

研究助成
成果報告論文集
(令和6年度)

公益財団法人 カシオ科学振興財団
CASIO SCIENCE PROMOTION FOUNDATION

成果報告論文

第40回(令和4年度)研究助成

第40回（令和4年度）研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
1	廃プラスチックのビッグデータ分析による識別モデルの構築と評価手法の確立	東北大学大学院国際文化研究科 准教授 大 窪 和 明
2	高開口率の細胞足場シートを用いたサステイナブル食肉培養システムの開発	東京医科歯科大学生体材料工学研究所 教授 梶 弘 和
3	磁性扁長粒子の形状異方性を利用したナノ複相膜の磁気光学効果の高感度化	東北大学大学院工学研究科 講師 青 木 英 恵
4	磁性ワイル半金属のトポロジーに由来する駆動力を用いた磁気秩序の高効率制御法の確立とプロトタイプ実証	物質・材料研究機構 若手国際研究センター ICYS 研究員 竹 内 祐 太 朗
5	食道癌リンパ節転移を見落とさず検知するPETを応用した術中計測支援機器の開発	千葉大学フロンティア医工学センター 准教授 川 村 和 也
6	超臨界CO ₂ が創出する量子空間欠陥に基づいた可視発光ドットの開発	東京工業大学物質理工学院 助教 織 田 耕 彦
7	マルチロボティック測位システムの開発：リアルタイム測位の普遍化・高精度化が変える未来の情報化社会	京都大学大学院情報学研究所 准教授 櫻 間 一 徳
8	紫外光励起-可視光検出-遷移状態分光装置開発	神奈川大学化学生命学部 教授 岩 倉 い ず み
9	電気光学変調コムを用いた広帯域周波数可変かつ極低ノイズなマイクロ波発生	日本大学生産工学部 教授 石 澤 淳
10	ウェブゲームと計算論的モデリングを通して、人の汎化及び弁別能力を測定し、統合失調症との関係性を評価する	東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構 講師 Cai Mingbo
11	機能的磁性ナノ粒子を用いた磁場誘導型がん温熱療法の開発	名古屋大学大学院工学研究科 教授 井 藤 彰
12	多品種少量の放射性薬品を精緻に調製するための唯一無二の自動化システムに関する研究	東京電機大学工学部 教授 茂 木 克 雄
13	機動的レーダリモートセンシングの実現に向けた小型無人機搭載合成開口レーダの開発	室蘭工業大学大学院工学研究科 助教 泉 佑 太
14	多元系スピネル酸化物ナノ粒子の合成と水分解触媒への応用	東北大学多元物質科学研究所 講師 岩 瀬 和 至
15	ハロゲン架橋銅(II)錯体一次元鎖のスピン量子ビットへの展開	公立千歳科学技術大学理工学部 准教授 脇 坂 聖 憲
16	電荷移動錯体導入による多積層型ペロブスカイト量子ドット創出と高効率・長寿命LEDの開発	山形大学理学部 助教 江 部 日 南 子
17	機能的ドメイン境界における相転移・物性発現機構の解明	東京工業大学物質理工学院 教授 横 田 紘 子
18	省エネルギー技術の実現に向けた強磁性酸化物材料の開拓	東京大学大学院工学系研究科 准教授 Hirschberger Maximilian
19	強分極薄膜を自発形成する極性分子の開発 －分子の末端構造による分子配向制御－	東京農工大学大学院工学研究科 助教 田 中 正 樹
20	鋭利なガラス管先端を利用した超電導ナノセンシング技術の開発	電気通信大学大学院情報理工学研究所 准教授 小 久 保 伸 人
21	元素戦略を考量した透明太陽電池の高効率化	長岡技術科学大学大学院工学研究科 教授 田 中 久 仁 彦
22	二次元半導体を利用したマイクロ発光ダイオードへの機能付与	信州大学工学部 助教 浦 上 法 之
23	反力可変触覚ディスプレイ用触知ピンアクチュエータ	名古屋大学大学院工学研究科 准教授 櫻 井 淳 平
24	酸化物異相界面におけるバンド変調機構の解明と制御に向けた原子・電子レベル解析	名古屋大学大学院工学研究科 講師 横 井 達 矢
25	光生成キャリアの空間分離を特徴とする量子ドット太陽電池の開発	豊橋技術科学大学大学院工学研究科 准教授 山 根 啓 輔
26	接合形成と機能発現を同時に成す半導体界面材料工学	京都大学大学院工学研究科 准教授 田 辺 克 明
27	メタ表面を用いる光マネジメント科学の実践－蛍光の100%前方放出を目指して	京都大学大学院工学研究科 助教 村 井 俊 介

No	研究テーマ	代表研究者
28	送受信回路系極低温組込み核磁気共鳴法による微小物質の高感度測定の開発と新奇物性探索	大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授 椋田 秀和
29	位相的データ解析による料理空間の構造解明とおいしい新料理の客観的な提案への応用	神戸大学大学院人間発達環境学研究科 助教 ESCOLAR Emerson Gaw
30	長波長側の可視光を利用可能にする螺旋型有機光触媒の開発	岡山大学異分野基礎科学研究所 助教 田中 健太
31	マルチモーダル分光計測による材料認識ペプチドの機能解明	徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所 特任助教 加藤 遼
32	Si-CdTe一体型3次元半導体放射線イメージセンサの開発	宮崎大学工学部 准教授 武田 彩希
33	伝搬型表面プラズモンを励起子と結合して発光として系外に取り出す技術の開発	兵庫県立大学大学院理学研究科 准教授 小 箕 剛
34	弾性偏光回折格子を用いた非メカ式レーザー偏向機の開発	兵庫県立大学大学院工学研究科 准教授 近藤 瑞穂
35	デュアル光コムによる非接触リモート計測技術の開発	東邦大学理学部 講師 中嶋 善晶
36	深層学習による遺伝子発現制御ネットワーク解析技術の開発	早稲田大学理工学術院総合研究所 主任研究員 大里 直樹
37	双方向ワイヤレス電力伝送のオンライン磁気パラメータ同定による高効率制御に関する研究	立命館大学理工学部 助教 清水 悠生
38	高輝度円偏光発光材料創出を志向したキラルヘテロカーボンナノベルト開発とキロプティカル特性の解明	就実大学薬学部 講師 山本 浩司
39	脳-計算機-超音波閉ループによるてんかん発作の実時間制御	北海道大学大学院薬学研究院 准教授 竹内 雄一
40	ジュニアスポーツにおける主観的運動強度によるトレーニング負荷定量化の妥当性と障害との関連性の検討	北海道教育大学教育学部(旭川校) 講師 土橋 康平
41	生体電気インピーダンス法を用いて骨格筋の量と質を評価するための電氣的パラメータの検討	筑波大学体育系 助教 下山 寛之
42	自動ヒト培養幹細胞動態解析による再生医療支援システムの構築	鳥取大学医学部医学科 教授 難波 大輔
43	MR (Mixed Reality:複合現実) を用いた気管支鏡支援	藤田医科大学医学部 講師 岡地 祥太郎
44	小児てんかん発作の頻度と気圧変動の統計的相関を調べる研究	鳥取大学医学部附属病院 助教 荒井 勇人
45	パーキンソン病患者における頸部多チャンネル表面筋電図による嚥下動態の解析と電気刺激による効果の検討	広島大学大学院医系科学研究科 助教 中森 正博
46	CEST-MRIと機械学習を組み込んだ定量的pHイメージング手法の開発	徳島大学医学部 助教 金澤 裕樹
47	人工知能および距離センサーを用いた次世代手術トレーニングシステムの開発	九州大学病院 助教 福田 篤久
48	タイピングスキルを支える手指運動制御則の解明	埼玉県立大学大学院保健医療福祉学研究科 准教授 国分 貴徳
49	殺菌レーザーとバクテリオファージを融合した狙撃分子の創成	徳島文理大学薬学部 准教授 阪口 義彦
50	慢性疼痛患者に対するストレス評価方法の開発と生活習慣病のリスク判定への応用	東京都健康長寿医療センター研究所 非常勤研究員 守屋 正道
51	皮膚表面形状の計測方式の差が手の動作認識の精度に及ぼす影響についての検証	東京電機大学理工学部 助教 趙 崇貴
52	寒冷誘発性血管収縮の新規メカニズム解明-塩素イオンチャネルTMEM16Aに着目して-	新潟医療福祉大学健康科学部 講師 藤本 知臣
53	緑内障治療に向けた微弱電流刺激による眼球の若返り	九州大学大学院農学研究院 准教授 池上 啓介
54	柔道の初心者における頭部外傷を予防する安全な大外刈りの構築	びわこ成蹊スポーツ大学スポーツ学部 教授 林 弘典

No	研究テーマ	代表研究者
55	腱の三次元培養技術と力学的収縮を組み合わせた抗運動器治療戦略	同志社大学スポーツ健康科学部 助教 土屋吉史
56	光操作技術による適切な行動を生み出すtop-down入力 of 解明	立命館大学生命科学部 助教 塩谷和基
57	加速器ホウ素中性子捕捉療法におけるデータ駆動型アプローチによる全身被曝線量の予測	大阪医科薬科大学関西 BNCT 共同医療センター 助教 柿野諒
58	末梢神経刺激が静的ストレッチの柔軟性向上効果に与える影響とその神経機序	九州産業大学健康・スポーツ科学センター 助教 齋藤輝
59	変貌する日本の食文化 - はじまりの米と魚の食文化から再考する -	山形大学学士課程基盤教育機構 准教授 白石哲也
60	森林伐採と気候変動の飲み水のアクセスへの影響：高解像度衛星データとGPS付き人口健康調査による分析	筑波大学人文社会系 教授 内藤久裕
61	感染症予防難易度の高い社会福祉施設における環境特徴量抽出と空気質管理方法に関する研究	電気通信大学iパワードエネルギー・システム研究センター 教授 横川慎二
62	小中学生のハイリスクなネット利用行動に及ぼす規定因の研究：個人レベルと学校レベルの分析	奈良女子大学研究院人文科学系 教授 中山満子
63	学校数学における生徒が確率的に推論する授業の理論的・実証的研究	岡山大学学術研究院教育学域 講師 石橋一昂
64	個別最適な学びと協働的な学びの一体化を目指したプログラミング教育における学習プロセス評価手法の開発	九州工業大学教養教育院 教授 山田雅之
65	幼児期の「サウンド・エデュケーション」を支援するアプリケーションの開発と検証	つくば国際短期大学保育科 常勤講師 仲条幸一
66	自閉スペクトラム症児を支援する大学生に対するヒデユン・カリキュラムの効果	星美学園短期大学幼児保育学科 准教授 渡邊孝継
67	障害者福祉拠点における利用／支援実態と拠点間連携の研究 -共生型地域包括ケアシステムの構築を目指して-	東京電機大学未来科学部 教授 山田あすか
68	移民二世代のオートエスノグラフィー	早稲田大学人間科学学術院 教授 樋口直人
69	デジタル時代におけるヒト固有なコミュニケーション方策の変化予測	文部科学省 科学技術・学術政策局 事務官 阪口幸駿
70	熟練の情報科教師に見られる「翻案」の特徴の解明	崇城大学総合教育センター 助教 古賀竣也

第39回（令和3年度）研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
3	局所配位構造・結合状態に立脚したHfO ₂ 基薄膜の強誘電相の安定化メカニズムの解明と強誘電性の向上	熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター 教授 木口賢紀
17	大面積フィルム処理のための大気圧長尺マイクロ波プラズマにおける酸素ラジカル空間分布計測	名古屋大学大学院工学研究科 講師 鈴木陽香
49	マタギの知と技術の継承に関する社会学的研究	東北大学大学院教育学研究科 准教授 鷲谷洋輔
57	評価表現分析で読み解く医学論文査読者の嗜好と思考：査読自動化へ向けた基盤研究	福島県立医科大学附属病院 特任准教授 大前憲史

第38回（令和2年度）研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
25	表現力豊かな音声の声質を決める声門流波形と声道伝達関数特徴の解析	富山県立大学 工学部 教授 MOKHTARI Parham
54	自然体験活動における学校教員の危機管理能力向上を目指した視線特徴分析：初心者と経験者の着眼点比較	立命館大学産業社会学部 准教授 岡本尚子

【助成 40-01】

廃プラスチックのビッグデータ分析による識別モデルの構築と評価手法の確立

代表研究者 東北大学大学院国際文化研究科 准教授 大窪 和明
共同研究者 東北大学大学院国際文化研究科 教授 劉 庭秀
共同研究者 芝浦工業大学デザイン工学部 教授 田邊 匡生
共同研究者 東北大学大学院国際文化研究科 専門研究員 劉 曉玥

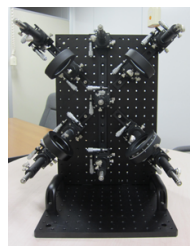
〔研究の概要〕

一般家庭から排出された廃プラ(廃プラスチック)のサンプルを収集し、異なる周波数の THz(テラヘルツ)波を各サンプルに照射し、透過率を計測した。機械学習アルゴリズムを用いて、計測したデータを基に透明なプラスチックを PET と PS に、黒色プラスチックを PET、PP、PS に高精度で識別するモデルを構築した。また、(1)各周波数の透過率が識別精度に与える影響度の評価、(2)再資源化のための素材識別モデルとしての精度評価といった二つの観点から評価方法を検討した。(1)では XAI(eXplainable AI)を用い、識別精度を高めるために重要な周波数を定量的に明らかにした。(2)では機械学習の分野で用いられる Precision 値は識別から得られる再生原料の品質、Recall 値は選別による環境負荷の低減を評価する指標として、それぞれ有用であることを示した。これらの成果は、廃プラの識別における THz 波や機械学習の有用性と将来性を示す意義のある成果といえる。

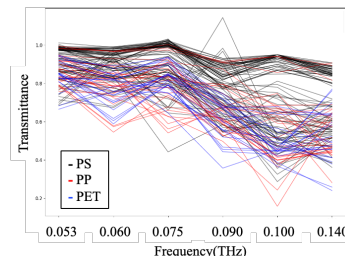
〔研究経過および成果〕

はじめに仙台市内の一般家庭からプラスチック製容器包装廃棄物を廃プラのサンプルとして収集し、各サンプルについて FTIR(フーリエ変換赤外線分光法)などを用いて素材を特定した。それらのサンプルについて、異なる複数の周波数の THz 波の光源と検出器を設置した装置(図(a))を用いて透過率を計測した。

次に透明なプラスチックでも異なる素材、同じ素材でも色の異なる廃プラの識別における THz 波の有効性を検証するため、透明な PET、PS および黒色の PS が混在する廃プラから、色と素材を識別する。周波数 0.075、0.090、0.140THz で透過率を計測した結果、素材ごとに傾向の違いは見られたが、サンプルに含まれる添加剤などの影響により、同じ素材と色であっても透過率にバラツキが見られた。そこで機械学習アルゴリズムの一つである XGBoost を用いて、識別対



(a) 計測装置



(b) 6 光源での計測結果

図 透過率の計測

象の透過率を入力データとして、透明な PET、PS または黒色 PS であるかを識別するモデルを構築した。構築した識別モデルの Precision 値は高く、透明な PET と PS、黒色 PS それぞれの値は 0.92、1.00、0.90 であった。これらの値は、例えば、識別モデルが透明な PET として識別したサンプルの中で、本当に透明な PET であったものの割合が 0.92 であることを示す。すなわち、Precision 値は識別された廃プラを再資源化したときの再生原料の品質を評価する上で重要な

指標であり、本識別モデルを用いることによって不純物の少ない再生原料が期待できる。また、透明な PET と PS、黒色 PS の Recall 値は、それぞれ 0.92, 1.00, 0.90 であった。これらの値は、例えば、識別対象の廃プラに含まれる透明な PET の内、0.92 の割合で透明な PET として正しく回収されたことを示す。正しく回収されなかった素材が残渣として焼却処理されることを考えると、Recall 値が高いほど再資源化される量が多く、環境負荷が低減されたと考えることができる。さらに XAI(eXplainable AI)の一種である SHAP 値を用いて識別精度への重要度を評価した結果、素材ごとに重要な周波数は異なることが明らかになった。

次に、近赤外線による識別が難しい黒色プラスチックを PET、PP、PS に識別することを考える。ここでは 6 種類の周波数での THz 波について透過率を計測し、SVM(Support Vector Machine)を用いて識別モデルを構築した(図(b))。入力データに用いる周波数を 1 種類から 6 種類まで一つずつ増やしていったときの精度の変化を検討した結果、より多くの周波数を用いるほど Precision 値, Recall 値は高くなることが確認された。また教師データ、テストデータの組み合わせを 500 通り与え、それぞれについて識別モデルを構築し、評価した。その結果、特に黒色 PS の Precision 値が高く、6 種類の周波数を用いた場合には 0.70 以上の Precision 値を達成した識別モデルが高い確率(0.78)で構築できた。一方、サンプルサイズが小さい黒色の PET と PP は、比較的、低い精度であった。

そこで黒色 PET、PP に SMOTE(Synthetic Minority Over Sampling Technique)によるオーバーサンプリング法を適用し、識別モデルの精度を検討した。また、生成 AI の発展に重要な役割を果たしている GAN(敵対的生成ネットワーク)の応用の一つである cGAN(条

件付き GAN)を応用したオーバーサンプリング法を試し、SMOTE または cGAN によって Precision 値や Recall 値が高まることが明らかになった。また、XAI を用いて周波数の影響度を評価し、黒色プラの識別には 0.060THz の重要度が高いことが明らかになった。

[発表論文]

1. 田邊匡生、大橋隆宏、蘆澤雄亮、劉庭秀、眞子岳、大窪和明、佐々木哲朗「特集：プラスチック資源循環（現状&取組み） テラヘルツ波を用いたプラスチックの素材識別・劣化診断装置」JETI Vol. 70 (2022) 29-30.
2. 田邊匡生、大橋隆宏、劉庭秀、眞子岳、大窪和明、佐々木哲朗「廃プラスチックの選別装置開発によるリサイクルの高度化」化学工業 第 73 巻 8 号 (2022) 481-486.
3. 佐々木哲朗、田邊匡生、劉庭秀、眞子岳、大窪和明「第2節 テラヘルツ波による廃プラスチック高度識別装置の開発」第2章 リサイクル材・バイオマス活用のための分析技術、リサイクル材・バイオマス複合プラスチックの技術と仕組(サイエンス&テクノロジー 2023) 7-13.
4. 劉庭秀、プラスチック製容器包装廃棄物の高度選別装置の開発、光学 52(11) (2023) 497-499.
5. Kazuaki Okubo, Tadao Tanabe, Jeongsoo Yu, Gaku Manago, Xiaoyue Liu, Tetsuo Sasaki, Identifying plastic materials in post-consumer food containers and packaging waste using terahertz spectroscopy and machine learning, 投稿中.
6. 大窪和明、眞子岳、劉庭秀、田邊匡生、テラヘルツ波を用いたプラスチック素材識別のための機械学習モデルの開発、第 15 回廃棄物資源循環学会東北支部研究発表会予稿集、(2024) 8-9.

【助成 40-02】

高開口率の細胞足場シートを用いたサステナブル食肉培養システムの開発

代表研究者 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授 梶 弘和

共同研究者 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 助教 堀 武志

〔研究の概要〕

世界人口は増加しており、現在の食肉供給システムでは将来的に供給が追いつかなくなると懸念されている。さらに供給量だけでなく、自然環境への負担を小さくした持続可能な食糧供給システムを構築することの重要性が認識されている。この様な背景から、本研究では、我々がこれまでに培ってきた細胞培養技術を基盤として新たな食肉培養システムの要素技術の構築を目指した。現在の食肉培養システムは、成形技術が不十分であり、さらに、培養肉への細胞足場材料の混入比率が高いという課題がある。本研究では、これらの課題を克服するための高開口率の細胞足場シートの開発を行った。この細胞足場シートを活用することにより、実際の食肉に近い培養肉を効率的に作製できるものと期待される。

〔研究経過および成果〕

細胞培養により食肉を作製する技術は、持続可能な食糧供給システムに繋がる技術として世界中で開発が進んでいる。しかし、解決すべき課題が多く存在する。たとえば、コラーゲングルなどの細胞足場材料の占める割合が高いため、実際の食肉を模倣するためには足場材料の混入比率を下げる必要がある。また、実際の食肉が有する層状構造を模倣することは容易ではなく、成形技術が十分に発達していない。さらに、しばしば増殖能の高い筋芽細胞等の未熟な細胞が培養肉作製に利用されるが、これらの細胞を培養足場上で成熟させるための工夫も必要となる。

これらの課題を克服するために、我々は新たな細胞足場シートの開発を行った。足場材料の混入比率を下げ、生体組織のような細胞-細胞間接着が優位になる状況を作り出すため、高開口率のメッシュシートを作製を試みた。足場材料として着目したのは、バイオマスマテリアルの一つであり、生物生産量がセル

ローズに匹敵するほど多量に存在するキトサンである。

キトサンは、カニやエビなどの殻の主成分となる高分子多糖であり、サプリメントや医療用デバイスに利用されている安全性の高い物質である。我々はまず、キトサン溶液を調整し、微細加工により作製した多数のピラーを有する鋳型に塗布した。乾燥後に鋳型から

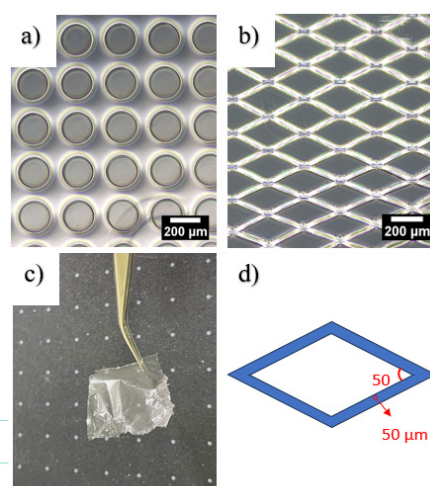


図1 キトサンメッシュシート。a) 開口部が円形、b) 菱形のメッシュシート。c) メッシュシートの全体写真、d) 菱形メッシュの開口部の形。

剥離することにより、マイクロスケールの目（開口部）を持ったキトサンメッシュシートを作製することに成功した（図1）。開口部の形として、円形と菱形のメッシュシートを作製した。このメッシュシートは厚さ 20 μm 程であるにもかかわらずピンセットで持ち上げても破れないほどの強度を有していた。

作製したキトサンメッシュシートを用いた細胞培養が可能かどうかを確認するために、表面張力を利用してメッシュシートの上に線維芽細胞の懸濁液を載せた。培養液中で培養を継続した結果、細胞はメッシュシートの開口部を埋めるように増殖し、厚みを持った細胞シートを形成した（図2）。この細胞シートは、ディッシュ底面から浮遊させた状態で固定されている。培地中の酸素や栄養素が細胞シートの上下から細胞へ供給された結果、より効率的に厚みを持った細胞シートが形成されたものと考えられる。

さらに、この細胞培養法の重要な特徴として、細胞の配向性（細胞の向き）を制御できるという点が挙げられる。細胞を配向させることにより、若い筋芽細胞から筋管細胞への成熟が促進されることが知られている。筋管細胞への成熟は、食肉の歯ごたえなどに関係してくるものと考えられるため培養肉の作製には重要な要素である。図2に示すように、本研究では、開口部の形を菱形にすることにより、多くの線維芽細胞を一方向（菱形の長軸方向）に配向させることができた。筋芽細胞を用いた検討も今後必要であるが、別の種類のメッシュシートを利用した研究では、マウス筋芽細胞株を菱形の開口部を持つメッシュシート上で培養することにより、効率的に筋管細胞へと成熟させることができることが明らかになっている。

本研究では、キトサンを材料として高開口率の細胞足場シートを作製することができ、さらに、このシート

を用いた細胞培養にも成功した。この新しい細胞培養方法は以下の4つの特徴を有する。①培養中、細胞への栄養供給に優れている、②細胞の配向性と成熟を開口部の形の調節により制御することができる、③培養肉に対する足場材料の混入比率が低い、④細胞シートを容易に重ねることができる。今後、筋肉細胞、脂肪細胞、線維芽細胞などから細胞シートを作製し、積層化することにより、実際の食肉に似た構造を有する培養肉の作製を試みたい。

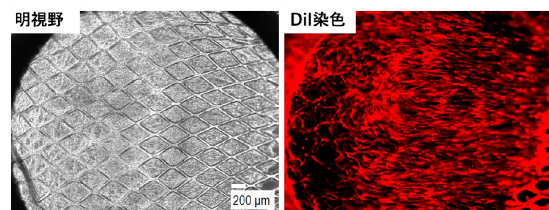


図2 キトサンメッシュシートを用いた線維芽細胞の培養。明視野像（左）と蛍光色素による染色像（右）

[学会発表]

1. 許家誠, 堀 武志, 梨本裕司, 吉田昭太郎, 梶弘和, 細胞培養肉作製に向けたバイオマスメッシュシートの開発, 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第48回研究会(CHEMINAS 48) 2023年11月7日, 熊本
2. 許家誠, 堀 武志, 梨本裕司, 吉田昭太郎, 梶弘和, Development of a biomass mesh sheet for cell-cultured meat, 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第47回研究会(CHEMINAS 47) 2023年5月14日, 仙台

【助成 40-03】

磁性扁長粒子の形状異方性を利用したナノ複相膜の磁気光学効果の高感度化

東北大学工学部 講師 青木 英恵

〔研究の概要〕

ナノスケールの極限的な磁気-光変換機能の基盤技術を確立することは、情報化社会において通信の高速化・低電力化やデバイスの小型化を可能にする。既存のYIG系光学結晶は、ファラデー回転角(θ_F)が小さく、十分な θ_F を得るために強力(巨大)な磁石が必要である点が、素子の小型化・薄型化に向けた課題であった。本研究提案では、結晶材料より大きなファラデー回転角を有する強磁性ナノ粒子が透明マトリクス中に分散するナノ複相膜に着目し、金属ナノ粒子を「球」から「扁長」形状へ変化させ配列させることで、形状異方性を利用し磁気光学効果の高感度化を実現することを目的とする。本研究提案の狙いである磁気光学効果の高感度化を達成できれば、わずかな磁界で大きな θ_F が期待でき、磁石の体積を減少または磁石自体を省けるため、光学素子の小型化・薄型化に貢献できる。

〔研究経過および成果〕

【背景】磁気光学効果は、近年の高度情報化社会を支える光エレクトロニクス分野で光の変換・制御を司る中心であるが、代表的な磁気光学材料はフェライトガーネット(YIG)が不動である。一方で、高品質な結晶性が求められるYIGにはナノサイズの微細化が望めず、光エレクトロニクスと高度集積化を基盤とするナノエレクトロニクスの融合においては、材料学的な発想の転換が求められる。申請者らは、透明セラミクス中に磁性金属ナノ粒子を分散させた「ナノ複相膜」において、YIG結晶の40倍の θ_F が得られることを見出した(N. Kobayashi, et al., Sci. Rep.8, 4978, 2017)。これはYIG結晶の原子に束縛されるスピン依存電子より、ナノ複相膜の強磁性ナノ粒子間のスピン依存トンネル伝導電子の方が、外部磁界への感受率が大きく、誘電率の非対角成分に大きく寄与するためと考えられる。本研究では、ナノ複相膜中の金属ナノ粒子を「球」から「扁長」形状へ変化させ配列させることで、形状異方性を利用し磁気光学効果の高感度化を実現すること

を目的とする。

【実験方法】磁性金属と透明セラミクスターゲットが対向して回転する基板に交互に積層可能なタンデムスパッタ法を用いてナノ複相膜を作製した。申請者は基板回転速度が速いと球形、中速度で扁長、低速で扁平粒子化することを報告している。

【実験結果】図1に示すように、様々な形状のCo粒子からなるCo-SiO₂膜(いずれも約30 at.%Co)を作製し

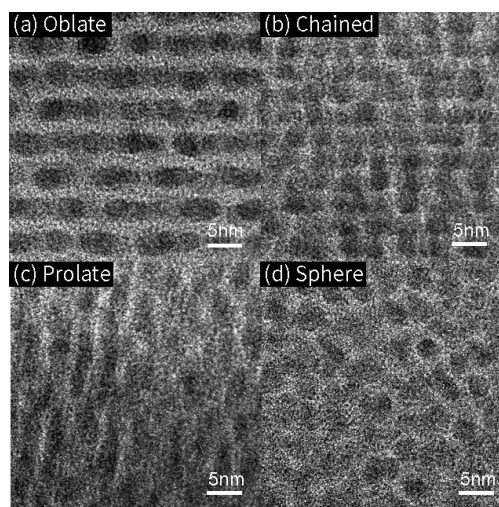


図1 (a) 扁平(oblate), (b)チェーン状(chained), (c)扁長(prolate) および (d)球形(Sphere)の磁性粒子からなるCo-SiO₂ナノ複相膜のTEM断面像。垂直方向が膜面垂直方向

た。基板回転速度を2, 3, 5 rpm 上げることで、粒

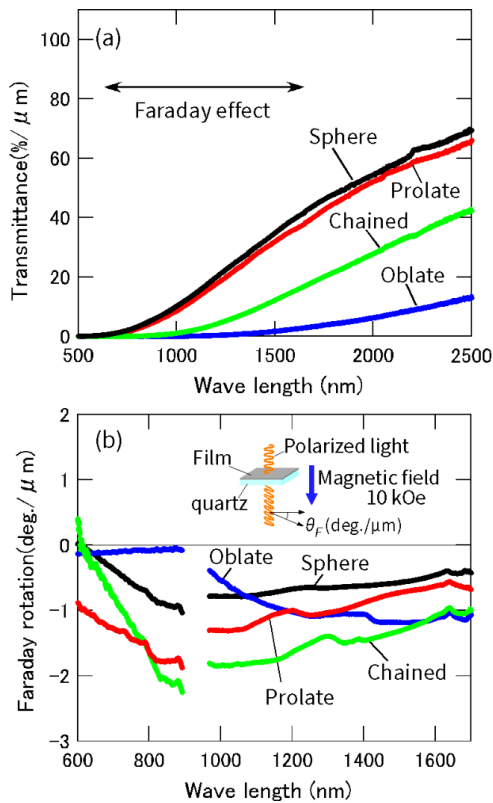


Fig.2 The wavelength spectra of (a)transmittance and

(b)Faraday rotation angle(θ_F) of Co-SiO₂ nanogranular

粒子形状はそれぞれ(a)扁平形、(b)鎖状、(c)扁長形に変化した。また、共スパッタ法で作製すると(d)球形粒子となった。このような基板回転速度に依存する金属ナノ粒子の変化は、非平衡状態における相分離が、粒子の核生成エネルギーまたは表面界面エネルギーが成長過程に影響することに起因する。このようなナノ複相構造が、基板の回転速度のみで制御可能であることは工業的に有用である。TEM 観察および小角散乱測定からの面内方向の平均粒径は、4.4 nm から2.5 nm に減少した。図2は、扁平形(青)、チェーン状(緑)、扁長形(赤)、球状(黒)のナノ粒子を有する Co-SiO₂ ナノ粒状膜の(a)T および(b) θ_F の波長 (λ) スペクトルである。可視光から光通信帯域 ($500 < \lambda < 1700$) までの透過率は、球状、扁長形、チェー

ン状、長円形の順に減少した。粒子形状が扁長形と球形の場合、通信帯域である1550 nm 付近で最大透過率 35 %/ μm が得られ、これは球形粒子の CoFe-SiN ナノ複相膜の報告値の2倍に相当する。これらの透明性の向上は、面内方向のナノ粒子径の減少に対応する。入射光と磁界が膜面垂直方向に測定したファラデー効果(図2(b))において、いずれの膜も負の θ_F 値を示した。最大 θ_F 値とそのときの λ は、扁平粒子では-1.2 deg./ μm at 1500 nm、チェーン状粒子では-2.1 deg./ μm at 860 nm、扁長形粒子では-1.8 deg./ μm at 860 nm、球状粒子では-1.0 deg./ μm at 860 nm であった。チェーン状および扁長形粒子膜は同等の光透過率であるが、球状粒子膜よりも2倍大きい θ_F 値を示した。今後は、粒子形状配列に起因する膜の異方性方向に合わせた、効果的な磁界印加方向や電圧などの複合的な光機能性の評価に取り組む。

[発表論文]

1. H. Kijima-Aoki, K. Ikeda, N. Kobayashi, M. Ohnuma, Y. Honda and H. Masumoto, "Faraday effects of magneto-dielectric nanogranular films with various particle shape," *2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (INTERMAG Short Papers)*, Sendai, Japan, 2023, pp. 1-2, 0305022.
2. N. Yokohama, H. Kijima-Aoki, and H. Masumoto, "Improving magnetic and dielectric performance of Co-BaMgF₄ nanocomposite films by thermal annealing treatment." *Short Papers (INTERMAG Short Papers)*, Sendai, Japan, 2023,
3. 青木英恵、池田賢司、小林伸聖、増本博、遠藤恭、「光周波数帯の誘電特性に及ぼす Co-BaF₂ ナノ複相膜の Co 添加量の効果」日本金属学会春期講演大会、2023年3月9日
4. H. Kijima-Aoki, K. Uchikoshi, T. Miyazaki, M. Ohnuma, Y. Honda, N. Kobayashi, S. Ohnuma, and H. Masumoto, "Structure and Tunneling Magnetodielectric Effects of Cobalt-(Barium Fluoride) Lateral Nanogranular Films" *Materials Transaction*, (2024) Accepted.

【助成 40-04】

磁性ワイル半金属のトポロジーに由来する駆動力を用いた磁気秩序の 高効率制御法の確立とプロトタイプ実証

研究者 物質・材料研究機構 ICYS 研究員 竹内 祐太郎

〔研究の概要〕

磁性ワイル半金属はそのトポロジカルなバンド構造によって様々な新奇量子物性を示すことから新しい磁性材料として注目されている。スピントロニクス分野でも磁性ワイル半金属を利用することで更なる低消費電力化や新しい機能性の付与など革新的デバイスへの展開に向けた研究が活発になっている。本研究では反強磁性ワイル半金属を有する薄膜構造を作製し、これまで研究されてきた電流誘起スピン軌道トルクに加えて、ワイル半金属のトポロジーに由来したスピントルクについて探求するとともに、それらを利用したデバイスのプロトタイプ実証を行った。反強磁性ワイル半金属に作用するスピントルクの定量的な評価手法の確立に成功し、さらにスピン軌道トルク、トポロジー由来のトルクを用いて、磁気秩序の高速・高効率な電氣的制御を実現した。

〔研究経過および成果〕

スピントロニクスでは様々な磁性材料の電氣的制御が最重要課題であり、当該技術を利用した不揮発性メモリ・ロジックや新規コンピューティングデバイスの実現が期待されている。一方、近年では物質のトポロジーに由来した様々な新奇量子効果が報告されるようになり、とりわけスピントロニクスでは磁性ワイル半金属を用いたデバイスにおける高速・高効率制御や新しい機能性の付与を目指して研究活動が活発化している。本研究では磁化がゼロの反強磁性スピン構造を有したトポロジカル物質である反強磁性ワイル半金属薄膜を用いる。磁性材料の制御のための従来手法であるスピン軌道トルクに加えて、ワイル半金属のトポロジーに由来したトルクを利用した新規デバイスの実証を目的とする。

本研究で用いたすべての薄膜は DC/RF マグネトロンスパッタリングによって成膜した。反強磁性ワイル半金属として $D0_{19}\text{-Mn}_3\text{Sn}$ を使用している。デバイスへの微細加工にあたりフォトリソグラフィおよび電子線リソグ

ラフィを用いた。

図 1(a), (b)は反強磁性ワイル半金属 Mn_3Sn に作用する電流誘起スピントルクの評価実験の模式図である。 $\text{MgO}(110)$ 基板上に $\text{W}(2\text{ nm})/\text{Ta}(3\text{ nm})/\text{Mn}_3\text{Sn}(8.8\text{ nm})/\text{Pt}(5\text{ nm})$ のヘテロ構造を作製し、高調波ホール測定法によってスピントルクの評価を検討した。図 1(c), (d)はそれぞれホール抵抗の基本波、2倍波の磁場印加角度依存性である。従来の磁性材料とは異なる、 Mn_3Sn のトポロジカルな磁気構造と特異なダイナミクスを考慮し、ホール抵抗の計算モデルを構築することで、 Mn_3Sn 内部のスピントルクの定量的評価に成功した。さらに Mn_3Sn の電流誘起スイッチングを実証し、その反転ダイナミクスも明らかにした。本成果は米国・マサチューセッツ工科大学との共同研究によるものである¹。

続いて $\text{MgO}(110)$ 基板上に $\text{W}(5\text{ nm})/\text{MgO}(t_{\text{MgO}})/\text{Mn}_3\text{Sn}(30\text{ nm})/\text{MgO}(1.3\text{ nm})/\text{Ru}(1\text{ nm})$ [t_{MgO} は MgO 膜厚]の薄膜を作製し、反強磁性ワイル半金属の電流誘起反転の実証を行った。図 2(a), (b)に各 MgO 膜厚

および外部磁場における Mn_3Sn の電流誘起スイッチングの結果を示す。 $t_{\text{MgO}} = 0 \text{ nm}$ のときは $\text{W}/\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{MgO}$ の非対称な構造になるとめスピン軌道トルクによるスイッチングと考えられる¹。より対称的な構造である t_{MgO} が 1 nm 以上のとき、スイッチングの極性が反転していることから、スピン軌道トルクとは異なるメカニズムであり、 Mn_3Sn 内部の特異なバンド構造や磁気構造に由来したトルクが作用している可能性がある[論文執筆中]。

この他にも、反強磁性ワイル半金属の非線形ホール効果の発現など当初の予定以外の成果も得られた。また、反強磁性ワイル半金属のナノスケール微細ドット素子を世界で初めて作製し、その情報保持時間を決定する因子である熱安定性も明らかにするとともに³、電流による高速・高効率制御の実証も行った⁴。以上の研究は反強磁性ワイル半金属を用いたデバイスの新しい機能性を示すものであり、革新的な半導体ロジック・メモリ素子および AI デバイスの実現に向けた重要な知見が得られた。

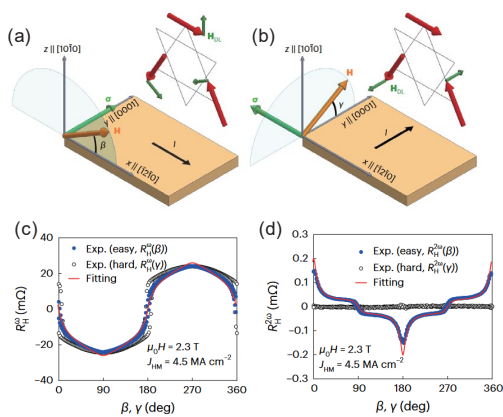


図 1(a), (b) 反強磁性ワイル半金属 Mn_3Sn に作用するスピントルク評価測定の模式図。それぞれ電流 I を六方晶 Mn_3Sn の $[1\bar{2}10]$ 、 $[0001]$ 方向に印加している。ホール抵抗の(c)基本波および(d)2 倍波の磁場印加角度 β, γ 依存性。赤線は本研究で考案したモデルによるフィット曲線¹。

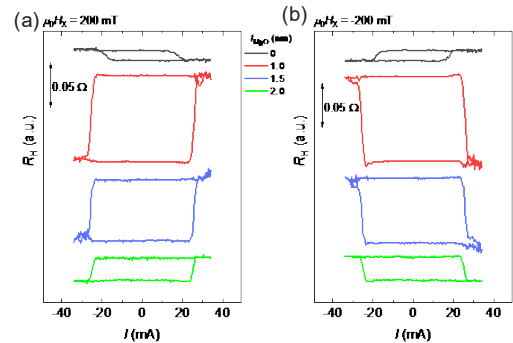


図 2 外部磁場 $\mu_0 H_x$ (a) 200 mT および (b) -200 mT のときのホール抵抗の電流依存性を各 MgO 膜厚で測定した実験結果。電流方向と Mn_3Sn の結晶方位の関係は図 2(a)と同じである。外部磁場 H_x は電流方向と平行に印加している。

[発表論文]

1. J.-Y. Yoon, P. Zhang, C.-T. Chou, Y. Takeuchi *et al.*, “Handedness anomaly in a non-collinear antiferromagnet under spin-orbit torque”, *Nat. Mater.* **22**, 1106 (2023).
2. J. Han, T. Uchimura, Y. Araki, J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi *et al.*, “Room-temperature flexible manipulation of the quantum-metric structure in a topological chiral antiferromagnet”, *Nat. Phys.* Accepted (2024).
3. Y. Sato, Y. Takeuchi, “Thermal stability of non-collinear antiferromagnetic Mn_3Sn nanodot”, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 122404 (2023).
4. Y. Takeuchi *et al.*, Submitted (2024).

【助成 40-05】

食道癌リンパ節転移を見落とさず検知する PET を応用した術中計測支援機器の開発

研究者 千葉大学フロンティア医工学センター 准教授 川村 和也

〔研究の概要〕

食道癌治療は、広範囲に渡るリンパ節郭清により根治率を維持している一方、年々増加傾向にある術後合併症が課題である。先行研究では、食道癌に対する FDG 特異性を利用し、これを術中に計測することで転移を特定する鉗子型ミニ PET の開発を進めてきた。本研究では、鉗子型ミニ PET の抱える課題のとして、検出器と線源の相対的位置の違いによる放射線検出感度のばらつきに着目し、ロボット技術を利用した適切な食道癌の切除範囲をヒトの技量に依存せず術中に決定する支援システムの試作を目的とした。計測方向に応じた感度分布を計測・評価した結果から、ロボットアームを用いて検出感度最大点と線源位置を一致させる手法を構築した。

〔研究経過および成果〕

内視鏡手術やロボット支援手術の進歩にともなう、外科の「取る」技術が進歩を続ける今、「術中に見る」技術が求められている。特に、術中における食道癌のリンパ節転移の見極めは、術前の画像診断を用いても、術前・術中での患者の体位差や呼吸運動の影響などから非常に難しい。術中にリンパ節転移を目視することはほぼ不可能であるため、現状の外科治療では、転移する可能性のあるリンパ節をすべて切除する治療を標準とし、根治性を高めてきた。しかし、高侵襲な治療となるにも関わらず、切除後の病理検査で転移が認められたものは極めて僅かであると報告されている。術後の死亡率の高さも指摘されていることから、術中において適切な切除範囲の決定が課題となっている。先行研究として、陽電子放出断層撮像 (PET) を小型化し、術中利用する鉗子型ミニ PET の開発を行い、PET 機能を応用した癌検知の可能性を確認した。しかし、鉗子構造を模したことで、検知精度が対象部位の大きさや使用者の技量に大きく依存することが確認され、術中に安定かつ正確

に計測することが課題となっている。そこで、鉗子型ミニ PET を基本構造とし、体内自由度の拡張と計測動作を支援するロボット技術を利用した適切な食道癌の切除範囲をヒトの技量に依存せず術中に決定する手法の実現を目指す。本研究では、実験的検討段階として、提案システムに必要な機構面と制御面における仕様選定と試作開発を目的とした。

安定かつ正確に計測するために鉗子型ミニ PET の抱える課題として、検出器と線源間の角度・距離の違いによる放射線検出感度のばらつきがあること、検出器と線源の相対的位置の違いによる放射線検出感度のばらつきがあることの二つが挙げられる。前者の課題は先行研究にて、リアルタイムに計測した鉗子先端角度を用いた感度補正により改善できることが確認されている。そこで、検出器表面上の放射線検出感度分布を計測した (Fig.1)。この結果から、検出器表面上の水平方向(x 軸)、長軸方向(y 軸)方向でそれぞれ放射線検出感度のピーク値が発生し、それらピーク値の交点で放射線検出感度が最大になることがわかった (Fig.2)。これは、検出器中心部の方が、

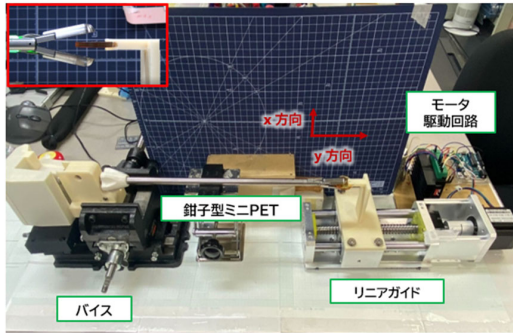


Fig.1 計測実験のセットアップ

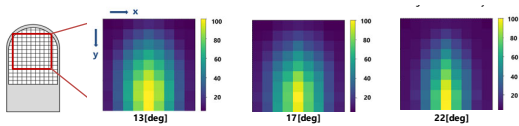


Fig.2 鉗子先端角度に応じた検出感度分布

放射線を検出できる立体角が広く、放射線が通過できる結晶内距離が長いことに起因する。

この結果に基づき、それぞれの方向に対して放射線量のピーク値を探索し、その交点が理論的には線源位置と一致する。この検出器特性を踏まえると、検出器の感度最大点と線源位置が一致した状態で放射線計測を行うことができれば、検出器と線源の相対的位置の違いによる感度のばらつきを排除できると考えられる。これにより、放射線検出感度の補正係数は鉗子先端角度にのみ依存して決定されることとなり、鉗子型ミニ PET における 2 点の課題を解決できると考えた。これに加えて、鉗子型ミニ PET の操作では、計測対象の臓器を牽引した状態での計測が必要となる。清潔環境内における人員やタスク、医療従事者への被ばく抑制といった観点も含めて、

本研究では放射線量のフィードバックに基づいて鉗子型ミニ PET を自動制御することで、正確な位置制御とそれに基づく線源探索が可能なシステムとすることとした。現在は、Fig.3 に示すシステム試作を行

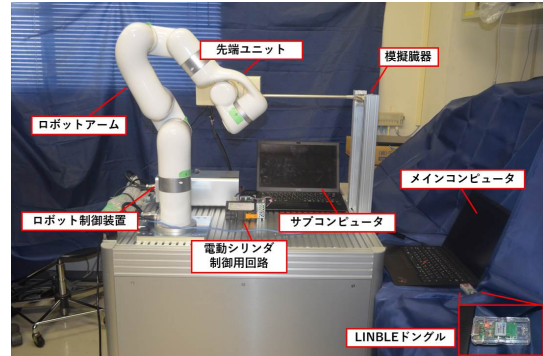


Fig.3 支援システムの試作

っている。動作精度を検証しつつ、その評価を進めている。

〔発表論文〕

1. 中島彩乃, 川村和也, 伊藤繁記, 高橋美和子, 山谷泰賀, "鉗子型ミニ PET における放射線検出感度の位置依存性評価", 日本コンピュータ外科学会誌, vol. 25, no. 3, p.87, 第 32 回日本コンピュータ外科学会 (JSCAS2023), 鹿児島県鹿児島市, 12 月, 2023
2. 中島彩乃, 川村和也, 伊藤繁記, 高橋美和子, 山谷泰賀, "鉗子型ミニ PET における放射線検出感度補正システムの開発", Proceedings of the 2023 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Nagoya, Japan, June 28-July 1, 2023
3. 中島彩乃, 川村和也, 伊藤繁記, 高橋美和子, 山谷泰賀, "鉗子型ミニ PET の開発 / 検出感度補正法に関する検討", 未来 PET 創造研究ユニット]第 2 回 Bench to Clinical シンポジウム, July 12-13, 宮城県仙台市, 2023
(現在英文誌へ投稿中 1 件)

【助成 40-06】

超臨界 CO₂ が創出する量子空間欠陥に基づいた可視発光ドットの開発

研究者 東京工業大学物質理工学院 助教 織田 耕彦

〔研究の概要〕

ZnO は紫外発光特性を有するワイドギャップ半導体であるが、量子化することで欠陥構造に起因した可視発光特性が発現するため、Ga や In といった希少元素に代わる次世代の発光材料として期待されている。対して、本研究は超臨界 CO₂ を用いた欠陥内包 ZnO ドットの合成と欠陥制御に基づいた可視発光特性の創出に向けて、ZnO の低温合成と量子化への展開を試みた。その結果、超臨界 CO₂ を活用した ZnO 低温合成に成功するとともに、Zn(CO)_x(CO₂)_y(acac)_z 錯体の形成という CO₂ 自身による新奇な反応駆動メカニズムを見出した。また、3-Butoxypropylamine (有機修飾剤) を超臨界 CO₂ 場に共存させることで、ZnO 量子ドットの合成にも成功し、高圧 in-situ 光吸収解析も実施することで、その形成機構も明らかにした。

〔研究経過および成果〕

1. 緒言

酸化亜鉛 (ZnO) は日焼け止めや白色塗料など身近に利用されているが、量子化することで欠陥構造に起因した可視発光特性が発現するため、Ga や In といった希少元素に代わる次世代の発光材料として、生体イメージング材料・ディスプレイ材料としての応用も期待されている。一方で、量子ドットを合成する現在主流の Heat-up 法や水熱法は、300°C 以上の高温域の利用が不可欠であるため、粒子の結晶化がいち早く進行し、欠陥構造の導入や制御が困難な点が懸念される。これらに対して、本研究は超臨界 CO₂ を用いた合成技術に着目した。超臨界流体は分子の運動が激しい高拡散場であり、核生成・結晶成長プロセスにおける非平衡性が大きいいため、欠陥構造の導入に有利な媒体である。特に CO₂ は 31°C という低温の臨界点を有するため、「高拡散×低温」という、欠陥導入と欠陥量の制御の双方において有利な条件を達成できる媒体である。更には、超臨界 CO₂ は脱圧の

みで溶媒除去ができ、洗浄・乾燥媒体としても利用可能であるため、クリーンな反応場としても期待される。

以上より本研究は、超臨界 CO₂ を用いた欠陥内包 ZnO ドットの合成と欠陥制御に基づいた可視発光特性の創出に向けて、ZnO の低温合成と量子化への展開を試みた。

2. 研究経過及び成果

耐圧容器に、所定量の Zn(acac)₂・H₂O、有機修飾剤 (3-Butoxypropylamine) を封入したのちに、CO₂ を送液することで昇圧した。その後、耐圧容器をオイルバスに投入し 18 h 反応させることで、ZnO 粒子を合成した。反応後は 0.5 MPa min⁻¹ で CO₂ を減圧することで、生成物を回収した。比較として、N₂ 雰囲気下 (0.1 MPa or 30.0 MPa) での合成検討も同様に行った。回収物は 2-methoxyethanol で洗浄し、24 h 減圧乾燥を行うことで粒子を得た。乾燥粒子は XRD, TEM, TEM-ED, FT-IR, TG, TG-MS よって分析し、その重量から、合成収率 (合成粒子の重量/ZnO の理論最大生成重量) も算出した。

まず、有機修飾剤を用いない温度 60°C 条件で、各雰囲気下 (CO₂ or N₂) での ZnO 低温合成を試みた。その結果、全条件で ZnO 単相を得るとともに、その合成収率が CO₂ 圧力の増大とともに顕著に向上するという興味深い結果を得た (Fig.1 左)。この結果は、超臨界 CO₂ 場が ZnO の低温合成に有利であり、CO₂ による反応駆動効果が存在することを指し示すものである。この効果を詳細に検証すべく、XRD, TG, TG-MS, FT-IR 分析を行い、さらには超臨界 CO₂ 場の相挙動を直接観察した (Fig.1 右)。その結果、Fig.2 に示すように、CO₂ が固体状の Zn(acac)₂·H₂O の分子間に高速侵入し、Zn(CO)_x(CO₂)_y(acac)_z 錯体を形成することで、ZnO の低温合成が可能になるといふ、新奇な反応駆動メカニズムを見出した。本結果は、「CO₂ 自身による反応駆動」という点で、新たな学術領域の開拓に寄与するだけでなく、「CO₂ のみを用いた無溶媒・低温合成」という点で、SDGs の実現を加速する技術的な意義も有している。本内容は現在、学術誌 *RSC advance* にて revision 中である。

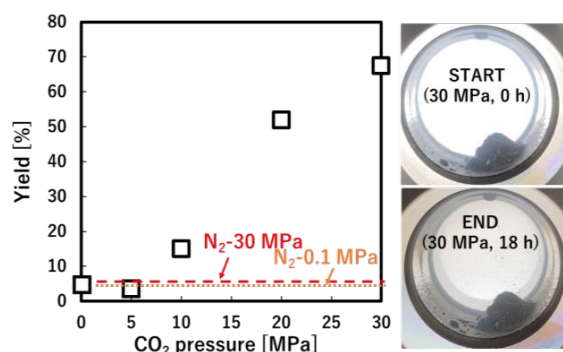


Fig.1 ZnO 収率の圧力依存性と相挙動

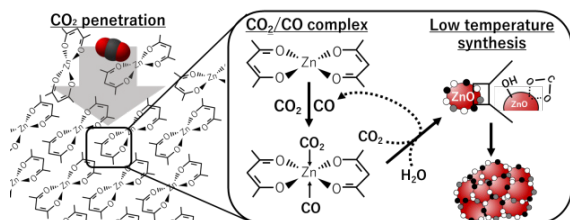


Fig.2 超臨界 CO₂ 下での ZnO 形成機構

続いて、3-Butoxypropylamine (有機修飾剤) を超臨界 CO₂ 場に共存させることで、ZnO 粒子の量子化と可視発光特性の発現を試みた。その結果、Fig.3a に示すように、10 nm 以下のサイズを有する ZnO 量子ドットの合成に成功した。また、相挙動観察と高圧 in-situ 光吸収解析を実施することで、超臨界 CO₂ 場で Zn(acac)₂ と 3-Butoxypropylamine が反応し、Zn(R-NHCOO)_x という有機金属錯体を形成することで、ZnO 量子ドットが合成されることが明らかとなった。一方で、合成 ZnO 量子ドットの Hexane 分散液を UV ランプ (254 nm) に曝した所、明瞭な可視発光特性は確認できず (Fig.3b)、今後はより詳細な発光解析・材料設計が望まれる。

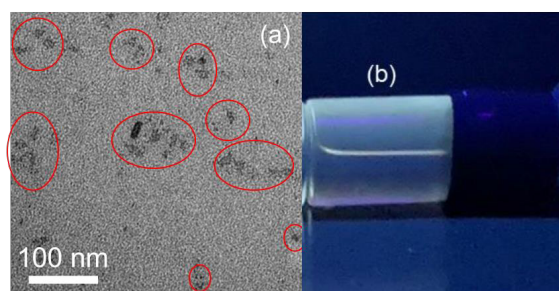


Fig.3 超臨界 CO₂ 合成した ZnO 量子ドットと発光特性

[発表論文]

1. **Yasuhiko Orita***, Keito Kariya, Thossaporn Wijakmatee, Yusuke Shimoyama “Formation mechanism of iron oxide nanoparticles using controlled hydrolysis reaction in supercritical carbon dioxide” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **664**, 131136 (2023).
2. Taishi Furuya, Yusuke Shimoyama, **Yasuhiko Orita*** “Low temperature synthesis of ZnO particles using CO₂-driven mechanism under high pressure” *RSC advance* [revision]

【助成 40-07】

マルチロボティック測位システムの開発： リアルタイム測位の普遍化・高精度化が変える未来の情報化社会

研究者 京都大学大学院情報学研究科 准教授 櫻間 一徳

〔研究の概要〕

本研究の目的は、非 GPS 環境のような既存システムでは高精度なリアルタイム測位ができない状況に対応する「マルチロボティック測位システム」を開発し、リアルタイム測位の普遍化・高精度化を図ることである。まず、デプスカメラと LiDAR を設置した構成の測位対象の全方向移動台車ロボットを製作し、移動体としてドローンを考えた。次に、ロボットの自己位置・姿勢・物体位置の同時推定を、ノイズ及びバイアスが含まれた相対観測を用いて行う手法を提案した。最後に、ロボット群が複数のターゲットを巡回して観測するための分散制御器を設計した。さらに、数値実験によって複数ロボットが多数のターゲットを協調的に観測できていることを確認した。

〔研究経過および成果〕

本研究の目的は、非 GPS 環境、外部測位装置を事前に設置しない、自己測位では低精度になる、という既存システムでは高精度なリアルタイム測位ができない状況に対応する「マルチロボティック測位システム」を開発し、リアルタイム測位の普遍化・高精度化を図ることである。本システムは多点に配置された測位装置を能動的に動作させる新しい構成のシステムである。研究経過および成果は以下の通りである。

ハードウェアの製作(期間:2023年4月~12月) 図



図 1 : 測位ロボット 2 台

1 のような測位ロボット 2 台を製作した。全方向移動台車ロボットに、デプスカメラを搭載したマニピュレーターと相手ロボットを測定する LiDAR を設置した構成である。測位対象の移動体としてドローンを考えた。

協調測位法の考案(期間:2023年7月~2024年2月) 複数の測位ロボットから得られるセンサ情報を統合し、移動体を協調的に測位する方法論を考案した。まず、1. システムの状態変数(ロボット・移動体の位置姿勢、マニピュレーターの関節角度など)と得られるセンサ値の関係から、移動体の位置姿勢を推定するアルゴリズムを考案した。さらに、2. 得られた推定値をもとにロボットをより観測しやすい位置に移動して巡回するような制御法を提案した。以下、この二つの方法について具体的に説明する。

方法 1. ロボットの自己位置・姿勢・物体位置の同時推定を、ノイズ及びバイアスが含まれた相対観測を用いて行う手法を提案した。特に、相対観測値は位置情報のみであり、姿勢は含まず、不均一なバイアスを含む点に注意されたい。まず初めに、バイアス及びノ

イズが含まれたロボットとターゲットの相対位置の観測モデルを定式化した。ここで、エージェントの姿勢を表現するために、特殊直交群に属する回転行列を適用した。次に、エージェントの位置と姿勢、物体の位置、バイアスからなる未知パラメータを含んだ尤度関数を与えて最適化問題として定式化した。この最適化問題を分散的に解くために、元の問題を合意制約付き最適化問題に再定式化した。そして、この問題をリーマン多様体上の勾配に基づく主双対上昇法によって解くことで、全ての変数を同時に推定する分散アルゴリズムを得た。提案した分散アルゴリズムの有効性をシミュレーションにより検証し、提案法は、集中的な手法と同程度の精度であることを示した。提案法の利点は以下の通りである。(i) リーマン多様体上の最尤推定から導かれるアルゴリズムの意味が明確である点。(ii) エージェントと物体の同時推定により、エージェント情報を統合できるため推定性能を向上させられる点。(iii) 観測バイアスを考慮した推定を行う点。(iv) 相対姿勢の計測が不要である点。(v) 提案した推定手法は、リーマン多様体上の定式化であるため、空間の次元によらず適用可能である点。(vi) 事前情報として具体的な分布(正規分布とフィッシャー行列分布)を用いることで、分散アルゴリズムを提案している点。

方法 2. ロボット群が複数のターゲットを巡回して観測するための分散制御器を設計した。分散制御とは、集中管理に頼ることなく、ロボットが観測した情報のみを用いた制御法である。ターゲットが観測されていない時間に応じて重みが増加する目的関数を用いることで、ロボットがターゲットを巡回する新しい方法を提案した。さらに、設計した分散制御器の有効性を数値実験で示した。実際、図 2 のように 3 台のロボットに

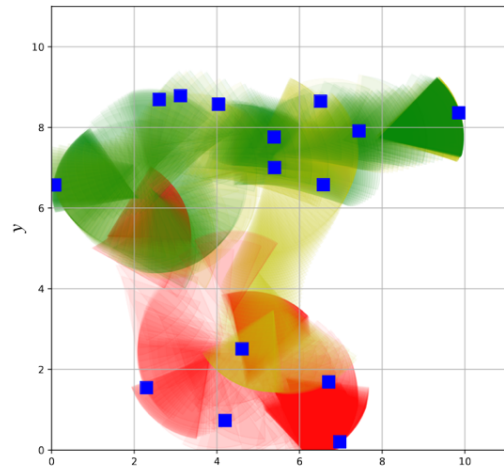


図 2 : シミュレーション結果

よる累積観測領域が多数のターゲットをカバーしていることが分かる。提案法の特徴は以下の通りである。

- (i) ロボットの台数に依らず、多くのターゲットを巡回するように観測できる。各ロボットは自身で記録している時間の重みによって、どのターゲットを観測すべきか判断する。したがって一部が故障しても対応できる。
- (ii) 通信機器やコンパスを必要としない。各モバイルセンサが従う制御器に必要とするのは、自身が取得した情報のみで、GPS やコンパスが使えない、あるいはそれらの精度が下がる屋内等でも利用できる。

社会的ニーズの探索(期間:2023年10月~2024年3月)企業の技術者と議論し、倉庫や図書館での使用などの社会的ニーズを探索した。

[発表論文]

1. Patrolling Control of Mobile Sensor Swarms Using Time-Varying Objective Function: Hirokazu Sakata and Kazunori Sakurama, SICE Annual Conference, 2023
2. 異方性センシング機能を持つモバイルセンサ群の時間重みを用いたターゲット観測: 坂田 寛知, 櫻間 一徳, システム制御情報学会 研究発表講演会, 2023 (SCI'23 学生発表賞受賞)

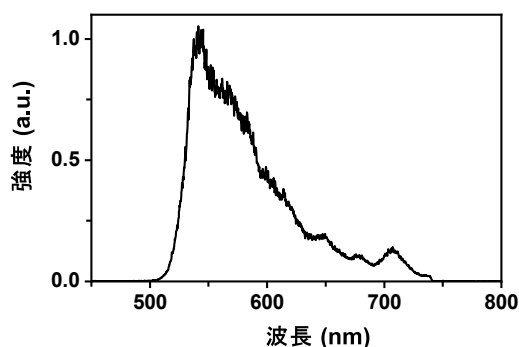


図 2. 増幅白色光

さらに、回折格子と可変形鏡を組合せたパルス幅圧縮系を構築した。波長 500 nm に対して最適化された回折格子(G_1 :300 本/mm)を用い、増幅光を回折させ、左右方向に波長分散させた扇状とし、これを凹面鏡(C_1 :曲率半径が 400 mm の球面銀鏡)で受けて収束させ、水平線状焦点を形成させた。線状焦点の各点には特定波長成分のみが集中するよう(外観が定盤と水平な方向に虹色となるよう)、調整した。この線状焦点に可変形鏡(D_1)を配置し、小さく上方向の煽りをつけて、折り返した。折り返された白色光を再び往路と同一の凹面鏡(C_1)で受け、往路と同一の回折格子(G_1)の往路照射位置の上に集光し、再回折させることで、全波長成分を重ね合わせ、同一方向に進行する分散補償-白色光を再構築した。

増幅白色光の和周波を発生させ、和周波の強度が最大になるよう、二つのビームの空間的・時間的重なりを微調整しながら、可変形鏡(D_1)と回折格子(G_1)を調整した。この時、試料の透過によるパルス幅の広がりを見補償するために、測定試料の半分の厚さの溶液セルを挿入した状態で調整し、パルス幅を約 10 fs まで圧縮した。周波数分解光ゲート法による測定結果を図 3 に示す。

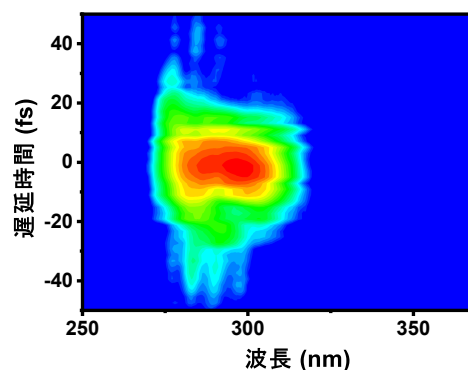


図 3. 波数分解光ゲート法による測定結果

遷移状態分光測定の出検光として用いるために、既存の紫外光を用いるポンプ・プローブ(遷移状態分光)測定系まで導いた。フリップミラーを用いて、既存の紫外検出光と、新たに発生させた可視検出光とを選択可能にした。高速フォトダイオードによる光強度時間波形計測を用いて、増幅白色光と紫外光の到来タイミング差を測定した結果、増幅白色光が先行していた。そこで、光路長差修正を目的に、遅延経路を構築し、到来タイミング差を解消させた。

現在、構築した遷移状態分光装置を用いる分光により、アゾ化合物の異性化反応、及びケージド化合物の光脱保護反応に伴う「分子振動の実時間変化」を解析中である。

[学会発表]

1. 岩倉いずみ, 橋本征奈, 岡村幸太郎, 紫外および可視超短パルス分光による異性化機構解析, 日本化学会第 103 春季年会, P3-2am-09.
2. 岩倉いずみ, 橋本征奈, 力石紀子, 山本翔太, 山口和夫, ケージド化合物からの放出速度と放出生理活性物質との関係, 2023 年光化学討論会, 2P59.

