ＩＳＳＮ ２１８５-７３２６

２０２１年度

特別教育・研究報告集

芝浦工業大學

SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

はじめに

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

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

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

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

今年も２０２１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

２０２２年５月

２０２１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

ロボット技術による見守り･健康支援等スマートタウン構築(地域連携の強化)････ 2

工　　学　　部　　機 械 機 能 工 学 科　　松 日 楽　　信 人

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･･･････････ 4

工　　学　　部　　電　子　工　学　科　　村 上　　嘉 代 子

**コロナ禍を乗り切るためのシニア向け“オンライン型運動教室”の実践････

芝浦アーバンデザイン･スクール2-地域まちづくり組織への実装-･･･････････24
建　築　学　部　　建　築　学　科　　前　田　　英　寿

東京臨海地域における安心安全健康のまちづくり････････････････････････26
建　築　学　部　　建　築　学　科　　佐　藤　　宏　亮

実践的教育

金属加工経験の乏しい学生へコンピュータ支援型加工方法を教授した際の教育効果評価･･･････････････････

２．　特　別　研　究

（１）プロジェクト研究助成

着任時研究助成

高密度水素貯蔵を目指す反応機構の解明‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 45

工　学　部　機械機能工学科　佐　藤　豊　人

Self-assembled and on-surface structures of Phenanthrene and Phenanthrolene-terminated Pyrazinacenes‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 49

工　学　部　応用化学科　ゲイリー ジェイムス リチャーズ

磁気ギアを用いたEV用モータシステムの開発‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 53

工　学　部　電気工学科　相　曽　浩　平

「ニューノーマル」な大学での学びの変容‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 57

工　学　部　情報通信工学科　大　橋　裕太郎

スマートモニタリングによるABWの革新‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 61

工　学　部　情報工学科　新　熊　亮　一

Machine learning for the discovery of novel van der Waals heterostructure for energy conversion applications‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 65

工　学　部　先進国際過程　フロンズイ　マルコ

Development of Framework for Individual-based Emotion Estimation‥‥‥‥ 68

工　学　部　先進国際過程　ラオハカンワンウィット ティポーン

Paper-based disposable sensor for the detection of Antibacterial Drugs‥ 72

工　学　部　先進国際過程　アーリャシュリー

マイクロプラスチックの観察と微細化の解明‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 76

ＳＩＴ総合研究所　関　宏　範

説明可能な社会シミュレーション分析技術‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 80

システム理工学部　電子情報システム学科　後　藤　裕　介

環境適応型システム開発方法論と実証研究‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 84
システム理工学部　電子情報システム学科　久住　憲嗣

都市景観を映し出す五輪のスポーツ工学への影響～ロンドン五輪における市内仮設競技会場の事例～‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥

Synergetic modulation thermoelectric performance and mechanism exploration in metal doped Si1-xGex-based materials at near room temperature・・・・・・・・131
工　学　部　材料工学科　苗　蕾

導電性を発現するカーボン／水酸化物ヘテロ構造皮膜の創製・・・・・・・・・・・・・・137
工　学　部　材料工学科　芹　澤　愛

仮想結び目理論における不変量と局所変形の関係性の解明・・・・・・・・・・・・・・・・141
工　学　部　材料工学科　櫻井　みぎ和

分子インプリントプローブによる中枢神経内疾患モデル動物の伝達物質分泌可視化・・・・・・・・・・・・・・・・

昆虫標本の表面詳細形状および内部構造を含めたデジタルデータ化手法・・・

表面波の伝播速度による超砥粒ホイール砥粒層の縦弾性係数導出と研削特性に関する研究‥‥‥

宇宙デブリ捕獲用 MR ダンパの高速接触力制御‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥252
工　学　部　電 気 工 学 科　安 孫 子　聡 子

形状記憶合金を利用した折り紙スピーカー‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥256
工　学　部　電 気 工 学 科　重 宗　宏 毅

地盤環境のためのライフサイクル技術の開発‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥260
工　学　部　土 木 工 学 科　稲 積　真 哉

歯周病予測のための機械学習による力学的性質データ解析の検討‥‥‥‥‥264
システム理工学部　生 命 科 学 科　中 村　奈 緒 子

- 所属学科等名は、2021 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

「ロボット技術による見守り・健康支援等スマートタウン構築」プロジェクト

代表者	松日楽信人【教授】(工学部 機械機能工学科)
構成員	内村裕 (工学部　機械工学科)／安藤吉伸、吉見卓 (工学部　電気工学科)／菅谷みどり、新熊亮一 (工学部　情報工学科)／森野博章(工学部　情報通信工学科)／佐々木毅 (デザイン工学部　デザイン工学科)／志村秀明 (建築学部　建築学科)／伊藤敏夫(システム)理工学部　機械制御システム学科)

■プロジェクトの概要

ロボットネットワークでつながった　教育・研究・社会貢献！

江東区、中央区の下町地区では少子高齢化が進む一方で、人のつながりを大切にする地域でもある。このような地域では、災害対策やお年寄りの安否確認など健康管理、防犯などは深刻な課題であり、本学が研究を進めてきた共存型ロボット、遠隔ロボット技術や移動ロボットの技術を活かして、災害対策やお年寄りの安否・健康管理などを実施できるロボットネットワークのシステムの構築を図り、地域のQOL(クオリティ・オブ・ライフ)の向上を図ることを目的とする。本課題は日本の課題でもあり、世界でも共通の課題であることから、新しい地域モデルの創出に繋がるものである。これまで地域の商店街、高齢者団地、資料館などでのロボット実証実験を通して、研究者ばかりでなく多くの学生がニーズと研究との繋がりの重要性を認識することができた。研究室連携、大学連携、企業連携、地域との連携のもと活動を進める。

■FDSD(地域志向)活動の成果

多くのニーズに応えるロボットネットワーク実証！！

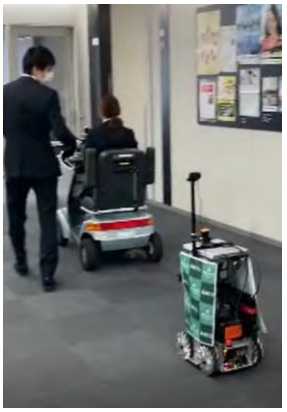
【教育】 看護の現状にロボット技術は活かせるか？
今年度の創成ゼミナール(機械機能工学科3年必修)松日楽テーマでは、上尾看護専門学校と、ロボット技術の看護応用に関して、看護学校の学生約40人と交流授業を実施した。看護実習に基づく大変現実的な内容について、現場と技術の議論ができ、双方に取って大変有益であった。最終発表(11/12)では介護機器企業も興味を持って頂き、一部を聴講参加された。授業内容についても、年々、改善できている。
　また、上尾看護専門学校で開催された防災訓練後(11/13)に遠隔ロボットのデモを実施。1時間で準備、豊洲から上尾のロボットを遠隔操作するデモなどを学生、職員に紹介でき、理解を深めて頂いた。

【研究】 コンテストでもアイデアの受賞
　日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(6月)や日本ロボット学会学術講演会(9月)、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(12月)などで、多数の研究発表を行った。システムインテグレーション部門講演会では、優秀講演5件、コンテストで奨励賞5件、特別賞1件など良い内容の発表が今年も続いた。

【社会貢献】 コロナ禍で注目される遠隔ロボットと活用
　ロボット・サービス・イニシアチブ、ベイエリアおもてなしロボットコンソーシアムとの協力で毎年講演会を実施し、一般に広く成果を公開している。8回目となるベイエリアロボティクスフォーラム(1/25)では「知識の活用とその実装」をテーマに6トピックスについて紹介して頂いた。コロナ禍でもあることからロボットの応用、とくに遠隔ロボットの利用は今後、大変期待される。オンライン開催となったが学外を中心に約70人が参加した。
　また、深川江戸資料館では8年目となるロボット展示および実験(8月)を行った。今回は東京都立大学、東芝、タケロボの協力のもと、入館からの館内でのロボットによる一連サービスを検証した。このほかにも、モビリティとの連携実験、大学生協での実証実験、海外からのロボット遠隔操作など、沢山の実証に対応した。今後は豊洲スマートシティへの展開を進めて行きたい。
　対外的なデモも増えているが、学生たちが準備から説明、撤収までをスムーズに実施できるようになった。



【上尾看護専門学校内巡回】 看護学校での自律巡回・遠隔操作デモの様子。



【見守り追従移動】
ADAM秋の成果発表会で自動運転シニアカーを自動追尾し、シニアカー搭乗者の画像をアップし、見守る。



【生協店舗内案内】
豊洲生協での案内デモの様子。どこからでも様子をみることができる。



【キャンパスツアー実験】
オンラインインターンシップ、gPBLの参加学生との4ヶ国(仏、馬、印、泰)からの「キャンパスツアー実験。

主なトピックス

■文科省ロボットショーケース（ユニバーサル未来社会推進協議会）で紹介

●文科省ロボットショーケース（7/30）にてオンラインでデモを行った。コロナ禍でもあるので、ロボットを介した施設の遠隔見学を実施した。基本になっているのは、RSNP遠隔操作技術である。芝浦工大グループ、都産技研、会津大、産技大が実験に参加。芝浦工大は深川江戸資料館内の浮世絵展を、都産技研はロボット実験施設を、会津大は先端ラボの見学、産技大は浄瑠璃ロボットの実演を行った。
RSNP: Robot Service Initiative

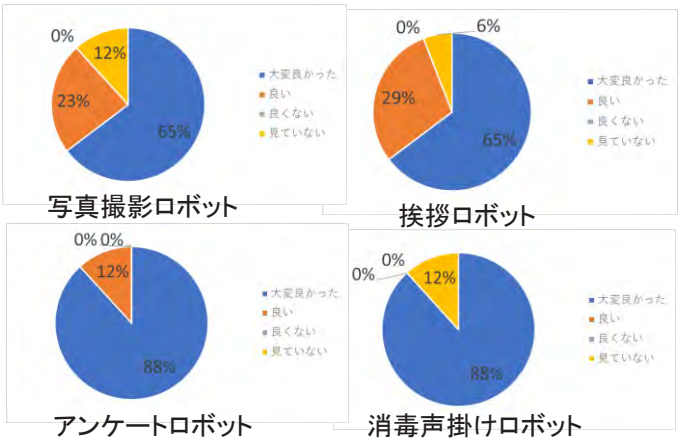


【ロボットによる施設見学デモ】 深川―テレコムセンター会津一相模原をインターネットで接続、ロボットの遠隔操作を実施した。

■ロボットとの共存を目指して

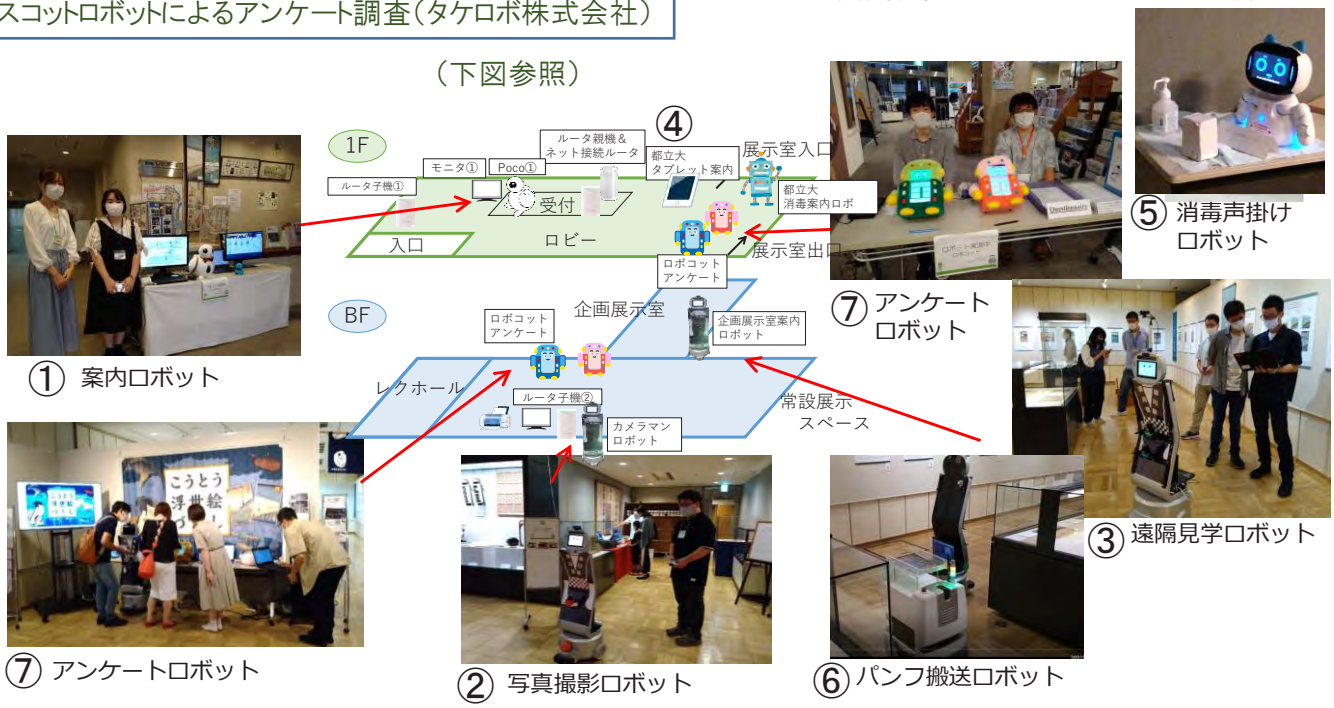
●ロボットとの共存を実証するために、一連のサービスを実施した。新しい日常が求められているときこそ、ロボットをどう社会に活用するか、新しい展示の形を求め、深川江戸資料館の協力のもと、ロボット実験を実施した。この成果を街なかへ拡張する。

① 受付案内ロボットによる入退館時の挨拶、人数確認、人流把握
② カメラマンロボットによる記念写真
③ テレプレゼンスロボットによる遠隔からの見学
④ ビーコンを使った展示案内タブレット（東京都立大学）
⑤ 卓上コミュニケーションロボットによる指手消毒声掛け（東京都立大学）
⑥ 小型移動ロボットによるパンフレット搬送（株式会社東芝）
⑦ マスコットロボットによるアンケート調査（タケロボ株式会社）



【アンケート結果（抜粋）】 スタッフ、来館者ともに評価が高かったのは写真撮影、挨拶、アンケート、消毒声掛けの4種。とくに、アンケートロボット、消毒声掛けロボットをはスタッフからも好評。

（下図参照）



【深川江戸資料館におけるロボットネットワーク実験】 ロボットによる一連のサービス：来館者、スタッフ、ボランティアとの共存

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

本プロジェクトでは地域と連携したPBL型授業において、地域の観光促進のためのサービスシステムを開発した。一つ目は、さいたま市を対象地域としてアグリツーリズムとサイクルツーリズムを掛け合わせ、メタバース要素を取り入れたVR空間でのピクニックとサイクリングの疑似体験による旅マエのプロモーションから実体験へ移行させるシステムと、二つ目は、那須塩原温泉地域の活性化を目的とし、一定層に人気のある温泉むすめのキャラクターのホログラムを活用したまちめぐりツアーを実現させるためのツールとアプリによるシステムである。さいたま市のヨーロッパ野菜を扱う「ヨロ研カフェ」によるピクニック用の新しい商品開発と家族層をターゲットとしシェアサイクルの利用者増を自然体験を通して実現させる提案は、地産地消を推進し、健康で環境に優しい移動手段を推進するSDGsの取り組みとなり、那須塩原温泉のキャラクターを活用してファン層を獲得する仕組みづくりにMR(Mixed Reality)技術を用いた提案は、地域の観光産業への理解や課題解決に貢献する技術開発を促進させる取り組みとなった。SDGsは自治体での観光振興にも広がっており、これらのプロジェクトを通してSDGsと観光の理解を深めることにもつながった。そのほか、学部・修士研究においてもニューロツーリズムの研究を行い、PRとして有効な写真の構図の比較分析のためのウェブサイト作成、観光人材の育成のためのVRトレーニングによる評価実験のためのプレ実験を行った。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】
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 」において日本人学生22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 、 日本人学生 16名 、 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6名、計 44名が本プロジェクトに参加した。前期のシステム工学特別演習では、シェアサイクリングを活用した観光活性化として①HELLO CYCLINGを利用した新システムの提案として、危険地帯の通知と回避システムの提案を行った。また、那須塩原温泉の活性化に向けて②ホログラムによるまち巡りツアーの提案を行った。後期のCIPでの提案の詳細は次ページからの主なトピックスで紹介している。



音声案内により危険を回避するナビゲーションアプリの提案。過去3年間の事故発生地点をアプリのマップ上に表示かつ音声案内で警告する。

【研究】
卒業研究と修士研究としてニューロツーリズムの研究を行った。より有効なPR方法の検討について昨年度から発展させた形で、実験用ウェブサイトを作成した。また、観光人材育成のためのVRトレーニングコンテンツを作成し、プレ実験を行った。観光PRに携わる団体から協力をいただき、ウェブサイトやSNSにおける写真の掲載に関するヒアリングにより実験素材の検討を行った(さいたま市観光国際課、広報課、さいたま観光国際協会)。また、実験用ウェブサイト用の素材の写真撮影やVRコンテンツの作成においては企業からの協力をいただいくことにより、実験を進めることができている(Modis株式会社、株式会社casaliz、株式会社明徳)。これらの研究成果は修士研究の一環として2つの学会で6件の発表を行った(観光情報学会第1回かがのと観光情報学研究会、IEEE ProComm Japan)。また査読論文1本の採録となった(Journal of Global Tourism Research)。




日本料理を別の角度からとった写真の比較実験ウェブサイトの作成。SNS等に掲載する写真として魅力的な構図を脳血流量や心拍及び主観評価により分析を行う。

【社会貢献】
那須町と本学の観光活性化に関する連携協定を7月に行った。またPBL授業において那須塩原市、さいたま市自転車まちづくり推進課、さいたま市産業創造財団の方々より指導をいただきながら、課題解決に向けてフィールドワークを行い、提案を行った。これらの成果については3月のCOC学生成果報告会で発表を行った。



VRトレーニングコンテンツの開発。VR空間内で被験者は英語による接客トレーニングを行い、クレーム等による緊張がトレーニングにより緩和されるかを脳血流量などの生体情報により分析する。

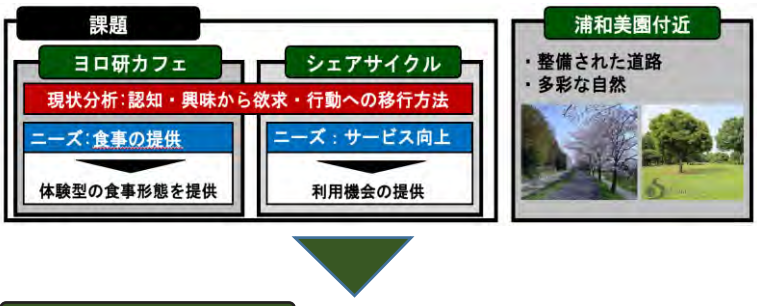
主なトピックス 【さいたま市連携】

シェアサイクリングの活用とさいたま市ヨーロッパ野菜研究会

【背景】 さいたま市の観光資源の活用
・ヨーロッパ野菜研究会(カフェジャルディーノ):ヨーロッパ野菜の地産地消・ヨロ研カフェを運営
・ハローサイクル:東京都を中心に全国でシェアできる電動自転車レンタサイクリングサービス

【現状分析およびニーズと課題】



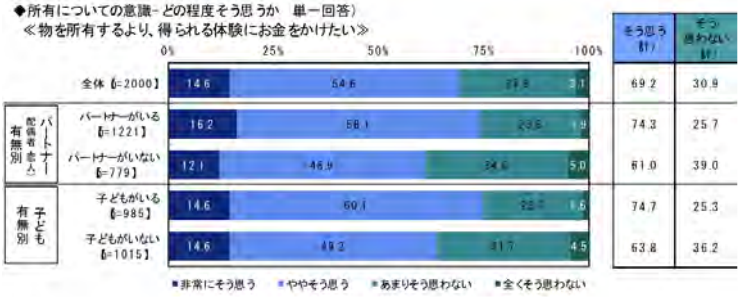


プロジェクト目的

幅広いターゲットに体験型の食事とシェアサイクルの利用機会の提供

ピクニックとサイクリングの新規事業提案

【背景および目的】
モノ消費からコト消費への変化



物を所有するより、得られる体験にお金をかけたい」と思う割合が、69.2%を占める

【新規事業提案】

このお店に行くと楽しい、美味しい、元気になれる、胸を張れる、くつろげる、など、情緒的価値が得られる事業提案

提案概要

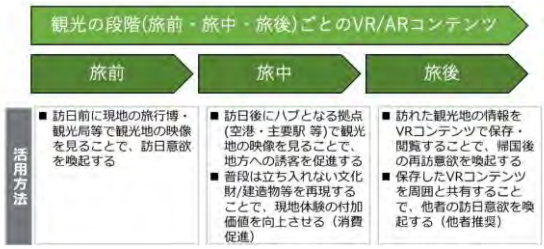


サービス手順



メタバースを活用した新規事業の集客

【背景および目的】

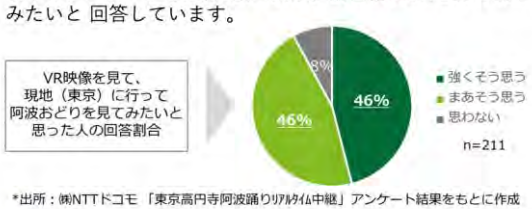


旅前のVR活用に注目



■VR有効性の検証結果

以下のアンケートでは約9割の人が、訪日前にVRを見て現地に行ってみたいと 回答しています。



*出所:㈱NTTドコモ 「東京高円寺阿波踊りリアルタイム中継」アンケート結果をもとに作成

Point 「旅前」におけるVR/AR等を活用したコンテンツの提供は、訪日意欲 喚起の施策として有効と考えられる

【システム内容】



【プロトタイプ】



主なトピックス 【那須塩原市連携】

ホログラスを利用した新しいまちめぐりツアーの提案

【背景および目的】

塩原温泉街



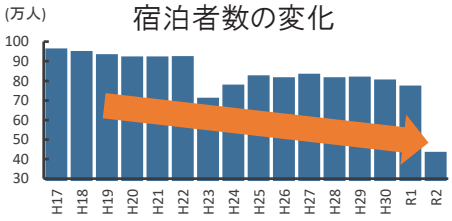
開湯1200以上の長い歴史を持ち,箒川の渓谷にそってできた温泉街

塩原温泉の現状

宿泊者数の減少

廃墟ホテルの増加

衰退



プロジェクト目的

・塩原温泉への来訪者を増加させるイベントの提案

【塩原温泉の対策】



- まちめぐりツアー

  約2時間で塩原温泉街の名所を散策するツアー



- 温泉むすめ

全国の温泉地を盛り上げるべく温泉地をモデルにした想像上の2次元キャラクター

提案するイベントの狙い

- **塩原温泉の特色を活用**
- **集客力と購買力の高いオタク**

新たな客層の獲得

【提案するイベント:88Walk】

ホログラムを頭につけてホログラムに搭載された映像と音声に従ってまちめぐりを行う

システム内容

- 安全性と臨場感が期待できるホログラスを採用
- GPSでのアプリ制御により導入コストの削減と利便性の向上

投影される映像



音声



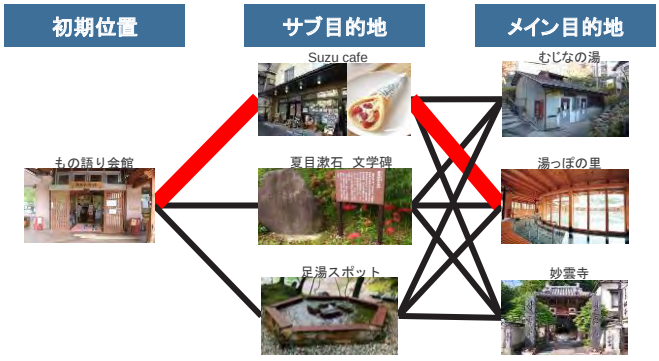
ホログラス



GPSの位置情報データを基に制御

まちめぐりツアーのルート作成について

- ランダムにルート作成
- メイン目的地に温むスポットで紹介された場所を設定:聖地巡礼効果→集客力UP
- サブ目的地に飲食店や地元の人しか知らない場所を設定:購買力UPとリピート率UP



安全性と臨場感を考慮したホログラムの開発

【ホログラムとは】

- 映像を立体的に空中に浮かぶことが可能な映像手法
- 映像を投影機器と透明なフィルムのみで作成可能



ホログラスの狙い

- **2次元キャラクターと一緒に散策体験が可能**
- **低コストでイベント開催が可能**

プロトタイプ1



- 腕時計型を採用
- スマートフォンを設置

- 映像が小さく見づらい
- 利便性が悪い

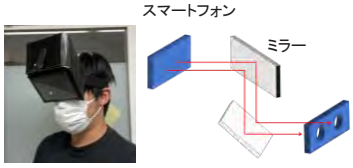
プロトタイプ2



- ゴーグル型を採用
- 小型ディスプレイを搭載

- 安全性は向上
- 映像が小さくて見づらい

プロトタイプ3



- ゴーグル型を採用
- スマートフォンを設置

- 安全性は向上
- 臨場感のある体験が可能

「コロナ禍を乗り切るためのシニア向け“オンライン型運動教室”の実践」プロジェクト

※ コロナ禍のため、申請時のタイトル 「地域活性化を目的とした多機能+ハイブリッド型シニア向け運動教室の実践」 から変更しています。

代表者	石﨑聡之【教授】(工学部 情報工学科)
構成員	磐田朋子(システム理工学部 環境システム学科)／浜野学(工学部 電子工学科)

■プロジェクトの概要

2014～2019年まで本研究室では芝浦工業大学大宮キャンパスの体育施設を活用した対面型の運動教室を開催してきた. しかしながら、COVID-19影響により, 感染リスクを伴う対面型の運動教室の実施は困難となっている. コロナ禍による外出制限は体力の低下のみならず, 認知機能の低下も懸念されている. このことから2020年度は, オンライン型による運動教室を実施し, 体力の維持向上については有効性を示すことができた. 一方で, オンライン運動教室による参加者間の交流による効果については十分な知見が得られていない.

本PJでは, 昨年に引き続きオンラインによる運動教室を実施し, 併せて運動教室後に10分間の“トークタイム”を付加することで交流の有効性について検討した. その結果, オンライン運動教室は体力の維持・向上をもたらすだけでなく, トークタイムを導入することで交友関係を広げることに有効であることが明らかとなった.

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

本PJ代表者が行ってきた運動教室では, 参加者からの“学生との交流がしたい”という要望が非常に多い. そのため、PJ実施のために数名の学生サポートを導入した.

本PJでは2名の男子学生を責任者として, 参加者への連絡・説明などの準備に加え, オンライン運動教室のサポート, 体力測定の実施, データのフィードバックなどに関わってもらった. さらに, 体力測定時にはさらに5名の学生を追加し, 万全の体制で高齢者のサポートを行った. 学生自身の責任が明確になったことで, 自発的にPJに参加することができ, 学生の成長に繋げることができた.

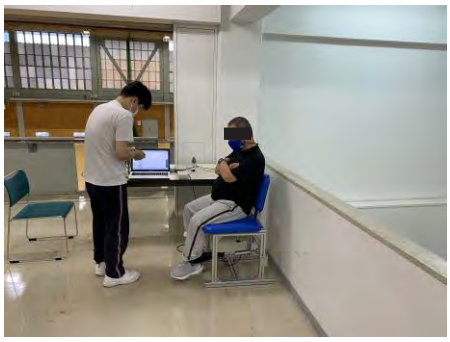


【キャプション】担当学生が参加者にPJ内容の説明している様子

【研究】

さいたま市内に在住の地域高齢者(84名, 65-88歳)を対象に週2回の運動教室を全16回行った. 本PJでは週2回のオンライン群(Z群), オンライン(週1回)+自宅での課題実施(週1回)群(ハイブリット群:Hy群)に加え、週2回自宅での課題実践グループ(H群)も募集した. 各群の運動内容は, 筋力, 持久力, 柔軟性, バランス能力などを向上するための複合的な運動プログラムとした. 運動介入期間の前後に体力測定等を行い, 定期的な運動効果について検討した.

その結果, Z群, Hy群, H群とも定期的な運動により体力の向上を示し, 運動方法の違いによる効果の差には大きな差が示されなかった.



【キャプション】脚進展筋力の測定

【社会貢献】

さいたま市の高齢化率は23.12%(令和3年), 65歳以上の高齢者 30万人を超えている. 高齢者の割合は今後, 益々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, コロナ禍においては高齢者が健康維持のためのノウハウを持ち合わせているわけではない.

本PJでは, 非対面(非接触)であっても. オンラインでの運動や自宅での課題実施などの方法を活用することで高齢者の健康維持・増進が可能であることが明らかになった. さにらオンラインにより「会話」を付加することでコミュニケーションの促進に有効であることを示すことが出来た.



【キャプション】サポート学生が関わってのロコモ測定の様子

主なトピックス

■ オンラインの有効性を高める取り組み

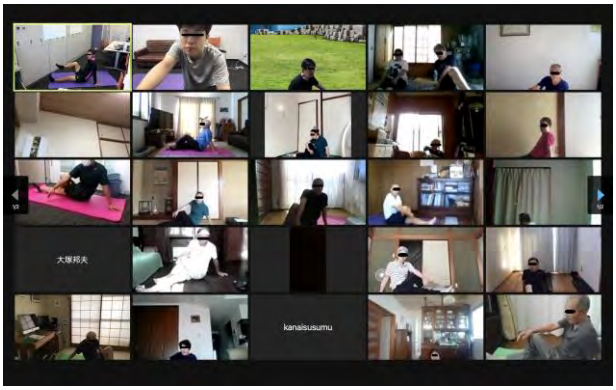
オンライン運動教室の有効性を検討するため，幾つかの参加方法でトレーニング実験を行った．

①オンライン（Z群）：週2回オンライン運動
②ハイブリット群（Hy群）：週1回　オンライン ＋ 週1回　自宅での課題実施
③課題実施群（H群）：週2回自宅での課題実施

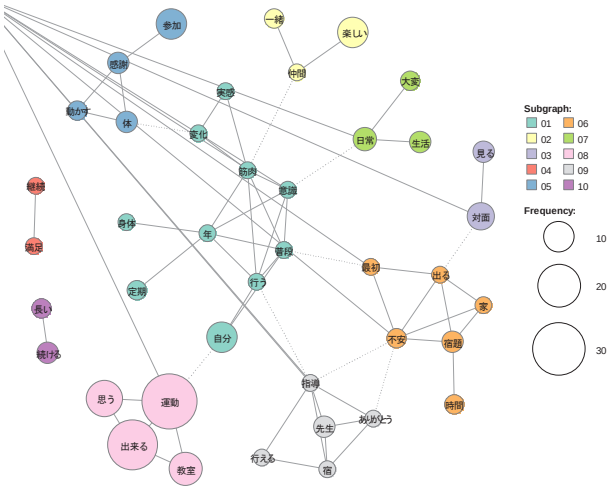
運動は，オンライン・自宅にかかわらず，ストレッチング，筋力トレーニング，ステップ運動から構成され，約60分で終了した．H群には運動方法が記載されている冊子を渡し，それを見ながら実施して貰った．

その結果，どのグループにおいても約90%の参加率を得ることができ，運動効果にも大きな差がなかったことから，トレーニングの強度・頻度・時間が適切であれば，体力の維持向上が認められることが明らかになった．

また，Z群・Hy群には運動教室後にブレイクアウトルームを用いた10分間のトークタイムを導入し，交流の効果について検討を加えた．会話のテーマについては主催者側で設定した．



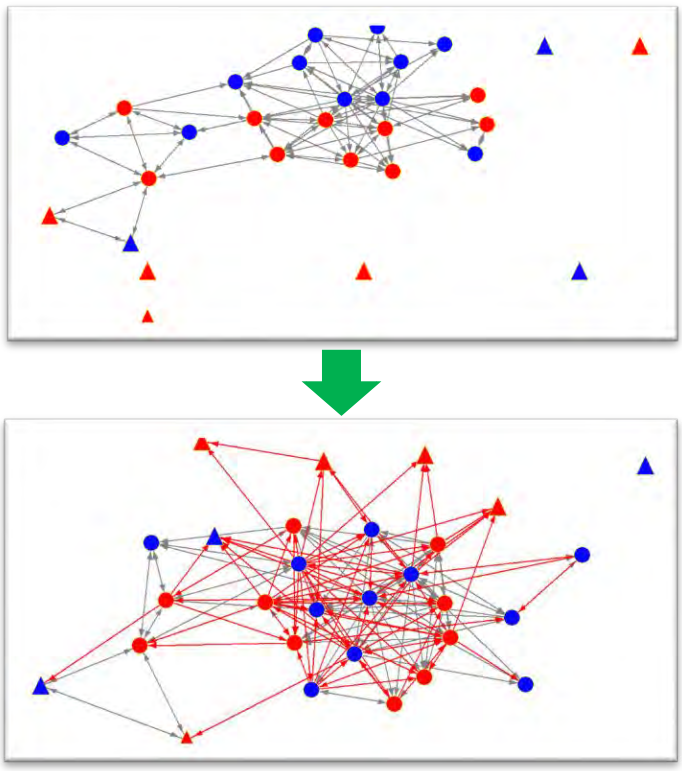
【キャプション】zoom中での運動教室の様子
（ストレッチング）



【キャプション】アンケートから得られた共起
ネットワーク

自由記述のアンケート結果をテキストマイニングを用いて分析した．左下図は「運動教室の感想」の共起ネットワークであるが，「運動」，「出来る」などが多い頻出語であった．「個人ではなかなか運動は進まないが，運動教室があると進んで出来る」，「定期的に運動することが出来て良かった」などの回答例があり，運動方法を問わず“運動の機会がある”ことの重要性が明らかになった．

一方，Z群・Hy群を対象に，トークタイムによる交流の効果をみると，2ヶ月間の交流を行うことで交友関係が広がる結果が得られた．したがって，単に運動を実施するよりも会話や交流を付加することで運動教室の有効性がより高まることが明らかとなった．



【キャプション】オンライン参加者（Z群，Hy群）の交友関係
ネットワーク図（上：運動教室前，下：2ヶ月の運動教室語）

■オーダーメイドプログラムの必要性

本PJの実施により，コロナ禍下における新たな運動実施の方法を示すことができた．一方で，参加者の年齢，性別，体力レベル，運動歴等を考慮すると，全員が同じ運動プログラムでは運動強度が十分でないことも考えられる．今回は，右脚・左脚それぞれの膝伸展筋力を測定したが，筋力に左右差がある高齢者が多いことが明らかになった．高齢者の自立歩行には，左右脚の片脚立位保持が必要不可欠とされているため，体力測定等で個々人のウィークポイントを見つけ，高齢者一人一人に適切なプログラムを作成していくことが今後の課題であると考えられる．

「豊洲スマートシティ構想との産学官民連携」プロジェクト

代表者	坂井 直道 （工学部 先進国際課程 教授）
構成員	武田 貞生(複合領域産学官民連携推進本部 副本部長)／志村 秀明(建築学部 建築学科 教授)／松日楽 信人(工学部 機械機能工学科 教授／新熊 亮一(工学部 情報工学科 教授)／大山 雄己(工学部 土木工学科 准教授)／伊東 敏夫 (システム理工学部 機械制御システム工学科 教授)／市川 学(システム理工学部 環境システム学科 准教授)／佐藤 宏亮(建築学部 建築学科 教授)／花房 昭彦(システム理工学部 生命科学科 教授)／青島 啓太(SIT総研 客員准教授)／白石 美知子(研究推進室 次長)／杉野 博之(産学官連携コーディネーター)／髙島 もも(産学官連携コーディネーター)

■プロジェクトの概要

「豊洲スマートシティ」は、2019年に全国の牽引役となる先駆的な取り組みを行うプロジェクトとして国土交通省スマートシティモデル事業の先行モデルに採択、昨年度には「スマート東京」の実現に向けて先行的なモデルを構築する事業にも選定された。多様なステークホルダーが存在し、成長途上にある豊洲で、先進的技術と都市OS活用により様々な分野のサービス・ソリューションを提供し、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。地方公共団体(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。最先端のまちづくりを目指すプロジェクトにおける、豊洲に所在する理工系総合大学として研究ポテンシャルを活用しながら連携・協働を行う産学官民連携事業である。

■今年度の動き

5月に昨年度の本学活動報告を豊洲スマートシティ推進協議会(以下、推進協議会)に向けて実施、このプレゼン以降、各プロジェクトと推進協議会との意見交換会、研究室訪問など今年度は活発な動きがあった。昨年に引き続き、コロナの影響により、対面実験ができず困難な状況もあったが各テーマにおける研究を着実に進めると共に、9月には「スマートシティ」に繋がる技術やアイデアを競うアイデアソン・ハッカソンを本学教員が中心となり、推進協議会後援のもと開催した。また、推進協議会主催の「豊洲VR観光体験コンテスト」で本学学生が特別賞を受賞、豊洲の街に対する分析と企画への落とし込みへの評価が高かった。また、推進協議会による様々な実証実験も増えてきているので、今後の具体的な連携に繋げていきたい。

■主な活動の成果

【社会貢献】

PJ-1ではコロナ禍で対面イベントが開催できない「豊洲地区運河ルネサンス協議会」と連携、オンラインで豊洲の運河をめぐる「豊洲オンラインクルーズ」の動画を制作、配信した。PJ-3ではLiDAR(Light Detection and Ranging)を用いた3次元データ取得実験を行い、産学連携によりスマートモニタリングの社会実装を進めた。PJ-4では実現可能な高齢者・社会弱者の自動移動手段を既存のシニアカーに自動運転セットボックスを追加するだけで実現、社会受容性を実証した。PJ-5ではデジタルツイン、DX時代での社会課題解決に向け、センサやカメラを用いたハードウェアアプローチとコンピュータシミュレーションを用いたソフトウェアアプローチを検討。PJ-6では豊洲2・3丁目地区まちづくり協議会と連携、豊洲地区のエリア防災の取り組みを進めるため、防災をテーマとした小冊子『まちつかいTOYOSU』を発行した。



PJ-1: 豊洲オンラインクルーズの動画を制作し、Youtubeで配信

【教育】

PJ-1では運河クルーズの動画制作により、学生達は実際に乗船して見どころのガイドを経験、豊洲の地域資源を実地で学ぶことができた。PJ-3ではLiDARで取得した3次元データを用いてアイデアソン、ハッカソンを開催、学生チームが入賞する等、学生の育成や有能な学生の発掘に貢献。PJ-4では学生の卒論・修論・博論テーマとして自動運転セットボックスの研究開発に取り組み、卒論4本、修論2本、博論1本をカバーした。PJ-5ではハードウェアを用いた実機実験及びシミュレーションによる仮想実験により、直面する課題の本質を見極める力を養った。PJ-6では豊洲地区のエリア防災をテーマとした『まちつかいTOYOSU』の編集に院生、学部生が参画。研究成果を住民の方々にわかりやすく伝える工夫を議論しながら進めた。


360度カメラを用いた空間把握技術の開発

【研究】

PJ-1では運河クルーズ動画の閲覧状況分析とアンケート調査結果から豊洲地域の情報プラットフォーム形成のための知見を得ることができた。PJ-3では複数のLiDARを用いたスマートモニタリングのリアルタイム性を向上する独自方式を考案して有効性を示し、IEEE Sensors Journalをはじめ4件の国際的な査読付論文の発表を行った。PJ-4では国内会議としては自動車技術会春季・秋季学術講演会、国際会議としてはFAST-zero、SEATUC、ICSJ(論文賞受賞)で発表。PJ-5では社会シミュレーションの技法によるシミュレーション研究の適応と、センサやカメラから得た機器情報を機械学習させる技術力を向上した。PJ-6では昨年度の研究を発展させて、被災後の建物の倒壊や火災の発生などによる遮蔽面積率を考慮した、最適な避難先の検討を行う手法について研究した。



PJ-6: 防災まちづくり冊子『まちつかいTOYOSU』発行

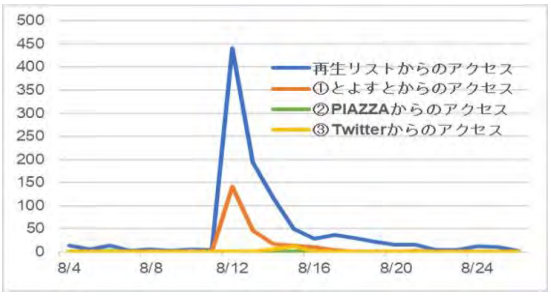
TOPへ戻る

主なトピックス

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

― 豊洲オンラインクルーズ ―

YouTubeでオンデマンド配信した動画「豊洲オンラインクルーズ」への参加を、情報発信媒体「とよすと（地域密着ウェブサイト）」「PIAZZA（地域SNS）」「Twitter」で呼びかけた。そしてYouTubeチャンネルアナリティクスのデータを用いて、各情報発信媒体と動画閲覧数との関係を分析した。またGoogle Formを用いたオンライン上でのアンケート調査を行い、動画の評価などを明らかにした。
結果として、情報プラットフォーム形成のためには、情報発信力が極めて高い地域密着ウェブサイト「とよすと」や、PIAZZA等での情報発信力が高いアカウントなどと連携すべきであることを明らかにした。



各情報発信媒体からの動画へのアクセス数の推移：「とよすと」が記事を投稿した8/12にアクセス数が急増加し、8/15までのアクセス数は、調査期間内全アクセス数の8割を占めた。

PJ-2 「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」 松日楽 信人

歩行者ナビとロボットとの連携に関して関連企業と意見交換を行い、APIを介した情報交換ができることを目標とした。前年度にナビを体験させて頂き、その後、11月には研究室のロボットを見学して頂くなど意見交換を行った。
また、実験環境の候補としてメブクス豊洲での豊洲場外マルシェを見学した。実験準備として、実験環境にすぐにロボットを持ち込み地図作成など一連の準備が短時間でできるように、遠隔操作ロボット環境（遠隔操作プラットフォーム）を整備した。これを確認するために、羽田イノベーションシティでのデモを11/27に実施した。ナビのAPIに対応できるようにすることで、移動地点での案内などが可能となる。



【遠隔操作プラットフォームによるロボットデモ】 オンラインインターンシップ中のフランスの学生からも操作を実施した。

PJ-3 「未来都市に向けたスマートモニタリングを実現するネットワークAI」 新熊 亮一

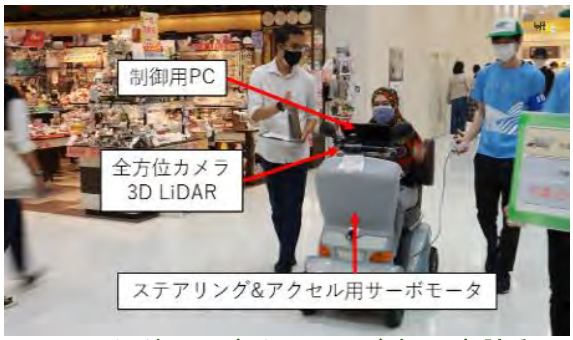
半年以上にわたり、大学施設、公道の車道、交差点（横断歩道含む）、駐車場など国内10地点において、LiDAR (Light Detection and Ranging) を用いて3次元データを取得する社会実験を行なった。
スマートモニタリングの社会実装のための計画立案とデータ利活用促進のため、取得した3次元イメージセンサを用いて2021年9月に「アイデアソン」「ハッカソン」を開催した（主催: 芝浦工業大学他、共催: エクサウィザーズ他、後援: 京都大学桂図書館、豊洲スマートシティ推進協議会他、チーム数（「アイデアソン」10チーム、「ハッカソン」7チーム）。
結果として、3次元イメージセンサを用いたスマートモニタリングの応用先となりえる多くの事業アイデアを得ることができた。
3次元データから車両などを検出する深層学習を用いたエッジコンピューティングシステムを開発し、下図の例のような結果が得られた。



データを取得した交差点と深層学習による検出結果の例

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

シニアカーを完全自動運転化し、利用者の出発地点（最寄り駅を想定）から目的地点（駅からショッピングモール内の目的店舗等）まで、自動で安全に利用者を搬送することを目指す。
2021年度実施事項は、
●実証実験として9月中旬に1週間、さいたま市と関連企業の協力で、コクーンシティ・さいたま新都心駅での自動走行を一般公募者に試乗（26人）いただき、社会受容性を評価（シニアカー追加価格10万円実証）
●インフラセンサとの連携として、11月中旬に豊洲キャンパス内1階⇔4階教室まで、エレベータにも自動搭乗し、コンシェルジュ・ロボットとも協調作業するデモを実施し、一般希望者にも試乗いただいた。

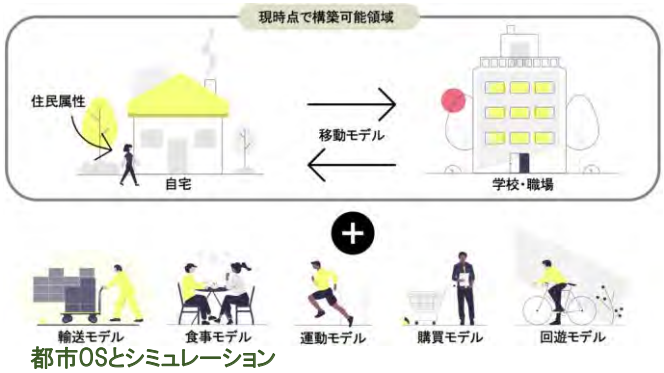


ショッピングモール（コクーンシティ）内で一般試乗希望者を載せて自動走行する様子

主なトピックス

PJ-5「豊洲におけるシステム理工学的課題解決」 市川 学

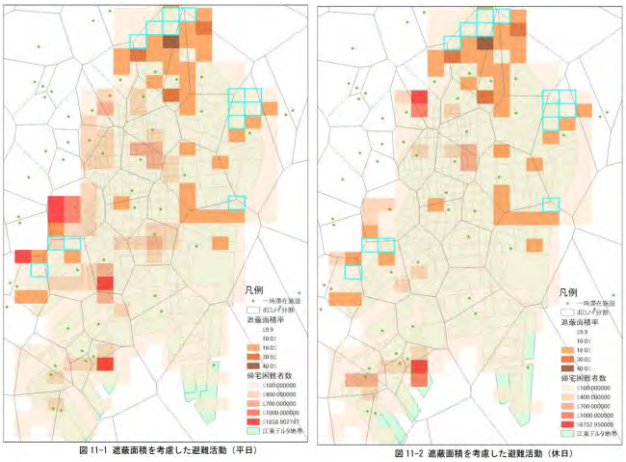
豊洲における課題を解決すべく、1.ハードウェアを活用したデータ分析 2.仮想豊洲シミュレーションモデルの構築を進めた。1.では、IoTとAIを活用したスマート保育園のアイデア実現に向け、試行実験として研究室を対象とした学習環境の可視化を行った。カメラを用いた人物検知と滞在時間推定、センサを用いた学習環境の分析を実施した。(次年度以降、行動推定を行うことで、実対象での利用に向けた提案を試みる。)2.では、仮想豊洲シミュレーションの環境構築を進めた。仮想豊洲を作ることで、シミュレーション内でのログデータを取得できるため、都市OSと共に活用することでエビデンスベースの施策やサービスの提案ができるようになる。本年度は住民の飲食モデルが反映できる土壌を整えた。



都市OSとシミュレーション
都市OSとエージェントベースシミュレーションで実現する仮想社会

PJ-6 「ビッグデータを活用した避難者・帰宅困難者推計と災害時連携体制の構築」 佐藤 宏亮

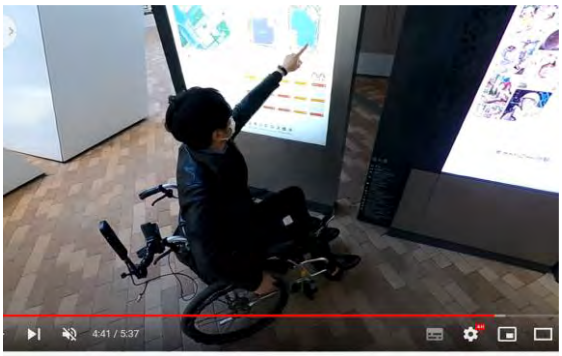
災害時には江東デルタ地帯全体において多くの帰宅困難者が発生することが予想される。江東デルタ地帯では、地震時に建物倒壊や火災の発生の危険があり、木造密集市街地が広がっており、移動困難なルートが発生することが予想される。そのため、最適な避難経路の検討が必要となる。
本研究では、帰宅困難者の一時滞在施設への移動経路を検討する上で、市街地の建物倒壊等による「遮蔽面積」を考慮した避難活動をシミュレーションすることで最適な避難先について検討を行った。



遮蔽面積を考慮した避難活動
平日(左)、休日(右)

PJ-7 「豊洲「都市型道の駅」の障がい者モビリティ評価に関する研究」 志村秀明, 花房昭彦, 山口純, 青島啓太

障がい者による公共交通機関の移動経路及び課題を可視化・分析する手法を検証した。本年度は東京BRT：（仮）ミチノテラス豊洲停留所～新交通ゆりかもめ：市場前駅間の経路で実験を行った。
車いす利用者、視覚障がい者を想定した移動経路を全方位カメラ等で撮影し、経路及び課題を可視化・分析した。また撮影した動画をYouTube等で共有・ライブ配信することにより現場に直接参加しない障がい当事者からも意見を求められる仕組みの構築を図った。
実験で得た知見はミチノテラス豊洲事業主である清水建設に共有され、次年度以降の音声ナビゲーションシステム実装計画に反映される予定である。



豊洲MiCHiの駅停留所周辺の経路やバリアを検証した

研究協力:㈱ヤマグチ　山口　純　（元SIT総研 客員研究員）

「豊洲、大宮地区の車載センサを応用した交通安全対策活動」プロジェクト

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

■プロジェクトの概要

近年，ACC(Adaptive Cruise Control)やLKA(Lane Keeping Aid)などの機能を搭載した自家用車が公道を走るようになり，自動運転技術用のレーダが普及し始めている．しかし，インフラを利用した交通安全技術は開発途中で実装はされていない．そこでインフラに車載用レーダを設置し交通安全システムとして、歩行者保護システムを開発する．芝浦工業大学大宮キャンパス付近は狭い道路が多く，交通量も多いため交差点での歩行者事故の発生が多い．そこで，交差点での歩行者事故を減らすためレーダを用いた歩行者保護システムを企業と連携し,光る横断歩道を提案する．

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

【教育】

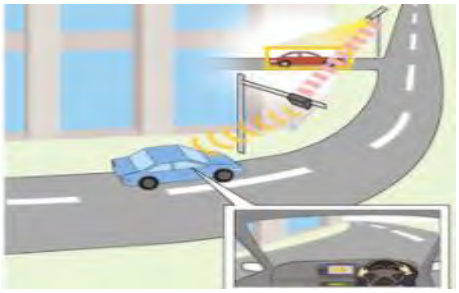
近年，高齢化社会の到来によりドライバの高齢化などが進み，安全運転に対する意識の高まりから，多くの運転支援システムが生み出され注目を集めている．そのような先進運転支援システムの中でレーダシステムは多く利用され，急速に普及している．学生がこれらレーダシステムの動作原理から応用にいたるまで、知識と理解を深めることができた．また，対象デバイスの知識だけでなく，それを必要とする社会背景や提案システムに必要な状況を調査して社会ニーズを解析できるようになった．そして，これらの調査研究をチームメンバーと協力企業との調整も行い活動することによって，コミュニケーション能力やチームマネジメント能力も向上した．



【先進運転支援システムの将来像】

【研究】

自動車それぞれに安全対策するのではなく，車載レーダを交通インフラに設置し，社会全体が活用できるような歩行者保護システムの開発という視点で研究活動を推進した．従来の開発事例として，インフラと自動車の協調によりドライバへ車両周辺の危険要因を知らせ，交通事故の削減をはかるDriving Safety Support Systems (DSSS)がある．DSSSはインフラ設置の監視カメラにより通行車両を検知し，ドライバの認知･判断の遅れや誤りによる車々の交通事故を未然に防止することを目的とするシステムであるが普及には至っていない．そこで，本プロジェクトではインフラ側にレーダに応用するという視点から，歩行者とドライバへと注意喚起を行う光る横断歩道を提案した．



【既存のドライバへの情報提供DSSS】

【社会貢献】

大宮地区において，狭路で交通量が多い地域で起こる歩行者事故の特徴を分析し，インフラから警告することで事故を軽減する光る横断歩道を提案した．これらは，より地域の交通安全に貢献するものである．大宮地区では事故特性の分析のため，交通事故発生状況マップからの事故発生場所の実地の調査を行った．調査で分かった，大宮地区での交差点では見づらい交差点が多く存在しており，他車両の認識に遅れ事故につながるといったことが考えられる．さらに関連企業等と直接意見交換する場を設け，交差点における事故対策が有効であることを確認し．今後も意見をいただくこととした．

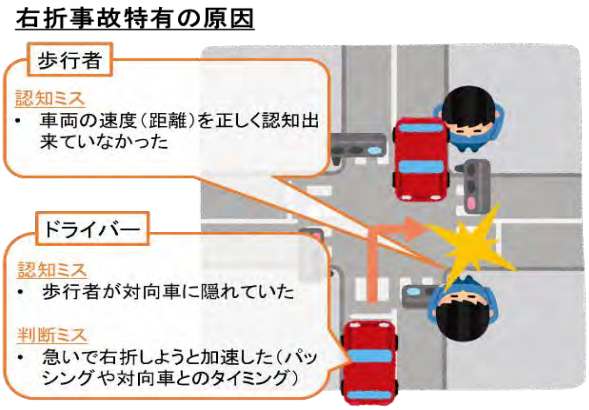


【光る横断歩道】

主なトピックス

■交差点右折事故の内部モデル分析結果

交通事故を外部要素からではなく，ドライバーや歩行者の内部要素から分析を行った．人の行動は認知･判断･操作の3要素から成り立っている．交差点下ではドライバーの視覚による歩行者認識や，歩行者の聴覚による音声付信号機の音認識となる．ドライバーはハンドルを右に切るべきか左に切るべきかを判断し，歩行者は横断歩道を素早く渡るべきか，停止すべきか判断する．ドライバーではステアリング操作やアクセル，ブレーキの踏み込みとなり，歩行者においては脚を動かし歩行を行うこととなる．交差点の右折事故の場合は左折と大部分が一致するため，右折事故内部モデルは右折特有の事柄のみを記述する．



【右折特有の事故内部モデル】

提案システム概要

提案するシステムはドライバへの認知補助と交差点全体の監視システムに分けられる．交差点に設置したセンサが交差点全体を監視し，歩行者や車両などの総合的な情報から横断歩道を赤く点滅させるかを判断する．交差点に進入するドライバはライトの点滅情報から周辺に危険が迫っているかの認知を得ることができ，安全な走行が可能となる．

このシステムが有用であると考える根拠として，人間が持つ「注意の捕捉」という習性と，色によるアフォーダンスが挙げられる．ドライバが歩行者を発見してから停止するまでの行動において3ステップの内部モデルが形成される．従来の流れではまず「認知」としてドライバが歩行者を発見し，その結果“止まるべき”という「判断」を行い，ブレーキを踏むという「操作」に移していた．一方提案システムでは，赤という色を通じてドライバに対して本能的に危険を認識させることで，判断を経由せずにドライバに停止のための操作を起こさせることが期待できる．赤色に点滅するライトを「認知」して，直ちにブレーキの「操作」をさせる狙いである．

■ 実験概要

被験者の状態を計測するため脳血流計，アイマークレコーダを装着し，ハンドル･ペダル操作を計測するためハンドコントローラーを実験車両に搭載した．実車走行に近い環境で効果検証を行うため，左ハンドル車の助手席に疑似ハンドルと疑似ペダルを取り付け，右ハンドルを模した擬似コックピットで被験者は操作を行った.実験協力者は本学学生8名で，夜間，大宮キャンパス5号館裏手のT字路で行った．

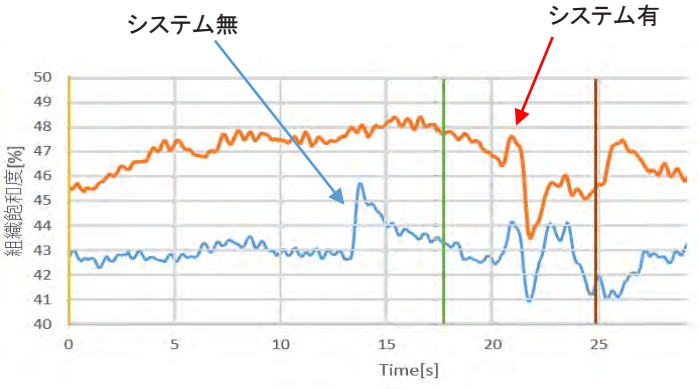


【実験車両の内装（左が運転席，右が助手席）】

■ 実験結果

注意監視システム無では交差点突入後の脳血流は下降傾向にあるのに対して，注意喚起システム有の方では交差点進入後，システムが作動することで酸素化ヘモグロビンの量が増えていることが分かった．これは，ドライバが注意喚起システムから危険であると警告されたことによる集中度の向上によって起こり，注意喚起システム作動後にドライバの集中度が上がったことが確認された．

提案システムによって交差点内でのアクセル量が0.9倍，ブレーキ量が3.8倍となった．アクセル量が減り，ブレーキ量が増えたことにより，被験者が交差点内を慎重に走行を行っていることが分かった．特にブレーキ量が大幅に増加，提案システムの有用性を確認できた．



【システム有無の脳血流の差】

豊洲、大宮地区の車載センサを応用した交通安全対策活動

機械制御システム学科　　伊東　敏夫

共同研究者
機械制御システム学科　　長谷川　浩志

１．まえがき

日本の交通事故件数は年々減少傾向にある．これはシートベルトの義務化や，安全システムの導入などが要因だと考えられる．現在ある車両の安全システムとして，追突被害を軽減または回避することを目的とした衝突被害軽減ブレーキや，エンジンの出力を抑え，数秒間急発進を抑制するペダル踏み間違い時加速抑制装置などがある．しかし，それでもいまだ事故件数は多いのが現状となっており，2019 年には約 38 万件の事故が発生している．このような背景から交通事故を減らすシステムの提案が必要であると考える．

事故発生状況を場所別にみると，交差点で発生した事故は約 13 万件であり，事故全体の 43%を占める．交差点付近も含めると全体の 56%にもおよぶ．また，死者・重傷者割合においても，交差点での死者・重傷者割合は高くなっている．以上から本研究では交差点での交通事故を減らすことを目的とする．

また，既存の事故防止システムとして，様々な安全システムが開発されている．これらの多くは車載システムであるが，車載システムは認識できる範囲に限界があり，情報量や死角の多い交差点では十分な安全を確保することが難しい．さらに，すべての車両に安全システムを搭載することは困難である．これらの観点から，本研究では交差点におけるインフラ型の事故防止システムを提案する．

２．研究計画

交差点での事故を防止するために，インフラ型の注意喚起システムを提案する．本システムは図 1 に示すようにドライバへの認知補助と交差点全体の監視システムに分けられる．交差点に設置したセンサが交差点全体を監視し，歩行者や車両などの総合的な情報から横断歩道を赤く点滅させるかを判断する．交差点に進入するドライバはライトの点滅情報から周辺に危険が迫っているかの認知を得ることができ，安全な走行が可能となる．

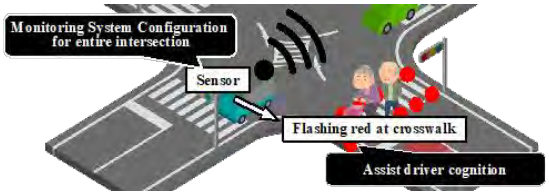


Fig.1 Model of the proposed system

本システムはライト点滅によってドライバの認知にアプローチする．運転時には認知情報のうち視覚からの情報が 90%を占めることが報告されている．そこで，本システムでは，人の認知特性の中でも視覚に関する特性を利用する．

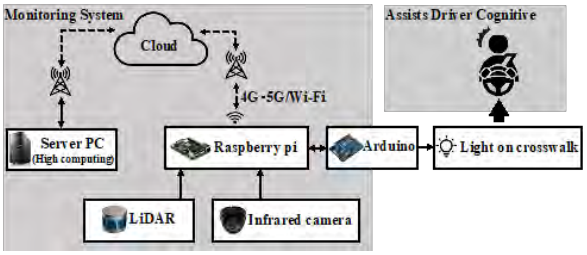


Fig.2 Monitoring System Configuration

TOPへ戻る

図 2 に監視システムの構成を示す．監視システムに使用するセンサは LiDAR(Light Detection and Ranging)と赤外線カメラである．センサデータの取得には Raspberry pi を使用し，取得されたデータはクラウドを経由してサーバーPC に送られる．サーバーPC は，受け取ったセンサデータを元に交差点全体が危険であるかどうかを判断する．判断した結果は再び Raspberry pi に送られ，判断結果を元に Arduino が横断歩道のライト点滅を制御する．

監視システムのセンサには LiDAR と赤外線カメラを採用した．交差点では接近してくる物体の歩行者,自転車,車両といった種類や，その位置で状況が大きく変わる．つまり，危険の判断をするためには物体の種類と位置の情報が必要となる．

カメラはパターン認識を得意とし，物体の種類の判別に適している．一方，LiDAR やレーダーなどは高い距離精度を持ち，物体の位置情報の取得に適している．これらより，一般的に物体の種類の判別にはカメラが使用され，物体の位置の取得には LiDAR やレーダーなどの測距センサが使用される．

本システムのセンサを検討する上で重要となるのが夜間での使用の可否である．時間帯別の交通事故の死者・重傷者割合では，夜間における死者･重傷者割合が高くなっている．このことから，夜間でのセンサ性能の高さが不可欠であるといえる．しかし，通常のカメラは夜間での使用が難しく，物体の種類の判別が困難である．そこで，物体の種類を判別するためのセンサとして，赤外線カメラを採用する．赤外線カメラは夜間でも撮影が可能であるため，物体の種類の判別も可能になると考えられる．また，LiDAR や RADAR などのアクティブセンサは昼夜を問わず使用することができるため，物体の位置の取得は可能である．

以上より，本システムには赤外線カメラと LiDAR を採用した．これらのセンサを用いて製作したセンサシステムの外観を図 3，センサの仕様を表 1，2 に示す．

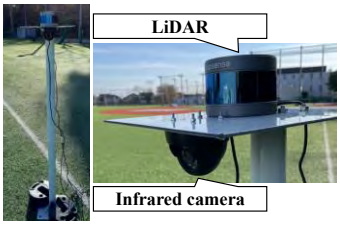


Fig.3 Sensor system

Table 1 Specification of infrared camera

Model number	ELP-USBFHD05M T-DL36-J
Image sensor	1/3"CMOS V2710
Resolution	1280*720
Frame rate	30fps
Infrared wavelength	850nm
Infrared effective distance	25m

Table 2 Specification of LiDAR

Model number	RS-LiDAR-16
Light wavelength	905nm
Accuracy	±2cm
Distance range	0.2m to 150m
Vertical angular range	+15°～-15°
Horizontal angular range	360°
Scan speed	10Hz

製作した監視システムが実環境において動作することを確認するため次の予備実験を行った．実際の交差点において交通状況のデータ収集を行い，収集データに対して監視システムが正常に動作することを確認するためである．

埼玉県さいたま市見沼区東大宮 5 丁目出戸橋通り交差点において歩道側から交差点に向けてデータ取得を行った．この交差点では過去 4 年間に 8 件の負傷事故が発生している．データの収集は昼間と夜間の 2 回行い，昼間は通常カメラモード，夜間は赤外線カメラモードを使用した．また，安全に配慮し，赤外線ライトなどの車への照射は禁止，車道や歩

TOPへ戻る

道などへ固定する必要のある設置物などを禁止としてデータ収集を行った．

予備実験により監視システムが実際の交差点においても動作することを確認した．この実験により，下記課題を発見することが出来た．

・交差点では，多くの車両と歩行者が同時に往来するため，交差点の対面側にいる歩行者はその前を通る車両によって隠れてしまい，検出できなくなる．

・車両のライトによって逆光が発生し，車両・歩行者ともに検出が困難となるシーンあり．

３．計画の進行状況

提案システム全体の有用性を検証するために，実車を用いた被験者実験を行っている．実験協力者は普通自動車免許を所持している本学学生 13 名である．本実験は提案システムの夜間での効果の検証を目的としていたため，実験時間は日没後とした．実験では，大学構内に疑似交差点を製作し，右折時のドライバの生体情報と運転操作量を取得した．また，本疑似交差点においても監視システムが動作することは事前に確認を行った．実験は注意喚起システムの有無で 2 回実施した．実験では，疑似交差点を右折してもらい，システムの有無でドライバにどのような違いが生じるかを検証した．

なお，本実験は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認を受けている．実験協力者に対して事前に実験内容や個人情報保護等に関する説明を行い，すべての実験協力者から同意を得た上で実験を行った．

図 4 にアイマークレコーダーとハンドコントローラを示す．実験ではこれらの機材を使用して眼球運動の生体情報と運転操作量のデータを取得した．

実車走行に近い環境でタスク効果検証を行うため，運転支援システム研究室で製作した擬似自動運転体験車を今回の検証用に改良して使用した．今回の実験で使用した実験車両では左ハンドル車の助手席に疑似ハンドルと疑似ペダルを取り付け，右ハンドルを模した擬似コックピットを搭載した．この車両は，実際に運転するのは左側の運転手であるため，助手席に乗車すると擬似的な運転を体験することが出来る．



Fig.4 Nac eyemark recorder and Steering controller　(logicool: LPRC-15000d)

交差点右左折時に歩行者との事故が起きる要因として，交差点進入時までサッケードが頻繁に発生するのに対し，進入時はサッカードが減少してしまうことが問題として挙げられる．サッカードとは安全確認時に伴う眼球運動のことであり，眼球の移動量が多いことは安全確認を多く行い走行していることを意味する．そこで，実験車両に搭乗した被験者の眼球の運動量を計測し，交差点でのライトの有無によって眼球の運動量が変化するかどうかの解析を行った．

被験者はアイマークレコーダーを装着し，カメラで眼球の映像を取得する．映像は一度に片目しか撮影できないため，本実験では右目の撮影を行った．そして撮影された映像は図 5 のようになる．運動量を取得するため図 5 のように瞳孔をトラッキングし，被験者の単位時間に対する運動量を算出した．交差点のライトが存在するときとしないときの単位時間に対する運動量の比較を行った．評価する動画は実験車両の交差点進入時からライトが見えなくなるまでの区間で行っている．また，データ取得は 13 名に対して行ったが，ノイズや撮影位置のズレなどの要因により解析を行ったのは 11 名となる．

図 6 に一人の被験者の交差点内での眼球移動量を示す．注意喚起システムがないときで

TOPへ戻る

は，目線は固定され右折時の大きな目線移動



Fig.5 Eye image and pupil detection

のみが目立つが，注意喚起システムがあることで常に周囲に目線を向けているのが分かる．さらに，解析の行えた被験者 11 名の眼球移動量において t 検定をおこなったところ注意喚起の有無で 5%水準での有意差が確認された（図 7）．

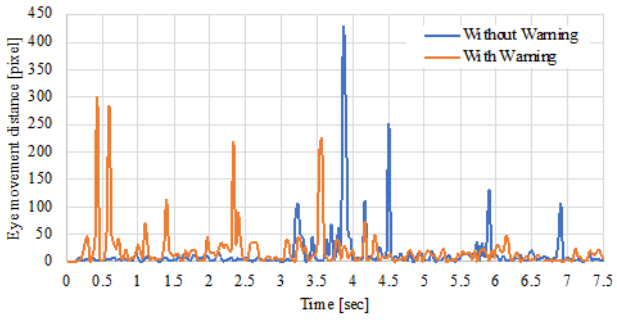


Fig.6 Eye movement example in intersection

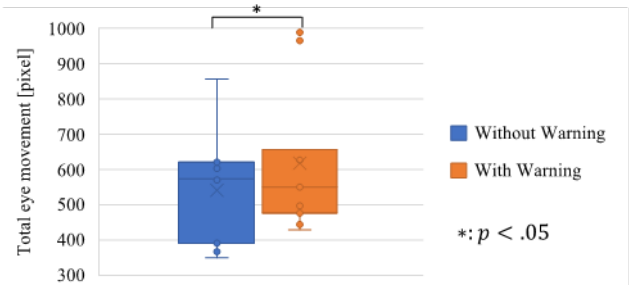


Fig.7 Eye movement with/without warning

被験者は疑似コックピットで運転操作を行った．注意喚起システムによってより安全に運転を行ったかどうかをブレーキ量から確認する．ブレーキ量の解析には，交差点内での各数値の積分値を用いた．図 8 に一人の被験者の交差点内でのブレーキ量を示す．被験者は，注意喚起システムがあるときは，ないときと比較し，ブレーキを多く踏んでいるのがわかる．また，被験者 13 名のブレーキ量において t 検定を行ったところ注意喚起の有無で 5%水準での有意差が確認された（図 9）．

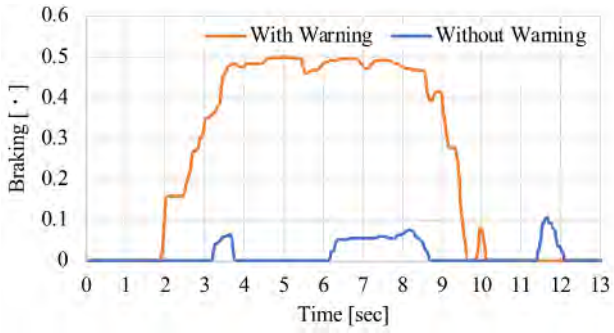


Fig.8 Braking in intersection about one subject

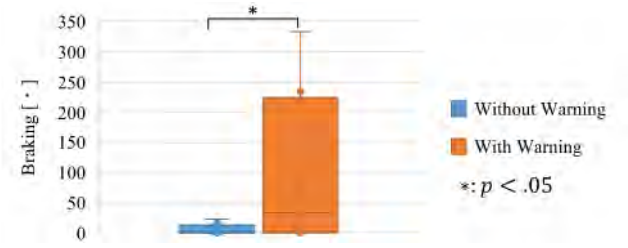


Fig.9 Amount of braking in intersection

眼球運動では，注意喚起システムによって眼球移動量が増加することが確認された．交差点にライトを用いることによって被験者の交差点周辺の確認がより入念に行われ，安全に走行したと言える．また，注意喚起システム有りの場合は無しの場合と比べてブレーキ量が増加した．このことより，提案システムによって被験者が交差点内をより慎重に走行を行ったと言える．注意喚起システムを使用しなかった場合にブレーキを踏まなかった被験者が，提案システムがあった場合にブレーキを踏んでいる例もあり，提案システムによってドライバが交差点内でより安全に走行することが示唆された．以上の結果から提案システムによって，ドライバがより安全な走行を行う傾向が見られた．したがって，提案システムによって交差点での交通事故防止が期待される．

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の予定としては，被験者数の増加や，脳波や脳血流などの他の生体情報を行う．また，より実環境に近い環境での実験を検討中である．学会発表予定としては，自動車技術会 2022 年度学術講演会春季大会で発表予定である．

TOPへ戻る

「Connected NASUの実現に向けたサービス・モビリティ創生」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）／後藤裕介（システム理工学部 電子情報システム学科）／市川学（システム理工学部 環境システム学科）／村上嘉代子（大学院 システム理工学専攻）

■プロジェクトの概要

地域課題：Connected NASUの構想実現に向けた取り組みを，地域と連携して学部総合研究とプロジェクト演習（システム工学特別演習，システム工学演習C，クロスイノベーションプロジェクト，CIP）で実施した．また，CIPの拡大版，CIPeXを那須町とキングモンクット工科大学トンブリー校をつなげ，ハッカソン&アイデアソンをサイバーフィジカルPBLとして実施した．さらに，実学指向のアントレプレナー教育を本学OBと連携してシステム工学特論で実施した．

地域課題の解決を地域企業，自治体，協議会と一緒になって進めた結果，「芝浦工業大学と那須町で観光活性化の協定を締結する」に至った．産官学の課題に対するアイデアをかたちにすることで，社会に積極的に参加し，自己の生活とキャリアの両輪をうまく回し，社会価値創造のために率先して前進できる能力（アントレプレナーシップ）を育成できたと考える．



メタバース環境下でのサイバーフィジカルPBL空間

■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，同演習C，CIP，CIPeX，CEP@FCT/UNL，創生設計，同演習，総合研究にてConnected NASUに関連する様々なプロジェクトを総合的に実施．創生設計では，魅力的なキックスケータを企画，総合研究では，マイクロモビリティRinGoの2次試作を地域と協働で実施．CIPeXにて，モビリティサービスを那須町関係者に披露．システム工学特論では，起業家，コンサルティング分野のOBと連携して，「共感：構想を熱く語る」といったアントレプレナーシップのコンピテンシーをマイインドチェンジのステップとして実施．PBLにアントレプレナーシップ教育を組合わせた新教育プログラムを試行できた．



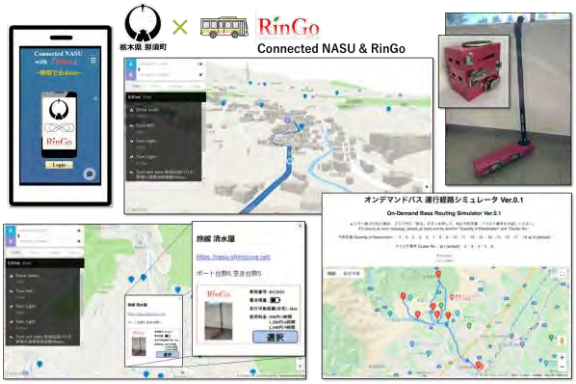
創生設計，同演習での新たな組合せによるキックスクータ

CIP: Cross-Innovation Project, CEP: Cross-cultural Engineering Project

【研究】

ラストマイルの移動手段であるマイクロモビリティ，RinGoを川口市の中小企業と連携し2次試作．那須町関係者に公開．また，このRinGoのビジネスモデル（コスト積算含む）を産学連携ビジネスコンペティション2021を通じて実施．

MaaSベースのサービス実装のために，オンデマンドバス運行経路シミュレータ，RinGoのためのMaaSアプリケーションのプロトタイプを，Mapboxを利用して作成．また，ワンウェイ型カーシェアリングのダイナミックプライシングの可視化，自動運転車を利用したカーシェアリングについても研究を実施した．これらの研究を統合することで，Connected NASUのステークホルダーに対する便益配分シミュレータを産学官連携で構築可能になると考える．

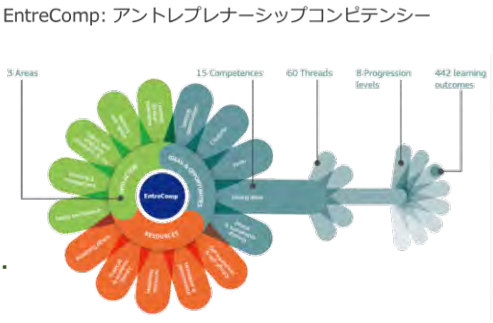


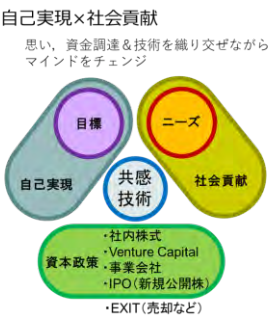
Connected NASU & RinGoを製作，那須町関係者に披露

【社会貢献】

那須町と連携して実施してきた活動の成果として，芝浦工業大学と那須町間で観光活性化の協定を締結した（2021.7.8）．この協定締結では，課題解決型教育を活用した課題抽出とその解決，研究・社会実装のための産学官連携，知的創造の担い手となる人材育成・活用，未来の職業人材育成のためのSTEAM教育などを連携していくことになった．

研究活動助成のプロジェクト，Connected NASUとRinGoの成果物をCIPeXで公開した（ホテルサンバレー那須，2021.12.16）．また，CIPeXで実施したハッカソン＆アイデアソンの発表会は，下野新聞（2022.1.5）で取り上げられた．那須町開催の第4回プレゼンフェスティバルin那須（2022.2.5）でDXを発表した．



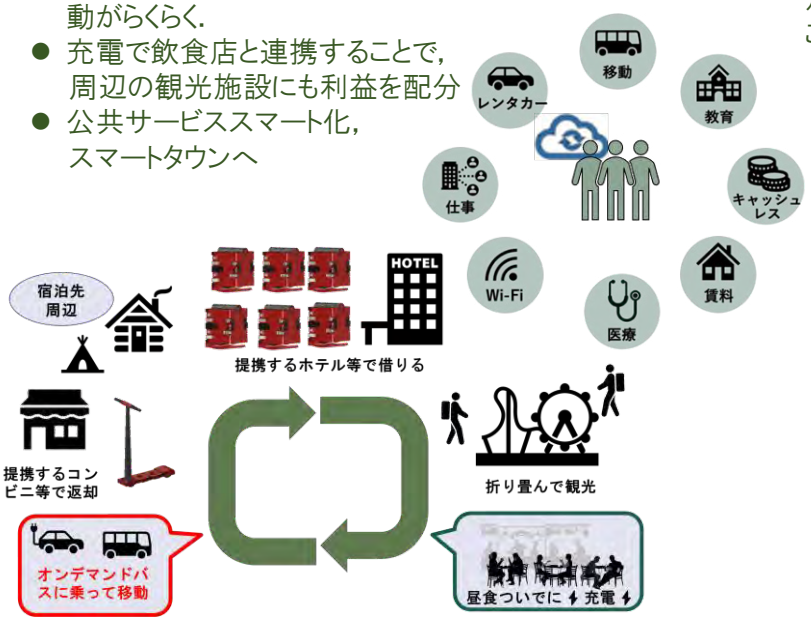


実学志向のアントレプレナー教育

主なトピックス

■Connected NASU & RinGo

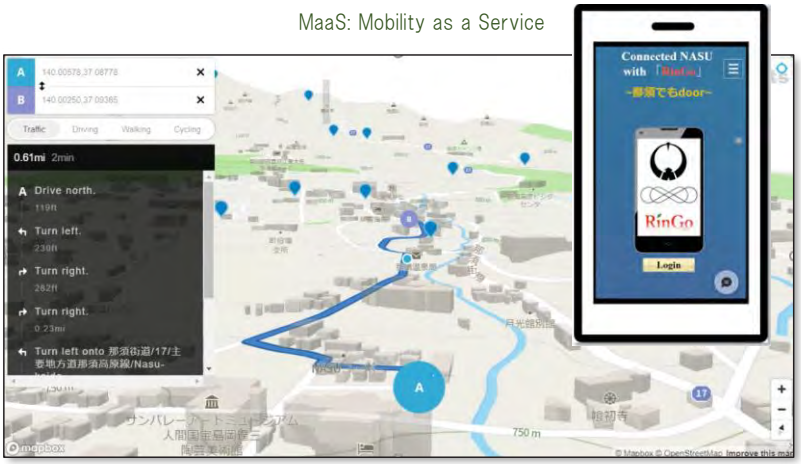
- オンデマンドバス，幹線バス（公共交通機関），ラストマイルを担当するRinGoを，シームレスに接続
- ポートレスで普及が簡単．観光地，那須に溶け込み易い
- 持ち運びによりオンデマンドバス，他の公共交通機関とのハイブリッドが実現．オンデマンドバス内でのレンタル可．
- 必要なときに，必要な場所からラストマイルの横方向移動がらくらく．
- 充電で飲食店と連携することで，周辺の観光施設にも利益を配分
- 公共サービススマート化，スマートタウンへ



Conncted NASUアプリで提携先を検索．提携旅館やホテルでRinGoをレンタル．折り畳んで観光．お昼の次いでに充電．充電先でポイントGet．オンデマンドバスに乗って今日の宿泊先のグランピング施設へ．周辺のコンビニで返却

産学連携ビジネスコンペティション2021で，マイクロモビリティRinGoを利用したMaaSのビジネスモデルを提案．那須町の横方向の移動手段を増やすことを目的とした観光地周遊型のラストワンマイルモビリティ．那須町内での観光施設，RinGoを充電する観光施設，出発地，目的地などの要素を想定し，最適な経路で案内するモデルとなっている．2D，3Dマップに対応することで，現在位置や返却場所をより分かり易く可視化．既存の公共交通機関への導線も目に見える形で表現，つながりやすく，利用しやすくなっている．

MaaS: Mobility as a Service



Connected NASUシステムでのRinGo利用イメージ．ホテルサンバレー那須から旅館清水屋へ．RinGoを利用，返却可能台数5台

■ オンデマンドバス運行経路シミュレータ

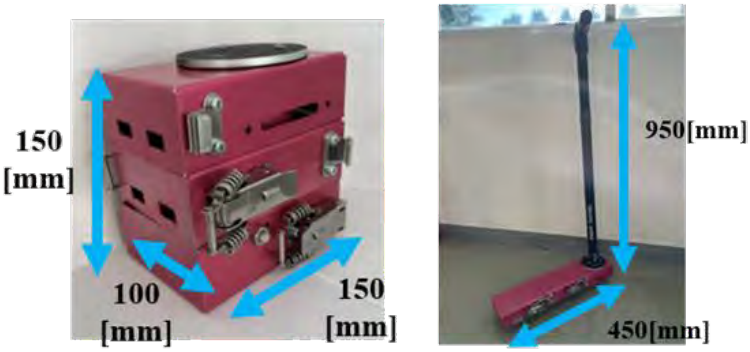
Connected NASUを構築するシステムであるMaaS研究の取り組み．デジタル地図作成ツール(Mapbox)で可視化．システムのアプリケーション化．那須町の関係者，被験者でも目に見える形でシステムの妥当性を確認できるように環境構築．オンデマンドバス運行経路シミュレータでは，出発地，目的地，需要地をシミュレータ上で操作し，乗り継ぎにおける走行距離，待ち時間短縮の最適化結果をマップ上に表示．これにより，利用者視点からの運行見積が可能になる．



オンデマンドバス4台の運行経路：予約数19カ所，ダイユー那須高原店，那須町湯本支所，ザ･ビック那須店，那須ハイランドパーク，那須湯本温泉菅間記念病院などへ移動．

■ マイクロモビリティ RinGo

ポートに依存しない輪行可能なキックスケータの開発として，電動アシスト付き折りたたみキックスケータRinGoの設計，実機製作を行った．2次試作では，リュックに収納できる大きさまで折りたたむことができ，ノータパソコン2台分の重量まで軽量化を実現．輪行に適したキックスケータとなった．また，構造体のたわみ，耐久性の妥当性確認．小型化による不安定性の改善（ハンドル部等）が必要．那須町関係者による試乗を通じて，利用者視点からのフィードバックを受けた．これらを反映し，那須町内での実証実験を目指す．



バッテリー搭載．ステアリングを外側へ．駆動輪として後輪にインホイールモーターを搭載．軽量化･車体強化のため，構成部品及び節の削減

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

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

■プロジェクトの概要

これまで環境システム学科で取り組んできた以下4つのCOCプロジェクトの成果を踏まえ、学科カリキュラムにおける「地域志向活動型アクティブ・ラーニング」の確立と、全教員の参画と地域関係者の協力のもと、学科の総力を挙げて「国連と学科独自のSDGs達成に向けての地域課題解決策の実践」に取り組むものである。
1)社会人基礎力向上を目指す地域志向活動型アクティブ・ラーニングのカリキュラムマネジメントと教育アセスメント(代表:澤田英行)　2)公民学連携による高齢化社会対応まちづくり研究-サテライトラボ上尾の全世代型サードプレイスと地域教育研究拠点(代表:作山康)　3)学生主体のSDGs協働プロジェクトによる地域課題の解決策の実践(代表:中口毅博)
4)気候変動と地震災害に適応したレジリエントな地域環境システム(代表:増田幸宏)

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

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

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

【社会貢献】 高度な専門性と学生の行動力を活かすことのできる地元の大学が地域の発展のために果たす役割は大きい。特に地域特性に応じた課題や活用可能な資源を丁寧に評価し、地域の関係者と共有することが重要である。地域協働プロジェクトは、その活動成果が地域や自治体に採用され、社会に役立つことを多くの学生が実感できる貴重な機会でもある。今年度は、学生が研究成果を基に、東大宮地域の関係者や自治体の市長等とも独自のネットワークで交流を拡げ、自発的に意見交換の機会を持つなど、社会のニーズに実際に応え具体の課題解決に繋がる学生主体の充実した成果をあげることができた。また「環境システム応用演習A/B(3年)」においては、現地のSDGs達成にどの程度貢献したかを、ヒアリング調査や外部ゲストの講評を通じて明らかにしている。



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



SDGs達成の視点を盛り込んだ、地域への多面的価値創出に向けたごみ焼却施設の計画プロセスに関する実証的調査研究の事例



アーバンデザインセンターの協力の下、コロナ禍で重要性が高まっている屋外空間の熱中症リスクに関する課題解決型調査研究を実施

主なトピックス

■SDGsスタディツアーとボランティア活動

1年生対象の「環境フィールド体験」、2年生対象「環境フィールド実習」の両授業において、岡山県西粟倉村や宮城県気仙沼市・南三陸町や福島県浪江町・田村市といった農山村や東日本大震災の被災地を訪問し、SDGs達成や震災復興の活動現場や遺構を見学・取材したり、ボランティア活動を行った。また、静岡県三島市においては、グランドワーク三島による水辺再生現場を見学するとともに、河畔林の維持管理のための竹林伐採活動を行った。



宮城県震災復興ツアー
牡蠣養殖見学(気仙沼市)



福島原発周辺ツアー
原子力災害伝承館見学



宮城県震災復興ツアー
ぶどう畑の草引き(南三陸町)



静岡県三島市　水辺再生の
現地見学(源兵衛川)

■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1地区、それ以外の首都圏3地区、計9地区を対象として9チームを編成して実施した。本演習では各地域において現地調査や関係者ヒアリングを実施のうえ、建築・都市・環境の視点から地域課題を解決する提案作成を行った。中間及び最終発表には各地区の関係者に出席いただき(オンライン)意見交換するなど、地域志向活動型アクティブ・ラーニングを実践するものとなっている。また履修学生へのアンケートを授業前・後に実施し、目標の達成度、および現地のSDGs達成にどの程度貢献できたかを把握した。



建築設計、プランニング、環境システムの各専門分野に分かれた分野融合型協働によるグループワークをハイブリッド形式で行い、地域関係者への提案について議論を行っている様子



環境システム学科の全教員が参加し、各専門分野の非常勤講師の先生方と共に、ハイブリッド形式にて各グループへのエスキスと地域密着型問題解決に関する指導を行っている様子

■「サテライトラボ上尾」を拠点とした活動

コロナ化の影響で約2年間休止していた実証実験を再開し、2021年10月から12月にかけて、原市カフェや電動アシスト三輪車等によるシェアサイクルなど、「サテライトラボ上尾」を拠点とした地域課題解決に関する研究と実践を、地域住民、行政、URなどと連携して実施した。

学生が新たに提案した小図書館の可能性や男性高齢者をターゲットとした麻雀カフェなど、その可能性のアンケートやヒアリングなどに多くの参加者が協力して総合研究として都市まとめた。



健康増進と買い物不便地域におけるバスの代替モビリティとしての電動アシスト自転車のシェアサイクル可能性調査



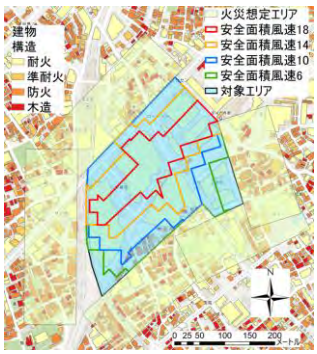
コロナ禍によってサードプレイスの重要性が再認識された。

■「すみだテクノプラザ」を拠点とした活動

「すみだテクノプラザ」を拠点として、地域福祉や産業活性化と連携した防災まちづくり(地震火災、水害対策)などに関する研究と実践を、地域住民、事業者、福祉系・建築系専門家、墨田区防災まちづくり課、防災課、UR都市機構などと連携して実施した。研究面では、墨田区北部地域を対象として大規模市街地火災に対する避難場所の安全性と新規指定可能性の検討を行い、学生の修士論文として成果をまとめた。実践面では、コロナ禍による制約があったが、墨田区鳩の街通り商店街沿道地区の防災まちづくりの検討、学生プロジェクトと連携した地域活動、UR都市再生機構との新たな地域連携活動の検討、などを実施した。



墨田区北部地域における大規模市街地火災に対する避難場所(候補)の安全性の検討



曳舟駅周辺エリアは、大規模市街地火災発生時の新たな避難場所の候補となり得る

「内部河川・運河の活用とコミュニティ強化」プロジェクト

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

■プロジェクトの概要

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

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。

■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んでいる。建築学科では、「都市地域計画」や「地域設計論」で地域課題を理解し、「プロジェクトゼミ」や「空間地域デザイン演習」で地域課題の解決に取り組んだ。また大学院では、「まちづくり特論」「都市計画総論」「Urban and Community Design」で地域課題の理解と解決に取り組んだ。

特に「プロジェクトゼミ」では、月島の歴史的街区と再開発街区の違いを実地調査と分析により可視化して明らかにした。また「空間地域デザイン演習」では、地区住民を対象として成果発表を行った。



プロジェクトゼミの成果は、月島長屋学校で、地区住民に対して発表した。

【研究】

アクション・リサーチの手法に基づき、中央区月島では「月島長屋学校」を拠点として、インターネットによるまちづくり情報発信に関する研究、江東区ではパークマネジメントに関する研究や歩行者が中心となる街路空間計画手法に関する研究、子どもの来訪に着目した商店街の再生に関する研究に取り組んだ。

卒業研究では、東京湾岸地域に関する研究が4本あり、修士研究では中央区に関する研究が1本あった。日本建築学会大会で、東京湾岸地域に関する研究が3本発表され、国際会議Pacific Rim Community Design Networkで、東京湾岸地域に関する研究が1本が発表された。



空間地域デザイン演習では、10名以上の住民にインタビュー調査を行った。

【社会貢献】

中央区月島では、学部4年生が地域雑誌「佃・月島」の表紙イラストを描いた。またその地域雑誌で、「プロジェクトゼミ」の成果を発表し、得られた知見を社会に還元した。卒業研究「インターネットによるまちづくり情報発信の相互連携に関する研究」では、「月島長屋学校ウェブサイト」や「佃島・月島百景ウェブサイト」などをハイパーリンクで繋ぎ、それぞれの情報発信力を高める社会実験を行った。

福島県南会津町舘岩地区では、2年ぶりにたのせ集落の住民と交流会を行い、ウィズコロナにおける集落再生の取り組みについて意見交換を行い、また舘岩総合支所振興課と、地域再生の方法について意見交換を行った。

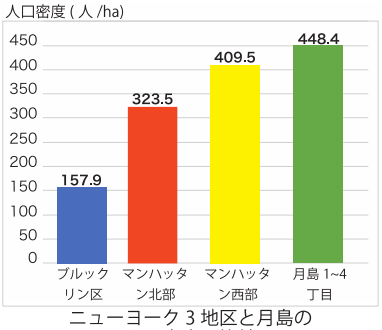


南会津町たのせ集落では、集会所で住民との意見交換会を開催した。

主なトピックス

プロジェクトゼミ　脱･近代都市を構想するin月島

建築学科3年生「プロジェクトゼミ」では、「脱･近代都市を構想する」をテーマとして、再開発が進みタワーマンションが林立しつつある一方で、戦前の歴史的な市街地が残る月島を対象として調査･分析を行った。脱･近代都市を持続可能な都市と捉え、①人口･人口密度、②建物状況、③建物ファサード、④植栽量と植種、⑤交通量、⑥歩行者状況の6点から調査し、2番街の再開発街区と3番街の既存街区（歴史的な街区）を比較して分析した。



ニューヨーク 3 地区と月島の人口密度の比較

左：①人口･人口密度
月島は、世界的大都市のニューヨーク主要地区よりも人口密度が高い。

下：③建物ファサード
同じ系列店を比較した。ファサードに使用されている素材は全く異なり、個性的なのは既存街区の店舗である。



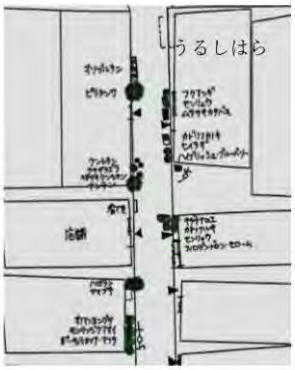
まるた	
既存街区	再開発街区
木 70% 紙 20% ガラス 10%	アルミ 66% ガラス 12% 紙 16% 布 5% 木 1%



	既存街区	再開発街区
植栽量	263.5㎡	212㎡
植種	76種	11種

表　調査結果

・既成市街地区は路地５本分から構成されるものとし、路地１本あたりの植栽面積を求め、全体の植栽量はその値を５倍にしたもの
・植栽の大きさは大・中・小に分けてカウント
（大：半径 20cm 以上　中：10cm ～ 20cm　小：10cm 以下）
・カウント結果は大：59 個、中：40 個、小：24 個
・植栽は円形と仮定し、カウントした個数と掛け合わせて計算
・再開発街区の植栽面積は地図をもとに計測



路地植栽マップ（部分）

上：④植栽量と植種　植栽量（面積）は既存街区の方が大きい。植種も、住民がそれぞれ育てているので、既存街区の方が圧倒的に多い。

下：⑥歩行者状況　3番街（既存街区）の歩行者は、店舗に立ち寄りながら移動する。魚屋や酒屋には、のぞき込んだり、店主と話すなどして購入するとは限らない。そのため、歩行者の平均通過時間は、3番街の方が20秒長かった。



歩行者の軌跡

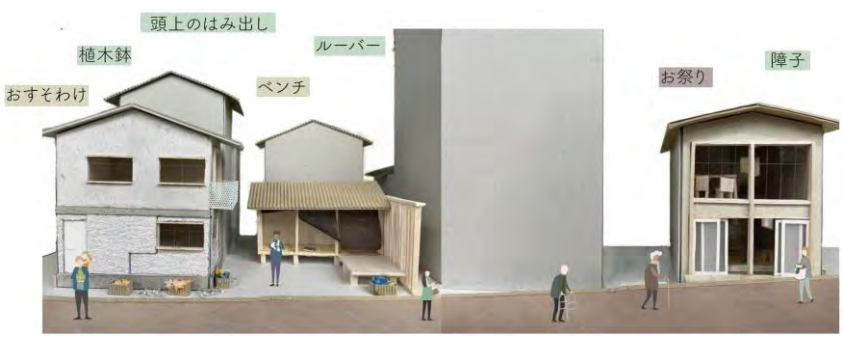
空間地域デザイン演習　地域資源を活用するコミュニティ･デザインin佃島

建築学科3年生「空間地域デザイン演習」では、歴史的な街並みとコミュニティが残る佃島を対象として、地域資源に関する調査と分析をもとにして、未来に向けたコミュニティ･デザインを提案した。

調査･分析の結果から、佃島の魅力を「佃図鑑」としてまとめ、それをもとにして、「かけわたす　～過去から未来へ～」を提案した。

右：提案の全体像　佃島の魅力を地物との人々だけではなく、周辺住民にまで発信できるような4つのプロジェクトを提案した。これによって、昔から住んでいる人々も、移り住んだ人々も、佃島に誇りをもって過ごすようになることを狙っている。

下：空き家や空き地を活用した2つのプロジェクト。左側が「おすそわけ食堂」で、土日などはレンタルキッチンになる。右側が「100年ながいきプロジェクト」で、高齢者の居場所になる。運営は町会が認定する運営委員会によることを想定している。





「芝浦アーバンデザイン・スクール2 – 地域まちづくり組織への実装 –」プロジェクト

代表者	前田英寿【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	

■プロジェクトの概要

このプロジェクトは、2013年度から大学COC事業の一環で行った「芝浦アーバンデザイン・スクール」を、実際のまちづくり組織に実装し、地域が抱える課題に取り組みながら、建築都市計画の教育、研究、社会貢献の量質を高めることを目的とする。芝浦アーバンデザイン・スクールは学びを通して建築、都市、地域の未来を探ることを理念に掲げ、行政、市民、企業、海外と関わりながら、①教育：地域の建築物や都市空間を題材とする建築都市計画演習、②研究：地域の課題に応じるゼミナール、③社会貢献：地域行事等における情報発信、以上を融合的に実施してきた。この教育・研究・社会貢献のパッケージを、まちづくりの現場で用いて身につけるのが、このプロジェクトのねらいであり、2021年度はその3年目である。

■教育改革研究活動助成(地域志向)活動の成果

３つの連携エリアで上記概要の①教育、②研究、③社会貢献を行った。

1. 清水港（静岡県静岡市清水区）
プロジェクト代表者とその研究室学生が「清水みなとまちづくり公民連携協議会」に参加した。 https://shimizuportcity.jp/
【教育】①地域の建築物や都市空間を題材とする建築都市計画演習：建築学科4年9名が都市デザインの基本理論を用いて東京都内または近県の地域を分析し、同じ手法を清水港のフィールドワークに用いた（※１）。
【社会貢献】③地域行事等における情報発信：プロジェクト代表者が清水港のみなとまちづくりについて講演した。前田英寿「清水の未来ひらくみなとまち」2021年5月10日第9回静岡まちみがきセミナー

※１ 学会発表：前田英寿「大学建築学科都市デザイン分野卒業設計における理論書と事例集の活用」日本建築学会2021年度大会学術発表会

2. 柏駅中心市街地（千葉県柏市）
プロジェクト代表者とその研究室学生が「柏アーバンデザインセンター」に参加した。 https://www.udc2.jp/
【研究】②地域の課題に応じるゼミナール：修士1年10名が「都市デザイン研究特別演習1」の一環として、柏駅中心市街地を題材に「パブリックライフとパブリックスペースの観察的計画」を行った。
【社会貢献】③地域行事等における情報発信：プロジェクト代表者が柏アーバンデザインセンターと協力し、前記の研究成果を同センター策定『柏セントラル・パブリックライフガイド』に盛り込んだ。

3. 浦和美園（埼玉県さいたま市）
プロジェクト代表者とその研究室学生が「アーバンデザインセンターみその」に参加した。https://www.misono-tm.org/udcmi/
【教育】①地域の建築物や都市空間を題材とする建築都市計画演習：修士1年10名が「都市デザイン研究特別演習1」の一環として、アーバンデザインセンターみそのから出題された都市デザインスタジオ「美園スタジアムタウンビジョン2050を実現する保留地活用計画」を行った。


清水港の現地調査


柏アーバンデザインセンターの訪問


浦和美園スタジアムタウンの現地調査

主なトピックス

■ 静岡県清水港のフィールドワーク「ひらく みなとまち１０の視点」

建築学科都市デザイン研究室4年9名が、清水みなとまちづくりグランドデザイン（2019年7月清水みなとまちづくり公民連携協議会）「ひらくみなとまち１０の視点」に即して清水港（静岡県静岡市）を分析した。
①清水みなとまちづくりグランドデザインのパネルを清水みなとまちテラス（静岡市清水区）に展示した。
②予備調査（４～５月）東京都または近県を題材に都市デザインの理論書を用いて地域分析を行った。
③現地調査（１０月１１日）清水港及び周辺を訪れ、貸し自転車と水上バスで調査した。
④図上分析（１０月１２日～２９日）現地調査の結果を都市デザインの理論書を参照してシートにまとめた。
⑤プロジェクト代表者を通じて、分析結果を清水みなとまちづくり公民連携協議会に書面と口頭で報告した。



清水みなとまちテラスにおける展示→



分析シート（視点１海洋経済）



分析シート（視点３海洋研究）

■柏駅中心市街地と浦和美園スタジアムタウンを題材とした都市デザイン研究特別演習

建築学専攻都市デザイン研究室修士1年10名が「都市デザイン研究特別演習１」の中で、アーバンデザインセンターと交流し、柏駅中心市街地（千葉県柏市）と浦和美園スタジアムタウン（埼玉県さいたま市）を研究した。



1a	まちなかカルチャーデッキ　サッカーや音楽を身近に感じるイベント空間の創出
1b	チャイルドガーデン　保育園園庭の拡張と保護者向けスペースの創出
1c	ハウジングガーデン　住宅展示場の高質化と可変な休憩スペースの創出
2a	レイソルにぎわいギャラリー　-街路空間と空地を活用した和レイソルの展示空間と日常的な滞留空間の創出-
2b	みんなのフラワーガーデン　-地域住民が花を植え、出し、まちの残余空間で育てるカシバナ制度の提案-
2c	モバイル街路樹　-空き家・空地・駐車場を活用した移動式街路システムの提案-
3a	SOGO Side　再開発を待つ廃墟の暫定利用
3b	stand parking　キッチンカーが気軽に出店できる駐車場レイアウト
3c	パブリック駐輪場　既存駐輪場を活用した利用者を限定しないサイクル拠点
4a	よりみちパーク　既存駐車場の一部をキッチンカーと広場空間に
4b	バスステイよ　ホテル前の歩行空間の一部を利用したパークレット的利用法
4c	Play Ground　ボールから生まれる交流の創出
5a	Mobile GARDEN　住宅地のスキマを移動していくコミュニティガーデン
5b	ウラカシ STREET　植付けウラカシ文化でフレキシブルなパブリックライフへ
5c	エキウラ ダイアタイ　ストリートミュージックで活きる大階段
6a	まず座るそして出会う　DAYONEタワー境内地アクティブ空間へ
6b	ミニパーク　既存場所の修景による休憩スペースの創出
6c	KASHIWATANI　谷のような空間の活性化と多世代向けスペースの創出
7a	Greening Park　元町通り沿い駐車場緑化計画
7b	柏市民美術館　駅前通りを活用した市民ミュージアム
7c	まちなかlibrary　デッキ上の屋外図書館
8a	PRベンチと分館レンタル　柏駅東口ウッドデッキの平時利用の提案
8b	がいろ で ごはん　柏セントラルプラザ周辺の食イベントから機能する広場に
8c	トレインデッキ　広告パネルの移動と滞留空間の確保
9a	踏切広場　-柏駅南口の踏切跡地における三ポケットパークの再整備-
9b	おもてうらパーク　-表・裏通りに接する駐車場の公共空間活用-
9c	まちなかヒミツ基地　-都市から逸脱した若者の活動拠点の創出-
10a	イッタン・ポート　-駐車場のひと区画に、一旦起こるパブリックライフ-
10b	横丁公園　-旧水戸街道のわきみち「横丁」における都市公園認定-
10c	食べられる道　-横丁公園と既存空地を使い増す、交換型グリーンネットワーク-
11a	The new "line"　線露む街路空間へ
11b	The new "point" インタラクションを生むの柱間空間
11c	The new "grid"　街路空間の機能をより明確

柏駅中心市街地パブリックライフ・パブリックスペースの観察的計画



美園スタジアムタウンビジョン2050を実現する保留地活用計画

「東京臨海地域における安心安全健康のまちづくり」プロジェクト

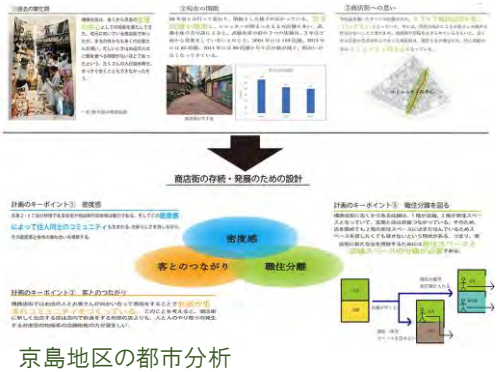
代表者	佐藤宏亮【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	村上公哉(建築学部 建築学科)／秋元孝之(建築学部 建築学科)／清水郁朗(建築学部 建築学科)／桑田仁(建築学部 建築学科)

■プロジェクトの概要

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

■FDSD(地域志向)活動の成果

【教育】
本プロジェクトには都市計画や建築計画を専攻している学部学生、大学院学生が参加している。東京臨海地域は災害対応や安心して住まい続けることのできる環境づくりなど、最先端の都市計画や建築計画が進められている地域であり、生きた学びの環境を提供してくれる。
本年度は、墨田区の木造密集市街地を対象とした防災まちづくりの提案、江東区臨海部の新産業拠点形成にともなう土地利用更新の提案など、現代都市が抱える重要な課題をテーマに研究、教育に取り組んだ。著しく変化する都市の変化や戦略的な都市計画など最先端のまちづくりに触れながら、都市防災や多文化共生への取り組みなど多様な側面から都市を眺める視座を養うことができた。



京島地区の都市分析

【研究】
健康のまちづくりを進めていくために、豊洲地区を対象として、ランニングやウォーキングなどの健康につながるアクティビティ調査を実施した。運動を行なっている人へのヒアリング調査によりデータを収集し、豊洲地区で行われている運動に関わる行動を把握した。そして、より快適に運動を行えるような都市空間の整備や改善方法について提案につなげた。また、快適な都市空間という視点から、豊洲地区において人々が滞在する空間の環境分析を実施した。五感をテーマとして、人々の五感を刺激する都市空間が備える要素を抽出し、アクティビティとの関係について分析を行った。


江東区職員よりレクチュアを受ける

【社会貢献】
豊洲地区における防災対策の課題を共有するために、豊洲2･3丁目まちづくり協議会と連携して、防災をテーマとした小冊子『まちつかいTOYOSU』を発行した。冊子は豊洲2･3丁目まちづくり協議会のホームページ上で広く公開しているほか、地域のイベント等の際に無料で配布していく予定である。また、この冊子を活用して、大学の生涯学習講座を開講し、地域の方々への情報発信を行った。100名を超える聴講があり、豊洲地区の防災まちづくりに向けた社会貢献につながった。また、豊洲の防災上の課題に対応したエリアマネジメントの具体化を目標に、オフィスビルの管理者の相互の連絡体制の構築と、災害時の連携体制について継続して検討を行なっている。


豊洲地区の環境分析

主なトピックス

■防災をテーマにした小冊子の発行

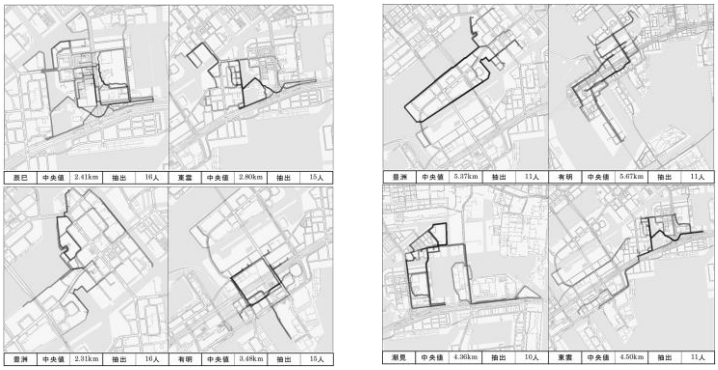
豊洲地区は比較的災害に対しては強いと考えられていいるが、タワーマンションが並ぶことによる避難生活上の課題や、帰宅困難者の発生など拠点的市街地ならではの課題も存在する。周囲には災害に対して脆弱な江東デルタ地帯が広がっており、災害時の避難者の受け入れなども検討しておく必要がある。
このような豊洲地区の防災に関する情報について、研究成果をもとにした冊子『まちつかいTOYOSU』を発行した。広く地域の方々やオフィスワーカーに情報を発信していくとともに豊洲地区の防災上の課題を共有し、エリア防災の取り組みにつなげていく予定である。



防災まちづくり冊子の編集と発行

■ 健康促進に関わるアクティビティ調査

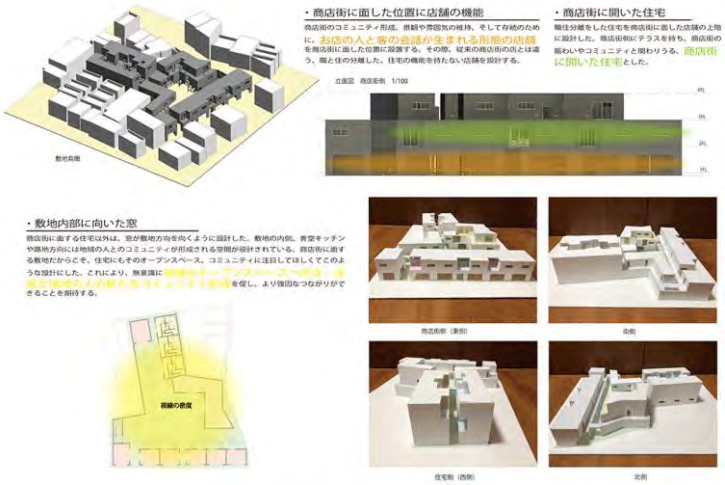
豊洲地区を含む東京臨海地域はオリンピック関連施設をはじめ、体育館やスタジアムなどの施設が充実し、健康のまちづくりを進めていくことが期待されている。本研究では、このような充実した施設を活用するのみならず、日常的な運動を支える都市空間をテーマとして、人々の運動などのアクティビティ調査を実施した。
ウォーキングやランニングなどのアクティビティをヒアリング調査をもとに把握し、豊洲地区の運動に資する空間や、連続性が失われているなど課題のある場所を把握し、提案につなげた。



豊洲地区でのアクティビティ調査

■ 木造密集市街地の集合住宅の提案

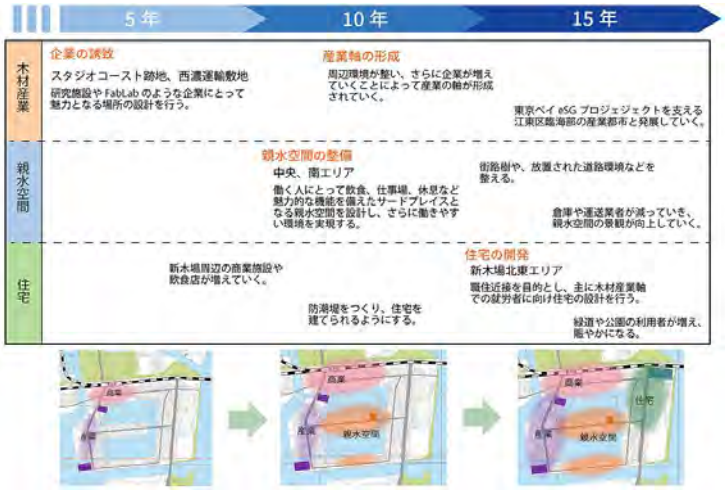
学部3年生の授業として、江東デルタ地区に位置する墨田区の木造密集市街地を対象に、災害に強いまちづくりや建築計画の提案を行った。木造密集市街地は地震時には家屋の倒壊や火災の発生により被害が拡大する可能性があり、地震に強い建物への更新が求められる一方で、昔ながらの街並みやコミュニティが残るため、開発と保全のバランスのとれたまちづくりが必要になっている。この授業では、フィールドワークを通して密集市街地の都市分析を行うとともに、防災まちづくりの体制づくりや空間づくりについても検討を行いながら、災害に強い集合住宅の設計提案を行なった。



木造密集市街地に建つ集合住宅の提案

■ 土地利用転換にともなう都市更新提案

江東区臨海部は、海の森や新木場などの広大なエリアが広がり、物流施設や木材産業などの拠点となっている。しかし、産業構造の転換による土地利用の変化への対応や、オリンピック競技施設の活用など、将来に向けたまちづくりの検討が進められている。
本研究では、新しい土地利用として新産業拠点の形成に着目し、海外における先端産業拠点としの都市デザイン事例の分析、産業転換に伴う都市更新の方法の検討などを行った。また、外国人居住者の増加、新しいライフスタイルの形成などを念頭におき、多様な人々が共生する都市デザインの提案をとりまとめた。



東京臨海部の土地更新の分析

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

機械機能工学科　　青木　孝史朗

１．はじめに

今日的なものづくりは，3D プリンタの様なものを除けば，設計時に Computer Aided Drawing；CAD を，製造をコンピュータ制御された Numerical Control；NC 装置により実施するのが一般的である。故に CAD データを NC 装置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である。

機械機能工学科では 2 年及び 3 年時に汎用工作機械を用いたものづくり教育を実践していたが，ものづくりセンターの運営方針変更や授業数削減化のため，これらの実習は行われなくなった。しかし，ものを設計し具現化するには加工の知識・経験は必要であり，技術者教育として欠く事はできない。

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。また将来的に学内にてファブラボを開設した場合に，利用希望者へどの程度の予備知識を教授すればよいかと云う判断を行う際にも有益な知見となる。本研究の目的は上述した内容の情報を収集し，現状に即した教授方法を考案することを目的としている。

２．２０２１年度の実施内容

２－１　実践方針と対象となる学生達の状況

実践の対象とした科目は創成ゼミナール２（3 年生対象，4Q 開講（1 コマ×6 週）必修科目）である。この科目は，8 人程度の専任教員が担当しており，学生は事前に決められた教員の元で教員ごとに異なった内容を受講することになっている。

当初予定していた，CAD→ Computer Aided Manufacturing；CAM→ NC 工作機械という一連の工程が諸事情により実施できなくなったため，履修者を 5 つのグループに分け，以下のように実施内容を変更した。

100×100 ㎜の平面を持つアルミニウムブロックを共通課題の供試材とし，外周 4 辺を 10 ㎜切り込み，80×80 ㎜の表面に深さ 3mm の任意形状をマシニングセンタ；MC で製作する。その形状に合わせて黄銅の部品を 3 ㎜厚の板材からワイヤ放電加工機；W-EDM で切り出して，2 つの部品を嵌め合わせる，と云うものである。

2 種類の NC 工作機械を利用して G コード（NC 用の加工プログラム）を見比べることができる，W-EDM に CAM が内蔵されているので別途 CAM ソフトウエアの説明を丁寧にする必要がない，色の異なるアルミニウムと黄銅と云う２つの金属から自身の設計した部品同士を嵌め合わせると云うパズルに似た感覚を学生達にイメージさせることができる。以上のメリットを想定して，上記の実施内容とした。

TOPへ戻る

アルミニウムブロックの外周を削る際，4つの角は2つが直角，1つが面取り，1つが円弧となる様にした。この外周加工までの工程は，5グループ全てで共通とし，Gコードも提供することで，具体的な切削工程を理解してもらうヒントとした。

今回担当したのは14名であった。これら学生達の加工関係の受講履歴としては，1，2年生で設計や加工に関する講義およびドラフターを用いた製図（CADは教えていない）であり，前述の様に加工実習など実際にものを製作する科目はなく，ほとんどの学生が趣味やサークル活動でのDIY経験程度である。

CADについては，知っている人が5名，他は知らない学生もいると云う状況で，グループ決めを行う際は，この5人は同一のグループにならない様に分けた。

２－２　具体的な実施方法

6回の授業を以下の構成とした。

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

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

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

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

・第5回（実習）：W-EDMの実演と作製物同士の嵌め合い確認。

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

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

２－３　教育効果などの測定方法

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

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

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

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

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

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

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

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

TOPへ戻る

ような形状に加工するのか等）

２－４　授業評価アンケート

また第 6 回の授業後に授業評価アンケートを実施した。質問項目は以下の通りである。

①講義についてお聞きします。講義に参加して全体的に満足していますか。

②講義に使用したテキストは理解しやすかったですか。

③講義に使用したテキストは必要十分な内容でしたか。

④講義で学んだことはものづくりの理解に役立ちますか。

⑤本ゼミは楽しかったですか。

⑥講師についてお聞きします。講師の説明は理解しやすかったですか。

⑦講師は適切な時間管理の下，効果的に講義を運営していましたか。

⑧講師は受講者の求めに適切な対応をしていましたか。

⑨グループワークについてお聞きします。班の分け方に問題はありませんでしたか。

⑩班に課せられた内容の量は適当でしたか。

⑪班活動は概ね全員が協力して活動できたと言えますか。

⑫加工学や創成設計など，今までの授業内容を本ゼミで生かすことができましたか。

⑬（問 12 で回答したものに対して）そう思った理由を教えてください。

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

３．実施結果

３－１　授業実施の状況

5 つのグループにおいて，実際に製作する対象物に関しては，4 グループはアルファベットの組み合わせやピクトグラムなど比較的単純形状の溝を掘る対象を選択した。1 つのグループのみ対象を浮かせ，周りを削り落とす形状を選択した。各グループに CAD を扱える人を配したが，3 つのグループが CAD を使える人が描いた対象を採用した。MC 加工までは大きな問題は生じなかった。

MC 加工終了後，W-EDM 用の図面を修正させる際，黄銅板から同一形状をダイモード（空いた穴に寸法を合わせる）・パンチモード（抜いた部品に寸法を合わせる）で切り出したサンプルを提示し，工具オフセットや公差の考え方を説明したが，よく理解してもらえなかった様で，MC 加工後の状態を正確に測らずに EDM 用の座標を誤った値で指定してくるグループが多数いた。加工可能な程度に修正する作業には時間を要したが，丁度第 4 回目終了後に冬期休業となり，時間的猶予はあった。

結局，MC・W-EDM 双方で作成した部品が嵌ったのは３グループに留まった。最終的な学生達の製作物の写真を図 1 に示す。



図１　学生達が設計・製作した製品の外観

３－２　テスト結果による客観的な教育効果の測定

２－３で示したテストの 14 人平均点は以下の様になった。

授業開始時：(1)8.6，(2)6.5，(3)0.3，(4)7.9，(5)2.9，(6)0.4，合計 26.4。正答率は(1)43%，(2)46%，(3)2%，(4)52%，(5)19%，(6)2%。

授業終了時：(1)14.3，(2)8.0，(3)9.1，(4)10.7，(5)7.5，(6)3.9，合計 53.6。正答率

TOPへ戻る

は(1)71%，(2)57%，(3)57%，(4)71%，(5)50%，(6)20%。

正答率の差は(1)+29%，(2)+11%，(3)+55%，(4)+19%，(5)+31%，(6)+18%。全ての設問で上昇し，総合点は値として倍になった。

設問間のばらつきは以下の様に考えられる。専門用語の理解については，(問 1)ある程度聞いたことはあるが，(問 2)それぞれがどの様に連携しているのかは知らなかった。G コードについては，(問 3)これまでに学んだことがなかった。NC 等の加工システムについては，(問 4)便利と云う事は薄々分かっていたが，(問 5)システムを使いこなすためには様々な知識や工夫が必要であることまでには考えが及んでいなかった。実際の NC 工作機械については，(問 6)自身が直接触って操作している訳ではないので，理解が深まらなかったと考えられる。

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

装置の操作に関して言えば，今回使用した MC や W-EDM においては操作方法の講習だけで数時間を要するので，授業中に行うのは現実的ではない。今回の授業に組み込むと云うより，別の時間（授業）枠を用意する方が現実的な対応かと考えられる。

３－３　アンケート結果による学生の主観的感想

アンケートを集計し結果を換算すると，以下の通りとなった。①3.7，②3.5，③3.7，④4.0，⑤3.7，⑥3.9，⑦3.9，⑧3.9，⑨3.8，⑩3.9，⑪3.9，⑫3.1。

⑫以外は 3.5 以上を示し，学生たちにとっては満足度の高い内容であったことが伺える。4.0 の満点であった④は，これまでの本学科の開講科目で加工らしいことを殆ど行ってこなかった事を鑑みれば当然の結果と言えよう。

⑫は質問の意図を間違えて自己評価を書いてしまう学生が何人かいた。「考察がうまくいかなかった」「2 つの部品が嵌らなかった」と云う理由で低い点を付けており，これが平均点で低い値として現れた。

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

・CAD の使い方，分かりやすいプレゼン，自ら課題を設定してグループで話し合い解決するサイクル，を学べたから。

・ワイヤ放電加工の特徴や利点は加工学で学んでいたため。実物を初めて見た時に理解しやすかったため。

・加工学や創成設計で CAD を学べていたら生かせたと思う。

・CAD をもう少し深く学ぶことができていたら，この授業をもっと発展的にできたのではないかと思った。

不満に感じた箇所が改善点となるが，テスト結果により想定した内容とほぼ同じであることが分かった。

４．おわりに（今年度の総括と来年度の展望）

金属加工経験の乏しい学生へ簡単な CAD/CAM の解説・G コードによる NC 加工などを教授し，どの程度の教育効果が得られるのか調査した。

実際にものに触れる経験は教育効果に有効であることを確認した。一方で事前に CAD 等の知識があれば，同じ時間内でももう少し高度な内容が可能であり，装置などへの理解も深まったであろう。

来年度は，当初予定していた CAD/CAM＋NC 工作機械の一連の流れを教授して，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。

TOPへ戻る

「グローバルサイエンス＆エンジニアリングカフェ」および「グローバルオープンセミナー」の開催

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、ミリアラ ムラリダ、パオロ メレ、
マルコ　フロンジ、ディタ サリー、ニコデムス ラディニアン
工学部機械工学科　　石井 康之
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

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、GSE カフェ）」を実施する。この GSE カフェを通して、学内の学生や教員が広い視野と興味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。

2019 年度ならびに 2020 年度は、国際理工学専攻の教員（2020 年度は工学部先進国際課程(IGP)に異動）を中心として、大学院共通科目「科学コニュニケーション学」の講師であるお茶の水大学の大崎先生（サイエンスコミュニケーターとしての経験豊富）とも共同で企画運営した。主としては、科学コニュニケーション学の履修学生と国際理工学専攻の教員とその研究室の学部生大学院生の運用とするが、学内の興味ある人は誰でも企画に参加できるとする。このような縦横斜めの学内横断はまさに教育改革研究活動の一環であり、さらに留学生や外国人教員に参加してもらうことでグローバル教育を推進する。特に、表現の方法や受け取り方には国や文化により様々であるので、なるべく先入観を持たず、いろいろな形式や手法に挑戦してみたい。GSE カフェが軌道に乗れば、女性限定や地域向けへサイエンスカフェへと発展できる可能性も広がり、将来のリカレント教育への足がかりともなる。

２．研究計画

本事業 GSE カフェはまずは３年続ける予定で企画を進めている。2019 年度は、初年度となるため、事業のテーマ設定、ニーズ、集客、運営なども含めて、事前調査や予行演習を行った。当初は、前期１回、後期２回の計３回行いたいと考えていたが、実際は大宮ならびに豊洲のオープンキャンパス、日本科学未来館を借りての実施などを７月、８月に計６回行った。日本人、外国人教員、日本人学生留学生など予想より多くの履修者、協力者があり、科学コミュニケーション学を学ぶ学生にもふ

TOPへ戻る

さわしい内容となった。

２年目は初年度の経験を参考に改善、同様のサイエンスカフェを拡充させていく予定だった。しかしながら、コロナ感染症予防の影響で人が直接対話する形でのサイエンスカフェを実施することができなくなってしまった。これを、逆に、オンラインによるサイエンスコミニュケーション方法の開発の好機ととらえ、2020年はオンライン形式で実施した。2021年度についても、感染状況や大学の方針を鑑み、オンラインを利用したサイエンスカフェ、これに加え、2020年度に実施し、大変評判の良かったグローバルオープンセミナーを計画した。

３．計画の進行状況

本年度は、Zoomを用いたオンラインGSEカフェを2回実施した。これに加え、インドネシアの進学高校２校とオンラインで結び、グロバルオープンセミナーを実施した。

(1) GSEカフェ@Zoom 5/1,5/22,14:00-16:00

(2) グローバルオープンレクチャーオンライン@Zoom,大宮からライブ 2/28

以下にそれぞれの詳細を報告する

3.1 GSEカフェ@Zoom 5/1,5/22

(1)場所：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

(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18名(ブラジル、中国、韓国の留学生６名含む)

(3)対象者：5/1受講生１８名、受講生以外20名（履修生の家族、友人、知人、学内の院生他、アンケート回答16名）

5/22（受講生１８名、受講生以外17名（履修生の家族、友人、知人、学内の院生他、アンケート回答14名）

(4) プログラム：

第1 回 サイエンスカフェ「SciencEasy」
第２回サイエンスカフェ
「らくらくかがく」のおしゃべりかい
１班3,4名でテーマごとにルームを作った。

◇Aルーム「今後の生活を支える技術展」自動車をオーダーメイド？　橋の骨折・健康診断？橋などのインフラから、自動車などの身近なものまで！みなさんの生活を支えているモノづくり技術をご紹介します

◇Bルーム「ダルい」普段の生活の上で皆さんはどんな不便を感じていますか？　このルームではそれぞれの分野での「面倒なことを楽にする」ための研究をご紹介します。

◇Cルーム「カジュアルサイエンス」さまざまな分野の科学者が集うBAR.多国籍なメンバーが自分の研究をわかりやすく説明してくれます。

◇Dルーム「将来役立つサイエンス見本市」将来役立つ研究を一挙にご紹介します。ここでは、現在最前線でやってる研究内容をわかりやすくお伝えするグループとなっています。

◇Eルーム「人事必見　SDGs貢献技術フェア」私達は、今話題のSDGsに貢献する技術に日々挑戦しています。ここでは、それらの技術に関する話を分かり易く紹介しています。

院生が自分の研究内容を参加者に伝える。ただし、学会発表のように専門的な内容を同じ属性を持つ人に対して一方的に伝えるのではなく、一般の人（一定の対象を設定）に理解してもらって、質問や議論など双方向のコミュニケーションが持てることを目指した。

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

TOPへ戻る

苦労したところ：オンラインで顔が見えないため、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。

実施の様子：



図１グローバルサイエンスカフェの様子

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

外部参加者の感想：

愛着心の例で「ヘッドホン」を使用しており、理解しやすく、自分の場合に置き換えて考えることができた。知識のない私であっても、理解しやすい表現で説明していた点が良かった。

I was impressed by his ability to talk about his research in a way that is easy to understand. I'm not particularly familiar with membrane technology, but understood everything he explained about the subject.

