

ISSN 2185-7326

2025年度
特別教育・研究報告集



芝浦工業大學

SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

は じ め に

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

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

この視点に立ち、「教育・研究・社会貢献の三位一体推進」を実現すべく、本学における研究活動及び教育活動の活性化を目的に、教育改革研究活動助成及びプロジェクト研究助成の充実は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2025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

2026年7月

目 次

1. 特 別 教 育 研 究

(1) 地域志向 (COC) 活動助成

少子高齢化社会へ向けたインバウンドとウェルビーイングのプロモーションによる ビジネス創出のためのローカリゼーションプロジェクト・・・・・・・・・・2

工 学 部 村 上 嘉 代 子

地域活性化を目的とした要介助者向け運動教室の実践・・・・・・・・・・4

工 学 部 石 崎 聡 之

システム思考の工学 Ver3.0 : ビジネス包括の産学官金連携スキームのエコシステム化・・・・・・・・・・6

システム理工学部 機械制御システム学科 長 谷 川 浩 志

サテライトラボ上尾におけるサービスラーニングと社会実装教育の実践 ～ウェルビーイングまちづくりの実証実験～・・・・・・・・・・8

システム理工学部 環 境 シ ス テ ム 学 科 作 山 康

社会システム科学のアプローチによる課題解決 : 最適手法の探索と適応2025・10

システム理工学部 環 境 シ ス テ ム 学 科 市 川 学

地域との共創による地域課題解決にむけたアクティブラーニングの実践 ～環境・都市・建築の包括的改善提案の作成～・・・・・・・・・・12

システム理工学部 環 境 シ ス テ ム 学 科 鈴 木 俊 治

地域に貢献できる大学パブリックスペースの研究 ～豊洲校舎キッズパークの遊具の提～・・・・・・・・・・14

デザイン工学部 デ ザ イ ン 工 学 科 橋 田 規 子

大学をハブ拠点とした地域連携特化型のデザイン実践力向上プラットフォーム開発・・・・・・・・・・16

デザイン工学部 デザイン工学科 蘆澤 雄亮

館山市における「地域に住み続けるDIY支援サービス」の開発・・・・・・・・・・18

建築学部 建築学科 山代 悟

江東内部河川・運河の活用とコミュニティ強化・・・・・・・・・・20

建築学部 建築学科 志村 秀明

豊洲四丁目団地における安全・安心なコミュニティ形成プロジェクト・・・・・・・・22

建築学部 建築学科 小菅 瑠香

農業小屋の改修と活用 ～栃木県益子町における農業景観の維持とアグリツーリズムへの展望～・・・・・・・・・・24

建築学部 建築学科 小埜 芳秀

豊洲スマートシティ事業の産学官民連携による推進・・・・・・・・・・26

複合領域産学官民連携推進本部 古瀬 利博

2. 特 別 研 究

(1) プロジェクト研究助成

着任時研究助成

鏡面加熱壁面を用いた Background Oriented Schlieren 法による自然対流乱流境界層の可視化とその乱流メカニズムの解明・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30

工 学 部 古 川 琢 磨

ゾル・ゲル転移によって物体形状に適応可能な自律型ハイドロゲルグリッパの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34

工 学 部 吉 田 光 輝

分光分析による新規薬物検査法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38

工 学 部 瀬 川 尋 貴

風力発電の出力予測を利用した蓄電池制御・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42

工 学 部 小 岩 健 太

地形変化を利用したクローラの障害物乗越え・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46

工 学 部 谷 島 諒 丞

マルチビーム形成用球型レンズ回路の最適化・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 50

工 学 部 新 井 麻 希

眼内閃光提示のための電極配置推定手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54

工 学 部 金 丸 真 奈 美

耐水性可食ソフトロボット・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58

工 学 部 深 田 健 太

密集市街地の持続可能な防災まちづくり・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 62

工 学 部 田 中 由 乃

危機下の世論分極化の動態解明・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 66

工 学 部 楊 鯉 昊

深層学習に基づくロボットの知的自己位置推定・・・69
工 学 部 パトハック サーサク

海洋深層水抽出ミネラル添加水による運動トレーニングの増強効果について・72
システム理工学部 生 命 科 学 科 徳 本 一 善

IoT システム用高性能アンテナの開発・・・76
システム理工学部 電子情報システム学科 平 山 裕

居住環境移行時の負荷軽減に資するものづくり支援手法の開発・・・80
システム理工学部 環 境 シ ス テ ム 学 科 水 谷 晃 啓

研究大学における URA の戦略的役割の分析と提言・・・84
デザイン工学部 デ ザ イ ン 工 学 科 志 方 宣 之

集合住宅の価値向上に資するモビリティハブ・・・88
建 築 学 部 建 築 学 科 本 多 久 美 子

科研費連動型

単結晶の巨大圧電性と多結晶の強靱性を両有する圧電メタ結晶薄膜の研究・・・92
工 学 部 吉 田 慎 哉

女性アスリートの初経初来年齢と足関節捻挫発生要因の関連検討・・・96
工 学 部 深 野 真 子

力学環境に応じた骨造形機構の数理解と医療応用・・・100
工 学 部 亀 尾 佳 貴

乱流の運動量・熱輸送のスケール非相似性に着目した革新的熱流体制御の基盤研究・・・104
工 学 部 河 田 卓 也

分子インプリントプローブによる神経伝達物質分泌イメージング・・・108
工 学 部 吉 見 靖 男

ナノポーラス構造の3次元細胞培養プラットフォームへの応用・・・112
工 学 部 李 素 潤

遠赤外撮像を用いた光と熱計測による人の内部・外部状態の計測・理解・・・116
工 学 部 前 田 慶 博

環境性能と物理特性を両立した高炉スラグ微粉末の有効活用手法の各種提
案・・・120
工 学 部 伊 代 田 岳 史

Design and Fabrication of Flexible Oxide Heterostructures for Sustainable
Hydrogen Generation・・・124
工 学 部 P a o l o M E L E

データの時空間特性を考慮した階層型デジタルツインの研究・・・128
システム理工学部 電子情報システム学科 三 好 匠

身体拡張機構を応用したエルゴノミック VR ワークスペースの設計基盤・・・132
システム理工学部 電子情報システム学科 高 嶋 和 毅

記憶の哲学のシミュレーション的展開と記憶の共有:集合記憶の不正義と記
憶のケア・・・136
デザイン工学部 デザイン工学科 櫻 木 新

視聴覚情報の空間的整合による CG アバタの実在感と対話体験の向上に関する基
礎的研究・・・140
デザイン工学部 デザイン工学科 益 子 宗

ジェンダー多様性のための多様性を持った情報教育教材・・・144
デザイン工学部 デザイン工学科 野 田 夏 子

デジタルメディアを介した記憶の保存と死者祭祀・追悼儀礼デザイン・・・148
デザイン工学部 デザイン工学科 瓜 生 大 輔

大学間連携

高速応答性を有する柔軟センサーによる振動計測・・・152

工 学 部	細 矢 直 基	
単結晶 PZT-MEMS アクチュエータ		156
工 学 部	吉 田 慎 哉	
ウェアラブル連動型折紙包装設計システムの開発		160
工 学 部	重 宗 宏 毅	
イベントカメラを受信機とする AI 駆動型可視光通信の実現		164
工 学 部	プレーマチャンドラ チンタカ	
実時間対応多視点異常検知技術		168
工 学 部	PHAN XUAN TAN	
脳神経を再生し、機能回復を促す革新的神経分化誘導剤の開発		172
システム理工学部	生 命 科 学 科	須 原 義 智

➤ 所属学部等名は、2025 年度中のものです。

特 別 教 育 研 究

（ 1 ） 地 域 志 向 （COC） 活 動 助 成

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

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

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

1.御殿場市における口コミおよび人流データによる実態分析と課題の抽出について

研究背景

静岡県御殿場市は、富士山の東側に位置し御殿場プレミアム・アウトレットなど強力な集客施設を持つ観光都市である。しかし、課題が2つある。1つは「滞在時間の短さ」である。県全体の平均滞在時間が約9時間であるのに対し、御殿場市は約3時間しかない。もう1つは特定の施設に観光客が集まってしまう問題がある。人気観光地1位と2位で年間を通し大きな差がある。

目的

1. 口コミデータをテキストマイニングで分析し御殿場市の特徴や課題を明らかにする。
 2. 人流データをGISで地図上に可視化し、観光客の行動傾向を明らかにする。
- これらのそれぞれの分析、クロス分析を用いて将来的な観光周遊促進に向けた基礎資料を得る。

口コミ分析

KH Coderという計量テキスト分析ソフトウェアを用いた。分析する口コミは世界最大級の旅行口コミサイトであるTripadvisor、日本最大級の旅行サイトじゃらんの2つでTripAdvisorは観光地に、じゃらんは宿泊地に強い。分析する観光地は各サイトの人気観光地を上から10か所採用する。御殿場プレミアム・アウトレットの観光客がほかの観光スポットを訪れるためのヒントを得るという目的から、御殿場プレミアム・アウトレットを外したランキング第2位から11位までの10か所を口コミ分析の対象とする。

口コミ分析結果

TripAdvisorの月ごとの共起ネットワークでは、ワードの円はより多くの月とかわりがあるほど深い緑色になり、より多くの口コミに含まれるほど大きくなる。11月から2月の冬はイルミネーションやショーなど観賞型の観光が主であることがわかる。

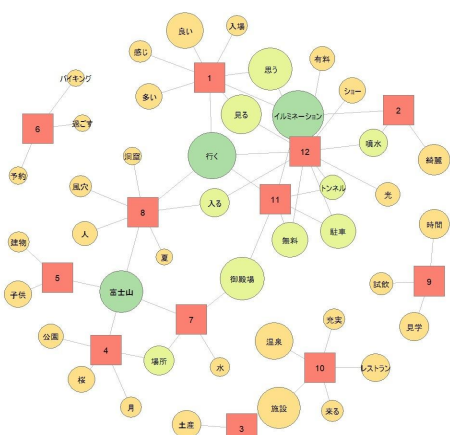


図1. Tripadvisorの月ごとの共起ネットワーク

4月から8月の春から夏にかけての時期に注目すると富士山や桜、洞窟、風穴など自然を体験するアクティブな観光が主となっていた。一方でじゃらんでは11月から4月にかけての関係が強く、11月から1月の期間ではトンネル、綺麗、噴水、など時之栖のイルミネーションに関する単語が多く、1月から4月ではイチゴ、甘い、練乳などいちご狩りに関する単語が多かった。TripAdvisorでみられた夏でのアクティブな観光傾向は確認できなかった。

人流データ分析

ArcGISという地図や情報を検索、作成、共有、利用できるようにするための統合プラットフォームを用いる。口コミ件数や人流データなどを地図上に表示することで、数字だけでは見えにくい傾向を視覚的に把握できる。

人流データ分析結果

1km四方での3月の平均の人流データを示す。赤くなるほど人が集中しており、青枠で囲ったいちご狩り施設アグリモンスタースペシャルのあるメッシュについてイチゴのピークによる影響で滞在人口が多い可能性が示唆される。

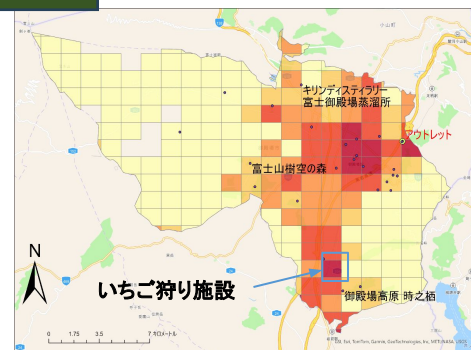


図2. 人流データ1kmメッシュ

考察

観光地ごとに明確な季節的な強みは存在することがわかった。冬：時之栖(イルミネーション・温泉)春：秩父宮記念公園(桜)などである。しかし人流データと照合すると、口コミで評価の高い季節・施設でも滞在人口の顕著な増加は限定的であった。口コミと人流を組み合わせることで観光実態を可視化できた。御殿場市の観光課題は強力な集客施設は存在するが、周辺エリアへの波及が起きていないことである。「点」から「面」への観光戦略、季節ごとの強みをエリア単位で連携させる必要がある。口コミと人流データの組み合わせにより強みが集客につながらないことなどを可視化できた。

2.御殿場市駅周辺活性化

御殿場駅周辺現状分析

【御殿場市観光現状】

令和6年度の観光交流客数は約1,538万人、宿泊客数は約122万人である。観光目的は買い物が中心であり、観光動線は特定施設に集中する傾向が強い。その結果、駅前エリアでの滞在や夜間回遊は十分に活用されていないと考えられる。

【現地調査】

御殿場駅周辺で複数回の現地調査を実施した結果、駅近くに居酒屋、バー、スナック、カラオケ、レトロ映画館などの夜間消費施設が多数集積していることが確認された。しかし、これらの夜間施設の利用率は極めて低く、ほとんど観光客が見られない。一方、日中は御殿場プレミアム・アウトレットに観光客が集中しており、日夜の客足に大きなギャップが生じている。無料シャトルバスの認知度・利用率も低く、周辺の昭和レトロ街並み、地元精肉店・パン屋・酒屋、富士山ビューポイントなどの魅力的なスポットも十分に活用されていない。これらの観察から、御殿場観光はアウトレット中心から地元全体への深い体験へシフトする大きな可能性が示された。

【改善に向けて必要な要素】

駅周辺に存在する飲食店や商店街などの地域資源が十分に可視化されておらず、観光客にとって魅力が伝わりにくい点が挙げられる。また、昼間の観光と夜間の滞在が分断されており、一日を通じた体験として設計されていないことも課題である。さらに、駅前を回遊する動機づけが弱く、滞在時間の延長につながりにくい構造となっている。

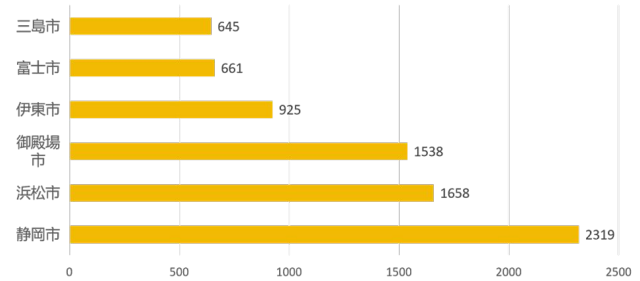


図1. 令和6年度観光交流客数(万人)

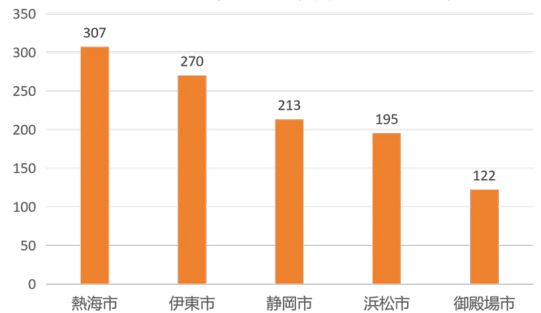


図2. 御殿場市令和6年度宿泊客数(万人)

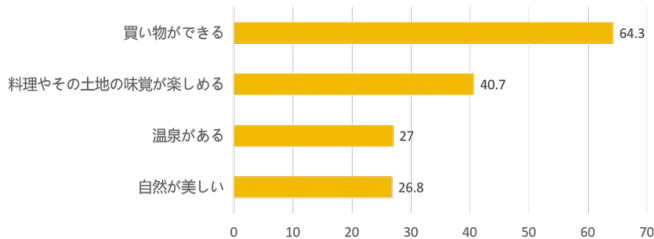


図3. 1,458名の観光客を対象にしたアンケート調査(御殿場市を旅行先として選んだ理由(%))

観光マップを用いた回遊促進提案

本提案は、御殿場駅を中心とした観光客の回遊性向上と滞在時間延伸を目指し、現地調査とステークホルダー対話に基づいて2つの提案を立案した。提案1は駅起点の総合多言語観光マップで、地元魅力(昭和レトロ街並み、日中スポット、夜間消費ゾーンなど)を視覚的に紹介する。提案2はマップと連動したオンラインデジタルスタンプラリーで、位置チェックインによるスタンプ収集と報酬システムを導入。両提案は相互補完的に機能し、日中のアウトレットモールへの集中から地元の夜のエリアへの自然な流れを創出することを目的とする(ナイトタイムエコノミーの活性化)。

【昼夜連動型観光マップ】

駅周辺の飲食店や商店街、観光資源を一元的に整理し、昼と夜に分けて表示するウェブ型観光マップを作成した。昼は観光・軽飲食・立寄施設を中心に、夜は居酒屋やバーなどの夜間利用店舗を可視化することで、時間帯に応じた行動選択を支援する。これにより、駅前の情報分散という課題を解消し、回遊のきっかけを創出する。

【デジタルスタンプ機能】

観光マップの利用と連動し、対象店舗を訪問・利用することでデジタルスタンプを獲得できる仕組みを導入した。スタンプは昼夜別に設定し、達成型の設計とすることで、観光行動そのものを可視化する。これにより、駅前を複数店舗で回遊する動機を生み出し、滞在時間の延長とエリア全体の活性化を図ることを目的とした。



図4. 御殿場駅周辺の商店街



図5. 提案した観光マップのインターフェース

「地域活性化を目的とした要介護者向け運動教室の実践」プロジェクト

代表者	石崎聡之【教授】(工学部 情報工学科)
構成員	浜野学(工学部 電子工学科)

■プロジェクトの概要

本研究グループは2014年より地域高齢者の健康維持増進事業を推進し、継続的な運動教室の参加が高齢者の体力を向上させることを報告してきた。また、COVID-19の流行時には、Zoomを用いた遠隔型運動教室を開催したが、参加者へのアンケートから、参加者間の会話などの交流が運動継続の大きな要因であることが分かっている。今年度は「要介護の高齢者」を対象として、これまでの知見を還元し、“社会的フレイル予防 × 世代間交流 × 学生参画モデル”の実践を行った。

対象年齢が平均87.2歳とかなり高齢であったため、運動教室には十分な配慮が必要であることが分かった。運動後の会話では多くの高齢者が学生との交流を楽しんでいた。アンケート結果から、世代間交流による心理的活性が生じた可能性が示唆された。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】

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

本PJでは5名の男子学生を運動教室のサポート役として参加して貰った。対象が後期高齢者(75歳以上)のみならず、超高齢者(90歳以上)も多く参加していたことから事前に十分な打合せを行った。参加学生は最初は緊張していたが、徐々にコミュニケーションを取ることができるようになり、大きな成長の場になった。

【研究】

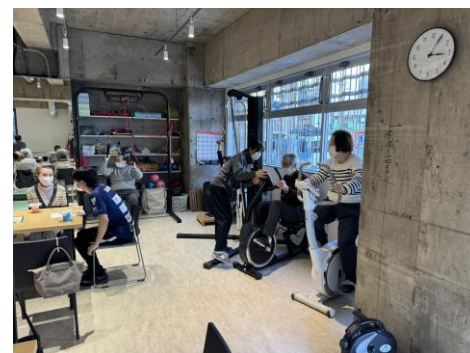
品川区近郊に在住し、リハビリフィットネスリふり品川店に通所する高齢者にアンケート調査等の協力を依頼した。対象者は週に1～2回の頻度で介護予防サービスを受けており、男女29名(男性6名、女性23名)、平均87.2歳(78-97歳)だった。計画当初は研究代表者が運動教室を実施する予定だったが、施設運営の関係により、運営サポートに行くこととした。約50分の運動教室後、各々が補足トレーニングを行っている間、参加学生が高齢者に声を掛け、コミュニケーションを取って貰った。帰宅前に高齢者に運動教室・世代間交流などの項目についてのアンケート(5件法)と自由記述の感想を求めた。一方、参加学生にも類似したアンケートを実施した。

【社会貢献】

2025年には団塊の世代が全て後期高齢者となり、超高齢社会が一層進行する。健康寿命の延伸には身体機能の維持だけでなく、社会的つながりの確保が不可欠である。本PJは、品川区近郊の通所高齢者を対象に、学生参画型の運動教室支援と世代間交流を実践した点に大きな地域的意義がある。アンケート結果からは、交流が「元気をもらえた」「また会いたい」といった情緒的活性や継続意欲につながる可能性が示された。本モデルは、地域資源である大学生の力を活用し、要介護高齢者の孤立予防や生きがい創出に寄与するものであり、地域包括ケアの一端を担う実践的枠組みとして他地域への展開も期待される。



【キャプション】運動教室の様子



【キャプション】補足トレーニング



【キャプション】高齢者と学生の交流

主なトピックス

参加者(高齢者)のアンケート結果

質問	Mean	SD
今日の運動教室は楽しかった。	4.3	1.1
今日の運動の強さはちょうど良かった。	4.3	0.9
また参加したいと思う。	4.6	0.7
若い学生と触れあえて楽しかった。	4.6	0.7
学生と話すことで元気をもらえた。	4.7	0.5
学生との交流は良い刺激になった。	4.6	0.6
今日の活動で人とのつながりを感じた。	4.5	0.8
今日の活動後、気持ちが明るくなった。	4.6	0.7
学生とまた会いたいと思う。	4.8	0.5
学生との交流は、日常生活の楽しみにつながると思う。	4.6	0.6
こうした交流は健康に良いと思う。	4.8	0.4

※ 5:とてもそう思う、4:ややそう思う、3:どちらでもない、
2:あまりそう思わない、1:全くそう思わない



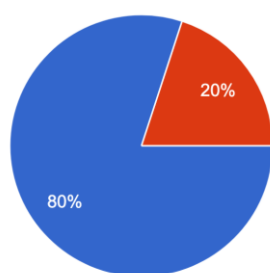
【キャプション】アンケート実施の様子(文字が書きにくい対象者には代筆して記入)

「学生との交流で印象に残ったことがあれば教えてください。」
(自由記述)

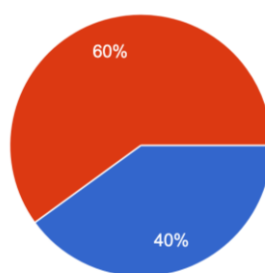
回答1	今日は沢山の学生と交流が出来て楽しかったです。ありがとうございました。
回答2	私は二人の息子を育て上げ、男の子大好きなおばあさんです。今日は龍君に逢えて、とても、とても幸せでした。感謝しています。元気をいただきました。有り難うございました♡
回答3	気持ちが若くなりました。
回答4	楽しいと思った。
回答5	真面目に物を考える学生に会えて良かった。
回答6	若さを表面に活動して欲しい 気分が若々しくなる。
回答7	ちょっと変わった考えが浮かぶ。
回答8	楽しかった。
回答9	楽しいので続けたい 楽しい時間を過ごしました。
回答10	楽しく過ごせました。また交流ができればと思います。
回答11	家では男の人がいないので、一寸変わった雰囲気の良い思い出です。
回答12	学生と話せて楽しかった。
回答13	孫と接しているようで楽しかったです

■ サポート学生のアンケート結果

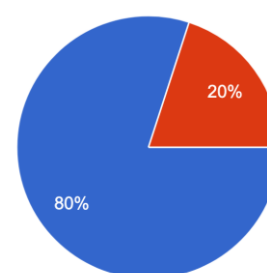
Q 今日の活動は有意義だった。 Q 高齢者との交流は楽しかった。



Q 高齢者への理解が深まった。



Q 高齢者の身体的・心理的特徴について学びがあった。



● とてもそう思う
● ややそう思う
● どちらでもない
● あまりそう思わない
● 全くそう思わない

Q 自分の行動で改善点や工夫すべき点があれば教えてください。

- ・年齢が離れている分、話の話題など、難しい部分もあったので、そんな中でも盛り上がるような、楽しめるような話題の提供ができればよかった。
- ・最初慣れるまで表情が固かったため次回参加する機会があれば今回の経験を生かして上手くやりたい。
- ・すぐに心を開いてくれる方とそうでない人がいたので距離感を合わせるのが難しかったです。
- なのでその人に合った距離感の掴み方をもっと上手になりたいと思った。
- ・補聴器を着けた方とお話する時に、もっとハキハキ喋った方が良いと感じた。(語尾までしっかり)
- 複数を巻き込んでお話をすればもっと交流を深められたと思う。
- ・もっと笑顔で接するべきだった

Q 今後どのような活動をしてみたいですか？

- ・高齢者の方も楽しんでくれたので、またこのような交流も増やしたい。
- ・今回のように社会貢献できることがあれば積極的に参加したい。
- ・今の所これがやってみたいとかは思い浮かばないが、今回のように自分がやった事ないことにどんどん取り組んで行きたいと思った。
- ・決まったテーマについて年配の方のお話や考えをもっと聞けるような活動をしていきたい。

■プロジェクトの概要

AKKODiSコンサルティング株式会社、株式会社志結舎、主催による「第6回産学連携ビジネスコンペティション」大賞(1位)、受賞。本プロジェクトでは就活生の不安を解消することに焦点を当て、ゲームとゲーム内AIアバターを用いた新たなゲームサービスの提案を行った。うつや不安の改善に効果があるゲーム、他者に悩みを話すことで精神的な安定や不安の解消を得るカタルシス効果の二点に注目し、ゲームを通して悩みを解消できる。

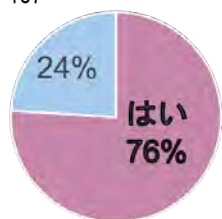
第6回産学連携ビジネスコンペティションとは

「持続可能な社会を創ろう!」をテーマに社会課題の発掘からビジネスモデルの創出, 実証実験までを行う長期プログラム。

9つの大学から全31チーム, 200名以上の参加者の中で大賞を獲得。

プロジェクトの目的

n=107



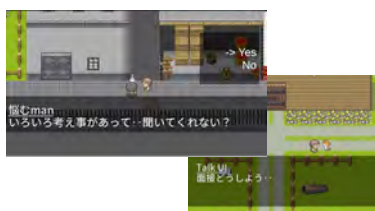
- 就活生の多くが不安を感じている
- 不安が強くなると就活鬱などの精神的負担になる

一人で抱え込む, 相談ができない

ターゲット 学生, 就活に前向きでない, 悩みを持つ人

目的 不安を無くし気軽に就活できるようにする

ゲーム内容



ゲームを遊ぶことはうつや不安の改善に効果がある

一人用ゲームの実装

ゲームの流れ



悩みの聞き出し

情報収集・調査

手助け

他者の悩みを知ることで自分を見直す, 悩みに共感, 解決策を知ることができる

悩み相談機能



カタルシス効果に注目

悩みを人に話すことで精神的な安定や気分の改善

相談できる環境の実装

AIアバターを用いた相談

MyGPTを用いて, 人事系の社会人の人格を再現

【参考】Joong Sung Park, et al.
Generative Agent Simulations of 1,000 People



アンケートの作成



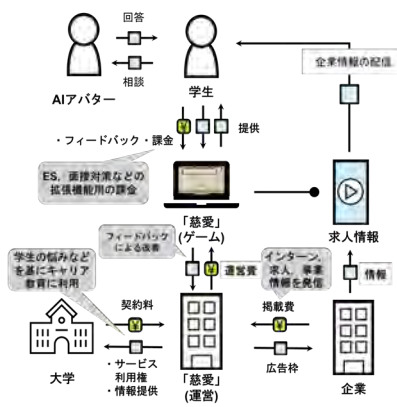
自身の人生, 仕事について回答



MyGPTにデータとして入力

ハードルの低い相談環境, いつでもゲーム内で相談可能

ビジネスモデル



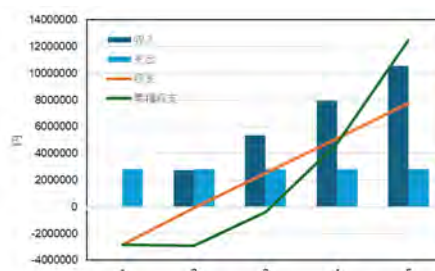
主な収益源

- 大学との契約料
- 機能拡張のための課金
- 求人情報の掲載

機能拡張: ES添削や面接対策

大学との契約: キャリアサポートのデジタルブースの設置

収支計画



Unity	30万2940円/年
サーバー	\$1016/月
ChatGPT Pro	\$200/月(約31000円)
ChatGPT Pro API	約28.4円/1回
ドメイン維持費	1408円/年
サーバー証明書	63900円/年

収入

大学との契約費用	15万/年
学生の課金	1000円/月
企業広告	20万/1社

- パイロット版として一つの大学で提供
- 本学学部3年生1849人を対象に1年目で100人の課金ユーザーを目指し, 年数につれて増加

今後の展望

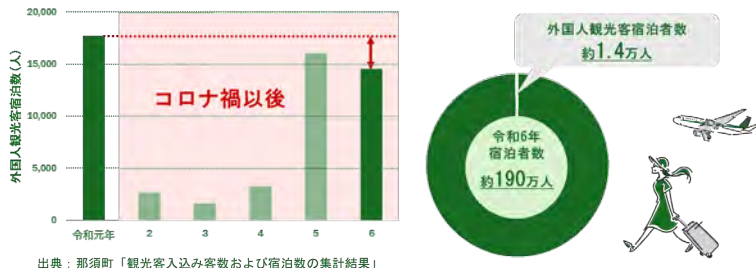
- UIの改善
- サービスの実装
- AIアバターの改善
- ゲーム空間の拡大

■プロジェクトの概要

那須町観光商工課およびDMOと連携し、インバウンド誘客の促進を目的とした産学連携プロジェクトに取り組んだ。観光を「タビマエ・タビナカ・タビアト」の循環モデルで捉え、SNSによる情報発信、多言語対応の観光案内AIロボット、観光情報を一元化したデジタルマップ「NASUnavi」を構築。実証実験を通じて、来訪者の回遊性向上と体験価値の最大化を目指した。

那須町観光における現状

- インバウンド状況を見るとコロナ禍以前の水準まで達していない
- 宿泊者数におけるインバウンドの比率は1%未満



インバウンド誘客における課題

- ① 情報発信と多言語対応…観光情報は日本語中心で外国語への翻訳やSNS情報発信が不十分
- ② 移動手段…那須町観光の移動は自家用車が前提となっており、公共交通だけで回るのは困難
- ③ 受け入れ体制の整備…宿泊施設や飲食店での外国人を受け入れるための環境整備や事業者向けのサポートが不十分

SNSプロモーションの実施

来訪体験を次の誘客につなげる情報循環の設計



CEP@SIT2025

- 本学で開催されたグローバルPBL
- 各国から約70名の外国人が参加
- 那須町での3日間のワークショップ



1 来訪者の参加・関与を生むプロモーション

「きゅーびー」モザイクアート

- 観光中に撮影された写真を収集
- 写真を統合し、モザイクアートを作成
- 完成画像をInstagramに投稿



➢ 公式アカウントを起点とした、那須町の認知度拡大

2 情報拡散と来訪動機の誘発を担う施策

リール動画コンテスト

- #storyofnasuをつけた動画投稿を実施
- コンテスト形式による参加促進
- 優秀作品チームにインセンティブ付与



➢ UGCとハッシュタグ検索による、タビマエの誘発

生成AIを活用した観光案内ロボット

✓ 観光案内ロボットの構成

- ディスプレイ+パペット型ロボット
- 音声入力・音声出力



➢ 多言語サポート・対話による観光情報の提供

地域特化型デジタルマップの構築

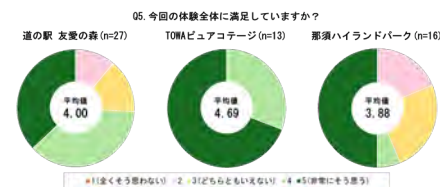
- 観光情報を統合した多言語対応デジタルマップ
- モデルコース提示および観光案内ロボットとの連携機能



実証実験による評価

「観光案内ロボットおよびデジタルマップの有用性評価に関する検証」

2日間で56名が体験、アンケートに回答



「タビマエ・タビナカ・タビアト」の循環モデル

- 観光を一度きりで終わらせない循環設計
- 他地域へ展開可能な地域共創型デジタル観光モデルの提案



「サテライトラボ上尾におけるサービスラーニングと社会実装教育の実践-ウェルビーイングまちづくりの実証実験-」プロジェクト

代表者	作山 康【教授】(システム理工学部 環境システム学科)
構成員	松下希和(システム理工学部 環境システム学科)／水谷晃啓(システム理工学部 環境システム学科)／中村 仁(システム理工学部 環境システム学科)／増田幸宏(システム理工学部 環境システム学科)

■プロジェクトの概要

環境システム学科2年専門科目環境フィールド実習、都市計画演習において地域の課題解決提案とその社会実装を企画実施している。また、本年度より上尾高校2年生全員を対象とした「総合探究」のフィールドの一つとして活用する準備をしており、公立高校との高大連携の新たな教育研究機会にもなる。

2023年3月に上尾市と包括連携協定を締結し、大学の技術・人材の登用とともに、上尾市と連携強化した協働の実証実験や上尾市全体の課題解決に向けた取り組みを強化すべくサテライトラボ上尾を将来、公民学連携のまちづくり拠点「上尾市アーバンデザインセンター」としてステップアップする準備を進めている。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】

都市計画・まちづくり系の大学院の演習科目、学部の演習科目では、従来から特定の地域を対象として地域の課題を把握し、その課題への対応を提案するというPBL(プロジェクト・ベースド・ラーニング)の計画・設計演習を実施した。COC事業を受けて、地域との連携をより強化した教育プログラムに発展させ、学生の教育効果をさらに高めている。

2015年度から演習等の提案成果を関係団体と連携して実証実験を行っている。

【研究】

学外の地域活動拠点をベースとする卒業論文、修士論文の研究を通じて、地域の課題である「超高齢化に対応した都市環境の形成、地域の安全性の向上、低負荷環境の創出、経済力の維持・向上」およびその実現のための「多様な主体の協働による都市・地域計画システムの創出」に関する先進的かつ実践的な研究を行い、実社会に役立つための研究成果を提案としてまとめている。2025年度は学術団体論文研究発表会(都市環境デザイン会議)において、「eスポーツによる健康増進と多世代の交流に関する研究」優秀賞を受賞した。

【社会貢献】

演習や卒業論文、修士論文の成果を、広く地域に還元している。2025年度は、地元自治会や社会福祉協議会と連携して各プロジェクトの進行中に創意工夫の改善を行い、地元と協働による課題解決のサービスラーニングとしての成果が見えている。

学外に地域活動の拠点を設け、地域住民をはじめ多様な主体が活用・交流する場となっており、ラボや学生たちの活動が契機となり行政や民間、市民団体等の活動を触発し、連携しながら地域の課題解決に向けた取り組みが展開している。



環境フィールド実習にて「多世代交流とみんなの居場所イベント」の実装教育



研究論文発表での優秀賞受賞の様子



敬老の日・原市カフェイベントは毎年地元高齢者等に好評

主なトピックス

サテライトラボ上尾の新たな展開可能性

11年間活動実績のある学外教育研究機関で、2階を無料DIY 室やみんなの居場所として新たな課題解決の社会実験を展開中であるとともに、次年度はさらに上尾市との連携強化を図るべく「上尾市アーバンデザインセンター」の認定に向けた地域連携強化を図る準備を行なっている。



サテライトラボ上尾での論文発表会の風景2025年は7題の研究発表が行われ地元や関係団体が参加した

■高大連携プロジェクト

県立上尾高校との高大連携授業では、高校2年生全生徒を対象に「ウェルビーイングまちづくりと地域貢献」を講義し、そのうちサテライトラボ上尾の活動に興味を持った7名の生徒がイベントに参画。高校生優秀者研究発表会を作山ゼミで行うなど高大連携の新たな取り組みを実施した。



シルバーe-スポーツ高校生も参加して多世代交流の可能性が発見され、e-スポーツの新たな展開の研究が発見できた

■年々注目されている団地内教育研究機関

UR都市機構広報誌「URPRESS vol.83」にて活動が紹介



1965(昭和41)年に管理開始した原市国地。外壁塗装や外付けよし
 ばたの設置などを実施している。



「団地は日本の課題」「団地の課題は、今後の日本の課題でもある」とは、私どもの大学は、社会に貢献する人材の教育を理念に掲げています。『都市団地とその実践的教育の場』学生たちは地域の人と触れ合いながら、現場で課題を見つけ、その解決方法を考えます。答えがひとつではないなか、採用される提案をして競うその即戦力を養うこと、社会に役立つことを実感することで、学生は成長します。それが可能なのは、学生の提案を自治会の方が真に受け止めて



イやれるのが楽しい
住良さんも声をかけ
てくれますので」と
学生たちは楽しそう
一方、自治会長の栗
田 尚さんは「若い
人たちが来てくれる



ウボの隣のスペースを利用して設置される屋外カフェ。この日は臨時にも関わらず、近所や外から多くの人が来店。その場で食べられるテーブルセットも用意されている。



一流と調査・研究で
工学が地域に貢献！

名古屋市 城東区 市南地

「田舎は日本の縮図」(田舎の縮図は、今後の日本の課題と)の考のもと、芝浦工業大学の生が地域の課題解決に「工学」を生かして取り組む。そんな活動が10年以上続いている「田舎塾」ある。



そ際で焼くヒサカ人の
原市力フエ

かけにもなるし、いろいろ新しい
取り組みもしてくれて、ありがた
いです」と笑顔だ。

UR PRESS vol.83 C

文部科学省
地(知)の拠点

山先生たちは、早くから、多様な山人が豊かに暮らすウェルビーイングなまちづくりを掲げ、いろいろな方と連携して活動されています。それだけで個性を発揮できる、温かい雰囲気の魅力で、学生さん、もピザの焼き方を後輩に伝授したり、卒業生がイベントに顔を出してくれたりしています」と話す。

上 奈良県では学校と家の間が近い児童を見ることが多いと話す、川口の通村。右 この日は上原高校から3名の女子高生が園カワフェに参加。体験授業としてお手伝い。

9

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

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

■プロジェクトの概要

社会に存在する課題に対して、問題の構造化や現地調査などの課題特定手法や、データサイエンスやシミュレーション、センサ類を用いたハードウェア開発、建築計画、教育ツールなどの課題解決手法から、最適な手法もしくは複数の手法を組み合わせて用いることで、解決することを目指した。事業の対象は、都道府県、地域、市区町村、地区、建物、企業などの制限はせず、対象が抱える課題を活動対象とした。地域を支える信用金庫や地区を所管する行政、保健所、企業と連携することで、産官学金が連動した事業へと発展させた。今年度は、合計7個の事業を遂行し、その全てにおいて、システムズ・アプローチやデザイン思考をベースにしながら、ワンストップで課題発見、解決を行った。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】

事業の対象である都道府県や市区町村、地域や地区、建物、企業などが抱える課題解決には、論理的思考力や技術力を駆使して、複数領域の知識や技術を連携させる必要がある。座学だけではなく、実際に社会に存在する課題に対して、知識獲得・データ収集・データ分析・シミュレーション分析による予期予測、解決策の提案、ドキュメント化の一連のプロセスを経験することで、「手が動くコンサルタント」として新規事業や企画時に活躍できる人材を目指した。

【研究】

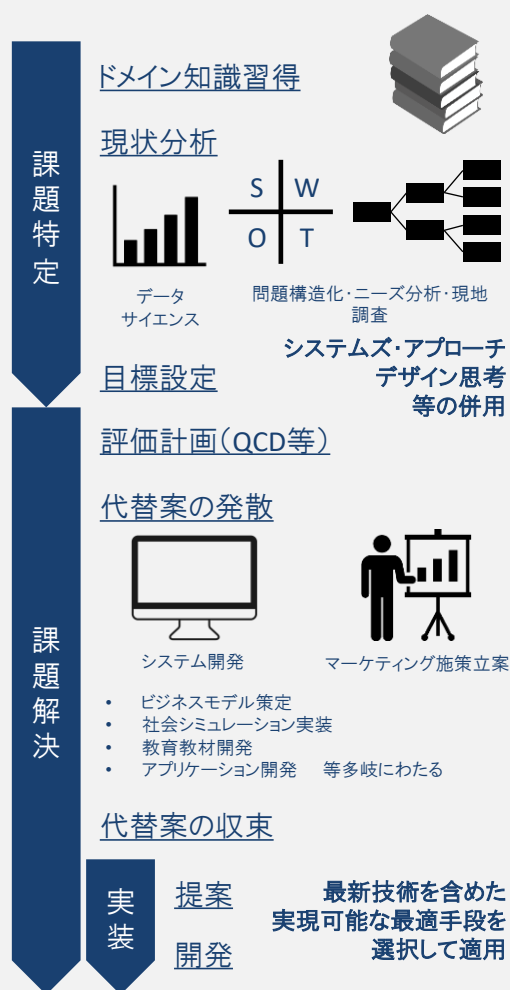
各課題が持つ特徴は異なり、解決手法も統一されない。各課題と向き合い理解するためには、関係する知識や技術の習得、課題提供者との密な関係構築も求められる。解決のために最新技術を含めた実現可能な最適手法を選択して適用するプロセスは、他課題にも応用可能である。新たな課題への展開が期待され、課題解決を数多く行うことでブランディング効果も期待される。

今年度は合計7個の事業を遂行した。中でも特筆すべきものについては、具体的な事業内容を後述の主なトピックスにて報告する。全ての事業において、社会システム科学のアプローチを用いて、特定の方法にとらわれずに、ワンストップで課題解決を行った。

【社会貢献】

行政、建物、企業が抱える課題を、データサイエンスやシミュレーションの技術を用いて解決する取り組みは、プログラミング教育/Society5.0が注目される現代において重要であり、エビデンス付きの成果を地域へ還元することで地域貢献にも繋がる。

今年度は全7個の事業において、解決策の提案にとどまらず、その実施あるいは実施に向けた検討段階に進んでいる。地域を支える信用金庫や地区を所管する市区町村等と連携したこと、学生がもつ柔軟なアイデアをエビデンスベースで提案したことが結実した。中には、地域との連携を通して共同研究に発展した事例も存在する。来年度も継続して貢献するため、事業計画を進めている。



「手が動くコンサルタント」の課題解決フロー

主なトピックス

■東京東信用金庫 データドリブンな施策立案システムの構築

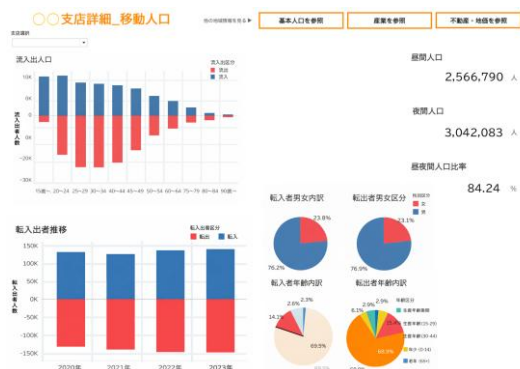
【データサイエンスによる営業支援ダッシュボードの開発】

地域に根ざした金融機関である信用金庫にとって、支店ごとの地域のニーズに即した営業戦略を行うことは重要である。

支店ごとの地域特性を可視化・分析することにより、経営の方針を導出するためのダッシュボードを開発した。

ダッシュボードでは、支店ごとの収益に加え、人口構成、産業構造などを統合し、支店ごとの市場や顧客構造、地域特性をマップ、グラフで直感的に把握するように設計した。

従来は個別に分散していた内部・外部データを統合し、営業戦略や出店判断に活用可能な分析基盤を構築した。



開発したダッシュボードの一例（※本ポスターではダミーデータを使用）

【ダッシュボードを活用したワークショップの実施】

開発したダッシュボードと企業データを活用し、新規出店候補地分析および営業戦略立案ワークショップを実施し、人口動態、企業分布、競合状況などを既存支店との比較を通じて地域のポテンシャルを評価した。

参加者は、ダッシュボードのデータを用いて仮説を検証し、想定される顧客の設定、支店機能の方向性を検討した。

本ワークショップを通じて、データに基づいた出店判断、営業戦略立案の有効性を確認するとともに、ダッシュボードの実用に向けた改善点を明確化した。



開催したワークショップの様子

■埼玉県さいたま市における緑地保全活動に向けた提案

【緑地保全活動に向けたイベントの実施】

さいたま市の緑地面積は平成18年以降、著しく減少傾向にあり、保全活動の強化が求められている。しかし、愛護会の高齢化や後継者不足により安定的・持続的な人材の確保が困難であり、保全活動の継続が課題となっている。

安定的・持続的な人材の確保を図るため、小学生を対象とした「保全活動×遊び」を組み合わせたイベントを実施した。



緑地の資源(落ち葉)を活用した企画に取り組む参加者

【安定的・持続的な運営体制の確保】

イベントでは、芝浦工業大学 SDGs学生団体のメンバー2名が参加した。

今後はさいたま市、みどり愛護会、学生団体を絡めた持続可能なイベントの企画・運営を担う。

来年度以降は、通年イベントとして「学び×遊び×保全活動」の形式での実施を計画している。



親子約60名が参加し、アンケート結果から環境保全意識の向上を確認

■その他のプロジェクト

- 東大宮の小学生を対象とした探究型学習の実践
- 熊谷高校を対象とした探究型学習の実施
- 那須地域でのリノベーション提案・アプリ開発
- 長与町の地域交通施策の立案に向けたシミュレーションモデルの構築
- 熊本県芦北町における施策立案のための調査

■今後の展開

中小企業への取り組みはDX、AI、データサイエンスをキーワードに売り揚げ向上狙う。

自治体支援については、都市計画、医療計画、にぎわい創出、教育など幅広い分野での連携を模索して、活動を行う。

「地域との共創による地域課題解決にむけた アクティブラーニングの実践 ～環境・都市・建築の包括的改善提案の作成～」

代表者	鈴木俊治【教授】(システム理工学部 環境システム学科)
構成員	作山康(システム理工学部 環境システム学科)／松下希和(同)／市川学(同)／増田幸宏(同)／山寄一也(同)／石川裕次(同)／田口博之(同)／ターレク・カトラミーズ(同)／袖野玲子(同)／吉岡剛(同)／片岡誠(同)／水谷晃啓(同) 他に外部講師計6名

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【実施概要】

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

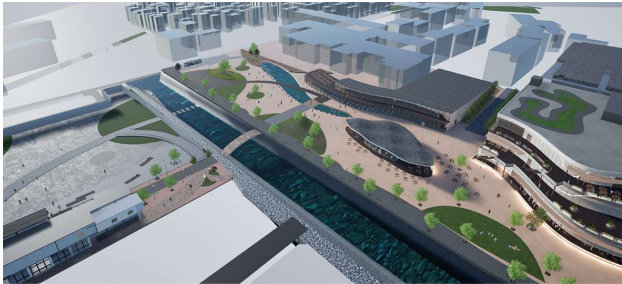
本演習は開講された2017年以降、地域との協働／地域貢献を大前提として実施している。2025年度はさいたま市内2地域(浦和地区、深作地区)、上尾駅西口地区の3か所を対象とした。それぞれの地域において2チームが住宅、商店街、公共空間(広場、緑地、河川等)、地域交通などに関する課題について現地調査を行い、その結果を踏まえて建築・都市計画・環境に関する提案作成に取り組んだ。

【地域共創・地域イノベーション創出・人材育成拠点の形成への貢献など】

今年度本科目の履修学生総数は57名であり(例年に比べて在籍学生数が大幅に少ない)、専門分野別では建築設計(A-1)20名、構造設計(A-2)7名、設備設計(A-3)5名、都市計画・設計(B-1)10名、環境計画(B-2)10名、情報システム計画(B-3)5名であった。男女別では男子40名、女子17名であった。分野混在で6チームを編成した。

今年度の新たな取り組みとして、教員による指導の均質化と重層化を図るため、建築・都市・環境分野から各1名、計3名の教員がふたつのチームを指導担当し、加えて建築及び環境分野では非常勤講師も加わる体制とした。

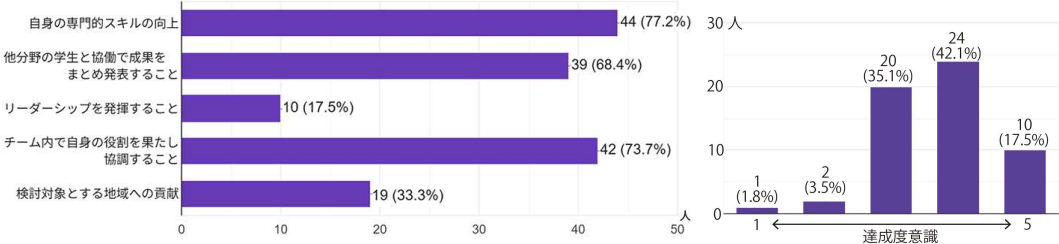
それにより、地域課題を包括的にとらえ、提案を作成する能力の育成を試みた。当初目的とした、各地域のパートナーと連携強化、住民参加型ワークショップ、自治体の複数部局のヒアリング、地域活動調査については、ワークショップ以外はおおむね達成できた。特に本学大宮キャンパスの地元である深作地区との連携が進展したことは意義があり、今後さらなる発展が期待される。



建築専門分野の学生が作成した計画イメージパース
上:深作地区 下:浦和地区

【期待される教育効果とその評価】

本プロジェクト申請時に記した、地域でのワークショップや意見交換会などについては、地元自治会や住民に対するヒアリングやアンケート調査は実施したものの、それ以上の展開はできなかったことは反省点である。授業前後に履修学生及び教員に対する評価アンケートを実施し、回答数は学生57、教員14であった※。以下、その結果を踏まえて考察する。



履修学生は専門的スキルの向上、チーム内他分野学生との協働・協調に高い達成感を得た。地域貢献への達成感を得たと回答した学生は1/3程度。

【学生事後アンケート結果より】

地域貢献についての達成度意識5段階評価では平均3.7であった。

【学生事後アンケート結果より】

※回答数は前後両方のアンケートに回答した人数

【期待される教育効果とその評価 続き】

◆地域貢献に対する学生の事前意見 要点

1. 専門性と学生らしさを活かした提案作成意欲

- ・ 多角的な分析: 建築・都市・環境・システムなど、異なる専門性を持つ学生同士が協働し、複合的な視点から課題を解決しようとする姿勢が多くみられた。
- ・ 学生ならではの発想: 行政にはない独創的でユーモアのあるアイデアと、3Dモデル等の技術を活かしたわかりやすい提案で地域の活性化を目指した。
- ・ 持続可能性と現実味: 単なる理想論ではなく、5年・10年先を見据えた持続可能な計画や、住民が納得できる現実的な解決策を提示したいという声が多く出された。

2. 調査や対話による十分な地域理解への意欲

- ・ 現場の生の声の反映: 住民や行政へのヒアリング、フィールドワークを通じて、数値化できない潜在的な課題やニーズを汲み取ることを目指した。
- ・ 客観的視点の提供: 外部の人間(学生)だからこそ気づける地域の魅力や資源を再発見し、その土地らしさを活かしたまちづくりに貢献したいと考えた。
- ・ 繋がり構築: 大学と地域、あるいは住民同士が繋がるきっかけを作り、コミュニティの維持や幸福度の向上を促す仕組みづくりへの意欲が見られた。

3. 自己成長や貢献への意欲と責任感

- ・ 実践的な成長: 将来まちづくりを担う人材として、合意形成の難しさや現場の現状を学ぶ貴重な機会と捉えていた。
- ・ 貢献への熱意: 「地域の人に喜んでもらいたい」「利便性を向上させたい」という純粋な精神に基づき、力を尽くして具体的な成果を出そうとする責任感が示された。

◆地域貢献に対する学生の事後評価 要点

1. 学生ならではの視点による提案を作成

浦和・上尾・深作の各地域に対し、現地調査や行政・自治会へのヒアリングを行い、現状分析に基づく将来像を提示したことについては比較的高い自己評価となった。市役所移転後の浦和の再開発、上尾の駅前活用、深作の水辺資源の可視化など、学生の素直な発想や環境・レジリエンス視点での提案は、行政や地域住民に「新たな気づき」や「対話のきっかけ」を与える貢献となったと評価している。

2. 実現可能性と住民意識の十分な取り込みは課題

一方で、提案がアイデア先行で非現実的な規模に留まった点や、具体的なニーズの検討不足を反省する声も出された。特に住民ら利用者目線での検討や、実現可能性の精査に課題を感じた。

◆学生による事前／事後意見の総括

学生アンケートによる事前期待と事後実感を総括すると、学生ならではの「斬新な発想」や「多角的な分析」によって地域に新たな気づきを与えることができた点では、期待した貢献を概ね達成できたと評価している。行政や住民に対し将来像を可視化し、「対話のきっかけ」を作った点にも手応えを感じている。

一方、当初目標に掲げていた「住民が納得する現実的な解決策」や「ニーズの深い反映」については、実現可能性の低さや住民目線の不足を自省する声が多く、意欲や期待と実現性の乖離を感じた。

◆教育効果の総括

総じて学生たちは、約4か月の期間で地域関係者と触れ合いながら分野横断型の協働作業を体験し、図面、模型、計算書などの成果品を作成した。その提案によって一定レベルの地域貢献はできた。一方実社会の諸々の壁や、まちづくりの難しさも認識した。以上から、本プロジェクトの目的はほぼ達成され、教育効果はあったと判断する。

【今後の方向性】

本プロジェクトは地域と協働し、地域貢献を行う「サービスマーケティング」であることを基本とし、来年度以降もその方向で発展的に継続させる。そのため以下の点に留意し、地域との関係の構築や教育体制の改善を図る。

- ・ 多くの学生が良く努力し所定の成果を挙げたことから、学生が「自分たちの提案は非現実的で役に立たなかった」と無力感を感じないように配慮する。そのためには、演習開始時点において、「どの程度の現実性を目指す」のか、また「今すぐにはできないにしても、将来的にはできる、このようにしたい」と地域関係者が思える提案であればよいなど、実現性に関するレベルをより具体的に提示するとともに、常時フィードバックを行う。
- ・ 今年度も実施した地域への「中間報告」については機会や時間を増やし、地域とのコミュニケーションをより密に行う。
- ・ 学生の、建築・都市・環境という専門分野間の協働と合意形成については、学生のコメントからは、分野間の連携不足が「不完全な提案」に繋がったという認識が読み取れる。しかしこれは、学生は多角的な視点を統合する難しさを学んだという肯定的評価もできる。
- ・ 学生の意見として、専門分野が異なる教員間の意見が異なり戸惑った等がある。これについては教員の立場や意見の捉え方について学生に良く周知するとともに、教員間でも地域課題や提案コンセプト、手法についての認識をよりよく共有することが必要と考えられる。

そのためには、個別のエスキスだけではなく、同じ地域に取り組むグループの全教員と学生、さらには地域関係者が参加する合同エスキスを複数回行うことが考えられる。教員や地域関係者同士がその場で議論し、合意形成を図るプロセスを学生が直接見て学ぶことは、高い教育効果があり、地域貢献にもつながると考えられる。

学内チーム最終発表会
3つの地域関係者の参加
を得て大宮キャンパス及
びオンラインで実施



学生が制作した模型
(上尾チーム)



「地域に貢献できる大学パブリックスペースの提案 -豊洲校舎キッズパークの遊具の提案-」プロジェクト

代表者	橋田規子【教授】(デザイン工学部 デザイン工学科)
構成員	田中竜真(デザイン工学部 デザイン工学科)／千葉悠和(デザイン工学部 デザイン工学科) 新熊亮一【教授】 工学部情報工学科 / 中島瑞季【教授】 (デザイン工学部 デザイン工学科)

■プロジェクトの概要

都心における子どもの遊び場が減少している中で、芝浦工業大学豊洲校舎のキッズパークは地域の親子連れが多く訪れる公園となっている(図1)。しかしながら、小さな子供用の遊具が少ないとの意見が多い。本プロジェクトでは、キッズパークを「地域に貢献できる大学パブリックスペース」とするため、調査と観察をおこない、それらの調査結果をもとに、新しい遊具の提案を行う。本プロジェクトは、遊具提案で地域の人々に貢献する以外にも、試作製作において、都内ものづくり企業と連携(東京東信用金庫様経由)をおこない、実施することで製作過程でも地域に貢献することができた。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】【研究】

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

a.キッズパークでの調査:

すでにキッズパークにある遊具に加え、どのような遊具が必要なのか、利用状況を観察した。結果、子どもの年齢3-5歳が多く、ターゲットとして設定した。また、この年齢の子供は親と一緒に訪れて、親に自分が達成できたところをみて欲しい、会話をしたいという事が分かった。また、一方で滑り台の要望が多いことも分かった。

b.新しい遊具の提案アイデア:

aの調査をもとに、2種の遊具を提案した。

①子供の創造性を刺激する遊具の提案(図2)

コンセプトを「ゴールを設けることによって達成感を感じ親子のコミュニケーションを活発にする遊具」とし組み立てられる平均台遊具を検討した。モチーフについて芝浦工業大学らしさを出すため、工学的、建築的素から、鉄骨とボルトをモチーフに作成した。

② TENTを活用した遊具の提案(図3)

滑り台の要望が多いが、すでに2つの既製品が設置されている。今回、新しい滑り台として、太陽テント株式会社(足立区)との連携で幕材からなるテント構造を使った遊具を検討することとした。太陽テントの新しい商材として市場開拓につなげることを視野に置く。①②共、日本公園施設業協会より出版されている「遊具の安全に関する規準」を用いて遊具の安全性を行った

c. 提案モデルの制作:

①子供の創造性を刺激する遊具の提案

製作に当たっては学内で発泡スチロールの造形物を製作し、その後に、ライノジャパン社(新宿区)のポリウレタ樹脂を塗装することで、堅牢性があり、かつ子供が怪我をしないようにした。2種のブロックで様々な構成ができるように工夫し、子どもの想像力が刺激されるように配慮した。

② TENTを活用した遊具の提案

円形の滑り台は既存であるため、六角形の滑り台と市、一番急な面には把手を配置。各面の傾斜が異なる面白味のある滑り台をデザインすることができた。製作と並行して、一般社団法人日本公園施設業協会副会長・規準委員長の丸山智正氏にアドバイスをいただいた。

【社会貢献】

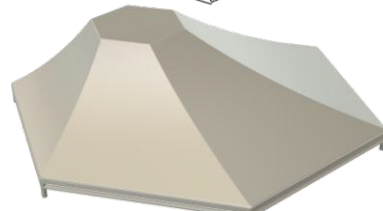
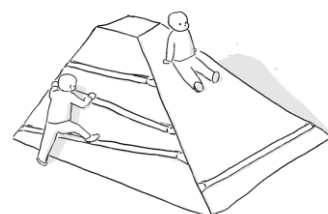
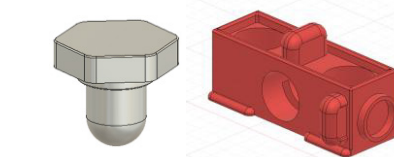
製作したモデルについて、キッズパークで遊ぶ子供から大人まで、楽しんで遊んでもらえることが確認できた。この遊びは年齢制限がないため、世代間のコミュニケーションを促すことができ、地域の活性化に繋がるのではないかと考える。ルーレットの絵や背景の模様を差し替えることにより、飽きずに楽しめるのではないかと考える。



【図1.キッズパークの現在の遊具】滑り台は2個現存



【図2.提案モデル①】ゴールを設けて達成感を感じ、親子のコミュニケーションを活発にする遊具
上:初期案 下:決定案



【図3.提案モデル②】テント生地をつかって山を構成し、角度違いの複数面で滑ることのできる滑り台
上:初期案 下:決定案

主なトピックス

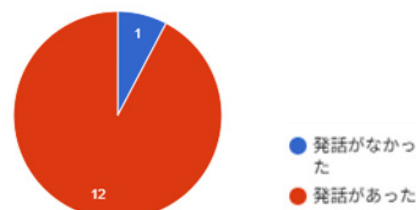
①子供の創造性を刺激する遊具の提案

d. 提案モデルの検証 実験・観察・アンケートの実施

目的:「ゴールを設けることによって達成感を感じ、親子のコミュニケーションを活発にする遊具」というコンセプトが実現できているかを知るため

結果:遊びながら「見て」「できた」等の注目・評価を求める発話があった(図4)。「すごいでしょ」と得意げに発話していたり「そっち側を持って」と協力を求める様子がみられた。図5のようにとても楽しく遊んでもう事ができた。

保護者との良好なコミュニケーションを活発にするための遊具設計



多様な遊び方とゴールの設定
子供の創造性を刺激する遊びの要素



【図5実験中の遊ぶ様子】

②テントを活用した遊具の提案

d. 提案モデルの検証 実験・観察・アンケートの実施

目的:実際に遊具として成立するのか、製作した遊具が想定通り楽しまれているか、想定外の遊び方はないか、遊具の耐久性に問題はないかという観点で検証を行う。

結果:様々な遊びが見られ、どの子供も楽しく遊んでいた。

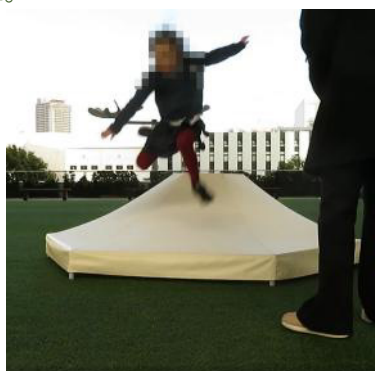
滑り台としての滑る動作(座って滑る、横向き寝て滑る、うつ伏せで滑る)の他、逆走、よじ登り・跳躍系の動作をメインとした遊びが見られた。

よかった点

様々な角度から、自由に好きなように滑れる楽しさ、トランポリンのように遊べるなど自由な遊び方ができる。高さが低いので、怖がらずに遊べる。天候に左右されない点が良い(夏場は金属遊具は高温になるため)。

悪かった点

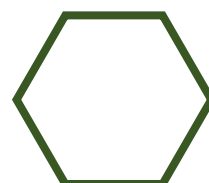
大きさが小さい、物足りないという声が多い。もっと大きいサイズだとより楽しめそう。大人数だと頂上が狭い。滑った際にフレーム角に頭を打った子どもがいた。角の部分がもう少し柔らかい素材で丸みがあるとより安全。角に力がかかり縫製糸が切れてしまった部分があった。



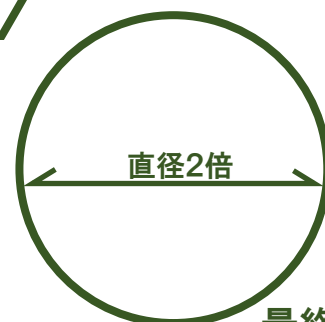
【図6.実験中の遊ぶ様子】

【表1.身長と遊びの関係】

身長階	滑	横	仰	伏	滑	逆走	よじ	跳	飛	跳	計	滑降割合%	跳躍割合%		
85	13	13	0	4	0	3	0	0	4	2	0	39	17	21.8	
86	10	10	0	0	1	0	0	2	0	0	0	23	11	23.9	
90	20	16	3	0	1	8	0	0	7	0	0	55	20	18.2	
98	4	2	2	0	2	4	0	1	7	2	0	26	6	11.5	
100	1	10	0	0	1	1	2	9	1	0	0	1	26	11	21.2
106	2	1	0	0	0	2	1	2	0	0	1	8	17	1	2.94
110	3	2	1	0	0	1	8	13	8	1	1	3	41	3	3.66
113	9	0	1	0	4	0	1	16	0	5	20	11	67	5	3.73
119	3	3	3	7	11	8	2	10	4	6	2	11	70	24	17.1
120	9	11	0	0	3	7	3	7	0	7	8	63	14	11.1	23.36
相関	-0.2	-0.7	-0.1	-0.1	0.5	0	0.4	0.5	-0.2	0.6	0.6	0.5	0.6	-0.62	0.71



修正案



最終案

【図7.最終案】遊具の狭さに関して頂上を広げたフレームの形について、安全面と耐久性のため、円形で検討する。

テントを活用した遊具の有効性が確認できた。今後は再試作し、耐久性などの検討を行う。

大学をハブ拠点とした地域連携特化型のデザイン実践力向上プラットフォーム開発

代表者	蘆澤 雄亮【教授】（デザイン工学部デザイン工学科）
構成員	益子 宗（デザイン工学部デザイン工学科）／繁里 光宏（デザイン工学部デザイン工学科）／中島 瑞季（デザイン工学部デザイン工学科）

■プロジェクトの概要

デザイン工学部では、各教員それぞれが地域企業等と連携した協働型授業ないし研究を行っており、学生にとっては具体的な地域課題に取り組むことを通じたデザインの実践力向上につながっている。また、企業側にとってもデザインならではの考え方に触れることでデザインへの理解が深まり、実践的な成果が得られている。これらは、終了後にプロジェクトとして継続・研究化される例も多いが、各教員の個別の取り組みにとどまり、十分なシナジーが発揮される状況には至っていない。課題には共通性も多く、大学をハブとした情報共有・交流の場を設けることで、取り組み全体の相乗効果を狙い、最終的には本学が地域課題に取り組むハブ拠点として機能することを目指す。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】

本プロジェクトでは、全国9箇所においてプロジェクトが進行しており、そのうち連携協定準備中の1プロジェクトを除く8プロジェクトすべてにおいて、具体的なプロジェクトアクションを実施した。各プロジェクトには複数の学生が参画し、それぞれの地域課題に対応した取組を展開することができた。特に「地域の魅力を紹介するプロジェクト（@三重県紀北町）」においては都内での展示イベントを開催し、「地域のハブ拠点構築をめざすプロジェクト（@山口県岩国市）」においては、地域と連携した読書イベントを実施するなど、学生主体による具体的な成果が複数のプロジェクトで得られた。

【研究】

「木工作品をとおした知的障がいのある作り手と地域のつながりを考えるプロジェクト（@岩手県盛岡市）」、「スーパーを通じて地域の商品の魅力を紹介するプロジェクト（@愛知県一宮市）」、「地域の魅力を紹介するプロジェクト（@三重県紀北町）」、「地域のハブ拠点構築をめざすプロジェクト（@山口県岩国市）」、「地域の集会所を立ち上げるプロジェクト（@長野県佐久市）」、「温泉旅館から始まる地域創生プロジェクト（@愛知県蒲郡市）」等においては、プロジェクトの実施過程で得られた知見を形式知化することを目的として、複数の学生の卒業研究テーマへと発展している。

【社会貢献】

いずれのプロジェクトも地域課題に根ざした内容であり、プロジェクトの実施にあたっては、地域住民をはじめとする多様なステークホルダーと協働しながら取り組んでおり、地域活性化に貢献している。例えば、「地域のハブ拠点構築をめざすプロジェクト（@山口県岩国市）」においては、11月に読書イベントを実施し、地域の保育士や学生等と連携して「絵本の読み聞かせイベント」や「ビブリオバトル」などの企画を行った。これらの取組を通じて、地域住民との継続的かつ良好な関係構築が進められている。



「地域の魅力を紹介するプロジェクト（@三重県紀北町）」にて実施された展示イベントの様子@市ヶ谷



「温泉旅館から始まる地域創生プロジェクト（@愛知県蒲郡市）」にて掲示物を製作している様子



「木工作品をとおした知的障がいのある作り手と地域のつながりを考えるプロジェクト（@岩手県盛岡市）」でヒアリングをしている様子

主なトピックス

■ 特設ウェブページを開設

本プロジェクトでは、デザイン工学部が多様な地域連携活動を実施していることを学内外に広く発信・訴求することにより、活動への理解促進および新たな参画者の拡大を図ることも目的としている。この目的のもと、プロジェクト全体の趣旨や構成、ならびに各地域で展開されている個別プロジェクトの取組概要を体系的に整理し、これらを説明するウェブページを新たに開設した。

今後は、各プロジェクトの進捗状況や成果について、適宜情報を更新・発信することで、継続的な情報共有および学内外への可視化を図っていく予定である。



デザイン工学部特設サイト内に開設されたページ
<https://renew-sit-eng-design.jp/other-activity/cocdesign>

■ DNPプラザにて展示イベントを開催

市ヶ谷に所在するDNPプラザにおいて、三重県紀北町の魅力を発信することを目的とした展示を開催した。本展示では、内装デザイン、ジオラマ、パネル、映像コンテンツ等を用いて地域の特性や魅力を多角的に紹介しており、その企画・制作・実施には修士課程および学部課程の複数の学生が参画した。

また、本取組の様子は本学のニュース記事としても取り上げられ、学内外への情報発信にも寄与した。特に、研究室配属前の学部3年生が自主的に本プロジェクトへ参画したことにより、地域連携活動が学年を越えて継続・接続される契機となり、教育的波及効果の観点からも意義のある取組となった。



展示会場の様子

■ 地域協働イベントを開催

11月1日から3日にかけて、山口県岩国市のイロハープにおいて、「いろはに本と。」と題した地域連携イベントを開催した。本イベントでは、マルシェの開催をはじめ、地元の保育士による絵本の読み聞かせ会、地元の中高生によるビブリオバトル、ならびにおすすめ選書コーナーの展示など、多様な企画が実施された。本イベントは、地域住民に加え、本学のほか山口大学も参画するなど、複数の主体による協働体制のもとで実施された。本学学生は主としてイベント現場のマネジメントを担う役割として参画するとともに、研究活動の一環として、地域連携イベントにおける運営上の課題を抽出するための観察・記録を行った。



絵本の読み聞かせ会の様子

■ 旅館内展示がスタート

10月に、学生が主体となって制作した「平野屋の沁み方マップ」および「平野屋いきもの図鑑」を平野屋館内に設置した。本取組は、平野屋を地域連携拠点として位置づけていくにあたり、館内における総合的なサイン計画および展示計画の構築に向けた第一段階の試行として実施したものである。

本試行の結果、来館者からの反応も良好であったことから、現在は館内全体のサイン計画をはじめ、メディテーションルームの空間デザインや動線・誘導計画へと展開しつつ、地域との関係性を可視化することを目的としたサイン計画および展示企画が本格的に始動している。



平野屋内に設置された「平野屋の沁み方マップ」

「館山市における『地域に住民続けるDIY支援サービス』の開発」プロジェクト

代表者	山代 悟【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	水谷 晃啓【准教授】(システム理工学部 環境システム学科) 岡野 道子【准教授】(建築学部 建築学科) 細川すず／塚田響／小野田朋葉(理工学研究科 建築学専攻)／上田妃奈乃／市原帆香／成岡桜／尾幡修平／大谷華／大澤弥央／大巻里桜／椎名果那美(建築学部 建築学科)／小林瑳和貴／伏江玲／相原陸人／大越久毅／鈴木悠途／寺田圭佑／海野開(システム理工学部環境システム学科)

■プロジェクトの概要

本プロジェクトは、令和元年台風被害を受けた千葉県館山市富崎地区にて、学生と地域が協働し「終わらない復興」を実践する活動である。2023年度は、地域に長年愛されてきた旅館跡地を、その歴史を継承しながらキャンプ場として再生。予算制約の中、旅館オーナーが持つ熟練の技能を最大限に活用した用途計画により、地域の拠点を復活させた。今年度は、移住促進や福祉対応改修を支える「DIY支援拠点」の設置運営体制を構築した。台風被害を逃れた旅館一角に木材加工機ShopBotを導入し、デジタルファブリケーション技術を実装した拠点を整備。ハード・ソフト両面の課題を抽出することで、空き家活用に資する持続可能なビジネスモデルの構築と地域課題の解決を目指す。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】地域社会との協働を通じた実践的な設計・施工の習得

令和元年の台風被害以来、継続的に関わらせていただいている館山市富崎地区の皆様との交流を軸に進めてきた。5月の助成決定後、富崎館オーナーの多大なるご協力により広間への「ShopBot」設置が実現し、拠点の立ち上げから運用までの実務に携わった。12月に実施したワークショップでは、地域の景観や歴史を汲み取った「富崎におく椅子」の製作を通じ、デジタル技術を具体的な形にするプロセスを共有した。図面上での検討に留まらず、実際に現地の様子を感じながら設計を行い、さらに地域の方々から直接フィードバックをいただく過程は、本プロジェクトが次の段階へ進むための大きな一歩となった。



12月WSにてグループ発表の様子

【研究】地域に開かれたデジタル加工拠点の運用モデルと可能性の検証

研究面では、住民の方々がこれからも住民続けるための基盤となる「DIY支援拠点」の在り方を模索した。地域に愛されてきた場所である富崎館の空間にデジタル技術を導入することで、単なる加工場に留まらない、地域に開かれたコミュニティスペースとしての役割を持たせることを期待した試みである。本年度は、機材を実際に稼働させる中で生じる運用上の課題について議論を重ねた。現在は今後は地元の建築関係者の方々が主体となって拠点を活用できる仕組みの構築を検討している。この地域におけるデジタル技術の活用が、新たな交流を生み出し、地域活性化に寄与する可能性について、持続可能な運営体制の観点から研究を進めている。



製作した「富崎におく椅子」

【社会貢献】技術交流を通じたコミュニティの維持と活性化

12月のワークショップでは、地域住民や富崎館オーナーに加え、地元の建築関係者を交えた技術交流の場を設けた。学生が製作した椅子をお披露目するとともに、建築関係者が将来的なユーザーとして拠点を活用するための具体的な議論を行い、デジタル技術が地域の「住民続けるための道具」になり得ることを提示した。この活動は、地域に愛されてきた場所を、未来を支える多機能な交流拠点へとアップデートさせる一助となっている。今後は館山市役所や地元専門学校とも協力し、地元の建築従事者や地域おこし協力隊が主体となって、住民が自ら住環境を整えていける公的な支援体制の構築を目指す。地域愛着をもつ人口を維持し、その土地らしい暮らしが続く仕組みづくりに寄与したい。



製作中のSHOPBOTの様子

主なトピックス

■12月ワークショップ「富崎におく椅子」の展開プロセス

本年度は、数ヶ月にわたる準備期間を経て、デジタル技術を地域に実装する2泊3日の集中ワークショップ(WS)を実践した。

・準備期間：地域理解と技術基盤の整備(7月～11月)

7月のまち歩きを通じた地域理解を深めると同時に、富崎館へのShopBot設置、事前講習、WSの段取りなど、デジタル加工を地域で運用するための環境整備と入念な準備を行った。

・WS初日：デザインワークとモックアップ製作

4グループに分かれ、地域の文脈を反映した椅子のデザインを検討。レーザーカッターで1/4模型(モックアップ)を作成し、プレゼンテーションを通じて構造と意匠の精査を行った。

・WS2日目：ShopBotによる原寸大製作と公開加工

前日の検証を基に、ShopBotを用いて実寸大の切り出し・組み立てを実施。地元の建築関係者や地域おこし協力隊の方々に実際の製作風景を公開し、デジタル加工機が地域でどのように活用できるかの具体的なイメージを共有した。

・WS3日目：公開プレゼンテーションと成果共有

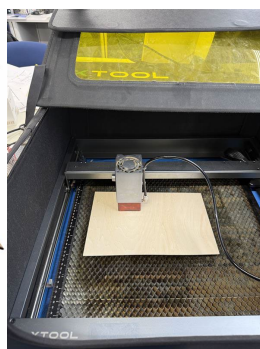
完成した椅子を披露する公開プレゼンテーションを開催しました。地域住民の方々にプロダクトを紹介し、座り心地を体感してもらうことで、今後の拠点活用の可能性を広く発信する貴重な場となった。



7月まち歩きの様子



モックアップ



レーザーカッター製作時



プレゼンテーションの様子

■地域主導のコミュニティ拠点へ

今後は学生主導から「地元の担い手」が主体となる運営体制への移行を目指します。富崎館を単なる工房ではなく、技術と人が交差するコミュニティの核として機能させていく。

地元の建築関係者による実務への導入

地元の建築従事者が、現場での実測に基づいた補修パーツの切り出しや治具製作にShopBotを活用する体制を整えます。手加工では困難だった高度な微調整を地域内で完結させることで、迅速かつ質の高い住環境整備を可能にする。

地域おこし協力隊との連携による運営の自律化

地域おこし協力隊が拠点の管理やワークショップの運営の担い手として、学生が不在の期間でも日常的に機材が稼働する仕組みを構築します。地元の担い手が「講師側」に回ることで、持続的な活用を目指す。

住民が「住み続ける」ための相談・実践窓口

富崎館を、住民が自宅の「直したい」「変えたい」という想いをもち込めるオープンな拠点として開放します。現地の寸法に合わせたオーダーメイドのDIY支援を通じて、住民自らが住まいの維持管理に主体的に関わる「共助」の関係を構築する。

持続可能なビジネスモデルの構築

機材の維持管理費を賄うための利用ルールや、地元建築関係者との協業による収益モデルを検討します。デジタルファブリケーションをきっかけに地域の仕事づくりを支援し、若者の定住や移住促進にも寄与する持続可能な仕組みを確立する。

「江東内部河川・運河の活用とコミュニティ強化」プロジェクト

代表者	志村秀明【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	原田真宏、桑田仁、佐藤宏亮、前田英寿、本多久美子(建築学部 建築学科)／岩倉成志(工学部 土木工学科)

■プロジェクトの概要

東京湾岸地域の社会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する。本学のブランド向上にも貢献する。講義科目から演習科目、ゼミナール科目や卒業研究までを相互に連携させることで、教育・研究・社会貢献の質を高める。単なる教育や研究に終わらず、まちづくりに関わる地域の人材を育成することで、教育・研究・社会貢献の新たな展開を狙う。「豊洲地区運河ルネサンス協議会」や「せんなんまち結い会」といった地域のまちづくり組織と連携することで、最先端で自律的なイノベーション創出・人材育成拠点を形成する。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【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だ。建築学科では、「都市地域計画」や「地域設計論」で地域課題を理解し、「プロジェクトゼミ」や「空間地域デザイン演習」で江東区や中央区の地域課題の解決に取り組んだ。また大学院では、「まちづくり特論」「都市計画総論」「Urban and Community Design」で地域課題を理解し、「建築学演習・都市地域デザイン」で地域課題の解決に取り組んだ。

特に「プロジェクトゼミ」では、江東区千田の美術館通りで、地元のまちづくり組織と連携してシャッターアートなどを制作した。

【研究】

アクション・リサーチの手法にもとづき、卒業研究として、中央区佃・月島の地域雑誌に関する研究、豊洲スマートシティプロジェクトに関する研究、江東区猿江の同潤会アパートの公共ストックの継承に関する研究が取り組まれた。

また日本建築学会では、月島もんじゃストリートのテーマパーク化に関する研究、江東区北砂の空地通り抜け社会実験、画像生成AIを用いる将来イメージの検討方法に関する3本の研究が発表された。また日本都市計画学会では、豊洲運河クルーズに関するものなど2本の研究が発表された。さらに国際会議では、佃・月島に関する研究が発表された。

【社会貢献】

江東区豊洲では、「豊洲水彩まつり」を6月に開催し、学生たちはその企画補助とスタッフを務めた。特にその中の「運河クルーズ」では、東京湾岸地域の地歴について学修した上で、船上からの風景について分かりやすく、また楽しくガイドを行い大好評だった。

江東区千田では、11月に開催されたまちづくりイベント「せんなんまち結いマルシェ」の中で、「こどもみちおえかき」を開催して大盛況だった。

また福島県南会津町館岩地区では、10月に開催された集落再生活動「たのせふるさとまつり」などを11名の学生が支援するとともに、地域おこし協力隊を経た移住者に対するヒアリング調査も実施した。



豊洲水彩まつりでの運河クルーズ：学生たちの元気で楽しいガイドは大好評だった。



建築学演習・都市地域デザインの最終発表会：地元まちづくり協議会の会長や江東区、コンサルタントも参加した。



たのせふるさとまつり：学生たちは、イベントの準備や地元特産品の販売などをサポートした。

主なトピックス

プロジェクトゼミ 近隣商店街の再生デザイン

シャッターアートの制作

地下鉄8号線新駅開業を見越して、地元のまちづくりの機運を高めたいという地元町会会長の要請で制作した。町会長と話し合った結果、地元のお祭りの様子を描くことになった。下絵の制作から実際のシャッターアートの制作までを、2025年9月～11月にかけて11名の学生たちが取り組んだ。

シャッターにペンキで絵を描くことは皆はじめてであり、試行錯誤しながら見事に完成させた。



シャッターアートの制作風景: 下絵をもとに、シャッターに鉛筆で下書きし、ペンキで描いていった。脚立などは、地元町会長から貸して頂いた。店舗の方からご飯やお菓子、お茶などの差し入れを頂き、そのような地元の方々との交流が学生たちにとって良い経験となった。



シャッターアートのお披露目式: 2025年11月30日に開催された「せんなんまち結いマルシェ」で、完成したシャッターアートのお披露目式が行われ、大久保朋果江東区長(写真中央)にも見て頂いた。地元ケーブルテレビでも紹介され、学生たちがインタビューに答えた。

こどもみちおえかき:

2025年11月30日に開催された「せんなんまち結いマルシェ」を支援する企画の一つとして開催した。学生たちは、中央区月島で開催された過去の記録を参照して企画・準備を進め、地元の方々とも打ち合わせをして実施にこぎつけた。

「こどもみちおえかき」は、チョークで道路に自由に絵を描くという、かつてはどのまちでも普通に見られた子どもの遊びを復活させるものである。



こどもみちおえかきの様子: 子どもだけで150名の参加と大盛況で、道路は子どもたちの絵で埋め尽くされた。学生たちは受付も行ったが、あまりの来場者の多さに大忙しだった。また学生たちには、子どもや親子との交流が良い経験となった。



こどもみちおえかきでの記念撮影: 視察に来られた大久保朋果江東区長と子どもたち、学生との記念撮影。学生たちにとっても良い思い出となった。この後、子どもたちが大挙して訪れ、学生たちは大忙ししながらも、このイベントを楽しんだ。

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

建築学科SAコース3年生「空間地域デザイン演習」は、課題テーマを「地域資源の解説、地域資源を活用するコミュニティ・デザイン」、対象地区を「佃・月島」として開講した。留学生3名を含む24名の履修者が5つのグループに分かれて、「定量的視点から見る月島・佃の再生」「地元から愛される商店街へ」「商店街事務所のリノベーション」「月島飲食店リノベーション・ガイドライン」「鉢植えがつくる『おすそ分け』の景色」の提案制作に取り組んだ。

学生たちは、初回にフィールドワークを行い築100年を超える佃島旧飯田家住宅の保存・活用の取り組みなどを見学した。

最終回では、地元でまちづくり活動に取り組む市民2名をゲスト講評者としてお招きして、学生の提案についてコメントを頂いた。学生たちは学内の教員からの評価にとどまらず、実際の課題対象地区の市民から講評を得るという貴重な経験ができたことで、単なる演習以上の学修効果を得ることができた。



「鉢植えがつくる『おすそ分け』の景色」グループは、要求された成果物の図面に加えて、提案を手にとって多くの市民に見てもらいたいとのことからA5サイズの冊子『地域緑化ガイドブック』を制作した。地元市民の好評を得た。



上: 授業最終回では、課題対象地区の市民2名をゲスト講評者としてお招きした。

左: 『地域緑化ガイドブック』の1ページ。佃・月島らしい鉢植えがいくつかのタイプに整理されて、イラストで表現されている。

「豊洲四丁目団地における安全・安心なコミュニティ形成」プロジェクト

代表者	小菅瑠香【教授】(建築学部 建築学科)、山本創太【教授】(デザイン工学部 デザイン工学科)
構成員	中田新(理工学研究科 建築学専攻 修士2年)／森内帆香(建築学部 建築学科 4年)／ 細川誉(デザイン工学部 デザイン工学科 4年)／山岸奎祐(デザイン工学部 デザイン工学科 4年)

■プロジェクトの概要

本プロジェクトは、芝浦工業大学とUR都市機構の包括連携協定に基づき、2023年度から豊洲四丁目団地を対象に住民の孤立問題の解消とコミュニティ活性化を目指して行われているものである。

2025年度は建築学とデザイン工学の合同研究として、現地調査で得たデータをもとに3Dプリンターで住戸模型を制作し、理想のインテリアを協働で配置する「住みこなしデザイン教室」を、団地および近隣の居住者向けに全3回開催した。イベントを通して楽しい時間を共有するだけでなく、参加者が個人作業からグループ作業へと移行する中で発生する会話や関係構築の過程を記録・分析することで、多世代間交流を促進する環境構築の手法を模索し、中長期的なコミュニティ形成支援に向けた実践的な基礎知見を得た。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

【教育】

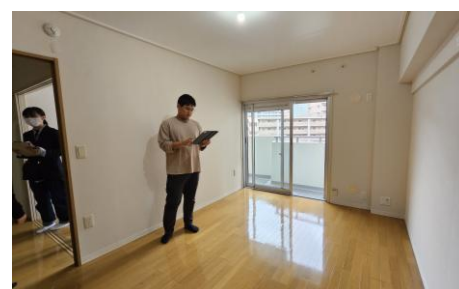
建築計画学(小菅瑠香研究室)とデザイン工学(山本創太研究室)の合同プロジェクトとして、学生が実社会の課題に主体的に取り組むPBL(課題解決型学習)を実践した。現地調査に基づく3D住戸モデリング技術の習得や、コミュニティ活性化の成功事例(カフェ06)での運営方式ヒアリング調査を通じ、地域特性の理解を深めた。また、UR都市機構との度重なる研究計画打合せや振り返りミーティングに参加することで、ステークホルダーとの協働プロセスを経験した。これらの活動成果は、参加学生の卒業研究や修士論文に組み込まれており、実践的な課題解決能力とコミュニケーション能力の向上に大きく寄与した。



【写真1】豊洲四丁目団地

【研究】

都市部の高経年団地において希薄化しがちな住民コミュニケーションの発生要因と形成プロセスについて、実践的なデータを得ることができた。集会室で開催した「住みこなしデザイン教室」において、参加者が団地住戸模型に「夢のインテリア」を配置するワークショップを実施した。個人作業からグループ作業への段階的な移行プロセスにおいて、団地模型というツールが媒介となって初対面同士の会話がどのように成立し、親交が深まっていくかを連続的に記録・分析した。まだ3回分と収集データ量は少ないが、これにより、世代を超えたコミュニケーションを自然に誘発する環境構築のための基礎的な知見を収集することができた。



【写真2】住戸実測調査

【社会貢献】

前述の通り、UR都市機構との連携体制のもと、実際の団地集会室を舞台に「住みこなしデザイン教室」を全3回開催し、性別や年齢を問わず近隣住民が交流できる場を直接的に提供した。インテリア配置のみでなく、教員による住宅に関する講義や、モバイル・フロアランプ等のインテリア小物を作成する体験型ワークショップを交えることで、住民の住環境に対する関心の向上に寄与した。さらに、一連のワークショップを通じて得られた成果や住民の声をまとめたポスターを作成し、団地内に掲示することで、ワークショップに参加していない住民に対しても、住環境への関心の向上や体験型ワークショップへの興味を喚起することができた。



【写真3】住みこなしワークショップ

主なトピックス

■「カフェ06」の事例ヒアリング調査

7月8日、プロジェクトメンバーは大島六丁目団地の「カフェ06(ゼロロク)」でヒアリング調査を実施した。カフェ06はシニア世代の多い地域において、みんなが気軽に立ち寄れる居場所づくりを目指して、自治体がきっかけを作って団地内で運営されるようになったカフェである。



【写真4】カフェ06のヒアリング



【写真5】カフェ06の運営風景

■住みこなしデザイン教室 - 団地をミニチュア空間で知ろう！

住みこなしデザイン教室
- 団地をミニチュア空間で知ろう！ -

参加費無料！

いつもの部屋が、もっと好きになる。

一緒に部屋の模型を作り、皆で「理想の住みこなし方」を探して見ませんか？

イベント概要		
＜場所＞ UR豊洲団地目黒地4号棟集会所	＜参加対象＞ 小学生から高齢の方まで、どなたでも！ 豊洲団地目黒地外にお住まいの方もご参加いただけます！	
＜開催日時＞ 11月26日 日曜日 10:00～11:30	11月08日 土曜日 14:00～15:30	11月16日 日曜日 10:00～11:30
(1) 住居の暮らしについてのお話 (2) 団地模型製作 (3) ヒンメル (4) モビール製作	(1) 住居内の暮らしについてのお話 (2) みんなの住みこなし紹介 (3) ランプ製作	(1) 理想のインテリアの模型製作 (2) 生活小話 And more...

