研究助成
成果報告論文集

（令和5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39回（令和3年度）研究助成

成果報告論文一覧

第39回（令和3年度）研究助成

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
1	人工光合成を加速する固-固界面制御分子素子の開発	北海道大学 大学院理学研究院 准教授 小　林　厚　志
2	CO_2電気化学還元に選択的に駆動する電極触媒開発と作動機構解明	京都大学 大学院工学研究科 教授 寺 村　謙 太 郎
4	1〜2トランス次元系の設計・創出と電子物性	名古屋大学 理学部 特任准教授 北　浦　　良
5	糖尿病予防に向けた無線式糖度計測レンズの開発	早稲田大学 大学院情報生産システム研究科 教授 三　宅　丈　雄
6	超音波と液晶を用いたフィルム型多機能レンズ	同志社大学 理工学部 教授 小　山　大　介
7	細胞内微小金属粒子形成による放射線治療の効率化	北海道大学 大学院医学研究院 准教授 小 野 寺　康 仁
8	人工知能による人間支援デバイスを用いた次世代型口腔がん検診システム構築のための基盤研究	山形大学 医学部 講師 石　川　恵　生
9	高速画像センシングによりヒトの運動能力を引き出すマン・マシンシステムの研究	名古屋大学 大学院工学研究科 准教授 青　山　忠　義
10	新物質探索によるスキルミオン物質空間の拡張	北海道大学 大学院理学研究院 教授 吉　田　紘　行
11	ノンコリニア反強磁性の電流誘起高速ダイナミクスの直接観測と新機能スピントロニクスデバイスの創製	東北大学 材料科学高等研究所 特任助教 竹 内　祐 太 朗
12	少数の受信信号データに基づく複数ネットワークによる抽出特徴量の最大化と人工データセットの生成	東京大学 生産技術研究所 特任助教 小　島　　駿
13	メゾスケールトポロジカル発光マテリアルの開発	千葉大学 大学院工学研究院 教授 矢　貝　史　樹
14	有機合成に頼らない有機EL材料開発：アントラセン発光体分子のナノ空間閉じ込めによる発光色変調	東京大学 大学院工学系研究科 助教 岸　本　史　直
15	光によって低侵襲的な脱着を可能とする矯正歯科用接着剤の開発に関する研究	東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 准教授 田　村　篤　志
16	CO_2を化成品原料へ再資源化するための革新的な微生物電気合成システムの開発	金沢大学 新学術創成研究機構 教授 仁　宮　一　章
18	$SrTiO_3$系新規光触媒電極の作製とプラズモニック増強による太陽光水分解性能の向上	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 准教授 河　村　　剛
19	太陽光発電パネル用の静電砂塵クリーニングシステムにおける摩擦現象が粒子除去性能に及ぼす影響	京都大学 大学院工学研究科 助教 安　達　眞　聡
20	光ポンピング法によるプラズマ励起粒子時空間分布の３次元可視化	京都大学 大学院工学研究科 助教 占 部　継 一 郎
21	次世代バイオマス構造体：100%セルロースナノファイバー成形体の機械要素用切削加工法に関する研究	横浜国立大学 環境情報研究院･人工環境と情報部門 助教 大　久　保　　光
22	電界による局所カイラル磁気構造誘起を利用した磁壁伝送に関する研究	大阪大学 産業科学研究所 准教授 小　山　知　弘
23	傍熱型ホローカソードを用いたプラズマウィンドウの実用化	広島大学 工学部 助教 山 崎　広 太 郎
24	Tailor-made color filter -色覚異常の多様性を考慮するデジタルカラーフィルタ	香川大学 創造工学部 准教授 佐　藤　敬　子
25	冷却速度を変えるだけで超伝導体にも絶縁体にもなる物質―何が超伝導に必要なのか、実験からの機構解明	愛媛大学 大学院理工学研究科 教授 内　藤　俊　雄
26	錯体分子集積による極性配位高分子合成と機能開拓	九州大学 大学院理学研究院 准教授 大　谷　　亮

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
27	非太陽周回小天体ミッションにおける天体暦エラーの影響の定量化と軽減	九州大学 大学院工学研究院 助教 陳　　泓　儒
28	外場応答性金属錯体を用いた多機能性電子材料の創出	熊本大学 大学院先導機構 准教授 関　根　良　博
29	SEUを利用した高位置分解能型半導体検出器の実証試験とシミュレーション	総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 講師 津　野　総　司
30	フォトクロミックエレクトロニクスを利用した新しいエステルフリー型分解性高分子材料の分解制御	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 教授 網　代　広　治
31	医薬品製造用3Dプリンターに関する萌芽研究	名古屋市立大学 大学院薬学研究科 准教授 田　上　辰　秋
32	内包フラーレンの精密秩序集積による超原子物質科学の開拓	大阪公立大学 工学部電子物理工学科 准教授 渋　田　昌　弘
33	ナノスケール分子磁石の縮重電子軌道を利用した新しいマルチフェロイクスの開拓	大阪公立大学 大学院理学系研究科 教授 細　越　裕　子
34	昆虫の眼を超える偏光と位相を検出する2Dセンサー	埼玉医科大学 保健医療学部 教授 若　山　俊　隆
35	光圧増幅ナノ構造体を用いたナノ物質マニピュレーション法の開発	神奈川大学 理学部 准教授 東 海 林　竜 也
36	カイラリティーを特定した2つの単層カーボンナノチューブ間の熱伝導の解明	東京理科大学 理学部第一部 ポストドクトラル研究員 入　田　　賢
37	表面プラズモン共鳴型光ファイバーセンサーによる地熱スケールの計測	明治大学 理工学部 助教 岡　崎　琢　也
38	光エネルギーによる新たな無痛性不整脈治療の開発	北海道大学病院 助教 渡　邉　昌　也
39	培養皿の中で運動を再現する - 培養骨格筋への電気刺激システムの開発を通じた運動応答遺伝子の解析	東北大学 加齢医学研究所 助教 久　保　　純
40	末梢伝搬メカニズムの解明に基づく軟骨伝導デバイス群の開発	千葉大学 フロンティア医工学センター 教授 中　川　誠　司
42	脳への微弱な電気刺激がリハビリテーションを促進する分子細胞機序の解明	お茶の水女子大学 基幹研究院 助教 毛　内　　拡
43	神経情報の操作計測のためのフレキシブルマイクロLEDシートの開発	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 准教授 関　口　寛　人
44	神経サーキット特異的光操作による精神疾患への新たなアプローチ	福島県立医科大学 医学部 助教 中　園　智　晶
45	収束超音波のニューロモデュレーション効果の作用機序の解明とこれを用いた神経ネットワーク活動の制御	杏林大学 医学部 講師 三　嶋　竜　弥
47	行動・ドーパミン・神経活動の同時計測による注意欠陥多動性障害の予測アルゴリズムの創出	金沢医科大学 医学部 助教 古　山　貴　文
48	中枢および自律神経系情報に基づく複合型ニューロフィードバックによる注意機能訓練系の開発	成蹊大学 理工学部 理工学科 准教授 櫻　田　　武
50	「心の目」の欠如：国内における新奇事例「アファンタジア（aphantasia）」の提唱	福島大学 人間発達文化学類 准教授 髙　橋　純　一
51	青少年の非認知能力の向上に有効な体育授業時の教師行動の特徴	群馬大学 共同教育学部 講師 島　　孟　留
52	高性能インターネット望遠鏡の制作と高校生を対象とした新しい遠隔授業の開発	東京学芸大学 教育学部 教授 土　橋　一　仁
53	本物体験を提供するツアーガイドのトレーニング構築～持続的な観光におけるガイドの質の向上に向けて	金沢大学 融合研究域 准教授 山 田　菜 緒 子

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
54	ビジョン介入を用いた英語学習に対する動機づけ向上に関する量的・質的検証	信州大学 教育学部 助教 青　山　拓　実
55	自律型モビリティと共生する社会におけるヒトの移動・回避行動特性の解明	豊橋技術科学大学 情報･知能工学系 助教 田　村　秀　希
56	医看工芸連携を促進する共創型知的財産教育とその手法についての実証的研究	大阪工業大学 知的財産学部 准教授 吉　田　悦　子
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
58	プロジェクションマッピングを用いた3次元コンテンツ提示による幼児教育のための能動的学習支援システム	千葉工業大学 先進工学部 准教授 藤　井　浩　光
59	立体視180度動画を用いたVR建設現場教材の開発と脳波・脈波モニタリングによる学修効果の評価	国士舘大学 理工学部 准教授 位　田　達　哉
60	AI技術援用による科学的事実に基づいたエネルギー政策の構築	明治大学 法学部 教授 勝　田　忠　広
61	身体と社会：乳幼児の運動協調が社会関係の形成に及ぼす効果	立教大学 現代心理学部 教授 大　石　幸　二

第38回（令和2年度）研究助成

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
10	安定･安価な高効率有機EL発光素子の開発－Cu(I)錯体の励起状態解析を基にして	群馬大学 大学院理工学研究科 教授 浅　野　素　子
50	「掛かりつけ農家」をハブとする社会的ネットワークの経済的合理性と頑健性の検証	石川県立大学 生物資源環境学部 准教授 山　下　良　平

第37回（令和元年度）研究助成

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
1	熱磁気効果を活用した革新的環境発電技術の研究開発	名古屋大学 大学院工学研究科 教授 水　口　将　輝
42	複数地域の連携による不登校児童の学習支援としてのオンラインゲームを用いたまちづくり学習の開発	名城大学 都市情報学部 准教授 田　口　純　子
43	教員育成スタンダード化政策における女性管理職育成に関する調査研究―先進的な取組を中心に―	立教大学 コミュニティ福祉学部 助教 跡　部　千　慧

【助成 39－01】

人工光合成を加速する固-固界面制御分子素子の開発

代表研究者　北海道大学 大学院理学研究院　准教授　　小林　厚志

〔研究の概要〕

本研究では人工光合成とも呼ばれる太陽光水分解光触媒の高活性化を目指し、色素二層化酸化チタンナノ粒子に対して、電子伝達剤を表面担持することで光電荷分離効率の抜本的向上を目指して研究を展開してきた。トリスビピリジン型 Ru(II)錯体増感剤と可視光透過性に優れたヘキサシアニド Ru(II)錯体伝達剤を逐次多層化することで、色素増感酸化チタン光触媒系として世界最高の水素生成量子収率(2.2%)を実現しつつ、これまで活用が難しいとされたヒドロキノン系伝達剤も活用可能であることを合わせて実証した。これらの成果は、高効率 Z スキーム型水分解光触媒の実現にむけて必須とも言える固-固界面における一方向電子伝達の実現に、本戦略が極めて有効であり、色素と伝達剤の組み合わせによるさらなる拡張性や将来性を示したものといえる。

〔研究経過および成果〕

太陽光と水から水素を生成可能な水分解光触媒反応において、可視光を幅広く利用でき、電子移動の駆動力を十分確保可能な二段階励起（Z スキーム）型光触媒が注目を集めている。高効率な系の創成には、水酸化触媒部から水還元触媒部への一方向的な電子移動の実現と、これら 2 つを繋ぐ電子伝達剤との高効率・高選択的反応性の実現が必要不可欠である。我々はこれまでに、水素生成光触媒として機能する層状ニオブ酸塩に対し、Ru(II)光増感剤を Zr^{4+}イオンとの配位結合により二層化した色素増感系を構築し、光触媒表面へ担持される電子伝達剤の可視光透過性が光増感サイクルに多大な影響を及ぼすことを見出してきた。[1]

そのような背景を踏まえて本研究では、水素生成光還元として高活性な Pt 担持酸化チタンを用い、酸化還元電位の異なる2種類の Ru(II)ポリピリジル錯体増感剤を複層化し、さらに正孔受容剤として適する酸化還元電位を有しながら可視光を透過するヘキサシアニド Ru 錯体を表面担持した、光レドックスカスケード触媒 (**PRCC-1**; **HCRu**-Zr-**RuCP^6**-Zr-**RuP^6**@Pt-TiO_2; **HCRu** = $[Ru(CN)_6]^{4-}$, **RuCP^6** = $[Ru(mpbpy)_3]^{10-}$, **RuP^6** = $[Ru(pbpy)_3]^{10-}$, H_4mpbpy = 2,2′-bipyridine-4,4′-bis(methanephosphonic acid), H_4pbpy = 2,2′-bipyridine-4,4′-bis(phosphonic acid) を新たに構築し、光電荷分離効率と電子伝達剤との反応性制御を試みた。[2]

図1に酸化還元可逆な電子源としてコバルトトリスビピリジン錯体$[Co(bpy)_3]^{2+}$またはヒドロキノンスルホン酸カリウム(H_2QSK)を用いた水素生成光触媒反応の結果を示す。**HCRu** を表面担持した **PRCC-1** はいずれの電子源条件下においても、**HCRu** を持たない二層色素増感光触媒（DDSP; Zr-**RuCP^6**-Zr-**RuP^6**@Pt-TiO_2）よりも高い活性を示した。**PRCC-1** の表面に担持した **HCRu** を鉄類縁体 **HCFe** ($[Fe(CN)_6]^{4-}$)に変更した **PRCC-2** が **DDSP** よりも低活性であったことを考慮すると、電子源となる$[Co(bpy)_3]^{2+}$や H_2QSK からの電子供給に十分な駆動力を確保しつつ、

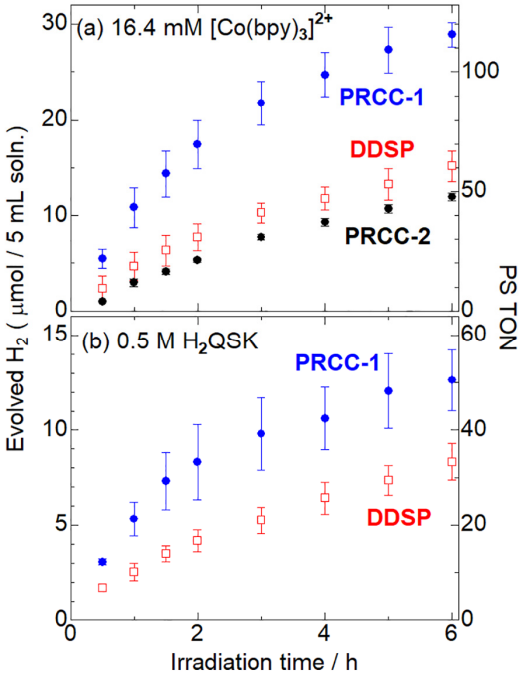


図 1. (a) $[Co(bpy)_3]^{2+}$または(c)H_2QSK を電子源とした **PRCC-n** または DDSP による光水素生成実験結果.

酸化チタンへの電子注入後に生じる正孔を光触媒表面へ導く適切な酸化還元電位勾配を形成させることが極めて重要であることが示唆された（図２）。**PRCC-1** は 24 時間の光照射により、系中に存在する $[Co(bpy)_3]^{2+}$を一電子酸化種へ完全に酸化しながら水素生成反応を駆動できる耐久性を有することも明らかとなり、Zr^{4+}イオンによる増感剤の複層化や HCRu の表面担持が増感剤の脱離や分解を抑制に効果的であることも示唆された。興味深いことに H_2QSK を電子源とした場合には、反応6時間後においても反応液の pH がほとんど変動しなかった。これはH_2QSKが水素生成プロトン源としても機能していることを示唆しており、2電子2プロトン移動を伴うヒドロキノン系電子伝達剤が水素生成光触媒反応へ活用できた例として注目に値する。

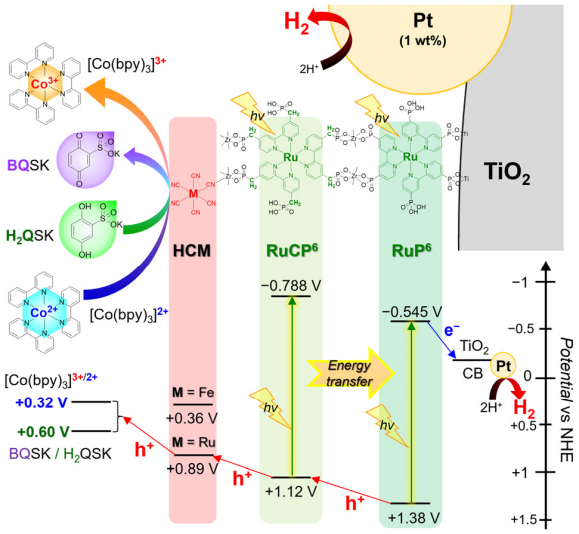


図 2. PRCC-*n* (*n* = 1,2)の Ru(II)光増感剤-電子伝達剤多層膜の構造と推定エネルギーダイヤグラム.

以上の成果は、高効率 Z スキーム型水分解光触媒の実現にむけて、光増感剤と伝達剤を多層担持する本戦略が有効であることを実証するものであり、増感剤と伝達剤のさらなる拡張性を有することを考慮すれば、人工光合成の実用化に向けた基盤的戦略として期待できる。

〔発表論文〕

1. N. Yoshimura, O. Tomita, R. Abe, M. Yoshida, A. Kobayashi, Importance of Electron Mediator Transparency: Photocatalytic Hydrogen Production from Polyoxometalate using Dye-double-layered Photocatalysts, *ChemCatChem* **2023**, *15*, e202201386.
2. N. Yoshimura, M. Yoshida, A. Kobayashi, Efficient Hydrogen Production by a Photoredox Cascade Catalyst Comprising Dual Photosensitizers and a Transparent Electron Mediator, *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 6035-6038.

【助成 39－02】

CO_2 電気化学還元に選択的に駆動する電極触媒開発と作動機構解明

代表研究者　京都大学大学院工学研究科分子工学専攻　教授　寺村　謙太郎
共同研究者　京都大学大学院工学研究科分子工学専攻　教授　田中　庸裕

〔研究の概要〕

ガス拡散電極セル(GDE)を用いた CO_2 電気化学還元系を構築し，気相からの高濃度 CO_2 の供給により液相中に CO_2 を供給する反応系と比較して還元電流密度の向上を達成した．GDE は Ag 種の担持により還元電流密度が 2 倍以上に向上し， 86%の高い選択率で CO を生成した．液相のみに CO_2 を流通させると CO 生成への選択率及び還元電流密度がいずれも低下し，気相からの CO_2 供給の重要性と GDE の優位性が示された．

〔研究経過および成果〕

【緒　言】

CO_2 を再資源化する技術として，再生可能エネルギーの利用，常温・常圧下での運用が可能な電気化学還元に期待が寄せられている．液相中での CO_2 電気化学還元おいては，電解液への CO_2 の溶解度は低く，電極表面への CO_2 供給が律速となるため，現在のところ実用化レベルの還元電流密度は得られていない．このような背景のもと，高濃度な CO_2 を気相から，プロトン源を液相から触媒に供給可能なガス拡散電極(GDE)を用いた GDE セルが検討され，還元電流密度の向上が報告されている．当研究室では，これまでに AgO を前駆体として電気化学的に還元した Ag 電極が，液相中での CO_2 電気化学還元において高い選択率で CO を生成することを見出した．本研究では，AgO 前駆体を用いた GDE を作製し，GDE への基質供給が CO_2 電気化学還元活性に与える影響を検討した．

【実　験】

CO_2 電気化学還元には，カソード気相室，カソード液相室，アノード液相室からなる GDE セルを用いた．カソード気・液相室の間に挟んだ GDE を作用極とし，対極に Pt ワイヤー，参照極に Ag/AgCl 電極を用いた三電極法により評価した．電解液には 0.1 M $KHCO_3$ 水溶液を用いた．GDE にはカーボンペーパー(SGL Carbon, SIGRACET® GDL39BB, 1.9 cm^2)を用い，AgO，Vulcan XC-72，Nafion™分散液，純水及び 2-propanol から調製した触媒インクを滴下，減圧乾燥して Ag 前駆体を担持した．触媒担持面を液相側に向け，0 V vs. Ag/AgCl の定電位を 15 分間印加して AgO の還元前処理を行った．また，対照実験として作用極に Ag を担持していない GDE，及び Ag 板(ニラコ, 99.98%, 1.9 cm^2)を用いた．電極表面の清浄化のため−1.0 から−2.0 V vs. Ag/AgCl の範囲で印加電位を繰り返し掃引後，−1.6 V vs. Ag/AgCl の定電位で CO_2 電気化学還元を行った．気・液相室の一方のみ，または，気・液相室の両方に合計 20 mL min^{-1} の CO_2 を流通し，反応開始 30 分後の還元電流密度及び CO 生成への選択率を評価した．

【結 果 と 考 察】

図 1 に各種電極を用いた CO_2 電気化学還元の反応開始後の電流密度および CO へのファラデー効率

を示す. ガスを透過しない Ag 板を作用極に用い, 液相室に CO_2 を供給すると, 0.86 mA cm^{-2} の還元電流密度を示し, 気相生成物における CO への選択率は 71%を示した. 一方, Ag ナノ粒子を担持した GDE に気・液相室の両側から CO_2 を供給すると, Ag 板の 3 倍以上の還元電流密度(3.2 mA cm^{-2})を示し, また, Ag 板より高い CO への選択率(86%)を示した. Ag ナノ粒子を担持していない GDE を用いると, 還元電流密度は 0.94 mA cm^{-2} であったが, CO はほとんど生成せず, H_2O 分解由来の H_2 が気相生成物の 99%を占めた(CO への選択率:0.92%). これらの結果より, 担持した Ag ナノ粒子が CO の生成に寄与したと結論した. Ag を担持した GDE に気相室から CO_2 を供給すると, CO 生成への選択率(85%), 還元電流密度(3.4 mA cm^{-2})ともに, 気・液相室の両側から CO_2 を供給した場合と比べて有意な差は認められなかった. 一方, 液相室のみから CO_2 を供給した場合, 1.5 mA cm^{-2} の還元電流密度を示し, CO 生成への選択率は 22%と大きく低下した. 以上より, 気相からの CO_2 供給が高い CO 生成活性に重要であると考えられ, GDE の優位性が示された.

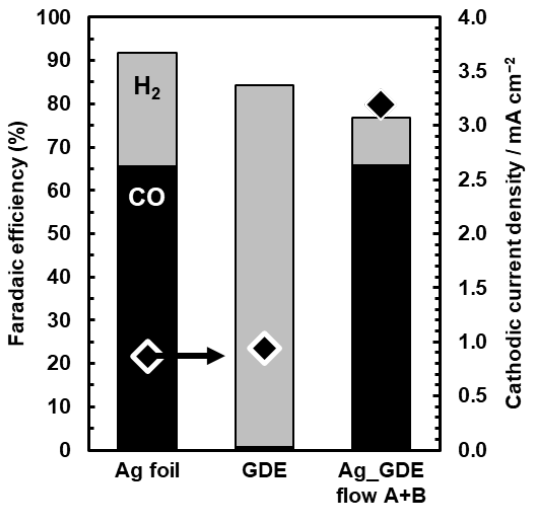


図1 各電極を用いたCO_2電気還元反応における反応開始30分後におけるCOへのファラデー効率(左)および還元電流密度(右)
対極: Ptワイヤー, 参照極: Ag/AgCl, 電解液: 0.1 M $KHCO_3$水溶液, カソードCO_2流量合計: 20 mL min^{-1}, 印加電圧: −1.6 V

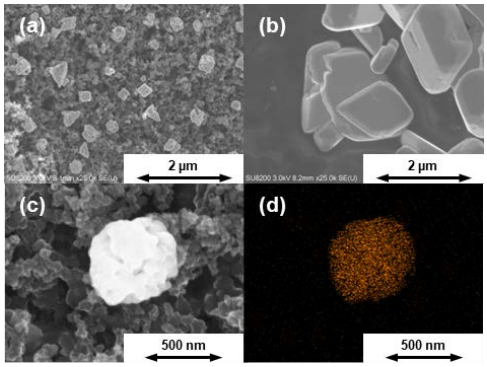


図2 SEM像およびEDX分析像: (a,c,d)Agナノ粒子担持GDE, (b)AgO試薬粉末

図 2 に Ag ナノ粒子を担持した GDE の SEM-EDX 像およびインク調製前の AgO 試薬粉末の SEM 像を示す. 図 2(a)より, 数百 nm 単位の Ag ナノ粒子がカーボンペーパー上に担持されていることが観察された. 図 2(b)にインク調整前の AgO 粉末の SEM 像を示す. 平滑な表面を持つ AgO の粒子径は 1 μm よりも大きく, カーボンペーパー上の Ag ナノ粒子に比べて大きな粒子であった. カーボンペーパー上の粒子は図 2(c)および(d)に示す SEM-EDX 像より Ag ナノ粒子であることを確認した. すなわち, 溶媒に分散した AgO を電気化学的に還元する過程において分散, 還元, 凝集が繰り返された結果, AgO 前駆体よりも比較的小さい粒径・大きな表面積を有する Ag ナノ粒子が形成されたと結論した. 金属ナノ粒子の粒径が触媒活性(電流密度)に影響することはよく知られており, 今後の活性向上には電極表面上の金属ナノ粒子の粒径及び分散性が重要であると考えられる.

〔発表論文〕

1. CO の選択的生成を目指したガス拡散電極による CO_2 電気化学還元, 稲田孟, 寺村謙太郎, 朝倉博行, 細川三郎, 田中庸裕, 第 129 回触媒討論会

【助成 39－04】

1～2 トランス次元系の設計・創出と電子物性

代表研究者　名古屋大学理学部　特任准教授　北浦　良

〔研究の概要〕

本研究では、独自の結晶成長法を用いてナノスケールの二次元半導体の構造を制御し、新機能を持つ二次元半導体の創製を試みた。特に、接合幅が 10 ナノメートル以下の二次元接合構造に着目し、それを用いて超短チャネルトランジスタの実証など、新しい光電子機能の開発に取り組んだ。この一連の研究により、接合幅が原子 1 個分しかない超微細な接合構造を初めて実現するとともに、接合構造に特徴的な光学特性を発見することに成功した。現在、超短チャネルデバイスの実証に向けたデバイス作製プロセスの開発を進めており、近い将来、一定の成果を得ることができると考えている。

〔研究経過および成果〕

次元性は物質のバンド構造を左右し、光学的・電子的な性質に大きな影響を与える。例えば、グラフェンでは、多層構造であるグラファイトを単層にすることで、ディラック・コーンと呼ばれる特徴的なバンド構造が出現し、質量のないディラック電子が現れることが知られている。この発見を契機として、グラフェンを含む多様な二次元系の研究が急速に発展し、二次元系の研究は現在の材料研究で最も活発な分野の一つとなっている。

次元性による物性変化は、2 次元への変化に限らず、1 次元への変化においても現れる。例えば、グラフェンを巻き上げたカーボンナノチューブではバント端の状態密度が発散し、特徴的な光学応答が見られる。本研究では、2 次元層状構造に 1 次元構造を埋め込んだ新奇ナノ構造(二次元接合構造)を制御して生み出す手法を確立するとともに、その光・電子物性探索を行った。

本研究では、本研究では有機金属化学気相成長(MOCVD)法を用いて、まるでレゴを組み立てるように二次元接合構造をプログラム構築できる手法の確立を行った。MOCVD 法は、液体原料に Ar をバブリングし、原料蒸気を反応室に送り込み、加熱された基板上で反応させる方法である。原料の供給量はマスフローコントローラー（MFC）で制御され、原料の供給はソレノイドバルブ（SV）の開閉で行われる。構造制御性および再現性の向上をめざし、MFC、SV、基板温度制御を自動制御し、ボタン一つで成膜を行う自動成膜装置の開発をはじめに行った。以下に、開発した装置の概要を示す。

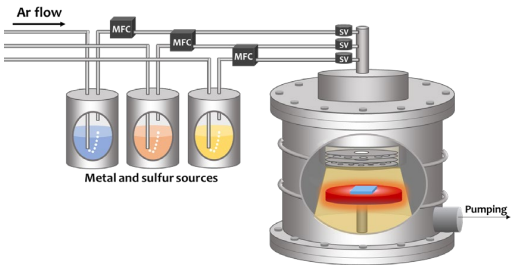


図 1. MOCVD 装置の概略図、バブリングによって原料をチャンバーに供給し、加熱した基板上に吹き付けることで結晶成長を行う。

本実験では、開発したプログラムを用いて、六方晶窒化ホウ素基板上に Et_2S 供給下で$(t\text{-}Bu{=}N)_2W$

$(NMe_2)_2$ と$(t\text{-}Bu{=}N)_2Mo(NMe_2)_2$ を交互供給して、2 次元 WS_2／MoS_2 接合構造を作製した。AFM 像には、結晶内部に WS_2 および MoS_2 に対応する明暗のコントラストが見られ、MoS_2 幅は 10 nm 以下と極めて細いことがわかった。また、AFM の高さプロファイルより、結晶の厚みはおよそ 1.0 nm であったことから作製した構造は単層であることがわかった。次に、接合界面の原子レベルの構造解析を行うため、球面収差を補正した走査透過型電子顕微鏡(STEM)を用いた高角度環状暗視野(HAADF)観察を行った

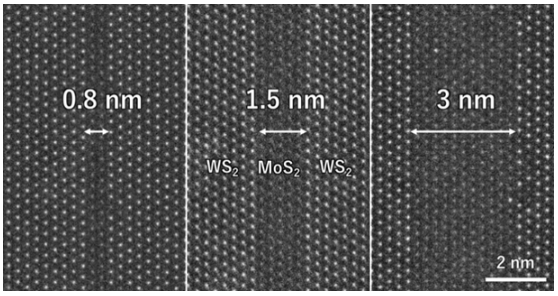


図 2. WS_2/MoS_2 接合構造の HAADF-STEM 像。接合界面が原子レベルで平坦であることがわかる。

図 2 に示したのは、異なる太さを持つ WS_2/MoS_2 接合構造の HAADF-STEM 像である。HAADF 像では、原子番号に強く依存したコントラストが付き、W 原子が最も明るく、Mo 原子がそれよりも暗く観察される。左から Mo 原料の供給時間を 15~60 秒で変化させて成長させた 2 次元接合構造の界面付近の像であり、供給時間に応じて 0.8 ~3 nm の接合幅が実現できていることがわかる。0.8 nm の接合幅は、これまでに報告されている作製された 2 次元接合構造の中で最も細いものである。また、予備的結果ながら、最近単元子の接合も実現することができた。実現した接合界面は原子レベル急峻であり、接合界面で原子の混合は起こっていない。

WS_2/MoS_2 接合構造の光応答性には、1.55eV 付近に WS_2 や MoS_2 単体では現れない新たなピークが観測された。WS_2/MoS_2 接合構造のバンド計算の結果を考え合わせると、この発光は MoS_2 の伝導帯から WS_2 の価電子帯への遷移によるものであると考えられる。また、1.55eV の新しいピークの強度の励起光強度に対する対数プロットの傾きは 0.5 であり、このピーク強度は励起光強度に対して強く飽和していることもわかった。

〔発表論文〕

1. Nanami Ichinose, Mina Maruyama, Takato Hotta, Zheng Liu, Ruben Canton-Vitoria, Susumu Okada, Fanyu Zeng, Feng Zhang, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Ryo Kitaura. Two-dimensional atomic-scale ultrathin lateral heterostructures. arXiv:2208.12696
2. Takato Hotta, Haruna Nakajima, Shohei Chiashi, Taiki Inoue, Shigeo Maruyama, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Ryo Kitaura. Trion confinement in monolayer MoSe2 by carbon nanotube local gating. Applied Physics Express. 16 [1] (2023) 0150012022
3. Sihan Zhao, Ryo Kitaura, Pilkyung Moon, Mikito Koshino, Feng Wang. Interlayer Interactions in 1D Van der Waals Moiré Superlattices. Advanced Science. 9 [2] (2022) 2103460
4. Kaoru Hisama, Yanlin Gao, Mina Maruyama, Ryo Kitaura, Susumu Okada. Continuous Fermi level tuning of Nb-doped WSe2under an external electric field. Japanese Journal of Applied Physics. 61 [1] (2022) 015002

【助成 39－05】

糖尿病予防に向けた無線式糖度計測レンズの開発

代表研究者　早稲田大学大学院情報生産システム研究科　教授　　三宅丈雄

〔研究の概要〕

コンタクトレンズは，屈折異常を矯正して視力を補強するウェアラブルな高度医療機器としての利用が一般的であったが，近年，これらレンズと電子デバイスを組み合わせることで「視る」から「診る」を実現可能なスマートコンタクトレンズの開発が盛んである．このような背景の中，申請者は世界で失明原因第一位である糖尿病網膜症を検出するための涙中糖度を無線で計測するためのスマートコンタクトレンズを開発している．本研究課題では，糖度計測可能な酵素修飾アンテナ素子の開発を主たる目的とし，さらに共振結合回路と組み合わせることで，無線で糖度情報を計測することに挑戦した(図1)．

〔研究経過および成果〕

本課題で開発する眼レンズは、糖尿病に関わる生体情報を手軽に取得できることに加え、疾患予防や治療効果を数値データとして視える点に優れるため、健康寿命の延伸や医療費削減に対する社会的貢献への期待が持てる。これは、近年開発が盛んな IoT（インターネット・オブ・シングス）に Health の H を加えた IoHT を実現するものであり、高齢化社会における在宅診断・治療へのビジネス展開が可能になる。また、労働者を見守る Industry4.0 や Society5.0 に向けたサービスビジネスへと展開できることが予想される。

グローバルにおける失明原因第１位は、糖尿病(網膜症)であり、涙中グルコース濃度をモニタリングすることが出来れば、より正確な眼診断が可能となる。東京医科歯科大学三林研究グループの成果によると、血中と涙中糖度は高い相関性があり、大よそ 8 分程度遅れて涙中糖度が変化する。しかしながら、涙成分は、分泌量が 3 μl min^{-1} cm^{-2}と少なく、血中濃度と比べると約 2 桁低い値(13–51 μM 糖度)で変化するため計測が極めて困難であった。一般的に血糖値を始めとする糖度計測においては、正確性という観点で酵素を用いたバイオセンサが古くから開発されてきた。我々は、酵素/メディエータ/カーボンナノチューブが分子レベルで配列した 3 次元集積化酵素フィルムを開発することで、糖度計測の高感度化と世界最高性能のバイオ発電を実現することに成功した(図2)。

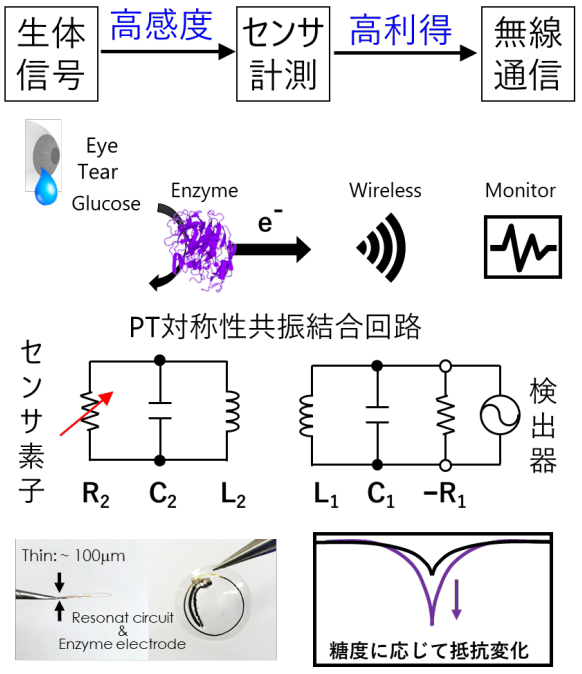


図１．無線式糖度計測レンズの概要

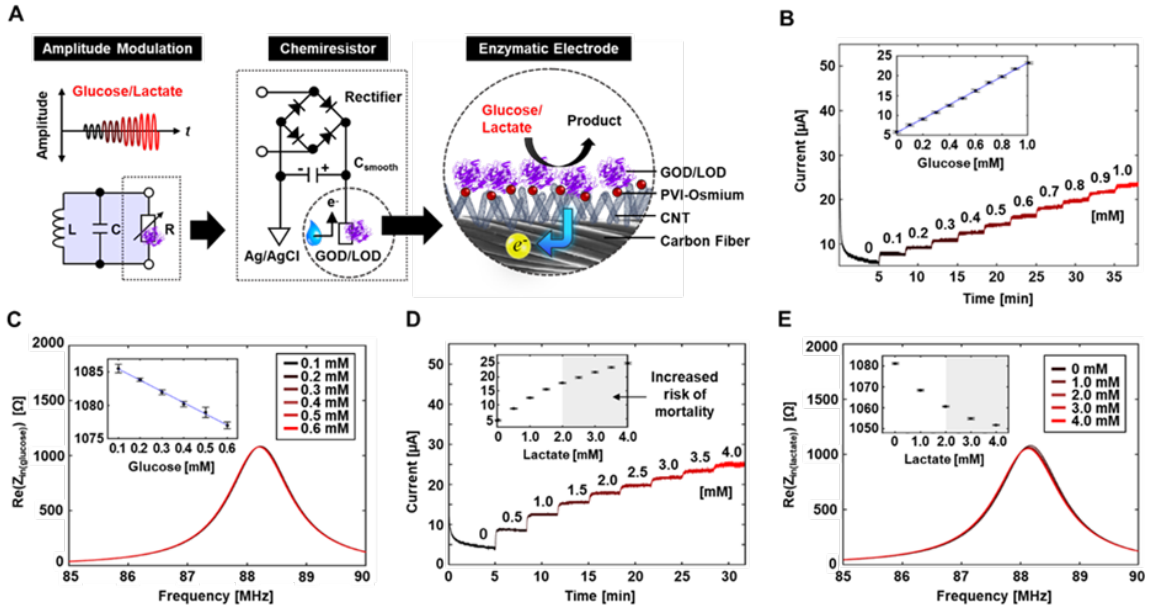


図２．グルコース(糖度)に応じた振幅変調および糖度計測レンズの開発

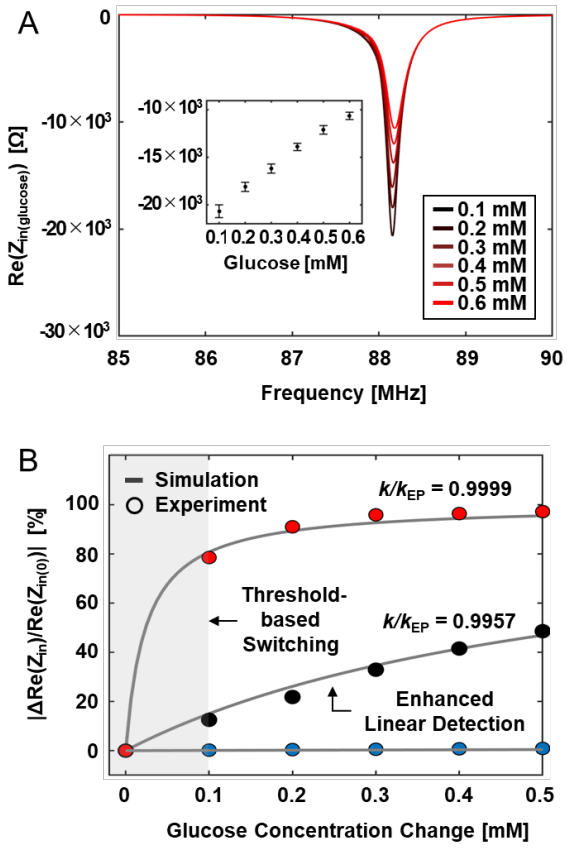


図３．糖度の無線計測結果

特筆すべき点は、グルコースオキシダーゼ酵素とメディエータが静電相互作用で密に結合しているため、大気中酸素と反応することなく電子伝達可能な高感度グルコースセンサを実現したことである。さらに、酵素を修飾したマイクロ繊維を開発し、コンタクトレンズ上で利用した世界初の無線給電と生体電池を組み合わせたハイブリッド電源の開発に取り組んできた。この高感度な酵素センサと従来型 LC 共振回路を統合されることで無線式糖度計測が可能であることを確認した。ただし、損失を多く含む従来型の無線システムを用いて、これら微弱な生体信号を無線で計測することは極めて困難であった。そこで申請者は、新しい原理の共振結合回路を用いることで無損失化(ほぼ100%利得)が実現出来ることに加え、涙中糖度を無線で計測できることを実験的に確かめた(図3)。

［発表論文］

投稿中

【助成 39－06】

超音波と液晶を用いたフィルム型多機能レンズ

代表研究者　同志社大学　理工学部　電気工学科　教授　　小山　大介
共同研究者　同志社大学　理工学部　電気工学科　教授　　松川　真美

〔研究の概要〕

本研究では、超音波によって液晶配向を変化させることにより、その焦点距離を制御可能な超薄型の可変焦点レンズについて検討した。特に、可変焦点機能にとって最適な液晶層厚み、液晶層の多層化、レンズの基板への搭載方法の3項目について検討した。レンズ内の3次元的な液晶配向分布は液晶配向膜による強制力、超音波振動による音響放射力、液晶の弾性的性質の関係によって決定され、液晶層厚みには最適値が存在することが明らかとなった。また液晶の多層化によって、単層レンズと比較し焦点変化特性は劇的に向上する結果が得られた。さらにレンズの端部を基板に固定することにより、固定前と同等の焦点変化特性を実現できた。これらの結果は将来的な超音波液晶レンズの電子デバイスへの搭載にとって非常に意義あるものと考える。

〔研究経過および成果〕

本研究では、超音波によって液晶の屈折率分布を変化させることにより、光学的焦点位置を制御可能な超薄型の可変焦点レンズ（以下超音波液晶レンズ）について検討を行った。特に、研究期間内において①超音波液晶レンズの最適な液晶層厚み、②可変焦点範囲の拡大を目的とした積層型超音波液晶レンズ、③電子回路への搭載を想定した超音波液晶レンズの設置方法の3項目について検討を行った。

第1に、液晶層厚みが可変焦点機能に与える影響について検討を行った。図1は開発した超音波液晶レンズの構造を表しており、2枚のガラス円板（直径 15 mm と 30 mm, 厚み 0.5 mm）間にスペーサを介し、液晶（5CB）を注入することにより異なる厚さ（100～300 μm）の液晶層を作成した。ガラス円板にアニュラ型の圧電超音波振動子（PZT）を接着しており、電気信号を入力することによりレンズ全体に超音波振動が励振される。図2は異なる液晶厚さを有する超音波液晶レンズの消費電力と焦点距離変化量の関係を表しており、いずれのレンズにおいても電力の増加と共に

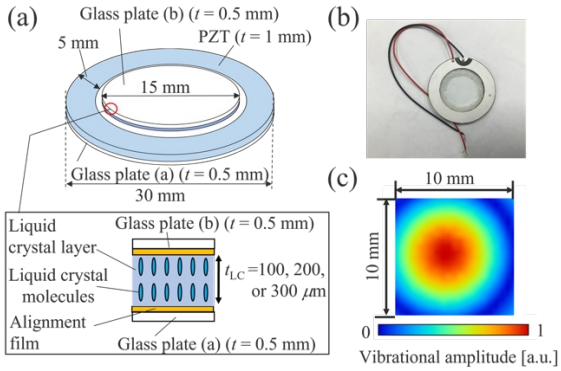


図１ 超音波液晶レンズの構造と振動分布

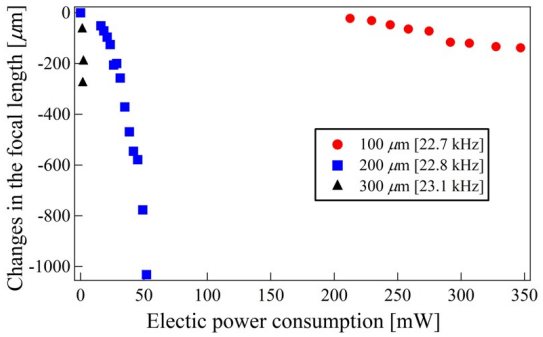


図２ 液晶層厚みが異なる場合のレンズ焦点変化特性

焦点距離変化量は増大した(焦点変化量が負値であることは焦点がレンズ側に近づく、すなわちレンズは凸レンズとして動作することを意味する)。従って同結果は、入力信号振幅値によって焦点位置を制御可能な可変焦点レンズであることを表している。また、液晶層厚みが 100 および 300 μm のレンズと比較し、液晶層厚み 200 μm のレンズでは可変焦点範囲が大幅に上回ることがわかり、液晶層厚みには最適値が存在することが明らかとなった。これらの結果は、3次元的な液晶配向が液晶配向膜による強制力、超音波振動によって生じる音響放射力、液晶の弾性的性質の関係によって決定されることを示唆している。

第2に、可変焦点範囲の拡大を狙った超音波液晶レンズの積層化を検討した。図1と同構造の超音波液晶レンズの裏面にも同形状の液晶層を作成し、中央のガラス円板厚みが異なる試作器を複数作成した。単層および2層の超音波液晶レンズの焦点変化特性を測定した結果、単層レンズと比較して、2層レンズではより小さい消費電力で大きな可変焦点範囲を実現した。また、中央のガラス円板が薄いほどその可変焦点範囲は増大することが明らかとなった。

第3に、将来的な電子回路への搭載を想定した、超音波レンズの固定方法について検討した。固定対象とした基板に液晶層径とほぼ同径の穴を設け、単層レンズのガラス円板端部を基板に直接接着し、その焦点変化特性を評価した。固定前、固定後のレンズの超音波振動分布および焦点変化特性を比較した結果、固定前後にかかわらずレンズ中心部分には共振たわみ振動が励振され、ほぼ同等の焦点変化特性が得られることが明らかとなった。

〔発表論文〕

1. T. Iwase, J. Onaka, A. Emoto, D. Koyama, M. Matsukawa, Relationship between liquid crystal layer thickness and variable-focusing characteristics of an ultrasound liquid crystal lens, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 61, No. SG, p. SG1013 (2022)
2. J. Onaka, D. Koyama, Y. Kuroda, A. Emoto, M. Matsukawa, Optical evaluation of a double-layered ultrasound liquid crystal lens, J. Appl. Phys., Vol. 131, No. 19, p. 193103 (2022)
3. T. Iwase, Y. Kuroda, J. Onaka, A. Emoto, M. Matsukawa, D. Koyama, Orientation angles of liquid crystals via ultrasound vibrations, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 61, No. 6, p. 068002 (2022)
4. 黒田悠真, ジェシカ オナカ, 原田裕生, 江本顕雄, 松川真美, 小山大介, 基板実装型超音波液晶レンズの検討, 日本音響学会 2022 年秋季研究発表会 (2022)
5. Y. Kuroda, T. Iwase, J. Onaka, A. Emoto, M. Matsukawa, D. Koyama, Ultrasound Multi-Layered Liquid Crystal Lens, IEEE International Ultrasonics Symposium 2022 (2022)
6. 黒田悠真, 原田裕生, ジェシカ オナカ, 江本顕雄, 松川真美, 小山大介, 基板実装型超音波式可変焦点液晶レンズ, 第 43 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (2022)
7. Y. Kuroda, T. Iwase, J. Onaka, Y. Harada, A. Emoto, M. Matsukawa, D. Koyama, Effects of the interlayer thickness on the optical characteristics of an ultrasound multilayered liquid crystal lens, Appl. Phys. Express, Vol. 15, No. 12, p. 122004 (2022)

【助成 39－07】

細胞内微小金属粒子形成による放射線治療の効率化

代表研究者　北海道大学大学院医学研究院　准教授　　小野寺　康仁

〔研究の概要〕

金属微粒子はがん細胞内への導入により放射線治療や CT・MRI における増感効果を示すことが知られている。精製された金属微粒子をがん細胞特異的に細胞外から導入するための方法が広く研究されているが、放射線増感を特に必要とする腫瘍深部への物質送達は容易でなく、さらにがんの多様性や可塑性を勘案すると、普遍的な方法の確立は難しいと考えられる。本研究では、磁性細菌に由来する鉄微粒子形成因子の遺伝子（群）を利用してがん細胞の内部に鉄微粒子を自ら形成させる手法の確立を目指す。

〔研究経過および成果〕

磁性細菌の鉄微粒子形成に関する文献を参考にして、粒子形成の過程で特に重要であると思われる遺伝子を複数選定した。人工遺伝子合成サービスを利用して、これらの遺伝子の cDNA を得た。各遺伝子の核酸配列は、ヒト細胞における発現を効率化するためにコドンの最適化を行った。また、ウエスタンブロッティングや免疫蛍光染色による検出のため、任意のタグを付加することのできる制限酵素配列を 5’および 3’末端に付加した。これらの cDNA 断片を、HA タグをコードする配列と共に、哺乳動物細胞用のプロモーターを含むトランスポゾンベクター[1]に挿入し、得られた発現ベクターを乳癌細胞株 MDA-MB-231 に導入した。ベクターに組み込まれた薬剤耐性遺伝子を利用して、当該遺伝子が安定導入された細胞群を選択した。細胞内のタンパク質を抽出して電気泳動し、HA タグ抗体を用いたウエスタンブロットによって発現を確認した。いずれの遺伝子を導入した場合も、予想されるサイズのタンパク質として発現していることが明らかとなった。タグを付加する部位による発現量やサイズの違いは殆ど見られなかった。

次に、各遺伝子を安定発現した MDA-MB-231 細胞の放射線感受性を調べた。簡便な方法として、生存細胞数を吸光度により推定することのできる「CCK8 アッセイ」によって、放射線照射後の細胞数の変化を解析した。例として、遺伝子 X および遺伝子 Y を単独導入した細胞の放射線照射後の細胞数を図1に示す。表記の数値は親株（parental）の未照射群を1として全体を基準化し、さらに相対変化を明確にするため各遺伝子を導入した細胞の未照射群の数値を1として再基準化したものである。図から明らかなように、これらの遺伝子の単独導入では放射線増感効果が全く得られなかった。その他の遺伝子のうち、単独導入で放射線増感の傾向を示すものも見られたが、その効果はごく僅かであった。

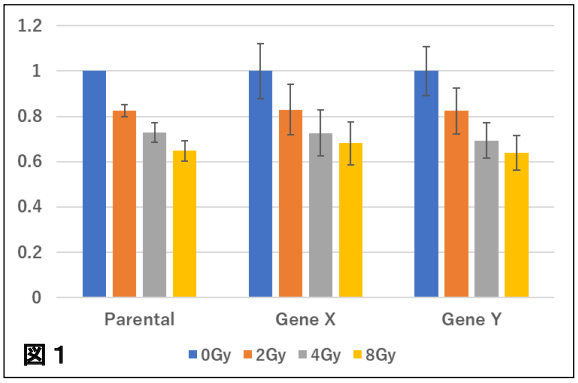


図 1

以上の結果は当初から想定しており、したがって複数遺伝子の同時導入が必要となると考えていた。本研究において導入を試みる鉄微粒子形成因子群は磁性細菌において協調的に機能しており、そのためにはそれらの細胞内局在が重要であると考えられる。すなわち、細胞内で会合し得ない因子同士が相互作用することは、期待できない。そこで複数因子の同時導入に先立ち各因子の細胞内局在について免疫蛍光染色によって確認した。予想に反し、細胞質中に疎らに存在する因子は少なく、むしろ何らかの細胞内構造に局在するものが多く認められた。例として、前述の遺伝子 X および遺伝子 Y の遺伝子産物の細胞内局在を図2に示す。X は細胞質中に比較的疎らに

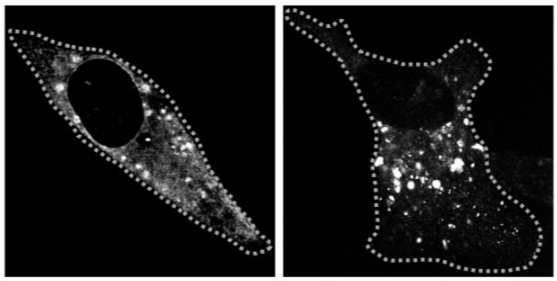


図２

存在するものの、何らかの粒子状の局在も示した。後者については発現過多による非特異的なタンパク質集積等の可能性もある。一方で、遺伝子 Y については、細胞質中に疎らに存在するものは殆ど見られず、多くが小胞状の局在を示した。小胞の内部に局在するのか、或いは小胞の脂質膜上に局在するのか、この結果からは明らかではない。いずれにしても、このようにタンパク質の殆どが何らかの構造に集積してしまう場合、同じ部位に局在するものを除いて、他の因子と相互作用することはできないと考えられる。ここでは明示しないが、特定の細胞内小器官に集積する傾向を示す因子も見出されている。

磁性細菌に由来するタンパク質が、磁性粒子形成能を持たない哺乳類細胞の内在性タンパク質と「意味のある相互作用」をすることは考えにくい。したがって、上述の細胞内局在がタンパク質間相互作用に基づく場合、その局在も意義のあるものとは考えにくい。一方で、生体膜を構成する脂質二重層は、磁性細菌と哺乳類細胞とで共通する因子の一つである。磁性細菌において、鉄微粒子は膜間領域と呼ばれる狭い空間で形成される[2]。このことを考慮すると、脂質と磁性粒子形成因子の相互作用が重要である可能性は十分に考えられる。上述のような、一部のものに見られた特定の細胞内小器官への集積は、このような脂質－タンパク質間の相互作用を反映しているのかもしれない。細胞質中に自由拡散している状態のタンパク質同士よりも、生体膜上に局在した状態、すなわち二次元平面に限局して拡散している状態のタンパク質同士の方が、相互作用を生じやすいのは自明である。本研究で目指す効率の良い鉄微粒子形成を達成するためには、粒子形成のための適切な場を選定することが重要である。何らかの生体膜上をその場として各因子を集積させることは、有効な手段の一つであると考えられる。

〔参考文献〕

1. Onodera Y, Nam JM, Horikawa M, Shirato H, Sabe H. Arf6-driven cell invasion is intrinsically linked to TRAK1-mediated mitochondrial anterograde trafficking to avoid oxidative catastrophe. Nat Commun. 2018; 9(1): 2682.
2. Müller FD, Schüler D, Pfeiffer D. A Compass To Boost Navigation: Cell Biology of Bacterial Magnetotaxis. J Bacteriol. 2020; 202(21): e00398-20.