3.2　グローバルオープンセミナーオンライン@Zoom, 大宮からライブ 2/28（英語実施）

場所：大宮キャンパス先端工学研究機構棟 103, 105 号室（時差２時間）

実施者：教員４名山本、石井、ディタ、マルコ、院生学部生 8 名（山本研、イザベラ研）

対象者：インドネシアスラバヤの進学校高校２校（理系クラス生徒 20 名、高校教員（校長含む）5 名

内容：山本が「圧力と温度：物質の三態」、「様々な高圧氷」、「天然と人工のダイヤモンド」の 3 つのテーマでオンライン講義を行った。各講義の後には、山本研究室の学生によるライブ実験や演習が行われた。その後、生徒は 5 つのグループ（A～E）に分かれ、ポイントを決めてグループディスカッションを行い、その後全体で発表した。

また、大学のキャンパスやテクノプラザの紹介をライブで行った。さらに、学生の研究紹介や IGP のインドネシアからの留学生による本学への入学と日本での学生生活の紹介があった。約４時間の一日プログラムであった。

工夫したところ：海外対象の講座であったため、高校の先生方との事前打ち合わせを行った。ライブ実験で、もしもうまくいかなかった時に備えて、リハーサルを行った際のビデオを撮影するなどバックアップ教材を準備した。また、受講者には現地校長と本学山本の連名でリアルな受講修了証を印刷、捺印し、国際郵便で送るなど実感を持てるように工夫した。



図２グローバルオンラインセミナーチラシ

苦労したところ：ブレイクアウトルームの議論で

TOPへ戻る

は、積極的な生徒とそうでない生徒がおり、なるべく皆に発言してもらうのが難しかった。

実施の様子：図３参照

今回、ディタ先生と博士学生のアンナさんの出身校の生徒対象ということもあり、先方が非常に協力的で雰囲気が良かった。また、すべて英語で行ったものの、インドネシアからの教員や留学生（博士課程）2 名がチューター役に入ってくれたので、参加者も安心して取り組めたようだった。

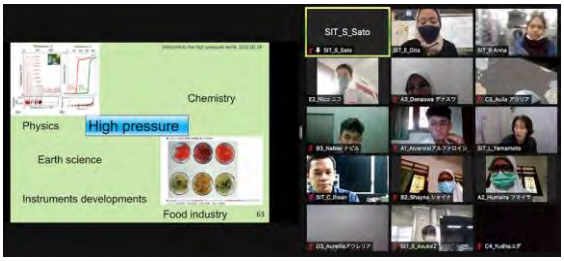




図３　グローバルオンラインセミナー実施の様子

実施者の感想：生徒のレベルは、物理に関する知識、英語力（聴講、議論とも）ともに高く、何より好奇心旺盛で積極的に学ぶ姿勢が印象的だった。

参加者の感想：

事後アンケートでは 78%が非常に面白かった、22%が面白かったと答え、また、75%がまた同様のプログラムに参加したい、ということで満足度は非常に高かった。以下は感想である。

(1)this is one of my favorite event in my life and also this event makes me want to go to study abroad. The experiment was amazing and i like the lesson very much. i can study more in this event and i love how the connection between japan and indonesia. i hope i can join at the same event like this! thank you Shibura Institute of Technology, Japan

(2)This program is so interesting. The explanation of every experiment gave me a lot of new informations. And also the experiments are great because i've never seen before. This program also made me speak English, so my English improved now.

４．まとめと今後の計画

2021 年度も、コロナ禍により、オンライン中心のグローバルサイエンスカフェであったが、これにより、オンラインでのサイエンスカフェのノウハウが昨年に増して習得できた。オンライン特にオープンセミナーは、準備に大変時間はかかるが、直接大学に来てもらうことのできない国内海外の多く人たちに、本学やその研究内容を知ってもらうことができる、ということがわかったことは大きな収穫であった。

当初計画した以下の GSE カフェの教育効果(1)(2)(3)は十分に達成できた。(4)(5)は一部は達成できたが、十分でないところもあるので引き続き活動していきたい。（１）実施する学生の企画力、コミュニケーション能力の向上、（２）教員のコミュニケーション能力指導力の向上、（３）参加者が最先端科学技術を知ることによる学習意欲の向上、（４）普段研究内容に踏み込む機会の少ない職員への意識付け、（５）学内外の教員の異分野交流が始まるきっかけ作り

来年度以降、GSE カフェとグローバルセミナーで得た経験を生かして、この発展形として、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企画していきた。を継続していきたい。

TOPへ戻る

ＰＢＬにおける学生の学びの促進・プロセス可視化・アセスメントのための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

１．はじめに

本研究では，2012 年度からの大学院の国際 PBL，及び，2015～2019 年度に実施した地域/COC を対象とする PBL 授業の経験を踏まえて，2020 年度より PBL 活動そのものの高度化を目指した EdTech 技術に目標を定めて研究を進めている．本研究の概要は以下のとおり．

1.1 対象となる授業

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

1.2 目的

PBL 教育は，学生主体の学びであり，各人の専門知識をもとに，社会における問題の発見と課題解決のための科学的リテラシー，プロジェクト遂行・リーダシップ等の総合的能力の育成が期待されている．しかしながら，各人のプロジェクトへの貢献度，プロジェクト促進については，これまで，事前・事後の振返りと成果物の評価，PROG テストが主であり，実際のプロジェクト活動中のデータの反映は少ない．本研究では，PBL 遂行中の各学生の行動（音声・映像等）データを取得し，学びの促進，プロセスの可視化システムを開発し，行動と従来のアセスメントとの関連性，さらには，行動分析から学生へのフィードバックを行う EdTech システムの開発をめざす．

２．研究計画

2.1 実施計画

本研究の全体計画としては，対象授業における学生自身のデータをもとに，以下の機能をもつ，EdTech システムの設計・開発・評価を行う．

(1)PBL における各学生の行動データの取得（音声を主として映像情報の利用も考慮）
(2)行動データに対して，属性を付与した非構造化データベースの構築
・話者ダイアライゼーション(いつ，だれが，どのように活動(発声)しているか)．
・クラウド上でのデータベース化，行動記述（アノテーション）．
(3)PBL 時のリアルタイム活動予測
(4)PBL 時の活動から，事前・事後，成果物，PROG スコアの予測（可能性の検討）
(5)EdTech システムによる学生へのフィードバック技術(プロジェクトの学びの促進技術)．

TOPへ戻る

2.2 学科・学部・専攻等の FD・SD 活動との関連，教育改革への貢献

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

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

2.3 教育において期待される効果

「学生が何を学んだか」には，学んだ知識と，それを活用するための科学的リテラシー＆コンピテンシー（課題を設定し，解決していく能力）の２つがある．前者は，試験や成果物でその教育効果を評価できるが，後者は，評価が難しい．この研究では，PBL 中の学生の行動データから，PBL の事前・事後の振返り，成果物評価，PROG スコアとの関係を予測し，学修を支援する EdTech システムの提案をめざす．また，PBL 活動のリアルタイムでのフィードバック，PBL 活動と成果物との関係の定量的な関係づけができるとよい．

３．計画の進行状況

2021 年度は，以下のシステム提案・研究を実施した．

3.1 音声（映像を含む）データのデータベース化，VR ツールの利用： COVID-19 によるオンライン化・ハイブリッド化の推進もあり，システム工学特別演習をはじめとして，PBL の機会において 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（アノテーションツール）による行動記述のデータベース化を実施した．

3.2 PBL 参加者の活動の可視化

PBL 活動のオントロジーによる記述を試みた．構築すべきオントロジーとしては，次の 2 種類を考慮している．

(1)PBL 活動の様子を表現するオントロジー：PBL 自体の定義，あるいは，PBL に共通する概念を定義したもの．例えば，PBL を構成する，人間，ロール（参加者の役割・担当：生徒，先生,），場所・日付，成果物・レポート，評価，発表といった行動表現がある．また，ディスカッション表現として，誰が・いつ・誰に・発言したか，及び，発話時間・発話回数といった情報の記述．さらに，聴取者に関しては相槌情報の記述も含める．

(2)ディスカッションの内容（話題）を表現するオントロジー：議論対象の内容そのものを記述するための語彙体系．例えば，防災システムとか，VR による実験システムといった開発システムの内容，具体的な名称・用語等．

我々は，構築したオントロジーを用いて，PBL 活動へのアノテーション付与し，その PBL オントロジー系列による活動の分析を提案している． PBL オントロジー系列全体，あるいは，注目すべきオントロジーによる部分的なオントロジー系列を抽出することによるプロジェクト活動の可視化を試みた．図 1 に，発言者の発言内容，聴取者の相槌情報を含めたオントロジー系列の例を示す．

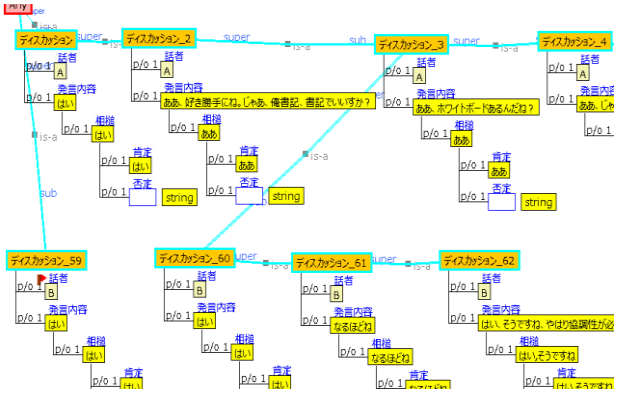


図 1．相槌可視化を示すオントロジー系列

これにより，誰が誰に何を話しているのかを明確に記述できる．

TOPへ戻る

また，今年度は，可視化に関して，従来の人間によるディスカッションのグラフィックレコーディング表現に対応するものとして，行動のテキスト情報をあらかじめ準備したピクトグラムの対応付けによる画像出力手法を検討した．図 2 にピクトグラムによる可視化の例を示す．

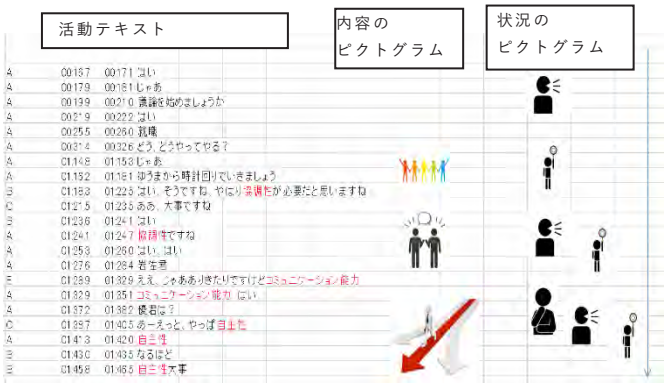


図 2. ピクトグラムによる可視化

今後，PBL オントロジー系列やピクトグラムによるグラフィックレコーディング技術の自動化が進めば，会議の内容をグラフィックでわかりやすく可視化が可能になり，ディスカッションがより活発になることが期待できる．

3.3 映像と音声による PBL 行動の可視化

これまで，PBL ディスカッションでの発言音声に注目して，参加者の活動に注目してきた．しかしながら，ディスカッションにおいては，発言者と聴取者がおり，音声の記録では，聴取者の行動がわかりにくい．

そこで，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．このデータにより，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，より詳細な PBL 活動の評価ができることが期待できる[1]．

図 3 に，映像・音声データの ELAN によるアノテーション付与の例を示す．また，PBL 参加者 A～F の各人の行動として，図 4 に参加者（発言者）の発言時間・発言回数・相槌回数，図 5 に参加者（聴取者）の注視時間と注視回数を示す．参加者 E は，発言回数も多く，他者からの注視回数も多く，その発言が他のメンバーにも興味を持ってもらえたと考えられる．一方，話者 C は，発言回数では 2 番目であったが，注視回数は 4 番目であり，発言の内容については必ずしも他のメンバーに受け入れられていないといえるのではないだろうか．

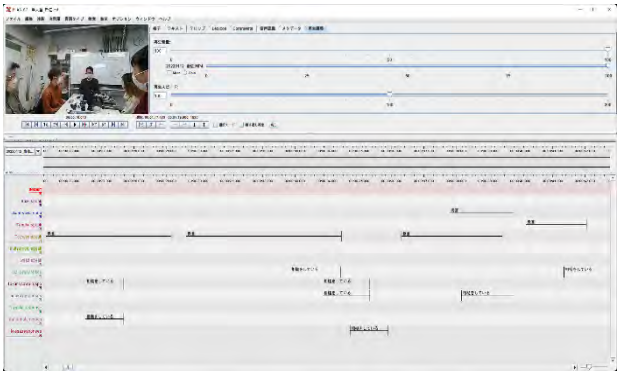


図 3. ELAN による映像音声アノテーション

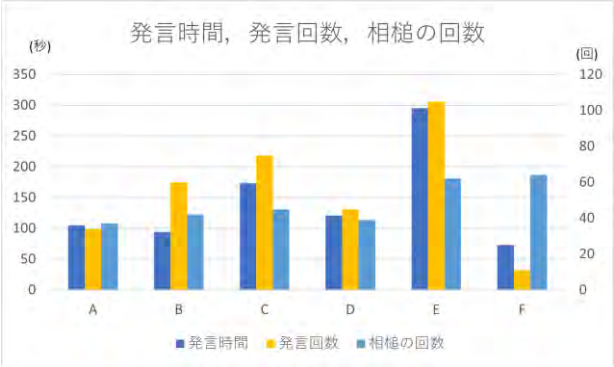


図 4. 参加者（発言者）の発言時間，発言回数，相槌の回数

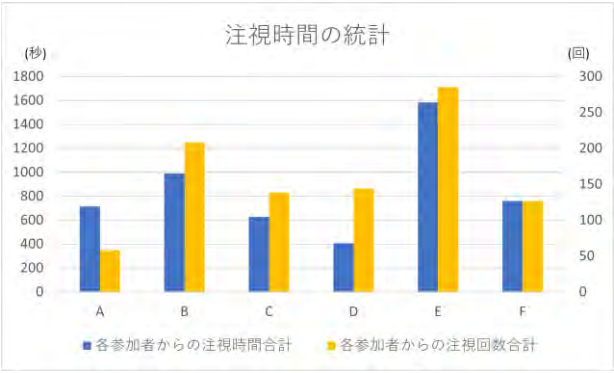


図 5. 参加者（聴取者）の注視時間と注視回数

TOPへ戻る

3.4 PBL のアイデア出し支援のための合意形成支援

従来の PBL の運営において，活動手順を形式化し，必要事項の確認や精緻化を促すことで，合意形成の効率化が期待できる．そこで，グループメンバーにシステムからの誘導による議論を行い，その発言内容をシステムに入力することで，議論の可視化，円滑な合意形成を支援するシステムを提案した．このシステムの表示画面を図 6 に示す．Django によりプロトタイプ実装し，ユーザーの入力内容データを SQLite データベースに保存する．グループメンバーは進捗状況に合わせ，ステップを画面上部のナビゲーションバーから選択し，表示されたページの表に議論した内容を入力していく．この手順を繰り返して，議論を「精緻化」し，より効率的なアイデア発想・合意形成ができる．



図 6. 合意形成支援システムの画面

3.5 PBL リアルタイム活動予測・振返り支援

PBL ディスカッションの各時点でのアイデア創出，発言について，リアルタイムでデータ処理をする活動予測・振返り支援についても検討している．現在，クラウドシステムを利用して以下のシステム構築した[2].

(1)グループでの発言音声の抽出
(2)音声の同時テキスト化（speech-to-text）
(3)発言分析(KH coder/Analyzer)
(4)分析結果の可視化（Visualizer）
(5)PBL 活動状況のレビュー，メンバーへのフィードバック

今後発言分析により PBL 活動のディスカッションの開始，アイデアの発言の飽和といった状態の管理を考えている．

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

2022 年度は，これまでの技術の評価，より上位レベルでのデータ処理技術を構築する．

(1) スマートホンを複数利用した，PBL 音声(画像)のマルチストリームデータのクラウド集約，ダイアライゼーションの効率化・リアルタイム化．

(2) PBL オントロジー付与の(半)自動化と音声及び PBL オントロジー系列列情報から，より上位レベルの対話の意図（意味）推定法の検討．

(3) PBL 活動予測のモデル化によるリアルタイムフィードバックの可能性や，対話の進行からチームとしての活動の可視化，すなわち，協同学修という点に注目した評価の検討．

(4) PBL 活動と，PBL 評価（スコア，コンピテンシー）との対応関係の仮説提案．PBL オントロジー系列による学生の時々刻々の行動特性をコンピテンシーの細かい出現＝"マイクロプロダクト"として捉え，その累積を AI 学習によるプロジェクトの評価や学生の行動評価，支援する技術の検討など．

学会，論文等投稿・発表状況

[1] 間野，松本，”音声と映像による PBL メンバーの行動可視化，”日本工学教育協会・年次大会講演（2022 年度発表予定）．

[2] K. Matsuhisa, Y. Mu, M. Inoue, T. Yokemura, K. Mano,”Discussion visualization and reflection system to facilitate team-based learning,”Proc. SEFI 2021, 49th annual conference, pp.1454-1457, 2021-09.

謝辞：本研究に関連して，間野研究室の修士研究・総合研究の一部として実験協力をいただいた，ムエイ，豊岡カイト，高根沢玲伽，松本光太郎，岩佐直樹各氏に感謝する．

以上

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
システム理工学部電子情報システム学科　渡部　英二
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
工学部機械機能工学科　山本　創太
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
豊洲学事部　久保　ひとみ
大宮学事部・学生課　荻田　忠伸
情報システム課　星野　励
豊洲学事部大学企画課　小倉　佑介
豊洲学事部学生課　茂木　亜貴子
大宮学事部　鈴木　洋
教育イノベーション推進センター事務課　星　由華・山本　郷子・逸見信子

１．はじめに

本学・教育イノベーション推進センターでこれまで開発・実施してきた新任教職員研修プログラムや理工学教育共同利用拠点プログラムは、教員個人の授業改善における 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（図 1 参照)。一方、中教審・教学マネジメント指針（図 2 参照）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体制の構築が急務である。

第 4 期認証評価を見据えた、学修者の学びを担保するカリキュラムマネジメント実現のため、入学年度ごとに、

（１） 学修・教育到達目標の設定
（２） 目標達成のための合理的な教育課程の編成
（３） 目標達成を可視化するための主要科目の設定
（４） 主要科目における学修成果の特定と可視化
（５） 可視化された情報をふまえての検討と改善

を各学科等が継続的に実施することが必要である。この活動の目的は、（１）～（５）を継続的に実施できるようなラインの明確化と支援体制を構築することにある。また、それら

TOPへ戻る

の実現のために、カリキュラムマネジメントに関わる教職員に必要な資質向上の機会を主導する教職員を充実させる。

２．準備段階及び研究計画

準備段階：本学ではこれまで、DP を詳細化した学修・教育到達目標を学科ごとに設定、WEB シラバスの充実、学生ごとの e ポートフォリオが稼働している。ここに至る過程で、榊原、山本、奥田、久保、荻田、星野、鈴木、星、他４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５年間の活動実績があり、目的に掲げた（１）（２）の設定および整合性の確認を実施しており、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。

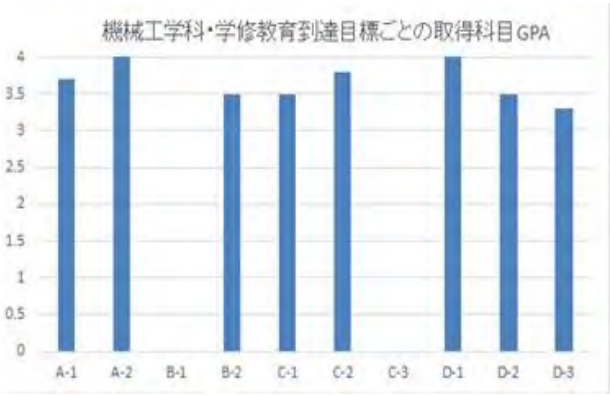
2021 年度：各学科等において、目的に掲げた（３）以降の継続的実施ができるようなラインの明確化と支援体制を構築する。また、カリキュラムマネジメントに関わる教職員に必要な資質向上の機会を主導する教職員を、本申請の分担者を中心に増やす。これらを実施する過程では、国内外の FDer 集団と情報交換を行い、最新の状況変化に備えるとともに、適切な助言を得る。

３．計画の進行状況

年度当初に、各学科の学修・教育到達目標と開講全科目の対応表を整備し、学修成果を可視化するための主要科目の設定を行った。この過程で、全 17 学科と必要に応じて懇談を行い、整合性整備の支援を行った。具体的には、2021 年度入学生のカリキュラムに関し、

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

を行った。また、下記イメージのような、「学修・教育到達目標ごとの取得科目 GPA」に関するグラフを、2021 年度入学生から、e ポートフォリオ上で可視化することとした。



この取り組みは、現行カリキュラムについて実施されるだけでなく、現在検討中の課程制カリキュラム設計支援としても行った。具体的には、工学部の課程制カリキュラム設計に関し、

- 各課程・コースの 3 ポリシーと学修・教育到達目標の整合性確認
- 各コースの学修・教育到達目標について、対応する科目単位を１単位以上取得して卒業する設定になっていることの確認
- 各コースのカリキュラムツリー確認

を、課程制設置準備室と協働で実施した。ま

TOPへ戻る

た、全学共通科目や学部間共同科目を新たな枠組みで実施するための制度設計、類似科目を共通開講するための調整を実施した。

ここまで実施したことを進める中で、学修・教育到達目標の見直し、カリキュラムの整合性確認、学修成果の可視化等を継続的に実施する体制、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概ね整った。

カリキュラムマネジメントに関わる教職員の能力開発を進めることは、カリキュラムマネジメントを持続的に進めるために必須である。このため、愛媛大学と本学主催のカリキュラムコーディネーター養成講座初級編に渡部が、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研修会評価編に角田が出席した。また、(株) ビズアップ総研主催の教学マネジメント推進者養成講座を、ミドルマネジメント層の 24 名の学内教職員に受講頂き、これらの受講費用の一部を、本助成により支出した。

４．今後の計画と課題

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

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

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

５．学会等発表状況

- 榊原暢久：芝浦工業大学における COVID19 対応と遠隔授業の組織的対応、中国・四国工学教育協会大学教育部会研究会、2021 年 12 月.
- 榊原暢久：芝浦工業大学における教学マネジメントの取組、高等教育国際シンポジウム「ウィズコロナ時代に高等教育は何を保証するのか」、2022 年 2 月.
- 榊原暢久・角田和巳・鈴木洋・相原総一郎：芝浦工業大学におけるカリキュラムの整合性整備に関する取り組みの現状と課題、第 28 回大学教育研究フォーラム、2022 年 3 月.

６．参考情報

- 中央教育審議会大学分科会：教学マネジメント指針、2020.
- 愛媛大学教育・学生支援機構教育企画室（教職員能力開発拠点）、芝浦工業大学教育イノベーション推進センター（理工学教育共同利用拠点）：カリキュラムコーディネーター養成講座初級編、2021. https://web.opar.ehime-u.ac.jp/info/cc2021/
- 日本高等教育開発協会：カリキュラムコーディネーター養成研修会評価編、2021. https://www.jaedweb.org/cc1
- 中井俊樹：教学マネジメント推進者養成講座、2021. https://www.bmc-net.jp/univ_fd_sd/

TOPへ戻る

【図 1】

「理工学教育共同利用拠点」2021年度実施　３０プログラム

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

（1） プレFD、入職から3年以内の教員を主たる対象とした教育能力開発
・大学教育開発論（プレFD）　・詳細シラバスの書き方WS　・授業デザインWS
・学生主体の授業運営手法WS、実践編　・ティーチングポートフォリオ（TP）作成・完成WS

（2） 理工系教育に関わる教員の基礎的・共通的な能力開発
・ルーブリック評価入門WS　・理系科目の評価について考えるWS　・英語による授業のためのWS
・英語による授業のためのスキルアップ研修　・LMS使用法入門（学内）　・障がい学生への対応（学内）

（3） 理工系教育に関わる教員のさらなる能力開発
・研究室指導に必要なコーチング技能入門WS　・実験・実習の授業設計入門WS　・反転授業入門WS
・PBLに活かすプロジェクトマネジメント入門講座　・デザイン能力を育成する授業設計入門
・グローバルPBL参加　・SCOT研修見学

研究能力開発（RD：Research Development）プログラム

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

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

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

芝浦工業大學 SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

【図 2】



TOPへ戻る

特　別　研　究

（１）プロジェクト研究助成

TOPへ戻る

高密度水素貯蔵を目指す反応機構の解明

機械機能工学科　　佐藤　豊人

共同研究者
芝浦工業大学 工学部 機械機能工学科　伊藤純也
量子科学技術研究開発機構　　齋藤　寛之
東北大学 材料科学高等研究所　折茂　慎一
東北大学 金属材料研究所　　高木　成幸

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

水素貯蔵技術は、再生可能エネルギーから製造された水素の保管用や効率的な輸送手段への展開が期待される。これまでに高圧で気体水素が圧縮された高圧水素ガス、低温で気体水素が液化された液体水素、水素を原子として貯蔵する水素貯蔵材料（水素化物）等が水素貯蔵方法として提案されている。これらの水素貯蔵方法の中でも、水素を原子状態で物質内に含有する水素化物は、高圧水素ガス、又は液体水素のような水素を分子状態で貯蔵する方法では到達不可能な高い体積水素密度（単位体積当たりに占める水素重量）が実現される（図 1）[1-3]。そのため、様々な水素化物が水素貯蔵材料として報告されている。一方、水素貯蔵材料は、質量当たりの低い水素量（質量水素密度）の改善が課題であり、水素吸蔵反応の機構解明や高い質量水素密度を有する新規水素化物の探索が不可欠である。

水素貯蔵材料研究では、数十 MPa 未満の水素加圧で水素吸蔵･放出反応が評価されるが、物質中に水素が吸蔵される反応（=水素化反応）は、1 GPa 以上で水素の化学ポテンシャルが急激に向上する[4]。即ち、この圧力領域の水素化実験は、一般的な水素吸蔵反応では潜在化されている反応の解明や新規水素化物の探索に有効な方法となっている。

そこで、本研究では、実用化されている水素貯蔵材料 $LaNi_5$ に着目し、その質量水素密度改善のための知見取得と幅広い圧力領域での水素吸蔵反応の解明を目的に汎用的な水素圧力領域から水素の化学ポテンシャルが向上する圧力領域までの水素吸蔵反応を観測する。

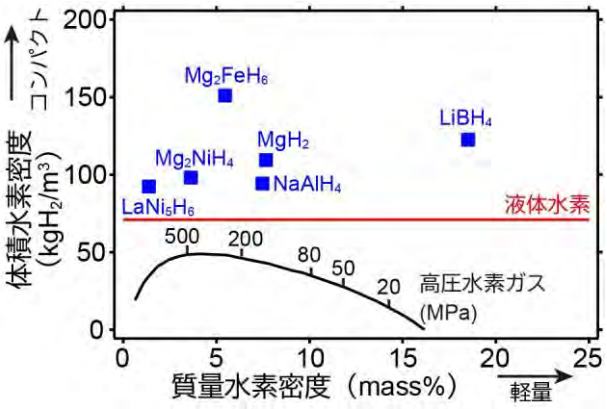


図 1 （黒）高圧水素ガス、（赤）液体水素、（青）代表的な水素化物の体積・質量水素密度[2, 3]
高圧水素ガスの線上の数字は圧力、液体水素は 20.3 K のときの体積水素密度を示す

２．研究計画

２－１．　試料

本研究では、塊状の $LaNi_5$（日本重化学工業製）が用いられた。

TOPへ戻る

２－２．2 MPa 以下での水素貯蔵特性評価

塊状の $LaNi_5$ (0.4746 g) が Ar 雰囲気中（酸素濃度：1 ppm 以下）でステンレス製の耐熱耐圧容器に封入され、水素貯蔵特性評価装置（PCT 装置　日本重化学工業製　AJ-001）に取り付けられた。

水素貯蔵特性評価前の活性化処理として、真空下で 623 K の熱処理を 3 時間行った後、室温で水素吸蔵・放出反応を 5 サイクル行った。サイクルにおける水素吸蔵反応は、1 MPa の水素ガス加圧を 10 時間保持され、水素放出反応は、ロータリーポンプによる真空下で 10 時間保持された。

活性化処理後、2 MPa 以下で $LaNi_5$ の水素貯蔵特性が評価された。水素貯蔵特性は、PCT 装置を用い、303 K, 323 K, 343 K で保持された時の水素圧力と水素吸蔵量が評価された。

２－３．1 GPa 以上での水素吸蔵反応の観測

1 GPa 以上での水素吸蔵反応の観測には、SPring-8 BL14B1 に設置された高圧プレスと放射光 X 線回折が利用された[5]。

試料は、2 MPa 以下での水素貯蔵特性評価と同様に水素貯蔵特性評価前の活性化処理として、真空下で 623 K の熱処理を 3 時間行った後、室温で水素吸蔵・放出反応を 5 サイクル行った。活性化処理後の試料は、水素供給源となる内部水素源（BH_3NH_3）と共に NaCl カプセルに同封され、高圧実験用セルに挿入後、BL14B1 に設置された高圧プレスにセットされた。水素源から水素を放出させるために高圧実験用セルは、1 GPa まで加圧後、473 K まで昇温され、15 分保持された。その後、加圧状態で室温まで冷却し、室温下で 10 GPa まで加圧された。

上記の一連の流れに関して、その場での放射光 X 線回折を行い、得られた X 線回折パターンの変化(結晶構造の変化)が観測された。

３．計画の進行状況

３－１．2 MPa 以下での水素貯蔵特性

図 2 に 303 K で評価された $LaNi_5$ の水素吸蔵・放出反応曲線を示す。この結果から約 1.3 mass%の水素が可逆的に吸蔵・放出されることが明らかになった。323 K と 343 K でも同様の評価を行い、各温度での水素吸蔵・放出反応の平衡状態の圧力を表 1 に示す。

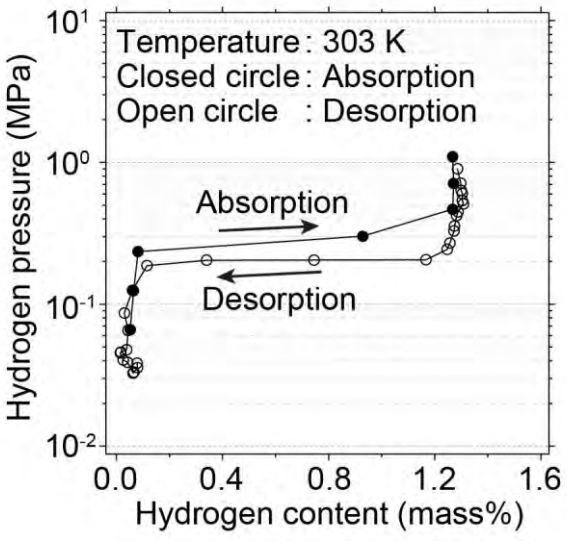


図 2. $LaNi_5$ の 303 K における水素吸蔵・放出反応曲線

表 1. 各温度の水素吸蔵・放出反応における平衡水素圧

	303 K	323 K	343 K
水素吸蔵	0.28 MPa	0.55 MPa	1.01 MPa
水素放出	0.20 MPa	0.43 MPa	0.86 MPa

平衡水素圧と測定温度の関係から、$LaNi_5$ の水素吸蔵・放出反応におけるエンタルピー変化は、-27.46 kJ/mol H_2（吸蔵）、-30.92 kJ/mol H_2（放出）であった。これらの値は、既存の結果[6]と一致し、$LaNi_5$ は、下記の(1)式と図 3 に示すように結晶構造内に水素が原子状態で吸蔵され、水素ガスとして放出された。

$$LaNi_5 + 3H_2\ (g) \leftrightarrow LaNi_5H_6 \qquad (1)$$

TOPへ戻る

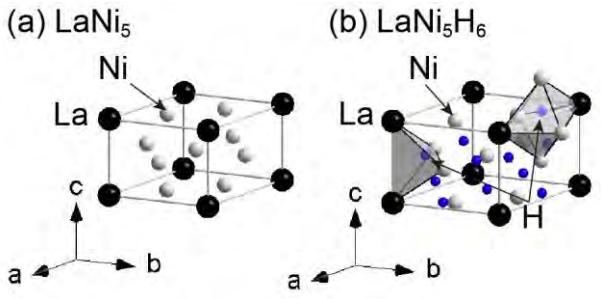


図 3. (a) $LaNi_5$ [6]、及び(b)$LaNi_5H_6$ [7]の結晶構造（黒丸：La、灰丸：Ni、青：H）水素は、La と Ni で形成される四面体、又は八面体内に存在する。

３－２．1 GPa 以上での水素吸蔵反応の観測

図 4 に 1 GPa の加圧下で室温から 473 K まで昇温した時の放射光 X 線回折パターンを示す。473K に到達後、5 分後のブラッグピークは、面間隔 *d* が大きな方向へシフトした。この結果は $LaNi_5$ が水素源から放出された水素を吸蔵し、格子が膨張したことを示す。

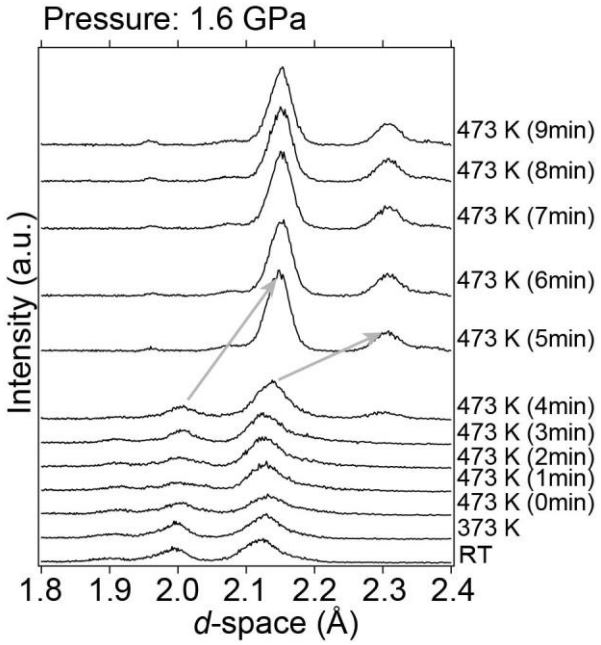


図 4. $LaNi_5$ を水素源と共に 1 GPa の加圧下で室温から 473 K まで昇温した時の放射光 X 線回折パターン

図 5 は、室温に冷却後、昇圧過程での $LaNi_5$ の格子体積の変化（図 5 上の赤）と水素源を含有しない場合の $LaNi_5$ の格子体積の変化（図 5 上の黒）を示す。$LaNi_5$ と $LaNi_5H_6$ の格子体積の差は、22.05 A^3 であり、水素原子 6 個分の体積に相当する（1 水素原子当たり 3.68 A^3)。そのため、予想される $LaNi_5H_6$ は(図中の青)、$LaNi_5$（水素源無）の昇圧過程の結果に 22.05 A^3 を加えた値が図中にプロットされた。

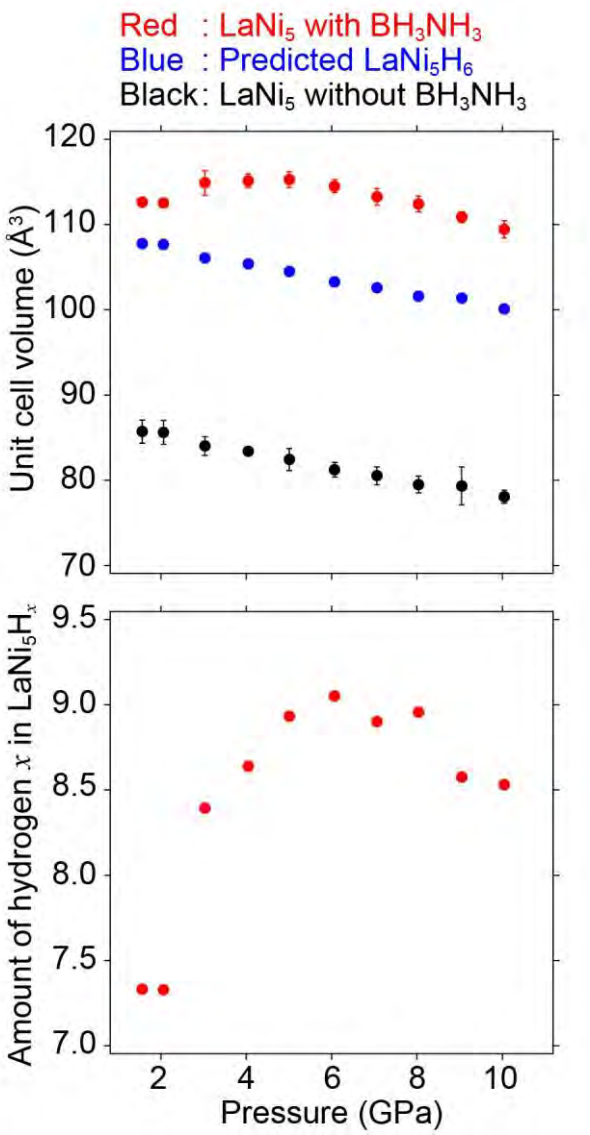


図 5. 室温で $LaNi_5$ を 10 GPa まで加圧した時の（上）格子体積変化と（下）水素吸蔵量 *x* 上図において、黒：水素源無、赤：水素源有、青：予想される $LaNi_5H_6$ の格子体積を示す。

一方、$LaNi_5$（水素源有）の体積変化は、予想される $LaNi_5H_6$ の体積と一致しない。これは、高圧下で $LaNi_5$（水素源有）が $LaNi_5H_6$ よ

TOPへ戻る

りも過剰な水素を含有していることを示唆する。この結果、6 GPa において、最大の水素吸蔵量（$LaNi_5H_9$）に達し（2 式)、その値は、$LaNi_5$ の水素吸蔵量の 1.5 倍に達した（2.05 mass%)。

$$LaNi_5 + 4.5H_2\ (g) \leftrightarrow LaNi_5H_9 \qquad (2)$$

高圧下で水素吸蔵された $LaNi_5$ の結晶構造は、格子膨張で説明ができることから、$LaNi_5$ において、汎用的な圧力下での水素吸蔵・放出反応では、水素が占有可能なサイトの約 67%のみに水素が占有されることが明らかになった。即ち、水素占有率を向上させることで $LaNi_5$ の水素貯蔵量の増加が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

４－１．今後の計画

本研究では実用化されている水素貯蔵材料 $LaNi_5$ に着目し、その水素貯蔵量を改善させるための知見取得と反応機構の解明を目的に、汎用的な圧力下と水素との反応が促進される 1 GPa 以上での $LaNi_5$ の水素吸蔵反応が評価された。その結果、汎用的な圧力下では（2 MPa 以下)、$LaNi_5$ は約 3 mol 分の水素吸蔵量（1.3 mass%）であったが、高圧下では 4.5 mol 分の水素吸蔵反応を示した（2.1 mass%)。高圧下での水素吸蔵反応は、汎用的な圧力下で観測される格子膨張と同様であった。そのため、高圧下での水素は、2 MPa 以下での反応と同じ位置に存在しているが、水素の占有サイトにおける占有率が向上したことが示唆された。高圧下での水素吸蔵量は、汎用的な圧力下の約 1.5 倍であることから、汎用的な圧力領域では、水素が占有されるサイトの内、約 67%の占有に留まっている。今回の高圧下での実験によって、$LaNi_5$ は、既存の 1.5 倍まで水素吸蔵量の増加が期待される。そのため、今後、潜在化されている水素占有サイトを低圧下でも利用可能な反応機構を解明することを検討している。また、関連した試料を用いて、1 GPa 以上の高圧下での水素吸蔵反応の観測も検討している。

４－２．論文等投稿・発表状況

本研究で得られた結果は、関連する研究を遂行して、数年以内に成果発表を検討している。

謝辞

高温高圧下での放射光 X 線回折は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業のもと、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の齋藤 寛之博士と内海伶那氏と共同で SPring-8, BL14B1 に設置されたマルチアンビル型高圧プレスを用いて実施された（課題番号：JPMXP09A21QS0031)。

参考文献

[1] L. Schlapbach, A. Züttel, Nature 414, 353-358 (2001).
[2] A. Züttel, Mater. Today 6, 24-33 (2003).
[3] 佐藤豊人，折茂慎一，応用物理，90, 570-573, (2021).
[4] H. Sugimoto, Y. Fukai, Acta Metallurgica, 40, 2327-2336, (1992).
[5] H. Saitoh, S. Takagi, K. Aoki, S. Orimo, 日本放射光学会誌，27, 10-18, (2014).
[6] E. H. Kisi, C. E. Buckley, E. M. A. Gray, J. Alloys Compd. 185, 369-384, (1992).
[7] P. Fischer, A. Furrer, G. Busch, L. Schlapbach, Helv. Chim. Acta., 50, 421-430, (1977).

TOPへ戻る

Self-assembled and on-surface structures of Phenanthrene and Phenanthrolene-terminated Pyrazinacenes.

応用化学科　RICHARDS Gary James

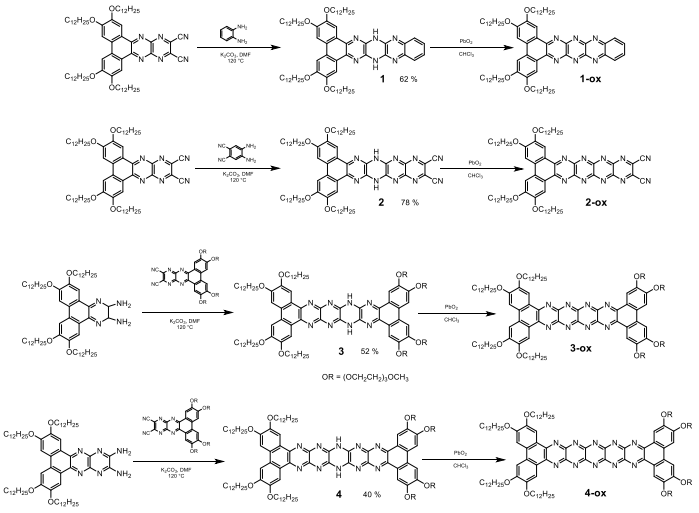
Research colleagues
○ 応用化学科 Dr TAMBOLI Majid and Professor HORI Akiko
○ 物質・材料研究機構，国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA) ナノマテリアル分野 光機能分子材料グループ，Dr HILL Jonathan P.

１．Paper introduction

The aim of the proposed research was to prepare pyrazinacene[1] molecules terminated with phenanthrene and phenanthroline units and to investigate their photophysical (UV/Vis absorption, fluorescence, fluorescence quantum yields.) Their self-assembling properties, including any liquid-crystalline and solution self-assemblies were also planned to be investigated. Phenanthrolene-terminated molecules were expected to bind to various metal cations to form 2D or 3D metal organic frameworks. However, due to difficulties encountered in the synthesis of the phenanthrolene-terminated derivatives, we instead focused on the synthesis and characterization of a family of phenanthrene-appended compounds. Based on our previous findings, we chose to explore pyrazinacenes containing either four or five consecutively fused pyrazine rings as these are known to be REDOX active compounds.[2] We have prepared several four and five-pyrazine containing compounds terminated with phenanthrene units. The phenanthrene units were appending with alkoxy chains (either hydrophobic $C_{12}H_{25}O$ (C12O) or hydrophilic triethyleneglycol-monomethylether (TEG) chains to impart solubility as well as possibilities to achieve self-assembly through either liquid-crystallinity or through aggregation in solution.

２．Research program

Synthesis of the compounds is shown in scheme 1.



Scheme 1. Synthesis of compounds.

Synthesis of the compounds is achieved

TOPへ戻る

through a double nucleophilic substitution of the electron deficient dicyano-tetraazanaphthalene derivatives using various aromatic diamines.[3] Using this strategy, we were able to synthesize a wide variety of compounds based on an octaazatetracene or decaazapentacene core. The as-prepared reduced compounds can be oxidized using lead (IV) oxide or other commonly available oxidants. All compounds have been fully characterized by ^{1}H NMR, ^{13}C NMR, FTIR and MALDI-TOF mass spectroscopic analysis.

3. State of progress

Liquid Crystalline and other Self Assembling Properties

Compound **1** was found to form a mesophase upon cooling at 170 ° C. Polarised optical microscopy is consistent with a columnar phase and powder X-ray diffraction measurements indicate a rectangular columnar ordering. Compounds **3**, **3-ox**, **4** and **4-ox** can form organogels from some solvents as well as fibrillar self-assemblies from others.

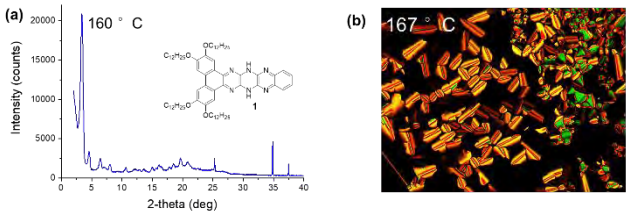
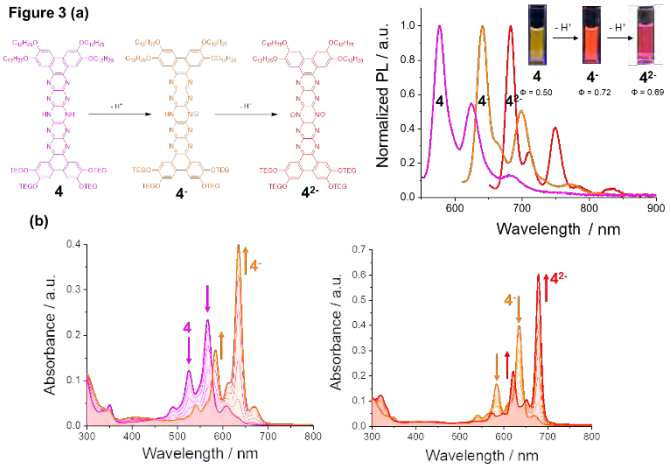


Figure 2. (a) Powder X-ray diffraction pattern from **1** upon cooling to 160 ° C. (b) Polarised optical microscopy of **1** on transition from isotropic to Columnar phase at 167 ° C,

Photophysical Properties – Deprotonation

Reduced pyrazinacenes feature a dihydropyrazine ring that can be easily deprotonated using mild bases such as triethylamine. Here, because of the electron-donating alkoxy-substituted phenanthrene units, deprotonation can be more readily be achieved using stronger bases such as TBAF or tetramethylguanidine.

Figure 3 (a) shows changes in fluorescence spectra upon deprotonation of **4** using TBAF in $CHCl_3$. All species show very high photoluminescence quantum yields (Φ) with double deprotonation resulting in efficient fluorescence in the deep-red to NIR

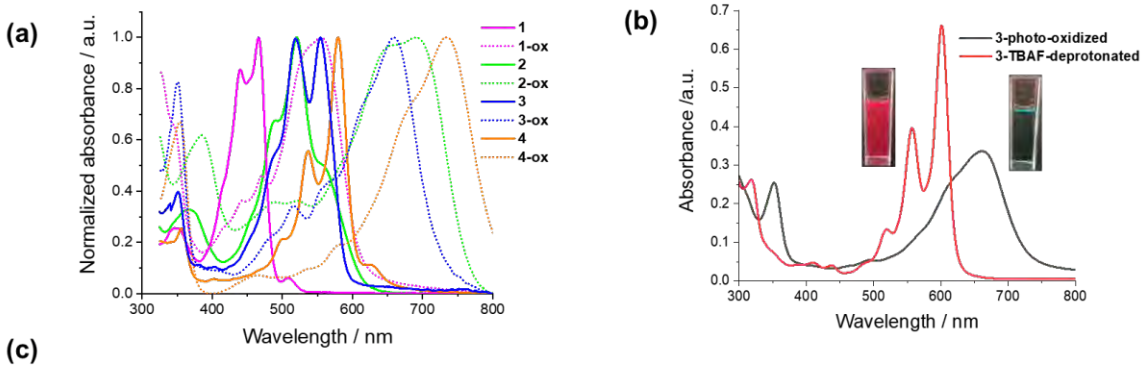


region. (b) shows changes in absorption upon deprotonation of **4** – these changes are typical of pyrazinacenes – a bathochromic shift is observed with maintenance of the typical acene vibronic structure.

Photophysical Properties - Oxidation

Reduced pyrazinacenes exhibit similar UV-vis absorption spectra to conventional acenes with characteristic vibronic structure. Upon oxidation, a significant bathochromic shift is observed, and the vibronic structure becomes less well-defined. Reduced derivatives are highly fluorescent with solution PLQYs typically >50%. Conversely, fluorescence from oxidized species is significantly attenuated, typically <2%. Compound **3** can be photo-oxidized to **3-ox** using 254 nm UV light. Compounds **1** and **2** undergo photo-oxidation, although further reactions also

TOPへ戻る



(c)

Reduced Compounds					Oxidized Compounds				
	DFT Calculated (B3LYP 6-31+G*)			Experimental		DFT Calculated (B3LYP 6-31+G*)			Experimental
Compound	HOMO (eV)	LUMO (eV)	E-gap (eV)	E-Gap (Optical - $CHCl_3$)	Compound	HOMO (eV)	LUMO (eV)	E-gap (eV)	E-Gap (Optical - $CHCl_3$)
1	-5.2	-2.1	3.1	2.5	1-ox	-5.7	-3.7	2.0	2.0
2	-5.8	-3.2	2.6	2.1	2-ox	-6.2	-4.7	1.5	1.6
3	-5.2	-2.5	2.7	2.0	3-ox	-5.6	-3.8	1.8	1.7
4	-5.5	-2.9	2.6	2.0	4-ox	-5.7	-4.2	1.5	1.5

Figure 4. (a) UV/visible absorption spectra of reduced compounds **1-4** (solid lines) and oxidized compounds **1-4-ox** (dashed lines) showing a significant bathochromic shift upon oxidation. (b) Changes in absorption spectra upon photooxidation of TBAF deprotonated **3** in $CHCl_3$ upon exposure to 30 seconds UV_{254} light. (c) Table summarizing DFT calculated frontier orbital energies and comparison with experimental optical gap.

occur such that clean photo-chemical isolation of **1-ox** and **2-ox** is challenging. Efforts to understand the effect of REDOX processes on solution or liquid-crystalline self-assembling properties are currently under investigation.

In conclusion, a series of pyrazinacenes with core octaazatetracene or decaazapentacene units terminated with phenanthrene units have been prepared. To impart solubility, liquid-crystalline and other self-assembling properties, the molecules are further functionalized with alkoxy groups on the phenanthrene units.

The reduced compounds **1-3** are readily oxidized using standard chemical oxidants such as PbO_2 or DDQ and can also undergo photooxidation using ultraviolet light. Reverse reduction reaction can be achieved by adding weak reducing agents such as ammonia or sodium dithionite. Reduced compounds show efficient fluorescence in solution which can approach the NIR region on deprotonation.

4. Future program, paper submission and results briefing

Further work is now under way to investigate the self-assembling properties of these compounds along the relationship of the compounds REDOX properties to their self-assembling behaviours. Preliminary results from this project have already been presented at the Pacifichem conference[4] and at the Chemical Society of Japan Annual Meeting.[5] Amphiphilic compounds **3** and **4** will be studied for potential self-assembling properties at the air-water interface, in collaboration with Professor Somobrata ACHARYA at the Indian Association for the Cultivation of Science in India. This project has allowed us to continue our fruitful research collaboration with Dr Jonathan HILL at the National Institute for Materials Science, NIMS, in Tsukuba, including

TOPへ戻る

several visits their to perform various experiments including MALDI-TOF mass spectroscopy and Scanning Tunnelling Microscopic analysis (SEM).
We hope to publish these works in an academic journal with IF>2 later in 2022, or early 2023.

References

1. G. J. Richards, The Pyrazinacenes, *Acc. Chem. Res.*, 2021, 54, 16, 3228-3240.
2. D. Miklik, et al. Pyrazinacenes exhibit on-surface oxidation- state- dependent conformational and self-assembly behaviours, *Commun. Chem.*, 2021, 4, 29.
3. G. J. Richards, et.al. Pyrazinacenes: Aza Analogues of Acenes, *J. Org. Chem.,* 2009, 74, 23, 8914–8923.

Publications at Conferences

4. Photophysical Properties, Liquid Crystalline Behaviour and Photoredox Activity of Phenanthrene-Terminated Pyrazinacenes, G. J. Richards, J. P. Hill, and A. Hori, *Pacifichem 2020*, December 2021, Online.
5. Decaazapentacenes appended with electron-rich triphenylamine and phenanthrene units - their redox-coupled photophysical and self-assembling properties., G. J. Richards, M. Tamboli, K. Aoki, J. P. Hill and A. Hori. *102nd CSJ Annual Meeting*, March 2022, Online [K2-3pm-02].

TOPへ戻る

磁気ギアを用いたEV用モータシステムの開発

電気工学科　　相曽　浩平

共同研究者
横浜国立大学　大学院工学研究院　知的構造の創生部門　　赤津　観
日立製作所　青山　康明

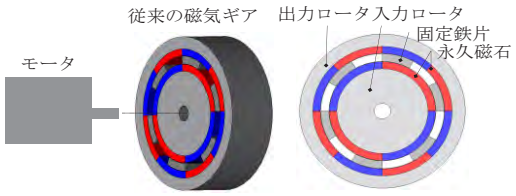
１．序論（はじめに，まえがき，目的）

自動車業界ではモータシステムの小型軽量化が要求されており，高速モータとギアを組み合わせた駆動システムの開発が進められている。モータを高速化することで高出力密度を満たし，所望のトルクと回転速度はギアを用いて得ることでシステム全体を小型軽量化できる。しかしながら，現在多く用いられている機械式ギアは歯同士の接触により動力を伝達するため高速回転時には歯の機械的疲労や磨耗から伝達効率の低下，振動及び騒音の増大といった問題が生じる。これらの問題に対し，磁気ギアは永久磁石の磁力を利用することで入力ロータと出力ロータの磁石極対数の比でギア比を得ることができ，非接触の動力伝達を可能とするため低振動・低騒音，潤滑油が不要であることから保守性が高い特徴を有している。一方で国内外において磁気ギアの研究は数多く報告されているが，適用するモータの回転速度が低速（3000 回転/分以下）である場合がほとんどであり，自動車のように高速（10000 回転/分以上）を要するモータに磁気ギアを適用した例は存在しない。これはモータの高速化に伴い，従来の磁気ギアでは固定鉄片を用いた磁束伝達原理に起因して磁束高調波による磁石渦電流損失の増大に加え，入力ロータの機械的強度の低さが欠点となるためである（図 1）。

そこで本研究では，磁気ギアの高速化に向けた課題に着眼し，高速領域で駆動可能な磁気ギアを提案することにより，高速モータと磁気ギアを一体化したモータシステムを構築することで小型軽量化かつ高効率化，さらにはギアの摩擦を無くすことによる高付加価値化の実現を目的とする。本研究で提案するMagnetic Multiple Spur Gear (MMSG)と複数の小型・高速モータの駆動システムを図 2 に示す。提案する MMSG は，一つの出力ロータと複数の入力ロータから構成されており，全ての入力ロータに小型・高速モータが取り付けられている。MMSG は下記の利点を有している。①入力ロータを複数に分散することで一つあたりの入力ロータ径を小さく設計できるのでロータに生じる遠心力が低減され，高速回転に有利な構造となる。②固定鉄片を用いずに，入力ロータの磁束が直接的に出力ロータに伝達されるため高調波磁束の発生が少なく，高速回転時の損失を低減できる。

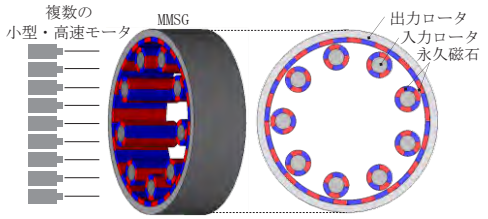
最終的には上記の駆動システムを図 3 のように電気自動車のホイール内にモータとギアを配置したインホイールモータシステムに適用することで，車内空間拡大による快適性向上と走行距離拡大を目指す。

TOPへ戻る



ギア比 ＝（出力ロータの磁石極対数）/（入力ロータの磁石極対数）

図 1 従来の磁気ギア



ギア比 ＝（出力ロータの磁石極対数）/（入力ロータの磁石極対数）

図 2 提案する磁気ギア(MMSG)

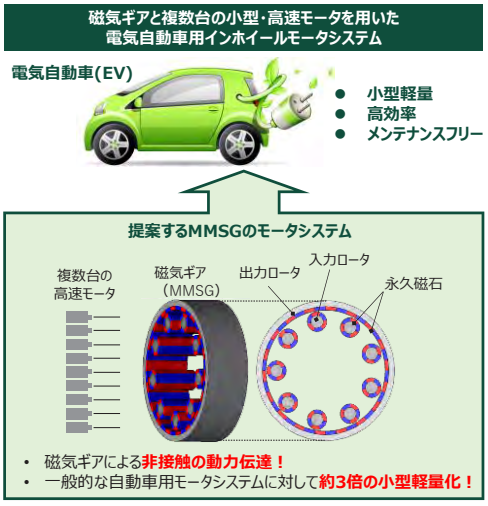


図 3 磁気ギアを用いた EV 用モータシステム

２．研究計画

提案する磁気ギアを用いた EV 用インホイールモータシステムを構築するために下記①②③の研究を計画している。

① 出力25.5kWのMMSGの実機評価

25.5kWのMMSG実験機と駆動用モータ15台を用いた実験によるギア効率と損失の取得（目標性能：最大出力25.5kW,最高回転速度50000回転/分,伝達効率95%）

② 複数台の高速モータの制御方法及び駆動システムの確立

・複数台モータの始動時の課題（各モータのロータ位置ずれ,ギアの入力ロータ間の磁極ずれ）の明確化

・スムーズに始動するための制御法と駆動システムの提案および実機実験による検証

・走行時の負荷に応じて複数台のモータ台数を切り替える高効率制御法の提案と実機実験による検証

③ 機電一体構造のモータシステムの冷却方法と性能評価

・機電一体構造に向けたギア,複数台モータ,インバータを同時に冷却するための配置と冷却器構造の設計と実機評価

・機電一体構造のモータシステムの性能評価（最大出力 25.5kW,最高回転速度 50000 回転/分までの駆動範囲における損失および効率特性）

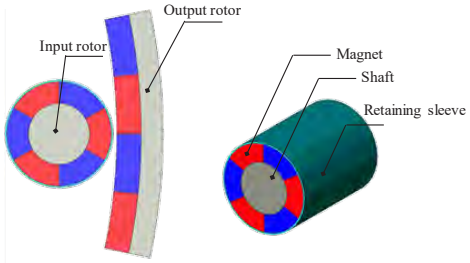
３．計画の進行状況

本年度は研究計画①の内容について検討を進めた。下記に検討結果を報告する。

3.1 MMSG の再設計と試作

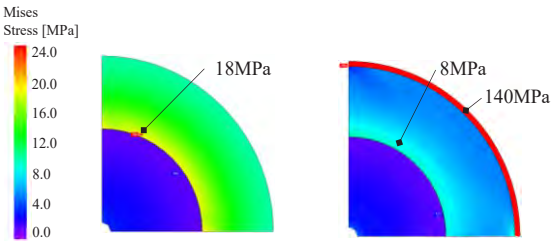
MMSG の実験機において最高出力 25.5kW, 最高回転速度 50000 回転/分における特性評価を行うために，高速ロータの補強構造を検討した。MMSG を複数台のモータにより入力回転速度 50000 回転/分で駆動した場合，遠心力による入力ロータ磁石の破損が懸念されるため，安全率を考慮し，磁石に生じるミーゼス応力が 10MPa 以下になることを目標値として再設計を行った。設計した構造を図 4 に示し，応力低減効果を図 5 に示す。図 4, 図 5 より前回モデルからロータ外径を 1mm 減少し，ロータの外周を保持スリーブで補強することで 50000 回転/分における応力を 8MPa まで下げられることを遠心力解析により確認した。以上の検討を基に入力ロータ再試作し，高速試験を実施して 80000 回転/分まで機械強度的に耐えられることを明らかとした。

TOPへ戻る



(a) MMSG の 1/15 モデル (b) 入力ロータの構造

図 4 設計した MMSG の入力ロータ



(a) 前回までの構造 (b) 補強した構造

図 5 最高回転速度 50000rpm 時の
入力ロータのミーゼス応力分布

3.2 MMSG の実機実験による性能評価

図 6 に示す出力 25.5kW の MMSG 試作機についてギア効率，ギア損失，システム効率の測定を行った。測定条件として MMSG をモータ 15 台により駆動し，最高回転速度 21000 回転/分，負荷 120Nm の駆動範囲においてギア効率，ギア損失，システム効率のマップを取得した。モータには市販のラジコン飛行機用ブラシレスモータを使用した。

図 7，図 8 にギア効率及びギア損失の測定結果を示す。図 7，図 8 より，高速領域においても損失増加の影響は小さく，95%以上の高効率が得られた。これまでの従来の固定鉄片を用いた磁気ギアにおいて 21000 回転/分以上の駆動が可能であり，かつ 90%以上の高効率が得られるものは存在せず，今回の実験結果は磁気ギアの高速化に向けた重要な成果と言える。また，MMSG では負荷が大きくなるほど高出力が得られるため，高効率となる傾向を明らかとした。システム効率を図 9 に示す。図 9 より，モータとギアを含めたシステ

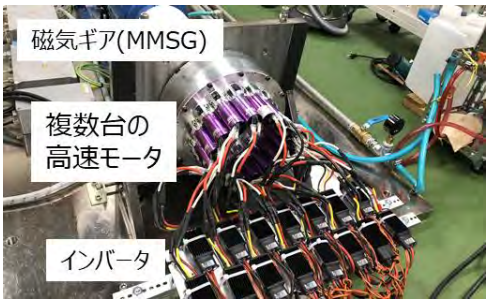


図 6 MMSG の実験システム

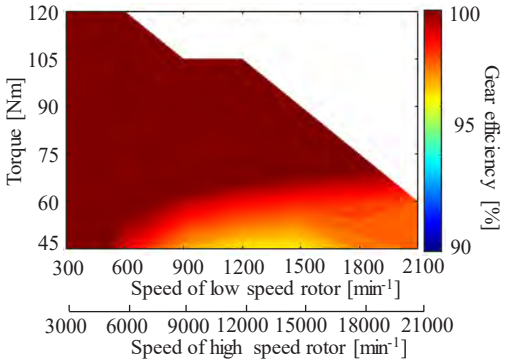


図 7 ギア効率

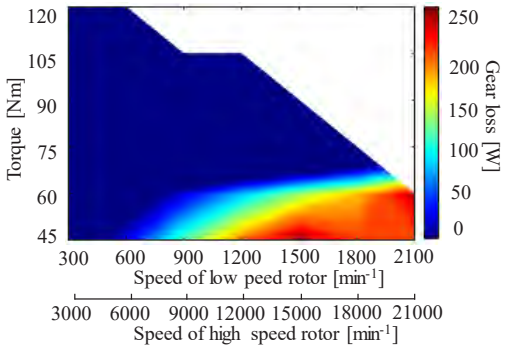


図 8 ギア損失

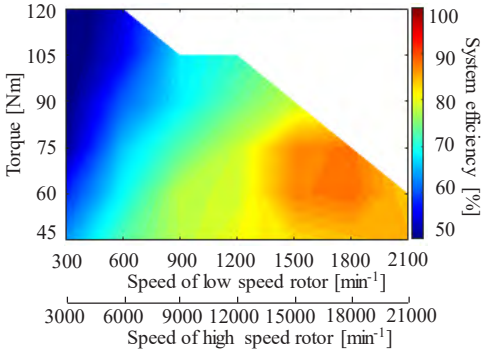


図 9 システム効率

TOPへ戻る

ム効率は中負荷，中速度域において 80%-90%の効率が得られた。一方で高負荷，低速域ではモータ効率が低下することから，システム効率も低下する結果となった。 また，最高出力 25.5kW（回転速度 42000 回転/分，負荷 60Nm）の点でのギア効率は 95%，システム効率は 87%が得られた。今回は市販のブラシレスモータを使用したが，今後モータ効率を改善できれば更なるシステム効率向上が可能と考えている。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の研究計画は，２．研究計画で示した②③についての研究を進め，電気自動車に駆動システムを搭載し実車試験による性能評価を行う予定である。

本研究における 2021 年度の論文･発表業績を下記に示す。

[1] K. Aiso, K. Akatsu, Y.Aoyama, “Characteristics Evaluation of Magnetic Multiple Spur Gear for High Speed Motor Drive System”, 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 2021.

[2] K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, “A Novel In-Wheel Motor Drive System of Multiple High-Speed Motors Integrated with Magnetic Gear for Electric Vehicle”, IPEC-2022, May 2022.

[3] 相曽浩平，赤津観，青山康明，“磁気ギアと複数台の高速モータを用いた EV 用インホイールモータシステム”，2021 年春季大会-自動車技術会

[4] TECHNO-FRONTIER 2022　第 42 回モータ技術シンポジウム　（発表予定）

TOPへ戻る

「ニューノーマル」な大学での学びの変容

情報通信工学科　　大橋　裕太郎

1．序論

コロナ禍をきっかけに日本の大学の多くが遠隔授業を導入した。文部科学省が 2020 年 8 月から 9 月にかけて全国の 1060 の国公立大学、短期大学、高等専門学校に対しておこなった調査によれば、回答した大学の約 2 割が授業を全面的に対面で実施し、8 割が対面授業と遠隔授業を併用していた[1)]。2021 年には、授業の半分以上を対面で実施する予定とした大学等は、1064 校中 1036 校（約 97.4%）となった。授業形態はコロナ前に戻りつつあるが、遠隔授業を取り入れている大学等は 2021 年時点で依然として 6 割を超え、今後も「ニューノーマルな学び」としてある程度日本の大学教育に引き続き定着すると考えられる。しかしながら約 1 年の遠隔授業への移行期間を経て、教育・学習方法の急激な移行による遠隔授業の負担感、メンタルヘルスの不調や孤独感といった具体的な問題が指摘されている。たとえば飯田らの研究は、経済的に困っている学生がコロナ発生以前の 2.7 倍に増加し、学生の半数以上がストレスを抱え、そのうち約 17%は強いストレスによる気分・不安障害を伴っている可能性があることを報告している[2)]。全国大学生活協同組合がおこなった調査には、アルバイト収入減少やアルバイト先での感染への不安、経済的な悩み、オンライン授業による課題の多さや心身への影響に対する不満の声が寄せられた[3)]。また、伊藤らの調査では新入生は大学生活への不安感が強く、一人暮らしの学生の方が、心身ともにストレスを感じていることが報告された[4)]。橋本らは、コロナ禍における大学生のストレスについて独自に開発した尺度を使って調査をおこなった。その結果、コロナ禍に伴うあらゆる出来事や制約がストレスの原因となっていたことを報告している。一方で、活動中止などのようなライフイベントよりも、日々の学業や生活で生じている日々のストレス（例えば不規則な生活や規則を守ることなど）の方が、抑うつと関連していたことを明らかにしている[5)]。

このように、大学生はコロナ禍による複合的な要因から経済的、精神的、身体的なストレスを受けていることが数多くの報告から明らかになっている。一方、先行研究には以下のような課題も見受けられた。

① 学生を取り巻く様々なストレス要因について検討されているものの、遠隔授業などの「ニューノーマルな学び」との関連性や、遠隔授業に対する学生の評価とその要因が明確でない

② 遠隔授業に焦点が当てられていても、それ以外の要素（学生のデジタル読解力や学習習慣や生活習慣など）に十分目が向けられていない

③ 調査対象が特定の大学や地域に限定されている事例が多い

本研究では、上記の①から③の課題に対して、以下のような差別化をはかっている。

TOPへ戻る

①に対しては、学生が抱えていると考えられるストレスと、遠隔授業に対する学生の評価と評価の要因を同時に調査することとした。

②に関して、遠隔授業では学生は多くの場合、家などの場所から学習する。通常であれば教室で得られるはずの支援が容易には得られないことから、基礎的なデジタルリテラシーやデジタル読解力、自律的に学習する態度といった様々な能力や態度が求められる。そこで本調査では遠隔授業を、大学の授業がそのままオンライン化・デジタル化したものとしてではなく、上記の様々な能力や態度が求められる「ニューノーマルな学び」という包括的な概念としてとらえ直す。その上で、大学生が「ニューノーマルな学び」に対してどのような意識を抱きどのような評価をしているのか、ストレスにどのような関連性があるのか(またはないのか)、デジタルメディアの利用実態と合わせて調査することとした。

③に対しては、全国規模のオンライン質問紙調査を実施し、サンプル数2000以上を目標にすることとした。

今後、対面とオンラインを合わせたハイブリッド型の教育がある程度定着していくことが予想される。本調査で「ニューノーマルな学び」という、遠隔授業よりも広い視点から調査をおこなうことで、これまで見えなかった課題を明確化させ、教員だけでなく学生が遠隔授業あるいはハイブリッド型教育へのレディネスを高める足がかりとなることが期待される。

２．計画の進行状況

インターネット調査会社の協力を得て2021年7月に大学生・大学院生を対象としたインターネット上での質問紙調査をおこなった。リサーチクエスチョンは以下の通りである。

① 大学生はコロナ禍においてどのようなストレスを抱えているのか、そのストレスの主な要因は何か

② 大学生は遠隔授業をどのように評価し、評価に何が影響を与えているのか

③ デジタルメディアの日頃の利用は遠隔授業への評価に関連性があるか

分析については、総計を算出し、場合によっては属性ごとに比較を行った。本調査で利用した質問項目を表1に示す。ストレスの測定に関しては、心理的ストレス反応尺度SRS-18を使用した[6)]。SRS-18は日常的に経験する心理的ストレス反応を測定することができる3つの因子（抑うつ・不安、不機嫌・怒り、無気力、各6問）計18問で構成される。選択肢は「全くちがう」0、「いくらかそうだ」1、「まあそうだ」2、「その通りだ」3の4種類で、値の合計をストレスの指標とする。すでに信頼性と妥当性が検証されており、質問数と回答のしやすさからも本調査に適当であると判断した。

３．結果

結果の一部を報告する。

① 大学生のコロナ禍におけるストレス要因

SRS-18の平均値が回答者全体、男女ともに「普通」となり特に高い値を示していたわけではなかった。しかし、先行研究と比較したところ、全体・男子では第Ⅰ因子「抑うつ・不安」と第Ⅲ因子「無気力」が、女性ではすべての因子が高い結果となった。全体として、「抑うつ・無気力型」のストレスを感じているものと考えられる。

具体的なストレスの要因として、選択式の設問（Q4）では就職や進路などの将来が見通せないという回答が最も多かった。遠隔授業がストレスの主な要因と回答したのは5.4%にとどまった。一方、自由記述式の設問(Q11)では若干結果が異なった。生活面では「対面機会の減少・孤独・対人ストレス」、「精神的・身体的不調」、「将来や進路への不安・戸惑い」、「充実・楽しい」、「活動制限・自粛・新たな

TOPへ戻る

規則への不満や戸惑い」、「経済的困窮・学費に対する不安・不満」、「コロナウイルスへの感染、感染蔓延が不安」、「生活の乱れ」、学業に関する事柄では、「学習や研究への支障・不安、授業が大変」、「対面授業への支持・遠隔授業への不満」、「遠隔授業への支持・対面授業への不満」、「通学や対面授業、大学の対応への不安・不満」がストレス要因や回答者の関心ごととして挙げられた。選択式と自由記述式の設問を併用したことで、大学生が抱える問題の全体としての傾向と個別具体的な事例を検討することができた。

② 大学生の遠隔授業に対する評価

約 9 割が何らかの形で遠隔授業を受講していた。遠隔授業に対して肯定的な評価をした人（53.5%）は否定的な評価をした人（17.7%）を大きく上回った。肯定的に評価する人は、移動時間や移動費の削減といった効率性や合理性を挙げた人が多かった。一方で遠隔授業を否定的に評価する人は、教育の質の低下、教員からのサポートの欠如、学生間のコミュニケーション機会の欠如、課題が多すぎること、学費に見合った教育が得られていないと感じていることなどを挙げた人が多かった。

③ デジタルメディア利用との関連性

デジタルの教材が分かりやすいと回答した人（34.6％）は分かりにくいと回答した人（16.5%）の約 2 倍であった。このことから、デジタルリテラシーやデジタル読解力がそれほどの問題にはなっていないと考えられる。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

以下の論文誌や学会にて発表を予定している。

(1) Ohashi, Y. “Stress from COVID-19 Disaster and Awareness of Learning: A Case Study of Japanese University Students” IFIP WCCE 2022: World Conference on Computers in Education, 20-24, Aug, 2022 in Hiroshima

(2) 大橋裕太郎「コロナ禍での大学生のストレスと遠隔授業」2022 PC カンファレンス, 2022 年 8 月, 筑波大学.

参考文献

1) 文部科学省:“大学等における後期等の授業の実施方針等に関する調査”, https://www.mext.go.jp/content/20200915_mxt_kouhou01-000004520_1.pdf (2020).

2) 飯田昭人,水野君平,入江智也,西村貴之,川崎直樹, 斉藤美香:“新型コロナウイルス感染拡大が大学生に及ぼす影響（第 1 報）～北海道内の大学への調査結果から～”,北翔大学生涯スポーツ学部研究紀要, 12, pp.147-158 (2021).

3) 全国大学生活協同組合連合会広報調査部:“「緊急！大学生・院生向けアンケート」大学生結果報告”, https://www.univcoop.or.jp/covid19/recruitment_thr/pdf/link_pdf01.pdf (2001).

4) 伊藤美奈子, 栗本美百合, 白水倫生:“コロナ禍による大学生のストレスと大学生活への意識”, 人間文化総合科学研究科年報, 36, pp.25-37 (2021).

5) 橋本剛:“コロナ禍初期における大学生の心理社会的ストレスに関する探索的検討 : 社会規範としての援助要請スタイルの効果も含めて”,人文論集,71(2),pp.15-34(2021).

6)鈴木伸一,嶋田洋徳,三浦正江,片柳弘司,右馬埜力也,坂野雄二:“新しい心理的ストレス反応尺度（SRS-18）の開発と信頼性・妥当性の検討”, 行動医学研究, 4(1), pp.22-29 (1997).

TOPへ戻る

表1 本調査で利用した質問項目

番号	選択肢
Q1　学校種と学年	私立・国公立と学年（大学院含む）を選択
Q2　居住地 （該当するものを選択）	・　もともと実家に住んでいる ・　一人暮らしをしていたが、新型コロナウイルスの影響で今は実家に住んでいる ・　アパートやマンションなどで一人暮らしをしている ・　学生寮、学生会館、学生マンションなどに住んでいる ・　シェアハウス、親戚宅などに住んでいる ・　上記以外
Q3　ストレスチェック （ここ１ヶ月の感情や行動の状態に最もあてはまる数字を１つだけ選択。選択肢は「全くちがう」0、「いくらかそうだ」1、「まあそうだ」2、「その通りだ」3）	・　怒りっぽくなる　・　いらいらする ・　悲しい気分だ　・　いろいろなことに自信がない ・　何となく心配だ　・　なにもかもいやだと思う ・　怒りを感じる　・　よくないことを考える ・　泣きたい気持ちだ　・　話や行動がまとまらない ・　感情を抑えられない　・　なぐさめて欲しい ・　くやしい思いがする　・　根気がない ・　不愉快だ　・　ひとりでいたい気分だ ・　気持ちが沈んでいる　・　なにかに集中できない
Q4　Q3の理由 （Q3 の回答の理由を１つだけ選択）	・　新型コロナウイルスの感染蔓延や感染することが不安だ ・　家族のことが心配、家族と会ったり話したりできない ・　友人のことが心配、友達と会ったり話したりできない ・　好きなことややりたいことができない ・　就職や進路などの将来が見通せず将来が不安だ ・　大学の授業が分からない、難しい、意義が見いだせない ・　人と話したり交流したりできず孤独を感じている ・　経済的に困っている ・　人と会ったり話したりするのが不安だ、いやだ ・　分からない ・　その他（　　）
Q5　遠隔授業の割合 （講義の形態として最も近いものを１つだけ選択）	・　すべて遠隔授業　・　大半が遠隔授業 ・　大半が対面授業　・　すべて対面授業 ・　遠隔授業と対面授業が同じくらいの割合
Q6　遠隔授業での困り度 （回答者の考えにあてはまるものをすべて選択）	・　遠隔授業で使うデジタルの資料や教材は利用しやすい・分かりやすい ・　遠隔授業で使うデジタルの資料や教材は利用しにくい・分かりにくい ・　遠隔授業は対面授業と比較して全体的に分かりやすい ・　遠隔授業は対面授業と比較して全体的に分かりにくい ・　遠隔授業は対面授業と比較して先生や友達に質問しやすい ・　遠隔授業は対面授業と比較して先生や友達に質問しにくい ・　遠隔授業は通学の必要がないので良い ・　遠隔授業は通学の必要がないので良くない（大学に行った方が良い、大学に行きたい） ・　遠隔授業は家など自由な場所で学習できるので良い ・　遠隔授業は家など自由な場所で学習できるが誘惑が多く学習に集中できない ・　遠隔授業は自分のペースで学習できるので良い ・　遠隔授業は自分のペースで学習できるが、ペースが遅れたりついて行けなくなったりすることがある ・　遠隔授業は一人で学習できるので良い ・　遠隔授業は孤独である ・　遠隔学習は自主的に学習できるので良い ・　遠隔授業は自主性・自律性が求められるので大変だ ・　遠隔授業は学費に見合う内容だと感じている ・　遠隔授業は学費に対して損をしている感じがする ・　遠隔学習では教員は学生に気を配って教えていると感じる ・　遠隔学習では教員は学生に気を配って教えていると感じられない
Q7　遠隔授業への評価（1つ選択）	・良い　・やや良い　・どちらでもない　・やや悪い　・悪い
Q8　スマートフォンの利用時間	・利用しない、持っていない ・「1時間未満」から「10時間以上」まで1時間ごとの選択肢から選択
Q9　ゲームの利用時間	・利用しない、ゲーム機等を持っていない ・「1時間未満」から「10時間以上」まで1時間ごとの選択肢から選択
Q10　勉強や進路について考える上で最も信頼している人やもの	・大学の先生や授業　・通っている大学以外の先生や授業 ・家族・親戚　・友達 ・主にテレビや新聞などで発言や活動をする有名人・芸能人 ・会社社長などの経営者　・主にネットで発言や活動をする有名人やインフルエンサー ・上記以外のネットの情報　・あてはまるものはない
Q11　最近感じていること	自由記述

TOPへ戻る

スマートモニタリングによるABWの革新

情報工学科　　新熊　亮一
共同研究者　　株式会社良品計画

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

これまで取り組んできたスマートモニタリングのための 3D イメージセンサネットワークシス テムの研究成果を活かし、屋内でのオフィス環境を対象としたABW(Activity Based Workplace)に関する研究を行う。3Dイメージセンサである LIDAR(Light Detection and Ranging)のユニットを2台以上用いて、オフィス環境で作業を行う人々をリアルタイムに検知する。個々人の属性や、習慣、その日の作業の目的と、オフィス環境での作業スポットや、滞在時間、アクティビティを紐付け、機械学習のモデルを構築する。構築した機械学習のモデルを用いることで、個々人とその目的に応じて、適した作業スポットを予測できるようになる。本成果を芝浦工業大学全体の研究室に共有し、生産性向上につなげる。

3D イメージセンサで取得される点群データから、人や車両を検知するためのディープラーニングの研究が 盛んに行われている[Qi2017]。しかし、複数のLIDARユニットのデータをリアルタイムに統合し、リアルタイムに検出を行うネットワークシステムは、申請代表者独自のものである。一方、ABWは2009年頃にオランダの民間企業が提唱したと言われているが、機械学習による予測を導入した研究は国内外でほとんどなく、3Dイメージセンサを用いた検出については全く行われていない。本研究は単にABWと、機械学習、3Dイメージセンサを組み合わせたものではなく、オフィス環境の概念を革新する、あるいは新しい概念を創造する研究である。

図1にSoodらが提案した従来の作業スポット推薦システムSpacematchを示す。温度、照明といった環境に対する快適性について作業スポットごとに入力することで、個人個人に適したスポットをシステムが推薦できるようになる。図2が本研究で提案するシステムである。個人個人の属性情報と作業目的ごとの作業スポットの嗜好をあらかじめ取得し、機械学習のモデルを生成し、特徴選択により作業スポットの選択に大きく寄与する属性情報を抽出する。これにより、入室時に作業目的を入力するだけで、最適な作業スポットを推薦できる。

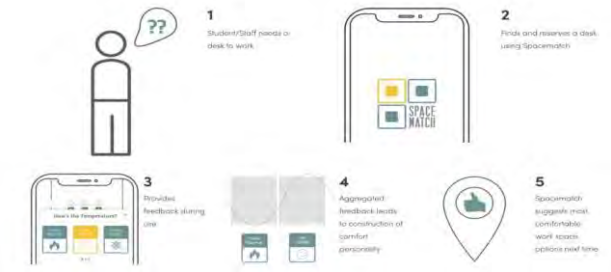


図 1: Spacematch

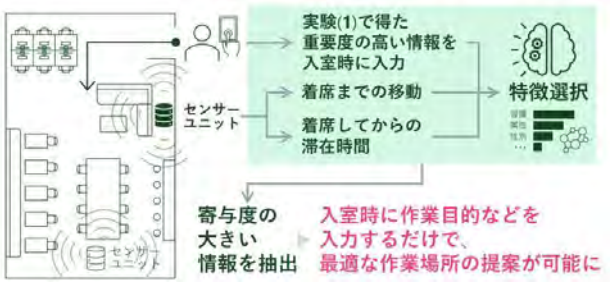


図 2: 提案システム

TOPへ戻る



図 3: 研究室の内装



(a)アンケートフォーム



(b)アンケート受付



(c)実験告知

図 4：実験実施状況

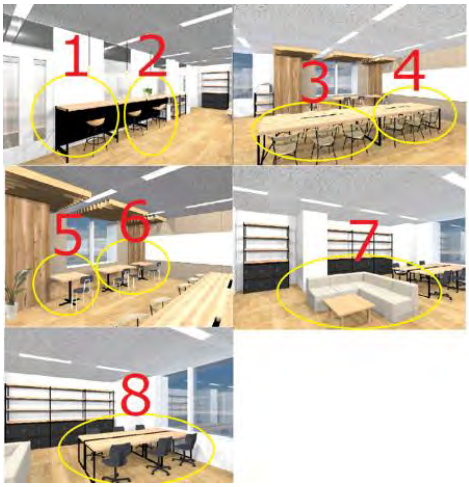
2．研究計画

2021 年 5 月、研究室を実際のオフィス環境として実験を行う準備が整った（図 3)。実空間での実験に向けた仮説を立てるため、図 4 のとおり、数百人規模のアンケートを実施し機械学習モデルを構築した。前期は以下の手順で研究を実施した。

1. 大学生～社会人の参加者を募集した
2. 個人ごとに属性や習慣の情報を取得する
3. オフィススペースは 3D イメージで見せる
4. オフィススペースでの目的ごとに、カフェ風オープンオフィス環境 or 従来のオフィス環境を選び、さらに作業したいスポットも選ばせる
5. 機械学習の入力を個人の属性、習慣、目的とし、出力をオフィス、スポットとして学習を行う
6. データの 80%を学習、20%をテストに用いて、推定を行い精度評価を行う
7. 特徴選択により属性、習慣、目的の重要度をスコアリングする

結果、235 名の参加が得られた。アンケートで得られたデータによる機械学習モデルの構築と並行して、実空間の実験環境でのネットワー クシステムの構築を進める。具体的には、LIDAR ユニット 2 台、小型デバイス、エッジサーバを無線ネットワークで相互接続する。

後期は、実験参加者に入室時にタブレットに 情報を入力させ、当該実験参加者が席に座るまでの移動をセンサネットワークシステムによりトラッキングし、座った作業スポット、滞在時間などの情報を記録する。入力情報と、センサネットワークシステムにより得られた情報を用いて機械学習のモデルを構成し、その予測可能性を評価するとともに、特徴選択により 寄与度の大きい情報を抽出した。



(a) カフェ風オープンオフィス環境

TOPへ戻る

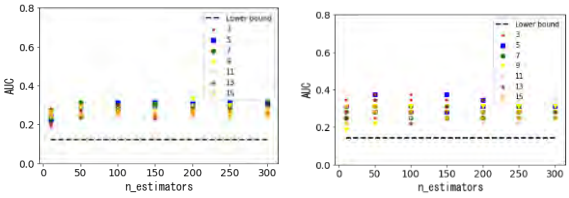


(b)従来のオフィス環境

図 5: アンケートで用いた 3D の CG

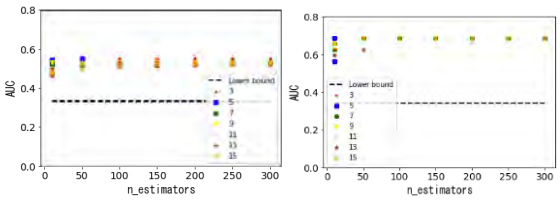
3. 計画の進行状況

図 6 に機械学習の作業スポット推薦の精度評価の結果を示す。図 6、7 は作業目的がそれぞれ資料作成、ブレイクのときの作業スポット推薦の精度結果である。AUC で適度な精度 0.7 を達成できたのは図 7(b)の場合のみであった。



(a)学生 (b)社会人

図 6: 作業目的=資料作成



(a)学生 (b)社会人

図 7: 作業目的=ブレイク

また、今回取得した属性は、年齢、性別、血液型、出身地、居住地、学部、職業、最終学歴、好きな食べ物、好きなスポーツ、好きな観光地であった。表 1 に、機械学習モデルにおいて、特徴として重要な属性上位 5 位を作業目的ごとに示す。

いずれの作業目的に対しても上位 5 位は、好きなスポーツ、食べ物、観光地、出身地、年齢であり、興味深い結果となった。

表 1: 特徴として重要な属性上位 5 位

Work objective	1st	2nd	3rd	4th	5th
Preparing materials	SP	HT	AG	SS	FD
Reading materials	HT	SP	AG	FD	SS
Meeting	AG	HT	SP	SS	FD
Informal conversation	AG	SS	SP	FD	HT
Formal work consulation	AG	SP	HT	SS	FD
Presentation	HT	SP	AG	SS	FD
Break	SP	AG	FD	SS	HT
Creative activities	AG	SP	HT	SS	FD
Getting motivated	SP	HT	AG	SS	FD

次に、オフィス環境を以下のとおり（図 8 参照）変化させ、実験参加者に快適性などについてのアンケートを実施した。

第 1 週目 (11/1～2, 11/10～12)：水

第 2 週目 (11/15～19)： コーヒー＋おかし

第 3 週目 (11/22～26)：音楽

第 4 週目 (11/29～12/3)：アロマ

第 5 週目 (12/6～10)：照明

第 6 週目 (12/13～17)：観葉植物



(a) 水のサーバーとお菓子、コーヒー



(b)間接照明



(c)観葉植物

図 8: オフィス環境の変化

TOPへ戻る

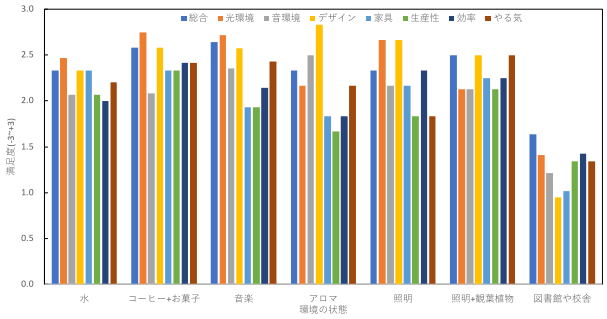


図 9:環境ごとの快適性などの回答

図 9 に結果を示す。普段の環境よりもすべての項目について高いスコアが得られた。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

2022 年度以降も研究室を対象とした実験を継続し、デザイン工学科橋田研究室との共同研究を開始する。

また、(株)良品計画との連携を強化し、良品計画のオフィス環境や店舗を対象とした実験を行う計画の検討を進めている。具体的には、無印良品有明店のオフィスならびに店舗での実験を予定している。

また、本研究は、オフィス環境にとどまるものではなく、将来の未来都市を背景とし、教育や、医療・健 康に関わる環境への応用を視野に入れ、研究を発展させる予定である。そのため、生活に溶け込む IoTxAI 環境の研究を進めている。最新の iPhone など今後のスマホは 3D センサ (LIDAR) を標準装備している。これを用いることで、オフィス利用者の姿勢など作業に取り組む状態のデータを取得し、作業スポットや内容の変更を促すシステムも実現できると考えられる。

(学会発表)

1. Y. Nakamura, R.Shinkuma,``Machine learning framework for activity-based workplace in office environment,″ IEICE Society Conference, B-11-21, Sept. 2021.
2. 阿部真帆・菅野竜聖・中村　陽・新熊亮一, ``オフィス環境における関係性に基づいた機械学習による適切な作業スポットの推定″, 電子情報通信学会 SeMI 研究会, May 2022.
3. Kuon Akiyama and Ryoichi Shinkuma, ``Real-time adaptive data filtering with multiple sensors for indoor monitoring,″ IEEE/IFIP NOMS 2022, April 2022.

(報道発表など)

1. 芝浦工業大学プレスリリース「テレワーク定着後の「オフィス空間」を革新する研究を開始」(https://www.shibaura-it.ac.jp/news/nid00001857.html)
2. 日刊工業新聞 2022 年 2 月 3 日「芝浦工業大学 働き方多様化へ技術提案」



図 10: iPad の LIDAR を用いて取得した研究室の 3D イメージ

TOPへ戻る

Machine learning for the discovery of novel van der Waals heterostructure for energy conversion applications

先進国際課程　Fronzi Marco

Innovative Global Program, College of Engineering,

１．Paper

Layered 2D crystals are unique in their chemical and electronic diversity, with over 6000 known individual crystals. This diversity enables rare examples of unique combinations of properties that have profound implications in the future of energy harvesting and conversion. Notable developments in catalysis, generation of solar-fuels, thermoelectric and piezoelectric devices hint at the broad commercial uptake of devices exploiting 2D crystals in the coming years and decades. However, the unique properties of layered 2D crystals are not limited to one of these individual applications, rather it is the fact that a single 2D crystal can achieve exceptional performance in multiple energy conversion applications simultaneously. My work focuses on the exploitation of different possible energy conversion mechanisms from heterostructures. Eventually, also simultaneous energy conversion devices can be achieved and provides a vision towards the future of highly efficient energy conversion devices.

２．Research program

Application of state-of-the-art density functional theory calculations on novel 2D van der Waals hetero-structures to calculate fundamental properties: band gap, piezoelectric tensor, electron mobility, density of states, Seeback coefficient, electron and phono contribution to the thermal conductivity. After collecting a set of DFT

TOPへ戻る

calculations, machine learning models will be trained to extend the predcitions to a very large set of possible heterostructures (in principle up to 20 millions).

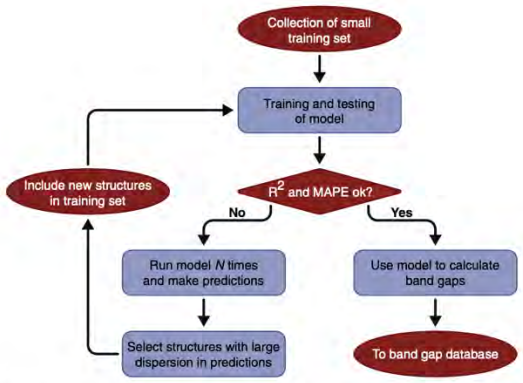


Figure 1. Flowchart of the AL model used to build the BNN model. The structures included in the training set of iteration $M+1$ were selected from the worst performing, after the evaluation of the mean value and the standard deviation calculated for each value from N runs of the model at the iteration M.

3. State of progress

The bandgap is one of the most fundamental properties of condensed matter. However, an accurate calculation of its value, which could potentially allow experimentalists to identify materials suitable for device applications, is very computationally expensive. In my most recent work, active machine learning algorithms are used to leverage a limited number of accurate density functional theory calculations to robustly predict the bandgap of a very large number of novel 2D heterostructures. Using this approach, a database of around 20 million bandgap values for various novel 2D van der Waals heterostructures is produced. This work created the basis for solid future research on novel materials for energy conversion applications.

[M.Fronzi Adv. Intell. Syst. 2021, 2100080] [P.Sherrel and M. Fronzi (co-first authro) Chem Soc Rev, DOI: 10.1039/D1CS00844G (2022)]

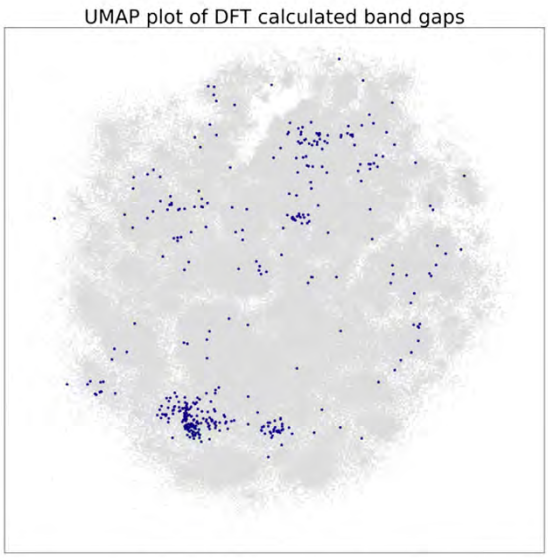


Figure 2. Uniform manifold approximation and projection showing the distribution of DFT (dark blue) calculated bandgaps over the whole 2.2M dataset (light gray).

4. Future program, paper

TOPへ戻る

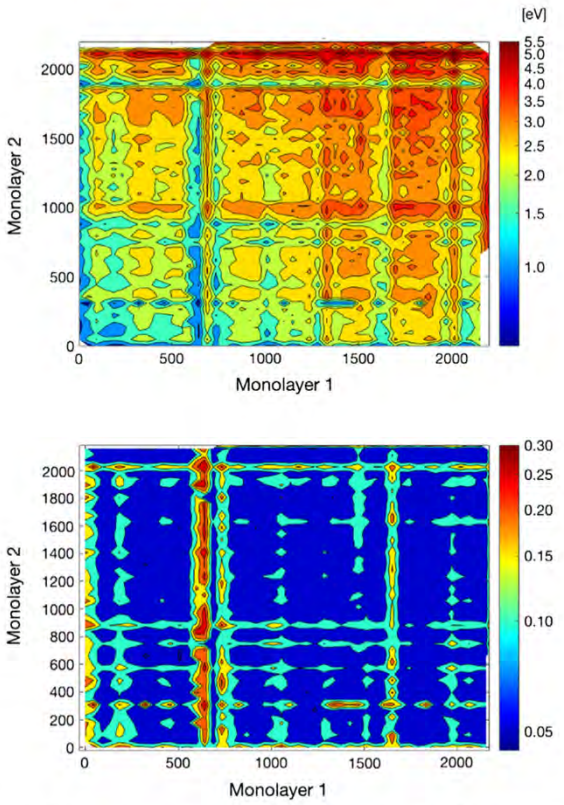


Figure 3. Bandgap (top) and relative error (bottom) of the bilayers as a function of the two monolayers building blocks. Absolute errors have been calculated as the standard deviation of the response distribution, using a dropout approach with probability 0.1. Detailed information can be found in Bayesian Neural Networks section. The heatmaps have been generated by interpolating the function $BG = f(x,y)$ and so that the images can provide information by showing potential clustering.

submission and results briefing

Next step of the work will be the calculations of piezoelectric tensor for a set of around 400 novel structures using perturbation theory, which will be followed by a training of a Bayesian Neural Network. Once the model will reach a 0.9 R^2 with a relative error below 15%, the model will be applied for the prediction of piezoelectric tenson over 2.2 million structures. Selected structures with a desired piezo tensor will be screened and fabricated for experimental

TOPへ戻る

Development of Framework for Individual-based Emotion Estimation

先進国際課程　Tipporn Laohakangvalvit

Research colleagues
College of Engineering, Shibaura Institute of Technology　Midori Sugaya
Innovative Global Program, Shibaura Institute of Technology　Peeraya Sripian

1. Paper introduction

According to the technological advancement, many systems in daily life have been developed to have advanced functionality such as autonomous vehicle and social robot. However, they still lacks the capability to capture and respond to people's emotions appropriately, which is a big issue that may affect human performance. Cai et al. reported that different emotional states affected different driving performance; the anger and excitement state of the drivers showed poorer lane control capability than neutral states [1]. Ben Robins et al. reported the effect of robot's appearance on facilitating and encouraging interaction with human [2]. Since emotion estimation has an important role in various applications in daily life, it is necessary to establish a method that can be integrated into the systems to estimate emotions effectively.

Ikeda et al. proposed a method of estimating emotions using involuntary biological information aiming to understand true emotions and emotions that are sometimes not expressed explicitly [3]. The proposed method classified emotions into two dimensions based on Russell's Circumplex Model of Affect [4] using biological indexes obtained from brainwave and pulse signals. However, they did not consider the main issue in emotion estimation that is the individual differences. In addition, the method has not yet been confirmed to be useful for different applications.

Therefore, the goal of this research is to develop a framework for emotion estimation using biological signals and considering individual differences using subjective evaluation. In addition, we employed our framework for two different applications: (1) autonomous driving and (2) empathy robot.

2. Research program

The research program was conducted using similar experiments as follows.

2.1 Experiment method

2.1.1 Emotional stimuli

We used visual information as our emotional stimuli for both applications. For autonomous driving experiment, we used a 5-min driving video (Fig.1). For empathy robot experiment, we used robot facial expressions alongside a happy arousing video selected by participant with at least 5-min long (Fig.2).

TOPへ戻る



Fig.1: Video stimulus for driving experiment

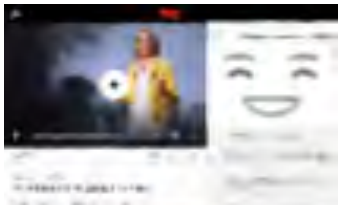


Fig.2: Video stimulus and robot facial expression for robot experiment

2.1.2 Evaluation method

1) Biological signal measurement (Objective evaluation)

Based on previous study [3], we employed the following biological signals.

- Data from pulse sensor (Switch Science; Fig.3a) attached to index finger was used to calculate "pNN50" as HRV index to estimate valence/comfort.
- Data from brainwave/EEG sensor (NeuroSky MindWave Mobile 2; Fig.3b) was used to calculate "Difference between Attention and Meditation (Attention-Meditation)" as EEG index to estimate arousal.



Fig.3. Biological sensors used in the experiment: (a) pulse sensor (b) brainwave sensor

2) Questionnaire (Subjective evaluation)

We employed a self-assessment manikin (SAM) scale (Fig.4) for the subjective evaluation of emotions. It allows the evaluation of arousal and valence in regardless of languages by selecting one out of the 9 pictorial items that has closest expression to their emotions [5].

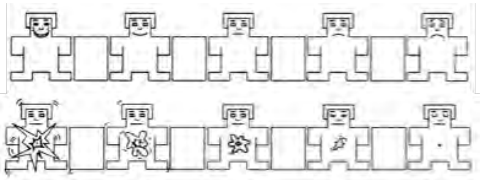


Fig.4: Self-assessment manikin (SAM) scale for valence (upper) and arousal (lower) evaluation

2.1.3 Experimental setup and procedure

Due to the COVID-19 pandemic, the experiment was performed at each participant's residence. We asked them to make sure that the room is quiet during the experiment to minimize the environmental effect on the emotions.

The experiment procedure is as follows:

1) Wear biological sensors
2) Start sensor recording and sit in resting condition (baseline)
3) Watch video as emotional stimulus
4) Answer SAM questionnaire during or after watching the video
5) Stop sensor recording

For the autonomous driving study, the experiment was performed under two conditions: awakening and drowsiness states. These conditions were judged by the participants themselves before deciding to start the experiment.

Similarly, for the empathy robot study, the experiment was performed under two conditions: synchronized and non-synchronized states between robot facial expressions and emotions. The synchronization was done using estimated emotions from the biological indexes. The non-synchronization displayed random facial expressions every 5 seconds. A total of 16 robot facial expressions from previous study [6] were used.

TOPへ戻る

2.2 Experimental result and analysis

2.2.1 Result of autonomous driving study

We performed experiment with 3 male participants in their 20s. The analysis section for biological data is divided into 7 sections: pre-resting, the first, second, third, fourth, and fifth minutes of the video, and post-resting. Each analysis interval used the data the 30 seconds before answering the SAM questionnaire. The EEG index (arousal) was obtained from the mean value of Attention-Meditation during each interval. The HRV index (comfort) was obtained from the 30th pNN50 value.

Next, correlation analysis between biological indexes and SAM results was performed. We obtained significant strong correlations from some participants for both indexes (Table 1). However, the results are still inconsistent across participants as well as the conditions possibly due to large individual differences.

Table 1: Correlation coefficient between biological indexes and SAM results (driving experiment)

Participant	Awakening state		Drowsiness state	
	Arousal	Valence	Arousal	Valence
P01	-0.105	**1.000	0.449	0.249
P02	-0.567	*-0.796	*0.845	-0.495
P03	-0.095	0.037	0.533	-0.013

Note: **: p<0.01, *: p<0.05.

2.2.2 Result of empathy robot study

We performed experiment with 3 participants (2 females, 1 male) whose ages are in the range of 13-18 years old. Both EEG index (Attention-Meditation) and HRV index (pNN50) were obtained from the mean value of the whole experiment period. The mean Attention-Meditation values increased from -27.2 to -5.7 (difference=21.5) during non-synchronized condition, and from -29.1 to 7.7 (difference=36.8) during synchronized condition (Fig.5). The mean pNN50 value increased from 0.5 to 0.9 (difference=0.4) during non-synchronized condition and from 0.6 to 1.0 (difference=0.4) during synchronized condition (Fig.6). These results indicate an increase in both arousal and valence, especially in the synchronized condition.

In addition, the SAM results show that the video stimulus were rated 7 points for arousal, and 8 points for valence, indicating similar results to the biological indexes that the video stimulus selected based on individual interest was effective to evoke high arousal and valence.

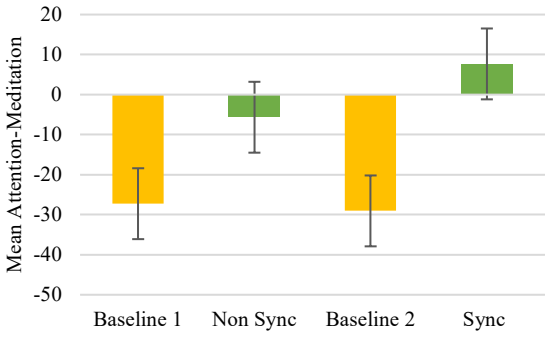


Fig.5: Mean Attention-Meditation values from robot experiment

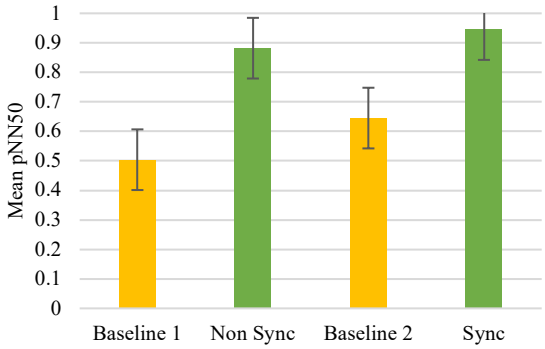


Fig.6: Mean pNN50 values from robot experiment

TOPへ戻る

３. State of progress

From the results of both studies, we obtained certain relationship between the biological indexes using EEG and HRV and the subjective evaluation using SAM scale. Therefore, we confirmed that biological indexes have potential to be used as a framework for emotion estimation.

However, the results were still inconsistent across the participants. Therefore, we need to improve subjective evaluation methods that consider factors influencing individual difference. By integrating individual data to analyze biological indexes, we expect to clarify suitable emotion estimation method for different groups of individuals.

４. Future program, paper submission and results briefing

For the future program, we plan to employ other subjective evaluation methods such as BIGFIVE personality test. Also, we will employ multiple EEG and HRV indexes to construct model as a framework for emotion estimation that is generalizable for various applications.