ヒンメル(モビール) 説明書付きのキットです！
ランプ(シェード) 説明書付きのキットです！



【写真8】ワークショップポスターと作業風景

各回約2時間、全3回開催した「住みこなしデザイン教室」には、毎回5～15名程度の団地内外の住民が参加した。

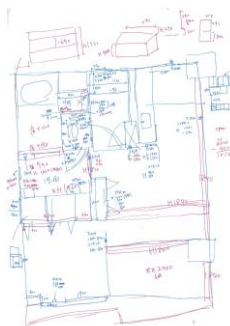
当初は知らない人ばかりで黙々と自分の作業に取り組む参加者も見受けられたが、住戸内のレイアウトワークが進んでくると、状況に変化が見られた。

住戸模型の間取りが現在の自宅と似通っているせいか、参加者は家具を配置するうちに自身の生活や家族との思い出をファシリテーターの学生に自然と語り始め、それを契機に同席する参加者間へと会話の輪が広がっていく様子が観察された。またこのようなコミュニケーションにより、「前回が面白かったから」と再参加する、いわゆるリピーターもみられた。子どもの参加者からは「魚が好きなので水槽を見ながら寝たい」といった夢あふれる作品が生まれ、模型づくりを通して多世代が和やかに交流する有意義な場となった。

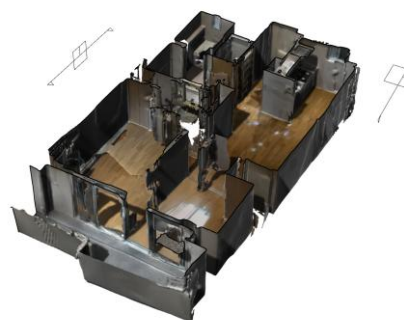
■ 団地住戸の実測調査

UR都市機構の案内のもと、学生たちは実際の団地住戸を複数訪問し、内部の実測および3Dスキャンによる現地調査を実施した。調査には専用のアプリケーションを用いたが、初めて操作する学生も多く、専門的機材を用いた実践的な技術習得の場となった。

さらに、収集したデータをもとに大学内の3Dプリンターを活用して、1/25スケールの住戸模型を制作した。この一連のプロセスを通じて、学生たちは実際の居住空間の現状を正確に把握し、取得した情報をデジタルデータとして整理・出力・活用する手法を実践的に修得することができた。



【写真6】実測の野帳



【写真7】フォトグラメトリを用いた計測

■ コミュニケーション発生要因の分析

今年度は全3回の開催だったため、コミュニケーション発生要因の分析としては推測の域を出ないが、本イベントが会話の促進に効果的だった理由としては、現在のところ、以下のようなことが考えられる。

- ・「住みこなし」という共通のテーマが与えられている
- ・手作業に集中しながらの会話なので気軽である
- ・同じ作業をすることで共感性が発生している
- ・住戸模型が慣れ親しんだ間取りなので、そこから回想されて自分の生活について語りやすい
- ・同じ状況で他者がどう住みこなしているか関心があるため、人の話に耳を傾けやすい
- ・多世代が集まっているため、作業が苦手な人への手助けの会話が発生する 等

本プロジェクトは次年度も継続していく予定であり、今後はサンプル数を増やして定量的な分析を試みる。



【写真9】共同作業の距離感



【写真10】夢のインテリア作品事例

「農業小屋の改修と活用ー栃木県益子町における農業景観の維持とアグリツーリズムへの展望ー」プロジェクト

代表者	小埸芳秀【教授】(建築学部 建築学科)
構成員	池田大佳(理工学研究科 建築学専攻)／藤岡克典(理工学研究科 建築学専攻)／堀川佳子(理工学研究科 建築学専攻)／呉田祐哉(理工学研究科 建築学専攻)

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

解体前



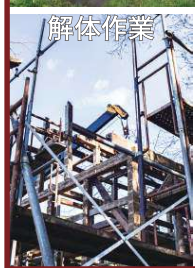
解体後



「解体から解剖へ」

小埸研究室は2021年度より栃木県益子町の景観計画に参画し、アグリツーリズムの推進とコミュニティ活性化に取り組んでいる。今年度実施した「タバコ乾燥小屋解体プロジェクト」は、単なる建物の撤去ではない。図面や口伝といった記録が少ないため、実物を解体しながら調査・保存・考察を進める「建築の解剖」として実践した。さらに、この活動を通じて研究室を中心とする関係人口は着実に拡大し、多様な属性を持つ人々との協働が、次なる展開と新たな思索を生む強固な基盤となった。

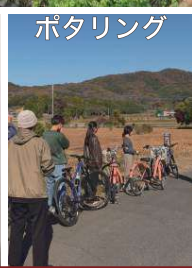
解体作業



OC 展示



ポタリング



職人視察会



意見交換会

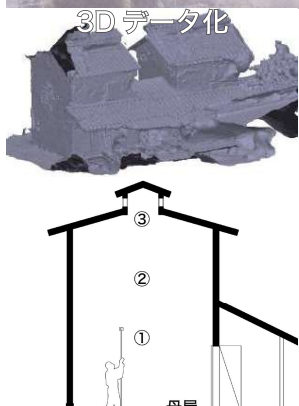


材料実験



タバコ乾燥小屋解体調査・手法

3D データ化



③
②
①
母屋

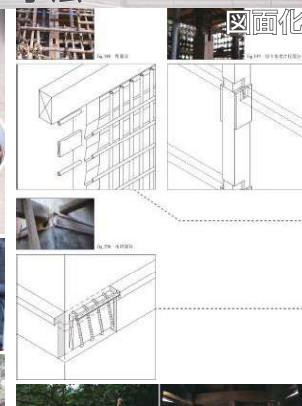
ナンバリング



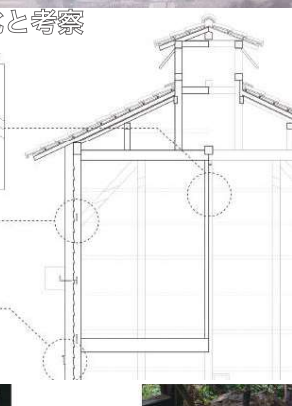
保存転用



図面化と考察



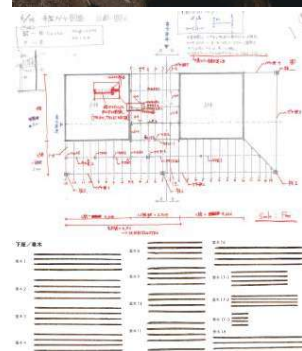
作業道上の各種作業詳細



QRコード



作業道の各種作業詳細



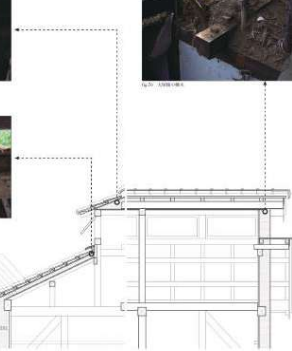
土研りから調査



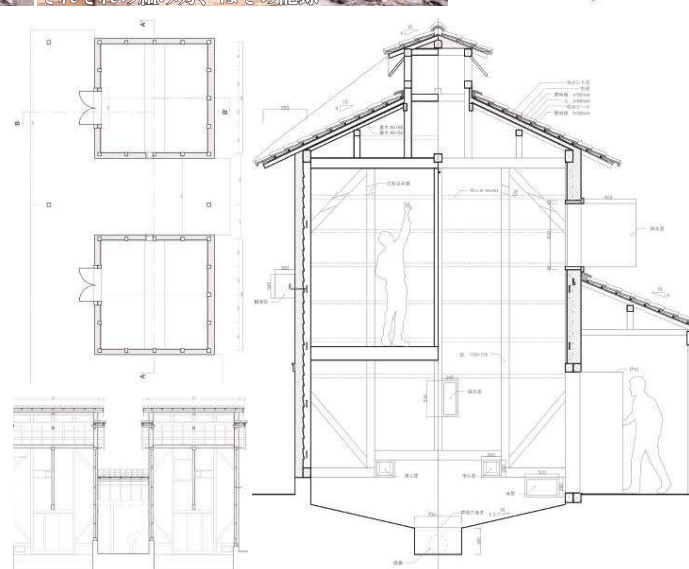
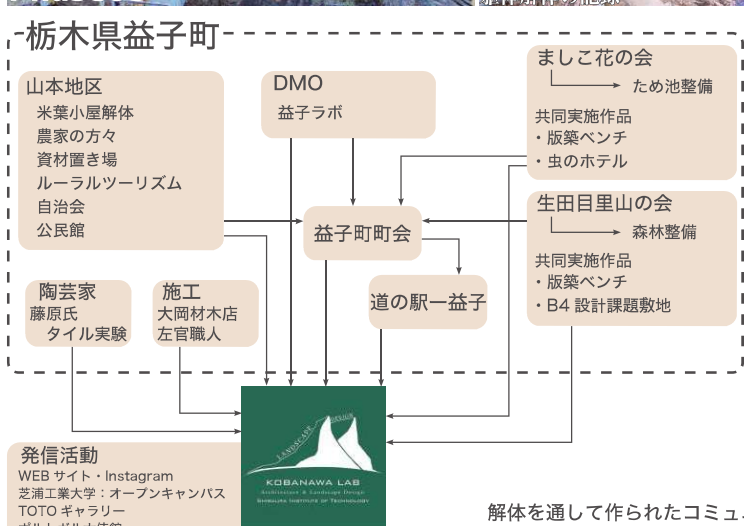
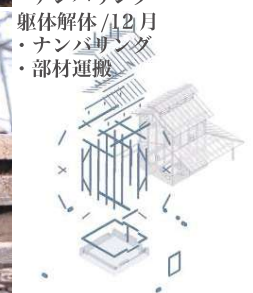
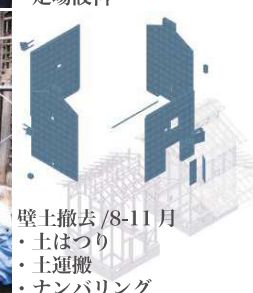
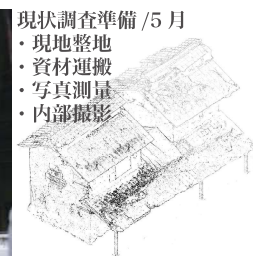
建築の実験場



部材記録場



Project Process



「豊洲スマートシティ事業の産学官民連携による推進」プロジェクト

代表者	古瀬利博(複合領域産学官民連携推進本部 副本部長)
構成員	志村 秀明(建築学部 建築学科 教授)／ 廣瀬 敏也(工学部 機械工学課程先進機械コース 教授)／新熊 亮一(工学部 情報・通信工学課程情報工学コース 教授)／ 楽 奕平(工学部 土木工学課程都市・環境コース 教授)／ 市川 学(システム理工学部 環境システム学科 教授)／ 益子 宗(デザイン工学部 デザイン工学科 教授)／ 小菅 瑠香(建築学部 建築学科 教授)／ 山代 悟(建築学部 建築学科 教授)／ 高島 もも(産学官連携コーディネーター)／ 三浦 一彦(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プロジェクトは、2019年に民間企業の協議会、東京都・江東区・本学と連携した連絡会を組成し発足。2023年度からは「一般社団法人豊洲スマートシティ推進協議会(TSC)」(本学は学術会員)、東京都や江東区を含む「豊洲スマートシティ連絡会」で国や都の事業に採択され活動し、豊洲地域を最先端技術を活用した最先端のまちを目指す。本学は豊洲地域の理工系大学として、研究ポテンシャルを活用した地域貢献、本学のブランド向上に資する極めて重要な産学官民連携事業プロジェクトである。TSCは(会員企業[順不同]:清水建設・IH・東京ガス不動産・NTTデータ・東京地下鉄・三菱地所・TIS・日本総研・三井不動産・NEC・三井住友フィナンシャル・グループ11社)、学術会員(芝浦工業大学)、連絡会(東京都、江東区)等で推進している。

■地域志向(COC)活動助成プロジェクトの成果

TSCとしての主な活動は、本学が主管である学術研究WGの一環として、「本学活動報告会」を9月に実施し、各教員プロジェクトと豊洲スマートシティ連絡会・推進協議会との意見交換を行った。TSCで採択された国土交通省「令和7年度スマートシティ実装化支援事業」の「地域オープンスペース活用促進プラットフォームプロジェクト」においては、本学の本プロジェクト教員の中から2研究室が参画した。また、江東区とTSCの間で締結している防災支援協定の下、防災連絡会議や推進協議会の防災WGに参加している。2025年度の学内メンバー研究活動については、以下のプロジェクトが実施され、上記のとおり、国交省採択事業「地域オープンスペース活用促進プラットフォームPJ」への参画も含まれる。今年度オープンした豊洲セイルパークでの実証実験に向けた調整も開始された。

PJ-1	「地元まちづくり組織と連動する賑わい創出のプラットフォーム整備に関する研究」	志村 秀明
PJ-2	「モビリティのためのデジタルツイン基盤」	廣瀬敏也・新熊 亮一
PJ-3	「地下鉄8号線延伸に伴う江東区の交通需要構造の変化」	楽 奕平
PJ-4	「タンジブルインタフェースを活用したSocietal Prototype Design 手法の豊洲への適応」	市川 学
PJ-5	「デジタルサイネージを通じた都市生活者の行動喚起に関する研究」	益子 宗
PJ-6	「生成AIやXR活用による地域ワークショップ」	山代 悟

【教育】

PJ-1では院生・学部生13名で船カフェ・サンセットクルーズを企画・開催。自ら運営し効果を実感する貴重な機会となった。PJ-2ではパーソナルモビリティ車両(PMV)にインフラからの情報を得て走行可能な自動運転の機能を実装、実験を通じてシステム構築とその課題を理解した。PJ-3では学生が実データ分析、アンケート設計、需要予測モデル構築を学んだ。PJ-4ではタンジブルな都市計画シミュレーション実現に向け、ハードとソフトおよびVRの融合プログラムの探究を行なった。PJ-5では360度撮影・3D再構成・VR実装を通じて、XR技術を活用した都市空間可視化の実践的教育を実施した。PJ-6では公共空間への主体的な関わりを促し、シビックプライドを醸成する実践的教育モデルを構築した。

【研究】

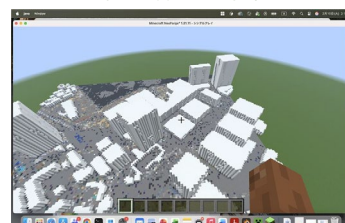
PJ-1では豊洲スマートシティのオープンスペース活用ワークショップを通じて、地域関係者がスマート技術を身近に感じるための方法を提示することができた。PJ-2では充電設備がある駐車スペースまで戻ったPMVが駐車スペースを認識し、自動で駐車を完了するシステムの実証実験を行った。PJ-3では顕示選好(RP)と表明選好(SP)を統合した需要予測モデルを構築し、地下鉄延伸とシェアモビリティの連携効果を推定した。PJ-4では住民参加型の都市計画シミュレーション&タンジブルを達成するために、世界的な都市計画シミュレーションの傾向を探った。PJ-5では都市歩行空間の三次元モデルと没入型ウォークスルー環境を整備し、情報提示手法の影響評価に向けた基礎的検証基盤を確立した。PJ-6では産学連携で都市の隙間に潜在する価値を顕在化させ、新たな設計手法の研究に貢献した。

【社会貢献】

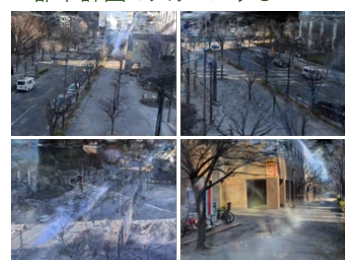
PJ-1では豊洲の資源である運河と水辺の魅力を、多くの地元関係者の方々に再認識して頂けた。オープンスペース活用ワークショップによって、地域関係者がスマート技術に触れる機会をつくることができた。PJ-2ではPMVが手動運転にて目的地まで到着した後に駐車スペースまで自動で戻るシステムの検証を行い、移動支援と利便性の高いサービスの提供に取り組んだ。PJ-3では地下鉄八号線(豊洲～住吉間)延伸を見据え、シェアモビリティ導入が鉄道利用や地域内移動に与える影響を定量的に分析。PJ-4では住民参加型の都市計画シミュレーションを実施すべく小学生を対象とした探究の機会を設けた。PJ-5では実空間を再現したVRシミュレーション基盤を構築し、都市情報提示施策を現地設置前に検証可能な環境を整備した。PJ-6では廃材利用や住民参加型の運営を通じ、空間を与えられる場から住民が使いこなす場へ変容させ、地域活性に寄与した。



PJ-1:豊洲スマートシティ・オープンスペース活用WS:学生達がスタッフや参加者として参画



PJ-4:豊洲をMinecraftで再現都市計画の入り口にする



PJ-5:3Dガウシアン・スプラッティングによる都市空間の三次元再構成結果

主なトピックス

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

豊洲船カフェ&サンセットクルーズ

2025年10月17日(金)12:00～16:30 豊洲運河船着場で船カフェを開催した。来場者は、係留されているエスエス3世号の船内と屋上デッキでくつろいだ。飲み物は、SIT Global Caféと連携して、コーヒーと紅茶を販売した。天候に恵まれたこともあり、子供も43名を含む約190名の来場者が非日常的な時間を楽しんだ。

同日17:30～はサンセットクルーズを開催した。船カフェで使ったエスエス3世号で、豊洲を一周するコースを周り、40名の乗船者が、学生のガイドを聞きながら東京港と豊洲の夜景を楽しんだ。



上2枚 豊洲船カフェ: 本学脇にある船着場が憩いの場となった。TBSのテレビ番組でも紹介された。

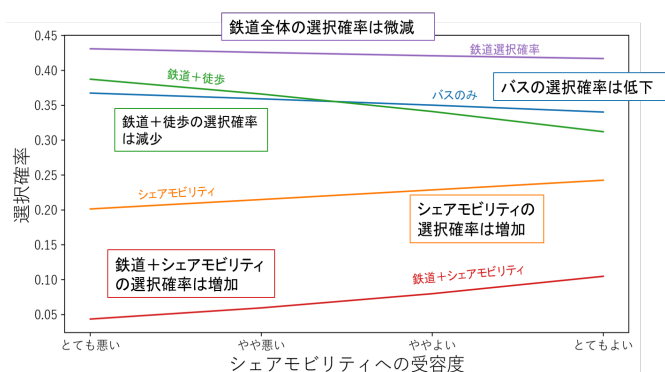
左 サンセットクルーズ: 多くの人々が夕焼けの中、美しい夜景を楽しんだ。



PJ-3 地下鉄8号線延伸に伴う江東区の交通需要構造の変化 楽 奕平

江東区・墨田区周辺では、バスの減便が顕著な一方で、シェアリングサービスのポート数は急激に増加しており、既存の二次交通を補完・代替する勢力となっている。

2030年代に地下鉄8号線延伸(豊洲～住吉間)が予定されており、延伸に伴う交通需要構造の変化を解明するため、実際の移動データとアンケート調査を組み合わせ、駅までの移動手段が変わることで鉄道利用や地域内の移動がどのように変化するかを推定した。シェアモビリティを利用しやすい環境の整備が、鉄道利用の維持と地域の回遊性向上に寄与する可能性が示された。



【シェアモビリティの普及による交通機関選択率の変化】

PJ-2 「モビリティのためのデジタルツイン基盤」 新熊 亮一・廣瀬 敏也

豊洲エリアにて移動支援として、パーソナルモビリティ車両(PMV)の自動運転に関する研究開発を行った。研究開発では、外部のインフラセンサを設置して、通信により情報を取得してPMVが自動運転を行うシステムを対象とした。

研究では、まず駐車スペースからPMVを手動で運転し、自動走行のためのマップを構築する。目的地まで手動にて運転した後は、PMVが無人で走行し、充電設備がある駐車スペースまで自動運転により戻り、駐車スペースを認識し、自動で駐車を完了する。実証実験では、仮想の駐車スペースをキャンパス内に想定し、システムの実証実験を実施した。

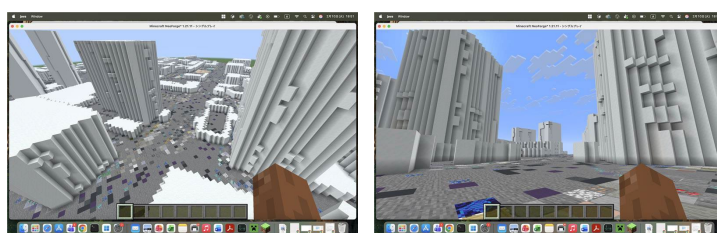


自動駐車システムに関する実証実験 (芝浦工業大学豊洲キャンパス)

PJ-4 タンジブルインタフェースを活用したSocietal Prototype Design 手法の豊洲への適応 市川 学

D2J(Digital Twin Japan)シミュレータを都市計画へ応用することを目的に、2025年度は子どもから大人までが都市を主体的に考えられるタンジブルな環境の構築に取り組んだ。小中高生向けには対象地域をMinecraft上に再現し、土地利用や施設配置を自由に試行できる仕組みを整備し、遊びを通じて都市構造や防災との関係を体験的に理解できる環境を構築した。

さらに、高校生以上を対象にVRによる没入型都市体験環境を整備し、空間変化を身体感覚で評価できる基盤を形成した。また、タンジブル操作とD2Jシミュレーションを接続し、配置変更が人口や交通、防災へ与える影響を即時可視化できる仕組みを構築した。これにより、構想と評価を循環的に行う都市共創環境の基礎を整えた。



【豊洲Minecraftの世界】

主なピックアップ

PJ-5 都市空間における情報提示手法が歩行者の行動意図・体験に与える影響の検証 益子 宗

本年度は、都市空間における情報提示手法が歩行者の行動意図や体験に与える影響を検証するための基盤整備を目的とし、没入型VRシミュレーション環境の構築に取り組んだ。

市街地における歩行空間を対象に、360度カメラで取得した映像を用いて三次元都市空間を3次元ガウシアンスプラッティング技術を活用することで再構成し、歩行者視点で移動可能なVRウォークスルー環境を実装した。これにより、デジタルサイネージやAR表示などの情報提示手法を仮想的に配置・検討可能な環境を整備し、現地実験に先立つ事前検証の基礎的条件を整えた。



【360度映像を用いて再構成した都市空間の3Dウォークスルー表示例】

PJ-6 生成AIやXR活用による地域ワークショップ 山代 悟

形骸化した公共空間に家具スケールの介入を行い、豊洲ぐるり公園に新たな価値を創出することを目的とする。

川に対して垂直方向のベンチやテーブルを配置。従来の使い方を超えた対面での対話やPC作業等、多様な滞在を許容するサードプレイスを実現した。当日は折り紙ワークショップを開催し、制作物を単管パイプの什器に飾ることで、住民自らが空間を彩る体験を提供した。これらの試みにより、橋下空間を自分達の場所とする愛着を育み、地域コミュニティを活性化させる実践的な空間運用を提案している。現在は、来年度以降に向け、VRやSNSアンケートを活用したデザインプロセスの構築を清水建設と協議を重ねている。



【素通りされていた橋げた空間に滞留を生み出す】



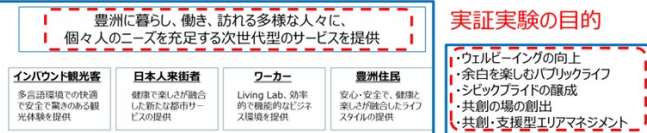
【折り紙により彩られた簾とワークショップ当日の様子】

豊洲スマートシティ実行計画（豊洲スマートシティ連絡会）

〇住民やワー、来街者など多様なステークホルダーが存在し、成長途上にある豊洲エリアにおいて、先進的技術と都市OS活用により様々な分野でサービス・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」を実現する。



■本事業全体の概要

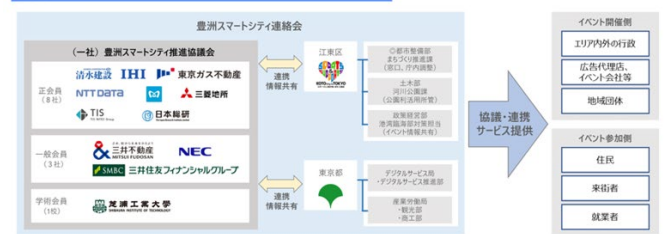


■区域の目標・ビジョン

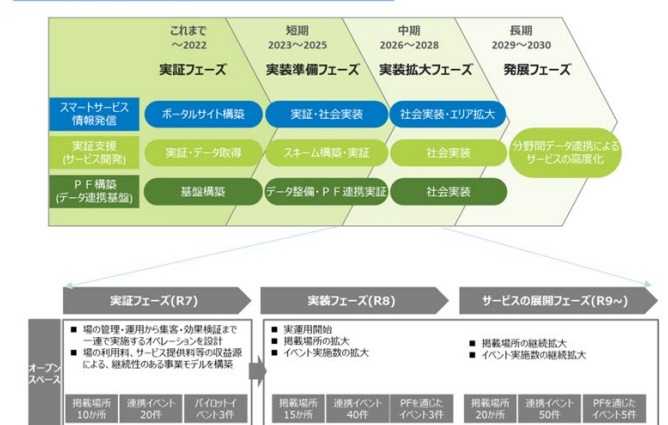


豊洲スマートシティ実行計画（豊洲スマートシティ連絡会）

■事業の実施体制



■実装に向けたロードマップ



【参考資料】出典：（一社）豊洲スマートシティ推進協議会

特 別 研 究

(1) プロジェクト研究助成

鏡面加熱壁面を用いた Background Oriented Schlieren 法による自然対流乱流境界層の可視化とその乱流メカニズムの解明

工学部 古川琢磨

共同研究者

東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 赤嶺政仁

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

自然対流境界層は、温度差によって生じる浮力により形成される代表的な熱流動現象であり、伝熱機器、建築環境、電子機器冷却、火災・安全工学など、多くの工学分野に関係する基礎的かつ重要な流れである。特に、垂直加熱平板に沿って発達する自然対流境界層では、流れの発達に伴い、層流状態から遷移状態を経て乱流状態へ移行する。この過程では、壁面近傍において熱プルームや組織構造が形成され、それらの崩壊、再配列、三次元化が熱輸送特性に大きく影響すると考えられる。

従来、垂直加熱平板まわりの自然対流境界層については、熱線流速計、温度計測、Particle Image Velocimetry 法、数値解析などにより、多くの研究が行われてきた。しかし、実験的研究の多くは点計測または二次元平面計測に基づくものであり、壁面近傍に形成される三次元的な密度変動構造を直接的に把握することは困難であった。特に、壁面に付着した熱流動場では、固体壁が光路を遮るため、多方向からの光学計測が制限され、壁面近傍の三次元計測は大きな課題であった。

そこで本研究では、鏡面加熱壁面を用いた三次元 Background Oriented Schlieren (BOS) 法により、垂直加熱平板に沿って発達する自然対流境界層の壁面近傍三次元構造を可視化し、その発達過程を明らかにすることを目的

とした。BOS 法は、背景画像の見かけの変位から密度勾配場を評価する光学計測法であり、温度差によって生じる空気の密度変化を非接触で可視化できる。本研究では、加熱壁面を鏡面として利用することで、通常が多視点計測では得にくい壁面近傍の光路を確保し、三次元的な密度変動構造の再構成を試みた。

本研究では、単に自然対流境界層を可視化することではなく、局所レイリー数の増加に伴って、壁面近傍の構造がどのように変化し、二次元的な横ロール状構造から、より複雑な三次元構造へと再編成されるのかを実験的に示す。さらに、連続フレーム間の密度差の標準偏差分布を評価し、遷移過程における構造変化を評価・議論する。

2. 研究計画

本研究期間では、三次元 BOS 法を自然対流境界層に適用し、壁面近傍の三次元密度変動構造を実験的に再構成することを計画した。具体的には、垂直に設置した鏡面仕上げの加熱平板に沿って自然対流境界層を形成し、複数台のカメラと背景モニターを用いて、流れ場による背景画像の見かけの変位を取得した。加熱平板は鏡面としても機能するため、直接観察される光路に加えて、鏡面反射を介した光路を利用することで、壁面近傍の密度変動場に関する多方向情報を得ることを目指した。

実験では、鏡面加熱平板、背景モニター、複数台の同期カメラを用いた計測系を構築した。加熱平板の背面を電気ヒーターにより加熱し、静止空气中に自然対流境界層を形成した。背景にはランダムドットパターンを表示し、流れ場による屈折率変化に起因する背景画像の変位を計測した。カメラ群は外部トリガーにより同期させ、同一時刻における複数視点の BOS 方による光学的変位量を取得した。

本研究では、通常の新加熱時参照画像を用いる方法ではなく、連続する二つのフレーム間の画像変位を用いた。これは、加熱に伴う鏡面壁の熱変形により、新加熱時の参照画像との差分には、流体密度変化だけでなく、壁面変形に起因する準定常的な光学歪みが含まれるためである。連続フレーム間の変位を用いることで、準定常的な鏡面歪みの影響を低減し、主として時間的に変動する密度差に対応する情報を抽出した。

取得した複数視点の光学変位データに対して、三次元 BOS 法に基づく逆問題解析を適用し、連続フレーム間の三次元密度差場を再構成した。再構成では、光路に沿った密度勾配の積分関係を用い、正則化付き最小二乗問題として定式化した。これにより、ノイズの影響を抑えつつ、壁面近傍の三次元的な密度変動構造を評価した。

本研究では局所レイリー数の異なる領域における三次元構造を可視化し、流れの発達に伴う構造変化を比較した。さらに、連続フレーム間密度差の時間変動から標準偏差分布を算出し、遷移に伴う非定常性の増大を評価した。また、流れ方向およびスパン方向の相関長を算出し、壁面近傍構造の異方性が局所レイリー数の増加に伴ってどのように変化するかを評価した。

3. 計画の進行状況

本研究期間には、鏡面加熱壁面を用いた三次元 BOS 法による計測系を構築し、垂直加熱

平板に沿う自然対流境界層の壁面近傍三次元構造を再構成した。実験では、鏡面仕上げの垂直加熱平板、背景モニター、複数台の同期カメラを用い、背景画像の光学変位を取得した。さらに、カメラ、鏡面加熱壁面、背景モニターの相対位置を推定するための校正を行った。

3.1 キャリブレーション結果

3DBOS 法による三次元再校正のためにカメラ及び背景モニター、加熱壁面の相対位置を正確に把握する必要がある。本研究では OpenCV ライブラリに含まれる Charco パターンの画像を背景モニターに投影することにより、それぞれの機器の位置のキャリブレーションを実施した。キャリブレーションによる校正結果を図 1 に示す。比較のため、図 2 に実際の実験での各機器の設置状況を示す。図に示されるように、各機器の位置は概ね一致していることが確認できた。

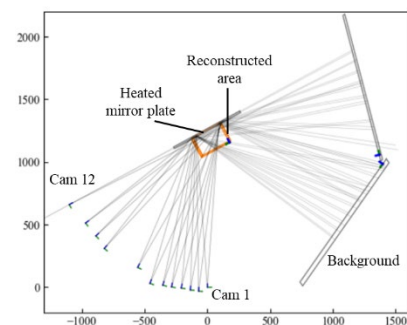


図 1 キャリブレーションによる機器の相対位置モニター位置

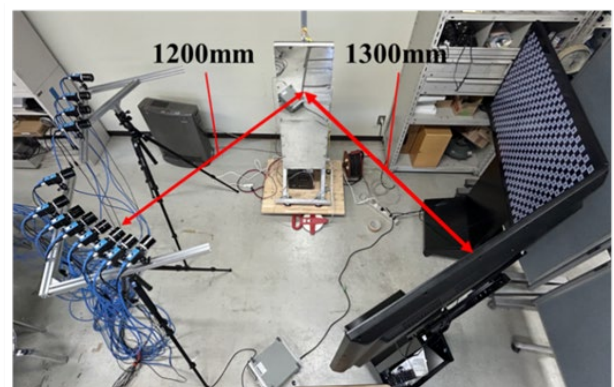


図 2 実際の機器の位置

3.2 各カメラでの光学変位量の評価

次に本研究では BOS 法により得られた各カメラの光学変位場から、自然対流境界層の発達に伴う構造変化を評価した。図 3 および図 4 に低レイリー数領域および高レイリー数領域における各カメラが取得した変位量の分布を示す。図 3 に示されるように、比較的低い局所レイリー数の領域では、壁面に沿ってスパン方向に連続した横ロール状の構造が観察された。一方、図 4 に示されるように高い局所レイリー数の領域では、変位分布が細かく分断され、スポット状かつ複雑な構造へと変化した。この変化は、自然対流境界層において、初期の組織的な横ロール構造が崩壊し、三次元的な乱れを伴う構造へと発達していく過程を反映していると考えられる。

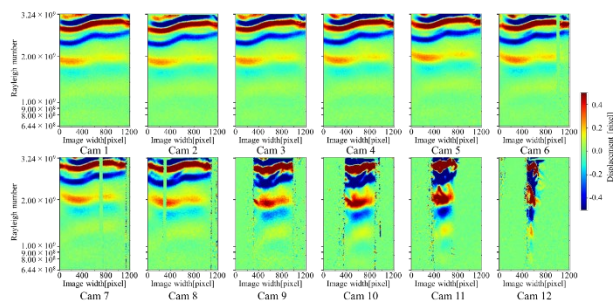


図 3 低レイリー数領域における各カメラの変位分布

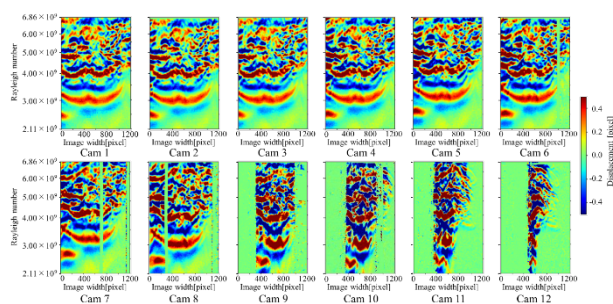


図 4 高レイリー数領域における各カメラの変位分布

3.3 フレーム間の密度差の三次元再構築結果

次に、複数視点の光学変位データを用いて、連続フレーム間の三次元密度差場を再構成し

た。図 5 および図 6 に低レイリー数及び高レイリー数領域における再校正されたフレーム間の密度差の再校正画像を示す。図 5 に示されるように、低局所レイリー数領域では、スパン方向に比較的連続したシート状または横ロール状の構造が確認された。一方で図 6 に示されるように、高局所レイリー数領域では、ロール状の構造が分断、傾斜、対形成を伴いながら、流れ方向に伸長した複雑な三次元構造へと変化する様子が確認された。特に、側面方向からの可視化により、初期にはスパン方向に整列していた構造が、流れの発達に伴って連続性を失い、絡み合った三次元構造へと移行する過程を把握できた。

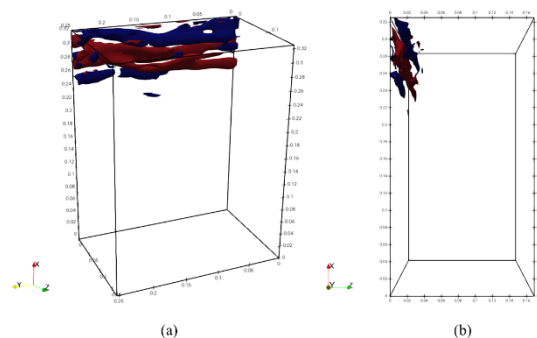


図 5 低レイリー数域におけるフレーム間の密度差の三次元再構築結果

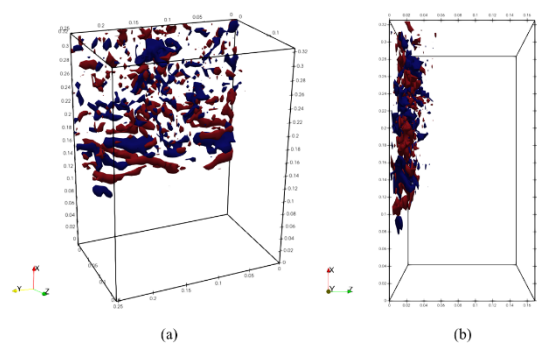


図 6 高レイリー数域におけるフレーム間の密度差の三次元再構築結果

3.4 標準偏差の空間分布

本研究では連続フレーム間密度差の時間変

動に基づいて、乱流強度起因の標準偏差分布の空間分布を評価した。図 7 に加熱壁面近傍における標準偏差の空間分布を示す。図 7 に示されるように、高いゆらぎは主として壁面近傍に現れ、局所レイリー数の増加に伴って、強い非定常性を示す領域が壁面から外側へ広がることが分かった。これは、熱境界層内で形成された熱プルームや組織構造が、流れの発達に伴って外側へ拡大することを示している。

本研究では層流から乱流への遷移位置を特定するために、フレーム間の密度変化の標準偏差を壁鉛直方向に空間的に積分してその空間分布を評価した。積分結果を図 8 に示す。図 8 に示されるように、局所レイリー数の増加に伴い、流れ場の非定常性が段階的に強まることが示された。特に、ある局所レイリー数範囲において、標準偏差が急激に増加する傾向が確認された。この領域は、横ロール状またはシート状の構造が急速に崩壊し、より複雑な三次元構造へと移行する遷移過程に対応すると考えられる。その後、さらに局所レイリー数が増加すると、標準偏差はピークを示した後、ほぼ飽和する傾向を示した。これは、流れ場が発達した乱流的状态に近づき、大規模な密度差変動が統計的に安定化したことを示唆している。

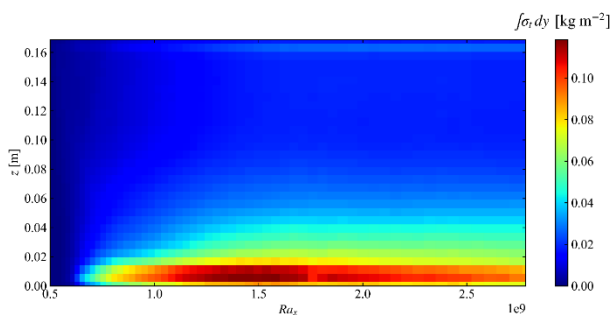


図 7 フレーム間の密度差の標準偏差の空間分布

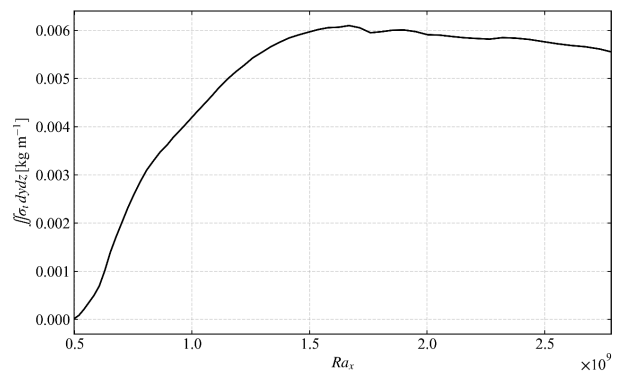


図 8 図 7 に壁鉛直方向の積分値分布

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、本研究で得られた三次元再構成結果および統計解析結果を整理し、国際学術誌への投稿を進める予定である。現在、本研究結果をまとめ、International Communications in Heat and Mass Transfer にて投稿論文の査読中である。

ゾル・ゲル転移によって物体形状に適応可能な 自律型ハイドロゲルグリップの開発

工学部 吉田 光輝

1. 序論（はじめに，まえがき，目的）

【研究背景】 物体を把持・操作する能力は，ロボットが実環境で機能するための基盤的要素である．中でもグリップは，ロボットと外界を直接結ぶインターフェースとして，対象物の形状，材質，重量といった多様な不確実性に対応する役割を担っている．産業用ロボットからサービスロボット，医療・農業分野に至るまで，安全かつ確実な把持技術は，ロボット応用の可能性を大きく左右する重要な研究課題である．近年，物理世界での自律的な知能の実現を目指す「フィジカル AI」への関心が高まっており，実環境とインタラクションするグリップの機能向上は重要である．

従来の金属のような剛性の高い材料で構築されたグリップは重量物の把持に適している一方，脆弱な物体の把持には精密な制御が糧ようである．脆弱な物体の把持の実現に向けてシリコンゴムなどの柔軟な材料を活用したソフトグリップの研究が盛んに行われている．これまでに，粉体のジャミング効果，吸盤，インターロッキング，トポロジカル拘束など様々な把持原理が検討されてきた．しかしながら，ソフトグリップの多くは大きな把持力を発生することができない．

【研究目的】 重量物を把持するためには大きな把持力が必要である一方，柔軟で脆弱な対象物を把持するためには，対象物を損傷しな

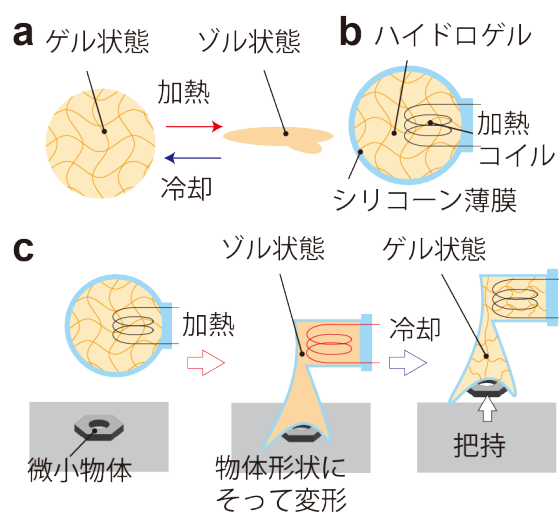


図 1 本研究の概要, (a) ハイドロゲルのゾル-ゲル転移, (b) ハイドロゲルグリップ, (c) ハイドロゲルの物体把持.

い優しい把持が求められる．これら二つの要求は一般にトレードオフの関係にあり，従来は把持力や接触状態を制御するために多数のセンサや複雑な制御系が必要であった．本研究の目的は，ハイドロゲルのゾル・ゲル転移を応用することで，微小物体の形状に沿って自律的に変形して把持可能なハイドロゲルグリップを実現することで，重量物と脆弱物体の把持のトレードオフを打開することである（図 1）．液体のような流動性のあるゾル状態と高分子ネットワークを形成し固体のように振る舞うゲル状態を遷移可能なハイドロゲルをグリップに利用する．液体のようなゾル状態で微小物体の形状に沿った形に自律的に変

形した後に、固体のようなゲル状態になることで微小物体を把持する新しい物体把持原理を創出する。はじめに、ハイドロゲルを高分子が分散し液体のようにふるまうゾル状態から、高分子が3次元網目を形成し固体のようなゲル状態に遷移させるシステムを開発する。次に、開発したゾル・ゲル転移可能なハイドロゲルとゾルを保持するためのシリコーン薄膜、ゾル・ゲル転を行うための加熱システムの統合を行う。最後に開発したハイドロゲルグリッパによる微小物体の把持性能の評価を行うことで、微小物体の把持の原理およびグリッパの設計論を確立する。

2. 研究計画

本研究で提案するハイドロゲルグリッパの構成要素は、ゾル・ゲル転移可能なハイドロゲル、ハイドロゲルを保持するためのシリコーン薄膜、ハイドロゲルを加熱するための伝熱線である(図1b,c)。3つの項目に分けて研究を実施していく。

(1) ゾル・ゲル転移可能なハイドロゲルの開発および特性評価：ゾル・ゲル転移可能なハイドロゲル材料としてゼラチンゲルを利用する。ゼラチンゲルは23-30℃でゲル状態からゾル状態に転移することができる。ハイドロゲルグリッパに適したゼラチン濃度の選定を行う。はじめに、ゼラチン濃度を変化させた場合のゲル化温度の観察を行う。次に、ゼラチン濃度の温度変化に与える影響を調査することで、ハイドロゲルグリッパの駆動条件を検討する。

(2) ハイドロゲルグリッパ機構の構築：液体のようなゾル状態をグリッパとして活用するために、シリコーン薄膜を用いる。シリコーン薄膜は、未硬化状態のシリコーンゴムを成型型上に塗布することで作製する。シリコーン薄膜の厚さや硬さなどグリッパに適した条件の選定を行う。同時にシリコーン薄膜の形状やハイドロゲルの包み方、固定方法など

について検討する。また、ゾル・ゲル転移を制御するための加熱コイルの統合および制御技術の開発を行う。ハイドロゲルグリッパを小型化することで、伝熱および冷却の高速化、および微小物体への把持性能の向上が期待されるため、フォトリソグラフィ技術による小型化も検討する。

(3) ハイドロゲルグリッパの把持性能評価：最後に微小物体を模擬した測定治具を作製し、引張試験機を用いて開発したハイドロゲルグリッパの把持能力を測定する。また、対象物体のサイズや形状の変化、加熱開始からのゾル・ゲル転移の速度、グリッパの把持力などシステムとしての応答性や仕事の効率、システムの有効性など多角的にグリッパの特性を評価する。

3. 計画の進行状況

ゾル・ゲル転移によって物体形状に適応可能な自律型ハイドロゲルグリッパの開発に成功し、研究計画を概ね達成することができた。研究計画に対する進行状況を以下に示す。

(1) ゾル・ゲル転移可能なハイドロゲルの開発および特性評価：はじめに、ハイドロゲルグリッパに適したゼラチン濃度(20 wt% - 50 wt%)の選定を行った。ゼラチン濃度によるゾル-ゲル転移温度の変化を測定すると、ゼラチンがゲル化した際の中心温度は、20 wt%では21.8℃であったのに対して、50 wt%では35.5℃まで上昇した。ゼラチン濃度の増加に伴い、ゲル化に至る転移温度も上昇することが確認された。次に、中心温度と表面温度の温度差を比較した。20 wt%では温度差が0.4℃であるのに対して、50 wt%では7.4℃の温度差が生じた。この結果より、ゼラチン濃度が高い方が中心温度と表面温度差が大きくなることが示唆された。

次に、20 wt%、30 wt%、40 wt%のゼラチン水溶液における自然冷却開始30分後の温度

変化を観察すると、20 wt%では 24.6 °Cまで低下したのに対し、30 wt%では 24.7°C、40 wt%では 25.1°Cとなり、濃度による有意な差は見られなかった。この結果よりいずれの濃度においても自然冷却開始 30 分後にゲル化が完了し、物体を把持できると考えられる。

(2) ハイドロゲルグリップ機構の構築：本研究で提案するハイドロゲルグリップの構成要素は、ゼラチン溶液、ゼラチン溶液を内包するためのシリコン薄膜、外部機構と接続するためのグリップ枠である。シリコン薄膜は、3D プリンタで作製した成形用の膜に未硬化のシリコンゴムを塗布し、その後恒温槽で硬化することで作製した。シリコン薄膜には、Eco-flex 00-50 を利用した。グリップ枠は 3D プリンタで作製した。シリコン薄膜内部にゼラチン溶液を充填し、グリップ枠で蓋をすることでグリップを構築した。加熱機構については、シリコンチューブ内にニクロム線を配置したシステムを構築し、電流を流すことで温度上昇することを確認した。

(3) ハイドロゲルグリップの把持性能評価：直径 20 mm の金属球を把持対象物体として、ゼラチン濃度による最大荷重の変化を観察した。ゼラチン濃度 20 wt%では 162.7 g、30 wt%では 350.6 g、40 wt%では 329.3 g、50 wt%では 318.6 g となった (図 2)。この結果より、本研究で提案するハイドロゲルグリップが物体を把持できることが示された。また、ゼラチン濃度が 30 wt%を超えると把持力に大きな差がないことが明らかとなった。

次に、物体形状が把持性能に与える評価として、球体と円筒形の物体の把持実験を行った。直径 20 mm 球形と円筒形の物体把持実験では 387.5 g と 130.1 g と高い把持荷重を示した。さらに、直径 30 mm の場合、円筒形では 500.0 g、球形では 1000.0 g と大きな把持力が実現できることが明らかになった。一方で、

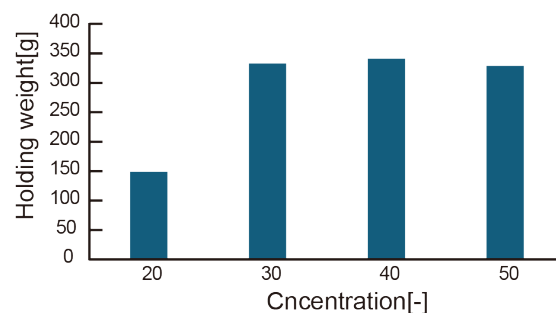


図 2 ゼラチン濃度による把持力の変化。

直径 10 mm の球形では 8.0 g、円筒形では 48.5 g となった。以上の結果より、把持物体の形状によって把持力が変化することが明らかになった。物体の形状が大きい場合は、グリップとの接触面積が大きくなるため大きな把持力を実現できたと考える。

4. 今後の計画及び学会論文等投稿・発表状況

【今後の計画】

年度終了後は、本研究課題で開発するゾル・ゲル転移を用いたハイドロゲルグリップに化学反応を用いて内部の加熱を行うシステムを導入することで、外部配線を使わずにゾル・ゲル転移可能なシステムの構築を目指す。化学反応には、過酸化水素水を白金触媒によって分解する際に発生する熱の利用検討している。ハイドロゲルの特徴としてハイドロゲル内部が液体で満たされているため、外部に存在する液体がゲル内部に拡散することができる。そのため、白金触媒をゲル内部に分散し、外部より過酸化水素水を拡散させることで、発熱しゾル状態に変化させることができる。電気配線の必要のないゾル・ゲル転移の制御機構を開発することで、グリップへの応用だけでなく、外部環境を自由に動き回ることのできるスライム型マイクロロボットに発展させる。また、現在開発中の DNA ゲルやこれまで開発してきたハイドロゲルロボットと統合することで、外部情報に基づいた制御機構の開発も行う。

【論文投稿・発表状況】

本研究で新しく創出した把持原理は、従来のものと比較して簡便かつ把持にエネルギーを利用しないため長時間の把持に適している。これまでのグリップとは異なる長時間把持への実用化が期待されるため、特許申請に向けて研究推進部と相談中である。

論文化の準備も進めており、特許申請の状況も踏まえて投稿の時期は検討する。

本研究成果は、第 16 回マイクロ・ナノ工学シンポジウムおよび第 11 回サイボウニクス研究会にてポスター発表を行った。

学会発表

1. 野内大雅, 吉田光輝, “ゼラチンを用いたソフトグリップの開発,” 第 11 回サイボウニクス, 2025 年 12 月 6 日.
2. 野内大雅, 吉田光輝, “ゼラチンのゾル-ゲル転移を利用したソフトグリップの開発,” 第 16 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2025 年 11 月 10 日.

分光分析による新規薬物検査法の開発

工学部 瀬川 尋貴

共同研究者
科学警察研究所 山室 匡史

1. 序論(はじめに, まえがき, 目的)

薬物乱用は体感治安・公衆衛生の悪化につながるなど、安心安全な社会の実現に対する身近な脅威のひとつである。効果的な取り締まりの実施はこうした脅威に対抗する有力な手段であり、その科学的な裏付けとして、取り締まり現場および研究室での化学分析法がこれまでに開発されてきた。前者における代表例としては特定の薬物と反応することで特徴的な色を示す呈色反応試験が挙げられ、市販のキットとして入手することができる。後者の例としてはクロマトグラフィー／質量分析法が挙げられ、試料が混合物であっても構成成分ごとに化合物を分離し、高感度に定性・定量分析を行うことができる。

一方、現場レベル・研究室レベルの手法はいずれも解決が待たれる課題が存在している。取り締まり現場で使用される呈色反応は、基本的に結果の判断は目視判定であり、客観性の担保が困難であるほか、構造が類似する化合物が誤って陽性と同様の呈色を示す偽陽性の懸念がある。研究室で使用されるクロマトグラフィー／質量分析法は、分析までの前処理に時間と技術を要し、特に試料の成分が未知である場合には適切な前処理法の設計に慎重な対応が求められる。

研究代表者はこれまでに、客観証拠に基づく規制薬物の取締り強化に貢献するため、新しい薬物分析法の開発を行ってきた。とりわ

け、分光分析を利用した手法は、①可搬型装置が既に数多く市販されている、②試料に前処理を施さなくても計測できる、③試料を構成する分子の構造情報を取得できる、という特徴を有する。そのため、現場レベル・研究室レベル両方においてそれぞれの課題を克服した手法となりうる。

そこで本研究では、(1) オンサイト薬物分析に向けた手法の高度化、および(2) 混合試料からの薬物スペクトル分離法の実現を行う。(1) では覚醒剤の代表的な検出法であるマルキス試薬の反応機構解明に取り組み、(2) では添加物を含む麻薬コカイン試料について、添加物の種類と量を半定量的に推測する分析モデルの構築を行った。

2. 研究計画

(1) マルキス試薬の反応機構解明

覚醒剤メタンフェタミンの呈色反応に用いられるマルキス試薬は、化合物の構造によって明確に異なる色調とその経時変化を示すことが特徴であるが、呈色生成物の構造や反応機構に関する情報はほとんど得られていない。そこで、構造の異なる各種化合物についてマルキス試薬による呈色反応を実施し、色調と経時変化を確認する。さらに、各種分光計測法を利用し、色調の経時変化から反応機構の解明に資する情報の取得を行う。

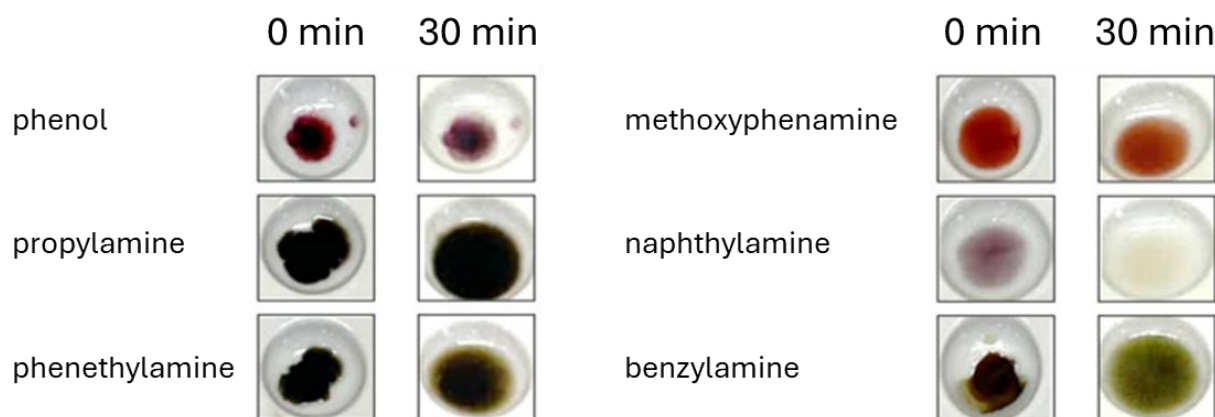


図1 マルキス試薬添加直後と 30 分経過後の色調

(2) 混合試料からの薬物スペクトル分離法開発

麻薬コカインと、押収コカイン試料において添加物としてコカインに加えられることが知られている代表的な化合物 21 種類について、赤外吸収スペクトルおよびラマンスペクトルの標準データを取得する。取得したデータを利用し、混合スペクトルからコカインの有無や添加物の種類、およびそれらの量を推定する識別モデルを複数構築する。性能の比較を行い、現場運用可能な判定スキームの構築を行う。

3. 計画の進行状況

(1) マルキス試薬の反応機構解明

6 種類の化合物に対して研究室で調製したマルキス試薬を添加した後に観察された色調と経時変化を図 1 に示す。化合物の構造に応じた明瞭な色調の差異と、経時変化を確認することができた。時間変化と共に淡色化する傾向が見られたが、密閉容器中で反応を行うと淡色化は抑制され逆に濃色化したことから、淡色化は空気中の酸素等の影響によるものと推測された。検討した化合物のうち、ベンジルアミン、フェネチルアミン、プロピルアミンは側鎖の炭素骨格の長さが 1 ずつ異なる構造を有している。これらの化合物は試薬を加えた瞬間に黒色を示したが、その色調や空気中での淡色化の挙動には差異が見られた。

色調の経時変化が確認されたことから、吸収スペクトルの経時変化を追跡しデータを解析することで、呈色反応に関与する化学成分数の推測を行った。メトキシフェナミンを対象に紫外可視吸光度計を用いて吸収スペクトルを測定したところ、吸光度が高くなり過ぎた。そこで呈色反応液の希釈を試みたが、水およびメタノールでの希釈では呈色が消失し白色の懸濁液となる現象が確認され、希釈困難であった。そこで、簡易な顕微分光装置を構築し、極めて短い光路長下で吸収スペクトルを測定した結果、スペクトルとその経時変化の取得に成功した(図 2)。得られた吸収スペクトルには等吸収点は確認されず、スペクトル全体が比例して増加するのではなく広帯域にわたってスペクトルがブロード化するように変化していたことから、始物質と終物質の交換のような単純な反応では表現できないことが分かった。

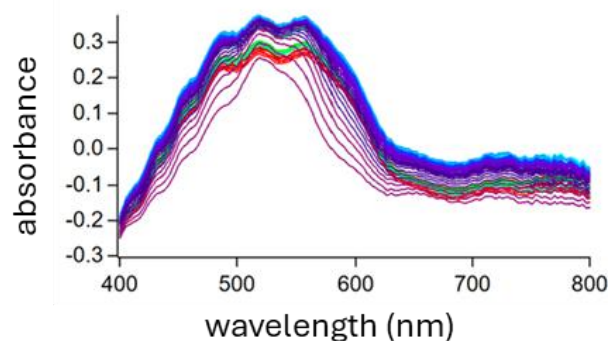


図2 プロメタジンとマルキス試薬の呈色反応液の吸収スペクトルおよび経時変化

次に、吸収スペクトルの経時変化データに対して特異値分解 (singular value decomposition; SVD) を実施した。図 2 に示したのと同じプロメタジンという化合物を解析して得られたスクリープロットを図 3 に示す。このプロットと特異値ベクトルを利用したスペクトルの再構成の結果から、プロメタジンの吸収スペクトルの経時変化を説明するには最低 6 成分の寄与が必要であることが分かった。他の複数の化合物についても同様に解析した結果、いずれも 4 から 6 成分程度が必要であった。この結果も始物質と終物質の交換のような単純な反応では表現できないという結果を支持するものである。先行研究によれば、マルキス試薬の呈色にはカチオンラジカルが関与することが示されている。マルキス試薬が濃硫酸とホルムアルデヒドで調製されることも考慮に入れると、これらの結果は、呈色の経時変化は生成物が分スケールで進行する重合反応によるものであることを示唆していると推測された。

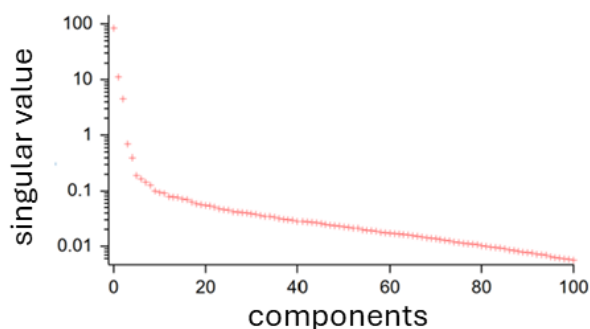


図3 プロメタジンの吸収スペクトルの経時変化データを SVD して得られたスクリープロット

(2) 混合試料からの薬物スペクトル分離法開発

フーリエ変換赤外分光装置および顕微ラマン分光装置を利用し、コカイン塩酸塩および代表的な添加剤 21 化合物の標準スペクトルを取得した。これらのデータについてノイズ除去、ベースライン補正を行った。

次に、得られた計 22 化合物の標準スペクトルを利用し、以下のルールに基づき人工的なスペクトルデータを 20,000 個作成した。

1. 各データはコカインを含む。
2. 21 種類の添加物のうちいずれか 3 種類をランダムに選ぶ。
3. 各データについて、コカインおよび 3 種類の添加物にランダムに重みを割り振る。重みは合計 1 とする。
4. 割り振られた重みどおりに標準スペクトルを足し合わせ、1 つの人工スペクトルを作成する。

このデータを 4:1 の割合にランダムに分け、16,000 個のスペクトルを学習用データセット、4,000 個のスペクトルを検証用データセットとした。学習用データセットの二次微分なし/ありとしたデータを利用し、非負拘束最小二乗法 (NNLS)、エラスティックネット (Enet)、非負拘束行列因子分解 (NMF)、多層パーセプトロン (MLP) の 4 種類の方法により、コカインおよび添加物の含量を半定量するモデルを構築した。構築したモデルを検証用データセットに適用して得られた結果の例を図 4 に示す。検証用データの段階で、NMF は正確性の高い結果を与えなかった。他の 3 種類については、差はわずかであるが

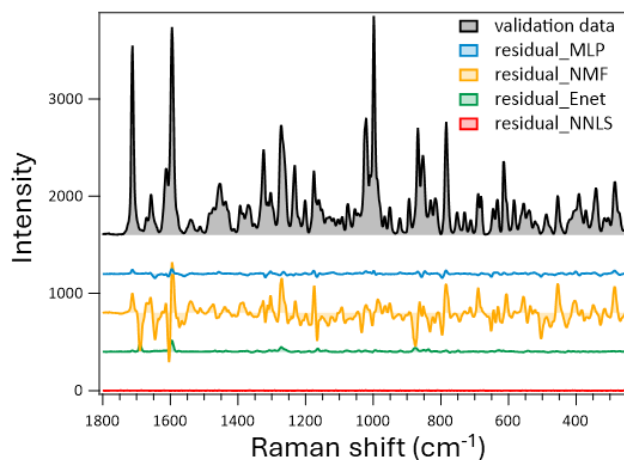


図4 検証用データのラマンスペクトルと各モデルにより再構成されたスペクトルとの残差。灰色は、用いた検証用データのスペクトル。

NNLS が最も良い成績を示した。

次に、構築したモデルを実際の押収コカイン試料に適用した。試料を測定して得られたラマンスペクトル、および各モデルの出力に基づき再構成したスペクトルとの残差スペクトルを図5に示す。検証用データと異なり、Enet においてスペクトルの再現性が大きく低下した。NNLS が最も良い成績を示し、MLP が次点であった。

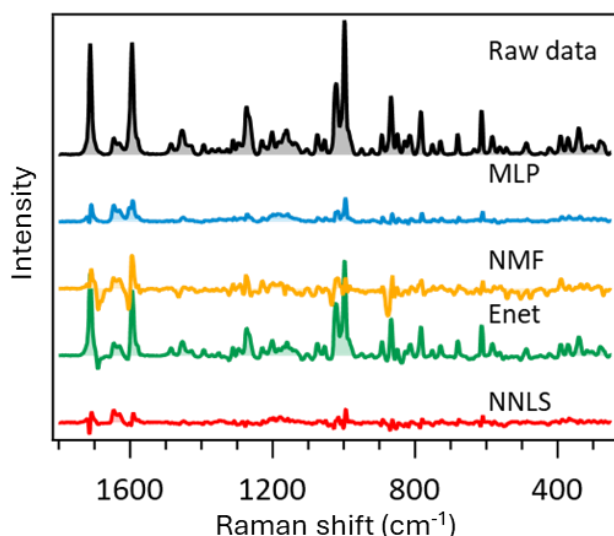


図5 実試料のラマンスペクトルと各モデルにより再構成されたスペクトルとの残差。灰色は、用いた実試料のスペクトル。

識別モデルごとの性能差は、各モデルの特性を反映したものと考えられる。NMF は用いた4種の方法中で唯一教師なし学習に分類されるが、学習後に出力されるスペクトルが元の標準物質と対応していなかったため、本研究の目的に合致しない結果であった。Enet は最小二乗法にスパース性を増すように制約条件を課す方法である。しかし、今回の結果では NNLS の方がスパース性も高く、予測結果も優れていた。これは、学習用データセットで過学習が生じ、制約条件が実試料の計測にそぐわなかった可能性を示唆している。

最後に、モデル構築に含まなかった化合物を添加物として含むような模擬試料を用意し、構築したモデルで予測を行った。その結果、

スパース性が低下し、様々な化合物の和でモデル対象外の成分を表現しようとする挙動が確認されたが、その傾向は NNLS と MLP で異なっていた。この事実に基づき、図6に示した判定フローチャートを構築し、実試料および模擬試料の評価を行ったところ、擬陽性を与えない正しい結果を得ることができた。

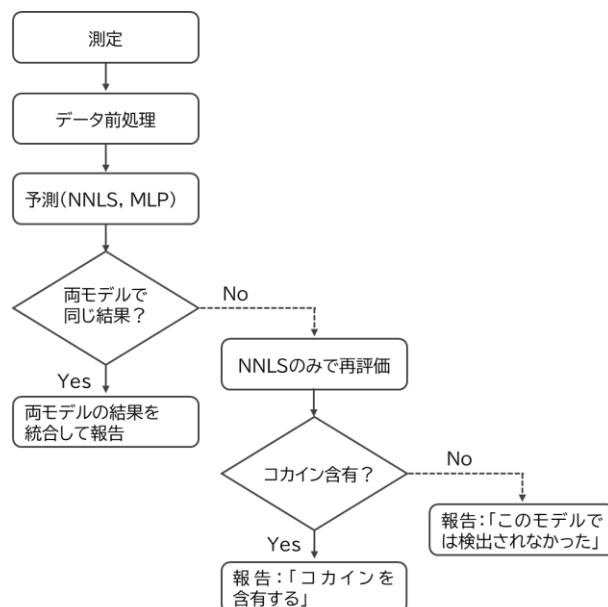


図6 NNLS と MLP を利用し、測定データからコカイン含有の有無と添加剤の種類を半定量しながら予測するフローチャート。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

マルキス試薬については、ラマン分光など他の計測を併用し、計測と解析の両面から反応機構の解明を試みるとともに、客観的な検出法の確立を目指す。スペクトル分離法については、近年国内で問題化している大麻関連化合物の解析などへ、手法を横展開することを目指す。両手法は特定のターゲットに留まらない広範な対象に適用できる可能性を秘めており、継続的な手法の発展を図っていく。

本研究に関連する成果発表

H. Segawa et al., *Forensic Toxicology*, accepted.

風力発電の出力予測を利用した蓄電池制御

工学部 小岩 健太

共同研究者

千葉大学大学院工学研究科 劉 康志

1. はじめに

本研究では，風力発電の大規模導入を実現するために，風力発電の変動電力を平滑化する蓄電池制御法を開発する．化石燃料の枯渇・地球温暖化などの問題が深刻化するにつれ，風力発電の導入拡大に期待が集まる．しかし，その出力は風況によって大きく変動するため，電力システムの周波数変動などの品質低下を招く．特に，離島や日本のような小規模系統では周波数変動が生じやすいため，風力発電の変動電力がより深刻な問題となる．したがって，今後さらなる風力発電の導入拡大を進めていく上で，この変動電力の問題解決は急務である．