【助成 39－08】

人工知能による人間支援デバイスを用いた
次世代型口腔がん検診システム構築のための基盤研究

代表研究者　山形大学医学部歯科口腔外科　職名　講師　　石川恵生
共同研究者　山形大学工学部　職名　教授　深見忠典
共同研究者　東京医科大学　　職名　教授　杉本昌弘

〔研究の概要〕

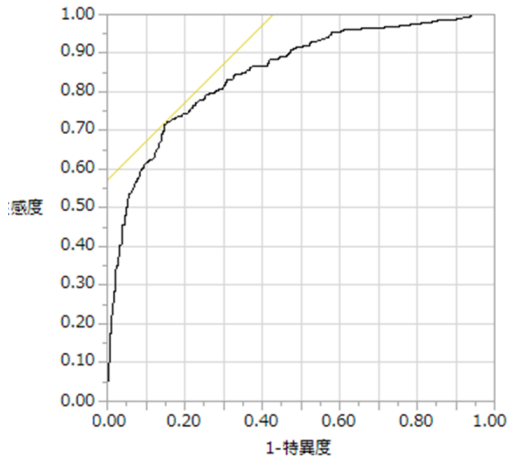
口腔がんは舌や歯肉など「口のなか」に発生するがんの総称であり、予後不良として知られている。予後改善のためには、他のがん同様に早期発見・早期治療が極めて重要である。そこで我々は、口腔がんを早期に発見し、遅滞なく高次医療機関に送るために、唾液による一次スクリーニングの後に、かかりつけ歯科医院での人工知能（AI）搭載型口腔粘膜診断装置による高精度な二次スクリーニングを行う口腔がん検診システムの発案に至った。本研究では、上記検診システムの社会実装に向けた基盤的研究を行った。即ち質量分析装置をベースとした唾液中物質測定を行い、我々の有するマーカー候補物質が約80％の精度で口腔がんをスクリーニングできることを明らかにした。また、AI 技術を用いて悪性、良性、健常の3グループの画像判別を約93％で達成した。これらの結果は従来の検診に置き換わる可能性のある新しい仕組みとしての可能性を示すことができた。

〔研究経過および成果〕

本研究では、以下[1]、[2]の研究を行った。

[1] 新規バイオマーカーの探索研究および検証研究

口腔がん患者・口腔潜在的悪性疾患患者341名と健常者539人の唾液中の物質を、キャピラリー電気泳動・質量分析装置を用いて網羅的定量測定を行った。その結果、約88％の精度で判別できることを明らかにした（下図）。



なお判別モデルを作成するために使用した物質は、

Malonate,

1,3-Diaminopropane,

N1,N12-Diacetylspermin,

Adenosine,

N-Acetylneuraminate,

5-Aminovalerate

等である。

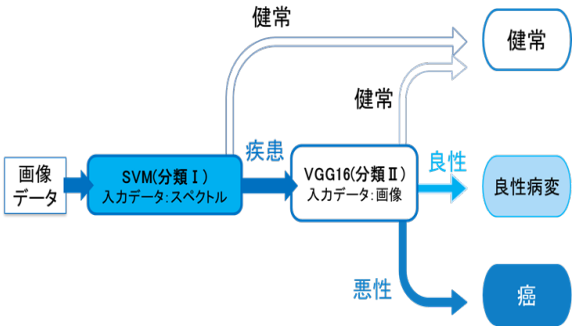
さらにわれわれは上記の候補物質を用いて作成した判別モデルを用いて、全く別の集団（口腔がん患者・口腔前がん患者）でも判別が可能かどうかの検証研究を行った。検証研究の対象は、口腔がん患者・口腔潜在的悪性疾患患者61名と健常者195名とした。

候補物質を用いて作成した判別モデルを用いて検証グループでの判別精度を算出した結果、約80％の精度で判別できることを明らかにした。

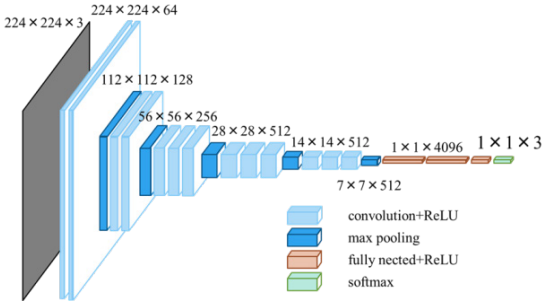
[2] 悪性、良性、健常の画像を判別するソフトウエアの開発

悪性（口腔がん画像）1245 人分と、良性（口腔良性病変画像）1762 人分、そして健常 1113 人分の合計 4120 人分の画像を用いて AI による画像解析処理を行った。これらの画像は、識別する領域を小さくし、さらに画像の分割・水増し処理により画像枚数を増やすことによりデータ総数を 1000 倍に増加させた。

判別モデルは、SVM（サポートベクターマシーン）を用いて、[健常]と[健常以外]の 2 グループ判別（一次分類）を行ったうえで、疾患群を[健常]、[良性]、[悪性]の 3 グループ判別（二次分類）を行う二段階判別方式を採用した（下図参照）。



なお二次分類には、大規模画像認識のコンペティション（ILSVRC2014）で使用された畳み込み層のブロックが 5 つ，その後に全結合層が付く構造で、畳み込み層が 13 層、全結合層 3 層の計 16 層からなる畳み込みニューラルネットワークである VGG16 を用いた（下図参照）。



これらの解析により、[悪性]を[悪性]と判別できる正解率は、約 95%であった。また[良性]を[良性]と判別できる正解率は 90%であった。また[健常]を[健常]と判別する正解率は 96%であった。

今回われわれは、次世代型口腔がん検診システムといえる簡便で高精度な口腔がん二段階スクリーニングシステム確立のための基盤研究を行った。唾液による判別精度は約 80%であったが、社会実装に向けて決して悪くない精度であると考えている。画像判別ソフトウエアの精度についても、目標としていた 99%には達しなかったが、現段階の基盤研究としては有用な結果が得られたと考えている。

今後は社会実装に向けて、それぞれのスクリーニング方法のさらなる精度向上を目指し、研究を進めていく予定である。

【助成 39－09】

高速画像センシングによりヒトの運動能力を引き出すマン・マシンシステムの研究

代表研究者　名古屋大学大学院工学研究科　准教授　　青山　忠義
共同研究者　国立長寿医療研究センター　室長　　加藤　健治

〔研究の概要〕

本研究では，高速画像計測により少し先の未来を予測する「未来視」を基盤とし、高速画像計測による予測結果を遠隔ロボットの動作修正に使用し，その運動感覚をヒトへ提示するヒューマン−マシン・システムを開発した．また，開発したシステムを通した運動感覚をヒトへ提示する運動補完がヒトの運動学習に与える影響を調査した．実施した卓球のリフティング動作による被験者実験の結果から，ヒトの学習能力を大幅に超える運動感覚の提示により，運動学習が促進させる可能性が示唆された．

〔研究経過および成果〕

これまでにスポーツトレーニング支援の研究開発が行われているが，その多くは，映像提示によるトレーニング支援であり，コーチやインストラクターが手取り足取り指導するような，フィジカルなスポーツコーチング支援には至っていない．昨今のコロナ禍により，人の接触がないスポーツ指導への要求は上がっているものと考える．本研究では，高速画像計測による予測結果を遠隔ロボットの動作修正に使用し，その運動感覚をヒトへ提示するヒューマン−マシン・システムを開発した．本研究では，高速画像計測による少し先の状態量を推定する技術を「未来視」と呼称する．本研究成果論文では，開発したシステムを用いて，未来視による運動補完がヒトの運動学習に与える影響を調査し，スポーツトレーニング支援システムへの応用を見据え，ヒトの運動学習を促進させる手法を考察したので報告する．

図 1 に本研究で提案しているヒューマン−マシン・システムの構成図を示す．提案しているシステムでは，高速ビジョンによる実時間画像処理により，操作対象の少し先の状態量を推定し，操作するロボットの動作を修正する．その際，修正された運動感覚がハプティクスデバイスを介してヒトへフィードバックされることにより，ヒトの運動学習を促進させることを狙ったものである．図 2 に提案システムの外観を示す．3 自由度ロ

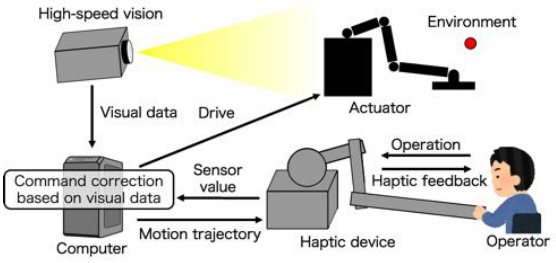


図 1 提案システムの概要

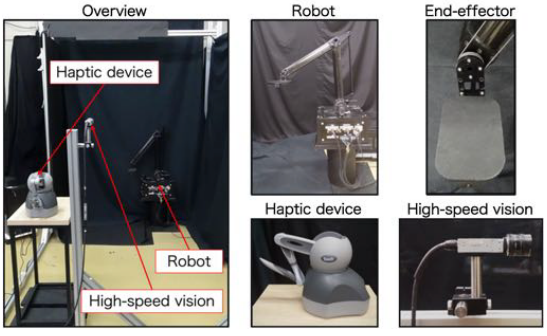


図 2 提案システムの外観

ボットアーム，制御用 PC，高速ビジョンシステム，力覚デバイスから構成されている．ロボットアームはヒトが操作する力覚デバイスの先端位置情報を基に 2 自由度で駆動する．高速ビジョンはロボットアームから 1.25 m 離れた地点に設置している．

未来視による運動補完がヒトの運動学習に与える影響を調査するため，被験者実験を行った．本実験は，名古屋大学工学部倫理部会の承認を経て実施された(21-16)．被験者は自由落下するボールを遠隔ロボットに装着した卓球ラケットにて設定された目標点を目指して打ち返す．打ち返したボールの軌道の最高点と目標点との誤差を評価指標とする．タスクの難易度を調節するため，ボールの落下開始地点を 2 箇所，目標点を 4 箇所設定する．タスク 1 試行ごとに目標点は反時計回りの順番に，落下点は目標点との組み合わせが全て同じ回数になるように適宜変更する．各被験者はこのタスクを 104 回，それを 3 セット繰り返し行う．被験者をグループ A, B に分割し，グループ B の 2 セット目のみに対して力覚教示を行う．それ以外の実験では，力覚教示を行わない．本実験では力覚教示が両グループとも行わない 1 セット目から 3 セット目にかけての評価指標の改善量を導出し，改善量が大きいほどヒトの運動学習が進んだと判断する．改善量に着目し，力覚教示の有無による運動学習の変化について考察を行う．被験者は各グループ本システムの操作経験のない 6 名ずつ，計 12 名で行った．

表 1 に各グループに属する被験者全体における評価指標の平均値をセット毎に示す．このセット毎の結果に対し，要因をタスクの試行回数と各グループとした反復測定分散分析を行った．その結果，力覚教示の条件が等しい 1 セット目の成績に有意な差は生じなかった(p>0.01)．しかし，グループ B の被験者に対し力覚教示を行った後に，再び等しい条件に戻す 3 セット目ではグループ A の成績が有意に高くなることが確認された(p<0.01)．図 3 に各被験者の 1-2 セット間及び 1-3 セット間の評価指標の改善量を示す．この傾向から，本システムの力覚動作教示により，2 セット目に 1 セット目を大きく超えるアシストを行うことで，運動学習が促進される可能性が示唆される．力覚教示によって自身の成績が大きく向上したことで，動作教示への信頼性が向上し，その結果として教師あり学習が進んだためであると我々は考えている．なお，本成果に詳細な解析・考察を加えた論文の投稿準備中である．

表 1 実験結果（評価指標の平均値）

Groups \ Set numbers	1st set	2nd set	3rd set
Group A	0.333	0.283	0.276
Group B	0.362	0.229	0.309

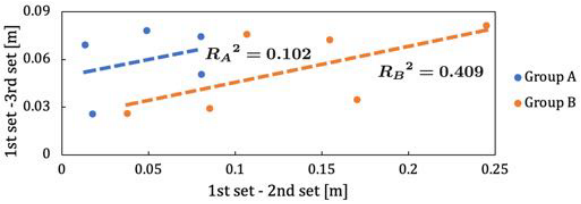


図 3 評価指標の改善量

〔発表論文〕

1. 松井諒，青山忠義*，加藤健治，竹内大,長谷川泰久，“高速画像計測による動的な力覚動作教示を通したヒトの運動学習に関する調査”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022，2P1-R10，2022.
2. 松井諒，青山忠義*，加藤健治，竹内大,長谷川泰久，“未来予測と人工筋スーツによる力覚提示を統合した卓球のフォアハンドスイング指導システムの開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023.（2023 年 6 月発表予定）

【助成 39－10】

新物質探索によるスキルミオン物質空間の拡張

代表研究者　北海道大学大学院理学研究院　教授　　吉田　紘行

〔研究の概要〕

本研究は、空間反転対称性を有する金属間化合物における新物質探索と物性評価を通し、非従来型のメカニズムに基づくスキルミオン創発を実験的に観測することを目的として行った。いくつかの候補物質の開発に成功し、中でも純良単結晶が得られた $GdOs_2Si_2$ について詳細な物性評価を行った。$GdOs_2Si_2$ は空間反転対称性を有する金属化合物であり、低磁場では T_N = 26.6 K で反強磁性秩序を示す。T_N 以下の高磁場領域には複数の磁気相が確認され、multi-q で記述されるスキルミオン相の存在が示唆された。今後、スキルミオンの創発を実験的に確立することで、スキルミオン創発空間の拡張が実験的に実証できると期待される。

〔研究経過および成果〕

半導体素子や磁気記録デバイスに代表される機能性電子材料は電子の基本的自由度であるスピン・電荷・軌道を制御するものであり、現代社会を支える基盤材料として、長きにわたり研究されてきた。一方、近年固体中で観測されたスキルミオンは、従来の基本的電子自由度の制御に基づいた機能性材料に変革をもたらす可能性から大きな注目を集めている。

スキルミオンは、単純な強磁性・反強磁性構造の連続変形では移り変わることができないトポロジカルに保護された渦状の磁気構造である。スキルミオンは電流駆動が可能なため、大容量かつ高速な記録デバイスの創成等も期待される。研究黎明期にはスキルミオンは空間反転対称性の破れた金属化合物という限られた物質系においてのみその発現が予想され、実際に観測されてきた [1]。一方、研究の進展とともにスキルミオンが創発する物質空間は拡がりつつあり、空間反転対称性が破れていない金属化合物や絶縁性三角格子反強磁性体においてもスキルミオン創発の可能性が指摘されている [2-4]。

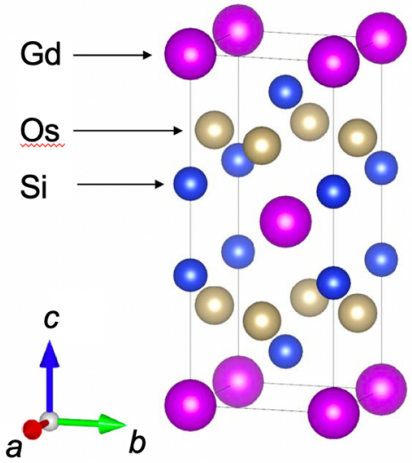


図 1 $GdOs_2Si_2$ の結晶構造。

本研究では、空間反転対称性を有する金属間化合物の合成と物性評価によるスキルミオンの実験的観測を通して、スキルミオンが創発する物質空間を拡張することを目的として研究を行った。

我々は化学的な手法を用いて、磁気スキルミオンを発現する物質の新規開発に取り組んだ。アーク溶融法や 6 GPa、2000℃までの条件下における高温高圧合成法を駆使することにより、候補物質として六方晶の $Gd_3Os_4Al_{12}$ と正方晶の $GdOs_2Si_2$ を見出した。両

者はともに空間反転対称性を有する金属間化合物である。

$Gd_3Os_4Al_{12}$ においては、結晶を育成することは出来たものの、結晶構造解析から単ドメイン試料ではない事が明らかになった。そのため粉末試料を用いた物性評価を行い、スキルミオン相の存在を示唆する温度磁場相図を得たが、その詳細を明らかにするには至っていない。今後より詳細な物性評価を行うために、純良な単結晶試料の育成を行う必要がある。

一方、$GdOs_2Si_2$ においては良質の単結晶試料を得ることに成功した。単結晶構造解析から、$GdOs_2Si_2$ は $ThCr_2Si_2$ 構造を有し、空間群は $I4/mmm$ で格子定数は a = 4.1549(2) Å、c = 9.8117(8) Åである。我々は、単結晶における電気抵抗、磁化、比熱測定を行い $GdOs_2Si_2$ のバルク物性を評価した。$GdOs_2Si_2$ の電気抵抗率は降温とともに減少し、金属的な電気伝導特性を示した。磁化率は高温で Curie-Weiss 則に従い、Weiss 温度はΘ_W = 43 K、有効磁気モーメントは 8.02 μ_Bとなった。これはGdの磁気モーメントが局在していることを示している。低磁場における磁化率の温度依存性から、$GdOs_2Si_2$ は T_N = 26.6 K で反強磁性的な磁気秩序を示すことが明らかになった。特に、磁場を c 軸に平行に印加すると逐次的な磁気相転移を示し、低温に複数の相が存在することが明らかになった。各相の磁気状態の詳細は現段階で明らかになっていないものの、この相図はスキルミオン物質として知られる $GdRu_2Si_2$ の温度磁場相図と類似したものであり、$GdOs_2Si_2$ においても低温磁場中で multi-q 状態として記述されるスキルミオンの創発を示唆している。

$GdRu_2Si_2$ ではスキルミオン発現機構として、遍歴電子に由来する多重スピン間相互作用に起因した新たなメカニズムが提案され、理論・実験の両側面から大きな注目を集めている [5,6]。これは、従来考えられてきた反転対称性の破れた系における Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用に起因したメカニズムとは異なるものであり、より多彩な物質系においてスキルミオンが創発することを示している。今後、$GdOs_2Si_2$ における異常ホール効果の観測や量子ビームを用いた回折実験により、スキルミオン創発を実験的に確立することで、スキルミオン創発空間の拡張が実験的に実証できると期待される。

本研究は、北海道大学大学院総合化学院、物質・材料研究機構の林浩章氏、山浦一成氏との共同研究として実施したものである。

〔参考文献〕

[1] S. Mühlbauer, et al. Science, **323**, 915 (2009).

[2] M. Hirschberger et al., Nat. Commun., **10**, 5831 (2019).

[3] T. Kurumaji, et al., Science, **365**, 914 (2019).

[4] T. Okubo et al., Phys. Rev. Lett., **108**, 017206 (2012).

[5] S. Hayami et al., J. Phys. Condens. Matter, **33**, 443001 (2021).

[6] N. D. Khanh et al., Nat. Nanotech., **15**, 444 (2020).

〔発表論文〕

1. Hiroaki Hayashi, Hiroyuki K Yoshida, Hiroya Sakurai, Naoki Kikugawa, Kazunari Yamaura, Crystal, growth and physical properties of $GdOs_2Si_2$, JPS Conference Proceedings LT29, in press.

【助成 39－11】

ノンコリニア反強磁性の電流誘起高速ダイナミクスの直接観測と新機能スピントロニクスデバイスの創製

代表研究者　東北大学　材料科学高等研究所　特任助教　　竹内　祐太朗

〔研究の概要〕

近年、スピントロニクスの分野で磁化がゼロの反強磁性体が注目を集めている。特にノンコリニア反強磁性体は異常ホール効果など特異な量子効果を示すことが報告され、当該研究領域が活性化している。さらに最近では薄膜デバイスを用いた研究が活発になり、ノンコリニア反強磁性体の磁気構造の電気的制御などが実証されるようになった。本研究ではこれらを更に発展させ、ノンコリニア反強磁性体の磁場・電流誘起ダイナミクスの評価およびナノスケールデバイス領域での特性評価を行った。ノンコリニア反強磁性の特異な反転ダイナミクスを観測するとともに、ナノサイズにおける熱安定性の評価・高速電流誘起反転の実証に成功した。

〔研究経過および成果〕

スピントロニクスでは磁化を有する強磁性体を中心に研究されてきた。近年では磁化がゼロの反強磁性体がその高速性、外部磁場に対するロバスト性など従来の強磁性体にない特性を有することから、注目されている。反強磁性体は一般的に磁気秩序の変化に伴う電気抵抗の変化が小さく、デバイスの電気的な読み取りが難しいという課題を抱えていたが、スピンが非共線的な構造を有したノンコリニア反強磁性体で大きな異常ホール効果が観測され、新しい反強磁性スピントロニクス材料として期待されている。ごく最近ではノンコリニア反強磁性体の薄膜デバイスを用いて、電流印加による磁気構造の反転・回転などが報告され、当該材料の薄膜デバイス研究が活発になっている。本研究ではノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn 薄膜デバイスにおける磁場および電流誘起ダイナミクスの観測を行うとともに、より応用に向けた研究として世界初のノンコリニア反強磁性体のナノドットを作製し、その特性評価および高速電流誘起反転を行った。

最初にマグネトロンスパッタリング法によって薄膜を成膜した。ナノドットの微細加工には電子線リソグラフィと Ar イオンミリングを使用した。また、ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn の磁気構造の観測手法として直流四端子法による異常ホール測定の評価および磁気光学カー効果を用いた。

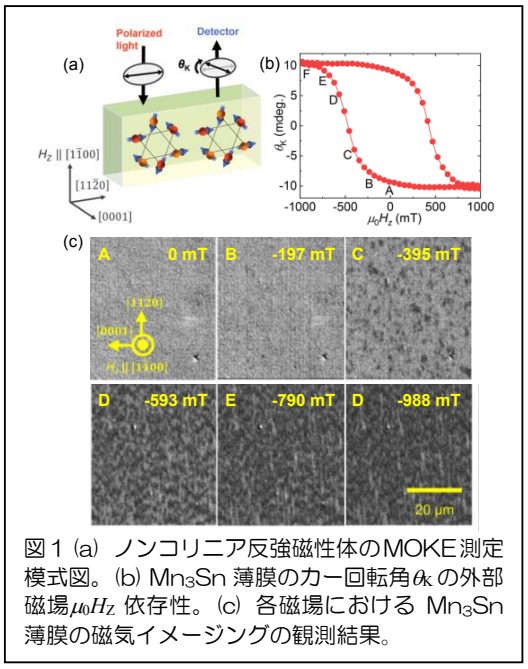


図１ (a) ノンコリニア反強磁性体のMOKE測定模式図。(b) Mn_3Sn 薄膜のカー回転角 θ_K の外部磁場 $\mu_0 H_Z$ 依存性。(c) 各磁場における Mn_3Sn 薄膜の磁気イメージングの観測結果。

Mn_3Sn の磁場誘起ダイナミクスの観測のため磁気光学カー(MOKE)効果による磁区観測を行った[図 1(a)]。10 mdeg のバルクの報告に近い大きなカー回転角を得る[図 1(b)]とともに、Mn_3Sn のカゴメ面内に延びた異方的な磁壁伝搬という従来では見られなかった特異な反転ダイナミクスが観測された[図 1(c)]。

次にノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn のナノスケールドット素子を作製し、その特性を調べた。図 2(a)および(b)はそれぞれ作製した単一ナノドットの電子顕微鏡による観察画像と特性評価のための測定系の模式図である。作製したナノドット Mn_3Sn において磁気秩序の状態保持時間を決める熱安定性を調べた。熱安定性の評価にはパルス磁場をドット素子に印加し、Mn_3Sn のスイッチング確率の反転磁場依存性から評価した。図 2(c)は評価した熱安定性Δのドット直径 D 依存性である。熱安定性はドット直径が 300 - 1000 nm の間では有意な変化は見られず、300 nm 以下では減少に転じた。この振る舞いについては従来の強磁性体でも報告されたように、単磁区モデルおよび核生成モデルによって説明が可能であることを明らかにした。

本研究では他にも重金属/Mn_3Sn における Mn_3Sn に作用するスピントルクの定量的評価やナノドット Mn_3Sn のナノ秒~サブナノ秒パルス電流による高速電流誘起反転の結果が得られた。以上の研究によって新規反強磁性スピントロニクス材料であるノンコリニア反強磁性体のスピンダイナミクスの理解を深めるとともに、メモリ・発振素子など新規デバイス等の実現に向けた重要な指針が得られた。

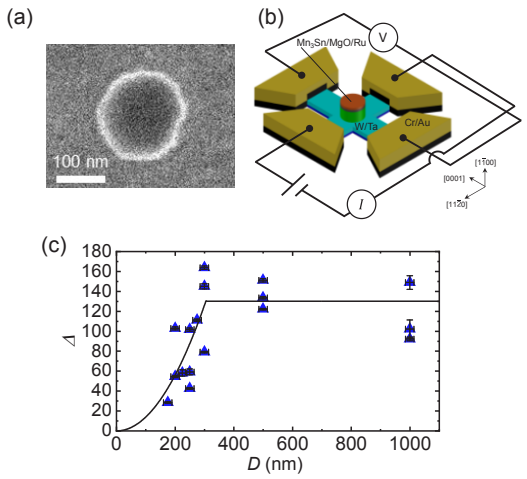


図２ (a) ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn 単一ナノドットの走査電子顕微鏡による観察画像。(c)ナノドットホール素子の電気測定系模式図。(b)Mn_3Sn ナノドットの熱安定性のドット直径依存性。点は実験結果。実線は単磁区モデルおよび核生成モデルによる計算結果。

〔発表論文〕

1. T. Uchimura, J-Y. Yoon, Y. Sato, Y. Takeuchi *et al.*, “Observation of domain structure in non-collinear antiferromagnetic Mn_3Sn thin films by magneto-optical Kerr effect”, Appl. Phys. Lett. **120**, 172405 (2022).

2. Y. Takeuchi *et al.*, "Chiral-spin rotation of non-collinear antiferromagnetic Mn_3Sn by spin-orbit torque" (招待講演), 15th Joint MMM-INTERMAG Conference, New Orleans, USA, 2022/1/10-2022/1/14.

3. K. Kishi, Y. Takeuchi *et al.*, “Evaluation of spin-orbit torque acting on antiferromagnet”, submitted (2022).

4. Y. Sato, Y. Takeuchi *et al.*, “Thermal stability of non-collinear antiferromagnetic Mn_3Sn nanodot”, submitted (2022).

【助成 39－12】

少数の受信信号データに基づく複数ネットワークによる抽出特徴量の最大化と人工データセットの生成

代表研究者　東京大学生産技術研究所　特任助教　小島　駿

〔研究の概要〕

Society5.0 の実現を目指す上で，サイバー・フィジカル空間をデータにより密接に結ぶデジタルツイン技術の発展に伴い，無線通信における機械学習の応用はますます重要性を増してきている．学習に使用される信号のデータセットには膨大な数が要求されるため，データセットをシミュレーションで生成し評価を行う検討が大多数となっているが，無線通信シミュレーションでは統計的に伝搬路を生成するため，現実環境との剥離は避けられない．そこで，実用に耐えうる評価を行うためには，実際に測定された受信信号データが必須ではあるが，無数に存在する伝搬路に対し学習要求を満たすほどのデータの収集は容易でない．本研究では，少ない現実の通信環境の測定データでも十分な学習を可能とする擬似的な信号データセットの生成を目指し，無線信号の特質に適った高精度な敵対的生成ネットワークの構築を行い，生成したデータセットの有効性を明らかにした．

〔研究経過および成果〕

本研究では，学習に使用可能な無線信号データが限定的な場合においても十分な学習性能を達成可能なデータセット拡張法の実現を目指し，無線信号の特質に適った複数入力構造を導入した敵対的生成ネットワーク（GAN: generative adversarial network）を提案した．その概要図を図 1 に示す．

GAN とは，生成器と識別器の 2 つのネットワークから構成され，生成器ではランダムノイズから偽のデータを生成し，識別器では偽データと教師データを識別する．生成器は識別器に正しく判別されないようなデータの生成を，識別器は偽データを正しく判別することを目的に敵対的に学習を行うことで飛躍的に高い性能を達成可能である．

本研究では初期的検討として，GAN により生成する画像を，受信信号を短期間フーリエ変換した波形形式であるスペクトログラムとしている．スペクトログラムは変調方式分類や信号対雑音電力比（SNR: signal-to-noise ratio）推定等で一般的に使用されており，時間・周波数・電力を表す 3 次元グラフであり GAN との親和性も非常に高い．

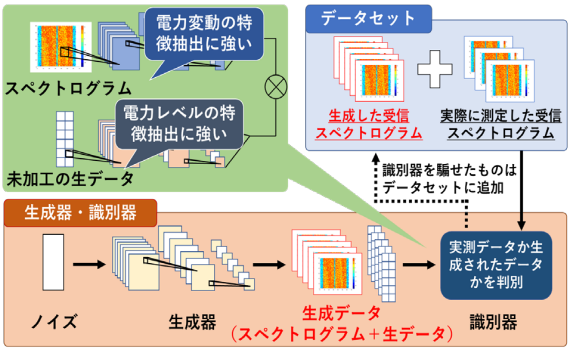


図 1：提案法の概要図

提案法では，GAN による受信スペクトログラム画像の生成精度を向上させるため，送受信端末の移動速度に起因するドップラーシフト等の電力変動に関わる特徴抽出に優れるスペクトログラム波形に加え，信号の電力レベルの特徴抽出に優れる未加工の生データを入力とする複数入力畳み込みニューラルネットワ

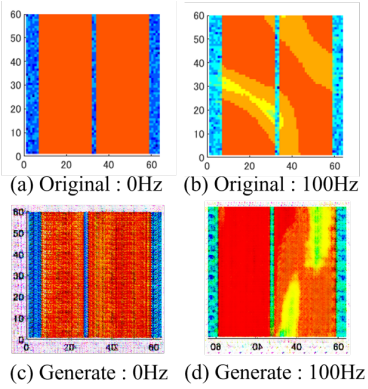


図 2：提案法による生成結果

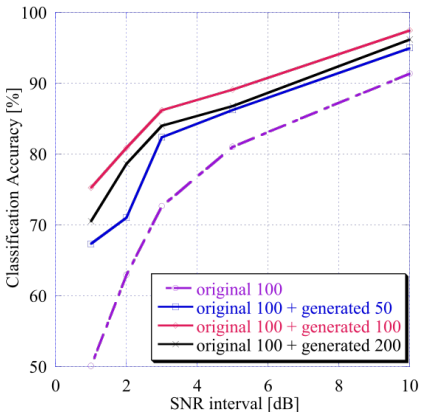


図 3：データ数を変化させた場合

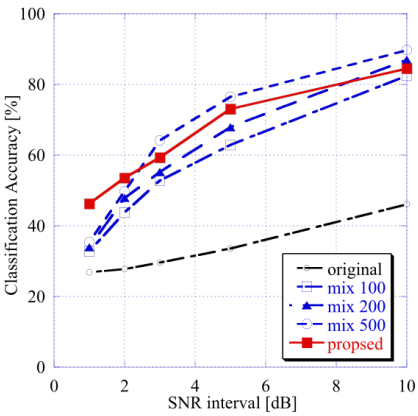


図 4：ドップラーによる影響

ークを適用している．複数の信号の波形形式から特徴を抽出することで，無線信号に含有される通信環境情報等の特徴を余すことなく反映した生成結果が得られる．

提案法によるデータセット拡張の有効性を明確化するため，シミュレーションによる評価を行った．伝送方式は OFDM，生成器は 3 層，識別器は 4 層の畳み込み層からなるシンプルなネットワーク構造としている．学習には Adam を適用し，オリジナルデータが 100 枚に限定される環境において SNR 分類を行い，その精度を比較することで評価する．

図 2 に提案法を用いて実際に生成したスペクトログラム画像を示す．提案法を用いることで SNR の特徴のみならずドップラーシフトの特徴も生成画像に反映できており，オリジナルデータと遜色のない画像が生成できていることが確認できる．また図 3 にデータ数を変化させた場合の SNR 分類精度の比較結果を示す．100 枚だけのオリジナルデータで学習させた場合に比べ，提案法により生成したデータを加え学習させることで，最大で分類精度を 25%向上させることが明らかとなっている．最後に図 4 にドップラーシフトが様々に変化する場合における SNR 分類精度の比較結果を示す．黒のグラフがオリジナルデータのみで学習させた場合を示しており，ドップラーシフトの影響により分類精度が大幅に劣化してしまう．青のグラフは様々なドップラーシフト環境下の学習データを用いた場合であり，データ数が減っていくにつれ分類精度は劣化することが確認できる．一方で，提案法を用いることで，オリジナルデータを増やすことなく SNR 分類精度を改善させることが明らかとなっている．

以上の成果より，無線信号における提案法によるデータセット拡張の有効性が示された．今後は，提案法をさらに拡張させ，環境の変化にロバストなデータ生成手法の検討や，変調方式分類やドップラーシフト推定に応用した場合の性能評価について検証していく予定である．

〔発表論文〕

1. **小島駿**，赫赫，王君ハン，丸田一輝，安昌俊，″敵対的生成ネットワークによる受信信号データセットの拡張，″電子情報通信学会，ソサイエティ大会，no. B-5-9，2022 年 9 月．
2. 田村幸佑，**小島駿**，赫赫，丸田一輝，安昌俊，“GAN によるドップラーシフトに堅牢なデータセットの拡張，”電子情報通信学会，総合大会，no. B-5，2023 年 3 月．

【助成 39－13】

メゾスケールトポロジカル発光マテリアルの開発

代表研究者　千葉大学大学院工学研究院　教授　矢貝　史樹

〔研究の概要〕

本研究は、当研究グループが 2020 年に見出した超分子ポリマー（非共有結合性ポリマー）からなるポリカテナン（リング構造からなる鎖状超分子）をもとに、従来のポリカテナンが有するナノスケールでのサイズよりも1桁から2桁大きな“メゾスケール”における機能性トポロジカル材料（分子の形を利用した材料）の開発を目的とした。この目的を達成するために、二つの大きな課題に取り組んだ。一つは、リングに重合部位を導入することで、リングを重合によって安定化する課題である。もう一つは、ポリカテナン化した際に物性が機械的な刺激等によって変化するよう、リングの発光特性を強化することである。両課題ともに興味深い結果が得られたので、以下で報告する。

〔研究経過および成果〕

環状分子をいかなる結合をも用いずにメカニカルに重合させることで得られるポリカテナン（カテナは鎖の意）は、従来の高分子よりもはるかにダイナミックな動きを実現することができ、剛直さとしなやかさを兼ね備えた次世代の高分子材料として期待される。しかしながら、ポリカテナンの合成は未だ極めて困難であり、その報告例は多くはない（例えば、S. J. Rowan ら, *Science* **2017**, *358*, 1434）。本研究は、このように合成することが困難なポリカテナンを分子の自発的な集合を利用して効率的に合成し、さらに従来のポリカテナンが有するナノスケールでのサイズよりも1桁から2桁大きな“メゾスケール”における機能性トポロジカル材料として展開することを目的とした。

2020 年に我々の研究グループは、分子集合を利用して顕微鏡で観察可能なメゾスケールのポリカテナンを作成することに成功した（図 1a, S. Yagai ら, *Nature* **2020**, *583*, 400）。このポリカテナンを構成するリングは超分子ポリマーと呼ばれる、小分子の集合体である。本研究では、この成果をさらに発展させ、超分子ポリマーからなるポリカテナンを機能性のトポロジカル（形に基づいた）材料とするために、二つの大きな課題を設定した。一つは、超分子ポリマーの脆弱性を克服するために、リングに重合部位を導入することで、リングを安定化する課題である。もう一つは、ポリカテナン化した際に、力が加わることでその光物性が変化するよう、リングの発光特性を強化にすることである。

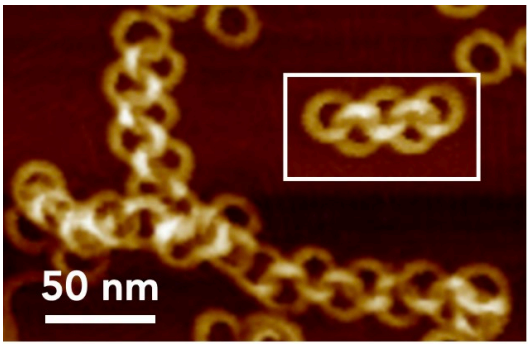


図 1. 分子集合体からなるポリカテナンの AFM 像

まず、一つ目の課題に関して、モノマー分子に重合部位を導入する戦略を検討した。リングを形成する分子 **1** に重合部位であるジアセチレンを導入された **2** を合成したが、**2** はジアセチレン部位の相互作用によって、そもそもリングを形成できず、その代わりに伸長したナノファイバーを形成することが明らかになった。そこで、この結果を逆手にとって、**2** をリングを形成する分子 **1** と混合したところ、渦状（スパイラル）の超分子ポリマーが得られた。つまり、**1** の湾曲する性質と、**2** の

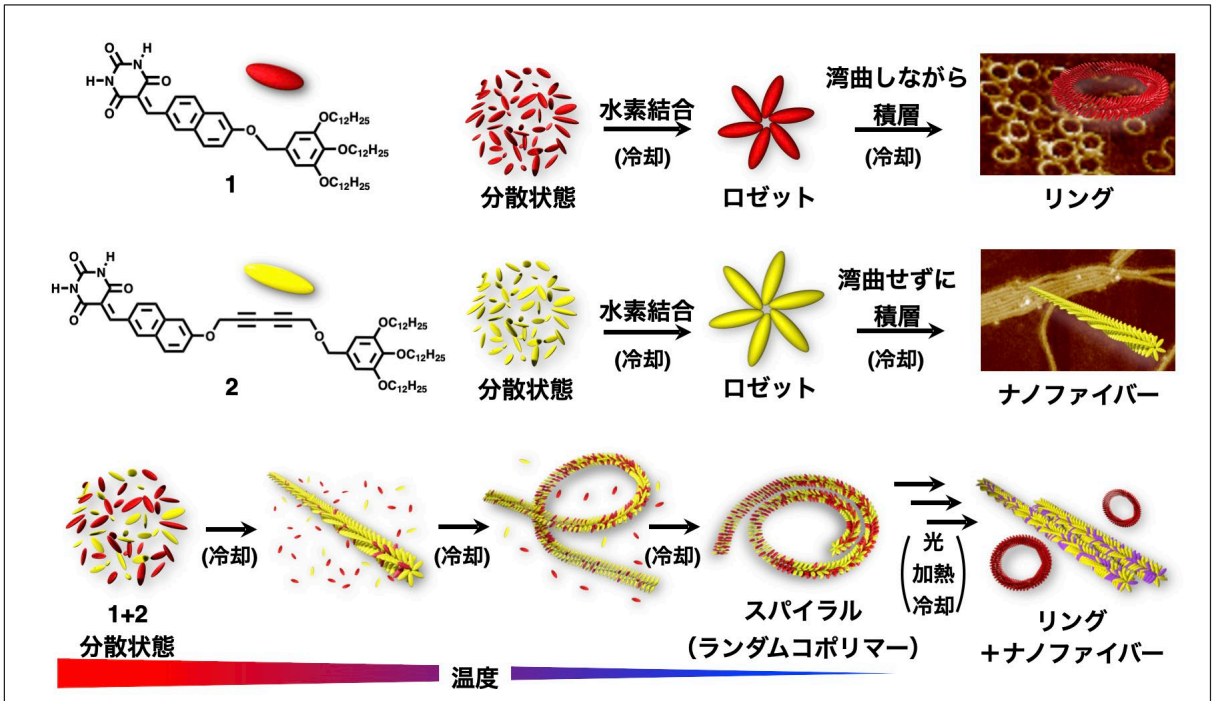


図 2. モノマー1 と 2 の超分子共重合によるスパイラル超分子コポリマーの形成と光による成分分離

伸長する性質が合わさった構造が得られた事になる。この超分子共重合プロセスを詳細に調査すると、1と2はランダム共重合していることが明らかになった。さらに、この共重合体に紫外光を照射すると、隣接した **1** 同士がスパイラル構造内で光反応を起こした。そして光照射したスパイラル構造を加熱して冷却すると、**1** と **2** は超分子共重合せず、分離して超分子重合を起こし、ファイバーとリングの混合物を与えた。このように、当初の目的は達成できなかったが、超分子ランダム共重合と、さらに光による異種モノマーの分離という技術を初めて報告することができた。この成果は、アメリカ化学会雑誌に成果を掲載済みである。

もう一つのリングの発光特性を強化する課題に関しては、これまでで一番発光特性が高い、ジフェニルナフタレン分子の構造を改変することで取り組んだ。ジフェニルナフタレン分子のナフタレン部位はエキシマーを形成し、これが発光特性を低下させると考え、ナフタレン部位をエテン部位に変えた新規分子を合成した。この新規分子が形成するリング構造の精製法を検討することで、リングの形成によってジフェニルナフタレン分子に比してより高い量子収率（5%→18%）を示すことが明らかになった。この成果は、現在論文を執筆中である。

以上、本研究では、発光性ポリカテナンの構築に向けて、二つの大きな課題に取り組んだ。予定通りに進まなかった課題もあったが、全く新しい超分子重合技術を開発することができ、当該分野の発展に大きく貢献できたと考えている。当初の目的に関しては、引き続き研究を推進していく予定である。

〔発表論文〕

1. Sho Takahashi, Shiki Yagai, Harmonizing Topological Features of Self-Assembled Fibers by Rosette-Mediated Random Supramolecular Copolymerization and Self-Sorting of Monomers by Photo-Cross-Linking, *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 13374-13383.

【助成 39－14】

有機合成に頼らない有機 EL 材料開発：
アントラセン発光体分子のナノ空間閉じ込めによる発光色変調

代表研究者　東京大学大学院工学系研究科　助教　　岸本　史直

〔研究の概要〕

The development of light-emitting materials that exhibit a variety of luminescent colors is being vigorously studied for a broad range of applications such as solar energy utilization. This project demonstrated that photoluminescence of the unsubstituted anthracene confined in zeolites was drastically affected by the zeolite topology, Si/Al ratio of the host zeolite, and the acidity of the solvent used for the anthracene introduction, resulting in ultrapure blue and white emission from 2DA confined in MOR and FAU zeolites, respectively.

〔研究経過および成果〕

The development of pure-blue and single-white light emitters is considered very significant for the development of full-color light-emitting devices. Various polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), mainly anthracene and pyrene rings, have been reported as pure-blue emitters. However, because the methods used to synthesize these PAHs are very complex, alternative green methods are needed from a green chemistry perspective. Indeed, white light-emitting devices can be obtained by mixing the respective light-emitting molecules that emit the three primary colors of light, but it is further difficult to create ideal conditions due to phase separation and cohesive quenching.

Strong confinement of luminescent molecules or metal clusters into angstrom-sized nanospace is an alternative strategy for controlling luminescence behavior without complex organic synthesis. The confinement of small molecular PAHs in micropores such as zeolites can be proposed as a promising method for highly obtaining color-rendering

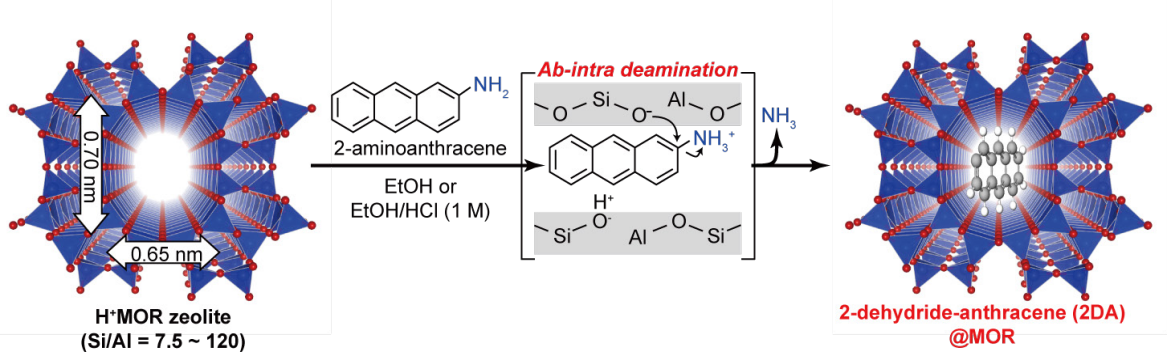


Fig. 1. Scheme of 2-dehydride-anthracene incorporation in MOR zeolite (2DA@MOR) synthesis via deamination of 2AA already introduced in the microcavity.

luminescent materials without complex organic synthesis.

In this paper, we have integrated unsubstituted anthracene molecules in the nanocavity of Al-rich zeolites via *ab-intra* zeolite catalyzed deamination of anthrylammonium cation already introduced in the zeolite cavity, which is an application of our previously reported introduction technique of unsubstituted anthracene into layered clay minerals. Figure 1 shows the schematic image of the liquid-phase introduction of unsubstituted anthracene into the microcavity of proton-type mordenite (H^+MOR) zeolite using 2-aminoanthracene (2AA) as a precursor. The introduced 2AA was protonated by the protons in the zeolite cavity to form a 2-anthrylammonium cation. Subsequently, acidic sites of zeolite induce catalytic deamination for cleaving the C–N bond of intercalated 2-anthrylamm onium to generate 2-dehydride-anthracene (2DA) in the zeolite cavity. The addition of mineral acid such as hydrochloric acid in the solution of 2AA introduction induces the formation of extra-framework aluminum (EFAL) species in the cavity to some extent simultaneously occurring with the confinement of the 2DA. Photoluminescence of the 2DA was drastically affected by the zeolite topology, Si/Al ratio of the host zeolite, and the acidity of the solvent used for 2AA introduction, resulting in ultrapure blue and white emission from 2DA confined in MOR (Fig. 2) and FAU zeolites (Fig. 3), respectively.

〔発表論文〕

1．岸本史直、「ナノ空間を利用した光機能性材料の開発」、ゼオライト、38, 52 (2021).

2．F. Kishimoto, K. Hisano, K. Iyoki, T. Wakihara, T. Okubo, Stable ultrapure blue and white emission from unsubstituted anthracene confined in zeolites, *under evaluation.*

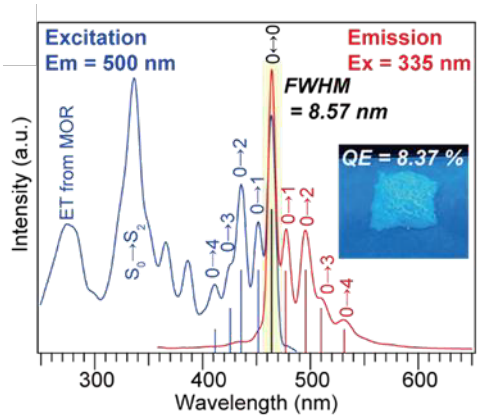


Fig. 2. Emission and excitation spectra of 2DA@MOR (Si/Al = 7.9) synthesized in EtOH/HCl mixed solvent. Inset shows the photograph of the particulate sample under 365 nm light irradiation.

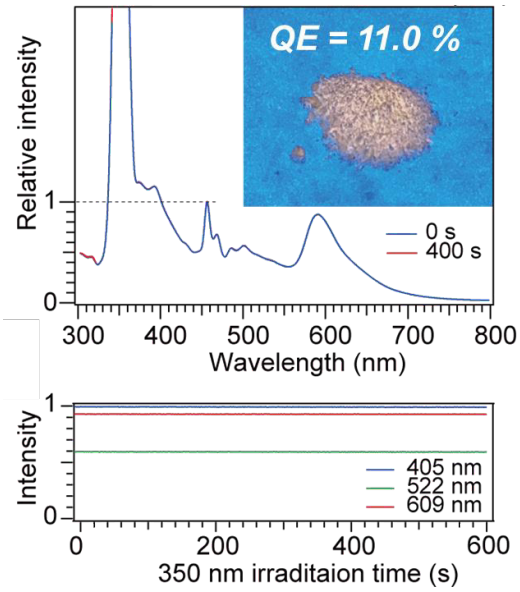


Fig. 3. Emission spectrum and a lifetime of 2DA@FAU (Si/Al = 250) synthesized in EtOH/HCl mixed solvent. Inset shows the photograph of the particulate sample under 365 nm light irradiation.