Our paper submission is as follows:

1) Jadram, N., Anuardi, M., Laohakangvalvit, T., Sugaya, M.: "Preliminary Experiment for Driver's Comfortable State Using EEG and HRV During Semi-autonomous Driving", In: International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, pp. 373-381 (2021).
2) Ueno, S., Zhang, R., Laohakangvalvit, T., Sugaya, M.: "Evaluating Comfort in Fully Autonomous Vehicle Using Biological Emotion Map", In: International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, pp. 323-330 (2021).
3) Raja, K., Laohakangvalvit, T., Sripian, P., Sugaya, M.: "Effect of Emotion Synchronization in Robot Facial Expressions", In: International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 181-188 (2021).

In conclusion, we achieved our goal to develop a framework for emotion estimation using biological signals to some extent through two applications: autonomous driving and empathy robot. Future work will continue to solve the issue on individual differences to generalize the framework.

References

1. Cai, H., Lin, Y., Mourant, R.: Study on Driver Emotion in Driver-Vehicle-Environment Systems Using Multiple Networked Driving Simulators. In: Driving Simulation Conference. pp.1-9 (2007).
2. Robins, B., Dautenhahn, K., Te Boekhorst, R.: Robots as Assistive Technology - Does Appearance Matter? In: IEEE Int Workshop on Robot & Human Interactive Communication, pp. 277-282 (2004).
3. Ikeda, Y., Horie, R., Sugaya, M.: Estimating emotion with Biological Information for Robot Interaction. Procedia Computer Science, 112, 1589-1600 (2016).
4. Russell, J. A.: A circumplex model of affect. Journal of personality and social psychology 39(6), 1161-1178 (1980).
5. Bradley, M.M., Lang, P.J.: Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. Journal of behavior therapy and experimental psychiatry 25(1), 49-59 (1994).
6. Kajihara, Y., Sripian, P., Feng C., Sugaya, M.: Emotion Synchronization Method for Robot Facial Expression. In: HCII 2020, pp. 644-653, (2020).

TOPへ戻る

Paper-based disposable sensor for the detection of Antibacterial Drugs

先進国際課程　Aaryashree

Aaryashree
Innovative Global Program, Shibaura Institute of Technology, Toyosu Campus, Koto, Tokyo.

１．Paper introduction

Antimicrobial-resistant (AMR) infections are likely to cause more than 10 million deaths every year by 2050. It can be more severe and lethal than COVID-19. Therapeutic drug monitoring (TDM) of an antibacterial drug is effective in the determination of the timing, and the amount by physicians. Development of economical sensors for antibacterial (e.g., vancomycin, meropenem, colistin) in the blood, which can be used in developing countries is strongly required to overcome such paradoxical status. In developed countries, TDM is mandatory for chemotherapy vancomycin (VCM), the first-line antibacterial for methicillin-resistant Staphylococcus aureus (MRSA) infection. However, hospitals, even in developed countries, outsource the analysis of the blood level of VCM.

This research focused on the development of:

a) Low cost and highly stable sensing material (using molecularly imprinted polymers, which are molecular recognition materials)

b) Disposable paper-based sensor for bedside monitoring of drug level (this will reduce the burden on the pockets and provide infection-free testing as it will be disposed of).

２．Research program

Our main aim was to design and synthesize molecularly imprinted polymers (MIPs) for highly sensitive VCM sensing, which would primarily focus on increasing sensitivity and selectivity to VCM. In this regard, the below steps were followed:

a) Synthesis of designed MIP
b) MIP electrode formation/chip sensor
c) In vitro evaluation
d) Real-time sensing

３．State of progress

The detailed results and discussions based on the planned research program are described below.

A. Methodology:

Materials: Methacrylic acid (MAA), N, N

TOPへ戻る

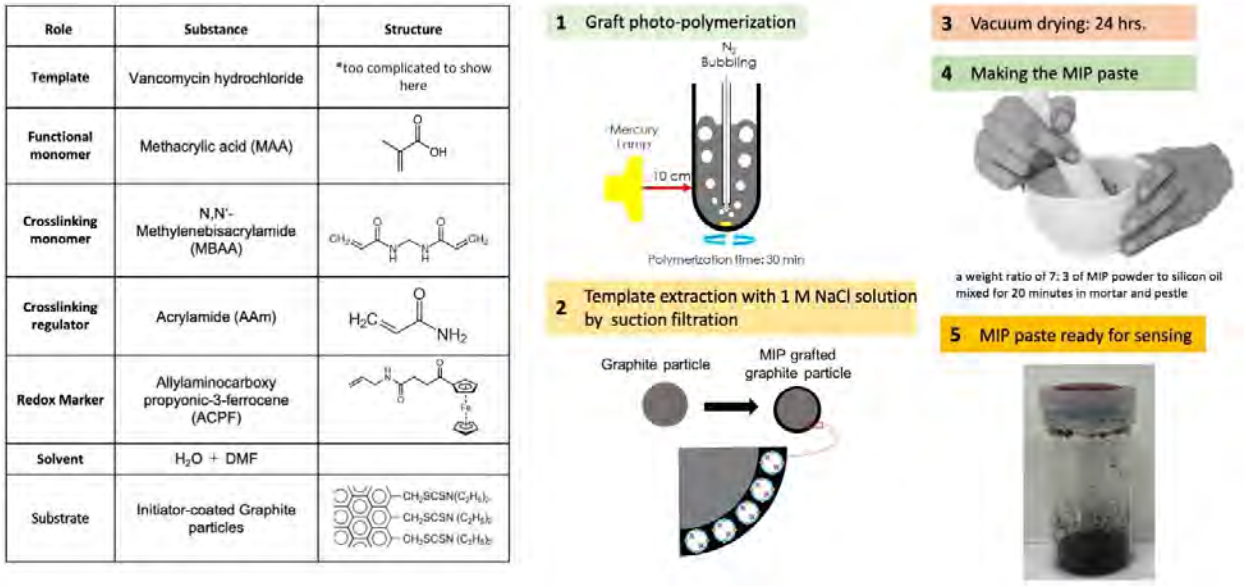


Figure 1 The process of making MIP by photopolymerization of various monomers.

'-methylenebisacrylamide (MBAA) and acrylamide (AAm), ethylene glycol dimethacrylate (EDMA), vancomycin hydrochloride, were bought from Wako Pure Chemical Industry (Osaka, Japan). Ethanol and N,N-dimethylformamide (DMF) were purchased from Kanto Chemical Co., Ltd. (Tokyo, Japan). Allylaminocarboxy propionic-3-ferrocene (ACPF) was prepared by Prof. Akihiko Hatano from Dept. of Chemistry, SIT. Bovine blood for testing was bought from the Tokyo Shibaura Zoki Corporation (Tokyo, Japan). MAA and EDMA were used after purification by reduced-pressure distillation. Spherical graphite particles 8 μm in diameter (SG-BH8) were donated by Ito Graphite Co., Ltd. (Kuwana, Japan).

Preparation of MIP: Initiator graphite (IG) was prepared following a previously reported method by Yoshimi et.al. [1]. The functional monomer MAA (5.8 mmol, 0.5 g), the cross-linking monomer MBAA (9.7 mmol, 1.5 g) the cross-linking regulator AAm (7.1 mmol, 0.5 g), redox monomer ACPF (0.17 mmol, 0.15 g) and the template vancomycin hydrochloride (0.12 mmol, 0.18 g) were dissolved in a mixed solvent of 2 mL distilled water and 9 mL DMF. The solution and 0.25 g IG were placed in a quartz crystal test tube and bubbled vigorously for 30 min with nitrogen which passed through a mixture of distilled water and DMF (2:9 in volumetric ratio) to remove dissolved oxygen. With continuing the bubbling, the fluid was irradiated with light from a mercury lamp placed at 10 cm from the tube. The treated particles were washed with distilled water and 1M NaCl and then distilled water again three times each, respectively to remove the template from the MIP layer. The cleaned MIP was dried under a vacuum overnight.

Making the Chip: The wiring film was prepared by printing silver ink using the inkjet printer JET Circuit,

TOPへ戻る

specified for conductive ink on a photo paper. The design for the base electrodes, electrode holes (reference and counter), and reservoir were all made using Adobe Illustrator CC 2020 (institutional license). The circular holes for the reservoir (10 mm in diameter) were made by cutting the thermally adhesive PET films using the CO_2 laser cutter The counter electrodes (2 mm in diameter), reference electrodes (1 mm in diameter), and working electrodes (1 mm in diameter) were then punched using a metal punch. Next, using a laminator Fellowes-Jupiter Plus, the PET film with the electrode holes was attached to the paper-printed electrodes, and the PET film with the reservoir hole was also laminated. Silver/silver chloride (Ag/AgCl) ink (ALS Co., Ltd, Tokyo) was packed in the reference electrode hole and left to dry overnight in the oven at 60 °C. The un-grafted carbon was packed in the counter electrode hole using a spatula. Lastly, the prepared MIP was packed in the working electrode hole using a glass tube.

Sample Preparation: All the trials were performed using phosphate buffer saline containing 0.1 M NaCl and a 0.05 M mixture of potassium dihydrogen phosphate and disodium hydrogen phosphate. Samples of different concentrations were prepared in phosphate buffer saline of pH 7.4 and with whole bovine blood.

Electrochemical Conditions: In this study, differential pulse voltammetry (DPV) was selected for the determination of the response of the drugs in the saline buffer and blood as this electrochemical technique

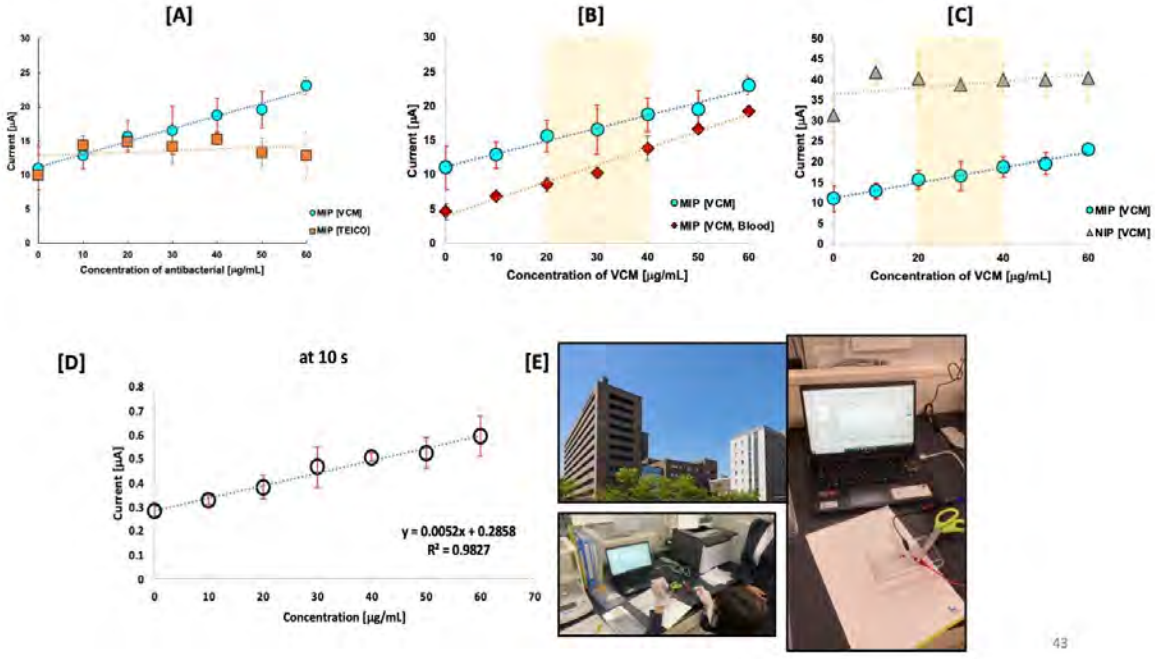


Figure 2: Response of the sensor. A) selectivity of the sensor towards VCM, B) response of MIP in buffer and in whole bovine blood, C) imprinted vs non-imprinted polymer, D) chronoamperometric analysis of the sensor, and E) Clinical trial at Saitama Medical University.

TOPへ戻る

is known to provide high sensitivity. The electrochemical sensing was done using Compactstat.h potentiostat by Ivium Technologies, along with IviumSoft version 2.783[3]

B. Results and Discussions

The developed vancomycin sensor was highly sensitive to vancomycin. We tested the MIP sensor to be more sensitive than the non-imprinted sensor. Sensitivity of the MIP was tested in both buffer saline and in whole bovine blood and was. Found to be almost same. However, in whole blood, the intercept value was somewhat smaller than that in buffer saline. It may be possible that blood protein and lipids combine with VCM and seem to interfere with the response current.

The sensitivity and co-efficient of linearity (R^2) values are given in the below table.

Electrode	Sensitivity [A·mL/g]	R^2
MIP [VCM]	18.78	0.98
MIP [TEICO]	2.43	0.08
MIP [Blood]	24.72	0.99
NIP	8.06	0.26

It is clear from the above values that the paper chip sensor was highly sensitive to VCM both in buffer saline and in whole bovine blood with R^2 value greater than 0.9. the sensitivity in NIP is very showing that the absence of imprinted sites in NIP renders no interaction or rebinding of template to cavities, reducing the current vales and thus the sensitivity. Further, to reduce the time taken by the sensor, we tried to implement chronoamperometric analysis and found that the sensor can get results in 10 second. The sensor was then tested at Saitama Medical University and reports are awaited.

4. Future program, paper submission and results briefing

In FY2022, I plan to:

1) Develop disposable sensors for ot her drugs
2) Test these sensors in India

Continue to develop a completely portable sensor for therapeutic monitoring, similar to the present glucose sensor.

Publication and conferences:

The work of this project is well communicated through conferences.

1. Aaryashree, Akihiko Hatano, Tomoji Oishi, and Yasuo Yoshimi, 'Drug sensor chip using molecularly imprinted carbon paste on a plastic base',Pacifichem 2021, Online Presentation.
2. Aaryashree, Haruki Ebisawa, Sayaka Azuma, Akihiko Hatano, and Yasuo Yoshimi, 'A Disposable Vancomycin Sensor Using Molecularly Imprinted Carbon Paste on a Paper Chip',Electrochemical Society of Japan Fall meeting 2021,Online Presentation.
3. Aaryashree, Yui Nakane, Masaki Abe, Yuuto Takeda, Tomoji Oishi, and Yasuo Yoshimi, 'Molecularly Imprinted Carbon-Paste for Theophylline Sensing On A Disposable Paper Chip Sensor, International Meeting of Chemical Sensors 2021, Online presentation.

TOPへ戻る

マイクロプラスチックの観察と微細化の解明

SIT 総合研究所　　関宏範

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年、海洋や河川等の水環境において人類の活動の際に生じたマイクロプラスチック(MP)が生態系の循環の中で濃縮され、最終的には摂取した人体に蓄積し健康に害を及ぼすことが危惧されている。東京海洋大学の荒川教授らによって MP の場所ごとにおける量や種類や分布が明らかとなっている[(1)]。図 1(a),(b)に示すように MP 表面には、Ag 等の金属、および SiO_2 や TiO_2 などの酸化物無機ナノ粒子が付着、蓄積することで生態系への更なる悪影響が懸念される[(2)]。MP は水環境中への放出後、環境紫外線による光化学的な酸化劣化と共に、海中での力学的作用で微細化する（図 1(c),(d)）。既に 350 μm 以下のスーパーマイクロプラスチック（SMP）に関する研究が報告され[(3)]、更にその影響が未知の 100 nm 以下のナノプラスチック(NP)は、捕集と検出に技術的課題がある。

以上のように、SMP および NP の発生機構の解明は喫緊の課題であるにもかかわらず、その動態は明らかとなっていない。マイクロナノスケールでの形態観察と分析により、水環境中でどのような過程を経て、どのように形態変化するのかというという学術的な問いに取り組むべく、本研究を申請した。

（参考文献）(1) H. Nakano, H. Arakawa, T. Tokai, Marine Pollution Bulletin, Vol.162, (2021) 111887, (2) Lars Hildebrandt et al., PLOS ONE (2020) https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236120, (3)環境省令和 2 年度海洋プラスチックごみ学術シンポジウム http://www.env.go.jp/water/post_85.html

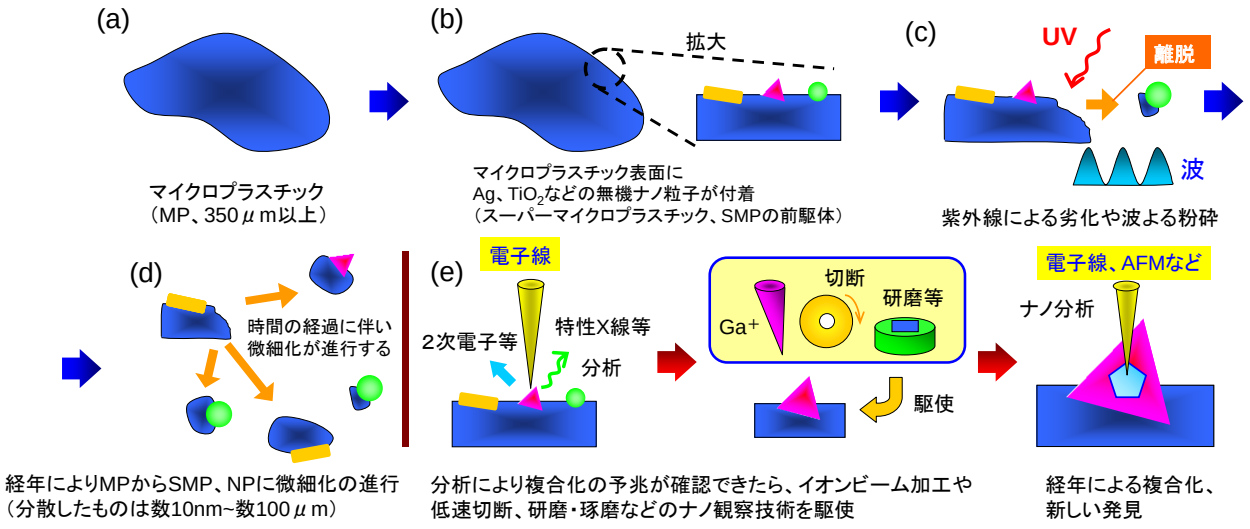


図 1 (a)海中の MP における(b)表面への無機粒子の付着、その(c)紫外線等による劣化および(d)微細化の流れ。(e)電子線をプローブとする表面のナノスケール形態観察と分析。

TOPへ戻る

２．研究計画

本研究では未だ解明されていない海洋マイクロプラスチック(MP)の表面形態観察と分析によるナノ粒子化の機構解明を行うことを目的とする。具体的には、図 1(c),(d)に示すように MP を前駆体として、剥離と微細化のサイクルを繰り返し NP に変化するという仮説の下、応募者がこれまで培った材料科学者としての微視的かつ分析的なアプローチにより、NP の発生機構に迫る研究を行った。

（１）回収

すでに東京海洋大学の荒川久幸先生には実際に海洋にて回収された MP の試料提供依頼を進めた。また、自ら MP を回収するために、水循環システムを構築している。これを活用し、豊洲の河川に対して水中ポンプとストレイナー、流量計などの部材を利用して連続的に MP の回収実験を行った。

（２）前処理

海洋や河川で得られたサンプルには、トイレットペーパー由来のセルロースや、アオコ・アオミドロなどの藻類、プランクトンなどの微生物が多く含まれる。MP 分析の妨げになるため、前処理を行う。前処理には 2 パターンを準備した。一つは、有機物の分解に有利なアルカリ処理である。もう一つは過酸化水素に硫酸鉄(II)を混合したフェントン試薬である。残された MP をフィルタと減圧吸引法によってフィルタ上に回収し、乾燥後サンプルとした。

（３）観察および元素分析

前項の前処理によって得られたサンプルに対して高解像度観察のできる JSM-7610F (JEOL)とエネルギー分散型元素分析装置 EDS を用いて表面、サイズや形状の観察、組成分析を行った。

３．計画の進行状況

前項の実験計画で示した 3 項目について進行状況を示す。

研究協力者の電気工学科の西川宏之教授をはじめ、機械工学科の二井信行教授、機械機能工学科の長澤純人教授、電子工学科の小池義和教授の協力の下、研究活動をスタートさせた。

（１）回収

東京海洋大学の荒川久幸先生から、東京湾の各海域で船上よりニューストンネットを用いて採取されたマイクロプラスチックを含む海水 3 サンプルのご提供を頂いた。

また、ポータブル電源、耐海水用水中ポンプ、水量計、散水用継手、各メッシュ付きストレイナーを組み合わせて MP 回収システムの作製を行った。大学付近の豊洲運河にかかる桟橋より本システムの水中ポンプを投下し、MP 回収を行うことに成功した(図 2)。

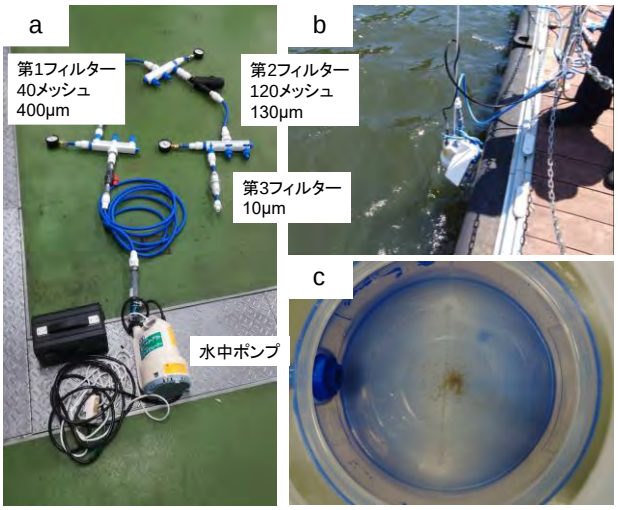


図 2 自作したスーパーマイクロプラスチック回収システム。(a) システム外観 (b) 豊洲運河桟橋にて投下の様子 (c)

（２）前処理

MP の分析には海水中に大量に存在するプランクトンやセルロースといった生物由来の有機物を分解する必要がある。このため、水酸化ナトリウム 1 Mol/L を準備し、これに採取した MP を含む海水を添加し、ホットプレートで 50 ℃に加熱した。

その他の有機物分解の手法としてフェントン反応を実施した。塩酸にて pH: 3 より高い

TOPへ戻る

酸性にしたあとに、硫酸鉄(II)7 水和物を加え、2 Mol/L のオキシドールを加えた。その後、日光に 1 日間当て有機物分解を試みた。
得られた溶液に対してメンブレンフィルターおよび減圧法を用いて残った物質を濾した。（図 3）

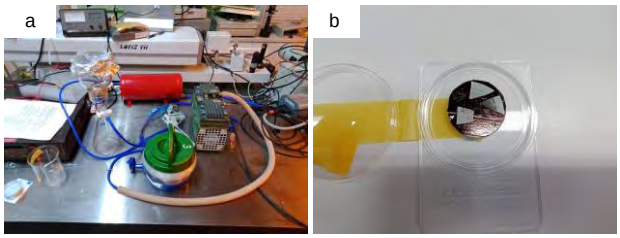


図 3 減圧法による濾過。(a)減圧濾過装置と(b)得られた SEM サンプル。

（３）観察および元素分析

フィルター上に残った物質に対して乾燥処理を行った後、JSM-7610F (JEOL)を用いて観察および EDS による元素分析を行った。
図 4 にアルカリ処理やフェントン反応を行う前の観察結果を示す。様々なプランクトン類を観察することができた。

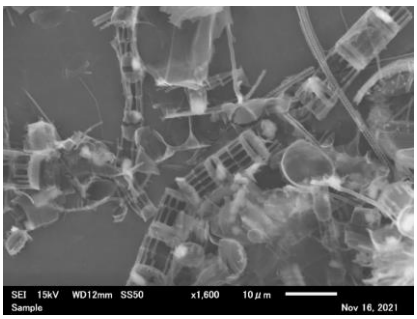


図 4　薬品処理を行わない場合の観察結果。

薬品処理を行わない場合、プランクトンにより観察に不向きであるため、アルカリ処理を行った。溶解したあとのプランクトンの残骸により一様な膜を形成しているため、マイクロプラスチックを含む粒子の観察は困難であった。図 5 に元素分析を行った結果を示す。この結果、Al や Si、Mg、Fe といった種々の金属や半導体の元素を確認することができた。一部では Au 粒子の存在をも確認することができた。Al と Si は同一の場所に観察することができることから合金化していることがわかる。Al-Si 合金はアルミ 4000 系であり、その用途はアルミ建材やピストン治具であることから風化等の現象により人々の活動域から水環境中に流れ出たと考えられる。

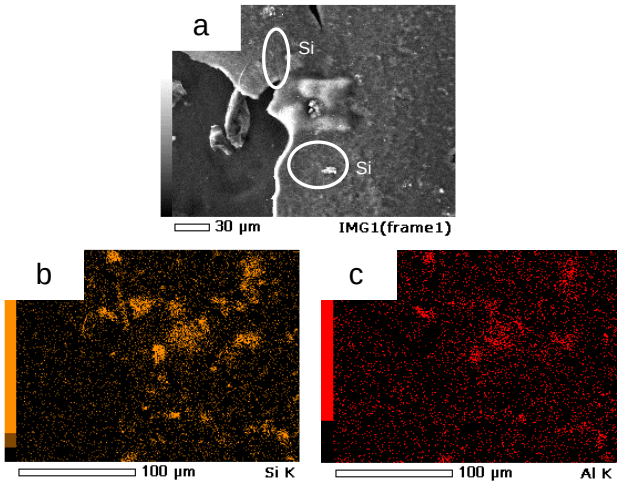


図 5 電子顕微鏡による観察と元素分析。（a）表面観察。（b）Si のマッピング。（c）Al のマッピング。

第 2 の薬品処理としてアルカリ処理のあと、フェントン反応を行った。ほとんどの粒子を観察することが困難であるほど液中に目視にて粒子の存在を確認できなかった（図 6）。フェントン反応では塩酸といった酸を用いるため、Al や Si は観察されるがイオン化傾向の高い Fe や Mg などは溶解してしまう可能性がある。フェントン反応では、マイクロプラスチックの確認には有益であるが、金属ナノ粒子の観察には不向きではないかと考えている。

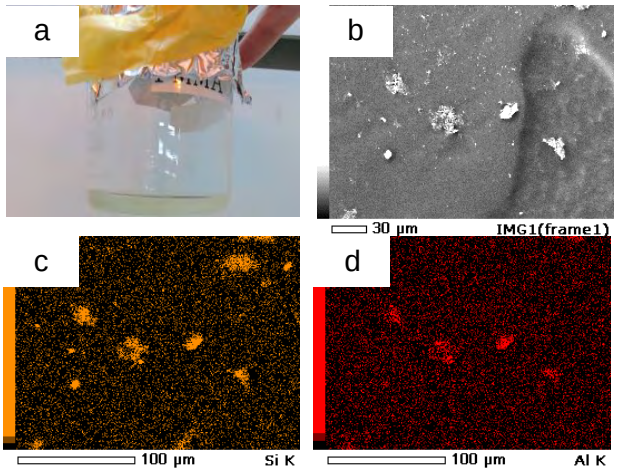


図 6　フェントン反応後の溶液と元素分析結果。（a）透明な液となる。（b）表面観察。（c）Si のマッピング。（d）Al のマッピング。

TOPへ戻る

この他、誘電泳動技術を用いたマイクロプラスチックの捕集の実験を進めた。共通機器センターに有る陽子線描画装置を用いてマイクロプラスチック捕集用ピットを形成したフィルムに対して交流電流を流し、誘電泳動力による粒子の捕集を行うものである。実験の結果、1 μm の粒子サイズを有するポリスチレン粒子に対して捕集を行うことに成功した（図7)。

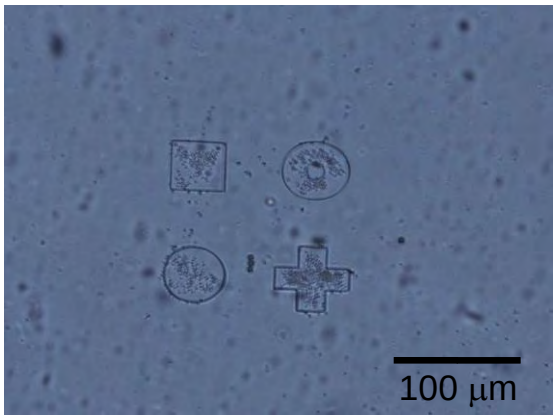


図 7 誘電泳動現象を用いたポリスチレン粒子の捕集の様子。

また、この捕集デバイスの大容量化のためにはドライフィルムレジストを用いた捕集ピットの作製を行う必要がある。陽子線描画装置を用いてドライフィルムレジストを、指定した図形パターンに感光させることに成功した(図 8)。これにより、マイクロプラスチックの捕集デバイスの大容量化の目処ができた。

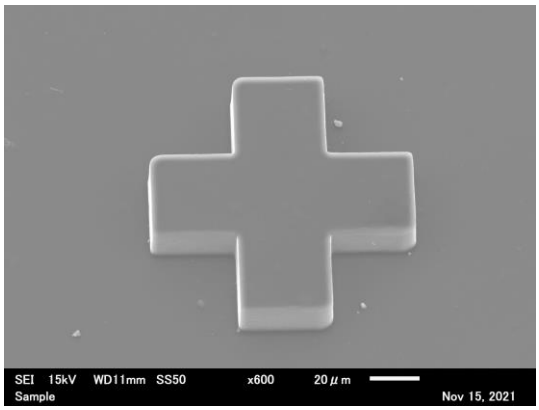


図 8　陽子線描画装置を用いてドライレジストフィルムに対して照射後に現像したあとの様子。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

プラスチックの分析にはラマン分光装置や FT-IR などを用いて測定されることが多い。これらの装置を利用し、Carbonyl Index 値（CI 値）を測定することにより目標の物質の同定や酸化劣化具合を知ることができる。拡散反射測定ユニットを準備し共通機器センターに有る FT-IR を用いて採取したマイクロプラスチックに対して CI 値を測定し物質の同定を行う予定である。

この他、前項で示した誘電泳動現象を利用したマイクロプラスチックの捕集については

（１）関宏範 (芝浦工業大学)、林秀臣(NPO エコデザイン推進機構)、内田諭(東京都立大学)、西川宏之(芝浦工業大学)

“水環境中のポリスチレン微粒子の捕集に及ぼす誘電泳動用ピットの影響”

2021 年 9 月 2 日電気学会 A 部門大会

として口頭発表を行った。ドライフィルムレジストに対する陽子線描画装置の適用については、

（２）H. Seki, K. Kawamura, H Hayashi, Y. Ishii, N. Puttaraksa, H. Nishikawa

“Utilizing a photosensitive dry film resist in proton beam writing”

MNC2021 online and on-demand conference, October 26, 2021

その論文発表については、

（３）Hironori Seki, Keiya Kawamura, Hidetaka Hayashi, Yasuyuki Ishii, Nitipon Puttaraksa, Hiroyuki Nishikawa

“Utilizing a photosensitive dry film resist in proton beam writing”

JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 61(SD) 2022 年 6 月

として 6 月に掲載予定である。

さらに、誘電泳動法を用いたスーパーマイクロプラスチックの捕集についても今後、論文発表を行う予定である。

TOPへ戻る

説明可能な社会シミュレーション分析技術

電子情報システム学科　　後藤　裕介

共同研究者
岩手県立大学 ソフトウェア情報学部 ソフトウェア情報学科　　市川　尚
大東文化大学 経営学部 経営学科　　白井　康之
大阪府立大学 現代システム科学域 知識情報システム学類　　森田　裕之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

新型コロナ感染症に代表される複雑・不確実な現象を対象とする社会シミュレーションは，現実の政策意思決定において活用され始めているが，AI がその実用化において直面したように，説明可能性が課題となっている．

説明可能性への取組みとして，社会シミュレーションの結果（現象）がどのような原因により生じたのかを明らかにする原因分析について，いくつかの研究が行われており，一定の成果がある．後藤（2020）は，社会シミュレーションのマクロレベル現象をクラドグラムという図形式で分類可視化し，その原因をミクロレベルの挙動の異なりから説明する方法を開発している．倉橋ら（1999）は，はじめに関心のある現象を定義して，進化計算手法によりその現象を生成する原因を分析する逆シミュレーション手法を開発している．菊地ら（2019）はクラスタリング手法等機械学習手法を用いてシミュレーションログから有効な原因分析を可能とする手法を開発している．

社会シミュレーションでは，複数のステークホルダーが異なる関心を抱いていることから，状況を多目的最適化問題としてとらえることができる．このような背景から，本研究では多目的最適化問題としての社会シミュレーションにおける説明可能性のためのホワイトボックス化の研究に取り組むこととした．

具体的には，以下を研究目的とした．

1) 多目的最適化社会シミュレーションの性質整理
2) 多目的最適化社会シミュレーション事例としての経済政策分析シミュレータの開発
3) 説明可能性のための多目的最適化社会シミュレーションにおける解集合に基づいた状況分類手法の開発

（参考文献）

菊地剛正，國上真章，高橋大志，鳥山正博，寺野隆雄,“ビジネスケース記述言語を用いたエージェントシミュレーションログの分析手法,” シミュレーション&ゲーミング, Vol.29, No.1, pp.36-48 (2019)

倉橋節也，南潮，寺野隆雄，“逆シミュレーション手法による人工社会の分析,” 計測自動制御学会論文集，Vol.35, No.11, pp.1454-1461 (1999)

後藤裕介,“複数の分析関心に基づく社会シミュレーション・ログの階層的分類と可視化手法,” 計測自動制御学会論文集, Vol.56, No.10, pp.463-474 (2020)

TOPへ戻る

２．研究計画

前述の研究目的 1)～3)について，それぞれ次のような計画を立てた．

２．１ 多目的最適化社会シミュレーションの性質整理

通常の多目的最適化の問題とは異なり，社会シミュレーションでは，その不確実性の取扱が問題となると考えられる．このことから，社会シミュレーションにおける不確実性の概念整理と進化計算における不確実性の概念整理を行い，社会シミュレーションにおける多目的最適化技術についての考察を行うこととした．

２．２ 経済政策分析シミュレータの開発

技術の評価のためには，適切な事例を準備する必要がある．本研究では，社会シミュレーションの多目的最適化事例として，例えば目的間にトレードオフが存在しうる経済支援施策の設計を対象としたシミュレータを開発し，事例として利用することとした．

２．３ 説明可能性のための多目的最適化社会シミュレーションにおける解集合に基づいた状況分類手法の開発

開発した経済政策分析シミュレータを事例として，ホワイトボックス化の研究に取り組む．具体的には多目的最適化社会シミュレーションにおいて入力する状況間の類似度を定義する手法を開発することとする．開発した手法を用いることで，施策の期待効果に基づいて状況の類似性を根拠に基づいて評価することを可能にするとともに，状況や施策の効果に関する理解を深めることも可能になると考えられる．

３．計画の進行状況

上述の 2.1～2.3 の研究計画について，それぞれ次のように進行している．

３．１ 多目的最適化社会シミュレーションの性質整理

関連論文のサーベイとレビューを行い，社会シミュレーションではデータ，状況シナリオ，モデルの 3 要因について，不確実性が存在しうると整理した．また，進化計算では，目的関数にノイズがある，設計変数や環境パラメータ変化する，目的関数地が近似されている，目的関数が時間変化するという形で不確実性が表現されていることがわかった（Jin & Branke, 2005）．そして，両者を比較したところ，一部には素直ではない対応も含まれるが，概ね対応関係があることがわかった．

これらをふまえて，以下の技術が重要であると考察し，この成果を[3]にて発表した．

1. 解の実行結果が不確実性を持つことの意味付けを行う技術
2. パレートフロントの近似解から，意思決定に際しての考察を促す技術

なお，1 に関連して，[6]の発表を行った．

３．２ 経済政策分析シミュレータの開発

技術の評価のため，経済政策分析シミュレータの関連研究である Goto (2018)を参考にして，新規に開発した．図 1 はシミュレータの概要を整理したものである．シミュレータは，自治体における新型コロナウイルス感染症による経済ショックに対する給付金施策設計の最適化問題を分析するためのものである．入力には仮想合成人口個票データ，経済ショック，経済支援施策を設定する．このとき，経済支援施策の予算は限りあるため，対象と金額を最適化する必要がある．シミュレータはこれらの入力に基づいて，経済ショック規模を決定し，対象となる住民の失業や給与変動を行う．そして，定義した経済支援施策から定まる給付対象に指定した金額を支給し，収入を変化させる．この結果を出力し，データから目的関数値を計算する．

目的関数は 2 つ設定した．1 つ目は，相対

TOPへ戻る

的貧困に該当する世帯を減らすことを目的としている．2 つ目は失業や収入減少があった世帯の収入を減少分だけ補償することを目的としている．これらの目的関数間にはトレードオフが存在する．

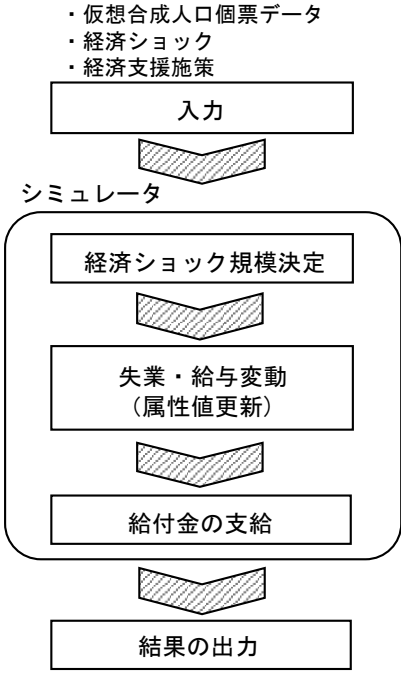


図 1：経済政策分析シミュレータの概要[2]

また，開発したシミュレータは進化計算学会 実世界ベンチマーク問題分科会が開催する進化計算コンペティション 2021[1]において，最適化問題として提供を行った．なお，コンペティションのスケジュールは以下の通りである．

- Web サイト公開 : 2021 年 10 月 21 日（木）12:00
- チュートリアル問題公開：2021 年 10 月 26 日（火）21:00
- 競技開始 : 2021 年 10 月 26 日（火）21:00
- 競技終了 : 2021 年 12 月 18 日（土）23:59
- 結果発表：2021 年 12 月 25 日（土）午前

コンペティションには単目的部門で 12 チームが解を提出し，多目的部門では 10 チームから解の提出があった．コンペティションの解法は結果発表時に各チームから報告がなされ，その一部は本研究の開発技術の着想の参考となった．なお，関連する成果として，[4][5] にて発表を行った．

３．３ 説明可能性のための多目的最適化社会シミュレーションにおける解集合に基づいた状況分類手法の開発

本研究では，多目的最適化社会シミュレーションの結果として得られた決定変数空間および目的関数空間における解集合を類似性の定義に用いることを着想した．このように考えると，同様の施策が最適であることや同様の施策効果が見込めるという観点で状況の分類を行うことができ，ホワイトボックス化に貢献すると考えられる．

図 2 は提案手法の概要を整理したものである．提案手法は「多目的最適化社会シミュレーションによる解集合の獲得」と「解集合に基づく類似性評価」の 2 段階から構成される．多目的最適化社会シミュレーションによる解集合の獲得段階では，対象状況群について，各状況における施策の多目的最適化を行い，最適な解を獲得する．第 2 段階では，状況間の類似性評価を行う．決定変数空間における解集合と目的関数空間における解集合のそれぞれの特徴をふまえた類似性を定義する．

[1] コンペティション Web サイト：（https://ec-comp.jpnsec.org/ja/competitions/eccomp2021）

（参考文献）

Y. Jin and J. Branke, “Evolutionary Optimization in Uncertain Environments－A Survey,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.9, No.3, pp.303-317 (2005)

Y. Goto, “Stylized Fact Analysis of Cash-For-Work Programs in the Disaster Reconstruction Process,” Proc. of the 2018 IEEE SMC, pp.1140–1145 (2018)

TOPへ戻る

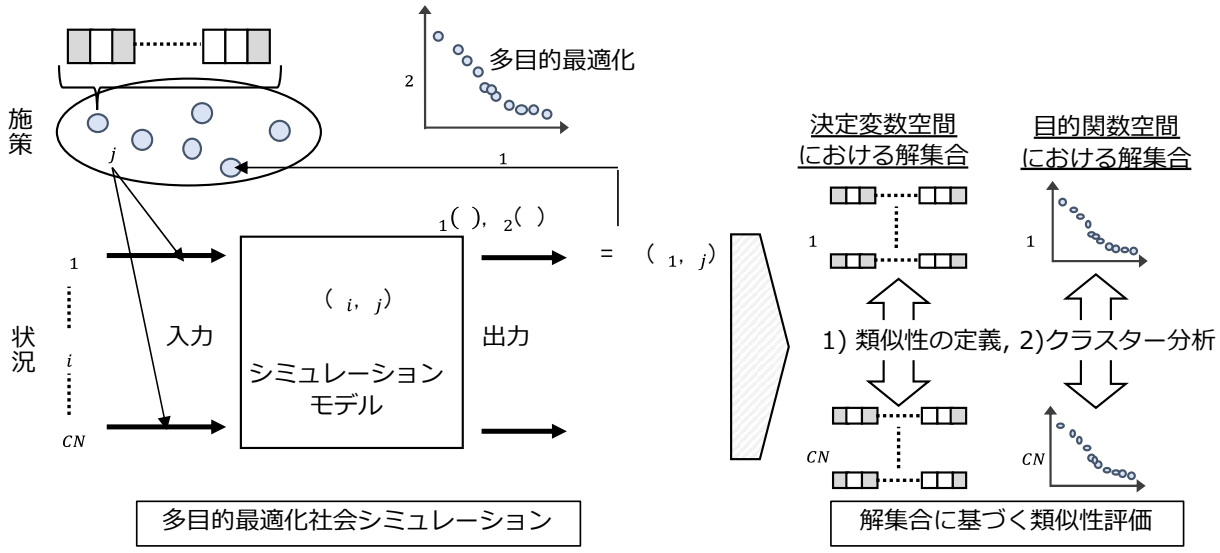


図 2：解集合に基づいた状況分類手法の概要[2]

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，進化計算コンペティション 2021 の内容をまとめた論文を投稿予定である．また，本研究を発展させた分析技術に関して科学研究費補助金 基盤研究(C)にて採択がされた[7]．この他，関連した研究課題で JST 等研究費申請の準備を進めている．

研究の成果としての投稿・発表状況は以下の通りである．関連して，合計 6 件の研究発表を行い，1 件の受賞があった．

[1] 後藤裕介，“社会システムを対象とした予測と感性，”第 17 回日本感性工学会春季大会，1 page，ハイブリッド，2022 年 3 月．

[2] 後藤裕介，白井康之，森田裕之，市川尚，“多目的最適化社会シミュレーションにおける解集合に基づく状況分類手法の検討，” 計測自動制御学会 システム・情報部門 第 27 回社会システム部会研究会，pp.1-9，ハイブリッド，2022 年 3 月．

[3] 後藤裕介，市川尚，白井康之，森田裕之，“経済支援政策分析のための社会シミュレーション基盤にむけて，” 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 SSI2021，pp.268-269，オンライン，2021 年 11 月．

[4] Y. Goto, H. Ichikawa, H. Morita, and Y. Shirai, “Toward Simulation Analysis of Subsidy Payment Policies Amid COVID-19 Pandemic: Multi-Objective Optimization in Agent-Based Simulation,” IEEE CYBCONF 2021, p.127, online, 2021(June)

[5] 高橋耕平，市川尚，後藤裕介，“COVID-19 感染対策による経済影響分析シミュレータの開発，”経営情報学会 2021 年度年次大会，pp.60-61，オンライン，2021 年 6 月．**一般社団法人経営情報学会 2021 年度年次大会 優秀萌芽研究賞**

[6] 工藤大輝，市川尚，後藤裕介，“政策議論を促す多目的最適化社会シミュレーション手法の開発，” 経営情報学会 2021 年度年次大会，pp.56-57，オンライン，2021 年 6 月．

[7] 後藤裕介，“因果内包クラスタリングによる社会シミュレーションの説明可能化，” 科学研究費補助金 基盤研究(C)，2022 年～2024 年度．

TOPへ戻る

環境適応型システム開発方法論と実証研究

電子情報システム学科　　久住　憲嗣

共同研究者
福岡大学工学部電子情報工学科　　中西　恒夫
福岡大学工学部電子情報工学科　　藤永　拓矢

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年の組込みシステムは、IoT やインダストリー4.0 に代表されるとおり、時々刻々と変化する外部環境に応じて、システムの振舞いを変えるシステムを実現する技術が求められている。

コンテキスト指向プログラミング(Context-Oriented Programming: COP)は、コンテキストに依存したソフトウェアを開発するためのソフトウェア構成手法である。前述システムを実現するための技術として注目されている。コンテキストとはシステムを取り巻く状況や文脈のことであり、システムから観測可能なものである。コンテキストの例としてはシステムを取り巻く外部環境、システムの内部状態、あるいはそれらの変化の順序が挙げられる。COP はコンテキストに依存した振舞いをレイヤとしてモジュール化し、それらを実行時のコンテキストの変化に応じて切り替える。これにより COP はコンテキストに応じて全体の振舞いを変えるようなソフトウェアの開発を容易にする。また、COP では従来のプログラミング言語では取り扱いにくかった横断的関心事を部品化して管理できるため、テスト容易性、再利用性の向上が見込める。

しかしながら、COP を使用するための適切な要求分析、設計手法についての検討がなされていない。また、効果は期待されるものの、組込みシステムにおける実証実験がなされておらず、COP の考え方を適用したときの定量的な効果が不明である。そこで本研究では開発プロセス論，組込み／オートモーティブシステム，ロボティクスの研究者らを共同研究者として招き、方法論をまとめ、ケーススタディの実施を通してその効果を計る。

２．研究計画

本年度は上流を中心に開発方法論の整備、および、実アプリケーションによるケーススタディを実施する。

コンテキスト指向プログラミング(COP)のパラダイムを取り入れた開発方法論の提案

既存手法に不足している要求分析、レイヤ設計を中心に COP の考え方を取り入れた開発方法論を提案する。具体的には、要求分析においてソフトウェアプロダクトライン工学で使用される共通性、相違性分析手法を導入し、いつ、どの部品が可変するかの分析を行う手法を提案する。また、要求分析結果に基づいて COP 部品であるレイヤを設計する手法を提案する。

実アプリケーションによるケーススタディ

研究分担者が構築している実験車両を対象に，COP を用いて実装した運転者支援システムを構築し、ケーススタディを行う。当該実験車両には、車載ネットワーク、ならびにインターネットに接続する Linux、及び ROS

TOPへ戻る

の動作する PC が搭載されている。当該 PC には、3D LiDAR、深度カメラ、運転者の身体計測システム等が接続できる。この実験車両を対象に 1)で提案した手法に加え実装評価を実施する。

３．計画の進行状況

３．１ コンテキスト指向プログラミング(COP)のパラダイムを取り入れた開発方法論の提案

本節では、コンテキスト指向プログラミング(COP)のパラダイムを取り入れた開発方法論を提案する。従来手法ではソフトウェア開発の上流において構造に関する分析や設計を支援する方法論は提案されてきた。しかしながら、COP の考え方を導入した振る舞いに関する分析、設計手法の検討は不十分であった。そこで、本研究では振る舞いを検討するために、UML ステートマシン図を拡張して COP 対応する。

提案手法では，基本となる振る舞いを表すベースのモデルに対して，COP の機能であるレイヤの振る舞いを断片的なモデルの情報を持った差分のモデルを重ねて書き換えることでレイヤのモデルを表現する。画用紙に描いた絵に透明な紙を重ねて書き加えるようにモデルの差分を作る。また、複数のレイヤが同時に活性化した合成レイヤの振る舞いは、どちらのレイヤが上位なのかを設定し、振る舞いをモデル化する。透明な紙の上にさらに別の透明な紙を重ねるようにしてモデル上で表現している。これらのレイヤの活性化する条件を整理するために決定表を使用する手法を提案する.

レイヤ階層型ステートマシン図(Layer Hierarchy State Machine Diagram)

提案手法は COP のレイヤによる振る舞いの変化や活性化による実行の違いをステートマシン図でモデル化をし、組み込みソフトウェア開発の支援を目的とする。COP のモジュール化の特徴はレイヤにあるため、モデル上で COP の振る舞いを表現するにはレイヤの表現が重要である。既存のステートマシン図を用いる場合、レイヤはガード条件の中にしか表現できず、メモによって文脈とレイヤを記述して、活性化の条件だけをガード条件に記述することになる。

提案手法を用いてモデル化した例を図 1 に示す。ベースと書かれているモデルは、基準となる振る舞いだけをモデル化する。そして、ベースの差分として晴れレイヤと雨レイヤのステートマシン図を作成する。右上の表は、レイヤが活性化する為の条件を並べたものであり、詳しくは後述する。また、ベースとなる振る舞いとレイヤで完全に分離しているわけではなく、ベースに透明な紙を上から重ねるようにレイヤで振る舞いのモデルを表現する。提案手法を用いた場合、視認性の向上と誤読の低下が期待できる。また、COP では元の振る舞いと違う振る舞いをする場合や複数のクラスが 1 つのレイヤ内にある為、複数のステートマシン図に同じレイヤが拡散することもあり、この図だけではレイヤの活性化の条件との両立は既存のステートマシン図では困難である。実現する際には、内部的にはすべての振る舞いを統合した図を持っており、ユーザ側は提案手法のような UI により表示する必要がある。

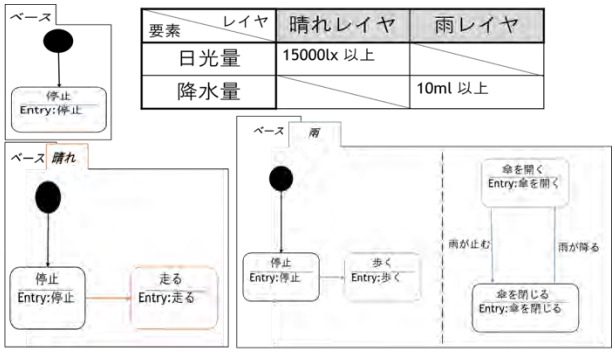


図 1 レイヤ階層型ステートマシン図例

提案手法では、モデルの精度向上のために活性化の条件を表にした決定表を用いる。しかし，JIS 規格の決定表のままでは活性化の

TOPへ戻る

条件に使われる単位や文脈に対応できないため、COP 向け拡張が必要である。表 1 に提案拡張の例を示す。行にコンテキスト要素、列にレイヤを示す。交点には活性化する条件を記入する。

表 1　レイヤ活性化決定表

要素＼レイヤ	レイヤ1	レイヤ2
活性化する要素1	活性化する条件	
活性化する要素2		活性化する条件

3．2 実アプリケーションによるケーススタディ

本節では実施したアプリケーションによるケーススタディについて説明する。当初計画においては実機上で組込みシステム応用を実装しケーススタディを実施する予定であった。しかしながら共同研究者間で十分に往来できる状況でなかったため、急遽、開発環境の共有が容易であるシミュレーション環境によるケーススタディを実施することとした。

本ケーススタディでは提案者らが継続して開発している組込みシステム向け COP フレームワークである RTCOP の評価を実施する。本ケーススタディでは応用として非接触型配送ロボットを設計する。本システムは ROS、Gazebo、及び、Ardupilot を用いて環境を構築する。

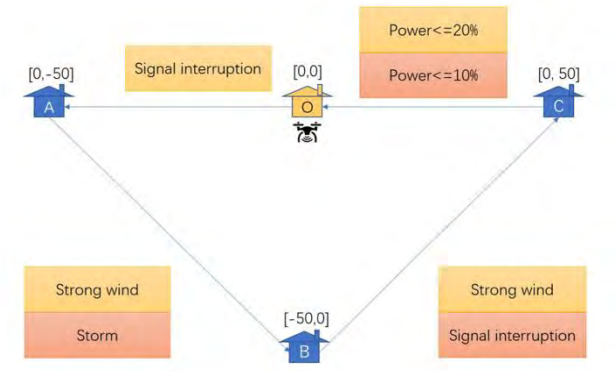


図 2 配送ロボットシナリオ

ケーススタディシナリオ

図 2 に配送ロボットのシナリオを示す。組込みシステムを開発する際には例外状態に対応した振る舞いを的確に実現できることが重要である。そこで、配送ロボットが作業を行う際の、レストランとの通信の大幅な遅延や中断、強風や荒天、少ない電池残量という 3 つの緊急事態を想定したケースを計画する。

シーンは風の強い開けた地形に設定する。配達ロボットはレストラン(起点 O)を出発し、注文者 A、B、C の順に料理を配達し、レストランに戻る。シナリオ全体は 4 つのステージに分けられ、以下のイベントが発生する。

1) O->A：出発地 O で離陸中にネットワーク接続が遮断されると、Flight レイヤの起動が中断され、代わりに No signal レイヤの起動が実行される。ネットワーク信号が再開される一定時間後に Nosignal レイヤが非活性化し、配送ロボットが Flight レイヤの起動を継続することを想定する。Flight モードに切り替わると、配達ロボットは注文者 A まで飛行し、ステージは終了する。

2) A->B：注文者 B への飛行中、風速の急激な増加により StrongWind レイヤが作動し、配達ロボットの飛行高度が半分になる。その後、さらに風が強くなったため、Storm レイヤが作動し、配達ロボットは強制的に着陸させられる。嵐が収まった後、配達ロボットは再び離陸し、注文者 B の元へ飛んでいく。

3) B->C：離陸の際、風速が急に強くなり、Flight レイヤの起動が中断され、StrongWind レイヤが起動される。このとき、Flight の起動は中断され StrongWind レイヤが起動される。ほぼ同時に通信が途絶したため、Nosignal レイヤの起動が開始される。ネットワーク信号が復旧すると、Nosignal レイヤは停止し、配送ロボットは引き続き StrongWind レイヤーを起動する。飛行中、風速は徐々に弱くなる。このとき、StrongWind レイヤは解除され、配達ロボットは引き続き飛行レイヤーの起動

TOPへ戻る

を実行する。最終的に、配達ロボットは通常の高さで注文者 C に飛行する。

4) C->O。離陸の途中で配達ロボットのバッテリーが 20%以下になり、Flight フライトレイヤを終了し、LowPower レイヤを起動する。その後、配達ロボットは半分の高さで原点に戻る。途中、電力が 10%以下になったので、LowPower レイヤーを解除し、NoPower レイヤーを起動する。配達ロボットはその場に着地し、スタッフに回収されるまで待機する。

シナリオ全体では、通常のレイヤの活性化と不活性化、レイヤの活性化の一時停止と再開を実施する。

ケーススタディ結果

ケーススタディでは前述した複雑なシナリオを想定通りに実行できたか、また、組込みシステムで開発フレームワークである RTCOP を活用するために十分な性能であるかを確認する。

まず、想定通りに実行できたかを確認するべく、各レイヤの活性化、非活性化時刻を計測する機能を開発した。この結果、すべてシナリオ通りに実行でき、特に実現が難しい機能であるレイヤ活性化の中断に対応できることを確認できた。実行結果を図 3 に示す。

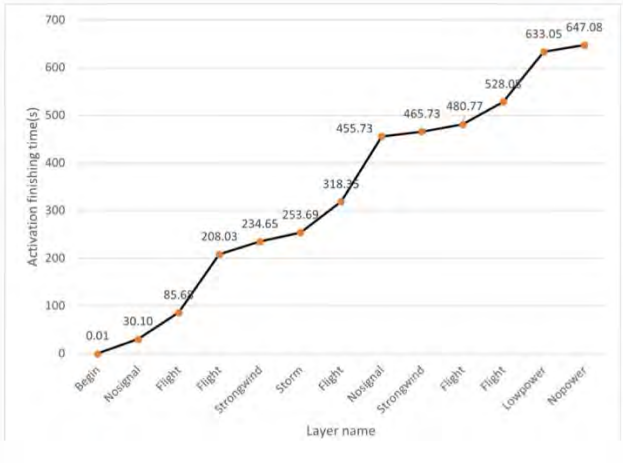


図 3 シナリオの実行結果

さらに、正しさの検証に加えてノード数の増加によるレイヤの活性化オーバーヘッドの解析を実施した。計測結果を図 4 に示す。いずれの場合も負荷ノード数が増えてもレイヤの活性化時間はほとんど変化せず、2 から 2.5 μ秒の範囲に収まっていることが検証できた。

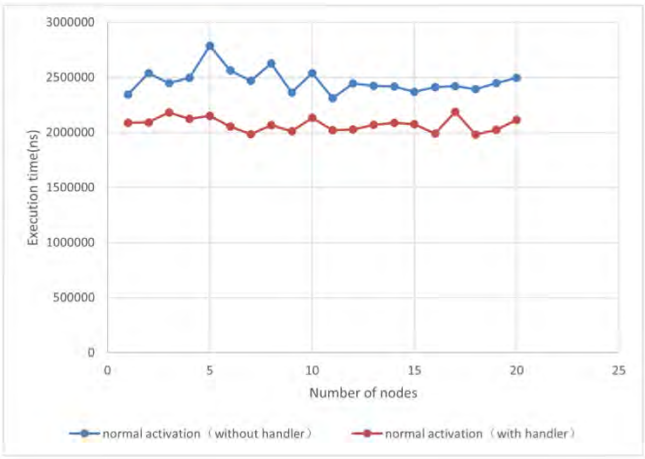


図 4 活性化時間

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本研究に関連して２件の発表を行った。[1]はコンテキスト指向プログラミング(COP)のパラダイムを取り入れた開発方法論の提案、[2]はケーススタディに関連する内容である。

今後は方法論、ケーススタディともに拡張及び検証を実施して論文投稿を行いたい。また、特に方法論については、現状はツールの支援無くモデリングを実施しているが、実用のためにはツール化が必要不可欠である。ツール化を行いオープンソースとして公開することを目指す。

[1] Shintaro Takenaka, Kenji Hisazumi: Context-oriented Design Method for UML State Machine Diagram, Proceedings of the Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS 2021), 2021.

[2] Kenji Hisazumi, Tsuneo Nakanishi, Application of Context-Oriented Programming Paradigm to Automobile Driving Assistance System, International Workshop on Context-Oriented Programming and Advanced Modularity(COP 2021), 2021.

TOPへ戻る

都市景観を映し出す五輪のスポーツ工学への影響
～ロンドン五輪における市内仮設競技会場の事例～

環境システム学科　　山嵜　一也

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究の背景と目的として､以下を挙げた。研究助成対象期間であった 2021 年に開催された東京五輪 2020 を調査および総括する際に、英国・ロンドン市において開催された 2012 年ロンドン五輪を研究対象とすることで、成熟都市において開催する夏季五輪として比較対象とし、その課題を浮かび上がらせるものとする。

東京五輪の影響を総括

史上初、開催が延期された東京五輪 2020 は、レガシーを含め、開催地に大きな傷跡を残すことになるだろう。それゆえ、東京五輪を総括することは、今後、日本で開催する各種スポーツイベント(世界大会、国体など)のような都市型イベントを計画する際に有効になる。五輪開催国ゆえ、スポーツの都市に与える影響を総括すべきであると考える。

ロンドン五輪コンセプト

東京五輪を総括する際、比較対象としてのロンドン五輪に注目する。2012 年に開催された同五輪は都市計画的には、市内東部地区をメーンパークとして再開発し、そのレガシー計画と共に評価、注目された。一方、大会時には市内中心部の広場や公園を敷地とする仮設競技会場を建設し、周辺都市景観を背景とした競技中継を世界のテレビ画面に映し出し、五輪をシティプロモーションとして活用した。

都市景観を映し出す五輪

負の遺産を避けつつ、テレビ映えする大会開催を目指すIOCの要望(総会リポート2003)をロンドン五輪招致委員会は大会コンセプトに巧みに盛り込みつつ､「都市景観を映し出す五輪こそが英国の観光政策に寄与する」として政府の支援を取り付ける。その大会コンセプトを具現化するための大会計画と競技会場計画の立案方法と関係者間の調整を明らかにするのが本研究の目的である。

続いて、本研究の特色・独創的な点としては以下を挙げた。

都市景観を映し出す五輪とは？

ロンドン五輪では、市内中心部の広場や王立公園を敷地とし、布と鉄パイプの簡易な仮設競技会場(※)を設置し、競技背景に都市景観を映し出すテレビ映像を世界中のテレビ画面に発信した。このコンセプトを本研究では「五輪景観」と定義する。(※グリニッジパーク馬術、ホースガーズパレード・ビーチバレーボール、ハイドパーク・トライアスロン、ザ・マル・マラソン 以下写真群)


グリニッジ・パーク
競技：馬術、近代五種


ホース・ガーズ・パレード
競技：ビーチ・バレーボール

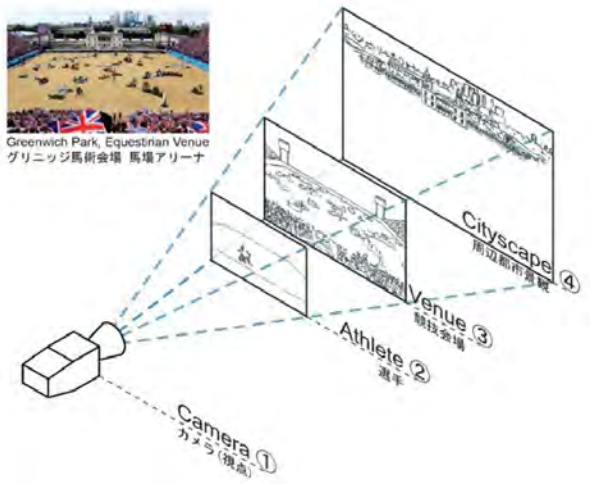

ハイド・パーク
競技：トライアスロン(水泳)など


ザ・マル(市内中心部)
競技：マラソンなど

TOPへ戻る

五輪景観とは？

「五輪景観」の構成要素は４つからなる。【競技会場】で競技する【選手】の背景にある【都市景観】を【TV カメラ】によって重層的に映し出す映像を五輪景観とする(以下図)。この「五輪景観」というコンセプトがどのように生み出され、実現されていたのかを、関係者へのヒアリング調査だけでなく、図面、資料、公式リポートなどの文献調査から明らかにすることが本研究における特色である。





また、本研究を概観するために以下の８つのキーワードを挙げた。①オリンピック、②ロンドン、③レガシー、④建築計画、⑤シティプロモーション、⑥メディア、⑦観光科学、⑧スポーツ工学。

２．研究計画

研究計画概要

本申請研究の実施方法として、現地でのヒアリング調査、文献調査、そして学会などでの研究発表がある。また、これらの研究計画を実施するにあたり、申請者ならではの研究方法を紹介する。

現地調査

ヒアリング調査対象者はロンドン五輪の関係者(元同僚など。英国や欧州在住)である。既にロンドンでの現地調査は実施しているが、コロナ禍の昨年はメールでのやり取りに留まり、授業のない長期休み時期に更なる現地調査の実施を計画していた。五輪関係者は大会の持続可能性に危機感を抱いており、メディアと連携する競技会場計画で五輪の持続可能性に寄与する本研究に対して非常に協力的である。

しかし、コロナ禍による海外渡航を含めた移動の制限により、研究助成対象機関であった 2021 年には英国ロンドンを含めた海外渡航をすることは叶わなかった。

その代わり、東京五輪 2020(コロナ禍による１年の延期により 2021 年の夏に開催)の現地調査として、東京・お台場地区の仮設競技会場を外部から視察した。仮設競技会場は期間限定の建築であったが、こちらもコロナ禍による無観客開催による内部からの視察は叶わず、外部環境と中継映像からの調査分析となった。

文献調査

既にロンドン五輪関連の資料が収蔵されている東ロンドン大学図書館(University of East London Archives)を訪問し、招致委員会作成資料の一次情報などにあたっている。他にも五輪研究活動のために IOC が設立した Olympic Studies Centre の中にある Olympic World Library から文献調査を実施している。しかし、更に研究を進めるには今後も継続的な現地調査や文献を購入および複写する必要がある。また、コロナの影響で大学への文献資料請求もままならない状況であった。

また、都市を背景とした競技会場計画の読み解きに際して、景観研究、特に借景研究の

TOPへ戻る

数々の文献を調査することで五輪景観の構造を以下の「景観を縁取る構造」のように整理することを可能とした。

申請者の背景ならではの研究業績

申請者がロンドン五輪に携わった建築士ゆえの人脈を最大限に活用し、現地調査(平昌冬季五輪 2018、ロンドン 2018&2019)を実施。その調査結果を分析・考察し(博士課程に在籍)、学会、専門誌へ寄稿、講演、インタビューで発表し、最終的には査読付き論文(筆頭著者)に投稿。この過程で専門家によるレビュー、読者や聴衆の反応を反映することで着実に研究成果を挙げている。

研究発表と論文投稿

調査結果を分析考察し、学会で発表し、査読付き論文投稿として研究発表することで専門家によるレビューを受け、研究内容を常に更新することも重要な研究方法であると考えている。

申請者による 2020 年後半に日本建築学会論文集に投稿し、不採用決定された査読付き論文は、再投稿の結果 2022 年 2 月に採択された。

申請者ならではの研究方法

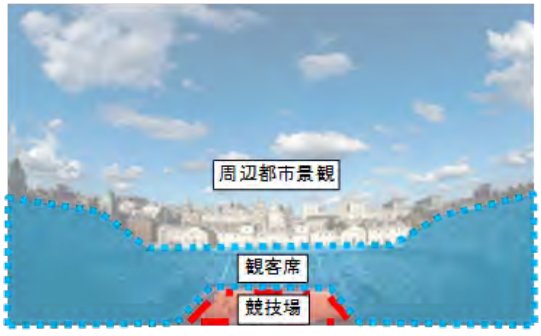
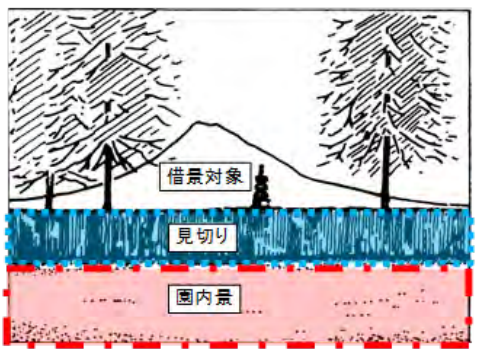
申請者はかつて英国ロンドンを拠点に建築士として従事し(2001-2012)、その間、ロンドン五輪に携わっていた(招致模型マスタープラン、レガシー、馬術競技会場建設現場監理)。その経験を活用した現地での調査方法(設計図書や資料へのアクセス、人脈、英語による調査、土地勘など)がある。また、それらの建築士としての経験を経て現在、東京都立大学大学院博士後期課程・観光科学域(岡村祐研究室)に在籍し(2017-2022)、都市景観や観光科学を専門とする岡村祐准教授の指導を受け、2022 年 3 月に博士論文「カメラによって選手・競技会場・都市景観を映し出す五輪景観の構想・計画・実現の経緯に関する研究 ―ロンドン 2012 年大会を事例として―」を提出し、観光科学の博士号を取得した。並行して、調査結果に分析・考察を加え、日本建築学会において査読付き論文などを投稿することで専門家によるレビューを受け、自身の経験を客観的に扱うことで研究を独創的なものとしている。

既往研究から紐解く研究の独自性

学術的背景における先行研究をレビューしつつ、本研究の独自性と新規性を明らかにしている。これら先行研究分野は、本研究のテーマである都市景観を見せる五輪会場を形成する要素であるが、これらを横断的に検証する研究は極めて少ない。すなわち、テレビ画面の競技中継を通して開催都市の都市景観を見せるための競技会場の建築的計画とその計画を実現するための経緯、また都市景観を映し出し方(演出法)までも計画したロンドン五輪を紐解くことに独自性があると考える。

３．計画の進行状況

研究の進行状況や成果として、東京五輪 2020 の現地リポートやロンドン五輪の調査結果を発表している。以下にそれらのタイト

	五輪景観の構造	借景の構造
景観を縁取る構造		

TOPへ戻る

ルを記すが、その一部を添付する。

延期の末、2021 年の夏に無観客開催となった東京五輪 2020 の仮設競技会場などの現地リポートを建築専門誌・日経アーキテクチュアオンライン版、日経クロステックに連載した(４回 2021 年 8 月掲載)。

「仮設会場で読み解く東京五輪」
https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01739/080300001/

また、日本建築学会計画系論文集に投稿し、2022 年 2 月に採択された査読付き論文「カメラによって選手・競技会場・都市景観を映し出す五輪景観の計画・実現の経緯」も同誌の 2022 年 8 月 第 87 巻 第 798 号にて掲載予定である。これらの査読付きを元にした博士論文によって東京都立大学大学院の観光科学の博士号を取得した。

スポーツ社会学で五輪を研究している石坂友司准教授(奈良女子大学)による東京五輪を総括する勉強会(2021 年 9 月および 2022 年 3 月にオンライン開催)にも参加し、東京五輪 2020 の現地調査を報告、ロンドン五輪 2012 の研究報告を、社会学を中心とした専門家に向けて発表し、意見交換を実施した。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

大会コンセプト立案、実現への調整

期待できる研究成果としては、大会関係者間の要望をどのように調整し、大会コンセプトや競技会場計画が立案、実現されたかを明らかにすることである。具体的には既にある成果として、各国際競技連盟は「大会後の負の遺産になる競技会場は残すべきではない」という態度を早々に表明しており、期間限定の仮設競技会場で対応した(馬術他)。競技会場は簡素な仮設建築であったが、組織委員会とロンドン市は敷地を世界遺産の王立公園や保全地区の広場など、メディアが注目する場所を計画し、新興＆マイナー競技団体の競技普及促進を協力した(ビーチバレー、トライアスロン)。一方でマラソン競技は観光都市ロンドンをテレビ画面に映す出すために選手には石畳や直角コーナーを走らせる負担を強いていた。これらの成果は今後、東京五輪を総括する際にも比較対象として参考になるので、引き続きレガシー計画を含めた追跡調査していくものとする

スポーツを介して波及する研究

ロンドン五輪を対象とする本研究は、オリンピックのようなスポーツと建築、都市、景観、メディア、観光などの分野横断の研究への波及効果を期待する。また、それは都市開発や五輪開催の持続可能性という SDGs の観点からの効果がある。申請者はロンドンの都市景観を研究している岡村祐准教授(観光科学:東京都立大)の元で博士研究を実施しており、前出の石坂准教授や金子史弥准教授(立命館大学)ほか、Monica Chien 博士(観光学：クイーンズランド大・豪)、Stephen Essex 博士(地理学：プリマス大学・英)らと研究成果を意見交換している。

このように、様々な分野の企業や団体とも講演会を通して意見交換しており、申請者の専門である建築と都市を軸にスポーツを介して、他大学の研究者や多分野の企業と更なる共同研究や連携を視野に入れている。それは、スポーツを工学的に捉えることを目指す本学の今後の研究体制へ貢献へと繋がる。

東京五輪の先へ

本研究は東京五輪総括への比較対象資料だけでなく、都市型スポーツイベントへの活用も期待できるため、年度後も研究を継続する。既に 2030 年の冬季五輪招致を目指す札幌市の担当者とも意見交換をしており、イベントにおいて開催都市の景観の映し出し方について本研究の成果を共有したい。

TOPへ戻る

益子町ランドスケープ計画に関する研究

建築学科　　小塙　芳秀

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

2018 年度に開始した益子町ランドスケープ計画の継続を目的とした研究である。

カタルーニャ州立工科大学大学院で研究を行った「地方における風景のデザインの手法」の中で、スペイン・ガロッチャ地方におけるランドスケープ計画について言及し、その後、実際にガロッチャ地方で建築とランドスケープ計画を行う RCR アーキテクツに在籍し実施のプロセスについて学んだ。

現在の日本において、都市計画同様に風景計画を行っている自治体はほぼないと言っても過言ではない。公園計画、植栽計画、河川計画、地域コミュニティー計画といった個別のアプローチは日本では見られるものの、未来の町の風景像を思い描き、全体的な計画から詳細のデザインまでを一貫性を持って実行する例は少ないと言っていい。本研究の比較対象とてあげられるオロット町（スペイン・ガロッチャ地方）は人口 3 万人ながら、自然環境を維持しながら、建築と風景との融合を図り、ユーロ内ではサステナブルな自然環境における観光都市として注目されている。日本ではオロット町とガロッチャ地方についての資料を参照するのは難しく、また、日本においては、それに類似した手法により風景計画が展開する事例はない。

2018 年度より益子町の依頼により益子町全体のランドスケープ計画を担当しており、主にスペインの研究を日本の地方における里山風景の維持とデザインに反映させるべく、現在も調査研究、また設計計画を行っている。

栃木県益子町は、人口 2 万人強を要する町であり、関東圏では特に益子焼で知られており、観光に力を入れている町である。かつては、産業、文化、生活、そして風景が融合しあう美しい里地里山の地であったが、農業人口の減少、観光の衰退、森林の維持問題なども含め、里山資源の活用に対して多くの難題を抱えている。

2021 年度においては、これまでに作成したランドスケープ計画のガイドラインにそって、益子町 7 地区における具体的な調査やワークショップが求められた。数年後には住民主体による風景づくりが求められているため、そのきっかけとなる調査研究が目的の一つでもあった。また今年度は、益子町の風土的祭りである「土祭」が開催さたことで、その土祭に合わせ、各地区との連携の下、本学小塙研究室のメンバーと共に実施計画としてワークショップを企画、運営することとなった。

TOPへ戻る

２．研究計画

2018 年度、2019 年度にまとまられた益子町ランドスケープ計画を基に調査と活動を始め、益子町の風土的祭である「土祭」にも合わせながら複数のワークショップを開催した。

今年度においては、小塙芳秀が全体計画を行いながら、土祭期間に合わせて、芝浦工業大学建築学科・小塙芳秀研究室によるワークショップ企画が進められた。また同時期に別のワークショップを担当していた東洋大学建築学科・伊藤暁研究室と慶應義塾大学・石川初研究室のチームとの連携をはかりながら進めた。さらに、ワークショップと調査においては、芝浦工業大学非常勤講師でもある、景域計画株式会社・八色宏昌氏に、里地里山の植生に関する協力をいただくこととした。

ワークショップの開催と並行して、ランドスケープ推進委員会の設立に向け準備を行ってきた。今年度は専門家と共に行うワークショップの開催を目指したが、徐々に町民主体による意見交換と計画の実施を目標としている。推進委員会には、各 7 地区の代表、益子焼関連、歴史関連、専門家などが集まり、各地区の問題点と解決方法を共有していくことが基本となっている。

これまでのランドスケープ計画では、全体の方針として多様な可能性についてまとめられてきたが、今年度においては、各地区において計画のスタートを切ることができる状態をつくることを目標とした。大々的な自然環境の保護に関しては町や県の指導の下、各課による協力が必要となるため、ここでは、数年後に各地区主体で活動を継続できるよう、地域の活動拠点から全体に広げられるよう考慮した。

小宅地区における亀岡八幡宮里山の会、七井地区では益子里山の会、益子西地区では琴平池の整備をされている方々、益子地区では益子花の会、大羽地区ではいくべ会をはじめとする自治会の方々、益子・田野・山本にまたがる前沢町有林では生田目里山の会、山本地区では未来ファームの小玉氏をはじめ地域の方々と話し合いをし、協力を頂きながら計画を開始した。また、各地区における里山整備の活動を町内外に広め、風景整備に対して多くの人とその重要性を共有できることを目標とした。

今年度の活動内容で重要視されていたのが「土祭」での活動であった。土祭においてランドスケープも主要テーマに含めるとの趣旨により、土祭期間内にワークショップを開催することが求められた。コロナ禍において、ワークショップの開催が直前まで未定という状況が続き、できる限り町内の方に参加いただきながら、状況が許せば町外の方も参加できるように準備するのが良いのではないかなど色々と話し合われた。また、多くの専門家に声をかけ直接参加いただくことも、コロナの状況下ではリスクが大きいという考えもあった。土祭におけるワークショップはイベント性を持ちながらも、ランドスケープ計画の一環として、今後における各地域の活動に繋がることを目的としていた。そのためにも、小宅地区では亀岡八幡宮里山の会、そして益子地区では益子花の会、前沢町有林では生田目里山の会に協力を依頼し、共同で行える内容を検討した。さらに、各活動団体に話を伺う中で、子供にも興味をもってもらい、益子の自然を身近に感じとってもらいたいという

TOPへ戻る

意見も多かったことから、学生の視点から子供用のワークショップを複数企画するに至った。

今年度のワークショップは、一過性のものではなく、次につなげるためにスタートとしての位置づけであった。引き続き、各団体の活動と共に計画が進められることが望まれる。

３．計画の進行状況

益子町 7 地区における計画について

益子町 7 地区：小宅地区、七井地区、益子地区、益子西地区、大羽地区、田野地区、山本地区

小宅地区および益子地区においては、10 月の土祭メイン期間に合わせてワークショップを企画、開催した。その為に 4 月より研究室所属学生と共に益子を訪問し、現状調査を開始しながら、ワークショップの内容を詰めていく作業を続けた。

■小宅地区 WS：10 月 10 日開催

小宅地区では、地域の小学生を含むワークショップ参加者に、約 2km の道のりを歩くフィールドワークを行い、耕作放棄地問題に言及しながら、この地区の素晴らしい里地里山環境を伝えるべく、植栽の説明、また昔の風景と暮らしについて説明をした。フィールドワーク後には現在は廃校となっている小宅小学校を活用しながらレクチャー等も開催した。また学生が中心となって、子供を対象としたテラリウム作りのワークショップを開催し、また、町の重要文化財でもある旧小宅小学校のアカマツを保護する目的もあり、アカマツの柵をデザインした。これらの準備は 4 月から開始し、4 月 22 日の初回の現地調査以降、定期的に現地を訪れた。

■益子地区 WS：10 月 17 日開催

益子町の中心地よりほど近くに位置する円道寺池（ため池）周辺の整備につながる計画である。この円道寺池は、益子地区の花の会（里山を整備する会）が中心となり、荒地を公園として整備している場所であり、今後の活用が強く望まれている。益子花の会の活動を町内外に紹介しつつ、彼らの活動と連携しながら、益子の自然環境を伝えるワークショップを開催した。林道を歩きながらのワークショップを予定していたが、残念ながら雨天により、屋内での開催となった。また、学生が主体となり、さらに二つのワークショップを企画した。一つ目は、バグハウス（虫のホテル）のデザインと制作である。バグハウスは益虫が冬を越すための装置であり、てんとう虫やミツバチを対象とした。6 月ごろよりデザインを開始し、夏にモックアップ、10 月に現地に設置を行った。もう一つは、小学生用に、バグハウスの小型版を作るワークショップを準備した。いずれも益子町が主催する土祭期間内のイベントとして開催するに至った。

■山本地区

さらに主な活動として挙げられるのが、山本地区において、かつての葉タバコ乾燥小屋（ベーハ小屋）の改築設計案の提案である。益子町では 1920 年前後に多く建てられた小屋であるが、現在は老朽化し解体が進んでいる。かつては、益子の風景の中でたくさん見られた特徴ある建物であり、益子の農業と暮らしを理解することができる重要な遺産ともいえる。益子の貴重な財産としてこれらの小屋を残し活用する為に、研究室の学生とともに 8 つの改築案を提案した。主に 4 月から 6

TOPへ戻る

月にかけて設計を行い、その後、2022 年の 3 月には、実際に地域の方に提案を発表し、意見交換を行った。さらには、道の駅ましこにて展示を約 3 週間に渡り開催し、多くの方に見ていただく機会を得た。

■その他の地区

七井地区では、アカマツ再生計画を益子里山の会のメンバーと話し合い、公共空間にアカマツを植樹する計画を進めた。

益子西地区では琴平池（ため池）と隣接する浅間塚古墳の管理と整備について話し合い、大羽地区では雨巻山駐車場の整備に関して地域住民と意見交換を行い、また田野地区では前沢林道整備に関するワークショップを開催した。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

7 地区の計画においては、それぞれ細分化をし、個別のプロセスの中で、研究と調査、また計画と設計を進めていくこととする。

代表的な計画として挙げられる山本地区における葉タバコ乾燥小屋の改築案に関しては、引き続き地域の方々と連携を図り、小屋の保存と活用に努める。2022 年度 3 月に成果物の発表を行い、ベーハ小屋の所有者を含め地域の方との意見交換をしたことで、ベーハ小屋の価値に対して認識が高まったと言える。実現させるために必要なことは何か、非常に実りのある意見交換ができた。さらには、2022 年 4 月に新たな研究室所属学生と共に山本地区を訪れ、2021 年度には調査できなかった小屋をさらに調査することができた。2022 年度においても、4 月から 6 月にかけては、第 2 回目の改築案を研究室所属の 4 年生 9 名と設計に取り組んでいる。2021 年度の意見を取り入れながら、より実施に近い案を提案する事で次のステップに進める予定である。最終目標としては、実際に小屋を解体し、移築、そして改築を実施することである。小屋の解体を希望する所有者と、それらを新しく使いたい人を結びつけ、現実的な設計に落とし込み、さらには実現可能な施工費に収める計算をしていく必要がある。

基本設計ができた時点で、全体構想の発表を建築雑誌に依頼する予定であり、また竣工の時点でも同じく建築雑誌および成果を論文として発表につなげたい。

その他の地区においては、今年度同様に冊子として調査委内容と活動、および計画内容をまとめたい。今年度は益子地区と小宅地区の冊子を作成し、現在印刷の用意をしている。印刷物は一般公開すると共に、地域の風景と活動を紹介し配布をすることで、計画地により多くの訪問者が訪れることを期待する。

益子町全体のランドスケープ計画としては、スペイン・ガロッチャ地方におけるランドスケープの手法との比較検討を行いながら、地方における風景の在り方と手法について論文としてまとめていきたい。コロナ過で研究対象地への渡航が難しく、直接的なフィールドワークを再開できていないが、2022 年度も継続して調査と設計計画を進めたい。

TOPへ戻る

鋼構造制振架構における梁端接合部の設計法構築

建築学科　　浅田　勇人

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

In moment frames installed with either brace-type dampers, the beams are subjected to not only flexure but axial force. The previous investigation (Takahashi et al., 2007) has reported that the beam axial force reaches up to 30% of its beam axial yield strength on the entire beam cross-section in existing steel buildings with the passive control system in Japan. Extensive research has been previously conducted for the members subjected to combined flexure and axial force, but not for the connection. The previous experimental study (Sim et al., 2017) demonstrated that large axial tension on the beam results in welded web connection fracture rather than the beam flange fracture since a large amount of axial force was carried by the beam web when WUF-W connection in which the welded web connection is fully restrained in the out-of-plane deformation is employed. On the other hand, when RHS is used for the column and through-diaphragm connection commonly used in the Japanese moment frame is employed to connect the beam with the RHS column, while the out-of-plane deformation of the welded beam flange connection is fully restrained and beam flange can achieve its fully plastic strength, the welded beam web - column connection strength is strongly dependent on the out-of-plane flexural strength of column face since the beam web directly is connected to the column face without reinforcement. For this connection configuration, It is well known that the strain

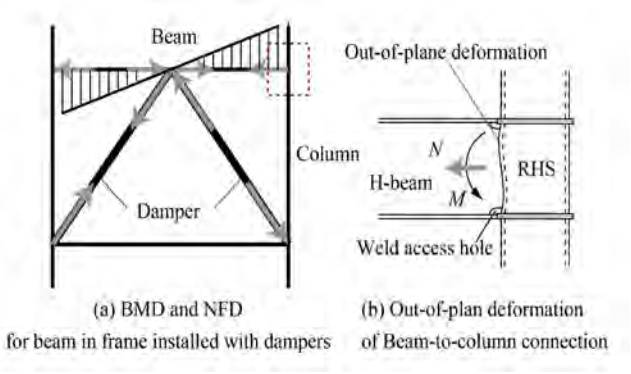


Figure 1. Beam-to-column connection subjected to combined flexure and axial force

demand at the hot spot (i.e., the toe of the weld access hole) is one of the governing factors, as well as CVN toughness and stress triaxiality to determine the plastic deformation capacity of the beam-to-column connections.

Moreover, the strain demand at the hot spot increases as the decrease in out-of-plane flexural strength of the web connection. Therefore, the current Japanese design provision (Architectural Institute of Japan, 2012) specifies the ultimate flexural strength subjected to flexure in consideration of the out-of-plane flexural strength of the column wall. However, the provision has not covered the connection subjected to flexure and axial force.

This study develops FE models representing the typical shop-type welded beam-to-column connection commonly used for the moment frame with a passive damping system and investigates the effect of axial beam tension on the strength and

TOPへ戻る

strain demand at the hotspot for the beam-to-column connections with different column thickness.

２．研究計画

FEA were performed using ABAQUS to investigate the effect of the beam axial tension on global and local responses of the beam-to-column connections. FE model is shown in Fig. 1. The FE models represent typical beam-to-column connections adopted for the moment frame with a passive damping system in Japan and was constructed with the 3-dimensional solid elements (C3D8R) for the region around the beam-column connection and beam elements (B31) for the region away from the connection which remain essentially elastic. The beam was built-up WF section of H-500×300×16×25 made from SN490B, and the column was built-up box section 450×450×tc, where tc is the thickness of the column, made from SN490B. The beam was connected to the column with through-diaphragms, where the welded access hole configurations with “35R + 10R” which is commonly used in Japan, were adopted. For this connection configuration, the region of the high local strain (“hot spot”) at the beam end locates at the toe of the weld access hole (See Fig.2). It is well-known that this type of connection fractures at the beam flange due to the crack initiation from this hot spot, as observed in many previous tests. A bi-linear kinematic hardening model with Young’s modulus, E, of 205000MPa, the yield stress of 325MPa, and post-yield stiffness of 1% of E was assumed for the column, the beam, and the through-diaphragm except for the panel zone (elastic).

In the analyses, two-column thicknesses, tc, 12, and 32 mm, were selected to investigate the effect of out-of-plane flexural strength of the column wall (the web connection). To simulate the beam-to-column connection subjected to axial force and flexure, the vertical load was monotonically applied to the end of the beam by displacement control, supporting both ends of the column, while the constant axial load N with a magnitude of 10 to 50% of the axial yield strength based on the entire cross-section of the beam, N_{by} was applied (normalized axial force (=N/ N_{by}) was denoted by n_b). For comparison, the analyses were also performed for the case only applied vertical load (No axial tension).

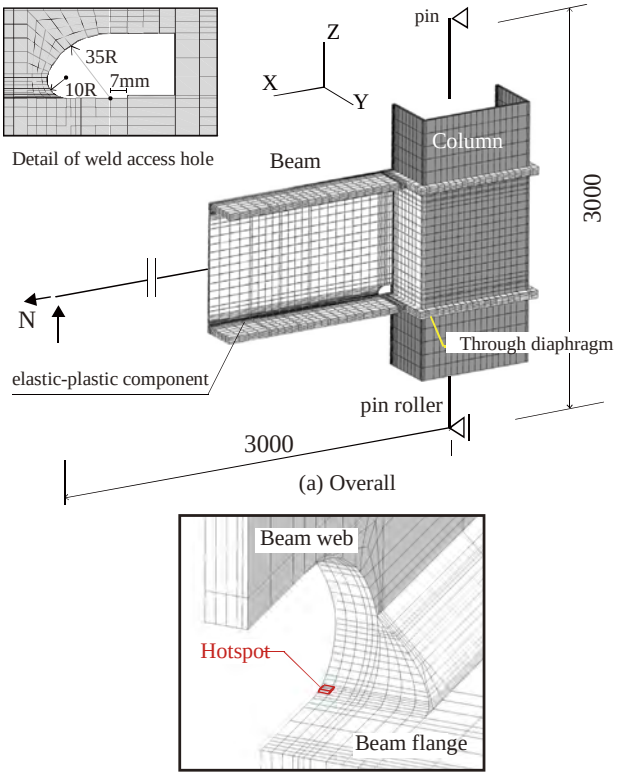


Fig 2. FE model

３．計画の進行状況

Numerical results:

【Global responses】

Fig. 3 shows the beam end moment versus the beam rotation angle relationships obtained from FEA. Even though the beam has same cross section, It can be seen that when the column thickness is 12mm, more significant decrease in the strength depending on the increase in the beam axial tension was observed.

Fig. 4 shows the deformed shapes and normal

TOPへ戻る

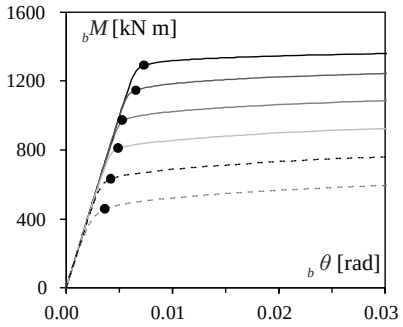
stress contours on the beam axis at the beam rotation angle of 0.03 rad for the connections under combined axial force (n_b= 0.1, N=772kN) and flexure. A significant out-of-plane deformation of the column wall (column flange) and stress concentration around the top beam flange was observed in the model with thinner column wall (tc=12mm), indicating that large force was carry by the top beam flange and an adjacent web nearby the column face.

【Strain demand at the hotspot】

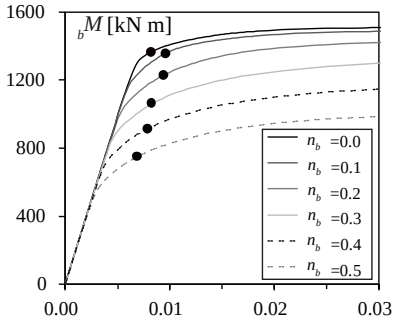
Fig.5 shows an equivalent plastic strain (PEEQ) at the hotspot with respect to the beam rotation angle, $_b\theta$. PEEQ was extracted from the element located at the hotspot, as shown in Fig. 2 (b). PEEQ was significantly increased with beam tension and with a decrease in the thickness of the column. Compared with and without the presence of the axial load, a larger difference in PEEQ between two models with different column thicknesses was observed when axial tension was applied. The beam tension causes a significant increase in the strain demand, which may decrease the plastic deformation capacity when the flexural strength of the web connection is governed by the out-of-plane flexural strength of the column wall.

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

Further investigation is needed to clarify the impact of beam axial tension on the actual plastic deformation capacity of the beam-to-column connection. For this purpose, the experimental tests will be conducted in mid-2023. The configuration of test specimen is shown in Fig.6. The test specimen represents the beam-to-column connection in mid-rise steel moment frames with connection detail commonly used in Japan. All specimens are sub-assemblages consisting of a H-beam and a rectangular hollow section column with a through-diaphragm connection

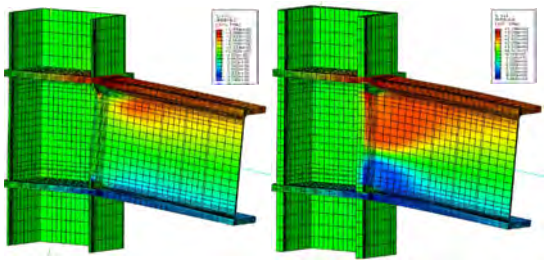


(a) □-450×450×12



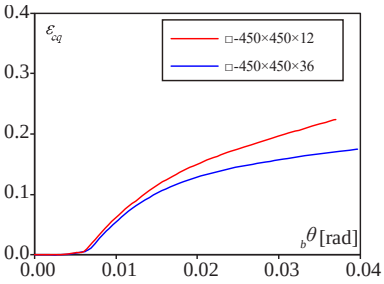
(b) □-450×450×36

Fig.3 Beam-end moment versus beam-rotation relationships

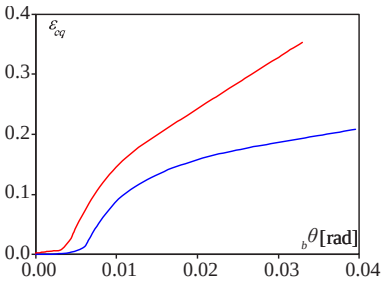


(a) □-450×450×12　　(b) □-450×450×36

Fig.4 Deformed shapes and normal stress contours



(a) n_b =0.0



(b) n_b =0.3

Fig.5 PEEQ versus beam-rotation relationships

TOPへ戻る

configuration. The beam is H-400×400×8×13 of SN490B, and The column is RHS-300×300×16 of BCR295. The weld access hole details with 35 mm + 10mm radii are adopted for the welded beam-to-column connection. The test matrix is shown in Table 1. The experimental parameter includes column thickness and axial force ratio applied to the beam. The column thickness was 12 and 19mm. The axial force ratio is varied from 0.0 to 0.3.

The setup is shown in Fig. 7. The static loading tests will be performed using the testing facility at Tokyo Institute of Technology.

The two oil jacks are attached to the beam end of the specimen. The quasi-static force is generated from the vertical jacks to the specimen, while the constant axial force is generated from the horizontal jack. The vertical load is controlled by the beam rotation angle $_b\theta$.

From test results, the effect of beam axial tension on the connection strength and the plastic deformation capacity will be discussed.

The combined results of the numerical analyses the experiments will be analyzed and submitted to a journal paper.

References:

AIJ (Architectural Institute of Japan). (2012). *Recommendation for Design of Connection in Steel Building Structures*.

Sim, H. B., Ballantyne, G., Chen, A., and Uang, C.M. (2017). "Effect of Beam Tension on Cyclic Performance of WUF-W Steel Moment Connection." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 9(143).

Takahashi, S. Kishiki, S., and Wada, A. (2007). "The Experiment study on Buckling Restriction Brace and Investigation into Existing Structure", *Proceeding of AIJ Kanto Branch*, pp.233-236. (in Japanese)

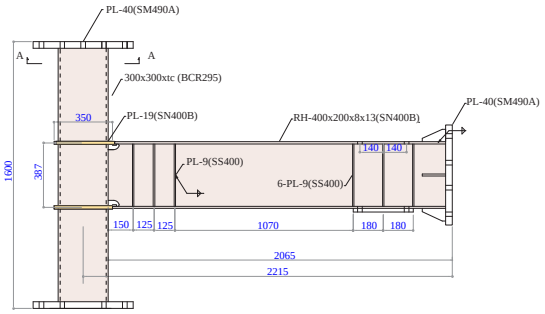


Fig.6 Configuration of test specimen

Fig.7 Test matrix

Specimen	Beam	Column	n_b $=N_b/N_{by}$
A	RH-400×200×8×13	300×300×12 (B/t=25)	0
B			0.15
C			0.30
D		300×300×19 (B/t=16)	0
E			0.3

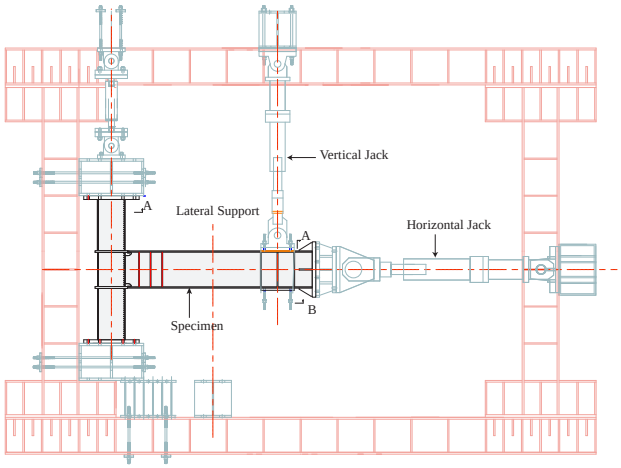


Fig.8 Setup

TOPへ戻る

工匠林兵庫の建築技術書に関する研究

建築学科　　小柏　典華

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

北関東域には、歓喜院聖天堂（埼玉県内唯一の国宝建造物、熊谷市）に代表される、近世発展した華麗な彫刻装飾を有する建築群が多数現存する。今回、これらの建築をつくりあげた技術の一端を有した工匠林兵庫の文書（清水家所蔵史料）を閲覧・調査する機会を得た（図 1,2)。歓喜院聖天堂や歓喜院貴惣門など彫刻装飾を有する建築群は（図 3)、その意匠デザインの独自性が際立ち、近世中期以降の大工技術の創意工夫が理解できる。

このような大工技術の源流を理解するため、大工技術書の解明は必須の課題であり、今回のように新たな大工技術書が発見された事は、従来の建築史・建築技術史・生産史の見解に新たな知見を加えることが可能である。

工匠林兵庫は、日光東照宮台徳院霊廟など著名な建築を建設した平内正信の直系である。平内正信は、近世初期に大工技術である木割を体系化した「匠明」の作者としても著名である。政清は、妻沼の林家の養子として家門に入り、初代林兵庫政清として歓喜院聖天堂の建設を計画した事が知られる。政清や２代正信によって確立された建築彫刻の技術は、北関東域の大工技術として伝播し、今日にみる建築群として現存する。埼玉県教育委員会『埼玉県近世社寺建築緊急調査報告書』(昭和 59 年)や、群馬県教育委員会『群馬県近世社寺建築緊急調査報告書』（昭和 53 年）の悉皆調査により､その存在の一部が明らかである。

松本十徳「利根川沿岸の造営文化」(『群馬文化 207』昭和 61,pp51-58)、同氏「続・利根川沿岸の造営文化」(『群馬文化 209』昭和 62,pp47-59）は、正信ら大隅流大工の技法を紹介している。この他、北関東域の個別の事例研究は着実に進んでいるものの、技術の文化的伝播の理解を得るための建築史的解釈には至っていない。

今回研究対象とする林兵庫家文書には、大工技術書も多く含まれており、当時「匠明」を基に確立されていった大工技術に対して、林兵庫家の大隅流技術がどのように工夫を加え、優秀な建築を各地に建立していったのかは未だ明らかでない点が多い。

以上より本研究は、華麗な彫刻を有する建築を積極的に推進した大工技術について、現存する建築からのみでなく、大工技術書等の史料と対照しつつ、その源流を解明していくことを目的としている。

２．研究計画・研究方法

本研究は、下記の３つの成果達成を目標として研究を進めるものとする。

短期成果 1) 清水家所蔵林兵庫家文書のアーカイブ化および図録の作成

中期成果 2) 林兵庫政清および正信による大隅流建築技術の解明

長期成果 3) 埼玉県北部から群馬県南部に所在する優秀な建築彫刻を有する技術の理解

建築の価値評価が明確になると、国指定や県・市指定の文化財に代表されるような、直接的に我が国の文化資産となり得る。近世社寺建築の全国的調査は平成前半期に一段落し、

TOPへ戻る

この３０年間にはそれらの研究も着実に進んできたが、地域性や多様性が顕著なため、現状はさらなる個別研究が求められている。

本研究で対象とする工匠林兵庫の携わった建築は、近世中期から後期にかけて、北関東地域で発達した荘厳な建築彫刻を刻んだ建築群として高く評価できる可能性を有する。また、現存する建築だけでは個々の事例研究だが、今回新たな大工技術書やデザイン案等を含む史料群の発見により、事例研究を包括した建築史的研究が可能であるといえる。特に、平成２４年に歓喜院聖天堂が国宝に指定されたことで、北関東域での近世中期以降の華麗な彫刻を有する建築群の評価が高まったといえる。さらに、文化庁の最新の答申（令和３年 11 月）でも、霧島神宮本殿・幣殿・拝殿（鹿児島県霧島市）が国宝指定されるなど、建築装飾で彩られた建造物が着目されている。本研究は、建築技術史および生産史の側面からこれらの源流を解明することで、我が国の文化を知る重要な課題と考える。

本研究は、令和３年度～令和６年度の研究課題である。令和３年度は研究初年度のため、清水家所蔵史料の全体像を把握するための撮影および内容把握を先行した。史料の撮影は、一眼レフカメラで装潢全体・本紙部分・必要な場合に本紙の分割撮影を行う。装潢され目視出来ない裏書きや、墨線の曖昧な史料には、LED トレース台を差し込み透過光による部分撮影や、赤外線カメラを用いた反射撮影か透過撮影を行う。また内容把握については、描かれている建築図面の内容を記述するに留め、名称不明の建築の検討等は次年度以降の課題とした。本年度の調査は、令和３年１月、６月、７月、９月、および令和４年１月、２月、３月にそれぞれ複数回調査を実施した。

３．計画の進行状況

清水家所蔵の史料群は、代々社寺建築の工匠として旧武蔵野国や上野之国で活躍した林兵庫家の残した大工技術に関する絵図面類が中心である。林兵庫の初代政清は、江戸幕府の作事方大棟梁を務めた平内家の出自である。平成 24 年に国宝に指定される歓喜院聖天堂（埼玉県熊谷市妻沼、埼玉県下唯一の国宝建造物）は、約 25 年をかけて民衆の寄進により建設され、華麗な彫刻装飾を有する近世中期以降の代表作である。また、境内には重要文化財・貴惣門が建ち、嘉永４年(1851)に５代正道によって造営されている。この貴惣門は、岩国藩（現山口県）の大工による設計図書を林兵庫正道が引継ぐ形で建設されたもので、岩国藩の設計技術と林兵庫の施工技術が合わさり非常に技巧的な惣門である。その独特な意匠は、日本全国でも数少ない好例である。

近世初期以降、平内家が作成した大工技術指南書である「匠明」が広く全国的に流布したことで、近世の大工技術には一定の様式が確立された。しかし、清水家所蔵の林兵庫家文書を確認すると、各種堂舎の造営や(図 4)、その木割書及び詳細図（図 5)、および建築彫刻のデザイン案など一家相伝の技法が描かれていることが理解できる（図 6)。特に、虹梁などの意匠デザインには、歓喜院聖天堂や林兵庫の関わった建築に共通する大隅流の曲線が図案化されている点など非常に興味深い独特な史料群である。

現在の埼玉県北部から群馬県南部にかけて、近世には中央集権が存在しなかったにも関わらず、荘厳な彫刻装飾を有する建築が多数現存しているのは（皆沢八幡宮（市指定)、小夜戸稲荷神社（市指定)、上尾市氷川神社（市指定）など)、林兵庫家などに大工技術が浸透していたからに他ならない。

このように本史料群は、近世中期から後期にかけての建築技術について、現存する建築群からのみでなく、史料群と対照させながら武蔵国や上野国で活躍した大工技術の源流を解き明かす可能性をもつ非常に有力な史料である。

事前調査では、史料の総数は約 200 点と推

TOPへ戻る

定していたものの、令和３年度の調査中に新たな所蔵史料の発見が多くあり、絵図文書史料の総数は現在500点近くにのぼっている。この他に、近世の大工技術雛形も約180冊所蔵されていることが明らかになった。

絵図文書史料の撮影調査は、事前に予定した以上の調査日程を組んだ上で実地の史料撮影および調査を行ったものの、令和３年度の調査終了時点で、全体の約２／３の把握にとどまっている。また大工技術雛形は、近世中期から大正前期までの、堂舎雛形、絵様雛形、構法雛形と多様な和装本が所蔵され、今後は一般流通していた大工技術書と比較することで、どのような技術を取り入れて技術が洗練されていったのかを理解していきたい。

現在までに把握した史料群は、写真と共にリスト化が完了している。令和４年度以降の継続調査により、目録の刊行を予定している。

また本年度は史料全体像の調査の他、一部の着彩絵図の詳細調査まで実施した（図 7)。研究成果は、次項（４項）の通り研究発表を予定している。

特に、八幡神社本殿古絵図（２幅）は熊谷市指定有形文化財であるものの（図8)、これまで詳細調査は実施されてこなかった。従来の見解では、絵図の作成年代は寛永 3 年(1626)とされているものの年代根拠に乏しく、さらに、描かれる建築の図像は江戸中期頃を描くものと推察される。そのため、図像調査・科学調査により、絵図の精査を行った。

図像調査では、絵図の独特な表現の１つである、虹梁両肩の鯖尻末端を、弓眉から連続して跳ね上げるデザイン（以下、鯰口型虹梁とする）に着目した。近世建築雛形や清水家所蔵史料の一部との対照から、鯰口型虹梁の導入時期やその流布を検討することで、「八幡神社本殿古図」の成立年代の推考をした。

科学調査では、蛍光X線分析装置を用いて彩色箇所の元素分析を行った。その結果、白色顔料や青色顔料に、一般的な技法とは異なる手法が確認され、２人以上の人物によって分担・彩色された絵図である可能性が高いことが明らかとなった。

最後に、今後の喫緊の課題として、現在の史料群が個人所有のため保管環境が芳しくなく、適切な温湿度管理の出来ない状態から虫喰いや欠損の著しい史料が散見されている。中には、長持に収納していたものの直接土間の上に置かれていたため、湿気・土砂の流入から史料閲覧が難しい史料もあった。また、先代所有者が生前に装潢を施した絵図は裏書きが読み取れない史料も多くある。本研究対象のような、地域の文化形成に深く関わる史料の発見は、地域の財産である。今後、史料の散逸を防ぐためにも、早急なアーカイブ化による全体像の把握、および熊谷市や文化財センターとの連携による史料保全が急務と考えられる。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本年度は、清水家所蔵史料の全体像を把握するための悉皆調査を実施した。地域の文化形成に直接関わる史料群の発見は大変貴重であり、地域の文化資産となり得る。今後は地域の文化の伝播を理解できる基礎資料となるよう、目録作成やより詳細な個別調査から研究成果をまとめていく。

本年度の成果として、着彩絵図である「八幡神社本殿古図」の年代推定や科学的調査、祭礼に関する史料のうち神輿に着目した研究をまとめることができた。令和４年度の日本建築学会大会発表に、以下３本の口頭発表を登録し、令和４年９月に成果発表を行う予定である。

1) 小柏典華、大和あすか、松下裕介「「八幡神社本殿古図」の史料的価値　その１　鯰口型虹梁の導入」(『日本建築学会大会学術講演梗概集』,2022)

2) 松下裕介、小柏典華、大和あすか「清水家所蔵史料にみる神輿関連史料について」(『日本建築学会大会学術講演梗概集』,2022)

TOPへ戻る



図 1　屋内収納の状態



図 2　所蔵史料



図 3　歓喜院聖天堂



図 4　堂舎造営



図 5　組物之図（詳細図）



図 6　絵様や彫刻デザイン案



図 7　着彩絵図



図 8　八幡神社本殿古絵図

TOPへ戻る

ムスリムの埋葬地に関する日仏比較

建築学科　　佐藤　香寿実

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

これまで報告者が調査対象地としてきたフランスでは，第二次大戦後に大量流入した移民とその子孫の社会的統合が政治的課題となって久しい．国是であるライシテ（政教分離）を軸としたナショナル・アイデンティティが強化されるなか，特にイスラーム系移民とその子孫に対する統合政策がすすめられてきた．他方，外国からの移住者およびその子孫の増加により多文化社会化が進む現代日本では，いかに日本の習俗や文化を尊重しつつ，彼らの出身地域の習俗・文化の維持を可能にしていくかが社会的課題として浮上している．近年では特にムスリムの宗教的禁忌に対する理解促進の必要性が認識されるようになった．

本研究は，特に埋葬場所の観点から，日本とフランスにおけるムスリム住民の埋葬をめぐる現状と課題を明らかにし，整理することを目的とする．

一般に，イスラームの伝統では，清めた遺体を白い布でくるみ，右脇腹を下に，顔をメッカの方角に向けて土葬する．死後直後の埋葬が勧められ，墓はなるべく質素なものが良いとされる．また，火葬は地獄の業火を想起するものとして忌避される．これらの慣習は，フランスや日本などムスリムがマイノリティとして存在する国々における墓地規則や葬送文化とは合致しない部分があり，どこまで彼らの信仰・信条に配慮した墓地運営が行われているかは，国によって，また地域によって大きく異なる．

フランスのムスリム埋葬地に関しては，報告者はすでにストラスブールにおいてムスリム専用の公共墓地（図１・図２）に関する調査を実施したことがあるが[*1]，ストラスブールの事例はフランスの他地域とは異なる特殊な墓地規定によって可能となった計画であり，典型的な事例とは言えない．他都市との比較が十分ではなかったうえにアップ



図1 ストラスブールのムスリム公共墓地（報告者撮影）

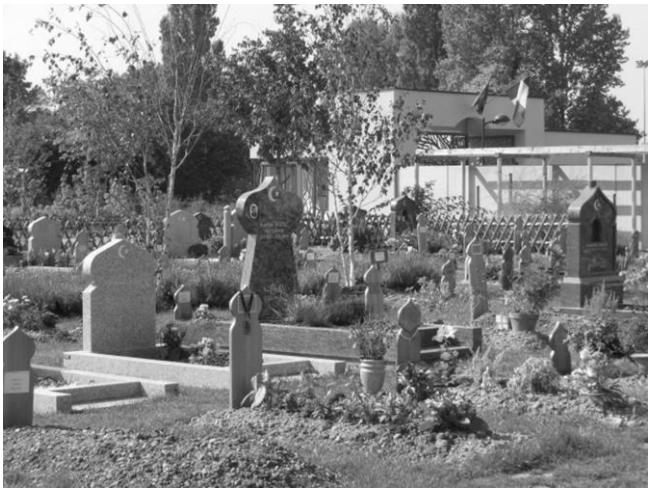


図2 墓地内部の様子（報告者撮影）

TOPへ戻る

デートも必要である．また，近年日本でもムスリム人口は増加傾向にあり，埋葬地をめぐるムスリム住民の困難や，非ムスリム住民との対立がメディアでも報じられるようになってきたが，日本におけるムスリム埋葬地を主題とする既往研究は限られており*2，さらなる議論の深化が必要とされる．

日本とフランスを比較する視点が本研究の重要な特色である．比較により各社会の特徴や個別の課題を明らかにしたい．

２．研究計画

当初の研究計画においては，①文献調査（先行研究のレビュー・新聞記事分析）②関東近郊における現地調査③フランスにおける現地調査，の３つを柱としていた．このうち，①先行研究のレビューに関しては，フランスと日本に加え，西欧をはじめとするムスリム・マイノリティが存在する国々におけるムスリムの埋葬を主題とする文献を調査し，整理すると同時に，ムスリムの埋葬問題を扱った新聞記事を収集・分析した．②関東近郊における現地調査においては，都内モスクの運営者および関係者らの協力を得て，関東近郊のムスリムの埋葬地におけるフィールドワークを主に８月～9 月上旬に実施する予定であった．

さらに，③のフランスでの現地調査に関しては，2 月上旬にパリ，リヨン，ストラスブールの三都市をまわり，各都市におけるムスリムの埋葬地を訪問するほか，墓地を管理する行政担当者や葬儀会社の担当者へのインタビューを実施する予定であった．

また，交付された予算 40 万円のうち，約 30 万円は渡仏のための交通費にあて，残りは書籍や雑費の費用にあてる予定であった．

３．計画の進行状況

新型コロナウイルス感染拡大による緊急事態宣言・蔓延防止措置等の発令のため，上述の計画のうち②関東近郊における現地調査の進捗は芳しくなく，③フランスにおける現地調査も実施することが叶わず，計画の進行は当初の予定と比べ大幅に遅れている．

代わりに本年度は，①文献調査に注力した．②関東近郊における現地調査に関しては，報告者にとっては日本における現地調査が初めてであったため，本年度は調査協力者とのラポール形成に努めた．新型コロナウイルス感染拡大の合間に複数回，東京ジャーミイ（図

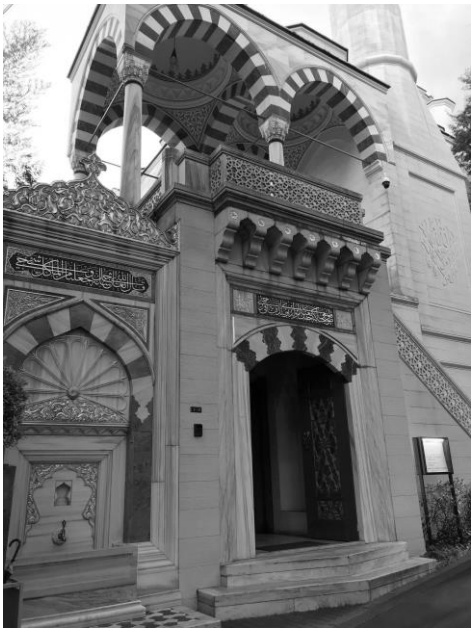


図3 東京ジャーミイ（正面玄関）



図4 東京ジャーミイ（後背）



図5 マスジド大塚

TOPへ戻る

３・図４）およびマスジド大塚（図５）を訪れ*4，各モスクの担当者からの聞き取り，各モスクの宗教行事での参与観察を行い，利用者との交流・接触をはかった．

なお，予算執行について，渡仏のための交通費にあてる予定であった約 30 万円は，年度途中に買い替えが必要となったノートパソコンの購入にあてた．

文献調査によって得られた日仏比較の視点は，表１の通りにまとめた．また，日仏におけるムスリム埋葬地をめぐる問題は，下記４点において大きな違いがあることが確認された．

（１）土葬に対する抵抗感の有無

火葬が一般化している日本においては，土葬可能な墓地は極めて限定されており，土葬に対する強い抵抗感が既往研究において報告されている*3．このことが地域の非ムスリム住民の理解を得ることを困難とし，ムスリムの墓地取得を妨げる一因となっている．一方，カトリックの伝統が強いフランスでは，土葬が主流であり，土葬それ自体が問題視されることはない．

（２）ライシテ／政教分離の影響

「ライシテ」が共和国原則となっているフランスでは，原則，新規の宗教別墓地の建設は認められておらず，新規墓地はすべて地方自治体が管理する公共墓地となる（1881 年 11 月 14 日の法）．公共墓地内の宗教的区分を禁じる規定も存在し，これらライシテに関する規定が，イスラームの慣習に則った埋葬地の取得を困難としていた．一方，日本では墓地の所有および管理は公共団体のみならず宗教法人にも認められており，イスラーム団体によって管理されるムスリム墓地が存在する．

（３）中央政府からの働きかけ

フランスでは，ムスリム埋葬地に対するニーズの急増を受けて 1975 年，1991 年，2008 年に通達が出され，既存の公共墓地内にムスリム用の墓地区画（carré musulman）を設けることが推奨されている．ただし，その判断は各自治体の首長に委ねられる．日本では，ムスリムの埋葬地取得に関し中央政府から明確な指針は示されていない．

（４）非ムスリム住民の反対運動

前述の通り，フランスでは既存の公共墓地内にムスリム用の区画を設けることもあり，地域の非ムスリム住民による反対運動は目立たない．一方，日本ではイスラーム団体が新規に墓地建設する場合に反対運動が生じることがある．例えば現在，大分県日出町に建設が予定されるムスリム墓地をめぐって反対運

表１ ムスリムの埋葬地をめぐる現状の日仏比較[*5]

		フランスにおける状況	日本における状況
ムスリム人口【全人口比】		約400万～800万【約6～12%】	約11万（2012年推計）【0.1%未満】
イスラーム墓地の数		およそ70（殆どが公共墓地内に設置，2008年時点）	5（2020年時点）
墓地の所有・管理		公共団体	公共団体、宗教法人
イスラームの慣習との比較			
	イスラームの慣習	フランスにおける状況	日本における状況
方角	遺体は右脇腹を下に、顔をメッカの方角に向ける。	方角に関する規定なし。 各自治体の首長の判断で公共墓地内にムスリム区画を設けることができる。	方角に関する規定なし。
埋葬方法	土葬。特に火葬は忌避される。	土葬が一般的だが、近年火葬率も増加（2018年時点で39%）。	火葬が一般的（火葬率99.9%）。
埋葬時機	死後直後の埋葬が推奨される。	死後24時間経過してからの埋葬。	死後24時間経過してからの埋葬。

TOPへ戻る

動が展開されており，町議会は国にガイドラインの策定を求める意見書を提出している．

以上の大きな相違点が見られたものの，ムスリム墓地設置の決定／許可においては各自治体首長の権限が大きい点，管理費用や土地の不足が主要課題となっている点，イスラームの慣習と受け入れ地域の葬送の慣習の折衷が見られる点は，日仏ともに共通している．ただし，地域・事例によって直面しうる地理的・歴史的・人口学的・法的現状は異なるため，安易な一般化はできず，さらに慎重かつ地道な現地調査が必要である．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

文献調査の一環として，科学研究費助成事業基盤研究（A）「西洋社会における世俗の変容と「宗教的なもの」の再構成-学際的比較研究」（研究代表者：伊達聖伸，課題番号：20H00003）・比較教育社会史研究会「宗教と世俗化部会」の合同開催で行われた，伊達聖伸編『ヨーロッパの世俗と宗教―近世から現代まで』（勁草書房，2020 年）合評会で，評者の１人として発表した（2021 年 5 月）．

また本研究に関連する成果として，科学研究費助成事業基盤研究(B)「欧米諸国の生命倫理に関する基本理念及び運用・制度の法学的，哲学・倫理学的比較研究」（研究代表者：小出泰士，課題番号：21H00468）第 1 回研究会において，「フランスのライシテをめぐる現代的課題－イスラームとの関係に着目して―」という講演を実施した（2021 年 8 月）．本講演の内容は，「生命倫理・生命法研究資料集 VII」（p. 62 - 104）にまとめられている．（2022 年 3 月）．

進捗状況が芳しくない日本およびフランスにおける現地調査に関しては，新型コロナウイルス感染状況を鑑みつつ 2022 年度に再度実施を試みる．現地調査の成果を整理・分析し，これまでの文献調査の成果と合わせて論文を仕上げ，日本地理学会で発表後，『地理学評論』に投稿予定である．

さらに，2022 年度末に単著『ライシテの普遍主義を問い直す―「辺境の街」ストラスブールにおけるムスリムの場所づくり』（仮）を刊行予定である．本書は科学研究費助成事業研究成果公開促進費（学術図書）（課題番号：22HP5105）の採択を受けたもので，フランスのムスリムの埋葬地に関する文献研究の成果が含まれる．

注

*1 佐藤香寿実（2018）「地域特性を活かしたムスリムのための場所づくり-フランス・ストラスブールにおけるムスリム公共墓地を事例に」人文地理学会大会研究発表

*2 例えば,池田千洋（2005）「日本におけるイスラーム教徒の墓地と埋葬-東京トルコ人協会と日本ムスリム協会の事例から」民俗文化研究 (6), 70-100.,川﨑のぞみ（2016）「ムスリム墓地取得活動と地域社会の変化 ： 日本ムスリム協会と大塚マスジドの事例」宗教学・比較思想学論集 (17), 95-103.

