の小型車両の同時走行（右: LIDARセンサーの点群イメージ）

PJ-4 「スマートシティにおけるシステム理工学的課題解決」　市川　学

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


【都市の見える化システム】
豊洲駅付近を可視化した結果

【人の行動検知システム】
動画を解析し人の行動内容を分析する

主なトピックス

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

今年度は多様な人々のアクセシビリティを検討するための事例として、江東区・新所沢・デンマーク(2都市)における商店街や繁華街と、同エリアにおける鉄道や地下鉄、飛行機などの公共交通機関について、360度カメラを用いた空間情報収集と、車いす被験者の行動体験を伴う現地ヒアリング調査を行った。調査実施においては行政、商店会、NPO、社会福祉協議会、他大学等に協力いただき、意見交換の機会を得た。次年度は豊洲を含む各地での調査を増やし、比較検証を行っていく。わが国では2024年4月に事業者の合理的配慮の提供が義務化されるため、本研究成果は多くの公共空間計画に寄与することが期待できる。

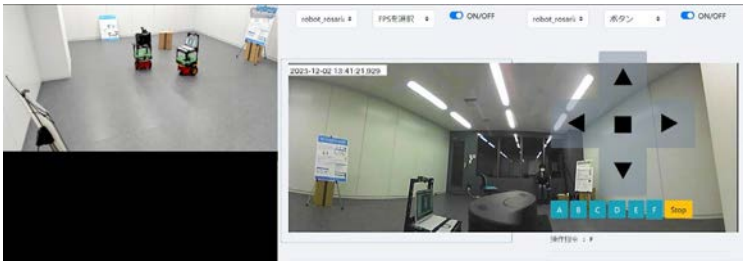
【調査対象地における行動体験およびヒアリングの様子】

研究協力:㈱ヤマグチ　山口　純　(元SIT総研 客員研究員)

PJ-6「ロボットネットワークを活用した異業種、異機種間連携プラットフォームによる地域活性」 佐々木　毅

これまでに開発を進めてきたロボットサービスのための共通通信インタフェースであるRSNP (Robot Service Network Protocol)を用いた遠隔操作プラットフォームにおいて、操作性を改善するための提案を行った。

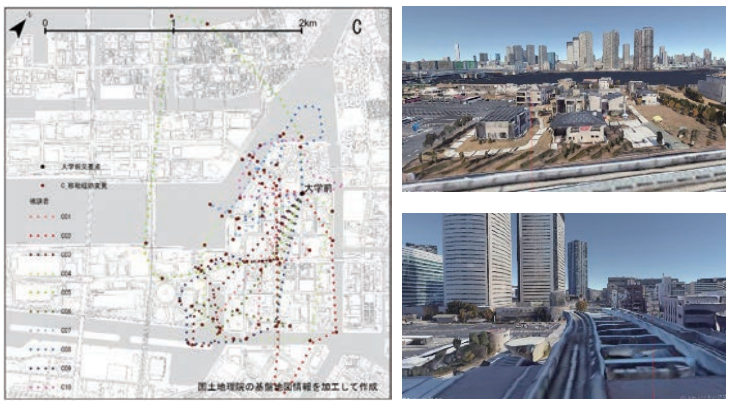
環境に配置された複数のカメラを自動で切り替えながら操作可能な機能を実現し、操作者の作業時における精神的な負荷が減少することを確認した。2023国際ロボット展では会場の東京ビッグサイトと豊洲キャンパスのロボットをRSNPでつなぎ、遠隔操作と自律移動を切り替えて目的地へと移動するデモンストレーションを実施した。



【国際ロボット展での遠隔操作デモの様子】

PJ-7「3次元都市データを活用した住民参加型まちづくりの方法に関する研究」　佐藤宏亮

住民参加型のまちづくりにおいて、3次元都市モデルの活用について検討を行った。本年度は修士研究において、3次元空間を活用した参加型まちあるきの手法の検討を実施した。都市内の魅力的な地域資源を探索しながら都市構造を把握することをテーマに設定し、現実の都市での街歩きと3次元都市空間におけるVR街歩きを実施し、3次元都市モデルの参加型街歩きへの活用の可能性やその有用性について検討を行った。



【3次元都市モデルを活用した街歩きにおける移動経路の分析】

【プロジェクト一覧】

PJ-1「地元まちづくり組織と連動する賑わい創出のプラットフォーム整備に関する研究」　志村 秀明

PJ-2「ラストワンマイルにおけるシニアカーの自動走行に関する研究」　廣瀬 敏也

PJ-3「モビリティのためのデジタルツイン基盤」 新熊 亮一

PJ-4「スマートシティにおけるシステム理工学的課題解決」　市川 学

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

PJ-6「ロボットネットワークを活用した異業種、異機種間連携プラットフォームによる地域活性」　佐々木 毅

PJ-7「3次元都市データを活用した住民参加型まちづくりの方法に関する研究」　佐藤 宏亮

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

機械機能工学科　　青木　孝史朗

１．はじめに

ものづくりにおけるイノベーションでは「発想したモノを具現化し創造する」事が求められ、これを支援する様々なデジタル技術が準備されている。これらを互いに連携して学ぶことはものづくり分野でのデジタル人材育成に必要不可欠であろう。3D プリンタなど一部の製造用工作機械では各装置に最適化された付属のソフトウエアを使うケースもあるが、一般的に今日的なものづくりは設計時に CAD（Computer Aided Drawing）を、製造時にコンピュータ制御された Numerical Control; NC 工作機械により実施するのが一般的である。故に CAD データを NC 用の製造データに変換する仕組みを理解することは、工作機械によるものづくりを理解するのと同義と言える。

しかし本学内ではこれらの内容を系統立てて教授しているのは生命科学科やデザイン工学科の一部のみである。そこで金属加工経験の乏しい機械系学生のみならず、設計したものを造りたいと望む全ての学生を対象に、比較的安全に運用できるコンピュータ支援を用いた金属加工法を教授し、どの程度の習熟が可能かと云う情報を把握しておくことは、ものづくり教育の具体的な教授法や課題の設定などを考えるうえで重要な知見となる。本研究は上述した内容の情報を収集し、現状に即した教授方法を考案する事を目的としている。

２．２０２３年度の実施内容

２－１　実践内容と対象となる学生達の状況

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

当初の計画通り、CAD→ Computer Aided Manufacturing; CAM→ NC 工作機械という一連の工程を学べる形とした。具体的には、100×100mm の平面を持つアルミニウムブロックを供試材として、以下の様に実施した。

【第１回】各ソフトウエアや装置の連携状態の講義。

【第２回】スタッフから CAD を用いてブロック表面に深さ 4mm 程度の見本形状（図１）

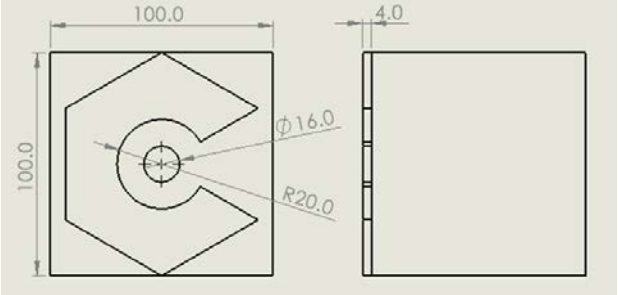


図 1 CAD に於ける形状見本

TOPへ戻る

を作成し、その形状データを CAM へ引き渡して G コードを作成する操作方法を教授。

【第 3 回】各自にて任意形状を考案・作図・G コード作成し、そのコードを読み込ませて工具の動きなどをシミュレーションする。その状態等に関しレポートを作成。グループ内で実際に作製するモデルを 1 つに絞る。

【第 4, 5 回】各グループ毎にマシニングセンタ ; MC にてアルミニウムブロックを加工し、加工後の形状と設計図面との差異を確認。

【第 6 回】製作したブロックの状態、寸法誤差等に関する考察を学生より発表。

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

受講者は 18 名で 6 グループに分けた。これら学生達の加工関係の履修履歴としては、1, 2 年生で設計や加工に関する講義およびドラフターを用いた製図（CAD は未教授）であり、加工の実習などは授業としては教授しておらず、ほとんどの学生が趣味やサークル活動での DIY 経験程度である。

２－２　教育効果などの測定方法

成績評価はグループ評価と個人評価に分けた。グループ評価はプレゼンテーションを踏まえた最終レポートの考察内容、個人評価は第 3 回時でのレポート内容とした。

授業における教育効果は、上記の成績評価とは別に、カークパトリックモデル(1)のレベル 1（満足度）とレベル 2（教育効果）を用い

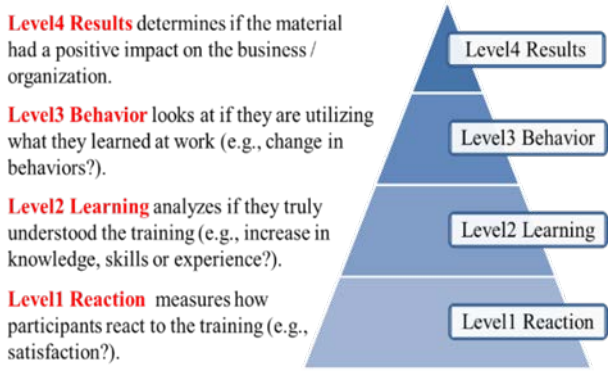


図２　カークパトリックモデル

た。レベル 3 以上の評価は教授内容と授業時間の制約から本授業内での実施は困難と判断した。

レベル 1（満足度）は第 6 回授業後に授業評価アンケートを実施し評価を行った。質問項目は以下の通りである。

①講義についてお聞きします。講義に参加して全体的に満足していますか。
②講義に使用したテキストは理解しやすかったですか。
③講義に使用したテキストは必要十分な内容でしたか。
④講義で学んだことはものづくりの理解に役立ちますか。
⑤本ゼミは楽しかったですか。
⑥講師についてお聞きします。講師の説明は理解しやすかったですか。
⑦講師は適切な時間管理の下、効果的に講義を運営していましたか。
⑧講師は受講者の求めに適切な対応をしていましたか。
⑨グループワークについてお聞きします。班の分け方に問題はありませんでしたか。
⑩班に課せられた内容の量は適当でしたか。
⑪班活動は概ね全員が協力して活動できたと言えますか。

以上の問では、そう思う・ややそう思う・あまりそう思わない・そう思わない、の 4 択とした。

レベル 2 の教育効果は、授業第 1 回目の最初と第 6 回の最後に同一設問のテスト（100 点満点）を記名式で実施し、受講前後での得点状況から評価した。なお、このテストの結果は成績評価には用いない事とし、学生達にも周知している。設問は以下の通りである。

・(問 1)[配点 25 点]「CAD」,「CAM」,「CAE」,「NC 工作機械」についてそれぞれ説明してください。（どのようなものであり、役割は何であるか等）
・(問 2)[配点 20 点]設問 1 で示した 4 つの用

TOPへ戻る

語を用いてものづくりの基本的な流れを説明してください。(図やフローチャートを使用してもよい)

・(問 3)[配点 20 点]製造データ（G コード）で知っているコードや指令をできるだけ書いてください。(例 G91：インクリメンタル指示、M05：主軸停止など)

・(問 4)[配点 35 点]ものづくりをする上で、NC 工作機械を使う方がよい場合と、そうでない場合があります。どういった時に NC 工作機械は多用されるべきなのか、反対に使うには不向きなのはどんな条件、環境下なのかそれぞれ説明してください。

このテストの得点の伸びを仮説検定（t 検定）[(2)]を用いて統計的に処理し、教育効果としての検証を行った。

3．実施結果

3－1　授業実施の状況

6 グループの製作物の写真を図 3 に示す。4 グループは表面に溝を掘る形状を選択し、2 グループは対象を浮かせて周りを削り落とす形状を選択した。

ソフトウエア関連の教授に関しては特に問題はなかったが、実際に MC で切削を行う際に工作機械が動作しないことが多々発生した。機械メーカーのサポートと連絡を取りながら対応し、動作不良は解決したが、実際の加工は授業時間外にて対応することも多かった。

図 3　学生達が設計・製作した製品の外観

3－2　アンケート結果によるカークパトリックモデル（レベル 1：満足度）の評価

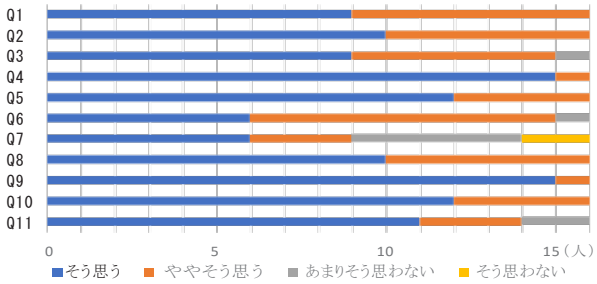


図 4　満足度アンケート（レベル 1）結果

図 4 に 6 回目の授業後に行った満足度調査アンケート結果（18 名中 16 名分を有効と認め利用）を示す。好意的評価（4 つの選択肢のうち“そう思う”、“ややそう思う”）が 93.8%となった。受講した学生達の満足度は高水準であり問題ないと判断できた。

3－2　テスト結果によるカークパトリックモデル（レベル 2：教育効果）の評価

授業前後のテスト結果を図 5、表 1 に示す。

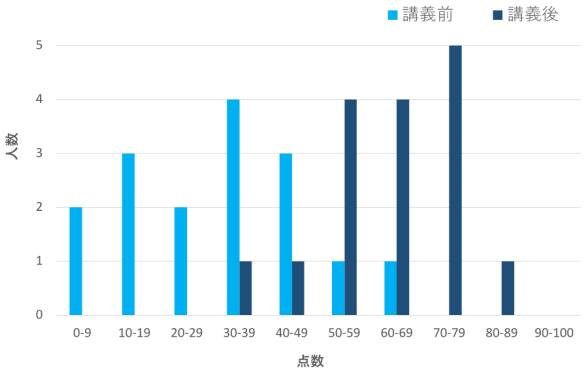


図 5　授業前後におけるテスト結果

	設問 1	設問 2	設問 3	設問 4	合計
授業前	41.5	47.8	0.0	28.8	30.0
授業後	74.5	73.4	75.3	43.8	63.7
伸び率	33.0	25.6	75.3	15.0	33.7

表 1　授業前後におけるテスト得点率の平均

これらのデータを用いて、学生の理解度が向上したか、仮説検定を用いて検証した。具体的な手順を以下に示す。

1) 初期条件として、講義前後での点数の伸びと平均値を求めた。

2) 帰無仮説と対立仮説を次のようにそれぞれおいた。

帰無仮説 H_0：講義前後の点は等しい。

対立仮説 H_1：講義によって点数差が生じた。

3) 有意水準は 5%とした。

TOPへ戻る

4)不偏分散S^2を用いるt統計量を使った。$\bar{d}$は講義前後の点数差の平均、μ は差の母平均、nを標本数と置くと、

$$t=\frac{\bar{d}-\mu}{\sqrt{\frac{S^2}{n}}}=\frac{\bar{d}-\mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

となる。

5)ここで棄却域を決めた。今回は標本数 16 で、自由度 15 の t 分布を用いた。また点数が上がったかどうかのみを見ればよいので片側検定を行った。

統計数値表より　$t_{0.05}(15)=1.753$

したがって棄却域は、t の値が 1.753 より大きい範囲となる。

6)検定統計量をもとに結論を出した。講義前後での点数差が 0 であるとすると、$\mu=0$ である。また講義前後の点数の伸びと全体の平均点の伸びについて不偏分散 S^2 を求めると、受講者の講義前後の平均点の伸びは約 33.69 であったので、不偏分散は、

$$S^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}{n-1}\cong 364.763\ldots$$

となった。したがってtを求めると、

$$t=\frac{\bar{X}-\mu}{\sqrt{\frac{S^2}{n}}}=\frac{33.7-0}{\sqrt{\frac{364.76}{16}}}\cong 7.05$$

であり、これをt分布における5%点と比較すると、

$$7.05\gg t_{0.05}(15)=1.753$$

となる。したがって帰無仮説 H_0 は棄却され、対立仮説 H_1 が採用される。よって本講義はテストに対して有意な点数差を生じさせたことが検定できた。

7)具体的に今回の場合点数にして何点分が学生の理解度に寄与したかを検証した。同様に帰無仮説と対立仮説を次のように置いた。

帰無仮説 H_0 : 講義前後で μ 点の点数差は生じなかった。

対立仮説 H_1 : 講義前後で μ 点の点数差が生じた。

8) $\mu=26$ のとき、

$$t=\frac{33.7-26}{\sqrt{\frac{364.76}{16}}}\cong 1.613<t_{0.05}(15)=1.753$$

よって帰無仮説 H_0 は棄却できない。

9) $\mu=25$ のとき、

$$t=\frac{33.7-25}{\sqrt{\frac{364.76}{16}}}\cong 1.822>t_{0.05}(15)=1.753$$

よって帰無仮説 H_0 は棄却でき、対立仮説 H_1 が採用された。以上よりテスト結果に見られる理解度の伸びは、点数にして最大 25 点分であることが分かった。

この結果を直接比較する事例がないため 25 点分の大きさを評価し難いが、学生達への教育効果があった事は間違いないと言えよう。

相対的に見ると設問４における点数の伸びが低く、学んだ内容をアウトプットする機会が少なかったことにあると推測できる。限られた授業時間ではあるが、改善方法を検討したい。

４．おわりに

金属加工経験の乏しい学生へ簡単な CAD/CAM の解説・G コードによる NC 加工などを教授し、どの程度の教育効果が得られるのか調査した。今回の教授内容の教育効果は十分にあることが判明した。

引き続き、今年度得られた結果と比較し、どの様な内容であれば学生のレベルに応じて効率よくものづくり教育が可能なのか、更に検討を続けたいと考えている。

参考文献

1) Michael B. Cahapay, “Kirkpatrick Model: Its Limitations as Used in Higher Education Evaluation”, International Journal of Assessment Tools in Education, 2021, Vol. 8, No. 1, pp. 135–144.

2) 高橋麻奈, ”統計学”, 技術評論社 初版, (2015).

TOPへ戻る

gPBL に実装可能な被災者探索ロボット組立て教材の開発と製品化、およびその横展開を通した FD の取組み

機械機能工学科　　長澤 純人

共同研究者
環境システム学科　　中村 仁
先進国際課程　　吉久保 肇子
マレーシアオフィス　　石崎 浩之

１．はじめに

本研究はグローバル PBL に実装可能な被災者探索ロボット組立て教材の開発・製品化に関して企画・設計・試作・実施・評価を行う．また，そのロボット教材を用いて，分野横断での FD に取組む．

（1）ロボット組立て教材

ロボットを使ったプログラミング教育は，実際にハードウェアが動くのでプログラミングの実行が確認しやすく，学習者のモチベーションを高く保つことができるため学習効果が高い．しかしながら，市販のロボット教材は小～中学校の生徒をメインのターゲット層としているため，ハードウェアと共に提供される教材も，このターゲット層に合わせて用意される．入門者レベルを超えた学習者や数式や物理知識を扱うことができる高校生以上の学習者もこの教材を使わざるを得ない状況である．大学学部教育では，運動方程式やロボットの動特性を考慮した制御手法などが導入され，前述の市販のロボット学習キット教材との内容のギャップが大きい．本研究では学習者の学習レベルに応じた段階的学習指導法（入門者から研究導入レベルまで）の整備と，そのどのレベルにも対応できるロボット教材キットの設計・試作・評価を行う．

（2）レスキューロボットコンテスト

ロボット組立て教材は，平時にはプログラミング教材として，災害などが起こったときには災害探索目的に用いることを本研究チームは提案している（ASEE2023 国際会議，石崎ら）.数万円程度の廉価なロボット組立て教材が，災害現場というシビアな状況で信頼性のある利用が可能であることを示す必要がある．この実践の場として，レスキューロボットコンテスト（レスコン）に参加する．ロボット OS2（ROS2）に近年実装された，XRCE-DDS（組込みコンピュータなどの限定的なリソースシステムでも ROS システムと高信頼性通信を実現する DDS:Data Delivery System）技術を用いて複数台のロボットネットワークを構築することで，ロボット工学的にも研究意味のあるテーマとなっている．

（3）グローバル PBL（gPBL）への導入

学習指導マニュアルを英語で作成し，分野横断での gPBL に活用する.この教材を導入すれば他大学でも gPBL を実施できることから，将来展開として，本教材の製品化販売，国内他大学への横展開につなげることを計画している.その第一歩として，タイとの SIT-KMUTT gPBL AY2023 において試用し，参加者からのフィードバックを得る．

TOPへ戻る

２．研究計画と進行状況

（1）ロボット組立て教材

ロボット組立て教材は本研究チームとキット試作を依頼する㈱浜野製作所（GTI コンソーシアム会員企業),将来的な商品化を見据えて㈱エスアイテックのスタッフに開発に加わっていただいた．Face to Face Meeting を３回，技術的詳細の相談などには Slack を常時利用して設計・開発を実施した．試作したロボット教材キットを図１に示す．

本研究チームが小中学生と大学生のロボットワークショップの指導経験をもとに作成した，ロボット工学学習ロードマップを表１に示す（ASEE2023 国際会議にて発表）．表中の Secondary Level では機械分野と情報分野の基礎を学ぶが，次の Undergraduate (UG) level では突然専門性が高まり，複雑な数式利用による機械制御にまで学習段階が飛躍する．小中学生と大学生の間には学習難易度に大きな差があり,Secondary Level と UG level の間の難易度を補填する，高校生を対象とした教育カリキュラムを設計，実施マニュアルを作成した．試作ロボット教材キットを用いて速度・加速度データを測定・評価した．

図１ 試作したロボット組立て教材キット.

（2）レスキューロボットコンテスト

過酷な災害現場でレスキューロボットとして信頼性の高い情報を測定・共有できるための技術として，ROS2（ロボット・オペレーション・システム 2）を導入した．5 種 9 台のロボットが ROS2 によってロボットネットワークを構築するシステムは，これまでの競技会での１チームの最多ロボット数であり，メインマシンが ROS2 上でマスター･スレーブシステムを実現している技術力などが評価され，**競基弘賞レスキューロボットコンテスト奨励賞** [1]，**アイデア賞（レスキューコンテスト 2023 競技会本選レスコンメモリアルプライズ）**[2] を受賞した（図２）．

（3）グローバル PBL への導入

試作したロボット教材キットを１０セット，先行的に量産し，タイとの gPBL に導入した．

表１ ロボット工学学習ロードマップ.

	Interconnectivity		Core Program: GPBL Workshop	
Assessment of study progress	Mini test for basic knowledge	Exercise of kit assembly & HW/SW operation	Design of own idea and operational demonstration	Simulation test at prospective disaster environment
Application / Soft skills	• Usefulness of robots in the real society • Understanding robot application environments	• Estimate about actual operation environment • Selection of extra functions to be added	• Functional designs to be used in disaster sites • Issues identification	• Simulation of actual deployment • Comprehensive consideration of social factors, e.g., ethics
Software (SW)/ Programming & Control knowledge	• Major parameters • meanings of output data	• SW processing procedures • Overall • Algorithm and components • Programming mind	• Programming and installation to robot • Series data acquisition and setting of its variation range • Realtime synchronization of mechanical parts and SW • Adjustments	• Optimization of each function and sensors • Settings of multiple • Mechanical alignment as response to programming contents • Evaluation of overall factors e.g., durability & cost
Hardware (HW)/ Mechanical & Functional Knowledge	• Robot basic structure and main components • Mechanical movements and functions	• Mechanical scalability • Mechanical and electrical constraints for new functions		
	Primary Level	Secondary Level	Undergraduate (UG) level	Postgraduate Level
Accumulated Insights	20 years of Robot Seminar Series		UG GPBLs	Community Programs

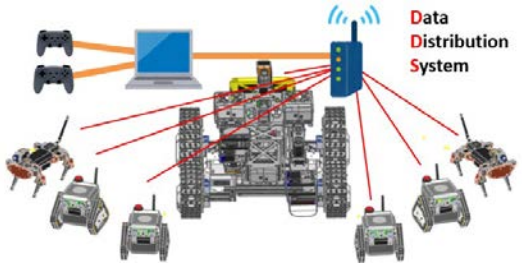


図２ ROS2 によるレスコンシステムと参加したチーム QoQ メンバー写真.

TOPへ戻る

図３に実施の様子とグループワークによって参加学生らがカスタマイズしたロボット例を示す．英文の組立マニュアルを用意して実施したところ，特に問題なく数時間の組立作業でハードウェアは完成した．さらにスマートフォン連携のサンプルプログラムを動作させるグループワークもスムーズに達成された．開発したロボット教材キットの扱いやすさは意図したとおりに実現できていたものと考えられる．

３．おわりに

本教材の開発と gPBL での実装という取り組み自体が，機械機能工学科，環境システム学科，先進国際課程，マレーシアオフィスとの interdisciplinary な連携プロジェクトの学科連携であり，災害という世界規模の課題を取り扱う教育手法であるとともに，GTI コンソーシアム会員大学などへの本学 gPBL ノウハウ横展開につながる，多面的 FD・SD 活動である．災害状況で使用可能な実践的研究開発，レスコンを通した学生指導と新たな評価方法の設計，およびメーカーと連動した製品開発というプロセスが，新たな教育手法の創出である．災害+ロボティクスという世界中のどの地域でも感心の高い題材であることから，

図３　SIT-KMUTT gPBL AY2023 のグループワークによってカスタマイズされたロボット例．

アメリカ工学教育協会（ASEE）など海外有力学会での発表，論文投稿を通して，本学の国際プレゼンスの向上に貢献した．

2023 年度に計画していた研究内容は，ほぼ実現できたといえる．ロボット教材キットを実際の高校生に使ってもらう機会などを調整しており，改良を進めながらロボット教材キットの商品化，分野横断での FD 推進を進める．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後も積極的に論文出版，国際学会発表などを実施する．ASEE2024 でも発表が予定されている[3-4]．本研究に関するジャーナル論文，国際学会発表，国内学会発表・講演・競技会表彰等の成果を以下に示す．

◆ジャーナル論文

(1) Kenjiro Sugimoto, Sumito Nagasawa, “Micro-hexapod robot with an origami-like SU-8-coated rigid frame”, Robotica, 1–14, DOI:10.1017/S0263574724000419, Apr. 2024.

(2) Seki H, Yamamoto Y, Nagasawa S, “The Influence of Micro-Hexapod Walking-Induced Pose Changes on LiDAR-SLAM Mapping Performance,” MDPI Sensors, 24(2), DOI: 10.3390/s24020639, Jan. 2024.

(3) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Nabilah Ibrahim, Hiroyuki Ishizaki, Masahiko Tachibana: “Interdisciplinary Online Robotics Workshop: Pedagogical Issues and Innovations”, Journal of JSEE, Special Issue 71-1, pp.27-34, January 2023.

(4) 吉久保肇子，中村仁，藤田吾郎，三好匠，長澤純人，橘雅彦，石崎浩之，猪田政彦，古屋雄高，仙波亮典，影山礼子，宮坂勇也，“gPBL のアセスメントとイノベーション創出，” 2022 年度特別教育・研究報告集，pp.41-44, 2023 年 5 月．

(5) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Leo Kimura, Yujiro Iwata: “Measuring Student Engagement in Group Work Using Slack-Based Evaluation: Solving Issues in Global Project-Based Learnings”, Journal of JSEE, 72-3, May 2024.

◆国際学会発表

[1] Hiroyuki Ishizaki, Sumito Nagasawa, Hatsuko Yoshikubo, Hitoshi Nakamura, “Affordable robotics toolkits for equitable and interdisciplinary education, transformable to searching nodes for disaster onsite investigations,” The 2023 American Society for Engineering Education (ASEE) Annual

TOPへ戻る

Conference & Exposition, #37674, Baltimore, USA, Jun. 25-28, 2023.

[2] Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Hiroyuki Ishizaki, “Creating Innovation for Interdisciplinary Robotics Workshops: Solving Issues in the Online Project-Based Learnings in Engineering Education,” The 2023 American Society for Engineering Education (ASEE) Annual Conference & Exposition, #37772, Baltimore, USA, Jun. 25-28, 2023.

[3] Yujiro Iwata, Leo Kimura, Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa: “Enhancing Student Participation in Online Global Project-Based Learnings (gPBLs) Through a Slack Based Evaluation: A Student Perspective”, 2024 ASEE Conference Paper, Portland, US, June 2024.

[4] 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 Conference Paper, Portland, US, June 2024.

◆国内学会発表・講演・競技会表彰等

1) **第十九回競基弘賞レスキューロボットコンテスト奨励賞**, 杉本賢二郎, 関拓, 中俣太一, 新田雄真, 森瑞樹, 山本優灯, 平塚亮太, 矢島由稀, 山本郁弥, 櫻井智基, 木村玲雄, 岩田侑次郎, 特定非営利活動法人 国際レスキューシステム研究機構, 2024 年 1 月.

2) **アイデア賞（レスキューコンテスト 2023 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), ”たくさんのロボで大捜索!!,” レスキューロボットコンテスト 2023 競技会本選, 2023 年 8 月.

3) 星佑輝, 長澤 純人, “モーションキャプチャによる小型ロボットアームのジェスチャー制御,” JSME 関東学生会卒業研究発表講演会, 813, Mar. 13, 新宿区, 2024.

4) 五十嵐崇幸, 長澤 純人, “スマートフォンの顔検出技術によるインターフェースロボット制御,” JSME 関東学生会卒業研究発表講演会, 824, Mar. 13, 新宿区, 2024.

5) 西田智郁, 長澤 純人, “インターフェースロボットのための小型ロボットハンドと ロボットアームの統合,” JSME 関東学生会卒業研究発表講演会, 832, Mar. 13, 新宿区, 2024.

6) 櫻井智基, 長澤 純人, “小型脚ロボットの体軸に固定した ToF センサと IMU 補正による環境測定法,” JSME 関東学生会卒業研究発表講演会, 834, Mar. 13, 新宿区, 2024.

7) 熊谷祐汰, 長澤 純人, “MEMS リビングヒンジの特性評価とマイクロロボット関節への応用,” JSME 関東学生会卒業研究発表講演会, 1323, Mar. 13, 新宿区, 2024.

8) 茂木拓海, 長澤純人, “小型インターフェースロボットのボディーカラーのセルフカスタム手法,” 日本機械学会関東支部講演会, 14G08, 新宿区, Mar. 13-14, 2024.

9) 中俣太一, 長澤純人, “スマートフォンによって制御されるインターフェースロボットの開発,” 日本機械学会関東支部講演会, 14G09, 新宿区, Mar. 13-14, 2024.

10) 四方太一, 長澤純人, “コントロールモーメントジャイロ制御によるロープ吊下型の球型海洋探査ロボットの姿勢制御,” 日本機械学会関東支部講演会, 14H03, 新宿区, Mar. 13-14, 2024.

11) 四方太一, 長澤純人, “海洋探査用球型ロボットの CMG による姿勢安定化制御,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-C13, 名古屋市, Jun. 28 - Jul 1, 2023.

12) 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再現システム,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-B12, 名古屋市, Jun. 28 - Jul 1, 2023.

13) 矢島由稀, 長澤純人, “飛行種子を模した落下体の落下軌道制御による着地位置分散システム,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A2-F10, 名古屋市, Jun. 28 - Jul 1, 2023.

14) 外山龍之介, 長澤純人, “遺伝アルゴリズムによるブロックロボットの歩行パターン学習時間の短縮手法,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-G06, 名古屋市, Jun. 28 - Jul 1, 2023.

15) 本田親彬, 長澤純人, “折り紙構造による静電角度センサを備えたマイクロ 6 脚ロボットの歩行機構,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-H19, 名古屋市, Jun. 28 - Jul 1, 2023.

16) 李思逸, 長澤純人, “CMG を用いた小型 2 足ロボットの倒立振子モデルによる姿勢安定化制御,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-G11, 名古屋市, Jun. 28 - Jul 1, 2023.

17) 長澤純人, “ロボット教材を使ったグローバル PBL のグループワーク評価法の課題,” 「大学の国際化促進フォーラム」事業 グローバル PBL プログラム研究会演習機会② PBL の実施効果の情報提供・評価, オンライン, 2023 年 7 月 14 日.

18) 長澤純人, “小さなロボットで災害救助 ～社会システムとしての実現方法～”, 地域連携・生涯学習センター公開講座, 江東区, 2023 年 9 月 2 日.

19) 長澤純人, “身体性を持ったスマホロボットによるコミュニケーション”Art for Well-being 表現とケアとテクノロジーと、東北のこれから, 文化庁/(財)たんぽぽの家主催, 塩釜市, 2023 年 10 月 1 日.

TOPへ戻る

AI 実装の実習及び AI を導入した研究課題の設定と継続

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）

理工学系の技術開発において AI の導入が徐々に拡大されている.そして,卒業生にとって AI の実装の経験が大変重要だと考えており,今回,まず研究室に在籍する電子工学ゼミナールを受ける全ての学生に AI 実装の基礎体験をさせる.さらに,各学生に AI の導入が必要な研究課題を考えさせ,それを卒業研究及び大学院の研究として取り組む.その研究成果を国際会議や国際学術雑誌で発表することを目的とする.そして,2022 年度では,研究室の学生全員にAIを経験させ,さらにAIと関わった多くの研究テーマを設定し,学生に研究を進めさせてきた.主な研究テーマについて以下に述べる.

２．研究計画

2023 年度も,2022 年度と同じように,研究室の学生にAIの基礎を指導を行い,主に以下の研究テーマを設定し,研究を進めてもらった.

①余分点群領域の削減による深度カメラを用いた携帯電話使用者検知の精度向

②点群データに対する深層学習を用いた顔周辺における手の存在判別

③ハイパースペクトル画像を用いた LSGAN による高性能な顔識別

３．計画の進行状況

上述の主な研究テーマの背景と進捗を以下,上記の番号順に述べる.

①鉄道は移動手段としてだけでなく,物資の輸送手段としても非常に有効である.今日では鉄道はその利便性から世界中で利用されているが,その一方で駅ホームからの転落事故のような鉄道関連の事故が多発している.

人口密度の高い日本において，鉄道は特に都市内，都市間の交通インフラとして重要な役割を担っている．2022 年度の JR 旅客会社と民鉄の旅客数量は合わせて,およそ 17 億人に上り，2020 年度以降増加し続けてい．それに従って，駅ホームでの事故が多く発生している．国土交通省が公開している資料によると,ホームからの転落事故件数は平成 22 年度から増加傾向にあり,平成 26 年度ではおよそ 3,600 件発生している．平成 26 年以降は減少傾向がみられ，令和元年度ではおよそ 2,900 件となった．しかし，その原因に着目すると携帯電話使用による転落事故件数は平成 25 年度以降,横ばいとなっている.したがって,携帯電話使用者に対してさらなる対策が必要だと考えられる.

政府は駅ホーム転落事故の対策をハードとソフト，両方の面で進めている．ハード面の対策の一つとして，2022 年度末までに 1,060 駅にホームドアを設置した．ホームドアは列車への接触事故や駅ホームからの転落事故を防止するだけでなく，利用客の安心感向上にも役立つ．しかし，国内の駅数は約 10,000 駅であり，ホームドア設置駅数は全体の 10%

TOPへ戻る

程である．ホームドア設置が進まない背景にはコストの問題がある．1 つの駅にホームドアを設置するためには 4~5 億円が必要とされる．また，駅によってはホームドア設置のために補強工事が必要とされることもあり，さらにコストがかかってしまう．さらに，ホームドアを設置する駅は 1 日の利用者数によって決まるため，利用者数が少ない駅には設置されない，という問題もある．

一方でソフト面の対策として，駅員による声かけ・見守り強化に加えて，鉄道事業者独自の取り組みを実施するなどしている.また，カメラを利用して駅員が監視する方法を実施している．しかし，この方法では駅員に負担が強いられるほか，見落としのような人為的なミスが発生する恐れがある．

以上のような問題を踏まえて，駅ホーム周辺で歩きながら携帯電話を使用している人を AI で検知し，その人に警告をすることで，携帯電話使用者の駅ホームからの転落事故を防止できるのではないかと考え，本研究を行った．本研究では携帯電話使用者のＡＩによる検知と，ＡＩに読み込ませるデータのダウンサンプリングについて取り組んだ．

② 国際道路交通事故データベース(IRTAD)がデータを有する 30 か国について，2021 年における人口 10 万人当たりの交通事故死者数を比較すると,日本は 2.6 人であり，第 7 位となっている．日本では交通事故件数が減少傾向にあるが，2022 年には 30 万件以上発生している．また，令和 4 年における日本の法令違反別死亡交通事故件数に着目すると，死亡交通事故の原因の約 13%が漫然運転であり，約 9%が脇見運転によるものである．漫然運転とは，集中力や注意力が低下している状態で運転することである．前方を見ているにも関わらず，運転中に考え事をしていたり疲れが溜まっていたりするなど，運転に集中できていない状態のことで，他の車や歩行者，信号に気付くことができず，事故の原因となってしまう．

それに対し，居眠り運転及び脇見運転防止策として運転手の顔方向推定を行うことで運転手の脇見状態を把握し，交通事故防止に繋げるシステムが既に提案されている．

それらの研究では，深度カメラから取得した 3 次元点群データを用いて顔方向推定が行われている．3 次元点群データを用いることで，顔の特徴領域の認識が不要になり，さらに点群を用いているため RBG 画像と違って個人の特定が難しく，利用者のプライバシー保護も可能となる．また，上述の先行研究では現在の世情も考慮し，マスク着用時における顔方向推定も行われている．先行研究では，カメラに被験者の顔のみが写っている場合を想定して顔方向推定が行われているため，運転中に運転手の顔の一部が手で隠れてしまう状況が考慮されていないという課題がある．運転中に顔周辺に手が存在する状況は，運転手は緊張や不安などを感じていることが考えられ，運転に対する集中力が散漫になっている可能性がある．このような状況では，漫然運転による事故につながると考えられる．また，居眠り運転や脇見運転中に自然と顔の一部を手で隠している状態になることや携帯電話を耳に当てて通話をするという状態も想定される．さらに，運転手の手が顔周辺に存在しているという状況は片手がハンドルから離れている危険な状態である．そこで，交通事故防止の観点から，顔の周辺における手の有無状態の把握が重要である．

本研究では，深度カメラから取得した 3 次元点群データに対して，DBSCAN でクラスタリングを行い，顔領域に該当する点群領域を抽出する．その抽出点群領域に対してダウンサンプリング処理等を施し，深層学習で学習させることで顔周辺における手の存在の判別について検討を行う．今回は，顔が正面を向く状態に限らず，様々な姿勢にある際の顔周辺

TOPへ戻る

における手の存在を把握することも含めて検討を行う．提案手法に対する検証実験では実用化できる程度の判別結果を確認できた．

③昨今の情報技術の発展に伴い，個人情報を保護する重要性が高まっている．現在，パスワードによる個人認証以外に生体情報を用いた生体認証も利用されるようになっている．しかし，主に画像を用いた生体認証には入手困難な生体情報を模倣可能な技術である GAN が登場したことによる悪意のある認証が行えるという問題がある．一般的な RGB 画像ではなく，撮影装置が高価であるために画像データの取得が困難であり，かつ多次元のデータであるために再現性が低いハイパースペクトル画像を用いることで，GAN の脅威に対抗する研究が行われている．先行研究では，ハイパースペクトル画像の次元削減等を行わずに利用しているため，検証には時間がかかってしまう．そこで，本研究では，主成分分析に基づいた次元削減手法を提案することで，検証時間の削減を追究する．さらに，先行研究では，識別対象である複数人のハイパースペクトル顔画像を学習させ，分類器を生成することで，顔識別を行っている．そこでは，学習済みではない人物の顔画像を分類器に入力しても，いずれかの学習済み人物（クラス）として必ず判定されてしまうという問題がある．言い換えれば，学習済み人物の画像データと学習済みではない人物の画像データ間の 2 値分類が不可能であり，それが応用する上で問題となる．本研究では，上記の問題に対して解決策を追求する．LSGAN モデルを導入し，次元削減を行ったハイパースペクトルカメラ画像を用いてクラスごとに識別器を生成し，検証を行う．そして，各識別器を用い，検証用データに対して各識別器の生成に用いたクラスとそれ以外のクラスで 2 値分類を行う．各クラスでの検証を行った結果，平均正解率は 0.994，平均再現率は 0.949，平均適合率は 1.000 となり，高性能な識別結果が示された．さらに，検証時間は先行研究の約 198 秒と比べ，提案手法では約 34 秒(次元削減済みデータ使用時)であり，検証時間が削減された．また，各識別器を RGB 画像に対して検証した結果，全ての画像が学習済みではない人物(クラス)と判定されたため，提案手法は一般的な RGB 画像での再現が不可能であり，完全にハイパースペクトル画像に依存していることが示された．以上の結果より， RGB 画像を用いて再現不可能であり，ハイパースペクトル画像のみで再現可能な強固な顔識別を実現した．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

2022 年度～2023 年度間に提案してきた上述 AI と関わる研究テーマはもちろんの他にも複数のテーマが現在も継続いる．

そして 2023 年度中，研究成果で以下の論文「学術雑誌論文 4 件，国際会議論文 4 件」の公開を行った．更に，現在投稿済（現在査読中）の際学術雑誌論文 3 件がある．

[1] T. Yoshikawa and Chinthaka Premachandra, ″Pedestrian Crossing Sensing Based on Hough Space Analysis to Support Visually Impaired Pedestrians,″ in Sensors, 23(13), 5928, June 2023.

[2] C. Premachandra and Y. Funahashi, ″Depth-Gyro Sensor-Based Extended Face Orientation Estimation Using Deep Learning,″ in IEEE Sensors Journal, Vol. 23, Issue 17, pp. 20199 - 20206, July 2023

[3] C. Premachandra and Y. Kunisada, ″GAN Based Audio Noise Suppression for Victim Detection at Disaster Sites with UAV,″ in IEEE Transactions on Services Computing, Vol. 17, Issue 1, pp. 183 - 193, Feb, 2024.

TOPへ戻る

[4] T. Witchuda, A. Wiranata, S. Maeda, and C. Premachandra, ″Reservoir Computing Model for Human Hand Locomotion Signal Classification,″ in IEEE Access, Vol. 11, pp. 19591-19601.

[5] T. Matsumoto and C. Premachandra, ″Depth Sensor Application in Ground Unevenness Estimation for UAV Emergency Landing,″ Proc. of IEEE Sensors Applications Symposium 2023, July 2023.

[6] T. Furusawa and C. Premachandra, ″Innovative Colormap for Emphatic Imaging of Human Voice for UAV-Based Disaster Victim Search,″ Proc. of 2023 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), pp. 1-5, Sept. 2023

[7] T. Furusawa and C. Premachandra, ″An Innovative Victim Search Approach by Subtracting Pix2Pix-Based Pseudo Propeller Sound-Image from UAV-Mounted Microphone Captured Sound-Image ,″ Proc. of 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Nov. 2023.

[8] W. Thongking, A. Wiranata, S. Maeda, and C. Premachandra, ″Depth Camera Video-Based Reservoir Computing for Accurate Classification of American Sign Language,″ Proc. of 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Nov. 2023.

TOPへ戻る

IoT と AI が溶け込んだ次世代教育環境の研究

情報工学科 新熊 亮一
共同研究者
建築学科　蟹澤 宏剛　　生命科学科　中村 奈緒子
機械機能工学科　廣瀬 敏也　デザイン工学科　橋田 規子

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

環境・視覚センサなど IoT(Internet-of-Thing)機器が生活に浸透している。AI(人工知能)を適用することで、個々人や状況に合わせたサービスが提供され、生活の利便性が高まっている。しかし、これら IoT と AI は教育環境では、まだほとんど生かされていない。本研究では、視覚センサ LIDAR(Light Detection and Ranging)を用い、学習時の動きや姿勢をセンシングし、３次元データとして取得する。同時にその時の習得度をテストなどで取得し、蓄積したデータに深層学習 AI を適用することで、LIDAR だけで習得度を予測できるようになる。また、手の動きや体の傾きなどが習得度にどう寄与するかも明らかにする。ただし、センサや AI が学習を阻害しないよう、教育環境に「溶け込む」センサ・AI のデザインを行う。

講義や、演習、研究室での実験を対象とする。また、本部棟 4 階、交流棟 4 階、教室棟、図書館、食堂などの自習スペースも対象とする。座学など受動的学習、演習や実験など能動的学習における取り組む姿勢とそのときの習得度をデータから明らかにする。さらに、習得度に寄与するファクタを特定し、教育方法に取り込むことで、データドリブン型の次世代教育環境を確立する。

２．研究計画

上記場所ごとに、空間全体をカバーできるよう教室では 1～2 機、自習スペースでは 3～5 機の 3 次元センサ LIDAR を設置する。その際、学習を阻害しない環境に溶け込む試作デザインでの設置を行う。学習中の 3 次元データを取得し、2022 年度に独自に開発した深層 AI により、学習状態(聴講中/作業中/対話中)を自動分類し、体の傾きや PC の操作スピードも数値化する。一方、学習内容の習得度を試験のスコアや学生からのヒアリングにより取得する。これを繰り返すことで、AI の推定精度を向上し、習得度に寄与するファクタを明らかにする。実際の教育環境に組み込み、学生や、教職員、連携先民間企業からフィードバックを得て PDCA につなげる。

３．計画の進行状況

大学構内で LiDAR+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。本部棟 4 階の自習スペースや研究棟の廊下などで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から、実空間のデジタルコピー(=デジタルツイン)を形成することに成功した。壁やフロアといった静的空間特徴と、歩いている人といった動的特徴とを自動判別する 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た。これらデジタルツインと AI の組み合わせにより、教育環境の学修者の動きの特徴を推定し、集中度など学習効果につながる要因を定量的に推定できる。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

まず、デジタルツイン形成のための三次元データをリアルタイムで取得できるよう教室など教育環境への設置を進める。取得したデータから学修者を自動検知し動きの特徴を抽出する AI ならびに学修者の視線や姿勢から集中度や、習得度、生産性を推定できる必要がある。研究成果は、IEEE の権威ある国際会議または Journal 論文誌で発表する。また、研究成果について、工学教育賞に応募することを目指す。

TOPへ戻る

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

工学部先進国際課程　　山本 文子

共同研究者
工学部先進国際課程(IGP)　イザベラ ジェズニチカ、パオロ メレ、ディタ サリ
工学部機械工学科　石井 康之
大学院地球環境システム　平田 貞代
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（特に学部１、２年生）（４）普段研究内容に踏み込む機会の少ない職員への理工学系の大学で働いているという意識付け、（５）学内外の教員の異分野交流が始まるきっかけ、が期待される。

２．研究計画

GS カフェは、「科学コミュニケーション学」の実習として、大宮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したい。これとは別に(あるいは連携して)、必ずしも科学技術を専門としない本学内の事務職員（契約やパート、外部委託の職員も含む）を対象に GS カフェを行いたい。

この活動は、3 年間の継続を予定しており、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や駅近くなど、学外の一般市民がより参加し

TOPへ戻る

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。また、本学の入学希望者にも研究の魅力を伝える。今回、レクチャーやセミナーと言った形式ではなく、サイエンスカフェといった双方向コミュニケーションの手法を用いることでより理解度や満足度の高い事業を目指す。

３．計画の進行状況

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

3.1 GSカフェ（4/29, 5/20）

(1)場所：

（4/29）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
（5/20）大宮祭斎藤記念館２F

(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 42 名(中国の留学生 3 名含む)

(3)対象者：

(4/29)受講生 42 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 16 名）

(5/22) 受講生 42 名、受講生以外 60 名前後（地域住民、受験志望の高校生とその保護者、学内の学生、院生、留学生）

(4) プログラム：

(4/29, 5/20 グループとテーマは共通)

A 班:10 年後の街づくり？

運転手が危険を感じる道路ってどんな道路？/鉄が環境問題を解決できるって知っていますか？/ペダルの踏み間違いって、どうやって検知すればいいと思いますか？

B 班:もうそこまで来てる⁉SF の世界

誰でも使えるかっこいいデザインって何？ /人混みの中の知り合い、すぐ見つけたくない？/世界の双子を作る…って？/3D プリンターでクッションって作れる？

C 班:未来を変える！？新しい技術

布を丁寧に掴むことはできますか？/携帯がつながらない時ってありませんか？/UFB って知っていますか？/LiDAR って知っていますか？

D 班:留学生視点から見た実用的な科学技術(中国語対応可)

なぜ MEC 技術を使うのですか?/360° VR 映像は何？中心視野は何？/障害者は緊急時に便利なコミュニケーションが取れるのか？/脳波を予測することで低覚醒検知できますか？/祖父母は今何をしていますか

E 班:実用化に向けた新しい科学技術

シミュレーションってどんなことすると思いますか？/工場排水をリサイクル？/スマホが安くなるかも？/クラシックカーを生き返らせる方法

F 班:未来を健やかに

漢字学習をゲームのようにハマれる?/血管に穴が開いたらどうなる？/にぎやかな一人暮らし！？/センサを使ったかくれんぼ

G 班:これからのまちづくり

高架下空間の変化って？/防災について何か知っていることはありますか？/ブータンの道路ってどうなっているの？/神田川の地図、お持ちですか？

H 班:より健康的に生活するには

色が人の行動をコントロールする？/作業効

TOPへ戻る

率を上げる音って何？/体温計を飲んでみる？/交通事故ってどうしておこるの？

I 班：体験する価値とは？

自動運転バスを利用したことはありますか？/あなたは普段洋服をどのように捨てますか？/メガネで好きなアーティストのライブに行けるって聞いたらワクワクしませんか？

J 班：こんなものまで自動化させる…ってコト！？

ブルドーザの未来のカタチ，想像できますか？/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？

K 班：実現できるかじゃない現実にするんだ

マイクロプラスチックを実際にみたことがありますか？/微細管のチューブハイドロフォーミングって簡単？…じゃない！/月面でどうやって測量をするのか想像できますか？/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すようした。ライブで画面にコメントができる機能を取り入れたグループもあった。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１、2 年生や教職員が複数いた。

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@大宮キャンパス

場所：学生会館 2 階 GLC

実施者：教員４名山本、石井、田中、イザベラ、院生学部生アシスタント 3 名（山本研）

対象者：事務系職員（15 名）

特別参加：本学学生団体「ひなこ」
　飲み物（コーヒー・紅茶）提供

内容：参加者は 4, 5 人ずつに分かれて４トピックのうち２トピックに参加した。（図２）

A：漆碗再発見, Revisit a lacquer bowl
　システム理工学部機械システム
　田中みなみ教授

B：色の不思議, The wonders of colors
　工学部 IGP　イザベラジュズニチカ教授

C：天然ダイヤはどっち？ Find a real diamond
　工学部 IGP　山本文子教授

D：マグネットマジック, Magnet magic show
工学部機械工学科　石井康之教授

TOPへ戻る

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：大宮の事務職員対象ということで、参加しやすい昼休みの時間帯に実施した。を利用した。サイエンスカフェへの敷居を下げてもらいたいということから、学内の教室ではなく学生会館２FGLC を貸切って会場として利用した。本学学生起業団体「ひなこ」がコーヒーなどを提供し好評であった。

実施の様子：図３参照

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

参加者の感想：

事後アンケートでは 42%が非常に満足、50%が満足と答え、また、100%がまた同様のプログラムに参加したいと回答した。例を示す。「工科系大学に勤務しているのでサイエンスに触れる機会が今後もあるといいなと思いました。」

リカレントニーズ調査：

回答した 19 名のうち 74%の人がリカレント教育を聞いたことがあり、全員が受けてみたいと答えた。その理由（複数可）は教養を身に付けたい（74%）、仕事に役立てたい(42%)などで

図３　一般向けサイエンスカフェの様子

あった。一方で、学び直しに障害があるとすればと尋ねたところ「自由になる時間がない」（42%）「費用の面で心配」(36%) との回答があった。実際、どのような形学び直したいかについては、多くの人（70%以上）は、単発の講座を希望した一方、修士課程への入学や科目聴講生を希望する人(38%)もいて、リカレント教育へのニーズの高さを実感した。95%の人はこのようなサイエンスカフェがきっかけになると回答した。

４．まとめと今後の計画

2023 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、リカレント教育を目指して、一般市民に向けたサイエンスカフェを継続していきたい

TOPへ戻る

The propose of research-based learning style by integrating virtual reality andemotion-sensing technology

Innovative Global Program Peeraya SRIPIAN

1. Introduction

Many educational institutions adopt a research-based learning (RBL) pedagogical approach to make education engaging and effective. RBL requires students to actively participate in learning and apply their knowledge in real-world contexts. Due to the COVID-19 pandemic, students have become accustomed to online classes, making face-to-face learning less appealing. Therefore, it is necessary to explore alternative modes of instruction that can enhance the quality of in-person learning.

The current project aims to blend cutting-edge technology with physiological signal measurement lessons. The project makes use of virtual reality (VR) technology to create an engaging and immersive experience that transports learners to an alternate reality. This project aims to investigate the use of VR technology for studying affective computing, by measuring physiological signals while exposing participants to different VR environments. This approach is expected to make learning an enjoyable and stimulating experience. Rather than simply reading about physiological signals and sensors, learners can now engage with the subject in a virtual reality environment. This approach enables students to observe sensors' operation, understand basic ideas of how to create VR environment and how to analyze the signals.

2. Research plan

We specifically targeted students who had little to no experience in conducting research, and as such, we recruited those who were part of the IGP program at Shibaura Institute of Technology. Our aim was to hold RBL workshops to help students develop their research skills and collect RBL evaluation results from them. The workshop was divided into the following steps. Table 1 shows outline of the study session.

1. Faculty members gave theoretical and practical lectures to introduce students to VR development using Unity and HRV measurement using heart rate sensors.

2. Students applied the knowledge they gained in stage 1 to develop individual projects and propose their ideas for different VR environments that could affect HRV differently.

TOPへ戻る

Table 1; Outline of study session

Week	Outline
1	Guidance, 3D Coordinate system in Unity
2	3D world, 3D coordinate, vectors, camera, faces, edges, vertices, shaders
3	Rigidbody physic, collision detection - installation of unity
4	Basic C# programming, Unity interface
5	Design fundamental
6	Design environment - sketching, mood boards staging
7	Get environment from asset
8	Make VR environment
9	Make VR environment (continue) & decide physiological signal collection method
10	Analysis of signal
11	Final Presentation

Table 2: List of evaluation questions

No.	**Question**	**Answer choice**
1	How confident do you feel in your understanding of the usage of sensors within virtual reality environments after completing this study session ?	1(Very poor) - 5 (Excellent)
2	How confident do you feel in your ability to create virtual reality environments after completing this study session ?	1(Very poor) - 5 (Excellent)
3	Did the study session adequately cover the process of creating VR environments using relevant software/tools?	Yes completely / Yes to some context / No, not at all
4	Overall, how would you rate the Affective VR study session in terms of its effectiveness in studying sensor usage and VR environment creation?	1(Very poor) - 5 (Excellent)

3. Students then designed and developed the VR environment, including the interaction of the character inside the VR environment and the addition of multimodal stimuli (such as music) to ensure that the environment could create emotions such as relaxation, concentration, etc.

4. Students performed experiments to evaluate the effect of their environment on HRV. Finally, students presented and discussed their projects and evaluated their teaching/learning experience (see Table 2 for evaluation questions).

3. Status of progress

We recruited three male students from different years of the IGP program to participate in the Affective VR study session workshops. During the workshops, the students were given lectures on the basics of VR and then encouraged to design and develop their own projects based on their newly acquired knowledge. There were no restrictions on project themes, but they were encouraged to utilize their knowledge as much as possible.

TOPへ戻る

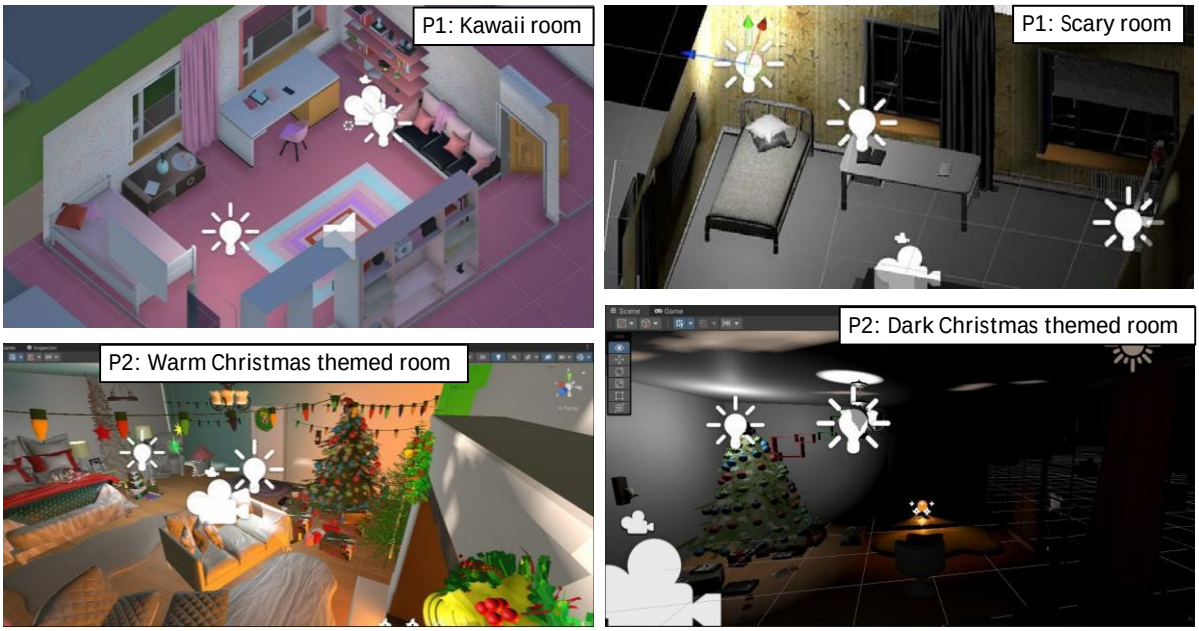


Figure 1 Example of the VR environments created by participating students.

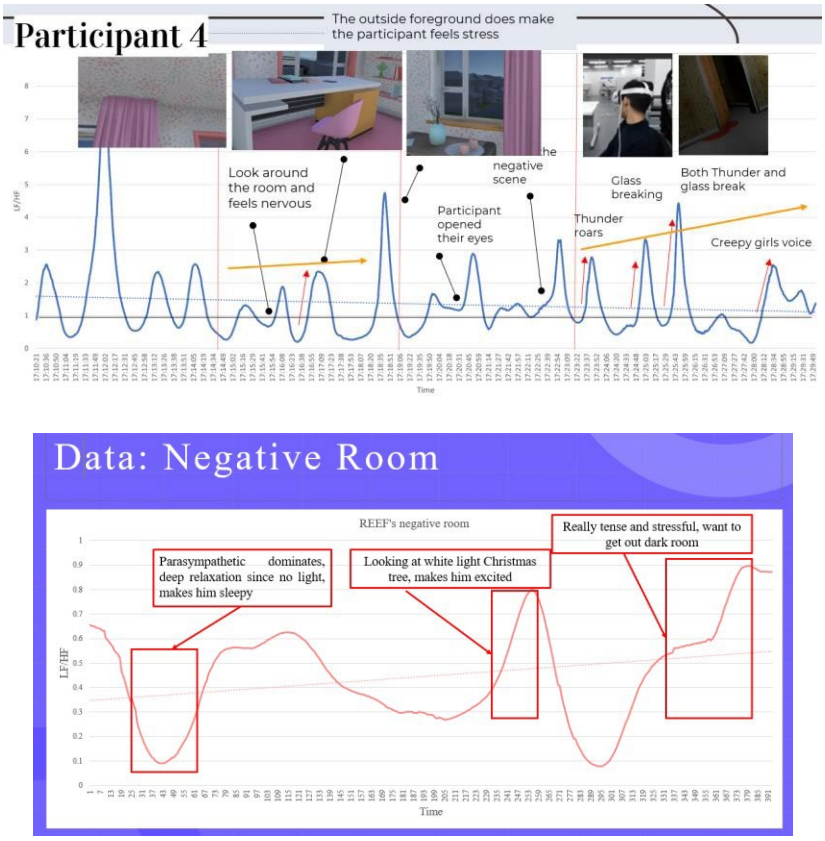


Figure 2 Example of the results collected from the sensors for project 1 and 2.

The students proposed three different topics for their Affective VR research study session. The first topic examined the difference in physiological signals between a Kawaii room and a scary room (See Figure 1:P1). The second topic was to study the difference in physiological signals between a warm Christmas-themed room and a

TOPへ戻る

dark Christmas-themed room (See Figure 1:P2). The third topic was investigating changes in alpha rhythms and time perception in VR and real environments.

The first two topics employed HRV sensor, mybeat, to measure the HRV and calculated LF/HF ratio to investigate stress/relaxation emotion inside the opposite environment. The third topic used EEG sensor, MUSE headband, to measure the Alpha waves during the exposure in the application to study time perception.

After completing the projects, the students were asked to evaluate their experience of participating in the study sessions. The evaluation results indicate that most of the students felt confident in their understanding of the usage of sensors within a VR environment and their ability to create a VR environment after completing the study session. All of them also reported that the study session adequately covered the process of creating VR using relevant software (Unity and Meta Quest 2 were employed in this project). Finally, the evaluation result shows that the study session was very satisfactory.

4 . Future plans and status of submission/presentation at conferences, papers, etc.

Our research aims to enhance the RBL style by integrating creativity through VR environments in face-to-face learning and collaboration. We conducted workshops on Affective VR with IGP students and assessed their experience with the workshops.

We discovered that the students were pleased with the study session and felt confident in using physiological signal sensors. The participating students acquired technical skills, particularly in VR environment development, through this research. They applied this knowledge to develop VR in their primary research work, and as a result, they published these works as research papers in the on-site poster session of an international conference, SEATUC 2024. The title of their work is "Study of Heart Rate Variability Responses in Different Virtual Reality Environments," which was written by Aarif Suksai and Peeraya Sripian.

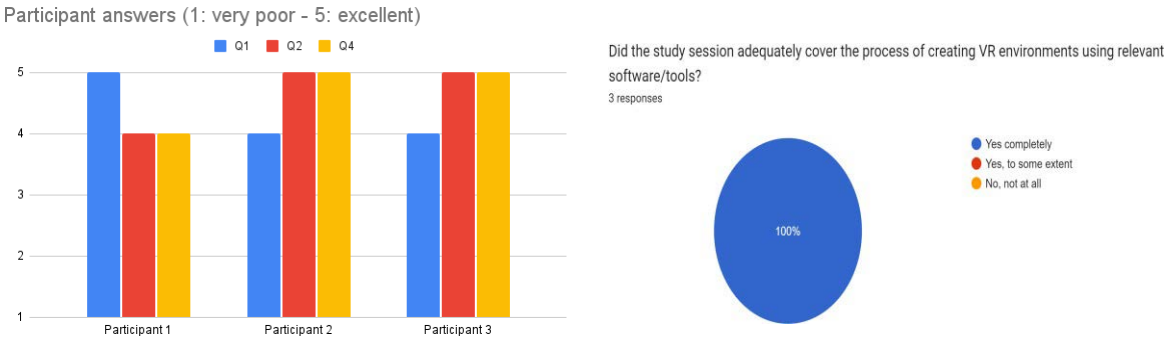


Figure 3 Evaluation questionnaire results.

TOPへ戻る

Enhancing Student Performance in Research-based Learning through Group-based Activities on IoT Device Development

Innovative Global Program　Tipporn Laohakangvalvit

1. Introduction

In the rapidly evolving landscape of education, it is crucial to use new teaching methods to foster meaningful learning experiences. Research-based learning is one such method that emphasizes the acquisition of knowledge through active engagement in real research tasks. Within this paradigm, one area ripe for exploration is the Internet of Things (IoT), offering many opportunities for interdisciplinary collaboration and hands-on experimentation to students.

This research aims to investigate the role of group-based activities in augmenting student performance in research-based learning, specifically focusing on IoT device development. As technology becomes more important in our lives, knowing about IoT is useful. By immersing students in the process of conceiving, designing, and implementing IoT devices, educators can cultivate not only technical skill but also other important soft skills that are necessary in professional settings such as critical thinking, problem solving, communication, and teamworking.

Moreover, since making IoT devices is complicated and requires several technical skills in combination, it is best to learn by doing. By engaging in group-based activities, students are encouraged to adopt hands-on experience in learning, which help them to reduce the gap between theoretical knowledge and practical application. Through active experimentation and problem solving, students are expected to develop a deep understanding of IoT principles while enhancing their creativity and innovation.

This paper presents our plan and implementation of research-based learning which aims to enhance both teaching and learning styles and contribute to a better education in research-based learning, especially the Innovative Global Program (IGP) of our university.

2. Research Program

We targeted students with no or little experience conducting research. Thus, we recruited those who belong to IGP, an undergraduate research-based learning program of the Shibaura Institute of Technology.

The research is divided into 3 stages as follows:

TOPへ戻る

(1) Instructors give short lectures to get students ready with the same background necessary for IoT device development. Small exercises and discussion are also conducted along with the lectures to increase the understanding and communication among students. The achievement goals of this stage are: (1) Students understand and can describe basic ideas of IoT and embedded system (both hardware and software), and (2) Students can apply knowledge to design and develop simple things by utilizing sensors.

(2) Students form a group to plan and develop an IoT device as part of their project in a 6-week workshop under the theme "IoT Device Development for Daily Usage in University Life." Throughout the workshop, presentations and discussions are conducted among students and instructors several times to keep track of their progress and allow them to brainstorm and communicate.

(3) Students make a final presentation and discuss their project. Throughout the workshop, instructors monitor and evaluate student performance on each activity. The results will be used for discussion as part of the performance evaluation in research-based learning.

To proceed with the above research program, the workshop was held with the students based on the schedule as shown in Table 1.

Table 1: Overall workshop schedule

Week	Topic
1	Basics in IoT and embedded system
2	Electronic circuits and sensors
3	LED and sensors (Part 1)
4	LED and sensors (Part 2)
5	Sensors and CG programming (Part 1)
6	Sensors and CG programming (Part 2)
7-12	Project design, development, testing, and final presentation

3. State of Progress

We recruited a total of 3 students; 2 of them are the freshmen of IGP program and 1 of them is the graduate student. The freshmen students developed IoT devices as part of their projects and the discussion on the technical knowledge required for project design and development was conducted among 3 students and 1 instructor. The detailed outcomes obtained from the research are described as follows:

3.1 Student Workshop Outcomes

Each student developed the IoT device on two different themes to solve the actual problem faced in their daily life as follows:

Student A developed an automatic plant watering device (Figure 1) as inspired by the fact that people usually forget to water the plants and sometimes make bad decisions on the watering amount and timing. The student integrated moisture and light sensor for monitoring the plant, and a pump to water the plant when certain conditions are met. There were several new components that were not included during the short lectures. However, the student was able to

TOPへ戻る

figure out how to integrate them into the device successfully.

Student B developed a runaway alarm robot (Figure 2) as inspired using robot to motivate people to run and catch it while the alarm is ringing so that they can wake up easier and fully conscious. The student integrated motion sensor, buzzer, LCD screen, and keypad with the Arduino-programmable robot.

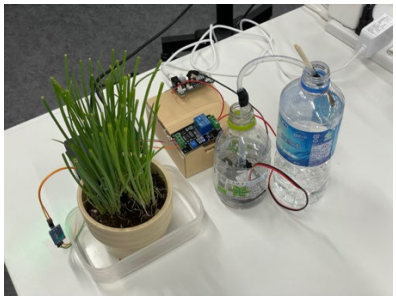


Figure 1: A prototype of automatic plant watering device

Figure 2: A prototype of runaway alarm robot

After the workshop, both students successfully built project prototypes from scratch, drawing on their IoT and embedded systems knowledge. They demonstrated notable growth in soft skills like task planning, time management, problem-solving, and communication. Despite facing technical challenges, they effectively tackled them through trial-and-error and guidance from peers and instructors. Face-to-face discussions, enhanced with illustrations, facilitated smooth idea exchange and communication. Figure 3 illustrates this use of visuals in discussing Student A's project design.

The workshop produced satisfactory outcomes, representing significant milestones in the first-year students' learning journey. Although minor improvements are possible, the successful development of key features underscores invaluable experiential learning and growth, positioning them for success in future research-based learning programs.

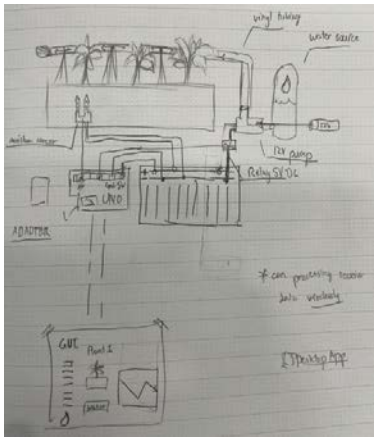


Figure 3: An illustration used during discussion of plant watering device design

3.2 Evaluation of Student Performance

During the workshop, we conducted a performance assessment by contrasting group activities with individual assignments. The instructor evaluated student performance by observing all assigned tasks throughout the workshop. The evaluation yielded the following

TOPへ戻る

results.

The average score for group activities was 82 (SD=26), whereas for individual assignments, it was 73 (SD=34) out of 100. These findings suggest that students generally exhibit slightly better performance during group activities, as they benefit from prompt learning and collaborative problem-solving. Conversely, individual assignment performance varied among students, influenced by their background knowledge and proficiency in tackling complex problems.

Moreover, these findings underscore the importance of designing collaborative learning experiences within workshops. Group activities not only foster a conducive environment for discussion and knowledge sharing but also promote active engagement and critical thinking among students. Conversely, the variation in performance observed in individual assignments emphasizes the need for personalized support tailored to students' diverse backgrounds and skill levels. Moving forward, integrating a balanced mix of group collaboration and individual tasks, supplemented by targeted assistance and resources, can enhance overall student learning outcomes. Additionally, ongoing monitoring and assessment of student performance will enable instructors to adapt and refine workshop strategies to better meet the evolving needs of learners. By leveraging these insights, we can continue to enhance the effectiveness and impact of future workshops in facilitating student success and development.

As part of our ongoing efforts to enhance the educational approach within the newly established research-based program, IGP, we have implemented various FDSD activities. This research endeavor serves to advance educational reform on two aspects: (1) It aims to refine teaching and learning methodologies tailored for research-based learning within IGP, and (2) It seeks to cultivate students' competencies in research-based learning alongside essential soft skills like collaborative communication within group settings. Through this research, we aspire to contribute substantively to the continual improvement of educational practices within IGP as well as other research-based learning programs, fostering a dynamic learning environment conducive to student growth and achievement.

４. Future Program, Paper Submission, and Results Briefing

Due to the limited number of participants, drawing definitive conclusions from our research remains challenging. Nevertheless, preliminary findings suggest that the group-based learning approach we have designed holds promise for enhancing student performance in research-based learning contexts. Moving forward, we are committed to further investigation to refine and optimize this approach within IGP. Our next steps involve expanding our data collection efforts to include a larger cohort of students. Subsequently, we intend to disseminate our findings through conference papers, thereby contributing to the ongoing advancement of teaching and learning practices within IGP and beyond.

TOPへ戻る

BOiCE（Bay Area Open Innovation Center）における起業プロセス支援ワークの実施～学生のインプット（学び）をとアウトプット（実践）に変えるために～

デザイン工学科　　加藤　恭子

共同研究者
教育イノベーション推進センター　　長谷川豊
生命科学科　　奥田宏志
研究推進部　　岩崎靖

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

製品開発やエンジニアリング、社会貢献ビジネス等様々な分野においてイノベーションを起こせる人材の需要は高まる一方である。芝浦工業大学では、図１に提示した各種プログラムを通じて、イノベーション人材の育成を継続できる仕組みを整備しつつある（次ページの図を参照のこと）。

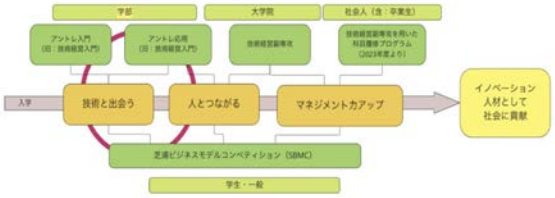


図１：本学におけるイノベーション人材育成のしくみ

2019 年度より開始した「技術経営入門」は、理工系学生が最初のステップとして企業の経営やビジネスの基礎を学ぶことができるようデザインされている。2022 年度までの 4 年間で延べ 400 人近い学生が履修し、一部の学生はその成果を SBMC（Shibaura Business Model Competition の略：芝浦工大で開催しているビジネスコンペであり、他校の学生も可能なイベント）に応募するなど、学部での学びを通じて外部とつながる経験も味わっている。こうした成果の一方で、課題も明らかになってきた。最も大きな課題は、インプット（受講）がアウトプット（実践）になかなか結びつかない点である（上記図の図における赤丸の枠の部分）。ビジネスや企業経営の知識は、外部に向けて発信・交流することで初めて実践的な力となるため、履修で得た知識や知見を講義の外の世界と結びつける必要がある。以上を考慮し、2023 年開講のアントレプレナーシップの講義は、技術経営入門を発展させ、起業家意識の醸成とビジネス実践力の育成を目的に再構成した。初学者が学べる「入門」と実践力を磨く「応用」の 2 ステップを設けることで、より多くの学生に機会を提供するとともに、講義外のワークショップ推奨やビジネスコンペ(SBMC)応募への支援など、より幅広い学習と実践の機会を提供している。
本研究では、上記の課題を学術的な視点から検証し、課題解決にむけたプロトタイピングを実施・検証する。具体的には学生がビジネスモデルに応募するまでのプロセス（起業プロセス）の各ステージに存在する障壁を分類・整理し、それらの障壁を取り除くための各種ワーク（支援ワーク）を開発する。これらのワークを大学内イノベーションハブ（BOiCE）に設置し、効果を検証することを目的とする。

２．研究計画

申請書に記した 2023 年度に実施を予定しているステップは以下の通りである。

- 2023 年 3 月～4 月：履修生やビジコン参加者のネットワークを利用し、ビジコン参加者及びビジコン不参加者へのヒアリング調査を行う。
- 2023 年 3 月～4 月：文献レヴューと仮説：起業家教育科目に関する文献レヴューを行い、大学生（若手）人材の起業に関する課題や障壁を整理・分類した上で、仮説構築を行う。本年度に関しては、起業プロセスの一箇所のみにフォーカスする。評価のための指標作成も順次進める。
- 2023 年 4 月：必要な用具（シェイカー、

TOPへ戻る

LEGO ブロック）の調達を行う。
● 2023 年 5 月上旬：仮説をベースにワークの大枠を決め SBMC に共有し、周知をはかる。
● 2023 年 5 月下旬：ワークを完成させる。日本工学教育学会発表へ応募（予定）
● 2023 年 6 月：プロトタイピング（1）開始（SBMC 最終審査会まで）
● 2023 年 9 月：収集したデータの分析・日本工学教育学会にて発表（予定）
● 2023年11月：分析結果を元に、ワークの修正や改善を行う。大学院副専攻プログラム科目におけるプロトタイピング（2）を実施。
● 2024 年 1 月：来年度の講義準備に合わせて、ワークの修正・改善を行う。
● 2024 年 2 月：研究報告書の作成・次年度申請の準備

３．計画の進行状況

上記計画のうち、細かな修正を行いながらも実施までたどり着いた点について以下記述する。

文献レヴューと仮説：

文献レビューは主に、プロジェクト管理、チームビルディングなどの分野を中心に行った。その中でも、ダニエル・キムの「成功循環モデル」が当該研究の抱える問題点を説明するのに適切であると考えている。このモデルは組織やチームが長期的な成功を達成するために重要なプロセスとして、連続した成功体験が次の成功にどのようにつながるかを説明しており、ある活動における成功がポジティブな感情や自信を高め、これが更なる努力や能力の向上に繋がるとしている。このプロセスが繰り返されることで、個人やチームは持続的な成長と成功の循環を実現することができるため、特に教育や職場の環境で有効であり、チームビルディングや個人の能力開発に利用されている。

このモデルは、プロセスの初期の段階でチームビルディングをしっかり行うことの大切さを強調していること、筆者自身の体験からも、初期の段階でのチームビルディングが、その後のチームの持続性やパフォーマンスの向上に影響を及ぼしていると推測できることから、本研究の仮説は以下の通りとした。

仮説：プロジェクトの初期段階での効果的なチームビルディングワークショップの導入は、大学生のチームビルディング能力を高め、結果として持続的で高いパフォーマンスを発揮するチームを形成することができる。

必要な用具の調達：

長らく在庫切れが続いていた以下の商品を本プロジェクトの実施期間内に購入することができた。
● Lego®Serious Play - アイデンティティ&ランドスケープ キット
● Lego®Serious Play - コネクション キット
● Lego®Serious Play - ウィンドウ・エクスプローション バッグ

ワークのデザイン：

上述の Lego®Serious Play のキットを用い、担当する各種講義の中で使用する想定でワークをデザインした。詳細は以下の通り。

● 想定グループ人数：4 人
○ グループとしての活動は初日であるが、このグループはペア×2 組で構成されており、各ペアはそれまで 3 週間活動を共にしていることが前提。
● 想定グループ：学期後半から始まる「期末プロジェクト」のためのグループ（学生の特性～申告制～をベースに教員がグループを作成）
● 想定実施日：期末プロジェクト初日
● 材料：Lego®Serious Play - ウィンドウ・エクスプローション バッグ

スケジュールは以下の通り。
● 学生一人ひとりに、紙皿（Lego を入れて使用）、Ziplock（収納用）とともに、上記 Lego®Serious Play - ウィンドウ・エクスプローション バッグを配布する。
● 他人の Lego と混ぜないようにすること、なくさないようにすることを周知。
● 今回の Lego ワークの目的を周知
○ Lego を上手に作ることが目的ではない。
○ 正解はない。
○ 文字にはしにくい、なんとなくの気持ちなどを Lego に乗せて、仲間に届ける気持ちで実施する。
● 今回の Lego ワークのルールを周知※
○ 出来上がった自分の Lego を説明する時は、仲間の顔ではなく Lego を見て説明すること。
○ 聞く側も、話す人ではなく Lego を見て説明を聞くこと。

※このルールは、Lego®Serious Play の中で徹底されているルールの一つであり、「あえて他人の顔や目を見ない」で話すことで、周りの環境や他人の表情に影響されることなく、自分が本来伝えたかったことを伝えられるようになるという効果を意図している。

TOPへ戻る

●　ワーク 1：Lego で自分の気持ちを表してみる「ドキドキ」「ワクワク」など（3 分）
○　作った Lego を仲間に説明（4 分）
●　ワーク 2：自分のペアのすごいところを他のメンバーに紹介する Lego を作る（3 分）
○　作った Lego を仲間に説明（4 分）
●　ワーク 3：自分がこのグループでどんな風に貢献できるか、を他のメンバーに紹介する LEGO を作る（3 分）
○　作った Lego を仲間に説明（4 分）
●　ラップアップ
○　グループメンバーの役割分担
○　グループとしての目的を考える

ワークのプロトタイピング：

プロトタイピングとしては、2 箇所で実施することができた。以下、2 つのプロトタイピングについて説明する。

Kaizen program in Thailand（gPBL）：1 つ目のプロトタイピングは本研究の仮説の中でも特に「プロジェクトの冒頭で、重点的にチームビルディングを実施することの効用」について、担当する gPBL の初日を全て一連のチームビルディングワークを実施することで検証した。本プロトタイピングでは、Lego を含め、様々なワークを実施しており、Lego ワークも必ずしも上記で提示したものをそのまま実行できたわけではない。一方で、「初日のチームビルディングの効用」をデータと共に検証できている点で、本研究の補助的役割を果たしていると考えた（詳細については、SEATUC Symposium 2024 Proceedings を参照のこと）。

図 2：Kaizen program の様子

講義「プレゼンテーション」期末プロジェクト：2 つ目のプロトタイピングは、担当する講義「プレゼンテーション」の期末プロジェクトキックオフ初日に実施した。このプロトタイピングでは、上述のプロセスをそのまま用いて実施している。

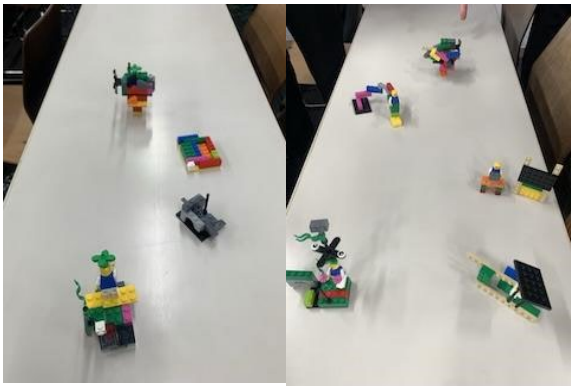


図 3：「プレゼンテーション」講義での様子

ワークのデータ収集：

1 つ目のプロトタイピングである Kaizen program in Thailand（gPBL）でのデータ収集はアンケートにて実施した。アンケートはプログラムの介入前と介入後の両時点で行われ、各変数の平均スコアを比較することで、介入の効果を測定した。

アンケートで用いた変数は以下の通りである。これらの変数は、チームパフォーマンスやメンバー間の相互作用における重要な要素を反映しており、プログラムの介入がこれらの側面にどのような影響を与えたかを明らかにするために導入されている。

●　チームの感情的知能（Jordan & Lawrence, 2009）：
○　自己感情認識・自己感情管理・他者の感情認識・他者の感情管理
●　チーム信頼（McAllister, 1995）：
○　感情的信頼・認知的信頼
●　チーム創造性（Rego et al., 2007）：
●　協力的文化（Lopez, Peon & Ordas, 2004）：

2 つ目のプロトタイピングである講義「プレゼンテーション」期末プロジェクトでは、時間的制約の関係から、このプロトタイピングに限定したデータの収集は行うことができなかった。一方で、講義課題として学生が提出している「（講義の）ふりかえり」の記述から、当該プロトタイピングについての言及があったものを取り出して質的分析を行うためのデータを収集することはできている。

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

ワークの発表：

1 つ目のプロトタイピングである Kaizen program in Thailand（gPBL）での上記仮説の検証については、The 18th South East Asian

TOPへ戻る

Technical University Consortium (SEATUC) Symposium 2024 におけるポスターセッションでの発表が実現している。分析結果については、上記学会Proceedingsに詳しいが、総じてプロジェクト初日の丁寧なチームビルディングのためのワークの実施（介入）は、実施前に比べ、グループメンバーの感情知能、チーム信頼、チーム創造性、そして協力的文化の全ての要素を向上させることがわかった。また、こうした変数は、プログラム実施数日後に至っても一定の効果を示していることも明らかになった。今後は、プロジェクトのパフォーマンス（最終成果）の評価との関連についても詳しく調べていきたいと考えている。

2つ目のプロトタイピングである講義「プレゼンテーション」期末プロジェクトでは、上述の通り学生全員が本プロトタイピングについてふりかえりで言及したわけではないことから、前提的な傾向をつかむことはできなかったが、言及しているふりかえりからは、一般的な挨拶や自己紹介に比べ、自己開示のしやすさや、相手を知るきっかけがより多く提供されていること、自分が他人にどう見られているかがわかった（＝安心感につながる）などの言葉も多く見受けられ、こうした気持ちを通じて、自分のチームでの立ち位置がより早く、的確に把握できたのではないかと推測している。

上記の見識については、まだ学会発表等は行っていないが、プロトタイピングを数回繰り返し、効果測定の仕組みを確立していく必要があると考えている。

今後の計画：

タイトルにもある通り、本研究の最終目標は、BOiCE（Bay Area Open Innovation Center）における起業プロセスを支援するためのワークの開発にある。学生だけでなく、企業のプロセスにおいて、チームがいかに協力しあえるかは、チームメンバー間での信頼関係作りや適切な役割分担にかかっていると言っても良い。

一方で、現実の職場や教育現場では、プロジェクトの重要性に比べてチームビルディングの重要性が低く評価されがちであり、これがプロジェクトの進行に様々な問題を生じさせる原因となっている。特に、問題が発生した際にこれを解決するための適切なチームビルディング活動の欠如は、チームの分裂を引き起こし、起業プロセスが頓挫することで、せっかくのすばらしいアイディアがマネタイズされずに葬られてしまうことも少なくない。加えて、教育現場ではコミュニケーションに対する若者のアプローチが変化している現代において、オープンなコミュニケーションや自己開示をためらう傾向があり、これがチームビルディングをさらに難しくしているという現実がある。

本研究で開発したワークショップは、短期間で実施可能でありながら、学生たちの間で迅速に自己開示や相互理解を促進できることがわかってきた。ワークショップを通じて、学生たちは自分たちの役割を明確にし、チームメンバー間の信頼を築くことができ、これがチーム全体の協働とクリエイティビティの向上に寄与していると考えられる。

現時点までで、仮説「プロジェクトの初期段階での効果的なチームビルディングワークショップの導入は、大学生のチームビルディング能力を高め、結果として持続的で高いパフォーマンスを発揮するチームを形成することができる」という仮説については、一定の支持がみられたといえるため、今後は以下のような点に注意して研究を進めていく。

- 効果測定の指標の開発
- BOiCE（Bay Area Open Innovation Center）との接点づくりとプロトタイピングの実施

以上

TOPへ戻る

国際連携教育　–ラモン・リュイ大学との「スクールメイト」プログラムの実施–

建築学科　　小塙　芳秀

1．序論

グローバル教育のさらなる可能性を視野に入れ、本学の建築設計演習系授業において、他国との同時共有プログラムの実施に繋げることが目的である。

提携校であるスペインのラモン・リュイ大学と、彼らが以前より準備を進めている国際間共有プログラム「スクールメイツ・プログラム」と本学の授業とを将来的に連携すべく、前年度より話し合いを進めてきた。

「スクールメイツ・プログラム」とは本学が勧めるコイルと近い性質のプログラムであり、海外の大学とプログラムを共有しながら授業を行うものである。

このようなプログラムの実施において、建築系授業の設計演習で行うのは非常に難しいのが現状であり、本学建築学部および建築学専攻の設計授業においては未だ実施されていない。

設計演習において難しい最大の問題は以下の 3 点と考える。

一つの目の問題は、課題条件である。設計演習では敷地を設定する必要があり、他の国の敷地条件を理解することは容易ではない。また、それぞれの国の社会問題が課題設定に関係するため、同一課題をリモートで行うには無理が生じる。

二つ目は、設計においては個々の学生による成果物は、その人数分異なる点である。短期間の対面によるワークショップ形式では異なる国の学生によるチームを作ることが可能であるが、週 1 回の授業ではかなり困難である。

三つ目はスケジュールである。設計課題では 7 週もしくは 14 週を必要とするため、開始時期が異なる可能性が高い海外との連携は難しい。

日本建築学会の「建築教育の国際通用性に関わる戦略小委員会」のメンバーを務めており、以前に千葉大学墨田サテライトキャンパスを視察した際、千葉大学では特定のプログラムにおいて海外の大学との共同授業の実施を試みていた。実施するための授業科目が用意されており単位化されていることは、学生にとって参加しやすい状況であった。しかし、海外の大学のプログラムに合わせている面もうかがい、まだ改良の余地はあると感じた。

ラモン・リュイ大学の課題（インターナショナル・プロジェクト・コース）でも、設計課題はセメスターを通して行っている。つまり、約 14 週間において、どれだけ教育的課題を共有できるかが問題となってくる。

TOPへ戻る

本学では初めてとなる試みとなるため、学生の意識の変化を調査するきっかけともなる。また、本学においてどのような教室や空間が必要になるのか、単位化できる可能性はあるのかなどをまとめる機会となる。

２．研究計画

提携校であるスペインのラモン・リュイ大学の学部長であるジョセップ･フェランド氏、また副学部長であるジョルディ・マンシーヤ氏との意見交換を行いながら、異なる課題設定の中で共通項目を探し、将来的なプログラムの実施に向けて準備を整える。

2023 年 9 月に実施する gPBL においてラモン・リュイ大学との交流の中で共通テーマを見つけ出していく。その際に、お互いの大学での活動を紹介しあうことで、相互の理解に努める。

また、期間中には、2023 年度後期に行う設計課題の敷地見学と調査を行う。gPBL 期間中に演習の作業を進め、ラモン・リュイ大学においてプレゼンを行う。

後期の 14 週間では実際に実験的に「スクールメイト･プログラム」を始動させる。主に、中間発表と最終発表を英語で行うことで、プロセスを通して問題点を整理し、次年度へつなげる計画である。

課題の内容は以下である。

敷地はバルセロナのグラシア地区を対象とする。グラシア地区は細い路地で形成されている地区であり、特徴的な街区といえる。また店舗規模は小さく、個人商店やアトリエなども多く残っており、地元意識の強いコミュニティーが存在する。8 月には地区の祭りが開催され、道ごとのコミュニティーにより飾り付けがされる。バルセロナでは有名な祭りの一つである。

そのグラシア地区には 1892 年に建設された市場があり、現在は立て直しの計画が進んでいる。その歴史ある市場のリノベーションとして、市場と公共施設を合わせた、新しい市場の設計を行うプログラムを設定した。

現地での敷地見学の様子
市場の構造のみが残っている状態

gPBL で現地を訪れて調査を行い、現地の教員によるレクチャーを得られることで、問題点の一つである、敷地への理解とプログラムの共有に対処する。また、課題開始前にお互いのこれまでの成果物を発表しあいディスカッションを行うことで、二つ目の問題点である個々の成果物の違いに対しての理解に対処する。三つ目の問題点であるスケジュールに関しては、今年度の活動を通して整理していくこととする。

ラモン・リュイ大学における授業風景

TOPへ戻る

３．計画の進行状況

gPBL・スペイン・バルセロナワークショップに参加した13名の学生のうち､小塙研究室の学生8名と他研究室1名がバルセロナのグラシア地区市場再生の設計課題に取り組んだ。

同時期にラモン・リュイ大学ではトルコ・イスタンブールを敷地とした設計課題に取り組み、現地調査後にバルセロナに戻り設計課題を行った。

本学の学生は修士1年生であり、後期の１４週間の中で設計を行い、ラモン・リュイ大学の学生は主に５年生で、前期のセメスター期間で実施した。ちなみに、スペインの５年生は､日本の修士１年生と同等の学年である。

また、プログラムの途中から本学の別の提携校であるルーマニアのイオン・ミンク建築都市大学の5年生チームもこの交流プログラムに加わり、3 大学による設計課題の同時進行を実験的に開始することとなった。ダン・ドィノイウ先生担当のクラスがメインとなり、ジュスティン・バロンセア先生がサポートとして参加をした。

イオン・ミンク・建築都市大学では、ブカレスト市内に失われつつある市場を再生する設計課題が設定されていたことから、偶然にも我々の課題内容と類似していた。また事前調査の内容もかなり近かったこともあり、途中からの参加が決まった。

ZOOMによる中間発表の様子

以下、スケジュールと活動概要。

9月8日からgPBL事前調査。

9月11日から１８日にラモン・リュイ大学とのgPBL実施期間｡各大学の発表とミーティングを兼ねる。

9月25日から本学で設計課題開始。週1回のエスキースを実施。

11月28日に中間講評会を開催。本学およびイオン・ミンク建築都市大学より5名程度の発表。

1月9日に最終講評会を開催。本学より小塙研の8名と西沢研1名の計9名が発表。

イオン・ミンク建築都市大学よりダン・ドィノイウ先生およびダン先生担当のクラスより5組が発表。ジュスティン・バロンセア先生がサポートとして参加。

ラモン・リュイ大学より、ジョルディ・マンシーヤ先生および、ジョルディ先生担当のクラスより2組が発表。

3時間を予定していたが、講評が長引いたことと、発表時間が伸びたことで、合計で約4時間に延長となった。

1月19日　イオン・ミンク建築都市大学による最終講評会にて約15組の発表が行われた。本学からは小塙のみがZOOMで参加｡本学の学生の参加は時期的に難しい結果となった。

中野椋平によるプレゼンテーションシート

TOPへ戻る

一連の発表後には、2 月 26 日よりイオン・ミンク建築都市大学のギャラリーにて、本学とイオン・ミンク建築都市大学との合同で展覧会を開催するに至った。

４．今後の計画

2024 年度においては、前期よりイオン・ミンク・建築都市大学と共同授業への実施に向け計画を発展させ、後期においてはラモン・リュイ大学との共同授業を試みる。特に、後期においては、2023 年度同様に 3 大学での共同授業の開催に繋げる可能性もあるため、引き続き 2 校との調整を続けていくこととする。

2023 年度の前期においては、大学院の設計演習授業である、建築学演習デザイン１・２における設計課題をイオン・ミンク建築都市大学と連携を行う。

本学では、次のような設計課題とする。
外濠の再生をランドスケープと建築から考える。
設計課題の敷地を東京都内の外濠とする。飯田橋から四谷にかけて調査範囲として、歴史を理解した上で、水辺としての外濠を一部再生させる公園および、公園内に現存する土木学会の建物を新たに設計する。

歴史、ランドスケープ及び都市、建築を一連の物としてとらえる設計手法は、スペインとルーマニアでも常識的なアプローチであり、共通点が多いことから共同授業を行う上で問題が少なくなると考えられる。
また、ブカレストの中心部においても、水辺再生が問われる川が流れており、共通問題としてご論を深めることも可能となる。

14 週の課題のうち、4 週を歴史の理解、10 週をランドスケープと建築設計に充てることとし、その間に中間発表を開催し、最後に最終発表を行う予定とする。

また、後期においては、2023 年度同様に市場の設計課題を行いながら、3 大学間内でのさらなる可能性を探ることとする。

結果の考察と報告としては、学科内での情報共有と、日本建築学会の「建築教育の国際通用性に関わる戦略小委員会」においての意見交換を通じて、学内および学外からのフィードバックを得ることを目標とする。

また､英語でのプレゼンテーションおよび、英語によるプレゼンテーションシートの作成は、本学の参加学生にとっては貴重な機会となるため、可能な限り展覧会を開催できるように、引き続きイオン・ミンク建築都市大学に協力を仰ぐ。

TOPへ戻る

学修者の学びを担保するカリキュラムマネジメント支援と学修成果の可視化体制の構築

教育イノベーション推進センター　榊原　暢久

共同研究者
工学部機械工学科　角田　和巳
教育イノベーション推進センター　相原　総一郎
システム理工学部生命科学科　奥田　宏志
建築学部　恒安　眞佐
情報イノベーション部　鈴木　洋
就職・キャリア支援部　久保　ひとみ
教育イノベーション課　小倉　佑介
付属中学高等学校　荻田　忠伸
豊洲学事部・学生課　茂木　亜貴子
学事本部・大学企画課　宇佐美　優里・古川祐輔
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

本学・教育イノベーション推進センターでこれまで開発・実施してきた新任教職員研修プログラムや理工学教育共同利用拠点プログラムは、教員個人の授業改善における PDCA サイクルの実質化や、研究・管理運営にまで FD を広くとらえた支援という意図をもったミクロレベルの FD プログラムが主であった。

一方、中教審・教学マネジメント指針にある教学マネジメントを支える基盤としての「三つの方針を通じた学修目標の具体化」、「授業科目・教育課程の編成・実施」、「学修成果・教育成果の把握・可視化」が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。

本課題では第 4 期認証評価を見据えたカリキュラムマネジメント実現のため、学科・入学年度ごとに、

（１）　学修・教育到達目標（mDP）ごとの学修成果の可視化
（２）　mDP と各授業の到達目標・評価方法の整合性整備
（３）　可視化された情報をもとにした優先的な検討課題の決定
（４）　課題の共有と改善

を各学科等が継続的に実施できるような支援体制を構築する。また、それらの実現のために、カリキュラムマネジメントに関わる教職員に必要な資質向上の機会を主導する職員や、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．準備段階及び研究計画

準備段階：本学ではこれまで、DP を詳細化した mDP を学科等ごとに設定、WEB シラバ

TOPへ戻る

スの充実、学生ごとのｅポートフォリオが稼働し、上にあげた（１）を実施してきた。

ここに至る過程で、榊原、角田、奥田、恒安、久保、荻田、鈴木、星、他７名が日本高等教育開発協会主催のカリキュラム・コーディネーター養成講座を、榊原、鈴木、星、他６名が愛媛大学主催の SD コーディネーター研修を既に受講し、この課題を実施する際の素地が出来ている。理工学教育共同利用拠点として既に７年間の活動実績があり、学生スタッフの１つであるSCOTプログラムも既に構築されている。

2023 年度：各学科等において、上記の（１）～（４）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 SD コーディネーター養成講座およびカリキュラム・コーディネーター養成講座受講者を増やす。これらを実施する過程では、国内外の FD 専門家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

今年度は、2023 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科目の設定
- 全 17 学科への整合性整備支援
- 主要科目のシラバスに掲げる到達目標と mDP の整合性チェック

を実施するとともに、以下の点を進めた。

- 学科の多くの mDP に対応する卒業研究について、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の確認
- 2021 年度入学生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（表 1 参照）
- 各学科に対し 2022 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
- 2024 年度以降のカリキュラム大幅改訂にむけて、各学部執行部からの要請に従い支援

これらにより、ここまで実施したことを継続的に実施する体制、および教育イノベーション推進センター・カリキュラムマネジメント部門としての支援体制が固まりつつある。また、2024 年度以降のカリキュラム大幅改訂にむけて、各学部執行部からの要請に従い支援を行った。具体的には、工学部、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、愛媛大学と本学主催のカリキュラム・コーディネーター養成講座初級編を 3 名の教職員が、ファカルティデベロッパー養成講座を 2 名の教職員が、（株）ビズアップ総研主催の教学マネジメントに関する講座を６名の学内教職員が受講し、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、学生ごとの mDP 達成度を可視化したことにより、学科ごと・年度ごとの入学生全体についての mDP 達成度が可視化可能になり、それに基づき改善サイクルが回りつつある。一方、mDP に紐づく

TOPへ戻る

各科目の評価方法については、確認が不十分である。また、mDP を達成するためのカリキュラム全体の妥当性について、当事者である学生からの意見を改善サイクルに反映するシステムもまだ不十分である。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：学部・研究科レベルでの質保証活動における学部等の執行部及び全学的な組織の役割、大学基準協会　大学・短期大学スタディー・プログラム FD 講演、2024 年 2 月.
- 榊原暢久：教育活動をより良くするための学生参画の可能性、帝京科学大学 FD 研修会、2024 年 3 月.
- 榊原暢久・角田和巳・鈴木洋・相原総一郎：芝浦工業大学におけるカリキュラムの整合性整備、可視化情報による改善の取組と課題、第 30 回大学教育研究フォーラム、2024 年 3 月.