【助成 39－15】

光によって低侵襲的な脱着を可能とする矯正歯科用接着剤の開発に関する研究

代表研究者　東京医科歯科大学生体材料工学研究所　准教授　　田村篤志

〔研究の概要〕

任意のタイミングで脱着可能な歯科用接着剤開発を目的に、光分解性ポリロタキサンを架橋剤として含有した歯科用接着剤の開発を行った。新たに設計した光分解性ポリロタキサンは365 nmの紫外光照射直後より分解がはじまり、約 20 分間の照射で完全に分解した。光分解性ポリロタキサンを市販の歯科用接着剤に混合し、歯列矯正用ブラケットと牛歯間の接着強度を評価した結果、紫外光照射 5 分で接着強度が約 4 割低下した。本研究により、任意のタイミングで紫外光を照射することで接着強度が低下する歯科用接着剤の基盤技術が確立できたことより、脱着機能を有する新規歯科用接着剤としての今後の応用展開が期待される。

〔研究経過および成果〕

歯科治療では治療用器具を歯質表面に直接「接着」させることで治療が行われており、接着は現在の歯科治療の基盤となる技術である。しかし、強固に固定された治療具を歯質表面から脱着するための方法は、力学的な剥離、脱着、あるいは材料の破壊以外の選択肢がないのが現状である。特に、矯正用の治療器具（ブラケット）を脱着する場合などにおいて、力学的な脱着では歯質再表面のエナメル質も同時に剥離してしまい、エナメル質が損傷することが指摘されている。よって、「接着」の技術だけではなく「脱着」の技術も非侵襲的な歯科治療の確立には必須だと考えられている。よって、従来の接着剤に脱着を容易にする高度機能を賦与した新たな接着剤の開発が、非侵襲的な歯科治療具の脱着を達成するためには必要不可欠だと考えた。

任意のタイミングで脱着可能な歯科用接着剤開発を目的に、ホワイトニング等の歯科治療でも利用されている紫外光（約 400 nm）の照射によって接着強度が低下する材料を考案した。紫外光照射により接着強度を低下させるための成分として、環状糖類シクロデキストリンの空洞部に高分子鎖が貫通し、軸高分子末端がかさ高い化合物で封鎖された構造の超分子ポリロタキサンに着目した。ポリロタキサン中のシクロデキストリン部位は接着剤成分（モノマー）との架橋に利用することで従来と同等の接着強度を示す。一方、紫外光照射によって解離する光分解性封鎖基を軸高分子両末端に導入することで、紫外光照射で軸高分子が切断されシクロデキストリンが放出される。これにより、架橋構造が崩壊するため、接着強度の低下につながると期待される。本研究では光分解性成分としてクマリンで封鎖した光分解性ポリロタキサンを新たに考案した。クマリンは生体に対する毒性が軽微な近紫外光（約 320～400 nm）でポリロタキサン構造を崩壊へと導くことができるだけではなく、光の到達深度やポリロタキサンの分解効率など実用化における設計上の課題を解決できると考えた。

クマリン封鎖型光分解性ポリロタキサン（PRX-DEACM）は、ジエチルアミノクマリン誘導体を封鎖基として利用することで合成した。核磁気共鳴

スペクトルより計算した PRX-DEACM のシクロデキストリン貫通数は 44、貫通率は 39%、数平均分子量は 53,000 となった。

PRX-DEACM の光分解特性について評価を行った。UV LED 光源を用いて 365 nm の紫外光を 1〜60 分間照射し、サイズ排除クロマトグラフィー測定によりポリロタキサン構造の分解を評価した。PEX-DEACM は紫外光照射直後より分解がはじまり、約 20 分間の照射で完全に分解した。また、PRX-DEACM は歯科治療で材料硬化のための光重合に使用される可視光（465 nm）ではまったく分解しなかったことから、PRX-DEACM は既存の光重合にも適応可能だと考えられる。

紫外光照射によるレジンの力学強度変化について検討するため、重合性官能基を導入した PRX-DEACM を架橋剤として 2-ヒドロキシエチル又クリレート（HEMA）の光重合を行い、ダンベル型の硬化体を作成した。引張試験により、最大引張応力を評価した。PRX-DEACM 架橋剤を 10 wt%含有したレジンの最大引張応力は 33 MPa であった。これに対し、UV LED 光源を用いて 365 nm の紫外光を 2〜30 分照射し、同様の引張試験を行った。その結果、紫外光照射 5 分より有意に最大引張応力が低下した。5 分間の紫外光照射により最大引張応力は約 50%低下し、それ以降は照射差時間を延ばしても顕著な変化は見られなかった。以上の結果より、紫外光の照射により封鎖基であるクマリンが脱離することでポリロタキサン構造が崩壊し、伸長時の力学特性に変化を及ぼしたと考えられる。

矯正治療への応用を検討するため、市販の歯科矯正用接着剤であるスーパーボンドオルソマイト（サンメディカル社製）のモノマー溶液に、PRX-DEACM 架橋剤を 10 wt%で溶解させ牛歯のエナメル質に、矯正用光透過性セラミックブラケットを固定した。ブラケットの接着強度を評価した結果、スーパーボンドオルソマイトのみの接着力は約 10 MPa であり、PRX-DEACM を添加しても有意な変化は見られなかった。紫外光を 5 分間照射し、同様の試験を行った結果、PRX-DEACM を添加した接着剤では 4 MPa 程度に接着力が低下する傾向が認められた。一般的に矯正に必要な接着力は 5〜10 MPa と考えられているので、紫外光照射により接着力が低下することで矯正用ブラケットを容易に剥離できると予想される。

本研究では、矯正治療で使用されるブラケットを低侵襲的に剥離することを可能とする材料の確立を目的に、超分子骨格を有する光分解性ポリロタキサンを新たに設計し、紫外光照射による力学特性や牛歯に対する接着力の変化を検討した。市販の矯正歯科用接着剤に PRX-DEACM を 10 wt%添加することで、紫外光照射により接着強度が低下することを確認した。このような機能を有する歯科用接着剤は、任意のタイミングでのブラケットの剥離を容易に行うことができる接着剤として、歯科治療に貢献すると期待される。今後は、接着剤の組成や PRX-DEACM の含量等の詳細な条件を検討することで材料の最適化を行い、実用化を目指す計画である。

〔発表論文〕

該当なし

【助成 39－16】

CO_2を化成品原料へ再資源化するための革新的な微生物電気合成システムの開発

代表研究者　金沢大学新学術創成研究機構　教授　　仁宮一章

〔研究の概要〕

本研究では、化石資源由来 CO_2 の再資源化を目指し、微生物電気合成による CO_2 から化成品原料（エタノール）への連続・高速変換のための技術開発を行った。*Clostridium ragsdalei* DSM 15248 株、YT 培地（主に Yeast extract, Tryptone からなる培地）を用いて微生物電気合成を行った。電圧をかけない場合の微生物電気合成では、菌体濃度の低下が確認され、また、酢酸、エタノール濃度の増加は見られなかった。一方、電圧 0.8 V の微生物電気合成では、電流が約 5 mA 流れていること、そして、菌体濃度が維持されていることが確認でき、また、酢酸濃度、エタノール濃度の上昇がみられた。培養 3 day における酢酸濃度は 3 g/L、エタノール濃度は 1 g/L であった。この値は、YTF 培地（主に Yeast extract, Tryptone, Fructose からなる培地）を用いた *C. ragsdalei* DSM 15248 株の従属栄養培養での値を超えるものであった。

〔緒言〕

CO_2 は温暖化の原因として、排出削減や回収・貯留について技術開発が行われてきた。近年、逆に CO_2 の再資源化を図る挑戦的な研究開発が進展している。

CO_2 を炭素源として利用できる微生物には光独立栄養と化学独立栄養に大別される。そのうち、化学独立栄養細菌とは、炭素源として CO_2、エネルギー源として H_2 や酸化鉄（II）などの電子供与体を利用して生育する細菌である。特に、エネルギー源として H_2 を電子供与体として生育する細菌を、水素酸化細菌という。また、水素酸化細菌のうち、絶対嫌気性で主な代謝産物が酢酸である微生物をアセトジェンという（**図 1**）。

一方、2010 年、アセトジェンを用いた微生物電気合成 (Microbial ElectroSynthesis) の最初の論文が発表された。微生物電気合成とは、水の電気分解（アノード電極における H_2O の酸化による O_2 発生、そして、カソード電極における H^+の還元による H_2 発生）と、カソード電極側での水素酸化細菌の培養を組み合わせたものである。これにより、炭素源として CO_2、エネルギー源として電気を用いることによって、水素酸化細菌に有機物（酢酸）を生産させることが実証された。（ここで、微生物電気合成に用いる電気は、太陽光をはじめ風力・水力・地熱など様々な自然エネルギー由来の電力が利用可能用である。）

しかしながら、現状では、(1) アセトジェンを用いた微生物電気合成で生産される物質は酢酸であり、それ自身の付加価値が極めて低い、そして、(2) 微生物電気合成における生産速度が極めて遅い、という質的・量的な問題がある。これらが解決されれば、微生物電気合成による CO_2 の再資源化が実用に近づくのではと考えた。

そこで、本研究では、化石資源由来 CO_2 の再資源化を目指し、微生物電気合成による CO_2 から化成品原料（エタノール）への連続・高速変換のための技術開発を行った。

〔実験方法と結果〕

エタノール生産性のアセトジェン株として、*Clostridium ragsdalei* DSM 15248 株を用いた。本 *C. ragsdalei* DSM 15248 株は、$CO/CO_2/H_2$ の混合ガスを用いた従属栄養培養（CO と CO_2 が炭素源、CO と H2 がエネルギー源）に用いられてきた株であり、微生物電気合成の報告はない。

まず、電気培養を行う前に、YTF 培地（主に Yeast extract, Tryptone, Fructose からなる天然培地）を用いた *C. ragsdalei* DSM 15248 株の従属栄養培養を行った。炭素源（C 源）かつエネルギー源としてフルクトース 5 g/L を加えた。初期菌体濃度は 0.06 g/L に設定した。**図 2** に従属栄養培養の結果を示す。5 g/L のフルクトースは 2 day までに消費され、そして、菌体濃度、酢酸濃度、エタノール濃度の上昇がみられた。培養 3 day における最終的な菌体濃度は 0.9 g/L、酢酸濃度は 0.5 g/L、エタノール濃度は 0.4 g/L であった（**図 2 赤**）。Negative control として YTF 培地から炭素源であるフルクトースを除去した YT 培地を用いた培養も行った。菌体濃度、酢酸濃度、エタノール濃度の上昇は見られなかった（**図 2 青**）。

次に、上述の炭素源を含まない YT 培地を用いて微生物電気合成を行った（**図 3, 4**）。炭素源（C 源）として 100%CO_2 ガスを 1 vvm (50 mL 培地に対して CO_2 ガス流量 50 mL/min)で供給した。エネルギー源としては、一定の電圧 0.8 V をポテンショスタットでかけた。初期菌体濃度は 0.6 g/L に設定した。**図 5** に微生物電気合成による独立栄養培養の結果を示す。まず Negative control として電圧をかけない場合の微生物電気合成を行った。その結果、電流が流れていないこと、そして菌体濃度の低下が確認された。また、ギ酸、酢酸、エタノール濃度の増加は見られなかった（**図 5 青**）。一方、電圧 0.8 V を掛けた場合の微生物電気合成では、電流が約 5 mA 流れていること、そして、菌体濃度が維持されていることが確認できた。また、酢酸濃度、エタノール濃度の上昇が

みられた。培養 3 day における酢酸濃度は 3 g/L、エタノール濃度は 1 g/L であった(**図 5 赤**)。この値は、**図 2 赤**に示した YTF 培地を用いた従属栄養培養での値を超えるものであった。しかしながら、培養 3 day 以降は、炭素源である 100%CO_2 およびエネルギー源である電流が供給され続けているにも関わらず、酢酸濃度とエタノール濃度は頭打ちとなった。YT 培地中のアミノ酸やビタミン、微量金属の何かがショートしている可能性が考えられる。明確な原因は不明である。

以上の微生物電気合成の実験では、YT 培地（主に Yeast extract, Tryptone からなる天然培地）を用いて行った。そこで、培地のシンプル化を図るため、アセトジェンの培養で用いられる合成培地である PETC 培地（主に無機塩、微量金属、ビタミン群と 0.1%の酵母エキスからなる準合成培地）を用いて、同様の微生物電気合成を行った。しかしながら、菌体濃度は低下し、酢酸濃度やエタノール濃度の上昇は全く見られなかった。YT 培地には含まれているが、PETC 培地に含まれていないものとして、アミノ酸があり、これが律速になっていたと考えられる。

YT 培地の構成成分である Yeast extract, Tryptone は、それぞれ酵母熱水抽出物（ビタミン源）、乳タンパク質加水分解物（アミノ酸源）である試薬である。そこで、農業副産物である、コーンスティープリカーに置き換えた検討も必要であると考えられる。

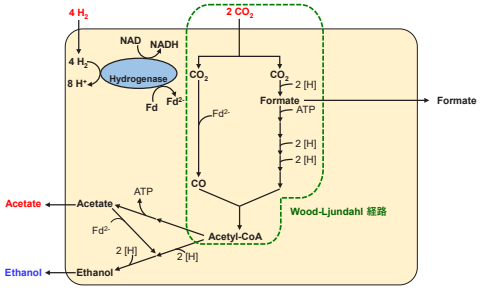


図 1. アセトジェンの化学独立栄養培養時の代謝経路の概要

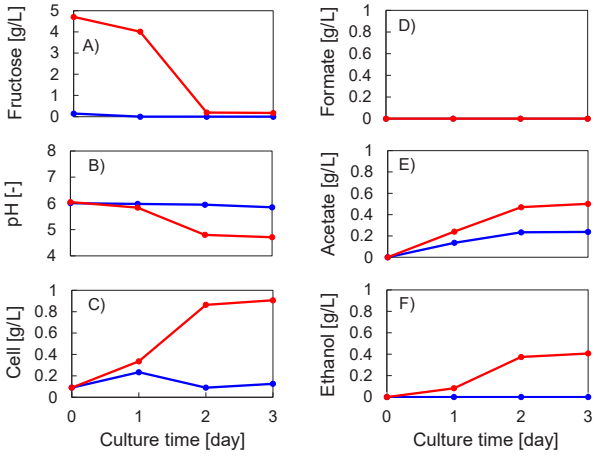


図 2. アセトジェンの従属栄養培養の挙動

〔発表論文〕

1. 任歓、仁宮一章；CO_2 conversion to acetate and ethanol by microbial electrosynthesis using *Clostridium ragsdalei*、第73回　生物工学会大会、2021年10月
2. 任歓、仁宮一章；PHB production from CO_2-derived acetate via acetogen、第74回　生物工学会大会、2022年10月

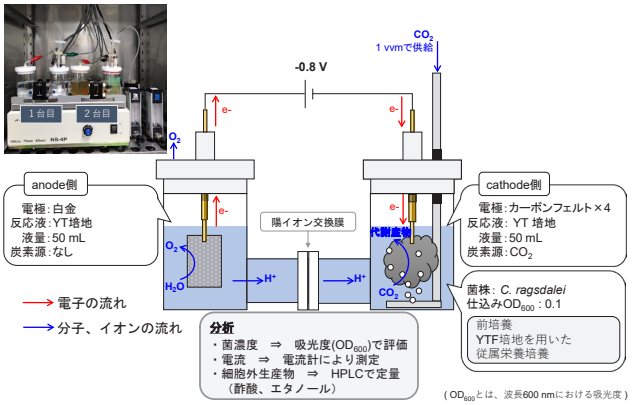


図 3. アセトジェンの微生物電気化学合成における化学独立栄養培養のセットアップ

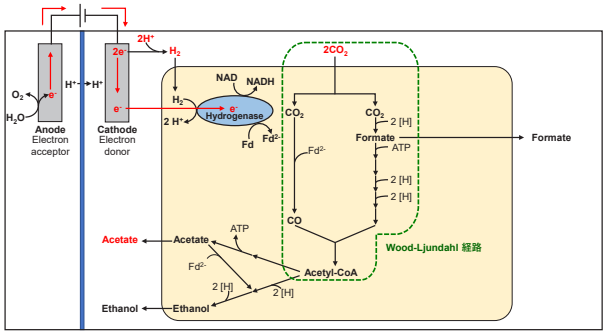


図 4. アセトジェンの微生物電気化学合成における化学独立栄養培養時の代謝経路の概要

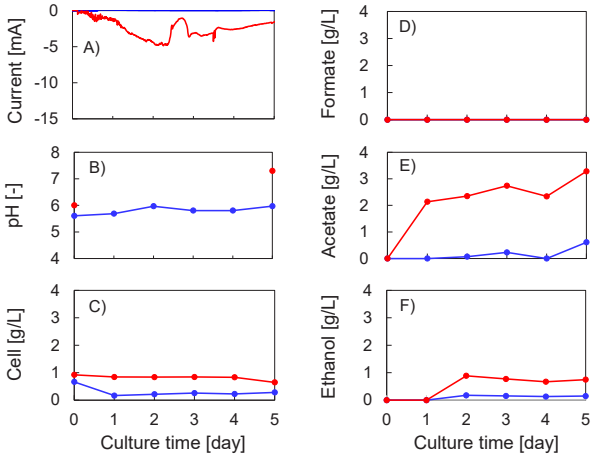


図 5. アセトジェンの微生物電気化学合成における化学独立栄養培養の挙動

【助成 39－18】

$SrTiO_3$ 系新規光触媒電極の作製とプラズモニック増強による太陽光水分解性能の向上

代表研究者　豊橋技術科学大学大学院工学研究科　准教授　河村 剛

〔研究の概要〕

太陽光エネルギーを利用した水分解水素製造技術は、将来のクリーンな水素社会の構築に向けて期待が高まっている。太陽光水分解には、①太陽電池を用いた水の電気分解、②光電極を用いた光電気化学的水分解、③光触媒を用いた水分解の3種類が検討されているが、①は高コスト、③は低効率が実用化に向けた主な課題であり、②はそのどちらもが課題となっている。本研究では、$SrTiO_3$ 系新規光触媒電極の開発を目指す。特に効率の向上に向けて、助触媒や量子ドット、プラズモニックナノ粒子の担持を実施し、水分解特性の評価を行う。

〔研究経過および成果〕

$SrTiO_3$（STO）系新規光触媒電極として、本研究では、TiO_2 ナノチューブアレイをベースとした。これは、申請者が得意とする陽極酸化法により、比較的容易に準備できる点と、その大比表面積が太陽光水分解反応に有利であると考えたためである。研究開始当初は、TiO_2 ナノチューブアレイの TiO_2 を、ほとんど全て STO に変換することを考えていたが、その場合、ナノチューブの形態を維持できないことがわかったため、TiO_2 ナノチューブアレイを骨格とし、STO ナノキューブをその表面に析出させたものをベース光電極とすることとした。また、TiO_2 と STO は、太陽光に多く含まれる可視光を吸収することができないことや、光照射で生成した電荷の寿命が短いことが光電極としての課題であるため、Al や Cr、Co といった金属イオン種を、Sr や Ti と置換することで、金属イオンドープ STO ナノキューブの析出も実施した。このナノキューブの析出には、水熱処理法を採用し、様々な処理条件での形態の変化や光電流特性を調査した。Fig. 1 と Fig. 2 には、Al と Cr を共ドープした STO ナノキューブが析出した TiO_2 ナノチューブアレイ光電極の走査型電子顕微鏡（SEM）像と、水熱処理時間を様々に変更した際の可視光照射時の光電流値測定結果を示す。1

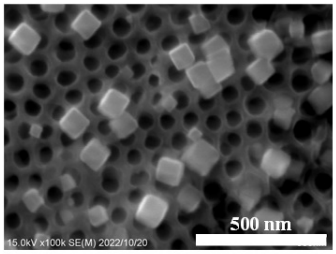


Fig. 1. SEM of TNTA-STO:Al,Cr after 1h of hydrothermal treatment.

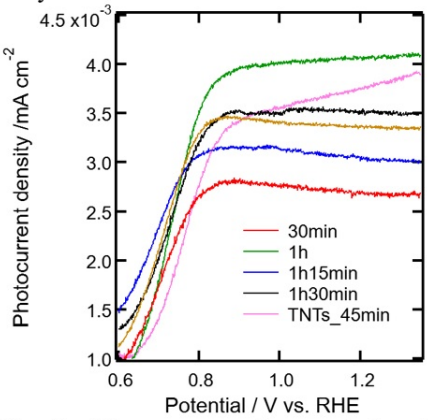


Fig. 2. Photocurrent characteristic of TNTA-STO:Al,Cr under visible light.

時間の水熱処理により、100 nm 弱の STO ナノキューブが TiO_2 ナノチューブアレイの上部に析出することがわかった。各種元素分析実験の結果から、析出した STO ナノキューブには、Al と Cr がドープされていることが示唆された。光電流測定結果を見ると、水熱

処理時間が 1 時間の時に、最も大きな電流値を観測した。これは、Al と Cr を共ドープした STO ナノキューブが可視光を吸収し、それが水分解に利用されたことで電流値が上昇したものと考察された。また、水熱処理後の試料全てにおいて、水熱処理前の試料よりもオンセット電位が低くなっていた。これは、TiO_2 と STO の界面における自己バイアスが有効に働いたことで、電荷の流れがスムーズになっていることを示唆している。一方で、水熱処理時間が 1 時間より長くなると、光電流値は低下する傾向があった。これは、多量に析出したナノキューブがナノチューブの穴を埋めてしまうことで、水分解反応に利用できる表面積が低下したためであると考えられる。

STO への助触媒とプラズモニックナノ粒子の担持が、太陽光水分解に与える影響を詳細に調べるために、STO 粉末をベースとした光触媒を作製した。Fig. 3A と 3B には、STO 粉末に水素生成助触媒である $RhCrO_x$（パネル B 中の赤）と、プラズモニックナノ粒子である Au ナノ粒子（緑）を析出した試料の走査型透過電子顕微鏡（STEM）−エネルギー分散型 X 線分光（EDX）像を示す。 200 nm 程度の STO 上に、10 nm 以下の $RhCrO_x$ と Au のナノ粒子が別々に析出している様子がわかる。$RhCrO_x$ の担持量を 0.1 wt%で固定し、Au の担持量を 1−10 wt%で変化させた際の、可視光照射による水分解水素製造量を Fig. 3C に示す。Au なしでは可視光応答を示さないため、この実験で生成した水素は、Au の局在表面プラズモン共鳴によって生成した熱電子が STO や $RhCrO_x$ に移動（熱電子移動）して水の還元反応に使用されたものであると言える。また、4 wt%より少量の Au では熱電移動の効果が小さく、4 wt%より多い Au では、STO と $RhCrO_x$ 間でのスムーズな電子移動が阻害されることで、生成する水素の量が減少することが考えられる。

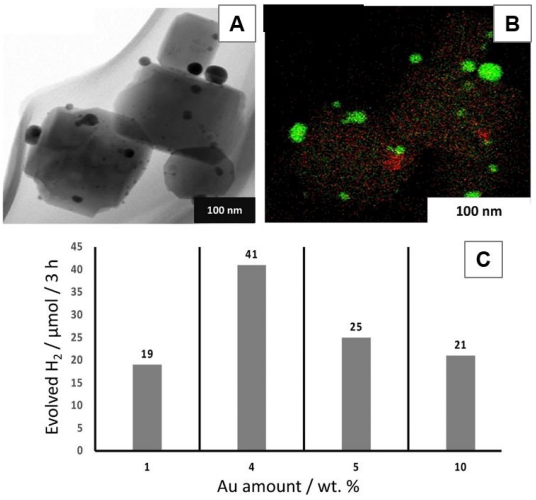


Fig. 3. STEM-EDX images of STO deposited with $RhCrO_x$ and 4 wt% Au (A and B). (C) is a histogram showing generated hydrogen amount by $RhCrO_x$:STO with different amount of Au.

本研究により STO をベースとした光触媒電極に関する多くの知見が得られた。本成果は、STO に限らず、WO_3 などの、似た光学特性を有する半導体光触媒電極に関する研究においても有用であり、太陽光水分解技術に関する幅広い研究への貢献が期待できる。

〔発表論文〕

1. K. Inoue, A. Matsuda, **G. Kawamura**, “Tube length optimization of titania nanotube array for efficient photoelectrochemical water splitting,” *Sci. Rep.*, Accepted.
2. M.M. Abouelela, **G. Kawamura**, W.K. Tan, A. Matsuda, “Anodic nanoporous WO_3 modified with Bi_2S_3 quantum dots as a photoanode for photoelectrochemical water splitting,” *J. Colloid Interf. Sci.*, **629**, 958-970 (2023).
3. M.M. Abouelela, **G. Kawamura**, A. Matsuda, “Metal chalcogenide-based photoelectrodes for photoelectrochemical water splitting,” *J. Energy Chem.*, **73**, 189-213 (2022).

【助成 39－19】

太陽光発電パネル用の静電砂塵クリーニングシステムにおける摩擦現象が粒子除去性能に及ぼす影響

代表研究者　京都大学大学院工学研究科　助教　安達　眞聡

〔研究の概要〕

本研究は、太陽光発電パネル表面に堆積して太陽光入射を妨げることにより発電性能低下を招く砂を静電気力により自動除去する静電砂塵クリーニングシステムについて、パネルの表面性状やパネル・粒子の接触状態が粒子除去率に及ぼす影響について調査するものである。まず、静電砂塵クリーニングシステムの基板表面に微細構造を形成し、AFM を使用してその表面性状を測定した。さらに、表面微細構造と静電場を組み合わせた際の粒子挙動を観察した。また、静電砂塵クリーニングシステムを加振する機構を作成し、振動場と静電場を組み合わせた際の粒子除去率に及ぼす影響についても調査を行った。

〔研究経過および成果〕

図1に示すような静電砂塵クリーニングシステムの実験装置を構築した。位相がずれた高電圧矩形波を、クリーニング対象物表面に設置する基板の電極に印加することにより進行波電界が形成され、それを利用して粒子を任意の方向に除去する仕組みである。基板は透明電極パターンが形成されたガラスと、電極を絶縁するための薄板ガラスと絶縁接着層により構成される。本研究では、基板の表面性状が粒子除去率に及ぼす影響を明らかにするために、最表面の薄板ガラス上に微細構造を形成した基板と（株式会社ニデックによる加工）、フラットな表面性状を持つ基板の 2 種類を使用した。また、粒子と基板の接触状態が粒子除去率に及ぼす影響も確認するために、垂直・水平方向への加振機構と組み合わせた装置も作成した。

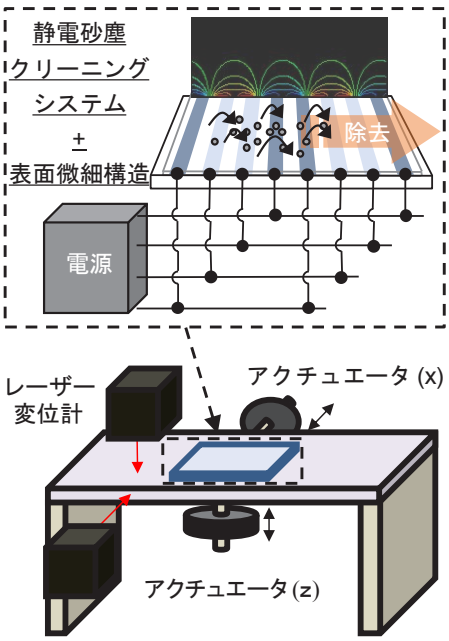


図1　静電砂塵クリーニングシステムの実験装置

図 2 に AFM を使用した表面微細構造の測定結果を示す。0.1mm 厚さの薄板ガラス表面上に、その透過性を損なわずに微細構造を形成することに成功した。それらの基板を使用して高電圧を印加した際の粒子除去試験の様子を図 3 に示す。ガラス表面に表面微細構造を形成することで、粒子の付着力を軽減させる効果があることは予備試験により確認しているが、静電場と組み合わせた場合は粒子が除去されずより多くの粒子が付着したままとなることが確認された。この要因について、表面微細構造により摩擦の影響

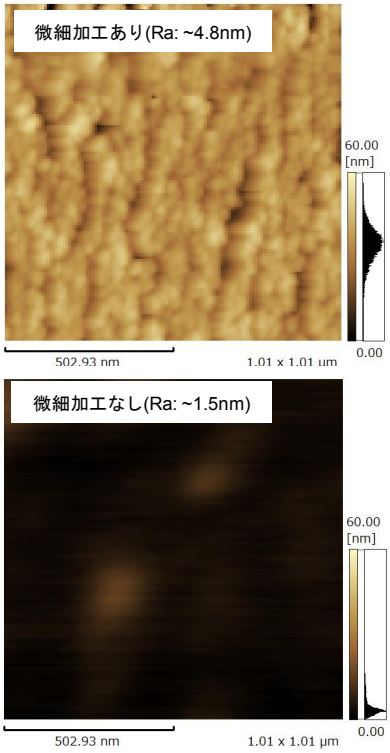


図 2 静電砂塵クリーニングシステム基板の表面微細構造

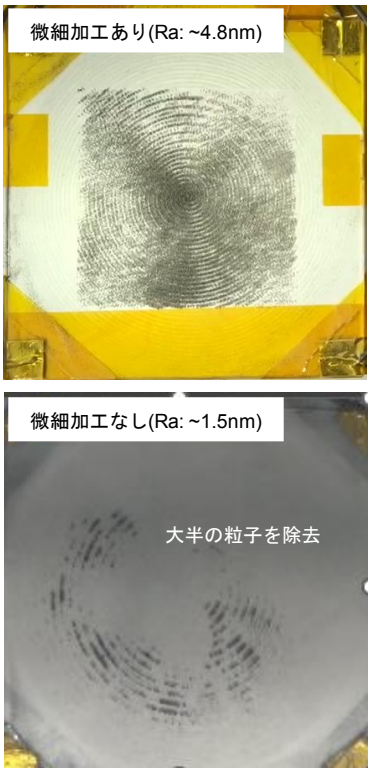


図 3 微細構造と組み合わせた場合の静電場中の粒子挙動

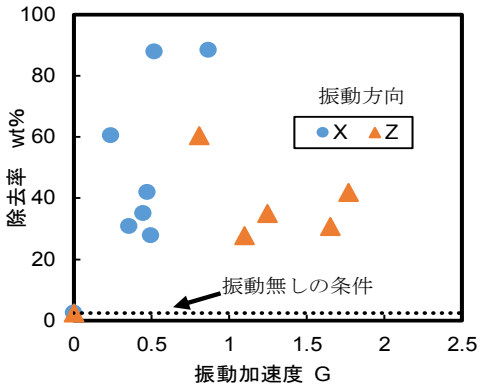


図 4 振動と組み合わせ場合の静電砂塵クリーニングシステムの除去効率(付着力が大きい小粒径粒子を使用)

が増加して、粒子の移動を阻害したものと考えられる。粒子除去効率を向上させるには、よりフラットな表面性状を持つ基板を適用することが望ましいといえる。ただし、この現象について詳細な理解は得られていないため今後も調査が必要である。

次に振動場と静電場を組み合わせた際の粒子除去試験の結果を図 4 に示す。この試験では表面微細構造がない基板を使用している。この結果より、振動と静電場の組み合わせが粒子除去に効果的であることが確認できる。また、垂直振動よりも水平方向の振動の方がより多くの粒子を除去できることが分かった。これは水平方向の振動により粒子が回転し、接触面積が減少することで付着力が減少した影響であると考えられる。このように粒子とパネルの接触状態を制御することで静電砂塵クリーニングシステムの除去効率が改善できることを明らかにした。

〔発表論文〕

1. Masato Adachi, et al., “Electrodynamic Dust Shield with Vibration Assistance for Cleaning Lunar Regolith Particles.” 9th World Congress on Particle Technology, Madrid, Spain (2022/9)

【助成 39－20】

光ポンピング法によるプラズマ励起粒子時空間分布の3次元可視化

代表研究者　京都大学大学院工学研究科 助教　占部 継一郎
共同研究者　京都大学大学院工学研究科 講師　伊藤 陽介

〔研究の概要〕

本研究は，従来のプラズマ計測技術では難しい，プラズマ中の励起粒子絶対密度の時空間分布モニタリングを光ポンピングによる計測対象粒子の電子スピン偏極と外部交流磁場によるプローブ光偏光回転角計測で実現することを目的としたものである．プラズマ（励起粒子）生成と電子スピン偏極を組み合わせた数値計算モデルを構築し，計算結果から本実験に適したプラズマ生成や外部磁場印加条件について考察した．さらに，計算結果により示された計測に適した放電条件に近く，かつ測定対象のヘリウム準安定励起原子が多く生成されるプラズマが放電空間中の不純物を除去することにより得られることを実験により明らかにした．

〔研究経過および成果〕

先端プラズマ技術の更なる発展には，プラズマ状態の時空間的挙動を精密かつ高速にモニタリングする技術の確立が欠かせない．プラズマ工学において，「励起粒子絶対密度の時空間分布」は非常に重要なパラメータの一つであり，このパラメータを非擾乱かつ 3 次元計測することは困難であった．本研究は，研究者独自の着想による「プラズマ励起粒子の多次元可視化計測技術の実現」を目指し，「光ポンピング」という従来プラズマ計測に活用されたことのない物理現象による計測技術の実現に取り組んでいる．

上記の研究目的達成には，プラズマ中の測定対象励起粒子の電子スピンをポンプ光により偏極させ（光ポンピング），外部磁場と偏極した電子スピンとの相互作用により生じる磁気光学効果を計測する必要がある．そこで，本研究では従来のプラズマ科学の枠組みに電子スピン偏極という新たな現象を取り入れ，活用するための基礎研究を計算・実験の両面から行った．

光ポンピングとは，円偏光のポンプレーザー光により対象粒子の電子スピンを偏極させる（式(1)）ことであり，そのスピン偏極方向が外部磁場によって傾き，結果としてポンプ光と直交な直線偏光プローブレーザー光の偏光面が回転する．（式(2)）このプローブ光の偏光回転角から，磁場強度もしくは測定対象粒子密度を計測することができる．

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{S} = \gamma \boldsymbol{S} \times \boldsymbol{B} - \frac{1}{T_2}\boldsymbol{S} + \frac{R_{\mathrm{OP}}}{2}S_z \qquad (1)$$

（$\boldsymbol{S}$：スピン偏極，γ：磁気回転比，$\boldsymbol{B}$：磁場，T_2：緩和時間，R_{OP}：ポンピングレート）

$$\theta = ncr_{\mathrm{e}}f\frac{\nu_{\mathrm{probe}} - \nu_0}{(\nu_{\mathrm{probe}} - \nu_0)^2 + (\Gamma/2)^2}l_{\mathrm{cross}}S_x \qquad (2)$$

（θ：偏光面の回転角，n：粒子密度，r_{e}：古典電子半径，f：振動子強度，ν_{probe}：プローブ光周波数，ν_0：共鳴周波数，Γ：線幅，l_{cross}：計測部の長さ）

本研究では，ある放電条件と外部磁場印加条件において，光ポンピング（スピン偏極）によるプローブ光偏光回転角がどのような値となるか，数値計算によっ

て推定可能な手法開発に取り組んだ．具体的には，ヘリウムガスプラズマ中の準安定励起原子（He^m）生成および失活を純 He ガス中の 0 次元グローバルモデルにより数値計算し，得られる He^m の密度と寿命から，ある交流外部磁場印加条件におけるプローブ光偏光回転による検出光強度変化を計算した．その結果，現在想定している放電条件では，交流磁場周波数が 250 Hz 以下の範囲で高感度な偏光回転計測が可能であることが示唆された．（図1，発表論文1）

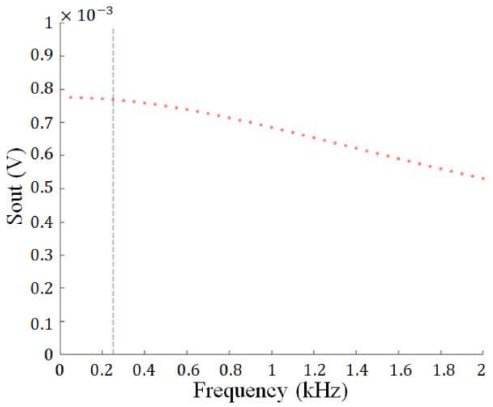


図１： 数値計算により得られた He^m スピン偏極によるプローブ光偏光回転角に対応する検出高強度（S_{out}）と外部交流磁場周波数の関係

この数値計算研究から，10 分の 1 気圧（10 kPa）程度の He ガス条件にて He^m 原子を高密度生成することが，本計測の信号検出に有効であることが示された．そこで，この圧力領域で He^m 失活の主要因となる He ガス中の分子性不純物を除去し，理想的な数値計算に近い実験条件を実現するための研究を行った．高純度 He ガスをガラス管に供給し，ガラス管内で誘電体バリア放電によりプラズマ（He^m 原子）を生成した．不純物の低濃度化を目的として，ガス供給系の見直しや，He ガス精製器の導入を行った．図 2 に示す通り，ガス精製器の導入により He^m 原子密度が 2 倍程度に上昇し，不純物による He^m 失活抑制が達成されている．この実験で得られた 10^{13} cm^{-3} という He^m 密度は数値計算で得られたと同等のものであり，光ポンピングによる He^m 計測に適した放電条件であると言える．（発表論文 2）

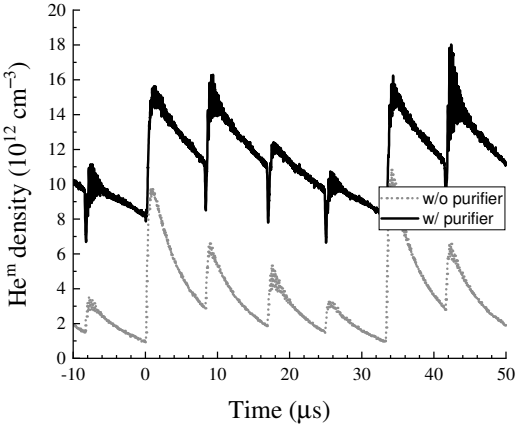


図２： レーザー吸収分光実験により得られた He^m 密度の時間変化．He 精製器導入により 2 倍程度の He^m 高密度化が実現できた．

以上で得られた光ポンピングによる He^m 密度計測に適した外部交流磁場や放電条件を活用し，3 次元空間分布計測を行うための実験システム構築を現在行っている．

〔発表論文〕

1. 日髙 颯哉，伊藤 陽介，占部 継一郎，「光ポンピング磁気センサへの応用に向けた準安定励起ヘリウム原子の密度及び寿命に関する検討」，第 83 回応用物理学会秋季学術講演会（仙台，2022 年 9 月），22p-A404-15.
2. K. Urabe, M. Toyoda, Y. Matsuoka, and K. Eriguchi,「Quantification of molecular impurity ratio in high-pressure helium dielectric barrier discharge by laser absorption spectroscopy」, 75th Annual Gaseous Electronics Conference / 11th International Conference on Reactive Plasmas（Sendai, Oct. 2022）, HW6.00048.

【助成 39－21】

次世代バイオマス構造体：100%セルロースナノファイバー成形体の機械要素用切削加工法に関する研究

代表研究者　横浜国立大学環境情報研究院　助教　大久保光

〔研究の概要〕

本研究では，次世代のバイオマス構造体：100％セルロースナノファイバー（CNF）成形体に対する切削加工法について，トライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑）の視点から検討した．特に，セルロースの構造的弱点である「水」を避けた加工法を確立するため，潤滑油を併用した加工法の確立を目指した．本研究の成果から，潤滑油を併用した場合の加工では，表面性状の乱れ等は発生せず，良好な性状を獲得できた．加えて，脂肪酸系の潤滑剤を添加した潤滑油用いた場合には，非常に平滑な面を得ることができた．表面分析の結果より，その平滑化メカニズムは，潤滑油の吸着による化学摩耗の進展によるものと結論した．

〔研究経過および成果〕

近年，世界規模で深刻化する環境問題を背景として，環境調和を志向した工業製品の素材転換が進められている．とりわけ，生分解性・生物資源由来（バイオマス）素材の活用は，現代の大きな潮流であり，軸受・オイルシール等の摺動機械要素においてもその導入が検討され始めている．次世代のバイオマス産業資材としてセルロースナノファイバー（cellulose nanofiber :CNF）の研究開発が進められている．CNF は，セルロース分子が集合したセルロースミクロフィブリルから構成されるファイバー状の構造体であり，鋼の 5 倍の高強度・1/5 の低比重・低熱膨張率・高界面制御性を有したバイオマス材料である．筆者らは，従来バイオマス素材の欠点を克服したCNFの優れた特性に着眼し， CNF 分散液を加圧成形することで得られる高強度，軽量，低熱膨張性及び高加工性を有するバイオマス摺動材料：「100%CNF 成型体（以下，CNF成型体）」を創製した．本研究では，CNF成型体の加工法を模索することで，CNF 成型体の構造材料：建築資材・機械材料への広範な応用を目指すことを目的とした．とりわけ，CNF 成型体の加工性の基礎評価としてCNF成型体と汎用切削工具を想定した鉄鋼材とのトライボロジー特性に着目し，その研究を進めた．

図1にCNF成型体の外観を示す．本試験では，図 1 に示す CNF 成型体についてのトライボロジー性能を確認し，加工法についての基礎的な考察を行った．

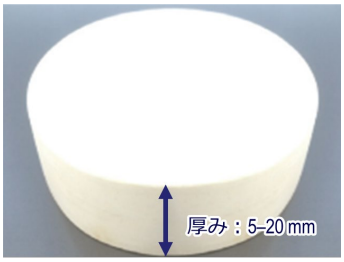


図1　CNF 成型体の外観

図2にCNF成型体を工業潤滑油PAO及びそれに脂肪酸（GMO）摩擦調整剤摩擦係数の速度依存性を示す．全ての組み合わせにおいて，低速度域（1-10 mm/s）から中－高速度（50-500 mm/s）の間で摺動速度の増加に伴う摩擦係数の低減が確認された．低速度域（＝境界潤滑領域）における GMO の摩擦

低減効果に着目すると，CNF-SUJ2 ペアで 80%程度，SUJ2-SUJ2 ペアで 20%程度の摩擦低減効果が確認された．特に，PAO＋GMO 潤滑油環境下における CNF-SUJ2 ペアでの摩擦係数は 0.015-0.025 であり，全速度域に渡って卓越した低摩擦性が確認された．従って，CNF 成型体―工具間の摩擦状態を考慮した場合，摩擦調整剤の添加が有効であり，従来素材（SUJ2-SUJ2）では確認されない卓越した低摩擦性を発現することが明らかとなった．

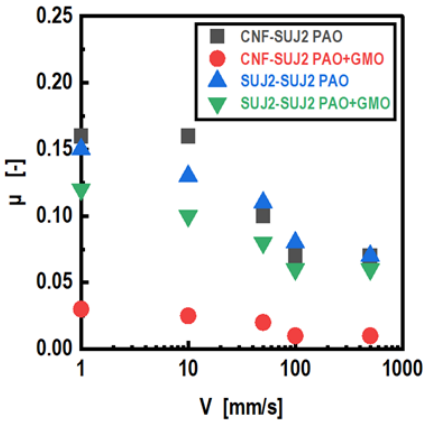


図2　摩擦―速度曲線

工具側を想定している鉄鋼材側の摩耗状況を確認した．図3に摩耗量を示す．CNF－SUJ2 ペアの場合，鉄鋼材側の摩耗量は GMO 添加により，大幅に減じられた．このことは，CNF 成型体の加工に伴う工具寿命を大幅に伸ばすことが可能と考えられる．

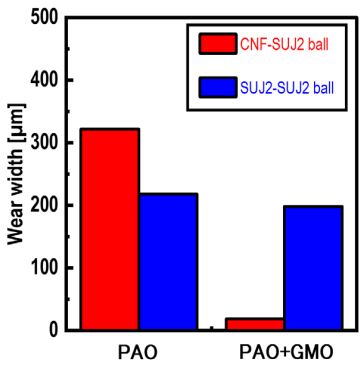


図3　工具側の摩耗量

次に，表面性状を原子間力顕微鏡にて確認した．図 4 に CNF 成型体の加工面の表面性状（Sa）及び AFM 形状像を示す．図 4 より，CNF 成型体表面を GMO 添加油で加工する事で，表面の平滑化が確認された．一方，PAO 油のみでの加工を行った場合，性状は悪化した．

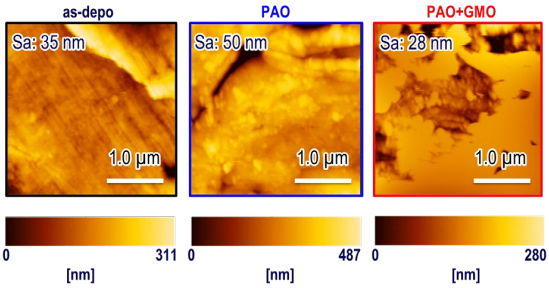


図 3　AFM 形状像及び Sa

上述した結果より，CNF 成型体の加工油には，脂肪酸系摩擦調整剤が有効であることが示された．

〔発表論文〕

1．H. Okubo, R. Nakae, D. Iba, K. Yamada, H. Hashiba, K. Nakano, K. Sato, S. Sasaki, Tribological properties of 100% cellulose nanofiber (CNF) molding under dry- and boundary lubrication-conditions at CNF/steel contacts, Cellulose, Accepted.

2．H. Okubo, H. Hashiba, T. Inamochi, K. Sato, S. Sasaki, K. Nakano, Superlow frictional and environmentally superior tribomaterial: 100% cellulose nanofiber molding, Scitific Reports, under review.

【助成 39－22】

電界による局所カイラル磁気構造誘起を利用した磁壁伝送に関する研究

代表研究者　大阪大学産業科学研究所　准教授　　小山　知弘

〔研究の概要〕

本研究ではスピンのカイラリティを利用した可逆的な磁区の反転伝送の実現を目指して、局所的に磁気異方性を変調させた Pt/Co 構造におけるカイラル磁気構造の観測を行った。試料表面のエッチングにより Pt/Co 細線の異方性を部分的に変調し、一つの磁性体の中に面直と面内磁化が共存した異方性変調構造を作製した。磁気抵抗測定から、この系では界面においてジャロシンスキー・守谷相互作用に由来するカイラル有効磁場が存在し、それにより面直磁化の方向に依存して面内磁化の方向が一意に定まることを見出した。このことは、異方性を局所的に変調させることでカイラル磁気構造を誘起できることを示唆している。

〔研究経過および成果〕

強磁性細線中の磁区に情報を担わせ、その境界である磁壁を電流でシフトさせて動作する磁壁移動メモリは、次世代のストレージクラスメモリへの応用の観点などから盛んに研究されている。一方で現状の磁壁デバイスは、一度入力されたビット情報の書き変えや消去技術が確立されていないという課題がある。実用化のためには上記の動作を高速かつ省エネルギーで実行するための技術の開発が必須である。我々は、近年スピントロニクス分野で注目されている「電圧印加による局所的な磁性制御」と「カイラル磁気構造」を組み合わせることで問題を解決できると考えている。具体的には、スピンの旋回性が一意に決められたカイラル磁気構造を局所的に電圧により誘起し、可逆的な磁区の反転動作を行うための技術の確立を目的とする。本研究ではその準備として、電圧を印加せずに局所的に磁気異方性を変調した白金(Pt)/コバルト(Co)積層構造を作製し、カイラルな構造が誘起されるための条件を調べた。

Pt/Co/酸化マグネシウム(MgO)構造をスパッタにより製膜し、電子線リソグラフィーとイオンミリングを用いて細線形状(線幅 1 μm)に微細加工した試料を作製した。製膜した状態での試料の磁化容易方向は面内である。この試料に対し、最表面の MgO の表面をエッチングすることで面直磁化容易になることがわかった。これは Co 層の表面がわずかに酸化されたためであると考えられる。細線の一部が部分的にレジストで覆われた状態を作製し MgO 表面のエッチングを行うことで、部分的に面直磁化領域を作りだすことができる、すなわち磁気異方性変調構造を実現できる。本研究では、面内領域の幅を変えた数種類の変調構

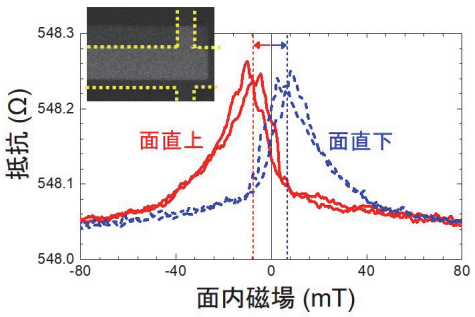


図１： 素子構造(左上)と面内磁場下での磁気抵抗測定結果

造を作製し実験を行った。

本研究では面内磁場下で試料の磁気抵抗(MR)の測定を行い、面内領域の磁化方向について調べた。細線と直交する方向(y 軸方向)に磁場を印加した際の結果を図に示す。あらかじめ面直領域を上向きにした試料では、MR 曲線が中心から左すなわち-y 方向にシフトしていることが確認された。重要なことに、面直磁化を下向きに反転させると、シフトの符号が反転することがわかった。MR 曲線のシフトは、面内磁化に対してアディショナルな有効磁場が作用していることを意味している。すなわち面直磁化が上(下)向きの時、+y(-y)方向の有効磁場が働いていることになる。面直磁化の方向と有効磁場の向きについて考察したところ、ジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)により形成されるカイラル磁壁に作用する有効磁場と同方向であることがわかった。観測された有効磁場の大きさから大まかに見積もったDMIの大きさがPt/Co系で過去に報告されている値と近いことからも、有効磁場の起源がDMIであることの証拠の一つである。この結果は、面内磁化と面直磁化を共存させた異方性変調構造においては、DMIによりカイラルな磁気構造が形成されることを意味している。

さらに本研究では、面内領域幅と有効磁場の関係を調べた(図 2)。有効磁場の大きさは面内領域幅が大きくなるほど減少することがわかった。これは、有効磁場の起源が面内/面直界面に起因するためである。これにより、異方性変調により効果的にカイラル構造を誘起するためには、面内領域幅を細くすることが有効であることが示唆される。

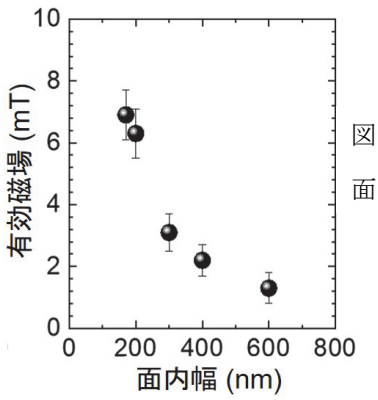


図２：有効磁場の面内領域幅依存性

本研究により、DMI を有する系において、面内磁化と面直磁化が界面を形成するような構造では、カイラル磁気構造が誘起されることが明らかになった。今回は表面エッチングによる異方性変調を用いたが、電圧効果による局所的な磁気異方性変調によってもカイラル構造を可逆的に誘起することは可能であると考えられる。今後の展望としては、実際にゲート電圧印加構造を作製して検証するとともに、磁区の反転動作の観察へと進んでいく予定である。

〔発表論文〕

1. T. Koyama, Y. Nakatani and D. Chiba, “Chirality-induced effective field in Pt/Co/MgO system with spatial anisotropy-modulation”, Applied Physics Letters **120**, 172402 (2022).
2. T. Koyama, ”Unidirectional effective field observed in Pt/Co structure with spatial anisotropy modulation”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会(青学大), 口頭発表
3. K. Yoneda, T. Koyama et al., “Observation of chirality-induced effective field on in-plane magnetization in Pt/Co system with spatial anisotropy modulation”, ICMFS2022 (OIST), ポスター発表
4. K. Yoneda, T. Koyama et al., “二重磁気異方性変調界面を有する Pt/Co 系におけるカイラリティ誘起磁化制御”, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会(東北大), 口頭発表

【助成 39－23】

傍熱型ホローカソードを用いたプラズマウィンドウの実用化

代表研究者　広島大学工学部　助　教　　山崎　広太郎

〔研究の概要〕

プラズマウィンドウ(PW)はプラズマの熱を用いて高めた粘性を用いて大気と真空の圧力差を支えるプラズマ応用技術である．本研究では PW の実用化を阻む問題であるカソードの寿命を解決し，さらに圧力隔壁性能向上するために傍熱型ホローカソードを用いた PW の開発を行った．本研究で開発した傍熱型ホローカソードを用いたPWは1時間以上の長時間にわたって圧力隔壁として動作することが確認された．またトムソン散乱計測を行うことで傍熱型ホローカソード出口付近において電子温度 1.6 eV 程度，密度 10^{19}–10^{20} m^{-3} 程度の高温高密度なプラズマが生成できていることが確認できた．

〔研究経過および成果〕

プラズマウィンドウ(PW)はプラズマの熱を用いて高めたガス粘性を用いて大気と真空の圧力差を支えるプラズマ応用技術である．PW はガラス窓等の固体を用いることなく大気と真空を隔てることができるため，実用化できれば通常の真空窓を通過することができない軟X線や電子・イオンビームを大気側に導くことができ，量子ビーム技術の適用範囲を大幅に拡張することが可能になる．これまで行われてきた PW の研究から，実用化を図る上で従来以上に高密度なプラズマを長時間生成することが必要であることが明らかになった．本研究では PW が抱える上記の課題を解決することを目的としてカソードを外部から加熱する機構を持つホローカソード(傍熱型ホローカソード)を用いた PW の開発を行った．ホローカソードは円筒形をした陰極のことであり，放電の際に円筒内部に高密度プラズマを生成するホローカソード効果と呼ばれる性質を示すことが知られている．陰極部から高密度プラズマを生成することができれば，チャンネルを通過するガス粘性をさらに向上させることが可能となる．また，従来の PW では陰極に表面積の小さい針状電極を用いており，熱負荷による損傷が長時間放電実現を妨げていた．ホローカソードを用いることでプラズマとの接触面積が増えるため，陰極に生じる熱負荷を大幅に低減させることが期待できる．

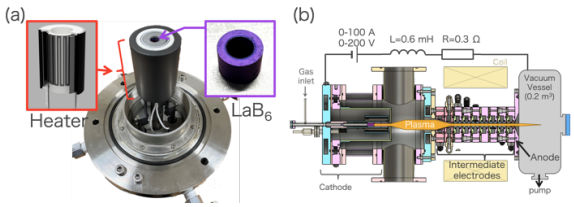


図 1 (a)傍熱型ホローカソードの概略図 (b)本研究で開発した PW の概略図

傍熱型ホローカソードの概略図を図 1 に示す．円筒形 LaB6 の周囲に C/C コンポジット製のヒーターを設置し，LaB6 から生じる熱電子放出を促すことで放電に必要な電圧を低下させ，さらにカソード内部に高密度プラズマ柱を形成しやすい条件をつくり出す．ヒーターを用いて LaB6 を 1200 ℃以上に加熱した状態で放電を開始する．