変動電力を抑制する手法の 1 つとして，蓄電池が広く使用されている．風力発電の変動電力を平滑化するために図 1 に示すように風力発電所に蓄電池を併設することで WF 出力

の過不足分を蓄電池による充放電で補い，平滑化することができる．しかしながら，蓄電池は高コストであるため，風力発電導入拡大の大きな障壁となる．近年，風力発電所の出力予測技術は著しく進歩している．しかし，蓄電池を用いた風力発電の出力平滑化に関する研究において，過去の風力発電所の出力情報のみを利用した方法に対する検討のみにとどまっており，風力発電の出力予測情報を活用し，低容量な蓄電池で出力平滑化を実現した研究はほとんどない．そこで，本研究では風力発電の出力予測を活用した蓄電池の最適制御法の開発を目指す．具体的には，その予測情報を活用したうえで，風力発電の出力平滑化を最適化問題に帰着させることで，定格出力・容量の小さい蓄電池で十分な風力発電の出力平滑化を実現する．これにより，従来の方法に対し，50%程度のコスト低減を目指す．

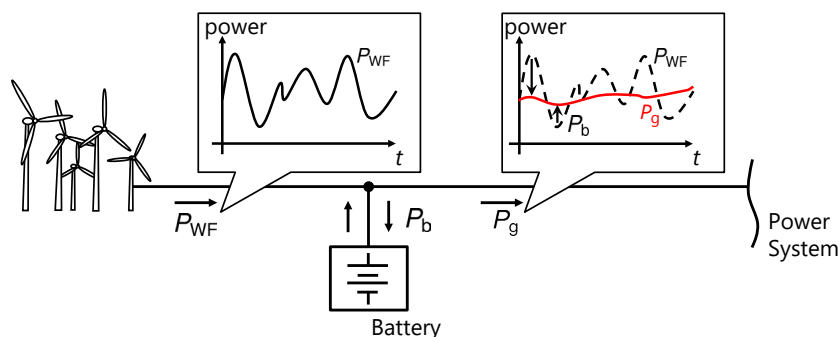


図 1 蓄電池による風力発電所の出力平滑化． P_{WF} : 風力発電所出力， P_b : 蓄電池出力， P_g : 系統出力

2. 出力予測を利用した蓄電池の制御

図 2 に提案制御系の構成を示す．図 2 において， $P_{WF}(t)$ は風力発電（WF: Wind farm）の出力， $P_b(t)$ は蓄電池システム（ESS: Energy storage system）の出力， $P_b^{\text{ref}}(t)$ はその指令値を表す．また， $P_g(t) = P_{WF}(t) - P_b(t)$ は系統へ送電される電力を表し， $E(t)$ は残存容量（SOC: State of Charge）の状態量を示す．図の Dynamics は蓄電池の動特性を表すが，本検討では，蓄電池の充放電が指令地に対して十分早く追従できるとし $P_b^{\text{ref}}(t) \approx P_b(t)$ とした．なお， $P_b(t) > 0$ は ESS の充電動作を意味する．また，信号 $x(t)$ に対して $x[n]$ はその離散化されたものを意味する．

図 3 に提案法における風力発電出力変動の平滑化概念を示す．ここで， ΔP_g^{lim} は技術要件で定められる許容出力変動幅， P_{WF}^{max} および P_{WF}^{min} はニューラルネットワーク（NN: Neural network）で予測された WF 出力の最大値および最小値を表す．また， P_b^{max} は予測区間 T_{pre} における ESS 出力の最大値を示し， P_b^+ および P_b^- はそれぞれ ESS の充電電力および放電電力を表す．

図 3 に示すように，ESS の充放電量が大きくなると必要な ESS 出力容量も増加する．一方， P_b^+ と P_b^- が均衡する場合，ESS 出力の最大値 P_b^{max} は次式で与えられる．

$$P_b^{\text{max}} = \frac{P_{WF}^{\text{max}} - P_{WF}^{\text{min}} - \Delta P_g^{\text{lim}}}{2} \quad (1)$$

式(1)より，最適化問題における ESS 出力制約は以下で与えられる．

$$|P_b[n]| \leq P_b^{\text{max}} \quad (2)$$

また，図 3 における系統送電電力 $P_g = P_{WF} - P_b$ の最大値および最小値は次式で表される．

$$P_g = \begin{cases} P_{WF}^{\text{max}} - P_b^{\text{max}} \\ P_{WF}^{\text{min}} + P_b^{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

さらに， $P_b^{\text{max}} = P_{WF}[n] - P_g$ の関係より，ESS 出力に対する制約条件は以下となる．

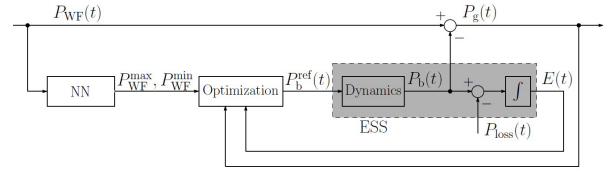


図 2. 提案制御系

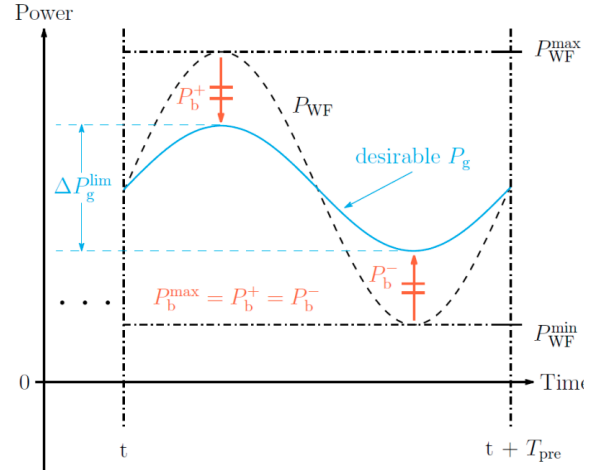


図 3. 風力発電出力変動の平滑化概念図

$$\begin{cases} P_b[n] \geq P_{WF}[n] - P_{WF}^{\text{max}} + P_b^{\text{max}} \\ P_b[n] \leq P_{WF}[n] - P_{WF}^{\text{min}} - P_b^{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)は，技術要件を満足しつつ，過大な出力ピークの発生を抑制するために導入される制約条件である．さらに，SOC を適切に管理するため，以下の目的関数を最小化する．

$$J = (P_g^{\text{ref}} - P_g[n])^2 + q(E^{\text{ref}} - E[n])^2 \quad (5)$$

ここで， E^{ref} は SOC の目標値， q は SOC 偏差に対する重み係数を表す． $E[n]$ および系統への目標送電電力 P_g^{ref} はそれぞれ次式で与えられる．

$$E[n] = E[n-1] + P_b[n] \frac{T_s}{3600} \quad (6)$$

$$P_g^{\text{ref}} = \frac{P_{WF}^{\text{max}} + P_{WF}^{\text{min}}}{2} \quad (7)$$

式(5)の第 1 項は，ESS の充放電を均衡させることで出力変動を抑制する役割を持ち，第 2 項は SOC を目標値へ維持する役割を持つ．したがって，式(4)の制約条件のもとで式(5)を最小化することにより，最適な ESS 出力指令値 P_b^{ref} を求めることができる．

3. 実験結果

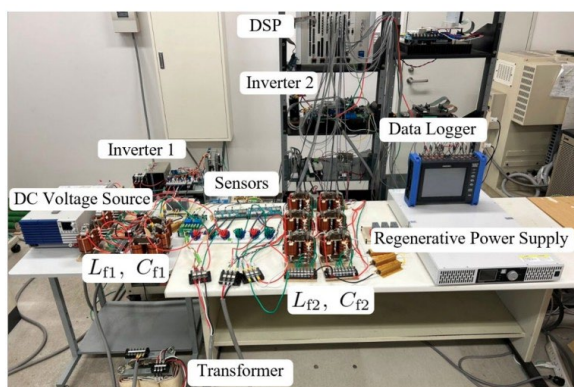


図 4. 実験環境

提案手法の有効性を検証するため、実風速データから算出した出力データに基づき、ハードウェア実験による検証を実施した．図 4 にミニモデルに基づく実験環境を示す．WF 出力は直流電源から給電されるインバータ 1 により模擬した．また、回生用電源により駆動されるインバータ 2 によって ESS を模擬した．両インバータの出力は LCL フィルタを介して接続され、変圧器を通じて統合される．さらに、電流センサおよび電圧センサを用いてシステム状態を計測した．また、実験データは図に示す通りデータロガーにより測定した．

技術要件として、系統へ送電される合成出力電力の変動率を、1 分間で 2% 以内、5 分間で 5% 以内に抑制することを要求した．また、WF の定格出力は 1120 W とした．

図 5 に系統出力を示し、図 6 および図 7 に系統出力変動率を示す．なお、変動率算出時におけるセンサノイズの影響を低減するため、系統出力には一次ローパスフィルタを適用した．図 6 および図 7 より、実環境においても技術要件を概ね満足していることが確認できる．なお、図 6 において、660 秒付近で 1 分間の変動が技術要件を超えている．これはセンサノイズの影響が考えられるため、提案制御法の制約条件にこのノイズの影響を盛り込む

ことで、確実に技術要件を満足することがで

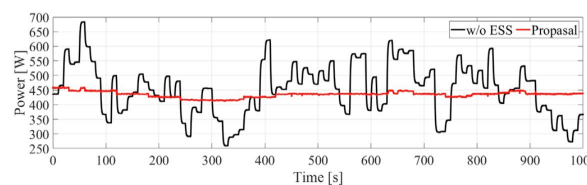


図 5. 系統出力

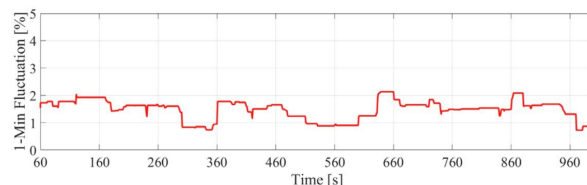


図 6. 1 分間の系統出力変動

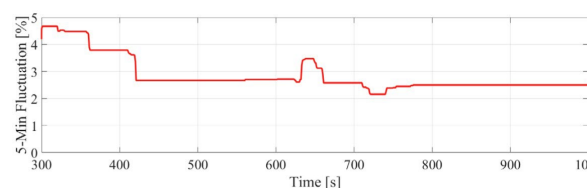


図 7. 5 分間の系統出力変動

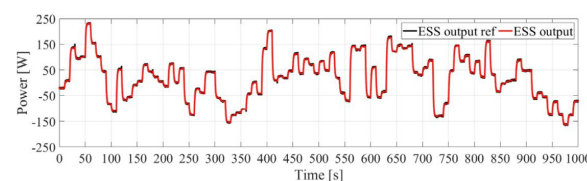


図 8. ESS 出力

きる．これについては今後の課題である．また、図 8 に ESS 出力を示す．同図より、ESS 出力は指令値に良好に追従しており、これまでシミュレーションで得られた結果と比べて同等の性能が実機環境においても実現できた．

4. まとめ

本研究では、WF 出力の予測値を活用した最適制御手法を開発した．また、提案制御法の有効性をミニモデルによるハードウェア実験により検証を行った．その結果、実環境においても提案手法が技術要件を満足しつつ、必要な定格出力を低減できることを確認した．以上より、提案制御手法の実装面における有効性を示した．

5. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

本研究の成果をまとめたものを学術論文として投稿中である。今後の計画としては、本研究の方法を拡張し、強化学習を利用した方法論の確立を目指す。下記に発表状況をまとめる。

[1] H. Morita, K. Koiwa and K.-Z. Liu, “Optimal Control for Energy Storage System Using Prediction of Wind Farm Output – Experiment Verification –,” in Proceedings of the 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2025), Vienna, Austria, 2025, pp. 392–394.

[2] 森田 響, 田代 智徳, 小岩 健太, 劉 康志, 「ウィンドファームの出力予測を利用した電力貯蔵装置の最適制御法 — ミニモデルを用いた実機検証 —」, 令和 7 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2025 年.

地形変化を利用したクローラの障害物乗越え

工学部 谷島 諒丞

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

クローラ機構は、不整地での高い走行性能から建設機械や災害現場で活動するロボットなどの移動機構として用いられている。段差や階段、地面の凹凸のような環境でのクローラ機構の走行については、様々な研究がおこなわれており、走行性能や乗越えのための条件が分かっている[1]。一方で、砂地のような軟弱な地面を走行する場合や岩石やがれきのような力を加えると動く可能性のある障害物を乗越える場合などは、クローラ機構にも走行が容易ではない。特に、これらが組み合わさった、軟弱な地面の上で動きうる障害物を乗越えるような状況は、車体の沈下と障害物の移動が組み合わさるため、より走行が難しくなる。

これまで、このような軟弱かつ動きうる障害物がある環境でのクローラ機構の走行現象を解明し、走行性能を向上させることを目的に研究を進めてきた[2, 3]。その結果、前進と後退を繰り返す走行パターンによって、後退時にクローラがかき出してできた土砂山の上に乗り上げることで乗越え性能が向上する可能性があることが分かった。しかし、限られた条件下での観察にとどまり、乗越え性能と各種環境条件や走行パターンの各パラメータの関係は十分に解明されていない。

そこで、軟弱かつ動きうる障害物がある環境でのクローラ機構の障害物乗越え性能を向上させることを目的とし、走行中に生じる地形変化を利用した走行制御手法を確立するこ

とを目指す。本研究では、上述のようなパラメータを変化させた実験を通して乗越え性能への影響を分析し、最適な走行パターンの抽出を行い、実機への適用を目指す。

2. 研究計画

本研究は、大きく分けて以下の4段階で計画した。

① 模擬環境および実験用ロボットの構築

軟弱地盤と移動可能な障害物を含む環境を再現する模擬環境を構築する。また、小型のクローラ型移動ロボットを設計・製作する。

② 障害物乗越え性能に対する環境条件・走行パラメータの影響評価

模擬環境において各種条件（障害物特性、地盤条件、走行パラメータ）を系統的に変化させた走行実験を行う。乗越え成功率や姿勢変化などを指標として記録・分析し、地形変化と乗越え性能の関係を定量的に評価する。

③ 最適走行パターンの検討

実験結果に基づき、乗越え性能向上に有効な走行パターンの特徴を抽出する。複数の走行パターンを設計・比較実験することで、地形変化を有効活用する走行戦略を導出する。

④ 実機への走行パターンの適用検証

抽出した走行パターンを大型のクローラ型移動ロボットに適用し、有効性と再現性を検証する。屋外環境での実験を通じて、実機への適用可能性と応用展開の基盤を確認する。



図 1 構築した模擬環境と実験用ロボット

3. 計画の進行状況

3. 1. 模擬環境と実験用ロボットの構築

まず、研究を進めるにあたり、模擬環境と実験用のロボットが必要であったため、これらの準備を進めた。図 1 に模擬斜面、模擬障害物、クローラ型移動ロボットを示す。模擬斜面は、プラスチックケースに真砂土を入れたもので、任意の斜度に変更することができる。模擬障害物は、鉱物粒子が塗布された滑り止めテープを貼り付けた断面が正方形のアルミフレームを用いた。クローラ型移動ロボットは、左右二つのクローラを有し、駆動には ROBOTIS Dynamixel XM430-W350-T を用いており、外部 PC から各クローラベルトを速度制御することができる。

3. 2. 障害物乗越え性能に対する前進・後進サイクルの影響評価

次に、対象とする条件として、前進と後退を繰り返す走行パターンでの前進・後進サイクルを選び、この条件の違いが障害物乗越え性能に与える影響を評価するため、走行実験を

行った。実験では、前進・後退サイクルを変えながら軟弱斜面上でクローラ型移動ロボットに障害物を乗越えさせ、その際の乗越えの可否や挙動を確認した。走行速度は 0.02 m/s に設定した。前進・後退の全体サイクルは、 3.0 , 5.0 , 7.0 s とし、さらにその中で前進の時間割合を 0.6 , 0.8 , 1.0 (一定速度での前進) と変化させた。また、斜面の斜度は、 21.5° に設定した。

表 1 に実験結果を示す。また、図 2 に実験時の走行の様子の一例を示す。実験では、大きく分けて、① 走行に伴い障害物が転がって、ロボットが後方に滑落を繰り返し、乗越えることができなかった、② 後退時にロボットが障害物から転落した、③ 障害物が転がったり、ロボットが後方に滑落するが、最終的に乗り越えた、という挙動が見られた。

実験結果より、設定した条件の中では、全体サイクルが 5.0 s で前進の割合が 0.8 (前進 4.0 s , 後退 1.0 s) の場合のみで障害物を乗越えることができた。従って、どのような条件でも乗越え性能が向上するわけではなく、乗越え性能が向上する適切な前進・後進サイクルが存在することが分かった。これは、サイクル全体が長すぎたり、前進に対して後退の時間が短いと、一定速度で前進する場合と変わらず、逆に後退が長すぎるとその場で動いているだけになったり、滑落も重なることで障害物から転落してしまうため、その間に適切な範囲が存在するためだと考えられる。

表 1 実験結果

Cycle duration	3.0 s			5.0 s			7.0 s		
Forward time ratio	Forward time	Backward time	Results	Forward time	Backward time	Results	Forward time	Backward time	Results
0.6	1.8 s	1.2 s	△	3.0 s	2.0 s	▽	4.2 s	2.8 s	▽
0.8	2.4 s	0.6 s	△	4.0 s	1.0 s	○	5.6 s	1.4 s	△
1.0	Continuous forward		△	Continuous forward		△	Continuous forward		△

△: Failed to climb due to repeated backward slipping.

▽: Fell off during the backward phase.

○: Eventually succeeded in climbing despite rolling or slipping.

3. 3. 走行パターンによる地形変化の解析

ここまでで前進・後進サイクルを変えてその影響を評価した。一方で、実際には、このサイクルそのものではなく、それによって発生する地形変化の違いがロボットの挙動の違いに影響を及ぼしていると考えられる。そこで、走行中の地形を計測し、さらに解析することとした。

地形を計測するために図 3 に示すように実験装置を拡張した。三脚を使って模擬斜面の上方に LiDAR を設置し、これを使ってロボットが走行中の地形を計測できるようにした。LiDAR には, Livox MID-70 を使用した。また、カメラと AprilTag を利用し、地形変化と同時にロボットの位置姿勢の変化も計測できるようにした。

これを用いて、走行中の地形変化を計測する実験を実施した。ここでは、計測可能かを確認することを目的に、前進 6.0 s、後退 2.0 s の 1 条件のみで走行を行った。

図 4 に実験で得られたデータの一例を示す。実験の結果、走行中の地形を点群として取得することができた。また、同時にロボットに与えている速度指令や位置姿勢の変化を計測することができた。試行的に実施した実験ではあったが、前進時に後方に土砂山が形成され、後退時にそれに乗上げてロボットの姿勢が戻されていることが計測データから確認することができ、前進・後退と地形変化、乗越え性能の関係を定量的に評価するための基盤を構築できたと言える。

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

今後は、さらに障害物乗越え性能に対する環境条件や走行パラメータの影響評価を進める。特に、走行パラメータが地形変化に与える影響を定量的に評価する。さらに、それらを最適な走行パターンや地形をリアルタイムに計測しながら適切なタイミングで前進や後

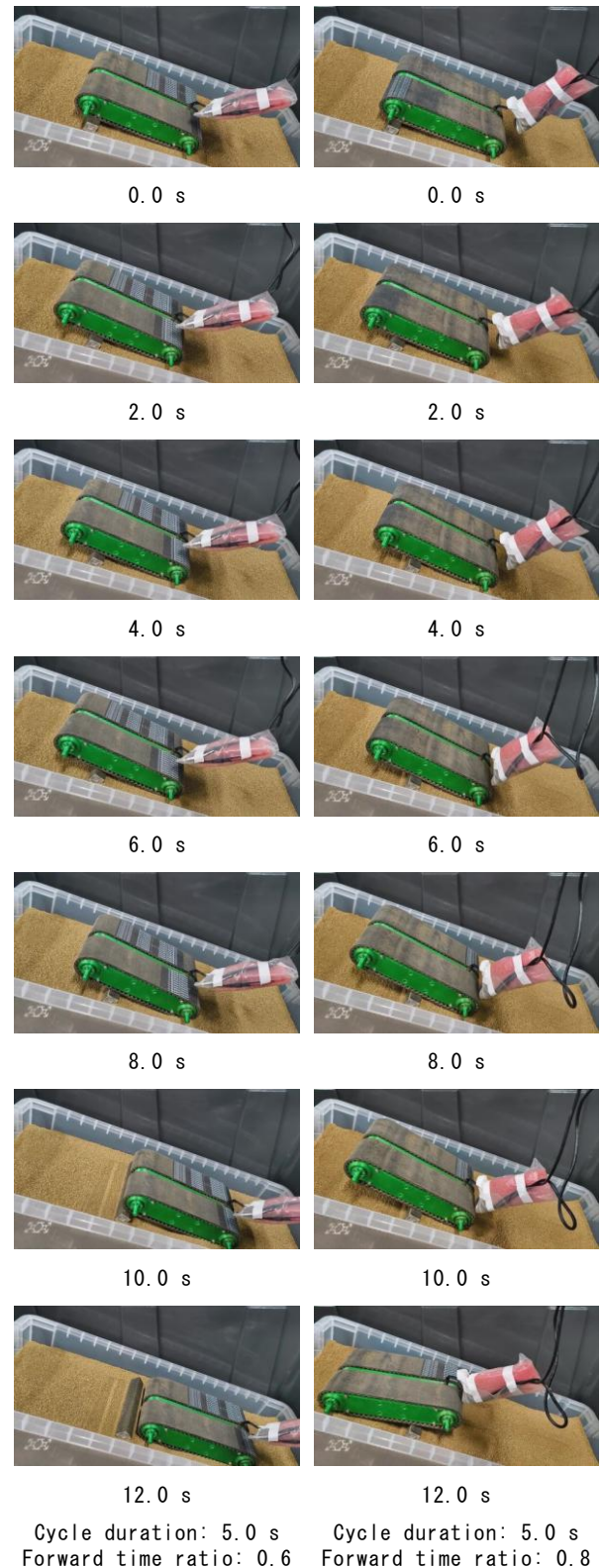


図 2 走行実験の様子の一例

退を行う走行制御につなげる。また、より大型のクローラ型移動ロボットの整備を進めたが、実験には至らなかったため、今後は、これを用いた実環境に近い状況での実験を行い、

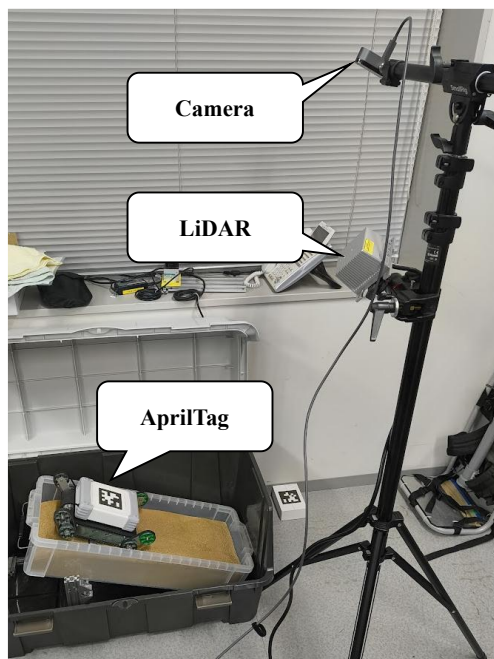


図3 地形とロボットの位置姿勢を計測するために拡張した実験環境

実機や実環境への適用可能性を検討する．これらを進めることで，クローラ機構で走行可能な環境や状況を拡大することを目指す．

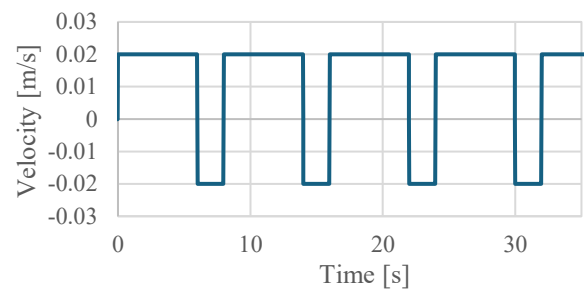
4. 2. 学会, 論文等投稿・発表状況

第 26 回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 (SI2025)において, これまでの実験と解析の結果を発表した[4]. また, この発表で優秀講演賞を受賞した.

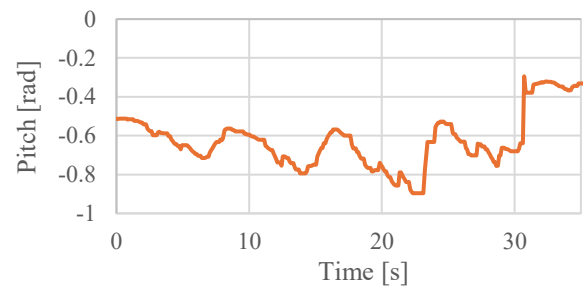
今後は, 走行パラメータが地形変化に与える影響の定量的評価を進め, 論文投稿することを計画している.

参考文献

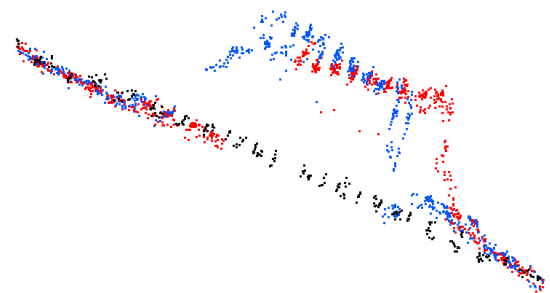
- [1] T. Seo et al., "Stair-climbing robots: A review on mechanism, sensing, and performance evaluation," IEEE Access, vol. 11, pp. 60539-60561, 2023.
- [2] 谷島諒丞, 永谷圭司, "軟弱かつ障害物がある斜面におけるクローラ機構の走行性能に関する検討," 第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), 1D3-06, 2023.



(1) 速度指令



(2) 姿勢（ピッチ角）の変化



(3) 点群

(黒：初期地形, 青：30 s, 赤：32 s)

図4 地形とロボットの姿勢の計測結果

- [3] 谷島諒丞, 永谷圭司, "軟弱かつ障害物がある斜面におけるクローラ機構の走行性能向上の一手法," 第68回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 24), 22E-1, 2024.
- [4] 谷島諒丞, "軟弱斜面におけるクローラ機構の障害物乗越え性能に対する前進・後進サイクルの影響評価," 第26回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 (SI2025), 3D6-18, 2025.

マルチビーム形成用球型レンズ回路の最適化

工学部

新井 麻希

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

Beyond 5G や 6G などの将来無線通信システムにおいて多数の端末の同時収容や大容量通信を実現するため、複数の方向へ同時に高利得な電波の放射を実現するマルチビーム形成技術が重要とされる。多数の素子を用いたアレーアンテナとアナログビームフォーミング用給電回路により、図 1 のように多数の高利得ビームを形成することで、空間リソースを効率的に使用することができる。[R1] 一方、アンテナ素子数やビーム数が増加するにつれて給電回路の構成が複雑化し、入出力ポート間の配線数や設計コストが増大するといった課題がある。

本研究では、入出力ポート間の配線簡易化のため、図 2 に示す球型ルーネベルグレンズを用いたアナログビームフォーミング給電回路を用いる。レンズ外周に配置した入出力ポートの位置関係とレンズ内部の電波伝搬を利用することで、信号の振幅・位相調整を行う。本構成により、従来の複雑なマトリクス型の配線を用いずに、水平・垂直両方向のマルチビーム形成を単一レンズ構造で実現可能である。

本研究の目的は、将来無線通信システムに向けた多数のビーム形成を簡易に実現する球型ルーネベルグレンズ給電回路を最適設計することである。これまでに検討してきた球型ルーネベルグレンズでは、理想的な連続の誘電率分布を半径方向に段階的かつ等間隔で近似する構成を用いていた。そのため、誘電率

分布が部分的に理想値からずれ、不要方向への電波放射が強くなるといった課題があった。

そこで本研究では、ルーネベルグレンズ内部の誘電率分布をより正確に実現するためのレンズ内部構成を導出する。また、入出力ポート間の振幅・位相特性および放射特性を評価し、マルチビーム形成に適した給電回路設計法の確立を目指す。今年度は主に、球型レンズ給電回路の設計や評価に必要な入出力ポート間伝搬特性の解析手法について検討を行った。

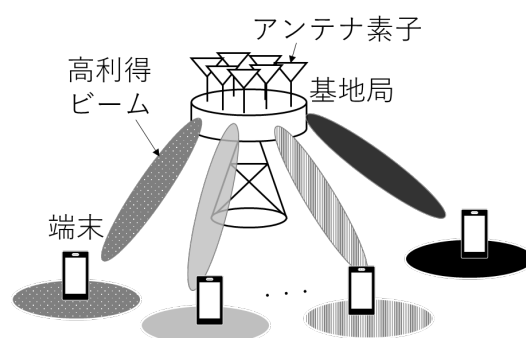


図 1 マルチビーム形成による
空間分割多重伝送

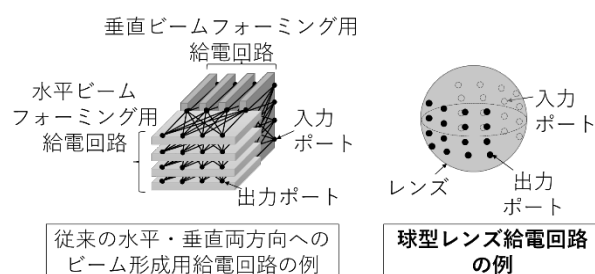


図 2 従来給電回路と球型レンズ給電回路

2. 研究計画

本研究ではルーネベルグレンズ内部の理想

的な誘電率分布特性を実現する最適レンズ構成を明らかにし、マルチビーム形成用球型レンズ給電回路の設計法を確立することを目指す。そのため、以下の研究計画に沿って検討を行う。

まず、レンズ給電回路の入出力ポート間伝搬特性を評価するための数値解析環境、およびレンズ内部の電磁界分布や外部への電波放射特性を評価するための電磁界解析環境を構築する。次に、球型ルーネベルグレンズ内部の誘電率分布特性について理論モデルの定式化を行う。得られた理論モデルに基づき、理想的なルーネベルグレンズ誘電率分布を実現する球型レンズ構成の最適設計を行う、また、導出したレンズ構成について、数値解析および電磁界解析により、レンズ内部の伝搬路における振幅・位相特性と、レンズ外部の近傍および遠方における電波放射特性を評価する。これにより、最適化したレンズ構成を用いた場合の所望方向へのビーム形成や不要方向への放射抑制効果について確認する。さらに、最適構成を用いた球型レンズ給電回路により複数の高利得ビームを形成した場合の無線通信システム特性を評価する。複数端末に対するマルチビーム形成を想定し、端末間干渉の抑制や通信路容量の改善効果を確認する。

以上の検討により、球型ルーネベルグレンズ給電回路の短期間かつ効率的な設計手法を確立し、将来の大容量無線通信システムへの適用可能性を明らかにする。

3. 計画の進行状況

3.1 進行状況の概要

2025年度は第2章の研究計画に記載したレンズ内部構成の最適化に先立ち、数値解析および電磁界解析を行うための計算機環境を構築した。また、球型レンズ内部の誘電率分布特性の理論モデルの定式化について検討した。特に、短期間かつ効率的な設計を実現するた

め、給電回路の入出力ポート間の振幅および位相特性を高速に導出する幾何差分計算法（GDCM）について検討を実施した。従来レイトレース解析手法との比較により、GDCMの妥当性と計算時間の短縮効果を確認した。これにより、レンズ構成を表す多種類のパラメタの最適解を効率的に探索できる見通しを得た。

3.2 球型レンズ給電回路の高速解析

本節では、給電回路に用いるルーネベルグレンズ [R2] の原理と、本研究にて検討したGDCMに関して述べる。

ルーネベルグレンズは、レンズ半径を R としたとき、レンズ中心からの距離 r に応じて下記の式に従い誘電率分布 $\epsilon_r(r)$ が定義される。

$$\epsilon_r(r) = 2 - \frac{r^2}{R^2}$$

この誘電率分布により、レンズ外周近傍の点波源から入射した電波が対向方向で等位相となり強め合うため、高利得なビームを形成できる。本研究で対象とする球型ルーネベルグレンズ給電回路では、送信信号をアンテナから放射する場合、図3のようにレンズ外周に配置した入力ポートからの信号がレンズ内部を伝搬し、複数の出力ポートに到達する。このとき、入出力ポート間の伝搬経路に応じた振幅と位相の変化を含めた信号が各アンテナから送信され、特定の方向に対して電波が強め合う。よって、入出力ポートの配置を適切に調整することで電波の放射方向を制御できる。

レンズ内部の伝搬経路は、レンズの誘電率分布とスネルの法則に基づき、屈折による波の進行方向 $\alpha(r)$ を下記の式を用いて逐次的に計算することで求められる。[R3]

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{\tan \alpha(r)}{r}$$

ここで、 θ はレンズ中心を原点とする極座標系における角度を表す。

上式に基づき伝搬経路を求めることでレンズ内の詳細な伝搬経路を算出し、入出力ポート間の振幅および位相を求められる。しかし、入出力ポートの組合せごとに経路計算が必要となるため、レンズの大きさやポート数が増加すると計算時間が大きく増加する。さらに、レンズ構成を最適設計する場合にはレンズの各種パラメタや入出力ポートの配置ごとに経路計算が必要となり、計算負荷が膨大となる。

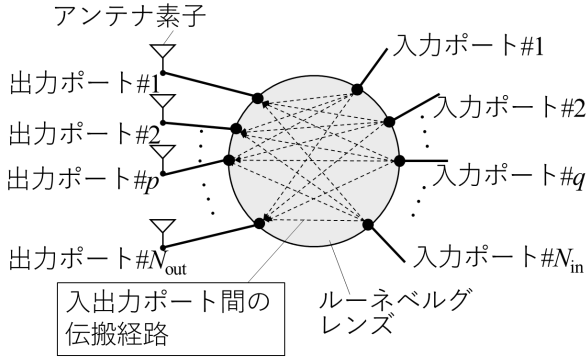


図3 球型ルーネベルグレンズ給電回路の例

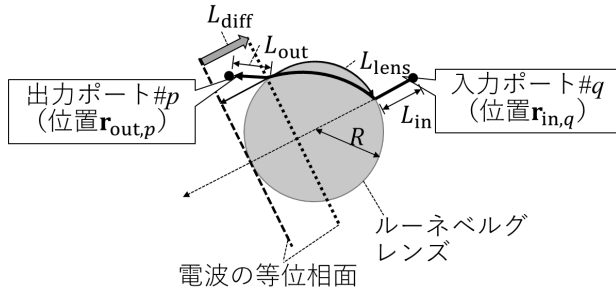


図4 入出力ポート間の伝搬経路と等位相面

そこで、より効率的に入出力ポート間の振幅および位相を導出するため、ルーネベルグレンズを通過した波の等位相面と出力ポート位置の幾何学的な差分に基づき、入出力ポート間の伝搬距離を直接求める幾何差分計算法（GDCM）を提案し、検討を行ってきた。

図4に示すように、入力ポートからレンズ表面までの距離を L_{in} 、出力ポートからレンズ表面までの距離を L_{out} 、レンズ内の伝搬距離を $L_{lens} = R(\pi/2 + 1)$ 、等位相面と出力ポートの距

離の差分を $L_{diff}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p})$ とすると、第 q 番目の入力ポートから第 p 番目の出力ポートまでの伝搬距離 L_{pq} は次式で表される。

$$L_{pq}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p}) = L_{in} + L_{lens} - L_{diff}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p}) + L_{out}$$

よって GDCM ではレンズ内部の伝搬経路を逐次的に計算するのではなく、入出力ポートと電波の等位相面の位置関係から、伝搬経路の長さに応じた振幅 $A_{pq}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p})$ と位相 $\psi_{pq}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p})$ を幾何学的な計算により導出できる。したがって、第 q 番目の入力ポートから第 p 番目の出力ポートの間のアナログビームフォーミング用重み付け係数に相当する複素伝搬路応答 S_{pq} を簡易に算出することが可能となる。入出力ポート間の複素伝搬路応答 S_{pq} は次式で表される。

$$S_{pq} = A_{pq}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p}) \exp(j\psi_{pq}(\mathbf{r}_{in,q}, \mathbf{r}_{out,p}))$$

GDCM の妥当性と計算効率を確認するため、数値解析による検証を行った。

まず、GDCM と従来の逐次演算を行うレイトレーシング手法を用いた場合の計算時間を比較した。従来レイトレーシング手法で7300秒かかる計算について、GDCM では0.011秒で計算完了するという結果を得た。このとき、GDCM による振幅と位相の計算誤差が従来レイトレーシングによる計算誤差以下になることも確認した。得られた結果より、GDCM はレイトレーシングと同程度の精度を保ちながら計算時間を 1.5×10^{-6} 倍に大幅に短縮できることを明らかにした。

次に、周波数10GHzにおける入出力ポート間の振幅と位相について、GDCM およびレイトレーシングによる計算値と、最適設計を行っていない段階的かつ等間隔な誘電率分布近似を用いた試作レンズによる測定値を比較した。図5に示す結果より、GDCM と従来レイトレーシングの値が一致しており、GDCM により振幅と位相が正しく計算されることを確認した。

一方、測定値と計算値との間に差が見られることから、給電回路の振幅・位相特性の実現性を高めるため、理想的な誘電率分布を再現するレンズ構成最適化が重要であると考える。

以上の結果から、GDCM が球型ルーネベルグレンズ給電回路の設計・評価において、計算時間と計算精度の両方の観点で有効な解析手法であることを示した。

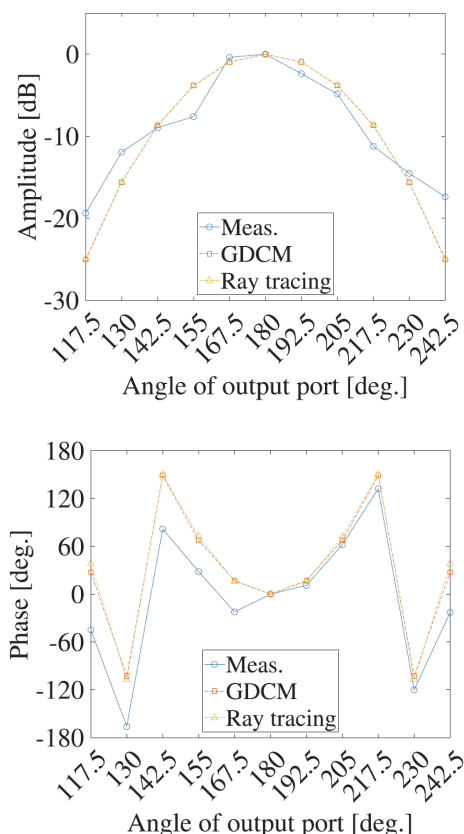


図5 GDCM と従来レイトレーシングによる入出力ポート間伝搬特性計算結果の比較 [1]

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

今後は、2025 年度に構築した解析環境と GDCM を用いて、レンズ内部構成の最適設計を引き続き実施する。球型ルーネベルグレンズを構成する各種パラメタについて、理想的なルーネベルグレンズ誘電率分布特性を実現する条件を明らかにし、数値解析および電磁界解析による電波放射特性や通信路容量特性の

評価を行う。これらの検討内容について、今後学会発表および論文を予定している。さらに、最適構成のレンズの試作や実験検証への展開も行う。

4.2 学会、論文等投稿・発表状況

本研究に関する 2025 年度の学会発表および論文投稿状況は下記の通りである。球型ルーネベルグレンズ給電回路の高速解析手法に関する論文が採録された。[1] また、複数の高利得ビームの制御に関する関連成果として、量子ウォークに基づく多腕バンディットアルゴリズムを用いた高速ビーム割当手法に関して国際会議にて発表を行った。[2]

- [1] M. Arai, M. Hasegawa, “Fast path analysis by geometric-difference calculation for beamforming network with Luneburg lens,” IEICE Commun. Express, Vol. 15, No. 3, pp. 54-58, 2026.
- [2] M. Arai, T. Yamagami, T. Mihana, R. Horisaki, M. Hasegawa, “Beam alignment for massive MIMO transmission based on multi-dimensional and multi-particle quantum walks,” 2026 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), pp. 381-386, 2026.

参考文献

- [R1] H. Tataria, M. Shafi, A.F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, F. Tufvesson, “6G Wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities,” Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1166-1199, 2021.
- [R2] R. K. Luneburg, M. Herzberger, “Mathematical Theory of Optics,” 1st ed., University of California Press, 1964.
- [R3] S.P. Morgan, “General solution of the Luneburg lens problem,” Journal of Applied Physics, vol. 29, no. 9, pp. 1358-1368, 09 1958.

眼内閃光提示のための電極配置推定手法

工学部 金丸 真奈美

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

視覚障害者の支援システムとして広く利用されているのは白杖であるが、片手を常に使用することができず緊急時に両手を使用することができないという問題点がある。これを受けてハンズフリーの支援システムも開発されているが、いずれも視覚障害者の視覚以外の感覚を阻害して外界の情報を伝える手段としている。これらを阻害することなく外界の情報を伝える支援システムが求められる。そこで本研究では視覚障害者でも認識することができる視覚情報である「眼内閃光」と呼ばれる現象を用いて視覚障害者の支援を行うことを目的とする。具体的には視覚経路を体外から電氣的に刺激することで閃光という形で障害物の位置を視覚障害者に示し、支援する。眼球周辺を刺激する場合、電極配置を調整することで眼内閃光の提示位置を調整可能であることが先行研究より示されている。しかしながら、この電極配置の調整は何度かの試行が必要であるため、被験者への負担を鑑みて電極配置の調整を自動で行うシステムが必要とされている。本研究では眼内閃光を意図した位置に提示可能な電極配置を自動で選出するシステムを構築し、その有効性を示す。

2. 研究計画

（Step1）顔面の特徴量取得

人間の顔の表面は眼窩や頬骨、筋肉等によってそれぞれ異なる凹凸をもつ。眼内閃光を

意図した位置に提示する電極配置を報告した先行研究では、電極が意図した領域を刺激するためには顔面表面の形状を加味した電極の配置が必要であると述べられている。したがって眼内閃光を意図した位置に提示するためには顔面表面の形状の情報が必要不可欠であると考えられる。そこで本研究では顔面の特徴量を取得し個人差の大きい顔面表面の特徴量を取得し、眼内閃光を意図した位置に提示可能な電極配置の推定に使用するものとする。

（Step2）刺激条件と顔面の特徴量、眼球表面の刺激領域の機械学習

眼内閃光の提示位置と眼球表面の刺激位置に対応関係があることが先行研究にて明らかにされている。したがって、意図した位置に眼内閃光を提示する場合、意図した眼球表面の領域を刺激することを可能とする電極配置を調べる必要がある。実際に被験者に電極を配置し、眼内閃光の提示位置を報告してもらうことで、顔面上の電極配置と眼内閃光の提示位置の対応関係を調査することができるが、人間の顔面表面の形状は個人差が大きく、それぞれの被験者に合致した電極配置を調査する必要がある。したがって本研究では、電磁界シミュレーション上でヘッドモデルの顔面表面の特徴量を取得し、電極配置と眼球表面の刺激領域を収集することで、これらの関係を機械学習にかけ、意図した眼球表面の領域を刺激可能な電極配置を明らかにする。

（Step3）複数の人間の顔面の特徴量を用いた

機械学習

本研究では個人の顔面形状に依存する、意図した位置に眼内閃光を提示可能な電極配置の調整を瞬時に行うことができるシステムを目指す。したがって、**Step2**の学習モデルを複数の人間のヘッドモデルを使用しての学習に拡張することが求められる。**MRI** で取得した人間の頭部の情報に基づいてヘッドモデルを作成し、それぞれのヘッドモデルにおいて同様に意図した眼球表面の領域を刺激可能な電極配置を出力可能なシステムを作成、検証する。

3. 計画の進行状況

眼内閃光を提示可能な電極配置は **SimNIBS** を使用してシミュレーションして求めた。電極配置は関連研究で使用されたものを参考に表 1 に示す電極配置の組み合わせで **80** パターン用意し、人体メッシュモデルは **SimNIBS** のサンプルモデルである **Ernie** を使用した。**SimNIBS** による顔面の電気刺激の刺激条件は **1mA**、**10Hz** とし、各電極は関連研究において使用されているジェルパッドの **42mm×42mm** の寸法で設定した。また、表 2 に示すように人体メッシュモデルの導電率も **10Hz** の電気刺激に対応した値とした。

顔面の特徴量抽出には **Dlib** を使用し、図 1 に示す **68** 点の特徴量を使用した。**Dlib** の特徴点は、事前に学習された顔形状モデルを用いて顔の特定部位（眉、目、鼻、口、輪郭）にわたる **68** 点の座標を推定する。この特徴点を利用することで、顔面の構造を数値的に表現し、個人の顔面形状の違いを考慮しながら電極配置の最適化が可能となる。**68** 点の顔面特徴量の座標を学習モデルに使用する前に、**80** パターンそれぞれの電極によって刺激された眼球表面座標の内、最も強く刺激された座標と **68** 点の顔面特徴量の座標とのユークリッド距離を算出した。ユークリッド距離は式 (1) で算出した。

Euclidean distance =

$$\sqrt{(x_s - x_f)^2 + (y_s - y_f)^2 + (z_s - z_f)^2} \quad (1)$$

TABLE I. シミュレーションに使用した電極座標

電極	座標		
1	-56.1	72.8	17.6
2	-47.9	78.9	18.4
3	-36	83.9	18.6
4	-25.2	87	19
5	-16	88.2	18.7
6	-2.4	89.7	17.5
7	8.9	90.1	19.4
8	17.6	88.9	18
9	29.7	86.4	18.9
10	42.3	80.3	15.5
11	52.8	73.8	13.7
12	57.8	66.31	23.9
13	25.2	89.02	28.21
14	61.91	61.96	-27.86
15	20.72	82.38	-29.32
16	60.92	63.15	11.09
17	-0.81	90.4	20.72
18	-32.33	86.49	30.09
19	-58.37	66.4	28.5
20	-1.03	99.96	-23.91
21	-38.82	78.54	-27.97
22	-67.2	59.45	-24.09
23	-66.58	53.11	13.43
24	-42.1	76.2	-22.6
25	-53.8	65.5	-56.9
26	39.7	76.2	-25.2
27	51	66.1	-59.2
28	36.84	60.07	-94.86
29	18.1	78.77	-95.18
30	43.04	69.8	-66.64

式(1)における各変数の説明は表 3 に示す。
一つの刺激電極の座標に対して式(1)の計算
を 68 パターン行った。

学習モデルには重回帰分析を採用した。目
的変数として電極配置の座標を使用し、説明
変数として「右目、左目のどちらを刺激した
か」、「眼球表面の刺激された座標」、「顔面
の特徴量 68 点と各刺激電極座標とのユークリ
ッド距離」の 3 種類の変数を使用した。最終
的に意図した位置を刺激可能な電極配置の座
標を推定し、回帰するモデルデザインとした。

本モデルの評価手法としてシャッフル交差
検証を使用した。データを 10 分割した内、
20%がテストデータ、50%がトレーニングデ
ータとして選択された。また 10 回試行を繰り
返すことで他のデータが採用された場合の CV
スコアに偏りがいないか確認した。

TABLE II. シミュレーションモデルの電気伝導率

組織	導電率[S/m]
白質	0.027656
灰白質	0.027512
脳脊髄液	2.0000
骨	0.020028
頭皮	2.0000×10^{-4}
眼球	0.41113

TABLE IV. RESULT OF SHUFFLE-SPLIT CROSS-VALIDATION

	Split 1	Split 2	Split 3	Split 4	Split 5	Split 6	Split 7	Split 8	Split 9	Split 10	Average
Trial 1	0.977	0.998	1.000	0.982	0.992	0.990	0.992	1.000	0.997	0.999	0.993
Trial 2	1.000	0.974	0.971	0.964	0.945	1.000	1.000	0.984	0.970	1.000	0.981
Trial 3	0.993	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	0.980	0.997	0.997
Trial 4	0.994	0.996	1.000	0.999	1.000	0.976	0.999	0.999	1.000	1.000	0.996
Trial 5	0.977	0.986	1.000	0.995	0.977	0.995	0.994	0.998	0.981	0.995	0.990
Trial 6	1.000	0.992	0.999	0.956	1.000	1.000	0.999	0.988	0.981	0.978	0.989
Trial 7	0.984	0.987	0.999	0.971	1.000	0.998	0.987	1.000	1.000	0.962	0.989
Trial 8	0.997	0.991	1.000	0.997	0.970	0.992	0.997	0.996	0.949	0.992	0.988
Trial 9	0.987	0.999	0.995	0.986	0.994	0.985	0.994	0.989	0.993	0.994	0.991
Trial 10	0.996	1.000	0.998	0.986	0.992	0.984	0.983	0.995	0.998	0.999	0.993

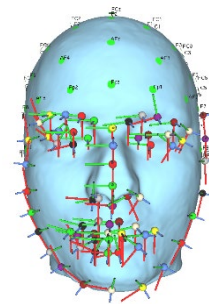


Figure 1. Ernie における 68 点の顔面特徴量

TABLE III. ユークリッド距離算出に使用した変数

変数	説明
x_s	刺激電極の座標の x 座標
x_f	顔面特徴量の x 座標
y_s	刺激電極の座標の y 座標
y_f	顔面特徴量の y 座標
z_s	刺激電極の座標の z 座標
z_f	顔面特徴量の z 座標

表 4 に提案モデルのシャッフル交差検証の結果を示す。表 4 に示す値は 0 から 1 の値で示される CV スコア (Cross-Validation Score) であり、1 に近いほど優れたモデルであることを示す。表 4 を見ると提案モデルはどの分割データ、どの試行においても 1 に近い値を示していることが分かる。これにより、顔面の特徴量を使用した本モデルの有効性が示された。

Features,” 48th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2026. (In progress)

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

提案モデルではErnieのみを人体メッシュモデルとして採用しているが、実際には複数の人体の顔面の特徴量の変化を許容したモデルを作成する必要がある。今後はMRI等で取得した別の人体メッシュモデルも使用したモデルを作成することで、汎用性を高めていく。

提案モデルでは刺激電極と顔面特徴量 68 点とのユークリッド距離を採用したが、単純なユークリッド距離の採用では顔面の曲面等を表現できていない可能性がある。そのため、より顔面の凹凸を表現可能な説明変数について議論することで、様々な人体メッシュモデルに対応可能なモデルにしていくことを目指す。

またシステムが推定した、意図した位置に眼内閃光を提示可能な電極配置を検証し、システムの推定とどの程度乖離しているのかを明らかにする。加えて、眼内閃光の歩行支援システムへの活用に際し、複数方向への眼内閃光の提示も求められると考えられる。したがって、今後は複数電極の推定にも使用可能なモデルにしていく必要がある。

学会発表状況

Manami Kanamaru, Keita Tanaka, “3D Coordinate Estimation System for Optimal Facial Electrode Positioning Using Facial

耐水性可食ソフトロボット

工学部 深田 健太

1. 序論

<背景・目的>

電子デバイスは人類社会の隅々で活用され必要不可欠な存在であるが、使用後に破棄した場合は分解されず、また人や動物が摂取すると健康被害につながる恐れがある。そこで近年、人や動物に害の無い食品素材（可食材料）によって構成されるデバイスに注目がある。使用後には環境に負担をかけずに破棄をすることも可能なため、体内や自然環境を探索するソフトロボットへの活用についての検討も活発である。しかし、可食材料は水を吸収しやすく、水系環境での利用は容易ではない。我々はこれまでに可食電子回路^[1]や可食耐水コーティング^[2]など、食品素材のデバイス利用について検証を重ねてきている。

以上より、本研究では「可食ソフトロボットの耐水性向上」を技術的課題とし、耐水性可食材料によるロボット作製に取り組み、水の多い場所でも動作し、使い捨て可能な可食ロボットを提案することを目的に実施する。

<研究の特色・独創的な点>

可食ロボットは、一定時間動作したあとに、分解、消化されることを必要とする。一般的に可食材料は吸水性が高く容易に変形を起こしてしまうが、我々は、融点の違いを利用したミセル化によって、親水性基板中に可食疎水性粒子を分散させる「疎水化可食材料」を提案^[3]し、水の吸収抑制技術を確認している点に特色がある。この材料をソフトロボットに用いることで、これまで実現していない水

系環境で動作可能な可食ソフトロボットの創成につなげる。将来的に、人の消化管における胃液や腸液、自然環境、たとえば、海洋や河川、インフラ上下水道管等において安全にデータを収集し、また治療や修理に取り組む、ヘルスケア・環境ロボット、センサーへの適用を見据える。あるいは食品の製造、陳列分野での自動ロボットを念頭に、ロボットハンド先端の可食化や、ロボットアームを食品素材で構成することに挑戦し、食品製造分野での異物金属片やプラスチック片など混入防止をめざす。以上の将来的なユースケースを想定し、「可食ソフトロボット、センサー分野」の創成に取り組む。

2. 研究計画

2.1. 材料検討

複数の可食材料（ゼラチンやアガロース、キサンタンガムなど）について、食品中に含まれる素材の混合による機能最適化や改善を検討し、ロボット素材としての検証を行う。伸縮性や曲げ性などの機械的特性、導電性や絶縁性などの電気的特性等について調査を進める。疎水化可食材料（図1）を混合することで、撥水性や付着性等、化学的特性の制御にも取り組む。



図1 疎水化可食材料

2.2. ロボットアーム設計、作製

ロボットハンド先端部分を可食材料でコーティングすることや、3D プリンターによってロボットアームの型枠を作製し、疎水化可食材料を流し込むことでロボットアーム本体を作製する。疎水化されていることで離形性の向上を期待し、離形が困難な場合は、アームの形状変更や、植物油等を用いて離形性の向上に取り組む。

2.3. ロボットアーム動作検証

機械的あるいは電氣的制御によってロボットアームを動作させる（図 2）。機械的制御の場合は、アームに中空構造を導入しておき、空気や水を注入することで、アームを膨らませたり、しぼませることでモノをつかむ動作が可能か検証を行う。電氣的制御の場合は、アームにイオンを含有させておき、外部電源による電位差を用い、イオンが移動することでアームを変形させモノをつかませる。以上より、耐水性可食材料を軸にソフトロボット研究を推進する。

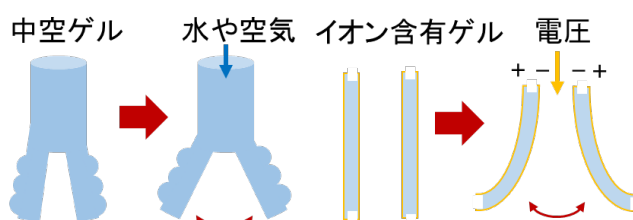


図2 ロボットアームの例

3. 計画の進行状況

当初計画の通り、疎水性材料（蜜蝋などの食用ワックス）を混合したロボット素材の作製をめざし検討を開始したが、混合による素材の曲げ性低下が懸念されたことから、図 3 に示すロボットハンドの動作部と撥水機能を分離した構造で検討を進めることとした。図 3 の構造は“人間が作業する際に手袋（グロー

ブ）を装着する”ことと類似の発想であり、ロボットの柔軟性を活かしながら、防汚、防水機能を手袋（グローブ）が担うことで、フレキシブル性と防水性の両立をめざすものである。これを実現するためには、柔軟性をソフトロボットだけでなく、撥水機能を担うコーティングにも備える必要がある。しかしながら、一般的な撥水コーティングはガラス基板やプラスチックフィルムへのコーティングであり、ロボットの繊細な動きに追従できるほどの柔軟性がない。

一方、超撥水コーティングを実現するには、ナノ・マイクロの凹凸構造を必要とし、マイクロサイズの細孔を有するメッシュを基材とする研究例が数多くこれまでに提案されている。ところが、このメッシュ基材を可食超撥水に適用したことはこれまでに例が無く、本構造はロボットアームを保護するネット、グローブとしての素材として活用できるのではないかと着想するに至った。この構造によってロボットハンドの柔軟性を維持しつつ、超撥水グローブ（ネット）による耐水性の向上も期待できることから、本研究では図 3 の構造を水中で利用できるソフトロボットとして検証をすることとした。

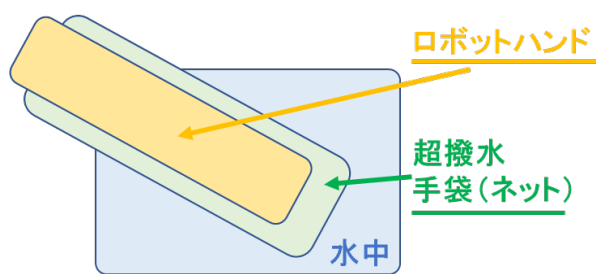
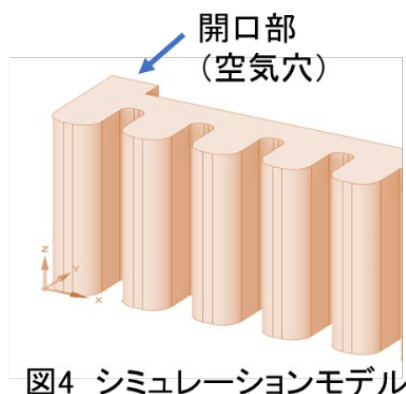


図3 耐水性ロボットハンドの提案モデル

3.1 ソフトロボットの設計

まず、本構造の妥当性を検証するために、有限要素法シミュレーションモデル (FEMTET、ムラタソフトウェア株式会社) による力学的

検証を進めている。図 4 はシミュレーションのモデル（ロボットアームの先端で、物体を掴むアームの片側）の例であり、開口部から内部が空洞でつながっており、空気等を流入させることで、曲げ具合を評価している。素材の粘弾性（たとえばゼラチンや寒天などのゲル素材）等の情報をパラメータとすることで、最適形状を探索できる環境を構築している。



3.2 超撥水コーティング

一方、超撥水メッシュ・ネット構造については、柔軟性を有するポリ乳酸メッシュを基材として、可食の撥水性素材（蜜蝋）をスプレーコーティングすることで作製できることを確認している。図 5 は作製した超撥水メッシュに対して、水 $10\mu\text{l}$ を滴下した際の様子である。高い接触角となっており、傾けると水は転落する。また走査型電子顕微鏡による観察では、撥水性素材が階層構造を持って、繊維状に製膜されていることが確認できている。メッシュ上に製膜しているため、フレキシブルであり、耐摩耗性については改善を必要とするが、使い捨てのグローブとして適用可能となる見込みである。本取り組みについては、可食超撥水性メッシュとして学術誌へ論文を投稿し、現在は査読中（minor revision）である。

以上より、ロボットアームの設計および、

アームとしての機能と耐水性を両立させる指針について一定の見通しを得ている状況であり、本研究の当初目標である「耐水性可食ソフトロボット」の実現に向けて着実に取り組みを進めている状況である。

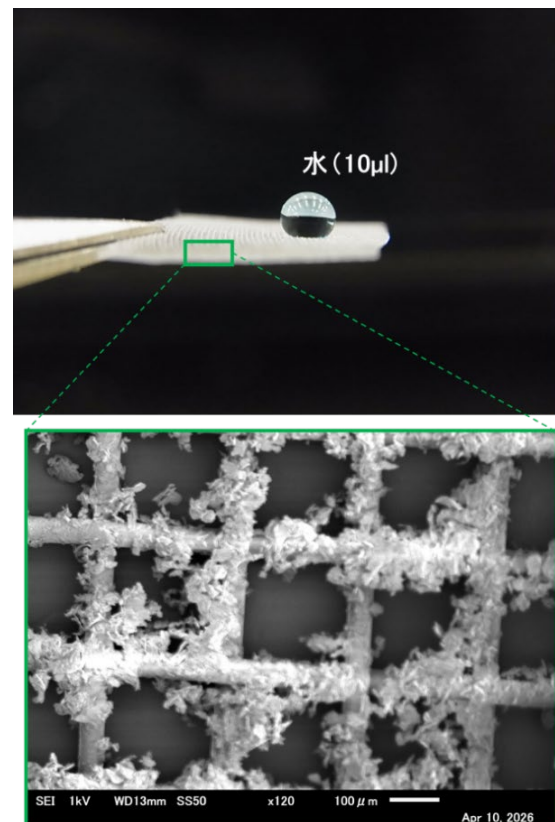


図5 耐水性手袋(メッシュ素材)の超撥水性

4. 今後の計画及び学会、論文等発表状況

<今後の計画>

4.1. 水中でのソフトロボットの検証

超撥水グローブおよびソフトロボットを組み合わせることで、本提案構造を作製し、水中での耐水性や操作性を検証する。

また、可食性については別途検証が必要であり注意を要する。一般的なスーパー等で購入できる食品でデバイス・ロボットを作製できる可能性もあるが、現状では食品用途ではない試薬を用いてデバイス・ロボットを作製していることや、食品用途の素材であったと

しても人体における一日あたりの摂取上限量などの制約があることから、動物試験等での安全性の確認が必要になると考えられる。

4.2. フィードバック制御によるロボット動作の改良

ロボットアーム先端への薄膜圧力センサーの導入やカメラ画像のデータ解析（機械学習）によって、物体認識、硬さ認識を行い、食品などの柔らかい素材を運搬できる可食ソフトロボットを構築し、ソフトロボットの可能性を拡大する。

4.3. 多関節アームなどロボットの改良

ソフトマテリアルの特性を活かし、関節（屈曲する点）を増加させて多自由度で動作するロボットアームを作製する。あるいは、蛸や蛇のように巻き付くことで、水中で物体を操作する、特色あるソフトロボットを作製する。

4.4. 自律型ロボットへの展開

本ロボットを動作させるためには、電源や外部からの送気系、送液系を必要としており、自律的な動作をさせることができない課題がある。将来的には、バッテリーの可食化や、毛細管力などを用いることで送液系の可食化をすすめ、外部電源や外部送液系・送気系に頼らずに、自律的に動作可能なソフトロボットを構築する。以上より、将来的に体内や自然環境中で動作可能な可食ソフトロボットを提案する。本研究の推進によって、体内で自律的に検査、治療するロボットや、工場の配管内等を自律的に修復するロボット、自然環境中で生態系を自律的に調査するロボットなどを、生体や環境に負担をかけずに、安全に行うことができる社会の実現が期待できる。

<学会・論文等発表状況>

2025 年に開催された大阪・関西万博では、EU での先駆的な取り組みとして、可食ロボットに関する科学ワークショップ（スイスパビリオン）が開催されており、深田が登壇し、可食センサーや通信技術を紹介した。また、スイス、イタリア、英国、日本の関連分野の研究者と交流し、ディスカッションや可食ロボットの実食会等に参加した。健康・ヘルスケア、環境向けのロボット、センサ技術における「可食」の今後の可能性や連携について意見交換を実施することができた。

また、本研究における成果の一部として、可食超撥水技術については、論文を査読有りの学術誌（American Chemical Society）へ投稿中（minor revision）であり、ほか国際学会等へも発表を予定している。

1. 深田 健太, 「可食ワイヤレス通信に向けて」大阪・関西万博スイスパビリオン 科学ワークショップ (RoboFood)、口頭発表、2025 年、大阪

5. 参考文献

- [1] Fukada, K*; Tajima, T.; Seyama, M. Thermally Degradable Inductors with Water Resistant Metal Leaf/Oleogel Wires and Gelatin/Chitosan Hydrogel Films. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. **2022**, 14, 39, 44697-44703.
- [2] Fukada, K*; Hayashi, K. Degradable Superhydrophobic Coatings Using the Solid-Liquid Transition of a Multilayer Structure near Body Temperature. *ACS Food Sci. Technol.* **2024**, 4, 1, 36-39. Suppl. Journal Cover.
- [3] Fukada, K*; Hayashi, K. Thermally Degradable Water Diffusion Barrier Assembled by Gelatin and Beeswax toward Edible Electronics. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. **2024**, 16, 31, 41223-41229.

密集市街地の持続可能な防災まちづくり

工学部 田中 由乃

協力者

独立行政法人都市再生機構 岡本佳久

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

地震時の延焼や避難等、防災上多くの課題を抱える密集市街地は、東京都内においても複数地域が存在している。その改善は都市の安全確保のため喫緊の課題であり、2021年3月に閣議決定した住生活基本計画（全国計画）においては、地震時等に著しく危険な密集市街地の解消とそれにあわせた地域防災力の向上に資するソフト対策を強化すること、とされた。このような背景に加えて、人口減少や地域コミュニティの希薄化が進行する現在、単なる建替えやインフラ整備にとどまらない、地域の持続的再生に向けた包括的なまちづくりの視点が求められている。そこで本研究では、密集市街地における物理的・社会的構造の再編を通じた地域再生のあり方について、現地調査を通じて明らかにすると同時に、アクション・リサーチの手法で実際に再生プロセスに関わることで、地域の独自性を活かした地域拠点的空間の維持管理や地域コミュニティの醸成を通じた、持続可能な地域づくりの新たな手法を提案することを目的とする。

2. 研究計画

本研究は密集市街地整備事業に取り組んでいる独立行政法人都市再生機構（UR 都市機構）との協働のもと、研究室の学生グループとともに実際のフィールドを通じて実践的なアクション・リサーチを行うことを研究計画の中心とする。

その準備と実現のため、研究は主に以下の3つのパートに分けられる。

1) 既存事例の分析と課題整理

国内の密集市街地再生事例について、文献調査、現地視察をもとに比較検討し、空間構成、施策、住民参加の手法などを整理・分析する。

2) 現地プロジェクトへの参加

渋谷区本町を対象に、現在行われている住民参加活動の運営に加わるとともに、運営団体へのヒアリングなどを行う。具体的には、2023年度に取り組みがスタートした、独立行政法人都市再生機構（UR 都市機構）と特定非営利活動法人ピープルデザイン研究所による「わざわざ空き地」のプロジェクトに参画する。本プロジェクトはこれまでに、密集市街地再生に関するシンポジウムの開催や、空き地を利用した菜園運営などを行っている。本研究を通じて、「わざわざ空き地」プロジェクトと協力体制を築くことで、対象地域への無理のないアプローチが可能である。

3) 活動拠点空間・地域コミュニティの醸成を通じた地域づくりの手法の提案

文献調査やプロジェクト参加を通じて得られた知見をもとに、対象地域の特色を踏まえた地域づくりについて、空地活用の空間的デザイン、およびイベント等の運営の仕組み等、ハードとソフトの両面から新たなアイデアを創造・提案する。提案は事業者・地域関係者と

も共有し、その有効性について議論する。

3. 計画の進行状況

1) 既存事例の分析と課題整理

国内の密集市街地再生事例については、文献調査及び中野区弥生町の現地視察を行った。また、葛飾区西新小岩五丁目地区および四つ木二丁目地区を対象に木造密集市街地整備の進め方について行政へのヒアリング調査を行った(論文-1)。さらに、対象敷地である渋谷区本町において、密集市街地整備の過程で一時的に生じる空き地の今後の活用の展開が課題となっていたため、空き地の活用事例についての文献レビューを行い、活用方法別の長所と短所を整理した(表1)。

2) 現地プロジェクトへの参加

現地プロジェクトの対象地である本町地区は渋谷区の北西部に位置し、主に住居系用途地域であるとともに、不燃化特区(東京都が定める制度で、木造住宅が密集する地域において、地震や火災による被害を軽減するために特に改善が必要な地区を指定し、火災に強いまちづくりを推進するもの)に指定されている(2025年度まで。2026年度からは一部地域が「整備地域等不燃化集中促進事業」地区に指定)。以上の背景から、本町地区においてはこれまで主に以下のような事業・施策が行われてきた。

①地区防災街区整備地区計画の策定・変更

本町二・四・五・六丁目が対象であり、既存の防災街区整備計画の拡大・見直しが行われた(2008年8月-)。また、水道道路沿道に対するまちなみ誘導型の地区計画が変更された(2025年8月変更・決定済み)。

②道路整備

主要生活道路5号線及び8号線において、幅員6mの道路として現在拡幅整備が行われている。この道路整備により、消防活動困難区域の解消や不燃領域率の向上につながる効果が見込まれる。

③防災性の向上

木造住宅密集地域の改善のため、耐火・不燃化の進展状況を評価している。防火規制区域や準防火地域の指定の検討、ならびに本町地区防災都市づくりグランドデザインの策定(2021年3月-)が行われている。

④まちづくり・居住環境の改善

良好な住環境の確保(道路や公共空間・商業のにぎわい)を図るため、水道道路沿道エリアまちづくりビジョン策定(2024年3月-)や、地区計画を通じた建物・敷地利用のルールの見直しが行われている。

さらに2023年度からは、渋谷区本町4丁目内の空き地の空間活用として、防災と菜園を組み合わせた「ぼうさいえん」の運営が行われている(土地所有:UR 都市機構、管理:NPO 法人ピープルデザイン研究所、写真1)。本プロジェクトは密集市街地の整備改善の過程で一時的に生じている空き地空間を活用した取り組み事例であり、敷地には、地域の防災シェア倉庫である「防災POD」が設置されている。防災PODには備蓄食料や保存水などの災害時用の防災用品だけでなく、日常時にも活用できるテーブル、椅子、パラソルなどの備品が収納されている。さらに、敷地には花壇やプランターが設けられ、地域の菜園スペースとして活用されている。菜園の手入れは地域住民らの参加によって行われ、水やり、収穫などの菜園活動はLINEのオープンチャット機能を用いてメンバー(2026年4月7日現在59名)に共有される。菜園管理に用いる肥料やスコップなども防災POD内に保管されている。

本研究においては、まず現在行われているシェア菜園「ぼうさいえん」の取り組みや敷地に設置されている「防災POD」の見学会を実施した。さらに、見学会を踏まえて空き地を用いたイベント案を複数提案し、敷地関係者との議論を重ねた。最終的に、次項で述べるイベントの出展ブースの1つとしてワークショップを実施した。

3) 活動拠点空間・既存コミュニティの醸成を

表 1 空き地活用方法とその長所・短所

商業目的	用途	畑・運動場(6)	駐車場(13)	イベント利用(5)(15)
	長所	・健康教育や環境教育への貢献(6)	・経済的価値を創出(13) ・将来的な恒久開発までの緩衝的機能を果たす(13)	・地域活性化(15) ・資金と調整力が必要(15) ・多様な人々との交流が生まれやすい(5) ・地域の街づくり活動においても新たな展開が生まれやすい(5)
	短所	・維持コストや季節依存が大きい(6)	・恒久的(13) ・土地利用との整合性を保つ必要がある(13)	・運営上の課題が発生しやすい(15)
	用途	仮設店舗(12)	キッチンカー(6)	道の駅(9)
	長所	・初期投資が安く済む(12)	・収入源になる(6)	・住宅市場の空き地よりも頻繁に発生し、回転率も早い(9)
	短所	・集客が見込めない場合がある(12)	・初期投資や営業許可の課題(6)	・記載なし
コミュニティ形成目的	用途	地域施設代替（治療院・保育園）(7)(12)	農園(7)(12)	広場(7)(11)(12)
	長所	・整備が追いついていない地域の機能を代替することができる(12)	・目的がはっきりしているため主体間の運営がしやすい(12) ・地域の人々の中で交流が生まれる(12) ・都市部でも農業体験ができる(12) ・景観改善(7) ・防犯性向上(7) ・地域マネジメントの基盤を形成(7) ・高齢者の孤立防止(7) ・子育て支援(7) ・地域交流の促進(7)	・初期費用が安く済む(12) ・賑わいを形成する(11) ・都市の核にする(11) ・ヒートアイランド緩和(7) ・雨水浸透(7) ・生物多様性保全(7) ・住民の交流や地域コミュニティ形成の場として機能(7) ・都市スプロール抑制のためのバランス要素(7)
	短所	・十分なスタッフの確保が難しい(7)	・住民や団体の高齢化・担い手不足により活動が持続しにくい(7) ・所有者不明土地や管理不全地では活用が難しく、合意形成が必要(7) ・暫定利用の場合、長期的収益を得にくく助成金や自主財源の確保が課題(7)	・目的がはっきりしていないため管理・運営の主体が積極的に考案しなければならない(12) ・整備・維持にコストがかかる(11) ・都市内部に位置するため、開発ポテンシャルの算出を複雑化させる(7)
	用途	情報収集とマッチング(8)	防災目的の空地化(8)	コミュニティガーデン(7)
	長所	・民間参加が広がる(8) ・初期コストが小さい(8)	・防災力&安全性UP(8) ・景観改善(8) ・固定資産税の優遇で協力を得やすい(8)	・住民の運動・交流・精神的健康を促進(7)
	短所	・担い手などの継続性が欠ける(8) ・責任分担が重い(8)	・対象要件が厳しい(8) ・高級活用に直結しにくい(8) ・維持管理の負担(8)	・記載なし
環境緑化目的	用途	食物生産や共同利用を目的とした緑地(14)	見たい・景観の改善を目的とした緑化(14)	緑地・ミニパーク(4)(9)(13)(14)
	長所	・地域住民間の社会的交流の改善(14) ・その土地への愛着心の向上(14)	・記載なし	・市民の幸福度向上(4) ・都市環境問題の緩和(4) ・都市のレジリエンス（回復力）強化(4) ・微気候と大気質の改善(4) ・生活の質の向上と生物多様性の支援(4) ・心理的な安らぎ(4) ・健康と社会的交流の促進(4) ・生態系機能の改善(13)
	短所	・記載なし	・維持管理の手間とコストの増大(14) ・他の層との摩擦を生む可能性(14)	・資金不足(4) ・計画の不備(4) ・維持管理の困難さ(4) ・合意形成の難しさ(4) ・利用の偏り(4) ・放置化(9) ・土壌汚染や土壌侵食などの環境問題が発生(14)
	用途	都市緑化(2)	緑化・農的利用による環境再生(8)	環境教育・生態系との共存(8)
	長所	都市の緑化向上(2)	・景観改善(8) ・都市のヒートアイランド抑制(8) ・住民の癒し効果(8)	・子ども・学生の環境学習の場(8) ・自然との接点増(8)
	短所	・記載なし	・維持管理の手間・水管理や雑草対応が必要(8)	・活動が個別依存になりやすく、継続的な資金と人材確保が課題(8)
	用途	都市環境改善・低炭素効果(8)	空気の質の向上(3)	
	長所	・持続可能な都市構造形成(8) ・脱炭素への貢献(8)	・大気汚染の抑制(3)	
その他	用途	工業用地・住宅用地(10)	民間の屋内施設(11)	非公式な公共空間(11)
	長所	・都市開発の主要な原動力となる(10)	・サービスが安定して提供される(11)	・低コストで交流が生まれる(11) ・柔軟に活用できる(11)
	短所	・記載なし	・公共性が低く、誰にでも気軽に利用できるとは限らない(11)	・整備不足で安全や持続性に課題(11)

参考文献

- (1) Glackin, S., & Dionisio, M. R. (2016). 'Deep engagement' and urban regeneration: Tea, trust, and the quest for co-design at precinct scale. Land Use Policy, 52, 363–373.
- (2) Tu, T., Wang, X., & Long, Y. (2024). Spatiotemporal changes of urban vacant land and its distribution patterns in shrinking cities on the globe. Science of the Total Environment, 947, Article 174424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174424>
- (3) Kim, G., Newman, G., & Jiang, B. (2020). Urban regeneration: Community engagement process for vacant land in declining cities. Cities, 102, Article 102730.
- (4) Naghibi, M. (2024). Rethinking small vacant lands in urban resilience: Decoding cognitive and emotional responses to cityscapes. Cities, 151, Article 105167.
- (5) 田中 智朗・阿部 大輔 (2021). コミュニティ型暫定利用による空地活用の実態と事業期間終了後の動向に関する研究. 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集, 日本都市計画学会, vol.19, pp.29-39
- (6) 江坂 巧・石川 翔悦・泉山 望威・宇崎 勝也 (2022). 東京都心部の民有地における「暫定広場活用」の機能・空間特性及び事業マネジメントの特徴. 都市計画報告集, vol.21, No. 4, pp.556-562.
- (7) Schiller, G., Blum, A., Hecht, R., Oertel, H., Ferber, U., & Meinel, G. (2021). Urban infill development potential in Germany: Comparing survey and GIS data. Buildings and Cities, 2(1), 36–54.
- (8) 国土交通省 不動産・建設経済局 土地政策課. 空き地等の適正管理と利活用に関する取組事例集 <https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/content/001880207.pdf> (最終閲覧日 2025.11.30)
- (9) Lee, R. J., & Newman, G. (2019). A classification scheme for vacant urban lands: Integrating duration, land characteristics, and survival rates. Journal of Land Use Science, 14(4–6), 306–319.
- (10) 内閣官房まち・ひと・しごと創生本部事務局, 内閣府地方創生推進事務局 (2025). 「小さな拠点」づくり 事例集〜取り組み概要と形成プロセス〜令和 7 年7月 第4版 <https://www.chisou.go.jp/sousei/about/chiiisanakyoten/pdf/jireisyuu.pdf> (最終閲覧日 2025.11.30)
- (11) Martí, P., García-Mayor, C., & Serrano-Estrada, L. (2019). Identifying opportunity places for urban regeneration through LBSNs. Cities, 90, 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.02.001>
- (12) 大野智佳 (2018). 暫定利用および仮設利用による市街地内の空地・空家活用手法に関する研究, 東京大学修士論文.
- (13) Song, X., Wen, M., Shen, Y., Feng, Q., Xiang, J., Zhang, W., Zhao, G., & Wu, Z. (2020). Urban vacant land in growing urbanization: An international review. Journal of Geographical Sciences, 30(4), 669–687. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1749-0>
- (14) Stewart, W. P., Gobster, P. H., Rigolon, A., Strauser, J., Williams, D. A., & van Riper, C. J. (2019). Resident-led beautification of vacant lots that connects place to community. Landscape and Urban Planning, 185, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.011>
- (15) Konsti-Laakso, S., & Rantala, T. (2018). Managing community engagement: A process model for urban planning. European Journal of Operational Research, 268(3), 1040–1049.