【助成 40-09】

電気光学変調コムを用いた広帯域周波数可変かつ極低ノイズなマイクロ波発生

日本大学生産工学部学部 教授 石澤 淳

〔研究の概要〕

本研究では、電気光学変調 (EO) コムに着目し、マイクロ波の位相ノイズを光で読み取り、フィードバック制御によりマイクロ波信号の位相ノイズを大幅に低減することを目指している。EO コムは、周波数間隔が可変かつ数十 GHz 帯にあるため、光通信などへの応用に適しているものの、周波数の安定性に問題があった。信号対雑音比の高い EO コムを生成する光学系の工夫と独自の $2f3f$ 自己参照干渉法により、EO コムの周波数安定化に成功した。この手法では EO 素子に印加を駆動するマイクロ波信号へ帰還制御するため、周波数安定化した EO コムに加えて、極低位相ノイズなマイクロ波信号が生成可能である。これにより、金融・証券分野の高頻度取引に必須である高精度な時刻同期への応用が期待される。

〔研究経過および成果〕

EO コムは、従来のファイバーコムやチタンサファイアレーザーと比較して次の 2 つの利点がある。(i) 周波数間隔が数十 GHz 程度と広いと、各光コムを分離することができ、複数のモードを独立して扱う光通信などの応用に適している。(ii) EO 変調器に印加するマイクロ波発生器の設定周波数によって周波数モード間隔が容易に変えられ、応用範囲を広げられる。一方で、周波数軸上で EO コムは、種光源からコムモード数が増加するに従ってマイクロ波の位相ノイズが重なり、周波数揺らぎが大きくなるという問題がある。したがって、これらの応用を実現するためには、EO コムの周波数を安定化させる工夫が必要である。本研

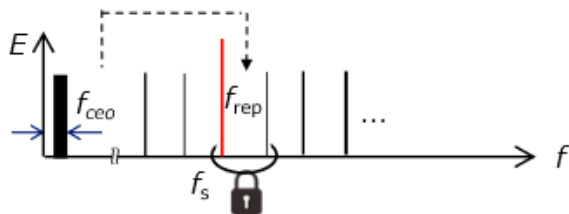


図 1 EO コムの光周波数安定化

究では、1 台の連続波レーザー光源を種光源に使用し、EO コムで難しかったキャリアエンベロップオフセット (CEO) 周波数の検出に成功した。これにより、EO 変調器に印加されるマイクロ波信号をフィードバック制御することで、EO コムの光周波数をさらに安定化させることができた。図 2 に CEO 信号の周波数安定化の結果を示す。CEO 信号の周波数揺らぎは、測定時間に反比例し、ノイズの種類が(ホワイトあるいはフ

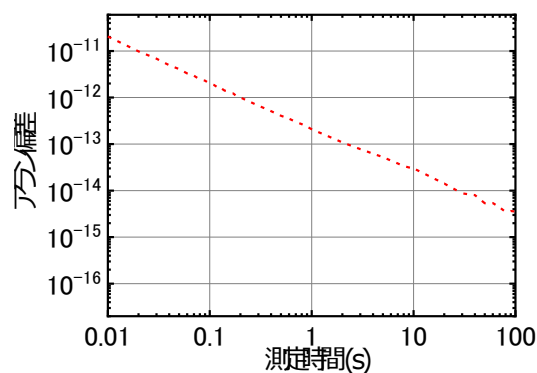


図 2 CEO 信号のアラン偏差

リック) 位相ノイズと分かり、EO コムにおいて CEO 周波数が安定化されていることを示している。また、フィードバック制御されたマイクロ波の位相ノイズ測定を

行った(図 3). この結果, マイクロ波の位相ノイズが測定器の測定限界以下まで低減し, マイクロ波の安定度が市販の高精度水素メーザーと匹敵する水準に達していることが確認された.

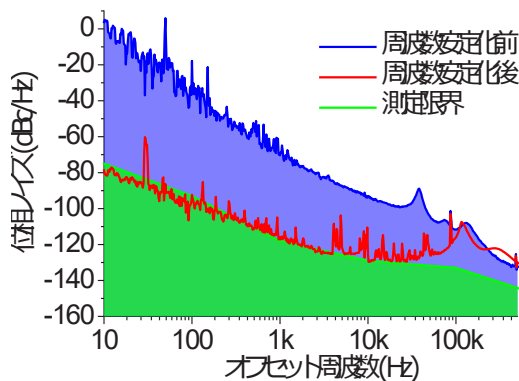


図3 マイクロ波の位相ノイズ

本研究では, 参照光源を使わずにも 12 桁の精度で光周波数計測が可能であることが実証した. 安定化された EO コムを活用して, 種光源の光周波数 f_s を決定した. 通常, 光周波数の高精度な測定には市販の波長計を用い, 約 8 桁, すなわち, 10 MHz オーダーの精度で光周波数を計測できる. また, 光コムと高精度な波長計を併用する場合には, 約 12 桁, すなわち, 1 kHz オーダーの精度で光周波数を計測できる. ただし, 波長計には既知の参照光源が必要である. 種光源の光周波数 f_s はコムモード次数 s (s : 自然数) を用いると, $f_s = f_{\text{ceo}} + s \times f_{\text{rep}}$ と 1 次式で表される. モード次数 s が決定できれば, 異なる 2 条件での f_{ceo} と f_{rep} の関係性を調べることで光周波数 f_s が決定できる. 周波数モード間隔が広い EO コムを使用すれば, 周波数が既知の参照光源が不要となり, 光周波数 f_s を 12 桁の周波数精度で計測可能であることを実証した.

今回の成果により, 周波数間隔が広い EO コムでも CEO 周波数の安定化が可能であることを実証できた. こ

れにより, EO コムを利用した光通信などへの活用が期待される. また, マイクロ波の位相ノイズを, 非常に正確な位相ノイズ測定器の限界以下にまで減少させた. これにより, マイクロ波発生器の周波数がより正確になり, マイクロ波評価装置 (たとえば, 周波数カウンタや位相雑音測定器) の測定もより精密に行えるようになる. 同時に GPS 信号の受信が難しい場所でも正確な時刻管理が可能になる. 将来的には, 光ファイバーネットワークで超高精度な光源を配信し, 配信先の通信局舎で光コムを使用して光をマイクロ波に変換する技術を研究開発し, 高精度な周波数基準信号が手軽に利用できるテクノロジーを目指している.

[発表論文]

1. Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa, Kenichi Hitachi, Tomoya Akatsuka, and Katsuya Oguri, “Optical referenceless optical frequency counter with twelve digit absolute accuracy,” Scientific Reports, vol. 13, pp. 8750-1-8750-9, May.30 (2023).
2. Yugo Kikkawa, Atsushi Ishizawa, Rai Kou, Xuejun Xu, Koki Yoshida, Tai Tsuchizawa, Noritsugu Yamamoto, Kota Kawashima, Tai Tsuchizawa, Takuma Aihara, Tadashi Nishikawa, Guangwei Cong, Kenichi Hitachi, Tadashi Nishikawa, Noritsugu Yamamoto, Koji Yamada, and Katsuya Oguri, “Sub-30-fs fibre-coupled electro-optic modulation comb at 1.5 μm with a 25-GHz repetition rate,” Electronics Letters, vol. 59 (11), pp. 1-3 (2023).

【助成 40-10】

ウェブゲームと計算論的モデリングを通して、人の汎化及び弁別能力を測定し、統合失調症との関係を評価する

研究者 東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構 講師 Cai Mingbo

〔研究の概要〕

この研究では、強化学習における一般化と識別プロセスを測定できる新しい実験パラダイムを開発しました。私たちは、3歳から50歳以上までの広範な年齢層の人々が課題を実行した際の行動を説明するための計算モデルを開発することで、これらの二つのプロセスがどのように発展し、それに対する年齢の影響を見つけました。また、観察された変化の基になるさまざまな認知プロセスの変化するパラメーターを特定しました。さらに、この課題の変種をオンラインで大規模な参加者グループに実施することで、これら二つのプロセスのバランスと統合失調症に関連する症状との潜在的な関連性を見つけました。

〔研究経過および成果〕

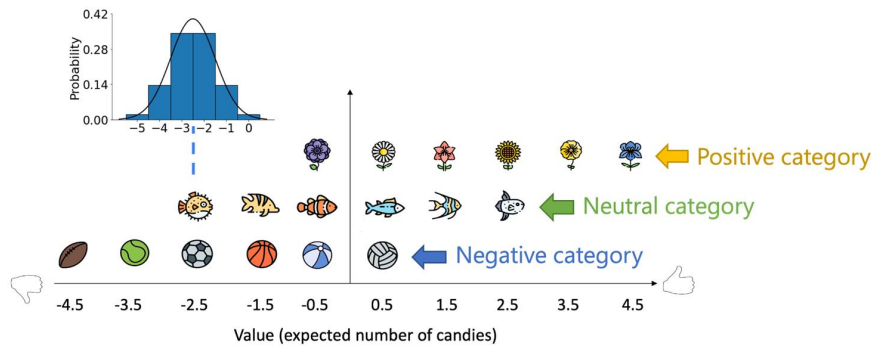
Schizophrenia (統合失調症) is a mental disorder that creates a huge burden to the society. Although with intensive research, its cause remains unclear. The major medicines to treat schizophrenia target a type of receptors for the neurotransmitter dopamine, named D2 receptors (ドーパミン D2 受容体). Recently, my colleagues found that this receptor is critical for animals to learn to discriminate the difference between similar situations in their predictability of future outcome (Iino, et al., Nature 2020). In other words, when there is deficit in D2 receptors, animals over-generalize (過度の汎化) what they have learned. Arguably, over-generalizing in a similar but different situation from past experiences can lead to wrong prediction, and cause people to misattribute the surprising outcome to the wrong cause. It is possible that frequent confusion

caused by over-generalization and misattributing causes may eventually lead people to have a disorganized view of the world, developing into delusion (妄想). However, this hypothesis has not been tested. Importantly, to eventually transform biological findings into the understanding of schizophrenia, behavioral experiments on human participants have to be conducted to confirm that people who have tendency to develop schizophrenia indeed over-generalize or under-discriminate different situations. Towards this goal, my lab has designed a web-based game to measure the degree by which people can generalize and discriminate when they learn to gain rewards.

Developmental change of generalization and discrimination

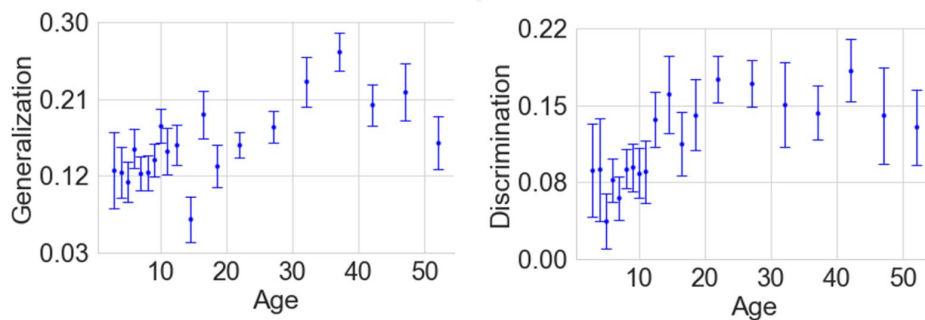
We have previously collected data of 1007 participants with ages starting from 3 years old to higher than 50 years old, playing the game we developed. In this game,

participants need to learn which of the 18 different objects lead to more reward and which lead to more punishment, and to choose only those leading to reward. The expected amounts of reward or



punishment by choosing each stimulus is organized in a hierarchical way according to the semantic categories (as in the figure above).

We quantified generalization by the difference in the frequencies of choosing stimuli of the same values but belong to different categories, and discrimination by the difference in the frequencies of choosing stimuli in the same categories but with higher or lower values. We found that performance of generalization increases with age and peaks at 30~34 years old and declines afterwards, while the discrimination peaks at 14~15 years old and remains stable afterwards.



By modeling the behavior in more details, we found that age-related change of multiple learning-related

variables underlie the observed performance change in the graph above.

Furthermore, we have examined the relationship between generalization/discrimination in our task and

the degree of severity of psychotic symptoms from a group of participants recruited online. Contrary to our original hypothesis, we found a positive correlation between performance of

discrimination of the severity of psychotic symptoms ($r=0.31$, $p=0.004$, $N=89$), indicating that people with higher risk of schizophrenia may rely less on prior knowledge of semantical categories when learning values of stimuli.

[発表論文]

We are in the process of completing the manuscripts summarizing the findings and will submit the papers soon.

【助成 40-11】

機能性磁性ナノ粒子を用いた磁場誘導型がん温熱療法の開発

研究代表者 名古屋大学 教授 井藤 彰

共同研究者 京都大学 助教 堀江正信

名古屋大学 助教 金子真大

〔研究の概要〕

我々は交流磁場による磁性ナノ粒子の発熱を利用したがん温熱療法の研究を行ってきた。直接注射できる一部の腫瘍を除き、ナノ粒子は血中投与により腫瘍に送達されるが、肝臓等の細網内皮系に捕捉されて体外へ排除されることが問題となる。一方で、血中滞留性が高いナノ粒子は、enhanced permeability and retention effect (EPR 効果) により、腫瘍組織へ蓄積しやすいことが知られている。したがって、温熱治療に十分な粒子量を腫瘍に集積させるためには、生体内で安定かつ貪食細胞に捕食され難い表面構造を有した磁性ナノ粒子が必要不可欠である。本研究では、高い生体親和性を有する 2-メタクリロイルオキシエチルホスホリルコリン (MPC) ポリマーの磁性ナノ粒子表面への修飾技術を利用し、粒子の表面構造と特性の関係理解と生体内で利用可能な高機能性磁性ナノ粒子の開発を行った。

〔研究経過および成果〕

シランカップリング反応により、マグネタイト (Fe_3O_4) のナノ粒子 (Magnetite nanoparticles, MNPs) 表面に原子移動ラジカル重合法 (Atom transfer radical polymerization, ATRP) の開始基である 3-(trimethoxysilyl)propyl 2-bromo-2-methyl propanoate を修飾した。この粒子に対して、2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine (MPC) と ethyl 2-bromoisobutyrate (EBiB) を添加して表面開始 ATRP を行うことで MPC ポリマー被覆磁性ナノ粒子 (MNPs-PMPC) を調製した。MPC と EBiB の仕込みモル比を調節することで、10, 50, 100 量体の MPC のポリマー層 (PMPC) を有する機能性磁性ナノ粒子 MNPs-PMPC(10), MNPs-PMPC(50) および MNPs-PMPC(100) をそれぞれ合成した。

マウスのマクロファージ様細胞 RAW264 細胞培

地に MNPs-PMPC を添加し、24 時間後にナノ粒子の細胞内への取り込み量を鉄濃度測定により評価した。さらに、血中投与による腫瘍組織への蓄積量を調べるため、マウス結腸がん CT26 腫瘍を担持した BALB/c マウス尾静脈へ MNPs-PMPC の血中投与を行い、各臓器および腫瘍への蓄積量を測定した。動的光散乱測定から、いずれの粒子も 100 nm 前後の粒径を有することが分かった。次いで、タンパク質吸着性や貪食細胞に対するステルス性を検証するため、粒子に対するウシ血清アルブミンの吸着量およびマウスマクロファージ様細胞への取り込み量を評価したところ、吸着量および取り込み量のいずれも、ポリマー鎖長の向上に伴い小さくなる傾向が認められた (図 1)。これらの結果から、MPC ポリマーの磁性ナノ粒子表面へのコートにより、血中安定性が向上して、肝臓のマク

ロファージであるクッパー細胞による捕食を回避できることが示唆された。

次に、生体内における MNPs-PMPC の動態を調べるために、蛍光物質であるローダミン B を表面に結合させた MNPs-PMPC(100) を作製し、マウスの尾静脈から投与したところ、投与 24 時間後に腫瘍内に MNPs-PMPC 由来の蛍光シグナルが検出された。このことから、MNPs-PMPC(100) は血中を滞留して腫瘍組織に送達されることが分かった (図 2)。さらに、MNPs, MNPs-PMPC(10), MNPs-PMPC(100) をそれぞれ、マウス結腸がん CT26 腫瘍を担持した BALB/c マウス尾静脈へ血中投与したところ、未修飾の磁性ナノ粒子と MNPs-PMPC(10) に比べ、MNPs-PMPC(100) を注射したマウスでは腫瘍における粒子の蓄積量 (鉄を定量) が約 2 倍に向上していた (図 3)。

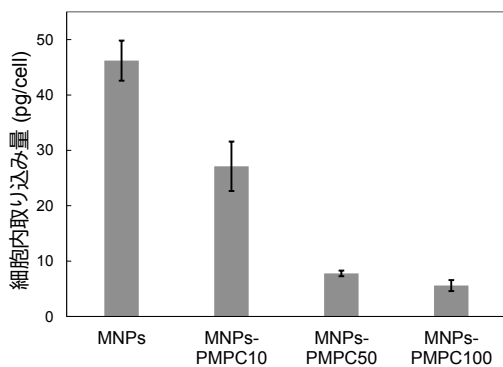


図 1 MNPs-PMPC のマクロファージへの蓄積

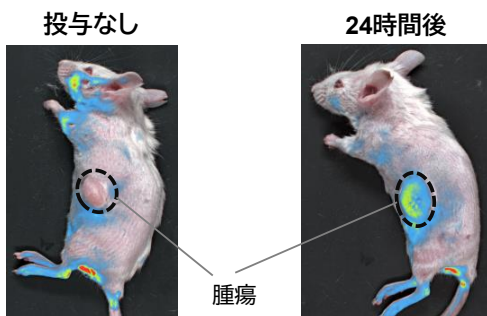


図 2 MNPs-PMPC の腫瘍への蓄積

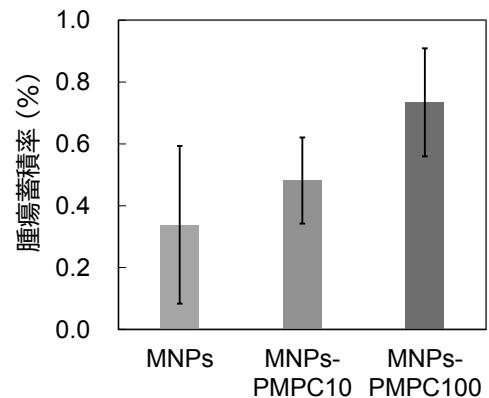


図 3 MNPs-PMPC の腫瘍への蓄積量

以上の結果は、一定鎖長以上の PMPC 層を MNPs 表面に構築することで、マクロファージに対するステルス性、ひいては血中投与における腫瘍集積性が向上することを示している。さらに、蓄積した MNPs-PMPC が MRI で造影可能であることと、交流磁場で発熱し、温熱療法に有効な温度まで加温可能であることが分かってきている。

この研究は公益財団法人カシオ科学振興財団の第 40 回助成を受けて実施された。感謝申し上げます。

〔発表論文〕

- 金子真大, 大野孝紘, 井藤 彰 「磁性ナノ粒子の血中投与を指向したリン脂質ポリマー被覆磁性ナノ粒子の開発」 第 36 回中部ハイパーサーミア研究会学術集会 2023 年 7 月 22 日 名古屋市
- 大野孝紘, 井藤 彰, 金子真大 「血中投与によるがんの診断と治療を指向したリン脂質ポリマー被覆磁性ナノ粒子の開発」 第 75 回日本生物工学会大会 2023 年 9 月 5 日 名古屋市

【助成 40-12】

多品種少量の放射性薬品を精緻に調製するための唯一無二の自動化システムに関する研究

研究者 東京電機大学工学部 教授 茂木 克雄

〔研究の概要〕

微量の放射性核種を用いた非破壊的な画像診断技術は、がんの診断だけでなく社会的関心の高い疾患（アルツハイマー病や、パーキンソン病、糖尿病など）の確定診断や、創薬分野のリード化合物の評価検証に有効性が示されており、世界的にその重要性が増してきている。一方で、放射性薬品の調製にかかる膨大な運用コストと人材不足が普及を妨げる課題となっている。そこで、本研究では運用コストと人材不足の致命的な課題を、ロボティクスと微小液滴の操作技術によって解決し、健康長寿社会の新しい枠組みを拓こうとしている。本申請者は、微量の試薬を自動操作できる知財技術を有しており、これを応用して放射性薬品の調製を安全かつ正確に行える自動化システムの開発を進めている。具体的には、本申請で以下の3つのテーマに取り組んだ。

〔研究経過および成果〕

1. システムに組み込む温調ユニットの開発

加熱処理が必要な薬品の調製に用いる温調ユニットを製作した。この温調ユニットは、センサーの値を参照して温度をフィードバック制御するもので、一定温度の試薬調製環境を保持することができる。温調ユニットは温調台と制御部で構成されており、温調台はペルチェ素子と、電熱線シートおよび、K型熱電対を積層した $5 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$ の基板となっている。また、制御部は温調台に接続されたリレースイッチと Arduino UNO R3 で構成されており、熱電対から得られる温度をモニタリングしてリレースイッチを切り替えている。

試作した温調ユニットの動作検証のために、60分間、 37°C の環境を保持する実験を行った。図1は、検証実験の結果である。誤差は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ となっており、一定の温度が保持されていることがわかる。リレースイッチの切り替えのみで温度制御が行える単純な機構は、小規模で故障しづらいことから放射性核種を扱う用

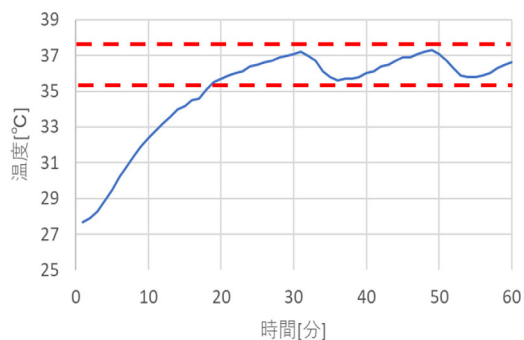


図1. 温調ユニットによる温度保持結果

途に高い親和性がある。今後の展開としては、特定の薬品調製で必要となる 150°C の環境を保持する運用テストを行っていく予定である。

2. 汚染基板の交換ユニットの開発

薬品の調製作業において、放射性核種が付着する用具は基本的には使い捨てにする必要がある。本研究で開発を進めている自動化システムについても、汚染基板は使い捨てにしなければならない。そのため、汚染基板を交換する際の作業者の負担を軽減するための交換ユニットを開発した。放射性核種を安全に扱うために、ネオジム磁石の磁力を利用した単

純な機構を考案し実装した。この交換ユニットにより、汚染物質と使い捨て基板を同時に廃棄できるようになった。交換ユニットの脱着機構は汎用性が高いため、今後は放射性薬品だけでなく、抗癌剤、毒劇試薬、病原性ウイルスなどに適用できるように仕様を拡張していく。

3. 原理検証機による実証実験

調製作業を自動で行うシステムを試作し、放射性医薬品の代替試薬を用いた実証実験を行った(1)。試作したシステムの薬品搬送機構は、小規模な実験室や診療所などで利用されることを想定し、安価かつ単純な構造のものとなっている(図2)。具体的には、無線通信が可能な電子ピペットをアームロボットに取り付けた機構であり、使い捨てのピペットチップの脱着方法や、試薬の搬送先座標の決定方法などに独自の工夫がなされている。これにより、簡単な操作で正確な試薬搬送が行えるようになった。また、本研究では微量の液体を送液する駆動力としてパッシブポンプの技術を取り入れた。従来の微量試薬送液には、機械式のシリンジポンプが広く用いられているが、低流量で安定した流れを発生させることが難しく、システムも複雑化してしまう。そこで本研究では、シンプルな構造で安定した低流量の送液が可能な「表面張力を利用したパッシブポンプ」を実装してこの課題を解

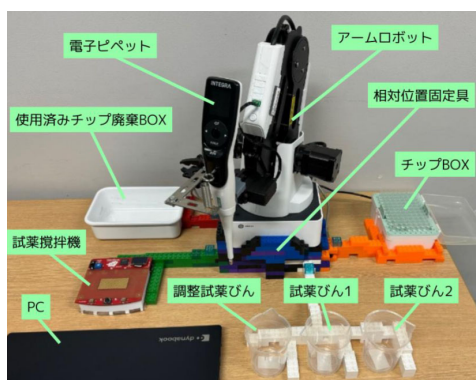


図2. 薬品搬送機構

決した(2、3)。パッシブポンプへの試薬の補充作業については、試薬滴下装置を試作して自動化を試みた。我々は、滴下装置の精度検証結果を、国際学会MNE2023で発表するとともに(4)、詳細をまとめた論文を国際誌に投稿した(5)。

本テーマでは最後に、放射性医薬品の代替試薬を用いた調製作業を行い、試作したシステムによって一連の作業が自動化できることを確認した。放射性核種を用いた実証実験については、共同研究者の新所属先の研究施設で年度内に実施しようとしている。本システムは、多くの有能な放射線技師を単純作業から解放する画期的なものであり、社会実装されれば有能な人材が高度な医療や創薬の学術研究に専念できる新しい社会の仕組みが拓かれる。

[発表論文]

1. 【招待講演】茂木克雄, 木村寛之, 高田尚樹, 第34回日本臨床微生物学会総会・学術集会, 企業セッション, (横浜), 2023.02.
2. 嶋田玲皇, 木村寛之, 小此木孝仁, 茂木克雄*, 1P28, CHEMINAS47, (仙台), 2023.05.13-14.
3. 松永愛海, 高田尚樹, 茂木克雄*, 1P39, CHEMINAS47, (仙台), 2023.05.13-14.
4. R. Shimada, H. Kimura, N. Takada, K. Mogi*, “Development of an automatic reagent drip system for passive pumps”, 49th international conference on Micro and Nano Engineering, Berlin, 25 - 28 Sep 2023.
5. R. Shimada, H. Kimura, N. Takada, K. Mogi*, “Development of an automatic reagent drip system for micro passive pumps”, Micro and Nano Engineering, Elsevier (査読中)

【助成 40-13】

機動的レーダリモートセンシングの実現に向けた小型無人機搭載合成開口レーダの開発

代表研究者 室蘭工業大学 大学院工学研究科 助教 泉 佑太

共同研究者 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 教授 Josaphat Tetuko Sri Sumantyo

〔研究の概要〕

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) は能動的にマイクロ波を送信・受信することで地球の情報を得る環境リモートセンシング技術の一つである。SAR は一般的に人工衛星に搭載され、宇宙から地球の広範囲を計測するが、希望する時間、場所での観測が困難、さらに、橋梁の床板裏やトンネル内部などは観測できないといった課題がある。こうした課題を解決するため、本研究では SAR を小型無人機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) であるドローンに搭載した、ドローン搭載型 SAR の開発を目的とする。これにより、機動的かつ準リアルタイムで広域 SAR 観測を可能とする計測技術を目指す。最終的にターゲットに関する形状や散乱状態を計測できる多偏波観測が可能なシステムを開発し、災害観測、圃場観測、積雪深観測等への応用を目指す。

〔研究経過および成果〕

1. システムの開発

本研究では、自動車周囲の障害物検知などのオートクルーズ用途として低コスト化や市販化が進む 24GHz 帯準ミリ波レーダモジュールをベースとしたシステム試作機を開発した。使用するレーダモジュールは障害物の角度推定のため、MIMO (Multi-Input Multi-Output) 型となっている。この MIMO 型におけるマルチチャネルの利点を生かし、送信、受信それぞれに二つのアンテナを実装し、多偏波システムとする。

また、デザイン、制作したアンテナは 4×2 のマイクロストリップパッチアレイアンテナとなっており、測定の結果 S11 の値が -10dB を下回ることを確認できている。図1に開発したシステムを示す。

通常、SAR の画像化アルゴリズムではプラットフォームの直線軌道を仮定しているが、ドローンをプラットフォームとして利用する場合、軌道は非線形となるた

め、正しく画像がフォーカスしないといった課題がある。この軌道誤差を補正するため二機の GNSS 受信機による RTK (Real Time Kinematics: RTK) 測位データをレーダの送受信と同時に取得する。レーダ散乱信号に紐づいたプラットフォームの位置データを利用することで、軌道誤差を修正し画像を生成する。

レーダや GNSS 受信機は Raspberry Pi4 に接続されており、遠隔でデータの送受信を制御することができる。レーダ本体、バッテリー、Raspberry Pi4 は 3D プリンターで制作した治具によりドローンに固定されている。

3. テストベッドによる評価

理想的な環境下でレーダシステムの性能を評価するため、地上実験用テストベッドを開発した。図2に開発した地上システムを示す。テストベッドはレーダとアンテナポジションを同期したシステムとなっており、理想的な軌道である直線軌道を保ちつつ移動しながら

散乱波計測を行うことができる。

開発したテストベッドによる地上計測実験を電波暗室内にて実施した。反射体の画像生成によるデータの評価、偏波データの評価が実験の目的である。そのため、ターゲットとして散乱メカニズムが既知である校正用反射体(三面コーナリフレクタ(CR)、二面コーナリフレクタ、金属板、金属棒)を採用した。図3 (b)は三面 CR をレーダから6m先に設置し、計測を行った際の生成 SAR 画像である。比較のため、図3 (a)に反射体が無い状態で取得した画像を示す。図3 (a)と(b)を比較すると、レーダ設置箇所から6mの地点にCRが点として現れていることがわかる。実験では全ての偏波データを取得したが、現状偏波校正を適用できておらず偏波データの評価を達成できていない。

4. フライトテスト

開発したドローン搭載 SAR システムの動作検証のため、屋外にてフライトテストを実施した(技適取得済みのアンテナ一体型レーダを使用)。実験では地面に設置した三面 CR のイメージングを試みた。実験では、レーダ、GNSS 受信機共に正しくデータを取得することができた。しかし、本論文執筆時点でデータ処理を終えておらず SAR 画像は生成できていない。

5. 今後の展望

GNSS のデータを用いた軌道誤差補正イメージングアルゴリズムの開発・適用、偏波データに対する偏波校正手法や散乱分解手法の適用が今後の課題となる。また、今後は偏波 SAR としての活用に留まらず、干渉計測によるインフラの振動計測や地滑り計測に応用するなど、さらなる展開を目指す。



図1 開発したドローン SAR システム

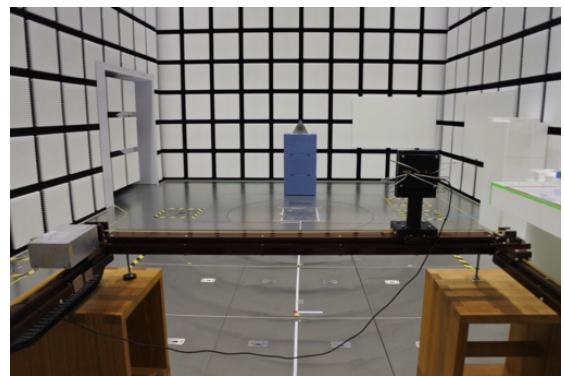


図2 テストベッドによる地上実験

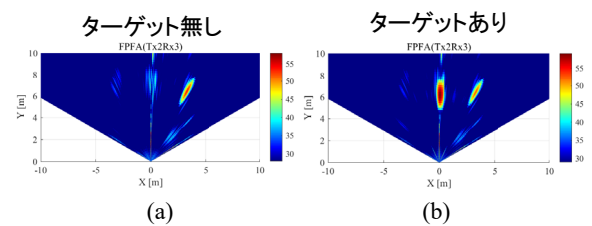


図3 CR イメージング結果。(a) CR 無し。(b)CR あり。



図4 ドローン搭載 SAR フライトテスト

【助成 40-14】

多元系スピネル酸化物ナノ粒子の合成と水分解触媒への応用

研究者 東北大学多元物質科学研究所 講師 岩瀬 和至

〔研究の概要〕

本研究は、遷移金属酸化物触媒からなる新規酸素発生反応(OER)電極触媒の開発および高活性化の設計指針解明を目的として行った。主な成果として、超臨界流体を用いて合成した多元系酸化物触媒であるハイエントロピー酸化物ナノ粒子の in-situ XAFS 解析による反応中の構造解析を行い、ハイエントロピー酸化物触媒が単一元素のみからなる酸化物触媒と比較して高い構造安定性を有することを明らかにした。また、スピネル酸化物への異種アニオン(具体的にはフッ化物イオン)のドーピングを行うことにより、金属元素の価数変化に伴い OER 活性が向上することを明らかにした。これらの成果は、遷移金属酸化物からなる OER 触媒開発の有用な知見になると期待される。

〔研究経過および成果〕

再生可能エネルギー由来の電力を用いた水分解はクリーンな水素製造方法として注目されている。水電解のアノード反応である酸素発生反応(OER)は、反応過電圧(エネルギーロス)が大きいことから高活性触媒の開発が望まれる。遷移金属酸化物触媒は、特にアルカリ性電解液中で比較的高い OER 活性を示すことから注目されている。本研究で著者らは酸化物触媒の構成元素(金属カチオン種及び主に酸化物イオンに代表されるアニオン種)の多元素化により高活性 OER 触媒の開発を試みた。特に本研究での特筆すべき成果として、以下の2点

- (1) 5 種の金属カチオンからなる酸化物であるハイエントロピー酸化物ナノ粒子の in-situ XAFS による OER 反応中の構造解析
- (2) Co 及び Fe からなるスピネル酸化物へのフッ化物イオンドーピングによる OER 活性の向上がある。以下に成果を記載する。

(1)ハイエントロピー触媒の in-situ 構造解析

筆者らはこれまでの研究で、超臨界流体を用い、5 種の金属元素からなる多元系酸化物であるハイエントロピースピネル酸化物ナノ粒子(HE-so)の合成に成功し、高活性 OER 触媒として機能することを明らかにした¹。本研究では HE-so のさらなる OER 活性向上を目的として、in-situ XAFS による反応中の構造解析を行った。測定は、定電位条件で行った。成果の1例として、著者等の既報に倣い合成した Mn, Fe, Co, Ni, Zn の 5 元素からなる HE-so と、対照試料として同様の手法で合成した Ni のみからなる Ni 酸化物触媒(Ni-ox)の、Ni-K 吸収端の測定結果を図 1 示す。本研究では、1 M KOH を電解液として用いた。いずれのサンプルも、1.6 Å の位置に Ni-O のピークに対応

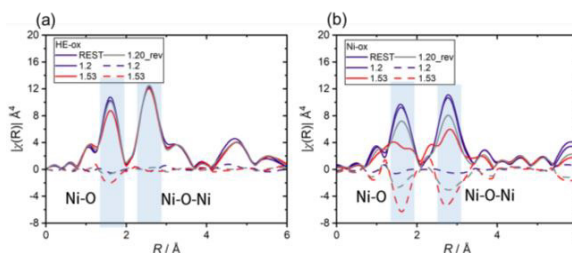


図 1 電位印加条件での Ni-K 吸収端の in-situ での EXAFS スペクトル。(a)HE-so, (b)Ni-ox。

するピークが、およそ 2.6 Å もしくは 2.8 Å の位置に Ni-O-Ni の位置に対応するピークが見られた。ここで HE-so では、電位を OER が起こらない 1.2 V から OER が起こる 1.53 V にすると 1.6 Å のピークの形状が僅かに変化した。これは OER 中間体の吸着に起因すると考えられる。一方 Ni-ox では、1.6 Å のピークに加えておよそ 2.8 Å のピーク形状が大きく変化した。このことは、電位印加により Ni-ox の構造が大きく変化したことを示し、HE-ox は Ni-ox と比較して高い構造安定性を有することが示唆された。

(2) スピネル酸化物へのフッ素ドーピング

著者らはこれまでの研究で、ペロブスカイト酸化物に異種アニオンであるフッ化物イオン(F)を導入することで、金属元素の価数を変化させ OER 活性を向上させることに成功している²。本研究では、同手法を Co 及び Fe を含むスピネル酸化物に展開した。材料合成は、水酸化物前駆体を空气中で熱処理して合成した。水酸化物前駆体を F 含有前駆体と混合した後に同様に熱処理することで、F ドーピングのサンプルを合成した。

特に本報告書では、Co:Fe=1:2 となっているサンプルについての結果を示す。F ドーピング有無のサンプルについて粉末 X 線回折(XRD)パターンを測定したところ、F ドーピングの有無にかかわらず、単相の立方晶スピネル構造に帰属するピークが観測された。また、X 線光電子分光法(XPS)により表面元素を解析したところ、F ドーピング処理を行ったサンプルでは F の残存が確認され、F ドーピングの成功を確認した。

得られた触媒の OER 活性を図 2 に示す。測定は、1 M KOH の塩基性条件で行った。F ドーピング有無のサンプルを確認すると、F ドーピングにより OER 電流が 3 倍程度に向上することがわかった。ここで、触媒中に含

まれる金属元素の電子状態の変化を X 線吸収端近傍構造(XANES)スペクトルにより解析したところ、F ドーピングにより Fe-K 吸収端にはほとんど変化は見られなかった一方で、Co-K 吸収端は低エネルギー側にシフトしていた。このことから、Co が F ドーピングのプロセスにより還元されたことで OER 活性が向上したことが示唆された。

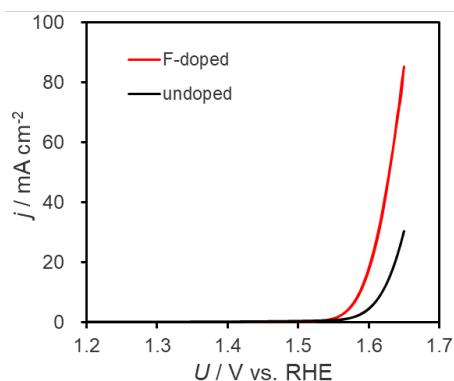


図 2 F ドーピング有無の Co : Fe=1:2 のサンプルの電流電位曲線。

上記の(1)(2)の結果は、今後の酸化物からなる OER 触媒の設計指針となりうる。また、関連する研究成果として、超臨界流体を用いたハイエントロピー触媒の合成において、出発原料の適切な選択により粒子径制御に成功し、10 nm 以下の極小のハイエントロピースピネル酸化物ナノ粒子の合成にも成功した。以上の研究成果らは学術論文として投稿準備中である。

[参考文献]

1. K. Iwase *et al.*, *ACS Appl. Energy Mater.*, 5, 8, 9292-9296 (2022).
2. K. Iwase *et al.*, *Chem. Mater.*, 35, 7, 2773-2781 (2023).

[発表論文]

現在投稿準備中

【助成 40-15】

ハロゲン架橋銅(II)錯体一次元鎖のスピ量子ビットへの展開

公立千歳科学技術大学理工学部 准教授 脇坂 聖憲

〔研究の概要〕

電子スピンの量子二準位系は、アップスピンとダウンスピンの重ね合わせ状態をとることが可能なため、スピ量子ビットとしての活用が期待されている。本研究は、スピ量子ビットが一次元に並んだ構造と見なせる化合物として $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{chxn})_2]\text{I}$ を新規合成した。単結晶 X 線構造解析によって鎖構造を明らかにし、磁気測定及びスピン共鳴スペクトル測定により、一次元の弱い反強磁性を伴うミリ秒オーダーの磁気緩和を示すことを明らかにした。本成果は、ハイゼンベルグ型反強磁性鎖における磁気緩和挙動を世界で初めて実証したものであり、一次元量子スピン系とスピダイナミクスが融合する新たな領域の知見が得られた。

〔研究経過および成果〕

1. 研究背景

量子コンピュータは、「0」と「1」の重ね合わせ状態にある量子ビットと呼ばれる素子を用いる。この量子ビットを多数並べて量子もつれ合い状態にすることで、同時並列的に、膨大な量の計算を一瞬ですることが可能になると期待されている。量子ビットになる物質は数多く見つかったが、量子ビットを多数並べることは難しく、重要な課題である。

ハロゲン架橋金属錯体は、金属イオンとハロゲン化物イオンが交互に一直線に並ぶ鎖構造の一次元錯体である(図1)。これまでの研究では、金属としてニッケルを用いた場合、 d^7 電子系の Ni(III)の d_z^2 軌道とハロゲンの p_z 軌道が重なることで、一次元の半導体となることがわかっている。一方、銅(II)イオンは d^9 電子配置の $S = 1/2$ のスピンを持つ。 $d_{x^2-y^2}$ 軌道と p_z 軌道は直交するため、一次元上に並んだ銅(II)の電子スピンは、遅い時期緩和を示すスピ量子ビットとして有望である。そこで本研究は、ハロゲン架橋銅(II)錯体を新規合成し、構造及び磁気特性を明らかにする。

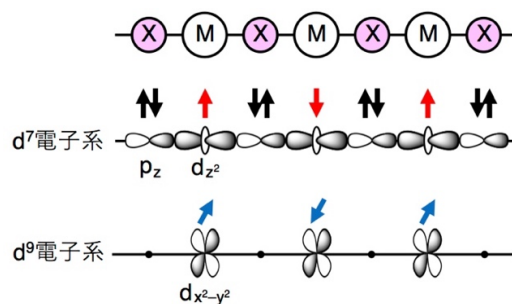


図1. ハロゲン架橋金属錯体の模式図. M は金属イオン, X はハロゲン化物イオンを示す。

2. 結果と考察

CuI, 1R,2R-ジアミノシクロヘキサン (chxn)、ヨウ素をエタノール中で加熱環流することで反応を行い、目的物である $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{chxn})_2]\text{I}$ を紫色結晶として収率 65% で得た。単結晶 X 線構造解析により、Cu 周りに chxn 二分子が平面位から配位し、軸位をヨウ化物イオンが架橋した一次元鎖構造を形成していることがわかった(図2)。chxn のキラリティにより、一次元鎖は一方方向に巻いた螺旋構造を取り、対称心を持たない三方晶系 ($P3_21$) の結晶構造を有する。

直流法の磁化率測定によって、弱い反強磁性が確

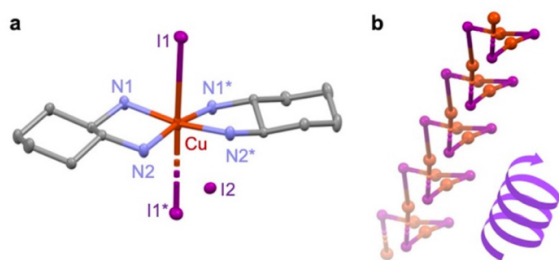


図 2. $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{chxn})_2]\text{I}$ の単結晶 X 線構造解析. (a) Cu 周り及び (b) 一次元鎖の構造.

認められた。理論フィッティングから、鎖内の $\text{Cu}(\text{II})$ 間の磁気相互作用は $J = -0.3 \text{ cm}^{-1}$ と見積もられた。スピンは鎖軸にほぼ直交した $d_{x^2-y^2}$ 軌道に局在するため超交換相互作用は生じず、磁気双極子相互作用によるものと考えられる。また、固体状態における電子スピン共鳴法によって、 $\text{Cu}(\text{II})$ スピンの異方性 ($g_{\parallel} = 2.17$, $g_{\perp} = 2.06$) が確認された。

更に交流法の磁化率測定を行い、ゼロ磁場では緩和を示す信号が観測されなかったが、静磁場を印加することでその信号が観測された(図3)。交流磁化率の虚数成分のピークをデバイ緩和式でフィッティングし、1.8 K で 43 ms の遅い緩和を示すことが明らかになった。この磁気緩和は、静磁場によってゼーマン分裂した $M_S = \pm 1/2$ スピン副準位間の緩和に相当すると考えられる。更に温度依存性を測定し、ラマン過程 ($\tau = CT^{-m}$) で磁気緩和することがわかった。フィッティングから指数 m は 4 であり、振動モードとカップリングした磁気緩和が生じていることが示唆される。

3. 結論

ハロゲン架橋銅(II)錯体として $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{chxn})_2]\text{I}$ の新規合成に成功した。ヨウ素架橋された $\text{Cu}(\text{II})$ サイト間には、鎖内で磁気双極子相互作用による弱い反強磁

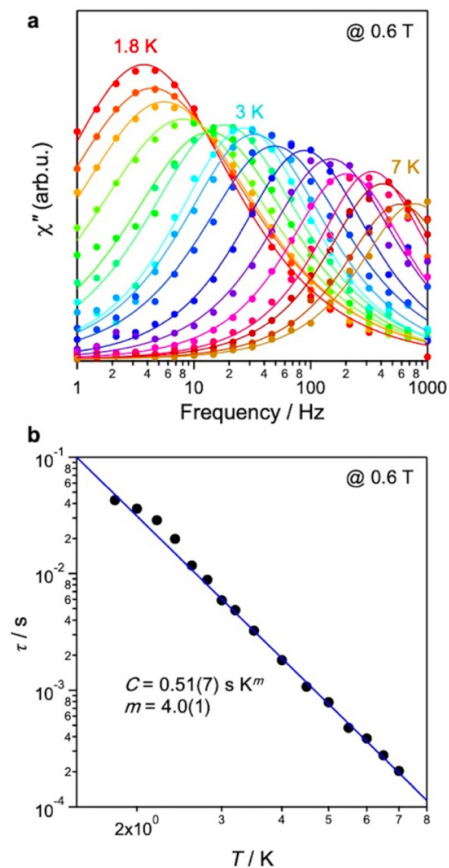


図 3. $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{chxn})_2]\text{I}$ の (a) 交流磁化率 (χ'') の虚数成分, (b) 緩和時間 (τ) の温度依存性プロット. 静磁場 (0.6 T) 下で測定.

性相互作用が働き、各 $\text{Cu}(\text{II})$ サイトはラマン過程で磁気緩和することが明らかになった。本研究はハイゼンベルグ型反強磁性鎖における磁気緩和挙動を世界で初めて実証し、一次元系スピン量子ビット実現に向けて重要な知見が得られた。

[発表論文]

1. Masanori Wakizaka*, Mirosław Arczyński, Shradha Gupta, Shinya Takaishi, Masahiro Yamashita*, Spin dynamics in a Heisenberg weak antiferromagnetic chain of an iodide-bridged $\text{Cu}(\text{II})$ complex, *Dalton Transactions*, **2023**, 52, 10294-10297.

【助成 40-16】

電荷移動錯体保護層導入による高発光ペロブスカイト量子ドット創出と多積層型 LED 開発

研究者 山形大学 理学部 助教 江部日南子

〔研究の概要〕

有機分子-ペロブスカイトナノ結晶 (PNC) 間のエネルギー移動は、効率的なエネルギー収集および光電特性の向上が期待でき、次世代の光電変換材料の有望な設計戦略として期待されている。我々は、電子ドナー分子および電子アクセプター分子の組み合わせにより、エネルギー構造を自在に制御可能な電荷移動錯体に着目した。本研究では、簡便な溶液プロセスにより、電荷移動錯体 (CT) -ペロブスカイトナノ結晶 (PNC) 複合膜を創出し、CT-PNC 複合膜の創出を試みた。また、発光特性評価および励起スペクトル測定、過渡吸収スペクトル測定により、CT-PNC 間のエネルギー移動機構を解析した。

〔研究経過および成果〕

(研究背景・目的)

ハロゲン化鉛ペロブスカイトナノ結晶 (PNC) は、高い電荷輸送性および光吸収特性、低い欠陥密度、バンド構造制御が容易であり、次世代の半導体材料として注目されている。また、有機スペーサーで被覆された PNC は、キャリアの閉じ込め (量子閉じ込め効果) により、高い発光量子収率 (~100%) が達成されている。さらに PNC は、低い三重項準位を有する色素分子や多環芳香族スペーサー (ナフタレンやピレンなど) の導入により、PNC から有機分子へのエネルギー移動または電荷移動を引き起こす。これらの PNC-有機分子間のエネルギー / 電荷移動プロセスは、エネルギー収集効率および電荷分離能の向上が期待でき、次世代の光電変換材料の有望な設計戦略として期待されている。一方、PNC 複合材料における電荷またはエネルギー移動機構の検討において、PNC のエネルギー構造を固定しながら系統的に有機分子のエネルギー準位を調整する必要がある。我々は、電子ドナー分子および電子アクセプター分

子の組み合わせにより自在にエネルギー準位を制御可能な電荷移動 (CT) 錯体に着目した。本研究では、CT-PNC 複合材料の創出と材料間のエネルギー / 電荷移動プロセスの解明を目的とする。

(実験手法)

CT-PNC 複合膜は、一段階のスピンコート法により作製した。前駆体溶液は、臭化鉛およびホルムアミジニウム臭化水素塩、2-フェネチルアミン臭化水素塩、電子ドナー分子のピレン、電子アクセプター分子の 1, 2, 4, 5-テトラシアノベンゼン (TCNB) をジメチルホルムアミド (DMF) 溶媒に溶解させ調整した。次に、石英基板上に前駆体溶液をスピンコート (3000 r.p.m. / 30 秒) およびアニール (100 °C / 2 分) することで CT-PNC 膜を作製した。得られた CT-PNC 膜は、結晶構造解析および膜形態の観察、光学特性評価を行った。また、励起スペクトル測定および過渡吸収スペクトル測定により、材料間のエネルギー / 電荷移動機構を評価した。

(実験結果)

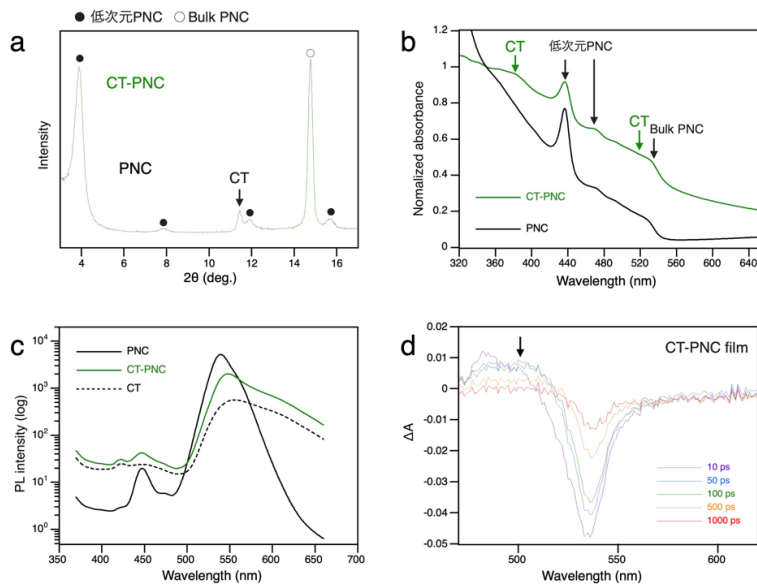


図1 PNC膜およびCT-PNC膜の **a** X線回折スペクトルおよび **b** 紫外-可視吸収スペクトル、**c** 蛍光スペクトル、**d** CT-PNC膜の過渡吸収スペクトル測定

CT-PNC 膜の X 線回折測定より、PNC および CT 結晶の形成を確認した (図 1a)。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像およびエネルギー分散型 X 線分光法より、PNC 膜中にワイヤー状の CT 結晶が観察され、CT-PNC 複合膜の形成を示した。また、CT-PNC 膜の紫外-可視 (UV-Vis) 吸収スペクトルにおいて、低次元 PNC (吸収波長 400~460 nm) および CT に由来する吸収 (吸収波長 380, 520 nm) を示した (図 1b)。また、蛍光スペクトル測定より、PNC 膜は Bulk PNC に由来する緑色発光 (発光波長 550 nm) を示した。一方で、CT-PNC 膜において、PNC 発光の消失と CT に由来するブロードな発光 (発光波長 550~600 nm) を示したことに加え、蛍光寿命測定より、PNC 発光の短寿命化を確認した。これらの結果より、CT-PNC 間においてエネルギーまたは電荷移動相互作用が生じていることが示唆された (図 1c)。CT-PNC 間エネルギー移動を検証するため、励起スペクトル測定および過渡吸収スペクトル測定を実施した。CT-PNC 複合膜における CT 発光 (検出波長 585

nm) の励起スペクトル測定より、PNC 由来の励起スペクトルが確認されなかった。FRET 機構によるエネルギー移動が制限されていると考えられる。一方、過渡吸収スペクトル測定より、CT-PNC 膜において 504 nm 付近に TCNB のアニオンラジカルの過渡種を示し、CT-PNC 間相互作用は、電子交換を介したデクスター型エネルギー移動が支配的であると示唆された (図 1d)。

(まとめ)

本研究では、簡便な溶液プロセスにより CT-PNC 複合膜の作製に成功した。また、励起スペクトルおよび過渡吸収スペクトル測定の結果より、CT-PNC 間相互作用はデクスター型エネルギー移動が支配的であることを示した。今後は、CT-PNC 複合膜を用いた光電デバイスへの応用を進める。

[発表論文]

1. H. Ebe et al., *Chemical Engineering Journal* 471 (2023) 144578.

【助成 40-17】

機能性ドメイン境界における相転移・物性発現機構の解明

東京工業大学 物質理工学院 教授 横田 紘子

〔研究の概要〕

強誘電体や強弾性体、強磁性体に代表されるような強制的秩序を有するフェロイック物質はエネルギー的に等価で方位の異なる領域が存在し、それらを隔てるのがドメイン境界として知られている。これまでドメイン境界は単なる壁として取り扱われていたが、2000 年以降バルクとは異なる独自の物性が発現する可能性が示唆され注目を集めている。本研究は、ドメイン境界で発現する極性を外部制御が容易な温度や電場、光などを用いて外部制御を行うことで、ドメイン境界で発現する物性の起因を明らかにすることを目指す。

〔研究経過および成果〕

反強誘電体である $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) の反位相境界について光第 2 高調波顕微鏡 (SHGM) および X 線散漫散乱を用いた実験を行った。SHGM 実験には波長 1064 nm, 周波数 25 kHz の Nd:YVO₄ レーザーを用いた。SHG は空間反転対称性の破れにより生じる非線形光学現象であることから極性の有無を判別する有効な手段として知られている。また、基本波と SH 波との偏光方向を変化させ、偏光依存性を測定することにより対称性を決定することが可能であるため、ドメイン境界研究に適した実験手法である。異なる偏光条件で 2 次元測定を行った結果を図 1 に示す。反強誘電体は中心対称性を有していることから SH 不活性であるが、[110] 方向に平行な方向に SH 活性な領域が存在していることがわかる。この方向は強弾性ドメイン境界とは異なり、散漫散乱実験から確認した反位相境界の方向と一致していることから、反位相境界が SH 活性であることがわかった。さらに偏光依存測定を行うことにより、反位相境界が極性を有する、すなわち分極を持っていることを明らかにした。図 1 下図には分極の空間分布を示す。反位相境界に平行な

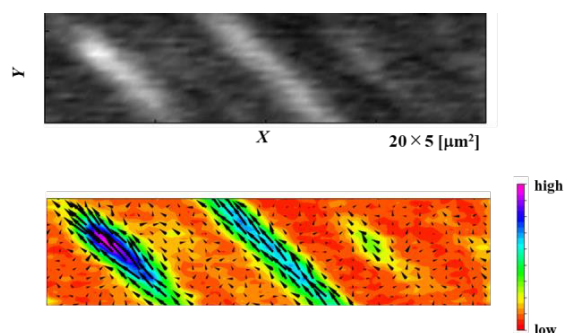


図 1 (上) SHG2 次元画像: 色の明るい所ほど強い SHG が発生
(下) 分極分布図

方向に分極成分を持つことがわかった。このことは、反位相境界内における分極の起因が原子変位であることを考えると説明がつく。

続いて、反位相境界において発現する分極を制御することを目指し、応力印加を行った。応力印加装置を自作し、反位相境界に平行な方向、垂直な方向それぞれの方向から応力を印加し、SHG 強度に変化が現れるかどうか実験を行った。応力を反位相境界に平行な方向から印加した場合には SHG 強度に大きな違いは見られなかったが、垂直方向から印加すると図 2 に示すように SHG 強度が応力印加後に飛躍的に増大した。

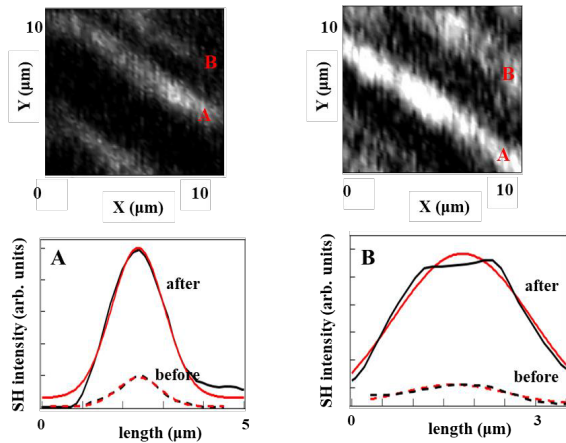


図2 (上) SHG2 次元画像: 応力印加前(左), 印加後(右)
(下) 反位相境界 A, B の SHG 強度 1 次元断面像

そこで、散漫散乱実験においても同様に応力を印加し、印加前後の逆格子マッピングを比較したところ、応力印加によって反位相境界の数が増加すること、またドメインスイッチングが起こっていることが分かった。これらの結果から応力印加によって、反位相境界内の極性が増大すると同時に、反位相境界自身の数も増えることによって全体として極性が増強され、それにより SHG 強度が増加すると解釈することができる。さらに、散漫散乱実験に関しては外部電場を印加し

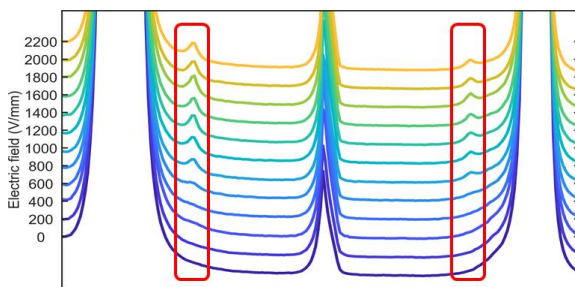


図3 回折強度の電場依存性
赤い枠で囲まれた回折ピークが電場印加により発現した超格子反射

外部電場依存性に関する測定を行った。その結果、図3に示すように、電場印加により新しい超格子回折が現れ、その強度は印加電場の大きさと共に増加す

る様子を確認した。この超格子回折は反強誘電体構造に由来する2倍周期とは異なり、3倍周期を有しており、この超格子反射の発現は反位相境界の内部構造に起因すると考えられる。これらの実験結果から、反位相境界の内部構造として図4に示すようなフェリ的な構造を提案した。このようなフェリ的な構造はMD計算からも安定であることがわかり、反位相境界内部において電気双極子モーメントの向きが完全に打ち消されていないために極性が発現することを明らかにした。

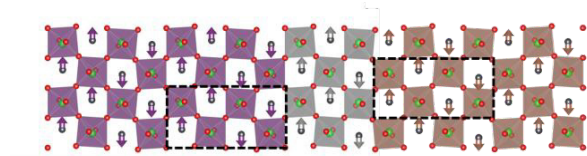


図4 反位相境界の内部構造
図の矢印が原子変位の方向に対応

[発表論文]

1. 第15回日中強誘電体応用会議, “Domain boundaries in Ferroics”, Hiroko Yokota, 2023年8月13日, Tai’an (China) Plenary Talk
2. Beyond Imperfections : New Structure-Property Relationships in Ceramics and Glasses, “The Investigations of Polar Domain Boundary in Ferroics”, Hiroko Yokota, 2023年5月22日, Bad Honnef (Germany) Invited Talk
3. Workshop “Trends in Topological Materials Science and beyond”, “Evaluation of topological defect by using a second harmonic generation microscope”, Hiroko Yokota, 2023年3月15日, Prague (Czech) Invited Talk

【助成 40-18】

省エネルギー技術の実現に向けた強磁性酸化物材料の開拓

研究者 東京大学 大学院工学系研究科 准教授 ヒルシュベルガー マクシミリアン

〔研究の概要〕

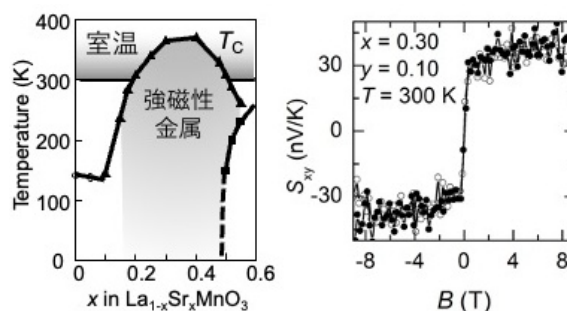
この研究プロジェクトの焦点は、ジュール熱によって廃熱として浪費されるエネルギーを有用な電気に変換するプロセスである熱電効果である。現在、多くの民生・産業プロセス、例えばコンピューター設備の大規模電子回路や自動車の燃焼エンジンなどでエネルギーが失われている。熱電効果はこの問題を解決するもので、2つのタイプに分類できる：ゼーベック効果とネルンスト効果である。最近の研究では、磁性材料におけるネルンスト効果が、熱変換のためのエネルギー効率の高い代替手段を提供することが示されているが、これはまだほとんど未解明である。具体的には、酸化物の熱電ネルンスト効果を対象とする。酸化物は、非常に高温でも化学的に安定な材料であり、腐食に強く、化学的置換プロセスによって高度に調整可能である。

〔研究経過および成果〕

この研究プロジェクトの焦点は、ジュール型加熱によって浪費されるエネルギーを有用な電気に変換するプロセスである熱電効果である。現在、多くの民生・産業プロセス、例えばコンピューター設備の大規模電子回路や自動車の燃焼エンジンなどでエネルギーが失われている。熱電効果はこの問題を解決するもので、2つのタイプに分類できる：ゼーベック効果とネルンスト効果である。最近の研究では、磁性材料におけるネルンスト効果が、熱変換のためのエネルギー効率の高い代替手段を提供することが示されているが、これはまだほとんど未解明である。具体的には、酸化物の熱電ネルンスト効果を対象とする。酸化物は、非常に高温でも化学的に安定な材料であり、腐食に強く、化学的置換プロセスによって高度に調整可能である。

本研究では、強磁性酸化物のネルンスト効果を探る。マンガン系ペロブスカイトのような酸化

物強磁性体は、300°Cまでの温度で化学的に安定であることが特徴であるが、そのネルンスト効果については詳しく研究されていない。我々は、これらの材料がネルンスト効果による熱電変換に適しているかどうかを調べることを目的としている。1990年代から将来の省エネルギー技術への可能性が注目され、広く研究されてきたゼーベック効果とは対照的に、ネルンスト効果はあまり研究されていない。しかし最近、Co₂MnGa [NPG Asia Materials **11**, 16 (2019)] などの金属強磁性体が巨大なネルンスト効果を示すことが報告された。



図、LSMIOの磁気相図と室温(300K)で観測された異常ネルンスト効果。

これらの金属の問題点は、熱電材料の最も重要な応用が想定される高温での腐食の可能性である。そこで我々は、化学的に強靱で耐食性に優れた材料である酸化物の熱電ネルンスト効果を提案した。酸化物では、遷移金属イオン（マンガン、Mn など）による強磁性状態が先行研究で観測されている。

室温に近い温度で強磁性を示す、ストロンチウム含有量 30% の高品質酸化物 $(\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})(\text{Mn}_{1-y}\text{Ir}_y)\text{O}_3$ (LSMIO) 多結晶を合成した。3d 元素マンガンの代わりに少量 (5 ~ 10%) の重 5d 遷移金属元素イリジウムを使用すると、この材料のスピ軌道相互作用が増加し、ネルンスト効果が強化されることが期待される。合成した試料を、X 線回折測定、走査型電子顕微鏡、および元素固有 X 線分光法 (EDX) により特性評価した。私たちの研究室では、磁化と輸送特性を使用して、相転移、電子特性 (絶縁体/金属の特性) などを調べた。我々は、かなり強く置換された結晶 (Ir 10%) であっても、磁気転移温度 T_c が 320 K 以上と高いままであることを発見した。これは、強磁性状態の堅牢性とそれが研究目的に適していることを示す。熱電測定では、 T_c でのゼーベック効果の符号の変化と、 T_c の上下の間でネルンスト効果信号の明らかな変化が観察された。特に、磁石のスピ軌道結合によって生成される異常ネルンスト効果の特徴であるステップ異常は、強磁性状態でのみ現れる。このネルンスト効果は、 Fe_3Ga や Co_2MnGa などの標準金属化合物に比べて大幅に小さいにもかかわらず、多結晶で容易に製造できる原料を使用した耐食材料で実現された。将来的には、大きなネルンスト