*3 ただし火葬が普及したのは近代以降のことで，それまでは土葬も広範囲で実施されてていた．（勝田至編（2012）『日本葬制史』吉川弘文館ほか）

*4 図３～５の写真はすべて 2021 年度中に報告者が撮影した．

*5 表１作成のために参照した*２以外の主な文献は次の通り。店田廣文（2015）『日本のモスク 対日ムスリムの社会的活動(イスラームを知る 14)』山川出版社., Aggoun, A. (2006). *Les musulmans face à la mort en France.* Librairie Vuibert., FASILD, Frégosi, F. (ed.) (2006). L*'exercice du culte musulman en France : Lieux de prière et d'inhumation.* La documentation française.

TOPへ戻る

誘電エラストマーアクチュエータによる果物の成熟度評価

機械機能工学科　　細矢　直基

１．緒　　論

アボカドは他の多くの果実と異なり，木の上では完熟せず，収穫後に一定期間貯蔵することで成熟する．そのため，正しい収穫時期よりも早く収穫を行った場合には適切に完熟せず，市場の需要に応えることができない[1]. 野菜や果物の熟度を評価する指標として，光学的な手法や硬さを含む機械的性質を計測する技術が広く研究されている．これらの方法には，ペネトロメーターや穿刺試験を用いるような破壊的な方法と，近赤外線分光法などの光学的な方法や音響振動法などの非破壊的な方法がある[2]．ペネトロメーターを用いた貫通法では，試料を貫通させるのに必要な力の最大値を求め，硬さの指標とする．穿刺試験では，果実に器具が貫通する際の時間-力線図を描き，その中で最大の力を求めて固さの指標とする．これらの方法はいずれも破壊的であり，試験後のサンプルは破壊されて使用できない．また近赤外線分光法は，アボカドの外皮に凹凸があることにより，可視光を強く吸収してしまい計測結果に影響を与えてしまう[3]．加えて，近赤外線分光法の装置は，商業的に利用することは容易ではない[4]．そのため，非破壊かつ定量的に行うことができる評価方法が必要とされている．

誘電エラストマーアクチュエータ(Dielectric elastomer Actuator: DEA)は伸縮性があり，軽量・薄型であるため，外皮に凹凸のあるアボカドにも貼り付けることが可能である．また，DEAを用いた振動実験システムは，高出力パルスレーザーや複雑な光学系で構成される非接触レーザー加振技術[5]に比べて，より小型で安全なシステムを実現している．そのため，DEAは品質測定システムに適している．HirutaらはDEA加振によるリンゴの振動実験と硬さ評価を行い，DEAは硬さ評価に有効であることが明らかになっている[6]．また，これまでの研究で，アボカドの硬さは熟度や保存期間とよく相関していることが分かっている[7].

本研究では，DEA を用いてアボカドの加振実験を行い，その応答を計測することでアボカドの硬さ評価する．また，保存期間と硬さの相関を調べることでアボカドの成熟度評価における DEA の適用可能性を調べる．

２．DEA の駆動原理

DEA は大きな歪みを起こすために柔軟な材料が電極と誘電膜に用いられる．DEA は，誘電膜を柔軟電極同士が挟み込むキャパシタ構造をしている．図 1 に示すように，DEA の両面に位置する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，面外（厚み）方向に圧縮し，面内方向に伸長する．この時発生する圧縮応力は式(1)のように表される[8].

$$p = \varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{V}{d} \right)^2 \tag{1}$$

このとき，p は圧縮応力[Pa]，ε_r は誘電膜の比誘電率，ε_0 は真空誘電率[F/m]，V は印加電圧[V]，d は電極間距離[m]である．

TOPへ戻る

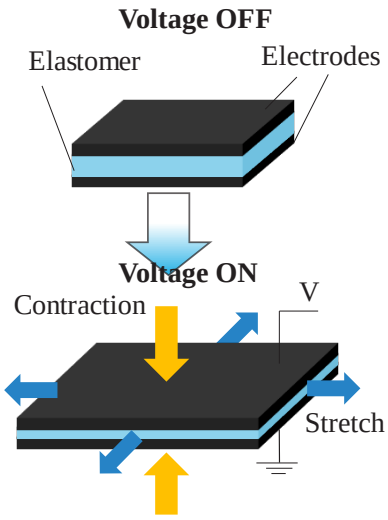


図 1　DEA の駆動原理

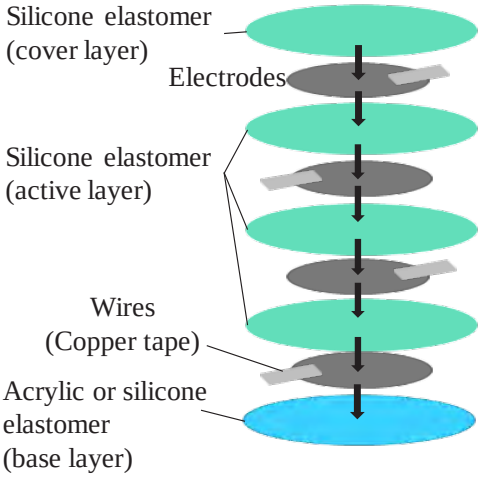


図 3　積層 DEA の構造

３．DEA の製作

図 2 に本実験で製作した DEA の大きさを示す．直径 30 mm の誘電エラストマーに，直径 20 mm の柔軟電極を塗布した．導線には銅テープを使用した．誘電エラストマーはシリコーン系材料とした．

本実験では，DEA の高出力化を実現するために，積層数を 3 とした．図 3 に積層化された DEA を示す．本研究では 3 種類の DEA の製作を行った．違いは，最下層にある．Type A では最下層をシリコーン系材料とし，果物に接着剤で貼付する．Type B では最下層を粘着性のあるアクリル系材料とし，それ自身の粘着性を利用して果物にはそのまま貼付する．Type C では，最下層(アクリル系材料)と active 層(シリコーン系材料)とを接着剤で積層する．また，5 枚目の活性層の上にシリコーンエラストマーを貼り付けて保護層とした．

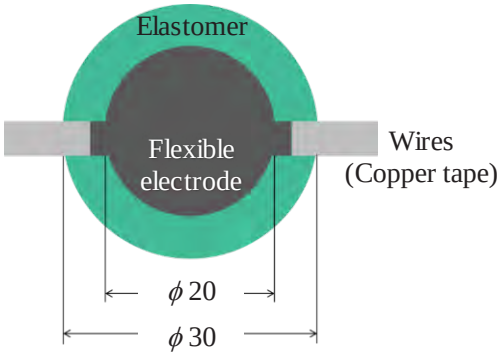


図 2　DEA の大きさ

４．DEA による果物の振動試験

４．１．サンプル

図 4 に，供試体として用いたメキシコ産のハス種のアボカドを示す. 図 4(a)を Avocado A，(b)を Avocado B とした．質量は電子天秤で計測した．それぞれ Avocado A が 212.3 g，Avocado B が 183.4 g であった．実験開始日を day 0 とし，1 日後を day 1，2 日後を day 2 のように表すことにした．熟成は温度 20 ℃，湿度 50%の室内で行った．



(a) Avocado A

TOPへ戻る



(b)　Avocado B

図 4　供試体（メキシコ産のハス種のアボカド）

４．２．DEA による硬度評価システム

図 5 に，DEA によるアボカドの硬度評価システムを示す．アボカドは，気泡緩衝材上に設置することで，周辺自由状態とした．DEA でアボカドを加振し，応答をレーザードップラー振動計(Laser Doppler Vibrometer: LDV)で計測した．計測点には，反射シール (およそ 3 mm × 3 mm)を貼り付けた．各供試体と取り付けた加振信号は，20 Hz–20 kHz の正弦波掃引とした．この信号を高電圧アンプで増幅した後，DEA に入力した．増幅前の入力信号と LDV により計測された振動応答は，スペクトルアナライザーで記録した．

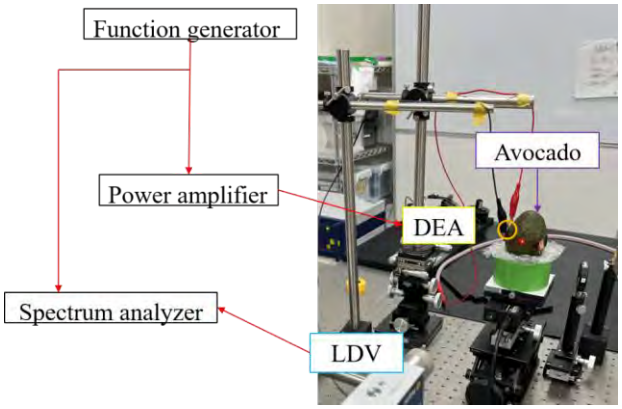


図 5　DEA による硬度評価システム

多くの場合，果物の硬度評価は，その赤道上の加振点と計測点を設け，${}_0S_2$ モードと呼ばれる固有振動モードに着目する[5]．この固有モード周波数を計測することで硬さを評価する．本実験でも同様に，赤道上にそれぞれ加振点と計測点を設けた．図 6 にアボカドの加振点と計測点を示す．

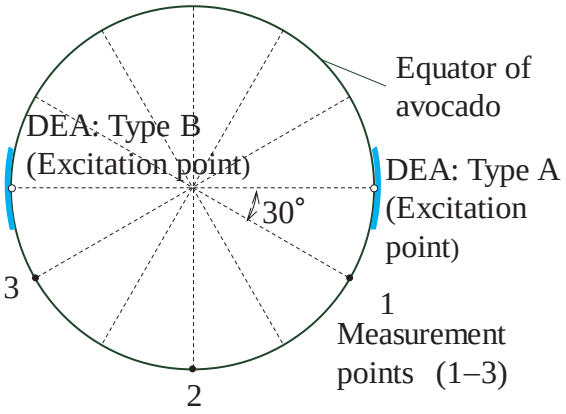


図 6　アボカド上の加振点と計測点

４．３．貯蔵時の成熟度評価

図 7 に，Avocado A の貯蔵時の ${}_0S_2$ モード振動数の変化を示す．これは，Type B の DEA で加振し，点 2 で計測された振動応答のフーリエスペクトルである．図 7 においては，貯蔵日数をそれぞれ，0 日目，3 日目，4 日目の時に計測されたものを重ねて示している．先行研究においては，${}_0S_2$ モード振動数は柔らかいもので 560–1300 Hz, 硬いもので 1700–1800 Hz と報告されている[9, 10]．本実験においても，図 7 の赤色または黒色の矢印で示したピークがアボカドの固有振動数であると考えられる．今後，どちらのピークが ${}_0S_2$ モード振動数に対応するのかは，実験モード解析により調べる必要がある．本報告では，1000–1350 Hz の固有振動数を ${}_0S_2$ モードと仮定する．図 7 に示すように，どちらのピークも貯蔵日数が増加するに伴い，振動数が低下していることがわかる．

TOPへ戻る

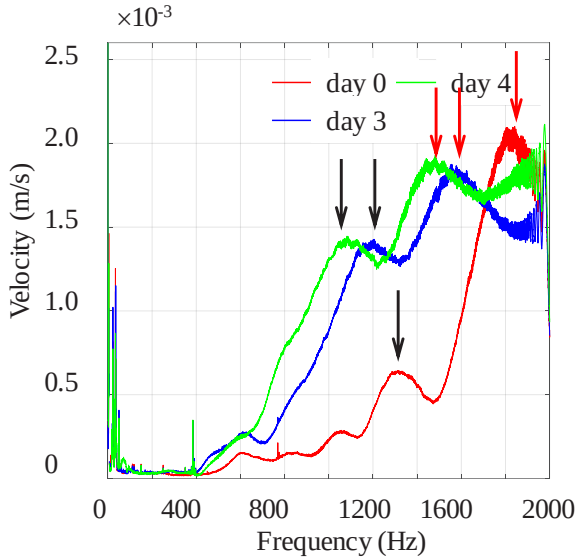


図 7　貯蔵日数と $_0S_2$ モード振動数の関係

５．結論

DEA による振動試験システムを用いることでアボカドの硬さを評価できることを示した．2022 年度に，日本機械学会の講演会で発表する．そして，より詳細な検討を続け，学術論文として投稿する．

文　　献

1. N. Galili, I. Shmulevich, N. Benichou, Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation, American Society of Agricultural Engineers 41 (1998) 399–407.
2. Z. Fathizadeh, M. Aboonajmi, S.R.H. Beygi, Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response, Scientia Horticulturae 262 (2020) 109073.
3. P.P. Subedi, K.B. Walsh, Assessment of avocado fruit dry matter content using portable near infrared spectroscopy: Method and instrumentation optimisation, Postharvest Biology and Technology 161 (2020) 111078.
4. A. Woolf, C. Clark, E. Terander, V. Phetsomphou, R. Hofshi, M. Lu Arpaia, D. Boreham, M. Wong, A. White, Measuring avocado maturity; ongoing developments, The Orchardist (2003) 40–45.
5. N. hosoya, M. Mishima, I. Kajiwara, S. Maeda, Non-destructive firmness assessment of apples using a non-contact laser excitation system based on a laser-induced plasma shock wave, Postharvest Biology and Technology 128 (2017) 11–17.
6. T. Hiruta, N. Hosoya, S. Maeda, I. Kajiwara, Experimental evaluation of frequency response and firmness of apples based on an excitation technique using a dielectric elastomer actuator, Sensors and Actuators A: Physical 330 (2021) 112830.
7. U. Flitsanov, A. Mizrach, A. Liberzon, M. Akerman, G. Zauberman, Measurement of avocado softening at various temperatures using ultrasound, Postharvest Biology and Technology 20 (2000) 279–286.
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. S. Landahl, L. Terry, Non-destructive discrimination of avocado fruit ripeness using laser Doppler vibrometry, Biosystems Engineering 194 (2020) 251–260.
10. K. Peleg, U. Ben-Hanan, S. Hinga, Classification of avocado by firmness and maturity, Journal of Texture Studies 21 (1990) 123–139.

TOPへ戻る

ＭＥＭＳプロセスによるマイクロ６足ロボットの製造法と基本ミドルウェアの開発

機械機能工学科　　長澤　純人

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究の目的は MEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）プロセスによる折紙構造のロボットフレームを適用したマイクロ６足ロボットの製造法と，これらのマイクロ・ロボット群を効率的に制御するための基本ミドルウェアを開発することである．

2019～2021 年度に実施した科研費研究では，折紙構造のロボットフレーム，SMA アクチュエータによるコンプライアント・メカニズムの駆動，組込 MPU や電装系の実装，積層型静電角度センサによる角度フィードバック制御など，マイクロ６足ロボットの実現に必要な基礎技術を確立した（Fig.1）．これらの基礎技術を集約し，実際のアプリケーションへの展開のために，実機のマイクロ６足ロボットの MEMS プロセスによる製造法の確立とマイクロ・ロボット群を制御するための基本ミドルウェアの開発が必要である．



Fig.1 コンプライアント・メカニズムによる小型６足ロボット．１枚の FPC シートから折り上げる([2]Asamura, Nagasawa, JJAP, 2021)．

本研究には大きく３つの柱がある．

①製造手法の MEMS プロセス化
②積層静電型センサのアクチュエータ化
③探索などのアプリケーションのための
**　ミドルウェアの開発**

近年，ロボット分野では ROS や RT-middleware などのロボット用ミドルウェアの利用が一般的になっている．しかし，マイクロ・ロボット用のミドルウェアはまだ一般的ではない．マイクロ・ロボットは基本的には複数台で稼働するロボット群として運用するため，開発するミドルウェアは群制御に適応していなければならない．また，マイクロ・ロボットに実装される組込み MPU は一般的には非力なプロセッサなので，その処理能力でもミドルウェアのモジュールとしてリアルタイム処理ができなくてはならない．これらの技術的問題を解決し，世界に先駆けてマイクロ・ロボット用のミドルウェアを開発・提供したい．

近年の移動ロボットでは LiDAR（レーザーレンジスキャナ）による実時間の空間把握が可能になり，その研究応用が進んでいる．LiDAR の小型化・低価格化は自動車の自動運転技術を背景に急速に進んでいる．本研究で開発するマイクロ６足ロボットはパームトップサイズであるが，そのサイズでも搭載可能な LiDAR も発表されており，ミドルウェアで群制御されたマイクロ・ロボットで SLAM（自己位置推定と環境地図作成の同時生成）の実現はホットトピックになり得る．

TOPへ戻る

２．研究計画

○2021 年度：折紙構造ロボットフレームの MEMS プロセス化の確立．これまで角度センサとして用いてきた積層型静電角度センサに SMA（形状記憶合金ワイヤ）をアクチュエータとして組込み，センサとアクチュエータの両方の機能を持つ統合デバイスとして試作・評価を行う．マイクロ・ロボットに ROS と LiDAR を導入する前段階として，通常サイズの 6 足ロボットに ROS と LiDAR を導入する．

◆2022 年度： マイクロ 6 足ロボットの MEMS 製造プロセスの確立．特にセンサ・アクチュエータの正確な取り付け手法の確立を目指す．センサ・アクチュエータ統合デバイスの実機ロボットへの適用検討．小型移動ロボットに組込みマイクロコントローラ用の micro-ROS を導入する．

◆2023 年度： センサ・アクチュエータ統合デバイスも折紙構造であり，折紙構造のロボットフレームと一体化して再設計・試作・評価を実施する．micro-ROS によるマルチエージェント（複数台ロボット用）ROS を試作マイクロ 6 足ロボットに実装して評価する．

◆2024 年度： センサ・アクチュエータ統合デバイスの ROS によるリアルタイム制御の実現を目指す．マイクロ・ロボットのハードウェアとミドルウェアの適用例として，マルチエージェントによる探索タスクを実施する．

３．計画の進行状況

①製造手法の MEMS プロセス化

2021 年度にはロボットフレームの MEMS プロセス化を行った．Fig. 2 に示すように，これまでコイル型形状記憶合金アクチュエータ，組込 MPU，表面実装部品や小型リチウムポリマー電池などの駆動系・制御系の統合を進めてきたが，ロボットフレームの更なる小型化・高精度化のためには，MEMS プロセスの適用が欠かせない．ロボットフレームとしてこれまでは FPC シートのトラス構造体を使用してきたが，関節駆動の際に構造が歪んでしまうため，設計どおりに動作しなかった．SU-8 による高剛性の構造部を使うことで FPC トラス構造よりも簡潔になり，駆動部の歪みを少なくできた（[4] Sugimoto, Nagasawa, MNC2021 Int. Conf.）．今後は，プロセス基板のリリース，アクチュエータの均一な取り付けを中心としてプロセス条件の確立を目指す．

②積層静電型センサのアクチュエータ化

積層静電型の角度センサは Fig. 3 のように折紙構造のロボットフレームと同様に 1 枚の FPC シートから折り上げられる．積層静電型の角度センサは，静電容量変化から角度を推定可能で，減速機付モータと組合せて角度フィードバック制御に成功している（[1]Hara, Nagasawa, JJAP Journal 2021）．

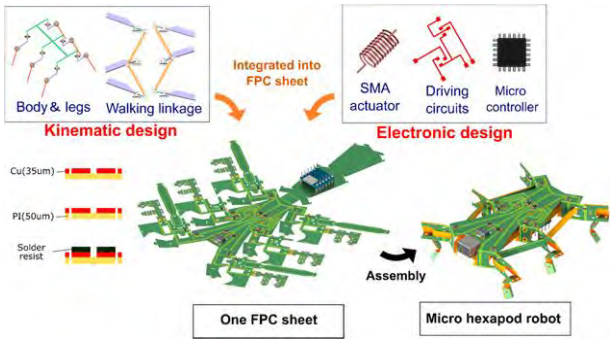


Fig.2 折紙構造ロボットフレームにアクチュエータ，組込 MPU，表面実装部品や小型電池などの駆動系・制御系要素を統合した．

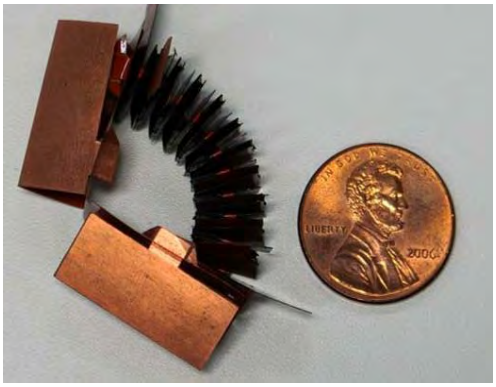


Fig.3 1 枚の FPC シートから折り上げる積層静電型の角度センサ．静電容量変化からヒン

TOPへ戻る

ジ角度を直接測定できる（[5]Hara, Nagasawa, MNC 2021 Int. Conf.）.

2021 年度には SMA をアクチュエータとして組込み，角度センサとアクチュエータが統合した状態でのフィードバック制御に成功した[5]．当初は本センサの積層された電極構造に高電圧を印加することで，各電極間が縮むように駆動することを検討したが，電極間距離が大きすぎるために十分な駆動力が発生できないことが明らかになった．この積層型静電角度センサの構造をアクチュエータとして利用している報告があるので，静電アクチュエータとしての駆動検討を継続して進める．

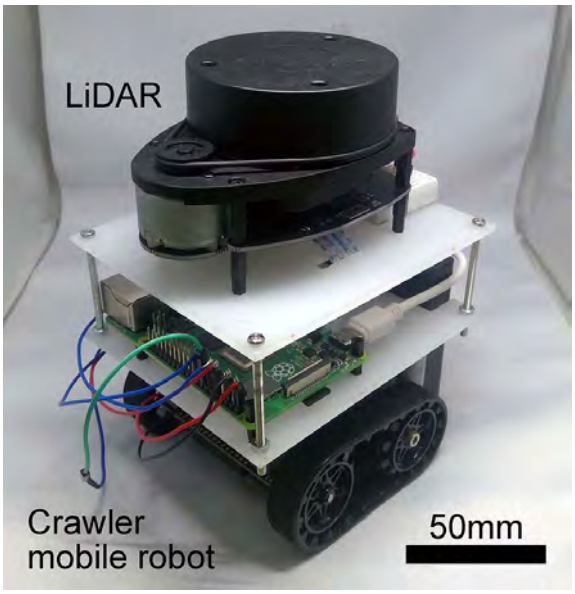
③探索などのアプリケーションのための ミドルウェアの開発

マイクロ・ロボットのアプリケーションは基本的に複数ロボット（群ロボット）での協調タスクとなるため，ユーザーの利便性のために群制御に対応したミドルウェアの開発は必須である．また，LiDAR のような測定データに対して複雑な処理が必要なアプリケーションの導入にもミドルウェアは有効である．2021 年度は Fig.4 a) に示すオリジナル設計のクローラ移動ロボットと Fig.4 b) に示す 6 足ロボットに LiDAR と IMU を搭載し，ROS ミドルウェアによる SLAM (Simulutanious Localization and Mapping) を導入した．この 2 台のロボットをオリジナル設計とした理由は，移動機構以外の部分に関しては全く同じ構成とすることで，クローラ移動と脚移動の比較が容易になるようにするためである．組込 MPU としては Raspberry4 を利用しているが，SLAM の処理は ROS で接続されたホスト PC で行う構成である．

車輪移動型ロボットに搭載する従来型の LiDAR は，LiDAR 基部のピッチ角やロール角は傾かないが，脚移動ロボットでは体軸の変化が激しい．このため，脚移動ロボットの LiDAR による周囲情報計測はこの体軸変化による誤差の補正が必要となる．ロボットの姿勢を測定する IMU (Inertial measurement unit) で時々刻々の体軸変化を正確に推定し，LiDAR 測定値を補正する．また，垂直方向スキャンに積層型静電アクチュエータを用いる２次元スキャニング方式の実現可能性も検討する．

クローラ型と脚移動型ロボットの比較によって，これらの移動手法の違いが LiDAR 測定・SLAM に与える影響が定量的に評価できる．今回実施した簡単なマップによる SLAM 適用では，脚移動型ロボットの方がクローラ型ロボットで得た SLAM のより約 1.6 %程度誤差が大きいことがわかった．

a)



b)

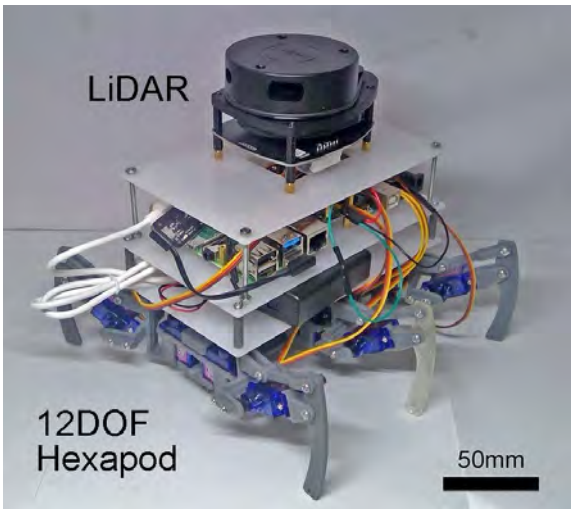


Fig.4 ROS 上での多脚ロボットの LiDAR によ

TOPへ戻る

る SLAM を実施している，12 自由度の自作６足ロボット．IMU による深度測定の補正手法を確立させる．([10] 関, 長澤, 日本機械学会関東支部卒業研究発表講演会, 2022)．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本研究は本プロ研による支援により，2022～2024 年度の科研費基盤Ｃ研究に採択された．本助成によって，①ロボットフレームの MEMS プロセス化，②積層型静電角度センサに SMA をアクチュエータとして組込み，センサとアクチュエータを統合した状態でのフィードバック制御，③ROS ミドルウェアによる LiDAR を使った SLAM をクローラ型ロボットと脚移動型ロボットに導入，これらの事項を科研費研究の研究計画に先んじて 2021 年度に始めることができたのは大きなアドバンテージとなった．ロボットフレームの MEMS プロセス化とセンサ・アクチュエータ統合デバイスは２件とも MNC2021 国際会議で発表し，論文投稿の準備を進めている．今後も得られた成果は迅速に査読付き論文や国際学会で発表していく．本研究に関連する発表を，以下の参考文献に示す．

参考文献

■査読付論文

(1) T. Hara, K. Asamura, Y. Nagata, S. Nagasawa, “Stacked Electrostatic Angle Sensor Implemented in Micro Robot Leg Joints,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.60, SCCL08, (**2021**), DOI: 10.35848/1347-4065/abe5c0.

(2) K. Asamura, S. Nagasawa, “A micro Hexapod Robot for Swarm Applications Assembled from a Single FPC Sheet,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.60, SCCL03, (**2021**), DOI: 10.35848/1347-4065/abe689.

(3) K. Asamura, S. Nagasawa, “MEMS Fabrication of Compliant Sheet for Micro Hexapod Robots,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.59, SIIL03, (**2020**), DOI: 10.35848/1347-4065/ab7439.

■国際会議

(4) K. Sugimoto, S. Nagasawa, “Micro-Hexapod Robot Having an Origami-like SU-8 Coated Rigid Frame,” *Digest of 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021)*, 29C-2-2, Online, Japan, Oct. 26-29, 2021.

(5) T. Hara, S. Nagasawa, “Sensor and Actuator Double Functional Component for Micro Robot Leg Joints,” *Digest of 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021)*, 29C-2-3, Online, Japan, Oct. 26-29, 2021.

(6) K. Kojima, S. Nagasawa, “Sequential Automatic Assembling Method for Microstructure Using Shape Memory Polymer Units,” *Digest of 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021)*, 29C-3-2, Online, Japan, Oct. 26-29, 2021.

(7) K. Shimomoto, S. Nagasawa, “Continuous Size Classification Device for Marine Microplastics by Pinched Flow Fractionation,” *Digest of 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021)*, P5-18, Online, Japan, Oct. 26-29, 2021.

■国内会議

(8) 新田雄真, 長澤純人,“ジェスチャ用マイクロ多指ハンドの小型ロボットへの実装と評価,”日本機械学会関東学生会第 61 回学生員卒業研究発表講演会，718，オンライン，Mar. 14, 2022.

(9) 冨永裕太, 長澤純人，“自動組立のための SMA を用いた任意角度の自動折り上げユニット,”日本機械学会関東学生会第 61 回学生員卒業研究発表講演会，809，オンライン, Mar. 14, 2022.

(10) 関拓，長澤純人，“LiDAR を用いた Micro-Hexapod への SLAM の実装,” 日本機械学会関東学生会第 61 回学生員卒業研究発表講演会，809，オンライン，Mar. 14, 2022.

(11) 金井貴勲, 長澤純人, “ＭＥＭＳ３次元コンプライアントヒンジによるマイクロロボットフレーム,”日本機械学会関東支部 第 28 期総会・講演会，15E20，オンライン，Mar. 14-15, 2022.

(12) 空真奈花, 長澤純人, “画素ごとに光学設計したマイクロレンズアレイの deep RIE によ

TOPへ戻る

る製作,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-J15, オンライン, Jun. 6-8, 2021.

(13) 児島啓太, 長澤純人, “マイクロコンピューターを搭載した構造物の形状記憶ポリマーユニットを用いた順序自動組立,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-L05, オンライン, Jun. 6-8, 2021.

TOPへ戻る

Synthesis of novel high entropy oxides and search for their functionalities as oxygen storage materials for oxygen generation

機械機能工学科　Alicja　Klimkowicz

Research colleagues
機械機能工学科　　Takasaki Akito

1. Paper introduction

In 2014 two separate groups of scientists developed and introduced high-entropy materials (HEMs), sometimes called multicomponent alloys or Cantor alloys [1, 2]. Since then, the materials have attracted increasing attention due to their unique properties of solid solution formation with the simple crystal structure. An example of high-entropy oxide (HEO) with randomly distributed cations crystalizing in a perovskite-type structure is presented in Fig.1.

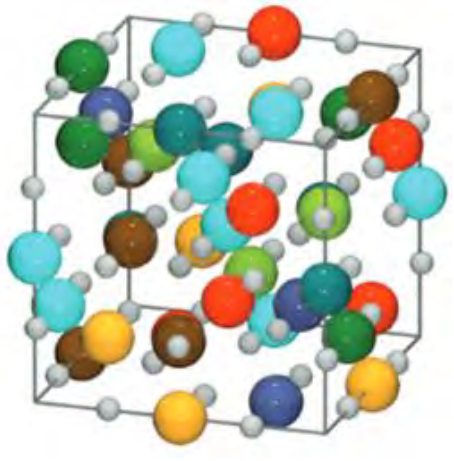


Fig. 1. A crystal structures of high-entropy oxide with perovskite-type structure (based on [3]). Colors represent different atoms randomly distributed, gray - oxygen.

The HEM materials gathered a lot of interest for their wide chemical composition range. Tailoring their chemistry opens a whole range of potential functionalities and benefits of the synergic effect of a multi-elemental system.

According to [1] high entropy alloys are defined as having configurational entropies larger than 1.5R ($\Delta S \geq 1.5R$ in a random state, single-phase, or multiphase at room temperature). For the random solid solution, the configurational entropy, ΔS, is represented by the following equation:

$$\Delta S_{conf} = -R \sum_{i=1}^{n} x_i ln x_i$$

where R is the ideal gas constant and x_i represents the molar fraction of the i-th component. For a given number of components, n, configurational entropy reaches the largest value when the atomic fraction of all components is the same (i.e., equimolar) [4].

Only a year after the discovery of HEM, the entropy stabilization concept was introduced for oxides. The molar

TOPへ戻る

configurational entropy of ceramic materials can be obtained based on the following equation:

$$\Delta S_{conf} = -R\left[\left(\sum_{i=1}^{n} x_i ln x_i\right)_{cation\ site} + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i ln x_i\right)_{anion\ site}\right]$$

According to Cantor, because of the random distribution of elements, in HEM, there are almost 20 trillion local clusters in a 5-component material. Of course, this number grows exponentially when the number of components increases. A similar phenomenon can be observed for HEO as well. This fascinating and complex local arrangement gives rise to the unique bulk properties of the materials. Further, using many components in one compound gives literally infinite combinations of elements and, therefore, compounds.

The high-entropy oxides were predicted to exhibit oxygen vacancies (δ), and the number of vacancies was calculated to increase with an increase of elements used [6]. A large amount of oxygen vacancies hints that the material can be suitable as an oxygen storage material (OSM). Since, up to date, there was no reporting on the oxygen content change for the HEO, the first trials are introduced in this report.

２. Research program

The presented research focused on obtaining new single-phase high entropy materials belonging to three families. First, $ABO_{3-\delta}$ perovskite-type structure was a parent, and the modifications were made in B sublattice, namely A = Y or La, and B = 5 different *d*- or *f*-block metals (M) in equiatomic proportions $(La/Y)1/5(M_{1/5})O_{3-\delta}$). Analogously, A sublattice was modified, and A = 5 different rare earth elements (Re) in equiatomic proportions and B = Mn, $1/5(Re_{1/5})MnO_{3-\delta}$. The third group of studied materials was simple rare earth (Re) oxides of the general formula $n(Re1/n)O_{2-\delta}$. The sol-gel method was used for material preparation. Respective nitrates were used as a cation source, and the EDTA was used as a complexing agent. Diluted ammonia was used to neutralize the pH of the solution. The sol-gel transition was carried out using an electric mantel, and the solution was heated up to 400 ℃ and dried completely. The obtained precursor was pressed into pellets and sintered in airflow at 1000 ℃ or 1100 ℃. The X-ray diffraction (XRD) technique was used to investigate the structure of the obtained materials. For the single-phase samples, a Rietveld refinement was conducted. The microstructure of the obtained samples was evaluated using Scanning Electron Microscope (SEM). Elemental analysis was also conducted to ensure the even distribution of the elements within the sample. However, the resolution of the measurement did not allow for quantitative calculation of the material's composition.

The suitability of the sintered materials for oxygen production and storage properties was evaluated using a thermogravimetric device (TG). The effect of the temperature and pressure on the oxygen content in the materials was a subject of investigation, and the tests

TOPへ戻る

were conducted in various temperatures (TSA) and oxygen partial pressure range (PSA) as well as the combined Temperature Pressure Swing Absorption method (TPSA).

The XRD (Rigaku smart lab), SEM (JEOL / JSM-7100F), and TG (TA Instruments TGA 5500) devices used in this work were available in technoplaza in SIT.

３. State of progress

Due to the space limitation, only selected results are presented in this report. The presented data were gathered by three undergraduate students as part of their graduation research under my supervision:

- Shotaro Dokin (AB18108) Equiatomic rare-earth element oxides a s Oxygen Storage Material
- Shiho Koike (AB18054) Oxygen storage properties of high entropy oxides Y, Lax(1/xM)$O_{3-\delta}$ (M: 3d metals)
- Kenshin Sugihara (AB18080) Sintering and Oxygen Storage Properties of High Entropy Oxides 5($R_{0.2}$)$MnO_{3-\delta}$ (R: Rare Earth Elements)

Three series of compounds, namely (La/Y)5($M_{1/5}$)$O_{3-\delta}$, 5($Re_{1/5}$)$MnO_{3-\delta}$, and $nRe_{1/n}O_{2-\delta}$, where M is a *d*- or *f*-block metal, and Re is a rare earth element, were tested using X-ray diffraction technique. The gathered data, together with phase analysis, are presented in Tab.1. Most of the samples crystallized in a single-phase structure despite complicated chemical formulas. However, some of the designed structures could not be obtained. However, some of the designed structures could not be obtained. After phase identification, a Rietveld analysis was performed, and selected results are shown in Fig. 1. The calculated unit cell parameters are gathered in Tab. 2. A significant error on the refinement conducted for the 1/5(PrNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$ is caused by the presence of impurities.

Table. 1 XRD analysis results of the prepared sample.

Samples	T [℃]	Space group
La1/5(MnFeCoNiAl)$O_{3-\delta}$	1000	Multi
	1100	*R*-3*c*
La1/5(CrMnFeCoNi)$O_{3-\delta}$	1000	*R*-3*c*
	1100	Multi
Y1/5(MnFeCoNiAl)$O_{3-\delta}$	1000	*Pbnm*
	1100	*Pbnm*
Y1/5(CrMnFeCoNi)$O_{3-\delta}$	1000	*Pm*-3*m*
	1100	*Pm*-3*m*
1/5(PrNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$	1100	*Pbnm* +
	1000	*Pbnm* +
1/5(LaNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$	1100	*Pbnm*
	1000	*Pbnm*
1/5(CeNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$	1100	Multi
	1000	Multi
1/5(LaCePrTbY)$MnO_{3-\delta}$	1100	Multi
	1000	*Pbnm*
1/4(CeLaPrY)$O_{2-\delta}$	1100	*Fm*-3*m*
1/5(CeLaPrSmY)$O_{2-\delta}$	1100	*Fm*-3*m*
1/6(CeLaNdPrSmY)$O_{2-\delta}$	1100	*Ia*-3
1/7(CeTbLaNdPrSmY)$O_{2-\delta}$	1100	*Ia*-3

Table. 2 Unit cell parameters (*a*, *c*, *V*) obtained using Rietveld refinement for 1) 1/5(PrNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$ using *Pbnm* 2) La1/5(AlMnNiFeCo)$O_{3-\delta}$ using *R*-3*c* and 3) 1/6(CeLaNdPrSmY)$O_{2-\delta}$ using *Ia*-3 (χ^2 = goodness of fit).

	a [Å]	*c* [Å]	*V* [Å^3]	χ^2
1	5.4765(1)	13.2304(3)	343.64(2)	3.325
2	5.3534(1)	7.4878(1)	233.73(1)	8.543
3	10.9816(1)		1324.35(2)	1.735

TOPへ戻る

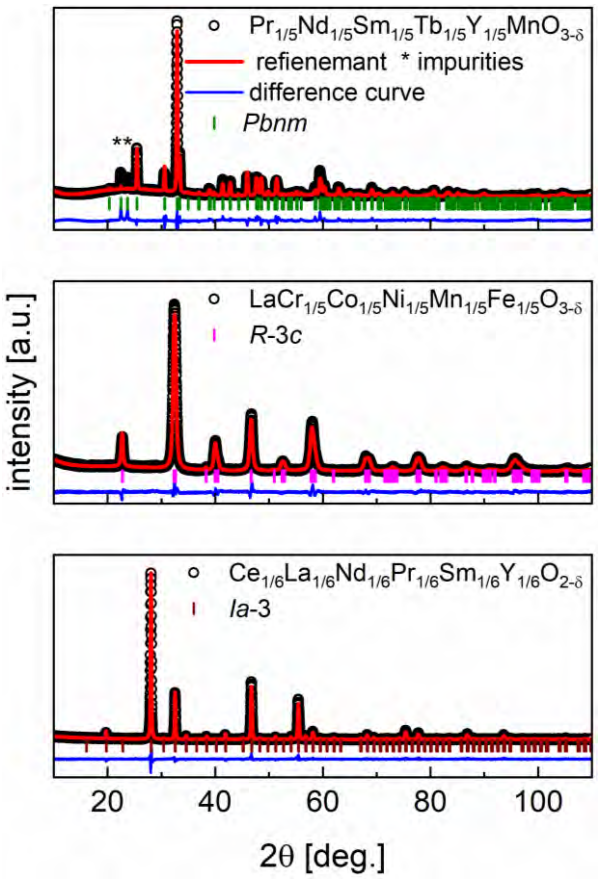


Fig. 1. XRD data with Rietveld refinement of selected samples, sintered at 1000℃ in air.

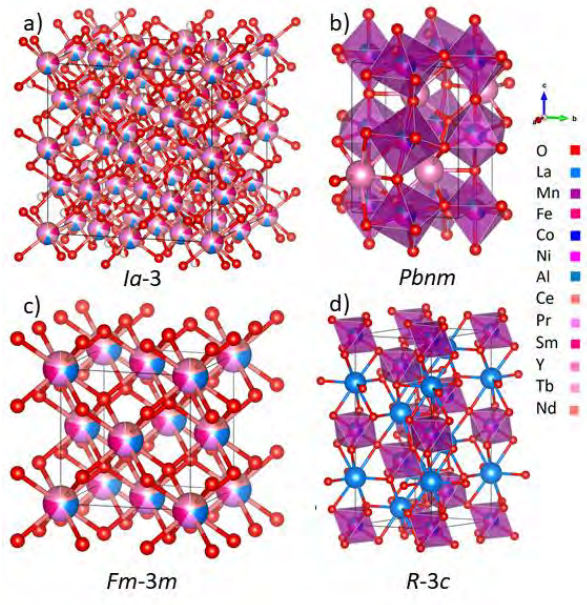


Fig.2 Visualizations of the
a) 1/7(CeTbLaNdPrSmY)$O_{2-\delta}$ (*Ia*-3)
b) Y1/5(MnFeCoNiAl)$O_{3-\delta}$ (*Pbnm*)
c) La1/5(MnFeCoNiAl)$O_{3-}\delta$ (*Fm*-3*m*)
d) 1/5(CeLaPrSmY)$O_{2-\delta}$ (*R*-3*c*).
Atoms not to scale.

The structures observed for selected materials are visualized in Fig.2. There is no clear tendency between the chemical composition and the structure adopted by the material.

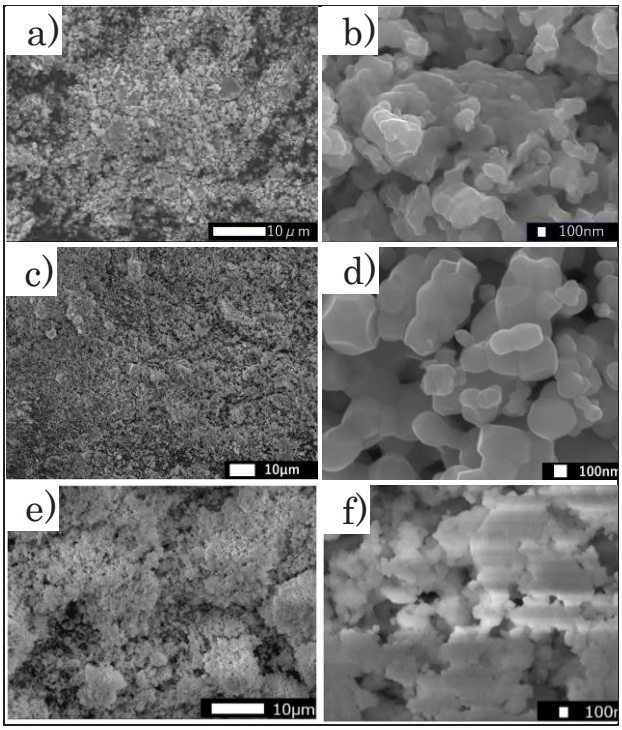


Fig. 3. SEM images take for a) b) 1/5(PrNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$, c), d) La1/5(AlMnNiFeCo)$O_{3-\delta}$, and e), f) 1/6(CeLaNdPrSmY)$O_{2-\delta}$ samples under varies magnifications.

The microstructure of all studied samples is similar, and therefore other results can be compared. Exemplary morphology for the studied samples is shown in Fig. 3. The elemental analysis (Fig. 4) confirmed an even distribution of elements for all single-phased elements.

The analysis of the thermogravimetric data showed that HEO materials exhibit little change in the oxygen content under the studied conditions. During the initial heating in argon, all materials release oxygen (Fig 5a, b). However, this

TOPへ戻る

oxygen loss is difficult to reverse even under highly oxidizing conditions (pure oxygen, high temperature in the order of 500-600 ℃). Further tests on the reversibility, shown in the example of La1/5(CrMnNiFeCo)$O_{3-\delta}$, exhibited a small intake of oxygen (Fig. 6). The effect was stronger at higher temperatures.

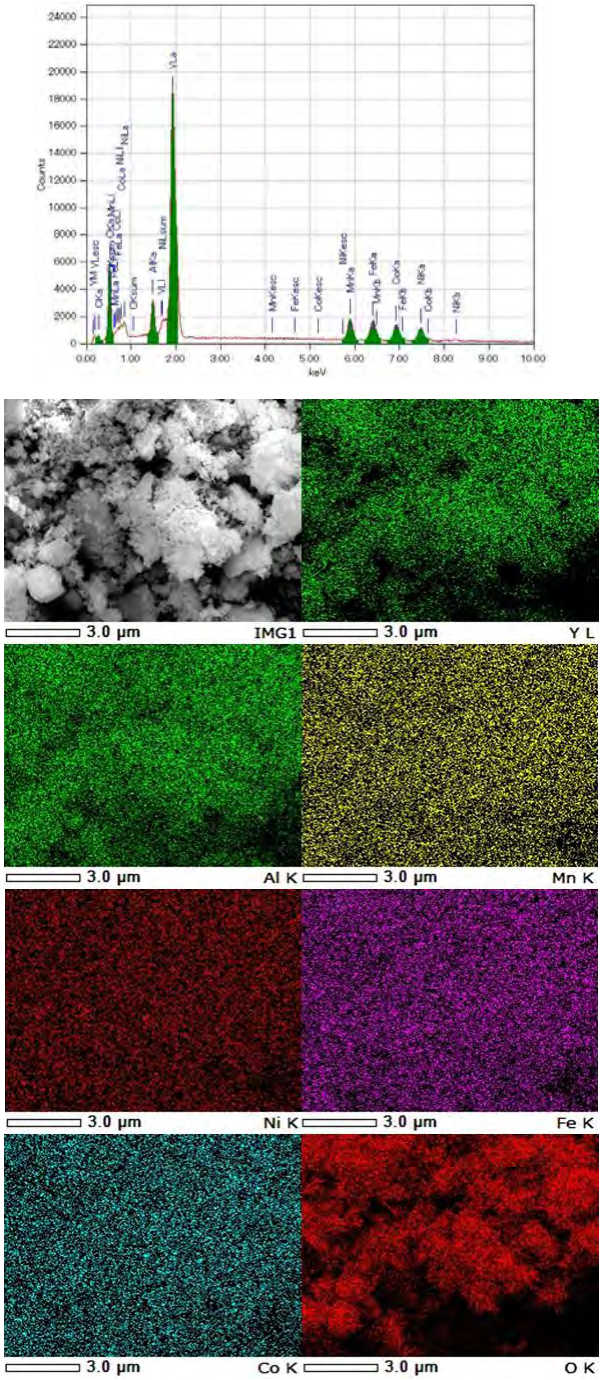


Fig. 4. The spectrum of elements and elemental analysis by element registered for Y1/5(AlMnNiFeCo)$O_{3-\delta}$ using SEM under 10000x magnification.

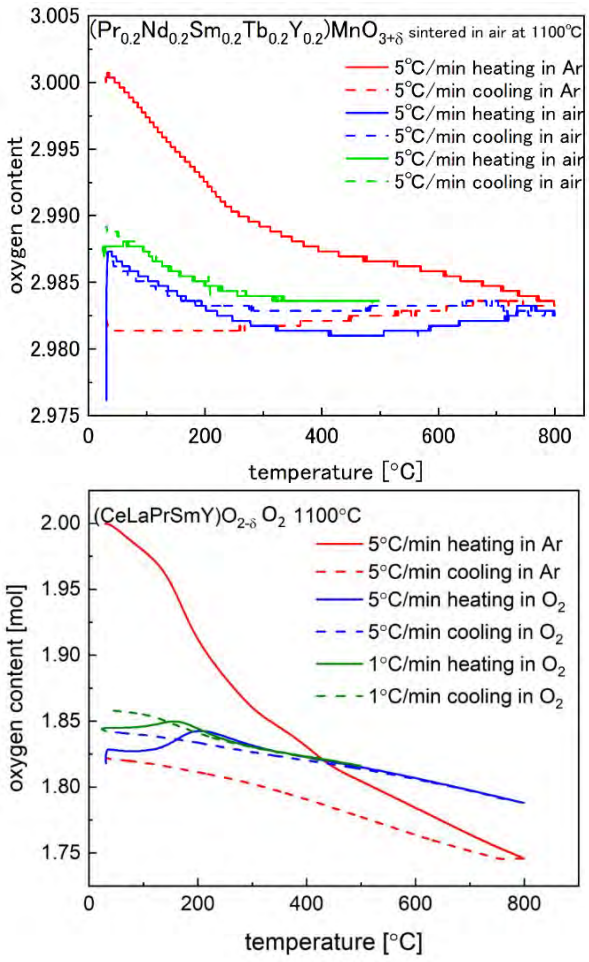


Fig. 5. Temperature dependence of the oxygen content registered under Ar and O_2 flow for 1/5(PrNdSmTbY)$MnO_{3-\delta}$ and 1/5(CeLaPrSmY) $O_{3-\delta}$ sintered at 1100℃ in air.

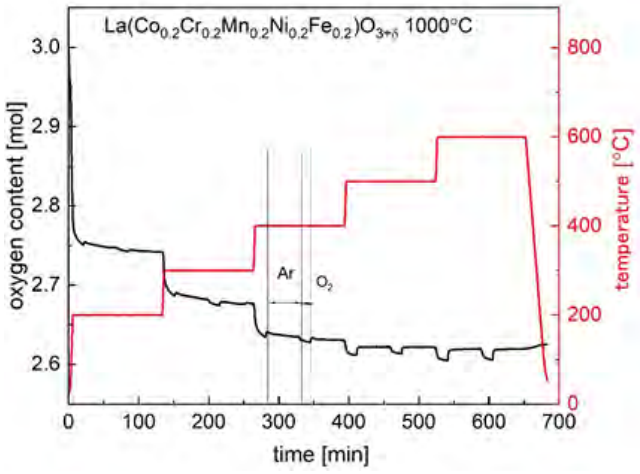


Fig. 6. TG data for La1/5(CrMnNiFeCo)$O_{3-\delta}$ registered using the PSA regime at different temperatures, recalculated into oxygen content change.

TOPへ戻る

In conclusion, several materials were sintered for the first time during this study. Investigation of their properties enlarged the basic knowledge in the new field of high-entropy materials. Regarding the oxygen storage properties, the perovskite-based materials showed little reversibility as small oxygen storage capacity. Therefore, those types of HEO should be used for applications other than oxygen production and storage. The rare earth oxides $nRe_{1/n}O_{2-\delta}$ (Re is a rare earth element) exhibited the most promising OSM properties, and the work will be continued to optimize their composition further and improve their properties.

４. Future program, paper submission and results briefing

The obtained results were presented during the 1st World Technology Universities Network WTUN SDG13 (Climate Action) Workshop - March 3 2022(invited talk) A. Klimkowicz, An alternative method for oxygen production using ceramic materials,

The results will be presented during the upcoming conferences:

- Oral presentation at the XXX International Materials Research Congress, to be held in Cancun in August 14 - 19, 2022, during the symposium on the topic of Emerging Materials for Clean Energy and Environmental Remediation Applications, entitled "Rare-earth manganese oxides used for Temperature and/or Pressure Swing Absorption for oxygen generation" by Alicja Klimkowicz, Yudai Kasuya, Takahiro Toyama, Akito Takasaki.
- Poster Presentation at SSI-23 from July 17 - 22, 2022 at the Boston Park Plaza in Boston, Massachusetts Symposium: EF: Energy and Fuels Conversion entitled Novel high entropy oxides for oxygen storage and generation, Alicja Klimkowicz, Shotaro Dokin, Akito Takasaki.

The results for the perovskite-based materials $(La/Y)5(M_{1/5})O_{3-\delta}$, $5(Re_{1/5})MnO_{3-\delta}$, probably won't be published due to the poor performance of the materials. The study on the rare earth high entropy oxides ($nRe_{1/n}O_{2-\delta}$) will be continued, and if the results are proven to be satisfactory, they will be published in an impact factor journal, possibly in an open access mode.

References

[1] J. Yeh, et. al, Adv. Eng. Mater., 2004, 6, 299-303.

[2] B. Cantor, et. al, Mater. Sci. Eng., A, 2004, 375-377, 213-218.

[3] Y. Ma et. al, Energy Environ. Sci., 2021, 14, 2883-2905.

[4] M. Gao, et. al, High-Entropy Alloys, Springer International Publishing, Cham, 2016.

[5] C. M. Rost, et. al, Nat. Commun., 2015, 6, 8485.

[6] A. Sarkar, et. al, Dalt. Trans., 2017, 46, 12167-12176.

TOPへ戻る

金属触媒を利用した半導体結晶薄膜の低温形成

材料工学科　　弓野健太郎

１．はじめに

Ge は Si よりもキャリア移動度が高く、バンドギャップが小さいなど、電気特性に優れ、次世代 LSI 用の電界効果トランジスタのチャネル層やⅢ－Ⅴ族化合物半導体を用いた多接合太陽電池のための下地層（バッファー層）として期待されている。このタイプの太陽電池は、光吸収係数が大きく、広い範囲の波長の太陽光を利用できるため、高い変換効率が期待できる。しかし、Ge は資源量が極端に少ないため、ウェハーではなく、ガラス基板などの上で薄膜として利用することが望ましい。また、Ge は Si と同じように、低温で成膜すると非晶質構造をとるが、電気特性的には結晶の方が望ましい。基板上に形成した非晶質の Ge 薄膜を結晶化させるには 400℃程度の温度での熱処理が必要となるが、プラスチック基板上への成膜を可能とするためには、300℃以下のプロセス温度を実現しなければならない。

われわれはこれまで、金属の触媒効果を利用した半導体薄膜の低温結晶化（金属誘起結晶化法）に関する研究を進めてきた。この方法では、触媒となる金属層の上にアモルファスの Ge 層を形成し、アニールをすることで Ge 層の結晶化を行う。この時、金属層と半導体層が入れ替わり、層交換することが特徴となっている。これまでに層交換以外の方法の開発にも取り組んでおり、AuGe 合金（共晶温度 361℃）を加熱基板上（170℃）に成膜すると、Ge の結晶薄膜が得られることを見出した (Fabrication of crystalline Ge thin films by co-deposition of Au and Ge at low substrate temperatures (<200℃) without post annealing, T.Sugiyama, N.Mishiba, M.Kamiko, K.Kyuno, Applied Physics Express 9, 095501 (2016))。また、多結晶 Ge は通常 p 型半導体となることが知られているが、AgSb 合金を用いた金属誘起結晶化を行うと、Sb が Ge 内でドナーとして働き、n 型の多結晶 Ge が生成することを確認した (Low-temperature(330° C) crystallization and dopant activation of Ge thin films via AgSb-induced layer exchange: Operation of an n-channel polycrystalline Ge thin-film transistor, T.Suzuki, B.M.Joseph, M. Fukai, M.Kamiko, and K.Kyuno, Applied Physics Express 10, 095502 (2017))。プラスチック基板上に低温で p 型、n 型の半導体を作製することができるようになれば、様々なデバイスの実現が可能となる。

２．研究計画

金属誘起結晶化法は低温で結晶の Ge 薄膜を得ることのできる優れた方法であるが、表面の粗さが大きいことが知られており、太陽電池用のバッファー層としての利用などにおいては問題となっている。そこで、本研究では、Au を用いた金属誘起結晶化法における Ge 薄膜の結晶化の機構を詳細に調べ、薄膜表面

TOPへ戻る

を平滑にするためのプロセスに関する指針を得ることを目的とした。

３．計画の進行状況

Au の膜厚を 29nm に固定し、アモルファス Ge の膜厚を 27-55nm の範囲で変化させた。これらの試料を 220℃で 1 時間、窒素雰囲気中でアニールした。その結果、いずれの試料の X 線回折プロファイルからも明瞭な Ge(111)面からの回折が観測され、Ge 薄膜は結晶化していることを確認した。これは AuGe 合金の共晶温度（361℃）よりもはるかに低い温度であり、Au による金属誘起結晶化の効果がはっきりと表れている。

これらの試料の表面の Au をエッチングにより取り除いた後の SEM 像を図１に示す。アニール前のアモルファス Ge の膜厚が 27nm の試料においては、結晶の Ge と思われる島状の構造が確認されるが、初期のアモルファス Ge の量が少なかったためか、島の間にはすき間が存在し、結晶 Ge の連続膜を形成するには至っていない。この結晶 Ge の厚さを原子間力顕微鏡（AFM）で測定すると、初期の Au 膜厚に非常に近いことがわかった。このことは、Au 層内に拡散した Ge 原子が結晶として核生成し、Au 層を鋳型として成長したことを示唆している。Ge の成長に伴って Au は上の層へ押し上げられ、層交換が起こっていると考えられる。

アモルファス Ge の膜厚を 36nm まで増やすと、一部で島同士が結合するものの依然として下地の表面（SiO_2）が露出している部分が見られる。初期のアモルファス Ge の膜厚をさらに 46nm まで増やすと、下地が露出している部分は非常に少なくなり、極めて平坦な結晶 Ge の連続膜が形成されていることが確認でき、Au 層厚、Ge 層厚の調整により、平坦な結晶 Ge の連続膜が形成可能であることがわかった。

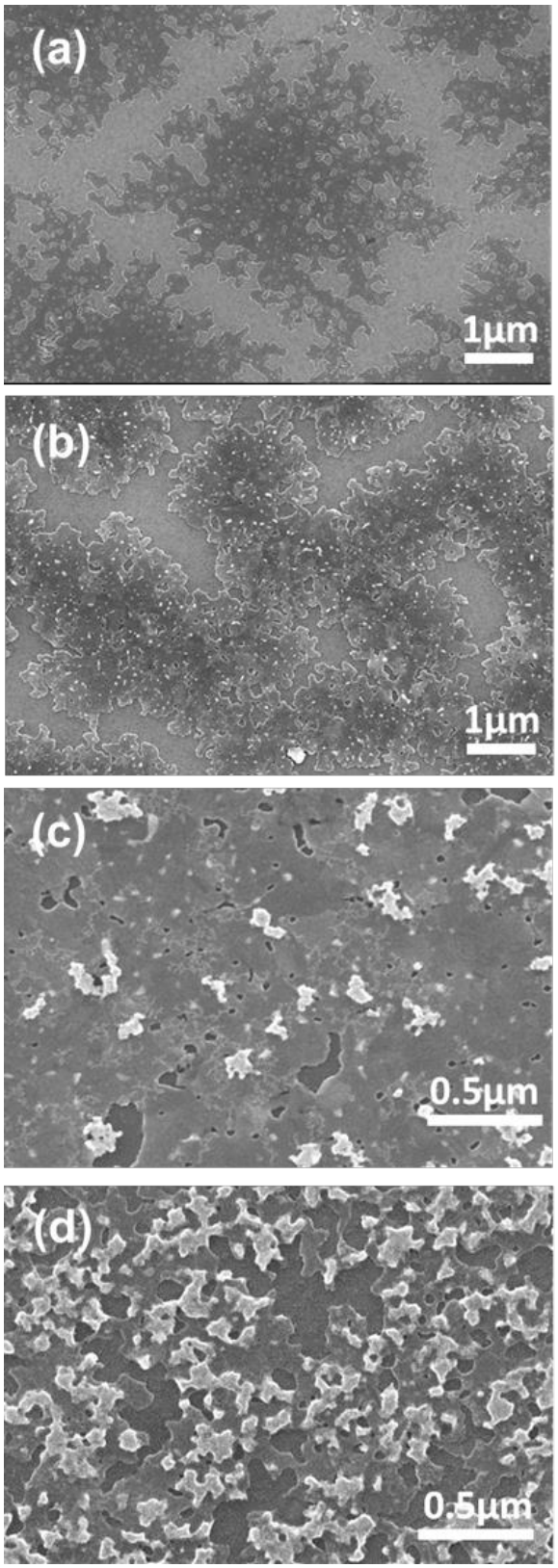


図１　各試料の表面の SEM 像。
(a) Ge(27nm)/Au(29nm), (b) Ge(36nm)/Au(29nm),
(c) Ge(46nm)/Au(29nm), (d) Ge(55nm)/Au(29nm)。

TOPへ戻る

一方、この試料においては平坦な結晶の上に小さな島状の Ge 結晶も確認できる。つまり、1 層目の結晶 Ge 薄膜の完成とほぼ同時に 2 層目の成長が始まっていることがわかる。さらに、初期のアモルファス Ge の膜厚を 55nm まで増やすと、2 層目の面積が増えていることが確認できるが、同時に基板の露出部分も増えていることがわかった。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

以上のことから、Au 層厚、Ge 層厚の調整により、平坦な結晶 Ge の連続膜が形成可能であることがわかったが、得られる結晶 Ge の構造は Au、Ge の膜厚に非常に敏感であることもわかった。今後、この原因を突き止め、結晶性の優れた結晶 Ge 薄膜の構造制御手法の確立を目指す。

1. MIC 法による Au を触媒にした Si 薄膜の低温結晶化、米田　了、弓野 健太郎、日本金属学会 2022 年春期（第 170 回）講演大会（2022 年 3 月 22 日）

2. AuSb 触媒を用いた Ge 薄膜の低温結晶化、守谷 彩乃、弓野 健太郎、日本金属学会 2022 年春期（第 170 回）講演大会（2022 年 3 月 22 日）

3. Au で被覆した加熱基板上へのスパッタによる Ge 結晶薄膜の低温成長、島村 侑弥、弓野 健太郎、日本金属学会 2022 年春期（第 170 回）講演大会（2022 年 3 月 22 日）

4. AgSb 合金を利用した多結晶 n 型 Ge 薄膜の作成、堀場 友菜、弓野 健太郎、日本金属学会 2022 年春期（第 170 回）講演大会（2022 年 3 月 22 日）

5. Ag 触媒を用いた MIC 法による多結晶 Ge 薄膜の作製と電気特性、鷲雄 藍子、弓野 健太郎、日本金属学会 2022 年春期（第 170 回）講演大会（2022 年 3 月 22 日）

6. Au を触媒とした Ge 薄膜の結晶化と熱処理の昇温速度依存性、廣瀬 乾、木村 健二郎、SUNTHORNPAN Narin、弓野 健太郎、日本金属学会 2022 年春期（第 170 回）講演大会（2022 年 3 月 22 日）

7. Crystallization of Ge Thin Films by Au-Induced Layer Exchange: Effect of Au Layer Thickness on Ge Crystal Orientation, Narin Sunthornpan, Kenjiro Kimura, and Kentaro Kyuno, Japanese Journal of Applied Physics **61** (2022) SB1029

8. In-situ observation of low-temperature crystallization process of germanium thin films by gold-induced layer exchange, Sunthornpan Narin, Nairu Tezuka, Kenjiro Kimura and Kentaro Kyuno, The 8th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2021)

9. Controlling the Morphology of Ge Thin Films Crystallized by Gold-Induced Layer Exchange at Low Temperature (220° C), Sunthornpan Narin, Kenjiro Kimura and Kentaro Kyuno, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2021)

TOPへ戻る

10. Influence of Gold Layer Thickness on the Metal-Induced Crystallization Behavior of Ge Thin Films, Sunthornpan Narin, Kenjiro Kimura and Kentaro Kyuno, The 67th American Vacuum Society Symposium (AVS 67)

11. Low Temperature Crystallization of Ge Thin Films for Channel Layers of Thin-Film Transistors by Gold-Induced Layer Exchange, Sunthornpan Narin, Kenjiro Kimura and Kentaro Kyuno, Materials Research Society Fall Meeting & Exhibit (MRS 2021)

12. Metal-Induced Crystallization Process of Ge thin films, Sunthornpan Narin and Kentaro Kyuno, 1st Green Electronics Symposium, Shibaura Institute of Technology (2022/2/25)

TOPへ戻る

新規触媒を利用した高性能 Li 空気電池の開発

材料工学科　　石崎　貴裕

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

低炭素化社会の構築に向けて、二酸化炭素排出量の抑制は急務の課題となっている。この課題の解決手段の一つとして、ガソリン車から電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HV)への転換が急速に進められている。EV や HV の動力源として、現在、Li イオン電池や燃料電池が使用されているが、Li イオン電池には一度の充電で航続可能な距離が短い、燃料電池には水素を供給するためのインフラ整備が不十分であるという欠点がある。このため、現在のインフラで使用可能であり、航続距離をより長くすることが可能な蓄電池の開発が求められている。これを実現するためには、より大きなエネルギー密度を有する新しい蓄電池の開発が必要である。

Li 空気電池(LAB: Li-air battery)は Li イオン電池の 10 倍以上のエネルギー密度を示し、ガソリンに匹敵するエネルギー密度を有しており [1)]、実用化できれば、次世代型の EV や HV の動力源としての活用が可能である。LAB は負極にリチウム、正極に酸素を用いており、リチウムと酸素の化学反応から電気を取り出す電池である。LAB では、放電反応に必要な酸素を電池の外部から取り入れているため、極めて高い理論エネルギー密度を実現できる。しかし、LAB を実用化させるためには、酸素の酸化反応(OER)・還元反応(ORR)が遅い、繰り返し充放電時に発生するデンドライト成長によるサイクル数の低下、長期間使用する際の電解液の揮発性等、様々な課題がある [2)-4)]。これらの中でも酸素の酸化・還元反応の高効率化(充放電過電圧の低下)と長寿命化(充放電サイクル数の向上)が大きい課題として考えられており、これらの課題解決に向けた研究開発が進められている。具体的には、ヘテロ元素ドープや貴金属を担持したカーボン系材料や酸化物を正極触媒材料に、Li 塩(1M LiTFSI)を溶解させたテトラエチレングリコールジメチルエーテル(TEGDME)を電解液に用いた Li 空気電池の研究開発が主に進められている [1)-4)]。しかし、このシステムでは、先述のような課題が解決できていない。この要因は、充放電反応で鍵となる Li_2O_2 の生成(酸素還元反応(ORR)の低効率)と溶解(酸素発生反応(OER)の低効率)が生じにくいためである。正極触媒の開発や電解液中への Redox mediator(RM)の利用により、その性能が徐々に向上しているが [4)]、Li 空気電池を実用化させるためには、効果的な触媒材料の開発がさらに必要である。これを実現させるためには、従来から行われている正極材の開発に加えて、電解液側からのアプローチが重要になる。これは、電解液が充放電で重要な Li_2O_2 の生成と溶解反応の反応場であり、この反応に直接的な影響を与えるためである。しかし、電解液に関する研究開発はほとんど着手されていない。そこで、我々のグループでは、新しい電解液として深共晶溶媒(DES: Deep eutectic solvent)に着目した。DES は、2 種類の固体を混ぜ加熱することで得られる液体であり、イオン液体と同様の物理化学的特性を有し、製造コストは圧倒的に安価である。また、室温近傍で液体であり、イオン伝

TOPへ戻る

導性を有し、イオン液体より安全性が高く、揮発性が低い。DES はバイオ医療やナノ材料分野で利用可能な新しい溶媒として、近年注目されている。しかし、DES は 21 世紀初頭に着目され始めたためその研究歴史が浅く、特性の詳細については不明点が多い。

ごく最近、申請者らの研究により、特定の DES を溶媒に用いることで充電過電圧が大きく低下することがわかり、DES が Li 空気電池に資する酸素の酸化反応の触媒として機能することを世界で初めて発見した。すなわち、DES が酸素の酸化還元反応の触媒として機能することがわかった。

最近、電解液の溶媒にイオン液体を用いることで、高速(60s)で充放電が可能であり、サイクル特性の優れた Al イオン電池が開発された[5]。この電池では、正極材の 3 次元構造のカーボンと電解液のイオン液体が電池の高機能化に重要な役割を果たした。これはイオン液体と 3 次元構造のカーボン触媒材料のシナジー効果によるものである。このため、Li 空気電池の正極材料でもヘテロ元素をドープした 3 次元的構造のカーボン複合体を用いることで、ORR の高活性化を実現できると考えられる。

本申請では、Li 空気電池の新規触媒として使用可能なカーボン系正極材と DES の開発をめざした。

2．研究計画

(1)マクロポーラスカーボン材料の合成

リチウム空気電池では正極電極でおこる酸素還元反応(ORR)によって電気エネルギーを得る。放電電圧を高くするために高い酸素還元特性を持つ触媒の開発が必要不可欠である。ORR に有効な触媒として Fe-N-C 系触媒が非白金触媒として注目されている[6]。本研究では低コストかつ高い酸素還元特性を有する触媒として金属有機錯体(Metal Organic Framework:MOF)を前駆体とした炭素系材料を異なる試薬で合成した。

(2)電解液として使用可能な DES の探索

本研究では，イオン液体と物理化学的性質が類似しており，かつ無毒性，安価という特性をもつ深共晶溶媒に着目し，深共晶溶媒を用いたリチウム空気電池の開発の検討を行った。

3．計画の進行状況

(1) マクロポーラスカーボン材料の合成

3D 構造を有する触媒を作製するため 300nm の polystyrene sphere(PSS)をテンプレートとして用意した。前駆体の MOF を合成する原料には、硝酸鉄と 2-Methylimidazole(2MZ)、硝酸鉄と 4,5-Imidazoledicarbonitrile(DCI)、塩化鉄と 2-Amino-4,5-imidazoledicarbonitrile(AIDCN)の組み合わせを用いた。溶媒はメタノールを使用し、それぞれ 1：3 のモル比になるように溶液を調整した。PSS に溶液を 1h 含侵させ乾燥した。溶液が含侵した PSS をアンモニア水とメタノールを体積比 1：1 で混合した溶液に 24h 浸し結晶化させ、MOF を合成した。混合溶液をろ過で取り除いた後、tetrahydrofuran(THF)で PSS を取り除いた。PSS を除去した MOF を Ar ガス中で炭素化を行った。

合成した試料の化合物の同定を行うために XRD を用いた。Fig.1 に XRD の結果を示す。

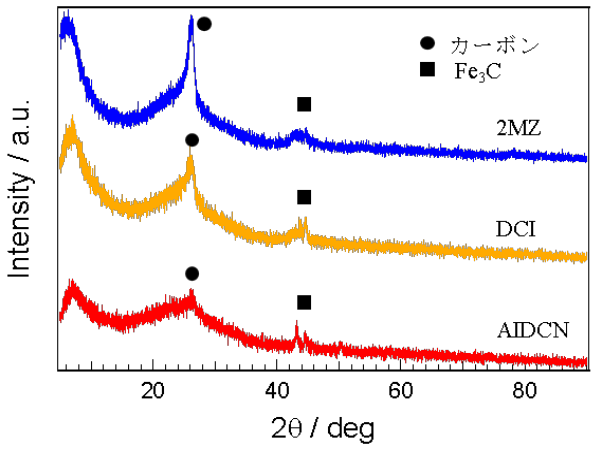


Fig.1：XRD による化合物の同定

異なる窒素源、鉄源の試薬の組み合わせを用いて炭素系材料を合成したが、全ての組み

TOPへ戻る

合わせで同様のピークが確認できた。42°から 45°にかけて Fe_3C のピークがみられるため、合成した炭素材料に鉄が含まれていることを確認した。

異なる試薬で合成した MOF の FE-SEM による構造観察を行った。SEM 像を Fig. 2 に示す。全ての試料で三次元構造を確認することができた。スケールバーによる細孔の大きさが 200-300 nm であったため，この三次元構造はテンプレートの構造に依存して形成されたと考えられる。AIDCN, DCI を用いた MOF は細孔の輪郭が鮮明であるのに対して，2MZ では細孔の輪郭が不鮮明であった。また DCI, AIDCN を用いた試料と比較すると細孔のサイズも不均一であった。テンプレートである PSS の作製時に粒子サイズが不均一なものとなってしまったため, MOF の構造に影響を与えてしまったと考えられる。

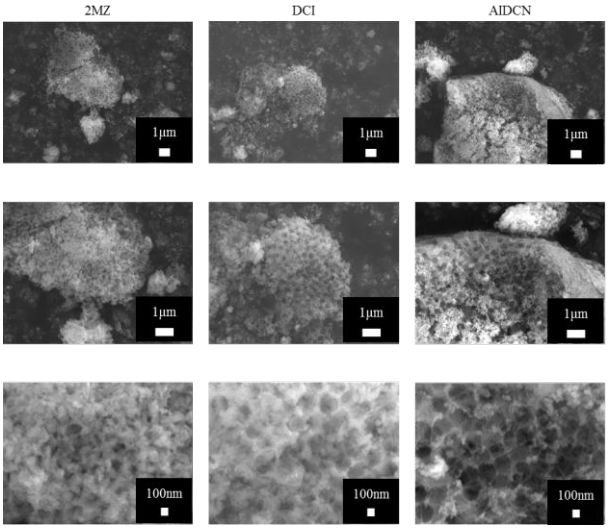


Fig.2: 2MZ，DCI，AIDCN を原料に用いて製作した MOF の SEM 像

合成した試料の窒素含有量をX線光電子分光法(XPS)で測定した。それぞれの試料に含まれる試料表面の窒素の割合は、2MZ、DCI、AIDCN でそれぞれ 0.42、0.78、1.30at%であった。窒素含有量のは使用した窒素源の試薬に含まれる窒素の割合に由来すると推察される。2MZ の分子式は $C_4H_6N_2$、DCI は $C_5H_2N_4$、AIDCN は $C_5H_3N_5$ のように窒素の個数と窒素の割合に相関がみられた。

合成したカーボン材料を正極材に用いて Li 空気電池を構築し、その充放電試験を行った。その重宝電極線の結果を Fig.3 に示す。

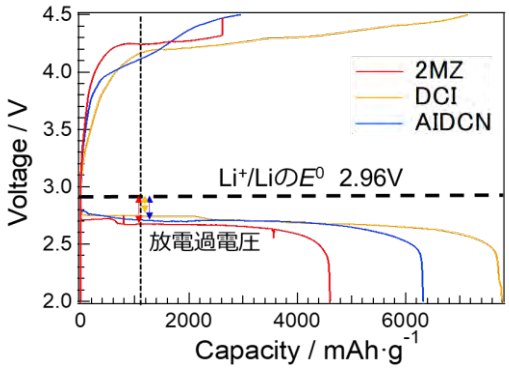


Fig.3 : 合成したカーボン材料を正極材に用いて構築した Li 空気電池の充放電曲線

Fig.3 の結果から、DCI が最も放電電圧が高く, AIDCN, 2MZ の順で放電電圧が高かった。また, 放電容量の大きさは、2MZ、DCI、AIDCN でそれぞれ 4605、7777、6327mAh/g となり、放電電圧と同様の順であった。

これらの結果から、各正極材料は Li 空気電池として作動することを明らかにした。

(2)電解液として使用可能な DES の探索

正極材にケッチェンブラック EC600JD(KB)，負極材に Li 箔，セパレーターにガラスフィルター(Whatman GF/A)，電解液に深共晶溶媒を用いた。リチウムビス(トリフルオロメタンスルホニル)イミド(LiTFSI)あるいは硝酸リチウム($LiNO_3$)と N-メチルアセトアミドを特定のモル比率で混合し，深共晶溶媒を得た。その深共晶溶媒を電解液としてリチウム空気電池に組み込み，充放電試験を行った(電流値 100 mA/g)。

Fig.1 に LiTFSI-N-メチルアセトアミドを電解液として用いて構築したリチウム空気電池の充放電曲線を示す。N-メチルアセトアミドのモル比率が増加するほど放電および充電の容量が増加し，放電および充電の過電圧が減少する傾向が見られた。

TOPへ戻る

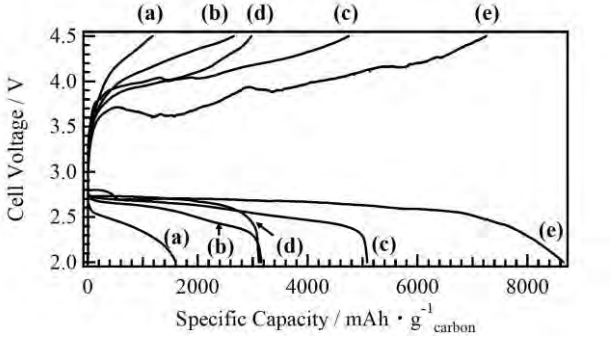


Fig. 1 LiTFSI と N-メチルアセトアミドを (a)1:3, (b)1:4, (c)1:5, (d)1:7, (e)1:9 のモル比率で作製した深共晶溶媒を電解液として用いたリチウム空気電池の充放電曲線

また，溶液導伝率は N-メチルアセトアミドのモル比率が低い順に 0.565, 1.319, 1.627, 2.048, 2.702 Scm^{-1} となり，粘性は 78.48, 59.41, 41.98, 18.86, 9.13 mPa(25℃)であった。

N-メチルアセトアミドのモル比率が増加するほど，電解液の粘性が減少し，Li イオンの拡散性が向上したため，Li_2O_2 の生成・分解が促進され電池性能が向上したと考えられる[7]。また，深共晶溶媒の導伝率の向上に伴い，放電および充電の過電圧が減少したと推察される。

これらの結果から、LiTFSI と N-メチルアセトアミドを 1:9 のモル比率で混合した深共晶溶媒が，最大の放電容量と最小の充放電過電圧を示したことから，Li 空気電池の電解液として最も適していることを明らかにした。

本研究で最も電池性能が性能が良かった LiTFSI と MAc を 1:9 のモル比率で混合した深共晶溶媒の耐久性能を測定するため、サイクル試験を行った。また、その性能を比較するために現在有機溶媒として最も安定とされるエーテル系の有機溶媒である TEGDME に電解質として LiTFSI を 1 M 溶解させたものも同様の実験条件でサイクル試験を行った。5 サイクル目までは 1:9 のモル比率で混合した LiTFSI-MAc の電池性能の方が高い値が出たが、6 サイクル目以降は電池性能が TEGDME に 1 M の LiTFSI を添加させた電解液よりも電池性能が低下した。MAc のアミド結合におけるカルボニル基(C=O)は反応性 O_2^-種による求核攻撃に対して不安定であることから、サイクル数が増すにつれ電解液内の分解が進行し、電子求引性基を持たず求核攻撃に対して安定な TEGDME よりも電池性能が低下したと推察される。

これらの結果から、本研究で用いた DES は Li 空気電池の電解液として使用可能であることがわかった。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後は、Li 空気電池の性能を向上させるために、マクロポーラスカーボン材料および DES の最適化を行っていく予定である。

論文(1) T. ISHIZAKI et al., Materials (2022), in press.

参考文献

1) G. Girishkumar, et al., Lithium−Air Battery: Promise and Challenges, J. Phys. Chem. Lett. 1, 2193 (2010).

2) Daniel Sharon et. al., Catalytic Behavior of Lithium Nitrate in Li-O2 Cells, ACS Appl. Mater. Interface, 7, (2015), 16590.

3) Zhuojian Liang et. al., Critical Role of Redox Mediator in Suppressing Charging Instabilities of Lithium–Oxygen Batteries, J. Am. Chem. Soc., 138, 7574 (2016).

4) Sina Rastegar et. al., High-Rate Long Cycle-Life Li-Air Battery Aided by Bifunctional InX3 (X = I and Br) Redox Mediators, ACS Appl. Mater. Interfaces, 13, 4915, (2021).

5) Lin. et al., An ultrafast rechargeable aluminium-ion battery, Nature, 520, 7547 (2016).

6) Z Li, H Sun, L Wei, WJ Jiang, M Wu, JS Hu, ACS Appl. Mater. Interfaces , 9 (2017), 5272-5278.

7) J. Chen, C. Chen, T. Huang, A. Yu, J. Am. Chem. Soc., 4, (2019), 20713.

TOPへ戻る

Synergetic modulation thermoelectric performance and mechanism exploration in metal doped $Si_{1-x}Ge_x$-based materials at near room temperature

Ying Peng[1,2], Lei Miao[1,2*], Chengyan Liu[2], Masashi Kurosawa[3], Osamu Nakatsuka[3], Song Yi Back[4], Jong Soo Rhyee[4], Masayuki Murata[5], Takahiro Baba[6], Tetsuya Baba[6], Takahiro Ishizaki[1], Takao Mori[*6,7]

[1]Department of Materials Science and Engineering, SIT Research Laboratories, Innovative GlobalProgram, Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Tokyo,135-8548, Japan

[2]Guangxi Key Laboratory of Information Material, School of Material Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, 541004, China

[3]Department of Materials Physics, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

[4]Department of Applied Physics, Integrated Education Institute for Frontier Science and Technology (BK21 Four) and Institute of Natural Sciences, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

[5]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

[6]International Center for Materials Nanoarchitectonics (WPI-MANA), National Institute for Materials Science (NIMS), Namiki 1-1, Tsukuba 305-0044, Japan

[7]Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

1. Paper introduction

The thermoelectric (TE) energy conversion efficiency is dominated by the dimensionless figure of merit ZT $=S^2\sigma T/\kappa$, where S, σ, and κ represent the Seebeck coefficient, electrical conductivity, and thermal conductivity, respectively. For commercial application, the standard requirement of ZT should be greater than 2.5. Currently, κ of TE materials has been demonstrated to be suppressed to the limit of the amorphous phase by nano structuring and intrinsic mechanisms, therefore, an imperative strategy to achieve high ZT is to significantly increase S due to its quadratic dependence with ZT while maintaining high σ. However, on account of the inverse intercoupling of the S and σ via the carrier density, it is difficult to increase both S and σ at high carrier concentrations. Over the last few decades, through hard efforts of thermoelectric researchers, power factor ($PF=S^2\sigma$) enhancements have been achieved through various strategies such as quantum confinement, modulation doping, energy filtering effects, band-structure engineering, grain boundary complexion, magnetic effects, etc. However, although theoretical work suggests that improvements of PF are possible, experiments to date have generally shown that a single strategy does not dramatically improve PF.

Recently, Vincent Talbo et.al. reported that in quantum dot-based single-electron transistors, the theoretically calculated ZT can go up to 200. Jeffrey J. Urban predicted that quantum dot hybrid arrays may lead to advanced TE performance and silicon-based TE devices could have a prominent role in this possible future with a moderate ZT. Therefore, the QDs hybrid system with fine parameters can be a rational candidate for a striking ZT and new approaches or strategies that can substantially improve the performance of the existing QDs hybrid materials become more competitive. Furthermore, if the QDs could manage to be utilized in the more macroscopic form of thin films for example, they could be of practical use also as energy harvesting thin film devices to power myriad Internet of Things (IoT) sensors.

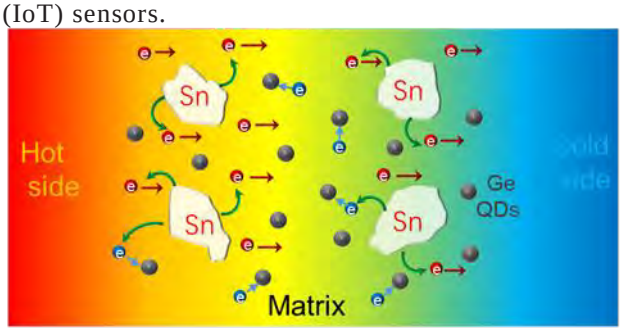


Figure 1. Schematic diagram of energy filtering and modulation doping in SiGeSn hybrid film, the matrix is the SiGeSn film, Ge QDS and Sn precipitation particles are evenly distributed in the matrix and the heat is transferred from the hot end to the cold end in-plane direction.

In this work, we have prepared the SiGeSn hybrid films with the Ge QDs and Sn precipitation particles. The Ge QDs are uniformly distributed in the matrix of SiGeSn film, and the precipitated Sn particles are also intermixed in the matrix as shown in Fig.1 and Supplementary Figure S1. Here, the Sn particles with uniform distribution and moderate size furnish more charge carriers to enhance electrical conductivity through modulation doping effect, meanwhile the high-density QDs act as charge traps to filter low energy electrons to markedly improve S

TOPへ戻る

by the energy filtering effect as schematic demonstrated in Fig.1. With our specially constructed hybrid QDs film structure, we obtain a n-type TE films where the PF reaches as high as 91 $\mu Wcm^{-1}K^{-2}$ leading to a ZT value of **0.8** @300 K. The giant power factor is a champion value achieved @300 K, for any thermoelectric thin film. For silicon-based materials which can be more readily compatible to industry, the ZT value obtained is also a champion value for either thin film or bulk.

2. Research program

2.1. Preparation of $Si_{1-x-y}Ge_xSny$ film

The deposition of $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ (x=0.1, y=0.028-0.051) films on the Si/SiO_2 substrate was performed by a magnetron sputtering system. phosphorus (P)-ion was implanted into SiGeSn film as n type electronic donor. Ion implantation technology has been deeply rooted in the manufacturing process of semiconductor materials. The ion implantation process is highly agile in the selection of dopant species, arranging the spatial location within the materials, and providing a refined concentration profile varied over several orders of magnitude. For Si-based TE materials, ion implantation process has been proved to reduce κ by defect engineering, increase σ via heavy doping and carrier mobility enhancement effect, enhance S through the effect of amorphization. Consequently, we simulated the optimal energies and doses of P-ion by using the stopping and range ion matter (SRIM) program. The P- ion dose implanted into the $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ layers were $2\sim4\times10^{15}$ atoms /cm^2 and the designed doping concentrations were $2\sim4\times10^{20}/cm^3$ with ion depth range of ~100 nm (Supplementary Figure S2.a), respectively. Ion implantation is commonly followed by post annealing to recrystallize the amorphized material and activate dopants. For Si-based film, the rapid thermal annealing (RTA) of just under 20 seconds can achieve a higher ion activation rate and greater carrier mobility than conventional annealing furnaces (CAF). Moreover, both experimental and theoretical analysis indicate that the higher temperature and in seconds RTA can enhance the growth of SiGe QDs. Therefore, in this work, an ultrafast high temperature annealing (UHA) in N_2 ambient was performed to electrically activate the dopants and grow Ge QDs (Supplementary Figure S2.b). Crucially, the ultrahigh heating rates (50~200 ºC/s) and very short annealing times of 2~10 seconds were performed in this work, which is far outpacing those of most conventional furnaces.

2.2. Characterization and measurement

The $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ films were characterized using X-ray diffraction (XRD) measurements (Rigaku RINT-2100) with Cu $K\alpha_1$ radiation at a wavelength of 1.54056 Å. Scanning electron microscopy equipped with EDS (SEM Hitachi SU-6600) was carried out at an acceleration voltage of 20 kV and a working current of 15 μA. Transmission electron microscopy (TEM, JEOL JEM-2100F) was conducted to analyze the film morphology and structure. Hall mobility μ_H and carrier concentration n were measured using a Hall effect measurement system (Toyo Corporation RESITEST 8300) at room temperature. Magnetic resistance test was carried out by PPMS (PPMS－9T) at a temperature range of 2 K-300 K. The thermoelectric transport performance was measured on the test platform made by AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) at a temperature range of 160 K-380 K, see Supplementary Figure S3 for test details. And the room temperature thermoelectric performances were double-checked by the commercially SBA485 system (Netzsch).

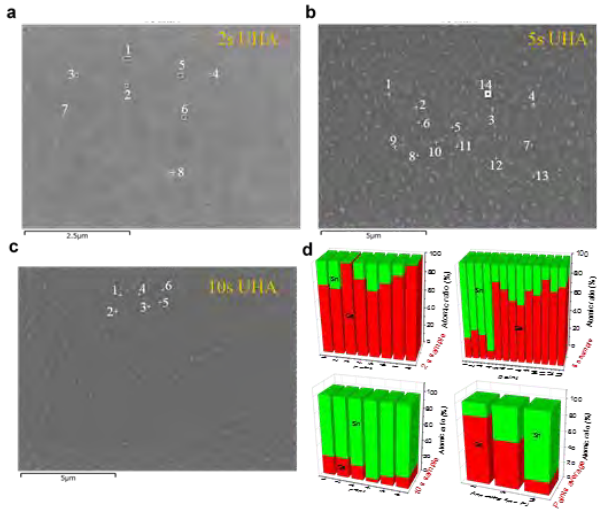
3. State of progress

3.1. Nanostructure analysis of thin films.

The nominal $Si_{0.843}Ge_{0.105}Sn_{0.052}$ films on the Si/SiO_2 substrate prepared by magnetron sputtering were implanted with 4×10^{15} atoms cm^{-2} of P ion and further ultrafast high temperature annealed at 1100 ºC for 2, 5, and 10 seconds. The 5 seconds annealed film (5s-UHA) corresponds to the best TE performance (ZT~0.8), which makes it outstanding in Si based materials due to the Ge QDs hybrid structure. The evolution of Ge QDs and Sn precipitation is illustrated in Fig.2. In Fig. 2a to 2d, for the 2 seconds annealed film (2s-UHA), a large number of black particles with sizes ranging from 50 nm to 150 nm were precipitated, and the corresponding Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) spectrum confirms that the black particles are mainly composed of Ge (with an average relative ratio of 84.2 %). When the annealing time was 5 seconds, the black Ge particles were largely gone and replaced by milky, ubiquitous Sn particles with sizes ranging from 10 nm to 320 nm, the average particle size of 80 nm, and average spacing of 100 nm as displayed by the SEM images in Fig. 2j. And for 5 seconds UHA sample, the corresponding EDS spectrum shows the average content of Ge decreased to a relative ratio of 59.2%, while the content of Sn increased to 40.8%. For 10 seconds annealed sample, all the black Ge particles disappear completely, left only Sn precipitates randomly distributed in the film and the average content of Ge decreased to a relative ratio of 16.2 %, while the content of Sn increased to 83.8 %. To further explore the evolution mechanism of the Ge and Sn precipitates, we employed Transmission Electron Microscopy (TEM) to analyze the cross-section image 5s-UHA for tracking a large number of Ge particles' evolution behavior. Fig. 2e to 2g show the larger Ge particles decompose into smaller irregular spheres QDs with an approximate diameter of 3-5 nm and evenly distributed in the film with a density of about 10^{12} cm^{-2} for 5 seconds UHA sample. The high-resolution TEM images show that the focused QDs have interplanar spacings of 2.45 Å and 2.34 Å, which correspond to the 211 and 212

TOPへ戻る

interplanar spacing of Ge, respectively.
The evolution processes of Ge and Sn particles observed in Fig. 2a to 2g are schematically summarized in Fig. 2h. The evolution of Ge and Sn precipitates can be exemplified as three stages depends on annealing time. First, for the $Si_{0.844}Ge_{0.105}Sn_{0.051}$ film with a high dose of 4×10^{15} atom /cm^2 P ion implanted, the 1100 °C annealing temperature exceeded the melting point of Sn (263 °C) and Ge (938°C), but below the melting point of Si (1410 °C), thus, most of the Ge and Sn were melted and precipitated first but could not form alloys with silicon during the ultra-fast annealing period in 2 seconds. And during the cooling process, the temperature descended below the melting point of Ge in one second, and the Ge rapidly solidified into nano-sized particles. However, Sn continued to melt and precipitate before the temperature dropped to the melting point of Sn. Second, as the 1100 °C annealing time was extended to 5 seconds, part of the Ge and a small amount of the Sn were combined with silicon to form a SiGeSn alloy, and the rest part of Ge, which was not alloying with silicon, nucleated into Ge quantum dots with a size of about 3-5 nm during cooling. Because the solubility of Sn in SiGe is approximately 1%, the excess Sn precipitates out and randomly distributed in the film. Third, when the annealing time was extended to 10 seconds, almost all of the Ge element was alloyed with the Si, and the excess Sn precipitated in the film.



3.2. Characterization of Ge quantum dots.
To further study the properties of QDs, we measured the electrical transport properties of the 5seconds UHA from 2K to 300 K. As shown in Fig.3a, the electrical resistance increases with decreasing temperature down to 15 K, saturating in 3 K < T < 15 K, and steeply increased again at low temperatures (T < 3 K). When we make a plot with an activation gap fitting $R=R_0\exp(-E_g/T)$ in Fig.3b, we find two activation regions; E_g = 0.01 meV (1.16 K) at low temperature (T < 3 K) and E_g = 2.12 meV (25 K) at mid temperature (20 K < T < 50 K). It is noteworthy that the activation energy gap is smaller than the measured temperature range, implying that the increase of electrical resistance is not solely originated from the semiconducting energy band gap. The significant increase of electrical resistivity at low temperature (T < 3 K) may be associated with the charge localization by disordered distribution of QDs. When we fit the electrical resistance by the Mott variable range hopping transport $R=R_M\exp[(T_M/T)^{1/4}]$ at low temperature (T < 3 K) shown in Fig.3c, the resistance roughly follows the Mott variable range hopping mechanism, indicating the existence of disordered hopping mechanism.

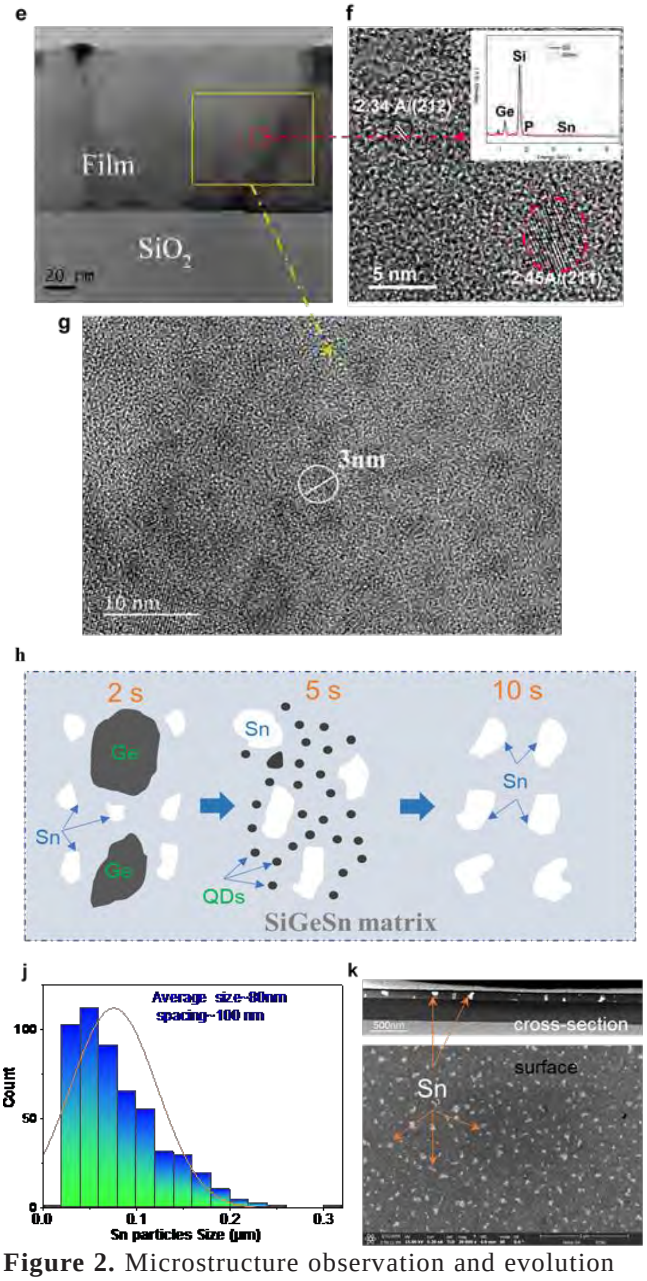
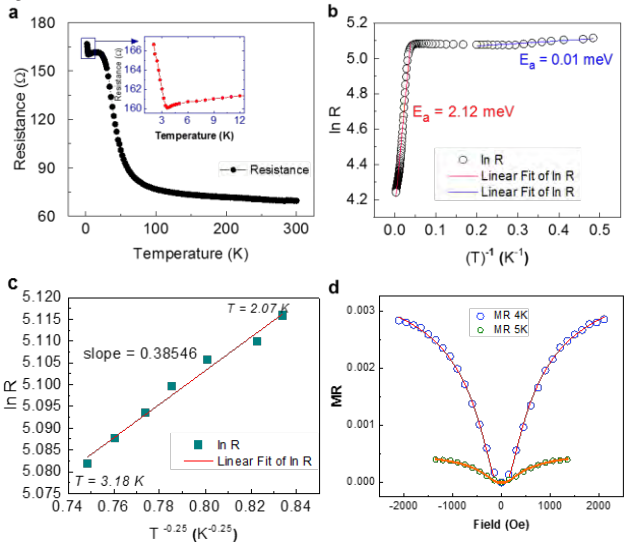


Figure 2. Microstructure observation and evolution analysis of thin films. **a**, **b** and **c,** surface SEM images of 2,5 and 10 seconds UHA $Si_{0.843}Ge_{0.105}Sn_{0.052}$ samples. **d,** comparison of Ge and Sn content detected by EDS in 2,5 and 10 seconds UHA samples. **e**, **f** and **g,** high-resolution TEM image of cross-section of 5s-UHA sample. **h,**

TOPへ戻る

schematic diagram of the evolution of Ge and Sn nanoparticles. **j** and **k,** Surface and section SEM image with a histogram of Sn particle size of 5s-UHA sample.

Therefore, the quantum mechanical scattering with the disordered quantum dots can localize charge carrier due to localized electronic states near a Fermi level. Based on further revealing the influence of QDs on carrier transport characteristics, we measured and analyzed the low-temperature magnetoresistance (MR) of the sample, here MR = [R(H) - R(0)]/ R(0), R(H) and R(0) are the resistance at magnetic field H and zero fields, respectively. In Fig. 3e and 3f, the MR behaves like a strong localization at 2 K, which is consistent with the localization effect of carriers, at temperatures of 4 K and 5 K, the strong localization becomes weak, so that the weak anti-localization (WAL) effect is observed (sharp downward cusp feature of MR at the low magnetic field). The WAL effect is a quantum mechanical phenomenon that backscattered electrons by impurities having a phase factor under applying a magnetic field. At a high magnetic field, the phase factor becomes incoherent so that the electron behaves like a ballistic scattering, thus the weak localization (WL) effect is discovered. The competing behavior between WAL and WL provides strong evidence for the quantum mechanical scattering of electrons due to QDs. In Fig. 3d, a short phase-coherence length (L_ϕ) of ~ 3nm is observed at 4 K and 5 K via the fitting of WAL by use of Hikami-Larkin-Nagaoka theory. The scale of L_ϕ is about the same size as that of QDs diameter, which indicates that the quantum interference of electron waves in QDs exists in the film.



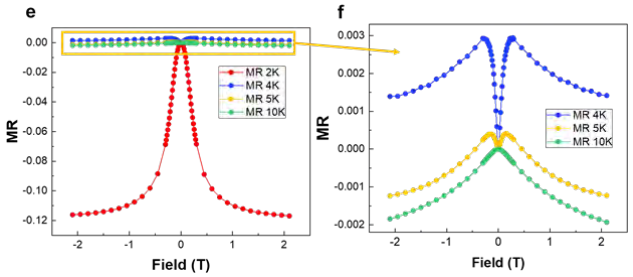


Figure 3. Electrical transport properties and MR analysis **a**, **b** and **c,** resistance and test temperature dependence diagram of the film. **d,** 4K and 5K magnetoresistance fitting diagram, **e** and **f,** fitting of WAL at 2 to 10 K for 5 seconds UHA $Si_{0.843}Ge_{0.105}Sn_{0.052}$ sample.

3.3. Modulation doping model construction

We previously reported precipitation of Sn particles in SiGeSn films can significantly improve the carrier concentration and mobility, thus greatly enhance the TE performance under room temperature.

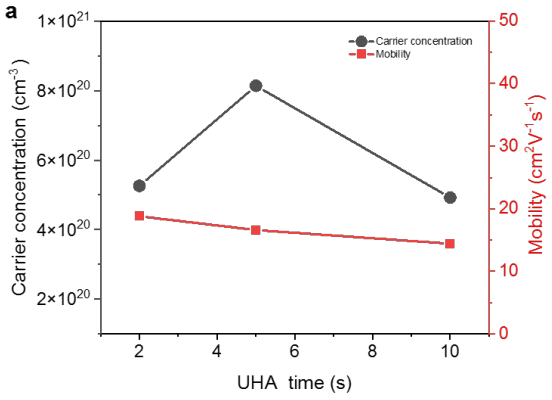


Figure 4. a, Hall effect results of $Si_{0.843}Ge_{0.105}Sn_{0.052}$ samples with different UHA times. **b,** Mechanism diagram of modulation doping and energy filtering of QDs in hybrid films, φ_{matrix} and φ_{Sn} are the work functions of the matrix and Sn nanoparticles, E_{vac} is the vacuum energy level, $E_{f\text{-}matrix}$ and $E_{f\text{-}Sn}$ are the Fermi energy levels of the matrix and Sn after ohmic contact, $E_{fb\text{-}Sn}$ is the Fermi energy levels of Sn before contact with matrix, CB is the conduction band, respectively.

In this work, we measured the Hall mobility and carrier concentration of the samples at room temperature to examine the effect of Sn particles on electron-transport property. In Fig. 4a, the carrier concentrations of all samples were higher than the designed value (4×10^{20} cm^{-3}) while the mobilities of all the samples were almost similar. In particular,

TOPへ戻る

when the annealing time was 5 seconds, the carrier concentration of the sample containing 5.1% Sn was about twice the design value, which indicates that a charge injection or charge overflow into the host SiGeSn matrix happened. The aforementioned phenomenon can be explained by the modulation doping effect between the precipitate metal particles and matrix. The schematic of the energy band diagram for the Sn-precipitates/matrix interface at equilibrium is shown in Fig. 4b. The work function φ_{matrix} of SiGeSn alloy is approximate 4.5 eV and that φ_{Sn} of 4.42 eV for metal Sn, respectively. After heavy dosage P doping, the aligned Fermi energy level of SiGeSn matrix was above the bottom of conduction band, and the work function of degenerate SiGeSn matrix would close to 4.42 eV, ohmic contact was formed between Sn and the matrix. As a consequence, the electron of charges are prone to overflow into matrix from Sn precipitates, substantially increase the carrier concentration while maintain the mobility of the host matrix due to the modulation doping effect related to doping Fermi levels.

3.4. Discussion

Following the purpose of developing high performance TE materials at a low temperature range, we specifically measured the TE performance of the annealed SiGeSn hybrid films as a function of measured temperature as illustrated in Figure 5. Fig. 5a shows that high σ was obtained after the 1100 ℃ UHA treatment and the σ increase with annealing time from 2 to 5 seconds, but then decrease from 5 to 10 seconds and that corresponds to the change in carrier concentration. Fig. 5b presents the Seebeck coefficients S of the hybrid films at different annealing times. The negative sign of the S is corresponding to n-type behavior dominated by P ion implantation. The sample annealed for 5 seconds has the highest Seebeck coefficient in the whole temperature range, reaching -248 μV/K at room temperature. The remarkable increase of S for 5 seconds UHA can be attributed to the energy filtering effect caused by the formation of high-density QDs (Fig.1). The introduction of Ge QDs with appropriate sizes comparable to or smaller than the mean free path and/or coherence length of the carriers would introduce quantum-confinement effects. The embedded QDs act as charge traps, charge carriers with energy higher than the quantum confinement ability can effectively escape and pass by through the QDs traps, whereas low energy charge carriers are trapped as shown in Fig. 4b. The embedded QDs change the characteristic energy-dependent scattering relaxation time, which is proportional to the scattering energy, thus, the S was enhanced, since it is determined by the average total energy of charge carriers. The low energy carrier loss caused by energy filtration can be supplemented from precipitated Sn particles by modulated doping effect, so high carrier concentration and large S can be strikingly synchronously maintained for the 5seconds UHA. The increase of S strongly depends on the QDs, and when the density of QDs greatly reduced or the size of QDs increase, the confinement capacity of QDs decreases, spontaneously, the energy filtering effect will be weakened and the S will drop in response significantly. Such as the 10seconds UHA film, where the QDs were annihilated by the extended annealing time, thus the S of 10 seconds annealed samples were significantly lower than that of samples with annealing time of 5 seconds. Moreover, the S of the 2 seconds annealed sample were relatively lower due to the Ge particle sizes being much bigger than that of the 5 seconds annealed sample. The PFs are shown in Fig. 5c. The 5 seconds annealed sample has an excellent PF of about 91 $\mu Wcm^{-1}K^{-2}$ @ 300 K due to the synergistic enhanced S and σ. This is a striking result and a record for thin films at room temperature range, at which temperature most IoT energy harvesting applications for them are envisaged. Previously, for Heusler metastable films, a huge maximum power factor was reported in Nature, however, the temperature dependence had a steep dependence and the maximum PF @300 K for these films were below 30 $\mu Wcm^{-1}K^{-2}$. Even considering bulk, the PFs obtained here for the QD hybrid films are amongst the highest ever reported for n-type thermoelectric materials. With only recently reported band engineered Fe_2VAl-based materials or $YbAl_3$ having similar or higher values. However, both of these materials suffer from very high thermal conductivities, leading to ZT values around 0.3 near room temperature, also the D. M. Rowe paper above. The κ of films were measured by a customized thermo-reflectance Pico-TR apparatus (PicoTherm Cooperation) at room temperature. In order to observe thermo-reflectance signal with good signal to noise ratio, 100nm molybdenum layer was sputtered on the sample's surface. Since the thermoelectric thin film is semi-transparent to the heating beam, front-heat front-detect (FF) configuration was adopted instead of rear-heat front-detect (RF) configuration. For analysis of thermo-reflectance signal, we didn't use built-in program which tends to underestimate thermal conductivity, and thereby overestimate ZT values, mainly because of limited range fitting and linear correction. This time we introduced a modified program based on analytical solution considering periodic pulse heating. In our program, the complete temperature response signal over the period of the repetitive heating pulse observed by PicoTR were expanded by Fourier series and least square fitted over the whole range, to obtain more accurate thermal effusion values. The thermal conductivities of the 5 and 15 seconds annealed samples were determined to be 3.4 and 3.8 $Wm^{-1}K^{-1}$, respectively, and the estimated thermal conductivities of the 2 and 10 seconds annealed samples could be approximately 3.4 ~ 3.8 $Wm^{-1}K^{-1}$. Here, the thermal

TOPへ戻る

conductivities were suppressed to a low level based on the structure of a well-ordered arrangement of QDs in the matrix, Sn nano-precipitation particles and nanoscale polycrystalline boundaries. The thermal phonons of SiGe based polycrystalline film are distributed in very short (< 20 nm) and long (>200 nm) mean free path (MFP) ranges. The short MFP phonons are strongly scattered by QDs, polycrystalline boundaries and a fraction of small size Sn nano-precipitation particles, while the long MFP phonons can be significantly scattered by amounts of Sn nano-precipitation particles. Hence, the hybrid nanostructure provides a broader range of tunable MPF that can reduce the thermal conductivity. The κ of samples increase with the annealing time due to better crystallinity caused by prolonged annealing. Based on the aforementioned thermal conductivity data range, the 5seconds UHA samples achieved excellent ZT values of **0.8** at room temperature, which is amongst the highest ever reported Si based thin film and nanowires, and the ZT comparison diagram is shown in Supplementary Figure S7. Particularly striking, compared with reported TE materials of silicon-based and other state of art films, the power factor of our QDs hybrid film exhibits is superior than that of conventional silicon-based, bismuth telluride based, and other representative high performance thermoelectric films, as given in Fig. 5d.

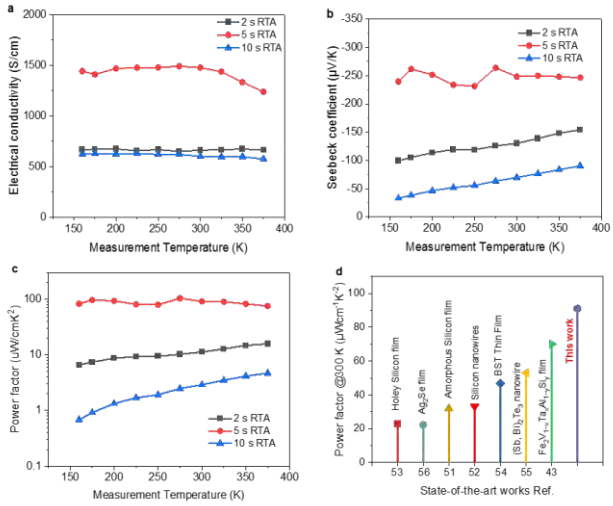


Figure 5. a, Temperature time-dependent electrical conductivity. **b**, Seebeck coefficient. **c**, power factor of $Si_{0.843}Ge_{0.105}Sn_{0.052}$ samples with different annealing times from 160 K to 380 K. **d**, power factor values comparison of TE materials at room temperature.

4.Future program, paper submission and results briefing

In conclusion, we reported a high-performance n-type TE material based on SiGeSn QDs hybrid nanostructure in this work. It suggests that the interplay among size and density of QDs, and Sn content is the fundamental origin of the giant PF obtained in the films. The UHA treatment synergy ion implantation process may produce films with QDs and metal precipitation particles, and amorphous mixed crystalline phases that lead to remarkable TE properties. Our study, provides a pathway to approach composition effect of energy filtering and modulation doping for achieving the largest PF and highest ZT for a thin film reported at 300 K, namely ambient room temperature.

The research related with this project has been published by **Adv. Energy Mater**. 12, (2022)2103191（1-9）.