傍熱型ホローカソードを用いた PW で得られた圧力隔壁性能を図 2 に示す．カソード側からヘリウムガ

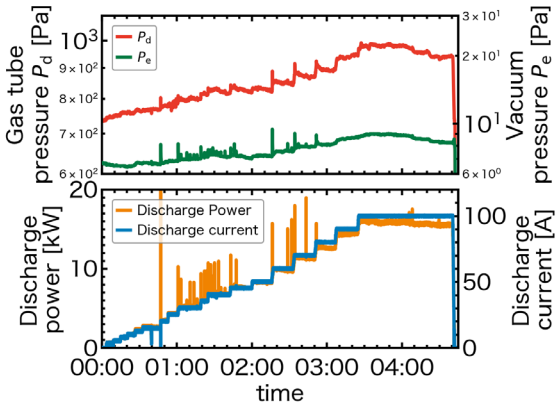


図 2 (上)大気圧側と真空容器側の圧力，(下)放電電力および放電電力の時間発展

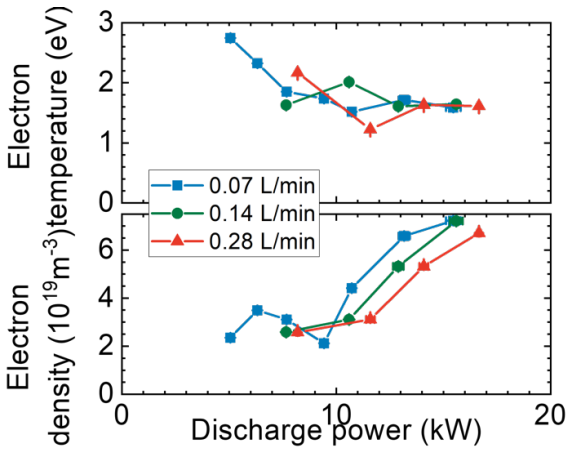


図 3 傍熱型ホローカソード出口付近における電子温度(上)密度(下)の放電電力依存性

スを 0.07 L/min で流入させた状態で放電を行った．アーク放電電力を増加させて上流部圧力が 1 kPa 程度に達した条件で 1 時間以上にわたって圧力隔壁として動作させることに成功した．

PW の圧力隔壁特性を定量的に評価する上で重要である電子温度および密度を計測するためにレーザーを用いたトムソン散乱計測を行った．本研究では特に傍熱型ホローカソードで生成されるプラズマの電子温度密度と圧力隔壁性能の関係を明らかにするためにカソード出口から軸方向に 2 cm 離れた位置における電子温度密度計測を行った．計測により得られた電子温度および密度の放電電力依存性を図 3 に示す．電子密度は放電電力が増加するとともに 10^{19}–10^{20} m^{-3} の範囲で増加しており，ガス流量にはほとんど依存していないことが明らかになった．放電電力増加とともに密度が増える傾向はHβ線のシュタルク広がりを用いた計測の結果と一致している．また，達成できた密度は以前の PW で達成できた 6.6x10^{19} m^{-3} よりも高くなっており傍熱型ホローカソードを用いることでチャンネル内のプラズマの高密度化に成功したことが明らかになった．電子温度は放電電力にほとんど依存せず 1.6 eV 程度であることが明らかになった．これまで PW 内部の電子温度を推定する手法として，放電抵抗の変化を用いてきた[発表論文 1]．放電抵抗から推定した電子温度は放電電力に対して単調に増加していたため，トムソン散乱計測で得られた結果はこれまでの結果と矛盾する傾向を示している．トムソン散乱計測で得られたプラズマパラメータはカソード出口付近の局所的なデータであるのに対し，放電抵抗から推定した電子温度は PW のチャンネル全体で粗視化したデータである．そのためこれらの物理量に現れる傾向の不一致はカソード出口付近とチャンネル内部でプラズマパラメータが不均一であることを示唆している．そのため PW の圧力隔壁特性を定量的に評価するためにはカソード付近だけでなくチャンネル内部のパラメータを取得する必要があることが明らかになった．

〔発表論文〕

1. K. Yamasaki, O. Yanagi, Y. Sunada, *et al.*, “Discharge characteristics of steady-state high-density plasma source based on cascade arc discharge with hollow cathode” Review of Scientific Instruments **93**, 053502 (2022)

【助成 39－24】

Tailor-made color filter －色覚異常の多様性を考慮するデジタルカラーフィルタ

代表研究者　香川大学創造工学部　准教授　　佐藤　敬子

〔研究の概要〕

着色フィルタは，色覚異常者にとって区別しづらい色に輝度差を生じさせることで弁別性を高める効果があり，商業用メガネ等に応用されてきた。本研究では，色覚異常の型と強度を考慮したデジタルカラーフィルタを提案するため，RGB 色空間からLMS 色空間への変換行列に着目し，型と強度別にフィルタの分光透過率を導出した。導出したデジタルカラーフィルタを評価するため，1 型及び 2 型の赤緑色覚異常者 9 名に対して，色相配列テストを実施し，色弁別性に及ぼす効果を検証した。その結果，提案したデジタルカラーフィルタにより弁別パフォーマンスは向上した。本研究で提案したデジタルカラーフィルタは，色覚異常者が表示デバイスを利用する際，色を混同してしまう不便さを解消する可能性を示唆した。

〔研究経過および成果〕

色覚異常者は特定色の組み合わせを混同することがあるため，路線図の色識別など，日常生活で不便さを感じているだけではなく，職業制限を受けることもある。このような不便さを解決するデバイスとして，古くから着色フィルタが研究されてきた。着色フィルタのコンセプトは，1837 年に Seebeck によって提案され，Maxwell が赤緑色覚異常のための眼鏡として設計した歴史がある。着色レンズは，光の通過帯域を変えることで網膜の錐体刺激量が変化し，区別しづらい色の組み合わせに輝度や色味の差が生じることを利用している。

研究者らは，これまで表示デバイスに実装可能な「色覚デジタルカラーフィルタ」を提案し，その有効性を検証してきた。デジタルカラーフィルタは着色レンズの原理を表示デバイスに応用する試みであり，一部の色を変換する既存手法よりもシンプルな手法で簡便に実装できる。カラーフィルタは色覚異常者の色弁別性を向上させることは示していた一方で，異常の型や強度によって効果が様々であり，型の多様性，異常強度の連続性といった異なる特性を考慮できるフィルタの設計が必要であった。

そこで本研究では，個々の異常特性に合わせた最適なフィルタを構築するため，色覚異常の型と強度に基づく錐体感度関数を利用して，最適化手法によりフィルタの透過率を算出する手法を提案し，さらにフィルタの有効性を実験によって示した。

提案手法について説明する。まず正常色覚者の 3 種類の錐体を表す LMS 基本感度関数を異常の型や強度に沿ってシフトさせ，色覚異常者の錐体感度関数を表現した。さらに，この感度関数で表現される色覚異常者の錐体色空間を，カラーフィルタを通して観測することで，空間での色域を拡大するように，次に示す式を達成するカラーフィルタの分光透過率を求めた。具体的には，色覚異常者がデジタルカラーフィルタを通して観測したときの錐体色空間 LMS の変換行列 T_F を，正常色覚者の変換行列 T_N に一致させるようにフィルタの分光透過率を求めた。

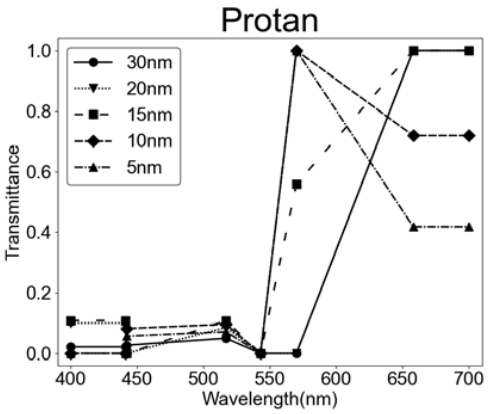


図 1　1 型色覚異常者に最適化されたフィルタ

$$T_F = \begin{pmatrix} L_r^* & M_r^* & S_r^* \\ L_g^* & M_g^* & S_g^* \\ L_b^* & M_b^* & S_b^* \end{pmatrix} \fallingdotseq \begin{pmatrix} L_r & L_g & L_b \\ M_r & M_g & M_b \\ S_r & S_g & S_b \end{pmatrix} = T_N$$

各波長における分光透過率を，制約付き非線形最小 2 乗法を用いて求め，各型及び異常強度（シフト量）別で導出した。1 型色覚異常の結果を図 1 に示す。

求めたフィルタの効果を検証するため，図 2 に示すような，色を色相順に並び替える色相配列検査（D-15 テスト）を赤緑色覚異常者 9 名に対して実施した。フィルタの無い条件とフィルタがある条件において並び替えた結果について色損失の程度を表す Confusion index（C-index）を算出した結果を図 2 に示す。結果，フィルタの種類によって色損失のばらつきはあるものの，フィルタの有無による色弁別パフォーマンス向上が認められた［t (8) = 2.851, p = .021］。

本研究における最適化手法や評価実験設定の限界として，導出するフィルタの分光透過率の波長を経験的に決定したことが挙げられる。また，実験結果から型と異常強度に沿ったフィルタとしては不十分な点も見られた。現在，設計パラメータや目標関数の設定を再検討するとともに，実験参加者の型や強度のばらつきについて分析している。このフィルタを表示デバイスの色調整等に反映させることで，色を混同してしまう不便さを解消できると考えられる。

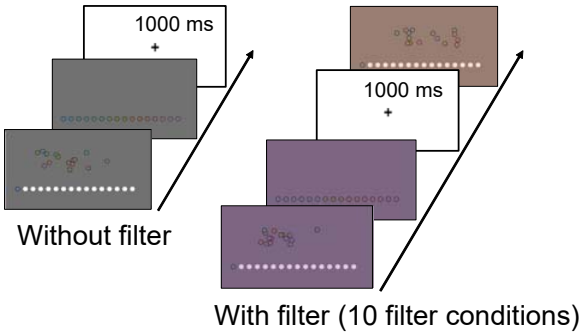


図 2　実験の流れ（色相配列検査）

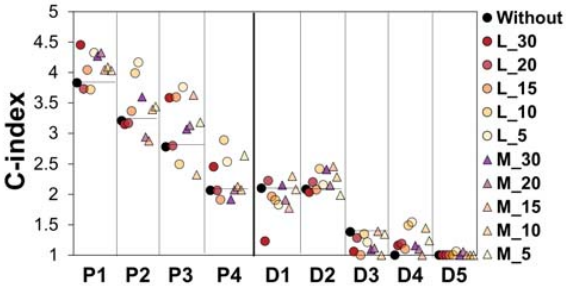


図 3　色相配列検査の結果
（C-index は色損失の程度を示す）

〔発表論文〕

1. Saito, S. and Sato, K. Effect of digitally generated colored filters on Farnsworth-Munsell 100 hue test by red-green color vision-deficient observers, Proc. IS&T 29th Color and Imaging Conf., 2021.
2. 武村知樹・佐藤敬子. 色覚異常者は色表現においてハンデを抱えるか？, 日本視覚学会 2022 冬季大会, 2022
3. 武村知樹・佐藤敬子. 色覚異常者の色塗り作業において物体の親密度はどのような影響を及ぼすか, 2022 年電気学会 C 部門大会講演論文集, pp.639-643, 2022

【助成 39－25】

「冷却速度を変えるだけで超伝導体にも絶縁体にもなる物質―何が超伝導に必要なのか、実験からの機構解明」

代表研究者　愛媛大学大学院理工学研究科　教　授　　内藤　俊雄

〔研究の概要〕

30年ほど前にアメリカのグループが発表したκ-$ET_2Cu[N(CN)_2]I$ という有機超伝導体がある。ところがこの物質は有機物の中では最高の転移温度（約 10 K）を示すという報告と、絶縁体であり超伝導体ではないという報告が混在し、その真偽や原因も含め、長い間謎のまま放置されていた。本申請者はこのような特質はどちらもこの物質の本質であり、何らかの違いによって電気特性が全く変わってしまっているのだろうと推測した。仮にそうだとすると、その違いを明らかにすれば高い温度で超伝導になるための重要な条件が分かると考え、上記の物質の単結晶を合成し、その構造と電気特性を単結晶ごとに測定して、相違点を詳細に比較した。その結果、電気伝導を担っている ET 分子の末端の構造にごくわずかな違いが見つかり、それをもとに一見互いに矛盾する色々な電気特性データを説明できた。つまり、超伝導になるための重要な構造上の条件が見つかった。

〔研究経過および成果〕

現代社会は、地球規模でエネルギーと環境という難しい問題に直面している。その解決に科学技術、特に材料科学の果たすべき役割は大きな比重を占めている。中でも特に期待の大きい物質群に、「超伝導体」と呼ばれる材料がある。超伝導体は、ある温度（転移温度）以下に冷やすと、エネルギー（電力）のロスや発熱をせず、電気を運べるようになる。その他にも、超伝導体が実用化されれば、様々な夢のハイテク技術が実現する。しかし現状では、超伝導体の数はごく限られている。更に、その物質も我々が普段生活している温度では超伝導を示さず、マイナス 270℃ ＝ 3 ケルビン（3 K）付近まで冷やす必要がある物質も珍しくない。従って超伝導体を実用化するためには、何よりも高い転移温度を持つ新しい物質を開発することが急務である。しかしそのための方向性は分かっておらず、試行錯誤や勘に頼った物質開発が過去100 年間に渡り行われてきた。この 100 年間で最高記録の転移温度は室温（300 ケルビン）の約半分（150 ケルビン付近）まで来たが、このままのペースでは室温に到達するのにもう 100 年かかる計算になる。本研究プロジェクトではそうした状況を打開すべく、どういった特徴を持つ物質が高い温度で超伝導になるのかを明らかにすることを目的とした。その為に選んだ試料（研究対象）は、同一の物質でありながら、結晶ごとに違う電気特性を示し、測定の仕方によっても超伝導体になったり、絶縁体になったりするという不思議な物質κ-$ET_2Cu[N(CN)_2]I$ である。これは30年ほど前にアメリカの研究グループによって”有機高温超伝導体”の一つとして報告され、大変注目された。しかしその後の世界各国での追試により報告通りの超伝導を示さず、単に報告に誤りがあるか、再現性のない研究成果だと思われ、長い間放置されてきた。本申請者はこの違い（電気特性の多面性）はこの物質の本質

であり、この原因や機構を明らかにすれば、”高温超伝導体”を得るための重要な知見が得られると考え、本申請の研究提案に至った。

実際の研究は、試料（κ-$ET_2Cu[N(CN)_2]I$ の単結晶）の合成、X 線構造解析と電気抵抗測定を繰り返し、得られた結果（結晶構造と電気特性）を詳細に比較した。その結果、それまで電気伝導には一切関与していないと思われていた ET 分子末端のアルキル基と呼ばれる部分の構造が、超伝導になる場合とならない場合とで異なることが分かった（図 1）。この部分は小さなエネルギーで柔軟にその構造を変えるため、単結晶を合成する際の条件の違いや、電気特性を測定する際の冷却速度など微妙な条件の違いによっても当該部分の構造が変化することがあり得る。その為、各研究グループでこれらの条件を完全に統一することができず、実験結果が異なったと解釈される。

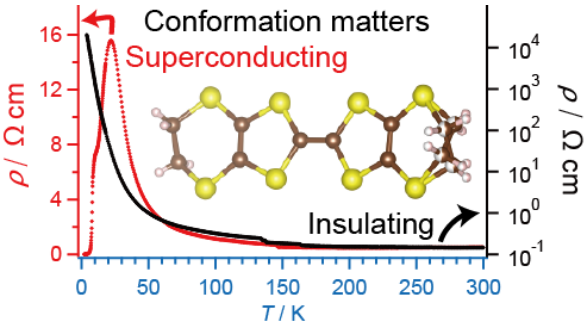


図 1．物質を構成する分子の電気の通り道ではない部分の形状の違い（挿入図の分子の右端に 2 通りの形状を重ねて示す）で、超伝導体（電気を世の中で最も良く流す物質；図中の赤いグラフ）にも絶縁体（電気を殆ど流さない物質；図中の黒いグラフ）にもなり得る物質（発表論文1から引用）。グラフの左端（10 K 付近）で赤い方だけが突然電気抵抗がゼロに向かって落ちている（超伝導転移）。一方、黒い方は同じぐらいの温度で 10^4 Ω cm 程度の非常に高い電気抵抗を示し、その差は 5 桁（10 万倍）以上である。

今回見出された事実は、単に物質の部分構造が超伝導の出現に意外な大きな影響を及ぼしていたということに留まらない。これまでに提唱されていた有機超伝導体の一般的相図では考慮されていなかった要素が、実際には根本的に重要であることを示した。更に他にも重要な意義がある。分子の振動など一般に格子振動と呼ばれる現象が、有機物を始めとする各種超伝導体に共通して、超伝導を引き起こす原動力となっていることがこれまでの多くの研究の蓄積から示されている。一方、今回の ET 分子末端の構造の変化も、元はと言えばこの部分の分子振動に起因している。だとすれば、物質内で電気の通り道に含まれていようがいまいが、分子の一部分の振動を制御することによって、超伝導を引き起こせる可能性を示した。例えば当該の分子振動と同じ振動数を持つ光（赤外線など）を当てて共鳴を起こし、目的の振動を強制的に活発にすれば、温度に関係なく超伝導が起こるのであろうか？もしこうしたことが可能になれば、室温で超伝導を実現できる見込みは充分出てくる。本研究の成果を受けて、次なる研究課題として是非追及してみたいテーマである。

〔発表論文〕

1．"Organic charge transfer complex at the boundary between superconductors and insulators: critical role of a marginal part of conduction pathways." T. Naito, H. Takeda, Y. Matsuzawa, M. Kurihara, A. Yamada, Y. Nakamura and T. Yamamoto. *Mater. Adv.* **3**, 1506-1511(2022). DOI: 10.1039/D1MA00933H. 【注目論文として、裏表紙に挿絵としても掲載】

【助成 39－26】

錯体分子集積による極性配位高分子合成と機能開拓

代表研究者　九州大学理学部　准教授　　大谷　亮

〔研究の概要〕

反転対称性のない結晶構造を有する極性化合物は、機能性材料として活発に研究されている一方で、未だ系統的に設計することは難しい。我々のグループでは、五配位型極性錯体ユニット $[MnN(CN)_4]^{2-}$ とテトラエチルアンモニウムカチオン(NEt_4^+)およびカリウムカチオン(K^+)を組み合わせることで極性化合物を得ることに成功し、極性プロトン伝導体としてふるまうことを見出した。いずれの化合物も、結晶格子中に水分子を含んでおり、室温加湿条件下においてプロトン伝導を示した。また、加熱による脱水処理を行うと無極性構造へと転移した。この水分子の有無に依存した極性－無極性構造転移は可逆的であり、第二次高調波発生(SHG)のスイッチングも達成された。極性プロトン伝導体はほとんど報告例がなく、極性材料としての新たな可能性を示している。

〔研究経過および成果〕

チタン酸バリウムを代表とする極性構造物質は強誘電性、圧電性、焦電性を示す機能性材料である。極性構造中の「高度に揃った構造ひずみ」がダイポールを生み出し、電場や圧力に対する応答性に繋がっている。既に実用化もされている一方で、極性構造の設計は極めて難しく、化学的な物質開発において極性物質を設計・合成するためのブレークスルーが求められている。我々は、シアノ金属錯体をベースとして、極性材料開発を進めてきた。特に、分子ユニットの対称性を落とした五配位型極性錯体ユニット $[MnN(CN)_4]^{2-}$ に着目し、様々な構築素子と組み合わせることで物質開発を行っている。この分子は、四つのシアノ基が *xy* 平面からズレた傘型であるため、分子ユニットとしてダイポールを持つ点やシアノ基の配位角度により分子ダイポールの変化を誘起できるといった特徴をもつ。これらを最小のダイポールユニットと捉えて錯体ネットワーク中での配列制御を行うことで、極性構造とプロトン伝導を併せ持つ材料が得られてきた。

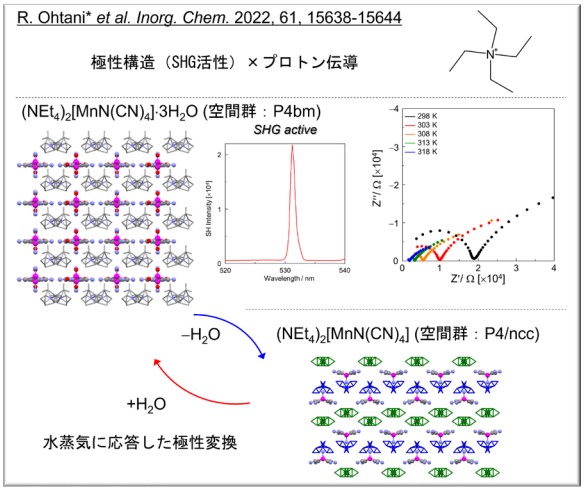


図1．極性プロトン伝導体$(NEt_4)_2[MnN(CN)_4]\cdot 3H_2O$と水の吸脱着に応じた極性変換

まず、テトラエチルアンモニウムカチオン(NEt_4^+)とMn錯体との組み合わせにより、水分子に応答して極性変換が可能な有機－無機ハイブリッド錯体 $(NEt_4)_2[MnN(CN)_4]\cdot 3H_2O$ **(1·H₂O)** の合成に成功した。合成直後は空間群 P4/ncc で結晶化し、有機カチオンと錯体アニオンユニットが交互に配列した無極性

構造体 **1** であった。しかしながら、この結晶を水蒸気にさらすことで、結晶水を取り込み、空間群 P4bm へと変化することを見出した。水和した極性構造中では、錯体ユニットはダイポールを打ち消しあうように配列していた一方で、有機カチオンが非対称な形態をとり *c* 軸方向にダイポールをそろえて並ぶことで反転対称性のない結晶構造を構築していた。さらに、脱水処理により空間群 P4/ncc へと戻ることも確認できたことから、水の吸脱着に応答した可逆の極性－無極性変換を達成した。この構造変化は、SHG 応答のスイッチングからも確かめられた。また、水吸着体は、プロトン伝導性も示した。室温、湿度 80％下において、2.3×10^{-6} S/cm のプロトン伝導度を示した。プロトン伝導度の値としては、他の金属錯体系固体電解質と比較して高いものではないが、極性構造と組み合わせた極性プロトン伝導体は極めて珍しい。この成果は、*Inorganic Chemistry* 誌に掲載された。

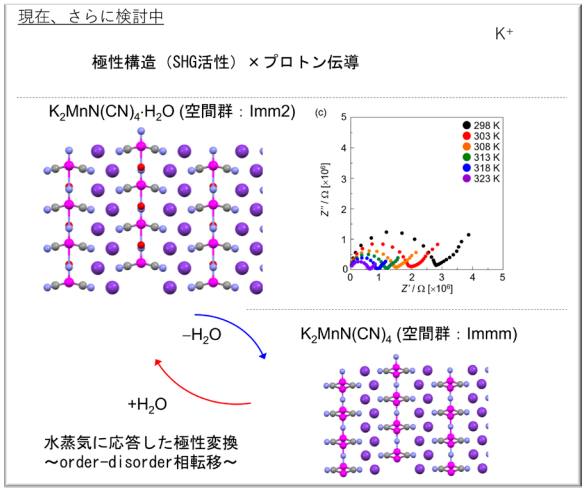


図2. 極性プロトン伝導体 $K_2MnN(CN)_4\cdot H_2O$ と水の吸脱着に応じた極性変換

さらに、カリウムカチオン（K^+）との組み合わせにおいても極性プロトン伝導体 $K_2MnN(CN)_4\cdot H_2O$ (**2·H₂O**) が得られた。**2·H₂O** は Imm2 で結晶化しており、錯体ユニットがダイポールをそろえて配列することで極性一次元鎖構造を構築していた。また、加熱脱水により Immm の無極性構造 **2** に相転移した。この無極性構造には、錯体ユニットのディスオーダーが観測され、すなわち order-disorder 相転移による極性変換であった。これは、SHG 応答のスイッチングからも確かめられた。また、室温、湿度 80％下において、5×10^{-5} S/cm のプロトン伝導度を示した。この **2·H₂O** は評価するうえで良好な単結晶試料が得られることが分かってきており、結晶軸に依存したプロトン伝導の評価をさらに進めている。

本研究は、五配位錯体を用いると、カチオン種を変化させることで系統的に極性化合物が得られる可能性を示している。現在は、さらにさまざまなカチオン種を用いた合成に取り組んでおり、極性プロトン伝導体の機能性材料としての確立を目指している。

〔発表論文〕

1. "Vapor-induced conversion of a centrosymmetric organic-inorganic hybrid crystal into a proton-conducting second-harmonic-generation-active material"
   J. Yanagisawa, K. Tanaka, H. Kano, K. Miyata, B. L. Ouay, R. Ohtani, M. Ohba
   Inorg. Chem. **2022**, 61, 15638-15644.
2. "Zero area thermal expansion of honeycomb layers via double distortion relaxation in (PPh4)[$Cu_2(CN)_3$]"
   Y. Iwai, M. Nakaya, H. Ohtsu, B. L. Ouay, R. Ohtani, M. Ohba
   CrystEngComm. **2022**, 24, 5880-5884.

【助成 39－27】

非太陽周回小天体ミッションにおける天体暦エラーの影響の定量化と軽減

代表研究者　九州大学　大学院工学研究院 助教　　陳 泓儒

〔研究の概要〕

Many small celestial bodies (i.e., comets, asteroids, and small planetary moons) preserve pristine relics of the early solar system. Small-body missions Hayabusa-1, -2, Rosetta, and Osiris-REx have returned notable samples and data. The confirmed MMX (JAXA) and HERA-Juventas (ESA) missions will explore Martian moons (i.e., Phobos and Deimos) and the binary asteroid Dimorphos, respectively, which are small bodies orbiting a primary body. In such missions, not only the complex gravity of the primary body, but also the position of the secondary relative to the primary, the ephemeris, perturbs the orbiting operations as well as the science return. The ephemeris error had not been experienced in previous missions. However, it can greatly perturb the GNC and geodesy in the near-term non-heliocentric small body missions. The impact of ephemeris error had not been identified nor tackled before, which was addressed in this project.

〔研究経過および成果〕

Problem statement

Previous work generally constraints the number of estimated variables or set the *a-priori* uncertainties to 5%, and only assumes a few hundred meters of ephemeris error. The error of estimated C_{22} goes to 30%, libation amplitude cannot be estimated, errors of orbits are 200 m and 5 cm/s large, libration amplitude cannot be observed, as ephemeris error goes from 0 to just a few hundreds of meters. The realistic ephemeris error can be a few kilometers. This accuracy of degree-2 gravity terms and libration amplitude is useful in reflecting the internal structure of the target. Ephemeris error has at least three influencing position components. It is tricky to identify all variables, namely, spacecraft's six orbit states, geodetic parameters, and the ephemeris error, as the overall uncertainties are too large, and the estimation problem has too many local optima.

Approach 1: **Consider ephemeris time shift in estimation**

The ephemeris error can by approximated by the error in the transvers direction and represented by a mean anomaly or time shift Δet. As the fly tracking information barely exhibits signature of the ephemeris error, it is still tricky to recover this single variable. The applicant treated Δet as a "consider parameter" in estimation. That means, it is not estimated, but its noise on the estimation of other parameters is considered (Pub. [1]). As a result, even under an ephemeris error of 2 km, orbit determination error becomes 10 times smaller, and the libration amplitude (θ) identification of geodetic parameters of the target is significantly improved. The degree-2 terms

can be estimated to an accuracy of 0.5%, and libration amplitude 8%. which is excellent for distinguishing the interior families (Fig.1).

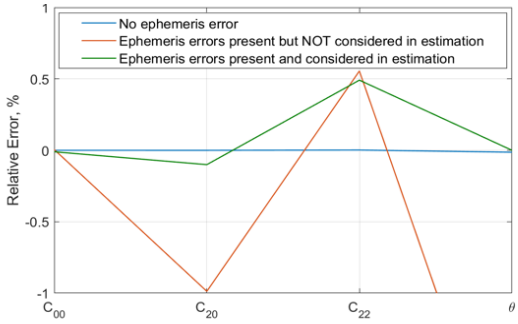


Fig. 1 Errors of gravity coefficients estimated in the three situations

Approach 2: **Parallel high-fidelity orbit propagator-based estimation**

The applicant developed the full dynamics orbit propagator that can take dynamical variables, such as ephemerides and non-spherical gravity fields of celestial bodies. The tool is coded in C to enjoy fast integration and can be called by Matab (using the C-MEX interface) to enjoy fast and handy matrix operations. In the problem of interest with many variables to estimate, many local minima exist and can cause the linearization-based estimation (e.g., extended Kalman filter) to fail. The estimation based on the more accurate modeling unscented transform (e.g., unscented Kalman filter) works much better for such a non-convex problem. While there are the sigma points, which are 2 times the number of estimated variables, to propagate, the propagations can be performed in parallel. Therefore, the parallel propagator comes to play a role (Fig.2). The estimation takes into account almost all variables (30 of them) and reasonable a-priori uncertainties, and still return good estimation performance. The OD accuracy reaches 20 m and 0.4 cm/s in just one day (Fig.2), much more advanced than the presumed performance of MMX, namely 86 m and 0.5 cm/s in one week. Thus, this mission manner is promising to support quick and autonomous navigation in the highly perturbed small-body environment.

〔発表論文〕

1. Chen, H.; Rambaux, N.; Lainey, V.; Hestroffer, D. Mothership-Cubesat Radioscience for Phobos Geodesy and Autonomous Navigation. *Remote Sens.* 2022, 14, 1619.
2. Chen, H., Rambaux, N., Lainey, V., and Hestroffer, D., "Mothership-CubeSat Radioscience for Phobos Geodesy and Autonomous Navigation", in *44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July*, 2022, vol. 44, p. 228.

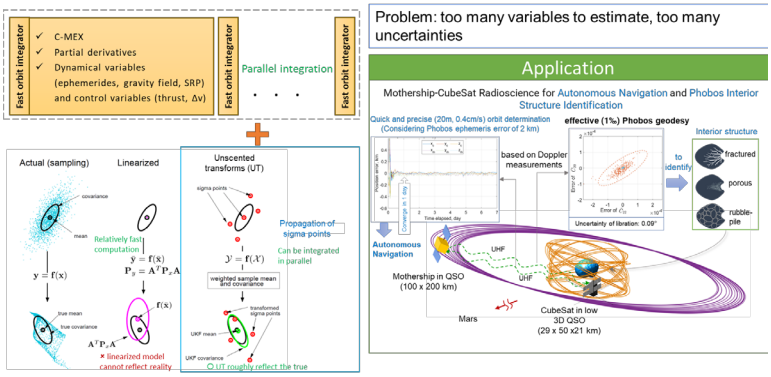


Fig. 2 Parallel high-fidelity propagator-based estimation result.

【助成 39－28】

外場応答性金属錯体を用いた多機能性電子材料の創出

代表研究者　熊本大学大学院先導機構　准教授　　関根　良博

〔研究の概要〕

本研究では、外場応答性分子の創出を目的として、電子ドナーアクセプターユニットが配位子を介して連結した金属多核錯体の合成および物性測定を行った。この外場応答性分子は、酸化還元活性な電子ドナー(D)と電子アクセプター(A)からなり、配位子や骨格構造の設計・制御によりそれぞれの酸化還元電位を制御可能である。本研究で合成した外場応答性分子は、温度変化により DA 間での分子内電子移動を示し、$D^0A^0 \Leftrightarrow D^+A^-$の電子状態変化・磁気状態変化を示した。

〔研究経過および成果〕

電荷移動錯体は、電子ドナー(D)･アクセプター(A)分子間の電荷移動に伴い電子や磁気スピンが相乗的に機能するため、特異な電気伝導性や磁気特性を示す。π－πスタック等非共有結合により弱く集積した DA 孤立分子系と比べ、DA 分子が共有結合的に連結する DA 型金属錯体は強固な電子的･磁気的相互作用の発現や空孔の設計･制御が期待できる。さらに、DA 分子のフロンティアオービタルを精密に設計することで外場誘起電子移動を制御し、電子状態変化を利用した多重安定性の創出、および物質物性変換が可能である。DA 型金属錯体は、これまでに金属イオン間での電子の非局在化や多段階酸化還元挙動、強磁性/フェリ磁性的なスピン配列による量子磁性/バルク磁性について研究が行われてきた[1][2]。

特異的な電気的性質を示す強誘電体の研究は無機化合物を中心に古くから行われているが、最近では次世代不揮発性メモリとして有力視される強誘電メモリやキャパシタ、非線形光学材料等、種々の光電子材料への応用が期待され、研究の重要性は一段と高まりつつある。従来の無機強誘電体と比べて、金属錯体は分子構造、電子及びスピン状態において高い内部自由度を有し、新しい多重機能性や多重外場応答性を発現する可能性を秘めている。このような物質系へと展開するためには、新しい機能性分子、特にその分子の電子状態や磁気状態、電子状態を自在に変換可能な金属錯体の創出が必要である。本研究では、分子の電子状態の変換が期待できる、シアノ架橋 CoFe 金属錯体の合成を行い、その外場応答性について明らかにした。

異種金属イオンからなる DA 型錯体の合成を行った。D としてシアノ Fe 錯体、A として Co イオンを選択し、大気下、D と A をそれぞれ含む溶液を混合し自然濃縮したところ、暗赤色結晶を単離した。単結晶 X 線構造解析の結果、D/A ユニットが共有結合により組みあがった分子であることが分かった。温度依存磁化率測定を行ったところ、相転移温度 $T_{1/2}$ = 305 K において DA 間電子移動に基づいた常磁性と反磁性の変化を示すことを明らかとした(図 1)。

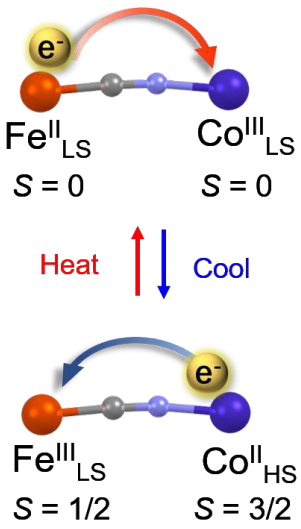


図 1. DA ユニットにおける電子状態変化

本研究を遂行する上で、X 線構造解析に適した良質な単結晶試料を得ることが困難であったが、結晶化温度の最適化や有機配位子の精製などの合成条件を最適化することで、最終的にこれらの課題を解決した。結晶内における外場誘起電子移動の異方性制御のためには、分子配列制御が極めて重要となるが、本研究で得た配位子の骨格構造に基づいて形成される分子パッキングと対イオンを検討することで、新たな分子性錯体の開発を進めていく。

配位子の化学修飾を行い置換基効果について明らかにし、電子移動温度の精密制御を行うとともに、光照射実験を行い電子移動の光制御について検討を行う。DA ユニットの合理的合成法を確立し、特異な電気的性質を示す金属錯体を創出する。

本研究成果は、金属錯体の機能化(磁気・電気的性質)を目指して新たな分子性材料を開拓するための設計指針を与えた。これまで数多くの熱や光照射によって電子状態変化を示すスピン転移錯体や電子移動錯体が構築されてきたが、巨大な電子双極子モーメント変化に着目した研究は極めて例が少ない。金属錯体からなる分子性材料において、磁気的性質や半導体挙動の精密な制御を行うことができれば、多様な物理的性質を有する材料設計への指針にも貢献できる。

〔発表論文〕

1. Yoshihiro Sekine, Shinya Hayami, Development of stimuli-responsive metal complex, 8th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC 8th), 2022. 8. 7-11th.
2. Yoshihiro Sekine, Shinya Hayami, Development of stimuli-responsive cyanide-bridged metal complexes, 錯体化学会第 72 回討論会

[引用・参考文献]

1. Y. Sekine, J. Chen, N. Eguchi, H. Miyasaka Fine tuning of intra-lattice electron transfers through site doping in tetraoxolene-bridged iron honeycomb layers, *Chem. Commun.*, **2020**, *56*, 10867-10870.
2. J. Chen, Y. Sekine, A. Okazawa, H. Sato, W. Kosaka, H. Miyasaka Chameleonic Layered Metal-Organic Frameworks with Variable Charge-Ordered States triggered by the Temperature and Guest Molecules, *Chem. Sci.*, **2020**, *11*, 3610-3618.
3. J. Chen, Y. Sekine, Y. Komatsumaru, S. Hayami, H. Miyasaka, Thermally Induced Valence Tautomeric Transition in a Two-Dimensional Fe-Tetraoxolene Honeycomb Network, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **2018**, *57*, 12043-12047.

【助成 39－29】

SEU を利用した高位置分解能型半導体検出器の実証試験とシミュレーション

代表研究者　高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所
研究機関講師　津野　総司

〔研究の概要〕

半導体検出器は、放射線計測において、素粒子・原子核実験のみならず医療・非破壊検査などの分野でも広く用いられている。放射線計測の要諦は、エネルギーの測定と飛来方向の同定である。飛来方向の同定において、半導体は、その微細加工技術と電気制御技術を駆使して、放射線が通過した位置(ピクセル)を精度良く決定できる事から用いられている。デジタルカメラのように光子を検出するのとは違い、素粒子・原子核反応から生じる荷電粒子(電子など)は、半導体を貫通するので、半導体検出器を幾層にも重ねて、通過位置を３次元的に検出する。しかしながら、荷電粒子の飛跡を同定する半導体検出器は、しばしば大きな有効面積を必要とするため、高額であり、読み出しチャンネルの多さから、システム設計の技術的なハードルは極めて高い。本研究は、微細加工技術の成熟した商用のメモリチップをわざと放射線耐性を脆弱にした設定に施すことによって、放射線検出器へ転用する可能性を探る実証実験研究である。もし転用ができるのであれば、安価な検出器が可能となり、放射線技術を必要とする分野の裾野を広げる。

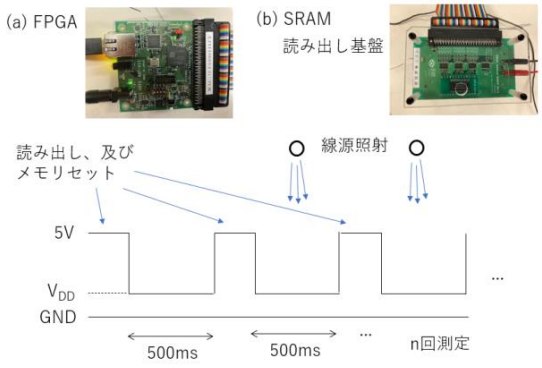
〔研究経過および成果〕

近年の半導体加工技術は、線幅が数ナノメートルのオーダーにも迫り、技術的な限界が指摘されている。理由は自然界に存在する放射線が各メモリセルとの衝突によって、メモリに格納された情報を書き換えてしまうからである。この効果は広義には、Single Event Upset (SEU)として知られている。一般に SEU を起こさせないためには、十分に配慮した大きな電気容量を確保する必要があり、微小の領域に大容量の電荷を確保するために、ゲート電圧のアスペクト比と干渉効果、制御技術の難易度は困難を極める。我々は、むしろ、この事実を逆手にとり、積極的に自然放射線がメモリ情報を書き換える粒子放射線検出器を開発する。

半導体メモリは、pn 接合間に印加電圧を付加することによって、双安定点と呼ばれるポテンシャルの谷間に電子を捕獲することによって、0/1 の信号を保持する。通常、この印加電圧 V_{DD} は、2 - 5V である。逆に V_{DD} を規定の電圧から下げていくと、双安定点は消失し、メモリは保持できなくなる。SEU 問題は、加速器科学や宇宙分野で広く研究されており、先行研究では、この V_{DD} 依存性を調べ、規定電圧(5V)の時に比べて、V_{DD}~200mV の時は、SEU 発生確率は、5 桁以上も上昇することが報告されている。これは当然、メモリとしての機能は果たさないが、逆に放射線検出器として使えるかもしれない。本研究は、商用の SRAM メモリの規定電圧を下げていき、どこまで放射線に対する検出効率を獲得することができるのか、実証試験を行う。

実験は、当該研究所にある 180MBq のストロンチ

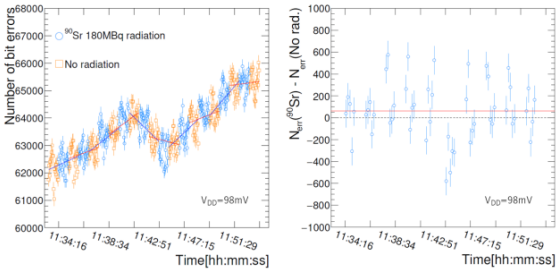
ウム密封線源(2.27MeV ベータ線)を用いて行った。実験の読み出しシステムを下図に示す。



(c) データフロー

まず、規定電圧(V_{DD}=5V)に於いて、初期メモリをすべて 1 か 0 に設定する。次に、500ms の間、V_{DD} を下げて線源を照射、その後、規定電圧に戻し、初期設定値から、どれくらいのメモリセルが 0 か 1 へ反転したか測定する。SRAM の測定基板、及び、FPGA は、当該研究費により設計・購入した。使用した SRAM は、EPSON SRM2B256SLMX55 で、262,144 個のメモリセルを搭載している。チップ内の正味の有効面積を 262,144 x 1[μm²] = 0.26 [mm²]と仮定し、線源強度から、500ms の間におおよそ 100 個の電子が入射するように調整した。つまり、100 個の入射電子に対して、何個のメモリセルがビット反転したかが、検出効率となる。しかし、有意な検出効率を達成するために、V_{DD} を極限まで下げるため、揮発性メモリの性質から、500ms の間に自然にメモリ情報を失うメモリセルも複数存在する。これをノイズと規定し、500ms の間に照射する場合としない場合を交互にそれぞれ 200 回測定する。

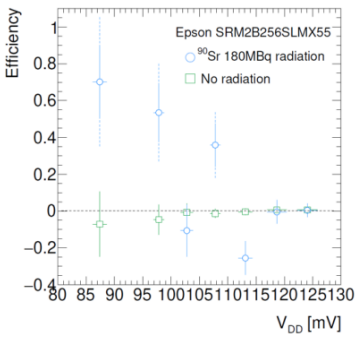
測定データの分布を以下に示す。左図は、V_{DD}=98mV の時の照射有りと無しの測定毎のビット反転の数を示している。照射有りの両側にある照射無しのデータをサイドバンドで直線フィットで得



(a) 照射データ。青：照射有り、橙：照射無し。分布中の直線(赤、青)は、照射無しデータを直線フィットしたもの。

(b) 照射無しデータから、サイドバンドフィットで得られた直線(左図)を照射データから差し引いたもの。

られた推定値を照射有りの時のノイズとして、差し引くと、照射による効果を統計的に取り出せる。差し引いた後の分布が右図であり、この操作を V_{DD} を変えて繰り返す。線源の照射強度と立体角から、検出効率を算出したのが下図である。



(a) 検出効率のV_{DD}依存性。照射無しデータに対してもサイドバンドの手法によって得られた検出効率を示す(緑)。

照射無しデータでもサイドバンドの手法を繰り返し、確かに検出効率がゼロになっていることを確認した。結果、線源照射によって検出効率に有意な差が得られた。しかしながら、現在のところ、統計誤差とチップ内の有効面積の不定性 50%による系統誤差しか考慮していない。また、ノイズが多く、少なくとも、照射間隔 500ms を 1/10 まで低減して使用しないと信号がノイズに埋もれてしまう。

本研究期間に於いて、実証実験は達成できたので、今後は、ノイズの低減と多層構造へ拡張していく。並行して、シミュレーションに基づいて、ビームに同期して駆動する飛跡検出器を設計する。

【助成 39－30】

フォトクロミックエレクトロニクスを利用した新しいエステルフリー型分解性高分子材料の分解制御

代表研究者　奈良先端科学技術大学院大学　教授　網代広治

〔研究の概要〕

光反応性を有するシンナミル基を有するエステルフリータイプのポリ(トリメチレンカーボネート)(PTMC)誘導体を合成した。また、ベンジルアルコール、2,2-ジメチル-1-プロパノール、4-(2-hydroxyethoxy) benzaldehyde および 2-(*p*-tolyloxy)ethan-1-ol などのアルコール系開始剤とポリマー構造を設計し，分子量が熱分解性および物理特性に及ぼす影響について解析した。シンナミル基を有する PTMC 誘導体のホモポリマーおよびコポリマーは、分子量 7400-12300g/mol に達し、置換基を有しない場合に比べて熱分解温度は、最大で 60℃程度向上した。また、光反応によって分子量の向上が観測された。

〔研究経過および成果〕

持続可能な地球にやさしい素材開発が求められている。特に、海洋におけるマイクロプラスチック問題を解決するためには、従来の汎用樹脂に替わる新しい高分子材料の開発が必要となる。分解性高分子材料は、種々のポリエステル類のほか、ポリトリメチレンカーボネート(PTMC)など、限られた高分子骨格しか用いられておらず、材料使用の際に必要となる力学的特性や熱的特性を満足に満たすためには、新たな分解性高分子材料の開発が求められている。これらの中でも、PTMC は加水分解により二酸化炭素とジオール化合物に分解され、一般的なポリエステル化合物が酸性有機化合物を生成することと比較すると、分解しても中性を保つことが特徴である。

本研究では PTMC の特徴を活かすために、側鎖に光応答性置換基を導入する際において、分解後も酸性有機化合物を生成しないようにエステル構造を避けたエステルフリータイプの新しい PTMC 誘導体を合成した。モノマー**1** の場合では、種々の開始剤を用い末端に様々な構造を導入したポリマーを合成した(**PTMCM-MC1**, **PTMCM-MC2**, **PTMCM-MC3**, および **PTMCM- MC4**)。また、側鎖を有しない PTMC を開始剤としたブロック共重合体も合成した(**PTMCM-MC-*b*-PTMC1**, **PTMCM-MC-*b*-PTMC2**, および **PTMCM-MC-*b*-PTMC3**)。これらの化学構造と分子量および分子量分布を図 1 に示す。

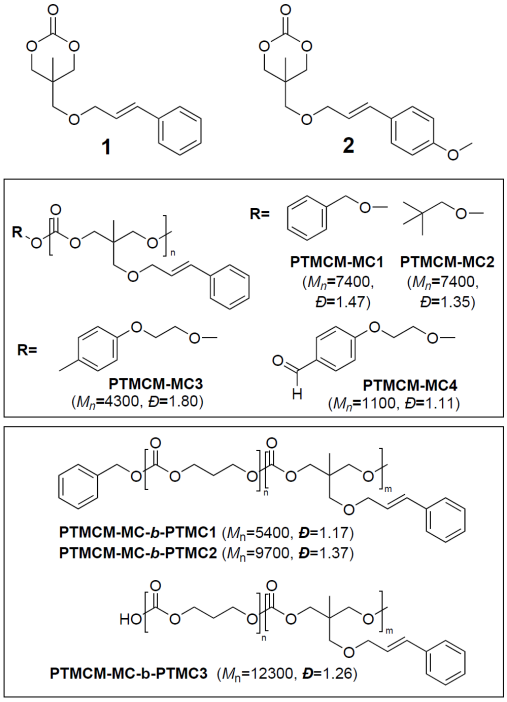


図 1. 新規モノマーと本研究において得られたポリマーの化学構造.

表 1. 新規ポリマーの熱分解温度とガラス転移温度.

Entry	Sample	T_{10} (℃)	T_g (℃)
1	**PTMCM-MC1**	253	-
2	**PTMCM-MC2**	264	8
3	**PTMCM-MC3**	240	0
4	**PTMCM-MC4**	210	-30
5	**PTMCM-MC-*b*-PTMC1**	221	-
6	**PTMCM-MC-*b*-PTMC2**	268	7
7	**PTMCM-MC-*b*-PTMC3**	259	8

まず、これら新規ポリマーについて、熱的特性を調べた。10%重量を損失する熱分解温度(T_{10})を熱重量分析によって、またガラス転移温度(T_g)を示差走査熱量分析によって、それぞれ測定した結果を表 1 に示す。置換基を有さない PTMC では分子量の違いにより熱的特性は様々であるが、以前の我々の分析では、T_g = -38℃, T_{10} = 198℃であった(M_n=6000, $Đ$ =1.5; *ChemistrySelect* **2022**, e202104326)。この値と比較すると、同程度の分子量を有する今回得られた新規ポリマーでは、すべて 20℃～60℃程度、熱分解温度の向上が認められた。

一方、シンナモイル基の光反応性を利用した高分子反応を試みたところ、モノマー**1** から得られるポリマーはいずれもほとんど反応性を示さなかった。そこで、光反応性を高めるために *p*-位に電子供与性置換基であるメトキシ基を導入したモノマー**2** を設計した。このモノマー**2** から得られたポリマーについて、紫外線光を照射し、高分子反応を試みた。光反応の前後で ^{1}H NMR 分析を比較した結果を図 2 に示す。6.0～6.5 ppm 付近に見られるシンナモイル基の二重結合由来のピーク強度が減少し、シクロブタン環が形成されたと思われる、新しいピークが 3.5～3.8 ppm および 6.8

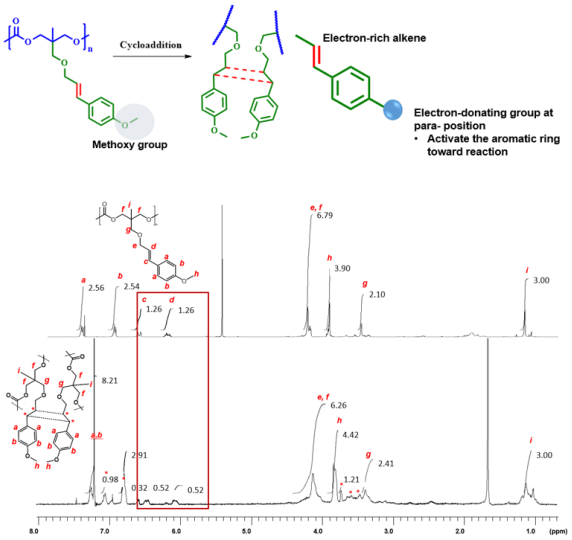


図 2. ポリ(**2**)の光照射による化学架橋反応と、反応前後の ^{1}H NMR スペクトル.

～7. 1ppm に確認された(図 2)。また、これらの高分子試料の分子量を測定すると、反応前の分子量(M_n=2400, $Đ$ =1.36)に比べて、反応後の分子量(M_n=2900, $Đ$ =1.80)はわずかに増加し、光反応による架橋反応が示唆された。

〔発表論文〕

1. Miguel Palenzuela, KamolchanokSarisuta, Marta Navarro, Narumi Kumamoto, Nalinthip Chanthaset, Julien Monot, Hiroharu Ajiro, Blanca MARTIN-VACA, Didier Bourissou, "5-Methylene-1,3-Dioxane-2-One: A First Choice Comonomer for Trimethylene Carbonate", *Macromolecules*, accepted on 21st Dec. **2022**.
2. Lee Yae Tan, Nalinthip Chanthaset, Arif Fadlan, Hiroharu Ajiro, "Synthesis of Ester-free Poly(trimethylene carbonate) Bearing Cinnamyl Moiety for Antibacterial Biomaterials Applications", *React. Funct. Polym.* submitted on 15th Dec. **2022**.