通じた地域づくりの手法の提案

2025 年 11 月 22 日に行われた「第 2 回本町防災ランチ」イベントの出展ブースの 1 つとして、近隣住民の防災 POD の認知度を高めると同時に、日常時から使える防災 POD の中身を検討するため、大日本印刷株式会社と本研究室の共催で「あなたの理想の防災 POD をつくろう！ワークショップ」を実施した（写真 2）。このワークショップは参加者が防災 POD に入りたいものを 7 つ（うち 1 つは防災用品でなくてもよい）を選んでオリジナルの防災 POD を作り、作った POD の特徴をあらわす名前を付けてもらうというものであり、最終的には 13 個の防災 POD が作られた（写真 3、写真 4）。防災 POD の中身はあらかじめ作成した中身リスト 45 品目の中から選択するか、他に入りたいものがあれば参加者が自由に追加してもよいとした。最も多く選択されたのはラジオ、簡易トイレ・トイレトパーパー、LED ランタン、小型発電機で、いずれも 5 回選択された。また日常時に使えるものの自由記述として、アロマキャンドル（明かりとリラックス）、縄跳び（ロープ替わり）など、非常時にも活用でき、かつリラックスや遊びにも使うことが出来る道具が提案された。このような提案は、必要最低限のものの保管が重視される防災倉庫とは異なる、日常と連続した防災 POD であるからこそその使い方の可能性を示すものである。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本プロジェクトは現在も活動中であり、2026 年度もイベントの実施や、菜園活動へのより日常的・継続的な参加を通じて、地域の暮らしがより楽しく、安全になるための場所づくりについての研究を継続する。

本年度の関連する研究成果は以下のとおりである。

（論文-1）前田実佑、葛飾区の木造密集市街地整備における区行政とまちづくり協議会の

関わり方、2025 年度芝浦工業大学卒業論文

（学会ポスター発表-1）田中由乃・麦倉大樹・百瀬遥香・前田実佑・畑隆輝・小原きせい、密集市街地における持続可能な防災まちづくり：「いつも」と「もしも」をつなぐ空き地活用手法の検討、第 21 回景観・デザイン研究発表会、富山、2025 年 12 月



写真 1 渋谷区本町の空地の様子
(2025.11 田中撮影)



写真 2 ワークショップの様子
(2025.11 田中撮影)



（上）写真 3
ワークショップで作成
された防災 POD の展示
(2025.11 田中撮影)



（左）写真 4
作成された防災 POD の例
(2025.11 田中撮影)

危機下の世論分極化の動態解明

工学部 楊 鯤昊

共同研究者

早稲田大学現代政治経済研究所 傅 夢媛

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

国際情勢の動揺、自然災害の頻発、社会の不確実性の高まりを背景として、危機下の世論分極化は社会の安定を脅かす喫緊の課題となっている。本研究は、計算社会科学の手法により危機下の世論分極化を高解像度に把握し、その発生メカニズム、社会政治的要因、及び誤情報・陰謀論拡散との相互作用を解明することを目的とする。具体的目的は、(1) ニュース等データからの世論の時系列的変遷と分極化の測定、(2) 分極化の発生メカニズムと類似意見集団の形成要因の究明、(3) 分極化が危機下の誤情報拡散に与える影響の検証、の三点である。

ここで本質的な制約は、分極化が単独で観測される現象ではなく、人々の「注意」を媒介として、メディアが提示する争点・フレーム・物語の上に立ち現れる点にある。すなわち、いかなる事象がいつ・どのように社会的注目を集め、どのような枠組みで語られるかというメディアによる現実構成の過程こそが、世論形成と分極化の上流に位置する。したがって分極化の動態解明には、その前提として、メディアと公衆の注意がどのように生成・配分・減衰するかを計測可能にする方法論的基盤が不可欠である。

そこで 2025 年度は、本課題の基盤構築の年と位置づけ、(i) 大規模データ収集・整備基盤の構築、(ii) 注意・フレーム・意見分布を

計測する計算モデルの開発と典型事例への初期適用、(iii) 誤情報検出と世論ダイナミクスへの生成 AI 応用の試行、を重点とした。事例には、猛暑・気候変動を典型事例として主に用いた。猛暑は毎夏反復する比較可能な外的ショックであり、メディアの注意生成・フレーミングや、気候変動という分極化を孕む争点との接続を統制的に観測できるためである。

2. 研究計画

2025 年度計画は三段階から成る。第一段階（6～8 月）では、関連分野の研究動向を網羅的に調査し、既存の大規模データセットを再検証して分析対象を選定するとともに、分極化測定の核となる表現学習モデルの基本設計を完了する。第二段階（8～11 月）では、選定事例について Yahoo!ニュース等から記事・コメントを体系的に収集・蓄積し、前処理を施したうえで測定モデルを開発し、テキストを分析可能なベクトル表現へ変換する。第三段階（12～3 月）では、典型事例（猛暑、気候変動等）でモデルの有効性・妥当性を評価し、同定された意見クラスタの言語的特徴を抽出するとともに、LLM による解釈可能なラベルの自動生成を試験的に導入し、年度成果の取りまとめと 2026 年度計画の策定を行う。

本研究の特色は、感情分析では捉えきれない分極化の動態と意見対立構造を表現学習と LLM により高解像度かつ解釈可能に測定する

点、世論形成の因果解明に生成 AI を用いる点、及び誤情報の検出に留まらず信奉・拡散の社会政治的動機の特定を目指す点にある。

3. 計画の進行状況

2025 年度の計画はおおむね当初想定どおり、ないし一部前倒しで進行し、成果の一部は既に査読付き論文として結実した。以下、三本柱に沿って報告する。

【データ収集・整備基盤の構築】 測定基盤として、Yahoo!ニュースを中心とする大規模ニュースデータ収集パイプラインを構築した。本基盤は当初想定した国内事例の規模を大きく上回り、現時点で 26 か国・1000 万件以上の記事と 1 億 8,000 万件以上の読者コメントを継続的に収集・蓄積する規模へ発展し、国際比較可能な分析基盤となった。あわせて、重複除去・表記揺れ統一・キーワードによる事象抽出・気象データとの人口加重による時系列整合等の前処理工程を確立した。気温データは気象庁から取得し、2020 年国勢調査の人口加重で全国レベルへ集約した。

【注意・フレームの測定モデルの開発と典型事例への適用】 分極化の上流にあるメディアの現実構成過程を計測する基盤的課題に対し、猛暑・気候変動を対象に注意とフレーミングを定量化する手法を開発・検証し、以下を得た。

(a) 猛暑報道の季節的フレーム分化（査読付き学術誌論文）。Yahoo!ニュース 343 万件（うち猛暑関連 5,040 件）に、Kleinberg のバースト検出・行列分解型単語埋め込み・情報理論的指標（communication burden）を適用した。その結果、メディアが日最高気温約 30℃ を実質的な「猛暑」報道の閾値とすること（気象庁基準 35℃ より低い）、及び報道の物語が季節で明確に分化することを見いだした。酷暑期は実時間の気象情報と個人の適応行動に焦点化し気候変動への言及を回避する一方、冷涼期は社会的帰結に焦点を移し気候変動を科学的説明として持ち出す。この「体感と説

明の時間的ずれ」は、分極化を孕む気候変動という争点の接続・切断を規定する構造であり、分極化の上流メカニズムの一端を実証した。本成果は学術誌 Journalism Studies に掲載された。

(b) メディアの注意配分と気温の乖離（査読付き国際会議論文）。同データにバースト検出と勾配ブースティング木（LightGBM）を適用し、高温日を「猛暑」と枠づける操作的枠組みを抽出した。気温のみから報道バーストを高精度（F1=0.940）で予測できる一方、前日の報道の有無が最重要変数であり、高温でも報道が低調な「見過ごし」と低温でも報道が突出する「過剰反応（早期警戒）」が体系的に存在することを示した。メディアの注意が気温から独立した経路依存性・減衰を持つことを示し、分極化を駆動する注意配分の計測に直結する。本成果は KES 2025 で発表し Procedia Computer Science に掲載された。

(c) 反復ショックに対する注意疲労の計測（査読付き国際会議発表）。注意の生成・減衰を精緻に定式化するため、記事 470 万件・コメント 1 億 1,300 万件を用い、猛暑イベントごとに注意の立ち上がりと減衰を冪乗則・指数関数で当てはめるエピソード単位の代替過程モデルを開発した。その結果、同一シーズン内で後続の波ほど立ち上がりが遅く減衰が速いという注意疲労の痕跡を、メディア側・読者側双方で検出した。本成果は国際コミュニケーション学会（ICA）第 76 回年次大会（南アフリカ・ケープタウン）で発表予定である。

【誤情報検出と生成 AI 応用の試行】 第三の目的（誤情報・陰謀論との関連解明）と因果推論への生成 AI 導入の試行に対応し、二つの基盤的検討を行った。

(d) LLM による気候誤情報検出の言語間格差（査読付き国際会議論文）。危機下の誤情報検出に LLM を用いる際の信頼性を英語・日本語で比較した。5 つの LLM で評価した結果、英語（平均 F1=0.811）に対し日本語（0.711）で

系統的な性能低下が生じ、メカニズム分析により、これがモデルの意味理解の不足ではなく非英語入力に対するアライメント（安全性較正）の不足に起因することを示した。誤情報という分極化の燃料への防御能力が言語間で不均衡に分配されるという AI の公正性の問題を提起し、誤情報分析基盤構築への布石となる。本成果は CHI 2026（Extended Abstracts）に採択された。

（e）生成 AI エージェントによる分極化シミュレーションの試作、2026 年度以降に実施予定である「生成 AI エージェントによる因果推論シミュレーション」の予備的実装として、社会的影響・同質性・拒否反応を組み込んだ動的ネットワーク上で、専門家による正確な情報発信の効果を検証した。専門家介入は平均的な否認論をわずかに下げる一方、中間層が専門家に近づき強い否認論層が情報を拒否するため、意見の分散（分極化）はむしろ増大しうることを示した。社会的アイデンティティ理論・エコーチェンバー仮説と整合する分極化機構を生成 AI で再現・観察できる概念実証であり、次年度の因果推論研究の基盤となる。

4. 今後の計画及び学会論文等投稿・発表状況

2025 年度の測定基盤と初期検証を土台に、本プロジェクトの目的達成へ向け研究を発展させる。2026 年度は、分極化のメカニズム解明と社会政治的要因の多角的分析を中心とする。2025 年度の注意・フレーム測定手法を多様な危機事例（政治的対立、災害、関税戦争等）へ適用してモデルの汎用性を高めるとともに、分極化の形成・先鋭化に関わる社会人口学的属性・メディア接触・ネットワーク構造等を機械学習で探索的に特定し（帰納的）、既存理論（社会的アイデンティティ理論、エコーチェンバー仮説等）に照らして検証する（演繹的）。さらに、2025 年度試作した生成 AI シミュレーションと疑似パネルデータの統計的因果推論により、特定要因が分極化に与え

る因果的影響の検証を試みる。2027 年度は、分極化と誤情報・陰謀論拡散の関連性解明、及び社会的対策への貢献を目指す。本年度の LLM 誤情報検出の知見を発展させ、データセット内の陰謀論・誤情報を特定・分類し、意見クラスタと誤情報の受容・信奉・拡散行動との関連、及び脆弱性の背後にある社会政治的・心理的要因を解明する。これらを通じ、過度な社会分断を抑制し建設的な公論形成に資する実証的根拠と実践的ツールの提供を目指す。

本課題に関連して 2025 年度に公表（採択・掲載・発表予定を含む）した業績を以下に示す。いずれも研究代表者を筆頭著者、傅夢媛との共著である。

〈学術誌論文（査読付き・確定）〉

1. Yang, K., & Fu, M. (2025). Heat in Real Time, Climate in Retrospect: Mapping Seasonal Gap in Japanese Heatwave Journalism. *Journalism Studies*. doi: 10.1080/1461670X.2025.2588789

〈国際会議論文（査読付き・確定）〉

2. Yang, K., & Fu, M. (2025). Media Framing of Heatwaves in Japan: Misalignment between Temperature and News Coverage. *Procedia Computer Science*, 270, 812-821.
3. Yang, K., & Fu, M. (2026). The Multilingual Safety Divide: Cross-Lingual Disparities in LLM Climate Misinformation Detection. CHI EA '26, Article 662.

〈国際会議発表（発表予定）〉

4. Yang, K., & Fu, M. (2026). Measuring Attention Fatigue in News and Audience Responses to Recurrent Extreme Weather Events. 76th Annual Conf. of the International Communication Association (ICA), Cape Town.

深層学習に基づくロボットの知的自己位置推定

工学部 パトハック サークル

共同研究者

中央大学 理工学研究科 精密工学専攻 椎野 朝木直道

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

ロボットが実環境で自律移動するためには、周囲環境を意味的に理解した上での頑健な自己位置推定が不可欠である。既存手法の多くは GPS や高精度な 3 次元距離センサ (LiDAR) に依存しており、センサコストの高さや未知環境・環境変化への対応困難さが課題であった。また、幾何学的特徴のみに基づく地図は意味情報を持たないため、「どこに何があるか」をロボットが理解することができなかった。本研究では、360 度カメラ画像から物体の種類・位置を取得する意味情報センシングと Visual SLAM を統合し、意味付き 3 次元地図の生成と同時に頑健な自己位置推定を実現する手法の構築を目指した。360 度カメラは一度の撮影で広域情報を取得できるため、死角が少なく少ない視点数で環境全体をカバーできる。一方、360 度画像には通常画像と異なる幾何学的歪みが存在するため、一般的な深層学習手法をそのまま適用することは困難であった。本研究ではこの課題に対応した処理手法の構築を目指した。意味情報付き 3 次元地図により、ロボットのナビゲーションのみならず、施設管理や遠隔点検への応用も期待した。

2. 研究計画

図 1 に示すように、本研究では以下の 3 段階で研究を進めた。

(a) センサ構築とデータ収集：360 度カメラ

(RICOH THETA X) を複数台用いて室内環境に

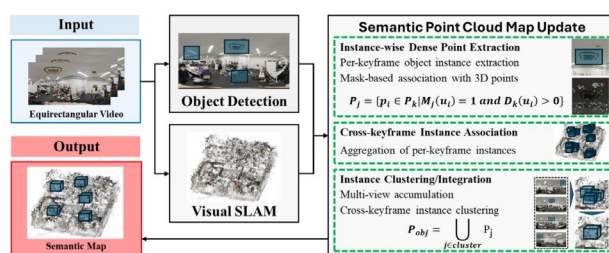


図 1：提案手法の概要

おける 360 度動画データを収集した。RICOH THETA X は 30fps および 3840×1920 の解像度での撮影が可能であり、歩行しながら環境全体を効率的に記録できる。実験環境として、固定設備と可動家具を含む研究室空間、および長距離の廊下環境の 2 種類を選定した。これらは将来的な工場・建設現場への適用に向けた基礎的な検証環境として位置づけた。

(b) 意味情報センシングと SLAM の統合：Dense 360 度 Visual SLAM (Stella VSLAM) [1] と開放語彙物体検出器 (YOLOE) を疎結合で統合する意味 3 次元マッピングパイプラインを構築した。パイプラインは主に 3 段階で構成した：(1) Dense 360 度 SLAM による 3 次元再構成と各キーフレームでの物体検出、(2) クロスキーフレームインスタンス統合、(3) 意味付き 3 次元地図の生成。各キーフレーム k に対して、SLAM はカメラ姿勢 T_k およびワールド座標系における密な点群 P_k を出力する。同時に、対応する正距円筒図法キーフレーム画像 I_k および Dense 深度マップ D_k を取得し

た．物体検出は YOLOE[2]を用いて各キーフレームに対して実行し，バウンディングボックス，セグメンテーションマスク，クラスラベル，および信頼度スコアを取得した．

(c) 実環境での評価：平面図を真値とした定量的な物体検出・位置推定精度の検証を行い，提案手法の有効性を確認することを目指した．

3. 計画の進行状況

センサ構築として，RICOH THETA X を 5 台調達し，研究室および廊下環境における 360 度動画データを収集した．なお，当初計画していたモーションキャプチャシステムによる精度検証については，既存の平面図を真値として代替評価を実施した．

3 次元位置推定と検出の統合 / 3D Localization and Detection Integration

2 次元検出結果と 3 次元幾何情報を関連付けるため，各検出のセグメンテーションマスクによって特定された物体ピクセルに対応する 3 次元点を抽出した．

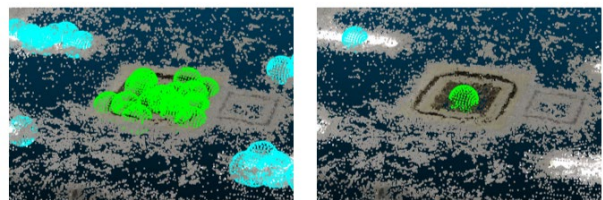
ワールド座標系における 3 次元重心 c_j は，各検出に含まれる 3 次元点の平均として算出した．物体検出は成功・失敗が混在するが，物体が複数フレームで撮影されるため，各成功検出が地図上の物体のおおよその 3 次元位置に「投票」する形となった．Visual SLAM により，同一インスタンスの全投票がほぼ同一の 3 次元位置に集積するため，統合が容易となった．また，誤検出のフィルタリングも容易であり，画像間でインスタンスを対応付ける必要もなかった．各キーフレーム内では，マスク IoU が 0.5 を超える同クラスの重複検出を除去し，信頼度の高い検出を保持した．

クロスキーフレームインスタンス統合 / Cross-Keyframe Instance Integration

同一の物理的物体が複数のキーフレームにわたって繰り返し検出される問題に対し，2 段階空間クラスタリングと色情報に基づく隣接処理によるインスタンス統合を行った．まず，



(a) Same object (air conditioner) across 9 keyframes



(b) Before integration

(c) After integration

図 2：キーフレーム間の融合

各物体クラスに対して，3 次元重心に距離閾値を用いた DBSCAN[3]による粗クラスタリングを適用し，空間的に近接する検出を同一物体候補としてグループ化した．次に，各粗クラスタ内で閾値による細クラスタリングを適用し，初期グループ内に含まれる別インスタンスを分離した．さらに，同一キーフレーム内で近接して検出された視覚的に類似するインスタンス（横並びの椅子など）の誤統合を防ぐため，色識別子を用いた隣接処理を実施した．各最終クラスタについて，構成する全検出の 3 次元点を集約し，統合された物体表現を生成した．キーフレーム間の融合を図 2 に示す．

実験結果 / Experimental Results

生成されたセマンティック地図を図 3，4 に示す．研究室環境における定量評価では，固定天井設備を対象とした検出精度の検証を行った．蛍光灯 32 個中 32 個 (100%)，エアコン 4 台中 4 台 (100%) を正確に検出・位置推定し，クロスキーフレーム統合の有効性を確認した．可動家具である椅子についても，検出結果が 3 次元空間上の正確な位置に反映されることを確認した．

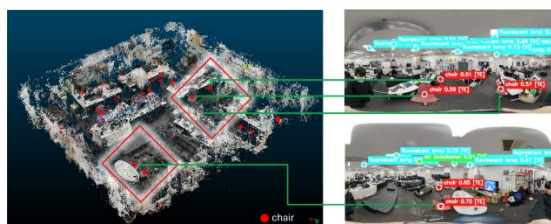


図 3：生成されたセマンティック地図

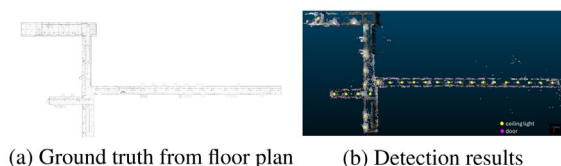


図 4：生成されたセマンティック地図
(廊下での実験)

廊下環境では、天井照明 29 個中 26 個 (89.7%) を検出した。未検出の 3 個は物体検出器による認識失敗によるものであり、一部に非常口灯の誤検出も見られた。ドアについては、平面図上の 23 箇所に対して 24 インスタンスが検出された (95.7%)。1 件の過剰検出は、大型ドアが複数視点から異なるインスタンスとして認識されたためである。また、生成した意味 3 次元地図上の物体を選択することで、対応する 360 度ストリートビュー画像へアクセス可能なインタラクティブ閲覧システムを実装した。これにより、環境全体の俯瞰的な把握と各物体の詳細画像確認を同時に実現し、意味地図をロボットの自己位置推定における意味的ランドマークとして活用できることを示した。共同研究者（椎野 丞ノ進・朝木 直道）が実験・実装・論文執筆に積極的に参加した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究の成果をまとめた論文が IEEE Signal Processing Society のフラグシップ国際会議 International Conference on Image Processing 2026 (ICIP2026) に採択された。今後は、(1) 意味的ランドマークを用いた確率的自己位置推定への統合、(2) 物体

寸法に基づくクラスタリング閾値の適応的設定による頑健性向上、(3) 学習ベース深度推定との組み合わせ、(4) 自然言語クエリによる物体検索・ナビゲーション指示への拡張、(5) 実際の工場・建設現場への適用を進める予定である。また IROS および日本ロボット学会誌への投稿を目指す。

参考文献

- [1] H. Surmann, M. Thurow, and D. Slomma, "Patchmatch-stereo-panorama, a fast dense reconstruction from 360° video images," in Proc. IEEE SSRR, 2022, pp. 366-372.
- [2] A. Wang, L. Liu, H. Chen, Z. Lin, J. Han, and G. Ding, "YOLOE: Real-time seeing anything," arXiv preprint arXiv:2503.07465, 2025.
- [3] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, "A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise," in Proc. KDD, 1996, pp. 226-231.

海洋深層水抽出ミネラル添加水による運動トレーニングの 増強効果について

—室戸 301 バランスウォーターを用いた大学駅伝部選手へ の介入研究—

システム理工学部（生命科学科） 徳本 一善

共同研究者

芝浦工業大学システム理工学部（生命科学科） 福井 浩二

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

健康志向の高まりとともにミネラルウォーターの消費量は増加しているが、その生体への効果メカニズムは十分に解明されていない。海洋深層水から抽出したミネラル成分（いわゆる「にがり」成分）を濾過水に溶解させた「室戸 301 バランスウォーター」（硬度 301mg/L、高知県室戸沖採取の海洋深層水由来、株式会社タケナカ製造）については、過去に本学福井教授らがマウスを用いた研究で運動トレーニング増強効果を確認しており（Fukui et al., Nutrients 2022; Heliyon 2024）、さらにヒト 35 名への 1 か月摂取試験で体脂肪率の有意な減少・筋肉量の増加・基礎代謝量の上昇を確認している（Yuzawa & Fukui et al., Water 2024）。

これらの先行研究はいずれも一般成人を対象としたものであり、高強度トレーニングを日常的に行う持久系アスリートを対象とした介入研究は存在しない。アスリートは一般人と比較して発汗量が多くミネラルの需要が大きいため、ミ

ネラル補給の効果はより顕著に現れる可能性がある。

以上を踏まえ、本研究では室戸 301 バランスウォーターを芝浦工業大学駅伝部選手に 2 か月間継続摂取させ、身体組成・最大酸素摂取量（ VO_2max ）・乳酸カーブ・持久力パフォーマンスへの影響を縦断的に検証することを目的とした。本研究成果は科学的コンディショニング指針の確立および本学駅伝プロジェクトへの貢献が期待される。

2. 研究計画

(1) 研究対象

芝浦工業大学駅伝部男子部員 20 名（白亜寮居住者）を対象とした。推奨サンプルサイズ 17 名（95%信頼区間±10%）を上回る設定であり科学的妥当性を確保している。本研究参加は任意であり、参加の有無が部活動・学業成績に影響することは一切ない。

(2) 介入プロトコル

室戸 301 バランスウォーター（550mL/本）を 1 日 2 本、2 か月間（60 日間）継続摂取させた（合計 2,400 本；株式会社タケナカより提供）。日常的な練習前後・寮生活での飲料の一部を本飲料に置き換えるものであり、特別な新規トレーニングや追加的な身体的負担は伴わない。

(3) 測定項目

摂取開始前（Pre）・摂取 1 か月後（Mid）・摂取終了時（Post）の 3 時点で以下を測定した。

① **VO₂max・乳酸カーブ**：呼気ガス分析による呼吸代謝能の定量的評価（駿河台大学スポーツ科学部・吉野貴順教授に有償委託）。

② **身体組成**：InBody970（インボディ・ジャパン）を白亜寮に設置し、起床～朝食前に週 1 回測定（体重・体水分量・除脂肪量・筋肉量・体脂肪率・基礎代謝量 等）。

③ **持久力パフォーマンス**：芝浦工業大学第 2 グラウンド（さいたま市見沼区深作 307）での定期走行テストにおける走行距離・タイムの変化を

記録した。

(4) 役割分担

福井浩二教授：研究総括・VO₂max データ受領と解析・論文執筆。

徳本 一善：各種測定の実施・走行データの管理・選手への説明と同意取得。

株式会社タケナカ：室戸 301 バランスウォーター 3,600 本（150 ケース）の提供および搬送（資金提供なし）。

(5) 倫理的配慮

本研究は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認のもとで実施しており、株式会社タケナカとの共同研究契約も締結済みである。データは福井教授のパスワード保護済み PC（大宮校舎 6 号館 203-1 室）にて管理する。

3. 計画の進行状況

(1) 実験の実施状況

2025 年度に Pre・Mid・Post 全測定を予定どおり完了した。データ取得率 98%以上、脱落例なし。VO₂max・乳酸カーブ測定は駿河台大学・吉野教授に委託して実施し、InBody970 による身体組成データは白亜寮にて定期的に取得した。介入期間中のトレーニング管理は駅伝部監督（徳本）が一貫して行い、全選手のトレーニング強度・量・コンディショニングを記録した。

(2) 箱根駅伝予選会における実績

本研究で蓄積した身体組成・乳酸カーブデータを選手個別のコンディショニングに応用した結果、2025 年度の箱根駅伝予選会（10 月，昭和記念公園・立川ハーフマラソン，87 校参加）においてチーム順位は過去最高の第 18 位を達成した。これは研究代表者が監督として継続してきた科学的トレーニング指導の成果を示すものである。また，予選会の結果を受けて全日本大学駅伝の学連選抜チームに本学の横尾選手が選出され，8 区において区間 14 位相当の成績を収めた。乳酸カーブデータに基づいたペースニング戦略およびレース前コンディショニング管理がパフォーマンス発揮に寄与したと考えられる。

(3) 介入効果の傾向

室戸 301 バランスウォーター摂取グループでは，Pre-Post 比較において除脂肪体重の増加傾向および LT2 強度での血中乳酸値の抑制傾向が観察

された。これらの結果は先行研究（Fukui et al., 2022; Yuzawa & Fukui et al., 2024）と概ね一致しており，持久系アスリートにおけるミネラル補給介入の有効性を支持するものと考えられる。現在，福井教授と詳細な統計解析を進めている。

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

(1) 論文投稿

福井浩二教授（芝浦工業大学）および株式会社タケナカとの共著論文を作成中である。

(2) 今後の展開

本研究の成果をもとに、今後はミネラル補給介入の継続研究をさらに発展させる予定である。具体的には、室戸 301 バランスウォーターの摂取期間を延長したうえで、本研究で実施した身体組成・VO₂max 計測に加え、乳酸カーブ測定を新たな指標として組み込み、有酸素性作業能力（LT1・LT2）の縦断的变化を詳細に追跡する計画である。乳酸カーブはトレーニング適応の鋭敏な指標であり、ミネラル補給が持続的パフォーマンスの生理的基盤に与える影響をより深く解明できると考えている。

これらの研究成果を選手個々のコンディショニングに還元し、科学的エビデンスに裏打ちされたトレーニング指導を継続することで、芝浦工業大学駅伝部の競技力をさらに高めていく。2025年度予選会での過去最高順位18位という実績を足がかりに、研究と実践の両輪で箱根駅伝本戦への学校枠出場という目標に向けて邁進する。

IoT システム用高性能アンテナの開発

システム理工学部（電子情報システム学科） 平山 裕

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

IoT システムにおいて、アンテナは、情報通信のみならず、エネルギーハーベスティングによる電力の確保の手段としても重要である。本研究は、IoT デバイスの設定姿勢に依存せずに通信・受電が可能な等方性アンテナ（水平面内で 360 度感度を持つ「無指向性」アンテナでなく、上下方向からの電波も受信可能な、球形の指向性を持つアンテナ）の開発を、第一の目的とする。具体的には、申請者がこれまでに開発してきた小型・薄型のエネルギーハーベスティング用等方性アンテナおよび受電回路の設計理論を確立することを目標とする。

さらに、IoT システムを効率的に運用するためには、無線アクセスポイントの配置を最適化することが必要となる。機械学習を用いて電波の伝搬を高速に推定する方法を確立することが、第二の目的である。

これらの成果により、IoT デバイスの設置自由度を高め、IoT デバイスの適用領域を拡大することを最終的な目標とする。

2. 研究計画

本研究は、1) エネルギーハーベスティング用等方性アンテナの開発、2) エネルギーハーベスティング用受電回路の開発、3) アクセスポイント配置最適化のための機械学習を用いた電波伝搬推定の 3 本の柱から成る。申請者の前任の大学で 2024 年度まで研究指導をし

ていた、現在大学院修士 2 年の学生 3 名を研究協力者として、それぞれの 3 つのテーマを実施する。

1) エネルギーハーベスティング用等方性アンテナの開発については、これまでに原理の提案と最適化による設計・検証を行ってきたが、設計理論が未確立である。電磁界解析における固有モード解析の手法を適用して、定量的な設計理論を開発し、論文投稿を行う。

2) エネルギーハーベスティング用受電回路の開発については、現時点で論文投稿するための結果がそろっているため、論文作成・投稿を行う。

3) アクセスポイント配置最適化のための機械学習を用いた電波伝搬推定については、論文投稿のために必要なデータを収集し、論文投稿を目指す。

共同研究者との打ち合わせ、および、2025 年度末までは諸事情により実験設備を前任校に残している都合上、実験の実施のために、前任校への移動旅費として本研究費を用いる。また、論文投稿費として本研究費を用いる。

3. 計画の進行状況

ここでは、紙面の都合上、上記の 3 つの課題の中で、最も大きな進展のあった課題 1 について詳細を述べる。

近年、医療・農業・物流など様々な分野で IoT の需要が高まっており、IoT デバイスの数は近い将来さらに急増していくことが予想さ

れる．しかし，デバイス数の増大に伴い，IoT デバイスの電池交換の手間が膨大になってしまい問題がある．そこで，IoT デバイスの電力消費量が比較的少ないことに着目し，周囲の環境から電磁エネルギーを受け取る技術であるエネルギーハーベスティングが解決策として注目されている．エネルギーハーベスティングに用いられるアンテナは，電波の到来方向が不定であることから，アンテナが等方性の放射パターンであることが求められる．しかし，等方性の実現は不可能であるため，代替として準等方性平面アンテナが提案されている．

アンテナの準等方性を達成する手段として，ダイポールアンテナとループアンテナを組み合わせる方法や，複数のダイポールアンテナを組み合わせる方法など，様々なアンテナが提案されている．

しかし，CMA (固有モード解析) を用いた準等方性の実現，またその検討はされていない．CMA は近年アンテナ設計において注目されている解析手法であり，これを用いることで放射特性をより詳細に検討でき，解析・設計時間の短縮が見込める．そこで，本研究では，先行研究で提案されたアンテナについて，準等方性が達成された理由を CMA により解明する．また，CMA を用いたパラメータスタディを行い，寸法の変化による MS (モーダルシグニフィカンス) や放射パターンの変化による準等方性への影響を検討する．

■ 提案アンテナと寸法・解析条件

本研究で使用する 920 MHz 帯アンテナのモデルを図 1 に示す．本研究では，解析のために電磁界解析ソフトである **feko** を使用し，CMA を行う都合上，アンテナは PEC で作成した．また，本アンテナは FR-4 基板を使用しており，基板はクレジットカードサイズ (84.6mm×54mm) となっている．さらに，表 1 はこのアンテナの寸法を示している．この寸法は最適化により決められた寸法である．本

研究では CMA を用いたパラメータスタディを行い，このアンテナの放射特性を詳細に検討したい．

また，本研究においてモード毎の放射パターンを評価する際，それぞれのモードで絶対利得の最大値を基準として正規化した放射パターンで評価を行う．

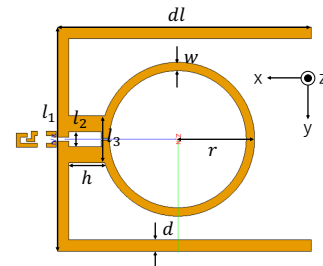


図 1 提案アンテナ

表 1 アンテナパラメータ

Paramete <i>r</i>	Value	Paramete <i>r</i>	Value
l_1	52.42m m	d	2.63mm
l_2	3.49mm	dl	52.42m m
l_3	10.97m m	h	7.56mm
w	1.98mm	ϵ_r	4.7
r	18mm	$\tan \delta$	0.015

■ 提案アンテナの放射特性検討

920 MHz における提案アンテナの絶対利得を図 2 に示す．絶対利得の最大値は 0.39 dBi，最小値は-0.95 dBi であり，利得偏差は 1.34 dB である．このことから，準等方性の放射パターンを実現できていることが分かる．

MS の周波数分布を図 3 に示し，920 MHz における Mode1，Mode2 の放射パターンを図 4 (a) (b) に示す．920MHz おける Mode1，Mode2，Mode3 の MS は Mode1 は MS=0.148，Mode2 は 0.112，Mode3 は 0 である．また，絶対利得の

利得偏差は Mode1 が 3.21dB, Mode2 は 21.6dB である. 図 3 から, 920MHz において, Mode1 と Mode2 は MS の値がほぼ同じである. これらの結果から, Mode1 と Mode2 は, 絶対利得の最小値となる位置が異なっており, それらを互いに補完し合うことで, 準等方性を実現している特性が確認できる.

Mode2 の電流分布を図 5 に示す. 図の黒い矢印は電流の向きを示している. 図 5 から, 節となっている部分以外は電流の大きさが概ね同じ値となっていることが分かる. 電流の大きさや向きから, 図 5 の赤く囲った部分でそれぞれ電磁波の干渉が起こっていることが予想できる. この干渉を変化させることで放射パターンが変化するが, そのためには最適化されたアンテナにおける l_1 の長さを変更する必要がある. よって, 電磁波の干渉を変化させるため, l_1 の長さについてパラメータスタディを行う.

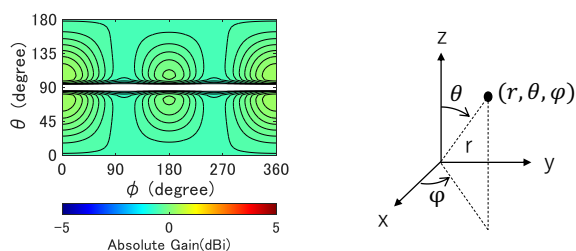


図 2 提案アンテナ

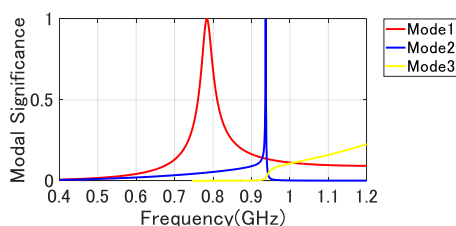


図 3 MS の周波数分布

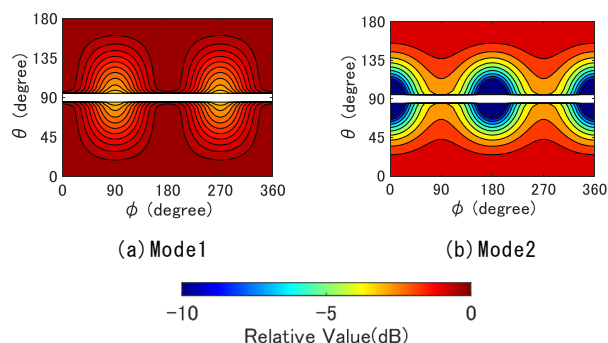


図 4 モード毎の放射パターン

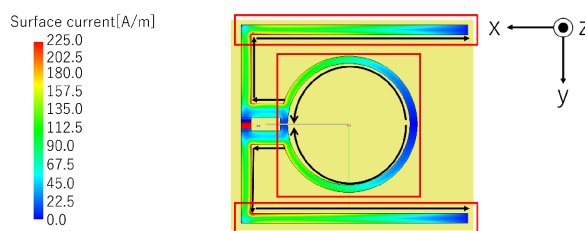


図 5 Mode2 の電流分布

■ CMA を用いたパラメータスタディ

$l_1 = 54, 45\text{mm}$ での絶対利得を図 6(a) (b) に示す. $l_1 = 54, 45\text{mm}$ での利得偏差は 1.43dB, 1.68dB である. いずれの寸法でも提案アンテナより利得偏差が低下している.

$l_1 = 54, 45\text{mm}$ での MS の周波数分布を図 7(a) (b) に示す. $l_1 = 54\text{mm}$ の時, 920MHz における Mode1, Mode2, Mode3 の MS は $l_1 = 45\text{mm}$ の時, Mode1 は MS=0.099, Mode2 は 0, Mode3 は 0.066 である. $l_1 = 54\text{mm}$ での Mode1, Mode2 の放射パターンを図 8(a) (b), $l_1 = 45\text{mm}$ での Mode1, Mode3 の放射パターンを図 8(c) (d) に示す. $l_1 = 54\text{mm}$ の時, Mode1, Mode2 の絶対利得の最大値と最小値の差は 3.30dB, 21.6dB であり, $l_1 = 45\text{mm}$ の時は Mode1 が 2.03dB, Mode3 は 21.9dB である.

$l_1 = 54\text{mm}$ においては, 提案アンテナと比べ Mode1, Mode2 の放射パターンにほとんど変化はない. しかし, 2つの主要モード間における MS の差が大きくなったことで, 各モードの影響力が変化し, 絶対利得が悪化したと考えられる. $l_1 = 45\text{mm}$ においては, 提案アンテナと比べ主要モード 2 つにおける MS の差にほとんど変化はない. しかし, Mode1 の放射パターンが等方性に近づいていることから, 提案アンテナで実現していた互いに不感方向を補い合う形が崩れたと考えられる.

以上のように CMA を使用したことで, 2つの主要モードが互いの非感度方向を補完することで準等方性が達成されることを初めて明らかにした. さらに, CMA を用いたパラメータスタディにより, 2つの主要モード間における MS の差と放射パターンが均衡状態にある場合に準等方性が確立されることを確認した.

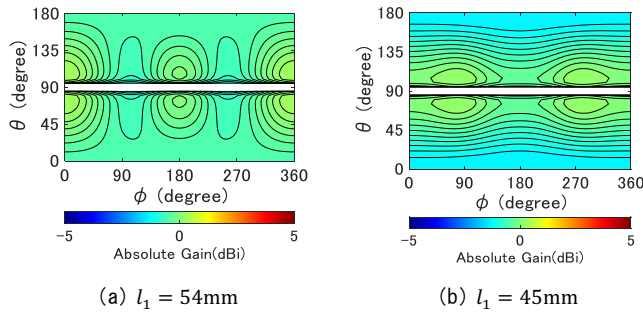


図 6 各寸法における絶対利得

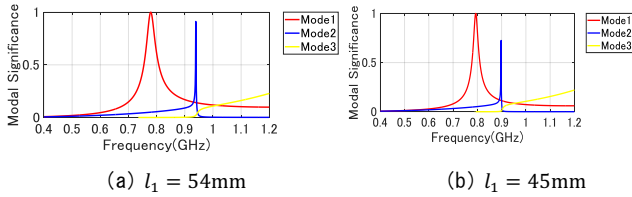


図 7 各寸法における MS の周波数分布

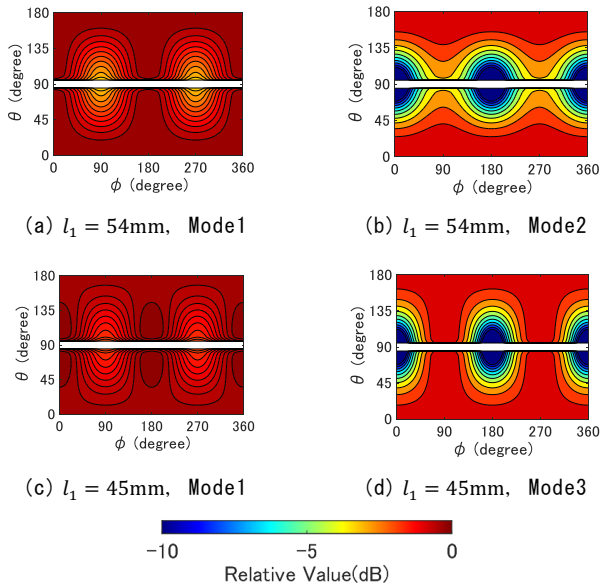


図 8 各寸法におけるモード毎の放射パターン

■ むすび

本研究では、提案されたアンテナについて CMA を行い、2 つのモードにより準等方性が達成されたことを明らかにした。また、CMA パラメータスタディにより、寸法の変化が MS の差分やモード毎の放射パターンを変え、それにより準等方性が崩れてしまうことを明らかにした。最適化されたアンテナは絶対利得の最大値と最小値の差が 1.34dB であった。最適化されたアンテナを CMA 解析した結果、2 つのモードが励振されていることが確認された。その 2 つのモードが互いに不感方向を補い合うことで、準等方性を実現していると予想で

きる。その後、CMA を用いたパラメータスタディを行い、2 つの主要モードにおける MS の差や放射パターンが均衡状態にある場合に、準等方性が成立することが確認された。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

1 章で述べた 3 つの研究テーマそれぞれについて、学会発表、論文発表を行った。

テーマ 1) については、文献 1 の学会発表を行った。その上で、IEEE Trans. On Industrial Electronics に投稿を行った。Reject with possibility of resubmission となり、再投稿論文を準備中である。

テーマ 2) については、文献 2 として発表を行った。

テーマ 3) については、文献 3 として採録決定済である。

[1] 飯田将太, 平山裕, “複素 MPPT 回路を用いた動的インピーダンス制御の検証,” 信学技報, vol. 125, no. 90, WPT2025-11, pp. 11-15, 2025 年 6 月。

[2] Kazuki Ban, Hiroshi Hirayama, “A study on a quasi-isotropic planar antenna using characteristic mode analysis”, IEICE Communication Express. Mar. 2026 (Early Access), doi: 10.23919/comex.2026XBL0013

[3] Riku Kakamu, Tomoaki Nonome, Naoki Kato, Seiichi Harata, Takuto Sakuma, Shohei Kato and Hiroshi Hirayama, “A Study on Improvement of Accuracy in Estimation of Radio Signal Strength in a Factory by 3D U-Net,” IEICE Communication Express, Printing

今後は、それぞれについて、社会実装を目指して研究を継続していく。

居住環境移行時の負荷軽減に資する ものづくり支援手法の開発

システム理工学部（環境システム学科） 水谷 晃啓

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

近年，自然災害による住居被害や公営住宅の更新，住替え等に伴い，居住環境の移行を余儀なくされる場面が増加している。こうした環境移行時には，生活環境の変化に伴う心理的・身体的・経済的負荷，いわゆるリロケーションダメージが生じることが知られている。特に高齢者においては，新たな環境への適応が困難となり，生活の質やコミュニティとの関係性にも影響を及ぼしうる。

これに対し，本研究では，住まい手自身が主体的に居住環境を再構成していくための「ものづくり支援手法」に着目する。既存家具や生活道具の再編・改修を支援する手法として，デジタルファブリケーション技術を活用し，居住環境移行時の負荷軽減に資する支援プロセスの構築を目的とする。

本研究では，住環境改善ニーズの把握，支援プロセスの整理，およびプロトタイプ開発を通じて，新たな住環境改善支援モデルの基礎的知見を得ることを目指している。

近年の災害復興や人口減少地域においては，住宅そのものの確保だけでなく，生活の継続性や地域コミュニティとの接続をいかに維持するかが重要な課題となっている。特に高齢者世帯では，長年使用してきた家具や生活動線の変化が生活不安につながる場合があり，住環境移行時の支援は空間整備と心理的支援の双方から検討する必要がある。

本研究は，単なる物理的改修にとどまらず，住み手自身が主体的に住環境を整えていく過程そのものを支援対象と捉える点に特徴がある。

本研究の基本的な考え方を図1に示す。居住環境移行時に生じる生活課題に対し，住民主体のものづくり支援を介在させることで，住環境の再構築と生活継続性の確保を図るものである。従来の一方向的支援ではなく，利用者参加型の支援モデルとして位置づけられる。

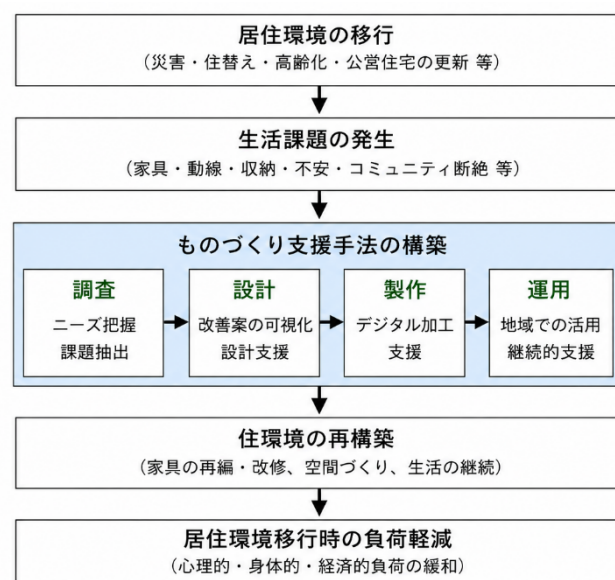


図1. 本研究の基本フレーム

2. 研究計画

本研究では以下の3段階で研究を進める計画とした。

第一に、居住環境移行時に生じる課題を把握するため、先行研究整理と現地調査を通じてニーズと負担要因を抽出する。

第二に、抽出した課題に基づき、デジタルファブリケーション技術を活用した住環境改善支援プロセスを検討する。具体的には家具リノベーションや DIY 的改修支援を対象に、設計支援から加工支援までを含むプロトタイプ構築を進める。

第三に、試作や実践活動を通じて手法の有効性と課題を検証し、将来的な支援モデルとして発展させることを目指す。

本年度は特に、基礎調査および初期プロトタイプ構築の形成を中心に位置づけた。

また、本研究では支援手法を「調査・設計・製作・運用」の 4 段階プロセスとして整理し、各段階で必要となる支援内容を明確化することを計画した。調査段階では生活課題の抽出、設計段階では家具・空間改善案の可視化、製作段階ではデジタル加工支援、運用段階では地域内で継続的に活用可能な仕組みづくりを対象とする。

本年度においては、文献調査・現地調査・課題整理・試作環境整備・地域実践という段階的なプロセスで研究を進めた。図 2 にその進行プロセスを示す。

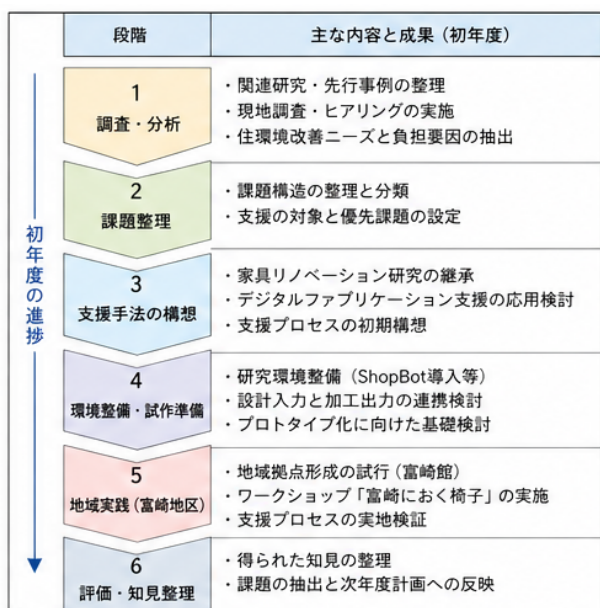


図 2. 初年度における研究進行プロセス

3. 計画の進行状況

本年度においては、関連研究および先行事例の整理を進めるとともに、居住環境移行時の住環境改善ニーズに関する調査を実施し、課題構造の整理を進めた。

また、既往研究¹⁾²⁾で蓄積してきた家具リノベーション研究やデジタルファブリケーション支援研究を基盤として、本研究課題への応用可能性を検討し、支援手法の初期構想を整理した。

さらに、試作に向けた研究環境整備とあわせて、設計入力と加工出力をつなぐ支援プロセスの検討を進め、プロトタイプ化に向けた基礎段階に着手した。

加えて、本研究の実践的検証として、館山市富崎地区において地域志向（COC）活動と連携し、デジタルファブリケーションを活用した図 3 に示す連携体制を通して DIY 支援拠点形成に関する試行を実施した。地域拠点への ShopBot 導入およびワークショップ「富崎におく椅子」を通じて、設計支援—加工支援—地域運用を接続する支援プロセスを検証し、居住環境移行時の負荷軽減に資する支援モデルの基礎的知見を得た。特に、地域内での持続的運営可能性や共助型支援体制に関する検討は、本研究課題の発展に資する成果と位置づけられる。

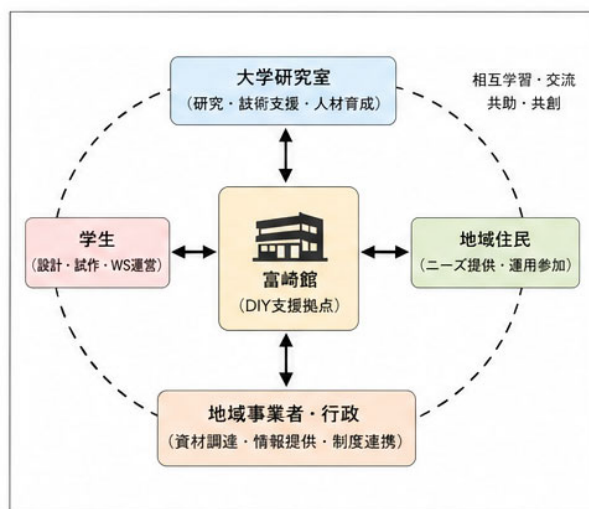


図 3. 地域 DIY 支援拠点の連携体制

これらを通じ、当初計画に沿って研究基盤形成を進めることができ、次段階の実践的検証に向けた準備を整えつつある。

館山市富崎地区での実践では、地域に長年親しまれてきた建物空間を活用し、加工機器を導入することで、地域に開かれた **DIY** 支援拠点形成の可能性を検証した。住民・学生・地域事業者が協働することで、単なる加工施設ではなく、相談・交流・試作・学習が一体となった拠点モデルとして機能しうることが確認された。

また、ワークショップでは、地域景観や暮らしの文脈を踏まえた家具提案として「富崎におく椅子」を製作し、グループワークを通じたデザイン案作成からレーザー加工機による縮尺模型の試作、ShopBot による実寸加工、組み立て、公开发表までを一連の教育研究プログラムとして実施した。

これらの活動を通じて、住環境改善支援においては、加工機器そのものよりも、地域内で課題を共有し、試作し、改善を重ねる「場」の形成が重要であることが明らかとなった。

また、学生参加型で進めることで、教育的効果と地域貢献を両立できる可能性も確認された。

さらに、本実践を通じて、住環境改善支援は個別住宅への対応にとどまらず、地域に蓄積された人的資源や空間資源を活用しながら展開することで、継続的かつ自律的な支援へ発展しうることが示唆された。これは、人口減少地域や高齢化地域における新たな生活支援モデルとしても意義を有する。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、初年度に得られた知見をもとに、支援プロセスの具体化とプロトタイプの高度化を進める。特に、住環境改善支援プログラムとしての体系化と、実践活動を通じた有効性検証に取り組む予定である。また、実践的フィールドでの検証を通じて、従来支援との比較評価や社会実装可能性の検討も進めたい。

研究成果については、建築学会等における発表および査読付き論文への投稿を予定している。さらに、本研究を基盤として科研費等外部



図4 教育研究プログラムの流れ

資金への展開も進め、継続的な研究発展を図る予定である。

今後は、図5に示すように本年度の基礎的成果を踏まえ、技術面・運営面・制度面の3側面から支援モデルの高度化を図る。特に、地域主体で継続可能な運営スキームの検証が次年度以降の重要課題である。また、今後の検証にあたっては、利用者満足度、継続利用意向、地域主体による運営可能性、費用対効果等の観点から評価指標を設定し、定量的・定性的両面から支援手法の有効性を検証する予定である。このようなことから、以下を進める予定である。

- 家具改修支援ツールの高度化
- 住環境改善支援手法の体系化
- 館山市における継続運用検証
- 建築学会大会での成果発表
- 査読付き論文投稿
- 科研費等外部資金申請

年度	2025年度 (初年度)	2026年度 (2年目)	2027年度 (3年目)
研究フェーズ	基礎構築	実証・検証	モデル化・社会実装
主な内容	・基礎調査 ・課題整理 ・支援手法の構想 ・研究環境整備 ・地域実践の試行	・プロトタイプの開発 ・実践フィールドでの検証 ・効果評価 ・手法の改良	・支援モデルの体系化 ・他地域への展開検討 ・社会実装の仕組み構築
成果目標	初期プロトタイプと基礎的知見の獲得	支援効果の実証と手法の高度化	持続可能な支援モデルの構築と普及
学会発表・論文投稿・外部資金獲得			

図5. 今後の研究ロードマップ（3年間）

学会、論文等投稿・発表状況

論文投稿準備中、地域実践成果の外部発表を計画中

5. おわりに

本年度の研究を通じ、居住環境移行時支援において、デジタルファブリケーション技術は単なる加工技術ではなく、住民参加型の住

環境改善を支える媒介技術となりうることが示唆された。特に、地域に技術拠点を設けることにより、生活課題への迅速な対応や、共助的な支援体制形成への展開可能性が確認された。さらに、本研究は住環境支援のみならず、地域の空き施設活用、人材育成、ものづくり教育、福祉分野との連携など、多面的な波及効果を有することが示唆された。今後は実証研究を継続し、図6に示すような地域実装可能な支援モデルとして発展させたい。あわせて、本研究で得られた知見は、災害復興期の仮設住宅支援、公営住宅移転支援、高齢者住宅改修支援など、他地域・他分野への応用可能性も有している。今後は汎用化を視野に入れ、社会実装研究として継続的に発展させる予定である。

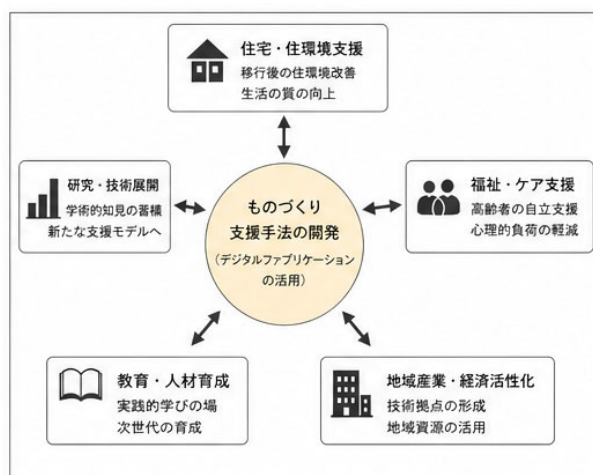


図6. 本研究の成果波及イメージ

参考文献：

- 1) 水谷 晃啓，市川 新之助，鷲見 良：複数人称視点から体験可能なメタバースプラットフォームを用いた建築情報可視化システムの開発，日本建築学会技術報告集，第31巻，第79号，2025.10.
- 2) 水谷 晃啓，奈良 祥平，前川 寛太：デジタル・ファブリケーションを活用した木育に資する木製椅子デザイン開発，デザイン学研究作品集，第25巻，第1号，pp.1_58-1_63，2020.3.

研究大学における URA の戦略的役割の分析と提言

デザイン工学部（デザイン工学科） 志方 宣之

共同研究者
大阪公立大学法人本部 北垣 和彦

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

現代の知識基盤社会において、大学は単なる知識の生産拠点にとどまらず、知識の生産・伝達・移転を担う中核的な主体として、産業との連携を含む広いネットワークの中で役割を果たすことが求められている[1]。

本研究は、「大学のエコシステム化」という上位概念に基づき、日本の大学において研究開発力を強化するための規定要因を明らかにすることを目的とする。大学研究力を研究者個人の属性のみに還元するのではなく、大学における**研究支援体制、外部連携構造、人材流動化を含む組織設計の成果**として捉える。とりわけ、研究支援専門職である URA（University Research Administrator）の配置密度、民間企業との連携ポートフォリオ、クロスアポイントメント制度の導入状況に着目し、それらが大学の研究開発力とどのように関係しているのかを、日本の工科系大学を対象として実証的に分析・検討する。

2. 研究計画と進行状況

2.1 研究設計 本研究では、日本の大学における研究開発力強化の規定要因を解明するため、定量分析と質的調査を組み合わせた順次的混合研究法を採用する。まず、工科系大学を対象とするパネルデータを用いて、研究支援体制および連携ポートフォリオと成果指標との関連を定量的に把握する。次に、その分析結果を踏まえて複数大学へのインタビュー調査を実施し、定量分析で確認された統計

的関連の背景にある組織的メカニズムを検討する。

2.2 分析対象

分析対象は、国内工科系の中で研究者数の多い 10 大学とした[2]。表 1 に我が国の工科系大学における研究者数（e-Rad に登録しており、科研費応募資格

がある研究者数（R5）人）上位 10 大学のリストを示す。

対象を工科系大学に限定した理由は、医学系分野を有する総合大学では、医療・製薬分野を中心とした大型研究資金が共同研究費や外

表 1：我が国の工科系大学における研究者数上位 10 大学（R5 年）

工科系 大学名	研究者数 (研究者数-e-Rad & 科研費応募資格) (人)
東京工業大学	1168
東京理科大学	855
東京農工大学	651
東京電機大学	455
岡山理科大学	393
名古屋工業大学	388
九州工業大学	369
芝浦工業大学	360
金沢工業大学	353
電気通信大学	349

部資金総額に大きく影響し、比較可能性を損なう可能性があるためである[3] [4] [5]。本研究の目的は、研究支援体制や連携構造と成果との関係を比較可能な条件下で把握することである。研究資金構造の類似性が比較的高い工科系大学群に対象を絞ることで、分析の内部妥当性の確保を優先した。

2.3 分析データ 定量分析には、文部科学省「大学等における産学連携等実施状況について」[2]、日本学術振興会（JSPS）の「科学研究費助成事業の配分について」[6]のデータを用いた。「大学等における産学連携等実施状

況について」では、研究者数、民間企業（大企業、中小企業、大学発ベンチャー企業）からの共同研究費受入額、共同研究件数、URA 配置人数、クロスアポイントメント制度導入状況などを把握することができる[2]。「科学研究費助成事業の配分について」では、大学、短大、専門職大学、公的研究機関等の研究機関別の科研採択件数や新規採択率を把握することができる[6]。本研究では、令和元年度から令和5年度までの5年間について、大学名を共通キーとして両統計を接合し、大学・年パネルデータを構築した。

2.4 変数の定義 本研究では、大学の規模によるバイアスを排除し、組織的な「支援密度」と「獲得効率」を精緻に評価するため、先行研究[7]の手法をさらに発展させ、原則として説明変数を「研究者一人当たりの比率」として算出している。また、共同研究費金額は規模の差が大きいため、正規化した。研究者数は、前述した通り e-Rad に登録しており、科研費応募資格がある研究者の数とした[2]。

(1) 目的変数（成果指標）

大学の研究開発力を「学術的卓越性」と「社会的実装力」の両面から評価するため、以下の二指標を設定する。

- ・科研費新規採択率

＝新規採択件数/新規応募件数

- ・新規共同研究費率

＝ $\log_{10}$ （（企業からの共同研究費の新規受入額）/研究者数）

(2) 説明変数（組織・戦略的要因）

外部資金獲得を規定する組織的・制度的要因として、以下の変数を用いる。

- ・URA 率＝URA 数/研究者数

- ・大企業率＝大企業との新規共同研究の件数/研究者数

- ・中小企業率＝中小企業との新規共同研究の件数/研究者数

- ・大学発ベンチャー率＝大学発ベンチャー企業との新規共同研究の件数/研究者数

- ・クロスアポイントメント制度導入の有無と各年度に合わせたダミー変数を付与した。

2.5 質的調査 定量分析の結果を補完するため、6 大学の実務担当者を対象に半構造化インタビューを実施した。主な質問項目は、①URA の職務範囲、②科研費支援の実態、③共同研究創出プロセス、④学内外連携の設計、⑤制度運用上の課題である。設置形態や大学規模の異なる大学を含めることで、定量分析で観察された関連がどのような組織実務を通じて成立しているかを比較検討した。表2にインタビュー対象一覧を記載する。

2.6 定量分析結果 重回帰分析の結果を表3、4に示す。なお、説明変数間の相関係数は低く、多重共線性の問題はない。

科研費新規採択率に対しては URA 率および大学発ベンチャー率が統計的に有意な正の相関を示した。これらの結果は、研究支援体制の厚みや社会実装に近接した研究環境が、競争的資金獲得と関連している可能性を示している。

次に、新規共同研究費率を目的変数としたモデルでは、大企業率が正の相関を示した。またクロスアポイントメント制度導入についても有意水準は低いものの正の相関を示した。一方、中小企業率についても有意水準は低いものの負の相関を示した。これは大学の連携先構成が企業からの共同研究費規模と関係している可能性を示唆する。

表2：インタビュー対象一覧（対象者数（n=8））

	設置区分	大学類型	対象者数	主な担当領域	URAとしての経験年数
東北大	国立	総合大学	1	産学連携研究戦略	5年
電通大	国立	工科系大学	1	産学連携研究支援	6か月
大阪公立大学	公立	総合大学	2	研究戦略URA業務	10年 9年6か月
京都産業大学	私立	総合大学	1	科研費支援研究支援	13年
大阪工業大学	私立	工科系大学	1	科研費支援産学連携	10年
芝浦工業大学	私立	工科系大学	2	研究支援産学連携	11年6か月 5年9か月

表 3：科研新規採択率を目的変数
とした重回帰分析結果

変数 結果	URA率	クロス アポイントメント 制度の導入	大企業率	中小 企業率	ベンチャー 率
係数	1.79	-8.12×10^{-3}	-1.95×10^{-2}	-4.96×10^{-2}	3.08
t値	3.28	-4.32×10^{-1}	-2.65×10^{-1}	-3.82×10^{-1}	3.34
有意水準	1%	-	-	-	1%

決定係数：0.537

表 4：新規共同研究費率を
目的変数とした重回帰分析結果

変数 結果	URA率	クロス アポイントメント 制度の導入	大企業率	中小 企業率	大学発ベン チャー率
係数	3.74	1.76×10^{-1}	2.09	-1.03×10^{-2}	-1.31
t値	1.48	2.03	6.16	-1.72	-3.07×10^{-1}
有意水準	-	5%	1%	10%	-

決定係数：0.737

表 5：URA へのインタビューによる
定量分析結果の妥当性の確認

定量分析結果	妥当と 判断 (人)	判断 保留 (人)	妥当と回答 した率 (%)	主な理由・コメント
科研新規採択率 とURA率は正の相関	7	1	87.5%	申請支援、添削、伴走、 研究戦略支援が採択率向上に寄与
科研新規採択率と 大学発ベンチャー率 は正の相関	3	5	37.5%	一定の支持あり。大学発ベン チャーへ関わった経験が少な いためわからない。
新規共同研究費率 と大企業率 は正の相関	7	1	87.5%	大企業案件は1件当たり 金額が大きい。但し、大企業 からの信頼が必要。
新規共同研究費率と クロスアポイントメント 制度導入は正の相関	4	4	50.0%	制度活用実績のある 大学では支持、 ない大学では判断保留
新規共同研究費率 と中小企業率 は負の相関	7	1	87.5%	中小企業案件は 金額が小さく、 地域貢献的性格が強い

2.7 質的調査の結果 科研新規採択率に対
する URA 率の正の相関結果に関して 87.5%
(7/8 人) が妥当と回答した。主なコメントと
して申請支援、添削等の伴走だけではなく研究
戦略支援が採択率向上に寄与するという回答
が得られた。また、大学発ベンチャーとの
相関に関しては一定の支持 37.5% (3/8 人)
はあったものの、大学発ベンチャーに関わっ
た経験が少ない URA も存在した。

新規共同研究費率に関する定量分析結果に
関して、大企業との共同研究は1件当たりの
金額が大きいので支持できる (87.5% (7/8
人))。しかし、企業からの信頼が必要のため、
あまり獲得できていない等の回答もあった。
さらにクロスアポイントメント制度と共同研
究費の関連についても、外部資源を大学内部
に取り込み、案件形成を継続的に行う実務体
制が重要なので理解できるという回答と、本

制度そのものを活用したことがないのでわか
らないという回答が半々 (50.0% (4/8 人))
であった。また、中小企業率と新規共同研究
費率に負の相関があるとの定量分析の結果に
関しては、中小企業案件は金額が小さく、地
域貢献的性格が強いと、概ね妥当との回答を
得た (87.5% (7/8 人))。

2.8 考察

(1) URA による研究マネジメント機能の組
織化 定量分析において、URA 率は科研費新規
採択率と正の相関を示した。このことは、大
学の研究開発力が研究者個人の能力だけでは
なく、組織的支援体制の厚みによっても左右
されることを示唆している。特に、質的調査
では、成果を上げている大学において、URA が
申請支援にとどまらず、研究構想の整理、学
内資源の接続、外部連携の調整まで含めた広
範な役割を担っていることが確認された。し
たがって、本研究が捉えた URA 率の効果は、
単なる人数効果というより、大学における研
究マネジメント機能の組織化の程度を反映し
ている可能性が高い。この結果は、大学内部
の専門職機能の高度化を指摘する研究
[8][9][10]と整合的である。すなわち、URA は
研究者の事務負担を軽減する存在であるだけ
でなく、研究者と制度、研究者と企業、研究者
と学内資源をつなぐ媒介者として、大学の研
究成果形成に寄与していると考えられる。

(2) 共同研究費獲得における戦略的連携ポ
ートフォリオ 新規共同研究費率に対して大企
業率が正の相関を示したことは、大学の共同
研究収入拡大において、相手先構成が重要で
あることを示している。一般に大企業との共
同研究は、案件規模が大きく、継続契約や複
数部門を巻き込んだ関係に発展しやすい。そ
のため、共同研究件数だけでなく、受入額総
額の拡大という観点では、大企業との接点形
成や継続案件化が重要になると考えられる。
一方で、中小企業率が負の傾向を示したこと
は、中小企業連携の価値を否定するものでは

ない。むしろ、中小企業との連携は地域貢献や技術相談、社会課題解決の観点で重要である一方、案件当たり金額が相対的に小さい、あるいは調整コストが高い可能性がある。そのため、共同研究費総額を成果指標とした場合には、負の方向で現れた可能性がある。したがって、本研究の含意は中小企業連携を縮小すべきということではなく、大学が何を成果指標とするのかに応じて、連携ポートフォリオを戦略的に設計する必要があるという点にある。これらの結果は、大学-産業連携の成果が関係の質や相手先属性に依存することを示した先行研究[11][12][13]と整合的である。ただし、本研究の貢献は、大学-企業連携のポートフォリオ構成が共同研究費規模と関係することを、定量的に実証した点にある。

(3) クロスアポイントメント制度と外部接続能力 クロスアポイントメント制度導入が新規共同研究費率と正の相関を示したことは、人材流動化が大学の外部接続能力と関係している可能性を示している。企業や研究機関との人材往来は、知識移転だけでなく、相互理解や信頼形成、共同研究テーマの形成にも寄与しうる。質的調査でも、外部人材との接点が強い大学ほど、研究シーズの外部展開が迅速である傾向が確認された。先行研究では、知識移転や大学-産業連携の成果が、相互理解、信頼形成、組織間調整に依存することが示されてきた[11][14][15]。本研究の結果は、制度としての人材流動化が、そのような関係形成の基盤を強化する可能性を示唆している。

2.9 結論 本研究は工科系大学を対象に、科研の新規採択率向上及び、企業からの新規共同研究費受入額を増大させるための規定要因を分析した。その結果、URA を適切に配置することで研究者をサポートすると共に、大学における研究マネジメント機能を組織化し研究戦略を提示することが重要であることが分かった。また、企業からの共同研究費の総額を増大させるための適切な企業連携ポートフォ

リオの戦略検討、実施に関する重要性についても示唆を得た。

3. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

(1) 志方宣之, 北垣和彦 ” 研究大学における URA の多角的職務と研究力強化への貢献: 私立・公立大学連携調査から見出す新たな役割”, RA 協議会 第 11 回年次大会, 2025/10.

(2) 学術論文として投稿 2026/6 月末

(3) 2026 年度学会発表検討 2026/秋季

参考文献

- [1] OECD. The Knowledge-based Economy. OECD/GD(96)102. Paris: OECD; 1996.
- [2] 文部科学省, 「令和 5 年度 大学等における産学連携等実施状況について」, 2025.
- [3] Miyaki M, Okajima Y. Do External Funding Sources Affect Research Productivity?: A Departmental-Level Analysis of Seven Former Imperial Japanese Universities. MPRA Paper No. 88931, 2018.
- [4] Azoulay P, et al. Medical Research and Health Care Finance: Evidence from Academic Medical Centers. NBER Working Paper 27943, 2020.
- [5] Kuwashima K. A role model of large-scale university-industry collaboration in Japan: The case of Chugai Pharmaceutical and Osaka University. *Annals of Business Administrative Science*. 2020;19(3):81-96.
- [6] 日本学術振興会, 「令和 5 年度 科学研究費助成事業の配分について」, 2023.
- [7] 古澤 陽子, 他, “大学における研究推進支援人材が 外部研究資金獲得に与える影響”, NISTEP DISCUSSION PAPER, No. 179, 2020.
- [8] Croucher, G. and Woelert, P., “Administrative Transformation and Managerial Growth: A Longitudinal Analysis of Changes in the Non-academic Workforce at Australian Universities,” *Higher Education*, Vol. 83, No. 5, pp. 1157-1175, 2022.
- [9] de Jong, S., et al., “How Do Professional Staff Influence Academic Knowledge Development? A Literature Review and Research Agenda,” *Studies in Higher Education*, Vol. 49, 2024.
- [10] Irjala, O., “Revisiting the concept of highly skilled professionals: an analysis of support staff in Finnish universities,” *Higher Education*, Vol. 88, 2024.
- [11] Steinmo, M. and Rasmussen, E., “The interplay of cognitive and relational social capital dimensions in university-industry collaboration: Overcoming the experience barrier,” *Research Policy*, Vol. 47, No. 10, pp. 1964-1974, 2018.
- [12] Isaeva, I., Ooms, W. and Cunningham, J. A., “How firms use coordination activities in university-industry R&D collaborations: a study of university research centers,” *The Journal of Technology Transfer*, Vol. 47, pp. 1158-1183, 2022.
- [13] O'Dwyer, M., Filieri, R. and O'Malley, L., “Establishing successful university-industry collaborations: barriers and enablers deconstructed,” *The Journal of Technology Transfer*, Vol. 48, pp. 900-931, 2023.
- [14] de Wit-de Vries, E., Dolfsma, W. A., van der Windt, H. J. and Gerkema, M. P., “Knowledge Transfer in University-Industry Research Partnerships: A Review,” *The Journal of Technology Transfer*, Vol. 44, No. 4, pp. 1236-1279, 2019.
- [15] Al-Tabbaa, O. and Ankrah, S., “Social capital to facilitate ‘engineered’ university-industry collaboration for technology transfer: A dynamic perspective,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 104, pp. 1-15, 2016.