６．参考情報

- 愛媛大学・芝浦工業大学（2023）カリキュラム・コーディネーター養成講座. https://web.opar.ehime-u.ac.jp/info/fdercciintokyo/
- 中井俊樹（2023）セミナー「いま全大学に求められる学修成果の把握と可視化」 https://ict-enews.net/2023/10/26bmc-net-3/

【表 1】2021 年度入学生の取得単位数平均が 2 単位以下となっている mDP 一覧（2023 年 4 月時点）

学科・コース	2021 年度入学生 mDP	（参考）2022 年度入学生 mDP
A.機械工学科	B1, C3	A1, A2, B1, C3
B.機械機能工学科	D	D
C.材料工学科	II.g, III.i	I.d, II.f, II.g, III.h, III.i, III.j
D.応用化学科	なし	E
E.電気工学科	A2, B, E, G	B, E, G, H, I
F.情報通信工学科	E, F1, G, H	B, D3, E, F1, G, H
G.電子工学科	E, F, G	B, E, F, H
H.土木工学科	E, G, H, J	A2, E, F, G, H, J, K
L.情報工学科	B4, B6, C1, D, F1, G	F1, G
M.先進国際課程	C, D	B, C, D
P.電子情報システム学科(一般)	B, D3, G2, G3	D1, D2, D3, E, G2, G3, H1, I
P.電子情報システム学科(国際)	B, D3, G3, H3	D1, D2, D3, E, G2, G3, H1, H3, I
Q.機械制御システム学科(一般)	B, G2, G3,	B, D1, D2, D3, E, G3, H1, I
Q.機械制御システ	B, G3, H3	D1, D2, D3, E, G3, H1, H3, I

TOPへ戻る

ム学科(国際)		
R.環境システム学科(一般)	D3, G2	B, D1, D2, D3, E, G2, H1
R.環境システム学科(国際)	D3, G2, H3	B, D1, D2, D3, E, G2, G4, H1, H3
N.生命科学(一般)	B, D3, G1N2b	B, D1, D2, D3, E, G1N2a, G2, G3, H1, I
N.生命科学(国際)	B, D3,	B, D1, D2, D3, E, G1N2a, G2, G3, H1, H3, I
N.生命医工(一般)	B, D3, G2	B, D1, D2, D3, E, G1N2b, G2, G3, H1, I
N.生命医工(国際)	D3, G1N2a, G2, H3	B, D1, D2, D3, E, G1N2a, G2, G3, H1, H3, I
V.数理科学科(一般)	B, D3, G2, G3, H3	B, D1, D2, D3, E, G1, G2, G3, H1, H4
V.数理科学科(国際)	B, D1, D3, E, G2, G3, H4	1名のみのため要個別対応
Y.デザイン工学科	G	B, D1, D2, F
Z.建築学科(AP)	7	7, 8, 9
Z.建築学科(SA)	7, 8, 9	7, 8, 9
Z.建築学科(UA)	7, 8	7, 8, 9

TOPへ戻る

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

先進国際課程　ミリアラ　ムラリダ

1. Introduction

In the present scenario, the presentation of a university as a brand plays an important role in drawing the attention of national and international students, further securing a sustainable future for the growth of the institution. Currently, the popularity and prestige of any institution are judged by its academic rankings. Various factors such as international educational programs, research work, publications, and collaborations serve as determinants of the institution's rank at the global level. With the aim of fostering better international collaborations, Joint Degree (JD) and Dual Degree (DD) programs are crucial and play an important role globally. Joint Degree (JD) and Dual Degree (DD) programs offer a collaborative environment and lead to effective research, subsequently paving the way for various international publications in prestigious journals.

In the past, it was observed that due to curriculum differences at the international level among various universities, it was difficult to formulate combined JD programs. However, over time, universities are now moving towards standardized courses and syllabi globally, which has largely facilitated the design of JD programs. Similarly, dual degree (DD) programs present students with a unique opportunity to obtain two degrees simultaneously, fostering not only a well-rounded education but also an appreciation for cultural variances in both nations in the scenario of international exchange students. Furthermore, DD programs double students' job prospects, as it makes them increasingly desirable to both local and international employers.

Shibaura Institute of Technology (SIT), moving ahead with the wave of globalization, aims to embrace growth by emphasizing programs like Joint Degree (JD) and Double Degree (DD). Over recent years, SIT has precisely observed and understood how leading universities worldwide successfully integrate such programs, confront challenges, and gain significant benefits. With a firm focus on excellence, SIT has closely examined universities with outstanding global rankings, strategic locations, and diverse academic offerings. SIT's predominant goal is to forge robust partnerships with global universities, establishing top-tier DD/JD programs for doctoral candidates and taking important steps towards this vision.

SIT has outlined key objectives that comprise an implementable strategy to enhance its global reputation and ranking. Through extended research endeavors, fostering innovation and entrepreneurship, cultivating international collaborations, and enhancing teaching quality, SIT aims

TOPへ戻る

for substantial growth. Collaboration with esteemed international institutions serves as a crucial gateway to fresh research ideas, resource sharing, and enhancing the impact and quality of research output. Additionally, increased enrollment of PhD students fuels a steady stream of talented researchers who contribute to SIT's research agenda, boost research quality, and support its reputation as a research-intensive university.

SIT's mission is to provide a diverse and inclusive campus environment that embraces students from across the globe, fostering cross-cultural interactions. SIT envisions a vibrant environment where cultural exchange programs, enriching study tours, and impactful community engagement projects thrive. Importantly, these initiatives can be implemented with minimal financial strain, ensuring a cost-effective and sustainable approach to long-term growth. By leveraging existing resources and forming strategic alliances, SIT is poised to create an innovative learning environment that attracts and retains the brightest talents globally, thereby elevating its reputation to unprecedented heights as a bastion of academic excellence.

2. Research Activity / Plan

For a long time, the Shibaura Institute of Technology has successfully conducted the DD/JD program, leading to various international collaborations and constructive outcomes. For instance, SIT facilitated the enrollment of a doctoral student from the University Putra Malaysia for a year of joint supervision at SIT and collaborated with the University of Caen (France) to host a research exchange student at SIT. Furthermore, SIT has expanded its collaborative efforts with several universities, including IITM (India), IITH (India), UPM (Malaysia), and the University of Caen (France).

Currently, SIT has initiated dialogues with Directors, Vice Chancellors, and Deans from renowned Indian universities via the Japan-India Universities forum facilitated by JST. These discussions have unveiled promising prospects for introducing DD/JD programs and fostering research exchange initiatives. During the fiscal year 2023, SIT carried out various research initiatives that resulted in successful collaborations with other universities. One of the accomplishments was the publication of research work in an International Journal. Ms. Aliah Nursyahirah Kamarudin, a PhD and Joint supervision program candidate from UPM (Malaysia), successfully published her work performed at SIT. This achievement further strengthened the research partnership between the institutions. Additionally, SIT welcomed a doctoral candidate Mr. Gaetan Simon from the University of Caen (France) for a year-long research exchange and joint supervision, enhancing the cross-institutional collaboration. Notably, SIT facilitated student and faculty exchanges with IITM in India and UPM in Malaysia during the aPBL program held in December 2023. These exchanges provided an opportunity for discussions on the DD/JD program and fostered research exchange activities.

TOPへ戻る

IIT (Hyderabad), one of the prestigious institutions in India, has shown keen interest in having research collaborations with SIT and establishing a JD program in the future. This collaboration would greatly enhance SIT's reputation and recognition. In the future, a process to develop a DD/JD Memorandum of Understanding (MoU) with IITH should be considered. UPM is already a strong collaborative partner with SIT, and they currently have a PhD student who is jointly supervised by both institutions. In the upcoming year, SIT will focus on establishing an MoU for a PhD-level JD/DD program and identifying suitable candidates. Additionally, SIT is in discussions with other esteemed Indian universities and looking for potential research collaborations.

3. Program

During my visit to Universiti Putra Malaysia (UPM) in 2023, I had the privilege of attending a presidential meeting with President Prof. Dr. Mohd Roslan bin Sulaiman. The primary topic of discussion was the potential establishment of a joint degree and double degree program for PhD students. Furthermore, a discussion on the implementation of double degree programs between both universities was held. The proposed program aims to make a significant impact by enriching both the quality and quantity of research initiatives between the two universities. Not only will it offer students the chance to earn degrees from both institutions, but it will also cultivate a stronger bond between SIT and UPM. The collaborations in progress mark a milestone that underscores the dedication of both universities to advancing academic excellence and nurturing partnerships that go beyond individual campuses.

In 2023, Osmania University in Hyderabad, India, initiated a partnership with SIT during the visit of their Vice Chancellor. This agreement, in the form of a Memorandum of Understanding (MoU), signifies the commencement of collaborative efforts and research exchanges between the two academic institutions. During discussions with the Vice Chancellor and myself, we explored plans to implement and develop Joint Degree (JD) and Double Degree (DD) programs as part of this collaboration. The partnership between Osmania University in Hyderabad, India, and SIT through a Memorandum of Understanding (MoU) holds several benefits. The Joint Degree (JD) and Double Degree (DD) programs will allow students from both institutions to access a broader range of academic offerings. These programs often combine the strengths of each institution, providing a more comprehensive educational experience. Collaborative efforts and research exchanges foster a global perspective among students and faculty. They gain exposure to different academic approaches, cultural contexts, and research methodologies, enriching their understanding and skills. Students and faculty participating in joint programs have the opportunity to interact with individuals from diverse cultural backgrounds. This promotes cultural exchange, understanding, and appreciation, contributing to the development of global citizens. Partnerships between academic institutions create networking opportunities for students and faculty.

TOPへ戻る

These connections can be valuable for future collaborations, research endeavors, and career opportunities both domestically and internationally. Two-way initiatives with reputable institutions like Osmania University and SIT enhance the prestige and reputation of both organizations. This can attract top-tier students, faculty, and funding opportunities, further strengthening their academic standing. Overall, increasing SIT's global reputation and brand value. In September 2023, the esteemed Indian Institute of Technology (IIT) Hyderabad graced our campus at SIT for an exchange program. During their visit, we had the privilege of engaging in fruitful discussions regarding the potential implementation of Joint Degree (JD) and Double Degree (DD) programs between our institutions. The exchange of ideas was further explored, and we sought the valuable input of participating students regarding the possibility of enhancing research exchange programs. Their insights were pivotal in shaping the direction of our discussions. Fortunately, the outcome was overwhelmingly positive. The successful conclusion of the exchange program not only solidified our existing partnership but also opened up new possibilities of collaboration. This laid the foundation for future actions, including the prospect of students from IIT Hyderabad joining us at SIT for JD/DD programs, thus promoting a deeper connection between our institutions and enhancing academic opportunities for our students.

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

The overarching objective of the program is to strategically identify globally acclaimed universities whose research focus harmonizes seamlessly with that of SIT. By cultivating enduring partnerships with these eminent institutions, we aim to foster a collaborative environment conducive to academic excellence. This entails the establishment of Memorandums of Understanding (MoUs) designed to facilitate Joint Degree (JD) or Double Degree (DD) programs.

At present, SIT has successfully forged MoUs with esteemed institutions such as UPM and Osmania University, offering students the invaluable opportunity to pursue joint or double degrees from two prestigious universities. Furthermore, SIT is actively engaged in the development of a PhD-level JD/DD program in collaboration with UPM and IITH. Anticipating an influx of students for research exchange and JD programs from these partnerships, we are committed to further expanding our academic horizons.

Moreover, we are earnestly pursuing mutually beneficial research collaborations with distinguished universities like IITM and the University of Caen (France), aiming to foster innovation and propel the frontiers of knowledge. Through these collaborative endeavors, we aspire to advance not only our own research initiatives but also contribute significantly to the global academic landscape.

TOPへ戻る

gPBL の体系化と持続的イノベーションの創出

工学部先進国際課程　　吉久保　肇子

共同研究者
システム理工学部環境システム学科　　中村　仁
工学部電気工学科　　藤田　吾郎
システム理工学部電子情報システム学科　　三好　匠
工学部機械機能工学科　　長澤　純人
システム理工学部生命科学科　　渡邉　宣夫
システム理工学部生命科学科　　Shahrol Mohamaddan
マレーシアオフィス　　石崎　浩之

国際部　　猪田　政彦
国際部　　古屋　雄高
国際部　　影山　礼子
国際部　　宮坂　勇也

１．序論

本研究は、2022 年度教育改革研究活動助成「gPBL のアセスメントとイノベーションの創出」の後続プロジェクトである。2022 年度には、本学が東南アジアの工科大学と共同で行った gPBL を中心に、各プログラムに共通する課題の特定と改善策の検証を行った。その結果、gPBL における体系的問題を以下の 3 つのカテゴリーに分類することができた。

1) 参加者の知識の不足。
2) 参加者の英語力不足と異文化環境への適応の難しさ。
3) オンライン gPBL におけるグループプロジェクトの固有の課題。

本研究では特に 3 番目のカテゴリーであるオンライン gPBL におけるグループプロジェクトの課題とその解決策に焦点を当て検証した。

２．研究計画

以下の 4 項目を研究目標として設定した。

1) gPBL の効果を、定量的および定性的な両方の観点から検証。
2) gPBL 担当教員および参加者を対象に行ったフィードバック調査を基に、PDCA サイクルを実施。
3) Journal に投稿した論文を基に、学内での情報共有を行い、国内外の学会で発表。
4) 1-3 の作業を通じて体系化された実践手法を他の大学と共有。

３．計画の進行状況

1)　課題の抽出

gPBL 担当教員によって観察された、各プログラム間に共通する課題は以下の 2 点である。

- gPBL の主活動であるグループワークにおける、学生間の貢献度の不均等。
- グループワークにおける学生個々の関与。度評価方法の欠如。

多くの場合、gPBL の成績評価は最終日のグループプレゼンテーションの結果のみに基づいている。そのため、本学および協定校の参加者間では、成績評価の対象とならないグループ活動において手を抜く学生や、プロジェクトの途中で参加を止めてしまう学生も存在する。一方で、オンライン（または対面）での教育においても、担当教員が参加者の個別

TOPへ戻る

の関与を終始正確にモニタリングし、定量的に評価することは困難である。

2)　解決策：Slack による評価方法の開発

本研究ではグループワークにおける学生個々の関与度評価手法の開発に取り組んだ。明確な評価基準を設けることにより、評価プロセスの公平性と一貫性を学生に保証することを目指した。方法論として、オンライン gPBL のグループワークスペースで頻繁に利用される Slack に着目した。この Slack プラットフォームを用いて、理工系だけでなく他の分野にも適用可能なコストのかからない国際協働学修におけるグループワーク内の学生個別の関与度評価手法を開発した。Slack の利点は、以下の通り。

- グループメンバー間のコミュニケーションが Slack チャンネルに自動的に記録され、アーカイブされる。
- Slack のタイムスタンプ付きデータを利用することで、参加者のグループプロジェクト内での活動パターンを、時間単位で分析することが可能。

初めに、教員と学生で構成される「Slack 評価開発チーム」を結成した。次に、Slack 上での発言を A から C の 3 つのレベルに分類して個々の関与度を評価する尺度を設定した（図 1）。

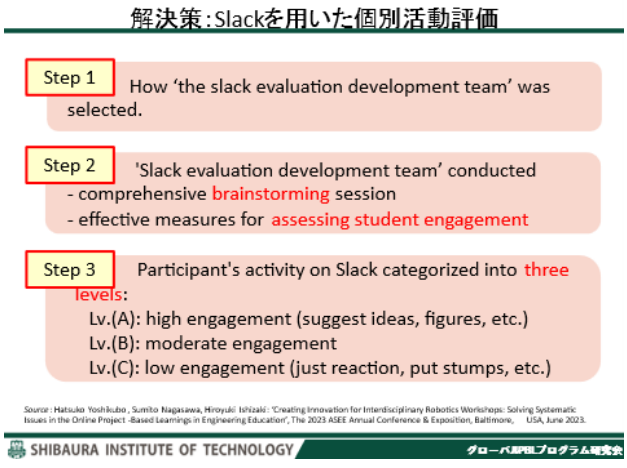


図 1 Slack 評価方法開発手順

図 2 は、Slack 上での発言分類方法を示す。例えば、グループワーク内の作業に貢献する発言や、プロジェクトの方向性に直接貢献するアイデアや意見、ビデオクリップ作成などはレベル A に分類される。一方、プロジェクトに関係のないカジュアルな会話や絵文字を使ったリアクション、単純な同意を示す発言、チームのやる気を損なうようなネガティブな発言はレベル C に分類される。A にも C にも分類されない発言はレベル B に分類される。

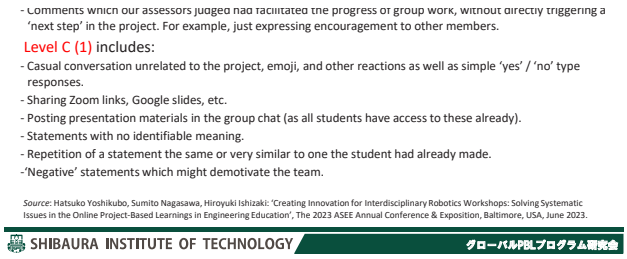


図 2 Slack 上での発言の分類方法

3)　Slack 評価導入後の検証結果

Slack 評価の導入により、グループワークにおける学生個々の関与度スコアが最終成績に反映されることで、参加者のグループプロジェクトに対するコミットメントは強まるという仮説の下で検証を行った。パイロット調査の段階では成績には影響せず、参加者にも事前に通告せずに Slack 上の発言を観察・分析した。パイロット調査の結果、Slack を用いたグループプロジェクト内での個別活動評価の運用が可能であることが確認できた。また TA２名にデータの抽出とソート作業を依頼した場合、gPBL 終了後一週間以内には成績報告が可能であることも判明した。図 3 は、パイロット調査後の Slack 評価正式導入前後で、参加者のグループワークへの関与度を比較分析したものである。gPBL 開始時に Slack 評価方法と、グループプロジェクト関与度が最終成績に参入されることを参加者に予め伝

TOPへ戻る

えたところ、参加者一人当たりの Slack 投稿数(グループワーク関与度)はほぼ倍増した。Slack 評価導入することで、特定の参加者のアクティビティ調査も可能となった（図 4)。

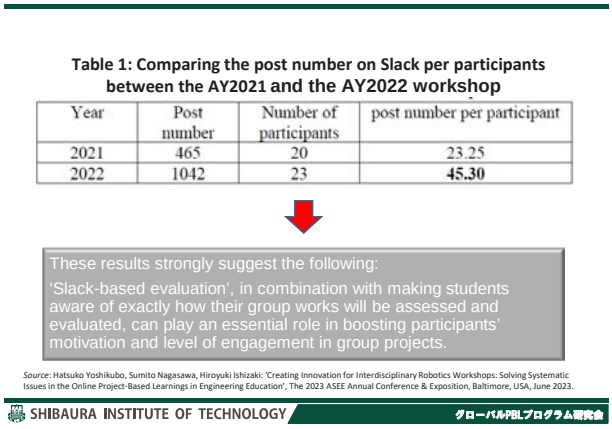


図 3 Slack 評価導入後の参加者一人当たりの Slack 投稿数（グループワーク関与度）

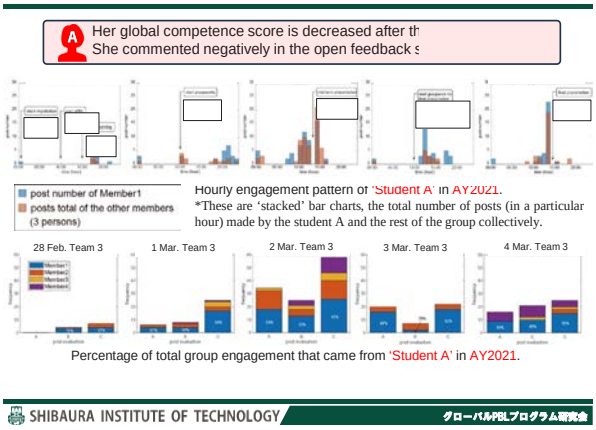


図 4 学生満足度調査で否定的なコメントをした学生 A の Slack アクティビティ

4．今後の計画及び学会，論文投稿・発表状況

本プロジェクトの活動内容は、最終的にジャーナル論文 5 件、テクニカルレポート 3 件(本報告書も含む)、国際学会論文発表等 9 件、合計 17 件の研究成果に繋がった。本プロジェクトの予備的調査として 2022 年度に芝浦工業大学から教育改革研究活動助成を受けた「研究課題名：gPBL のアセスメントとイノベーション創出」は、2023 年 11 月芝浦工業大学創立記念式典で学長賞(教育)を受賞した。また、2023 年 7 月 14 日開催の本学主催「グローバル PBL グラム研究会（文部科学省・大学の国際化促進フォーラム事業)」では、本プロジェクトで得られた知見を学外の参加者にも共有することで、本報告書の第 2 部で挙げた 1)から 4)までの全ての研究計画を遂行することができた。今後は、「グループプロジェクトにおける学生の個別の関与度評価」に加えて、研究対象を「学修評価手法」に拡大する予定である。

【学会，論文等投稿・発表状況：2023-2024】

1. Journal papers

1) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Nabilah Ibrahim, Hiroyuki Ishizaki, Masahiko Tachibana: "Interdisciplinary Online Robotics Workshop: Pedagogical Issues and Innovations", Journal of JSEE, Special Issue 71-1, pp.27-34, January 2023.

2) Hatsuko Yoshikubo, Soichiro Aihara, Masahiro Inoue, Atsuko Yamazaki, Ned Loader, Hiroyuki Ishizaki, Masahiko Tachibana: "Assessment of Online Study Abroad Programs from the Students' Perspectives", Journal of JSEE, Special Issue 71-1, pp.18-26, January 2023.

3) 塚原修一、濱名篤、山田礼子、深澤晶久、川嶋太津夫、中村仁、栗本博行：「コロナ化がもたらした大学教育の可能性＜ラウンドテーブル報告＞」、大学教育学会誌 45(2) 、169-174、2023 年 12 月

4) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Leo Kimura, Yujiro Iwata: "Measuring Student Engagement in Group Work Using Slack-Based Evaluation: Solving Issues in Global Project-Based Learnings", Journal of JSEE, 72-3, May 2024.

5) Hatsuko Yoshikubo, Gabriele Trovato: "The Value of Humanities Components in

TOPへ戻る

Engineering Curricula: Evaluating a Japanese History course in the context of SIT's Innovative Global Program", Journal of JSEE, 72-3, May 2024.

2. Technical reports

1) 吉久保肇子、中村仁、藤田吾郎、三好匠、長澤純人、橘雅彦、石崎浩之、猪田政彦、古屋雄高、古屋雄高、仙波亮典、影山礼子、宮坂勇也他:「gPBL のアセスメントとイノベーション創出」、2022 年度特別教育・研究報告集 41-44、2023 年 5 月

2) 吉久保肇子:「グローバル PBL 学修成果理論構築とエンジニアリング教育測定ツール開発の国際協働研究」、2023 年度特別教育・研究報告集(プロジェクト研究助成)、2024 年 5 月

3. International conference papers and others

1) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Hiroyuki Ishizaki: "Creating Innovation for Interdisciplinary Robotics Workshops: Solving Systematic Issues in the Online Project-Based Learnings in Engineering Education", 2023 ASEE Conference Paper, Baltimore, US, June 2023.

2) Hatsuko Yoshikubo, Gabriele Trovato, Hiroyuki Ishizaki: "Fostering Global Engineers through the Study of the Humanities: Assessment of the Course 'Science and Religion in Japan' from a Racial Equity Perspective", 2023 ASEE Conference Paper, Baltimore, US, June 2023 (MULTI Eng. Division Best Diversity Paper Award).

3) Hiroyuki Ishizaki, Sumito Nagasawa, Hatsuko Yoshikubo, Hitoshi Nakamura: "Affordable robotics toolkits for equitable and interdisciplinary education, transformable to searching nodes for disaster onsite investigations", 2023 ASEE Conference Paper, Baltimore, US, June 2023.

4) 中村仁:「オンライン産学官連携グローバル PBL の事例」、ラウンドテーブル 20「コロナ化がもたらした大学教育の可能性～対象・方法・内容～」、大学教育学会第 45 回大会、大阪大学、2023 年 6 月

5) 中村仁:「イノベーション創出・人材育成に資するグローバル PBL の取組」、日 ASEAN ビジネスウィー2023、2023 年 6 月

6) 吉久保肇子:「グローバル PBL のグループワークにおける個別活動とその評価」、「大学の国際化促進フォーラム」事業:グローバル PBL プログラム研究会演習機会② PBL の実施効果の情報提供・評価 、2023 年 7 月

7) Yujiro Iwata, Leo Kimura, Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa: "Enhancing Student Participation in Online Global Project-Based Learnings (gPBLs) Through a Slack Based Evaluation: A Student Perspective", 2024 ASEE Conference Paper, Portland, US, June 2024.

8) 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 Conference Paper, Portland, US, June 2024.

9) Hatsuko Yoshikubo, Dita Puspita Sari, Gabriele Trovato, Eiji Kamioka, Darminto Darminto: "Global Competence Scores among Indonesian Undergraduate Physicists: A Preliminary Study Towards the Implementation of a New COIL", WERA 2024, Manchester, UK, September 2024.

TOPへ戻る

GLOBAL e-class 講義開発のための教材制作

デザイン工学科　　梁元碩

共同研究者
国民大学造形学部工業デザイン学科　MyeongHeum　YEOUN

1．序論

本研究は、2015 年から現在まで行なっている「異文化の体験による交流活動」テーマの韓国国民大学との短期間のグローバル PBL を長期的なオンライン講義化することでさらに発展させるために企画したものである。今まで行ったグローバル PBL は学生にとっていい経験になり、プログラム終了後に成果を書籍としてアーカイブ化して、参加できなかった学生たちにも教育資料として活用した。しかし、相手大学と交流を行いながら、短期交流プログラム(gPBL)から始め、交換留学、その後大学院進学まで繋がれる様々な成果を出したが、教育や研究に活用するためにはより質を高めるため必要を感じた。また、成果物として参考資料の書籍も出版したが、アイデアの事例にとどまった印象が強いため、コロナ禍をきっかけで試みした 8 日間のオンライン gPBL の経験からオンライン講義の可能性を感じた。

図 1　gPBL 成果物の書籍化

それで、2022 年 2 月の gPBL 後に両国の新学期から始まる e-class を開発するために教材の必要性を考えた。デザイン専門の教育は理論中心の座学と実践中心のプロジェクト演習での教育として大きく分類ができる。

特に、実践中心の教育は、技術的スキルと人間的知識のバランスの取れた統合を重視し、思考と表現のバランスの取れた発展が重要なデザイン思考を学べる価値を持つ。実践的なプロジェクト演習型の教育は多様な方法論を採用し（Caner Yüksel et al., 2021)、学生がデザインの原理や方法論を学び応用するためのプラットフォームを提供したり（Mine et al., 2022; A., Berrin et al., 2022)、デザイン思考能力を探求し開発する環境を提供したり（Gizem Bodur, Dilek Akbulut, 2022）する。さらに、教育へのアプローチはデザインプロジェクト演習の経験を形成する上で重要な役割を果たす（Orhan Hacihasanoglu, 2019)。この内容を実現するため、最初に大学院生のプロダクトデザイン研究（大学院）の講義をオンラインで同時開講することで、短期間での経験中心の活動だけではなく、常に年間を通して専門分野の留学する体験が実現させたい目的である。

図 2　2023 年度 gPBL の団体写真

TOPへ戻る

２．研究計画

本研究では、デザイン教育のグローバルオンライン講義のプロセスを教材の制作について、次のプロセスで行う。

１）今までの両大学の交流活動と各大学のシラバスや講義の調査を実施し、グループワーク型のスタジオ教育のモデルを検討した。

２)既存プログラム事例の調査･設計を行い、デザインの授業構成や具体的事例を調査・整理した。調査結果に基づき、オンライン講義のシラバスを作成した。

３)テーマに合わせて４つのグループを分け、学期スケジュールに合わせて実際の学生で検証した。本研究で提案した教育カリキュラムは、2023年4月から2023年5月までの間、プロダクトデザインのクラスにおいて、本学からは8人、韓国国民からは12人の学生が参加して実施され、毎週の講義と時に方向性を少しずつ調整した。

４）その成果として、e-class講義の流れを資料として作成した。次年度に開発されて教材の検証を行う。

３．実践型のオンライン講義の現状

3.1　実践型のスタジオ授業への適用事例

両大学のデザインのカリキュラムを検討すると、デザイン授業のプロセスは、部分的には異なるものの、基本的には①テーマ・アイテムの選定、②リサーチ（文献、定量･定性）、③デザインコンセプトの定義、④モデリング、モックアップの制作、⑤成果物の制作とプレゼンテーションという流れで進めることは類似な部分が多かった。

テーマや項目の選定範囲、デザインリサーチの期間、プロトタイピングの形態や有無、活用するデザインツールなどは少し違いあるが、教育の基礎となる講義の目的、内容はほぼ同じだった。デザインのあらゆる側面を統合するために学生は一連の簡単な演習、個人およびグループ・プロジェクト、リサーチ、アイデア出し、反復スケッチ・モデリング、プロトタイピング、プレゼンテーションの探求を通して、デザイン・プロセスの基本的な理解を深める。

3.3　既存プログラム事例の調査

デザイン工学部のグローバル活動は、10日程度の短期交流中心の単位認定してもらえるgPBL1、2、3(学部)、Advanced　PBLⅠ、Ⅱ（大学院）の科目が主な活動であり、グローバル意識を高める経験としては意味があるが、国ことの差があるため専門的な教育の質的保証には様々な問題もあった。大学のグローバル化に際しては，教育の質保証への取組が，競争力向上に欠かせない。

図３　gPBLのグループワーク風景

これにより、短期間での経験中心の活動の改善とともに、学期中に講義と専門分野の体験が実現する必要性を感じた。しかし、本学は大学間の交流に際に gPBL は学生の規模や参加学年、テーマなどの背景により柔軟性が必要であるため、一般的な講義の成績評価や義務付けの形にすることが難しいため、カジュアルな体験中心の活動になることが多い。

3.3　e-class 講義設計の試み

１）オンライ講義設計の流れ

オンライン講義を設計するために2023年2月に行われた受け入れgPBL(2月7日～14日）に時に教員間と参加対象になる院生中心の打ち合わせを行った。参加学生に対するアンケートから年間プログラムのニーズがあったので、教員間で以下のように実施計画をまとめた。

① 先方の新学期3月に合わせて、2月下旬から講義の内容や参加規模について打

TOPへ戻る

ち合わせを行う。

② 本学の新学期に合わせて 4 月から 6 月末まで大学院中心に 7 週のパイロットプログラムを行う。6 月頭に派遣 gPBL の際に現地（韓国）で集中講義とその成果を発表する。

③ 6 月末からは参加した学生の中心で国内外の学会に論文投稿するための研究を進める。お互いの指導教員が論文指導を行う。

④ 8 月末から後期の講義に合わせて学部講義を設計とその内容について講義を記録して、毎年改善する。

⑤ 成果は次年度の国際コンペで発表して発信するために年末から論文作成を行う。院生は講義開発と教材作成に関する研究を国際会議で発表する。

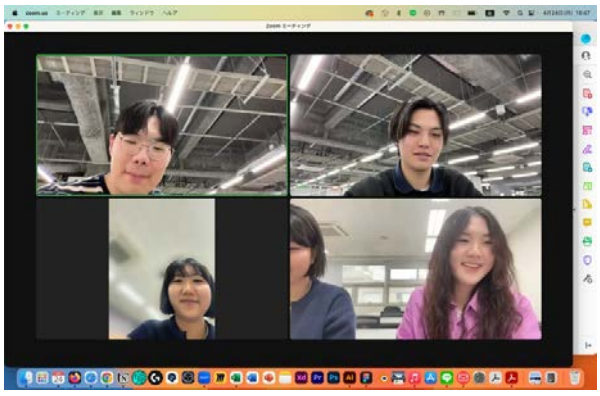


図 4　e-class 講義のグループ分けとキックオフ

今回の講義開発のための教材は 7 回（1 クォーター）の内容である。

2）e-class 講義の実行と教材資料作成

・計画＞実施＞成果発表

今回の活動は韓国側が 3 月から学期が始まるため、テーマについて事前に検討を行い、本学の学生が参加したいテーマのグループに配属する形にする。毎週の講義開始時に教員による進捗とやることの確認

① 1 週目：講義中に目標を設定する。

提示されたテーマについて全体の流れをまとめる。 7 週間のスケジュールの中で行われる作業の項目をまとめて、オンライン講義中に教員と学生(グループ)の役割を明確認する。

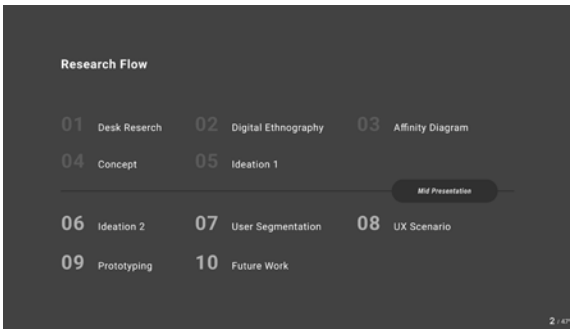


図 5　e-class 講義の目標設定イメージ

② 2 週目：リサーチ（文献、インタビュー、アンケートなどの方法を使用して調査内容からインサイトを明確にする）

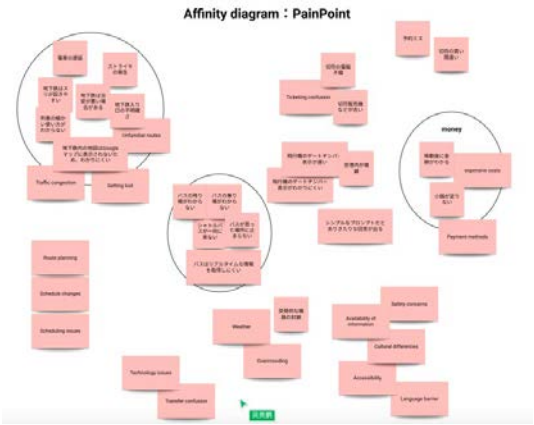


図 6　e-class 講義の目標設定イメージ

③ 3 週目：コンセプトメイキング＆アイデアの発想

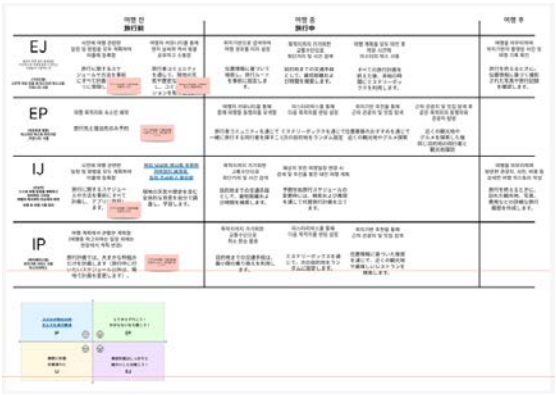


図 7　コンセプトメイキング

TOPへ戻る

④　４週目：中間チェック（教員による）

両大学の複数人の教員が参加する形で進捗内容について細かなコメントを行うことで、次のステップに進められる。

⑤　５週目：アイデアの視覚化

図８　ユーザーシーンの具体化

デザインツールを用いて、アイデアを明確認するためのプロセスを行う。ビジュアルデザインも重要なポイントなので毎度確認する。

⑥　６週目：プロトタイピング

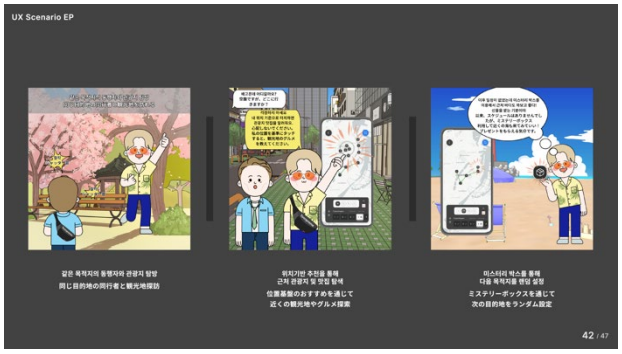


図９　ＵＸシナリオの検討

ユーザーがこのデザイン提案を使用する場面に合わせたシナリオを検討することで検証を行う。

⑦　７週目:韓国での最終プレゼンテーション

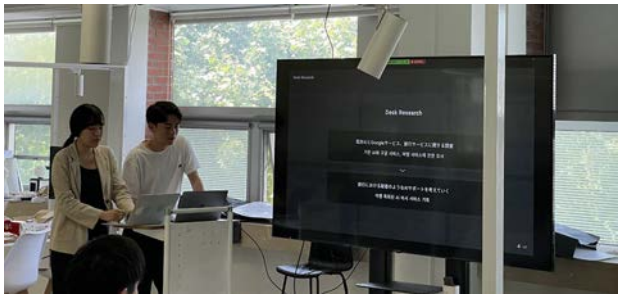


図 10　最終プレゼンテーション

成果を韓国派遣ｇＰＢＬの際に現地で国民大学学生の前で行うことで、英語力と大人数の前に研究成果を発表するコミュニケーション能力の向上にもつながる。

４．成果の発信

１）学会論文等投稿・発表状況

成果を研究・論文化するための試みとして国内（韓国デザイン学会、日本感性工学会）、国外（AHFE、HCII）などで論文投稿を行う。2024年年３月時点でAHFE2024(International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics）国際会議で６件の論文を採択され、７月に発表する。他にも韓国国内や日本感性工学会にも投稿予定である。

２）2024 年度の活動報告

2024 年度も同じく 2024 年２月受入ｇＰＢＬの時から同じプロセスで進めている。今年度からは４年生の中で院進学を希望する学生もグループに参加させ、先方から 13 人、本学から 14 名の学生が参加して、同じプロセスで講義を行なっている。

今後の計画

昨年度の活動からテーマを決める段階で、お互いの文化や希望の違いで進捗が遅れた経験があり、今年度の活動からこの問題を改善するための取り組みを検討している。

参考文献

1. Güzelci, O.Z., & Çetinel, M. (2021). A Pedagogical Model to Integrate Computational Thinking Logic to First Year Design Studio. doi: 10.4018/978-1-7998-7254-2.CH005.
2. Mine, Tunçok, & Sarıberberoğlu. (2022). An Online Basic Design Studio Experience: From Point to Space. Journal of design studio. doi: 10.46474/jds.1150261.
3. Hacihasanoglu, O. (2019). Architectural Design Studio Culture.
4. Al Maani, D. (2022). Revisiting learning styles and autonomy in the design studio: an undergraduate assessment. Open House International.

TOPへ戻る

人工知能を利用したデジタル採点支援システムによる記述試験問題の自動採点化の検討

材料工学科　　幡野　明彦

共同研究者
生命科学科　　福井　浩二　　応用化学科　　北川　理

１．はじめに

ロボットが自動的にテストの採点をしてくれる夢のような現場，それがAIによって現実化されつつある。スピーディーでミス無く，採点するロボットができれば，働き方が大きく変化が生じ，学生への教育研究指導がもっと手厚くなると考えられる。

著者が小学生のころ，「がんばれ！！ロボコン」という石ノ森章太郎先生の実写版テレビドラマが放送されていた（東映制作）。ロボコンという赤いロボットが，優しく思いやりをもち，自分が不利益を被っても友達を助ける・・・そして，一日の最後に，ボスロボット（ガンツ先生）が各ロボットの行動を採点する・・・という内容であった。ロボコンはいつも０点であった，と記憶している。「頑張れロボコン！！」を今考察すると，ガンツ先生はロボットの一日の行動ログを読み取り，一瞬で採点して得点表記していた。ある意味，AI自動採点を予想した，素晴らしいエンターテインメント作品であると感慨深い。

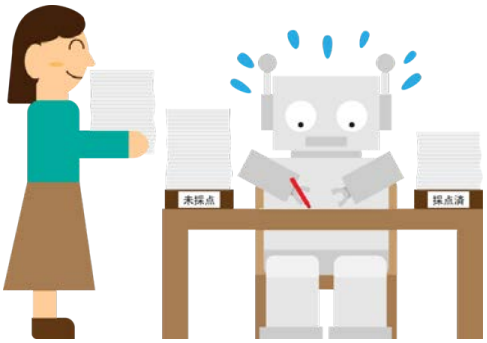


図１　ロボット（機械）が教員のかわりにミス無くスピーディーに採点してくれたら。

さて，現代社会の教育現場に話を戻す。自動採点は，マークシート方式が代表的である。専用のシートを基に所定の位置の数字などを鉛筆で塗りつぶし，そのシートを光学式マーク認識（Optical Mark Reader）装置で読み取って位置情報を基にして採点する方式である。誤読み取りが少なく，スピーディーで共通テストや国家試験などに広く利用されているが，設問が選択式に限定されるため正解が確率論で導き出されてしまう，記述問題を出すことができないなど，欠点もあった。そこで近年注目されているのが記述問題も採点できるAIデジタル採点支援システムである。

AIデジタル採点支援システムは，デジタル採点機能が含まれていて全国に広まりつつある。インターネットで「AI」「自動採点」などと入力して検索すると，数社がヒットし，使用例も報告されていて，教育効果向上，働き方改革，フィードバック機能搭載などとある。本システムは，まるでドラえもんがタイムマシンに乗ってやって来て，のび太君を助けるために出してくれる秘密道具の様にも思えてしまう。

そこで本申請では，株式会社教育ソフトの採点ナビというAIデジタル採点支援システ

TOPへ戻る

ムを活用し，定期試験の採点でのスピードアップ，ならびにAI採点機能がどこまで活用できるのか，精度と効果について検討を行った。

２．研究計画

使用するAIデジタル採点支援システムは，株式会社教育ソフト社のクラウド版デジタル採点システム「採点ナビ」である。AI機能を主として歌っているわけでは無く，あくまでもディジタル採点ソフトである。マークシート試験では専用の用紙が必要であったが，本システムはスキャナーを通して読み取りデジタル化し，複数の回答を一括採点できるようなシステムである。我々が持っている名簿と紐付けることにより，集計自動化も可能であり，ペーパーレス返却もできる。今回は，PDF化してスコームにて各人にフィードバックを行った。

以下，行った手順を示す。

・試験問題は通常のA4用紙でに二ページの問題として，学生は配布するときにはA3用紙裏表とした。
・試験終了後，答案を学籍番号順に並べた。
・スキャナーで裏表を読み込む
・デジタルデータを自分自身のPCに送信。このとき，解像度は300dpi程度が必要である。ファイルサイズが大きくなり過ぎないように注意する。
・PCにて「採点ナビ」を開く
・最初に，模範解答を登録する。このとき，試験問題と同じものを利用しないと，採点欄がズレるため注意する。
・採点終了後，PDFファイルにて保存する。このとき，一括で保存すると一枚のPDFファイルになってしまうため，一枚ずつ（学生１人ずつ）のファイルで出力する。
・スコームにて，全員に個別に試験を返却する（この作業が一番大変であった）。
・成績編集はスプレットシートタイプでアウトプット可能であり，エクセルで編集した。

試験サンプルとしては，著者が材料工学科二年生向けに担当している必修授業である「材料工学入門A,B」の中間試験を用いた。

また，本システムではAI自動採点機能が付属している。簡単な英数字やアルファベットは認識可能である。今回は立体異性体のR,S表記法を調べる問題として出題し，「S」「R」を答えさせることとした。また，選択問題を出題し，ABCDEのアルファベット内から正解であるBのみを認識できることを確かめた。今回は化学構造式や化学式の自動採点は検討しなかった。

３．計画の進行状況

3-1　通常のデジタル採点

AIデジタル採点支援システムは，PCの画面上で，複数回答を同時に写しながらクリック一つで採点が可能になる。図２に通常の採点画面を示した。一番左に見えるのが模範解答で，右側が学生の答案の解答部分である。複数の受験者の同じ設問に対する解答が表示さ

図２　通常のデジタル採点画面。クリック１つで○と×を選択でき，正誤判定ができる。

れる。各セルの左上にチェック欄□があり，こちらをクリックすることで○か×を設定で

TOPへ戻る

きる。すなわち，クリック 1 つで○，何もしなくて飛ばしたところは，下から二行目左から二番目の○欄にチェックを入れると，一括×採点を行ってくれる。この一括採点がスピードアップの秘訣であった。しかし，しっかりと目視にて正誤を識別する必要があり，本部分は通常の採点と変わらない。

3-2　AI の画像認識による自動採点

次に，選択問題の AI 画像認識自動採点を試した。まず，設定画面を図 3 に示した。少々図が小さくて見にくいが，解答欄がどこにあるのかを赤い囲みで指定した。この赤い囲みはそれぞれ指定された番号が付いていて，問題 1, 2, 3 のように区別される。それを反映したのが図 3 右側の設定画面であり，設問 8 を AI 選択問題形式で採点することを指定し，選択肢としては「A，B，C，D，E」という 5 個があり，正解は「B」であることを指定した。この

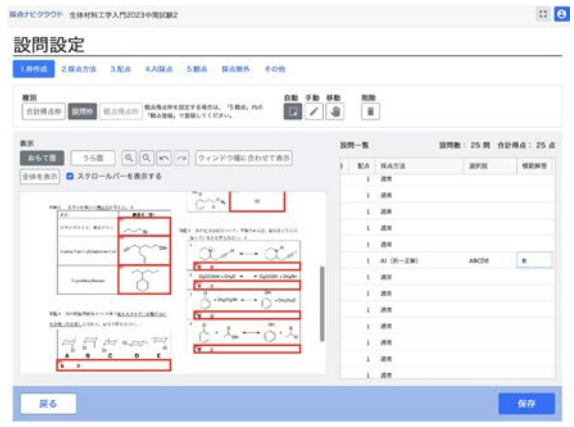


図 3　AI 画像認識自動採点の設定画面。左側に模範解答とどの位置に答えがあるのかを設定し（赤い囲み），右側でどこの問題をどのような採点形式で行うのかを指定した。今回の設問 8 は ABCDE の選択肢から B という答えを選ぶことができるかを確かめる。

図 4　図 2 を AI 自動採点した結果。問 8 の模範解答の欄が解答用紙とズレてしまい，正確に判定できなかった。

状態で保存を行い，採点画面に移った。しかし，今回の設問 8 は，模範解答の解答欄の位

図 5　設問 17,18 の模範解答と AI 画像認識自動採点の設定画面。設問 17 の答えは「S」，設問 18 の答えは「R」であった。

図 6　AI 画像認識自動採点後の画面。正解と判断した解答欄が現れる。正確に「S」を判定したものは 10/34 であった。

図 7　AI 自動採点で「S」と認識されなかった解答。今回は「S 体」という解答も正解であるため，「S 体」表記された解答は不正解として判断された。こちらの画面でデジタル採点を行い，補正した。

図 8　AI 採点とデジタル採点を組み合わせて AI 採点のエラーを修正した結果。

TOPへ戻る

置が解答用紙の解答欄とズレてしまい，自動採点はできなかった（図４）。

そこで，同様に記号選択問題である設問17,18もAI画像認識自動採点を行った。結果を図５～８に示した。図５は設問17,18の模範解答の解答欄設定画面であり，右側にAIの設定を行った。選択肢としてはR，S，ラセミ体という３つが考えられた。自動採点を行ったところ，34名中10名が正解となり，「S」の解答であった（図６）。しかし，二択問題なのに，少々正答率が悪かったため，不正解の答案をチェックした。その結果を図７に示した。「体」の字が入ったことにより，「S体」が不正解として判定されてしまったことが原因であることがわかった。そこで，デジタル採点機能を利用して左上のチェック欄「□」をクリックして，不正解と正解を選んだ。その結果を図８に示した。本操作により，正解として「S」と「S体」を選ぶことができた。AI自動採点は完全に文字認識を行うこと，ならびにイレギュラーな正解を判断できないため，必ず確認作業が必要であることが分かった。また，二通りの正解を設定することも可能らであるため，今後検討する。

3-3　AIデジタル採点システムの利用法

AI画像認識は精度が高く，手書きのアルファベットをほぼ間違えることなく選択識別することができた。設問18は逆の「R」が正解であったが，文字の識別間違いは無かった。以上の結果を踏まえて，上手に問題を出し解答方法と解答欄を工夫することで，化学反応式や計算結果の自動採点が可能になると期待した。具体的には図９のような解答欄である。問題としてはメタノールと数字85.3を答えるテストを作成し，研究室の学生５名を対象に試験を行った。メタノールの示性式を答えよという問題の正解はCH_3OHである。このとき，炭素Cには個数を示す1は省略するのが通常であるが，今回は1も明記することにすればよい。その結果，AI自動採点は18.2%（55個中正解が10個）の認識度でしかなかった。解答欄の指定が良くなかったようで，文字認識機能が低下した。結果の一部を図１０に示した。文字認識は，解答欄の設定で大きく影響し，別の文字が指定した位置の中に入ってしまうと正確性が低下することが分かった。

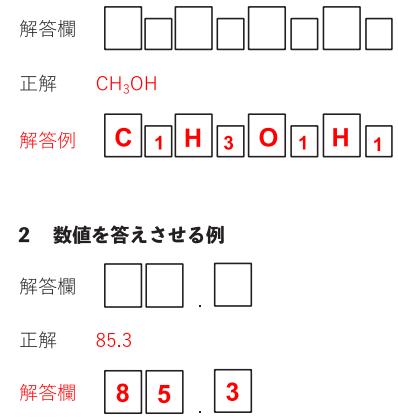


図９　AI画像認識採点機能を活用することを前提とした試験問題の解答欄の例

図１０　AI画像認識採点機能の識別できなかった例。CH_3OHの酸素原子であるOの文字認識ができていない。

４．まとめと今後の計画

以上，本申請では，株式会社教育ソフトのAIデジタル採点システム「採点ナビ」を利用してAI自動採点の効果を検討した。デジタル採点システムは採点効率を高めたものの，AI自動採点機能を利用するためには問題の出し方，解答欄の設計が必要となることが分かった。

５．及び学会，論文等投稿・発表状況

無し

TOPへ戻る

ＰＢＬ授業におけるプロトタイプ・デザイン及びチーム活動プロセスを支援するサイバーフィジカルＥｄＴｅｃｈシステムの開発

電子情報システム学科　　間野　一則

共同研究者
機械制御システム学科　　長谷川　浩志
電子工学科　　村上　嘉代子
情報工学科　　中島　毅
電子情報システム学科　　久住　憲嗣

１．はじめに　（目的）

本研究では，PBL 教育の DX として，サイバーフィジカルシステムによるプロトタイプ・デザインの促進・可視化及び，ディスカッションの促進･可視化を支援する EdTech システムの開発を行う．

Covid-19 を契機として，VR/AR による授業での実験のプロトタイプシステムや，オンライン/VR 空間での PBL 授業の実施例も増えてきた．これらの取り組みは，PBL 教育の DX の新しい大きな流れである．さらに，PBL 教育の本来の目的を考えると，これらの技術は独立ではなく，学生同士のディスカッションを促進するファシリテーションとプロトタイプの可視化・システム記述・検証といった両側面について融合させた新しい授業形態となるサイバーフィジカル EdTech システムの構築を目的とする．

対象となる授業

大学院システム理工学専攻システム工学特別演習(学部システム工学演習 C 含む)，Cross-Innovation Project (CIP), Cross-cultural Engineering Project (CEP; 大宮 gPBL を含む)，電子情報システム学科 ICT Systems Design，テクニカルセミナー，総合研究 I，II 等．

２．研究計画

2.1 実施計画

対象 PBL 授業において，以下の機能をもつ EdTech システムについて実践的に検討する．

(1)PBL における VR/AR によるプロトタイプ・デザインプロセスの記述・可視化支援：プロトタイプを VR/AR を利用してサイバーデータとして記述してシステムデザインすることで，要求項目に対して，様々な角度からの検討を可能とする．

(2)PBL におけるチーム行動データの取得･詳細記述の非構造化データベース(音声・映像等)の構築:　チームのディスカッション状況を音声・画像・テキスト入力，プロトタイプの中間成果物によるデータのやりとり等をサイバー上で記述(アノーテーション)し，チーム活動状況の可視化・フィードバックを行う．

TOPへ戻る

(3) (1)と(2)を融合した，サイバーフィジカル EdTech システムの開発: プロトタイプとチーム活動をサイバー上で融合した EdTech システムとして構築し，PBL の PDCA をより速く回す.

2.2 学科・学部・専攻等の FD・SD 活動との関連，教育改革への貢献

EdTech は，AI，IoT，データサイエンスに関連しており，システム理工学専攻，電子情報システム学科をはじめ情報系学科の専門技術と関連する．一方．PBL では個々の専門分野の知識をもつ学生が分野横断チームを構成し，協働活動を通じて問題発見・課題解決を図る科学リテラシー向上を期待されている.

FD・SD 活動として，PBL の指導法やアセスメントでは，従来のデザインレビューやシステム計画書だけでなく，チームの実際の行動中のデータに基づく可視化による評価や，システムからのリフレクションの促進も重要である．本研究により，PBL におけるフィードバックをデザインレビューだけでなくよりリアルタイム性をもたせることができ,さらに,PDCA の精緻化･高速化といった DX による PBL 授業推進を期待できる.

さらに，高大接続としての附属高の Arts& Tech 授業(2023 年度は SDGs Scratch Game Project を実施)や女子高校生のインターンシップなどにおいてもサイバーシステムに関連した未来の EdTech 教育への貢献を期待できる.

2.3 教育において期待される効果

「学生が何を学んだか」には，学んだ知識と，それを活用するための科学的リテラシー＆コンピテンシー（課題を設定し解決していく能力）の２つがある．前者は，試験や成果物で教育効果を評価できるが，後者は評価が難しい．この研究では，PBL 中の学生の行動データ，プロトタイプの作成プロセスに関するデータを集約し，PBL 活動のリアルタイムでのフィードバックを可能とする EdTech システムを検討する．これにより，PBL で学ぶ学生が，VR/AR 技術を用いた新しいプロトタイプの構築技術やシステム最適化の協働作業を効果的に行える．そして，得られたサイバーデータと成果物・デザインの中間プロセスを含めた総合的評価が可能となる.

３．計画の進行状況

3.1 今まで（2022 年度末）の活動実績

2020 年度～2022 年度は,関連の実践的研究「PBL における学生の協同学修プロセスの可視化・促進のための EdTech システムの開発」として，主に PBL における学生の行動把握・リフレクション・評価システムについて提案・研究を実施した.

(1)システム工学特別演習等の PB において VR ツール（zoom も含む）を利用して収集した音声記録データベースに,ELAN ツールによるアノテーションを実施した.

(2)アノテーションデータからの PBL 参加学生の活動の可視化： 従来の話者ダイアライゼーションとともに，新たに PBL オントロジーを定義し，PBL オントロジー系列によるプロジェクト活動の可視化を試みた．これについては，学会発表も実施した．また，可視化に関して，従来の人間によるグラフィックレコーディングに対応するものとして，ピクトグラムによる画像出力手法も検討した.

(3)さらに，音声とともに，各人の頭部に小型ビデオカメラを取り付けて，発話者と聴取者の両者の活動データを取得した．このデータより，発話者の発言と，聴取者の視線情報を組み合わせることで，単に発話量の大小ではなく，聞き手側の反応も合わせて活動評価することが可能となり，より正確な PBL 活動の評価ができることを示した.

(4)PBL 演習授業において,VR を用いたプロトタイプ構築により，各チーム提案の可視化

TOPへ戻る

を実施した.

3.2 2023 年度計画

2023 年度は，PBL 教育に関する従来の授業実践を基に,PBL 教育のための DX を目指して，これまでに検討した各要素技術と，その融合となるサイバーフィジカル EdTech システムについて検討する.ここで対象とする PBL は，これまで実施者が参加してきたシステム工学特別演習や CIP,CEP を中心とした広く社会課題の解決策の提案・プロトタイプの作成を想定している.

具体的に以下を計画している.

(1)PBL における VR/AR によるプロトタイプ・デザインプロセスの記述・可視化支援：本 PBL で典型的な IoT データ/実サービス事例に基づくプロトタイプ例につて VR/AR を利用したクラウドデータとして記述して，中間成果物についてチームメンバーでの共有・評価機能を実現する.

(2)PBL におけるチーム行動データの取得･詳細記述の非構造化データベースの構築:チームのディスカッション状況（音声･画像･テキスト入力，あるいは，プロトタイプの中間成果物によるシステム・サービスデータ）をクラウド上で記述し，それにかかわるチーム＆チームメンバーの活動状況の可視化・フィードバック機能を実装する.

(3) (1)と(2)を融合したサイバーフィジカル EdTech システム：クラウド上プロトタイプ・デザインプロセスとチーム活動の可視化を融合して，各チーム・各メンバーが PBL 状況を把握する機能をもつ EdTech システムを構築する.

3.3 計画進行状況

2023 年度は，以下のシステム提案・研究を実施した.

3.3.1 サイバーフィジカル PBL システムによる行動分析技術

サイバーフィジカル PBL システムとは,PBL 活動を行う物理的空間(VR 空間内での活動も含む)の行動データを獲得し,サイバー空間で行動分析，活動の可視化，参加者の貢献や支援を行うものである．なお，VR 環境での PBL は,物理環境よりも簡単に行動データ(音声，映像）や付随する時刻情報や空間情報を取得できるというメリットがある.

研究実験として，VRchat を利用した VR 環境において，参加者各人がアバターとして行動する PBL を実施し，その行動可視化システムを構築した．図 1 にシステム概要を示す.参加者から得られる情報取得は,(1)アバターのジェスチャーパラメータから，顔・手の動作や体の移動を示す Action Tag，(2)音声データの音声認識によるテキスト情報,(3)各データの時刻記録，からなる．これらの情報から，PBL の活動状況を把握できる．図 2 は，コミュニケーション ACT として,話者の発言，うなずき，移動の様子を表示し PBL 活動の把握が容易になった.

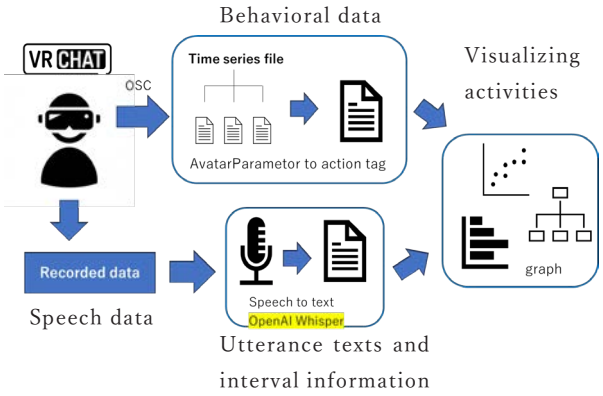


図 1. 行動可視化システム概要

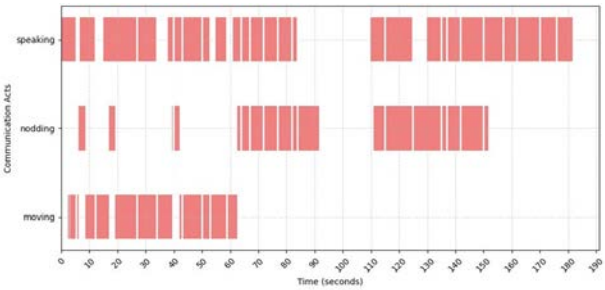


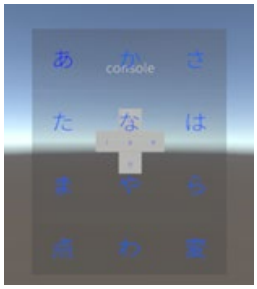
図 2. コミュニケーション ACTS の表示

TOPへ戻る

3.3.2 VR利用における視線情報入力の提案

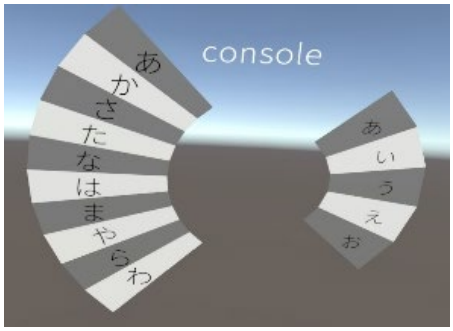
VR空間での活動では，音声・映像以外の視線情報も参加者の行動記録や情報入力に適している．そこで，VR空間での視線入力インタフェースを提案した．

図3に示すように，従来の顔の動き(Gaze)に対応する入力記号領域での一定時間の停留による入力方式に対して，3種類の視線入力方式を試みた．(a)は，奥行きを利用した視線の距離入力，(b)は，円の外周・内周への視線移動による入力，(c)は，視線移動による入力を左右に分けた手法である．予備的な実験では，(c)の方式が，誤入力率をGaze方式と同等に低く，かつ，入力速度がキーボード入力とほぼ同等であることを確認できた．



(a) 距離入力
(Distance Input)

(b) 円の外周・内周入力
(Circle Input)



(c) 左右入力(Beside Input)

図3. 視線入力インタフェースの提案

3.3.3 PBLプロセスにおける生成AI利用

ChatGPTによる階層化意思決定の支援

近年，大規模言語モデル(LLM)を利用した各種サービス支援が試みられている．PBL活動においても様々な利用の可能性が考えられる．

一つの試みとして，システム工学演習Aで実施する問題発見・意思決定手段である階層的意思決定(AHP)への利用実験を行った．AHPの各工程のうち，総合目的設定やその評価基準設定は人間が行うが，アイデア出しの代替案の提案，代替案の重要度評価についてChatGPTの支援を行った．ChatGPTへはプロンプトで各工程での情報を示し，代替案の追加と重要度評価を行うことに支援が可能であることが分かった．

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

システム理工学部は，2026年度より課程制に移行する．情報課程メディアコースでは，VRの利用や，コンテンツ制作授業期待されている．また，PBL教育では，本研究のようなチーム活動プロセスを支援するサイバーフィジカルEdTechシステムの重要性が増す．さらに，遠隔との国際協働活動(Cooperative Online International Learning; COIL)への展開として，意思疎通支援・コミュニケーションデザインや，Chat-GPT等の生成AIを利用したAI-CopilotによるPBL支援，教育DXとして授業の多様化に関連してオンデマンドコンテンツ制作技術等の研究開発を継続する．

学会，論文投稿・発表状況

[1] 間野一則，牟瀛，東山龍雅，”PBLにおける学生の協働学修プロセス可視化技術，”日本工学教育協会，2023年度工学教育研究講演会講演論文集，3C20，pp.256-257，2023-09.
[2] 井上雅裕，大江信宏，間野一則，”グローバルPBLとサイバーフィジカル空間への拡大，” 日本工学教育協会，工学教育，Vol. 70，No.3，pp.9-14，2022-05.

謝辞：本研究に関連して，間野研究室の総合研究の一部として実験協力いただいた，鈴木あゆ奈，黒澤尚正，西川颯人各氏に感謝する．

TOPへ戻る

DX 推進に向けた情報セキュリティ管理体制強化研究

環境システム学科　　持永　大
情報システム部　　我妻 隆宏

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

サイバーセキュリティの実践には総合的な取組が必要である。例えば、サイバーセキュリティの強化には、技術的な知識に加えて、政治経済、組織管理、人間工学、法律、政策等の俯瞰的な視点が必要である。本学は多くの情報資産を有するが、それらの管理は教員や職員が行っており、ログ管理や教育研修プログラムの実施、または情報管理台帳の整備が必要である。

本活動の目的は教職学協働の取組による DX 推進に向けたサイバーセキュリティ強化である。具体的な活動として、教員と職員が協働でログ収集分析システムとサイバーセキュリティ教育研修プログラムを構築する。本学は2022年8月に情報セキュリティ基本規定を制定したところであるが、ログの保存や全教職員を対象とした毎年の研修プログラムがないため、文部科学省が令和4年3月に発出した教育情報セキュリティポリシーに関するガイドラインにおいて適切な対応をしていないと判定される可能性がある。そこで、6 ヶ月分のアクセスログ保存と、全学校全教職員に対する研修プログラムを構築し、情報セキュリティ管理体制を強化する。

これらの活動の背景には、大学等の教職員を狙った標的型メール攻撃をはじめとしたサイバー攻撃が頻発していることがある。近年起こっている事案では、教職員が個人で管理・利用する端末でのマルウエア感染を検知する事が難しい事情がある。例えば、教員が研究・資料作成などを大学が管理するネットワーク外で行っている場合、大学等側はマルウェアの感染状況を把握することが困難となっている。これを解決するためには、教員の端末に EDR(Endpoint Detection and Response)システムをインストールする方法があるが、本学では職員用端末にのみインストールされている状況である。また、これ以外にも被害を受けた教職員もマルウェア感染に気付いていないことがある。これらは、令和４年１２月８日の文部科学省高等教育局私学部私学行政課による「『大学等におけるサイバーセキュリティ対策の徹底等について（周知)』の発出について」においても言及されており、サイバーセキュリティの確保が本学だけの課題でないことがわかる。

２．研究計画

2023 年度上半期に通信ログを収集・管理する基盤を設計する。また、情報イノベーション課とともに SIT-CSIRT の活動への貢献を検討する。

2023 年度下半期に、通信ログの分析と 2024 年度からの教育研修プログラムの検討を行う。

３．計画の進行状況

2023年度上半期にSIT-CSIRTの活動への貢献として教育研修プログラムについて検討した。現在本学では、情報倫理ビデオによる教

TOPへ戻る

育を行っているが、これらは職員の活動を想定したものとはなっていない。例えば、令和2年改正個人情報保護法では、漏えい・滅失・毀損があり、個人の権利・利益を害する恐れが大きい場合の個人情報保護委員会への報告・通知を義務化している。そのため、従来よりも職員に対する教育プログラムの充実が必要なことがわかった。

また、個人情報を含むやりとりが、適切な保護無く行われていることも分かった。例えば、学内・学外とのやりとりにおいてパスワードなしZoom会議の設定やPPAP（メールでパスワード付きのZIPファイルを送り、あとで別メールでパスワードを送る）によるファイル共有が行われている。なかには、パスワードがメール本文に記載されており、学生の個人情報の漏えいリスクが高いこともわかった。

このような状況に対し、本研究は2024年度の職員向けの教育研修プログラムの実施に向けてリスクの見直し、規定整備、ベストプラクティスの収集を行うことを学術情報センター会議にて提案した。その結果、2024年度以降に教授会等で普及啓発をおこなうこととなった。

SIT-CSIRTの活動について、本学では様々なインシデントが発生しているが、処理フローが明確化されていないことが課題と分かった。本研究の期間中にも、本学のウェブサイトを模した偽のウェブサイトを発見したが対応フローが明確化されておらず検討に時間がかかった。このウェブサイトは、芝浦工業大学のロゴや外観を偽装しており、本学をGoogleで検索した際の結果の上位に表示されていた。そのため、情報イノベーション部と連携し、偽サイトに関する情報提供をGoogleやJPCERT/CCに行った。

分析の結果、このページはBet365の中国コンテンツが表示されており、ページ内のリンクを押下するとBet365（中国語）のサーバーに接続することがわかった。コンテンツを掲載する背景や目的は不明であるが、中国に英Bet365のミラーが乱立しているという情報もあり、本件も中国のオンライン賭博ユーザー向けのコンテンツの隠れ蓑のようなサイトとして利用された可能性がある。

図 1　本学を騙るウェブサイト

その他にも、インシデントに対して対応が後手に回っていることがわかった。具体的には、学内に設置された脆弱性を有するコンピュータが存在している際の対応等、インシデントの認知、情報共有、トリアージ、分析、対応計画、対応実施の手順が定められていないため、都度状況に合わせて対応していることがわかった。

そのため、現在のSIT-CSIRTではハンドリングフローの確立が急務である。インシデントの発見者・関係者からの連絡を受けた後、SIT-CSIRTは情報イノベーション部から学長・理事会に報告を行い、外部専門組織に情報共有をする。その後、トリアージ、インシデント対応をするフローを確立しマニュアル化することで、迅速な対応が可能となる。このためには、JPCERT/CCが提供しているインシデントハンドリングマニュアルを参考にすることも可能である。

試験的なログ収集分析システムとして、マイクロソフトのAzure上に通信ログの収集機構を実装した。このログ収集分析システムはAzure上に設置されたハニーポットであり、本学に限らない悪意のある通信を収集する送

TOPへ戻る

致である。これを試験的に学外に設置したのは、将来的に学外から本学を標的とした攻撃を観測することや、学内で悪意のある通信を行うコンピュータを早期に発見することを想定している。

本研究において、ハニーポットは、T-Pot（https://github.com/telekom-security/tpotce）を元に作成した。T-Pot は、Docker を用いたマルチハニーポットプラットフォームであり、SSH に対する攻撃を観測する crowrie 等の複数のサービスを想定したハニーポットや、収集した情報を可視化する Elastic Stack といったサービスを統合したツールである（図 2）。これをクラウド上に展開することで、攻撃者に対する罠を用意する。

収集した情報により、SSH に対する攻撃を観測することができた。観測した攻撃は、1 日あたり数千程度であり、発信源を地図上に表示することができた。crowrie は、認証を拒否する ID・パスワードの組合せを設定することが可能である。

今回の研究では ID・パスワードを空欄とするもの以外を収集し、本学に関連のある言葉を含んだ ID やパスワードがあるかを検証する事で本学に対する攻撃があるかどうかを検証した。その結果、ほとんどの攻撃は、既知の ID と脆弱なパスワードの組合せにより SSH の認証を試みるものであった。そのため、学外から本学を標的として攻撃するトラフィックは観測できなかった。また、ハニーポット上では、これらの組合せを収集するために入力されたパスワードを可視化した。（図 3）ユーザ ID は Azure、パスワードは Passw0rd61 が最も多い試行であった。

この結果は、攻撃側が標的の利用するインフラに合わせて ID を選定していることを示している。また、パスワードは Password を変更したものであり、推測可能なパスワードを試行していることがわかる。

図 2 アクセス解析画面

TOPへ戻る

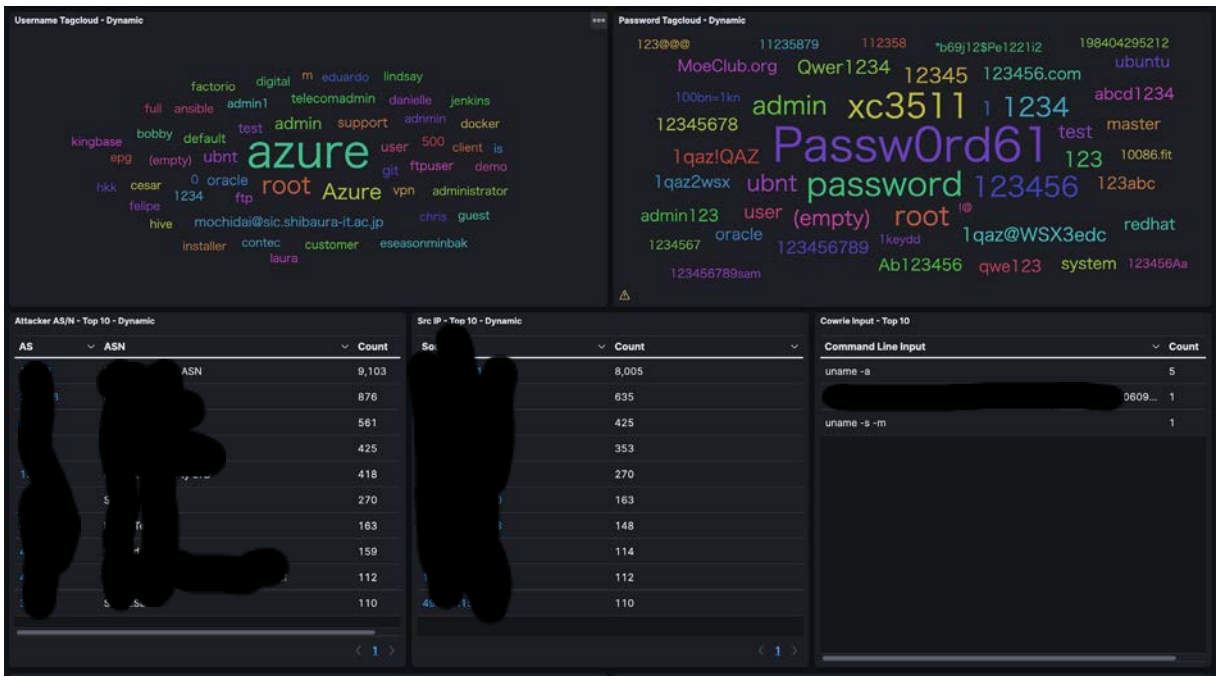


図 3　SSH の攻撃に対する ID パスワードの組合せ

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本研究の今後の計画は、学内におけるサイバーセキュリティ教育プログラムの実施、SIT-CSIRT の運用マニュアル、及び情報セキュリティ管理規程等の修正である。まず、教育プログラムに関して、情報イノベーション部とともに、2024 年度中の教育プログラム作成を目指す。この内容をもとに、教授会や入職研修におけるセキュリティ教育を実施し、本学のサイバーセキュリティ水準を向上させる。

SIT-CSIRT はハンドリングフロー等の運用マニュアル整備が必要である。SIT-CSIRT メンバーが一定の訓練を行った後に対処ができるよう、限られた人員等を最大限活用するためのハンドリングフローやマニュアルを整備する必要がある。例えば、学内に脆弱なサーバが存在するかどうかを確認する方法、脆弱性修正の呼びかけ方法などを文書化しておくことで、経験の少ない人員が対処する際の指針となる。

そして、情報セキュリティ管理規程の見直しをする必要がある。サイバーセキュリティは法人全体で取り組む問題であり、定期的な理事会への報告や、情報資産の洗い出し、情報漏えい時の責任の所在など、SIT-CSIRT 等の体制整備に加えて、活動根拠を与えることが必要である。

TOPへ戻る

特　別　研　究

（１）プロジェクト研究助成

TOPへ戻る

複雑乱流場における乱流拡散機構の解明

工学部　機械工学科　　河田　卓也

共同研究者
電気通信大学　大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻　守　裕也

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

乱流は流れの中に大・小様々なスケールの渦構造が生じる多重スケール現象であり、スケールの異なる渦構造間の非線形相互作用によって運動量・熱・物質の空間拡散が生じる。この様な乱流による輸送効果は著しい摩擦抵抗の増大や熱伝達・物質混合の促進に繋がるため、熱交換器やエンジン等の流体関連機械の高効率化に極めて重要であるが、本質的に非線形な現象であるためそのメカニズム解明は困難を極める。これまでの乱流の非線形スケール間相互作用に関する研究は比較的単純な形状の流れ場に限られ、流れの剥離や大規模渦放出等を伴う様な実用に近い条件下において乱流輸送のメカニズムを調べた研究はほとんど無い。

そこで本研究では、円柱の後流や段差付き流路内の流れの直接数値シミュレーションを行い、そのデータの解析によって、剥離・大規模渦放出を伴った複雑乱流場におけるスケール間の非線形相互作用により乱流エネルギーや熱のスケール間輸送・空間輸送が生じるメカニズムを解明する。

乱流の非線形スケール間相互作用の効果は、乱流エネルギーのスケール間輸送効果と、運動量・熱・物質の空間拡散効果に分けられる。これまでの研究は前者に注目したものが殆どで、後者に着目した研究は極めて少なく、有効な解析手法も確立されていない。申請者は過去の研究で乱流の非線形多重スケール相互作用をスケール間輸送効果と空間輸送効果に分離する解析手法を提案しており、近年ではその解析手法を用いた乱流熱伝達に関する研究で成果を上げている。本研究の特色・独創的な点は、剥離・渦放出を伴う複雑な乱流場における非線形スケール間相互作用による空間拡散効果について、独自の解析手法で現象のメカニズム解明を目指す点にある。

２．研究計画

主催する研究室に配属された学部４年生のうち、１・２名に本研究課題に関連して、バックステップ乱流（段差付き流路内の乱流）や円柱後流乱流の直接数値シミュレーションを行う課題を卒業研究テーマとして与える。バックステップ乱流はパイプライン等の内部流、円柱後流は翼周りの流れ等の外部流を想定したテストケースである。

今年度の前半では、申請者がこれまでの研究で用いた平行平板間乱流の直接数値シミュレーションプログラムを基に境界条件の与え方等を変更することで、バックステップ流・円柱後流の直接数値シミュレーションの計算プログラムを作成する。本研究課題用のワークステーションを導入し、まずは低レイノルズ数条件下の数値シミュレーションを行い、過去の実験・数値シミュレーション結

TOPへ戻る

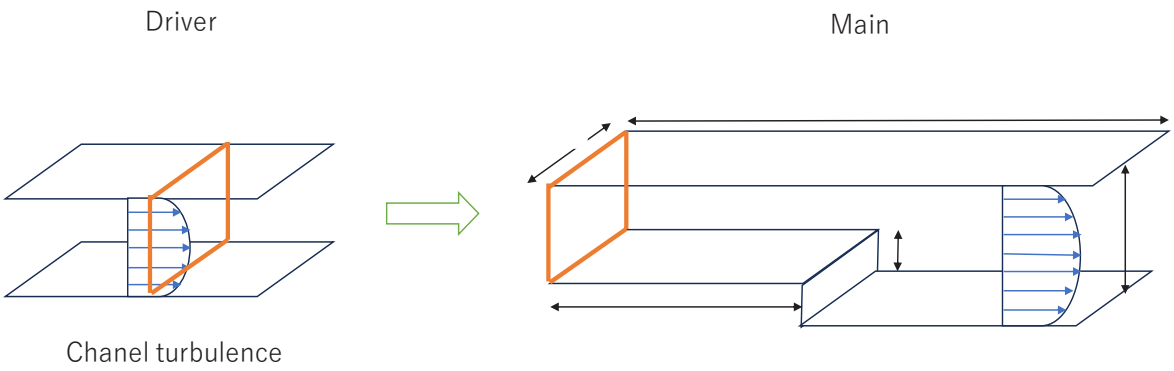


図１：バックステップ乱流の計算条件．ドライバーパートの計算領域は、$L_x^d/h \times L_y^d/h \times L_z^d/h = 2\pi \times 2 \times \pi$であり、メインパートの計算領域は$L_x/h \times L_y/h \times L_z/h = 7\pi \times 2.4 \times \pi$．ステップ高さは 0.4h であり、ステップ長は 3π である。

果と比較することで作成した数値シミュレーション用のプログラムの健全性の確認を行う。

年度の後半では、バックステップ乱流・円柱後流乱流の流れ場を様々なスケールへと分解し、それらの相互作用により生じる乱流拡散効果を解析する統計解析プログラムを作成する。比較的低いレイノルズ数条件下で段差・円柱の下流で幾つかの位置に着目して詳しい解析を行い、乱流拡散によるエネルギー輸送が主に生じるスケールや、乱流拡散に主に寄与するスケール相互作用の組み合わせを明らかにする。同様の解析を、様々なレイノルズ数条件下で行い、解析結果のレイノルズ数依存性を調べる。乱流の数値シミュレーションの計算負荷は概ねレイノルズ数の 9/4 乗に比例して増加するため、比較的高いレイノルズ数条件下の計算は研究室所有のワークステーションでは難しくなることが予想される。その場合には、大阪大学サイバーメディアセンター等の外部研究機関の大規模計算機を利用する。

上記の様なバックステップ乱流・円柱後流乱流の数値シミュレーション・データ解析を行うことで、剥離を伴う複雑乱流場における乱流拡散メカニズムを明らかにし、投稿論文として年度末ごろに発表することを目指す。

３．計画の進行状況

前述の通り、本研究プロジェクトでは、複雑乱流場における乱流輸送機構のメカニズム解明のため、バックステップ乱流と円柱後流乱流の数値シミュレーションを行った。研究の遂行にあたり、主催研究室に配属された学部四年生を、バックステップ乱流・円柱後流乱流のシミュレーションにそれぞれ一人ずつ割り当て、当研究費の支出によりワークステーションをそれぞれ１台ずつ購入し、数値シミュレーションを行う環境を整えた。以下にそれぞれにおける研究の進捗状況について述べる。

3.1　バックステップ乱流の数値シミュレーションについて

バックステップ乱流の計算領域については、共同研究先である電気通信大学大学院理情報理工学研究科機械知能システム専攻の守研究室から譲渡された Fortran によるバックステップ乱流のシミュレーションコードを用いて行った。図１に示す通り、バックステップ乱流のシミュレーションを行うメインパートの流入条件である完全発達チャネル乱流を得るため、メインパートとは別に、ドライバーパートとしてチャネル乱流のシミュレーションを行うシミュレーションを別に行った。メインパートにおけるステップは、埋め込み境界

TOPへ戻る

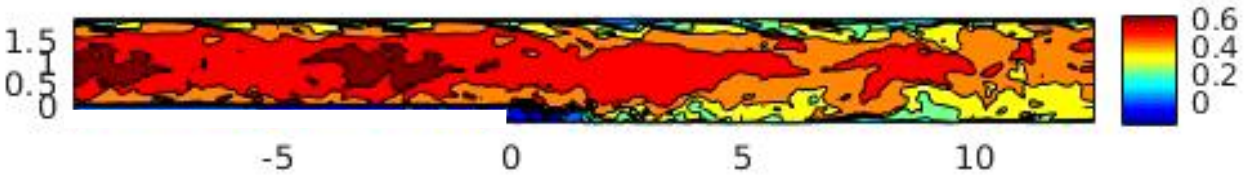


図２：バックステップ乱流 Re=5,600 の計算領域中央の断面における主流方向速度の瞬時分布のスナップショット

法により表現されており、ドライバー・メインパート、共にシミュレーションの支配方程式は、ドライバーパートの流路幅$2h$と体積流量U_bで無次元化された非圧縮性流れの連続の式と運動方程式（Navier-Stokes 方程式）：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{0}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2 \boldsymbol{u}$$

である。ここで、$\boldsymbol{u}$は流体の無次元速度、pは圧力、$Re = U_b h/\nu$（νは流体の動粘性係数）はレイノルズ数である。ドライバーパートは上下壁面上では滑りなし条件、x 方向、z 方向には周期境界条件を適用することで完全発達するチャネル乱流を計算し、図１に示す通り、ドライバーパートの計算領域の中央における主流方向に垂直な断面の瞬時速度分布をメインパートの流入条件として用いた。メインパートの他の境界条件は、z 方向と壁面上の境界条件に関してはドライバーパートと同様に

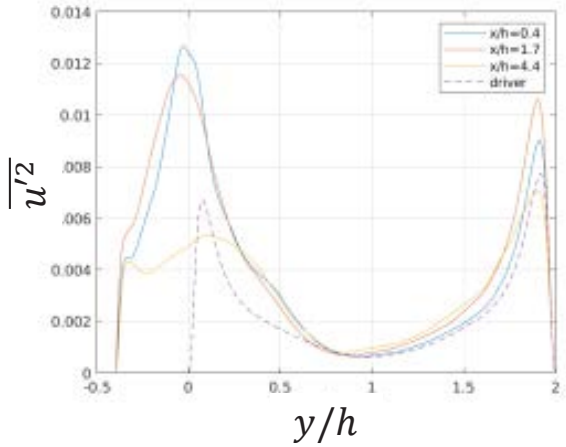


図３：ステップ下流、x/h=0.4, 1.7 4.4 における主流方向乱流強度の分布

周期境界条件と滑り無し境界条件をそれぞれ用い、流出条件には対流流出条件を課した。レイノルズ数は Re=5600 として計算を行った。

図２に、本シミュレーションで得られたバックステップ乱流の瞬時速度場を示す。x＝-9.5 の流入境界から乱流が流入し、x=0 のステップで剥離して下流に一層乱流強度の強い乱流場が形成されている様子が確認できる。図３に示すのはステップ下流の特徴的な位置における乱流強度分布であり、流入条件である Re=5,600 のチャネル乱流と比較して示されている。これを見る限り、乱流強度はステップ下流において流入条件のチャネル乱流に比べて著しく増加しており、これは主にステップにおける剥離に起因すると考えられるが、ステップが位置する　y＝-0.4 の壁面付近だけでなく、反対側の y=2h 側の壁面付近でも顕著な乱流強度の増加が見られることは注目に値する。反対側の壁面付近で生じている流れの剥離による乱れの影響とも考えられるが、流路幅の急激な増加による逆圧力勾配の影響等も考えられるため、今後さらに詳しい解析が必要となる。

3.２　円柱後流乱流の数値シミュレーションについて

本研究では、共同研究先である電気通信大学大学院理情報理工学研究科機械知能システム専攻の守研究室から譲渡されたバックステップ乱流のシミュレーションコードを円柱後流乱流のシミュレーション用に編集することで円柱後流乱流の数値シミュレーションを行うことを試みた。バックステップ乱流のシミ

TOPへ戻る

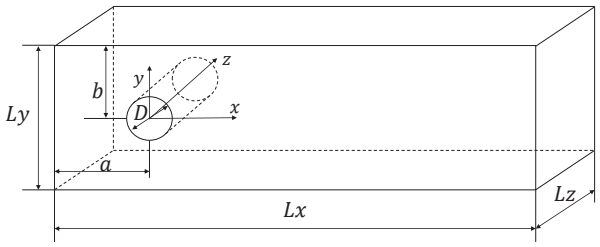


図４：円柱後流の計算条件.