効果を持つ酸化物、特に反強磁性体に焦点を当てて研究を拡大する予定である。反強磁性体は、親結晶構造に対して特定の対称性要件が満たされていれば、ゼロ磁場で大きな熱電応答を示す可能性がある [Phys. Rev. X **12**, 040501]。

[発表論文]

1. Kamil Kolincio, Max Hirschberger, Jan Masell, Taka-hisa Arima, Naoto Nagaosa, and Yoshinori Tokura, “Kagome Lattice Promotes Chiral Spin Fluctuations”, Physical Review Letters **130**, 136701 (2023)
2. Rinsuke Yamada, Takuya Nomoto, Atsushi Miyake, Akiko Kikkawa, Ryotaro Arita, Masashi Tokunaga, Yasujiro Taguchi, Yoshinori Tokura, and Max Hirschberger, “Nernst effect of high-mobility Weyl electrons enhanced by a Fermi surface nesting instability”, Submitted (2023)
3. Shun Akatsuka, Sebastian Esser, Shang Gao, Seno Aji, Yoshichika Onuki, Taka-hisa Arima, Taro Nakajima, and Max Hirschberger, “Non-coplanar helimagnetism in the layered van-der-Waals metal DyTe_3 ”, Submitted (2023)
4. Nguyen Duy Khanh, Susumu Minami, Moritz M. Hirschmann, Takuya Nomoto, Ming-Chun Jiang, Rinsuke Yamada, Daiki Yamaguchi, Yudai Hayashi, Yoshihiro Okamura, Guang-Yu Guo, Youtarou Takahashi, Shinichiro Seki, Yasujiro Taguchi, Yoshinori Tokura, Ryotaro Arita, and Max Hirschberger, “Gapped nodal planes drive a large topological Nernst effect in a chiral lattice antiferromagnet”, Submitted (2023)

【助成 40-19】

強分極薄膜を自発形成する極性分子の開発

—分子の末端構造による分子配向制御—

研究者 東京農工大学工学部 助教 田中 正樹

〔研究の概要〕

有機分子の自発配向を制御することで、薄膜の物性を精密に制御できる。本研究では、真空蒸着による成膜過程で、分子の永久双極子を自発配向することで分極薄膜を形成する極性分子を開発する。筆者はこれまでに、フッ化アルキル基を有する分子骨格が自発配向を強力に誘起できることを明らかにしてきた。本研究ではフッ化アルキル骨格と組み合わせる極性官能基の置換位置異性の影響を検討し、位置異性による双極子モーメントの制御が膜分極の大きさおよび極性の制御に効果的であることを明らかにした。本成果は、有機電子デバイスや環境発電デバイスの高性能化に寄与すると期待できる。

〔研究経過および成果〕

有機半導体分子から成る薄膜の電気・光物性は分子の配向状態に強く依存することが知られている。いくつかの配向モードが報告されているが、極性分子の永久双極子モーメント(PDM)を膜厚方向に平均的に向きをそろえて自発配向する場合、成膜するだけで分極薄膜を形成することができる。例えば、有機 EL 分野で発光分子として知られる Alq₃ 分子の真空蒸着薄膜は、成膜過程で分子の PDM が膜厚方向に自発配向し、膜厚に比例する巨大な表面電位を有する分極薄膜を形成する。巨大表面電位(GSP)の大きさは膜厚 100 nm で約+5 V に到達し、単位膜厚あたりの GSP、すなわち表面電位の成長率(GSP slope)である +50 mV/nm が指標として用いられる(E. Ito et al., *J. Appl. Phys.*, **92**, 7306 (2002))。強分極薄膜は、有機 EL デバイスの駆動電圧低減や静電誘導型振動発電デバイスのエレクトレット材料としての応用も検討されており、高性能化のためには大きな配向分極・表面電位を発生する極性分子の開発が必要である。しかし、

PDM 配向の根本的なメカニズムは未解明の部分が多く、意図的に PDM 配向を誘起する分子設計はほとんど提案されてこなかった。

筆者のグループは、真空蒸着過程の薄膜再表面における分子堆積過程に着目し、分子間の van der Waals 相互作用を弱めるはたらきを有する官能基としてフッ化アルキル基を導入する極性分子の設計指針を新たに提案した(M. Tanaka et al., *Nat. Mater.*, **21**, 819-825 (2022))。この結果、蒸着過程再表面において、薄膜表面に堆積した分子はフッ化アルキル基を下地薄膜側から遠ざけるように真空側へ配向し、平均的に分子の向きが揃った分子配向および双極子配向状態が形成される。上記の配向誘起効果により 100 mV/nm を超える GSP slope を示す極性分子の設計に成功した。しかし、極性分子の配向秩序や GSP 極性の制御の手法に関する報告は未だ限られている。本研究では、フッ化アルキル骨格に組み合わせる極性官能基により、GSP slope の大きさや極性制御の手法を検討した。

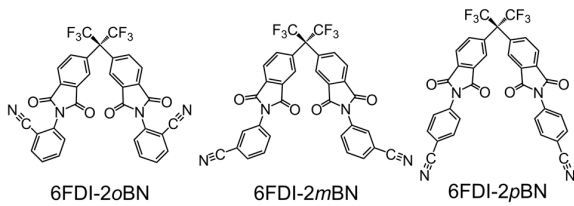


図 1. 開発したフッ化アルキル極性分子

双極子配向を誘起するフッ化アルキル分子骨格として、4,4'-(hexafluoroisopropylidene)diphthalic anhydride と各種アミンとの脱水反応により得られるイミド (6FDI) を用いた。また、アミンとして aminobenzonitrile の位置異性体を用い、極性シアノ基の位置異性体が双極子配向に与える影響を検討した。合成した *o* 異性体 6FDI-2*o*BN、*m* 異性体 6FDI-2*m*BN、*p* 異性体 6FDI-2*p*BN (図1) を ITO 基板上に真空蒸着し、ケルビンプローブ法により薄膜上の表面電位を測定した。それぞれの蒸着薄膜は膜厚に比例して表面電位が増大し、PDM が膜厚方向に配向して自発配向分極を形成していることがわかった (図 2)。6FDI-2*o*BN が負の GSP を示したのに対して、6FDI-2*m*BN および 6FDI-2*p*BN は正の GSP を示した。GSP slope はそれぞれ、 -103 mV/nm 、 $+87 \text{ mV/nm}$ 、 $+218 \text{ mV/nm}$ であった。

表面電位の極性は薄膜内での PDM の配向方向に依存する。6FDI 骨格では CF_3 基側が真空側への配向を誘起すると考えられるため、極性官能基の位置異性により分子 PDM の方向が変化していることが示

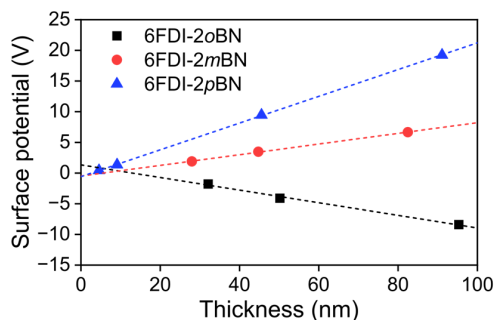


図 2. 蒸着薄膜の膜厚と表面電位の関係

唆される。6FDI 骨格において、フタルイミド部位の配座により分子形状および PDM の向きが異なる配座異性体が複数存在する。配座解析の結果、対称性が高い 6FDI-2*p*BN は PDM が大きく異なる配座異性体は 3 種類であるのに対して、対称性が低い *o* 異性体および *m* 異性体では、それぞれ 36 種類および 27 種類と見積もられた。各配座異性体の存在比率を考慮した平均 PDM は *o* 異性体: 4.61 Debye、*m* 異性体: 5.93 Debye、*p* 異性体: 5.84 Debye であった。PDM の方向は、強力な電子吸引性官能基であるシアノ基が CF_3 基とは反対の方向に向いている *p* および *m* 異性体では CF_3 基側が δ^+ に分極しているのに対して、*o* 異性体では多くの配座異性体が反転した PDM を有し、 CF_3 基側の分極の極性が GSP 極性と対応することがわかった (図 3)。このことから、構成元素・分子量が全く同一である位置異性体の利用により、GSP の極性を簡便に設計できることが明らかになった。また、有機分子は一般的に多くの配座異性体を有しているため、配座構造およびその PDM を考慮した配向性極性分子の設計が必要だと考えられる。

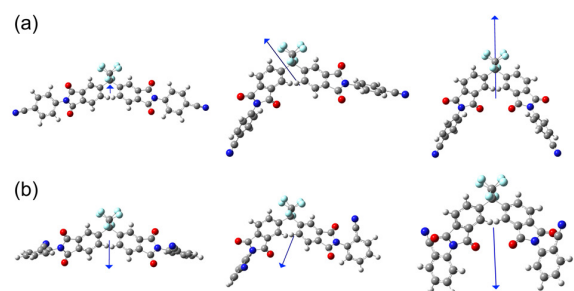


図 3. 極性分子の配座異性体
(a) 6FDI-2*p*BN、(b) 6FDI-2*o*BN (一部抜粋)

[発表論文]

1. 田中正樹、屈曲型極性分子における自発配向分極の制御、22p-B205-17、第 84 回 応用物理学会秋季学術講演会 (2023)。

【助成 40-20】

鋭利なガラス管先端を利用した超電導ナノセンシング技術の開発

電気通信大学情報理工学研究科 准教授 小久保伸人

〔研究の概要〕

針状の石英ガラス細管の先端を利用した超伝導量子干渉計(SQUID)は、ナノスケールの空間分解能と高い磁気分解能とを両立した磁気探針として注目を集めている。これまで探針はガラス管の両側面と先端に超伝導膜を真空蒸着することで作製されてきたが、扱える材料に起因した劣化が課題となっていた。本研究は、化学的に安定な窒化膜を成膜できる反応性スパッタに着目し、これを用いた成膜装置の開発を行った。有効径～56 nmをもつ窒化ニオブチタン薄膜の先端型ナノSQUIDを作製することに成功し、報告例がない高い温度域まで動作することが分かった。この探針の磁束感度は単位帯域幅あたり磁束量子の100万分の1程度に達し、スピンの感度は単位帯域幅あたりボーア磁子の10倍程度となった。

〔研究経過および成果〕

先端型ナノSQUIDは針状のガラス管先端の超伝導ナノループとガラス管側面の電極で構成される(図a)。蒸着源の真上に針状ガラス管を配置し、これを回転させることで、両側面と先端への3方向に超伝導膜を成膜する。点状の蒸着源とみなせるボートやバスケットからの真空蒸着法が用いられてきたが、扱える材料が大気中で劣化しやすい鉛やインジウム、スズなどの単元素超伝導体に限られ、探針の寿命が課題となっていた。

スパッタリングはイオン化した不活性ガスをターゲット表面に衝突させることで、ターゲットを構成する原子を弾き出し、基板表面に成膜材料を堆積させる手法である。合金や化学的に安定な窒化物など真空蒸着では扱えなかった幅広い材料の成膜が可能となる一方、様々な角度から成膜材料が堆積されるため、蒸着フラックスの指向性が求められる成膜には不向きとされてきた。本研究では、蒸着フラックスの方向を絞るコリメータを導入し、これまで例がない反応性スパ

タによる3方向成膜装置の開発を進めた。

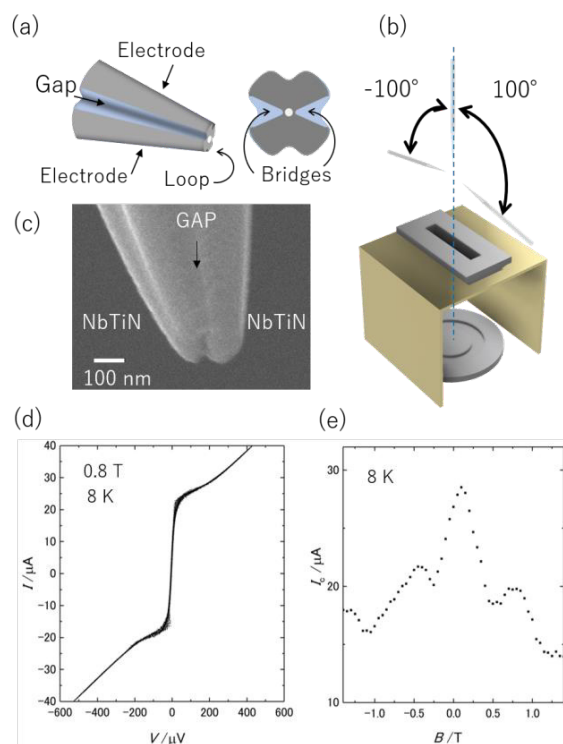


図 先端型ナノSQUIDの模式図 (a)、成膜方法の概略図 (b)、電子顕微鏡像 (c)、輸送特性 (8 Kにおける電流電圧特性 (d)と臨界電流の量子干渉パターン (e))

成膜装置の概略を図 b に示す。溝付の石英ガラス管から引張加工で作製した針状ガラス管をチャンバー内の回転可能なホルダーにセットし、ターゲットからの蒸着フラックスを絞る貫通穴の真上に配置した。ターゲットからの軸に対して $\pm 100^\circ$ に倒したガラス管の両側面を成膜し、その後、正面から成膜した。今回 NbTi の合金をターゲットとし、グロー放電を持続させる不活性 Ar ガスと堆積膜を窒化させる N_2 ガスをチャンバー内に導入した。得られた窒化ニオブチタン (NbTiN) の先端型ナノ SQUID の電子顕微鏡像を図 c に示す。両側面の電極膜が溝によって作られたギャップによって隔たれている。先端部の凹凸は引っ張り加工した溝つき石英管の肉厚の差に起因し、その谷の部分に堆積した 2 本の細線(ブリッジ)と超伝導電極で先端にナノループが形成させている。

先端径が最も細い針状ガラス管で得られた探針の輸送特性を図 d と図 e にまとめた。可逆で非線形な電流電圧特性が 8 K から超伝導転移温度の 13 K 近くまで得られた。臨界電流の量子干渉パターンは包絡線の影響を大きく受けたが、フーリエ解析から振動の磁場周期は 0.81 T となった。この磁場周期と先端の超伝導ナノループの面積との積が磁束量子に相当することを利用して、先端の超伝導ループの有効直径を 56 nm と見積もった。

探針の磁束感度を調べるため、臨界電流をわずかに超える直流電流をバイアスし、探針に流れる電流ノイズを測定した。白色ノイズスペクトル密度から探針の磁気感度を評価したところ、磁束感度は単位帯域幅あたり磁束量子 Φ_0 の百万分の1($\sim 1 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$)に達し、スピン感度はボーア磁子 μ_B の 10 倍程度($\sim 10 \mu_B/\sqrt{\text{Hz}}$)となった。単一スピン感度を達成した鉛の先端型ナノ SQUID には及ばないが Nb を用いた

探針の報告例と同程度であった。

以上、絞りを付けた反応性スパッタによる3方向成膜装置を開発し、NbTiN 膜の先端型ナノ SQUID の作製に成功した。図 e で示した臨界電流の量子干渉パターンを 2 K から過去最高 10 K まで観測し、これまで報告されてきた単元素超伝導体の先端型ナノ SQUID の動作温度を大きく超えた。一方、磁場範囲については、 ± 1 T 程度までが限界であった。高磁場では量子干渉パターンに重畳する非単調な包絡線状の寄与だけでなく、振動振幅の減少が顕著であった。バイアスの極性によって干渉パターンの最大値と最小値が現れる磁場の値が異なることから、ナノループを構成する2つの弱接合(ブリッジ)の特性が等価ではない可能性が高い。このような非対称を含めて、高磁場での量子干渉パターンを歪ませる要因を除くことが今後の開発のポイントとなっていくであろう。

[発表論文]

1. 小久保伸人、針状ガラス管先端を利用した超伝導センサの開発：超伝導熱・磁気顕微鏡を目指して、電気通信大学ナノトライボロジー研究センター第4回 シンポジウム (2023年3月8日)
2. 小久保伸人、窒化ニオブチタン膜を用いた先端型ナノ SQUID の輸送特性、日本物理学会第78回年次大会、18a-PS23
3. 磯部陽州、上原諒、小久保伸人、島田宏、ガラス針先端のナノ SQUID を探針とした走査型熱・磁気顕微鏡の開発、第70回応用物理学会春季学術講演会、16p-PA10-5

元素戦略を考量した透明太陽電池の高効率化

長岡技術科学大学 電気電子情報系 教授 田中久仁彦

〔研究の概要〕

汎用金属酸化物 n 型半導体 ZnO ナノロッド群(ZnO NRs)の隙間を汎用金属 Cu と日本での生産量が多い Br、I からなる p 型半導体 $\text{CuBr}_{1-x}\text{I}_x$ (CuBrI) で埋めた元素戦略的に優れた透明微細構造太陽電池の発電量増加を試みた。初めに十分な空乏層と光吸収層を確保するため、従来よりも ZnO NRs を太く成長させエッチングすることで十分な隙間のある ZnO NRs 群の作製法を確立した。しかし、シード層までエッチングされ発電量増加には至らなかった。次にハロゲン欠陥を補うためプロモエタノールに太陽電池を浸漬させた結果、わずかに開放電圧の上昇を確認した。最後に、ZnO NRs と CuBrI の間に MgO バッファ層を挿入した結果、従来よりも発電量が増加し、AM1.5、100 mW/cm² 照射下で 7.4 nW/cm² の発電量を示す可視光透過率約 70%の透明太陽電池が得られた。

〔研究経過および成果〕

1. 背景: 太陽光のうち紫外光が占める割合は 6%しかないため、本研究室では pn 接合面を増やした Fig. 1 に示す透明微細構造太陽電池の研究を行っている。n 型半導体には汎用金属酸化物 ZnO ナノロッド群(ZnO NRs)を p 型半導体には汎用金属 Cu と日本での産出量がそれぞれ世界 5 位、2 位の Br と I からなる $\text{CuBr}_{1-x}\text{I}_x$ (CuBrI)を用い、元素戦略的に優れた透明微細構造太陽電池となっている。これまで、強力な紫外線照射下にて発電を確認していたものの、通常の太陽電池評価に用いる AM 1.5、100 mW/cm² の疑似太陽光照射下では発電量が不十分で解析を行えなかった。そこで本研究では①微細構造の検討、② CuBrI の高品質化、③ CuBrI/ZnO NRs 間へのバッファ層挿入により発電量増加を目指した。

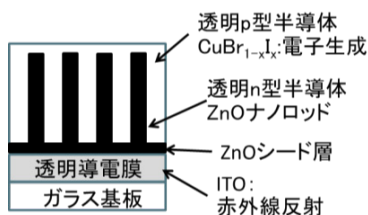


Fig. 1 Schematic of transparent solar cell

2. 実験方法: 2-メトキシエタノール(2-Metho)とモノエタノールアミン(MEA)に酢酸亜鉛二水和物を溶かした溶液を F 添加 SnO₂(FTO)基板上に塗布して ZnO シード層を作製した。続いて、純水に酢酸亜鉛二水和物とヘキサメチレンテトラミンを溶かした成長溶液中で、水熱合成法によりシード層上に ZnO NRs を成長させた。その後、2-Metho、MEA、純水にヨウ化銅、臭化銅を溶かした溶液を塗布し、透明微細構造太陽電池を作製した。

3. 実験結果

3.1 微細構造の検討: 発電量が少ない原因は、ZnO NRs 間の空隙が狭く光吸収層 CuBrI が十分でない、また ZnO NR が細すぎて十分な空乏層を確保できていないためと推測した。そこで、ZnO NRs 成長条件、エッチング条件を検討した結果、ZnO NRs 成長温度を通常の 45°C から 55°C に上昇させ ZnO NRs を太く成長させたのち、純水とメタノールを 1:1 で混合した溶媒にアセチルアセトン を 1vol% 溶かした溶液でエッチングを行うことで、Fig. 2 に示す様に十分な太さと空

隙を持つ ZnO NRs の作製に成功した。しかし、エッチングで ZnO シード層まで溶かされ FTO と CuBrI が短絡したため、むしろ発電量が減少してしまった。

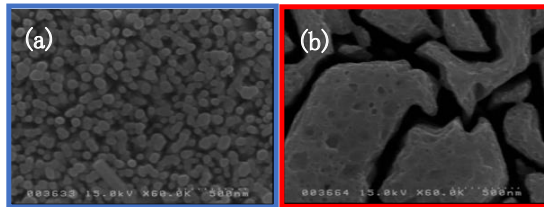


Fig. 2 ZnO NRs (a) before improvement, (b) after improvement

3.2 CuBrI 高品質化: 発電量減少要因として CuBrI のハロゲン抜けが推測できる。そのため、作製した透明太陽電池を濃度 50% のプロモエタノールに 5 min 浸漬 (= 臭化) し、太陽電池特性の変化、太陽電池の光励起発光 (PL) スペクトルの観測を行った。Fig. 3 に示す様に臭化後は励起子 (exciton) 発光が強くなり、品質が改善されたことが分かる。太陽電池特性をみると開放電圧が臭化によりわずかに上昇していた。しかし、素子の品質が悪く、臭化効果があるのかを再検討する必要がある。

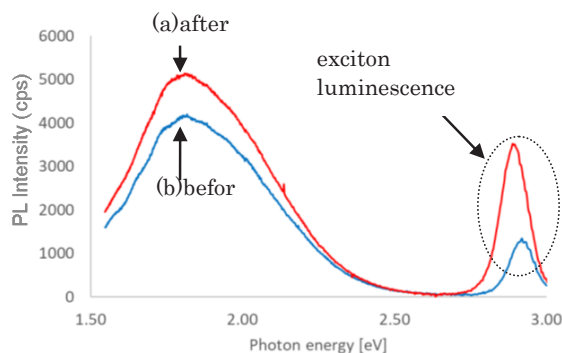


Fig. 3 PL spectra (a) before bromination, (b) after bromination.

3.3 バッファ層挿入による発電量増加: CuBrI/ZnO NRs 構造では、シード層と CuBrI との短絡、CuBrI/ZnO 界面でのキャリア再結合があると考え、CuBrI/ZnO 界面に ZnO または MgO バッファ層の挿入を行った。バッファ層は酢酸マグネシウム六水和物

または酢酸亜鉛二水和物の水溶液を塗布して加熱処理することで作製した。Fig. 4 にバッファ層無し、ZnO または MgO バッファ層ありの AM1.5、100 mW/cm² 疑似太陽光照射下での電流密度 - 電圧 (J - V) 特性を示す。バッファ層の挿入で開放電圧の大幅な増加が、また MgO バッファ層の挿入で短絡電流密度の増加が観測された。MgO は加熱処理により ZnO に熱拡散して ZnMgO になっていると推測でき、この ZnMgO はバンドギャップが大きく高抵抗であるため、短絡ならびにキャリア再結合を防止して短絡電流密度、開放電圧の増加につながったと推測している。最後に、MgO バッファ層挿入により発電量が増えたため AM1.5、100 mW/cm² 照射下での解析が可能となり、視域で 70% の透過率をもつ CuBrI/MgO/ZnO 透明微細構造太陽電池において発電量 7.3 nW/cm²、開放電圧 42 mV、短絡電流密度 0.64 μ A/cm²、fill factor 26.7% の諸特性を得ることができた。

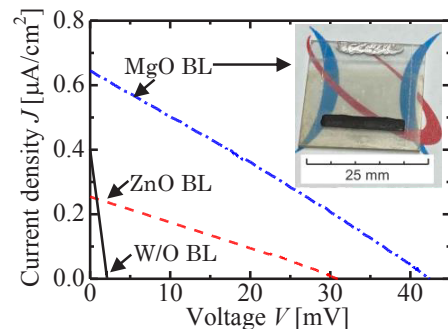


Fig. 4 J - V properties of transparent solar cells with or without buffer layers

[発表論文]

1. “ZnO/CuBr_{1-x}I_x 透明微細構造太陽電池の構造改善”, 辻本直也他, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-PB03-7, ‘R5 年 3 月 17 日.
2. “ZnO/MgO/CuBr_{1-x}I_x 透明微細構造太陽電池の構造最適化”, 辻本直也他, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-P06-2, R5 年 9 月 20 日.

【助成 40-22】

二次元半導体を利用したマイクロ発光ダイオードへの機能付与

研究者 信州大学 工学部 助教 浦上 法之

〔研究の概要〕

窒化ガリウム系混晶による青色マイクロ発光ダイオード(μ LED)に強い関心が寄せられており、多機能化による応用展開が期待されている。その発光層には $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 量子井戸構造が採用されているが、In 組成の制御では発光波長の制御に留まる。本研究では、二次元半導体を持つ固有の発光特性(偏光、黄色発光)を青色 μ LED に付与することによる多機能化を目標に、多層膜化することでその実装手法を検討した。単層から赤色発光しその成分が円偏光である二硫化モリブデンや二硫化タングステン、および黄色発光が得られるヒ化ゲルマニウムを発光材料として採用し、六方晶窒化ホウ素と組み合わせた多層膜を発光層として光の導波の観点から構造を設計した。

〔研究経過および成果〕

窒化ガリウム系混晶の微細加工により作製可能なマイクロ発光ダイオード(μ LED)は、安定して高い外部量子効率を得られるだけでなく小型端末への集積化の親和性も高い。これらの発光波長や偏光は用いる半導体材料に由来するため、これらを変えて使用するためには、素子の外部に共振器や波長板などの付与が必要である。他方、層状物質の単分子層(0.7 nm)からなる二次元半導体は、室温を超える励起子結合エネルギーにより、安定した光励起発光が得られる。また速い発光寿命や内因性の円偏光を放出可能なことから、新奇な機能性発光素子への展開が期待できる。また近年では、様々な波長で発光する材料も発見されてきており、その材料選択性も増加している。これらを発光材料とし μ LED を光源としてその構造内に組み込むことができれば、新奇な機能性発光素子への展開が期待できる。しかし、単分子層の MoS_2 や WS_2 は直接遷移型のエネルギーバンド構造を有するが、 μ LED の放射光と比較して実際の発光

強度は極めて小さい。そのため、二次元物質の十分な発光を得るためには、 μ LED の青色放射光を吸収して遮断しながら強い発光を得るための構造設計が必要である。

本研究で用いる二次元半導体は、1) 円偏光(の赤色発光)が得られる二硫化モリブデン(MoS_2)や二硫化タングステン(WS_2)、および 2) 黄色発光が得られるヒ化ゲルマニウム(GeAs)を選定した。また多層膜のもう一つの材料は、絶縁体(Eg: 6 eV)六方晶窒化ホウ素(h-BN)を選定した。これらが繰り返し積層することにより、 MoS_2 (WS_2)または GeAs の単層膜がそれぞれ独立に存在している多重量子井戸構造を作り出すことができる。しかし多層膜は入射光の波長によるが界面での反射が発生するため、 μ LED の青色光を

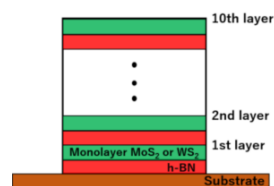


図 1 二次元物質の積層による多層膜の概略図。

透過させて二次元半導体による吸収や発光に寄与させるために、青色光の導波を詳細に検討して多層膜を設計する必要がある。本研究では、二次元物質を繰り返し積層した多層膜を光の導波の観点から設計し、その構造を作製することを目指した。

多層膜構造内の光の導波には有限差分時間領域(FDTD)法に基づく電磁界解析シミュレーションを用い、MoS₂(WS₂)/h-BN 多層膜構造における透過率と反射率に対する照射光の波長依存性を計算した(図2a)。h-BNの膜厚は、20 nmとした。可視光は波長によらず50%以上透過するため、構造内で得られた単層MoS₂およびWS₂の発光(600-700 nm)が取り出せることが分かった。また青色μLEDの発光波長である475 nm程度の光は、MoS₂の場合は80%、WS₂の場合は80%透過することがそれぞれ示された。ただしこれはh-BNの膜厚に依存することも分かっており(図2b)、それを5 nm変化させると、MoS₂の場合は40%程度、WS₂の場合は20%程度、透過率が減少することも分かった。実際に構造を作製する際は、転写工程による手法を採用するため、h-BNの膜厚は経験的に5 nm程度のばらつきがある可能性を考慮すべきである。今後は実際に作製した試料に対するシミュレーションを実施し、より現実に近い光の導波を解析していく予定である。

GeAs/h-BN多層膜構造に対しても透過率と反射率に対する照射光の波長依存性をシミュレーションした。μLEDの475 nm程度の光は53%透過することが示され、単層GeAsの580 nmの発光は67%透過することも分かった。本構造は、μLEDの青色光とGeAsの黄色光を組み合わせた白色光を得るための設計である。そのため、青色光と黄色光の実際に得られる光強度を参考に、それらを組み合わせた白色光になるための設計指針を今後構築していく予定である。

多層膜構造を採用することにより、二次元物質の発光強度が増加するのかを検証した。剥離と転写の繰り返しにより、MoS₂/h-BN多層膜構造を作製しフォトルミネッセンス(PL)スペクトルを得た。MoS₂の積層数を増加することにより、PL強度は単調に増加した。二次元物質の発光強度を増加するために積層構造を採用することで単層膜の積層数を単純に増加させることができ、その優位性を確認することができた。更なる積層数の増加により、μLEDの実際の青色光の強度を超える多層膜を作製し、MoS₂(WS₂)で取得可能な偏光を付与したμLEDの実現を目指す。またGeAsの黄色発光を放射可能な多層膜の作製により、多機能(光通信や給電など)と白色を実現するμLEDへの展開にも期待できる。

多層膜構造を採用することにより、二次元物質の発光強度が増加するのかを検証した。剥離と転写の繰り返しにより、MoS₂/h-BN多層膜構造を作製しフォトルミネッセンス(PL)スペクトルを得た。MoS₂の積層数を増加することにより、PL強度は単調に増加した。二次元物質の発光強度を増加するために積層構造を採用することで単層膜の積層数を単純に増加させることができ、その優位性を確認することができた。更なる積層数の増加により、μLEDの実際の青色光の強度を超える多層膜を作製し、MoS₂(WS₂)で取得可能な偏光を付与したμLEDの実現を目指す。またGeAsの黄色発光を放射可能な多層膜の作製により、多機能(光通信や給電など)と白色を実現するμLEDへの展開にも期待できる。

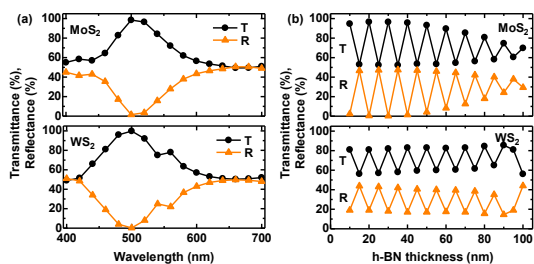


図2 MoS₂(WS₂)/h-BN多層膜構造における透過率と反射率に対する(a)照射光の波長依存性(h-BN: 20 nm)および(b)h-BNの膜厚依存性(波長: 475 nm)

[発表論文]

1. 上篠 雄登, 浦上 法之, 橋本 佳男, “二次元物質の積層による多層膜構造の設計と作製”, 2024年 第71回応用物理学会 春季学術講演会 講演予稿集, 24a-31B-6.

【助成 40-23】

反力可変触覚ディスプレイ用触知ピンアクチュエータ

研究者 名古屋大学工学研究科 准教授 櫻井 淳平

〔研究の概要〕

高成形性 SMA 製触知ピンアクチュエータを作製し、ホットプレートによる外部加熱とアクチュエータ自身に通電加熱した際の駆動特性を評価した。いずれの場合でも、超弾性特性の駆動原理通りの挙動を示し、抵抗値計測によって温度と反力の関係が線形関係を示すことから、温度、反力の制御が可能であることが分かった。今後は、温度制御プログラムの作成を行う。また、断熱、絶縁膜の被覆を行い、実際に触ることができるデバイスの作製を目指す。

〔研究経過および成果〕

【背景・目的】

触覚ディスプレイとは、皮膚の感覚受容器を刺激することで触覚情報を伝達するデバイスである^①。これまでに、我々は、新しい触覚ディスプレイ用アクチュエータピンとして、高成形性形状記憶合金(High formable Shape Memory Alloy: HFSMA)を用いた反力可変触覚ディスプレイ用アクチュエータを開発してきた。高成形性 SMA を使用することで凸形 3 次元形状の触知ピンが製作でき、小型化が可能になる。本アクチュエータは触知ピンを押し込む力に対して、ピンからの反力をアクチュエータの温度制御により、変えることができる。

【成果】

作製した触知ピンアクチュエータを図 1 に示す。半導体微細加工プロセス及び金属ガラスの粘性流動特性を利用したマイクロ成形加工により、中央が凸形状の十字はり構造を作製した。作製した触知ピンの高さは 123 μm であった。

触知ピン中心部の押し込み実験の結果を図 2 に示

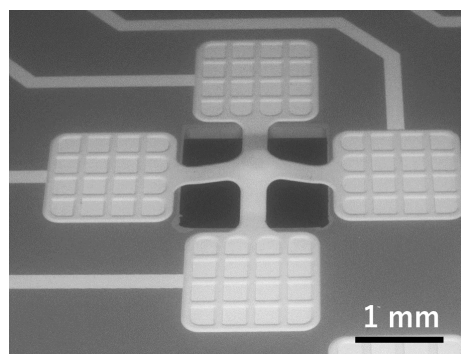


図 1 触知ピンアクチュエータ

す。基板全体をホットプレートで加熱し逆変態温度 A_f 以上の温度 (70, 80, 90 $^{\circ}\text{C}$) で、触知ピン高さ h と同値になるまで 5 μm ずつ押し込み、反力測定を行った。

押し込み量がある値を超えると反力が一定となるプラトー領域が確認できた。また、除荷後の残留ひずみも見られず塑性変形していないことが確

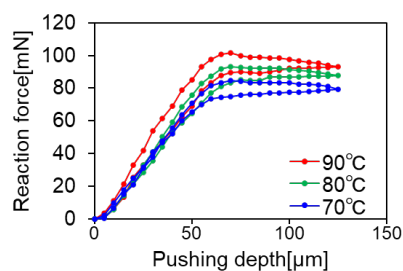


図 2 反力と押し込み量の関係

認できた。また、温度変化に伴い反力が増大する特性を示した。

次に、デバイス応用時に通電加熱によって触知ピンの温度を変化させ反力の制御が可能であるかを評価するため、触知ピンに直流電流を 100~800 mA までの範囲で流し、その時の反力を測定した。触知ピン温度については、図 3 のホットプレート加熱時のデバイスの抵抗値とホットプレート温度の関係より算出した。図 4 は各電流値に対する反力と押し込み量の関係を表している。いずれのサンプルでも、反力が一定になるプラトー領域が確認でき、通電加熱時においても駆動原理通りの挙動を示すことが確認できた。図 5 は、通電加熱時とホットプレート加熱時の最大押し込み点 (120 μm) における反力と温度の関係である。通電加熱時もホットプレート加熱時と同等の反力値を示しており、抵抗値測定による触知ピンの温度制御が可能であることが示された。

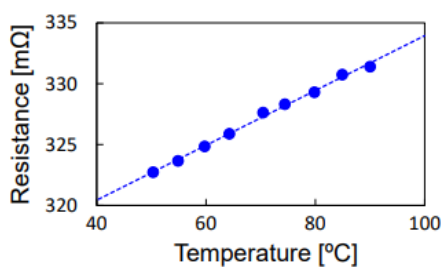


図 3 デバイスの抵抗値と温度の関係

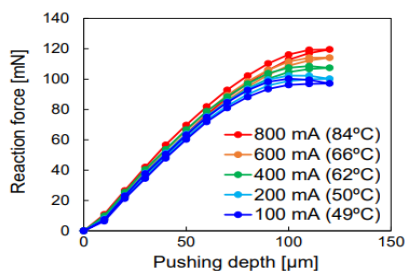


図 4 各電流値に対する反力と押し込み量の関係

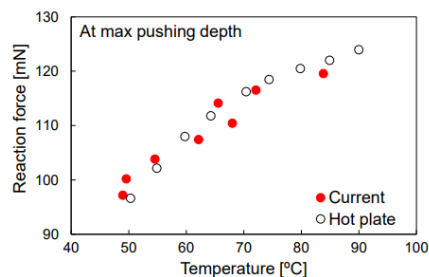


図 5 通電加熱, ホットプレート加熱時の最大押し込み時における反力と温度の関係

【まとめ】

高成形性 SMA 製触知ピンアクチュエータを作製し、ホットプレートによる外部加熱とアクチュエータ自身に通電加熱した際の駆動特性を評価した。いずれの場合でも、超弾性特性の駆動原理通りの挙動を示し、抵抗値計測によって温度、反力の制御が可能であることが分かった。今後は、温度制御プログラムの作成を行う。また、断熱、絶縁膜の被覆を行う。

〔発表論文〕

1. 村瀬 正憲, 南原圭汰, 岡智絵美, 秦誠一, 櫻井淳平, 反力可変触覚ディスプレイ用アクチュエータの反力特性に及ぼす触知ピン形状の影響, 電気学会論文誌 E, Vol.143 (2023) 236-241
2. N. INUI, M. MURASE, C. OKA, S. HATA, J. SAKURAI, Driving Characteristics of Highly Formable Shape Memory Alloy Pin Actuators for Tactile Displays, 8th ISBE, P3-2 (2023.11 Hiroshima, Japan)
3. M. Murase, K. Nambara, T. Yamazaki, C. Oka, S. Hata, J. Sakurai, Effect of tactile pin height on driving characteristics using high formable shape-memory alloy for reaction force variable tactile displays, ICM&P 2022, P1-17, (2022.11. Naha, Japan)

【助成 40-24】

酸化物異相界面におけるバンド変調機構の解明と制御に向けた原子・電子レベル解析

研究者 名古屋大学大学院工学研究科 物質科学専攻 講師 横井達矢

〔研究の概要〕

酸化物異相界面の原子・電子構造の根源的な理解と制御指針の獲得に向け、人工ニューラルネットワーク (ANN) 原子間ポテンシャル、第一原理計算、電子顕微鏡観察を有機的に連携させた研究基盤の確立を試みた。本研究では、幅広い用途をもち他の酸化物としばしば異相界面を構成する α - Al_2O_3 を対象とした。まず、様々な格子欠陥の原子構造とエネルギー的安定性を高精度・高速で予測できる ANN ポテンシャルを構築した。そして材料界面の一種である結晶粒界に適用し、原子構造を正確に予測できることを示した。また、計算結果と電子顕微鏡観察像は正確に一致しており、計算と実験の両面から材料界面の 3 次元的な原子構造を決定できた。さらに α - Al_2O_3 中の不純物を想定した 3 元系に拡張し、界面の不純物偏析も予測できることを示した。以上より、本研究により材料界面における原子・電子構造を系統的に解明するための方法が構築できた。

〔研究経過および成果〕

本研究では、まず酸化物の原子構造とエネルギー的安定性を高精度・高速に予測する手法を確立するため、人工ニューラルネットワーク (ANN) 原子間ポテンシャル (図 1) を構築した。ANN の構成は 2 層の隠れ層をもつフィードフォワード型ネットワークである。入力には、各原子周りの原子環境を、並進、回転、同種元素との交換の不変性を満たす構造記述子を用いて数値化した。本研究では、2 体間および 3 体間の対称関数を用いた。また、元素種および元素種の重複組み合わせごとに記述子を評価し、組合せごとに入力層のノードを割り当てることで、元素種の違いを表現した。なお、この構成は任意の多元系に対しても同様に適用できる。

学習データは、Vienna ab initio package (VASP) による DFT 計算を用いて収集した。学習データには、完全結晶だけでなく点欠陥や表面も含めた。また、比較的小さい計算セルでモデル化できる $[12\bar{1}0]$ 軸の対

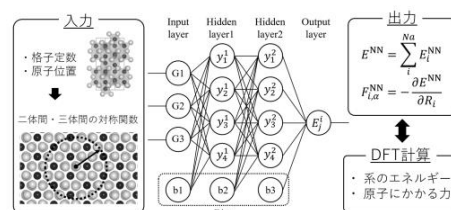


図 1 ANN ポテンシャルの概略図

称傾角粒界 7 種類も考慮した。これらの計算セルを用いて、構造緩和や MD 計算を実行した。構造緩和では、参照となる計算セルをもとに、原子位置や格子定数をランダムに変化させた計算セルを複数作製し、それらを数ステップから数十ステップ構造緩和した。そして緩和途中のスナップショットも含めて学習データに加えた。また、400-2800 K の温度域で MD 計算を行い、スナップショットを学習データに加えた。

学習データに含まれない $[0001]$ 回転軸の $\Sigma 7$ 及び $\Sigma 31$ 対称傾角粒界について、ANN ポテンシャルと Buckingham 経験的ポテンシャルを用い、粒界構造を予測し、DFT 計算との粒界エネルギーの誤差を検証した (図 2)。ANN ポテンシャルの場合、どちらの粒界

についてもデータ点が対角線付近に分布している。また ANN ポテンシャルは、DFT 計算の粒界エネルギーの大小を精度良く予測できている。よって本手法により、DFT 計算に先んじて安定な粒界構造を絞り込み、粒界構造探索にかかる計算コストを大幅に削減できた。他方、Buckingham ポテンシャルの予測値は対角線から大きく逸脱している。また、このポテンシャルから予測された粒界エネルギー最小の粒界構造は 3 J/m² を超えており、ANN ポテンシャルの予測より 1 J/m² 以上高い。よって Buckingham ポテンシャルによる粒界構造の予測は困難といえる。

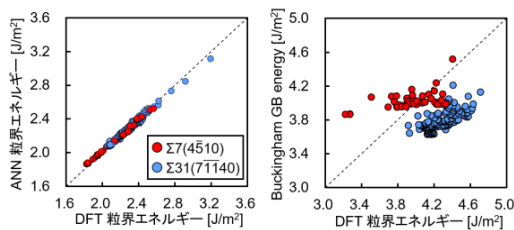


図 2 ANN ポテンシャルと Buckingham ポテンシャルの粒界エネルギー予測。

また ANN ポテンシャルから予測された粒界エネルギー最小の粒界構造と、走査型透過電子顕微鏡による観察像を重ね合わせた結果を図 3 に示す。両者は、[0001]軸方向に投影された Al および O カラムとも一致している。また粒界面近傍の観察像において、黒色が薄い Al カラムは、計算において Al の占有率が低下しているカラムと対応している。以上より、本手法により 3 次元的な粒界構造を正確に予測できるようになり、原子・電子構造の定量解析が可能となった。

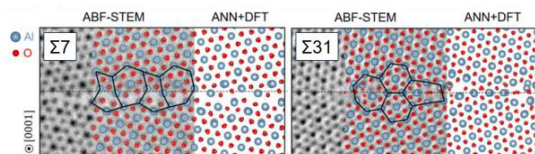


図 3 本計算手法と走査型透過電子顕微鏡観察から得られた粒界構造の比較。

また 3 元系 ANN ポテンシャルを用いて、計算セル中に Y が 1 個存在する場合のエネルギー的に安定な占有サイトを予測できるか検証した(図 4)。Σ7 粒界について、結晶学的に非等価な Al に Y を置換し、その ANN ポテンシャルにより構造緩和した。それらの緩和構造を用いて DFT 計算で 1 点計算して、ANN ポテンシャルと DFT 計算のポテンシャルエネルギーを比較した。この結果より、ANN ポテンシャルと DFT 計算でエネルギーが低い Y 占有サイトは一致していることが分かる。他方で、図 4 の黒矢印で示されるように、ANN ポテンシャルで最安定と予測された Y 占有サイトは、DFT 計算では 2 番目に安定なサイトであった。このような誤差は、今後の学習データの拡張により改善できると期待している。

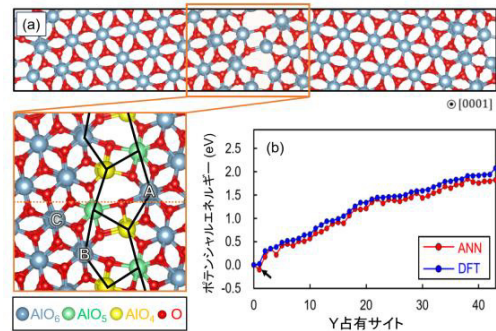


図 4 Y を 1 個置換し、ANN ポテンシャルでエネルギー的に安定な占有サイトを予測。

[発表論文]

1. T. Yokoi, A. Hamajima, Y. Ogura, K. Matsunaga, J. Ceram. Soc. Japan, 131 (2023) 751-761.
2. M. Matsuura, T. Yokoi, Y. Ogura, K. Matsunaga, Scr. Mater. 236 (2023) 115685.

【助成 40-25】

光生成キャリアの空間分離を特徴とする量子ドット太陽電池の開発

豊橋技術科学大学 電気電子情報工学系 准教授 山根啓輔

〔研究の概要〕

我々は InP 積層量子ドットを Si 格子整合系埋め込み層 (Ga(As)PN)で埋め込んだ Type-II バンドアライメントを III-V/Si 多接合太陽電池のトップセルとして提案した。電子/正孔の空間分離に必要な伝導帯および価電子帯のバンドオフセットを実現するためのドットサイズを、計算機趣味レーションを用いて導出した。InP 量子ドットの設計値を直径 10 nm, 高さ 4 nm とし、InP 量子ドットと GaPN 埋め込み層を組み合わせた太陽電池構造の作製を行った。本研究を通して、InP 量子ドットを希薄窒化物結晶で埋め込むことに初めて成功し、提案した InP/III-V-N 系 type-II 量子ドット太陽電池の作製が可能であることを示すことができた。

〔研究経過および成果〕

大面積・低環境負荷の高効率太陽電池の作製を最終目標とし、図 1 に示す希薄窒化物半導体と量子ドットを組み合わせた新たなデバイスコンセプトを提案する。これにより、受光により生じた正電荷と負電荷の対消滅（太陽電池の電流値低下）を劇的に抑制することができる。具体的には、量子ドットに正電荷、希薄窒化物層に負電荷が分離され、外部負荷に取り出す。たとえるならば、駅の上り階段と下り階段を分ける構造をとることで、混雑を緩和することに相当する（専門的には type-II バンドアライメントの積層量子ドットを太陽電池に応用するものである）。本太陽電池が実現できれば、航空機・自動車等への設置、災害時の非常用電源としての活用が期待できる。

本構想を実現するためには、最適成長温度域の異なる InP と GaPN 系材料を同時可能な条件を模索する必要がある。結晶成長には RF-MBE 法を用いた。成長温度については、InP の窒化がほとんど生じないこと、目的の量子ドットサイズが実現

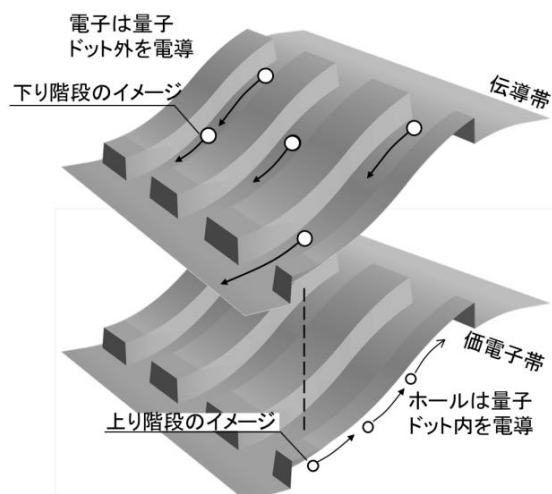


図 1 提案する太陽電池のエネルギーバンド図

できること、GaPN の成長が可能なことの 3 点を考慮して、480°C を採用した。窒素源には RF ラジカルセルを用い、InP 量子ドットの成長中もブライトモードで使用した。GaP 基板上に GaP バッファ層を成長後、InP 量子ドットを成長し、GaPN 埋め込み層を続けて成長した。InP 量子ドットの設計値は、事前検討[2]から直径 10 nm, 高さ 4 nm とした。また、埋め込み層を 4 nm 成長した後、InP

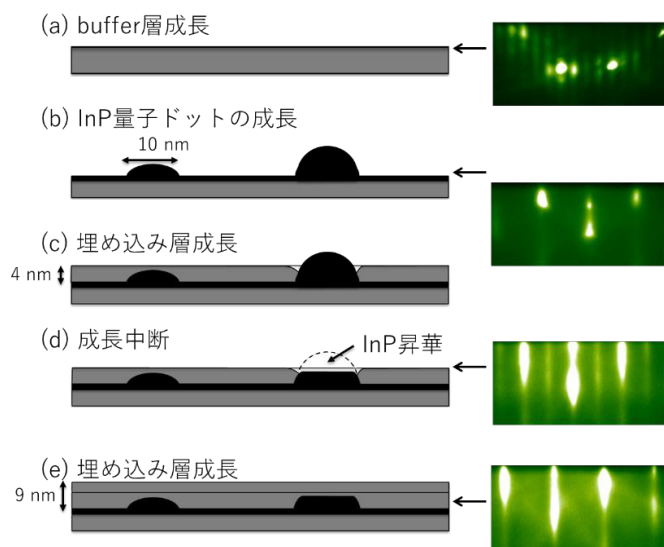


図2 成長中の RHEED 像の変化.

量子ドットの高さをそろえるための成長中断を設け、その後残りの 6 nm の埋め込み層を成長して完全に埋め込みを行った。図 2 に成長中の反射高速電子回折(RHEED)像を示す。InP 成長中はドットの形成を示すスポットパターンが GaP 層のストリークパターンの内側に観察されている。その後 GaPN による埋め込みを行うと、再びストリークパターンが表れた。図 3 に GaPN 埋め込み層成長後の原子間力顕微鏡(AFM)像を示す。RMS 値は 0.14 nm であり、平坦な GaPN 層を成長することができている。今後この工程を繰り返すことで光吸収層の結晶成長が可能と考えられる。本研究を通して、InP 量子ドットを希薄窒化物結晶で埋め込むことに初めて成功し、InP/III-V-N 系 type-II 量子ドット太陽電池の作製が可能であることを示すことができた。

[1] José Alberto Piedra Lorenzana et al., JJAP 60, 045502 (2021).

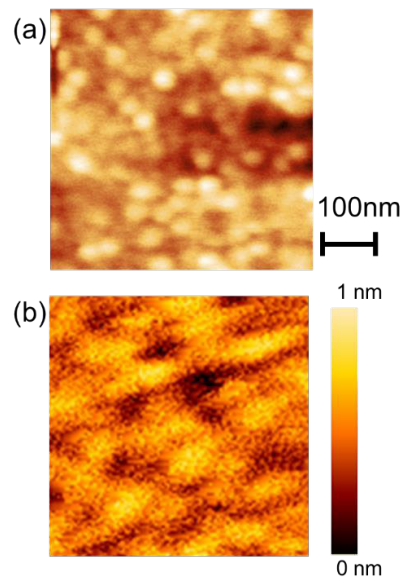


図3 表面 AFM 像(a)量子ドット(b)埋め込み層成長後

[2] 有本岳史他,第 82 回秋応物, 23p-P06-3 (2021)

[発表論文]

- 山根啓輔, 若原昭浩, InP/GaP 系 Type-II 量子ドット太陽電池構造におけるバンドオフセットのドットサイズ依存性, 第 5 回結晶工学 xISYSE 合同研究会, P-13, 11.18, 2022, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府吹田市, ポスター.
- 有本岳史, 山根啓輔, 若原昭浩, InP/GaPN 系 Type II 量子ドット太陽電池構造の作製, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A301-4, 3.14-3.18, 2023, 上智大学四谷キャンパス, 東京都, 口頭発表.
- 平井健登, 山根啓輔, 若原昭浩, 大島武, 中村徹哉, 今泉充, 希薄窒化物結晶の結合状態制御に向けた GaPN 混晶への電子線照射試験 (2), 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A301-3, 3.14-3.18, 2023, 上智大学四谷キャンパス, 東京都, 口頭発表.

【助成 40-26】

接合形成と機能発現を同時に成す半導体界面材料工学

研究者 京都大学工学部 准教授 田辺 克明

〔研究の概要〕

半導体製品の製造プロセスには、高性能化のための高密度化・微細化や低コスト化のための生産効率の向上を満足させる技術が求められる。流体自己集積は基板(リリーサ基板)上に作成された薄膜状デバイスを液体中で単離し、ターゲットとなる、ポケットが格子状に配置されたホスト基板(レシーバ基板)上に集積させる手法であり、そのような要求を満たしうる技術である。本研究では、流体自己集積技術において、集積効率を評価する収率、選択率、総括収率を新たに定義し、「酸化膜の導入による薄膜-基板間引力の制御」と「集積後のリンス工程による外力付与」の2つの集積法によって厚み 200 nm の微小 Si 薄膜の高効率集積法について検討した。

〔研究経過および成果〕

1. 緒言

流体自己集積(Fluidic Self-Assembly, FSA)は基板(リリーサ基板)上に作成された薄膜上デバイスを液体中で単離し、ターゲットとなる、ポケットが格子状に配置されたホスト基板(レシーバ基板)上に集積させる手法である。過去の FSA の研究例として GaAs や Si を用いた例が報告されているが[1], 集積方法については定量的な評価がされておらず、微細化についても数十 μm 程度までにとどまっていた。本研究では単離されたデバイス状薄膜の集積効率を表す評価関数(収率, 選択率, 総括収率)を新たに定義し, 厚さ 200 nm, 数 μm 四方の微小 Si 薄膜の高効率集積を目指して(A)「酸化膜の導入による薄膜-基板間引力の制御」と(B)「集積後のリンス工程による外力付与」の効果を検討した。

2. 実験方法

本研究では, Si ウエハと Silicon - On - Insulator ウエハ(SOI ウエハ)をフォトリソグラフィーによって加工し,

FSA の実験を行った。Fig.1 のようにリリーサ基板とレシーバ基板を作成し, リリーサ基板をエタノールで希釈した HF 水溶液に 30 分間浸漬することで Si 薄膜を液体中で単離し, Si 薄膜の分散液を作成した。その後, (A)の実験では, レシーバ上の酸化膜が溶解しないようにエタノールで分散液を希釈したのちに酸化膜付き SiO₂ レシーバを投入し, 20 時間浸漬することによってレシーバ上に Si 薄膜を集積した。加えて, 対照実験として, 希釈していない分散液に Si レシーバを投入し, 同様に浸漬した。(B)の実験では, 希釈していない分散液中に Si レシーバを投入し, 20 時間浸漬することでレシーバ上に Si 薄膜を集積したのちに, 純水中で Si 薄膜集積後のレシーバを 4 種類の回転数で 10 秒間リンスを行った。

3. 結果と考察

集積効率を評価する収率 Y , 選択率 S , 総括収率 YS を以下のように定義した。

$$Y = n_D/n_I, S = n_P/n_D, YS = n_P/n_I$$

ここで、 n_D 、 n_T 、 n_P はそれぞれレシーバ上に集積された Si 薄膜数、分散液中の Si 薄膜数、レシーバの pocket に集積された Si 薄膜数であり、 n_T は Si 薄膜分散液を全量滴下した Si ウエハの観察により算出した。

実験結果において、pocket の広さに関わらず、レシーバに酸化膜を導入することで選択率の大幅な向上が見られた。これは、Si-(溶媒)-Si 界面に働く分子間力に比べて、Si-(溶媒)-SiO₂ 界面に働く分子間力が小さいこと[2]によって、pocket-Si 薄膜間により大きな分子間力が働くと考えられるためである。一方で SiO₂ が HF に溶解されないようにエタノールを添加するため Si レシーバに比して収率、総括収率が大きく低下することが分かった。

5 種類の pocket の大きさによる実験結果において、リンスを行うことで溶媒から Si 薄膜に外力が付与され、pocket と Si 薄膜の衝突確率が上昇し、加えて pocket 外の Si 薄膜が溶媒中に分散されることで選択率の増加と収率の減少が起こった。また、回転数をさらに増やすことで Si 薄膜の溶媒への分散が優位になり、選択率のピークが見られた。そしてその点で総括収率も最大となった。

4. 結言

集積効率を定量的に評価する評価関数を新たに設定した。また、2 μ m 四方の Si 薄膜の FSA では 50rpm でリンスを行うことで高い選択率と総括収率を達成することができた。

5. 参考文献

[1] J.K. Tu et al, “Fluidic self-assembly of InGaAs

vertical cavity surface emitting lasers onto silicon”, ELECTRONICS LETTERS, 31, 1448-1449, (1995)

[2] M. Matsuo et al, Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ. 58, 523 (1981).

〔発表論文〕

1. Y. Fujita and K. Tanabe, “ Experimental considerations for integration method of Si thin-film microchips for fluidic self-assembly”, Japanese Journal of Applied Physics 62 (8), 086501 (2023).