集合住宅の価値向上に資するモビリティハブ

建築学部（建築学科） 本多 久美子

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

近年、MaaS（Mobility as a Service）の進展とともに、多様な交通モードをシームレスに接続する拠点として「モビリティハブ」が国内外で注目を集めている。特に、バス路線の廃止・減便など地域公共交通の衰退が深刻化する大都市郊外や地方都市において、モビリティハブは鉄道駅と自宅間の「ラストワンマイル」を補完する重要な都市インフラとして期待されている。しかし、国内におけるシェアサイクル等のステーションやモビリティハブの整備は、事業採算性の観点から、主に鉄道駅前や都心部の高密度エリアに集中する傾向にある。その結果、ラストマイルの交通手段を必要とする駅から離れた住宅地エリアにおいて、サービスが十分に供給されないという配置偏在の課題が生じている。

本研究は、この課題を解決するポテンシャルを持つ空間として「集合住宅の共用部」に着目する。集合住宅は、駅から離れた立地であっても一定の居住人口（需要）が集積しており、モビリティサービスの事業性を担保する需要の拠点となり得る。また共用部、とりわけ既存の駐輪場スペースは、多くの集合住宅において飽和や乱雑化といった管理上の課題を抱えている一方、空間利用の最適化という観点からは十分に活用されているとはいえない。もし敷地内に利便性の高いシェアサイクルが導入され、居住者が所有する私有自転車の一部が削減されれば、既存の駐輪場スペースに「余剰空間」が生まれ、その空間を新

たな価値のためにデザインし直す可能性が開かれる。これは単なる交通結節点の設置というインフラ整備の議論を超え、居住者の生活空間の質的向上に寄与する空間デザインの課題である。

以上を踏まえ、本研究の目的は、集合住宅の共用部を都市の交通ネットワークを補完する「小さな結節点」として捉え、そのデザイン可能性を探るための基礎的知見を得ることにある。具体的には、東京都内の集合住宅居住者を対象としたウェブアンケート調査に基づき、敷地内へのシェアサイクル導入に対する居住者の意識、特に私有自転車からの移行意向とその規定要因、そして削減可能性のある自転車台数を定量的に検証する。さらに、これにより創出される可能性のある共用部のポテンシャルを考察し、将来的なモビリティハブのデザイン提案に向けた示唆を得ることを目指す。本研究は、既存ストックである集合住宅の共用空間を創造的に活用し、地域住民の移動環境改善と空間価値向上に貢献する新たな都市デザインの可能性を提示するものである。

2. 研究計画

本研究は、集合住宅共用部を「小さな結節点」として捉える視点に立ち、シェアサイクル導入による私有自転車の削減意向と、それに伴い創出される余剰空間の活用可能性を定量的に検証することを計画した。従来、モビリティハブに関する研究は都市スケールでの機能分類や交通結節点としての役割を中心に進展

し、シェアサイクルについても私有自転車との代替・補完関係が分析されてきたが、住宅共用部を対象とした分析はほとんど存在しない。そこで本研究では、都市交通研究と居住空間デザインを接続し、既存ストックを活用したモビリティハブ設計の基礎的知見を提供することを企図した。

調査計画としては、東京都内に居住し、5階建て以上の集合住宅に住み、自転車を所有し乗ることができる20歳から69歳までの男女を対象とするウェブアンケート調査を設計した。標本の偏りを避けるため、性別（男性・女性）および年代（20代から60代までの5区分）が均等になるよう割り付けを行い、計520名分のデータを収集する計画とした。

設問は、世帯構成や住居の物理的条件（建物階数、築年、専有面積、1フロア住戸数等）といった基本属性に加え、自宅周辺の公共交通に対する満足度、シェアサイクルの利用経験（近隣ステーションの有無、利用頻度、目的、仕様）、駐輪場の利用状況（場所、物理的・心理的評価、料金）、現在の私有自転車の所有・利用状況（所有台数、車種、利用頻度、目的、移動時間）を多角的に聴取するよう構成した。特に研究目的に直結する設問として、シェアサイクルがどのような条件を満たせば自転車の所有台数を減らす可能性が高まるかを問う9つの実装条件（敷地内設置、近隣設置、目的地設置、電動アシスト、アプリ不要、管理費内包、荷物対応、子ども送迎対応、子ども用車両）を提示し、それぞれの条件下での削減意向を評価させる設問（Q31）、および理想的なシェアサイクルが敷地内に導入された場合の削減意向を「0台」「一部削減」「全削減」の3択で問う設問（Q32）を設けた。

分析計画としては、まず回答者属性・居住形態・自転車保有利用実態・駐輪場環境・シェアサイクル利用実態に関する記述統計を整理する。次に、削減意向の規定要因を多角的に明らかにするため、単変量解析（Spearmanの順

Table 1 Questionnaire Summary

テーマ	設問概要（Q番号）
基本属性	Q2：世帯人数、Q3：子ども人数、Q4：子どもの年齢層、Q5：建物階数、Q6：居住階、Q7：築年、Q8：分譲／賃貸、Q9：専有面積、Q10：1フロア住戸数
公共交通評価	Q11：自宅周辺の公共交通に対する満足度
シェアサイクルの利用状況	Q12：近隣ステーション有無、Q13：利用頻度、Q14～Q15：利用目的・継続時間、Q16：仕様（電動等）
駐輪場の条件	Q17：駐輪場の有無、Q18：設置場所（屋内／屋外）、Q19：取り出しやすさ、Q20：距離感、Q21：盗難不安、Q22：利用料金、Q23：駐輪場の総合満足度
自転車所有・利用状況	Q24：所有台数、Q25：駐輪場利用台数、Q26：所有車種、Q27：メイン自転車の仕様（電動）、Q28：利用頻度、Q29：利用目的、Q30：平均移動時間
シェアサイクル実装条件と削減意向	Q31：施策別削減意向（9条件） ・敷地内設置・近隣設置・目的地設置・電動車導入・アプリ不要・管理費内包・荷物対応・子ども送迎対応・子ども用車両 Q32：理想条件下での減車意向（0台／一部削減／全削減）

位相関係数、Mann-WhitneyのU検定、 χ^2 検定）による関連要因の網羅的把握、二値および多項ロジスティック回帰分析による規定要因の推定、さらに9つの実装条件間の効果差を検証するMcNemar検定（Benjamini-Hochberg法による多重比較補正）の実施とした。

3. 計画の進行状況

計画に基づき、2025年8月にウェブアンケート調査を実施し、予定どおり520名分の有効回答を取得した。現在、得られたデータに対する各種統計分析を完了し、以下の知見を得ている。

回答者の居住形態をみると、世帯構成は単身世帯24.0%、二世帯27.7%、三世帯28.1%、四人以上20.2%であり、子供のいる世帯は49.8%であった。居住する集合住宅の形態は分譲56.9%、賃貸43.1%で、築年数は2000年代以前の住宅が約5割を占めた。保有する自転車の種類（複数回答）は大人用シティバイクが76.9%と最も多く、主要な利用目的は買い物61.3%、通勤・通学19.0%であった。近隣のシェアサイクルステーションについては「ある」が55.0%を占めた一方、利用経験者は約17%に留まり、普及の途上にある実態が確認された。

記述統計の結果、世帯あたりの自転車平均保有台数は約1.8台であり、週1回以上利用する層が約6割を占める一方で、低頻度の利用層も一定数存在し、所有の冗長性が生じて

いる可能性が示された。駐輪場環境については、取り出しにくさ・距離・総合満足度のいずれかに対し約 4 割の回答者が何らかの不満を抱えていることが明らかとなった。理想的なシェアサイクルが敷地内に導入された場合の削減意向 (Q32) では、「0 台」が約半数を占めたものの、「一部削減」と「全削減」を合わせて 51.2%の居住者が私有自転車を削減する可能性を示し、集合住宅におけるシェアサイクル導入が私有自転車からのシフトを促す一定のポテンシャルを持つことが確認された。

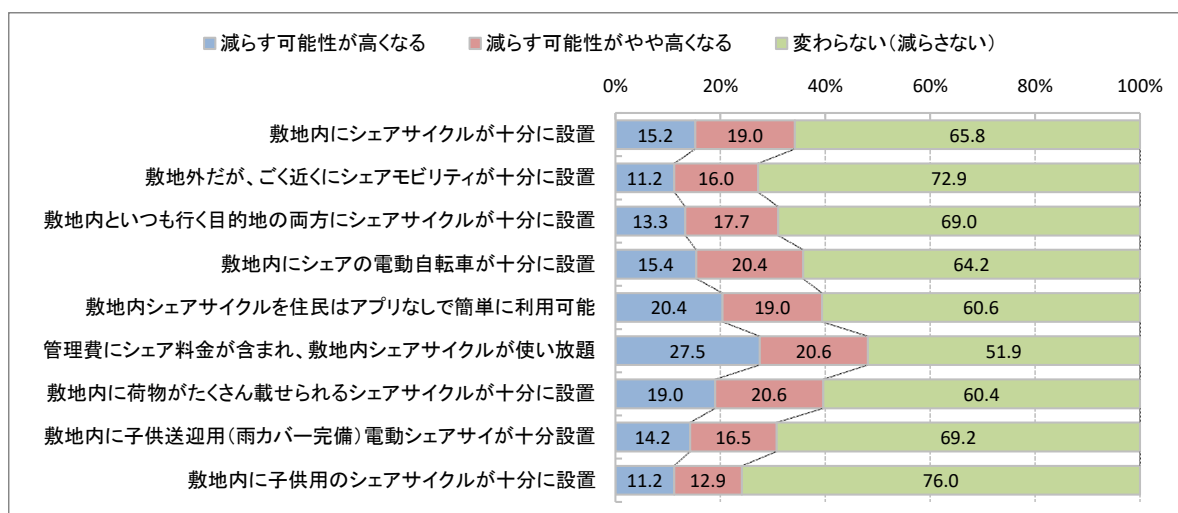
削減意向の規定要因に関する分析からは、シェアサイクルへのアクセス (近接性・利用経験)、既存駐輪環境の質 (体感距離・満足度・取り出しやすさ)、現在の利用習慣 (所有自転車の利用頻度)、所有構造 (車種) といった複数の要因が関係していることが明らかとなった。二値ロジスティック回帰分析では、近隣にステーションが無いことが削減意向に負の影響を与え、駐輪場満足度が低いほど削減意向が高まる傾向が確認された。多項ロジスティック回帰分析では、「一部削減」と「全削減」とで影響要因が異なり、複数台所有世帯は一部削減には向かいやすい一方で全面的な放棄には抵抗が大きいこと、ステーションの近接性が完全な移行を後押しすることが示された。

単変量解析では、駐輪場からの体感距離が遠いと感じるほど ($\rho = 0.187$)、また自転車

が取り出しにくいと感じるほど ($\rho = 0.140$) 削減意向が有意に高まり、シェアサイクルの利用頻度が高いほど削減意向が高まるという正の関連も確認された。一方、世帯の自転車所有台数や、子供同居の有無、分譲・賃貸の別、運転免許の有無、1 フロア住戸数といった属性・物理的要因には、今回の単変量解析では有意な関連が認められなかった。さらに補助分析として建物の物理的特性と駐輪場評価の関係を検討したところ、1 フロアあたりの住戸数が多い高密度な建物ほど駐輪場を遠く感じ ($\rho = 0.206$)、築年が新しい住宅ほど駐輪場満足度が高い ($\rho = 0.248$) ことが示された。これは、築年数が経過した高密度な集合住宅において駐輪環境の課題が顕在化しやすく、シェアサイクル導入による共用空間再編のポテンシャルが高い可能性を示唆している。

また実装条件の効果差を検証した McNemar 検定では、「管理費に料金が内包され使い放題となる」条件が賛成率 48.1%と最も高く、「荷物がたくさん載せられる」(39.6%)、「アプリなしで簡単に利用できる」(39.4%)、「電動自転車が十分に設置される」(35.8%) がこれに続いた。ペア比較では「管理費内包・使い放題」が他の多くの条件に対して有意に高い賛成率を示し、経済合理性、操作の簡便性 (アプリ不要)、実用的な機能性 (積載能力) が私有自転車からの移行を促す上で重要であること

Fig 2 Conditions for Shared Bicycle Implementation and Potential Reduction of Private



が示された。一方、「子ども送迎対応」や「子ども用車両」といった特定層を想定した条件は全体平均では優位性が限定的であったが、子育て世帯など特定の層にとっては移行の決め手となりうる要素と考えられる。

これらの分析を通じて、築年数が古く 1 フロアあたりの住戸数が多い高密度な集合住宅ほど駐輪環境に課題を抱えやすく、シェアサイクル導入による自転車削減および共用空間再編のポテンシャルが高いこと、私有自転車の削減により創出される余剰空間を休憩スペースや小さなプレイロット、宅配ボックスの増設、緑化スペース等へ転用することで共用部の価値を高めうること、そしてターゲットとする居住者層のライフスタイルや自転車への依存度に応じた段階的・適応的なサービスデザインが必要であることといった、デザインへの示唆を導出するに至っている。特に、既存駐輪場の改善とシェアサイクル導入を一体的に計画することで、単なる交通機能の提供に留まらず、住民の交流促進や生活利便性の向上に資する共用空間を実現しうる点に、本研究の含意がある。以上のとおり、当初計画した調査・分析はおおむね順調に進行し、所期の基礎的知見の獲得を達成している。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究費による調査分析の成果として、以下の 2 編の論文を発表した。

- (1) 本多久美子：都市の中の小さな結節点をデザインする ―シェアサイクル利用を前提とした集合住宅共用部の新たな可能性―，Design シンポジウム 2025 講演論文集，H-2-1，pp.163-169，2025 年 12 月。
- (2) 本多久美子：集合住宅の共用空間を活用したモビリティハブ導入可能性検討 ―共用部へのシェアサイクル導入と居住者意識分析―，第 37 回アーバンインフラ・テクノロジー推進会議，B05，pp.1-6，2025 年 12 月。

また、本研究をベースに発展的に実施する

研究課題について、以下の競争的研究資金を獲得している。

- ・「公益性」と「経済性」を両立するモビリティハブ設計条件の導出―行動データ解析と 3D 人流シミュレーションによる統合評価―，公益財団法人大林財団，2026 年 4 月～2027 年 3 月。
- ・持続可能な猛暑対策としてのクールモビリティハブ：産官学連携による社会実装と効果検証，鹿島学術振興財団 2026 年度一般研究助成，2026 年 4 月～2027 年 3 月。

今後は、本研究で得られた基礎的知見を発展させ、具体的な空間デザインおよびサービスモデルの提案、さらには実証実験を通じた効果検証を進める計画である。特に、行動データ解析と 3D 人流シミュレーションによる統合評価を組み合わせることで、「公益性」と「経済性」を両立するモビリティハブの設計条件を導出するとともに、猛暑対策としてのクールモビリティハブの社会実装と効果検証に取り組む。これらの研究成果を踏まえ、科学研究費助成事業（科研費）への申請・採択を目指すとともに、関連する国際学会での論文発表を予定しており、国内外への研究成果の発信を積極的に進めていく。なお、本研究は特定の地域の居住者意識調査に基づくものであり、他地域や異なるタイプの集合住宅への一般化には慎重な検討が必要であり、今後は調査対象の拡大も併せて検討する。

単結晶の巨大圧電性と多結晶の強靱性を両有する 圧電メタ結晶薄膜の研究

工学部 吉田 慎哉

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

本研究では、微細加工技術とエピタキシャル成長技術を組み合わせて、任意の形状と大きさに設計した結晶粒からなる多結晶薄膜：メタ結晶薄膜を研究する（図1）。ここでフォーカスする材料は、MEMS アクチュエータ用の巨大圧電単結晶材料とし、巨大な圧電性能と機械的強靱さを兼ね備えた革新的な圧電トランスデューサ薄膜を創出する。

学術的な問いは、「単結晶は脆く、多結晶は単結晶特有の性能や機能を発揮できない。これらのコンポジット薄膜を作れば、圧電性と強靱さを、任意に設計できるのではないかな？さらに、先端リソグラフィ技術を用いれば、サブマイクロメートルスケールの単結晶を自在に整列させた「完全にデザインされた多結晶薄膜＝メタ結晶薄膜」を創れるのではないかな？その性質はどうなるのだろうか？」である。本研究の目的を以下に記す。

① 『メタ結晶薄膜』という新しい概念の薄膜を研究する。ここでは、「巨大な圧電性能と機械的強靱さを兼ね備えた革新的な圧電薄膜」を創出することを第一の目的とする。そして、圧電 MEMS アクチュエータの性能限界の打破を目指す。

② ①の目的達成を目指す過程で、前述の学術的な問いに対する解を見出す。首尾よく研究が進んだ場合は、圧電体以外（電歪、磁歪材料など）への適用可能性も調査する。

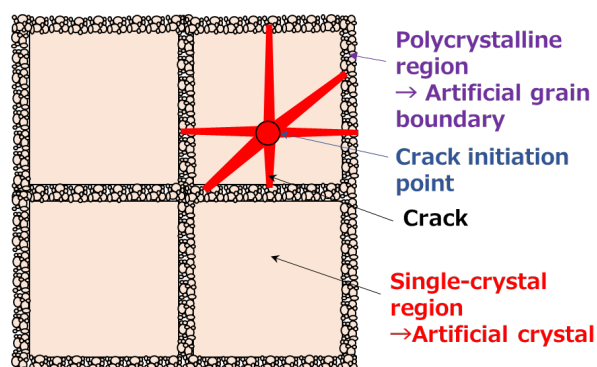


図1 メタ結晶薄膜の概念図

2. 研究計画

・圧電メタ結晶薄膜の形成法の開発

Si 基板上にエピタキシャル成長用バッファ層を形成し、その上に微細な多結晶シード層をパターンニングする。次にスパッタ法により圧電材料（PZT）を堆積し、意図的に多結晶化させたメタ結晶薄膜を試作する。結晶構造は電子線後方散乱回折（EBSD）や透過型電子顕微鏡（TEM）で解析し、圧電性や靱性も評価する。並行して、巨大圧電材料 Sm-PMN-PT の薄膜の成膜技術も開発する。

・巨大圧電 Sm-PMN-PT メタ結晶薄膜の形成

巨大圧電性能と強靱性を兼ね備えた Sm-PMN-PT メタ結晶薄膜を試作する。単結晶・多結晶部の設計による性能最適化や、圧電性向上のための組成探索も進める。

・MEMS デバイスへの応用実証

開発した圧電メタ結晶薄膜を用いて、ユニ

モルフカンチレバー、MEMS スピーカー、走査型ミラーなどを試作し、デバイス動作における優位性を検証する。さらに、他の機能性材料への展開も試み、技術の普遍性を確認する。

3. 計画の進行状況

片貝らは、エピタキシャルバッファ層をウェットエッチングによって領域選択的に改質し、その箇所にて PZT の多結晶成長を促進させるという方法を提案した^[1]。具体的には、バッファ層の最上層である SrRuO_3 (SRO) 層を過ヨウ素酸ナトリウム水溶液で部分的にエッチングする。その後、PZT を適切な成膜条件で成膜することで、その領域のみに多結晶 PZT を成長させる。しかしこの方法は、ウェットエッチングを時間制御で行うため、作製再現性も面内均一性に乏しい。例えば、SRO のエッチング量が足らなければ、多結晶は成長しない。一方、過剰にエッチングしすぎると、SRO の下地層の Pt 層が露出してしまい、圧電性を持たないパイロクロア相が発生してしまう。

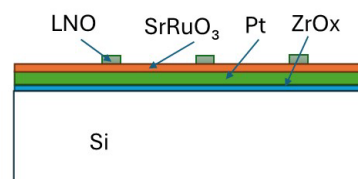
そこで本研究では、以下の方法を提案する。

①エピタキシャルバッファ層上に、LNO 多結晶シード層を成膜する。②LNO 多結晶シード層をウェットエッチングによってエッチングする。エッチングは SRO 層にて自然に停止する。③PZT を成膜し、多結晶シード層上に PZT 多結晶を成長させる。それ以外の領域には、単結晶薄膜が成長する (図 2)。

2. メタ結晶薄膜の作製工程

メタ結晶薄膜の作製工程を記す。まずエピタキシャルバッファ層付きのウエハを用意する。本実験では、KRYSTAL®ウエハ (I-PEX Piezo Solutions 株式会社) を用いる。層構成は、 $\text{SRO}/\text{Pt}/\text{ZrOx}/\text{Si}$ 基板である。次に多結晶 LNO シード層を成膜し、その上にフォトレジストをパターニングする。そして PZT エッチング液 PT204 (林純薬工業株式会社) を用いて、LNO をエッチングする。レジストを除去した後、

(1) Patterning of polycrystalline LNO layers



(2) Sputter deposition of PZT

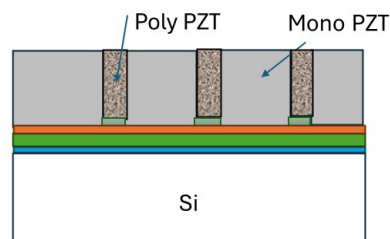


図2 本研究の加工プロセス

PZT をスパッタ成膜する。そして LNO 露出部には多結晶 PZT が、SRO の露出部分には PZT 単結晶が堆積される。これにより、メタ結晶薄膜を作製する。

2-1. 全面膜での予備実験

図2の工程を達成するには、次の点を確認する必要がある。①LNO 多結晶シード層を KRYSTAL®ウエハの SRO 上に形成できるか？②その上に、多結晶 PZT を成長させられるか？③LNO をウェットエッチングし、再度露出させた SRO 上に単結晶 PZT を成長させられるか？そこで、以下のような予備実験を実施した。

<実験方法>

1. KRYSTAL®ウエハ上に、LNO 前駆体溶液をスピコート法によって塗布した。次に、ホットプレートを使って、 400°C 、3分加熱し、仮焼成した。その後赤外線加熱装置を用いて 700°C まで $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ で昇温させ、酸素雰囲気中で1分間本焼成した。

2. PZT をスパッタ成膜した。組成比は PZT (50/50) とし、さらに鉛の蒸発を補正するために、 PbO を 10 mol% 過剰に添加した。膜厚は $1\mu\text{m}$ とした。ここでは、LNO 上に成膜した PZT 試料を、「PZT/LNO」と表記する。

3. X線回折 (XRD) を用いて、PZT/LNO 膜の結晶配向性や微細構造を評価した。比較として、KRYSTAL®ウエハの SRO 上にスパッタ成膜した PZT 試料 (以下 PZT/SRO) も評価した。

〈実験結果と考察〉

図 3 (a) と (b) に、XRD の $2\theta/\theta$ 法と極点図の結果をそれぞれ記す。図 3 (a) からわかるように、PZT/LNO における PZT (001) 回折ピークの強度は、PZT/SRO のそれよりも 1/10 となった。また、PZT (111) や (110) といったランダム配向性を示すピークは確認されなかった。図 3 (b) において、両試料ともに 4 つの回折スポットが見られた。このことは面内配向性を有することを意味する。しかし、PZT/LNO においてのみ、円環状の回折パターンもそのスポットに重なって見られた。以上の結果は、PZT/LNO は、「面外方向への単一配向性を持つ繊維状配向性多結晶」であり、かつ「単結晶膜ほど整っていない面内配向性がある程度有すること」を示唆する。したがって、LNO 上に成膜された PZT は、繊維状配向多結晶になることが確認された。

2-2. エッチングによる単結晶 PZT 成長への影響

LNO をエッチングして再度露出させた SRO 上への単結晶 PZT の成長可能性を、以下の実験を通じて調査した。

〈実験方法〉

1. エピタキシャルバッファ層付きのウエハ上にスピコート法によって LNO を成膜した。
2. PZT エッチング液 PT204 を用いて LNO を完全に除去した。電子プローブマイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer, EPMA) を用いて元素分析を行い、LNO が出来ているかを確認した。
3. LNO エッチング後、PZT をスパッタ成膜し、XRD にて結晶性を評価した。

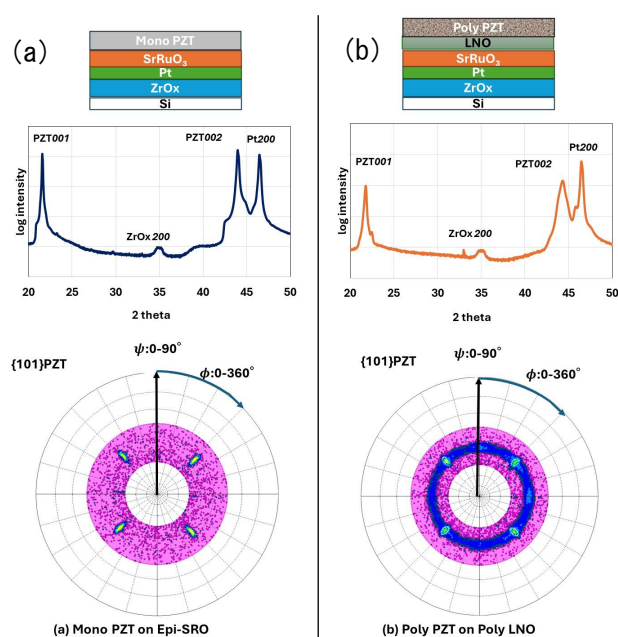


図 3 θ - 2θ 法による X 線回折パターンと極点図。(a) SRO 全面膜上 PZT、(b) LNO 全面膜上

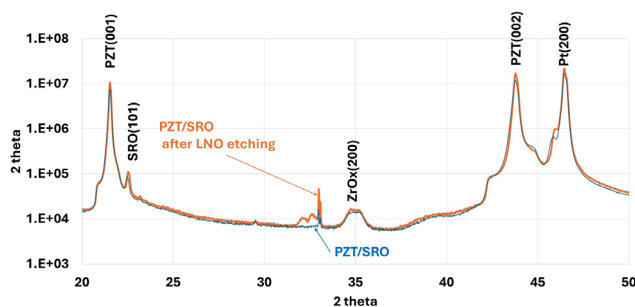


図 4 LNO エッチング後に PZT を成膜した基板および PZT/SRO 基板の XRD パターン

〈実験結果と考察〉

EPMA の分析の結果、PZT エッチング液 PT204 を用いることで、SRO に対して LNO を完全かつ選択的にエッチングできることを確認した。また、図 4 は、LNO をエッチング後に SRO 上に成膜した PZT、および LNO の堆積もエッチングもしなかった SRO 上に成膜した PZT 薄膜の XRD 分析結果を示す。LNO エッチング後の基板上に堆積した PZT 薄膜は、SRO 上の PZT 単結晶薄膜と同等程度の強度を持つ PZT (001) 回折ピークが観察された。これは、前者も後者も、同程度の結晶品質を持つ単結晶であることを示唆する。したがって、LNO をウェットエッチングし、再度露出させた SRO 上に単結晶

PZT を成長させられることが示された、また、LNO 上 PZT が、メタ結晶薄膜の多結晶領域として機能することが期待された。

2-3. PZT メタ結晶薄膜の作製

前述の予備実験にて良好な結果が得られたので、PZT メタ結晶薄膜を試作した。

<実験方法>

1. KRYSTAL®ウエハにスピコート法を用いて LNO を成膜した。
2. LNO 上にフォトレジスト (TSMR-V90、東京応化工業株式会社) をパターンニングした。コンポジット薄膜のパターンは多結晶領域のピッチが $250\ \mu\text{m}$ 、線幅は $50\ \mu\text{m}$ であり、単結晶部の一辺の長さは $200\ \mu\text{m}$ である。
3. PT204 を用いて LNO をエッチングした。そして、レジストを除去した
4. PZT をスパッタ成膜し、コンポジット薄膜の作製を試みた。
5. 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) と電子後方散乱回折 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) を用いて、コンポジット薄膜の結晶形態を評価した。

<実験結果と考察>

図 5 に、SEM による観察結果を記す。堆積した PZT にはメッシュパターンが確認され、LNO および SRO 上の PZT を比較すると、前者の方が表面はやや粗く見えた。図 6(a) と (b) に、それぞれの領域での EBSD での分析結果を示す。SRO 上 PZT 領域では面外、面内方向ともに配向していた。つまり、その領域の PZT は単結晶であることを意味する。一方、LNO 上 PZT 領域では面外方向には (001) 面で揃っているが、面内方向では (101) や (001) 配向性を持つ結晶粒が観察された。以上より、PZT メタ結晶薄膜の形成に成功した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状

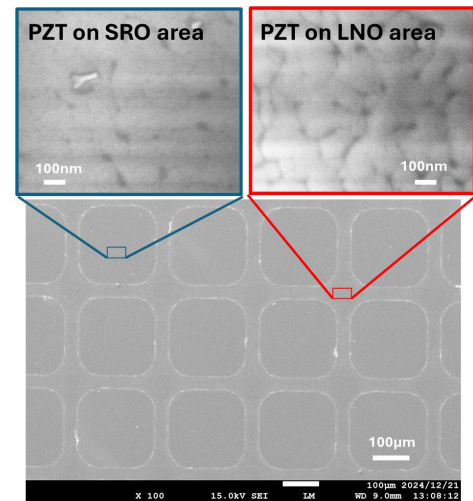


図 5 PZT メタ結晶薄膜表面の走査型電子顕微鏡像

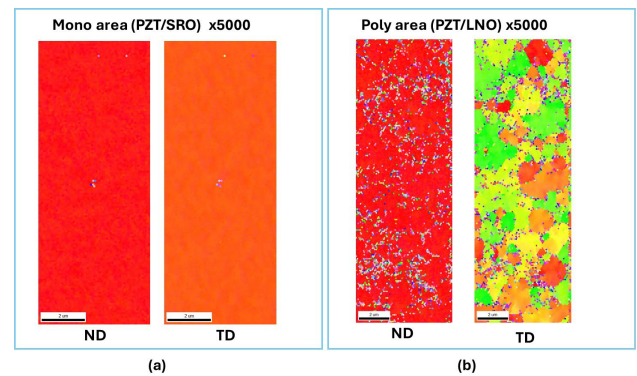


図 6 (a) 単結晶領域 (PZT/SRO) と (b) 多結晶領域 (PZT/LNO) の EBSD による配向性分析。
(赤色 : 001 配向部、緑色 : 101 配向部)

況

今後は、単結晶部と多結晶部のパターンサイズを縮小したメタ結晶薄膜の形成を試みる。本成果は第 42 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウムにて発表した。今後、さらに研究データを蓄積した後、学術論文を投稿する。

参考文献

- [1] Y. Katagai, A. Teshigahara, and S. Yoshida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 64, no. 8, p. 085502, Aug. 2025

女性アスリートの初経初来年齢と足関節捻挫発生要因の関連検討

工学部 深野 真子

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

足関節捻挫はスポーツ現場で頻発する外傷のひとつであり、捻挫後約 30～70%の確率で足関節不安定症(Chronic ankle instability, 以下:CAI)へ移行する。足関節捻挫の発生頻度は男女で異なり男性よりも女性に多い(Kerr ZY et al. J Athl Train. 2016, Doherty C et al. Sports Med. 2014)と報告され、CAI の発症頻度も男性よりも女性が有意に高い(Tanen L et al. Foot Ankle Spec. 2014)ため、足関節捻挫に関連する女性特有の要因があると予測されている。

足関節捻挫や膝前十字靱帯(以下:ACL)損傷などの靱帯損傷が女性に多い要因として、女性に特徴的な高い関節弛緩性があげられる。関節弛緩性の男女差は、男女の性ホルモンの違いおよび女性の月経周期に伴うホルモン変動によると考えられ、特に主に卵巣から分泌されて妊娠中や出産時に関節の弛緩性を高めるホルモンであるリラキシンについて 2000 年以降に運動器の外傷との関連が指摘されるようになった。リラキシンは非妊娠時は黄体期に分泌され、靱帯の約 42～56%を占めるタイプ I コラーゲンの分解を促し合成を抑制する作用があり(Uemori EN et al. J Biol Chem. 1990)、リラキシン分泌によりコラーゲン密度の低下や粘性の低下など靱帯の力学的特性を変化させ強度低下を招く(Dragoo JL et al. Knee. 2009)とされている。実際に女性の発症

頻度が高い ACL 損傷では、月経前の黄体期に分泌されるリラキシン濃度が高いアスリートで ACL 損傷リスクが高い(Dragoo JL et al. Am J Sports Med. 2011)と報告されている。さらにリラキシンの作用を踏まえると、月経周期中のホルモン濃度の変動だけでなく、月経周期を繰り返すごとにコラーゲンの分解促進と合成抑制が繰り返されることになり、ホルモンにさらされる期間が長くなればなるほど靱帯の力学的特性の変化が大きくなり、靱帯損傷につながるリスクが上昇する可能性があるのではないかと考えた。実際に米国 NCAA ディヴィジョン 1 に所属する女性アスリート 120 人を対象とした調査では、ACL 損傷既往のある 14 人の選手は損傷歴のない他の選手よりも約 8 か月初潮発来が早かった(Froehle AW et al. J Sports Med and Allied Health Sci 2020) と報告されている。またごく最近発表された研究では、女性アスリート 686 人の初経発来時期と膝関節弛緩性の関連を調べ、初経発来が 12 歳もしくはそれより若い年齢であったグループは初経発来が 14 歳以降であったグループよりも膝関節弛緩性が大きく、また月経開始から 5 年以上経過したアスリートは月経開始から 2 年以内のアスリートよりも膝関節弛緩性が大きかった(Shultz SJ et al. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2024)と報告されている。これらより、比較的早期に初経発来を迎えて女性ホルモンにさら

される期間が長くなることにより関節弛緩性が増大する可能性がある」と予測し、初経発来年齢に応じて足関節捻挫のリスクとなりえる足関節弛緩性が増大するとともに靱帯の力学的特性にも変化が生じると仮説を立てた。この仮説を検証するため、女性アスリートにおける初経発来年齢と足関節の関節弛緩性および靱帯の力学的特性の関連を検討することを目的とし、今後以下の3つの検討を行うことを予定している。具体的には、①足関節捻挫の既往歴やCAIを有する者の初経発来年齢は早い傾向にあるか、②足関節弛緩性および身体特性が初経発来の時期と関連するか、③初経発来の時期により前距腓靱帯の力学特性が異なるかの検討を行う。

一方、これらの検討を行うには「足関節捻挫やCAIの発症頻度の性差が思春期以降顕著に表れる」ことが前提条件となる。つまり性ホルモンによる影響を受けない思春期以前には性差が無いことを確認する必要がある。そのため、2025年度は5～9歳の思春期前の小児における足関節捻挫およびCAIの有病率とその発生状況を調べて性別比較することを目的として研究を行った。

2. 研究計画

2025年度【前提課題】子供の足関節捻挫とその発生状況に関する性差の検討（調査）

2026～2027年度【課題①】足関節捻挫の既往およびCAIの有無と初経発来年齢の関連検討（調査）

2027～2029年度【課題②】女性アスリートにおいて初経発来の時期により足関節弛緩性および身体特性が異なるかの検討

2028～2030年度【課題③】女性アスリートにおいて初経発来の時期により前距腓靱帯の力学特性が異なるかの検討

3. 計画の進行状況

2025年度は「子供の足関節捻挫とその発生状況に関する性差の検討」を実施したので、以下に報告する。

【目的と方法】

本研究では、5～9歳の思春期前の小児における足関節捻挫および足関節不安定症の有病率を調査し、その発生状況を性別ごとに比較することを目的とし、ウェブベースのアンケート調査を実施した。

アンケートは、ウェブ調査会社（楽天インサイト株式会社）に登録されているモニターで5～9歳の子どもを持つ保護者に対して無作為に配布された。配布に際しては、男女比が均等で、かつ地域的な偏りがないようサンプリングを行った。

本研究は倫理委員会の承認を得て、ヘルシンキ宣言の原則に則って実施された。研究の目的および手順は、アンケートの冒頭ページに書面で提示し、参加者が同意ボタンをクリックすることでインフォームド・コンセントの意思表示とし、回答画面へと進む形式をとった。

アンケートは、2つのスクリーニング質問と7つの本質問で構成され、最初のスクリーニング質問では、回答者に5～9歳の子どもがいるかを確認し、2つ目のスクリーニング質問では、対象となる子どもが以下の除外基準に該当しないかを確認した。除外基準は、(1) 子供に歩行や運動を妨げる疾患、障害、または症状がある、(2) 医師から思春期早発症と診断されている、あるいはその可能性を指摘されたことがある、の二点であった。スクリーニング質問の結果、包含基準を満たし、かつ除外基準に該当しなかった者を本アンケートの対象とし、子どもの足関節捻挫の既往やその発生状況について回答を求めた。

統計検定にはSPSS ver. 23 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)を使用し、回答の各項目をカイ二乗検定もしくはマンホイットニーのU

検定を用いて男女を比較した。

【結果】

配布したアンケートより、計 5,624 件（男児の親 2,858 件、女児の親 2,766 件）の回答を得た。このうち除外基準に基づき 263 件を除外し、5,361 件の有効回答を得た。5,361 件の有効回答のうち、719 名（13.4%）で子どもに足関節捻挫の既往があると回答した。その後、調査会社による無作為データ抽出プロセスを経て、最終的に 600 件（男児 300 件、女児 300 件）が解析対象として選出された。

表 1. 足関節の症状と足関節捻挫回数、受傷年齢の男女比較 (n = 600)

質問	回答	N	%	男児	女児	p value
足関節の自覚的な不安定感またはgiving-wayの有無	有り	186	31	91	95	0.72
	無し	414	69	209	205	
足関節捻挫の回数	1回	296	49.3	153	142	0.15
	2回	167	27.8	88	79	
	3回	52	8.7	20	32	
	4回以上	85	14.2	38	47	
	不明	0	0	0	0	
受傷年齢（複数回受傷であれば、初回時の年齢）	1	6	1.0	2	4	0.71
	2	19	3.2	9	10	
	3	61	10.2	30	31	
	4	55	9.2	31	24	
	5	141	23.5	68	73	
	6	114	19.0	53	61	
	7	108	18.0	58	50	
	8	71	11.8	37	34	
	9	25	4.2	12	13	

解析対象となった 600 件のうち、186 名（31.0%）が、子どもに「自覚的な足関節の不安定感」あるいは「giving-way（崩れ落ちるような感覚）」の経験があると回答し、304 名

（50.7%）が足関節捻挫の反復既往があると回答した。主観的な足関節の不安定性、捻挫の回数、初回捻挫の年齢、および受傷時の活動内容や場所の状況因子および受傷後の症状や受診行動に性差は認められなかった。（表 1, 表 2）

表 2. 足関節捻挫受傷時の状況と受診行動の男女比較 (n = 600)

質問	回答	N	%	男児	女児	p value
足関節捻挫受傷時の活動	スポーツの試合や練習中	105	17.5	59	46	0.24
	外遊び	373	62.2	182	191	
	階段昇降	18	3.0	9	9	
	歩行	41	6.8	23	18	
	その他	29	4.8	9	20	
	不明	34	5.7	18	16	
	不明	0	0	0	0	
受傷場所	スポーツ施設や公園	301	50.2	154	147	0.47
	家	61	10.2	26	35	
	学校(保育園)施設内	98	16.3	48	50	
	駅、商業施設、公共施設	21	3.5	7	14	
	舗装された道	44	7.3	22	22	
	舗装されていない道や広場など	28	4.7	15	13	
	その他	5	0.8	4	1	
	不明	42	7.0	24	18	
	不明	0	0	0	0	
受傷後の症状（複数回答）	痛み	507	84.7	248	259	0.56
	腫れ	160	26.7	75	85	0.25
	熱感	49	8.2	22	27	0.56
	痛みなどのために運動できない期間があった	85	14.2	39	46	0.18
	特になし	48	8	27	21	0.26
	不明	0	0	0	0	
	不明	0	0	0	0	
受傷後の病院受診の有無、受診しなかった場合の理由（複数回答）	受診有	326	54.3	153	173	0.46
	受診無し	274	45.7	147	127	0.1
	子供が大丈夫と言った	205	74.8	111	94	0.68
	親が大丈夫と思った	85	31.0	42	43	0.35
	受診にかかる費用が心配だった	2	0.7	2	1	0.19
	どの病院に行けばよいかわからなかった	4	1.5	3	1	0.39
	近くに病院(整形外科)がなかった	6	2.2	1	5	0.07
	その他	37	13.5	19	18	
	不明	0	0	0	0	
	不明	0	0	0	0	

【考察】

本研究では、5～9歳の思春期前の日本人小児における足関節捻挫およびCAIの有病率を調査し、性別による比較を行った。対象となった小児の13.4%に足関節捻挫既往があることが明らかとなった。さらに、捻挫既往のある600名を対象とした解析では、31.0%が主観的な足関節不安定感やgiving-wayを訴え、50.7%が複数回の捻挫を経験していた。

International Ankle Consortiumが提唱する「研究におけるCAI患者の標準的な包含基準」には、1) 少なくとも1回の重篤な足関節捻挫の既往、2) 患部のgiving-way、反復性捻挫、および/または不安定感の既往、3) 妥当性が確認された質問票により測定された自己申告による足部・足関節機能の低下、の3要件がある(Gribble PA et al., Br J Sports Med. 2016)。本研究対象者の31.0%は1)と2)を満たし、実質的にCAIの定義に該当すると考えられる。先行のシステマティックレビューでは、捻挫既往のある15～32歳におけるCAIの有病率は25%（範囲：7～53%）(Lin CI et al., J Foot Ankle Res. 2021)と報告されており、本研究でCAIに該当する可能性があると考えられた小児の割合が15～32歳の集団で報告されている数値と同等であることが明らかとなった。

本研究では、足関節捻挫や不安定症の有病率に関して、男女児間で有意な差は認められなかった。この結果は、先行研究で報告されている「女性の方が足関節捻挫やCAIの発生頻度が高い」という性差が顕著になるのは思春期以降である可能性を示唆しており、性ホルモンが靱帯損傷や関節不安定症の発症において何らかの要因となるとする仮説を支持するものである。

足関節捻挫受傷の状況に関しては、本研究集団における大部分は、5～7歳の時期に組織的なスポーツ活動ではなくスポーツ施設や公園などでの「外遊び（62.2%）」の最中に発生

していた。この結果は、子どもたちが競技スポーツを開始する一般的な年齢（およそ10歳前後）において、たとえ本人に自覚がなくとも、すでに相当数の子どもが初回の足関節捻挫や自覚的不安定感・giving-wayを経験していることを示唆する。指導者やトレーナーを含むスポーツ関係者は、若年選手が競技スポーツの世界に入る時点で、すでに足関節の不安定性を抱えている可能性があることを認識すること、また早期の評価と予防的なケアを行う準備を整えておくことが重要だと考えられる。

捻挫受傷後に医療機関を受診しなかったと回答した割合は45.7%であった。現在、アスリートにおける足関節捻挫に対する適切な処置の重要性が強調されている。本研究の結果では小児の足関節捻挫はスポーツ現場よりもむしろ幼児期の遊びの中で主に発生していた。したがって、子どもたちの活動を最も身近で観察する立場にある保護者に対し、日常の遊びの中で生じた捻挫であっても必要に応じて医療機関を受診することの重要性を啓発する必要がある。保護者の意識向上は、初回の足関節捻挫が見逃されるのを防ぎ、将来的なCAIを予防するための適切な早期介入を確実にするために重要と考えられた。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

2025年度に実施した研究結果は論文にまとめ、現在国際誌に投稿中である。

今後は研究計画に従い、以下の研究を実施する。

- ・2026～2027年度【課題①】足関節捻挫の既往およびCAIの有無と初経発来年齢の関連検討(調査)

- ・2027～2029年度【課題②】女性アスリートにおいて初経発来の時期により足関節弛緩性および身体特性が異なるかの検討

- ・2028～2030年度【課題③】女性アスリートにおいて初経発来の時期により前距腓靱帯の力学特性が異なるかの検討

力学環境に応じた骨造形機構の数理的理解と医療応用

工学部

亀尾 佳貴

共同研究者

京都大学医生物学研究所

金 英寛

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

脊椎動物の骨格を構成している多数の骨は、それぞれ荷重支持や運動などの力学的機能に適応したユニークな形状と大きさを有している。興味深いことに、四肢や体幹の骨のほとんどは、その形態の多様性にもかかわらず、いずれも軟骨内骨化と膜性骨化という共通のメカニズムにより形成される。このような外形状の変化をとまなうモデリングにより形成された骨は、同時に、骨吸収と骨形成を繰り返して自らをリモデリングすることにより、その内部構造を変化させる。近年の分子生物学の発展により、骨のモデリング・リモデリングに関連する様々なシグナル伝達経路や遺伝子制御ネットワークが同定されてきたが、機能的な骨が形成されるためには、そのような生化学的因子のみならず、組織外部からの力学的作用が重要な役割を果たしていることが明らかにされてきた。このように、骨のモ

デリング・リモデリングは、力学的因子と生化学的因子とが関連した複雑な生命現象であり、骨組織中に存在する細胞群がいかにして協調的に振舞い、力学環境に適応した外形状と内部構造を持つ骨を自律的に形成するのかは未だ不明である。骨のモデリング・リモデリングの制御メカニズムを包括的に解明することは、骨組織の発生・成長過程の理解はもちろんのこと、軟骨無形成症や骨形成不全症など、遺伝的要因により骨格異常をきたす骨系統疾患に対する新たな治療法の確立など、将来の医療に大きく貢献すると考えられる。

そこで本研究では、軟骨細胞による骨モデリングと破骨細胞・骨芽細胞による骨リモデリングの数理モデルを統合し、力学環境に応じた骨の外形状と内部構造の変化を同時に解析可能な骨形態形成のシミュレーション基盤を開発することを目的とする。これにより、骨が力学環境に適応した形状と構造を自律的

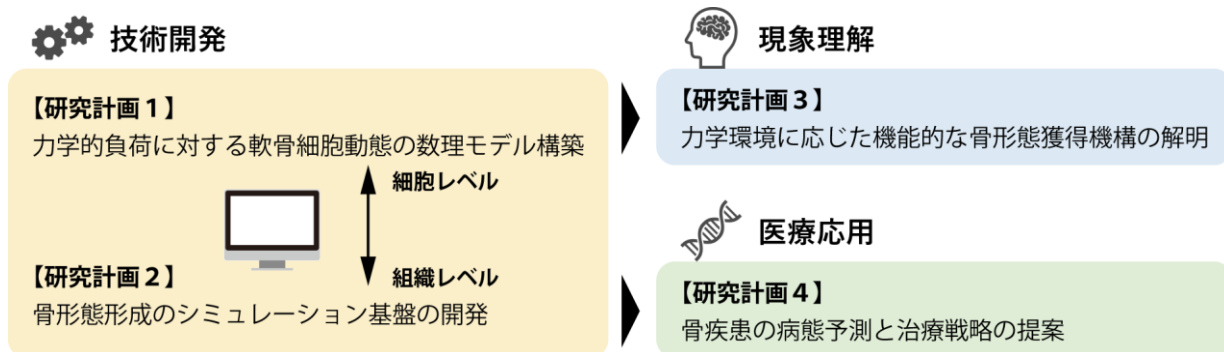


図1：研究計画の概要

に獲得する基本原理を多細胞ダイナミクスに基づいて統合的に明らかにするとともに、骨形態の異常をともしう骨疾患の病態予測と、その効果的な治療戦略の提案を目指す。

2. 研究計画

研究計画の概要を図1に示す。まず計画1では、骨の形態形成において重要な役割を担う軟骨細胞動態の数理モデルを構築し、力学的負荷に対する基本的な振舞いを検討する。次に計画2では、計画1で得られた知見を基に、軟骨細胞の活動と組織の成長・変形とを関連付ける骨モデリングの数理モデルを構築し、破骨細胞・骨芽細胞による骨吸収・骨形成を表現する骨リモデリングの数理モデルと結合することにより、力学環境に応じた骨の形状・構造の変化を同時に解析可能な骨形態形成のシミュレーション基盤を開発する。本シミュレーション基盤を用い、計画3では、生理的な骨伸長の再現を通じて構築した数理モデルの妥当性を検証するとともに、器官培養実験との比較により、力学環境に応じた特徴的な骨形態形成の基本原理を探る。さらに計画4では、骨形態の異常をともしう骨疾患の病態を予測し、その病態に応じた効果的な治療戦略を提案する。

3. 計画の進行状況

本稿では、図1に示す計画1の進捗状況、および、計画4の前段階として、骨リモデリングシミュレーションの医療応用に関する研究成果について報告する。

3.1 力学環境に応じた軟骨細胞の増殖・肥大化にともしう関節形態形成の基礎検討

骨形態形成の過程において、関節は、機能に応じた形態を獲得する。この過程では、骨原基内部の軟骨細胞が周囲の力学環境に応答して、細胞挙動を変化させる。そこで、医学的・工学的な応用を見据え、力学環境に応じ

た特徴的な関節形態が形成されるメカニズムの解明を目的とし、骨原基内部の軟骨細胞の力学応答則である **Carter** の骨化理論に基づき、細胞の力学応答を表現する数理モデルを構築して、これに基づいた関節形態形成シミュレーションを行った。

骨組織の変形を解析するため、連続体力学ベース粒子法として知られる **Material Point Method** を用いた。本手法における物体粒子を細胞とみなし、粒子の成長のストレッチを周囲の力学環境に応じて変化させ、**Carter** の骨化理論に基づいて軟骨細胞の増殖や肥大化を表現する数理モデルを構築した。本モデルにより、組織形態形成の過程において、組織全体の変形と内部の細胞挙動とを同時に解析することが可能となった。

次に、構築した数理モデルに基づき、立方体骨組織に対して関節形態形成シミュレーションを行った(図2a)。骨組織同士の接触を想定し、立方体骨組織上面に圧縮荷重を負荷した結果、荷重が作用する骨表面の直下に、骨形成指標(OI)の値が高く、初期の二次骨化中心に相当すると考えられる領域が形成された(図2b)。また、それにともしない、長骨の骨端部に類似した凹状の形態が形成された。さらに、立方体骨組織に対して非対称な圧縮荷重を負荷した場合には、組織の成長速度の空間的な不均一性に起因して、骨組織が大きく湾曲することが示された(図2b)。

以上の結果から、本研究で構築した数理モデルは、力学的負荷に対する軟骨細胞の動態から、骨形態形成の力学的メカニズムを理解する上で有用であることが示唆された。

3.2 副甲状腺ホルモンが骨形態変化に与える影響の in silico 評価

副甲状腺ホルモン(PTH)は、体内で過剰分泌されると骨粗鬆症を引き起こす(異化作用)のに対し、間欠的に投与すると骨量を増加させる(同化作用)という二面性を持ち、実際に

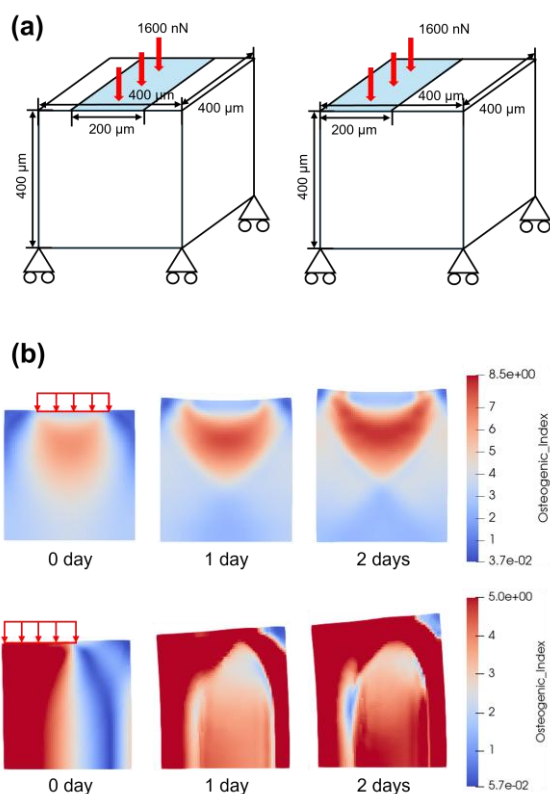


図 2：力学的負荷に対する関節形態形成シミュレーション。(a)解析モデル。(b)骨組織の変形と骨形成指標 (OI)。

テリパラチドと呼ばれる骨粗鬆症治療薬として使用されている。このように、PTH の作用機序は非常に複雑であることから、関連する病理の予防や診断、さらには、薬剤としての治療効果の改善に向け、PTH が骨形態変化に与える影響を予測することが重要である。そこで、PTH が骨代謝に関連するシグナル伝達経路に及ぼす作用を組み込んだ骨代謝数理モデルを構築し、骨リモデリングシミュレーションにより、PTH が骨形態変化に与える影響を *in silico* で評価した。

まず、本数理モデルにおいて、内因性 PTH の過剰分泌による骨減少という異化作用を再現可能か検討するため、PTH 分泌量を増加させ、骨リモデリングシミュレーションを行った。その結果、内因性 PTH 分泌量が増加するほど骨が減少する様子が観察され、本数理モデルが慢性的な PTH の過剰による骨粗鬆症を再現可能なモデルであることが示された。次に、

PTH の薬剤としての利用、つまり、テリパラチドとして骨粗鬆症を治療する同化作用を再現可能か検討するため、骨粗鬆症骨に対しテリパラチドを 1 日に 1 回投与し、骨リモデリングシミュレーションを行った (図 3)。その結果、テリパラチドの間欠投与により、骨粗鬆症に対する治療効果が認められ、本数理モデルが、PTH 製剤として骨量を増加させる作用を再現可能なモデルであることが示された。

以上の結果から、本数理モデルは、PTH の異化作用および同化作用の双方を再現可能なモデルであり、PTH による骨形態変化を解析する上で有用であることが示唆された。

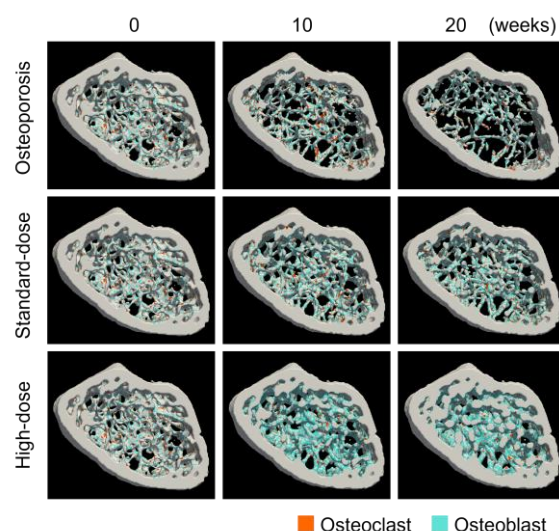


図 3：骨粗鬆症において投薬治療を行わない場合と基準用量、高用量のテリパラチドを投与した場合の骨形態変化。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況【今後の計画】

今年度の研究を通じて構築した軟骨細胞による骨モデリングの数理モデルに対し、さらに破骨細胞による骨吸収と骨芽細胞による骨形成を考慮することにより、骨モデリングと骨リモデリングの統合数理モデルを構築する。これにより、力学環境に応じた骨の外形状の変化と内部構造の変化とを同時に解析可能な骨形態形成のシミュレーション基盤の開発を

推し進める。さらに、コンピュータ上で生理的な長管骨の伸長過程を再現し、骨形態と細胞配置を指標として開発したシミュレーション基盤の妥当性を検証する。

【学会，論文等投稿・発表状況】

国際会議講演

- (1) Young Kwan Kim, Yoshitaka Kameo, Sakae Tanaka, Taiji Adachi, “Osteoclast Precursor Inhibition for Preventing Excessive Osteoclast Activity after Denosumab Discontinuation: An In Silico Proof-of-Concept Study”, ASBMR 2025 Annual Meeting, Seattle, USA, Total 1 page, 2025. 9. 5-8.
- (2) Yoshitaka Kameo, “Continuum-based Particle Modeling of Biological Tissue Growth and Deformation”, The JSME-KSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2025, Gwangju, Korea, Total 1 page, 2025. 8. 21-23. (招待講演)
- (3) Young Kwan Kim, Yoshitaka Kameo, Sakae Tanaka, Taiji Adachi, “Computational Examination of Therapeutic Strategy for Preventing Rebound After Denosumab Cessation”, 30th Congress of the European Society of Biomechanics (ESB2025), Zürich, Switzerland, Total 1 page, 2025. 7. 6-9.

国内会議講演

- (1) 数野大樹, 金英寛, 亀尾佳貴, “副甲状腺ホルモン製剤の間欠投与が骨形態変化に与える影響の in silico 評価”, 日本機械学会第 36 回バイオフィロンティア講演会, 2A05, 弘前, 2025. 12. 6-7.
- (2) 亀尾佳貴, 数野大樹, “骨粗鬆症における皮質骨・海綿骨リモデリングのシミュレ

ーション解析”, 日本機械学会 M&M2025 材料力学カンファレンス, OS0818, 熊本, 2025. 11. 10-13.

- (3) 金英寛, 亀尾佳貴, 田中栄, 安達泰治, “抗 RANKL 抗体薬中止後のリバウンドを抑制する新規治療コンセプトの in silico 検証”, 第 40 回日本整形外科学会基礎学術集会, S1570, 弘前, 2025. 10. 16-17.
- (4) 横山優花, 亀尾佳貴, 須長純子, 牧功一郎, 安達泰治, “軟骨細胞のカラム形成を介して骨形態形成を制御する力学場”, 第 63 回日本生物物理学会年会, 2SFA-7, 奈良, 2025. 9. 24-26.
- (5) 庭山悠斗, 数野大樹, 亀尾佳貴, “骨粗鬆症におけるシグナル分子動態の骨代謝シミュレーション”, 日本機械学会第 38 回計算力学講演会, OS9-4, 長野, 2025. 9. 24-26.
- (6) 数野大樹, 亀尾佳貴, “副甲状腺ホルモンの過剰分泌にともなう骨粗鬆症シミュレーション”, 日本機械学会第 37 回バイオエンジニアリング講演会, P2-06, 横浜, 2025. 5. 24-25.

学術論文

- (1) Young Kwan Kim, Yoshitaka Kameo, Sakae Tanaka, Taiji Adachi, “In Silico Exploration of Osteoclast Precursor Inhibition for Preventing Rapid Bone Loss After Denosumab Discontinuation”, npj Systems Biology and Applications, 12, #40, 2026.
- (2) Yoshitaka Kameo, Kei Imai, Yuki Miya, Young Kwan Kim, Taiji Adachi, “In Silico Model of Mechano-biochemical Bone Remodeling Characterizes the Therapeutic Effects of Osteoporosis Drugs Depending on the Action Mechanism”, Biomedical Engineering Advances, 9, 100176, 2025.

乱流の運動量・熱輸送のスケール非相似性に着目した 革新的熱流体制御の基盤研究

工学部 河田 卓也

共同研究者

東京理科大学 創域理工学部機械航空宇宙工学科 塚原 隆裕

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

乱流には様々な大きさ（スケール）の渦が存在しており，こうした無数の渦が流体を複雑に混合することで，流れにおける運動量と熱の輸送が著しく促進されている．乱流の混合作用による運動量・熱輸送の促進はそれぞれ壁面摩擦抵抗・壁面熱伝達の著しい増加につながるため，「乱流による運動量輸送は低減，熱輸送は促進」という乱流輸送の非相似制御が実現できれば，様々な熱流体機器に用いられている熱交換技術の飛躍的な効率改善が可能である．そのためには，本質的に非線形な乱流混合メカニズムを理解し，それに立脚した熱流体制御技術の構築が必要である．本研究課題では，「運動量を運ぶ渦」と「熱を運ぶ渦」の大きさの違い（運動量・熱輸送のスケール非相似性）に着目し，効果的な乱流輸送の非相似制御手法を開発するための基盤的研究を行う．スーパーコンピュータによる大規模数値シミュレーションを駆使し，様々な種類の乱流において運動量・熱輸送のスケール非相似性が生じる条件の特定とそのメカニズム解明を行う．それにより乱流混合メカニズムの本質を明らかにし，乱流の非線形性の理解に立脚した革新的熱流体制御技術の創出を可能にする．

2. 研究計画

壁面に沿う乱流（壁乱流）には，基礎的な流

れの種類として，チャンネル乱流（静止した2枚の平行な平板間を流れる乱流），円管乱流（真っ直ぐな円管内を流れる乱流），平面クエット乱流（片方が静止し，片方が一定速度で移動する2枚の平行平板の剪断により駆動される乱流），平板境界層（平板上に発達する境界層）の4種類がある．これらはいずれも，壁面と平行に流れる乱流であるが，平面の曲率の有無，流れの駆動方法，空間発達の有無等に違いがあり，これら種類の異なる基礎的壁乱流に共通した性質，つまり壁乱流の普遍的性質の発見・メカニズム解明は，壁乱流の本質理解・有効な制御手法の創出に極めて重要である．

まず平面クエット乱流に関する先行研究にて発見された「乱流による運動量輸送・熱輸送のスケール非相似性」の普遍性を明らかにするため，チャンネル乱流・円管乱流・平板境界層の直接数値シミュレーションを行い，これら3種の基礎的な壁乱流においても，平面クエット乱流と同様に運動量輸送・熱輸送間のスケール非相似性が見られるかを確認する．それぞれの流れの直接数値シミュレーションを，卓上ワークステーションでも実行可能な規模に抑えるため，いずれの流れ場においても摩擦レイノルズ数（壁乱流の流れ場の統計的性質を基本的に支配するパラメータ）を180，プラントル数（乱流による熱輸送の性質を基本的に支配するパラメータ）を1とする．こ

れにより、比較的低レイノルズ数においてプラントル数=1と限定された条件下ではあるが、代表的な壁乱流に共通して上記のスペクトル非相似性が見られるかをまず検証する。

次に、4種類の壁乱流、チャンネル乱流、円管乱流、平面クエット乱流、乱流平板境界層における運動量輸送・熱輸送のスペクトル非相似性について、レイノルズ数依存性・プラントル数依存性を調べるため、各壁乱流場において摩擦レイノルズ数やプラントル数を変化させた計算を行う。各パラメータの範囲は、摩擦レイノルズ数が180～1000程度、プラントル数は0.1～10程度の範囲で数値シミュレーションを行い、特に大きな計算コストがかかる高摩擦レイノルズ数・高プラントル数のケースに関しては、MPI 並列計算による大規模計算を、大阪大学や東北大学等、他の研究機関が所有する大規模計算機を使用して行う。これにより、乱流による運動量輸送・熱輸送のスペクトル非相似性が見られるパラメータ範囲を調べ、普遍性を検証するとともに、独自解析手法によりそのメカニズムを解明する。

最終年度の研究では、前年度までの研究活動により明らかにした乱流運動量・熱輸送のスペクトル非相似性のメカニズムに基づき、スペクトル非相似性を促進するような制御入力を考案し、乱流運動量・熱輸送の非相似制御(乱流摩擦抵抗は低減・乱流熱伝達促進)の数値シミュレーション上での実現を目指す。これにより、抜本的な乱流制御技術の研究に新しい指針を見出す。

3. 計画の進行状況

研究計画に記載の通り、平面クエット乱流における直接数値シミュレーションを行い、同流れ場における運動量・熱の乱流輸送のスペクトル非相似性について調査を行った。当初の研究計画では、平面クエット乱流の他に、平行平板間乱流・円管乱流等の数種類のカノニカル壁乱流に関して同様の解析を行い、スペクトル非相似性の普遍性をまず調査し、その次に各流れ場におけるスペクトル非相似性

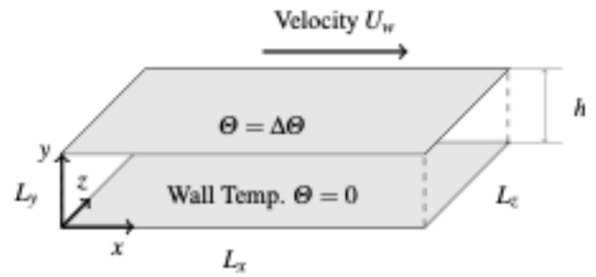


図1：平面クエット乱流の計算条件

のレイノルズ数依存性とプラントル数依存性を調査することになっていたが、計画を変更し、まず平面クエット乱流に関して幾つかのレイノルズ数・プラントル数条件下における直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)を行うことで、この流れ場におけるスペクトル非相似性のレイノルズ数依存性とプラントル数依存性に関する調査をまず行った。

本研究でこれまで行った平面クエット乱流のDNSの計算条件は図1に示す通りであり、温度差が一定の2枚の平行平板により駆動されるせん断流を、主流方向とスパン方向に周期境界条件を課すことで再現する。シミュレーションにおいて解く支配方程式は、流れ場の支配方程式である非圧縮性流れの連続の式・Navier-Stokes 方程式

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

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

と、受動スカラーとして扱う温度場を支配するエネルギー方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \theta = \frac{1}{RePr} \nabla^2 \theta$$

である。ここで、 $\mathbf{u}$ は流体の無次元速度、 p は圧力、 θ は無次元温度、 $Re = U_b h / \nu$ (ν は流体の動粘性係数)はレイノルズ数、 $Pr = \alpha / \nu$ (α は流体の温度拡散係数)はプラントル数である。乱流運動量輸送・熱伝達輸送のスペクトル非相似性のレイノルズ数依存性とプラント

表 1 : パラメータ条件一覧

Case	Re_w	Pr	$N_x \times N_y \times N_z$	Re_τ
R43P1	4,300	1.0	$2^8 \times 96 \times 2^8$	69.9
R86P01	8,600	0.1	$2^8 \times 96 \times 2^8$	126.8
R86P05	8,600	0.5	$2^8 \times 96 \times 2^8$	125.7
R86P1	8,600	1.0	$2^8 \times 96 \times 2^8$	125.7
R86P2	8,600	2.0	$2^9 \times 192 \times 2^9$	122.3
R86P4	8,600	4.0	$2^9 \times 192 \times 2^9$	127.7
R190P1	19,000	1.0	$2^9 \times 192 \times 2^9$	256.2
Ref	8,600	0.71	$2^9 \times 96 \times 2^9$	126.1

ル数依存性を調べるため、両者のパラメータを振った計算を数ケース行った。本研究でこれまで行った DNS のパラメータ、各計算における領域サイズ・格子数等は表 1 に示す通りである。

図 2 に本研究で行った数値シミュレーションにより得られた結果の平面クエット乱流に

存性を示す。プラントル数は $Pr = 1$ に固定し、レイノルズ数を $Re = 4300, 8600, 19200$ として行った DNS 結果から算出している。これらの分布を壁垂直方向（それぞれの図の縦軸方向）に積分することにより、運動量輸送スペクトルと乱流熱輸送スペクトルをそれぞれ得ることができ、各レイノルズ数において求めたそれぞれのスペクトルを比較したものを図 2 に示す。全てのケースにおいて、青実線で示した運動量輸送スペクトルが熱輸送スペクトルの分布よりも長波長側にシフトしており、運動量輸送が生じるスケールの方が、熱輸送が生じるスケールよりも優位に大きいことを示している。これは摩擦抵抗の増加に寄与する乱流構造の方が、熱伝達増加に寄与する乱流構造よりも優位に大きいスケールにおいて生じていることを示唆している。図 2 に示す運動量輸送スペクトルと熱輸送スペクトルの分

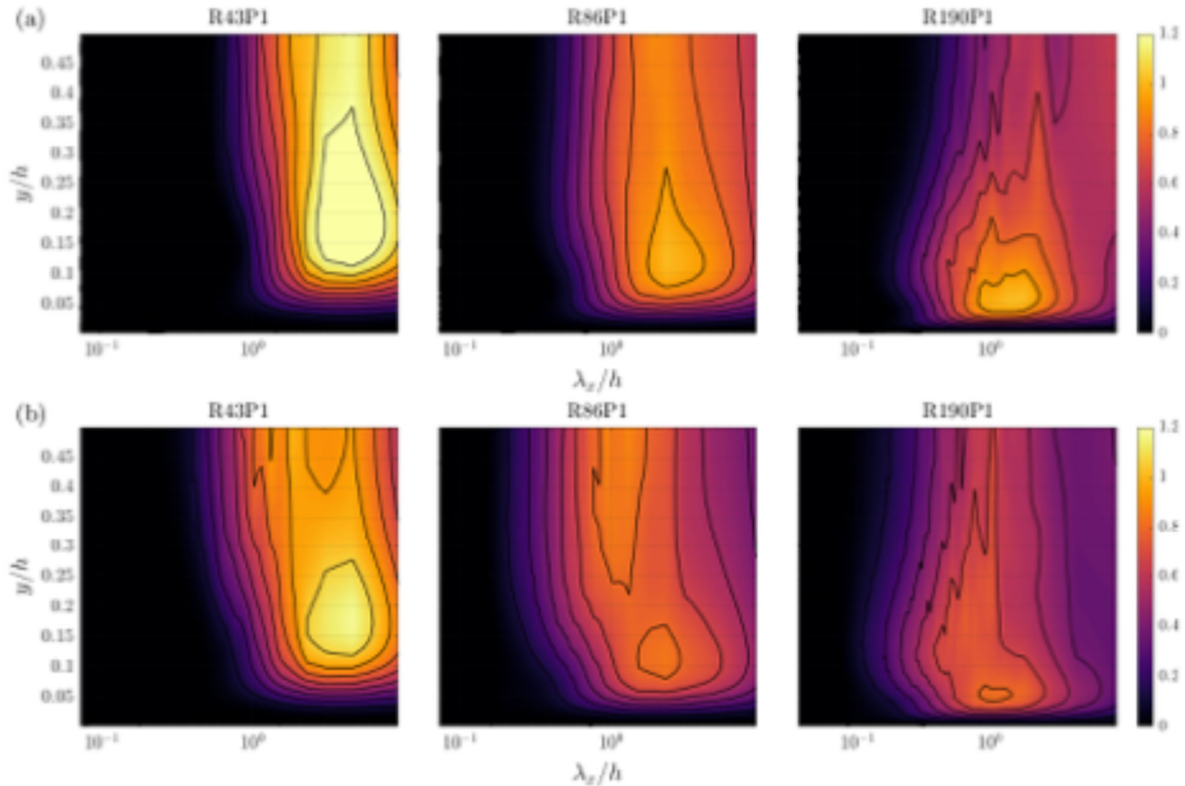


図 2 : 本研究の直接数値解析により得られた平面クエット乱流における (a) レイノルズせん断応力スペクトルと (b) 乱流熱流束スペクトルの分布図。横軸は主流方向波長 λ_x/h 、縦軸は壁垂直方向座標 y/h を表す。

おけるレイノルズ剪断応力スペクトルと乱流熱流速スペクトルのレイノルズ数に対する依

布から、それぞれの乱流輸送が生じるスケールの代表値を以下の様に定義する。

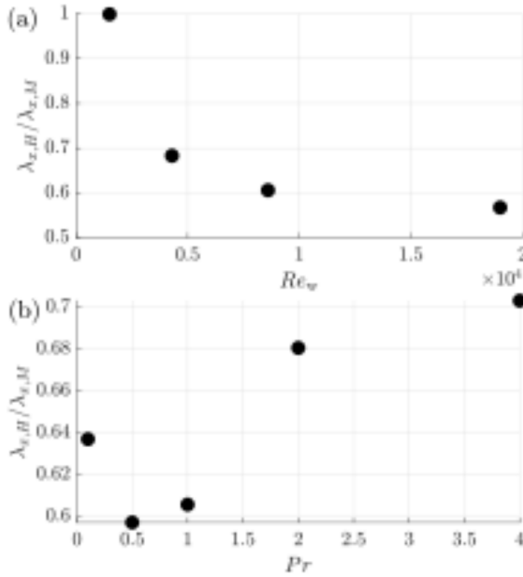


図 3：乱流運動量輸送と熱輸送の代表波長の比 $\lambda_{x,H}/\lambda_{x,M}$ の(a)レイノルズ数依存性 ($Pr = 1$) と (b)プラントル数依存性 ($Re = 8600$)

$$\lambda_{x,M} = 2\pi \frac{\int_0^h -\overline{u}v dy}{\int_0^\infty k_x \mathcal{E}_{-uv}^x dk_x}$$

$$\lambda_{x,H} = 2\pi \frac{\int_0^h -\overline{v}\theta dy}{\int_0^\infty k_x \mathcal{E}_{-v\theta}^x dk_x}$$

乱流運動量輸送と熱輸送のスケール非相似性をこれら代表波長の比 $\lambda_{x,H}/\lambda_{x,M}$ として定義すると、レイノルズ数・プラントル数に対する依存性は図 3 に示すようになる。図 3 (a) から、代表波長の比 $\lambda_{x,H}/\lambda_{x,M}$ はレイノルズ数の増加と共に単調減少し、本研究で計算した最も高いレイノルズ数条件下において $\lambda_{x,H}/\lambda_{x,M} = 0.6$ 以下まで減少している。これは、熱伝達が生じる波長が、運動量輸送が生じる波長の半分程度であることを示している。一方、プラントル数に対する依存性(図 3 (b))は単調なものではなく、 $Pr = 0.5$ 付近で極小値を取ることを示している。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究では、平面クエット乱流における乱流運動量輸送・熱輸送のスペクトル非相似性についてレイノルズ数依存性とプラントル数依存性を調査した。その結果、本研究において調査した範囲では、いずれのレイノルズ数・

プラントル数条件下においても運動量輸送・熱輸送の間にスペクトル非相似性が見られ、これら乱流輸送の代表スケールの差は、レイノルズ数が増加するほど大きくなり、プラントル数は $Pr = 0.5$ 付近で最も顕著になることが明らかとなった。今後は同様の非相似性に関する調査を平行平板間乱流や円管乱流といった他の形状の乱流場に対しても実施し、乱流運動量輸送・熱輸送のスペクトル非相似性の普遍性を明らかにする。

本研究に関連する発表状況・予定は以下の通りであり、特に本報告書に記載した結果は 7 月末に開催予定の国際会議 TSFP-14 にて、研究室修士 2 年の大学院生が発表予定である。

論文等投稿・発表状況

- K. Suetsugu, T. Tsukahara, T. Kawata, "Spectral dissimilarity between momentum and heat transfers in a plane Couette turbulence", In Proc: The 11th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT-'25), Tokyo, Japan, July 21-25, 2025
- T. Kawata, T. Tsukahara, "Wavenumber-to-wavenumber energy exchange by triadic Fourier-mode interactions in wall turbulence", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 3173, 012027 (2026)
- K. Suetsugu, T. Tsukahara, T. Kawata, "Spectral dissimilarity between momentum and heat transfers in transitional and turbulent plane Couette flows", In Proc: The 14th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-14), Heidelberg, Germany, July 28-31, 2026 (口頭発表に採択)

分子インプリントプローブによる 神経伝達物質分泌イメージング

工学部 吉見 靖男

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

神経細胞間の情報伝達を担うセロトニン、ドーパミン等の神経伝達物質は、学習・記憶・情動制御など高次脳機能の基盤を成す。これらの分泌動態をリアルタイムかつ非侵襲的に観察する技術は神経科学上の重要課題であるが、マイクロダイアリシス法は時間分解能に限界があり、アンペリメトリー法は侵襲性と選択性に課題がある。蛍光タンパク質プローブは高選択性を有する一方、遺伝子導入、作製期間、対象分子の制約が大きい。そこで本研究では、標的低分子を鋳型として人工的な分子認識空間を形成する分子インプリント高分子を蛍光ナノ粒子化し、神経伝達物質の分泌を高速・選択的に可視化する基盤技術の確立を目的とした。

申請時の研究課題名は「分子インプリントプローブによる神経伝達物質分泌イメージング」であり、次期科研費への展開課題として「分子インプリント蛍光ナノ粒子による超高速神経伝達検出技術の確立」を設定した。中心的な学術的問いは、特定の神経伝達物質の動的分泌が、刺激、学習、記憶に応じてどのような時間・空間スケールで変化するかである。本研究は、従来の膜電位計測やカルシウムイメージングとは異なり、化学伝達物質そのものを選択的に捉える「化学イメージング」の実験基盤を構築する点に独自性がある。

2. 研究計画

申請書に基づく研究計画では、2026年度に蛍光分子インプリントナノプローブ（fMIP-NP）の細胞表面への安定かつ高効率な吸着手法を確立し、ポリマー表面の官能基修飾により非特異吸着を低減する。共焦点レーザー顕微鏡およびMiCAM03を用い、蛍光応答の再現性と選択性（80%以上）を定量評価するとともに、既存の蛍

光タンパク質法およびアンペリメトリー法との性能比較を行う。2027年度には、アメフラシ神経節をfMIP-NPで染色し、味覚刺激に伴うセロトニン等の分泌をリアルタイムに観察する。10 ms以下の時間分解能を活かし、神経活動との即時的相関を解析する。2028年度には、嫌悪刺激による条件づけ学習モデルを用いて、刺激前後の分泌パターン変化を可視化し、神経可塑性の化学的指標化を試みる。米国 Caltech との共同研究により、ヒル等の他動物種への適用も進め、国際展開を図る。

3. 計画の進行状況

本年度は、神経伝達物質セロトニンを対象とし、ポリ（メタクロレイン-co-メタクリルアミド）をテンプレート固定用アンカーとして用いるfMIP-NP合成法を確立した。従来の固相合成法では、ガラスビーズ表面に固定したテンプレート分子間の相互作用が強く、鋳型近傍での機能性モノマー配向が乱れることで選択性が低下する可能性があった。そこで、メタクロレイン由来のアルデヒド基を利用してセロトニンの一次アミンと反応させ、同時にメタクリルアミドにより水溶性を付与した柔軟な高分子アンカーを導入した。

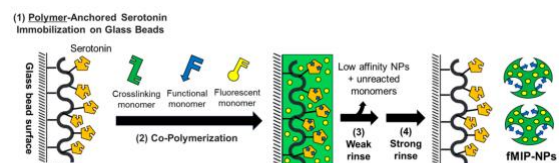


Figure 1. Scheme of the procedure for the synthesis of fMIP-NPs with the template anchored a polymer on glass beads: (1) The target molecule (serotonin) was immobilized on the su

図1 ポリマーアンカーを用いたfMIP-NP固相合成の概念図（論文 Fig. 1）

高分子アンカーは、メタクロレイン／メタクリルアミド比、開始剤量、総モノマー濃度を変えた3条件で合成した。過マンガン酸カリウムを用いた酸化還元滴定によりアルデヒド基量を

評価した結果、条件 3（メタクロレイン：メタクリルアミド=5：1、開始剤：総モノマー=1：150、総モノマー濃度 4.59 M）が最も高いアルデヒド機能性を示し、0.5 g の共重合体中に 38.8 μmol のアルデヒド基を含むことが確認された。FeCl₃ を用いた呈色試験では、条件 2 および条件 3 でセロトニン固定化が確認され、特に条件 3 では非共有結合的吸着の寄与が小さい安定な固定化が示唆された。

得られたセロトニン固定化ガラスビーズを用い、メタクリル酸、エチレングリコールジメタクリレート、ジアリルフルオレセイン等を共重合して fMIP-NP を調製した。蛍光測定では、励起波長 425 nm、発光 500～540 nm の条件で、セロトニンおよび類似物質 L-トリプトファンへの応答を比較した。条件 1 および条件 2 で作製した fMIP-NP では濃度依存的な応答が明瞭でなかったのに対し、条件 3 で作製した fMIP-NP はセロトニン濃度 0～15 μM に対して蛍光強度が増加し、最大 37% の蛍光増強を示した。一方、L-トリプトファンに対する応答は小さく、セロトニン選択性が確認された。

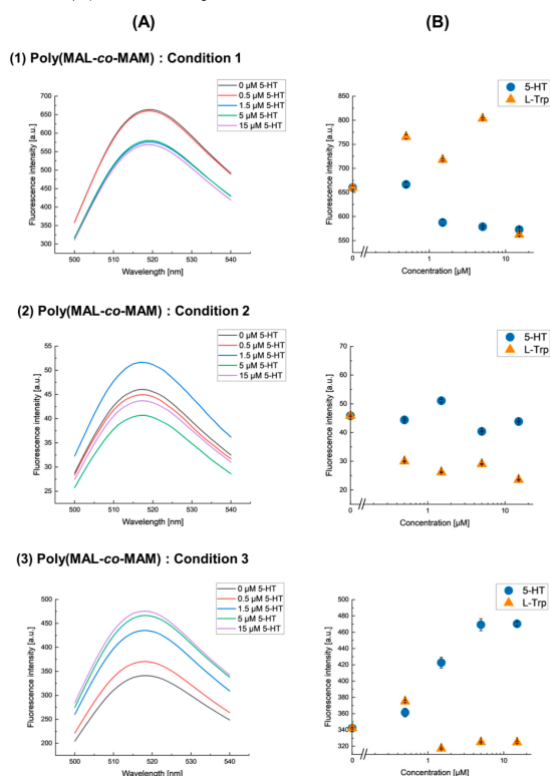


図2 3条件で合成した fMIP-NP の蛍光スペクトルと選択性評価（論文 Fig. 6）

表1 ポリ（メタクロレイン-co-メタクリルアミド）アンカー条件と成果

条件	合成条件	アルデヒド機能性	fMIP-NP の応答
1	MAL:MAM=1:3、 開始剤比 1:100、 1.23 M	4.5 $\mu\text{mol}/0.5$ g	濃度依存性は不明瞭
2	MAL:MAM=1:1、 開始剤比 1:100、 4.30 M	9.3 $\mu\text{mol}/0.5$ g	濃度依存性は不明瞭
3	MAL:MAM=5:1、 開始剤比 1:150、 4.59 M	38.8 $\mu\text{mol}/0.5$ g	セロトニンで最大 37% 増強

3. 計画の進行状況（成果の詳細）

対照として、セロトニンを固定化しないガラスビーズから蛍光非インプリントナノ粒子（fNIP-NP）を同条件で合成した。fNIP-NP はセロトニンおよび L-トリプトファンのいずれにも濃度依存的な蛍光変化を示さず、fMIP-NP で観察された応答がインプリント空孔とセロトニンとの特異的相互作用に由来することを裏付けた。Langmuir 型の結合等温線解析では、最大蛍光変化量 $\Delta F_{\text{max}}=130.5$ 、結合定数 $K_b=0.7 \mu\text{M}^{-1}$ 、解離定数 $K_d=\text{約 } 1.43 \mu\text{M}$ と見積もられ、通常の MIP と同程度の親和性を示すことが明らかとなった。

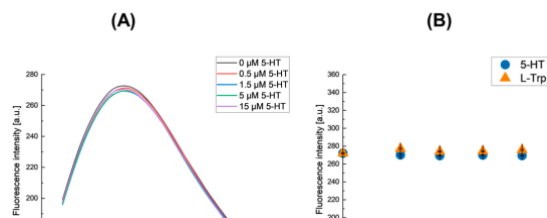


図3 非インプリント対照 fNIP-NP の応答（論文 Fig. 7）

粒径評価では、DLS により 2.60 nm、60.29 nm、239.57 nm 付近の集団が観察され、Z 平均半径は 83.1 nm であった。各ピークの PDI は 0.03 で、個々の集団内では狭い粒径分布を有することが示された。SEM 観察では乾燥過程で形成された凝集体が見られ、最高倍率では約 1 μm の球状凝集体が確認された。これらの結果から、液中ではナノ粒子として分散するが、乾燥時には粒子間相互作用により凝集しやすいことが分かった。今後の細胞表面応用には、分散安定化と表面官能基制御が重要である。

interactions in the dispersion.