TOPへ戻る

導電性を発現するカーボン／水酸化物ヘテロ構造皮膜の創製

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）

我々の研究室では、鉄鋼材料の３分の１の密度を有するアルミニウム合金の高機能化を図ることで適用部位の拡大をめざしている。鉄鋼材料に比べてはるかに軽量なアルミニウム合金は、例えば輸送機器材料に使用した際には燃費が大幅に向上することで、地球温暖化といった環境問題の改善に大いに貢献しうる。具体的には、水蒸気を利用することで、高耐食性を有する皮膜（以下、耐食性皮膜）をアルミニウム合金上に作製するとともに、アルミニウム合金の組織制御を同時に行うことで高強度アルミニウム合金を創製するための技術開発を行ってきた。

一方、近年、輸送機器の動力源として、化石燃料に頼らず低環境負荷なクリーンなエネルギーを積極的に利用していく動きが盛んである。その一つとして、本学豊洲キャンパス近郊においてもよく目にする燃料電池車（バス）が挙げられる。燃料電池は、近年、次世代エネルギーとして燃料電池が注目されているが、その一方で軽量化に対する強い要求にさらされている。一般に、燃料電池の重量の大半を占めるのがセパレータである。そこで、次世代セパレータの材料として、軽量化の観点からアルミニウムが有力視されているが、アルミニウムは耐食性が低いという欠点を持つ。燃料電池に要求される特性は、高い耐食性と電気伝導性であるため、本研究では水蒸気プロセスを用いて耐食性皮膜（AlO(OH)皮膜）を形成することとした。しかし、水蒸気プロセスで作製する AlO(OH)皮膜は、水酸化物であり電気伝導度が極めて低い。

そこで、本研究では、導電性皮膜を金属材料基板上に形成することをめざすこととした。金属材料は、自由電子がもたらす導電性により、高い電気伝導率を有する。一方、金属単体では耐食性に劣るため、耐食性を担保するために酸化物あるいは水酸化物でバリア層を形成させる必要があるが、酸化物あるいは水酸化物はイオン結合性であることから電気伝導率は急減する。このジレンマを克服するため、本研究では絶縁体中に導電性物質を分散させ導電パスとして機能させることに挑戦する。これが本課題の学術的問いである。

以上のことから、本研究では、アルミニウム合金基材の導電性の向上に資する技術開発および合金基材上に高耐食性と高導電性を兼ね備えた皮膜を形成するための技術開発を行う。耐食性（一般に酸化物、水酸化物が有利）と導電性（一般に金属が有利）という両立しない特性を同時付与するため、我々が提案した新規プロセスである水蒸気プロセス（気相（水蒸気）と液相（亜臨界水）の混合状態の

TOPへ戻る

反応場を活用する、水のみを使用するプロセス）を利用するすることで多機能性を発現するヘテロ構造皮膜を創製する。さらに、水蒸気プロセスを行うことにより、皮膜を形成するのみならず、合金内にもナノスケールのヘテロ構造を創出することで基材自体の導電性や熱伝導性を向上させる。すなわち、水蒸気プロセスを用いることで、導電パスとして機能するカーボンを均一に分散させた水酸化物薄膜をアルミニウム合金上へ形成させる技術開発を行う。

２．研究計画

ヘテロ構造皮膜の作製にあたって、まず、カーボン材料と酸化物、水酸化物は、通常は界面形成が困難である。カーボンは、他の物質の混合を極めて嫌うためである。そこで、導電性皮膜を実現するために、水酸化物中に導電パスを作り出す技術開発を行う。これまでに、水酸化物／カーボンの異種界面形成を実現するため、我々が開発した水蒸気プロセスを用いてこれらヘテロ構造皮膜を *in-situ* で作製することを試みてきた。この際、出発原料として芳香族化合物を選択し、水蒸気中に揮発させて皮膜中に取り込ませる中で、皮膜中でナノカーボン粒子を自己組織化させる。しかしながら、*in-situ* 皮膜形成による異種界面形成は実現したものの、カーボン粒子を皮膜内に均一に分散することは極めて困難であり、皮膜の表面近傍にはカーボン粒子を分散できたものの、基材との界面近傍までカーボン粒子を分散させることは実現できなかった。

そこで、イオン化蒸着法着目し、電気伝導度の高いカーボンを利用したヘテロ構造皮膜の作製を検討した。導電性発現のメカニズムは、導電パスとなるカーボンを AlO(OH)皮膜中に形成させ、皮膜全体の導電性を向上させることである。したがって、本研究では、水蒸気プロセスおよびイオン化蒸着法を併用し AlO(OH)／カーボンヘテロ構造皮膜を作製することとした（**図 1**）。

実験方法は、以下の通りである。供試材として、20 mm × 20 mm、板厚 1.5 mm の Al-Mg-Si（A6061）合金の板材を用いた。本板材は、冷間圧延により作製したものである。試料を所定の大きさに切り出し、試料を鏡面研磨した後、イオン化蒸着装置を使用してイオン化蒸着処理を行った。この際、蒸着温度を 300℃とし、イオン化蒸着時間は 10 min に固定した。蒸着は、Filament 電流 30 A、Anode 電流 0.5 A、Reflector 電圧 10 V、基板電圧−4 kV の条件で実施し、炭素源にはベンゼン（C_6H_6）ガスを使用した。

イオン化蒸着によりカーボン皮膜を形成した試料に対して、多孔質化を目的として熱処理を施した。400℃に保持したマッフル炉に入れ、その後 400℃で 1 h 加熱後、5℃/min で徐冷し、1 h 後取り出した。イオン化蒸着処理後に熱処理を施した試料に対して水蒸気プロセスを 180℃、24 h の条件で施した。表面観察には、走査型電子顕微鏡（FE-SEM；JEOL/JSM-7610F：本学共通機器ものづくりセンター）を用いた。また、X 線回折法（XRD；SmartLab、Rigaku：本学共通機器ものづくりセンター）による皮膜の結晶構造解析および X 線光電子分光装置（XPS；QUANTERAII、ULVAC-PHI）を用いて元素分析および構造解析を行った。皮膜の耐食性は、分極測定

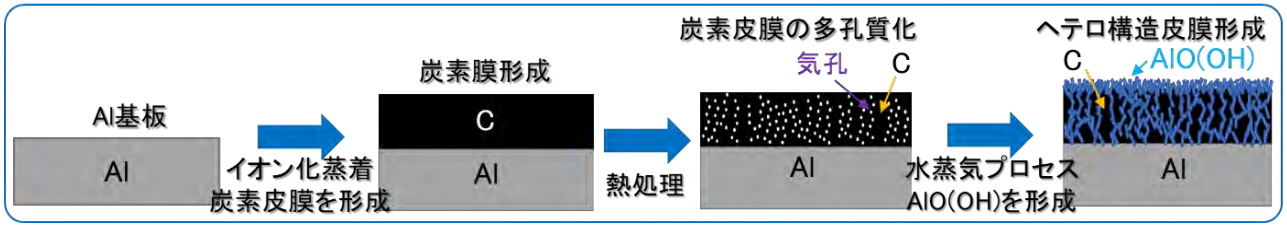


図 1　本研究で用いるヘテロ構造皮膜作製のためのストラテジー

TOPへ戻る

（VersaSTAT4、AMETEK）によって評価した。測定条件は、Initial Potential −0.1 V、Final Potential 0.8 V、掃引速度 10 mV/s とし、燃料電池の電解質を模擬した pH = 3 の H_2SO_4 溶液中にて実施した。

3．計画の進行状況

水蒸気プロセスにより作製した AlO(OH)皮膜、イオン化蒸着により作製した炭素皮膜、熱処理後の炭素皮膜および AlO(OH)／カーボンヘテロ構造皮膜の FE-SEM 像を**図 2** に示す。熱処理により、炭素薄膜の気孔率が増加することが FE-SEM 観察により明瞭に確認された。また、その後の水蒸気プロセス時に、熱処理により形成した気孔内に AlO(OH)が充填されることで AlO(OH)／カーボンヘテロ構造皮膜が形成されることがわかった。Al 基板、AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）の XRD プロファイルを**図 3** に示すが、ヘテロ構造皮膜（複合皮膜）において AlO(OH)に帰属する回折ピークが観察されたことから、イオン化蒸着後に水蒸気プロセスを施すことで AlO(OH)が形成されることを確認した。

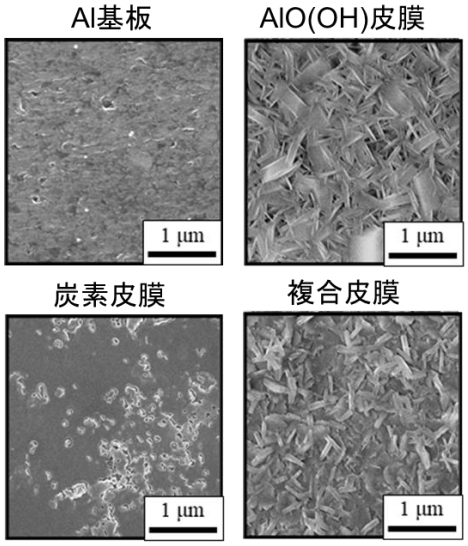


図 2　Al 基板、AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）表面の FE-SEM 像

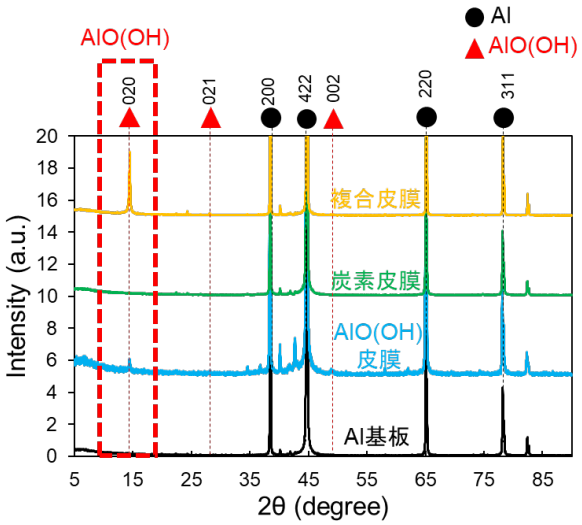


図 3　Al 基板、AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）の XRD プロファイル

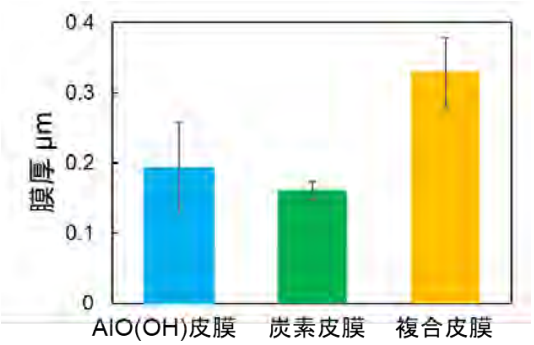


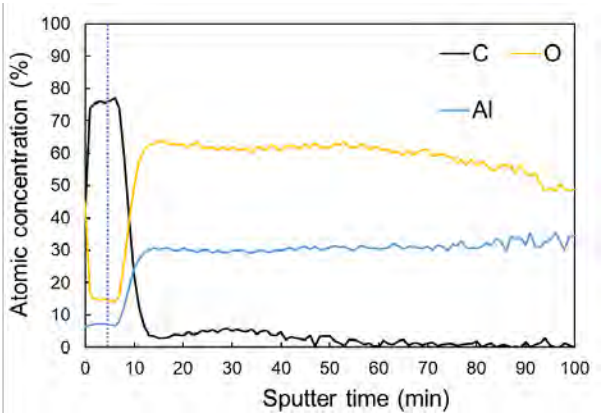
図 4　AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）の膜厚

AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）の膜厚を**図 4** に示す。各皮膜の膜厚は、炭素皮膜では 160 nm、AlO(OH)皮膜では 190 nm、ヘテロ構造皮膜全体では 330 nm であることが確認された。これらの結果から、水蒸気プロセスにより形成した AlO(OH)は、カーボン皮膜内の気孔内を充填した後、カーボン皮膜表面を覆うように成長したことがわかった。

ヘテロ構造皮膜における皮膜深さ方向の各元素濃度変化および皮膜内の領域における炭素結合状態の解析結果を**図 5(a)** および(b)にそれぞれ示す。深さ方向の濃度変化から、カーボンは皮膜全体にわたって均一に存在することを確認したとともに、炭素皮膜中の主な

TOPへ戻る

(a)



(b)

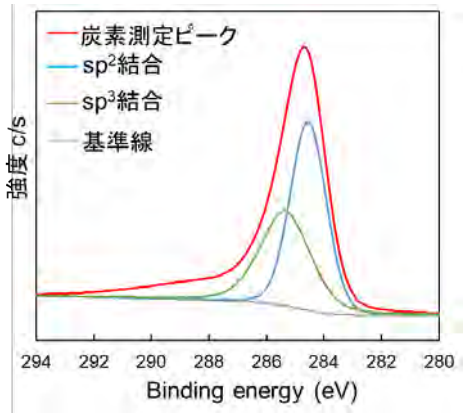


図５　ヘテロ構造皮膜における(a)皮膜深さ方向の各元素濃度変化および(b)図 5(a)中の点線部における炭素結合状態の解析

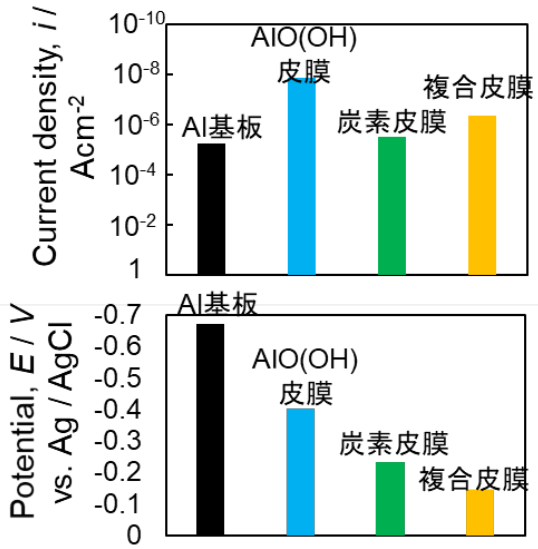


図 6　分極試験により測定した Al 基板、AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）の腐食電位および腐食電流密度

炭素の結合は sp^2 結合であることから導電性を有する可能性が示唆された。

分極試験により測定した Al 基板、AlO(OH)皮膜、炭素皮膜およびヘテロ構造皮膜（複合皮膜）の腐食電位および腐食電流密度を**図 6** に示す。AlO(OH)／カーボンヘテロ構造皮膜の腐食電位と腐食電流密度を分極曲線の Tafel 外挿によって評価した結果、それぞれ −0.143 V と 4.3×10^{-7} A/cm² であった。Al 合金基材に比べて腐食電流密度が 1 桁以上向上したことから、ヘテロ構造皮膜も優れた耐食性を示すことを明らかにした。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の研究計画

本研究は、イオン化蒸着および水蒸気プロセスを併用することで高い耐食性と導電性を兼ね備えたヘテロ構造皮膜をアルミニウム合金上に作製するための技術開発を図るものである。今後は、この研究を継続させ、学会発表や論文投稿を積極的に行う予定である。

本研究に関連した論文等投稿状況

[1] S.Y. Lee, D. Numata, A. Serizawa*, K. Sasaki, K. Fukushima, X. Hu, T. Ishizaki: *Materials*, **15** (2002) 1633-1644.

[2] N. Itano S.Y. Lee, A. Serizawa*: *Coatings*, **12** (2022) 262-273.

[3] 芹澤愛*，伊藤友佑，栗原健輔：*材料の科学と工学*，**58** (2021) 139-143.

[4] S.Y. Lee, T. Matsubara, D. Numata, A. Serizawa*: *Catalysts*, **11** (2021) 548-560.

TOPへ戻る

仮想結び目理論における
不変量と局所変形の関係性の解明

工学部 材料工学科　　櫻井　みぎ和

共同研究者
東京女子大学 現代教養学部 数理科学科 数学専攻　　大山　淑之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究の目的は，仮想結び目において，不変量と局所変形の関係性を解明することである．

本研究の対象となる仮想結び目理論は，結び目理論を一般化した分野にあたり，結び目理論を包含した，より広い領域を扱うことから非常に重要な研究対象である．結び目理論における大きな目標は「結び目を分類すること」であり，これは仮想結び目理論においても同様である．結び目を平面上に表す際に正則表示という方法が用いられる．その中で実交点だけでなく仮想交点も定義したものを仮想結び目の正則表示と呼ぶ．仮想結び目はこの仮想結び目の正則表示に対する，一般ライデマイスター移動による同値類として定義されている．つまり，仮想結び目は結び目を拡張した概念である．そのため，仮想結び目の性質を明らかにし，結び目の性質のとの差が明確になれば，結び目のこれまで見えなかった側面が明らかになることが期待でき，新たな結び目の問題提起にもつなげることができる．

結び目を分類するための方法として，不変量と呼ばれる代数的な量が用いられる．仮想結び目理論においても仮想結び目を分類するにあたり，不変量を用いるのが有効な手段である．例えば，結び目に対してそれをほどく操作(結び目解消操作) を何度か行い，結び目が解けた状態(自明な結び目)となるための最小回数は，結び目解消数と呼ばれる有名な不変量である．このように，不変量は結び目の分類を行うのに利用される．

不変量には結び目の分類能力の異なるものが多数存在しており，近年では k-writhe と呼ばれる不変量が仮想結び目において注目されている．仮想結び目にはインデックスと呼ばれる量があり，k-writhe はそのインデックスから定義される整数列からなる数値型不変量である．k-writhe は，与えられた正則表示に対して，それが結び目と同値ではない，すなわち仮想結び目の正則表示であるかどうかを判別することが可能であるとともに，仮想結び目に対する分類能力が高い不変量であるという特徴がある．さらに，具体的な計算を行うことも可能であるため，仮想結び目の分類を行う上で非常に魅力的である．

また，結び目の分類を行う上で，局所変形についても着目することが重要である．局所変形とは，仮想結び目の一部分に対して行う幾何的な変形のことであり，先の結び目解消操作もその 1 つである．局所変形は不変量を定義したり，結び目を大きく分類したりする際にも用いられる．

TOPへ戻る

結び目については，交差交換やデルタ変形といった局所変形が存在するが，仮想結び目においても類似の操作にあたる，virtualization や forbidden move などの結び目操作が存在する(図 1). virtualization は仮想結び目における最も基本的な局所変形である．図 1 に示すように，実交点を仮想交点に置き換える変形である．この virtualization によって，結び目理論において重要な局所変形である交差交換を実現することができるため，多くの局所変形の基となっている．

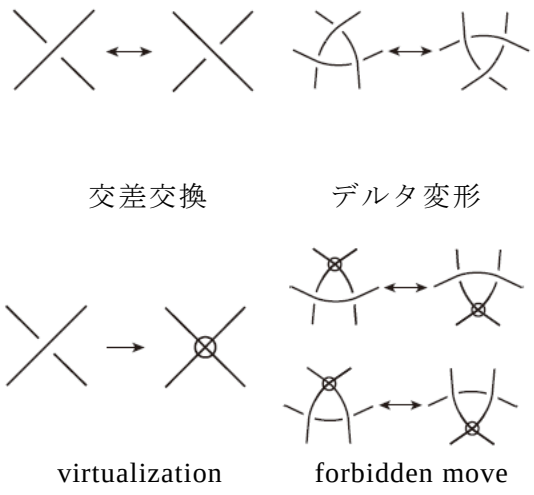


図 1: 様々な結び目解消操作と仮想結び目解消操作(局所変形)

このように，不変量と局所変形には様々な種類が存在し，また密接に関わっていることが分かっており，それが結び目の分類に大きく寄与している．しかし，仮想結び目理論においては，ほんの一部しか解明されていないのが現状である．そこで，中でも解明が進んでいる *k*-writhe と virtualization に着目し，以下のような問いを考えた．

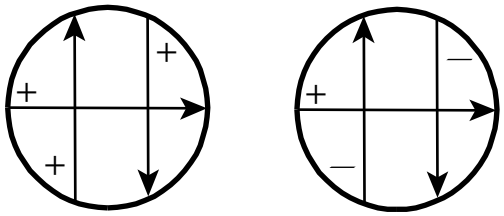
問い：仮想結び目の *k*-writhe(不変量) と virtualization(局所変形) にはどのような関係があるのか．

２．研究計画

本研究では，上記の問いである，*k*-writheとvirtualizationの関係性の解明を行う．特に，*k*-writheの条件を任意に満たす整数列を与えたとき，それらを*k*-writheの値として持ちかつ，virtualizationによる仮想結び目解消数が1の仮想結び目を無限個構成作成することを本研究の目標とする．これにより，限定的ではなく，一般性まで拡張した形での関係性の解明に着手できる様になると考える．これまでの研究で，著者は上記条件を満たす仮想結び目を，任意の*k*-writheの整数列に対して1つずつ構成することに成功している．本研究で行うことは，これらすべてに対して無限個構成するという拡張を試みるというものである．具体的には以下のような計画で本研究に取り組んだ．

【研究手法】

著者の先行研究では，*k*-writheの条件を任意に満たす整数列を与えたとき，それらを*k*-writheの値として持ち，virtualizationによる仮想結び目解消数が1の仮想結び目を構成してきた．ここで構成した仮想結び目のガウス図に対して，図 2の2種類のガウス図を頂点連結和と呼ばれる操作で左右から貼り合わせることを考える．ここで，ガウス図とは仮想結び目をコード化した図のことである．また，頂点連結和とは，ガウス図に対する二項演算である．



H *I*

図 2: 頂点連結和を行う 2 種類のガウス図 *H* とガウス図 *I*

2 つのガウス図 G_1 と G_2 を各々コード c_1 とコード c_2 をもつガウス図とする．c_1 と c_2 が

TOPへ戻る

同じ向きと符号を持つならば，c_1 と c_2 に関する頂点連結和 $G_1 \natural G_2$ は図 3 に示すように、c_1 の矢印の先と c_2 の矢印の根本の近くの小さな弧を削除し、向きを維持してそれらを貼り合わせて得られるガウス図となる．先行研究で構成した仮想結び目を $\mathcal{D}$ としたとき，$\mathcal{D}$ に H と I を n 回頂点連結和したガウス図 $\mathcal{D}_n = H \natural \ldots \natural H \natural \mathcal{D} \natural I \natural \ldots \natural I$ に対応する仮想結び目が本研究で構成することを目標としている仮想結び目である．

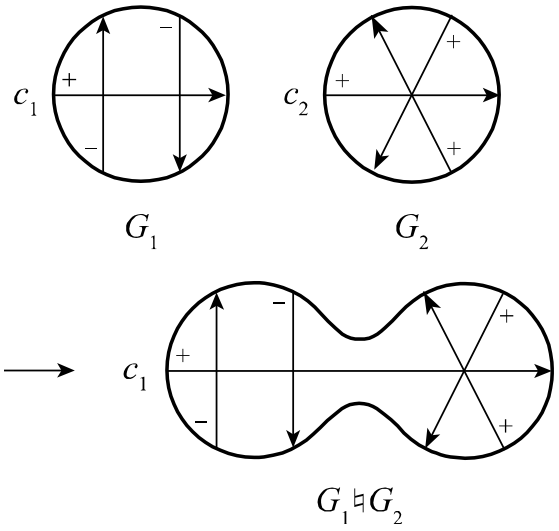


図 3. 頂点連結和.

更に，ここで作成した仮想結び目が全て異なるものであることを示すために，不変量を用いる必要がある．ここで採用することを予定したのは，交差多項式$I(t)$である．交差多項式はk-writheと同じくインデックスと呼ばれる数値的値を用いて定義される不変量であり，k-writheと相性の良い不変量である．当初は仮想結び目の不変量として有名なジョーンズ多項式やそれを拡張した宮澤多項式などを用いることも想定したが，先行研究で作成したガウス図についての計算を一から行う必要があるため，既に計算結果が解っておりk-writheの値を用いることができる交差多項式を用いることを考えた．

３．計画の進行状況

今年度の研究は予定通り進行し，研究成果としては，k-writhe と virtualization について後述の定理 2 を得ることができた．これは著者の以前の研究成果(定理 1)で得られたものを無限個までに拡張したものであり，以下に定理 1 と本研究で得られた定理 2 を比較する形で，概要を説明する．

定理 １．

$\{r_s\}_{s\neq 0}$ を任意の整数列とする．その整数列が$\sum_{s\neq 0} sr_s=0$ を満たすならば，任意の 0 でない整数 t に対して，

$$u^v(K)=1 \text{ かつ } J_t(K)=r_t$$

となるような仮想結び目 K が存在する．

本年度の研究により，著者は，更に次のような結果を得た．

定理 ２．

$\{r_s\}_{s\neq 0}$ を 0 又は r_{-1}, r_1 以外で少なくとも 1 つ 0 ではない項を持つ整数列とする．その整数列が$\sum_{s\neq 0} sr_s=0$ を満たすならば，任意の自然数 n と 0 でない整数 t に対して，

$$u^v(K_n)=1 \text{ かつ } J_t(K_n)=r_t$$

となるような仮想結び目 K_n が存在する．

【定理 2 の構成方法】

定理 2 を示すために，著者は，以下の補題を証明した．

補題 ３．

仮想結び目を K, K のガウス図を G, 図 2 のガウス図 H を持つ仮想結び目を $L, c_0', c_1', \ldots, c_n'$ を G のコード，$\varepsilon_0', \varepsilon_1', \ldots, \varepsilon_n'$ を各々 $c_0', c_1', \ldots, c_n'$ の符号，$\gamma_0', \gamma_1', \ldots, \gamma_n'$ を各々 $c_0', c_1', \ldots, c_n'$ の G 上の弧とする．このとき，以下の式を得る：

$$I_{L\natural K}(t) = I_L(t) + I_K(t) + \Sigma_{i\in M'_{10}(G)} \varepsilon_i'(t^{\gamma_i'\overline{\gamma_i'}}-1)(t^{-1}-1) + \Sigma_{i\in M'_{00}(G)} \varepsilon_i'(t^{\gamma_i'\overline{\gamma_i'}}-1)(t-1) + \Sigma_{i\in M'_{10}(G)} \varepsilon_i'(t^{\gamma_i'\overline{\gamma_i'}}-1)(t-1) + \Sigma_{i\in M'_{11}(G)} \varepsilon_i'(t^{\gamma_i'\overline{\gamma_i'}}-1)(t^{-1}-1).$$

TOPへ戻る

ここで，M'_{10}, M'_{00}, M'_{10}, M'_{11} は G の頂点連結和を行うコードに対して，そのコードと交差するのかしないのか，またどちらの方向に向いているのかについてのコードを分類した集合である．

補題 4．

仮想結び目を K, K のガウス図を G, 図 2 のガウス図 I を持つ仮想結び目を M，$d_0,d_1,\ldots,d_n$ を G のコード，$\delta_0, \delta_1,\ldots, \delta_n$ を各々 $d_0,d_1,\ldots,d_n$ の符号，$\zeta_0', \zeta_1',\ldots, \zeta_n'$ を各々 $d_0,d_1,\ldots,d_n$ の G 上の弧とする．このとき，以下の式を得る：

$I_{K\natural M}(t)= I_K(t)+ I_M(t)-\Sigma_{i\in M_{10}(G)}\delta_i(t^{\zeta_i'\overline{\zeta_i'}}-1)(t-1)-\Sigma_{i\in M_{00}(G)}\delta_i(t^{\zeta_i'\overline{\zeta_i'}}-1)(t^{-1}-1)-\Sigma_{i\in M_{10}(G)}\delta_i(t^{\zeta_i'\overline{\zeta_i'}}-1)(t^{-1}-1)-\Sigma_{i\in M_{11}(G)}\delta_i(t^{\zeta_i'\overline{\zeta_i'}}-1)(t-1).$

ここで，M_{10}, M_{00}, M_{10}, M_{11} は補題 3 と同様に，G のコードを分類した集合である．

補題 3,4 を用いて，定理 2 で構成した仮想結び目の交差多項式の値を計算した．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

【今後の計画】

今後も引き続き，不変量と局所変形の関係性に着目し，仮想結び目に関する研究を進めていく．特に，定理 2 では整数列 $\{r_s\}_{s\neq 0}$ には条件が付いているため，今後は任意の整数列で実現することに取り組む予定である．

現時点では，今回用いた交差多項式とは別の交差多項式を用いて分類することを想定している．交差多項式には 1 番多項式と 2 番多項式が存在しており，本研究ではまずは計算量の観点から 1 番多項式を用いた．一方で，2 番多項式の方は計算量が多く，複雑な分類ができる可能性があるため，今後はこちらを用いて今回作成した無限個の仮想結び目の分類することができるかを考える．

これが実現すれば，ある条件の下でしか構成することができなかった仮想結び目を，任意の整数列まで拡張することができ，より強力な結果を得ることができると予想される．その結果，更なる k-writhe と virtualization との関係性を解明することができると期待される．

【論文等投稿・発表状況】

論文：

Yoshiyuki Ohyama and Migiwa Sakurai, A virtual knot whose virtual unknotting number equals one and a sequence of n-writhes, *J. Math. Soc. Japan* 73(3) 983-994 2021 年 7 月.

研究発表：

1. Yoshiyuki Ohyama and Migiwa Sakurai , Relationship between virtualization and a sequence of n-writhes for virtual knots，研究集会「結び目理論」，東京女子大学，2021 年 9 月 4 日(招待講演).

2. Yoshiyuki Ohyama and Migiwa Sakurai , Virtual knots whose virtual unknotting numbers equal one and sequences of n-writhes，岐阜大学トポロジーセミナー，岐阜大学，2021 年 8 月 23 日(招待講演).

3. Yoshiyuki Ohyama and Migiwa Sakurai , A study of n-writhes and virtualization for virtual knots, Japanese Conference on Combinatorics and its Applications 2021，慶応義塾大学，2021 年 8 月 19 日.

※氏名の表記は，アルファベット順である．

TOPへ戻る

分子インプリントプローブによる中枢神経内疾患モデル動物の伝達物質分泌可視化

応用化学科　　吉見　靖男

共同研究者
帝京平成大学健康メディカル学部健康栄養学科　　長濱　辰文

日本薬理評価機構健康医科学センター　　岡本　摩耶

日本薬理評価機構研究統括　　犬塚　隆志

茨城大学農学部食生命科学科　豊田　淳

川崎医科大学医学部生理学２　氷見直之

１．序論

ヒトを含めて動物の神経活動は、神経細胞間を拡散移動する神経伝達物質によって担われ、その異常が多くの神経疾患の原因となる。生きた神経組織における神経伝達物質の分泌をリアルタイム検出し、とくに分泌箇所とタイミングを特定する技術があれば、神経における情報処理の機構解明や、疾病の機構解明、治療薬のスクリーニングに貢献できる。代表者の吉見は、古典的なラジカル重合による合成の過程で、任意の目的物質と特異相互作用し、それに伴って蛍光強度変化する機能を持つ蛍光分子インプリント高分子のナノ粒子（ fluorescent molecularly imprinted nanoparticle: fMIP-NP）を開発した。幾つかの伝達物質（ドーパミン、セロトニン、アセチルコリンなど）に対する応答を確認している。本研究の目的は、この fMIP-NP をプローブとして伝達物質の分泌部位とタイミングをリアルタイムで検出するイメージング法を新規開発し、その有用性を動物実験で実証することにある。内容としては代表者が各種神経伝達物質に応答する fMIP-NP を合成し、共有結合を介した吸着によって。このこれらを使って各分担者が作製した、各神経疾患モデル哺乳類（うつ病マウス、パーキンソン病ラット、アルツハイマー病マウス）の脳スライス fMIP-NP で染色して観察し、神経疾患解析法および治療薬のスクリーニング法としての有効性を検証する。

２．研究計画

本研究の目的は、「各種伝達物質に応答する fMIP-NP を細胞膜に吸着させた神経組織の顕微鏡観察によって、各々の伝達物質放出の位置とタイミングを検出し、神経活動とその機能障害を解析する新しいイメージング技術の創出」にある。

申請者は、合成の過程で目的物質の分子構造が内部に刷り込まれ、目的物質との特異相互作用によって蛍光強度を著しく変化させる性質が付与された蛍光分子インプリント高分子ナノ粒子（fluorescent molecularly imprinted nanoparticle: fMIP-NP）を合成した。既にセロ

TOPへ戻る

トニン、ドーパミン、アセチルコリンに対して選択的に応答する fMIP-NP の合成に成功している。本技術の優位性は①古典的なラジカル重合で合成されるため、イメージングに必要な量の fMIP-NP は数時間で入手できる、②特定の鋳型に感応性のある fMIP-NP の開発にかかる時間も数ヶ月程度と短期で可能な点にある。分子インプリント高分子をプローブとして蛍光強度変化を測定すれば、神経伝達物質の分泌を検出できる（図 1）。

ただし、伝達物質のイメージングを可能にするためには、この fMIP-NP を神経細胞表面に固定する必要がある。本研究では、まず fMIP-NP にアミノ基を導入し、神経細胞膜タンパク質のアミノ基と、グリシジル基含有コポリマー(EGCC)を介して結合させることで、fMIP-NP で神経細胞を染色する方法を確立する（図 2）。この方法で、染色されたアメフラシ中枢を観察することで、味覚認識や学習に伴う伝達物質分泌の変化を観察し、さらには疾病モデル動物の脳スライスを染色して、伝達物質分泌不全と治療薬による改善状況をイメージング法で観察することで、fMIP-NP のプローブとしての有用性を実証する。このような試みは世界的に類例が無く、独創的なものである。

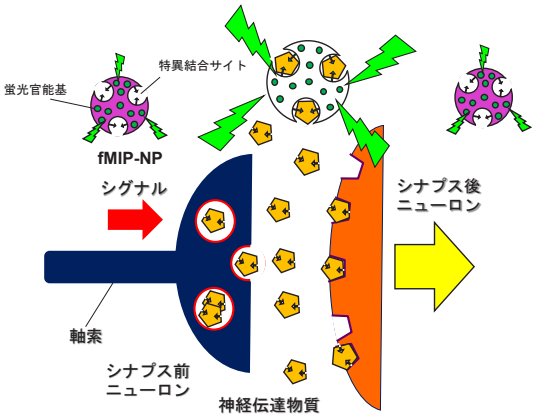


図 1: fMIP-NP をプローブとした神経伝達物質分泌のイメージング

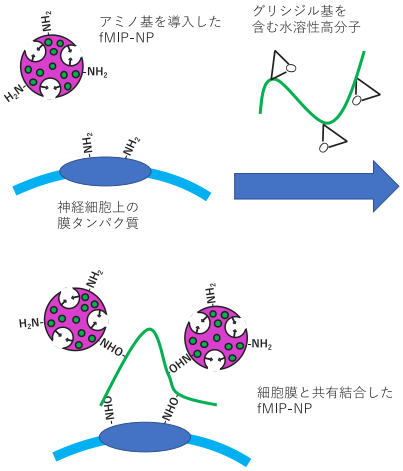


図 2: 化学結合を介した fMIP-NP の神経伝達物質分泌への吸着法

3．計画の進行状況

(A) fMIP-NP の合成

鋳型であるセロトニンを鎖長の異なるアミノアルキルシランカップリング剤とグルタルアルデヒドを介し、ガラスビーズ表面に固定した。

メタクリル酸、エチレングリコールジメタクリレート、アリルフルオレセイン、アリルアミンおよびジエチルジチオカルバミドベンジルを N, N-ジメチルホルムアミド(DMF)と蒸留水の混合溶媒に溶解した。

鋳型を固定したガラスビーズに上記重合溶媒に加え、窒素バブリングにより流動化させながらキセノンランプ光を照射しモノマーを共重合させた。

重合後、DMF 濃度25vol%から100vol%まで段階的に変化させた水溶液で、高親和性の fMIP-NP を抽出した。

透析法により fMIP-NP の分散媒を DMF からイオン交換水に置換し、測定直前に塩を加えることで人工海水(ASW)を分散媒した。

図 3 に示すように、鋳型であるセロトニンを加えたところ蛍光強度が濃度 15 μM で 7.7% 増大した。一方、トリプトファンの添加では蛍光強度が変化しなかった。この結果より、fMIP-NP が *in vivo* でセロトニンを選択的に捉えるプローブとして機能ことが確かめられた。

TOPへ戻る

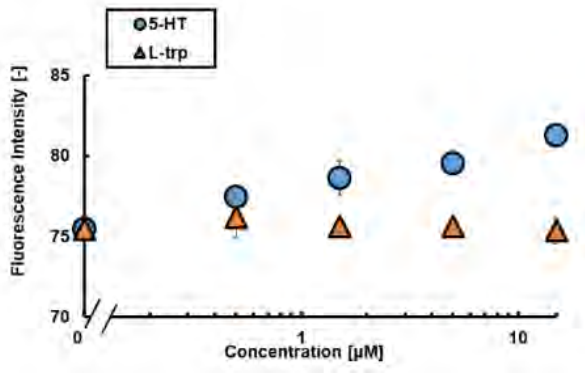


図3　セロトニンを鋳型とした fMIP-NP の蛍光強度のセロトニンとトリプトファン濃度依存性

(B) EGCC を介した fMIP-NP への細胞の接着

蒸留水を溶媒とし、ペルオキソ二硫酸アンモニウム、メタクリルアミド、グリシジルメタクリレート(GMA)により重合溶液を調整した。80℃で熱ラジカル重合を行い、メタノールを用いた再沈殿により精製を行いメタクリルアミドと GMA の共重合体である EGCC を得た。

fMIP-NP 固定前の神経細胞の蛍光強度を測定した。EGCC を ASW に分散させ20 min 浸漬後、fMIP-NP に10 min 浸漬し、その後、ASW で洗浄した。この神経細胞に、セロトニン溶液を吹き付けると、蛍光強度の揺動がみられた。しかし、L-トリプトファン溶液を吹き付けても、変化は見られなかった。EGCC に浸漬する操作を省いて fMIP-NP に10 min 浸漬させた神経細胞にセロトニン溶液を吹き付けても、蛍光強度の変化は見られなかった。この結果より、fMIP-NP は選択応答性を維持したまま、EGCC を介して神経細胞に吸着できることが示された。

(C)　味覚刺激剤に対する嫌悪化学習前後における頭部神経節内セロトニン分泌の検出

味覚刺激剤は嗜好物質としてノリ抽出液(溶媒:ASW)、嫌悪物質として蒸留水、味覚を感じないブランクとして ASW を用いた。各味覚刺激剤 500 μL を口球部に投与し、頭部神経節内学習前後におけるセロトニン分泌を fMIP-NP 存在下での蛍光強度変化として検出した。

口球への味覚刺激剤の投与により頭部神経節内で放出されたセロトニンを、細胞表面に固定された fMIP-NP の蛍光強度変化からの検出を試みた。結果を図 4 に示す。ノリ抽出液の嫌悪化学習前では全ての味覚刺激に応答した蛍光強度変化は観察されなかった。この結果からノリ抽出液嫌悪化学習前は味覚の判断に頭部神経節またはセロトニンが関与していないことが示唆された。一方でノリ抽出液嫌悪化学習後ではノリ抽出液投与のみで約 2.5 s 後に蛍光強度変化が確認された。嫌悪化学習前には観察されていないシグナルが嫌悪化学習後には観察されていることから、このセロトニン放出はアメフラシがノリ抽出液を嫌ったことを反映した応答だと考えられる。嫌悪味覚である蒸留水では同様のシグナルが得られなかったことから拒絶反応ではなく学習に特有のシグナルであり嫌悪化学習にセロトニンが関与していると言える。また 2.5 s というタイムラグは口球神経節内蛍光膜電位イメージングで得られた、ノリ抽出液嫌悪化学習後のノリ抽出液投与から膜電位変化までの時間とほぼ等しい。この結果から、細胞表面に吸着した fMIP-NP は、味覚刺激に応答して放出されるセロトニンを検出するプローブとして機能することが示された。

4．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

学習、味覚認識に伴うセロトニン、ドーパミンやアセチルコリンの分泌の関係を究明していく。

2022 年度　日本神経科学会大会(7 月沖縄)で演題登録ずみ

TOPへ戻る

論文投稿準備中

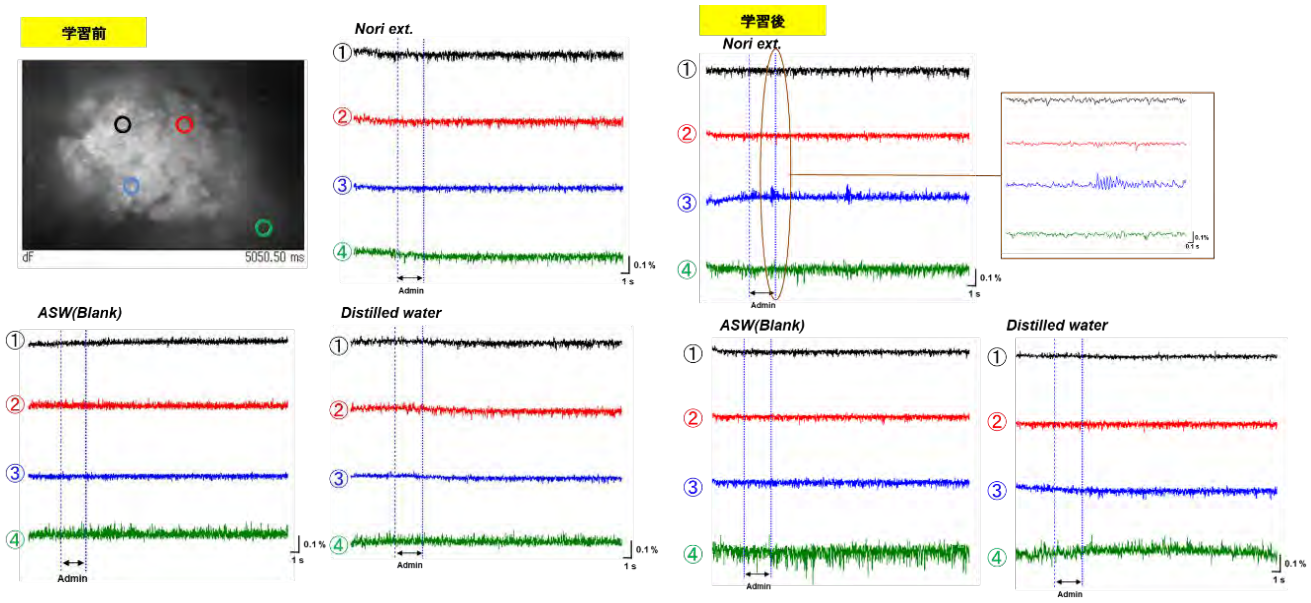


図4 ノリ抽出液嫌悪化学習前後における頭部神経節の蛍光強度変化

TOPへ戻る

周波数の低い環境振動でも高効率に発電できる新規 AlN 系圧電薄膜の合成

工学部応用化学科　　大口　裕之

1．序論（はじめに，まえがき，目的）

圧電振動型エナジーハーベスタ(図 1)とは、身の回りの僅かなエネルギーから電力を得るエナジーハーベスタのうちで最大級の出力を誇り、また圧電膜と電極を重ねるだけの単純な構造ゆえに小型化に適する、IoT 用無線通信機能付き小型センサの電源などとして注目を集めるデバイスである。外部振動が加わるとカンチレバーが上下に振れて、その上の圧電膜を歪ませ、交流電流を生じる。AlN を圧電膜とする場合には c 軸配向したウルツ鉱構造の AlN 膜が使用される。

申請者が AlN を用いる理由は、ハーベスタ用圧電体として一般的なチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を、以下の式(1)で与えられる振動発電性能指数(FOM)において AlN が超える可能性を秘めるからである(FOM は前者が 18 GPa、後者が 6.5 GPa)。

$$\mathrm{FOM} = \frac{d^2 E^2}{\varepsilon} \qquad (1)$$

ここで d は圧電定数、E は弾性率、ε は誘電率である。過去の研究で、AlN の Al サイトを金属 M によって置換($Al_{1-x}M_xN$)すると、圧電定数が増大して、その結果 FOM が上昇することが報告されている。ただし、極めて高価で量産に不向きな Sc による置換[*Adv. Mater.* 21, 593 (2009).]を除くと、この手法で PZT に匹敵する FOM を得るには至っていない。その理由は、多くの金属置換では、置換量が増えるにしたがって AlN の配向性が低下して圧電定数の増大が抑制[*J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 235406 (2009).]されることと、固溶体形成エネルギーが大きいために置換濃度の上限が低く抑えられてしまうからである[*Appl. Phys. Express* 8, 061501 (2015).]。

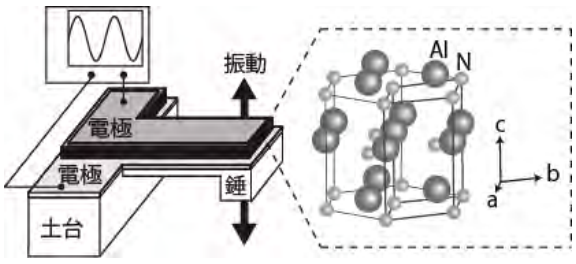


図 1　圧電振動型エナジーハーベスタ

圧電振動型エナジーハーベスタを作製するうえでは共振周波数にも注意を払う必要がある。なぜなら、振動エネルギーの電気エネルギーへの変換効率は共振点において最高となるからである。このため、デバイスの共振周波数を環境振動の周波数である 100 Hz 以下に設定する必要があり、機械力学に基づく様々な構造体設計が行われている。特に振動部の薄型化は効果的であり、厚み数百 nm の自立膜型デバイスでは共振周波数 64 Hz が記録されている[*Appl. Phys. Lett.* 98, 053502 (2011).]。しかし、自立膜はもろく、面積 0.1 mm^2 以下の小さなデバイスしか作製できず、また振動部の変位増大に必要な錘が付けられないため、出力は 1 nW 以下にとどまっている。この問題解決に有効だと考えられるのがマイカである。マイカは剥離するだけで共振周波数 100 Hz 以下の薄型構造となり、しかも、その面積を数 cm^2 以上にすることができる。さらに、マイカを母体としたフレキシブルデバイスは 1000 回以上も曲げ伸ばし可能であり[*Energy. Technol.* 7, 1900638 (2019).]、マイカが錘取り付けに適した高い靭性を持つことが示唆される。しかし、マイカを使った圧電振動型ハーベスタの作製例は皆無である。

そこで本研究は、エピタキシャル成長とマイカ基板を研究軸とする独自のアプローチに

TOPへ戻る

より高性能な圧電振動型エナジーハーベスタ開発へ挑戦し、その実用的デバイス開発を促進する学術基盤を構築することを目的とする。

2. 研究計画

本研究では、エピタキシャル成長と 2 次元層状物質の活用によって、圧電振動型エナジーハーベスタ開発における重要課題である高出力化と低共振周波数化を同時に達成するために必要な、薄膜合成化学的および機械工学的な条件を実験によって明らかにする。そして、得られた知見に基づいてハーベスタの研究開発指針を確立する。本申請研究終了後には、この指針に沿ってデバイス開発を継続し、最終的に、IoT 用無線通信付きセンサの電源としてふさわしい、1 秒毎に無線通信可能な 10 μW の出力を有する面積 2 cm^2 以下の小型ハーベスタを実現する。各実験項目の詳細は以下に述べる。

a) エピタキシャル成長を利用した金属置換AlN膜の配向性維持と置換量の増大

金属置換 AlN 膜のエピタキシャル成長は Ar と N_2 の混合ガスを用いた反応性スパッタ法にて単結晶基板上に行う。金属置換量の制御は、Al と置換金属それぞれのターゲットのスパッタ比を調整して行う。基板には、c 軸配向性 AlN 膜のエピタキシャル成長の実績がある Al_2O_3(0001)を使用する。また室温から 900℃程度までの温度範囲で成膜を行う。AlN 膜を置換する金属としては、AlN との固溶体形成エネルギーの異なる Ti、Cr、Ta、Y、Hf などの 3 価元素や、Mg-Hf などの 2 価-4 価元素を予定している。得られた膜の評価は、結晶性と配向性は X 線回折(XRD)により、エピタキシャル成長は XRD と反射高速電子線回折(RHEED)により、金属の価数などの電子状態は X 線光電子分光(XPS)により、組成はエネルギー分散型 X 線分析(EDS)により、誘電率はピエゾメーターにより、それぞれ評価する。以上の研究により、Sc 置換 AlN 膜と同等またはそれ以上の FOM を示す金属置換 AlN 膜を合成して、世界最高性能の振動発電用圧電膜を開発する。

b) マイカ基板上の金属置換AlN膜エピタキシャル成長

実験項目 1 で得られた成膜条件を基に、反応性スパッタ法を用いてマイカ基板上に高配向性・大量金属置換 AlN エピタキシャル膜を成長する。そして、実験項目 1 と同様の評価を実施して、マイカ基板上でも Sc 置換 AlN 膜と同等またはそれ以上の高性能な金属置換 AlN 膜が得られることを実証する。なお、マイカ基板上の AlN 膜エピタキシャル成長の報告は存在しないが、マイカ基板上の Pt 膜エピタキシャル成長[*Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 048001 (2018).]および、Pt エピタキシャル膜上の AlN 膜エピタキシャル成長[*Appl. Phys. Lett.* 64, 1359 (1994).]は報告されている。したがって、はじめにマイカ基板上に Pt 膜を、つぎに AlN 膜を堆積して AlN/Pt/マイカ基板とすれば、マイカ基板上の AlN 膜エピタキシャル成長が実現するはずである。

c) 圧電振動型エナジーハーベスタの試作

実験項目 3 で作製した AlN/Pt/マイカ基板からなる試料に Pt や Al などの上部電極を堆積したのち、実験項目 2 で得られた振動構造体設計基準に基づいてマイカを剥離して、共振点が 100 Hz 以下の圧電振動型エナジーハーベスタを作製する。作製したハーベスタを加振器に固定し、特定の周波数と加速度の振動を与えた際に発生する電圧をオシロスコープで観察して出力を決定する。この実験により高出力化のための改善点(例えば、必要な錘の重量、AlN 膜の厚み、電極面積など)を明確にして、本申請研究終了後に計画している出力 10 μW ハーベスタの開発へつなげる。

3. 計画の進行状況

研究計画に沿って以下三通りの成果を得ている。i)AlNエピタキシャル膜合成およびその膜へのCr置換、ii)マイカ基板上へのc軸配向性AlN膜合成、およびiii)AlN膜を応用したエナジーハーベスタ試作機の作製。一方で、AlNエピタキシャル膜を利用した金属置換量の増大や、マイカ基板上におけるAlNエピタキシャル膜成長においては、今のところ明確な成果は得られていない。以下には成果が得られて

TOPへ戻る

いる三通りの項目に対してその詳細を述べる。

i) AlNエピタキシャル膜合成およびその膜へのCr置換

AlNエピタキシャル薄膜はRF反応性マグネトロンスパッタ法を用いて、(111)配向したPt電極が堆積したAl_2O_3（0001）基板上に合成した。ターゲットにはAlを使用し、流量Ar/N_2 = 1：3の混合プラズマガスによりスパッタリングした。電極のPtもAr雰囲気下で同様に成膜した。基板温度を300℃、500℃、700℃として合成したAlN薄膜の評価を行うことで、基板温度が膜質に与える影響について調べた。

図２(a)は基板温度300℃、500℃、700℃で成長したAlN薄膜の$2\theta/\theta$ XRDパターンである。すべての薄膜において2θ = 36.04°および76.46°にAlN（002）面および（004）面からの回折ピークが現れたことから、振動発電に適したc軸配向性AlN薄膜が合成されたとわかった。基板温度700℃で合成したAlN薄膜の（002）面に対するロッキングカーブの半値全幅は0.8°と小さく、配向性に優れたAlN薄膜が合成されたことが分かった。また、高温であるほどPtの111およびAlNの002回折ピークがシャープであった。これらのことから、基板温度が高くなるほど結晶性・配向性に優れた

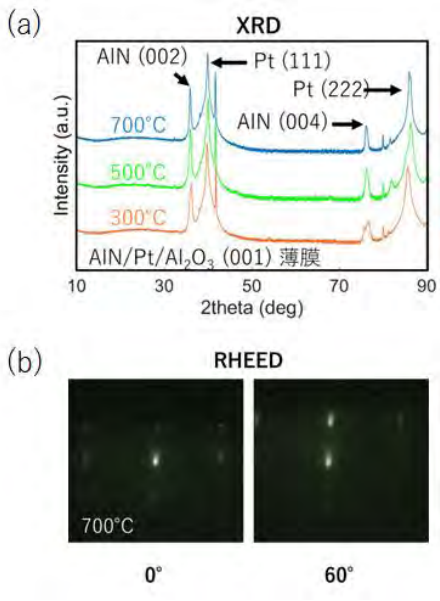


図２AlNエピタキシャル膜の(a)XRD回折パターンと(b)RHEED 回折パターン。

AlN薄膜が成長しやすいことが示唆された。

図2(b)にはAlN膜のRHEED回折像を示す。薄膜面内で電子線の入射方向を60°回転させる毎に同じ回折パターンが表れており、AlNのエピタキシャル成長が確認された。

ii) AlNエピタキシャル膜へのCr置換

AlNエピタキシャル薄膜へのCr置換は、RF反応性マグネトロンスパッタ法を用いて、AlとCrのターゲットを同時にスパッタすることで行った。そのほかの条件はAlNエピタキシャル膜成長時と同じであった。図3にはCrを置換する前後のAlNエピタキシャル膜のXRDパターンを示す。AlN(002)回折ピークが高角側へ約1.9°シフトしており、狙い通りにAlサイトの一部がCrにより置換されたことが示唆された。なお、エネルギー分散型X線分光法により組成を調べたところ、Cr置換量は約6.5 %

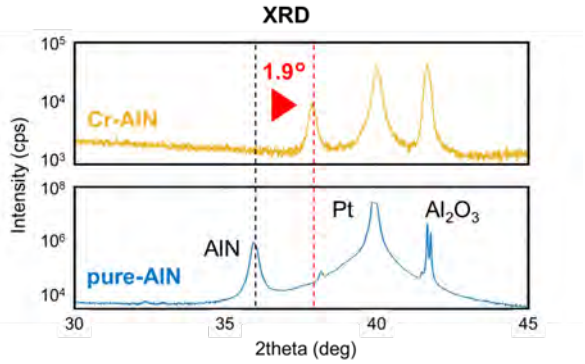


図３ Cr をドープする前(上)と後(下)の AlN エピタキシャル膜の XRD 回折パターン。

であることが判明した。

iii) マイカ基板上へのc軸配向性AlN膜合成

マイカ基板上へのAlN膜合成では1100 ℃まで加熱可能な人工マイカ$KMg_3AlSi_3O_{10}F_2$を基板として使用した。そして、成膜直前にマイカ基板の剥離を行い、そうして得られる清浄面上に、最初にPt電極(膜厚100 nm)を、その上にAlN圧電膜（膜厚300nmまたは600nm）を、どちらも700℃から900℃の範囲の温度において堆積した。成膜時のガス流量は、Pt成膜時にはAr 20 sccm、AlN成膜時にはAr 5 sccmとN_2 15 sccmであった。図4に700℃から900 ℃で

TOPへ戻る

マイカ上に堆積したPt/AlN膜のXRDパターンを示す。全ての試料に対して2θ = 39.8°および85.6°付近にPt111および222回折による強いピークが確認されたことから、c軸配向性AlNのエピタキシャル成長に適した(111)配向したPtが得られたことが分かった。しかし、マイカ基板の回折ピークとピーク位置が重なるためか、AlNの(0001)配向を示す回折ピークが認められず、エピタキシャル成長が確認できなかった。

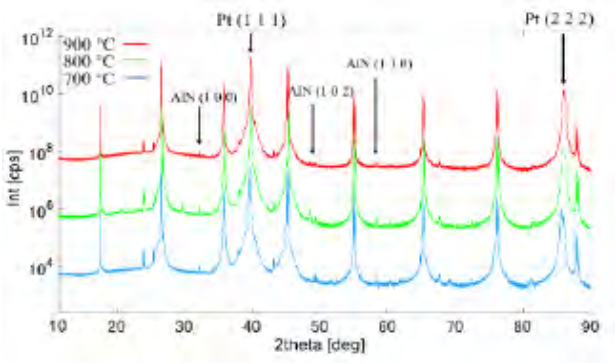


図 4 マイカ基板上に堆積した AlN 膜の XRD 回折パターン。

iv)AlN膜を応用したエナジーハーベスタ試作機の作製

上記の研究で合成したAlN膜を応用して振動試験デバイスを作製した。この試作機の振動発電試験を行ったところ振動数81 Hzに130 nWの明確な発電が確認された（図5）。

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後は、昨年度の成果を発展させて、研究計画に挙げた各項目の実現を目指す。

AlN系膜合成においてはエピタキシャル成長を利用した金属置換量の増大を確認できていない。そこで現在、置換に用いる金属のスパッタ速度と、AlNの成膜に用いるAlのスパッタ速度を、独立に制御できるシステムを開発しいる。このシステム開発を完了した後には、AlN膜に対して高濃度に金属置換を行った膜を合成して、エピタキシャル成長を利用した金属置換量を増大できることを実証する予定である。

マイカ基板上におけるAlNエピタキシャル膜の成長研究では、既にエピタキシャル成長に必要な(111)配向したPt電極が得られているため、AlNエピタキシャル成長に既に成功している可能性が高い。にもかかわらずXRD回折パターンにAlNのエピタキシャル成長を示す回折ピークが見えないのは、これらのピークがマイカ基板由来のピークと重なっているためである。この問題の解決には、基板からの回折を避けて膜からの回折のみを検出する表面敏感な手法が有効な手段となり得る。そこで現在、薄膜表面から数nm程度の情報しか取得しない極めて表面敏感なRHEED法を用いた試料評価を予定している。

振動発電素子の作製およびその発電性能試験ではこれまで、本格的な素子開発に必要な研究開発ノウハウを順調に蓄積している。そこで今後は、これらのノウハウを駆使して素子構造に改善を加え、高性能な素子の実現を目指す。実際に現在行っている実験で、基板の種類や、錘の重さおよびその設置位置を調整することで、環境振動の周波数帯で大きな発電が得られることが分かってきており、これらの仕様の最適化を目指す予定である。

今春の応用物理学会において、AlN 膜を応用した振動発電素子について一件の口頭発表を行った。今年度は、エピタキシャル膜によって金属置換量が増大した高性能圧電膜の合成や、その膜を応用した高性能発電素子の開発について複数の学会発表を、応用物理学会や機械学会を中心に行う予定である。また、これらの成果をまとめて論文発表も行う予定である。

TOPへ戻る

MRI 騒音環境における骨伝導マイクを用いた機械学習による被検者音声の検出

情報通信工学科　　武藤　憲司

共同研究者
室蘭工業大学大学院工学研究科　　小林　洋介

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

医療検査装置 MRI(Magnetic Resonance Imaging)は，磁気と電波を使って人体の断層画像を得る装置である．検査時には，傾斜磁場の変化によって生じる電磁気が，傾斜磁場コイルとコイルの保護具に大きな力を加えることで騒音が生じる[1,2]．検査中に被験者が体調不良になることがあり，その際には検査を中断する必要がある．被験者が操作室内の医師に緊急事態を伝える手段として緊急停止ボタンが用意されているが，手指が不自由な方は利用が難しく，バリアフリーな環境とは言い難い．また，医師と被験者の音声通話が検討されているが，MRI 駆動音がマイクロホンに混入し，被験者の声を伝える妨げになっている.つまり,医師は病気の診断に加えて，予測不能な被験者の訴えを聞き逃すことがないようにスピーカから出力される音に傾聴する必要がある．そのため，被験者の音声を普及が進んでいる音声認識技術を利用して医師に伝えることでコミュニケーションを可能にするシステムが重要な課題である.

一般的な音声認識のアプリケーションやソフトウェアは室内等の静穏環境下を対象としている[3]. MRI 駆動音のようなノイズの大きい場所では作動しないという問題がある．例えば，佐野らは人混みや電車内の特定の騒音環境下における音声認識において既知ノイズの除去を行っているが，ノイズ除去とともに話者情報も除去し，SN 比の低下で精度が低下する課題がある[3].

本研究では，MRI 駆動音が混入する被験者の音声を医師に伝える機械学習システムの開発を目的とする。実現のためにさまざまな機械学習のモデルから有効な手法の検討と音声だけでなく画像を用いた高度化の検討を行う.

２．研究計画

MRI 駆動音は撮像法の種類や分解能で多種多様に変化する．そのため，予め準備された学習データで作成された CNN モデルでは実際の検査時の MRI 駆動音に適用できない可能性がある．同様に被験者の音声も学習データとは異なるため，深層学習の分野では再学習という手法を適用する．再学習手法の概念を図 1 に示す[3]. その構成は Setting, Scanning, Detecting の要素の組み合わせである.

Setting では，事前学習に用いる教師データ作成と事前学習を行う．教師データとして，音声データベースの音声に任意の MRI 駆動音を加算した重畳音声を作成する．作成した重畳音声と MRI 駆動音を用いて学習を行い，学習モデルを作成する．これを事前学習モデルと呼ぶ.

TOPへ戻る

Scanning では，再学習部と Detecting が存在する．再学習部では，MRI 検査の最初の数秒間は被験者が体調不良を訴えることがないと仮定して，MRI 検査時の MRI 駆動音の取得および再学習を行う．MRI 駆動音の取得とともに音声データベースの音声とあわせて教師データを新たに作成する．作成した教師データによって事前学習モデルの再学習を行い，新たな学習モデルを作成する．

Detecting では，評価データを用いて被験者音声の検出と認識を行う．評価データとして，音声データベースに MRI 検査時の MRI 駆動音が重畳する信号を使用する．MRI 騒音下の被験者音声の検出において，再学習を行う CNN モデルと，再学習を行わない CNN モデルとおよび従来の HMM モデルとを比較するために，さまざまな SN 比の被験者音声の検出率と認識率を評価する．

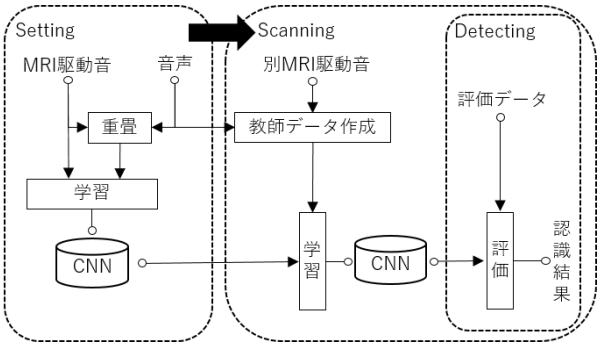


図 1　MRI 検査時における CNN を用いた学習モデルの再学習手法の構成

MRI 被験者の発話検出は音声と画像の二つの情報を用いたマルチモーダルなシステムで高度化を図る．提案システムの概念を図 2 に示す．

音による検出法では，MRI 騒音に頑健な音声取得のために骨伝導マイクロホンの使用する．アンテナの中のマイクロホンやケーブルはアーチファクトが生じるため，胸部装着に骨伝導マイクロホンを想定する．その際，混入する呼吸音や生体音といった MRI 駆動音とは異なるノイズの影響を低減する手法を検討する必要がある．

また，画像による検出法では，コロナ禍に伴い，感染拡大防止のためにマスクを着用することが必要となっており，医療現場においてもマスクの着用が想定される．マスク着用時には，唇等の動きで発話内容を読み取る従来手法において判断材料として使用されていた口唇情報が取得できなくなる．そのためマスク着用時に適応した口唇情報を必要としない発話検出を目指す．そして最終的には音声と映像の二つの情報を加味したマルチモーダル手法を用いて音声と映像のそれぞれの欠点を補い，精度の向上を目指す．



図 2　MRI 被験者発話検出の概念図

3．計画の進行状況

現のためにさまざまな機械学習のモデルから有効な手法の検討では，再学習の手法について既存する手法を組み合わせて最適なモデルを検討した．

3.1 再学習の有無における認識率の比較

再学習手法の有効なモデルを明らかにするために，再学習なしの CNN モデル，既存手法の HMM モデル，再学習ありの CNN モデルの 3 種類のモデルそれぞれの母音認識率を比較した．深層学習モデルとして 4 つの畳み込み層を持つ計 19 層の CNN モデルを使用した．CNN モデルの構造を図 3 に示す．再学習ありおよび再学習なしの CNN モデル，HMM モデルの認識率を図 4 に示す．ほとんどの SN 比において再学習ありの CNN モデルは他のモデルより認識率が高く，最大で 22%（-6dB）改善した．しかし，再学習に用いたデータの SN 比（-12dB）に近いところでは認識率の改善が見られたが，学習条件が異なると改善量

TOPへ戻る

は減少し，検査時の MRI 駆動音(T1W)の SN 比 12dB の時には再学習なしのモデルの認識率が高かった．このことから，撮像法の違いによる認識率の低下に対して，検査時に作成したデータを用いて再学習を行うことは有効ではあるが，再学習に用いるデータの SN 比は，認識対象とする音声の SN 比に合わせる必要がある．

Layer type	Output shape
melspectrogram input	40×100×1
Convolution2D	40×100×32
Batch Normalization	
ReLU	
MaxPooling	20×50×32
Convolution2D	
Batch Normalization	
ReLU	
MaxPooling	10×25×32
Convolution2D	10×25×64
Batch Normalization	
ReLU	
MaxPooling	5×12×64
Convolution2D	
Batch Normalization	
ReLU	
MaxPooling	2×6×64
Fully Connnected	1×256
Softmax	1×4
Class Output	

図 3　CNN モデルの構造

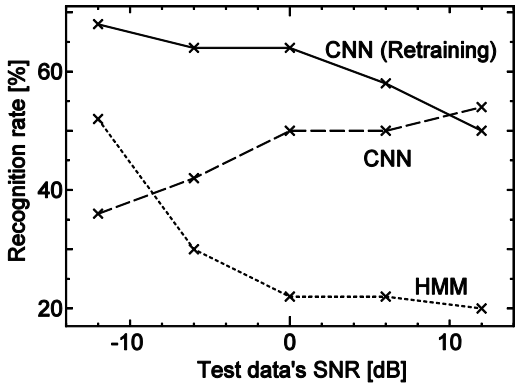


図 4　T1W を重畳した骨導音声の認識結果

3.2 再学習の有無における検出率の比較

被験者の発話内容に関わらず被験者の音声を検出した場合に検査を中断する状況を考慮した検出率という評価指標を用いて検討する．再学習ありの CNN モデルと再学習なしのモデルを比較し再学習の効果を調査する．再学習なしの CNN モデルの混合行列を図 5 に示し，再学習ありの CNN モデルの混合行列を図 6 に示す．

どちらのモデルも母音音声を MRI 駆動音と誤認識はなく，被験者発話の取りこぼしはなく，発話の検出率が高かった．再学習モデルで検出率が高かった要因は，検査時の MRI 駆動音と事前学習に用いた MRI 駆動音の特徴が異なり MRI のラベルにおける尤度が低いためであると考えられる．そのため，再学習なしのモデルは認識結果が母音の/e/に集中しており，検査時の MRI 駆動音は母音音声として認識されている．これに対して再学習ありのモデルは検査時の MRI 駆動音の特徴を学習しているため，MRI 駆動音を母音音声として誤認識することはなく，発話の湧き出し誤りが抑制できている．

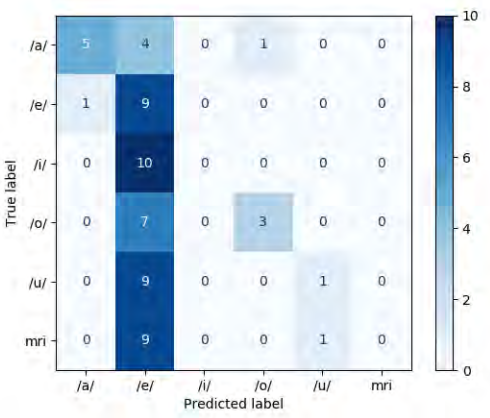


図 5　再学習なしの CNN モデルの混合行列

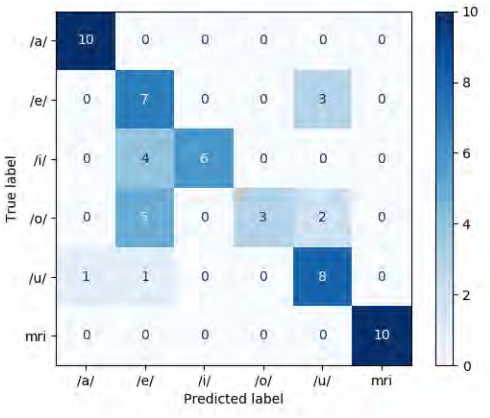


図 6　**再学習ありの CNN モデルの混合行列**

3.3 マルチモーダル発話検出に向けた取り組み

音と映像を用いたマルチモーダル MRI 被験者音声検出に向け，音と映像を用いたマル

TOPへ戻る

チモーダル深層学習を用いた研究を行なってきた[6,7]．運河沿いにおける音響イベント検出において，図 7 に示すような音と映像から CNN モデルを用いて個別に抽出した特徴量ベクトルを結合して全結合層に入力，学習するモデルを用いることで音または映像を単体で学習した場合を超える精度で音響イベント検出を実現したほか，CNN モデルと RNN モデルを組み合わせて時系列情報を考慮した学習を行うことで誤認識を減らし，安定した検出を行うことができることを確認した．

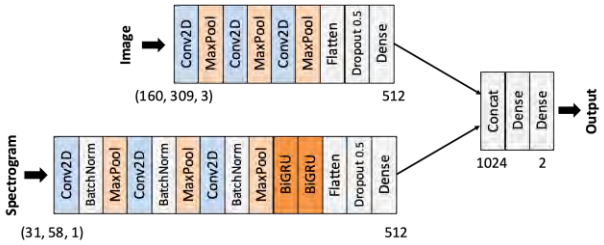


図 7　マルチモーダルイベント検出モデル

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 MRI 駆動音が混入する被験者の声を機械学習技術により検出して医師に通知するシステムの構築であり，本年度は有効な機械学習の手法の検討である．ここでは，深層学習における CNN による MRI 騒音下の音声検出を行い，その中で撮像法の違いに適応できる再学習手法を検討し，再学習を行うことによって性能向上を確認した．しかし，骨伝導マイクロホンを使用する場合，装着部位によっては呼吸音や生体信号等が混入し，精度低下の原因となる．今後は，呼吸音等の雑音を考慮したモデル学習法の検討とノイズ除去や音源分離といった多様な方面の音声認識における騒音対策を検討する．また，検査時の再学習における教師データや学習コストの削減を検討する．

MRI 被験者の発話検出をマルチモーダル発話検出の取り組みでは，従来法を組み合わせた手法の検討を行い，音と映像の時系列処理で性能評価を行った．今後は，映像面では，マスク着用時の発話検出における最適な映像データの検討を行う．そして，音を用いた再学習モデルと組み合わせた性能評価を行う．特に，頭部検査時に胸部や背部に骨伝導マイクロホン信号に混入する呼吸音や生体音に対して被験者の音声をより高品質で取得できる装着部位の検討を行う．

発表状況は，学術雑誌 1 編の技術資料と 3 件の国内大会報告である。今後はこれらをまとめて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] 清水公治：Q&A コーナー（コーヒーブレイク），日本音響学会，Vol.59,p.747,2003.
[2] 武藤憲司：MRI 検査環境における骨導音の利用，騒音制御, Vol.46, No.2, pp.65-69, 2022.
[3] 小島宏明：音による見守りシステム，日本音響学会誌，Vol.75，pp.544-550，2019.
[4] 佐野将太，村上史尚，川喜田 佑介，宮崎 剛，田中 博：特定の騒音環境下における音声認識のためのノイズ除去の検討と評価実験，信学技報，Vol.121，No.41，SeMI2021-2，pp.5–10，2021.
[5] 若松奏，庭山耕平，武藤憲司，小林洋介：CNN を用いた MRI 騒音下における被験者音声の検出法，日本人間工学会関東支部第 27 回卒業研究発表会, C-10, pp.78-79, 2021.
[6] 庭山耕平，武藤憲司，小林洋介：船舶検出 CNN モデルのための音と映像を用いた教師データの比較検討，日本音響学会春季研究発表会, 1-1P-1, pp.305-306, 2022.
[7] 庭山耕平，武藤憲司，小林洋介：船舶検出のための CRNN を用いた時系列情報学習の有効性の検討，電子情報通信学会総合大会, A-5-9, p.41, 2022.

TOPへ戻る

A novel approach to domain adaptive imitation learning

情報通信工学科　Phan Xuan Tan

1. Paper introduction

Reinforcement Learning (RL) is an effective method to solve sequential decision making tasks, where a learning agent interacts with the environment to improve its performance through trial and error. RL has achieved exceptional success in challenging tasks such as object manipulation, game playing, and autonomous driving. Besides its remarkable advancement, RL still faces appealing difficulties caused by the need of a reward function. For each task that the agent has to accomplish, a carefully designed reward function must be provided. However, these hand-crafted reward functions may cost too much time or expense, especially in complex tasks. This problem has motivated a number of studies on Imitation Learning (IL), where the learning agent tries to first estimate a reward function using expert-generated demonstration data and then learns an optimal policy from that estimation. IL has achieved success in numerous tasks including robotics control and autonomous driving. Despite RL and IL achievements, they are designed to focus on accomplishing a single narrowly-defined task. When faced with a new task after learning a previous one, the agent has to learn the second task from the ground up, even if both tasks are related and share the same structure. On the other hand, humans are capable of efficiently generalizing the learned knowledge and leveraging that to solve such related tasks in a short time. Transfer learning (TL) is a technique based on this idea. It reuses knowledge learned from the source task to facilitate learning a new target task, resulting in a more generalized agent. Recent studies [ref] have applied TL and achieved some success, especially in robot manipulation tasks since these tasks usually share a common structure (i.e., robot arm). Although TL has been broadly studied in RL, it is an emerging topic in IL. Moreover, while some level of success has been achieved, there is still an enormous difference between human ability and TL. Since the goal of TL is to leverage the learned knowledge to accelerate the acquisition of the new target task, the final performance on the target task may improve in exchange for the performance on the source task. In other words, the

TOPへ戻る

agent forgets how to perform the previously learned task when learning a new one, a problem known as catastrophic forgetting.

To address this problem, in this study, we propose a novel adaptation algorithm which allows an agent to expand and to repeatedly review the learned knowledge. In addition, to support the expansion of the learned knowledge, a novel agent is also proposed, which is capable of turning the knowledge learned from source task into a the so-called task embedding space. As the result, the learning performance on the target task is high, while the one on the source task is efficiently kept stable.

2. Research program

Before describing the main proposal, the problem formulation is introduced. we formalize the task adaptation in imitation learning as a Markov decision problem. A Markov Decision Process (MDP) Mx for a task x with finite time horizon Hx is represented as the following equation:

$$Mx = (Sx, Ax, Px, Rx, \gamma xHx)$$

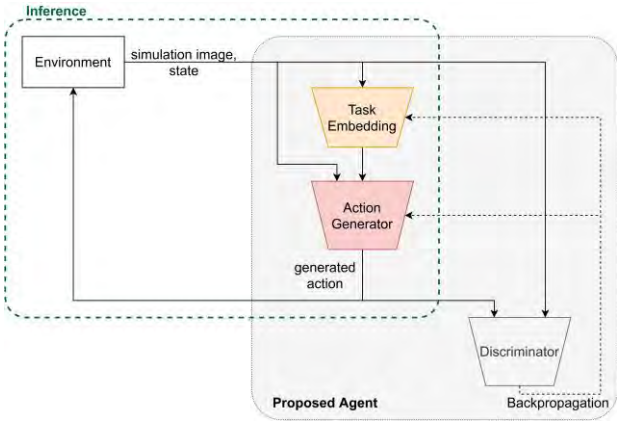
where Sx and Ax are the state and action spaces, respectively; Px : Sx × Ax × Sx → R+ denotes the transition probability function; Rx : Sx × Ax → R is the reward function; and $\gamma x \in (0, 1]$ is the discount factor. In IL setting, the reward function Rx is assumed to be unknown. A stochastic policy πx : Sx → P(Ax) for Mx describes a mapping from each state to the probability of taking each action. The goal in IL is to learn an optimal policy that imitates the expert policy E given demonstrations from that expert Ex. A demonstration for a task x is defined as a sequence of state-actions pairs

$$\pi x \quad \tau x = \{(stx, atx) : t \in [0, T]\}.$$

Let MS denote a source task, which provides prior knowledge KS that is accessible by the target task MT, such that by leveraging the information from KS, the target agent learns better in the target task MT, compared with not utilizing it. Our main objective is to learn an an optimal policy for both source and target tasks, by leveraging exterior information KT from MT as well as interior information KS from MS.

In order to achieve high learning performance on the target task, while avoiding the deterioration of those on the source task, the proposal is two-fold. First, we introduce a novel adaptation algorithm which is inspired of repetition learning in neuroscience. The main point in this algorithm is the manipulation of a hyperparameter which denotes how many percentages of chance the agent receives demonstration data on the source task. The higher value of this hyperparameter, the more the agent can review the previously learned knowledge. As the result, a smaller reduction in learning performance is found.

TOPへ戻る



The architecture of the proposed agent

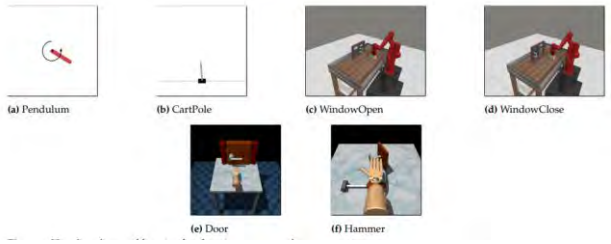
In addition, the adaptation algorithm has ability of knowledge expansion. More concretely, the knowledge learned on the target task will be "placed" on the top of the one learned on the target task.

To support the expansion of learned knowledge, we propose a novel agent, namely TAIL. This agent includes three deep feed-forward networks as shown in figure above:

- Task embedding output a latent vector of a particular state. The task embedding network is trained to store information about the source and target tasks in order to classify which task the state is represented. To do so, the contrastive loss is used, which minimize the distance between vectors that are generated from the same tasks and maximize the distance between vectors that are generated from different tasks.
- Action generator G aims to generate an action using the input latent vector.
- Discriminator D is designed to distinguish between expert action and the action generated by the action generator G. The intuition behind this is the expert behaviors are assumed to be optimal, thus, D is trained to minimize the difference between expert actions generated by G. The adversarial loss will be applied to both G and D networks.

3. State of progress

Currently we have already finished all the experiments to evaluate the performance of proposed method in comparison with various baselines. In the evaluation part, we used six simulated tasks: Penndulum, Cartpole, WindowOpen, WindowClose, Door and Hammer.



Visual rendering of six simulated environments used in our experiment

We evaluated the proposed method within two phases with the comparison with baselines. First, the learning performance on the source task was verified. In this phase, we used Proximal Policy Optimization (PPO) - a reinforcement learning based model and TA-TL a transfer learning model as the baselines. While PPO was trained on the source task and can directly receive the reward feedback from the environment, TA-TL used filted Q-iteration to learn optimal policy on the source task. Second, the learning performance during

TOPへ戻る

adaptation process is evaluated. In this phase, fine-tuning was applied into our method and PPO to generate two baselines, in addition to TA-TL.

The simulated results demonstrate that our proposed approach outperforms TA-TL in all cases in the first evaluation, while is slightly lower than PPO. This is understandable since PPO is a reinforcement learning approach. Meanwhile, in second evaluation, our proposed approach completely outperform all the baseline. This indicates that the proposed approach which is inspired of repetition learning in neuroscience is extremely efficient.

４. Future program, paper submission and results briefing

Thanks to the great support of linked Kakenhi FY2021, we have successfully finished all the experiments regarding this study. The results are positive. Based on that, a paper is currently under the final stage of writing. It will be very soon submitted to (journal) Sensors (indexed in SCIE with IF = 3.576)

TOPへ戻る

ドープと同時に触媒除去を行う
低抵抗グラフェン形成プロセスによる高周波デバイス作製

電子工学科　　上野　和良

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

多層グラフェン（MLG）は、集積回路等の電子デバイスの電極・配線に現在用いられている銅（Cu）などの金属に比較して、高い電流密度耐性や長い平均自由行程から、次世代の高信頼、低抵抗の電極・配線材料として期待されている。またインターカレーションした多層グラフェン（I-MLG）では、図１に示すように、キャリアの散乱が少ないグラフェンの特徴から生じる力学インダクタンスの効果で、通常の金属よりインダクタンス密度が高く、IoT デバイスの小型・高性能化につながるなど、高周波デバイス材料としても注目されている。現在までに高品質のグラファイト結晶から剥離した理想的な MLG を用いた実験で、高インダクタンス密度の原理検証が行われているが、原理検証に用いられた MLG は量産に適さず、実用化に向けた製造方法の構築が課題である。MLG 成膜法の中で、ニッケル（Ni）などの触媒を用いた熱 CVD 法は、大面積で高品質な MLG 膜を形成でき、実用化に適しているが、CVD 成長に用いた触媒層の Ni が残留するという課題がある。そこで、本研究では、CVD 後に低抵抗化のためのドーピングと同時に Ni 触媒層を除去する新たな製造方法を構築することを目的とする。

２．研究計画

本研究では図２に示すようなプロセスフローの構築を目指す。まず基板上にインダクタなどのデバイスの形状に Ni 触媒パターンを形成する。次に Ni パターン上に選択的に熱 CVD 法によって、MLG を成長する。次にその MLG に、低抵抗化のため、五塩化モリブデン（$MoCl_5$）のインターカレーションドーピング（以下、インターカレーション）を行う。この工程では、化学反応によって生じた塩素ガスによって、Ni のエッチング反応も生じるため、ドーピングによる MLG の低抵抗化とともに、Ni 触媒層の除去が期待できる。

このプロセスフローの構築のためには、Ni パターン上への高品質の MLG 膜を選択的に形成するプロセス、形成した MLG パターンに高濃度の $MoCl_5$ インターカレーションを行うと同時に Ni 除去を行うプロセスを開発する必要がある。今年度、そのようなプロセスが構築可能か検討を行った。

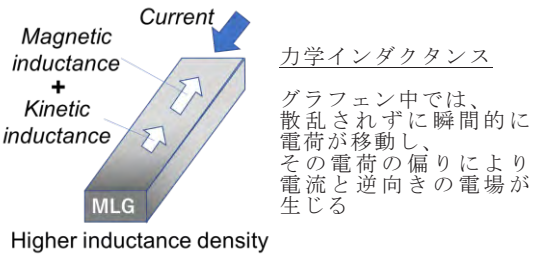


図 1. I-MLG における力学インダクタンスによるインダクタンス密度増加の模式図.
（通常の金線での磁気インダクタンスに加えて I-MLG では力学インダクタンスが加わる）

TOPへ戻る

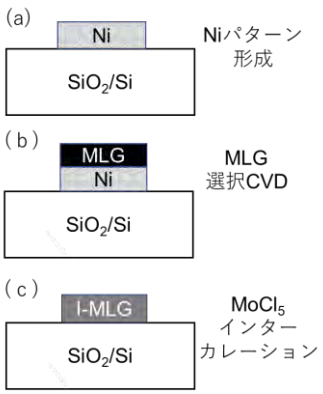


図２．本研究で検討する高性能 MLG デバイスの実用化を目指したプロセスフロー.

３．計画の進行状況

まず図 2 に示した工程において、MLG の選択熱 CVD および $MoCl_5$ インターカレーションのプロセスを個別に開発した。

その後、それらを組み合わせて、CVD で形成した MLG パターンへのインターカレーションドーピング（以下、インターカレーション）を行った。組み合わせプロセスは、最初はステンシルマスクを用いて Ni パターン形成を行ったが、ステンシルマスクによる影の部分で、Ni 膜厚が薄くなる問題が生じたため、フォトリソグラフィによる Ni パターン形成を用いて改善を行った。

構築したプロセスフロー用いて、ドープした MLG/Ni パターンの抵抗を Transmission Line Method（TLM）を用いて評価した。

さらに、高周波デバイスとしてスパイラルインダクタの作製を目的として、マイクロメータ幅のインダクタパターンの CVD 成長条件の最適化を行った。

以下にそれらの成果について、図を用いて説明する。

3.1　$MoCl_5$ インターカレーション

インターカレーションは図 3 に示すように、2 次元結晶であるグラフェンが縦方向に積層した層間に分子を挿入することで、分子がグラフェン層から電子を引き付け、不足した電荷分が正の電荷を持つキャリアとして伝導することで導電性を持つ。このキャリアドーピング効果とともに、インターカレーションによりグラフェン層間の間隔が拡がり、層間の電気的な相互作用が弱まって、単層グラフェンと同様のキャリア伝導特性を持つようになる。インダクタンス密度の高い MLG を得るには、この I-MLG の形成が必須であり、本研究では図 3 に示すような装置を開発し、原理検証で用いた臭素（Br_2）より安定性に優れる $MoCl_5$ インターカレーションを行った。

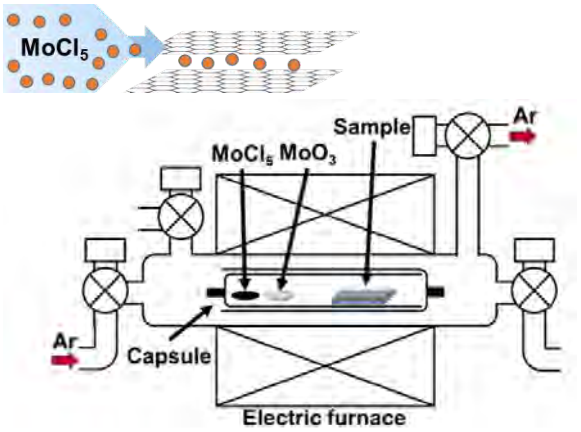


図 3. $MoCl_5$ インターカレーションと開発したインターカレーション装置の模式図.

$MoCl_5$ インターカレーションによる MLG の抵抗低減効果を図 4 に示す。プロセス時間を長くするに従って、ドーピング濃度が上昇し、抵抗低減効果も高くなることがわかる。図 4 に示すように、インダクタの原理検証に用いた Br_2 と同程度の抵抗低減が得られた。

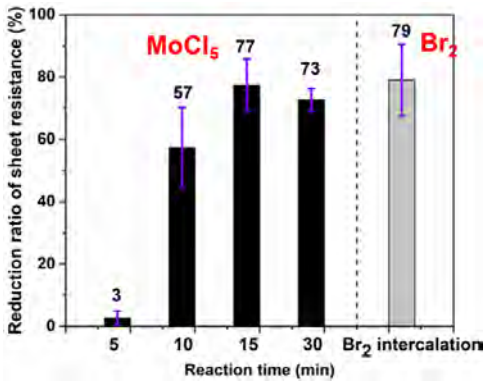


図 4.　$MoCl_5$ ｲﾝﾀｰｶﾚｰｼｮﾝの抵抗低減効果.

TOPへ戻る

3. Ni パターン上への MLG 選択成長と $MoCl_5$ インターカレーション

3.1 の検討では、理想的な高品質 MLG のモデルとして高配向熱合成グラファイト(HOPG)を剥離した薄膜を用いたが、実用化に向けて CVD で選択的に Ni パターン上に MLG を堆積し、$MoCl_5$ インターカレーションを行った。

図 5 は、フォトリソグラフィにより加工した幅 1 ㎜から 2 ㎜の Ni パターン上に CVD 成長した MLG 膜のラマンスペクトルで、グラファイト結晶構造に由来する G バンドと、結晶欠陥に由来する D バンドの比（G/D 比）が 50 を超える大変結晶性の良い MLG 膜が得られた。

図 6 は、CVD で堆積した MLG 膜に $MoCl_5$ インターカレーションを行った I-MLG のラマンスペクトルで、3.1 で示した高品質グラファイト膜と同様に高濃度のドーピングができていることを示している。

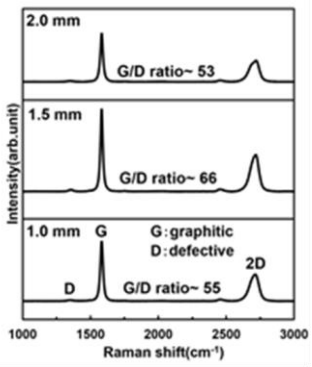


図 5.　Ni パターン上に選択的に堆積した MLG のラマンスペクトル.

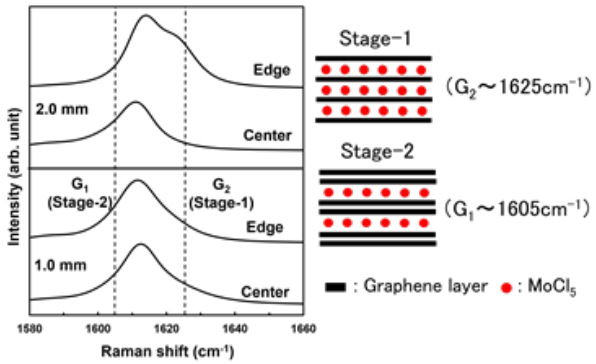


図 6. $MoCl_5$ インターカレーション後の CVD による I-MLG 膜のラマンスペクトル.

ドーピングによる MLG/Ni パターンの抵抗低減効果を調べるため、図 7 に示すように TLM パターンを作製し、ドーピング前後の抵抗変化を評価した。その結果、1 ㎜幅と 1.5 ㎜幅ではドーピング後に抵抗低減が見られ、ドーピングにより MLG の抵抗が低下したと考えられる。2 ㎜幅においては抵抗低減が見られず、Ni エッチングの影響が考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。

さらに高周波デバイスへの応用を目指してマイクロメータ幅のインダクタパターンの CVD を行った。図 8 は、試作したインダクタパターンの一例で、前記の技術を用いて良好なインダクタパターンが形成できた。

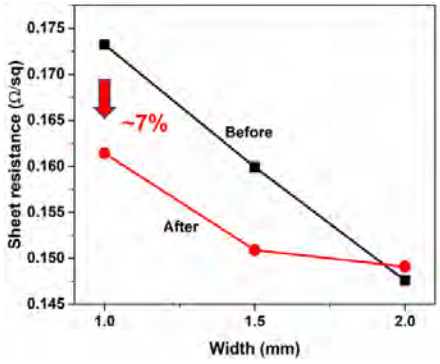


図 7.　ドーピング前後のシート抵抗比較.

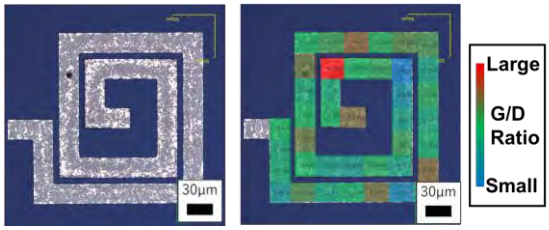


図 8.　CVD により形成した MLG インダクタ.

以上のように、実用化につながるプロセスフローにより、ドープ MLG/Ni パターンを形成し、MLG の低抵抗化が確認できた。また、選択 CVD により、マイクロメータ幅のスパイラルインダクタが形成できた。一方で、インターカレーション中に Ni 層が部分的にエッチングされたが、すべてを除去することはできなかった。Ni を完全に除去するには、プロセス条件の検討がさらに必要である。また、Ni 層は磁性を有するため、磁気インダクタンスを向上する効果も考えられ、MLG/Ni 積層構造

TOPへ戻る

の応用可能性についても検討の余地がある。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後、3 で述べた課題の解決に向けて、Ni 膜厚や $MoCl_5$ インターカレーションのプロセス条件を検討し、Ni のさらなるエッチング除去が可能か検討する。また、Ni を残した MLG/Ni 構造について、電気的特性や高周波特性を評価し、その特性に応じた応用の可能性についても検討する。

以下に 2021 年度に実施した本研究に関係する論文・発表を示す。

[論文（査読あり）]

1) E. Ketsombun, K. Ueno, “Optimization of $MoCl_5$ intercalation for low-resistance and low-damage exfoliated highly-oriented pyrolytic graphite”, Microelectronic Eng. **252**, 111666 (2022).
2) 上野和良，“ナノカーボンのインダクタおよびメタライゼーションへの応用”，エレクトロニクス実装学会誌 **24**、410 (2021)。
3) K. Ueno, “Present status and prospect of graphene interconnect applications “, Trans. IEICE E105-C, to be published (2022).

[国際学会（査読あり）]

1) E. Ketsombun, T. Akimoto, K. Ueno, “Fabrication of highly doped MLG patterns using selective CVD and $MoCl_5$ intercalation”, Proc. IEEE Int. Interconnect Technology Conf., 2021, PS-1-11.
2) R. Hasumi, K. Ueno, “Selective CVD of uniform multilayer graphene on Ni catalyst pattern”, Proc. Advanced Metallization Conference, Asian session, 2021, 5-4.
3) K. Ueno, “Present status and prospect of graphene interconnect applications (invited) “, 2021 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2021), B4-1, https://www.ieice.org/es/sdm/jpn/awad2021
4) K. Ueno, “Advances in graphene processes for metallization and high frequency devices (invited)”, Proc. 14th Int. Symp. Advanced Plasma Sci. and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 15th Int. Conf. Plasma-Nano Technology & Sci., Jpn. Soc. Appl. Phys., 2021, 07pD031.

[国内学会他（査読なし）]

1) 大山嵩太，E. Ketsombun，上野和良，“フォトリソグラフィで形成した Ni パターンへの選択 CVD による高濃度ドープ MLG パターン形成”，第 85 回半導体集積回路技術シンポジウム，2021，P8.
2) 蓮見玲乃，上野和良，“パターン Ni 触媒を用いた多層グラフェンの選択 CVD 成長”，2021 年電気化学秋季大会 S 13 電子材料及びナノ機能素子，2021. 1I04.
3) 松永健太，秋本知輝，ｹﾄｿﾝﾌﾞﾝ ｴｯｶﾌｫｯﾌ，上野和良、“ドープ多層グラフェンを用いたパッチアンテナの作製”，電気化学会第 89 回大会 S19 電子材料及びナノ機能素子技術，2022，1 R15 .
4) 大山嵩太，上野和良，“選択 CVD による高濃度ドープ多層グラフェンパターンの形成”，第 1 回グリーンエレクトロニクス国際シンポジウム，SIT，2022.
5) 蓮見玲乃，上野和良，“選択 CVD による多層グラフェンインダクタパターンの形成”，第 1 回グリーンエレクトロニクス国際シンポジウム，SIT，2022.

TOPへ戻る

ニューロマーケティングアプローチによる観光画像評価と訪日観光プロモーションに関する研究

工学部電子工学科　村上嘉代子

共同研究者
デジタルハリウッド大学大学院　山崎敦子
広島大学情報メディア教育研究センター　Muhammad Nur Adilin Mohd Anuardi
北陸学院大学短期大学部コミュニティ文化学科　沢田　史子
芝浦工業大学工学部機械機能工学科　中村　真吾

1. 序論（はじめに，まえがき，目的）

訪日観光客は年々増加していたが、2020 年の COVID-19 のパンデミックにより激減した[1]。しかしながら、このパンデミックが収束した際に訪日観光客数の回復と、新たな訪日観光客を集客するため、観光動機につながるプロモーションをオンライン上で行っていく必要がある。

SNS や観光ウェブサイトにおいて、写真や動画、スライドショーなど様々な形態の画像が使用されているが、静止画と動画、また写真の中でもどのような特徴によって観光動機を引き付けるのかについては、明らかにされていない。掲載する写真や動画については観光産業でプロモーションを担う担当者のノウハウによるところが大きい。また、近年、ニューロサイエンスやニューロマーケティングのような無意識下での心理や行動を分析する研究が注目されているが[2]、これまで観光分野においてはこれらのアプローチを活用した研究成果は乏しく、今後期待を寄せられている。

本研究の目的は、訪日観光活性化に寄与するため、SNS やウェブサイトにおいて観光動機を促す画像の特徴を明らかにし、より効果的な訪日観光プロモーション方法を提案することである。

本研究は 3 年間の期間を要する研究であるが、1 年目である 2021 年度は、静止画と動画の印象評価について外国人と日本人の評価の違いについてアンケート調査を行った結果と、その結果を踏まえて、写真（静止画）の構図についての印象評価のためのアンケート調査を行うことを目的とした実験デザインの設計を行った。これらを本報告書にてまとめた。

2. 研究計画

本研究では、まず、静止画と動画の印象の違いを評価する。制作コストを考えると静止画（写真）をウェブサイトに掲載するほうが動画よりは費用が掛からない。しかし、動画には一度に伝えられる情報量が多い。それぞれのメリットがあるが、日本の観光景観画像において、静止画と動画のどちらがより効果的であるかを検証するため、日本語と英語のアンケートを作成してウェブ上にて被験者に印象を評価してもらう。また、コストパフォーマンスに優れた静止画（写真）において、効果的な構図についても印象評価を行う。日本料理と観光景観の写真を様々な角度や構図で撮影したものを用意し、静止画と動画の比較と同様にこれらの評価も被験者にウェブ上

TOPへ戻る

で行ってもらう。評価方法には SD 法（Semantic Differential method）と呼ばれる相反する形容詞対を用いて測定する方法を用いる。

更に、意識下と無意識下において、これらの印象の違いが異なるかについても検証を行う。アンケートという主観的な評価で意識下における印象を計測し、光トポグラフィ（Near-infrared spectroscopy, NIRS）を用いて脳血流量や心拍といった客観的な指標で無意識下における変化を計測する。

これらのアンケート実験結果と脳血流量変化や心拍との関連について分析する。客観的、主観的な面から結果を合わせて分析することで、旅行者が興味を持つ観光画像の特徴を明らかにし、さらに旅行者の属性や国籍によってその違いがあるかを解明していく。

これらの実験・分析結果に基づき、実証実験を行う。自治体（那須町）の SNS 上に実験結果から得られた特徴を持つ写真を載せて反響を観察する。Facebook に載せた場合、いいね数、シェア数、コメントの分析を行い、コメントは言語別にデータを分析する。

以上が本研究の大きな流れであるが、本研究の 1 年目に行った、観光画像の静止画と動画の印象を日本語と英語のウェブサイトで被験者による評価を行った結果と、日本料理の写真の評価基準の設定や実験デザインの設計の概要を述べる。

3. 計画の進行状況

訪日外国人数を増加するためにも、ターゲットに合ったプロモーションが必要である。図 1 は 2015 年から 2019 年までのコロナ禍になる前の訪日外国人の上位国をまとめたものである。本研究では静止画と動画の印象評価アンケートを英語化し、日本人以外に、訪日外国人数の上位を占める中国人、タイ人、マレーシア人に対してアンケート実験を行った。

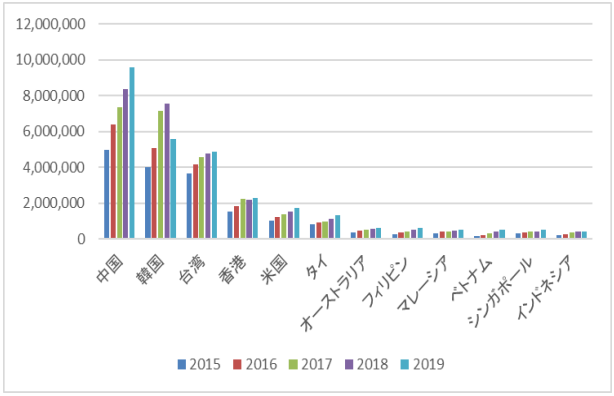


図 1.　2015 年から 2019 年の訪日外国人客数上位国

出典：日本政府観光局（JNTO）参考文献[1]を基に作成

被験者数は、日本人が 84 名（男性 71 名、女性 13 名）、中国人が 15 名（男性 11 名、女性、4 名）、タイ人は 7 名（女性のみ）、マレーシア人は 9 名（男性 4 名、女性 5 名）の、計 115 名である。印象評価に用いた日本の観光景観画像を図 2 に示す。

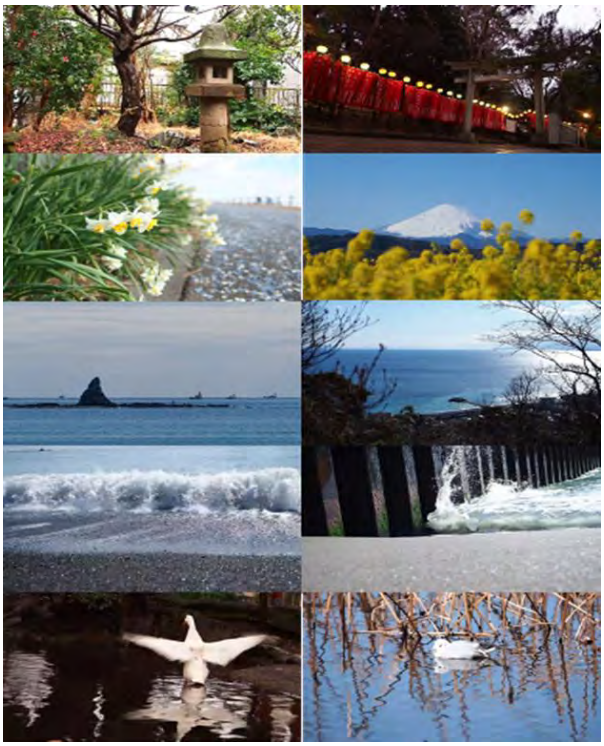


図 2. 静止画と動画の印象評価用の日本の観光景観画像

これら 10 の景観画像をそれぞれ静止画と動画で用意し、静止画 10 枚、動画 10 枚の印

TOPへ戻る

象評価を表 1 の SD 法アンケート項目によって評価してもらった。表 1 の SD 法アンケートの作成には佐々木[3]が用いた指標を参考にした。

表 1. 景観画像（静止画と動画）の評価項目

評価7		評価1
関心がある	⇔	関心がない
行ってみたい	⇔	行きたくはない
好きな	⇔	嫌いな
日常的な	⇔	非日常的な
親近感のわく	⇔	疎遠な
癒される	⇔	癒されない
穏やかな	⇔	刺激的な
安全な	⇔	危険な
素朴な	⇔	しゃれた
伝統的な	⇔	近代的な

SD 法調査のそれぞれの項目の 7 つの評価尺度（「非常にそう思う」を 7、「非常にそう思わない」を 1 とする）ごとの回答平均値を国籍別に算出して、各画像の静止画と動画において違いがあるか、t 検定を行い、主観評価の結果を分析した。

分析した結果は以下のとおりである。

日本人被験者では、各項目の評価点の平均値が全て、静止画よりも動画の方が大きくなることから、一般的に静止画よりも動画の方が伝えられる情報量が多く、動画になり、動きが出たことで持つ印象が静止画よりも動画の方が高くなったのではないかと考える。また、中国人では、石灯篭などの伝統的建築物の景観は動画での有効性も見られたが、その他のほとんどの景観画像では有意差が無かったため、伝統的建築物以外は、静止画を有効に活用できるのではないかと考える。また、タイ人やマレーシア人でも一部の景観画像では動画の方が有効であるような有意差が見られたが、中国人の結果と同様に、多くの景観で有意差は見られず、外国人旅行者には静止画でも有効なプロモーションができるであろうということが示唆された。

これらの結果から、静止画（写真）に置いて、旅行動機を引き起こす、より効果的な構図について、評価実験を行うため、以下のように実験のデザインを行った。

まず、構図を評価するため、訪日外国人旅行者が旅行目的としている日本料理を対象として実験を行う。日本料理としては、典型的な日本料理である、寿司、天ぷら、和牛ステーキ、刺身、うどん、の 5 品を比較することとした。これらの料理の写真には様々な構図が考えられるが、料理の写真として有効と思われている構図を検討した。柿森らの先行研究[4]を参考にし、表 2 のような評価のパラメーターを作成し、これに基づき日本料亭に協力を依頼し、撮影を行った。

表 2. 日本料理写真印象評価パラメーター

料理写真番号　料理名　パラメーター
料理1_寿司①お皿対角＋斜め45度＋皿かけあり
料理2_寿司②お皿対角＋真上＋皿かけあり
料理3_寿司③お皿対角＋横＋皿かけあり
料理4_寿司④お皿正面＋斜め45度＋皿かけあり
料理5_寿司⑤お皿正面＋真上＋皿かけあり
料理6_寿司⑥お皿正面＋横＋皿かけあり
料理7_天ぷら①日の丸+斜め45度
料理8_天ぷら②日の丸＋真上
料理9_天ぷら③3分割＋斜め45度
料理10_天ぷら④3分割＋真上
料理11_ステーキ①日の丸+斜め45度+皿かけあり
料理12_ステーキ②日の丸+斜め45度+皿かけなし
料理13_ステーキ③日の丸+真上+皿かけあり
料理14_ステーキ④日の丸+真上+皿かけなし
料理15_ステーキ⑤3分割+斜め45度+皿かけあり
料理16_ステーキ⑥日の丸+横+アップ
料理17_刺身①お皿対角＋斜め45度＋皿かけあり
料理18_刺身②お皿対角＋真上＋皿かけあり
料理19_刺身③お皿対角＋横＋皿かけあり
料理20_刺身④お皿正面＋斜め45度＋皿かけあり
料理21_刺身⑤お皿正面＋真上＋皿かけあり
料理22_刺身⑥お皿正面＋横＋皿かけあり
料理23_うどん①日の丸＋斜め45度
料理24_うどん②日の丸＋真上+器かけあり
料理25_うどん③日の丸＋真上+器かけなしり
料理26_うどん④日の丸＋斜め45度+アップ

図 3 に示すのは、26 枚撮影したうちの料理写真の一部である。これらを用いて SD 法アンケート項目を作成し、ウェブさんケートの構築を行った。表 3 に示す日本料理の写真に

TOPへ戻る

ついての SD 法の項目は、先行研究[5-6]を参考に作成している。



図 3. 写真の構図印象評価アンケートに用いた日本料理写真の一部

表 3. 料理写真の評価項目

評価7		評価1
食べたい	⇔	食べたくない
おいしい	⇔	まずい
好き	⇔	嫌い
美しい	⇔	醜い
鮮やかな	⇔	地味な
高級な	⇔	安っぽい
洗練された	⇔	粗野な
繊細な	⇔	大まかな
熟練した	⇔	未熟な
心がこもっている	⇔	心がこもっていない

4. 今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

今後の計画としては、無意識下の実験である、NIRS を用いた脳血流量や心拍の変化を測定する実験のための被験者募集を行い、実験実施、結果の解析と分析を行っていく。また、アンケート評価については、写真の構図に関しては景観画像の構図についても評価パラメーターを作成し、写真撮影およびウェブサイトの構築を行う。

なお、2021 年度の研究成果は以下の学会、論文で発表された。

（口頭発表 1）2021 年 9 月　高橋瑠依，村上嘉代子，山崎敦子「ニューロマーケティングアプローチによる観光画像印象評価実験」観光情報学会・第 1 回かがのと観光情報学研究会（2021 年 9 月 14 日　於　オンライン）

（口頭発表 2）2021 年 9 月　Rui Takahashi, Kayoko H. Murakami, Atsuko K. Yamazaki, "Experiment to Evaluate Tourism Pictures Using a Neuromarketing Approach," The IEEE ProComm Japan 2021 Workshop, September 21, 2021, Online

（専門誌発表論文 1）Muhammad Nur Adilin Mohd Anuardi, Kayoko H. Murakami, Atsuko K. Yamazaki, Eitaro Watanabe, “A preliminary study of impressions on photo and video sceneries by Japanese and foreign tourists for virtual tourism,” Journal of Global Tourism Research, Vol. 6, No. 2, pp. 143-149, 2021

参考文献

[1]日本政府観光局（JNTO）、訪日外国人客の動向、2022 年 5 月閲覧 https://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/visitor_trends/

[2] 竹村和久「ニューロマーケティングと意思決定研究」オペレーションズ・リサーチ Vol. 61(7), pp.429-434, 2016

[3] 佐々木土師二「観光旅行の心理学」北大路書房、pp94-p99、2007

[4]柿森隆生、岡部誠、尾内理紀夫「おいしそうな料理写真撮影を支援するシステムの検討」情報処理学会第 56 回 プログラミング・シンポジウム、pp. 131-141、2015

[5]大富あき子「アップルパイに対するイメージ調査」鹿児島純心女子短期大学研究紀要第 39 号 pp.141-149、2009

[6]竹澤智美「ケーキの写真のおいしさの印象とレンズの焦点距離および撮影角度」立命館人間科学研究第 39 号 pp. 39-48、2019

TOPへ戻る

強度発現による不確実性がセメント改良地盤の全体性能に与える影響評価手法の構築

土木工学科　　並河　努

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

深層混合処理工法によるセメント改良地盤の品質管理において、設計基準強度を満たすためのセメント配合量を室内配合試験等の結果に基づき適切に設定し、所定の原位置強度を確保することが要求される。本研究では、室内配合強度から原位置強度を予測する際に生じる不確実性が改良地盤に要求される性能に与える影響を定量的に評価し、室内配合強度より設計に用いる強度の特性値を決定する手法の構築を目的とする。セメント改良地盤の原位置強度の統計パラメータ（平均、標準偏差、自己相関距離）を施工前に推定する際に生じる不確実性を適切な統計手法を用いて評価し、その不確実性がセメント改良地盤の全体性能に与える影響を空間的ばらつきを考慮した FEM 解析（RFEM 解析）により評価する手法を構築する。構築した手法を用いて、室内配合強度に対する強度の特性値に関して議論する。

２．研究計画

本研究では、セメント改良体の原位置強度 q_{uf} の平均 μ_{quf} を室内強度 q_{ul} の平均 μ_{qul} より推定する際に生じる不確実性を適切に評価し、その不確実性が強度のばらつきを有する改良体の全体性能に与える影響を評価できる解析を実施する。そして解析結果より、強度の特性値と μ_{qul} の関係を明らかにすることが本研究の目的となる。本研究での解析手法の概要を図 1 に示す。

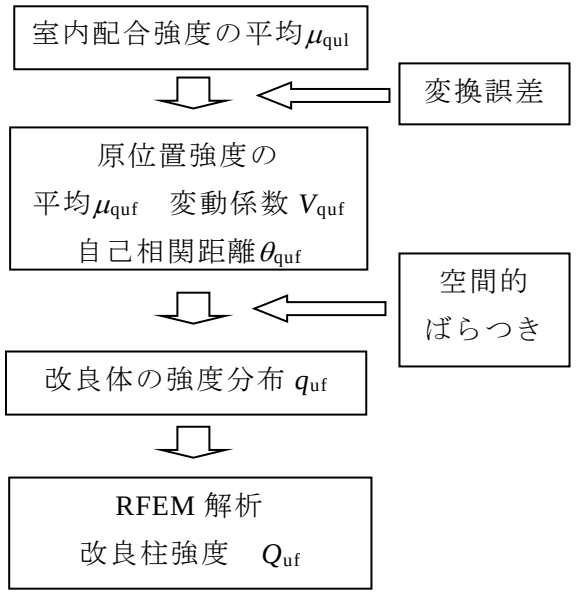


図 1　解析手順

μ_{qul} より μ_{quf} を推定する際に生じる不確実性は変換誤差として取り扱う。また、q_{uf} の標準偏差 σ_{quf} および自己相関距離 θ_{quf} にも不確実性が含まれるが、それらの不確実性は過去のデータより評価する。推定した μ_{quf}、σ_{quf}、θ_{quf} の実現値より q_{uf} の乱数場を生成する。生成した改良体の強度分布を用いて RFEM 解析を実

TOPへ戻る

施することにより、統計パラメータの推定に伴う不確実性を考慮したセメント改良体の全体性能の評価が可能となる。

３．計画の進行状況

深層混合処理工法で構築されたセメント改良体の原位置強度平均μ_{quf}と室内強度平均μ_{qul}の関係を図 2 示す[1)]。図 2 はセメント改良粘土の関係を示している。2021 年度はセメント改良粘土を対象に解析を実施した。

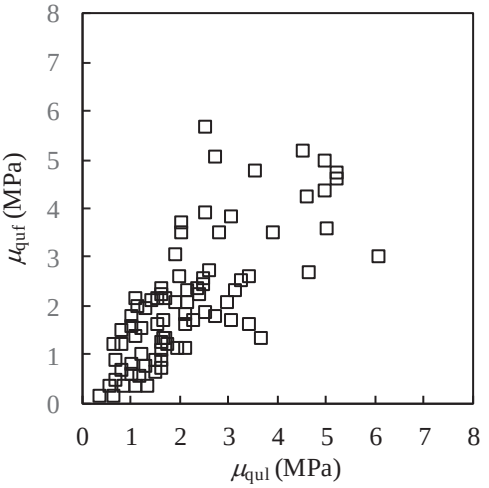


図 2　室内強度平均μ_{qul}と原位置強度平均μ_{quf}との関係（セメント改良粘土）[1)]

セメント改良粘土においてμ_{qul}からμ_{quf}を予測する際生じる変換誤差を図 2 の結果に基づき定量的に評価する。ここで、μ_{qul}とμ_{quf}の関係は線形であると仮定し、μ_{qul}とμ_{quf}の比 R_{quf} = μ_{quf}／μ_{qul}が確率密度関数で表現できると仮定した。本研究では、R_{quf}が対数正規分布に従うと仮定した。図 2 の結果における R_{quf}の経験分布関数を図 3 に示す。図には対数正規分布の累積密度関数を併せて示している。R_{quf}は対数正規分布にほぼ従っていることがわかる。図 2 の結果において、R_{quf}の平均μ_Rは 0.987 で、標準偏差σ_Rは 0.459 であるが、lnR_{quf}の平均μ_{lnR}と標準偏差σ_{lnR}は次式で計算できる。

$$\sigma_{lnR} = \sqrt{ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma_R}{\mu_R}\right)^2\right\}} \qquad (1)$$

$$\mu_{lnR} = ln\mu_R - \frac{1}{2}\sigma_R^2 \qquad (2)$$

(1)、(2)式で算出されるμ_{lnR}とσ_{lnR}より正規乱数を発生させ、その指数を取ることによりR_{quf}の対数正規乱数を発生させた。本解析では、μ_{qul} = 2.0MPa として、R_{quf}の乱数よりμ_{quf}の実現値を生成した。

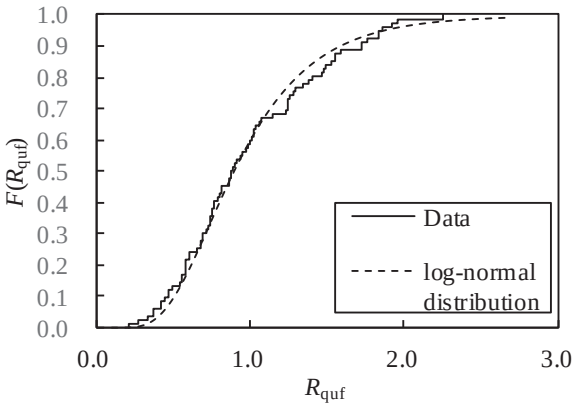


図 3 μ_{qul}とμ_{quf}の比 R_{quf} の経験分布関数

q_{uf}の変動係数 V_{quf}は設計時に不明である。既往の研究では、V_{quf}は 0.15～0.5 の範囲を取ると報告されている[1)]。本研究では V_{quf}が対数正規分布に従うと仮定し、その 95%信頼性区間を 0.15～0.5 とした。この場合、V_{quf}の平均は 0.29、標準偏差は 0.090 となる。深層混合処理工法の設計において、V_{quf}が 0.3 と設定されることも多く、本設定値は妥当な値と考えられる。R_{quf}と同様の手法により V_{quf}の実現値を生成した。

q_{uf} の自己相関距離θ_{quf} は設計時に不明である。既往の研究では、θ_{quf}は 0.1～4.0 の範囲を取ると報告されている[2)3)]。本研究ではθ_{quf}が対数正規分布に従うと仮定し、その 95%信頼性区間を 0.1～4.0m とした。この場合、θ_{quf}の平均は 0.98m、標準偏差は 1.2m となる。R_{quf}と同様の手法によりθ_{quf}の実現値を生成した。

100 のセメント改良柱の実現値に対して RFEM 解析を実施する。このため、μ_{quf}、V_{quf}、θ_{quf}の実現値を 100 生成し、これらの統計パラメータを用いてセメント改良柱の強度分布の乱数場を生成した。

TOPへ戻る

セメント改良柱の q_{uf} の分布は次式に示す多変量正規分布に従うと仮定した。

$$p(\mathbf{q_{uf}}|\mu_{quf},\sigma_{quf}^2,\theta_{quf}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m\left(\sigma_{quf}^2\right)^m|\mathbf{C}|}}\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{quf}^2}(\mathbf{q_{uf}} - \mathbf{\mu_{quf}})^T\mathbf{C}^{-1}(\mathbf{q_{uf}} - \mathbf{\mu_{quf}})\right\} \quad (3)$$

$$\mathbf{q_{uf}} = \begin{bmatrix} q_{uf}(\boldsymbol{r}_1) \\ \vdots \\ q_{uf}(\boldsymbol{r}_n) \end{bmatrix},\ \mathbf{\mu_{quf}} = \begin{bmatrix} \mu_{quf} \\ \vdots \\ \mu_{quf} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \rho_{quf}(\mathbf{d}) = \exp\left(-\frac{[\mathbf{r_i} - \mathbf{r_j}]}{\theta_{quf}}\right)$$

ここで、σ_{quf} は q_{uf} の標準偏差、m は q_{uf} の個数である。(3)式で表現される自己相関を有する乱数場は、covariance matrix decomposition 法により生成した。本手法では、正規乱数に相関行列 **C** の下三角形行列をかけることで、自己相関を有する乱数場を生成することができる。

RFEM 解析に用いた実大セメント改良柱のメッシュを図 4 に示す。直径 1m、高さ 2m の円柱モデルを用いた。モデルを構成する主な要素は 1 辺 100mm の立方体である。

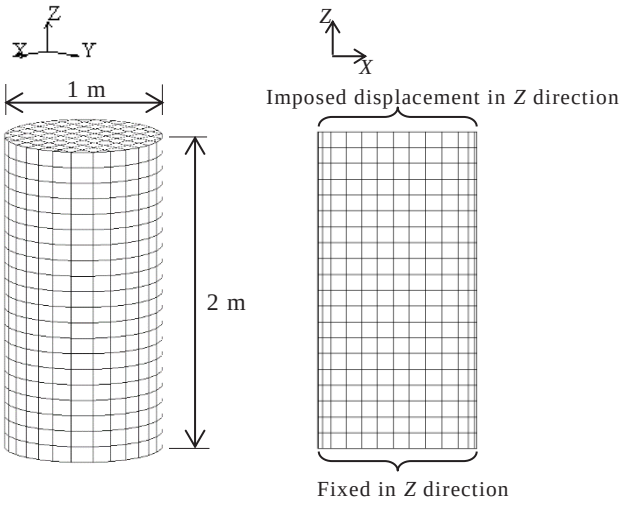


図 4 実大セメント改良柱のメッシュ

解析ではセメント改良土用に開発された弾塑性モデルを用いた[4]。q_{uf} = 2MPa の材料パラメータを表 1 に示す。解析では、要素ごとに q_{uf} が変化するため、材料パラメータは q_{uf} に比例して変化する Stochastic パラメータと、q_{uf} によらず一定値を取る Deterministic パラメータに分かれる。強度に関する材料パラメータはせん断抵抗角 ϕ と粘着力 c であるが、ϕ は 30 度一定の Deterministic パラメータとし、c を q_{uf} に応じて変化は Stochastic パラメータとした。弾性係数 E、引張強度 T_f、破壊エネルギー G_f を Stochastic パラメータとし、その他のパラメータは Deterministic パラメータとした。

表 1 材料パラメータ

Parameter	Stochastic or Deterministic	Value
E (MPa)	Stoch.	3520
ν	Deter.	0.167
ϕ (degree)	Deter.	30
c (MPa)	Stoch.	0.577
T_f (MPa)	Stoch.	0.448
α	Deter.	1.05
e_y	Deter.	0.0002
G_f (N/m)	Stoch.	10.6
e_r	Deter.	0.40
D_c	Deter.	-0.4
t_{s0} (mm)	Deter.	0.6
l_c (mm)	Deter.	100

Note: E = elastic modulus; ν = Poisson's ratio; ϕ = friction angle; c = cohesion; T_f = tensile strength; α = hardening parameter; e_y = hardening parameter; G_f = fracture energy; e_r = softening parameter; D_c = dilatancy coefficient; t_{s0} = localization size; l_c = characteristic length; Stoch. = stochastic parameter; Deter. = deterministic parameter.