ュレーションコードのドライバーパートの計算を削除し、メインパートには図４に示す様に直径１の埋め込み境界法により表現された円柱が固定されており、流入境界から$u/U_\infty = 0$の一様流が流入するものとした。また、他の境界に関しては、y 方向は０勾配条件、z 方向は周期境界条件を課し、流出境界に関しては対流流出条件が課されている。支配方程式はバックステップ乱流のシミュレーションと同様、無次元化された連続の式と Navier-Stokes 方程式であり、無次元化は流入速度U_∞と円柱直径 d によりされている。計算に用いたレイノルズ数は$Re = U_\infty D/d = 300$である。

図５に本研究において得られた円柱後流のシミュレーション結果の一例を示す。円柱周りの瞬時速度（x 方向成分）の瞬時分布が示されている。円柱下流に規則的なカルマン渦の放出がシミュレーションされていることを見て取ることができ、少なくとも定性的に円柱後流の流れ場の特徴を取られてシミュレーション結果が得られていることが分かる。

図５には円柱下流 x/d =10 における乱流強度$\overline{u'^2}$、$\overline{v'^2}$の輸送方程式における乱流エネルギー生成項、粘性散逸項、乱流拡散項の寄与を比較した図であり、この図からも乱流の空間拡散効果を表す乱流拡散項が生成項や粘性散逸項に比べて卓越していることが明らかになった。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後はバックステップ乱流・円柱後流のシミュレーションにおいて、得られた結果に基づいてスペクトル解析等を行い、より詳しい乱流拡散メカニズムの解析を行う計画である。

昨年度は研究室スタートアップの年で学部四年生のみの研究体制であったため、各プロジェクトにおいて基本的な結果を得る段階で年度末を迎え、卒業研究以外の学会発表等の対外発表はない状況であるが、今年度以降はそれぞれのプロジェクトを担当する学生が修士課程へと進学し、さらなる研究の進展が期待できる。今年度以降は国内学会や国際学会等、積極的に対外発表や論文投稿による研究成果の発表を行う予定である。

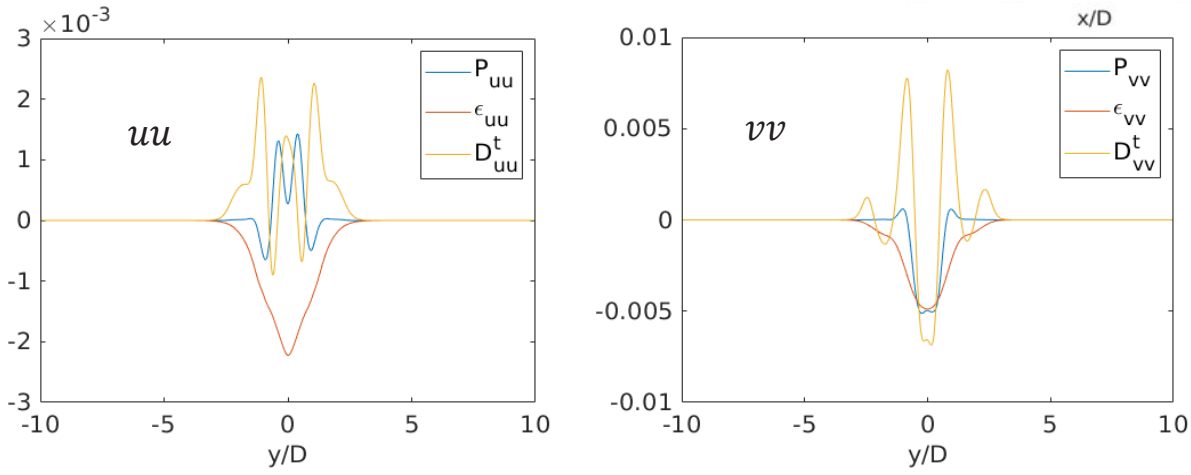


図５：円柱後流（Re=3900）、x/d=10 における x 方向、y 方向乱流強度の輸送方程式における乱流エネルギー生成項、粘性散逸項、乱流拡散項の比較

TOPへ戻る

多細胞による組織形態形成の数理モデル構築

機械機能工学科　　亀尾　佳貴

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

生体組織の形態形成過程では，組織同士の接触にともなう力学的な相互作用が組織形態の制御に重要な役割を果たしている．本研究では，組織間の力学的相互作用にともなう形態形成過程の一例として，特徴的な曲面形状が形成される関節の形態形成過程に着目した（図 1）．関節の形態形成過程では，向かい合った骨原基から滑液を介して及ぼされる力学的相互作用が，組織内部の軟骨細胞の増殖や分化を制御していることが知られている．この細胞の力学応答挙動は，Carter の骨化理論として定式化されている[(1)]．このような組織形態形成のメカニズムを力学的な観点から理解するために，計算機シミュレーションを通じて生体組織の力学的挙動を解析することが有用であるが，個々の細胞の力学応答とそれにともなう組織形態形成を同時に解析可能な数理モデルは未だ確立されていない．

そこで本研究では，細胞の力学応答に基づいて，関節の形態形成過程を再現可能な数理モデルの構築を目的とした．組織を構成する細胞の挙動を表現するため，形態形成過程における骨組織の力学的解析手法として，連続体力学ベース粒子法として知られている Material Point Method (MPM) を用いた（図 2）．まず，組織間の接触とそれにともなう組織変形が解析可能な数理モデルを構築した．さらに，MPM における粒子を細胞とみなし，Carter の骨化理論に基づいて，力学環境に応じた細胞の成長と増殖の数理モデルを構築するとともに，基礎的な関節形態形成シミュレーションを通じて本数理モデルの妥当性を検証した．

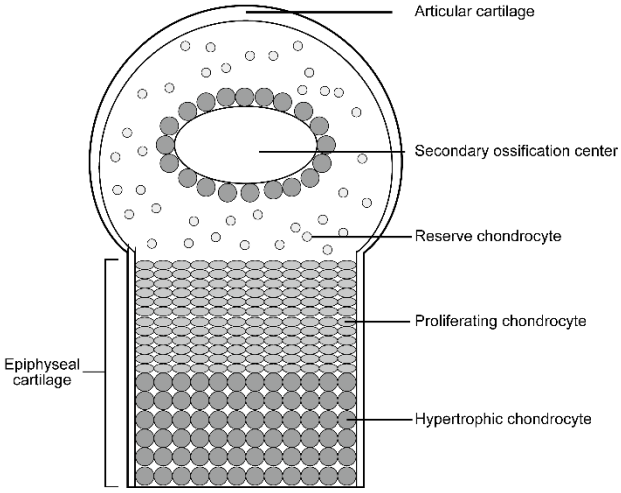


図 1.　長骨端部における関節形態形成に関連する細胞挙動.

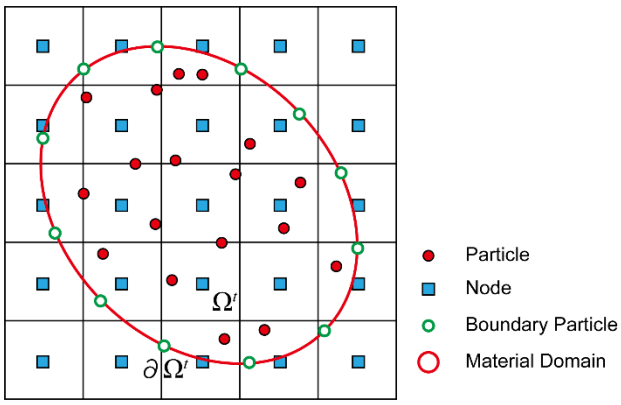


図 2.　Material Point Method (MPM) の概要.

TOPへ戻る

２．研究計画

2.1　組織間接触の数理モデリング

組織間接触を表現するため，本研究ではペナルティ法を採用した．まず，物体の表面形状に応じた接触応力を負荷するため，ヤング率などの材料特性と表面積の情報を持った表面粒子を導入した．次に，MPS などの粒子法においてこれまでに構築されてきたペナルティ法による接触解析アルゴリズムに基づき，接触した表面粒子に対して貫入を妨げる反発力を導入した．具体的には，表面粒子の外向き法線ベクトルと位置ベクトルを用いて物体間の接触条件を判定した後，接触が生じたとみなされた表面粒子に対して，物体間の貫入量に比例した大きさの反発力を課した．

2.2　細胞の成長・増殖の数理モデリング

関節の形態形成に関連する細胞挙動として細胞成長と細胞分裂の 2 つに着目し，両者の数理モデルを構築した[2]．まず，連続体力学における成長モデルを用い，成長のストレッチ θ を個々の粒子に与えることにより，細胞の等方成長をモデル化した．また，体積がしきい値以上に成長した親粒子を二つの娘粒子に分割することにより，細胞分裂をモデル化した（図 3）．

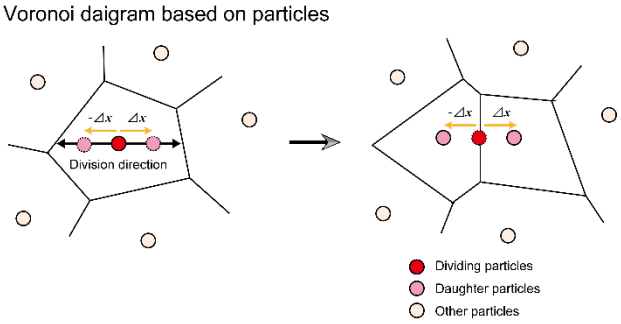


図 3.　MPM に基づく細胞分裂の数理モデル．

2.3　細胞の力学応答の数理モデリング

関節の形態形成過程における細胞の力学応答を表現するため，Carter の骨化理論に基づく成長則を提案した．関節の形態形成過程における細胞分化の段階を表す指標として，以下に示す骨形成指数（OI）が知られている．

$$OI = S + \alpha D \tag{1}$$

ここで，S は八面体せん断応力，D は平均応力，α はバランス係数である．この OI を用い，細胞の分化状態に応じた体積変化を，各粒子の成長のストレッチ θ の時間変化として，以下のように定めた（図 4）．

$$\dot{\theta} = \begin{cases} B - k_1(OI - OI_{\mathrm{th}}) & \text{if } OI \le OI_{\mathrm{th}} \\ B + k_2(OI - OI_{\mathrm{th}}) & \text{if } OI > OI_{\mathrm{th}} \end{cases} \tag{2}$$

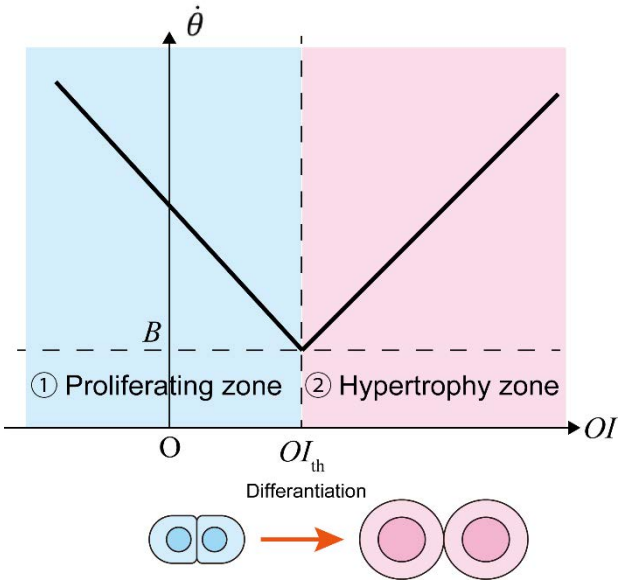


図 4.　Carter の骨化理論に基づく細胞力学応答の数理モデル．骨形成指数（OI）に応じて細胞分化が生じ，成長ストレッチ θ の時間変化が決定される．

ここで，k_1 と k_2 は細胞の体積成長の速度を表す定数，B は力学環境に依存しない細胞の体積成長の大きさを与える定数，OI_{th} は細胞の分化状態を決定するしきい値である．また，細胞には負の成長は生じないと仮定し，$B > 0$ とした．OI がしきい値以下であるとき，軟骨細胞は増殖軟骨細胞の状態にあるとみなし，$OI - OI_{\mathrm{th}}$ の絶対値が大きくなるほど，細胞増

TOPへ戻る

殖が促進され，組織の体積が増大するとした．一方，OI がしきい値以上であるときは，軟骨細胞は肥大化軟骨細胞の状態にあるとみなし，それ以降の細胞分化は生じないとした．肥大化軟骨細胞は細胞分裂せず，$OI - OI_{th}$ の絶対値が大きくなるほど肥大化が促進され，組織の体積が増大するとした．

３．計画の進行状況

3.1　組織間接触シミュレーション

第 2.1 節で構築した数理モデルの妥当性を検証するため，成長にともなう 2 つの組織間の接触シミュレーションを行った．向かい合った 2 つの立方体組織のそれぞれ一端を固定し，一方向成長を与えることにより，両者を接触させるシミュレーションを行った．その結果，与えた成長の大きさによらず，表面粒子間の反発力により，組織同士の接触が保たれることが確認できた（図 5）．また，接触面における成長方向の Cauchy 応力の理論解と数値解とを比較すると，接触モデルを導入しない MPM では，2 つの組織が完全には接触せず，理論解と異なる応力分布が生じたが，接触モデルを導入することにより，理論解と同様の応力状態を再現することができた(図 6)．したがって，本数理モデルを用いたシミュレーションにより，理論解と高い精度で一致する 2 物体間の接触を表現できたことから，本研究で構築した MPM に基づく組織間接触モデルの妥当性が示された．

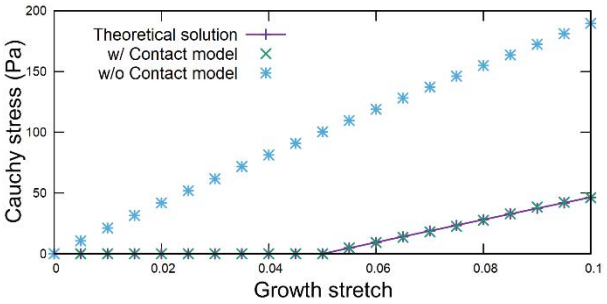


図 6．立方体組織の接触面における Cauchy 応力の成長方向成分の時間変化．

3.2　関節形態形成シミュレーション

第 2.2, 2.3 節で構築した数理モデルの妥当性を検証するため，組織間接触力を模擬した外力にともなう半球状組織の関節形態形成シミュレーションを行った．下面の面外変位を固定した半球状組織を，関節を構成する骨原基の一端とみなし，その上部から鉛直下向きに外力を負荷した．その結果，外力に応答して細胞の増殖や分化が制御され，組織全体の外形状が決定された（図 7）．半球状組織の中心部や外側頂上付近では，骨形成指数 OI の値が大きく，細胞分化が進行し，細胞体積の肥大化が見られた．その一方で，それらの中間

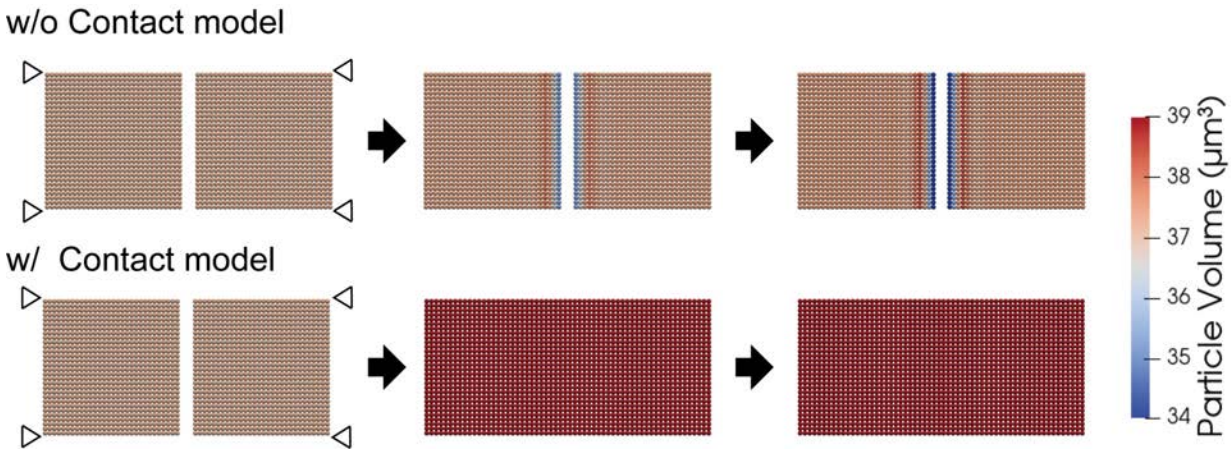


図 5．成長する立方体組織間の接触シミュレーション．

TOPへ戻る

領域では，*OI* の値が小さいために細胞分化がほとんど進行せず，細胞が活発に増殖する領域が表れ，空間的に不均一な多細胞ダイナミクスが確認された．関節の形態形成過程においては，組織内部の領域から骨化が進み，関節形態が形成されることが知られており，本シミュレーション結果は，その実現象と一致している．したがって，本数理モデルは，関節の形態形成過程における細胞の力学応答に基づき，実現象に即した関節形態形成を解析可能であ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

【今後の計画】

本研究では，力学環境の変化に応じた多細胞のダイナミクスを数理モデルとして表現し，単純な半球状組織を対象とした関節形態形成シミュレーションを通じてその妥当性を示した．生体内において，異なる骨同士を連結する役割を担う関節は，形態形成の過程を通じ，その部位に適応した形態と機能を獲得する．例えば，3 つの骨からなる肘関節は，特定の 1 軸を中心とする回転のみが可能な蝶番関節として機能する一方で，2 つの骨からなる股関節は，特定の回転軸が存在しない球関節として機能し，両者の形態は大きく異なる．このような関節における特徴的な骨の形態と機能が自律的に形成される機構を明らかにするため，今後は，構築した組織形態形成モデルに基づき，隣接する複数の骨組織を対象とした形態形成シミュレーションを行うことにより，骨組織同士の接触にともなう力学的な相互作用が，機能的な関節形成に及ぼす影響について検討する予定である．

【学会発表状況】

1. 増山諒，横山優花，亀尾佳貴，安達泰治，“組織形態形成機構の理解を目指した連続体ベース粒子法による組織間接触モデリング”，日本機械学会第 36 回計算力学講演会，OS-0512，豊橋，2023.10.25-27.
2. 増山諒，横山優花，亀尾佳貴，安達泰治，“組織間の力学的相互作用にともなう形態形成シミュレーション”，日本機械学会第 34 回バイオフロンティア講演会，1B13，宇部，2023.12.16-17.

【参考文献】

(1) Carter, D.R., Wong, M., 1988. The role of mechanical loading histories in the development of diarthrodial joints. J. Orthop. Res. 6, 804-816.

(2) Yokoyama, Y., Kameo, Y., Adachi, T., 2023. Development of continuum-based particle models of cell growth and proliferation for simulating tissue morphogenesis. J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 142, 105828.

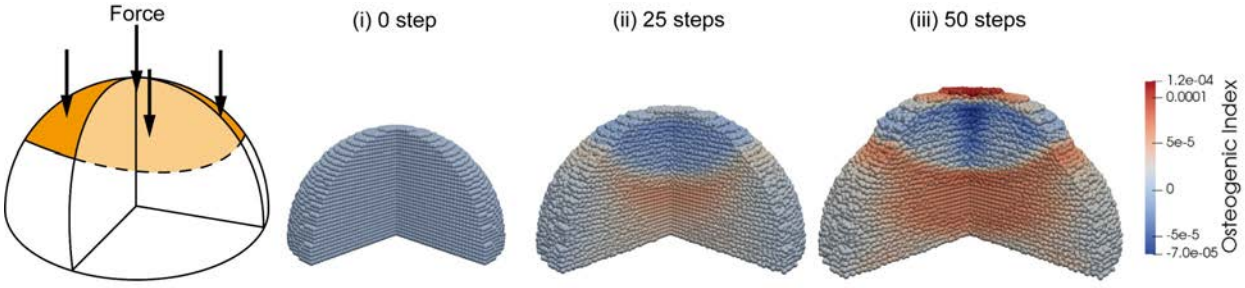


図 7. Carter の骨化理論に基づく関節形態形成シミュレーション．

TOPへ戻る

生細胞の動的光散乱に向けた顕微鏡システム開発

工学部　応用化学科　　廣井　卓思

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

全ての生物は、細胞からできている。そして、細胞内には様々な細胞小器官があり、生命活動を制御している。細胞小器官は、脂質膜によって細胞質と明確に区別されており、膜輸送を介して細胞小器官同士のやり取りを行っている。また、膜がないという点で細胞小器官ではないものの、細胞内には液液相分離によって形成された、タンパク質やRNAなどが濃縮された領域があることが知られており、膜のないオルガネラと呼ばれている。

2010年頃から、生物学において起きたパラダイムシフトとして、今までの生体機能のメカニズムを、生細胞中における液液相分離現象を用いて書き換えられるのではないかという流れが生まれた。ここで注目されている液液相分離現象は、メソスケール（おおよそマイクロメートルオーダー）におけるマイクロ秒～ミリ秒オーダーでの時空間構造に本質が隠されていると考えられている。そのため、このスケールにおける構造の可視化によって、液液相分離の本質解明につながる重要な手掛かりが得られると期待される。現在は蛍光タンパク質を利用した顕微鏡イメージングによる観測が中心であるが、染色が必要であることや、生細胞中のタンパク質濃度が極めて高い（20~30 wt%）ことから、蛍光イメージングに代わる観測手法が必要とされている。そこで本研究では、**溶質のゆらぎ測定法として知られる動的光散乱法を生細胞中の細胞質のゆらぎ観測に応用**し、生細胞中における液液相分離現象に対する新たな知見を得ることを目的とする。

動的光散乱法はゆらぎ測定法として広く知られており、市販装置が多くの研究室で日常的に使用されているような手法であるが、試験管中の希薄な溶液に対して適用するというのが常識であった。これに対し申請者は、顕微鏡下での動的光散乱により、**高濃度溶液の高空間分解能ゆらぎ計測が可能となることを独自に見出した**（*J. Phys. Chem. C*, **120**, 5776 (2016)等）。本研究では、この顕微動的光散乱法を細胞質のゆらぎ計測に適用する。生体への動的光散乱の応用例は報告され始めているものの、一細胞レベルでのゆらぎ計測を動的光散乱で実現した例はなく、生物化学分野に与えるインパクトは大きいと考えている。

２．研究計画

2023年度は、顕微動的光散乱装置を本学で新たに組み、モデル生物であるヒメツリガネゴケを用いて、**世界初の生細胞ゆらぎ観測に挑んだ**。図１に顕微動的光散乱装置の概略を示す。倒立型顕微鏡上に設置した生細胞に対して、レーザー光を下から照射し、発生した後方散乱光をフォトンカウンティング検出した上で、強度ゆらぎに対応する時間相関関数を計算する装置となっている。また、生細胞観察において特に問題になると考えられる、細胞小器官などに起因する異常に強い散乱については、申請者が近年報告したソフトウェア形式動的光散乱の解析手法を用いる

TOPへ戻る

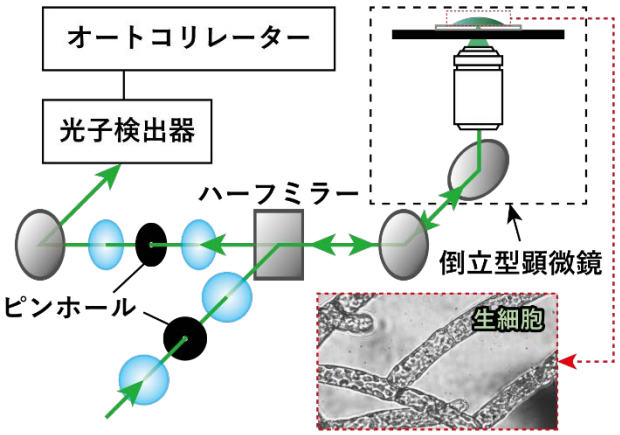


図 1. 顕微動的光散乱装置の概略

ことによって解決できる（特許出願中／T. Hiroi *et al.*, *Anal. Sci.*, **38**, 607 (2022)）。

本装置を生細胞に応用するにあたって新たに行う装置の改良として、**生細胞画像と散乱光強度ゆらぎの同時観測**が挙げられる。これを実現するために、照明と光学フィルターを組み合わせた顕微鏡システムを新たに開発する。なお、観察に用いるヒメツリガネゴケは、学術変革領域研究（A）の公募研究において共同研究を推進している宇都宮大学の玉田グループから提供していただく。

3．計画の進行状況

1. 顕微動的光散乱装置の開発

図 2 に、実際に開発した装置の写真を示す。研究室に新たに導入した 120 × 180 cm 上に波長 532 nm のレーザーおよび光学素子を配置し、角セルを用いた通常の動的光散乱および顕微鏡下での動的光散乱のどちらも行うことができる装置を新たに開発した。標準試料である粒子直径 120 nm のポリスチレンナノ微粒子を行い、**開発した装置が一般的な市販の装置より高い S/N 比で時間相関関数を得られることを確認した**（図 3）。得られた時間相関関数は、粒子直径 120 nm を仮定した理論曲線と良い一致を示しており、開発した装置が問題なくゆらぎ計測に利用できることを示している。なお、通常の動的光散乱で測定した試料は 0.001 %という低濃度試料であるのに対し、顕微動的光散乱で測定した試料は

図 2. 本学で新たに開発した
顕微動的光散乱装置の写真

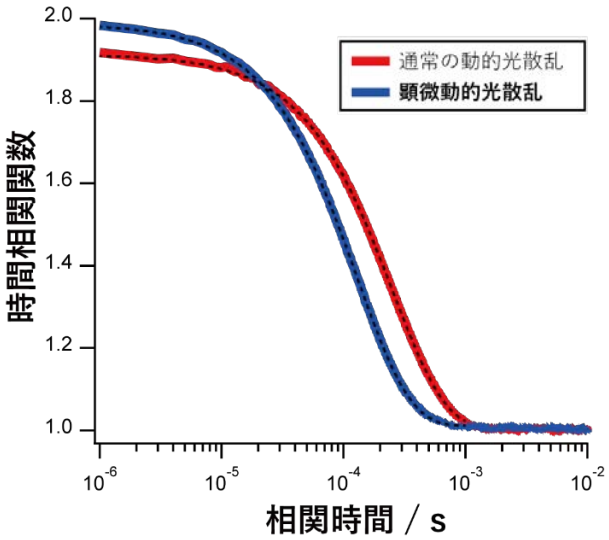


図 3. 開発した装置で得られた代表的な
時間相関関数（実線）および
フィッティング結果（点線）

1 %の高濃度試料である。このような高濃度試料は、多重散乱に起因する白濁のために通常の動的光散乱装置では測定が困難であるが、顕微動的光散乱では共焦点効果によりこれを可能としている。

2. ヒメツリガネゴケのゆらぎ計測

開発した装置を用いて、ヒメツリガネゴケを試料とした動的光散乱計測を行った、その結果、**ヒメツリガネゴケの細胞内部のゆらぎを計測することに初めて成功した。**以下、詳細を記す。

TOPへ戻る

試料としては、宇都宮大学の玉田グループから提供いただいた、ボトムディッシュ上に固定したヒメツリガネゴケを用いた。ヒメツリガネゴケは、ボトムディッシュ底面のカバーガラス上に設置したゲルの上に設置されており、倒立型顕微鏡によってボトムディッシュのまま光学像観察およびレーザー光の照射が可能となっている。なお、ヒメツリガネゴケは 1 つの細胞の長辺が 100 μm 程度と大きく、かつ細胞の重なりがない状態で観察できるため、光を用いた生細胞研究のモデル植物として広く使われている。

図 4(a)に、測定したヒメツリガネゴケの光学像を示した。測定を行ったのは、コケと聞いて最初にイメージするような葉（葉細胞）ではなく、葉を切ることによって形成される原糸体細胞である。原糸体細胞は、その頂端が成長していき、1 日未満で細胞分裂をしながら伸長していく。また、細胞によっては枝分かれをするため、切断した葉の先からはネットワーク上に伸びた原糸体細胞が観察される。顕微動的光散乱計測では、レーザースポットをマイクロメートルオーダーで制御できるため、生細胞中の任意の場所に光を照射し、そこからの散乱強度ゆらぎを計測することが可能である。実験では核や葉緑体といった細胞小器官を標的とした測定も行ったが、ここでは最も明確なゆらぎが観測された液胞からの散乱強度ゆらぎについて述べる。

図 4(b)に、ヒメツリガネゴケの原糸体細胞の液胞にレーザー光を照射し、そこから得られた散乱光強度の時間相関関数を示す。5 つの時間相関関数を示したが、これは異なる点から得られた時間相関関数ではなく、すべて図(a) の×印で示した場所から得られた時間相関関数である。それぞれの時間相関関数は 20 秒の露光時間で得られた結果であり、これは生細胞中の細胞質のある点における拡散の様子が、遅くとも 10 秒オーダーで大きく変化していることを示唆している。

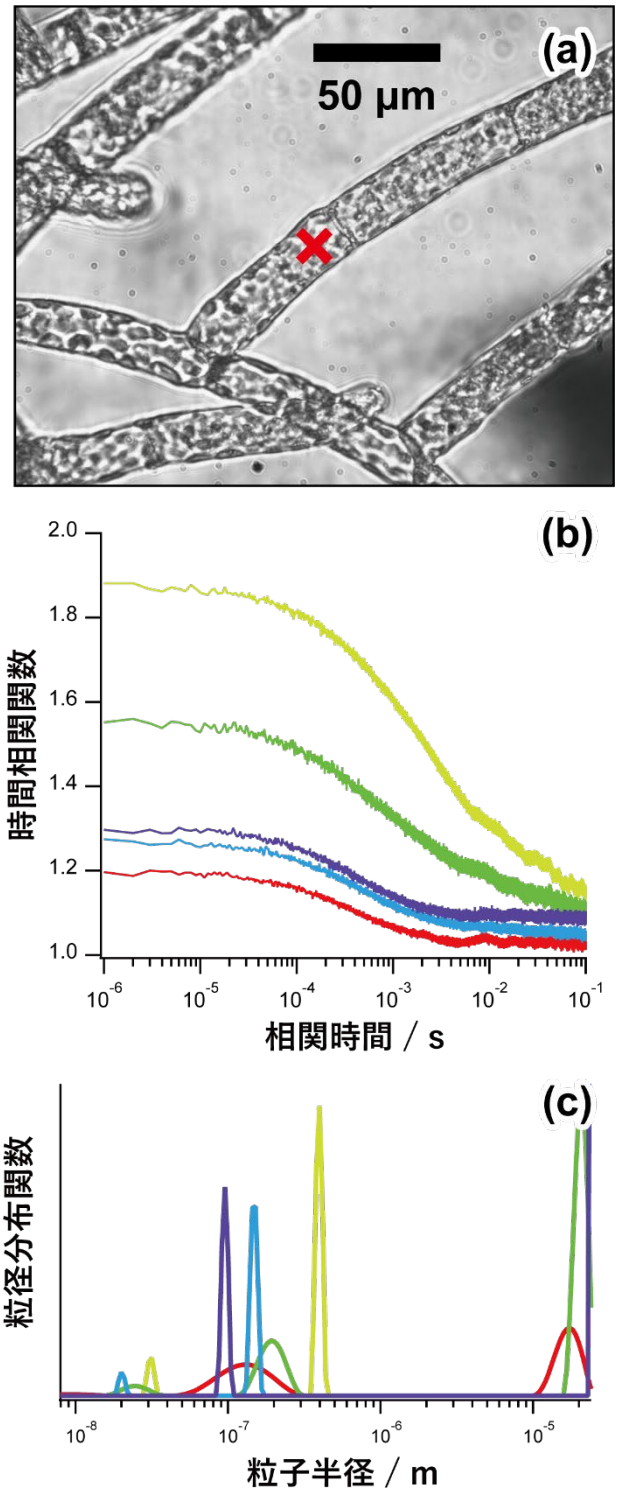


図 4. ヒメツリガネゴケを測定試料として用いた顕微動的光散乱法の実験結果
(a) 測定に用いたヒメツリガネゴケの光学像
(b) (a)の×印で示した場所から得られた代表的な散乱光強度の時間相関関数
(c) (b)で示した時間相関関数を逆ラプラス変換することによって得た粒径分布関数

TOPへ戻る

得られた時間相関関数は、逆ラプラス変換することによって拡散係数分布に変換することができる。そして、生細胞中における溶媒粘度を水と同じであると仮定することによって、Einstein–Stokes の式に基づいて粒子半径分布に変換することができる。その結果を図 4(c)に示した。粒径としてサブマイクロメートルオーダーの粒子の存在が示唆される。このような情報を非染色で計測できるという点も、顕微動的光散乱の新奇性であると考えている。

3. 薬剤による細胞ゆらぎの変化

前述したコケ細胞中において見られたサブマイクロメートルオーダーの粒子が何を表しているのかを推定するために、野生型のヒメツリガネゴケに対して各種薬剤処理を行い、原糸体細胞の先端部に対して顕微動的光散乱計測を行うことによって得られた時間相関関数を図 5 に、用いた薬剤とその効果を表 1 に示した。ここで、原糸体細胞の先端部を選んだ理由は、成長中の原糸体細胞では頂端成長のために先端部に微小管やアクチンが集中し、これらのタンパク質がゆらぎに影響すると推測したためである。

得られた実験結果として、微小管の安定化を進める薬剤である Taxol を加えたときに、最も顕著に時間相関関数の緩和速度の減少が見られた。緩和速度の減少は粒径の増加と対応し、微小管安定化によって微小管が分解せずに肥大化するという描像と合致する結果が得られた。しかし、アクチン重合阻害剤である Latrunculin B を添加した場合にも緩和速度の減少が見られ、これはアクチンの重合阻害に伴うアクチンの細分化の描像とは相反する結果となっている。これらの結果より、ヒメツリガネゴケの動的光散乱において見られたゆらぎは微小管由来である可能性が高いと推測される。

表 1. 薬剤処理に用いた薬剤とその効果

薬剤	効果
Oryzalin	微小管重合阻害
Taxol	微小管安定化
Latrunculin B	アクチン重合阻害
Jasplakinolide	アクチン安定化

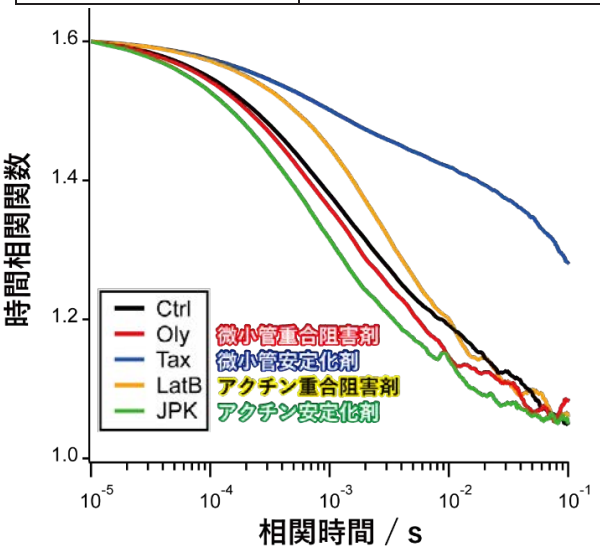


図 5. 各種薬剤処理を行った後に得られた時間相関関数の代表例

4. 今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

2024 年度以降は、ゆらぎが何によって起こっているかをさらに検証する段階に移行する。これには、特定の生体機能を阻害するために、遺伝子組み換え技術を用いて作成したヒメツリガネゴケを用いる手法が適切であると考えている。この研究展開については、共同研究先の宇都宮大学のグループとの議論を基に進めていこうと考えている。また関連した研究課題として、補償光学を用いた不透明試料の動的光散乱手法の開発も進めている（科研費・学術変革領域研究（A）（公募研究））。この手法を応用することによって、ヒメツリガネゴケに限らず**様々な種類の生細胞のゆらぎ計測も可能になると期待される。**

上述の研究を進めながら、従来にない知見を得たタイミングで、研究成果の学会発表および国際学術誌への投稿を行い、開発した手法を広く世界に向けて発信していく。

TOPへ戻る

低温硝化処理における温室効果ガスの抑制手法の開発

応用化学科　　李沁潼

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

従来の硝化作用に基づいた生物学的水処理技術は、硝化の副産物として強力な温室効果ガスである N2O の放出に寄与していることが課題として挙げられている。通常 2 ステップ（アンモニア⇒亜硝酸⇒硝酸)の硝化反応は、近年の研究により 1 ステップでコマモックス菌と呼ばれる完全硝化細菌により進行可能なことが報告された。コマモックス菌は従来の硝化菌（AOB）より N2O の放出が低減される傾向にあり、温暖化低寄与率の水処理技術の開発に応用性が高いと考えられる。本研究室では、5℃において下水処理場の返送汚泥を包括固定させた低温耐性硝化細菌群を 8 年間渡って集積培養しており、担体中にコマモックス菌が優占していることが確認されている。該当低温耐性硝化細菌群の平均硝化速度は 0.25 kg/m3/d を達しており、長期的安定性を有しているが、硝化の副産物である N2O の変換率についてはまだ明らかにしていない。本研究は、前述の低温耐性硝化菌群を対象に、担体中の優占菌の遷移による N2O の放出特性を解明することを目的とした。

２．研究計画

本研究は、AOB/コマモックス菌の消長を影響する要因の一つであるアンモニア濃度を 4 段階設定し、それぞれ 8 週間連続運転実験(装置は図 1 に示す）を行い、期間中の水質変化を観測すると共に、担体中の菌叢変化及び N2O 放出量を評価することで、低温耐性硝化菌群の N2O 放出特性を把握する。具体的には以下のスケジュールで実験を実施する予定である。

・2023 年 7 月～8 月、既存の実験条件で連続運転する（原水中の NH4+-N:40mg/L)。

・2023 年 9 月～10 月、NH4+-N　30mg/L の原水を供試する。

・2023 年 11 月～12 月、NH4+-N　20mg/L の原水を供試する。

・2024 年 1 月～2 月、NH4+-N　10mg/L の原水を供試する。

上記期間中において、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 2 回採取し、水中の NH4+-N(インドフェノール青法)、NO3--N、NO2--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、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（AOB、コマモックス菌）と次世代シーケンス解析（16S rRNA-V4 領域、amoA アンプリコン)に用いる。

・N2O 分析：リアクター上部をパラフィルムで密封し、週 1 回ヘッドスペースから気体サンプルを採取し、真空バイアル瓶に注入する。採取した気体サンプルは、GC-ECD で N2O 濃度を測定し、最後に水質結果（硝化率等）を合わせて各期間の N2O 変換率を算出する。

以上の実験を行い、2024 年 3 月には、研究成果をまとめ、論文投稿、学会発表、及び報告書作成等を実施する予定である。

TOPへ戻る

申請者は昨年度耐酸性硝化菌群を対象に、溶存酸素濃度が硝化菌叢及び N2O の放出特性に及ぼす影響に関する研究を株式会社クボタと共同研究を行った。その研究成果の特許出願の準備に至っており、今年度に成果を公表する予定である。本申請の遂行に必要な水質分析手法、微生物解析手法及び N2O の分析手法についてはすでに立ち上がっており、本申請課題の円滑な研究遂行は可能である。

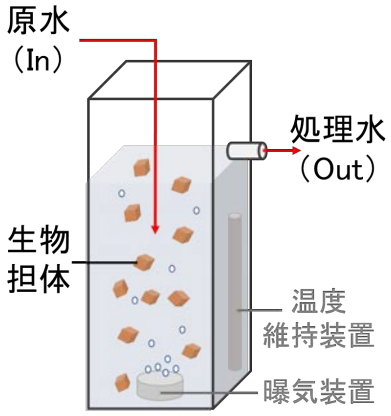


図1. 装置概略図

3. 計画の進行状況

今年度では概ね計画通り実施することができた。以下は研究成果について述べる。

3.1 水質の経日変化

本試験における HOA・AHS 両系の水質の経時変化のグラフを図 2 に示す。HOA・AHS 共に原水アンモニア態窒素濃度 40～10 mg/L 全期間を通じて、処理水から NO_2^--N がほとんど検出されず、原水中の NH_4^+-N と処理水中の NO_3^--N がほぼ同程度検出されたことから、どちらの系も安定した硝酸型硝化であることが確認された。そのため、低温・低濃度条件化(NH_4^+-N 40～10 mg/L)において原水濃度変化を加えた際も安定した硝酸型硝化を維持できることが示唆された。また、原水 NH_4^+-N と処理水 NH_4^+-N から各系のアンモニア除去率を表す硝化率(%)の計算（式:{(原水 NH_4^+-N 濃度 - 処理水 NH_4^+-N 濃度)/ 原水 NH_4^+-N 濃度} ・100)を行なった。各期間の平均硝化率は原水 NH_4^+-N 濃度 40 mg/L 間は HOA が 97.2%、AHS が 95.0%、30 mg/L 間では HOA が 96.0%、AHS が 96.7%、20 mg/L 間では HOA が 95.2%、AHS が 94.8%、10 mg/L 間では HOA が 93.6%、AHS が 93.8%であった(図 3)。この結果を見ると、原水 NH_4^+-N 濃度が低下すると硝化率も応じて低下していることが分かる。この結果から、

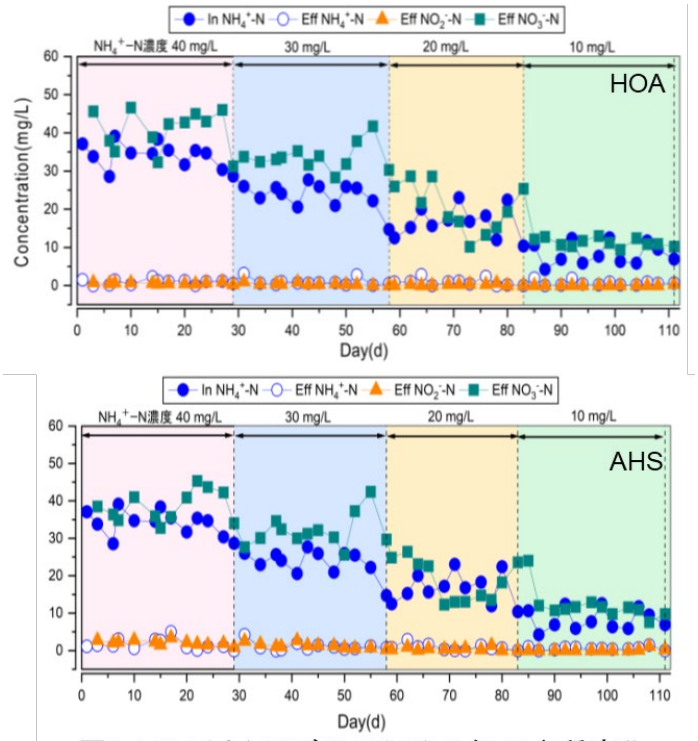


図2. HOA(上)及びAHS(下)の経日水質変化

原水 NH_4^+-N 濃度と硝化率に相関関係がある可能性が考えられ、T 検定を 40～10 mg/L の HOA・AHS 間で実施したが、どの期間でも相関は確認できなかった。HOA・AHS 間で硝化率に違いが生じた可能性の 1 つとして担体内の優先菌種や菌量などが原水 NH_4^+-N 濃度に応じて変化しており、硝化率の増減に寄与していることが考えられることから、微生物の分類を科/族/種まで検出が可能である菌叢解析や、機能性微生物の定量が可能である qPCR を行い、菌叢を細部まで明確にすることが今後の展望として挙げられる。

3.2 N_2O 放出係数の経日変化

本試験期間におけるリアクター上部の N_2O 濃度の経日変化をまとめたものを図 4 に示す。この結果から HOA・AHS 共に原水 NH_4^+-N 濃度

TOPへ戻る

30 mg/L 間での N_2O 放出量が高く、40～20 mg/L での運転期間までは HOA の方が N_2O 濃度が高いが、10 mg/L での運転期間では AHS の方が高い結果となった。また、装置間で見ると HOA は原水 NH_4＋-N 濃度 30 mg/L 間から濃度減少に応じて N_2O 濃度が減少している傾向が確認できるが、AHS には同様の傾向が見られないことが分かり、AHS に関しては 40 mg/L 間での N_2O 放出量が一番低いことが確認された。

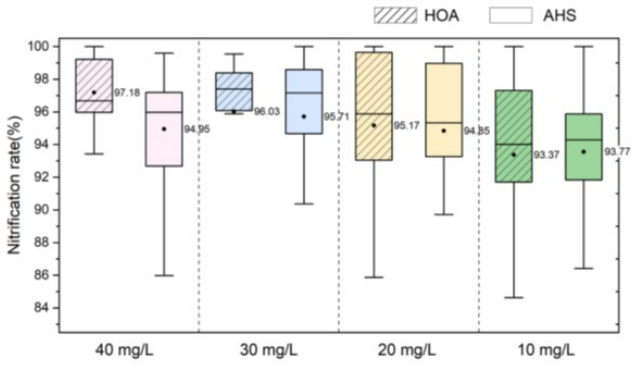


図3. 各期間における硝化率の変化

図 4 の N_2O 濃度と N_2O 放出係数式(Li et al.,2021)から N_2O 放出係数を換算した結果を図 5 に示す。N_2O 放出濃度の結果とは一転して HOA・AHS 共に原水 NH_4^+-N 濃度の低下に応じて放出係数が高くなる傾向が確認された。また、20 mg/L での運転期間まで HOA の方が AHS より放出係数が高いものの、10 mg/L での運転では AHS の方が HOA よりやや上回った結果となった。硝化率の結果と N_2O 放出係数の結果から、HOA・AHS 共に 40 mg/L NH_4^+-N 濃度での運転が最も環境負荷の少なく、水質の良い処理反応であることが把握できた。この結果の理由は原水 NH_4^+-N 濃度 40 mg/L の際には維持運転期間を含めると約 3 ヶ月間の運転期間があり低濃度・低アンモニア環境中においては AOB よりも comammox 菌が優占する傾向を見せる(Kits et al., 2017)(Shi et al.,2018)ことから低 N_2O 放出に寄与する comammox 菌が優占しており、N_2O 放出係数が低くなったことが考えられる。しかし、comammox 菌が濃度変化に影響を受け存在量が減少してしまうことに加え、低温条件下では硝化菌の活性が低下し、増殖速度が減少していることを考慮すると濃度変化を加えた後の comammox 菌が後に増殖が少なく、30～10 mg/L 間では N_2O 放出に寄与する AOB が優占し、N_2O 放出係数が 40 mg/L 間と比較すると高くなったことが考えられる。

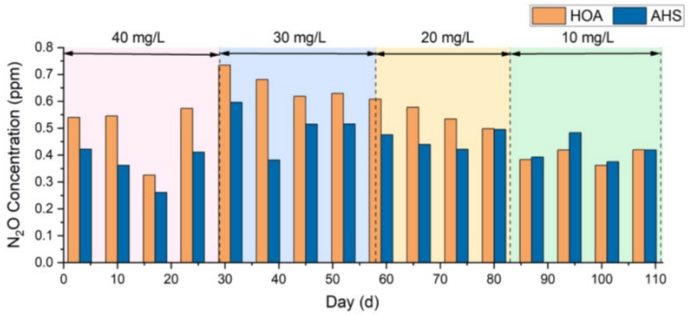


図4. リアクター上部におけるN_2O放出量の経日変化

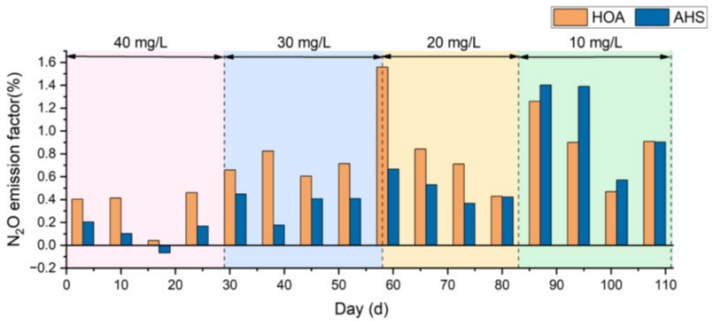


図5. N_2O放出係数の経日変化

3.3 低温硝化処理の長期安定性

原水 NH_4^+-N 濃度 40 mg/L で連続運転した時までの(本試験前の維持運転＋本試験での原水 NH_4^+-N 濃度 40 mg/L で運転した際のデータを含む)、HOA が 3480 日間、AHS が 1809 日間(両系 2023 年 10 月 2 日まで)の水質の経時変化をまとめたグラフを図 13 に示す。HOA は全体を通じて硝酸型硝化であるのに対して、AHS は 0～800 日までは原水アンモニアのほとんどが亜硝酸に変換される亜硝酸型硝化であったが 800 日～1809 日間は硝酸型硝化となっていることが確認できる。また、

TOPへ戻る

全期間を通じての平均硝化率は HOA が 96.18%、AHS が 91.32%であった。この結果は各担体の固定化方法の違いによって生じたものであると考える。安定した硝酸型硝化が確認された HOA では包括固定担体を用いており、生物濃度を高め、活性を保持したまま固定化できる特徴があるため、馴養開始時から安定して硝酸型硝化が行われ、付着担体を用いている AHS よりも硝化率が高い結果が得られたと考える。一方で、付着担体を用いている AHS は、1 から増殖速度の遅い硝化菌を増殖させることから安定するのに時間がかかる特徴があるため、一時的な亜硝酸型硝化を経て硝酸型硝化に安定したと考察する。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

前項で挙げられた菌叢変化によって処理性能が異なることを確認するためには機能性微生物の定量(qPCR)や菌叢解析を行なうことが必要であり、現在解析実験を実施している。また、本研究では 40 mg/L 間にて最も優れた処理性能をみせたが、より高濃度な条件化での反応や comammox 菌が濃度変化に弱い可能性などを考慮して改めて実験を行なう必要があると考える。コマモックス菌/AOB の消長を制御する要因についてこれから継続的に解明していきたいと考えており、今後はより学際的な視野で環境微生物が駆動する各プロセスの解明研究を行い、人間社会へ応用可能な新規微生物の探索に努めていきたいと考えている。研究室立ち上げ後の長期ビジョンとしては、「水の浄化」という研究キーワードを中心に、環境フィールド調査と水処理技術開発の両方を展開し、水資源の持続可能な保全と健全な水環境マネジメントの構築を目指すことである。

2023 年度の業績（学会発表）

・大塚柾人，髙橋美思，角野立夫，李沁潼，篠嵜耕太郎，若原慎一、Comammox 含有耐酸性硝化菌群による N_2O 放出特性評価、第 58 回日本水環境学会、2024 年 3 月

・北澤虎鉄，矢野翔也，Nguyen Thi, Khanh Huyen, 大内孝雄，内海真生，李沁潼、霞ケ浦湖底境界層におけるメタン酸化活性の季節変化、第 58 回日本水環境学会、2024 年 3 月

・矢野翔也，北澤虎鉄，Nguyen Thi，Khanh Huyen，大内孝雄，内海真生，李沁潼、富栄養化湖沼底泥における生物的メタン消失課程の解明、第 58 回日本水環境学会、2024 年 3 月

・Nguyen Thi Khanh Huyen, Amano Yukina, Shoya Yano, Kotetsu Kitazawa, Takao Ouchi, Qintong Li, Motoo Utsumi、Seasonal Change of Aerobic Methane Oxidation in Lake Kasumigaura、第 58 回日本水環境学会、2024 年 3 月

2023 年度の業績（論文）

・Xiaoyan Wang, Jin Gao, Yu Gao, Linlin Zhang, Congchao Xu, Qintong Li, Lin Li, Jianliang Xue 、Analysis of surfactant production by Bacillus cereus GX7 and optimization of fermentation conditions、Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 233 113629-113629 2024 年 1 月

・Jiayu Dong, Katsunari Hiroki, Mizuki Tobito, Keisuke Yoshida, Ai Tanabe, Taiki Shindo, Megu Gunji, Qintong Li, Teruaki Hasegawa 、Bacterial cellulose-based hydrogels carrying Lewis X trisaccharides as a system for monitoring carbohydrate-carbohydrate interactions with the naked eye、Journal of Carbohydrate Chemistry 1-19 2023 年 8 月 6 日

投稿済の論文（Reviewer コメントに基づいて Revision 中（5/28 まで））

・Qintong Li, …, Tatsuo Sumino、Relative abundance of comammox Nitrospira and AOB were reversed under acid conditions in a biofilm reactor 、投稿先：Applied Microbiology and Biotechnology

（その他、投稿準備中、1 件）

TOPへ戻る

計算可能性と計算複雑性に基づく創発現象の研究

先進国際課程　Aames Jericho Jimmy

Research colleagues
None

1. Paper introduction

A distinction that is often draw in philosophical discussions of emergence is that between *epistemological emergence* and *ontological emergence*. An epistemologically emergent phenomenon is one that is in principle "reducible" in some sense to its component elements, but is irreducible in practice due to its complexity and limitations in the observer's computational power and resources. It is, in a word, a kind of emergence that is only in the eyes of the beholder. An ontologically emergent phenomenon, on the other hand, is one that is irreducible to its component elements even in principle. Much of the philosophical discussion about emergence revolves around the question: Are there instances of ontological emergence in the world, or are all instances of emergence epistemological?

An issue that is often overlooked in these discussions is the question of what it means for an emergent phenomenon to be reducible or irreducible "in principle." There is a tendency to use this phrase in a rather impressionistic manner, without any sustained examination into the conditions under which an emergent phenomenon can be said to be reducible or irreducible "in principle." The unfortunate result of such a tendency is to lapse into speculative conceptmanipulation, detached from the actual science of emergent systems and phenomena.

This paper aims to rectify this situation and raise the level of rigor of philosophical discussions of emergence, by employing the conceptual tools of the theory of computation: namely, *computability*, *decidability*, and *computational complexity*. There are several known instances in which the macroscopic behavior of a system is undecidable, in the computational sense, from a microscopic description of its underlying elements. For example, Toby S. Cubit and his colleagues have demonstrated the undecidability of whether an energy gap exists in 2-dimensional lattice models of quantum many-body systems (Cubit et al., "Undecidability of the Spectral Gap," *Nature* 528, 2015). This can be interpreted as an instance of emergence in which the macroscopic behavior of a system is irreducible *in principle* to a microscopic description of its elements. Hence this is an instance of ontological emergence, where "reducibility in principle" is understood in a computational sense.

More generally, even if a problem is solvable *in principle*, there are various classes of computational complexity, such as P, PSPACE, and NP, corresponding to the different grades of difficulty of the computation required to solve the

TOPへ戻る

problem. Thus, even among emergent phenomena that are “reducible in principle,” there may be qualitative differences in the *difficulty* of reduction. In this paper we propose a hierarchy of varying “grades” of emergence, corresponding to the hierarchy of computational complexity classes, and investigate specific instances of emergence in the natural world according to this proposed framework.

2. Research program

Our first step is to examine the recent studies of emergence in the philosophy of science literature that deal with specific instances of emergence within physics. Especially pertinent for our purposes is Robert Batterman’s *A Middle Way: A Non-Fundamental Approach to Many-Body Physics* (2021), which explores the philosophical implications of mesoscale physics, taking the methods of fluid mechanics as a model. Another important study is Robert Bishop, Mark Pexton, and Michael Silberstein’s *Emergence in Context: A Treatise in Twenty-First Century Natural Philosophy* (2022), which examines the conditions that make the existence, stability, and persistence of emergent behavior possible, and on this basis presents the notion of *contextual emergence*, a kind of emergence that is neither epistemological nor ontological.

Although not dealing specifically with the topic of emergence, Scott Aaronson’s essays “NP-complete Problems and Physical Reality” (*ACM SIGACT News*, Vol. 36, No. 1, 2005) and “Why Philosophers Should Care About Computational Complexity” (included in the collection *Computability: Turing, Gödel, Church, and Beyond*, 2013) are also pertinent to the present study, as they explore a wealth of connections between the theory of computation, theoretical physics, and philosophy.

Building on the ideas presented in these studies, as well as my own previous research on patternhood and emergent behavior, I propose a framework for classifying and studying various examples of emergence that arise in the natural world. This framework distinguishes different grades of emergence depending on the difficulty of the computation required to reproduce (or make decisions about) certain macroscopic behaviors of the emergent system, based on a microscopic description of its elements.

Finally, we apply this framework to several specific instances of emergence. The energy gap (spectral gap) in 2-dimensional lattice models of quantum many-body systems, for example, is an example of the “strongest” type of emergence because it corresponds to an *undecidable* problem. A weaker type of emergence is one that corresponds to an *NP complete problem*. It has been shown, for example, that solving the 3-dimensional Ising model, used to describe ferromagnetism in statistical mechanics, is an NP complete problem (Sorin Istrail, “Statistical Mechanics, Three-Dimensionality and NP-completeness,” *STOC '00: Proceedings of the Thirty-second Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 2000). This suggests that the kind of phase transitions described by such models is an instance of this second grade of emergence, which we may call *NP complete emergence*.

3. State of progress

The survey of previous research on emergence and the broad outlines of the framework mentioned above are mostly complete. What remains to be done is to apply the framework to further examples of emergence arising in phys-

TOPへ戻る

ics (and perhaps other fields as well). Specifically, it remains to be seen whether there are any instances of emergence corresponding to the complexity classes PSPACE, EXPTIME, NEXPTIME, and EXSPACE, for example. Another issue that remains to be addressed is whether putative cases of emergence corresponding to problems in the complexity class P can be regarded as cases of emergence at all. Since the class P consists of those computational problems that are efficiently solvable or tractable, it would seem to go against our usual conception of emergence to say that a physical problem in the class P somehow corresponds to an emergent phenomenon.

4. Future program, paper submission and results briefing

While the main ideas of the paper are in place, the details mentioned above (in sec. 3) need to be filled in before the paper can be completed and submitted. This I hope to do within the academic year 2024. In the future, there are two research directions that I plan to pursue after the current research is completed.

The first has to do with the problem of downward causation, a putative type of causal relation, often attributed to strong types of emergence, where an entity or event at a higher level of a system somehow influences what goes on at a lower level of the same system. There are various conceptual difficulties involved in the notion of downward causation, as pointed out notably by the philosopher Jaegwon Kim. What I would like to explore is whether some of these conceptual issues surrounding downward causation could be resolved by adopting the computational approach to emergence outlined in the present study.

A second direction in which the present research may find potential application is the problem of *time*, most notably its *irreversibility*. Given that the physical laws at the micro level are reversable (symmetric with respect to time), it remains an open problem how to explain the irreversibility of phenomena we observe at macro scales. The standard view among physicists and philosophers is that this macro-level irreversibility is a statistical property arising from the Second Law of Thermodynamics (that is, the direction in which entropy increases in an isolated system is defined as the *future* direction). However, as argued by the philosopher Tim Maudlin, this view is untenable. There are various other approaches to the irreversibility problem, such as that of Ilya Prigogine, David Albert, and Nicolas Gisin. What I hope to do in the future is to examine these various approaches from the standpoint of the computational framework of emergence proposed in the present study.

TOPへ戻る

複合的環境情報による移動体の自律制御

機械制御システム学科　　桑原　央明

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

製造現場での搬送工程を自動化する AGV（Automated Guided Vehicle，無人搬送車）などの移動体が人と同じ空間で動作するニーズが高まっており，人協調作業や障害物回避など移動ロボットが自律的に実施するタスクも多様化している．これまで，AGV に対し，位置決めや障害物回避など各タスクの実現に必要なセンサ・制御手法を搭載することで，AMR（Autonomous Mobile Robot，自動搬送ロボット）として高度化が進められている．しかし，今後，製造現場で稼働する移動体が増加することを考えると，従来の開発方式では導入コストが肥大化していくと考えられる．

そこで，本研究では，移動体の最小限の内部情報と移動体の外部から俯瞰するシステムで得られる外部情報を融合することで移動体の環境（路面，人，設置物など移動体の周辺に存在するもの全て）の情報を把握し，自律制御に応用する手法の開発に取り組む．

２．研究計画

本研究は，移動ロボットの内部情報を用いた路面状態の推定方法と，外部情報による移動ロボットの広範囲な周辺環境の状態推定方法を個別に開発し，統合するという流れで研究を進めている．

（１）駆動軸の推定外乱による局所路面環境情報の取得と制御応用方法の開発：移動ロボットには精確な位置決め能力が求められるが，地面の滑りは大きな外乱となり得る．特に，路面との接触面積が大きい移動機構では，滑りを考慮した制御が不可欠である．これまでの研究で，滑りを含む運動メカニズムのシミュレーションや，滑りを検出し制御する多様な方法が提案されている．本研究では，特にクローラ機構を基に，一般的な移動機構に適用可能なモデルフリーの駆動力抽出と制御方法を開発する．さらに，外乱としての滑りをアクチュエータの外乱として捉え，機械学習を活用して車両速度を推定し，推定された駆動力を制御することで滑りを抑制できることを確認する．

（２）俯瞰システムによる広範囲環境情報の取得と動作計画方法の開発：本研究では，工場内の監視カメラを用いて作業空間全体を俯瞰するシステム(俯瞰システム)を構築し，移動ロボットの制御指令を生成する．俯瞰システムは，撮影した画像を解析し，人と移動ロボットを認識して衝突の可能性を予測する．衝突が予測された場合，Bluetooth 通信を介して移動ロボットに情報を送信し，ロボットは衝突回避のための動作に移行できることを確認する．

３．計画の進行状況

（１）駆動軸の推定外乱による局所路面環境情報の取得と制御応用方法の開発：図１に

TOPへ戻る

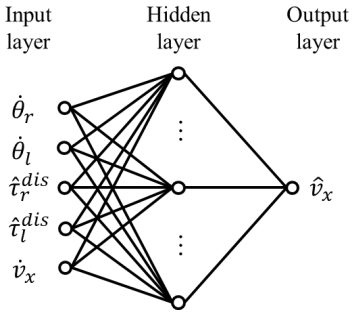
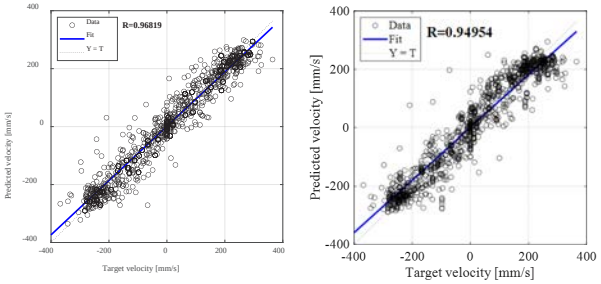


図１．速度推定ニューラルネットワーク



（a）使用する場合　（b）使用しない場合

図２．推定外乱の使用による速度推定性能

示す，駆動軸の推定外乱を入力に含む速度推定ニューラルネットワークを構築した．速度推定ニューラルネットワークは，移動ロボットの内部情報を入力に，滑りを含む躯体速度推定する回帰型のニューラルネットワークである．ここで，速度推定ニューラルネットワークは，移動ロボットの制御器のサンプリングタイムと同期して動作するようにネットワークの学習および調整をしている．

推定外乱を速度推定ニューラルネットワークの入力に使用する効果を確認するため，図２に示すように，推定外乱の使用有無による速度推定性能を評価した．図２（b）では，ニューラルネットワークの階層や次数を揃え，入力に推定外乱の代わりにランダム変数を与えた．図２より，推定外乱を使用することにより，路面環境の情報を正確に把握でき，精度高く滑りを含む速度を推定できていることを示した．さらに，路面環境の材質を変化させた評価において，推定外乱を使用することで，速度推定にロバスト性を付与する効果を確認している．

次に，推定した滑りを含む速度から，移動ロボットの駆動力を推定する観測器（駆動力オブザーバ）を設計した．図３に駆動力オブザーバを示す．さらに，図４に示すように，駆動力オブザーバにより推定した駆動力を経

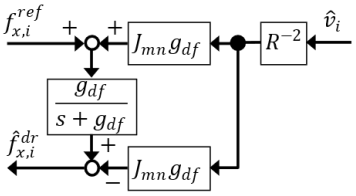


図３．駆動力オブザーバ

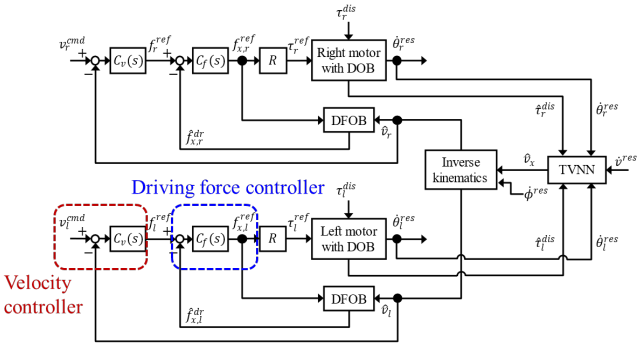
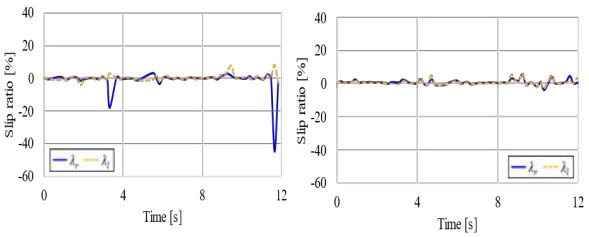


図４．駆動力制御を含む制御系

路追従のための制御系の内側に構成することで，駆動力を制御し，滑りを抑制できる．

図５に，駆動力制御による滑り抑制効果を示す．駆動力制御の導入により，滑り率が０に抑制されていることが確認された．駆動力動力制御は，路面環境との接触状態を適切に制御していることに相違なく，滑りを抑制するだけでなく，適切に滑らせることで運動性能を改善させることも可能であると考えている．



（a）駆動力制御なし　（b）駆動力制御あり

図５．駆動力制御による滑り抑制効果

TOPへ戻る

（２）俯瞰システムによる広範囲環境情報の取得と動作計画方法の開発：図６に俯瞰システムの概要を示す.工場などの閉空間では，人と移動ロボットが同じ作業空間を移動する．多くの場合，安全柵や仕切り板を設けて各々の移動エリアを区別する．一方，俯瞰システムにより，人と移動ロボットを認識し，移動ロボットの経路を変更することで，移動ロボット単体を高度化せずに安全性を確保できる．

図７に，俯瞰システムの移動ロボットの制御フローを示す．移動ロボットの目標位置までの経路は事前に設定されているものとする．俯瞰システムにより，人作業空間を撮像する．撮像画像に対して，背景差分により動体検出し，人と移動ロボットの位置関係を認識する．検出した人と移動ロボットの位置関係をもとに，衝突の可能性を予測判定する．衝突の予測判定値が閾値を超える場合，Bluetooth 通信により移動ロボットに衝突回避指令と経路再設定指令を送信する．この処理は，割込処理により実行され，現在の動作を中断して衝突回避行動に移行する．

表１に，回避動作をする場合と，回避動作をしない場合の到達位置と理論値の差を比較し，回避動作が目標位置到達に与える影響を確認した．

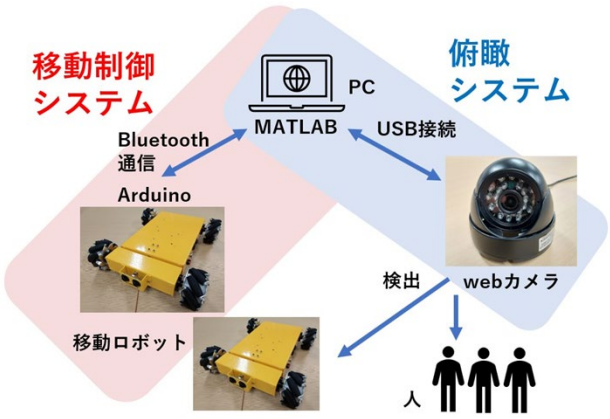


図６．俯瞰システムの構成

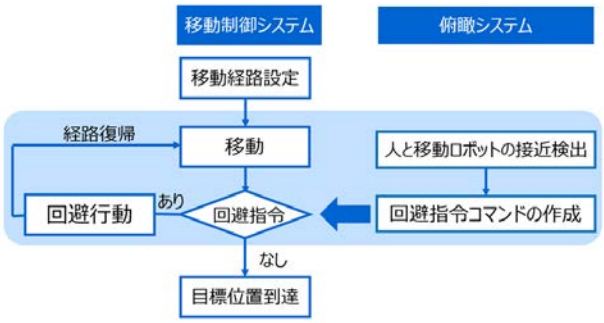


図７．俯瞰システムによる移動ロボットの回避指令生成フロー

表１．回避動作を含む場合の目標到達位置精度への影響

	回避動作をした場合(mm)	回避動作をしなかった場合(mm)
最大値	19.1	8.5
最小値	4.0	7.7
中央値	11.4	8.1
平均値	12.4	8.1
標準偏差	5.2	0.29

理論値からの誤差については，回避の有無にかかわらず誤差を含めて 100mm 以内であることがわかった．一方で，平均値や標準偏差は回避動作をした場合に増大している．これは，移動距離増加による移動制御の誤差が積み重なった結果と考えられる．したがって，今後は滑りなどばらつき要因を考慮した目標位置の設定が重要である．また，より動作の少ない移動経路の設定が求められることが示唆された．

次に，俯瞰システムが接近判定するときおよび移動ロボットが回避動作を開始するときの人と移動ロボットの位置を測定した．図８に，測定結果を示す．俯瞰システムが人と移動ロボットの接近を判定する距離は，平均から±100mm 以内に収まっており，一定の値を保っている．また，目標の2000 mm 以内を満たし，俯瞰システムの接近判定は機能したと考えられる．しかし，回避動作をした場合，判定時の距離

TOPへ戻る

に関わらず,最大50 0mm から最小35 mm と一定でなく,安全とは言えない距離にまで接近してしまう場合（11，33，4 回目）もみられた．また，各回の結果を見ると，判定時から回避時までの距離が開いていることがわかる．これらの結果から，原因は移動制御システムが回避指定を受信してから実際に動作をするまでに処理に時間がかかったこと,俯瞰システムによる接近判定，指令送信，指令受信，回避実行と判定から実行までの処理が人の接近に間に合わなかったことが考えられる．今後，システム運用のためには移動ロボットのアルゴリズムを見直し,回避指令の受信から実行までの処理時間を短縮すること,接近判定から回避実行までのラグを考慮し,人と適切な距離で回避動作がとれるシステムが求められる．

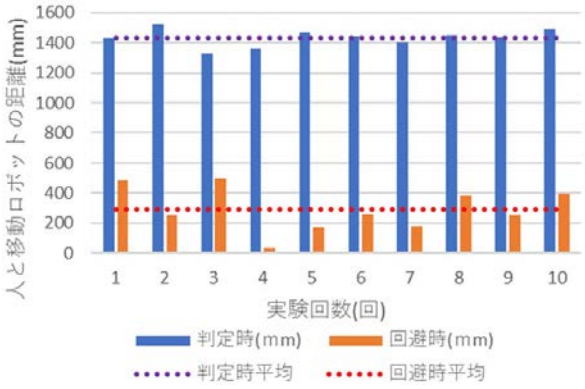


図８．人と移動ロボットの距離測定結果

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本研究では，移動ロボットの内部情報による局所的な路面環境情報の抽出，応用制御方法と，俯瞰システムにより人と移動ロボットを検出し,移動ロボットと人の衝突を回避し,目標位置までの経路を再設定するシステムを提案した．開発した提案システムの性能を実験により検証し，安価なシステムで移動ロボットが目標位置まで衝突なく到達できることを確認した．今後，提案システムの適用範囲を拡張するための課題として，局所的な路面環境情報と広域的な移動ロボットの周辺環境の情報を統合した移動ロボットのモーションコントロールおよび経路計画方法を検討する．さらに，申請者の保有する複数の移動ロボットの運動を独立に制御できるモード分解法と組み合わせる方法を考えている.具体的には,複数の移動ロボットの運動を把持・操作モードに分解し，分解したモード毎に，路面環境情報と周辺環境情報を適用することで，物体の把持力制御と軌道追従制御を同時に実現することを目指す．

成果：

（１）国際学会発表

Masaki Endo and Hiroaki Kuwahara, “Cooperative spatial control of human and mobile robot using overhead system,” Proc. of the 10th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2024), Kyoto, Japan, 2024.

（２）国際論文誌

Hiroaki Kuwahara and Toshiyuki Murakami, “Experimental study of tracked vehicle velocity using estimated disturbance and machine learning for application to environments different from those in training,” IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 13, no. 2, pp. 146-154, 2024.

TOPへ戻る

食品中微量成分の安定同位体比を用いた研究

生命科学科　　川島　洋人

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

日本酒は，主に水，米，麹のみで作られた日本の伝統的な飲み物である。主に水，エタノール，炭水化物，有機酸，アミノ酸で構成されている。お米のでんぷんは麹菌（糖化）によって生成される酵素によって糖に分解される。その後，糖は酵母によってアルコールに変換される（発酵）。このように，糖化と発酵（並行二重発酵）の同時プロセスによって製造される。醸造過程は，初めに米の外層を磨いて水に浸し，次にご飯を蒸す。その後，ご飯に麹菌をまぶして繁殖させる。次に，水，麹，ご飯，酵母をタンクに入れて発酵させる（酒母）。この工程にてアルコールを生産する清酒酵母で育てられ，2 週間から 1 ヶ月以上かかる。次に，ご飯，麹菌，水，麹を巨大なタンクに入れて発酵させる（もろみ）。この工程にて，並行二重発酵が実行される。その後，20 日間発酵させた後，圧搾して酒を分離する。最後に，ろ過を調整し，水を加え，低温殺菌した後，保管される。

日本酒は国税庁によって特別に分類されている。簡略化すると，日本酒を最初の 2 つに分類した。水，米，麹のみで作られた「純米酒」と，純米酒に醸造アルコールも添加可能な「吟醸酒」である。次に，純米は精米率に基づいてさらに分類される。純米酒の場合，精米率が 50%未満，50～60%，60～70%の場合，それぞれ「純米大吟醸酒」「純米吟醸酒」「純米酒」と分類される。精米率が低いほど，酒の風味が豊かになり，値段も高くなる。吟醸酒も精米率に基づいて 3 つのカテゴリーに分類される。精米率が 50%未満，50～60%，60～70%の場合，「大吟醸酒」「吟醸酒」「本醸造」に分類される。醸造アルコールを入れることで，より軽い味わいになり，香りが増す。上記のいずれにも該当しない酒は「普通酒」に分類される。普通酒は，醸造アルコール，砂糖，有機酸を加えることが可能である。これは，生産される日本酒の中で最も多く，最も安い。いずれの場合も，日本酒のカテゴリーは法的にラベルに表示する必要がある。

日本で生産された日本酒の生産量は，2013 年から 2017 年にかけて 19%減少した。一方，純米酒の生産量は 30%増加した。これは，純米酒に対する消費者の需要の高まりを反映していると考えられる。また，日本酒の輸出量は 2008 年から 2018 年にかけて 2.1 倍に増加し，2018 年には 25,747 kL であった。輸出される日本酒の大部分が純米酒であり，これは純米酒と吟醸酒（普通酒）の税率の違いを反映している可能性がある。輸出する際に，純米酒の方が税率が低いため，輸出する際は純米酒が好まれている。そこで，人気のある純米酒と他の種類の日本酒との価格差による詐欺が起きている。

現在までに日本酒の産地識別法として安定同位体が注目されており，日本全国の河川水・浅部地下水の水の水素・酸素安定同位体比を用いた産地識別がいくつかの研究で報告されている。日本酒中の水の酸素安定同位体を分析し，その醸造地近郊の水の酸素安定同位体比は，高い相関関係があることが確認された。また，北海道，東北，北陸地域の日本酒は，南の地域に比べて酸素安定同位体比は軽いと報告もある。また，全国各地の 100 個

TOPへ戻る

以上の日本酒中の水の水素安定同位体を分析し，その醸造地近郊の水の酸素安定同位体比との相関関係は,高い相関関係が確認された。これより，日本酒中の水の水素・酸素安定同位体比は，産地識別の一つのツールになることが示されている。水の水素・酸素安定同位体比を用いた識別方法は，安定同位体の緯度効果（高緯度ほど同位体比が軽い）が用いられているが，日本国内における緯度が近い都道府県やさらに中国で作られた日本酒と識別することが難しいのが現状であり，未だ明確な産地識別方法が確立されていない。

そこで，本研究では新たに日本酒中の硝酸に着目した。硝酸は，日本酒の造りの一つである生酛造りにおいて，重要な役割を果たしている。生酛造りとは，日本酒の元となる酒母を作る工程で，自然な微生物を利用し雑菌の増殖を抑える方法である。一般的な方法では，人工的に醸造用乳酸用いるが，生酛造りでは，硝酸還元菌により，仕込み水に含まれる硝酸塩から亜硝酸が生成して雑菌の増殖を抑える方法である。これより，日本酒の硝酸は，主に醸造中に使用される仕込み水に由来していると考えられている。そこで，硝酸の同位体比が醸造中に変化しなければ，仕込み水とその仕込み水にて作られた日本酒が類似な値になることが予測され,また酒蔵ごと(仕込み水ごと）に異なるとすると，酒蔵の特徴を把握し識別（産地識別）できる可能性があると考えられる。

近年，プリンストン大学の D.Sigman 教授らは脱窒菌を使った窒素・酸素安定同位体比の超高感度・高精度な測定方法を開発した。この方法は，脱窒菌株を用いて，硝酸イオンを亜酸化窒素に還元することで，硝酸の窒素･酸素安定同位体比を分析する方法である。この方法は，今まで主に環境中の硝酸やアンモニア中の窒素・酸素安定同位体比の分析に使用されてきた。現在までに，食品への適用は私たちの知る限り,本研究が初めてである。しかし，脱窒菌法を本研究で適応する上で，日本酒に高濃度で含まれているエタノールは分析装置に非常に大きなダメージが及ぼす。そこで，初めにエタノールや糖類等の夾雑物を除去するための固相抽出法を確立した。最終的には，14 酒蔵，87 種類の日本酒に含まれる硝酸イオンの窒素，酸素安定同位体比の分析を行い，仕込み水と日本酒の相関関係や各酒蔵，産地における特徴を調査した。

２．研究計画

以下に使用した標準試薬,日本酒サンプル,酸素・窒素安定同位体比分析方法について記載した。

● 標準試薬

疑似日本酒のサンプル(以下で詳細に説明)は，L（+）-酒石酸（> 99.5%)，リンゴ酸（> 99.0%)，乳酸（85.0-92.0%)，コハク酸（> 99.5%)，L-アラニン（> 99.0%)，L-グルタミン酸（> 99.0%)，エタノール（> 99.5%）硝酸カリウムは，富士フィルム和光純薬工業（大阪，日本）から購入した。D（+）-グルコース（> 98.0%）は関東化学（東京，日本）から購入した。SPE の工程では,塩酸(HCl, 35〜37%)を富士フィルム和光純薬工業から購入した。

● 日本酒サンプル

14 酒蔵における 87 つの日本酒（サンプル数は各酒蔵 2〜11 つ，秋田県：8 酒蔵，新潟県，京都府：2 酒蔵，石川県，福井県：1 酒蔵づつ）を購入した。本研究では，日本酒を水，米，麹のみで作る「純米酒」，純米酒に醸造アルコールも添加可能な「吟醸酒」，さらに砂糖や有機酸も添加可能な「普通酒」の 3 つに分類した。日本酒の醸造中に使用される水を仕込み水という。本研究では，14 酒蔵の仕込み水を，購入もしくは直接提供して頂いた。前処理に使用した SPE カートリッジは，アニオン交換樹脂 AG1-X8（Bio-Rad 社，東京，日本）を使用した。エンプティーポリエチレンカー

TOPへ戻る

トリッジ（1mL）に，AG1-X8 樹脂を充填した。

● 酸素・窒素安定同位体比分析方法

日本酒中の硝酸は，脱窒菌法を用いて硝酸中の窒素・酸素安定同位体比を測定した。その後，サンプルは脱窒菌（*Pseudomonas aureofaciens*）に添加し，NO_2^-をN_2Oに還元した。サンプルは 30～50nmolN となるように添加した。GasBench II（Thermo Fisher Scientific 社製）と IRMS（Deltaplus XP; Thermo Fisher Scientific 社製）を組み合わせ，PAL オートサンプラーを使用して，日本酒中の $\delta^{15}N\text{-}NO^{3-}$, $\delta^{18}O\text{-}NO^{3-}$ 値を分析した。IRMS 機器は，ISODAT3.0（Thermo Fisher Scientific 社製）を使用して制御した。$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$, $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値は，硝酸カリウムの国際同位体標準（USGS32，$\delta^{15}N$= 180‰，USGS34，$\delta^{15}N$= −1.8‰）および硝酸ナトリウム（USGS35，$\delta^{15}N$= 2.7‰）を使用し 2 点検量線法によって計算された。また，国際原子力庁（オーストリア）から入手した $NaNO_3$（USGS35，$\delta^{15}N$ = 2.7‰，$\delta^{18}O$= 57.5‰）で確認した。

● イオン濃度分析

イオンクロマトグラフィーを用いて日本酒中の NO_3^-イオン濃度を測定した。日本酒サンプルは孔径 0.45μm のメンブレンフィルター（Mini Sart RC15; ザルトリウス・ジャパン社製，日本）でろ過した。日本酒サンプルは，陽イオン測定では 100 倍希釈，陰イオン測定では 10 倍希釈で自動希釈した。抽出したサンプルをイオンクロマトグラフィー（IC2010; 東ソー株式会社，東京，日本）を用いて NO_3^- イオン濃度を測定した。陰イオン分析用のカラムは，TSK ゲルガードカラム Super IC- AHS, TSK ゲル Super IC Anion HS である。陰イオン混合標準溶液（和光純薬社製）と陽イオン混合標準溶液（和光純薬社製）の標準液の希釈を分析することにより，検量線を作成した。各検量線は，決定係数は＞0.999 であり，NO_3^- の検出下限値は 10ppb であった。

● 固相抽出法

SPE 手順を最適化するために，日本酒を摸擬した溶液を作成し最適化試験を行った。模擬日本酒サンプルは，エタノール/水（16:84, v/v）に 1 つの糖，4 つの有機酸，7 つのアミノ酸，硝酸ナトリウムの標準試薬を混合した。SPE は次のような手順で行った。初めにエンプティリザーバー（1mL, GL サイエンス社製）に，イオン交換樹脂（AG1-x8，GL サイエンス社製）0.25mL を充填した。イオン交換樹脂は，初めて超純水と 1:1 で溶かした。初めに，コンディショニングとして超純水を 50mL 通液し，イオン交換樹脂を活性化させた。その後，日本酒サンプルを 15～25mL を通液した。サンプルの通液流量は 1mL/min 以下とした。その後，超純水を 25mL で洗浄し，最終的に 1M　塩酸（HCL）で抽出した。最適化された固相抽出を用いて，疑似日本酒を分析した。本研究では，最適化した固相抽出法において，日本酒を摸擬した疑似日本酒を用いて検討した。疑似日本酒は以下の標準試薬を混合し作成した：エタノール/水（16：84，v / v），グルコース：20000ppm，リンゴ酸：300ppm，乳酸：800 ppm，コハク酸：300 ppm，アラニン：250 ppm，グルタミン：150 ppm，硝酸カリウム：1～10ppm とした。標準試薬とした硝酸カリウム（和光純薬社製）は，$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ は 23.7‰，$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$は−1.9‰とした。疑似日本酒における固相抽出法の検討では，それぞれ硝酸の絶対量が 0.4，0.8，2.0，4.0，8.1μmol になるように通液量を 5～50mL とした。それぞれ絶対量において，n=2～6 とした。

３．計画の進行状況

以下に使用した疑似日本酒を用いた固相抽出法の最適化についてと，日本酒中の硝酸濃度，$\delta^{18}O$，$\delta^{15}N$ 値について記載した。

● 疑似日本酒を用いた固相抽出法の最適化

NO_3^-の吸着量が 0.4～8.1μmol にて，疑似日本酒における $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値は，23.4 ± 0.3‰

TOPへ戻る

（0.4μmol），24.1 ± 0.2‰（0.8μmol），24.3 ± 0.1‰（2.0μmol），24.3 ± 0.04‰（4.0μmol），24.3 ± 0.1‰（8.1μmol）であり，確度と精度ともにそれぞれ≤0.6‰と≤0.3‰であった。また，$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$では，–1.5 ± 0.1‰（0.4μmol），–1.5 ± 0.1‰（0.8μmol），–1.5 ± 0.1‰（2.0μmol），–1.7 ± 0.1‰（4.0μmol），–1.6 ± 0.1‰（8.1μmol）であり，確度，精度ともにそれぞれ≤0.4‰と≤0.1‰であった。したがって，吸着量が 0.4～8.1μmol にて，$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$，$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$は，優れた確度と精度が達成された。

● 日本酒中の硝酸濃度，$\delta^{18}O$，$\delta^{15}N$ 値

14 酒蔵，87 つの日本酒における硝酸濃度は，0.6～10.9ppm（平均値：4.4 ± 2.7 ppm）であった。現在までに，日本酒中の硝酸濃度を分析した研究報告は私たちの知る限りなかった。次に，87 つの日本酒における $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$と$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$は，それぞれ 1.6～18.5‰（平均値：4.9 ± 2.6‰），0.4～13.2‰（平均値：7.1 ± 2.9‰）であった。全て分析を 3 回測定し，3 回測定における標準偏差は 0.5‰以内であった。

各酒蔵ことに分類すると，14 酒蔵における $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値は，2.3～9.1‰（平均値：4.6 ± 1.9‰）であり酒蔵間における $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値の標準偏差は小さかった。さらに，同酒蔵における$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$の標準偏差は 0.1～4.6‰であった。酒蔵 No. 10 では，特に標準偏差が 4.6‰と大きく，各商品により大きなばらつきが見られた。これより，$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値は，酒蔵によりばらつきに差があることが分かった。次に，14 酒蔵における $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$は，1.3～12.3‰（平均値：6.5 ± 2.9‰）であり酒蔵間における$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値の標準偏差は大きかった。また，同酒蔵における $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$の標準偏差は 0.1～1.4‰であった。これは，$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値よりも小さく，同酒蔵であれば $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$値は近い値をもつことが分かった。

都道府県における $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$は，秋田県は 4.3 ± 1.5‰，新潟県は 6.7 ± 3.5‰，石川県は 3.9 ± 0.3‰，福井県は 2.3 ± 0.8‰，京都府は 5.6 ± 1.0‰であった。都道府県における $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$における大きな特徴は見られなかった。次に，$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$は，秋田県は 6.1 ± 1.6‰，新潟県は 4.3 ± 4.1‰，石川県は 7.5 ± 0.4‰，福井県は 3.2 ± 0.1‰，京都府は 11.6 ± 1.0‰であった。硝酸の $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$は，化学肥料，人畜由来のし尿等の発生源により異なる同位体比の違いを持つため，都道府県別における違いは見られないと考えられる。また，$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$，$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$には，生酛系酒母と速醸系酒母による違いや，精米歩合による見られなかった。

仕込み水と日本酒の相関図を図 1 に示した。$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$値における仕込み水と日本酒の相関は，やや相関関係があった（R =0.68，図 1（A））。$\delta^{15}N\text{-}NO^{3-}$値における仕込み水と日本酒の相関は，強い相関関係があった（図 1（B））。日本酒の醸造過程において，$\delta^{15}N\text{-}NO^{3-}$は仕込み水から大きな同位体分別は生じていないと推測された。

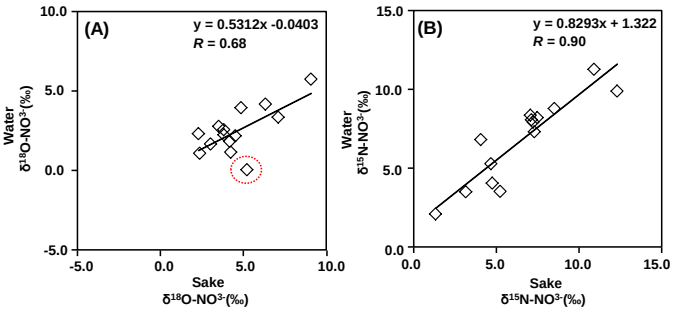


図 1 仕込み水と日本酒の相関関係（$\delta^{18}O$，$\delta^{15}N$）

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後は日本酒以外の飲料，食べ物に含まれる NO_3^-の $\delta^{18}O$，$\delta^{15}N$ の高精度分析法を確立させたい。

また本研究の結果は，国際学術雑誌である LWT（Momoka Suto, Hiroto Kawashima, Water-soluble ions and nitrogen and oxygen stable isotope ratios in nitrate in sake in Akita, Japan）に報告した。

TOPへ戻る

極小表現に関連する解析

数理科学科　　田森　宥好

共同研究者
立命館大学理工学部数理科学科　　平良　晃一

1．序論

xを n 次元空間R^nの元、tを時刻、ΔをR^nでのラプラシアンとして、自由粒子のシュレディンガー方程式

$$i\,\partial_t u(x,t) + \frac{\Delta}{2}\mathrm{u(x,t)} = 0,$$
$$u(x,0) = u_0(x)$$

の解$u(x,t) = e^{it\frac{\Delta}{2}}u_0(x)$を考える（ラプラシアンを 2 で割っているのは記号上の便宜）。

2 以上の実数（∞も許す）p,qが

$$\frac{2}{p}+\frac{n}{q}=\frac{n}{2}$$

を満たし、$(p,q,n) \neq (2,\infty,2)$ならば、初期条件の関数$u_0$に依存しないある定数 C が存在し

$$||u||_{L^p(R;L^q(R^n))} \leq C||u_0||_{L^2(R^n)}$$

が成り立つことが知られている。ただし両辺のノルムは

$$||u||_{L^p(\boldsymbol{R};L^q(\boldsymbol{R^n}))} = \left(\int_R \left(\int_{R^n} |u(x,t)|^q\,dx\right)^{\frac{p}{q}} dt\right)^{\frac{1}{p}},$$

$$\left|\left|u_0\right|\right|_{L^2(R^n)} = \left(\int_{R^n} |u_0(x)|^2\,dx\right)^{\frac{1}{2}}$$

で定義される。

上記の評価式は、大雑把に「初期条件として与えられる関数u_0をある意味で少し変化させた時に、対応するシュレディンガー方程式の解uは（異常な振る舞いをせずに）ある意味で少ししか変化しない」ということを意味している。偏微分方程式の解に対するこのような評価式はストリッカーズ評価と呼ばれ、ここ 30 年で広く研究されてきた。

$||x||$を x の位置ベクトルの大きさとして、調和振動子のシュレディンガー方程式

$$i\,\partial_t u(x,t) + \left(\frac{\Delta - \left|\left|\mathrm{x}\right|\right|^2}{2}\right)u(x,t) = 0$$

や少し状況を変えたシュレディンガー方程式

$$i\partial_t u(x,t) + \left|\left|x\right|\right|\Delta\, u(x,t) = 0,$$
$$i\,\partial_t u(x,t) + \left(\left|\left|x\right|\right|\Delta - \left|\left|x\right|\right|\right)u(x,t) = 0$$

などを考えても、（必要なら有限時間で考えることにすることで）ストリッカーズ評価が成り立つことがベンサイドにより知られている[Ben15]。

本研究の目的は、上記 4 つを特別な例として含む、より一般的なシュレディンガー方程式に対するストリッカーズ評価を与えることである。正確には、a を正の数、Δ_kをダンクルラプラシアン（ラプラシアンの一般化。K はあるR^n内のルート系 Φ 上の鏡映不変な非負の関数で、パラメータ k が 0 の場合にΔと一致する）として、非斉次のシュレディンガー方程式

$$i\,\partial_t u(x,t) + \frac{\left|\left|x\right|\right|^{2-a}\Delta_k}{a}u(x,t) = \mathrm{f(t,x)}$$

や

$$i\,\partial_t u(x,t) + \frac{\left|\left|x\right|\right|^{2-a}\Delta_k - \left|\left|x\right|\right|^a}{a}u(x,t) = \mathrm{f(t,x)}$$

の解 u を、f とu_0の何らかのノルムの定数倍

TOPへ戻る

で上から評価することが目的である。

２．研究計画

先程の 4 つのシュレディンガー方程式に関してストリッカーズ評価が得られていた理由として、シュレディンガー方程式の解uが簡単な特殊関数を含んだ積分を用いて具体的に書けることが挙げられる。さらにこのことは掛け算作用素と微分作用素のペア

$$\frac{||x||^2}{2}, \frac{\Delta}{2} \quad と \quad ||x||, ||x|| \Delta$$

がある意味で「大きい対称性を持つこと」（専門用語を用いると前者は「メタプレクティック群の極小表現にあらわれる作用素であること」、後者は「不定値直交群の極小表現にあらわれる作用素であること」と言い換えられる）が関係している。

本研究の目的のシュレディンガー方程式に現れる掛け算作用素と微分作用素のペア

$$\frac{||x||^a}{a}, \frac{||x||^{2-a} \Delta_k}{a}$$

は、ベンサイド-小林-エルステッドによって構成された、上記の二つのペアをパラメーターa と k を用いた「ある程度の対称性を保つ」特別な変形である[BK012]。特に今回のシュレディンガー方程式の解も積分を用いて具体的に書ける一方で、変形前ほどは対称性が大きくないために

$$L = \Gamma(b\nu + 1) \sum_{m \geq 0} \frac{m+\nu}{\nu} \left(\frac{w}{2}\right)^{bm} I_{\widetilde{b(m+\nu)}}(w) C_m^{\nu}(\cos \phi)$$

（ただし b は a によって決まる正の実数、ν は a と k によって決まる非負の実数、w は偏角が$-\pi$ラジアンからπラジアンの間にある複素数、ϕは実数、Γはガンマ関数、$I_{\widetilde{b(m+\nu)}}$は正規化された I ベッセル関数、C_m^{ν}はゲーゲンバウアー多項式）という複雑な形の特殊関数の積の無限和が積分に現れてしまう。

キール-タオによるストリッカーズ評価の一般論[KT98]から、本研究のストリッカーズ評価は、L の絶対値をϕに依存しない形で適切に上から評価することに帰着される。

３．計画の進行状況

L の絶対値に関する次の 2 種類の上からの評価を得た：

(1)b とνによって決まるある正定数 C が存在して、任意の複素数 w と実数ϕに対して

$$|L| \leq Ce^{|\mathrm{Re}(w)|}(1 + |\mathrm{Im}(w)|)^{(2-b)\nu}$$

が成り立つ。

(2)b<2 とする。b とνによって決まるある正定数 C が存在して、任意の複素数 w と$\cos\phi$が 0 以上となるような任意の実数ϕに対して

$$|L| \leq Ce^{|\mathrm{Re}(w)|}(1 + |\mathrm{Im}(w)|)^{(1-b)\nu}$$

が成り立つ。

この命題に関しては、2 通りの証明を与えた。1 つ目の手法は L にポアソン和公式を用いて積分の無限和の形へと書き直し、位相停留法を用いてそれぞれの積分を和のパラメーターに関して一様に評価するというもので、2 つ目の手法はベッセル関数の積分表示を用いて L の積分表示を求め、上手く積分経路を変形し、そこでの被積分関数の評価を求めるという複素解析的なものである。

上記の L に関する評価から、次のようなストリッカーズ評価を得た：

次のうちのいずれかを仮定する。

(1)　n=1 かつ$a \geq 2 - 4k$

(2)　$n \geq 2$かつ$(0 < a \leq 1$または a=2)

(3)　$n \geq 2$かつ$1 < a < 2$かつ k=0

また、

$$\sigma_{k,a} = \frac{n + a - 2 + \sum_{\beta \in \Phi} k(\beta)}{a}$$

として 2 以上の実数（∞も許す）p, qが

TOPへ戻る

$$\frac{2}{p}+\frac{\sigma_{k,a}}{q}=\frac{\sigma_{k,a}}{2}$$

を満たし$(p,q,\sigma_{k,a})\neq(2,\infty,1)$とする。さらに

$$p^*=\frac{p}{p-1},q^*=\frac{q}{q-1}$$

とし、(3)の時は

$$(p,q)\neq\left(2,\frac{2\sigma_{k,a}}{\sigma_{k,a}-1}\right)$$

も仮定する。

この時ある正定数 C が存在して

$$i\,\partial_t u(x,t)+\frac{||x||^{2-a}\,\Delta_k}{a}u(x,t)=\mathrm{f(t,x)},$$
$$u(x,0)=u_0(x)$$

の解 u は

$$||u||_{L^p(R;L^q)}\leq C\left(||u_0||_{L^2}+||f||_{L^{p^*}\left(R;L^{q^*}\right)}\right)$$

を満たす。ただし両辺のノルムは

$$||u||_{L^p(R;L^q)}$$
$$=\left(\int_R\left(\int_{R^n}|u(x,t)|^q\,|x|^{a-2}\prod_{\beta\in\Phi}|(\beta,x)|^{k(\beta)}\,dx\right)^{\frac{p}{q}}dt\right)^{\frac{1}{p}},$$

$$||u_0||_{L^2}=\left(\int_{R^n}|u_0(x)|^2\,|x|^{a-2}\prod_{\beta\in\Phi}|(\beta,x)|^{k(\beta)}\,dx\right)^{\frac{1}{2}}$$

で定義される。

さらに任意の正の実数 T に対してある正定数 C’ が存在して

$$i\,\partial_t u(x,t)+\frac{||x||^{2-a}\,\Delta_k-||x||^a}{a}u(x,t)=\mathrm{f(t,x)},$$
$$u(x,0)=u_0(x)$$

の解 u は

$$||u||_{L^p([-T,T];L^q)}\leq C'\left(||u_0||_{L^2}+||f||_{L^{p^*}\left([-T,T];L^{q^*}\right)}\right)$$

を満たす。ただし

$||u||_{L^p([-T,T];L^q)}=$

$$\left(\int_{[-T,T]}\left(\int_{R^n}|u(x,t)|^q\,|x|^{a-2}\prod_{\beta\in\Phi}|(\beta,x)|^{k(\beta)}\,dx\right)^{\frac{p}{q}}dt\right)^{\frac{1}{p}},$$

で定義される。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

・今後の計画

複素解析的手法を用いたストリッカーズ評価については現在論文を執筆中である。この論文を完成させて論文誌に投稿することが直近の計画である。

中長期的には、ベンサイド-小林-エルステッド[BKO12]による微分作用素の変形でストリッカーズ評価以外の解析的な性質も保たれるかを考えてみたい。

・学会発表状況

1. 田森宥好, Strichartz estimates for the (k,a)-generalized Laguerre operators, 2023年度表現論シンポジウム, 沖縄県市町村自治会館, 2023年11月.