【助成 40-27】

メタ表面を用いる光マネジメント科学の実践—蛍光の 100%前方放出を目指して

研究者 京都大学大学院工学研究科 助教 村井 俊介
アイントホーフエン工科大学 教授 Jaime Gómez Rivas

〔研究の概要〕

指向性ある蛍光を放つ「ナノアンテナ蛍光体」の蛍光強度向上を目指した研究を行いました。これまでに二酸化チタンからなるナノアンテナと蛍光体を用い、蛍光強度の増大と指向性の付与に成功しています。正面方向への蛍光強度はアンテナがない蛍光基板の 10 倍に迫る値に達し、また青色レーザー光から黄色蛍光への変換効率は蛍光基板と変わりませんでした。しかし、課題として、まだ有効利用できていない蛍光成分があることが挙げられます。垂直方向で 10 倍の発光強度の増強を示す試料でさえ、蛍光基板内で発生した蛍光の 50%程度しか前方に放っていません。残りの 50%は後方に放たれるか、側方に逃げています。本研究では、これらをすべて前方に放つことでさらに蛍光強度を高め、高輝度・狭角配光の超小型非コヒーレント指向性点光源としての特性を評価することを目的とします。そのために基板背面に青色を透過し黄色を反射する誘電体多層膜を成膜し、前方方向への発光強度の増加を調べました。

〔研究経過および成果〕

ナノサイズの粒子を基板上に周期的に並べた二次元構造は、光を平面内に強く閉じ込めたり、特定の方向へ集めたりする性質があります。このような構造は、光に対するアンテナ＝“ナノアンテナ”と呼ばれ、先端の光技術として研究が進んでいます。我々は、このナノアンテナと蛍光体を組み合わせた“ナノアンテナ蛍光体”を開発し、光源や照明応用を目指した研究を進めています。これまでに、黄色蛍光体基板の上にナノアンテナを作製し、青色レーザーと組み合わせて、指向性白色光源を設計・試作しました[1]。この試作品は、蛍光体から放たれる黄色光が基板表面に作製されたナノアンテナの作用を受けて前方方向に集められ、青色レーザー光と均一に混ざることによって、前方方向へ指向性を持った白色光を生成します。申請書作成

段階(2022 年 5 月)でメタ表面の無い場合に比べ垂直方向の発光強度では 10 倍の増強を達成しました[2]。申請時点の課題として、まだ有効利用できていない蛍光成分があることが挙げられます。垂直方向で 10 倍の発光強度の増強を示す試料でさえ、蛍光基板内で発生した蛍光の 50%程度しか前方に放っていません。残りの 50%は後方に放たれるか、側方に逃げています。本研究では、これらをすべて前方に放つことでさらに蛍光強度を高め、高輝度・狭角配光の超小型非コヒーレント指向性点光源としての特性を評価することを目的とします。

これまでの研究で、前方への光放出を高めるため、蛍光体基板背面に 2 種の酸化物の 2 層膜を成膜し、後方に放たれる蛍光を前方に反射する取り組みを行いました。本研究において、2 種の酸化物の 2 層膜を

3 層成膜し、反射強度を高めることで前方への発光強度を更に高めることを狙い研究を行いました。

スパッタ法を用い、ナノアンテナ蛍光体の背面に 2 種の酸化物の 2 層構造を 3 層積層させ、背面から青色レーザを入射し、前方へ放たれる蛍光を検出しました。未加工の蛍光体基板からの発光強度で規格化した蛍光増強度を比較すると、2 種の酸化物の 2 層構造を 1 層積層させた試料では最大で 10 倍程度の発光強度の増強が見られたのに対し、2 種の酸化物の 2 層構造を 3 層積層させると 16 倍程度まで増強度が高まることになりました(図 1)。また、透過スペクトルとの比較により、発光増強の波長は反射率の高い波長と一致することがわかりました。これらのことから、誘電体多層膜を背面に成膜することで、前方方向への発光強度を高めることに成功しました。今後は研究成果を論文にまとめると共に、更に積層回数を増やし、更なる発光増強を目指します。

また青色励起のナノアンテナ蛍光体の研究と並行して、アップコンバージョン機構を利用した赤外励起の可視ナノアンテナ蛍光体の研究も行いました。Si ナノ粒子からなるナノアンテナを用いることで、アップコンバージョン発光強度を大幅に増強することに成功しました[発表論文 1]。

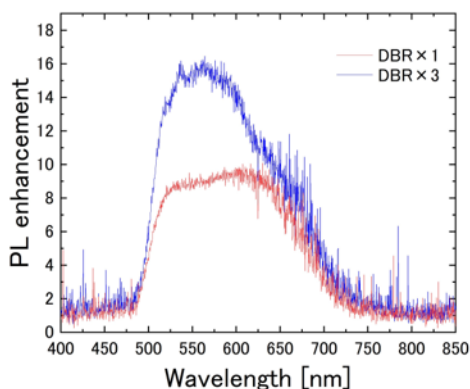


図 1: ナノアンテナ蛍光体の背面に 2 種の酸化物の 2 層構造を 1 組(図中赤線)、3 組(青線)成膜した試料における前方方向($\theta_{em}=0^\circ$)への発光増強。ここで発光増強は未加工の蛍光体基板からの発光強度に対する強度比として定義した。

[謝辞]

本研究の実施に当たり、カシオ科学振興財団からの助成金を試料作製の試薬や測定系構築のための光学部品の購入費に充てさせていただきました。記して謝意を表します。

[参考論文]

1. Enhanced photoluminescence and directional white-light generation by plasmonic array, Ryosuke Kamakura, Shunsuke Murai, Yusuke Yokobayashi, Keijiro Takashima, Masaru Kuramoto, Koji Fujita, Katsuhisa Tanaka, *Journal of Applied Physics*, **124** 213105 (2018).
2. Photoluminescence engineering with nanoantenna phosphors, Shunsuke Murai, Feifei Zhang, Koki Aichi, Katsuhisa Tanaka, *Journal of Materials Chemistry C*, **11**, 472-479 (2023)

[発表論文]

1. Enhancing Up-Conversion Luminescence Using Dielectric Metasurfaces: Role of the Quality Factor of Resonance at a Pumping Wavelength, Yuan Gao, Libei Liu, Shunsuke Murai, Kenji Shinozaki and Katsuhisa Tanaka, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15**, 39, 45960–45969 (2023)

送受信回路系極低温組込み核磁気共鳴法による微小物質の
高感度測定の開発と新奇物性探索

研究者 大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授 椋田秀和

〔研究の概要〕

核磁気共鳴(NMR)実験を用いたミクロな視点から、未解明の超伝導物質の機構の解明、従来型とは異なる超伝導機構の探索、新たな超伝導転移温度上昇機構の探索などを目標に研究を推進した。特に近年報告されてきた超高压下や薄膜など超微小物質での新奇な高温超伝導現象へと対象を広げることが必要となってきた。本成果報告では微小物質測定の技術開発の経過と、未解明の超伝導物質の機構の解明を目指した物性探索の成果について紹介する。低温部組込みのアンプと平面コイルにより信号のより高感度での検出を行った。大きな核(電気)四重極モーメントを持つ元素で一部置換した物質系において、その置換核をプローブとし同位体 NMR 比較法を用いるアイデアで、過去の NMR では観測が難しかった軌道揺らぎ成分が抽出できることを示し、超伝導との関連を調べる新しい手法となった。

〔研究経過および成果〕

格子振動(フォノン)を媒介としたクーパ対形成による超伝導機構(BCS 機構)で長らく理解されてきた超伝導現象であるが、近年その機構では説明が困難な超伝導体が次々と発見されている。これら未解明の超伝導物質の機構を実験的に解明すること、フォノン以外の根本的に全く新しい超伝導機構を見出すこと、その中で新たな超伝導転移温度上昇の機構を見出すこと、などを目標に、我々は核磁気共鳴(NMR)実験を用いてミクロな視点から研究を推進している。特に近年、超高压下や薄膜などで新奇な高温超伝導現象が報告されてきたが、超微小試料の実験の困難さが機構解明の実験研究を阻んでいる。超伝導発現機構に関わるスピン、電荷、軌道などの動的な揺らぎを検出できる核磁気共鳴 (NMR) 測定は、極めて重要な実験手法であるが、未だほとんど行われていない。

我々は NMR 測定法をより微小物質にも適用できるように送受信回路系の極低温設置により高感度化を計る測定法を開発を行いながら、新奇物性探索の実験を行ってきた。本成果報告では、この研究期間に行ってきた微小物質測定の技術開発の成果と、それと並行して行ってきた未解明の超伝導物質の機構の解明を目指した物性探索研究について報告する。

前者に関しては、現在標準的に使われている固体 NMR 測定装置では、試料と NMR 共鳴回路は低温クライオスタット内に設置することで外来ノイズから遮蔽されているが、室温部に置かれた受信側の高周波伝送路とプリアンプ周辺で、熱雑音や外来ノイズがのり感度が低下する。この問題を解決するために、我々は、試料と共に送受信回路系をすべて直接低温クライオスタット内へ設置を試みている。この方式により熱雑音や外来ノイズ

を大きく抑制できると期待される。我々は低温でも動作する電子部品を選別し電子回路を独自に設計した。この助成期間試行錯誤を繰り返しながらプローブに組み込める超小型化に取り組み、いくつかの試作を繰り返した中で低温設置可能な超小型プリアンプを試作できた。低温組み込み型プリアンプと平面型コイルで NMR 信号を高感度で検出できることを確かめた。その手法や開発の詳細などの途中経過を日本物理学会などで報告した(2023 年日本物理学会秋季大会 17aB103-2, 「微量試料 NMR を目指した極低温小型低ノイズアンプの開発」、西岡颯太郎, 椋田秀和ら)。

後者に関しては、多軌道強相関系物質の典型である鉄系高温超伝導においては、スピン揺らぎと軌道揺らぎのどちらがどのように超伝導出現と関わっているか長年の議論に決着がついていない。特に我々が着目した LaFeAsO 系高温超伝導物質

では、元素置換や圧力印加により、軌道成分、軌道縮重度、電子ドーパ量、電子相関を制御できることを巧みに利用し、高温超伝導相が複数現れ、スピンと軌道の揺らぎの臨界性との関係を明らかにできる数少ない物質系である。我々はこの系において、大きな核(電気)四重極モーメント Q を持つ元素で一部置換した物質系を合成し、その置換核を核磁気共鳴(NMR)プローブとして同位体 NMR 比較法を用いるアイデアで、過去の NMR では観測が難しかった軌道揺らぎ成分が抽出できた(図 1)。大きな単結晶を必要としない NMR で、多結晶試料でもスピンと軌道の両者を同時に見ることができ、広範な電子ドーパ域でスピン/軌道揺らぎがどのように超伝導と相関を本研究で議論できるようになった。本研究成果は学術誌(Phys. Rev. B 誌)の Editor's Suggestion に選出された。

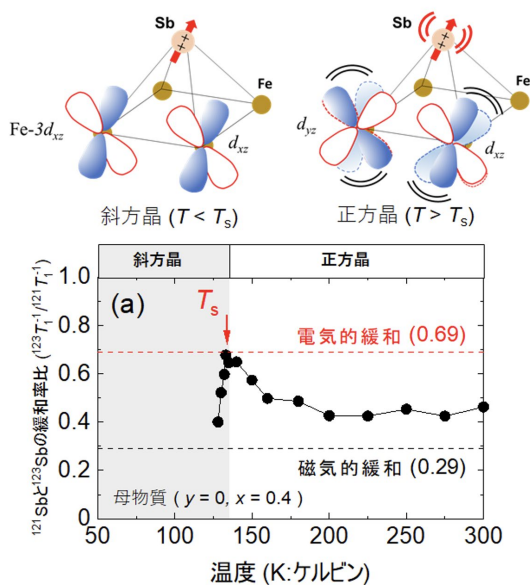


図 1 同位体 Sb-NMR 実験により超伝導体での軌道揺らぎの観測に成功

[発表論文]

1. Dynamics of orbital degrees of freedom probed via isotope $^{121,123}\text{Sb}$ nuclear quadrupole moments in Sb-substituted iron-pnictide superconductors, T Kouchi, H Mukuda, et al. Physical Review B 108, 014507 (2023). [Phys.Rev B 誌の Editor's Suggestion に選出]
2. Isotope $^{121,123}\text{Sb}$ -NMR study in iron-based superconductor $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x)\text{O}_{1-y}\text{F}_y$, T. Kouchi, H Mukuda et al., New Physics: Sae Mulli, in press.
3. 微量試料 NMR を目指した極低温小型低ノイズアンプの開発、西岡颯太郎, 椋田秀和ら、日本物理学会秋季大会, 17aB103-2, 東北大、仙台、 Sep/17 (2023)

【助成 40-29】

位相的データ解析による料理空間の構造解明と おいしい新料理の客観的な提案への応用

代表研究者 神戸大学大学院人間発達環境学研究所 助教 ESCOLAR Emerson Gaw

共同研究者 神戸大学大学院人間発達環境学研究所 助教 湯浅正洋

〔研究の概要〕

通常、新しい料理は料理人のセンスやインスピレーションにより考案されるが、料理人の主観を客観的なアイデア創出で補うと、これまでにない食材・味付け・調理法の新たな組み合わせの提案が容易になると考えられる。そこで本研究では、既存の料理で用いられるレシピのデータセットに位相的データ解析を適用して、「料理空間」の構造を数学的に解明し、新料理をその空間の「穴」から構成する手法を提案した。この手法で得られた食材の組み合わせから、実際にビスケット様焼き菓子を調理することができた。また、この焼き菓子は官能評価では受容されるおいしい菓子であることが明らかとなった。本研究により、位相的データ解析は新しいレシピ生成法構築に有用な解析方法であることが示唆された。

〔研究経過および成果〕

「データの形」に着目した位相的データ解析は、材料科学、経済学、生物学など、諸科学の問題に応用され、目覚ましい発展を遂げてきた。本解析は、対象データが持つ「穴」や「枝分かれ」といった構造や形を正確に捉える、適用範囲が広い解析手法である。本研究では、既存の料理で用いられるレシピデータに本解析を適用することで、「料理空間」の構造を数学的に解明し、新しいレシピをその空間の「穴」から構成することに成功した。一方、通常は、新しい料理は料理人のセンスやインスピレーションにより考案されるが、1人の料理人が提案できる料理レシピ数に限界がある。本研究成果はこのような料理人が新しい料理提案する際に、客観的アイディアとなることが期待される。

本研究の提案手法は、以下の通りである(図1)。

(1) パーシステントホモロジー解析[3]を用いてレ

シピデータの穴をサイクルとして特定する。

(2) 最適化問題を解いてサイクルから新たなレシピを生成する。

(3) 得られたレシピの調理と評価を行う。

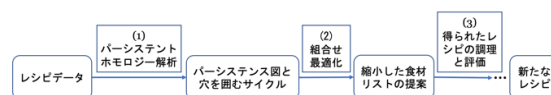


図 1: 本研究の概要

本論文では、先行研究[1]のレシピデータ(約5万個のレシピ, Supp. Dataset 2)に適用して得た解析結果と、実際に調理した料理の嗜好性を解説する。

(1) パーシステントホモロジー解析

パーシステントホモロジー解析の詳細に関しては、テキスト[5]を参照されたい。本研究では、レシピデータの各レシピを0-1ベクトル(特性ベクトル)として扱い、レシピ間の距離としてコサイン非類似度を適用した。ripser[2]というソフトウェアを用いて、レシピデータの Vietoris-Rips フィルトレーションを構成し、その1次パ

一システム図 (PD) 及び代表サイクルを計算した (図2). 各代表サイクルはレシピの列であり, レシピデータのある「穴」を囲んでいるものである. PD の各点 (b,d) は生成消滅対と呼び, それぞれの「穴」の生成スケール b と消滅スケール d を表している. また, $d-b$ はその寿命と呼ぶ. 図2では, 1から9番目に長い寿命の生成消滅対は星印で表している.

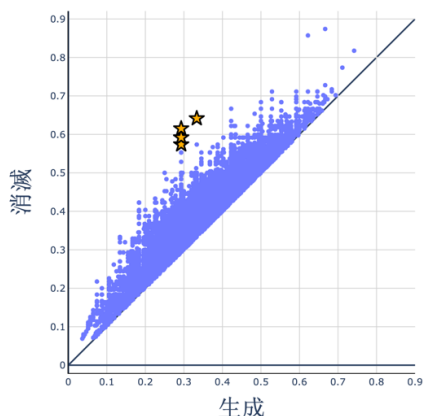


図 2: レシピデータの PD

(2) サイクルから新たなレシピを生成する

パーシステントホモロジー解析から得られた穴の周りにあるレシピの食材を, 候補食材(集合 S)として, 次の最適化問題を構成した.

$$y_* = \operatorname{argmax}_{y \in S, |y|=t} d_{\cos}(y, X)$$

この最適化問題は, 既存のレシピのデータセット X と最も似ていない y を見つけ出す問題である. ただし, 制限として, y は候補の食材集合 S から t 個の食材を選んだ部分レシピである. この定式化はパーシステントホモロジー解析における従来の optimal cycle 解析[4]と違い, レシピの特性に合わせた最適化問題である. 計算機を用いて一番長い寿命を持つサイクルに対して上の最適化問題を解くと, 次のような解が得られた(食材数 5 つのレシピ案を示す.).

```

('cranberry', 'cream cheese', 'gin', 'olive oil', 'raisin')
('cranberry', 'cream cheese', 'gin', 'raisin', 'starch')
('cranberry', 'cream cheese', 'gin', 'raisin', 'whole grain wheat flour')
('cranberry', 'cream cheese', 'gin', 'starch', 'whole grain wheat flour')
('cranberry', 'cream cheese', 'raisin', 'starch', 'whole grain wheat flour')
...

```

(3) 得られたレシピの調理と官能評価

得られたレシピをもとに, ビスケット様焼き菓子を調理し, その嗜好性を官能評価により明らかにした. 材料の異なる 5 種の焼き菓子で評価したところ, 全試料でおいしさと総合評価の評点が 7 件法 (-3~+3) の +1 前後であり, 焼き菓子として受容可能と判断された.

以上より, 位相的データ解析は新しいレシピ生成法構築に有用な解析方法であることが示唆された.

[参考文献]

- [1] Y. Ahn, et al. Sci. Rep., 1(1):1-7, 2011.
- [2] U. Bauer. J. Appl. Comput. Topol., 5(3):391-423, 2021.
- [3] H. Edelsbrunner, et al. Discrete Comput Geom, 28:511-533, 2002.
- [4] E.G. Escolar, Y. Hiraoka. In: Optimization in the Real World, pp 79-96. Springer Japan, 2016.
- [5] 池祐一, E.G.エスカラ, 大林一平, 鍛冶静雄. 位相的データ解析から構造発見へ: パーシステントホモロジーを中心に. サイエンス社, 2023.

[発表論文]

1. Emerson Gaw ESCOLAR, 湯浅 正洋. 料理空間の位相的データ解析 ~ 新しい料理の提案への応用 ~, 2023 年度応用数学合同研究集会, 口頭発表(2023/12/15, 龍谷大学)
2. 湯浅正洋, Emerson Gaw ESCOLAR. 位相的データ解析で生成した料理レシピの調理と有用性, 日本調理科学会近畿支部第 49 回研究発表会, 口頭発表(2023/12/3, 滋賀大学)
3. Emerson Gaw ESCOLAR, 湯浅 正洋. A Topological Analysis of the Space of Recipes, 日本数学会 2023 年度秋季総合分科会, 口頭発表(2023/09/22, 東北大学)

【助成 40-30】

長波長側の可視光を利用可能にする螺旋型有機光触媒の開発

代表研究者 岡山大学異分野基礎科学研究所 助教 田中 健太

〔研究の概要〕

近年の地球環境問題への世界的な取り組みとして「持続可能な開発目標 (SDGs)」を目指した活動が活発に展開されており、有機合成化学の分野においても環境に対する負荷を軽減しうる新たな合成プロセスの開発が試みられている。可視光を光源とすることのできる光触媒反応はクリーンで持続可能な化学プロセスに応じる新戦略の1つであり注目を集めている。その一方で、現在報告されている光触媒反応は紫外領域に近くエネルギーの大きい短波長側の可視光である紫～青色光(波長 380-490nm)を光源として使用しており低いエネルギー効率が課題となっている。このような背景から、本研究では長波長側の可視光である赤色光(波長 620-780nm)を光源として利用することの出来る新規螺旋型有機光触媒(TXTH)の開発と応用を検討した。

〔研究経過および成果〕

1. 新規螺旋型有機光触媒(TXTH)の合成

はじめに、新規螺旋型有機光触媒(TXTH)の合成を検討した(図1)。実験条件として、基質にチオエーテル **1**(0.2 mmol)およびサリチル酸 **2**(0.6 mmol)を用い、酸触媒として TfOH(3.0 equiv.)、溶媒として chlorobenzene (5.0 mL)を用いて 120 °C、24 時間の反応条件で検討を行ったところ、42%の収率で目的とする TXTH 触媒を得た。一般的に TXTH のようなヘリセニウムイオン骨格を有する分子の合成はトリアリールメチルカチオンを予め合成した後に分子内 S_NAr 反応により合成する手法が取られており、チオエーテルとサリチル酸のような入手容易な化合物を基質とした Friedel-Crafts 反応と S_NAr 反応の連続反応により一段階でヘリセニウムイオンを合成する手法はこれまで報告例が無いことから、新たなヘリセニウムイオンの合成手法を確立することができた。

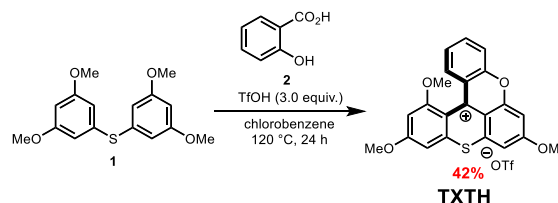


図1 TXTH 触媒の合成

2. TXTH 触媒の光触媒特性評価

次に、光触媒の吸収特性の比較を行うために申請者が以前開発した TXT 触媒の合成を行った。その結果、TfOH 触媒存在下チオエーテル **1** と酸クロリド **3** の Friedel-Crafts 反応により、目的とする TXT 触媒を 50%で得ることに成功した(図2)。

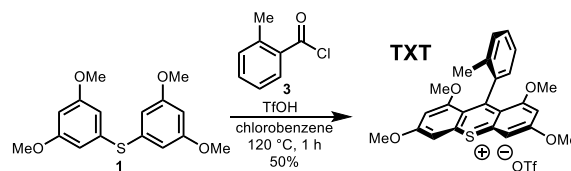


図2 TXT 触媒の合成

合成した TXTH 触媒と TXT 触媒の吸収特性の比較を行ったところ、TXT 触媒と比較し TXTH 触媒はよ

り長波長側の可視光領域を吸収する分子であることが分かった(図3)。これは、TXT 触媒よりもπ共役が拡張したため、HOMO-LUMO のバンドギャップが小さくなり吸収波長が長波長側にシフトしたためと考えられる。

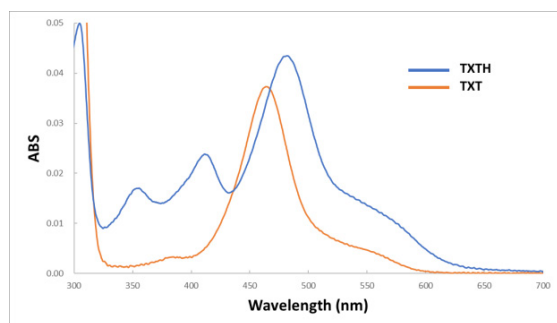


図3 TXTH 触媒とTXT 触媒の紫外可視吸収スペクトルの比較

3. 光触媒反応への応用

合成した TXTH 触媒の光触媒としての機能を創出するため、ラジカルカチオン Diels-Alder 反応への応用を検討した(図4)。実験条件として、基質に *trans*-anethole **4**(0.25 mmol)および isoprene **5**(0.75 mmol)を用い、TXTH 触媒(1.0 mol%)、溶媒として CH₃NO₂ (4.0 mL)を用いて空気雰囲気下、室温 15 分の反応条件で種々光源の検討を行った(図 7)。その結果、いずれの光を光源とした場合においても円滑に反応が進行し高収率で目的とする環化付加体 **6** を得ることに成功した。特に長波長側の可視光である Red LED(赤色光波長 640 nm)を光源として用いた場合に最もよい結果を示し、>99%の収率で目的物を得ることに成功した。一方、Entry 5, 6 において TXTH 触媒を加えない条件や Red LED を照射しない条件では反応が進行しなかったことから、TXTH 触媒と Red LED が本反応を促進していることが分かった。

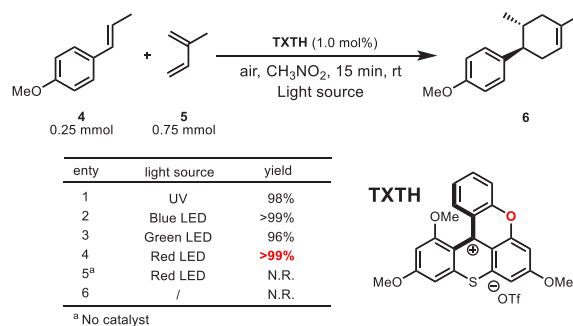


図4 TXTH 触媒と可視光を利用したラジカルカチオン Diels-Alder 反応への応用

本研究では赤色光を光源として利用することの出来る新規螺旋型有機光触媒(TXTH)を合成し、光触媒反応へ応用することに成功した。今後は TXTH 触媒を利用し、有機 EL 材料などの有用化合物の効率的合成法の開発や太陽光を利用した光触媒反応に展開する予定である。

[発表論文]

- 「フォトレドックス触媒を利用した[2+2]環化付加反応によるハロシクロブタンの合成」水谷 明日香・田中 健太・高村 浩由・門田 功, 第 33 回基礎有機化学討論会, 岡山コンベンションセンター, 2023 年 9 月 12 日~14 日
- 「チオキサニチリウム光レドックス触媒による Radical Cation Diels-Alder 反応」田中 健太・岸本 真実・大塚 尚哉・鈴木 敏泰・榎山 儀恵・高村 浩由・門田 功・星野 雄二郎, 第 33 回基礎有機化学討論会, 岡山コンベンションセンター, 2023 年 9 月 12 日~14 日
- 「フォトレドックス触媒を用いた[2+2]環化付加反応によるハロシクロブタンの合成」水谷 明日香・田中 健太・高村 浩由・門田 功, 第 47 回有機電子移動化学討論会, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2023 年 6 月 16 日~17 日

【助成 40-31】

マルチモーダル分光計測による材料認識ペプチドの機能解明

研究者 徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所 特任助教 加藤 遼

〔研究の概要〕

無機材料表面に特異的に吸着する材料認識ペプチドは、材料表面の電子特性や分子修飾性を改質できるため、バイオセンサー応用が盛んである。この生体分子—固体表面の相互作用を理解することは、重要である。これまでのペプチド-固体界面に関する研究は、材料表面上に形成する自己組織化構造の観察や、デバイスの電気特性の評価に集中しており、ペプチドの材料表面への吸着機構を明らかにする試みは少ない。

生体分子の材料表面への吸着機能は、ペプチドの立体構造の変化と材料の電子特性の局所的な変化の両方が重要である。本研究の目的は、フォトルミネッセンスと赤外吸収情報を同時にナノ計測できるマルチモーダル計測法を開発し、ペプチドの化学構造と無機材料の電子特性の相関を観察することで、材料認識ペプチドの吸着機構に新たな知見を与えることである。

〔研究経過および成果〕

マルチモーダルな振動分光技術の計測には、振動スペクトルと発光スペクトルの光信号を同時に検出することが必要である。そこで、2つのアプローチの技術開発を行なった。1つ目は、ラマンスペクトルと発光スペクトルを計測する装置を開発した。入射光と材料の発光波長の関係を考慮しつつ、分散角の小さいグレーティングを使用することで、ラマンスペクトルと発光スペクトルを同時に計測できるシステムを開発した。この手法を用いて、材料上の生体分子計測のデモンストラーションを行った。生体分子は NR7C という無機材料上に自己組織構造を形成する組み換えタンパクを使用した。無機材料の表面特性(生体分子の修飾性や電気特性)を改質できるためバイオセンサー研究への応用や、その剛直な機械特性からシルク産業への応用が行われている。この剛直な機械特性は、分子内の水素結合によって安定な β シートの2次構造を形成するからである。この NR7C の材料表面での

二次構造及び分子構造情報を1分子レベルで計測した。NR7C とその宿主材料である二硫化モリブデンからのラマン散乱と発光(フォトルミネッセンス)を同時にかつナノスケールで計測することに成功した。得られたラマンスペクトルには、タンパクの構成アミノ酸(グリシン、アラニン、フェニルアラニン等)の情報と、材料の Mo-S 間の水平と垂直方向の分子振動情報が観察された。これらの分子振動情報を解析し、材料間での相互作用の解析を現在行なっている。並行して、ナノスケールの赤外分光技術の開発にも取り組んだ。赤外領域の光信号を検出せずに試料の赤外吸収を計測できるフォトサーマル分光を利用することで、フォトルミネッセンス分光との共立を実現する。分子が赤外吸収を起こすと瞬間的な熱膨張が生じる。フォトサーマル分光は、熱膨張を可視光の散乱変化から計測することで、赤外吸収を計測する赤外分光技術である。試料の熱膨張は赤外パルスレーザーのパルス周波数と同じ周波数で繰り返し生じる。そ

のため、パルスと同じ周波数成分で変調される散乱変化のみを抽出することで(ロックイン検出)、赤外吸収情報が測定可能である。赤外パルス光の波長を掃引しながら、散乱情報を計測することで、赤外吸収スペクトルが得られる。この手法は、試料からの散乱を計測するため、ラマン分光と異なり、フォトルミネッセンスと赤外吸収の同時ナノ計測が容易である。開発した手法を用いて、ポリマー材質の微粒子とポリマーブレンドの超解像イメージングを実証した。現在は、ナノメートル膜厚の二次元材料の超解像イメージングの実証に注力している。

本研究は、フォトルミネッセンスと振動分光の同時ナノ計測を実現することで、生体分子の2次構造とホスト材料の電子特性を同じ時空間スケールで観測できる革新的なナノスケール分光計測法だと位置付けられる。化学・電子特性ダイナミクスというこれまでの1分子計測技術で得られてきた情報とは異なる観点で生体分子機能を議論することで、材料認識ペプチドの特異な機能を明らかにすることを今後の目標としている。

[発表論文]

1. 現在 投稿中

【助成 40-32】

Si-CdTe 一体型3次元半導体放射線イメージセンサの開発

研究者 宮崎大学工学部 准教授 武田 彩希

〔研究の概要〕

本研究は、Si センサ・CdTe センサー一体型の3次元半導体放射線イメージセンサを実現するための技術開発を目的とした。これまで研究開発してきた Si センサ・CMOS 回路一体型の「SOI-CMOS イメージセンサ」に対し、CdTe センサをマイクロバンプで接合する。SOI-CMOS イメージセンサは、既に自身で設計し、製造まで完了している。本研究では、主な開発項目として、マイクロバンプによる接合を進めた。最終的に、サイズが5 μm ϕ の金コーン型マイクロバンプで接合を実施し、実機を製造した。

〔研究経過および成果〕

X線天文学は、アメリカ、ヨーロッパと並び日本が世界を牽引する分野のひとつである。次世代の宇宙X線観測では、0.5-100 keV の広帯域な撮像分光が要求される。現在X線天文衛星の主力である Si センサは、高い撮像分光能力をもつが、現実的なエネルギー帯域は0.5-20 keV であり十分ではない。そこで、100 keV 程度までのエネルギー帯域がある CdTe センサを Si センサの後段に配置（スタック）することで、広帯域な撮像分光を実現する。しかし、この形式では Si センサ・CdTe センサを独立した基板に配置することになり、センサ間は最小4 mm の隙間ができる。このため焦点深度との兼ね合いで両者に対し同時に焦点を合わせられない。つまり、ピンボケした画像となる。また、Si センサ・CdTe センサは互いに独立するためシステムとして複雑になり、排熱や機械環境の成立性を難しくする。これらの課題を解決する方策として、Si センサ・CdTe センサを一体化した半導体イメージセンサが考えられる。一体化させることで焦点深度の制限が無くなり、システムとして単純化・小型化することができる。

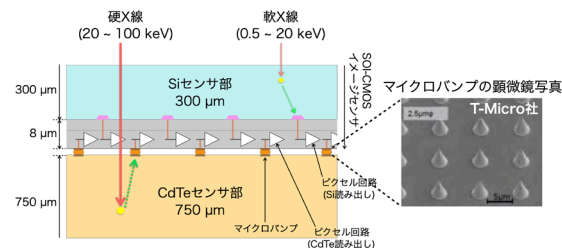


図1. Si-CdTe 一体型3次元放射線イメージセンサの模式図。センサ間にSOI-CMOS回路が存在する。

図1は、本研究で開発する Si-CdTe 一体型3次元放射線イメージセンサの模式図である。軟X線(0.5-20 keV)のエネルギー帯域は Si センサ部、硬X線(20-100 keV)のエネルギー帯域は CdTe センサ部で主に検出する。Si センサ部は、CMOS 回路が一体化した SOI-CMOS イメージセンサにより構成する。CdTe センサ部は、アクロラド社で製造された結晶により構成する。CdTe センサ用の読み出し回路は SOI-CMOS イメージセンサ内へ組み込むことで一体化した構造を実現させる。回路が同一層内に存在するため、親和性の高いシステムとなる。互いは、T-Micro 社のマイクロバンプで接合する。図2は、本研究のため自身で設計した SOI-CMOS イメージセンサである。36 μm 角の Si センサ用の画素 2×2 を1ユニットにし、その中に CdTe センサ用の読み出し回路を組み込んだ。

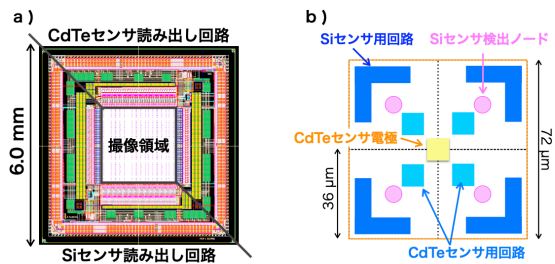


図2. a)設計した SOI-CMOS イメージセンサのチップレイアウト。b)設計した SOI-CMOS イメージセンサの画素構成。Si センサ用回路 2×2 画素が 1 ユニット。

SOI-CMOS イメージセンサと CdTe センサを安定的に接合する技術として、T-Micros 社による金コーン型マイクロバンプ接合を検討した。これは、最小 2.5 μm ϕ という微小なサイズでバンプ接合が可能な技術である。本研究で設計した SOI-CMOS イメージセンサ

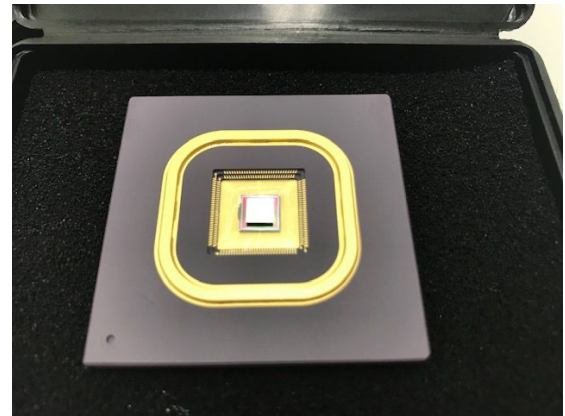


図5. セラミックパッケージに実装後の完成した実機。

には、画素部・周辺回路部に CdTe センサと接続するための電極を配置している。マイクロバンプは、電極毎に 4 個ずつ配置することにした。電極のサイズは 14 μm 角、マイクロバンプのサイズは 5 μm ϕ とした。図 3 は、実機の顕微鏡写真である。画素アレイ領域と周辺回路領域の境界付近であり、画素の中央にマイクロバンプを配置する電極、その中に 4 個のマイクロバンプを製造できていることが確認できる。点線が画素の境界を示す。また、図 4 は、さらに拡大した顕微鏡写真である。マイクロバンプがより鮮明に確認できる。

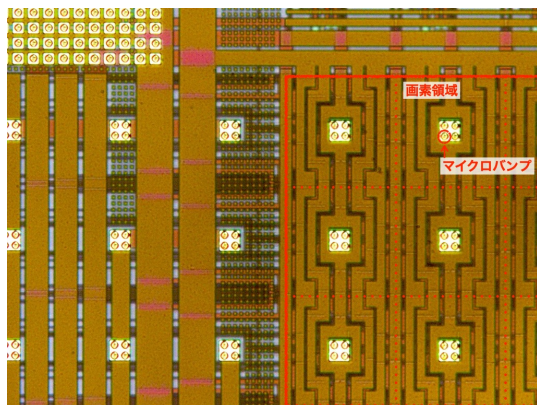


図3. 画素アレイ領域と周辺回路領域の境界付近の顕微鏡写真。画素の中央にマイクロバンプを配置する電極があり、各電極に 4 個のマイクロバンプを製造している。

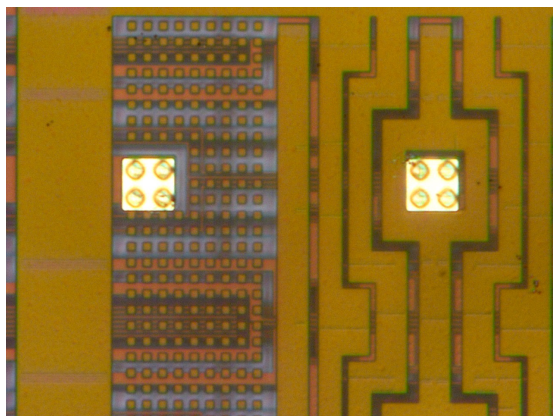


図4. 画素アレイ領域と周辺回路領域の境界付近の拡大写真。

マイクロバンプで接合した実機は、セラミックパッケージに実装した。図 5 は、実装後の完成した実機の写真である。本研究を経て、Si センサ・CdTe センサー一体型の 3 次元半導体放射線イメージセンサを実現するための技術開発を進めることができた。今後は、評価系システムを準備し、実機の性能評価を進めていく。評価結果は、論文にまとめていく予定である。最後に、本研究を進めることができたこと、本助成金に心より感謝申し上げます。

[発表論文]

該当なし

【助成 40-33】

伝搬型表面プラズモンを励起子と結合して発光として系外に取り出す技術の開発

研究者 兵庫県立大学大学院理学研究科 准教授 小鬟 剛

〔研究の概要〕

表面プラズモンは、発光の増強もしくは消光という両極端の効果を与える。増強は、主に金属ナノ粒子の局在型プラズモンと励起子の共鳴効果によって起こる。他方、消光は、薄膜などのバルクの金属の伝搬型プラズモンに励起子のエネルギーが移動することによって起こる。発光デバイスにおいて、後者の効果は悪玉となる。そこで、励起子を消光する悪玉である伝搬型プラズモンを、発光の増強を生む善玉に変えることに挑戦した。

〔研究経過および成果〕

伝搬型プラズモンによる励起子の消光は、プラズモンが励起子のエネルギーを吸収しつつ励起子のサイトから離れ去ることに起因する。そこで、図 1 に示すマイクロ共振器を用いて伝搬型プラズモンを励起子の近傍に閉じ込める工夫を講じた。マイクロ共振器は、直径 20 μm のシリカマイクロ球をガラス基板上に分散させ、その上から金属薄膜と発光材料である terfluorene およびスペーサー材料である CBP の薄膜を積層させることで作製した。

発光スペクトルを図 2 に示す。金属薄膜のない参照試料において、励起光強度の増大に伴って発光スペクトルが楕型に先鋭化した (図 2a)。アルミニウム、銀、金の薄膜を共振器に用いた場合においても同様に、発光スペクトルの先鋭化を観測した (図 2b-2d)。各スペクトルにおけるピーク間隔はウィスパリングギャラリモード (WGM) を仮定した場合のピーク間隔にほぼ等しい。このことは、各スペクトルの先鋭化が WGM の共鳴波長における自然放射増幅光に起因することを示唆する。

先鋭化の起こりやすさを表す励起光強度の閾値 (I_{th}) は、参照試料で $4.85 \pm 0.73 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ であり、アルミニウム、銀、金の薄膜を用いた場合におい

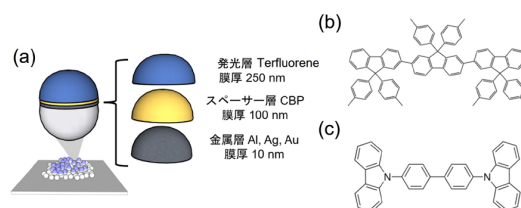


図 1 (a) デバイス構造と (b) terfluorene および (c) CBP の分子構造。

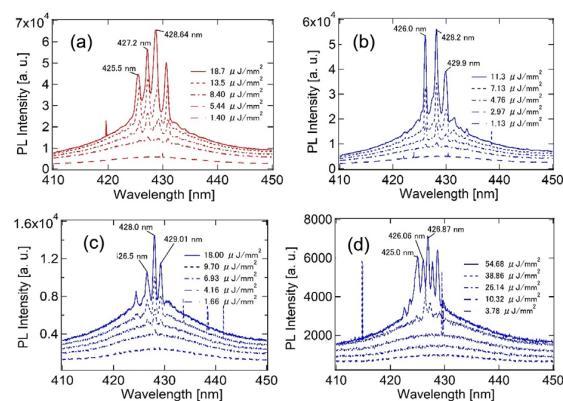


図 1 (a) 金属薄膜のない参照試料と (b) アルミニウム薄膜、(c) 銀薄膜、(d) 金薄膜を用いた共振器において得られた発光スペクトル。各図には、励起光強度の異なるいくつかのスペクトルを重ねて示した。

て、それぞれ 5.10 ± 1.14 , 5.43 ± 1.10 , 32.5 ± 1.05 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$ であった。 I_{th} は金薄膜を用いた場合において著しく高く、アルミニウム薄膜および銀薄膜を用いた場合では、参照試料と同程度と言える。金薄膜において I_{th} が高くなった原因のひとつとして、バンド間遷移による光吸収が挙げられる。また、重要なことには、金ではプラズモンによる発光増強効果が得られないことも一因として挙げられる。伝搬型プラズモンのプラズマ周波数を真空中における光の波長に変換した値を λ_p とすると、金における λ_p は、それぞれ約 530 nm であり、terfluorene の発光波長領域 (430 nm 付近) においてプラズモンは誘起されない。これに対して、アルミニウムおよび銀では、 λ_p がそれぞれ 300 nm 以下、約 430 nm であるため、共振器中で励起子および発光が伝搬型プラズモンと結合し得る。アルミニウム薄膜および銀薄膜を用いた共振器における I_{th} が参照試料の I_{th} と同程度であったことから、当初のねらい通り、伝搬型プラズモンを共振器内に閉じ込めることで、消光効果を抑制することができたと言える。他の解釈として、共振器内で光とプラズモンが結合しなかった可能性も考えられるが、別途行った光学シミュレーションの結果から、この可能性は排除できている。

上述の通り、アルミニウムおよび銀の薄膜を用いた共振器において、 I_{th} は同程度であった。一般に、発光の増強効果は λ_p 付近で最大となるため、銀薄膜を用いた共振器の方がアルミニウム薄膜を用いた共振器よりも I_{th} が低くなると予想していた。予想と異なる結果が得られたことについて、プラズモンの伝搬長 (L_{spp}) が関係していると考えている。 L_{spp} が長いほどプラズモンが共振器内

で減衰しにくく、発光の増強効果が増大する可能性がある。実際に、実験で用いた構造と同じ積層膜をシリカ板上に配置した構造について L_{spp} を計算したところ、アルミニウム薄膜の方が銀薄膜よりも L_{spp} が長くなることが分かった (Al: 2.77 μm , Ag: 0.82 μm)。(平板構造は、モデル化を容易にするために用いた。)現在、市販の光学シミュレーションソフトウェアを利用して、本研究に用いたものと同じお椀型の構造を対象に L_{spp} の解析を進めている。

本研究の結果から、表面プラズモンによる消光効果を抑制し、発光として系外に取り出す技術の開発に成功した。伝搬型プラズモンを善玉に変えるには至らなかったが、悪玉でなくすることに成功した。本研究では、発光に着目したが、デバイス構造如何では、他の物理現象や化学反応として余剰のエネルギーを系外に取り出すことも可能である。今後、我々は、このことに関する新技術を創出していく予定である。

[発表論文]

1. K. Togawa, T. Komino*, T. Mikajiri, J.-I. Yamada, H. Tajima, Dependence of Amplified Spontaneous Emission Threshold on Atmosphere in Whispering Gallery Mode Resonators Including 1,3-Diphenylisobenzofuran as a Singlet Fission Material, *Chem. Lett.*, **52**, 280–283 (2023).
2. T. Mikajiri, T. Komino*, J.-I. Yamada, H. Tajima, Device Parameter to Evaluate Exciton Energy Transfer in Organic Whispering-Gallery-Mode Microresonators and its Dependence on the Amplified Spontaneous Emission Threshold, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, in press.

【助成 40-34】

弾性偏光回折格子を用いた非メカ式レーザー偏向機の開発

研究者 兵庫県立大学大学院工学研究科 准教授 近藤瑞穂

〔研究の概要〕

本研究では、弾性回折格子の形成に必要な、光配向性とゴム弾性を併せ持つ NBA モノマーを用いたポリマーの合成を検討した。N-ベンジリデンアニリンを構成成分とする熱可塑性エラストマー (TPE) の合成に関して、高相分離性のトリブロックコポリマーを使用し、ARGET-ATRP 法を用いて NBA トリブロックコポリマーを合成した。また、光応答性メソゲンの探索を行った結果、厚膜で高い配向性を維持できる材料が得られ、弾性回折格子を製作する可能性が示唆された。

〔研究経過および成果〕

本研究では、ビームステアリングを小チャンネルの電圧制御によって実現できる弾性回折格子の実現を目的として、回折効率がフィルムの表面形状に依存しない偏光回折格子を、圧電アクチュエーターなどを用いて圧縮・延伸変形させる、もしくは回折格子そのものを静電場で変形させることが有効と考えた。この条件を満たす材料としては、偏光回折格子を任意に形成できる光反応性高分子液晶 (PLCP) を構成要素とすることに加え、室温でゴム弾性を示すことが必要である、そこで本研究課題では、ゴム弾性を示す材料で高い光配向性を示す材料の探索を行った。室温付近にガラス転移温度 (T_g) を示すためには柔軟なモノマーを共重合させればよい。そこで、これまでに高い配向性を示すことが報告されている NBA モノマーおよびその類縁体を光反応部としたブチルメタクリレートコポリマー (図 1) を合成し、光応答性を評価した。その結果、いずれの NBA 共重合体においてもブチルメタクリレートを 50mol% 程度含有することで、 T_g は室温程度まで低下した。また、波長 365nm の直線偏光を照射することで、軸選択的な光反応に基づく配

向挙動とそれに基づく異方性が観測された。しかしながら、これらのフィルムをガラス転移温度以上である 70°C に加熱すると (a) および (b) の共重合体は異方性が消失した。一方で、メトキシ基を 2 つ導入した NBA を用いた共重合体 (c) は熱処理によって異方性が向上することに加えて従来の材料と比較して厚膜でも高い異方性が保持できた。

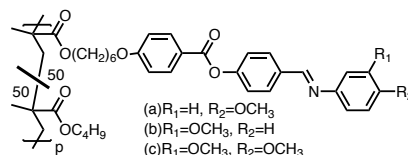


図 1 NBA を光応答部とする液晶高分子

また、(c) は光照射によって接着性能を制御できることから、再利用可能な異方性光応答性接着剤としての応用も期待できる。

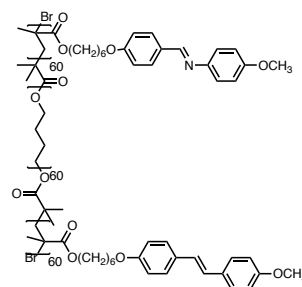


図 2 ATRP 法によって合成した PLCP の分子構造

続いて、高分子骨格部分の構成を検討するため、PLCP を構成成分とする熱可塑性エラストマーの形成を検討した。これまでに RAFT を用いて合成した PLCP ジブロックコポリマーにおいては、通常のラジカル重合で合成した PLCP と比較して光配向挙動に遜色がないことを報告しているが、PLCP を構成成分とする熱可塑性エラストマー(TPE)は得られていない。TPE を得るには、室温以上に T_g を有するセグメントが凝集し、物理架橋点と機能することが望ましい。そのため、本研究では相溶性の低い高分子骨格で構成されたトリブロックコポリマーを利用することで相分離を促進することが必要と考え、ATRP の利用を検討した。一方で NBA はカラムクロマトグラフィーなどで精製すると分解することがあるため、重合後にカラムクロマトグラフィーを用いなくても良い手法を用いる必要がある。そこで銅触媒使用量が少なく、重合後のカラム処理が不必要な ATRP である ARGET-ATRP 法を用いて NBA トリブロックコポリマーを合成し、光応答性を評価した。室温付近にガラス転移温度を有する市販のポリテトロヒドロフランを用い、分子量末端に ARGET-ATRP 開始剤を修飾した材料を開始剤として用いた。重合の結果、分散度 1.4 程度の構造制御されたポリマーが得られた。

図 3(a)にフィルムに光配向処理に伴う偏光吸収スペクトルの変化を示す。フィルムに直線偏光紫外光を 100 mJ/cm^2 照射し、 70°C で 10 分間熱処理すると、直線偏光の偏光軸と垂直方向の吸収が平行方向の吸収より大きくなった。また、配向に必要な露光量はホモポリマーよりも小さい一方で、得られた異方性はホモポリマーより大きく、光応答性が向上したことが示唆された。これは ARGET-ATRP を用いたことによりコポリマーの多分散度が低下し、熱処理に伴う自己組織

化により異方性の増幅が向上するためと考えられる。ポリマーフィルム表面を AFM で観察したところ、初期状態と比較してフィルムが歪み (RMS: $2.77 \text{ nm} \rightarrow 3.52 \text{ nm}$)、突起状の構造が観察された。周期性は完全ではないが、マイクロ相分離によるものと推測される(図 3(b))。さらに、得られたポリマーをテフロン基板上にキャストしたところ、フリースタANDINGなフィルムが得られた。フィルムは室温において曲げ変形に対して復元性を示し、熱可塑性材料であることが示唆された。(図 3(c))今後は得られた知見をもとに厚膜で回折格子を作製し、圧電素子などを用いて回折光のコントロールを検討する。

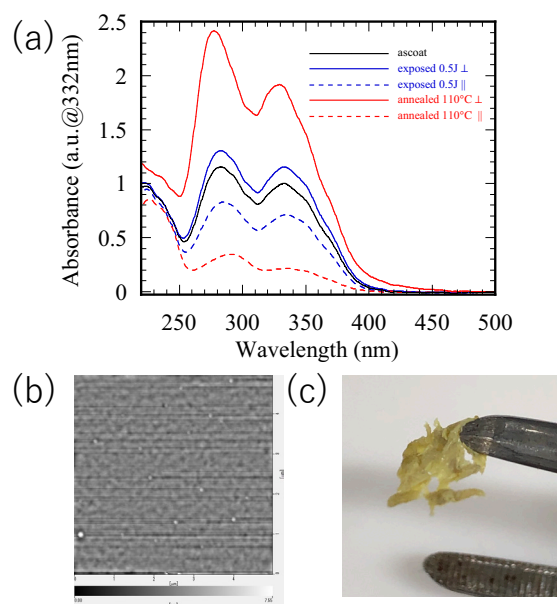


図 3(a) ブロック共重合体の偏光吸収スペクトル。スペクトルは成膜後を黒、光照射後を青、熱処理後を赤で着色し、直線偏光と平行方向を破線、垂直方向を実線で示した。(b)熱処理後のフィルムの AFM 画像 (c)熱処理後のフリースタANDINGフィルム

[発表論文]

1. M. Kondo, T. Nagata, Y. Hyodo, D. Okai, H. Adachi, N. Kawatsuki, *Chem. Lett. Submitted.*

【助成 40-35】

デュアル光コムによる非接触リモート計測技術の開発

研究者 東邦大学理学部物理学科 講師 中嶋善晶

〔研究の概要〕

波長 5 μm 以上の中赤外域では、分子の基本吸収スペクトルが多数存在するため、多種分子の分光による非接触リモート計測技術への利用が期待できる。そこで本研究では、光周波数のものさしといわれる光周波数コムを光源として用いるデュアルコム分光計を中赤外域において開発することで、新たな非接触リモート計測技術の創出を目的とした。本研究期間においては、1 台のレーザー共振器から 2 台の光周波数コム同時発生が可能なデュアルコムレーザー光源を近赤外域において開発した。次に、近赤外域のデュアルコムレーザー光源を基に、非線形波長変換を行うことにより中赤外域と THz 域への展開を目指した。

〔研究経過および成果〕

あらゆる環境下におけるデュアルコム分光の使用を想定して、環境変動による光ファイバ内での偏波揺らぎが小さい全偏波保持光ファイバ構成でのデュアルコムファイバレーザーを開発した。独自技術である機構共有型デュアルコムファイバレーザーを基に、超小型ファイバモジュール (Micro-optic component) を導入し、さらなる小型・堅牢化を目指した。

図 1(a)に示すように、半導体型の可飽和吸収ミラー (SESAM) と偏波保持 Er 添加光ファイバ (PM-EDF)、偏波保持ファイバ (PMF)、および部分反射ミラー (PRM) を用いてモード同期ファイバレーザーを構成した。モード同期機構に用いる SESAM 部と、レーザー共振器を構成するための PRM には自由空間部が存在するため、振動や温度変化に対して敏感である。そこで本研究では、自由空間部を小型・堅牢化するために、Micro-optic component を導入した。この小型かつ簡便な構成のモード同期ファイバレーザーを 2 台作成し、可能な限り密着させた状態で固定し、密閉箱の中に設置することで、機構共有型デュアルコ

ムファイバレーザーを構築した。図 1(b)に示すのは、デュアルコムレーザーの光スペクトルである。光コム 1 は中心波長 1547 nm、光コム 2 は中心波長 1558 nm であり、スペクトルの一部が重なっている。中心波長は、PM-EDF の長さを同程度に調整することで一致させることが可能である。図 1(c)に示すのは高速受光器を用いて検出した電気信号のスペクトル (RF スペクトル) であり、光コム特有の楕状のスペクトルが得られていることがわかる。また、楕状スペクトルの間隔は約 45 MHz であり、間隔周波数 f_r に相当する。図 1(d)に示すのは、周波数カウンタを用いて測定した光コム 1 と 2 の f_r とそれらの差 Δf_r の時間変化である。2 台の光コムはフリーランであるため、 f_r は、実験室の温度変化により測定時間 1000 秒において 60 Hz 程度変化しているが、 Δf_r は平均値 300 Hz において標準偏差 0.1 Hz 程度で安定化されている。これは、2 台のモード同期ファイバレーザーが密着した状態で設置されているために、振動などの環境変動によるレーザー共振器長の変化によって生じる f_r の変化が共通雑音となり、これらの差 Δf_r では相殺されるためである。

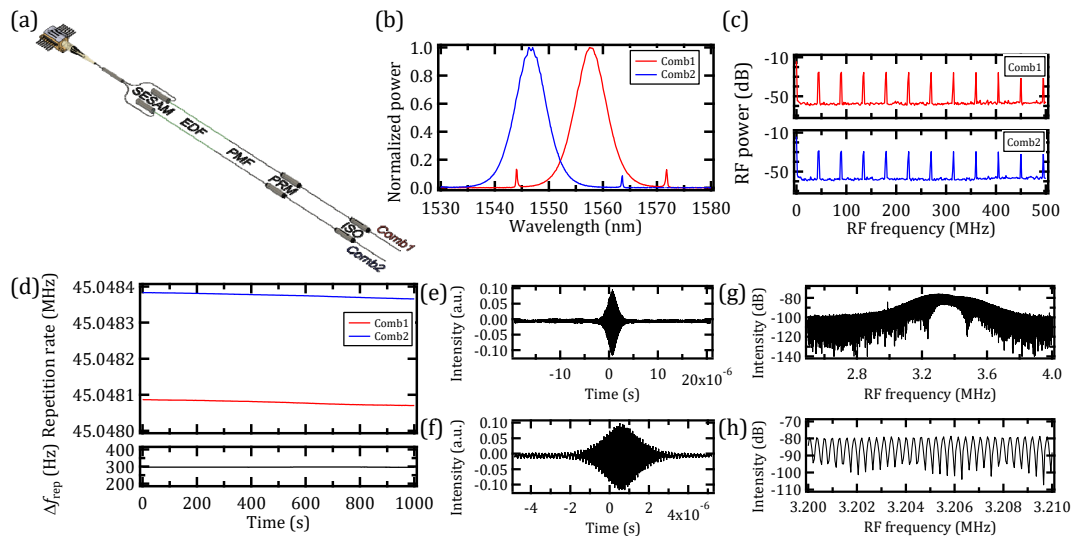


図 1 (a) 機構共有型デュアルコムファイバレーザ、(b) 光スペクトル、(c) RF スペクトル、(d) f_{rep} と Δf_{rep} の時間変化、(e) インターフェログラム、(f) (e) の拡大図、(g) (e) を高速フーリエ変換して得られたスペクトル、(h) (g) の拡大図

次に、2 台の光コムを空間的に重ねた状態で、高速受光器に入射し、電気信号を生成し、オシロスコープを用いて電気信号の波形を取得した。図 1(e)と(f)は、取得した電気信号の波形であり、インターフェログラムという。電気信号からオシロスコープの高速フーリエ変換機能を用いてスペクトル波形を取得した。図 1(g)と(h)は、取得したスペクトル波形であり、波長 1550 nm 帯における光コムのスペクトルに相当する。図 7(h)に示すのは、図 1(g)を拡大したスペクトルであり、 Δf_{r} の平均値 300 Hz に相当する間隔周波数で分解された光コムのスペクトルが観察できた。これは、2 台の光コムがフリーランでありながらも、高い相対安定性を有していることを示している。さらに、2 台の光コムを重ねた後に、HCN ガスが封入されたガスセルを用いて分光計測を行った。図 2 に示すのは、取得した HCN ガスの吸収スペクトルであり、HCN ガスによる複数の吸収線がみられる。測定に要したデータ取得時間は 10 ms 程度であり、光スペクトラムアナライザを用いた場合に同等のスペクトルを得るには 1 s 以上

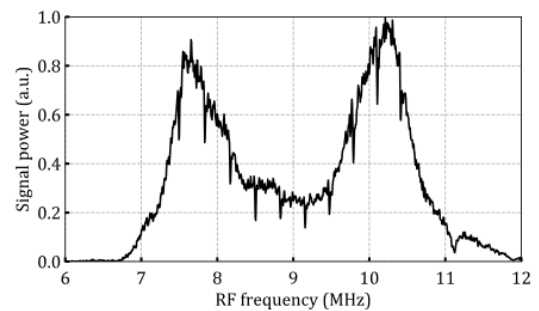


図 2 機構共有型デュアルコムファイバレーザを用いて取得した HCN ガスの吸収スペクトル

要することから、高速化を達成できた。また、開発したデュアルコムレーザ光源を基に中赤外域と THz 域への拡張を行った。中赤外域においては波長 3~4.5 μm 域と 7~10 μm 域、THz 域においては 0.1~1.2 THz 域における光コムの発生を実現した。

[発表論文]

1. T. Yumoto, W. Kokuyama, S. Matsubara, T. Yasui, Y. Nakajima, Optics Continuum, Vol. 2, pp. 1867-1874 (2023).

〔研究の概要〕

転写制御因子等による遺伝子の発現制御を理解し制御できれば、細胞分化のメカニズムの理解と制御や、遺伝子発現の異常による疾患の解明や治療法の開発などが期待される。本研究では、遺伝子発現制御のカスケードやネットワークを解析する手法を開発し、転写制御因子の発現量を変化させたときに、他の遺伝子の発現量がどのように変化するかを、遺伝子間の発現制御の相互作用を考慮して、定量的に予測できるようにする。遺伝子ネットワーク予測のための条件検討を行い、予測精度を向上し、遺伝子ネットワークに含まれる遺伝子発現制御の関係を予測し解明する。遺伝子発現制御の分子メカニズムに関わり、遺伝子から離れたゲノム DNA に結合する転写制御因子と遺伝子との相互作用の仕切りに関する DNA 結合タンパク質について、深層学習を用いた手法で網羅的に探索し、特徴を明らかにした。

〔研究経過および成果〕

ヒトの遺伝子(Gene)の発現制御の基本的な転写制御により、ゲノム DNA にコードされた mRNA 配列の転写が起こる。遺伝子の転写開始点近傍のプロモーター(Promoter)領域だけでなく、遺伝子から離れた位置(Enhancer 等)のゲノム DNA に結合する転写制御因子(転写因子)が遺伝子の転写開始点の周辺と相互作用し、転写を制御することが明らかとなった(図 1)。

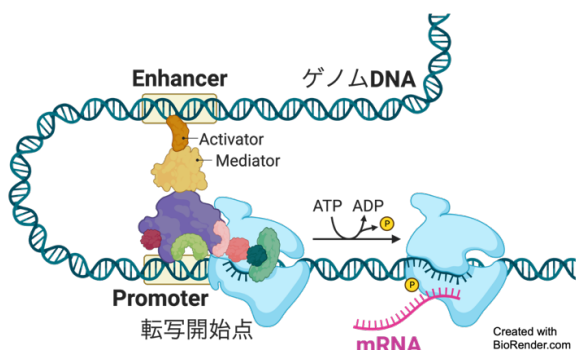


図 1 ゲノム DNA の転写制御

遺伝子から離れた位置の Enhancer 等と近傍の Promoter の相互作用の仕切り (インシュレータ)

として機能する DNA 結合タンパク質が報告されている。脊椎動物では、CTCF が主要なインシュレータとして知られ、DNA のループ構造を束ねる位置に二つ (二量体) の CTCF が結合する。CTCF は Forward-Reverse の向き (逆向き) に DNA のループに結合することが多い(図 2)。Enhancer はループの内側の遺伝子と相互作用するが、外側の遺伝子とは相互作用しない。

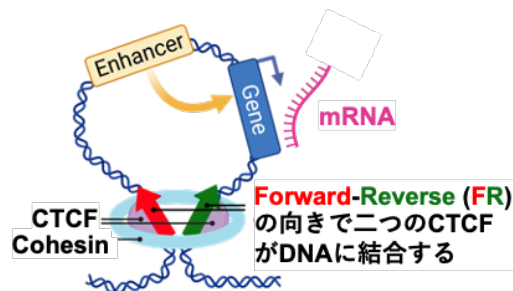


図 2 インシュレータ機能と関わる CTCF

本研究では CTCF 以外のインシュレータ機能と関わる DNA 結合タンパク質を網羅的に探索した。生物実験解析で多くの DNA 結合タンパク質について解析することは手間と費用がかかり困難である。

結果として、既知のインシュレータ機能に関わる DNA 結合タンパク質(CTCF, Cohesin)を含め、99 種類の DNA 結合タンパク質が、インシュレータと関わることを示された。

論文検索により、インシュレータや、ゲノム DNA の相互作用や構造変化により転写制御に関わる DNA 結合タンパク質が 23 種類含まれていた。2021 年に DNA 結合タンパク質で転写因子の MAZ がインシュレータと関わることを生物実験解析により報告された。

二つの CTCF が DNA のループに結合するときに、DNA 結合配列の向きに偏りがあることが生物実験解析により報告されており、その割合は 76.4% FR (Forward-reverse), 11.0% FF (Forward-Forward), 10.3% RR (Reverse-Reverse), 2.3% RF (Reverse-Forward) で、主に FR の向きになり、FF と RR が同じ程度、RF はほとんど見られない。本研究で、向きの偏りによる、遺伝子発現量の予測への影響 (Contribution score, 貢献度、重要度)を、説明可能な AI の手法(DeepLIFT)で解析した結果、同様の傾向が示され、深層学習による予測が正確であることが示された。99 種類の DNA 結合タンパク質のうち、大部分(89 種類)が DNA 結合配列の向きの偏りを示した。

mRNA が転写される活性のある領域と、転写されない抑制された領域を公共データベースの実験データを用いてゲノムブラウザ(UCSC Genome browser)で表示した。その二つの領域の境界(インシュレータサイト)にある、99 種類の DNA 結合タンパク質の DNA 結合位置と、結合位置と重なるゲノム DNA の相互作用の実験データを可視化し、DNA 結合位置と相互作用、活性と抑制の領域の対応について確認した(図 3)。

その結果、インシュレータサイトにある、DNA 結合位置と重なる相互作用が、遺伝子の転写の活性と抑制の領域とよく適合することがわかった。また 99 種類の DNA 結合タンパク質は、他の DNA 結合タンパク質よりも統計的に有意に多く、インシュレータサイトに結合することが示された。これらの結果から DNA 結合タンパク質の DNA 結合がゲノム DNA の相互作用と関わり、相互作用のループにより、遺伝子の転写が活性な領域と抑制された領域が区切られることが示唆された。

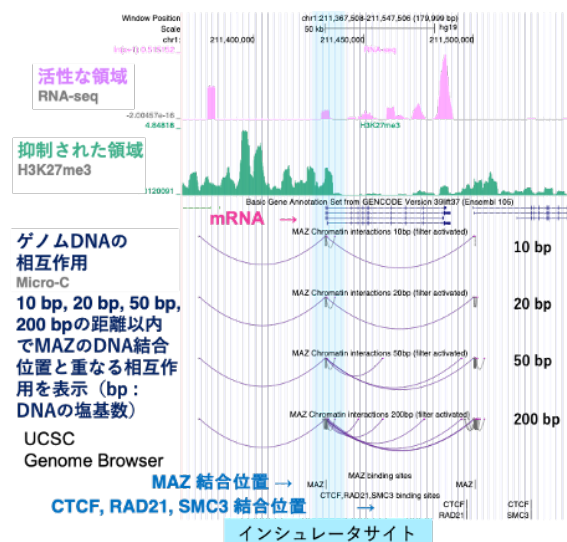


図3 インシュレータサイトと DNA 結合位置、相互作用のゲノムブラウザによる表示

[発表論文]

1. Osato N and Hamada M (2024) Discovery of regulatory motifs associated with human insulator sites reveals the role of directional bias in insulator function. *bioRxiv* preprint, doi: <https://doi.org/10.1101/2024.01.20.573595>

【助成 40-37】

双方向ワイヤレス電力伝送のオンライン磁気パラメータ同定による高効率制御に関する研究

研究者 立命館大学理工学部 助教 清水 悠生

〔研究の概要〕

近年、家電製品や電気自動車などでワイヤレス給電が注目されている。磁界共振結合を利用したワイヤレス給電では SP 方式が代表的であるが、2 次側インバータにコンデンサを並列接続するため、逆方向給電ができない。本研究では、逆方向電力伝送のための追加インダクタ回路トポロジーを提案し、パリティ時間対称理論に基づく回路設計法と周波数制御方式を明らかにする。回路設計法と制御理論を確立することで、磁気パラメータとシステム特性の関係性が明らかになり、磁気パラメータの同定により更なる高効率制御の可能性が見込めることが分かった。

〔研究経過および成果〕

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、自動車の電動化や再生可能エネルギーの普及が推進されている。再生可能エネルギーは発電量が時間や気候によって大きく変動するため、発電した電気を蓄える蓄電システムが必要不可欠となる。そこで、台数の増加が見込まれる電動車を系統に連携し、「動く蓄電池」として活用する技術が国を挙げて推進されている。

電動車は、蓄電池の性能限界による航続距離の短さや充電時間の長さが課題であり、解決策の一つにワイヤレス電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) がある。WPT は電動車の走行/停止中に無線給電を行う技術であり、バッテリー容量の補填という点で注目されている。WPT は既に様々な機関において研究・実証が進められているが、多くが「系統→電動車」という一方の給電のみを想定している。しかし、上述した系統連系型電気自動車の実現には、「電動車→系統」という逆方向の電力の流れにも対応可能なシステムが不可欠である。以上の背景から、筆

者らは双方向の電力伝送が可能である WPT システムの実証と高性能化に取り組んできた。先行研究では、1 次側に直列コンデンサ、2 次側に並列コンデンサを設ける SP (Series Parallel) 補償方式の WPT システムを採用した。SP 方式の WPT システムでは、2 次側インバータに並列接続されたコンデンサにより逆方向の電力伝送が不可能であるため、逆方向電力伝送を目的として、外付けインダクタを接続した回路トポロジーを提案した。

先行研究も含めた磁界共振結合型 WPT の一つの重要な問題点は、システムの結合係数により電力伝達効率や出力電力が大きく影響する点である。結合係数は送受電コイルの空間的な位置関係により変化するため、WPT システムの伝送特性が結合係数にロバストであればあるほど、様々なアプリケーションへの利用が促進される。本論文では、筆者らが提案してきた双方向電力伝送が可能な外付けインダクタ付き SP 方式 WPT システムに関して、パリティ時間対称理論に基づいた周波数制御方式について提案する。

図 1 に本研究で提案する回路トポロジー、図 2 に試作した実機構成、図 3 にシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。ただし、パリティ時間対象理論に基づき、動作周波数 ω は次式の通り計算した。

$$\omega = \begin{cases} \omega_0 & (k < k_c) \\ \omega_0 \sqrt{\frac{Q_{2eq}^2 - 2 \pm \sqrt{(Q_{2eq}^2 - 2)^2 + 4(k^2 - 1)}}{2(k^2 - 1)}} & (k_c \leq k < 1) \end{cases}$$

$$k_c = Q_{2eq}^{-1} \sqrt{1 - \frac{1}{4} Q_{2eq}^2}$$

ただし、 ω_0 は本システムの共振周波数、 Q_1 、 Q_{2eq} は品質係数、 k は結合係数である。図 3 を見ると、シミュレーション結果と実験結果はよく一致していることがわかり、導出した理論式の正しさを実験的に実証できた。

本理論により、磁気パラメータとシステム特性の関係性が明らかになり、磁気パラメータの同定により更なる高効率制御の可能性が見込めることが分かった。今後は電流電圧のセンシング情報と本理論を組み合わせ、磁気パラメータを同定し、磁気パラメータ情報を用いた周波数制御法の構築および実機実証を実施予定である。

[発表論文]

1. H. Sugihara, M. Ota, Y. Shimizu, Y. Kawabata, "Comparison of SS and SP Circuit Topologies for Wireless Power Transfer Systems Capable of Bi-directional Power Transmission," Proc. of the EPE 2023, DS2p (2023)
2. 清水悠生・杉原弘樹・荒谷 峻太・川畑良尚:「双方向電力伝送が可能な SP 型ワイヤレス電力伝送回路の共振設計」, パワーエレクトロニクス学会 第 250 回定例研究会, JIPE-49-18 (2023)

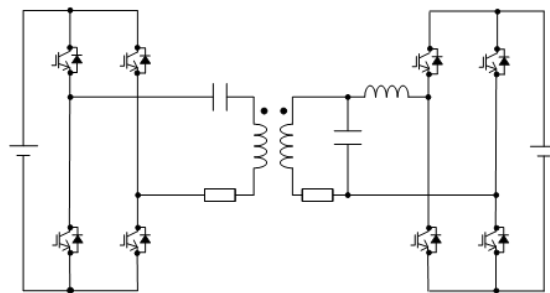


図 1 双方向電力伝送が可能な SP 型 WPT システム

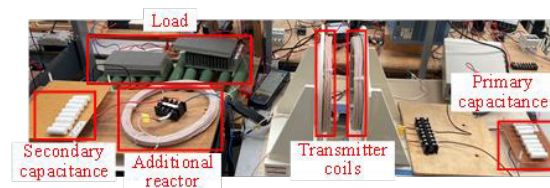


図 2 試作した実験システム

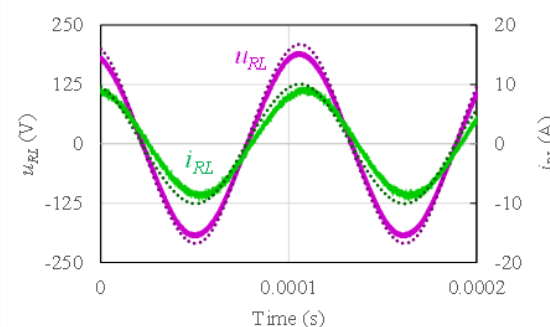
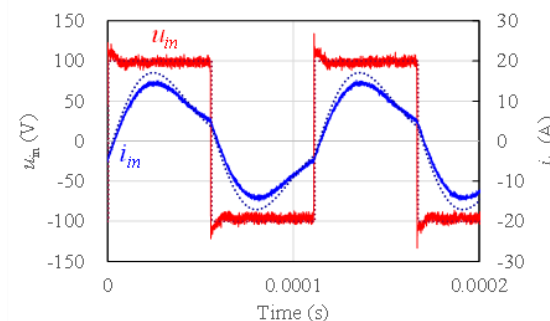


図 3 順方向電力伝送時の実験結果とシミュレーション結果の比較 (実線が実験結果、点線がシミュレーション)

【助成 40-38】

高輝度円偏光発光材料創出を志向した キラルヘテロカーボンナノベルト開発とキロプティカル特性の解明

研究者 就実大学薬学部 講師 山本 浩司

〔研究の概要〕

円偏光発光(CPL: Circularly Polarized Luminescence)は、高輝度液晶ディスプレイ用の偏光光源をはじめ、3D ディスプレイ、セキュリティペイント、光通信などの高度な光利用法が期待されている。本研究では、高輝度 CPL 材料として有望であるキラルヘテロナノベルトの合成法確立ならびに物性解明を目的に、ヘテロナノベルトの合成を検討した。ナノベルトの前駆体として有用な環状化合物の合成に成功した。構造は NMR および質量分析により確認した。ナノベルト前駆体を用いた反応によるナノベルトの合成を検討した。ナノベルトの生成は現在確認できていないが、目的の反応が一部進行することは確認できた。以下に、詳細を報告する。

〔研究経過および成果〕

円偏光発光(CPL: Circularly Polarized Luminescence)は、高輝度液晶ディスプレイ用の偏光光源をはじめ、3D ディスプレイ、セキュリティペイント、光通信などの高度な光利用法が期待されている。そのため、優れた有機 CPL 材料の開発は、学術的にも産業的にも要請が高く、その分子設計の確立は重要な課題である。最近、高輝度 CPL の実現には「剛直なキラル筒状構造」が重要であることが報告された(図 1 左)。この構造的な要請から、芳香環が筒状に縮環したキラルベルト状分子(キラルナノベルト)はさらに剛直であり、魅力的な標的分子と期待される(図 1 右)。さらに、そのベンゼン環の一部を他のヘテロ原子で置き換えたキラルヘテロナノベルトでは、立体構造および電子状態が変化し、特異な光物性の発現が期待される。しかし、高度な歪みを有するナノベルトの合成自体が極めて挑戦的であり、量的供給と物性解明が困難である。その解決には、まず、ヘテロナノベルトの効率的合成法の開発が求められる。最近、

代表者は、含窒素芳香族化合物の求電子的ホウ素化反応を見出した。本手法を用いて、高度な歪みを有するヘテロナノベルトの合成を検討した。

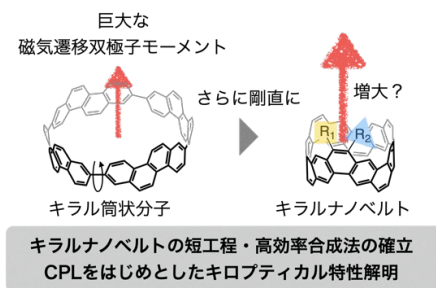


図 1 本研究の目的

まず、ナノベルト前駆体となる環状化合物の合成を行った。市販のカルバゾールから出発して、4段階でカルバゾールとベンゼンが交互に連結した環化前駆体に導いた。この前駆体とジボリルベンゼンの鈴木宮浦カップリングにより環状化合物を得ることに成功した。化合物の構造は NMR および質量分析により確認した。¹H NMR において、環状化合物はその高い対称性を反映した単純なスペクトルを与えた。また、MALDI-TOF-MS において分子イオンピークが観測された。フェノチアジンまたはジフェニルアミンを含む

環状化合物の合成も検討した。フェノチアジンを含む環状化合物については、環化前駆体を得た。環化反応を試みたが、目的化合物の生成は確認されていない。反応効率の向上が課題であり、今後、反応条件を精査する。また、ジフェニルアミンを含む環状化合物については、環化前駆体の合成を検討している。

得られたカルバゾールを含む環状化合物に鍵反応である求電子ホウ素化を適用した。その結果、複雑な混合物が得られた。現在、目的物の生成は確認できていない。NMR および質量分析より求電子ホウ素化が一部進行していることを確認した。今後は、条件検討および環状化合物の設計により、最適な条件および反応基質を見出し、ナノベルトの合成を達成する。その知見をもとに、キラルナノベルトの開発に展開する。

本研究では、高輝度CPL材料として有望であるキラルヘテロナノベルトの合成法確立ならびに物性解明を目的に、ヘテロナノベルトの合成を検討した。ナノベルトの前駆体として有用な環状化合物の合成に成功した。ナノベルトの生成は現在確認できていないが、目的の反応が一部進行することは確認できた。今後は、条件検討および環状化合物の設計により、最適な条件および反応基質を見出し、キラルナノベルトの開発を目指す計画である。

なお、本研究で得られたカルバゾールなどの官能基化に関する知見を活用して、一連の蛍光性ホウ素錯体を開発し、その諸物性を明らかにして、論文として発表した。

[発表論文]

1. Koji Yamamoto, Wakana Imai, Satoki Kanamori, Koji Yamamoto, Yosuke Nakamura,

“Phenothiazine-, Dihydroacridine-, and Acridone-Based Boron Difluoride Complexes: Synthesis and Structure-Property Relationships”, *J. Org. Chem.* **2023**, *88*, 4003-4007.