100 の実大改良柱の実現値に対して一軸圧縮試験のシミュレーション解析を実施した。解析で得られた実大改良柱の一軸圧縮強度 Q_u の経験分布関数を図 5 に示す。Q_u の平均は 1.64MPa、標準偏差は 0.779MPa であった。

Eurocode7 では信頼性設計に用いる材料パラメータを特性値として定義している[5]。特

TOPへ戻る

性値は地盤の空間的ばらつき、地盤パラメータ設定時の不確実性、各種不確実性、破壊領域を考慮して定めるべき抵抗を表すパラメータである。そして、特性値は破壊確率 5%を基準に設定する。

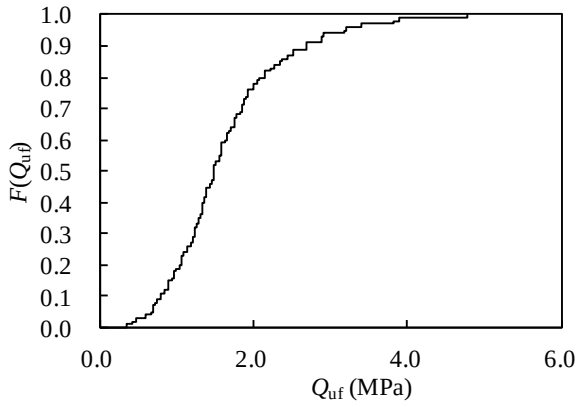


図 5 実大改良柱強度 Q_{uf} の経験分布関数

実大改良柱の強度の場合、RFEM 解析で得られた Q_u の経験密度関数をもとに特性値を設定することができる。図 5 より破壊確率 5%に相当する Q_u の値は 0.66MPa であり、この値が改良柱強度の特性値 X_k となる。μ_{qul} と X_k の関係は次式となる。

$$X_k = 0.33\mu_{qul} \quad (4)$$

本式より、μ_{qul} より設計で用いる X_k を設定することができる。

現行の設計法の場合、R_{quf} =0.5 とすることが多く、設計基準強度は想定される μ_{quf} の 0.6 程度とされることが推奨されている。この場合、設計基準強度は μ_{qul} の 0.3 程度となる。このことより、現行設計法における設計基準強度は本研究で算出された改良柱強度の特性値とほぼ一致することが明らかとなった。

４．今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

今後は、開発した手法を用いて様々な境界値条件に対する改良体の μ_{qul} と X_k の関係を評価する。具体的には、セメント改良柱の自立山留め壁、盛土のセメント改良支持杭などの用途に対して、破壊モード及び破壊領域を考慮した μ_{qul} と X_k の関係を評価する。

本研究の内容は Soils and Foundations 誌（IF=2.436）へ投稿する予定である。また、本研究に関係する内容の論文が Canadian Geotechnical Journal （IF=3.725）に掲載された [6]。

参考文献

1) Kitazume, M. and Terashi, M. 2013. The deep mixing method. CRC Press, Taylor & Francis Group.

2) Namikawa, T. and Koseki, J. 2013. Effects of spatial correlation on the compression behavior of a cement-treated column. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **139**(8): 1346-1359.

3) Honjo, Y. 1982: A probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method. *Soils and Foundations*, **22**(1), 23-38.

4) Namikawa, T. and Mihira, S. 2007: Elasto-plastic model for cement-treated sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **31**(1), 71-107.

5) CEN 2004. EN 1997-1:2004: *Eurocode 7*: Geotechnical design part 1. *Brussels*: European Committee for Standardization.

6) Namikawa, T. 2022: Influence of statistical sample size on evaluation of overall strength of cement-treated soil column. *Canadian Geotechnical Journal*, **59**(1), 74-86.

TOPへ戻る

昆虫標本の表面詳細形状および内部構造を含めたデジタルデータ化手法

情報工学科　井尻 敬

1．はじめに

昆虫標本は，文化・教育・自然科学研究などといった幅広い分野に需要を持つ．しかし，昆虫標本は長期保存に伴い劣化し，また，その保存にはスペースを要する．そのため，昆虫標本を計測し，デジタルデータとして記録するいわゆるデジタルデータ化（Digitization）は非常に重要な課題である．

実際，昆虫標本のデジタルデータ化について多くの研究がなされている．例えば，標本ケースの写真を撮影して保存する手法[1,2,3]や，多視点写真よりテクスチャ付き 3 次元形状モデルを構築する手法[4,5,6]などが挙げられる．

我々研究グループでは，2017 年ごろより昆虫標本のデジタルデータ化技術の確立に取り組んでおり，X 線 Computed Tomography(CT)と多視点写真より 3 次元形状モデルを構築する手法[7]（図 1）や，多視点深度合成写真から精密なテクスチャを復元する技術を確立した[8]（図 2）．特に前者の手法では，X 線 CT の利用により，遮蔽に拠らない精密な昆虫標本のモデリングが可能となった．また，後者の手法では深度合成写真の導入により非常に精密なテクスチャの復元が可能となった．

しかし，上述した既存研究では，形状とテクスチャの復元は行われているものの，昆虫標本表面の質感（反射特性）の復元は行われていない．そのため，体表の一部に光沢を有する昆虫標本（図 3）の質感を正確に表現することは困難であった．

そこで本研究では，体長数センチの昆虫標本に着目し，より高精度なデジタルデータ化手法の確立を目指す．具体的には『A.薄い・細い構造の正確な復元手法の確立』『B.表面の反

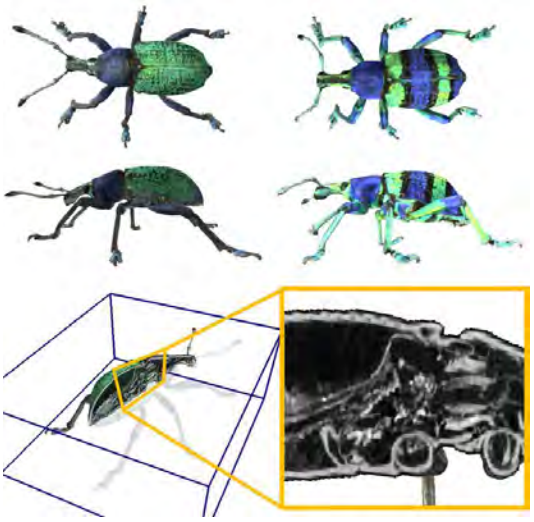


図 1. X 線 CT と写真を利用した小型標本のモデリング手法によるモデル構築例．本図は文献[7]の Fig. 13 および Fig. 14 より引用したものである．

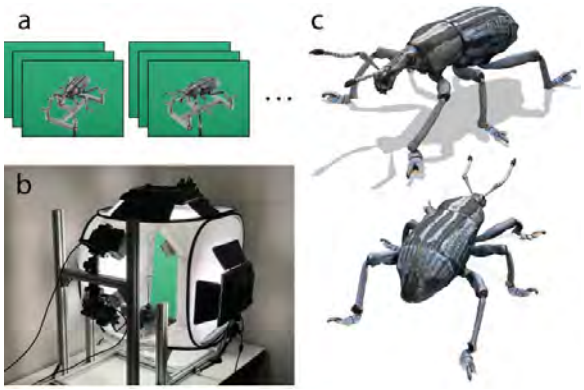


図 2．多視点深度合成写真を自動撮影可能なステージ(b)と，多視点深度合成写真群(a)より生成されたホウセキゾウムシのモデル(c)．本図は，文献[8]の Fig. 3 より引用したものである．

TOPへ戻る

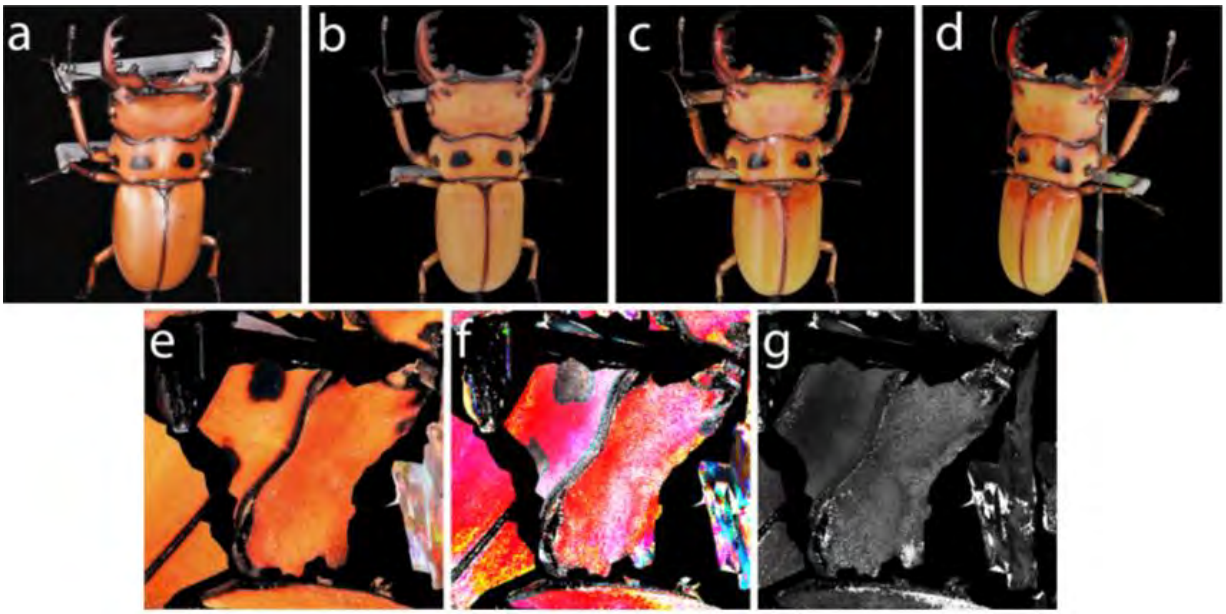


図3. 文献[9]の手法によるクワガタ標本のデジタルデータ化．（a）表面に光沢をもつクワガタの写真，(b）市販ソフトウェアのMetashape で生成したモデルのレンダリング結果，(c, d)提案手法により生成されたモデルのレンダリング結果，(e)Diffise Color マップの拡大図，(f)Specular Color マップの拡大図，(g)Roughness マップの拡大図．本図およびキャプションは，文献[9]の図1より引用したものである．

射特性の計測と復元』『C.内部構造の計測と復元』という三件のサブ課題に取り組む．

２．研究計画

本研究全体では，小型昆虫標本のデジタルデータ化において特に重要だと考えられる 3 件の課題に取り組む．各課題の詳細は以下のとおりである．

課題 A：多視点深度合成写真による詳細形状の高精度フォトグラメトリ法．昆虫の構造に関する前提知識を活用することで，薄い翅・細い脚を含んだ形状を多視点深度合成写真から正確に復元できる 3 次元再構築法（フォトグラメトリ法）を確立する．

課題 B：多視点・多光源フォーカスブラケット撮影による反射特性の推定．光源位置と視点位置を変化させながらフォーカスブラケット撮影を行うことで，テクスチャだけでなく，反射特性（表面粗さマップ）と微細凹凸（法線マップ）を推定できる手法を確立する．

課題 C：X 線 CT 撮影による内部構造のモデル化．造影剤導入等の事前処理を施した標本を作製しこれを X 線 CT 撮影することで，腸管や筋肉などの内部構造を持ったデジタルデータを構築できる手法を確立する．

３．研究の進捗状況

2021 年度は，表面の光沢も復元可能な昆虫標本のデジタルデータ化手法の確立に取り組んだ．詳細を以下に示す．

３．１ 計測とデジタルデータ化の流れ

本研究では，小型の昆虫標本を写真計測し，その『詳細形状』『Diffuse Color マップ』『Specular Color マップ』『Roughness マップ』を取得する手法を提案する．

我々は，LED チューブライトと回転台を利用した撮影環境を構築し，昆虫標本を 360 度回転させながらフォーカスブラケット撮影と深度合成を実施する．得られた複数の深度合成画像に多視点ステレオ法を適用することで標本の 3 次元形状とカメラ位置を復元する．最後に，推定された形状モデルと一連の深度合成画像から Diffuse Color マップ・Specular Color マップ・Roughness マップを推定する．

推定結果を図 3 に示す．既存手法では困難であった表面の光沢を復元できていることがわかる．

TOPへ戻る

３．２ 撮影環境の構築

本研究で構築した撮影装置の模式図と写真を図 4 に示す．撮影装置全体は，外部からの光の影響を受けないよう，卓上暗室の中に配置される．また，光源として LED チューブライトがカメラの左右に対称に配置される 被写体となる昆虫標本は，回転台に固定され，撮影の度に微小角ずつ回転させながら 360° 全方向から撮影を行う．

本研究が対象とする昆虫標本は非常に小さいため，ピンボケのない画像を取得するためには，ピントを変化させながら複数枚の写真を撮影（フォーカスブラケット撮影）し，得られた複数の画像をピンボケのない一枚の画像に合成する処理（深度合成）が必要である．そのため，本研究では，自動フォーカスブラケット撮影機能を搭載した Olympus OM-D E-M1 Mark II とマクロレンズ Olympus M.ZUIKO DIGITAL ED 60mm F2.8 Macro を使用する．

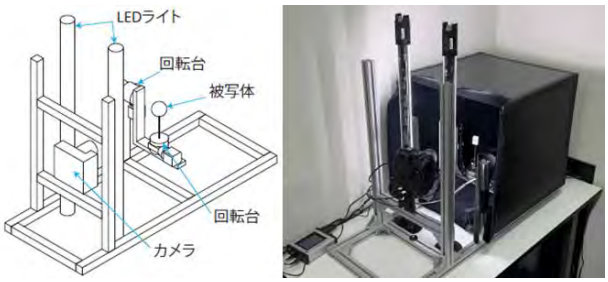


図 4．撮影装置の概略図と実際の装置の写真．この図は，文献[9]の図 2 より引用したものである．

３．３ 形状，テクスチャ，および，表面反射特性の推定

前述の撮影装置を利用して複数の視点からフォーカスブラケット撮影を行った後，各視点において深度合成を行う．続いて，多視点より撮影された深度合成画像群に対し，多視点ステレオ法を適用することで，被写体の 3 次元形状モデル・テクスチャマップ・深度合成画像の視点位置を推定する．

続いて，我々は，3 次元形状モデル表面の 1 次元反射率レスポンス関数を取得する．1 次元反射率レスポンス関数とは，モデル表面上の点(u,v)の上を線形光源 2 本が通過した際に得られるその点 RGB 色である．この 1 次元反射率レスポンス関数$\mathrm{T}_{\mathrm{u,v}}(\theta)$は，点$(\mathrm{u},\mathrm{v})$における法線と光源とのなす角$\theta$の関数として与えられる．この 1 次元反射率レスポンス関数は，撮影の際に設定した回転台の角度をθとし，すべての角度から撮影された深度合成画像を，3 次元モデル上に投影することで取得できる．

鏡面反射を持つ点と持たない点の 1 次元反射率レスポンス関数の例を図 5 に示す．鏡面反射成を持たない点では，1 次元反射率レスポンス関数は正弦波の半周期分と似た波形を示す（図 5a）．一方，鏡面反射成分を持つ場合，2 本の直線光源に対応する 2 つのピークが現れる（図 5b）．

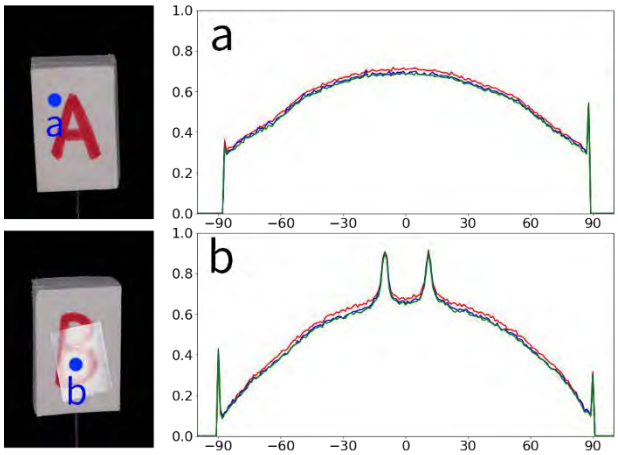


図 5．1 次元反射率レスポンス関数の例．鏡面反射成分を持つ点(a) と持たない点(b) における 1 次元反射率レスポンスのグラフ．利用した物体は，鏡面反射成分を持たないスポンジ状のサンプルに赤の水性ペンで文字 A・B を書き，その一部にセロファンを貼り付けたもの．本図とキャプションは文献[9]の図 3 より引用したものである．

続いて，各点(u,v) について，その質感を推定する．本研究では，モデル表面上の質感は，拡散反射色$\mathrm{k_d}$，鏡面反射色k_s，および表面粗さ値αにより定義される．この推定は，以下の最適化問題として定式化できる，

$$\min_{n,l,\alpha,k_d,k_s} \int ||\mathrm{L}(\theta,n,l,\alpha,k_d,k_s) - \mathrm{T}(\theta)||d\theta.$$

この最適化は，観測された 1 次元反射率レスポンス関数の形をなるべく満たすように，質感に関するパラメータ(α,k_d,k_s)，法線方向n，カメラ光軸と光源のなす角lを決定するもの

TOPへ戻る

である（詳細は割愛する）.

この最適化を解くことで，モデル表面上の任意の点における，拡散反射色k_d，鏡面反射色k_s，および表面粗さ値αを推定できる．これらのパラメータがあれば，モデル表面の色だけでなく，光沢も正確にレンダリングすることが可能となる.

３．４結果

提案手法によりクワガタ標本のデジタルデータ化を行った例を図 3(c, d)に，またホウセキゾウムシ標本と化石標本をデジタルデータ化した例を図 6 に示す．既存手法では考慮されてこなかった光沢を含む質感が再現されていることがわかる.

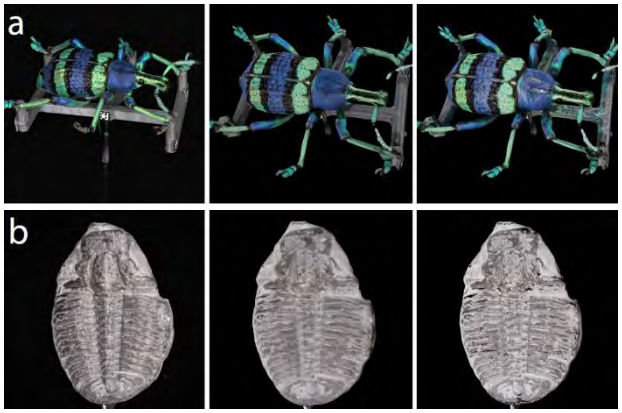


図 6. ホウセキゾウムシの標本(a), 化石標本の復元例(b). 左から写真，市販ソフトウエア Metashape により復元された鏡面反射を含まないモデルのレンダリング結果，提案手法により復元されたモデルのレンダリング結果である．静止画ではわかりにくいが，既存手法では，表面の光沢がテクスチャとしてモデルに張り付いてしまう．一方，提案手法では，拡散反射成分と鏡面反射成分が分離され，より正確な質感が再現されている.

４．今後の計画

本研究全体の目的は，高精度な小型昆虫標本のデジタルデータ化技術の確立である．2021 年度開始当初，この目的のため，『A.薄い・細い構造の正確な復元手法の確立』『B.表面の反射特性の計測と復元』『C.内部構造の計測と復元』という 3 件の課題に取り組む計画であった.

実際，2021 年度は，課題 B に着手し精度評価は十分ではないものの，昆虫標本の質感計測を実現した．この研究成果は，画像電子学会の研究会にて発表済みである[9]．今後，洗練を重ね，国内外の学会にて発表を行う予定である.

現在, 研究計画の見直しを図っており, 2022 年度は，前述の課題 A と課題 B を，科研費の補助のもの実施する予定である．一方，課題 C に代わる新たな課題として，課題 AB の成果を利用し, 3D 昆虫図鑑コンテンツを制作し公開することを計画している.

参考文献

[1] Beth Louise Mantle, et. al. Whole-drawer imaging for digital management and curation of a large entomological collection. ZooKeys, No. 209, p. 147, 2012.

[2] Oleksandr Holovachov, et. al. Whole-drawer imaging of entomological collections: benefits, limitations and alternative applications. Journal of Conservation and Museum Studies, Vol. 12, No. 1, 2014.

[3] Lawrence N Hudson, et. al. Inselect: automating the digitization of natural history collections. PLoS one, Vol. 10, No. 11, p. e0143402, 2015.

[4] Scott S Fisher, et. al. Micro-archiving and interactive virtual insect exhibit. In Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, Vol. 4660, pp. 375–381. International Society for Optics and Photonics, 2002.

[5] Chuong V Nguyen, et. Al. Capturing natural-colour 3d models of insects for species discovery and diagnostics. PloS one, Vol. 9, No. 4, p. e94346, 2014.

[6] Fabian Plum and David Labonte. Scant—an open-source platform for the creation of 3d models of arthropods (and other small objects). PeerJ, Vol. 9, p. e11155, 2021.

[7] **Takashi Ijiri**, Hideki Todo, Akira Hirabayashi, Kenji Kohiyama, and Yoshinori Dobashi. Digitization of natural objects with micro ct and photographs. PloS one, Vol. 13, No. 4, p. e0195852, 2018.

[8] Yucheng Qiu, Daisuke Inagaki, Kenji Kohiyama, Hiroya Tanaka, **Takashi Ijiri**. Focus stacking by multi-viewpoint focus bracketing. SIGGRAPH ASIA 2018, posters, Brisbane Australia 17 November 2019.

[9] **邱雨澄**, 小檜山賢二, 田中浩也, **井尻敬**. 多視点ブラケット 撮影による深度合成手法および評価用データセットの構 築. Visual Computing, 2020.

TOPへ戻る

超強力バルク超伝導磁石の表面磁場を利用したオープンエア・モバイル NMR の開発

工学部 先進国際過程　　坂井　直道

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

核磁気共鳴（NMR）装置は、有機合成を行う現場では必要不可欠な設備である。最もよく使われるのはプロトン（水素 1; 1H）NMR であり、分子中の水素 1 の原子核が起こす核磁気共鳴を測定して、その分子の構造を決定できる。ここで、外部磁場（周波数）が上昇するほど分解能が向上し、得られる情報が多くなっていく。強い外部磁場は超伝導体（抵抗ゼロ）の線材コイルによって作られ、高磁場（高周波数）の NMR が作製され、タンパク質の構造解析等に利用されている。現在では、23.5 テスラ（1 GHz）を超える NMR も開発されている。

ここで、超伝導体の中には、ペレット形状（バルク）にした材料で、強力な小型磁石を作製することも可能である。例えば、イットリウム(Y)とバリウム(Ba)と銅(Cu)を特殊な結晶成長をさせて作製した酸化物結晶（YBCO 系バルク超伝導体）では、2 センチ強の小さなバルクで17テスラ[at 29K]を超える高磁場を捕捉させた磁石を作製できる。世界最強の Nd-Fe-B 系永久磁石でもバルク形状では 0.5 テスラ程度が限界値であるのに対し、その 10 倍以上の超強力磁石の作製が可能である。これを利用して、可搬型の NMR や、磁気分離装置等への応用研究が進められている。

汎用の超伝導線材コイルを用いて作られる NMR は、本体がメートル級と大きく、漏れ磁場の影響範囲を考えると、数メートルの広い作業範囲が必要とされる。一方、バルク超伝導体は、小さなサイズで強い磁場を発生する磁石を作製できることから、小型で可搬型のデバイスへの応用が期待されている。ここで、理化学研究所の仲村らは、バルク超伝導体をリング状に加工し、その内部において NMR 測定するコンパクト NMR を開発し、世界に先駆けて NMR 信号を検出した。さらに、NMR イメージング（MRI）により、マウス胎児に断層画像をバルク NMR で観測することにも成功している。

ここで我々は、バルク内の円筒に入りきらないサイズの試料を計測するため、オープンアクセスのバルク NMR の研究開発を検討している。バルク超伝導体で形成した片側磁極の表面に、空間の磁場分布を均一化させるパッシブシムとして鉄製のリングを設置することで、4mm^2 平面において最良 463ppm の均一磁場が得られ、NMR 信号の検出に成功し、オープンアクセス小型 NMR の開発を進めている。

片側磁極のオープンアクセスの NMR としては、永久磁石を用いた NMR が Bruker 社により開発され、現在では、Magritek 社が NMR-MOUSE という商品目で販売している（www.magritek.com）。特徴としては、永久磁石を用いたコンパクトでポータブルなオープンタイプの NMR センサであり、このシステムでは、リング状の送受信コイルを磁石の上に設置し、深さの関数としてのプロトン密度から材料構造のプロファイルを得ることができ

TOPへ戻る

る。また、緩和時間、液体の自己拡散係数の測定も可能である。本装置は非常にユニークな装置であるが、NMR は磁場強度に比例して感度が向上するため、永久磁石で形成される磁場では低すぎる。また永久磁石は外部温度の変化により、磁場強度が変化してしまうという課題がある。

本研究は、小型バルク超伝導磁石の発生する数テスラ級の超強力磁場を使い、NMR 原理の緩和計測を利用した新たなオープンアクセス非破壊検査技術を開発することを目的とした。現在、永久磁石を使った小型プロファイリング NMR が販売されているが、磁場が小さく分解能が低い。ここで、磁場分布を劣化させずに磁場強度を向上させることができれば新たな非破壊検査技術の開発につながる可能性がある。ここで、リング状バルク超伝導磁石のリング内径調整と鉄リングのシミングで水平方向の磁場均一度を向上させ、深さ方向もバルク厚み(積層)とヨークの配置を最適化することで、より深い位置からの信号を得ることが可能と考えた。信号の送受信は磁極表面に設置するコイルで行う。これにより、大きな対象物でも、プロトン分布(体組成)、反応変化や劣化、拡散の進行などを深さ方向に検査できるといった、これまでに無い NMR の原理を用いた新たな非破壊検査技術を開発できる可能性がある。

2．研究計画

本研究を達成するため、以下(a)～(c)の 3 つの研究項目を掲げた。図 1 に本研究の対象とするバルク超伝導体利用プロファイル NMR 検査装置の特徴を示す。

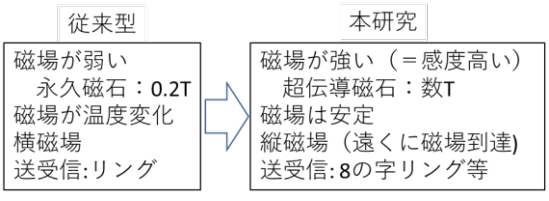


図 1　プロファイル NMR 検査装置の特徴

(a)：バルク超伝導体磁極構造の最適化による水平方向空間磁場分布の均一化

深さ方向には磁場変化があるが、水平方向に空間磁場均一度が高い磁極構造を設計することが重要である。バルク超伝導体は、臨界電流が内部を流れることより磁場を形成する。ここで、ペレット状のバルクでは中心部の電流の寄与により、中央部が最も磁場強度が高いコーン型の磁場となる(図 2(a))。しかし、中心に穴を開けたリング状とすると、図 2(b)に示すように空間磁場分布を平坦な形に変化出来る。また、深さ方向へのバルクやヨーク材の積層により、より遠くへ強い磁場を到達することが可能となることが考えられる。

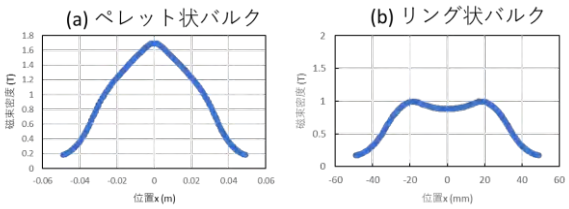


図 2　バルク磁石の形成する外部磁場分布

(b)：シムによる空間磁場分布の均一化

鉄製のリングを磁極表面に張り付けることで、空間磁場分布を変化させることができる。その形状・厚み等を検討し、最低限の NMR 測定が可能な数百 ppm の水平方向磁場均一度を得る。なお、研究項目(a)と (b)は FEM シミュレーションを併用しながら最適化を図る。

(c)コイル形状の最適化による送受信系の設計および非破壊検査装置としての検証試験

深さ方向への磁場と送受信コイル電磁波を直交させるため、コイル形状を変更して送受信系を設計し、深さ方向の磁場強度および距離と NMR 信号の関係を把握し、NMR 緩和測定によるプロトン密度の変化等の検出が可能か等を確かめる。

3．計画の進行状況

研究の進捗状況と得られた成果を以下に記す。

TOPへ戻る

(a):バルク超伝導体磁極構造の最適化による水平方向空間磁場分布の均一化

パルス管冷凍機のコールドヘッドを加工して、各種サイズの REBCO 系溶融バルク（穴内径 16-25mm φ、バルク外径 60mm、厚み 10-30mm^{t}）を搭載できるように、NMR 用の超伝導マグネット磁極の設計および製作を行った。まず初めに、内径 16mm φ、外径 60mm の SmBCO 系溶融バルクを設置して、3.5T で静磁場着磁して磁石化させ、ホール素子で X-Y-Z スキャンさせて空間磁場分布計測を実施した。

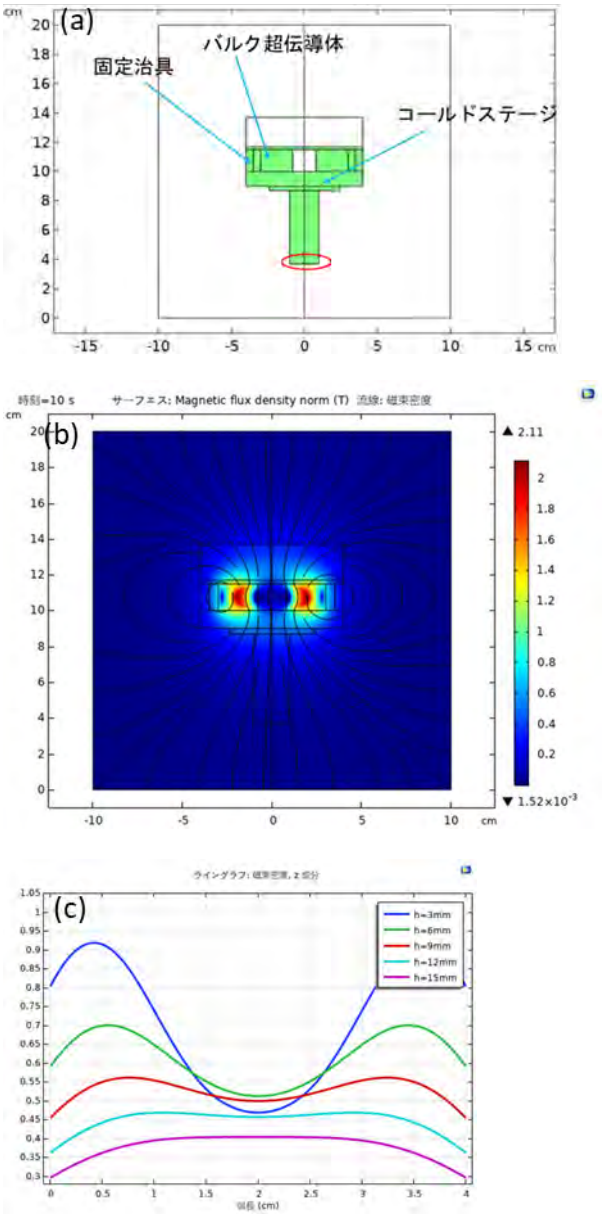


図 3　FEM シミュレーションの例　[a] モデル、[b] (x, 0, z) 面内における磁場分布計算例，[c] z 軸方向磁場の x 方向分布およびバルク表面からの距離 h 依存性

今後は、リング状バルク磁極の内径、厚み（積層数）およびヨークの配置（背面、内部、等）が外部磁場分布に及ぼす効果を調べ、1500ppm 以下の分布となる磁極の条件と空間磁場範囲を明確にする予定である。

(b):パッシブシムによる空間磁場分布の均一化

FEM シミュレーションを併用しながら、外径、内径、厚みの異なる鉄製のリングを磁極表面に張り付けることで、シミングによる空間磁場分布の均一化を図る。ここで、約 0.2mm のシリコンゴムとコイルにより NMR を使った精密磁場分布計測を行い、500ppm 以下を最初の目標とし、リング状鉄シムによる磁場均一度と空間の関係を明確にする実験を進めている。図 3(a), (b)および(c)に、それぞれ FEM シミュレーションのモデル、(x, 0, z)面内における磁場分布計算例および z 軸方向磁場の x 方向分布およびバルク表面からの距離 h 依存性の計算結果例を示す。現在、計算結果が実測値と一致するようにパラメータを検討している[1, 2]。

(c)：送受信系（コイル）の設計および非破壊検査装置としての検証試験

深さ方向への磁場と送受信コイル電磁波を直交させるため、コイルによる送受信系を設計し、深さ方向の磁場強度および距離と NMR 信号の関係を把握し、NMR 緩和測定によるプロトン密度の変化等の検出が可能かを確かめることを計画している。まず初めに、片側磁極での NMR 信号の受信範囲を明確化するため、小径（4mm 径で 9mm 長, 10 ターン）のソレノイドコイルを作製し、シリコンゴム試料中の 1H NMR 信号検出した結果を図 4 に示す。磁場強度は 1.12 T で、NMR の周波数では 47.8 MHz に相当する[3]。この様に、水平面内の磁場均一性を向上させることおよび小径のコイルを用いることで、片側磁極においても NMR 信号が検出できることが明らかとなった。

TOPへ戻る

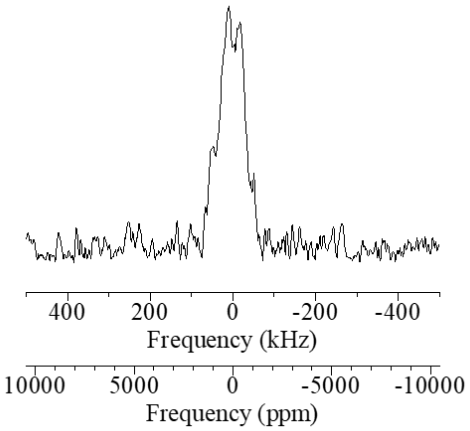


図 4　HTS バルク磁石を用いた片側磁極の表面でシリコンゴム試料中の 1H NMR 信号検出した例。

また、拡散 NMR としての利用可能性検討のため、スピンエコー法を用いた自己拡散係数の測定法の検討を実施した。これは、試料にパルス磁場を与えた際の緩和を NMR 信号で検出するものであり、以下の式で算出できる。

$$\ln\left(\frac{S(t_E)}{S(0)}\right) = -\frac{1}{12}\gamma^2 {G_0}^2 {t_E}^3 D,$$

ここで、$S(t)$, γ, G_0, t_E, D はそれぞれ、時間 t における NMR 信号強度、磁気回転比、磁場勾配、エコー時間、自己拡散係数である。

本手法を用いて、超純水およびアセトンについて実験を実施した結果を図 5 に示す。ここで、z 軸方向の磁場勾配 G_0 はホール素子による測定から、67 T/m とした。

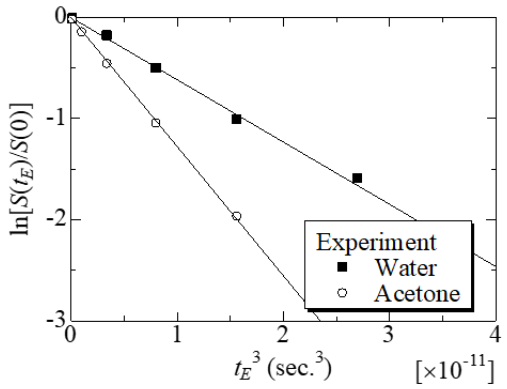


図 5　片面磁極の HTS バルク磁石を用いた拡散 NMR の測定結果。

水とアセトンの自己拡散係数 D の文献値、2.3×10^{-9}, 4.77×10^{-9} m^2/S と j ほぼ一致した[3]。以上の様に、片側磁極の超電磁極が拡散 NMR として利用可能なことが示唆された。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本研究の成果は、国際会議 MT27 にて報告するとともに査読論文として報告している[3]。

今後は、FEM シミュレーションを併用しながら、リング状バルク磁極の内径、厚み（積層数）およびヨークの配置（背面、内部、等）が外部磁場分布に及ぼす効果を調べるとともに、外径、内径、厚みの異なる磁性リングを磁極表面に張り付けるパッシブシミングによる空間磁場分布の均一化を図る。また、コイル形状の最適化等により、拡散 NMR など、片側超伝導磁極を利用した新しい分析装置（プロファイル NMR）開発につなげることを計画している。

参考文献

[1] Modelling of the pulsed field magnetisation of a REBaCuO bulk with a superconducting weld, R.Dorget, K.Berger, J Longji Dadiel, K.Sudo, N.Sakai, T.Oka, M.Murakami, J.Lévêque, Journal of Physics: Conference Series 2043 (1), 012001, 2021

[2] Review on the use of superconducting bulks for magnetic screening in electrical machines for aircraft applications
R.Dorget, Q.Nouailhetas, A.Colle, K.Berger, K.Sudo, S.Ayat, J.Lêvêque, M.Koblischka, N.Sakai, T.Oka, B.Douine, Materials 14 (11), 2847, 2021.

[3] NMR Relaxometry Using Outer Field of Single-Sided HTS Bulk Magnet Activated by Pulsed Field, M.Takahashi, S.Kikuchi, N.Inoue, N.Sakai, M.Murakami, K.Yokoyama, T.Oka, T.Nakamura, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 32 (6), 1-4, 2022.

TOPへ戻る

Development of MgB_2 cryo-magnets for the Bio-Medical Applications

先進国際課程　ミリアラ　ムラリダ

１．Paper introduction

Given the need for high sophistication in medical field such as for Magnetic Resonance Imaging (MRI), Magnetic Drug Delivery (MDD) etc., significance of superconducting magnets have grown tremendously. Simultaneously performance, cost of production and portability are crucial factor to consider for applications. Therefore despite the competition from other superconducting systems, MgB_2 came out to be a suitable candidate. Superconductivity in MgB_2 was discovered in 2001, and gained immediate popularity. Some of the advantages of this material, include light weight from low atomic numbered constituents such as Mg and B, moderate T_c close to 39 K where existing Nb-based superconductors can be replaced and also replace usage of liq-He with liq-H_2 cryogen, large coherence length resulting in good current density (J_c) and subsequently good trapped field (TF) in polycrystalline bulk MgB_2 material. These qualities are enticing for real applications while making the devices compact. Most of the high temperature superconductors have low coherence lengths and must be fabricated as single grained bulks for enough J_c properties, which can be time consuming and tedious process. However, the MgB_2 material as it is not upto the standards of commercial value. Some challenges in this system include enhancement in J_c, reduction of production cost and density. In order to address these challenges, research on MgB_2 has been performed since a decade until now. TF of the bulk is directly proportional to of the J_c of the bulk material. Therefore, our previous research is focused on improving J_c. In the initial stages, we have tried to understand the phase diagram of MgB2 to optimize the sintering conditions i.e. 775^{o}C for 3 hours and manipulate the microstructure which resulted in increment in J_c. The reason being reduced grain size and therefore more number of grain boundaries which act as flux pinning centers and enhance J_c. We understood that boron precursor plays an important role in addition to optimized sintering for grain boundary control. Hence, we used amorphous nano-boron precursor which lead to high J_c. However the expensive nature posed to be a deterrent, and hence we choose to pursue alternatives.

２．Research program

The research program is aimed to solve two main problems such as i) *Production of nano boron using alternative cheap means to produce high performance MgB_2 bulks,* ii) *Enhance the density of the sintered bulk*.

After realizing the dependence of boron on final microstructure of MgB_2, we employed the novel ultrasonication technique to refine the

TOPへ戻る

cheap boron. We plan to reduce the large boron particles to nanoscale using ultrasonic treatment. During the ultrasonication, particles bombard with each other to splinter into fine particles with irregular shapes. We used the Mitsui Ultrasonic Homogenizer 300-X. We subjected boron to ultrasonic treatment (at half power, 150 watt) with varying duration in several solvents with different viscosities. This B powder is mixed with Mg in inert atmosphere and used to synthesize MgB_2. The bulk MgB_2 is studied for understanding the correlations between J_c and microstructural features.

The regular sintered bulk is only 50% dense due to high porosity. The porosity arises due to spaces left by Mg after reaction with B to form MgB_2. Therefore there is need to densify the bulk for compactness, mechanical performance and others. There are several techniques to produce dense bulks such as Hot-isostatic pressing, Mg-diffusion reaction, and Spark plasma sintering (SPS) etc. Of all these techniques, SPS is quick, proven and easily controllable method which can produce high density bulks close to 100%. We employed this technique to produce large MgB_2 bulks with high density and studied the TF properties as well as mechanical characteristics.

For characterization we used a high-resolution automated Rigaku smart-lab X-ray powder diffractometer (RINT2200-) with a step size of 0.01 degree from 10- 90degrees, using Cu-K_α radiation generated at 40 kV and 30 mA. The microstructure of these samples was later studied by Field Emission-Scanning Electron Microscope (FE-SEM) as well as Transmission Electron Microscope (TEM). Particle size analysis was carried using ImageJ. Superconducting critical temperature (T_c) and magnetization hysteresis loops (M-H) were measured using SQUID Magnetometer (Quantum Design, model MPMS5).

3. State of progress

At this stage we have performed ultrasonication in 3 three solvents such as Hexane, Distilled water and Ethanol for 15, 30, 45 and 60 minutes. We have successfully refined the cheap boron (few μm) to fine particles (few nm) as depicted in Fig.1. XRD analysis revealed that the refined boron is free of oxide impurities.

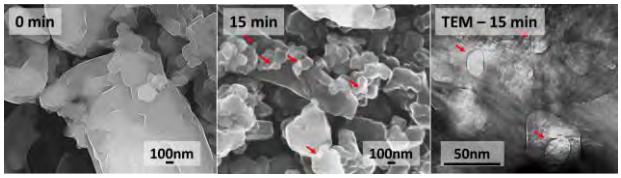


Fig.1: Effect of 15min ultrasonication in ethanol on cheap boron powder.

The refined boron when used to synthesize MgB_2 bulks led to nano-sized grains in the final microstructure. As a result increase in grain boundaries enhanced flux pinning and subsequently high J_c. High J_c of 220, 300 and 300 kA/cm^2 was observed after using boron subjected to 30, 30 and 15 minutes of ultrasonic treatment in hexane, distilled water and ethanol solvents respectively compared to 220kA/cm^2 of reference MgB_2. We calculated grain size of the best samples and we found the average grain size is around 460, 290 and 260 nm for in hexane, distilled water and ethanol solvents respectively. Fig.2 shows the correlation between J_c and average particle sizes of MgB_2 when using different solvents. We can clearly see an inverse dependence confirming the role of grain boundaries as pinning centers.

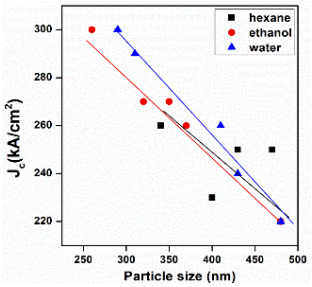


Fig.2: J_c Vs MgB_2 particle size for various ultrasonication solvents.

TOPへ戻る

While longer ultrasonication showed only small improvement, due to large MgB_2 grains in the microstructure. We believe that boron particles due to irregular shapes tend to often agglomerate during ultrasonic treatment which can lead to large MgB_2 grains. In summary we have successfully enhanced the J_c by 30 % at low processing cost with scalability, which is a considerable improvement for cryo-magnet applications.

To increase the density of bulk MgB_2 we utilized SPS at 1150°C. SPS based bulks showed high packing fraction of 99.8 % and relatively good mechanical properties with a high bending strength with eightfold increment compared to dense HIP based bulks. We measured TF properties at 14 K and 20 K, 1 mm above the bulk's surface, with applied field pulse up to 2 T via Pulse Field Magnetization (PFM), which is cheap and efficient. We mapped the temperature rise together with a complex trapped field formation in the MgB_2 bulks during pulse-field application as shown in Fig.3, which explained the limitations of PFM.

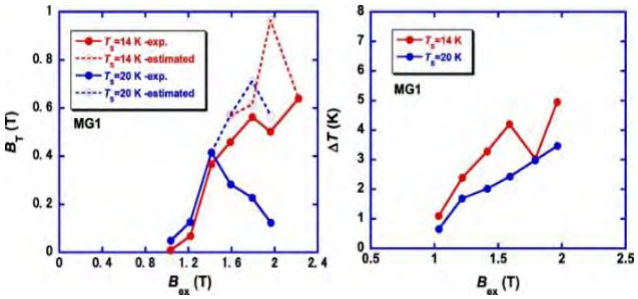


Fig.3: TF and temperature profile with increase in applied pulse field.

When large external magnetic fields were applied, the poor thermal conductivity of the material caused the material to overheat and the TP value to drop. This local increase in temperature leads to flux jumps and subsequent drop in TF. Despite its thermal limitations, the highly dense bulk MgB_2 superconductors are a significant improvement over the conventionally sintered counterparts. Fig.4 shows the 40mm bulk MgB_2 and uniform Trapped field characteristics, perfect for applications. This work is the first of its kind, to fabricate and study a large bulk MgB_2.

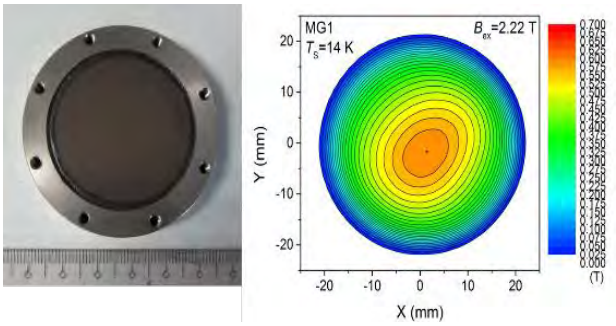


Fig. 4: Large SPS bulk MgB_2 with uniform Trapped field behavior.

4. Future program, paper submission and results briefing

The current results show a promising improvement towards realizing real MgB_2 cryo magnets for bio medical applications.

Another challenge in MgB_2 system is the flux jumps. Our prior work elucidated that the rise in temperature during flux jump was proportional to the applied pulse field. To reduce unwanted flux jumps, the MgB_2 bulks will need a good thermal conductive element inside the material. For this, we had drilled 4 holes (see Fig.5) and work has been under progress to fill out the U-alloy material and estimation of superconducting properties. Specially the trapped field experiments around 20K. Eventually, we will design 40-50mm cryo magnets for bio medical applications.



Fig. 5. Top view of the drilled bulk MgB_2

TOPへ戻る

Publications:

1. A. Sai Srikanth, M. Muralidhar et al., Quick boron ultra-sonic refinement in distilled water for a cheap and mass production of enhanced bulk MgB_2, SSRN, 3967332, 2022.

2. A. Sai Srikanth, M. Jirsa, M. Murakami, M. Muralidhar, Effect of boron precursor ultra-sonicated in hexane medium on the critical current density of sintered bulk MgB_2, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022 (at press).

3. M. Muralidhar, A. Sai Srikanth et al., Complex pulse magnetization process and mechanical properties of spark plasma sintered bulk MgB_2, *Mater. Sci. and Eng. B*, Vol. 273, 115390 (10pp) 2021. (IF – 4.051)

4. A. Sai Srikanth, M. Muralidhar et al., Superconducting properties of sintered bulk MgB_2 prepared from hexane-mediated high-energy-ultra-sonicated boron, *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 265, 115030, 2021. (IF – 4.051)

5. A. Sai Srikanth, M.Muralidhar et al., Pinning behaviour in bulk MgB_2 prepared using boron powder refined via high-energy-ultrasonication, *J Supercond. Nov. Magn.*, Vol. 34, pp. 1297–1301, 2021. (IF – 1.506)

Presentations:

1) **(Invited)** M. Muralidhar, “Superconducting Technology and Its Role in Disrupting Climate Change”, The 3rd INDIAN MATERIALS CONCLAVE and the Annual General Meeting of MRSI", December 20-23, 2021, IITM, India.

2) **(Oral)** M. Muralidhar, “Superconducting Super-Magnets Compatible with Sustainable Developmental Goals”, 34th International Symposium on Superconductivity (*ISS 2021)*, November 30-December 2, 2021, Tokyo.

3) **(Invited)** M. Muralidhar, “Importance of Superconducting Materials in the Endeavour to Stop Climate Cgange, 12th International Workshop on Processing and Application of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials (*PASREG 2021)*, November 11-13, 2021.

4) **(Invited)** M. Muralidhar “Advanced project-based learning (aPBL): SIT-IITM-IITD-UPM-KMUTT, The 6th World Technology Universities Congress (WTUC 2021), October 18-22, 2021.

5) **(Invited)** M. Muralidhar, "Teacher 4.0 - in the context of Hybrid Learning", the Panel Discussion is being organized by the Centre for Open and Distance Mode, Hindustan Institute of Technology and Science (HITS), India, October 17, 2021.

6) **(Keynote)** M. Muralidhar, **“**How Superconducting Materials Can Disrupt Climate Change”, the 12th International Fundamental Science Congress 2021, UPM, Malaysia, August 24-26, 2021.

7) **(Ambassador Guest Presentation)** M. Muralidhar, “How we can contribute to deepen cooperation towards promotion of Science, Technology, and Innovation between Indian and Japan” at 3rd Indian Sakura Science Club Alumni meet 2021” Japan Science and Technology Agency (JST), May 29, 2021

8) **(Invited)** M. Muralidhar, “India-Japan relations to improve the cyber-physical systems” India-Japan Webinar on “Cyber-Physical Systems”, Embassy of India in Tokyo, March 28, 2021.

9)**(Invited)** M. Muralidhar, “Superconducting Technology and its Significance Towards United Sustainable Development Goals”, VEBLEO-Science, Engineering and Technology, March 20, 2021.

TOPへ戻る

Development of solvent sensitive actuator based on inorganic-organic hybrid polymers

先進国際課程　Ahmed Kumkum

Innovative global Program, SIT research Laboratory, College of Engineering

１．Paper introduction

Siloxanes are one of the most important groups in inorganic polymers, which have a wide range of applications, such as coatings, adhesives, contact lenses, biomedical devices, and heat-resistant tiles.9 Physical and chemical characteristics of siloxane bonds (Si–O) generate the unique properties of polysiloxanes [1, 2] Silicone is a general term for synthetic polymer compounds that have a siloxane bond (-Si-O-) in the main skeleton by adding a further chemical reaction to metallic silicon and have the properties of both organic and inorganic compounds. A typical example of silicone is polydimethylsiloxane (PDMS). PDMS shows unique physical properties such as the low glass transition temperature. PDMS shows unique physical properties such as the low glass transition temperature, low surface energy, high gas permeability, heat/weather stability and oxidation resistance, nontoxicity, low cost, and chemical inertness [3,4]. In our previous work we have reported that the structure and network size can be controlled while maintaining the uniformity of the network polymer by changing the chain length and molecular structure of the joint molecule and the linker molecule [5, 6]. In this study, we used a multi-functional vinylsilane compound for the joint molecule and polydimethylsiloxane (PDMS) with mercapto groups at both ends for the linker molecule, and synthesized and characterized the PDMS network polymer by the thiol-ene reaction.

２．Research program

We used a variety of joint molecules and a linker molecule (two different molecular weight) for the synthesis of PDMS elastomer. Synthesis method of TVMCTS -PDMS-SH 1700 elastomer ([vinyl] / [thiol] = 1/1 mol / mol) is described here. After adding PDMS-SH 1700 2.72 g and DMPA in THF stock 1.64 g (the weight of DMPA is equivalent to 1/25 of PDMS-SH 1700) to a 20 mL screw tube at room temperature and stirring, 40 ° C. 30 min THF was removed under reduced pressure. The reaction solution was prepared by adding 276.7 µl of TVMCTS and stirring. The prepared reaction solution was transferred to an ampoule tube, sealed, and irradiated with UV (365 nm, 7000 µW / cm2) for 15 min in a dark room at room temperature to react to synthesize an elastomer. In addition, other samples were prepared in the same manner (Scheme 1).

Regarding the characteristic analysis, structural analysis by FT-IR measurement, mechanical characteristic analysis by compression test and tensile test, thermal characteristic analysis by TG-DTA, and swelling degree test in various solvent were performed. The synthesized gel and elastomer were formed into a cube of 10 mm × 10 mm × 10 mm and subjected to a compression test

TOPへ戻る

at a load rate of 0.5 mm / min. He used the TENSILON universal tester RTE-1210 (manufactured by ORIENTEC) for the measurement. Among the characterization techniques swelling tests will be discussed in the following section to utilize them in solvent sensitive actuator.

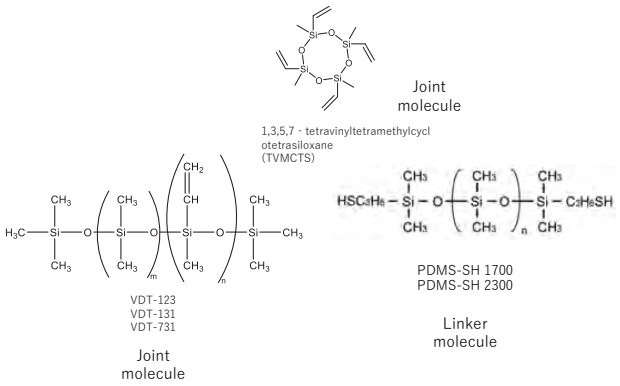


Figure 1: venyl containing monomers and of SH-containing linkers for Thiol-ene reaction-based network polymers

3. State of progress

The structure of the gel synthesized by FT-IR measurement was analyzed. Figure 2 shows the infrared absorption spectrum in the TVMCTS-PDMS-SH 1700 / Silicone oil 100 cs system.

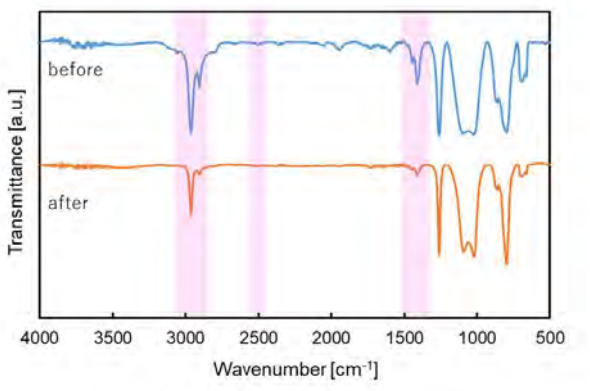


Figure 2. FT-IR spectra of TVMCTS-PDMS-SH 2300 elastomer system.

A peak derived from a siloxane bond (-Si-O-) was confirmed near 1100 cm-1 both before and after the reaction. The peak derived from the expansion and contraction oscillation of the vinyl group near 2960 cm-1 confirmed in the infrared absorption spectrum before the reaction and the peak derived from the in-plane angular vibration of the vinyl group confirmed near 1410 cm-1. It decreased after the reaction. It was also confirmed that the minute peak derived from the thiol group (-SH) around 2500 cm-1 disappeared after the reaction.

Results of mechanical test is shown in Figure 3.

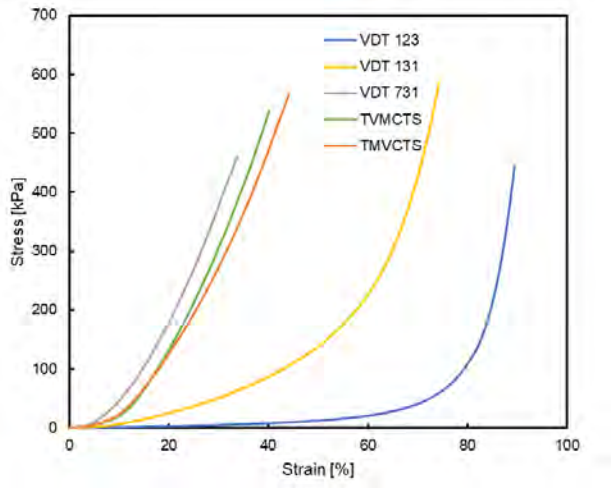


Figure 3. stress-strain curve of elastomers prepared by the joints VDT 123, VDT 131, VDT 731, TVMCTS and TMVCTS.

In the case of elastomer, the Young's modulus of the sample using the joint molecules TVMCTS, TVMCSZ, and TVDMSS having the same number of functional groups showed higher values in the order of TVDMSS, TVMCTS, and TVMCSZ. In particular, elastomers using TVDMSS showed a Young's modulus that was significantly different from elastomers using other joint molecules. It is considered that this is because the elastomer using the joint having an annular structure has a higher degree of freedom of deformation when stress is applied to the cross-linking point and exhibits a flexible property. In addition, the sample using TMVCTS with one less functional group ruptured under a stress of 50 N or less, and the Young's modulus was lower than that of other samples

TOPへ戻る

(Figures 3). This is because the ideal bridge density is about the same even if the number of functional groups of the joint molecule is different. On the other hand, the joint molecule with a small number of functional groups has a large number of joints per sample volume, so stress was applied. It is believed that the stress on the strain was reduced because the occasional load was distributed to more cross-linking points.

A swelling test was performed to evaluate the solvent resistance of the synthesized elastomer. Figure 4 and Figure 5 show the solvent swelling rate of the polymers prepared with the reaction solution of TVMCTS-PDMS-SH 2300, VDT-131-PDMS-SH 2300 series elastomer. Water, methanol, ethanol, N, N-dimethylformamide (DMF) and dimethyl sulfoxide (DMSO) was not swelled by any of the elastomers, but acetone, hexane, THF and chloroform swelled. However, the amount of swelling with acetone was very small. From the above results, it was found that these elastomers have solvent resistance to water, methanol, ethanol, DMF and DMSO. It was also found that there was a significant difference in the swelling degree for TVMCTS-PDMS-SH 2300 and VDT-131-PDMS-SH 2300 elastomers.

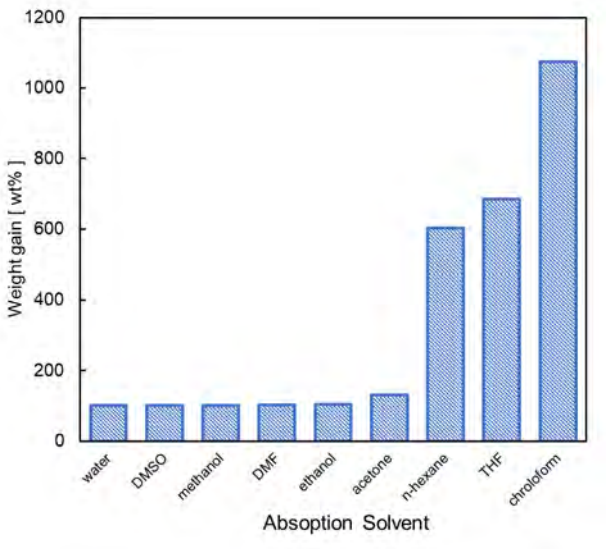


Figure 3. Absorption capacity of VDT-131-PDMS-SH 2300 elastomer.

To utilize the asorbtion capacity of PDMS elastomers we have coated the PDMS elastomer with a commercial acrylate type glue (3M, acrylate glue) on VDT-131- PDMS-SH 2300 elastomer to make a bilayer sample and put it in both tetrahydrofuran (THF) and water.

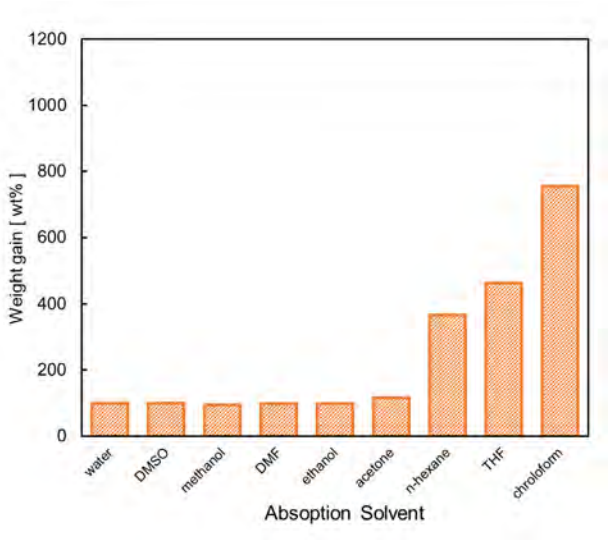


Figure 5. Absorption capacity of TVMCTS-PDMS-SH 2300 elastomer, [vinyl]:[thiol]=2:1

Within 1 minute the bending actuation towards the acrylate plane occurs as swelling of acrylate glue in n-nehane was very low (<100%) compared to the VDT-131-PDMS-SH 2300 elastomer (Figure 6). It can be mentioned here that in water, no bending actuation was observed. Work is underway to investigate the detail investigation of time, bending curvature and bending angle.

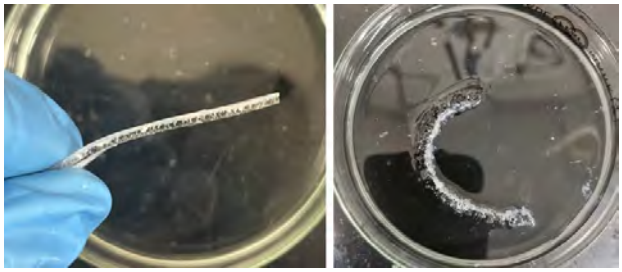


Figure 6. Bending actuation in THF by PDMS-acrylate bilayer sample. Left is before and right is after putting in THF.

4. Future program, paper submission and results briefing

Organic-inorganic hybrid PDMS elastomers

TOPへ戻る

was successfully synthesized and their structural, mechanical, thermal and swelling characteristics were investigated. The mechanical tests indicate that joint molecules with cycling ring show high rigidity compared to the pendant vinyl groups containing monomers. To utilize them in solvent sensitive actuator the PDMS elastomers were coated with actrylated glue and due to the difference in their swelling degree bending actuation was observed towards acrylate glue side. In future we plan to utilize this actuator system in a device prototype (encapsulation system) solvent specific sensing and actuating systems. This study will provide important insights into the design and fabrication of novel actuating materials. This work will be presented in an upcoming conference (SmaSys 2022, organized by Yamagata University) and a manuscript will be prepared in near future.

Reference

1. Kraxner, P, Louis Boogh, L, Lejenue A, “The Role of Silanes in Filled and Crosslinked Polymers.” *Organosilicon Chemistry Vol IV: From Molecules to Materials*, pp. 562–572. Wiley-VCH, New York, 2000

2. Gates, DP, “Inorganic and Organometallic Polymers.” Annu. Rep. Prog. Chem. Sect. A: Inorg. Chem., 98 479–492 (2002)

3. Raj M, K., Chakraborty, S. (2020), PDMS microfluidics: A mini review. J Appl Polym Sci, 137, 48958. doi: https://doi.org/10.1002/app.48958

4. Miranda I, Souza A, Sousa P, Ribeiro J, Castanheira EMS, Lima R, Minas G. Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review. Journal of Functional Biomaterials. 2022; 13(1):2. https://doi.org/10.3390/jfb13010002

5. Ahmed K, Inagaki A, Naga N. Joint-Linker Type Ionic Gels Using Polymerizable Ionic Liquid as a Crosslinker via Thiol-Ene Click Reactions. Polymers. 2020; 12(12):2844. https://doi.org/10.3390/polym12122844

6. Ahmed, K.; Naga, N.; Kawakami, M.; Furukawa, H. Extremely soft, conductive, and transparent ionic gels by 3D optical printing. Macromol. Chem. Phys. 2018, 18002

TOPへ戻る

早期肝細胞癌の病理診断支援
－細胞核による鑑別と特徴量分布可視化－

電子情報システム学科　　高橋　正信

共同研究者
横浜市立大学　医学部　　中野　雅行

１．序論

病理組織診断とは，薄切した組織に染色を施した標本を病理医が光学顕微鏡で観察するする診断手法である．最も高精度な診断手法として確定診断に利用されるが，病理医の主観によるため経験や体調などと言った要素が診断結果に影響を与えるリスクがある．そのため，病理組織を撮影した画像から診断に有用な情報を病理医に提供し診断を支援する機能を実現することは有用である．

我々は，非癌部との鑑別が特に難しいとされる早期肝細胞癌（早期肝癌）の診断支援を目的として，画像解析機能の実現に取り組んでいる．早期肝癌は構造や細胞の異型が小さい場合が多く,他の癌に比べて鑑別が難しい．特に，細胞一つや核一個から癌／非癌を鑑別するのは非常に困難である．そこで，深層学習の画像認識機能を利用することで，細胞核1 個の画像だけで癌／非癌を鑑別できる可能性があるのかを検討した．

また，診断に有用な特徴量を抽出し，その分布をバーチャルスライド（以下，WSI）全体で可視化することで，病理医は特徴量が他と異なる注目領域を容易に知ることができ，診断の支援情報となる．我々は，これまで様々な特徴量を抽出して個々の特徴量ごとに可視化画像を作成する機能を実現したが，新たに複数の特徴量を組み合わせた可視化画像の作成に取り組んだ．

２．研究計画

（１）細胞核による鑑別

複数の早期肝癌の標本画像を用い，癌部と非癌部の細胞核の画像を学習させて癌／非癌を鑑別できるかを実験により確認したが，十分な精度が得られなかった．これは，早期肝癌の特徴にバリエーションがあるためと考えた．そこで，標本をグループ化することで精度の改善を図った．

（２）複数特徴量を用いた可視化

複数の特徴量を組み合わせて特徴量分布の可視化画像を作成するため，線形判別分析により複数の特徴量から1次元の特徴量に変換することとした．また，類似した判別係数を持つバーチャルスライドをグループ化し，グループごとに判別分析式を求めて可視化画像を作成することとした．これにより，特徴量ごとに作成していた可視化画像の数を数種類程度に大幅に削減できる可能性がある．

３．計画の進行状況

３．１　細胞核による鑑別

まず，標本ごとに細胞核画像で学習し，標本ごとの癌／非癌の判定正解率を評価した．具体的には，1枚のWSIの癌部と非癌部からブロック画像を2枚ずつ選び，その画像から細胞

TOPへ戻る

核の学習用画像と評価用画像を作成した．深層学習にはResNet50を用い，データ拡張した学習用画像で学習した．学習に用いなかった他の標本の平均正解率が最大となったネットワークを用い，各標本の正解率を求めた．標本14枚を用いた実験で得られた正解率の一部を表1に示す．表1の対角線は学習に用いたのと同じ標本の画像で評価した正解率を表している．基本的に対角線上で高い正解率が得られたが，対角線以外の正解率も一部で高くなり，一部の他の標本に対しても有用なネットワークが得られたことが分かった．

標本1枚で学習した14種類のネットワークは14種類の特徴を抽出していると考えることもできるが，グループ化することでより汎用的な特徴を抽出できる可能性がある．そこで，標本をグループ化した．表1において正解率が高い組合せの標本は類似した特徴を持ち，グループ化できる可能性が高いと考えられる．しかし，表1の正解率は対角線について非対象，即ち訓練標本と評価標本を入れ換えると正解率が大きく異なる場合がある．そこで，ネットワークを特徴抽出器，正解率を特徴量ととらえ，正解率50%が0となるような規格化をした後，それぞれの列を特徴ベクトルとみなして，その内積の大きな組合せを求めた．

標本のグループ化は，まず内積の大きな組合せや表1において値が大きな組合せの標本をグループ化して学習する．そして，学習に用いなかった標本を評価し，正解率が高い標本をグループに追加して再度学習し評価するという処理を反復する．標本をグループに追加するかどうかの基準は，自グループの平均正解率が一定値以上，かつ他グループの平均正解率が一定値未満とした．これにより，自グループでは判定に有用でありながら他グループでは有用でない特徴を抽出するネットワークを実現できる．

自グループの平均正解率の閾値を85%，他グループの平均正解率の閾値を65%として14枚の標本をグループ化した結果の正解率を表2に示す．標本は3つにグループ化できた．表2の「全標本」の正解率73.9%は，14枚全ての標本をまとめて学習し評価したものである．3グループに分けることで平均正解率は86.9%に改善され，全ての標本に有効な判定機能を3つのネットワークで分担して実現できた．細胞核単体で癌／非癌を鑑別できる可能性が示されたと考える．

また，グループ化した標本を学習したネットワークを用いて顕著性マップを作成した．何れのグループでも核輪郭の色が濃い部分や核小体において値が大きくなっているものが多く，そうした領域が癌／非癌の判定に利用されている可能性が示唆された．

表 1 癌／非癌の判定正解率

訓練＼評価	標本1	標本2	標本3
標本1	82.5	48.8	46.3
標本2	72.5	77.5	73.8
標本3	56.3	51.3	91.3

表 2 グループ化後の平均判定正解率

訓練＼評価	グループ 1	グループ2	グループ3	全標本
グループ1	87.0	50.0	53.1	
グループ2	50.5	88.0	48.1	
グループ3	53.5	52.3	85.3	
全標本				73.9

３．２　特徴量の組合せによる可視化

算出可能な早期肝細胞癌の特徴量は，核密度，核面積，疑似 NC 比（以下，NC 比），核の円形度，重心から輪郭点までの距離の標準偏差，輪郭の長軸短軸比，核小体個数，核小体出現率，核小体面積，核輪郭色，核周辺色，核輪郭周辺色の 12 種類である．特徴量の組合せを検討する前に，これらの特徴量が癌部と非癌部の判別にどの程度有用なのかを WSI ごとに評価した．具体的には，WSI ごとに癌部と非癌部から同数の小領域（ブロック）をランダムに選択し，その特徴量をソートして中央値を求め，中央値を閾値として閾値より大きい（あるいは小さい）特徴量を持つブロッ

TOPへ戻る

クに含まれる癌部の割合を求めて正解率とした．なお，癌部の特徴量が非癌部より大きくなるか小さくなるかは同じ特徴量で合ってもWSI によって異なる場合があるため，何れを癌部とするかはWSI ごとに正解率の高い方を採用した．

実験に用いた21枚のWSIについて特徴量ごとに平均正解率を求めた結果，全ての特徴量で平均正解率は0.60 以上となった．

次に，複数の特徴量の組み合わせについて検討した．具体的には，特徴量を癌部と非癌部に最もよく分離できる変換式を線形判別分析により求めた．求めた変換式により複数の特徴量を１次元の特徴量に変換し，それを用いて特徴量１種類の場合と同様の手法で正解率を求めた．12 種類の特徴量の全ての組み合わせについて正解率を求めた結果，特徴量を組み合わせることで正解率は基本的に改善されることが分かった．

特徴量の組み合わせは正解率の改善につながるが，線形判別分析により求まる変換式の係数（判別係数）は癌部と非癌部が予め分かっている場合にWSI ごとに求まるもので，別のWSI に対して有効かどうかはわからない．そこで，判別係数が類似したWSI をグループ化することでより汎用的な変換式を求めた．汎用性のある変換式を数種類求め，その何れかの変換式を用いることで全てのWSI で正解率が一定値を上回るようにできれば，数種類の可視化画像で全てのWSI をカバーできることになる．

正解率の基準値としては,今回は0.60 とした．これは，正解率が0.6 程度以上あれば癌部と非癌部の差異がある程度視認できたからである．

グルーピングの手順は以下のとおりである．

(a) 線形判別分析によりWSI ごとの正解率を求める.求めた正解率が基準値0.60 を越えないWSI は基準を満たさないものとして排除グループに入れ，グループ化の対象外とする．

(b) 基準を満たしたWSI については,K-means 法により類似した判別係数を持つものをグループ化する．

(c) K-means 法でグループ化された個々のグループについて，所属するWSI の正解率の平均値が最大になるように判別係数を最適化する．グループ内で共通の判別係数を用いたことで正解率が基準値を満たさなくなったWSI については再度グループ化するために除外する．

(d) 除外されなかったWSI だけを用いて平均正解率が最大となるように判別係数を再度最適化する．これにより汎用性のある判別係数が１組求まる．

(e) K-means 法で求まった全てのグループについて(c)(d)の処理を行う．

(f) (c)で除外された全てのWSIについて再度K-means 法でグループ化し，求まった個々のグループについて(c)(d)(e)の処理を行う．

(g) 除外されるWSI が無くなるまで(f)の処理を反復する．

K-means 法ではグループ数がパラメータとなる．本研究では正解率が基準値を満たす限り，グループ数が少ない結果が得られる方が望ましい．そこで，適切なグループ数について実験的に検討した結果，グループ数１が最適であることが分かった．そこで，グループ化の際のグループ数は１とした．

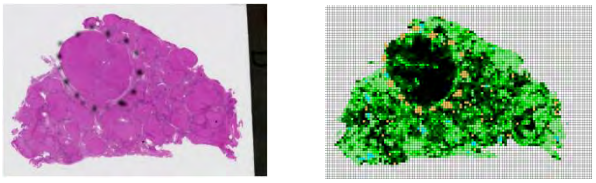
特徴量２種類の組み合わせの例として，核密度と核小体出現率の組み合わせについてグループ化を行った．その結果，排除グループに入ったWSI は無く，21 枚のWSI は２種類のグループに分類された．各グループに分類されたWSI をそのグループの判別係数を用いて可視化した結果の例を図１，図２に示す．

特徴量３種類の組み合わせの例として，核密度，核面積，核輪郭色の組み合わせについてグループ化を行った．その結果，排除グル

TOPへ戻る

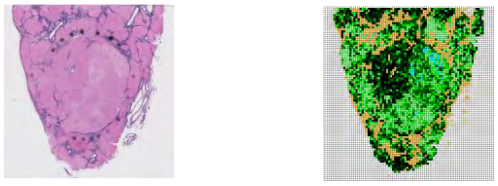
ープに入った WSI は無く，21 枚全ての WSI は 3 種類のグループに分類された．各グループに属する WSI をそのグループの判別係数を用いて可視化した結果例を図 3，図 4，図 5 に示す．

図 1 と図 3 は同じ WSI であるが，特徴量が 2 種類と 3 種類の場合で変換式が異なるため可視化画像は少し異なる．しかし，何れの場合でも癌部は他と特徴量が異なる領域として十分に視認できることがわかる．



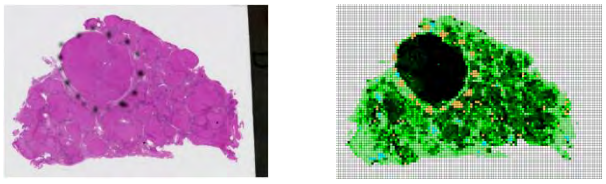
(a) WSI　　(b) 可視化画像

図 1 グループ 1 の可視化例（特徴量 2 種類）



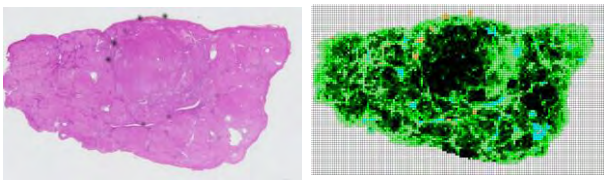
(a) WSI　　(b) 可視化画像

図 2 グループ 2 の可視化例（特徴量 2 種類）



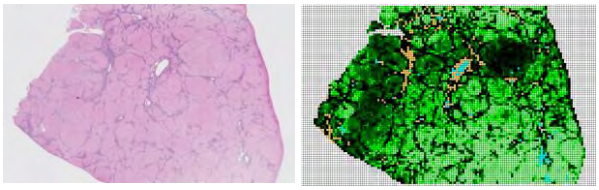
(a) WSI　　(b) 可視化画像

図 3 グループ 1 の可視化例（特徴量 3 種類）



(a) WSI　　(b) 可視化画像

図 4 グループ 2 可視化例（特徴量 3 種類）



(a) WSI　　(b) 可視化画像

図 5 グループ 3 可視化例（特徴量 3 種類）

4．まとめと今後の展開及び発表状況

一般の病理医にとって鑑別の難しい早期肝細胞癌の診断支援のため，深層学習により細胞核 1 個の画像から癌部の鑑別が可能かを検討した．その結果，標本をグループに分け，グループごとに学習したネットワークを用いることにより鑑別できる可能性のあることが分かった．

また，早期肝細胞癌のバーチャルスライドから抽出された様々な特徴量を組み合わせた特徴量分布の可視化について検討した．その結果，複数の特徴量を組み合わせることで癌部と非癌部の判別精度が改善され，特徴量分布の可視化画像において癌部がより視認しやすくなることが分かった．

今後は，癌部と非癌部の判別に核画像のどのような情報が用いられているかを明らかにすることが課題となる．また，学習済のネットワークの出力の分布をバーチャルスライドで可視化することで，癌部と非癌部の差異が視認できる可能性がある．従来の特徴量にそうしたネットワークの出力を加えたうえで，より有用な可視化方法が無いかを検討することも課題となる．

[学会発表]

[1] エン，高橋，中野：「バーチャルスライドの特徴量分布可視化 - 特徴量の組合せ - 」，第 16 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会，A2-1，2021.

[2] 畑仲，佐々木，中野，高橋：「早期肝細胞癌の病理診断支援 - 細胞核による鑑別 - 」，電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会，92，2022.

[3] 畑仲，佐々木，高橋，中野：「早期肝細胞癌の病理診断支援 - 細胞核による鑑別 - 」，電子情報通信学会総合大会，D-16-5，2022.

[4] 佐々木，山見，高橋，中野：「輪郭補完による肝病理組織標本画像の核抽出」，パーソナルコンピュータ利用技術学会論文誌，Vol. 16，No. 2，pp. 12-19，2022.

TOPへ戻る

自動運転への相互結合ニューラルネットワークによる倫理観モデルの実装

機械制御システム学科　　伊東　敏夫

1．まえがき

現在，自動運転の実用化には5つの課題がある．5つの課題とは，センサの実用化，テイクオーバー，手動運転車と自動運転車の混在，事故の責任問題，事故のときに生じる倫理的な問題である．これら5つの課題の中で解決の目途が立っていないのが，倫理的な問題である。この倫観課題を端的に表すものがトロッコ問題である．トロッコ問題とはブレーキの効かないトロッコがまっすぐ進めば5人，進路を変えれば1人の人間を轢いてしまう場合にどちらを選択するかという問題である．自動運転だと最悪このような状況も想定されるため，AIにどちらを選択するかを学習させる必要がある．しかし，倫理的な状況をどのように学習させるのかが課題となっている．本研究ではこの倫理観課題について検討する．

トロッコ問題を自動運転車に応用した思考実験が，マサチューセッツ工科大学のメディアラボの研究チームが作成したモラルマシーン（図1）である．これはトロッコ問題のように車がどちらかに進まなければならないときにどちらを選ぶかを調査したサイトである．この調査を233の国と地域に住む約4000万人がオンライン上で回答した．研究チームは回答結果から生存者と犠牲者の数や性別，年齢，人間か動物かなどのパラメータの中から何を優先して決めているかを分析した．回答結果から共通の傾向として，動物よりは人間，少人数よりは多人数，高齢者よりは若者を優先して助けることが分かった．つまりトロッコ問題の選択が人間の倫理観に反映されると考える．メディアラボの研究結果から共通の傾向が得られた一方で，地域や文化によって回答結果に差が生じた．大きく分けて，アジアや中東などのイスラム教や儒教など影響がある東グループ，欧米諸国やロシア，ブラジルといった主にキリスト教の影響を受けている西グループ，中南米諸国やフランスの南グループの3つに分けられる．西や東グループは自動運転車の進路を変更したがらないや，南グループは性別による影響が大きいといった傾向がみられる．また，日本やフィンランドといった治安の良い国は悪い国と比べて信号無視などの交通法を無視した歩行者にぶつかる傾向があった．また経済格差の少ない国と比べ，経済格差が大きい国ではホームレスのような社会的地位が低い人を選択する傾向も

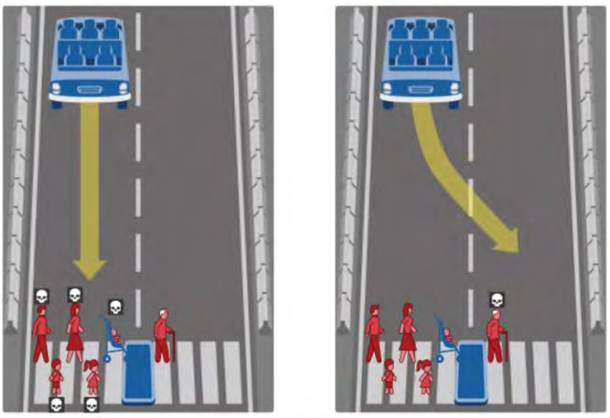


Fig.1 The moral machine

TOPへ戻る

みられる．このように，地域や宗教のような文化によって倫理観が異なっていることが分かる．

２．研究計画

先行研究ではアンケートから地域ごとの回答結果が得られた．しかし，実際に自動運転車に乗ってトロッコ問題のような状況を体験することで人間の内部状態から新たな倫理観の傾向を推定できるのではと考えた．そこで本研究では，トロッコ問題を自動運転車に応用してその状況を体験してもらい，そのときの脳波や脳血流の変化具合を調べる．もし望まないほうに進んだ場合，ドライバは焦って脳波や脳血流の変化が望むほうに比べて増加すると考えられる．そしてこの結果から，倫理観を決定するパラメータを相互結合ニューラルネットワークでモデル化し，競合する状況を再現可能かどうか検討する．

３．計画の進行状況

今回の実験の実験協力者は 20～24 歳の学生 20 名である．協力者は全員普通自動車免許を所持している．本実験は再現性や安全性を考慮し，ドライビングシミュレータによる実験とした．実験は実験協力者の予定の都合上，午前 11 時から午後 6 時の間で実施し，昼食後などの時間は避け，眠気はほとんどなく運転に比較的最適な状態であった．

まずドライビングシミュレータに乗車してもらい脳波計と脳血流計を取り付けた後に，調査としてタブレットでモラルマシーンの図を用いて合計 5 つの状況を見てもらい，どちらを選ぶか調査した後に実験を実施する．なお見せた順序と実際に走る順序は異なっている．自動運転のため，ハンドル操作やアクセル，ブレーキを踏んでも運転には影響は無い．コースの走行中にブレーキが故障したことを想定し，警告音およびハンドル操作を行うよう表示した．またブレーキ故障と同時に目の前に歩行者が横断歩道を渡っており，どちらかを選んで衝突してしまうという状況である．今回の実験では実験時に直進したかハンドル操作をしたかのデータやそのときの人間の内部状態として実験協力者の脳波と脳血流の状態を計測する．また脳血流計の性質上，リラックス時からの測定を行いたいため，実験の前後には目をつぶってもらい休んでもらう．なお，本実験は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認を受けており，実験前に実験協力者に対し，実験内容に関する説明を行い，同意を得た上で実験を行った．実験に用いたドライビングシミュレータを図 2 に示す．



Fig.2 Driving simulator

事前提案手法の評価については脳波解析と脳血流解析の 2 種類を行う．

脳波解析は頭部の合計 14 点の脳波計測を行うことが出来る脳波計を用いた．なお実験では危険を察知したときに活動が大きくなると考えて前頭葉付近に着目する．状況が視界に入ると脳が緊張状態になり，β 波が大きくなると考えた．そこで脳の活動時に出る β 波と，リラックス時に出る α 波との比率 β/α で評価を行う．これは人間の心理状態を観察するための指標としてよく用いられている．今回実験で取得したデータをハイパスフィルタとローパスフィルタに通し，FFT 処理を行い周波数成分への変換を行った．

脳血流測定に使用した脳血流計は額に貼るだけで前頭葉付近の脳血流の酸化ヘモグロビンの濃度などを計測することが出来る小型の脳血流計である．この脳血流計を用いることで脳波計と干渉することなく脳波と脳血流を同時に計測できる．脳波と同様に前頭葉付近の脳血流について着目する．状況が視界に入ると焦りが生じ，緊張状態になり脳血流の酸

TOPへ戻る

化ヘモグロビンの濃度が上昇すると考えた．脳内で神経活動が行われると，エネルギー代謝が増加し，酸素が消費される．その酸素を供給するために脳血流における酸化ヘモグロビンが増加する[1]．今回脳血流計のデータから酸化ヘモグロビンの濃度の変化の解析を行う．得られたデータにローパスフィルタを通し，警告音が鳴る 10 秒前の酸化ヘモグロビン濃度を基準値とし，時間的変動を測定した．

まず事前調査の実験協力者の傾向についてまとめた表を以下表 1 に示す．

Table 1 Trends of experimental collaborators

	Situation	Straight	Change the course
Course 1	Young or elderly	3	17
Course 2	A passenger or a pedestrian	9	11
Course 3	a pedestrian or a dog	0	20
Course 4	Three women or a man	0	20
Course 5	Three men or a woman	1	19

図 3，図 4 に 1 つ目のコースの脳波解析の結果を示す．望んだほうに進んだときの脳波の平均と望まないほうに進んだときの平均である．図 3 が F3 の電極から取得した脳波，図 4 が F4 の電極から取得した脳波である．解析結果から警告音が鳴ってからβ／αの値が上昇していることが分かる．なお 0 s のときに警告が表示された．

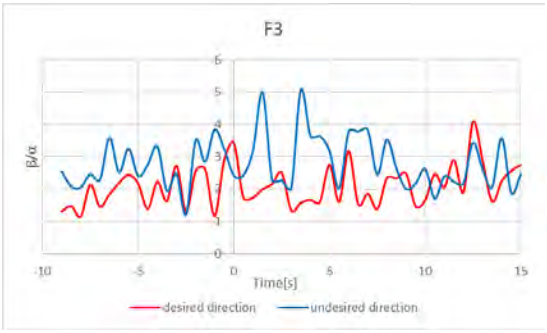


Fig.3 Result of F3's EEG analysis in first situation

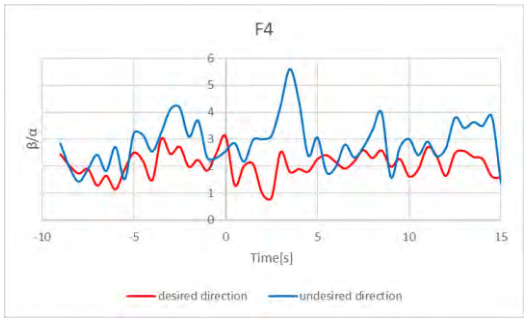


Fig.4 Result of F4's EEG analysis in first situation

図 5 に 2 つ目のコースの F4 から取得した脳波解析の結果を示す．倫理観が分かれていることもあり，大きな差は見られなかった．

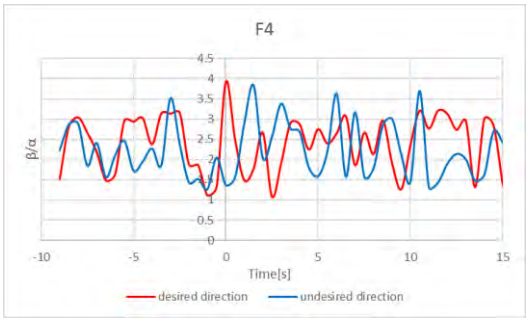


Fig.5 Result of EEG analysis in second situation

図 6 に 3 つ目のコースの F3 から取得した脳波解析の結果を示す．解析結果からβ／αの値が上昇していることが分かる．

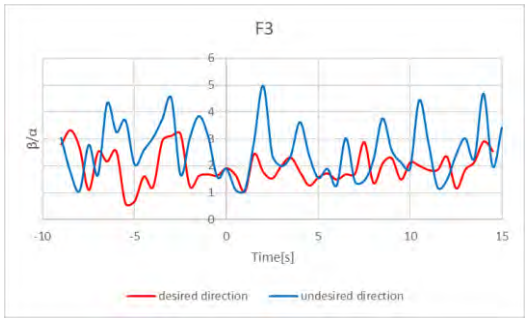


Fig.6 Result of EEG analysis in third situation

図 7 に 4 つ目のコースの F4 から取得した脳波解析の結果を示す．警告音が鳴ってからβ／αの値が上昇していることが分かる．

TOPへ戻る

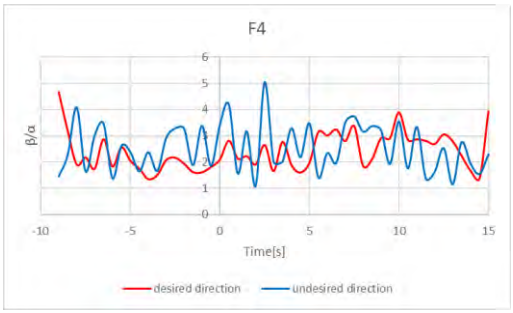


Fig.7 Result of EEG analysis in fourth situation

図 8 に 5 つ目のコースの F3 から取得した脳波解析の結果を示す．倫理観に傾向は出ていたが，脳波では傾向は確認できなかった．

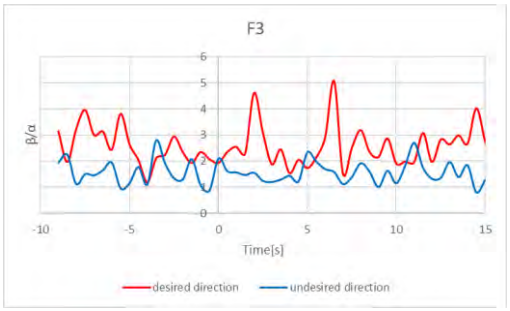


Fig.8 Result of EEG analysis in fifth situation

図 9 に 1 つ目のコースの酸化ヘモグロビンの濃度変化，図 10 に 4 つ目のコースの酸化ヘモグロビンの濃度変化，図 11 に 5 つ目のコースの酸化ヘモグロビンの濃度変化を示したグラフを示す．それぞれ望んだほうに進んだときと望まないほうに進んだときの平均濃度である．解析結果から望まないほうに進んだときのほうが酸化ヘモグロビンの濃度の上昇が確認された．

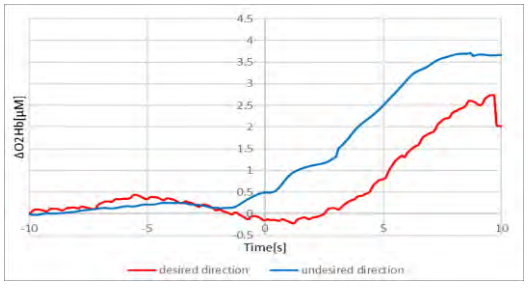


Fig.9 Result of cerebral blood flow in first situation

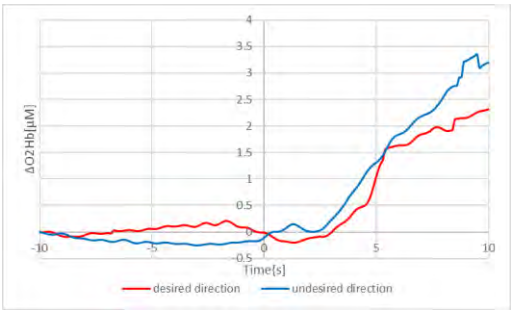


Fig.10 Result of cerebral blood flow in fourth situation

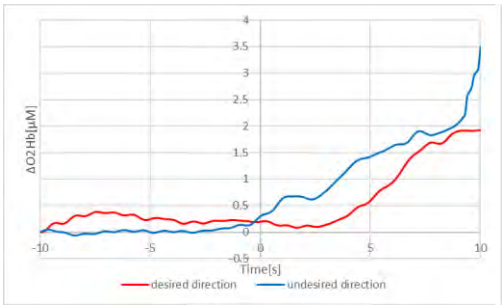


Fig.11 Result of cerebral blood flow in fifth situation

脳波解析からは倫理観が比較的一致していた状況に関しては警告音が鳴ってから望まない方向に進むことに対して β/α が大きくなるといった結果が見られた．その中でも F3 や F4 の計測箇所は傾向が出やすいことが確認された．脳血流測定も倫理観が一致していた状況に関しては望まないほうに進むと濃度が大きくなった．特に警告音が鳴ってから 7 秒以上経つと差が大きくなっている．このことから脳波と脳血流はトロッコ問題において倫理観の傾向に合わせて差が生じやすく，初期の目標であるパラメータ間の競合モデルに反映可能と考えられる．

4．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後は，今回得られた結果を相互結合ニューラルネットワークでモデル化することを検討する．学会への発表としては，自動車技術会 2022 年度学術講演会秋季大会に発表予定である．

TOPへ戻る

仮想実体人体モデルを一体化した人工股関節手術支援・トレーニングシステム

生命科学科　　花房　昭彦

共同研究者
生命科学科　　シャルー　モハマドダン
生命科学科　　高木　基樹
順天堂大学医学部整形外科　馬場　智規

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

高齢化社会の進行に伴い，人工股関節置換術が増加している．前方アプローチ法による手術が，低侵襲で人工関節のより正確な設置も可能なため予後も良いが，手技が複雑になるという問題があり，この問題を解決するため，前方アプローチ法用の下肢牽引手術台が開発され使用されている．過牽引，過伸展，過旋回を行うと筋肉，神経等の組織が損傷をうけ合併症を併発する危険があるが，これまで，その操作量は医師の経験的な判断によっていた．本研究の目的は，下肢牽引装置を用いた人工股関節手術時の，股関節回りの筋肉等にかかる負荷を明らかにし，その結果より下肢牽引装置に警告機能を付加すること，またその手術トレーニングを可能として，より安全な手術支援システムを構築することである．

本研究の特徴は，手術時の牽引操作量，牽引力を計測するシステムと共に，筋肉モデルを有するPC上の仮想的な人体モデルと共に，実体を持った人体モデルが一体となったシステムを構築し，精度の高い筋肉等に対する負荷を評価できるようにし，安全基準を推定して，より安全な人工股関節手術が行えるようにしている点，またその実体人体モデルを利用して，より安全な手術のトレーニングが行えるようにすることを目指している点である．

２．研究計画

本研究は2018年度より股関節手術用の牽引台を作成しているサージカルアライアンス株式会社との共同研究としてスタートした．2018年度と2019年度は図1に示す下肢牽引台に，牽引力を計測する6軸の小型力センサを搭載して手術時の力とモーメントを計測可能なシステムを構築した[1]．本装置は2019年11月，一般医療機器整形外科用手術台　JMDN　コード：35394000「LECURE　牽引力測定ブーツ」として登録され，手術に使用することが可能となった．以降，人工股関節手術時のブーツにかかる3軸方向の力と各軸回りのモーメントの計測を進めている．

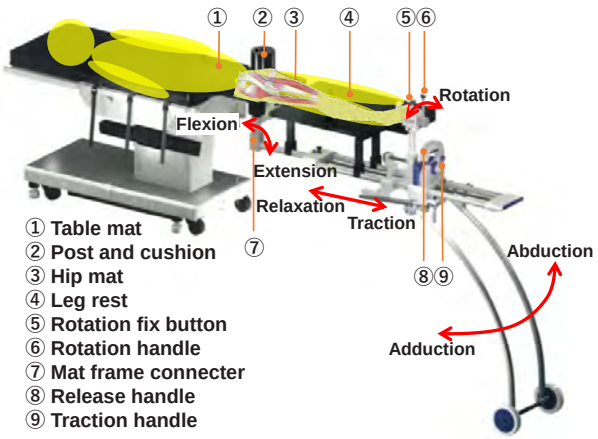


図1　下肢牽引装置(ｻｰｼﾞｶﾙｱﾗｲｱﾝｽ社)

TOPへ戻る

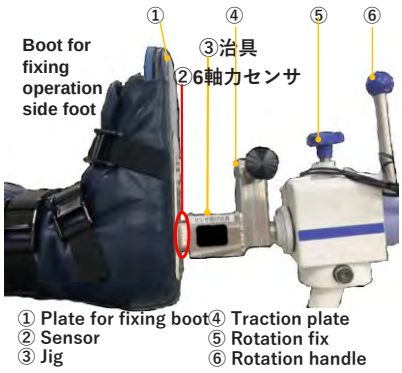


図 2 力センサ②を装着した牽引部

2020 年度は操作量の計測を慣性(IMU)センサによって行うシステムを構築し，屈曲・伸展，外転・内転，回旋動作が基本的に計測可能なことを確かめた[2].

股関節手術時の力計測データから，回旋動作時のモーメントがセンサの定格容量を越えていることが明らかとなった．このため，本プロジェクト研究の助成を受けた 2021 年度は，より定格容量の大きい 6 軸力センサの選定と購入，IMU センサも同時に搭載可能な新しい治具の設計を進めた．また PC 上の仮想的な人体モデルの筋骨格シミュレータ上への試行的な構築とシリコンゴムチューブによる筋モデルを有する実体モデルの試作を行った.

2022 年度からは，科研費「基盤 C」への申請が採択され，3 年間の研究費の助成が受けられることとなった．2022 年度には，新 6 軸力センサと IMU センサを搭載した治具を製作し,牽引台に設置して牽引評価実験を行う．仮想人体モデルは新たに有限要素解析ソフト上へのモデル作成と解析を試みる．実体人体モデルに関しては，張力計測可能な筋モデルへの機能拡張と筋肉数の増加を行う.

2023 年度以降は，手術時の牽引力計測データの蓄積を行い，仮想，実体人体モデルによる評価結果と比較して，筋にかかる負荷の妥当性評価，安全基準の導出を行う．この結果をもとに，牽引装置に警告機能を付加し，より安全な手術が可能な手術支援システムを構築する予定である.

2024 年度には，開発した手術支援システムを利用して，前方アプローチ法による手術トレーニングが行えるシステムへの拡張を行う.

３．計画の進行状況

本プロジェクト研究費の助成を受けた 2021 年度の計画の進行状況をまとめる.

牽引装置の牽引力，牽引量計測装置に関しては，従来牽引力の計測には，6 軸力センサ USX10-H10-1.5kN-A（株式会社テック技販）を使用していた．30 x 30 x 10[mm], 40[g]と小型，軽量であったが，特に旋回方向のモーメント計測の定格容量が 6[Nm]と小さく，手術時にはその定格容量を越えることがあった．このため，旋回方向のモーメント定格容量が 30[Nm]と大きい FFS080YS102U6S（株式会社レプトリノ）を新たに選定した．外径がφ80[mm]，重量が約 500[g]と大きく，接続の方法も異なるため，図 2 に示す力センサと牽引部を接続する③治具の再設計を行った．CAD で作成した外観図を図 3 に示す.

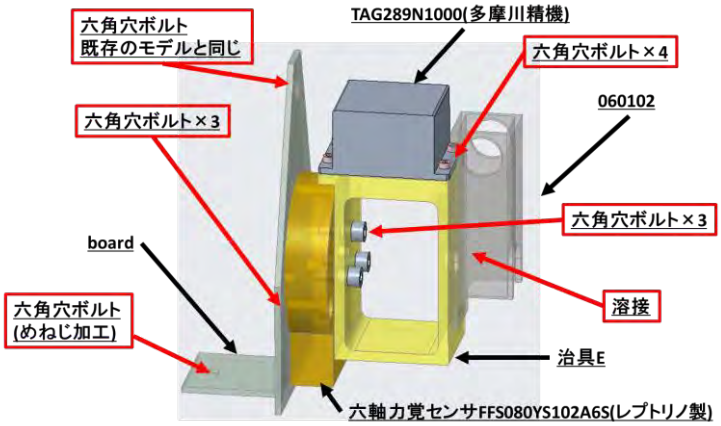
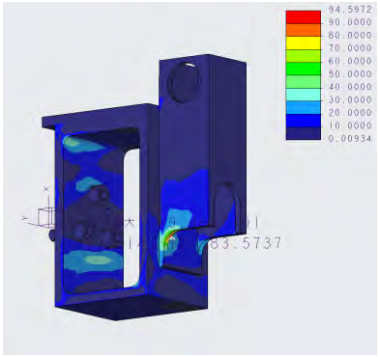


図 3 新たに設計した力センサ取付用治具

また，この治具上部には，2020 年度に評価を行なった牽引部の操作量を計測するための IMU センサ TAG289N1000 (多摩川精機株式会社)を搭載できるようにした．また力センサ取付用のボルトを締めやすくするため，開口部を大きくした．新形状とした場合でも，強度や変形量に問題ないかどうかを，Creo CAD (PTC 社)の有限要素法解析ソフトで解析評価

TOPへ戻る

した．センサ部に牽引力 1000[N]，旋回モーメント 30 [Nm]のセンサの定格容量と等しい力がかかったとして解析を行なった結果を図 4 に示す．



(a) ミーゼス応力分布[MPa]

図 4 新規製作治具の有限要素法解析結果

最大ミーゼス応力 94.6[MPa]（安全率 5.50），最大変位 0.0417[mm]と問題の無い結果となった．現在，本治具は株式会社大倉製作所にて製作中である．

仮想人体モデルに関しては，筋骨格シミュレータ OpenSim (National Center for Simulation Rehabilitation Research) を利用してのモデル構築を試みた．下肢に筋モデルを定義し，足部に荷重をかけたモデルを図 5 に示す．

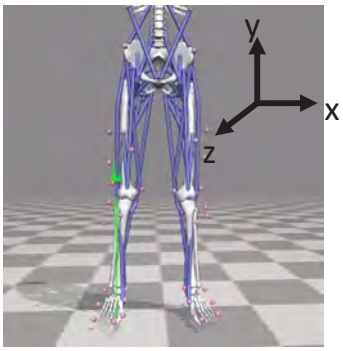


図 5 下肢筋モデルの右足底部に荷重負荷

本モデルによって筋力推定した結果を図 6 に示す．

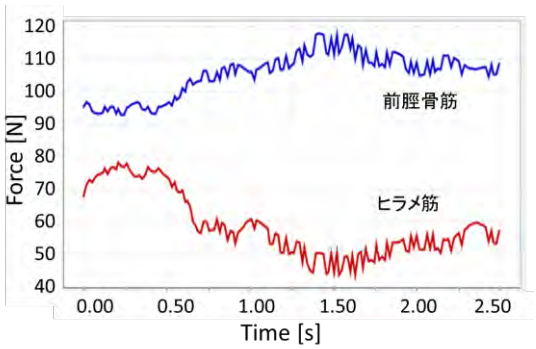


図 6 OpenSim により推定した前脛骨筋筋とヒラメ筋の筋力

図 6 に示すように一定外力を負荷したにもかかわらず，推定した筋力は変動する結果となった．また牽引装置での牽引時には，人工股関節埋入のため，股関節は離断された状態となっている．しかし，OpenSim によるモデルでは，股関節を離断した状態の再現が困難なことがわかった．このため，OpenSim の利用は断念し，別の解析ソフトの利用を目指すこととした．

実体人体モデルは，骨格標本モデルに筋肉を模擬した弾性体を付加することによって実現することとした．2021 年度は柔らかく弾性があり，入手が容易なシリコンゴムチューブを筋肉モデルとして使用した．外径 15[mm]で内径 6[mm]と 9[mm]のチューブを評価した．内径 6[mm]に対して引張試験を実施した結果を図 7 に示す．

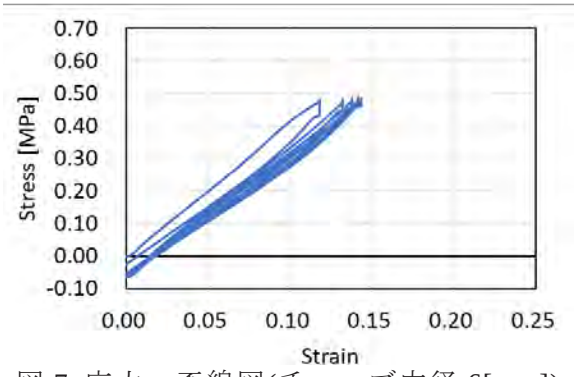


図 7 応力－歪線図(チューブ内径 6[mm])

ヤング率を求めた結果，内径 6, 9[mm] 各々平均 3.50, 3.22 [MPa]と内径 6[mm]の方が大きい結果となった．ただし，ヒト腹直筋の引張試験結果では，ヤング率 0.134～0.252[MPa]というデータがあり，それよりは 10 倍以上大きい

TOPへ戻る

値である．

2021 年度は図 8 に示すように大腿直筋，縫工筋，半腱様筋の 3 種類の筋を模擬し，その起始と停止の位置間に上記のシリコンゴムチューブによる筋モデルを配置した．

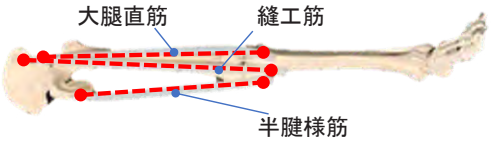


図 8 モデルを定義した筋肉位置

試作した実体モデルを使用して，牽引台による牽引実験を行い，牽引力を計測する実験を行なった．実験時の状態を図 9 に示す．

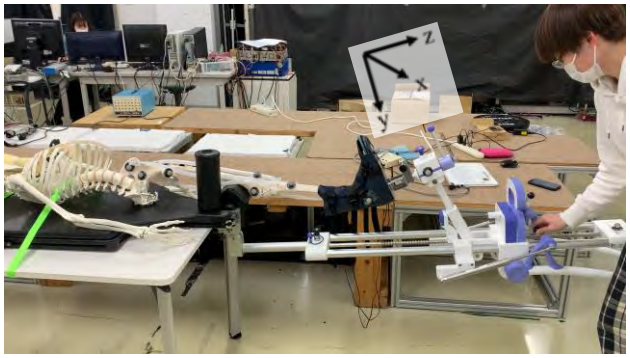


図 9 実体モデルによる牽引実験の状態

実験の方法を以下に示す．

- 筋モデルは内径 6, 9[mm]を使用して比較
- 牽引量 50[mm]（ハンドル 10 回転分），各 10 試行
- 股関節は外れた状態にする．
- ブーツに取り付けたセンサにより力とモーメントを計測

チューブ内径 6[mm]の時の力計測結果を図 10 に，モーメント計測結果を図 11 に示す．牽引操作は約 5～10[s]の間に実施している．

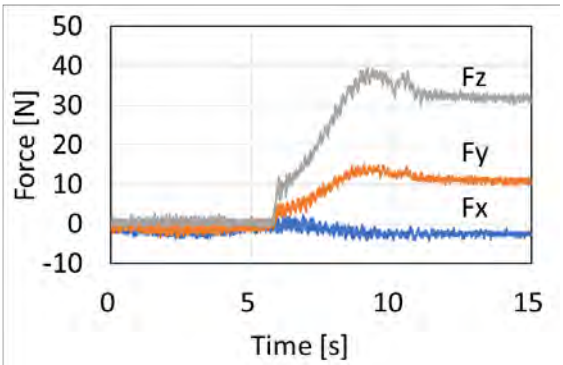


図 10 力計測結果(チューブ内径 6[mm])

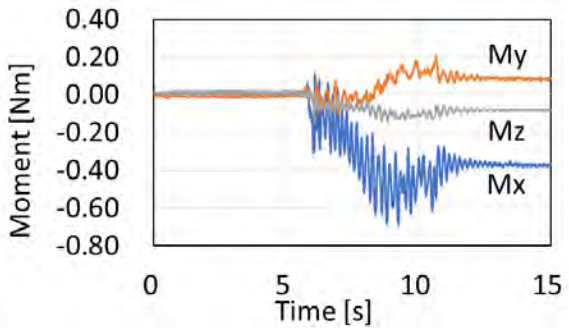


図 11 モーメント計測結果
(チューブ内径 6[mm])

図 10 の F_z が牽引方向の力と，図 11 の脚を屈曲させる方向のモーメント M_x が大きい結果となった．F_z の最大値は内径 6[mm]のチューブで平均 40.7[N], 内径 9[mm]では平均 37.1[N]となり，内径 6[mm]の方が有意に大きい結果となった．ただし，手術時の牽引力は最大 750[N]となることがあり，約 1/20 以下の値となった．今後この牽引力を手術時の値に近づけたモデルを構築する必要がある．

4．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

2022 年度中に，新規に設計した力センサ搭載用の治具を完成させ，定格容量の大きい力センサと IMU センサを取り付けた後，牽引台による評価を行なう予定である．仮想人体モデルに関しては，新たに動的有限要素解析ソフト LS-DYNA を利用しての解析を試みる．また実体モデルは手術時の牽引力と近づけるために，重量を人体の下腿と同様にするために増加させ，筋モデルの数も増加させる予定である．筋張力についても，センサにより計測できるようにシステム構築を行なう．

過去の本研究の成果は 2019 年度[1]と 2021 年度[2]の学会で発表してきた．2021 年度の成果は，2022 年 6 月に開催される第 61 回日本生体医工学会大会 2022 にて発表する予定[3]である．また 2022 年度中に，これまでの成果に関して論文を投稿する予定である．

参考文献

[1] 中津友里，花房昭彦，大石泰史，馬場智規，「人

TOPへ戻る

工股関節置換術用支援システムの開発」, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2019, pp.33, 2019.（講演論文賞を受賞）
[2] 加藤拓樹, 花房昭彦, Shahrol Mohamaddan, 高木基樹, 大石泰史, 馬場智規,「人工股関節置換術用支援システムの開発 −下肢牽引手術台姿勢計測の試み−」, 第 30 回ライフサポート学会フロンティア講演会, 予稿集, pp.48, 2021.
[3] 原朱那, 花房昭彦, Shahrol Mohamaddan, 高木基樹, 大石泰史, 馬場智規,「人工股関節置換術支援システムの開発－股関節筋群を配置した人体モデルによる牽引力評価－」, 第 61 回日本生体医工学会大会 2022, 2022.6.(採択決定)

TOPへ戻る

肥満由来のHSP60を介したミトコンドリア機能不全とトコトリエノールによる防御

生命科学科　　福井　浩二

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

肥満は大きな社会問題である．申請者は，肥満による生体内酸化の亢進が，二次的疾患発症の要因の一つと考え，これまで肥満マウスを用いて様々な検討を行ってきた．近年，我々はビタミン E(E)の一種トコトリエノール(T3)を，その強力な抗酸化作用を期待して高脂肪食(HFD)と同時に摂取させたところ,有意な抗肥満効果も同時に有することを明らかとした．またこの際，摂餌量は変化せずに脂肪量の有意な減少を確認した．これらは T3 の抗肥満効果が，ミトコンドリアの呼吸鎖やエネルギー代謝系に関与する可能性を示しているがそのメカニズムは全く不明である．そこで本研究では，HFD に T3 を同時添加したマウスにおける摂餌・運動量と呼吸代謝能を測定し，T3 の呼吸代謝能への関与を証明する．また，肥満時には過剰な酸化ストレスや脂質異常により，各臓器中で酸化タンパク質や立体・折り畳み構造が崩壊した（ミスフォールディング）タンパク質の割合が増える．そのため，脂肪組織や肝臓・脳中のミトコンドリアで，ミスフォールディングタンパク質の修復に関与する分子シャペロンの一つである Heat Shock Protein (HSP) 60 の発現変動に T3 が寄与することを立証する.これにより T3 が HSP60 の発現調節を介してミトコンドリアの恒常性を維持し，その結果，抗肥満効果を発揮することを証明し，食事摂取由来での予防医学的な可能性を明らかにする．

２．研究計画

マウスに高脂肪食と T3 を 2 か月間与え,抗肥満効果を検証する．その後，迷路課題を実施して認識機能や協調運動能力を判定，呼吸代謝装置を用いて呼吸商の変化を検証する．これらの実験が終了した後，解剖して各組織の生化学的解析を実施する．

同時に HSP60 の測定するための条件設定を行う．HSP60 はミトコンドリア特異的タンパク質であるため，ミトコンドリアの単離方法の確立を試みる．当研究室には超遠心機がないため，通常のシュークロースバッファを用いての密度勾配法は用いることができない．そのため，別の単離方法を確立する．

最後に，T3 の効果との関連を検証するために,各組織中の T3 量を液体高速クロマトグラフィ（HPLC）にて測定する．

３．計画の進行状況

全ての動物実験は本学の実験動物委員会に実験計画書を提出し，承認を得たのちに実施した．C57BL6 に 2 か月間 100g の餌に T3mix を 50mg 混ぜた餌を作成し投与した．2 か月間の投与により，HFD 群では体重が有意に増加したが，HFD に同時に T3 を添加すると，これまでの我々の報告と同じく，体重が有意に減少した．(Figure 1A) これより，T3 に体重抑制効果のあることが改めて明らかとなった．更にこの際，腎周囲脂肪と睾丸周囲脂肪量を測定したが，睾丸周囲脂肪量に変化はなかっ

TOPへ戻る

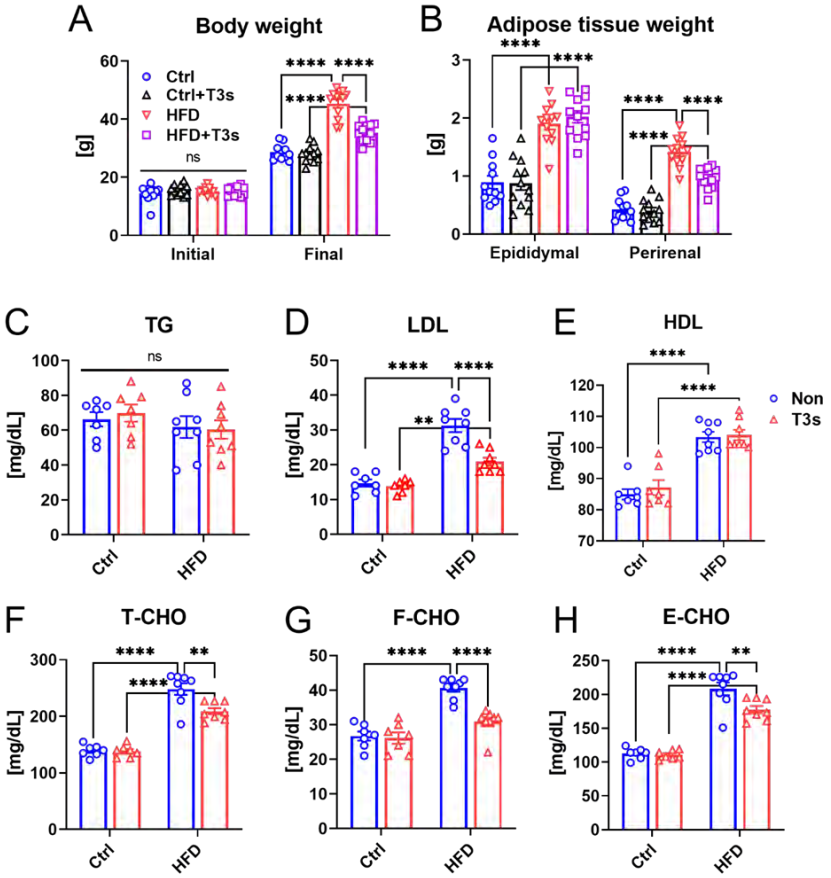


Figure 1　T3 は体重増加を抑制し血清コレステロール値を大幅に減少させる

たものの,腎周囲脂肪は T3 の投与によって有意に減少していた.(Figure 1B)更に，いくつかの血清マーカーを測定したが，低密度リポタンパク質（LDL)，コレステロール（トータルコレステロール（T-CHO)，遊離型コレステロール（F-CHO)，エステル型コレステロール（E-CHO)）が T3 添加により有意に減少していた.（Figure 1C-H）これらの事から，T3 添加による体重増加抑制作用の原因の一つには,脂肪量の減少と脂質代謝が関与している可能性のあることが分かった.