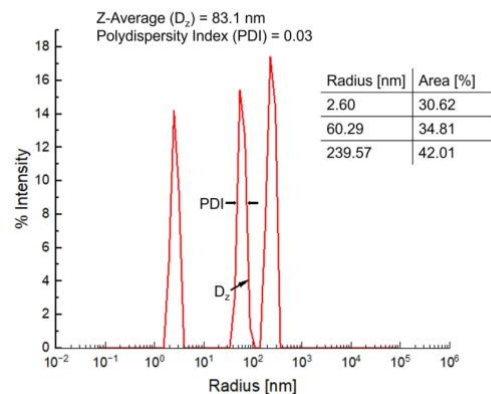


図4 fMIP-NP 分散液の DLS 粒径分布 (論文 Fig. 8)

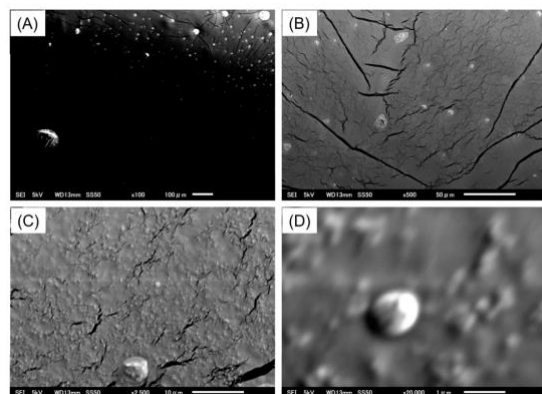


図5 乾燥後 fMIP-NP の SEM 観察像 (論文 Fig. 9)

以上の成果により、高密度かつ制御されたテンプレート固定化が、セロトニン選択的な蛍光応答を示す fMIP-NP の作製に不可欠であることを実証した。特に、条件3の高アルデヒド含有アンカーは、テンプレート分子間相互作用を抑えつつ剛直な認識空孔を形成し、従来のシランアンカー型 MIP で報告された 5% 程度の蛍光増強を大きく上回る 37% の応答を与えた。本成果は、MIP を食品・医薬品センサから神経科学イメージングへ展開するための重要な概念実証である。

表2

評価項目	結果
蛍光応答	セロトニン 0~15 μM で最大 37% 増強、L-トリプトファン 応答は小さい
非インプリント対照	fMIP-NP はセロトニン、L-トリプトファンの双方に不応答
結合解析	$\Delta F_{\text{max}}=130.5$ 、 $K_b=0.7 \mu\text{M}^{-1}$ 、 K_d =約 1.43 μM
粒径	DLS の Z 平均半径 83.1 nm、各ピーク PDI=0.03

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、神経細胞表面への fMIP-NP の局在化を実現するため、粒子表面へのアミノ基導入、ポリ（メタクロレイン-co-メタクリルアミド）を介した膜タンパク質との架橋、非特異吸着を抑える親水性表面処理を検討する。アメフラシ神経節を用いた実験では、味覚刺激および嫌悪学習刺激を与え、fMIP-NP の蛍光変化と電気生理学的応答を同期記録する。蛍光強度が微弱な場合は、高感度カメラ、画像積算、信号増幅アルゴリズムを導入し、10 ms 以下の時間分解能での観察を目指す。さらに、Caltech との共同研究によりヒル等の神経系への横展開を検証し、国際共同研究および次期科研費基盤研究 B への申請につなげる。

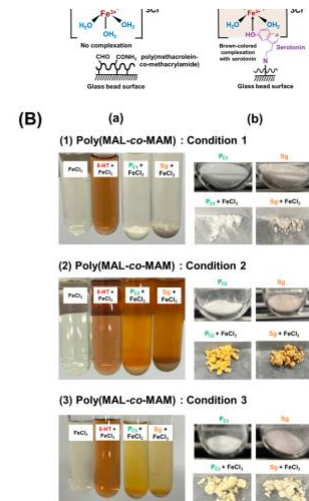


Figure 5. (A) Detection mechanism of serotonin immobilized on glass beads using FeCl_3 solution. (B) (a) Solutions from left to right: 0.01 M FeCl_3 solution, 0.01 g serotonin (5-HT) + FeCl_3 solution, 0.1 g of poly(methacrolein-co-methacrylamide)-immobilized glass beads synthesized under Condition 1 (Pc_1), (1) + FeCl_3 , Condition 2 (Pc_2), (2) + FeCl_3 , Condition 3 (Pc_3), (3) + FeCl_3 , and 0.5 g.

図6 FeCl_3 呈色によるセロトニン固定化確認 (論文 Fig. 5)

論文発表として、Madhav Biyani, Mizuki Matsumoto and Yasuo Yoshimi, “A Poly(methacrolein-co-methacrylamide)-Based Template Anchoring Strategy for the Synthesis of Fluorescent Molecularly Imprinted Polymer Nanoparticles for Highly Selective Serotonin Sensing,” *Nanomaterials*, 15, 977 (2025) が 2025 年 6 月 24 日に出版された。

本論文は、ポリマーアンカーによるテンプレート固定化戦略が fMIP-NP の選択性と感度を改善することを示したものであり、本研究助成による主要成果である。今後、本成果を基盤として、アメフラシ神経節でのリアルタイム観察結

果を J. Neuroscience 等に投稿し、米国神経科学会
年会等で発表する予定である。

発表・投稿状況

Madhav Biyani, Mizuki Matsumoto, Yasuo Yoshimi,
Nanomaterials, 15, 977 (2025).

総括

本研究では、ポリマーアンカーを用いた固相
合成により、セロトニン選択的に蛍光応答する
fMIP-NP を作製し、神経伝達物質の非侵襲的リアル
タイム観察に向けた中核材料技術を確立し
た。今後は細胞表面局在化、動物神経節への適
用、画像解析との統合を進め、次期科研費およ
び国際共同研究へ発展させる。

ナノポーラス構造の 3次元細胞培養プラットフォームへの応用

工学部 李 素潤

1. 序論（はじめに、まえがき、目的） （概要）

現在、バイオメディカル研究分野において、細胞培養技術は重要な情報を得られる方法として、広く定着している。現在までは、3次元構造である生体システムとは違う、平面上の2次元的な組織培養用プラスチック容器、あるいは細胞外基質（以下、ECM）を利用して、細胞培養を行った。しかしながら、2次元環境で培養した細胞を用いる *in vitro* での実験結果を、そのまま *in vivo* の臨床試験に反映することは不可能である。これは、生体はガスと栄養が交換できる3次元的なポーラス構造であり、細胞とECMの間の複雑なシグナルのやりとりが起こるが、2次元細胞培養では再現できないことが要因である。そこで、この問題を解決するため、より生体に近いプラットフォームを利用した細胞培養の研究が要求されている。この訳で、本研究では、3次元構造であるナノポーラス構造のプラットフォームを作製し、生体を模倣する事で *in vitro* と *in vivo* のギャップをなくし、生物学的に重要な情報を取られる事を目指す。様々な材料の中で、生体適合性が優れ、バイオメディカル研究分野で重要な材料として研究されているチタンを選択する。申請者は、新たな表面処理方法である Wet Corrosion Process (WCP) を利用して、ナノ構造を用いた酸化チタン皮膜の作製に特化されている。この技術を生かして、課題として①生体に近い3次元ナノポーラス構造を用いた酸化チタンプラットフォームの作製条件の調べ、②作製されたプラットフォームを

利用した細胞培養の実現で、バイオメディカル研究分野に貢献できる研究を目指す。

(1)ー1 本研究の学術的背景

現在、発生生物学、創薬、再生医学、タンパク質の生産などの分野を含むバイオメディカル研究分野において、細胞培養技術は重要な情報を得られる方法として、広く定着している。通常の細胞培養プレートやシャーレ等での培養は平面的な2次元(2D)培養だが、生体内の組織は実際には立体的な3次元(3D)構造をしている。2D環境で培養した細胞の情報である *in vitro* での実験結果を、そのまま *in vivo* の臨床試験に反映することは不可能である。立体的に培養することで、より生体に近い反応をすることが以前から知られている。



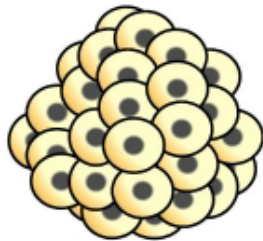
細胞同士が平面的に接触しており、細胞間の刺激伝達も横方向のみ。培地、薬剤は上方から直接供給される。

2次元培養

図1. 2次元環境での細胞培養の模式図

3D培養は細胞間の刺激伝達が3D的であり、細胞塊の内部と外部とで培地や薬剤の供給経路が異なるなど、生体に近い環境を再現することが出来る。2D環境では、生体みたいにガスと栄養が交換できる3次元的なポーラス構造でもないし、細胞とECMの間の複雑なシグナルのやりとりが起こる環境ではないので、この要因で *in vitro* と

in vivo のギャップが存在する。そこで、より生体に近い立体的なナノポーラス構造を用し、肝細胞など 2D 培養ではすぐに活性が低下してしまう幹細胞のような細胞でも長期間にわたって活性を維持できたり、幹細胞から各種細胞への分化において効率を高くできたりするなどの効果が得られる。



細胞同士が3次元的に接触しており、細胞間の刺激伝達立体的。内部の細胞は培地や薬剤に直接接触していないため、拡散によって供給される。

3次元培養

図2. 3次元環境での細胞培養の模式図

この訳で、近年の再生医療研究の活発化によって、生体に近い環境で培養することの重要性が増し、これに伴って3次元培養の研究も活発化している。また創薬においても、2D 培養による結果と動物実験による結果の違いが顕在化してきてあり、この分野でも注目を集め始めている。

(1)-2 研究課題の核心をなす学術的「問い」
立体的な3D ナノポーラス構造を用いたプラットフォームを利用した細胞培養を実施するため、申請者はこれまで研究してきた WCP の手法でナノポーラス構造を持つ酸化チタンを作製し、これの物質を細胞培養のプラットフォームで利用できると考えた。そこで今回、【WCP で作製された 3 次元ナノポーラス構造を用いた酸化チタンにおいて、どんな状態のときに3次元細胞培養が最も適当なのか】を研究課題の核心をなす学術的「問い」とした。

(2)-1 本研究の目的および学術的独自性と創造性
上記で叙述した「問い」を達成するため、**研究の最後目的を、3D ナノポーラス構造を用いた酸化チタンを利用したより生体に近い細胞培養に使うプラットフォームの開発とした。**具体的に、

本研究では、以下の2つの研究項目として定めた。

研究項目①:WCP による 3D 細胞培養に最適なナノポーラス構造を用いたチタン酸化膜の作製

材料工学の観点から考えるとナノポーラス構造で構成された 3D 構造が一番生体に近い立体的構造だと考えられる。しかし、今日まで、ナノポーラス構造の作製には**加工過程が複雑・熱処理必要・長い処理時間・低い再現性・高コストなどの問題点**が指摘されている。これらの問題を解決するために、新しいナノ構造作製の技術が求められている。そこで、申請者は Wet Corrosion Process (WCP) という新しい技術を導入し、様々なナノポーラス構造を用いた酸化チタン皮膜を作製する。WCP はアルカリ溶液を利用して、金属を処理し、表面にナノポーラス構造を作製する表面処理技術である。WCP は常温での処理が可能・熱処理が不必要・短い処理時間・高再現性・低コストなどのメリットがあり、材料工学において大変注目されている。本研究では、WCP で作製された様々な 3 次元的なプラットフォームの中で、細胞培養に最適なナノ構造を明らかにする。

研究項目②:WCP により作製されたナノポーラス構造による 3D 細胞培養の可能性の検証実験

WCP で作製されたナノポーラス構造を持つ酸化チタン被膜を細胞培養のプラットフォームとして利用し、現在まで使用した 2D の平面のプラスチックの代わりに細胞培養の可能性を確認し、どの表面構造が細胞培養に最適なのかを調べ、実際に 3D 細胞培養で貴重な情報を撮られるかを確かめる。

(2)-2 本研究の学術的独自性と創造性
現在まで研究されてきた平面上の細胞培養は、3D 構造を持つ生体と全く異なるため、生体に近い環境を再現することが出来ない。この問題で、*in vitro* と *in vivo* にはギャップが生じる。しかし、**生体に近い 3D ナノポーラス構造を細胞**

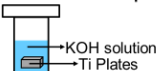
培養のプラットフォームとして用いる手法は、上記課題を解決できるまったく新しい培養法であるため、独自性は高いと言える。

Preparation of nano structured Ti oxide films via WCP

- Start materials : Pure Ti plates (1 cm x 1cm) and Pure Ti particles (< 250 μm)
- Preparation conditions for WCP
 - WCP reaction solution: KOH solution
 - Volume: 5 mL
 - Concentrations of KOH solution: 1 mol/L~25 mol/L
 - Treatment time: 24 hours
 - Temperature: Room temperature

□ Procedure of Chemical reaction of WCP

① Immersion the Ti plates and particles into KOH solution



② Occurring the chemical reaction using shaker

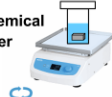


図 3.WCPによるナノポーラス構造を用いた酸化チタンの作製課程

さらに、ナノポーラス構造の作製に WCP という新しい方法を用いることで、材料工学の側面から見ても有意義な研究となる。つまり、材料工学的な課題から生命工学的な課題まで、広い分野への展開が期待でき点で創造性があると言える。

(3)-1 本研究の着想に至った経緯

バイオメディカル分野での大事な研究方法である細胞培養に関する研究は、一般的に平面培養(2D 培養)で行われてた。しかしながら、この方法では、高い細胞活性が見られないことから、薬物の毒性試験やスクリーニング、動物実験の代替となる安全性評価モデルの構築、再生医療など、様々な分野で使われる提案として3D 培養が注目されている。このために、まず、生体により近い細胞培養ためのプラットフォームが必要であり、材料工学の観点からナノポーラス構造が一番生体に似ている構造と考えられる。後、材料の特性としては、高い生体適合性が必要なので、【もしナノポーラス構造を持つチタン材料を利用したら、効果的な3D細胞培養に応用が可能であるプラットフォームになれる】と着想した。申請者は、WCP という新しい方法でナノポーラス構造を持つ酸化チタン皮膜の作製の研究を実施してきた。作製さ

れたナノポーラス構造を持つ酸化チタン皮膜は図4のような構造を示しているので、この構造は3D 培養に使われるような理想的な構造でしたので、本研究の着想となった。

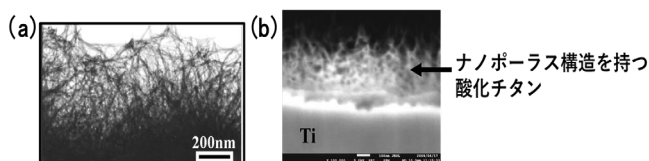


図 4. (a)TEM 観察によるナノポーラス構造を持つ酸化チタンのイメージ (b)SEM 断面観察によるナノポーラス構造を持つ酸化チタンのイメージ

(3)-2 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

3D 細胞培養技術は、ハイドロゲルを使用してタンパク質マトリックスを安定的に維持することで、より *in vivo* の生物学的条件に近い環境を作ることが出来るようになった。しかし、限界もあって、ハイドロゲルは大部分が均質で、そのため実際の細胞が置かれているような *in vivo* 条件の勾配を常に模倣するとは限らない。そのため今日では、体内の多種多様な細胞タイプの類似体に適した環境を作り出すために、ナノファイバーなどのプラットフォームが注目されている。ナノファイバーを含めたナノポーラス構造は作製課程が複雑・低再現性という工学的な問題があり、一般的に使われるのには壁がある。しかし、WCP によるナノ構造の作製は課程の簡単さ・高再現性に優れているので、工学的に利点があると言える。

2. 研究計画

研究項目①:WCP による 3D 細胞培養に最適なナノポーラス構造を用いたチタン酸化膜の作製

様々な濃度の KOH 水溶液5mLで鏡面に仕上げたチタンを沈積し、24 時間シェイカーで振動させて WCP によるナノポーラス構造を持つ酸化チタン皮膜を作製。作製された試料の物性

評価は次のようにする。

- ① 構造変化の観察: FE-SEM、AFM、TEM
- ② 化学構造の変: Raman spectroscopy, XPS
- ③ ナノ構造に閉じこまれた K の量: XRF

研究項目②: WCP により作製されたナノポーラス構造による 3D 細胞培養の可能性の検証実験

作製された 3D ナノポーラス構造に微細物や細胞の培養を通じて、3D 構造の効果を調べる。

① 微生物の培養の準備

- ✓ 使用材料: 微生物培養に 3 次元的な構造の効果を調べるために、比較材料として一般的に使用されている平面上の細胞培養プラスチックを準備する。
- ✓ 培養する生物としては、生命力が強い大腸菌 (*E. Coli*) を選択する。
- ✓ 作製した様々なナノ構造の上で、多様な大腸菌の濃度を利用して、培養をする。

この段階で、大腸菌が形成されるバイオフィルムの結果から、最適大腸菌の濃度を決定することが出来ると考えられる。

② 大腸菌の吸着や形成されたバイオフィルムの分析

- ✓ FE-SEM、化学顕微鏡、AFM など、大腸菌の形や構造を観察する。

様々な Elisa Kit を利用して、2D 細胞培養と 3D 細胞培養のプロファイルを調べる。

3. 計画の進行状況

今年は研究計画項目①になる WCP により作製された最適なナノポーラス構造の物性評価 に集中した。いままでの研究で、純チタンを様な KOH 濃度で WCP 処理すれば、ナノワイヤー構造で形成された全体的にはナノポーラス構造の 3D 構造を作製したことを、SEM・AFM・TEM 確認した。後、この WCP 処理方法の特徴である高再現性の確認も取れた。今年は作製されたこの試料の化学構造を FT-IR で、化学状態を XPS で、後、WCP 処理後には構造の中に WCP 処理で利用した KOH 溶液からの K が、

形成されたナノ構造の中に閉じこまれる特徴があるので、含量された K の量を XRF で分析した。以上の結果を基づいて、WCP 処理で K が閉じ込められたな 3D ナノポーラス構造の作製に成功した。

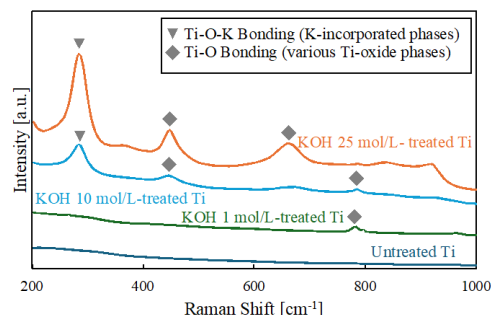


図5 WCP 処理後に作製されたナノ構造を用いた Ti 試料の Raman 分析による化学構造の変化

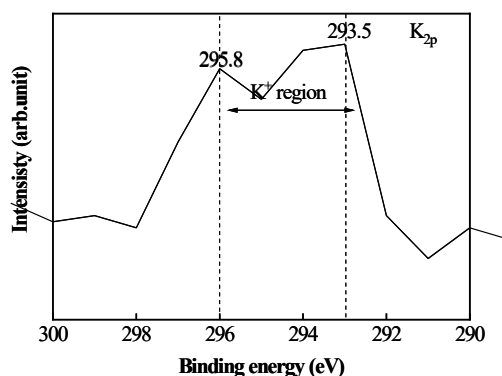


図6 作製されたナノ構造を用いた資料の K_{2p} の化学状況

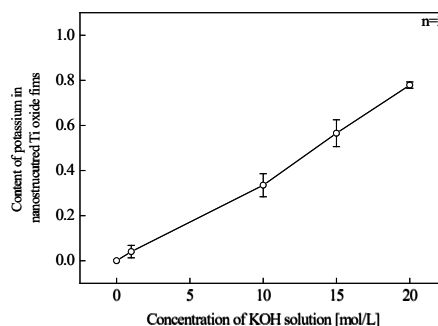


図7 ナノ構造の中に含量された K の量

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況
ナノ構造における細胞培養への影響を調査。

遠赤外撮像を用いた光と熱計測による 人の内部・外部状態の計測・理解

工学部 前田 慶博

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

人の感情などの内部状態と行動などの外部状態の計測と理解は、ストレス状態の把握や行動変化の予兆検出に関わる基盤技術であり、自動車内におけるドライバー状態モニタリング等への応用が期待される。

人の内部・外部状態を非接触に計測するためには、心拍・呼吸等の生命兆候計測、人の移動経路や動作に関する行動計測、さらに、これらの情報を統合した行動理解という複数の要素技術を組み合わせる必要がある。

画像や動画は、血流変化に伴う皮膚色変化、表情変化、姿勢変化等を時空間的に取得できるため、これらの要素技術に関する研究で広く用いられている。一方、可視光・近赤外光を用いた計測では、低照度環境における信号雑音比の低下や照明変動による外乱の影響を受けやすい。

この問題に対して、制御可能な光源や人間には不可視な近赤外光を用いる方法が検討されている。これらの方法は有効である一方、外部光源または環境光の反射を利用するため、照明条件や反射特性の変化に起因する不確かさを完全に排除することは難しい。

遠赤外撮像では、人体表面から放射される熱放射を観測するため、可視光・近赤外光とは異なる物理量に基づく非接触計測が可能である。また、熱伝導や熱拡散に起因する時間変化は、通常の反射光画像とは異なる情報を含む可能性がある。したがって、遠赤外動画

画は、人の生理状態や行動に関する情報を補完的に捉える手段として有用であると考えられる。

本研究は、遠赤外撮像を用いて、人体表面の熱放射とその時間変化を活用した人の内部・外部状態計測の可能性を検討するものである。特に、光として観測される遠赤外放射と、その背景にある熱的な時間変化の双方に着目し、従来の可視光・近赤外光画像に基づく方法を補完する計測手法を検討する。

2. 研究計画

本研究では、遠赤外動画を用いた人の内部・外部状態計測に向けて、生命兆候計測、熱的時間応答の解析、行動計測の三つを中心に検討を進める。生命兆候計測では、遠赤外動画から心拍に対応する微弱な時間変化を抽出するため、体動、撮像系の補正処理、背景温度変化の影響を考慮した信号抽出手法を検討する。熱的時間応答の解析では、熱の過渡変化に基づく画像復元やボケ除去の知見を発展させ、遠赤外画像に固有の時間変化をモデル化する。行動計測では、足跡等の残留熱情報や三次元的な形状情報を利用し、人の移動履歴や行動の手がかりを抽出する。また、遠赤外画像による環境理解のための三次元再構成についても検討する。

3. 計画の進行状況

計画の進行状況として、生命兆候計測に関しては、遠赤外動画において心拍に対応する微弱な時間変化を抽出するため、体動の影

響を抑制する信号処理手法の検討を進めた．また、動画像からの心拍数推定の高精度化に関する研究も実施した（発表文献[1]～[3]）．

熱的時間応答の解析に関しては、遠赤外動画像において発生するボケの除去に関する検討を行った（発表文献[4]、[5]）．これは、高精度な信号抽出を行うための前処理としても活用できる．

さらに、行動計測に関しては、遠赤外画像を用いた三次元再構成、足跡による人物経路予測等の検討を行った（発表文献[6]、[7]）．このほか、人の内部理解に向けて、画像からの感情推定に関する検討も行った（発表文献[8]、[9]）．

本報告書では、主に遠赤外撮像を用いた非接触心拍数推定に関する検討状況を報告する．

3. 1. 遠赤外撮像を用いた非接触心拍数推定

心拍数は医療およびヘルスケア分野における重要な生命兆候であり、日常的な健康管理、疾病の早期発見、治療効果の評価等に広く用いられている[1]．近年は、計測時の身体的負担を低減できるカメラを用いた非接触型の心拍数推定が注目されている．

可視光または近赤外光を用いる一般的なカメラベース心拍推定では、血流変化に伴う皮膚反射光の微小変動を利用する．このため、照明条件、皮膚反射特性、撮像環境の変化が推定精度に影響する．一方、遠赤外線カメラでは人体表面からの熱放射を観測するため、暗所や夜間などの低照度環境でも計測できる．

遠赤外線カメラに基づく従来手法[2]では、遠赤外動画像から得られる時系列信号に対して低ランク近似を適用し、空間的に支配的な時間変動成分を抽出した後、周波数解析によって心拍数を推定する．この考え方は、複数の画素または領域に共通して含まれる生理信号を利用する点で有効である．

しかし、遠赤外動画像には心拍に対応する

微弱な温度変化だけでなく、被験者の体動、姿勢変化、背景温度変化、カメラの感度補正に起因する不連続変動が含まれる．これらの成分は心拍成分と同様に時間的変動を持つため、単純な低ランク近似や周波数解析のみでは分離が困難である．特に、遠赤外動画像では信号変化が微弱であるため、体動由来の局所的な変動や撮像系に由来する共通変動が推定結果に与える影響は無視できない．

本研究では、遠赤外線動画像から得た時系列信号に対し、心拍成分と、カメラ固有および体動に起因するノイズ成分を同時に分離推定する手法を検討した．本手法の目的は、遠赤外画像全体に含まれる時間変化を利用しつつ、心拍推定に不利な共通ノイズ成分および局所的な体動成分を抑制することである．

提案手法

まず、遠赤外線動画像の各フレームを $N \times N$ 画素パッチに分割し、各パッチ内の画素値の平均値を算出する．これにより、画素単位のランダムな変動を抑制しつつ、身体領域や背景領域に含まれる時系列変化をパッチ単位で扱う．得られたパッチ時系列信号 $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{P \times T}$ を観測データとして用いる．ここで、 P はパッチ数、 T は入力フレーム数を表す．

遠赤外線動画像では、一定時間ごとに行われる感度補正やキャリブレーションにより、時系列信号に不連続な変動が生じることがある．この不連続変動は心拍周波数帯にも影響を与える可能性があるため、前処理としてHaar ウェーブレット変換を適用し、 m レベル以下の低レベル成分を除去した後に逆変換を行う．これにより、急峻な段差状の変動を低減し、心拍推定に利用しやすい時系列信号を得る．

さらに、心拍数に対応する周波数帯域(0.7-2.5 Hz)を通過域とするバンドパスフィルタを適用する．これにより、呼吸や姿勢変化に

対応する低周波成分，および撮像ノイズに対応する高周波成分を抑制する．これらの処理により得られる P 個のパッチと T フレームからなる観測行列を $\mathbf{Y}' \in \mathbb{R}^{P \times T}$ とする．

提案手法では，観測行列 $\mathbf{Y}'$ を，心拍成分，全パッチに共通する時間変動成分，および局所的な体動影響やノイズ成分の和としてモデル化する：

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{a}\mathbf{s}^T + \mathbf{1}\mathbf{n}^T + \mathbf{M}$$

ここで， $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^T$ は全パッチで共通する心拍時系列信号， $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^P$ はその空間的寄与を表すベクトルである．また， $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^T$ は全パッチに共通するノイズ成分を表し， $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{P \times T}$ は空間的に局所な体動の影響に起因するパッチごとのノイズ成分を表す．

このモデルでは，心拍成分を全パッチに共通する一つの時間信号として表す一方，体動等の影響はパッチごとに異なる局所成分として扱う．また，全パッチに同時に現れる変動を $\mathbf{n}$ として分離することで，撮像系の補正処理や環境変動に由来する共通ノイズを心拍成分から切り分ける．

これらの未知変数を同時に推定するため，次の最適化問題を解く：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{a}, \mathbf{s}, \mathbf{n}, \mathbf{M}} \quad & \|\mathbf{Y}' - \mathbf{a}\mathbf{s}^T - \mathbf{1}\mathbf{n}^T - \mathbf{M}\|_F^2 + \lambda \|(\mathbf{W}_E \mathbf{1}^T) \odot \mathbf{M}\|_1 \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{s}\|_2 = 1 \end{aligned}$$

ここで， λ は正則化項の重みパラメータであり， $\mathbf{W}_E \in \mathbb{R}^P$ はパッチごとのエッジ強度に基づく重みベクトルである．また， $\odot$ はアダマール積を表す．制約 $\|\mathbf{s}\|_2 = 1$ は， $\mathbf{a}$ と $\mathbf{s}$ のスケール不定性を解消するために導入する．

正則化項は，局所的な体動影響やエッジ付近で生じやすい不安定な変動を $\mathbf{M}$ として吸収しやすくするために導入している．これにより，心拍成分 $\mathbf{s}$ には，複数パッチに共通し，かつ心拍周波数帯に現れる安定した時間変動が残ることを期待する．

最適化により得られた $\mathbf{s}$ に対して周波数解析を行い，パワースペクトル $P(f)$ を算出する．

表 1: 心拍推定評価結果

手法	RMSE (bpm)	MAE (bpm)	成功率 (%)
提案	11.59	6.46	75.99
低ランク近似 [2]	18.52	12.55	65.83

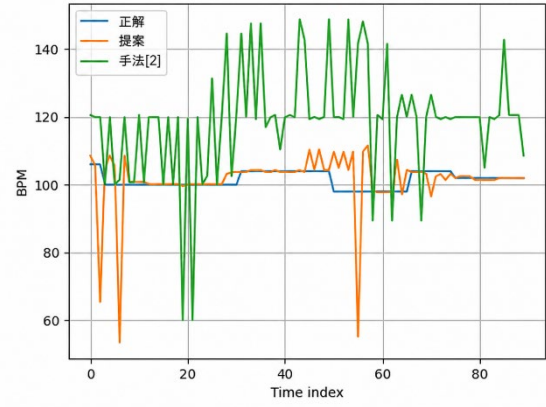


図 1 推定結果の時系列変化

その後，0.7–2.5 Hz の範囲で $P(f)$ が最大とな

るピーク周波数を求め，これを 1 分あたりの拍動数に換算して心拍数 (bpm) を算出する．
評価実験

従来研究 [2] で用いられた遠赤外線動画データセットを用いて，提案手法の有効性を評価した．時間窓長を 30 秒とし，撮影した動画全体から 1 秒刻みで時間窓をスライドさせ，各時間窓に対応するフレーム列を入力として用いた．この設定により，時間的に変化する体動やノイズの影響を含む実際的な条件下で評価を行った．

比較手法として，低ランク近似に基づく心拍数推定手法 [2] を用いた．評価指標として，正解心拍数に対する二乗平均平方根誤差 (RMSE)，平均絶対誤差 (MAE)，および推定誤差が ± 5 bpm 以内となるサンプルの割合 (成功率) を用いた．提案手法では， $N = 20$ ， $m = 3$ ， $\lambda = 0.5$ とした．

表 1 に評価結果を示す．表 1 より，提案手法は従来手法と比較して RMSE および MAE を低減し，成功率を改善することが確認できる．また，図 1 に心拍数推定結果の時系列変化を示す．この図からも，比較手法に比べて

提案手法の推定値が正解心拍数に近い範囲で推移していることを確認できる。これらの結果は、遠赤外動画像に含まれる心拍由来の微弱な時間変化を、体動や撮像系に由来する変動から分離して扱うことの有効性を示唆している。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、遠赤外動画像からの非接触心拍数推定について、体動、撮像系の補正処理、背景温度変化が推定結果に与える影響を整理し、外乱に対して安定な信号抽出手法を検討する。また、熱の時間遷移モデルに基づく遠赤外画像処理、残留熱情報を用いた行動計測、および感情理解との連携についても、検討する。

学会・論文等の発表状況は以下の通りである。

【発表文献】

1. 榎本晴菜, 栗原康佑, 杉村大輔, 浜本隆之, 前田慶博, “体動の影響を抑制した遠赤外線動画像からの非接触心拍数推定,” 電子情報通信学会総合大会, 1 page, Mar. 2026.
2. K. Kurihara, Y. Maeda, D. Sugimura, T. Hamamoto, “Unified Physiological and Illumination Modeling for Heart Rate Estimation Using Dynamic Mode Decomposition and RGB/NIR Sensor,” IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E109-D, no. 1, pp. 95--106, Jan. 2026. (peer-reviewed)
3. A. Tohma, K. Kurihara, Y. Maeda, Daisuke Sugimura, Takayuki Hamamoto, “Impact of Image Processing Pipeline on Video-based Heart Rate Estimation,” in Proc. International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), vol. 1407, pp. 155--160, Jan. 2026. (peer-reviewed)
4. T. Kuroiwa, K. Kurihara, Y. Maeda, D. Sugimura, T. Hamamoto, “Far-Infrared Image Deblurring Based on a Thermal Temporal Transient Model by Using Deep Unfolding,” in Proc. IEEE Sensors, pp. 1--4, Oct. 2025. (peer-reviewed)
5. 黒岩天心, 栗原康佑, 前田慶博, 杉村大輔, 浜本隆之, “熱の時間遷移モデルに基づいた深層展開による遠赤外画像のボケ除去,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 125, no. 55, IE2025-10, pp. 53--58, June 2025.
6. 山内航星, 福嶋慶繁, 中谷岳史, 前田慶博, “遠赤外画像を用いた三次元再構成における特徴点抽出および対応付け手法の比較評価,” 画像符号化シンポジウム (PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム (IMPS), 2 pages, Nov. 2025.
7. 小嶋優太, 杉村大輔, 永野健太, 前田慶博, “遠赤外画像を用いた足跡による人物の経路予測,” 画像符号化シンポジウム (PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム (IMPS), 2 pages, Nov. 2025.
8. 佐々木晴香, 栗原康佑, 前田慶博, 杉村大輔, 相澤清晴, 浜本隆之, “顔表情・情景解析に基づく感情間の関係性を考慮した複合感情認識,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 125, no. 410, IE2025-156, pp. 335--339, Mar. 2026.
9. 佐々木晴香, 栗原康佑, 前田慶博, 杉村大輔, 相澤清晴, 浜本隆之, “クラス増分学習による顔表情と情景の解析に基づく複合感情認識,” 画像符号化シンポジウム (PCSJ)/映像メディア処理シンポジウム (IMPS), 2 pages, Nov. 2025. (その他, 投稿準備中 : 1 編)

参考文献

- [1] P. Palatini, “Need for a revision of the normal limits of resting heart rate,” Hypertension, vol. 33, no. 2, pp. 622-625, 1999.
- [2] 梅澤ら, “低ランク近似に基づく遠赤外動画像からの非接触心拍推定,” 電子情報通信学会技術報告, vol. 124, no. 405, 2025, pp. 150-155.

環境性能と物理特性を両立した高炉スラグ微粉末の有効活用手法の各種提案

工学部 伊代田 岳史

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

環境負荷低減、二酸化炭素排出量削減の観点から、セメントに混合材を大量に置換したコンクリートの活用が望まれている。潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末は、クリンカの代わりに大量に使用することが可能であること、日本では古くから活用されていることから、現状、大量使用して二酸化炭素排出削減に資すると非常に期待されているところである。そのため、高炉セメント C 種相当（置換率 60–70%）やそれを上回るセメントの開発などが、建設会社を中心に積極的に開発され使用が進められている。これらのセメントを用いた硬化体は、様々な物理的特性を有することが知られている。圧縮強度の発現性においては、高炉スラグ微粉末の添加に応じて初期強度の発現は停滞するが、長期強度発現は大きくなることが知られている。ただし、乾燥環境での強度発現は長期強度においても停滞することもよく知られている。また、圧縮強度と静弾性係数の関係は、一般的なコンクリートと大差ないことも示されている。乾燥収縮特性については、水セメント比にも依存するが、特段高炉スラグ微粉末の置換率には大きく依存しない。しかしながら、中性化抵抗性は、ポルトランドセメントの低下により、アルカリ性に寄与する水和物である水酸化カルシウムが減少し、pH が低下することや Ca/Si 比の低い C-(A)-S-H などが生成することから、

特に促進環境での中性化速度が大きくなることが知られている。

それとは反するように、置換率が 45% 程度以上であれば、アルカリシリカ反応 (ASR) に対する抵抗性が高くなることも報告されており、さらに化学的な浸食に対する抵抗性も高い。図-1 は DEF による膨張を経時的に計測した結果であるが、明らかに、高炉スラグ微粉末の置換率が 25% を超えると膨張を抑制する傾向がとらえられている。さらに、塩化物イオンの浸透特性については、著しい抑制効果が認められること、水分浸透 (透水) においても、高炉スラグ微粉末を添加することで著しく抑制できることなどがこれまでに示されている。

これらの物質移動特性の向上、特に水分を媒体としたイオンを含めた移動に関しては、緻密な空隙構造を生成することで、拡散や移動が抑制されていると考えられている。

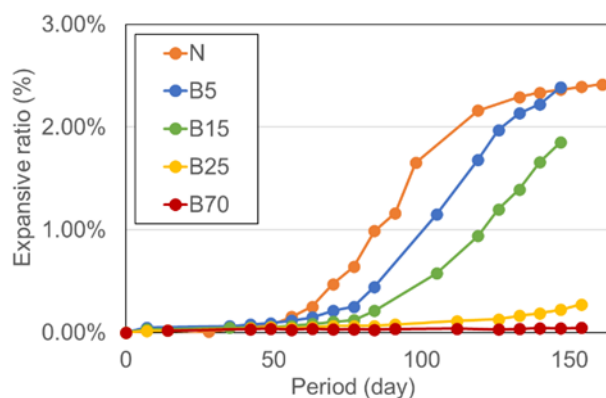


図-1 DEF による膨張計測結果の一例

2. 研究計画

(1) 環境性能におけるアプローチ

環境性能を向上させるために、高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートの二酸化炭素排出量および循環型社会貢献を数値的に整理する。具体的には、JCI（日本コンクリート工学会）が提示している環境影響評価ツールにより算出した環境影響を整理して、コンクリート種類による違いを整理する。

(2) 物理特定の把握

高炉スラグ微粉末を用いることで様々な性能が発揮され、普通ポルトランドセメント単体を用いた場合とは、大きく異なることは上述した通りである。その特性を発揮しているのは、硬化体内の空隙構造であることから、空隙構造の把握を目的として検討を行う。

(3) 炭酸化による空隙特性変化

セメントペーストが炭酸化することに空隙特性が変化することがわかりつつある。その定量化を水分移動に立脚して試みる。

3. 計画の進行状況

(1) 環境性能の整理結果

JCI の環境影響評価ツールおよびこれまでの研究室の成果による再生骨材による CO_2 吸収量を整理したインベントリデータを表-1に示す。これをもとに算出ツールより CO_2 排出量と廃棄物・副産物使用量を算定した。計算には、コンクリート 1m^3 に用いる結合材種類とその量を変化させた配合を用意した。また、強度レベルが異なるコンクリートにおいても計算を行った。その結果を単位結合材量との関係として、図-2、図-3に示す。これより、単位結合材使用量が増加するほど、明確に CO_2 排出量が増加することがみられる。また、その影響は OPC を用いると著しく、高炉スラグ微粉末を多く用いた BC（高炉セメント C 種）では抑制できていることがわかる。セメント由来の廃棄物・副産物使用量においても、結合材使用量ときれいな比例関係であり、一義

的に決定できることがみられる。これは、廃棄物はクリンカ製造時、副産物使用は結合材に用いる産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュの影響であることから当然ではあるが、明確な影響を示すことができたことは非常に大きな成果であるといえる。

表-1 各種材料のインベントリデータ

		投入副産物	CO ₂ 排出量	CO ₂ 吸収量	密度
		wet-kg/t	kg-CO ₂ /t	kg-CO ₂ /t	g/cm ³
Binder	ポルトランドセメント	52.44	806.51	—	3.15
	高炉セメントB種	463.06	471.12	—	3.04
	フライアッシュセメントB種	185.71	693.87	—	2.97
	高炉スラグ微粉末	1000.00	40.21	—	2.91
Fine Agg.	砕砂	—	7.09	—	2.65
	再生細骨材H	1000.00	40.98	—	2.40
	再生細骨材L	1000.00	2.20	—	2.23
	再生細骨材L（炭酸化）	1000.00	2.20	56.80	2.25
	再生微粉（炭酸化）	1000.00	2.20	71.90	2.54
Coarse Agg.	砕石	—	7.09	—	2.68
	再生粗骨材H・M	1000.00	7.47	—	2.50
	再生粗骨材L	1000.00	2.10	—	2.38
	再生粗骨材L（炭酸化）	1000.00	2.10	23.90	2.42
*骨材の密度は、表乾密度を利用					

*骨材の密度は、表乾密度を利用

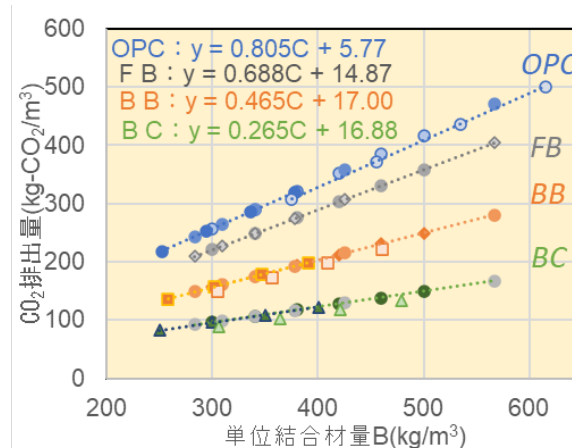


図-2 単位結合材量と CO_2 排出量

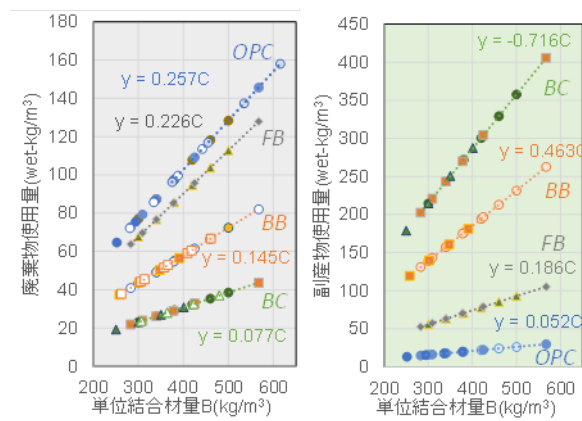


図-3 結合材製造時由来の廃棄物・副産物使用量

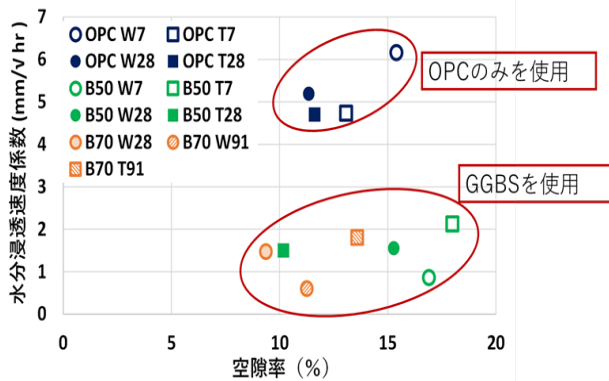


図-4 総空隙率と水分浸透速度係数の関係

(2) 物理特性と空隙特性の比較結果

図-4 はアルキメデス法で計測した総空隙率と土木学会の手法で計測した水分浸透速度係数の関係を示したものである。OPC と高炉セメント B 種相当（置換率 50% : B50）および高炉セメント C 種相当（置換率 70% : B70）の水中養生 W と初期温度養生 T を行った結果を比較したものである。これを見ると、OPC のみと高炉スラグ微粉末を用いた B50, B70 で、同程度の総空隙率であるにもかかわらず、水分浸透速度係数は大きく異なることがわかる。このように総空隙率では、物質移動特性を表現できないということが明らかである。

(3) 炭酸化による空隙変化と定量化

複雑な空隙構造を有する高炉セメント硬化体ではあるが、炭酸化が生じることで変質し空隙構造も変化することが明確となってきた。この原因を調査するために、炭酸化前後による MIP の空隙分布を図-5 に示した。ここでは、水銀を排出する際にも計測を行った。これにより、排出前後の違いが大きいほど、一度入った水銀が抜けにくい構造となっていることが表現できており、屈曲度が大きい複雑な空隙構造であるといえる。一方で、排出前後での差が小さい場合には、屈曲度が小さい単純空隙であると考えられる。炭酸化前後で比較すると、普通ポルトランドセメントでは変化が小さいが、高炉セメントを用いた場合には、炭酸化前では排出前後の差が非常に

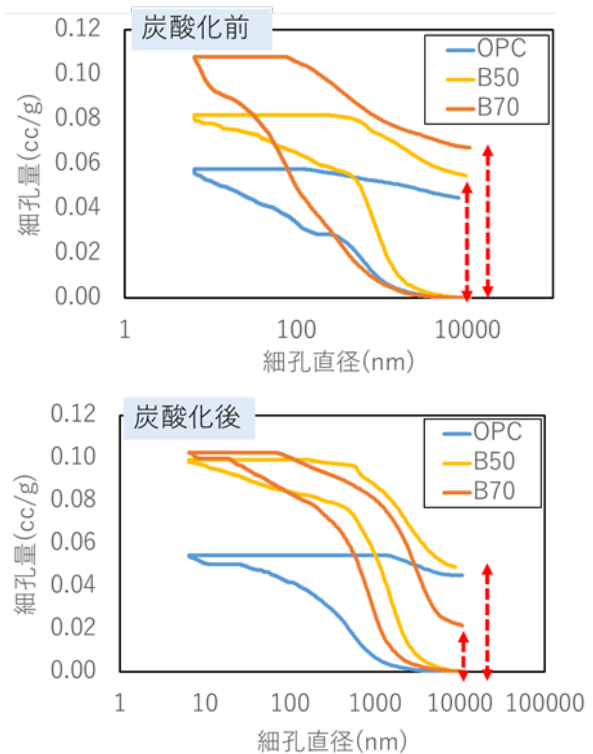


図-5 MIP の計測を用いた炭酸化前後による空隙特性の変化の比較

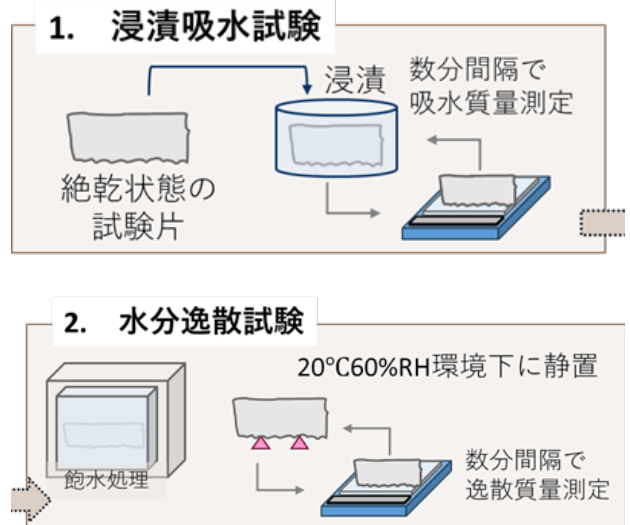


図-6 水分を用いた空隙構造把握のための試験方法の検討

大きい、炭酸化後では差が小さくなっており、空隙構造が大きく変化したことを示唆している。

硬化体の空隙構造を把握するためには、水分移動を計測することが有効であることから、水分を用いた空隙構造把握の試験方法の検討を試みた。具体的には、図-6 に示すように、

試験片を乾燥させた後に、水中に浸漬し水分の吸水速度を計測し、その後飽水处理を行って、アルキメデス法による総空隙率を計測する。さらに、今度は乾燥環境に暴露して水分逸散速度を計測するものである。なお、結果は無次元化するために、総空隙率中に存在する水分の量を、吸水の場合は占有率、逸散の場合は保持率として提示している。

図-7 にその試験結果の一部を示す。ここでは、実環境での中性化有無による試験体から切り出した試料を用いた結果を比較している。普通ポルトランドセメント (N)、高炉セメント B 種相当 (B50)、高炉セメント C 種相当 (ECM)、高炉セメント 80% 置換 (B80) を比較した。これより、吸水過程では未中性化のほうが中性化よりも最終的には水分占有率が大きくなった。これについては、原因を究明中である。ただし、初期における水分の浸透速度は、中性化部のほうが大きかった。一方、水分逸散では、未中性化部では水分保持率が高い状況でとどまることが分かった。それは高炉スラグ微粉末が添加されている試験体ほど大きくなった。一方で、中性化部では、逸散速度が速くまた、多くの水分が逸散した。さらにその量は、高炉スラグ微粉末を用いたもののほうが大きく、水分が逸散しやすい構造となっていることがわかる。今後はこの方法を異なる種類のセメントや水セメント比で作製した硬化体などに適用していきたい。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今回の成果を受け、(1) コンクリートのグレイディングに向けたさらなる検討を進めること、(2) 炭酸化後のコンクリートの空隙挙動などの検討を進めることを実施する予定である。なお、論文としては、下記を投稿および

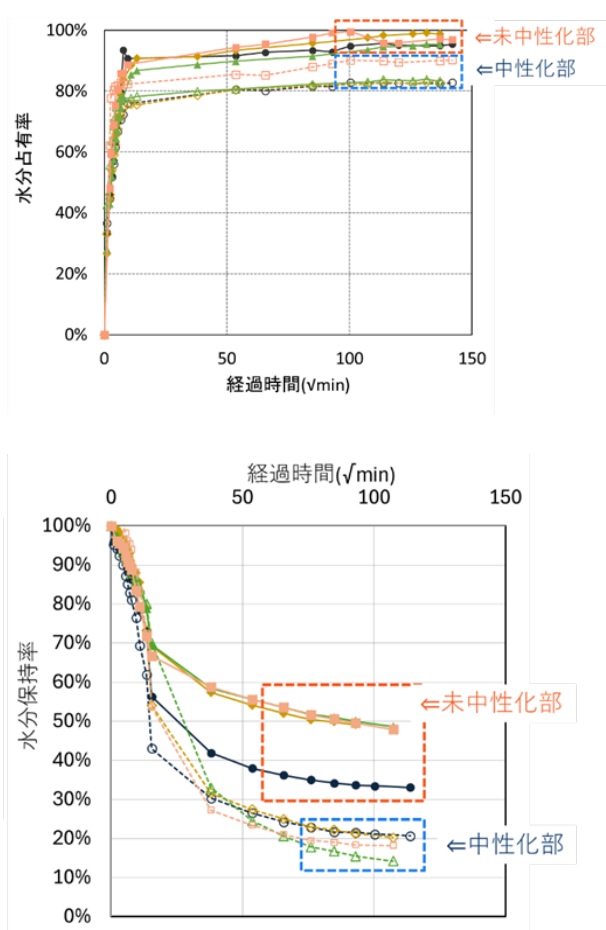


図-7 水分吸収、逸散を基にした空隙特性の把握の一例

投稿予定である。

【環境影響グレイディング】

1) 伊代田 岳史: 各種コンクリートの二酸化炭素排出量と廃棄物・副産物使用量を考慮した環境影響グレイディング設定の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol. 48, 2026 (投稿中: 採択決定)

2) ACF2026 国際会議への投稿予定

【炭酸化後の空隙構造】

3) 廣杉 海琴, 伊代田 岳史, 石川 英理香, 江口 康平: 実環境と促進環境において中性化した高炉スラグ微粉末含有コンクリートの物質移動抵抗性の把握, コンクリート工学年次論文集, Vol. 48, 2026 (投稿中: 採択決定)

4) RILEM 80th 国際会議への投稿予定

Design and Fabrication of Flexible Oxide Heterostructures for Sustainable Hydrogen Generation

工学部 Paolo Mele

共同研究者

Shibaura Institute of Technology / AGH University of Krakow, DD M2 Kazuma Ishida

1. 序論 (はじめに, まえがき, 目的)

Photoelectrochemical (PEC) water splitting is one of the most attractive approaches for sustainable hydrogen production because it directly converts solar energy into chemical fuel [1-4]. Since the pioneering work of Fujishima and Honda on TiO_2 photoelectrodes [1], oxide semiconductors have been extensively investigated for this purpose [2-5]. However, efficient PEC hydrogen generation still requires the simultaneous achievement of visible-light absorption, effective charge separation, and sufficient chemical stability under operation. WO_3 is a representative oxide photoanode material because of its moderate bandgap, visible-light response, and relatively good stability, but it suffers from charge recombination and limited interfacial efficiency [6, 7]. ZrO_2 , in contrast, is a chemically robust wide-bandgap oxide that is not photoactive in the visible region but may serve as a protective or charge-separating overlayer [3].

The present work investigated whether WO_3/ZrO_2 heterostructures fabricated by

pulsed laser deposition (PLD) could improve PEC water-splitting performance compared with single-layer WO_3 and mixed-composition $\text{WO}_3\text{-ZrO}_2$ films. In addition, oxygen-deficient WO_{3-x} prepared from spark-plasma-sintered targets was explored to evaluate the effect of sub-stoichiometric oxygen and possible Magnéli-type behavior on PEC activity. The central objective was therefore to identify a thin-film architecture that improves photocurrent generation while maintaining structural robustness. In this context, the present work should be regarded as a necessary foundational study on rigid substrates. Before considering transfer of oxide photoelectrodes to flexible substrates, it is essential to first establish the optimal material combination, thickness range, crystallinity, and interfacial design on a stable and reproducible rigid platform.

2. 研究計画

The research plan consisted of three main experimental directions. First, bilayer WO_3/ZrO_2 thin films were

deposited on FTO-coated glass by PLD, with systematic variation of deposition time and layer sequence, to evaluate the role of WO_3 thickness and ultrathin ZrO_2 protection. YAG laser ($\lambda = 266 \text{ nm}$) was focused on rotating dense targets of WO_3 and ZrO_2 . The experimental conditions were same for all experiments: Laser power: 300 mW; Base vacuum $P = 1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$; $P(\text{O}_2) = 27 \text{ Pa}$; $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$; Deposition time: variable; Substrate: F-doped SnO_2 (FTO) $2\text{cm} \times 1\text{cm}$, half covered. Two bilayer series were prepared: an initial screening series with broader thickness combinations, followed by a second series in which WO_3 was used as the bottom layer and ZrO_2 as a thin top layer, based on the trends observed in the first series.

Second, WO_{3-x} and $\text{WO}_{3-x}/\text{ZrO}_2$ thin films were fabricated using an SPS-derived WO_3 target that became oxygen-deficient during sintering, as indicated by the color change from yellow to blue. This part of the study aimed to clarify whether oxygen deficiency and mixed WO_3 polymorphs could promote charge transport or PEC response.

Third, mixed $\text{WO}_3\text{-ZrO}_2$ composite targets containing 1, 2, 5, and 10 wt% ZrO_2 were prepared by milling and sintering, and the resulting PLD films were evaluated as an alternative to layered heterostructures.

The deposited films and bulk targets were characterized by SEM/EDS, FIB cross-section analysis, XRD, and PEC measurements. PEC characterization was carried out in a three-electrode cell with 0.5 M Na_2SO_4 electrolyte, Pt counter electrode, Ag/AgCl reference electrode,

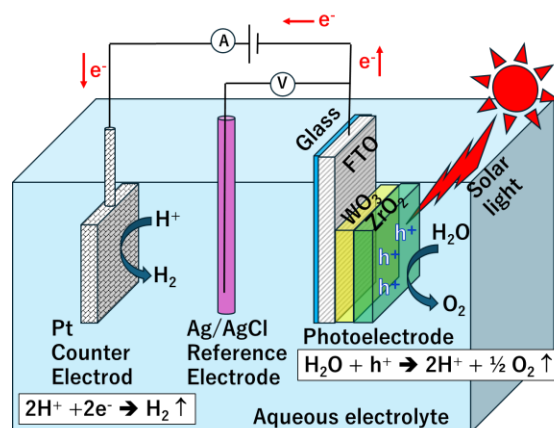


Fig. 1 - Schematic of PEC cell and WO_3/ZrO_2 thin film electrode for I-V evaluation [8]

and AM 1.5G Xe lamp irradiation (Figure 1). This combination of structural, morphological, and electrochemical analyses was intended to establish clear correlations between architecture, crystallinity, thickness, and PEC performance [8]. Such knowledge is also indispensable for any future transition to flexible devices, where the film system must already be well understood before substrate-related constraints are addressed.

3. 計画の進行状況

The project progressed through the successful fabrication and evaluation of all three designed material systems: WO_3/ZrO_2 bilayers, WO_{3-x} -based films, and $\text{WO}_3\text{-ZrO}_2$ composite films. For the bilayer architecture, FIB analysis confirmed near-linear thickness growth with deposition time. In the first series, WO_3 layers deposited for 6 and 18 min had thicknesses of about 62 and 188 nm, while ZrO_2 layers deposited for 4 and 8 min reached about 44 and 88 nm, respectively

[8]. In the second series, thicker WO_3 bottom layers were prepared, and the best-performing bilayer corresponded to approximately 528 nm WO_3 capped by about 30 nm ZrO_2 . These results were obtained on rigid substrates and provide the necessary benchmark for future extension toward flexible architectures.

XRD and SEM analyses showed that the WO_3/ZrO_2 bilayer structure preserved the crystalline character of WO_3 while allowing the ZrO_2 top layer to act mainly as a thin functional overlayer. The first series already indicated that a thicker WO_3 bottom layer combined with a thinner ZrO_2 top layer was more favorable than the reversed arrangement. In the second series this tendency became much clearer: among single-layer WO_3 films, only the 40 min sample showed marked photocurrent under high bias, while the 60 min WO_3 single layer was largely inactive because excessive thickness promoted recombination. Once capped with ZrO_2 , however, the 60 min WO_3 film showed a strong negative shift of onset and a pronounced increase in maximum photocurrent, indicating that the heterojunction suppressed electron-hole recombination. The best bilayer reached about 0.75 mA cm^{-2} at 1.4 V vs. RHE under AM 1.5 illumination (Fig. 2); this value is still unpublished. By comparison, the published preliminary result reported for a related optimized bilayer was 0.12 mA cm^{-2} at 1.4 V [8].

The WO_{3-x} series also showed important progress. SPS processing successfully produced an oxygen-deficient WO_3 target, and FIB confirmed thicknesses of about 44,

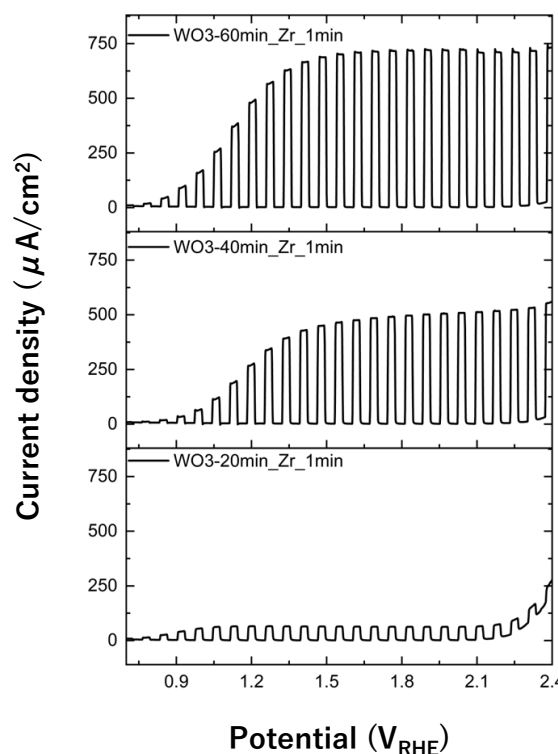


Fig. 2 - I-V curves for the system WO_3/ZrO_2

181, and 328 nm for 20, 40, and 60 min depositions, respectively. PEC measurements indicated that WO_{3-x} films already exhibited intrinsic water-splitting activity without a protective layer, and that coating them with ZrO_2 further improved the maximum current density, especially for the 40 and 60 min samples. These results suggest that oxygen deficiency and multiphase WO_3 -related structures can contribute positively to charge transport and interface tuning.

By contrast, the mixed-composition WO_3-ZrO_2 approach was much less successful from the PEC viewpoint. SEM/EDS and XRD confirmed that the composite targets were synthesized as intended and retained separate WO_3 and ZrO_2 phases without forming new compounds. Nevertheless, in thin-film form, the composite route

produced only weak PEC responses. Low-ZrO₂-content samples (1-2 wt%) showed slight activity, whereas higher ZrO₂ concentrations were detrimental. In particular, the 10 wt% sample did not show detectable WO₃ diffraction peaks, suggesting suppressed WO₃ crystallinity or partial amorphization.

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

The results of this study clearly indicate that heterostructure design is more effective than bulk compositional mixing for improving PEC response in the WO₃-ZrO₂ system. Future work should therefore concentrate on the bilayer and oxygen-deficient architectures. The priority will be a more systematic optimization of WO₃ bottom-layer thickness and ultrathin ZrO₂ top-layer thickness, to refine the balance between light absorption, charge transport distance, and interfacial recombination suppression. Since the present work already identified a strong benefit from capping thick WO₃ with thin ZrO₂, a finer thickness matrix around the best condition is expected to yield further performance gains.

A second important direction will be deeper investigation of the WO_{3-x} system. The coexistence of monoclinic, tetragonal, and orthorhombic WO₃-related phases suggests that non-equilibrium PLD growth and oxygen deficiency may create favorable internal interfaces for charge separation. This should be studied more systematically by adjusting oxygen pressure, substrate temperature, and post-deposition conditions, together with

additional structural analysis. The role of ZrO₂ as a protective and rectifying overlayer on oxygen-deficient WO₃ should also be clarified in more detail [8].

Once these aspects are consolidated on rigid substrates, the resulting optimized architectures may serve as the scientific basis for later transfer to flexible platforms compatible with lower thermal budgets and mechanically compliant device layouts.

One publication has already appeared as a preliminary report on WO₃/ZrO₂ bilayer thin films [8]. A fuller journal paper centered on the optimized bilayer concept and the beneficial role of ultrathin ZrO₂ protection would be the most direct next outcome.

References

- [1] Fujishima, A. and Honda, K., *Nature*, 238, 37-38 (1972).
- [2] Turner, J. A., *Science*, 285, 687-689 (1999).
- [3] Vilanova, R. et al., *Chemical Society Reviews*, 53, 2388-2434 (2024).
- [4] Hisatomi, T., Kubota, J., and Domen, K., *Chem. Soc. Rev.*, 43, 7520-7535 (2014).
- [5] Jiang, C., et al., *Chem. Soc. Rev.*, 46, 4645-4660 (2017).
- [6] Janáky, C., et al., *Catalysis Today*, 199, 53-64 (2013).
- [7] Mohamedkhair, A. K. et al., *Catalysts*, 11, 381 (2021).
- [8] Ishida, K., Mele, P. et al., *J. of Phys.: Conf. Ser.*, 3107, 012015 (2025).

データの時空間特性を考慮した階層型デジタルツインの研究

システム理工学部（電子情報システム学科） 三好 匠

共同研究者

システム理工学部（電子情報システム学科） 山崎 託

1. まえがき

デジタルツイン(Digital Twin, 以下 DT)は, スマートシティ実現のための基盤技術として注目されている. 従来研究では, 複数の DT 間でデータをやりとりするためのデータ様式や通信方式についての研究はあるが, より広範囲な DT については検討途中であり, 実用化に向けてより具体化した DT 構築基盤が求められている.

本研究では, さまざまな視点や対象範囲における問題を自動的かつ自律的に解決できるデータ基盤として, 利用者中心の DT 構築について検討を行う. 任意のサービスが必要とするデータの実時間性などを考慮したうえで, 実空間を正確かつリアルタイムに再現するスケーラブル DT アーキテクチャの全体設計を行う. また, 収集データを柔軟かつ効率的に利用できるようにするため, 時空間特性に基づいた分類や階層化を実施するとともに, これらのデータに効率的にアクセスできるように DT 構成データのネットワーク内での適切な配置手法について検討する.

2. 研究計画

本研究は以下の 3 つの課題から構成される.

(1) スケーラブル DT アーキテクチャの全体設計

ユーザが求めるさまざまなサービスに対応するためには, 実空間のあらゆる対象をデジタル化する必要がある. 本研究では, 特に深度カメラや LiDAR で取得された点群データ, 及びモバイル端末による位置情報データに注目する. DT 構成データは, 時空間解像度や精度, 収集頻度, 情報鮮度などの特性が異なり, これらのデータをサービスが利用する際の要求条件も異なる. そこ

で, データ取得時と利用時の時空間特性を考慮したうえで DT 構成データを保存するスケーラブル DT アーキテクチャの全体設計を行う.

(2) 時空間特性に基づいた DT データの階層化

DT 構成データは, 抽象化・平均化による低解像度化のほか, 空間階層化や時系列化が可能である. また, データ利用時の情報鮮度や実時間性に対する要求に基づいた多様化が重要な課題である. そこで, さまざまなユースケースを考慮しながら, 特に重要度や信頼度に注目した DT 構成データの分類と階層化を実現する.

(3) DT 構成データの効率的配置

DT 構成データの空間特性や情報鮮度, 実時間性, データ量などを考慮して, ネットワークのどの部分に保存するかを検討する. 具体的には, データの空間的及び時間的制約を考慮しながら適切に配置するための手法を考案する.

3. 計画の進行状況

(1) スケーラブル DT アーキテクチャの全体設計

都市全体をカバーするような DT を構築するためには, 広範囲かつ膨大な量のデータ収集が必要となる. そこで筆者らは, ユーザが DT 構成データの収集に参加する「モバイルクラウドセンシング(MCS)」を提案した[4]. これにより, さまざまな場所から多数のデータが集積されることになる. 一方で, データの統合方法や保存場所を決定したり, データの重要度や信頼性などを推定することが重要な課題となる.

点群データの統合方法として, 位置座標を Base32 で符号化する Geohash を用いて点群データを分割して統合する手法を提案した[4]. 図 1 の

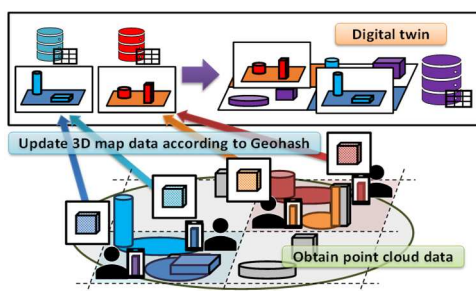


図 1 Geohash を用いた点群データの分割保存

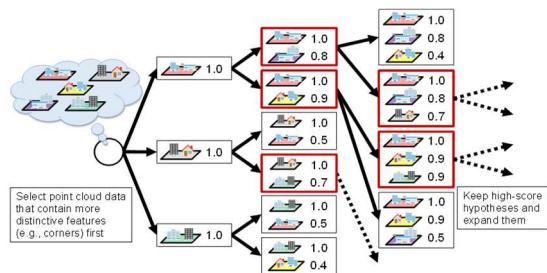


図 2 DT 構成データの多仮説統合手法

ように、本手法では、ユーザが取得した DT 構成データを Geohash 値ごとに集約し、DT に統合する。これにより、追加されるデータの統合領域を限定することが可能となる。DT 構成データの統合には正確な位置合わせが必要となるが、すでに登録されているデータとの共通点が少ない場合には正確な統合が難しい。そこで、複数の可能性を保持しながらより正確な位置を時系列的に探索する多仮説構築手法を提案した[13]。図 2 のように、本手法では複数の DT 構成データの統合順序を変更しながら、誤差が最も小さくなる位置を探索することで、より正確なデータ統合を実現できることが分かった。

都市 DT のユースケースとして、高度交通システム(ITS)との統合が考えられる。そこで筆者らは、3D ゲームの開発環境として知られる Unreal Engine をベースとした自動運転シミュレータ「CARLA」を利用した DT 構築について検討を行った[7]。本研究では、国土交通省が提供する 3D 都市モデル「PLATEAU」から建物などの静的オブジェクトを、オープンデータの地理情報データベースとして知られる「OpenStreetMap」から道路情報を取得して、CARLA 内に都市 DT を作成した。図 3 に示すように、現実世界とほぼ同様の仮想都市を再現することが可能となった。作成した都市 DT に対し、図 4 に示すように、実際の車両



図 3 CARLA による都市 DT の再現(東京都港区)

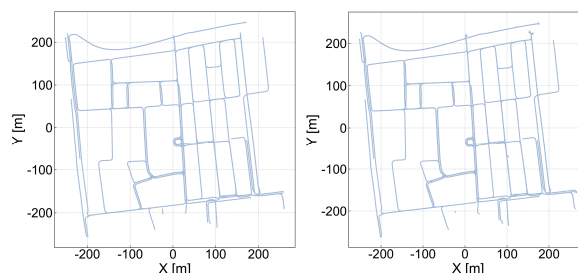


図 4 移動軌跡(左)に沿った車両走行(右)の実現

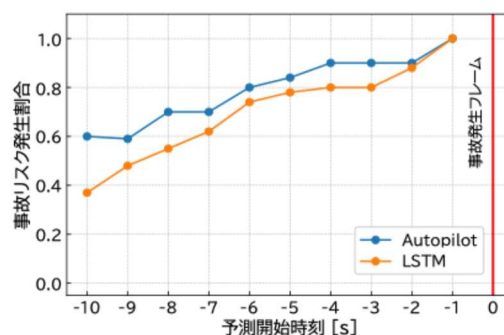


図 5 都市 DT を用いた危険状態の予測

走行軌跡を仮想的に作成し、これを時系列的に読み込みながら DT 内の車両を移動させる手法を実装した[7]。データ読込周期を変化させて実験を行ったところ、10 Hz 程度であれば実時間性を失うことなく計算可能であり、滑らかな車両移動を実現できることが分かった。更に、危険運転を行う車両の移動軌跡を仮想的に作成し、ある時点まではこれに沿って車両を走行させ、その後事故につながる危険状態が発生するかを予測する手法を提案した[12]。機械学習手法の LSTM と、CARLA に実装されている自動運転機能の Autopilot を実装して比較を行ったところ、図 5 に示すように道路情報を利用できる Autopilot 機能の方がより高い割合で危険状態を予測できることが確認された。

(2) 時空間特性に基づいた DT データの階層化

DT 構成データは時間の経過とともに劣化する。MCS では、古くなったデータ領域をユーザが積極



図 6 AR による情報鮮度の表示

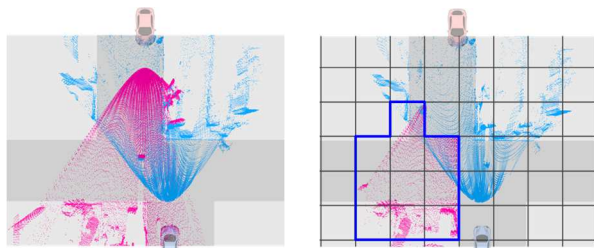


図 7 領域選択型点群共有システム

的にセンシングするような仕掛けが必要となる。そこで、DT 構成データの時間鮮度を拡張現実 (AR) を用いて視覚化する仕組みを提案した[10]。図 6 のように、点群データを取得した領域に色を重ねて表示し、情報鮮度に応じて色が薄くなるような仕組みを導入した。これにより、MCS に参加するユーザは鮮度の劣化した領域を積極的にセンシングするようになると考えられる。更に、点群データからオブジェクト認識が可能であると仮定し、オブジェクトごとに情報鮮度を定義して劣化領域を優先して送信する通信方式を提案した[2]。DT 構成データはデータ量が膨大であるため、本手法を用いることでセンシングしたデータを部分的に送信することが可能になることを示した。

DT をリアルタイムに利用する場合、DT 構成データの送受信が頻繁に行われる。ITSでの利用を想定すると、車両や歩行者は移動体通信などにより大量のデータを送受信する必要があり、通信の効率化が求められる。そこで、車車間及び路車間での点群データの共有を想定し、効率的な通信手法について検討した[8],[9]。LiDAR 搭載車両は、自車両で点群データを取得可能であるが、障害物の影響でセンシングできない領域がある。そこで、死角となる領域に限定して点群データを受信するための仕組みを提案した[9]。提案手法では、領域を Geohash などで分割し、Geohash 値をトピックとして指定する Pub/Sub 通信を用いることで、指定領域のみの点群データを受信するこ

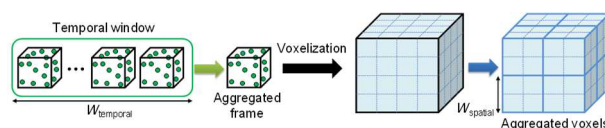


図 8 点群データの時空間統合

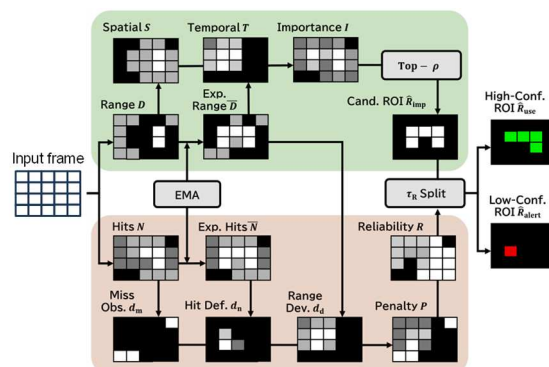


図 9 点群データの重要度と信頼性の推定

とが可能となる。図 7 左のように、2 台の車両がそれぞれ点群データを所持する環境において、図下側の青い車両は建物等の死角になっている青枠内の点群データのみを Pub/Sub 通信により受信することが可能となり、通信量を大きく削減することに成功した。一方、点群データそのものを共有するのではなく、車両や路側機などでオブジェクトの有無を判断し、その結果のみを共有する占有グリッドマップ共有方式についても提案した[8]。本手法では、領域をグリッドに分割し、その領域が占有されているかどうかを点群の有無で判断するとともに、各領域を占有、非占有、未観測の 3 状態で表現する。このように、DT 構成データを抽象化することで大幅なデータ削減を実現した。

DT 構成データの効率的な階層化を実現するためには、データの重要度と信頼性を考慮することが重要な課題となる。そこで、点群データの時空間変化から重要領域を推定する手法を提案した[3]。本手法では、図 8 に示すように、取得した時系列点群データを時間と空間のウィンドウを用いて集約することでデータ量を削減し、実時間での重要度推定を実現している。ボクセル内点群の重心を算出し、重心の変化から点群データの変化を発見する。一方、筆者らは、観測された点群データを 2D 平面に投影し、重要度と信頼性を同時に判定する手法も提案した[1]。図 9 のように、2 次元領域に分割された点群データに対し、点数

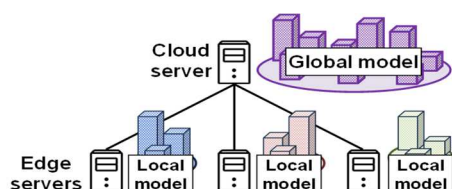


図 10 エッジ・クラウド連携による階層型 DT 構築

の時空間変化を用いて重要度(図 9 上)と信頼性(図 9 下)を算出する. 本手法により, 40 ms 程度の計算時間で高信頼重要領域と低信頼重要領域を出力することが可能となった.

(3) DT 構成データの効率的配置

取得された DT 構成データは, 用途に応じて時空間解像度や実時間性などが異なると考えられ, 適切な保存場所を検討する必要がある. 例えば, クラウドサーバでは大容量データを保存することができるが, 通信に時間を要する可能性があり, エッジサーバではその逆となる. そこで, 位置依存形サービスでの利用を一つのユースケースとして, エッジ・クラウド連携型の都市 DT 構築モデルを提案した[11]. 本手法では, 取得された DT 構成データを Geohash などを用いて領域分割し, 領域ごとのデータをエッジサーバで保存する階層型データ配置を実現した.

4. 今後の計画

本研究では, データの時空間特性を考慮した階層型 DT について, さまざまな観点から検討した. 1 年の研究期間であったが, 多くの研究成果を残すことができたと考えている. また, 筆者らは国際会議や国内学会において, 招待講演などを通じて得られた成果を発表している[5],[6].