2. Koji Yamamoto, Shun Matsui, Shin-ichiro Kato, Yosuke Nakamura, “A Series of Boron Difluoride Complexes of Azinylcarbazoles: Synthesis and Structure-Property Relationships”, *Org. Biomol. Chem.* **2023**, *21*, 5398-5405.

【助成 40-39】

脳—計算機—超音波閉ループによるてんかん発作の実時間制御

北海道大学大学院薬学研究院 准教授 竹内 雄一

北海道大学大学院薬学研究院 特任助教 Michele Chan

〔研究の概要〕

てんかん患者の約3割は薬物抵抗性であるため、非薬物療法的にその発作を制御する手法の新規開発が求められている。また臨床応用のため、当該法は侵襲性が低いことが望ましい。そこで本研究では、研究代表者らが開発してきた脳—計算機—脳深部電気刺激閉ループによるてんかん発作の制御法に関して、侵襲的な脳深部電気刺激部分を非侵襲的な脳刺激法である経頭蓋超音波照射法で置き換えた、新規てんかん制御法の創出を目的とした。てんかんモデル動物における概念実証のため、まずげっ歯類の頭蓋上にも留置可能なほど小型な経頭蓋集束超音波照射装置を作製し、その出力音場分布のシミュレーションおよび実測を実施した。さらにてんかんモデルラットにおいて、脳活動パターンの実時間シグナル分析によるオンデマンド経頭蓋超音波照射システムを確立し、てんかん発作の非薬物性かつ非侵襲的な制御に成功した。

〔研究経過および成果〕

（研究の目的）

てんかんやアルツハイマー病などの神経疾患、うつ病や依存症などの精神疾患はしばしば薬物抵抗性である。これらの脳疾患は脳の働き方の障害であるためその症状制御には、ウェアラブル医療機器等を紹介した脳刺激で疾患症状を司る脳活動に直接介入して脳内神経細胞の活動を操作することで、脳の働き方を整える戦略が効果的である。脳刺激による脳活動介入は、正常生理機能を司る脳活動の阻害回避による副作用減少のため、必要な際のみオンデマンドに刺激を行うことが重要である。そのためには脳活動を常にモニターし、病的な脳活動へオンデマンドに介入するウェアラブルあるいは埋込医療機器の開発が必要である。脳活動のモニター・刺激介入をオンデマンドに行う医療機器により、神経・精神疾患を克服した社会の実現が求められている。

そこで本研究では、研究代表者らが開発した脳—計算機—脳深部電気刺激閉ループによるてんかん発作の制御法に関して (Takeuchi *et al.*, Brain 144: 885-908, 2021)、侵襲的な脳深部電気刺激部分を非侵襲的な経頭蓋超音波照射法で置き換えた、新しいてんかん発作制御法の創出を目的とした。

1. 小型オンヘッド集束超音波照射装置の開発

げっ歯類の頭蓋上にも留置可能なほど小型の集束超音波照射装置を開発した。まず中心周波数1、5、10 MHz、直径10 mm、焦点距離10 mmのチタン酸ジルコン酸鉛超音波振動子を特注作製した(富士セラミックス)。当該振動子を収納するケースを光造形3Dプリンターで作製し、エポキシ系接着剤で振動子をケースに固定した。その後、振動子の共振周波数におけるインピーダンスを測定し、当該インピーダンスを駆動用高周波増幅器(T145-4726AA, Thamway)の出力インピーダンスと整合した。振動子の駆動波

形生成には一般的なファンクションジェネレーターを用いた。超音波振動子の音場分布はk-Waveソフトウェアを用いてシミュレーションするとともに、Pulser/Receiver (1050 PRJ/ Accu-Tron) を用いて3次元的に計測した。音圧の測定は、ニードル型ハイドロフォン(NH0500 型、Eastek)を用いて実施した。

例として、1 MHz 振動子のインピーダンスを計測した結果、実際の中心周波数は0.95 MHzであり、当該周波数におけるインピーダンスは約 200 Ω であった。パワーアンプの出力インピーダンスが 50 Ω であるため、パルストランスにより電気インピーダンス整合を行った。その結果、超音波振動子の出力エネルギー(音響放射圧)が著明に増加した。5 MHz 振動子では、集束超音波ビームの方位方向(XY 平面)に 0.5 mm 程度および長軸方向(Z 軸)に 1.0 mm 程度の焦点を得た。焦点の大きさは周波数依存であり、超音波の周波数が高いほど焦点サイズは小さかった。

2. てんかん発作の制御

てんかんモデル動物として雄性 Long-Evans ラット(3–12 ヶ月齢)を用い、自発的なてんかん発作の発生を電気生理学的に確認した。次に当該ラットの頭蓋上に研究項目1で作製した小型超音波照射装置を慢性留置した。てんかん発作を実時間シグナル分析装置(RX8, TDT)でリアルタイム検出し、オンデマンドに経頭蓋超音波照射したところ、発作を直ちに終息させることに成功した。

本研究で、オンデマンド経頭蓋超音波照射による欠伸発作の制御をプレリミナリーに達成できた。発作制御の機序として、超音波が発作リズムを生じる脳内神経回路を発作エピソードの初期において断ち切った可能性がある。

[発表論文]

1. Yoshida K, Minami M, Takeuchi Y, A closed-loop transcranial ultrasound irradiation system for an awake rat model of absence epilepsy, The 46th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society. Sendai, Japan. Aug 1, 2023.
2. Xu Y, Yoshida K, Takeuchi Y, Toward non-invasive, precise control of internal organs via ultrasound neuromodulation of the autonomic nervous system. *Proc. SPIE* 12608, Biomedical Imaging and Sensing Conference, 126081O. 20 Sep 2023.
3. 鈴木尚也ら、超音波ニューロモジュレーション用発振回路の製作、第40回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 7P2-PS-25. 07 Nov 2023
4. 三村聡優ら、経頭蓋ソノポレーションによる大脳神経細胞を標的とした新規遺伝子導入法、日本薬学会第143年会、札幌、3月26日、2023.
5. Chan M, et al., Non-invasive gene transfection to neurons in the cortex using transcranial ultrasound irradiation, The 46th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society. Sendai, Japan. Aug 3, 2023.
6. Li Q and Takeuchi Y, *et al.*, Reinstating olfactory bulb derived limbic gamma oscillations alleviates depression-like behavioral deficits in rodents. *Neuron* 111: 2065–2075. 05 Jul 2023.
7. Sierra RO and Pedrasa LK, *et al.*, Closed-loop brain stimulation augments fear extinction in male rats, *Nat Commun* 14: 3972. 05 Jul 2023.

【助成 40-40】

ジュニアスポーツにおける主観的運動強度によるトレーニング負荷定量化の妥当性と障害の関連性の検討

北海道教育大学 旭川校 教育学部 講師 土橋 康平

岩手大学 講師 奥平 柁道

〔研究の概要〕

本研究では session-RPE (主観的きつさと運動時間の積で求められる) という誰もが利用できる方法を用いて、ジュニアスポーツにおけるトレーニング時の身体的負荷の定量化の妥当性を検討した。高校生陸上競技長距離選手 12 名を対象にトレーニング時の走行距離、心拍数および session-RPE を 3 ヶ月間計測した。その結果、11 名の被験者で session-RPE と心拍数の間に強い相関が見られた。一方、走行距離との間には弱い～中程度の相関がみられる被験者が多く、相関が見られない被験者もいた。この結果から、session-RPE は内的なトレーニング負荷を推定できる一方、外的なトレーニング負荷 (走行距離) の推定を必ずしも行えないことが示唆された。

〔研究経過および成果〕

【背景】 多くのスポーツ現場では様々な障害が発生しており、中でも陸上競技の中・長距離選手はランニング時の毎接地で下肢に体重の 2~3 倍の力が加わるため (Miller, 1990)、下腿の腱鞘炎や腱炎、骨膜炎、疲労骨折などの過労性の障害が多い (白木ら, 1983)。そのため、障害のリスクを最小限にするためにはトレーニング時の身体への負荷を把握し、オーバートレーニングを防ぐことが重要である。

トレーニング負荷の管理にはその定量化が必要であり、負荷は内的 [各個人の生理学的・心理的負荷 (同じペースで距離を走っても心拍数や主観的なきつさが異なる)] と外的 [ヒトの内的特性とは無関係に測定される仕事量 (5 km を 5 分/km のペースで走る等)] に分類される。このような内的・外的負荷の定量化には三次元加速度センサーや GPS センサー、心拍計といった高価な機器が必要となり誰もが利用できない。

簡便に内的・外的負荷を推定する方法として session rating of perceived exertion (RPE) と呼ばれ

る主観的指標が用いられている。この session RPE は運動時間 (分) と RPE (Table 1) の積で求められる (Foster et al. 1998)、心拍数 (HR) から算出した内的負荷や三次元加速度センサーで算出した外的トレーニング負荷と高い相関関係を示すことが報告され、その妥当性が認められている (Scott et al. 2013; Takegami et al. 2022)。しかしながら、ジュニア～ユースアスリートにおいて、session RPE の妥当性を検討した際の女性のサンプル数が非常に少ない。そのため、その世代の女性アスリートにおいて、session RPE がトレーニング負荷の推定に利用できるかは明らかではない。そこで、本研究では陸上競技中・長距離走を専門とする女子ユースアスリートを主な対象とし、session RPE 法を用いて内的・外的負荷定量化の妥当性を検討した。

Table 1. Borg's CR-10 scale modified by Foster et al. (2001)

Rating	Descriptor
0	Rest
1	Very, Very Easy
2	Easy
3	Moderate
4	Somewhat Hard
5	Hard
6	
7	Very Hard
8	
9	
10	Maximal

【方法】被験者は旭川私立 R 高等学校陸上競技部に所属し、中・長距離走を専門としている男子高校生 1 名および女子高校生 11 名であった (age: 17±1 yrs; height: 1.60 ± 0.08 m; body weight: 47.0 ± 6.0 kg)。なお、対象者を含む駅伝チームは全国高等学校駅伝競走大会に北海道代表として 12 年連続で出場している。2023 年 3 月 1 日から 5 月 31 日までの 3 ヶ月間、走トレーニング時の主観的 (session RPE) および客観的負荷 [走行距離、heart rate-based training load (HRTL)] 指標を継続して測定した。Session RPE は毎トレーニング後 30 分以内に google form にて記録し、先行研究を参考に (Foster, 1998)、RPE (Table 1)×トレーニング時間 (分) で算出した。走行距離は右手首に装着した GPS ランニングウォッチ (Palar Pacer, Polar, Finland) によってトレーニングごとに測定した。内的トレーニング負荷指標である HRTL はトレーニング中の HR を 5 つの zone (zone 1 = 50 - 59.9%最大 HR (HR_{max}), zone 2 = 60 - 69.9% HR_{max} , zone 3 = 70 - 79.9% HR_{max} , zone 4 = 80 - 89.9% HR_{max} , zone 5 = 90 - 100% HR_{max}) に分類し、以下の式を用いて算出した。 HR_{max} は 220-年齢として推定した。 $HRTL(a.u) = (zone1 \text{ のトレーニング時間 (分)} \times 1) + (zone2 \text{ のトレーニング時間 (分)} \times 2) + (zone3 \text{ のトレーニング時間 (分)} \times 3) + (zone4 \text{ のトレーニング時間 (分)} \times 4) + (zone5 \text{ のトレーニング時間 (分)} \times 5)$ 。また、下肢等に障害や痛みがある場合、毎トレーニング後に google form 内でその程度を報告するよう指示した (1~10 スケール)。

Session RPE と走行距離および HRTL の関係について、person の積率相関係数を算出した。相関係数による相関関係の強さの評価はほとんどなし ($r < 0.1$)、弱い ($0.1 < r < 0.3$)、中程度 ($0.3 < r < 0.5$)、強い

($0.5 < r < 0.7$)、とても強い ($0.7 < r < 0.9$)、ほぼ完全 (> 0.9)、および完全 ($r = 1$) とした (Hopkins et al. 2009)。

【結果】 Table 2 に全被験者の session RPE と走行距離および HRTL との相関係数を示す。Session RPE と走行距離において、12 名中 9 名で弱い

～中程度の正の相関が見られ、相関がみられない被験者もいた。一方、session RPE と HRTL の間には 12 名すべての被験者で有意な正の相関が見られ、11 名で強い正の相関が見られた。

【考察】 本研究結果から、session RPE 法による主観的なトレーニング負荷の定量化は、内的負荷 (HRTL) を推定する上ではその妥当性が認められるものの、相関の強さから外的負荷 (走行距離) の推定は必ずしも正確に行えないことが示唆された。この相関係数の弱さは先行研究とは異なるが、それには走行距離のみを評価しており、トレーニング強度を考慮していないことが考えられる。そのため、女性ユースアスリートのトレーニング負荷を定量する際は、session RPE に加え走行距離の記録を行うことでより正確に負荷の管理が行える可能性がある。

[発表論文]

1. 高校生陸上競技者における session-RPE 法を用いたトレーニング負荷の定量化の妥当性の検討 (2023). 土橋 康平, 奥平 柁道. 日本体育・スポーツ・健康学会第 73 回大会

Table 2. 客観的および主観的トレーニング負荷指標の相関係数

Participants	session-RPE×走行距離	session-RPE×HRTL
A	0.350 *	0.434 *
B	0.513 *	0.729 *
C	0.074	0.552 *
D	0.464 *	0.704 *
E	0.347 *	0.680 *
F	0.246 *	0.569 *
G	0.370 *	0.610 *
H	0.238 *	0.559 *
I	0.324 *	0.655 *
J	0.558 *	0.712 *
K	0.436 *	0.585 *
L	0.318 *	0.711 *

Abbreviations: HRTL, heart rate-based training load
* indicates significant correlations.

【助成 40-41】

生体電気インピーダンス法を用いて骨格筋の量と質を評価するための電気的パラメータの検討

代表研究者 筑波大学体育系 助教 下山 寛之

共同研究者 筑波大学体育系/日本学術振興会 特別研究員(PD) 近藤 衣美

共同研究者 筑波大学体育系/日本学術振興会 特別研究員(PD) 内沢 彰子

〔研究の概要〕

本研究では生体電気インピーダンス法を用いて得られる電気的パラメータを用いて、骨格筋の「量」と「質」の視点に着目し、次の3つの研究を行った。まず、①アスリートの骨格筋量評価の研究において、安定同位体を基準とした、筋量推定の有用性を示した。次に、②糖代謝評価に関する研究において、相撲選手を対象に、位相角(PhA)は相撲選手の血糖状態を評価するための潜在的なバイオマーカーとして利用可能である可能性を示した。さらに、③女性を対象に生体電気インピーダンスベクトル解析を行い、筋の質を評価し、アスリート集団の特異性の分布を示した。これらの研究から、生体電気インピーダンス法が骨格筋量やその質の評価に有用であり、特定の集団における健康評価やバイオマーカーとしてのさらなる可能性を見出した研究となった。

〔研究経過および成果〕

骨格筋の減少と栄養不良は、罹患率の増加、入院期間の延長、機能的能力の低下、多額の医療費、死亡率の増加など複数の有害な結果をもたらす。近年、生体電気インピーダンスから得られるレジスタンス(R)、リアクタンス(Xc)、インピーダンス(Z)、位相角(PhA)など電気的パラメーターがヒトの骨格筋の量と質、さらには栄養状態の代替バイオマーカーとして応用されることへの関心が高まっている。そこで、本研究は生体電気インピーダンス法を用いて得られる電気的パラメータを用いて、特に骨格筋の「量」と「質」の視点に着目し、次の3つの研究を行った。

発表論文1では、アスリートを含む活動的な若者の全身骨格筋量を、重水素標識クレアチン希釈法を基準として、単一周波数、多周波数生体電気インピーダンス、生体電気インピーダンス分光で得られる各インピーダンス指標との関連を分析した。その結果、筋量は、身長²をそれぞれのレジスタンス値

(R)で除した、単一周波数生体電気インピーダンス(L^2/R_5 および L^2/R_{50})、多周波数生体電気インピーダンス(L^2/R_{250-5})、および生体電気インピーダンス分光(L^2/R_{ICW})といずれも有意な相関関係を示した(図1)。また、筋量とそれぞれの指標との相関係数(r)の関係性の強さは、単一周波数生体電気インピーダンス(L^2/R_{50})、多周波数生体電気インピーダンス

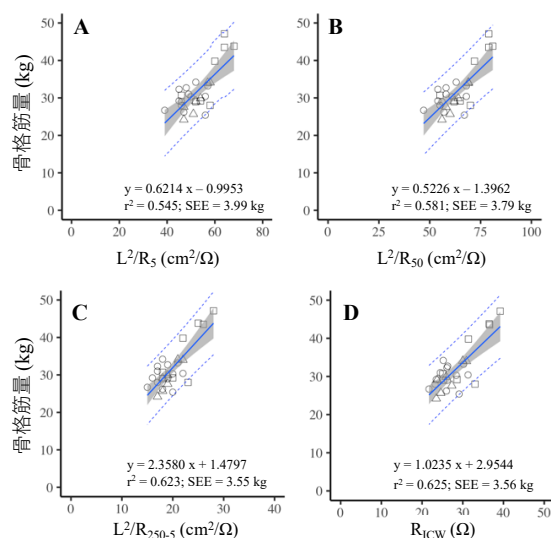


図1 筋量と生体電気インピーダンス指標との相関関係
筋量と L^2/R_5 (図A)、 L^2/R_{50} (図B)、 L^2/R_{250-5} (図C)

(L^2/R_{250-5})、および生体電気インピーダンス分光(L^2/R_{ICW})と違いが見られず、いずれの電気的パラメータからの筋量推定でも同程度の精度で評価が可能であることが示された。したがって、生体電気インピーダンス法による L^2/R_{50} 、 L^2/R_{250-5} 、 L^2/R_{ICW} を用い、一般的な成人とは骨格筋質の異なるアスリートにおいても、筋量を適切に推定できることが実証された。

発表論文 2 の研究では、相撲選手を対象に生体電気インピーダンスを用いて位相角 (PhA) および様々なバイオマーカーとの関連を検証した。二変量回帰分析では、年齢と体重で調整した HbA1c は PhA との間に負の関係が見られた (図 2)。この結果に基づき、PhA は相撲選手の血糖を評価するための潜在的なバイオマーカーとして利用可能である可能性が示唆された (図 2)。

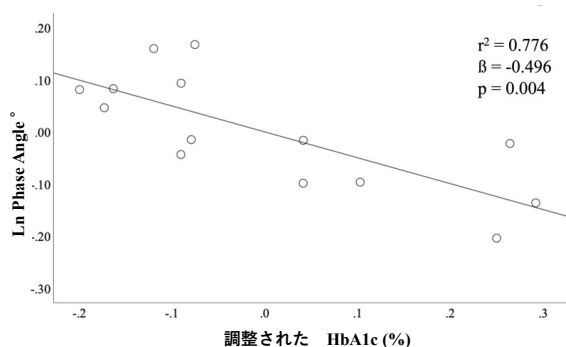


図2 電気的位相角 (Phase Angle) とヘモグロビンA1cの相関関係

発表論文 3 の研究では、女性を対象として筋細胞の質を評価する実験を行った。図 3 に示す生体電気インピーダンスベクトル解析を行ったところ、女性ランナーの月経の有無によるベクトルの違いは見られなかったが、女性ランナーは座位中心の生活を送る集団 (緑点) よりもベクトルが左上に集まる傾向が見られたことから、筋細胞量などの質を反映している可能性が垣間見えた。今後、122名の生体電気インピーダンスデータを取得してい

ることからさらに筋発揮能力や有酸素性能力との関連を検証する予定である。

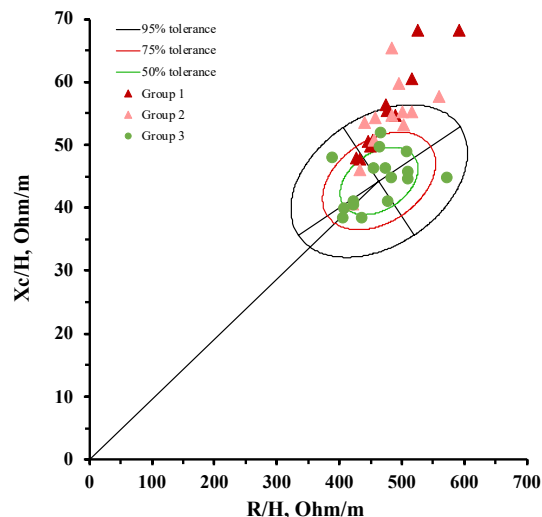


図3 生体電気インピーダンスベクトル解析
レジスタンス (X軸) とリアクタンス (Y軸) の電気的パラメータから得られるベクトル解析

[発表論文]

1. Sagayama H, *et al.*, “Comparison of bioelectrical impedance indices for skeletal muscle mass and intracellular water measurements of physically active young men and athletes” *Journal of Nutrition*. 2023 Sep;153(9):2543-2551.
2. Khatun S, Ogawa M, Uchizawa A, Hoshi D, Tamai S, Momma R, Kondo E, Watanabe K, Sagayama H. “Glycated hemoglobin is independently associated with the bioelectrical impedance phase angle in junior sumo wrestlers” Under Review.
3. Uchizawa A, Kondo E, Khatun S, Sagayama H. “Assessment of menstrual status and muscle quality in female runners using bioelectrical impedance vector analysis” 投稿準備中.

【助成 40-42】

自動ヒト培養幹細胞動態解析による再生医療支援システムの構築

研究者 鳥取大学医学部 教授 難波 大輔

〔研究の概要〕

本研究は、われわれが開発した自動細胞動態追跡システム DeepACT を培養ヒト表皮幹細胞に応用し、細胞動態データを最終的な医療の成果(移植後の生体組織の状態)と紐付けすることで、移植が成功しやすい培養幹細胞の状態を明確にし、実際の治療に活かす再生医療支援システムを構築することを目的としている。今回、われわれは、まず皮膚再生医療製品である培養表皮シートの作製過程における細胞動態を広範囲に捉えるため、システム開発を行った。さらに、培養表皮シートの品質向上に向けた培養法の改良も行った。両者を統合することで、より優れた再生医療製品が提供できることが期待される。

〔研究経過および成果〕

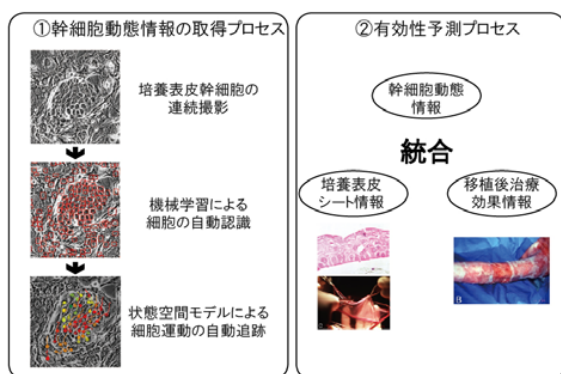
培養幹細胞を用いた再生医療が様々な疾患に対して応用されようとしている。しかしながら、発展途上にある培養幹細胞による治療は、幹細胞移植後の治療成果を予測できるほどの精度にはなく、熟練の細胞培養技術者による直感、いわば暗黙知によって、治療に最適な幹細胞が選別され、その治療が行われているのが現状である。ヒト表皮幹細胞を培養することで得られる培養表皮シートは、すでに臨床応用されており、多くの重度熱傷患者を救ってきた。しかしながら、その治療効果の決定要因である表皮シートの製造過程は細胞培養技術者の熟練度に大きく依存している。このことも要因の一部となって、実際に移植された培養表皮シートが正常に表皮として機能する割合は 100%ではなく、また培養表皮シートの製造プロセスに予測不能な要因が多いため、移植を待つ間に患者が死亡する例も多い。このような現状は、培養中の幹細胞の状態に関する情報と、最終的に形成される培養表皮シートの品質に関する情報、さらに移植後の治療効果に関する情報が全く乖離しており、

再生医療システムの中に組み込まれていないことが原因の一つである。皮膚の再生医療だけでなく、今後の幹細胞を用いた再生医療をさらに前進させるには、これらの情報を統合した治療効果予測技術の開発、及び、そのフィードバックによる治療成績の向上が不可欠である。

われわれは、ヒト表皮幹細胞の品質を培養中に評価する方法を開発するため、研究を行ってきた。そして、実際に培養中の表皮細胞の移動速度とその後の長期的な増殖能力に正の相関性を見出し、培養細胞の時系列位相差顕微鏡画像を解析するだけで、培養ヒト表皮幹細胞の品質を評価することに成功した(Nanba et al, J Cell Biol 2015)。これは培養幹細胞の動態情報から移植に適しているか否かを判断する本研究が目指す再生医療治療効果予測技術の基盤となる成果である。しかし、この方法は実験者の目視による細胞軌跡の解析を基盤としており、再生医療に応用できる精度に達していない。さらに細胞移動速度以外のパラメータも幹細胞の性質に大きく関与していると考えられる。以上のことから、われわれは、非侵

襲イメージングと機械学習による高度画像解析から得られる培養幹細胞の動態解析と、最終的に移植した表皮組織の状態(治療効果)を双方向的に関連させ、再生医療に応用するシステム構築の構想を得た。

以上の構想を実現すべく、われわれは、帝京大学教授である古徳純一博士と共に、深層学習と物体追跡アルゴリズムを組み合わせた自動細胞追跡システム DeepACT を開発し、培養環境と細胞動態の相関、さらに細胞動態のみからヒト表皮幹細胞を同定することに成功した (Hirose et al, Stem Cells 2021)。本研究では、すでに熱傷治療などへの臨床応用が実現しているヒト表皮幹細胞培養による再生医療をモデルとして、非侵襲イメージングと機械学習を用いた高度画像解析技術を組み合わせた DeepACT を用いて、培養幹細胞の状態を示すパラメータを網羅的に抽出することで、細胞培養技術者の暗黙知を数量化し、さらに、その情報と治療成績を結びつけることで、再生医療の有効性を予測するシステムを構築することを目的とした【下図】。



まず、培養表皮シートの作製過程における品質管理法を構築するには、広範囲における画像取得が必須である。われわれは、広範囲の視野を同時に撮影

できる広視野顕微鏡を使用し画像取得を行った。現在、使用できる広視野顕微鏡は、蛍光画像および明視野画像の取得が可能であり、われわれは培養ヒト表皮幹細胞の画像を明視野画像で取得し、DeepACT にて解析を行った。しかしながら、DeepACT は位相差顕微鏡画像を辞書データとして作製していることから、明視野画像を用いた解析では、十分な精度を得ることが出来なかった。現在、明視野画像を辞書データとしたシステムの再構築、また、位相差画像が取得可能な広視野顕微鏡の構築に向けて、検討を行っている。以上のような培養表皮シートの品質管理法を構築する一方で、われわれは、培養表皮シートの品質を向上させる手法の開発にも取り組んできた。そして、スイス連邦工科大学ローザンヌ校とシンガポール皮膚科学研究所と共同で、低温環境による mTORC1 シグナルの抑制が、培養系におけるヒト表皮幹細胞の維持を亢進し、mTORC1 シグナル阻害剤であるラパマイシンを培養系に添加することで、長期培養後も品質の良い培養表皮シートが作製できることを明らかにした【[発表論文1](#)】。今後は品質管理と品質向上の両方の技術を開発し、より優れた皮膚再生医療製品の提供ができるシステムの構築を行う予定である。

[発表論文]

1. [Nanba D*](#), Sakabe J, Mosig J, Brouard M, Toki F, Shimokawa M, Kamiya M, Braschler T, Azzabi F, Droz-Georget Lathion S, Johnsson K, Roy K, Schmid CD, Bureau JB, Rochat A, Barrandon Y. (2023). Low temperature and mTOR inhibition favor stem cell maintenance in human keratinocyte cultures. EMBO Reports, 24: e55439. (*: corresponding author)

【助成 40-43】

MR (Mixed Reality: 複合現実) を用いた気管支鏡支援

研究者 藤田医科大学医学部呼吸器内科/名古屋大学メディカル xR センター 講師 岡地祥太郎

共同研究者 名古屋大学メディカル xR センター 教授 藤原道隆

〔研究の概要〕

Microsoft HoloLens と Dynamics 365 Guides を用いた気管支鏡 MR トレーニングガイドの開発と評価を行った。ガイドは気管支の解剖、気管支鏡の操作方法、気管支内腔画像の説明などからなり、この研究では 10 人の医師がこの MR ガイドを用いた気管支鏡トレーニングを実施し、トレーニング時間や参加者のフィードバックを評価した。結果として、MR ガイドは効果的であり、参加者からの評価も肯定的であったことが示された。

また、医療用画像をヘッドマウントディスプレイ (HMD) に表示させる試みとして、スマートグラスを活用したリアルタイム超音波ガイド下胸腔穿刺シミュレーションを行った。6 人の医師が HMD の有り無しで手技を行い、両群とも成功率に差はなく、HMD 群で有意に頭部移動が少ないことが示された。

〔研究経過および成果〕

① Mixed Reality を用いた気管支鏡トレーニングガイド

気管支鏡のトレーニングツールには、バーチャルリアリティ (VR) シミュレータとシリコン気管支模型があり、どちらもより良い学習結果に関連し、互いに補完し合っている。気管支トレーニング模型を使用したシミュレーションは、実際の気管支鏡を使ってリアルな体験を提供できるが、解剖学的特徴やシミュレーション中の指示など、参照できる情報は十分ではない。Microsoft HoloLens は、コードレスの MR (Mixed Reality) ヘッドセットであり、現実世界には存在しないホログラムを閲覧・操作することで、遠隔操作によるアドバイスをガイドを提供することができ、医療現場で活用されている。そこで、HoloLens2 と Dynamics 365 Guides を使用して、学習者が気管支鏡検査を一人で効率的に学習できるトレーニングガイドを作成した。まず、気管支解剖の学習、スコープ操作、気管支内腔の観察という 3 つのタスクについて、パソコン内のア

プリケーションを用いて指示とスキーマを作成した。次に、HoloLens2 を装着し、取り込んだ 3D 画像パーツと操作ガイドを仮想空間に配置した (図 1(a))。そして、MR ガイドを用いた気管支鏡トレーニングのシミュレーションを行った。経験の異なる 10 名の医師が HoloLens2 を装着しながらトレーニングプログラムを行った。MR ガイドに従って、術者はまず気管支の 3D ホログラム (図 1(b)) で解剖学を学び、次に気管支鏡の

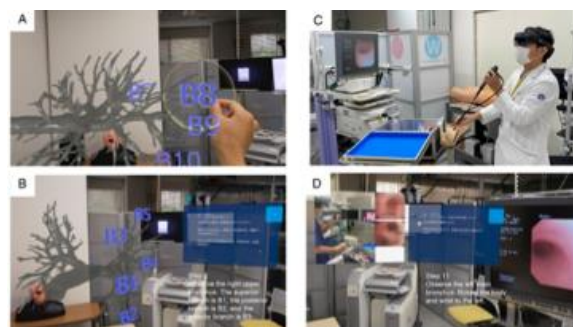


図 1.

操作方法を学んだ。最後に、気管支鏡を挿入し、トレーニングモデルを用いて気管支内腔を観察した (図 1(c), (d))。操作者はホログラフィックカードを操作し、

指示と画像をアイトラッキングまたはハンドトラッキングで確認した。参加者全員が1回トレーニングを受け、所要時間とアンケートで評価された。アンケートへの回答は、5段階のリッカート尺度(1=強く同意しない～5=強く同意する)を用いた。

参加者全員がトレーニングを終了し、所要時間の中央値は10.7分であった。ガイドの見やすさは5点満点中4.0点から4.5点であった。また、トレーニングをもう一度受けたいか、同僚に勧めたいかについても、それぞれ平均4.7点、4.6点であった。装置の装着感についての平均点は4.1点で、ほとんどの参加者において眼精疲労や酔いはないか軽度であった。

本研究では、気管支鏡トレーニング中にガイドを参照・操作するために HoloLens2 を使用することに、参加者は好意的な反応を示した。今後は、MRガイドの使用が従来の方法だけよりも効果的であるかどうかを確認し、より多くのサンプルを用いて研究を行うことによって身体的負担についてもさらに確認する必要がある。

②スマートグラスを用いたリアルタイム超音波ガイド下胸腔穿刺シミュレーション

①の研究に引き続き、臨床現場で活用する医用画像をヘッドマウントディスプレイ(HMD)に表示させて参照できることが必要と考え、超音波画像をワイヤレスでHMDに表示させる胸腔穿刺シミュレーション実験を実施した。

6名の医師がHMDとワイヤレス画像伝送システムを用いて胸腔穿刺シミュレーションを行った(図2。A-D)。所要時間、穿刺針の視認性、胸水採取成功率、および慣性計測ユニットを搭載したスマートグラスを用いた手技中の頭部の動きをすべて記録し、HMDの有無

で比較した。

参加者はすべての手技において胸水の採取に成功した。HMDの使用は手技時間に有意な影響を与えなかったが、手技中の頭部の水平方向および垂直方向の動きは顕著に減少した。

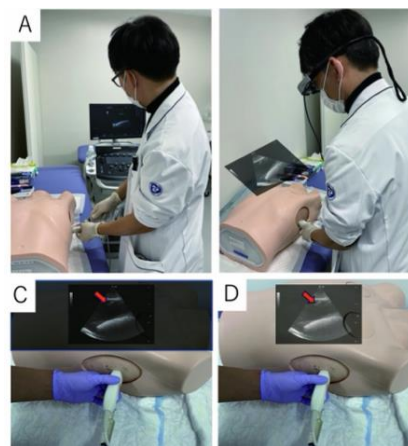


図2

本研究は、シミュレーションされたリアルタイムの超音波ガイド下胸腔穿刺手技におけるHMDの使用可能性を示し、人間工学と正確性を向上させる胸腔穿刺におけるHMDの可能性を示した。これらの知見を確認するためには、さらなる研究が必要である。

〔発表論文〕

1. Okachi S, Sakurai M, Matsui T, Ito T, Matsuzawa R, Morise M, Wakahara K, Ishii M, Fujiwara M. The Application of Mixed Reality in Bronchoscopy Simulation Training: A Feasibility Study. *Surg Innov.* 2023 Oct;30(5):685-686.
2. Okachi S, Matsui T, Sakurai M, Ito T, Morise M, Imaizumi K, Ishii M, Fujiwara M. Real-Time Ultrasound-Guided Thoracentesis Simulation Using an Optical See-Through Head-Mounted Display: A Proof-of-Concept Study. *J Ultrason.* In press.

【助成 40-44】

小児てんかん発作の頻度と気圧変動の統計的相関を調べる研究(中間報告)

研究者 鳥取大学医学部附属病院 脳神経小児科 助教 荒井 勇人

〔研究の概要〕

てんかんは溺水や眼外傷といった大事故に繋がる危険があり、発作発生の予測ができれば危険回避に役立つと考えられる。気圧・気象の変動が、てんかん発作を増加させることが近年の研究で成人てんかん患者においては明らかにされているが、小児てんかん患者における研究にはない。我々は、小児てんかん患者は成人以上に気圧・気象の変動と発作の出現が相関していると予想しており、小児のてんかん発作と気象・気候の関連性を明らかにするために、多施設共同前向き疫学調査を行う。また、既知のリスク要因を含めた気象・気候の関連についての詳細な分析も行い、小児のてんかん発作の単位時間内発生率の高精度の予測モデルを開発することを目標とする。

〔研究経過および成果〕

本研究は患者の記録情報をもとに解析するため、患者が必要項目を記録しやすいよう、専用発作手帳を作成した。

起床後～24時までの発作①

日付	前々日		前日		発作日		
	月	日	月	日	月	日	
時刻 (発作発生時)	時	分	時	分	時	分	
場所 (発作発生時)	市 町	市 町	市 町	市 町	市 町	市 町	
体温 (発作発生時)							℃
発作持続時間							分 秒
高熱発作 (発作発生時)	あり/なし		あり/なし		あり/なし		
激しい腹痛	あり/なし		あり/なし		あり/なし		
嘔吐の頻度	あり/なし		あり/なし		あり/なし		
月経	あり/なし		あり/なし		あり/なし		
精神的ストレス	1	2	3	4	5	6	
肉体的疲労	1	2	3	4	5	6	
睡眠時間 (発作発生時)	時	分	時	分	時	分	

※斜線部は記載不要です

記載方法

発作日、その前日、前々日の日付を欄に記入
発作が起きた時刻を記入し、発作発生時刻に前日、前々日(24時間単位)で記載してください。前日(24時間単位)は発作発生時刻から記載してください。その際、その時刻にどの時間帯にいたかを記載してください。例えば2024年1月1日(発作発生時刻)は発作発生時刻(20時)に記入し、2024年1月1日(発作発生時刻)は発作発生時刻(20時)に記入し、2024年1月1日(発作発生時刻)は発作発生時刻(20時)に記入してください。
発作が起きた場所の市町村を記入してください。
発作が起きたときの体温を記入してください。
発作が起きたときの持続時間を記入してください。
発作が起きたときに高熱(38.5℃以上)があったか、激しい腹痛があったか、嘔吐の頻度があったか、月経があったか、精神的ストレスがあったか、肉体的疲労があったか、睡眠時間が短かったかを記入してください。
発作が起きたときの精神的ストレスレベルを1～6で記入してください。1:非常に低い、2:低い、3:普通、4:やや高い、5:高い、6:非常に高い。
発作が起きたときの肉体的疲労レベルを1～6で記入してください。1:非常に低い、2:低い、3:普通、4:やや高い、5:高い、6:非常に高い。
発作が起きたときの睡眠時間を時と分で記入してください。
発作が起きたときの発作発生時刻を時と分で記入してください。
発作が起きたときの発作発生時刻を時と分で記入してください。
発作が起きたときの発作発生時刻を時と分で記入してください。

専用手帳には、記入例や記入手順のガイダンスを載せ、参加患者に配慮した。

その後、令和4年12月に協力病院との間でオンラインによるスタートアップミーティングを行い、令和5年1月1日から患者リクルートメントおよびデータの収集を開始した。本研究の協力病院は、鳥取県立中央病院、鳥取県立厚生病院、島根県立中央病院、東部島根医療福祉センター、西部島根医療福祉センター、津山中央病院、和歌山県立医科大学附属病

院、山口大学医学部附属病院、広島市立舟入市民病院、京都大学医学部附属病院、ベルランド総合病院、日本赤十字社 和歌山医療センター、公立豊岡病院の全13病院であった。

本研究は、発作低頻度群(グループA)と発作高頻度群(グループB)の2つに分けた。グループAは1年間の追跡(3か月ごとに手帳回収、合計4クール)、グループBは2か月間の追跡であった。2024年1月1日現在、グループAは全部で約100症例、グループBは約30症例のリクルートが出来ており、順次手帳をゆうパックで協力病院から回収している。

気圧・気象との関連は気象庁HPのデータを参考に、手作業ですると非常に大変であるため、株式会社ケイズの協力を得て本研究専用気象情報抽出プログラムを作成した。その後、鳥取大学ダイバーシティセンターの協力のもと技術補佐員を雇い、本プログラミングシステムを利用して、回収できた手帳情報から気象情報の抽出作業を現在行ってもらっている。2024年3月までにはグループBのデータ回収が終了し、2025年3月までにグループAのデータ回収が

終了する予定である。データ回収が早めに終了するグループ B については 2024 年中に論文化できると考えている。

また、助成期間の間に研究代表者はこどものてんかん・障害児医療に関連する研究を精力的に行い、7本の論文を投稿した。そのなかでも下記発表論文2の Prognostic factors for employment outcomes in patients with a history of childhood-onset drug-resistant epilepsy は、小児期発症の難治性てんかんの将来の就職予後に関わる因子について検討した研究であり、タイ (バンコク) で 2023 年 8 月に開催された The 16th Asian Oceanian Congress of Child Neurology (AOCCN) の The Best oral presentation award に選ばれた。

引き続き、本研究についても論文化を目指して愚直に取り組むつもりである。

[発表論文] 令和 4 年 11 月～現在

1. Arai Y, Okanishi T, Kanai S, Nakamura Y, Kawaguchi T, Ohta K, and Maegaki Y. Risk factors of Pre-hospital Emergency Care for Acute Encephalopathy in children with febrile status epilepticus. *Pediatr Neurol.* 2023;147:95-100.
2. Arai Y, Okanishi T, Noma H, Kanai S, Kawaguchi T, Sunada H, Fujimoto A, and Maegaki Y. Prognostic factors for employment outcomes in patients with a history of childhood-onset drug-resistant epilepsy. *Front Pediatr.* 2023 Jul;11:1173126.
3. Arai Y, Okanishi T, Kanai S, Ohta K, Sunada H, Noma H, and Maegaki Y. Identifying risk factors for adverse events of pyridoxal phosphate in infantile epileptic spasms syndrome. *Epilepsy Behav.* 2023 Aug;145:109348.
4. Arai Y, Okanishi T, Kanai S, Nakamura Y, Sunada H, Murakami H, Yamauchi K, Maegaki Y. Prediction Model for Long-term Seizure and Developmental Outcomes among Children with Infantile Epileptic Spasms Syndrome. *Front Neurol.* 2023 Jul; 14:1195252.
5. Arai Y, Okanishi T, Kumasaki K, Kanai S, Nishimura Y, Takahashi Y, Maegaki Y. A pediatric case of autoimmune encephalitis with chronologically moving seizure foci and cortical lesions: A case report. *Brain Dev.* 2023 Feb;45(2):146-151.
6. Arai Y, Okanishi T, Kanai S, Okazaki T, Koshimizu E, Miyatake S, Maeoka Y, Fujimoto A, Matsumoto N, Maegaki Y. A case of ALG11-congenital disorders of glycosylation diagnosed by post-mortem whole exome sequencing. *Brain Dev.* 2022 Nov;44(10):732-736.
7. Arai Y, Okanishi T, Oguri M, Kanai S, Fujimoto A, Maegaki Y. Power and connectivity changes on electroencephalogram in postoperative cerebellar mutism. *Brain Dev.* 2022 Nov;44(10):759-764.

【助成 40-45】

パーキンソン病患者における頸部多チャンネル表面筋電図による嚥下動態の解析と電気刺激による効果の検討

研究者 広島大学大学院医系科学研究科脳神経内科学 職名 助教 氏名 中森 正博

〔研究の概要〕

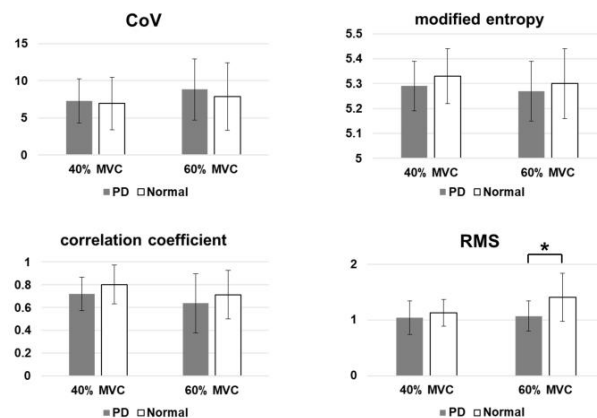
高密度表面筋電図 (HD-sEMG) は、運動単位の活動と動員を非侵襲的に分析することが可能な新規検査法である。嚥下関連の機能を評価するために、本研究ではパーキンソン病 (PD) 患者の舌骨上筋群を HD-sEMG で評価した。さらに、頸部経皮的干渉電流刺激の介入によってもたらされる変化を評価した。パラメータは、変動係数 (CoV)、modified entropy、相関係数、および電位の平均二乗根 (RMS) を用いた。22 人の PD 患者で評価した。60% maximum voluntary contraction (MVC) 時の RMS は、PD 患者では正常対照群よりも有意に低かった ($p = 0.007$)。頸部経皮的干渉電流刺激後、40%および 60%MVC での相関係数は有意に減少 ($p = 0.040$ 、 $p = 0.048$)、60%MVC での RMS は有意に増加した ($p = 0.035$)。HD-sEMG は、電気生理学的変化を検出し、治療効果を評価できるという有用性が示唆された。

〔研究経過および成果〕

特定臨床研究として介入試験を実施した。広島大学病院倫理委員会に提出し、令和 4 年 4 月 25 日承認、jRCT 公表を行った。症例数設計は統計解析の結果 27 名となった。開始から 4 週間以内に、2 名が個人的な理由で参加を中止し、同意を撤回した。さらに、検査環境でノイズが混入したため、3 名が評価から除外された。その結果、最終的に、22 名のデータの評価を行った。さらに、嚥下障害のない 14 名の高齢者も正常対照群として評価した。

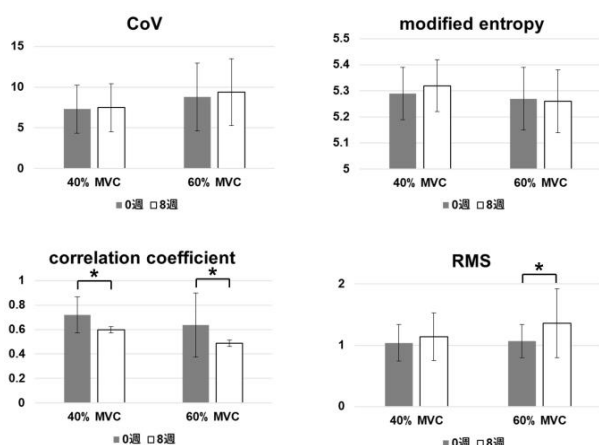
PD 患者と正常対照群の CoV、modified entropy、相関係数、RMS を示す。40%および 60%MVC において、CoV、modified entropy、および相関係数において両群間に有意な差は見られなかった。また、40%MVC における RMS も有意な差はなかったが、60%MVC において PD 患者の RMS は正常

対照群よりも有意に低かった ($p=0.007$)。



< PD 患者と正常対照群の比較 >

次に、頸部経皮的電気干渉電流刺激介入前後の HD-sEMG のパラメータを比較した。その結果、40%および 60%MVC での相関係数は有意に減少 ($p=0.040$ 、 $p=0.048$ 、それぞれ)、および 60%MVC での RMS は有意に増加した ($p=0.035$)。



<頸部経皮的電気干渉電流刺激介入前後の比較>

さらに、PD 患者において正常対照群と比較して有意に低かった 60%MVC での RMS に注目し、探索的な統計分析を行った。運動症状のサブタイプごとにわたっての検討を行い、UPDRS part3 の四肢スコアが高いと 60%MVC での RMS が低いという有意相関を認めた (p=0.048)。

[発表論文]

1. Nakamori M, Toko M, Yamada H, Hayashi Y, Yoshikawa K, Yoshikawa M, Nagasaki T, Hiraoka A, Shimizu Y, Mikami Y, Maruyama H. Impact of neck percutaneous interferential current sensory stimulation on swallowing function in patients with Parkinson's disease: A single-arm, open-label study protocol. *Contemp Clin Trials Commun.* 2023 Jun 10;33:101158. doi: 10.1016/j.conctc.2023.101158. PMID: 37342176; PMCID: PMC10277457.
2. Nakamori M, Toko M, Yamada H, Hayashi Y, Haruta A, Hiraoka A, Yoshikawa M, Nagasaki T,

Ushio K, Yoshikawa K, Shimizu Y, Mikami Y, Maruyama H. Detailed findings of videofluoroscopic examination among patients with Parkinson's disease on the effect of cervical percutaneous interferential current stimulation. *Front Neurol.* 2023 Nov 7;14:1279161. doi: 10.3389/fneur.2023.1279161. PMID: 38020611; PMCID: PMC10664245.

3. Nakamori M, Shimizu Y, Takahashi T, Toko M, Yamada H, Hayashi Y, Ushio K, Yoshikawa K, Hiraoka A, Yoshikawa M, Nagasaki T, Mikami Y, Maruyama H. Swallowing sound index analysis using electronic stethoscope and artificial intelligence for patients with Parkinson's disease. *J Neurol Sci.* 2023 Nov 15;454:120831. doi: 10.1016/j.jns.2023.120831. Epub 2023 Oct 10. PMID: 37837871.
4. Nakamori M, Toko M, Yamada H, Hayashi Y, Ushio K, Yoshikawa K, Haruta A, Hiraoka A, Yoshikawa M, Nagasaki T, Mikami Y, Maruyama H. Association between motor symptoms of Parkinson's disease and swallowing disorders. *Neurol Sci.* 2023 Dec 6. doi: 10.1007/s10072-023-07238-1. Epub ahead of print. PMID: 38055077.

【助成 40-46】

CEST-MRI と機械学習を組み込んだ定量的 pH イメージング手法の開発

研究者 徳島大学医学部 助教 金澤 裕樹

〔研究の概要〕

本研究の目的は、Chemical Exchange Saturation Transfer Magnetic Resonance Imaging (CEST-MRI) において、生体内組織の pH を定量的に可視化するために、内因性 CEST イメージング手法と機械学習を組み込んだ pH キャリブレーションの手法をすることである。3 テスラ MRI 装置を用いて、ファントム実験を行った。水、異なる濃度のウシ血清アルブミン (BSA)、Creatine 溶液のサンプルを封入したファントムを作成した。そして、異なる送信磁場 (B_1) 強度を用いて CEST-MRI のデータセットを取得した。本手法は水の Z-spectrum の対称性を利用し、静磁場 (B_0) 補正後、Lorentzian 関数でフィッティングした水の Z-spectrum を基線に設定した。その結果、水の Lorentzian Z-spectrum を基線としたとき、各オフセット周波数の濃度勾配を算出することにより、CEST 効果と nuclear Overhauser effect (NOE) を分けて評価することができた。

〔研究経過および成果〕

Chemical exchange saturation transfer (CEST) イメージングは、核磁気共鳴画像 (magnetic resonance image: MRI) 診断装置を利用して、可動性タンパク・ペプチド内のアミド基 (-NH) やヒドロキシル基 (-OH) のプロトンが周囲のバルク水と水交換されているために、その濃度や交換速度に基づくコントラストを得ることが可能である。最初に CEST イメージングを用いた pH に起因すると提唱した手法 (Zhou J, *Nature Med.* 2003) では、ラット脳の生体と剖検による過去の文献値から算出している。ヒトを対象にしたとき、また異なる組織を想定したときに、Zhou らの手法によって算出した pH は直接的に求めているとは言えない。MTR_{asym} による評価は、-NH の平均共鳴周波数のバルク水を挟んで反対側の周波数に nuclear Overhauser effect (NOE) が現れるため、確実であるとは言えない。また、MR spectroscopy においても pH の測定は行われているが、多くの場合造影剤を投与する必要があり、その造影

剤物質のキレートの影響を受けるので、生体の静的な pH 変化を捉えることはできない。

本研究は、MRI を用いて、生体内組織の pH を定量的に可視化するために、内因性 CEST イメージング手法と機械学習を組み込んだ pH キャリブレーションの手法を開発する。単に信号を取得する従来手法とは異なり、物理的および科学的な数値を算出し、機械学習により精度を向上させることで、生体内組織のダイナミックな物性を評価することを目的とした。

3 テスラ MRI 装置 (GE Healthcare 社製, Discovery 750) にて、前処置パルスとして phase cycling 法を付加した single-shot fast spin-echo 法にて撮像を用いてファントム実験 (A) (B) を行った。

(A) ファントム物質の pH ダイナミックレンジおよび CEST イメージングの pH の変化の検討。

キャリブレーションを行うためには、溶質として生体内で起こりえる pH 変化に対応する必要がある。ファントム溶質は、ウシ血清アルブミン (BSA)、Creatine を用

いて検討を行った。このとき、溶液の pH を一定に保つためにリン酸緩衝液を用いた。さらに、CEST イメージングは、特定の周波数を持つプロトンに対して適切にプリサチュレーションパルスを選択を行う必要があるため、 $-NH_2$ (+2.0 ppm) および $-NH$ (+3.5 ppm) の周波数で検討した。その結果、pH による CEST 効果は、BSA よりも Creatine の方が高くなった。

(B) 水スペクトルを基線として適応した CEST イメージングの可視化プログラムの開発。

MR 信号は装置や撮像条件に依存するため、これを補正する必要がある。補正には、溶質とバルク水との作用である CEST 効果を最大に抽出するために、送信磁場 (B_1) に依存しない基線を定義することで、溶質のタンパク質濃度を算出する手法を開発した。基線は、取得した CEST データを静磁場 (B_0) 補正し、Lorentzian 関数を用いて水の Z-spectrum をフィッティングすることで定義した ($WS_{Lorentzian}$)。その結果、基線に設定した水スペクトルは B_1 に依存しないことから、溶質の濃度勾配の定量評価に有用であることがわかった。Lorentzian 関数でフィッティングした B_0 補正後の水スペクトルは、中心周波数を中心に対称性があった。理想的な水スペクトルも対称性があることから、提案した基線はオフセット周波数に適応しているとい

える。各オフセット周波数でアルブミンの Z-spectrum と基線との差をとり、濃度勾配を算出した (図 1)。各オフセット周波数の濃度勾配を算出することにより、CEST 効果と NOE を分けて評価することができた。 $WS_{Lorentzian}$ を基線としたとき、各 B_1 強度 (0.5, 1.0, 1.5 μT) の +3.5 ppm のアルブミン濃度勾配は 0.01, 0.018, 0.022 /wt% となった。この各 B_1 のアルブミン濃度勾配の関係から二次関数で近似することで、 B_1 に依存しないアルブミン濃度関数として評価することができた。

以上の結果から、濃度勾配を関数化することで生体組織の CEST 効果をアルブミン濃度に換算可能で定量評価指標として使用できる可能性があり、本実験で取得した溶液濃度と pH の関係を機械学習に組み込むことで精度向上に期待できる。今後は、生体温度での pH 計測を行いデータを取得し、機械学習及びファントムから取得したデータとのパターンマッチングを行い、生体に適応できるシステムを構築する予定である。

[発表論文]

1. 富永羽香, 金澤裕樹, 三好光晴, 原田雅史. CEST イメージングの高分子濃度と pH 緩衝液依存性の検討. 日本放射線技術学会雑誌 2023: 79(9); 986.