2. Hiroyoshi Tamori, Strichartz estimates for the -generalized Laguerre operator, 7-th Tunisian-Japanese Conference Geometric and Harmonic Analysis on Homogeneous Spaces and Applications In Honor of Professor Toshiyuki Kobayashi, Monastir, Tunisia, 2023年11月.

3. 平良晃一, Strichartz estimates for (k,a)-generalized Laguerre operators, 日本数学会秋季総合分科会, 東北大学, 2023年9月.

TOPへ戻る

4. 田森宥好, (k,a)-一般化Laguerre半群の積分表示, Lie Groups and Representation Theory Seminar, 東京大学(オンライン), 2023年5月.

5. 田森宥好, Strichartz estimates for the (k,a)-generalized Laguerre operators, The 6th Langlands and Harmonic Analysis, 金沢大学, 2023年3月.

・論文投稿状況

位相停留法を用いたストリッカーズ評価については共著論文[TT23]にまとめ、プレプリントサーバーarXiv で公開した (https://arxiv.org/abs/2308.16815)。加えて、論文誌に投稿中である。

５．参考文献

[Ben15] S. Ben Said, Strichartz estimates for Schrodinger-Laguerre operators, Semigroup Forum 90 (2015), no.1, 251-269.

[BKO12] S. Ben Said, T. Kobayashi, and B. Ørsted, Laguerre semigroup and Dunkl operators, Compos. Math. 148 (2012), no. 4, 1265-1336.

[KT98] M. Keel and T. Tao, Endpoint Strichartz estimates, Am. J. Math. 120 (1998), no.5, 955-980.

[TT23] K. Taira and H. Tamori, Strichartz estimates for the (k,a)-generalized Laguerre operators, arXiv:2308.16815, 2023, submitted.

TOPへ戻る

熟練販売員の接遇の理解と遠隔接客への応用

デザイン工学科　　益子　宗

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

少子高齢化に伴う労働人口の減少が社会的に問題となり，誰もが活躍できる社会の実現が求められている．特に，女性が多いアパレル業界では高度な接客スキルや専門知識を持つ販売員が結婚や出産を理由に仕事を去る機会が多い．そのためメタバースを利用し，自宅などの遠隔地から実店舗にいる来店者と非対面での遠隔接客が試みられている（図 1）．

しかし，円滑な遠隔接客を実現するために必要な要件は未だ探究点が多く，既存システムの流用だけでは扱える情報に限りがあるなど，実店舗での対面接客に比べ十分なコミュニケーションを実現することが難しい．

本研究では，実店舗での熟練販売員の接遇を参考にすることで円滑な接客に必要な人間特性や環境要素の手がかりを探ることで，従来の遠隔接客に不足していた要素を動的に補完する情報取得・提示手法，ならびに遠隔接客の基盤技術の実現にむけた探索的な研究を行うことを目的とする．

２．研究計画

項目１）熟練販売員の接遇の理解

良い接客とは何かという人間の感性については未だ明確な指標がなく，実店舗での熟練販売員の接遇を参考にすることで顧客満足度の高い接客に必要な要素を明らかにする．

項目２）情報取得・UI デザインの提案

従来の遠隔接客システムで不足していた人間特性や環境要素を補完するための情報取得方法と提示手法を提案し，円滑な消費者コミュニケーションを実現する新しい遠隔接客基盤を検討する．

実店舗を Spatial 上で再現した様子
図１　メタバース店舗での遠隔接客

項目３）提案内容の検証

項目２で提案した手法の効果を評価するため，被験者に接客のロールプレイをして体験してもらい評価を行う．特に提案手法が実際に顧客満足度を向上させ，遠隔接客の効率と効果を高めるかどうかを検討する．

３．計画の進行状況

項目１）熟練販売員の接遇の理解

研究協力者が運営する実店舗（Zootie StylingLAB 東京北参道店 [1]）に勤務する販売員へのヒアリングを行い，実店舗での接客に必要な要素を調査した．インタビューを通じて，接客を行う際には顧客とのコミュニケーションを取るため，顧客の観察は重要であるという意見が多くみられた．

[1] https://stylinglab.jp/

TOPへ戻る

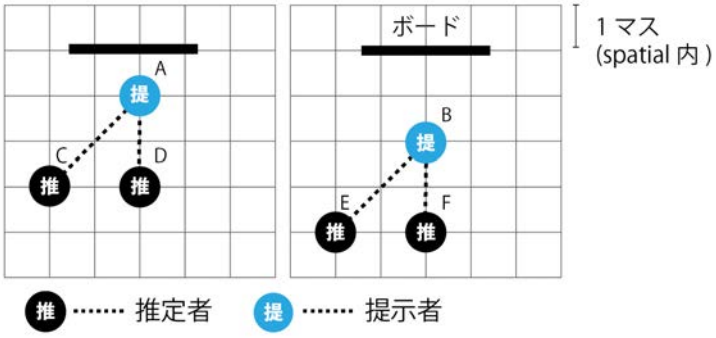


図 2　提示者と推定者の位置関係

図 3　アンケート用画像撮影の様子

ボード A（1.5x1.5）　　ボード B（2x2）　　ボード C（4x4）

図 4　実験に用いたボードサイズ

観察は顧客が入店した瞬間から行っており，顧客の身に着けているものから顧客の好みだけではなく，入店時のちょっとした声掛けに対する顧客の反応から販売員に対する心理的距離感をある程度把握していることがわかった．さらに，顧客の入店後に店内を歩く様子や商品の触り方で，目的をもった計画購買であるのかそうでない非計画購買なのか，立ち止まった位置などでどのジャンルの商品を探しているのかなどを推測している．また，そのような状況推測のもと顧客に声をかけ予想と違った場合でも，その先の話題作りのキッカケとして観察によって得られた知見を活かしていることが明らかになった．

また，現在のメタバースの店舗に関しては実店舗のように顧客が商品を手に取るなどの動作が見えないことに不便を感じており，コミュニケーションが取りづらいという意見が多く見られた．

項目２）情報取得・UI デザインの提案

メタバース空間における①視覚的情報から得られる顧客情報の理解度と②それを補う手法の検討を行った．

① アバター外見が視線方向知覚に及ぼす影響の調査

メタバースにおける顧客アバターの容姿や動きがどのくらい販売員の観察に影響をもたらすのか，アバターの視線方向の推定に関して以下の工程で調査を行った．

1)メタバースのプラットフォームの一つである spatial[2]を用いて「棚にある商品を見る提示者（顧客）を離れた位置から観察する推定者（販売員）」という状況（図 3）を想定し，そこでの推定者視点を画像として記録する．

2) 記録した画像をもとに視線方向について問うアンケートに回答してもらい，視線方向の推定の正誤判定や傾向などを考察する．

実験では，1 から 16 までの数字が 4×4 に並べられているボードを作成した．サイズが異なるボード A（1.5×1.5 マス），ボード B(2.0×2.0 マス)，また，商品棚の大きさと

[2] https://www.spatial.io/

TOPへ戻る

は関係なくボードを大きくした場合に推定がより容易になるか明確にするため，大きさが4.0×4.0マスであるボードCの3種類を用い，提示者と推定者の位置関係を 4 通りの位置（図 2 C,D,E,F），ボードA，Bは2種類のアバターを用い，計20通りの画像を記録した．

実験の記録をもとに，画像内のアバターが16 個の数字のうちどれを見ているか選択するアンケートを6名の大学生に回答してもらった．評価は16個の数字のうち回答と提示者の見た数字が一致した場合は2点，回答が提示者の見た数字の周り1マスの数字だった場合は1点とする加点式で行った．実験の結果として回答者の総得点の平均は 40 点中 22.2 点，標準偏差は1.94だった(表 1)．商品を手にとるなどの動作がわかる実店舗と比較すると，これらの結果からメタバース空間での顧客の視線の推定がアバターの外見から得ることは難しく，遠隔接客における観察には不便であることが明らかになった．

② 顧客の視線位置の表示の有無による興味対象の把握に関する実験

顧客の興味の手がかりとして顧客の視線位置情報を直接的に表示することで顧客の様子の理解度に違いが現れるかの調査を行った．実験では,顧客役の被験者が spatial 上で服屋の店内にある商品を見て回り，その様子を販売員役の被験者が観察した上で，顧客役が選んだ商品を推定する課題を与えた．顧客役には「友達の家に行く時」「旅行に行く時」「海に行く時」「大学に行く時」「部屋着」からランダムに選ばれたシナリオに合わせて商品として店内に配置された 10 種類の異なる絵柄がプリントされた服から2点を選ぶよう指示した．

観察する販売員役に対し（ア）店員視点のみ，（イ）顧客操作視点，（ウ）顧客操作視点と顧客視線位置の3パターンで情報を与えた（図 5)．顧客の視線位置の可視化には，Tobii Eye Tracker 5 を使用した．実験では顧客役が店内を回って選んだ2点の服に対し，販売員役が推定した2点の服の正答率で評価を行った．

表 1　立ち位置とボードごとの平均点

ボード	立ち位置			
	A-C	A-D	B-E	B-F
A	0.75	1.08	1.08	1.08
B	0.67	1.17	1.00	1.42
C	0.50	1.17	1.83	1.83

店員視点

図 5.1　パターン（ア）

追加された顧客操作視点

図 5.2　パターン（イ）

追加された顧客操作視点と視線位置（青丸）

図 5.3　パターン（ウ）

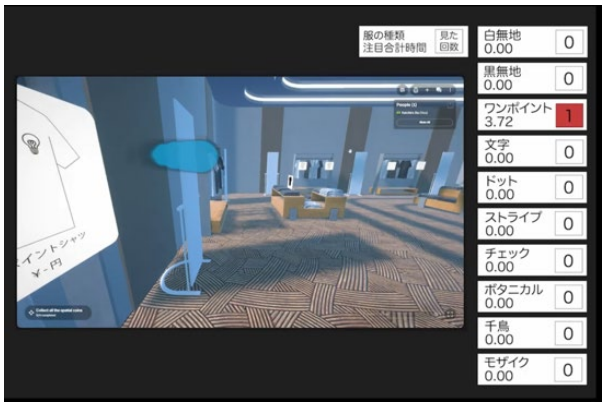
TOPへ戻る

実験の結果，パターンごとの平均正答数は 2 点中（ア）が 0.86 点，（イ）が 0.75 点，（ウ）が 0.63 点となり，顧客の視線位置を直接的に扱ったパターン（ウ）の正答率が一番低かった．視線を直接的に表示するだけでは，店内の商品配置や被験者の視線移動のくせ等から視線の動きに差が生まれ，顧客の興味対象を誤推定してしまった可能性が考えられる．

項目３）提案内容の検証

項目２で得られた知見を元に，視線情報を直接的に提示するのではなく，アイトラッキングの情報をもとに服ごとの注目サマリ情報「注目合計時間」「注目した回数」を表示し（図 6），顧客の動きに合わせて都度表示する手法を用いて，実験により効果を検証した．

実験では 3 つのテーマで行ったパターン（ウ）を 3 つの購入シナリオの動画として記録し，サマリ情報を付加したパターン（エ）を作成した．顧客が店内を回って選んだ 3 点の服に対し，販売員役が推定した 3 点の服の正答率で評価を行った．3 点満点で計算した被験者の結果を図 7 に示す．各シナリオにおいてパターン（ウ）よりもパターン（エ）の正答率が高く，サマリ情報の提示の効果があったといえる．また，販売員役の被験者から「推定する服の候補を最終的に絞るためにサマリ情報を利用した」といった意見も得られた．実際に同じ動画に対し，サマリ情報の有無の違いによる推定した服の種類分布を見ると，パターン（ウ）よりもパターン（エ）の動画を視聴した際の推定した服のばらつきが少ないことがわかり，サマリ情報が推定に影響を与える傾向が見られた．



サマリ情報を加えた動画の様子

図 6　パターン（エ）

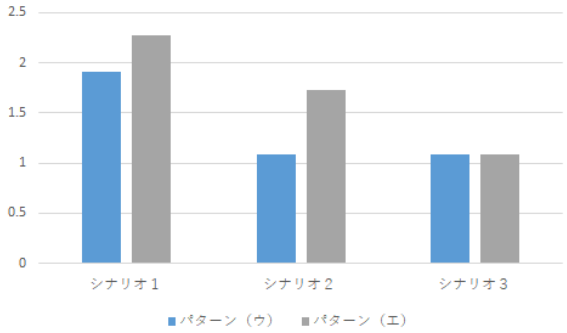


図 7　サマリ情報の有無による点数

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本年度は豊かな接客体験を実現するために必要な要素は何かという人間を中心とした探索的な調査を実施した．特にメタバース店舗における顧客の視線情報に注目し販売員に与える影響の調査を進めたが，視線情報以外の要素も顧客の興味や目的を知るための手がかりともなり得ると考えている．そのため今後は，販売員との会話音声や滞在時間時間などの複合的な顧客情報の活用や提示手法の検討を行いたい．また，今回は一店舗でのインタビューを実施したが，店舗によって接客マニュアルが完備されているなど接客スタイルが店舗や販売員によって異なるため，今後は他の店舗や販売員へのインタビューを実施し，状況に応じた接客コミュニケーションについての検討や実店舗にカメラやマイクを設置し，実際の接客の様子を観察することも必要である．

今後は，社会実装を見据え，実用面だけではなく運用面からも十分な考察を行い，プライバシーを考慮した情報の取得方法や，新しい情報提示手法を活用した人間に優しい接客インタフェースの実現など，本研究の成果を発展的に扱った研究を実施する予定である．

TOPへ戻る

快適な長時間座位作業を実現するための時系列下肢むくみ予測モデルの構築

デザイン工学科　　平尾　章成

共同研究者
慶應義塾大学理工学部機械工学科　　加藤　健郎

１．はじめに

オフィス作業や自動車運転において，長時間の座位姿勢は，肉体疲労をもたらし，腰痛や下肢痛の原因となり，作業の効率の低下や身体的不快感の要員となる．特に，コロナ禍におけるリモートワークの増加などによる長時間座位姿勢の身体影響は，社会問題にもなっている．

長時間座位作業中において，座位姿勢をモニタリングし，着座者に時系列の身体負担の状態を伝えることにより，姿勢の変更などの行動変容を起こすことで，身体影響の少ない快適な座位作業が実現出来ることが期待できる．そのため，本研究では，座位姿勢のモニタリングシステムの開発を行うことを最終目的とする．

座位姿勢の身体負担には，筋骨格負荷と接触負荷があり，筆者は，以前より，そのうちの筋骨格負荷を推定する技術を開発し，座位姿勢の解析や疲労低減自動車シート開発に応用し，解析を行い，モニタリングシステムの要素技術に関する研究を実施してきた[1)2)]．

本研究では，この座位姿勢モニタリングシステムの実現に必要なもう一つの要素である接触負荷に関する技術を開発することを目的とした．

座位姿勢における接触負荷とは，着座により身体が椅子やシートに接触し，力学的安定状態に至るにあたり，表面軟部組織が変形して圧迫されることにより生じる負荷であり，軟部組織内血流やリンパ流が阻害されることを示し，主に身体の自重が掛かる座面側で循環阻害が生じる．この状態は，大腿部や足部の血流計測により観察することが出来るが，筆者は時間蓄積の結果として生じる下肢のむくみを電気インピーダンス法（Bio Impedance: BI）により計測する手法を開発し，評価に用いてきた[3)]．

筆者らは，先行して一昨年度より，座面先端部が上下する自動車シートを用いて，大腿部の圧迫状態を変化させ，下肢のむくみの時系列変化を計測して，時系列のむくみの予測手法を開発してきた[4)5)]．

本研究では，上記自動車シートにおける時系列下肢むくみ予測モデルにおける実験参加者のダイバシティを向上し，よりロバストな予測式の構築を行った．また，自動車シートで得た知見および手法をオフィスチェアの長時間座位に適用し，オフィスチェア用の予測モデルを構築した．本稿では，本学にて実施したオフィスチェア適用に関して報告する．

２．研究の考え方

着座時には，心臓と足先の高低差により，重力の影響で体内の水分が下方へ移動し，足

TOPへ戻る

のむくみが生じる．人体は，この水分をリンパ液の還流により，全身へ拡散し，むくみを解消するが，着座による大腿部の圧迫により生じる循環阻害により，足のむくみは経時的増加していく．この時系列変化を複数の圧迫状態による時系列むくみ計測値を元に予測するモデルを構築する．

前述のように，自動車運転姿勢における下肢むくみ予測モデルの構築は進んでいるが,，自動車用シートにおける運転姿勢とオフィスチェアにおける作業姿勢では，着座姿勢の違いにより，心臓と足先の高低差が大きく異なるため，むくみの発生に違いがあり，運転姿勢における予測式をオフィスチェア使用時の疲労予測に利用することはできない．

そこで，本研究では，オフィスチェア使用時の体圧分布と下腿インピーダンスを計測することにより，足のむくみの時系列予測式を構築した．

３．計測方法

人がオフィスチェアに座っているとき，心臓と足の高低差による重力の影響や椅子の座面から大腿部を圧迫される影響で血液の循環が不安定になる．これにより，細胞外液である水分が血管やリンパ管に染み出し，皮下組織に過剰に溜まることによって足のむくみが発生する．

本研究では，足のむくみの計測方法にBI法を採用し，身体組成分析装置（SKメディカル電子製MLT-600N）により下腿に多周波電流を流すことで生体組織のインピーダンスを計測し，水分量の増減を計測した．むくみの増加を表すためにインピーダンスの逆数をとった値をBI値とする．BI値を求める式を式(1)に示す．計測開始時のデータを R_0 とし，時刻 t に計測したデータを R_t とした．

$$\left(BI値\right) = \frac{(1/R_t)}{(1/R_0)} = \frac{R_0}{R_t}$$

$$= \frac{R_0}{R_t} \qquad (1)$$

４．むくみと体圧の計測

実験参加者は，21～23歳の男性7名，女性7名計14名の大学生（身長：167.0±9.4cm，体重：58.5±8.4kg）である．

実験参加者に，オフィスチェアにてデスクワークを行わせ，5分おきに60分間のむくみの計測を行った．総実験時間は，BI初期値統一のための安静着座30分と計測60分を合わせた90分間とし，圧迫状態を変えるために座面高を変えて，3回計測を行った．実験参加者には，実験前に長時間座位を禁止し，参加者ごとに統一した実験開始時間において実験を行った．60分間の計測中は姿勢変更を禁止し，裸足で足の裏が床についた状態を維持させ，飲食と排泄を禁止した．

座面高による圧迫の状態を変更は，参加者の大腿骨が水平になる座面高さをC_Mとして式(2)からC_L, C_Hを算出し，設定した．このとき，参加者の床から膝上までの高さをxとした．

$$C_L = C_M - 0.1x$$

$$C_H = C_M + 0.1x \qquad (2)$$

実験手順は，以下の通りである．

(1)大腿骨が水平になる基準座面高さC_M，床から膝上の高さxの計測を行った．

(2) 計測したC_MからC_L, C_Hを算出し，C_Lの座面高で30分間の座位を行った．

(3)30分経過後，5分間歩行運動させ，初期インピーダンス値の回復を行った．

(4)5分経過後，身体組成分析装置を接続して実験姿勢をとらせ，60分間のむくみの計測実験を行った．

図１　使用したオフィスチェアと実験の様子

BI値

BI値

TOPへ戻る

５．実験結果及び考察

仮説では，圧迫が大きくなるほどむくみの増加が大きくなると考えた．実験結果から，仮説通り圧迫が大きくなるほど，むくみの増加が大きくなったのは 9 名，仮説と異なったのが 5 名であった．むくみの増加には，個人差を確認することができ，増加の様子により A～D の 4 パターンに分別することができた．圧迫の大きさは，座面体圧の前側分総和を指標とし，小さいほうからP_L，P_M，P_Hの 3 段階とした．なお，P_L，P_M，P_Hは，C_L，C_M，C_Hの座面高を変えた場合における体圧計測値から求めた実際の圧迫の段階であり，必ずしも高さと一致するわけではない．A は仮説通りのグラフとし，B はP_HのむくみがP_Mのむくみより小さいグラフ，C はP_LのむくみがP_Mのむくみより大きいグラフ，D はP_Lのむくみが最も大きく，P_Mのむくみが最も小さいグラフとした．B, C, D の参加者について，仮説通りでないむくみの増加がみられた計測時においては，初期インピーダンス値にばらつきがあったことから，実験前の食事時間や睡眠時間など生理的な実験前条件の統一不足が個人差の原因となったと考えられる．

６．足のむくみの予測式の構築

ステップワイズ法による重回帰分析を行い，足のむくみの予測式を構築した．計測値と予測値の関係性は図 3 の通り，変数と構築された予測式は以下の通りである．

$$y = 6.456 \times 10^{-4}t - 2.342 \times 10^{-3}\mathrm{b} - 9.000 \times 10^{-4}f + 4.788 \times 10^{-4}p - 9.000 \times 10^{-4}f + 4.788 \times 10^{-4}p \quad (3)$$

t 分後の BI 値 y を目的変数とし，経過時間 t，参加者の BMI 値 b，参加者の体脂肪率 f，座面前側体圧総和を体重で割り正規化した値 P，座面高を床から膝上までの高さで割り正規化した値 S を説明変数とした．調整済み決定係数は 0.475 であった．

７．まとめ

本研究では，座面高を変えて足のむくみを計測し，体格条件や実験環境条件を変数としたオフィスチェア着座時の足のむくみの予測式を構築した．また，課題として，初期インピーダンスの統一不足によるデータのばらつきが挙げられた．

本研究で構築した予測式は，研究の最終目的であるオフィスチェア着座中の身体負担を用いたモニタリングシステムの要素として組み込む予定である．

また，一般に椅子開発時には，本研究でも用いた体圧分布が評価ツールとして用いられているが，計測した体圧分布を構築した予測式に適用することで，長時間着座時の疲労の要素として下肢むくみ予測し，オフィスチェア設計に活用することで，より快適な椅子設

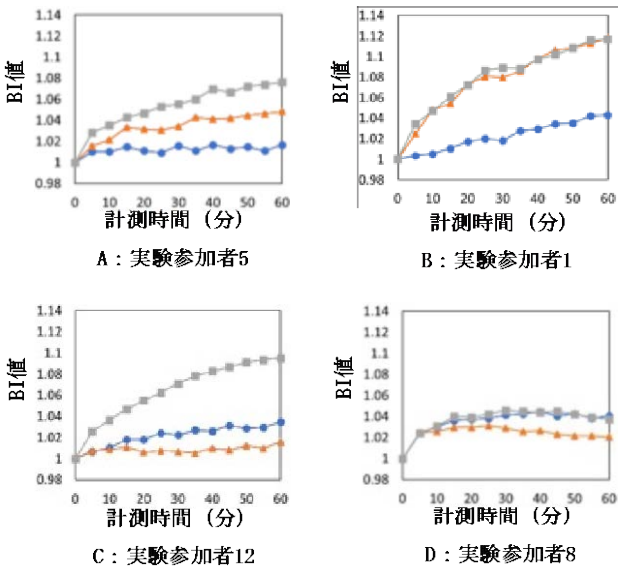


図 2　実験参加者のむくみとパターン分け
（● : P_L　▲ : P_M　■ : P_H）

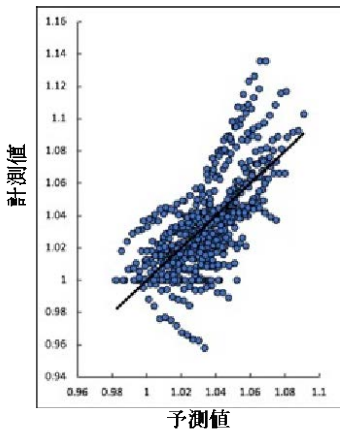


図 3　計測値と予測値の関係性

TOPへ戻る

計が可能となる.

８．今後の計画

今後は，予備実験で計測したデータや追加実験により，構築した予測式の精度検証を行う予定である．また，取得したデータを詳細解析することで，むくみ発生の個人差要因を考察する.

さらに,共同研究先と技術開発している「オフィス作業中の座位姿勢のモニタリングシステム」に本研究で得られた予測式を組み込み，着座者に対して作業姿勢に関するフィードバックを行うことで，行動変容を促し，長時間快適で疲れない作業姿勢を実現出来るか，検証を行う予定である.

９．学会,論文等投稿・発表状況

学会発表

(1) 和田直也，平尾章成，オフィスチェアにおける足のむくみの時系列変化のモデル化，日本人間工学会関東支部第 53 回大会第 29 回卒業研究発表会，2023.12.2，東京，日本人間工学会関東支部第 53 回大会講演論文集，pp.104-105，2023.

(2) 和田直也，平尾章成，オフィスチェアにおける足のむくみの時系列変化のモデル化，日本人間学会第 65 回大会にて発表予定(2024 年 6 月 22-23 日，千歳にて開催)

(3) Kajitani，F.，Kato，K.，Hirao，A.，Construction of Prediction Equations for Lower Leg Swelling in the Driving Posture，22nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA2024) にて発表予定(2024年8月25～29日，Jeju，Koreaにて開催)

論文投稿

(1)発表リスト(2)をベースに，人間工学(日本人間工学会誌)に論文投稿を検討中.

(2)発表リスト(3)をベースに，Applied Sciences に論文投稿予定.

参考文献

1) Uchida，H.，Kato，T.，Nishimura，H.，Hirao，A.，Development of sitting behavior modification system using an infrared depth camera，International Comfort Congress 2023，2023.9.7，Amberg，Germany，Proceedings of the 4th International Comfort Congress，pp. 50-54，2023.

2) Hirao，A.，Uchida，H.，Kato，T.，Analysis of musculoskeletal loads during prolonged sitting in the desk work，The 8th International Digital Human Modeling Symposium，2023.9.4，Antwerp，Netherlands，In: Scataglini，S. et al. (eds)，Advances in Digital Human Modeling. Proceedings of the 8th International Digital Human Modeling Symposium，Lecture Notes in Networks and Systems，Vol.744，pp. 258-265，2023.

3) Hirao，A.，Kato，K.，Kitazaki，S.，Yamazaki，N.，Evaluations of physical fatigue during long-term driving with a new driving posture，SAE Transactions Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems，V116-6，pp.69-76，2008.

4) 梶谷風翔，加藤健郎，平尾章成，運転姿勢における大腿部圧力と下腿浮腫の関係性の分析，日本設計工学会2023年度春季大会研究発表講演会講演論文集（Web），pp. 97-98，2023.

5) Kajitani，F.，Kato，T.，Hirao，A.，Analysis of the relationship between thigh pressure and lower leg swelling in the driving posture，International Comfort Congress 2023，2023.9.7，Amberg，Germany，Proceedings of the 4th International Comfort Congress，pp. 186-190，2023.

TOPへ戻る

オンライン・メタバース弔い調査研究開発

デザイン工学科　　瓜 生 大 輔

１．序論

本研究では、葬儀、追悼・慰霊、死者供養、家内・先祖祭祀など、弔いの文脈における調査・デザイン・技術開発に取り組んだ。研究代表者は、これまでにも死者を懐古・追悼するためのデジタルメディア研究開発や、遠隔葬儀中継、インターネット上での弔いに関する研究を行ってきており、本研究もその延長上に位置する。

コロナ禍を契機に、葬儀、法要、家庭内での死者供養などの弔いのコンテキストにおいてもオンライン、バーチャルコミュニケーション関連技術への期待が高まった。そして、直近の動向としては､生成系 AI 技術を用いて死者を「再現」しグリーフケアに応用する研究が国際会議で発表されるなど､AI 故人、バーチャル故人といった概念が一般にも知られるようになってきている。

本研究では、特にオンライン・メタバース空間、バーチャル空間における弔いに特化して国内外の最新技術･事例調査に取り組んだ。

本研究の特色は､HCI（ヒューマン・コンピューター・インタラクション）研究における最新技術・事例に関する知見と、人文学的葬送供養研究の知見を横断する点にある。具体的には、宗教学、社会学、民俗学、文化人類学研究で取り上げられる、社会的なニーズに応える具体的なデザイン提案に結実させることを目的とする。

今日、デジタル技術の葬送供養への応用に関する研究は、欧州、オーストラリアなどを中心に盛んとなっており、分野横断型研究としての創意工夫が求められる研究課題となっている。本研究は、ここにデザイン工学の視点を加えることで、基礎研究としての成果のみならず実社会への具体的な貢献を想定した実践的・応用的な成果創出を見据えている。

２．当初研究計画

6 月-9 月

- HCI デザイン研究の最高峰国際会議である ACM CHI、DIS などの掲載論文や、『Death Studies』『Mortality』などの人文科学系ジャーナルなどの関連研究サーベイを進め､近年の研究動向を把握する。
- 2000 年代前半から行政主導でオンラインメモリアル導入・整備を進めている台湾の実地調査・ヒアリングを行う。

10-12 月

- 関連研究サーベイを進める。
- 台湾の調査・ヒアリングを行う。航空券価格などの動向を考慮しつつ、オンライン・インタビューを併用する。
- オンラインメモリアルのデザイン要求仕様策定に着手する。

1-3 月

- 関連研究サーベイを進める。サーベイをもとにした論文執筆に着手する。
- 台湾の調査・ヒアリングを継続する。航空券価格などの動向を考慮しつつ、オンライン・インタビューを併用する。台湾企業関係者へのアプローチも進める。

TOPへ戻る

• オンラインメモリアルのデザイン要求仕様案をもとに、商業的実施を見据え、日本国内企業関係者と議論を進める。
• 成果報告書を執筆する。

３．計画の進行状況

台湾・台北市のオンラインメモリアルに関する実地調査をはじめとし、オンライン、バーチャル環境における弔いのデザインに関わる最新動向の調査を進めることができた。それとともに、バーチャル故人に関わる関連研究サーベイも進め、今後の日本マーケット向けのオンラインメモリアルの方向性を議論する論文執筆を行うことができた。以下、成果の概要を述べる。

3.1 台北市のオンラインメモリアル「生命追思網」調査

「生命追思網」は、2003 年に台北市葬儀管理局によって立ち上げられたオンラインメモリアルサイトである。当初の目的は、「公営墓地に眠る故人の遺族が、オンラインプラットフォームを通じて故人を偲ぶことができるようにすること」であった。本サービスは、現代のテクノロジーを利用して、人々が清明節などの特定の時期を待たずに、いつでも故人を追憶できるようにすることを目的としている。

時が経つにつれ、本サービスは多様なニーズに対応できるように改善された。2012 年には SNS 的な機能が追加され、ウェブサイトの操作や更新が簡単になった。個人の追悼ページで写真やテキストを共有できることに加え、管理者専用エリアが設けられ、プライバシーの保護にも配慮がなされた。2020 年には、新型コロナウイルスの流行にともない再び改良された。異なるデバイスから本サービスにアクセスできるようになった他、単一のアカウントで複数の故人を追悼できるようになった。

利用者からの声としては、ご息女を亡くした母親から「亡くなった娘に毎日日記のメッセージを書き、追悼の気持ちを伝えた」というものがあった。「このような声からも、本サービスは、故人専用の追悼サイトを作成するためのプラットフォームを提供するものであり、文章記述や写真を通じて、故人の手記や故人の人生哲学を浮かび上がらせるものである」と蔡氏は話した。

また、「現在も、ネット参拝のために埋葬地の実写写真を取り込む機能がある。今後、Google ストリートビューを活用し、参拝者が自由に埋葬地を歩き、あたかも本当に墓参りしているようにシミュレーションし、参拝時の儀式感を高めていく」という話があった。2024 年 3 月時点で、同機能はすでに実装されている。

3.2 樹木葬墓地「落羽之丘」（台湾台北市）調査

臺北市殯葬管理處へのインタビューの後、2023 年 8 月に台北市営の樹木葬墓地「落羽之丘」（図 1）への訪問調査を行った。落羽之丘は台北市街から車で 15 分ほどの場所に位置する「多層型」の樹木葬墓地である[1]。図 1 左のように、2023 年 8 月時点で 21 の埋葬区画が設けられている。どの区画に埋葬したいかは選択できるが、埋葬地点はその時点での埋葬箇所（図 2 左）となり、任意に指定はできない。多層型であるため埋葬地点は特定しないことが原理原則ではあるが、多くの遺族が埋葬時にその場所を写真で記録するため、図 2 右のように献花に訪れることができる。献花以外の供物を置くことは認められておらず、供えられた花は毎日 14 時に職員により撤去されるルールで運用されている。

[1] 一定期間経過すると、既に他の故人が埋葬されている地点の上からさらに埋葬するシステムであることから多層型と表記した。

TOPへ戻る

図 1 落羽之丘（左：区画図、右：第 1 区画の「問梅園」）

図 2 左:赤いマルが現在の埋葬場所の目印、右：遺族による埋葬地点への献花

3.3 自然葬とオンラインメモリアルの普及推進に関する考察

生命追思網が設立された 2000 年代前半は、台湾政府があらゆる行政サービスのデジタル化を進めていた時期であり、当初はほとんど認知されていなかったという。しかし、ここ 10 年の間に、台北市は落羽之丘などの樹木葬墓地や海洋散骨といった自然葬の普及・促進を開始した[2]。（参る場所がなくなるあるいは制限される）自然葬の普及と（コロナ禍による外出制限により）物理的な墓参りを控える動きが重なり、結果として、オンラインメモリアルの必要性が高まった。そのような経緯からも、市としては、今後もオンラインメモリアル（上での墓参り機能）の拡充を推進したい思惑がある。

新型コロナウイルス感染症が流行した 2020 年は、それまで 2～3 万人/年だったサービス利用者数が一時的に 15 万人に増大し、同サービスの改良・機能拡充の追い風となった。これまでは非常に限られた予算の中、細々と運営されてきた印象だったが、今後、社会的な要請が強まり、発展著しい台湾の IT 産業とも結びつけば、飛躍的な発展を見せることも考えられる。行政自らが、遺骨を維持しない自然葬を推進し、その代わりにオンラインメモリアルの普及を図っている事例として、今後の葬送墓制のあり方を考えるうえでも参考となる。

3.4 バーチャル故人に関わる関連研究

2007 年、Facebook は故人のアカウントについての制度を作った。これは Memorialized Accounts（追悼アカウント）と呼ばれ、利用者の死後、友達や家族が「集う場所」として残せるシステムだ。さらに 2015 年には、万が一の事態に備え、自分の死後、アカウントの管理を委託できる Legacy Contact（追悼アカウント管理人）を指定できるようになった。

米国の大手葬祭関係企業ディグニティー・メモリアル（Dignity Memorial）は、墓地の契約者向けに専用のオンラインメモリアルサービスを提供している。また近年、米国内での存在感を増しているのが「終活」に特化したオンラインサービス「cake」である。人生を終えるにあたってのプランニングや死後の身辺整理に関する情報整理の手助けをコンセプトとする。

SNS 上での追悼が徐々に認知されるようになってきた今日、新技術として脚光を浴びているのが、AI（Artificial Intelligence、人工知能）と VR（Virtual Reality、バーチャル・リアリティ）である。2020 年に韓国のテレビ局 MBC が放送したテレビ番組では、幼い娘を亡くした母親を主人公とし、AI と VR 技術を駆使して故人（娘）を蘇らせ、番組内で「対面」する様子が放送された。韓国国内で大きな反響を呼んだほか、英語の字幕付の動画が YouTube 上で公開され、その是非をめぐり世界的な議論を呼んだ。

コロナ禍を契機に VR 世界、メタバース世界への注目が集まった。それをお別れ会実施サービスに応用したのが、散骨事業で有名なハ

[2] これらの公共の自然葬サービスはすべて無料で提供されている。

TOPへ戻る

ウスボートクラブ運営の「Story」が提供する「VR お別れ会」である。ホテルの宴会場などの対面会場に加え、VR 空間上にもお別れ会会場がつくられる。対面参加者、VR（オンライン）参加者がともに列席できる「ハイブリッドイベント」が実施できる。イベント中、VR 参加者は故人や会場へのメッセージや、故人にまつわる写真などをリアルタイムに投稿することができ、内容を参加者全員に共有できる。準備の時間が十分に確保できない葬儀(通夜、告別式）の場では、現在のところ、ここまで手の込んだサービスを実施するには課題が多い。だが、今後の技術開発次第では遠隔・対面の「ハイブリッド葬」が当たり前になるかもしれない。

そして、2022 年以降、世界中から脚光を浴びることとなった生成 AI 技術も、弔い、家内祭祀に影響を与えはじめている。2023 年 4 月、故人の AI チャットボット(スマートフォンアプリ上で故人とチャットできる AI エージェント）を用いた遺族のグリーフケアに関する論文が発表された。英国の研究者アンナ・シグコウ（Anna Xygkou）らにより執筆された論文[3] では、親族、配偶者、婚約者、友人などを亡くした 10 名がチャットボットとして蘇った故人と「共生」した際のエピソードが生々しく報告された。これまでに発表された多くの先行研究が「『AI 故人』への依存症」は遺族が社会復帰する妨げになるためグリーフケアには不向きであると主張していたのに対し、本研究は具体的な事例から「AI で再現された故人」が、死別による深い悲しみに暮れる人が社会復帰に向かう移行期間を支える可能性を示唆した。

[3] Anna Xygkou, Panote Siriaraya, Alexandra Covaci, Holly Gwen Prigerson, Robert Neimeyer, Chee Siang Ang, and Wan-Jou She. 2023. “The “conversation” About Loss: Understanding How Chatbot Technology Was Used in Supporting People in Grief.” *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’ 23)*, Article 646.

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

関連研究サーベイをもとに、台湾以外の事例調査・実地調査も行う。複数の民間企業がサービスを提供している米国などが視野に入る。

実施協力企業と共にオンラインメモリアルのプロトタイプを制作し、ユーザー・エクスペリエンス調査を実施する。状況に応じて共同研究契約を締結し、産学共同で実運用を基盤とした研究成果創出を目指す。

本研究に関連する論文投稿・発表状況

瓜生 大輔, 「AI 時代の故人情報デザイン」, 特集:高齢多死社会と終活, 『都市問題』, 第 114 巻 第 8 号, pp.35-39, 2023 年 8 月 1 日, 後藤・安田東京都市研究所 (2023).

Jieun Kim, Daisuke Uriu, Giulia Barbareschi, Youichi Kamiyama, and Kouta Minamizawa. “Maintaining Continuing Bonds in Bereavement: A Participatory Design Process of Be.side.” In P*roceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI ’ 24 Full Paper).

瓜生 大輔,「地方都市の納骨堂に見られる新たなデジタル情報技術導入手法」,『論文集 : 冠婚編・葬祭編』, 冠婚葬祭総合研究所, pp. 72-80 (2023).

以下投稿中論文

瓜生大輔「21 世紀の両墓制：納骨堂へのデジタル技術導入にともなう埋葬形態と祭祀対象の変化」『冠婚葬祭総合文化研究所論文集』

瓜生大輔「家内・家外における死者祭祀の連携・統合―祭祀手法の多様化とデジタル技術導入動向―」『国立歴史民俗博物館研究報告』

TOPへ戻る

完全閉鎖型モバイル細胞培養デバイスによるウイルス活性検査法

機械工学科　　二井　信行

共同研究者
東海大学医学部基盤診療学系　浅井　さとみ

１．序論

2019年から発生した新型コロナウイルス感染症(COVID-19)は現在まで世界中に社会的な影響を与えている．感染症の脅威はCOVID-19のみならず，近い将来新たなウイルス感染症が発生し，大流行することが予想される．特に季節性の新型インフルエンザは過去に 10年から40年の周期で流行し、世界中で健康被害と社会的影響を与えている．特に，COVID-19において実際に生じたように，大量に発生した患者が隔離され続けることで病床ひっ迫し，医療活動全体が危機に陥る懸念がある．

インフルエンザ感染が疑われる患者は，医療機関などでPCR検査や抗原検査を受けることが主流である．本検査方法は検査精度が高く，迅速に結果を取得できることから世界中で採用されている．その一方，従来の検査方法ではウイルスの有無を直接的に評価するため，活性（感染能）を失ったウイルスも検出する．そのため，症状改善後の感染力のない状態でも検査で陽性となる可能性がある．感染リスクのない患者が不必要に隔離され続けると患者の隔離期間が延長され，病床ひっ迫の原因となる．

従来，ウイルスの活性評価には細胞培養による検査が必要とされてきたが，PCR 検査などと比較して費用が高く，操作が煩雑で結果が判明するまでの期間が長いことから，一般的な医療機関では感染症の検査に採用されていない．そこで我々は，簡便で取り扱いやすいモバイル細胞培養デバイスを開発し，生きた細胞にウイルスを含んだ検体を導入することでウイルスの増殖能を評価することを目指す．

２．研究計画

2.1 細胞培養デバイスの設計試作

図１に示す細胞培養デバイスを製作した．デバイスは，MASコートスライドグラス（松浪硝子工業）　とPMMA製リザーバ（金森産業）を接着した構造である．

PMMA製リザーバは射出成型で製作し，内部の液体漏れや外部からの衝撃に耐えうる設計にした．培地pH維持のためにガス透過性なシリコーンゴム（扶桑ゴム産業）を1 辺20 mmの正方形状に切り出し，リザーバにシリコーン接着剤(KE-42，信越化学工業)で接着した．また，右側のフェノール性樹脂キャップに切削加工を行い，スリットセプタム付メスルアーポートであるプラネクタ®（JMS）を溶剤接着（アクリサンデー接着剤）した．MASコートスライドグラスと PMMA リザーバはシリコーン接着剤で接着した．

細胞培養前に左側の導入口から予め重炭酸

TOPへ戻る

緩衝液を 2.5 mL 導入した．また，検査現場からラボ間において安定した輸送をすること，安全な液体の取り回しを目的として，内部のウイルス等を封じ込めた状態を保ちつつ検体の導入及び培地の抽出を行うために，プラネクタ®などのスリットセプタムポートをフタに結合し，そのポートからシリンジを用いて培地や細胞，インフルエンザウイルス培養液を導入できるようにした．

2.2 細胞培養及びウイルス導入

細胞培養デバイスでインフルエンザウイルスの増殖能を評価するためには，ウイルスの分離と増殖をすることが必須である．そのため，バイオセーフティーレベル 2（BSL-2）以上の感染対策が実施できる共同研究先の東海大学医学部基盤診療学系臨床検査学の実験室で評価した．イヌ腎臓尿細管上皮細胞由来 MDCK 細胞をウイルス培養用培地と懸濁して導入した．デバイスは 37 ℃を維持したホットプレート（上越電子工業）上で静置した．細胞培養 1 d 後に，ウイルス培養用培地で 200 倍希釈したインフルエンザウイルス保存液（A/cal/04/2009，8.5×10^4 PFU/mL）100 µL を導入した．ウイルス接種から 2 d・3 d・4 d 後に培地上清サンプルをシリンジで採取し，回収したサンプルは使用するまで冷凍保存した．

2.3 検証事項

インフルエンザウイルスがデバイス内で細胞に感染し，細胞内で増殖することを確認するために，不活化したウイルス保存液と比較して評価した．不活化は 70 %エタノール希釈と 70 ℃・5 min の熱処理の 2 種類で実施した．ウイルスの遺伝子を壊すことなく増殖能が消失することを RT-PCR 法で確認した．また，培地上清サンプルのウイルス検出量と接種経過時間の関係を考察し，増殖能の評価に必要な培養期間を評価する．

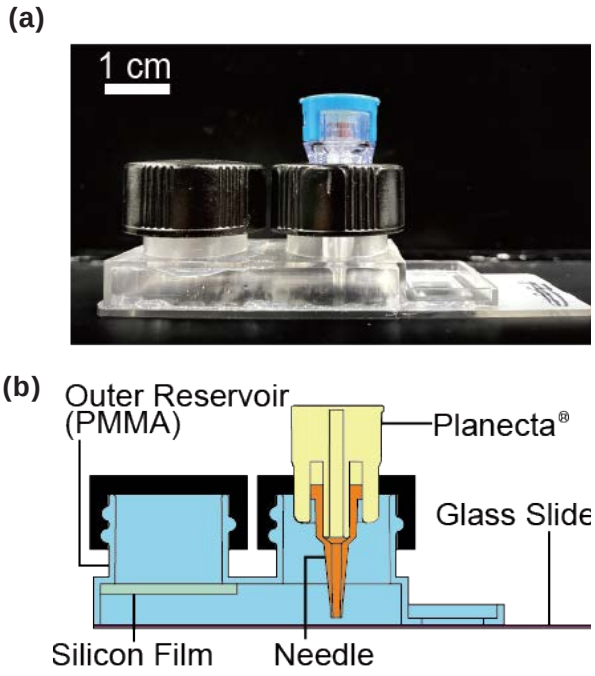


図 1 モバイル胞培養デバイス．(a)外観写真．2 このねじ口のうち左側から重炭酸緩衝液、右側から細胞懸濁培地，ウイルス培養液を導入した．右側の導入口のキャップにはプラネクタ®が装着されている．
(b)デバイスの概略図．スライドガラスの上面に細胞とウイルスを共培養した．

2.4 デバイス中ウイルスの増殖能評価

ウイルス導入 1 d 後と 4d 後に，倒立位相差顕微鏡（OLYMPUS，CKX53）で細胞の位相差像を取得した．位相差像から，細胞の接着性・ウイルス感染による細胞変性効果を観察した．

回収した培地上清サンプルはリアルタイム PCR（LightCycler 480，ロシュ）で検体中のウイルス量を定量的に評価した．リアルタイム PCR ではサンプルに酵素等を懸濁して，温度の上げ下げを繰り返すことで，ウイルスの中にある遺伝子を増加させて，Cq 値（Threshold Cycle）を測定する．Cq 値は遺伝子が検出されるまでの温度の上下サイクル数で，Cq 値が低いほどサンプルに含まれる遺伝子数が多く，ウイルスが多く含まれることを示す．

TOPへ戻る

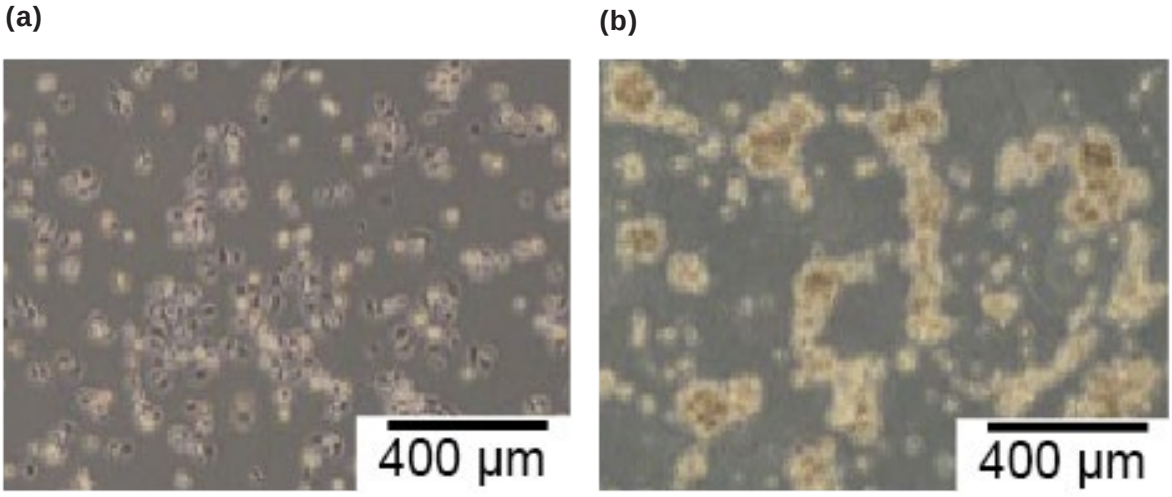


図 2 モバイル細胞培養デバイス内で培養した MDCK 細胞の位相差顕微鏡像 (a)播種 1 d 後 (b)4 d 後, (a)では接着細胞が多く確認できたが, (b)では死細胞が増加して生存率が減少した.

抗原検査キット（IMMUNO AG, FUJIFILM）は接種 3 d 後と 7 d 後のサンプルに使用して，ウイルス検出の定性評価をした．ウイルス接種時のウイルス保存液では，抗原検査キットの検査結果が陰性になることを確認した.

3．計画の進行状況

3.1 モバイル細胞培養

デバイスに播種した MDCK 細胞の位相差像を図 2 に示す．ウイルス接種前の(a)播種 1 d 後では細胞がスライドグラスに接着していて，細胞培養に適した環境であると考えられる．ウイルス接種後の(b)播種 4 d 後では，細胞が接着面から剥がれて状態が悪いことが確認された．ウイルスに感染したことに加え，培地を交換していないことから長期間の培養をすると，細胞の状態が悪くなると考えられる.

3.2 培地上清サンプルのウイルス量評価

サンプルを PCR 分析し，取得された Cq 値と接種時間の関係を図 3 に示す．通常のウイルスを接種したデバイスにおいて，培地上清サンプルからインフルエンザウイルスの遺伝子が検出され，抗原検査で陽性になった．特に Device A・Device D・Device E では接種 3 d 以降，多くの遺伝子が継続的に確認された．それ以外のデバイスは，接種 2 d でウイルス遺伝子数の検出がピークを迎え，その後ほとんど検出されなかった.

接種したウイルスはデバイス内の細胞に感染し感染能のあるウイルスが増殖したことで，接種 2 d 後以降にウイルスが検出されたと考えられる．接種 2 d 以降はウイルス量が大きく増加しなかったことは，図 2 に示す顕微鏡で取得した位相差像からわかるように，接種 4 d 後には細胞の状態が悪くなることが原因と考えられる.

続いて，ウイルス接種前にエタノール希釈・熱処理をした各サンプルが RT-PCR 法により，ターゲット遺伝子を検出することを確認した．不活化した各サンプルと PBS 希釈したサンプルを同濃度のウイルス量で細胞播種したデバイスに接種した．図 4 に示すように，不活化しなかったデバイスではウイルスの遺伝子が微量だが検出された．接種 2 d から 4 d まで緩やかに検出されるウイルス量が増えた．不活化したウイルス液を接種したデバイスでは遺伝子が検出されなかった.

TOPへ戻る

本実験の不活化処理プロトコルでは，ウイルスの遺伝子をすべて破壊することなく RT-PCR 法でターゲット遺伝子を検出することができると考えられる．また細胞の状態が悪い条件下だったが，増殖能のあるウイルス液をデバイスに接種し細胞に感染させることにより，ウイルスがデバイス内で増殖したといえる．それに対し，不活化したサンプルでは接種したウイルス液の活性がないと考えられるので，増殖することなく培地で希釈された培地上清サンプルではウイルスを検出することはできなかったと考えられる．

本結果より，設計したデバイスでは培地上清サンプルを接種 3，4 d 後に取得しリアルタイム PCR で分析することで感染能があることを評価できる．抗原検査の結果からも，ウイルスがデバイス内で細胞に感染し，ウイルスが増殖したといえる．

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

インフルエンザウイルスの増殖能評価のためにモバイル細胞培養デバイスを制作し，細胞培養及びウイルス感染，増殖能評価をした．本研究は接種時に陰性だった検体の増殖能を評価し，感染性の有無を評価可能で，開発したデバイス内で簡便に培養検査が可能なことを示した．

今後は複数のデバイスで同時に培養を実施し，感染能の評価性能を検証したい．さらにデバイスの改良をすることでウイルス収量を増加させて，インフルエンザウイルスの増殖能評価の正確性を高める手法を確立する必要がある

本研究の成果は，第 98 回日本感染症学会学術講演会／第 72 回日本化学療法学会総会にて発表予定である．

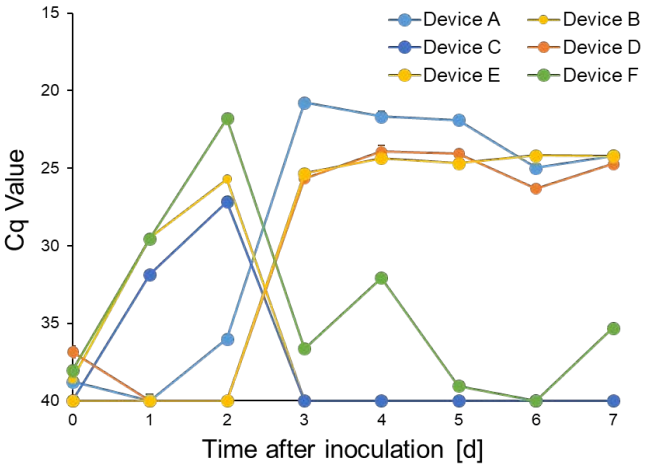


図 3 培地上清の RT-PCR 分析と接種経過時間の関係．培地上清サンプルはデバイスからシリンジで回収後に 1 度冷凍保存され，解凍後リアルタイム PCR 装置により定量的にインフルエンザウイルス量(Cq 値で示され、比較を容易にするために反転)を評価した．

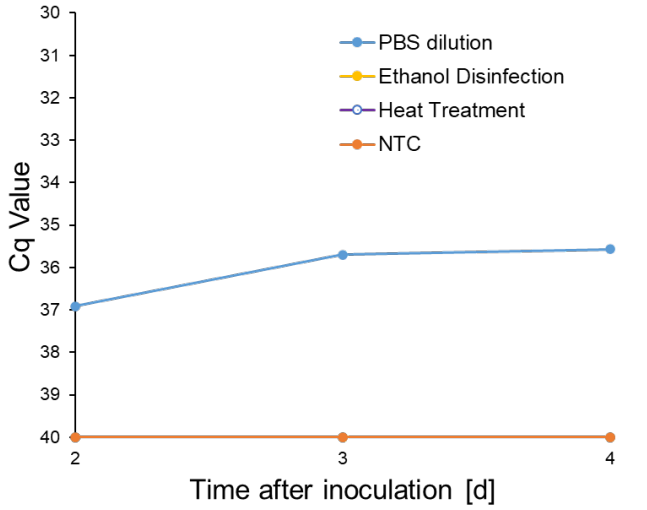


図 4 培地上清の RT-PCR RT-PCR 法による評価で得られた不活化の有無による Cq 値の変化と接種時間の関係．
不活化処理をしない培地上清サンプルでは遺伝子が検出されたが，不活化した培地上清サンプルでは遺伝子が検出されなかった．

TOPへ戻る

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

機械機能工学科　　細矢　直基

１．緒　　論

農業従事者は果物の熟度を大きさ,色,形,香りなどの様々な指標により評価し，収穫している．熟度は酸度や糖度，硬さなどと相関があることが知られており，それらも販売する基準を決定するための指標として用いられている[1]．これらの指標を評価する方法は，光学的手法や生化学的手法，機械的手法に分類できる．しかし，糖度や酸度が変化しない果物などにはこれらの光学的，生化学的手法による熟度の評価を行うことができないため[2]，果物の硬さを用いて熟度を評価する機械的手法が研究されている[3, 4].

硬さを計測する方法としてはペネトロメーターを用いるような破壊試験や音響振動法などのような非破壊試験が挙げられる[5,6]．ペネトロメーターによる標準的な硬度評価は，果物に器具を直接貫入し計測する破壊試験であるため，検査した果物の商品価値がなくなるため，全数検査はできない．音響振動法による計測は硬い加振器を果物に取り付け，その振動特性を計測する．この方法では果皮に硬いケーシングのロードセルや加振棒を取り付けるため,無傷で加振させることは難しい.他の手法としては，レーザー加振法が挙げられる．レーザー誘起プラズマ(Laser Induced Plasma: LIP)により生成された衝撃波を用いることで，りんごやマンゴーの硬さを評価した[7]．しかし，高出力パルスレーザーは可搬性が悪く,果樹園における熟度評価は難しい.

果物に無傷で接触し加振することができるデバイスとして，誘電エラストマーアクチュエータ(Dielectric Elastomer Actuator: DEA)があり，これは軽量かつ柔軟で，応答速度が速いなどの特徴を持つソフトアクチュエータである[8, 9]. DEA は様々な用途に使用されている．例えば，スピーカー[10]，ソフトグリッパー[11]，振動制御[12]，フレキシブルモーターなどが検討されている．また，近年の研究では DEA を用いた振動実験による果物の熟度評価が検討されている. DEA は曲面の果物に直接，接触し加振力を作用させることができる. Hiruta らは DEA を用いて果物の振動実験を行い, DEA は果物の加振に有効であることを明らかにした[13]．しかし，この方法では接着剤やテープなどで DEA を直接果物に貼り付ける必要があるため, DEA を剥がす際,果物を損傷させたり，商品価値を失わせたりすることがある.

本研究では，果物への接着を不要としたウェアラブル DEA を検討し，これを直接接触させることで果物を加振する．そして，そのときの振動応答を計測することで，果物の熟度を評価する.

２．ウェアラブル DEA

図 1 に DEA の駆動原理を示す．DEA は，柔軟な誘電膜を柔軟電極で挟み込むキャパシタ構造となっている. DEA の柔軟電極に電圧を印加することで電極間に静電気力が働き，

TOPへ戻る

厚み方向に収縮し，面内方向に伸長する．この時発生する応力は式(1)のように表される．

$$p = \varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (1)$$

ここで，p は発生応力[Pa]，ε_r は誘電膜の比誘電率 [-]，ε_0 は真空の誘電率[F/m]，V は印加電圧[V]，d は電極間の距離[m]をそれぞれ表している．

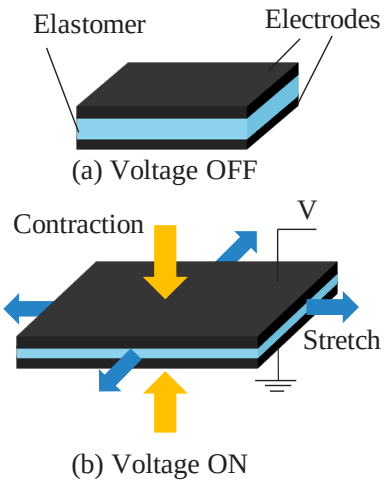


図 1　DEA の駆動原理

図 2 に，実験システムの概略図を示す．評価対象の果物のとして，りんごを用いた．シリコーンゴムを用いてウェアラブル DEA を製作し，指を模擬して製作したシリコーンゴムに装着した．指でウェアラブル DEA を果物に押しつけている状況を再現するために，ゴムバンドを用いた．押しつける力のばらつきを無くするために，ロードセルを用いた．

りんごの硬さは，りんごを加振させた際の応答を計測し，応答のフーリエスペクトルから固有振動数を求めることで評価した．また，比較のため，同様の加振点に対して，機械構造物の振動試験に用いているインパルスハンマーによる加振も行った（図 2 下）．

図 3 に，りんごの赤道上に設定した加振点と計測点を示す．図 3 に示すように，りんごの赤道上に等間隔（30 度毎）に 12 点設定した．加振点 2 から 12 までを順次加振した際の応答を，計測点 1 に取り付けた加速度センサで計測した．正弦波掃引信号によりを入力することでウェアラブル DEA を駆動し，りんごを加振した．本実験では，貯蔵期間の増加による固有振動数の変化を把握するため，計測回数は，計測初日を 0 日とし，10 日，30 日の 3 とした．

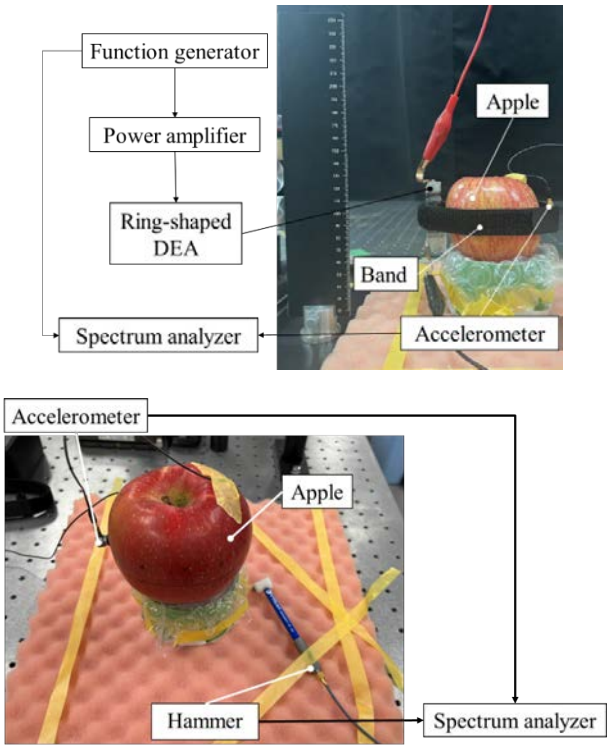


図 2　振動試験による果物の硬さ評価（上：ウェアラブル DEA による振動試験，下：インパルスハンマーによる振動試験）

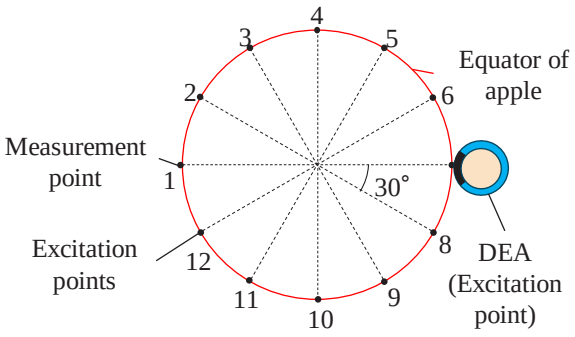


図 3　りんごの加振点と計測点

3．ウェアラブル DEA によるりんごの硬さ評価

TOPへ戻る

図 4 に，ウェアラブル DEA によりりんごの点 7 を加振し，点 1 に取り付けた加速度センサで計測した振動応答を示す．図 4 においては，同様の加振点をインパルスハンマーで加振した際の応答も比較のため重ねて示している．図 4 を見ると，ウェアラブル DEA およびインパルスハンマーにより得られたりんごのフーリエスペクトルにおいては，いくつかのピークが見られ，これらは共によく一致していることがわかる．これらのピークは，りんごの固有振動数であると推察される．また，図 4 を見ると，フーリエスペクトルの振幅の大きさは，インパルスハンマー加振に比べ，1/1000 程度小さくなっていることがわかる．これは，ウェアラブル DEA による加振力が非常に小さく，りんごに大きな損傷を与える恐れが少ないことを意味する．一般的に，果物の熟度と硬さは相関があり，その硬さは果物の赤道における 0S2 固有モード振動数との相関がある．次に，実験モード解析を行うことで，ウェアラブル DEA およびインパルスハンマーで加振した際のりんごの固有振動モードを調べる．

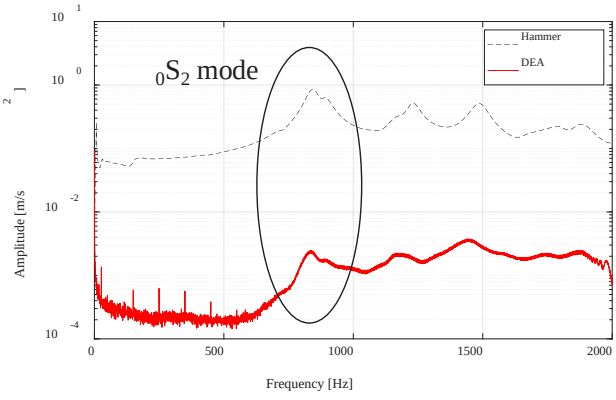


図 4　りんごのフーリエスペクトル（黒破線：インパルスハンマー加振，赤実線：ウェアラブル DEA 加振）

図 5 に，実験モード解析により得られた，りんごの赤道における固有振動モードを示す．図 5 の左は，インパルスハンマー加振，右はウェアラブル DEA 加振により得られた 800 Hz 付近の固有振動モード形をそれぞれ示している．図 5 を見ると，共に楕円形状に変形していることから，0S2 固有振動モード形であることがわかる．これにより，インパルスハンマーよりも加振力の小さいウェアラブル DEA を用いても，0S2 固有振動モードを励起できることがわかる．

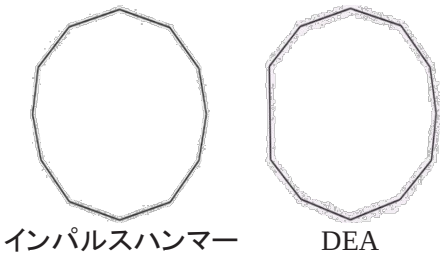


図 5　りんごの赤道における 0S2 固有振動モード形（左：インパルスハンマーによる加振，右：ウェアラブル DEA による加振）．

図 6 に，ウェアラブル DEA で加振した際に計測された，りんごの貯蔵中におけるフーリエスペクトルを示す．図 6 においては，計測初日（Day 0）を黒実線，10 日貯蔵後（Day 10）を赤実線，30 日貯蔵後（Day 30）を青実線でそれぞれ示している．貯蔵期間が長くなるにつれて，0S2 固有モード振動数が低下していることがわかる．これにより，ウェアラブル DEA は，貯蔵時のりんごの硬さ評価を実現できることがわかった．

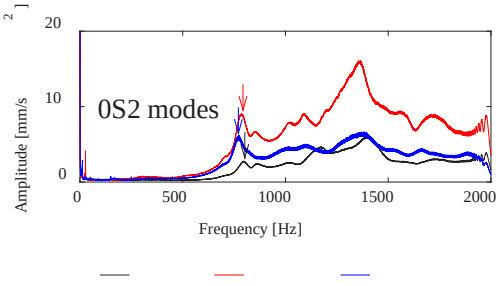


図 6　ウェアラブル DEA を用いた振動試験で得られた，りんごの貯蔵中のフーリエスペクトル（黒実線：計測初日（Day 0），赤実線：

TOPへ戻る

10 日貯蔵後（Day 10），青実線：30 日貯蔵後（Day 30））.

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

2024 年 9 月 3 日から 7 日（仮）で開催される日本機械学会機械力学計測制御部門講演会 Dynamics and Design Conference 2024（D&D2024）にて，本内容を発表する予定である.

文　献

[1] L.S. Magwaza, U.L. Opara, Analytical methods for determination of sugars and sweetness of horticultural products-A review, Scientia Horticulturae 184, 2015, 179–192.

[2] S.Z. Tesfay, I. Bertling, J.P. Bower, D-mannoheptulose and perseitol in ‘Hass’ avocado: metabolism in seed and mesocarp tissue, South African Journal of Botany 79, 2012, 159–165.

[3] S. Landahl, L.A. Terry, Non-destructive discrimination of avocado fruit ripeness using laser Doppler vibrometry, Biosystem Engineering 194, 2020, 251–260.

[4] A. Baltazar, J.I. Aranda, G.A. González-Aguilar, Bayesian classification of ripening stages of tomato fruit using acoustic impact and colorimeter sensor data, Computers and electronics in agriculture 60, 2008, 113–121.

[5] Z. Fathizadeh, M. Aboonajmi, S.R.H. Beygi, Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response, Scientia Horticulturae 262, 2020, 109073.

[6] E. Macrelli, A. Romania, R.P. Paganelli, E. Sangiorgi, M. Tartagni, Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness.Part I: Theory and development of acoustic techniques, Sensors and Actuators A: Physical 201, 2013, 487–496.

[7] N. Arai, M. Miyake, K. Yamamoto, I. Kajiwara, N. Hosoya, Soft mango firmness assessment based on Rayleigh waves generated by a laser-induced plasma shock wave technique, Foods 10(2), 2021, 323

[8] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, J. Joseph, High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%, Science 287, 2000, 836–839.

[9] J. Shintake, V. Cacucciolo, H. Shea, D. Floreano, Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators, Soft Robotics 5(4), 2018, 466–474.

[10] N. Hosoya, S. Baba, S. Maeda, Hemispherical breathing mode speaker using a dielectric elastomer actuator, The Journal of the Acoustical Society of America 138(4), 2015, EL424–EL428.

[11] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, H. Shea, Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators, Advanced Materials 28(2), 2016, 231–238.

[12] T. Hiruta, N. Hosoya, S. Maeda, I. Kajiwara, Experimental validation of vibration control in membrane structures using dielectric elastomer actuators in a vacuum environment, International Journal of Mechanical Sciences 191, 2021, 106049.

[13] T. Hiruta, K. Sasaki, N. Hosoya, S. Maeda, I. Kajiwara, Firmness evaluation of postharvest pear fruit during storage based on a vibration experiment technique using a dielectric elastomer actuator, Postharvest Biology and Technology 182, 2021, 111697.

TOPへ戻る

生体吸収性マグネシウム合金のその場観察によるマイクロスケール腐食現象の解明

機械機能工学科　　吉原　正一郎

共同研究者
芝浦工業大学理工学研究科機械工学専攻　　花山　環

１．はじめに

虚血性心疾患に対するステント治療には，ステンレス鋼など高耐食性を有する金属材料が使用されているが，体内に半永久的に残存するためステント内再狭窄を引き起こす危険性がある．したがって，機械的強度および体内で毒性反応なく吸収される分解性を持ったステント材料が求められている.そこで近年，生体への安全性や分解性が高いマグネシウムが生体吸収性ステント材料として注目されている．しかし，マグネシウムは著しく速い腐食速度からステントに必要な機械的強度を保持できず劣化することが課題となっている．ステントはバルーンへの圧着時や血管内での拡張時に塑性変形を受ける．加えて，移植後には血管の拡張および収縮によって，部分的な圧縮や引張応力を繰返し受ける．これらのひずみや応力に伴いマグネシウムの結晶組織は常に変化することが考えられる．

血管内のステントは循環体液や血液成分などにより大気中と比較して複雑な腐食環境下に晒される．そのため，結晶組織がマグネシウムの腐食速度に及ぼす影響を解明する必要がある．そこで，本研究ではマグネシウムの結晶組織に着目した．生体吸収性ステントの母材となる純マグネシウムを取り上げ，押出加工や熱処理，繰返し応力に伴い変化する結晶粒径や結晶方位が腐食速度に及ぼす影響を調査した．

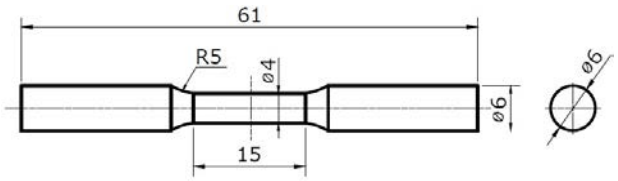


Fig.1 Pure magnesium test material size.

Table1 Tension-compression cyclic stress test conditions.

Stress ratio	-1
Environment	Atmosphere
Frequency[Hz]	20
Number of times	2.0×10^6
Tensile stress[MPa]	10, 20, 30
Compressive stress[MPa]	10, 20, 30

Table2 Test conditions for corrosion immersion test.

Solution	0.9(mass%) NaCl
Corrosive time[h]	24
Corrosive environment	Immersion

２．腐食浸漬試験

２．１供試材

Fig.1 に疲労試験で用いた供試材の寸法を示す．材料には純度 99.9%純マグネシウム熱間押出丸棒材を使用した．直径 6mm の純マグネシウム丸棒材に対して旋盤加工機を用いて

TOPへ戻る

所望の寸法に加工した．その後，耐水研磨紙(粒度：#800，#1000，#2000)の順番で供試材中央部を湿式研磨した．熱処理温度には 513K および 673K を設定した．熱処理の手順は，電気炉内の供試材を所定の温度まで急速に上昇させ，1 時間保持した後炉冷した．熱処理後に，アセトンで 180 秒の超音波洗浄を施した供試材を疲労試験片とした．

２．２引張-圧縮繰返し応力による疲労試験

Table1 に疲労試験条件を示す．疲労試験の種類は引張および圧縮の繰返し応力とした．繰返し応力値を選定するために，マグネシウムの圧縮降伏応力値の約 40%である 40MPa で疲労予備試験を実施した．その結果，熱処理温度 513K および 673K の試験片で破断もしくは試験片にき裂が生じた．そのため，繰返し応力値は 10，20，30MPa を設定した．疲労試験は応力値 3 条件を応力比-1 および 200 万サイクルで行った．

２．３腐食浸漬試験

Table2 に腐食浸漬試験条件を示す．疲労後の試験片中央部を 3 等分に切断し作製した金属片の切断面を耐水研磨紙(#2000)で湿式研磨した．その後，アセトンで 180 秒の超音波洗浄を施し，各金属片の質量を計測した．腐食溶液には血液と同等の塩分濃度を有する 0.9%の塩化ナトリウム水溶液を使用した．試験片は 3 時間ごとに腐食溶液から取り出し，質量を計測した.前述の手順で計 24 時間浸漬させた金属片の質量を再度計測し，浸漬前後の質量から質量損失量を算出し，腐食速度を定量的に評価した.式(1)に質量損失量の算出方法を示す．

$$Mass\ Loss = \frac{W_0 - W}{S} \quad [\mathrm{mg/mm^2}] \quad (1)$$

ここで，W_0 は腐食前の試験片の質量，W は腐食後の試験片の質量，S は腐食前の試験片の表面積である．

２．４結晶組織の観察

EBSD 付属の FE-SEM(日本電子 7100F)を用いて疲労試験後の純マグネシウムの結晶組織を観察した．EBSD 観察用の試料は室温でバフ研磨を施した後，180 秒間化学研磨(エタノール 180mL，リン酸 80mL，グリセリン 50mL)により仕上げた．研磨は試験片の曲面に対して施し，最初に腐食液に触れる表面に対応する方向の方位情報を得た．

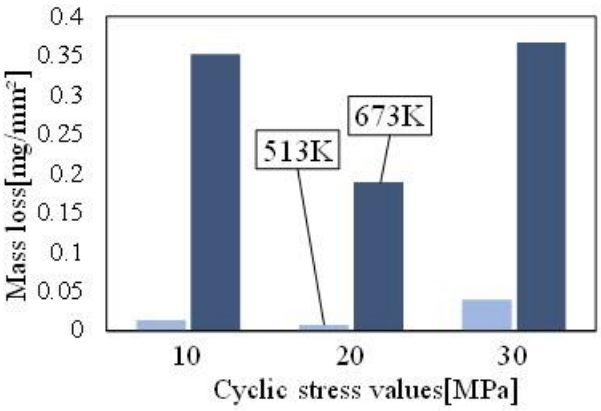


Fig.2 Mass loss of pure magnesium with cyclic stress.

３．実験結果および考察

３．１質量損失量

Fig.2 に繰返し応力を付与した純マグネシウムの質量損失量を示す．熱処理温度 513K では繰返し応力値 10，20MPa で抑制されたが，30MPa では増加した．熱処理温度 673K では繰返し応力値 20MPa において最も抑制されたが，10，30MPa では増加した．熱処理温度で比較すると，いずれの応力においても 513K の質量損失量が大きく抑制された．

３．２疲労試験後の純マグネシウムの結晶粒径

Fig.3 に熱処理温度 513K の繰返し応力値 10MPa(a)，30MPa(b)および熱処理温度 673K の繰返し応力値 20MPa(c)，30MPa(d)における純マグネシウムの Inverse Pole Figure(IPF マップ)を示す．IPF マップの上部は腐食液に晒される表面の結晶粒，下部が表面から深さ約 600μm の結晶粒の様子である．513K および 673K の結晶粒径は粗大粒と微細粒が混在していた．熱処理温度で比較すると，繰返し

TOPへ戻る

応力値 30MPa において 673K の方が 513K よりも粗大な結晶粒径が見られた．これらの結果には，熱処理による材料の状態変化が影響した．513K はマグネシウムの再結晶温度領域内であるため，結晶粒は小径だった一方で，673K は粒成長する高温領域だったことから結晶粒が粗大化したことが考えられる．Fig.2 よりマグネシウムの腐食速度には結晶粒径が影響している．具体的には，結晶粒界が腐食速度を抑制する働きをしたと考えられる [1]．純マグネシウムの腐食反応は次式で表される．

$$Mg+2H_2O=Mg(OH)_2+H_2 \quad (2)$$

$$Mg=Mg^{2+}+2e^- \quad (3)$$

$$2H_2O+2e^-=H^2+2OH^- \quad (4)$$

$$Mg^{2+}+2OH^-=Mg(OH)_2 \quad (5)$$

式(2)は腐食反応全体，式(3)および式(4)はアノード反応，カソード反応，式(5)は化学反応による腐食生成物の生成を示している．上記の式よりマグネシウムの腐食生成物は主に $Mg(OH)_2$ であることが分かる．$Mg(OH)_2$ 膜は，結晶粒界など表面の結晶格子欠陥で最初に生成される．そのため，結晶粒界が多いほど $Mg(OH)_2$ 膜の密度が高くなり，不働態層が生成されやすい．したがって，熱処理温度 513K では表面に位置する結晶粒界が多く，熱処理温度 673K よりも緻密で安定した腐食生成物が生成されたため，耐食性が向上したと考えられる．

３．３疲労試験後の純マグネシウムの結晶方位

Fig.3 より，熱処理温度 513K の繰返し応力値 10MPa および 673K の 20MPa の最初に腐食液に触れる表層は角柱面，錐面が混在していた．一方で，繰返し応力値 30MPa の試験片は(0001)の基底面が多く一部角柱面や錐面が観察された．マグネシウムは HCP 構造であり変形時のすべり系が底面すべりに限定される．繰返し応力値 30MPa では 20MPa より底面すべりが活動したため，基底面が多い結晶粒が見られたと考えられる．Fig.2 より，513K および 673K において繰返し応力値 30MPa の質量損失量が最も増加した．各結晶面は異なる腐食電位を有しており，最も腐食電位が高い結晶面は基底面であるため，角柱面や錐面は基底面より卑の値を示す [2]．腐食電位は耐食性の指標となるため，基底面が他の結晶面よりも耐食性に優れている．Fig.4 に多結晶金属の腐食の概略図を示す．多結晶金属では異なる腐食電位を持つ結晶面が同時に配向している．そのため，隣接する結晶面間に生じる腐食電位差が腐食速度に大きな影響を及ぼす．結晶粒間の腐食電位差が大きいほど，卑の電位を持つ結晶粒の腐食が進行すると考えられる．基底面が多い結晶粒では，腐食電位の高い基底面と角柱面や錐面の間に大きな腐食電位差

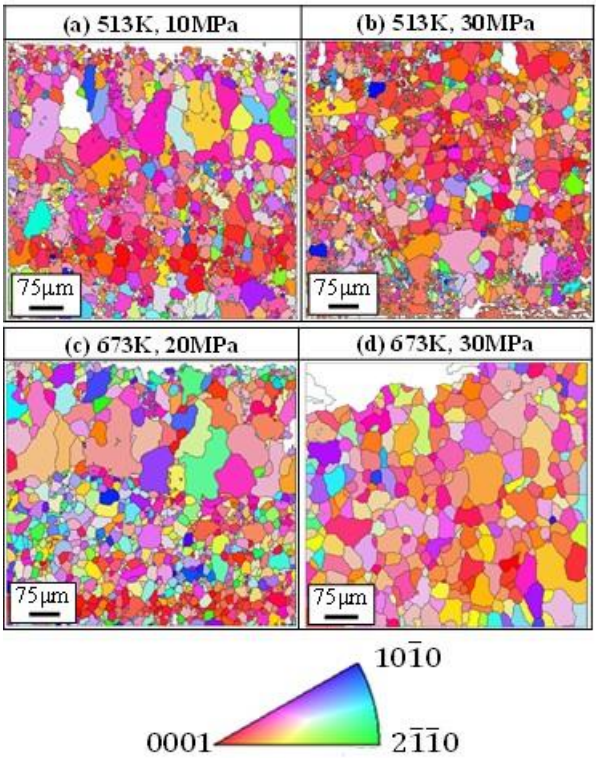


Fig.3 IPF map of pure magnesium with cyclic stress. At 513K with cyclic stress of 10MPa(a), 30MPa(b).At 673K with cyclic stress of 20MPa(c), 30MPa(d).

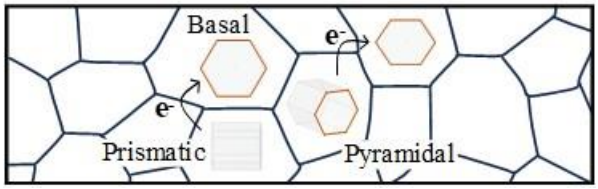


Fig.4 Schematic of corrosion of polycrystalline metals.

TOPへ戻る

が生じるため，角柱面や錐面の結晶粒が優先的に腐食する局部腐食が発生する．一方で，角柱面や錐面が混在した結晶粒間では腐食電位差がほとんど生じないため局部腐食が抑制される．したがって，513K および 673K の試験片は，基底面の配向が多い繰返し応力値 30MPa よりも角柱面や錐面が多い 10MPa もしくは 20MPa の耐食性が向上したことが示唆された．

４．まとめ

本研究では,引張-圧縮繰返し応力を付与した純マグネシウムの腐食浸漬試験を行い，以下の結果を得た．

(1)　熱処理温度 513K では熱処理の再結晶により小径の結晶粒，673K では高温領域により粗大粒が見られた．513K では結晶粒界が腐食伝播の障壁となったため，耐食性は向上したことが考えられる．

(2)　繰返し応力値 30MPa では(0001)の基底面が多く，隣接する結晶面との間に大きな腐食電位差が生じたため局部腐食が進行した．一方で，角柱面や錐面が多い 10MPa や 20MPa では結晶粒間に腐食電位差がほとんど生じないため耐食性が向上したことが示唆された．

５．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

Fig.5 に，なめらかな表面性状を有した純マグネシウム板材に 9%NaCl 溶液を垂らしたその場観察の結果を示す．NaCl 溶液を垂らした瞬間,および 200s 経過した状況の写真であり，気泡は、式(2)に示すように水素である．また,黒い部分は腐食された材料表面である．NaCl 溶液を垂らした瞬間に、気泡の発生位置から腐食の起点を確認することができた．また，黒い部分からも気泡が発生し，腐食の位置，さらに，糸状腐食の進展状況を確認することができる．このように，その場観察によって，腐食の起点や進展の仕方を確認することができた．今後の進め方として，Fig.3 に示すように IPF マップをもとに、どの結晶方位が腐食しやすいか，確認し腐食の進展メカニズムを解明することを目的として研究を進めたい．

これまでの研究成果として，2023 年 11 月にイタリアでの国際会議，IEEE ナノテクノロジー材料･デバイス会議 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, NMDC 2023 において，「Corrosion behavior of pure magnesium on different crystallographic structure」を公表した．今後、ジャーナル、Metals に 2 件の論文，「Influence of stress and annealing conditions on corrosion behavior of pure magnesium」および「Influence of both shear stress in flow and tensile stress by expanding on corrosion state of magnesium alloy mesh tubes」を投稿する．

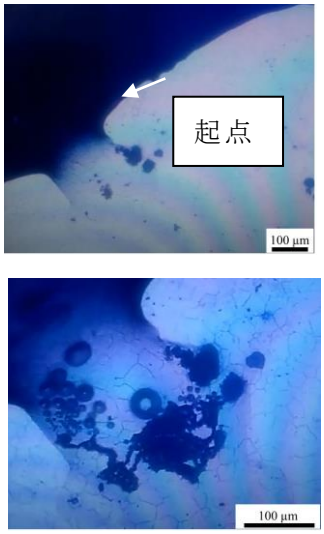


Fig.5 Surface observation of magnesium alloy material dropping NaCl solution.

参考文献

1)　P.M.Kalayeh, M.Malekan, A.Bahmani, M. Lotfpour, S.M.Fatemi and S.B.Zonooz, 927(2022), 166939.

2)　J.Peng, Z.Zhang, C.Longa, H.Chena, Y.Wua, J.Huanga, W.Zhouc and Y.Wu, 827(2020), 154096.