【助成 39－31】

医薬品製造用 3D プリンターに関する萌芽研究

代表研究者　名古屋市立大学　大学院薬学研究科　准教授　田上辰秋

〔研究の概要〕

3D プリンターは、産業分野においてものづくりをする工作機械として広く知られており、近年では医療分野までその裾野を広げてきている。薬学分野（製薬業界）では、2015 年に Binder jet 方式 3D プリンターで製造された錠剤（Spritam、精神薬）が米国で認可されており、新しい製造様式を活用した革新的な医薬品の誕生が期待されている。これまでに筆者は、3D プリンター錠剤に関する論文を報告し、「3D プリンターに関する医薬品のものづくり研究」を推進してきた。医薬品製造に特化した材料押し出し方式の 3D プリンターが論文報告されているものの、まだ成功・普及していないのが現状である。生産能力を改善し、精度の高い材料押し出し方式 3D プリンターの製作と、最適なプリンター条件とインク組成を予測する機械学習モデルを構築することを本研究の最終的な目的とし、これまでに得られた結果について報告する。

〔研究経過および成果〕

3D プリンターで医薬品を作製する場合、溶融したプリンターインク（溶融する前は、ポリマーフィラメント、ペースト状、粉末状などの製剤組成であり様々）を押し出す工程が非常に重要であり、どのような方式で押し出すことが適しているかについて、検討が必要であることがわかった。また筆者は、大量生産型の 3D プリンターよりはむしろ、医療従事者が医療機関で少量バッチのオーダーメイド医薬品を製造することを想定しており、生産の目的・目標によっても得られる最終的な 3D プリンターのモデルが異なるといえる。

医薬品製造用 3D プリンター（材料押し出し方式）について、押し出すためのノズルがこれまでに検討されており、ポリマーのペレットや、マイクロペレット、粉末状のポリマー・原薬を加熱溶融することのできるエクストリューダーをノズル部分に装着した 3D プリンターが各分野で開発されている。製剤分野では、二軸エクストリューダーを用いて、難溶性薬物を水溶性ポリマーに分散させた製剤技術（固体分散体という。薬物の溶解度が向上する）が検討されており、経験的に受容されやすい。また熱溶融積層方式（通称：FDM 方式）を比較してもあらかじめフィラメント状のポリマーを作製する工程を必要とせず、その点でもエクストリューダーの導入は有用である。またエクストリューダーの過程は、混合溶融の過程をリアルタイムで確認する技術（IR 測定）を導入することで、製造管理することが可能である。しかしながら、そのようなノズルは巨大であり、今回のように限られたスペースで少量スケールのものを製造することには適していない。

以上のことを踏まえるとエクストリューダーによる製剤組成の溶融・混合工程を現場で行うよりは、あらかじめカートリッジなどに製剤組成を充填し、ノズルにセットしてから加熱溶融して使用する方法が、品質管理面においても有用であると考えるに至った。筆者が想定するモデルに最も類似しているものとしては、チョコレートを造形するタイプの 3D プリンターが比較的近

いと考え(大量生産のためには、ノズルを増やすなどの工夫が必要である)、現在は、カートリッジ(シリンジ)をセットし、直接加熱して材料を押し出す方式のものを採用している。

当初の計画にも示したように、プリンターインクの特性から 3D プリンターによって意図した形状のものが造形できるかどうか予測するモデルについて構築を行っている(現在も継続中)。下図に示すように材料押し出し 3D プリンターを用いて、目的の条件のもの(錠剤)を造形する場合、非常に多くの条件設定が存在し、造形に影響する。プリンター条件では、プリンター温度、プリンター速度、層ごとの厚さ、そして押し出し量(%)を設定する必要がある。ノズル(シリンジ)からインクを押し出す工程に着目すると各温度におけるインクの粘度と押し出す力と量が影響する。

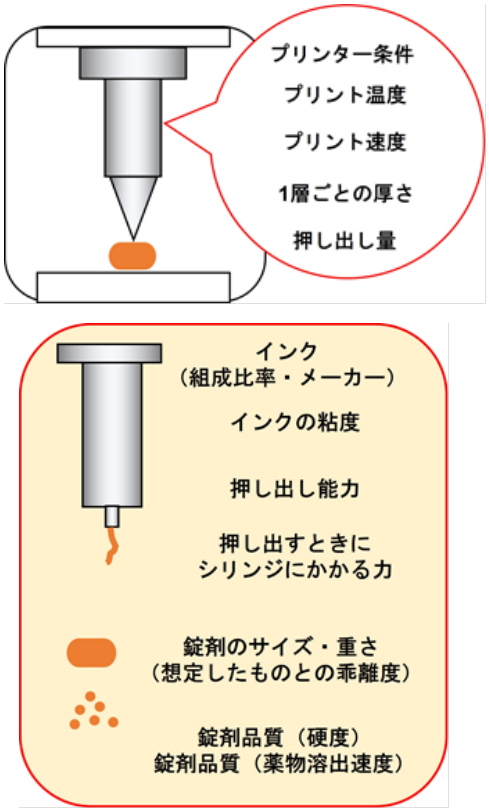


図:材料押し出し方式 3D プリンターの模式図と造形に必要となるパラメーターの例。

インクが加温により融けだしたものを射出して造形することを想定した場合、インクの溶融の程度が流動性に影響し、インクの押し出し量に影響する。低温で流動性が低いインクは、押し出し量が低く、造形できない一方、流動性が高すぎると、容易に押し出されたとしても、インクが適切に固まらないので積層されず、錠剤の形状が得られないといった結果につながる。従って複数の要因が造形に影響することから、材料押し出し方式における従来の3Dプリンティングは、実施者による試行錯誤の過程を経て最適な条件が設定される。筆者は、それぞれの製剤組成において最適な 3D プリンティング条件を試行錯誤によって探索し、それらの知見をデータベースとし、最適な 3D プリンティング条件を機械学習によるモデルにより予測するモデルを構築している。

また今回は、ゼラチンを含むチュアブルな錠剤をモデル医薬品として調製した。ある程度の弾力のあるグミ様の錠剤であるが、水分量が製剤品質に大きく影響し、錠剤の硬度や薬物放出パターンに影響することが想定された。このため、意図する硬さや体内吸収を示す最適な錠剤を調製するため、同様に機械学習による予測モデルが有用であり構築の必要がある。

予測するためにはある程度のサンプル数が必要であるため、現在、データを蓄積している過程であるが、将来は、組成を入力するだけで、最適な 3D プリンティング条件が出力されるようなウェブアプリケーションを公開したいと考えている。

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。

【助成 39－32】

内包フラーレンの精密秩序集積による超原子物質科学の開拓

代表研究者　大阪公立大学工学研究科　准教授　渋田　昌弘

〔研究の概要〕

原子が数～100 個程度集合化した「超原子」を基礎とした新たな物質科学を開拓するために、内包フラーレン超原子を基板に秩序集積し、その特徴的な電子状態を明らかにする研究を推進している。本研究助成では Li 内包 C_{60} フラーレン（$Li@C_{60}$）を対象に、基板上への秩序集積化の条件検討とともに、光電子分光を主幹とした電子状態評価を行った。その結果、高純度な $Li@C_{60}$ 超原子集積体の作製に成功するとともに、特徴的なエネルギー分散を持つ電子バンドの観測に成功した。この研究成果は内包原子を選択することによる超原子的電子物性の高い制御性を実証するものであり、超原子物質科学に基づく次世代バンドエンジニアリングの実現に資するものである。

〔研究経過および成果〕

原子が数～100 個程度集合化した分子やナノクラスターの中にはその機能単位が 1 つの原子の様に振る舞う超原子としての性質をもつものが見出されており、新規物質群としてその物性計測や機能開拓が進められている。本研究では超原子的な性質が顕著に表れる内包フラーレンを対象に、その秩序集積化を達成するとともに、秩序化により形成される特異な電子バンド（超原子電子バンド）とそれに関与する励起状態を精密に観測することを目的としている。

著者はこれまでに、非内包 C_{60} フラーレンの秩序薄膜についてその特徴的な超原子電子バンドを角度・時間分解 2 光子光電子分光により明らかにしてきた。本助成研究期間においては超原子的性質の高い制御性を実証するために、Li 原子を内包した C_{60}（$Li@C_{60}$）を対象とした高純度な超原子秩序薄膜作製技術の確立と、各種光電子計測を行った。$Li@C_{60}$ 秩序集積体では、空準位である超原子電子バンドがフェルミ準位に近接するため、超原子的性質が電荷分離、電荷伝達といった機能に顕著に反映されることが期待されている。

図 1a および 1b は高配向性熱分解グラファイト（HOPG）上に $Li@C_{60}$ を蒸着したときの X 線光電子スペクトルおよび紫外光電子スペクトルである。加熱セルから $Li@C_{60}$ の昇華が始まった段階で蒸着した場合、基板と C_{60} 炭素骨格の電子軌道に由来する強いシグナルのほかに、フッ素原子の存在を示すシグナルが強く観測された。これは $Li@C_{60}$ を安定化させるためのカウンターアニオン（TFSI：$C_2NO_4F_6S_2$）に由来するものであり、セル加熱の初期段階では $Li@C_{60}$ に加え

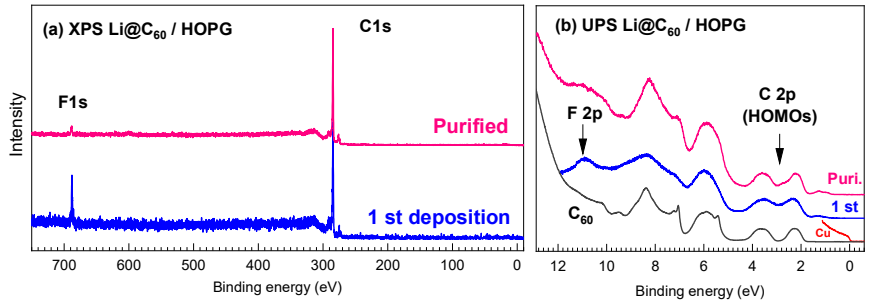


図 1. $Li@C_{60}$ 加熱セルからの昇華開始直後の蒸着試料と、十分な加熱後の蒸着試料の (a) X 線光電子スペクトルと (b) 紫外光電子スペクトル.

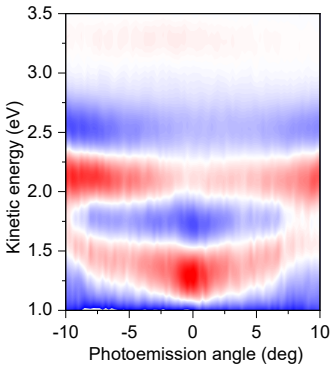


図 2. $Li@C_{60}$/HOPG の時間・角度分解 2 光子光電子スペクトル (励起エネルギー4.33 eV).

て多くの TFSI が共蒸着されることが分かった。一方セル加熱を十分に行った後での蒸着試料においてはこれらのフッ素由来のシグナルが十分に抑制されており、高純度な $Li@C_{60}$ の蒸着条件を抽出した。

上記の条件検討のもとで作製した $Li@C_{60}$ の角度・時間分解 2 光子光電子分光の結果を図 2 に示す。この物性計測手法は、一つ目の光により励起した電子を検出光により光電子として検出することで、通常の光電子分光では困難な空準位の電子状態を観測することができる。図 2 より、光電子の放出角が 0 度（表面垂直）から広角に向けて正のエネルギー（バンド）分散を持つ状態が観測された。このような高いバンド分散をもつ電子状態は通常の炭素原子骨格近傍に局在した分子軌道からは形成されないことから、ここでシグナルは $Li@C_{60}$ の超原子電子バンドに由来していると考えられる。非内包 C_{60} では同スペクトル領域には負の分散を示す超原子電子バンドが観測されており、これとも異なる挙動であることから、$Li@C_{60}$ 特有の超原子電子バンドの観測に初めて成功したといえる。

今後はより明瞭な超原子電子バンドの観測を目指して、集積化の条件検討と構造評価をさらに進めるとともに、その機能の鍵となる励起電子の超高速ダイナミクス観測へと研究を展開していく予定である。本助成研究で得られた成果を皮切りに、内包フラーレン系に加えて、超原子的機能が期待されるペンタセンやコロネンいった幾何対称性の高い分子へと対象とする系を拡張していくことで、超原子ナノテクノロジーを新たな学術分野として確立していきたい。

〔発表論文〕

1. M. Shibuta, A. Nakajima, “Two-Photon Photoemission Spectroscopy and Microscopy for Electronic and Plasmonic Characterizations of Molecularly Designed Organic Surfaces” Submitted.
2. H. Li, M. Shibuta, et. al., “Tunable Band Structure of $Cu_{2-x}Se_yS_{1-y}$ Promotes Near-Infrared Plasmon Driven Photoelectrocatalytic Oxygen Evolution.” Submitted.
3. M. Shibuta, A. Nakajima, “Spectroscopic imaging of photoexcited states at a polycrystalline copper metal surface via two-photon photoelectron emission microscopy” Chem. Phys. Lett. 804, 139909 (2022).
4. T. Kamoshida, M. Shibuta, et. al., “Molecularly Optimized Cluster-Surface Interaction for Group 3-5 Metals-Encapsulating Silicon Cage Superatom; on C_{60} and Coronene-Derivative Substrates” J. Phys. Chem. C 126, 10889 (2022).
5. H. Li, M. Shibuta, et. al., “Band Engineering-Tuned Localized Surface Plasmon Resonance in Diverse-Phased $Cu_{2-x}S_ySe_{1-y}$ Nanocrystals” J. Phys. Chem. C 126, 8107 (2022).
6. M. Shibuta, et. al., “Al_{13} and $B@Al_{12}$ Superatoms on a Molecularly Decorated Substrate” Nature Commun. 13, 1336 (2022). Selected as a Featured image.
7. M. Shibuta, et. al., “Size-Dependent Oxidative Stability of Missing or Excessive Silicon Atoms for Tantalum-Atom Encapsulating Si_{16} Superatom: Reactivity Based on a Nanocluster-Surface Interaction” J. Phys. Chem. C 126, 4423 (2022).

【助成 39－33】

ナノスケール分子磁石の縮重電子軌道を利用した新しいマルチフェロイクスの開拓

代表研究者　大阪公立大学 大学院理学研究科　教授　細越　裕子

〔研究の概要〕

炭素、水素、酸素、窒素などの軽元素のみから構成される有機ラジカルにおいて、電子スピンをπ共役系に非局在化させた分子磁石を合成した。複数のラジカル基をπ共役系に置換すると、π共役を介した分子内磁気相互作用が生じ、ナノスケールで磁気相互作用を制御することができ、縮重電子軌道を実現することができる。磁性体のスピンー軌道相互作用は、電子スピンの向きの制御に利用され、遷移金属磁性体における、強磁性と強誘電性の共存するマルチフェロイクスの発現に重要な役割を果たすことが明らかにされている。一方、縮重電子軌道に由来する新しいマルチフェロイクス発現の理論が提案され、実証の舞台として、分子磁石が注目されている。有機ラジカルのスピンー軌道相互作用は極めて小さく、スピンの向きが揺らぐ量子磁気状態が実現する。本研究では、縮重軌道と量子磁気状態の相関に着目して実験を行った。

〔研究経過および成果〕

室温・大気中で安定に扱うことができ、結晶性の良い代表的なラジカルとして NO ラジカルがある。電気陰性度の差により、分子は電気分極を持つ。NO 基上には δ+, δ−の部分電荷が生じており、分子間の静電引力は、結晶中での分子配列に影響し、分子間の磁気ネットワーク形成にも重要な役割を果たす。有機ラジカルの不対電子1つあたり S=1/2 であり、分子内に複数のラジカル基を置換する場合、分子内のスピン間に生じる磁気相互作用の符号（強磁性的あるいは反強磁性的）と大きさは、用いるラジカル種とこれを連結するπ共役系によって制御可能である。本研究では、分子内に 2, 3, 4 個のラジカル基を含む分子磁石の合成を行った。ここでは、分子内に 2 個のラジカル基を含むビラジカルについて記述する。ラジカル基を連結するπ共役系を拡張することにより、結晶中で分子間にπ－π積層を生じさせ、隣接二分子で S=1/2 の 4 量体を形成させることに成功した。ラジカル基同士の直接接触による分子間磁気相互作用に加え、π共役系を介した分子間接触による磁気相互作用を実現した。その結果、隣接スピン間で磁気相互作用を競合させ、基底状態および磁場中で縮重電子軌道を形成させることに成功した。

ベンゼン環の 1,3-位に 2 つのラジカル基を置換することで、2 つの S=1/2 間に分子内強磁性相互作用 J_0 を生じさせ、基底状態が縮重した S = 1 状態を実現した。分子内強磁性相互作用 J_0 の大きさは、用いるラジカル基の種類に依存するが、同じラジカル基を用いる場合、ラジカル基の分子平面と、これを連結するベンゼン環平面との間の二面角の大きさとの間に、相関関係があることを実証した。2-位への置換基導入により二面角を戦略的に制御し、2 つの二面角の余弦の積との相関関係を明らかにした。ラジカル基平面をほぼ直交させない限り、J_0 の符号が強磁性的であること、分子内強磁性相互作用を利用した縮重磁気状態を広範囲な物質群において実現できることを

明らかにした。

ニトロニルニトロキシド（NN）ラジカル基をビフェニルに置換したビラジカルについて述べる。ビフェニルの一方のベンゼン環の 3,5-位に NN 基を 2 つ置換することで、2 つの S=1/2 間に分子内強磁性相互作用 J_0 を生じさせ、基底状態が縮重した S = 1 状態を実現した。磁気測定の結果、J_0 は 30 K 程度の大きさの強磁性相互作用であり、上述の二面角から予想される値とよく一致した。単結晶X線構造解析を行った結果、結晶中で、隣接二分子間にπ－π積層が生じ、S = 1/2 の 4 スピンクラスターが形成されることが明らかになった（図 1）。実験的に得られた座標値を用いて分子軌道計算を行い、分子内および隣接二分子間の分子間磁気相互作用を見積もった。分子間で NN 基同士が直接接触する最近接相互作用 J_1 は反強磁性的で、ビフェニル基を介した次近接相互作用 J_2 は強磁性的であることが、分子軌道計算により示された。すなわち、隣接スピン間で磁気相互作用が競合する磁気フラストレーションが誘起されており、基底状態が縮重した量子磁気状態の実現が示唆された。磁気測定の結果は、分子軌道計算からの予想とよく一致するものであった。低温における磁化の磁場依存性(磁化曲線)の測定結果は、磁場によって、スピンの向きの回転の自由度が部分的に凍結する特異な量子磁気状態の形成を示唆するものであった。

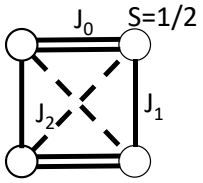


図 1. (a)ニトロニルニトロキシドビラジカルの二分子積層による4スピンクラスターモデル。○はS=1/2を、二重線は分子内強磁性相互作用 J_0 を表す。実線と、点線は分子間磁気相互作用 J_1 , J_2 を表す。J_1, J_2 の符号によって、磁気相互作用が競合するフラストレーションが生じる。

ラジカル基を置換したものものとはもう一方のベンゼン環にハロゲン置換基を導入し、分子間積層をわずかに変化させた。これにより、二重鎖の一次元二重鎖スピン系から二次元系にわたるフラストレート磁気格子を得ることに成功した。これらの縮重磁気状態について、低温磁場中物性測定から考察した。

一方、非対称な分子骨格を有する分子磁石の合成を行った。強誘電体とは、自発分極を持ち、その向きが電場によって反転する結晶をいい、電気分極のような極性ベクトルの存在を許す 10 個の点群のいずれかに属する。ラジカル基の NO 基には、δ+、δ−の部分電荷が生じており、分子は電気分極を持つものの、その結晶の多くは中心対称性を持つ。本研究では、非対称な分子構造を持つ有機モノラジカル分子の合成を行った。単結晶構造解析を行った物質のうち 2 種類の物質において、極性を持つ結晶点群に属する結晶を得ることに成功した。磁気測定の結果、低温での磁気挙動に結晶に依存する振る舞いが観測された。結晶構造からフラストレーションの存在が示唆されており、磁気構造の解析を進めている。

〔成果発表〕

1. Yuko Hosokoshi, “Quantum states in frustrated molecular magnets”, International Conference on Molecular Spintronics Based on Coordination Compounds: Toward Quantum Computer and Quantum Memory Device (The 73rd Yamada Conference), International Symposium on Frontier and Perspectives of Molecule-Based Magnets (Institute for Materials Research International Symposium), Sendai, Japan, October 8-11, 2022. [Invited Talk]

【助成 39－34】

昆虫の眼を超える偏光と位相を検出する 2D センサー

代表研究者　埼玉医科大学 保健医療学部　教授　　若山 俊隆

〔研究の概要〕

微細周期構造は，偏光と位相を同時に制御することが可能であり，ベクトルビームの制御法としても有名である。しかし，偏光と位相を同時に検出する技術はほとんど提案されていない。このような背景から我々は偏光と位相の同時イメージング法の開発を目指している。我々はレーザー加工を行なった材料基板の加工痕に興味深い偏光分布が生じていることに注目し，偏光と位相を同時検出する 2D イメージセンサーの開発を行なった。作製された偏光制御マイクロレンズアレイの偏光分布を評価すると共に偏光と位相の 2D 同時計測を行なった。

〔研究経過および成果〕

偏光イメージングを 1 枚の画像から可能にする偏光イメージセンサーは，おおよそ 2000 年から研究が進められ，最近になって量産されるようになった。このイメージセンサーは，偏光にとどまらず，位相の検出にも応用されている。これが実現されるようになったのも微細周期構造の制御が比較的容易にできるようになったことに起因している。この微細周期構造は，偏光と位相を同時に制御することが可能である。これまでの試みでは偏光と位相を制御したビームの発生にとどまっており，偏光と位相を同時に検出する技術はほとんど提案されていないのが現状である。レーザー科学や天体物理学などの研究において，偏光と位相の同時計測は研究対象である光そのものや惑星から放出される光の性質を捉えることが重要である。このような背景から我々は偏光と位相の同時イメージング法の開発を行なった。

偏光と位相を同時に計測するために，まず偏光と位相を空間的に分離する必要があった。分離したそれぞれを異なる方法で検出するために，我々はレーザー加工を行なった材料基板の加工痕に興味深い偏光分布が生じていることに注目した。レーザー加工によって作製されたマイクロレンズアレイを図 1 に示す。図 1(a)は作製された 1 個マイクロレンズに注目している。図 1(b)と 1(c)はそれぞれ同心円状の黒波線上の複屈折位相差と主軸方位の大きさを表している。複屈折位相差は角度によらずほぼ一定の値を示し，主軸方位は角度によ

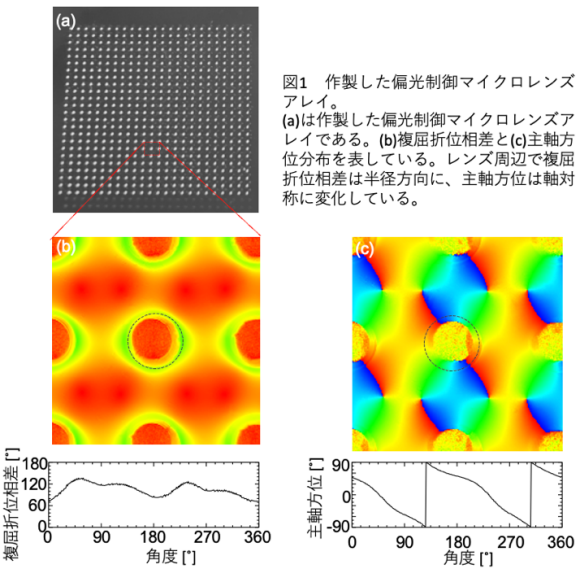


図1　作製した偏光制御マイクロレンズアレイ。
(a)は作製した偏光制御マイクロレンズアレイである。(b)複屈折位相差と(c)主軸方位分布を表している。レンズ周辺で複屈折位相差は半径方向に、主軸方位は軸対称に変化している。

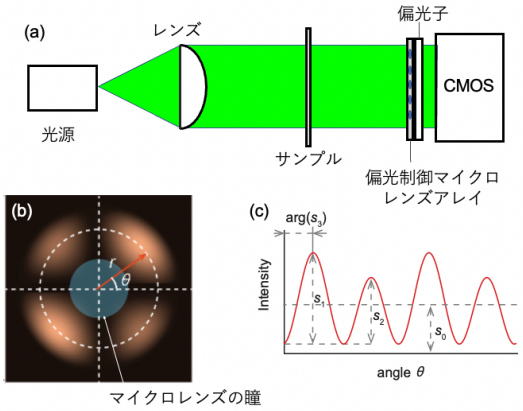


図2　偏光と位相の同時計測の原理　(a) 実験光学系 (b) CMOS面で得られる光強度分布の一部である。(c) (b)の破線部分の光強度分布を角度 θに対して分布させると、振幅とバイアス、位相はそれぞれ全偏光を表すことができるストークスパラメータ S_0～S_3となる。これを解析することで偏光の空間分布を取得できる。

って±180°の範囲で変化した。この光学素子を用いて偏光と位相の同時計測を試みた。このとき使用した光学系を図 2 に示す。図 2(a)は提案する実験光学系である。図 2(b)は CMOS センサーで検出される画像の一部であり，マイクロレンズ 1 個周辺を抜き出したものである。光強度分布はサンプルの持つ複屈折の影響を受けて偏光変化が起きるためクロス状の暗黒部の強度や角度が変化する。白波線の光強度を抽出したものが図 2(c)であり，この光強度の中に偏光を表すストークスパラメータ s0~s3 が含まれているので，フーリエ解析によってこれを求めた。これによって偏光状態を各マイクロレンズの周辺で決定することができる。マイクロレンズそのものは入射した光の位相の影響を受けて集光位置が変化するので，これを CMOS センサーで検出する。上記が偏光と位相の決定方法である。

上述した方法を用いて，偏光と位相の同時計測を行なった。偏光と位相を同時に制御する光波としてベクトルビームが知られている。図 1 に示したサンプルに vortex retarder (Thorlabs)を挿入してベクトルビームを生成した。このときわかりやすくするために位相は等位相を与えるように調整した。その結果を図 3

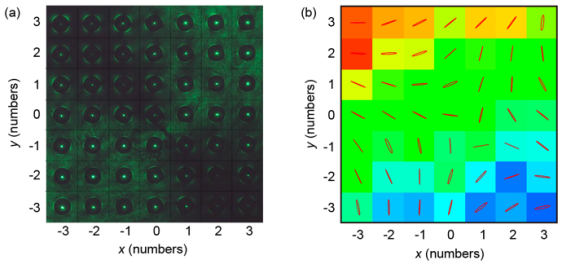


図 3 偏光と位相の同時計測結果　(a) CMOS センサーで撮像された光強度分布 (b) 偏光は赤色楕円で，位相はカラーマップで表している。

に示す。図 3(a)は CMOS センサーで検出される光強度分布である。7×7 個のマイクロレンズアレイの中心はフォーカスされた光強度であり，Vortex retarder を入れる前後での集光位置から位相を検出した。この結果を図 3(c)にカラーマップとして示す。位相は直線的な変化が生じているがこれは Vortex retarder を挿入した際に生じた位相波面の変化である。一方でベクトルビームの偏光状態は輝度情報から捉えることができる。左上から右下にかけて暗黒部分が見えるがこれは偏光が空間的に変わっていることから生じている。各マイクロレンズアレイでストークスパラメータを取得し，これを楕円率と方位で示したのが図 3(c)の赤色の楕円で示している。以上のように偏光と位相を同時に検出することが可能となった。

最後にカシオ科学振興財団には本研究を支援していただいたので，ここに深く感謝申し上げます。

〔発表論文〕

1. 座間あかね他,“偏光制御マイクロレンズアレイによる偏光と位相の同時計測,” Optics & Photonics Japan2022 P25, 2022 年 11 月 13 日.
2. T. Wakayama et al., “Demonstration of polarization-sensitive-wavefront sensor by an angular variant micro-retarder-lens array,” Optics & Photonics International Congress 2023 C000175 (Accept)

【助成 39－35】

光圧増幅ナノ構造体を用いたナノ物質マニピュレーション法の開発

代表研究者　神奈川大学理学部　准教授　　東海林　竜也

〔研究の概要〕

本研究では、光圧増強ナノ構造体を付与した光ファイバを作製し、ナノチップ増強光ピンセットの開発を目指す。光圧増強ナノ構造体として、金ナノ粒子自己組織化膜とチタンナノリンクル構造体を試作した。ナノ構造体に近赤外レーザー光を照射することで、溶液中に分散するポリスチレンナノ粒子の光捕捉に成功した。さらに、光ファイバ先端に金ナノ粒子自己組織化膜を転写したナノチップ増強光ピンセットを試作し、ナノ粒子の光捕捉を検討した。今後、本手法を進展させ、液液界面や気液界面に分散するナノ粒子・分子マニピュレーションの実現を目指す。

〔研究経過および成果〕

(1) 金ナノ粒子自己組織化膜を用いたプラズモン光ピンセット法の実証

貴金属ナノ構造体のプラズモン励起光を照射すると、増幅された光圧により溶液中に分散したナノ粒子を光捕捉できる。このプラズモン光ピンセットは、精緻な設計に基づき電子線リソグラフィーなどにより作製された貴金属ナノ構造体がこれまで用いられてきた。より簡便かつ容易なナノ構造製造方法として、金ナノ粒子自己組織化膜を用いたプラズモン光ピンセット法を開発した。

クエン酸還元法により直径 30 nm の金ナノ粒子を合成した。リンカーとしてチオール化合物を用いることで金ナノ粒子分散水溶液とヘキサンの液液界面に金ナノ粒子の自己組織化膜を作製した。これをガラス基板上に転写し作製された金ナノ構造体は、走査型電子顕微鏡（SEM）により金ナノ粒子が密に集積した構造であることがわかった（図 1(a)）。この構造体はギャップモード局在表面プラズモンに相当する 600~800 nm にブロードな消光帯が現れた（図 1(b)）そこで、波長 808 nm の近赤外レーザー光を用いることで、ポリスチレンナノ粒子の光捕捉に成功した（図 1(c)）。本研究で用いた自己組織化膜の作製法は、他のナノ粒子にも適用できると考えられる。今後は TiO_2 や SiO_2 などの Mie 共鳴による電場増強効果を示す誘電体ナノ粒子自己組織化膜を用いた新規光ピンセットの道が切り拓けるものと期待できる。

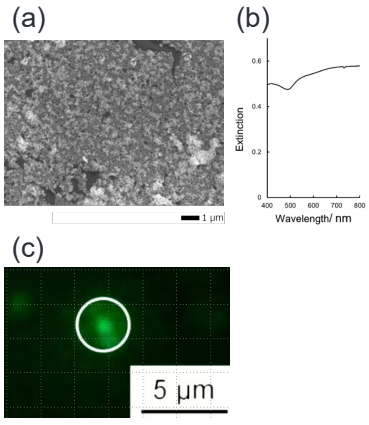


図 1 金ナノ粒子自己組織化膜の(a) SEM 像，(b) 消光スペクトル。(c) ポリスチレンナノ粒子を光捕捉した際の蛍光顕微鏡像

(2) チタンナノリンクル構造を用いたNASTiA光ピンセット法の実証

ナノ構造を付与したチタン（ブラックチタン; B-Ti）に高圧水銀ランプの紫外線を照射すると、高分子ナノ粒子が光 k 捕捉されることが近年わかった。このインコヒーレント光を用いた光ピンセットは前例がほぼ皆無であり、極めて興味深い。我々はこの光捕捉法を、NASTiA (Nanostructured titanium assisted)光ピンセットと名付け、その機構と特徴を明らかにすることを目指した。

本研究では、酸腐食により B-Ti を作製した。走査型電子顕微鏡により、先端がナノメートルサイズに先鋭化したシワ状模様の微細な構造を観察した（図 2(a)）。我々はこの構造をナノリンクル(nano-wrinkle)構造と名付けた。図 2(b)に B-Ti を用いたポリスチレンナノ粒子の光捕捉の顕微鏡像を示す。ナノ構造を利用することで、効率的なナノ粒子捕捉法を実現できた。今後、本手法の電場増強メカニズムや捕捉性能評価を明らかにするとともに、化学反応の光圧制御にも挑戦する。

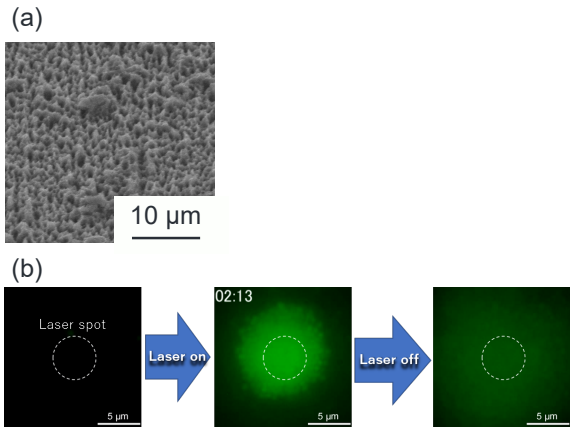


図 2　(a) ブラックチタン(B-Ti)の SEM 像, (b) B-Ti を用いたポリスチレンナノ粒子の光捕捉の顕微鏡像

(3) プラズモン光ファイバピンセットの検討

成果(1)および(2)のようにナノ構造体による電場増強効果を用いることで、従来の集光レーザー型光ピンセットよりも効率的なナノ粒子捕捉を実現できる。このようなナノ構造体を光ファイバ先端に付与させることで、液液界面や気液界面近傍のナノ粒子の運動制御や化学反応制御など、これまでアプローチしづらかった新たな光マニピュレーションの実現が期待できる。そこで、本研究では光ファイバ先端に成果(1)で作製した金ナノ粒子自己組織化膜を転写した、プラズモン光ファイバピンセットの試作とナノ粒子の光捕捉を試みた。

近赤外レーザー光を光ファイバの導入し、光捕捉を観察する独自の光学系システムを構築した。捕捉対象物として 500 nm のポリスチレンナノ粒子の光捕捉を試みた。しかしながら現在までに、ファイバ先端上でのプラズモン光捕捉の実現には至っていない。これは転写した金ナノ粒子が高密度に集積しているため、プラズモン励起に伴い発生する熱が捕捉を阻害しているためと考えられる。転写するナノ粒子の数密度を最適化することで、この問題を解決できると考えられる。さらに、TiO_2 や SiO_2 ナノ粒子自己組織化膜も光ファイバに転写することで、光熱効果を抑えたナノ粒子マニピュレーション法の実現が期待できる。

〔発表論文〕

1. 東海林　竜也, 浅瀬　有希, 吉田　匡志, *分離技術*, 「光ピンセットを用いたナノ粒子の捕集」, 第53巻, 第1号(2023).

【助成 39－36】

カイラリティーを特定した 2 つの単層カーボンナノチューブ間の熱伝導の解明

代表研究者　東京理科大学　理学部　ポストドクトラル研究員　　入田　賢

〔研究の概要〕

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)材料による熱伝導は SWCNT 自体の熱伝導だけでなくその接点の熱伝導特性に影響され，理想的な値には程遠いのが現状である．ナノスケールでの熱制御を行うためには，まず，構造が明らかな SWCNT 間の熱伝導特性を精確に理解することが不可欠である．本研究では，光学イメージング法を駆使した温度分布測定法を改善・高精度化し，精確な熱伝導率計測を可能にした．カイラリティーの異なる(9,8)と (12,4) SWCNT の熱伝導率を計測示した．本研究成果は，ナノスケールでの熱伝導制御の基盤となる基礎データを示し，今後，ナノスケールでの熱制御技術の発展に貢献することが期待される．

〔研究経過および成果〕

SWCNT 薄膜の熱電変換効率の制御に不可欠な SWCNT 間におけるナノスケール熱伝導機構の解明を目指し，カイラリティーを特定した 2 つの SWCNT 間における熱伝導特性を光学イメージング法を駆使した温度分布測定により非接触計測する技術を研究開発してきた．

本手法は，SWCNT からの Photoluminescence (PL) が SWCNT の温度に依存していること(Lefebvre et al. PRB 2004)を利用し，図 1 (a)の様にピラーに架橋した SWCNT 全体にレーザーを照射加熱することで，2 次元 PL 検出器で測定した PL イメージング像(b)より SWCNT の温度分布(c)を計測した．計測した温度分布を元に 1 次元−定常−熱伝導方程式

$$\lambda(T)\frac{d^2T(x)}{dx^2}+\frac{\alpha\cdot \mathrm{Laser}(x)}{A}=0$$

を解くことで，SWCNT の熱伝導率の温度変化を求めることが可能である．ここで，熱伝導率 λ(T) [W/m·K]，温度分布 T(x) [K]，位置 x [m]，レーザー光の吸収率 α [−]，レーザーパワー分布 Laser(x) [W/m]，SWCNT の断面積 A [m^2]として用いた．先行研究で

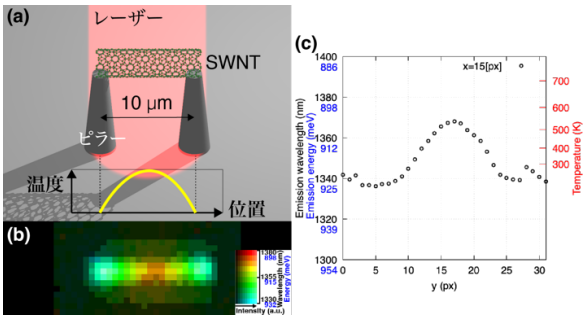


図 1 (a) 実験システム概略図．(b) (9,8) SWCNT の PL イメージング像．(c) SWCNT 軸方向クロスプロファイル．0.6 [μm/px]として示す．

は，(9,8) SWCNT の熱伝導率が室温で 1600 W/m·K であることが示されている(Yoshino et al. ACS Omega 2018)．

先行研究で用いられていた Savitzky−Golay 法を用い解析した結果を図 2 (a,b)に示す．Savitzky−Golay 法とは，隣接する 2n+1 点のデータに対して，m 次多項式による近似を行い，2n+1 点の中央値を近似した多項式の値に置き換えていくことで，ノイズを低減させる手法である．図 2 (a)に示す温度分布の最大値近傍の値のみしか熱伝導率を求める際に使用されてい

ない．図 2 (b)に示した熱伝導率を見ると不連続なプロットであり，特に室温近傍で熱伝導率がどの様な値になるかは予測が難しい．一方，本研究では，図 2 (c)に示す様に計測した温度分布に対し T(x) 関数をフィティングし求める事で，その二回微分より詳細な熱伝導率の温度変化(d)を明らかにした．

本研究で製作した試料チャンバーを図 3 に示す．この試料チャンバーを用い SWCNT の温度分布を計測，データ収集を行なっている．図 4 に 2 種類のカイラリティーの SWCNT の熱伝導率を示す．(9,8) と (12,4) SWCNT を比較すると，ニアアームチェアーSWCNT の方が，熱伝導率が高いという結果が得られた．本研究成果は，現在，論文投稿に向けてまとめている．

2 つの SWCNT 間の熱伝導計測については，計測および解析を進めている．上記の研究成果により，こちらの研究についても理解が深まり研究が飛躍的に推進することが期待される．

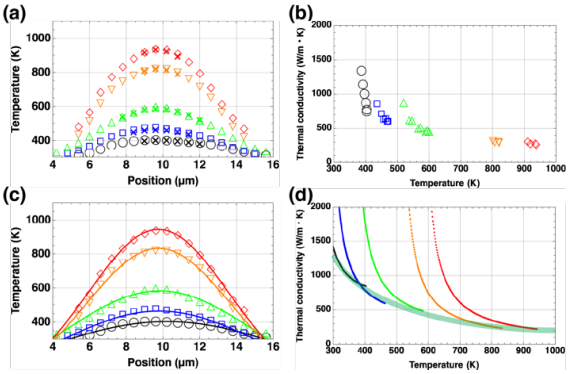


図 2 (a,b) Savitzky-Golay 法と(c,d) 本研究で計測した(9,8) SWCNT の熱伝導率．SWCNT の(a,c) 温度分布と(b,d) 熱伝導率．プロット形状は，各レーザーパワーに対応する温度分布を示す．n = 6 で(a)に示した×マークの点で二回微分の計算を行った．(c)に示したラインは，各温度分布に対するフィティングラインである．

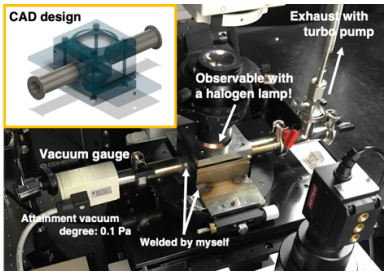


図 3 製作した試料チャンバー．

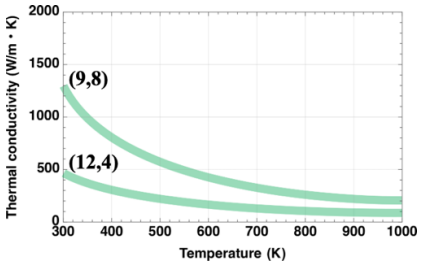


図 4 (9,8) と (12,4) SWCNT の熱伝導率．

〔発表論文〕

1. M. Irita, U. Taro, T. Yamamoto, Y. Homma, M. Sadgrove, Interaction between Phonons in a Single-Walled Carbon Nanotube and Near-field light of an Optical Nanofiber, 第 69 回 応用物理学会 春季学術講演会，口頭発表，(2022/03/24).
2. M. Irita, T. Uchikawa, T. Yamamoto, Y. Homma, M. Sadgrove, Control of Thermal Excitation in Single-Walled Carbon Nanotubes by Polarized Light, THE 22ND INTERNATIONAL VACUUM CONGRESS，口頭発表, (2022/09/12).
3. M. Irita, T. Yamamoto, Y. Homma，顕微蛍光分光法による半導体単層カーボンナノチューブのカイラリティー分布，第 5 回日本表面真空学会若手部会研究会，ポスター発表, (2022/11/10).
4. M. Irita, K. Yoshino, K. Nagano, K. Sasaoka, T. Yamamoto, Y. Homma，単層カーボンナノチューブのカイラリティーによる熱伝導率の違い，(論文投稿準備中).

【助成 39－37】

表面プラズモン共鳴型光ファイバーセンサーによる地熱スケールの計測

代表研究者　明治大学理工学部　助教　　岡崎　琢也

〔研究の概要〕

地熱で発電に利用される熱流体からのスケールの析出が重大な問題になっている。本研究では，表面プラズモン共鳴（SPR）を利用した光ファイバーセンサーによってスケールを計測する技術を開発した。室内実験では，SPR センサー表面に SiO_2 を析出させ，その SPR 波長シフトを得た。また水晶振動子マイクロバランス法によって付着する SiO_2 の質量変化を計測し，SPR 応答との比較を行った。電子顕微鏡によって付着した SiO_2 の膜厚の観察を行った。確立したセンサーを実際の地熱発電所の熱水に応用した結果，スケールの形成による明瞭な SPR 応答が得られ，硫酸添加の効果が 5 時間程度で評価できることがわかった。

〔研究経過および成果〕

地熱発電などの利用に際し，熱水に溶存する成分の析出はスケールと呼ばれ重大な問題になっている。特にシリカ，炭酸カルシウム，硫酸カルシウムがよく見られ，その抑制のための研究が進んでいる。一方で，それらの析出量や抑制法の効果を評価する手法は開発されていなかった。我々は，光ファイバーを利用した「スケールセンサー」を開発してきた。これは，光ファイバーのコアを熱水へ露出させ，スケール生成に伴う透過光の変化を用いる。一方で，このセンサーは感度や操作性に改善の余地を残している。特に，高温の熱水を多量に扱う際に，センサーの操作性は使用者の安全性に直結する。本研究では，より高感度な検出系として表面プラズモン共鳴（SPR）に着目した。光ファイバーコアに金薄膜を付着させることで SPR が生じ，表面の屈折率変化，すなわちスケールの生成によって波長シフトとしての応答が得られる。また，金による光の反射面を利用することで試料水にセンサーを直接挿入することが可能である。

実験では，マルチモード光ファイバー（FT200EMT, Thorlabs）を使用した。1 m 程度の光ファイバーを用い，片方の端面のクラッドを 5 mm 除去し，金をスパッタした。光源は一般的なハロゲン光源を使用し，分光器として小型の紫外可視分光光度計（SEC2000, BAS）を用いた。反射光を検出するため，2 本の光ファイバーを利用し，それぞれ片方のコアを 1 つのコネクターにまとめる分岐ケーブルを作製して使用し，センサーを接続した。また，それぞれ他方を光源と分光器に接続した。センサーの空気中での光強度をリファレンスして SPR 応答を得た。室内実験では，まずメタけい酸ナトリウム九水和物を 1000 mg SiO_2/L となるように溶解した。これを 85℃まで加熱した後に硫酸で pH8 となるよう中和して SiO_2 の重合を安定させた。この溶液に自作の昇降機にて光ファイバーの先端を自動的に出し入れし，浸漬と乾燥を繰り返した。乾燥時間を 60 秒，浸漬時間を 120 秒とした。

図1a に，浸漬，乾燥回数による水溶液中でのセンサーの吸収スペクトルの変化を示し，図 1b にSPRピーク波長の変化を示した。図のように，浸漬・乾燥に伴うSiO_2 の付着によってSPRスペクトルの高波長側

へのレッドシフトが見られた。ピーク波長も回数によって増加し，概ね直線関係が得られた。

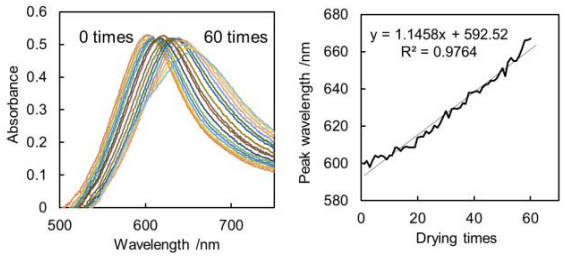


図1 ケイ酸水溶液へのセンサーの浸漬・乾燥による吸光度スペクトルの変化(a)および波長シフト(b)

続いて，付着量と応答の関係を明らかにするために水晶振動子マイクロバランス(QCM)法を導入した。この方法では，水晶振動子に被覆した金などの表面の質量変化を振動子の周波数から測定できる。実験では，QCM測定装置(THQ-100P-SW，多摩デバイス)を用いた。9 MHz の金被覆型(直径 5 mm)の振動子に防水処理を施し，前述のセンサーと同様に浸漬と乾燥を繰り返した。また，QCM は水中での測定において溶媒の粘性に強く影響を受ける。本実験においても，水中での急激な周波数低下がみられたことから，空気中での乾燥重量を測定値とした。結果では乾燥回数に対する直線的な質量増加が得られた。同様の実験を3度行い，乾燥回数に対する質量変化 0.11±0.020 μg を得た。

これを，QCMの電極面積あたりに換算し，図1におけるSPRセンサー(φ0.2 mm, 5 mm)の波長シフト1.2 nm/乾燥回数に適用すると0.066 nm/ngであった。検出限界(3σ)に換算すると 20 ng であり，センサーに付着するこの量の SiO_2 を検出可能であることが示された。

続いて，金表面に付着する SiO_2 を電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM)にて観察した。実験では，金を 1 min スパッタした 0.5 mm 厚の Ti 基板に，センサーと同様の浸漬実験を行い，20 回と 60 回乾燥を行った試料を得た。洗浄と乾燥後，SiO_2 表面にカーボンをスパッタした。FE-SEM 内で試料を 53° 傾斜させ，カーボンをさらに被覆した後に収束イオンビーム(FIB)にて垂直に表面を掘って観察を行った。断面の写真からは，下から Ti, Au, SiO_2, C の 4 層が確認できた。また，EDX 分析により，Si と Au の応答を得た。SiO_2 の厚みを計測し，乾燥回数との関係を評価したところ，良好な直線性が得られた。

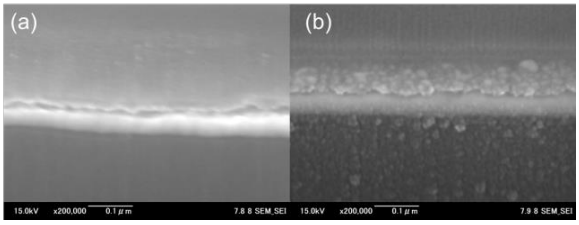


図 2 断面のSEM画像，乾燥回数(a) 20 回，(b) 60 回

最後に，九州地方のバイナリー地熱発電所にて実際の熱水におけるスケールの測定を行った。ここでは，ケイ酸マグネシウム系のスケールの生成が知られている。原熱水と硫酸添加によってpHを5にしたものをそれぞれ桶に流し，SPRセンサーによって測定を行った。原熱水では280分で約80 nmのピークシフトが得られ，pH 5 では目立ったピークシフトが得られなかった。このことから，スケール防止策の影響が数時間で評価できることが示された。また，露出させたコアを利用する従来のセンサーにおいて280分時点ではデータのふらつきに対して比較的明瞭な結果を得たことから，わずかに高い感度を有することが示唆された。以上のことから，SPR センサーは地熱スケールの計測に有用であることが本研究によってはじめて示された。

【助成 39－38】

光エネルギーによる新たな無痛性不整脈治療の開発

代表研究者　北海道大学病院　循環器内科　助教　　渡邉　昌也

〔研究の概要〕

光遺伝学とは対象となる細胞や組織に光感受性タンパクや蛍光タンパク質を遺伝的に発現させることで、生体機能を非接触で高精度に制御もしくはモニタリングする技術の総称である。現在、光駆動形チャネルまたはポンプを心筋細胞に発現させることで、心臓電気生理学特性の解明や、心筋ペーシングや除細動などの心臓電気生理制御法の開発が進められている。本研究では光駆動型チャネルであるチャネルロドプシン 2 (channelrhodopsin-2: ChR2)をプルキンエ線維および心房筋に特異的に発現させたトランスジェニックマウスを用い、短時間の光照射中の活動電位持続時間（APD)、有効不応期（ERP)の変化を光学マッピングを用いて詳細に検討した。短時間光刺激は、光照射後も APD、ERP を有意に延長させた。更に、心房細動の光除細動の波形解析から、不応期の延長が光除細動器の機序に関与することが示唆された。

〔研究経過および成果〕

【背景と目的】心房細動は日常診療で遭遇する最も一般的な不整脈である。電気的除細動は、最も確実な除細動手技であるが、疼痛を伴うため十分な鎮静管理を要する。光遺伝学を用いた「光除細動」は無痛的な除細動方法として臨床応用が期待されている。ChR2 発現心筋において、リエントリー性不整脈発症時に光刺激を与えることで光除細動が可能であることが報告されているが、光除細動の機序は十分に明らかになっていない。最も有力な説は「伝導ブロック説」である。これは光刺激により静止膜電位が上昇し、細胞膜に存在する電位依存性 Na+チャネルが不活化することで心筋の興奮性が低下し、伝導ブロックを形成するものである。その一方で、短時間の活動電位波形の修飾など、伝導ブロック説に依らない光除細動機序の関与も示唆されている。我々は「活動電位持続中に実施される光刺激による活動電位持続時間(action potential duration: APD)および有効不応期(effective refractory period: ERP)の延長が光除細動に関与している」と仮説を立て「還流心の心筋において、短時間パルス光刺激が APD および ERP に与える影響を明らかにすること、APD および ERP 延長効果と短時間パルス光刺激による光除細動の関連を明らかにすること」を目的とした。

【方法】Cre-loxP システムを用い、プルキンエ線維および心房筋に特異的に ChR2-tdTomato を発現させたマウスを使用し、凍結切片で ChR2-tdTomato の発現を確認した。ランゲンドルフ灌流心に対して、右心房を心外膜側から青色光(470nm)で刺激する心房光照射系を確立した。K_{ACh}-channel activator である Carbachol を溶解し、さらに低カリウム状態にした溶液（Carbachol + 低カリウム溶液）を灌流し、電気的連続刺激を行うことで心房細動を誘発した。心房細動誘発後に右心房にパルス光刺激を行い、心房細動抑制効果を検証した。活動電位持続中に実施されるパルス光刺激による APD 延長効果および ERP 延長効

果を、光学マッピング法を用いて観察した。パルス光刺激による光除細動時の活動電位波形を、光学マッピング法を用いて観察した。

【結果】凍結切片で心房に tdTomato を確認し ChR2 の発現を確認した。心房光照射系を用いたパルス光刺激で心房光ペーシングが確認された。Carbachol + 低カリウム溶液灌流および心房連続電気刺激により誘発された心房細動はパルス光刺激により光除細動された。光除細動率はパルス光刺激の光強度およびパルス幅に依存した。絶対不応期を含む活動電位持続中に実施されるパルス光刺激により APD は有意に延長し(図 1)、ERP も同様に有意に延長した。APD および ERP は活動電位再分極相でパルス光刺激を受けた場合に最も延長した。また、ERP 延長効果は光刺激のパルス幅に依存した。一方で一定値以上の光強度は ERP 延長に追加効果を与えなかった。パルス光刺激による光除細動は APD の延長を伴っていた(図 2)。【結論】光遺伝学を用いた光除細動の機序の一つとして、光刺激による APD の延長および ERP の延長が関与していることが示唆される。

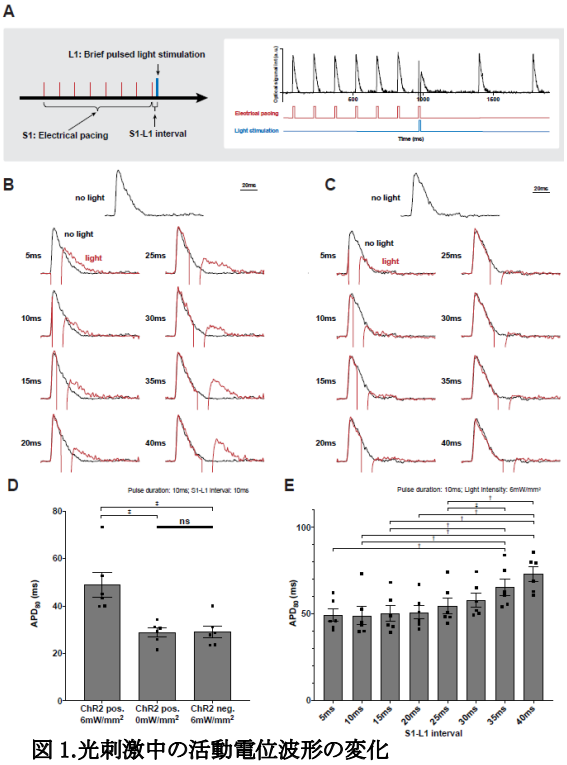


図 1.光刺激中の活動電位波形の変化

〔発表論文〕

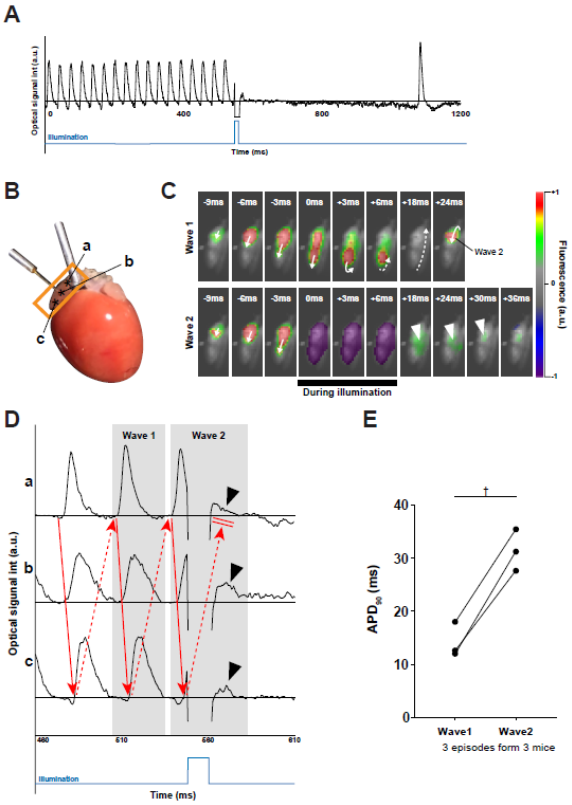


図 2.光除細動中の活動電位波形

1. Nakao M, Watanabe M, Natsui H, Koya T, Takahashi Y, Hagiwara H, Kamada R, Temma T, Anzai T. Optogenetic termination of atrial fibrillation delivered by brief pulse illumination in mice. 第 5 回日本循環器学会基礎研究フォーラム 2021.9.11-12. Oral on line.
2. Nakao M, Watanabe M, Natsui H, Koya T, Takahashi Y, Hagiwara H, Kamada R, Temma T, Anzai T. Prolongation of the Refractory Period is a Key Mechanism of Optogenetic Termination of Atrial Fibrillation in Mouse Hearts. AHA Scientific Session 2021.11.15. ePosters on line.