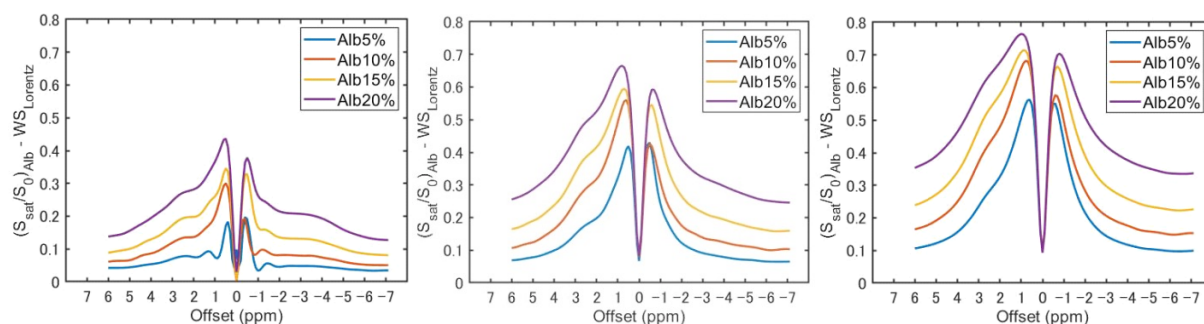


図 1. 各アルブミン濃度の Z-spectrum と Lorentzian 関数を当てはめた $1.0 \mu T$ 水スペクトル間の信号差のプロット図。

【助成 40-47】

人工知能および距離センサーを用いた次世代手術トレーニングシステムの開発

研究者 九州大学小児外科 助教 福田篤久

〔研究の概要〕

本研究では artificial intelligence(AI)を用いて内視鏡手術トレーニングシミュレータにおける鉗子操作の客観的評価システム開発検証を行った。トレーニングボックス上部から iPad で撮影した動画を用いて鉗子の動きを計測した。鉗子の認識と位置計測には、DeepLabCut と呼ばれる AI を用いた姿勢推定手法を使用し key point における追従安定性を検証した。検証の結果、改善すべき点はあるものの AI を用いた鉗子軌道評価システムは、内視鏡技術を客観的に視覚化し、将来的には内視鏡外科医の研修や技術評価に有用なツールになり得ると考えた。

〔研究経過および成果〕

本研究では、トレーニングキットに鉗子の動きを計測する機能を実装する方法について検証を行った。

追跡手法

本研究では、トレーニングキットを上部から撮影した動画から鉗子の動きを計測した。

動画からの鉗子の認識と位置計測には、DeepLabCut (DLC) と呼ばれる AI(深層学習)を用いた姿勢推定手法を使用した。DLC は、マウスや猿など動物各パーツ(例えば指や尻尾など)がどのように移動しているか定量的に計測するために用いられており、特に生物の行動解析や医療領域の研究に幅広く活用されている。DLC は AI による追跡手法であり、学習データセットを必要とする。学習データセットの作成にはラベル付けが必要となる。ラベル付けとは、AI に追跡対象を学ばせるために必要となる手続きであり、動画から複数のフレーム(画像)を抽出し、抽出したフレームに映る対象物の特定の部分を選択することを指す。ラベル付けされたそれぞれの点は keypoint と呼ばれる。

検証

図1中の tip1-tip7、stick1-4 に示す keypoint を 300 フレーム分ラベル付けした。図2は、DLC が検出した鉗子上の各パーツを丸印(●)、人によるラベル付けを十字印(+)で示したものである。動画全体のフレームのうち、学習に使用されていないフレーム 5% をランダムにピックアップして丸印(検出結果)と十字印(正解データ)の位置の比べた結果、ピクセル距離の差分の平均値は 9.2 ピクセルであった。

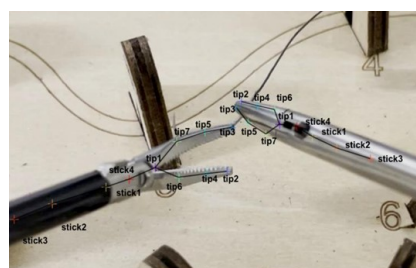


図1:ラベル付けされた鉗子の keypoints

なお、図2中のクロス印(×)は誤検知であると判断され追跡から取り除かれた点を示す。クロス印も DLC がパーツとして検知した点ではあるが、confidence score と呼ばれる検知の信頼性を示す値が低いいため、誤検知であると判断された点を示している。

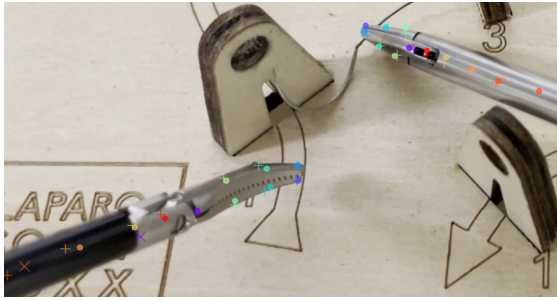


図 2:ラベル付けした keypoints と検出された keypoints の比較

リミテーション

鉗子の検出が不安定になる要因として、大きく分けて 3 つの種類の特徴が確認された。

1. Keypoint が観測不可になるケース

トレーニングキット上のオブジェクト等の遮蔽により keypoint が確認できない、鉗子の回転により keypoint が確認できない、高速移動時の激しいブレにより keypoint が確認できない、などの要因により検出が不安定になることが確認された。

2. Keypoint の見た目上の特徴が少ないケース

図1中の tip1,2,3, stick1,4 は比較的安定した追跡が可能であることが確認された、しかし、stick2,3 には検出位置のずれが発生するケースが多く見られた。原因として、stick2,3 の見た目上の特徴が tip1,2,3, stick1,4 に比べて少なく、かつ stick2,3 のそれぞれの見た目の特徴とラベル付けの位置がお互いに近いことが原因であることが想定される。

3. ラベル付けをした際の背景と追跡を行う際の背景に違いがあるケース

本研究では、図3に示すような 3 種類のトレーニング内容の動画を検証に使用した。DLC の機械学習モデルの学習には、図3左の動画から収集した学習データセットを用いた。機械学習モデルは、学習をおこなったデータと実際に推論(位置計測)を行うデータが

近いほど精度が向上する特徴がある。結果として、図3左の動画を入力した場合には安定した追跡が可能であることが確認されたが、図3中心のオレンジ色の紐がある箇所、図3中心右の青色のオブジェクトがある箇所においては、検出の安定性が大きく低下することが確認された。



図 3:検証に使用したトレーニング内容と背景の見目の違い

対策

比較的安定して計測が可能であった tip1,2,3, stick1,4 のそれぞれの位置の関係(ジョイント)情報を用いて追跡を安定化させる対策が考えられる。例えば、鉗子は剛体であるため、tip1,2,3, stick1,4 それぞれの検出位置の関係が大きき歪むことは考えられない。そのため、検出された keypoints のうち 1 点のみが歪んだ位置に検出された場合には、その点が誤検知であると検知可能となる。また、1 点がトレーニングキット上のオブジェクトによって遮蔽された場合にも、他の keypoints の位置情報を用いて視認できない keypoint の位置を推測可能となる。トレーニングキットの背景ごとの検出精度のブレに関しては、それぞれの背景を満遍なく学習データとして使用することによって解決されることが予測され、更なる改良開発中である。

[発表論文]

1. Fukuta A, et al: Innovative endoscopic surgical skill validation system using artificial intelligence technology: The first joint IPEG/ESPES congress in Sorrento, Italy, July 5-8, 2023.

タイピングスキルを支える手指運動制御則の解明

代表研究者 埼玉県立大学大学院保健医療福祉学研究科 准教授 国分 貴徳
 共同研究者 埼玉県立大学大学院保健医療福祉学研究科 博士後期課程 伊藤 貴紀

【研究の概要】

手部に特徴的な 2 つの構造特性の選択性がタッピングやタイピングの筋活動制御に及ぼす影響を分析した。結果として、MP 関節の側副靭帯の制動作用には共通性が示された。一方、指屈筋腱の作用には多様性が見られた。タッピング中、MP 関節の運動自由度を拘束するために、これらの構造特性を利用した運動選択を行う対象者が確認された。この運動選択は、筋の制御コストを軽減する可能性が示唆された。また、タイピング中では、多くの対象者が MP 関節屈曲位となり、構造特性を選択した制御を選択した。複雑な指運動課題において、MP 関節の自由度拘束による制御の簡略化は、より顕著に行われることが明らかとなった。

【研究経過および成果】

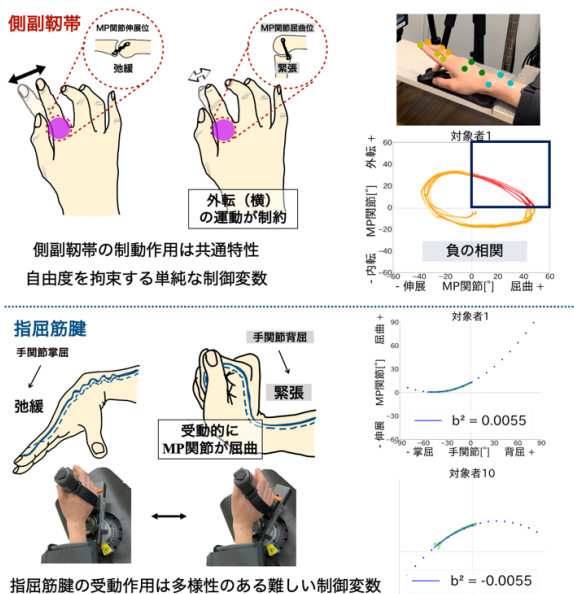
従来の研究では、収縮要素である筋の協調機能からヒトの運動制御則が語られてきた。しかし、非収縮要素である靭帯や腱といった構造体も関節運動の安定化や力伝達に寄与する。これら非収縮要素による作用は筋の制御コストを変化させ得るにも関わらず、制御変数として含まれないまま制御則が述べられてきた。この課題解決を目的に、実験 1-3 を実施した。

実験 1: 側副靭帯による MP 関節の制動作用

健康成人 10 名を対象とし、示指をできるだけ大きく動かす課題を実施した。課題中の中手指節(MP; Metacarpo Phalangeal)関節屈曲角度と外転角度の相関性を評価したところ、全ての対象者で、負の相関を認め、側副靭帯による制動作用は共通特性であることが示された(右図)。運動に貢献する筋の選択や個々の筋線維における筋張力の調整、複数筋の協調作用などといった筋に関する制御変数に対し、側副靭帯による制動作用は関節自由度を拘束する単純な制御変数であると考える。

実験 2: 指屈筋腱による手関節と MP 関節の拘束性

健康成人 10 名を対象とし、手関節の受動背屈課題を実施した。課題中の手関節と MP 関節の関節角度の回帰式における二次の項の係数はばらつく結果となった。腱は筋と骨を接続するため、骨同士的位置変化だけでなく、接続する筋の物理的特性の変化にも影響を受け、長さや張力が変化する。指屈筋腱の受動特性は側副靭帯の制動作用よりも難しい制御変数であることが示唆された。



実験 3: タッピングやタイピングにおける靭帯や腱の構造特性の選択性が筋活動制御に及ぼす影響

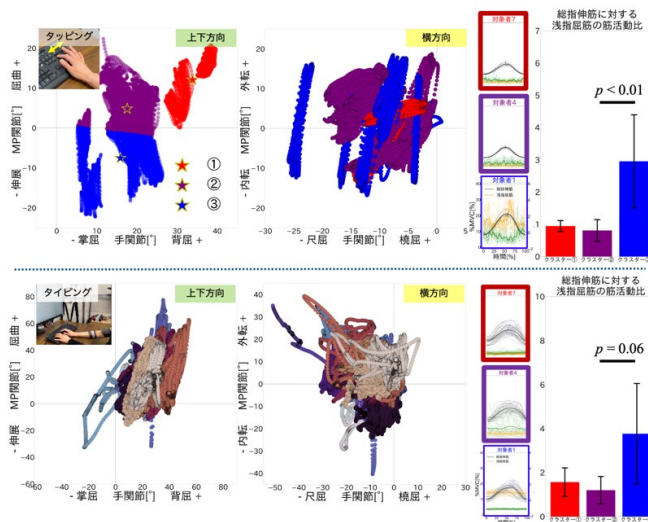
(A) タッピング課題

健康成人 18 名を対象とし、右示指を使ってテンキーの7と9の反復入力課題を実施した。課題中の MP 関節屈曲・伸展角度データに対して、k-means 法を用いたところ、3 つのクラスターに分類された(右図)。クラスター①②では、MP 関節の内転・外転角度を大きく変化させず、手関節と MP 関節の角度変化によって指先を横方向に動かしていた。従って、側副靭帯の制動作用によって MP 関節の外転方向の自由度を拘束した運動を選択していることが示された。また、クラスター③に対して、MP 関節の屈曲を伴うクラスター①②では、総指伸筋に対する深指屈筋の筋活動比は低値であった。従来研究では、腱の伸張作用に伴って指先剛性が増加することや、キーを速く正確に入力するための指先剛性の調整の重要性が示されている。これらのクラスターでは腱の受動特性を用いて手関節を背屈し、MP 関節を受動的に屈曲させた姿勢を選択することで、筋の収縮作用による制御を減少させていたと考えられる。

(B) タイピング課題

(A)と同一の対象者とし、ミスがないようにできるだけ速く入力を行うよう指示し、文章入力課題を実施した。課題中、右示指による入力区間を抽出し、マーカ位置と筋活動を分析した。タッピングと異なり、タイピングでは全対象者の MP 関節角度は屈曲位に収束し、指先の横方向の動きに貢献する手関節と MP 関節の内転・外転方向の動きは連動していた。複雑な指運動課題にはコンテキストの影響や指先の到達位置の変更といった制御の難しさがある。運動選択特性の変化は課題の複雑さを解消するため

に生じた適応であると考えられる。また、タッピングで MP 関節を伸展させていたクラスター③に対して、両課題で MP 関節を屈曲させていたクラスター①②では、総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比は、有意差は認めなかったが低値であった。運動指令が生じて筋収縮が生じるまでの短い時間に、タイピング中の連続的な指先の力調節を筋の収縮作用に依存すると、時間的限界が生じる。そのため、指屈筋腱の受動的な張力変化を効率的に利用して手部の関節運動を制御することで、制御を簡易化していると考えられる。



【学会発表】

1. 伊藤貴紀, **国分貴徳**. 指屈筋腱の受動特性は手指運動を簡易化させ筋活動制御コストを軽減する. 第 17 回 Motor Control 研究会 2023.8
2. Takanori Ito, **Takanori Kokubun**. Non-contractile tissue is an important component in regulating the degree of freedom of fingers during the tapping task. Neuroscience 2023 2023.11
3. 伊藤貴紀, **国分貴徳**. 靭帯・腱の構造特性は手指運動制御を簡易化させ筋活動負担を軽減する. 第 28 回日本基礎理学療法学会学術大会 2023.12

【助成 40-49】

殺菌レーザーとバクテリオファージを融合した狙撃分子の創成

研究者 徳島文理大学薬学部 准教授 阪口 義彦
共同研究者 北里大学医学部 助教 武 晃
岡山大学学術研究院保健学域 准教授 後藤和義
岡山大学学術研究院医歯薬学域 教授 阪口政清
藤田医科大学 教授 大宮直木
東京慈恵会医科大学医学部 教授 岩瀬忠行
東京慈恵会医科大学医学部 准教授 光永真人
京都産業大学総合生命科学部 教授 津下英明

〔研究の概要〕

Clostridioides difficile 感染症 (CDI) は、*C. difficile* が原因で引き起こされる難治性の下痢症・腸炎である。我々は、*C. difficile* を特異的に殺菌する手法として、バクテリオファージ(ファージ)および蛍光プローブ IR700 に着目した。ファージは、特定の細菌にのみ結合する特徴を有する。一方、IR700 は、近赤外光を殺菌レーザーに変換することで、様々な病原体に強い殺菌活性を示す。そこで、我々は、これらの分子を融合させた新しい狙撃分子を考案した。本研究において、まずは、推定したファージ由来結合分子(CDPX、CDPY)を発現・精製した。これらの分子は、*C. difficile* に対して結合が認められたが、菌株間の特異性が認められなかった。その特異性には、複数のタンパク質が関わっていることが示唆された。

〔研究経過および成果〕

Clostridioides difficile 感染症 (CDI) は、*C. difficile* が原因で引き起こされる難治性の下痢症・腸炎である¹。CDI の治療には抗菌薬が用いられるが、再発を繰り返し治療が難渋することがある。抗菌薬では、*C. difficile* のみを特異的に死滅させることは困難であり、腸内の有益な細菌までも死滅させる。そこで、我々は、*C. difficile* のみ特異的に殺菌する手法を開発するために、バクテリオファージ(ファージ)に着目した。ファージは、特定の細菌にのみ結合する特徴を有する。その特異性は、菌株を認識することができるファージ尾部が重要な役割を担っている。一方で、申

請者らが着目した蛍光プローブ IR700 は、近赤外光を殺菌レーザーに変換することで、様々な病原体に強い殺菌活性を示す。そこで、我々は、これらを融合させた新しい狙撃分子を考案した。本研究テーマでは、まずは、*C. difficile* に特異的な結合分子を同定することとした。

C. difficile に特異的に感染するファージ A のゲノム解析から、他のファージのゲノム上の遺伝子との相同性およびタンパク質機能予測解析により^{2,3}、2 個の遺伝子 (*cdpX* および *cdpY*) がファージ尾部の結合分子をコードしていると推察した。そこで、これらの遺伝子を人工合成し、大腸菌に組換えタンパク質として

発現し、アフィニティーカラムにより可溶性タンパク質として精製することができた。

精製 His-CDPX と His-CDPY について、*C. difficile* または粗細胞壁に対する結合性を Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) およびウエスタンブロット法により解析した。両タンパク質ともに *C. difficile* PCR-リボタイプ (RT) 027 株に対して濃度依存のおよび時間依存的に結合が認められた。また、ウエスタンブロット法による解析では、His-CDPX は、*C. difficile* RT 027 またはその粗細胞壁に対して結合することが判明した。一方で His-CDPY は、*C. difficile* RT 027 に対して結合性を示したが、粗細胞壁においては、上清および沈渣ともにシグナルが検出されなかった。同様に、2 種類の結合タンパク質について *C. difficile* の他の菌株 (RT 001、RT 017、RT 018、RT 027、RT 060) に対する結合性も調べたが、いずれも株間に対する結合の有意差が認められなかった (図 1)。このことは、*Bacillus subtilis* ファージおよび *Lactococcus lactis* ファージで報告されている尾部の 3 次元構造解析から、ファージの尾部先端は複数のタンパク質で構成することで特異性を示すことが予想され、1 種類のタンパク質では特異性が低いことが推察される^{5,6}。そこで、さらに *C. difficile*

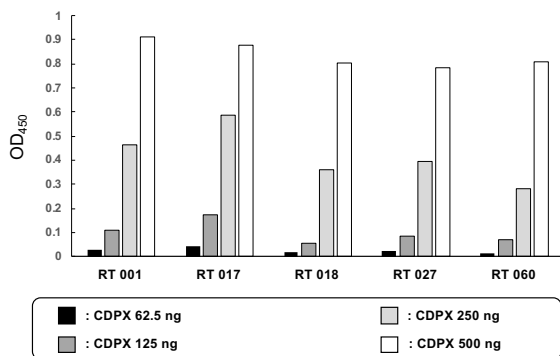


図 1 ELISA による結合分子の *C. difficile* に対する結合性

に特異的な結合分子を同定するため、隠れマルコフモデルを用いた遺伝子機能予測解析を行うと、*C. difficile* ファージ A のゲノム上には、新たに細菌の結合に関与する遺伝子群が推定された。今後、これらの遺伝子を個々に発現・精製し、*C. difficile* への結合性を調べる必要がある。*C. difficile* に対して特異的な結合分子を同定した後、本結合分子との IR700 の連結を検討し、近赤外光による *C. difficile* への殺菌活性を検証する。今回実施した研究成果から得られた問題点を解決することにより、*C. difficile* 感染症の原因となる *C. difficile* を特異的に殺菌する狙撃分子の創出が期待される。

〔参考文献〕

- Gotoh, K., Sakaguchi, Y., Kato, H., Osaki, H., Jodai, Y., Wakuda, M., Také, A., Hayashi, S., Morita, E., Sugie, T., Ito, Y., Ohmiya, N., Fecal microbiota transplantation as therapy for recurrent *Clostridioides difficile* infection is associated with amelioration of delirium and accompanied by changes in fecal microbiota and the metabolome. *Anaerobe*, 73, 102502, 2022.
- Oliva, M. A., Martin-Galiano, A. J., Sakaguchi, Y., Andreu, J. M., Tubulin homolog TubZ in a phage-encoded partition system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109(20), 7711–7716, 2012.
- Sakaguchi, Y., Hayashi, T., Kurokawa, K., Nakayama, K., Oshima, K., Fujinaga, Y., Ohnishi, M., Ohtsubo, E., Hattori, M., Ogma, K., The genome sequence of *Clostridium botulinum* type C neurotoxin-converting phage and the molecular mechanisms of unstable lysogeny. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102(48), 17472–17477, 2005.
- Farley, M. M., Tu J, Kearns, D. B., Molineux, I. J., Liu, J., Ultrastructural analysis of bacteriophage Φ29 during infection of *Bacillus subtilis*, *J. Struct. Biol.*, 197(2), 163–171, 2017.
- Spinelli, S., Veessler, D., Bebeacua, C., Cambillau, C., Structures and host-adhesion mechanisms of lactococcal siphophages, *Front. Microbiol.*, 5(3), 1–13, 2014.

【助成 40-50】

慢性疼痛患者に対するストレス評価方法の開発と生活習慣病のリスク判定への応用

代表研究者 東京都健康長寿医療センター研究所 非常勤研究員 守屋正道

〔研究の概要〕

本研究では、慢性疼痛患者のストレスを NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) を用いて評価可能か検証すると同時に、既に社会実装されているディープニューラルネットワーク(DNN)モデルを用いて認知機能を推定した。ストレスは NIRS から得られた酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)の左右偏奇性から laterality index at rest (LIR) を算出し評価した。認知機能は、初診時の血液データから DNN モデルを適用し推定 MMSE 値を算出した。さらに、本邦の慢性疼痛研究に用いられている共通質問紙との関連性を調査した。NIRS と質問紙との統計学的な関連はなかった。推定 MMSE 値は MCI のカットオフ値を下回っており、さらに質問紙の結果が不良な者ほど推定 MMSE は低値であった。

〔研究経過および成果〕

【背景】

慢性疼痛患者にとっての痛みは、存在そのものがストレスとなり不安などの心理的影響を受け、生活の質(quality of life; QOL)を低下させる。そのため、痛みによるストレスは QOL の低下、更には ADL を低下させ痛みの悪化要因となりうると考えられる。ADL が低下するこの一連のプロセスを考慮すると、痛みが生活習慣病のリスクになる可能性もある。そこで本研究の目的は、①痛みによるストレスを患者自身が計測・管理する評価システムを確立できるか検証すること、②痛みが生活習慣病、特に認知症のリスクとなるかを検証することである。

【方法】

対象は当院のペインクリニック内科に筋筋膜性腰痛症をはじめとする身体の様々な部位に慢性疼痛を患って受診した 114 例(男性 48 例, 女性 66 例)である。NIRS 計測はアステム社 Hb133 を使用し、国際脳波 10-20 システム Fp1 と Fp2 に相当する前頭前野をターゲットとした。測定は同意を得られた慢性疼

痛患者に対して実施し、空調設備を備えた静かな診察室で、背臥位安静時 2 分のデータを測定した。取得した酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)の左右偏奇性から LIR を算出した。

$$LIR = \frac{(\sum t \{(\Delta oxyRt - \Delta oxyRmin) - (\Delta oxyLt - \Delta oxyLmin)\})}{(\sum t \{(\Delta oxyRt - \Delta oxyRmin) + (\Delta oxyLt - \Delta oxyLmin)\})}$$

正の LIR (LIR>0)は安静時において右前頭前野が、負の LIR (LIR<0)は安静時において左前頭前野の神経活動が活発であることを示し、正の LIR はストレス状態(交感神経活動)を、負の LIR はリラックス状態(副交感神経活動)を反映している¹⁾。

認知機能は、血液検査データをすでに社会実装されている DNN モデルに投入し MMSE 値を推定し評価した²⁾。多層フィードフォワード DNN は、H2O オープンソース機械学習ライブラリを使用した。入力層は対象者の年齢と血液データで構成し、2 つの隠れ層を構造した。

さらに、NIRS で計測したストレスデータおよび DNN で用いた認知データと、痛みの主観的な評価 8 種類の質問紙(厚生労働省慢性の痛み研究班参加 31 大学・医療機関共通)との関連性を調査した。

【結果】

まず, NIRS を測定した患者 16 例のうちデータが安定して取得できた 10 例の左右の oxy-Hb から LIR を算出し (Fig. 1), 質問紙との相関解析をしたが有意な関連は示されなかった. 次に, 全ての慢性疼痛患者 114 例の初診時の血液データから DNN モデルを適用し推定 MMSE 値を算出したところ, 中央値は 26.8 点と MCI のカットオフ値を下回っていた. カットオフで 2 群に分類すると, MCI 群 (<27 点) が 62 例 (54.4%), non MCI 群 (≥ 27 点) が 52 例 (45.6%) であり慢性疼痛患者のうち半数以上が MCI と推定された. 質問紙との相関解析を行ったところ, non MCI 群の推定 MMSE 値と BPI および PDAS, Locomo に有意な相関を認めた (Fig. 2). このことから, 痛みの強さ, 痛みによる日常生活への影響, 身体機能低下による移動能力障害の程度と認知機能との間に何らかの関係がある可能性を示唆した.

【結論】

慢性疼痛が日常生活活動に影響し全身性の代謝障害を引き起こすことによって, 認知障害を呈する可能性を示唆した.

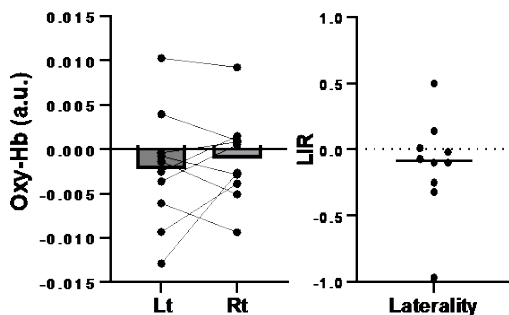


Fig. 1 Average value of left and right oxy-Hb at rest and LIR

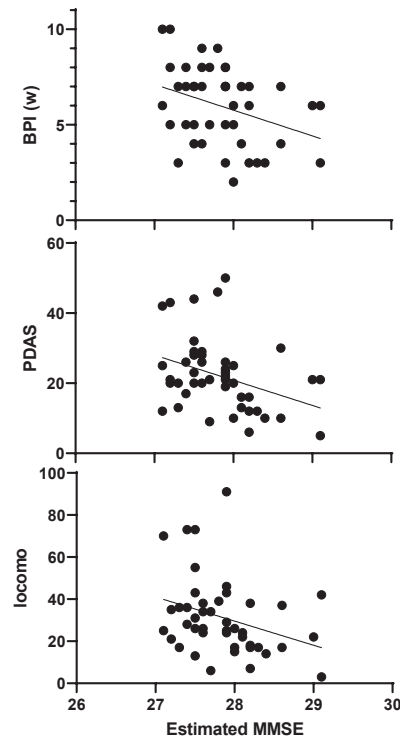


Fig. 2 Scatter plot of estimated MMSE and assessment battery

【参考文献】

1. Ishikawa W, et al. Correlation between asymmetry of spontaneous oscillation of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: a near-infrared spectroscopy study. *J Biomed Opt.* 2014;19(2):027005.
 2. Sakatani K, et al. Deep Learning-Based Screening Test for Cognitive Impairment Using Basic Blood Test Data for Health Examination. *Front Neurol.* 2020;14:11:588140.
〔発表論文〕
- Moriya M, et al. Estimation of cognitive impairment in chronic pain patients and characteristics of estimated Mild Cognitive Impairment. *Front Neurol.* 2024. (in press)

【助成 40-51】

皮膚表面形状の計測方式の差が手の動作認識の精度に及ぼす影響についての検証

研究者 東京電機大学理工学部 助教 趙 崇貴

〔研究の概要〕

筋肉・腱の伸縮、骨の変位などの体組織活動によって変化する皮膚表面形状(以下、皮膚変形)に基づいて手の動作を認識し、人の動作意図を検出する手法が提案されている。これまでに皮膚変形は様々な計測方式(力、距離、歪みセンサなど)により取得されてきたが、計測方式ごとの得手不得手は未だ明確になっていない。そこで本研究では、計測方式の特性により得られる皮膚変形に差が生じるか、その差が認識精度に影響を与えるか検証した。実際に距離と力で同時に皮膚変形を計測可能なユニットを開発し、計測値に基づく手関節角度推定の精度を検証した結果、特性の異なる距離と力の計測値を複合的に用いた場合に最も推定精度が高くなることが確認された。

〔研究経過および成果〕

本研究では図1に示すよう、先行研究でも広く用いられている距離と力により皮膚変形を計測可能なセンサユニットを開発した(図 1)。開発したユニットは距離センサ(SG-105, Kodenshi)、力センサ(FSR402, Interlink Electronics)、スポンジ、PLA プレートとマウント、反射シートにより構成される。力センサは筋隆起などによる皮膚変形により PLA プレートにかかる力を、距離センサはその力による PLA プレートの変位をそれぞれ計測する。図 2 はプレートの変位と各センサの出力電圧の関係を示しており、変位が小さい範囲では力センサが、変位が一定以上大きければ距離センサがそれぞれ反応し皮膚変形を広い範囲で計測可能なことが確認できる。

センサごとの特性が計測される皮膚変形に影響を与える場合、徐々に変化する皮膚表面形状を連続的に計測する必要がある、関節角度推定の精度が変化すると考えた。そこで、皮膚変形に基づく掌背屈動作時の手関節角度推定の精度を検証する実験を実施

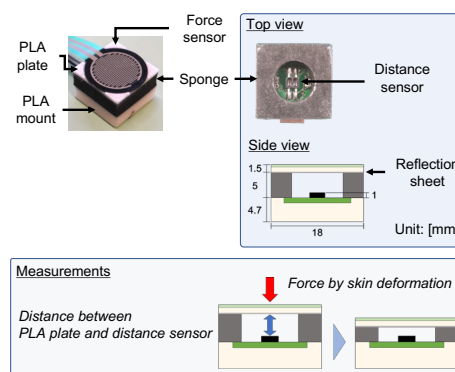


Figure 1 Developed sensor unit

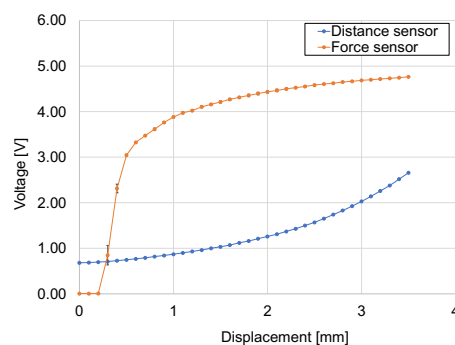


Figure 2 Relationship between displacement of the PLA plate and sensor outputs.

した。5名の被験者を対象に、掌背屈動作の主導筋・拮抗筋である尺側手根屈筋と長橈側手根伸筋上に

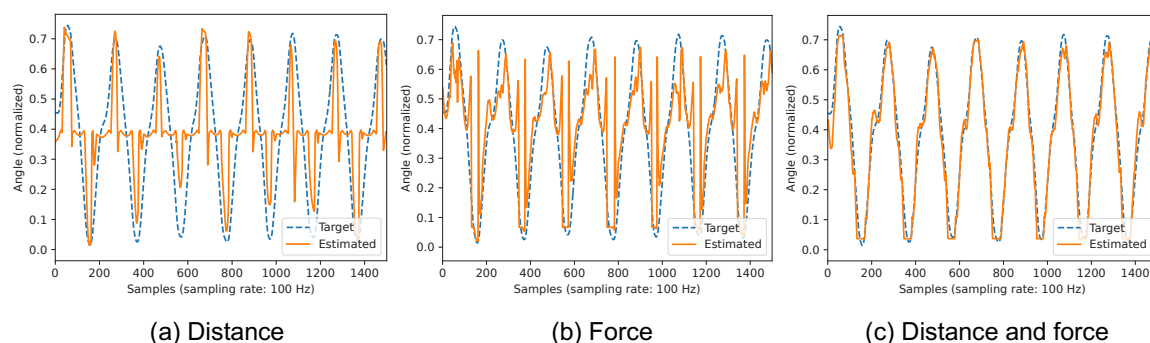


Figure 1 Example of estimated joint angles at the motion speed of 120 bpm

開発したセンサユニットを 2 チャンネルそれぞれベルトによって固定し、動作時の皮膚変形を計測した。動作速度によって皮膚変形の傾向が異なると考え 60bpm(遅い動作)と 120bpm(早い動作)の異なるテンポに合わせて動作を実施する動作条件を設定した。計測したデータに対し、距離のみ、力のみ、距離と力の複合の 3 種類の特徴ベクトルをそれぞれの入力とした MLP-NN によって、手関節角度を推定した。

同一速度内で学習・推定を実施し推定精度を決定係数によって評価した結果、60bpmと120bpmの双方で、距離と力の複合の特徴ベクトルが 0.93 以上の精度となり、距離もしくは力のみを単独で用いる場合に比べ 0.15 以上精度が向上した。図 3 に 120bpmでの推定結果の例を示す。距離および力を単独で用いる場合は動作の起始もしくは最大可動域近辺で推定が不安定になり、距離と力を複合的に用いる場合は、可動域全体で安定して推定できていることが確認できる。また、学習とは異なる速度を推定対象とした精度は、120bpm で学習した際の距離と力の複合の特徴ベクトルが 0.86 と最も高い値となった。

以上の成果^[発表論文 1]より、同じ動作であっても動作速度によって皮膚変形の量およびパターンが変化するため、それらの変化を細かく取得するためには、異なる特性のセンサを組み合わせた計測方式を採用す

ることが、推定・認識に有効であることが示された。今後は、開発したセンサユニットの改良に加え、どのような動作条件で大きく変化量とパターンが変化するか、光学式のモーションキャプチャなどにより調査し、動作認識における皮膚変形の有用性をより密に検証していく。

[発表論文]

1. Sung-Gwi Cho, Shinnosuke Odan, Masahiro Yoshikawa, and Kengo Ohnishi, "Wrist Joint Angle Estimation Based on Simultaneous Measurement of Distance and Force on the Forearm," in *Proc. of SICE Annual Conference (SICE2023)*, pp.964-969, 2023.
2. 岡安海斗, 趙崇貴, 大西謙吾: "皮膚変形に基づく手関節動作認識における前腕姿勢変化の影響を考慮した曲げセンサ貼り付け方向の検討", *The 7th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs (ROOB2023)*, 2023.
3. 長谷川賢太郎, 趙崇貴, 大西謙吾: "準備度合いの推定に向けた棒反応時間測定テストにおける前腕の FMG 解析", *The 7th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs (ROOB2023)*, 2023.

【助成 40-52】

寒冷誘発性血管収縮の新規メカニズム解明 -塩素イオンチャネル TMEM16A に着目して-

代表研究者 新潟医療福祉大学 健康科学部 健康スポーツ学科 講師 藤本 知臣
共同研究者 筑波大学 体育系 助教 藤井 直人

〔研究の概要〕

本研究では、局所皮膚寒冷刺激時のヒトの皮膚血管収縮反応における塩素イオンチャネル TMEM16A の機能を検討した。健康な成人男女 7 名を対象に、前腕部真皮（皮下 1 mm）に、2 本のマイクロダイアリスのチューブを挿入し、5%ジメチルスルホキシド溶液（Control 部位）および 2 mM ベンズブロマロン溶液（TMEM16A 阻害薬、Benzbromarone 部位）を投与した。その後、局所冷却装置を用いた 20 および 10℃の局所冷却（各 20 分）を行い、マイクロダイアリス処置部の皮膚血流量（レーザードップラー血流計）を測定した。その結果、Control 部位と比較して Benzbromarone 部位で 20℃の局所冷却時の皮膚血管収縮反応は減弱したが（ $P < 0.05$ ）、10℃の局所寒冷刺激に対する反応には差がなかった。これらより、TMEM16A は中程度の寒冷刺激（20℃）に対する皮膚血管収縮反応には関与するものの、より強い寒冷刺激（10℃）には関与しない可能性が示唆された。

〔研究経過および成果〕

ヒトは寒冷環境下において皮膚血管収縮を引き起こすことで放熱を抑制し、体温を維持する。この反応には、主にアドレナリンおよびニューロペプチド Y の放出が関与していることが知られているが（Johnson et al. 2014）、皮膚の寒冷刺激によってどのようにアドレナリンやニューロペプチド Y の放出量が調節されているかについては不明な点が多く残されている。

2008 年に新たにカルシウム活性化塩素イオンチャネルの 1 種として認められた TMEM16A は、血管平滑筋や器官平滑筋などに存在するイオンチャネルである。これまで、血管の収縮・弛緩における TMEM16A の役割についていくつかの研究で報告されているが（Tammaro 2023）、寒冷刺激に対するヒトの皮膚血管収縮反応にどのように関与しているかは明らかでなかったことから、本研究では、局所皮膚寒冷刺激時のヒ

トの皮膚血管収縮反応における塩素イオンチャネル TMEM16A の機能を検討した。

健康な成人男女 7 名（年齢：28±5 歳、身長：165.1±6.8、体重：64.6±11.2）を対象として実験を行った。実験では、前腕部真皮（皮下 1 mm）に、計 2 本のマイクロダイアリスチューブを挿入し、1) リンゲル液を用いて作成した 5%ジメチルスルホキシド（DMSO）溶液（Control 部位）、および 2) リンゲル液および 5%DMSO を用いて作成した 2 mM ベンズブロマロン溶液（TMEM16A 阻害薬、Benzbromarone 部位）を $2 \mu\text{L min}^{-1}$ でそれぞれ投与した状態で 60-90 分の安静を維持した。その後、5 分間の baseline 測定を行い、局所冷却装置（ADT1045, Advance, Japan）を用いて 20 および 10℃の局所冷却（各 20 分）を行った。さらに、最大血管拡張反応を測定するために 25 mM ニトロプルシド溶液（SNP）を投与して 43℃の

局所加温を行った。

測定項目は、皮膚血流量、局所皮膚温、動脈血圧、心拍数などとした。また、皮膚血流量および動脈血圧から皮膚血管コンダクタンス [CVC (皮膚血管の拡張度合の指標, 皮膚血流量/平均動脈血圧)] を算出した。局所の皮膚血流量には部位差が存在するため、各部位において最大皮膚血管拡張時を 100%とした相対値を算出した。さらに、冷却時の皮膚血管収縮の程度は冷却直前の 5 分間の baseline 測定時のデータを基準とした相対値で評価した。

1 名の代表的な対象者における CVC の経時変化を図 1 に示す。CVC は局所冷却によっていずれの部位においても baseline から徐々に低下した。これは、局所冷却による皮膚血管収縮が生じていることを示している。

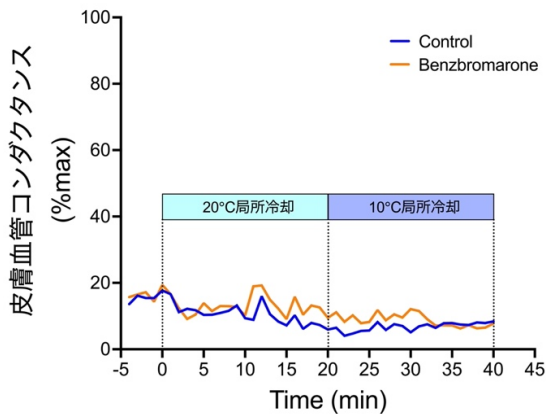


図 1. 1 名の対象者における CVC の経時変化

また、20°Cの局所冷却時における CVC の baseline からの低下率を図 2 に示す。20°Cの局所冷却時には、CVC の低下率は Control 部位よりも Benzbromarone 部位で高値を示した ($P = 0.0156$)。その一方で、10°Cの局所冷却時には、CVC の低下率は部位間に差は見られなかった ($P > 0.05$)。

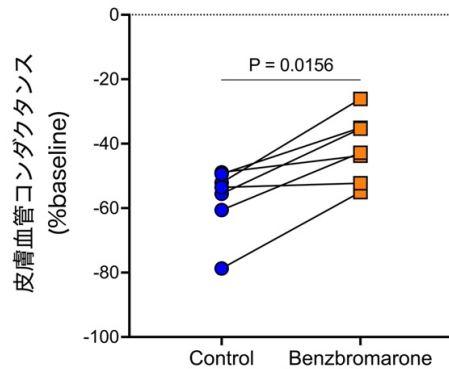


図 2. 20°Cの局所冷却時における CVC の低下率

これらの結果は、塩素イオンチャネル TMEM16A が中程度の寒冷刺激 (20°C) 時に生じる皮膚血管収縮反応に関与するが、より強い冷却刺激 (10°C) 時の皮膚血管収縮には関与しない、あるいは別のメカニズムが混在する可能性を示している。本研究の成果は、ヒトの体温調節における皮膚血管調節の新たなメカニズムが存在する可能性を示唆するものであり、今後はデータ収集の継続、他の刺激による皮膚血管収縮反応への関与、他のイオンチャネルなど (TRP チャネルなど) との相互作用について検討することで、ヒトの体温調節における皮膚血管調節の全容解明に寄与すると考える。

[参考文献]

1. Johnson JM, Minson CT, Kellogg DL. Cutaneous vasodilator and vasoconstrictor mechanisms in temperature regulation. *Compr Physiol.* 4(1):33-89, 2014.
2. Tammaro P. The TMEM16A anion channel as a versatile regulator of vascular tone. *Sci Signal.* 16(811):eadk5661, 2023.

[発表論文]

現在、学会発表準備および投稿準備中である。

【助成 40-53】

緑内障治療に向けた微弱電流刺激による眼球の若返り

研究者 九州大学大学院農学研究院(前所属 愛知医科大学医学部) 准教授 池上啓介

〔研究の概要〕5～8行程度

本研究では加齢などに伴う眼の疾患の治療に役立てるため、マウス眼球や網膜を用いて微弱電流刺激により眼球機能が亢進し、眼球細胞が若返るかを検証することを目的とした。微弱電流刺激装置を改良し、マウス眼球や細胞、培養網膜を刺激できる評価系を開発した。眼球線維柱帯細胞への刺激で細胞増殖能の亢進傾向が確認されたが、単回刺激ではマウス眼圧を抑制する効果は確認できなかった。現在網羅的遺伝子発現解析により分子レベルでの若返りを検証中である。また、生体における長期的反応は全く分かっていないため眼圧制御や緑内障予防に向けて解明しなければいけない課題である。

〔研究経過および成果〕

“緑内障”は中途失明原因第一位の疾患で、世界では1億人近くが罹患しているといわれ、予防や根治の方法が未だ見つかっていない。網膜神経節細胞からなる視神経が傷害され、加齢に伴い増加する。眼球内の圧力(眼圧)が緑内障の主な原因で、近年増加しているといわれる高眼圧を伴わない正常眼圧緑内障も原因が不明なことが多く減圧抑制が主な対処療法となる。進行が遅く自覚症状が少ないため、気づいた時には悪化している場合が多く、高齢化に伴い新たな予防方法や検査方法の開発および治療法の開発が重要な課題になっている。

眼圧は毛様体からの眼房水の産生と線維柱帯からの排出のバランスで生み出されているが、加齢に伴いそれらの調節機能は低下し、眼圧が上昇しやすく、視神経も障害されやすくなる。これらから、我々は外的環境の調整で加齢に伴う眼圧リズムの乱れや視神経障害といった老化を抑制または若返り効果が期待できるのではないかと考えた。再生誘導や細胞活性化の外的刺激の一つに微弱電気刺激が知られてい

るが、微弱電流刺激は筋再生を加速させたり、神経の軸索伸長を促したりする(Liu et al. Alzheimer's Research & Therapy 2020)ことが知られているため、本研究ではマウス眼球や網膜組織、初代培養細胞を用いて微弱電流刺激により眼房水産生排出部位の機能が亢進し、眼圧リズムの乱れが改善され網膜神経節細胞(視神経)の細胞死が抑制または若返るかの検証を試みた。

1) 微弱電流刺激装置の開発と検証

本研究では、ヒト用の治療用 ESPURGE(伊藤超短波株式会社、図 1)の電極で眼球を直接挟み込み微弱電流刺激する方法と、その電極を白金線を介して細胞培養ディッシュ(6well)に繋ぎ、培養細胞さらに



図1 ESPURGE

はそこに入れたカルチャーインサート上で培養するマウス組織を微弱電流刺激(10 μ A, 60 分)できる評価系を開発した。申請者の異動に伴い、検証が遅れており現在検証途中である。

2) 微弱電流刺激による眼球細胞への影響

加齢による眼圧上昇は眼房水排出部位である線維柱帯の線維化などの老化が原因ではないかと考えられる。そこで、申請者が保有する線維柱帯細胞の継代を繰り返し増殖効率が低下した老化細胞を作成する。そこに微弱電流刺激(10 μ A, 60 分刺激)を負荷し、その後の細胞増殖の変化を刺激後 24 時間後と 48 時間後に Cell counting kit-8 (Dojindo) を用いて測定した。その結果、現在 N = 1 であるが微弱電流刺激した方が細胞増殖効率が良いという傾向が観察できた。また、微弱電流刺激後 6 時間後に RNA シーケンシング (RNA-seq) により網羅的時系列解析 (シーケンス受託中) を行い、微弱電流への応答性の詳細を明らかにする予定である。

3) 微弱電流刺激によるマウス眼圧への影響

マウスやヒトは昼行性夜行性関係なく夜間(暗期)に眼圧が上昇し、高眼圧の緑内障患者でも夜間眼圧抑制治療が鍵となる。そこで、微弱電流を麻酔下の野生型 C57BL/6J マウスの眼球に明期に 1 時間刺激し、夜間の眼圧上昇を抑制できるかをポータブル眼圧測定器 TonoLab を用いて検証した。その結果、1 日一回の刺激では眼圧上昇抑制効果は見られなかった。刺激時間や頻度を変えた検証が必要であろう。

4) 微弱電流刺激による老齢緑内障眼球への影響

申請者の実験で網膜の概日時計遺伝子 Bmal1 が特異的に欠損したマウス(cBmal1KO)は加齢に伴い

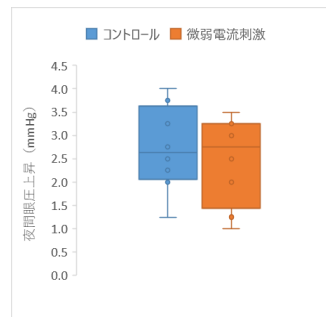


図1 マウスの夜間の眼圧上昇に微弱電流単回刺激が及ぼす影響。有意な差はなかった (t-test, $p < 0.05$)

網膜神経節細胞が減少することを発見した。視覚機能の低下を確認するため視覚機能テストを実施したところ有意に低下していた。

このマウスと、加齢に伴い緑内障様症状を呈す DBA/2J マウスおよび 1 年齢を超えると視神経が減少し始め緑内障様症状になる野生型マウスを用いて、眼球に若年期から微弱電流刺激を定期的に刺激し眼圧変動をモニタリングしながら視神経障害抑制効果を生体レベルで検証していく予定である。

5) 考察

本研究は世界に先駆けて微弱電流の眼球機能改善効果を細胞と実験動物を用いて検証するものであり、緑内障の予防・治療法の確立にも期待でき、将来的には微弱電流(または電子)を発生するようなコンタクトレンズ型緑内障治療の確立に繋げられる基盤研究を実施する。

微弱電流刺激を用いた緑内障治療予防法はこれまで確立されておらず、これまでは生活習慣の改善や、眼圧抑制剤の薬理的対処療法が主であったが、手術を伴わない微弱電流刺激により視神経障害を抑制、さらには視神経再生できるのであれば、失明による生活の質(QOL)低下を劇的に改善できる可能性があるため本研究は非常に意義がある。

[発表論文]

なし

【助成 40-54】

柔道の初心者における頭部外傷を予防する安全な大外刈りの構築

研究者代表者 びわこ成蹊スポーツ大学スポーツ学部 教授 林 弘典
共同研究者 石川工業高等専門学校機械工学科 准教授 穴田賢二
共同研究者 大阪教育大学表現活動教育系 准教授 石川美久
共同研究者 大阪体育大学体育学部 准教授 生田秀和

〔研究の概要〕

日本柔道において、大外刈りで投げられたことによる頭部外傷が深刻な問題となっている。全日本柔道連盟の安全対策によって、死亡事故や急性硬膜下血腫等の重篤な頭部外傷は減少したが、未だに死亡事故や重篤な頭部外傷が発生しており、脳震盪も報告されている。先行研究では、大外刈りによる頭部外傷の危険性を検証した研究が非常に多く、海外でも同様の研究が行われている。そのために、どのような大外刈りの投げ方が頭部外傷の危険を高めるのか、どのような投げ方が安全であるかは解明されていない。そこで、本研究は、①一般的な大外刈り(Osoto-gari)、②頭部外傷の危険があると想定した投げる者が身体を捻らない大外刈り(Hineri-nashi)、③頭部外傷を予防する大外刈りに代わる大外落とし(Osoto-otoshi)を比較した。その結果、③の大外落としの頭部最大角加速度が最も低かったことから、最も頭部外傷の危険が低い技であることが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

1. 研究経過

【予備実験】

2023年3月7日～3月10日、大阪体育大学において予備実験を実施した。被験者は男性柔道熟練者10名(年齢 19.9 ± 0.74 歳、身長 169.8 ± 2.90 cm、体重 73.2 ± 5.69 kg、頸部前屈筋力 130.3 ± 31.2 N、段位 1.8 ± 0.42 段)とした。被験者を投げる者は大外刈りの得意な男性柔道熟練者1名(年齢20歳、身長174cm、体重81.6kg、初段)とした。投げる者は、①一般的な大外刈り(Osoto-gari、図1)、②頭部外傷の危険があると想定した投げる者が身体を捻らない大外刈り(Hineri-nashi、図2)、③頭部外傷を予防する大外刈りに代わる大外落とし(Osoto-otoshi、図3)でヘッドギアを付けた被験者をそれぞれ3回マットの上

で投げた。その際、加速度計(MVP-RF8-GC、MicroStone社)で頭部角速度を測定した。



図1 Osoto-gariの様子



図2 Hineri-nashiの様子



図3 Osoto-otoshiの様子

【本実験】

2023年9月6日～9月8日、大阪体育大学において本実験を実施した。被験者は男性柔道熟練者13名(年齢 19.2 ± 1.09 歳、身長 170.8 ± 3.85 cm、体重 72.1 ± 8.27 kg、頸部前屈筋力 189.0 ± 45.13 N、段位 1.8 ± 0.44 段)とした。被験者を投げる者は大外刈りの得意な男性柔道熟練者1名(年齢21歳、身長174cm、体重77.4kg、二段)とした。予備実験と同様に、3種類の大外刈り(①Osoto-gari、②Hineri-nashi、③Osoto-otoshi)で被験者をそれぞれ3回マットの上で投げた。その際、加速度計(MVP-RF8-GC、MicroStone社)で頭部角速度を、慣性式モーションキャプチャ(MVN Analyze、Movella社)で頭部伸展角度を、筋電計(ワイヤレスEMG Delsys Trigno システム、DELSYS社)で頸部筋力の筋活動を測定した。

2. 成果

【予備実験】

3種類の大外刈り(①Osoto-gari、②Hineri-nashi、③Osoto-otoshi)について、被験者のX軸回りの頭部最大角加速度(図4)、頭部最大合成角加速度(図5)を比較した。いずれの頭部角加速度においても、③Osoto-otoshiが最も低く、頭部外傷の危険が低い技であることが分かった。また、②Hineri-nashiは①Osoto-gariよりも値が高かったが有意な差がなかった。

①Osoto-otoshiでは、投げる者が投げられる者の軸足を刈らずに、投げられる者を捻るように投げていることによって、投げられる者は後方へ倒れるスピードが低下する(偶力が弱まる)ためであると考えられる。①Osoto-otoshiを導入することによって、頭部外傷を予防できることが示唆された。

②Hineri-nashiと①Osoto-gariに有意な差が見ら

れなかった原因は、投げる者が②Hineri-nashiの投げ方に習熟していなかったためであると考えられる。ただし、両者とも危険な技であることが確認できた。

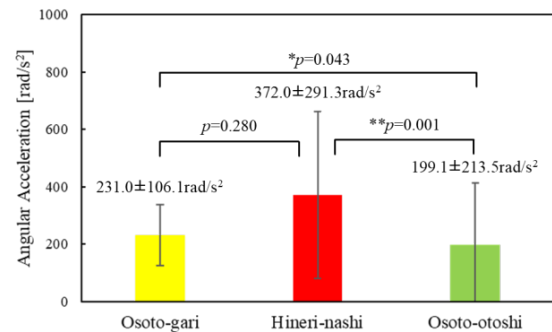


図4 X軸回りの頭部最大角加速度の比較

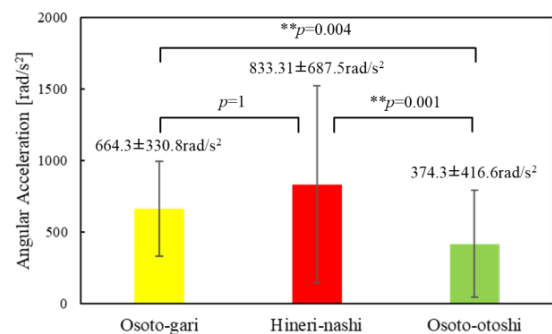


図5 頭部最大合成角加速度の比較

【本実験】

現在、被験者の頭部角速度、頭部伸展角度、頸部筋力の筋活動を分析している。

〔発表論文〕

1. 林弘典, 石川美久, 生田秀和 (2023) 柔道の頭部外傷を引き起こす大外刈りの解明. 日本体育・スポーツ・健康学会第73回大会(京都・同志社大学).
2. 林弘典, 穴田賢二, 石川美久, 生田秀和 (2023) 柔道の頭部外傷を予防する大外刈りに代わる大外落の検討. 日本武道学会第56回大会(大阪・大阪教育大学).

【助成 40-55】

腱の三次元培養技術と力学的収縮を組み合わせた抗運動器治療戦略

同志社大学 スポーツ健康科学部 助教 土屋吉史

〔研究の概要〕

加齢は体重や脂肪量増加だけでなく筋骨格系組織の機能を惰弱にし、QOL 低下をもたらす。本研究課題では、「腱の臓器連関特性」に着目し、これを上手く利用することで筋肉へ負荷をかけることなく、加齢に伴う筋量低下に効果的な戦略構築に挑戦した。まず、エストロゲン減少をもたらす閉経後女性を模倣したマウスを作出し、筋肉と腱組織から細胞をそれぞれ単離した。その後、腱細胞の存在下で、筋芽細胞の増殖能がどのように変化するかを観察した。その結果、エストロゲンを減少させたマウス由来腱細胞の存在下では細胞増殖の指標である EdU 陽性の筋芽細胞数が減少していたことが示された。これは、エストロゲンが筋-腱臓器連関における筋芽細胞増殖に重要であることを示唆するものであった。

〔研究経過および成果〕

加齢に伴う筋量や筋力が減少するサルコペニアは、運動器機能低下症の主要因であり QOL 低下をも誘発する。そのため、サルコペニアを抑える試みは、心身ともに健康を維持する上で欠かせない。さらに、昨今の COVID-19 感染拡大の影響による外出機会の減少・活動量の低下が問題視されており、ますます運動器の惰弱性を軽減する研究の発展が求められている。しかし、筋量や骨量の減少により運動器に悩みを抱える高齢女性などは、効果の現れにくい低用量の運動を繰り返さざるを得ない現状にある。そこで本研究課題では、これまで殆ど治療対象にされてこなかった臓器「腱」に着目し、腱の臓器連関特性を上手く利用することで筋肉へ負荷をかけることなく、サルコペニアの進行を遅らせる治療戦略構築を目的とした。

【成果 1: 後高齢女性モデルマウスの作出】

高齢女性は、女性ホルモン（主にエストロゲン）が著しく低下することで、体重および脂肪量の増加、筋

骨格系臓器の機能低下などを呈することが知られている。本研究では閉経後の高齢女性を模倣したマウスを作出することで、ヒトでは解明することのできないこれらメカニズムの解明に迫る。このためまず、エストロゲンが減少する閉経後女性モデルマウスを正確に作出することが求められた。

閉経後女性モデルマウスは 6 週齢の雌 C57BL/6 wild-type マウス (SLC, Shizuoka, Japan, n = 4) の卵巣切除 (ovariectomy: OVX) 手術により作出された。OVX 手術は、3 種混合麻酔を用い麻酔下にて行われた。まず、腹部を 1 cm 程度切開し、子宮の末端にある卵巣を完全に切除した。その後切開部を縫合し、覚醒までモニタリングを行った。対照群は、卵巣を切除しない Sham コントロールとした (n = 4)。OVX



図 1. 子宮サイズ
左: 通常のマウスの子宮
右: 卵巣切除マウスの子宮

後 24 週間までは通常飼育を行い、その後解剖を実施した。その際、子宮サイズと体重、そして内臓脂肪

量を測定した。その結果、OVX マウスの代表的な表現型である、子宮サイズの著しい減少が確認された(図 1)。また、体重および内臓脂肪量も OVX マウス群で大幅に増加していた (data not shown)。これは、本研究で実施した OVX 手術が、ヒトの閉経後女性を模倣し得ることを示している。

【成果 2: 細胞の単離】

OVX マウスの腱の臓器連関特性を理解するために、*in vitro* の実験を行った。まず、解剖で得られた筋および腱組織からそれぞれ筋芽細胞と腱細胞の単離・初代培養を行った。筋組織には筋芽細胞だけでなく様々な細胞が混在しているため、先行研究の方法に基づき CD56 磁器ビーズ抗体を用いた細胞単離法にて、筋芽細胞を特異的に単離した。次いで、単離した細胞の純度を確認を、筋芽細胞の指標である Desmin と、線維芽細胞の指標である TR-ER7 抗体を用いた蛍光免疫染色にて行った(図 2)。その結果、両群共に筋芽細胞分画において、筋芽細胞の指標である Desmin の陽性細胞が 88% ~ 98% の割合で存在していたことを確認した(図 2)。腱は両群ともに TR-ER7 陽性かつ、Desmin 陰性を示したことから、単離した腱細胞集団の中には筋系譜を有する細胞が殆ど存在していないことを確認した(図 2)。これらのことから、今回採取した筋芽細胞と腱細胞は純度よく単離することができたものと考えられる。

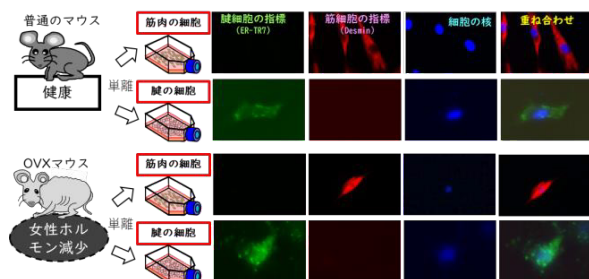


図 2. 免疫蛍光染色による筋芽細胞および腱細胞の精製度確認
上 2 列の画像: Sham コントロールマウスの筋芽細胞および腱細胞
下 2 列の画像: OVX マウスの筋芽細胞および腱細胞

【成果 3: 共培養実験】

OVX 由来の腱細胞と筋芽細胞を共培養し、エストロゲン減少が腱細胞存在下における筋芽細胞の増殖能に及ぼす影響を観察した(図 3)。

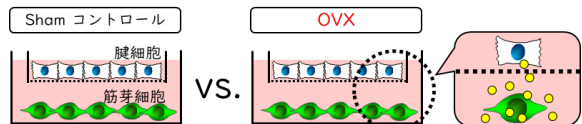


図 3. 腱細胞と筋芽細胞との共培養と、腱細胞が因子を放出するイメージ (右)

筋芽細胞は、筋分化制御過程で先ず増殖期に入る。そこで、腱細胞の存在下で筋芽細胞がどの程度増殖するのかを、細胞の増殖能評価に用いられる細胞周期(細胞分裂の過程)の指標である Ki67 や EdU の陽性細胞数を比較した。その結果、Ki67 陽性細胞数は両群とも差は認められなかったものの、EdU 陽性細胞数は OVX 群で有意に減少していた。これは、OVX マウス由来腱細胞が筋芽細胞の S 期(DNA 合成期)への移行を抑えていることを示唆するものであった。以上のことからエストロゲンの減少は、腱細胞存在下による筋芽細胞の増殖能を負に制御してしまうことが明らかになった。これにより、エストロゲンは筋量維持に重要な筋と腱の臓器連関に必要であることが示唆された。

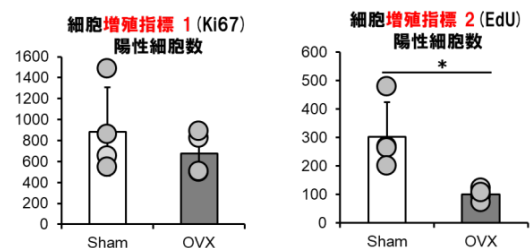


図 4. 左) ki67 陽性細胞数、右) EdU 陽性細胞数、平均±標準偏差

今後は、OVX マウス由来腱細胞の三次元培養、プロテオーム解析によるタンパク質の特定、筋-腱臓器連関の脆弱性が運動などによって回復させることができるか否かを明らかにしていきたい。

〔発表論文〕 該当なし

【助成 40-56】

光操作技術による適切な行動を生み出す top-down 入力 の 解明

研究者 立命館大学 生命科学部 助教 塩谷 和基

〔研究の概要〕

我々は、その時の状況(文脈)に依存して感覚情報を処理し適切な行動を取る。しかし、文脈に応じて感覚情報を正しい行動に結びつける神経メカニズムはいまだ十分解明されていない。そこで私は、感覚器官からの入力と適切な行動に必要な高次領域からの入力の双方を受ける嗅皮質を対象として、感覚-行動を結ぶ神経メカニズムの解明に取り組む。これまでに、嗅皮質の一亜領域である ventral tenia tecta(vTT)の神経細胞が文脈に依存した動物の行動状態に対して応答することを見出した。そして vTT が高次領域である medial prefrontal cortex (mPFC)から解剖学的な直接入力を受けていることから、vTT で見られる行動状態に対する文脈依存性の応答は、mPFC からの入力を反映したものであると考えた。単一ニューロン活動記録法と光遺伝学的手法を組み合わせることで、mPFC から vTT へ行動状態の情報が伝達されることを明らかにすることを目的とする。

〔研究経過および成果〕

突然、部屋から焦げ臭さを感じた時には、とっさに火元や匂い源を確認する。しかし、家族の誰かが料理をしているような状況(文脈)であれば、同じ匂いを感じてもそのような行動はとらない(図 1)。このような、文脈に基づき感覚入力を行動出力に正しく結びつけるための神経回路の働きは、動物の生存においてきわめて重要である。しかし、末梢からの感覚情報が文脈に応じた意味を持つためには、高次領域からの情報と統合されなければならないが、どこでどのように情報統合が行われるのかはほとんど不明である。これまで感覚入力と高次領域からの入力の統合は、比較

的高次の情報処理段階で行われると考えられてきた(Miller et al., 2005)。しかし、情報処理が高次の段階へ進めば進むほど、感覚情報の持つ意味が不明瞭となるという問題があった。そこで私は、嗅覚系に注目することで、その問題を回避できると考えた。嗅覚は五感の中で唯一、感覚受容器からの入力が、視床を経由せずに、一次中枢である嗅球から二次中枢の嗅皮質へ最短でわずか 1 シナプスで到達するというシンプルな解剖学的構造をもつ。さらに、これまでに私は、mPFC から vTT へ解剖学的な直接投射があること、vTT の神経活動が文脈に依存した行動状態を表象すること、の2点を明らかにしてきた。この結果は、mPFC から vTT への投射経路が、文脈に基づいた行動情報を vTT に供給していることを示唆している。この示唆を仮説として検証するために、私は単一ニューロン活動記録法と、光遺伝学的手法を組み合わせることで、vTT の行動状態の情報が mPFC からもたらされるかどうかを確かめることが可能であると考えた。



図 1. 文脈に基づく嗅覚情報処理

mPFC から vTT への投射経路が、文脈に基づいた行動情報を vTT に供給しているのかどうかの検証するために、マイクロインジェクターを用いて、mPFC に遺伝子組み換えアデノ随伴ウイルス(AAV)を投与することによって、mPFC 神経細胞に特定波長の光を照射することで発現ニューロンの活動を抑制させるオプション(Arch3.0)を発現させた。さらに、vTT に光ファイバーと記録電極の挿入を行った(図2左)。こうすることで、mPFC から vTT へと投射する mPFC 神経細胞の軸索を人工的に抑制(光抑制)することができる。その時の vTT の神経活動を記録電極から前置増幅器(ヘッドアンプ)と最新の PLD(プログラマブル集積回路)を組み合わせて増幅させたシグナルの記録を行った。マウスが匂いから適切な行動を取るように、行動制御装置である Bpod を用いて匂いと報酬の有無を連合させた嗅覚古典的条件付け課題の訓練を行った(図2右)。

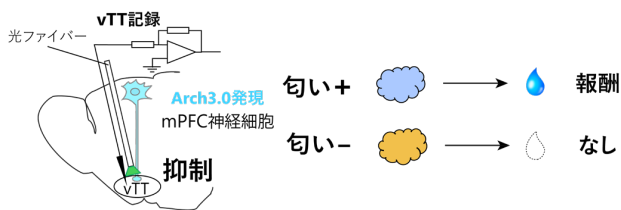


図2. (左) mPFC→vTT 投射の神経軸索抑制概略
(右) 嗅覚古典的条件付け課題の概要

訓練後、マウスが行動課題遂行中に、mPFC から vTT へと投射する mPFC 神経細胞の軸索を特定のタイミングで光抑制し、その際の vTT の活動を記録することで、mPFC から vTT に行動状態の情報が送られるのかどうかを明らかにした。マウスは、行動課題を1日に 300-400 試行繰り返し行うことが出来、その中のランダムな試行において、試行開始から終了まで光抑制を行った。光抑制を行わない条件を統制条件とし、これらの比較を行った。結果として、これまでの自身の研究で見られたように、嗅覚古典的条件付け課題

においても vTT の神経活動は、光抑制を行わない条件では文脈に依存した様々な行動に対して応答する神経細胞が見られた(図3青線: 光抑制がない条件下での vTT 神経細胞応答)。こうした応答特性を持つ細胞に対して、mPFC から vTT へと投射する mPFC 神経細胞の軸索