TOPへ戻る

ヘテロエピタキシャル成長技術を用いた非熱平衡状態物質の創製と新規機能の付与

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）

本研究では、Pb(Zr,Ti)O_3(PZT)、MgO、ZnOなどの既知の材料を、テンプレートとなる下地層上にヘテロエピタキシャル成長させることで、熱平衡状態とは異なる（つまり状態図上には存在しない）結晶構造を取らせることで、新しい機能を発現させられることを実証することを目指す。例えば、結晶配向性を自在に制御したり、高靭性を発現させるなどが考えられる。

この宇宙に存在するいかなる固体物質も、熱平衡状態においては固有の結晶構造を有する。例えば単体炭素が常温常圧下で六方晶構造を取り、高温高圧下で立方晶（ダイヤモンド構造）を取るように。しかし、もし熱平衡状態と異なる結晶構造を自在に創り出せれば、従来の熱平衡状態の物質には無かった物性を実現できるはずである。これを本研究にて実証し、材料（構成元素と組成）としては既知でありながら全く異なる物性を有する材料開発の道を切り開くとともに、デバイスの性能限界の打破を目指す。

２．研究計画

ここでは、非熱平衡状態物質として、急冷PZT単結晶薄膜を採用し、それに靭性を付与する技術の開発を行った。近年、微小電気機械システム(MEMS)の新しいトランスデューサ薄膜として､圧電単結晶が注目されている。例えば、正方晶組成のc軸配向Pb(Zr、Ti)O_3(PZT)単結晶薄膜は、高性能な圧電微小超音波トランスデューサを実現できる可能性を有する[1-3]。通常、PZT薄膜は、結晶性を上げるために、高温環境下にて堆積させる。ここで、PZTよりも熱膨張係数の小さな基板に堆積すると、冷却過程で引張応力が発生し、結果としてa軸配向してしまう。申請者らは、成膜後に急冷することでc軸配向性を凍結できることを発見した。これにより、高性能圧電単結晶薄膜を容易に得られるようになった。しかし、この膜にも欠点があることが近年わかってきた。その一つが、単結晶であるがゆえに、機械的に脆いことである。

そこで単結晶・多結晶コンポジット薄膜が提案されている[4]（図１）。これは、単結晶領域を網目状に多結晶体で区画化したものである。単結晶部に発生した亀裂の伝播は、多結晶体によって抑制されることで、膜全体としての脆性の改善が期待される。しかし、先行研究の作製工程は比較的複雑であり、歩留まりが悪いなどの課題がある。そこで本研究では、エピタキシャルバッファ層のウェットエッチングを用いた、より簡便な単結晶・多結晶コンポジットPZT薄膜の作製方法を開発する。

３．計画の進行状況

3.1　バッファ層 $SrRuO_3$(SRO)のエッチング

TOPへ戻る

による PZT の結晶形態の可制御性

通常、適切な条件下でエピタキシャルバッファ層の上に PZT を堆積させると、PZT がエピタキシャル成長し、単結晶 PZT が形成される。逆に言えば、エピタキシャル成長条件を満たさないようにすれば、PZT は多結晶化する。本研究では、バッファ層の最上層である SRO をエッチングして荒すことで、その上に堆積する PZT の多結晶化を狙う。まず、この基礎検討を以下のように実施した。

初めに、PZT のエピタキシャル成長を促すバッファ層を堆積した基板（KRYSTAL® Wafer, I-PEX Piezo Solutions 株式会社）を用意した。次に、0.004M の $NaIO_4$溶液を用いて SRO をエッチングした。エッチング時間を制御することで、SRO の表面粗さを制御した。そして、エッチング処理後の試料に対して、PZT のスパッタ成膜を行った。スパッタ装置は ANELVA 社製の装置を使用し、ターゲットの PZT 系単結晶薄膜には、Mn と Nb をドープした $Pb(Mn_{1/3}, Nb_{2/3})O_3$-$Pb(Zr, Ti)O_3$(PZT)を採用した。スパッタ成膜は通常(未処理)のバッファ層の上では PZT がエピタキシャル成長する条件で行った（表 1）。試料の結晶性は X 線回折(XRD)によって評価した。

各試料の XRD の結果を(図 2)に示す。まず 0 秒のエッチング処理、つまり未処理の試料において、2θ=21.6°付近に着目すると、PZT(001)配向に相当する強いピークがみられる。また、それ以外の PZT 由来のピークが見られないことから、この PZT 薄膜は単結晶が形成されたと思われる。30 秒処理のサンプルに関しても未処理と同じような結果となった。一方、60 秒処理の試料においては、PZT(001)の他に PZT(110)や(111)配向に相当するピークが見られた。つまり、多結晶化となった。また、180 秒処理の試料では、ペロブスカイト相のピークがほとんどみられず、パイロクロア相 PZT(222)、(400)のピークが発生した。したがって、過剰な SRO エッチングを行うと、

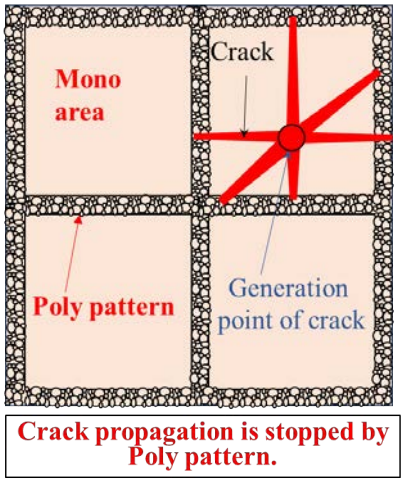


図 1　単結晶・多結晶コンポジット膜の概念図

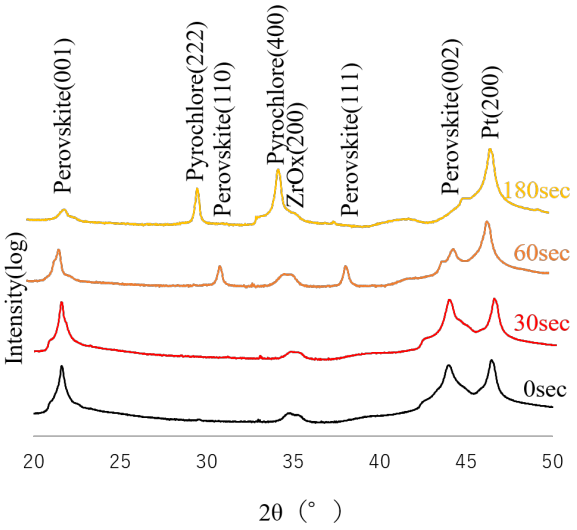


図 2　エッチング時間を変化させた SRO 上に成膜した PZT 薄膜の XRD パターン

表 1　PZT のスパッタ成膜条件

	Pre Sputter	Main Sputter
Target	—	$Pb(Mn_{1/3}, Nb_{2/3})O_3$-$Pb(Zr,Ti)O_3$(PZT)
Deposition pressure [Pa]	0.4	0.4
Ar Flowing [sccm]	5.00	5.00
O_2 Flowing [sccm]	0.09	0.09
Distance between target samples [mm]	50	50
RF power [W]	50	100
Temperature [℃」	600	600
Time [h]	0.5	2.5

パイロクロア相が発生することが示唆された

TOPへ戻る

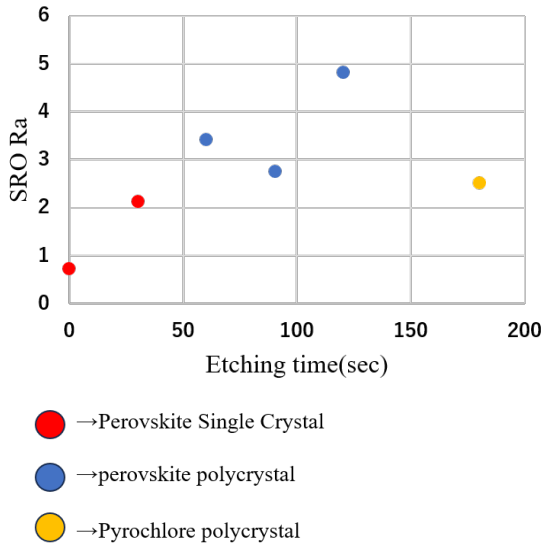


図 3　エッチング時間と SRO の平均粗さとの関係

3.2　PZT 多結晶化メカニズムの考察

次に、エッチング後の SRO の状態を指標化し、成膜後の PZT の結晶性との関連性を評価することで PZT 多結晶化のメカニズムを考察する。エピタキシャル成長に関わる要因は様々であるが、本研究では、エピタキシャルバッファ層 SRO の表面の粗さに着目する。

エッチング後の SRO の表面粗さは、原子間力顕微鏡によって評価した。図 3 にエッチング時間と SRO の平均粗さの関係を示す。また、それぞれの SRO 成膜された PZT が、ペロブスカイト単結晶だと判断されたものには赤色、ペロブスカイト多結晶のものには青色、パイロクロア相と判断されたものには黄色のプロットをした。図より、以下のことが読み取れる。まず、エッチング時間が増加していくほど SRO 表面の平均粗さが増加していく。そして、SRO 表面の平均粗さが 3.0 を超えると、その上に成膜される PZT がペロブスカイト多結晶化する。そして、エッチング時間が 120 秒を超えると、表面粗さは小さくなり、その上に成膜される PZT はパイロクロア相をとる。エッチング時間を過剰になると SRO 表面の粗さが減少するのは、SRO 下層の Pt 層が

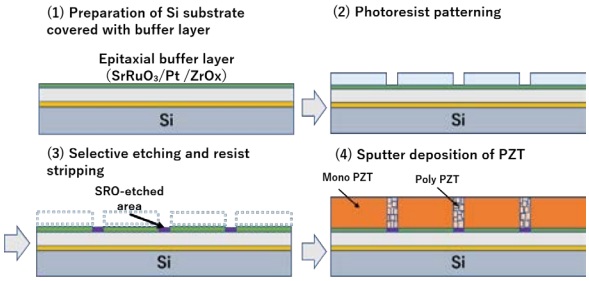


図 4　単結晶・多結晶コンポジット膜の作製法

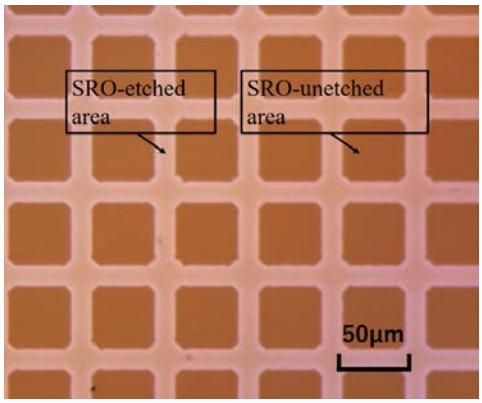


図 5 レジスト剥離後の基板表面の光学顕微鏡写真

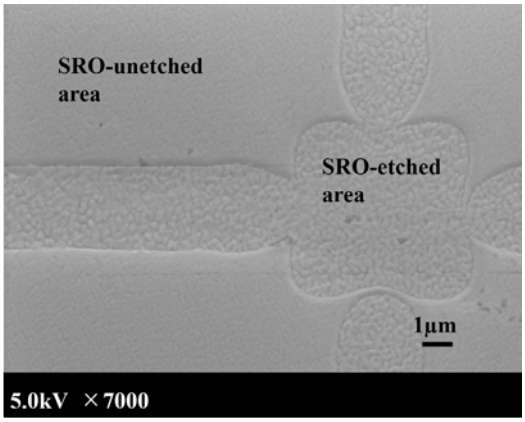


図 6 試作した PZT 単結晶・多結晶薄膜の走査型電子顕微鏡像

露出することに起因する。

以上より、適切な SRO エッチングにより、その上に成膜される PZT のエピタキシャル成長を抑制し、多結晶化を促進することができることが実証された。そして、PZT の結晶構造は、下地の SRO の表面粗さと関係がある

TOPへ戻る

ことが示唆された。

3.3　単結晶・多結晶コンポジット膜の作製

次に、領域選択的に SRO をエッチングすることで、PZT 単結晶・多結晶コンポジット膜の形成を試みた（図 4)。まずフォトリソグラフィ法によりレジストのパターニングを行う。レジストには TSMR-V90(東京応化工業)を使用した。また、表面の濡れ性を改善するために OAP(東京応化工業)を使用した。次に、エッチング溶液に試料を浸し、エッチング領域と非エッチング領域を作り分けた。その後レジストを MS-2001(富士フイルム)により剥離した。図 5 にレジスト剥離後の基板表面の光学顕微鏡画像を示す。最後に PZT のスパッタ成膜を行った。

PZT 成膜後の走査型電子顕微鏡(SEM)像を図 6 に示す。SRO バッファ層をエッチングした領域の薄膜表面には、結晶粒と思われる凹凸が確認された。一方で、非エッチング領域にはそれらは観察されず、平坦な面が観察された。これらのことからエッチング領域と非エッチング領域で異なった膜を作り分けられることを実証した。

本研究では、ウェットエッチングによりバッファ層を選択的に改質し、その箇所にて PZT の多結晶化を促進させるという簡便な単結晶・多結晶コンポジット膜の作製法を提案した。その結果、SRO のエッチング条件を最適化することで、狙い通り、コンポジット膜を作製することに成功した。

４．今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、この PZT コンポジット膜の機械的靭性の評価を行う。また、この方法の再現性についても評価を行い、必要な場合はその改善を行っていく。

また近年、リラクサ系強誘電体単結晶薄膜が、巨大圧電性を発現することが注目されており、我々の研究グループでも研究を開始している[5]。ここで開発した多結晶と単結晶膜を作り分ける技術は、様々な単結晶薄膜の成膜において有用であると考えられる。上記の巨大圧電体においても、単結晶・多結晶膜の作製を試みる予定である。以下に示すように、国内学会では一件発表を行った。今後、国際会議での発表、および学術論文での発表を行っていく。

発表実績

[1] 2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会, “バッファ層の領域選択的ウェットエッチングを利用した単結晶・多結晶コンポジット PZT 薄膜のスパッタ成膜” [23a-12H-4]

片貝 有作、勅使河原 明彦、吉田 慎哉

参考文献

[1] S. Yoshida, H. Hanzawa, K. Wasa, M. Esashi, and S. Tanaka, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 61, no. 9, pp. 1552–1558, Sep. 2014

[2] S. Yoshida, H. Hanzawa, K. Wasa, and S. Tanaka, *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 239, pp. 201–208, 2016.

[3] Z. Zhou, S. Yoshida, and S. Tanaka, *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 266, pp. 352–360, Oct. 2017

[4] Y. Katsumata, S. Yoshida, and S. Tanaka, *Proc. 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS)*, Jan. 2022, no. January, pp. 543–546

[5] F. Kai, Y. Shinya, Q. Xuanmeng, and T. Shuji, *Proc. IEEE MEMS2024*, vol. 23, no. January, pp. 765–768, 2024.

TOPへ戻る

水蒸気を用いたアルミニウム合金の表面改質技術の開発と触媒担体としての応用

材料工学科　　芹澤　愛

共同研究者
なし

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

触媒は比表面積を大きくすると反応速度が増加するため、主に粉体域で用いられる。しかし、有害物質の酸化分解特性を持つ光触媒を粉体として汚水処理に用いた場合、処理後に水中から粉体を分離することが非常に困難である。そこで、粉体の光触媒を用いた汚水処理を実用化するためには、粉体の光触媒を担持可能な基板が必要になる。

触媒は比表面積を大きくすると反応速度が高まるため､主に粉体で用いられる｡しかし、有害物質を分解する光触媒粉末を汚水処理に用いた後、水中から粉末を完全に分離することが非常に困難である。そこで、粉末の光触媒を用いた汚水処理を実用化するために、光触媒粉末を担持可能な基板が必要になる。本研究では、光触媒と結合する可能性があるOH^-基を持つAlO(OH)皮膜をAl合金上に形成可能な水熱合成法に着目した。本手法は処理温度や時間による皮膜の表面形態ならびに比表面積の制御が可能である｡これまでにKOH溶液にTiを反応させることでTiO_2にK^+が含有された$KTiO_x$も、溶液濃度によって表面形態ならびに比表面積を制御でき、AlO(OH)皮膜への担持が可能であるとわかっている。一方、従来の手法では、AlO(OH)皮膜を作製した基材と光触媒をデジタルシェイカーによって5日間攪拌しながら接触させて、イオン結合を形成することで担持するため、担持皮膜の作製に時間がかかってしまうという点があり、実用に向けて、生産に時間がかかってしまう点や複合体の触媒特性が実用可能な性能でない点があった。そこで、本研究ではアルカリ水熱合成法を用いて、AlO(OH)皮膜の作製と光触媒の担持を同時に行うことで、短時間で高性能な光触媒担持皮膜を作製することを目的とした。

２．研究計画

以下の3点を行う。

①アルミニウム合金表面の改質技術の確立

基材としてはアルミニウム合金を選択する。アルミニウム合金上に水蒸気を用いて作製したAlO(OH)結晶層を作製する技術を確立する。処理前後のアルミニウム合金の機械的性質ならびに耐食性の評価を行い、最適な処理条件を決定する。さらに、表面粗さならびに表面形状の計測を行い、プロセス条件との関係を明らかにする。

②表面改質を施したアルミニウム合金上への触媒の担持

水蒸気を用いて表面改質を施したアルミニウム合金上へ触媒を担持させ、担持量の評価を行う。また、表面形状と担持量の関係を明

TOPへ戻る

らかにする。

③アルミニウム合金の多機能化および触媒担持を実現するワンポッド担持法の確立

水蒸気を用いたアルミニウム合金の改質を行う反応容器内に触媒を添加し、ワンポッド担持を試みる。処理温度、圧力、水蒸気源となる純水の添加量を調製し、最適な処理条件を決定する。担持量が少ない場合は、適宜界面活性剤等を選定し、担持量の向上を検討する。

３．計画の進行状況

基板として 20 mm×20 mm に切り出した板厚 1.5 mm の Al-Mg-Si（A6061）合金、光触媒として純 Ti 粉末を用いた。Ti（粉体）は 1 g に対し 10 M KOH 溶液を 10 mL の割合で加え 24 h 攪拌した。Al 合金は試料表面をエメリー紙で#2000 まで湿式研磨した後、攪拌後の Ti と超純水および KOH（pH = 8、9、10、11、12）溶液とともにオートクレーブに封入し、電気炉内にて 200℃で 24 h 保持することでアルカリ水熱合成を行った。作製した複合体は超音波洗浄機にて 2 回、各 10 min 洗浄し、複合体と担持しなかった粉体を除去した。作製した粉体および複合体はレーザーラマン分光光度計を用いて結合状態を評価した。

各 pH で作製したアルカリ水熱合成前後の粉体の結合状態を Fig. 1 に、合成後の複合体の結合状態を Fig. 2 に示す。アルカリ水熱合成法で作製した試料は K^+イオンの結合が確認できず、Ti－Ti や Ti－O といった光触媒において最も使用されるアナターゼ型でよくみられる結合の割合が増加した。また、pH = 12 材のみ Al－O のピークも見られた。これは pH が増加したことで合成中の基板からの Al 溶解が促進され、基板表面の粉体のみだけでなく、担持されなかった粉体にも AlO(OH)皮膜が形成したためと考えられる。水熱合成後に K^+を含む結合が含まれなかったのは、熱処理によって置換ドーピングから格子間ドーピングに変化したのではないかと考えられる。格子間に K^+があると電気陰性度の高い O^{2-}を容易に分極させることがわかっており、分極した O^{2-}と AlO(OH)中の H^+が水素結合することで結合していると考えられる。

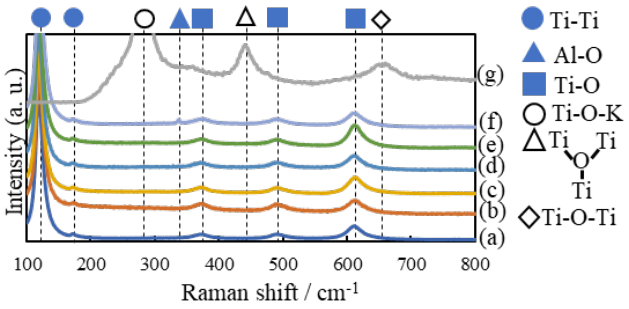


Fig. 1　アルカリ水熱合成後の粉体および合成前のラマンスペクトル (a) pH=7, (b) pH=8, (c) pH=9, (d) pH=10, (e) pH=11, (f) pH=12 および (g) WCP

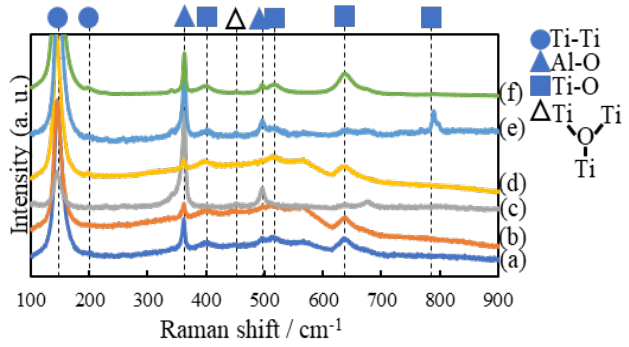


Fig. 2　アルカリ水熱合成後の複合体のラマンスペクトル (a) pH=7, (b) pH=8, (c) pH=9, (d) pH=10, (e) pH=11 および (f) pH=12

水熱合成法およびアルカリ水熱合成法により作製した複合体の外観写真を Fig. 3 に示す。pH=9 において色が特に黒に近くなり、pH が高いものの方が全体的に黒くに近くなったが、pH=11 以上では、ムラが発生した。特に pH=12 以上では黒い塊のようなものが中央部分に付着していた。

水熱合成法およびアルカリ水熱合成法によって作製した複合体の比表面積を Fig. 4 に示す。pH=7 の比表面積が一番大きく、pH を変

TOPへ戻る

化させたことによる変化は特にみられなかった。面粗さのばらつきは処理溶液の pH の影響による AlO(OH)皮膜の粒子の粗大化の影響よりも、断面観察結果から TiO_2 粒子によって皮膜の厚さに 2〜5 mm ほど違いがあることがわかっているため、担持皮膜の粒子の有無が大きいと考えられる。

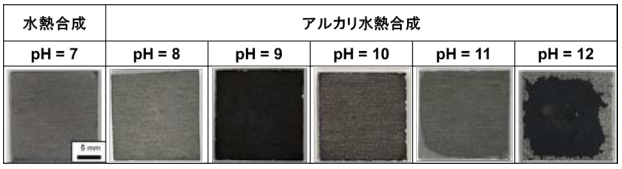


Fig. 3　水熱合成法およびアルカリ水熱合成法により作製した複合体の外観写真

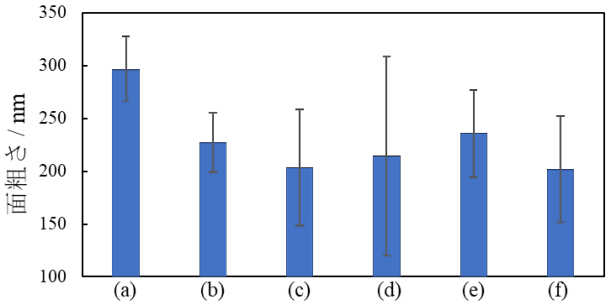


Fig. 4　水熱合成法およびアルカリ水熱合成法によって作製した複合体の比表面積
(a) pH=7、(b) pH=8、(c) pH=9、(d) pH=10、(e) pH=11 および(f) pH=12

各 pH で作製した複合体に紫外光および可視光を 60 min 照射した後のメチレンブルーの外観を Fig. 5 に、各 pH で作製した複合体に紫外光および可視光を 60 min 照射した後のメチレンブルーの吸光度を Fig. 6 にそれぞれ示す。紫外光および可視光のいずれにおいても、pH=12 で作製した複合体が最も高い触媒性能を示した。紫外光においては pH=8 を除いて 90 %近い分解率を示し、可視光においてはすべての試料で 90 %近い分解率を示した。

pH=7 に光を 60 min 照射し、5 サイクル行った後のメチレンブルーの外観および pH=7 に光を 60 min 照射し、5 サイクル行った後のメチレンブルーの外観を Fig. 7 に示す。pH=7 で作製した複合体に光を 60 min 照射し、5 サイクル行った後のメチレンブルーの外観に変化が認められなかったことから、pH=7 で作製した試料において試験回数の増加による触媒性能の低下は見られなかった。同様に、pH=8〜12 で作製した試料全てにおいても 5 サイクル行った後のメチレンブルーの外観に変化が認められなかったことから、本研究で作製した複合体は、触媒性能ならびに耐久性とも優れていることを明らかにした。

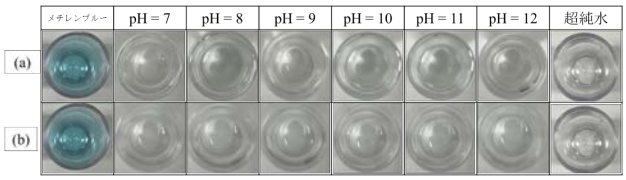


Fig. 5　各 pH で作製した複合体に光を 60 min 照射した後のメチレンブルーの外観
(a) 紫外光および (b) 可視光

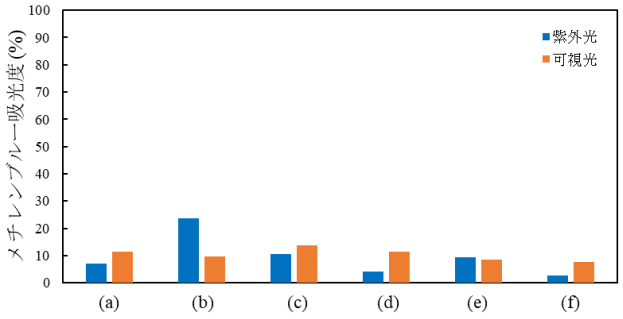


Fig. 6　水熱合成法およびアルカリ水熱合成法により作製した複合体の外観写真

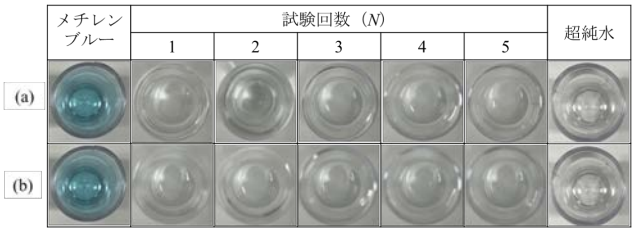


Fig. 7　pH=7 で作製した複合体に光を 60 min 照射し、5 サイクル行った後のメチレンブルーの外観
(a) 紫外光および (b) 可視光

TOPへ戻る

水熱合成法および pH を 8 から 12 まで変化させたアルカリ水熱合成法によって Al 基材上に TiO_2 を担持させた結果、以下の知見を得た。

(1) 水蒸気プロセス材と比べ、外観は黒くなり、pH=9 において最も黒くなり、pH=11 以上ではムラが発生した。色による表面観察結果の違いは特にみられず、比表面積も色による相関性は見られなかった。

(2) 表面観察結果より、AlO(OH)皮膜の上に粒子が見られ、その中に Ti 粒子が内包されていることがわかった。

(3) 化学結合評価の結果より、熱を加えることによって K の結合が消え、アナターゼ型でよくみられる Ti－Ti の結合が見られた。

(4) これまで 6 日必要だった AlO(OH)皮膜の作製と AlO(OH)上への KTiOx の担持を 1 日で行うことができ、本研究で作製した触媒の工業的な有用性を示すことができた。

触媒性能評価より、複合体では pH=12 において紫外光および可視光が一番高くなった。粉体では紫外光において pH=11 において一番高い触媒性能を示し、可視光では pH=10 において一番高い触媒性能を示した。紫外光においてすべての試料で 95 %近い分解率を示し、可視光においてはすべての試料で 95 %以上の分解率を示した。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の研究計画

本研究は，分離・再利用が可能で汚水処理に応用が期待される光触媒である $KTiO_x$s 粉末および $KTiO_x$s / AlO(OH)複合体を 1 ポッドかつ短時間で作製するための技術開発を図るものである。本研究の副次的な知見として，AlO(OH)の(101)面では水酸化物イオンがアルミニウムに直接配位し，結晶化した際にアルミノール基として(101)面表面に露出することを見出している。本研究で AlO(OH)の作製に用いた水蒸気プロセスは，処理温度や処理時間だけでなく，超純水に化学物質を加えることでも結晶成長を制御できることがわかっている。したがって，今後は，(101)面を大きく生成させることができれば，$KTiO_x$s 光触媒が担持する量が増え，$KTiO_x$s / AlO(OH)複合体の性能が向上すると考えられる。

本研究に関連した論文等投稿状況

[1] K. Kurihara, I. Lobzenko, T. Tsuru, A. Serizawa: Effects of Local Bonding between Solute Atoms and Vacancy on Formation of Nanoclusters in Al-Mg-Si Alloys, *Materials Transactions*, 64 (2023) 1930-1936.

[2] A. Serizawa: Steam-derived multi-functionalization of aluminum alloys, *JSAP Review*, (2023) 230417.

[3] 芹澤愛*：水蒸気のみで実現するアルミニウム合金の多機能化，*応用物理*，92 (2023) 230-233.

TOPへ戻る

高分子材料に対する集束電子線を用いた微細加工技術の開発

材料工学科　　下条雅幸

１．はじめに

一部の高分子材料では引張変形を与えることで、微細な孔をあけ、フィルターに利用している[1)]。しかしこの方法では孔の数や大きさを、特に少ない孔数で制御することは困難である。当研究室での予備実験により、PE(ポリエチレン)に低加速電圧で集束電子線を照射し、その後わずかに引張変形を与えることで、その部分にクレーズと呼ばれる微細な構造ができることが分かっている。クレーズは、微細な孔（ボイド）とフィブリルと呼ばれる配向した繊維からなるものである。これを利用することで、位置や数を制御して孔を開けることが可能となり、流量の小さいフィルターや光学部品作製への応用が考えられる。

高分子材料に電子線を照射すると、電子線のエネルギーによりラジカルが生成し、周囲の分子と架橋し硬化する反応と、分子鎖が切断されることによる軟化（崩壊）が同時におこる[2)]。硬化と軟化のうちどちらが主に起きるかは、高分子の種類によってことなる。一般に有機物へ電子線を照射して改質する研究は、加速電圧 300kV 以上、場合によっては 1MV 以上で、広範囲に照射する条件で行われている[3)]。しかし、本研究のように低加速電圧で、微小な範囲に照射する研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、PE において、低加速電圧の集束電子線照射によりクレーズができるメカニズムの解明、および PE 以外の高分子材料におけるクレーズ生成などの微細加工の可能性を探ることを目的とした。

２．研究計画

PE（ポリエチレン）、PI（ポリイミド）、PET（ポリエチレンテレフタレート）、PEN（ポリエチレンナフタレート）フィルムに対し、走査型電子顕微鏡(SEM)に組み込んだ自作引張試験機に取り付け、i)電子線を照射し、その後 ii)引張ひずみを与える。これにより、所望の位置、数、形状でクレーズを生成できるか調べる。

i)の電子線照射には走査型電子顕微鏡（SEM）を用いるため、5kV～30kV 程度の加速電圧であり、ビーム径は数 nm に集束されている。このときの電子線の加速電圧（電子のエネルギー）やドーズ量（単位面積あたりの照射電子数）の最適値を、高分子の種類ごとに調べる。この際、自作のプログラムにより、照射する点数、位置、形状、ドーズ量を制御することができる。

ii)では、SEM に入る自作の引張装置を用いて、試料に引張ひずみを与える。この装置では、ねじを用いてモーターの回転を一軸引張変形に変換している。このモーターの回転を、SEM の外側から制御できるようになっている。

電子線を試料に照射した際の、試料内での散乱範囲を、モンテカルロ・シミュレーション(MC)によって求める。

一部の試料については、電子線照射による

TOPへ戻る

高分子の結合状態の変化を見るため、ラマン分光装置による計測を行う。

３．計画の進行状況

3.1 PE（ポリエチレン）

Fig. 1 に加速電圧 10kV で電子線を照射した後、20%の塑性ひずみを与えた PE 試料表面の SEM 像を示す。

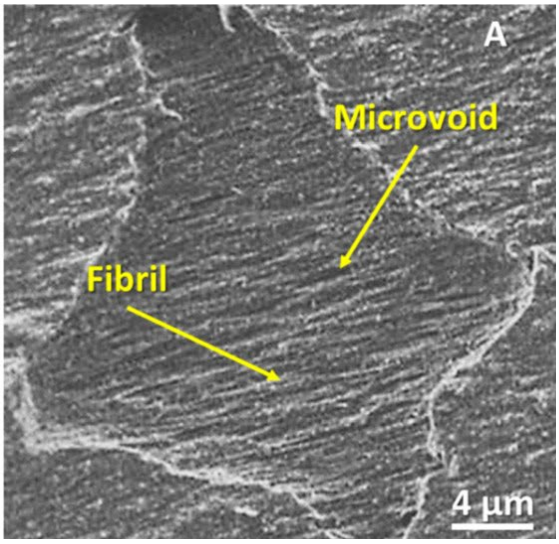


Fig.1 加速電圧 10kV の電子線照射後、20%の引張ひずみを与えた PE フィルム表面の SEM 像

電子線を照射した位置にフィブリルとボイドが観察されるため、本手法でクレーズが作製できたことが分かる。同様な操作を、加速電圧を変えて行った。その結果をまとめて模式的に表したものが Fig.2 である。

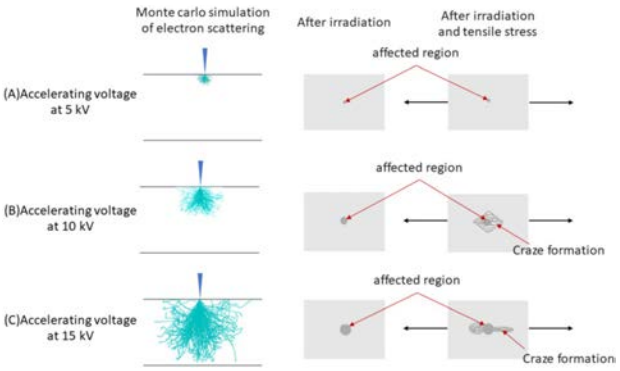


Fig. 2 加速電圧による変化の模式図

PE においては、加速電圧 5kV では、MC により求めた電子線の基板内での散乱範囲が小さく、照射位置におけるクレーズの発生は見られなかった。加速電圧 15kV では、照射点から引張方向に平行な位置で、照射点の両側にクレーズが生成した。加速電圧 10kV では照射点にクレーズが生成した。したがって、10kV での照射が、最もクレーズの位置制御か容易であることが明らかとなった。

加速電圧 10kV で、3×3 の 9 点に電子線照射を行い、引張ひずみを変化させたときの試料表面の SEM 像を Fig. 3 に示す。

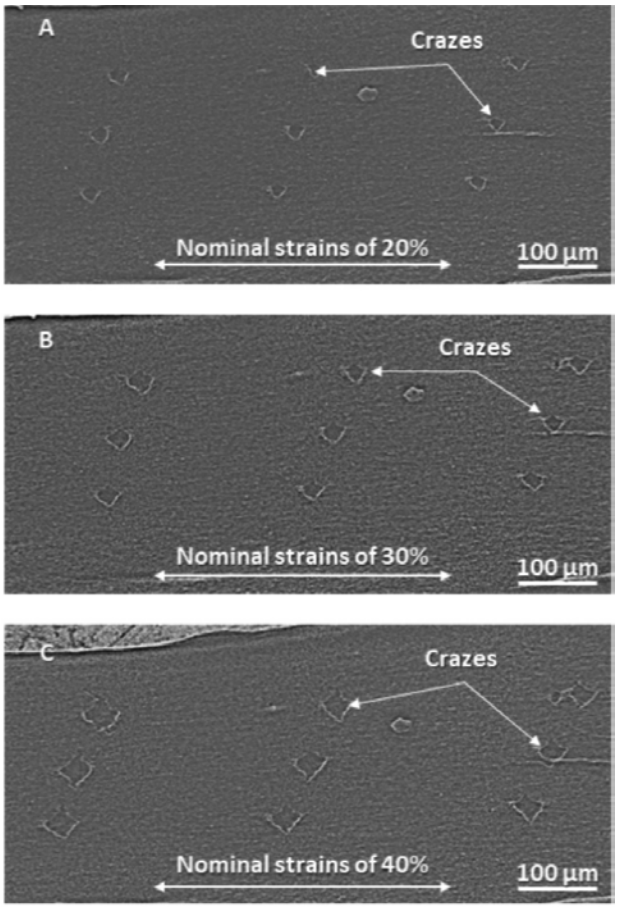


Fig.3 加速電圧 10kV で電子線照射後、(A) 20%、(B)30%、(C)40%の引張ひずみを与えた PE フィルム表面の SEM 像

電子線の照射パターンと同様の 3×3 の 9 カ所でクレーズが発生し、ひずみの増加とともにクレーズが大きくなっていた。このこと

TOPへ戻る

から、クレーズの位置の制御に加えて、大きさの制御も可能であることが明らかとなった。

3.2 PI（ポリイミド）

Fig. 4 に電子線照射後、30%の引張ひずみを与えた PI 試料表面の SEM 像を示す。

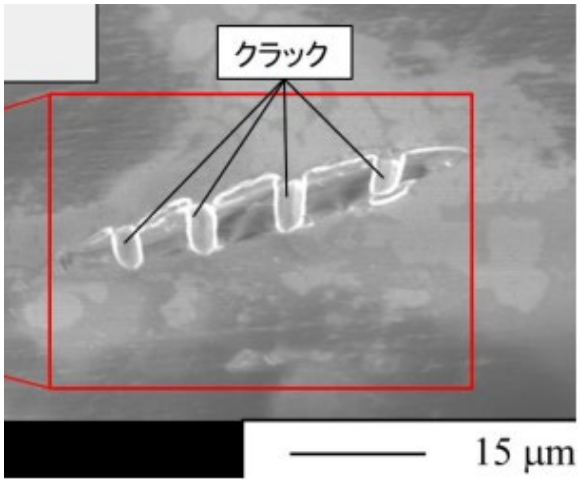


Fig.4 電子線照射後､30%引張ひずみを与えた PI フィルム表面の SEM 像

PI においては、電子線照射位置に Fig. 4 に示すような変化が観察された。しかし、その内部にフィブリルが観察されなかったため、クレーズではなくクラックが生成したと考えられる。クレーズよりは大きな孔になってしまうかもしれないが、場合によっては利用できる可能性もあると考える。

3.3 PET（ポリエチレンテレフタレート）

Fig. 5 に電子線照射後、15%の引張ひずみを与えた PET 試料表面の SEM 像を示す。

PET においては、フィブリルが観察されることから、所望の位置へのクレーズ生成が可能であることが示された。

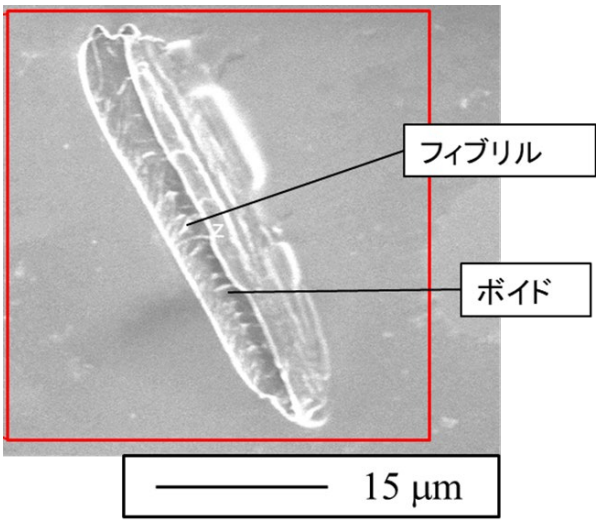


Fig.5 電子線照射後､15%引張ひずみを与えた PET フィルム表面の SEM 像

3.4 PEN（ポリエチレンナフタレート）

Fig. 6 に電子線照射後の PEN 試料表面のラマン・スペクトルを示す。

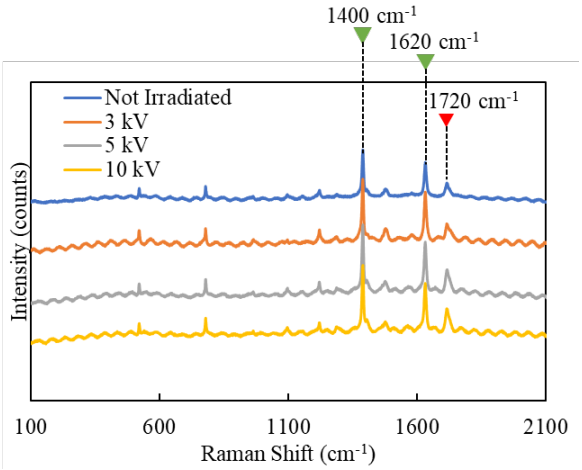


Fig.6 電子線照射前後の PEN フィルムのラマンスペクトラム

電子線を照射していない試料に比べて、照射した試料では 1720 cm^{-1} のピーク強度が大きくなった。このピークは C=O 伸縮振動由来のピークであり、電子線照射により結合が変化したと考えられる。

TOPへ戻る

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

以上のように、PE，PI，PET，PEN の各試料において、電子線照射による内部構造の変化や、その後の引張変形によるクラックやクレーズの生成が確認できた。このことは、従来のような広範囲の電子線照射による表面改質とはことなり、非常に微細な領域において内部構造や変形挙動を制御できる可能性を示している。

この中で特に条件が明確になってきている PE に関して、今後は点照射ではなく、線や面状の照射によって、クレーズの形状を制御することを計画している。また、PE では電子線照射によって架橋が起こり、材料が硬化する反応が主であると考えられるため、これを利用した材料の部分的な強化とその応用を考えている。他の高分子材料では、まだ最適な電子線照射条件が確定していないため、これらの条件の詳細を調べていく計画である。

学会発表

(1) S. Toocharoen, D. Yokota and M. Shimojo; Precise Control of Crazing in Polyethylene Film via Focused Electron Beam Irradiation；表面技術協会第 148 回講演大会 (2023)

(2) S. Toocharoen, D. Yokota and M. Shimojo; Controlled craze formation in polyethylene via focused electron beam irradiation; 日本顕微鏡学会　第 79 回学術講演会 (2023)

論文発表

(1) S. Toocharoen, D. Yokota, M. Suzuki and M. Shimojo; Location-controlled crazing in polyethylene using focused electron beams and tensile strain; J. Polym. Eng., 44, 1, (2024), 73-79

(2) S. Toocharoen and M. Shimojo; Precision control of the shape and size of crazing in polyethylene using a focused electron beam and tensile strain; 表面技術，75, (2024), in press.

参考文献

1) R. W. Gore, U.S. Patent 3, 953, 556 (1967)

2) 曲慧: 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 77 (2021)，I_45-I_52

3) 横地英一郎: 放射線化学，90 (2010), 29-32

TOPへ戻る

分子インプリント高分子を用いたリアルタイム治療薬モニタリング用センサの開発

工学部応用化学科　　吉見　靖男

共同研究者
埼玉医科大学総合医療センター・感染症科・教授　　大野　秀明
埼玉医科大学総合医療センター・薬剤部・次長　　齋藤　健一
川崎医科大学医学部生理学 2 教室・准教授　　氷見直之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

分子インプリント高分子（MIP）は、鋳型重合によって目的物質に対する特異結合能を付与された合成高分子である。固定した電極におけるレドックス電流は、目的物質の濃度に依存することを代表者は見出した。ことに MIP をグラファイト粒子表面に固定し、シリコンオイルなどの油と混練して作製された MIP-CP 電極を利用して、選択性や再現性に優れたセンサを発明した。この特性を最も大きく活用できる場が、治療薬モニタリング（TDM）である。血中薬剤濃度を監視して、薬の安全性を保ちながら最大限の効果をもたらす投与スケジュールを設計する TDM によって、安全治療有効濃度範囲の狭いハイリスク薬を安全に使えるようになった。しかし現状の TDM は、①保険償還と分析コストのバランスから分析回数が限られ、②分析を院内検査室または外部分析機関に頼るため、血液採取してから濃度分析結果を得るまでに、短くても 2-3 時間、長くて 2-3 日間を要する。併用薬の投与や、食事が治療薬の代謝速度に対する干渉は TDM に期待されていた能力であるが、血中濃度の連続データが得られないため、その期待に応えられていないのが現状である。薬剤を検出できるセンサを皮下に留置して血中濃度の連続データを得れば、干渉解析が可能になる。そこで本研究では、MIP-CP 電極に適度な柔軟性と機械的強度を与えることによって体内留置が可能なセンサを開発し、ラットを用いた動物実験やヒト血漿を用いた臨床医実験によって、実用性を検証する。

２．研究計画

【2023 年度】MIP-CP を用いて直径 0.2 mm 程度のワイヤ型センサ電極を前述の手順で作製する

(1) スクリーンプリント用のインクを直径 0.2 mm 程度のピアノ線に塗し、続けて抗菌薬バンコマイシン（VCM）に特異反応する MIP-CP をインク塗布域の上に塗布する。当該電極の先端 2 ミリ程度、末端 5 mm 程度を残して絶縁樹脂で被覆する。 被覆部にカーボンインク、銀／塩化銀インクを塗布して、それぞれ対極、参照極としたセンサを作製する。

(2) MIP-CP 固定銀電極、対極、参照極を電気化学測定器（ポテンショスタット）に接続し、バンコマイシン 0-40 μg/mL（至適血中濃度 20-40 μg/mL）を含む緩衝液またはウシ血清にセンサを浸し、微分パルスボルタンメトリーを行う。電流とバンコマイシン濃度の相関を得る。血中タンパク質などが測定値に当たる影

TOPへ戻る

響を解析し、その影響の小さい MIP-CP の合成条件を特定する。

(3) 検出された電流のバンコマイシンに対する感度、選択性（分子構造が類似したテイコプラニンに対する感度と比較)、応答速度を評価する。

【2024 年度】前年で開発されたワイヤ型で生体試料中の薬剤濃度を測定できることを実証する。

(4)川崎医科大学において分担者の氷見が、ラットの皮下に当該センサを留置した上で、バンコマイシンを投与し、電流値をモニタリングする。24 時間おきに血中濃度をイムノアッセイ測定し、電流値から計算されるバンコマイシン濃度および血中濃度の実測値と比較し、相関を確認する。

（5） 埼玉医科大学総合医療センターで患者から採取された血液試料中の薬剤濃度を当該センサで測定し、従来の方法（イムノアッセイ、クロマトグラフ法など）によるデータと照合し、ヒトを対象とした薬剤監視が可能であることを確認する。

３．計画の進行状況

体内留置センサには、より高い機械的強度が求められるため、MIP を熱硬化性シリコン樹脂プレポリマーと混練し、熱硬化させる、MIP-carbon dough（MIP-CD）電極を作製した。これを針金に塗布して柔軟なワイヤ型センサを開発し、性能を評価した。

2-1. MIP グラフト重合 /MIP-CD の作製

鋳型の VCM の存在下で、重合開始剤を固定したグラファイト粒子の表面に、メタクリル酸、エチレングリコールジメタクリレート、アリルアミンカルボキシプロピオニック-3-フェロセンをグラフト共重合させた。その後、塩化ナトリウム水溶液、蒸留水で洗浄、乾燥後、熱硬化シリコン樹脂と重量比 7 : 3 で混錬して未硬化 MIP-CD を作製した。合成時に鋳型を加えずに同手順で作成した non-imprinted polymer (NIP)-CD も比較のために作製した。

2-2. MIP-CD センサの作製

50 mm のスズメッキ銅線の先端 20 mm に、カーボンインクを塗布し、その上に未硬化 MIP-CD を塗った。そして、絶縁用にシリコン樹脂を塗布して MIP-CD 電極の有効面積を制限した後、乾燥機で絶縁材と MIP-CD を共に加熱硬化して、**Fig. 1** に示すワイヤ型電極を作製した。

Fig. 1: Scheme of the MIP-CD deposited wire electrode

2-3. 測定方法

MIP(または NIP)-CD センサを VCM または構造が類似するテイコプラニン（TEIC)含有リン酸緩衝液中で微分パルスボルタメトリを行い、その電流と濃度の関係をプロットした。

３．結果および考察

MIP-CD 電極と NIP-CD 電極の VCM に対する感度の比較を **Fig. 2** に示す。MIP-CD における電流は VCM 濃度増加と共に直線的に上昇したが、NIP-CD のそれは感度が無かった。この結果より、MIP-CD 電極の電流は、VCM をインプリントされた結合サイトと VCM の特異的結合を反映することが示された。また **Fig. 3** に示すように、MIP-CD 電極は TEIC に対して感度がなく、高い選択性が示された。

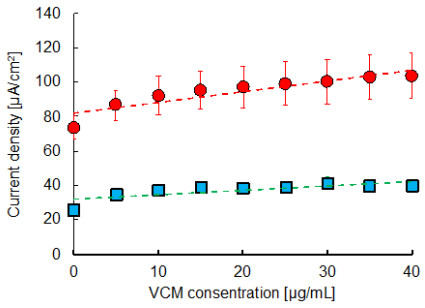


Fig. 2 : Comparison between VCM sensitivities of MIP-CP (○) and NIP-CP （△） electrodes

針金上に MIP-CD を固定した電極は、強度

TOPへ戻る

と柔軟性がありながら VCM に特異的な応答性があり、皮下留置型のセンサとして期待で

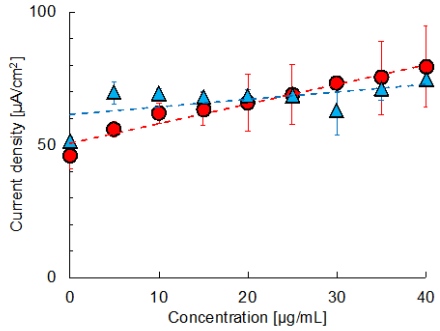


Fig. 3: Comparison of sensitivity of MIP-CD to VCM (○)and TEIC(△)

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

センサの感度と機械的強度が充分に保てるように、MIP-CP のバインダーとなる熱硬化性シリコン樹脂とシリコーンオイルの混合比を検討する。またドリフトを押さえるために、MIP-CP とワイヤの接着を促すプライマーの選定も行う。充分な安定性と感度が確認されたら、センサをラットに皮下留置し、血中濃度の連続モニタリングを検討する。

学会発表

岡村陽香、銅坂圭悟、吉見靖男：分子インプリント高分子を利用したワイヤ型抗菌薬センサの開発，第 61 回日本人工臓器学会大会，東京，2023 年 11 月

2024 年 10 月に Banff(カナダ)で開かれる、Annual Meeting of International Association of Therapeutic Drug Monitoring and Clinical Toxicology にもエントリーした。

TOPへ戻る

元素置換に基づくペロブスカイト水素化物の機能性創出と新規な学術分野の開拓

応用化学科　　大口　裕之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

ペロブスカイト水素化物は、元素置換の実績が豊富なペロブスカイト化合物の一種である。そのため、元素置換による機能性創出・制御が期待される物質である。しかも、その機能性は、水素由来の特殊なものになり得る。そこで本研究では、元素置換によってペロブスカイト水素化物の機能性を引き出すために、世界で申請者しか合成できないペロブスカイト水素化物のエピタキシャル薄膜を軸とする研究を展開する。つまり、構造が安定化するエピタキシャル薄膜を用いることで、元素置換を行ってもペロブスカイト構造が維持できる状態を実現し、それによって、様々な元素を高濃度まで置換可能とするのである。そして、エピタキシャル薄膜を用いない研究では達成不可能な機能性を創出したり、得られた機能性を極限まで高めたりするのである。以上によって、ペロブスカイト水素化物をベースとする前例のないイオニクス・エレクトロニクス分野を開拓する。

２．研究計画

本研究では、はじめに、ペロブスカイト水素化物 $MLiH_3$ のエピタキシャル膜(M : Sr, Ba)を合成する。そして次に、得られた膜に高濃度元素置換を施して、水素化物の示す代表的機能性の一つであるヒドリド伝導を高速化する。この研究によって、元素置換を利用して水素化物が示し得る多様な機能性を創出・制御する新規な分野の開拓につながる学術基盤を構築する。

a) MLiH3 エピタキシャル薄膜合成

本研究では、水素化物薄膜合成に高い効力を発揮する活性水素 (反応性の高い原子状の水素ラジカル) ガス雰囲気下における赤外レーザー蒸着法(図 1)を用いる。そして、$BaLiH_3$

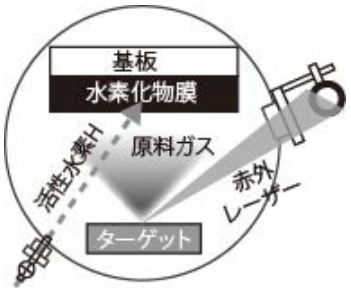


図 1 赤外レーザー蒸着法。

および $SrLiH_3$ エピタキシャル薄膜の新規合成を行う。これらの研究では、これまでの試験的な $BaLiH_3$ 膜合成経験に照らして、薄膜成長時の基板温度は 100 ℃から 300 ℃程度、また活性水素ガス圧は 1×10^{-4} Torr から 1×10^{-2} Torr 程度とする。基板には $MLiH_3$ との格子整合性が高い $MgAl_2O_4$ (100)単結晶や MgO (100)単結晶などを使用する。出発原料であるターゲットには MH_2 (M : Sr, Ba)と LiH の粉体を 1:1 のモル比で混合して圧粉した(MH_2-LiH)ペレットを使用する。膜の評価は、相の同定はラマン分光法、結晶構造は X 線回折法(XRD)、組成は高周波誘導結合プラズマ(ICP)分光法などによりそれぞれ実施する。

TOPへ戻る

b）元素置換を利用した高速ヒドリド伝導開発

初めてヒドリド伝導が報告された BaH_2 の室温伝導率は 1×10^{-7} S cm^{-1} 程度であったが、その後に研究されたペロブスカイト水素化物 $MLiH_3$ では、アルカリ金属 A を最大 10 %まで置換($M_{1-x}A_xLiH_3$)して、1×10^{-5} S cm^{-1} 程度の値を達成している[*ACS Appl. Energy Mater.* 5, 2968 (2022)]。伝導率が増大したのは、2 価 M を 1 価 M’ で置換したために、電荷バランスを補償するようにヒドリド欠損が導入されて、ホッピング可能なヒドリドの数が増えたためである。本研究では、エピタキシャル薄膜による構造安定化を利用して、10 %より高濃度にアルカリ金属 A(Li, Na, K など)を置換し、伝導率の最高値を更新する。伝導率はインピーダンス測定により決定する。

３．計画の進行状況

初めに、ラジカル水素反応性赤外レーザー蒸着法による $BaLiH_3$ 薄膜成長に適した合成温度を探索した。ラジカル水素発生装置内の H_2 ガス圧は 1.0×10^{-2} Torr、W フィラメント温度 T_f は 800 ℃に設定した。Fig.2 は基板温度 100 − 170 ℃において $MgAl_2O_4$(100)上に成長した $BaLiH_3$ 薄膜の $2\theta/\theta$ XRD 回折パターンを示す。すべての温度で $BaLiH_3$ 由来の回折ピークがみられた。特にはっきり見られたのは $BaLiH_3$ の 100 (2θ = 22.0788°)、200 (2θ = 45.0352°)、300 (2θ = 70.1225°)回折ピークであったため、比較的(100)配向性の高い膜がえられたことが分かった。これらの回折ピークは成膜温度が高温になるにしたがってシャープになっており、結晶性が向上したことも分かった。100 ℃と 130 ℃で合成した膜では、h00 (h = 1, 2, 3)回折ピーク以外に、110 (2θ = 31.4236°)、111 (2θ = 38.7391°)、210 (2θ = 50.7030°)、211 (2θ = 55.9437°)、220 (2θ = 65.5851°)回折ピークも見られた。これらの温度では、おそらく、結晶成長速度が十分早くなかったために配向が不完全になったと思われる。成膜温度が 150 ℃では(h00)面からの回折ピーク以外は非常に小さくなっており、ほぼ(100)配向した膜が得られた。ところが、さらに温度が高くなり 170 ℃になると、(h00)面以外の回折ピークが再び目立つようになっており、配向性の低下が示唆された。おそらく、この温度では膜からの水素脱離が起こり、組成にずれ生じたために、結晶が歪むなどして配向性が低下したと考えられる。以上の結果から、$BaLiH_3$ 成膜には 150 ℃が適切であると判断した。

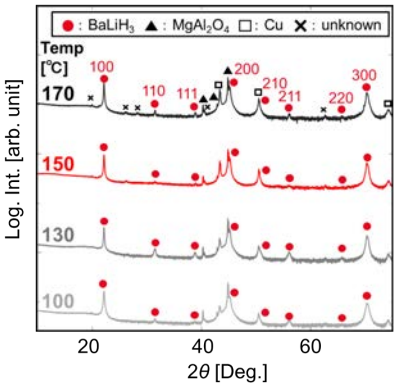


Fig. 2 100 ~ 170 ℃で成膜した $BaLiH_3$ 膜の $2\theta/\theta$ XRD 回折パターン。異なる温度に対するパターンが見やすいように縦軸にはオフセットを入れている。

次に、$BaLiH_3$ 成膜におけるラジカル水素の効果を検証した。結果だけを述べると、ラジカル水素発生温度を 2000 ℃に設定して大量のラジカル水素を膜に供給すれば、金属の混入しないほぼ単相の $BaLiH_3$ 膜が得られることがわかった。

ほぼ単相の $BaLiH_3$ 膜が得られる条件(基板温度 150 ℃、P_{H2} = 1.0 ×10^{-2} Torr, T_f = 2000 ℃)で MgAl2O4(100)基板上に成膜を行ったところ、単一配向性かつ高結晶性の $BaLiH_3$ エピタキシャル薄膜を成長させることに成功した。Fig. 3(a)は XRD $2\theta/\theta$ 回折パターンである。Fig.2 に見られたような余分な配向の存在を示す回折ピークはなく、基板と Cu 保護層を除くと $BaLiH_3$ の h00 回折ピークしか観察されないことから、基板面に対して(100)面が単

TOPへ戻る

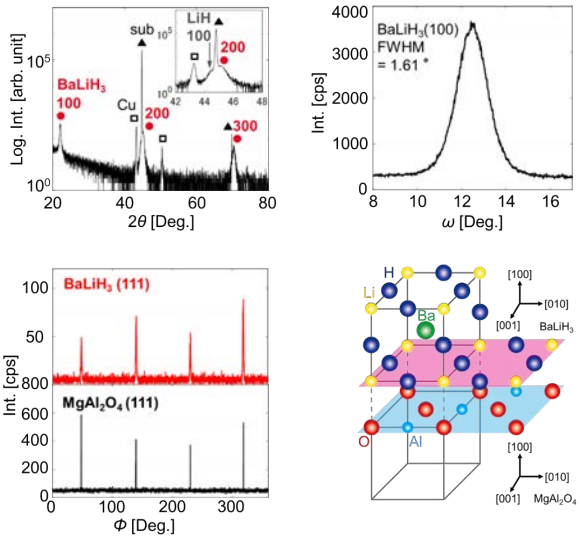


Fig. 3 最適条件で合成した $BaLiH_3$ 薄膜の(a) 2θ / θ XRD 回折パターンと(b)XRD ロッキングカーブ。(a)の挿入図では LiH 回折ピーク付近を拡大した。(c) $BaLiH_3$ 薄膜と $MgAl_2O_4$ 基板の 111 回折ピークの φ スキャンパターン。(d) (a)と(b)の結果から予想される結晶成長の様子。

一配向したほぼ単相の $BaLiH_3$ であることが分かった。ただし、200 回折ピークの側に LiH の存在を示唆するショルダーピークがあることから、ごく少量ながら LiH が混在していることが示唆された。BaLiH3 (100)面の rocking curve の FWHM は 1.61°であり、水素値となっていた（Fig.3(b)）。還元性の強いラジカル水素によって酸化物基板表面が荒らされた可能性などを現在調査中である。XRD φ スキャンには膜と基板で同じ回転角に 111 回折ピークが現れており、面内のエピタキシャル関係は $[001]_{BaLiH3}$ // $[001]_{sub}$ とわかった（Fig.3(c)(d)）。

これらの MLiH$_3$ エピタキシャル薄膜を用いると MLiH$_3$ 結晶の本質的なヒドリドイオン伝導を評価可能であることが電気化学インピーダンス法により測定から明らかになった。Fig. 4(a)は $MgAl_2O_4$ 基板上に成長した $SrLiH_3$ エピタキシャル薄膜を 200 ℃に加熱して行った測定により得られたナイキストプロットである。低周波側にやや膨らみがみられる以外にはきれいな半円形をしており、ほぼ結晶粒内のヒドリド伝導を表すデータとなっていた。データ解析から算出されたキャパシタンスの値は 1.1×10^{-10} F となっており、たしかに結晶粒内のヒドリド伝導を観察していることが裏付けられた。ナイキストプロットの低周波側に対してフィッティングを行うと、粒界でのヒドリド伝導を示唆する 3.2×10^{-8} F のキャパシタンス値が得られた。300 ℃での測定により得られたナイキストプロットの低周波領域には電極界面でのヒドリド拡散を示唆する直線が現れた（Fig. 4(b)）。$SrLiH_3$ 結晶本来のヒドリド伝導率は、70 ℃から 300 ℃までの温度範囲で得られたナイキストプロットに対してフィッティングをおこない決定した(Fig. 4(c))。こうして得られたヒドリド伝導率は従来の粉末研究と比べると 5 分の 1 程度の低い値となっていた。今回観察されたイオン伝導率が低くなったのは、結晶の乱れによりイオン伝導が高速化しやすい粒界の影響が粉末の伝導率には強く表れていたためだと考えられる。

最後に、$SrLiH_3$ エピタキシャル薄膜への Na 置換によるヒドリド伝導率増大を目指した。そしてこの実験では、飽和蒸気圧が高く膜から蒸発しやすい Na による置換を実現するために、基板温度をこれまでの 250 ℃から 200 ℃へと低下させた。その結果、基板温度 250 ℃では EDS 測定で 0.2 at%しか検出されなかった Na が基板温度 200 ℃では 14 at%にまで増えていた。残念ながら、Na を 14 at%含む $SrLiH_3$ 膜のヒドリド伝導率測定には失敗してしまい再実験中である。ただし、同様

TOPへ戻る

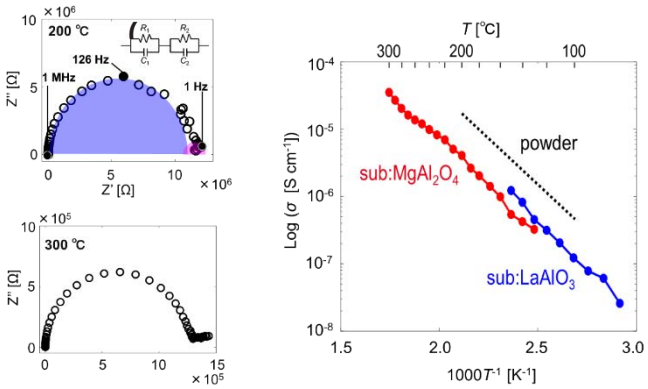


Fig. 4 $MgAl_2O_4$基板上に堆積させた$SrLiH_3$薄膜のヒドリド伝導性。(a) 200 ℃におけるナイキストプロット。青の半円が粒内成分を示しており、キャパシタンスの値は 1.1×10^{-10} F であった。ピンクの半円が粒界成分を示しており、キャパシタンスの値は 3.2×10^{-8} F であった。(b) 300 ℃におけるナイキストプロット。$SrLiH_3$のヒドリド伝導率。赤丸で示されるのが$MgAl_2O_4$基板上に合成した$SrLiH_3$薄膜。青丸で示されるのが$LaAlO_3$基板上に合成した$SrLiH_3$薄膜。黒の破線で示されるのが$SrLiH_3$粉末。

の手法によって合成した、Na を 10 at%以上含むと考えられる $BaLiH_3$ 膜では Na 置換前に比べて伝導率が 1000 倍程度にも増大していた。したがって、$SrLiH_3$ 膜においても伝導率の大幅な上昇が見込まれる。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の計画

これまでの実験で得られた知見を活かして、置換元素を 20 at%以上含む $SrLiH_3$ エピタキシャル膜を合成し、それによってヒドリド伝導率が従来比で 1000 倍以上になることを実証する計画である。さらに、構造が不安定であるためにこれまでは理論上の存在にとどまっていた高ヒドリド伝導相である $CaLiH_3$ をエピタキシャル薄膜特有の構造安定化効果を利用して実現し、10^{-3} S cm^{-1} 以上のいわゆる超イオン伝導を達成することも狙っている。また、これらの研究の実施効率を向上させるために、置換量を正確に調整できる、置換元素と被置換物を別々に蒸着できる新装置（デュアルレーザー赤外レーザー蒸着装置）の開発にも取り組む。

論文

エピタキシャル薄膜を利用することでこれまで不明であった $MLiH_3$ 本来のヒドリド伝導率を明らかにできた。また $MLiH_3$ への Na 大量置換に成功し、それによってヒドリド伝導率を約 1000 倍に上昇させられた。この研究の成果は *ACS Applied Energy Materials* **7**, 2810 (2024). (IF = 7.0)に掲載されている。

エピタキシャル薄膜を利用することで前例のない LiH への Mg 置換に成功し、それによって Li イオン伝導率を約 20 倍に上昇させられた。この研究の成果は Inorganic Materials (IF = 4.6)に投稿中である。

賞与

本研究の成果により、日本金属学会 2023 年秋季講演大会にて優秀ポスター賞を 1 件、日本金属学会 2024 年春季講演大会にて優秀ポスター賞を 2 件受賞した。

TOPへ戻る

鳴き声コンテンツのリアリティ再生システムの開発

情報通信工学科　　武藤　憲司

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

セミの鳴き声は夏の風物詩である。東京ではミンミンゼミやアブラゼミなどの種のセミの鳴き声を聴くことができる。セミの鳴き声はやかましく，種類ごとに特徴的な鳴き声であり，夏休みの自由研究などのテーマに取り上げられる。web 図鑑などで鳴き声を聞くことができるが，その音量は定量的でなくユーザー設定次第になっている。また，セミの鳴き声は大きな騒音レベルであり，交通騒音測定の妨げとなる[1]。交通騒音測定の騒音原因であるセミの鳴き声の音響的特徴を明らかにする必要がある。

セミの鳴き声に関する先行研究は，屋外や室内といった環境でセミの鳴き声を測定している。このような環境では道路交通騒音や他種の生物の鳴き声といった暗騒音の影響を受けるという問題がある。例えば，松尾らはニイニイゼミ属の鳴き声の周波数特性を測定したが，測定地点で暗騒音の影響やセミまでの距離を考慮していなかった[2]。

本研究の目的は，教材にとって重要な鳴き声，特に正確な鳴き声の音量の収集と分析，リアリティ提示である。研究方法は，防音箱を用いた鳴き声の高精度計測である。収集した鳴き声について分析を行い，取得したデータは公開する。さらに，リアリティ再生に必要な野外の鳴き声の分布計測を行い，仮想環境における鳴き声コンテンツの生成を行う。これにより，生物学の発展のみならず，初等教育教材としての活用や環境音計測技術の向上に寄与すると考えられる。

２．研究計画

本研究の最終到達点は，さまざまな生物の正確な鳴き声のデータベース構築であるが完成までには長い年月を必要とする。本研究では，まず，ミンミンゼミを対象として，次の４つの研究を遂行する。正確な音量の計測，鳴き声の特徴分析，鳴き声データの公開，鳴き声のリアリティ再生である。

本年度は，自由音場で鳴き声の計測環境を構築する。豊洲に生息するミンミンゼミを対象に多数の採取を行い，個体音を得ることを目標とする。また，たくさんのセミが鳴いている環境において，セミの分布の調査を行う装置として,音源探査タブレットを開発する。

2024 年度以降に，ハイレゾ再生環境を構築するとともに，5～40 kHz の高周波数成分を発生する生物の鳴き音の収録を行う環境整備を行う。その後に収集した鳴き声を分析結果とともに公開できるようにデータサーバを構築し，鳴き声コンテンツの作成を行う。

３．計画の進行状況

本年度は，雑音のない正確な１匹当たりのセミの鳴き声の音響的特徴を明らかにすることを目的とした。この実現のためにセミの鳴き声を自由音場で測定し，セミから測定点までの距離を考慮した，ミンミンゼミの鳴き声の音圧レベルと周波数特性を分析した。

先行研究で，セミの鳴き声は暗騒音を含んだ録音データを用いて測定されてきた。そのため，暗騒音や反射音の影響のない自由音場

TOPへ戻る

で鳴き声を測定する必要がある。自由音場は，暗騒音の音圧レベルが十分に低く，音の距離減衰特性が逆二乗則を満足する範囲である[3]。自由音場範囲は，測定装置である防音箱内でスピーカからマイクロホンまでの距離と受音レベルによって算出した。防音箱内における自由音場範囲を評価したのち，セミを入れる虫かごと測定マイクロホンの配置場所を決定した。

セミの鳴き声の測定では，自由音場で 1 匹が鳴いているときの鳴き声を録音した。その際，セミの鳴いている位置を正確に知るためにカメラを用いてセミの鳴いている様子を録画した。セミの鳴き声の測定環境を図 1 に示す。そして，セミからマイクロホンまでの測定距離r_1を測定し，距離減衰式[4]を用いて，基準距離r_2でセミが鳴いているときの音圧レベルに補正する。

ミンミンゼミの鳴き声の音響的特徴分析として，音圧レベルと周波数特性を分析指標とした。そして，多くのミンミンゼミの鳴き声データを用いて，音響的特徴の分布と基本的統計量を算出した。分析データは，ミンミンゼミが配偶行動のために発する主鳴音のうち，測定で最大音圧レベルが最も大きい部分を含む高潮音[5]の 1 区間である。

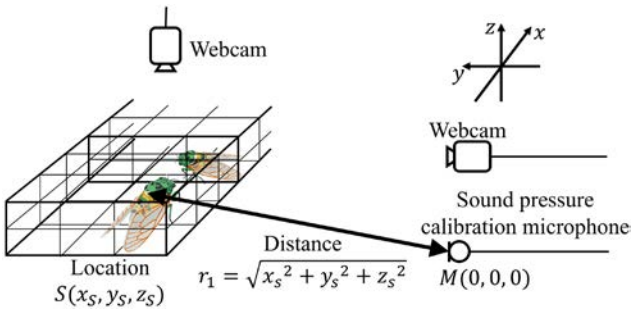


図 **1　測定対象と測定装置の配置**

3.1 自由音場測定装置評価

セミの鳴き声を正確に測定するために，防音箱で自由音場の成り立つとみなせる範囲にセミとマイクロホンを設置する必要があった[6,7]。

防音箱の自由音場とみなせる範囲を得るために，音圧レベルとスピーカからマイクロホンまでの距離を計測した。防音箱の中心に置かれた小型スピーカから 1/3 オクターブバンドノイズを発生させて，マイクロホンより音圧レベルを測定した。防音箱の音響特性を図 2 に示す。これより，自由音場は防音箱の中心から 50～240 mm 以内の範囲とみなせた。セミとマイクロホンの距離は 138～338 mm であるため，セミとマイクロホンは直径 480 mm の球状の自由音場内にあると判断した。

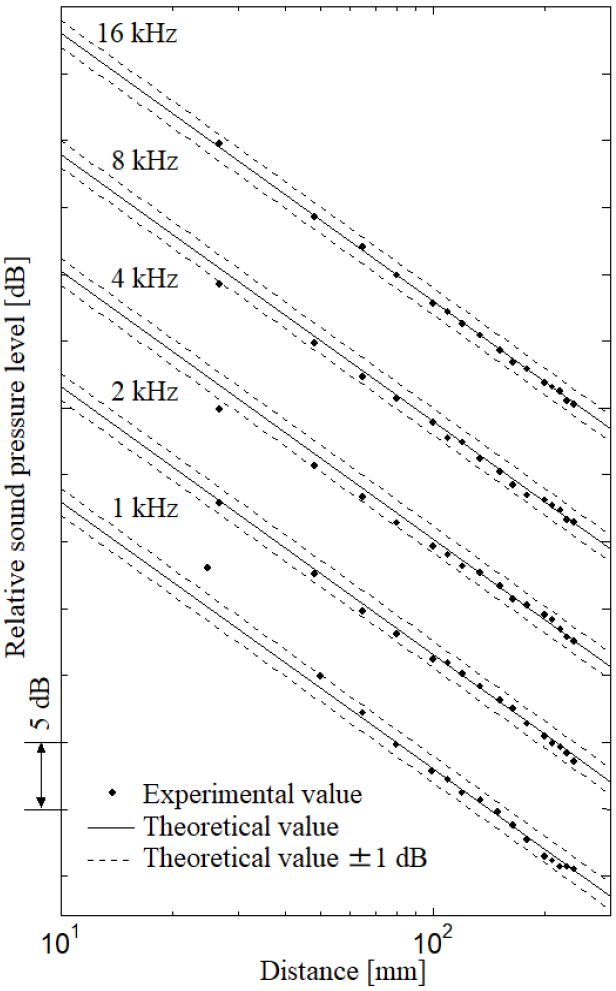


図 **2　防音箱の音圧距離特性**

自由音場とみなせる範囲で測定したミンミンゼミの高潮音と暗騒音の周波数特性を図 3 に示す。測定したミンミンゼミの高潮音の周波数特性は，1～20 kHz の範囲で暗騒音の周波数特性より 10 dB 以上大きかった。

TOPへ戻る

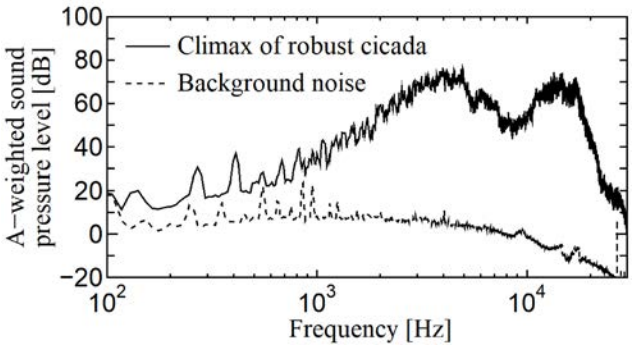


図 3　自由音場で測定したミンミンゼミの鳴き声と暗騒音の周波数特性（$r_1 = 238$ mm）

3.2 ミンミンゼミの鳴き声の測定結果

前節で自由音場とみなせる範囲にて，ミンミンゼミの鳴き声を測定した[7]。測定装置を図 4 に示す．そして，基準距離r_2=1 m におけるミンミンゼミ 1 匹当たりの高潮音の A 特性音圧レベルの最大値，これを含む 1 区間の等価騒音レベル，周波数特性とそれらの分布を分析した．

1 匹当たりのミンミンゼミの高潮音の最大音圧レベルL_{Amax}の 77 匹分の分布を図 5 に示す．最大音圧レベルの分布は正規分布を示し（Shapiro-Wilk 検定[9]，$p = 0.47$, $\alpha = 0.05$），推測された正規分布の頂点は 101.2 dB ref. 1 m (SD 4.2)であった。最大音圧レベルの平均値は 103.0 dB ref. 1 m であった。

次に，離散フーリエ変換を用いて正確なセミの鳴き声のピーク周波数を分析した。鳴き声「ミ」の 73 匹分の分布を図 6 に示す。鳴き声「ミ」のピーク周波数の分布は正規分布を示した（$p = 0.82, \alpha = 0.05$）。一方で，4.6 kHz もしくは 4.8 kHz にピーク周波数を持つ個体が多く見られた。ピーク周波数の平均値は 4727 Hz (SD = 213)であった。このような音響的特徴を計測してまとめた。

3.3 セミの鳴き声の可視化装置の開発

鳴いているセミの場所を探査するために，タブレットＰＣを用いて音源探査装置を開発する。音源方向を可視化するためにステレオマイクロホンアレイで得た音波を遅延時間推定法で音源方向推定を行った。ステレオマイクロホンアレイを２組直交配置して音源方向を推定する。そして，推定した音源方向は図 7 のようにタブレットＰＣのカメラ画像に線描写の重ね合わせで表示する手法を用いた。方向推定および画像取得は MATLAB を用いて処理を行った。マイクロホンアレイは SPL LTD. の ECM WM-61A を用いて構築した。USB オーディオは WKWZY DX-M02 TRS TO USB C マイク変換アダプタと Plugable USB Audio Adapter を用いた。処理速度は MATLAB の X 軸と Y 軸の録音時間差は 0.32 秒あり，1 回の音源方向可

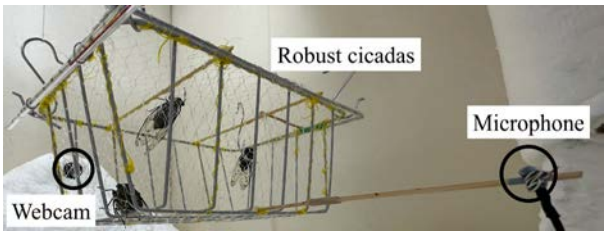


図 4　鳴き声の測定装置

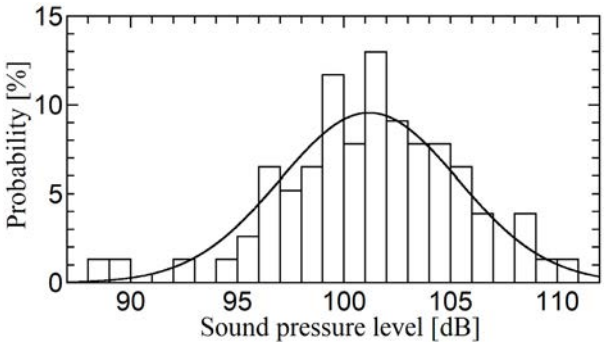


図 5　ミンミンゼミの高潮音の基準距離r_2=1 m の最大音圧レベルL_{Amax}のヒストグラム

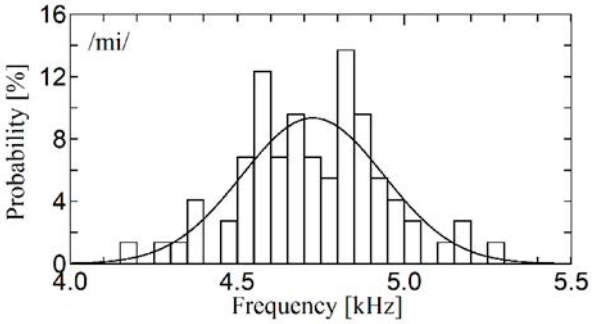


図 6　ミンミンゼミの高潮音で「ミ」と鳴く部分のピーク周波数のヒストグラム

TOPへ戻る

視化処理にかかる時間は 9.9 秒であった。本年度はＰＣとオーディオデバイスの動作を安定させることに注力した。推定精度の検討や処理速度の改善が今後の課題である。

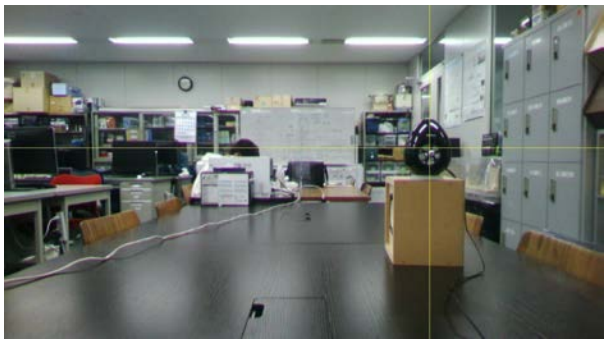


図 **7　二次元配置したマイクロホンアレイによる音源方向可視化実験の例**

3.4 セミの鳴き声の可聴域外の周波数特性測定に向けた取り組み

セミの鳴き声の可聴域外の周波数特性測定に向け，防音箱における可聴域外の周波数の自由音場測定を行った。防音箱内の吸音材の形状や配置を検討した結果，くさび型吸音材を反射の大きな壁面に局所的に設置することによって 50 kHz までの音の測定が可能であることを確認した。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本研究の目的は，雑音のない正確な 1 匹当たりのセミの鳴き声の音響的特徴を明らかにすることであり，本年度は，セミの鳴き声測定装置の自由音場環境の構築と音響的特徴の分析であった。ここでは，測定時にセミが入る防音箱における測定装置構築および自由音場範囲の評価を行った。そして，雑音や反射音の影響がない空間でミンミンゼミの鳴き声を測定し，1 匹当たりの正確な音響的特徴を明らかにした。しかし，ミンミンゼミは可聴域外の周波数も含んで鳴いていると考えられるため，可聴域外を含んだ正確な鳴き声の周波数特性を明らかにする必要がある。今後は，セミの鳴き声を可聴域外の周波数まで測定できる実験装置の構築と，鳴き声の音響的特徴の分析を実施する予定である。

発表状況は，学術雑誌掲載 2 編，国際会議発表 2 件，国内学会発表 7 件である。今後は，セミの鳴き声の音響的特徴を詳細に分析し，国際会議や学術雑誌に査読付き論文を投稿する予定である。

参考文献

[1] 犬伏宏行，近藤博之，中村敬，中島信博：自動車交通騒音に係る環境基準達成状況について，徳島県保健環境センター年報，No. 26, pp. 27–33, 2008.

[2] 松尾行雄，立田晴記，佐々木健志：野外モニタリングによるニイニイゼミ属の鳴音の音響的特徴，電子情報通信学会信学技報，EA2021-20, pp. 1–4, 2021.

[3] 日本規格協会：JIS Z 8732:2021（音響―音圧法による騒音源の音響パワーレベル及び音響エネルギーレベルの測定―無響室及び半無響室における精密測定方法），2021.

[4] 大賀寿郎：オーディオトランスデューサ工学（コロナ社，東京, 2013），p. 206.

[5] 林正美，税所康正：日本産セミ科図鑑（誠文堂新光社，東京, 2015），p. 168.

[6] 吉川昭吉郎，渡辺真吾，梶浦英男，村上正之：簡易無響室の吸音壁構造に関する検討，日本音響学会誌, Vol. 24, No. 6, pp. 343–354, 1968.

[7] 御園玲央，武藤憲司：ミンミンゼミの鳴き声の高潮音の音圧レベル測定，日本音響学会誌, Vol. 80, No. 2, pp. 61–64, 2024.

[8] 御園玲央，武藤憲司：2023 年に採集したミンミンゼミの高潮音のピーク周波数の統計分析，日本音響学会第 151 回研究発表会講演論文集, 2 pages, 2024. (in press)

[9] S. S. Sharipo and M. B. Wilk, “An analysis of variance test for normality (complete samples),” *Journal of the Biometrika*, **52**, 591–611 (1965).

TOPへ戻る

デジタル技術による事件事故防止に向けた リスクマネジメント教材の開発

情報通信工学科　　大橋　裕太郎

１．序論

スマートフォンをはじめとしたデジタル技術の普及によって若年層が事件や事故に巻き込まれるケースが後を絶たない。2023 年度は、高校生の情報行動に焦点を当て、スマートフォンを中心とした情報端末を使った学習行動について調査をおこなった。

２．研究計画

２．１　調査・分析手法

インターネット調査会社の協力のもと、全国の高校生を対象に､以下の 10 問からなるアンケートを実施した。

- Q1 学校の種類（公立・私立）と学年
- Q2 パンデミックによる休校期間中の学習指導の種類
- Q3 現在考えている進路（複数選択可）
- Q4 塾や通信教育、学習アプリなどの利用状況（複数回答可）
- Q5 学習に利用しているデバイス（複数選択可）
- Q6　Q5 を勉強に使うメリット（複数選択質問、自由記述）
- Q7 パンデミックの状況下での生活や学習の変化（複数選択可、自由記述）
- Q8 学習について信頼できる人（またはもの・こと）
- Q9 将来のキャリアについて信頼できる人（またはもの・こと）
- Q10　Q8、9 の理由、またはあなた自身の学習・進路・生活に関する悩み（自由記述）

選択式の回答については、合計を算出し、場合によっては属性別に比較を行った。自由記述形式の質問に対する回答は､事例-コードマトリックスという質的データ分析手法を用いてコーディングをおこなった。

２．２　結果

542 名から回答を得た。回答者の学校の種類（Q1）は、公立（349, 64%）、私立（186, 34%）、不明（7, 1%）であった。回答者が考えている進路（Q3）は以下の通りである（表 1）。これは 2019 年時点の全国平均（大学 53.7%、短期大学 4.4%、専門学校 23.8%）に非常に近く、全国的な傾向を探る上で適切なサンプルと考えられる。

表 1 現在考えている進路（Q1）

進路	回答数（%）
大学	316（58.3%）
短期大学	36（6.6%）
専門学校	127（23.4%）
就職	117（21.6%）
その他	1（0.2%）
未定	36（6.6%）

パンデミックによる休校期間中に学校が行

TOPへ戻る

った学習指導の種類（Q2）については、全体では「教科書・参考書等を用いた学習指導（59%）」が最も多かった。

学校外での学習における ICT の利用状況（Q5）では、スマートフォンが 7 割、スマートフォン、タブレット、パソコンのいずれかが 8 割を占めた（表 2）。なお、日本の高校では原則としてスマートフォンの持ち込みを規制・禁止している場合が多いため、この設問では自宅学習や学習塾での学習を想定している。大学進学予定者では、何らかの端末の利用率が高く、9 割近くが何らかの端末を利用していることが分かった。大学進学予定者以外でも約 7 割が何らかの端末を利用しており、ICT を活用した学習が一般化していることがうかがえる。

表 2　学習における ICT 機器の利用状況

ICT 機器の種類	回答数（N=542）
スマートフォン	387（71.4%）
コンピュータ	114（21.0%）
タブレット PC	112（20.7%）
使わない	111（20.5%）

ICT を活用した学習で重視すること（Q6）として、「自分のペースで学習できること」（43.4％）「効率的に学習できること」（30.4％）「答えがすぐに見られること」（28.1%）「学習計画とスケジュールを管理できること」（26.9%）といった項目が上位に挙げられ、効率性や学習効果を重視する傾向が見られる。

パンデミック後の生活や勉強の変化（Q7）については、「友人と過ごす時間や頻度が減った」（50.2%）、「スマートフォンと過ごす時間や頻度が増えた」（48.3%）、「朝起きる時間が遅くなった」（38.4%）、「ゲームをする時間や頻度が増えた」（33.8%）、「夜寝る時間が遅くなった」（32.5%）などが上位項目として挙げられ、筆者の予想通りの結果となった。しかし、例えば「家にいることが楽しいと思うようになった」と「家にいることがつらいと思うようになった」はほぼ同率（15%）、「ゲームをする以外の時間が増えた、または回数が増えた」と「ゲームをする以外の時間が減った、または回数が減った」もほぼ同率（約 10%）であった。このように、必ずしも悪影響ばかりが示されたわけではなかった。

一方、「有料の学習アプリを利用するようになった」（1.8%）、「無料の学習アプリを利用するようになった」（1.3%）、「通信教育や塾を利用するようになった」（0.7%）といった学習の変化は、他の生活の変化に比べて少ないことが分かった。したがって、スマートフォンなどを利用した学習は、パンデミック以前からある程度普及しており、パンデミックによって学習方法が変化したということはなさそうであることが分かった。また、「変化はない」と回答した回答者も 18%いた。

学習に関して信頼している人（またはもの・こと）（Q8）では、学校の先生が 43.9%と最も多く、友人（12.5%）、両親や家族（10.9%）と続いた。また、直接知っている人以外からの情報（テストや模試の結果（10%）、学習アプリ（4%）、ネット情報（4%）、つまり人ではなく情報を最も信頼すると回答した人も 2 割いた。

興味深い点の 1 つは、塾に通っているかどうかで比較すると、塾に通っている回答者は、学校の先生よりも塾の先生を信頼している点である（学校の先生を信頼すると回答したのは 26%、塾の先生を信頼すると回答したのは 47%）。これは、Q9 将来のキャリアについて信頼している人（またはもの・こと）でも同じ結果となった。

最後の質問（Q10）では、信頼している人（またはもの・こと）についての質問（Q8,9）や、勉強や進路、生活に関する自分の悩みについて、その理由を尋ねた。「特にない」と回答した人や、意味不明な記述を除いた 268 の回答

TOPへ戻る

を上記の分析方法を用いて分析した結果、5つのカテゴリーが生成された。

- 学校重視タイプ（N=101）。

このタイプの回答者は、基本的に学校や教師を信頼している。Q8 学習について信頼できる人（またはもの・こと）、Q9 将来のキャリアについて信頼している人（またはもの・こと）、ともに「学校の先生」と答えた回答者が該当する。

「先生に一番勉強を見られている気がするから。」（公立高校 2 年、大学進学希望）

しかし、中には「他に頼れる人がいないから」と消極的な回答もあった。また、学校や先生は信頼しているが、オンライン教育の連携が取れていないことに不満を持つ回答者もいた。したがって、このカテゴリーに属する回答者全員が、等しく学校や教師を信頼しているわけではないようである。

「学校の先生以外に頼れる人がいないから。」（私立高校 3 年、専門学校進学希望）

- 人間関係重視タイプ（N=71）

このタイプの回答者が最も信頼しているのは、家族、友人、時には長年通っている塾の教師である。必ずしも学校や先生を信頼していないわけではない。

「（友達は）同じクラスなので頼みやすい。（家族は）私のことを一番よく知っていて、良いアドバイスをしてくれる。」（公立高校 3 年。就職希望。Q8 は「友達」、Q9 は「親・家族・親戚」を選択）

- 合理性重視タイプ（N=45）

このタイプは、目的（主に進学か就職）によって、学習面で信頼する人（または相談する人）、進路面で相談する人（または相談する人）が変わる。

「どんな勉強をするかによって、信頼できる人が変わるから。」（公立高校 1 年、大学・短大・就職を検討中。Q8 は「学校の先生」、Q9 は「塾の先生」を選択。）

- 情報重視タイプ（N=26）

学校や他人を信用せず、基本的に人間以外からの情報しか信用しないタイプである。このタイプは、学校不信タイプ（後述）と似ているが、自分の学習や進路を考える上で信頼できる人がいない、もしくは少ないという点で異なる。

「（ネットの情報は）実際にその大学に通っている人の情報が得られるし、わかりやすいので良い。他大学と比べても遜色ないし、間違った方法で勉強することも避けられる。」（公立高校 3 年、進学希望。Q8、Q9 ともに「ネットの情報」を選択）

- 学校不信タイプ（N=25）

このタイプの回答者は、パンデミック後、あるいはそれ以前から、学校や教師に対して強い不信感を抱いており、基本的に教師や学校の方針に賛同していない。4 つ目の情報重視タイプと似ているが、オンライン、オフラインに関わらず、信頼できる人がいるという点で基本的に異なる。

「初対面の人のほうが、物事を軽く考えられる気がするから。」（私立高校 3 年、専門学校進学希望。Q8、Q9 ともに「ネット上の友人」を選択）

２．３　考察

ICT 環境の整備が遅れている学校とは対照的に、個人レベルでの ICT（主にスマートフォン）の学習利用が当たり前になっており、学校と生徒のギャップが浮き彫りになった。また、COVID-19 による休校をきっかけに生徒のデジタル学習方法が変化したわけではなく、パンデミック以前から生徒の間でスマートフォンやタブレット端末の利用がある程度浸透していたことがわかった。また、「ICT を活用した学習で大切なこと（Q6）」という質問に対する回答では、効率性や学習効果を重視する回答が多く、現在の学校では提供できないような個別最適の学習を確立しようとしている表れと見ることができる。ICT を活用した授

TOPへ戻る

業に関しては、学校は教育サービス事業者、さらには個人レベルの ICT 活用に遅れをとっていると言わざるを得ない。

生徒の勉強や進路を考える上で最も信頼されるのは学校の先生だが、塾に通っている人は学校の先生よりも塾の先生を信頼している割合が高かった。この結果は予想外だった。人間よりも情報を信頼すると答えた人は 20%だったが、これは「直接知っている人（学校の先生、家族、友人など）を信頼する」と答えた人の割合よりは少なかった。この数字が多いか少ないかは議論の余地がある。

この調査はパンデミック後に実施されたため、信頼関係がどのように変化したかを比較することはできない。したがって、今後どうなるかを予見するのは容易ではないが、パンデミックの影響もあり、学校や教師が教育主体として絶対的な信頼を得られていないことが、この調査からうかがえる。

学校が今後も重要な学習の場であることは間違いないが、その重要性は以前と同じではないかもしれない。生徒の態度に「情報重視」「学校不信」といったカテゴリーが出現していることは、教師や学校が考えている以上に生徒たちはドライ／シビアな考えを持っていて、学校を学びの場のひとつとしてしか見ていない可能性を示唆している。教えることが教師だけの領域でないのであれば、教師の役割は今後どうなるのだろうか？この問いは、決して教師を批判するものではない。私たちは休校措置期間を経て、学校や教師の存在意義の重要性を実感している。テクノロジーや商業的な教育サービスでは容易に実現できない、子どもを守り、育み、見守るという本質的な要素は残らなければならない。学校と教師は、その役割を再考する岐路に立たされているのではないだろうか。

３　まとめ

筆者は、新型コロナウイルス感染拡大が教育や生徒の学習に大きな影響を与えたことを受け、(1)パンデミック後、高校生の学習実践、特に ICT、塾、通信教育、学習アプリの利用がどのように変化したのか、(2)学習や進路を考える上で誰を（何を）信頼しているのかを明らかにするため、全国規模のインターネットアンケート調査を実施した。

(1)については、学校における教育の情報化はの進展は調査時点で限定的であること、生徒の個人レベルでの学習における ICT（主にスマートフォン）の活用は、パンデミック以前からある程度普及していたこと、パンデミックが直接的に学習方法のデジタル化につながったわけではないことを明らかにした。

(2)については、学校の先生は生徒からある程度信頼されているものの、塾の先生ほど信頼されていないことが分かった。また、テストや模試の結果、学習アプリやネット情報などの情報を最も信頼すると回答した回答者が 2 割おり、学校や教師が絶対的な信頼を得ているわけではないことが分かった。生徒は「学校重視」「人間関係重視」「合理性重視」「情報重視」「学校不信」の各タイプに分類され、学校側がおそらくこれまで想定してこなかった生徒像が明らかになった。これらの結果は、学校と生徒の意識のギャップがさらなる問題を引き起こす可能性を示唆している。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本研究結果を、2024 年 3 月にフィンランドにて開催された国際会議 21st International Conference on Smart Technologies & Education Smart Technologies for a Sustainable Future にて発表した。発表原稿は Springer 社から Lecture Notes in Networks and Systems series のチャプターとして発刊される予定である。

TOPへ戻る

サテライトオフィスの多様な社会的効果の計測手法－男女共同参画の促進に向けて

土木工学科　　岩倉　成志

１．序論

SDGs の目標 5 に「ジェンダー平等を実現しよう」という項目があり，日本政府も男女共同参画計画など様々な政策を掲げている．しかし，2023 年のジェンダーギャップ指数ランキングでは 146 ヵ国中 125 位と低い順位であり，日本では女性の社会進出があまり進んでいない．

実際，厚生労働省発表のデータより，2020 年の日本女性が無償で行う家事や育児に使う労働時間は男性の 6 倍以上である一方で，有償労働時間は半分以下である(表-1 参照)．加えて，未婚女性と配偶者がいる女性の労働力率を比較すると，配偶者がいる女性の方が労働力率が低いため，女性は全体的に有償労働時間に割く時間が少ない．つまり，無償・有償労働時間や労働力率は，性別などの個人属性だけでなく配偶者の有無といった世帯属性にも強く影響を受けており，世帯員間の相互作用も加味して活動時間配分割合の実態把握を行うことが重要である．

本研究の目的は，子育て世帯の夫婦間の相互作用を考慮した活動時間配分モデルの構築を通して 1 日の活動時間配分割合の実態把握を行うことである．女性が長期的かつ継続的に活躍できる社会の設計に繋げるために，モデルを用いてシェアオフィス活用による世帯活動時間の改善や夫婦間におけるお互いの個別活動の尊重の意義を明らかにする．

２．研究計画

課題１）サテライトオフィスがもたらす社会的効果の体系的整理（令和 5 年度前期）: テレワークの社会的効果に関する既存研究の整理をおこなう．

課題２）複数オフィス利用を念頭においた家庭内相互作用活動時間配分モデルの開発（令和５年度後期－令和６年度後期）: 世帯構成員の一日の行動パターンを，東京圏パーソントリップ調査（2018 年）と三井不動産のサテライトオフィス利用実績，さらに本申請で科研採択に向けたプロトタイプ調査を独自に実施してサテライトオフィス利用者の活動ダイアリー調査データから収集する．それらを複合させてプロトタイプのアクティビティモデルを開発し，在宅勤務やサテライトオフィスが利用可能な場合の活動パターンの変化を推計するとともに，家族の生活効用がどの程度上昇するかを計算することを目指す．

以下の課題３）～課題５）は科研基盤 B 採択後に研究をおこなう．

課題３）サテライトオフィスの利用が子育て中の親に与える心理的効果と子どもへの影響（令和６年度前期－令和７年度）

TOPへ戻る

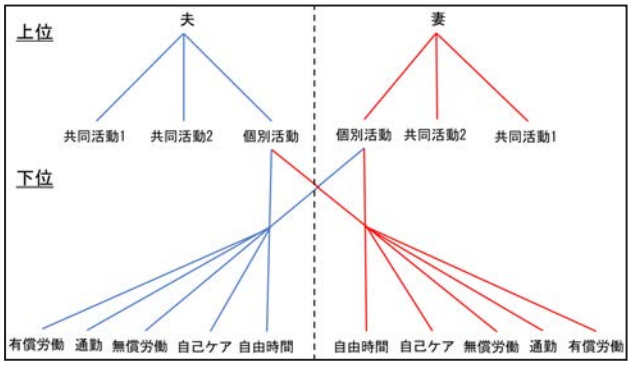


図-1 NL モデル

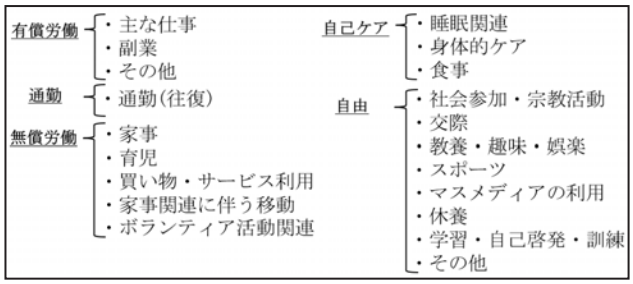


図-2 活動種類

課題４）サテライトオフィスが育児期女性のライフコースに与える影響（令和６年度前期－令和７年度前期）

課題５）サテライトオフィスの社会的効果のケーススタディ　（令和７年度）

３．計画の進行状況

今年度は課題２）として以下を行った．Gliebe & Koppelman を参考に，集計ロジットモデルを用いて各世帯員(夫と妻)の相互作用を考慮した活動時間配分モデルの構築を行う．上位では配偶者または配偶者と子の組合せ同伴活動を行った場合の共同活動を示す．モデルの選択肢となる活動種類について，共同活動 1 は無償労働，共同活動 2 は無償労働以外の有償労働，通勤，自己ケア，自由時間の総活動時間を表す．　下位では共同活動の同伴行動以外と単独行動を行った場合の各個別活動を示す．なお，各活動種類の詳細を図-2 に示す．

また，効用関数はその時間配分になった要因が説明変数となる．なお，パラメータ推定は Nested Logit モデルの段階推定で下位と上位，夫と妻について計 4 回 MNL の推定を行い，その構造は図-1 である．各活動時間配分割合と各効用関数を以下に示す．

レベル 1　（下位）

$$S_{pn}(i|C_p)=\frac{exp(X_{ipn}\beta)}{\sum_{j\in C} exp(X_{jpn}\beta)},\forall j \in C_p$$

$$V_{有償労働}=\theta_1*A_{area}+\theta_5*A_{nomal}+\theta_8*A_{arr1}+\theta_9*A_{arr2}$$

$$V_{通勤}=d_s*(\theta_s*A_{dis}+C_s)+d_m*(\theta_m*A_{dis}+C_m)$$

$$V_{無償労働}=\theta_2*A_{old6}+\theta_3*A_{old10}+\theta_4*A_{child}+\theta_6*A_{holiday}+C_1$$

$$V_{自己ケア}=\theta_7*A_{health}+C_2$$

$$V_{自由時間}=\theta_6*A_{holiday}+C_3$$

レベル 2　（上位）

$$S_n(i|C_n^{Jnt})=\frac{exp(X_{in}\beta)}{exp(p_1*\Gamma_1+p_2*\Gamma_2)+\sum_{j\in C_n^{Jnt}} exp(X_{in}\beta)},\forall j \in C_n^{Jnt}$$

$$V_{共同活動\,1}=\theta_{10}*A_{child}+\theta_{11}*A_{nomal}+C_4$$

$$V_{共同活動\,2}=\theta_{12}*A_{holiday}+C_5$$

$$V_{個別活動}=\mu_{夫}*\Gamma_1+\mu_{妻}*\Gamma_2$$

$$\Gamma_p=\ln\left(\sum_{j\in C_p^{Indp}} exp\left(X_{ipn}\beta\right)\right).$$

A_{area}:三大都市圏か否か　A_{old6}:子 6 歳未満　A_{old10}:子 10 歳未満　A_{child}:子いるか否か　A_{nomal}:通常の日　$A_{holiday}$:休日　A_{health}:健康か否か　A_{arr1}:フルタイム勤務　A_{arr2}:パートタイム勤務　A_{dis}:通勤距離(片道)　μ_1,μ_2:夫と妻の個人活動のスケールパラメータ　$C_s,C_m,C_1,C_2,C_3,C_4,C_5$:定数項

なお，通勤距離について，本分析で使用している社会生活基本調査は通勤時間は分かるが，居住地と勤務先の情報，利用交通手段の情報が無いため，通勤時間と距離の関係について 2018 年 PT 調査の計画基本ゾーンのデータを用いて算出し，通勤距離を通勤時間の説明変数として用いた．通勤時間の効用関数に

TOPへ戻る

ついて，d_s は 2km 以下(徒歩)，d_m は 2.1km 以上(鉄道)とし，d_s は 2.0km 以下の場合に 1，2.1km 以上の場合に 0，d_m は 2.0km 以下の場合に 0，2.1km 以上の場合に 1 と設定した．スイッチング回帰モデルで推定したパラメータである距離 d_s は t 値 1%有意基準を満たし，距離 d_m は 5%有意水準を満たしていない．通勤時間と距離の関係を高い精度で推定できていないことは今後の課題である．

パラメータ推定結果は表-1，表-2 の通りである．下位の尤度比は，夫の推定結果では 0.330，妻の推定結果では 0.322 とある程度の精度が得られた．しかし，t 値について 5%有意水準を満たすパラメータは少ない．その一方で，5%有意水準を満たす場合は 1%有意水準を満たす場合が多く，通常の日(夫，妻)か休日(夫)か，勤務形態がフルタイム(夫，妻)かパートタイム(妻)かの要素に活動時間配分割合が大きく依存するといえる．説明変数である休日は，妻のみが有意にならなかったことから，休日とそれ以外の日で無償労働時間や自由時間の時間配分にあまり変化がないといえる．また，子に関する要素については妻に関して子の人数のみが 5%有意水準を満たしており，パラメータをみると子の年齢よりも子の人数の方が影響を与えている．なお，有償労働時間の説明変数について世帯収入も考えたが夫と妻共に全く有意な結果ではなかった．

上位は，尤度比は夫の推定結果では 0.478，妻の推定結果では 0.433 と精度が高く，t 値が 5%有意水準を満たす場合は 1%有意水準を満たす場合が多い．本分析のスケールパラメータ μ_夫，μ_妻は相手の個別活動に対する協力度合いを表しており，妻のパラメータ推定におけるスケールパラメータ μ_夫，μ_妻は共に 1%有意水準を満たしている．夫の推定結果

表-1 下位のパラメータ推定結果

レベル1		夫		妻	
三大都市圏か否か	［有償］θ_1	-0.018	(-0.102)	-0.160	(-0.616)
子6歳未満	［無償］θ_2	0.010	(0.023)	0.158	(0.663)
子10歳未満	［無償］θ_3	-0.156	(-0.316)	-0.016	(-0.055)
子の人数	［無償］θ_4	0.237	(1.134)	0.249	(2.066)
通常の日	［有償］θ_5	2.361	(10.576)	2.868	(7.146)
休日	［無償，自由］θ_6	0.625	(3.470)	0.094	(0.573)
健康か否か	［自己］θ_7	-0.129	(-0.421)	-0.159	(-0.552)
フルタイム	［有償］θ_8	4.206	(2.609)	5.697	(4.198)
パートタイム	［有償］θ_9	3.148	(1.326)	4.919	(3.610)
距離ds	［通勤］θ_s	1.927	(3.446)	2.240	(3.449)
距離dm	［通勤］θ_m	0.019	(1.710)	0.026	(0.831)
定数項	［通勤］C_s	0.629	(0.333)	2.169	(1.206)
定数項	［通勤］C_m	4.561	(2.722)	6.504	(4.129)
定数項2	［無償］C_1	3.734	(2.270)	7.236	(5.100)
定数項3	［自由］C_2	6.576	(3.981)	8.666	(6.033)
定数項4	［自己］C_3	4.794	(2.939)	7.087	(5.008)
尤度比		0.330		0.322	
サンプル数		888			

表-2 上位のパラメータ推定結果

レベル2		夫		妻	
子いるか否か	［共同1］θ_{10}	0.201	(1.130)	0.239	(1.827)
通常の日	［共同1］θ_{11}	-1.138	(-2.622)	0.004	(0.017)
休日	［共同2］θ_{12}	0.413	(2.020)	-0.036	(-0.156)
定数項1	[共同1] C_4	2.700	(2.401)	3.964	(3.829)
定数項2	[共同2] C_5	3.684	(3.147)	4.660	(4.451)
スケールパラメータ［夫］$\mu_{夫}$		0.153	(3.870)	0.186	(5.407)
スケールパラメータ［妻］$\mu_{妻}$		0.063	(2.410)	0.072	(2.830)
尤度比		0.478		0.433	
サンプル数		888			

について，スケールパラメータ μ_夫が 0.153，スケールパラメータ μ_妻が 0.063 となり，μ_夫の方が大きい値であることから夫は夫自身の個別活動をより大切にしているといえる．一方で，妻の推定結果について，スケールパラメータ μ_夫が 0.186，スケールパラメータ μ_妻が 0.072 である．スケールパラメータ μ_夫の方が大きい値であることから，妻は妻自身の個別活動よりも夫の個別活動をより大切にし，夫の個別活動に協力的であることが明らかになった．

推計結果より，通勤時間が減少することで特に有償労働や自己ケアの活動時間配分量が増加することが明らかとなった．そこで，新たな要素として社会的側面から，送迎保育機

TOPへ戻る

表-3 通勤距離ごとの夫と妻の 1 日の活動時間配分量

	通勤距離 夫：30.0km，妻：30.0km		通勤距離 夫：30.0km，妻：5.0km		通勤距離 夫：5.0km，妻：30.0km	
	夫	妻	夫	妻	夫	妻
共同活動1	11.0	36.5	11.4 (+0.4)	38.1 (+1.6)	11.8 (+0.8)	39.7 (+3.2)
共同活動2	75.1	57.4	78.0 (+2.9)	59.9 (+2.5)	80.4 (+5.3)	62.3 (+4.9)
有償労働	565.1	425.2	563.7 (-1.4)	445.3 (+20.1)	585.2 (+20.1)	422.7 (-2.5)
通勤	137.7	137.0	137.4 (-0.3)	75.7 (-61.3)	88.2 (-49.5)	136.2 (-0.8)
無償労働	43.3	198.8	43.2 (-0.1)	208.2 (+9.4)	44.8 (+1.5)	197.6 (-1.2)
自己ケア	510.2	471.2	508.9 (-1.3)	493.5 (+22.3)	528.3 (+18.1)	468.3 (-2.9)
自由時間	97.7	113.9	97.4 (-0.3)	119.2 (+5.3)	101.2 (+1.5)	113.2 (-0.6)

能付きシェアオフィスを導入した新たな都市サービスの提供の検討を行うことで，有償労働時間配分量が増加し，女性が長期的かつ継続的に活躍できる社会の設計を支えることができると考える．なお，送迎保育ステーションとは駅前などの利便性の高い場所に設置されてバスで子供を保育園などに送迎してくれるサービスのことである．

実際に,独自の Web 調査として，シェアオフィスを利用している子育て世帯を対象に 2023 年に楽天インサイトにて実施した．1 日の活動時間配分量に加えて無償労働時間の配偶者との分担率や満足度, 1 日の移動，シェアオフィス利用に関する質問など社会生活基本調査で補えない質問項目を追加した．サンプル数は 400 である．

もし送迎保育ステーションとシェアオフィスが連携した送迎保育機能付きシェアオフィスが出来たら利用したいと回答した人は男性が 81.7%，女性が 88.9%となり多くの人が望んでいるといえる(図-3 参照).