呼吸商測定装置では，リアルタイムでどの程度酸素を消費したかがわかる．本装置は今年度新規導入したものであり，現在も実験を実施している最中である．現在までの結果では,T3 投与により代謝能に変化が確認されている.

次に,組織中に含まれる T3 量を測定した.通常，我々の体内には輸送タンパク質（α-TPP）が存在するために，ビタミン E の中でもαトコフェロールが圧倒的に多い.しかし,2 か月間の T3 の添加により,脳や脂肪組織中ではαT3 が有意に増加していることが明らかとなった.（Figure 2）T3 は高度不飽和脂肪酸を多く含む脳や血液が多く流れ込む肝臓,また皮膚や脂肪組織中に比較的多く集まりやすいことが指摘されている．今回の実験結果は，これらの従来からの説を裏付けるものとなった．しかし，αトコフェロール量と比較するとその量は何百倍も少ない．この非常に少ない T3 が脳や肝臓,脂肪組織中で重要な役割を直接的に果たしているのか？それとも間接的なのかなどは今後の課題である.

TOPへ戻る

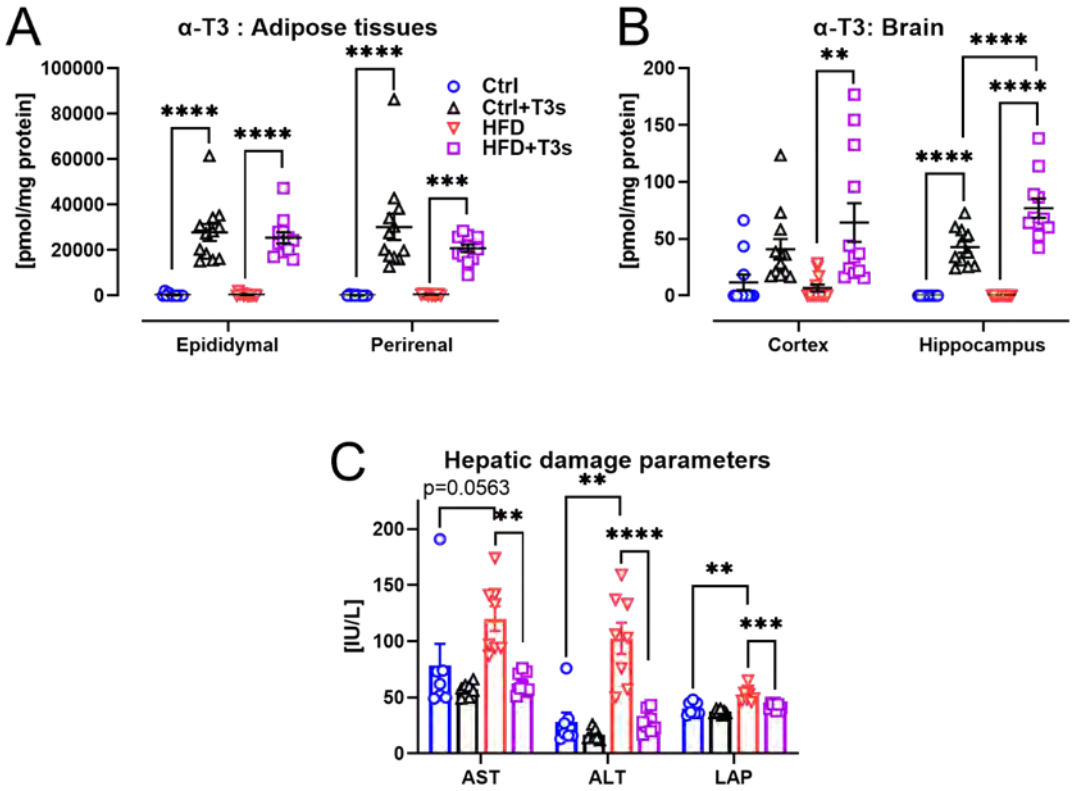


Figure 2　脳や脂肪組織中では T3 は有意に増加する

T3 による抗肥満効果にはミトコンドリア機能の活発化による脂肪燃焼効果が一因として考えられる．そこで，HSP60 について検討するために，ミトコンドリアの単離法の確立を行った．初めに SureBeads システムを用いて COX IV 抗体を用いた単離を試みた．その結果，Western Blotting による検証では，単一のバンドが確認されたものの，想定していた分子量とは異なる位置にバンドが検出される結果となった．この一因として，SureBeads に付随しているアンカーが COX IV 抗体と結合しており，この分の分子量が増加した結果なのではないかと想定しているが，アンカー部の分子量は不明であるため，この仮説を立証することはできていない．次に，SureBeads を用いない単離方法の確立を試みた．方法は可能な限り現在保有している遠心機で高 G のもとで遠心分離を行うというものである．詳細な条件は割愛するが，その結果，かなり濃い濃度でミトコンドリアが単離できることが明らかとなった．しかし，この方法ではミトコンドリア以外の細胞小器官（ER など）が混在している可能性は否定できない．よって，更なる改良が必要である．

一方，同時に RT-qPCR を用いて HSP60 の遺伝子発現量の測定を試みた．まず初めに，BLAST にてプライマーを設計し，その後，qPCR による検量線の作成を実施した．その結果，高い精度で検量線を作成することができ，HSP60 について RT-qPCR を実施することが可能となった．今後はマウスサンプルを用いて HSP60 の RT-qPCR を実施する予定である．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今回の結果から，T3 による抗肥満効果の確認とそれに伴うミトコンドリアを介した脂質･脂肪代謝の亢進が明らかとなりつつあり，更にそのメカニズムとして，ミトコンドリア内の HSP60 の関与まだを明らかとしたかったが，この点は現在も検討中である．次年度以

TOPへ戻る

降も引き続き，同内容を検証していく．

論文

・ Kato Y, Aoki Y, Kiyose C, **Fukui K**, Tocotrienols Attenuate White Adipose Tissue Accumulation and Improve Serum Cholesterol Concentration in High-Fat Diet-Treated Mice, ***Molecules,*** 27(7), 2188, 2022, (*Corresponding Author) doi: https://doi.org/*10.3390/molecules27072188*

・Kato Y, Uchiumi H, Usami R, Takatsu H, Aoki Y, Yanai S, Endo S, **Fukui K***, Tocotrienols reach the brain and play roles in the attenuation of body weight gain and improvement of cognitive function in high-fat diet-treated mice, ***Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition***, 69(3), 256-264, 2021 (*Corresponding Author), doi: 10.3164/jcbn.21-10

学会発表

・加藤優吾、**福井浩二**、トコトリエノールは肥満および脳酸化を予防する、**第 34 回　日本酸化ストレス学会　関東支部会**、12 月 18 日、(Web 開催)

・**福井浩二**、ビタミンＥによるマウスの抗肥満効果について、セッション No. 2S05e：放射線障害と加齢性傷害:食事の影響、**第 94 回日本生化学会大会**、11 月 9-11 日（Web 開催）

・**福井浩二**、ビタミンＥによる神経保護作用について、シンポジウム 3：ビタミンと脳神経機能、**第 73 回　日本ビタミン学会　Part2 大会**、11 月 21 日（東京）(Hybrid 開催)

・Kato Y, Ben J, **Fukui K**, The relationship between obesity and cognitive dysfunction; Prevention by tocotrienols, **50th Annual Meeting of the Society for Neuroscience**, Chicago, Nov.4-7, 2021 (with Online)

・**福井浩二**，加藤優吾，投与量や投与期間の違いによるトコトリエノールの抗肥満効果について，**第 368 回　脂溶性ビタミン総合研究委員会**，6 月 18 日（Online hosted by SIT）

TOPへ戻る

脱細胞化技術を用いた人工腎臓の創製

生命科学科　　中村　奈緒子

共同研究者
東京医科歯科大学 生体材料工学研究所　　岸田 晶夫
東京医科歯科大学 生体材料工学研究所　　木村 剛

１．序論

年々増加し続けている腎臓疾患患者の増加やドナー（臓器提供者）の不足の問題を解決するべく、長期的な生着が可能な人工腎臓の開発が望まれているが、腎臓は血管・糸球体・尿細管・腎盂・尿管などの組織を有する複雑で複合的な臓器であるため、人工的な再生が困難な臓器として知られている。

再生医療・組織工学的な手法による腎臓再構築として、腎臓より細胞成分を除去し、細胞外マトリックスを保持した脱細胞化腎臓が、三次元構造を有する足場材料として期待されている。これまでに報告された脱細胞化方法は界面活性剤法であり、成分除去能力は高く、細胞成分のみでなく、多くの細胞外マトリックスまでも破壊し、除去してしまうことが知られている。一方で、申請者らはこれまでに高静水圧印加を応用した新規の脱細胞化手法を開発し、細胞外マトリックスを多く維持した脱細胞化組織の調製に成功している。特に、血管内腔に存在する薄い基底膜と呼ばれる細胞外マトリックスは、血管内皮細胞の接着に顕著に影響し、これらは血管の早期の内皮化や血管閉塞の抑制にポジティブに働くことが明らかとなっている。腎臓の主な機能は血液から水分や特定の物質を濾過・再吸収することであるが、この過程は腎臓内に局在する血管内皮細胞と腎実質の上皮細胞、そしてそれらの間に存在する基底膜によって行われている。したがって、腎臓の機能に必須の血液濾過の実現には、血管内皮細胞や腎臓上皮細胞の接着に大きく寄与する基底膜を残存させた脱細胞化腎臓を作製し、重要な役割を担う細胞を適切な場所に再配置させる必要があると考えた。これらの学術的背景をもとに、基底膜の成分および三次元的構造を維持した脱細胞化腎臓の作製および再細胞化による人工腎臓の創製の実現可能性を本研究課題の核心をなす学術的「問い」とした。

腎臓の再細胞化では、血管内皮細胞と腎臓の細胞であるメサンギウム細胞は血管の基底膜の内腔に、腎臓の細胞である腎上皮細胞は基底膜の外側に、尿細管細胞は尿細管内腔にと、それぞれがあるべき場所に局在し、機能発現を行う必要がある。人工的にこれらの細胞を再配置するのは困難でだが、申請者らが見出した脱細胞化組織のガイドの役割（細胞の再配置や機能発現を誘導すること）を利用することで、腎臓への細胞の再配置を実現できると考えた。

申請者らはこれまでに、種々の組織における in vivo 組織再構築を報告しており、脱細胞化海綿骨では、異所性において造血や造血幹細胞の生着を誘導すること、歯根膜でも異所性において歯根膜のコラーゲン繊維に細胞が再配置し、歯根膜様の組織の再構築による硬

TOPへ戻る

組織との結合することが示された。これらは、脱細胞化組織の細胞外マトリックスが、本来の細胞成分や機能を再構築すべく、細胞の再配置や機能発現を誘導していることを示している。以上の背景のもと、細胞外マトリックスの微細な三次元構造や成分を維持することが極めて重要だと考え、高静水圧印加処理法を応用して調製した脱細胞化腎臓を用いることで、本来の腎臓と同様の部位に細胞を再配置させた再細胞化腎臓を構築できるとの着想に至った。腎臓の再生に関する研究において、近年注目されている細胞を主体としたアプローチであるオルガノイド研究では、ネフロン、血管系、腎臓間質などからなる腎臓の最小単位を形成することに成功している。これは腎臓に対する薬剤の毒性試験や腎臓機能の解明を主な目的としている。一方、申請者らは腎移植を目指した腎臓そのものの再生を目的としている。腎臓に限らず生体の臓器は三次元的な構造を形成しているため、細胞だけを用いて生体外で臓器全体を再構築することは困難であり、材料を主体としたアプローチが必要である。界面活性剤を用いた脱細胞化腎臓の再細胞化では、再細胞化腎臓の濾過および再吸収の機能性は低く、その原因は脱細胞化腎臓への細胞の接着が不十分であることが報告された。細胞接着性向上には、細胞接着面の改善や播種細胞自体の改質が必要であると考えられている。

種々の脱細胞化技術を用いて基底膜の成分および三次元的構造を維持した腎臓の細胞外マトリックスを作製すること、脱細胞化腎臓に播種・培養された血管内皮細胞および腎臓上皮細胞の接着性および機能発現を明らかにすること、再生医療・組織工学的に再細胞化した人工腎臓の血液濾過機能を解明し、生体腎・献腎移植の代替としての有用性を明らかにすることを本研究課題の目的とした。

手法として、①種々の手法による腎臓の脱細胞化の条件検討および細胞外マトリックスへの影響の検討、②in vitro における血管内皮細胞および腎臓上皮細胞の接着性および機能発現の検討、③in vitro における再細胞化腎臓の血液濾過機能の検討を実施する。

これまでに報告されている脱細胞化腎臓の作製は、簡便な方法である界面活性剤を用いた手法が主流であるが、この手法では基底膜の維持が困難である。一方、申請者らの開発した高静水圧印加処理法は大動脈などの大きな血管では基底膜の維持と細胞成分の除去を両立できているものの、微細な血管網が豊富な臓器全体の細胞成分の除去は十分ではなく、脱細胞化腎臓の作製には至っていない。そこで本研究課題では、高静水圧印加処理法と界面活性剤を併用し、界面活性剤の利用を最低限に留めることで、細胞成分の除去と細胞外マトリックスの維持を両立させた脱細胞化腎臓の調製を目指す。

２．研究計画

2-1. 種々の手法による腎臓の脱細胞化の条件検討および細胞外マトリックスへの影響の検討（2021 年度）

ラット腎臓を、高静水圧印加し、界面活性剤・DNA 分解酵素を灌流させ、細胞成分を除去する。初期検討の結果、細胞外マトリックスの残存量の異なるサンプルを調製できた。基底膜を中心とした細胞外マトリックスの維持を染色により評価し、細胞外マトリックスの残存量を制御した脱細胞化腎臓の調製を行う。

2-2. in vitro における血管内皮細胞および腎臓上皮細胞の接着性および機能発現の検討（2021～2022 年度）

血管内皮細胞として HUVEC、腎臓上皮細胞として初代培養細胞を用い、脱細胞化腎臓を再細胞化させる。血管内皮細胞や腎臓細胞の表面マーカー、および細胞外マトリックスを免疫染色し、血管内皮細胞の血管内腔への接着および腎臓細胞の腎実質部位への接着

TOPへ戻る

を明らかにする。細胞接着後、培養液を灌流させ、腎臓全体に分布する細胞への栄養供給を行い、細胞の生存性や分布を明らかにする。適宜フィードバックを行い、細胞外マトリックスの残存量と細胞接着性の関係を解明し、腎臓機能を再構築するための最適条件を明らかにする。

2-3. in vitro における再細胞化腎臓の血液濾過機能の検討（2023 年度）

再細胞化腎臓の血液濾過機能を明らかにするため、腎動脈から血液を灌流させ、腎静脈と尿管から排出された溶液を回収して、再細胞化腎臓によって濾過・産生された成分（クレアチニンなど）を分析する。コントロールとして生体腎臓を用い、再細胞化腎臓の有用性を明らかにする。

３．計画の進行状況

研究協力者として修士 1 年生 1 名が本研究の一部に参画し、修士論文のための研究テーマとした。

3-1. 脱細胞化腎臓の作製

Wistar ラット(8 週齢，オス)から腎臓を摘出し，腎動脈にサーフロー留置針を挿管した．脱血処理後，Table 1 に示す 6 条件で処理をした．ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)で細胞膜の破壊を，DNA 分解酵素である DNase 溶液で拡散除去を，構造保持のために HHP を印加した．各溶液は腎動脈からペリスタポンプで灌流させ，静脈および尿管から廃液した(24h, 1.6 ml/min)．脱細胞化評価として，HE 染色，基底膜の主な構成成分である Laminin の免疫染色，残存 DNA の定量を行った．

Table 1 Decellularization conditions

treated name	decellularization treatment		
0.5S		0.5%SDS24h	DNase24h
500H-0.5S	HHP_5000atm	0.5%SDS24h	DNase24h
10000H-0.5S	HHP_10000atm	0.5%SDS24h	DNase24h
1.0S		1.0%SDS24h	DNase24h
5000H-1.0S	HHP_5000atm	1.0%SDS24h	DNase24h
10000H-1.0S	HHP_10000atm	1.0%SDS24h	DNase24h

作製した脱細胞化腎臓の染色結果を Fig. 1 に示す． HE 染色より，処理後は細胞核が観察されず，細胞成分の除去が示された．また，すべての条件において腎小体の Laminin が陽性であることがわかり，糸球体の ECM 成分が保持されていることが示された．SDS のみで処理した条件では，糸球体以外の部位の Laminin が消失していることが示された．組織構造は，SDS が低濃度条件の方が保持されていた．また，高圧条件のほうが濃く染色され，HHP により ECM 残存性が向上することが示唆された．DNA 定量の結果より，残存 DNA 量はすべての条件で脱細胞化基準の 50 ng/mg 以下であり，未処理と比べて有意に減少した．以上より，SDS と HHP を併用することで，ECM 残存性の高い脱細胞化腎臓の作製が可能であることがわかった．

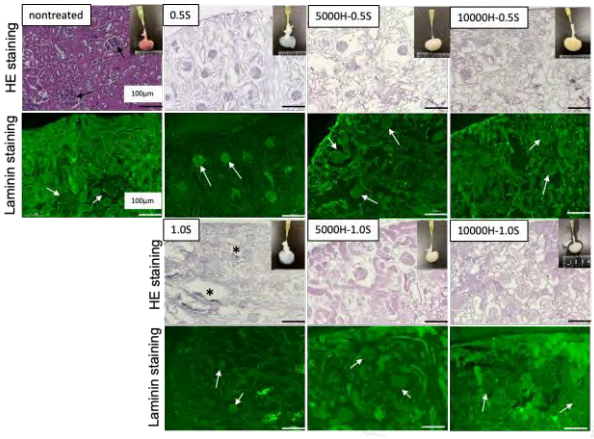


Fig. 1 HE and laminin staining of decellularized kidney. White arrows: kidney corpuscle, black arrows: cell nucleus, asterisk: destruction area.

3-2. 脱細胞化腎臓への細胞播種

初めに腎動脈の直径や播種する細胞である人血管内皮細胞(HUVEC)の大きさを参考に播種する細胞数を 2.0×107cells に決定した．作製した脱細胞化腎臓(0.5S, 5000H-0.5S, 10000H-0.5%S)に HUVEC をシリンジポンプを用いて播種した(1.0ml/min)．インキュベーター内で一晩静置した後，ペリスタポンプで

TOPへ戻る

灌流培養した(24h, 1.6 ml/min). 細胞接着性をHE 染色および生細胞(Calcein-AM)染色, DNA 定量で評価した.

細胞を播種した脱細胞化腎臓の染色結果をFig. 2 に示す. Calcein-AM 染色より, 播種したHUVEC が腎臓内に局在していることが示された. HE 染色からも 0.5S では HUVEC が糸球体で観察され, 糸球体基底膜に接着している可能性が示唆された. 0.5S では Fig. 1 で観察された Laminin 陽性の部分に特異的に播種した HUVEC が観察された. 一方, 5000H-0.5S や 10000H-0.5S では HUVEC は糸球体ではわずかしか観察されず, 輸入細動脈に局在していた. これは 5000H-0.5S や 10000H-0.5S では Laminin が全体的に残存していたため, 糸球体よりも細胞懸濁液を注入した動脈側の輸入細動脈にほとんどの細胞が接着し, 糸球体まであまり到達しなかったためと考えられた. これらの結果より, 細胞接着には Laminin が寄与することがわかった. 本実験では理論値よりも播種細胞数が少ないため, 播種細胞数を増やすことで ECM が多く残存した 5000H-0.5S や 10000H-0.5S においても糸球体への細胞接着が期待される. 以上より, ECM 残存性の違いにより血管内皮細胞の基底膜への細胞接着性に差が生じ, その結果, 細胞局在に影響することが示唆された.

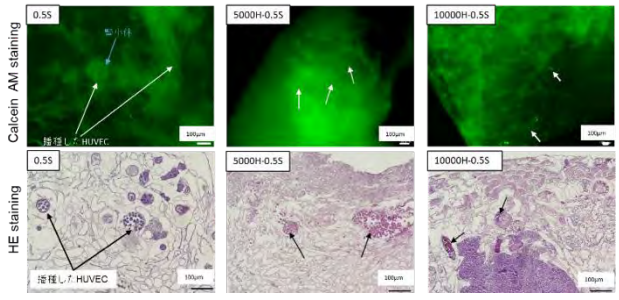


Fig. 2 HE and laminin staining of cell seeded kidney. White and black arrows : HUVEC.

3-3. まとめ

構造保持のための HHP と SDS の併用によって腎臓全体に ECM を残存させた脱細胞化腎臓を作製できた. HUVEC を播種することで ECM の残存度によって細胞接着性に差が生じ, 細胞局在に影響することが示された.

４. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

4-1. 今後の計画

HUVEC の播種細胞数の増加による糸球体基底膜への細胞接着数の増加, 腎臓上皮細胞の播種による腎実質の再細胞化,再細胞化腎臓の濾過機能への基底膜残存性の影響を明らかにしたいと考えている.

研究協力者として修士 2 年生 1 名と学部 4 年生 1 名の計 2 名の学生が本研究の一部に参画し、卒業論文および修士論文のための研究テーマとする。

4-2. 学会発表状況

1. 中村奈緒子, 松浦黎,木村剛, 岸田晶夫, 糸球体基底膜の保持を目指した脱細胞化腎臓の作製,第 59 回日本人工臓器学会大会, 11 月 25-27 日, 2021（口頭）
2. 松浦黎, 中村奈緒子, 木村剛, 岸田晶夫, 腎機能再構築を目指した脱細胞化腎臓の作製, 第 60 回日本生体医工学会大会, オンライン, 6 月 15 日, 2021（口頭）
3. 中村奈緒子, 松浦黎, 後藤雄也, 木村剛, 岸田晶夫, 再生腎臓構築のための脱細胞化腎臓の調製, 第 20 回日本再生医療学会総会, 3 月 11-13 日, 2020（ポスター）

TOPへ戻る

不確かな切替えシステムに対するサンプル値制御

システム理工学部数理科学科　　サイ　貴生

共同研究者
トヨタ工業大学・研究員　　ナラパン　グナセカラン

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年，複数のサブシステムからなる切替え／ハイブリッドシステムに関する研究が活発に行われている．その背景は，現実システムのほとんどは単一モードのダイナミックスでなく，複数のモードで記述しなければならないことにある．例えば，走行している車の位置と速度を考える場合には，ギアシフトの位置によって複数の異なるダイナミックスが存在する．また，知能制御分野では，単一の制御器で望ましい性能を達成できないシステムに対して，複数の制御器と適切な切替え法によって制御仕様が実現できる研究が数多く報告されている．

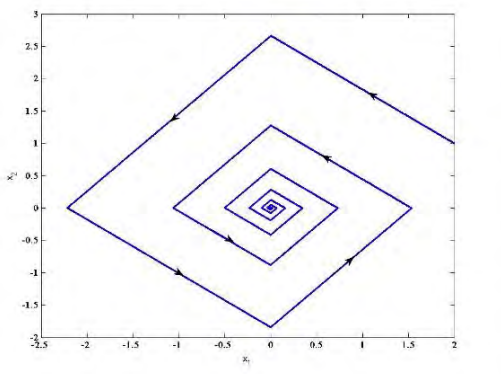


図１　切替えシステムの軌道の様子

切替えシステムの大きな特徴はすべてのサブシステムが不安定であっても，適切な切替え法の下で全体システムが安定となることである．その代表的なアプローチは切替え線形システムに対して各サブシステム行列の安定な凸結合を用いた方法である．例えば，二つの連続時間サブシステム$\dot{x} = A_1 x,\ \dot{x} = A_2 x$ で構成された切替えシステムについて，行列A_1, A_2が不安定であってもその結合$A_\lambda = \lambda A_1 + (1-\lambda)A_2$が安定となる実数$0 < \lambda < 1$が存在すれば，$A_\lambda$のリヤプノフ行列を用いた切替え法で全体システムが安定化できる．また，各サブシステムの右辺に定数ベクトル項が含まれる切替えシステムについて，共通な平衡点をもたないあるいは平衡点すらもたないサブシステムが存在しても，適切な切替え法を与えれば，切替えシステムは通常の安定と同じ振る舞いをもち，望ましい点へ漸近収束することが可能である．例えば，四つの積分器

S_1: $\dot{x} = col[-3, 2.5]$,　S_2: $\dot{x} = col[-2.5, -3]$,

S_3: $\dot{x} = col[3, -2.5]$,　S_4: $\dot{x} = col[2.5, 3]$

から構成された切替えシステムを考える．明らかに，全てのサブシステムに平衡点が存在しないため，単独で作動させる場合には必ず無限へ発散する．しかし，初期値$col[2,1]$から出発して，座標平面の第Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ象限にそれぞれサブシステムS_1, S_2, S_3, S_4をアクティブにした場合の解軌道は図１に示すとおり，原点へ漸近収束している．

本研究では不確かさを含む切替えシステムに対して，複数種の不確かさに対応するような形でサブシステムの凸結合を定義し，それに基づく切替え平衡点や安定化を達成する切替えアルゴリズムを提案する．そし

TOPへ戻る

て，サブシステムの状態が利用できないときに，観測出力を用いた切替え型オブザーバを構築してオブザーバの状態による切替え法を考える．システムの性能指標は原点（あるいは望ましい平衡点）での二次安定、切替え平衡点集合の設計や設計した軌道への追従(トラッキング)などが考えられる．応用として，切替え非線形システムに対して原点に向かう点列を考え，逐次にその点で非線形システムの微分項を一次テイラー展開して得られた線形システムを安定化することによって，元の非線形システムを安定化することができる．

本研究の学術的な独自性と創造性は以下の点が挙げられる．まず，連続時間切替えシステム(1)について不確かさがある場合の凸結合アプローチは既存研究にないもので，理論的にも実用的にも既存の研究に対する重要な拡張となっている．そして，本研究で外乱抑制（低減）と関連して独自な切替えアルゴリズムを提案する点や凸結合以外の結合方法を考察・提案する点がオリジナルである．次に，離散時間切替えシステム(3)についてサブシステム凸結合の定義自体は既存研究で不自然さがあるため，本研究ではより自然で実用的な凸結合の定義を提案し，それに基づく二次安定化切替えアルゴリズムを構築する．最後，切替えシステム(1)と(3)に定数項b_iが入っているため，システムの収束点（切替え平衡点と呼ぶ）の解析と設計を行うことによって，より一般化した切替え非線形システムの研究に大きく寄与できる．

２．研究計画

本研究では切替え線形システムを含む切替えアファインシステムを制御対象とし，連続系の場合の制御対象は次式で表される．

$$\dot{x} = \left(A_{\sigma(t)} + \Delta A_{\sigma(t)}\right)x + b_{\sigma(t)} \quad \sigma(t) \in \{1,2,\ldots,N\} \qquad (1)$$

ここで$\sigma(t)$ は時刻tに用いるサブシステムの番号を決める切替え信号関数で，微分方程式の右辺にある行列 $A_1, A_2, \ldots, A_N$ と $\Delta A_1, \Delta A_2, \ldots, \Delta A_N$はそれぞれサブシステム行列の確定部分と不確かさを表す。$b_1, b_2, \ldots, b_N$はアファイン項を表す定数ベクトルで，N はサブシステムの数である．このシステムに対して解析と設計を考えるため，各サブシステム行列確定部分の凸結合

$$A_\lambda = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i A_i, \quad \sum_{i=1}^{N} \lambda_i = 1, \forall \lambda_i \geq 0 \qquad (2)$$

が Hurwitz 安定（行列固有値の実部がすべて負である）となるものを見つける．

このような設定のもとで，本研究では次の問題を考える：

(P1) 不確かさがない（$\Delta A_i = 0$）システム(1)の二次安定化条件と切替えアルゴリズムを仮定(2)のもとで導出する．特に，サブシステムが共通の平衡点を持たない，$b_\lambda = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i b_i \neq 0$ のケースについて切替え平衡点集合やトラッキング問題も考える；

(P2) 有界な不確かさがある(例えばノルム有界な$\Delta A_i = D_i F_i(t) E_i \neq 0, ||F_i(t)|| \leq 1$）システム(1)の二次安定化条件と切替えアルゴリズムを仮定(2)の下で導出する．

次に，離散時間切替えシステム

$$x(k+1) = \left(A_{\sigma(k)} + \Delta A_{\sigma(k)}\right)x(k) + b_{\sigma(k)} \quad \sigma(k) \in \{1,2,\ldots,N\} \qquad (3)$$

のロバスト安定化問題を考える．文献[6]ではサブシステムの凸結合アプローチを離散時間系へ拡張してみたが，(2)式のようなサブシステム行列のみでの条件は得られなかった．さらに，(3)式にアファイン項が入ってきたため，平衡点の解析やロバスト安定化が難しくなる．本研究ではシステム(3)について次の問題を考える：

(P3) 不確かさがない（$\Delta A_i = 0$）システム(3)に対してサブシステムの“凸”結合を定義し，それに基づく二次安定化条件と切替えアルゴリズムを導出し，切替え平衡点集合やトラッキング問題も考える；

TOPへ戻る

(P4) 有界な不確かさがある（例えば，$\Delta A_i = D_i F_i(k) E_i \neq 0, ||F_i(k)|| \leq 1$）システム(3)の二次安定化条件と切替えアルゴリズムを導出する．

なお，上記の問題(P1)−(P4)ではそれぞれ連続系と離散系を対象としているが，連続系からの離散化を意識して両者の関連や組合せたサンプル値制御も議論する．以下，各年度の研究計画を説明する．

初年度（2022 年度）では不確かさがない（$\Delta A_i = 0$)連続時間切替えシステム(1)について，仮定(2)のもとで$b_\lambda = 0$ を満たすときの安定化切替えアルゴリズムを整理・拡張し，$b_\lambda = 0$を満たさないときの切替え平衡点集合およびトラッキング性能を解析設計する．主なツールは凸結合行列A_λに対するリヤプノフ関数とそれを拡張したものを用いる．凸結合以外の結合手法や切替え時に起きるチャタリング回避策についても考察する．

次年度では不確かさがある（例えば，$\Delta A_i = D_i F_i(t) E_i \neq 0, ||F_i(t)|| \leq 1$やポリトピック型）切替えシステム(1)に対して，二次安定性と L2 ゲインの関係を利用して仮定(2)を拡張し，それに基づく安定化切替えアルゴリズムを導出する．システム状態が利用できない場合に切替え型オブザーバを構成し，オブザーバの状態に基づく切替え法を確立する．

2024 年度には連続時間切替えシステムで得られた成果を踏まえて，離散時間切替えシステムの結合形の定義を再検討し，できるだけサブシステム行列で判断できる合理的なものを提案していく．その定義のもとでロバスト安定化問題を考え，システム状態及び出力による切替えアルゴリズムの下での安定化、外乱抑制しながら追従制御問題を検討する．

最終年度では連続時間切替えシステムと離散型制御器から構成される切替えサンプル値システムに対して安定性／追従性や外乱抑制性能を達成するように，切替えアルゴリズムと制御器の同時設計を提案する．

３．計画の進行状況

以前の準備も含めてこれまで切替え線形システムと切替えアファインシステムに対してロバスト二次安定化問題を考えてきた．切替えシステムについて既存の公称システム行列の凸結合を拡張して，有界な不確かさを表す行列を含めた凸結合を提案している．アファインシステムについて，すべてのサブシステムに共通な平衡点がない場合について，線形部分のシステム行列の凸結合が Hurwitz でかつアファイン部分の凸結合がゼロであれば，切替えシステムが二次安定となるような切替え法を提案している．システムの状態情報が使えば，状態による切替え法となるが，状態情報が利用できないとき，オブザーバによる推定状態情報を用いる必要がある．実際，出力に基づく切替え方法について考察した結果は一部公表している．

システム行列やアファインベクトルが線形時不変で不確かさがない切替えシステムに対する上記の結果は不確かな切替えアファインシステムへ拡張することができている．さらに，時変切替えアファインシステムにも一部結果を拡張している．

最近，システム行列の有界不確かさと関連している L2 ゲイン外乱抑制問題を考えて，２次安定化より広い枠組みで本研究を捉えるように広げている．

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

上記の進行状況を踏まえて，今年度は出力情報を用いた切替え線形やアファインシステムの２次安定化や L2 ゲイン外乱抑制問題に対して，凸結合に基づく切替え則やフィードバック制御則の設計を考える．同時に，状態や出力を用いて切り替えるときに生じるチャタリングについて定量的な解析と回避策を提案していく．

以下，準備段階も含めて本研究関連の論文投稿と発表リスト（最近 3 年間の関連業績論

TOPへ戻る

文）をまとめる．

①学術誌等に発表した論文

[1] Y. Chang, **G. Zhai**, B. Fu, L. Xiong: Quadratic stabilization of switched uncertain linear systems: A convex combination approach; IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Vol.6, No.5, pp.1116-1126, 2019.

[2] J. Mao, Z. Xiang, **G. Zhai**: Sampled-data control of a class of switched nonlinear systems under asynchronous switching; Journal of the Franklin Institute, Vol.356, pp.1924-1943, 2019.

[3] M. Xiao, **G. Zhai**, C. Huang: Quadratic stabilisation of switched affine systems, Journal of Control and Decision, Vol.7, No.1, pp.1-23, 2020.

[4] **N. Gunasekaran**, **G. Zhai**: Sampled-data state-estimation of delayed complex-valued neural networks, International Journal of Systems Science, Vol.51, No.2, pp.303-312, 2020.

[5] Y. Chang, **G. Zhai**, L. Xiong, B. Fu: Global quadratic stabilization in probability for switched linear stochastic systems, IEEE Access, Vol.8, pp.103610-103618, 2020.

[6] N. Gunasekaran, G. Zhai, Q. Yu: Sampled-data synchronization of delayed multi-agent networks and its application to coupled circuit; Neurocomputing, Vol.413, pp.499-511, 2020.

[7] Q. Yu, G. Zhai: A limit inferior Φ-dependent average dwell time approach for stability analysis of switched systems; International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.31, No.2, pp.565-581, 2021.

[8] N. Gunasekaran, S. Srinivasan, G. Zhai and Q. Yu: Dynamical analysis and sampled-data stabilization of memristor-based Chua's circuits, IEEE Access, Vol.9, pp.25648-25658, 2021.

[9] N. Gunasekaran, G. Zhai, Q. Yu: Exponential sampled‐data fuzzy stabilization of nonlinear systems and its application to basic buck converters, IET Control Theory & Applications, Vol.15, No.9, pp.1157-1168, 2021.

[10] Q. Yu, G. Zhai: New stability criteria of switched systems with unstable modes under a weighted ADT scheme, International Journal of Systems Science, Vol.52, No.13, pp.2735-2751, 2021.

② 国際会議における発表

[11] Y. Chang, **G. Zhai**, B. Fu, L. Xiong: Stabilization of switched linear uncertain stochastic systems; Proc. 38th Chinese Control Conference (CCC2019), Guangzhou, China, 1784-1788, July 27-30, 2019.

[12] Y. Chang, **G. Zhai**, L. Xiong, B. Fu: Output-dependent switching laws for quadratic stabilization of switched linear stochastic systems; Proc. 32nd Chinese Control and Decision Conference (CCDC2020), Hefei, China, pp.1796-1801, August 22-24, 2020.

[13] M. Xiao, **G. Zhai**, Q. Yu, J. Lian: Switching output feedback control of LTI systems; Proc. 16th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA2020), Singapore, pp.1032-1037, 2020.

[14] Y. Chang, **G. Zhai**, L. Xiong, B. Fu: Quadratic L2 performance analysis of switched uncertain linear systems; Proc. 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC2021), Kunming, China, pp.6666-6671, May 22-24, 2021.

［注］ **G. Zhai** は研究代表者翟 貴生の英語名(Guisheng Zhai)の略で，**N. Gunasekaran** は共同研究者ナラパン グナセカラン（Nallappan Gunasekaran）の英語名の略である．

【謝辞】本研究は芝浦工業大学 2021 年度特別研究助成（プロジェクト研究助成）を受けて行われたことを付記する．

2022 年 5 月 1 日

TOPへ戻る

表面波の伝播速度による超砥粒ホイール砥粒層の縦弾性係数導出と研削特性に関する研究

デザイン工学科　　澤　武一

１．はじめに

航空機・自動車の構造材料や半導体の次世代パワーデバイス材料は一層難削化する一方，需要増と国際競争力強化のための加工能率向上，加工コスト低減，高品位・高精度加工は生産現場の大きな課題である．このような背景のもと，研削加工においては耐摩耗性と高熱伝導率の優位性から WA 砥石や GC 砥石の普通研削砥石から CBN やダイヤモンドを砥粒とする超砥粒ホイールへの移行が望ましい．しかし，超砥粒ホイールはツルーイング，ドレッシングが困難なことや砥粒層の機械的性質（特に縦弾性係数）と研削性能の関係が明確でないこともあり発売されて久しいが十分に普及しているとはいえない．また，超砥粒ホイールの砥粒層に含まれる結合剤やフィラー(添加剤)は製造メーカのノウハウであり，砥粒層の構造体としての縦弾性係数が生産現場で把握できないため，制御性が低く，加工結果の良否は作業者の熟練度に依存する．このことから，研削加工の研究や技術開発は研削状態をモニタリングまたはセンシングするものが主であり，加工前の段階で加工状態や加工結果を予測する技術に関してはほとんど検討されていない．切削工具の性能評価法として活用される寿命曲線（VT 線図）と同様に，超砥粒ホイールでも砥粒層の縦弾性係数を含む機械的性質と研削性能（アブレシブ摩耗特性）を関連付ければ，砥粒層の機械的性質から加工性能を評価でき，ホイールの選定や研削作業の条件設定に有益な情報となる．

普通研削砥石では縦弾性係数を測定する方法として，共振周波数測定法（ソニック法）や超音波パルス透過法が確立されており，縦弾性係数と研削性能との関連が明確になっている．一方，超砥粒ホイールは台金に砥粒層を固定する構造上，普通研削砥石に適用されるソニック法や超音波パルス法を適用することは不可能であり，現在，砥粒層の縦弾性係数を測定する手法は確立されていない．

そこで本研究では，超砥粒ホイールの構造に制限されない新しい縦弾性係数測定法として，弾性体を媒質とした縦波，横波よりも減衰の少ない表面波の伝播特性によって砥粒層の縦弾性係数を導出する手法を提案する．実験の結果，表面波の伝播速度により砥粒層の品質を評価し，縦弾性係数を導出できる可能性を見出したので以下に報告する．

２．表面波の伝播速度から縦弾性係数を導出する原理

弾性体を伝播する弾性波には縦波，横波，表面波の 3 種類がある．波長に比べて弾性体が十分に大きく，一様で等方性と見なせる場合には半無限等方体の自由表面に沿う波の伝播速度は Rayleigh によって式 (1)，(2)，(3) で導くことができることが示されている．

Vp : 縦波の伝播速度（m/s），Vs : 横波の伝播速度 (m/s)，Vr : 表面波の伝播速度 (m/s)，v：ポアソン比，E：縦弾性係数（GPa），ρ：

TOPへ戻る

密度（kg/m³），G：せん断弾性係数を示す．

$$V_p = \sqrt{\frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2(1+v)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

$$4\sqrt{1-\left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2}\sqrt{1-\left(\frac{V_r}{V_p}\right)^2} - \left\{2-\left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right\}^2 = 0 \quad (3)$$

ただし，これらの関係は単一材料において成立する．砥粒，結合剤，気孔で構成される普通研削砥石の縦弾性係数の評価には

超音波パルス法透過法が適用されていることから普通研削砥石は等方性と見なすことができる．したがって，超砥粒ホイールの砥粒層でも式（1），（2），（3）が適用できると考えられる．

（1）と（2）はともにEに関係している式のため，式（1）と式（2）から式（4）が得られる．

$$V_p = \sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}} \cdot V_s \quad (4)$$

そして，式（4）を式（3）に代入すると，式（5）が得られる．

$$\left\{2-\left(\frac{Vr^2}{V_s^2}\right)^2\right\} - 4\sqrt{1-\left(\frac{Vr}{Vs}\right)^2} \cdot \sqrt{1-\frac{V_r^2(1-2v)}{2V_s^2(1-v)}} = 0 \quad (5)$$

式（5）は表面波の伝播速度 Vr，横波の伝播速度 Vs，ポアソン比 v のみの多項式として表すことができる．つまり，式（5）に本研究で試作した表面波測定装置で計測する表面波の伝播速度 Vr と弾性体のポアソン比 v を代入することで横波の伝播速度 Vs が導出できる．そして，導いた横波の伝播速度 Vs と弾性体の密度 ρ を式（2）に代入することで，弾性体の縦弾性係数 E を算出できる．

３．表面波の測定方法と測定結果

３．１表面波の測定方法

図１に，試作した表面波測定装置の概略図を示す．２つの AE センサを超砥粒ホイールの砥粒層表面に押し付け，表面波を測定する．表面波はシャープペンシルの芯を圧折して発生させた．シャープペンシル芯圧折法は ASTM（アメリカ材料試験協会） E976 として規格化された正規の方法であり，圧折時の角度を一定に保つことで繰り返し精度を向上させることができる．本実験では AE センサから 10mm 離れた位置にて，芯の突き出し長さを 3mm，傾斜角 30°で圧折した．AE センサによって検出された表面波はプリアンプ（増幅器），データロガーを介してパソコンで読み取る．波形データの観測にはキーエンス製の MEGA VIEW を用いた．本測定装置で使

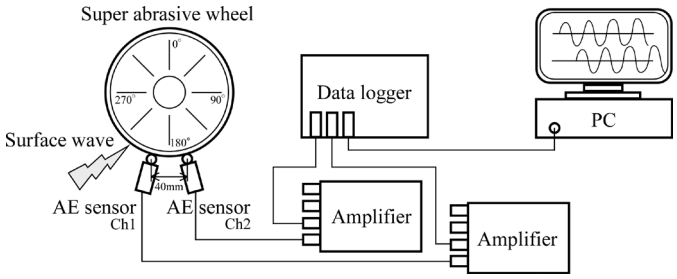


Fig.1　Schematic diagram of measuring equipment

Table1　Specifications of measuring equipment

AE sensor	NF Corporation	AE-901S
Amplifier	NF Corporation	AE9501A
Data logger	KEYENCE Corporation	NR-500

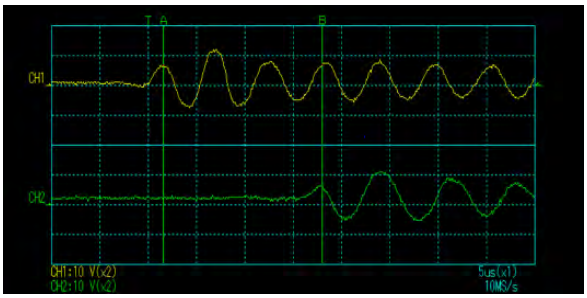


Fig.2　Measurement of delay time

TOPへ戻る

用した各種計測機器は**表 1** に示す．AE センサの中心間距離は治具によって40mmに保ち，2 つの AE センサが検出する表面波の遅延時間を計測した．**図 2** に，遅延時間の計測の様子を示す．図に示すように，遅延時間は CH1 と CH2 の AE センサで計測する最初の波形の頂点を基点にして計測した．AE センサの 2 点間距離（40mm）を遅延時間で除することにより，表面波の伝播速度を算出した．シャープペンシルはホイール作業面の中央で圧折し，AE センサはホイール作業面の中央に位置するように治具を設計している．また，AE センサの 2 点間距離のホイール台金には粘土を張り付け，台金表面を伝播する表面波は遮断した．ただし，粘土の有無による表面波形の乱れや伝播時間に差がないことは予察実験にて確認している．また，狭域の AE センサを使用し，表面波に近い周波数以外の波を測定しないようフィルタリングしている．実験に使用した超砥粒ホイールはすべて新品未使用のもので，レジノイドボンドホイール，メタルボンドホイールは無気孔，ビトリファイドボンドは有気孔である．砥粒層の厚みはすべて 3mm である．本実験の予察において，数種類の超砥粒ホイールを使用し，目つぶれ状態のホイール作業面とドレッシングを行い目立て終了後のホイール作業面で本測定方法によって表面波の計測を実施したところ，両者の表面波は同じ波形になり，伝播速度の差異も確認できなかった．このため，本測定方法は砥粒の突き出し高さおよび摩耗状態に影響せず，表面波を測定できることを付記する．また，砥粒層が薄くなると台金が表面波の伝播速度に影響すると推察されるが，この点は現在吟味中であるため次報で報告したい．

4．砥粒層の仕様と表面波の伝播速度の関係

超砥粒ホイールの砥粒層を伝播する表面波の特性を把握するため，砥粒層の各種仕様と表面波の伝播速度の関係について実験的に検討した．超砥粒ホイールは高価で購入が困難であるため，比較対象以外の仕様を同一にできていない場合があるが本実験の主目的は表面波の特性を知ることであるためこの点は予了承いただきたい．

図 3 に，粒度が異なる砥粒層の表面波を測定した結果を示す．実験に使用したホイールはレジノイドボンドホイールとメタルボンドホイールで，レジノイドボンドホイールの仕様は SDC-N100B，メタルボンドのホイールの仕様は MD-N100M である．レジノイドボンドホイールの粒度は 140，230，400，メタルボンドホイールの粒度は 140，270，600 の 3 種類を準備した．SDC は低衝撃度ダイヤモンド砥粒を金属被覆したもの，MD は高衝撃ダイヤモンド砥粒で金属被覆がないものである．本実験ではホイールの側面に 30°間隔で印を付け，この印を基準に測定点を変え，砥粒層の 12 か所で表面波を計測した．各測定点では 5 回測定し，計測値の最大と最小を除く 3 つの値を平均し，その値を各測定箇所の値とした．そして，測定点 12 カ所の値を平均し，その値を実験値とした．図の棒グラフの値はその実験値である．なお，各測定点での伝播速度の差異は最大で約 7%である．

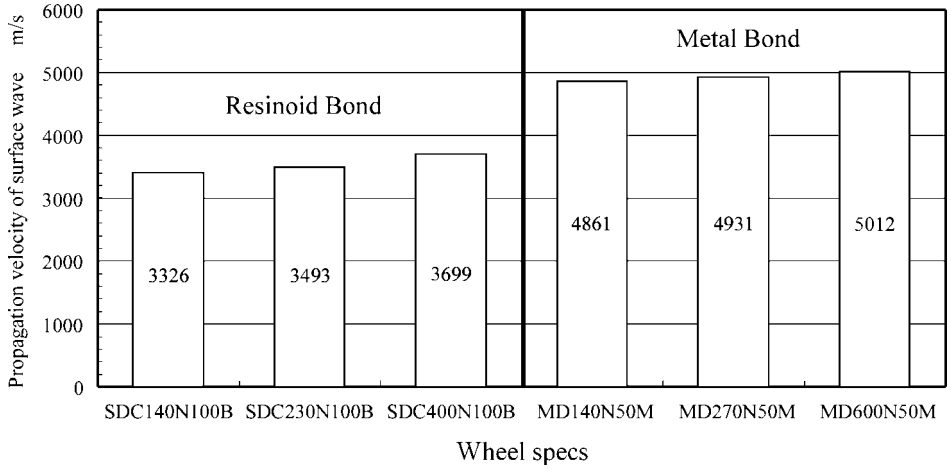


Fig.3 Surface wave velocity of various abrasive layers

TOPへ戻る

図から，レジノイドボンドホイール，メタルボンドホイールともに粒度が高くなると表面波の伝播速度が僅かに速くなることがわかる．これはコンセントレーションが同じであるため，粒度が高いほど砥粒数が多くなることに起因するものと考えられる．式（1），（2）に示す通り，弾性波の速度は縦弾性係数が大きくなるほど速くなる．レジノイドボンドホイール，メタルボンドホイールともにダイヤモンドと結合剤の密着性を考慮する必要があるが，砥粒数が多いほど砥粒層の縦弾性係数が高くなるためであると考えられる．本実験で行ったシャープペンシルの芯圧折法では表面波の周波数は速くても 400kHz 程度であり，波長は最小でも 6.0mm 程度になる．つまり，波長が砥粒径に比べてはるかに大きいため，砥粒径の差異を本手法で検出するのは困難であると考えられる．しかしながら，本図の結果から，粒度の違いにより表面波の伝播速度に僅かな差異が見られることは明らかであり，粒度と表面波の関係は高い周波数を発信させることができる方法を適用することも含めて今後追加実験が必要であると考えている．本実験においては粒度 600 までは測定できることを確認している．

図 4 に，結合剤が異なるダイヤモンドホイールの表面波を測定した結果を示す．結合剤はレジノイドボンド，ビトリファイドボンド，メタルボンドの 3 種で，実験に供したホイールは図に記載のとおりである．レジノイドボンドホイールとメタルボンドホイールは無気孔，ビトリファイドボンドは有気孔である．図から，細かい仕様の違いによって表面波の伝播速度に違いがあるが，表面波の伝播速度はレジノイドボンドが最も遅く，次いで，ビトリファイドボンドが速くなり，メタルボンドが最も速くなることがわかる．この順列は縦弾性係数と相関関係が成立するため，図 3 の結果と同様に，砥粒層の構造体としての巨視的な縦弾性係数が表面波の速度に影響しているといえる．また，メタルボンドホイールの伝播速度が速いのはダイヤモンドと結合剤の密着性も起因していると思われるが，この点は詳細な検討が必要である．さらに，ビトリファイドボンドホイールは有気孔のため表面波の伝播速度が遅くなると予測したが，レジノイドボンドホイールよりも速くなっているのは伝播速度に対する影響が気孔よりも弾性係数が大きいことが起因していると思われる．

5．おわりに

本研究では表面波の伝播速度を用いて超砥粒ホイールの砥粒層の縦弾性係数を導出する手法について提案し，その可能性について実験的に検討した．得られた成果を以下に示す．

(1)表面波の伝播速度は粒度およびコンセントレーションが高くなるほど速くなる．

(2)表面波の伝播速度はレジノイドボンドが最も遅く，次いで，ビトリファイドボンドが速くなり，メタルボンドが最も速くなる．

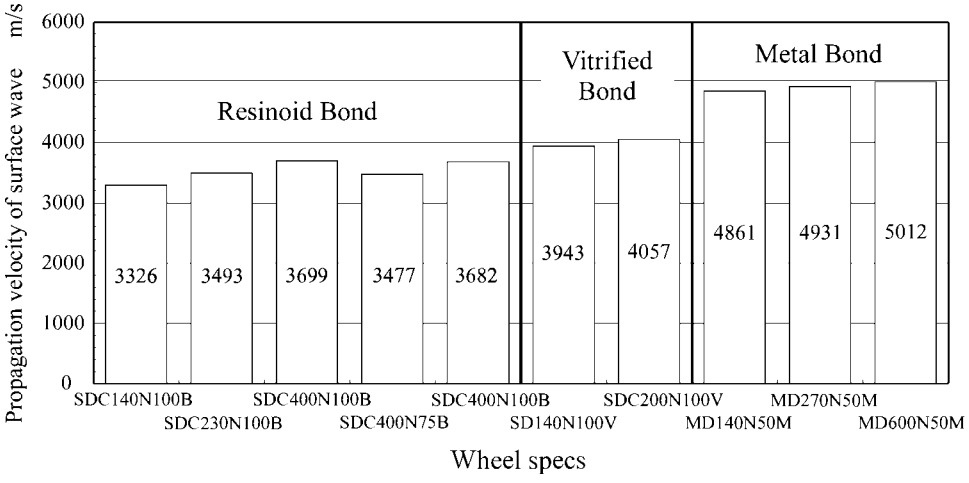


Fig.4　Surface wave velocity of various abrasive layers

TOPへ戻る

“Sense of Place”
観光のためのインタラクティブ展示とその未来

デザイン工学科　　日髙　杏子

１．はじめに

2021～2022 年、コロナ禍はまだ世界中に広がっており、さらに 2022 年初頭にはロシアによるウクライナ侵攻が起き、海外旅行や観光は世界各国で制限されている。人間は常に新しい体験を渇望しているが、しかし旅行が制限・禁止された時代に、どのような新しい場所の体験法があるのだろうか。この問いを探るために、今回の研究をおこなった。

本研究は、教育工学の視座から、遠隔で実施された「第 4 回カラーデジタルアート×ライティング国際シンポジウム＆ワークショップ」を実証例とし、バーチャル観光体験の共同制作について検証する。芝浦工業大学の色彩・コミュニケーションデザイン研究室は、タイのアサンプション大学のスワンナプームキャンパスにある建築デザイン学部（モンフォール・デル・ロサリオスクール）の教員らと協力し、2019 年から一連の共同ワークショップと国際シンポジウムを開催してきた。第 1 回は東京[1]、第 2 回はバンコクで開催され、第 3 回はパンデミックのため遠隔開催[2]された。

本シンポジウムとワークショップでは、今後のインタラクティブな空間デザインやデジタルアートの技術の方向性や流れについて議論し、制作するワークショップを通じて未来のデザイナーやエンジニアのインキュベーターとなる場を目指してきた。

このワークショップと国際シンポジウムでは、インタラクティブなデジタルアートの没入感について考察する。アート展示は魅力的な没入体験をもたらし、日本でもチームラボ、ライゾマティクス、1 to 10 など、世界をリードするデジタルアート制作企業が数多く存在し、その発表手法や発表の場が世界中から注目されてきた。特に VR や AR などの没入型体験は非常に人気がある。こうした没入感を高めるデザインが求められている。何気ない環境を新しい世界に変え、体験者の想像力や好奇心を刺激し、より満足度の高い体験をもたらす。

表 1 これまでのワークショップ・シンポジウムのテーマおよび開催地

回	ワークショップ/国際シンポジウム		
	日程	テーマ	場所
1	2019 年 3 月	Colourful Playground for Children	東京
2	2019 年 11 月	Illuminate	バンコク
3	2020 年 11 月－2021 年 3 月	Ubiquitous lighting	遠隔
4	2021 年 11 月－2022 年 3 月	Sense of Place	遠隔

２．ワークショップ・国際シンポジウム概要

これまで通常、アサンプション大学チームか筆者の研究室のどちらかが、交互で各ワー

TOPへ戻る

クショップの作品全体テーマを決めてきた。過去のワークショップの日程、テーマ、会場は表 1 の通りである。(表 1) ワークショップ開始後、4〜6 つの学生のグループに分かれ、それぞれサブテーマに沿った作業を行う。今回のテーマは”Sense of Place”と決まった。

２．１ 観光とは何か？

場所の感覚（Sense of Place）という共通テーマを考える上で、観光は特に重要な問題である。国連世界観光機関（UNWTO）は、「観光に関する世界倫理綱領」の第 1 条で、「観光は、人々と地域社会の相互理解と尊重に寄与するものである」[3]と書いている。観光とは、単に五感を刺激するだけでなく、その土地の人々の文化や地域社会を知ることでもある。

本ワークショップを通じ、制作前の調査で世界各地の観光地でインタラクティブなデジタルアート化によって興味深い作品となるかを深く議論していった。

図 1 遠隔ワークショップの様子



２．２ 没入感とは何か？

「身体は世界を持つための普遍的な媒体」[4]
--モーリス・メルロ＝ポンティ

身体感覚は、まぎれもなく「没入」への入り口である。フランスの現象学者メルロ＝ポンティの著書によれば、人間の身体は、私たちが世界を経験するための媒体であると記された。

没入感（Immersive）について、各種の定義がある。ヘッドマウントディスプレイの文献では「システムによって提示された空間に実際に身をおいている感覚になること」と定義されている。[5]また似たような言葉で「臨場感が」あり、「その場で実際に体験しているような感じ」を受ける心的状態[6]である。

近年、感情や感覚が学際的議論の対象となっているが、本ワークショップの学生は、バーチャルでありながらも、人間の感覚に訴え、リアルな体験を与える作品を作りたいと考えていた。リアリティを向上させるために、さまざまな工夫がなされていた。さらに VR ヘッドセットを使用しなくても、没入感を得られる展示を目指したいと考えた。

図 2 国際シンポジウムの広報バナー



３．2022 年 2 月 28 日の国際シンポジウム

2022 年 2 月 28 日に開催される国際シンポジウムに向け、4 グループに分かれて展示の制作に取り組んだ。約 30 名の学生と教員が協力し、マイコンのプログラミングや展示のデザインなどを行った。(図 1)

シンポジウム当日は、バンコクや東京、中国などから遠隔で参加した参加者が、独創的な作品を発表した。アサンプション大学ヴィンセント・メアリー科学技術学部教員である Tapanan Yeophantong 氏とメディアアーティスト Theerawat Klangjareonchai 氏の講演と作品の講評も行われた。(図 2)

グループ 1 (図 3) は、照明でオーロラを再現し、グループ 2 はインドのカラフルな祭り「ホーリー」をインタラクティブアートで演出した。その後、グループ 3 はタイの寺院の

TOPへ戻る

バーチャル 3D モデルを、グループ 4 はアサンプション大学のバーチャルツアー動画を作成した。

図 3 グループ 1 オーロラ

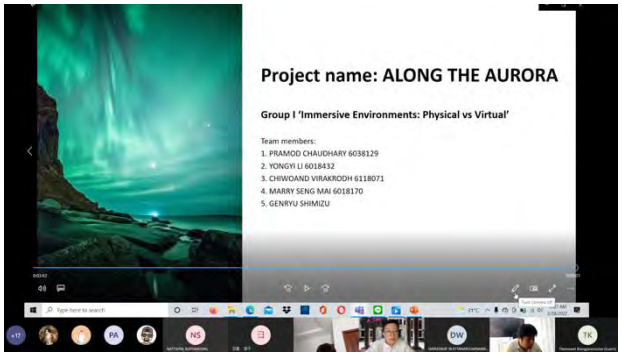


図 4 グループ 2 ホーリー祭

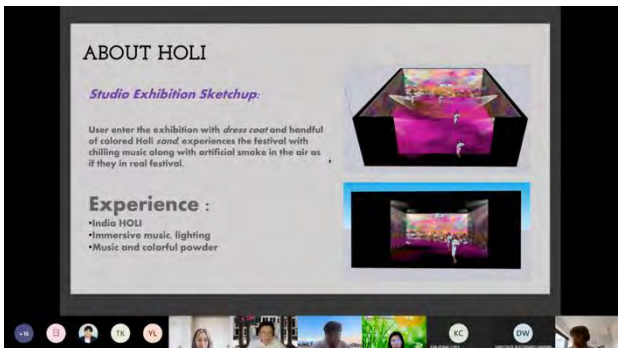


図 5 グループ 3 寺院シミュレーション

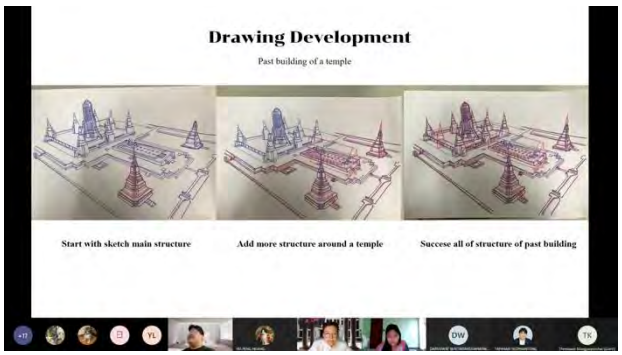
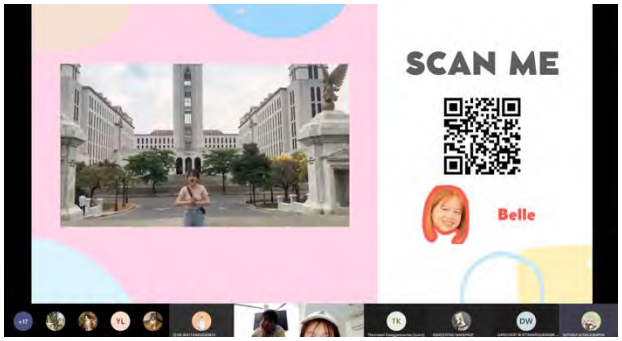


図 6 グループ 4 大学バーチャルツアー



4．まとめ

アートは他者と交流するための世界共通言語である。デジタルアート制作のための遠隔でのワークショップやシンポジウムは、単に場所の感覚を再現するための粗削りだが、魅力的な試みに過ぎないかもしれない。しかしながら、北極のオーロラ、インドのホーリー祭、タイの遺跡や大学など、パンデミックや戦争で現実に訪れることができない場所の存在を感じられるのが、本ワークショップの目指した到達点である。また、国際的に遠距離に住む学生が交流する機会を作ることも目的であった。講評という面では、ワークショップという制作の場だけでなく、シンポジウムで発表することで、第三者の視点を得ることができる。[7]

多言語・多文化によるデジタルアートのワークショップと講評の場のテストケースを示すことで、本インタラクティブ・デジタルアートのワークショップは、技術のイノベーションを通じて世界や宇宙の存在をリアルに伝えている。このようなアクティブラーニング活動を通じ、より魅力的で楽しい観光体験を提供していき、将来的にも重要な教育の役割を果たせると考える。

5．今後の展望および学会発表状況

本稿は、デジタルアート国際会議 EVA London2022 の予稿を翻訳、大幅に加筆したもので、会議は 2022 年 7 月 4 日～8 日に開催される。当該会議(EVA London2022)で本ワークショップと国際シンポジウムについて発表予定である。

今後の観光およびデジタルアート関連に関する色彩・コミュニケーションデザイン研究室の研究計画としては、2022 年 9 月～11 月に開催される山梨県河口湖にある「音楽と森の美術館」において、デジタルアート展示に協力予定となっている。

TOPへ戻る

６．参考文献

[1] Hidaka, K. (2019) Fusion of Art and Technology: The First Color Digital Art x Lighting Symposium and Workshop. 2nd International Conference, Digital Culture & AudioVisual Challenges, Interdisciplinary Creativity in Arts and Technology (DCAC2019) Corfu, Greece, 10-11 May 2019. Academy of the Ionian University, Corfu.

[2] Hidaka, K. (2021) Ubiquitous Lighting: The Third Color Digital Art × Lighting Symposium and Workshop. EVA London 2021, Online, 5-9 July 2021, 101-108. Proceedings of EVA London 2021.
DOI: 10.14236/ewic/EVA2021.16

[3] UNWTO. (2020) Global Code of Ethics for Tourism.
https://www.unwto.org/global-code-of-ethics-for-tourism (retrieved 5 January 2022).

[4] Merleau-Ponty, M. (2013, First published in 1945) Phenomenology of Perception. Routledge, London.

[5]一般デジタルコンテンツ協会(2018)「ヘッドマウントディスプレイを中心とした没入型映像システムに関する戦略策定報告書」

[6] 寺本渉,吉田和博,浅井暢子,日高聡太,行場次朗,鈴木陽一(2010)「臨場感の素朴な理解」,『日本バーチャルリアリティ学会論文誌』第 15 巻 1 号,pp.7-16

[7] 日髙杏子 (2022) 「ユビキタス照明：第３回カラーデジタルアート×照明 国際シンポジウム＆ワークショップ」色彩・コミュニケーションデザイン 2022, p.18-29

TOPへ戻る

変動軸力を受けるパイルキャップの
力学モデル構築と耐震性能評価

建築学部建築学科　　岸田　慎司

１．はじめに

2011 年の東日本大震災の際に杭頭部・パイルキャップの損傷により防災拠点施設の継続使用が出来なくなった事例が挙げられる。原因として，杭頭部・パイルキャップの損傷が建物に対し軸方向変形に影響を及ぼし建物に傾斜を発生させたためである。パイルキャップを有する杭基礎構造では，杭頭接合面破壊が破壊モードの一つとして考えられる。杭頭接合面の破壊がパイルキャップなどの各部材に与える影響を確認することを目的とする。

既往研究において，杭－パイルキャップの墓石形試験体を対象とした杭頭埋込部の耐力評価を目的とした実験は行われているが，柱・基礎梁部材が取り付いた部分架構形式での耐力評価には至っていない。本研究では既製杭を想定した杭基礎部分架構試験体の杭頭埋込部の曲げ挙動および曲げ耐力評価を目的とし，杭基礎部ト形部分架構試験体の静的繰返し載荷実験を行う。

２．研究計画

図-1 に試験体概要を，**表-1** に試験体諸元を示す。試験体は 地上 8 階建ての鉄筋コンクリート造の側柱下における ト形部分架構を参考に設計を行い，パイルキャップ，基礎梁，柱，袖壁，杭により構成された 1/3 スケールのト形部分架構とした。杭頭の埋込長さを 0.75D

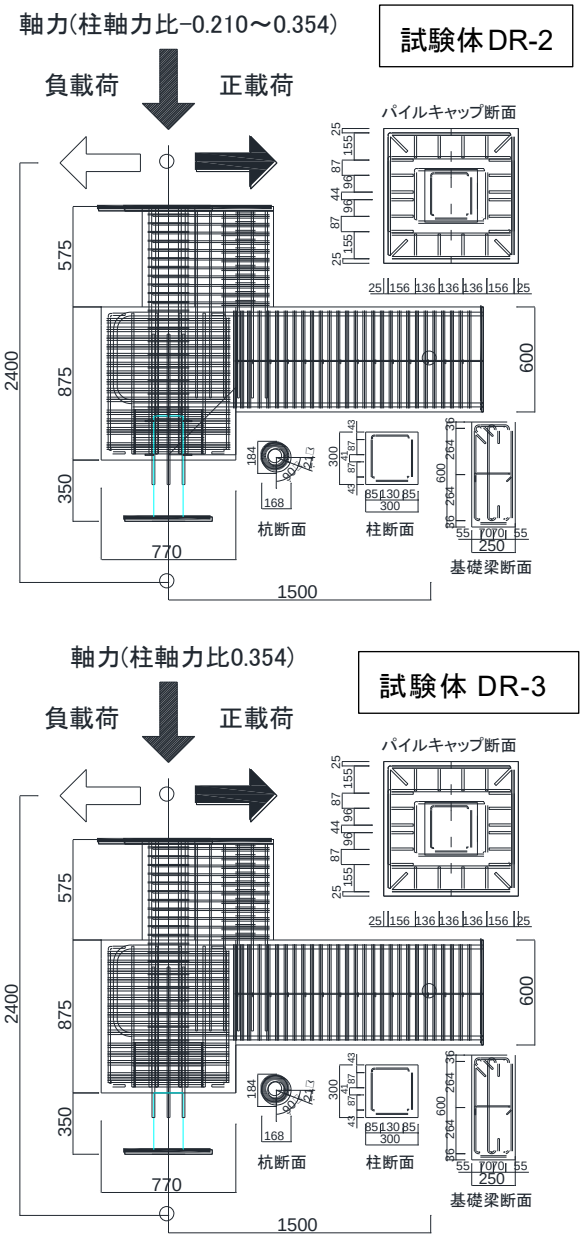


図-1　試験体概要（上：DR-2　下：DR-3）

TOPへ戻る

（D は杭直径で 168.3mm）とした試験体 DR-1 を基準試験体とし，埋込長さ 2 倍の試験体 DR-2,埋込なしの試験体 DR-3 の 3 体を作成した。柱は 300mm×300mm，梁は 250×600mm とした。パイルキャップは前年の試験体 D-4[1]の結果を踏まえ，パイルキャップの曲げおよびせん断破壊を防止するために 770×770mm と大きくした。杭体には，杭体の破壊を防止するため鋼管厚 35mm の鋼管杭（杭直径 D：168.3mm）を使用した。柱は曲げ圧壊を防止する為に片側に袖壁（150mm×450mm）を取り付けた。

表-2,表-3 に試験体に用いた鉄筋とコンクリートの材料特性をそれぞれ示す。

試験体は，杭頭埋込部の曲げ破壊となるように設計した。

図-2 に載荷装置を示す。柱頭および杭脚をピン支持，基礎梁端はピンローラー支持とした。軸力は実験開始時に柱頭から，試験体 DR-1, DR-3 を一定軸力で軸力比 0.354，試験体 DR-2 を変動軸力で軸力比-0.210~0.354 の範囲で導入した。変動軸力では，柱頭水平力に比例して軸力を作用させた。**図-3** に試験体 DR-2 の軸力変動ルールを示す。層間変形角 R は柱頭の水平変位を柱頭加力点から杭脚支持点までの距離で除した値とした。水平力は柱頭のピンの位置での層間変形角にて制御し，正負交番繰り返し載荷を行った。

３．計画の進行状況

３．１層せん断力-層間変形角関係

図-4に層せん断力-層間変形角関係を示す。各諸現象をグラフに記載した。試験体DR-1の正載荷時では，層間変形角R=1.36%時に156.9kNとなり最大耐力を迎えた。杭頭定着筋は，R=1.0%の1周目サイクル途中で圧縮降伏した。R=3.0%の1周目サイクル途中で層せん断力は低下した。また，R=3.0%の2周目サイクルでは，杭頭定着筋が破断した。R=+0.5%の1周目サイクルでパイルキャップ底面部のひび割れが発生した。負載荷時では，R=-2.00%程度時に-160.8kNとなり最大耐力を迎え，その後耐力低下を示した。杭頭定着筋は，R=-2%の1周目サイクル途中で引張降伏した。R=-0.5%の1周目サイクルでパイルキャップ

表-1　試験体諸元

試験体		DR-1	DR-2	DR-3
軸力(柱軸力比)（圧縮：正，引張：負）		323kN(0.354)	-86.9kN~-82.7kN~326kN (-0.210)~(0.09)~(0.354)	323kN(0.354)
コンクリート強度	柱	80kN/mm²		
	袖壁			
	梁	30kN/mm²		
	パイルキャップ			
柱	幅×せい	300mm×300mm		
	主筋	12-D16(SD785)		
	補強筋	D6@50(SKK785)		
	パイルキャップ内補強筋	D6@75(SKK785)		
袖壁	幅×せい	150mm×450mm		
	主筋	拘束域4-D13(SD490) 拘束域以外8-D10(SD490)		
	補強筋	D10@50(SD490)		
基礎梁	幅×せい	250mm×600mm		
	主筋	6-D22(USD590)		
	補強筋	U9.0@50(SBPD1275)		
杭	杭種	S45C φ168.3mm t-35mm		
	杭頭定着筋	6-D16(SD295)		
	杭頭埋込長さ比（埋込長さ）	0.75D(126.2mm)	1.5D(252.5mm)	0D(0mm)
パイルキャップ	幅×せい×高さ	770mm×770mm×875mm		
	縦筋 90度方向	20-D13(SD295)		
	縦筋 45度方向	4-D13(SD295)		
	帯筋	15-D13(MK785)		
	中子筋（内側）	7-D13(MK785)		
	中子筋（外側）	15-D13(MK785)		

表-2　コンクリート材料特性

		圧縮強度 (N/mm²)	ひずみ (μ)	ヤング率 ×10⁴(N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
DR-1	基礎梁 パイルキャップ	34.9	2618	2.56	2.25
	柱・袖壁	82.9	2889	3.84	3.51
DR-2	基礎梁 パイルキャップ	34.5	2433	2.67	2.32
	柱・袖壁	81.8	2807	3.78	3.71
DR-3	基礎梁 パイルキャップ	33.9	2390	2.59	2.53
	柱・袖壁	83.1	2963	3.56	4.56

表-3　鉄筋材料特性

試験体	鉄筋種類	使用部材	降伏応力度 (N/mm²)	降伏ひずみ (μ)	弾性限界 (μ)
DR-1 DR-2 DR-3	D16 (SD785)	柱主筋	845.7	4266	-
	D6 (SKK785)	柱補強筋	925.5	6987	4987
	D22 (USD590)	梁主筋	621.8	3453	-
	U9.0 (SBPD1275)	梁補強筋	1384.5	8977	6977
	D6 (SD295)	梁幅止め筋	393.3	2630	-
	D16 (SD295)	杭頭定着筋	349.7	1875	-
	D13 (SD295)	パイルキャップ縦筋	345.8	1844	-
	D13 (MK785)	パイルキャップ補強筋，中子筋	803.3	4117	-
	D13 (SD490)	袖壁主筋（拘束域）	546.3	3140	-
	D10 (SD490)	袖壁主筋（拘束域以外），袖壁補強筋	524.0	2938	-

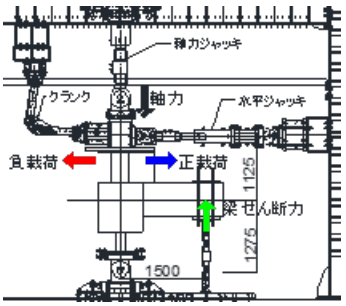


図-2　載荷装置図

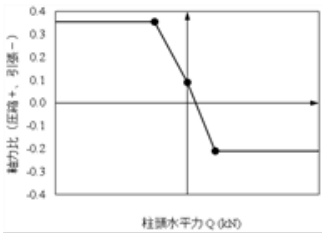


図-3　変動軸力ルール

TOPへ戻る

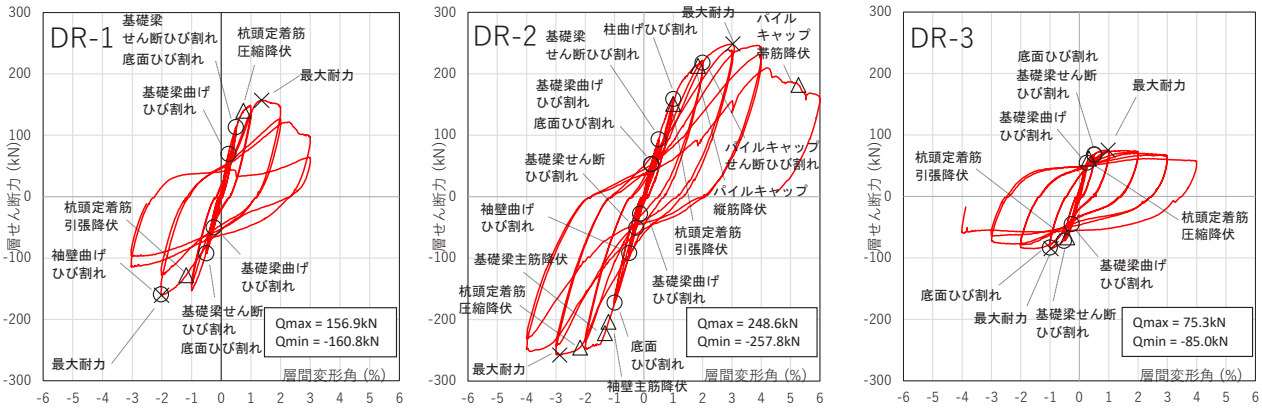


図-4　層せん断力-層間変形角関係

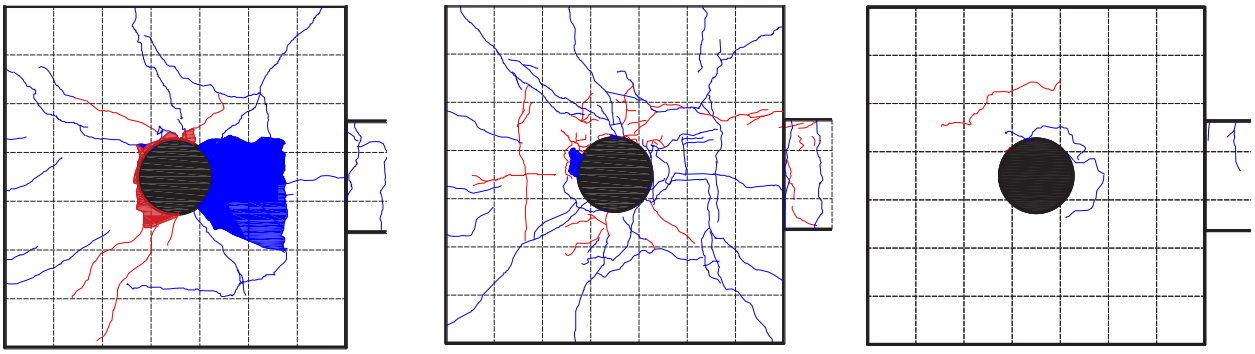


図-5　各試験体の最大耐力時損傷図（青：正載荷，赤：負載荷）

底面部のひび割れが発生した。試験体DR-2では，杭頭定着筋以外の鉄筋降伏が発生しており，正載荷時で杭頭定着筋が引張降伏した後にパイルキャップ縦筋が引張降伏した。その後，R=3.10%時に248.6kNとなり最大耐力を迎えた。R=0.25%のサイクルでパイルキャップ底面部のひび割れが発生し，R=2.0%の1周目サイクルで底面部のひび割れがパイルキャップ側面に進展したことで危険断面位置にせん断ひび割れが発生した。負載荷側では，杭頭定着筋が圧縮降伏し，袖壁主筋と基礎梁主筋は引張降伏した。杭頭定着筋の圧縮降伏後，R=-2.87%時に-257.8kNとなり最大耐力を迎えた。R=-1%の1周目サイクルでパイルキャップ底面部のひび割れが発生した。試験体DR-3についても正載荷と負載荷の両側で杭頭定着筋の降伏後，最大耐力を迎えた。正載荷ではR=0.98%時に75.3kN,負載荷ではR=-0.97%時に-85kNとなり最大耐力を迎えた。最大耐力は，杭頭の埋込を無しとした試験体DR-3が最も小さい結果となった。試験体DR-1,DR-3は杭頭定着筋のみが降伏した。試験体DR-2は杭頭定着筋の降伏が最も多く発生し，基礎梁主筋の降伏も多く発生した。

3．2　ひび割れ状況

図-5 に最大耐力時における各試験体の杭頭接合部底面の損傷状況を示す。試験体 DR-2 については，基礎梁損傷状況を**写真-1** に，**図-6** に正載荷，負載荷それぞれのピーク時において，ひび割れ幅が最大となったひび割れのグラフを示す。全試験体で杭頭接合部底面のひび割れや杭頭埋込部周辺のコンクリートの剥離や剥落が生じた。杭頭接合部底面のひび割れは，杭頭埋込長さを 1.5D とした試験体 DR-2 で最も広がり，杭頭埋込を無しとした試験



写真-1　最大耐力時の基礎梁のひび割れ状況（試験体 DR-2）

TOPへ戻る

体 DR-3 では殆ど発生しなかった。試験体 DR-2 では基礎梁の曲げひび割れも顕著であった。特に，負載荷時に発生した基礎梁の曲げひび割れ幅は，R=-2.0%ピーク時に最大で 2.50mm を示した。一方正載荷側では，基礎梁の曲げひび割れは発生したが，ひび割れ幅の最大値は R=+2.0%時に 0.60mm 程度だった。また，試験体 DR-1，DR-3 は R=-3.0%の 1 周目サイクル以降は杭頭埋込部底面の剥離のみ進行し，他の部材で新たなひび割れは発生しなかった。

３．３最終破壊性状

全試験体で杭頭接合部底面のひび割れや杭頭埋込部周辺のコンクリートの剥離や剥落が生じた。試験体 DR-1，DR-3 に関しては，杭頭定着筋のみが降伏していたこと，杭頭接合面底面のひび割れ，剥離，剥落が目立ち，その他の部材では大きなひび割れは見られなかった点より杭頭接合面での曲げ破壊と判断する。試験体 DR-2 では，層間変形角 R=-2.0%時 2 周目サイクルで基礎梁上端で曲げひび割れが拡幅し，基礎梁主筋が引張降伏していた点より，杭頭接合面での曲げ破壊に加え，基礎梁の曲げ破壊も生じたと判断する。

３．４杭頭埋込部の曲げ挙動

正載荷時では，全試験体で杭の部材角 Rp は大きく，試験体 DR-2 や DR-3 では約 Rp=10%まで変形していた。また，全試験体で部材角 Rp=3.88%程度まで大きな耐力低下は発生せず安定した挙動を示した。試験体 DR-2 では杭頭埋込み長さを 1.5D としたことで，最大耐力は他の試験体より大きくなった。また，最大耐力時部材角 Rp は他試験体より大きくなった。DR-3 では，杭頭部の埋込みを行わないことで他試験体より耐力は小さくなったが，最大耐力後の耐力低下は緩やかであった。負載荷で試験体 DR-2 の最大耐力は他の試験体より大きかったが，載荷終了時の杭部材角 Rp は 3.0%程で，他の試験体より杭部材角は小さかった。これは負載荷では，基礎梁の上端で曲げひび割れが大きく発生したことが要因であると考える。試験体 DR-3 は，正載荷時と同様に他の試験体より最大耐力が小さくなったが，最大耐力後の耐力低下は緩やかであった。

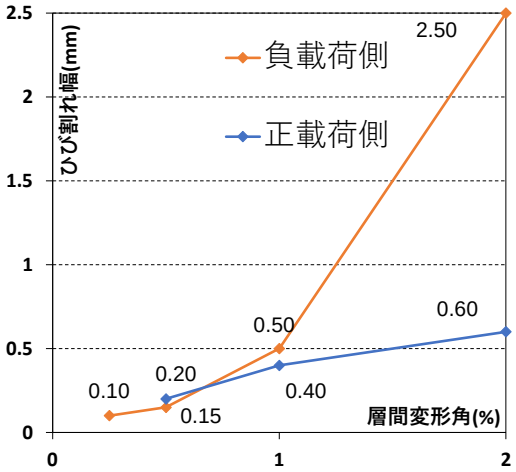


図-6　±2%時にひび割れ幅が最大となったひび割れ幅の推移

３．５まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

(1) 試験体で杭頭埋込部周辺のコンクリートが剥離・剥落し，耐力の低下が生じた。杭頭埋込部周辺に十分な配筋を施すことで，杭頭埋込部は高い変形性能を発揮する傾向にあった。

(2) 最大耐力時までの杭頭接合部底面のひび割れ，剥離，剥落は，杭頭埋込長さを1.5Dとした試験体が最も顕著であり，埋込無しとした試験体ではあまり発生しなかった。

(3) 埋込無しとした試験体では最大耐力は最も小さいが，その後の耐力低下は緩やかになった。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

2022 年度日本建築学会大会にて発表予定。

参考文献

1) 岸田慎司ほか：ト形部分架構パイルキャップにおける杭頭接合部の破壊性状の検討，日本建築学会大会学術講演概要集，構造 IV，pp.397-398，2021.9

2) 成田杏花：パイルキャップを有するト形部分架構に関する研究－杭頭接合部の配筋および架構における破壊性状の検討－，芝浦工業大学卒業論文，2020

TOPへ戻る

近代日本における建築基礎教育の基礎的研究

理工学研究科　　林　要次

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

本研究は、新たな建築基礎教育手法の構築に向けた基礎的な研究である。建築の表現手法は手書きからコンピューターの活用まで多岐にわたり、建築基礎教育も変革の時期に来ており、新たな時代の建築基礎教育を確立するために、これまでの歴史的な営みの整理が求められている。

本研究では、こうした問題意識に基づき、近代日本の建築教育機関に眼を向け、ひとつの高等教育機関、横浜高等工業学校における建築基礎教育に着目した。

横浜の建築教育は、フランス・パリのエコール・デ・ボザール（以下、「ボザール」）教育を範として行われた。同校の教育システムは、近代社会の建築教育モデルとなり、その教育システムが世界的に伝播したことが知られている。横浜での教育を牽引した中村順平（1887-1977）は日本人としてはじめてボザールを修了した人物であり、中村が行った教育はボザール教育の日本化とも言え、世界で取り組まれたボザール教育との関係を比較する上でも重要な教育である。

本研究の端緒は筆者が 2015 年に提出した学位請求論文の作成過程で、「建築図画」のガラス乾板や写真ネガを発見したことにある。

発見したガラス乾板は、中村の教え子が設立した同窓組織「桧の会」蔵で、作品記載の提出年等の情報から中村の横浜の在職時の 1925 年から 1944 年ごろに撮影されたものと推定される。一方、写真ネガは、1997 年ごろに中村の教え子、谷喜夫（1939 年卒）が中心となって撮影したものである。これらの写真資料の枚数と現況概略調査を行ったところ、茶封筒等に保管された大半のガラス乾板は段ボール内で常温保存され、写真ネガは現像時の紙ケースで無造作に保存され、今後の劣化が懸念された。

本研究では、近代日本の建築基礎教育の一端を明らかにするために、当時の学生が描いた建築図面の写真群 544 点（ガラス乾板およびネガフィルム）を対象に、デジタル・アーカイブ化による研究資源化を試みる。加えて、研究資源化されたデータをもとに、描画対象を特定し、デジタルデータの詳細なレイヤ分けを行うことで当時の教育理念や教育状況を解明する。こうした一連の作業から、これからの建築教育への応用可能性を提言することを目的とする。

2021 年度日本建築学会大会［東海］でのパネルディスカッション「建築資料の現在―建築学におけるアーカイブズの役割を考える」で明らかになったように、著名な建築家の資料収集の促進は見込まれる一方、その基準から漏れた資料、特に教育資料の収集・保存は今後大きな課題となり、それらに対応する方法論の確立は喫緊の課題である。

近代日本の建築教育における明治期の図

TOPへ戻る

学・図案教育に関する研究が『明治期建築学史』(角田真弓、中央公論美術出版、2019)で体系化されたが、大正期・昭和初期の建築教育機関における同種の取り組みに関する体系的な研究成果は十分に確立されていない。

本研究はその一翼を担うため、近代日本の建築教育資料はどのように保存・継承すべきなのかを含め検討し、近代の教育資料の継承の課題に対する一つの方法の提示することで、文化庁が掲げる「文化芸術の次世代への確実な継承」に貢献できる課題と考えられる。

一方、教育資料のデジタル・アーカイブ化の研究は、例えば、建築分野の先駆的・代表的な研究、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)「建築写真のデジタル化と高精度解読に関する研究」(研究代表者:藤井恵介、2001 年度採択・研究課題/領域番号 13555165)では、明治期のガラス乾板のデジタル・アーカイブ化に関する具体的な手法が提示された。

また、同補助金基盤研究(B)「東京美術学校収蔵写真の研究 ―明治期の古写真・ガラス乾板から見る美術教育―」(研究代表者:原田一敏、2013 年度採択・研究課題/領域番号 25284024)では、芸術教育分野の状況が明かされ、明治期の写真資料のアーカイブ化により当時の教育を伺い知る重要な資料としての価値が提示され、明治の芸術教育を詳らかにした。

さらに、2000 年代以降、デジタル・アーカイブ化の手法やデータベース構築手法を開示する研究も継続的に行われており、その具体的な手法が山家浩樹らによる『文化財としてのガラス乾板』(勉誠出版、2017)にまとめられた。山家がガラス乾板を「近代学術の足跡が確実に刻まれた貴重な存在」と指摘するように、本研究で対象としたガラス乾板等の写真資料は、当時の教育実態の把握にとどまらず、将来の近代日本の建築教育研究への活用も可能な史料であることから、デジタルによる研究資源化の着想に至った。

２．研究計画

本プロジェクト研究が科研費連動型である特性を踏まえ、今年度の計画では、科研費獲得を念頭に、その申請および獲得後の推進に必要な準備状況の構築を目指した。

本研究で着目した「建築図画」は、中村が横浜での建築基礎教育に取り入れたものである。「建築図画」は、中村自身がボザールで経験した 2 つの課題、「装飾構成 composition décorative」と「要素分析 élément analytique」(建築を構成する最小単位をエレメントと捉えて過去の建築を分析する課題)が想定され、さらに中村独自の解釈が加えられている。「建築図画」は中村がボザールで経験した手法を横浜で発展させて実践したもので、主に西洋建築と日本建築が描かれており、当時の建築基礎教育の状況を把握することのできる貴重な史料である。

本プロジェクト研究では、前述の問題意識に則り、時間的な制約も加味し、対象の絞り込みを行った。本プロジェクト研究では、発見した「建築図画」の写真ネガのデジタル化およびデジタルデータから描画対象を明らかにし、要素ごとに細分化し情報整理を行う計画とした。

デジタル化対象写真は、35 ㎜フィルム 40 枚および 35 ㎜フィルムの約 4 倍に相当する 6×7 ㎝フィルム(ブローニー判)278 枚の計 318 枚とした。また、分析対象は、これらの写真の内、複数の要素が一枚に描かれた作品を対象に Adobe Photoshop を使用し、構成要素ごとの分解作業を施す計画とした。なお、スキャン実施にあたっては外部専門機関を利用する計画とした。

また、「建築図画」のスキャニングおよび分解作業と並行し、公設・私設の博物館・美術館・資料館等におけるアーカイブの現状のヒアリングを行い、アーカイブ化されたデジタルデータの保存方法や活用方法の検討を計画した。

TOPへ戻る

３．計画の進行状況

本プロジェクト研究は、2021 年 6 月 16 日付の内定を受け、同年 7 月 2 日の予算執行計画書を提出しスタートした。科研費申請が例年より1カ月程度早まり同年10月上旬の締め切りであったため、写真ネガによる検証を行うための時間を確保するため､学外専門機関、株式会社誠勝（そのままスキャン）に写真資料の高解像度スキャニングを依頼した。

スキャニングにあたっては、サンプル確認を行いながら解像度・保存形式等の精度の設定を行った。サンプル確認では、まず、納品までの時間が短縮できる 1200dpi で JPEG 形式の品質差による容量の大小を比較するとともに、同解像度による保存形式の異なる tiff 形式との品質差を比較した。

比較の結果、tiff 形式ファイルがデータ容量は増大するものの、ノイズが滑らかな状態で保存されており、デジタルデータ保存という観点から優れていると判断した。

一方、1200dpi では原本サイズの 4 倍程度までの拡大に留まるため、元データが 6×7 ㎝フィルムと 35 ㎜フィルムであることを考慮すると、原本サイズの 8 倍程度までの拡大に耐えられる 2400dpi がその後の分解作業に有効ではないかと判断し、2400dpi のサンプルも確認した。確認の結果、最終的に、スキャニングは解像度 2400dpi で保存形式を tiff 形式とした。採用した方法によるスキャニング作業日数が 23 営業日程度となり､約 1 か月の作業期間が必要となり、8 月末納品でスキャン作業が進行した。

8 月末のデジタル納品された画像データを整理し、構成要素の特徴をとらえやすい画像データを抽出し、分解作業を実施するデジタルデータを 42 点に絞った。（図１）

構成要素の分析では、額に相当する部分をまず取り出し、次に画面上に描かれた建築物を把握し、それぞれの建築要素ごとに整理した｡整理された要素ごとにレイヤ分けを行い、一枚に描かれる平面図・断面図・立面図・天井伏図等が明確に判断できるよう明暗比を与えて調整を行った。（図２）

図 2 はその一例で、この「建築図画」では、一枚の図面内に平断面図や立面、部分を拡大したものや天井の設え等が丁寧に収められていた。建築全体を捉えた後にその建築物の特徴を捉える要素を抽出して一枚にレイアウトされていることが読み取れる。

４．今後の計画及び学会,論文等投稿・発表状況

本プロジェクト研究は、令和 4（2022）年度日本学術振興会科学研究費補助金若手研究の採択（研究課題/領域番号 22K14414）という結果をもたらし、プロジェクト研究科研費連動型の一定の成果をあげた。

なお､採択された研究は､2 か年の計画で、今後、本プロジェクト研究で対象とした写真ネガのみならずガラス乾板も同様の分析手法による構成要素の分解を試みる予定である。

また、今後の計画では、コロナ禍の制約もありインタビュー計画が十分に進行できなかったことを踏まえて、適切な対策を講じる計画を立案するとともに、近年、フランスや中国などにおいてボザールで行われた「要素分析」の手法の再評価や古典教育の見直しの動きがみられることを踏まえ、研究資源化により国内外の比較研究も推進する。

各種学会への投稿や口頭発表の予定は、これまでの成果をまとめ 2022 年度末の日本建築学会関東支部研究発表会や 2023 年度日本建築学会大会学術講演会を計画している。

謝辞

本研究の推進を快諾いただいた本学建築学部教授原田真宏先生、予算執行等のサポートをいただいた原田真宏研究室秘書小林久美氏、画像分解作業の補助をしていただいた原田真宏研究室修士 1 年（作業当時）小野眞央氏にはこの場を借りて感謝いたします。

TOPへ戻る

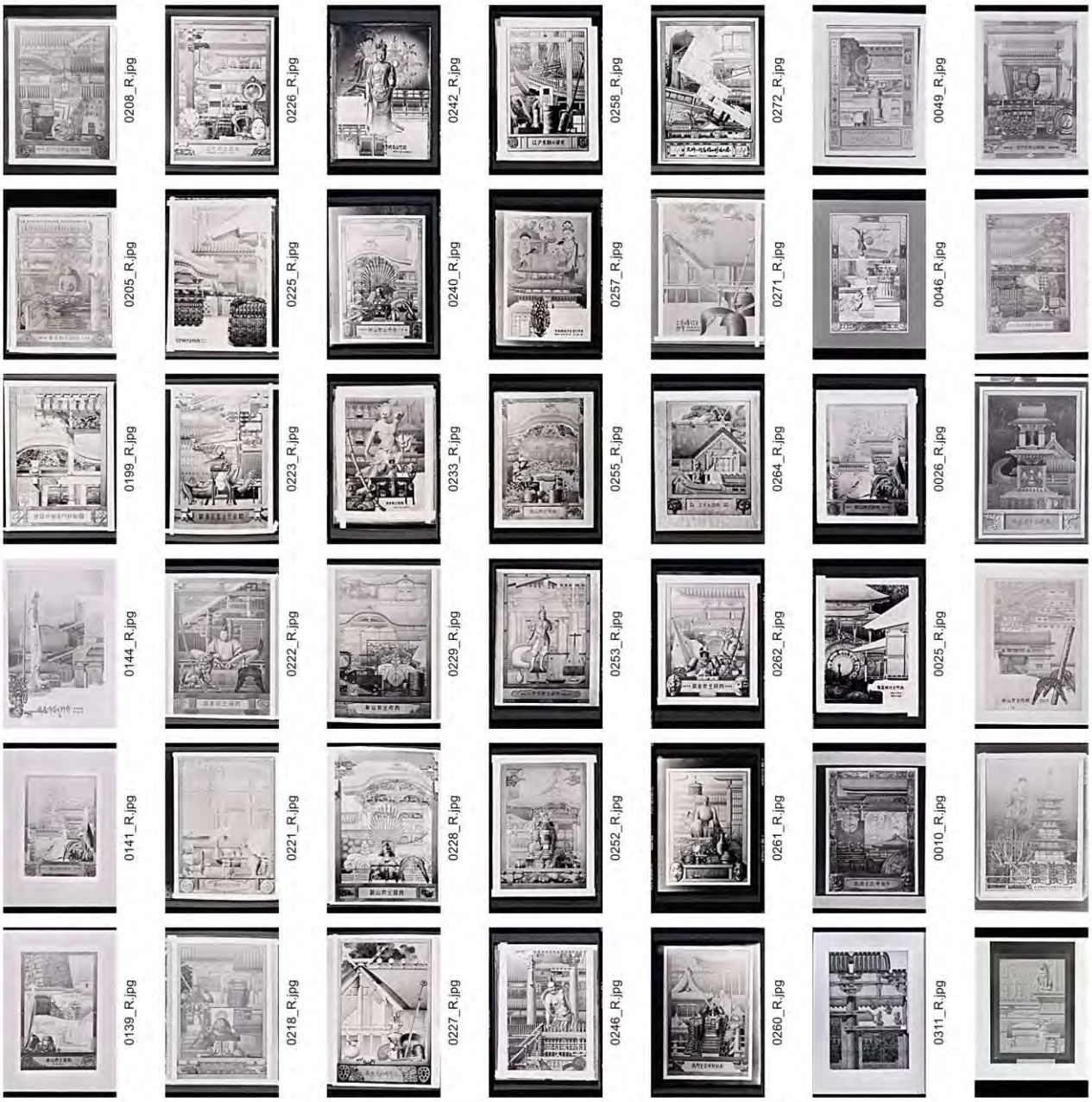


図 1　分解作業対象データ一覧（42 作品：jpg 形式サムネイル）



図 2　構成要素分析一例（最左：0049 デジタルデータ）

TOPへ戻る

Human error prediction model using physiological signals in real time and its application to autonomous systems

機能制御システム専攻　Muhammad Nur Adilin Bin Mohd Anuardi

1. Paper introduction

Due to the population decline, the retirement age in Japan has been considered to be increased. However, the human ability is declining with the increase in age. Therefore, most industries have utilized autonomous systems (robots) to tackle such problems. However, the autonomous systems for supporting the Quality of Life (QoL) are still in doubt, and many factors need to be considered. Physical and mental health are closely connected and important to ensure the QoL. Unlike physical health, it is difficult to monitor mental health. Poor mental health contributes to the high possibility of human error occurrence that leads to an accident.

Many methods using gaze position, facial expressions, and even movement behavior have been proposed to prevent human error. However, these indexes usually vary and differ among individuals. It has already been demonstrated that mental health could affect cognitive function easily. Therefore, this study aims to build the human error prediction model by considering both physiological and psychological states.

Here, the combination of questionnaires from subjective evaluation of psychological states, and physiological states of biological signal measurements from the objective evaluation will be analyzed. The biological signal measurements such as brain wave analysis using electroencephalography (EEG) and blood flow changes analysis using near-infrared spectroscopy (NIRS) have been actively considered for this research. EEG has a high-resolution in time phase measurement which complements the high-resolution in objects' size measurement of NIRS, which is better than Magnetic Resonance Imaging (MRI) alone.

To achieve the aim of this study, we plan to develop a hybrid physiological EEG-NIRS measurement method. First, we will compare the effective evaluation between EEG, NIRS, and EEG-NIRS measurements. Then, we will propose the emotion visualization model for NIRS, based on the emotion visualization model for EEG. The developed emotion visualization will be implemented in

TOPへ戻る

cognitive state evaluation by predicting human error. The human error prediction then acts as a simple measurement system for the application with autonomous systems interaction and its verification evaluation will be conducted.

For example, this could be applied and not limited to the semi-autonomous driving situation. In semi-autonomous driving, there is a moment where human control is needed. It is important to analyze the driver's cognitive state before the autonomous control changes to human control to avoid any unexpected incident. The human error prediction can be used to analyze the cognitive states; thus, it can be applied as a standard to be decided whether to perform the task.

Previously we only considered EEG for the analysis of the cognitive state. This time, the hemoglobin (Hb) concentration of the blood flow changes will be measured by NIRS and will be used to determine the brain activity in the prefrontal cortex (PFC). PFC, which roughly corresponded to working memory, is sensitive to the cognitive state. Lastly, the combination of indexes such as the spectral power of EEG and the heart rate variability (HRV) measurement index also will be integrated together with NIRS to determine the cognitive states using the emotion visualization model based on Russell's emotion classification. The integration of EEG-NIRS using emotion visualization is expected to have better cognitive state measurement. EEG is among the most reliable method in cognitive measurements. Together with NIRS, even though relatively a new imaging technique, is actively progressing in neurological research.

２. Research program

(1) Analysis and establishment of evaluation method based on (2) Empirical experiment and application development: The emotion visualization developed in EEG will be applied in NIRS and EEG-NIRS, and the accuracy analysis will be conducted. The evaluation system will be conducted by experimenting with the indexes on a large sample size to prove the evaluation's robustness. In application to monitor the physiological state for conducting difficult tasks such as driving, a human error prediction model will be introduced. Stroop task, which is the error induced psychological task, will be utilized for the experiment to evaluate the model. By using the human error prediction model as a standard, it may be able to indicate both psychological and physiological states whether for the person to perform the task.

Based on the results of (1) and (2), (3) QoL index and model construction will be developed: A model based on the result will be constructed. The construction of a systems collaboration model related to QoL indicators will be discussed. In this study, it is considered that appropriate measures can be taken for monitoring the physiological states by predicting the human error using biological signals and based on psychological states, including interactions with other autonomous systems that assume support for the elderly. Here, the model evaluation will be expanded to confirm the model's

TOPへ戻る

robustness.

３. State of progress

Previously, we already conducted the experiment on the error prediction model by using EEG. This time, we conducted the same experiment by replacing the method using NIRS. We utilized the same Stroop task for the experiment. However, we improved the way to answer the Stroop task by only using the keyboard button instead of the mouse. This will help to decrease the unnecessary error made by the subjects.

For the evaluation of the physiological state, we used NIRS HOT-2000 from NeU by considering three indexes from the measurement, which were total Hb concentration changes (left and right) [mMmm] and heart rate [bpm]. Figure 1 shows the experiment situation during the NIRS measurement.



Figure 1. The Stroop task flow for the experiment.

We conducted the pre-experiment with one subject to confirm the flow and to investigate the correlation of the indexes with the number of error occurrences. Figure 2 shows the flow of the Stroop task and Figure 3 shows the sample of the Stroop task page.

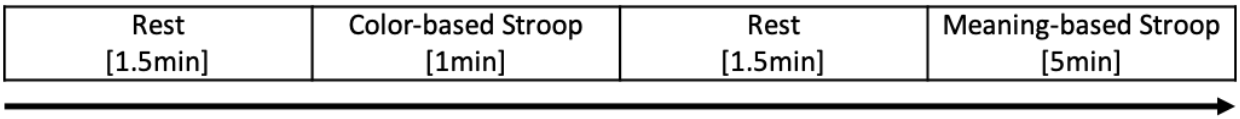


Figure 2. The Stroop task flow for the pre-experiment.



Figure 3. The Stroop task page for the pre-experiment.

For the pre-experiment, we realized that the timing for NIRS measurement, which is every 0.1[s], did not match with the timing of the Stroop task. Therefore, we decided to average the NIRS results for every 1[s]. Then, we calculated the correlation of the physiological indexes from NIRS with the number of error occurrences from the Stroop task. Table 1 shows the correlation value for each index from NIRS with the number of error occurrences.

Table 1. A correlation value of NIRS indexes with the number of error occurrences.

Indexes	Correlation Value
Total Hb concentration changes [mMmm] - Left	0.6568
Total Hb concentration changes [mMmm] - Right	0.5651
Heart rate [bpm]	0.2911

From the pre-experiment, we found

TOPへ戻る

that all of the indexes from NIRS shows a positive correlation towards the number of error occurrences. In fact, the total Hb concentration changes at the left side of PFC shows a high correlation with the value of 0.6568.

To achieve more robust results, we continue the experiment by increasing the number of subjects. We managed to recruit another three subjects and planned to conduct the experiment three times each. The flow of the experiment is shown in Figure 4.

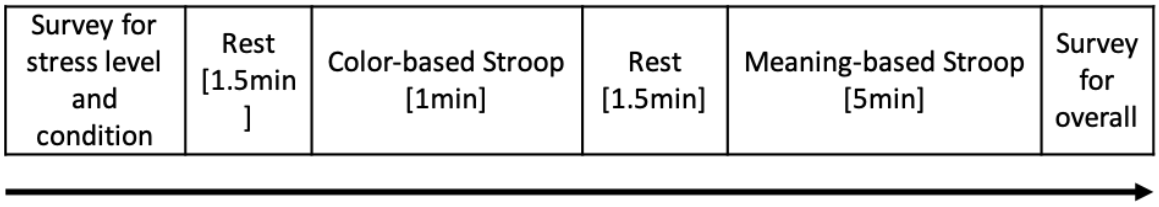


Figure 4. The flow of the experiment.

After the first experiment, we found that the results show the individual difference for the correlation. Also, the correlation observed were low for each index with the number of error occurrences. Here, we are planning to reanalyze the results before proceeding to the next experiment.

4. Future program, paper submission and results briefing

For the next step, we are planning to reanalyze the measured results by calculating the correlation value for every 20[s]. We believed that it is important to find the accuracy and precise results for the human error prediction. As a pre-experiment, we hypothesized that the increment of total Hb concentration changes at the left side of PFC shows the higher number of errors made by the subjects. This is because the left side of PFC was a part of working memory, where its role is including decision making and attention span. However, individual differences need to be expected since brain functions and physiological signals are varied among individuals.

Here, we will proceed the same experiment on repeat for three times for each subject. The results then will be used to build the model using both decision tree and logistic regression for human error prediction and will be compared with those from EEG. Not only that, the previous results from EEG also will be reutilized for the model building using decision tree method.

Overall, the research will be finalized with the integration of EEG-NIRS for human error prediction. The best method for human error prediction with the best model will be determined. Also, we are planning to further discuss our study in international conference in the future and publish the findings in the journal.

Last but not least, we would like to list out the limitation of the study where it is difficult to recruit the subject for the study in the Covid-19 situation. However, we would like to thanks the support from SIT for the awarded research grant.

TOPへ戻る

超電導バルク磁石による開放空間をもつ超小型 NMR の研究

SIT 総合研究所　　岡　徹雄

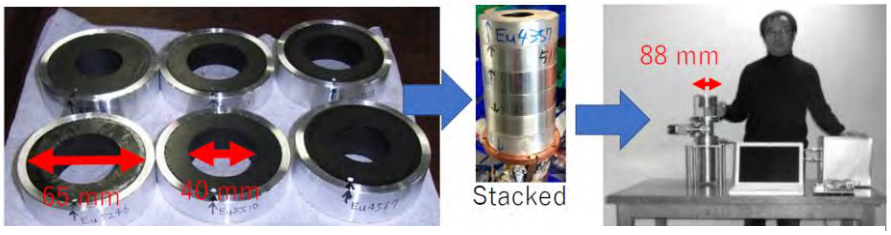
共同研究者
工学部先進国際課程　　坂井　直道
理化学研究所放射光科学研究センターNMR 研究開発部門　　仲村　高志
足利大学工学部創生工学科　　横山　和哉

１．序論

超伝導磁石の発達により、核磁気共鳴(NMR)分析装置や医療用 MRI など強磁場を利用した機器の開発が活発である。一方で、このような大型高性能な装置とは別に、図１のように超小型化をねらう研究が、高温超伝導バルク磁石（以下バルク磁石）を使って進められている[1, 2]。しかし、中空円筒状のバルク磁石を使うこの装置は試料空間が円筒内に限定されるため、より開かれた磁場空間の装置が期待される（図２）。これが実現すれば、試料形状によらず測定でき、他の分析機器と組み合わせて使える、簡便で安価な NMR 機器となり、その市場分野の大幅な拡大が期待できる。

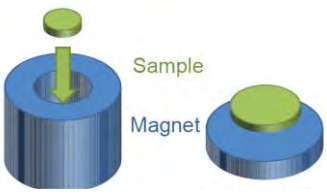
本研究では、超小型の NMR 分析装置をねらい、その要素技術となるバルク磁石による単一磁極からなる装置の開発を目的とする。その第１段階として、簡便な着磁方法であるパルス磁場によって励磁したバルク磁石を用いる。NMR 磁極には高い均一性をもつ磁場空間が必要なため、磁極表面に磁性板を取付けて、均一度に優れた磁場空間を得る[3]。

今年度は単一磁極表面からの NMR 信号の検出に世界で初めて成功しており、この NMR 信号が磁場均一性の評価に使えることを利用し、磁極面に平行な面内での磁場均一性の向上をねらって特許を出願した[4]。単一磁極の z 軸方向の磁場傾斜を利用し、磁極から遠ざかる



(a)リングバルク　(b)積層磁極　(c)　卓上NMR

図１．　超小型卓上 NMR 分析装置



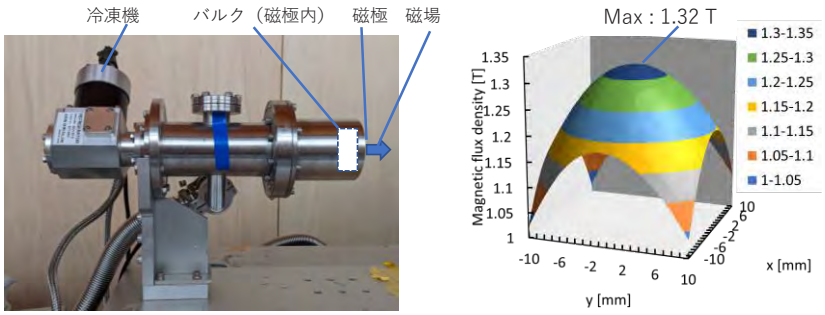
(a)筒状　(b)単極

図２．　NMR 試料のアプローチ



図３．　拡散 NMR の応用

TOPへ戻る



(a)GM冷凍機によるバルク磁極（30K)　(b)　磁極表面の磁場分布（max1.32T）

図４．　単極型高温超伝導バルク磁石(a)とパルス着磁によるその磁場分布

方向に試料の溶質が拡散する過程に注目して物質の変質や劣化が評価できる（図３)。

２．研究計画

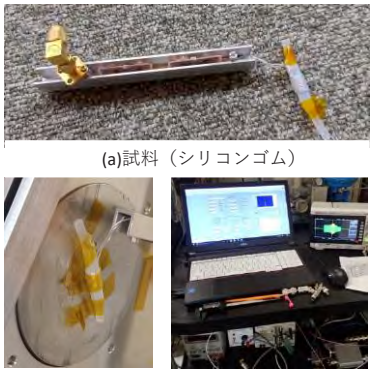
2021 年度は、バルク磁石での世界初の NMR 信号の検出に続き、さらに均一な磁場形成をめざした。すでに 1mm 径の試験管内の硫酸銅水溶液の NMR 信号の半値幅を急峻にして感度向上するため、シミング材料として用いているリング状磁性体の形状を最適化する実験を実施した。このため、COMSOL などの計算機シミュレーションを利用して設計に生かすとともに、実際に磁性板を磁極に取付け、その磁場分布と NMR 信号強度から磁場均一性を評価した。その結果、広い範囲にわたって面内に均一な分布が得られ、特許出願につながった。NMR プローブと信号系の機器はその構成を完了しており、磁極とその周辺の磁場の性状を評価する手順になっている。パルス磁場によって着磁した磁場は昨年度の 0.3T から 1.12T へと大幅に向上しさらに 1.17T となった。

研究体制としては、芝浦工大、理研、足利大が有機的に繋がり、情報共有しながら遂行する。この実施体制は、世界最高水準の NMR 研究を誇る理研の技術、芝浦工大の磁石合成と磁極構造に関する世界有数の技術、世界から一流の研究者が見学に来る励磁技術をもつ足利大によって可能となる。

３．計画の進行状況

GM 冷凍機を用いたバルク磁極とその磁場分布を図 4 に示す。磁極にはφ87 の真空槽内にバルク磁石（φ60）が搭載され、パルス着磁で最大 1.32T に励磁された。磁極表面の磁場分布は釣鐘状をしており、リング状の鉄板を取り付けることによって、中央部の磁場を遮へいして、磁極面内方向に均一磁場を得る。

信号検出の結果について図5と図6に示す。



(a)試料（シリコンゴム）

(b)磁極上の試料　(c)　信号測定系

図５．　NMR 用試料と磁極上の構成、

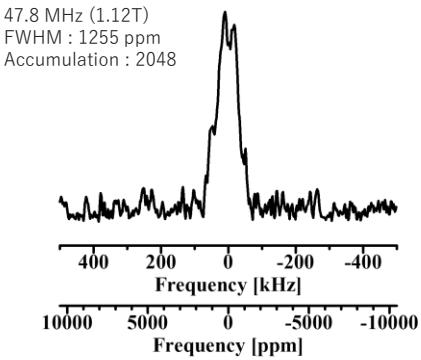
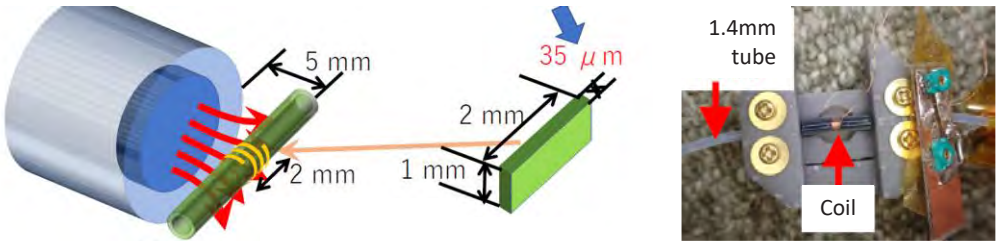


図６．　単極バルク磁石上で検出された世界初の NMR 信号

TOPへ戻る



(a)磁極構成　　(b)検出部　　(c)　試料装着部

図７．　傾斜磁場を用いた拡散 NMR

図には微小な管状のシリコンゴムを試料としてこれを磁極中央部に張り付け、その場所での 1.12T の磁場中での NMR 信号の検出を示す。2048 回の信号積算によって明確な NMR 信号ピークが得られ、この結果はバルク磁石による拡散 NMR として世界初の信号検出となった。これらの結果は 11 月に福岡で開催された国際会議（MT27）で発表した[5]。

図７に示すように、φ1.4mm の試料管と 2mm の検出コイルを用い、磁極から 5mm の地点で 1mmx2mm の範囲の信号を検出し、拡散係数との関係を調べた。拡散の原理に基づき、拡散係数と NMR 信号の遅延時間との関係式を図８に示す。磁場勾配を与えれば、水とアセトンで理論式が測定値によく一致することがわかる（図９）。このように単極バルク磁石の強磁場とその磁場勾配から、拡散 NMR が構成できることを世界で初めて実証した[6]。

磁極面から放射される磁場空間を利用するから、試料の形状や大きさに自由度が高く、NMR の利用価値を大きく広げることができる。

一方､長期の連続運転によって GM 冷凍機のヘリウムガスがわずかに汚染されることから、3 か月以上の連続運転では磁極が停止する問題が発生しており、励磁作業ごとに磁極性能の再現性の確認と、強磁場化を狙ってパルス励磁を年度内に 3 回にわたって実施した。最後の励磁作業の結果を図 10 と表 1 に示す。

冷凍機は室温から半日程度の冷却を経て 31.8K に達し、バルク磁極は、液体窒素冷却された 112 ターンのパルスコイルによって 40mF のコンデンサの放電で 6 回にわたって着磁された。ヨークを取りはずして室温となった磁極表面での磁場は最高 1.87T となった。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後の計画

次年度はパルス着磁より強磁場で均一性に優れる磁場中冷却法（FC）による励磁を、現状の NMR に使われる超伝導コイルを使って、3.5T の静磁場磁極を実現する。パルス着磁による 2T 級から磁場強度は 2 倍に、分解能も 2 倍となる。パルス励磁磁極についても冷凍機に振動がないパルス管冷凍機を用いて信号検出の精度を向上させる。

現状での GM 冷凍機にはそのディスプレー

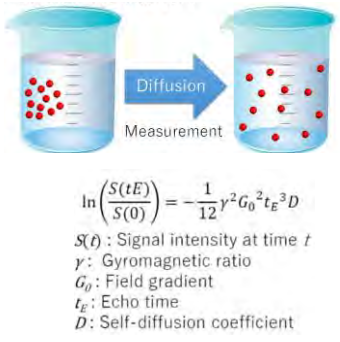


図 8.　拡散 NMR の仕組み

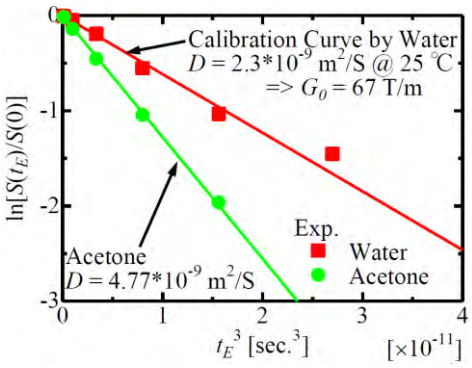


図９．　拡散係数の測定と理論値との整合性

TOPへ戻る

サの運動によって磁極に伝わる振動があり、このためにNMR信号にノイズが入る問題が想定されるため、さらなる高性能化に向けて無振動型のバルク磁極の構成が必要となっており、外槽に振動吸収用の多重管を用いた構成をすでに構想として設計中である。これにより磁場安定性の向上が期待できる。

今年度新たに科研費が採択されたため、理化学研究所を主体にこの共同研究の枠組みを維持しながら3年間の研究開発を進める[7]。

学会等での発表状況（2021年度）

国際会議発表：6件、論文発表：3件

参考文献

[1] Nakamura T. *et al.*, “Development of a Superconducting Magnet for Nuclear Magnetic Resonance Using Bulk High-Temperature Superconducting Materials” *Concepts in Magnetic Resonance Part B* (Magnetic Resonance Engineering) **31B** (2) 2007 65

[2] Ogawa K. *et al.*, “Development of a magnetic resonance microscope using a high Tc bulk superconducting magnet” *Appl. Phys. Lett.* **98** 2011, 234101-1

[3] Oka T. *et al.*, “Generation of Uniform Magnetic Field between Face-to-Face HTS Bulk Magnets” *J. Phys. Conf. Ser.* **1293** 2019 012044

[4] 岡徹雄他、「磁場発生装置、核磁気共鳴装置および磁場発生方法」特開2021-89911, 出願日：令和1.12.2

[5] Kikuchi S. *et al.*, “First NMR Signal Detection on Single-sided Magnetic Pole Surface Containing HTS Bulk Magnet Activated by Pulsed Field”, *27th International Conference on Magnet Technology (MT27)*, 11/15-17 2021, Fukuoka, THU-PO3-405-05, poster

[6] Takahashi T. *et al.*, “NMR Relaxometry Using Outer Field of Single-Sided HTS Bulk Magnet Activated by Pulsed Field”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity,* **32**, 6, September 2022, 4602404

[7] 岡徹雄、坂井直道、仲村高志、高橋雅人、横山和哉、科研費補助金一般（C）「単一の超電導バルク磁極を使った超小型NMRの研究」220万円/3年間



図10.　強磁場をねらったパルス着磁とその方法

表1.　パルス着磁条件と磁極表面での捕捉磁場

2022/1/17		理研GM左極	2.1MPa	31.8K		3.61E-05
No	Time	V	A	T_{int}/T_{aft}(K)	B_{cent}/B_{edge}(G)	Pa
1	8:55	690	319	31.5/32.6	345/698	3.41
2	9:25	650	312	32.1/32.3	406/776	3.35
3	9:55	600	290	31.9/32.0	459/763	3.36
4	10:25	580	270	31.7/31.8	480/752	3.29
5	11:56	560	265	31.7/31.8	488/915	3.51
6	12:25	530	257	31.7/31.8	492/805	3.28
磁極表面中央					1.866 T	

TOPへ戻る

Analysis on Effect of Stochastic Resonance on Postural Control Strategies during Continuous Translation Perturbation

SIT 総合研究所　Nur Fatin Fatina Binti Mohd Ramli

1. Paper introduction

The ability to maintaining balance in upright positon during quiet standing and in dynamic task condition is necessary for successful performance in daily life tasks (S. R. Lord et. al 1991, D. A. Winter 1995). There are three major senses involved in posture balance control which are vision, vestibular and somatosensory systems. Sufficient feedback from these senses can make balancing process become more effective. Degeneration of postural control system function can lead to balance disorder. Balance disorder and body instability can be caused by certain health condition, medications, injuries, diseases or even ageing. The best way to solve these problems are by maintaining good health and physical fitness. However, it becomes difficult to perform such activities especially on elderly people or people with disability. Thus, development of exercise equipment and training methods for daily exercise and rehabilitation are needed.