【助成 39－39】

培養皿の中で運動を再現する
－ 培養骨格筋への電気刺激システムの開発を通じた運動応答遺伝子の解析

代表研究者　東北大学　加齢医学研究所　助教　久保　純

〔研究の概要〕

運動は個体レベルでは多方面へと影響を与えるため、実験動物を用いた個体レベルの研究では、純粋に筋肉のみに与えられる影響を解析することは不可能である。そこで本研究では、培養皿上にて形成した培養筋肉に対して、運動神経を模倣した電気刺激を与える装置を開発した。この装置は任意の刺激パターンをプログラムすることが可能である。生体の筋肉の運動に相当する電気刺激条件の探索を行った。速筋パターンと遅筋パターンとでは、異なる筋収縮の様子が観察された。培養条件の最適化も併せて行い、成熟した筋繊維に対して培養皿上で収縮運動を起こすことに成功した。この装置を用いて運動に応答する遺伝子の同定を行った。

〔研究経過および成果〕

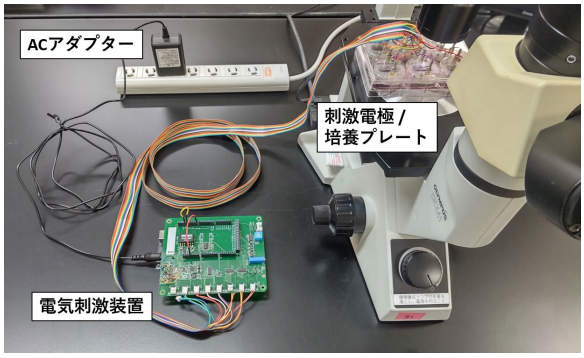
サルコペニアとは加齢による骨格筋の萎縮のことであるが、実際には 30 歳前後から骨格筋量は減少し始め、70 歳になるとピーク時の 70%程度まで低下すると言われている。この骨格筋量の減少に対して、運動が効果的であることは感覚的、経験的には理解できるものの、どのようなメカニズムが骨格筋維持に働いているのかは未だ完全には分かっていない。

これまでに運動によって活性化されるシグナル伝達経路がいくつか同定されているが、運動時に骨格筋細胞内で起こる変化についてはまだまだ未解明な点が多く、効率的に解析を行っていく必要がある。一般的に運動を解析する方法として、マウスを用いた動物実験が行われている。しかし、動物実験に頼る方法では、実施に長期間を要し、労力、費用の面から効率が悪い。さらにはマウスとヒトの種の違いが存在しているため、マウスで得られた知見が必ずしもヒトでは当てはまらないという懸念もある。一方、動物実験を代替する実験系として、培養皿上に形成させた培養筋肉に電気刺激を加え、強制的に収縮させる電気刺激装置が市販されている。しかし、培養骨格筋に電気刺激を加えた際の遺伝子発現などの応答が、生体の筋肉の運動への応答と一致しないことがあり、完全に運動を代替できる実験系とは言い難いという問題点がある。そこで本研究では培養皿上で形成させた培養筋肉に対し、効率的に電気刺激を加えることのできる装置の開発を行い、また生体の運動に近い刺激条件の探索を行った。さらに運動に応答する遺伝子について調べ、その機能解析も行った。

(1) 培養筋肉への電気刺激システムの改良

我々が開発した電気刺激装置の外観を図 1 に示す。AC100V のコンセントから電源を取り、筋管を培養している培養皿に対して電気パルスを発生させる。電気パルスは電子基板により制御されており、任意の刺激パターンをプログラムすることが可能である。以上の装置については、特許出願済みである（特願 2022-46893）。

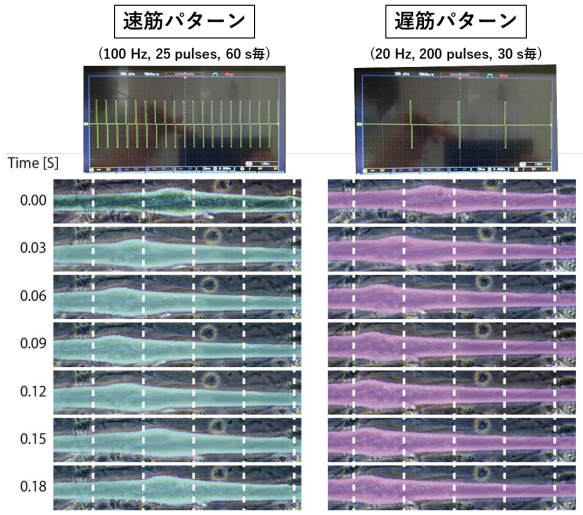
図 1 電気刺激装置の外観



(2) 生体の運動に匹敵する電気刺激条件の探索

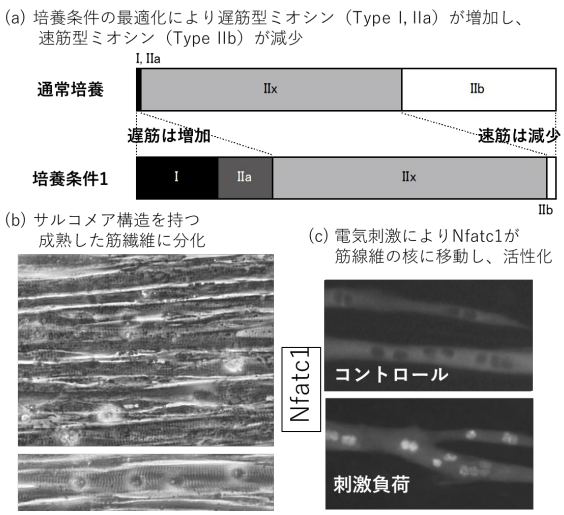
(1)で作製した電気刺激装置を使用して、生体の運動に相当する電気刺激条件の探索を行った。図 2 では、刺激パターンの一例として速筋パターンと遅筋パターンをそれぞれ示している。同一の筋管に速筋パターンと遅筋パターンでの刺激を行い、筋管の収縮の様子を観察した。速筋パターンでは力強い収縮の後、ただちに弛緩する様子が観察された。一方で、遅筋パターンでは絞り込むように収縮が起こり、刺激している間、収縮が継続していた。

図 2 刺激パターンの一例



次に培養筋管の培養条件の最適化を行った。培養筋管として C2C12 細胞を分化させたものがよく用いられているが、この筋管由来の培養筋管は未成熟であることが知られている。そこで、培養条件の最適化を行い、培養皿上で成熟した筋繊維を作り出した。図 3 に示すように、通常培養と比べて、培養条件 1 では、速筋繊維であるタイプ IIb が減少し、遅筋繊維であるタイプ I とタイプ IIa が増加していた。また通常の筋管では観察されないサルコメア構造を確認することができた。このような成熟した筋管に対して、電気刺激を負荷したところ、転写因子の核移行などの変化が観察された。図 3 (c)では一例として Nfatc1 の例を示す。

図3 成熟筋繊維への電気刺激



(3) 新規運動応答遺伝子の同定と機能解明

最後に、In vitro での電気刺激を用いて同定した、電気刺激に応答する遺伝子が生体の運動においても応答するかどうかを調べた。マウスをトレッドミルで運動させ、運動後に後肢の筋肉を摘出し、細胞内タンパク質を回収した。電気刺激に応答する遺伝子のいくつかは生体の運動においても応答することが確認できた。現在、その機能解析を進めている。

〔発表論文〕

なし

【助成 39－40】

末梢伝搬メカニズムの解明に基づく軟骨伝導デバイス群の開発

代表研究者　千葉大学フロンティア医工学センター　教授　中川誠司
共同研究者　千葉大学フロンティア医工学センター　助教　大塚　翔
共同研究者　千葉大学フロンティア医工学センター　特任助教　Qin Xiuyuan

〔研究の概要〕

頭骨部に振動子を押しつける従来の骨伝導には，痛みが生じる，振動子がずれやすいという欠点があった．このような問題を解決する手段として，耳介軟骨に振動子を呈示する“軟骨伝導”が提案され，補聴器やスマートホンに応用されている．軟骨部は骨部に比べて軟らかく，弾性を持つために軟骨伝導では痛みを生じにくい．また，従来の骨伝導と同様に使い方を工夫することで騒音下でも聞きやすい，耳栓やイヤホンを装着した状態でも利用できるというメリットも有している．しかしながら，軟骨伝導の知覚メカニズムには不明な点が多く残り，新たなデバイス開発が効率よく行えない原因となっている．本提案では，軟骨伝導デバイスの最適化や派生機器の開発に有用な知見の獲得を目指して，軟骨伝導の末梢伝搬過程の解明に取り組んだ．

〔研究経過および成果〕

1.　軟骨伝導音の末梢伝搬特性の推定

一般に骨伝導では，(1) 一旦は頭部の生体組織に入った後，主に軟骨部を介して外耳道内に放射される外耳道内放射成分，(2) 頭部組織を介して中耳に到達し，耳小骨連鎖に慣性運動を生じさせている慣性骨導成分，(3) 頭内組織を介して内耳に到達し，蝸牛殻に圧縮・伸張を生じさせている圧縮骨導成分，(4) 振動子から空気中に放射され，外耳道に侵入する気導成分の 4 つの伝搬成分が知覚される．軟骨伝導における振動子の呈示部位が，上記の各伝搬成分および知覚に与える影響を検討した．

1.1.　方法

聴覚健常者 5 名(男性 4 名，女性 1 名 22~24 歳)を被験者とした．

実際の骨伝導スマートホンに使用されている圧電振動子 (R11-244018-01, TOKIN) と 1 枚のアクリル板（5 cm 平方）を用いて，スマートホンのパネルスピーカーを想定した軟骨伝導振動子を作成した．左側の耳介，側頭骨の乳様突起，および耳前部(耳珠から顆状突起にかかる部位)に振動子を呈示した (Fig. 1) ．

外耳道全体の容積の 0, 20, 40, 60, 80, 100% の水を外耳道に注入した (Fig. 2)．その状態で，三肢強制選択，2up - 1down 方式の変形上下法を用いて，250, 500, 1000, 2000, 4000, および 8000 Hz トーンバーストの聴覚閾を計測した．

1.2.　結果と考察

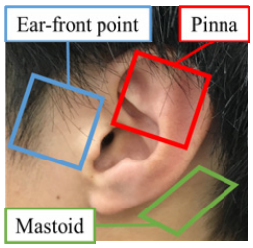


Fig. 1 Placements of the transducer

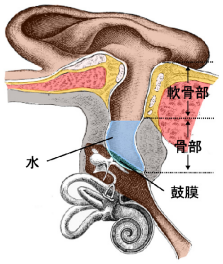


Fig. 2 The ear canal at 40% water injection

検出閾に対する呈示部位の主効果が見られた．また，1000 - 4000 Hz では，乳様突起に比べて耳介，耳前部で有意に大きな聴覚閾上昇が観察された．外耳道への注水によって気導成分と外耳道内放射成分の両者が遮断されたため，耳介，耳前部では上昇量が大きくなったこと，および，乳様突起は他の呈示部位に比べ知覚に占める気導成分と外耳道内放射成分の割合が低いため，上昇量が抑えられたと推測される．

これらの結果は，振動面が耳介軟骨のみに接触する場合は外耳道内に生じる成分が増大し，頭骨部に接触する条件では慣性骨導成分および圧縮骨導成分が発生することを改めて示している．

2.　軟骨伝導音知覚に及ぼす耳介特性の効果の推定

軟骨伝導では，耳介そのものの特性が聞こえに

影響を与えると考えられるが，先行研究は極めて限定的である．ヒトの耳介のサイズおよび硬度と聞こえの関係を調査した．

2.1. 方法

聴覚健常者 15 名（男性 10 名，女性 5 名，19~28 歳）の左右耳，合計 40 耳を対象とした．.

硬度計測にはデュロメータタイプ E（GS-779G, テクロック）を用いた．伏臥位を取った被験者の耳介にデュロメータを垂直に 3 秒間押し当てて硬度を計測した．硬度の計測点（対輪，耳珠，耳輪）を Fig. 3 左に示す．なお，デュロメータの押し当てによる計測部位およびその周囲組織の変形を防ぐため，耳珠における計測時にはシリコンゴムの耳栓 (INSTA-PUTTY, Insta-Mold Products) を被験者の外耳道に挿入した．同様に，対輪および耳輪計測時には，耳介の裏側にシリコンゴムを挟み，自作の固定治具とゴムバンドで頭部に固定した (Fig. 3 右)．また，耳長(A)，耳幅(B)，耳介付着部長(C), 耳介軟骨長(D), 外耳道までの距離(E), 耳垂長(F)を測定した (Fig. 4)．

また，実験 1 と同じ方法で聴覚閾を計測し，耳介のサイズ，硬度との関係を調べた．

2.2. 結果と考察

聴覚閾に及ぼす対輪および耳輪の硬度の主効果は有意であり，それぞれの部位の硬度の増加に伴う検出閾の下降/上昇が認められた（Fig. 5）．一般に硬度，すなわち弾性率が高いほど，物体内での距離減衰は小さくなる．一方，硬度が小さい場合は振動子の押付に対して生体組織が変形し，両者の接触面積が増加することで，骨伝導音の伝達効率が上昇することも考えられる．

250-1000 Hz では，耳介軟骨長-検出閾間に正の相関が確認された．この結果は先行研究（Nakagawa et al. 2021）に一致する．また，対輪および耳輪の硬度，さらには外耳道までの距離(E)を除くすべての形態パラメータ，および 250-1000 Hz の検出閾に男女間の有意差が認められた．これらの結果は先行研究 (Nakagawa et al. 2021) に一致するもので，耳介の硬度と耳介サイズは軟骨伝導の検出閾に影響すること，小さな耳介を持つ女性の方が軟骨伝導音を効率よく聴取できることを示している．

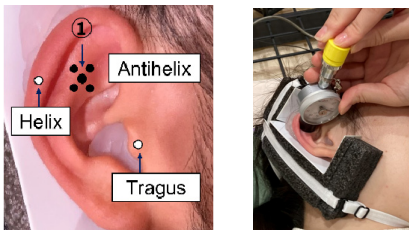


Fig. 3 Left: Measurement locations for the hardness of the pinna. Right: The durometer and pinna-holding jig for the hardness measurement.

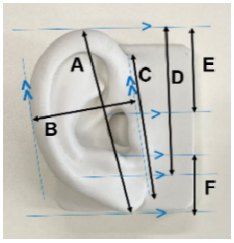


Fig. 4 Auricle dimensions.

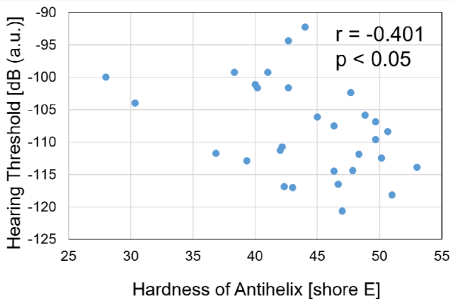


Fig. 5 A Scatter diagram of threshold and hardness of the helix.

〔発表論文〕

1. Irwansyah, Otsuka S, Nakagawa S, Improved Low-Frequency Crosstalk Cancellation in Bone Conduction Using Bone Transducers and Probe Microphone, IEEE Access, 10, 79201-79212, 2022
2. Ishikawa H, Otsuka S, Nakagawa S, Threshold and frequency- and temporal resolutions of distantly presented bone-conducted sound in the audible-frequency range, J. Jpn. Appl. Phys., 61 SG1065, 2022.
3. 菅原，大塚，中川，振動子呈示部位の変化に伴う軟骨伝導伝搬成分比の推定，日本音響学会講演論文集，2022.
4. 田村，Irwansyah，大塚，中川，耳介の形態・硬度および性別が軟骨伝導の検出閾特性に及ぼす影響，日本音響学会講演論文集，2022.
5. Uemura K, Otsuka S, Nakagawa S, Basic perception and propagation characteristics of bone-conducted sounds presented to facial parts, J. Jpn. Appl. Phys., Accepted.

【助成 39－42】

脳への微弱な電気刺激がリハビリテーションを促進する分子細胞機序の解明

代表研究者　お茶の水女子大学　基幹研究院自然科学系　助教　　毛内　拡

〔研究の概要〕

我々は、脳への微弱な電気刺激（tDCS）がリハビリテーションを促進する機序として、脳脊髄液と細胞間質液の交換による脳の老廃物の排泄の促進が重要な役割を果たすと仮説を立て、マウスを用いた生理学的研究によりこれを検証した。マウス大槽より、脳脊髄液に直接トレーサーを注入し、続いて、10 分間 0.1mA の tDCS を視覚野直上の頭蓋骨に対して行った結果、有意に脳脊髄液の細胞間質への流入が上昇した。その効果は、30 分後、60 分後も持続した。また、tDCS を行ってから 30-60 分後の脳波を周波数解析したところ、1-4 Hz のデルタ帯のパワーが有意に増加していることを明らかにした。さらに脳脊髄液に注入した色素が、頸動脈のリンパ管に排出され蓄積していく様子をリアルタイムに生体計測し、tDCS が有意に脳リンパ排泄を促進することを明らかにした。

〔研究経過および成果〕

＜背景＞

近年、頭蓋直流刺激（tDCS）は非侵襲的脳刺激として注目されるようになっている。臨床研究では、1-2 mA の弱い直流を頭蓋または頭皮を通して 10-30 分間刺激する tDCS が、アルツハイマーの進行抑制や脳卒中後のリハビリの促進等、神経学的な疾患の治療を促進するための補助としてさまざまな方面で検討されている [1]。例として、アルツハイマー病の治療に関する臨床試験では、tDCS 後に患者のアミロイドβ（Aβ）1-42 の血清レベルが増加し、その結果脳内の Aβ の沈着が減少した [2]。また、アルツハイマー病を有するマウスに対する tDCS 後に、海馬の Aβ レベルと前頭葉の Aβ レベルが減少することが予備的な研究で示された [3]。これらの研究結果から、tDCS は脳の老廃物排出の促進に影響する可能性が示唆されている。

近年注目されている「グリンファティックシステム」は、脳脊髄液・組織間液（CSF-ISF）の交換によって代謝老廃物の効率的な排出を促すことができる、いわば脳のリンパ排出機構が存在するという説である [4,5]。Monai らは、急性虚血性脳卒中の後、アドレナリン受容体のブロックによってマウスの運動機能不全の回復を促すことを見出した [6]。この結果は、アドレナリン受容体のブロックが CSF-ISF 交換によって脳の細胞外イオン環境の正常化を促したことを示している。

一方、tDCS の細胞メカニズムは Monai らによって提案されており、アドレナリン受容体の活性化が重要な役割を果たしていると考えられる [7]。しかし、tDCS が脳の CSF-ISF 交換にどのように影響するかは未解明である。

＜目的＞

本研究では、脳への微弱な電気刺激（tDCS）がリハビリテーションを促進する機序として、脳脊髄液と細胞間質液の交換による脳の老廃物の排泄の促進が重要な役割を果たすと仮説を立て、マウスを用いた生理学的研究によりこれを検証した。

＜方法＞

本研究では、ケタミン・キシラジン（KX）麻酔下の C57BL/6 マウスに、大脳皮質上部の頭蓋骨に設置した陽極と頸部に挿入した陰極により tDCS（0.1mA、10 分）を適用した。脳流入液の動態を直接可視化するために、tDCS 後に cisterna magna（CM）を介して CSF トレーサーとして biotinylated dextran amine（BDA）を注入し、免疫組織化学を用いて Alexa 594-conjugated streptavidin (SA) によって BDA を可視化した。tDCS のメカニズムを探るため、脳波記録と AQP4/CD31 免疫染色を実施した。また、リンパ節イメージングにより脳代謝性廃棄物の流出を観察した。

＜結果＞

マウス大槽より、脳脊髄液に直接トレーサーを注入し、続いて、10 分間 0.1mA の tDCS を視覚野直上の頭蓋骨に対して行った結果、有意に脳脊髄液の細胞間質への流入が上昇した。特に、大脳皮質や海馬における流入増加が顕著であった。その効果は、30 分後、60 分後も持続した。

また、tDCS を行ってから 30-60 分後の脳波を周波数解析したところ、1-4 Hz のデルタ帯のパワーが有意に増加していることを明らかにした。これは、デルタ帯のパワーと脳リンパ流に正の相関があるという過去の研究と矛盾しない。

一方、脳リンパ流の重要な駆動力と考えてられている、脳の水チャネル AQP4 の発現には影響を及ばさなかった。

さらに、脳リンパ流による老廃物の排出(脳リンパ排泄)を評価するために、脳脊髄液に注入した色素が、頸動脈のリンパ管に排出され蓄積していく様子をリアルタイムに生体計測し、tDCS が有意に脳リンパ排泄を促進することを明らかにした(図)。

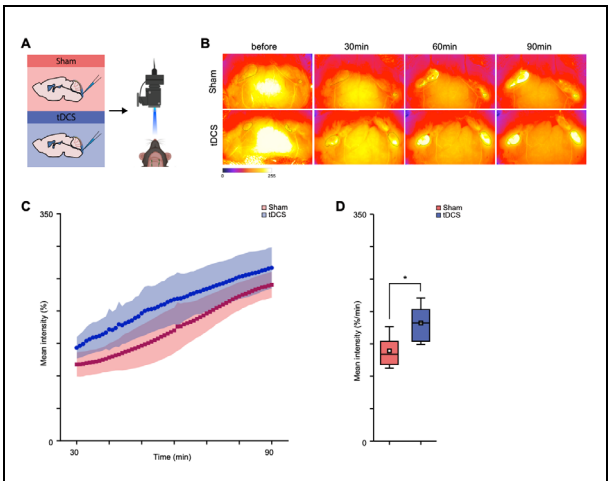


図 tDCS によるリンパ節への流出への影響
(A) リンパ節イメージングの模式図
(B) リンパ節イメージングの代表画像
(C) 偽マウスと tDCS マウスのリンパ節における平均強度（%）
(D) 最初の 30 分間の記録におけるリンパ節充満率
*p < 0.05, t-test

〔学会発表〕

1. Yan Wang, **Hiromu Monai**†, 12th Ewha-JWU-Ochanomizu Joint Symposium 2021, Dec, 2021（口頭発表）
2. 王岩, **毛内拡**†, 経頭蓋直流電気刺激が脳脊髄液と間質液の交換に与える影響の解析, NEURO2022, 2022 年 7 月（ポスター）
3. Yan Wang, **Hiromu Monai**†, Transcranial direct current stimulation alters cerebrospinal fluid-interstitial fluid exchange in mouse brain., 日本バイオイメージング学会, 2022 年 9 月（ポスター）

〔参考文献〕

1. Lefaucheur, J. P. (2016). A comprehensive database of published tDCS clinical trials (2005–2016). Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology, 46(6), 319-398.
2. Khedr, E. M., Salama, R. H., Abdel Hameed, M., Abo Elfetoh, N., & Seif, P. (2019). Therapeutic role of transcranial direct current stimulation in Alzheimer disease patients: double-blind, placebo-controlled clinical trial. Neurorehabilitation and neural repair, 33(5), 384-394.
3. Luo, Y., Yang, H., Yan, X., Wu, Y., Wei, G., Wu, X., ... & Wen, H. (2022). Transcranial Direct Current Stimulation Alleviates Neurovascular Unit Dysfunction in Mice With Preclinical Alzheimer's Disease. Frontiers in Aging Neuroscience, 14.
4. Iliff, J. J., Wang, M., Liao, Y., Plogg, B. A., Peng, W., Gundersen, G. A., ... & Nedergaard, M. (2012). A paravascular pathway facilitates CSF flow through the brain parenchyma and the clearance of interstitial solutes, including amyloid β. Science translational medicine, 4(147), 147ra111-147ra111.
5. Jessen, N. A., Munk, A. S. F., Lundgaard, I., & Nedergaard, M. (2015). The glymphatic system: a beginner's guide. Neurochemical research, 40(12), 2583-2599.
6. Monai, H., Wang, X., Yahagi, K., Lou, N., Mestre, H., Xu, Q., ... & Hirase, H. (2019). Adrenergic receptor antagonism induces neuroprotection and facilitates recovery from acute ischemic stroke. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(22), 11010-11019.
7. Monai, H., Ohkura, M., Tanaka, M., Oe, Y., Konno, A., Hirai, H., ... & Hirase, H. (2016). Calcium imaging reveals glial involvement in transcranial direct current stimulation-induced plasticity in mouse brain. Nature communications, 7(1), 1-10.

【助成 39－43】

神経情報の操作計測のためのフレキシブルマイクロ LED シートの開発

代表研究者　豊橋技術科学大学　大学院工学研究科　電気･電子情報工学系　准教授　　関口　寛人
共同研究者　獨協医科大学　先端医科学統合研究施設　先端医科学研究線センター　助教　瀬戸川　将

〔研究の概要〕

生体の外部から光のみを当てることで神経細胞の活動を制御することが可能な光遺伝学的手法が注目されている。近年，複雑な神経ネットワークをもつ脳機能の解明に向けて，脳の広範囲の特定の神経細胞に光を当てる光照射デバイスが求められていた。本研究では，脳に密着して利用できるよう，薄さと軽さ，柔軟性をもつ LED シートの実現に向けて，マイクロ LED の中空構造の作製技術と熱剥離シートを用いた LED の一括転写技術の確立に取り組み，曲げても光を照射する性能が低下しない多点マイクロ LED シートの開発に成功した。

〔研究経過および成果〕

特定の色の光に反応する光感受性タンパク質を神経細胞に発現させることで神経活動を光で制御できる光遺伝学的手法は，時間分解能が高く，脳機能の理解に向けて活用されている。神経細胞が作る複雑な脳神経ネットワークの理解に向けて脳の広範囲に分布する特定の神経細胞を自在に制御する光照射技術が求められていた。これまでに光照射技術として用いられてきた光ファイバや顕微鏡を用いた手法では特定の部位や複数の部位を同時に光照射することは困難で，自由行動中の動物への利用も限られていた。そこで，生体に埋め込むことのできる LED デバイスの活用が期待されていたが，市販の LED は大きく厚いため，脳などの組織全体を覆うように取り付けるような応用には適していなかった。本研究では，厚さ数 μm の LED 層のみを、極薄の生体適合性フィルム上に高精度で配置する技術の確立に挑戦し，新たな生体埋込み型の光デバイスの開発を行った。

フレキシブルな LED シート実現に向けて，図1に示すように，(1)厚さ数 μm の LED 層のみを取り出すためのマイクロ LED の中空構造を形成する技術と(2)フレキシブルシートに精度よく LED を配置するための一括転写技術の 2 つのプロセス技術開発に取り組んだ。本研究では Si 基板上にエピタキシャル成長された青色発光する InGaN 系 LED ウエハを用意した。まず一般的なマイクロ LED の作製プロセスにて p 型，n 型の電極形成を行った後，それぞれのマイクロ LED 周囲の GaN 領域をドライエッチング法で除去して Si 基板面を露出させた。さらに，露出した Si 層を 1μm ほどドライエッチングした。水酸化カリウム溶液による異方性ウェットエッチング法を適用することで，

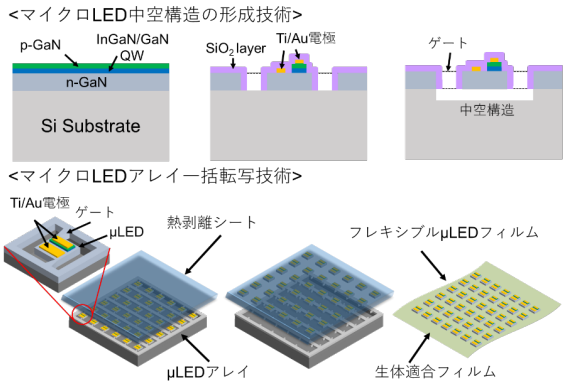


図１．マイクロ LED の中空構造の形成およびフィルム上への一括転写技術

LED 層下部の Si 基板を選択的に除去し，高密度に配置されたマイクロ LED の中空構造を形成することに成功した。

次に，生体適合性をもつパリレンフィルム上に正確かつ精度のよい配置を目標として，熱剥離シートによるマイクロLEDアレイの一括転写を試みた。熱剥離シートを，中空構造をもつマイクロ LED アレイに押し当てはがすことですべてのマイクロLEDが熱剥離シートへと転写された。続いて，熱剥離シートをSi基板上に形成された厚さ 10um 程度のパリレンフィルム上におき，試料を 150℃にて加熱することで熱剥離シートの粘着力が失われ，欠けることなくマイクロLEDがパリレンフィルム上へと一括配置された。また転写されたマイクロ LED は位置ずれ，回転等の問題は確認されなかった。最後に，Ti/Au 金属(50/400 nm)およびパリレンによる保護層を形成し，Si 基板上から完成したマイクロ LED アレイシートを剥がした。作製した LED シートは PCB 基盤へとフリップチップボンディングにより実装した。

作製したマイクロ LED は転写前後で特性劣化なく，立ち上がり電圧 3.2V 程度のきれいな整流特性が得られた。図2に完成したマイクロ LED シートの発光像を示す。マイクロLEDは独立駆動可能であり，任意の位置の LED を発光させることが可能である。異なる

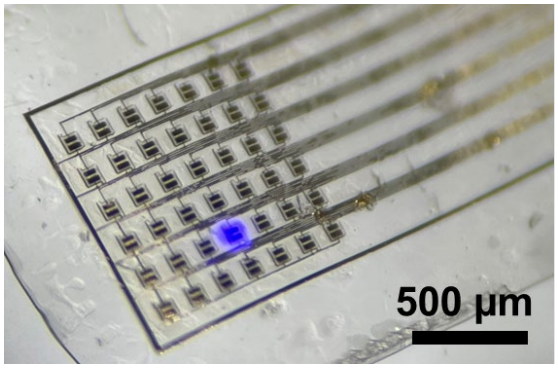


図２．フレキシブルマイクロ LED シートの発光像

円柱のブロックに巻き付けて順方向電圧の違いを観察したが，その変化は 1%未満であり，ほとんど影響を受けないことが明らかとなった。また作製したマイクロ LED シートをマウスの大脳皮質においたところ，合計厚さ11μmのシートは脳に十分密着して，光遺伝学実験に利用可能な明るい発光が得られることが実証された。

本研究で開発された脳の広範囲に適用可能な多点フレキシブルマイクロ LED シートは，光によって時空間的に自在に複雑な脳活動の制御を実現するものである。別途開発を進める皮質脳波計測デバイスと組み合わせることで，因果関係に裏打ちされた脳活動と行動や疾患との包括的理解を目指す，新しい脳科学研究の発展に大きく寄与すると期待される。

〔発表論文〕

1. H. Sekiguchi, H. Matsuhira, R. Kanda, S. Tada, T. Kitade, M. Tsutsumi, A. Nishikawa, A. Loesing, I. Fukunaga, S. Setogawa and N. Ohkawa, “Adhesionable flexible GaN-based microLED array film to brain surface for in vivo optogenetic stimulation”, Appl. Phys. Express, 15, 046501 (2022).
2. S. Setogawa, R. Kanda, S. Tada, Y. Saitoh, M. Ishikawa, S. Nakada, F. Seki, K. Hikishima, H. Matsumoto, K. Mizuzeki, O. Fukayama, M. Osanai, H. Sekiguchi, N. Ohkawa, “A novel micro-ECoG recording method for recording multisensory neural activity from the parietal to temporal cortices in mice”, bioRxiv (2022).

【助成 39－44】

神経サーキット特異的光操作による精神疾患への新たなアプローチ

代表研究者　福島県立医科大学　医学部　システム神経科学講座　　助教　　中園智晶

〔研究の概要〕

光刺激を用いて神経細胞の活動を操作する光遺伝学（オプトジェネティクス）は、時間分解能の高さという工学的利点と、特定の細胞のみを制御しうる遺伝学的利点を併せ持ち、脳内の神経ネットワークレベルの活動を制御しうる技術である。この技術を用いて精神疾患の新しい治療の可能性を探る試みが国外では既に始まっており、統合失調症に対しても有効なアプローチだと考えられる。本研究では、オプトジェネティクスを用いることによって、特定の神経回路のみを狙って操作することにより精神疾患の行動異常（社会行動の低下など）が再現できるかどうか試み、神経ネットワーク活動異常と精神疾患との間に存在している因果関係を明らかにすることを目指した。

〔研究経過および成果〕

本研究ではまず「統合失調症・陰性症状に関連するとされる神経サーキットを光刺激することで、陰性症状において見られる行動異常が誘発されるか」について予備実験を実施し（実験 1）、その結果を受けて「陰性症状を引き起こすとされる薬物・フェンサイクリジンは前頭皮質神経細胞タイプごとにどのような影響を及ぼすか」について検討を行った（実験 2）。

［実験 1］　陰性症状を引き起こすとされる薬物・フェンサイクリジンの投与は、まず腹側海馬の錐体細胞の異常活動を引き起こし、その活動がさらに前頭皮質神経細胞の異常活動を誘発するが、この神経サーキット活動の異常が陰性症状の原因の一つではないかと考えられている（Jodo et al., 2005）。

この仮説に基づき、まずはラット前頭皮質の錐体細胞にチャネルロドプシン 2(ChR2)をウイルスベクターの両側への注入によって発現させ、脳内に刺入した光ファイバーによって青色光で継続的に刺激した。この手続きにおいてはフェンサイクリジン慢性投与による統合失調症モデルラット作成の手順を参考に、5 msec の光刺激を 10Hz のリズムで、自由行動下のラットに対して光ファイバーを通して一時間/日のように呈示した。刺激は 15 日間にわたって実施した。

行動への影響の指標として、オープンフィールドにおいて新奇個体へのアプローチの頻度を指標とする社会性テストを刺激の前後で実施し、比較した。社会性テストは新奇個体をケージに拘束した条件と実験個体・新奇個体をともに自由行動下で接触させた 2 条件で検討した。

予備実験として 2 個体を使用し、一頭（実験個体）には ChR2 および GFP を発現するウイルスベクターを、もう一頭（コントロール個体）には ChR2 は発現せず GFP のみを発現するウイルスベクターを注入した。この手続は二重盲検法にて実施した。

結果として実験個体では自由行動下での社会性テストの値（新奇個体にアプローチした時間）は刺激前の 265.37%と増加し、拘束条件での値は 95.54%とほぼ

変化がなかった。一方でコントロール個体では自由行動下の値は 70.91%と減少を示し、拘束条件では158.42%と増加した。

社会性テストは個体差が大きく、今回の 1 ペアのみで結論を導くことはできない。しかしながら前頭皮質の錐体細胞をターゲットとして刺激した場合は統合失調症の陽性症状ないし多動症のような傾向を示す可能性が示唆された。これは前頭皮質の神経細胞の中でも腹側海馬との特定のサーキットを形成しているものが陰性症状の発症に寄与している可能性を示唆する。

[実験 2]　実験 1 から、前頭皮質の錐体細胞を無作為に刺激するだけでは陰性症状に似た行動異常を引き起こすフェンサイクリジンの作用を再現できないことが示唆された。当初の仮説のように腹側海馬-前頭皮質サーキットを特異的に刺激することが重要であると考えられるが、まずフェンサイクリジンが前頭皮質内のサーキットにどのような影響を及ぼしているのか再検討する必要があると考えられた。フェンサイクリジンが前頭皮質神経細胞に及ぼす影響を検討した先行研究では単一細胞記録法を用いていたためネットワークとしてのダイナミクスを検討できなかった。そのため今回は、同時に大量の神経細胞の活動を記録できる多細胞同時記録法を用い検討した。発火パターンによって神経細胞のタイプを識別できると考えられるが（Trainito et al., 2019）、今回はより正確な識別を目指して錐体細胞のみを対象として ChR2 を発現させ、光応答を示した細胞を錐体細胞とみなすオプトタグ法（Kvitsiani et al., 2013）を用いた。

本実験はラット 8 頭を用いて実施中である。解析に十分なデータを記録した後に、先行研究（Trainito et al., 2019）に従い、発火パターンの Trough-to-peak 期間および再分極時間をパラメータとしてガウス混合モデルによるクラスタリングを行う。その結果とオプトタグ法による識別のデータを組み合わせることで、より正確に細胞タイプを同定しながらフェンサイクリジンの影響を検討しうると考えられる。予備データを図 1 に示す。この神経細胞は光応答を示すことから錐体細胞と考えられるが（図 1B）、フェンサイクリジンの投与に対して発火率の上昇を示さなかった（図 1C）。この結果は前頭皮質の錐体細胞への影響が一様でないことを示唆し、このような感受性の多様さが実験 1 で見られたような仮説と異なる結果の原因とも考えられる。今後は錐体細胞だけでなく抑制性神経細胞のタイプも考察しながらフェンサイクリジンの影響を明らかにし、実験 1 の刺激実験にて再度仮説を検証してゆく。

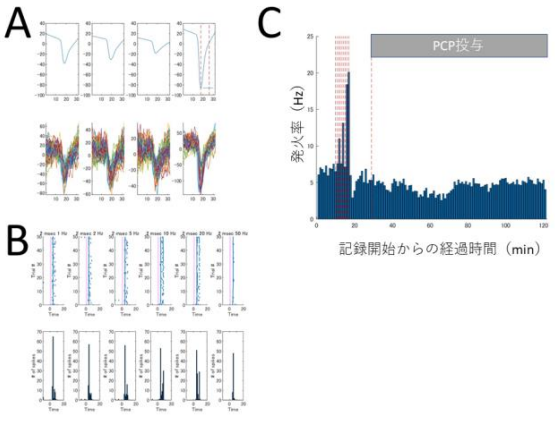


図 1. 光応答を示した前頭皮質錐体細胞の発火パターン。A: 多点電極から記録された神経細胞の波形。B: 光刺激に対する応答のラスタープロットとヒストグラム。C: 麻酔下においてフェンサイクリジンを投与した際の発火率の変化。

【助成 39－45】

収束超音波のニューロモデュレーション効果の作用機序の解明とこれを用いた神経ネットワーク活動の制御

代表研究者　杏林大学 医学部 講師　　三嶋竜弥

〔研究の概要〕

低強度の収束超音波（focused ultrasound: FUS）が非侵襲的に神経機能を亢進あるいは抑制する効果（ニューロモデュレーション効果）を示すことが報告された。FUS で経頭蓋的に特定の脳領域を刺激すると、運動機能や知覚機能に影響を及ぼす他に、細胞間隙に存在する GABA やドパミンの濃度を可塑的に調整する作用が観察されている。しかし、FUS 刺激による機械的・熱的作用がどのような分子機序により神経機能に作用しているのかは不明である。FUS によるニューロモデュレーション効果を難治性神経疾患の治療に応用するために、本研究では超音波が神経の興奮性やシナプス伝達機能に及ぼす作用を解明することを目的とする。そこで、超音波刺激に対する初代培養神経細胞の電気的応答を顕微鏡下で解析する実験系を構築し、超音波がシナプス伝達機能に及ぼす影響を解析した。

〔研究経過および成果〕

1.　生体脳組織に似た動的粘弾性を持つコラーゲンゲルの作製

生体脳組織に吸収された超音波は機械的・熱的作用を及ぼす。その受容には神経細胞膜上の機械受容イオンチャネルや熱感受性イオンチャネル等が関与していると考えられる。通常、神経細胞はプラスチックやガラス等の硬い素材上で培養するが、脳組織の変形により生じる機械刺激の受容を解析には生体脳組織の物理特性を考慮する必要がある。そこで、細胞外マトリックスの主成分であるコラーゲンと架橋剤の濃度を調整して種々の硬さのコラーゲンハイドロゲルを作製し、動的粘弾性を計測した。コラーゲンは I 型コラーゲン、末端のテロペプチドを除去したアテロコラーゲンを 3.0–4.5 mg/ml の濃度で使用し、コラーゲン繊維の架橋剤として細胞毒性の低い genipin を 0.25–1.00 mM で用いた。作製したコラーゲンハイドロゲルの弾性貯蔵係数（G'）と粘性損失係数（G''）をレオメーター（ONRH-1、Ohnatech）を用いて計測した（図 1）。脳組織の機械的特性は、ヤング率では

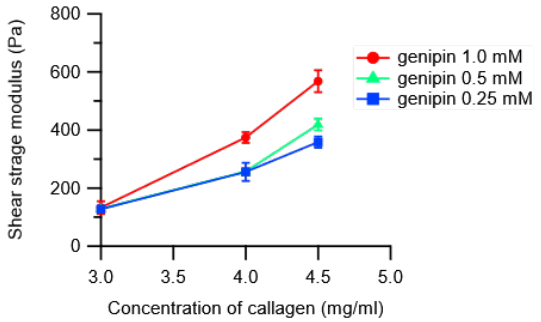


図 1　コラーゲン濃度と弾性貯蔵係数との関係

500–1500 Pa 程度、レオメーターによる計測では 100–350 Pa 程度の弾性貯蔵係数を示すことが報告されている。

2.　超音波トランスデューサーの性能解析

先行研究では、経頭蓋脳刺激には頭蓋骨の透過性と刺激領域のサイズとの兼ね合いから 500kHz 付近の超音波周波数が用いられている。しかし、この範

囲の周波数用のトランスデューサーの外形は 20～30 mmと大きく、また焦点距離も長いためコリメーターの使用が必要となる。さらに、ガラス電極を用いるホールセル記録時には、振動によりギガオームシールの安定性を著しく損なうことがと報告されている。これらの欠点を踏まえ、本研究では小型（外形 2mm）でより高い周波数（5～10MHz）の超音波トランスデューサーを用いることとした。ハイドロホンを用い、トランスデューサーの駆動電圧、周波数を変えて水中超音波の受信電圧を測定すると共に、ハイドロホンを移動させ上下 5mm、左右 5mm、距離 6mm～12mm の範囲にわたって音圧の空間分布を求めた。入力周波数 10MHz、入力電圧 40V 時の最大音圧は約 100kPa であった。トランスデューサーとの距離が 6mm の時、半径 0.5mm 程度の円状に音圧の高い狭いエリアを示すことが判った（図 2）。

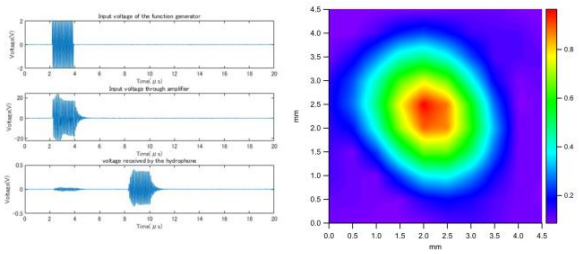


図 2　超音波トランスデューサーの音圧分布

3.　シナプス伝達機能に対する超音波刺激の解析

カバーグラス上に弾性貯蔵係数 100-200 Pa のコラーゲンハイドロゲル層を作製した。ハイドロゲル上にグリア細胞を播種し10日間程度培養してシート状のフィーダー層を形成させた。フィーダー上で新生仔マウスから採取した海馬神経細胞の分散培養を行い、培養 14-21 日に実験を行った。カバーグラスをチャンバーに移動し、音圧の高いエリアに培養神経細胞が位置するようにセットした。分散培養した神経細胞からホールセル記録を行っている間に超音波刺激を加えてもギガオームシールが維持されるかを確認した。その結果、5～10MHz の超音波周波数では、アンプからの出力電圧が 80V（約 150kPa）程度まででであれば、刺激後も安定してギガオームシールを維持したままで記録が可能なことが判った。そこで、超音波刺激がシナプス伝達機能に及ぼす影響を明らかにするために、分散培養した神経細胞の間に形成されたシナプスに生じる自発性微小シナプス後電流を計測し、刺激前後で自発性微小シナプス後電流の発生頻度に変化が生じるかを解析した。

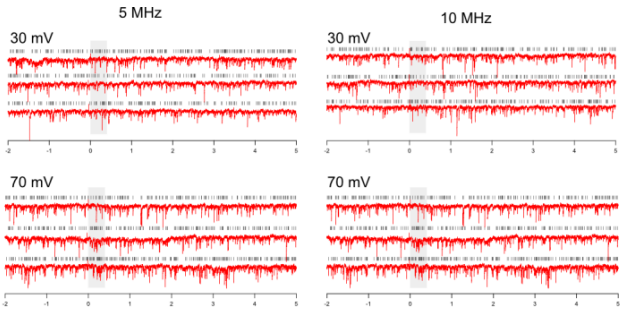


図 3 自発性微小シナプス電流に対する超音波刺激の影響

潅流液にテトロドトキシン（1 μM)、CNQX（10 μM)、D-AP5（50 μM)を加え、抑制性の自発性微小シナプス後電流を記録した。記録している神経細胞を含む領域に 5MHz もしくは 10MHz の超音波刺激を 400 ミリ秒間の連続波として種々の強度で加え、抑制性の自発性微小シナプス後電流の発生頻度を解析した。その結果、自発性の抑制性伝達物質放出頻度の超音波刺激による影響は見られなかった（図 3）。

本研究では、神経細胞の種々の情報伝達機能の中でも自発性のシナプス小胞放出機構に対する超音波刺激の影響を解析した。引き続きシナプス伝達機能、神経ネットワーク活動に対する効果を明らかにしていきたい。

【助成 39－47】

行動・ドーパミン・神経活動の同時計測による注意欠陥多動性障害の予測アルゴリズムの創出

代表研究者　金沢医科大学　医学部　助教　　古山　貴文

共同研究者　　准教授　　山本　亮

〔研究の概要〕

注意欠陥多動性障害(ADHD)とは不注意、多動、衝動性の行動がある神経発達性精神障害であり、小児の 5～8%が罹患する。現在の ADHD 診断には、問診や知的水準を計測する心理検査が中心である。そのため、子供の時に診察機会に巡り合えず、成人後に ADHD と診断されるケースも増加しており、ADHD を簡易計測にて早期診断できる機器の開発は重要である。本研究の目的は、ADHD モデル動物を対象に、前頭前皮質の神経動態を解明し、ADHD 簡易診断用の予測アルゴリズムを創出することである。ADHD のモデル動物作成および蛍光バイオセンサを用いて、行動中の被験体を対象にドーパミンおよび神経活動を同時計測する実験環境の構築を行った。その結果、多動性が生じるモデル動物の作製、ドーパミンおよび神経活動の同時計測に成功した。今後は、これらを組み合わせ、ADHD 症状時の前頭前皮質のドーパミンおよび神経活動を計測し、予測アルゴリズムの創出を目指していく。

〔研究経過および成果〕

ADHD の原因究明を目指した研究では、ADHD 患者の脳構造や脳活動を計測した研究が多い。また、ADHD 患者には、メチルフェニデートという精神刺激薬が処方され、この薬の服用により、前頭前皮質のドーパミン濃度が上昇することがわかっている(Fona and Nutt, 2005)。しかし、計測機器の分解能や環境の制限などにより、①前頭前皮質のドーパミン濃度が上昇することにより、行動と神経活動がどのように変化するのか？、さらに②その神経活動変化により、なぜ症状が改善するのかについては、未だに不明なままである。

報告者のこれまでの研究で、ファイバーフォトメトリー法を用いて、報酬と恐怖条件付け時のドーパミンの役割を明らかにするために研究を進めてきた。本研究では、ADHD モデルマウスを対象に、行動・ドーパミン濃度・神経活動を同時計測する実験手法を適応し、ADHD の神経動態を明らかにすることを目的とした。

実験 1 ADHD モデルマウスの作製と行動評価

生後 5 日目の幼獣 C57BL/6J マウスを被験体として用いた。幼獣に、セロトニンおよびノルアドレナリン再取り込み阻害剤薬のデシプラミン塩酸塩(20mg/kg)を皮下注射した。30 分後に、被験体を氷の上に1分間置き、麻酔をかけた。頭部固定後、側脳室に 30μg / 3μl の 6-OHDA(PBS で溶解)を注入した(図 1)。6-OHDA 注入後、37 度のホットプレート上に乗せ、覚醒後、母親のもとに戻した。各被験体は、22-24℃の部

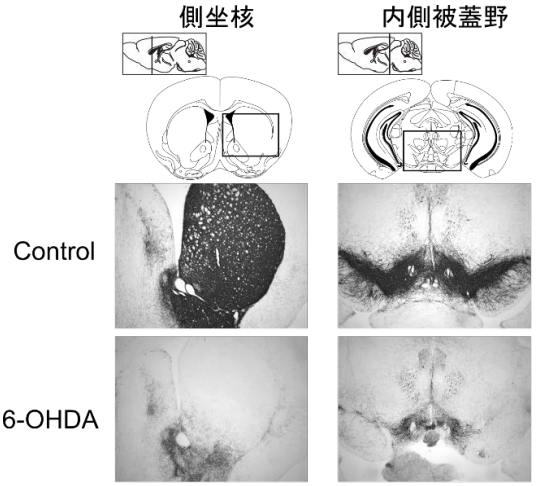


図1 脳室に6-OHDAを入れた個体とコントロール個体のチロシンヒドロキシラーゼ(TH)染色。

屋で飼育され、12 時間の光管理(Light on: 7:00、Light off: 19:00)、水および食べ物については自由に摂取可能であった。生後 24 日目に、円形のオープンフィールド(直径:1m、高さ:45cm)テストを 10 分間行い、行動量を測定した。その結果、Control 個体と比べて、6-OHDA 個体では、行動量が増加した(図 2)。そのため、ADHD モデル動物の作成に成功した。