スケーラブルな DT を構築し, これらのデータをより柔軟に利用するためには, DT 構成データの取得から利用までを統合的に設計する必要がある. 多くの課題が残っている. 本研究における知見として, DT 構成データを Geohash を用いて領域分割し, 保存・利用することが実時間処理の観点から重要であるが, これを実現するためには MCS など取得したデータを即座に領域分割し, 何らかの処理を行ってサーバに送信する手法などが有効であると考えられる. 今後は, DT 構成データの保存形式や, 階層型配信手法などにつ

いて研究を進める予定である.

主な発表文献

- [1] Y. Umemoto, J. Sato, T. Yamazaki, T. Miyoshi, and R. Shinkuma, “Reliable-aware important region estimation for LiDAR point cloud streaming,” to appear in *IEEE ICME W. 2026*, 6 pages, July 2026.
- [2] T. Yamazaki, K. Mitobe, T. Miyoshi, and S. Miyata, “Efficient participatory digital twin updates via selective point cloud transmission,” *IEEE INFOCOM 2026*, 2 pages, May 2026.
- [3] J. Sato, R. Shimizu, Y. Umemoto, T. Miyoshi, T. Yamazaki, and R. Shinkuma, “Real-time spatial importance estimation using window-based spatiotemporal aggregation,” *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 15, no. 3, pp. 60-75, May 2026.
- [4] T. Yamazaki, K. Watanabe, T. Kase, K. Hasegawa, K. Saida, and T. Miyoshi, “A 3D mobile crowdsensing framework for sustainable urban digital twins,” *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 15, no. 3, pp. 76-88, May 2026.
- [5] T. Miyoshi, “Toward scalable urban digital twins: integrating point cloud sensing and real-time traffic simulation,” Keynote Speech, *ICIET 2026*, Apr. 2026.
- [6] 山崎 託, 三好 匠, “3D モバイルクラウドセンシングによる都市デジタルツインの構築,” 招待講演, 信学技報, NS2026-10, Apr. 2026.
- [7] S. Kamioka, T. Yamazaki, and T. Miyoshi, “Towards urban digital twins: a framework integrating CARLA with 3D city models,” *IEEE ICCT-Pacific 2026*, pp. 23-26, Mar. 2026.
- [8] 神谷健太郎, 萬代雅希, 山崎 託, 三好 匠, “道路領域情報を用いた占有グリッドマップの路車間共有手法,” 2026 信学総大, B-6-112, Mar. 2026.
- [9] 大島知哲, 萬代雅希, 山崎 託, 三好 匠, “Pub/Sub 型通信を用いた領域選択型点群データ共有手法,” 2026 信学総大, B-6-113, Mar. 2026.
- [10] 三戸部凱都, 三好 匠, 山崎 託, “3D モバイルクラウドセンシングにおける AR を用いた空間情報鮮度の可視化,” 2026 信学総大, B-15-31, Mar. 2026.
- [11] 只野陽生, 三好 匠, 山崎 託, “エッジクラウド連携型都市デジタルツインにおける都市モデルの構築,” 第 31 回信学東京支部学生会研究発表会, no. 34, Mar. 2026.
- [12] 上岡俊介, 山崎 託, 三好 匠, “都市デジタルツイン環境における車両移動軌跡を用いた危険予測,” 信学技報, NS2025-231, Mar. 2026.
- [13] 長谷川健太, 三好 匠, 山崎 託, “3D モバイルクラウドセンシングにおける多仮説地図構築に基づくデジタルツインの更新,” 信学技報, NS2025-331, Mar. 2026.

身体拡張機構を応用したエルゴノミック VR ワークスペースの設計基盤

システム理工学部（電子情報システム学科） 高嶋 和毅

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

バーチャルリアリティ（VR）を用いて、いつでもどこでも技能トレーニングをしたいという要求がこれまで以上に高まっている。特に、医科・歯科、工業・工芸など、身体の高精度な運動制御の習得が必要な分野においてそれが顕著である。しかし、腕を空中で動かし続けると肩に疲労が蓄積しやすいことはゴリラアーム症候群と呼ばれる古典課題であるが、未だ解決には至っておらず、この数年はその問題が顕著に現れている。この問題に対するこれまでの解決策は、手が届きにくい場所にコンテンツを配置しないことや上腕の疲労予測モデルを用いて作業時間を工夫すること等であり、根本的な解決に向かっていない。本質的な課題は、「作業空間は HMD の中で視覚的に高精細に表現される」が、「ユーザの身体運動に必要な物理空間は周囲に存在しない」ことであり、視覚と身体の状態に大きな乖離が存在することである。ユーザの身体や周囲に何も物体を要さない事は、VR の手軽さの象徴でもあるが、運動強度を必要とする VR アプリケーションでは身体疲労問題を引き起こす主要因である。

本研究課題では、VR ユーザの姿勢やタスクに応じて身体疲労コストを算出し、そのコストを最小化するように身体拡張を導入することで人間工学的に適したエルゴノミック VR ワークスペースの設計基盤を提案する。具体

的な研究項目は、身体疲労コストの算出方法の確立、身体拡張機構の設計実装およびその検証、および、様々な身体拡張機構（ロボット群や外骨格機構等）の検討を通してエルゴノミック VR ワークスペースの設計ガイドラインを提案する。

2. 研究計画

本研究では、HMD（頭部搭載立体ディスプレイ）を装着したユーザが部屋サイズの計測可能（トラッキング）範囲を歩き、空中に配置された VR コンテンツを操作する際にロボット群を自動的に配置し、ユーザの不安定箇所を絶妙にユーザの不安定箇所を適切に安定させる。申請者は、VR ユーザと連携するロボットの基本的なプラットフォームをこれまでの研究歴で構築済みであり、これを応用し、図 1 に示すように、ロボットに鉛直水平の両軸に伸縮可能な機構を導入する。また、将来的にはそれらを複数台準備してモジュールとして連携してお互いに接続と分離できる機能を導入することで、多様な姿勢安定化の環境を VR ユーザ付近に即座に作るシステムを構築する。例えば、複数のモジュールを適宜、接続・分離し、高さや幅を調整することで、VR ユーザに対して、タッチ支持面、キャンバス面、または臨時の机面、手すり、椅子、背もたれなど、活動に不可欠な身体支持環境を即座に構築することができる。本研究項目では、身体の部位

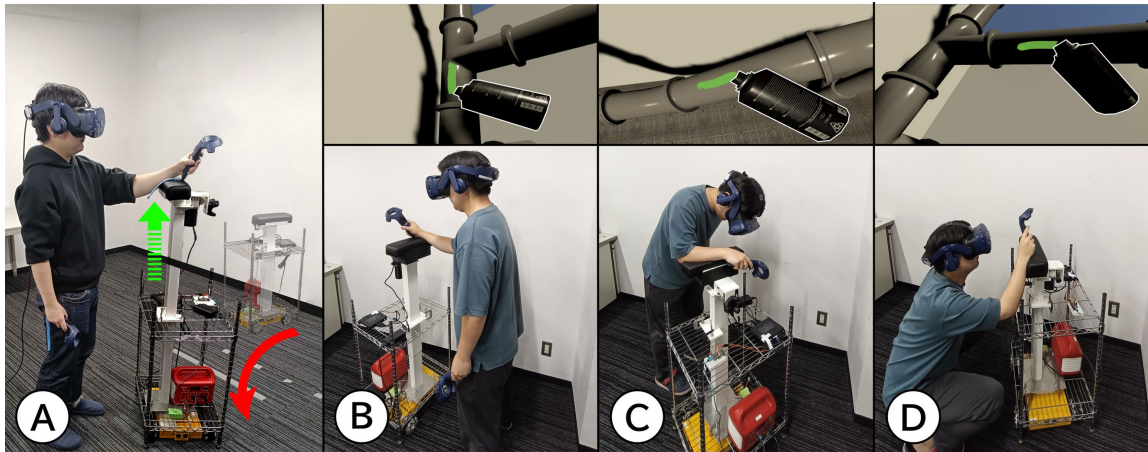


図 1．実装したロボット型デバイスとエルゴノミック環境構築例

ごとに姿勢安定化ロボットデバイスの設計，開発，運用システムを実装し，個別のデバイスの効果をまず明らかにする．実験の際，オフィスユーザだけではなく，筋骨格系に課題を抱えている方（リハビリ中の方や高齢者）に対する効果検証も考慮し，本研究で提案する身体安定化エルゴノミックデバイスがどのように VR オフィスユーザ以外のユーザ層へ波及可能かも確認する．

3．計画の進行状況

本年度では，目的を達成するための一つの重要なロボットの形態として，単一の「ロボティックアームレスト」を実装し，それを VR システムとして稼働させて効果検証した．

ロボティックアームレストの設計と実装：
本研究で実装したロボティックアームレストの外観は図 1 に示した通りである．ルームスケール VR における空中インタラクションは，ユーザがその場に留まらず，3次元空間を移動しながら行う場合が多い．このため，ロボティックスタンドはユーザの移動に追従し，必要な位置に動的に配置できるようにする．ロボットを3次元空間で適切に配置するためには，平面面方向および鉛直方向への移動機能が重要である．平面方向の移動では，ユーザの前後左右の移動に即座に応答できる全方向移動機構が求められる．また，鉛直方向の移動では，ユーザの腕の高さに応じてロ

ボットの高さを適切に調整する昇降機能が必要である．これらの機能を実現するため，全方位置動可能な4輪駆動の小型オムニホイールロボット「Nexus Robot」，上に80～150cmの範囲で昇降可能なリニアアクチュエータを設置した．Nexus Robot は360度全方位に自由に移動でき，リニアアクチュエータはその長さ（ここでは高さに相当）を連続的かつ精密に調節可能である．

VR システムの構築：本システムの利用には，VR システムとして VIVE Pro Eye HMD および対応するコントローラーを使用する．また，ルームスケール XR の環境を構築するため，3台の SteamVR Base Station 2.0 を部屋内に設置して，約 5.5m×6.5m のトラッキングエリアを確保した．システムの開発には Unity エンジンを使用し，ロボティックスタンドの位置情報をリアルタイムで取得するために VIVE Tracker 3.0 を採用した．Unity 上で取得したロボットの現在位置とユーザが指定する目標地点の差分を基に，PID 制御アルゴリズムを用いて適切な移動および昇降コマンドが随時生成される．生成されたコマンドはロボティックスタンドに送信され，ロボットは目標地点へ移動する．このように，本システムでは，ユーザが指定する位置（ユーザが指定または事前に指定）にロボットが常に追従する形で運用することになる．さらに，VR ユーザ側から見ると，VR 中でロボティックスタンドの現

在位置，目標位置，高さの情報を視覚的に確認できるため，ロボットを安全に利用することができる．図1では，異なる高さに配置された VR コンテンツに対して適切な身体指示をロボティックアームレストで提供できることを示している．腕が空中に浮いている間に精密な入力をする場面全般に応用できる見通しがある．

4. ユーザスタディ

ロボティックアームレストによって提供される物理的な腕のサポートが，VR 空間での空中インタラクション中の腕の疲労感や入力精度に与える影響を調査するために，ユーザスタディを実施した．参加者は VIVE のハンドヘルドコントローラーを使用して，バーチャルキャンパス上に文字を書くタスクに取り組んだ．ロボティックアームレストのパフォーマンスは，物理的なサポートが提供されない従来の空中インタラクションと比較して検証した（図2参照）．この実験のデザインは，私たちの大学の倫理審査委員会によって承認されて実施した．

18 歳から 23 歳の大学生および大学院生 12 名（女性 3 名，男性 9 名）が参加し，7 名は事前に VR 経験があると報告した．参加者は立った状態で，片手で筆記タスクを実施した．

タスクでは，被験者は，VR 空間内で漢字を 12 個書き続けるものとした．一漢字書き終わるたびに次の漢字付近にロボティックアームレストの位置が調整される．図2に，本実験による主要な独立変数である，空間インタラクション条件（A）とロボティックアームレスト条件（B）の様子を示す．従属変数として，CR10（身体疲労を計測するアンケート）と VR 内で提示した漢字の各ストロークと入力ストロークの差（入力精度）として計測した．

図3にその結果をまとめる．図中のアスタリスク（*）は，収集したデータに対して分散分

析（ANOVA）を適用した結果，統計的に有意な差があることを示している．

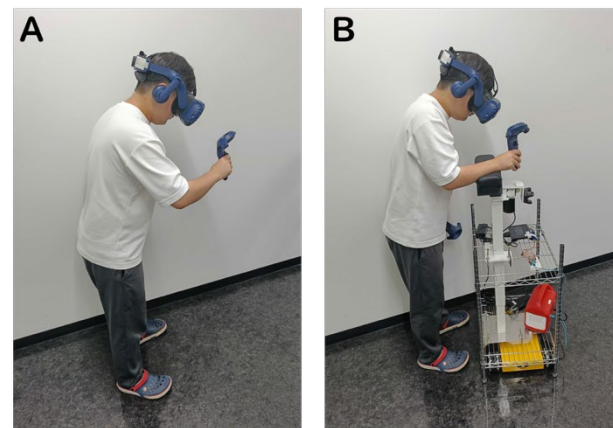


図2．実験における比較条件

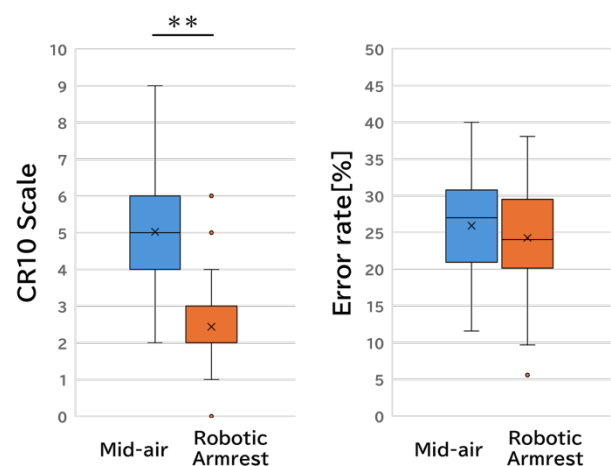


図3 結果（左）CR10 身体負荷，（右）入力精度

CR10 スコア

実験の結果，図3（左）に示すように，入力方法が CR10 スコアに与える主な影響が顕著であることが分かった．ロボティックアームレスト条件では，空中条件に比べて腕の物理的な負担感が有意に低かった ($F(1, 11) = 44.2$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.80$)．この結果は，空中での手書き中に物理的サポートを提供することが，長時間の VR インタラクションでよく見られる腕の疲労を大幅に軽減できることを示唆している．

入力精度

入力精度は，テンプレートからの筆記の軌跡の逸脱時間を全体の筆記時間に対する割合と

して定義した．入力方法が入力精度に与える統計的に有意な影響は観察されなかった ($p > 0.05$) が，図4に見られるように，わずかな数値的傾向として，ロボティックアームレスト条件では精度がやや向上していることが示唆された．これは，ロボティックアームレストによる物理的なサポートがユーザーの入力動作を妨げることなく，手書きタスク中の入力精度を低下させないことを示している．

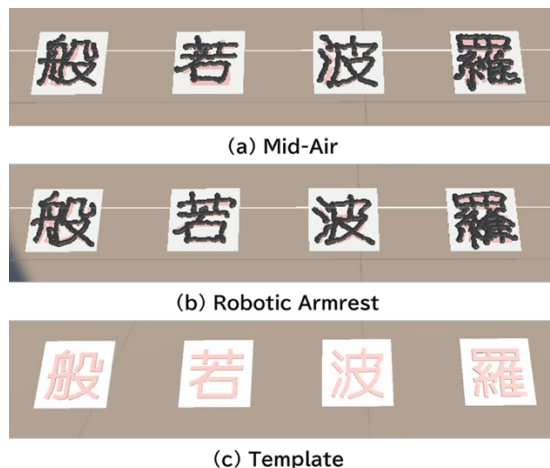


図4 実験結果，各条件における筆記精度

全体的に，結果は提案されたロボティックアームレストが，入力精度に悪影響を与えることなく，バーチャル空間内での手書き中の物理的負担感を効果的に軽減することを示した．しかし，本研究は片手での単一平面手書きタスクに焦点を当てており，複数の観点で発展が期待できる．例えば，今後の研究では，両手操作をサポートするための二つのアームレスト構成を検討することや，被験者がタスク遂行中にどのような荷重分布を持つのかなどを計測し，より詳細な人間工学上の効果を分析をする予定である．

4. 今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

本研究では，バーチャル筆記タスクを実験として取り上げたが，図1に示すように工作現場等より実践的アプリケーションでも効果を示すことができると考えている．その他，図5に示すように，より事務作業に適したア

プリケーションなどにも期待がある．

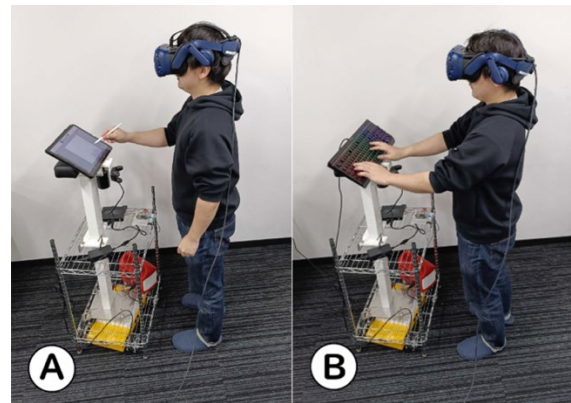


図5 オフィス向けアプリケーション

現在の成果は，2025年6月に東京大学で開催されたヒューマンインタフェース学会研究会にて口頭発表をした．また，2026年3月に開催された世界最大のVR分野の国際会議 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces 2026 にて査読ありポスターとして発表をした．現場では，VRの専門家から多くの有意義なコメントを得ることができ，それをもとに現在は，上記で示したより詳細な実験を含めて，フルペーパーまたはジャーナル投稿の準備を進めている．

1. 青山 脩，高嶋 和毅，ロボティックアームレストを用いたルームスケール VR における空中インタラクション支援，ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol. 27 No. 4, pp. 231-134, 2025
2. Naoshi Aoyama, Kazuki Takashima. Exploring Robotic Armrest for Supporting Mid-air Interactions in Room-Scale VR, In Proceedings of IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 1181-1182, 2026 (reviewed poster)

記憶の哲学のシミュレーションニズムの展開と記憶の共有： 集合記憶の不正義と記憶のケア

デザイン工学部（デザイン工学科） 櫻木 新

共同研究者

デザイン工学部（デザイン工学科） 野田 夏子

広島大学大学院人間社会科学研究科 稲荷森輝一

東京大学 川本 隆史

茨城大学教育学部 佐藤 邦政

北海道大学大学院文学研究院 宮園 賢吾

千葉工業大学 三村 尚央

1. はじめに

本研究のテーマはエピソード記憶の共有である。エピソード記憶は個人の記憶であるが、その共有も社会集団の存在や成り立ちに大きな役割を果たしている。我々は、例えば「私は家族旅行の時のことをよく覚えている」と「私達家族は家族旅行の時のことをよく覚えている」という二つの表現を使い分けているように、家族一人一人の家族旅行のエピソード記憶と、共有された記憶を区別している。共有された記憶は、社会認識論で論じられる集合による知識の共有の一つの形であると共に、経験の共有という側面を有する。分析認識論では伝統的に命題的な知識に興味が限定され、知識の共有も多くの場合命題的なものに焦点が絞られてきた。しかし例えば戦争被害者の証言の社会的共有には命題的知識の共有だけではなく、彼（女）の知識の背景にある個人的経験の社会的な受容という側面があり、これが彼（女）の証言力の背景にある。

この個人のエピソード記憶と社会的な知識の共有の持つ社会認識論的な重要性は、様々

な証言の抑圧という社会倫理的な問題と表裏一体である。Miranda Fricker (2007) の *Epistemic Injustice* (Oxford) 以降、社会認識論は差別、偏見などの様々な要因によって、知識とその根拠の適切な共有が妨げられる認識的不正義の存在に光を当ててきた。他方で、命題的な知識の共有としての集合記憶の背景に存在するであろう、エピソード記憶の社会的共有にはほとんど光が当たっていない。本研究の一つの目的は、エピソード記憶の適切な社会的共有を妨げる様々な要因を、共有のあり方の解明を通じ明らかにすることにある。

集合記憶についての社会学関連領域での多くの議論にもかかわらず、集合によるエピソード記憶の共有という事象にはほとんど光が当たって来なかった背景には¹、エピソード記憶が本質的に個人的な事象であるという想定他に、記憶が因果的プロセスであるという前提がある。これらの想定が心の哲学における自然主義的な傾向を伴うとき、エピソード記憶はある種の脳内プロセスによって実現されるという、ごく自然な理論を帰結する。こ

¹ Henry L. Roediger, Magdalena, A., "Collective memory: a new arena of cognitive study," *Trends in*

Cognitive Sciences, Volume 19, Issue 7, 2015, 359-361.

れを Martin and Deutscher (1966) は記憶の痕跡 (Memory trace) という概念で説明しようとしたが²、これを集合に拡張しようとする、我々は明らかな壁に突き当たる。社会学的な意味での集合記憶が様々な言語・記号的表象というある種の「痕跡」によって維持される一方、社会的グループのどこにエピソード記憶の痕跡が、個人の記憶と類比的な形で、保持できるのか明らかな疑問が残るのである。

他方、我々は日常的に (いかなる言語においても) 複数形の主語で経験の記憶を帰属・報告している。この心理学・記憶の哲学における個人主義的な記憶理解と、集合記憶を巡る我々の日常的な営みの間のギャップを橋渡しするのが、心理学・記憶の哲学におけるシミュレーショニズムである。シミュレーショニズムによれば、記憶は因果的な痕跡ではなく、経験表象 (エピソード) を (再) 構成するシミュレーションシステムによって保持される³。この理論を社会集団へ拡張することによって、痕跡説の下ではせいぜい類比に留まった社会的なエピソード記憶の共有は、個人の記憶と同じ包括的な理論によって説明される。

またこのアプローチは、個人の記憶における捏造 (confabulation) と認識的不正義の間の類比を明らかにしてくれる。個人のエピソードシミュレーションシステムがわれわれに誤ったエピソード記憶をもたらすのと同じように、集合のエピソードシミュレーションシステムは社会に捏造された過去を表象する。こうして、エピソード記憶の共有に関わる認識的不正義のより正確な理解が可能になる。様々な社会的要因が個人的なエピソード記憶の報告が不当に妨げられ歪曲するとき、集合的エピソードシミュレーションシステムの (再) 構成プロセスの本来の機能は妨げられ、

認識的不正義が帰結するのである。

2. 研究計画

本研究は (1) 集合的エピソード記憶と社会的知識共有の概念的解明と (2) 集合的エピソード記憶に関わる認識的不正義と記憶のケアの提案という、二つの柱から構成される。(1) はさらに (1-a) 集合的エピソード記憶の概念的解明と (1-b) 集合的エピソード記憶のシミュレーショニズム、という二つの異なる研究プロジェクトによって構成され、(2) は (2-a) 集合的エピソード記憶の社会認識論と (2-b) 集合的エピソード記憶の認識的不正義の事例研究の二つの角度から推進される。本研究はこれら複数のプロジェクトを文献研究、経験的調査などさまざまな角度から検討し、互いに有機的に関連させながら遂行される。

3. 計画の進行状況及び学会・論文等投稿・発表状況

2025-6 年度はそれぞれのテーマを分担する担当者から複数の成果が得られた。

(1) 集合的エピソード記憶の概念的解明についての成果

(a) 櫻木は "Simulation and collective episodic memory" (*Chris McCarroll との共著, Simulationism 2025 Part II で口頭発表) で、集合的記憶が個人の記憶の集合に還元できる場合と、集合による共同の想起作業や相互理解を伴う非還元的な場合を区別し後者の集合記憶にどのようにして「我々の記憶」(we remember) という感覚が生じるのかを、個人のエピソード記憶に特有の「自覚意識 (autonoesis)」⁴ との関係から検討し、集合記憶に関するシミュレーショニズムの優位性を検討した。特に、ある種の社会集団で生ずる

² C. B. Martin and Deutscher, M. "Remembering," The Philosophical Review, Vol. 75, No. 2 (1966), 161-196.

³ D. L. Schacter and Addis, D. R., "The cognitive neuroscience of constructive memory:

remembering the past and imagining the future," Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 362(1481) (2007), 773-786.

⁴ Tulving, E. "Memory and consciousness," Canadian Psychology, Vol. 26, No. 1 (1985), 1-12.

「集合的自覚意識」(collective auto-noesis)が集団独自の集合的エピソードシミュレーションシステムによって生成される感覚であると論じた。この「集合的自覚意識」については、”Episodic Memory and the Sense of Us: The Phenomenology of Remembering the Shared Past” (Chris McCarroll & 櫻木, Eurasian Memory Meeting 2026 で口頭発表) で取り扱い、「我々」の過去を語る (we-narrative) 際に付随する「我々」の感覚の分析から、集合的な行為のような共有された過去の記憶と一人称複数の主体 (we-identity) がどのように構成されるかを論じた。

(b) 宮園と稲荷森は、昨年度より因果説と直観との整合性を検証する実験を行ってきた。本年度はこれまでの実験とは別に記憶帰属にかかわる直観においてノープ効果が存在するかどうかについても研究を進めた。ノープ効果とは特定の行為の帰結に対する意図性の帰属が、当該行為の帰結の道德性に左右される現象を指す。本研究ではシナリオ型実験を用い、第三者に対するエピソード記憶の帰属においても行為の帰結がもつ道德性の影響することが明らかとなった。本研究成果は 2025 年 11 月に行われた日本科学哲学学会の年次大会で報告済みであり、現在国際誌への掲載を目指して研究を継続している。とりわけ、知識帰属におけるノープ効果の先行研究を踏まえ、ノープ効果のもつメタ哲学含意と、記憶の哲学における直観の役割について議論を重ねている。

(c) 宮園が中心となってオーガナイズした「CPM-CHAIN ワークショップ」(2026 年 3 月 9 日、北海道大学) は、記憶の哲学における最先端かつ極めて学際的な議論の場となった。グルノーブルアルプ大学の CPM (Centre for Philosophy of Memory) と北海道大学の CHAIN (Center for Human Nature, Artificial Intelligence, and Neuroscience) の合同企画として、CPM 側から記憶のシミュレーション説に関する議論など分析的な記憶の哲学に

についての提題がなされた一方で、CHAIN 側からは田口茂氏による時間論の現象学的な検討、および猪ノ原氏による西田幾多郎の哲学を扱った日本哲学的なアプローチからの提題があり、多様な議論が繰り広げられた。分析哲学、現象学、日本哲学が一堂に会したこの交流は、記憶の哲学が今後、幅広い展開と可能性を持つことを強く示唆している。

(2) 集合的エピソード記憶の認識的不正義の事例研究の成果

(a) 川本は、前年度から準備を進めてきた秦恒雄氏 (1910~1979 年) の遺著『ひろひと天皇年代記』(底本『原爆と一兵士』は 1980 年に旺史社より刊行) の復刊を実現し、同書の巻末に「脱=被爆ナショナリズム・記憶のケア・オートエスノグラフィー—『ひろひと天皇年代記』に寄せて」を寄稿した(琥珀書房、2025 年 7 月 1 日発行)。この論考において、秦氏の作品を「記憶のケア」の実践の試みとして読み解いている。さらに東日本大震災・原発事故から 15 年を経た時点での「記憶のケア」をめぐる共同通信社のインタビュー取材を受け、2026 年 3 月 17 日より加盟地方紙各紙に掲載されるにいたった(見出し=「【大震災・記憶のケア】協働してほぐし、広げる 不安な時代、友が支えに」)。

(b) 佐藤は人々のナラティブの証言と「どのようなことか」の記憶的知識の共有・継承について検討した。自伝や体験エピソードのような一人称視点から語られるナラティブの証言は、自分の経験した現象や出来事が「どのようなことか」の知識の命題的形態を他者に伝達することができる。一方で、主体が体験したエピソード記憶は、それを思い出す主体の個人的な記憶表象ではあるが、「その経験がどのようなものだったのか」という問答的知識(interrogative knowledge)については部分的に命題的形態のナラティブの証言を通じて伝えることができると思われる。そうだとすると、主体のエピソード記憶に関する「ど

のようなことか」の記憶的知識は問答的知識の形態でナラティブの証言を通じて伝達され、世代を超えて継承されうる可能性が拓かれる。以上の仮説を踏まえて、本年度の研究は、ナラティブの証言が命題的形態で「どのようなことか」の記憶的知識を伝えうるだけでなく、その証言を通じて語り手がどのような経験をしたのかを想像できるようになる可能性があることを明確にした。次に、そのような知識の共有が可能になるためには、証言の聴き手や読み手に「語り手の経験とはどのようなことだったのか」に対する問答的態度——問いを適切に探求しようとする傾向性など——が求められると論じ、適切な仕方で適切な範囲での命題的知識の獲得や想像力の向上という観点から記憶の共有・継承にかかわる倫理的問題について示唆した。これら研究成果は① “Testimony and “what-it-is-like” memorial knowledge” Eurasian Memory Meeting 2026, 2026 年 3 月 5 日、及び②「書き言葉の証言としての教科書を介した認識的暴力- : 「どのようなことか」の問答的無知、非当事者のマジョリティ性、〈他者〉化への認識的脆弱さ」. 『教育哲学研究』132: 1-20 (2026) で報告された。

(c) 三村は移民たちのアイデンティティを支える文化的な集合記憶の検証した。集合記憶が形成され、変容してゆくプロセスを可視化する効果的なメディアとしてのフィクション作品のはたらきに着目して研究を重ねた。中でも文化的な特異性が反映される事例として、イギリスの移民系作家たちの作品に描かれる、自分たちのルーツの文化的記憶表現に注目して検証した。特に今期はカリブ系移民二世作家アンドレア・レヴィの、自身の自伝的要素を多く取り入れた作品を取りあげた。たとえば『レモンの実』(*Fruit of the Lemon*) では、主人公の 20 代女性はイギリスで生まれ育ったにも関わらず、ジャマイカ系の両親から受け継いだ外見的特徴により、「イギリス人」

とはみてもらえない経験を重ねる。精神的に不安定になった彼女は両親の勧めで生まれて初めてジャマイカを訪れて、その風景と文化に触れ、親族にも会うことで自分を取り戻してゆく。イギリスで生まれながらも完全には受け入れられていない疎外感を、自分が生まれる以前からのルーツという文化的記憶を辿ることで乗り越えようとする試みは、移民第二、第三世代たちにとって典型的な生存戦略であり、EU 離脱 (Brexit) 後の分断が広まる現在のイギリス国内でさらに重要性を増していることが確認できた。

(d) 野田は認識的不正義の事例としてのソフトウェア開発分野におけるジェンダーバイアスについての検討を進めた。日本においては理工系分野で技術職や研究職等の専門職に従事する女性が少ないことが、問題となっている。これには様々な原因があることが明らかになりつつあるが、背景のひとつとして、女性は理工系に向いていないという思い込みによる、女性の成果や発言の軽視も存在する。本研究ではこれを認識的不正義として捉え、理工系の一分野であるソフトウェア開発分野における事例収集を行っている。今期は、事例収集や文献調査のために情報処理学会ソフトウェア工学研究会においてワークショップを開催した。こうした問題はエピソードとしては語られるものの、公式の記録としては残りにくいために調査結果が実際と乖離したり、分析が困難になる等の課題がある。この課題の解消のための方法を継続検討中である。

4. 今後の計画

今後の計画であるが、本研究プロジェクトは、2026 年より 2030 年まで科研費基盤研究 B に採用された。今後は毎年 2 回の研究集会を主催、研究成果を積極的に発表するとともに、そこでの議論を踏まえて国内学会や国際会議等での発表を積極的に行ってゆく予定である。

視聴覚情報の空間的整合による CG アバタの实在感と対話体験の向上に関する基礎的研究

デザイン工学部（デザイン工学科） 益子 宗

共同研究者

芝浦工業大学 デザイン工学部 デザイン工学科 原田 翔史

1. 序論

近年、AI および CG の発展に伴い、現実の人間と見分けが付きにくいほど写実的なバーチャルエージェントが登場している。その一方で、駅や商業施設ではデジタルサイネージに CG アバタを起用する事例が普及しつつあり、近い将来、写実的なエージェントをサイネージ上で目にする機会が増えることが予測される。しかし、スクリーン上のエージェントは物理的実体を持たないため、画面上の視覚情報と外部スピーカからの聴覚情報が空間的に一致しにくく、視聴覚のズレが生じやすい（図 1）。

サイネージに対面した利用者は、画面上のエージェントの口元や顔向きから、「音声はここからこの方向に向かって発せられるはずだ」と聴覚を予測しやすい。しかし実際のスピーカ位置や指向特性がそれと一致しない場合、視覚と聴覚の間にズレが生じる。本研究では、この視聴覚の物理的なズレがマルチモーダル知覚上どのような負荷となるかを問題の中心に置き、ズレが注意を散漫にさせたり無意識的な違和感や認知的負荷を招いたりすることで、エージェントに対する注意の捕捉が妨げられ、場合によっては否定的な印象評価につながり得る、といった仮定のもと、視聴覚の空間的一致を高める技術的・知覚的アプ

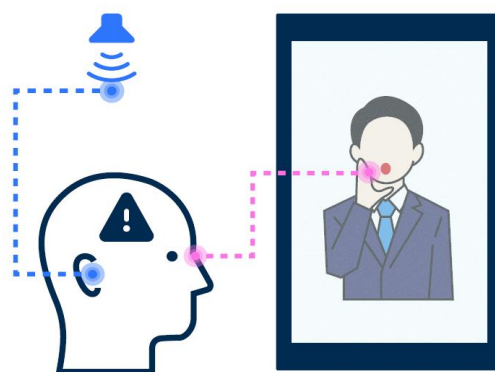


図1 サイネージにおける視聴覚のズレ
チを検討する。

2. 関連研究

視聴覚のズレについては、視覚に続く聴覚を無意識に予測する人間の特性として、予測と異なる音響は違和感として知覚されうること、また空間的にずれた視聴覚統合には心的努力が必要となり注意が散漫になりうることも、先行研究により示唆されている [2, 3]。さらに、対面や遠隔を含むロボット提示と画面上のバーチャルエージェントとを比較した実験研究を総説した報告 [1] では、物理的実体や同席といった条件が、注意の捕捉や説得力・信頼性の面で画面上のエージェントより有利になりやすい、とまとめられている。すなわち、身体を持たないスクリーン表現だけでは得にくい物理的の手がかりが、注意や印象

評価に効きうるという示唆であり, CG エージェント側では視聴覚の整合など知覚的に補う設計が手掛かりとなりうる。

CG アバタにおいては, 視線や発話の宛先知覚と音声の空間的關係が利用者評価に影響しうることが報告されており [5], 視聴覚の空間的整合を設計する際にも参照すべき知見である。しかし, 視聴覚の不一致がエージェントの印象にどの程度寄与し, その影響が写実性の観点でどう変化するかを検証した研究は十分とは言えない。そこで本研究では, 視覚と聴覚の空間的な不一致が注意や印象評価に与える影響を明らかにすることを目的とする。また, 写実的エージェントの实在感および信頼性を高めるために, 顔向き等に応じた音響制御とスピーカ構成による音声定位制御の可能性を検討する。この目的を達成するうえでは, 利用者が音の届き方から話者の向きを推定する際に, 子音に富む高周波成分が重要な手がかりになりうるとされており [4], 後述する予備実験 1 における音場の計測や, 定位制御のパラメータ設計にも資する知見として活用した。

3. 研究計画

本研究では, 背景と先行研究に基づき, 中心仮説として「視覚と聴覚の空間的な不一致は, ユーザの注意を阻害し, 対話内容への集中を妨げることで, バーチャルエージェントに対する否定的な印象評価をもたらす」と置いた。また作業仮説として, その傾向はエージェントの写実性が高いほど顕著になる, と置いた。つまり, 写実的な外見は鑑賞者に対して「この顔向きであれば, 音声は口元からこの方向に発せられるはず」という, より人間らしい音響特性への期待を無意識に高め, その期待が裏切られることで違和感が強まる, というメカニズムを仮定する。

検証は, 音声の空間的拡がりと指向特性が定位制御の設計に与える制約を明らかにする



図 2 計測用マイクを配置した様子

こと, およびエージェントの写実性の違いが視聴覚の一貫性に対する主観評価に与える影響を検証するための予備実験 1, 2 と, 提案する音声定位制御が实在感・信頼性等に与える効果を検証するための本実験に分け, 段階的に進める計画とした。

予備実験 1 では, 人の声および各種スピーカが物理的にどのように拡がるかを可視化する。図 2 に示すように円周上に 8 点のマイクを等角間隔 (中心に対し 45° ずつ) に配置し, 中心での発話またはスピーカ再生を録音し, 周波数スペクトルおよび指向性マップを作成する。

予備実験 2 では, ①実写, ②写実的エージェント, ③アニメ調の非写実的エージェントの 3 条件について, 同一内容・同一動作の接客映像を作成し, 音声は定位制御を行わないモノラルとしたうえで主観評価にて比較を行う。評価項目には, 体験の自然さ (顔や口の動きと音声の同期, 音源の定位感) および全体的な印象 (实在感, 信頼性, 人間らしさ) を含め, HRI で用いられる Godspeed Questionnaire や RoSAS 等の標準化尺度を組み込んだ評価シートを用いる。

本実験では, 予備実験 1, 2 で得た物理特性をモデル化し, 顔向きに応じた音響フィルタと複数スピーカ提示により口元方向への定位を実現するシステムを構築し, 中心仮説に対応する形で实在感・信頼性等の指標を用い有効性を評価する。

4. 計画の進行状況

(1) 執行期間と中断

本研究は科研費連動型の学内助成の元、2025 年 4 月から実施した。しかし、本研究で対象とした「視聴覚の整合と音声提示に関する検討」はデジタルヒューマンとの対話体験と音声制御を結びつける、より包括的な研究課題として NEDO「官民による若手研究者発掘支援事業（若サポ）」に採択が決まったことに伴い、科研費連動型の学内助成は打ち切りとなった。これにより、本助成のみに依拠する実施期間はおおむね 3 か月程度にとどまった。

(2) 実施した成果

計画の前半に位置づく予備実験 1, 2 を実施し、基礎検証を行った。

予備実験 1：音場の計測

円周 8 点マイクにより中心からの発話／再生を記録し、スペクトル分析および指向性の極座標表示を行った。話者として男性・女性を用い、音源として指向性スピーカ（SOUNDIC）および無指向スピーカ（Audio-Technica AT-MSP70TV）を用いた条件比較を行った。その結果、子音に多く含まれる高周波成分が話者前方で強く、後方で著しく減衰する傾向等を確認した（図 3・図 4）。Best ら [4] が示すように、音声定位には子音帯域に富む高周波成分が手がかりとなるため、本計測で得られた「前方と後方でスペクトル形状が大きく異なる」という事実は、画面上の顔向きと実スピーカ位置が一致しないときに、聞き手が無意識に期待する方向性と実際の音響がずれやすい、という設計上の論点を定量的な材料として考えられる。つまり、極座標マップ上で前方角域にエネルギーが集中し後方角域で相対的に低下するパターンは、定位制御で「口元方向の聴感」を補うべき周波数

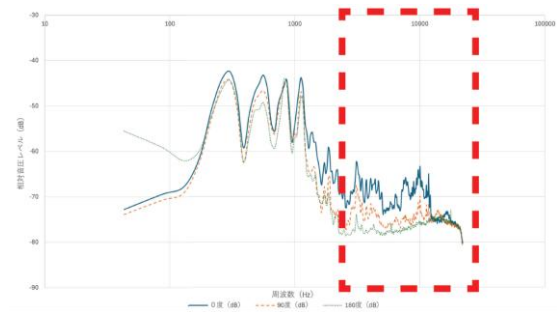


図 3 顔向きによる周波数特性の変化

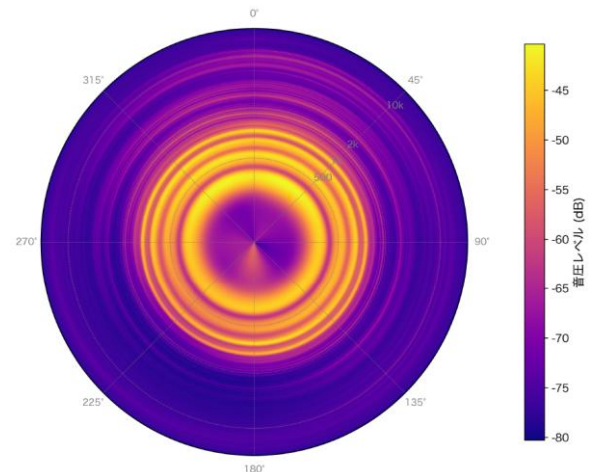


図 4 音声指向性の極座標プロット

帯を選ぶ際の参照となる。

予備実験 2：視覚刺激の整備

予備実験 2 および本実験に活用するため、Unreal Engine 上で動作する MetaHuman¹を用いた写実的エージェントの映像・アニメーション制作に着手した。また、NICE CAMERA²を用いてアニメ調の非写実的エージェントも作成した（図 5）。また、同一台詞・同一動作で 3 条件を比較可能とする手順を検証し、評価項目（自然さ・定位感、実在感・信頼性・人間らしさ等）に対応する質問紙の準備を進めた。本助成の執行終了時点では、実験に用いる映像は制作途上であり、期間中は MetaHuman を用いて、ブロックアウトからリギング・シーケンシングまでのパイプラインの確立に重点を置いた（図 6）。

¹ <https://www.metahuman.com/>

² <https://nicecamera.kidsplates.jp/>

(3) 到達範囲

主観評価を伴う予備実験 2 の完遂, および音声定位制御システムの統合・本実験までは, 上記のとおり本助成期間内には至っていない。取得データと UE 上の制作手順は, 引き続き上記の若サポの研究テーマにつながる研究基盤として蓄積する。

5. 今後の計画

本研究は, NEDO 若サポの研究シーズ「デジタルヒューマンとの対話体験を高める音声制御技術の開発」の下で発展的に推進する。本助成で得た音場データと UE/MetaHuman による写実的 CG アバタ生成の手順は, 当該シーズが掲げる課題の下位要素として位置づけられ, デジタルヒューマンと音声制御を接続する研究全体の基盤として活用する。

今後は, (1) 予備実験 2 の実施と主観データの分析, (2) 顔向き連動の音響処理とマルチスピーカ提示の実装, (3) 本実験による仮説の検証, の順で進める。学会発表・論文投稿については, バーチャルヒューマン, HCI, 音響関連の学会および査読付き論文への投稿を, 結果の到達に応じて検討する。

参考文献

- [1] J. Li, “The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 77, pp. 23-37, 2015.
- [2] A. P. Saygin, T. Chaminade, H. Ishiguro, J. Driver, and C. Frith, “The thing that should not be: predictive coding and the uncanny valley in perceiving human and humanoid robot actions,” *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, vol. 7, no. 4, pp. 413-422,

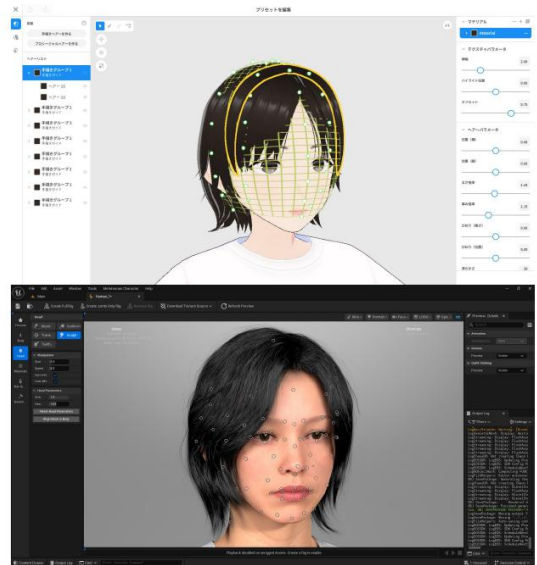


図 5 非写実的と写実的 CG アバタ

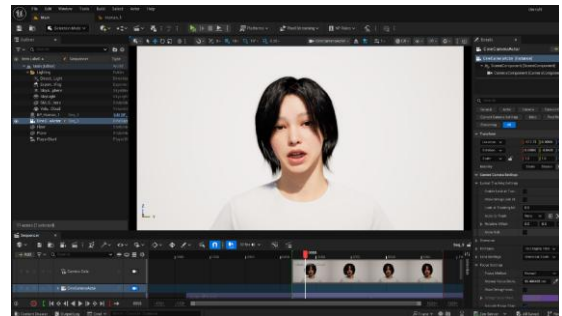


図 6 CG アバタ生成の様子 (MetaHuman)

2012.

- [3] C. D. Wickens, “Multiple resources and performance prediction,” *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 3, no. 2, pp. 159-177, 2002.
- [4] V. Best, C. J. Carlile, S. Jin, and C. van Schaik, “The role of high frequencies in speech localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 118, no. 1, pp. 353-363, 2005.
- [5] D. Kakinuma and S. Masuko, “An Investigation of the Effects of CG Avatar Gaze-Speech Misalignment on Addressee Perception,” in *Proc. NICOGRAPH International 2024*, P16, 2024.

ジェンダー多様性のための 多様性を持った情報教育教材

デザイン工学部（デザイン工学科） 野田 夏子

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

情報科学・工学分野の人材需要は高まり続けているが、日本において当該分野へ進む女子は依然として少ない。文部科学省「学校基本調査」（令和5年度）によれば、大学工学部の女子学生割合は17.3%にとどまり、情報工学を含む電気通信工学分野では10.5%とさらに低い。情報分野における人材確保と多様な視点の取り込みの観点から、このギャップの解消は重要な課題となっている。

教育学分野では、学習者に題材や進め方の選択の余地を与えること、興味や経験・習熟に応じて題材や難易度を変えた教材を用いることが、学習意欲や課題遂行を高めることが報告されている。他方で、扱う題材に「男性的」とされるステレオタイプが強い環境では女子の所属感や関心が低下することも示されており、情報教育においてもジェンダーを含む多様な学習者に合う教材の整備が望まれる。しかし、これまでの研究はプログラミング教育を中心とした個別の教材提案が主であり、情報教育全般を対象として、ジェンダーを含む多様な学習者一人ひとりに合う教材を体系的に作る方法はまだ確立されていない。

報告者は、これまでソフトウェアプロダクトライン（SPL）開発における可変性モデリングに関する研究を継続して行ってきた。可変性モデリングとは、ソフトウェア製品群

の共通部分と製品ごとに異なる可変部分を整理し、個別の製品を体系的に作るための形式的なモデリング技法である。この技法を情報教育の教材設計に応用すれば、多様性を備えた情報教育教材を体系的に作り出すことができ、ジェンダーを含む多様な学習者一人ひとりに合う教材を提供できるのではないかと考えた。本報告書が対象とする研究は、この着想に基づき、ジェンダー多様性に対応するために多様性を持った情報教育教材を体系的に作るための方法論を構築することを目指すものである。

上述の方法論は、理論的検討と実証的検証の双方を含むものである。報告者は2025年度をその準備年度と位置づけ、方法論の枠組みを具体化するための予備的検討と、後続の本格的な研究計画の策定を行った。本報告書は2025年度の取り組みの単年度報告であるが、後続研究計画と一体の関係にあり、本報告での検討が後続計画の基盤となっている。

2. 研究計画

2025年度は、前節で述べた方法論構築の準備年度として位置づけ、次の2つを柱として取り組むこととした。

（1）情報教育教材の予備的分析：教材設計に可変性モデリングを応用することの妥当性と方向性を見極めるため、まず教材の側に

存在する多様性の実態を把握する。具体的には、中学校技術科目および高等学校情報科目の教科書を対象として収集・分析し、教材として可変性を与えうる要素を整理する。

また、現在使用されている教科書に、多様性の観点から課題となる点がないかを調査する。

（２）後続研究計画の検討と策定：上記分析の結果と関連する研究の動向を踏まえ、可変性モデリングを教材設計に応用する方法論をどのような構造で具体化すべきかを検討する。検討結果を、次年度以降の具体的な研究計画として取りまとめる。

両者は相互に関連しており、並行して進めることで、準備年度としての密度と後続研究との一体性を確保する設計とした。あわせて、後続研究で予定する教育実験のための連携先（附属中学高等学校）との協議や、関連分野の研究動向の整理、研究倫理面での事前検討にも着手することとした。

３．計画の進行状況

前節に述べた２本柱について本格的に取り組み、それぞれ所期の成果を得た。以下、順に述べる。

（１）情報教科書の予備的分析：中学校技術・家庭科技術分野および高等学校情報科の教科書のうち、現行学習指導要領下で発行されている主要なものを収集し、分析を実施した。分析では、単元構成と取扱題材の俯瞰を行ったうえで、教材として可変性を与えうる要素を仮説的に整理した。

整理の結果として、仮説的に次の４つの軸を抽出した。第一に「対象工程」（要件分析・設計・実装・テスト等のうち、どの工程

に焦点を当てるか）。第二に「題材ドメイン」（日常生活的題材、社会課題的題材、産業応用的題材など）。第三に「学習方法」

（座学、個人演習、グループワーク、プロジェクト型学習など）。第四に「評価方法」

（知識確認型、成果物評価型、プロセス評価型など）である。これら４軸について、同一教科書内に複数の選択肢が用意されている場合や、教科書間で異なる立場が採られている場合を整理し、可変性として扱える範囲のドラフトを得た。

多様性の観点からの課題の抽出については、ソフトウェア開発ツールにおけるジェンダー多様性に関するバグを発見する手法である GenderMag (<https://gendermag.org/>) を応用し、高等学校「情報Ⅰ」の教科書について、ジェンダー多様性に関するバグの分析を行った。顕著なバグの発見には至らなかったが、実習を伴う学習を促す単元においてジェンダー多様性を阻害し得る要因が存在することを確認した。

（２）後続研究計画の検討と策定：上記の教科書分析を進める過程で得た知見と、関連分野の文献調査（SPL 可変性モデリングの動向、e ラーニング等における学習者モデリングの動向、情報教育におけるジェンダー配慮の研究動向）を組み合わせ検討を進めた結果、以下のような整理に至った。

第一に、可変性モデリングを教材設計へ応用するにあたっては、個別の教材を直接提案するアプローチよりも、多様な教材を体系的に生み出すための導出枠組みそのものの理論基盤を整備することが本質的に重要である。教科書分析で得られた４軸からも分かるとおり、教材の取りうる選択肢は多岐にわたり、

個別教材として網羅することは現実的でない。導出枠組みの理論基盤があれば、個別教材は必要に応じて生成できる。

第二に、ジェンダーを含む多様な学習者一人ひとりに合う教材を導出するためには、教材側の可変性だけでなく、学習者側の特徴も可変性として明示的に表現し、両者の対応関係を扱う必要がある。従来の SPL 分野では可変性モデリングはプロダクト側に限って用いられてきたが、教材設計においては利用者側にも同様のモデリングを適用することで、対応関係の記述に基づく体系的な導出が可能になると考えられる。

第三に、上記の方向性を具体化するためには、①可変性として扱う要素の同定とカタログ化、②教材側・学習者側可変性モデルおよびその対応関係のメタモデル定義、③メタモデルに基づく教材導出アルゴリズムの設計、という3段階の構成が妥当である。これら3段階は、2か年から3か年程度の研究期間で順を追って取り組むのが現実的である。

以上の整理を基に、後続研究計画を策定した。あわせて、2026年度以降のパイロット教育の実施に向けて、附属中学高等学校との連携体制についても担当者との協議を開始した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、前節で述べた整理に基づき策定した研究計画に従って、方法論の構築を本格的に進める。後続計画の各年度の概要は次のとおりである。

【1年目】2025年度の教科書分析の成果

を出発点として教材側の可変性カタログを完成させる。あわせて、これまで実施してきた女子高校生サマー・インターンシップや女子小中学生向けプログラミング講座の参加者アンケート・観察記録の体系的分析と、関連する学習分析研究の文献調査を進め、学習者側の可変性カタログを構築する。これら2種のカタログを基に、可変性モデルのメタモデル第1版を策定する。

【2年目】メタモデル第1版を入力として、教材導出アルゴリズムの第1版を策定する。具体的な教材側および学習者側の可変性モデルを記述し、第1版のアルゴリズムによる教材の試行的導出を行う。導出された教材に必要な手作業の補完を加えたうえで、附属中学高等学校と連携してパイロット教育を実施し、モデル・アルゴリズム両面のフィードバックを得る。所属機関の倫理審査委員会への研究計画の提出・承認取得、および生徒・保護者からの同意取得などの体制も本年度中に整える。

【3年目以降】メタモデルおよび導出アルゴリズムを改良し、完成版とする。完成版アルゴリズムの参照実装としてプロトタイプツールを開発し、完成版で導出した教材を用いた中学・高校での教育を再度実施することで、方法論全体の妥当性を総合的に評価する。本年度をもって本研究の主要な学術的成果を確定する計画である。

学会・論文等の投稿・発表状況について、本報告時点で、論文としての公表・発表はない。前述のとおり教科書分析と後続研究計画の策定を中心とした準備的活動と位置づけたためである。ただし、本年度に得られた成果の速報とソフトウェア工学研究コミュニティ

からのフィードバックを得るため、以下の口頭発表およびポスター発表を実施した。

- (ポスター発表) ジェンダーインクルーシブの観点による高校情報教科書の調査 (塚田 愛加, 野田 夏子) 第 32 回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ, 日本ソフトウェア科学会, 2025 年 11 月
- (口頭発表) GenderMag による高校情報科目教科書の分析, (塚田 愛加, 野田 夏子) ウィンターワークショップ 2026・イン・静岡, セッション「ソフトウェア工学とダイバーシティおよびインクルージョン」, 情報処理学会ソフトウェア工学研究会, 2026 年 1 月

次年度以降の後続研究で得られる成果は、速やかに国内外の研究コミュニティへ発信する計画である。

国内では、情報処理学会ソフトウェア工学研究会、ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム (SES)、日本ソフトウェア科学会ソフトウェア工学の基礎ワークショップ

(FOSE) 等での発表を計画している。報告者は情報処理学会ソフトウェア工学研究会ダイバーシティワーキンググループ主査、および情報処理学会ダイバーシティ委員会委員を務めており、これらのコミュニティとの連携を通じて研究成果の議論と検証を進める。

これらの発表では、単に完成した教材やツールを提示するだけでなく、本研究で得られた可変性カタログやメタモデルを、教育実践の設計過程を記述するための共通語彙として位置づける点を強調する。特に、題材ドメイ

ンや学習方法の選択が学習者の関心・経験とどのように結びつくかを整理することで、情報教育における多様性配慮を個別教員の経験則に依存させず、再利用可能な設計知として蓄積できることを示す予定である。国内の研究会では、教育現場の制約を踏まえた実装可能性についても意見を得て、後続年度のパイロット教育に反映させる。

本研究で構築する枠組みは文化背景の違いも可変性のひとつとして扱える一般性を備えるため、国際的な展開も視野に入れた成果発信を行っていく。国際発信では、日本の中等教育における情報科・技術科の制度的特徴を説明したうえで、本研究の方法論が特定の学年や教科書に閉じない抽象度を持つことを示す。とりわけ、教材側の選択肢と学習者側の特徴を独立にモデル化し、その対応関係を明示する点は、文化的背景や教育制度が異なる地域にも適用可能である。VARIABILITY (ソフトウェアプロダクトラインに関する SPLC 等の主要会議群を発展統合した国際会議シリーズ)やモデル駆動工学のフラッグシップ会議である MODELS の他、教育工学関係の論文誌・会議への投稿も検討する。

本報告では、ジェンダー多様性に対応するために多様性を持った情報教育教材を体系的に作るための方法論を構築するための準備として 2025 年度に実施した情報教科書の調査分析、及びそれに基づいて構築した方法論骨子について述べた。今後も研究を継続し、進捗に応じて速やかに学術的成果として公表していく予定である。

デジタルメディアを介した記憶の保存と死者祭祀・追悼 儀礼デザイン

デザイン工学部（デザイン工学科） 瓜生 大輔

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

写真や映像などのデジタルメディアは、人々が生きた足跡を残し、記憶と密接に結びつく。しかし、日々蓄積されるデジタルメディアをどのように保管し、鑑賞するかは、データ量の増加と種類や扱い方の多様化に伴い、一筋縄ではいかない状況となっている。これらのメディアは、自分が生きている間には過去を振り返る助けとなり、その人の死後は、残された人に故人を想起させるものとなる。

一方今日、故人の偲び方、死者祭祀・追悼儀礼は新たな局面を迎えつつある。SNS の普及により、家族や血縁以外のつながりが強固になるなど、デジタルメディアをやりとりする人間関係が多様化した。生成 AI 技術の普及により、実際には記録されていないデータを人工的に生成できるようになった。生成されたデータが、人々の記憶にどのように作用するのか、とりわけ「死者 AI」が社会に与える影響については未解明な点が多い。

さらに、葬送儀礼の個人化が進み、従来型の葬儀や、墓や仏壇などを介した死者祭祀の形は大きく変わりつつあり、新たなデザインが求められる時代となった。コロナ禍を経て葬送儀礼の簡素化がより進んだ一方で、死者祭祀・追悼儀礼におけるデジタル技術・メディアの存在感はさらに増している。

本研究では、このような背景をふまえ、次の 10～20 年を見据えたデジタルメディアを介した記憶の保存方法と死者祭祀・追悼儀礼

のデザインに取り組む。これまで別々に検討されてきた生前のデータ保存、葬儀（お別れ会）、死者祭祀・追悼儀礼を一気通貫で検討し、一つの道筋を提示することを目的とする。

2. 研究計画

2025 年度の研究計画は、2 つの項目に大分される。1 つ目は、当該課題に関する国内外での実地調査研究、2 つ目は、昨年度制作したバーチャル葬儀に関するフィクション映画[1]を通じた研究である。

2.1 実地調査

国内外の事例収集に取り組んだ。科学研究費挑戦的研究「遠隔葬儀参列研究：事例調査とデザイン実践」（2022～2024 年度、以下「挑戦的研究」と表記）では、多くの移民が暮らすオーストラリア・メルボルンにおける葬儀のインターネット配信の需要と実践状況を調査した。2025 年度は、オーストラリアと同様に複数の人種が小さい国土の中で共生するシンガポールでの調査を実施した。

2.2 映画を通じた研究

挑戦的研究の成果のひとつとして、バーチャル葬儀が普及した世界をフィクション映像作品として描いた短編映画『それはかつてあったから』を制作した。2025 年度中にこの映画の上映会を各所で開催し、記述式アンケートを通して鑑賞者からのフィードバックを収集した。この活動を継続し、本研究課題であるデジタルメディアを介した記憶の保存と死

者祭祀・追悼儀礼デザインに関わる次の研究ビジョン、具体的なデザインアイデアの検討に取り組んだ。

3. 計画の進行状況

3.1 シンガポールでの調査

シンガポールでは2つの施設を訪問・調査した。ここではその概要を報告する。

3.1.1 Nirvana Memorial Garden Singapore

Nirvana（富貴）グループは1990年にマレーシアで設立された。現在、マレーシア（ヘッドクォーター）、シンガポール、タイ、ベトナム、インドネシア、カンボジアに拠点を持つ。今回訪れた Nirvana Memorial Garden Singapore は2008年に竣工し、2009年に納骨堂事業を、2017年に葬儀事業を開始した。

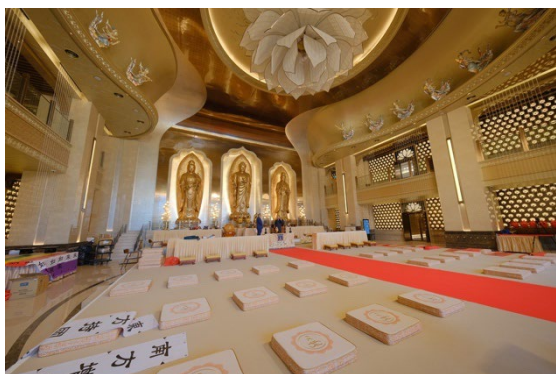


図1 各種儀礼を行うためのホール



図2 納骨室

施設内には各種儀礼を行うためのホール（図1）や様々な意匠の納骨室（図2）が配備されている。現在、シンガポールの民間納骨堂では、個々人の納骨壇を自由にアレンジすることが慣例となりつつある（図3）。後述す

る Woodlands Memorial でも納骨壇のオリジナルアレンジパッケージが用意されている。一方で、他の公共納骨堂は共通の石板に規格化された彫刻が施されている。この点も民間の納骨堂を選択する利点として認知されていると考えられる。



図3 案内してくださったスタッフが所有する納骨壇

3.1.2 Woodlands Memorial

Woodlands Memorial は2023年に竣工・開業した9階建ての統合型施設である。仏教・道教向け斎場、キリスト教向け斎場（図4）、宗教不問の斎場、仏教・道教向け納骨堂（図5）、キリスト教向け納骨堂、エンバーミング室などを備える。オーナーは不動産業を生業とし、同施設で初めて葬祭関連事業を手掛ける。

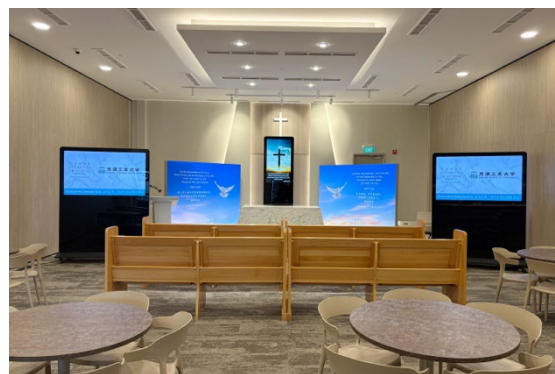


図4 キリスト教向け斎場

マレーシア・ジョホールバルとの国境に近い郊外に位置する立地は、新規参入の同社にとって大きなハンデとなっている。Facebookなどのソーシャルメディアや Google 広告を

活用するのみならず、デジタルメディアとの距離がある高齢者からの認知を集めるために、シンガポール中の住居へのチラシのポスティングも行っている。また、開業当初からシンガポール中の葬祭ディレクターとの関係づくりに力を入れ、大規模会館葬の選択肢として受容されつつある。



図5 仏教・道教向け納骨堂

Woodlands Memorial の納骨壇は韓国製で、図6のように、扉を前に開くと物が供えられる構造になっている。透明なレイヤーに写真や書誌情報をプリントするサービスも提供されている。Nirvana Memorial と同様に、個々の納骨壇の中を自由にアレンジすることが慣習化している様子が見て取れる。生花を供えている納骨壇も散見され、毎日のように参拝に訪れる遺族もいるという。



図6 花が供えられた納骨壇

3.2 映画を通じた研究

3.2.1 上映会の実施

2025 年度中に合計 16 回の対面での上映会、2 回のオンライン上映会を開催した。また異

なる文化・宗教的背景を持つ視聴者からの意見も収集するために、横浜で開催された国際会議 ACM CHI '25 会場近くでの上映会、またシンガポール国立大学での上映会なども実施した。対面上映会は以下の日程で実施した。

- 2025/3/7 芝浦工業大学豊洲キャンパス
- 4/17 Death フェス 2025 (於 渋谷ヒカリエ) での上映会 (東京都渋谷区)
- 4/30 kino cinéma 横浜みなとみらい (神奈川県横浜市)
- 5/1 芝浦工業大学豊洲キャンパス
- 6/21 芝浦工業大学豊洲キャンパス
- 7/10 THEATER ENYA (佐賀県唐津市) 唐津国際映画祭 2025
- 6/19-21 Movie's cafe MATERIAL tanimach (大阪市中心区) 第3回 MATERIAL ショートムービーフェス
- 7/25 情報科学芸術大学院大学 [IAMAS] シアター (岐阜県大垣市)
- 9/6 とわノイエ鶴田 オープン1周年記念感謝祭 (栃木県宇都宮市)
- 9/16 日本宗教学会 第84回学術大会 第6部会パネル「バーチャル葬儀のゆくえー映画で描く近未来像と世界の最新事例ー」於上智大学四谷キャンパス (東京都千代田区)
- 9/28 とわノイエ峰 オープン1周年記念感謝祭 (栃木県宇都宮市)
- 10/25 千葉商科大学 CUC 教室映画講座 第1回『それはかつてあったから』上映会〜デジタル社会における新しい弔いのかたち〜 (千葉県市川市)
- 10/31 College of Design and Engineering, シンガポール国立大学 (Singapore)
- 12/13 芝浦工業大学豊洲キャンパス
- 12/21 別府ブルーバード劇場 (大分県別府市)
- 2026/1/24 伝統文化交流館 (東京都港区) 「エコプラザ・伝統文化交流館連携企画

吊う？吊わない？”死”のデザインの現在地」

3.2.2 論文執筆

これらの上映会を通して、のべ 140 件の記述式アンケートの回答を得た。アンケート結果の質的分析を行い、今後のバーチャル葬儀やデジタルメディアを介した記憶の保存と死者祭祀・追悼儀礼デザインに関わるテーマと複数のデザイン案をまとめた論文を ACM DIS '26 (Designing Interactive Systems) に投稿し、採録が決定した[5]。

映画の鑑賞者の中には、看取りに関わる医療・介護従事者も含まれ、彼らとの対話の中で、病院や高齢者住宅といった場所からのバーチャル参列環境の必要性が指摘された。図 7 は上記論文に掲載したスケッチのひとつであり、今後取り組むべき研究課題を可視化したものである。



図 7 病室からバーチャル参列する様子

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本研究を基盤とする研究課題が科学研究費基盤 (B) 「デジタルメディアを介した吊いのデザイン：事例調査・解釈と創作活動の横断的实践」(2026～2029 年度) に採択され、研究分担者とともに継続実施する。同課題は、主にバーチャル葬儀、死者 AI に関わる調査と、具体的な吊いのデザイン提案を同時並行する分野横断型の研究プロジェクトである。

学会、論文等投稿・発表状況 (発表・掲載済)

[1] Daisuke Uriu and Shun Arima. 2025. Designing Virtual Funerals as a Design Fiction: A Film-Based Exploration of Near-Future Memorial Rituals. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '25)*. Article 269, 1-19.

<https://doi.org/10.1145/3706598.3713399>

[2] Daisuke Uriu, Lena Paulsen. 2025. “A Virtual Funeral in the Hands of the Family.” *Mechademia*. Volume 18, Number 1, Winter 2025, pp. 111-138, University of Minnesota Press.

<https://muse.jhu.edu/article/976616>

[3] 瓜生 大輔. 2025. 「オーストラリアのバーチャル葬儀—「移民の国」での適応状況—」 <日本宗教学会 第 84 回学術大会 第 6 部会, 東京, 2025 年 9 月 16 日 (火) 上智大学 (東京都)>, 『宗教研究 第 99 巻 別冊 第 84 回学術大会紀要特集』, p. 78.

[4] 瓜生 大輔. 2026. 「技術革新と死者祭祀手法の変遷—1990 年代以降の変容と今後の展望」, 『国立歴史民俗博物館研究報告』, 第 257 集, pp.125-142.

学会、論文等投稿・発表状況 (採録予定)

[5] Daisuke Uriu and Shun Arima. 2026. Exploring Design Opportunities in Virtual Funerals: Audience Feedback and Reflections on the Film Interfuit. In *Designing Interactive Systems Conference (DIS '26)*. 17 Pages.

<https://doi.org/10.1145/3800645.3812896>

高速応答性を有する柔軟センサーによる振動計測

工学部 細矢 直基

共同研究者

Universitas Gadjah Mada, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Ardi Wiranata

1. 緒 論

エラストマーで構成される柔軟センサーは、人の皮膚や関節の動き、ソフトロボットの運動などの計測に適していることから、様々な検討がなされている (Petronienė et al., 2024, Pyo et al., 2021). 柔軟センサーはその動作原理に基づき、静電容量型と抵抗型の2種類に大別される。静電容量型センサーは、誘電体層を両側から柔軟電極で挟んだサンドイッチ構造を有しており、外力の作用によりこれが変形すると、電極の面積および誘電体層の厚さが変化し、静電容量が変化する。このセンサーの変形量と静電容量の相関から変位量を計測する。抵抗型センサーは、エラストマー内または表面に形成された柔軟電極（導電経路）の変化に伴い電気抵抗が変化し、これを変位量として捉える。静電容量型は低消費電力や低ヒステリシス性、抵抗型は簡便な構造と高い感度という特徴をそれぞれ有している (Dong et al., 2021, Qin et al., 2021, Yuan et al., 2024).

これまでに、アクリル系エラストマーを基材とし導電性カーボンナノチューブ (Carbon nanotube: CNT) 粉末を柔軟電極とした抵抗型センサーによる膝の曲げ動作の計測 (Minaminosono et al., 2023)、あるいはシリコーンエラストマ (PDMS) を基材とし CNT 粉末を電極とした抵抗型センサーによる最大 40 Hz の振動応答計測 (Wiranata et al., 2021) が報告されている。また、シリコーンエラストマ (Ecoflex) を基材、カーボンブラック粉末を柔軟電極とし、グローブに組み込んで手の動きを検出する静電容量型センサー (Shintake et al., 2018) や、PDMS を基材、CNT 粉末を電極とし、流体エラストマーアクチュエータの静的圧力およびおよそ 100 Hz までの振動応答を計測する静電容量型センサー

(Kurata et al., 2025) も研究されている。

一方で、柔軟センサーの電極の材料として用いられる CNT は非常に高価であるため、社会実装する上で障害となることが予想される。著者らは、低コスト化を目的に天然ゴムと黒鉛電極からなる柔軟センサーを製作し振動応答を計測したが、10 Hz までしか振動応答を計測できなかった (Fujimaki et al., 2023).

本研究では、数十 Hz 以上の振動応答が計測可能な、低コストな柔軟センサーを検討する。柔軟電極材料を高価な CNT から安価な黒鉛に変更する。基材を PDMS、電極を CNT 粉末 (PDMS/CNT)、黒鉛粉末 (PDMS/黒鉛) とした、静電容量型および抵抗型の柔軟センサーの振動実験により、周波数応答特性を評価した。

2. 柔軟センサーの周波数応答性評価

2.1 柔軟センサーの構造

本研究では、CNT 粉末と黒鉛粉末を誘電エラストマー膜上に刷毛で塗布することで、柔軟電極を形成した。図 1 に静電容量型と抵抗型の柔軟センサーの構造を示す。静電容量型では、エラストマー膜の両面に、抵抗型ではエラストマー膜の片面に柔軟電極が塗布される。さらに、柔軟電極の損傷を防ぐためにエラストマー膜で保護した。

2.2 振動実験システム

図 2 に、柔軟センサーの周波数応答を評価するための振動実験システムを示す。電磁加振器に取り付けられた加振ロッドにより柔軟センサーを変形させ、その時の静電容量値および抵抗値の変化を LCR メーターで計測した。加振周波数は、10 Hz、60 Hz の2種類とした。柔軟センサーの変形量（変位量）は、電磁加振器の加振テーブル上に取り付けられた加速度センサーにより加速度として計測し、得

られた加速度を積分することで変位を算出した。

2.3 振動実験システム

図 3 に示すように、本研究で検討した各エラストマーと柔軟電極の組み合わせによる柔軟センサーは、10 Hz での振動応答を計測できる。図 3(a)および(c)に示すように、同じエラストマー基材 (PDMS) に異なる電極 (CNT または黒鉛) を用いた場合、静電容量型柔軟センサーでは理想的な調和振動波形が得られた。図 3(b), (d)に示すように、PDMS 基材とし、CNT または黒鉛を電極とする抵抗型柔軟センサーでは、時刻歴波形がゆがんでいる。さらに、黒鉛電極を用いた静電容量型および抵抗型柔軟センサーは、CNT 電極を用いた場合よりも大きな抵抗値および静電容量値の変化を示した。

図 4 に、60 Hz における振動応答の時刻歴波形を示す。各図は図 3 に対応している。図 4 に示すように、抵抗型および静電容量型の両方の柔軟センサーは、60 Hz までの振動応答を計測することができた。ただし、図 4 に見られる傾向は図 3 と同様であった。

3. 結 論

本研究では、10 Hz 以上の高周波数帯域の振動応答が計測できる柔軟センサーを検討した。さらに、社会実装を可能とするために、柔軟センサーに用いられる電極材料を、高価な CNT 粉末から安価な黒鉛粉末に置き換えることで、低価格化することを目指した。

計測原理と周波数応答性を評価するために、静電容量型および抵抗型の柔軟センサーを検討した。静電容量型においては、CNT 粉

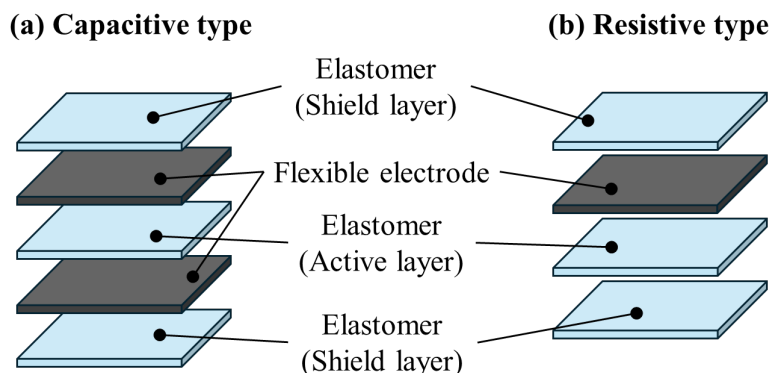


Fig. 1 Structure of flexible sensors.

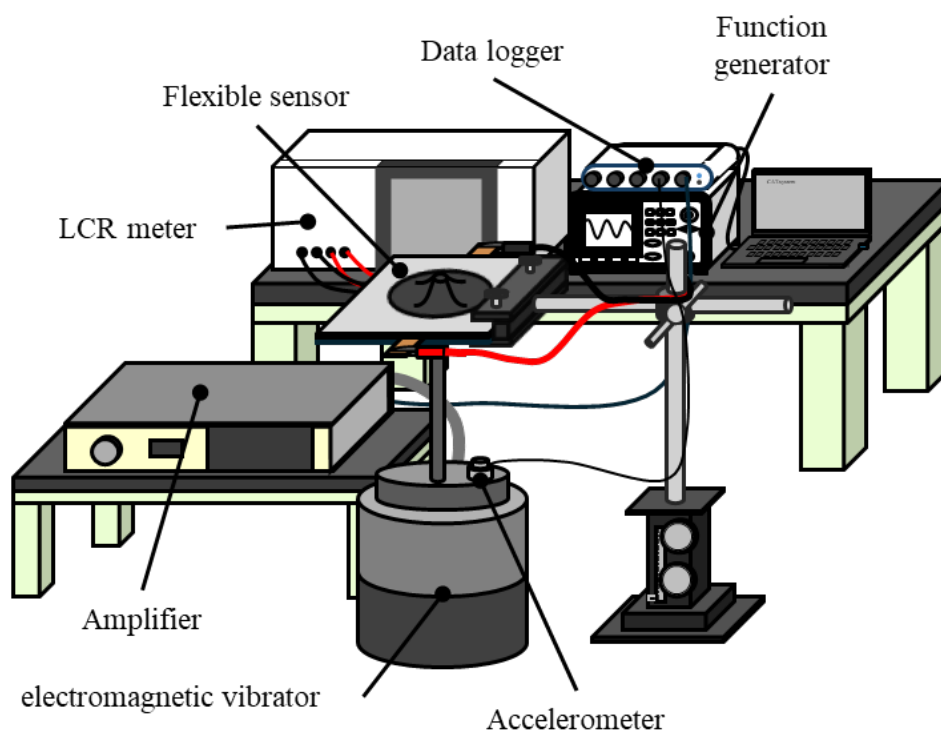


Fig. 2 Experimental system to evaluate in high frequency response of capacitive- and resistive-flexible sensors.

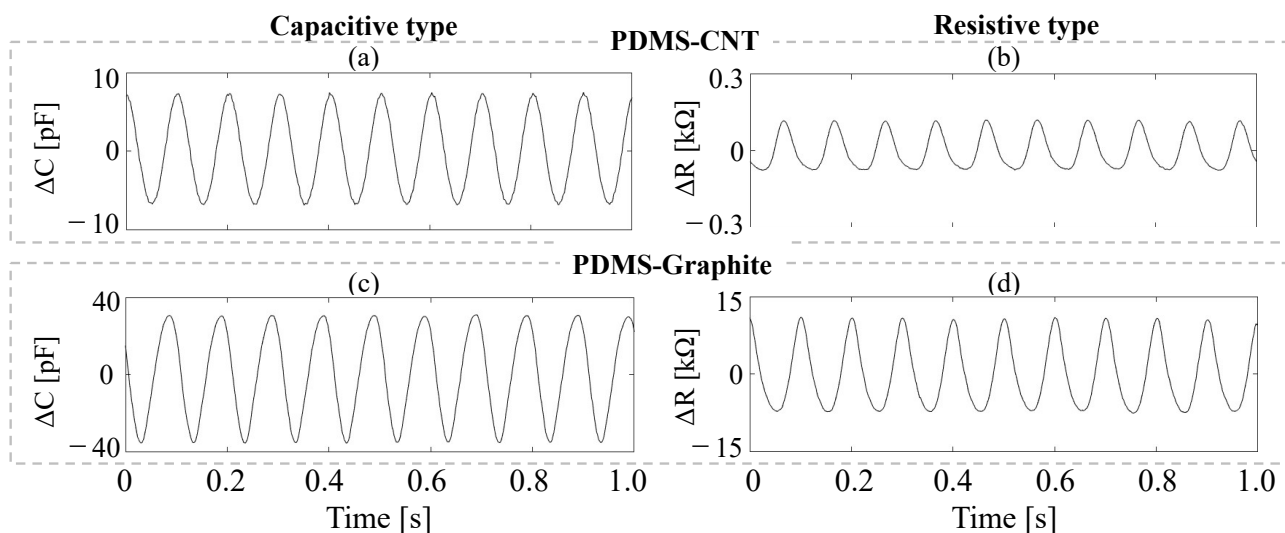


Fig. 3 Time-history waveforms measured by each flexible sensor at a vibration frequency of 10 Hz. (a) PDMS/CNT capacitive-, (b) PDMS/CNT resistive-, (c) PDMS/graphite capacitive-, and (d) PDMS/graphite resistive-type sensors.