加えて，シェアオフィスを利用したことによる日常生活の変化として多く挙げられたのが，移動時間の短縮や朝夕の時間の創出，仕事の効率向上である．シミュレーションのテレワークの効果で示した通り，妻は通勤距離が短くなると有償労働時間が増加することが明らかとなった．つまり，妻が送迎保育機能付きシェアオフィスを利用した場合，通勤距離が短くなることによる通勤時間短縮効果が得られ，妻の有償労働時間配分量の増加に繋がり，女性の長期的かつ継続的に活躍できる社会の設計に繋がると期待する．

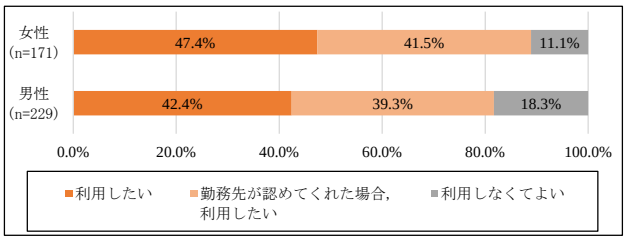


図-3 送迎保育機能付きシェアオフィス

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

2024 年度科学研究費基盤研究(B)（一般）として「女性のキャリア継続に資する都市空間の検討に向けた家族相互作用モデリング」が採択された．研究課題３）～５）の研究を今後３年間で進めるとともに，課題２）のモデルの改良を進める．

今年度の学会投稿は，以下の２つである．

・第 69 回土木計画学研究発表会・春大会（自由投稿型）2024 年 5 月 25 日(土)–26 日(日)

・第 79 回年次学術講演会:2024 年)9 月 2 日(月)～6 日(金)

TOPへ戻る

セメント改良土の動的引張挙動の解明

工学部　土木工学課程　　並河　努

1．序論

深層混合処理工法などによるセメント地盤改良工法は、構造物基礎、掘削工事、液状化対策など土木建築プロジェクトにおいて国内外で幅広く適用されてきている。開発当初は全面改良のようなブロック状の改良形式が用いられていたが、近年は設計の合理化に伴い杭状や壁状（図 1）の改良形式の適用が増加してきている。ブロック状の改良の場合、外力に対して改良体内に大きな引張応力が作用することはなく、設計での内的安定評価において改良体の圧縮挙動とせん断挙動を検討すれば問題ない。一方、図 2 に示すように壁状形式の改良体に地震時水平慣性力等が作用すると曲げ変形が生じるため、曲げに伴うセメント改良体の引張挙動の評価が本工法の設計において重要となってきている。

図 1 壁状改良の例

壁状形式の改良工法の代表として格子状セメント改良地盤による液状化防止工法がある。本工法の適用事例を図 3 に示す。本工法

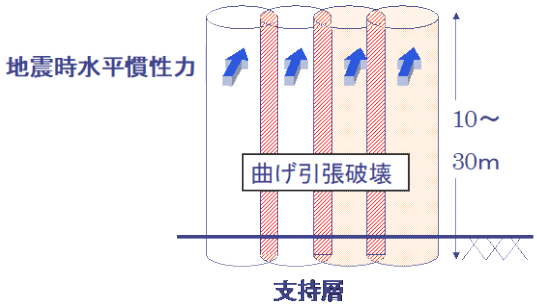


図 2 地震時水平外力を受けるセメント改良壁

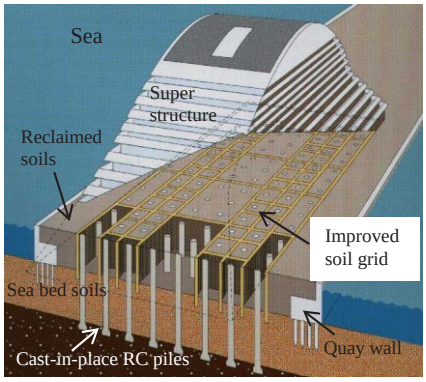


図 3 格子状セメント地盤改良例 [1)]
メリケンパークオリエンタルホテル

の合理化策としてはセメント改良体格子の間隔を広げることが考えられるが、その場合格子状内の未改良地盤の液状化防止の検討とともにセメント改良体の内的安定の評価が重要となる。研究代表者は、三次元動的 FEM 解析を実施し、格子状セメント改良地盤の地震時挙動をより詳細に調べた [1)]。最大加速度時におけるセメント改良体内引張応力分布の解析結果を図 4 に示す。この解析ではセメント

TOPへ戻る

改良体を弾性体でモデル化しているが、図 4 は改良体のコーナー部に大きな引張応力が作用することを示しており、地震時において改良体内に引張破壊が生じる可能性を示唆している。一方、兵庫県南部地震や東日本大震災後の調査において、格子状セメント改良地盤に亀裂等の損傷が生じたという報告事例はない。

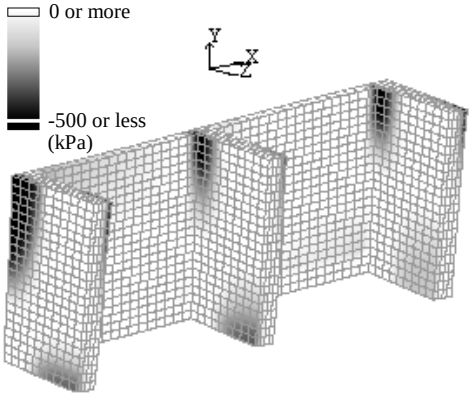


図 4 地震時に格子状セメント改良体内に生じる引張応力（FEM 解析結果）[1)]

FEM 解析結果と震災後調査で差異が生じた要因は主に２つ考えられる。ひとつめの要因は、解析における改良体の力学モデルの精度にあると考えられる。現在、セメント改良土の繰返し引張挙動は明らかになっておらず、その挙動を適切に表現できるモデルも存在していない。図 4 の解析では改良体を弾性体でモデル化しているが、この解析においてセメント改良体の繰返し引張挙動を適切にシミュレーションできていない可能性がある。ふたつめの要因は、材料の引張強度には載荷速度依存性があることである。セメント改良土の引張強度に載荷速度依存性が存在するならば、載荷速度が遅い引張試験で得られた引張強度に対し、地震時慣性力に対応した載荷速度に対する引張強度は大きくなる可能性がある。これらのことより、格子状セメント改良地盤の地震時挙動を精度よく評価し、本工法のより合理的な設計を実現するには、動的引張試験を実施し、セメント改良土の動的引張挙動を明らかにすることが必要である。

セメント改良地盤の力学挙動に関しては、圧縮及びせん断挙動の解明が主に行われてきた。地震時におけるセメント改良地盤の挙動予測を目的とし、セメント改良土の繰返し三軸圧縮試験等が実施されてきており、繰返しせん断応力に対する応力―ひずみ関係は明らかにされてきている。一方、セメント改良土の引張挙動に関しては、単調載荷による引張載荷試験は実施されているが、繰返し引張試験を実施した研究はない。

本研究の目的は、セメント改良土の動的引張挙動特性を明らかにすることである。セメント改良土供試体を用いた繰返し直接引張試験と急速直接引張試験を実施し、地震時において生じる繰返し引張載荷条件下におけるセメント改良土の応力―ひずみ関係と載荷速度が引張強度に与える影響を明らかにする。

２．研究計画

本研究での実施事項は以下の 2 項目である。

・セメント改良土の繰返し直接引張試験

・セメント改良土の急速直接引張試験

以下に各試験での実施内容と明らかにしようとする点について述べる。

1) セメント改良土の繰返し直接引張試験

セメント改良土の繰返し直接引張試験を実施し、繰返し引張載荷条件下におけるセメント改良土の応力－ひずみ関係を明らかにする。引張強度の 50%~100%の引張応力を荷重制御 1Hz で繰返し載荷し、各応力レベル（ひずみレベル）における応力－ひずみ関係を明らかにする。試験結果より、引張応力下におけるセメント改良土の引張弾性係数と履歴減衰のひずみ依存性を明らかにする。また、繰返し引張載荷にともなう累積ひずみの増加現象（力学的ラチェット現象）とその減衰現象の有無を明らかにする（図 5）。

TOPへ戻る

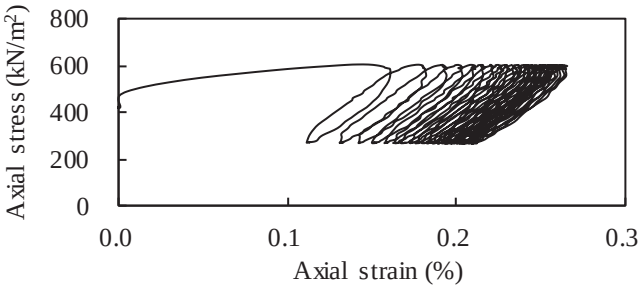


図 5　繰返し載荷応力による力学的ラチェット現象

2)　セメント改良土の急速直接引張試験

セメント改良土の急速直接引張試験を実施し、載荷速度が引張強度に与える影響を調べる。試験では、周波数を変えた余弦波引張荷重を供試体に荷重制御で載荷する。余弦波の周波数は 0.001～1Hz まで変化させる。試験結果より、載荷ひずみ速度と引張強度の関係を明らかにする。

３．計画の進行状況

1)　セメント改良土の繰返し直接引張試験

セメント質量比 6%と 7%の 2 種類のセメント改良砂供試体を用いて、繰返し直接引張試験を実施した。引張試験時の供試体例を図 6 に示す。供試体側面に局所変位計を取付け、供試体の変形を直接計測した。引張荷重履歴の例を図 7 に示す。試験では想定破壊荷重の 50%～100%の引張荷重を段階的に供試体に載荷した。１載荷段階における繰返し回数は 10 回である。

図 7 に示す載荷履歴より得られた試験結果（引張応力－引張ひずみ関係）を図 8 に示す。各載荷段階において、引張応力－引張ひずみ関係はほぼ直線となっており、載荷応力の増加に伴う非線形は見られない。また、圧縮繰返し試験で見られた力学的ラチェット現象も見られず、載荷応力に関係なく繰返し引張挙動は線形弾性挙動であることが明らかとなった。

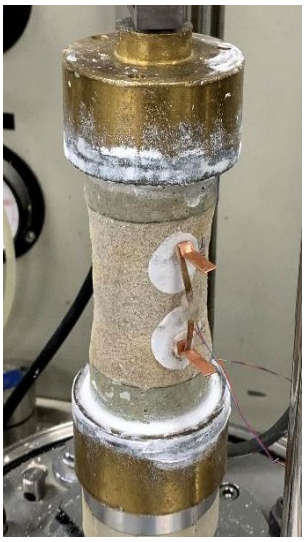


図 6 直接引張試験時の供試体

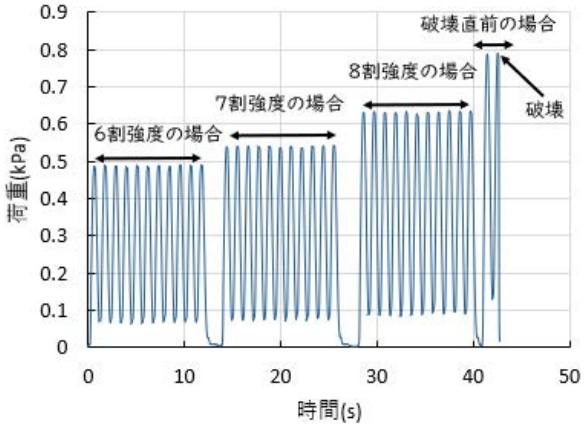


図 7 繰返し直接引張試験の載荷例

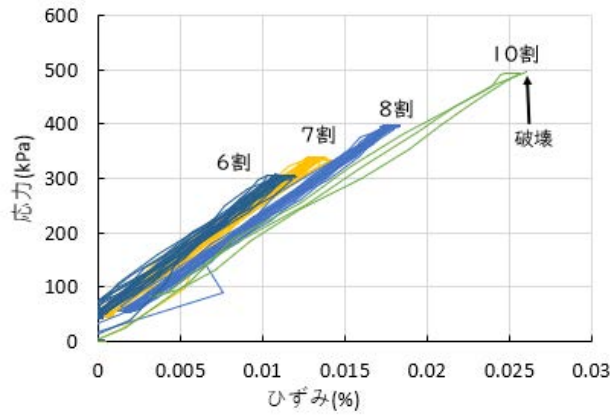


図 8 繰返し直接引張試験の応力-ひずみ例

2)　セメント改良土の急速直接引張試験

セメント質量比 5%、6%、7%の 3 種類のセ

TOPへ戻る

メント改良砂供試体を用いて、急速直接引張試験を実施した。引張荷重は余弦波で与え、周波数を 0.001～1Hz まで変化させることにより、引張載荷速度が引張強度に与える影響を調べた。また、低速条件の試験として変位速度制御試験を変位速度 0.005 mm/min で実施した。

急速直接引張試験より得られた載荷速度と引張強度の関係を図 9 に示す。図中の試験条件は C5A：セメント 5%気中、C6A：セメント 6%気中、C7A：セメント 7%気中、C6W：セメント 6%水中を示している。セメント量の増加に伴い引張強度は増加するが、同一セメント量の条件では載荷速度に伴う引張強度の増加はほとんど見られない。また、荷重制御試験と変位制御試験から得られる引張強度にも差が見られない。

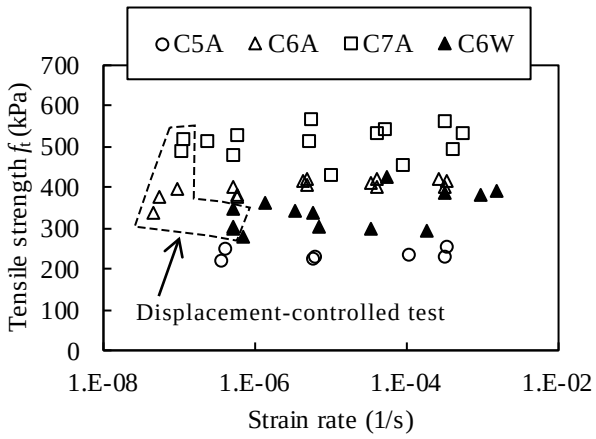


図 9　載荷速度と引張強度の関係

引張試験結果を DIF（Dynamic increase factor）で整理したものを図 10 に示す。DIF は各載荷速度での引張強度と $10^{-6}s^{-1}$ のひずみ速度の引張強度との比である。今回のひずみ速度 10^{-7}～$10^{-3}s^{-1}$ の範囲では引張強度の顕著な増加は見られないことがわかる。図中 C は格子状セメント改良地盤の地震時解析で得られた改良体内のひずみ速度であるが、本ひずみ速度は $10^{-3}s^{-1}$ 程度で、地震時における改良体内に発生するひずみ速度程度では、引張強度の増加は大きく見込めないことがわかる。図中 D は地盤工学会基準における岩及びセメント改良土の直接引張試験の載荷速度の範囲を示している。試験結果は地盤工学会基準より広範囲のひずみ速度で DIF の変化が小さく、基準より広範囲な載荷速度が直接引張試験の条件として可能であることを示唆している。

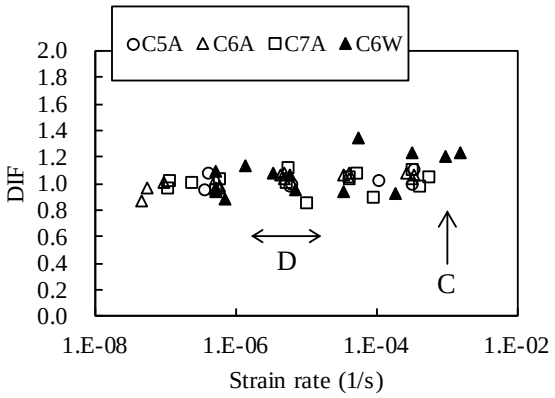


図 10　DIF（Dynamic increase factor）

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本研究におけるセメント改良土の急速引張試験の成果は「Tensile strength of cement-treated sand at different loading rates」と題して、Geotechcnical Testing Journal（ASTM）に投稿し、現在査読中である。

今後は、セメントの代わりに高炉スラグ微粉末を用いた地盤改良工法開発の一環として、高炉スラグ微粉末改良土の引張試験を実施する予定である。

参考文献

1)　Namikawa T. and Koseki J.: Finite element analysis of lattice-shaped ground improvement by cement-mixing for liquefaction mitigation. *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, 559-576, 2007.

TOPへ戻る

Study of ultra-performant thermoelectric thin films based on spinel ferrite crystal structure

先進国際課程　Paolo　MELE

Research colleagues
University of Genoa: Alberto Giribaldi

1. Paper introduction

Thermoelectric (TE) materials [1] can directly convert waste heat into electricity without moving parts, being candidates to address current energy issues [2]. However, several problems are limiting their diffusion: the inclusion of toxic and/or expensive elements, low conversion efficiency η ($\eta < 10\%$) and low thermal stability. Therefore, the most performant TE materials, like Bi_2Te_3, are confined to niche applications (e.g. power supply to space probes). Oxide materials are good candidates to overcome these issues being stable, environmentally benign, abundant, and cost-effective. The best TE oxides so far are the n-type Al-doped ZnO [3] and p-type $Ca_3Co_4O_9$ [4], however, their efficiency ($\eta \sim 1\%$) is significantly lower the one of conventional TE.

The performance of a TE material is quantified by the a-dimensional figure of merit $ZT = (\sigma S^2) \times T/(\kappa_{el}+\kappa_{ph})$ (Eq.1) where σ is the electrical conductivity, S is the Seebeck coefficient ($S = \Delta V/\Delta T$, being V the electrical voltage); the electronic thermal conductivity is $\kappa_{el} = LT\sigma$ (Eq. 2), where L is the Lorentz number and the phononic thermal conductivity is $\kappa_{ph} = 1/3\ Cv\Lambda$ (Eq. 3) with C = heat capacity, v = speed of phonons, Λ = phonons mean free path. T is the absolute temperature.

Since η increases with ZT [5], the goal is to improve ZT by enhancing the numerator of Eq. 1, σS^2 (power factor, PF) or depressing the denominator, $\kappa_{el} + \kappa_{ph} = \kappa$ (thermal conductivity). $ZT \geq 1$ is considered the threshold to have applicable TEs.

The conventional TE have ZT~2 (η ~ 20%) at low operational temperatures (T ~600 K) and oxides have ZT~0.65 at 1000 K. Therefore, it is mandatory to improve the ZT of oxides and make it approach the same level as conventional TEs.

Recently, oxides belonging to the spinel ferrite family MFe_2O_4 (M = Mn, Rh, Cr, Mo) have been theoretically investigated and identified as potentially high-performance TEs, since their S is predicted to be $\pm$600~700 μV/K at room T [6], while for a typical TE this value is in the order of $\pm$50~100 μV/K. It is worth noting that the n- or p- behaviour of the oxides can be simply trimmed by varying the

TOPへ戻る

carrier concentration. Therefore, the enhancement of ZT of oxides can be pursued with a double strategy: 1) improving σS^2 because of the large intrinsic S of the spinels [6], and 2) depressing κ as an effect of the low dimensionality of thin films [7]. However, there is currently no exhaustive experimentation on this kind of structure for TE application.

The goal of this project is to find more high-performance spinel TE oxides by application of computer simulations, then synthetize the best ones as thin films by pulsed laser deposition (PLD) and characterize them. In this way, oxide spinels can be established as a new family of efficient TE materials.

２. Research program

The original research program of submitted Kakenhi was

1) Fabrication and evaluation of MFe_2O_4 thin film (M = Mn, Mo, as other metals are rare or toxic) - First, fabrication of MFe_2O_4 compound powder by solid phase method or chemical coprecipitation method. Second, fabrication of dense targets of MFe_2O_4 compound by spark plasma sintering (SPS). Third, laser ablation of the dense target to fabricate spinel thin films on fused silica using pulsed laser deposition (PLD). Eventually, application of post-annealing at different conditions to tune the oxygen content of the thin film and control the n-/p-behavior, and evaluation of structure, morphology, transport, and thermoelectric properties.

2) Addition of nano defects to lower k and improve ZT

3) Selection of the optimal n-type and p-type doped spinel, obtained through post-annealing and doping. Fabrication and characterization of thin film modules using n/p couples.

The present yearly research was focused on point 1) due to time constraints.

３. State of progress

$MnFe_2O_4$ is available as commercial powder, while $MoFe_2O_4$ (which is expected to be the most performant spinel) has been found as extremely difficult to obtain via solid state reaction from the oxides, and also via coprecipitation of Mo and Fe salts, In order to overcome this difficulty, it has been tried to synthesize the solid solution $(Mo_xMn_{1-x})Fe_2O_4$. The samples with x = 0.1, x = 0.3 and x = 0.6, have all been prepared via coprecipitation method, mixing the stoichiometric amounts of $Fe_2(SO_4)_3$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ and MoO_3 in distilled water and using NH_3 as precipitating agent. The precipitant has been filtered with a Buchner funnel at low pressure, washed two times with deionized water and dried at 100° C overnight in a stove. The brown aggregated powders were crushed in a mortar and calcined at 900° C for 12h under air atmosphere, in alumina crucible, with a furnace. XRD patterns and SEM-EDS analysis (not shown here) have shown that the obtained phase is not the spinel but a mixture of two or more phases, in which $Fe_{1.8}Mn_{0.2}O_3$, (hematite structure) is dominant.

$MnFe_2O_4$ has been prepared as thin film via pulsed laser deposition using a commercial bulk powder of spinel ferrite, densified via spark plasma sintering at 900° C under

TOPへ戻る

45MPa, as target for the technique. The source for this thin film deposition method is Nd:YAG laser, that worked with energy density of 4.2J/cm^2 and a frequency of pulses of 10Hz. The deposition was performed on silica substrates kept at different temperatures, from room temperature to 700° C, at a 35mm distance from the target. The process was carried out for 30min under high vacuum. A subsequent annealing was performed on the samples at a temperature of 700° C under different atmospheres (O_2, Ar + H_2 1%, and air.

The ferrite thin films as deposited show the spinel phase with a preferential orientation along the [311] crystallographic direction, and a secondary orientation along [111] and crystallinity that improves with the temperature of deposition. The only exceptions are the film deposited at RT, whose orientation seems to be along [220], and the film deposited at 700 ° C that is almost completely [311] oriented.

The effect of the atmosphere for the annealing at 700° C on the crystal structure can be summarized as follows.

a) oxidizing atmosphere (O_2) induces a structural change from the spinel type (space group Fd-3m) to a hematite type (space group R-3c);

b) reducing atmosphere (Ar + 1% H_2) induces a change of the preferential orientation from [311] to [111];

c) inert atmosphere (Ar) has different effects based on temperature. At 300° C the spinel structure with [311] orientation is retained, while from 500° C there is a change of the orientation from [311] to [111].

The as deposited films have a quite homogeneous surface as inferred from the SEM images at low magnification. The annealed samples, however, are characterized by a rougher surface texture and an extended net of deep cracks spreading through the whole area of the thin film. The morphology encountered depends on the atmosphere used in the annealing process, with rounder aggregates in the samples treated in presence of O_2 (either as pure gas or as air), polygonal if treated with Ar, and flakier with hollow points if annealed in the reducing atmosphere Ar + 1% H_2. In all these cases the dimension of the grains is significantly smaller, reaching at most half of the value of the as-deposited samples.

Room temperature S and sheet resistance R_S of the as-deposited samples brought a peculiar dependence of the transport properties with respect to the temperature of deposition, as shown in the graph of Figure 1.

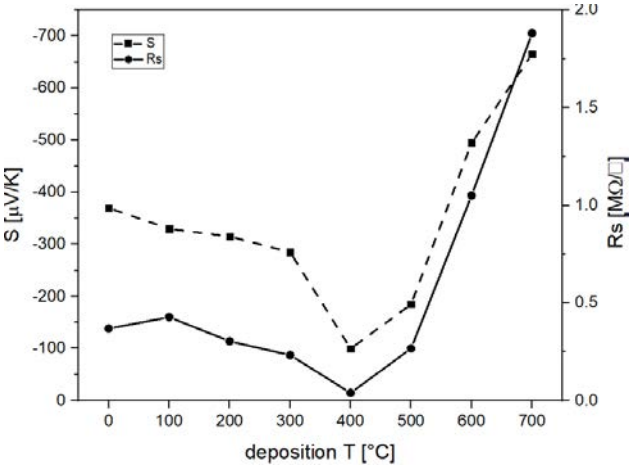


Figure 1 - S (dotted line - left axis) and R_S (straight line - right axis) results at room temperature of the as deposited samples.

TOPへ戻る

It is worth pointing out that these samples show negative S, and hence a n-type semiconductor behaviour. S and R_S both find a minimum for the sample deposited at 400 °C, before rapidly rising in module for the samples deposited at higher temperatures, reaching -665μV/K and 1.88MΩ/□ respectively. This could be explained by the occurrence of two different effects. First, the samples deposited between RT and 300 °C are mostly amorphous, and this can lead to a lower conductivity and higher S and RS. Secondly, the samples fabricated between 500 °C and 700 °C are strongly oriented along the [311] crystallographic direction, and this could introduce a beneficial effect on the conductivity. The sample deposited at 400°C seems to be a trade-off, since its structure has a high enough crystallinity but not a strong orientation, giving a minimum of resistivity and Seebeck coefficient.

The annealing at 700° C did not bring the expected results, increasing dramatically the sheet resistance of all the samples, independently of the atmosphere adopted, and consequently the Seebeck coefficient was not measured. The annealing temperature, as well as the reducing or oxidizing character of the atmosphere, seem to heavily influence the properties of these thin films. This effect must be considered along with the deposition temperature, the other important parameter of this synthetical protocol, in the future work on these intriguing compounds.

４. Future program, paper submission and results briefing

Regarding $MnFe_2O_4$ thin films, the effect of annealing at temperatures lower than 700 ° C will be investigated. Measurements of electrical conductivity and Seebeck coefficient up to 600 K will be performed. These data will allow to complete the scientific discussion and prepare a research paper to be submitted to an international peer-reviewed journal.

Next research will be focused on the synthesis of powders of $MoFe_2O_4$ via high-energy ball milling and preparation of the corresponding dense target by SPS and thin films by PLD, and on the addition of nanostructured defects to $MnFe_2O_4$ and $MoFe_2O_4$ thin films to enhance the thermoelectric performance, Eventually, the spinel thin films of both compounds will be fabricated on single crystals of $MgAl_2O_4$ (spinel structure) to study the effect of an higher grade of crystallinity on the thermoelectric performance.

References

[1] Th. Seebeck, Ann. Phys. 82 (1821) 133; [2] Report of L. Livermore N. Lab./ US Department of Energy 2021; [5] G.J. Snyder and E.S. Toberer, Nature Mater. 7, 105 (2008); [6] M. H. N. Assadi, J. J. Gutierrez Moreno and M. Fronzi, ACS Apl. Energ. Mater. 3 (2020) 5666

TOPへ戻る

Development of a system to evaluate the effect of microplastics on the mobility of zooplanktons

先進国際課程　Rajagopalan Umamaheswari
In collaboration with
Yoshikazu Koike, Jun Yamada

Abstract
In the study, we propose the use of laser speckle method in investigating the effects of SMPs on the mobility of microorganisms, brine shrimps (BS). In the experiment, a 635 nm laser was used to generate speckles from polystyrene SMPs or BS in salt water, and then speckles movies were recorded with a CMOS camera. BS were hatched from eggs under different conditions of control (no SMP), SMP and SMP with feed. As SMPs, 2μm and 20μm SMPs were used. Analysis of speckles from BS revealed that having SMPs influenced the mobility of BS. While 2μm SMPs increased the mobility of BS in comparison to the control and 20μm SMPs and feed-only conditions. The increased mobility under 2μm was against the expectation of the negative effects of SMPs. We have also investigated the short and long-term effects of SMPs on BS.

1. Introduction

Plastic debris has been detected in oceans worldwide, including at the sea surface, along coastlines and even in the Arctic sea ice. It has been estimated that improperly discarded plastic debris accounts for approximately 95% of all marine litter, with 4.8 to 12.7 million tonnes of plastic debris entering the ocean yearly [1]. Plastic debris flowing into the sea is broken down into smaller particles by mechanical friction due to waves, ultraviolet radiation, or ageing. Small plastics with a particle diameter of 5 mm or less are called microplastics (MP), and microplastics with a particle diameter of 350 μm or less are called supermicroplastics (SMP). Microplastics are difficult to collect because of their small size and can contribute to marine pollution because of their difficulty to break down, they tend to stay in the sea [2]. Furthermore, microplastics that have been taken in by marine organisms are difficult to expel from the body, resulting in accumulation in the body. This not only threatens the lives of marine organisms but is also said to have indirect health effects on humans from the food chain, such as eating fish that contain plastic in their bodies [2].

SMPs, being lighter than MPs that are mainly found in surface seawater, could reach deeper sea regions, thus posing more of a serious threat to zooplankton, which are the main initial players in the marine food web and thus play an important role in the transport of pollutants [3]. Wang et al [4] have studied the effects of SMPs on brine shrimps. To investigate the effects of SMPs on the microorganisms, experimental brine shrimp were placed in artificial seawater containing various concentrations of 10 μm diameter microplastics and fed with microplastics for 24 hours (short term) and 14 days (long term). Survival and ingestion were observed throughout the experimental period, and the size and digestive tract were observed under a microscope after the experiment. The results showed that ingestion of microplastics caused damage to the digestive tract of brine shrimp, which in turn had a negative effect on the survival and the growth rate. However, by this conventional method, it may be difficult to follow the behaviour of the organisms, thus making it impossible to monitor their activities and movements in real-time.

Here, we propose the use of laser biospeckle method in monitoring the growth of the BS in artificial seawater under the exposure of two different SMPs, 2 mm and 20 mm polystyrene spherical particles. Short-term over a period of three days and long-term over a period of 14 days were conducted. In the experiment, a 635 nm laser was used to generate speckles from polystyrene SMPs or (salinity of 35.5 ppt, pH 8.3 ± 0.1 and specific gravity

TOPへ戻る

at 25 °C of 1.0215).

2. Materials and methods

A. Preparation of sample

We used a zooplankton called the brine shrimp as they are widely used in laboratories for acute and chronic toxicity studies because of their small size, short lifespan and easy availability of eggs [3,4]. Tetra brine shrimp eggs (dried eggs) sold by Spectrum Brands Japan K.K. were used. The eggs were stored in a refrigerator at -5 °C until use to prevent a decline in hatchability over time. Dried brine shrimp cysts of 1 g were placed in 1 L of artificial seawater in an incubator maintained at 28 ± 1 °C with constant aeration to improve hatchability and illumination by the time they hatched. After hatching, the incubator was adjusted to a 12-h light/12-h dark cycle at a temperature of 26 ± 1 °C. Eggs hatched in about 24 hours at a water temperature of 28 °C. Care was taken to ensure the water temperature was maintained above 20 °C, as the eggs may not hatch if the water temperature drops below 20 °C. We used a 2.8ml cuvette (w x d x h = 12.5 mm x 12.5 mm x 45 mm).

To prepare samples for study, the cuvette was first filled with a small amount of seawater, and then 10 brine shrimp were captured using the pipette visually and added to it. To capture the BS, we utilised the behaviour of BS congregating in bright areas (phototaxis) and thus, by shining light on the surface of the water, brine shrimp were sucked into the pipette, as shown in Figure 1. Finally, the cuvette was filled with the required polystyrene microplastics, food, and artificial seawater. A micropipette of capacity 20 to 200 µl (Pipet Gene, Tokyo Glass Instruments Co., Ltd.) was used to add the polystyrene microplastic particles.

Figure 1 Collecting BS with a pipette (left) and a BS Napuli (right)

Six sample types were used in the experiments, as shown in the Table, with three per experimental condition and thus a total of 18 samples. The six types included control which contained brine shrimp only, and the rest included samples containing brine shrimp and microplastics of two different sizes, 2 µm and 20 µm. Samples containing diatoms (feed) were also prepared to investigate the relationship with the presence or absence of food. Artificial diatoms were used as food for brine shrimp in this experiment. Commercially available artificial diatom powder was dissolved in a small amount of artificial seawater and added using a pipette in an amount sufficient for the brine shrimp to be fed each time. The food was placed in the cuvette once a day, approximately two hours before the measurement, considering the feeding time of the brine shrimp.

Samples of the two different particle sizes of microplastics used in this experiment were prepared so that the weight of the SMPs in each solution was the same. The microplastic solutions were shaken and mixed before use until there was no precipitation so that the overall concentration was uniform based on the following relation:

$$V_2 = \frac{W_2 \times C_1 \times V_1}{W_1 \times C_2}$$

where Vi: volume of microplastic solution [ml] (V1: volume of 2 µm MP, V2: volume of 20 µm MP), Ci: concentration of microplastic solution [%] (C1: concentration of 2 µm MP, C2: concentration of 20 µm MP), W1:

TOPへ戻る

density of 2 µm MP in g/cm^3, W2: density of 20 µm MP in g/cm^3). After sample preparation, the container was turned upside down, and the contents were mixed before and after each daily observation to prevent sedimentation of plastic and food. The samples were placed in an incubator except during experiments, and the temperature was maintained at 26 ± 1 °C with a cycle of 12 h light period and 12 h dark period, referring to the paper by Wang et al [3].

Sample details with volume fractions)
Brine shrimp (Control)
Brine shrimp + feed
Brine shrimp + 2 µm microplastic (66.22 µl)
Brine shrimp + 20 µm microplastic (96.125 µl)
Brine shrimp + 2 µm microplastic (66.22 µl) + feed
Brine shrimp + 20 µm microplastic (66.22 µl) + feed

B. Experimental system

A schematic of the experimental setup used is shown in Figure 2. A laser (Neoarc Corporation, LDP6705-HA) of wavelength 635 nm was used as the source and a cuvette (Azwan Corporation, BRA759116, 12.5 x 12.5 x 45 mm) containing the sample was irradiated with the laser light. The light scattered from the sample interferes to produce speckles on the CMOS camera (Thorlab Japan, DCC1545M-GL, 1024 × 1280 pixel). The speckles were acquired onto a PC and speckles were recorded. In the experiment, in order to reduce the light intensity incident on the CMOS camera, an ND filter (Sigma Koki Co., Ltd., MAN-25-5, 5%) was placed between the sample and the CMOS camera. The integration time of the CMOS camera was also adjusted to optimise the light intensity incident of the CMOS camera so as to have better speckle contrast. The recording was done at 15 fps for a period of 20 sec. To observe the speckle images with better contrast, the speckle patterns were acquired by the CMOS camera after the sample was allowed to rest for one minute. During the measurement, images were acquired at a frame rate of 15 fps for 3 minutes.

After three days of data acquisition, microscopic observations were conducted using a 600x desk-type USB microscope (Miyoshi Corporation, UK-05). The BS sample was frozen beforehand to stop the movement of the BS during the observation.

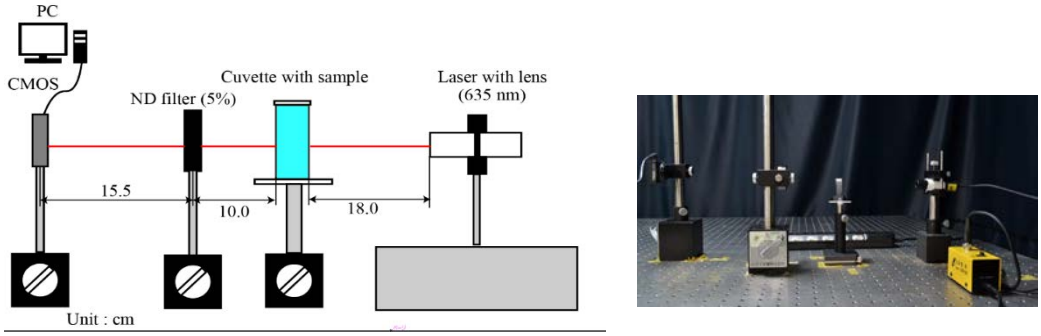


Figure 2 Experimental schematic of the simple system (left) and a photo of the system.

Here, the speckles depend on the nature of the object and when the object is static, then the intensity of the speckles remains the same. However, when the object is a biological object such as brine shrimp (BS) considered in this study that moves, then the intensity of the speckle is no longer constant. Such speckles are called biospeckles as the speckles formed reflect the activity of the biological object under consideration. Having a mixture

TOPへ戻る

of SMPs and BS would lead to speckles that reflect both the static and the dynamic properties and these characteristics can be advantageously used to discriminate the SMPs from BS.

C. Data analysis

In this study, the analysis method used in previous studies to distinguish brine shrimp from microplastics using the laser speckle method was improved so that the movement of the organisms can be captured more accurately [Daiki ENMM] and the number of their passages can be counted automatically, and changes in the movement of brine shrimp were evaluated.

In the analysis, the evaluation parameter D^k was calculated from approximately 2700 images taken at 15 fps for 3 minutes, as shown in equations (1) and (2), where $A^k_{m,n}$ ($1 \le m \le 1280$, $1 \le n \le 1024$) is the intensity value at position m,n for the k-th frame ($1 \le k \le 2700$). The difference between the intensity values at the same pixel position in the first and k^{th} frames was calculated and denoted $D^k_{m,n}$. The sum of the differences within a frame is denoted by D^k.

$$D^k_{m,n} = \left| A^k_{m,n} - A^1_{m,n} \right|$$

$$D^k = \left\langle D^k_{m,n} \right\rangle$$

D^k was calculated as the difference between the intensity values of the frames. So when D^k is 0 then there would be no change in the speckle pattern between the frames. On the other hand, when the difference D^k is larger, then the change between the consecutive frames is large and thus the mobility of the BS. Our earlier study was based on this principle in discriminating the BS from SMO by estimating the maximum of the consecutive difference images from the recorded video.

$$D^k = \left| A^{k+1}_{m,n} - B^k_{m,n} \right|_{Max}$$

Here A, B denote for k^{th} and $k+1^{th}$ frames respectively with $A_{m,n}$, $B_{m,n}$ representing the individual intensity values at the position represented by pixel indices, m, n on each of the frames. When the difference D is large, then it indicates that there is a large change between the neighbouring frames and vice versa. In other words when D could be a parameter to assess the mobility of the BSs. Difference analysis was done using the analysis software MATLAB.

3. Results and Discussion

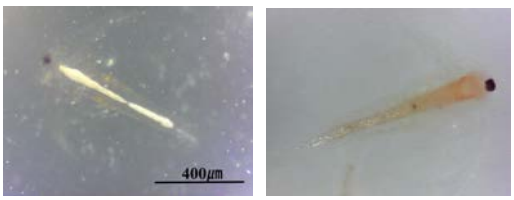


Figure 3 Microscopic observations of BS under the exposure of 2μm and 20 μm on the third day.

Figure 3 shows the results of the microscopic observations made on the third day under the exposure of 2μm and 20 μm SMPs. Compared to 20 μm SMPs, 2 μm SMPs have largely accumulated in the abdomen of the BS. Figure 4 shows the speckles obtained under different conditions for SMP alone and BS under SMP exposure for three different SMPs of 2 μm, 20μm and 200μm. Although the single-frame speckles themselves look alike, no large difference could be seen; there were clear differences in the dynamics of the speckles with change in the size of SMPs and also the presence of the SMPs.

TOPへ戻る

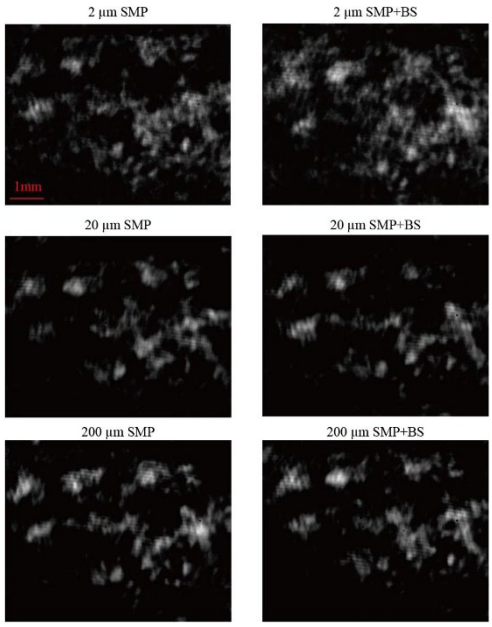


Figure 3 Speckles under different conditions for different SMPs (left) and for SMPs plus BS (right).

Figures 4 show the results of D obtained with BS under exposure to 2 μm and 20 μm SMPs, respectively. In both cases, the top represents the first-day results while the bottom represents the third-day ones. In all the cases, the number of peaks detected D, as calculated from the video analysis, was given as a function of the frame number or, in other words, the time. Here, the value D^k increases corresponds to the frame when the brine shrimp passes over the laser beam, so the number of times the brine shrimp passes can be determined by counting the number of times D^k increases in the graph and is done using the PEAK function of MATLAB and was detected by setting a threshold.

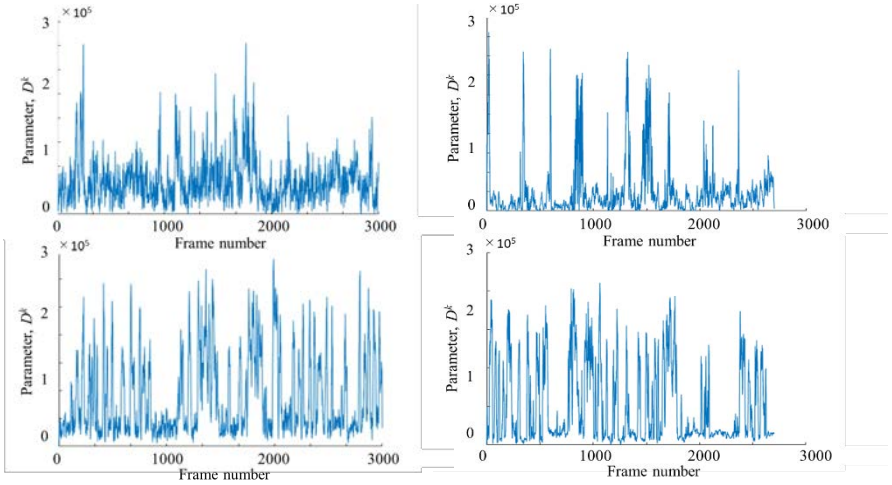


Figure 4 Parameter D as a function of frame number or time reflecting the mobility strength of BS under different SMP sizes for first (top in either) and third (bottom in either) days with 2μm (left) 20 μm (right).

Figure 5 shows the average D that indicates the amount of activity of BS under six different conditions obtained for day 1 and day 3. As can be seen from the figure, as expected under all conditions. brine shrimp is more

TOPへ戻る

active on day 3 than on day 1 in all conditions. This may be due to the fact that brine shrimp have various life stages and are characterized by a growth speed of 14 days from birth to adulthood, which may have resulted in the difference in activity between Day 1 and Day 3. Comparing the conditions control and feed, as expected providing food to the BS, the BSs become active. Next, comparing feed and SMP only, the feed shows larger activity. In contrast, under the condition of feed with 2 μm SMP, an unexpected result is observed. It can be seen that the activity under feed with 2 μm SMP is larger than that of just feed. The same result could be seen for the case of 20 μm also. The activity parameter D was found to be larger for feed with 20 μm SMP than just feed without SMP. The Feed-only sample had a 57 % larger peak count than the Feed+20 μm SMP sample when the peak counts on Day 3 were compared. However, the peak count was 10 % lower than in the Feed+2 μm SMP sample. It should be noted that the presence of SMPs, although positive in the short term, in the long run has negative effects, as reported by others.

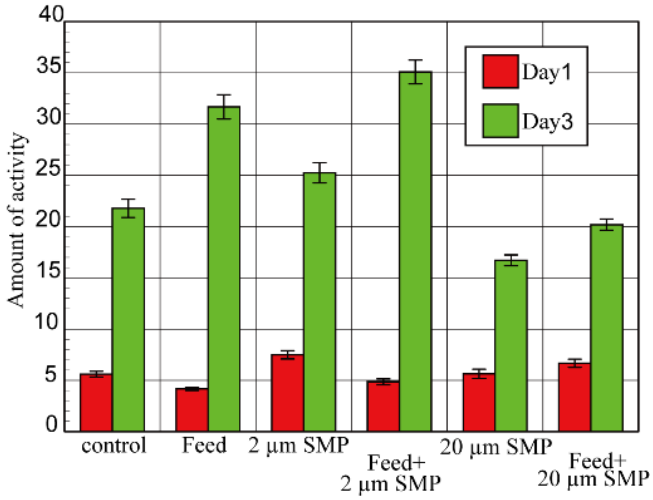


Figure 5 Amount of activity of BS as a function of different conditions of control, feed, 2μm SMP, 2μm SMP+feed, 20μm SMP, 20μm SMP+feed for day 1 (red)and day 3 (green). Here control indicates artificial sea water only conditon.

Figures 6 and 7 show, respectively, the survival rate and body length of BS as a function of day under different conditions, namely, feed, feed + 2 μm SMP, and feed + 20 μm SMP. As expected, under the feed, the BS survived the longest, and they survived the least under 2 μm SMP, with 50% survival reaching within 10 days for the former and 5 days for the latter. These results show that the activity of the BS varies with the size of the ingested MP. It is considered that microplastics with smaller particle sizes may have more influence on the BS because they are easier to ingest. Our earlier results conducted with 10times SMP levels also showed that the activity of samples with 2 μm SMPs exceeded that of samples with 20 μm SMPs or BS alone. Results were found to be reproduced with with one-tenth the amount of SMPs. These results suggest that microplastics can affect brine shrimp under concentration of SMPs close to the actual concentration of microplastics in seawater which remains largely under surveyed.

Figure 7 shows that the samples with microplastics have smaller body sizes than the feed-only samples. In particular, the Feed+2 μm SMP samples on days 10 and 14 showed more than 0.2 mm difference in length than the Feed+20 μm SMP and feed-only samples. Our results with BS on survivability and body lengths suggest that SMPs with much smaller particle sizes compared to body size have a stronger effect.

TOPへ戻る

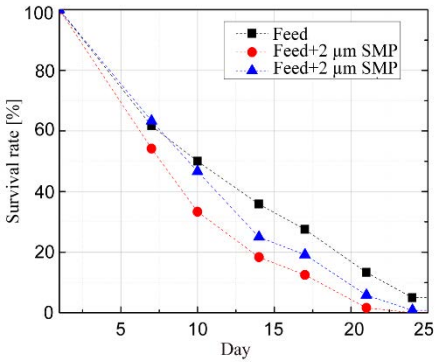


Figure 6 Survival rate of BS as a function of day under different conditions.

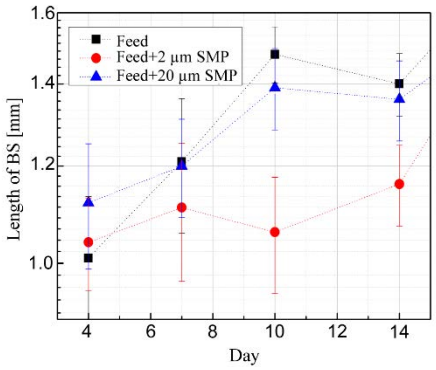


Figure 7 Length of BS as a function of day under different conditions.

4. Summary

We proposed using laser speckles to investigate the effect of 2 μm and 20 μm on the mobility of brine shrimps. Based on the existing research [4], brine shrimp fed with microplastics have a negative effect with the accumulation of SMP in their abdomen and thus decreased survival time. However, our results indicate that under short term, brine shrimp that have ingested smaller microplastics of 2μm SMPs were found to be more active. The concentration used in the current study was almost close to that found in the sea and furthered our initial study with an investigation done under 10 times of the current study also showed that the results were very similar to the current one. Therefore, from our results, it is clear that microplastics with smaller particle sizes can affect the activity of brine shrimp in the short term. Our results further agree with the existing studies of long-term effects on survival rate and also body length. Microplastics with small particle sizes were found to have a particularly strong effect on brine shrimp because they are easily ingested. Our results indicate that microplastics with small particle sizes have a strong effect on brine shrimp in both the short and long term. Future work is needed to investigate the loading rate of brine shrimp that ingest microplastics, the effects on their offspring, and the effects of ingesting microplastics through the food chain.

5. Future program, paper submission and results briefing

Part of this work was presented at the SEATUC 2024 workshop. Plan to submit the manuscript within a month or so to Science of Total Environment.

Acknowledgements

I would like to thank graduated students Ms. Shiori Sato, Mr. Kota Kaneko and Mr. Daiki Endo.

References

[1] Varó, et al, Time-dependent effects of polystyrene nanoparticles in brine shrimp Artemia franciscana at physiological, biochemical and molecular levels, Science of the Total Environment, VoL.675, pp.570-580, (2019).

[2] Cauwenberghe, et al, Microplastics in bivalves cultured for human consumption, Environment Pollution, Vol.193, pp.65-70, (2014).

[3] Proshad, et al, Toxic effects of plastic on human health and environment: A consequences of health risk assessment in Bangladesh, International Journal of Health, (2018).

TOPへ戻る

[4] Wang, et al, Effects of ingested polystyrene microplastics on brine shrimp, Artemia parthenogenetica, Environmental Pollution, Vol. 244, pp.715-722, (2019).

TOPへ戻る

gPBL の体系化とエンジニアリング教育における国際協働学修成果の可視化

工学部先進国際課程　　吉久保　肇子

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

海外の協定校等との国際協働によって実施される「グローバル PBL（以下、本学の通称「gPBL」と称する）」の研究においては、事例報告やプログラム評価報告が一般的である。本研究では、gPBL の PDCA を目的とした学修効果の評価方法を検証する。通常の工学系 gPBL ではあまり取り入れられていない人文教育の部分にフォーカスすることで、汎用性が高く効果的な学修評価方法の開発を目指す。

２．研究計画

以下の項目を研究目標として設定した。

1) gPBL をモニタリングし、課題の抽出を行う。
2) 観察された課題を元に、汎用性の高い評価方法に関する文献レビューを行う。
3) 評価方法を選定する。
4) 評価のパイロット実施を基に、PDCA サイクルを適用する。
5) 1)から 4)の作業を通じて体系化された評価方法の分析結果をまとめ、学内外での情報共有を目的として、国際学会や Journal に論文を投稿する。

３．計画の進行状況

1)　課題の抽出

gPBL のモニタリングの結果、工学系 gPBL 学修アセスメントにおける主な課題は以下のカテゴリーに分類できた。

- 多様なスキルの評価:学生の知識と技能の両方を効果的に評価する必要がある。
- 工学系 gPBL はプログラム毎に分野が異なり、多様な評価方法が存在する。その中から汎用性の高い評価方法を選定するのは困難である。
- 公正性と一貫性: すべての学生に対して公平な評価を保証するためには、明確な評価基準が必要である。
- フィードバックの質と速度：学習者が受けた評価を次の学習に生かすたためには、質の高いフィードバックをタイムリーに提供することが必要である。

2)　解決策

上記の課題を踏まえ、本研究では通常の工学系 gPBL ではあまり取り入れられていない人文教育の部分にフォーカスすることで、汎用性が高く効果的な学修評価方法の開発を目指す。gPBL 担当教員にヒアリングした結果、最近は学生が国際会議への投稿機会が増えており、工学系スキルに加えてアカデミックな英語ライティングスキルの習得が新たな課題であることも明らかになった。本研究では「学生の書く英文評価」というアプローチを採用することで、工学系 gPBL の学修内容に依存しない、評価方法を検証する。文献レビューの結果、CEFR-based Vocabulary Level Analyzer

TOPへ戻る

(ver.2.0)を用いて、学生の書く英文語彙の評価と分析を行うことにした。

CEFR-based Vocabulary Level Analyzer（以下、CVLA と呼ぶ）は、英文の語彙使用レベルを The Common European Framework of Reference for Languages（以下、CEFR と呼ぶ）の基準に沿って分析・評価するツールである。CEFR は言語学習、教授、評価に広く使用される枠組みで、A1（初級）から C2（上級）までのレベルに言語能力を分類する。CVLA は英文テキストを分析し、それが CEFR のどのレベルに相当するかを判断する。

図 1 に示されるように、英文テキストをホワイトスペースにコピー＆ペーストすることで、CEFR レベル判定が可能である。正確な結果を保証するためには、一度に分析される入力テキストは 400 語以上、2000 語以下であることが重要である。図 2 は CVLA (ver.2.0)による分析結果の一例である。

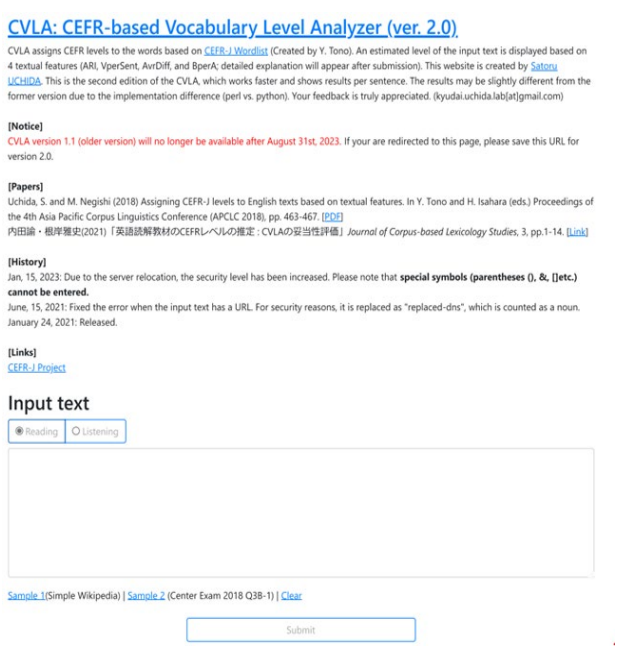


図 1 CVLA (ver.2)のインターフェース

また、CVLA は図 3 に示されるように、テキストの特徴を示す 4 つの指標も示す：ARI (Automated Readability Index 自動可読性指数)，VperSent (verbs per sentence 文あたりの動詞数)，AvrDiff (the average of word difficulties 単語の難易度の平均)，および BperA (the ratio of B-level content words to A-level content words B レベルの内容語と A レベルの内容語の比率)が含まれる。

図 2 CVLA (ver.2.0)による分析結果の一例

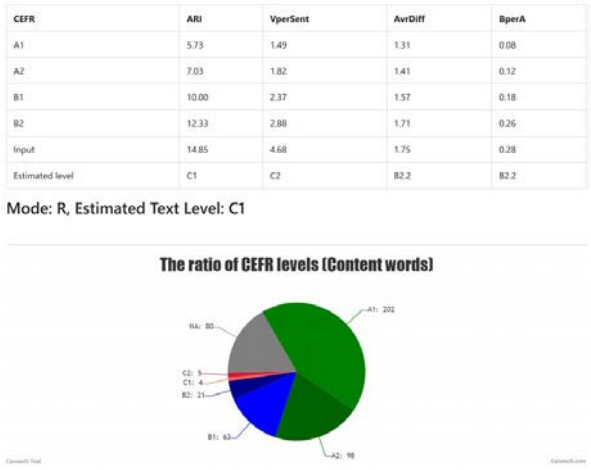


図 3 CEFR マッピングの結果とテキストの特徴を示す 4 つの指標

3) CVLA による学生の英文語彙分析

本研究では、研究代表者が担当する工学部

TOPへ戻る

先進国際課程（IGP）の「日本史」授業を履修する学生をパイロット調査の対象とした。IGPは工学部内に設置された英語学位プログラムで、所属学生のほとんどが外国籍である。また、この「日本史」授業には本学に所属する他の留学生も多数履修している。

一般的に、日本の大学に所属する外国人留学生の英語力は日本人学生のそれよりも高いと認識されており、日本の大学に所属する外国人留学生の書く英語語彙分析が研究テーマになることはまだそれほど多くはない。本研究では、CVLA を用いて、コースを受講する22人の外国籍学生それぞれについて2種類のCEFRスコアを分析した。1つ目は、コースの1〜3 週目の書かれたアウトプットに基づいており、2つ目は終了間際の11〜13週目のアウトプットに基づく。CEFRスコアは0.5から6.0の数値として表す。コース初めの3週間のデータで行った定量分析の結果、学生の書く英文語彙のレベルの平均値は 4.955（CEFR B2.2-C1）であり、終了間際の3週間の平均は5.432（CEFR C1-C2）であった。平均スコアの増加は、統計的に有意であることが示された。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本プロジェクトの活動内容は、最終的にジャーナル論文4件、報告書3件（本報告書を含む）、国際学会論文発表等9件、合計16件の研究成果に繋がった。これらの中で一件は、2023年6月に開催されたASEE 2023にてBest Diversity Paper Awardを受賞した。継続研究の成果については、2024年6月に開催されるASEE 2024および2024年9月に開催されるWERA-BERA 2024で発表が決定し、本報告書の第1部で挙げた1)から5)までの全ての研究計画を遂行することが出来ている。今後は、研究対象を日本人学生に拡大して研究を行う。

【学会,論文等投稿・発表状況:2023-2024】

1. Journal papers

1) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Nabilah Ibrahim, Hiroyuki Ishizaki, Masahiko Tachibana: “Interdisciplinary Online Robotics Workshop: Pedagogical Issues and Innovations”, Journal of JSEE, Special Issue 71-1, pp.27-34, January 2023.

2) Hatsuko Yoshikubo, Soichiro Aihara, Masahiro Inoue, Atsuko Yamazaki, Ned Loader, Hiroyuki Ishizaki, Masahiko Tachibana: “Assessment of Online Study Abroad Programs from the Students’ Perspectives”, Journal of JSEE, Special Issue 71-1, pp.18-26, January 2023.

3) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Leo Kimura, Yujiro Iwata: “Measuring Student Engagement in Group Work Using Slack-Based Evaluation: Solving Issues in Global Project-Based Learnings”, Journal of JSEE, 72-3, May 2024.

4) Hatsuko Yoshikubo, Gabriele 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, 72-3, May 2024.

2. Technical reports

1) 吉久保肇子、中村仁、藤田吾郎、三好匠、長澤純人、橘雅彦、石崎浩之、猪田政彦、古屋雄高、古屋雄高、仙波亮典、影山礼子、宮坂勇也他：「gPBL のアセスメントとイノベーション創出」、2022 年度特別教育・研究報告集 41-44、2023年5月

2) 吉久保肇子、中村仁、藤田吾郎、三好匠、長澤純人、渡邉宣夫、Shahrol Mohamaddan、石崎浩之、猪田政彦、古屋雄高、影山礼子、宮坂勇也：「gPBL の体系化と持続的イノベーションの創出」、2023 年度特別

TOPへ戻る

教育・研究報告集（特別教育助成）、2024年５月

3. International conference papers and others

1) Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa, Hiroyuki Ishizaki: “Creating Innovation for Interdisciplinary Robotics Workshops: Solving Systematic Issues in the Online Project-Based Learnings in Engineering Education”, 2023 ASEE Conference Paper, Baltimore, US, June 2023.
2) Hatsuko Yoshikubo, Gabriele Trovato, Hiroyuki Ishizaki: “Fostering Global Engineers through the Study of the Humanities: Assessment of the Course ’Science and Religion in Japan’ from a Racial Equity Perspective”, 2023 ASEE Conference Paper, Baltimore, US, June 2023 (MULTI Eng. Division Best Diversity Paper Award).
3) Hiroyuki Ishizaki, Sumito Nagasawa, Hatsuko Yoshikubo, Hitoshi Nakamura: “Affordable robotics toolkits for equitable and interdisciplinary education, transformable to searching nodes for disaster onsite investigations”, 2023 ASEE Conference Paper, Baltimore, US, June 2023.
4) 吉久保肇子：「グローバルPBLのグループワークにおける個別活動とその評価」、「大学の国際化促進フォーラム」事業：グローバルPBLプログラム研究会演習機会② PBLの実施効果の情報提供・評価 、2023年７月
5) Hatsuko Yoshikubo: “Comparing the Written English Level and Overall Performance of Global Engineering Students: An Analysis using CVLA”, WERA 2023, Singapore, November 2023.
6) Yujiro Iwata, Leo Kimura, Hatsuko Yoshikubo, Sumito Nagasawa: “Enhancing Student Participation in Online Global Project-Based Learnings (gPBLs) Through a Slack Based Evaluation: A Student Perspective”, 2024 ASEE Conference Paper, Portland, US, June 2024.
7) Hatsuko Yoshikubo, Gabriele Trovato, Ahmet Cetinkaya: “Can Writing Assignments Help Foster Engineers Who Will Thrive in a Globalised World? - Comparing Students’ Written English Levels and Overall Performance in Humanities Modules in Engineering Curricula -”, 2024 ASEE Conference Paper, Portland, US, June 2024.
8) 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 Conference Paper, Portland, US, June 2024.
9) Hatsuko Yoshikubo, Dita Puspita Sari, Gabriele Trovato, Eiji Kamioka, Darminto Darminto: “Global Competence Scores among Indonesian Undergraduate Physicists: A Preliminary Study Towards the Implementation of a New COIL”, WERA 2024, Manchester, UK, September 2024.

【参考文献】

1) 内田諭・根岸雅史(2021)「英語読解教材のCEFRレベルの推定 ： CVLAの妥当性評価」Journal of Corpus-based Lexicology Studies, 3, pp.1-14.
2) Uchida, S. (n.d.), CVLA: CEFR-based Vocabulary Level Analyzer (ver. 2.1). https://cvla.langedu.jp/

TOPへ戻る

Light Field Compression: Neural Radiance Field Approach

先進国際課程　Phan Xuan Tan

Research colleagues
〇〇affiliated institution　Name

1. Paper introduction

Light Field (LF) imaging is a technology that captures and displays three-dimensional (3D) images by recording the intensity and direction of light rays in a scene. It creates a "light field" that contains the full spectral and angular information of the scene, allowing for the recreation of the exact way light behaves in the scene. LF content can be captured by different acquisition techniques. Fig. 1(a) shows a multi-camera array set up where a number of views with parallax on both directions (full parallax) is captured using an array of cameras. By exposing all cameras at the same time, a multi-perspective-view LF image can be captured. Figure 1(b) shows an example of captured LF image where (u,v) coordinate is camera plane illustrating different views created by cameras in different positions; and (x,y) coordinate is as spatial image plane. The number of views represent the LF angular resolution, whereas the resolution of each view is considered as LF spatial resolution. LF can also be captured by lenslet camera which contains of multiple micro lens as shown in Fig. 1(c). Since LF contains both angular and spatial information of the scene, it provides more immersive experience to the users, facilitating various applications such as refocusing, VR/AR, especially glass-free 3D broadcasting. However, due to high dimensionality and complex structure, storing and processing large-scale light fields extremely challenging. As a result, there is a growing demand in developing efficient light field compression schemes.

There exists prominent schemes of LF compression: conventional-based and geometry-based approaches. The methods of both categories commonly attempt to exploit spatial redundancy within each view as well as the redundancy between views. In fact, the efficiency of LF compression schemes heavily depends on the representation of LF to be encoded. Conventional methods leverage standard video compression techniques, e.g., HEVC, JPEG to encode all LF views. This causes potential problems: inefficient compression ratio due to huge data to be sent; low rate-distortion (RD) performance due to less accurate prediction at the decoder. Meanwhile, in geometry-assisted methods, a sparse set

TOPへ戻る

of LF views and estimated depth as the explicit priors are first encoded and used to synthesize (predict) the remaining views. However, depth dependency might be a problem since estimating depth is not always easy, for example, in the case of non-Lambertian scene. In addition, directly encoding and transmitting a sparse set of views is still inefficiently in terms of compression ratio. A branch of geometry-based methods, attempt to use different representation of LF, for example, in terms of graph. This could improve the compression ratio. However, processing graph is costly due to diagonalization process where combinatorial graph Laplacian matrix is eigen-decomposed. In conclusion, despite the efforts of existing works, compressing LF is still a challenging task for wide and realistic adoption. In our research, we aim at answering a key scientific question: Can we compress LF efficiently at a certain level that allows LF images/videos to be consumed as normally as today 2D/3D images/videos?

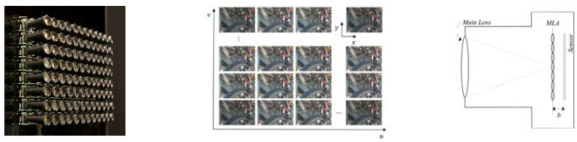


Figure. 1. *Light Field acquisition & representation:* ***(a)*** *Multi-camera array (http://graphics.stanford.edu/projects/array);* ***(b)*** *4D representation of LF;* ***(c)*** *Lenslet camera (Conti, C., et al. 2020. Dense light field coding: A survey.)*

2. Research program

The objective of this research is to design an effective LF compression scheme. We believe that the key point here would be a creative representation of LF scene that can be encoded such that depth dependency as well as directly encoding LF views are avoided. In this case, Neural Radiance Fields (NeRF) could be a potential solution. NeRF is a technique for synthesizing highly realistic images of 3D scenes. It represents a scene as a continuous function that maps 3D coordinates to scene properties like color and opacity. The key idea behind NeRF is to use a neural network to model this function and learn the scene's appearance and structure from a set of input images of the scene. During training, NeRF learns to predict the radiance (color and opacity) at any given 3D point in the scene.

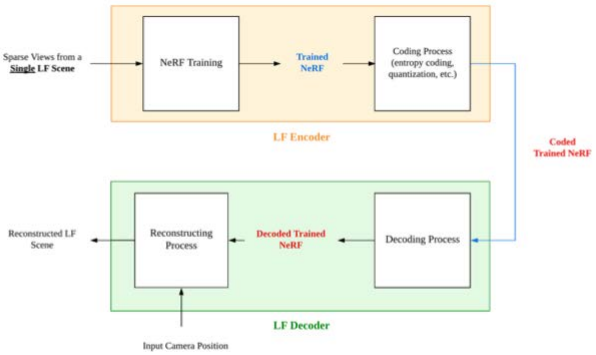


Figure 2. The initial idea of LF compression scheme based on NeRF.

Our initial idea here is that we could train a NeRF from a sparse set of view. Then, the trained NeRF, as a sole representation of LF scene, is encoded and transmitted to the decoder. Finally, reconstructed LF scene is produced via reconstructing process with input camera position provided by the user (e.g., moving the computer mouse). Comparing to existing methods, we do not need to encode either all LF views or sparse of LF views. This will significantly improve compression ratio. With NeRF, a dense LF

TOPへ戻る

scene can be precisely reconstructed with high quality, even with non-Lambertian scenes. Therefore, high RD performance is expected. However, training NeRF for a particular scene is computationally expensive. Practically, it takes days to train a NeRF for a scene from a set of high-resolution input images. On the other hand, the original NeRF is not generalizable, thus, for a new scene, it must be retrained from the scratch. Recently, a number of generalizable variants of NeRF which is capable of rendering different scenes, has been introduced. With these models, only a great computational effort is considered for initial training followed by fine-tuning for a new scene. However, such generalizable NeRFs are not suitable to be integrated into LF compression scheme for couple reasons. First, the size of generalized model is commonly large, leading to inefficient compression ratio. Second, with complex architecture, it is not suitable for coding process. For example, applying quantization onto attention unit of the model might result in low-quality reconstructed LF. Therefore, in this project, we plan to propose a dedicated generalized NeRF then design a novel LF compression scheme that can integrate such the NeRF model to ensure: (1) the improvement of compression ratio; (2) high-quality reconstructed LF scenes. The proposed architecture of dedicated generalized NeRF is shown Fig. 3. It comprises of two main components: Scene Encoder and Scene Renderer. The former extracts information/features (color, density, etc.) from multiple scenes, which can be mapped into a high-dimensional scene-independent latent space which is then fed into the Scene Renderer to produce detailed LF scenes. Both components are generalizable and can be trained at the same time with multiple different scenes. Our novel LF compression scheme is shown in Fig. 4 where scene encoder component is located at LF encoder and scene renderer is in LF decoder. To compress a new scene, a fine tuning is only needed for the Scene Encoder to produce latent space. The scientific originality and creativity of this project is that a latent space of different scenes' features is encoded and transmitted to the decoder. The size of latent space is considered small ensuring efficient compression ratio. Meanwhile, the information in the latent space will not be significantly affected by coding process, for example, quantization, resulting in high-quality reconstructed LF images.

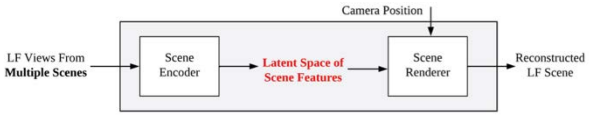


Figure 3. Dedicated generalized NeRF for LF compression

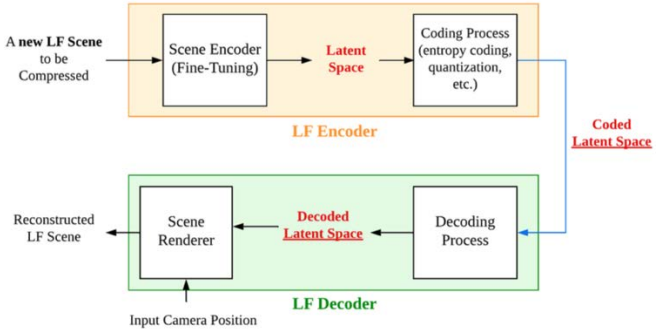


Figure 4. Novel LF Compression scheme

TOPへ戻る

３. State of progress

To facilitate the proposed idea, in FY2023, we focused on investigating the existing compression methods, especially the graph-based one. The purpose is to confirm the importance of neural radiance field idea. Firstly, we aimed at reducing computational cost of graph-based method by mitigate the cost caused by Laplacian matrix decomposition. Since a high number of super-rays may incorporate a Light Field, there exists a high number of eigendecomposition. In our research, a super-rays grouping scheme is proposed to reduce the number of times for this operation. The grouped super-rays should share similar coefficients in such the way that the predicted signals are close to the original. The proposed grouping scheme is shown in Figure 5.

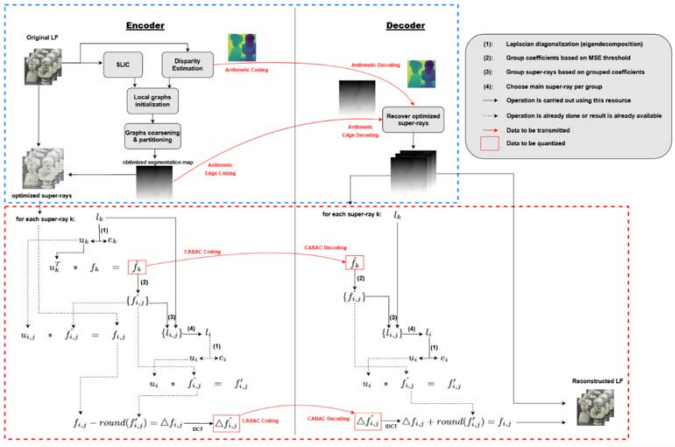


Figure 5. The proposed grouping scheme.

We also investigated the performance of Graph Convolutional Network (GCN) in LF compression. In fact, GCN combines the characteristics of graph structure and deep learning for views reconstruction with learnable parameters, particularly by doing convolution (via passing message) on irregular graph-based representation of LF, in a similar manner to traditional Convolutional Neural Network (CNN) on 2D image. However, GCN mainly account for node features, and doesn't directly support edge features. In other words, they omit edge features which might have lower or higher contribution to the reconstruction of non-key views from the notion of a message (delivered on that edge), Therefore, we proposed to implement a Message Passing Neural Network (MPNN) model (as shown in Fig. 6) to both utilize and optimize edge features, learning suitable weighted contribution for a message arriving at destination node.

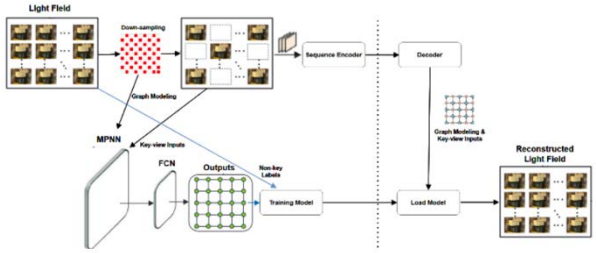


Figure 6. The proposed MPNN

In addition, we also studied various deep learning which can be applied to solve different problems in computer vision. This allows us to accumulate necessary knowledge for this research project.

４. Future program, paper submission and results briefing

As the result, in FY2023, we published one Journal (Sensors - IF =3.9), one Conference (IEEE MIPR 2023) and got acceptance for one conference (9th International Conference on Intelligent Information Technology 2024).