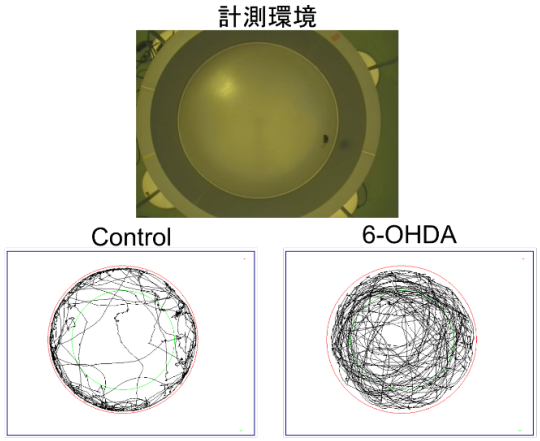


図2 Control個体と6-OHDA注入個体の行動量の違い。
オープンフィールドで各個体の行動量を計測した結果、
Control個体は円の縁を探索している野に対し、6-OHDA
個体では、円の縁や円の中心を回るような行動が観測された。

実験 2 前頭前皮質のドーパミン濃度・神経活動の同時計測

実験 2 では、3 か月齢の C57BL/6J マウスを用いた。被験体をイソフルランで麻酔(導入:3%、維持:1%)し、頭部固定装置に固定した。表面麻酔後、頭蓋骨上部の皮膚を切開し、頭蓋骨を露出させた。前頭前皮質(Bregma から AP:+1.8 mm、ML:−0.9 mm、DL:−2.2 mm、角度 20°)の部分にドリルで頭蓋骨に穴をあけた。この被験体に対して、アデノ随伴ウイルス(AAV)を用いて、AAV9-CAG-d-Light (ドーパミンセンサ、緑)と AAV9-hsyn-jRGECO(カルシウムセンサ、赤)をそれぞれ 100nl 注入した。注入部位上部 200 μm に、光ファイバーの先端が来るようにカニューレを挿入し、頭部固定用プレートとともにデンタルセメントで固定した。

2 週間の回復期間後、行動実験を行った。音刺激として、8 kHz のトーンバースト音を使用した。嫌悪刺激として 5s の Air puff を使用し、被験体の左目に Air puff が当たるように設置した。音刺激を 5s 間提示後、Air puff を提示した。ドーパミン濃度と神経活動の計測には、励起光 470 nm と 560 nm を使用し、蛍光 520 nm (緑)と 610 nm (赤)を計測した。d-Light は緑色、jRGECO は赤色の蛍光を発するため、ドーパミンと神経活動をそれぞれ独立に計測可能となる。その結果、前頭前皮質において、音の提示では、d-Light および jRGECO では傾向に変化は観測されなかった。一方、嫌悪刺激提示に対して、d-Light の蛍光変化量は変化せず、jRGECO の蛍光は上昇した。一方、嫌悪刺激終了後は、jRGEGO の蛍光が減少し、d-Light の蛍光が上昇した。

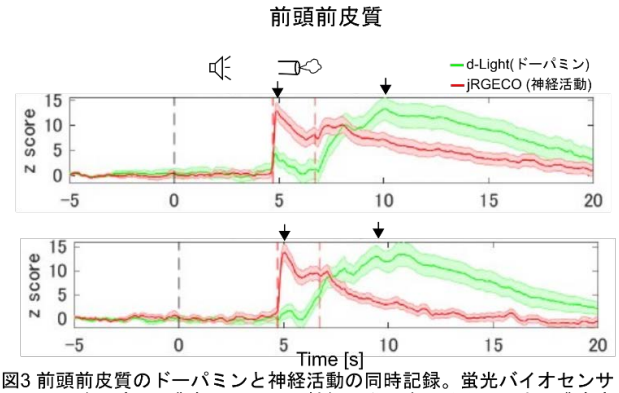


図3 前頭前皮質のドーパミンと神経活動の同時記録。蛍光バイオセンサ(d-Light:ドーパミン濃度、jRGECO:神経活動で生じるカルシウム濃度変化)により、行動中の被験体からドーパミンと神経活動の記録に成功した。

これらの結果から、前頭前皮質において、ドーパミンと神経活動の同時計測に成功したと考えられる。さらに、前頭前皮質において、神経活動およびドーパミンは恐怖音の予測として反応せず、嫌悪刺激に対して反応することが明らかになった。また、神経活動が生じた後にドーパミン濃度の上昇が確認されたため、嫌悪刺激に抵抗するために、ドーパミンを放出している可能性が示唆された。

〔発表論文〕

なし

【助成 39－48】

中枢および自律神経系情報に基づく
複合型ニューロフィードバックによる注意機能訓練系の開発

代表研究者　成蹊大学理工学部　准教授　　櫻田　武

〔研究の概要〕

本研究では、ヒトの注意機能向上を目的とした、ニューロフィードバックによる訓練システムの開発を目指した。特に、訓練効果を高めるための手段として、中枢神経系における脳活動に加え、心理状態を反映する自律神経系における心拍変動も解析対象とした、複合型のシステム構築を試みた。具体的には、訓練中の注意状態を推定するための生体信号として、定常状態感覚誘発電位と呼ばれる律動的脳波に着目した。一方、心理状態（訓練中のストレス状態）を推定するための生体信号として、心拍変動に着目した。以上の生体信号をリアルタイムに解析するニューロフィードバック訓練システムを構築し、その訓練効果の実証を進める。

〔研究経過および成果〕

「注意」とは、神経系に入力される様々な感覚情報（視覚や体性感覚などの五感情報）を取捨選択し、その時の状況に応じて一部の情報を優先的に処理するフィルターの役割を担う認知機能を指す。このような注意機能は、健常者が日常生活において適切な行動を取るために役立つだけではなく、リハビリテーション効果を左右する重要な機能であることも知られている。このような注意機能を訓練するための神経科学的手法として、ニューロフィードバックと呼ばれる技術があるが、この技術を利用した訓練においては、その効果に個人差が大きいことが指摘されている。本研究では、このようなニューロフィードバック訓練効果差を克服するための手段として、訓練中における心理状態（ストレス状態）がモニターできる複合型ニューロフィードバック訓練システムの構築を試みた。

開発した複合型ニューロフィードバック訓練系において、訓練者の注意状態は定常状態体性感覚誘発電位あるいは定常状態視覚誘発電位と呼ばれる脳波を利用した。これらの脳波は感覚刺激が提示された際に、低次感覚野で観察される脳波であり、感覚刺激に注意を向けると応答が強くなる特性を持つ。本システムでは、このような該当脳波の応答強度の変化をリアルタイムにモニターすることで、訓練者の注意状態を推定する処理系を実装した。

一方、ストレス状態の推定には、心電図から観測されるR波と呼ばれる信号の間隔変動に着目した。検出したR波間隔に対し、トーン・エントロピー解析を適用することで、ストレス状態を定量化した。予備検討結果から、1 分程度のR波間隔データからストレス状態が推定できることを示唆する結果を得ている。この結果は、5 分程度のデータ長を必要とする従来研究よりもリアルタイム性に優れる結果であり、ニューロフィードバック訓練系に組み込むことが可能であるものと言える。今後、構築した系に基づき、注意機能の向上が認められるかについて実証を進めていく。

〔発表論文〕

未定

【助成 39－50】

「心の目」の欠如：国内における新奇事例「アファンタジア（aphantasia）」の提唱

代表研究者　福島大学人間発達文化学類　准教授　　髙橋純一

〔研究の概要〕

アファンタジア（aphantasia）とは，実際の知覚は機能しているもののイメージ形成が難しい状態である。アファンタジアの同定方法は確立されておらず，出現率やイメージ特性も十分には検討されていない。本研究ではウェブを用いた大規模調査を行うことで，アファンタジアの出現率とイメージ特性（多感覚イメージ）の検討を行った。その結果，アファンタジアの出現率は 3.9%（視覚イメージ鮮明性の基準）および 12.2%（自己報告法の基準）であった。また，多感覚イメージについては，アファンタジア群（VVIQ ≤ 32）において全ての感覚モダリティのイメージ形成が難しい当事者，特異的に視覚イメージの形成が難しい当事者など様々なタイプの存在が明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

本研究は，大規模調査によりアファンタジアの出現率の推定およびイメージ特性（多感覚イメージ）について検討することを目的とした。

方 法

調査参加者　1,050 名の回答を収集し，不備のある回答と重複回答を除いた 1,032 名を分析対象者とした（男性 545 名，女性 478 名，無回答 9 名；平均年齢 = 40.6 歳，*SD* = 10.5）。本研究の実施は，福島大学研究倫理委員会の審査を完了した（2021-01）。

質問項目　①回答者の属性（性別，年齢，最終学歴，職業），②イメージ鮮明性（QMI [Questionnaire upon Mental Imagery]: Betts, 1909），③視覚イメージ鮮明性（VVIQ [Vividness of Visual Imagery Questionnaire]: Marks, 1973），④認知スタイル（VVQ [Verbalizer-Visualizer Questionnaire]: Richardson, 1977），⑤自己報告（家具や顔の視覚イメージの想起の可否）について尋ねた。⑤について「あまりイメージできない」あるいは「イメージできない」と回答した場合は，さらに 19 項目の自由記述への回答を求めた（Zeman et al. [2015] を参照して作成した）。

手続き　調査会社を通して，オンライン・サンプリングにより 5 回に分けて実施した。

結果と考察

アファンタジアの出現率　収集したデータから，VVIQ によるアファンタジアの出現率を算出した。VVIQ の基準（VVIQ ≤ 32: Dance et al., 2022; Zeman et al., 2015）を用いて出現率を算出したところ，3.9%（40 名）であった。先行研究でも 3.9% と報告がある（Dance et al., 2022）ことから，本研究の VVIQ を用いた出現率は Dance et al.（2022）を再現したと考える。

次に，自己報告法によるアファンタジアの出現率を算出した。「あまりイメージできない」あるいは「イメージできない」と回答した割合を算出したところ，12.2%（126 名）であった。自己報告法を用いたアファンタジアの出現率については，過去に報告がない。アファンタジア研究の文脈ではないが Faw（2009）が類似した調査を行っており，イメージ想起が難しい割合は 10-11% であった。本研究の自己報告法を用いた出現率は Faw（2009）の結果と類似したものと言える。

アファンタジアのイメージ特性（多感覚イメージ） 感覚モダリティの観点からアファンタジアのイメージ特性を検討するため，VVIQ の基準（VVIQ ≤ 32: Dance et al., 2022; Zeman et al., 2015）に該当する者をアファンタジア群と定義し，QMI の下位因子（視覚，聴覚，触覚，体性感覚，味覚，嗅覚，内臓感覚）の評定平均点から z 得点を算出した上でクラスター分析（ward 法）を行った。その結果，3 つのクラスターを抽出した（それぞれクラスター 1, 2, 3 とする）。それぞれの因子においてクラスターを参加者間要因とした一要因分散分析を行うことで，各クラスターの特徴を検討した。その結果，全ての因子においてクラスターの主効果が見られ（$6.04 < F < 42.26$, $p < .001$），多重比較から，聴覚ではクラスター 1 = 2 < 3 の順に z 得点が高くなったが，その他の感覚ではクラスター 2 < 1 < 3 の順に z 得点が高くなった（$2.04 < t < 8.73$, $p < .05$）。以上から，全ての感覚モダリティについてクラスター 1 と 2 は 3 よりもイメージの想起が難しいこと，さらにほとんどの感覚モダリティでクラスター 2 の方が 1 よりもイメージ想起が難しいが，聴覚については両者で違いが見られないことがわかった。

まとめ

本研究では，VVIQ と自己報告法を用いたアファンタジアの出現率の推定，および多感覚イメージにおけるイメージ特性の検討を行った。出現率については，VVIQ による出現率（3.9%: Dance et al., 2022）および自己報告法による出現率（10–11%: Faw, 2009）と類似した結果であった。またイメージ特性については，アファンタジア群（VVIQ ≤ 32）において，全ての感覚モダリティでイメージ形成が難しい者，特異的に視覚イメージのみイメージ形成が難しい者が存在した。

本研究の結果から，VVIQ だけでなく自己報告法や多感覚イメージを考慮することで，アファンタジアを定義する基準やサブタイプの理解につながると言える。今後は，様々な尺度を用いることで，アファンタジアの定義についてより精度を高める必要がある。そのうえで，アファンタジアの存在について，社会における理解促進が期待される。

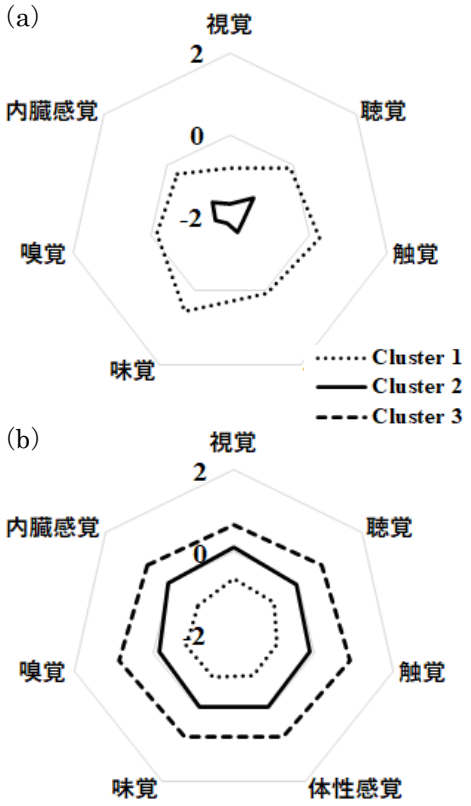


図 1 感覚モダリティどうしの関連．(a)はアファンタジア群（VVIQ ≤ 32），(b)は統制群のプロフィールを示す．

〔発表論文〕

1. Takahashi, J., Saito, G., Omura, K., Yasunaga, D., Sugimura, S., Sakamoto, S., Horikawa, T., and Gyoba, J. (2022). Diversity of aphantasia revealed by multiple assessments of the capability for multi-sensory imagery. *PsyArXiv*. https://doi.org/10.31234/osf.io/pucsm

【助成 39－51】

青少年の非認知能力の向上に有効な体育授業時の教師行動の特徴

代表研究者　群馬大学共同教育学部 講師　島 孟留

〔研究の概要〕

本研究では、中学校で実際に行われている授業（ダンス、器械運動）を通じた中学1年生の非認知能力（共感性や自己効力感）の変容に関わる教師からの言葉かけを解析した。結果、教師から生徒個人への【肯定的で一般的な内容の言葉かけ（いいね、上手など）】や【矯正的で一般的な内容の言葉かけ（伸ばそう、曲げようなど）】、【励まし】の回数が、生徒の共感性もしくは自己効力感の向上と正の関係を示した。一般的な内容の言葉かけでも生徒らの非認知能力の向上に有効ならば、専門種目外の単元を教える教師らの支えとなるかもしれない。

〔研究経過および成果〕

教育現場が抱える問題として、いじめや運動嫌いなどがある（文部科学省、2022；スポーツ庁、2022）。これらは非認知能力のうち「共感性」や「自己効力感」と関連しうるため、共感性や自己効力感を養うような指導法が現場に必要とされる。運動・スポーツ活動は、共感性や自己効力感の向上に寄与することから、学校教育における体育・保健体育授業の効果が注目されるが、どのような要因が共感性や自己効力感を高めるのか詳細に迫った研究はない。「授業中、先生に個別にコツやポイントを教えてもらった」ことが、子どもたちの意識や行動の変化に貢献することから（スポーツ庁、2022）、本研究では、子どもら個人への言葉かけが生じやすい器械運動単元やダンス単元を対象として、共感性や自己効力感を高める教師の言葉かけ行動を探索した。なお本研究は、「群馬大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会」の承認を得て実施された（No. HS2021-191）。

1、共感性の向上に寄与する言葉かけ

群馬県内の A 中学校 1 年生 2 クラス（男子 38 名、女子 30 名）の「マット運動（計 8 時間）」を対象とした。担当教員は、中学校保健体育の教員免許を有する教員歴 2 年目の若手女性教員（専門種目：バスケットボール）であった。3 回以上の欠席か見学、もしくはアンケートの回答に不備のあった 8 名を排除し、60 名（男子 35 名、女子 25 名）のデータを解析対象とした。授業担当教員に携帯させたワイヤレスマイクを通じて、授業中の教師から生徒への言葉かけを記録するとともに、教師の行動をビデオカメラで記録した。その後、教師の言葉かけを、全員を対象とするものを「全体」、3~4 人でのグループを対象とするものを「グループ」、一人を対象とするものを「個人」として 3 種類に分類した。加えて、賞賛などの言動を「肯定的」、矯正的・修正的な言動を「矯正的」、否定的な言動を「否定的」として、言葉かけの内容を 3 種類に分類、さらに、具体的な内容を伴っていない場合を「一般的」、伴っている場合を「具体的」として分類して、その回数を記録した。連続して複数の言葉かけがあった場合には、文脈的に同義であれば 1 回の言葉かけ、意味や言葉かけの対象が変わった場合は複数の言葉かけとして分類した。個人への言葉かけについては、教師が発した個人名、もしくは生徒に着用させたビブス番号によ

って、教師から言葉をかけられた生徒を同定した。単元の前後で、生徒に日本語版 Questionnaire of Cognitive and Affective Empathy を回答させ、認知的共感と情動的共感を評価した。

結果、マット運動単元を通じて、認知的共感が男子で有意に高まり、女子で有意に低下した(図 1)。一方で、情動的共感に変化はなかった(図 1)。

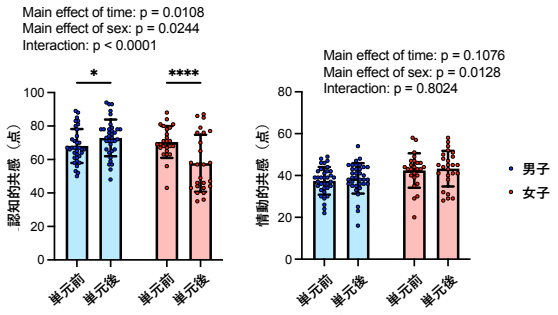


図 1　マット運動単元を通じた共感性の変化
数値は平均値±標準誤差。* p < 0.05, **** p < 0.0001.

共感性の変化率と個人への言葉かけとの関係をみると(表 1)、男子では有意な相関関係がみられなかったものの、女子では教師からの「励まし」回数と認知的共感の変化率に有意な正の相関がみられた($r = 0.426$, $p < 0.05$)。また、「矯正的で一般的な内容の言葉かけ」を受けた回数と情動的共感の変化率に有意な正の相関が、女子でみられた($r = 0.437$, $p < 0.05$)。加えて女子では、「発問」を受けた回数と情動的共感の変化率に有意な負の相関が、女子でみられた($r = -0.465$, $p < 0.05$)。

表 1　言葉かけを受けた回数と共感性の変化率の関係

		個人							
		肯定的		矯正的		否定的		励まし	発問
		一般的	具体的	一般的	具体的	一般的	具体的		
男子	共感性								
	認知的共感	-0.157	0.045	0.060	0.053	-	0.241	0.053	-0.197
	情動的共感	0.088	0.044	0.116	0.066	-	0.063	0.169	-0.112
女子	共感性								
	認知的共感	0.252	0.211	0.091	0.160	-	-	0.426*	-0.305
	情動的共感	0.098	0.092	0.437*	-0.090	-	-	0.094	-0.465*

数値は相関係数を示す。* p < 0.05.

2、自己効力感の向上に寄与する言葉かけ

群馬県内の A 中学校 1 年生 2 クラス(男子 32 名、女子 35 名)の「現代的リズムの授業(計 6 時間)」を対象とした。担当教員は、中学校保健体育の教員免許を有する教員歴 1 年目の若手女性教員(専門種目:陸上競技)であった。前述と同様の理由で 4 名を排除し、63 名(男子 32 名、女子 31 名)のデータを解析対象とした。言葉かけの記録は上記と同様に行った。単元の前後で、生徒に日本語版特性的自己効力感尺度を回答させ、自己効力感を評価した。

結果、生徒の自己効力感はダンス単元前より単元後で有意に低かった(図 2:$F_{(1, 61)} = 6.168$, $p = 0.0158$)。

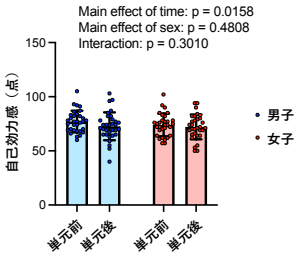


図 2　ダンス運動単元を通じた自己効力感の変化
数値は平均値±標準誤差。

自己効力感の変化率と個人への言葉かけとの関係をみると(表 2)、男子では有意な相関関係がみられなかったものの、女子では教師から「肯定的で一般的な内容の言葉かけ」や「矯正的で一般的な内容の言葉かけ」を受けた回数と自己効力感の変化率に有意な正の相関がみられた(肯定的:$r = 0.599$, $p < 0.001$; 矯正的:$r = 0.546$, $p < 0.01$)。

表 2　言葉かけを受けた回数と自己効力感の変化率の関係

		個人					
		肯定的		矯正的		否定的	
		一般的	具体的	一般的	具体的	一般的	具体的
男子	自己効力感	0.273	-0.150	0.161	0.190	0.139	0.106
女子	自己効力感	0.599***	0.106	0.546**	-	0.036	0.053

数値は相関係数を示す。** p < 0.01, *** p < 0.001.

今後、専門種目の異なる教員間でも、本研究と同様の結果が得られるかどうか、また、教員と生徒の性別の組み合わせによる影響などの検討を通じて、最適な教師行動の提言につなげる。

〔発表論文〕

1. 島孟留、齋藤梨花子:中学生の自己効力感の変容に寄与する体育授業時の教師の言葉かけ. 群馬大学教育実践研究、第 40 号、2023.

【助成 39－52】

高性能インターネット望遠鏡の制作と高校生を対象とした新しい遠隔授業の開発

代表研究者　東京学芸大学　教育学部　教授　土橋一仁
共同研究者　東京学芸大学　教育学部　講師　西浦慎悟

〔研究の概要〕

本研究では、東京学芸大学に設置された口径 40cm の本格的な光学望遠鏡の整備・開発を進め、これをインターネットに接続して高等学校の教室からの遠隔天体観測を行った。遠隔観測に参加した高校生の大多数はリアルタイムでの天体観測に熱中し、高い学習意欲を示した。これは、遠隔授業のツールとしてのインターネット望遠鏡の高いポテンシャルを物語っており、将来的には実験・観察が不可欠な理科授業における有効な観察方法の一つになることが期待される。

〔研究経過および成果〕

１．遠隔授業とインターネット望遠鏡

新型コロナウイルスの世界的な感染拡大により、小学校から大学までの多くの学校が遠隔授業を余儀なくされた。座学で済ませることのできる科目については、通信環境さえ整えば授業を全て遠隔で行うことは可能だが、実験・観察を伴う理科の授業には困難が多い。ウイルス感染拡大が深刻化した 2020 年３月、東京学芸大学に口径 40cm の光学望遠鏡（図１、以後、40cm 鏡）が設置された。これを整備してインターネットに接続すれば、理科授業のための天体観測を遠隔で行えるようになる、との着想を得て、本研究をスタートした。

２．40cm 鏡の開発と整備

40cm 鏡は、東京学芸大学の中期計画の一環として古い望遠鏡を置き換える形で導入した教育用の望遠鏡である。フォーク式赤道儀にカグセレンの鏡筒を取り付けた構造をしており、PC で制御することが可能である。導入当初から標準測光システムに準拠した４色の光学フィルター（BVRI）と高感度冷却 CCD カメラを搭載し、天文学の専門的な測光観測も行える（土橋ほか 2022）。

導入以来､我々は 40cm 鏡本体や周辺機器の開発･整備に取り組んできた。40cm 鏡は直径６m の古い天文ドームに納められている。築 40 年以上のこの



図１　（上）40cm 鏡と（下）６m ドーム

ドームには、回転させるためのモーターこそ付いているものの、制御は全手動式である。さらに、起動・停止時に強烈な電磁波ノイズを発生させて望遠鏡と制御用 PC の通信を阻害する等、本研究の開始当初は多くの問題を抱えていた。カシオ科学振興財団等からの経済的な援助を得て、モーターの電源に電磁波ノイズ低減のためのインバーターを設置した。さらに、回転角を検出・制御するためのエンコーダーも取り付け、40cm 鏡と連動して回転するよう開発を進めた（富田ほか 2022)。また、40cm 鏡の制御用 PC をインターネットに接続し、インターネット越しに遠隔操作できるようにした。さらに、データ処理用のソフトウェア開発や CCD カメラの性能評価も進め（鈴木ほか 2022)、2022 年春頃までに遠隔観測を実施する準備を整えた。

３.遠隔観測とその教育効果

整備した 40cm 鏡を利用して、研究期間中に高等学校からの遠隔観測を二度試みた。一度目は 2022 年６月に桐朋高等学校（東京）で、二度目は９月に春日部高等学校（埼玉）で行った。受講を希望した高校生（各校 20 人程度）に対して、数学や物理学、情報といった他の科目との関係を交えながら 40cm 鏡の構造や性能について説明した後、東京学芸大学にある 40cm 鏡を遠隔操作して金星や木星といった天体の観察を試みた。遠隔操作で望遠鏡とドームが動き出すと、「オー！」という歓声が上がり、生徒は皆モニター画面に釘付けになった。

事後アンケートによると、桐朋高等学校からの遠隔観測は悪天候のため残念ながらほとんど出来なかったにも拘らず、大多数の生徒からは「望遠鏡の原理がよく分かった」、「遠隔操作が楽しかった」などのポジティブな感想が寄せられた。これは、遠隔授業のツールとしてインターネット望遠鏡の高いポテンシャルを物語っている。さらに、「望遠鏡と数学やプログラミングとの繋がりが理解できた」と感じた生徒も多かった。小口径ながら 40cm 鏡のような本格的な観測装置は、それ自身が STEM 教育のための有効な教材になり得るものと考えられる。今後はそのような STEM 教育も視野に入れつつ、小学校や中学校の理科授業にも遠隔観測を応用していくことを計画している。

紙面の都合で割愛するが、これらの遠隔観測の他に、本研究では星団の HR 図の作成や食変光星の光度曲線の測定などに関する天文教材の開発にも取り組んだ(下井倉ほか 2022)。

〔発表論文〕

1. 下井倉ともみ、浜田麻比呂、土橋一仁、東京学芸大学 40cm 望遠鏡による散開星団 M29 の試験観測、東京学芸大学紀要　自然科学系、 Vol.74、pp. 59-66、2022
2. 鈴木海哉、富田飛翔、西浦慎悟、土橋一仁、東京学芸大学新天体観測システムの性能評価―広帯域フィルターと冷却 CCD カメラ―、東京学芸大学紀要　自然科学系、 Vol. 74、pp.67-75、2022
3. 土橋一仁、西浦慎悟、川﨑優太、富田飛翔、東京学芸大学新 40cm 望遠鏡の特徴と基本性能、東京学芸大学紀要　自然科学系、 Vol. 74、pp.77-84、2022
4. 富田飛翔、土橋一仁、川﨑優太、西浦慎悟、東京学芸大学40cm望遠鏡の観測システムの開発、東京学芸大学紀要　自然科学系、 Vol. 74、pp.85-93、2022

【助成 39－53】

本物体験を提供するツアーガイドのトレーニング構築
～持続的な観光におけるガイドの質の向上に向けて（中間報告）

代表研究者　金沢大学融合研究域　准教授　山田　菜緒子

〔研究の概要〕

本研究の目的は、COVID-19による観光の変容を踏まえて今後の持続的な観光に必要となるガイドの技能と機能を検証し、ガイド育成の方策を検討することを目的とする。具体的には住民およびガイド参加者へのインタビューを通して観光の変容を多面的に捉え、本物体験を提供できるガイド要素を明らかにし、そのガイド要素を習得できるトレーニング体系を検討することを目指す。ツアーガイドの効果、機能、スキルを明らかにして（現状把握）、今後の観光変容に伴って必要とされるツアーガイドの効果、機能、スキルを特定して（機会分析）、トレーニング体系を検討する（将来計画）。(1)文献調査によるガイド知識・スキル・特性の同定、(2)ガイドツアー参加者へのインタビュー、(3)住民へのインタビュー、(4)ツアーガイドへのインタビュー、(5)研究者・実務家との討議、(6)トレーニング構成の検討を通して、トレーニング指針を提示する。

〔研究経過および成果〕

オーバーツーリズムを防ぎ持続的な観光にするためには、そこでの自然・文化資源を育んできた住民の長年の営みを維持しながら観光体験に組み込まなくてはならない。これには資源の意味とコミュニティの成り立ちを来訪者に伝え、それらの価値を体験してもらい、来訪者との個人的なつながりを示すことができるツアーガイドが欠かせない。

ツアーガイドの効果を高める一手法としてトレーニングがある。これまでツアーガイドの効果やトレーニングに関する研究報告例は少なく、関連した国内施策もエコツーリズム推進法（環境省，2010）に限られており、ガイドの育成体系が整備されているとは言えない状況にある。また、資源保全や本物体験においてガイドの果たす役割が十分に評価されておらず、報酬面でも施策面でも不安定で専門職として確立されていない（筆者によるインタビュー調査）。資源保全と本物体験を促進するためにはツアーガイドの効果を高める必要があり、技能の向上を図るトレーニング体系を検討しなくてはならない。

そのため、本研究は、ガイド育成の方策を検討し、トレーニングの指針を得ることを目的とする。本物体験を提供できるガイド要素を明らかにし、そのガイド要素を習得できるトレーニング体系を検討するため、これまでに以下の研究活動を実施した。

1 文献調査を通して来訪者の知識・態度・行動に影響を及ぼすことができるガイドの機能、知識、スキルを同定し、妥当性・一貫性を確認中である。

2 ツアーガイドへのインタビューを実施し（n = 11）、ガイドスキルについて分析中である。体験の質を重視したツアーガイドの特性を分析・抽出する。

3 金沢市内外の住民に対して質的インタビューを実施した（n = 28）。金沢を表す特徴的な資源とその意味について、場所、食、工芸、街並み・景色、気候、文化・慣習、環境の視座から表されていた。これらは、本物体験の構成要素と捉えることができる。

4 オンラインツアーに対する一般的な見解を得ることを目的に、基礎的データとして、オンラインツアー参加者にインタビューをおこなった（n = 11）。

これらの活動に加えて、今後は、以下の活動を進めていく計画である。トレーニング指針を提示することを目指す。

1 対面及びオンラインのガイドツアー参加者に対してインタビューもしくはアンケート調査を実施する。

2 ツアーガイドに関する研究者および実務家と討議して、ガイドが実施可能なスキルを検討する。必要に応じて、ガイドもしくはトレーナーのトレーニングを試行する。

3 上記結果を踏まえて、ツアーガイドのスキルを育成するトレーニング指針を検討する。

【助成 39－54】

ビジョン介入を用いた英語学習に対する動機づけ向上に関する量的・質的検証

代表研究者　信州大学教育学部　助　教　　青山　拓実

〔研究の概要〕

本研究は，外国語学習の成功に影響を与える要因の一つである，第二言語学習者の動機づけについて，学習者自身の将来の自己イメージに着目した理論である L2 動機づけ自己システム理論に基づいて，日本人大学生の英語学習者に対して実際の指導を通した効果の検証を行った。指導プログラムは理論的背景，活動事例，海外での先行研究に基づいて構築し，事前・事後アンケートによるスコア比較ならびに質的調査の分析結果に基づいて効果を検証した。その結果，ビジョン介入は理想の自己像やその実現可能性について考えることを通して，将来の自己イメージの明確化ならびに英語学習に対する努力に効果を与えることが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

1. 研究背景

第二言語習得において，学習者の動機づけは学習成果に大きな影響を与える要因の一つであり，日本における学習環境でも，これまでに多くの理論的・実証的研究が行われてきた。本研究は，日本人英語学習者を対象とした介入を伴う実証的研究を通した検証事例が蓄積されていない Dörnyei (2009) による L2 動機づけ自己システム理論（L2 Motivational Self System）に基づき，学習者が持つ英語学習に関する将来の自己像を明確化することを通して動機づけを高めるための要素を含んだコミュニケーション活動を中心とする英語指導（ビジョン介入）を行うことにより，日本人英語学習者が将来理想とする英語使用に関する自己像（L2 理想自己）を明確にし，英語学習に対する動機づけを向上させることができるかについて，①受講前後での自己認識の変化及び②その変容のプロセスの両側面から検証することを目的とする。

2. 研究方法

本研究の参加者は，研究代表者の所属機関において募集した日本人の大学生英語学習者 13 名であった。ビジョン介入の内容は Dörnyei and Kubanyiova (2014) による理論的説明，Dörnyei and Hadfield (2013) による活動事例ならびに海外での研究事例 (e.g., Sato & Lara, 2019) を参考として構成し，オリエンテーション 1 回と 60 分の授業 6 回からなる計 7 回のプログラムとして実施した。授業ではビジョンの構築，ビジョンの強化，ビジョンの検証，ビジョンの現実化を主な要素として含む，参加者の実態に合わせたレベルの英語コミュニケーション中心型活動を行った。

指導効果の検証は，英語学習に対する動機づけに関するアンケート調査によるデータ，毎回の振り返りシートの内容，プログラム終了後のインタビュー調査のデータ分析によって行った。アンケート調査は，学習者の将来の第二言語使用者像（L2 理想自己，L2 義務自己），外国語学習に対する努力に関する質問項目によって構成され，プログラム開始前・終了後に実施した。毎時間の振り返りでは，その時間の活動を通して考えたことや，学んだことに関する記述を求めた。インタビュー調査はすべてのプログラムの終了後に実施し，回顧的に学習中の経験について尋ねた。

3. 分析結果

事前・事後アンケートのスコアは，繰り返しありの t 検定を用いて統計的に比較した。効果量 Cohen's d は

Plonsky and Oswald (2014) による外国語教育研究における基準（効果量小: d= 0.40, 効果量中: d=0 .70, 効果量大: d= 1.00）を用いてその効果を検討した。

第二言語学習者がもつ将来の自己像のうち，L2 理想自己のスコアは事前テストと事後テストの間に有意な差と大きな効果量がみられ（p< .001, d= 1.43），参加者がもつ将来「なりたい」英語使用者像が明確になったことがわかった。将来予期される失敗の回避などと関連づけられた概念であるL2義務自己については，有意な変化がみられたが効果量は小さく（p= .050, d = 0.60），周囲からの要請や義務感による，将来「あるべき」英語使用者像については強化されていないと考えられる。また，実際の英語学習に向かう努力について測定する学習努力の項目についても，有意差とともに大きな効果量がみられたことから（p< .001, d= 2.43），本研究における指導プログラムは参加した英語学習者の将来なりたい英語使用者としての理想像について明確にしただけではなく，実際の学習行動についても，その努力量を向上させたと考えられる。

質的データ分析は，授業ごとの振り返りシートの記述ならびにインタビュー調査のデータを対象として行った。紙面の関係上，一部のデータについて取り上げる。分析では学習プロセスの側面に焦点を当て，プログラム参加期間中にどのようなことを考えたかが明らかとなる記述に注目して分析した。その結果，①理想の自己像について考え，②自己像の実現可能性について検討し，③自己像に近づくための目標を設定するプロセスがみられた。L2 動機づけ自己システム理論では，強い将来の理想的な自己像を持っていることだけが学習の原動力となるのではなく，その自己像が明確かつ実現可能であると考えられることが重要であるという点が議論されている。本研究でみられたプロセスによって，参加者は「ただ理想を語っても現実味がないので，留学でどの域まで達することが出来るのか現実的に考えて…（略）…は大事だと思った」というように，理想の自己像の実現可能性を現状での英語運用能力と照らし合わせて考えることができた。また，「考えている以上に海外に出ることのハードルが低いのかもしれない」というように，それまでは現実味のない目標であると考えていたものについても，逆にそれが実現可能であると見直すことができるという点もみられた。さらに，本研究の授業は英語を用いて行い，参加者間のコミュニケーションも英語であった。これにより，「初めはできなかったが，その後教えて貰いながら様々な活動に取り組むことができたのでよかった」という内容が示すように，英語運用能力の向上についても影響があったと考える。

4. 結論

本研究の結果から，これまで海外の研究によって効果が示されてきたビジョン介入は日本人英語学習者に対しても有効であることが示唆され，そのプロセスを明らかにすることができた。本研究の限界点としては，実施形態が正規の授業外で実施したプログラムであったことから，すでに英語学習に対する意欲が強い学習者が参加を希望していたことが考えられるため，今後の研究においては，異なる英語運用能力のレベルをもつ学習者に対象を広げた検証を行う必要があると考えられる。例えば，本研究の対象者は大学生の英語学習者であったが，異なる学校段階や，大学卒業後の社会人レベルの英語学習者を対象とすることにより，より多くの日本人英語学習者に対して効果のある指導方法を検討することができるだろう。

〔発表論文〕

国際学会 1 件，国際学術雑誌への投稿準備中。

【助成 39－55】

自律型モビリティと共生する社会におけるヒトの移動・回避行動特性の解明

代表研究者　豊橋技術科学大学情報・知能工学系　助教　　田村　秀希

〔研究の概要〕

私たちの街並みがスマートシティ化するに連れて，自律型モビティ(Autonomous Mobile Robot，以下 AMR)と遭遇する機会が増えてきている．歩道で歩行者同士が対面ですれ違う際に，「お互いが左右どちらに避けるかを躊躇し，同じ方向に避けてしまう」という，いわゆる「お見合い現象」が見られるが，これは AMR に対しても生じるのだろうか．本研究では，ヒトと AMR が対面ですれ違うケースを対象とし，ヒトが AMR に対して左右どちらに避ける確率が高いのかを心理物理実験により調査した．その結果，左右どちらかに避けやすいというバイアスは認められず，回避方向は利き手や交通文化の影響で決定づけられるとはいえないことが示唆された．一方で，回避時の身体運動の時間関係から，ヒトは「実際に避ける方向へ事前に腰が向く」ことがわかった．これは腰の角度が歩行者の回避方向を推定する際の重要な指標になりうることを示唆する．

〔研究経過および成果〕

1.　背景・目的

ヒトと AMR の衝突回避の研究では，ヒトが直進歩行する際に AMR が 90 度横から現れて十字にすれ違って横切るケースが対象とされてきた．しかし，スマートシティ化が進んでいる昨今の状況を顧みると，お互いに対面ですれ違うことがより多く想定される．歩道でヒト対ヒトの対面ですれ違う場合に，私たちは左右どちらに避けるかを躊躇するが，このような事象は AMR に対しても生じるのであろうか．本研究では，ヒトと AMR が対面ですれ違うケースを対象に，ヒトは AMR に対して左右どちらに避ける割合が高いのかを明らかにすることを目的に，心理物理実験を行った．

2.　方法

［参加者］豊橋技術科学大学の学生 16 人が実験に参加した(FLANDERS 利き手テスト 9.1±1.9)．実験は，「豊橋技術科学大学における人を対象とする研究規程」の下で研究倫理審査・承認された計画に基づき実施された．全ての参加者から実験参加の同意・署名を得た．

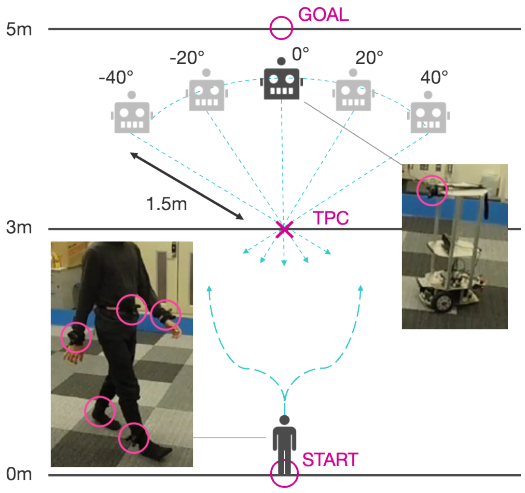


図 1　実験環境

［実験環境］図 1 に示すように，4m x 5m の空間に参加者 1 人と AMR 1 台が配置された．AMR，制御用 PC，トラッカー用 PC が Wi-Fi で接続され，ROS Melodic を介して通信が行われた．参加者の腰，両手首，両足首の計 5 箇所にモーショントラッカーが装着され，Unity および Steam VR で制御された．

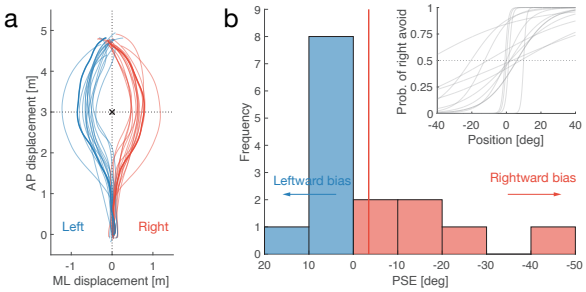


図 2 ヒトの衝突回避行動. a) 参加者の回避歩行軌跡. b) 左右回避バイアスの分布.

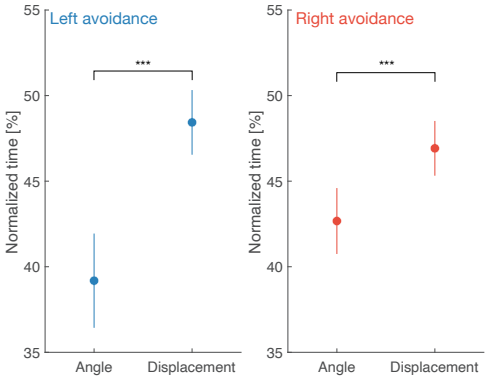


図 3 各回避方向における腰の角度と身体位置の時刻

[手続き・タスク] 参加者はスタートから 5m 離れたゴールに向かってAMRとの衝突を避けながら歩くように教示された. その歩行開始と同時に, AMR は正面(0度), ±20 度, ±40 度のいずれかの位置から0.5 m/s の定速で直進した(図 1 参照). 参加者がゴール地点に到達するまでを 1 試行とし, 各角度条件に対して10 試行ずつ, 計 50 試行を参加者ごとに実施した.

[データ解析] モーショントラッカーの位置情報から各試行の歩行軌跡を求めた. 次に, 理論的衝突位置(TPC)における各参加者の右に回避した確率を算出した. そして, 各角度における右回避確率を心理測定関数でフィッティングし主観的等価点(PSE)を求め, 左右回避バイアスとした. この際, 適切にフィッティングできなかった 1 人のデータを解析から除外した.

3. 結果・考察

[左右回避] 図 2a に参加者の歩行軌跡を示す. 参加者はTPC に対して, 左右同じように回避した. 図2b に左右回避バイアスの分布を示す. PSE の符号から左バイアスが 9 人, 右バイアスが 6 人だった. 参加者平均は-3.47±14.43 度であり, 左右への有意な差は認められなかった(t(14) = −0.93, p = 0.37, CI = [−11.46, 4.52]). 今回の参加者は全員右利きかつ左側通行の交通文化の下で生活してきたが, これらの結果から, 左右どちらに回避するかというバイアスは, 利き手や交通文化に依存するとはいえなかった.

[身体運動解析] ヒトの回避方向を推定する指標の特定のため, 身体運動の時間関係に着目した. その結果, 図 3 に示すように, 身体が左右に動く(位置が変わる)よりも有意に速く, 腰がその方向に向くことがわかった(左:t(14) = 4.00, p < 0.005, CI = [4.29, 14.21], d = 1.03; 右:t(14) = 3.53, p < 0.005, CI = [1.67, 6.83], d = 0.91). これはヒトが無意識のうちに腰を回避したい方向に向けて, その後に身体を動かしていることを示唆する.

4. まとめ

本研究では, AMR とすれ違い歩行する際の, ヒトの回避方向を明らかにすることを目的に実験を行った. その結果, 左右バイアスは認められなかったが, 腰の角度が回避方向推定の指標になりうることが示唆された. これは, ヒトの回避方向を事前に推定してより安全に回避する AMR の開発の糸口になるだろう.

〔発表論文〕

1. Tamura, H., Yamauchi, T., Nakauchi, S., & Minami, T. (2022). Waist rotation angle as an indicator of probable human collision avoidance direction for autonomous mobile robots, *bioRxiv*, https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2022.05.03.490539v2

【助成 39－56】

医看工芸連携を促進する共創型知的財産教育とその手法についての実証的研究

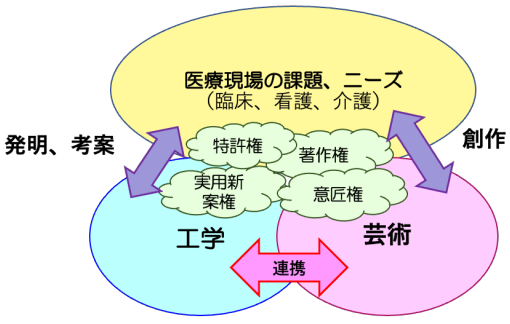
代表研究者　大阪工業大学知的財産学部　准教授　　吉田 悦子
共同研究者　京都市立芸術大学芸術学部　教授　　辰巳明久
共同研究者　大阪大学大学院医学系研究科保健学専攻　教授　上野高義

〔研究の概要〕

医療現場における現場改善の活動は、従来から行なわれているものの、繁忙な日々の改善活動が中心で、現場のニーズ提供者が、新たな医療機器などの製品化に関与する時間の確保は難しい現状にある。本研究では、医療現場における課題に対して、工学の技術力、芸術学のデザイン力といった様々な専門分野のアイデアを組み合わせ、当事者意識をもって、そのプロセスを可視化するという一連の手法を身につけるために、従来の医工連携の範囲を広げた医療・看護・工学・芸術分野の連携活動（医看工芸連携）を促進・啓発し、有益なアイデアを円滑に医療機器や医療サービスの開発に活用するためのアイデア創造力と知的財産マインドの醸成に資する実践的な教育手法を開発することを目的としている。

〔研究経過および成果〕

本研究における「医看工芸連携」とは、従来の医工連携の範囲を広げた医療・看護・工学・芸術分野の連携活動を促進・啓発し、有益なアイデアを円滑に医療機器や医療サービスの開発に活用するための活動である。例えば、具体化したアイデアを製品化する場合、必ず特許や意匠、商標、著作権といった知的財産が関わりをもつことになり、誰が創作に関与したのか、どんな役割を果たしたのかということを把握しておく必要がある（図1）。



共創によりアイデア創造力と知的財産マインドを醸成する
図１

本研究では、このような医看工芸連携に関与する人材が、共通の価値観として知的財産マインドをもって円滑な連携活動を展開するための実践的な教育手法を開発することを目的とする。本研究の特徴は、医療現場における課題に対して、工学的アプローチで現場のニーズを技術的に解決するだけでなく、芸術学のデザインの力で利便性、美しさ、安全性などの要素を視覚化することにある。また、『対話・共感・観察』をコンセプトにアイデア創造に取り組み、知的財産マインドを醸成する実践的な共創型知的財産教育でもあるので、単に知的財産制度を学ぶだけではなく、知的財産情報の検索方法を身につけ、当事者意識をもってアイデア創造に取り組み、そのプロセスを可視化するという一連の手法を共創コミュニケーションとして展開している。特に可視化することにおいては、芸術学のデザインの力を活用しているが、本研究での「デザイン」とは、「見た目を良くする」という意味で

はなく、何らかの問題を解決するために、企画・提案し、実施するものと位置付けている。

本研究では、①医療現場ニーズの収集、②ワークショップ実施・検証について取り組んだ。

① 医療現場ニーズの収集

医療従事者へのヒアリングから現場改善の努力がされつつも断片的な問題解決にとどまる医療環境として、手術室、診察室、待合室に着目し、そこに介在する医療従事者、患者、介護者などのそれぞれの意味づけを可視化することで、情報や問題を共感し、医療環境についてのアイデア創出に取り組むことにした。また、令和元年意匠法改正による保護対象の拡充(画像、建築、内装)があったため、医療分野と意匠登録状況について調査を行い、いくつかの事例収集を行った。

② ワークショップの実施(全 6 回、7 月～10 月)

Covid-19 の情勢をみながら、第 1 回のガイダンスのみオンラインとし、第 2 回以降は対面で行った。第 2 回では、セミナー、病院見学による現地調査、第 3 回では、①テーマ、②課題、③ターゲット、④価値、⑤解決方法、⑥考えられる知的財産、⑦貢献できる SDGs からなる「アイデア創出シート」を配布し、ガイダンスで提示したテーマについて、「共感」の持てるアイデアの絞り込みを中心としたアイデアソンを行った。第 4 回、第 5 回には、現場ニーズに対して、問題の発見解決アプローチ(ペルソナ設定、ストーリーテリング)や当事者インタビュー等で、デザイン思考をプラットフォームに、各グループテーマに対する理解を深めると同時に、潜在的な問題抽出を行った。第 6 回では、伝える工夫を意識した成果報告会を実施した。今回のワークショップでは、共同研究者等の協力により医療従事者による現場アンケート(約 100 名)の収集を行い、現場経験のない参加者の現場ニーズへの理解が円滑となるようにした。さらに、芸術大学の学生が加わっていることで、現場調査で得た内容をすぐに可視化することが可能となったことは、コロナ禍のグループワークにおいて、オンライン併用型のディスカッションを建設的なものとした。このようなアイデア創造手法は、気づきのサイクルとして好循環を生み出し、ワークショップ参加者の提案は、第 8 回医美同源デザインアワード優秀賞(空間デザイン部門)の受賞など、一定の評価を得た。また、ワークショップでの経験を伝達していく方法として、ワークショップ経験者を同プロジェクトのティーチングアシスタントに採用し、中小企業を対象とするワークショップにおいて学んだ内容を伝えるという試みを行った。これは共創型知的財産教育を持続的に展開するだけでなく、参加者相互のコミュニケーション促進にもなった。これらの研究成果は、3 月 24 日(金)に大分大学医学部主催の次世代医療機器連携拠点整備等事業(AMED プロジェクト)医看工芸ものづくりシンポジウムにおいて報告する機会を得た。

〔発表論文〕

1. 吉田悦子「医看工芸連携における共創と知的財産マインドの醸成」生体医工学, Annual 59 巻, Abstract 号, 164 頁(2021 年).
2. 吉田悦子「知財法論壇 研究プロジェクト奮闘記」IP ジャーナル 20 号, 43-48 頁(2022 年).
3. 吉田悦子「自治体が取り組むデザイン経営支援の意義」自治体・支援機関のためのデザイン経営セミナー (近畿経済産業局主催 2023 年)
4. 吉田悦子「知財創造と知的財産マインドの醸成」医看工芸ものづくりシンポジウム in おおいた(2023 年)

【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

代表研究者　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〕

本研究の最大の目的は、医学論文査読に特化した、膨大なデータから成るコーパスの構築である。査読対象となる医学論文には、一般的に IMRAD（背景・方法・結果・考察）と呼ばれる共通の枠組み的構成要素があり、その構造を体系的に捉えることはそう難しくない。実際、著者側の視点で作成された医学論文コーパスは既に構築されており、コーパスを用いた論文執筆サポートツールもいくつか存在する。他方、査読レポートは、雑誌ごとにある程度形式が定められてはいるものの、論文ほど定型ではないことが多い。そのため、最初のステップとして、査読レポートの構成要素を明らかにし、意味的・構造的まとまりに分類する作業が必要となる。言語教育の分野では、このまとまりを Move と呼んでいる（Move の下位区分を Step と呼ぶ）。Move を分析することで、効果的に論文の構造を明らかにしたり、説得力のある文章を構成したりできるようになる（図参照）。

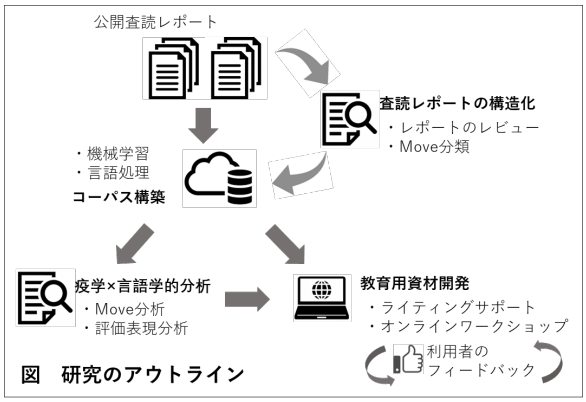


図　研究のアウトライン

我々はまず、研究の第一段階として、公開査読制を採用する医学研究雑誌のうち、4 大トップジャーナルの1つとしても知られる The British Medical Journal (BMJ)に絞って、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することにした。トップジャーナル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る。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。

そこで、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 2 名の臨床疫学専門家が独立して作業した。その後、互いの作業結果を照らし合わせたが想定以上に両者の見解の相違が多く、言語学および教育学の専門家も加わって両者の合意形成がなされた。このプロセスでの気づきとして、同一の雑誌であっても査読者による査読レポートの形式上の異質性が非常に高いということと、その一方で、査読者が言及する項目や内容にはある程度の集約が見込めることがわかった。そこで、作業の効率化を図るため、引き続いての 4 本の RCT 論文に対する計 22 名の査読者コメントへのアノテーションは、まず 1 人の臨床疫学専門家で行い、それをもう 1 人の臨床疫学専門家が検証するようにした。この作業では、マイナーな相違点はいくつかあったものの、メジャーな相違点は 1 か所のみで、それも両者の議論を通して容易に合意形成が得られた。

これまでの解析の中で、査読者が最も言及することの多かった項目は元論文の方法に関連する事項であった。特に、①アウトカムの測定や定義、②サンプルサイズ設計や解析手法、③研究対象者の選定、④当初のプロトコールとの相違について、より明確化するための追加情報を要求する内容のコメントが多かった。次に多かった、元論文の考察に対するコメントでは、①選択バイアスや一般化可能性に関連する事項に加え、②結果についてのメカニズム的な解釈を求める内容がよく言及されていた。これらの過程で得られた知見は、下記の論文や学会にて報告を行った。

今後は、さらに解析する査読レポートの数や種類を増やし、査読者コメントの意味的・構造的分類(Move や Step)について理論的な飽和を目指す。その上で、コーパスに取り込んだデータを利用して、各パートでどのような言語表現が使用されることが多いか、評価表現辞書を用いた言語学的解析を加えていく予定である。

〔発表論文〕

1. 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〕

1. 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.
2. 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.
3. 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 39－58】

プロジェクションマッピングを用いた 3 次元コンテンツ提示による幼児教育のための能動的学習支援システム

代表研究者　千葉工業大学　先進工学部　准教授　　藤井　浩光

〔研究の概要〕

本研究では，幼児教育における教材としての仕掛け絵本の有効性に着目し，そのデジタルコンテンツ化を目的とした．具体的には，プロジェクションマッピングを用いた Augmented Reality 技術による仕掛け絵本のための映像提示システムを提案している．家庭内での使用と幼児教育という観点から，「① 家庭内への簡便な設置」，「② 立体的な視覚効果」，「③ ユーザとシステム間のインタラクション」の 3 つが要求仕様として挙げられる．本研究では，プロジェクションマッピング技術と絵画技法であるアナモルフォーシスによる立体的錯視効果を掛け合わせた，独自の映像提示システムを提案し，統一的な解決を図る．各要求仕様に対する機能的な目標値を，「装置規模」，「投影精度」，「応答速度」の 3 つの観点から定量的に設定した上で，検証実験を行い，それらの目標値が達成されていることを確認した．

〔研究経過および成果〕

1. 研究背景：　近年の新型ウィルス蔓延に伴い，感染症対策のために家庭で過ごす時間は増大し，家庭教育の重要性はますます高まっている．特に幼児期の経験は子供の成長に大きな影響を与えるため，幼児期の教育は非常に重要である．例えば，絵本においては子供たちの想像力や感性を豊かにすることが可能であり，一般的な教育現場で多く用いられている．「仕掛け絵本」は，ページをめくると絵本の登場人物や建物が飛び出す仕掛けが施されたものである．仕掛け絵本は幼児教育において，想像力や感性を養うだけでなく，空間認識能力も培うことが可能であり，教育効果の高い教材である一方で，その作成には高い技術や費用を必要とする．本研究では，仕掛け絵本のデジタル化を目的し，図 1 に示すように一般家庭内での実現が容易な仕掛け絵本提示システムを構築した．まず，仕掛け絵本システムの要求仕様を以下の 3 つと分析し，単独のシステム内でこれらを統一的に実現した．



図 1 ：提案システムのコンセプト図

① 家庭内への簡便な設置

② 立体的な視覚効果

③ ユーザとシステム間のインタラクション

2. 提案システムの概要と研究成果：　上述の要求仕様について，①ではデジタル化の手法として急速に普及が進んでいる家庭用プロジェクタを用いたプロジェクションマッピングを採用した．特に家庭内での設置を容易にするために，プロジェクタの投影ずれを自

動で補正するためのプロジェクタ・カメラキャリブレーション手法を提案した．また，一般家庭内の限られた空間を活用するために，図 1 に示す部屋の隅の様な複数の平面への投影に対応した．②では 2 次元的な投影による 3 次元的な視覚効果を実現するために，アナモルフォーシスと呼ばれる絵画手法による錯視効果を利用した．③では投影されたコンテンツとユーザとのインタラクションを実現するために，システム内で鑑賞者の位置や動作を陽に扱うための，ユーザ追跡手法を提案した．

上述の要求仕様を満たす上で，機能的な目標値を以下の 3 つの観点から定量的に定め，実装したシステムを実験により検証した．

- 装置規模：　子供部屋の一般寸法である 10 m^2
- 投影精度：　子供の平均手幅である 55 mm 以内
- 応答速度：　快適な視聴に必要な 15 fps

構築したシステムの外観を図 2 に示す．小規模なシステムながら，部屋の隅の様な 3 平面から成るスクリーンまで投影が可能である．2 面スクリーンにおける投影結果を図 3 に示す．アナモルフォーシスの効果により，2 次元平面への投影結果が立体的に見えることが確認できた．実測による評価において，投影精度と応答速度についても目標値を十分に満たすことが検証できた．

3. 今後の展望：　本研究の成果は，英文学術誌である Journal of Robotics and Mechatronics（発表論文 1.）の学術論文としてまとめた．今後の課題としては，より効果的なインタラクションの実現などが挙げられる．例えば，鑑賞者自身が投影光を遮蔽して生じる影の除去（発表論文 2.）などについては，既に発展的な検討を開始している．

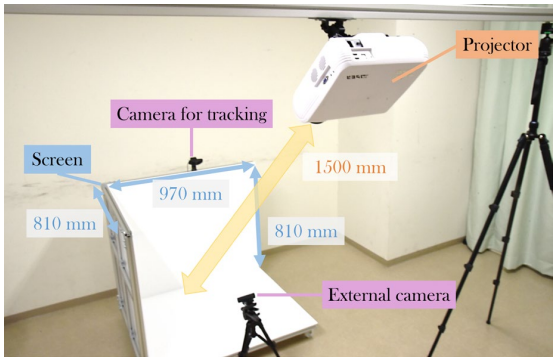


図 2：仕掛け絵本提示システム


図 3：アナモルフォーシスによる立体視映像

〔謝辞〕

本研究を遂行するにあたり，千葉工業大学の戸田沙也香氏には多大なる尽力を頂いた．ここに謝意を表する．

〔発表論文〕

1. Sayaka Toda, Hiromitsu Fujii: “Projection Mapping-Based Interactive Gimmick Picture Book with Visual Illusion Effects”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 35 No. 1, 2023. (Accepted)
2. 堀井 健吾，戸田 沙也香，藤井 浩光：“人形劇におけるプロジェクションマッピングを用いた空間演出のための影除去”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’22 講演論文集（ROBOMECH2022），1P1-Q02，札幌，2022.