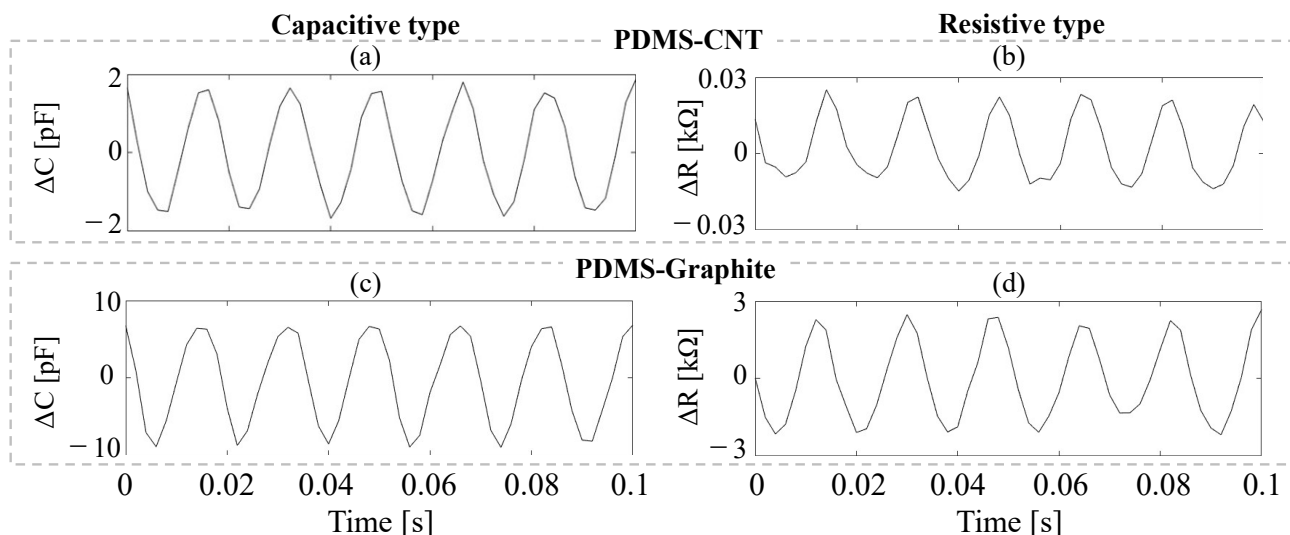


Fig. 4 Time-history waveforms measured by each flexible sensor at a vibration frequency of 60 Hz. (a) PDMS/CNT capacitive-, (b) PDMS/CNT resistive-, (c) PDMS/graphite capacitive-, (d) PDMS/graphite resistive-type sensors.

末から黒鉛粉末に置き換えても、60 Hz までの周波数帯域であれば、波形が歪むことなく振動応答を計測できることがわかった。抵抗型においては、電極材料を変更しても同様の周波数帯域まで計測できるが、波形が歪むことがわかった。また、この周波数帯域までであれば、電極材料をナノメートルサイズの CNT 粉末からマイクロメートルサイズの黒鉛粉末へと変更することで、電極材料の大きさが約 1000 倍異なる条件においても、周波数応答性はほぼ同等であることがわかった。さらに、両型式の柔軟センサーにおいて、電極材料として黒鉛粉末を用いることにより、計測感度が向上することがわかった。

4. 今後の予定

現在までに得られた成果を整理し、今後検討すべき内容を精査する。また、追加実験によりデータの信頼性を高め、学術論文の投稿準備を進める。

5. 文 献

Chen, X., An, J., Cai, G., Zhang, J., Chen, W., Dong, X., Zhu, L., Tang, B., Wang, J. and Wang, X., Environmentally Friendly Flexible Strain Sensor from Waste Cotton Fabrics and Natural Rubber Latex, *Polymers*, Vol.11, No.3 (2019), 404.

Dong, T., Gu, Y., Liu, T. and Pecht, M., Resistive and capacitive strain sensors based on customized compliant electrode: Comparison and their

wearable applications, *Sensors and Actuators A: physical*, Vol.326 (2021), 112720.

Fujimaki, R., Maeda, S., Shintake, J. and Hosoya, N., Vibration sensor with natural rubber, *Proceedings of the Dynamics and Design Conference 2023*, Paper No.251, Japan. (in Japanese)

Kurata, H., Wiranata, A., Maeda, S., Garcia Cava, D., Giorgio-Serchi, F. and Hosoya, N., Dynamic response characterization of soft fluidic actuators via dielectric elastomer sensors, *Measurement*, Vol.246 (2025), 116616.

Ma, J., Yu, P., Zhou, M., Huang, H., Cai, Z., An, H., Shu, Z., Zhu, Y. and Tan, L., Mechanically Robust and Ultrasensitive Natural Rubber/PEDOT:PSS Foam for Piezoresistive Sensors and Motion Monitoring, *ACS Applied Electronic Materials*, Vol.7, Issue14 (2025), pp.313–321.

Minaminosono, A., Ohsugi, Y., Yamaguchi, Y., Wiranata, A., Sawada, H., Hosoya, N. and Maeda, S., Pre-Strain Method for Stretchable Strain Sensors With Linear Sensitivity Using Acrylic Elastomer and CNTs Powder, *IEEE Access* Vol.11 (2023), pp.125790–125799.

Nendza, M., Hazard assessment of silicone oils (polydimethylsiloxanes, PDMS) used in antifouling-/foul-release-products in the marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.54 (2023), pp.1190–1196.

Petronienė, J.J., Dzedzickis, A., Morkvėnaitė-Vilkončienė, I. and Bučinskas, V., Flexible strain sensors: Recent progress 2016-2023, *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol.366 (2024), 114950.

Pyo, S., Lee, J., Bae, K., Sim, S. and Kim, J., Recent Progress in Flexible Tactile Sensors for Human-Interactive Systems: From Sensors to Advanced Applications, *Advanced Materials* Vol.33 (2021), 2005902.

Qin, J., Yin, L., Hao, Y., Zhong, S., Zhang, D., Bi, K., Zhang, Y., Zhao, Y. and Dang, Z., Flexible and Stretchable Capacitive Sensors with Different Microstructures, *Advanced Materials* Vol.33

(2021), 20008267.

Shintake, J., Piskarev, Y., Jeong, S.H. and Floreano, D., Ultrastretchable Strain Sensors Using Carbon Black-Filled Elastomer Composites and Comparison of Capacitive Versus Resistive Sensors, *Advanced Materials Technologies*, Vol.3 (2018), 1700284.

Wiranata, A., Ohsugi, Y., Minaminosono, A., Mao, Z., Kurata, H., Hosoya, N. and Maeda, S., A DIY Fabrication Approach of Stretchable Sensors Using Carbon Nano Tube Powder for Wearable Device, *Frontiers in Robotics and AI*, Vol.8 (2021), 773056.

Yuan, H., Zhang, Q., Zhou, T., Wu, W., Li, H., Yin, Z., Ma, J. and Jiao, T., Progress and challenges in flexible capacitive pressure sensors: Microstructure designs and applications, *Chemical Engineering Journal*, Vol.485 (2024), 149926 .

単結晶 PZT-MEMS アクチュエータ

工学部 吉田 慎哉

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

圧電アクチュエータは変位精度、応答速度、発生力に優れており、現在産業分野の機械装置から、携帯電話などの小型電子機器まで広く応用されている。MicroElectro Mechanical Systems (MEMS) の分野においても、圧電薄膜を搭載したアクチュエータは、低電圧かつ比較的大きな駆動力を発生でき、インクジェットプリンターヘッド、走査型ミラーデバイス、デフォーマブルレンズ、マイクロスピーカー、半導体チップ冷却器などに用いられている。

現在、圧電 MEMS アクチュエータには、大きな圧電性能を有するモルフォトロピック相境界組成のチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) 多結晶薄膜が主に用いられている。しかし、駆動電圧に対する変位の非線形性があるという欠点がある。特に大きな駆動電圧を印可したとき、これが顕著となる。

一方、正方晶 PZT 単結晶薄膜は、良好な線形性を示すことが報告されている。したがって、これを組み込めば線形性のよい圧電 MEMS アクチュエータを実現できる。しかし、単結晶薄膜の圧電性能は、多結晶の 60~70% と小さい。ゆえに、単位駆動電圧に対するアクチュエータの絶対的な変位量は小さくなってしまふ。これは、外因性要因の電場誘起歪みが、正方晶の PZT 単結晶薄膜では小さいことに起因する。

そこで本研究では、大変位・良線形性を持つ圧電 MEMS アクチュエータの実現を目指し、

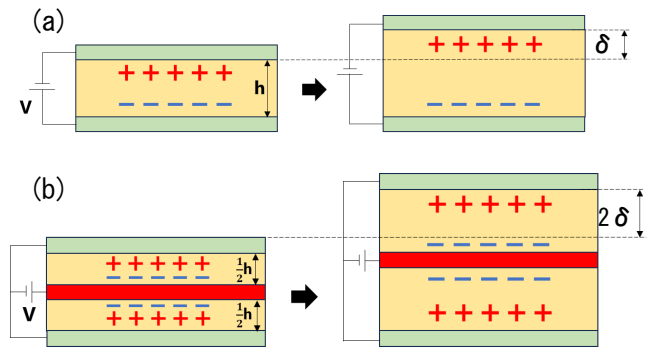


図 1. 積層型圧電アクチュエータの原理の概略図 (a) 圧電体単層に駆動電圧 V を印加した際の変位 δ 。(b) 圧電体二層構造に電圧を印加した場合。

中間電極層を介した PZT 単結晶薄膜の積層アクチュエータを提案する。その原理を以下に記す。圧電アクチュエータは、電圧を印加することで印加した電圧に応じて圧電体が歪む逆圧電効果を用いているが、そのひずみ量 S は、圧電定数を $d[\text{m/V}]$ 、電界強度 $[V/\text{m}]$ を E とすると次の式(1)で表される。

$$S = d \times E \quad (1)$$

式(1)から、駆動電圧が一定のとき、圧電薄膜の厚さは全体の変位量に影響を与えないことがわかる。図 1(a)のように、厚さ h の圧電薄膜に対して駆動電圧 V を印加した場合、変位 δ は、次式となる。

$$\delta = d \times V \quad (2)$$

両辺を h で除すると

$$\delta/h = d \times V/h \quad (3)$$

となり、(1)と一致する。

ここで図 1(b)のように、中間電極層を介して圧電体を積層化し、中間層を基準に上下方

向に分極させるとする。ただし、全体の厚さは図 1(a) と等しくする。ここで駆動電圧 V を印加すると、原理的には、図 1(a) の変位量の二倍にできる。この多層薄膜構造を Si などの弾性板の上に形成すれば、圧電 MEMS アクチュエータとなる。このコンセプトは、多結晶 PZT を用いた研究にて報告されている^[1~3]。しかし、単結晶 PZT での実施例はほとんどない。

我々は、この積層される圧電体を PZT 単結晶にすることで、大変位を達成できるだけでなく、線形駆動性もよい革新的な圧電 MEMS アクチュエータが実現できると考えた。本研究ではその実現に挑戦する。

2. 研究計画

(1) 単結晶 PZT/中間電極/単結晶 PZT 積層構造の作製と分析

まずは、単結晶 PZT と中間電極の積層プロセスを開発する。その手順は以下のとおりである（図 2）。

① SrRuO_3 (SRO) (100)、Pt (100)、 ZrO_2 (100) のバッファ層が堆積された Si 基板を用意する。I-PEX 社の Krystal wafer®を用いる予定である。このバッファ層は、単結晶 PZT の成膜に適している。

② スパッタ法を用いて PZT をエピタキシャル成長させる。組成は c 軸配向させた際に線形駆動性に優れる正方晶組成とする。

③ 中間電極層をエピタキシャル成長させる。材料には LaNiO_3 (LNO)、成膜法には化学溶液法をそれぞれ用いる。LNO は導電性酸化物であり、PZT と同じペロブスカイト型結晶構造と同程度の格子定数を持つ。ゆえに、エピタキシャル成長させられるはずである。

④ 再び、スパッタ法を用いて PZT をエピタキシャル成長させる。

全ての層が単結晶構造になっているかは、X 線回折や透過型電子顕微鏡などの分析的手法を用いて確かめる。

さらに上部電極も形成して一層目と二層目

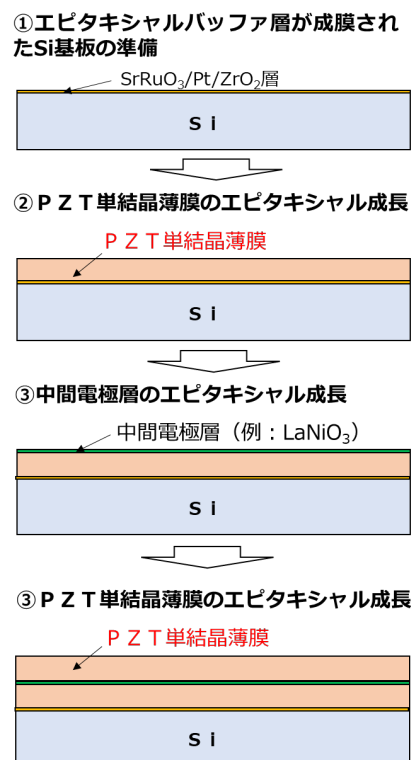


図 2. 単結晶 PZT/中間電極/単結晶 PZT 積層構造の作製

の単結晶 PZT の電気的特性や強誘電体特性など差異を評価する。

(2) マルチモルフアクチュエータの試作と性能評価

成膜プロセスの開発が首尾よく進んだ場合は、カンチレバー型アクチュエータを試作し、その駆動特性を評価する。そして、本積層構造によって、線形駆動性と大圧電性を両立する圧電 MEMS アクチュエータを実現できることを実証する。

3. 計画の進行状況

3-1. エピタキシャル積層膜の成功因子の調査

昨年度までの研究において、この積層技術の実現可能性が実証された^[4]。しかし、歩留まりは高くない。図 3 は、一層目 PZT が単結晶、二層目 PZT が多結晶化した試料に対する電子線後方散乱回折 (EBSD) による分析結果である。二層目 PZT は、面外方向で (001) 単一

配向しているものの、面内においては複数の面が分布している、つまり多結晶体であることがわかる。

これは、下地 LNO 層が多結晶化しているためだと考えた。では、LNO 層の単結晶化と多結晶化を決定する因子は何なのか？我々は、LNO の下地層の表面粗さが要因のひとつという仮説を立てた。

そこで、上記の試料の界面付近を、透過型電子顕微鏡を用いて観察した（図 4）。一層目 PZT では、原子は整然と並んでいる。続いて成膜した LNO 層も、エピタキシャル成長していたが、二層目 PZT の結晶は、LNO の凹凸によって乱れていた。これは、上記仮説を支持する結果である。

3-2. 一層目 PZT の平坦化処理とその効果の検証

前述の結果を踏まえ、一層目 PZT の表面平坦化を試みた。まず、SR0/Pt/ZrO₂/Si 基板上にこれまでと同様、PZT を 500nm 堆積させる。次に、平行平板型高周波（RF）エッチング装置において、Ar 流量：15sccm、高周波電源：20w、圧力：2.0Pa という条件で Ar エッチングを行った。図 5 にエッチング後の一層目 PZT 表面の AFM 像、および算術平均粗さ（Ra）を示す。エッチングによって、PZT 表面の平坦化が進行する様子が確認された。

次に、一層目 PZT を 300s のエッチングした後、LNO と二層目 PZT をこれまでと同様の条件で成膜した。二層目 PZT の EBSD 測定結果を図 6 に示す。エッチング無しの条件では、やはり二層目 PZT は多結晶となった。一方、エッチング処理を施した試料では、面外面内ともに単一の面が配向しており単結晶体を得ることに成功した。つまり、一層目 PZT の Ar エッチング処理は、それに続く LNO および二層目 PZT のエピタキシャル成長を促す効果があることが確認された。

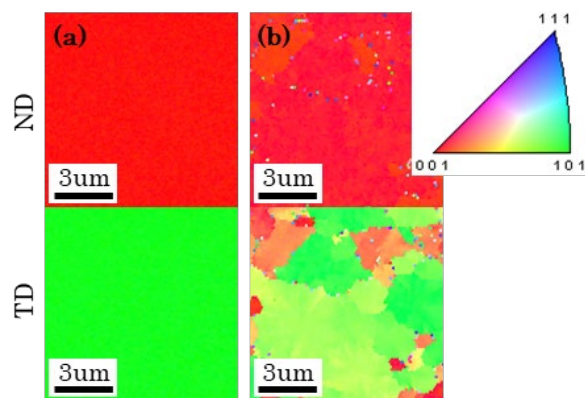
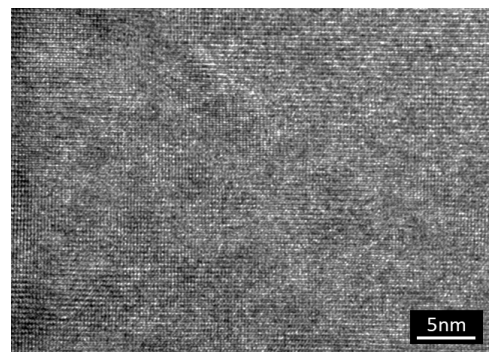
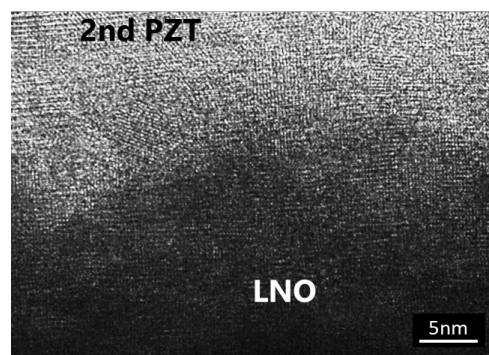


図 3. PZT の EBSD 結果 (a)一層目、(b)二層目

(a)一層目 PZT



(b)LNO と二層目 PZT の界面



(c)二層目 PZT

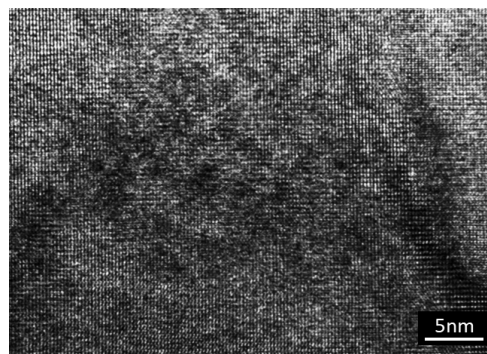


図 4. 透過型電子顕微鏡による積層膜の界面付近の分析

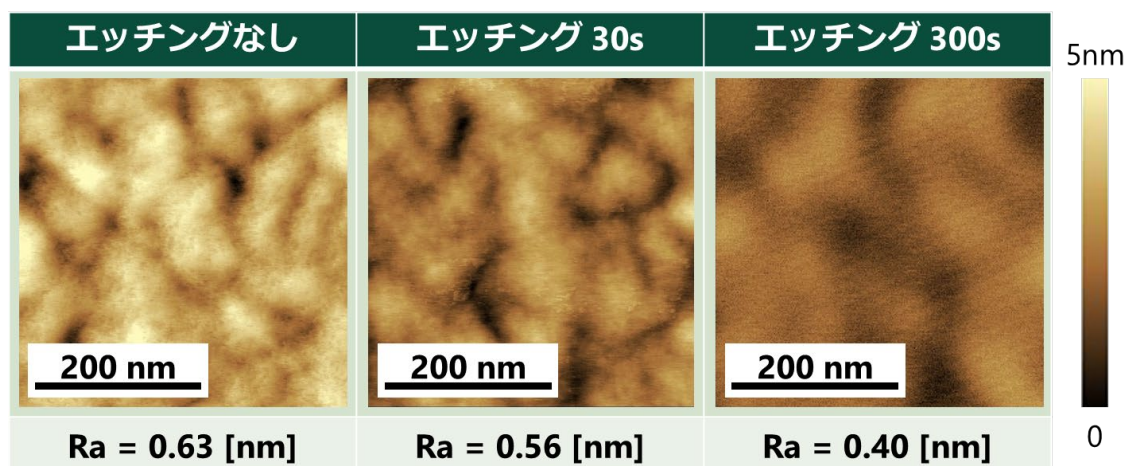


図 5. エッチング後の一層目 PZT 表面の AFM 像、および算術平均粗さ (Ra)

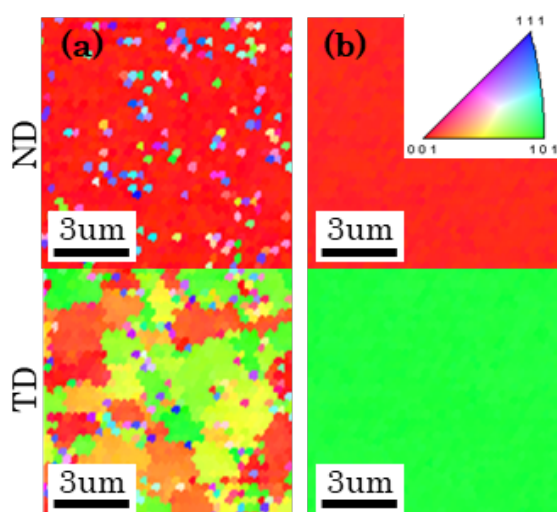


図 6. 各エッチング条件における二層目 PZT の EBSD 結果 (a) 0s、(b) 300s

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本年度は、単結晶 PZT/LNO/単結晶 PZT 積層構造を形成するための要因の一つは、表面の平坦性であるという仮説を立て、その実証実験を行った。その結果、仮説を支持する実験結果を得られた。しかし、前述のエッチングによって、例えば表面のコンタミネーションが除去され、それが二層目 PZT のエピタキシャル成長を促進した可能性もある。今後詳細な調査で要因を明らかにしていく。そして、次のステップとして、積層アクチュエータ化

を進めていく。

本成果は第 42 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウムにて発表した。今後、さらに研究データを蓄積した後、学術論文を投稿する。

参考文献

- [1] 森山雅昭、川合祐輔、田中秀治、江刺正喜” RF-MEMS スイッチのための低電圧駆動薄膜 PZT 積層アクチュエータ”、電気学会論文誌 E 132(9) 282-287 (2012)
- [2] R. Sano, J-I. Inoue, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka, “Fabrication of multilayer Pb(Zr、Ti)O₃ thin film by sputtering deposition for MEMS actuator applications”, Japanese Journal of Applied Physics, 54(10S), 10ND03-10ND03 (2015)
- [3] Kurokawa, F., Kishimoto, M., Tsujiura, Y. et al. “Fabrication of piezoelectric multilayer thin-film actuators.”, Microsyst Technol 22, 1275-1283 (2016).
- [4] 芝浦工業大学 2024 年度特別教育・研究報告集

ウェアラブル連動型折紙包装設計システムの開発

工学部 重宗 宏毅

共同研究者

岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域 遠藤 みのり

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

近年、青果物の収穫後工程においては、生産現場の人手不足や熟練作業者の減少に加え、流通形態の多様化や高付加価値化の進展に伴い、作業負担の軽減と品質保持の両立がこれまで以上に重要な課題となっている。特に果実の選別、包装、輸送といった工程では、対象物ごとに形状、寸法、表面状態、損傷しやすさが異なるため、一律の処理では十分に対応できず、対象物の状態に応じた柔軟な設計や判断が求められる。一方で、これらの工程の多くはいまだ現場の経験や熟練に依存しており、取得された情報を定量的に扱いながら、選別条件や包装条件へ一貫して反映する設計基盤は十分に整備されていない。とくに、収穫時に得られる対象物情報と、その後の包装設計とを直接接続する枠組みは未成熟であり、省力化と品質保持を同時に実現する上で大きな課題となっている。

このような背景のもと、本研究では、ウェアラブルデバイスにより取得される対象物情報を入力とし、折紙構造に基づく包装設計へ接続することで、計測結果に応じて包装形状を設計可能なウェアラブル連動型折紙包装設計システムの開発を目的とした。折紙構造は、平面から立体への変換性に優れ、収納性、成形性、形状制御性を有することから、対象物条件に応じて柔軟に包装形状を設計できる可能性を有している。また、ウェアラブルデバ

イスによる計測は、作業中に対象物の情報を取得できるため、従来は分離していた計測工程と包装設計工程とを連携させる上で有効であると考えられる。すなわち、本研究は、ウェアラブル計測と折紙工学に基づく包装設計とを統合し、対象物情報に基づく新たな包装設計基盤の構築を目指すものである。

今年度はその基礎段階として、計測情報を包装設計へ反映するための設計枠組みの整理と、振動低減を考慮した折紙緩衝構造の評価基盤の整備を進めた。具体的には、包装側では対象物条件に応じて折紙構造の設計パラメータを定めるための逆方向設計の考え方を整理し、設計から試作へ接続するための基盤を検討した。また、構造体に伝達される振動を評価するための測定系を整備し、折紙緩衝構造の特性を定量的に比較可能な評価基盤の構築を進めた。これにより、ウェアラブル連動型折紙包装設計システムの実現に向けた包装側要素技術の基礎を整備した。

2. 研究計画

図1に、本研究で検討した折紙包装構造の一例を示す。本研究では、平面状の紙材料に印刷あるいは加工により折り線情報を付与し、外部刺激に応じて立体構造へ変換させる紙の自律構造形成技術を基盤として、包装用途へ展開可能な折紙構造の作製を行った。紙の自律構造形成は、あらかじめ設計した折り線配

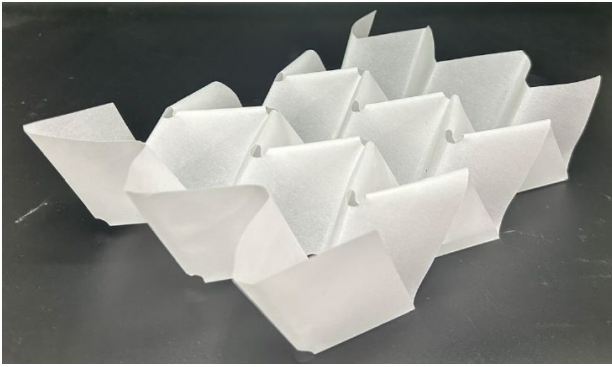


図 1．紙の自律構造形成によって作製した三浦折構造

置や材料特性に基づき、平面状態から所望の立体構造を再現性よく形成できる点に特徴がある。この特徴は、製造工程の簡略化に加え、折紙構造の幾何学的特性を活かした軽量かつ省スペースな包装材の実現に有効である。本研究では、この基盤技術をもとに、内部に複数の空間を形成し、対象物を支持しつつ外力や振動を低減できる構造として三浦折に着目した。三浦折は、構造パラメータの調整により、立体形状、セル寸法、変形挙動を制御しやすく、対象物条件に応じた包装構造へ展開しやすい特徴を有する。そこで、紙の自律構造形成に適した三浦折パターン設計条件を整理し、立体形成後に安定したセル構造を得るための基盤整備を進めた。さらに、作製した三浦折構造を包装材として活用することを目的として、対象物支持性や構造安定性に加

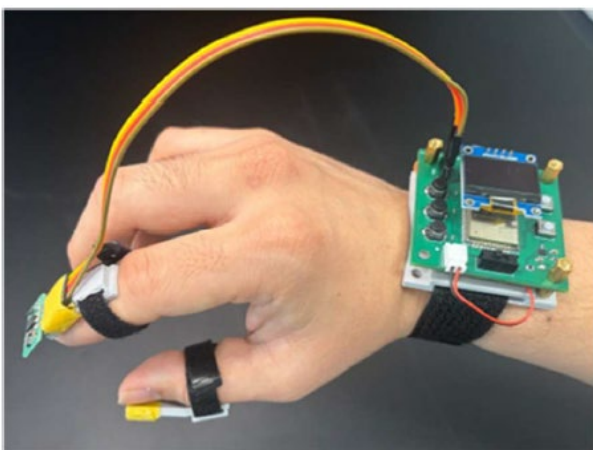


図 2．青果物径計測ウェアラブルデバイス

え、振動低減を考慮した緩衝構造としての利用可能性を検討した。

図 2 に、本研究で用いるウェアラブルデバイスの外観を示す。本デバイスは手指動作と連動して対象物情報を取得するための計測系として構成されており、指先および手部に装着したセンサ部と、前腕部に搭載した計測回路部から成る。収穫や把持などの実作業中に対象物の状態を取得できることが、本研究におけるウェアラブル計測の重要な特徴である。従来、包装設計はあらかじめ定めた寸法条件や経験的判断に基づいて行われることが多かったが、本研究では、このウェアラブルデバイスにより取得される対象物情報を包装設計へ利用することを狙いとした。すなわち、作業中に取得された対象物の寸法、形状、状態に関する情報を入力値とし、折紙包装構造の設計条件へ接続することで、対象物条件に応じた包装形状を設計する枠組みの構築を目指した。

以上より、本研究では、図 1 に示す折紙包装構造と、図 2 に示すウェアラブル計測デバイスとを連携対象として位置付け、計測情報に基づく包装設計システムの実現を目指した。今年度はその基礎段階として、包装側では紙の自律構造形成技術を用いた三浦折構造の作製と緩衝構造としての評価基盤の整備を進め、ウェアラブル側では対象物情報を取得するための計測基盤の整備を進めた。さらに、包装側については、対象物条件から折紙構造の設計パラメータを導出する逆方向設計の考え方を導入し、ウェアラブルデバイスから得られる情報を将来的に包装形状へ接続するための設計枠組みを整理した。これにより、ウェアラブル計測と折紙包装設計とを接続するための要素技術を段階的に整備する計画とした。

3. 計画の進行状況

本研究では、折紙包装構造を単に試作するだけでなく、対象物条件に応じて設計可能な

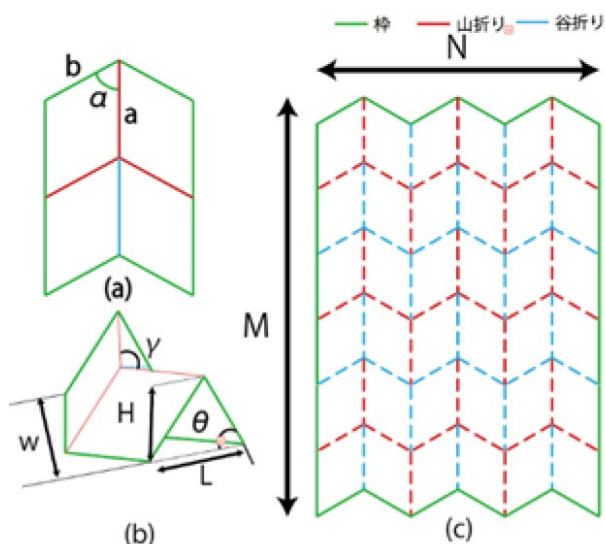


図 3. 三浦折の基本ユニットおよび展開パターン

構造として扱うため、三浦折の幾何学的設計条件を整理した。図 3 に三浦折の基本ユニットおよび展開パターンを示す。三浦折構造では、基本折り形状を規定する幾何パラメータと、立体形成後の高さ、幅、長さなどの構造寸法とが対応しており、これらの関係を用いることで所望の立体形状に応じた設計が可能となる。図 4 に示す寸法関係式は、折りパターンを規定する設計変数と形成後の構造寸法や形状条件との対応を与えるものであり、包装構造を対象条件に応じて定量的に設計する基礎となる。本研究では、これらの順方向関係を基礎として、所望の包装条件から必要な構造パラメータを導出する逆方向設計の考え方を導入した。すなわち、対象物の大きさや必要な収納空間、保持条件などを出発点とし、それを満たす三浦折構造の設計値へ変換する設計枠組みを整理した。

$$\begin{aligned} w &= \frac{2b \cos \theta \tan \alpha}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \alpha}} & (1) \\ l &= 2a \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \alpha} & (2) \\ u &= \frac{2ab \cos \alpha}{l} & (3) \\ h &= a \sin^2 \theta \sin^2 \alpha & (4) \\ \sin \frac{\gamma}{2} &= \frac{\cos \theta}{\cos \alpha \sqrt{\sin^2 \theta \sin^2 \alpha}} & (5) \end{aligned}$$

図 4. 三浦折寸法関係式

この逆方向設計は、ウェアラブルデバイスとの連携を考える上で特に重要である。図 2 に示したウェアラブルデバイスにより、作業中の対象物情報を取得できれば、その情報を図 3 および図 4 で整理した設計条件へ入力し、対象条件に応じた包装構造を決定することが可能となる。すなわち、ウェアラブル計測は単なる状態把握に留まらず、包装形状を決定するための入力部として機能し、逆方向設計はその情報を具体的な折紙構造へ変換する設計変換部として位置付けられる。本年度は、このような役割分担のもとで、ウェアラブル連動型折紙包装设计システムの基礎構成を整理した。

図 5 に、Grasshopper を用いて構築した三浦折包装構造のパラメトリック設計環境を示す。本設計環境では、セル長さやセル幅、ならびに三浦折の幾何パラメータを入力値として与えることで、対応する折紙構造の形状を計算的に生成し、立体構造として出力できるようにした。これにより、従来のように設計者が個別に形状を描き直すことなく、対象条件に応じた構造変更を一貫して行うことが可能となった。特に、本研究で整理した逆方向設計の考え方と組み合わせることで、対象物条件から求めた設計値をそのまま構造生成へ接続できるため、ウェアラブルデバイスにより取得される情報を将来的に包装形状設計へ反映するための基盤として位置付けられる。Grasshopper の導入により、設計変数と出力形状の対応を視覚的かつ再利用可能な形で整理でき、ウェアラブル連動型折紙包装设计システムにおける包装側の設計自動化基盤を整備した。



図 5. Grasshopper を用いた逆方向設計の実装例

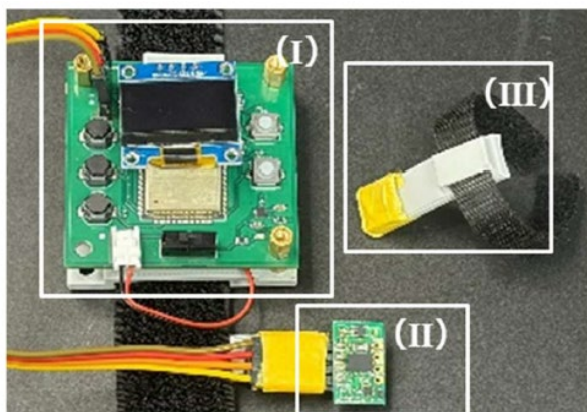


図 6. ウェアラブルデバイス構成

図 6 に、本研究で用いたウェアラブルデバイスの構成を示す。図 6(I)は表示・制御部であり、取得したセンサ信号の処理、動作制御、計測結果の表示を担う中核部である。図 6(II)はセンサ部であり、対象物との位置関係や動作に応じた情報を取得する役割を持つ。図 6(III)は磁気発生部であり、センサ部と組み合わせることで、手指動作に伴う対象物との相対位置変化を計測可能とする。本研究では、このように表示・制御部、センサ部、磁気発生部を分離して構成することで、手指装着時の柔軟性を確保しつつ、作業中对象物情報を取得するための計測基盤を整備した。特に、磁気発生部とセンサ部の組合せにより、対象物の把持動作と連動した情報取得が可能であり、将来的にはここで得られる計測値を包装設計側へ入力することで、対象条件に応じた折紙包装構造の設計へ接続することを想定している。一方で、このような計測値を設計入力として利用するためには、手指動作に伴う姿勢変化が距離推定に及ぼす影響を把握し、入力情報の安定性を確認する必要がある。

図 7 に、姿勢変化に対する推定距離誤差の評価結果を示す。図 7(a)は補正を行わない場合の結果であり、傾斜角の変化に応じて推定距離が大きく変動し、特に大きな負角度条件で誤差が増大することが確認された。これに対し、図 7(b)では姿勢情報を用いた補正後の結果を示しており、全体として推定距離の変

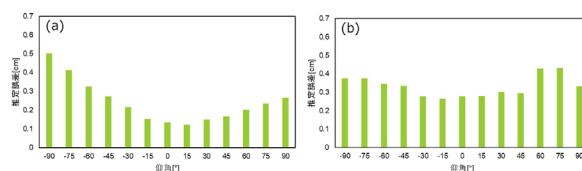


図 7 姿勢変化に対する推定距離の評価結果。
(a) 補正前の推定距離. (b) 補正後の推定距離.

動幅が抑制され、姿勢依存性が低減していることが分かる。すなわち、ウェアラブルデバイスにおいては、磁気計測のみでは姿勢変化の影響を受けやすい一方、姿勢情報を併用することで距離推定の安定性向上が可能であることが示された。以上より、本デバイスは、把持動作に連動した対象物情報の取得に加え、包装設計へ入力可能な情報基盤としての適用可能性を有することが確認された。本結果は、作業中に取得される対象物情報を包装設計へ利用する上で、入力情報の信頼性を高めるための基礎的知見として位置付けられる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、ウェアラブルデバイスで取得される対象物情報を三浦折構造の逆方向設計へ入力し、対象条件に応じた折紙包装構造を導出する連動設計手法の具体化を進める。包装側については、実際のイチゴを用いた包装性能評価を実施し、対象物保持性、振動低減特性、損傷抑制効果の観点から構造の有効性を検証する。ウェアラブル側については、対象物情報の取得精度および姿勢変化に対する安定性の向上を進め、包装設計へ入力可能な計測基盤としての信頼性向上を図る。以上により、計測結果に基づいて包装構造を設計し、その性能を実果実で検証する一連の研究展開へ接続する予定である。

発表状況としては、2026 年度中に国際会議での発表を目指して準備を進めるとともに、本研究で得られた構造設計、計測基盤、包装性能評価に関する知見を整理し、論文投稿についても検討を進める。

イベントカメラを受信機とする AI 駆動型可視光通信の実現

工学部 プレーマチャンドラ チンタカ

共同研究者

スリランカ・ベネディクト 16 世カトリック大学情報学部 Waruna Premachandira 博士

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

近年、ロボット、ITS、監視システムなどの分野において、時間的に点滅する光源を環境中から自動的に検出・認識する技術の重要性が高まっている[1][2][3]。点滅光源は、警告灯や信号灯、表示用 LED など、安全確保や情報提示を目的として広く利用されており[4]、これらを確実に認識することはシステムの信頼性向上に直結する。さらに、これらの点滅光は情報伝達媒体としても利用可能であり、可視光通信（VLC）の観点からも重要な対象である。特に、カメラ自身が移動する状況や背景が複雑に変化する環境下では、点滅光源のみを安定して抽出することは容易ではない[5][6][7]。

このような課題に対して、イベントカメラは有効な受信センサとして注目されている[8]。イベントカメラは、各画素における輝度変化のみを非同期に出力する特性を有し、高い時間分解能と低消費電力を両立している[9][10]。この特性により、高速に変調された光信号に対して高い感度を有し、AI と組み合わせることで、可視光通信の受信機としての応用が期待されている。

一方で、イベントカメラは輝度変化のない静止物体に対してイベントを出力しないが、カメラが移動する環境では、背景中の静止物体も相対的な輝度変化としてイベントを発生

させる。その結果、通信信号や点滅光源に由来するイベントと、カメラの移動に起因するイベントが混在し、有効な信号の抽出が困難となる[11]。

イベントデータを画像化せず直接扱う手法では、イベントの高い時間分解能やスパース性を活かした点滅光源検出や信号抽出手法が提案されている[12][13]。しかし、イベントデータを高フレームレートの動画として扱う場合、点滅や変調に起因する時間構造がフレーム単位に離散化され、露光時間内で輝度変化が平均化されるため、高速信号の検出や復元は不利となる。このため、従来研究の多くは、背景変動やカメラ移動の影響を避ける目的から、カメラおよび対象光源が固定された条件に限定されている。

そこで、本研究では、イベントカメラを可視光通信の受信機として位置付け、移動環境下において背景由来のイベントを含む状況でも、高速に変調された光信号を教師なしで自動検出・抽出する AI 駆動型手法を提案する。

2. 研究計画

本研究では、点滅光源として LED アレイを対象とし、時間的特徴に基づく候補領域の抽出と、空間的特徴に基づく位置検出から構成される二段階の検出手法を提案する。イベントカメラから取得したデータを高フレームレ

ートのフレーム系列として扱い、フレーム間差分に現れる点滅由来の特徴を利用することで、カメラ移動に起因する背景イベントとの分離を実現する。

イベントカメラが移動する環境では、背景由来のイベントが画像全体に広く発生する一方で、LED アレイの点滅に起因するイベントは、時間的に周期性を有し、かつ空間的に局所的に発生するという特徴を持つ。本研究では、このような時間的・空間的特性の違いを段階的に活用することで、背景イベントを抑制しつつ、LED アレイの高精度な位置検出を実現する。さらに、これらの特性は可視光通信における変調信号の検出にも対応可能であり、イベントカメラを受信機とする AI 駆動型可視光通信の基盤技術として有効である。

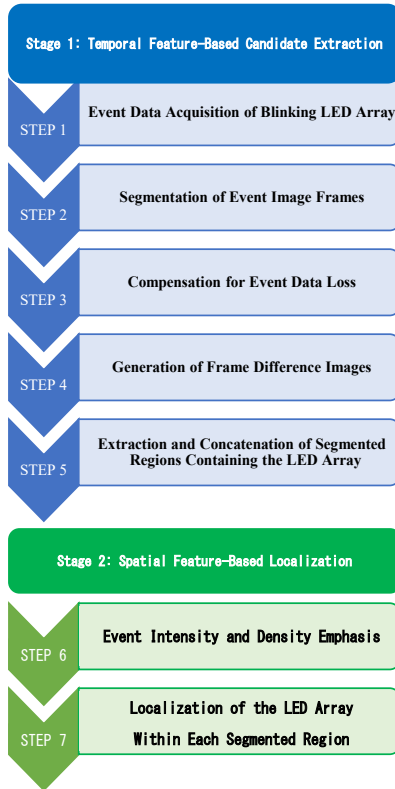


Fig.1 Flow chart of proposed method

提案手法の全体の流れを Fig. 1 に示す。Fig. 2 では、入力データの生成から最終的な LED アレイ位置の出力に至るまでの処理構成を示している。STEP 1 から STEP 4 は、イベ

ントデータの取得およびフレーム画像生成、領域分割、イベント欠損補償、ならびにフレーム間差分画像の生成といった前処理に対応する。続く STEP 5 では、第 1 段階 (Stage 1) として、時間的特徴に基づく LED アレイを含む候補領域の抽出を行う。その後、第 2 段階 (Stage 2) として、STEP 6 および STEP 7 において空間的特徴に基づく位置推定を行う。

2. 1 入力データと領域表現

入力として、イベントカメラから得られる非同期イベント列を、一定時間幅ごとに積算することで高フレームレートのフレーム画像列として表現し、これを解析対象とする。各フレーム画像は空間的に複数の領域に分割され、これらの領域を R_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) と表し、具体的な例を Fig.2 に示す。

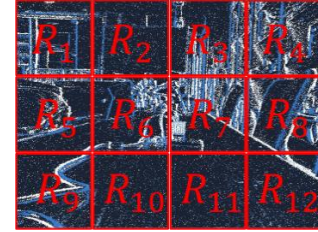


Fig.2 Dividing frame image

各領域 R_i に対して、時間長 T の固定長フレーム列を単位として、各領域の時間的変化を(1)に示す。

$$\{R_i(t)\}_{t=1}^T. \quad (1)$$

本論文では、 $R_i(t)$ は時刻 t における当該領域の画像を表すものとし、Fig.3 に示す。

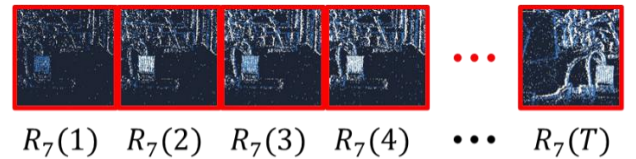


Fig.3 Time change of divided area images

2. 2 時間特徴に基づく LED アレイが含まれる候補領域の抽出

本節では、Fig.1 における STEP 5 に対応し、時間的特徴に基づいて LED アレイを含む候補領域を抽出する手法について述べる。

LED アレイの点滅は、時間方向に周期的な輝度変化を引き起こす。一方、イベントカメラの移動によって生じる背景イベントは、時間的な周期性を持たず、画像全

体に広く分布する傾向がある。この違いを利用するため、各領域 R_i に対して、時間方向の輝度変動特性およびフレーム間差分画像の統計的特性に基づく特徴量を(2)で算出する。

$$\varphi_i = f(\{R_i(t)\}_{t=1}^T). \quad (2)$$

得られた特徴量集合 $\{\varphi_i\}$ に対し、教師なし学習に基づく外れ値検出を適用することで、背景イベントとは異なる振る舞いを示す領域を候補領域として抽出する。これにより、LED アレイを含む点滅物である可能性の高い領域集合(3)を得る。

$$\mathcal{R}_{cand} \subset \{R_i\}. \quad (3)$$

なお、LED アレイは複数の領域にまたがって観測される場合があるため、同一時刻に抽出された候補領域のうち空間的に隣接するものは、同一の物体に由来するものとして結合する。

3. 計画の進行状況

提案手法の有効性を検証するため、イベントカメラとLED アレイの距離を三段階に設定した実験を行った。その結果、すべての条件において、 $\text{IoU} \geq 0.5$ の評価基準下で高い検出性能を達成し、見逃しの少ないLED アレイ検出が可能であることを確認した。

本研究では、イベントカメラが移動する環境において、点滅するLED アレイの位置を、二段階の教師なし処理によって自動検出する手法を提案した。本研究は、ロボット、ITS、監視システムなどの様々な分野に応用が期待できると考える。

イベントカメラとLED アレイ間の距離を三段階に設定し、イベントカメラを約6cm/sで移動させた条件下で撮影した。検証実験の結果を、 $\text{IoU} \geq 0.5$ 、 $\text{IoU} \geq 0.3$ の評価基準に基づき、提案手法の検出性能を定量的に評価した。 $\text{IoU} \geq 0.5$ におけるPrecisionが、最も高い精度で0.959となり、すべての動画において0.9以上の精度を達成した。

LED アレイの位置検出において、教師あり学習手法であるBounding Box 回帰CNN(以下、BBox R-CNN)との比較を行い、教師データを

必要としない本手法であっても、高い検出性能を達成可能であることを示した。

提案手法は教師データを必要としない点に特徴がある。本節では、教師あり学習に基づくBBox R-CNNとの比較を通じて、教師なし手法がどの程度の検出性能を達成可能であるかを検証する。

BBox R-CNNの学習には、各ヒートマップに対して手動で付与したBounding Box ラベルを用い、動画ごとに学習用データと評価用データを7:3の割合で分割した。両手法に対して同一の評価指標を用いてLED アレイの位置検出精度を評価した。

提案手法はすべての動画においてFNが発生せず、見逃しの少ない検出結果を示した。これは、2.1章で抽出された候補領域に対して必ず1つの検出結果を出力するという、本手法の処理構成によるものである。一方、BBox R-CNNでは、一部の動画においてFNが発生しており、LED アレイを検出できなかったフレームが存在することが確認された。

各動画内ではLED アレイの大きさがほぼ一定であり、入力表現も提案手法と同一のヒートマップを用いていることから、BBox R-CNNにとって極端な条件ではないと考えられる。一方で、本研究における学習データ数は各動画あたり約930枚程度であり、位置回帰タスクに対するデータ量の影響について、本研究の範囲では十分に検討できておらず、今後の検討課題とする。

Precisionに関しては、BBox R-CNNが一部の動画において高い値を示したが、提案手法においてもすべての動画で0.90以上の値を維持している。これらの結果から、教師データを用いない提案手法であっても、教師あり学習に基づくBBox R-CNN手法に近い位置検出性能を達成可能であることが示された。特に、高速点滅物体の見逃し抑制という観点において、提案手法の有効性が確認された。

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

本研究のこれまでの成果を基に, 国際会議 The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2026) に論文を投稿した. 現在, 本研究のさらなる発展を目指しており, 今後は追加の論文投稿も検討していく予定である.

5. 参考文献

- [1] M. K. Hasan, M. O. Ali, M. H. Rahman, M. Z. Chowdhury and Y. M. Jang, "Optical Camera Communication in Vehicular Applications: A Review", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 23, Issue 7, pp. 6260 - 6281, July 2022.
- [2] G. Ebmer, A. Loch, M. N. Vu, R. Mecca, G. Haessig, C. Hartl-Nesic, M. Vincze and A. Kugi, "Real-Time 6-DoF Pose Estimation by an Event-Based Camera Using Active LED Markers", Proc. of IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), pp. 8137 - 8146, Jan. 2024.
- [3] S. Mehmood Sheikh, H. M. Asif, K. Raahemifar and F. Al-Turjman, "Time Difference of Arrival Based Indoor Positioning System Using Visible Light Communication", IEEE Access, Vol. 9, pp. 52113 - 52124, 2021.
- [4] Z. Tang, T. Yamazato and S. Arai, "A Preliminary Investigation For Event Camera-Based Visible Light Communication Using The Propeller-type Rotary LED Transmitter", Proc. of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pp. 646 - 650, 2022.
- [5] C. Zhao, Y. Li and Y. Lyu, "Event-based Real-time Moving Object Detection Based On IMU Ego-motion Compensation", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 690-696, May 2023.
- [6] C. Iaboni, H. Patel, D. Lobo, J.-W. Choi and P. Abichandani, "Event Camera Based Real-Time Detection and Tracking of Indoor Ground Robots", IEEE Access, Vol. 9, pp. 166588 - 166602, 2021.
- [7] C. Shi, Y. Li, N. Song, B. Wei, Y. Zhang, W. Li and J. Jin, "Identifying Light Interference in Event-Based Vision", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 34, Issue 6, pp. 4800 - 4816, June 2024.
- [8] G. Gallego, T. Delbrück, G. Orchard, C. Bartolozzi, B. Taba, A. Censi, S. Leutenegger, A. J. Davison, J. Conradt, K. Daniilidis and D. Scaramuzza, "Event-Based Vision: A Survey", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 44, Issue 1, pp. 154 - 180, Jan 2022.
- [9] M. Gehrig, M. Muglikar and D. Scaramuzza, "Dense Continuous-Time Optical Flow From Event Cameras", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 46, Issue 7, pp. 4736 - 4746, July 2024.
- [10] Y. Suh et al., "A 1280×960 Dynamic Vision Sensor with a 4.95-μm Pixel Pitch and Motion Artifact Minimization", Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1 - 5, 2020.
- [11] A. Mitrokhin, C. Fermüller, C. Parameshwara and Y. Aloimonos, "Event-Based Moving Object Detection and Tracking", Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1 - 9, 2018.
- [12] G. Chen et al., "A Novel Visible Light Positioning System With Event-Based Neuromorphic Vision Sensor", IEEE Sensors Journal, Vol. 20, Issue 17, pp. 10211 - 10219, Sept. 2020.
- [13] A. Mondal et al., "Moving Object Detection for Event-Based Vision Using Graph Spectral Clustering", Proc. of IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops, pp. 876 - 884, Oct. 2021.

実時間対応多視点異常検知技術

工学部 Phan Xuan Tan

共同研究者

FPT 大学 Dinh Hoang Cuong

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

In modern manufacturing, automated visual inspection is an indispensable process at the core of quality assurance. Although deep-learning based industrial anomaly detection (IAD) has advanced rapidly, most existing methods rely almost exclusively on RGB images. While RGB is effective for surface discolorations or obvious damage, it is fundamentally limited in capturing physical deformations (micro-scratches, dents, geometric anomalies) and subsurface/internal defects (delamination, voids, thermal inconsistencies).

To overcome these limits, multimodal anomaly detection that integrates complementary sensors—Infrared (IR) thermal imaging, depth maps, and surface normals—has attracted strong interest. IR can reveal subsurface thermal anomalies invisible to standard cameras, while surface-normal data highlights minute geometric deviations independent of texture or lighting. However, multimodal fusion brings significant challenges: registration errors between sensors, cross-modal noise contamination, and the

high computational cost of processing high-resolution feature maps. This project establishes a lightweight, real-time multi-view and multimodal anomaly detection technology that operates robustly under lighting variation, occlusion, and minute sensor misalignment.

2. 研究計画

The FY2025 plan was structured into three phases progressing from algorithm design to system integration and benchmark evaluation.

Phase 1: System Setup, Data Acquisition and initial multi model fusion

The first phase focused on constructing a highly realistic evaluation testbed capable of synchronously acquiring multimodal data (RGB, IR, depth, and surface normals). We procured an NVIDIA Jetson Xavier GPU-embedded edge device to explicitly define the real-time hardware constraint, and used IR Camera to collect necessary image data of various industrial devices with internal defects (voids, micro-cracks) and surface anomalies. In addition, we performed initial study on multi model fusion focusing lightweight and real-time RGBD anomaly detection framework that not only

refine per-modality features but also performs robust hierarchical fusion and tolerates missing inputs.

Phase 2: Core Model Development

We engineered two foundational deep-learning architectures. The first is an unsupervised anomaly detection model explicitly tailored to the characteristics of IR thermal images (low contrast, smooth temperature gradients), with High-Frequency Gradient Fusion (HFGF) and Directional Saliency Attention (DSA) to amplify minute thermal anomalies. The second is the MambaAlign architecture for robust RGB-X fusion: QuadSnake scanning extracts direction-dependent contexts, while Cross Mamba Interaction (CMI) is applied at the deep feature level to achieve fusion that is highly resilient to spatial misalignments.

Phase 3: Integration and Dissemination:

We integrated the developed models and optimized them for edge deployment via quantization and TensorRT. Rigorous quantitative evaluations focused on detection accuracy (I-AUROC, P-AUROC, AUPRO) and inference speed (FPS) using public benchmarks (MulSen-AD, Real-IAD D3) as well as our custom RGB-D dataset. The comprehensive findings were targeted for publication in high impact factor journals.

3. 計画の進行状況

Within a limited duration of this project, we developed several novel fusion frameworks. This led to publications in Q1 academic journals.

(1) A lightweight Real-time Multi Modal Fusion Framework

Our first attempt in this project was

motivated by the fact that RGB-based anomaly detection framework often fails to detect subtle structural defects. Meanwhile, most RGB-depth (RGBD) methods are computationally heavy and fragile in the presence of missing or noisy depth data. Therefore, we proposed a lightweight and real-time RGBD anomaly detection framework that not only refines per-modality features but also performs robust hierarchical fusion and tolerates missing input. In this approach, we employed a shared ResNet-50 backbone with a Modality-Specific Feature Enhancement (MSFE) module to amplify texture and geometric cues, followed by a Hierarchical Multi-Modal Fusion (HMM) encoder for cross-scale integration. Additionally, a curriculum-based anomalous feature generator to produce context-aware perturbation was introduced. Via careful evaluations with different evaluation metrics, we achieved competitive such as 99.6% image-level AUROC and 99.0% pixel-level AUROC, setting a new standard for detection and localization accuracy.

(2) MambaAlign: Alignment-Aware State-Space Fusion

Continue the succeed of previous step, we study further the possibility of IR domain in anomaly detection. The chief difficulty in fusing RGB with auxiliary sensors (IR, depth, surface normals) is sensor misalignment together with the rapidly growing cost of high-resolution feature maps. Thus, in this period, we designed MambaAlign—an alignment-aware state-space fusion framework (Fig.1) that refines each modality with Per-Modal

Mamba Modules (PMMs) built on state-space models and QuadSnake scanning to capture long-range, orientation-aware context while preserving spatial coherence. Mamba Align enables semantic, content-conditioned cross-modal exchange through a lightweight Cross Mamba Interaction (CMI) applied at deep semantic stages, which provides cross-modal guidance with near-linear complexity and reduced sensitivity to spatial offsets. A top-down alignment-aware fusion (AAF) reconstitutes low-level channels via local fusion and channel reconstruction, tolerating small spatial misalignments and preserving precise localization. Extensive evaluation on multiple multimodal anomaly detection benchmarks demonstrates large, consistent gains in both image-level detection and pixel-level localization; averaged across three data sets, MambaAlign improves I-AUROC (image-level area under the receiver operating characteristic curve) by 4.8%, P-AUROC (pixel-level area under the receiver operating characteristic curve) by 5.0%, and AUPRO (area under the per-region overlap curve) by 6.5% while maintaining a competitive runtime of 30 frames per second (FPS). Fig. 2 shows our qualitative results with precise detection and localization of anomaly.

(3) Unsupervised IR Anomaly Detection Framework

When working with IR thermal images, we realized that such images have weak texture and smooth temperature gradients, making microscopic anomalies easy to miss. Thus, in this research period, we built a deep framework (Fig. 3) trained only on

normal IR data.

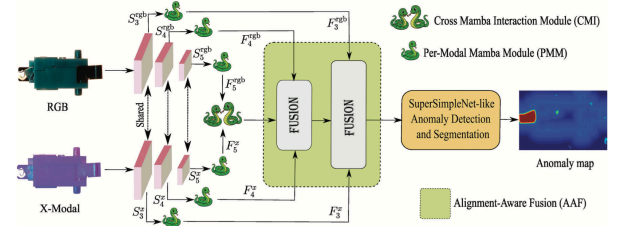


Figure 1: Overview of the proposed multimodal anomaly detection framework

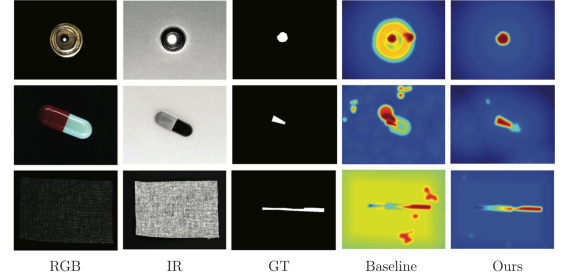


Figure 2: Qualitative results on the MulSen-AD data set.

The High-Frequency Gradient Fusion (HFGF) module extracts horizontal, vertical, and diagonal gradients with fixed directional edge filters and injects them into a pre-trained ConvNeXt-B feature space, explicitly amplifying micro-cracks and hot spots. The Directional Saliency Attention (DSA) module focuses on directional patterns characteristic of IR (e.g., thermal-diffusion directions), letting the network learn priors of normal background structures. The Multi-Scale Attention Refinement (MSAR) module uses deformable convolutions to handle defects of varying size. To train the discriminator using only normal data, we devised Saliency-Aware Feature Perturbation (SAFP), which injects physically plausible pseudo-noise directly into feature space, guided by DSA saliency and gradient maps. To train the discriminator using only normal data, we devised Saliency-Aware Feature Perturbation (SAFP), which injects

physically plausible pseudo-noise directly into feature space, guided by DSA saliency and gradient maps. Quantitative evaluations highlighted the framework's state-of-the-art performance. Quantitative evaluations (Fig. 4 highlights the framework's state-of-the-art performance).

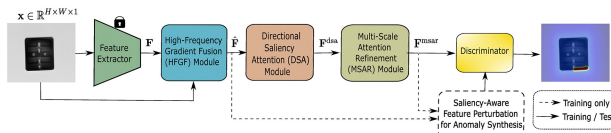


Figure 3: The proposed unsupervised framework for IR anomaly detection.

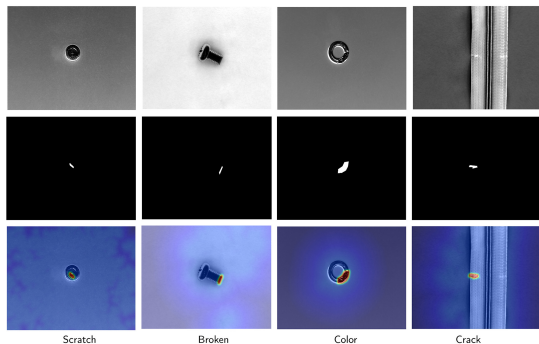


Figure 4: Qualitative anomaly detection results on the MulSen-AD dataset.

(4) Educational & Social Contributions via International Collaboration

In alignment with SIT's mission to foster global engineering talent and reflecting the spirit of the Special Education and Research Grants, our collaboration with FPT University extended well beyond technical research into educational and social domains. A business trip to Vietnam in December 2025 facilitated face-to-face mentorship and knowledge exchange with the local research team, accelerating the refinement of our data augmentation strategies. Participating in the SOICT 2025 conference in Hanoi allowed us to

disseminate our findings to a broader academic community while gathering feedback to refine our models. This project actively involved graduate and undergraduate students in cross-border research, significantly enhancing their technical capabilities and global perspectives.

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

Future Research Plans

Building on the MambaAlign and IR-specific frameworks established in FY2025, we will pursue real-world deployment such as industrial pilot programs (e.g., long-term operational tests on factory production lines), robotic integration (e.g., wheeled autonomous mobile robots and UAVs, etc).

Publication Status

Three peer-reviewed papers have been accepted in highly prestigious Q1 journals with very high impact factors as direct outcomes of this project:

[1] Dinh-Cuong Hoang, Phan Xuan Tan, et al. "Accurate industrial anomaly detection with efficient multimodal fusion," *Array* (Q1, IF = 4.5), Vol. 28, September 2025.

[2] Dinh-Cuong Hoang, Phan Xuan Tan, et al. "Object anomaly detection using infrared images," *Results in Engineering* (Q1, IF = 7.9), Vol. 28, 108063, November 2025.

[3] Dinh-Cuong Hoang, Phan Xuan Tan, et al. "MambaAlign: Alignment-aware state-space fusion for RGB-X industrial anomaly detection," *Journal of Computational Design and Engineering* (Q1, IF = 6.1), Vol. 13, Issue 1, 514-537, January 2026.

脳神経を再生し、機能回復を促す 革新的神経分化誘導剤の開発

システム理工学部（生命科学科） 須原 義智

共同研究者

システム理工学部（生命科学科） 廣田 佳久

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

我が国における脳血管疾患（脳梗塞、脳出血、くも膜下出血等）の総患者数は188.6万人、関連する医科診療医療費は年間1兆8,168億円にのぼることが報告されている（厚生労働省「令和5年（2023）患者調査／傷病別年次推移表」および「令和5（2023）年度国民医療費の概況」より）。これらの疾患によって生じる麻痺、失語症、記憶障害などの脳機能障害は、神経細胞の損傷・脱落や神経回路の破綻に起因し、失われた機能を十分に回復させる確立した治療法はなお限られている。人工多能性幹細胞（iPS細胞）を用いた神経再生研究も国内外で進められているが、細胞の安全性、品質管理、移植後の腫瘍化リスクなど、臨床応用に向けて解決すべき課題が残されている。

本研究は、近年ますます注目されている「再生医療」の観点から、「失われた神経回路の再建」および「中枢神経機能の回復」を目指し、「脳を正常な状態に近づける」ための新たな治療法の開発につながる基礎研究である。申請者は、神経細胞の供給源となる神経幹細胞から神経細胞（ニューロン）への分化を、従来の遺伝子導入ではなく、安全性の高い低分子神経分化誘導物質によって促進し、神経の修復・再生へつなげることを目指している（図1）。神経幹細胞は成人にも存在することが確

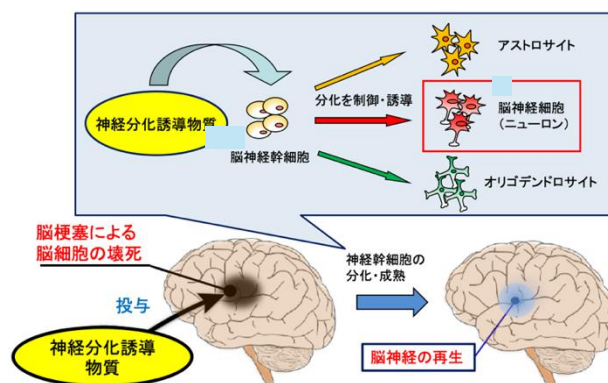


図1. 中枢神経機能の回復を促す神経分化誘導物質の創製

認されているため、このような化合物を創製できれば、成人の中枢神経機能回復を促す新たな治療法として、脳梗塞やパーキンソン病をはじめとする各種脳機能障害への応用が期待される。

申請者は、ビタミンKがマウス胎仔大脳由来の神経幹細胞をニューロンへ分化させる作用をもつことを見出し、誘導体化によって活性向上を実現した[J. Med. Chem., 2015]。しかし、EC50値は数～数十 μM であり、医薬品シーズとして望まれるnMレベルへ近づけるには、活性を少なくとも100倍以上高める必要がある。また、細胞レベルだけでなく個体（動物）レベルにおいても有効性を示す化合物を創出する必要がある。最近、我々はトランスクリプトーム解析および阻害剤を用いた検討により、ビタミンKの神経分化誘導作

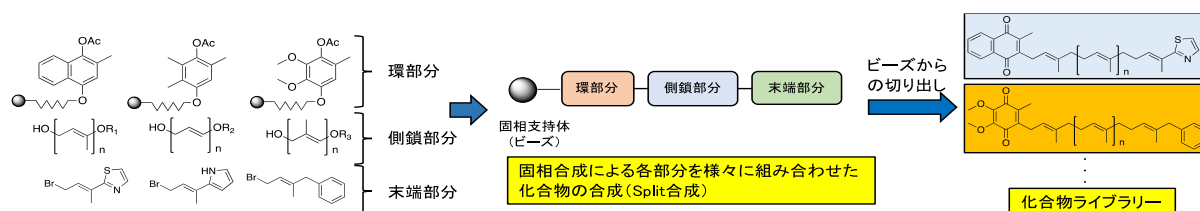


図 2. コンビナトリアル合成による多種多様な誘導体の合成

用に関与する標的分子が、脳内の代謝型グルタミン酸受容体 1 (mGluR1) であることを同定した。代謝型グルタミン酸受容体は神経系に広く発現し、記憶・学習に関与するほか、精神疾患治療薬の標的分子としても注目されている。そこで本研究では、mGluR1 に強く作用する化合物の創製を目的とした。

現在までに、神経回路再建を目的として臨床で確立された低分子治療は限られている。一方で、レチノイン酸など、細胞分化を誘導できる低分子化合物の例が報告されていることから、本研究で見出す化合物にも神経再生を促進する可能性がある。

これまでも脳障害や神経変性疾患に関連する誘導体研究は行われてきたが、幹細胞から神経細胞への分化を強力に促進し、失われた脳機能の回復を目指すという視点に立った研究は国内外でも極めて少ない。本研究では、ビタミン K を基盤とした mGluR1 標的の新規医薬シーズの開発を進める。ビタミン K は我が国で既に臨床応用されており、安全性に関する知見が蓄積している。さらに、ビタミン K は血液脳関門を通過して脳内へ移行し、中枢神経系に作用し得ることも報告されている。キノン骨格を有するビタミン K 誘導体は、従来薬とは異なる作用機序をもたらす可能性があり、誘導体化によって有効性と安全性を兼ね備えた新規薬剤の創出が期待される。

2. 研究計画

研究計画は次のとおりである。(A) 計算化学により標的タンパク質に強く結合する候補リガンドを設計し、(B) コンビナトリアル合成により化合物ライブラリーを構築・拡充し、

(C) 活性化合物を選別する。具体的には、以下の計画に従って研究を進める。

(A) 計算化学による標的タンパク質に強く結合するリガンドの設計

ビタミン K の構造を基に、標的タンパク質である代謝型グルタミン酸受容体 1 (mGluR1) に強く作用するリガンドを、計算化学の手法を用いて設計する。具体的には、PDB (Protein Data Bank) に登録された mGluR1 の構造情報 (X 線結晶構造、クライオ EM 構造等) を用いて、アロステリック部位に結合する化合物の至適コンフォメーション、ファーマコフォア、結合ポケットの疎水性および結合エネルギーを検討し、複数の候補化合物を設計する。

(B) コンビナトリアル合成による化合物ライブラリーの構築

さらに活性向上の精度を高めるため、上記 (A) の結果を基に周辺化合物を合成する。合成には「コンビナトリアルケミストリー」の手法を応用し、ビタミン K の構造を基本骨格として、官能基や立体構造の一部を変えた多種多様な化合物を合成して化合物ライブラリーを構築する (図 2)。

(C) in vitro 試験による活性化合物の選別と in vivo 試験への展開 (共同研究：神戸薬科大学)

上記 (A)、(B) で構築した化合物ライブラリーについて、mGluR1 への結合親和性を等温滴定型カロリメトリーにより評価する。さらに、当研究室で開発した高効率な High-Throughput Screening 法により、神経分化誘導活性をもつ化合物を選別する。細胞は、取り扱いやすく再現性の高い市販の株化神経幹細胞を用いる。評価では、分化したニューロ

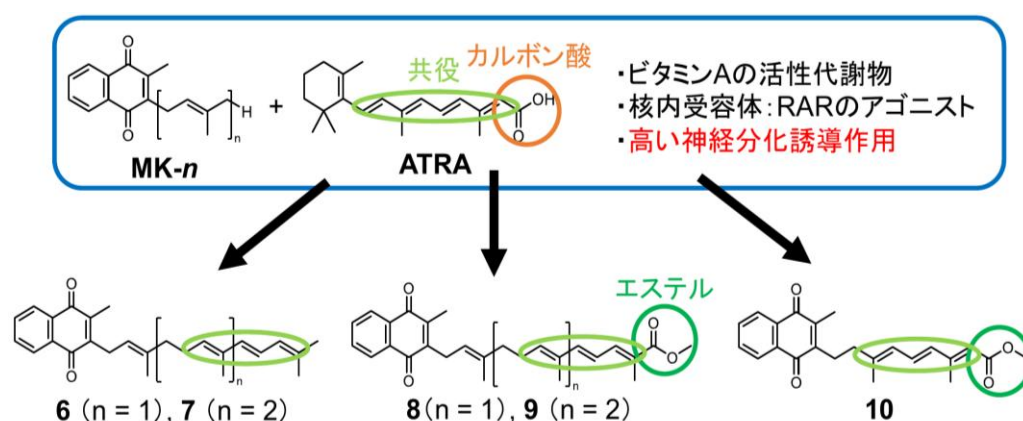


図3. 神経分化誘導活性を向上させた化合物の設計

ンに特異的に発現するタンパク質 (MAP2: Microtubule-Associated Protein 2) を蛍光免疫染色し、蛍光強度や MAP2 陽性細胞率を指標として分化促進の程度を測定する。得られた結果から高活性化合物を選抜し、脳障害や神経変性疾患の病態モデルマウスにおける有効性を検討する。

以上の検討を通じて、mGluR1 に高い親和性を示す候補化合物を設計・合成し、in vitro スクリーニングにより高活性化合物を選抜する。

3. 計画の進行状況

我々はこれまでに、目的化合物を見出すため、新規ビタミン K 誘導体を設計・合成し、化合物ライブラリーを拡充するとともに、活性化合物の選抜を行った。具体的には、電子求引性基、嵩高い置換基、脂溶性の高い置換基などを系統的に導入し、多様なビタミン K 誘導体を合成した。

令和7年度はさらに、強い分化誘導作用をもつことが知られているレチノイン酸の側鎖部分を導入した誘導体を合成し、神経分化誘導活性の高い化合物の創出を目指した(図3)。得られた誘導体は側鎖末端に共役構造とカルボン酸メチルを有し、予想どおり、化合物8は天然型ビタミンKより強い神経分化誘導活性を示した (ACS Chem. Neurosci., 2025)。そこで、この誘導体が mGluR1 とどのように結合するかを、計算化学に基づくドッキング解析

により検討した。その結果、天然型ビタミンKではナフトキノンのキノン部位が mGluR1 の Arg323 と水素結合しているのに対し、化合物8ではこれに加え、側鎖末端のカルボン酸エステルのカルボニル基も Arg323 と水素結合していることを見出した。この相互作用が、天然型ビタミンKより強い分化誘導作用を示す要因であることが示唆された。しかし、エステルは加水分解されるとカルボン酸体となり、共役構造が不安定化して分解しやすいことがわかった。そこで、化合物の安定化を図るため、生物学的等価体 (バイオアイソスター) の検討を行った。その結果、側鎖末端をアミドおよびチオアミドに変換することで、神経分化誘導活性を保持しつつ、安定性を向上させた誘導体を得ることができた(図5)。現在、これらの誘導体について神経分化誘導活性、安定性および mGluR1 との結合親和性を総合的に評価し、高活性と安定性を両立する化合物を探索している。

4. 今後の計画および学会・論文等の投稿・発表状況

神経幹細胞のニューロン分化を低分子で選択的に促進する化合物の報告例は限られており、標的分子と構造活性相関が整理された例はさらに少ない。我々はビタミンK側鎖末端を系統的に修飾した誘導体を50種以上合成し、1.0 μ M で細胞毒性を示さず、神経幹細胞のニューロン分化を天然型ビタミンK比で約

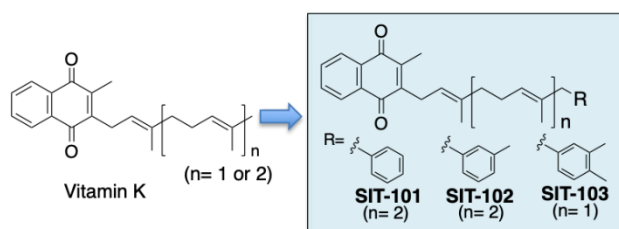


図 4. 申請者が見出した神経分化誘導作用をもつ誘導体

1.3 倍に増強する SIT-101 および SIT-102 を見出した (図 4) [J. Med. Chem., 2015]。一方、同一骨格から分化誘導を抑制する SIT-103 も得られており [Bioorg. Med. Chem. Lett., 2017]、促進・抑制の両方向の化学プローブを基盤に、分化運命決定に関わる分子機構へ踏み込める点が本研究のチャレンジである。

さらに、ビタミン K は血液脳関門を通過して脳内に到達することが報告されており、中枢に作用し得る化学基盤として展開できる可能性がある。また、我々は標的タンパク質とし mGluR1 を同定しており、神経機能調節に関与する受容体を起点に、神経疾患のみならず精神神経領域への波及も期待できる。以上より本研究は、「低分子で神経分化を制御する」という治療原理の概念実証と、候補化合物の最適化を同時に狙う点で、斬新かつ挑戦的である。

今後は、これまでに得られたビタミン K 誘導体について、構造最適化、神経分化誘導活性評価、mGluR1 結合親和性評価を継続する。

あわせて、安全性および薬物動態特性を検討し、有望候補化合物を選定する。得られた成果については、特許出願ならびに学会発表・論文投稿を進め、in vivo 評価へ展開可能な創薬基盤の確立を目指す。

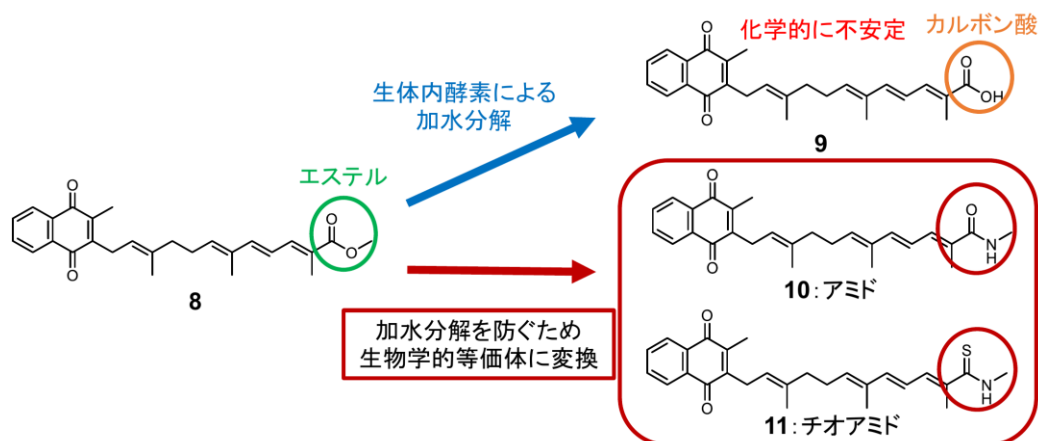


図 5. 高活性化合物 8 の生物学的等価体の設計

芝浦工業大学 2025年度特別教育・研究報告集

発行年月日 2026年7月29日

発行所 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5
TEL 03(5859)7180

発行部署 芝浦工業大学
研究推進部 研究企画課

ISSN 2185-7326

無断複写・転載を禁ず