Previous studies have reported that somatosensory plays an important role in postural control (Fransson P et. al, 2007). Deep understanding in the postural control mechanism is considered useful for fall prevention. There are some studies that have reported that the tactile sensitivity at the sole, which is one of somatosensory sensations, is improved by stochastic resonance (SR) and balance function is improved. The focus of this research is to support those with balance disorder to undergo optimal and comfortable exercise and rehabilitation session. SR is a promising sub-sensory noise, neither a perturbation nor disturbance stimulation, which enhance balance control during upright stance. SR is a phenomenon in which the performance of signal detection and feedback controlled system is improved by the application of noise as shown in Figure 1.

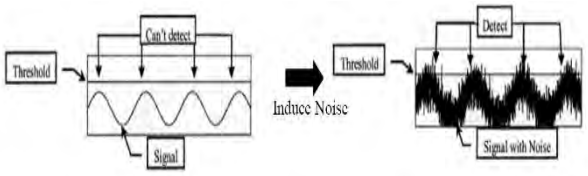


Figure 1 Signal detection enhance by Stochastic Resonance (Kudo et al. 2012)

The ability to maintain balance in an upright position during quiet standing and dynamic task conditions is necessary for successful performance in daily life tasks (Pollock A. S. et. al,2000; Anne S. C. et. al, 2007). Up until now, the application of SR during dynamic task has not been addressed. Since motor learning in rehabilitation is often associated with complex tasks, it is essential to observe whether SR can improve posture balance during dynamic task. Therefore, the key scientific question of this research proposal is whether the implementation of SR can improve postural control balance during dynamic task which can be used as training and in rehabilitation session.

The application of SR has been used widely in order to improve posture control balance in human by applying SR at the foot sole (Priplata et. al, 2002; Scott E. Ross et. al,2006; Marius Dettmer et. at, 2015; Yannik Fase et. al, 2018) as shown in Figure

TOPへ戻る

2.

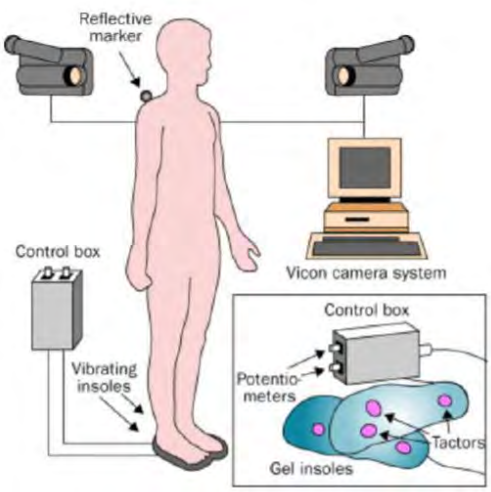


Figure 2 Experiment system overview (Priplata et. al, LA Lipsitz et. al)

The review study suggests that the SR application on foot sole produce better position since the body sway was decreased, thereby improving the performance of the postural balance control. Although the results suggest that the application of SR at foot sole can enhance balance control, the contribution of SR on the other parts than foot sole is less in discussion. It is important to determine whether applying SR at the other parts of the body can enhance postural balance control. Moreover, the correct location of applying SR could provide maximum influence in improving postural balance.

Balance disorder problem can be treated by balance training exercises. Besides, people with disability need to do rehabilitation to enhance their postural control balance. Therefore, the main purpose of this research is to observe whether the implementation of SR for training and rehabilitation session with dynamic tasks enhanced the postural balance for people with balance disorder problem or for who wants to improve postural balance. New balance assessment, balance training and rehabilitation system or equipment can be developed through data collection from this research. This will help people such as people with disability and elderly to improve and train their postural control balance, motor performance and sensory function for daily training and also rehabilitation and treatment process. This research project will have significant impact and broad contribution to the rehabilitation balance training and balance assessment.

The originality of this research includes 1) application of SR during dynamic task for training and rehabilitation used, and 2) optimization detection of SR implementation position for maximum benefits. Up until now, the investigations were mainly focus by applying SR at foot sole. Besides, the experiments were done just by applying SR in quiet stance condition. Thus, the implementation of SR during dynamic task and placement of SR should be investigated (Figure 3). This research finding has yet been established according to the literature and patent novelty search.

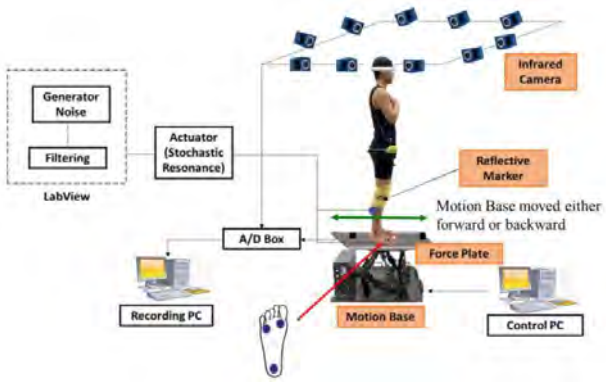


Figure 3 Experiment system overview of proposed research

The idea of this research was trigged since the researcher found out about SR is used to enhance balance ability during upright stance. Besides, the use of SR in balance training was shown to give positive effects in improving balance (Y. Faes, et al. 2018). However, up until now, the researcher observed that there is still lack of investigation on applying the SR during dynamic task condition. Therefore, the applicant proposed to implement the use of SR for observing whether postural control balance ability is improving while inducing dynamic task. Research related to SR has been actively done in domestic and overseas. Priplata et al. (2003) had done investigation by using SR stimulation which was attached at the shoe insole for balance evaluation. In 2015, LA Lipsitz et al. used piezoelectric vibrator insole towards elderly people in quiet stance to improve balance and walking.

TOPへ戻る

However, it was difficult to create an insole with built in vibrator and direct stimulation to the sole may cause an awkward body sensation or damage to the device. Besides applying the SR stimulation to the sole of the feet, Kudo et al. (2012) had tried to apply the SR stimulation to the other parts than feet sole such as tarsal tunnel and measured the tactile sensitivity. Most of the research were conducted during quiet stance. Thus, there is still lack of investigation on influence of SR stimulation on body segment in dynamic task environment by applying at the other parts of the body. By this research project, the influence of SR on body segment during dynamic task, which is the applicant will apply external perturbation, could be determined and is believed to improved balance ability.

２. Research program

(1) Selection on SR threshold. This analysis is crucial in order to determine either subthreshold or supra threshold will improve postural control. Besides, the threshold is different for each individual. Thus, this part is important in order to determine the range of the threshold.

(2) Study on implementation of SR along with dynamic task. This analysis is important in order to observe whether SR will improve postural balance during dynamic task environment. Movable platform with 6 axis will be used to produce the external perturbation for mimicking dynamic task condition. The movement of anterior and posterior direction of external perturbation will be applied in dynamic task condition.

(3) Determine the best position for applying stochastic resonance at the body. It is important to know the correct location to apply SR for maximum influence in improving postural balance. The applicant had plan to implement the SR at foot sole, lower limb muscles, fingers and wrist.

(4) Design modeling for analyze human postural control balance for balance assessment. This will be finalized based on the specifications or results obtained from the experiment data.

(5) Simulation of the human postural control during dynamic environment with SR implementation. This will simulate human postural control balance strategy in dynamic task environment condition along with SR implementation for deep and better understanding.

３. State of progress

Until now, we already setup and cleared the selection of the SR threshold. Subthreshold and suprathreshold were both used in this experiment in order to determine more clearly the effect of SR towards postural control. Based on the literature review, subthreshold shows more positive results, however, suprathreshold also need to be given attention.

At first, we want to focus and observes the effect of SR towards postural control in quiet standing even though the actually focus is during dynamic task. However, to start the experiment with dynamic task in quite challenging since there is no previous study covered the effect of SR during dynamic task. Preliminary experiment of the research has been done with dynamic task condition. The purpose of this experiment is to investigate whether SR can influence the postural control balance strategies during dynamic task. The experiment was done with the condition of without SR (NoSR) and with SR (SR40%, SR60%, SR80% and SR140%). The SR is applied at the foot sole (ball) at the dominant leg. The results gathered from this experiment are in terms of Center of Mass (COM) and Center of Pressure (COP) displacement. For COP displacement, during no perturbation condition, NoSr and SR80% shown the decreased on COP displacement. SR140% shown decreased in COP displacement during 0.2Hz perturbation condition. during 0.8Hz perturbation condition, SR140% shown the most decreased value in COP displacement. However, during 0.6Hz perturbation condition, The COP displacement were high when SR is applied. We observed that these results were slightly difference from our hypothesis and previous study where some of these results shown higher displacement when the SR is applied. The obtained results are not quite convincing.

TOPへ戻る

Therefore, the experiment protocol need to be reconstruct in term of which part of body is suitable for location to apply SR and observed the effect of SR during quiet standing first.

Now, we are in the stage where, we are determining the best position to apply SR. We had tried to apply the SR vibration at the foot sole, heel and foot thumb. However, the given results are not convincing.

４．Future program, paper submission and results briefing

For the future program, we will continue in determining the best position to apply SR vibration. We plan to apply SR at Achilles tendon since this tendon play important role in postural control. If this position is suitable, we will continue the experiment with condition quiet standing and during dynamic task. As mentioned in state of progress column above, the experiment protocol need to be revised and the preliminary experiment need to be start with quiet standing condition.

One paper had been submitted to the Human Movement Science journal. However, the paper had been rejected by the review panel. As now, we are working with another journal to be submitted to Posture and Gait Journal.

TOPへ戻る

Application of Laser Biospeckles and Biospeckle Optical Coherence Tomography (OCT) in speedy monitoring environmental effects on living things

機械工学科　Rajagopalan Umamaheswari
Ryotaro Wakumoto, Takahiro Kono, Hirofumi Kadono*, Jun Yamada
[a]Dept. of Mechanical Engineering, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5, Toyosu, Koto-ku, Tokyo Japan 135-8548
*Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama Japan 338-8570

1.INTRODUCTION

Water, light, carbon dioxide, temperature, and humidity are among the conditions necessary for plant growth. The effects of these conditions on plant growth have been studied extensively [1], and their relationship to plant growth is becoming clearer. In recent years, sound has been attracting attention because it is said to have some effect on plants. In 1973, Retallack [2] exposed plants to classical music and rock music and found that classical music promoted growth. Uematsu et al [3] reported in 2012 that continuous exposure of plants to sound increased carbon quantification and promoted growth. Gagliano et al. [4] reported that corn roots placed under 220 Hz sound showed bending of the root response in the direction of the sound source. Gagliano et al. interpreted that the roots responded to the environmental sound in search of water and actively grew towards the water flowing underground, suggesting that plants respond to natural sounds in their environment. In 2014, Appel et al [5] demonstrated that plants can distinguish larval chewing sounds from vibrating sounds caused by other insects such as wind and pollen they showed that the leaves under threat showed an increased chemical reaction. Importance of acoustic communication in plants with plant responding to sounds have already been well established.

However, the evaluation methods used to study the plant -sound interaction require a considerable amount of time to investigate the effects of sound. Such methods include measurements of dry weight and yield, root, stem lengths, number of tillers, and reactive oxygen species. These techniques involving several growth stages, including harvest and yield measurements, require considerable time to estimate the effects of sound stimuli and their specific characteristics. In addition, due to the insufficient sensitivity of the technology used, continuous measurement and monitoring in real time is hardly possible.

To compensate for these shortcomings, we propose the use of laser bio-speckle method to study the effects of sound on plants [6]. Laser biospeckle is a dynamic interference pattern formed on a detector by scattering of reflected light from a living body [7]. When the sample is a plant, there are two types of scattering, one from the surface of the leaf and the other from deep within the leaf, and both types of scattered light generate speckle. The intensity of the speckles changes randomly depending on the movement of intracellular organelles and cellular activities such as the transport of water and nutrients. By studying the dynamic change of the speckles, it is possible to monitor plant activities [8]. We used this laser bio-speckle method to observe the activity of plants exposed to sound in a non-invasive, real-time manner, and reported that exposure of plants to sound reduced the activity of their leaves.

These studies showed that exposure of plants to sound reduced leaf activity and negative responses, but the results were based on observations near the surface of the leaf, and the detailed mechanisms of how sound affects the internal tissues of the leaf have yet to be elucidated.

In 1991, Optical Coherence Tomography (OCT) was introduced for ophthalmology [9]. OCT is a technology that enables non-destructive, non-contact, real-time measurement of tomographic images of biological tissues by using light to measure information inside objects in three dimensions. OCT is widely used and studied in ophthalmology, dermatology and other fields [10]. In this study, we propose to use OCT to study the internal changes of plant leaves under sound stimulation. The purpose of this study was to evaluate the effects of sound on plants by exposing arugula leaves to sound and examining the changes in OCT signals. A low frequency (100 Hz) and a high frequency (10 kHz) were used as sound stimuli.

TOPへ戻る

2.SAMPLES AND EXPERIMENTAL METHODS

a.Sample (Arugula)

Arugula was used as the plant sample for this experiment. Arugula is a cruciferous herb with a faint sesame-like aroma and a bitter taste. We used arugula in this study because it grows quickly, is easy to cultivate, and can be grown in a variety of environments.

The plants were cultivated for 24 hours at a temperature of 27±5˚C and a photosynthetic photon flux density (PPFD) of 180 mmol/(m^2/s). The plants were periodically fed with the following culture medium and three seedlings were used that were 30 days old after the seeds were planted.

b.Arugula soil and Growing techniques

Instead of soil, hydroponic cultivation with rockwool was used in this experiment. Three cm square cubes of rockwool (0138-008, Grotop Grodan) were made by cutting and placing it in a plastic cup (100 ml). Three holes were made at the bottom of the plastic cup so that water could be sucked up from below. Then a knife was used to make a cross-shaped slit on the top of the rockwool for planting the seeds. The plastic cups were placed in tray and water was poured into the tray so as to make the rockwool absorb enough water. Two or three seeds were sown on the top of the rockwool so that the roots were less grounded to the wool.

The culture medium is a mixture of commercial hydroponic fertilizers, Otsuka House No. 1 and Otsuka House No. 2, in a ratio called "A formula. This A formula is a general-purpose culture solution that can be widely used for leafy green plants.

The culture solution used was obtained by diluting with water to have an appropriate concentration that has a value of EC = 1.0 ds/m. The EC here is the electrical conductivity and is an indicator of the concentration of all ions dissolved in the culture medium. EC is measured using a water quality meter (Gondo Electronic 7200 EC). 1.5 g of Otsuka House No. 1 and 1.0 g of Otsuka House No. 2 were mixed with 2.2 L of water.

c.Experimental System

A schematic diagram of the spectral-domain optical coherence tomography (SD-OCT) along with a sample plant and a speaker is shown in Figure 1.

A superluminescent diode (SUPERLUM, SLD-137-HP3-DBUT-SM-PD, Cork, Ireland) with a central wavelength λ_0= 836.1 nm and a bandwidth $\Delta\lambda$ = 55.2 nm, providing a total outpower of 15.6 mW, was used as a light source. The light from the light source was first coupled to the input port of the circulator (AC Photonics, Inc., Santa Clara, CA, USA) and further divided into two beams by a 2 × 2 50/50 fiber coupler (TW850R5A2-2 × 2 Wideband Fiber Optic Coupler, 850 ± 100 nm, THORLABS, Exeter, UK), illuminating the sample seed and the reference mirror, respectively. The reference arm consisted of collimating lens L1, objective lens L4, and mirror M1, and the sample arm consisted of lenses L2, L3 (LSM03-BB—Scan Lens, EFL = 36 mm, THORLABS, Exeter, UK), and Galvano scanning mirrors.

Dispersion was compensated by a glass plate placed in front of the reference mirror, followed by offline mathematical compensation following the collection of data. Light from L3 irradiated the leave of the sample plant. To avoid minute movements, the leaf was sandwiched gently between two 10 cm square magnets with a 3 cm square hole in one of them. The power of the light incident on the seed in the sample arm was 2.6 mW, which is below the irradiance damage threshold for leaves. The two-dimensional scanning mirror (Galvano mirror scanners) can scan laterally in the X and Y directions. The sensitivity was measured to be 96 dB at a depth of 0.24 mm. The sensitivity roll-off was around 7.94 dB/mm.

Each measurement is a 2048 (x) and 512 (z) raster scan over an area of 3.1 × 1.6 mm2 at an acquisition rate of 10 frames per second (fps). A total of 100 cross-sectional images were recorded. The fiber coupler recombined the backward scattered light from the leaf and the reflected light from the reference mirror. This light was directed through a circulator to a spectrometer that consists of a collimator, lens L5, and a grating. The collimated light illuminated the grating to obtain the spectral interference signal focused onto a line scan camera through lens L6. The spectra recorded by the spectrometer were mapped to K-space and then processed with a numerical dispersion compensation algorithm.

To acquire the spectral interference signal, a line scan camera (L104k-2k, BASLER, Ahrensburg, Germany) was used, with a total of 2048 pixels. A custom-built software was used for acquisition and transformation to real space and MATLAB(R2021a) was used for analyzing the images to reveal the response of the plant under exposure to sound.

The depth resolution (axial resolution) of the system in free space was calculated as 6 μm using the following Equation (1), and the lateral resolution was calculated as 22 μm by Equation (2);

TOPへ戻る

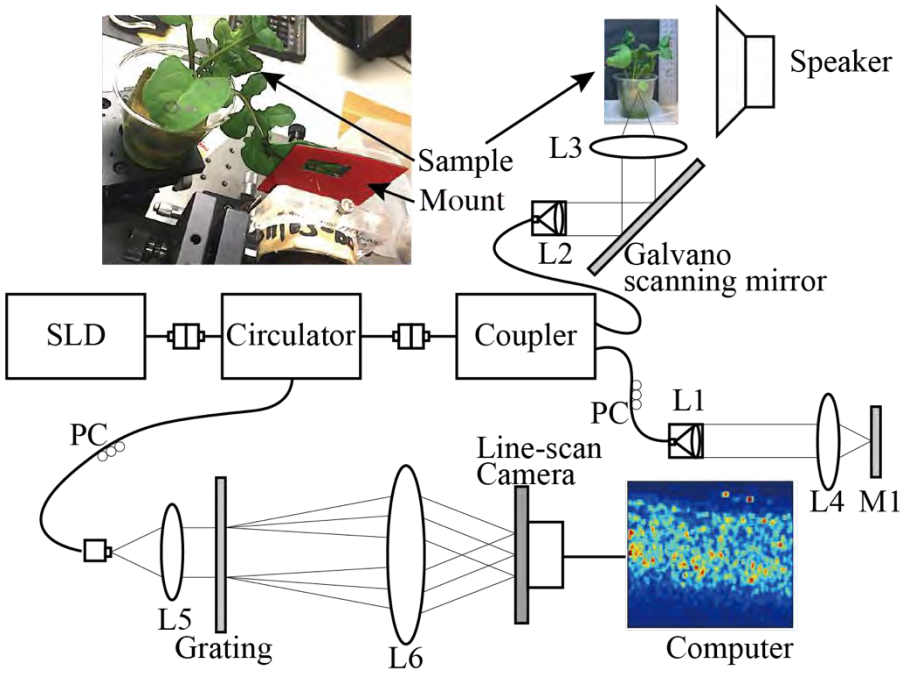


Fig.1Image of optical system by SD-OCT

$$\Delta z = \frac{2\,ln\,{\lambda_0}^2}{\pi\, n\, \Delta\lambda} \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{4\lambda_0}{\pi}\left[\frac{f}{d}\right] \quad (2)$$

where f is the focal length, d is the beam diameter, and n is the reflectivity index (n = 1.4).

d.Sound generation and exposure protocol

In order to expose plants to sound, speakers (FOSTER, P1000-E) with a 10 cm full-range woofer (FOSTER, FF105WK) were used to produce sound. The circuit consisting of an OpAmp (TDA2030A WINGO) to adjust the sound pressure level with a variable resistance amplifying the signal from a function generator (FG-281 TEXIO Oscillation frequency 0.01 Hz – 15 MHz) was used to generate the required frequency. The sound pressure level was measured before starting the experiment with sound pressure sensor (SL-100U-M INABA).

A low frequency of 100 Hz and high frequency of 10 kHz sounds were chosen as the sound stimuli and they were the same as the ones used in our previous experiments with laser speckle [6], and the sound pressure was set to be 100 dB. The age of the sample arugula plant was chosen to be around 30 dap (days after planting or dap) and three plants were used for measurement. The distance between the leaf and the speaker was set to be 10cm.

As an initial step, the arugula plants were kept in a dark and soundless environment for 60 minutes to eliminate the effects of ambient noise and light stimulation on the leaves. Next, the protocol shown in Figure 2 was used for exposing to sound and making measurements. As of the procedure shown in the diagram:

1. With ten minutes of silence and no light, three consecutive ten-second OCT scans were acquired at 10 fps;

2, Sound exposure was given to the leaf for a period of one minute;

3. The procedure given in #1 was repeated.

4. A total of five cycles of these measurements were performed.

5. The whole procedure was repeated for three plants.

TOPへ戻る

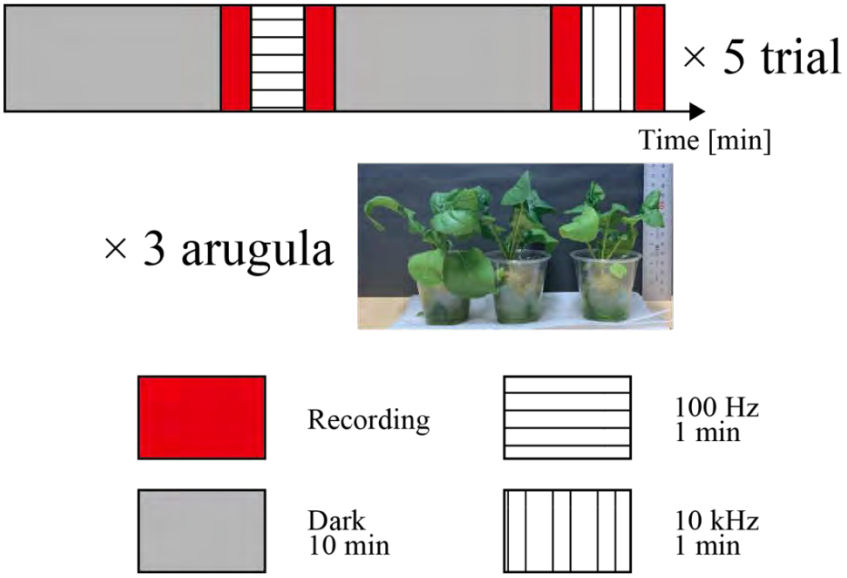


Fig.2 Experimental protocol with three different sample plants and the different conditions used.

A total of 500 scans were obtained for each plant under different sound stimuli, namely no sound or control, 100 Hz and 10 kHz. In the analysis, we calculated the ratio of the average intensity before and after exposure to sound.

First, the standardization per frame is done using equation (1), where $x_{i,j}$ is the intensity at the pixel i and j was normalized by the maximum of that frame, x_{max}

$$x^{norm} = \frac{x_{i,j} - \overline{x}}{x_{max} - \overline{x}} \tag{3}$$

Then, from the normalized frames, the average across the number of frames N_f was obtained by the equation as given below,

$$\overline{X} = \frac{1}{N_f} \sum_{i_f=1}^{N_f} x_{i_f}^{norm} \tag{4}$$

Where i_f is the frame number. Finally, we calculated the effect of sound on the plants by using equation (4) to calculate the ratio of after to before exposure to sound as given below,

$$ratio = \frac{1}{N_t} \sum_{i_t=1}^{N_t} \frac{\overline{X}_{i_t}^{after}}{\overline{X}_{i_t}^{before}} \tag{5}$$

3.RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 A and B with top row showing the structural image of the leaf (gray, top) and while the bottom row shows the functional or the ratio image for 100 Hz (bottom of A) for 10 kHz (bottom of B), respectively. The scale representing the ratio obtained by the analysis is shown on the left. In the functional or the ratio images, the red represents larger change of the ratio while the blue represents lower change. As can be seen from the figure, for all the sample plants used, for low frequency, namely 100Hz, there is more red region compared to the blue region and vice -versa for 10kHz.

This result clearly suggests that the low frequency sound of 100 Hz has more active effect on the plant than the sound at 10 kHz.

TOPへ戻る

As can be seen in both under 100 Hz and 10kHz, the surface region is almost not active while only the deeper region there exists significant differences in the activation patterns. This is expected as from earlier observations even a one-minute exposure to sound could lead to stomatal size changes. This in turn means size changes could lead to scattering changes and these scattering changes would be reflected in the ratio of fOCT or ratio signals. As sizes of stomata would get smaller with higher the frequency, it is natural to expect a smaller stoma for 10 kHz in relation to 100Hz. In terms of scattering, this means considering the Mie scattering regime, smaller the size and hence larger the forward scattering resulting in lesser OCT reflectivity signal. This is what that happens and we observe in our results with less activation or changes in the fOCT maps in relation to 100Hz ab shown in Fig 3 A, B (bottom maps in both A and B).

4.CONCLUSION

In this study, we measured the effects of sound on plants using OCT. We examined the effects of two types of sound, low frequency (100 Hz) and high frequency (10 kHz) and found that the low frequency sound increased leaf activity more than the high frequency sound. Our results demonstrate that both laser speckle based studies as well as OCT could reveal special aspects of light scattering in determining the strength of the leaf in advance. We expect this study could increase the awareness and extend the application to different fields of plant photonics. In future we plan to extend the studies to long term exposure and the application of laser speckle and OCT technologies.

REFERENCES

[1] Taiz, L. and Zeiger, E., [Plant Physiology 3rd edition], Sinauer Associates, Sunderland, (2002)
[2] Dorothy, L. R., [The sound of Music and Plants], Devorss&Co, 1-96 (1973).
[3] Uematsu, K., Suzuki, N., Iwamae, T., Inui, M. and Yukawa, H. “Increased fructose 1,6-bisphotsphate aldolase in plastids enhances growth and photosynthesis of tobacco plants”, Journal of Experimental Botany 63(8), 3001-3009 (2012).
[4] Gagliano, M., Mancuso, S., Robert, D., “Towards understanding plant bioacoustics”, Trends in Plant Science 17(6), 323-325 (2012).
[5] Appel, H. M., Cocroft, R. B., “Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing”, Oecologia 175(4), 1257-1266 (2014).
[6] Rajagopalan, U. M., et al., “Demonstration of laser biospeckle method for speedy in vivo evaluation of plant-sound interactions with arugula”, PLoS ONE, (2021)
[7] Aizu, Y., et al., “Bio-Speckles”, Trends in Optics,27-49 (1996).
[8] Zdunek, A., et al., “The Biospeckle Method for the Investigation of Agricultural Crops: A Review.”, Optics and Lasers in Engineering, 52, 276-285 (2014).
[9] Huang D, et. al., “Optical coherence tomography”, Science, 254 (5035), 1178-1181 (1991).
[10] Drexler, W., et al., “Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality”, Journal of Biomedical Optics, 19(7)07141, (2014)

Publications:
Ryotaro Wakumoto, Takahiro Kono, Hirofumi Kadono, Jun Yamada, Uma Maheswari Rajagopalan, "Functional optical coherence tomography in the study of plant-sound interactions," Proc. SPIE 11958, Optical Interactions with Tissue and Cells XXXIII; and Advanced Photonics in Urology, 119580G (2 March 2022); https://doi.org/10.1117/12.2607538

Uma Maheswari Rajagopalan, Ryotaro Wakumoto, Daiki Endo, Minoru Hirai,Takahiro Kono, Hiroki Gonome, Hirofumi Kadono, Jun Yamada, “Demonstration of laser biospeckle method for speedy in vivo evaluation of plant-sound interactions with arugula”, PLOS one, October 28, 2021
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258973

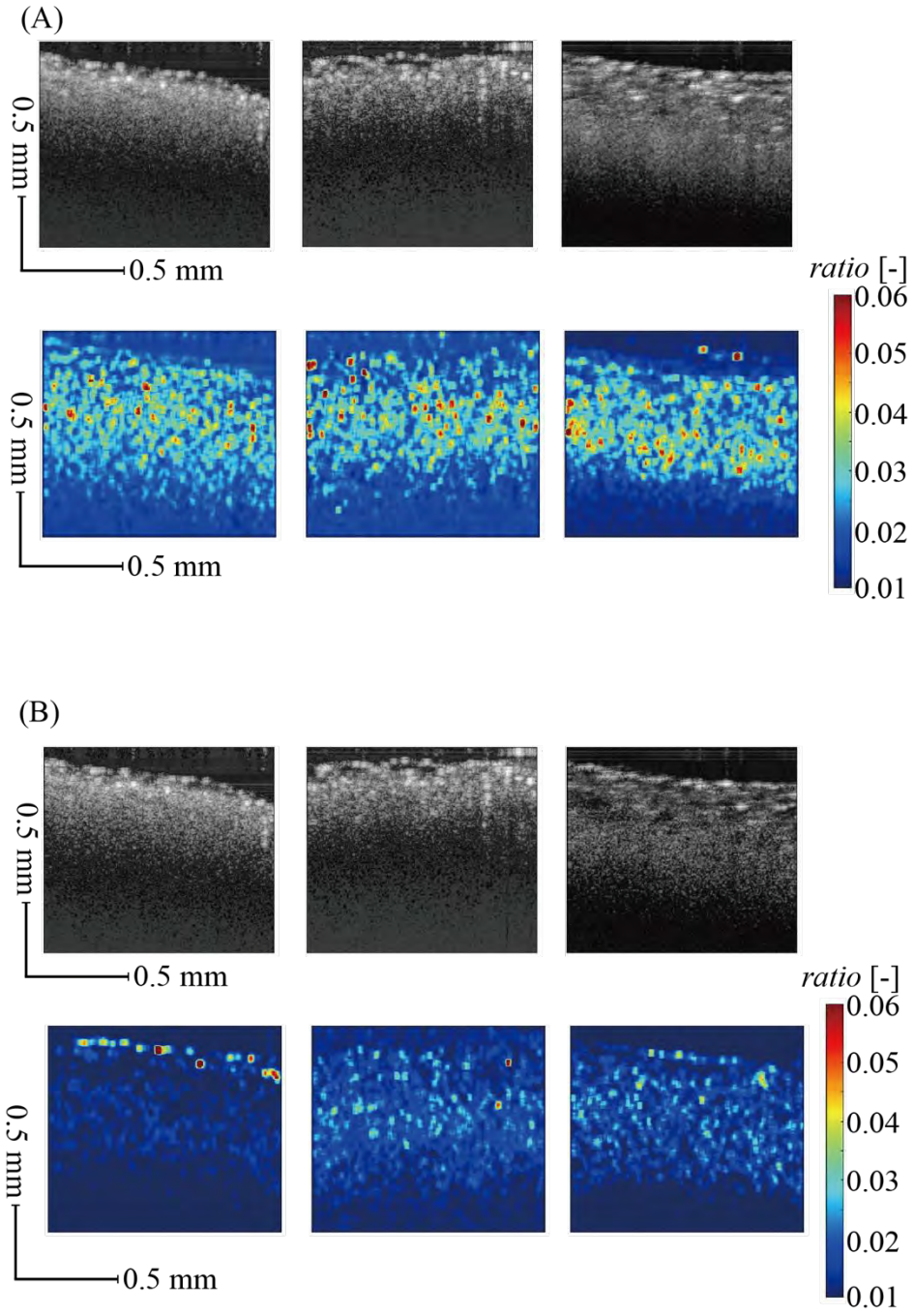


Fig.3 Comparison of images by OCT (A : top row is the leaf image and bottom row is ratio of 100 Hz, B : top row is the leaf image and bottom row is ratio of 10 kHz)

TOPへ戻る

異種元素含有カーボン系触媒材料の合成

材料工学科　　石崎　貴裕

共同研究者
Pusan National University, School of Materials Science and Engineering, Oi Lun Li

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

二酸化炭素排出や化石燃料資源の枯渇などの問題が議論されて久しく，それらを解決するエネルギー源として燃料電池や蓄電池が注目を集め続け，その研究開発が活発に続けられている。これらの利点としては，環境負荷物質のゼロ排出，高いエネルギー変換効率などがもたらす「グリーン・イノベーション」のみならず，国家エネルギー戦略としても燃料供給源の多様化によるリスク分散，自動車や電機など今後の産業競争力への広範な基盤強化になるなどが挙げられる。現在，これらのエネルギー源は自動車用や家庭用電源として一般市場に導入され始めたが，本格的な普及には，まだ多くの克服すべき点がある。

燃料電池や金属空気電池では，空気極における酸素還元反応 (ORR) が重要である。この ORR には 4 電子反応と 2 電子反応があるが，4 電子反応が起こらずに 2 電子反応が起きると電池性能のボトルネックとなる。そのため，一般的に空気極の ORR 触媒には ORR 活性の高さから Pt が用いられることが多い。しかし，Pt は その資源の希少性やアクセサリー類等の需要による高コスト化や，メタノールによる一酸化炭素吸着に起因する被毒により触媒活性の長期安定性に欠けるという欠点を抱えている [1)−4)]。このため，Pt 代替触媒材料の開発が求められている。

グラフェンは非常に大きな表面積と高導電性を有する 2 次元構造のカーボンで，ORR 活性を示すことが報告されている [4)]。構造中に N をドープすることで表面の π 電子雲に分極が生じ，ORR 活性が高まることが報告されており，その試みが多くなされている [5)−7)]。しかし，従来法ではアンモニア雰囲気中でグラフェンに熱処理を行う等，複雑な装置構成や高温処理が必要であり，高コストになること等が課題である。

ソリューションプラズマ(SP) は液中で発生する低温非平衡のプラズマであり，気相プラズマよりも分子密度が高いため反応速度が速い。さらに，大気圧プロセスであるため，装置構成が簡易，低コスト等の特長がある。最近，SP により結晶性のカーボン材料が合成可能であることが報告されている [8)]。このため，SP は新規カーボン合成法として近年注目を集めているプロセスである。この SP プロセス(SPP)を利用し，溶液の種類を自由に組み合わせることでモノマーから直接的にカーボンを合成することが可能であるため，カーボン中への窒素ドープを従来プロセスより効率的かつ低コストに行うことが期待できる [9)]。

２．研究計画

本研究では，『レアメタルフリーで，簡単に入手可能なカーボン系のヘテロ元素を含有する有機原料を利用して，巧みな分子構造設計と溶液中の低温非平衡プラズマを利用した合

TOPへ戻る

成技術によりカーボン系触媒材料合成技術の確立』をめざした。具体的には、以下の項目について研究を進めた。

(1)液中プラズマによるヘテロ原子含有カーボン材料の創製と評価

窒素や酸素等のヘテロ元素を含有する有機材料（モノマー等）を原料に用い，溶液中のプラズマ生成条件を精密に制御することで，有機材料を精密にアセンブリングするための技術開発を行った（条件最適化）。プラズマを制御するために，発光分光による活性種の解明を行った。合成したヘテロ元素含有カーボンの組成，結晶性，化学結合状態を XRD, SEM, TEM, ラマン分光, XPS 等を用いて評価した。

(2)合成したカーボン材料の酸素還元反応に対する触媒活性評価

作製したカーボン材料の触媒性能は電気化学的手法により評価した。サイクリックボルタンメトリーにより，カーボン材料の触媒性と触媒活性を評価した。また，回転電極を用いた評価により，酸素還元反応の反応電子数を算出した。さらに，クロノアンペロメトリーにより，触媒活性の耐久性についても評価を行った。

３．計画の進行状況

ソリューションプラズマにより窒素や酸素を含有するカーボン材料の合成を行い，合成したカーボン材料の物理化学的な特性とアルカリ水溶液中における酸素還元反応に対する触媒性能の評価を行った。窒素含有カーボンの合成にはピラジンとベンゼンを出発原料に用いた。ピラジンとベンゼンから合成したカーボンの SEM および TEM 像を図 1 に示す。合成したカーボンは，直径 20－30nm の粒状形状を有しており，その形状はピラジン濃度に係わらず同様であった。XPS の結果から，ピラジン濃度の増加に伴ってカーボン中の窒素含有量が増加した。また，N1 s XPS スペクトルの結果から，カーボン中の窒素の配置は sp^2 結合のグラファイト置換型とピリジン型

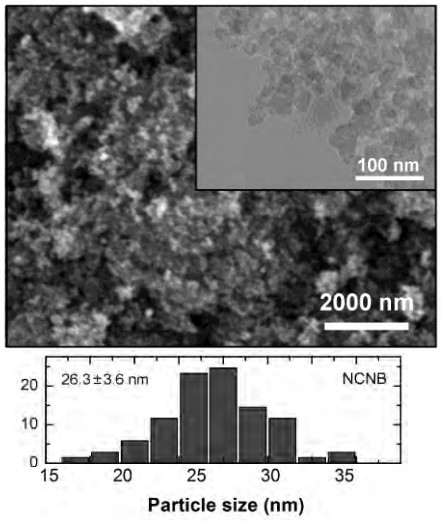


図 1 : ピラジンとベンゼンから合成したカーボンの SEM および TEM 像

であると推察される（図 2）。合成したカーボンの結晶性を調べるためにラマン分光測定を行った。ラマン分光測定の結果から，窒素含有量の増加に伴ってカーボンの結晶性は僅かに低下した。

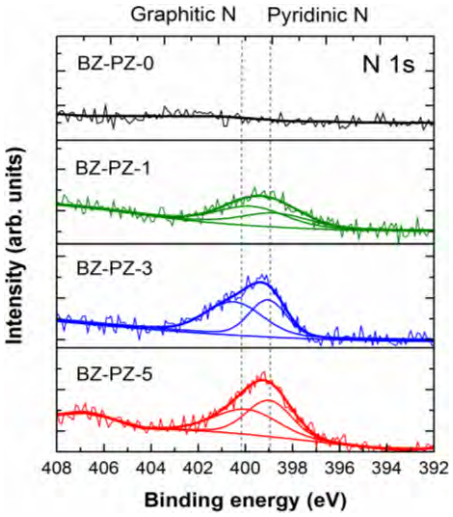


図 2 : 窒素含有カーボンの XPS N 1*s* スペクトル

合成した窒素含有カーボンの酸素還元反応に対する触媒活性および触媒性能を評価するために，アルカリ水溶液中において電気化学的特性を評価した。図 3 に，ベンゼンから合成したカーボンおよび窒素含有カーボンを作用極に用い，0.1M KOH 水溶液中でのサイクリックボルタモグラムを示す。ピラジン濃度

TOPへ戻る

の増加に伴って，約-0.3V 付近の酸素還元反応に起因する電流密度が増加した。このことは，酸素還元反応の触媒活性が向上したことを示す。また，還元反応の開始電位が貴な方向に僅かにシフトしていることから，窒素含有量の増加により，酸素還元の触媒能も向上

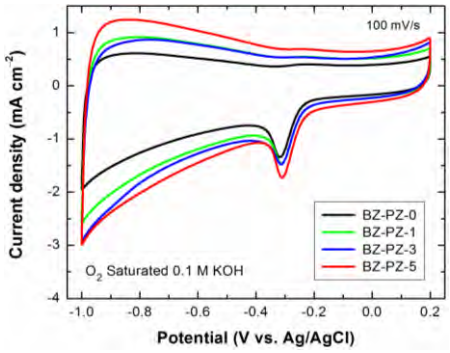


図 3：ベンゼンから合成したカーボンおよび窒素含有カーボンの 0.1M KOH 水溶液中でのｻｲｸﾘｯｸﾎﾞﾙﾀﾓｸﾞﾗﾑ

していることがわかる。

窒素含有カーボンの酸素還元に対する反応電子数を調べるために，回転電極（RDE）を用いた分極測定を行った。図 4 に異なる回転数で測定した分極曲線(LSV)を示す。回転数の増加に伴って，拡散律速に起因する電流密度が増加した。LSV カーブと電極の回転速度の関係から求めた Koutecky-Levich プロットを用いて各電位における反応電子数を解析した．その関係式を式 (1) に示す。

$$i^{-1} = i_k + (0.62nFAD^{2/3}\omega^{1/2}\nu^{-1/6}C)^{-1} \qquad (1)$$

i は測定によって得られたある電位での電流値，i_k は回転数に依存しない活性化支配電流，n，F，A，D，ω，ν，C はそれぞれ反応電子数，ファラデー定数，電極面積，拡散係数，電極の角回転数，溶液の動粘度，溶存酸素濃度である。LSV から得られた電流密度の値を用いて，Koutecky-Levich (K-L)式により，酸素還元反応に対する反応電子数を算出した。得られた反応電子数の値は，3.21～3.94 であった。この値は，一般的に触媒材料として用いられている Pt/C と同等である。この結果から，ソリューションプラズマで合成した窒素

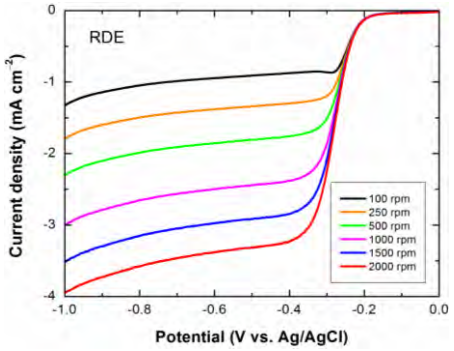


図 4：窒素含有カーボンの RDE を用いた分極測定

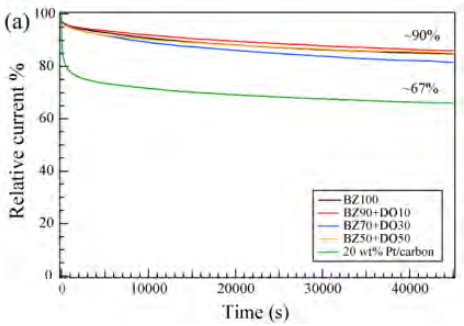
含有カーボンの酸素還元反応に対する触媒活性および触媒性は優れた性能であることを明らかにした。

SP で合成したカーボンの酸素還元反応に対する触媒能の耐久性を調べるために，-0.5V におけるクロノアンペロメトリー測定を行った。その結果を図 5 に示す。市販の Pt/C 電極の場合には，酸素還元に対する電流値が反応初期値に対して 70%程度に低下し，その後，その値は緩やかに減少した。このことは，その触媒活性が反応開始とともに，30%程度損なわれたことを示す。一方，ソリューションプラズマで合成したカーボンの場合には，酸素還元に対する電流値の減少は極めて少なく，半日経過後でもその減少率が 10%以下であった。この結果から，ソリューションプラズマで合成した酸素含有カーボンは電流密度の低下率が極めて小さく，高い耐久性があることがわかる。これらの結果から，ソリューションプラズマで合成したカーボンの酸素還元反応の触媒能に対する耐久性は，一般的な触媒材料として用いられる Pt/C と比較して，約 1.4 倍以上向上することを明らかにした。

これらの結果から，ソリューションプラズマにより合成したカーボンの酸素還元性能は優れているといえる。窒素を含有させた場合

TOPへ戻る

には，触媒の性能と活性および触媒性能の耐久性の向上に寄与することを明らかにした。



還元図 5 : 酸素含有カーボンの-0.5V における酸素反応に関するｸﾛﾉｱﾝﾍﾟﾛﾒﾄﾘｯｸ曲線

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

今後，ヘテロ元素含有カーボンの触媒性能を向上させるための技術開発を継続して行い，優れた性能の触媒材料を Li 空気電池の活物質に活用していく予定である。

（論文発表）

(1) Chayanaphat Chokradjaroen, Hiroko Watanabe, Takahiro Ishii, Takahiro Ishizaki, Simultaneous synthesis of graphite-like and amorphous carbon materials via solution plasma and their performance evaluation for Li-O_2 battery application, Sci. Rep., 11, 6261 (2021).

(2) Kefan Song, Xiulan Hu, Wenjie Gao, Zeyu Liu, Handan Qiao, Takahiro Ishizaki, Xiaodong Shen, Facilely synthesized honeycomb-like $NiCo_2O_4$ nanoflakes with an increased content of oxygen vacancies as an efficient cathode catalyst for Li-O_2 batteries, J. Alloys Compds., 898 (2022) 162774.

(3) 渡辺紘子，石井隆裕，石﨑貴裕，ソリューションプラズマプロセスを用いた酸化モリブデン粒子の合成，材料の科学と工学，58 (3), 106-110 (2021).

(4) Pengfei Wang, Jiazhong Zhang, Xiulan Hu, Lei Miao, Takahiro Ishizaki, Recent progress of carbon-based electrocatalytic materials in Lithium-based Battery, Sustain. Mater. Technol., in press (2022).

（学会発表）

(1) 佐々木滉大，奈良原柾，平峠由佳，田中健一，石﨑貴裕，ソリューションプラズマを用いた Fe-N-C 結合を有するカーボン系触媒材料の合成と評価，表面技術協会第 145 回講演大会，2022 年 3 月 9 日，オンライン開催

(2) 奈良原柾，佐々木滉大，平峠由佳，石﨑貴裕，ソリューションプラズマによる $CoSn(OH)_6$@カーボン系複合触媒材料の合成と評価，表面技術協会第 145 回講演大会，2022 年 3 月 9 日，オンライン開催

(3) T. Ishizaki, Y. Hiratoge, K. Fukushima, K. Tanaka, Solution plasma synthesis of carbon-based electrocatalysts for cathode materials of Li-air battery, ISPlasma2022 / IC-PLANTS2022, 2022 年 3 月 9 日，オンライン開催

参考文献

1) D. U. Lee, H. W. Park, D. Higgins, L. Nazar, and Z. Chen, Jornal of the Electrochemical Society, 160, F910 (2013).

2) Z. Jin, H. Nie, Z. Yang, J. Zhang, Z. Liu, X. Xu, and S. Huang, Nanoscale, 4, 6455 (2012).

3) J.-S. Lee, K. Jo, T. Lee, T. Yun, J. Cho, and B. -S. Kim, J. Mater. Chem. A., 1, 9603 (2013).

4) Z. Mo, R. Zheng, H. Peng, H. Liang, S. Liao, L. J. Power Sources, 245, 801 (2014).

5) Z. Mo, R. Zheng, H. Peng, H. Liang, S. Liao, L. J. Power Sources, 245, 802 (2014).

6) D. Wei, Y. Liu, H. Zhang, L. Huang, and G. Yu, Nano Lett., 9, 1752 (2009).

7) D. Geng, Y. Chen, Y. Li, R. Li, X. Sun, S. Ye, and S. Knights, Energy Environ. Sci., 4, 760 (2011).

8) J. Kang, O. L. Li, N. Saito, Carbon, 60, 292 (2013).

9) M. Matsushima, M. Noda, T. Yoshida, H. Kato, G. Kalita, T. Kizuki, H. Uchida, M. Umeno, and K. Wakita, J. Appl. Phys, 113, 114304-1 (2013).

10) S. Wang, D. Y, and L. Dai, J. Am. Chem. Soc., 133, 5184 (2011).

TOPへ戻る

宇宙デブリ捕獲用 MR ダンパの高速接触力制御

電気工学科　　安孫子　聡子

共同研究者
東京都市大学理工学部機械システム工学科　佐藤　大祐

1．はじめに

近年，宇宙産業が拡大するなか，宇宙デブリは増加し続けており，2009 年や 2013 年の大規模な軌道上衝突事故，2021 年のロケット残骸地上落下等，大型デブリの軌道上放置の危険性が顕在化してきている．一方，制御不能かつ相対航法支援システムを具備しない所謂，非協力ターゲットへの接近・捕獲は，対象物との接触の必要性，対象物の弾き飛ばしや新たなデブリ誘発の危険性のため，いまだ実運用に達するに至っていない．

多関節ロボットアームを用いたインピーダンス制御によるデブリ捕獲手法を提案した研究は多数ある[1][2][3]が，ロボットの制御応答性能より速い接触力を制御することは不可能である．そのため，予期せぬ接触力が生じた際に，デブリの質量推定を誤ると接触力に対して適切な抑制ができず，突き放しを完全に防ぐことはできないという課題がある．

本研究では，未知の物理パラメータを有する非協力ターゲットとの宇宙空間での安定な接触維持の実現を最終目標とし，MR（Magneto-Rheological）ダンパによる接触力制御の実現を目的とする．ここでは，特に，MR ダンパのモデリングおよびダンパの加振試験による特性評価を実施する．また，モデリングしたMRダンパによる接触制御の可能性について動力学シミュレーションにより検証する．

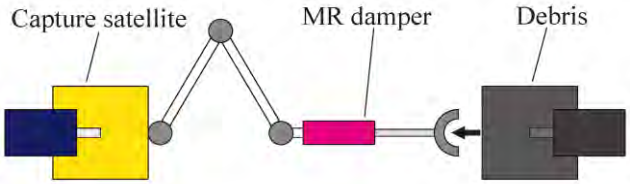


Figure 1 Debris capture mechanism

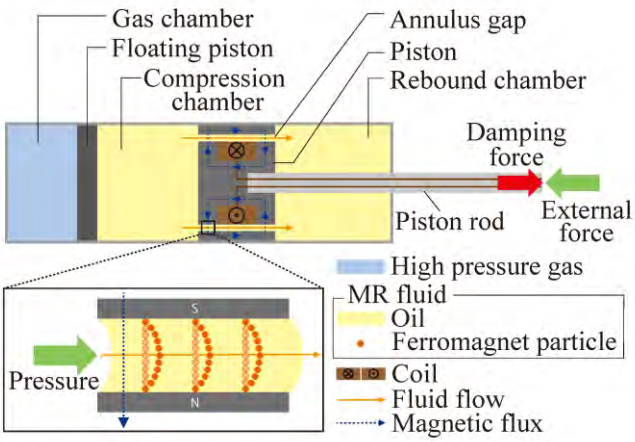


Figure 2 MR damper structure and mechanism

本研究では Fig.1 に示すロボットアームの手先に MR ダンパを搭載した捕獲機構でのデブリ捕獲を想定する．MR ダンパの特徴は，電流によって減衰力が可変であることと電流変化に対する高速な応答性をもつことである．これらの特徴から MR ダンパは様々な質量のデブリの捕獲に適用できる可能性が高く，ターゲットの質量推定を誤った場合でも瞬時の対応が可能であると期待できる．

TOPへ戻る

２．研究計画

２．１　カスタム MR ダンパの開発に向けた MR ダンパのモデリング

まず，MR ダンパの基本性能を確認するために，MR ダンパのモデリングを行う．ここでは，MR ダンパ内で生じる力学現象を定式化し，今後のカスタム MR ダンパの開発に向けた基礎検証フレームワークを作成する．

２．２　高速接触力制御のための動力学シミュレーション

MR ダンパモデルを用いて，デブリとの衝突現象を模擬し，接触時の動力学シミュレーションを実施する．複数の MR ダンパのパラメータを 用い，デブリ捕獲における MR ダンパの有用性を検証する．

３．計画の進行状況

３．１　MR ダンパのモデリング

MR ダンパはシリンダの中に MR 流体が封入されたデバイスである．MR 流体とは，分散媒に強磁性体粒子が分散・懸濁されている機能性流体である．外部磁界によって，強磁性体粒子が鎖状クラスタを形成する．

Fig.2 のようにピストンロッドに右から力が加わると,シリンダ内の圧力変化によって反発室と圧縮室に封入された MR 流体はピストンの環状流路を流れる．このピストンにあるコイルに外部から電流を流すと磁界が発生し，流路内の MR 流体の強磁性粒子が鎖状クラスタを形成する．この鎖状クラスタによる抵抗力がダンパの減衰力となる．また，電流によって流路内の MR 流体のレオロジー特性を調節する仕組みをコントロールバルブという．ここでは，Goldasz らの理論をもとに MR ダンパの減衰力およびコントロールバルブのモデリングを行った[4][5].

3.1.1 コントロールバルブのモデリング

コントロールバルブは，MR ダンパのピストンにある環状流路にて MR 流体のレオロジー特性を変化させ，ピストンの反発室と圧縮室の圧力差 Δp_aを調節する仕組みであり，

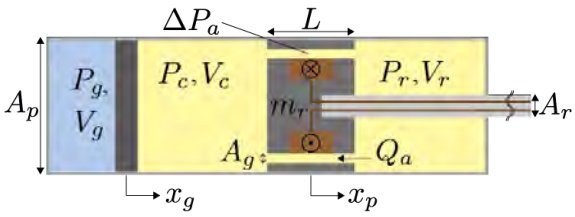


Figure 3 MR damper schematic model

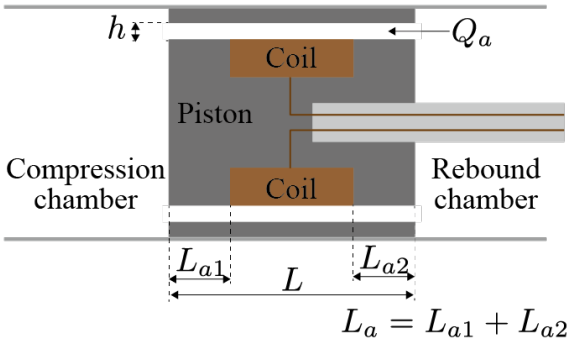


Figure 4 Schematic model of Piston

以下の式(1)で表される．

$$\Delta p_a = \frac{\tau_0}{3h} L_a (3+S)\left[2\cos\left(\frac{1}{3}\operatorname{atan2}(y,x)\right)+1\right] + 12\frac{L-L_a}{wh^3}Q_a \qquad (1)$$

ここでτ_0は MR 流体の降伏せん断応力，hはピストンの環状流路の幅，L_aはピストンのうち磁化される部分の長さ，Sは可塑度，Lはピストンの長さ，wはピストンにある環状流路の平均円周長，Q_aはピストンの穴を流れる MR 流体の体積流量を表す．また，可塑度S，x，yはそれぞれ式(2)-(4)で表される．

$$S = \frac{12\mu Q_a}{wh^2\tau_0} \qquad (2)$$

$$x = -27 + 27S + 9S^2 + S^3 \qquad (3)$$

$$y = 6\sqrt{3}\sqrt{27S + 9S^2 + S^3} \qquad (4)$$

3.1.2 ダンパ構造のモデリング

MR ダンパの減衰力F_dは式(5)で表される．

$$F_d = -m_r\ddot{x_p} - P_r(A_p - A_r) + P_c A_p + F_f \qquad (5)$$

ここでm_rはピストンとロッドの質量の合計，x_pはピストンの変位，P_rは反発室の圧力，A_pはピストンの断面積，A_rはロッドの断面積，P_cは圧縮室の圧力，F_fは摩擦力を表す．また，反発室の圧力P_rと圧縮室の圧力P_cは式(6)-(9)

TOPへ戻る

に示す連立微分方程式を解くことで求められる．

$$\dot{P}_r = \beta \frac{(A_p - A_r)\dot{x}_p - Q_a}{(A_p - A_r)x_p + V_{r0}} \tag{6}$$

$$\dot{P}_c = \beta \frac{A_p(\dot{x}_g - \dot{x}_p) + Q_a}{A_p(x_g - x_p) + V_{c0}} \tag{7}$$

$$\ddot{x}_g = \frac{1}{m_g}\left[A_p(P_g - P_c) + F_{fg}\right] \tag{8}$$

$$\dot{Q}_a = \frac{A_g}{\rho L}\left(P_r - P_c - \Delta p_a\right) \tag{9}$$

ここでβは MR 流体の体積弾性率，V_{r0}は反発室の体積の初期値，x_gはフローティングピストンの変位，V_{c0}は圧縮室の体積の初期値，m_gはフローティングピストンの質量，F_{fg}はフローティングピストンの摩擦力，A_gはピストンの環状流路の断面積，ρは MR 流体の密度を表す．またガス室の圧力の初期値P_{g0}とガス室の体積の初期値V_{g0}を用いて，ガス室の圧力P_gは式(10)で表される．

$$P_g = P_{g0}\left(\frac{V_{g0}}{V_{g0} + A_p x_g}\right)^n \tag{10}$$

3.1.3 MR ダンパモデルの検証

MR ダンパモデルの妥当性を検証するため，MR ダンパモデルの正弦波変位加振のシミュレーションと LORD 社製の MR ダンパ (RD-8040-1) の参考文献[5]によって提供される加振試験データの比較を行った．ここでは参考文献[5]に示されるヒステリシス特性を近似し，参照データとした．Fig. 5 にピストンの速度に対する減衰力を示す．これより MR ダンパモデルによる挙動が実データと同等の挙動を示すことが確認できた．

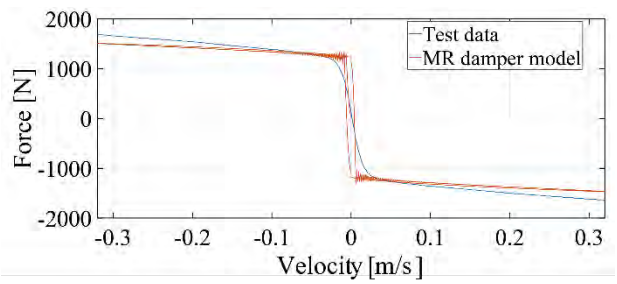


Figure 5 Relationship between damping force and piston velocity

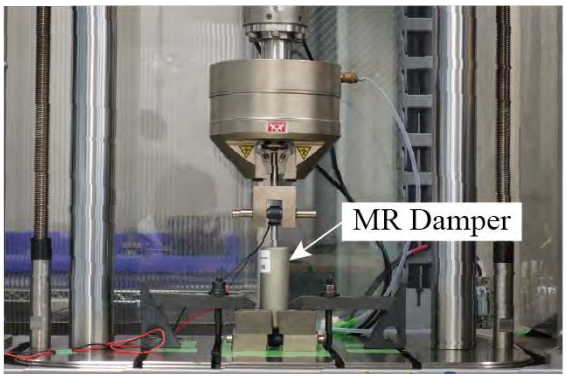


Figure 6 Experimental setup

３．２　MR ダンパの加振試験

前節では，参考文献データを元にモデルの評価を行った．そこで，ダンパ開発の基礎検証を確認するため，LORD 社製の MR ダンパ (RD-8040-1)の加振試験を実際に実施し，参考文献との整合性を確認した．ここでは，INSTRON 社製の疲労試験機，ElectroPlus E10000 を用いてピストンを振幅±12.7 mm の正弦波で上下に駆動させた．正弦波の周波数を 0.60 から 4.00 Hz の間で 20 種類，MR ダンパに流す電流を 0.00 から 2.00 A の間で 8 種類に変更し，合計で 160 種類の条件での MR ダンパの減衰力を測定した．実験の様子を Fig. 6 に示す．

Fig. 7 および 8 に電流が 0.00 A および 2.00 A の際の結果を示す．いずれの周波数においてもヒステリシス性をもち，周波数が高いほど減衰力が大きいことが確認できる．しかしながら理論上ピストン速度のピーク値は 0.32 m/s であるが，周波数が高いほどその値からずれている傾向が見られる．この原因は MR ダンパを試験機に設置する際に垂直に固定できておらず，ピストン駆動時に予期しない摩擦力が発生し，ピストンを正確な正弦波変位に駆動できなかったためと考察する．そのため治具の修正を行い，再度試験を行う必要がある．また開発する MR ダンパについても同様の試験を行い，試験結果とシミュレーション結果を比較してモデルの正当性を評価する必要がある．

TOPへ戻る

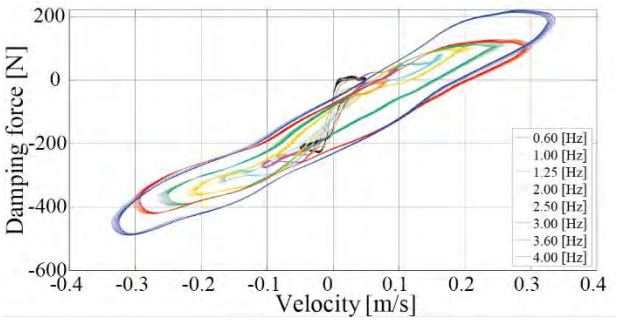


Figure 7　Relationship between damping force and piston velocity (0.0 A)

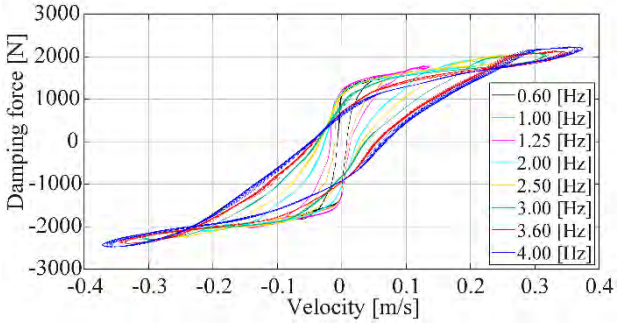


Figure 8 Relationship between damping force and piston velocity (2.0 A)

３．３　宇宙デブリ捕獲の動力学シミュレーション

Fig. 9 に示す動力学シミュレーションに MR ダンパモデルを組込み，デブリ衝撃緩和シミュレーションを行った．捕獲衛星と捕獲機構の質量の合計は 1000 kg，デブリの質量は 1000 kg，衛星に対するデブリの接近速度を 0.1 m/s，とした．また MR 流体の粘度を 0.042　Pa·s，MR ダンパの長さ等の幾何学的パラメータは任意に複数検討した．Fig. 10 にデブリ，捕獲機構の手先，衛星本体の各速度と手先に対するデブリの相対速度の一例を示す．Fig. 10 より，手先に対するデブリの相対速度は約 0.002 m/s まで減衰し，大きく反発することなく捕獲に十分な時間を確保できる可能性は十分に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

本研究では，MR ダンパのモデルングと宇宙デブリ捕獲への応用の可能性を動力学シミュレーションにて検証した．今後は，本研究で確立したフレームワークを元に，詳細な要求仕様を設定し，任意の MR ダンパの開発を行う．また，

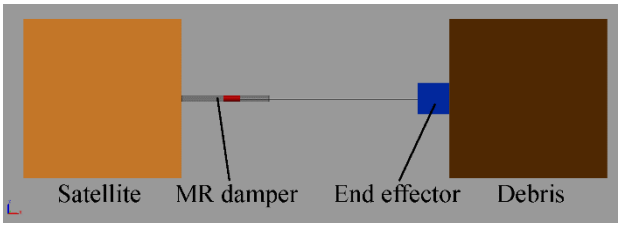


Figure 9　Debris capture simulation

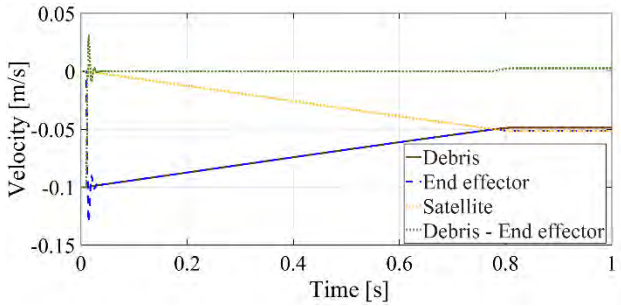


Figure 10 Velocities of debris, end-effector, and satellite

本研究で得られた成果を学会にて発表していくことを予定している．

参考文献

[1] K. Yoshida et al, “Dynamics, control and impedance matching for robotic capture of a non-cooperative satellite,” *Advanced Robotics*, vol.18, no.2, pp.175–198, 2004.

[2] S. Abiko et al, "Impedance Control for a Free-Floating Robot in the Grasping of a Tumbling Target with Parameter Uncertainty," *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1020–1025, 2006.

[3] P. M. Pathak et al, “Impedance Control of Space Robots Using Passive Degrees of Freedom in Controller Domain,” *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 127, no. 4, pp. 564–578, 2005.

[4] J. Gołdasz and B. Sapiński, “Insight into Magnetorheological Shock Absorbers,” *Springer*, 2015.

[5] LORD Corporation, “RD-1029-04 MR Damper Performance (also applicable for RD-8040 and RD-8041),” 2016.

TOPへ戻る

形状記憶合金を利用した折り紙スピーカー

電気工学科　　重宗　宏毅

共同研究者
早稲田大学先進理工学部応用物理学科　　澤田　秀之

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

折り紙は日本の伝統的な技術であり、折ることによって様々な力学特性をシート材料に付与することができる。数理から工学まで様々なアプローチで研究されており、医療から宇宙まで応用先も多岐にわたる[参考文献1,2]。ストレッチャブルなデバイスを構成する研究は台頭しつつあり、シリコンゴムなどの柔軟な材料を利用する研究がある一方、折り紙構造によって伸縮機能を付与する研究もある。伸縮性材料の利用は新規材料の開発となり、従来使われている基板や部品と対等な性能を持つデバイスの開発を目的とする。一方、折り紙構造の場合は従来の基板に対して直接技術を適用可能であり、性能を維持したまま折るだけでストレッチャブルデバイスを構成できる利点を持つ。本研究ではコンパクトかつ持ち運び性を重視したストレッチャブルな折り紙スピーカーを構想する。多様な展開構造が折り紙技術で提案されているが、その中でも三浦折りを利用することで展開可能なスピーカーの開発を実現する。

２．研究計画

スピーカーは主に振動子と振動板によって構成されているため、本研究では両面のアプローチから折り紙スピーカーに適した設計を検討する。振動子では三浦折りの展開機構を妨げないフレキシブルなアクチュエータの使用が望まれる。誘電エラストマアクチュエータ[3]、高分子アクチュエータ[4]などソフトロボティクス技術の台頭に伴い、様々なフレキシブルアクチュエータが提案されている。スピーカーの振動子は、人間の可聴域周波数の上限が 20,000 Hz であることより、応答性が高いことが望ましい。そこで我々は応答性・省電力性・制御性の面から性能の良い形状記憶合金ワイヤの振動子としての利用を検討した。形状記憶合金は太さが 100 μm 程度と髪の毛よりも細いため十分フレキシブルで、三浦折りの展開機構にも追従する。パルス状の電流を周期的に流すことによって振動を制御できるため省電力である。以上のように、折り紙スピーカーを実現するために行った振動子と振動板の考察について本稿では述べる。

３．計画の進行状況

A)　振動子の選定

まず、振動子の選定を行った。２章に記した理由より、スピーカーの振動子として形状記憶合金ワイヤの利用を検討した。形状記憶合金ワイヤを利用したスピーカーのメカニズムを図１に示す。形状記憶合金は予歪をかけた状態で電流を流しジュール熱を発生させることによって相変態を利用して伸縮する。電流を流すとジュール熱が発生し縮み、電流を止めて冷めると元の状態に戻ることで伸びる。これを周期的なパルス波を流すことによって

TOPへ戻る

振動とする。図１に示すように、形状記憶合金に予歪をかけるために支柱を利用した。支柱のがさによって形状記憶合金にかかる張力が変化し、予歪を制御できる。形状記憶合金の振動が支柱に伝播し、最終的に紙コップの底部が振動することによって音が発生する仕組みとなる。

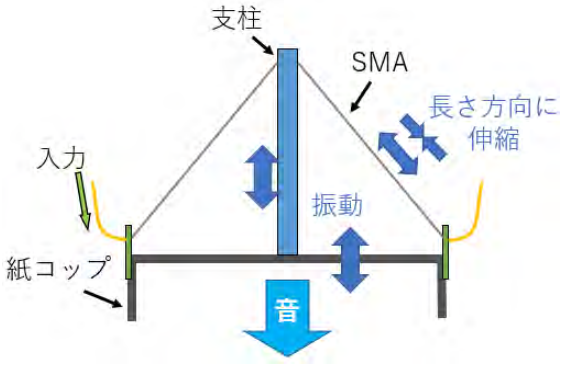


図１．形状記憶合金スピーカーのメカニズム

図２に実際に作製した形状記憶合金スピーカーの様子を示す。今回は予歪を検討するために支柱の長さを 40 mm と統一した状態で、アクリル柱・金属バネ・金属柱と変更した。図３に作製したスピーカーを評価するための測定系を示す。図２の形状記憶合金スピーカーを制御用の電流増幅回路に接続し、PC から信号を送ることで制御する。測定用マイクは反射音を防止するために簡易無響箱内に入れた。

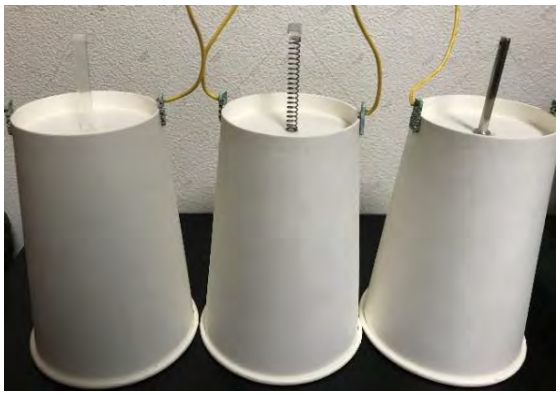


図２．実際に作製した形状記憶合金スピーカー（支柱長さ 40mm、左からアクリル・金属バネ・金属柱）

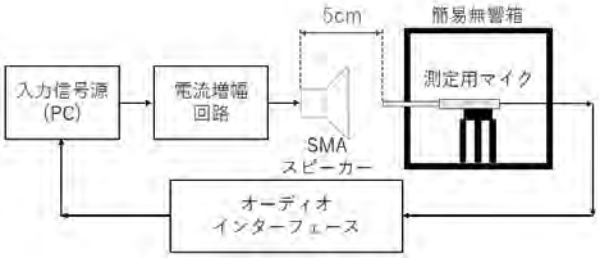


図３．測定系

各スピーカーでキャリブレーションをした後に、200-2000Hz のスイープ信号を入力し周波数特性を計測した。図４に各支柱使用時の周波数特性実験結果を示す。それぞれ青線がバネ、赤線がアクリル、緑線が金属ピンと対応する。縦軸の音圧レベルは以下のように表される。

$$L_p = 20\log_{10}\frac{p}{p_0}$$

それぞれ L_p は音圧レベル[dB], p は音圧[Pa], p_0 は基準音圧[Pa]を表す。

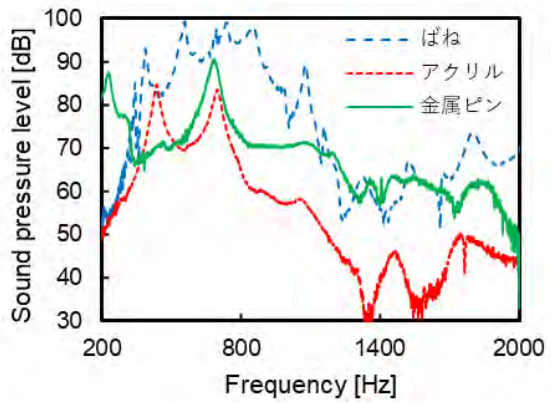


図４．周波数特性実験結果

アクリル・金属ピンが持つ固有振動数の影響によって 435 Hz，696.6 Hz と 227.5 Hz，682.7 Hz のそれぞれ 2 ヶ所でピークが確認された。最も良い音圧を示したのはバネである。バネは 325.5-1139 Hz のほとんどで他 2 つの支柱より大きな音圧レベルを示した。バネは復元力を持つため形状記憶合金へより強く予歪をかける。形状記憶合金の予歪が大きいほどひ

TOPへ戻る

ずみ量が大きくなる特性より、振動板がより大きく振動され音圧レベルが上がったと考察される。

図４の実験より、2000Hz 程度まで形状記憶合金スピーカーが音圧を発生することが確認された。そこで主に低周波域が使用される言語音の再現性について調査を行った。入力信号として女性の「あ」の音声信号を入力し、スピーカーから出力される音を計測し、振幅スペクトル解析を行った。原音を赤線、金属ピンの結果を緑線、バネの結果を青線で示す。原音と比較した時に、金属ピンでは 375-470 Hz で、バネでは 1200-1600 Hz の周波数域で音圧レベルの低下が見られた。金属ピンとバネでは音圧レベルが低下する帯域には違いがあり、この原因については今後調査する。

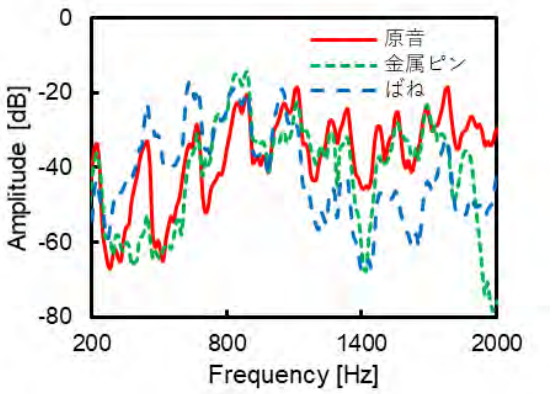
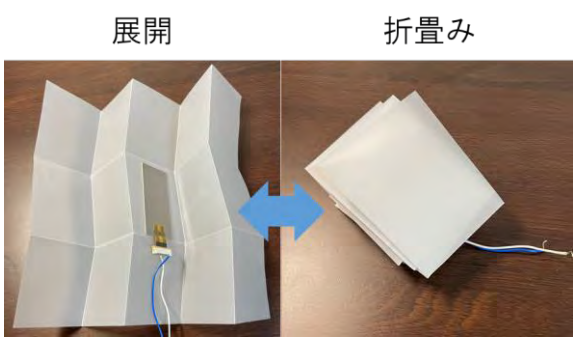


図５．形状記憶合金スピーカーの音声再現性

B)　振動板形状の選定

次に三浦折り構造を利用した振動板の調査を行った。図１に三浦折り構造を利用した展開可能な振動板の例を示す。図１左は展開した状態、図１右は折りたたんだ状態を示す。あらかじめ自動切断するカッティングプロッタを利用して折り目を準備することによって迅速に折り目の複雑な三浦折りを構成する工夫をしている。振動板の特性に注目するため、振動子は既存のピエゾアクチュエータを利用し、それを三浦折りの中心に配置することで板全体の振動を試みた。



図図６．展開可能三浦折り振動板

図７に三浦折り振動板の測定方法を示す。前の形状記憶合金スピーカーの実験と同様に反射音の影響を抑制するために、マイクを無響箱に入れた状態で測定した。

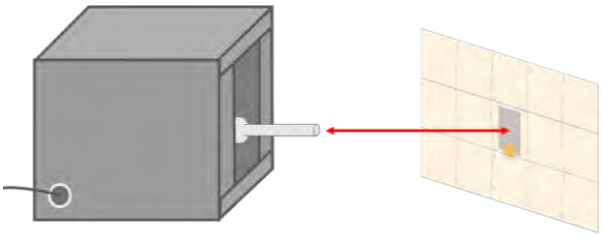


図７．折り紙振動板測定方法

図８に測定結果を示す。青線が展開状態時の音圧特性、オレンジ線が折り畳み状態時の音圧特性、灰線が振動子単体での音圧特性を示す。展開状態・折り畳み状態の双方において、振動子単体の時より大きな音圧特性を示した。また、展開状態において最も大きな音圧特性を示し、振動板を大きくすることでより大域の媒体を震わせ、特に低周波数帯において音圧を向上するという当初の仮説通りの

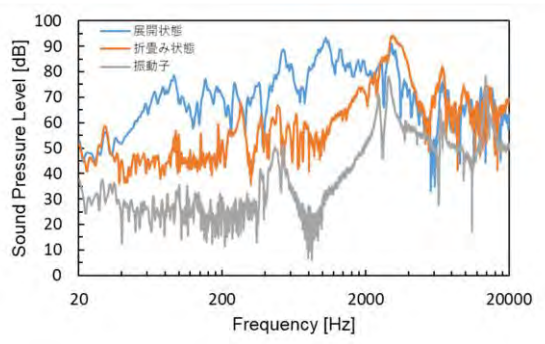


図８．折り紙振動板音圧特性

TOPへ戻る

結果を得られた。通常コンパクトな振動板は振動板面積を確保できないため、低周波数帯の音圧が低減する。展開機構を利用することによって、収納時はコンパクトながら使用時は大面積化し、低周波数帯を発生する振動板の開発に成功した。

最後に図９のように三浦折りの展開角度を制御することによって変化する音場指向性について観測した。-90 度～90 度まで 15 度ずつ図９のシステムを回転しながらマイクで測定することによって音場特性を評価した。図１０に結果の一例を示す。200Hz 入力時の試行性の結果であり、青線が展開角度 20 度、オレンジ線が 40 度、黄色線が 60 度の時の結果である。展開角度による音場の変化が確認された。今後は展開角度制御時のモード変化を有限要素法によって解析し、音場評価結果との対応について考察する。

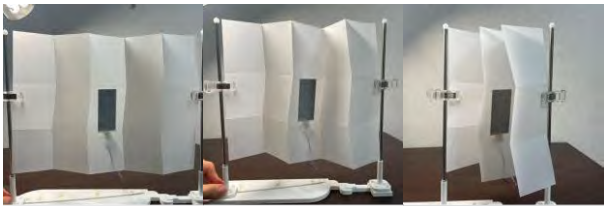


図９．三浦折りの展開角度制御

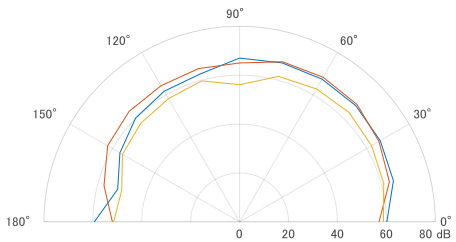


図１０．音場指向性評価（200 Hz 時）

参考文献

1. Kuribayashi, Kaori, et al. "Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil." Materials Science and Engineering: A 419.1-2 (2006): 131-137.
2. Yao, Shun, Xueli Liu, and Stavros V. Georgakopoulos. "A mode reconfigurable Nojima origami antenna." 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. IEEE, 2015.
3. O'Halloran, A., O'malley, F., & McHugh, P. (2008). A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. Journal of Applied Physics, 104(7), 9.
4. Bhandari, B., Lee, G. Y., & Ahn, S. H. (2012). A review on IPMC material as actuators and sensors: fabrications, characteristics and applications. International journal of precision engineering and manufacturing, 13(1), 141-163.

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本稿で紹介した内容については以下の論文にて国内学会発表を行った。現在は振動子・振動板双方のより詳細な特性理解を有限要素法等を通して行うことで、英文ジャーナル・国際学会での発表を目指している。本稿で得られた結果は競争的資金への足掛かりとして十分な役割を果たしており、さら笑なる展開が期待できる。

論文発表状況

1. 西村　一紀、岩名　紘基、山田　賢杜、澤田　秀之、重宗　宏毅、“形状記憶合金ワイヤスピーカーの開発に向けた予歪み付加方法の検討”、ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021.
2. 西村　一紀、細矢　直基、重宗　宏毅、折紙展開機構を利用したスピーカーの検討、電子情報通信学会 2022.

TOPへ戻る

地盤環境のためのライフサイクル技術の開発

土木工学科　　稲積　真哉

共同研究者
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Soralump Suttisak
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Jotisankasa Apiniti
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Chaiprakaikeow Susit
Kasetsart University　Faculty of Engineering　Nontananandh Supakij

１.序論

昨今，福島第一原子力発電所における汚染水対策にもみられるよう，地盤環境を修復する技術として遮水壁が再び注目を浴びている。遮水壁の技術はこれまで，廃棄物処分場における遮水壁構造ならびに地盤汚染現場における封じ込め遮水壁等の分野で大きな進展を遂げてきている。ただし，重要な長期的な環境安全性の確保と言った面から見た場合，現状における遮水壁技術の課題として，長期に渡る遮水性の発揮・確保に対するマネジメント技術の開発，ならびにマネジメント技術を土台としたライフサイクルを考慮した遮水壁技術の高度化が挙げられる。本研究では，地盤環境修復のために重要な役割を果たす鋼製遮水壁に着目し，鋼製遮水壁の信頼性寿命を考慮した遮水性・遮蔽性のライフサイクルマネジメント評価を行う。これより，これまで不明瞭だった鋼製遮水壁の劣化や寿命によって発生し得る長期的な環境（漏水）リスクを定量的に示すことが可能となり，長期にわたって環境安定性を保持するために必要とされる，鋼製遮水壁構造の選定や維持補修戦略における新たな意思決定基準とすることができる。

２.研究計画

鋼製遮水壁の構成部材における信頼性寿命評価・予測では，鋼製遮水壁の遮水・遮蔽性能に着目して，複数の確率統計的推定モデルの適用を試みつつ，信頼性寿命評価・予測を行う。鋼製遮水壁の構成部材には，鋼材と継手遮水処理材に大別することができる。鋼材に関しては，腐食に関するヒアリングや文献等から得られたデータおよび点検データに基づき，一方，各々の継手遮水処理材に関しては，既往の文献等から得られたデータ，および劣化促進試験を実施して得られる実験データに基づき，それぞれについて信頼性寿命評価・予測を行う。

信頼性寿命評価・予測に基づく鋼製遮水壁からの漏水リスク評価（3 次元浸透・移流分散解析）では，鋼製遮水壁の信頼性寿命評価・予測の結果を鋼製遮水壁の物性データとして取り込み，その状態下における鋼製遮水壁の漏水リスクを 3 次元浸透・移流分散解析から評価する。具体的には，廃棄物処分場における側面遮水工としての鋼製遮水壁を仮定した上，鋼製遮水壁の信頼性寿命評価・予測に基づく廃棄物処分場からの浸出水の漏水リスクを定量化し，周囲環境への被害度を把握する。同時に，鋼製遮水壁の信頼性寿命に伴う遮水・

TOPへ戻る

遮蔽性能の低下に基づく廃棄物処分場の環境安定性を評価するためのモニタリングに関して検討を行う。

鋼製遮水壁のライフサイクルコスト分析によるライフサイクルマネジメント技術の提案では，鋼製遮水壁に関連する点検データ（特に，鋼材に関する腐食調査データ）や遮水処理材（特に，止水材系）の高温劣化促進試験の結果を用いて，鋼製遮水壁の遮水・遮蔽性能に関する将来予測を行う。さらに，鋼製遮水壁から漏出することが予想される有害物質量（総和フラックス）を意思決定基準とし，環境経済学的見地から維持・補修の効果を考慮した鋼製遮水壁の戦略的ライフサイクルマネジメント評価技術（アセットマネジメント技術）を開発・提案する。鋼製遮水壁の寿命予測・評価に伴う有害物質の漏出量の推定において信頼性寿命評価・予測に基づく鋼製遮水壁からの漏水リスク評価（3 次元浸透・移流分散解析）で実施するリスク評価手法を採用することで，有害物質の漏出に関するリスクを意思決定基準として鋼製遮水壁の戦略的な維持補修を提案する。

3．計画の進行状況

本研究において対象としている海面処分場の最も深刻なリスクとして位置づけられているのは，海面処分場から有害物質を含み得る浸出水の漏出に伴う環境リスク（以降，“漏出リスク”と呼称）である。そこで本研究では海面処分場における漏出リスクを低減させる目的で，図-1 に示すフローに則してリスクマネジメントの適用を試みた。

海面処分場において，側面遮水工の劣化を考慮することで有害物質の漏出リスクは増加することを明らかにした。これより，海面処分場に求められる有害物質の封じ込め機能が達成されるためには，ライフサイクルにおいて適切な維持補修を行う必要がある。しかしながら，現状として海面処分場においては上記に対する補修工法等は確立されていない 3)。現在，環境リスクの発現が確認されるなどの問題がある内陸型廃棄物処分場に最も多く用いられている対策工法は，環境リスク発現の原因となる廃棄物を除去する工法である 11)。その他にも，漏出する浸出水に対する処理や汚染された水源や土壌への環境被害の対策など周辺環境を回復させる対策工が挙げられる。一方，海面処分場は内陸型廃棄物処分場と比較して，廃棄物量が莫大であること，また保有水等が存在するためいずれの対策工も適していないと考えられる。そのため，海面処分場においては，有害物質の原位置封じ込めと浸出水の制御・処理による原位置抽出が対策工として挙げられる。

構造物の維持補修戦略を立案する際には，アセットマネジメントの概念から適切な補修工法や時期等を選定するべきである。また，補修を行う際には維持補修戦略に関する意思決定指標として，補修コストと被害コストを含めた LCC や費用便益比を用いて補修を行うべきか否かの判断を行う。しかしながら，廃棄物処分場は廃棄物に起因する有害物質の封じ込め機能を達成することが最優先であり，環境リスクの発現が確認される場合には補修を行う必要があると考えられる。そこで本研究では，補修に伴う漏出リスクの低減を考慮した最適な維持補修戦略の検討を行う。

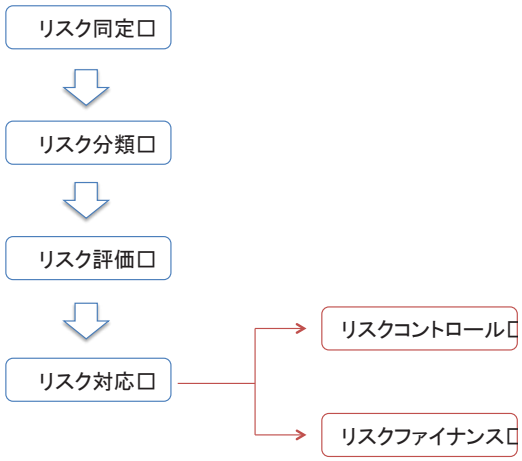


図-1　リスクマネジメントのフロー

TOPへ戻る

表-1　本研究で提案する維持補修プラン

	判断指標□	補修時期□	補修工法□
プラン①□	濃度□	海域の濃度が廃止基準に達する時点 C=0.1	側面遮水工を補修（海側）□
プラン②□			側面遮水工を補修（両側）□
プラン③□	総和フラックス□	総和フラックスが廃止基準に達する時点□	側面遮水工を補修（海側）□
プラン④□			側面遮水工を補修（両側）□
プラン⑤□	透水係数□	透水係数が遮水工基準に達する時点 1.0×10^{-6}m/s□	側面遮水工を補修（海側）□
プラン⑥□			側面遮水工を補修（両側）□

(1) 仮定条件

構造物における維持管理戦略を立案する際には，一般に点検間隔，補修対象とする構造物の性能レベル，またどのような補修工法を採用するかといった要素を考慮する必要がある。補修工法に関しては予算の制約や，補修対象の性能レベルおよび補修後による便益等を把握する必要がある。それに加え，本研究で対象としている海面処分場においては，補修を行う判断指標として漏出する有害物質のみでなく，遮水工の遮水性能についても着目しなければならない。そこで，遮水工の劣化に伴う有害物質の漏出リスクを意思決定基準として，判断指標および補修工法に関して検討を行う。一般に，海面処分場の側面遮水工（二重矢板式護岸）において透水係数に大きく影響すると考えられる箇所は矢板同士の継手部分である。そのため，側面遮水工（二重矢板式護岸）の補修工法としては，遮水工の継手部分の遮水性能を回復させることが挙げられ，本研究では膨潤性止水材の再注入を補修工法として採用した。さらに，各判断指標において設定した基準を上回る時点を側面遮水工（二重矢板式護岸）の補修時期と定義し，維持補修プランは表-1 のように計 6 パターンを設定する。

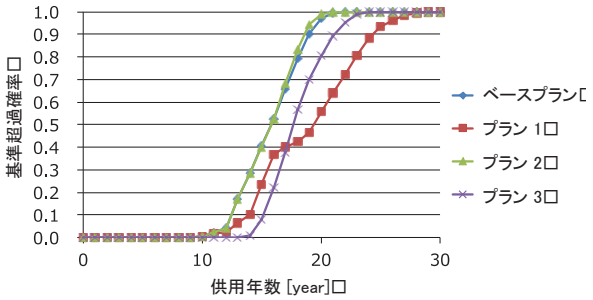
(2) 最適な維持補修プランの検討

側面遮水工（二重矢板式護岸）の補修を行わない場合の濃度と総和フラックスの関係を示す結果をベースプランとする。ベースプランにおいて，各判断指標において設定した基準を上回る時点を表-2 に示す。

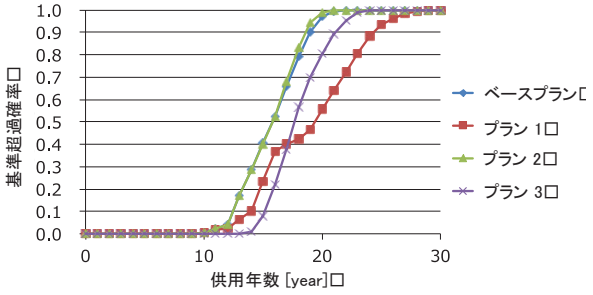
各補修プランにおいて，漏出する有害物質

表-2　判断指標に対する耐用年数

判断指標□	耐用年数 [year]□		
	μ-σ□	μ□	μ+σ□
濃度□	11□	16□	24□
総和フラックス□	15□	23□	44□
透水係数□	9□	22□	52□

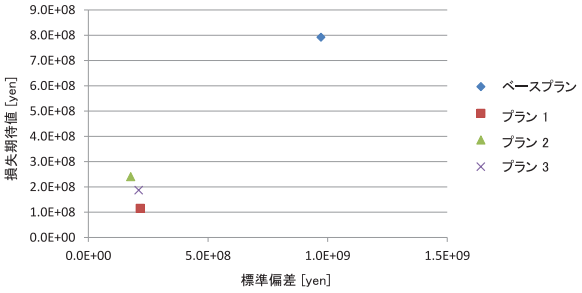


(a)　海側の遮水工を補修

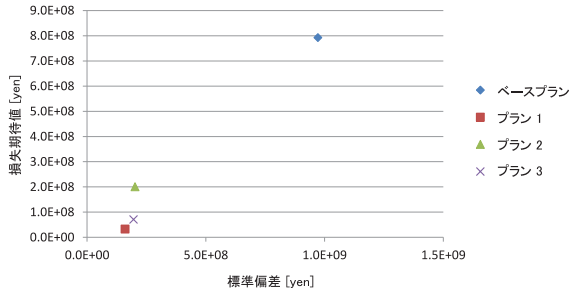


(b)　両側の遮水工を補修

図-2　基準超過確率の推移



(a)　海側の遮水工を補修



(b)　両側の遮水工を補修

図-3　補修プランの期待損失

TOPへ戻る

の濃度に関する基準超過確率の推移を図-2に示す。図-2によれば，プラン2およびプラン4においてはベースプランと差異がほぼないことから補修による効果がないことが明らかである。また供用30年経過時点で，プラン1およびプラン2が最も基準超過確率を抑えることが可能である。すなわち，補修における判断指標において，漏出する有害物質の濃度を採用するべきであると考えられる。

次に各補修プランにおいて，漏出する有害物質に関する期待損失値および期待損失における標準偏差をロス関数にて算出する。また得られた結果を金融工学分野において用いられるリスク-期待損失値平面にプロットすることで，各補修プランにおけるリスク低減効果の比較結果を示す（図-3参照）。図-3において，ベースプランは右上にプロットされるが，各補修プランは左下にプロットされる。すなわち，いずれの補修プランにおいても補修を行わないベースプランと比較して漏出リスクを低減することが可能であり，補修の効果を確認することができる。期待損失値の観点では，いずれの補修工法においてもプラン1およびプラン2が最も期待値を低減することが可能である。また，基準超過確率と同様に，両側の側面遮水工（二重矢板式護岸）を補修する工法が期待損失値を最も低減する工法であるといえる。

上記の結果をまとめると，補修を行う判断指標として海域に漏出する有害物質の濃度が最も適していると考えられる。また，補修工法では両側の側面遮水工（二重矢板式護岸）を補修することで，有害物質の漏出リスクを低減することが可能であることを示すことができた。

4.今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

(1)今後の計画

現在検討されている海面処分場の維持管理案においては，漏出する有害物質に関しては考慮されていない。しかしながら，本研究で得られた知見および成果より，海面処分場では長期的な環境安定性が求められていることから，有害物質の漏出を考慮したモニタリング，維持補修戦略の検討が必要である。

(2)学会，論文等投稿・発表状況

[1] Inazumi, S., Nakao, K., Kuwahara, S. and Jotisankasa, A.: Analytical study on subsidence behavior with time history of existing piled-up ground, International Journal of Geo-engineering, Springer, Vol. 13, 2022-2, Revised Manuscript Submitted.

[2] Inazumi, S., Kuwahara, S. and Jotisankasa, A.: Influence of ground after removing existing piles on installation of newly built pile foundations, Geotechnical Research, Thomas Telford, 2022-1, Manuscript Submitted.

[3] Semmad, S., Jotisankasa, A., Mahannopkul, K. and Inazumi, S.: Influence of prolonged high flow on lateral erosion and bank stability: a coupled simulation of lateral erosion and bank stability, Geomorphology, Elsevier, Vol. 385, 2021-4, Manuscript Submitted.

[4] Intui, S., Soralump, S. and Inazumi, S.: Behavior of bearing capacity on pile foundation during fluctuating groundwater level, International Journal of GEOMATE: Geotechnique, Construction Materials and Environment, The GEOMATE International Society, Vol. 22, No. 90, pp. 24-31, DOI: 10.21660/2022.90.gxi242, 2022-2.

[5] Semmad, S., Jotisankasa, A., Mahannopkul, K. and Inazumi, S.: A coupled simulation of lateral erosion, unsaturated seepage and bank instability due to prolonged high flow, Geomechanics for Energy and the Environment, Elsevier, DOI: 10.1016/j.gete.2021.100301, Online First Publication on 2021-12.

[6] Inazumi, S., Hashimoto, R., Shinsaka, T., Nontananandh, S. and Chaiprakaikeow, S.: Applicability of additives for ground improvement utilizing fine powder of waste glass, Materials, MDPI, Vol. 14, Issue 18, 5169, DOI: 10.3390/ma14185169, 2021-9.

[7] Inazumi, S., Shishido, K. and Soralump, S.: Possibility of impervious coating for the geotechnical reuse of soil and solid waste, Environmental Geotechnics, Thomas Telford, Vol. 8, Issue 5, pp. 324-333, DOI: 10.1680/jenge.17.00097, 2021-8.

[8] Inazumi, S., Kuwahara, S., Jotisankasa, A. and Chaiprakaikeow, S.: Improvement mechanism of sodium carbonate on traditional composite filler, Ground Improvement, Thomas Telford, Vol. 174, Issue 2, pp. 132-139, DOI: 10.1680/jgrim.19.00014, 2021-5.

TOPへ戻る

歯周病予測のための機械学習による力学的性質データ解析の検討

生命科学科　　中村　奈緒子

共同研究者
東京医科歯科大学 生体材料工学研究所　　岸田 晶夫
東京医科歯科大学 生体材料工学研究所　　木村 剛

１．序論（はじめに，まえがき，目的）

近年、歯科領域では予防歯科が注目され、一定の成果が得られている。定期検診では、歯周病を未然に防ぐため、歯肉や歯根膜などの口腔内ソフトマテリアルの状態を評価している。本研究では、歯科医師や歯科衛生士の技量によらず、定量的に口腔内ソフトマテリアルの状態を評価でき、さらに健康から疾病の連続状態（未病）を定義し、将来的な発病を予測可能なシステムの開発を目指している。本研究課題では、口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（組成、構造、力学的性質）と特性（細胞の被感染性）の関係を表す実験データを集積し、機械学習による予測モデルの構築を目指す。昨年度は特徴パラメータ（組成）に関して検討を行った。本年度は、次の段階として、口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（力学的性質）に関して、機械学習による解析方法の確立を目的とする。

歯科領域において、「口腔ソフトマテリアルの特徴（組成・構造・力学的性質）」と「細胞との相互作用」と「特性（細胞の被感染性）」という三者の相関についての研究はなく、本研究の学術的独自性といえる。また、これらを実験的に定量化することは、インフォマティクスを活用した健康―疾病の連続状態（未病）の定義と予測モデルの構築につながる基盤的技術確立に繋がり、創造性の高い研究といえる。本研究の提案手法は、歯科医療のみならず広範な医療への応用に展開できる可能性を有する。

近年のインフォマティクスの進展に伴い、医療・歯科医療への活用が期待され、特に、個別医療や疾患を予測・予防する先制医療に対するインフォマティクスの活用が強く期待されている。多くの場合、これまでに得られた疫学的データを駆使する方法論が取られ、疾患状態を診断する手法である。一方で、発病に至らない未病の状態でのケアの重要性が説かれ、インフォマティクスの活用が試みられているものの、健康-発病の連続状態（未病）の定義・予測は疾患毎に対応する必要がある。本研究課題では、口腔内ソフトマテリアルの健康-発病の連続状態（未病）の特徴パラメータ（組成・構造）のデータを集積し、それらの機械学習による画像解析方法の確立を目指している。口腔ソフトマテリアルと細胞の被感染性の定量化とインフォマティクスの活用は、これまでにない融合領域である。本研究で構築する予測モデルは、健康―発病の連続状態（未病）を定義できるものであり、予測に基づく介入により口腔健康の寿命を延ばす可能

TOPへ戻る

性を有し、国民の QOL の向上につながる。また、本研究の提案手法は、歯科医療のみならず広範な医療への応用に展開できる可能性を有する。

２．研究計画

口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（力学的性質）の機械学習による解析方法の確立のため、以下の①-③の検討項目を実施した。研究協力者として学部 4 年生 1 名が本研究の一部に参画し、卒業論文のための研究テーマとした。

① 力学的性質データ取得方法に関する検討

本研究では、口腔内ソフトマテリアルとして歯根膜に注目する。まず、ラットの歯根膜の力学的性質データ取得方法について検討する。力学的性質データとして、ラット下顎の歯根膜の押し込み試験により荷重と変位を取得する。具体的には、ラット下顎の歯を、歯冠から歯根の方向、歯列の外側から内側の方向等に押し込み試験を行い、押し込み方向について検討する。初期検討として、異なる特徴パラメータ（力学的性質）を有する口腔内ソフトマテリアルの調製のために、脱細胞化技術を応用し、特徴パラメータ（力学的性質）を検出可能な押し込み試験方法を明らかにする。

② 異なる特徴パラメータ（力学的性質）を有する口腔内ソフトマテリアルの力学的性質データ取得

予測モデルの確立のため、ラットを用いて歯周病モデルを作製し、異なる特徴パラメータ（力学的性質）を有する組織を得る。歯周病モデルの作製の評価として、microCT 撮像およびヘマトキシリン・エオジン染色による組織学的評価を実施する。正常モデルおよび歯周病モデルの歯の押し込み試験を行い、歯根膜の力学的性質データを取得する。予測モデルの構築に必要と考えられる 100～300 データの取得を目指す。

③ 口腔内ソフトマテリアルの力学的性質データの機械学習を用いた解析

②で取得した力学的性質データを機械学習に応用するためのデータセットとしてデータ処理する。具体的には、異なるサンプリング回数等を揃える必要があると考えている。機械学習は、MATLAB および Python を用いる。機械学習の判定精度が向上しない場合や、データセットのデータ量が不足する場合は、収集量を増やすなどして対応する。

３．計画の進行状況

① 歯の動揺の力学的特性評価方法の検討

引張試験では糸の伸びが検出され、歯にかかる荷重を検出できなかった。押し込み試験により動揺度の連続的なデータが得られた（Fig.1）。移動量が 0～0.5mm の範囲で荷重が大きく増加していた。ヒトにおける歯周病中度の移動量においてラットでは歯が抜けたため、ヒトの動揺度の移動量をラットの移動量に適用させる必要があることがわかった。移動量は歯根膜の厚みに依存すると考え、microCT 画像より厚みを測定したが、ヒトとラットの歯根膜の厚みに歯の大きさほどの差はなく、別の指標によりラット歯の移動量と動揺度を定義する必要があることがわかった。

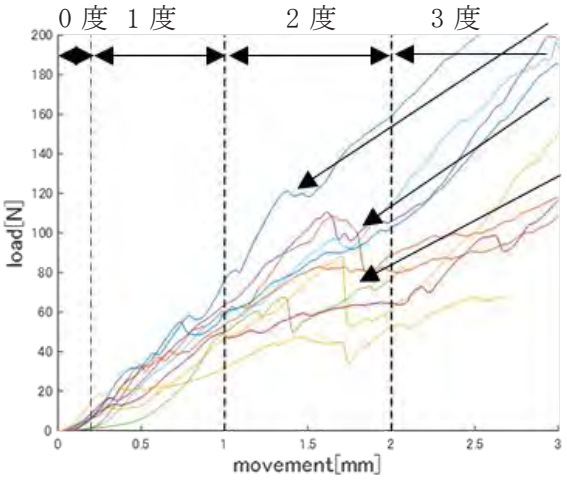


Fig.1 荷重と移動量の関係とヒトの動揺度検査の診断結果の範囲，矢印：歯を歯槽骨に固定する歯根膜が破壊された荷重と移動量

TOPへ戻る

② 歯周病モデルの作製と力学試験評価

microCT 画像から再構成した 3D 画像では歯槽骨に大きな変化は観察されなかったが、歯槽骨と歯頚部の距離の計測により、結紮処理ラットの値が未処理ラットよりも大きいことがわかり、歯周病モデルを作製できたと考えられた（Fig. 2, Fig. 3）。

押し込み試験の結果を Fig. 4 に示す。未処理ラットと結紮処理ラットでグラフの形状が異なることが観察された。結紮処理ラットの歯周組織は骨吸収が起こっているため、歯を支えられなくなりっているからであると考えられる。しかしながら、荷重 0.1N の時の傾きと移動量 0.01 mm と 0.05 mm の荷重を未処理ラットと結紮処理ラットで比較したところ、どちらの移動量でも有意差がなかった（Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7）。したがって、ある移動量の荷重で健全歯と罹患歯の判別を行うのは困難であることがわかった。一方、グラフの形状が異なることから、傾きの変化に違いがあると考えた。以上のことから、荷重、移動量、傾きの連続的な変化から健全歯と罹患歯の判別できる可能性が示された。

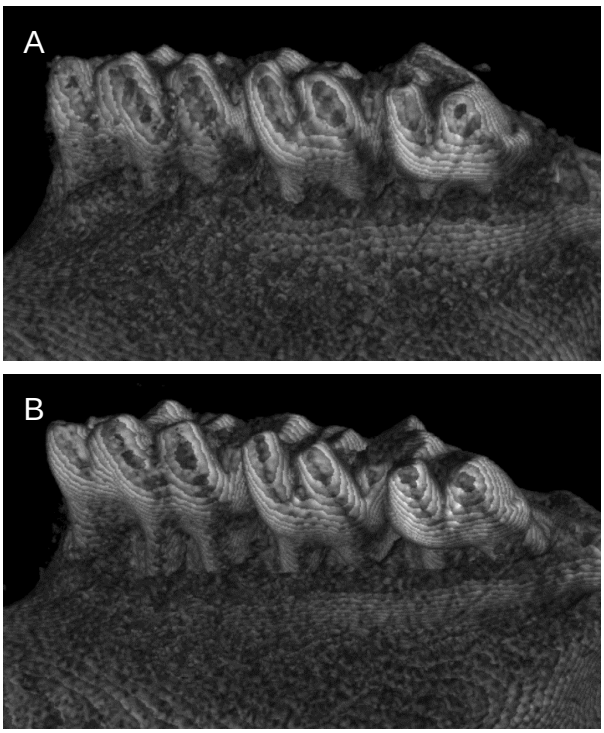


Fig. 2 microCT 撮像によって得られた 3D 画像,
A：未処理, B：結紮処理

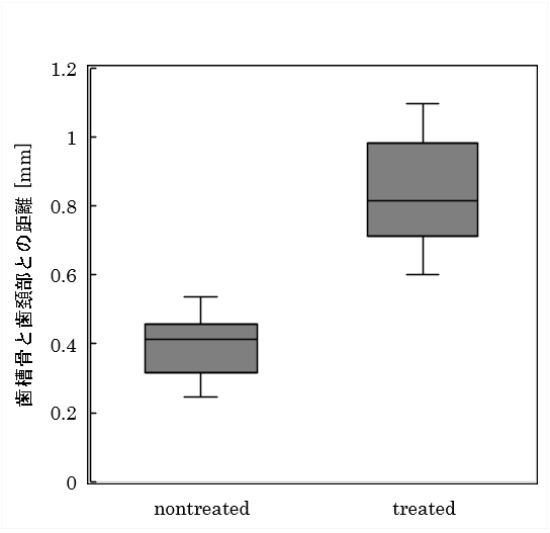


Fig. 3 歯槽骨の最も高い部分と歯頚部の距離

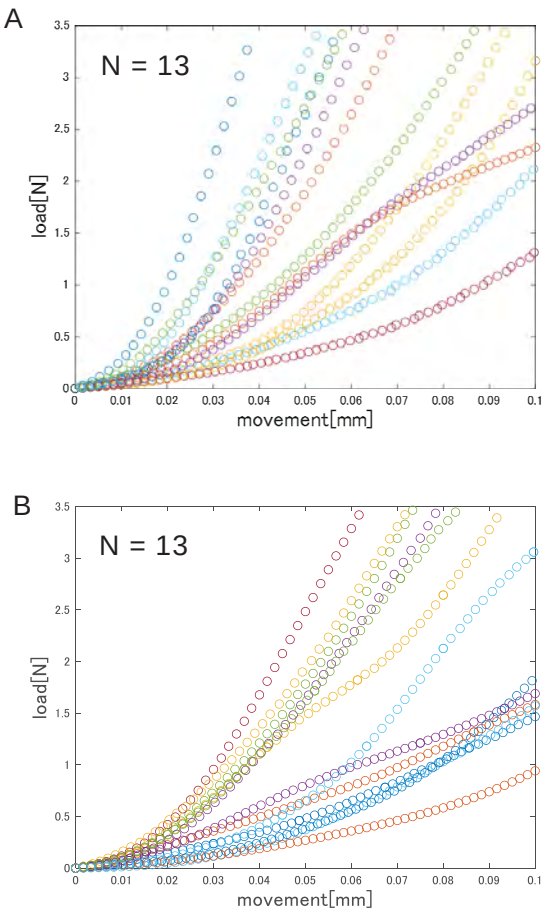


Fig. 4 押し込み試験,
A：未処理, B：結紮処理

TOPへ戻る

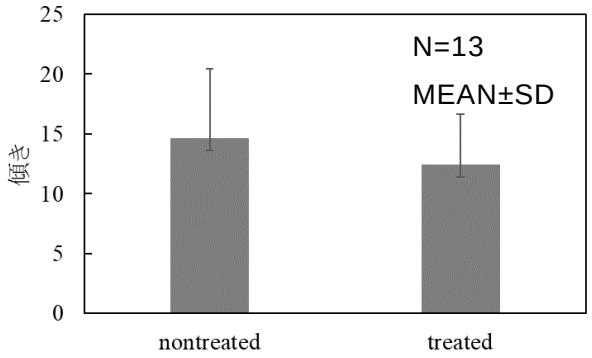


Fig. 5　0.1 N の時の傾き

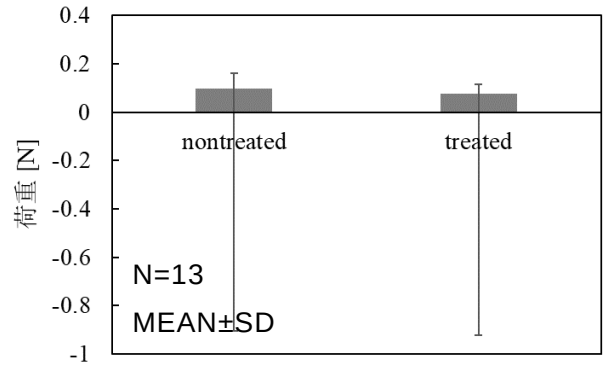


Fig. 6 移動量 0.01mm の時の荷重

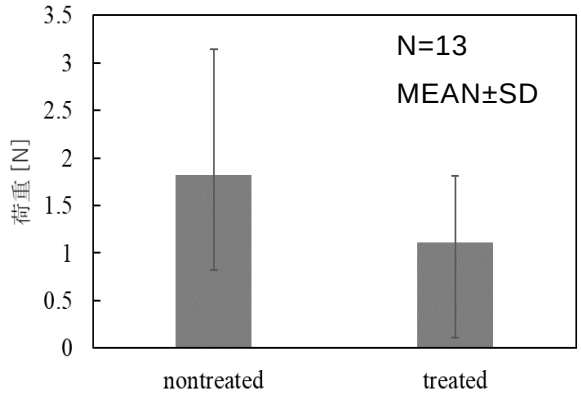


Fig. 7 移動量 0.05 mm の時の荷重

③ 力学的特性データの機械学習

荷重と移動量をデータセットとした場合、隠れ層が 3 層では約 6 割の精度を、5 層では約 7 割の精度を得ることができた。荷重と移動量と傾きをデータセットとした場合、隠れ層が 3 層と 5 層の時どちらも、約 6 割の精度が得られた。より精度の高い判別を行うため、機械学習を見直す必要があると考える。

４．今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

4-1. 今後の計画

① 口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（組成・構造）の解析

歯周病の予測に必要と考えられる、ヘマトキシリン・エオジン染色以外の、ピクロシリウスレッド染色やアリザリンレッド染色などの特殊染色画像を用いて、2021 年度に引き続き機械学習による解析を実施する。

② 口腔内ソフトマテリアルの特徴パラメータ（力学的性質）

2021 年度の内容を継続して行う。2022 年度は所有する圧縮試験機を使用して歯の押し込み実験を行うため、動物より組織を採取した後に測定を実施するが、経時的に測定可能となるような簡易かつ小型の圧縮試験機の作製を行う。

4-2. 学会発表状況

1. 秋山翔太，中村奈緒子，歯周組織にかかる力学的データ用いた新規歯周病診断法の開発，ライフサポート学会第 31 回フロンティア講演会，東京，3 月 7-8 日，2022（口頭）

TOPへ戻る

芝浦工業大学　　２０２１年度特別教育・研究報告集

発行年月日　　２０２２年５月３１日
発　行　所　　〒135-8548　東京都江東区豊洲 3-7-5
TEL 03(5859)7180　FAX 03(5859)7181
発行部署　　芝浦工業大学
研究推進室　研究企画課
製　作　所　　株式会社　エスアイテック

ISSN 2185-7326

無断複写・転載を禁ず

TOPへ戻る