TOPへ戻る

ナノポーラス構造の
3 次元細胞培養プラットフォームへの応用

IGP・材料工学　　李　素潤

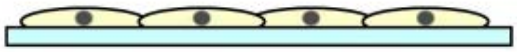
１．序論（はじめに，まえがき，目的）

（概要）

現在、バイオメディカル研究分野において、細胞培養技術は重要な情報を得られる方法として、広く定着している。現在までは、3 次元構造である生体システムとは違う、平面上の 2 次元的な組織培養用プラスチック容器、あるいは細胞外基質（以下、ECM）を利用して、細胞培養を行った。しかしながら、2 次元環境で培養した細胞を用いる in vitro での実験結果を、そのまま in vivo の臨床試験に反映することは不可能である。これは、生体はガスと栄養が交換できる 3 次元的なポーラス構造であり、細胞と ECM の間の複雑なシグナルのやりとりが起こるが、2 次元細胞培養では再現できないことが要因である。そこで、この問題を解決するため、より生体に近いプラットフォームを利用した細胞培養の研究が要求されている。この訳で、本研究では、3 次元構造であるナノポーラス構造のプラットフォームを作製し、生体を模擬する事で in vitro と in vivo のギャップをなくし、生物学的に重要な情報を取られる事を目指す。様々な材料の中で、生体適合性が優れ、バイオメディカル研究分野で重要な材料として研究されているチタンを選択する。申請者は、新たな表面処理方法である Wet Corrosion Process（WCP）を利用して、ナノ構造を用いた酸化チタン皮膜の作製に特化されている。この技術を生かして、課題として①生体に近い 3 次元ナノポーラス構造を用いた酸化チタンプラットフォームの作製条件の調べ、②作製されたプラットフォームを利用した細胞培養の実現で、バイオメディカル研究分野に貢献できる研究を目指す。

(1)－1　本研究の学術的背景

現在、発生生物学、創薬、再生医学、タンパク質の生産などの分野を含むバイオメディカル研究分野において、細胞培養技術は重要な情報を得られる方法として、広く定着している。通常の細胞培養プレートやシャーレ等での培養は平面的な 2 次元(2D)培養だが、生体内の組織は実際には立体的な 3 次元(3D)構造をしている。2D 環境で培養した細胞の情報である in vitro での実験結果を、そのまま in vivo の臨床試験に反映することは不可能である。立体的に培養することで、より生体に近い反応をすることが以前から知られている。



細胞同士が平面的に接触しており、細胞間の刺激伝達は横方向のみ。
培地、薬剤は上方から直接供給される。

2次元培養

図１．２次元環境での細胞培養の模式図

3D 培養は細胞間の刺激伝達が 3D 的であり、細胞塊の内部と外部とで培地や薬剤の供給経路が異なるなど、生体に近い環境を再現することが出来る。2D 環境では、生体みたいにガスと栄養が交換できる 3 次元的なポーラス構造でもないし、細胞と ECM の間の複雑なシグナルのやりとりが起こる環境ではないので、この要因で in vitro と

TOPへ戻る

in vivo のギャップが存在する。そこで、より生体に近い立体的なナノポーラス構造を用し、肝細胞など 2D 培養ではすぐに活性が低下してしまう幹細胞のような細胞でも長期間にわたって活性を維持できたり、幹細胞から各種細胞への分化において効率を高くできたりするなどの効果が得られる。

細胞同士が3次元的に接触しており、細胞間の刺激伝達は立体的。
内部の細胞は培地や薬剤に直接接触していないため、拡散によって供給される。

3次元培養

図２．3次元環境での細胞培養の模式図

この訳で、近年の再生医療研究の活発化によって、生体に近い環境で培養することの重要性が増し、これに伴って３次元培養の研究も活発化している。また創薬においても、2D 培養による結果と動物実験による結果の違いが顕在化してきてあり、この分野でも注目を集め始めている。

（1）-2　研究課題の核心をなす学術的「問い」

立体的な3D ナノポーラス構造を用いたプラットフォームを利用した細胞培養を実施するため、申請者はこれまで研究してきた WCP の手法でナノポーラス構造を持つ酸化チタンを作製し、これの物質を細胞培養のプラットフォームで利用できると考えた。そこで今回、【WCP で作製された 3 次元ナノポーラス構造を用いた酸化チタンにおいて、どんな状態のときに3次元細胞培養が最も適当なのか】を研究課題の核心をなす学術的「問い」とした。

（2）－1　本研究の目的および学術的独自性と創造性

上記で敍述た「問い」を達成するため、**研究の最後目的を、3D ナノポーラス構造を用いた酸化チタンを利用したより生体に近い細胞培養に使うプラットフォームの開発とした**。具体的に、本研究では、以下の２つの研究項目として定めた。

研究項目①：WCP による 3D 細胞培養に最適なナノポーラス構造を用いたチタン酸化膜の作製

材料工学の観点から考えるとナノポーラス構造で構成された 3D 構造が一番生体に近い立体的構造だと考えられる。しかし、今日まで、ナノポーラス構造の作製には**加工過程が複雑・熱処理必要・長い処理時間・低い再現性・高コストなどの問題点**が指摘されている。これらの問題を解決するために、新しいナノ構造作製の技術が求められている。そこで、申請者は Wet Corrosion Process（WCP）という新しい技術を導入し、様々なナノポーラス構造を用いた酸化チタン皮膜を作製する。WCP はアルカリ溶液を利用して、金属を処理し、表面にナノポーラス構造を作製する表面処理技術である。WCP は常温での処理が可能・熱処理が不必要・短い処理時間・高再現性・低コスモスなどのメリットがあり、材料工学において大変注目されている。本研究では、WCP で作製された様々な 3 次元的なプラットフォームの中で、細胞培養に最適なナノ構造を明らかにする。

研究項目②：WCP により作製されたナノポーラス構造による 3D 細胞培養の可能性の検証実験

WCP で作製されたナノポーラス構造を持つ酸化チタン被膜を細胞培養のプラットフォームとして利用し、現在まで使用した 2D の平面のプラスチックの代わりに細胞培養が可能かを確認、

の可能性を確認し、どの表面構造が細胞培養に最適なのかを調べ、実際に 3D 細胞培養で貴重な情報を撮られるかを確かめる。

（2）－2　本研究の学術的独自性と創造性

現在まで研究されてきた平面上の細胞培養は、3D 構造を持つ生体と全く異なうため、生体に近い環境を再現することが出来ない。この問題

TOPへ戻る

で、*in vitro* と *in vivo* にはギャップが生じる。しかし、**生体に近い 3D ナノポーラス構造を細胞培養のプラットフォームとして用いる手法は、上記課題を解決できるまったく新しい培養法であるため、独自性は高いと言える**。

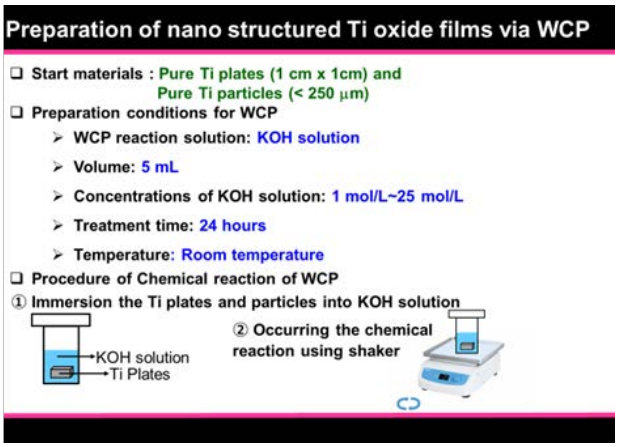


図 3.WCPによるナノポーラス構造を用いた酸化チタンの作製課程

さらに、**ナノポーラス構造の作製に WCP という新しい方法を用いることで、材料工学の側面から見ても有意味な研究となる。**つまり、**材料工学的な課題から生命工学的な課題まで、広い分野への展開が期待でき点で創造性が有ると言える**。

(3)-1 本研究の着想に至った経緯

バイオメディカル分野での大事な研究方法である細胞培養に関した研究は、一般的に平面培養(2D 培養)で行われてた。しかしながら、この方法では、高い細胞活性が見られない事から、薬物の毒性試験やスクリーニング、動物実験の代替となる安全性評価モデルの構築、再生医療など、様々な分野で使われる提案として3D 培養が注目されている。このために、まず、生体により近い細胞培養ためのプラットフォームが必要であり、材料工学の観点からナノポーラス構造が一番生体に似ている構造と考えられる。後、材料の特性としては、高い生体適合性が必要なので、**【もしナノポーラス構造を持つチタン材料を利用したら、効果的な3D 細胞培養に応用が可能であるプラットフォームになれる】と着想した**。申請者は、WCP という新しい方法でナノポーラス構造を持つ酸化チタン皮膜の作製の研究を実施してきた。作製されたナノポーラス構造を持つ酸化チタン皮膜は図４のような構造を示しているので、この構造は3D 培養に使われるそうな理想的な構造でしたので、本研究の着想となった。

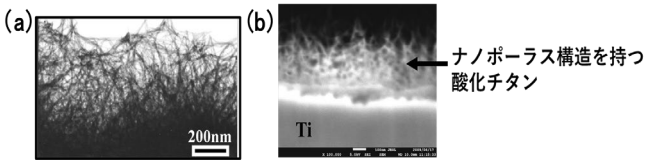


図 4.（a）TEM 観察によるナノポーラス構造を持つ酸化チタンのイメージ （b）SEM 断面観察によるナノポーラス構造を持つ酸化チタンのイメージ

(3)-2 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

3D 細胞培養技術は、ハイドロゲルを使用してタンパク質マトリックスを安定的に維持することで、より *in vivo* の生物学的条件に近いの環境を作ることが出来るようになった。しかし、限界もあって、ハイドロゲルは大部分が均質で、そのため実際の細胞が置かれているような *in vivo* 条件の勾配を常に模倣するとは限りない。そのため今日では、体内の多種多様な細胞タイプの類似体に適した環境を作り出すために、ナノファイバーなどのプラットフォームが注目されている。ナノファイバーを含めたナノポーラス構造は作製課程が複雑・低再現性という工学的な問題があり、一般的に使われるのには壁がある。しかい、WCP によるナノ構造の作製は課程の簡単さ・高再現性に優れているので、工学的に利点があると言える。

２． 研究計画

研究項目①：WCP による 3D 細胞培養に最適なナノポーラス構造を用いたチタン酸化膜の作製

様々な濃度の KOH 水溶液５mL で鏡面に仕上

TOPへ戻る

げたチタンを沈積し、24 時間シェイカーで振動させて WCP によるナノポーラス構造を持つ酸化チタン皮膜を作製。作成された試料の物性評価は次のようにする。

① 作製したナノ構造の観察：FE-SEM、AFM、TEM

② 作製したナノ構造の化学構造の散策：Raman spectroscopy, FT-IR、XPS

③ ナノ構造に閉じこまれている K の量の定量分析：XRF

研究項目②：WCP により作製されたナノポーラス構造による 3D 細胞培養の可能性の検証実験

作製された 3D ナノポーラス構造に微細物や細胞の培養を通じて、3D 構造の効果を調べる。

① 微生物の培養の準備

✓ 使用材料：微生物培養に 3 次元的な構造の効果を調べるために、比較材料として一般的に使用されている平面上の細胞培養プラスチックを準備する。

✓ 培養する生物としては、生命力が強い大腸菌（*E.Coli*）を選択する。

✓ 作製した様々なナノ構造の上で、多様な大腸菌の濃度を利用して、培養をする。

この段階で、大腸菌が形成されるバイオフィルムの結果から、最適大腸菌の濃度を決定することが出来ると考えられる。

② 大腸菌の吸着や形成されたバイオフィルムの分析

✓ FE-SEM、化学顕微鏡、AFM などで、大腸菌の形や構造を観察する。

様々な Elisa Kit を利用して、2D 細胞培養と 3D 細胞培養のプロファイルを調べる。

３．計画の進行状況

今年は研究計画項目①になる **WCP による 3D 細胞培養に最適なナノポーラス構造を用いたチタン酸化膜の作製**に集中した。先行研究で、純チタンを様な KOH 濃度で処理すれば、様なナノ構造が作製できる事が分かった。その再現性を確かめるために、再現実験を行って、再現性に成功した。

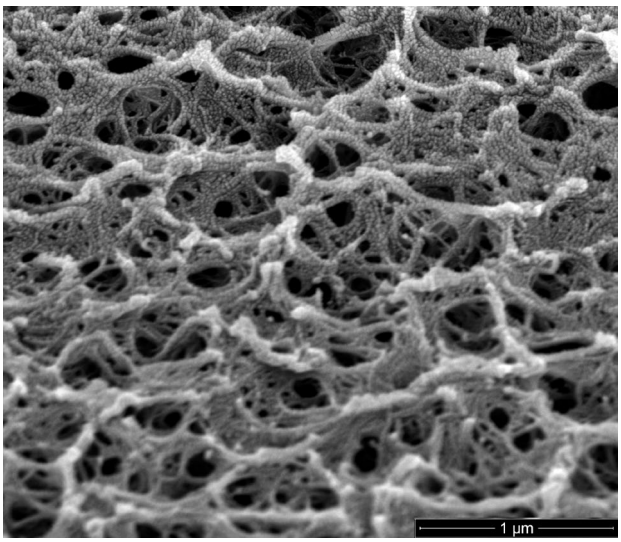


図 SEM で観察した 10 mol/L-KOH 溶液で作製されたナノ構造を用いた Ti 試料

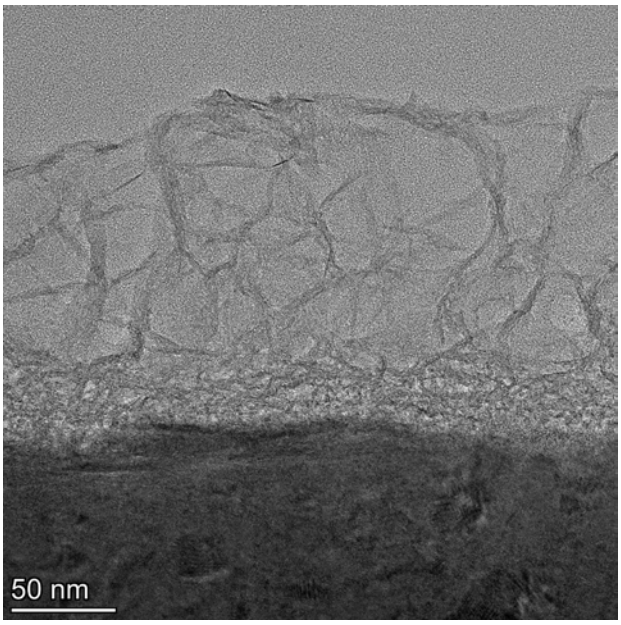


図 TEM で観察した 10 mol/L-KOH 溶液で作製されたナノ構造を用いた Ti 試料

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の計画としては、以下のようです。

① ナノ構造作製に成功しましたので、多様な分析を行って、物性評価を行う。

② ナノ構造における細胞培養への影響を調べるのが目的なので、まず、一般的な大腸菌（E.Coli）を利用して、３次元細胞培養を行う。

TOPへ戻る

Study on Task-adaptive Emotion Classification Modeling for Emotion-aware Robot

先進国際課程　Tipporn Laohakangvalvit

１．Paper introduction

In the upcoming era of human-robot society, robots are expected to play an important role not only in helping us perform daily-living tasks more efficiently but also in being able to understand and respond to our emotions. We aim to have a future society with robots that can support us emotionally, so-called emotion-aware robots, to improve overall quality of life.

One psychological model that can describe emotional states is the VAD (Valence, Arousal, Dominance) 3-dimensional emotional state model. In our previous research, we attempted to construct an emotion estimation model based on the 2-dimensional model of Valence and Arousal using biological signals [1]. However, the emotional states might vary by situation and task. Therefore, this research proposes to integrate Dominance into our existing model, which will provide information about the task intensity related to emotions at certain moments. This proposed VAD model aims to be implemented into an emotion-aware robot that will support people in the workspace and increase their productivity.

Therefore, our research goal is the development of a robot system capable of estimating emotions and task intensity degree through biological signals and providing timely biofeedback and interaction to improve productivity in the workspace.

２．Research program

We started our first step in the research program by designing the robot system and investigating the feasibility of module integration by implementing a robot prototype. Figure 1 illustrates the general system architecture. The system is to be set in a user workspace such as an office, or a study space so that a robot can monitor and provide support to users based on their cognitive states. The modules included in the system and their roles are described as follows:

- **Data acquisition module:** A user is equipped with physiological sensors. We plan on using EEG sensors in this system. Some potential EEG sensors for our application with robots include Emotiv Insight, Muse and Neurosky Mindwave Mobile 2.
- **Data storage module:** The data collected from the sensors will be sent to and stored on a server for pre-processing and analysis.

TOPへ戻る

- **Flow state recognition module:** Based on biological data, we propose to construct a machine learning model for classifying the user's cognitive states, i.e., boredom, flow, and overload. Firstly, we will create a dataset for model construction by performing an experiment in which participants are exposed to video-based stimuli for resting, boredom, flow, and overload. The participants will also be presented with a subjective rating questionnaire to perform self-reports on the same cognitive states after each of the stimuli.
- **Robot Operating System (ROS) module:** The robot will be implemented using TurtleBot3, which is an affordable and extensible robot platform capable of integrating multiple sensors. It has an accessible hardware base with educational resources, and it allows dynamic engagement in physical spaces.
- **User feedback module:** Depending on each user's estimated cognitive state (boredom, flow, or overload), the robot will provide feedback using three types of output: facial expression through a monitor, vocal cues through a speaker, and body movements. The cognitive state and examples of the feedback are shown in Table 1. The robot gives a low-concentration warning for the bored/unfocused state and motivates the user to work harder. For the overloaded state, the robot asks the user to take a break or take a deep breath. During the flow state, the robot would have minimal interaction with a few occasional motivational cues in order not to disturb the user while being focused.

In addition to the architectural design of the robot system mentioned above, we also plan to evaluate the robot system in a real setting. First, we aim to perform an experiment in a single-user

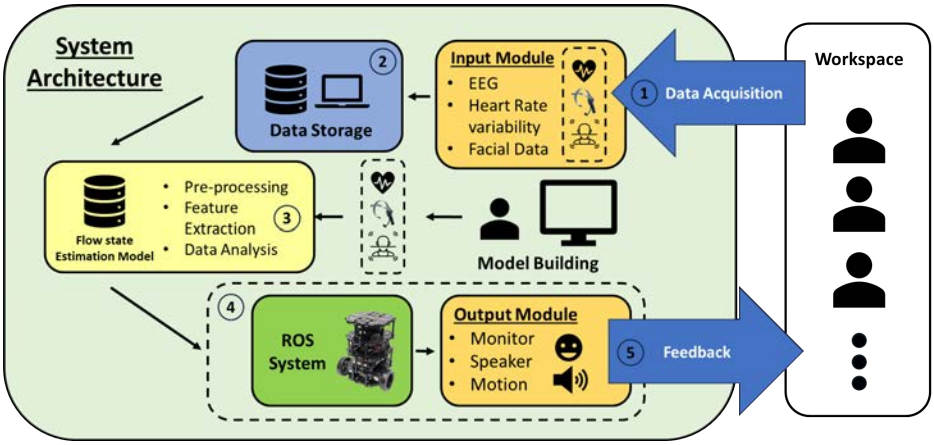


Figure 1: Robot system architecture

TOPへ戻る

environment to evaluate the robot's effectiveness in enhancing productivity. Next, we will move our focus to the functioning of the robot system in community workspaces with multiple users. The evaluation of the following two scenarios during the performance of intensive tasks will be conducted: (1) no robot assistance and (2) with biofeedback robot assistance.

3. State of progress

We have started working and confirmed the feasibility of the TurtleBot3 for our application, such as the configurations and basic teleoperation controls, learning the ROS system and built the robot prototype, which is equipped with a monitor and speaker as shown in Figure 2.

4. Future program, paper submission and results briefing

We have built the prototype of the biofeedback emotion-aware robot until now. In the next step, we will perform an experiment to collect data for constructing the model to classify task intensity degrees (boredom, flow, overload) based on the collected EEG data. After obtaining the model, we will integrate it into the robot and build the biofeedback based on the model result.

Finally, we will continue to work on each of the modules mentioned in Section 2 and finally combine them to build and evaluate the complete robot system. This proposed robot system aims to be used as a personal assistant to help improve productivity in a real workspace such as a student co-working space at our university.

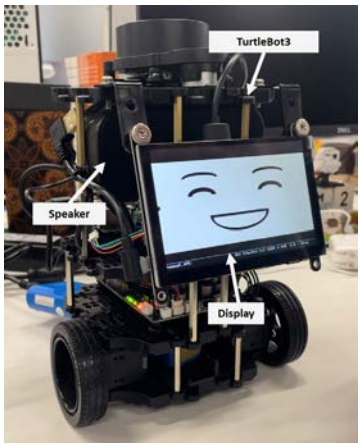


Figure 2: Robot prototype

Table 1: Robot feedbacks through vocal cues, facial expression, and body movements

Mental State	Vocal Cue	Facial Expression	Body Movement
Boredom/ Unfocused	"Let's get some work done", "Try just a bit more", " You are losing focus!", "Would some music help?"		More prominent close-proximity movement
Overload	"Are you okay?", "Take a breather", "Maybe you should take a break?"	(Dynamic emotion display)	Slow movement
Flow state	"Keep it up!", "You're doing great"		Minimal movement

TOPへ戻る

The paper submission under this research is listed as follows:

- N. Subsa-Ard, F. Fulini, T. Laohakangvalvit, K. Suzuki, M. Sugaya: “A Proposal of Emotion Estimation Method in Social Robots Using Facial Expression Recognition Model with Graph-based Techniques”, Proc. of the Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS), pp. 1-2, 2023.
- U. Pradhan, F. Fulini, T. Laohakangvalvit, K. Suzuki, M. Sugaya: “Towards Developing a Biofeedback Companion Robot for Productivity Enhancement through Flow State”, The 18th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), pp. 25-28, 2024.

In conclusion, we achieved our first goal of implementing the robot prototype, which is compatible with the EEG sensor that will be the most important tool to collect data for estimating cognitive states. Future work will continue to enhance other features of robot system and perform its evaluation. In addition, we also plan to include other modalities for estimating cognitive states and emotions, such as facial recognition from the camera, speech recognition, etc., which will increase the accuracy of prediction and flexibility of emotion estimation in various situations.

References

[1] K. Suzuki, T. Laohakangvalvit, R. Matsubara, M. Sugaya: “Constructing an Emotion Estimation Model Based on EEG/HRV Indexes using Feature Extraction and Feature Selection Algorithms”, Sensors, 21(9), 2021.

[2] M. Csikszentmihalyi: “Beyond boredom and anxiety”, Jossey-Bass, 2000.

[3] K. Katahira, Y. Yamazaki, C. Yamaoka, H. Ozaki, S. Nakagawa, N. Nagata: “EEG Correlates of the Flow State: A Combination of Increased Frontal Theta and Moderate Frontocentral Alpha Rhythm in the Mental Arithmetic Task”, Frontiers in Psychology, 9, 2018.

[4] M. Cherep, M. Kegler, J.P. Thiran, and P. Mainar: “Mental Flow Estimation Through Wearable EEG”, in the 44th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), pp. 4672-4678, 2022.

TOPへ戻る

自己適応型 Opportunistic Routing

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）

情報通信技術により多様な都市サービスを提供し，人々の生活を豊かにするスマートシティが広く注目を集めている．スマートシティでは，まちの見守りや監視，様々な事象の検知や予測等に基づき連携や自動化を行う高度な都市サービスの実現が期待されている．

この重要な基盤技術として，実空間を仮想空間に投影するデジタルツインが研究されている．デジタルツインでは，実空間をセンシングして仮想空間を生成し，AI 技術により仮想空間上で様々な処理を行い，その結果を実空間にフィードバックする．そのため，仮想空間を生成し維持するためのセンシングトラヒックに加え，様々な機器の自律的な制御や機器間での連携を行うためのトラヒックも発生する．Beyond 5G 時代の到来に向けて，通信インフラの容量拡大も期待できるが，未来のスマートシティではデジタルツインのための膨大な通信需要が発生すると考えられ，通信容量の確保が急務である．そのため，多くのデータが都市で生成され都市で利用されることから，そのようなデータを地産地消することが重要となると考えられる．

スマートシティでは，まちに設置された様々な機器，ユーザのデバイス，乗り物，自律ロボットやドローンなど膨大な量の端末が広範囲かつ高密度にネットワークに参加し，様々な処理やデータの生成を行うことが考えらえる．したがって，通信インフラに依らずに端末間の処理や生成されたデータの地産地消を実現する技術として，端末同士で直接通信し中継することでネットワークを構築する無線マルチホップネットワークが適用できると考えられ，図１に示すようなシステムモデルが期待できる．

上述した環境では，端末移動や電波干渉により，端末同士の接続関係が時々刻々と変化し，環境に適応した柔軟な中継端末選択が必要となる．そこで，特定の経路に依存せずに柔軟に中継端末を選択する OR(Opportunistic Routing) [1]が検討されている．しかし，都市

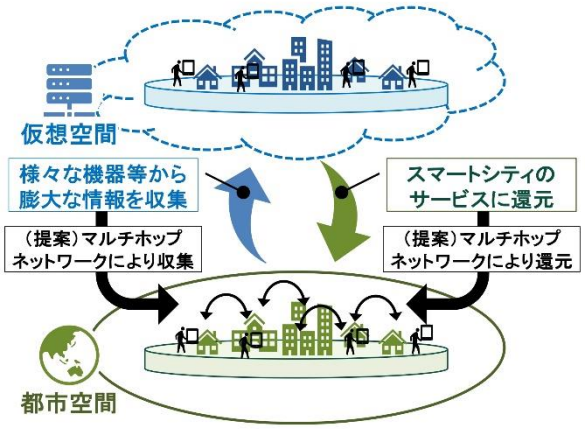


図１　提案するシステムモデル

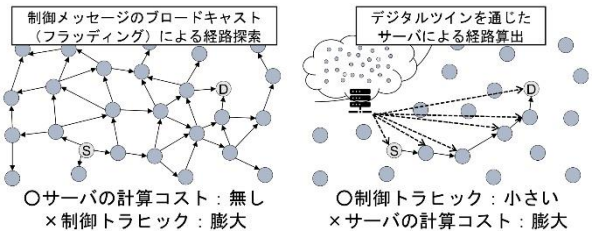


図２　都市環境での課題

TOPへ戻る

環境等において広範囲かつ高密度な環境における制御の検討については十分でなく，ネットワーク構築と維持の制御情報の交換に多くの通信資源を消費する（図 2 左）．また，多様な環境に適応するためには，OR に環境に適した設定を与える必要があるが，その設定値を一意に決定することが難しい．そこで，マルチホップネットワークの構築と維持による通信負荷と制御負荷をエッジサーバ等により補助する研究[2]も行われているが，こちらについても大規模環境での検討は不十分であり，両者ともにサーバ側の負担が著しいものとなると考えられる（図 2 右）．したがって，デジタルツインが利用可能なスマートシティにおいては，デジタルツインによるネットワーク構築と維持に関する補助が期待できる一方，過剰な利用は，デジタルツイン側の負担が増大する懸念がある．

２．自己適応型 Opportunistic Routing

上述したような環境での無線マルチホップネットワークを用いたシステムの実現に向け，無設定で制御パラメータや設定を自己適応できる OR を提案する．ここで，スマートシティトラヒックの地産地消に向け，図 1 に示したように，デジタルツインと無線マルチホップネットワークを連携させ，デジタルツインによる効率的なネットワーク構築補助と，OR による自己収束的な中継経路選択を用いて都市環境にマルチホップネットワークを自己適応させる．ここでは，各端末が保持するコスト情報の自己適応制御について検討した．

OR では，従来の経路制御手法と同様，制御メッセージの交換によって通信相手の探索とコスト情報の収集を行なう．しかし，このような制御は，広範囲かつ高密度に端末が存在する環境では，著しい探索負荷を生じさせる．そこで，デジタルツインと連携し，仮想空間側で中継経路を構築し，端末に配信することが考えられる．しかし，頻繁な環境変化に加え，広範囲かつ高密度である場合，サーバ側の負荷が著しいものとなる．更に，仮想空間で推定した通信環境が実空間と乖離している場合，通信の不安定性や通信の効率低下を招く．一方で，OR では一度コスト情報が拡散され，通信が開始できた場合，各端末の中継に応じてコスト情報を更新し，適切な経路に収束させることができる可能性があることが予備検討で分かっている．したがって，デジタルツインと連携し，ある程度妥当な経路を高速に算出して用いることで，OR によってコスト情報を自己収束させる制御を実現する．

上述した仮定に基づきトポロジー変化への耐性と宛先発見時のトラヒック負荷の抑制を両立する，デジタルツインによる初期経路注入を用いた OR を提案する．提案手法では，デジタルツインを通じて初期経路を構築し，パケット伝送とともに OR の特性により経路を収束させる．なお，各端末は，移動体通信を介して管理サーバへ自身の位置情報を定期的に送信しており，管理サーバは，受信した各端末の位置情報を一定期間記録して初期経路構築に利用するものとする．

経路情報注入による宛先探索

管理サーバは，送信元端末からの要求に応じて宛先端末までの初期経路を構築する．ここで，初期経路構築では，図 3 と図 4，及び以下に示す 2 種類の構築方式を用いる．構築方式 1 では仮想的な通信範囲$C_{\max}$を用いることで，

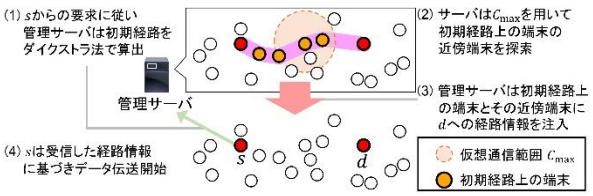


図 3　構築方式 1

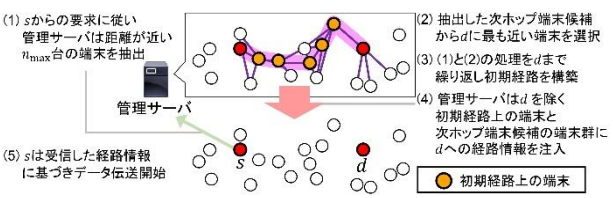


図 4　構築方式 2

TOPへ戻る

端末間のリンクをデジタルツイン上で再現する．図 3 に示すように，管理サーバはダイクストラ法を用いて初期経路を構築後，経路上の端末に宛先端末への経路情報を注入する．このとき，管理サーバは，経路情報を注入した端末の近傍端末を$C_{\max}$に基づき抽出しそれらの端末にも経路情報を注入する．この処理を$r_{\max}$回繰り返すことで,初期経路の冗長性を変化させ，中継に用いる領域を拡大する．なお，初期経路が得られなかった場合，管理サーバは送信元端末に構築失敗を通知し，送信元端末は要求パケットをフラッディングすることで宛先を探索する．構築方式 1 の精度は予め設定する$C_{\max}$に依存するが，実際の通信範囲は機器や環境により変動するため，設定が困難である．また，経路構築にダイクストラ法を用いるため，端末数が増加した際の計算コストが懸念となる.そこで,構築方式 2 では，端末間の近接性に基づき探索範囲を限定する．図 4 に示すように，管理サーバは，送信元端末から距離が近い順に$n_{\max}$台の端末を抽出し，抽出した端末群の中から最も宛先端末に近い端末を経路上の次ホップ端末として,同様の処理を行う．これを宛先端末に到達するまで繰り返して初期経路を構築し，経路上の端末と上述の処理で次ホップ端末候補として抽出した各端末に対し，宛先端末への経路情報を注入する．構築方式 2 は，仮想的な通信範囲に依存しないため，端末数が少ない場合でも,初期経路が構築される.一方で,実際には存在しない端末間のリンクを初期経路に採用する可能性もある.

このように,構築方式 1 及び構築方式 2 は，上述の手順に初期経路注入を行うことで，宛先探索に要する制御パケットを抑制する.

データ伝送と適応的経路選択

経路情報注入後のデータ伝送は参考文献[3]と同様の手順で行われる．送信元端末はデータ伝送を開始し,パケットを受信した端末は,自身の経路情報に含まれる宛先端末までのホップ数から得られる中継適正に基づき，転送待機時間を算出し転送待機を行う．なお，転送待機時間は宛先端末に近い端末ほど，短く算出される．待機中に自身と同一かもしくはより短いホップ数の端末による転送を検知した場合，自身の転送を中止する．転送を検知できなかった場合，待機終了後にパケットを中継する．中継端末は，自身と同一もしくはより短いホップ数の端末から同一パケットを再受信した場合，明示的 ACK を送信して近傍端末の中継を停止する．データパケット受信時に，各端末は経路情報の記録と更新を行うことで，OR の特性に基づく経路多様性の確保と経路情報の修正を行う.

３．シミュレーション評価と考察

ネットワークシミュレータである QualNet を用いて,従来手法である PRIOR [3],提案手法（構築方式 1，構築方式 2）の比較評価を行った．各端末の通信方式を IEEE 802.11b，通信速度を 11Mbps,通信範囲を 150m に設定し，1000 m 四方の領域に送信元と宛先の 2 台の端末のみ位置を固定し，一定の台数をランダムに配置した.固定した 2 端末間で 1,000 Bytes のパケットを交互に送信する処理を 1 ラウンドとし，これを 200 ラウンド繰り返した．なお，提案手法における経路構築時間の評価には，AMD Ryzen 9 3900X， 64GB の RAM を搭載したサーバを用いた．なお，構築方式 1 における$C_{\max}$は 150m とした.

表１　仮想的な経路構築に要した時間

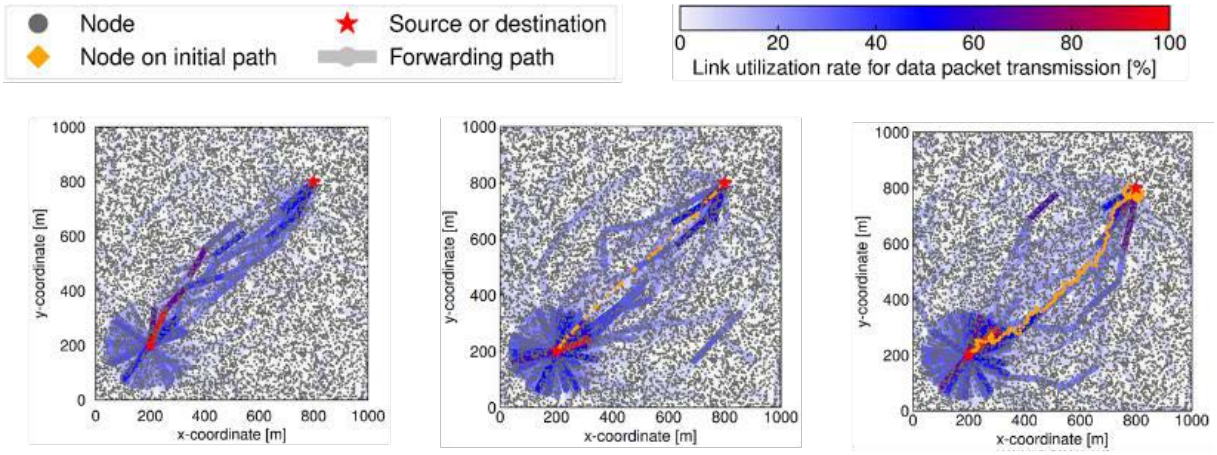
(a) 構築方式1 ($C_{\max}$ = 150m)

端末数	r_{max} = 0	r_{max} = 1	r_{max} = 2
10^2	8.1 × 10 [μs]	9.2 × 10 [μs]	1.2 × 10^2 [μs]
10^3	6.6 × 10^3 [μs]	6.8 × 10^3 [μs]	1.2 × 10^4 [μs]
10^4	9.4 × 10^5 [μs]	9.5 × 10^5 [μs]	6.4 × 10^6 [μs]

(b) 構築方式2

端末数	n_{th} = 3	n_{th} = 5	n_{th} = 10
10^2	1.9 × 10^2 [μs]	1.6 × 10^2 [μs]	1.4 × 10^2 [μs]
10^3	4.3 × 10^3 [μs]	3.3 × 10^3 [μs]	2.9 × 10^3 [μs]
10^4	1.4 × 10^5 [μs]	1.0 × 10^5 [μs]	8.8 × 10^4 [μs]

TOPへ戻る



(a) PRIOR　(b) 構築方式1 (C_{max} = 150m)　(c) 構築方式2 (n_{th}=3)

図 5　中継に用いられたリンクの利用割合

(1)　経路構築時間の評価

100～10,000 台の端末を配置した際の経路構築時間を表 1 に示す. 構築方式 1($r_{\max}=2$)は構築方式 1 ($r_{\max}\leq 1$) と比較し，端末数の増加に伴い経路構築時間が爆発的に増加していることが分かる．これは，近傍端末を抽出する処理が大量に繰り返されたためであると考えられる．一方，構築方式 2 ($n_{\max}=3,10$) では，構築方式 1 ($r_{\max}=0$～2) と比較し，端末数が増加した場合でも，経路構築時間が抑制できており，管理サーバの負荷を削減できることが確認できた．これは，経路構築時に次ホップ端末候補を$n_{\max}$台に限定することで，計算の反復回数を抑えられていると考えられる．また，$n_{\max}$の値を増加させると，宛先端末により近い端末が次ホップ端末に選択されやすくなるため，経路構築時間が減少している．

(2)　中継経路の収束性の評価

10,000 台の端末を配置し，200 ラウンド終了までに中継に用いられたリンクの利用割合を図 5 に示す．結果より，構築方式 1 ($r_{\max}=1$) と構築方式 2 ($n_{\max}=3$) で異なる初期経路が注入された場合でも，両方式ともリンクの利用割合に一定の収束が確認できた．提案手法では，送信元端末と宛先端末が双方向に通信することで，各端末が適応的に中継要否を判断しながら経路情報の記録や更新を行う．その結果，中継経路が一定のリンクに収束したと考えられる．

これらの結果より，提案する経路構築方式が，高端末密度な環境下においても，汎用のサーバ上で現実的な計算時間でデジタルツインを通じた仮想的な経路を構築でき，OR による経路制御により自律的に中継経路が収束できること確認できた．

４．学会公表，論文発表状況

本研究課題に関連する成果物として，1 件の査読付論文誌，4 件の査読付国際会議，5 件の国内研究会及び国内大会発表を実施した．また，本研究成果の査読付速報誌や査読付論文誌への投稿を予定している．

参考文献

[1] R. Dalal, et al., “Proliferation of Opportunistic Routing: A Systematic Review,” IEEE Access, vol. 10, pp. 5855-5883, Dec. 2021

[2] J. Li, et al., “Dynamic Cloudlet-Assisted Energy-Saving Routing Mechanism for Mobile Ad Hoc Networks,” IEEE Access, vol. 5, pp. 20908-20920, Oct. 2017.

[3] Taku Yamazaki, et al., “PRIOR: Prioritized Forwarding for Opportunistic Routing,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 1, pp. 28-41, Jan. 2017.

TOPへ戻る

ソーシャルメディアによるサイバー脅威分析と評価システムの開発

環境システム学科　　持永　大

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

ソーシャルメディアでは、ソフトウェアの脆弱性、サイバー攻撃の発信元 IP アドレス、マルウェアによる攻撃方法等のサイバー攻撃に関する情報が流通している。防御側がこれらをシステムの更新やファイアウォールの設定変更等に活用すれば、システム停止や情報漏えいにつながる攻撃を食い止めることができる。しかし、ソーシャルメディア上の情報は突然現れる上に流通量が多く、それらの正確性も判定が難しい。その結果、防御側がこれらの情報を短時間に活用できないことが問題となっている。

そこで本研究では、ソーシャルメディア上のサイバー攻撃に関する情報を、情報の発生パターンとアカウントの振る舞いから分析するシステムを開発する。既存研究では、ソーシャルメディア上の一般的なトレンドを分析し新たな情報を収集する手法が提案されている。また、サイバー攻撃に関連する攻撃者や防御者のアカウントを分析し、機械学習を用いて高い精度で攻撃者や防御側といった性質を特定できることが分かっている。本研究は、これらを組み合わせた手法を開発することで、新たな攻撃の兆候や脆弱性などの情報を検出し、従来よりも短時間で防御側が攻撃の兆候を捉えることを目指す。

本研究の目的は、ソーシャルメディア上のアカウントの特定やトレンド・キーワード分析を組み合わせ、未知のサイバー攻撃関連情報を検知することである。本研究は、ソーシャルメディア上のサイバー攻撃に関連するアカウントの特定に主眼が置かれていた既存研究から脱却し、攻撃に関する情報を収集する独自の試みである。また、ソフトウェアの脆弱性や侵害手法等といった情報が流通する未知のパターンを発見し、確度や深刻度を判定するシステムは新規性がある。

本研究の創造性は、アカウントの振る舞いをもとに精度の高いサイバー攻撃情報を検知しようとする点である。有効な情報を発信・参照するソーシャルメディア上のアカウントは事案毎に異なる。そのため、本研究は、動的に有効な情報を発信するアカウント集団の特定・更新を行うことで、新たな脅威情報の流通に早期に対応できる。

本研究の学術的な「問い」は、「ソーシャルメディア上のサイバー攻撃情報は、アカウントの動向を基に検出できるのか」にある。これまでの研究において、ソーシャルメディア上でサイバー攻撃に関連する情報に対して複数のアカウントが呼応することを観測している。しかし、ソーシャルメディアを利用した情報分析の難しさや、サイバー攻撃に関する

TOPへ戻る

情報が大量かつ事案毎に異なることから、国内外で体系的な研究は行われていない。

そこで、ソーシャルメディア上のサイバー攻撃情報と攻撃や防御に関わるアカウントの集団の呼応を観測・分析することで、短時間かつ正確にサイバー攻撃を検知出来ると考えた。

- サイバー攻撃の兆候などの情報はソーシャルメディア上で交換されている

サイバー攻撃やソフトウェアの脆弱性といった情報は、ソーシャルメディア等で公開情報として流通している。これらの情報は、脅威情報と呼ばれ､サイバー攻撃を実施する側、守る側、分析する側にとって、脆弱性情報の収集やサイバー攻撃の兆候等を観測するための手がかりとなる。例えば、新たな脆弱性の重要度を示す情報は、CVSS（Common Vulnerability Scoring System)による脆弱性の深刻度のスコアとして付与される。

しかし、サイバー攻撃は複数の手法を組合せて実施されるため､CVSSスコアだけではサイバー攻撃の実現可能性や被害を推定することは難しい。ソーシャルメディアには、マルウェアが利用する脆弱性の組合せや、侵害手法、その条件が流通するため、これらを分析することはサイバー攻撃の兆候を把握するのに有効である。

- 防御側はサイバー攻撃に関する情報を幅広く集める必要がある

サイバーセキュリティにおいて、攻撃側と防御側の持つ情報には非対称性がある。そのため、防御側は、情報収集を通じてあらゆる可能性を想定し、サイバー攻撃に備えなければならない。例えば、自身のコンピュータの防護だけでなく、ネットワーク上で利用するサービスからの侵入を視野に入れて、ネットワーク防護策や追加の認証システム導入をしたり、ソフトウェアの更新内容を確認したりする必要がある。すなわち、防御側は、自身の管理外のシステムに対するサイバー攻撃情報も収集しておく必要がある。

- 人手による情報収集には限界がある

ソーシャルメディア上には攻撃側やセキュリティ研究者が発信する情報があるが、その活用は困難である。その原因は、情報を発信するアカウントが事案毎に異なることや、情報の量が多いことに加えて、それらが深刻な被害につながるかの評価が難しいことにある。これまで、その確度や深刻度の判断はセキュリティの知見を有する者が行っており、情報の収集・分析・評価に時間がかかっていた。そのため、攻撃側が脆弱性を認知し悪用するまでの時間よりも短い時間で情報を収集・分析・評価する技術が求められている。

例えば､2021年12月に公開されたJavaベースのログ出力ライブラリ Log4j2 の脆弱性への対応は、人手による情報収集の限界を示す事案である。この脆弱性を用いた攻撃は容易に再現することが可能であり、ソーシャルメディア上で攻撃の観測情報が流通していたため、注目された。この状況をふまえ、ソフトウェア開発者たちのコミュニティであるThe Apache Software Foundationも同脆弱性の深刻度を最高（Critical）と評価した。

本件は、人手による情報収集・脆弱性対応の限界を示している。脆弱性を修正したプログラムの配信後も、サイバーセキュリティの専門家が修正プログラムの不完全性に関する情報や、対策方法に関する情報をソーシャルメディア上で提供した。しかし、これらは大量かつ広範囲な情報であり、第三者の人手による情報収集・分析が追いつかない状況であった。同ライブラリは様々なシステムで利用されていたため、職人的な作業による情報収集・分析・評価に限界があり、情報が出そろうまでに数ヶ月を要した。

２．研究計画

次の点を令和5年における研究計画のマイルストーンとして取り組む。既存研究のサーベイ及び新たな脅威情報を発信するアカウン

TOPへ戻る

トから構成される集団のうち、有効な情報を発信したアカウントが言及・参照する割合に着目することで、サイバー攻撃に関する情報を検知するシステムを検討する。

これまで有効な情報を発信するアカウントの特定が可能あることが分かっている。そこで、共起ネットワークとコサイン類似度を用いて、これらのアカウントが新規のサイバー攻撃情報に表れるキーワードを参照・言及するタイミングや振舞いを明らかにする。

３．計画の進行状況

既存研究のサーベイについて、次の通り実施した。

国内外の研究動向について、ソーシャルメディア上のコミュニティやアカウントの分類は機械学習の応用で可能なことがわかっている。また、Twitter のトレンドは共起ネットワークとコサイン類似度から分析可能であることがわかっている。関連研究は次の通りである。

- Mahani らは、機械学習を用いて、ソーシャルメディア上で有効な情報を発信するアカウントを特定する方法を提案した（Mahaini, M., et al, Detecting cyber security related Twitter accounts and different sub-groups: a multi-classifier approach, 2021）
- Jones らは、サイバー攻撃を展開するアノニマスに関連するアカウントを、機械学習を用いて特定する方法を提案した。(Jones, K., et al. Behind the Mask: A Computational Study of Anonymous' Presence on Twitter, 2020)
- 飯尾は、Twitter のトレンドを共起ネットワークとコサイン類似度から分析するシステムを提案した。(Iio, J., TWtrends: The Topic-Graph Extraction from Twitter Trends, 2019)

サーベイの結果、本研究と既存研究の違いは、サイバー攻撃の兆候となる情報をアカウントの振る舞いから検知する事にある。既存研究は、脅威情報に関連するアカウントの集団を見つけるための研究であり、サイバー攻撃に関する情報のパターン分析には不十分であることがわかった（）。

そこで、収集した脅威情報を他の対策と組み合わせてセキュリティを強化することで、リスクの低減が可能であることがわかった。例えば、収集した情報をファイアウォールや不正侵入防御システムと連携することで、収集した情報を対抗策として適用することが出来る。また、収集した情報をマルウェア情報共有プラットフォーム（Malware Information Sharing Platform: MISP）と組み合わせることで、異なる組織間での脅威情報の共有が可能となる。

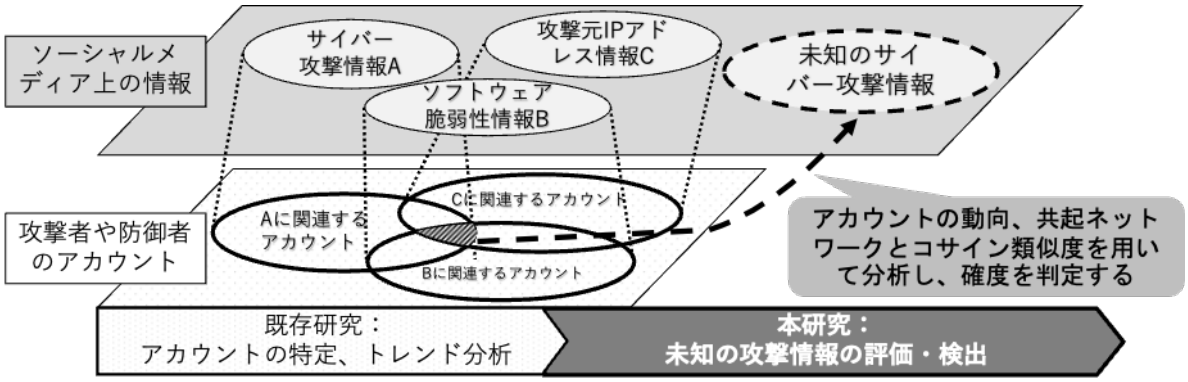


図 1　既存研究と本研究の違い

TOPへ戻る

また、X（Twitter）による情報収集機構についても検討した。しかしながら、X社が2023年以降にAPIを用いて投稿を取得する料金を大幅に引き上げたため、本格的な分析に至ることはできなかった。

本研究による情報収集の自動化は、脅威の発生から対抗策の実施までの時間を短縮する。セキュリティベンダ等の大きな組織間での脅威に関する情報交換は、MISP等により標準化が進んだことにより、従来よりも短い時間で情報を共有することが出来る。しかし、脅威の発生から脅威の検知までの時間の長さは依然として課題である。脅威情報の収集・検知はリソースの不足等の要因により時間の短縮が難しい。また、専門知識を有した人材であっても、新たな脅威情報を見逃す可能性がある。そのため、今後本研究はこの課題の解決にむけて、自動的に脅威情報を検出する機構を開発する。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の計画として、波及効果をねらった研究の推進を行う。本研究の波及効果はソーシャルメディアを利用したサイバーセキュリティ研究が誰でも出来るようになることである。これまで困難であったソーシャルメディア上の情報から脅威情報を検出するための理論構築とシステム開発を行い、その成果を共有することで、様々な組織や個人が自身の目的に合わせてソーシャルメディアを利用したサイバーセキュリティ研究ができるようになる。

学術的な波及効果は、現在注目を浴びつつあるソーシャルメディアを利用したサイバーセキュリティ研究において新たな脅威検出機構を提案することにある。これをさらに発展させることで、サイバーセキュリティ脅威インテリジェンス（CTI）の一部を自動化し、より高度な分析につなげることが可能である。

また、本研究の成果を活用した国際連携も可能である。例えば、欧州のCSIRTが中心となって、組織のセキュリティ対応チームがサイバーセキュリティ事案対処の一部の自動化をしようとするプロジェクトを推進している。このプロジェクトはIntelMQと呼ばれており、IHAP（Incident Handling Automation Project）として欧州各国のCSIRTが、事案対処における情報基盤整備を目指して活動している。本研究の成果は、事案対処の一部自動化に貢献するものであり、サイバーセキュリティ強化に向けた国際連携のきっかけを作り出すことが出来る。

TOPへ戻る

神経幹細胞の活性化作用を有する
抗新型コロナウイルス薬の開発研究

生命科学科　　須原　義智

共同研究者
鹿児島大学 医学部 医学科　　岡本　実佳

１．序論（はじめに，まえがき，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１）[*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 (論文投稿中)。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、側鎖と側鎖末端部分の構造と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つ、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。

２．研究計画

研究計画の流れは次の通りである。1）新たな化合物ライブラリーを構築し、in vitro アッセ

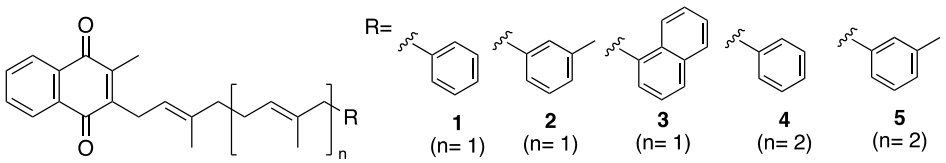


図 1 ビタミン K 誘導体の構造式

TOPへ戻る

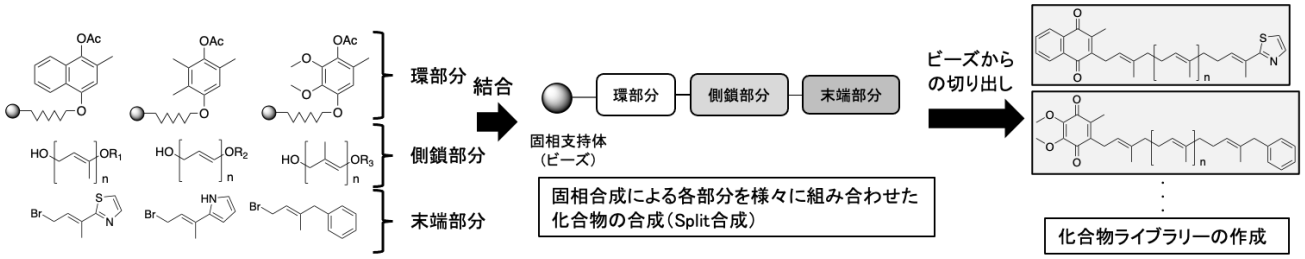


図2　コンビナトリアル合成による多種多様な誘導体の合成

イで抗 SARS-CoV-2 活性を調べる。高活性を示した化合物について、神経幹細胞に対する分化誘導活性をスクリーニングにより評価する。2）両方に活性を示した化合物の標的タンパク質を明らかにし、in silico 解析により、強く作用する新規化合物の探索を行う。3）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。

【2023 年度の計画】：1)-A コンビナトリアル合成による化合物ライブラリーの構築　先行研究で高活性を示したビタミン K 誘導体の化学構造式を基にして、主にその側鎖部分を様々な官能基に変えた周辺化合物を合成する。合成方法は多種多様の化合物を網羅的に合成する「コンビナトリアルケミストリー」の手法を応用して、ビタミン K の構造を基本に、環部分と側鎖部分、末端部分に分けて行う（図2）。また、側鎖と側鎖末端部の脂溶性（log P 値）も考慮に入れる。

1)-B　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)-A 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3）。

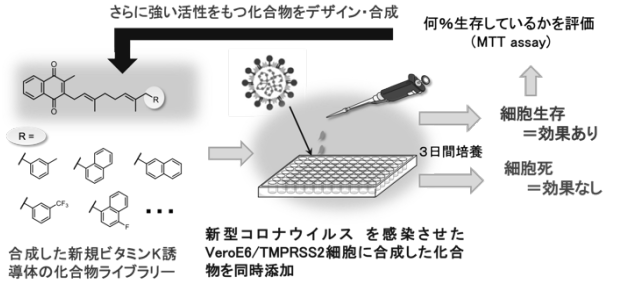


図3 化合物の抗 SARS-CoV-2 効果の判定および最適化の手法

1)-C 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　1)-B 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。

【2024 年度の計画】：2)-A 高活性を示した化合物を用いた作用機序の解析　上記1）-C による検討で得られた化合物について、SARS-CoV-2 に対する作用機序の解析を行う。time-of-addition 試験を行い、当該薬剤のウイルス増殖サイクルにおける作用段階を類推する。さらにウイルス由来の各種タンパク(酵素)を用いた阻害試験により、標的分子を絞り込む。薬剤の標的が宿主細胞因子と考えられる場合には、DNA マイクロアレイ法やプロテインアレイ法、リアルタイム RT-PCR 法により、標的分子の同定、検証を行う。 一方、神経幹細胞をニューロ

TOPへ戻る

ンへ分化させる作用機序は、これまでの我々の研究により代謝型グルタミン酸受容体を介していることが予想されているため、この研究で得られた化合物で確かめる。

2)-B In silico 解析による標的分子にさらに強く作用するリガンドの設計　上記 2)-A で明らかにされた情報を基にして、標的分子に強く作用するリガンドを計算化学の手法を用いて設計する。すなわち、PDB (Protein Data Bank) に収載されている場合は、その 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、結合ポケットの疎水性、結合エネルギーなどを検討し、いくつかの候補化合物を設計する。

【2025 年度の計画】: 3) In vivo 試験の検討

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ハムスターまたは hACE2 トランスジェニックマウスを用いた動物試験により、効果や安全性を検討する。

＜研究が当初計画どおりに進まないときの対応＞

2024 年度までに研究が当初計画どおりに進まないときは、どちらかの作用に特化した化合物の開発にシフトする。もしくは化合物の作用メカニズムを再検証し、化合物デザインを再考する。

３．計画の進行状況

ビタミン K が SARS-CoV-2 の治療薬になり得る可能性に着目して、当研究室では鹿児島大学ヒトレトロウイルス学共同センターと共同研究を行っている。VeroE6/TEMPRESS2 細胞（2×10^4 cells/well）を播種し、37 ℃で 24 時間培養後、SARS-CoV-2 に感染させて当研究室で合成した約 60 種類のビタミン K 誘導体で処理した。さらに 37 ° C で 3 日間培養した後、生細胞の生存率を確かめるため MTT assay を行い、その EC_{50}（半数効果濃度）及び CC_{50}（半数傷害濃度）を求めた。その結果、ビタミン K 誘導体の中でも、MK-2 の側鎖末端に環構造を有する置換基を導入した誘導体でのみ感染細胞の生存率の上昇が見られた。また環構造の中でもプリン骨格を有する構造を導入した誘導体の多くで強い毒性が見られたが、プリン骨格の 6 位に Cl を導入した誘導体 **2a** は毒性が見られず、最も強

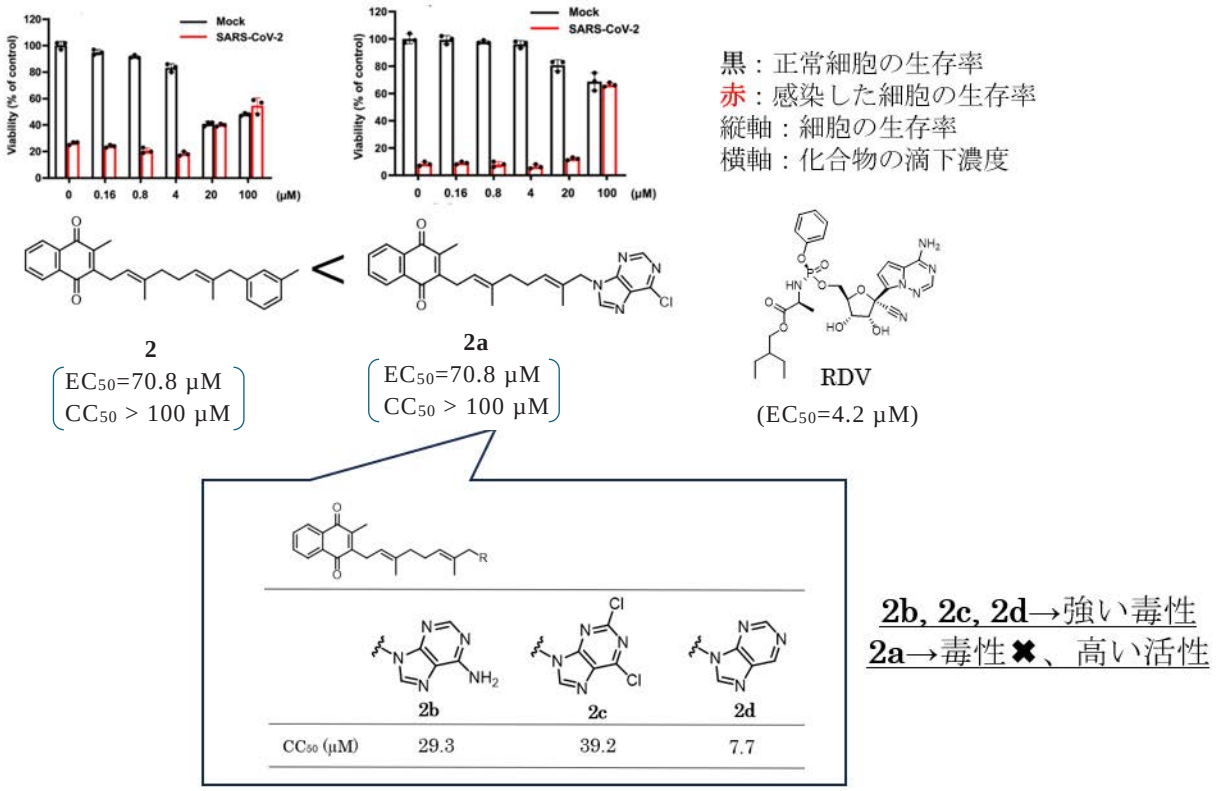


図4　抗 SARS-CoV-2 活性を示すビタミン K 誘導体

TOPへ戻る

い活性を示した。しかしながら、MK-2 誘導体 **2a** の抗 SARS-CoV-2 活性は既存の治療薬であるレムデシビルの約 1/15 であるため、さらなる活性の増強が必要であった。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

先行研究では、核酸塩基を導入した MK-2 誘導体 **2a** に最も高い抗 SARS-CoV-2 活性が見られた。RDV を始めとした RdRp 阻害剤のほとんどは核酸の構造を模倣しており、MK-2 誘導体 **2a** は側鎖末端にアデノシンを持つ RDV と構造が一部類似している。そこで、さらに高活性を示す誘導体の創製を目指して、次のような MK-2 の側鎖末端に様々な核酸塩基を導入した化合物をデザイン・合成することにした。

1）アデニン以外の核酸塩基であるウラシル、チミン、シトシン、グアニンを導入した誘導体
2）ウラシルとチミンの基本骨格であるピリミジン骨格の 5 位にハロゲンである-F, -Cl, -I および-CN を導入した誘導体
3）リード化合物である **2a** を基に、プリン骨格の 6 位に-Cl、2 位に-F または-NH_2 を導入した誘導体
4）誘導体 **2** の末端の 1,4-ナフトキノン環の 5 位と 8 位に-OH を導入した誘導体

今後、これらの化合物を合成し、抗ウイルス活性や細胞毒性を検討していく予定である。

学会発表

1. 小原沢 諒人，岡本 実佳，本間 大暉，早川 真由，廣田 佳久，馬場 昌範，須原 義智. 抗 SARS-CoV-2 活性を有するビタミン K 誘導体の創製，日本ビタミン学会第 75 回大会，2023.6.18
2. 小原沢諒人、早川真由、廣田佳久、須原義智. 3CL プロテアーゼ阻害活性を有するビタミン K 誘導体の探索，第 65 回天然有機化合物討論会，2023.9.15
3. 小原沢諒人、早川真由、廣田佳久、須原義智. 3CL プロテアーゼ阻害作用を有する menadione 誘導体の探索」，第 67 回日本薬学会関東支部大会，2023.9.16
4. 小原沢諒人、早川真由、本間大暉、金子達哉、廣田佳久、須原義智. 抗ウイルス作用の増強を目指した VK 誘導体の合成」，次世代のビタミン学に繋げるイノベーションミーティング，2023.11.11-19

論文等投稿

1. Koharazawa R, Hayakawa M, Takeda K, Miyazaki K, Tode C, Hirota Y, Suhara Y*. Exploring 2-methyl-substituted vitamin K_3 derivatives with potent inhibitory activity against the 3CL protease of SARS-CoV-2. Bioorg Med Chem Lett. 2024, 100, 129642.
2. Homma T, Okamoto M, Koharazawa R, Hayakawa M, Fushimi T, Tode C, Hirota Y, Osakabe N, Baba M, Suhara Y*. Exploring Novel Vitamin K Derivatives with Anti-SARS-CoV-2 Activity. *ACS Omega*. 2023, 8, 42248-42263 (*IF:4.1*)
3. 須原義智*，岡本実佳，新型コロナウイルス感染症とその後遺症に対する治療効果を併せ持つ薬剤の創製.*月間バイオインダストリー*, 11, 8-15, **2023**.

TOPへ戻る

動的状況時のアキレス腱力学特性の非侵襲簡易計測システムの開発

生命科学科　山本 紳一郎

共同研究者
生命科学科　赤木　亮太

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

脊髄損傷者(以下，脊損者)の歩行機能回復訓練には股関節可動域増大とアキレス腱からの求心性入力(図１)や足底負荷等の求心性入力が重要な要素であると提唱されている(Dietz ら, J. Appl Physiol 2004)．股関節可動域は容易に計測可能であるが，歩行訓練時のアキレス腱求心性入力(=力学特性)は容易に計測できない．また，中高年者に多発するアキレス腱断裂は，日本では年間発生率として 10 万人に約 30 名である．突発的に生じるために予防手段が確立されておらず，もし走行や跳躍等の動的条件下でもアキレス腱力学特性が容易に計測できれば，なんらかの予防手段も確立できるのではないかと考えられる．アキレス腱力学特性は，床反力計と三次元動作解析を用いて足関節トルクを算出し，超音波画像からモーメントアームを算出すれば間接的に推定できる．しかしながら，計測には制約が多く高額な計測機器も必要となるだけでなく，多人数の計測には無理がある．1990 年代には Komi らがアキレス腱張力簡易計測デバイスを開発したが，あくまで研究用の開発であり汎用性がなく，未だに実用化できていない．図２のようにアキレス腱は力発揮により複雑に形状変化し，内部組織であるアキレス腱力学的特性を皮膚上から推定するには技術的

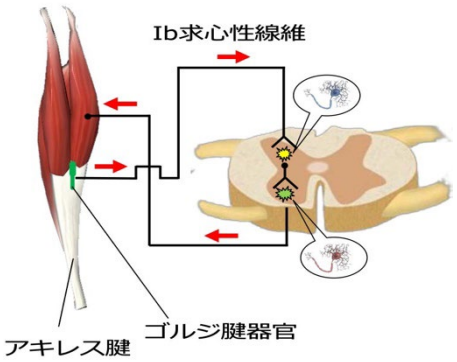


図１　アキレス腱の脊髄神経機構

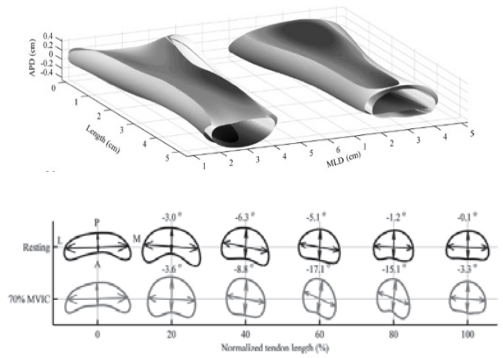
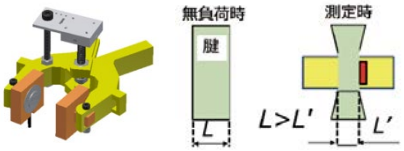


図２　力発揮時のアキレス腱の形状変化
Obst et al(J Appl Physiol 2014)

に多くの課題があるために約 30 年もの間，取り組む研究者がいなかったと考えられる．

これらのことから，困難な技術的問題はあるが，歩行や走行，跳躍等の動的条件下のアキレス腱力学特性を非侵襲かつ簡易的に計測できるシステムが開発できれば，様々な運動機能障害者の歩行訓練時の免荷量や強度の処方やアキレス腱断裂を予見・予防す

TOPへ戻る



$$\text{Lateral Stiffness [N/mm]} = \frac{\text{アキレス腱押し込み反力 [N]}}{\text{アキレス腱変位量 [mm]}}$$

図３　アキレス腱力学的特性計測デバイス設計案と LT 算出方法

るための有益な計測が可能となる．まさに誰も達成できていない挑戦的研究であるといえる．

本研究では，アキレス腱張力計測だけでなく，腱形状変位も自作デバイスによって計測し，横弾性係数(Lateral Stiffness: LT)として算出する．そこから縦弾性係数（ヤング率）やポアソン比，張力等の力学特性を動的条件下でも簡易的に推定できるデバイスを開発する（**図３：デバイス設計案と LT 算出方法**）．各パラメータの推定値は機械学習（U-NET 等）を用いて精度向上を図る．さらに生体内部組織の硬度を計測できる最新の超音波画像診断装置（エラストグラフィ）を用いて，アキレス腱力学特性の較正を行う．また，申請者らがこれまで義足ソケットのシミュレーション解析を研究してきたノウハウを生かして，有限要素法(FEM)を用いたアキレス腱および計測デバイスの構造解析（LS-Dyna 使用）も行い，最適なデバイス設計および計測方法，推定方法の検証を行う．　したがって，本研究課題では，座位，静止立位等の静的条件下だけでなく歩行や走行，跳躍等の動的条件下でもアキレス腱力学的特性を計測・推定できる評価法の考案と，その計測システムの開発，さらに別途開発中の免荷式トレッドミル歩行訓練システム（図４）や動的立位バランス訓練システムに組み込むことを最終目標とする．アキレス腱断裂への予見・予防対策の一助にもなり，さらなる波及効果といえる．

２．研究計画

アキレス腱力学特性計測デバイスの詳細設計と強度評価を実施し，試作機を３D プリンタによって製作する（**図３：デバイス設計案と LT 算出方法**）．また，シミュレーションによる構造解析では，アキレス腱は運動時にはほぼ常に力発揮され，図２のように複雑な形状変化を呈している．そのため力学特性を詳細に推定するには困難を極める．本研究では，簡易的にアキレス腱を皮膚表面から挟み，微小な腱幅変化や反力を計測するデバイスを製作し（**図３**），それらのパラメータから力学的特性を推定することを試みる．さらに有限要素法を用いた動的シミュレーションによる構造解析も進め，どの箇所にどの程度の応力変化が生じるのかを検討する．

歩行訓練システムにアキレス腱力学特性計測デバイスを組み込み，健常若年者で安全性を充分に確認した後，アキレス腱断裂の恐れがあり力学特性が異なる中高年者に対する臨床評価実験を実施する．

３．計画の進行状況と今後の計画

本研究課題は，科研費（挑戦的研究（萌芽））に応募した内容であり，２ 年間の研究期間で申請している．本プロジェクト研究課題では，研究としての見通しを得るために，初年度に計画されていた内容をあらかじめ進めた．そこで，まずはアキレス腱力学特性計測デバイスの詳細設計と強度評価を実施し，試作機を製作した．製作した試作機を図４に示した．

試作機の評価実験を実施した．対象者はア

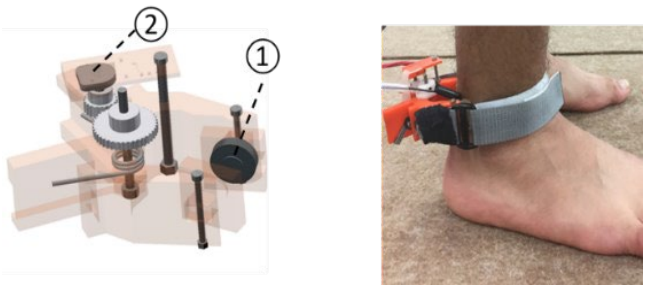


図４　試作したアキレス腱機械的特性計測デバイス

TOPへ戻る

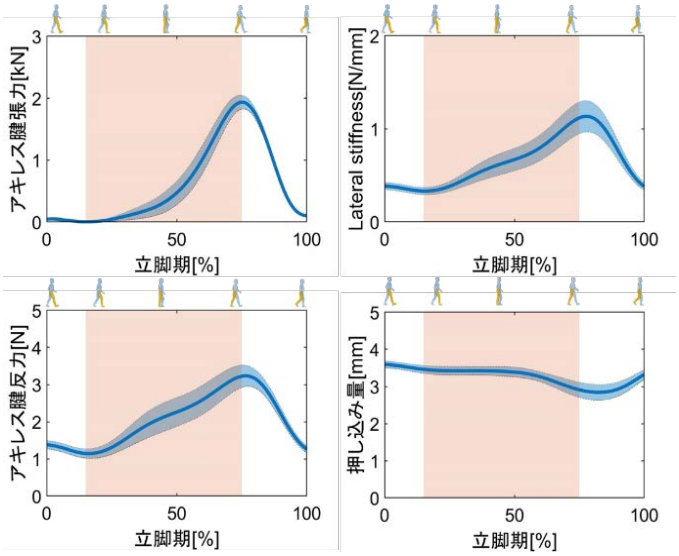


図５　各計測パラメータの典型波形

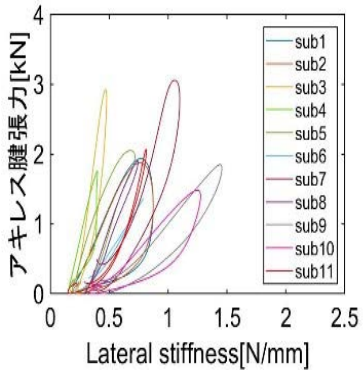


図６　計測デバイスから得られたLateral StiffnessとATFとの関係

キレス腱に疾患歴のない健常成人男性 11 名(年齢： 22 1[year]，身長 169.5±6.8[cm]，体重 67.5±10.0[kg])であった．開発した計測デバイスをアキレス腱遊離腱部に装着し，歩行，歩行路上に設置された路上に設置された 3 枚のフォースプレートフォースプレートを各々1 歩ずつ踏むように指示した．被検者の歩行動作を計測するために，左右の第三中足骨，外顆，踵骨隆起，膝関節るために，左右の第三中足骨，外顆，踵骨隆起，膝関節中心に中心に計計 8 個の個の反射マーカーを配置し，3 次元動作解析システム（MAC3D, MotionAnalysis 社）によって計測した．

本計測では，立脚期のアキレス腱の張力（ATF），横弾性係数（Lateral stiffness），反力，押し込み量を計測した（図５）．蹴り出し期において，全パラメータでピーク値に到達した．立脚期中期の範囲(薄橙色)において，ATF は増加した．それに伴い，非侵襲型計測デバイスで計測した反力は増加，押し込み量は減少した．反力と押し込み量の変化の影響を受けたことから Lateral stiffness は増加した．これらは，ATF と Lateral stiffness の関係性において材料力学的性質の考えである幾何剛性を示唆する結果となった．

図６には全対象者の ATF-Lateral stiffness の単回帰分析の結果を示した．対象者ごとの線形回帰式を求め，算出した決定係数は r2=0.899 ± 0.114(Range : 0.603 ～ 0.987)と高い決定係数を示した．しかし，対象者間において回帰式のばらつきがみられた．ATF-Lateral stiffness には時計回りのヒステリシスループが存在し，アキレス腱が粘弾性という先行研究を支持する結果となった．

今後の展望として，科研費・挑戦的研究（萌芽）採択に向けたアプローチを検討する必要がある．試作した計測デバイスでは，個人間のバラツキが非常に大きいため，汎用性のあるデバイスとしては使用できないことが判明した．したがって，どのように汎用性のある計測デバイスとして成立させるか何らかのブレイクスルーが今後の大きな課題である．ブレイクスルーできる見込みのある提案をできれば挑戦的研究として魅力ある申請ができるのではないかと思われる．また，これまでは脊損者等の障害者の歩行訓練システムの開発の一環として提案してきたが，さらに多くのニーズが見込まれる中高年者のアキレス腱断裂の予防対策という切り口で提案していくことも今後の一つの取り組みであると思われる．したがって，今後は中高年者のアキレス腱断裂対策を踏まえて，アキレス腱断裂を起こしやすい年齢層と若年層との比較検討を実施していきたい．

TOPへ戻る

４．学会，論文等投稿・発表状況

1) 宮田朋実，山本紳一郎：非侵襲型アキレス腱張力計測デバイスの開発：第31回ライフサポート学会フロンティア講演会：東京大学　本郷キャンパス：2022.3.7-8
2) 吉崎文崇，赤木亮太，山本紳一郎：非侵襲型計測デバイスを用いた歩行中におけるアキレス腱力学的特性の推定：第30回ライフサポート学会フロンティア講演会：東京都市大学 世田谷キャンパス：2021.3.9
3) Fumitaka Yoshizaki, Shin-ichiroh Yamamoto: Development of Achilles tendon force measurement device -Lateral mechanical properties of the Achilles tendon-, 42th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Montreal,Canada, 2020.7.21
4) Fumitaka Yoshizaki, Yoshiyuki Shibata, Shin-ichiroh Yamamoto,: Study on Morphological Change of Achilles Tendon for Development of Achilles Tendon Force Measuring Device ,The 14th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, Thailand, 2020.2.27
5) 吉崎文崇，赤木亮太，山本紳一郎：非侵襲型計測デバイスを用いた歩行中におけるアキレス腱力学的特性の推定：第 30 回ライフサポート学会フロンティア講演会：東京都市大学 世田谷キャンパス：2020.3.9
6) 吉崎文崇，山本紳一郎：非侵襲計測デバイスを用いた歩行中のアキレス腱張力の推定：日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2020：芝浦工業大学 大宮キャンパス：2020.12.12

TOPへ戻る

生細胞イメージング画像の AI 分類による マクロファージ表現型識別法の開発

生命科学科　　中村　奈緒子

共同研究者
東京医科歯科大学生体材料工学研究所　　木村　剛

１．序論

本研究課題の目的は、マクロファージの表現型（M0/M1/M2）の識別のための生細胞イメージング画像の AI 分類である。AI 技術として深層学習による画像分類を導入することで、新たな細胞分極評価法を確立する。具体的には、マクロファージの表現型と細胞画像を学習させ、表現型が未知のマクロファージの画像を評価させることで分極を明らかにする。タイムラプス撮影により、同一細胞の画像を経時的に取得する。また、生細胞イメージング画像として、細胞トラッキング可能な生細胞染色にて染色した細胞の蛍光顕微鏡画像を用いる。

人工臓器や再生医療用足場材料などの生体内に移植されるバイオマテリアルは、マクロファージなどの作用により、生体の炎症反応の一種である異物反応を引き起こすことが知られている。そのため、バイオマテリアル研究ではマクロファージをバイオマテリアル上で培養し、未分極マクロファージ（M0）が、炎症促進作用を示す M1、炎症抑制作用を示す M2 型のどちらの表現型に誘導されるかを評価する。遺伝子発現解析や免疫染色は細胞を殺して実施するものであり、経時的評価には、時間ごとに別のサンプルを準備する必要がある。遺伝子発現解析や ELISA で得られる情報は、細胞個々の遺伝子発現量やサイトカイン産生量ではなく、細胞集団の遺伝子発現量やサイトカイン産生量の総和あるいは平均であるため、全体的な傾向を解析していることになる。申請者らもマクロファージの表現型を評価するなかで、「マクロファージは集団として同時に同一の表現型となるとは限らないのではないか？」との疑問が出てきた。免疫染色では個々の細胞を観察できるものの、経時的に同一細胞を評価できない。しかしながら、マクロファージの表現型は外的環境に応じて可逆的に変化するため、「経時的な遺伝子発現量やサイトカイン産生量の定量では同じ結果を示しても、個々のマクロファージは変化しているのではないか？」と考えた。これに対し、「非侵襲的な生細胞イメージングにて得られる画像からマクロファージの表現型を識別できれば、同一細胞を経時的に評価できるのではないか？」と考えた。マクロファージは表現型によって、その形状が異なることが報告されているものの、形状から表現型を識別するまでには至っていない。深層学習による画像分類の導入により、マクロファージの形状情報を表現型の識別に応用する点が本研究課題の特徴である。また、本手法は、細胞を生存させたまま経時的に観察することを可能とする。また、この技術はバイオマテ

TOPへ戻る

リアルに接着して機能発現を行う上皮細胞や間葉系幹細胞の分化評価にも活用できる。さらに、経時的な評価が必要な薬物スクリーニングなど、様々な細胞応答性の評価にも応用可能である。学術的に広く貢献できる点が本研究課題の創造性である。

AI を用いた細胞画像の識別に関しては、iPS 細胞に関連する報告が多い。その一つとして、iPS 細胞の血管内皮細胞への分化を、細胞が生きた状態で撮影可能な位相差顕微鏡画像を用いて識別する手法が報告されている（D. Kusumoto, et al. Stem Cell Rep., 2018)。申請者らはすでに非侵襲で観察可能な位相差顕微鏡画像を用いたマクロファージの細胞画像分類に取り組み、約 80%の判定精度が得られた。位相差顕微鏡画像では細胞に処理をすることなく画像取得ができるものの、バイオマテリアルに接着した細胞の評価にはバイオマテリアルの映り込みが判定精度に影響してしまう。そこで、細胞のみの画像を取得できる蛍光顕微鏡画像を用いることとした。蛍光顕微鏡画像を用いたマクロファージの細胞画像の分類では、細胞核と細胞骨格のアクチンを染色して表現型を識別した報告がある（Hassan M. Rostam, et al. Sci. Rep., 2017)。この染色は細胞膜透過処理の必要があり、細胞は死ぬため、生きた細胞の経時的な変化は捉えられない。そこで種々の簡易な生細胞イメージング（非侵襲）で取得した蛍光顕微鏡画像を用いることで、外的環境に応じて可逆的に変化するマクロファージのバイオマテリアル上での表現型の識別を実現できるとの着想に至った。生細胞染色法には、細胞質全体を染色するものから、細胞の一部である細胞骨格、小胞体、細胞核などの小器官のみを染色するものまで様々である。現時点では何が各表現型を特徴付けるのかは明らかではない。そこで、各生細胞染色法による識別精度を比較することで、表現型の識別に有用な生細胞染色法の特定とともに、各表現型における細胞小器官の特徴を明らかにできると考えた。また、バイオマテリアル上に播種した細胞を観察するためにはバイオマテリアルが光を透過する必要がある。そこで本研究課題では、申請者らがこれまでに研究対象としてきた生体由来材料を用い、材料特性の一つである表面形状をシリコーン樹脂と透明度の高いアクリルアミドに転写することで、表面形状に注目したバイオマテリアルとマクロファージの応答性を評価する。

本手法は、細胞を生存させたまま経時的に観察することを可能とする。そのため、バイオマテリアルのサンプル数の削減や、経時的に変化するバイオマテリアルに対するマクロファージの評価にも有用である。また、この技術はバイオマテリアルに接着して機能発現を行う上皮細胞や間葉系幹細胞の分化評価にも活用できる。さらに、経時的な評価が必要な薬物スクリーニングなど、様々な細胞応答性の評価にも応用可能であり、学術的に広く貢献できる。

２．研究計画

本研究課題は 3 年間の計画とし、検討項目①、②、③の 3 つの要素技術に関する検討を実施する。

① マクロファージの各表現型の蛍光顕微鏡画像取得（データセット作成）

マクロファージ細胞に分極誘導因子を添加し､M1/M2 マクロファージへの分極を評価する｡一般的に利用されている細胞質､小胞体、細胞骨格、核等の生細胞トラッキング染色試薬を単独あるいは複数の組み合わせで染色する。タイムラプス蛍光顕微鏡撮影した後、各表現型マーカーの免疫染色により、正解データとなる個々の細胞の分極を評価する。MATLAB で画像抽出し、免疫染色により確認した表現型の情報を紐付ける。

② 蛍光顕微鏡画像の分類のための AI 構築

学習を行い、評価用データのマクロファージの表現型を評価する。深層学習には、

TOPへ戻る

MATLAB および Python を用いる。判定精度が不十分な場合には、取得した画像データに画像処理を加えることや、細胞周期を考慮するなどして、判定精度の向上を図る。生細胞染色試薬の違いによる判定精度を比較し、マクロファージの画像分類に適した生細胞染色試薬とその組み合わせを明らかにする。

③-1 種々の表面形状を有するバイオマテリアルの作製とマクロファージの応答性評価

生体組織に近い三次元構造を有する脱細胞化組織を用いる。マクロファージを播種し、細胞接着後に最も高い判定精度が得られた生細胞染色手法で染色し、72 時間タイムラプス撮影する。②の AI で評価する。

③-2 構築した AI のバイオマテリアル上のマクロファージへの応用可能性評価

72 時間後に各表現型マーカーで免疫染色して表現型を評価する。免疫染色結果と③-1 の AI で得られた 72 時間後の識別結果を比較し、開発したシステムのバイオマテリアル上の細胞への応用可能性を評価する。

3．計画の進行状況

2023 年度は実験計画の①および②の一部を実施した。

マクロファージ分極誘導

マウスマクロファージ J774A.1 を 3.6 cm^2 に対して 2.5×10^4 cells を播種し、24 時間インキュベートして接着させた。その後 M1 分極誘導因子である IFN-γ と LPS、M2 分極誘導因子である IL-4 を添加し、分極誘導を行った。

蛍光染色細胞撮影と画像処理

Calcein-AM 染色した各表現型細胞を蛍光顕微鏡にて 40 倍レンズで撮影した。その後、取得画像の細胞のみを Python の Cellpose 1.0 モジュールでセグメント化し、重心を中心として、150、300、600 pixels 四方に切り出した。背景は黒とし、シングルセル画像を作成した。

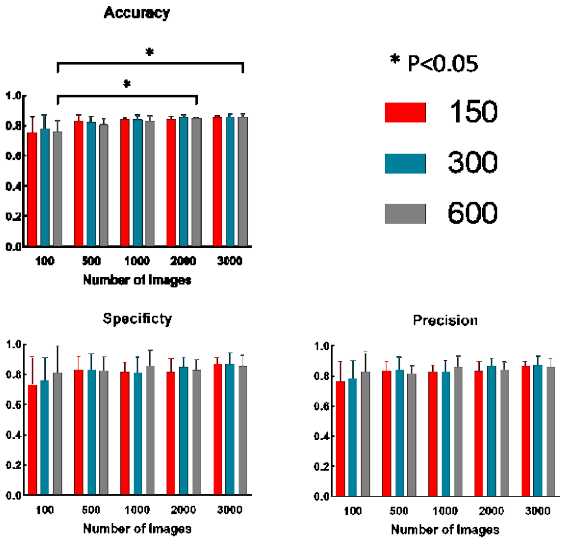


Fig. 1 各モデルの精度指標

機械学習

シングルセル画像から画像サイズごとにランダムに 100、500、1000、2000、3000 枚の画像抽出を行い、その 8 割を学習データ、1 割を評価データ、1 割をテストデータとした。条件ごとに 10 個の独立したデータセットを用意し、CNN モデルに学習させて評価を行った。タイムラプス画像から分裂期の細胞の面積と円形度を ImageJ で測定した。蛍光染色画像から M1 と M2 の面積と円形度を Python で測定した。

Fig. 1 に各条件で学習させて得られた精度、適合率、特異度、を示した。精度はおよそ 0.7 から 0.8 であり、枚数の増加が精度に僅かな影響を与えている傾向はあったが効果的なものではなかった。シングルセル画像の大きさは精度に寄与しなかった。これらの結果は枚数を増やすことで一部条件下では若干の精度の向上が見られるがシングルセル画像の大きさが精度に対して寄与する割合は低いことがわかった。また、現状のデータセットではこれ以上の精度向上は難しいことが示唆された。適合率と特異度を比べた際、わずかではあるが適合率が特異度より高かったため M2 識別がより難しいことが示唆された。しかし特異度が適合率と比べて大きな乖離を見せていな

TOPへ戻る

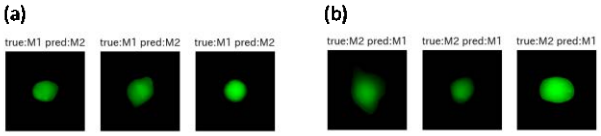


Fig. 2 誤識別されたシングルセル画像，(a) M1 を誤って M2 と識別した画像，(b) M2 を誤って M1 と識別した画像

いことから M2 を M1 と間違えて識別するのと同様に M1 を M2 として間違えて識別しているため M1､M2 間で共通した形状特徴を持っている細胞がいることが示唆された。

誤識別したシングルセル画像の一部を Fig. 2 に示した。Fig. 2 より、M１を M２と間違えた画像の細胞は丸い形状をしており、 M2 を M1 として誤識別した画像についても同様の傾向があることがわかった。通常であれば細胞は細胞分裂の前後にも丸い形状となることから、M2 の学習データの中に M2 の仮足が伸びた形状から M1 の丸い形状に似た細胞分裂前後の細胞が含まれており、誤識別が起きたと仮説を立てた。円形度と面積の計測の結果、円形度が高く小面積のエリアに M1、M2､細胞分裂前後の細胞が重なって分布していた。これは細胞分裂前後の M1､M2 が共通した形状特徴を持っていることを示しており、分裂期の細胞が精度に影響を与えているという仮説を支持する結果であった。表現型識別において細胞分裂の検知を行うことの必要性が示された。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

まとめと今後の計画

マクロファージの生細胞蛍光染色画像を用いた深層学習による画像分類は、M1 と M2 の形状の特徴を捉え、表現型を高精度に識別可能であることが示唆された。また、精度改善には細胞分裂の検知を行う必要性があることも示された。 今後は、細胞分裂時の細胞をタイムラプス撮影により特定した上で、細胞分裂を検知するシステムを構築する予定である。

学会，論文等投稿・発表状況

＜学会発表＞

1. 帆足和希，中村奈緒子．生細胞蛍光染色を用いたマクロファージ表現型の識別手法の開発に関する研究，ライフサポート学会第 33 回フロンティア講演会，埼玉，3 月 6-7 日，2024（口頭）
2. 帆足和希，木村剛，中村奈緒子．マクロファージの蛍光画像を用いた M1/M2 識別手法の開発 ，第 23 回日本再生医療学会総会，新潟，3 月 21-22 日，2024（ポスター・ショートプレゼン）

参考文献

1. Hassan M. et al., (2017) Scientific Reports, (7)1, art. no. 3521.
2. Stringer, C. et al., (2021). Nature methods, 18(1), 100-106

TOPへ戻る

Upper Limb Muscle Activation Estimation System using Assistive Device for Activities of Daily Living

生命科学科　Shahrol Bin Mohamaddan

Research colleagues
International Islamic University of Malaysia　Hazlina Md Yusuf
Shibaura Institute of Technology　Motoki Takagi

1. Paper introduction

The upper limb is an important part of the human body. However, due to health condition or/and accident, most people cannot perform the activities of daily living (ADLs) using their upper limb. Assistive device is an example of technology that can be applied to support the ADLs.

Table 1. Thirteen important ADLs task

No.	ADLs Task
1.	Calling with phone
2.	Brushing hair
3.	Wipe a face with towel
4.	Turning a page a reading
5.	Hanging out a towel
6.	Holding a plastic bottle and opening the lid
7.	Post paper to whiteboard
8.	Eating with chopsticks
9.	Eating with a spoon
10.	Eating with hoke
11.	Drinking with a cup
12.	Pouring a cup from a pitcher
13.	Writing with a pen

In our previous research, thirteen tasks as shown in Table 1 were identified as the important ADLs related to the upper limb movement. This research is aimed at developing a system that can estimate the upper limb muscle activation while using the assistive device and performing the ADLs task. This research is important to support the development of effective upper limb assistive devices in the future. In this paper, the conducted and on-going research will be reported.

2. Research program

Two research activities were conducted for this project. Both activities were conducted to support the development of the upper limb muscle activation estimation system. The first project focused on the upper limb posture recognition using Yolo8 AI system. The second project focused on the simulation of the upper limb movement using human musculoskeletal software, OpenSim.

The objective of the first project was to evaluate human posture while performing the activities of daily living

TOPへ戻る

(ADLs). Based on thirteen important tasks of ADLs that were identified in the previous research, four tasks were selected for the posture analysis including calling with phone, wiping face with towel, opening lid, and eating with chopstick.

The objective of the second project was to simulate human movement while performing the ADLs and analyze the muscle involvement. The simulation is an important process to predict the movement and to support the assistive devices development.

3. State of progress

Figures 1 to 4 show the posture evaluation process conducted using the Yolo8 AI system. Although only four tasks were selected for the posture evaluation, there were still problems that occurred. For example, in Figure 1 the system managed to recognize the posture of calling the phone. However, the system mistakenly recognized the posture of drinking using the mug with the posture of calling the phone as shown in Figure 2.

Figure 1. Example of correct upper limb posture recognition while using the mobile phone

Figure 2. Example of incorrect posture recognition while drinking using the mug

The same problem also occurred with the posture of wiping face with towel. As shown in Figure 3, the system correctly recognized the posture but mistakenly recognized the posture of wiping the face with towel while drinking using a mug in Figure 4. In general, the posture of drinking using a mug was a challenging task to be recognized.

Figure 3. Example of correct posture recognition while wiping face with towel

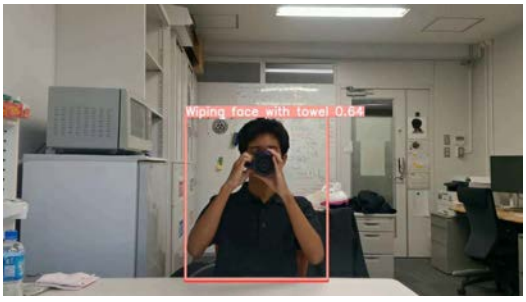


Figure 4. Example of incorrect posture recognition while drinking using a mug

TOPへ戻る

Figure 5 shows an overview of human musculoskeletal software, OpenSim. The initial study using the software was conducted previously focusing on the upper limb. However, in this project, the focus was to have a full body (upper and lower limb) simulation.

Before performing the full body simulation, the scaling process is needed to modify the anthropometry data or physical dimensions of the generic model so that it can matches the anthropometry data of a particular subject (for example the height and weight of the subject).

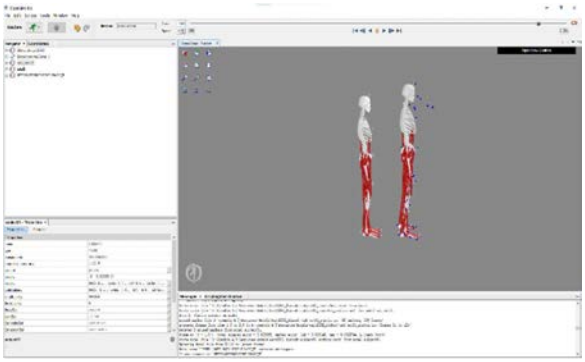


Figure 5. The scaling process using OpenSim software

To perform the scaling process, the data from motion capture as shown in Figure 6 is required. In the example, nearly 39 points were used for the scaling process. The points taken from the motion capture need to be adjusted to avoid any unnecessary errors. In this project, the scaling process was based on the measurement-based scaling concept where both experiment markers and virtual markers was implemented.

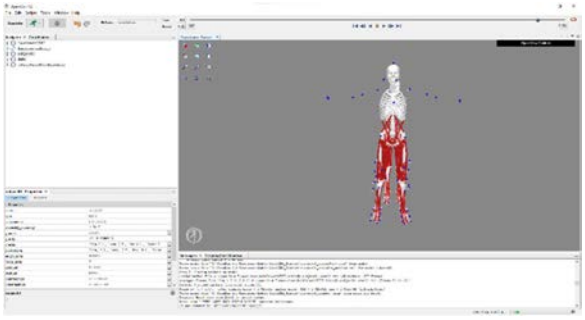


Figure 6. The points required for scaling process

In general, scaling is required to solve the inverse kinematics and inverse dynamics problems (Figure 7) because the human modelling using OpenSim is sensitive to the accuracy of the scaling step. The scaling step adjusts both the mass properties and dimensions of the body segments.

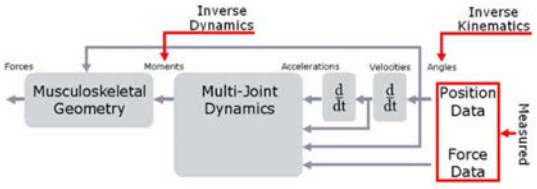


Figure 7. Overview of inverse kinematics and inverse dynamics

Example of simulation was also conducted using the OpenSim software as shown in Figure 8. In the simulation, the upper limb flexion and extension movement were presented. Two muscles, biceps and triceps were selected during the simulation movement.

TOPへ戻る

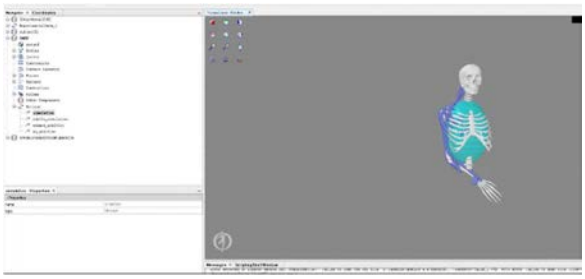


Figure 8. The flexion and extension movement within the OpenSim

４. Future program, paper submission and results briefing

For future programs, both methods applied for this research project will be further enhanced and improved. For AI based posture recognition, different methods will be implemented, and the results will be compared. A better recognition system is curial for this research. For human musculoskeletal simulation, different movements will be developed based on the newly scaled model. Experiment is expected to be conducted to evaluate the simulation.

Based on the results from these two projects, new research proposals will be developed and applications for the grant will be conducted. However, more results are necessary before any conference or journal paper submission.