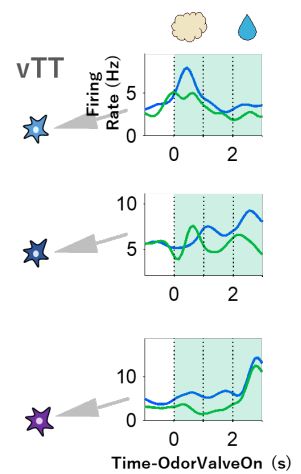


図3. mPFC→vTT の神経軸索抑制時における vTT 神経細胞応答

を光抑制することによって、光抑制を行わない条件に比べて vTT 神経細胞の活動が減ることが明らかとなった(図3 緑線: 光抑制条件下での vTT 神経細胞応答)。現在、複数の個体において vTT の神経細胞の記録ができた段階であり、全体で見ても、光抑制を行った条件では、光抑制を行わない条件と比べると、行動状態に応答した vTT 神経細胞の活動が有意に下がることが示された。これらの結果から、mPFC から vTT に行動状態の情報が送られていることが明らかとなった。

今後、光抑制するタイミングを試行開始から終了ではなく、任意に匂い提示区間や報酬区間などの短い時間で区切っていき、mPFC から vTT への入力される重要なタイミングを調べると共に、個体数を増やす予定である。さらに、mPFC から vTT の神経軸索の光抑制によって、マウスの行動変化について課題遂行中のマウスの行動動画について人工知能を用いた行動動画解析手法である DeepLabCut を用いて、より詳細に定量化した評価を行いたいと考えている。

【助成 40-57】

加速器ホウ素中性子捕捉療法におけるデータ駆動型アプローチによる
全身被曝線量の予測 (中間報告)

代表研究者 大阪医科薬科大学 関西 BNCT 共同医療センター 特別職務担当教員(助教) 柿野 諒
共同研究者 大阪医科薬科大学 関西 BNCT 共同医療センター 特別職務担当教員(講師)/京都大学複合原子力科学研究所 特定助教 呼 尚徳
大阪医科薬科大学 関西 BNCT 共同医療センター 専門教授・副センター長補佐 栗飯原輝人
大阪医科薬科大学 放射線腫瘍学教室 教授/関西 BNCT 共同医療センター センター長 二瓶圭二
大阪医科薬科大学 関西 BNCT 共同臨床研究所 所長 小野公二

〔研究の概要〕

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)は、中性子とホウ素薬剤との反応を利用し、腫瘍細胞を選択的に破壊する治療法である。BNCT を施行する際、全患者の人体複数個所にて、被曝線量をオフラインで測定するが、その手技の煩雑さ故、抜本的な改善策が求められる。そこで、機械学習を活用して、高精度に被曝線量を予測することを目的とした。最終的には、患者個別に行っている被曝線量測定の省力化を目指し、被曝線量を低減するような治療計画の立案方法を確立する。

〔研究経過および成果〕

ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy: BNCT)は、原子炉から照射される中性子と、中性子に増感効果のあるホウ素薬剤との反応を利用し、腫瘍細胞のみを選択的に破壊する治療法である。我が国では世界に先駆けて BNCT のプロジェクトが進行し、近年では原子炉に替わり病院に設置可能な加速器 BNCT システムが国内の病院に導入され、次世代放射線治療法として期待されている。2020年6月に切除不能な局所進行および局所再発の頭頸部癌が保険診療となった。一方、加速器 BNCT では中性子のみならず、照射野内外から γ 線が発生することが知られ、全被曝線量の多くを占める。また、患者の全身状態や照射部位に応じて、患者設定体位が様々であるために、患者毎に全身被曝線量は異なると考えられる。そのため、BNCT を施行する全患者の

人体複数個所にて、治療中の被曝線量をオフラインで測定しているが、その手技が煩雑かつ多大な時間を要するため、抜本的な改善策が求められる。そこで、加速器 BNCT における全身被曝に影響を与える因子を解明し、機械学習アルゴリズムを活用して、高精度に被曝線量を予測することを目的とした。

現在、被曝線量の予測に用いる機械学習アルゴリズムの選定を行っている。これまで行われてきた BNCT の治療計画情報や被曝線量データを収集次第、それらを入力・出力情報として、機械学習モデルを構築していく。

最後になりましたが、本研究を遂行するにあたり、ご助力頂きました貴財団に深く感謝申し上げます。

〔発表論文〕

準備中。

【助成 40-58】

末梢神経刺激が静的ストレッチングの柔軟性向上効果に与える影響とその神経機序

研究者 九州産業大学 健康・スポーツ科学センター 助教 齋藤 輝
名古屋大学 総合保健体育科学センター 准教授 水野 貴正

〔研究の概要〕

本研究の目的は、末梢神経刺激で誘起した感覚神経活動が静的ストレッチング後の関節可動域の変化に与える影響を明らかにすることであった。20 分間の末梢神経刺激と5 分間の静的ストレッチングが足関節の柔軟性に与える影響を調べた。感覚神経を優先的に活動させる末梢神経刺激の比較対象として、骨格筋電気刺激と電気刺激なしの安静条件を設けた。末梢神経刺激は静的ストレッチング後の関節可動域変化 ($2.3 \pm 2.3^\circ$) を骨格筋電気刺激 ($0.7 \pm 3.5^\circ$) や安静条件 ($1.2 \pm 2.1^\circ$) と比べて有意に改善させなかった。

〔研究経過および成果〕

静的ストレッチングは関節可動域の限界まで筋を伸ばし、数十秒間その姿勢を維持する。これを繰り返し行うことで、関節可動域の拡大が期待できる。随意運動と静的ストレッチングを組み合わせると効果的に柔軟性を向上させるストレッチング法がスポーツ現場で活用されている(例、PNF ストレッチング)。しかし、静的ストレッチング効果が向上する神経メカニズムは不明な点が多い。そこで、我々は末梢神経刺激を用いて静的ストレッチングにより柔軟性が向上する神経メカニズムの研究に取り組んでいる(Saito & Mizuno, 2023)。本研究は末梢神経刺激で誘起した感覚神経活動が静的ストレッチング後の関節可動域の変化に与える影響を明らかにすることを目的とした。

対象者は健康な成人男性 13 名(年齢 19.7 ± 0.8 歳, 身長 169.0 ± 5.6 cm, 体重 62.9 ± 6.7 kg)であった。対象者の足首を等速筋力計に固定し、足関節を最大限の伸張感を生じる角度まで背屈させて下腿三頭筋にストレッチングを与えた。1 分間の静的ストレッチングをセット間休息なしで 5 回繰り返した。静的ス

トレッチングの直前に下腿三頭筋の支配神経に 20 分間の電気刺激を与えた。感覚神経を優先的に刺激する末梢神経刺激と比較するため、骨格筋の皮膚上の電極から末梢神経を刺激する骨格筋電気刺激を行う条件を設けた。電気刺激の頻度は 10Hz であり、刺激強度は随意最大収縮の 5%の筋力が誘起される強度とした。末梢神経刺激中にヒラメ筋から表面筋電図を記録してホフマン反射(H 反射)を計測した(図 1)。なお、電気刺激を付加しない条件も設け、これらと静的ストレッチングによる変化率を比較した。

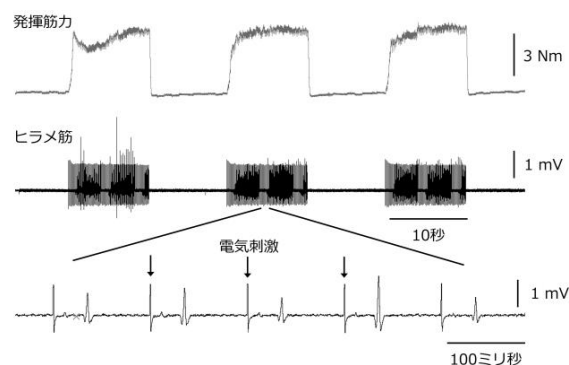


図1. 末梢神経刺激中の発揮筋力とヒラメ筋のH反射

静的ストレッチングの前後に、等速筋力計を用いて足関節を 1° /秒で受動的に背屈させ、足関節の柔軟

性を計測した。最大背屈角度で足関節全体の柔軟性を評価した。最大背屈位における受動トルクで知覚的な柔軟性(筋や腱の伸張に対する痛みの耐性)を評価し、角度—受動トルク曲線の傾きで組織の柔軟性(筋や腱の硬さ)を評価した。

末梢神経刺激は静的ストレッチング後の最大背屈角度を $2.3 \pm 2.3^\circ$ 増加させた ($p < 0.01$)。骨格筋電気刺激は静的ストレッチング後の最大背屈角度を $0.7 \pm 3.5^\circ$ 増加させた ($p = 0.44$)。電気刺激のない条件では静的ストレッチング後の最大背屈角度を $1.2 \pm 2.1^\circ$ 増加させた ($p = 0.05$)。静的ストレッチングによる最大背屈角度の変化に条件間で有意な主効果は認められなかった ($p = 0.285$, 図 2)。

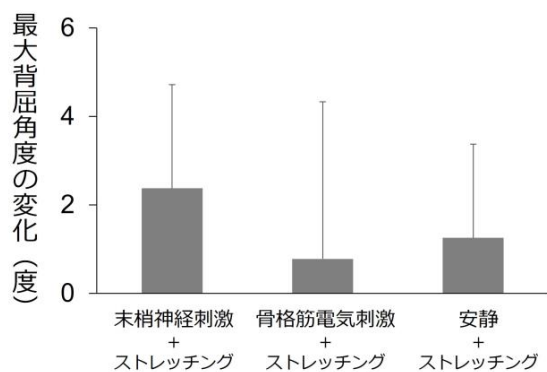


図2. 経皮的電気刺激が静的ストレッチング後の最大背屈角度の変化に与える影響

末梢神経刺激は静的ストレッチング後の受動トルクの最大値を $4.5 \pm 13.1\%$ 増加させた (前: 16.4 ± 4.9 Nm; 後: 17.1 ± 5.3 Nm, $p = 0.28$)。骨格筋電気刺激は静的ストレッチング後の受動トルクの最大値を $1.2 \pm 14.9\%$ 減少させた (前: 17.2 ± 6.0 Nm; 後: 17.0 ± 6.6 Nm, $p = 0.79$)。電気刺激のない条件では静的ストレッチング後の受動トルクの最大値を $2.6 \pm 6.0\%$ 減少させた (前: 16.6 ± 5.5 Nm; 後: 16.0 ± 4.9 Nm, $p = 0.13$)。静的ストレッチングによる受動トルクの最大値の変化率に条件間で有意な主効果は認められなかった (p

$= 0.194$, 図 3)。

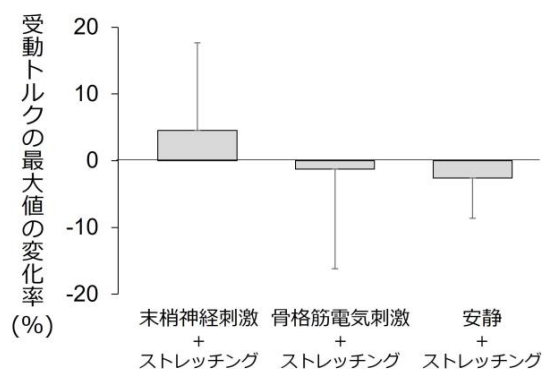


図3. 経皮的電気刺激が静的ストレッチング後の受動トルクの変化率に与える影響

末梢神経刺激は静的ストレッチング後の角度—トルク曲線の傾きを $12.3 \pm 6.8\%$ 減少させた ($p < 0.01$)。骨格筋電気刺激は静的ストレッチング後の角度—トルク曲線の傾きを $14.2 \pm 12.3\%$ 減少させた ($p < 0.01$)。電気刺激のない条件では静的ストレッチング後の角度—トルク曲線の傾きを $11.0 \pm 10.4\%$ 減少させた ($p < 0.01$)。静的ストレッチングによる角度—トルク曲線の傾きの変化率に条件間で有意な主効果は認められなかった ($p = 0.622$, 図 4)。

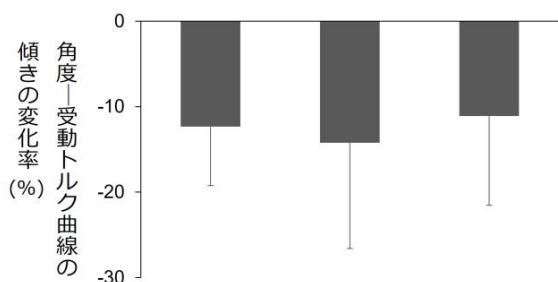


図4. 経皮的電気刺激が静的ストレッチング後の角度—受動トルク曲線の傾きの変化率に与える影響

以上の結果から、末梢神経刺激は静的ストレッチングによる関節可動域の向上効果を改善させなかった。末梢神経刺激条件に静的ストレッチング後の関節可動域の有意な向上が認められた。これは末梢神経刺激条件に静的ストレッチング後の知覚的な柔軟性の増加が認められたことが関与した可能性がある。

【助成 40-59】

変貌する日本の食文化—はじまりの米と魚の食文化から再考する—

研究者 山形大学学士課程基盤教育院 准教授 白石 哲也

〔研究の概要〕

本研究では、現代日本に繋がる「米と魚」の食文化の開始期である弥生時代の魚食文化の解明を目的として、内陸部と沿岸部の食文化比較を行った。対象とした弥生遺跡は、内陸部では滋賀県下之郷遺跡、静岡県白岩遺跡、沿岸部では静岡県梶子北遺跡、同県登呂遺跡、神奈川県中里遺跡などである。

これらの遺跡から出土した調理用鍋(甕形土器)について、使用痕跡の分析と土器に残存する脂肪酸の分析を実施した。これは調理方法を復元することで内容物を推定、評価するものである。これらの分析の結果、内陸部においても一部で海産魚介類を食していることが判明し、弥生人の志向性として、淡水魚類よりも海産魚類の利用が多く、かつ動物性タンパク質の利用も魚介類が多い傾向が確認された。

〔研究経過および成果〕

はじめに

海に囲まれた日本列島の食文化は、「米と魚」を基本としてきた。その食文化の体系は、弥生時代に稲作農耕が導入され、縄文時代以来の魚食文化と融合したことで、日本独自の「米と魚食」の食文化が形成され、「和食」へと昇華されていったと考えられる。

しかし、近年、日本の「米と魚」の食文化は、衰退の一途を辿っている。その結果として、伝統的な米と魚を中心とした日本の食文化が消えつつある。だが、「米と魚」は食糧安全保障上の要でもあり、日本の風土に適した「米と魚」の食文化を守ることは、多様化する食習慣のなかでも、守るべき大切な文化である。

本研究では、そのような現代日本に繋がる「米と魚」の食文化について、その開始期である弥生時代に焦点を当て、和食の起源となる米と魚食の文化のはじまりを解明することで、「米と魚」の食文化の再考を目指す。

1. 分析方法と対象

分析方法と対象資料は以下の通りである。

【分析方法】

- ① 調理方法と内容物を「調理土器の使用痕」と「土器残存脂質分析」から復元・推定する(図 1)。土器残存脂質分析は、土器に付着した炭化物やその胎土に浸み込んだ脂質を分析すること、調理した内容物のある程度、把握することが可能となる。
- ② ①から抽出された結果に基づき、沿岸部と内陸部の弥生集落の食文化比較を行う。

【対象地域と資料】

本研究では、内陸部としては滋賀県下之郷遺跡と静岡県白岩遺跡、沿岸部では静岡市登呂遺跡、神奈川県中里遺跡などを中心として分析を行った。

2. 分析結果

現時点では、解析途中にあり、本稿では下之郷遺跡と登呂遺跡の結果を報告したい。

まず、下之郷遺跡は予想に反して淡水性魚類よりも

陸獣の割合が高い結果が示されている。これまでの筆者らの調査では、あまり見ない結果であった。ただし、土器の使用痕跡からは他の遺跡と変わらず、米の炊飯が想定された。次に、登呂遺跡では、これまでも米の利用が非常に高いことが判明しており、水田も確認されている。筆者らの研究でも、雑穀はほとんど確認されなかった。ただ、魚介類の使用割合は高く、特に海産魚類に偏る傾向にあった。

3. 考察

これまでの研究成果(白石ほか 2021)と今回の研究結果を総合すると、弥生時代の人々は日常的に米を利用していたことは間違いない。さらに、魚(特に、海産魚介類)の利用頻度も非常に高いことが明らかになった。つまり、まず間違いなく「米と魚」の食文化は弥生時代に成立していたと言える。しかし、内陸部では淡水魚を利用する地域と白岩遺跡のように、陸獣系が多くなる地域があることが見えてきた。この背景には、遺跡の立地環境や技術力の問題が考えられ、灌漑水田の技術が未熟であったり、規模が小さい場合には水田漁撈などで十分な魚類が取れない可能性も考えられる。その場合は、陸獣が主なたんぱく質源になるのだろう。一方で、高い灌漑水田技術を持つと考えられる遺跡では、魚類の利用割合が非常に高い傾向を示しており、今後の精査が必要である。

さいごに

本研究により、弥生時代の食文化として、米と魚の食文化の基本が成立し、かつ海産魚介類への志向性の高さが確認された。しかし、集落の環境などによって多様な食文化も見えてきた。

今後、さらにデータの蓄積を行っていくことで、これ

までよりも高い解像度で弥生時代の食文化像を解明していくことが重要である。

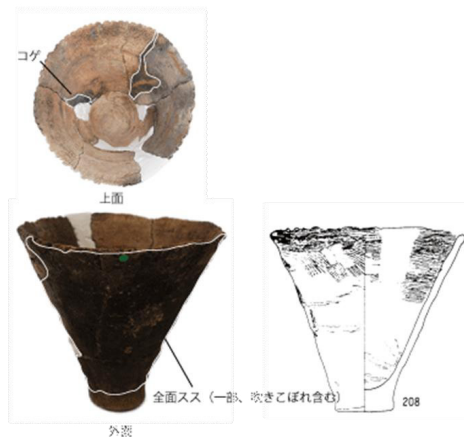


図1 分析対象とした土器の使用痕跡

引用文献

白石哲也, 藤田三郎, 柴田将幹, 堀内晶子, 宮内信雄, 吉田邦夫, 宮田佳樹 2021「奈良県清水風遺跡の食と調理—土器使用痕分析と脂質分析から—」『日本文化財科学会第38回大会研究発表要旨集』, pp.30-31

〔発表論文〕

1. 白石哲也・佐藤兼理・宮田佳樹・宮内信雄・堀内晶子・小澤仁嗣 2023「神奈川県間口洞穴遺跡出土土器の脂質分析」『日本文化財科学会第40回記念大会研究発表要旨集』, pp.222-223
2. 白石哲也, 小泉祐紀, 梶山倫裕, 篠原和大, 宮内信雄, 堀内晶子, 宮田佳樹 2023「登呂遺跡出土土器の脂質分析から見えてきたもの」『日本考古学協会第89回総会要旨集』
3. Tetsuya Shiroishi, Kazuhiro Shinohara, Yoshiki Miyata. Food Change in the Early Agricultural Initiation in Southeastern Japan, 29th EAA Annual Meeting-Abstract Book, 2023

【助成 40-60】

森林伐採と気候変動の飲み水のアクセスへの影響:高解像度衛星データと GPS 付き人口健康調査による分析

研究者 筑波大学人文社会系 教授 内藤久裕

〔研究の概要〕

安全な飲み水へのアクセスは SDGs6 の中でも主張されているとおり、人間らしく生きていくために本質的に必要なことである。本稿では、気候変動によって、降水量が減少した場合、安全な飲み水へのアクセスの変化が森林あることによって、どれほど緩和されるのか、あるいは緩和されないのかを、衛星データと Demographic Health Survey(人口健康調査)というマイクロデータを用いて分析した。これまでの持続可能性研究の分野では、森林の老が河川の水の量にどのような影響を与えるかの物理的な分析は行われてきたが、社会科学の見地から、世帯の安全な飲み水へのアクセスがどのように影響をあたえるかの分析は行われてこなかった。本稿では、気候変動による降水量が変化した場合に、周りの森林面積の大小が、安全な飲み水へのアクセスにどのように影響をあたえるのかを分析した。分析対象は、安全な飲み水へのアクセスが重要サブサハラアフリカ20か国とした。

〔研究経過および成果〕

分析にあたり、全世界ベースのマイクロサーベイである人口健康調査を用いた。サンプルは、1996から2020年まで使い、サンプル数は138,444世帯であった。本来人口健康調査は、単年度のクロスセクションデータであるが、同じ国内での複数のクロスセクションをプールし GPS 情報を使って、異なる年の異なる集落の GPS で測った距離が5km以内であれば、ほぼ同じような集落であるとして、おなじ集落インデックスを付与し、データをパネル化している。悔過として、図1が分析に使った集落の地図である。このような操作により仮想的な集落を長い期間観察することが可能になった。それにより、これらの集落周辺での森林伐採が進んだ場合に、安全な飲み水へのアクセスがどのように変わるかの観察が可能になった。図1が本研究の分析でつかわれた集落の分布を表す地図である。

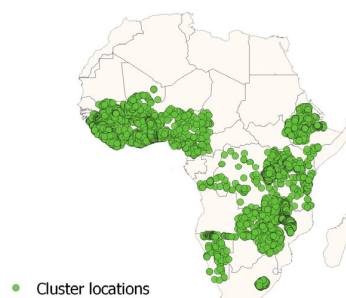


図 1 サンプル集落図

分析における被説明変数は安全な飲み水へのアクセスがあるかどうかを表すダミー変数で本稿のデータでは、約6割の世帯がそのような安全な飲み水にアクセスがあると答えている。分析における主要な説明変数は各集落における半径7.5kmの円における森林の比率である。森林面積には、衛星画像とGPS情報

をつかい、各集落の中心から半径 7.5 キロの円をかき、そのなかにおける森林面積を計算することによって、森林面積と森林面積比率を計算した。その計算を毎年おこない、その結果森林面積比率が変化した場合、降雨量が飲み水へのアクセスにあたる影響がどのように変わるかを分析した。たとえば以下の図は、マラウイにおける森林の変化量である。

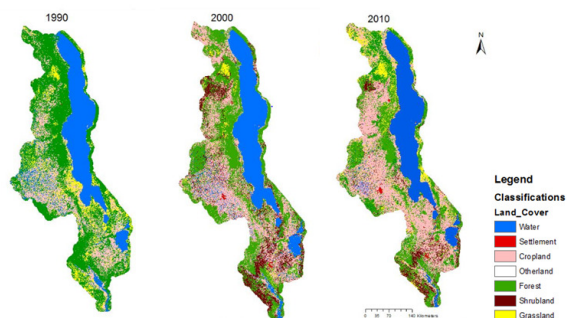


図 2 マラウイにおける森林伐採

このように森林面積が変化していくときに、飲み水へのアクセスがどのように変わるか観察することにより、降水量が変化したときに飲み水へのアクセスがどのように変わるのかを検証できる。

推定方法としては時間固定効果と集落固定効果を含んだOLSを用いた。コントロール変数としては、世帯主の年齢、教育年数、世帯人数、世帯資産の有無、家の材質、子供の数を用いた。表1が基本統計量である。表2が推定結果である。表2は、降水量の1cmの増加は、安全な飲み水へのアクセスができる確率を 0.07 パーcentageポイント増加させることを示し、それは統計的に1パーセントで有意である。一方森林の面積および森林の面積と降水量の交差項は、予想に反して、安全な水への影響を与えないことが分かった。

表 1 : 基本統計量

VARIABLES	mean	sd	min	max
Head of Household's education	5.070	4.895	0	25
Age of head of household	43.62	11.06	14	80
Gender of head of household	0.794	0.404	0	1
Spouse's education (years)	3.774	4.191	0	26
Mothers' age	35.64	7.575	15	49
Household size	6.839	3.307	1	45
Urban/Rural	0.337	0.473	0	1
Access to Improved water (dry season)	0.681	0.466	0	1
Access to Improved water (rainy season)	0.661	0.473	0	1
Access to improved toilet	0.545	0.498	0	1
Access to non-smoking fuel	0.108	0.311	0	1
Improved roof	0.420	0.494	0	1
Ownership of bicycle	0.318	0.466	0	1
Ownership of motor bike	0.148	0.355	0	1
Access to electricity	0.279	0.448	0	1
Ownership of radio	0.612	0.487	0	1
Television	0.247	0.431	0	1
Average Temperature at the in	23.55	3.712	9.254	31.29
Average Rainfall	104.6	49.48	0.388	328.9
N	138444			

Table 2 森林面積と降水量の安全な水へのアクセスへの影響 (OLS)

Dependent Variable	水へのアクセスダミー			
	(1)	(2)	(3)	(4)
平均降水量	0.000787*** (0.000188)	0.000785*** (0.000188)	0.000770*** (0.000188)	0.000770*** (0.000188)
森林面積	0.000136 (0.000149)	0.000136 (0.000149)	0.000148 (0.000150)	0.000150 (0.000150)
平均降水量偏差 ×森林面積偏差	0.000123 (0.000184)	0.000122 (0.000184)	0.000149 (0.000185)	0.000147 (0.000185)
R-squared	0.048	0.048	0.048	0.048
N	138,444	138,444	138,444	138,444
C. Control Variab				
Cluster FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Country Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Birth month				
Country FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Interview month				
Country FE		Yes	Yes	Yes
Individual covariates			Yes	Yes
Asset ownership				Yes

[発表論文]

現在原稿を準備中です。2月末までに完成の予定です。

【助成 40-61】

感染症予防難易度の高い社会福祉施設における 環境特徴量抽出と空気質管理方法に関する研究

電気通信大学 i-パワードエネルギー・システム研究センター 教授 横川 慎二

電気通信大学 国際社会実装センター 特任教授 石垣 陽

産業医科大学 産業医実務研修センター 准教授 喜多村 絢子

〔研究の概要〕

感染症予防難易度の高い社会福祉施設における空気質管理のために、実際に感染症クラスターが発生した施設における現地調査(フィールドワーク)による環境特徴量の抽出と、空気質管理方法について検討した。換気量だけでは定義出来ないリスクをトレーサガス法、熱流体シミュレーションなどで明らかにした。それらの結果に基づき、自己診断と改善のツールとしての感染症対策レベル表を設計、提案した。さらに、CO₂濃度の時系列データからエアロゾル感染リスクを定量判定する手法を開発した。これらの結果は、動画やガイドブックとして広く展開している。

〔研究経過および成果〕

これまで我々は、COVID-19 の感染症クラスターが発生した職場への立ち入り調査を多数行い、いずれも施設管理または安全組織運営に何らかの問題を抱えていたことを示した^{1, 2, 4, 5}。製造工場で発生した感染症クラスターの調査では、当時の1時間あたりの換気量(Air Change per Hour; ACH)が平均で0.73回/hであり、厚生労働省が推奨する2回/hを下回ることがわかった。また、換気経路の確保などの対策により3.41~8.33回/hまで改善することができた⁵。

典型的な社会福祉施設として、50人を超える感染者が報告された宮城県の高齢者介護施設で実施した調査では、居室のACHが2.0~6.8回/hであったものを、窓開けなどの低コストの介入によって2.2~5.7倍改善することができた。さらに、感染者が滞在する個室から多数の入居者が集うダイニングへのエアロゾル移流を、CO₂センサーネットワークを用いた測定と熱流体シミュレーションで確認し、集団感染の要因が

気流によるものであることを明らかにした⁴。

さらに、集団検診に用いられる循環器健診車(レントゲン車)内の換気に関する調査も行った³。自動車は建築基準法の対象ではないことや、放射線を扱うことや、受診者が軽装となる必要があることなどから気密性が高く、季節に応じて適切な換気経路を確保する必要があることを、トレーサーガス法による実験や、熱流体シミュレーションなどで示した。

クラスターが発生した保育園の調査においては、換気設備、窓、布団の位置に依存して昼寝時に発生した局所クラスターの事例に遭遇した^{6, 8}。社会福祉施設は施工から長年経過した建物を使用していることが多く、一般の飲食店や事務所の対策が適用し難いことも判明した。また、COVID-19により職員の業務負担が大幅に増加しており、対策効率を上げる支援策の必要性が非常に高い場所ともいえる。このような制約の多い場所では、ファシリティの改善だけでは改善が難しく、マネジメントから現場に至るまでの業務オペ

レーションの自律サイクルの体制構築し、全国の施設にノウハウを展開する必要がある。空気質改善に向けた活動を支援するフィードバック機能を持ったオンライン診断システムを開発し、その効果を検証した⁶⁾。

また、センサーデータを用いた客観評価として、さまざまな業態の場所において観測されたCO₂濃度変化のデータを用いた時系列クラスタリングにより、観測されるデータが4つのクラスタに分けることができること、その違いを生じる要因には「クローズドスペース」、「呼気が溜まりやすい空間」、「空気の澱みの発生しやすさ」などの環境特徴量が影響することがわかった。また、ナイーブベイズ分類器を用いて、測定されたデータから属するクラスタを推測する方法を示した⁷⁾。これらの方法に基づいて、CO₂センサーの時系列データのみによって、感染症リスク診断を行うことが可能となる。

以上の研究結果を広く社会還元するために、現場の担当者に向けた解説動画やガイドブックとして編集し、無償で公開して成果を展開している⁹⁾。

[発表論文]

1. Shinji Yokogawa, Yo Ishigaki, Hiroko Kitamura, Akira Saito, Yuto Kawauchi, and Taisei Hiraide; “Estimation of air change rate by CO₂ sensor network in workplace with COVID-19 outbreak,” *Environmental and Occupational Health Practice*, Vol.5, 2023-0007-OA (2023).
2. Yo Ishigaki, Yuto Kawauchi, Shinji Yokogawa, Akira Saito, Hiroko Kitamura, and Takashi Moritake; “Ventilatory effects of excessive plastic sheeting on the formation of SARS-Cov-2 in a closed indoor environment,” *Environmental and Occupational Health Practice*, Vol.5, 2022-0024-OA (2023).
3. 齋藤彰, 石垣陽, 横川慎二, 川内雄登, 田中晴美, 浅野美穂, 小川美紀, 石川正悟, 高橋里美, 齋藤泰紀; “CO₂ センサを活用した循環器健診車内の換気可視化の検討,” *日本人間ドック学会誌*, Vol.37, No.4, pp.699-707 (2022).
4. Yo Ishigaki, Shinji Yokogawa, Yuki Minamoto, Akira Saito, Hiroko Kitamura, and Yuto Kawauchi; “Pilot Evaluation of Possible Airborne Transmission in a Geriatric Care Facility Using Carbon Dioxide Tracer Gas: Case Study,” *JMIR Form. Res.*, Vol.6, e37587 (2022).
5. Hiroko Kitamura, Yo Ishigaki, Hideaki Ohashi, and Shinji Yokogawa; “Ventilation improvement and evaluation of its effectiveness in a Japanese manufacturing factory,” *scientific reports*, Vol.12, 17642 (2022).
6. 横川慎二, 石垣陽, 喜多村紘子, 齋藤彰, “感染症予防難易度の高い社会福祉施設の空気質管理,” 第14回横幹連合コンファレンス, E-1-3 (2023).
7. 川内雄登, 横川慎二, 石垣陽, “CO₂ センサを用いたフィールドワークと時系列データ解析に基づくエアロゾル感染リスク診断,” 第31回日本信頼性学会春季シンポジウム, S2-4 (2023).
8. 横川慎二, 石垣陽, 喜多村紘子, 齋藤彰, “保育園・幼稚園・高齢者施設の感染症抑制に向けた課題と現状分析,” 第13回横幹連合コンファレンス, B-3-2 (2022).
9. 病院の換気対策ガイド(動画版)／保育園の換気対策ガイド(動画版)／高齢者施設の換気対策ガイド(動画版), エアロゾル感染対策ガイド, <https://www.design4humanity.com/kanki>.

【助成 40-62】

小中学生のハイリスクなネット利用行動に及ぼす規定因の研究

-個人レベルと学校レベルの分析-

研究者 奈良女子大学文学部 教授 中山満子

〔研究の概要〕

本研究は、小中学生がネット上で知り合った人とコミュニケーションを取ったり、直接会ったりするハイリスクな行動に影響を与えるものとして、学校適応・友人関係といった心理的要因と学校から貸与・配布される情報端末の利用に焦点を当てて調査を実施し、小学生 200 名、中学生 630 名のデータを分析した。また学校による情報機器の貸与・配布と管理の実態について、学校教員 300 名を対象として調査した。調査の結果、小中学校では学校で情報端末を生徒に配布し自由に使える環境になっていることが多いこと、中学生ではハイリスク行動をとる生徒の割合に学校差がみられるとともに、学校適応感がハイリスク行動に影響を与えていることが示唆された。

1. 背景と目的

今日、小中学生でもスマートフォンやタブレット、ゲーム機器などを用いてインターネット(以下、ネット)を利用し、ネット上のコミュニケーションに対するハードルが下がっている。見知らぬ相手とも簡単に SNS 等でコミュニケーションをとり、その結果、犯罪被害(性被害、誘拐など)にあう事件も起きている。しかしネット上で見知らぬ人とコミュニケーションをとり(以下、交流経験)、実際に会う(以下、対面経験)といったハイリスク行動についての学術研究はほとんど行われていない。

研究では、小中学生のネット上のハイリスク行動(以下、ハイリスク行動)を規定する要因について、学校や友人関係に焦点づけて検討する。近年の GIGA スクール構想やコロナ禍の影響により、学校からタブレット端末が配布され、配布された端末を学外で利用することがハイリスク行動につながっていると推察されるため、教員対象の調査も実施し、学校からの端末の貸与や利用、教員の情報セキュリティへの意識についても調査する。

2. 小中学生に対する調査

2.1 方法

主な調査項目:情報機器、SNS の利用、友人関係、ネット上での交流経験、対面経験。

方法:小学校 3 校の 6 年生と中学校 7 校の 1、2 年生を対象に、担任もしくは教科担当教員から回答は任意であること等倫理的配慮についての説明ののち、各自でオンライン調査サイトで回答を行った。その結果、小学生 200 名、中学生 630 名から回答を得た。

2.2 結果

①情報機器の利用 表1に示す。小学生については、学校による差はほとんど見られなかった。中学生については、学校差がみられ、学校で配布されたタブレットは全く利用せず、学校で配布された PC を利用している率が高い学校が 2 校あった。

表 1 学校外の情報機器利用 (%)

	PC (家庭)	PC (学校)	タブレット (家庭)	タブレット (学校)	スマホ
小学生	28.0	9.5	36.5	55.5	71.5
中学生	20.2	11.7	29.5	51.6	82.9

注) (家庭)は家庭で購入、(学校)は学校で配布

②交流経験、対面経験 結果を表2に示す。小学生については学校による差はほとんどなかった。本調査では見知らぬ人と実際に会う対面経験を報告したのは全体の1名のみであった。また、ハイリスク行動と友人関係のあり方には関連は見いだせなかった。

中学生については、対面経験があると答えたのは全体の4%であり、「誘われたから」「興味があったから」との回答も多い。これらの生徒は、学校適応感(居心地の良さ、被受容感)が低いことも明らかになった。またボイスチャットや写真や動画の送受信などのハイリスクな交流経験の割合には学校差がみられ、ハイリスク行動の割合が高い学校は、学校で配布されたPCを学外で利用する割合が高い傾向がみられた。限定された学校のデータであるので、慎重な解釈が必要ではあるが、学校で配布する機器の利用とハイリスク行動との関係について、さらなる検討が必要であることが示唆される。

表2 交流経験、対面経験(%)

	テキスト メッセージ	ボイス チャット	画像・ 動画	対面
小学生	29.5	17.0	8.0	0.5
中学生	46.8	18.1	9.4	4.1

3. 教員に対する調査

3.1 方法

主な調査項目:学校で情報機器を貸与(配布)しているか、どの程度自由な利用を認めているか、教員や学校の情報セキュリティへの意識などを尋ねた。

方法:楽天インサイトに委託し、小中高校の教員を対象にWeb調査を実施し、300名(小学校77名、中学校84名、高校139名)から回答を得た。

3.2 結果

回答者が勤務する学校において、情報端末(タブレット、PCなど)を貸与・配布していると回答した人は

全体で86%で、高校に比べて小学校(98.7%)、中学校(94%)で高かった。また、ある程度生徒自身がアプリ等をインストールして、自由に使える状態であるとの回答が80%を超えており、高校では、娯楽やコミュニケーション目的で利用しているとの回答が30%を超えていた。一方で、小中学校教員の情報セキュリティへの意識は総じて高く、情報端末の利用も学習目的が想定されていることがほとんどであり、教員側の意識は高いことも示された。

4. 考察

小中学生を対象としたハイリスク行動についての調査と、教員を対象とした実態調査を実施した。その結果、多くの生徒が学校で配布・貸与している情報機器を学外で自由に利用していること、ネット上で知り合った人と実際に会うというリスクの高い行動をとった経験のある生徒は、学校適応感が低いことが明らかになった。またハイリスク行動をとる生徒の割合には学校差がみられた。また教員を対象とした調査からは、小中学校ではほぼすべての学校で何らかの情報機器を生徒に貸与・配布していること、教員の情報セキュリティへの意識は総じて高いものの、実態としては多くの学校で生徒が自由にアプリをインストールして利用できることが明らかになった。これらのことから小中学生のハイリスク行動の規定因としては、学校への適応感の低さと、制限なく貸与された情報機器(特にPC)を利用できる環境があると思われる。

本調査ではSNS利用者にはのみハイリスク行動を尋ねており、オンラインゲームをきっかけにしたものをとることが出来なかったこと、小学校の協力を得ることが難しく、限定されたデータしか取得できず予定した分析ができなかったことが課題である。引き続き、小学生のデータを収集して分析する予定である。

【助成 40-63】

学校数学における生徒が確率的に推論する授業の理論的・実証的研究

代表研究者 岡山大学教育学部 講師 石橋 一昂

〔研究の概要〕

本研究の目的は、先行研究でデザインされた実験と理論の往還により確率的に推論する力を育む高等学校数学 A「確率」の授業の構成原理を明らかにすることである。この目的を達成するために、文献研究を基本としながら、大学 1 年生を対象とした予備研究と、高校 1 年生を対象とした教授実験を行った。授業実践の結果、大学生の場合も高校生の場合も、授業者や他の学生・生徒と相互作用しながら、授業の目標を達成することができたと考えられる学生・生徒の存在が確認された。またこの結果から、授業の構成原理を同定した。

〔研究経過および成果〕

1. 本研究の背景と目的

急速に変化する現代社会では、我々市民は不確定さを定量化しながら意思決定しなければならない。そのため、全ての市民に対して確率的に推論する力を身に付けることが要請されている (Batanero et al., 2016)。確率的に推論する力とは、「[1] 自然、技術、社会における偶然事象を同定する」、「[2] そのような事象の条件を分析し、適切なモデル化の仮定を導く」、「[3] 確率論的 (stochastic) 状況の数学的モデルを構築し、これらのモデルから様々なシナリオと結果を探索する」、「[4] 確率・統計の数学的方法や手順を適用する」という 4 つの力を含む (Batanero et al., 2016, p. 9)。また、その力を育むためには、実験の結果から確率の理論値を予測・修正したり、反対に確率の理論値から実験の結果を予測したりすることを繰り返す (実験と理論の往還) 学習が重要視されている (Batanero et al., 2016)。

このような背景のもと、石橋 (2021) では病院問題 (図 1) を教材として高等学校数学 A「確率」の授業をデザインした。しかしながら、その実践には至ってい

ない。

あるまちに、2 つの病院があります。小さい病院では、一日平均、約 15 人の赤ちゃんが生まれ、大きい病院では、一日平均、約 45 人うまれます。男の子が生まれる可能性 (かのうせい) は、約 50%といわれています。しかしながら、50%以上男の子が生まれる日もあれば、50%以下の時もあります。小さい病院では、15 人の 60%にあたる 9 人以上男の子が生まれた日を、一年間記録しています。大きい病院では、45 人の 60%にあたる 27 人以上男の子が生まれた日を一年間記録しています。2 つの病院のうち、どちらが、そのような日が多かったでしょうか？

- 大きい病院の方が多かった。
- 小さい病院の方が多かった。
- 2 つの病院とも等しかった。

図 1. 病院問題

そこで本研究では、上記授業を実践し、そこから生徒が確率的に推論する授業の構成原理を明らかにすることを目的とした。この目的を達成するために、文献研究を基本としながら、まずは国立大学の 1 年生を対象に予備研究を行い、その結果の分析と考察をし

た。次に、その分析と考察から授業をデザインし直し、国立大学附属高等学校の1年生を対象に教授実験を行った。

2. 授業の概要

授業の目標は、「確率的に推論する力を働かせることができる」と「現実場面で確率の活用を意識するとともに、確率を考えるためのモデルとしてのランダム生成器の役割も意識することができる」の2つである。これらの目標を達成するため、まずは現実場面の文脈を意識して病院問題を提示し、実験の結果から確率の理論値を予測・修正したり、反対に確率の理論値から実験の結果を予測したりすることを繰り返す授業を実践した。実験では、Common Online Data Analysis Platform (CODAP, <https://codap.concord.org/>) (図2) を用いてランダム生成器をモデルとしたシミュレーションを行わせた。

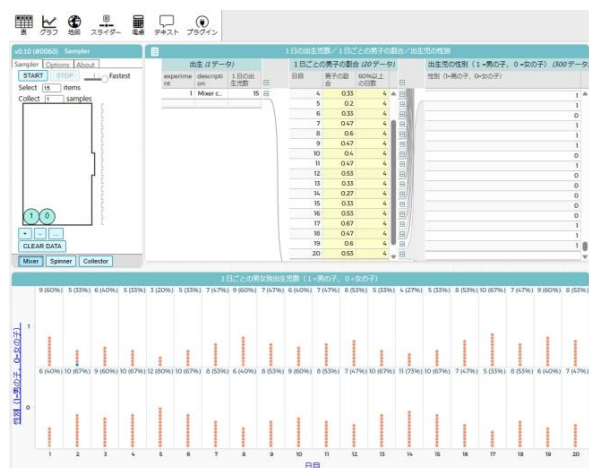


図2. CODAPによるシミュレーション

3. 成果と今後の課題

授業実践の結果、大学生の場合も高校生の場合も、授業者や他の学生・生徒と相互作用しながら、授業の目標を達成することができたと考えられる学生・生

徒の存在が確認された。

例えば、「数学系のサイトを使うのはおもしろい。こういう問題を普段テストで解くような問題におとしこむ(男子が…とかでややこしくなっているけど実際はサイコロ15回ふって9回以上おもてが出る確率は?と聞かれているのと同じと考える)のがむずかしかった」と答えた高校1年生がいたことから、「[2] そのような事象の条件を分析し、適切なモデル化の仮定を導く」の活動が実現できたと考えられる。また、「初め問題を見た時は、どちらが確率が高いのか、それとも等しいのか全然わからなくて、どうすればいいのか困ったけど、PCで試行を繰り返してやることで、実際の確率を確かめることができ、どうゆう計算をすればいいのかがよくわかるようになった」と答えた高校1年生がいたことから、「[3] 確率論的 (stochastic) 状況の数学的モデルを構築し、これらのモデルから様々なシナリオと結果を探索する」の活動が実現できたと考えられる。さらに、「確率を通して今までの授業にはないような問いで、計算だけでない数学的な思考力を使えたような気がして楽しかった。考え方は複雑でも、式にしてみると意外と単純だったりすることもあり面白かった」と答えた高校1年生がいたことから、「[4] 確率・統計の数学的方法や手順を適用する」の活動が実現できたと考えられる。

またこの結果から、授業の構成原理も同定した。今後はそれを、学術誌の査読等を通して精緻化する。

〔発表論文〕

1. 石橋一昂 (2023). 実験と理論を往還する高等学校数学A「確率」の授業: 大学1年生を対象とした予備研究. 日本科学教育学会年会論文集, 47, 609-612.

【助成 40-64】

個別最適な学びと協働的な学びの一体化を目指したプログラミング教育における 学習プロセス評価手法の開発

研究者 九州工業大学教養教育院 教授 山田 雅之

静岡大学情報学部 講師 遠山 紗矢香

〔研究の概要〕

本研究は、プログラミング教育における個別最適な学びと協働的学習の一体化を目指した。従来の「正解に基づくプログラミング」から、「目標達成と協働的改善を重視するプログラミング」へのシフトが求められている。子供たちの創造的なプログラミングプロセスに焦点を当て、「不適切な手続き」をバグとして分類し、学習プロセスの特徴を明らかにする手法を開発した。本研究では、3つの実践を実施し、①小学生の自由なプログラミング過程でのバグ分類、②プログラミング教室の開催と教育支援者の学習観に関する変容、③小中学生ペアのテキスト型プログラミング過程の分析、について検討した。

〔研究経過および成果〕

プログラミング教育が2020年に小学校で開始され、一人一台端末を活用した実践が進みつつある。加えて、「個別最適な学び」と「協働的な学び」の一体的な充実が求められている。両者を踏まえると、プログラミング教育における個別最適な学びと協働的な学びを一体的に引き起こすことで、学習指導要領で求められている「主体的・対話的で深い学び」の実現を目指した取り組みが求められていると言える。

従来のプログラミングにおけるバグを対象とした研究では、正解からどれだけ逸脱するかが主として検討されてきた。ここでは、プログラミングにおいて「与えられた問題について正解を導く」ことが暗黙のうちに期待されることが多かった。一方でAIが定型的なプログラムを自動生成するようになった現代では、自分で設定したゴールに向けてプログラムを作り、それを協働の中でより良く作り替えていけるような資質能力が重要である。こうした背景を受け、小学校段階から実現

したい、プログラムを作る過程やそれを協働的に改善する過程に関する知見が求められていると言える。

本研究では、創造的なプログラミング実践場面における、一見「不適切な手続き」に着目し、それを「バグ」と同定してアノテーションすることで、学習プロセスにおいてバグの特徴を顕在化させる評価手法の開発を目指した。本研究で子供の学習プロセスに着目した質的な分析結果を蓄積することで、AI等を用いた分析の自動化を進める知見が得られると期待される。

本研究では、3つの実践を実施した。

① プログラミング過程におけるバグのアノテーションによる分類

一つ目の実践では小学生が一人でプログラミングを実施している画面の操作ログを用いて、自由な発想でプログラミングを進める過程において発生するバグの事例をアノテーションした。小学生がScratchを用いてプログラミングを実施した際のパソコンの画面を録画した動画データを分析対象のデータとした。ここ

から、本人の思い描いた実行結果が得られた場合、思い描いた結果とは異なり、それが良い挙動である場合、悪い場合、思い描いた挙動ではない場合等の多様なパターンが存在し、さらに子供達がそれを言語化できていない場合も存在する可能性が示唆された。ここから、創造的なプログラミング課題においては学習プロセスが探索的になり、それに伴って発生するバグも多様性が見られることが示唆された。

② プログラミング教室の開催とプログラミング教育支援者における学習観の変容に関する検討

上記の分析結果を踏まえ、プログラミング教育を支援する教師側の学習観に着目した。この実践では、協調的なプログラミング教室を実施し、子供たちのプログラミング過程のデータを収集しつつ、質問紙調査を用いて情報教育支援士を目指す実習生の学習観について検討した。

プログラミング教室は九州工業大学で8月26日に実施した。参加者は小学校高学年(4年生から6年生)の14名であった。実践では、プログラミングロボット「Root」¹を用いた。子供たちの学習プロセスのデータについては、動画およびタブレットの画面録画によって、先の分析と同様にバグの分類について解析を進めている。一方で、支援士を目指す受講生の学習観については検討が進みつつある。本実践を通して、受講生の学習観は、プログラミングでも子どもたちが主体的に学習していけると言う学習観へと変容した可能性が示唆された。

③ テキスト型のプログラミング言語における小中学生のペアでのプログラミングに関する検討

先のプログラミング教室および分析では、ブロック型

のビジュアルプログラミング言語を用いていた。しかしながら、テキスト型の言語とへの移行には時間がかかることなどが懸念されている。そこで、テキスト型でのバグ収集も含め、小学生と中学生を対象とした協調的なプログラミング場面を設定した。実践では、中学1年生と小学4年生の兄弟を対象に、先のプログラミング教室で用いた課題をテキスト型で実施した。本実践については現在解析を進めているが、先のプログラミング教室で実施した同様の課題を対象者はテキスト型でも遂行可能であった。

これらの3つの実践を踏まえ、個別でプログラミング課題に挑戦し、そこでの学びの様子も踏まえその後協調的な学習を支援することでより良い実践へとつながることが示唆された。加えて、多様なバグについて教師や補助者が理解し、学習観を変容させていくことが重要であると考えられた。

[発表論文]

1. 山田雅之, 遠山紗矢香(2023). 小学生を対象とした創造的なプログラミング課題における探索的な学習プロセスに関する検討. 日本教育工学会2023年春季全国大会論文集, pp.523-524
2. 山田雅之, 遠山紗矢香(2024). 情報教育支援者の養成講座における受講生のプログラミング教育に関する学習観の変容. 日本教育工学会2024年春季全国大会論文集, (印刷中)

[その他:プログラミング教室の開催]

本助成を活用し、九州工業大学の情報教育支援士・情報基盤整備支援士養成講座における支援士実習、教育支援士実習の一環として、「第1回小学生対象プログラミング教室 “プログラミングロボットを動かしてみよう!”」を九州工業大学において2023年8月26日に開催した。

¹ <https://www.irobot-jp.com/root/> (2024年1月24日確認)

【助成 40-65】

幼児期の「サウンド・エデュケーション」を支援するアプリケーションの開発と検証

研究者 つくば国際短期大学 講師 仲条幸一

〔研究の概要〕

カナダの作曲家マリー・シェーファーによって提唱された「サウンド・エデュケーション」を研究の背景に、レズニックが提唱したティンカリングの概念を参照としながら、アプリケーション〈MimiCanvas〉を開発した。〈MimiCanvas〉は、幼児が主体的に操作できる UI のもと、絵を描く機能、写真を撮る機能、音を多重録音する機能を実装している。このアプリケーションを搭載したタブレット8台を活用して、C 幼稚園の4歳児クラス 24 名と、5歳児クラス 22 名を対象に、絵あるいは写真と音を統合していく実践を行った。子どもたちの反応や完成された作品から、〈MimiCanvas〉が、学習者の聴く力や表現力の高まりを期待できることを明らかとした。

〔研究経過および成果〕

本研究では、カナダの作曲家マリー・シェーファーによって提唱された「サウンド・エデュケーション」を背景としながら、幼児のためのアプリケーションを開発し実践を行った。研究の経過と成果としては次の通りである。

〔予備的研究〕 アプリケーションを活用した幼児の音楽表現を実践するにあたり、Resnick, M. (以下、レズニック)が提唱するティンカリング(手を動かしながら物事を試行錯誤するプロセス)の概念を参照しながら、プログラミング概念を含む音楽アプリケーションで遊ぶ幼児の観察を行った。幼児の創造力や思考力を育むために、レズニックは「クリエイティブ・ラーニング・スパイラル」(創造的な学びのスパイラル)の観点を示し、創造的なプロセスとして、**【発想】**(Imagine)、**【創作】**(Create)、**【遊び】**(Play)、**【共有】**(Share)、**【振り返り】**(Reflect)に続き、そしてまた**【発想】**(Imagine)へとつながること、そしてこのプロセスは、幼稚園の中で何度も繰り返されているとした。そこで、

筆者は、21名の5歳児を対象に、音楽アプリケーションをティンカリングする幼児の学習にはどのような姿があるのか、すでにリリースされているアプリケーションを用いた実践を通じて検証した。

また、幼稚園・保育所・認定こども園における ICT 活用の現状を調査した先行研究を概観すると、インターネットに接続した環境や Wi-Fi を学習用に使える状況は、初等以上の学校教育現場に比べて、十分に整備されていないことが明らかとなった。

〔研究 I〕 研究 I では、絵の描写、写真撮影、音声録音を組み合わせた多機能 Web アプリケーション〈MimiCanvas〉を開発した。利用する現場は主に幼児教育・初等教育現場とし、教育現場での多様な表現活動の支援ツールとして提案した。

開発したアプリケーション〈MimiCanvas〉は Web ベースであり、絵を描く機能、写真を撮る機能、および音を多重録音する機能を備えている。学習者は、撮影した写真に絵を描き加えることができるほか、完成した絵もしくは写真に自身の声や身の回りの音を

録音し、それを視聴する作品を提出することができる。録音機能には、5秒間をループしながらオーディオを生成する多重録音方式を採用し、学習者は最大5トラック分(25秒)まで、5秒間の音声を録音し、1つのオーディオトラックを生成することが可能である。これによって、自分達がつくった音の聴こえる絵画作品を生成・共有する活動ができる。次の画面1と画面2はそのアプリの一部である。

画面1 トップ画



画面2 録音中の画面



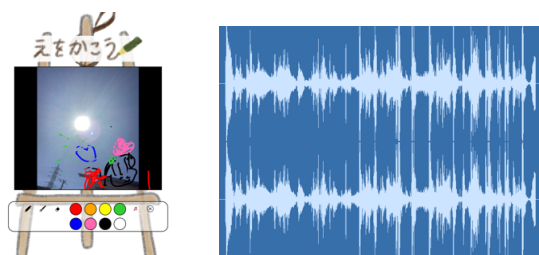
また、<MimiCanvas>はオフラインでも全ての作業が完結できる動作が可能になるように設計されているため、インターネット環境に依存しない。これにより、リモートエリアやネットワーク接続が不安定な場所(例:Wi-Fi設備のない幼稚園や、屋外等)でもこのアプリケーションを活用した学習活動が可能となり、教育現場での利用の幅が広がると考えられる。

〔研究Ⅱ〕 研究Ⅰで開発した<MimiCanvas>をタブレット8台に搭載し、①幼稚園教諭免許状と保育士資格の取得を目指す短期大学学生23名、②C幼稚園4歳児クラス24名、③C幼稚園5歳児クラス22名を対象に実践を行った。次にその概略を示す。

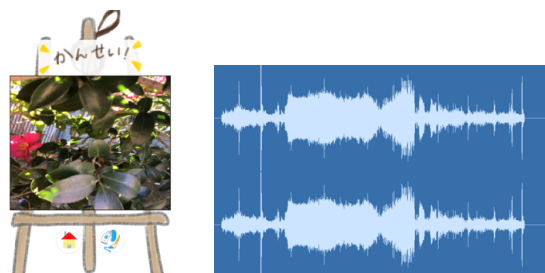
①を対象とした実践については、②③を対象に実施するための修正点や改善点といったフィードバックを得るために行った。またこの<MimiCanvas>を活用することが、保育における子どもたちの「聴く」という営為にいかに関与できるのかを検討した。

①の対象者から得ることのできた修正点を実装したのち、②③を対象とした実践については、それぞれ複数回実施した。次の画面3と画面4は、幼児が<MimiCanvas>を活用して作成した画像と、幼児が録音したデータを抽出し、波形で表示した内容である。

画面3 Aグループの作品データ



画面4 Bグループの作品データ



現在、これらの作品データ・実践中のビデオ・発話内容の分析と考察を行っている。また、引き続き、実際の教育現場で<MimiCanvas>の効果について実践を続けていく予定である。

〔注〕 アプリケーション<MimiCanvas>は、鈴木優貴氏の協力を賜り開発された。

〔発表論文〕

1. 仲条幸一(2023)「プログラミング概念を含む音楽アプリケーションの教育的価値—Resnickのティンカリングに基づく実践と分析—」つくば国際短期大学紀要第49輯, pp.35-48.
2. 現在, [研究Ⅰ][研究Ⅱ]に関する論文を執筆中である。口頭による発表と, 学会誌への投稿を予定している。

【助成 40-66】

自閉スペクトラム症児を支援する大学生に対するヒデユン・カリキュラムの効果

研究者 星美学園短期大学 准教授 渡邊孝継

〔研究の概要〕

本研究では、将来自閉スペクトラム症(以下, ASD と表記)児への対人援助職を志望する大学生を対象として、臨床発達心理領域のヒデユン・カリキュラムを開発することを目的とした。2022 年度から心理系学部に通い、臨床発達心理学を学び、卒業後に ASD 児の対人援助職を志望する大学生5名と大学院生3名に、ASD 児の行動変容を引き起こす上で必要な専門能力(知識とスキル)を促進する教育プログラムを作成し、実施した。2名の ASD 児への支援プログラムの実施と、事前・事後の事例検討を含む打ち合わせを行う教育プログラムを実施した結果、応用行動分析に関する知識が獲得されること、特に、応用行動分析に関する知識の変動が大きかった大学生・大学院生は、支援プログラムを経験するに連れて、ASD 児の行動や発言の意図の推測の種類と数が増加することが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

研究目的

自閉スペクトラム症(Autism Spectrum Disorder:以下, ASD)児を援助する職に就くことを志望する大学生は、学外のボランティアなどに積極的に参加する。しかしその場合、ASD 児と関わる体験を得ることができても、スーパービジョンが脆弱であり、大学生は悩みや困り感を抱え易い。この点を解決するために、海外の医学教育システムでは、ヒデユン・カリキュラム(Hidden Curriculum)と呼ばれ、一定の歴史がある手法を用いている。それは、正課外で行われ、大学生の専門能力の開発に強力な影響を与える学習形態の一型をなしている。以上をふまえ、本研究では将来対人援助職を志望する大学生への臨床発達心理領域のヒデユン・カリキュラムの効果を検証することを目的とする。具体的には、大学生が ASD 児の行動変容を引き起こす上で必要な専門能力を促進する教育プログラムの効果を検証することを目的とした。

研究成果

〔方法〕参加者は X 大学の心理系学部の3年生3名と4年生2名と修士1年生3名の合計8名であった。なお、参加者 C は、療育施設でアルバイトを行っていた。

支援プログラムは、30 分の事前の打ち合わせと 50 分の ASD 児への支援プログラム、30 分の振り返りで構成された。参加者全員の主な活動は、支援プログラムへの参加と行動観察、記録であった。支援プログラムは、1 年を通して、合計で 16 回実施された。振り返りは、X 大学の応用行動分析を専門とする教員がスーパーバイズを行った。

研究開始前、終了後に参加者全員へ応用行動分析に関する知識を測定する KBPAC の簡易版を実施し、評価点の変動を検討した。また、支援プログラムごとに、参加者は学習した内容を自由記述した。支援プログラム前期、後期で、テキストマインニングを用いて、共起ネットワーク分析を行い、支援プログラムの効果を質的に分析した。

(結果)

参加者	学年	経験年数	pre	post	変動値
A	3年	1年	9	12	3
B	3年	1年	18	21	3
C*	3年	1年	20	21	1
D	4年	2年	12	18	6
E	4年	2年	17	21	4
F	修士1年	3年	17	18	1
G	修士1年	3年	19	16	-3
H	修士1年	1年	12	20	8

表 1 KBPAC の評定値の推移

変動値は、post の評定値-pre の評定値の数値を示している (表 1)。ASD 児への支援プログラムの反復参加を実施した結果、変動値は、参加者 G 以外が 1～8 上昇し、参加者 G のみ 3 下降した。参加者の KBPAC の評定値の平均は pre で 15.5、post で 18.375 であり、その差は 2.875 であった。

参加者の支援プログラムごとの自由記述では、前期分において、「対象児」、「好み」、「話」、「学ぶ+できる」、「先生」、「SV」、「事後ミーティング」などの単語の繋がりが示された (図 1 の左側)。後期分においては、前期分に加えて、「特徴」、「変化」、「社会性」、「発言」、「思う」、「行動」、「視点」などの単語の繋がりが示された (図 2 の左側)。

参加者の KBPAC の評定値は、1 名を除いて上昇傾向であったことから、支援プログラムへの反復参加は、応用行動分析の知識を向上させると指摘された。参加者 A・B・D・E・H は変動値が 3 以上となったのは、経験年数が 1～2 年であり、未獲得の知識を得たことが要因であると考えられた。参加者 C の変動値が 1 であることは、本研究開始前から参加していた、療育施設でのアルバイト経験が影響している可能性がある。また、自由記述のネットワーク図を前期と後期で比較すると、対象児の行動や発言、特性に関する抽出単語が増

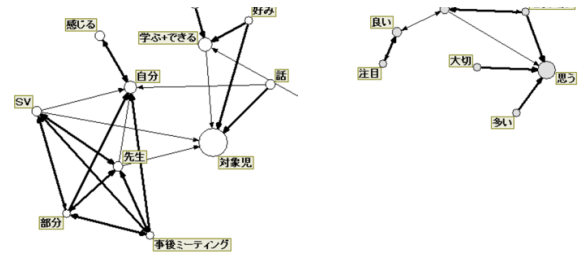


図 1 自由記述の共起ネットワーク図 (前期)

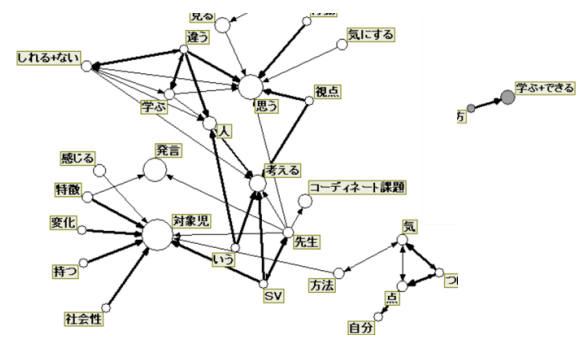


図 2 自由記述の共起ネットワーク図 (後期)

加した。このことから、支援プログラムの反復参加は、対象児の行動や発言の意図の推測・読み取りの数と種類が増加することが明らかになった。参加者は、自発的に対象児の見立てを行い、仮説を生成するようになったと推測された。以上のことから、対人援助職を志望する大学生への臨床発達心理領域のヒデユン・カリキュラムは、ASD 児の行動変容を引き起こす上で必要な応用行動分析の専門能力を促進する効果があると指摘された。

[発表論文]

1. 渡邊孝継(2023) ASD 児を支援する大学生へのヒデユン・カリキュラムの効果—応用行動分析の知識の変容に関する分析—. 日本特殊教育学会第 61 回大会(横浜国立大学). ポスターP3C-4.
2. 渡邊孝継(2023) 保育者養成校の大学生へのスタッフトレーニングの効果—活動プログラムへの参加により習得される応用行動分析の知識の分析—. 日本人間関係学研究* 査読あり

障害者福祉拠点における利用／支援実態と拠点間連携の研究

-共生型地域包括ケアシステムの構築を目指して-

代表研究者 東京電機大学未来科学部 教授 山田あすか

共同研究者 東京電機大学未来科学部 研究員 古賀 政好

〔研究の概要〕

本研究では共生型地域包括ケアシステム構築に向けて、東京都の足立区と練馬区でのヒアリング調査から障害者福祉の事業所・施設の利用と連携状況を把握し、障害者福祉の地域でのマネジメントの可視化を明らかにした。また関東／東北4県の障害者支援施設へのアンケート調査とヒアリング調査から入居者像やニーズの特徴、地域との交流機会や施設間連携などを把握し、施設の重度化と地域課題への取り組み実態を明らかにした。さらにドイツの「多世代の家」の現地調査を行い、多世代交流や地域の実情に応じたプログラム提供の実態を明らかにした。

〔研究経過および成果〕

現在、高齢者福祉では重度の要介護状態でも住み慣れた地域で自分らしい暮らしを人生の最後まで続けられる「地域包括ケアシステム」の構築が進められている。しかし人口減少で物的・人的資源が縮減するこれからの社会で地域密着型の支援／ケア体制を持続するには障害者福祉の施設や事業所等(以下、拠点)もまた地域資源として組み入れる「共生型地域包括ケアシステム(図1)」として再構築し、高齢／障がい／疾病等で何らかの支援やケアが必要な人々を包摂する必要がある。本研究では多様な支援サービスが提供される障害者福祉の拠点での利用／支援実態と拠点間連携について、ドイツでの世代等によらない共存の場:「多世代の家」についての調査を行った。

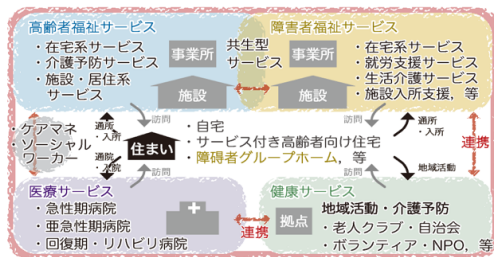


図1 共生型地域包括ケアシステムのイメージ

■障がい児者福祉拠点の実態と拠点間連携

東京都の各自治体の障がい者登録者数、障がい児・者の各福祉関連サービス事業数を収集し、各自治体の支援ニーズと障がい「児・者」の相対的な事業充実度を類型化した(図2)。そして最近隣選択ないし地域内利用を越えた事業所選択や定員不足の相互補填など、拠点間連携によるネットワークでの支援体制構築に着目し、支援ニーズが【高・中】で、「児・者」