TOPへ戻る

過去・現在・未来を繋げる数値再現性の新展開

数理科学科　　尾崎　克久

共同研究者
理化学研究所　　今村　俊幸

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年の数値計算を行う環境には，2～128 コアの CPU，1 万コア以上の GPU，700 万コア以上を有する分散メモリ型のスーパーコンピュータが存在する．使用する精度は，従来の IEEE 754 に定められた浮動小数点規格に加え，bfloat や TensorFloat が登場し，Tensor コアによる混合精度演算も行われるようになった．このような計算機環境の多様化が数値計算結果の不一致の問題を深刻化させている．さらに，計算機およびソフトウェア環境には一定の寿命があり，特にスーパーコンピュータは 5～6 年で稼働停止・撤去され次世代の環境に変わるため，過去の研究の再検証や知の継承が困難になっている．これらの問題に対処するためには，数値計算における再現性を確保する必要がある．

特性の異なるすべての計算機において高効率かつ再現性のある計算アルゴリズムを開発することは非常に困難である．数値線形代数の分野では，内積や行列積といった演算においては比較的効率的に再現性を達成できる研究が存在する．しかし，固有値分解，特異値分解，最小二乗問題といった分野では成果が見られず，5 年以上研究が停滞している．多様な計算機環境で高効率に実行可能な一つのアルゴリズムを提案するのが難しいためである．したがって，本研究では各計算機で独立に計算された結果に対して解釈性を与え，再現可能な数値計算結果を提供する「事後処理的アプローチ」を開拓することを目的とする．計算機環境の多様化および進化の壁を乗り越え，常に同じ計算結果を出力できるようにし，未来における知の継承・再検証を可能にしたい．数値再現性を確保するためには，高精度計算の研究を推進する必要がある．例えば，最も簡単に数値再現性を達成する方法の一つは，計算結果を最近点に丸めることである．これには高精度計算の発展が必須である．1 年間のこのプロジェクトでは，通常の浮動小数点演算を用いて，高精度な計算結果を得るアルゴリズムの開発を行う．

２．研究計画

数値再現性の困難さの主な原因は，計算機環境の違いとそれに起因する丸め誤差の挙動である．したがって，丸め誤差解析に強い研究代表者（尾崎克久：芝浦工業大学）と計算機環境に詳しい研究分担者（今村俊幸：理化学研究所）の協働により，この問題に取り組む体制を整える．

浮動小数点数の複数の和で数を表現し，その数の演算を定義した先行研究が以下のようにある．

- Pair Arithmetic (PW)
- Double-Word (DW)

TOPへ戻る

- Triple-Word (TW)
- Quad-Word (QW)

PW (Lange and Rump)と DW (Bailey)は，それぞれ 2 つの浮動小数点数の和で数を表し，TW (Fabiano ら)は 3 つ，QW (Bailey)は 4 つの浮動小数点数の和で数を表現する．これらのアルゴリズムは，通常の浮動小数点演算を使用するため，多倍長精度数値計算よりも速いことが知られている．しかし，これらは通常の浮動小数点数の指数部を拡張しないため，非常に大きな値を扱う多倍長精度数値計算とは異なる点に注意する．

本プロジェクトでは，TW と QW に対して，正規化作業を省略することで高速化を図りつつ，精度をできるだけ保つ新しい演算アルゴリズムの開発を目指す．

３．計画の進行状況

疑似高精度計算に関して，TW と QW に対応する新たなアプローチとして，

- Quasi Triple-Word（QTW）
- Quasi Quad-Word（QQW）

を提案する．本研究では，これらの四則演算および平方根の演算の定義に成功した．以下に，具体的なアルゴリズムを記述する．アルゴリズム中で使用される「[x,y] = TwoSum(a, b)」は、Knuth の 1969 年のアルゴリズムにより，加算 a+b の近似値 x とその誤差 y を求めるものであり，「[x,y] = TwoProduct(a, b)」は Fused Multiply-Add を用いて、乗算 a*b の近似値 x とその誤差 y を求めるアルゴリズムである． 以下に，QTW での四則演算および平方根の計算アルゴリズムを MATLAB のコードとして紹介する．アルゴリズム名の中で「sum」は加算を，「mul」は乗算を，「div」は除算を，「sqrt」は平方根の計算を意味している．減算は，加算の符号を変更するだけで対応可能なため，ここでは紹介を省略する．

```
function [c1,c2,c3] =
QTW_sum(a1, a2, a3, b1, b2, b3)
[c1,e1] = TwoSum(a1,b1);
[c2,e2] = TwoSum(a2,b2);
[c2,e3] = TwoSum(c2,e1);
c3 = a3 + b3 + e2 + e3;
end

function [c1,c2,c3] =
QTW_mul(a1,a2,a3,b1,b2,b3)
[c1,e1] = TwoProduct(a1,b1);
[t2,e2] = TwoProduct(a1,b2);
[t3,e3] = TwoProduct(a2,b1);
[c2,e4] = TwoSum(t2,t3);
[c2,e5] = TwoSum(c2,e1);
c3 = fma(a3,b1,e2) + fma(a2,b2,e3) +
fma(a1,b3,e4) + e5;
end

function [c1,c2,c3] =
QTW_div(a1,a2,a3,b1,b2,b3)
[c1,c2] = PA_div(a1,a2,b1,b2);
bunbo = b1 + b2;
[t1,t2,t3] = QTW_mul(c1,c2,0,b1,b2,b3);
[t1,t2,t3]                                =
QTW_sum(a1,a2,a3,-t1,-t2,-t3);
bunshi = t1 + t2 + t3;
c3 = bunshi / bunbo;
end

function [c1,c2,c3] = QTW_sqrt(a1,a2,a3)
[c1,c2] = PA_sqrt(a1,a2);
[t1,t2,t3] = QTW_mul(c1,c2,0,c1,c2,0);
[t1,t2,t3]                                =
QTW_sum(t1,t2,t3,-a1,-a2,-a3);
bunshi = t1+t2+t3;
bunbo = 2*(c1 + c2);
c3 = - bunshi / bunbo;
end
```


TOPへ戻る

ここからQQWにおける四則演算および平方根のアルゴリズムを紹介する.

```
function [c1, c2, c3, c4] =
  QQW_sum(a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4)
  [c1,e1] = TwoSum(a1,b1);
  [c2,e2] = TwoSum(a2,b2);
  [c2,e3] = TwoSum(c2,e1);
  [c3,e4] = TwoSum(a3,b3);
  [c3,e5] = TwoSum(c3,e2);
  [c3,e6] = TwoSum(c3,e3);
  C4 = a4 + b4 + e4 + e5 + e6;
end

function [c1,c2,c3,c4] =
QQW_mul(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4)
  [c1,e1] = TwoProduct(a1,b1);
  [t2,e2] = TwoProduct(a1,b2);
  [t3,e3] = TwoProduct(a2,b1);
  [c2,e4] = TwoSum(t2,t3);
  [c2,e5] = TwoSum(c2,e1);
  [t4,e6] = TwoProduct(a1,b3);
  [t5,e7] = TwoProduct(a2,b2);
  [t6,e8] = TwoProduct(a3,b1);
  [c3,e9] = TwoSum(t4,t5);
  [c3,e10] = TwoSum(c3,t6);
  [c3,e11] = TwoSum(c3,e2);
  [c3,e12] = TwoSum(c3,e3);
  [c3,e13] = TwoSum(c3,e4);
  [c3,e14] = TwoSum(c3,e5);
  c4 = a1*b4 + a2*b3 + a3*b2 + a4*b1 ...
    + e6 + e7 + e8 + e9 + e10 + e11 + e12
+ e13 + e14;
end

function [c1,c2,c3,c4] =
QQW_div(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4)
[c1,c2,c3] = QTW_div(a1,a2,a3,b1,b2,b3);
bunbo = b1 + b2 + b3;
[t1,t2,t3,t4]                                =
QQW_mul(c1,c2,c3,0,b1,b2,b3,b4);
[t1,t2,t3,t4] =
QQW_sum(a1,a2,a3,a4,-t1,-t2,-t3,-t4);
bunshi = t1 + t2 + t3 + t4;
c4 = bunshi / bunbo;
end

function [c1,c2,c3,c4] =
QQW_sqrt(a1,a2,a3,a4)
[c1,c2,c3] = QTW_sqrt(a1,a2,a3);
[t1,t2,t3,t4] =
QQW_mul(c1,c2,c3,0,c1,c2,c3,0);
[t1,t2,t3,t4] =
QQW_sum(t1,t2,t3,t4,-a1,-a2,-a3,-a4);
bunshi = t1+t2+t3+t4;
bunbo = 2*(c1 + c2 + c3);
c4 = - bunshi / bunbo;
end
```

以上，総演算量は表１にまとめる.

表１：演算数に関する比較

手法	加算	乗算	除算	平方根
PW	10	7	14	29
DW	8	4	7	5
QTW	21	24	55	43
TW	42	38	103	111
QQW	40	75	175	92
QW	61	94	300	800

表１から,提案手法のQTWはDWよりもコストが高く，TWよりは低いことがわかる．同様に，QQWはTWよりもコストが高く，QWよりは低く設計されている．したがって，QTWの計算結果の精度がDWよりも高く，TWよりも低い場合,またQQWの計算結果の精度がTWよりも高く，QWよりも低い場合には，計算コストと精度のトレードオフが存在すると言える.

次に，計算結果の精度については表２および表３にまとめる．計算は正方行列の行列積

TOPへ戻る

とし，行列は疑似乱数（一様分布）で生成した．表中の「Double」は倍精度浮動小数点演算を意味し，複数の浮動小数点数の和で数を表現する際には倍精度浮動小数点数を用いた．

表２：行列積に対する最大相対誤差（１）

手法	N=100	N=500
Double	1.1270e+21	3.3983e+22
PW	2.3213e+05	3.6220e+07
DW	4.3727e+04	1.8393e+06
QTW	6.1282e-11	2.8540e-08
TW	5.2710e-12	4.2060e-11
QQW	2.2962e-26	2.5880e-23
QW	1.3653e-28	5.2317e-28

表３：行列積に対する最大相対誤差（２）

手法	N=1000	N=3000
Double	1.8406e+22	1.6144e+23
PW	4.3656e+07	7.5622e+08
DW	3.3983e+06	2.8719e+07
QTW	1.2893e-08	1.1199e-06
TW	1.0311e-10	1.5648e-09
QQW	8.5843e-24	8.1201e-22
QW	1.4071e-27	1.0967e-26

表２と表３により，提案したQTWの精度はDW以上でかつTW以下となっている．計算時間についてはページ数の制限のため詳細は紹介しないが，QTWはDWよりも低速でTWよりも高速であり，QQWはTWよりも低速でQWよりも高速であることがわかった．特に，QQWの計算時間はTWと比較して遜色ないことが特筆すべき点であった．さらに，表２と表３の結果から，QQWはTWよりも高精度な結果を出力しており，提案手法の有用性が確認された．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後は，本研究プロジェクトで得られた成果を数値線形代数の他の問題へも展開していく．現在，コレスキー分解とLU分解への応用が完了している．次に，未着手のQR分解への適用を検討する．また，現在のコードは並列化されていないため，ブロック計算を導入し数値線形代数の問題に対する並列計算の実現を目指す．

最後に学会発表を数回行った業績を以下にまとめる．

国際会議講演

１．Katsuhisa Ozaki: Alternative Algorithms to Triple-Word and Quad-Word Arithmetic, 2024 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing, March 22--23 (Saturday), Hsinchu City, Taiwan, 2024

国内会議講演

１．尾崎 克久，今村 俊幸：Pair Arithmeticの拡張とその使い方について，第247回ARC・第192回HPC合同研究発表会，沖縄産業支援センター（2023/12/6）．

２．尾崎 克久，今村 俊幸：正規化されていない疑似高精度計算の設計と精度維持のための手法について，日本応用数理学会第20回研究部会連合発表会，長岡技術科学大学（2024/3/6）．

３．矢崎 雪莉，尾崎 克久：正規化されていない疑似高精度計算の行列計算への応用について，日本応用数理学会第20回研究部会連合発表会，長岡技術科学大学（2024/3/6）．

TOPへ戻る

軍艦島に残る歴史的建造物群の保全に向けた構造性能評価

建築学部　建築学科　　椛山　健二

１．序論

世界遺産で有名になった「軍艦島」は、長崎市端島の通称である。軍艦島の炭鉱施設が「明治日本の産業革命遺産　製鉄・製鋼、造船、石炭産業」の構成資産として 2015 年に世界文化遺産に登録された。島内に残存する居住施設である建物群（全て RC 造）は世界遺産の直接的な対象では無いものの、島の独特な景観を維持する、また、島における歴史や文化の証拠を残すという観点から、保全への取り組みが求められている。しかしながら、1974 年の炭鉱閉鎖以降に施設は放置され、程度の差はあるが劣化が進行しており、存続が危ぶまれる建物もある。**図 1** に示す主要な建物のうち、現存する最古の 30 号棟（1916 年建設）は激しい劣化で既に局所的に崩落が生じており、倒壊が危惧される段階に至っている。軍艦島の管理を担う長崎市は、建物群の構造性能を把握するため、2015 年から日本建築学会と日本コンクリート工学会に調査を委託し、その結果に基づいて、景観的・歴史的・技術的・経済的な観点から優先して維持保全すべき対象として、3 号棟（1959 年建設）、16 号棟（1918 年建設）、65 号棟南棟（1958 年建設）を選抜した。また、ユニークな建物として、神社である 1 号棟（1936 年建設）、病院の 69 号棟（1958 年建設）も重要視されている。これら歴史的価値の高い建物を適切に保全するため、劣化状況を考慮して性能を精確に評価することが喫緊の課題である。

そこで、島内に残存する建築物群の状態を把握するため、2015 年に日本建築学会「軍艦島コンクリート系建築物の健全度調査小委員会」を中心に建物全棟の調査が実施された。2016 年以降では、日本コンクリート工学会の「供用不可まで劣化破損が進行したコンクリート構造物の補修・補強工法に関する研究委員会」や「危急存亡状態のコンクリート構造物対応委員会」のメンバーを主に様々な研究組織が代表的な建築物の調査を行い、2023 年に建築研究振興協会の「長崎市・軍艦島に残存する建築物の劣化状態・構造耐力の評価委員会」を主体に二度目の全棟調査が実施された。著者はこれら委員会のメンバーとして現地調査に参画し、主として、3 号棟、65 号棟（北棟、東棟、南棟）、69 号棟を担当した。

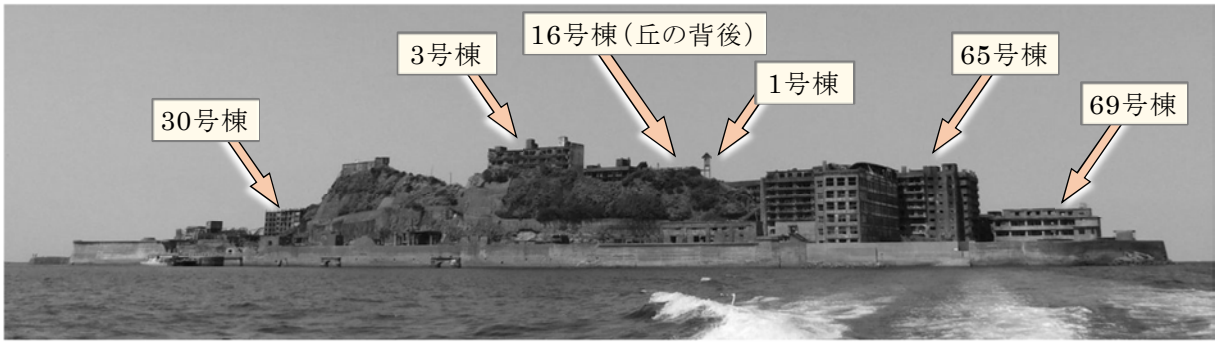


図 1　軍艦島の外観と主要な建物

TOPへ戻る

２．軍艦島 69 号棟の概要と調査

本報告では、代表的な建築物の一つであり、劣化が顕著な 69 号棟に着目し、調査方法や構造性能に関する検討状況をまとめる。

対象とする 69 号棟は入院設備の整った「端島病院」であり、**図 2** の施設配置に示すように、島北端の海際に立地している。鉄筋コンクリート造 4 階建てで 1958 年に建設された。南東側から撮影した 69 号棟の外観を**写真 1** に示し、建物の概要を**表 1** にまとめる。2015 年 9 月に最初の構造調査が実施され、文献※に示された手法に従ってすべての構造部材の劣化度が記録された。その後、2021 年 11 月、2022 年 11 月、2023 年 10 月に同様の手法を用いて構造部材の劣化度調査が実施されている。文献※に示された劣化度の定義と構造性能低減率を**表 2** に示す。

※ 岸本一蔵、他：端島の建物の劣化による構造性能低減に関する研究（その 1～9）、日本建築学会学術講演梗概集、構造Ⅳ、pp.515～531、2016 年 8 月

写真 1　69 号棟「端島病院」の外観
（2023 年 10 月 29 日撮影）

図 2　端島（軍艦島）における 69 号棟の位置

表 1　69 号棟「端島病院」の諸元

建設年	1958年（昭和33年）
用　途	入院施設のある総合病院
構　造	RCラーメン構造（一部に耐震壁）
階　数	地上4階（小規模な地下室あり）
階　高	1階＝3.7m　2階＝3.5m 3階＝3.3m　4階＝3.15m
特　徴	上階でセットバック 杭（ペデスタル杭）基礎

３．構造性能残存率と構造部材の劣化度

調査した結果の例として、劣化度Ⅴの柱と劣化度Ⅲの梁の様子（2023 年 10 月 31 日撮影）を**図 3** に示す。構造部材の劣化度を集計し、劣化を考慮した構造性能残存率として、鉛直荷重支持性能残存率 R_L と耐震性能残存

表 2　部材の劣化度と構造性能低減率

劣化度	劣化状況	構造性能低減率	
		長期性能	耐震性能
0	劣化のない状態。	1.00	1.00
Ⅰ	ひび割れ幅 1mm 程度以下で付着劣化なし。	0.95	0.95
Ⅱ	鉄筋が腐食でコンクリートと肌分かれし，若干の付着劣化あり。	0.90	0.80
Ⅲ	かぶりコンクリートが剥落し，鉄筋のかぶり側はほぼ肌分かれしているが，コア側はまだ付着があり，鉄筋は全面に浮き錆び程度。	0.90	0.33
Ⅳ	かぶりコンクリートが剥落し，鉄筋とコンクリートが肌分かれして付着はほとんどないが，鉄筋の断面積は 70%程度以上，あるいは，酸化鉄が表面のみと判断できる。	0.80	0.10
Ⅴ	コア部のコンクリートも欠落し，鉄筋とコンクリートは完全に肌分かれして付着はない。鉄筋の断面積は 70%未満と判断できる，あるいは，鉄筋が層状に割裂している。	0.30	0.00

TOPへ戻る

率 R_E を文献※※の計算式で求めた。R_L と各方向の R_E について、階ごとの分布を調査年で比較して**図 4** に示す。いずれも年々数値が低下しており、1 階で最も低い値を示した。R_L は全階で 60%以上を保持しているが、R_E は両方向とも 1 階で 20%を下回り、構造性能の低下が顕著である。また、R_L は下階ほど値が小さくなるのに対し、R_E では両方向ともに 2 階より 3 階の値が低くなる特徴がある。柱では下の階ほど劣化が進行しており、一方、梁では 2 階より 3 階で両方向とも劣化が顕著に進行していることが原因と言える。なお、3 階の梁で劣化が進行した原因については、今後に検討を進める必要がある。

構造性能残存率が最も低い 1 階について、柱と梁の劣化度分布を年ごとに比較して**図 5** に示す。梁とは、1 階から見上げた 2 階床レベルの梁を指す。なお、耐震壁の劣化度も調査しており、柱・梁に比べて劣化の度合いが低いことを確認している。図から判るように、2015 年時点から外構面の柱と梁に劣化度Ⅴが多数見られ、年の経過に連れて内側の構面でも劣化度Ⅴの本数が増えている。ただし、海岸線から最も遠い南西面では、他の外構面に比べ劣化の進行が緩やかであることが判る。一方、その他の外構面では、劣化度Ⅴの柱・梁が徐々に増えている。

南西面を含む外構面における劣化度Ⅴの本数の割合を年ごと（2015 年→2021 年→2022 年→2023 年）に比較すると、柱（全 27 本）で 37%→52%→56%→56%、梁（方向問わず全 25 本）で 32%→40%→40%→52%となる。1 階では梁より柱の数値がやや高く、2023 年には双方とも半数以上が劣化度Ⅴに達している。一方、内側の構面では、劣化の進行が顕著なエリアと軽いエリアが見て取れる。外から入る海風の当たり具合や雑壁等の付属物の影

図 3　構造部材の劣化状況（例示）

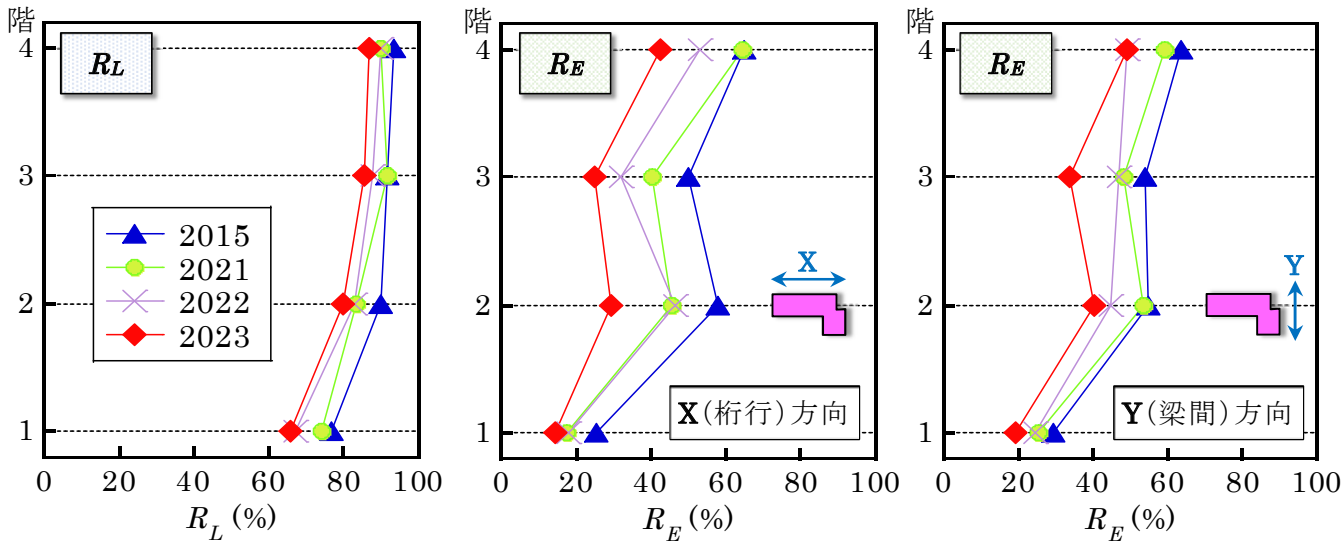


図 4　劣化による鉛直荷重支持性能残存率 R_L と耐震性能残存率 R_E の推移

TOPへ戻る

響が、その差違が生じた原因として考えられる。更なる検討課題の一つである。

※※ 椛山健二：経年で劣化した RC 建築物の構造安全性評価技術、コンクリート工学、第 56 巻、第 9 号、p.772-777、2018 年 9 月

４．今後の研究計画と成果の公開状況

過酷な環境である軍艦島に残存する建築物群は、徐々に劣化が進行している。今後も定期的に現地調査を行い、劣化の進行状況を把握して構造性能の現況を評価して、適切な維持保全策を提示する必要がある。引き続き、島の管理者である長崎市と連携しつつ、3 号棟、65 号棟、69 号棟を中心に文化財的価値を維持する施策を進める。

本研究に関わり、調査を開始した 2015 年以降で、査読論文 6 編、口頭発表論文 25 編を発表し、研究成果として公開した。近年に発表した査読論文を 3 編、投稿中の論文 1 編を以下に列記する。

[本研究に関連する近年の査読論文]

1) 椛山健二：歴史的建造物の維持保全に向けた取り組み（鉄筋コンクリート構造の技術的変遷 第 28 回），ビルディングレター，通巻 670 号，pp. 1-11，2021.9.

2) 相樂旺玖，椛山健二：端島 65 号棟の劣化状況と構造性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.133-138，2022.7.

3) 岩﨑雄樹，椛山健二：端島 3 号棟の劣化進展と構造性能の推移，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.145-150，2022.7.

4) 渡邊玄翔，椛山健二：端島 3 号棟の劣化進展と耐震補強の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，2024.6.（査読中）

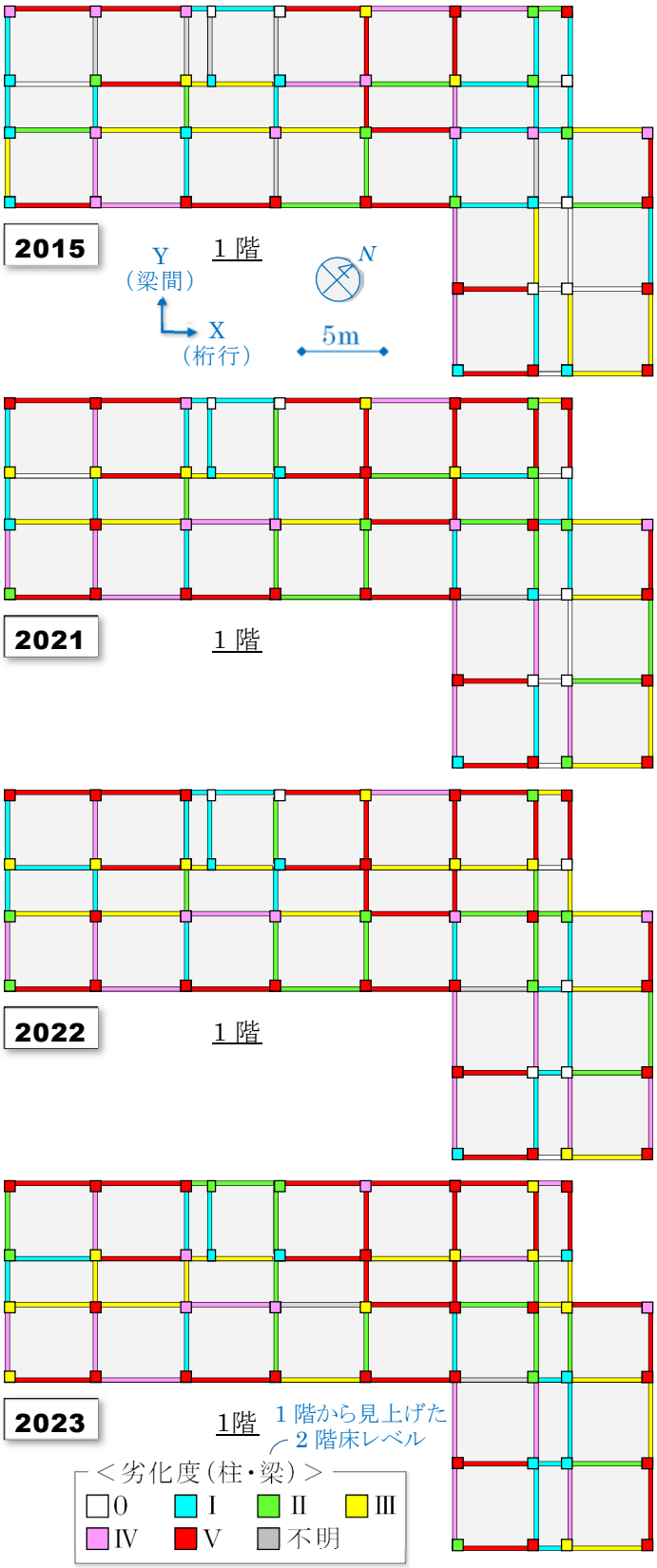


図 5　69 号棟 1 階における柱・梁の劣化度分布（2015～2023 年の比較）

TOPへ戻る

電炉スラグからの金属鉄回収プロセスの開発

工学部 材料工学科　　遠藤　理恵

共同研究者
フライベルク工科大学　鉄鋼研究所　Olena Volkova

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

脱炭素に向けて注目されている電炉製鉄では，鉄スクラップや還元鉄を原料として鋼を製造する。複数の電極を挿入してアーク放電によって原料を溶解し、酸素や窒素などの不純物を取り除く。このとき、取り除かれた不純物はスラグと呼ばれる溶融酸化物に吸収される。スラグは、例えば CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO から成る溶融シリケートである。このように製鋼工程で排出される電炉スラグは、従来は、セメント・コンクリート・地盤改良材として利用されてきた。しかしながら，精錬後の電炉スラグには鉄分が 30%程度含まれている。今後，鉄分の割合が多い良質な鉄鉱石が減少していくことに鑑みると，使用済みの電炉スラグは有効な鉄源となり得る。

共同研究者の Volkova らのグループでは、電炉スラグの資源としての有用性に着目して、その回収に関する研究を行ってきた。例えば、電炉スラグからのバナジウム回収などの研究がある[1]。製鋼スラグ中に鉄は酸化物(FeO_x などと表される)として存在するため，鉄を回収するには還元を行う必要がある。還元剤としては、CO ガス、H_2 ガス、低酸素分圧への制御などが挙げられる。本研究では、脱炭素に向けた還元剤として着目されている水素を利用することを検討する。水素の利用では、次のような検討課題がある。①還元反応が吸熱反応であるため、温度が下がる。②還元によりスラグの粘度や熱伝導率等の熱物性も変化する。③水素は反応性が高いため、スラグへの供給時に周りの耐火物とも反応する可能性がある。上の検討課題のうち、本研究では②の熱物性に対して検討を行う。

２．研究計画

【試料】電炉スラグを模擬した CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO 系スラグを試薬より作製して用いる。

【スラグの還元実験】(フライベルク工科大)

図 1 のようにスラグ試料を MgO るつぼ中に入れ，高周波炉中で加熱・融解させる。水素をスラグ中に導入して，還元させる。還元時のパラメータとして、水素ガスの導入方法を検討する。すなわち、水素導入チューブの材質、太さ，深さ，回転である。また、還元温度の影響も検討する。

還元生成物の形および生成場所確認した後，還元生成物およびスラグの成分を X 線回折(XRD)を用いて分析する。また、組織と組成をエネルギー分散型 X 線分析装置を搭載した走査型電子顕微鏡(SEM-EDS)を用いて分析する。

【スラグの熱物性測定】

還元後のスラグの組成に基づいて，FeO 濃度の異なる試料を準備する。

<粘度および密度> (フライベルク工科大)

TOPへ戻る

回転式粘度計を用いて，溶融状態から冷却過程でスラグの粘度を測定する。また、スラグの密度はモリブデンボブを用いて、アルキメデス法により測定する。

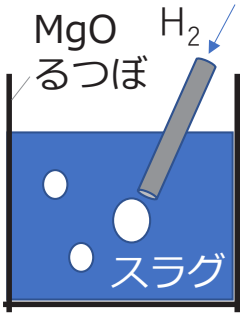


図 1 還元実験の概略図

<熱伝導率>(芝浦工業大学)

熱伝導率の測定には非定常熱線法を用いる。図 2 にその概略を示す。測定時には，試料上部のプローブを溶融試料に浸漬する。ヒータに定電流を供給してジュール発熱させ、一定の熱流束で試料に熱を供給する。この時のヒータの温度上昇を計測することで、以下の式より試料の熱伝導率(κ)を求めることができる。

$$\kappa = \left(\frac{Q}{4\pi}\right) / \left(\frac{d\Delta T}{d\ln t}\right) \qquad (1)$$

ここで、Q はヒータの単位長さ当たりの発熱量、T は温度、t は時間を表している。実際には温度上昇はヒータの抵抗変化として、4 端子法により計測する。したがって、熱伝導率は下の式より計算できる。

$$\kappa = \left(\frac{I^3 \alpha_T R_{273} X_T}{4\pi}\right) / \left(\frac{d\Delta V}{d\ln t}\right) \qquad (2)$$

ここで、X_T は T K における単位長さあたりのヒータ抵抗、R_{273} は 273 K における端子間の抵抗、α_T はヒータの抵抗の温度係数、V は電圧および I は電流を表す。

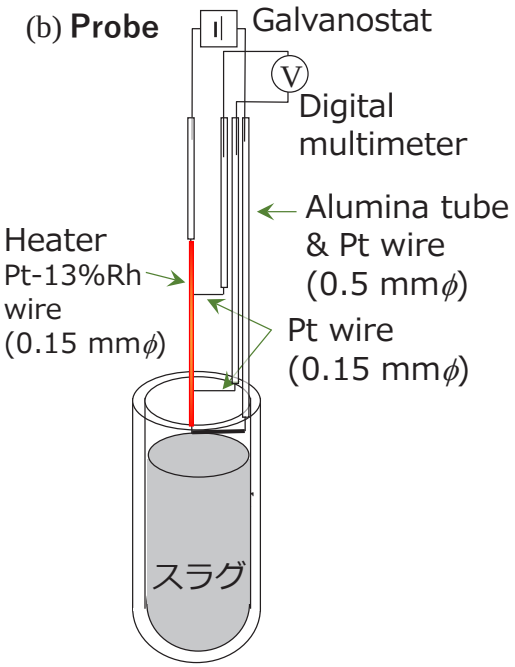


図 2 非定常熱線法の概略図

今回の試料には FeO が含まれるため，高温では電気伝導性を示すことが予想される。非定常熱線法では，ヒータに金属細線を用いてジュール加熱するため，試料への漏れ電流が測定上問題となる。そこで，試料の電気伝導性の熱伝導率測定への影響を予めシミュレーション(有限要素法，COMSOL Multiphysics)によって検討する。この計算には AC/DC モジュールを用いる。そのほか、高温における熱伝導率測定では、ヒータからのふく射や試料中の対流も測定される熱伝導率に影響を与える。これらの影響も有限要素法によって明らかにし、測定条件を検討することとした。

図 3 に有限要素法に用いたモデルを示す。ヒータは半径 0.075 mm,長さを 40 mm とし、回転軸対象系において棒状のヒータが円筒容器内の試料に浸漬しているように設定した。まず、試料を水、容器をパイレックスガラスとして計算を行った。実際にはヒータはジュール加熱されるが、計算ではヒータから一定の速度で熱が発生するように設定した。また、実際にガラスビーカーに水を入れ、非定常熱線法により熱伝導率を算出した。

TOPへ戻る

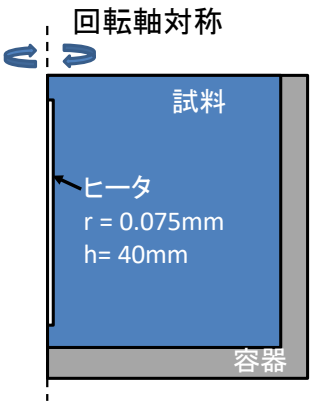


図 3 有限要素法に用いたモデル

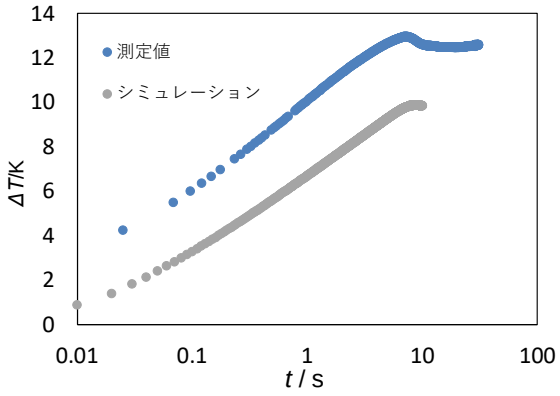


図 4　非定常熱線法による水の熱伝導率測定のシミュレーション結果と測定結果の比較

3．計画の進行状況

【スラグの還元実験】

水素還元により、溶融スラグ中の鉄を還元して金属鉄として取り出せることを確認した。鉄は粒状に形成された。水素を導入するチューブの材質としてモリブデンやアルミナを用いたが、いずれの場合もスラグと反応した。大気雰囲気では、モリブデンやアルミナ製のチューブを用いた場合にはスラグとチューブが反応することは観察されていなかった。したがって、水素還元実験におけるチューブの劣化は、水素の影響を受けてスラグの反応性が変化したためと考えられる。

【スラグの熱物性測定】

溶融 $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–TiO_2–FeO_x–V_2O_3$ の表面張力、密度、粘度を温度の関数として測定した。それぞれの熱物性値に対する TiO_2 および V_2O_3 濃度の影響を明らかにした。

図 4 に非定常熱線法による水の熱伝導率測定のシミュレーション結果と測定結果を比較して示す。シミュレーションではヒータの半径、ヒータの熱伝導率、ヒータの熱容量およびヒータの加熱によって発生する自然対流を考慮した。熱伝導率は、実測では 0.605 $W·m^{-1}K^{-1}$ であり、文献値よりも小さな値が得られた。シミュレーション結果は実測値よりも温度上昇が小さいが、形状は一致していることがわかる。図 4 の測定値とシミュレーションの相違は次のことが要因になっていると考えている。まず、測定側の要因として、供給電流およびヒータ抵抗の測定の不確かさがあげられる。また、シミュレーション側の要因として、ヒータ/試料の界面熱抵抗を考慮していないなど、適切なパラメータを選択できていないことが挙げられる。

さらに、水および溶融スラグの有限要素法によるシミュレーションを行い、実際の測定条件の検討を行った。水のシミュレーションでは、ヒータの半径、ヒータの熱物性および測定時の自然対流の熱伝導率測定に対する影響を検討した。ヒータ半径が大きい方が測定時に対流の影響を受けにくいが、算出される熱伝導率は設定値よりも大きくなることが分かった。次に、溶融スラグの熱伝導率を非定常熱線用により測定する場合のシミュレーションを行い、対流およびふく射の影響を検討した。ヒータと試料の熱容量の差が大きくなると、測定される熱伝導率の誤差が大きくなることが分かった。試料の熱容量がヒータよりも小さい場合には熱伝導率は設定値よりも小さく算出され、試料の熱容量がヒータより

TOPへ戻る

も大きい場合には熱伝導率は設定値よりも大きく算出される。また、試料の粘度が小さいほど熱伝導率は大きく算出されることが分かった。ふく射の影響では、試料の熱伝導率が小さいほど熱伝導率の測定誤差が大きくなることが分かった。この要因は、試料の熱伝導率が小さいほどヒータの温度上昇が大きく、ふく射により試料に伝わる熱が大きくなるためと考えている。

以上より、高温における熱伝導率測定では、試料に与える熱量を変化させてふく射の影響の有無を検討する必要があることが分かった。

漏れ電流の影響に関しては、竹内らが漏れ電流がある場合には、測定値は真の値よりも小さくなることを明らかにしている[2]。ヒータを太く短くすることで漏れ電流の影響を小さくすることができる。一方で、ヒータ端部の影響が表れる可能性があることも指摘している。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

【今後の計画】

水素還元実験では、水素導入の方法や温度を再検討して、鉄回収の効率化を目指す。

熱伝導率測定では漏れ電流の影響を有限要素法により検討する。ヒータの太さおよび長さについて最適な条件を求める。この結果に基づいて、溶融スラグの熱伝導率を測定する。

【学会発表状況】

・Olena Volkova:「スラグの粘度、密度、表面張力測定」，日本鉄鋼協会　評価・分析・解析部会　高温における最適な材料プロセス制御を目指した材料特性評価フォーラム，2023 年 12 月 12 日

・向後義樹，大関倖輔，西剛史，助永壮平，遠藤理恵:「非定常熱線法による酸化物融体の熱伝導率の測定条件～有限要素法を用いた検討～ 」日本鉄鋼協会第 187 回春季講演大会 2024 年 3 月 13 日

【論文】

"Thermophysical properties of $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–TiO_2–FeO_x–V_2O_3$ slag with CaO/SiO_2=1.13 with different TiO_2 and V_2O_3 additions"　Steel Research International (投稿中)

参考文献

[1]Tetiana Shyrokykh, Olena Volkova, Seetharaman Sridhar: Steel Research International, https://doi.org/10.1002/srin.202300477

[2] 竹内正顕，鈴木学，永田和宏: 日本機械学会論文集 B, 49 (1983), 1468-1476.

TOPへ戻る

既存杭処理のためのグランドデザインの創造

土木工学科　　稲積　真哉

共同研究者
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Nontananandh Supakij
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Chaiprakaikeow Susit
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Jotisankasa Apiniti

１．序論

近年では高度経済成長期に建設された大量の社会基盤構造物の高齢化、人口減少に伴う宅盤住宅・住居マンションを含む社会基盤構造物利用の減少、さらに東日本大震災を契機とした防災基準に不適合な構造物の取壊しが増加している。同時に、近年における景気も相まって上記した構造物の建替え需要も高まっている。

構造物を取り壊す際、構造物を支持していた杭基礎（既存杭）は産業廃棄物に指定されることを示している。よって、原則として既存杭は地中から撤去しなければならない。なお、既存杭の撤去は地中において破砕・現地土と混合する工法も存在するものの、上記したとおり既存杭は産業廃棄物に指定されることから、地中内で破砕・残置することは適当でない。そのため、既存杭の撤去は、主として既存杭の引抜き撤去を指すことになる。

既存杭を引き抜いた状態では地盤内に孔が形成し、地盤が不良化する原因になり得るため、既存杭引抜き工は既存杭抜跡地盤（引抜孔）の埋戻し処理までを包含しなければならない。例えば、**図-1** のように引抜孔に対して充填材等で埋戻し処理を行わない場合は、引抜孔周辺の地盤沈下、新設杭打設時における新設杭のズレや傾斜発生をもたらす等の地盤不良を誘発する。

既存杭引抜き工における引抜孔の埋戻し処理について、一般的には既存杭を引き抜きつつ、上部（地表面）から引抜孔内へセメントミルクや流動化処理土で代表される充填材の流し込み注入を行う。しかしながら、既存杭を引き抜く工程において、引抜孔にはケーシング削孔時の削孔泥水や乱された現地土砂が層を成して堆積している。そのため、**図-2** に示されるように既存杭を引き抜く工程の最後に行う引抜孔上部から充填材の流し込み注入で

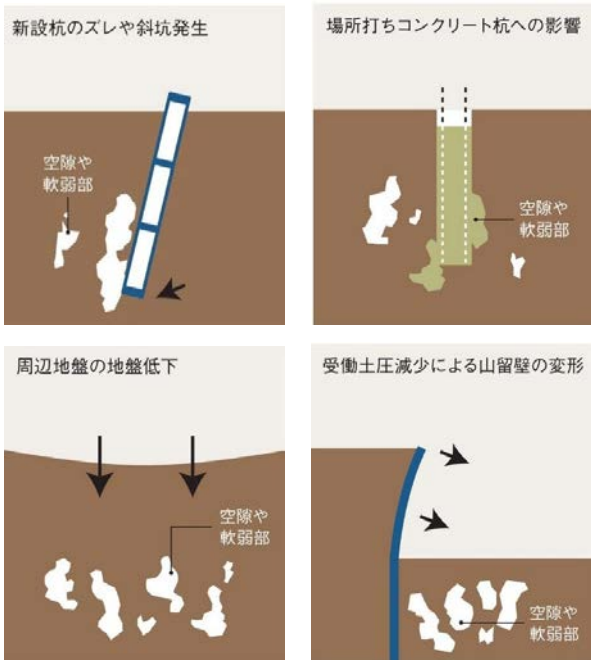


図-1　引抜孔に起因する地盤の不良化例

TOPへ戻る

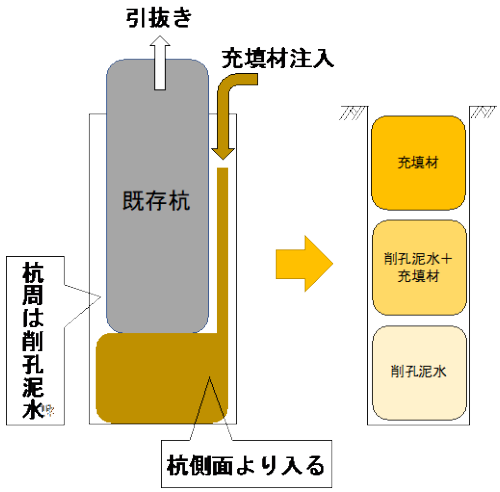


図-2　引抜孔内での充填材の充填状況

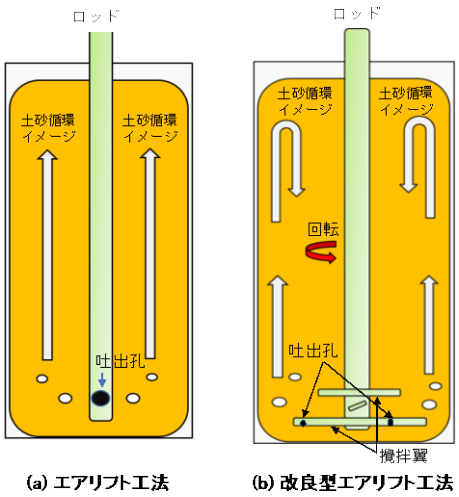


図-3　エアリフト工法および改良型エアリフト工法による引抜孔内の土砂循環イメージ

は、引抜孔の全深度にわたって均一な埋戻し処理を達成することが困難であり、結果的に引抜孔内では各層に分割・構成される。よって、引抜孔へ充填材の単純注入では引抜孔内の全深度にわたって均一な埋戻しは達成できず、引抜孔内で充填材が深度方向へ均一に埋め戻されるように工夫する必要がある。

上記した既存杭引抜き工における引抜孔の埋戻し処理の課題を克服するため、一連の研究では引抜孔の埋戻し処理工法としてエアブローを伴うエアリフト工法に着目し、エアブロー箇所に攪拌翼を設け、攪拌翼の回転とともにエアブローを行う改良型エアリフト工法の開発に着手している。なお、改良型エアリフト工法が引抜孔の埋戻し処理に効果的であることは現場において実証されているものの、その攪拌混合処理過程（処理メカニズム）の検証・解明には至っていない。

2．研究計画

引抜孔の埋戻し処理に付随する引抜孔の攪拌混合処理については、これまで技術開発の対象でなかった。しかしながら、数少ない引抜孔の攪拌混合処理技術としてエアリフト工法を挙げることができる。

エアリフト工法は、**図-3** で示されるような層構造を成す埋戻し状態を呈する引抜孔内へロッドを引抜孔下端付近まで挿入し、ロッド先端から空気を吐出することで堆積土砂や削孔泥水を浮上させつつ、引抜孔内で循環させる工法である。ただし、引抜孔内最下部で沈降堆積している堆積土砂はエアリフトによって循環させることが実務上困難であるため、予めサクションポンプ等で当該堆積土砂は吸引除去する措置が取られている。**図-3(a)**は、エアリフト工法による引抜孔内での充填材を含む土砂の循環移動のイメージを示している。

本研究では引抜孔の埋戻し処理としてエアリフト工法ならびに改良型エアリフト工法の攪拌混合処理過程（処理メカニズム）を明確にすることを目的として、個別要素法による粒状体解析（Granule Analysis using Distinct Element Method；以降“DEMによる解析”と略称）を用いて両工法による引抜孔の攪拌混合処理過程を再現するものである。さらに、攪拌翼の回転速度、攪拌時間ならびに空気（エア）の吐出圧（エアブロー圧）等、改良型エアリフト工法の設計・施工における仕様を検討する。

3．計画の進行状況

(1) 改良型エアリフト工法による引抜孔の攪拌混合処理性能

エアリフト工法ならびに改良型エアリフト工法による引抜孔内の攪拌混合処理の原理は、

TOPへ戻る

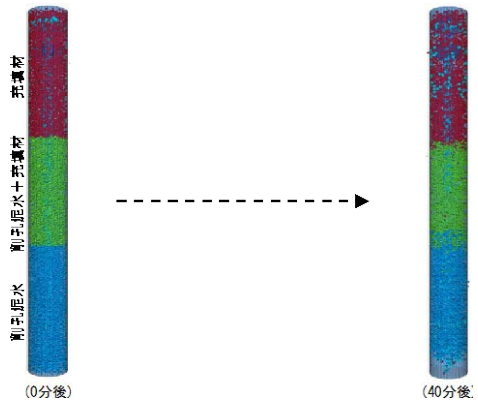


図-4　DEM による解析に基づくエアリフト工法を用いた引抜孔内の土砂攪拌・混合状況

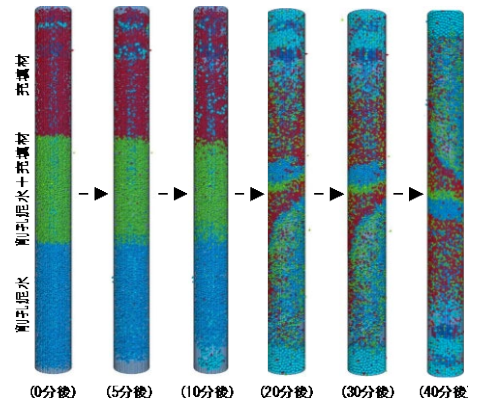


図-5　DEM による解析に基づく改良型エアリフト工法を用いた引抜孔内の土砂攪拌・混合状況

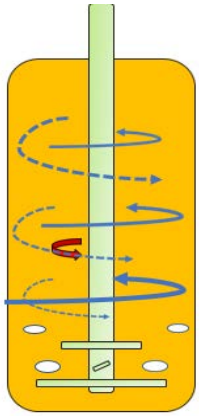


図-6　改良型エアリフト工法による引抜孔内の土砂循環移動の外観

既存杭引抜跡地盤内（引抜孔内）の土砂（充填材ならびに削孔泥水）が吐出された空気によって揚圧力を受け、引抜孔内を循環することに依る。

エアリフト工法は、攪拌翼が未装着且つ無回転のロッドから空気を吐出するのみによって、引抜孔内の土砂を攪拌混合する。しかしながら、DEM による解析を用いてエアリフト工法による引抜孔内の攪拌混合処理を再現した**図-4** では、引抜孔内の土砂は十分に混合することなく、引抜孔内の土砂は不均一な状態を維持している（空気の吐出圧力：0.25MPa、攪拌混合時間：60minutes)。よって、引抜孔内全体が効率的に攪拌混合することが困難であったため、エアリフト工法による均一な攪拌混合処理は困難であると考えられる。この要因のひとつには、エアリフト工法を適用した際、引抜孔内の土砂の移動方向が挙げられる。すなわち、引抜孔内の土砂は、引抜孔内を下部から上部へ伝う空気流によって揚圧力が作用するものの、その揚圧ベクトルの方向が単に上向きであるため、揚圧力が作用した土砂が循環することができなかったことが考えられる。

一方、改良型エアリフト工法ではロッドに三段組の攪拌翼を取り付け、空気を吐出するときは回転しながら吐出するものである。**図-5** では DEM による解析結果として、改良型エアリフト工法を適用した場合の引抜孔内の土砂の攪拌混合処理を表している（攪拌翼の回転速度：12rpm、空気の吐出圧力：0.25MPa、攪拌混合時間：60minutes)。**図-6** は**図-5** を基に引抜孔内の土砂移動の外観を示しており、空気の揚圧力によって削孔泥水層が持ち上がり、一方、揚圧力の作用が相対的に小さい充填材層は削孔泥水層とは逆方向（下部方向）へ移動し、徐々に 2 つの層が螺旋状に入り交じる。よって、引抜孔内の下部層であった削孔泥水は上方へ、上部層であった充填材は下方へ移動するため、結果的に引抜孔内の 3 層は、程よく均一層に攪拌混合される。

(2)改良型エアリフト工法による攪拌混合に伴う各粒子群の移動特性

改良型エアリフト工法における各層を構成する土粒子群の移動特性として、**図-7** および**図-8** は引抜孔内下部および上部における土粒子群の速度ベクトルを示している（攪拌翼の

TOPへ戻る

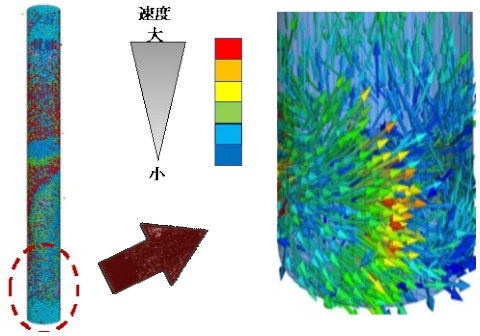


図-7　引抜孔下部における土粒子の群速度ベクトル（30 分後）（改良型エアリフト工法）

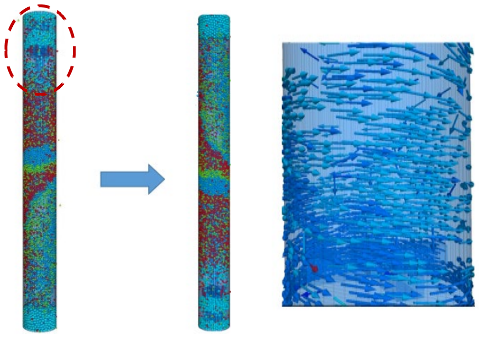


図-8　引抜孔上部における土粒子の群速度ベクトル（30 分後）（改良型エアリフト工法）

回転速度:12rpm、空気の吐出圧力:0.25MPa)。これらより、引抜孔内下部では撹拌翼から吐出された空気の揚圧力によって削孔泥水層の速度ベクトルが斜め上方を向いており、且つ相対的に速度も大きく、削孔泥水層は螺旋状に持ち上げられている。一方、引抜孔内上部では充填材の速度ベクトルは斜め下方を向いており、同時に速度は比較的小さい。すなわち、引抜孔内下部にて吐出された空気は撹拌翼の回転に伴い、螺旋状に削孔泥水を上方へ持ち上げ、上部付近では充填材と持ち上げられた削孔泥水ならびに削孔泥水＋充填材層の比重と揚圧力とのバランスにより斜め下方へ移動し、引抜孔内全体として循環することになる。

これまで、改良型エアリフト工法を適用した引抜孔内の撹拌混合処理について、施工後のボーリングコアの室内強度試験より、その撹拌混合処理性能は現場レベルにて実証されている。しかしながら、改良型エアリフト工法による撹拌混合処理のメカニズムを定量的に追究した事例は皆無であり、すなわち、本研究により改良型エアリフト工法による引抜孔内の撹拌混合処理のメカニズムが明らかになった。これにより、引抜孔内の撹拌混合処理における改良型エアリフト工法の最適設計が可能になると考えられる。

4．今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

(1)今後の計画

本研究では改良型エアリフト工法における空気の吐出圧力や撹拌翼の回転速度等の初期条件が土粒子群の移動特性に与える影響を相対的・定性的に考察したものの、定量的な考察・説明には至らなかった。今後、DEM による解析を用いて引抜孔の埋戻し処理工法をより詳細に評価し、さらに設計に援用するためには、上記した初期条件に対する土粒子群の移動特性を定量的に評価する必要がある。

(2)学会、論文等投稿・発表状況

[1] Inazumi, S. and Kuwahara, S.: Numerical simulation of backfilling behavior of boreholes, Results in Engineering, Vol. 21, 101907, 2024.
[2] Shakya, S. and Inazumi, S.: Applicability of numerical simulation by particle method to unconfined compression tests on geomaterials, Civil Engineering Journal, Vol. 10, No. 1, pp. 1-19, 2024.
[3] Shigematsu, Y., Inazumi, S., Hashimoto, R. and Yamauchi, H.: Experimental study on properties of liquefied stabilized soil produced with different types of solidifiers and thickeners, Case Studies in Construction Materials, Vol. 19, e02407, 2023.
[4] Inazumi, S., Hashimoto, R., Aizawa, E., Kuwahara, S. and Shishido, K.: Applicability of waste silica-based additive with surfactant-type liquid thickener as borehole filler, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 25, Issue 6, pp. 3776-3790, 2023.
[5] Kowsura, S., Chaiprakaikeow, S., Jotisankasa, A., Malaikrisanachalee, S., Nontananandh, S., Nusit, K., Sawangsuriya, A. and Inazumi, S.: Properties and performances of soil cement modified with concentrated para-rubber, International Journal of GEOMATE: Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol. 24, No. 102, pp. 42-49, 2023.
[6] Shigematsu, Y., Inazumi, S., Chaiprakaikeow, S. and Nontananandh, S.: Properties of high-flowability liquefied stabilized soil made of recycled construction sludge, Recycling, Vol. 8, Issue 5, 67, 2023.

TOPへ戻る

Nanocomposite polymer/skutterudite thin films for enhanced thermoelectric conversion

先進国際課程　Paolo MELE

Research colleagues
SIT-SRL and JSPS international fellow: Giovanna Latronico
Dillard University: Abdalla Darwish

1. Paper introduction

Thermoelectric (TE) materials [1] can directly convert waste heat into electricity without moving parts, being candidates to address current energy issues [2]. However, several problems are limiting their diffusion: the inclusion of toxic and/or expensive elements, low conversion efficiency η ($\eta < 10\%$) and low thermal stability. Therefore, the most performant TE materials, like Bi_2Te_3, are confined to niche applications (e.g. power supply to space probes). Stable, environmentally benign, abundant, and cost-effective materials are good candidates to overcome these issues being.

The performance of a TE material is quantified by the a-dimensional figure of merit $ZT = (\sigma S^2) \times T/(\kappa_{el}+\kappa_{ph})$ (Eq.1) where σ is the electrical conductivity, S is the Seebeck coefficient ($S = \Delta V/\Delta T$, being V the electrical voltage); the electronic thermal conductivity is $\kappa_{el} = LT\sigma$ (Eq. 2), where L is the Lorentz number and the phononic thermal conductivity is $\kappa_{ph} = 1/3\ Cv\Lambda$ (Eq. 3) with C = heat capacity, v = speed of phonons, Λ = phonons mean free path. T is the absolute temperature. Since η increases with ZT [3], the goal is to improve ZT by enhancing the numerator of Eq. 1, σS^2 (power factor, PF) or depressing the denominator, $\kappa_{el} + \kappa_{ph} = \kappa$ (thermal conductivity). $ZT \geq 1$ is considered the threshold to have applicable TEs.

A wealth of families of thermoelectric materials have been studied over the years, and some of them satisfy the basic requirements of chemical stability, environmental neutrality, sustainability, and low cost, such as oxides, silicides, selenides, Heuslers, and skutterudites. In PI lab, Co-free, Sm filled skutterudites of the system $Sm_y(Fe_xNi_{1-x})_4Sb_{12}$, have been extensively studied, both in bulk and thin film form [4-8].The great advantage of these compounds is that it is possible to prepare both n-type and p-type elements just tuning the electronic properties by playing with y, the RE filling ratio, and x, the substitution at the M site [8]. Having n- and p-legs the same crystalline structure the thermal expansion mismatch between the two legs will be negligible, with minimal thermal stress and prolonged

TOPへ戻る

lifetime of the device. Structural and thermoelectric properties of bulks belonging to the Co-free system $Sm_y(Fe_xNi_{1-x})_4Sb_{12}$, were already extensively investigated [4-8]. Moreover, we already succeeded in preparing a 1 cm^2 module on silica based on skutterudite thin films with output power $P_{max} \approx 5$ nW at 200-300 ° C [9]. The goal of this research is to enhance the performance of the skutterudite thin films via incorporation of carbon-based nanodefects of different morphology.

The strategy of researchers to improve ZT has traditionally been focused on two possible strategies: (i) Depression of κ via enhancing the phonon scattering - this approach is based on introduction of various shaped nanodefects. [10, 11] or (ii) energy filtering and improvement of S [12].

More recently, a new way has been considered by Prof. A. Darwish in his earlier collaboration with PI (Paolo Mele): (iii) enhance σ via introduction of highly conductive carbon nanoclusters and chains in Al-doped ZnO matrix, without enhancing κ [13]. This approach has been possible via simultaneous deposition of polymer and oxide in the unique matrix assisted pulsed laser evaporation (MAPLE) apparatus, which is only available at Dillard University.

In this research, these approaches are applied to the skutterudite thin films.

The novelty of this project is to combine the approaches (i): depression of κ in thermoelectric skutterudite thin films via controlled introduction of monodimensional (1D) nanodefects (PI) and (iii): enhancement of σ via engineered carbon nanocluster and chains introduction (Dillard U).

２．Research program

The research plan was made up of two pars.

1) At first, try to reproduce at Dillard University the results on pure skutterudite films obtained at SIT.

2) fabricate skutterudite thin films added with carbon nanocomposites by MAPLE-PLD, simultaneously ablating with 2 laser beams the dense SPS skutterudite target (prepared at SIT) and the polymer frozen solution. The relative skutterudite/polymer amounts will be varied, to establish the percolation threshold of carbon in the thermoelectric matrix.

３．State of progress

The research at Dillard University was mainly conducted by Dr. Latronico over one month of stage, and PI (Paolo Mele) joined the experimental activity for the first two weeks.

At Dillard University it was possible to work on the new PLD/MAPLE system which allows to mix constituents of entirely different chemical nature and to control their proportion in a composite film, instead of in a multi-layer common structure. It is worth noting that the vacuum chamber used is custom designed with an unique shape and structure, and it is not available commercially as a standard product. The system was not yet calibrated in February 2024, at the time of the scientific visit of SIT members to Dillard University, and therefore the calibration

TOPへ戻る

was necessary at the first stage.

The first ten days of the stay were dedicated to the alignment of 5 out of 6 laser beams which must reach the targets inside the vacuum chamber, one of which is visible in Fig. 1.

Figure 1 - Visible laser beam (λ = 532 nm) reaching the PLD/MAPLE system.

After that, the first deposition experiments were carried out. The targets prepared at Shibaura Institute of Technology in advance were Fe50 (n-type, x = 0.5, y = 0.17) and Fe70 (p-type, x = 0.7, y = 0.41) belonging to the system $Sm_y(Fe_xNi_{1-x})_4Sb_{12}$.

The deposition of the skutterudite was performed with a 10 Hz Laser with λ = 532 nm, while for the PMMA, on the MAPLE holder (cooled with liquid nitrogen), a 10 Hz Laser with λ = 1064 nm was used.

After a first try on the n-type target Fe50, a deep hole was found on the pellet, making clear that the laser beam was too strong and focused. Few preliminary tests were therefore performed on a spare ZnO target.

The chosen focusing lengths (f) for the lenses close to the chamber window (Fig.2) were f = 30' on the skutterudite laser beam and f = 20' on the PMMA laser beam. An iris was set on the path of the 532 nm laser to soften and reduce the ablation on the skutterudite target.

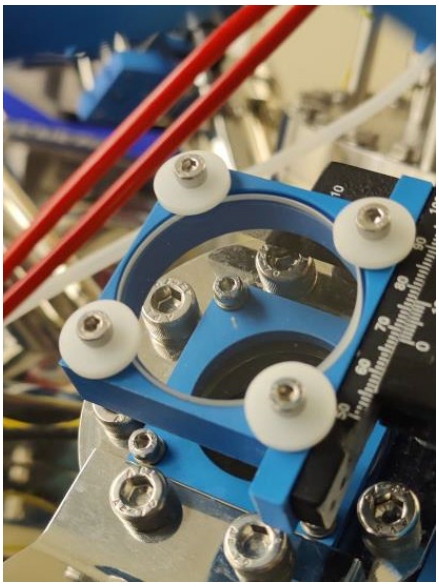


Figure 2-lens before the chamber window

The Q-Switch knob was set at the value of 7.5, and the deposition was carried on for 40 minutes.

The skutterudite target, which has a diameter of 1.5 cm, was moved with a rastering oscillation through the dedicated software with an angle of 5° at a speed of 2° /sec, while the substrates were set at the minimum substrate-target distance and rotated at 5 RPM. The skutterudite target was also slightly tilted by means of a copper tape to somewhat move the plume towards the center of the substrate holder.

The beam on the PMMA target was moved every 8/10 minutes to avoid the complete ablation of one point of the material. Anyway, even with this approach, the target was ablated too strongly and the PMMA was burned during the ablation.

Substrates were set on the side of the holder, where the deposition was stronger and more uniform (Fig 3).

TOPへ戻る

The final samples fabricated on silica glass at Dillard University are:
Fe50 Film; Fe50 Film + PMMA; Fe70 Film; Fe70 Film + PMMA

Figure 3 substrates after the deposition with PMMA.

The Fe50 and Fe70 appeared as transparent, which probably means that their thickness is less than 100 nm, while the films added with PMMA were black and opaque, which means that the polymer was completely burn out by the laser beam. It is possible to say that the optimal conditions for the deposition of the skutterudite (both pure and added with PMMA) were not reached.

The initial difficulties in the set up and calibration of the laser beams reduced the time for the core experiments. Therefore, the films were sent from Dillard University to Shibaura Institute of Technology to perform further characterizations in PI`s lab.

４．Future program, paper submission and results briefing

In Japan, some tries on the annealing conditions will be performed, together with the thickness evaluation via FIB, some acquisitions with XRD, and the room temperature evaluation of the Seebeck coefficient.

The conditions of the deposition for both the targets must be optimized after performing the first few analyses on the samples. The thickness of the skutterudite will be measured soon by means of the FIB technique and, depending on the result, the deposition time or power of the laser will be adjusted. Probably, the PMMA ablation performed was too strong, but due to the time constraints, it was not possible to adjust it further.

The work will be continued by the members of prof. Darwish's lab and possibly concluded in AY2024 at Dillard University in presence of PI, during a second internship stage under the same funding scheme.

After the completion of the experiments and characterization, a joint publication in peer-reviewed journal is planned.

References

[1] Th. Seebeck, Ann. Phys. 82 (1821) 133; [2] L. Livermore N. Lab./ DoE 2022; [3] G.J. Snyder and E.S. Toberer, Nature Mater. 7, 105 (2008); [4] G. Latronico, P. Mele, et al., Nanotech., 34 (2023) 115705; [5] G. Latronico, P. Mele et al, Materials, 14 (2021) 5773 [6] C. Artini, G. Latronico, P. Mele, et al., Mat. Res. Bull., 139 (2021) 111261; [7] C. Artini, G. Latronico, et al. J. of Mat. Eng. and Perform., 27 (2018) 6259; [8] C. Artini, et al., Inorg. Chem. 55 (2016) 2574; [9] G, Latronico, P. Mele et al., in preparation. [10] L.D. Hicks, M. S. Dresselhaus, PRB 47 (1993) 12727; [11] R.Venkatasubramanian et al., Nature 413 (2001) 517; [12] R. Prashad et al., Mat. Sust Energ. 9 (2020) 3; [13] A.M. Darwish, P. Mele, et al Composites B 167 (2019) 406

TOPへ戻る

ノルディックハムストリングの効果検証

生命科学科　　赤木　亮太

共同研究者
静岡産業大学　　江間　諒一

1．序論（はじめに，まえがき，目的）

大腿後面に位置する大腿二頭筋・半腱様筋･半膜様筋の総称をハムストリングという．ハムストリングの肉離れ（Hamstring Strain Injured：HSI）は，あらゆるスポーツ活動の中で生じ（Crema et al. 2018），特に急なスプリントや急停止，ジャンプで発生率が高い外傷である．肉離れは受傷率が高く，例えば，2019 年に行われたラグビーワールドカップ中に起きた怪我の中で，肉離れの割合が 9.8% と高い割合を占めていた（Fuller et al. 2020）．HSI は一般的に発症から完治までに 3 週間から 5 週間かかるとされており，再発率も高い（Wangensteen et al. 2016）．それ故，HSI の受傷予防は，アスリートのパフォーマンス向上において重要である．

HSI のリスクファクターとしては，伸張性膝関節屈曲トルクや大腿二頭筋長頭の筋束長が挙げられる（Wangensteen et al. 2016）．近年，伸張性膝関節屈曲トルクの向上および大腿二頭筋長頭の筋束長を改善させる運動として，ノルディックハムストリングエクササイズ（NHE）が注目されている（Presland et al. 2018）（図 1）．NHE は大きな器具や高価な機械を必要としないため，スポーツ現場のトレーニングセッションに加えやすい．しかしながら，このエクササイズは筋肉痛を誘発する（Behan et al. 2022）ことから，アスリートから敬遠される傾向が見られる（Bahr et al. 2015）．また，アスリートがエクササイズをトレーニングメニューとして取り入れるためには，怪我予防という視点だけではなく，トレーニングよってパフォーマンスが向上するかどうかが重要である．しかし，定期的に NHE を実施するトレーニングにより，瞬発力やジャンプ力など，スポーツ選手にとって重要な身体パフォーマンスが向上するのかはわかっていない．そこで本研究は，6 週間に亘る，NHE を実施するトレーニングにより，HIS のリスクファクターを改善しつつ，瞬発力やジャンプ力が向上するかどうか，そのメカニズムを含めて明らかにすることを目的とした．

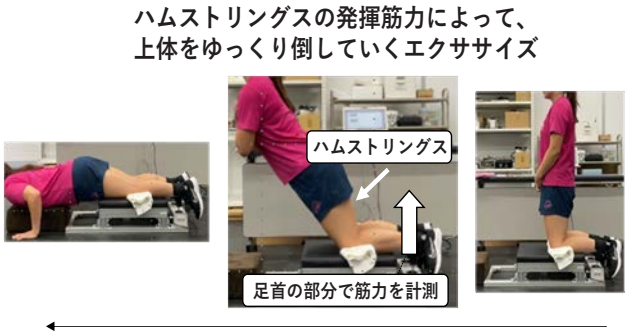


図 1 ノルディックハムストリングモデル

2．研究計画

本研究では，スポーツ現場への将来的な適用を見据え，週 2 日トレーニングを実施する群と，週 1 日トレーニングを実施する群を設定した．トレーニングを実施しないコントロール群と合わせた 3 群を対象に，介入前後の

TOPへ戻る

測定データを比較することを想定して，二元配置分散分析における交互作用に関するサンプルサイズを，検出力分析ソフト G*Power3.1.9.7 を用いて計算した．その結果，トータルのサンプルサイズは 42 と算出された．NHE は左右両方の足首を固定して行われるエクササイズであることに鑑み，本研究では，左右両脚を研究対象とすることで，各群，男子大学生及び大学院生若年男性 21 名（42 脚）を無作為に割り当てることとした（“週 2 日トレーニング群”身長：169.8 ± 6.8 cm，体重：63.4 ± 5.7 kg；“週 1 日トレーニング群”身長：168.0 ± 6.9 cm，体重：60.8 ± 9.5 kg；“コントロール群”身長：172.1 ± 3.7 cm，体重：66.5 ± 8.7 kg）．本研究では，過去 6 ヶ月間，下肢のトレーニングを実施していないものを対象とした．対象者全員に，測定前に本研究に関して十分な説明をした後，各対象者から実験参加への同意を書面で得た．本実験は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会より承認を受けた上で実施された．

週 2 日/週 1 日トレーニング群は，6 週間に亘り，NHE（図 1）を定期的に実施した．1 日のトレーニング時間は 30 分とした．トレーニング日は，必ず 1 日（24 時間）以上空けるようにした．1 日のトレーニング量は，先行研究（Behan et al. 2022, Bourne et al. 2017, Presland et al. 2018）を踏まえ，24 回とした．すなわち，トレーニング期間合計の反復回数は，週 1 日トレーニング群は 144 回，週 2 日トレーニング群は 288 回となった．動作ペースとしては，6 s かけて立膝の状態からゆっくり体を倒し，10 s 休憩し，このサイクルを 4 回繰り返した．そして，1 分の休憩を挟んで，合計 6 セット繰り返すことで，1 日のトレーニングを遂行させた．

本研究では，様々な測定データを取得しているが，ここでは，現時点で分析を終えている変数について報告する．具体的には，6 週間の介入前後で測定した，①伸張性膝関節屈曲トルク，②等張性膝関節屈曲パワー，③ NHE 中の膝関節屈曲トルク，④筋束長について報告する．

①及び②に関しては，筋力評価システム（図 2）を，③に関しては，図 1 に記載の NHE 用装置を使用した．そして，④に関しては超音波診断装置（図 3）を使用した．

図 2 筋力評価システム

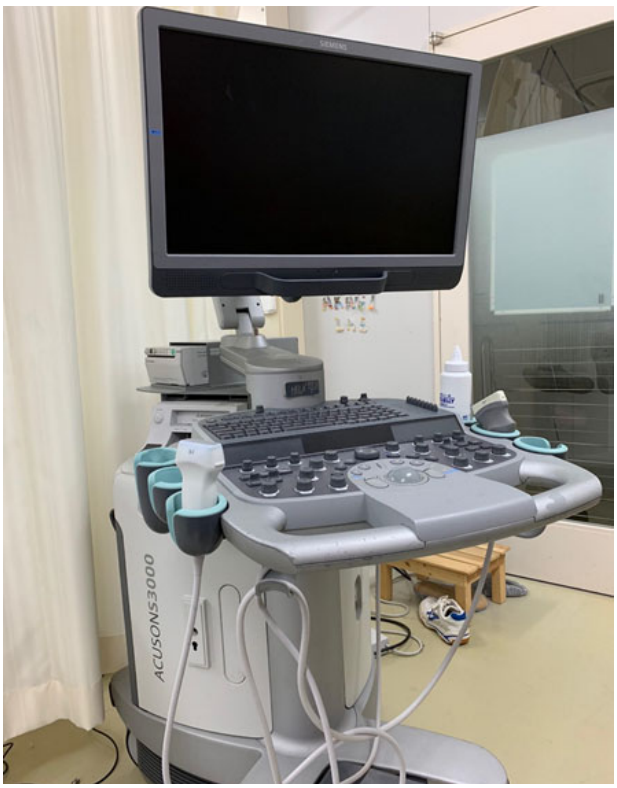


図 3 超音波診断装置

TOPへ戻る

３．計画の進行状況

現時点では，各データの正規性の確認ができていないため，二元配置分散分析等の統計分析も実施していない．上述の 4 つの変数に関し，介入前後の各群の平均及び標準偏差について，以下報告する．

①伸張性膝関節屈曲トルク（図 4（a））

週 2 日トレーニング群では，介入前は 103 ± 18 Nm，介入後は 122 ± 22 Nm，週 1 日トレーニング群は，介入前は 100 ± 16 Nm，介入後は 106 ± 18 Nm であった．コントロール群では，介入前は 135 ± 31 Nm，介入後は 132 ± 22 Nm であった．

②等張性膝関節屈曲パワー（図 4（b））

週 2 日トレーニング群では，介入前は 299 ± 55 W，介入後は 326 ± 52 W，週 1 日トレーニング群は，介入前は 288 ± 26 W，介入後は 313 ± 37 W であった．コントロール群では，介入前は 329 ± 41 W，介入後は 328 ± 36 W であった．

③NHE 中膝関節屈曲トルク（図 4（c））

週 2 日トレーニング群では，介入前は 226 ± 63 N，介入後は 313 ± 46 N，週 1 日トレーニング群は，介入前は 227 ± 47 N，介入後は 270 ± 35 N であった．コントロール群では，介入前は 256 ± 45 N，介入後は 266 ± 35 N であった．

④大腿二頭筋長頭筋束長（図 4（d））

週 2 日トレーニング群では，介入前は 79.4 ± 8.8 mm，介入後は 92.2 ± 8.6 mm，週 1 日トレーニング群は，介入前は 77.9 ± 8.4 mm，介入後は 91.1 ± 10.7 mm であった．コントロール群では，介入前は 79.9 ± 12.3 mm，介入後は 81.4 ± 14.3 mm であった．

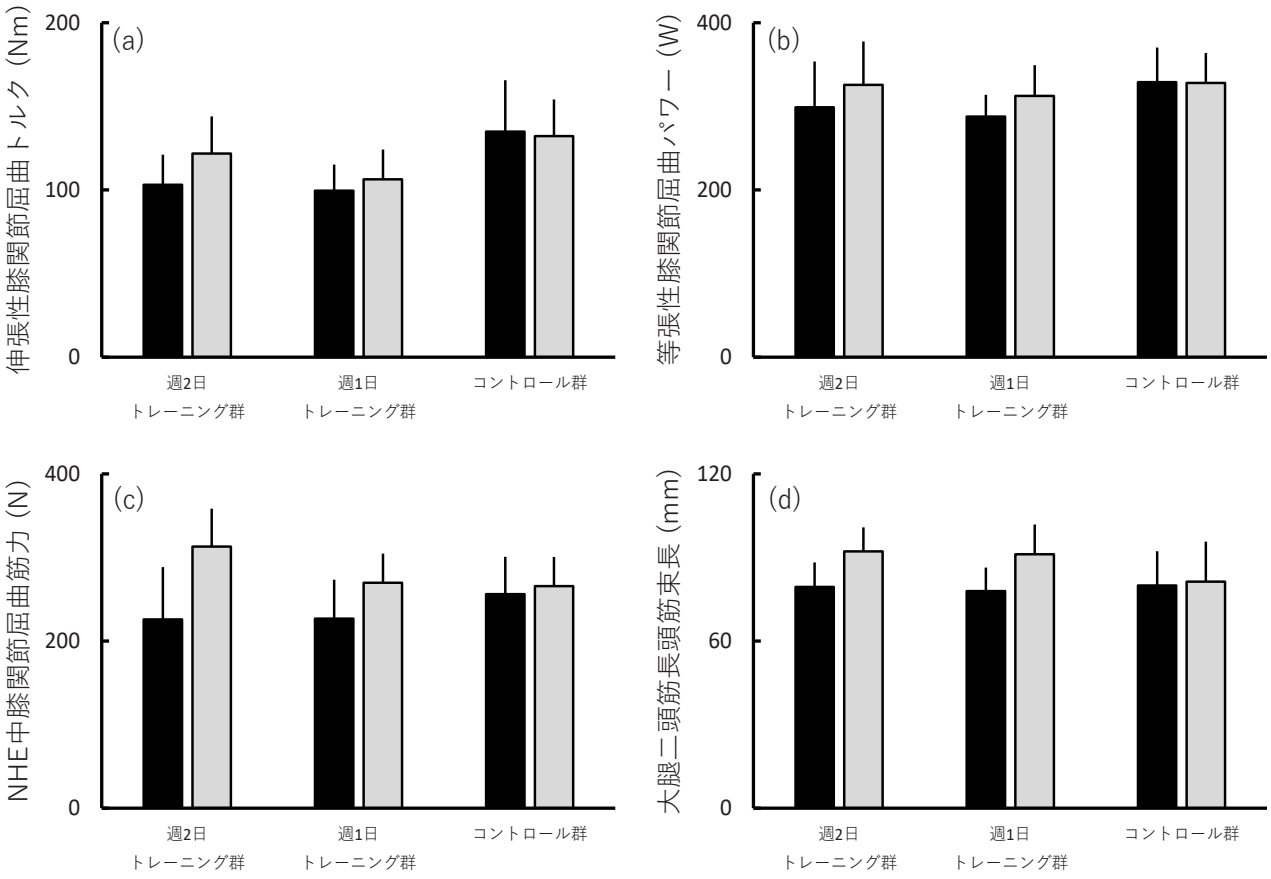


図 4 各群の介入前後の伸張性膝関節屈曲トルク（a），等張性膝関節屈曲パワー（b），NHE 中の膝関節屈曲トルク（c），および筋束長（d）（黒色：介入前，灰色：介入後）

TOPへ戻る

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

まずは，ジャンプ能力等，現時点で分析を終えていない変数について，分析を進めて行く．そうすることで，本研究の目的でもある，「瞬発力やジャンプ力が向上するかどうか」について，きちんと精査する．

その後，各変数を対象に統計分析を実施する予定ではあるものの，図４の通り，現状の結果としては，無作為に分けているにもかかわらず，コントロール群の関節トルク・パワーが他２群に比べて高い値となっている．こちらに関しては，体形で補正をするなど，もう少し工夫することを検討する．また，トレーニング効果の個人差について検討するために，図５のような形で，各回のトレーニング量をより正確に把握し，各変数の変化との関係性についても模索する．

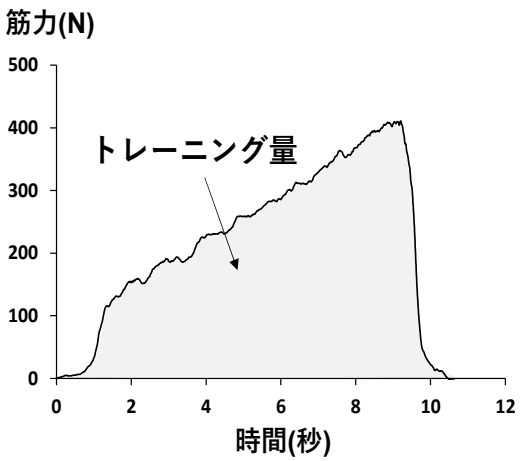


図５ トレーニング量評価イメージ

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】

・ Bahr R, Thorborg K, Ekstrand J. Evidence-based hamstring injury prevention is not adopted by the majority of Champions League or Norwegian Premier League football teams: the Nordic Hamstring survey. Br J Sports Med. 2015, 49(22):1466-1471.

・Behan FP, Vermeulen R, Whiteley R, Timmins RG, Ruddy JD, Opar DA. The Dose-Response of the Nordic Hamstring Exercise on Biceps Femoris Architecture and Eccentric Knee Flexor Strength: A Randomized Interventional Trial. Int J Sports Physiol Perform. 2022, 17(4):646-654.

・Bourne MN, Duhig SJ, Timmins RG, Williams MD, Opar DA, Al Najjar A, Kerr GK, Shield AJ. Impact of the Nordic hamstring and hip extension exercises on hamstring architecture and morphology: implications for injury prevention. Br J Sports Med. 2017, 51(5):469-477.

・Crema MD, Godoy IRB, Abdalla RJ, de Aquino JS, Ingham SJM, Skaf AY. Hamstring Injuries in Professional Soccer Players: Extent of MRI-Detected Edema and the Time to Return to Play. Sports Health. 2018, 10(1):75-79.

・Fuller CW, Taylor A, Douglas M, Raftery M. Rugby World Cup 2019 injury surveillance study. S Afr J Sports Med. 2020, 32(1):v32i1a8062.

・ Presland JD, Timmins RG, Bourne MN, Williams MD, Opar DA. The effect of Nordic hamstring exercise training volume on biceps femoris long head architectural adaptation. Scand J Med Sci Sports. 2018, 28(7):1775-1783.

・Wangensteen A, Tol JL, Witvrouw E, Van Linschoten R, Almusa E, Hamilton B, Bahr R. Hamstring Reinjuries Occur at the Same Location and Early After Return to Sport: A Descriptive Study of MRI-Confirmed Reinjuries. Am J Sports Med. 2016, 44(8):2112-2121.

TOPへ戻る

フェロトーシス関連ビタミンＫの脳疾患応用

生命科学科　　廣田　佳久

共同研究者
神戸薬科大学　薬学部　薬学科　　都出 千里
神戸薬科大学　薬学部　薬学科　　鎌尾 まや
神戸薬科大学　薬学部　薬学科　　岡野 登志夫
芝浦工業大学　システム理工学部　生命科学科　　須原　義智

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

ビタミン K は栄養素として広く認知され、緑黄色野菜に含まれるビタミン K_1（PK）や発酵食品に含まれるビタミン K_2（MK-n：n=1～14）に分類される。ビタミンＫは血液凝固や骨形成作用に重要な役割を担うことが報告されており、血液凝固薬や骨粗鬆症治療薬として利用されている［*Lancet*, 1995］。

我々は、これまでにビタミンＫの標的組織である肝臓や骨と比較して、ヒトやマウスの脳内ビタミンＫ量が非常に多く存在することを見出している［*JBC*, 2013］。また、PK から MK-4 への変換を担うビタミン K 変換酵素（UBIAD1）［*Nature*,2010］を脳神経特異的に欠損させたマウスによって世界で初めて脳内ビタミンＫが存在しないマウスの作出に成功し、脳の形態異常や認知機能低下などのアルツハイマー病様の表現型を示すことを見出した。さらに、東京都健康長寿医療センター村山先生との共同研究により、アルツハイマー病患者の脳内ビタミンＫ濃度が著しく低下することや、ビタミンＫ製剤を服用したヒト脳内のビタミンＫ濃度が 100 倍以上上昇する興味深い結果を得ることができた［論文準備中］。

ドイツ・ヘルムホルツセンターの三島らは、還元型ビタミン K が抗酸化能を有しており、脂質ラジカルを捕捉することでフェロトーシスを抑制することを報告した［*Nature*, 2022］。フェロトーシスは、2012 年に提唱された細胞死の一つである。脂質の過酸化と鉄の存在が重要な役割を果たし、脂質ラジカルに起因する細胞膜成分のリン脂質の過酸化によって引き起こされる。近年、アルツハイマー病の発症や重症化に寄与することが報告されている［*Nat. Metab.*, 2023］。

我々はビタミンＫの脳への移行性が高いことから、食事から摂取した栄養素ビタミン K が脳内へ移行し、フェロトーシスを抑制することでアルツハイマー病の進行抑制に繋がると想起した。また、強力にフェロトーシス抑制効果を有するビタミンＫ誘導体を創出できれば、新しいアプローチのアルツハイマー病治療に応用できる可能性が示唆されたため本研究を発案した（図 1）。

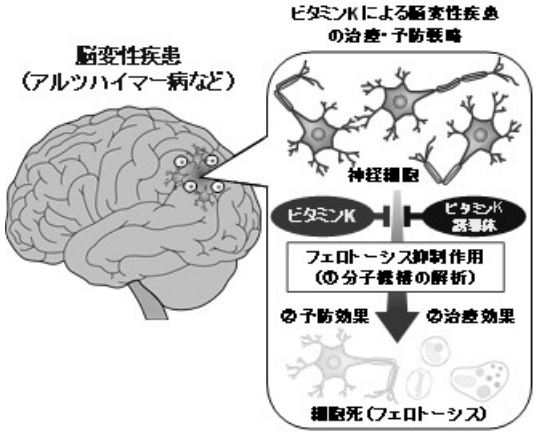


図１ 脳変性疾患に対するビタミンＫの予想される役割および本研究の目的

TOPへ戻る

2. 研究計画

①細胞死フェロトーシスの評価系の構築

本実験ではフェロトーシスの評価系として肝臓由来細胞 HepG2 細胞のゲノム編集により *GP x 4* 遺伝子を欠損した細胞を樹立する。具体的には、ヒト GP x 4 ゲノムのエキソン 2 に存在する、セレノシステイン残基を CRISPR-Cas9 システムを用いて、エキソン欠損をはかることで、*GP x 4* 遺伝子を欠損した細胞（HepG2 GPx4 KO 細胞）を樹立した（図 2）。

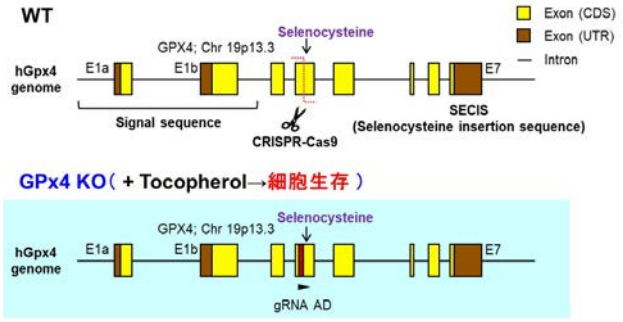


図 2 GPx4 KO 細胞の作製

②フェロトーシス抑制効果を有するビタミン K 同族体の評価

本実験では①で作出した、HepG2 GPx4 KO 細胞を用いて、ビタミン K 同族体の側鎖構造の違いによる同族体間の構造活性相関を評価する。HepG2 GPx4 KO 細胞は、10 μM Tocopherol 含有培地にて培養する。6 cm dish に細胞を継代し、Tocopherol 不含培地で 3 回洗浄後、96 well plate に播種し、3 日間 Tocopherol 不含培地で培養を行う。その後、ビタミン K 同族体を添加し、さらに 3 日間培養を行い、生細胞数を WST-8 アッセイにより評価し、フェロトーシス抑制効果を検証した。

3. 計画の進行状況

①細胞死フェロトーシスの評価系の構築

CRISPR-Cas9 システムを用いて、エキソン欠損をはかることで、*GP x 4* 遺伝子を欠損した HepG2 GPx4 KO 細胞の樹立に成功した（図 3）。

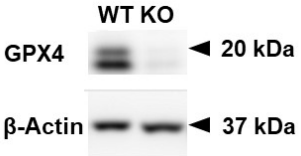


図 3 GPx4 KO 細胞のタンパク質発現量

②フェロトーシス抑制効果を有するビタミン K 同族体の評価

本実験で用いたビタミン K 同族体は、3 位の側鎖構造の違いによって 3 種類の同族体に分類されます。Phylloquinone（PK）は phythyl 側鎖を有します。Menaquinone-n（MK-n）は isoprenyl 側鎖を有し、その isoprene 基の数（n）に応じてさらに n=1~14 の同族体に分類されます。また、側鎖を持たない Menadione（MD）が存在します。本実験では、PK、MD、MK-2、MK-3、MK-4、MK-7 を用いて活性評価を行いました。フェロトーシス誘導細胞は、3 日間 Tocopherol 不含培地にて培養後に播種し、これらのビタミン K 同族体を 0.1~10 μM 添加しました。さらに 3 日間培養後、フェロトーシス阻害率を評価しました。

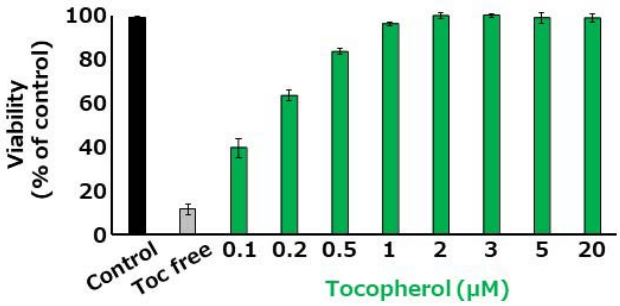


図 4 Tocopherol によるフェロトーシス抑制作用

その結果、側鎖をもたない MD は高濃度では細胞毒性を示し、生存率は低下しました。ビタミン K の中で最も生理活性の強い MK-4 は PK と比較して強いフェロトーシス阻害活性をしましました。次に、側鎖長によるフェロトーシス阻害活性の違いを検討しました。MK-2、MK-3、MK-4 は 0.1 μM レベルの低濃度からフェロトーシスを抑制できることを見出しました。また、側鎖長の長い MK-7 はフェロトーシスを阻害できないことが分かりました。そこで、フェロトーシス阻害活性の違いがビタミン K の取り込み量の違いによるものか検討しました。フェロトーシス抑制作用が強いビタミン K が細胞内に多く取り込まれているわけではないことが分かりました。

TOPへ戻る

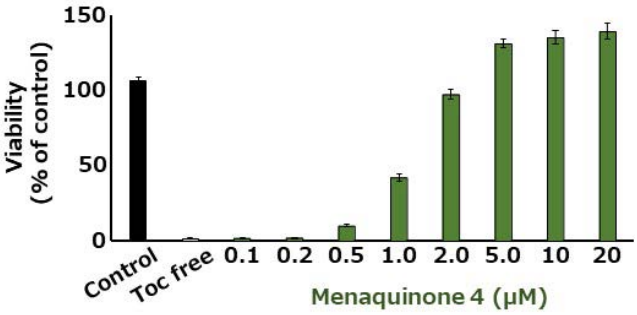


図 5 MK-4 によるフェロトーシス抑制作用

4. 今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本研究成果がもたらす意義は、学術面では脳内におけるビタミンKの重要性を明らかにすることで、新たなビタミンK研究のパラダイムを提示することに繋がる。本研究から明らかになるフェロトーシス抑制におけるビタミンK分子機構を基にビタミンK誘導体を合成し、独自の迅速なスクリーニング手法を用いればアルツハイマー病患者の新たな脳機能回復治療法の提案に繋がることが期待される。

[論文等投稿]（計 11 件）

1. Furukawa N, Chen X, Asano S, Matsumoto M, Wu Y, Murata K, Takeuchi A, Tode C, Homma T, Koharazawa R, Usami K, Tie JK, Hirota Y, Suhara Y.
Synthesis of new vitamin K derivatives with a ketone group at the C-1′ position of the side chain and their conversion to menaquinone-4.
J. Mol. Struct., **1276**, 134614 (2023)

2. Ikeda Y, Davis MI, Sumita K, Zheng Y, Kofuji S, Sasaki M, Hirota Y, Pragani R, Shen M, Boxer MB, Takeuchi K, Senda T, Simeonov A, Sasaki AT.
Multimodal Action of KRP203 on Phosphoinositide Kinases in vitro and in cells.
Biochem. Biophys. Res. Commun., **679**, 116-121 (2023)

3. Homma T, Okamoto M, Koharazawa R, Hayakawa M, Fushimi T, Tode C, Hirota Y, Osakabe N, Baba M, Suhara Y.
Exploring Novel Vitamin K Derivatives with Anti-SARS-CoV2 Activity
ACS Omega, **8**, 42248−42263 (2023)

4. Hirota Y
Elucidation of physiological functions of vitamin K in the brain and development of new derivatives for neuroregeneration.
Yakugaku Zasshi, **143**, 199-203 (2023)

5. Koharazawa R, Hayakawa M, Takeda K, Miyazaki K, Tode C, Hirota Y, Suhara Y.
Exploring 2-methyl-substituted vitamin K3 derivatives with potent inhibitory activity against the 3CL protease of SARS-CoV-2
Bioorg. Med. Chem. Lett., **100**, 129642 (2024)

6. Kofuji S, Wolfe K, Sumita K, Kageyama S, Yoshino H, Hirota Y, Ogawa-Iio A, Kanoh H, Sasaki M, Kofuji M, Davis MI, Pragani R, Shen M, Boxer MB, Nakatsu F, Nigorikawa K, Sasaki T, Takeuchi K, Senda T, Kim SM, Edinger AL, Simeonov A, Sasaki AT
A high dose KRP203 induces cytoplasmic vacuoles associated with altered phosphoinositide segregation and endosome expansion
Biochem. Biophys. Res. Commun., **680** *in press* (2024)

7. Arai T, Oshima M, Uemura M, Matsunaga T, Ashizawa T, Suhara Y, Yoneyama H, Usami Y, Harusawa S, Komeda S, Hirota Y.
Azolato-bridged dinuclear platinum(II) complexes exhibit androgen

TOPへ戻る

receptor–mediated anti–prostate cancer activity
in press (2024)

8. 小林正知、佐野翔、新井佑、村田昂平、田上晋太朗、渡邉莉菜、須原義智、廣田佳久*
ビタミンK変換酵素UBIAD1はコレステロール代謝酵素HMG CoA還元酵素の小胞体関連分解を制御する
ビタミン誌, **97**, 84-87 (2023)

9. 佐野翔、新井佑、清野航、渡邉莉菜、本間大暉、鎌尾まや、須原義智、廣田佳久*
ビタミンK変換酵素UBIAD1の変異により引き起こされるSchnyder corneal dystrophyの発症機構
ビタミン誌, **97**, 275-279 (2023)

10. 本間大暉、早川真由、廣田佳久、須原義智
脂溶性ビタミンとSARS-CoV-2に関する最近の知見
ビタミン誌, **97**, 280-284 (2023)

11. 田上晋太朗、浅野公志、中川胡桃、富岡涼、村田昂平、大島将、鎌尾まや、西川美宇、 生城真一、廣田佳久*
メナジオンは第II相薬物代謝酵素群により解毒代謝される
ビタミン誌, **97**, 518-522 (2023)

[学会発表]（計 42 件：筆頭・責任）
国際学会における発表が 6 件、
国内学会における発表が 36 件
発表学生の受賞回数が 9 件

TOPへ戻る

芝浦工業大学　　２０２３年度特別教育・研究報告集

発行年月日　　２０２４年５月３１日
発　行　所　　〒135-8548　東京都江東区豊洲 3-7-5
TEL 03(5859)7180　FAX 03(5859)7181
発 行 部 署　　芝浦工業大学
研究推進部　研究企画課
製　作　所　　株式会社　エスアイテック

ISSN 2185-7326

無断複写・転載を禁ず

TOPへ戻る