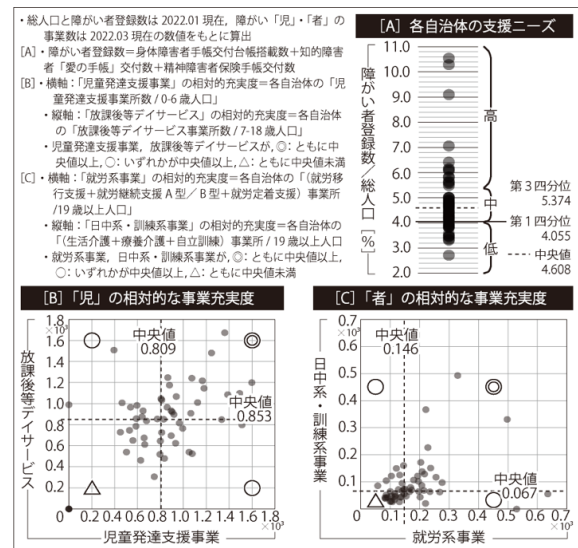


図2 東京都の各自治体の相対的な支援ニーズと障がい「児・者」の事業充実度の類型整理

の相対的な事業充実度が比較的低い足立区と練馬区を対象として自治体／ネットワーク基点／事業所へのヒアリング調査を行った。足立区では中心となるセンターを構えて連携等を図り、練馬区は4つのエリアそれぞれにセンターを設置し、各エリアで支援体制を整えていた。ともに事業所間連携や利用者のマネジメントの可視化が行われており、地域の支援体制を明快とし、障がい当事者だけでなく支援者も支援しやすい環境がつけられている。地域全体で障がい当事者を支える環境として、区内で事業所ネットワークを構築し、事業所間での連携を促し、区内に限らず区外の自治体、事業所・施設間での連携が重要と考える¹⁾。

■障害者支援施設の重度化と地域拠点機能

地理的条件が異なる関東地方と東北地方から「比較的大規模な施設」の比率に着目して、比率が高いA県(東北)、C県(関東)と比率が低いb県(東北)、d県(関東)」の4県の障害者支援施設へのアンケート調査とヒアリング調査を行った。比較的大規模施設の割合が高い県では重度・高齢の入居者が多く、グループホームへの移行が困難な状況にあると考えられる。地域との連携・交流機会(図3)では地域の障がい児者・高齢者を対象としたサービスや施設内外間わな交流や高齢者への支援やこどもの居場所づくりといった地域課題への取り組みがみられる。今後、地域が抱える課題への取り組みが施設にも求められるなかで、障がい者支援を主たる事業としながら地域の実情に応じた拠点機能の展開が必要になると考える²⁾。

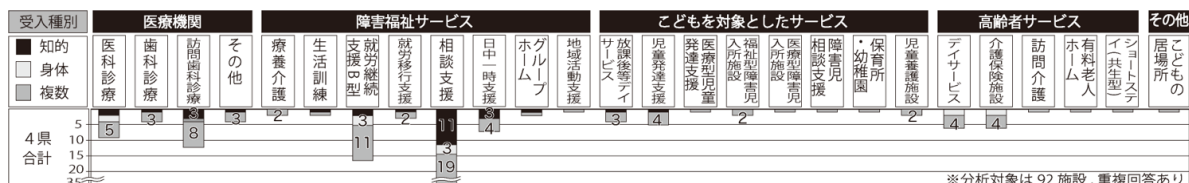


図3 同一建物・敷地内で行われている事業・取り組み

■ドイツ「多世代の家」での共存の場づくり

ドイツ連邦政府が2006年に地域交流を促進し、誰もが気軽に参加できる場「Mehrgenerationenhaus(以下:多世代の家)」を開始している。約530事例のうち9事例への現地調査を行った。多世代交流だけでなく、周辺地域の実情に応じて、世代ごと、障害者、移民・難民、ユダヤ人家系などへの多種多様なプログラムも展開されている。一例である高齢者住宅併設例ではウィンターガーデンと呼ばれる中庭とサンルーム(図4)で活動を行っている。日本の高齢者施設や障害者施設にしばしば置かれている地域交流スペースも、属性によらない共生型の地域包括ケアシステムの一環であるプログラムとして「多世代の家」のような活動の展開可能性が期待できると考える。

[発表論文]

- 梶川龍星・入佐奈都実・古賀政好・山田あすか: 東京都の障がい児者福祉拠点における利用/支援実態と拠点間連携の研究 -足立区と練馬区の障がい児者拠点の現状分析-, 日本建築学会, 地域施設計画研究 41, pp.319-326, 2023.7
- 柳田紗希・古賀政好・山田あすか: 関東/東北地方4県における障害者支援施設の重度化と地域拠点機能に関する研究, 日本建築学会, 地域施設計画研究 41, pp.337-346, 2023.7



図4 高齢者住宅併設の多世代の家での建物の余白空間

【助成 40-68】

移民第二世代のオートエスノグラフィー

研究代表者 早稲田大学人間科学学術院 教授 樋口直人
研究分担者 長崎大学多文化社会学部 准教授 南誠
桃山学院教育大学人間教育学部 准教授 オチャンテ・村井・メルセデス・ロサ
LEC 会計大学院大学准教授 劉昊
奈良学園大学人間教育学部 講師 オチャンテ・カルロス
中部大学人文学部 助教 王昊凡
東京都立大学国際センター 特任助教 ラファエラ・オリバレス・ヨシイ
獨協大学 非常勤講師 小波津ホセ
明治学院大学 非常勤講師 白皓
大阪大学大学院人間科学研究科博士課程 大川ヘナン
一橋大学大学院社会学研究科博士課程 山崎哲

〔研究の概要〕

本研究の目的は、移民第二世代の研究者が自らの経験を分析する、「オートエスノグラフィー」という手法を用いて、次の2点に取り組むことにある。(1)マジョリティの研究者が問うてこなかった論点を自らの経験をもとに提示し、従来の研究とは異なる問題設定と知見を導き出す。(2)第二世代自身の執筆による論文集を刊行し、移民は研究対象であるのみならず、研究主体でもあることを可視化する。そのため、研究代表者以外は中国系 5 名、ラテン系 5 名の移民第二世代研究者で研究組織を形成し、アイデンティティ・クライシス、パスポート、進学、同胞社会との軋轢、出自の隠蔽、宗教、次世代への文化継承、帰属意識、ネットワークといったテーマで自己分析を行った。

〔研究経過および成果〕

オートエスノグラフィーという手法は、日本で導入されるようになってから 5 年程度しか経過しておらず、日本語での先行研究は決定的に不足している。そのため、まず英語を主とした文献購読と検討会、実際にオートエスノグラフィーを書いた経験のある外部講師を招聘して討議するといった形で進めていった。それをもとに各自が分析するテーマを決めて、自己の経験を思い出し資料を集めて文脈も含めて再現した。

これを論文の形にまとめていく際に、口頭報告の場を何度も設定して論点を整理し、質疑をもとに修正する手続きをとることとした。そのため、まず 2023 年 1 月に早稲田大学でシンポジウムを開催し、代表者と分担者全員が報告した。次に、6月の AAS-in-Asia 会議で大川、山崎、ヨシイが報告した。また、7月の ASCJ 会議でオチャンテ・ロサ、大川、山崎が報告した。最後に、2024 年 2 月に長崎大学でシンポジウムを開催し、王、オチャンテ・カルロス、ヨシイが報告した。

こうした過程を経て、テーマを変更・微調整しつつ以下のようなテーマで書き進めることになった。「生活世界」(南)、「アイデンティティ・クライシス」(白)、「同胞の裏切り」(劉)、「出自の隠蔽」(山崎)、オチャンテ「世代間の文化継承」(オチャンテ・カルロス)、「宗教的アイデンティティの継承」(オチャンテ・ロサ)、「日系の再構築と帰属意識」(小波津)、「移民二世における継承語の役割」(ヨシイ)、「大学進学」(大川)。

本研究の目標は、移民第二世代を書き手とするオートエスノグラフィーの論集を刊行し、「書き手としての移民第二世代」を可視化することにあつた。その目標に向けては着実に進んできたが、それ以外に4つの点で当初予想していなかった知見が得られた。

第一に、ほぼ全員のメンバーが自らの「痛み」を取り上げ、かつ3分の2くらいが痛みを主題としている。マイノリティ性を持つ者がオートエスノグラフィーを書くときには、マイノリティ性ゆえに経験した痛みを言語化することの必要性を示している。これは、婚活や就職支援といった形で近年刊行されている日本人のオートエスノグラフィーにはない特徴で、それが最終的な成果のインパクトを高めるものと思われる。

第二に、一般に進学率が高くモデル・マイノリティと言われる中国系の第二世代の方が、痛みを伴う悩みを主題として取り上げていた。ラテン系の場合、実存的な問題よりは生活苦や進学の困難といった経済的問題が背景にあるため、痛みの性質が異なる。ラテン系のメンバーが、中国系の人は何でそんなに悩むのかと驚いていたのが、印象的であった。中国系第二世代の問題は、これまで見

逃されてきた傾向が強いため、その意味でも当初の予想以上の知見が得られたと評価している。

第三に、こうした知見を受けて、代表者の樋口が担当する序章も、オートエスノグラフィーの一般的なレビューを書く方針から変更した。すなわち、こうした第二世代の痛みは従来の研究が看過してきた論点であり、問われなかった経験を分析して言語化する「サバルタン・オートエスノグラフィー」としての意義を強調する必要がある。

第四に、討議の過程で生じた課題として、経験を言語化する際に必要な概念の問題がある。オートエスノグラフィーを単なる個人的経験の語りで済ませず、個々の経験の普遍性を言語化するには、社会理論や社会哲学の概念を援用する必要がある。具体的には、ベンヤミンの想起、ゴフマンのカバーリング、シュミットの主権、ルーマンのシステム分化と適応といったアイデアが出されている。こうした古典の思考を援用することで、議論に普遍性と深みを与えてオートエスノグラフィーの可能性を最大限に提示することが、最終的な成果刊行に向けた課題となる。

[発表論文]

1. 南誠「オートエスノグラフィの実践と中国帰国者のアイデンティティの問い——個人史研究の可能性をめぐって」『日中社会学研究』30号、2023年
2. 大川ヘナン「『当事者』と『研究者』の関係を問い直す——移動する『私』のオートエスノグラフィーを手がかりに」『異文化間教育』57号、2023年。
3. 劉昊「“移民創造的場所”的小叙事——基于自我民族志的论述」『国際社会科学』40卷3号、2023年。

【助成 40-69】

デジタル時代におけるヒト固有なコミュニケーション方策の変化予測

文部科学省 事務官 阪口 幸駿

〔研究の概要〕

デジタル化が叫ばれ高度に情報化されつつある昨今の潮流では、経済的な豊かさを増強させる一方で、本来アナログな生き物であるはずの人間の、「人間らしさ」や「人間性」の喪失につながるものが懸念される。したがって、「加速度的に進展する高度なデジタル社会やそれを後押しするデジタル技術」と、「心の豊かさが担保された環境下でのつながりの維持」の両立は、現代社会における喫緊の課題であり、“人間本来コミュニケーション”の持続可能性向上を目指す新たなコミュニケーション様式の模索とその精緻化が不可欠となる。そこで本研究では、「人間らしさ」や「人間性」といった定義が曖昧で且つ定量化が困難な概念をどのように理解できるか学際的に整理し、わたしたち人間がそもそもどのような認知・心理的特徴を持つ固有な生物であるのか捉え、コミュニケーションにおいて、どの部分でデジタルとの親和性を低下させてしまう可能性があると考えられるのか、探究した。

〔研究経過および成果〕

【研究方法】

研究方法としては主に、①文献調査と②研究会開催、③セミナーシリーズの3つを実施した。①まず文献調査では、コミュニケーションにおける人間固有な認知・心理的要因とそのメカニズムについてテーマドリブな発想に基づき、心理学、哲学、言語学、知能情報学など分野を問わず、幅広く学際的に調査を行った。②研究会では、2 個体間以上の間におけるコミュニケーションに関する発表を募り、2 回の開催で合計 21 名からの知見の提供を受けた。また、研究会内部で「デジタルコミュニケーションとアナログコミュニケーションのギャップ」に関するワークショップを開催し、参加者同士による議論を重ね、意見交換を行った。③セミナーシリーズでは、コミュニケーションや最新のデジタル・人工知能の動向に詳しい専門家を招聘し、多様なジャンルからの合計 22 回におよぶ連続講演と、今後のコミュニケーションの在り方に関するディスカッ

ションを実施した。

【研究成果】

コミュニケーションを巡る有名な考え方の1つに、シャノン・ウィーバーが提案した情報通信のコミュニケーションモデルがある(Shannon & Weaver, 1949)。このモデルではコミュニケーションの送信者は伝えたい情報を何らかの媒体に符合化し、それを受け取った受信者はもとの情報に復元して情報を得るといった、「情報伝達」の側面に注目している。このモデルではコミュニケーションという曖昧な行為を定式化し、システムチックに理解可能とさせる反面、このような古典的な見方では人間行為における何か重要な要素を見落としている可能性もある(三木, 2022)。

例えばわたしたち人間は日々顔を合わせる際には挨拶を欠かさないし、2 人以上で集まって時間をもて遊ぶ際には、そこに自然と雑談がはじまる。このようなコミュニケーション形態を考えると、ここではいったいいかなる「情報」を伝達していることになるのであ

ろうか？そこには情報性は皆無であって、目的もなく、あるのは社交性のみであると想定される。人類学者のマリノフスキーはこれを交感的コミュニケーションと呼び(Malinowski)、情報伝達機能をほとんど持たないような言葉のやりとりがあるのではないかと主張している。

また別の視点では、あなたとわたしで明日から毎日ジョギングをしようと約束したとする。これはわたしからあなたに誘いかけたという意味では情報の伝達という側面も一部内包されるが、しかし重要なことに、あなたとわたしで共同の約束事(ジョギングする)を形成し、それを互いに「了解する」という行為には、情報の伝達以上の機構と作用がはたらいていると考えられる。哲学者のギルバートはこのような行為を、共同コミットメントと呼んでいる(Gilbert, 1989)。

本研究では、交感的コミュニケーションや共同コミットメントはじめとした、情報伝達では説明しきれない人間固有な心的作用について観察し、それらの間の共通項の抽出を実施した。その結果、これらのコミュニケーションの根底に、「わたしたちを主語とする2重の入れ子構造的な心理」を構築させる機構が存在することを提案した(図1; 阪口、2024)。

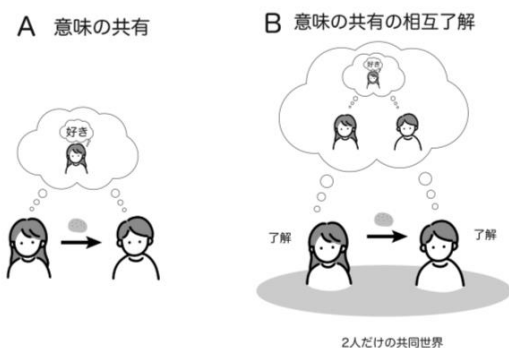


図1 2重の入れ子構造的な心理と相互了解
この機構は2次の心の理論(わたしは「Aさんが「B

さんが何を考えている」と考えているか)がわかる)の実行が不可能とみられるヒト以外の動物では観察されず、また、現状の人工知能においても未だヒトと同等のレベルには達しておらず、ヒト固有であると考えられる。

デジタル社会では情報伝達が加速する一方で、人と人をつなぎ合わせる「情報伝達を目的としない」コミュニケーションの機会が少なくなっている。相互の了解は相互の承認をもたらすことから、現代では翻って、つながりの希薄がSNSでの攻撃行為などといった、存在承認のための欲求行為の発露となってみられるのかもしれない。したがってデジタルツールでこれを補完するしくみの実装が急務であり、特に、最近著しい技術革新を見せる人工知能への心の理論の実装が、期待される。

[発表論文]

1. 阪口幸駿、『危ぶまれつつある人間本来コミュニケーション』、第1回デジタルコミュニケーション研究会、2023
2. 阪口幸駿、『「ヒトらしさ=概念化×象徴性×階層性×共同志向性」か？—ヒトと動物や機械とを分ける認知機能群解明のための基礎的考察2—』、日本心理学会第87回大会、2023
3. 阪口幸駿、『ヒトってどうやってつくるの？—ヒトに固有な認知機能群の探求—』、第10回認知科学若手のワークショップ、2023
4. 阪口幸駿、『共調をまとめよう—多分野を統合した新しい学問体系の構築』、第5回共調的社会脳研究会、2023
5. 阪口幸駿、富田健太(編)、『「合う」のメカニズムを科学する —影響し合う「あなた」と「わたし」の心理学』、ミネルヴァ書房、2024

【助成 40-70】

熟練の情報科教師に見られる「翻案」の特徴の解明

研究者 崇城大学総合教育センター 助教 古賀 竣也

〔研究の概要〕

情報科教師を対象とした研究機会の展開を背景に、本研究では知識に焦点を置き、熟練の情報科教師の「翻案」の特徴を明らかにすることを研究の目的とした。そして、教師4名を対象とした授業観察と半構造化インタビュー調査を実施し、得られたデータを分析した。その結果、様々な知識を活用しながら「翻案」過程を経て教材を開発していること、「翻案」ではある特定のカテゴリの知識が様々な段階で活用されているというよりは、各段階で活用されている知識カテゴリが異なっていたこと、研修では様々な知識カテゴリを導入しその活用方法を明示的に指導することで、参加者の教材開発に関する能力の成長が促されること、という3点が考察された。

〔研究経過および成果〕

1. 研究の背景

高等学校共通教科情報(以下「情報科」と呼称)は、2022年度から科目「情報Ⅰ」と「情報Ⅱ」が新設され、学習内容が高度化した。また、2025年度以降の大学入学共通テストに新たに出題教科として「情報」が追加される。こうした動向もあり、近年情報科教師を対象とした研修の機会が、様々なところ(文部科学省や学会など)で展開されている。研修の主な目的は、情報科教師の日々の授業改善である。つまり、研修に参加し様々なアイデアを得て、自身の授業で用いる教材の改善や開発に、それを活かすのである。

一方で、これらの研修の内容をみると、実践した授業や用いた教材の紹介が中心である。こうした「できあがったもの」の紹介だけでなく、「どのようにしてできあがるのか」という教材開発の過程も示すことができるのであれば、参加者である情報科教師は教材を開発するための新たな観点や方法を習得することができるのではないだろうか。つまり、情報科教師の教材開発の過程を明らかにしていけば、情報科の授業改善におい

て質的向上が図れるのではないかと考えられる。

2. 研究の目的

教育学の分野において教材開発の過程は、「翻案」と呼称される。高校のように教科によって担当する教師が異なる状況では、この「翻案」に教科の教師の専門性を見出せるため、情報科教師の専門性の一側面に情報科の「翻案」が位置づけられる。また、「翻案」の過程においては、教師が有する知識の活用が重要な役割を果たすことが指摘されてきた。

以上のことを踏まえ、本研究では情報科教師が有する知識に焦点を置き、情報科教師の「翻案」の特徴を明らかにすることを、研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、熟練の(情報科の授業を長年担当しており、かつ、教科書の編集や研究会での発表の経験が豊富な)教師4名を対象として、授業観察と半構造化インタビュー調査を実施した。授業はビデオカメラで撮影するとともに、インタビューの音声はICレコーダーで録音した。インタビューの質問項目は、「翻案」を構成する「準備」、「表現」、「選

扱」、「生徒の特徴への適応と仕立て」という4つの段階を参考にして作成した。作成した質問項目と実際の授業での指導内容などをもとに、インタビュー調査を実施した。

そして録音した音声を、全て文字として書き起こした。次に、意味ごと(話している話題を解釈できる程度ごと)に分割し、分割したデータごとに、翻案の4つの段階のどこに位置づけるのか(もしくはどこにも位置付かないのか)を判断し、データを4つの段階ごとに分類した。その後、各段階のデータを再度確認し、情報科教師が有する知識に関する内容を含むデータに「知識ラベル」を付けた。これまで本助成申請者は、情報科教師が有する知識のカテゴリとして10種の知識があることを明らかにしてきた。そこで、「知識ラベル」としてこれら10種の知識カテゴリを採用した。最終的に、類似する内容ごとに「知識ラベル」を整理し、「翻案」の各段階でどんな知識が活用されたのかを明らかにすることを通して、「翻案」の特徴の解明を図った。

4. 結果と考察

4名の教師の、分析対象とした単元とそこで用いられた教材の概要を表1に示す。調査データを分析した結果、本研究では以下の3点が考察された。

1点目は、熟練の情報科教師は様々な知識を有し、これらを活用しながら「翻案」過程を経て教材を開発

表1 分析対象の単元と教材の概要

ID	単元	教材
A	「情報デザインのプレゼンテーション」(時数:3)	生徒への配布プリント(A4サイズで計4枚)
B	「モデル化とシミュレーションの実施」(時数:3)	授業中に提示するスライド(計46枚)、生徒が編集するGoogleスライドとスプレッドシート
C	「アルゴリズムとプログラミングの導入」(時数:3)	授業中に提示するスライド(計61枚)
D	「プログラミングの演習と発表」(時数:10)	授業中に提示するスライド(計65枚)

していたということである。

2点目は、「翻案」では、ある特定のカテゴリの知識が様々な段階で活用されているというよりは、各段階で活用されている知識カテゴリが異なっていたということである。「翻案」の各段階で活用される知識カテゴリが異なっているとすると、教材を開発する過程において、情報科教師が有する知識の各カテゴリ間の重要度に顕著な差はないということである。具体的には、「準備」や「表現」の段階では「身近な事象との結びつき」や「学習内容の関連」についての知識が活用されていた。一方で、「選択」の段階では「身近な事象との結びつき」についての知識以外に、「体験的な学習」や「生徒自身で考える方法」についての知識が活用されていた。「生徒の特徴への適応と仕立て」の段階では「生徒の興味」や「生徒の苦手」についての知識に加え、「生徒が意識しないこと」や「生徒の情報科の捉え方」についての知識が活用されていた。熟練の情報科教師は、教科書や身の回りの題材を「翻案」の4つの段階の観点から批判的に解釈し、様々な知識を活用して教材を開発しているのである。

3点目は、自身の教材開発に活かすことを目的とするような研修においては、ある特定の知識カテゴリの習得を目指すのではなく、様々な知識カテゴリを導入し、その活用方法を明示的に指導することで、参加者の教材開発に関する能力の成長(つまり様々な知識を活用しながら「翻案」の過程を経て教材を開発できるようになること)が促されるということである。

〔発表論文〕

古賀竣也(2023)熟練の情報科教師の「翻案」過程において関係する知識—情報科教師が作成した教材の構成と意図に着目して—。日本情報科教育学会第16回全国大会講演論文集, 40-41.

【助成 39-03】

局所配位構造・結合状態に立脚した HfO₂ 基薄膜の強誘電相の安定化メカニズムの解明と強誘電性の向上

研究者 熊本大学工学部 教授 木口賢紀

〔研究の概要〕

本研究では、ZrO₂ に 7 配位形成ドーパントである FeO_{1.5}、HfO₂、相変態抑制ドーパントである CeO₂ を種々の濃度で固溶した薄膜について、組成比と基板による弾性場の観点から、局所配位構造-単斜晶相への相変態抑制効果の関係を調べた。特に、従来バルク結晶では単斜晶相形成への抑制効果が期待されないと考えられてきた 7 配位形成ドーパントである FeO_{1.5} をドーブした ZrO₂ において、初め直晶相エピタキシャル薄膜の創製に成功し、強誘電特性の発現を確認した。XRD や STEM による微細組織解析から、6 at%Fe:ZrO₂ により直方晶相が約 70%の体積分率と本研究で最大となり、HZO と同様の直方晶相のナドメイン構造形成を見出した。

〔研究経過および成果〕

ZrO₂ に 7 配位形成ドーパントである FeO_{1.5}、HfO₂、相変態抑制ドーパントである CeO₂ を種々の濃度で固溶した薄膜について、組成比と基板による弾性場の観点から、局所配位構造-単斜晶相への相変態抑制効果の関係を調べた。初めにスパッタリング法で YO_{1.5} 安定化(ZrO₂)YSZ(001)単結晶基板上に種々の組成の薄膜を堆積し、ポストアニールによって固相エピタキシーを行異、結晶相と配向性を X 線回折(XRD)と電子線回折(ED)により調べた。図1に Fe ドープ ZrO₂ に関する結果を示す。直方晶相の 100/010/001 のいずれかの配向でエピタキシャル成長していることが分かったが、共存する単斜晶相との判別が XRD では難しい。ED を見ると 002 反射にサテライトが弱い存在することから単斜晶も共存する。

次に、収差補正 STEM 法により Fe 濃度が 0,6,14at% 試料断面の HAAD-STEM 像(a)-(c)と単斜晶相や直方晶相の HAADF 像のシミュレーション像(d)-(i)を図 2 に示す。シミュレーション結果とのパターンマッチングから Fe 0at%では単斜晶相のみからなる双晶組織

が観察さ

れたのに

対し、Fe

6 at%お

よび 14

at%では

主に直方

晶相のナ

ドメイン

構造から

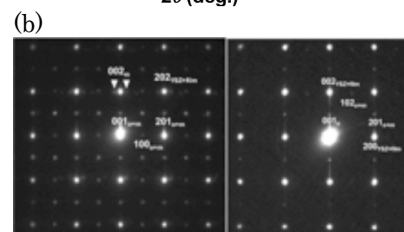
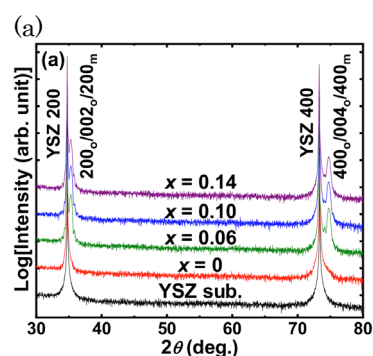
なり一部

にナノサ

イズの単

斜晶相がみられた。しかし、単斜晶相は大きな変形を伴うことから局所的に巨大な弾性場を発生し、大きく成長しないと考えられる。直方晶の体積分率は、Fe 6at%で最大の約 70%に達した。

Fe:ZrO₂ と YSZ 基板の間に下部電極として ITO 層をエピタキシャル成長し、上部電極として Pt 電極を堆積することでキャパシタ構造を作製し、P-E ヒステリシ



6 at%Fe 14 at%Fe
図 1 Fe:ZrO₂ 薄膜の(a) XRD, (b)ED パターン。

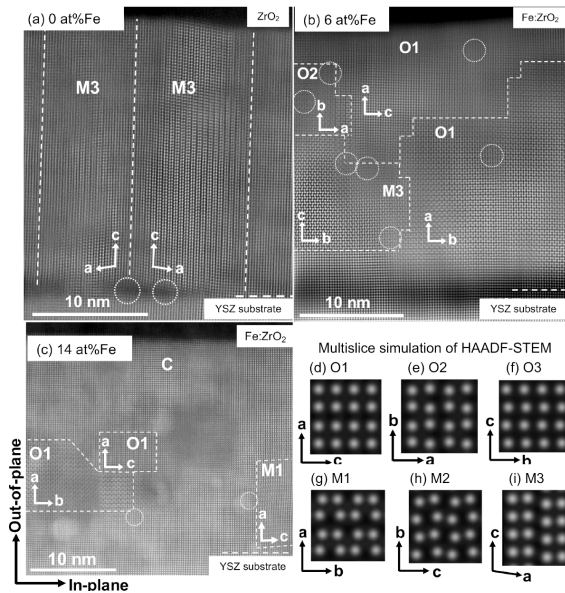


図2 Fe:ZrO₂ 薄膜における Fe 濃度 0,6,14at% 試料断面の HAADF-STEM 像(a)-(c)、直方晶相(d)-(f)や単斜晶相(g)-(i)の HAADF 像のシミュレーション像。

ス測定を行い、結果を図3に示す。Fe 0 at%では、電場に対して分極がリニアに変化しており、常誘電性を示している。これは図2(a)の単斜晶相単相であることと整合する。一方、6 at%ではややいびつな形状ではあるが P-E ヒステリシスを確認できた。ただし、図2(b)から分かるように常誘電相である単斜晶相が 30%程度存在することから、常誘電相の線形成分が重畳されていると考えられる。しかしながら、Fe:ZrO₂ における直方晶相の形成と強誘電性の発現を世界に先駆けて実現できたことは大きな進捗であると考えられる。

最後に、XAFS による局所構造解析から動径分布を解析し、配位状態を調べた。しかし、Fe:ZrO₂ 薄膜では Fe の濃度が少なすぎて精密な解析が困難であった。ここでは、代わりに標準試料である HfO₂ と Hf を 50mol% 添加した ZrO₂ 薄膜における XANES を調べた。標準試料である HfO₂ の結果は単斜晶相に起因したスペクトルと類似し、既往研究とも一致したのに対し、薄膜のスペクトルにおいて 9577eV に特徴的なピークが観測された。これは正方晶相に起因したピークであると考えられる。

事前測定した X 線回折測定の結果から、単斜晶相と極性斜方晶相が形成されていることは確認していた。しかし、正方晶相の回折ピークは基板の回折ピークと被っていることから形成の有無につい

ては判別が不可能であった。今回の XAFS 測定から Hf 添加により正方晶相が形成されていることが示唆された。現在、微小領域から高感度に検出可能なエネルギー損失吸収端微細構造による解析を進めている。

本研究では、従来バルク結晶では単斜晶相形成への抑制効果が期待されないと考えられてきた 7 配位形成ドープアントである FeO_{1.5} をドープした ZrO₂ において、初め直晶晶相エピタキシャル薄膜の創製に成功し、強誘電特性の発現を確認した。XRD や STEM による微細組織解析から、6 at%Fe:ZrO₂ により直方晶相が約 70% の体積分率と本研究で最大となり、HZO と同様の直方晶相のナドメイン構造形成を見出した。

最後に、XANES の測定にご協力いただきました九州大学 吉岡聡助教に謝意を表します。

[発表論文]

1. 【論文】 T. Shiraishi, S. Choi, T. Kiguchi, T. J. Konno, “Structural evolution of epitaxial CeO₂-HfO₂ thin films using atomic-scale observation: Formation of ferroelectric phase and domain structure”, *Acta Mater.*, 235 (2022) 118091.

2. 【招待講演】 木口賢紀, 「STEM 観察の基本原則と強誘電体薄膜のナノ組織解析」, 応用物理学学会 強制的秩序とその操作に関わる第 17 回夏の学校, 2023.9.24 (福岡) .

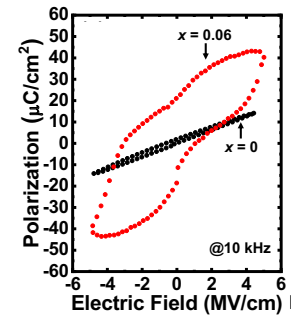


図3 Fe:ZrO₂ 薄膜における P-E 特性。Fe 濃度(a) 0 at%, (b) 6 at%。

【助成 39-17】

大面積フィルム処理のための大気圧長尺マイクロ波プラズマにおける 酸素ラジカル空間分布計測

研究者 名古屋大学 大学院工学研究科 講師 鈴木 陽香

〔研究の概要〕

近年の電子デバイス製造においては、フィルム上へのデバイス形成など新しい展開が始まっており、これらに伴い革新的なプロセス技術が要求されている。高価な真空容器が不要な大気圧プラズマ装置は次世代のフィルムプロセス装置として期待されるが、従来技術では処理速度や処理面積に限界があり、実用化に向けてプラズマ生成・応用技術のさらなる向上が求められている。本研究では、申請者が開発を行ってきた長尺の大気圧マイクロ波プラズマ装置に関して、酸素ラジカル供給による樹脂フィルム表面のエッチングプロセスにおいて、処理に寄与する活性種の評価と、活性種量とプロセスとの関連を明らかにすることを目的として、吸収分光による酸素原子密度評価と XPS による表面分析を組み合わせ、大気圧プラズマ照射による樹脂のエッチングレートの妥当性の検討を行った。

〔研究経過および成果〕

図 1 に本研究で製作した実験装置図を示す。Ar/O₂ 混合ガスを導波管に導入し、スロット(ギャップ幅:0.1 mm)から排出する。プラズマは、2.45 GHz パルスマイクロ波電力(ピーク電力:3.5 kW、パルス周波数:15 kHz、デューティ比:30%)を印加することにより、スロットギャップ内に生成される。ガス純度を向上させるため、スロット付き導波管の両端に気密窓を設置した。マイクロホローカソードランプ(MHCL)からの原子状酸素の発光は、スロット内プラズマから放出されたガス中の原子状酸素に一部吸収され、真空紫外(VUV)分光器で検出される。MHCL と VUV 分光器は共にドライポンプで排気される。光路の真空シールには MgF₂ 窓を使用し、吸収長は 2 つの窓の間隔(2.5 mm)で定義される。これらの分光計測系はプラズマ発生用のスロットに対して平行・垂直に走査可能である。

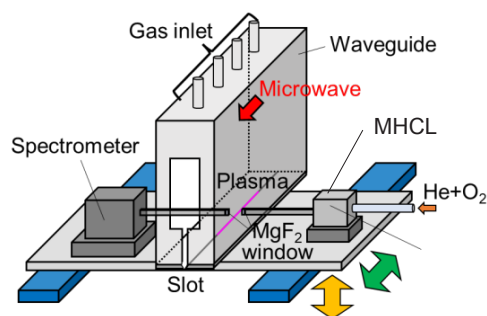


図 1. 実験装置図。

Ar ガスに対しての酸素添加率が 0.07%において、スロットから 5 mm 離れた位置における酸素原子密度の長手方向分布は 60 cm の範囲においてほぼ均一であり、密度は $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 程度であった。また、入射電力の増加に伴い、原子密度は単調に増加した。

酸素添加率を 3%として、ガスの流れ方向に沿った空間分布を測定したところ、スロットからの距離が長くなるにつれて酸素原子密度は指数関数的に単調減少することがわかった。この結果を外挿すると、スロットの位置での酸素原子密度は約 10^{15} cm^{-3} と推定され

た。また、酸素原子の減少は、ガス吹き出による拡散とガス粒子との衝突による失活であると考えられる。酸素原子密度の測定結果と、過去に実施された樹脂エッチング実験との結果を比較すると、処理対象物の位置における酸素原子フラックスは $2 \times 10^{18} / \text{cm}^2/\text{s}$ と計算されたのに対し、フィルムからの炭素原子の除去速度は $4 \times 10^{17} / \text{cm}^2/\text{s}$ であった。酸素原子のフラックスは炭素原子の除去速度を上回っており、酸素原子は重要な要因の一つと考えられる。

表面処理中の試料への熱の影響を調べるため、温度チョークを用いて試料温度を簡易的に測定した。掃引処理(ステージ走査速度 3m/min)において、処理前 20°Cであった試料温度は、プラズマ処理により 40~50°Cに増加することが確認された。従って、本装置を用いた場合、処理に対する熱の影響は小さく、また、樹脂フィルム試料への熱ダメージはほとんどないと考えられる。

次に、プラズマ装置下部に設けた搬送ステージ(速度 3 m/min、スロットからの距離 0.5 mm) にポリイミドフィルムを設置し、サンプルに複数回のプラズマ照射処理を行い、処理前後のサンプル表面を X 線電子分光法(XPS)により解析した。図 2 (a)プラズマ処理前と(b)プラズマ処理後(プラズマ照射時間 8 s)のサンプルの C1s スペクトルを示す。プラズマ処理後に C-O、C=O 結合が減少している。ポリイミドの構造式から、C-O 結合は鎖状構造を構成しており、プラズマ処理を行うことで鎖状構造が破壊されることを示している。また、C1s に対する O1s の割合はプラズマ処理前が 0.16、プラズマ処理後が 0.10 であった。これらの結果は、酸素添加アルゴンプラズマの照射によってポリイミド表面のポリマー構造が大きく変化していることを示している。

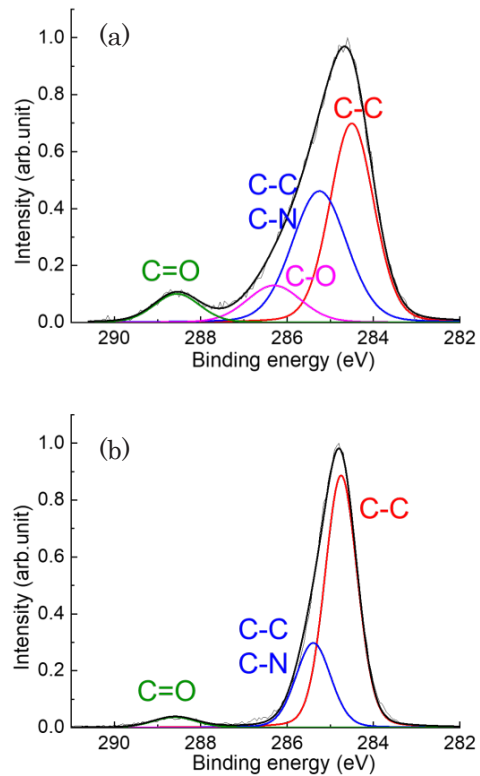


図 2. C1s スペクトル
(a)処理前、(b)処理後。

結論として、酸素ガスを添加した大気圧マイクロ波プラズマを用いた樹脂表面処理プロセスにおいては、酸素原子が重要な役割を果たしていると考えられる。また、本研究では温度による反応の促進の影響は示されなかったが、基板表面において局所的に生じる加熱の影響も考えられるため、熱量の評価が必要である。XPS 分析により、プラズマ照射によって樹脂表面のポリマー構造が破壊され、処理が進行していることが示唆された。

[発表論文]

1. 岩田 悠揮、小笠原 知裕、鈴木 陽香、豊田 浩孝、第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022).

【助成 39-49】

マタギの知と技術の継承に関する社会学的研究

研究者 東北大学教育学部 准教授 鷲谷 洋輔

〔研究の概要〕

本研究は、現代的な文脈においてマタギの知と技術はいかに継承されるかを問いとした。秋田県湯沢市南部のS氏を対象とする徒弟的なエスノグラフィーを通じ、そこに見られる旅マタギの系譜とからだでの学びを強調する継承形式が観察された。さらに、マタギによる継承のプロセスは、自らの経験に依ること、積極的な教示よりも最低限の安全確保の指示が優位であることが明らかになった。これらをふまえ、知識と経験を重ねつつも、常に変化に開かれたかたちで継承がなされること、そこでは自然環境、人間社会、マタギ自身を含めた事象が可変的にとらえられていることが示された。同時にマタギの知もまた動的な対象として探究する視角が提示された。

本研究の問い

現代的な文脈において、マタギの知と技術はいかに継承されるのか。この問いを本研究の出発点とした。これまで、マタギは伝統的な狩猟採集の実践者としてだけでなく、その独特な習俗も含めて多様な関心を集めてきている。学術的には、主として民俗学的な見地からの蓄積がある(たとえば田口 1994、佐藤ら 2004)。その一方で、気候変動や過疎化など、マタギもまた影響を受けている現代的なコンテキストに即した検証は限定的である。野生動物と人間の交錯が社会問題となっている昨今において、「自然と人間との調整役としてのマタギ」に学ぶ学術的・社会的意義は小さくない。



以上をふまえ、本研究は現在のマタギを取り巻く現状を整理し、マタギの知の継承に焦点を当てた。「マ

タギはいかなる知識を持つか」という体系的な記録以上に、そういった知識がいかに編み上げられ、伝えられていくのかを現在進行形でとらえる試みである。

対象と方法

これまでフィールドワークを続けてきた秋田県湯沢市南部のマタギであるS氏を対象とした。さらに、調査者自らが見習いとして弟子入りし、参与観察を行う徒弟的なエスノグラフィーを行った。調査は2022年の1月からおよそ週に1度の現地調査を継続した。フィールドでの観察、聞き取りによるデータを整理・検討することで得られたのが以下の考察である。

考察

1. 旅マタギの系譜と単独狩猟

フィールドワークの現場において、調査者は「二番弟子」「最後の弟子」として言及されるようになったことなどからも、本調査が徒弟的な関係性の中で進んでいることが示されるだろう。銃を譲り受け、猟に帯同するだけでなく、銃の構え方や道具の手入れ、猟場での位置取りから獲物の調理方法などに至るまでの知識とスキルとが、明示的に、そして丁寧に伝えられて

いる。マタギに関する研究の多くが指摘してきた独特なことばの運用や通過儀礼はほとんどない。おそらくS氏らがいわゆる旅マタギの系譜に位置づけることがその背景にある。S氏自身が語るように、当該地域のマタギ集団の始まりは、より北部に位置する地域のマタギ(通称「阿仁マタギ」)の一部が単独、あるいはごく少数で逗留したことに起因している。その折にマタギの技術とマタギとしての経脈とが引き継がれたと推測される。阿仁マタギにみられるような集団での狩猟ではなく、単独あるいは少数で行う形態が当地で継承されているのも、その経緯を反映していると思われる。

2. 自らの体を通じて学ぶ

うちの先祖に教えたのは、月山とか山形の山を専門に歩いてたんだな。そういう人たちの伝達のしかたって、自分で実感して体験して語るから、違うんだよな。

旅マタギの系譜に位置づけるということは、教科書的な情報ではなく、「自らのからだを通じて学ぶこと」の重要性にも通じている。ここでは、<自らに依る>ということと、<からだで学ぶ>ということの二つの側面が重要になる。

S氏が教えるしかたは、明示的な説明(情報)と、大まかな動きの修正を促すこととに大別できる。山菜の見分け方やランドマークの説明は前者、きのこの採り方や猟銃の扱いは後者の例である。前者については、S氏自身がマタギとなり、経験を得た過程そのものが徒弟的な指導ではなく、自身による探究に大きく依存していたことが背景にある。たとえばS氏の父方にマタギの系譜が認められる一方で、大型の動物を対象にするような今日知られるマタギの狩猟実践はほとんどなされていなかったという。S氏にとって、山とのかかわりは自らが知る山の境界を一人で拓いていく営

みであり、若くして家長となった環境において手の届くしかたで家族を養う限られた選択肢であったという事情もある。「自分でできることを自分で拓いていく」という構えが、自らに依って立つマタギとしての習熟につながっている。この点は、旅マタギが単独ないし少数で猟場を開拓した経緯にも重なっている。

一方後者の特徴は、しないこと(禁止)が強調される点である。多くの場合、それは危険の抑止(安全の確保)が求められる場面で生じる。反対に、動きや動作を積極的に促す教示(たとえば「こちらの道を歩いたほうがよい」というようなコーチング的声掛け)は極めて少ない。これらは、最低限度として安全確保が念頭にあることを示唆しているが、そこにはまずは自らが動き体験することに任せるという、自らのからだで覚えることへの信頼がみられる。習い覚えるべき型を予め示すよりも、為すべきではない事柄を示すことで、為すべき大まかな方向性を示すものである。

3. 可変性とその継承へ

S氏にとって、変わり続ける環境の前では、教科書的な情報や過去の経験則は現状を把握する足掛かりに過ぎない。ここでいう環境とは、自然と人間社会との双方も、さらには老いと向き合うS氏自身も含みこむような、可変的で重層的なものである。これらを踏まえると、マタギの知と技術とは自然との関係性においてこそ成り立つものであり、不変の伝統ではなく、常に変化に開かれたものとしてとらえられる。とすれば、マタギの知に迫る試みには、マタギそのものも変化の只中にある対象としてとらえ直すことが求められるだろう。知識や経験を足掛かりにしつつ、いかにマタギは変わり続けているのか。その可変的で動的な実践が、マタギの知をめぐる今後の具体的な課題となる。

発表論文 未発表

【助成 39-57】

評価表現分析で読み解く医学論文査読者の嗜好と思考: 査読自動化へ向けた基盤研究

(中間報告)

研究者 福島県立医科大学附属病院臨床研究教育推進部 副部長・特任准教授 大前 憲史

〔研究の概要〕

論文の質を複数人の専門家で評価する査読の仕組みは、医学エビデンス創出の基盤を成す。しかし、日本では、臨床医が忙しい臨床の傍ら研究に従事することも多く、査読を学ぶ機会は劇的に不足する。また、査読そのものも、性質上閉鎖的で、実態が不透明な部分も多く、査読教育を行う上での大きな障壁となってきた。本研究は、実証的エビデンスに基づき現行の査読の実態を明らかにし、効果的な査読教育の開発に繋げることを目的とする。そのため、まず、公開査読制を採用する医学研究雑誌の査読レポートを集積し、査読に特化した膨大な言語表現データベース(コーパス)を構築する。さらに、コーパスを利用して、医学研究のデザインや方法論的枠組みに着目した疫学的分析と査読特有の構造や評価表現に着目した言語学的分析から、査読者の思考や嗜好を質と量の両面から明確化する。

〔研究経過および成果〕

本研究の計画当初の最も大きな目的は、医学論文査読に特化したコーパスの構築であった。しかし、2022年11月に米国のOpen AI社がChatGPTをリリースしたことを皮切りに、膨大なテキストデータを用いて訓練された先進的な自然言語処理モデルが次々と登場し、比較的安価で簡単に利用できるようになった。訓練に用いられたテキストデータには医学研究や論文に関するものも多く含まれており、医学分野での応用事例もいくつか報告され、さらに自身の使用感覚も踏まえ、その性能の高さからコーパス構築の必要性は大きくないと考えるに至った。一方で、このような大規模言語モデルを本研究の中でテキストデータの言語解析に活用したり、さらには、実際の査読作業の一部のタスクを担ったりすることもできるのではないかと仮説に発展した。

我々はまず、研究の第一段階として、査読者コメントを意味的なまとまりに分類し、各パートに意味づけ

するアノテーションを行った。今回は、公開査読制を採用し、かつ4大トップジャーナルの1つとして知られるThe British Medical Journal (BMJ)に焦点を絞り、BMJに掲載されたランダム化比較試験(RCT)論文に対する査読レポートを解析した。BMJでは一流の査読者が査読を行うため質の高い査読レポートの入手が期待できた。また、観察研究と比較して、RCTでは研究の方法論がある程度決められており、査読レポートも構造化しやすいことが想定される。さらに、RCTは医学以外の領域でも広く用いられる研究デザインであり、得られた知見の汎用性も期待できる。BMJで出版されたRCT論文のうち、出版時期が最近のものから適当に10本抽出した(うち、2本は最初の査読結果でRejectと判断されたものを含めるようにした)。査読を受ける前の原稿とそれに対する初回の査読レポートをBMJのウェブサイトからPDFファイルで入手し、Pythonを用いて査読者のコメント部分のみ自動的に抽出できるようにした。その上で、2本のRCT論文に

対する計 10 名の査読者コメントに対して 2 名の臨床疫学専門家が独立してアノテーションを行った。その後、互いの作業結果を照らし合わせたが想定以上に見解の相違が多く、言語学および教育学の専門家も加わって最終的に合意形成がなされた。

そもそも査読者がコメントする対象は元論文の IMRAD 形式に依存するので、コメントの対象場所として、「論文全体」に関するものから、「タイトル」、「抄録」、「背景」、「方法」、「結果」、「考察」に加えて、「図表や補足資料」、「参考文献」や「謝辞」、「その他」に関するものに分類した。さらに、それぞれの下の階層としてより細かな分類を設定し、最も多いものでは、「方法」について、「報告の形式」や「研究デザイン」、「解析手法」など、計 38 に細分類した。一方で、コメントの内容については、「挨拶」、「賛辞・評価」、「研究の強みの列挙」、「疑義・懸念」、「査読者の見解」、「統計家の見解」、「改善策の提案」、「重要情報の追記や明確化の提案・依頼」、「不適切・不要な記述の修正や削除の提案・依頼」、「事務的報告・指示」、「その他」の計 11 の項目に集約された。

次に、医学論文の執筆経験および臨床疫学の専門性を有し、上記作業には関わっていない臨床医 2 名に、査読者コメントをこれらの項目に基づき改めて分類してもらった。評価者間の一致割合は平均 80% 以上と比較的良好な結果が得られ、不一致部分についても評価者間の議論を通して全て解決可能であった。さらに、同様の分類作業を、今度は Open AI の API を利用して ChatGPT (モデル: GPT-3.5-turbo) を用い、行った。プロンプト上で査読者としての役割を明示し、分類とともにその理由まで記載するよう指示した。平均一致割合では 50% を下回ったが分類理由の多くは妥当と考えられるものが多く、プロンプトの更

なる工夫や利用の仕方により、人の作業を補完できる可能性が高いことがわかった。

この結果からは、実際の査読作業自体においても最新の大規模言語モデル活用の可能性が示唆された。そこで、我々は査読作業における大規模言語モデルの有効性を検討した先行研究について文献レビューを実施した。その結果、医学研究領域では、2023 年 9 月に、少なくとも比較的簡潔な症例報告の査読では ChatGPT の利用が有効である可能性が Biswas らにより報告されていた (ChatGPT and the Future of Journal Reviews: A Feasibility Study, *Yale J Biol Med.* 2023;96(3):415-420)。さらに研究領域を広げ、医学以外も含めると、Liang らスタンフォード大学の研究チームが *Nature* 系雑誌 15 誌からの計 3,096 論文と International Conference on Learning Representations (ICLR) からの計 1,709 論文について GPT-4 を用いて査読を行わせ、人間の査読結果と比較した結果が 2023 年 10 月に報告されている (Can large language models provide useful feedback on research papers? A large-scale empirical analysis. arXiv:2310.01783)。GPT-4 と人間の査読者による指摘の重なりは 30.9~39.2% であったが、人間の査読者間の重なり 28.6~35.3% に匹敵するものであった。さらに、研究者を対象にしたアンケート調査では、回答者の 52.4% が GPT-4 による査読が有用あるいは非常に有用と感じていた。ただし、GPT-4 のトークン数の制限などから、本研究では「意義と新規性」、「受理される可能性のある理由」、「拒否される可能性のある理由」、「改善のための提案」の 4 項目についてのみ評価されていた。使用したプロンプトも公開されており、我々は医学論文においても同様の作業が行えることを実際に確認した。

これまでの研究で得られた成果は、下記の論文や学会、講演などの中で報告することができた。今後は、引き続き GPT-4 をはじめとする大規模言語モデルを活用しながら、さらに査読者コメントの言語解析を進め、特に統計査読者や患者査読者など、査読者の立場の違いがコメントの対象や内容にどのような影響を与えるかに着目していく。さらに、特に日本の臨床家が論文執筆の際、簡単ですぐに参照できるように Reviewer at Hand といった仕組みを実装できるよう引き続き研究を進めていく。

[発表論文]

1. 大前憲史. Cutting Edge 論文解説: Longitudinal Associations between Concurrent Changes in Phenotypic Frailty and Lower Urinary Tract Symptoms among Older Men. 排尿障害プラクティス(メディカルレビュー社) 第31巻第2号. 2023年12月.
2. 大前憲史. 効果的な論文査読を行うために知っておきたい重要な視点. 老年看護学(日本老年看護学会) 第27巻第2号. 2023年1月.

[発表学会・講演・セミナー]

1. 大前憲史. まるわかり! 医学論文査読のお作法 その① 査読ってなに? Dr's Prime Academia. 2024年2月. オンライン.
2. 大前憲史. データベース研究初級者が学ぶ Clinical Question から Research Question へ. 第1回疫学初級ウェビナー. 2024年2月. オンライン.
3. 大前憲史. リサーチクエスチョンにおいて何が最も重要なのか?: Feasible, Interesting, Novel,

Ethical, Relevant. 日本臨床疫学会第6回年次学術大会. 2023年11月. 東京.

4. 大前憲史. ミニ講義. 第11回臨床研究てらこ屋 in 福島. 2023年9月. オンライン.
5. 大前憲史. 量的研究論文、私はこう書く. PCR Connect 2022. 2022年12月. オンライン.
6. 大前憲史. 研究論文のどのパートが最も重要なのか? Introduction, Methods, Results, Discussion. 日本臨床疫学会第5回年次学術大会. 2022年11月. 東京.
7. 大前憲史. 効果的な論文査読を行うために知っておきたい重要な視点. 日本老年看護学会第27回学術集会. 2022年6月. オンライン.

【助成 38-25】

表現力豊かな音声の声質を決める声門流波形と声道伝達関数特徴の解析

代表研究者 富山県立大学工学部 教授 MOKHTARI Parham

共同研究者 富山県立大学工学部 講師 森川大輔

共同研究者 富山県立大学工学研究科 大学院生 河内太一

共同研究者 富山県立大学工学研究科 大学院生 松本幸輝

〔研究の概要〕

This research aimed towards automatic analysis and synthesis of speech that is rich in expressivity. In line with the classical source-filter model of speech production, we sought improvements in the performance of algorithms designed to separate the influence of the glottal flow and the vocal-tract on the speech signal. We improved a benchmark algorithm for estimation of the glottal flow from the speech signal, and we quantified the relationship between physiological parameters of Titze's vocal fold model and acoustic parameters describing the shape of the simulated glottal flow.

〔研究経過および成果〕

Aiming toward physiologically relevant analysis, modelling and synthesis of expressive human voices, our research prioritizes automatic estimation of the laryngeal source (glottal flow) from the acoustic speech signal, and its synthesis with physiological models and computer simulation methods.

In the mid-term report we summarized our research results on automatic formant estimation [1], glottal flow estimation [2][3], and a new database of recorded voice qualities [4]. Here below, we additionally summarize our subsequent research results obtained since the mid-term report.

Iterative adaptive inverse filtering (IAIF) is a benchmark method for estimating the glottal flow from the speech signal, and iterative optimal preemphasis (IOP) has also been proposed as an improvement of

that algorithm. However, the conventional method typically analyses a frame of speech spanning 30-50 ms, which includes several glottal cycles; it therefore suffers from inaccuracy due to the inclusion of the glottal open phase, during which there is acoustic influence of the sub-glottal tract (the

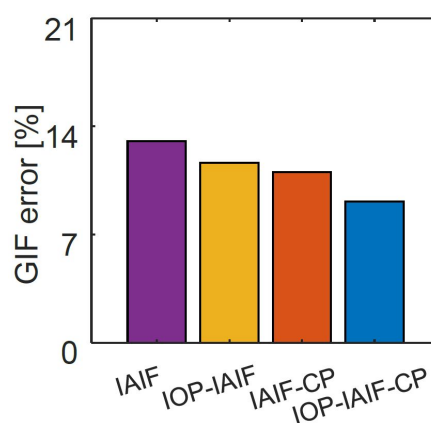


Fig.1 Glottal flow estimation error decreased with closed-phase (CP) analysis [5]

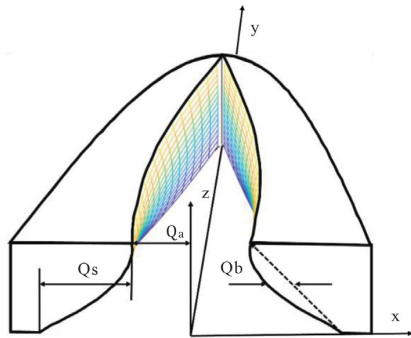


Fig.2 Titze's vocal-fold model [6]

trachea) and the glottis itself. We therefore proposed to combine the benchmark IAIF algorithm with closed-phase (CP) analysis, so that the vocal-tract characteristics and therefore the glottal flow signal too, could be potentially derived more accurately. As shown in Fig.1, evaluation using the OpenGlott dataset revealed overall lower errors for the proposed methods involving CP analysis, and the lowest overall error was obtained for the IOP-IAIF-CP method [5].

Another ongoing project in our laboratory is physiologically-based modelling and synthesis of various voice qualities, aiming at expressive speech synthesis. For this purpose, we investigated the characteristics of a vocal-fold simulation model originally proposed by Titze, to assess whether it is capable of producing various voice qualities. As shown in Fig.2, Titze's model is represented by 3 parameters Q_a , Q_s , and Q_b that describe the pre-phonatory posture of the vocal folds, plus one additional parameter Q_p that controls the phase difference between the upper and lower folds during dynamic oscillation. We used this model with a wide range of parameter settings to synthesize numerous

glottal flow waveforms, then extracted 3 acoustic parameters describing the shape of the glottal flow pulse (OQ, NAQ, and openNAQ). As a result, we were able to quantify the relationship between the vocal-fold model (physiological) parameters and the glottal flow (acoustic) parameters [6].

[発表論文]

1. 河口竜馬、モクタリパーハム、森川大輔(2021.6) 「ラーモニック減算法を用いたフォルマント周波数の自動推定法の検討」、情報処理学会研究報告、Vol.2021-SLP-137 No.22、5 pages.
2. 平野雄大、モクタリパーハム、森川大輔(2021.9) 「プリエンファシスの適用回数が IAIF に基づく声門流推定の精度に与える影響」、日本音響学会講演論文集、939-940.
3. 平野雄大、モクタリパーハム、森川大輔(2021.9) 「音声のスペクトル傾斜モデリングが IAIF に基づく声門流推定の精度に与える影響」、日本音響学会音声研究会資料 Vol.1 No.2 SP-2021-26、135-137.
4. Mokhtari P., Morikawa D.(2022.3) “Introducing a Japanese multi-talker database of laryngeal voice qualities,” 日本音響学会講演論文集.
5. 河内太一、モクタリパーハム、森川大輔(2023.9) 「声門の閉鎖期の音声信号による IAIF に基づく声門流推定」、日本音響学会講演論文集、1115-1116.
6. 松本幸輝、モクタリパーハム、森川大輔(2023.11) 「Titze の声帯モデルのパラメータが声門流波形の音響特徴に与える影響の検討」、日本音響学会音声研究会資料 Vol.3 No.5 SP-2023-42、9-14.

【助成 38-54】

自然体験活動における学校教員の危機管理能力向上を目指した視線特徴分析:初心者と経験者の着眼点比較

代表研究者 立命館大学産業社会学部 准教授 岡本 尚子

〔研究の概要〕

大学生を対象に、危険要因が含まれた自然体験活動場面のイラストを用いて、その中の危険を指摘する過程の視線移動を計測し、自然体験活動引率の経験者群と初心者群の特徴を比較した。「経験者群は半数以上が指摘したが、初心者群は半数未満しか指摘しなかった危険箇所」に着目すると、経験者群の方が視線の停留時間が有意に長かったのは、知識がなければ指摘が難しいと思われる箇所であった。その他の箇所は、停留時間に有意差はなかったことから、初心者群も視線が停留しているものの、知識や経験の不十分さが、危険を指摘できない状況を引き起こしたことが予想された。

〔研究経過および成果〕

1. 目的

現在、日本の小学校における宿泊を伴う自然体験活動(自然の中で自然を活用して行われる活動)の実施率は、およそ 90%となっており、多くの学校で実施がなされている。自然体験活動は、通常の学校生活よりも事故が発生しやすいことから、引率する教員の危機管理能力が重要となる。しかし、小中学生や 10 代・20 代の若者が、学校外で自然体験活動(キャンプ含む)を行う機会は減少していることが報告され、教員を目指す大学生が、十分な自然体験活動の経験をしてきているとはいえない(内閣府 2013)。また、教員養成を行う大学においても、その位置づけの難しさから、自然体験活動に関する十分な学習や引率研修を行っているとはいえない状況にある。有する経験も知識も不十分であることを前提にした、危機管理能力育成のための教員養成支援が求められている。

そこで、本研究では、自然体験活動経験・引率経験ともに豊富な「経験者」と、自然体験活動経験が少

なく、引率経験のない「初心者」に対して、自然体験活動場面での危険予測時の視線移動を計測し、その特徴を明らかにすることを目的とする。具体的には、危険要因が含まれた自然体験活動場面のイラスト(危険予知トレーニングシート)を用いて、その中の危険を見つける過程における視線移動を計測し、経験者と初心者の特徴の違いを比較する。

2. 方法

対象:次の 2 群を設定し、合計 23 名の大学生(平均 21.7 歳、標準偏差 1.1)を対象とした。

- ①経験者群:指導員として自然体験活動に 3 年以上携わっている大学生 7 名
- ②初心者群:指導員として自然体験活動の経験がない大学生 16 名

手続き:危険因子が含まれたキャンプ場面のイラストである危険予知トレーニングシート(公益財団法人全国子ども会連合会発行)を見て、危険と考えられる箇所に丸を書き込んで指摘する実験課題を設定した。実験後には、丸を書き込んだ各箇所につい

て、なぜ危険と考えたかの理由記述を求めた。実験課題は、3問(川遊び、調理、薪割りの3場面)とし、1問を30秒間に設定した。

記録:アイトラッカー (Tobii pro グラス 2:トビーテクノロジー製)を用いて、視線計測を行った。

3. 結果および考察

3-1.行動指標

表1は、各被験者が、危険と判断した箇所に丸を付した個数の平均を示したものである。いずれの課題においても経験者群の方が指摘箇所数が有意に多かった。経験と知識が、より多くの危険の予測や気付きにつながったと考えられる。

表1 危険と指摘した箇所の個数

課題	経験者群	初心者群	
川遊び	7.0	4.6	***
調理	7.3	5.1	*
薪割り	4.3	2.4	**

*** $p<.001$, ** $p<.01$, * $p<.05$

3-2.視線移動データ

各課題について、群間の視線移動回数を比較した結果、有意な差は認められなかった。課題全体の移動頻度には、群による差はないといえる。

危険と指摘した箇所のうち、「経験者群は半数以上の参加者が危険と指摘したが、初心者群は半数未満の参加者しか危険を指摘しなかった箇所」を取り上げ、各箇所の視線停留時間を群別に算出した。表2は、その結果を示したものである。2群間に有意差が認められたのは、「裸足で川に入っている」「まな板が机からはみ出ている」「地面に物が散らばっている」「ナタを持つ手の手袋を外す」であり、いずれも経験者群の方が停留時間が長い結果となった。これらは、「刃物を人に向けない」などの危険が直接的に想像しやすいものと違い、

知識がなければ指摘が難しかったり、経験がなければ危険が予測しづらかったりするものと考えられる。初心者群は、知識や経験が不十分であるために、経験者群ほど危険箇所が目に留まらず、十分に目を配れなかったと推察される。

その他の箇所については、2群間に有意差は認められなかったことから、初心者群も視線が停留しているものの、危険と回答するまでには至らなかったことが指摘できる。知識や経験の不十分さが、危険箇所を見ている危険を指摘できない状況を引き起こしたことが予想される。

表2 危険指摘箇所ごとの群別平均視線停留時間 (ms)

課題	危険指摘箇所	経験者群	初心者群	
川遊び	割れた瓶が落ちている	1217.1	804.8	
	裸足で川に入っている	5106.9	2847.6	*
	釘が落ちている	694.3	596.1	
調理	モリを持ちつつ不注意である	2165.7	1353.8	
	まな板が机からはみ出ている	1291.0	601.2	*
	地面に物が散らばっている	3524.9	1911.9	*
	包丁使用中の人の後ろから手を出そうとしている	1545.3	2774.1	
薪割り	まな板の台が不安定である	868.6	262.4	*
	ナタを持つ手の手袋を外す	1596.9	521.1	**
	割る前の薪や、それをまとめるロープが地面に置いてある	4407.9	3475.1	
	ナタと逆の手に手袋をつける	1299.6	1403.4	
	薪割りの土台が不安定である	1351.0	814.9	

** $p<.01$, * $p<.05$

[発表論文]

- 岡本尚子, 黒田恭史 (2022) 自然体験活動場面における危険予測時の視線特徴—初心者と経験者の比較—, 日本教育実践学会第25回研究大会
- 岡本尚子, 黒田恭史 (2023) 経験の違いが危険判断時の着眼点の違いをもたらすのか—キャンプ活動場面の視線計測—, 第41回日本生理心理学会

本冊子のPDFを掲載しています
<https://casiozaidan.org/naiyou/past/>

公益財団法人 カシオ科学振興財団
〒151-8543 東京都渋谷区本町一丁目6番2号
TEL (03) 5334-4747
令和6年5月1日 発行