【助成 39-59】

立体視 180 度動画を用いた VR 建設現場教材の開発と脳波・脈波モニタリングによる学修効果の評価

代表研究者　国士舘大学理工学部建築学系　准教授　　位田 達哉
共同研究者　国士舘大学大学院工学研究科　特任助教　三上 可菜子

〔研究の概要〕

建設現場の施工管理教育に関して，高等教育機関の教場講義という“読む・聞く”の間接的学修には限界があり，就業後の現任訓練（OJT）によって実務的な施工管理能力を獲得しているのが現状である。本研究では，初学者向けの仮想体験が可能な VR 建設現場教材を作成するとともに，その学修効果を脳波・脈波のモニタリングによって評価する一連の教育システムの開発に取り組んだ。その結果，VR 建設現場教材は,実際の建設現場を撮影した実写 VR 動画と操作可能な VR アプリケーションに分けることで，実体験に近づけることができた。また，VR 体験時に脳波・脈波を取得することで，課題への集中度合いや驚きなどをリアルタイムに評価することができた。

〔研究経過および成果〕

本研究は，建築系大学生の革新的な体験型授業の創出を試み，建築施工学と生体工学の学問的なアプローチを融合させた新時代の VR 教育システムの確立を目的としている。経験工学に基づき運営されている建設現場の VR 教材を構築するとともに,その VR 現場見学の学修効果を脳波解析による脳活動特性および心拍変動による自律神経系のモニタリングによって評価できることを実験的に検討した。研究経過と研究期間で得られた成果は下記 3 点に集約される。

１．VR 建設現場教材の構築

立体視 180 度 VR 動画（VR180），360 度全天球カメラによる全天球動画（VR360）および小型ジンバルカメラを用いた動画の 3 種類の実写動画を稼働中の建設現場で撮影したほか，スマートディスプレイによるリアルタイム観測を実施した。これら実写動画は建設業者の協力のもと撮影し，その業務の妨げにならないよう撮影する必要があったため，技能労働者の詳細な作業のほか，安全上の制限で危険箇所や事故現場を撮影することができなかった。そこで，3D ゲームエンジン（Unity）を用いて仮想建設現場をプログラミングし，HMD（Head Mount Display）とコントローラを用いて細かな現場作業や労働災害の仮想体験などができるように構築し,現場の臨場感を付与した(図 1)。



図 1　VR 建設現場シミュレータの画面

２．VR 体験時における学修効果の測定方法の検討

VR 体験時の学修効果評価のため，生理的指標のリアルタイム計測を試みた。生体情報デバイスは，HMD との併用を考慮し，簡易脳波計により脳活動（EEG）からα波（リラックスしている状態）およびβ波（緊張，興奮，思考など脳を使っている状態）を計測した。また，胸心拍センサにより心臓の電気的活動（ECG）を計測し，心拍数（HR）および R-R 間隔を計測した（図 2)。

30 名の国士舘大学大学生を対象として，HMD を装着した状態で脳波および心拍変動（HR および R-R 間隔）を計測し，概ね想定通りに生体情報が取得できることを確認した（図 3)。ただし，動きを伴う体験では，特に脳波のノイズが増す傾向があり，個人差を生ずる頭部形状と脳波計をフィットできるような固定具の開発を引き続き進めたい。

３．VR 建設現場教材を用いた学修効果の検証

VR 建設現場教材の学修効果を可視化するため，VR 被験に及ぼす脳波･脈波の影響を調べた(図 4)。その結果，VR 体験中はβ波が優位となる被験者が多く，脳活動の活発化，すなわち集中している様子を把握することができた。例えば建設現場内を歩いている際に死角からフォークリフトが飛び出して激突する労働災害を表現した VR 体験では，被災した 40 秒付近で急激にα波が低下してβ波が優位となり，HR の急激な高まりに伴って R-R 間隔が短くなるなど，VR 体験に連動した生体情報の変化を検知することができた（図 5)。ただし，数分程度の VR 体験であっても生体情報のデータ量が膨大となることから，この脳活動を簡易的に把握するための要素を抽出し，システムの軽量化を今後の課題としたい。

〔発表論文〕

1） 位田達哉，三上可菜子：コンクリートの施工教育に関する取組みの紹介 -VR 建設現場教材と学修評価手法の開発-，*コンクリート工学*，**60(6)**，pp. 548-553，2022.6

2） 位田達哉，三上可菜子：生理的指標を用いた VR 施工教材の学修評価に関する試み，*建設機械*，**59(1)**，pp. 19-25，2023.1

3） 位田達哉，三上可菜子：VR 建設現場の体験評価のための生理的指標の簡易モニタリング手法に関する基礎的研究，*国士舘大学理工学部紀要*，**16**，2023.3（掲載決定）



図 2　生体情報デバイスおよび装着の様子

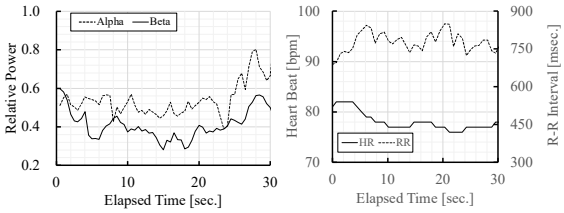


図 3　HDM 着用時の脳波（右図）・脈波（左図）

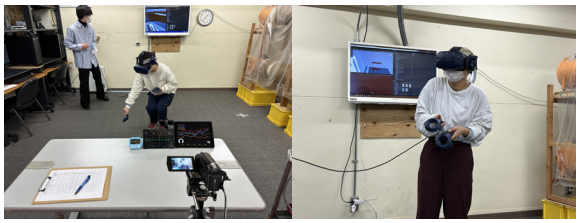


図 4　VR 体験の様子

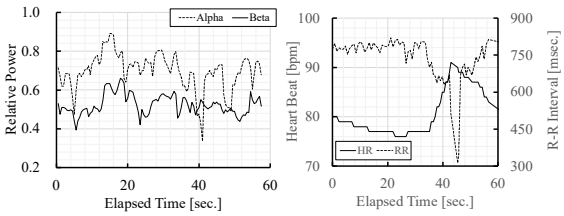


図 5　フォークリフト衝突時の脳波・脈波

【助成 39－60】

AI 技術援用による科学的事実に基づいたエネルギー政策の構築

代表研究者　明治大学法学部　教授　　勝田　忠広

〔研究の概要〕

AI 技術の一つである自然言語処理を用いて、福島第一原発事故の前後の日本のエネルギー・原子力政策の審議会の議事録を分析し、当時の意思決定プロセスの課題を定量的に求めた。形態素解析による TF-IDF 法での特徴語抽出や共起ネットワーク、さらに Word2Vec 手法を用いた教師なし学習の結果から、政策決定過程は目先の課題にとらわれがちな近視眼的なもので、事故の遠因の一つと考えられる可能性を客観的に示した。今回の成果から、科学的事実に基づいたエネルギー・原子力政策のあり方を提示する手法を得る可能性を見出した。

〔研究経過および成果〕

本研究の目標は、将来の日本社会にとって望ましい「科学的事実に基づいたエネルギー政策」(Evidenced Based Energy Policy)の手法を構築することにある。今回の研究では福島第一原発事故前後の日本のエネルギー・原子力政策の審議会に着目し、AI 技術、特に機械学習の援用によりその意思決定過程の構造や傾向を示し、その政策的課題を定量的に明らかにした。なお東京電力福島第一原子力発電所事故(2011 年 3 月 11 日)では、直接的原因は事業者の過酷事故対策の不備にあるとされ、結果として安全規制は強化された。しかし根本的原因と思われる政策審議の意思決定過程と政府の責任については検証されていない。

分析対象は、当時、将来の原子力政策の方向を示すために開催された2つの会議である。1)「原子力委員会 2004」:内閣府原子力委員会新計画策定会議(2004 年 6 月～2005 年 9 月)。32 名の有識者による 33 回の議論の後に示された原子力政策大綱は今後 10 年の原子力利用を示すものとして閣議決定された。2)「原子力委員会 2010」:内閣府原子力委員会新大綱策定会議(2010 年 12 月～2012 年 5 月)。26 名の有識者による 22 回の会議で、前大綱を改定することが目的であった。しかし第 5 回(2011 年 3 月 8 日)後に事故が発生して一時中断を繰り返し、翌年 10 月に会議は廃止となった。両会議とも議事録は公開されているが、膨大な量で価値判断が入りやすい分野でもあり、この定量的評価は意義が高いと考えられる。

分析手法には、人間が使用する言語をコンピュータ処理する技術である自然学習処理(Natural Language Processing, LNP)を用いた。全ての議事録をテキストデータに変換し Google の機械学習サービス Google Collaboratory で Python プログラムを作成、実行した。

1. 形態素解析

日本語の文章を単語の最小単位に分割し品詞に判別する形態素解析の後、以下の分析を行った。

(1) TF-IDF 法による特徴語抽出

頻出語ではなく、文章で使用される単語の特徴量を計算することでその単語の重要性を求めた。その結果、2つの会議とも数名の反対派委員は「再処理」「事故」「国民」といった喫緊の課題について言及するものの、多くの賛成派委員は事故後でさえこのような語は語らず、「研究」「開発」等を多用している。これは政府

の対応と社会の不信感との間の齟齬の存在を示しており、事故の遠因につながると考えられる。

(2) 共起ネットワークによる出現パターンの分析

同時出現数の大きい単語、つまり共起関係にある単語をつなぎ可視化することで内容が明瞭に示される。「原子力委員会 2004」の共起ネットワークでは、2023年現在でも実現性が不明瞭な核燃料サイクルの議論が大きな比重を占め、また「安全」の議論は多いが自然災害の予見性はない(図 1)。つまり事故の可能性を議論する重要な機会を逃した可能性を示している。

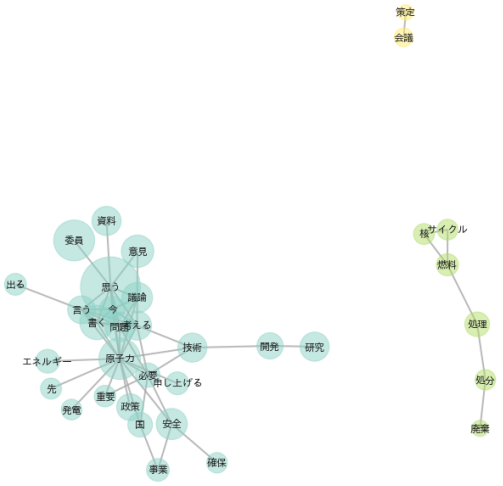


図 1「原子力委員会 2004」の共起ネットワーク

2. Word2Vec による分析

形態素解析した議事録データの単語を Word2vec 手法でベクトル化し分散表現した。例えば「事故」という単語に類似した単語が数値として示される(図 2)。これは機械学習における教師なし学習に位置する。

(1) 類義語の抽出

「原子力委員会 2004」の場合、「事故」で類推される語は過去に発生した「JCO」事故や「美浜」事故であり、将来を予見するような自然現象等の語は登場しない。一方、「安全」で類推する語は「大前提」「安全規制」「確保」「急務」等であり、事故後の「原子力委員会 2010」でようやく「自然災害」が登場する。つまり言葉だけの安全追求かつ近視眼的であったことを示す。

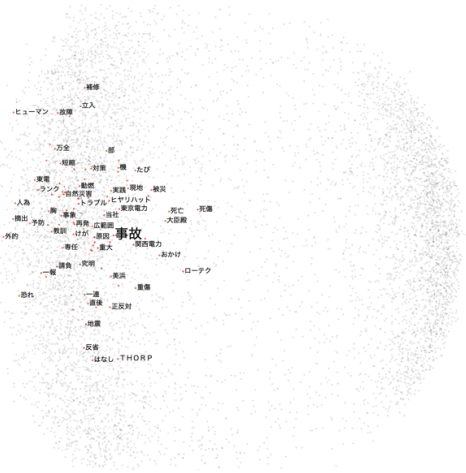


図 2「原子力委員会 2004」の類義語の可視化

(2) 単語の四則演算

「原子力委員会 2010」において、「原発＋安全」という単語の足し算では「再稼働」、一方の反対派のみのモデルでは「不安」という結果となり、教師なし学習において、現実の政府や反対派の感情に極めて近いという興味深い結果が得られた。

(3) K-means 法によるクラスタリング

自動でグループ化するクラスタリングを行った結果、「原子力委員会 2004」「原子力委員会 2010」の両方とも殆どのグループは「運営」「目標」「実情」といった抽象的で事務的な語のグループが多い一方、反対派委員の場合は「省エネルギー」や「再生可能エネルギー」という選択肢を示すグループが形成された。

自然言語処理を用いた定量的分析は、膨大な文章を客観的に分析し課題を示すことが可能であることが分かった。今後も分析を続け、その結果、科学的妥当性とみなすための「客観的指標」を導き、将来的なエネルギー政策のあり方を構築する予定である。

〔発表論文〕なし

【助成 39－61】

身体と社会：乳幼児の運動協調が社会関係の形成に及ぼす効果

代表研究者　立教大学現代心理学部　教　授　　大石　幸二

〔研究の概要〕

乳幼児の運動協調は、対人相互作用や共感の発達など後年の社会関係形成を導く重要な心理現象である。本研究では、①定型発達（TD）幼児の身体の同期および運動協調の成立、②自閉スペクトラム症（ASD）児における運動協調と社会関係の関連、③ASD 児における運動制御時の疲労感・困難感の影響について検討した。調査の結果、TD 幼児において接近や微笑反応は発達早期から確認され、ASD 児でも同様の知見が得られた。しかし、協働行動を含む社会的コミュニケーションについては、両者の乖離が大きかった。ASD 児では運動協調時の身体情報処理に、より多くの認知資源を配分しなければならないことが、この乖離を説明すると考えられた。

〔研究経過および成果〕

動きの同期（自分自身の動作と他者の動作が呼応すること）には、他者の認識（他者への注目）と自身の身体の知覚（視覚・聴覚・触振動覚などの感覚器・効果器を仲介する低次の情報処理）が作用する（**大石**, 2021）[1)]。同一空間内に他者の身体が存在し、他者の身体を意味あるものとして感知できる場合に動きの同期が生じやすい状態となり、共感の発達にも影響を及ぼす（**表1参照**）。

表1　定型発達児における動きの同期の生起様相

年齢段階	生起事態	動きの同期の生起様相のまとめ
1～2歳	母子関係	無意図的で、不随意的な、自然な身体の同期
3～4歳	仲間関係	同一空間で、接近や視線一致、微笑の活性化
5～6歳	仲間関係	意図的で、随意的な、直感的心理化を含む身体の同期

表1に示すように、5～6歳以降の定型発達（TD）児で頻繁に生起する自身と他者が相互に主体的に関与し合うことができる共同作業は、これらの動きの同期と共感性が促される恰好の事態である。

しかしながら、自閉スペクトラム症（ASD）児の場合には、その障害本態のために、TD 児において自然に発達するとされる、早期から作用する動きの同期が作用しにくい。よって、随伴模倣のような社会関係を築く特別な介入方略を用いて、他者との動きの同期や共感性の発達を促す試みが別途検討される必要がある（**大石**, 2022）[3)]。

以下、助成期間に行った研究経過および成果を報告する。

〔定型発達幼児の身体の同期および運動の協調に関する横断的パイロット調査〕

仲間関係が急速に発達する3～4歳および5～6歳の TD 児を対象に、身体の同期や運動の協調に関する質的差異を調査した。音楽が提示される事態（聴覚刺激によるプロンプティング）と、玩具や遊具の準備・操作・片付けがなされる事態（触振動覚刺激を介したプロンプティング）を、統制条件としての微細運動を含む自由あそびの事態（ままごと・描画・園庭あそび）と比較した。カテゴリ・チェック法による観察を基に、MEPA-R 評定を行った。情動表出は年少児から見られたが、運動協調は年中児以降で活性化していた。

〔知的障害を伴う自閉スペクトラム症児における運動協調と社会関係の関連〕(大石ほか, 2023)[4)]

パイロット調査における3～4歳および5～6歳のTD 児と比較するため、2名(年中のA児および年長のB児)の知的障害(ID)を伴う ASD 児を対象として、運動協調と社会関係の関連を調べた。運動協調を促進するため情動的交流あそびの事態で随伴模倣の介入を試み、視線一致と微笑反応の生起と社会性の発達を評価する心理検査(CHEDY)における社会的コミュニケーションの困難さ尺度の素点を比較した。

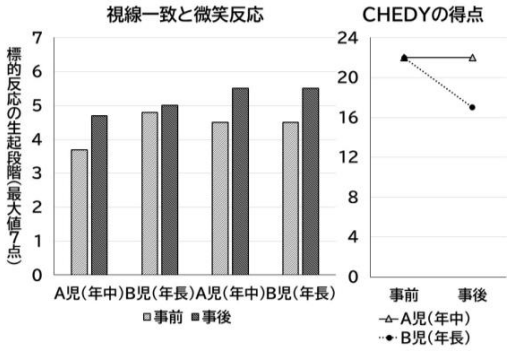


図1 視線一致と微笑反応および CHEDY の得点

微笑反応は、年中のA児でも、年長のB児でも確認され、随伴模倣操作を行った指導担当者との間で快の情動共有が成立した。また、視線一致についても、A児とB児で共に確認されるようになり、二者間の社会関係の基盤とである共同注意が促された。一方、より高次の運動協調を要する音声言語や身振りによる同調行動は、年長のB児において顕著であり、TD児と類する結果となった。なお、これら社会関係の指標となる視線一致や微笑反応は、身体接触や触振動覚刺激・音楽刺激の提示や楽器演奏時に、特に促進された。しかしながら、CHEDYにおける社会的コミュニケーションの困難さ尺度の素点変化は、年中のA児では検出されず、B児でも弱い変化に留まった。

〔高機能自閉スペクトラム症児における運動制御時の疲労感・困難感〕(大石ほか, 2022)[2)]

幼児期より身体感覚と運動制御に特異性を示した1名の ASD 児に身体模倣課題を行った。肢位を構成するポーズの正誤を視覚的にフィードバックし、身体模倣課題遂行時の困難感と疲労感の主観的評定値が下降するかを検討した。6か月間(計 11 セッション)の介入により視覚的なフィードバックは困難感を下降させたが、疲労感を変化させることはなかった。一方、下肢が非対称となる条件では困難感と疲労感が上昇した。肢位を構成するポーズは課題難度を変化させ、身体情報処理の負荷を高める可能性が示唆された。

〔発表論文〕

1. **大石幸二**(2021). 乳幼児における動きの同期に関する文献調査と実証研究の課題. *人間関係学研究*, **26**, 47-55.
2. **大石幸二**・竹森亜美・渡邉孝継・坂本真季・和田恵・木下愛・佐藤亜美・荻野梨紗子・佐々木水穂・濵田佳那(2022). 高機能自閉スペクトラム症児における運動制御の促進―動作模倣課題における疲労感・困難感の主観的評定値の確認―. 日本特殊教育学会第 60 回大会, P-12-19.
3. **大石幸二**(2022). 自閉スペクトラム症児への社会関係支援が精神的健康に及ぼす効果. *人間関係学研究*, **27**, 51-60.
4. **大石幸二**・青木啓・若井広太郎・藤島瑠利子・新城理奈・飯島徹・榎本拓哉(2023). 知的障害を伴う自閉スペクトラム症(ASD)児における対人相互作用の変容―行動観察を基にした情動的交流あそびの効果評価―. *臨床発達心理実践研究*, **17**, 印刷中.

【助成 38－10】

安定・安価な高効率有機 EL 発光素子の開発－Cu(I)錯体の励起状態解析を基にして

代表研究者　群馬大学大学院理工学府　教授　　浅野　素子

〔研究の概要〕

フェナントロリン類とジホスフィン類を1つずつ配位子とするヘテロレプティックな Cu(I)錯体は室温で可視部に最低励起三重項状態からのりん光と、最低励起三重項から熱的に励起された励起一重項状態からの熱活性化遅延けい光を発する。この性質を利用し、電気的に励起子を生成させると、銅(I)錯体を、りん光とけい光の両方の発光を用いることができる高効率な発光素子とすることができる。本研究では、豊富で入手しやすい金属イオンである Cu(I)を用いた錯体に着目し、より安定・安価で高効率な発光素子を開発することを目的とし、その励起電子構造の物理化学的、分子論的な解明を行った。特にりん光と遅延けい光の両者の発光が配位子によりどのように制御されるのかに着目した。

〔研究経過および成果〕

一価の銅を中心金属に持ち、フェナントロリン及びジホスフィンを配位子に持つヘテロレプティック Cu(I)錯体は、可視から近紫外の光を吸収し、比較的長寿命で高い強度で発光する。この発光はりん光と遅延蛍光の重ね合わせであり、有機 EL 発光材料など光機能性錯体として、盛んに研究が行われている。特に、Cu(I)錯体は、入手しやすく貴金属錯体の代替えとなり得ることからも注目を集めている。一般に電気的に生成させた励起種は一重項が25%、三重項が75%の確率となるため、三重項からのりん光と一重項からの TADF を発する物質は、双方の励起種からの発光を用いることができ、高効率発光素子として期待される。一方で、りん光と遅延蛍光が共に発光するということは、その発光特性には複雑な要因が絡み合い、発光制御は単純ではない。本研究では特に配位子依存性に着目し、発光制御に対する指針を導き、安定安価な発光素子開発を目的とし、励起電子構造の解析に基づいた発光特性の解明を行った。

1. 溶液中の励起構造と発光特性

ジホスフィン配位子依存性については、これまで得られていた一群の錯体に加えて、比較的剛直なキサントホス配位子を用いた場合について発光収量と発光寿命の温度変化実験を行った。その解析により、りん光輻射遷移速度 k_p が大きく、励起三重項からの緩和割合が大きく、発光寿命が短くなることがわかった。このことは発光素子として k_p が大きくなるように設計することが重要であることを示唆する。

一方、フェナントロリン配位子依存性について、電子吸引性・供与性の効果について検討した。フェナントロリン骨格の 4,7 位に電子吸引基や供与基で修

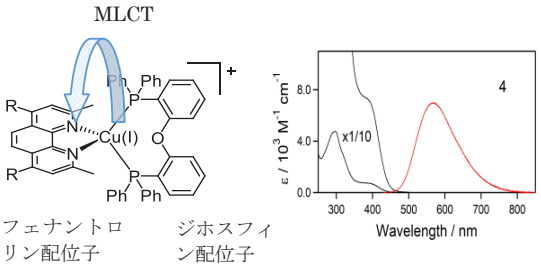
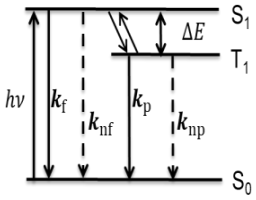


図 1　ヘテロレプティック Cu（I）錯体の構造と吸収・発光スペクトル



ΔE：一重項－三重項エネルギー差

kp：りん光輻射速度

kf：けい光輻射速度

図２　Cu（I）錯体の励起状態のエネルギーダイヤグラムと緩和過程

飾したフェニル基を導入したヘテロレプティック錯体を合成し、温度変化実験を行った(図3)。

電子吸引基及び供与基を導入したすべてのCu(I)錯体で温度が下がるに従って発光は長波長シフトし、強度が減少した。このことは温度を下げるに従って遅延蛍光が減少し、りん光の割合が増加していることを示す。また発光寿命は温度の低下と共に伸長し、発光スペクトルの変化と一致する。温度変化の結果を解析すると、一重項－三重項エネルギー差は電子吸引基をもつ Ph-CF_3 と持たない DPE-1 で共に 1000cm^{-1}程度となった。また、発光収量と寿命は電子吸引基を持つ場合にエネルギーギャップ則に従う現象がみられたが、電子供与基を持つ場合には、高い(π,π*)状態との相互作用による効果がみられエネルギーギャップ則とは無関係であった。

2. 薄膜固体中の発光と特性

ヘテロレプティック Cu(I)錯体の薄膜中の発光物性

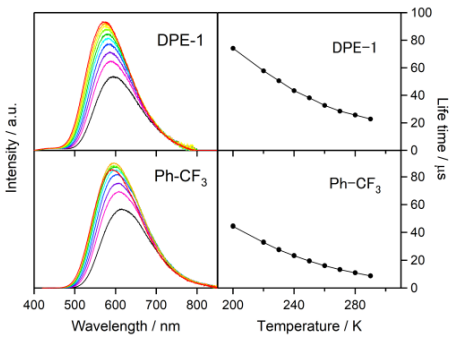


図３　溶液中の Cu（I）錯体の発光スペクトル(左)と発光寿命(右)の温度変化（200 K- 300 K）

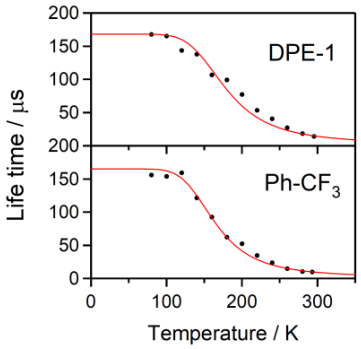


図４　固体薄膜中の Cu（I）錯体の発光寿命の温度変化　（80 K- 300 K）

を溶液中と比較した。先の Ph-CF_3とDPE-1の発光寿命の温度変化の結果を図4に示す。一重項－三重項エネルギー差ΔEは 2 つの錯体とも約 700cm^{-1} となり、溶液中よりも固体薄膜中では約 300cm^{-1}程小さくなった。これは溶液中よりも固体薄膜中では分子の変形が抑制されているためと考えられる。すなわち、光励起状態における配位子二面角変化が小さくなり、エネルギー差ΔEに関わる HOMO 及び LUMO 軌道間の交換積分が小さくなったためと考えられる。

〔発表論文〕

1. 下真・佐藤 那哉・竹田 浩之・浅川 直紀・浅野 素子、“発光の温度変化によるヘテロレプティック Cu(I)錯体溶液中と薄膜の励起電子構造の比較”、日本化学会春季年会、2023 年 3 月
2. 下　真・竹田　浩之・浅野　素子,“電子求引基を導入したフェナントロリン Cu(I)錯体の発光の温度依存性”、配位化合物の光化学討論会、2022 年 8 月
3. 咲間　隆也・下　真・竹田　浩之・浅野　素子、“*n*-Bu 基をもつフェナントロリン Cu(I)ヘテロレプッティック錯体における発光温度変化のジホスフィン配位子依存性”、日本化学会春季年会、2023 年 3 月

【助成 38－50】

「掛かりつけ農家」をハブとする社会的ネットワークの経済的合理性と頑健性の検証

代表研究者　石川県立大学生物資源環境学部　准教授　　山下良平

〔研究の概要〕

環境保全型農業を実践する複数の農家の実態を予備的に調査した後，そのうちの 1 人である西田氏（2016）が提唱する「掛かりつけ農家」という概念に着目した。この概念は，掛かりつけ医のように日常的な信頼関係を築く農家と消費者の間の関係を指す。本研究では、掛かりつけ農家を持つ消費者とそれ以外の一般消費者との間で、購買行動の経済的・倫理的合理性の差異を WEB 調査によって検討した。また，現在のコロナ禍や災害などの非定常期における食材調達に関する経験についても質問し，レジリエンスに関する優位性の有無を確認した。その結果，2 つの消費者グループ間に購買基準において有意な差異が確認されたほか，掛かりつけ農家を持つ農家には「災害時に作物を入手しやすかった」「価格高騰時にも通常価格で商品を購入できた」など，非定常期におけるレジリエンスに関する優位性が確認された。

〔研究経過および成果〕

はじめに

本研究では，環境保全型農業を実践する複数の農家の実態を予備的に調査した後、そのうちの 1 人である西田氏（2016）が提唱する「掛かりつけ農家」（掛かりつけ医になぞらえた，日常的に信頼関係を構築する農家と消費者の関係）という概念に着目した。そして，掛かりつけ農家を持つ消費者とそれ以外の一般消費者との間で，購買行動の経済的・倫理的合理性の差異を WEB 調査によって検討した。加えて，昨今のコロナ禍や災害など非定常期での食材調達関連の経験を問うことで，レジリエンス的優位性の有無を確認した。調査の全体像と結果は以下の通りである。

調査概要

具体的な調査内容は以下の通りである。

【題目】農産物の購入判断に関するアンケート

【期日】2022 年 12 月 22 日

【方法】Web 調査

【対象地域】福井県，石川県，富山県の 20 歳以上

【サンプルサイズ】掛かりつけ農家の有無（スクリーニング項目）を均等に，800 サンプルずつ合計 1600 サンプル程度。

【割り付け】男女比を均等に（年代は割り付け無し），可能な限り各県同数を目指して。

【主な質問内容】①個人属性，②農産物・加工品・果物の購買理由（複数選択してもらい順位付け），③1 か月あたりの農産物・加工品・果物の購入金額を月平均金額，④新型コロナウイルス感染拡大期や激甚災害期など社会の混乱期において食料調達に困った体験の有無，⑤その他食料調達以外で，掛かりつけ農家をもったことで得た機会や経験

結果と考察

得られた結果の一覧は以下の通りである。

【有効回答数】1,674

【年代別の掛かりつけ農家の有無】図 1

【購買意思に見る差】図 2

【レジリエンス】図 3，図 4

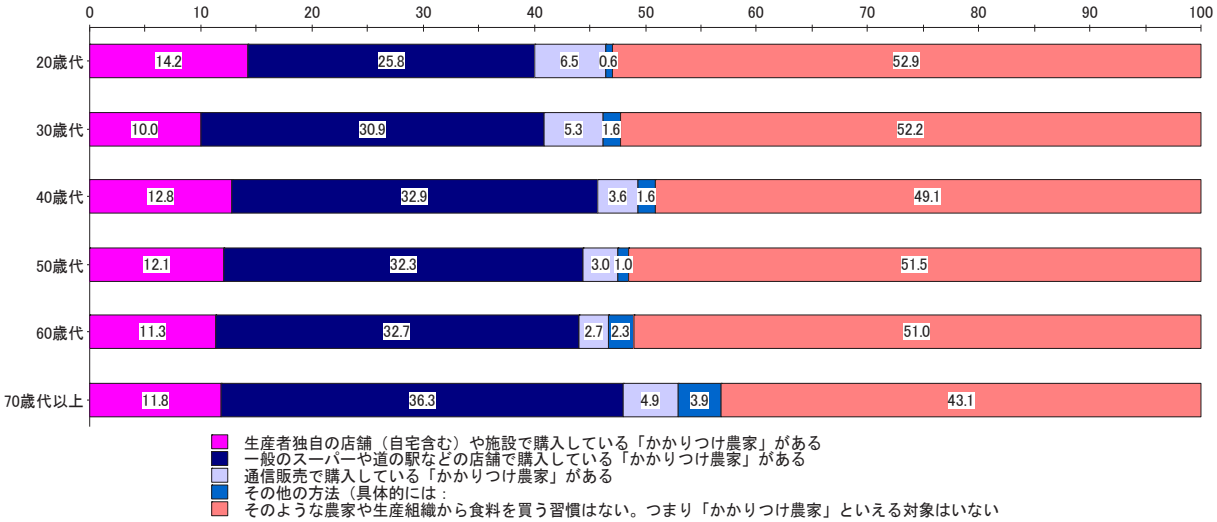


図１　回答者の年代×掛かりつけ農家の有無

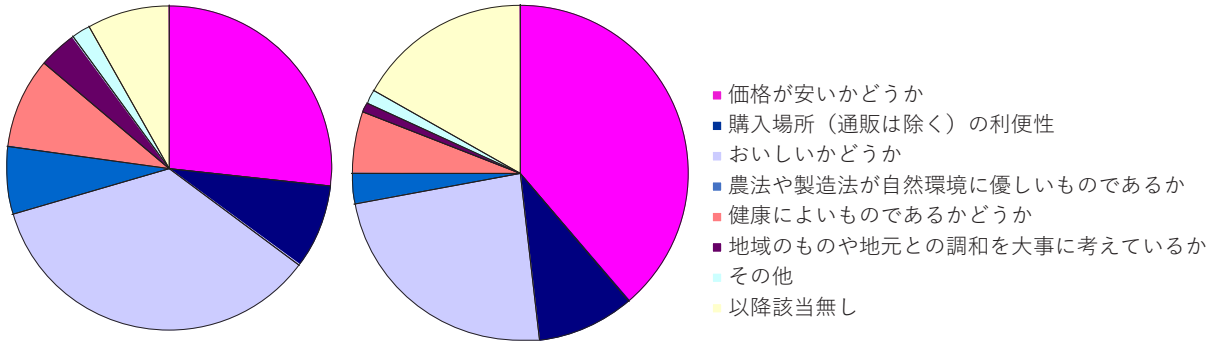


図２　掛かりつけ農家の有無（左：あり，右：なし）別の購買基準

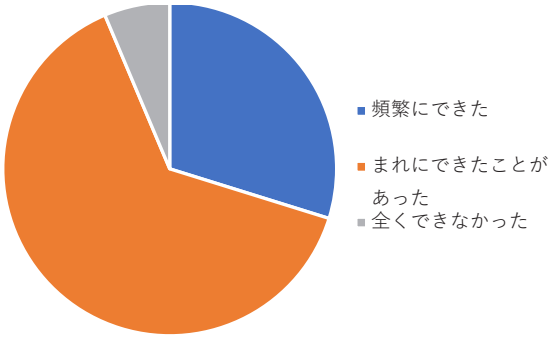


図３　非定常期の購買不便状況で掛かりつけ農家からは難なく購入できたか？

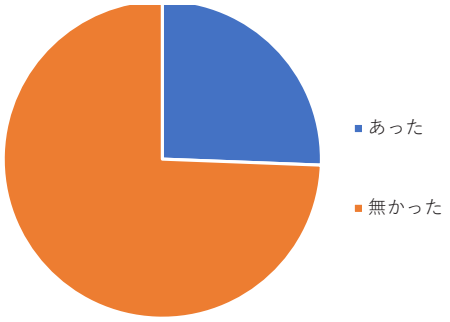


図４　あなたの周囲で，同様に非定常期の購買不便状況で掛かりつけ農家からは難なく購入できた例は？

結論

農産物・加工品・果物の購買基準における非定常期におけるレジリエンス機能を確認し，仮説は一定程度支持された。経済的合理性は単に価格が安いものを購入できるという意味ではなく，レジリエンス的な考え方に依拠する場合には，新しい定義による経済的合理性と解釈することもできる。頑健性（持続性）については，継続的な調査によって検証する必要がある。

〔発表論文〕該当無し

〔参考文献〕西田栄喜(2016) 小さい農業で稼ぐコツ

【助成 37－01】

熱磁気効果を活用した革新的環境発電技術の研究開発

代表研究者　名古屋大学大学院工学研究科　教授　　水口　将輝

〔研究の概要〕

熱流の方向と電力を取り出すための電極の方向が垂直関係にある異常ネルンスト効果は、電力の取り出しが熱勾配に影響されないことから、理想的な熱電変換技術といえるため、太陽光など身の回りのエネルギーを利用する環境発電の分野などで注目を集めている。熱磁気効果をもつ磁性体を効率的に発電に利用するためには、材料に内在するナノ構造を制御することにより、その変換効率を向上する技術が必要であることが提案されているが、その開発はあまり進んでいない。本研究では、熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に実現することを目的として、Si/Co 多層膜の異常ネルンスト効果を調べた。Co 単層膜と比較して、熱伝導率の低減とネルンスト係数の増大が確認された。

〔研究経過および成果〕

大気中の温室効果ガス、その中でも人類の活動によって排出され、大きな比重を占める二酸化炭素の排出抑制策が強く求められている。そこで、最もクリーンであり、半無限的なエネルギー供給源である太陽エネルギーの更なる効率的活用が期待されており、様々な研究プロジェクトが実施されている。地球に照射される太陽エネルギーの大部分は、地球表面、大気などに吸収され、熱エネルギーとして宇宙に再放射されており、このいわば廃棄された熱エネルギーを低コストで回収し、リカバリするシステムを確立できれば、地球環境問題を解決する大きな一歩となりうる。一方、電子とスピンの自由度をエレクトロニクスに利用するスピントロニクスの発展分野の一つとして、さらに熱流との相関を取り扱う「スピンカロリトロニクス」とよばれる新しい研究が注目を集めている。既存の熱電変換に対し、スピンの概念を取り入れることにより、新しい熱電素子や冷却素子などの新機能の発現が期待されている。

また、材料に薄膜を導入することにより、熱電変換効果を増大させる試みが行われている。膜厚をナノメートルのオーダーまで減少させると、熱磁気効果の一つである異常ネルンスト効果に特異性が生じる。一方、熱電材料への応用の観点からは、ネルンスト効果の大きさや電気伝導率の増加に加えて、熱伝導率の低減も重要である。一般に金属は高い熱伝導率を有するため、低い熱伝導率を示す半導体などとのハイブリッドナノ構造を設計することは有効な手段である。

そこで、本研究では低い熱伝導率を有するアモルファス半導体層と強磁性金属層からなる多層薄膜構造に着目し、熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に実現することを狙った。電子線蒸着装置を用いて、Si(001)基板上に Co および Si を室温でそれぞれ 20 nm ずつ交互に 2 層ずつ積層し、これを Si/Co 多層膜 (MLF; multilayer film) とした。参照試料として、20 nm の Co 単層膜 (CF;

cobalt film) も作製した。構造評価には、走査型電子顕微鏡法(SEM)、ラマン分光を用いた。熱伝導率測定には2 ω 法を用いた。Co 単層膜および Si/Co 多層膜の SEM 像を確認したところ、各層の膜厚が設計値通りに 20 nm で均一に積層されていることが分かった。また、試料の熱伝導率を測定したところ、Si/Co 多層膜は、参照用の Co 単層膜よりも 30 倍程度低い熱伝導率を示した。これは、熱伝導率の低い Si を挿入した効果であると考えられる。それぞれの膜の磁気特性を測定した結果、Fig. 1(a)に示すように、どちらの試料の磁化曲線も類似したものとなった。また、飽和磁化の大きさもほとんど一致する結果となった。これらの試料について、その異常ネルンスト効果を室温で調べた。薄膜面内方向に温度勾配を加え、発生するネルンスト電圧を測定した。異常ネルンスト効果の大きさは、異常ネルンスト係数 (Q_s) により見積もった。その結果、Fig. 1(b)に示すように、多層膜の Q_s は Co 単層膜のそれと比較して、2.6 倍程度大きい値となった。このように多層膜における異常ネルンスト効果が増大する要因として、磁性/非磁性界面において、近接効果により僅かな磁性拡散層が非磁性層内に生じ、異常ネルンスト効果が増大する効果が提案されているが、バンド構造が変調される効果や界面における散乱の効果も寄与するという報告もあり、議論が続いている。本研究で観測された増大効果の要因も明らかにはなっていないが、金属/半導体の多層構造における異常ネルンスト効果の増大はこれまでに報告が無いため、さらなる現象の解明が待たれる。いずれにしても、本構造を用いることにより熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に達成することができることが明らかになった。この結果は、金属・半導体のハイブリッドナノ構造を用いて熱電変換素子の設計を行うことにより、熱電変換効率を高められる可能性を示している。

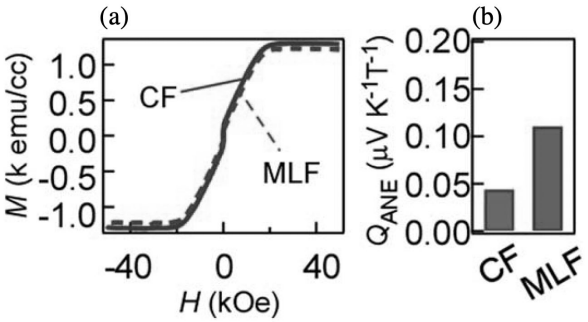


図 1: CF（コバルト膜）および MLF（多層膜）の特性。(a) M-H 曲線 および (b) 異常ネルンスト係数（Q_{ANE}）。

〔発表論文〕

1. P. Sheng, T. Fujita, and M. Mizuguchi, "Anomalous Nernst effect in $Co_x(MgO)_{1-x}$ granular thin films", Applied Physics Letters, **116**, 142403 (2020).

2. R. Kitaura, T. Ishibe, H. Sharma, M. Mizuguchi, and Y. Nakamura, "Nanostructure design for high performance thermoelectric materials based on anomalous Nernst effect using metal / semiconductor multilayer", Applied Physics Express, **14**, 075002 (2021).

【助成 37－42】

複数地域の連携による不登校児童の学習支援としての オンラインゲームを用いたまちづくり学習の開発

代表研究者　名城大学都市情報学部　准教授　田口　純子

〔研究の概要〕

本研究では，複数地域においてオンラインゲームや身近なテクノロジーを用いたまちづくり学習を開発し，地域特性別のまちづくり学習のあり方や，複数地域の連携可能性について検討することを目的とする。まちづくり学習の実施事例の分析からは「関心の異なる主体の参加」「リアルな地域と接触できる物理的近さ」「身近なテクノロジーの活用」「ゲームだけに完結しないプログラム」を特徴として得た。また，今後地域住民と共にまちづくり学習を支える仕組みづくりについて検討した。都市部と農山村地域の連携について引き続きの検討が課題である。

〔研究経過および成果〕

1．はじめに

コロナ禍で加速的に普及したオンライン学習は，一部の自治体で不登校の児童生徒の授業参加を進めるなど，学習支援ツールとして課題を抱えつつも広がりを見せている。筆者は，オンライン学習にリアルな地域社会との接点を持たせ，ものづくりゲームの「マインクラフト*1」を用いて実際の地域にある建物や街並みをオンラインで再現するまちづくり学習を開発し，ゲームに打込む不登校の児童生徒の関心をリアルなまちづくりに活かすための実践的研究を行ってきた。本研究では，複数地域においてオンラインゲームや身近なテクノロジーを用いたまちづくり学習を開発し，地域特性別のまちづくり学習のあり方や，複数地域の連携可能性について検討することを目的とする。

2．研究対象と方法

研究開始以降，2020 年，2021 年は新型コロナウイルス感染拡大の影響により地域との連携を取ることができず，研究準備期間（2018 年，2019 年）に実施した埼玉県深谷市，および，大阪市心斎橋地区のまちづくり学習の参加者アンケート調査及びインタビュー調査の分析をもとに事例検討を行った。その成果をもとに，2022 年には，千葉県香取市佐原地区（7 月），および，岐阜県郡上市石徹白地区（8～9 月）の地域づくり団体と連携し，地域住民と共にまちづくり学習を支える仕組みづくりについて検討した。

3.深谷市・大阪市におけるまちづくり学習

深谷市では，ゲームに打込む有志の高校生が現地で合宿をしながら，深谷市のシンボルである深谷駅を「マインクラフト」で再現するまちづくり学習を実施した。大阪市では，通信制高校のキャンパスにおける放課後活動として，ゲームに打込む高校生や関心を持った高校生が心斎橋地区で改装中であった歴史的建造物の大丸心斎橋店を「マインクラフト」で復元・再現するまちづくり学習を実施した。

分析結果によれば，両者の事例には「関心の異なる主体の参加」「リアルな地域と接触できる物理的近さ」「身近なテクノロジーの活用」「ゲームだけに完結しないプログラム」を特徴として得た。以下詳細を記す。

（1）関心の異なる主体の参加

まちづくり学習の参加者は，当初はゲームに熱心に打込む主体のみが想定されていたが，実際には対象

となる地域や建物に思い入れがあるため参加した主体や，チームでプロジェクトを成し遂げる経験に関心を持って参加した主体もいた。これらのばらつきが，ゲームに求められる要素（創作，調査，チームワーク等）と組み合わさり，まちづくり学習を推進していた。

(2) リアルな地域と接触できる物理的近さ

地域への関心が高い主体は当初少ないが，ゲーム上で建物や街並みをよりよく再現するために，実際に現場を訪れたり，現場のことをよく知る人に話を聞いたりする行動や関心が派生的に生まれていった。

(3) 身近なテクノロジーの活用

コミュニケーションツールとしてのオンライン会議システムや SNS，活動を記録・配信する動画編集ソフトや動画配信プラットフォーム，歩行者視点では得られない上空映像を資料とするためのドローン撮影（ライセンスを持った協力者の撮影による）等を活用した。

(4) ゲーム内だけで完結しないプログラム

オンラインサーバー上に複数の地域からプレイヤーがゲームに参加できるだけでなく，リアルな地域から得た情報を持ち寄ったり，身近なテクノロジーを利用してゲームの成果を拡張・拡散したりと，きっかけはゲームではあるが，それだけで完結しないプログラムを緩やかに設計しておく必要がある。

4. 香取市佐原地区におけるまちづくり学習

佐原地区では明治期に建てられた「与倉屋大土蔵」を地域の「なかなか遺産」として認定し，保存・活用する取り組みが行われている。込み入った木造の屋根裏架構が特徴的な「与倉屋大土蔵」は，その建築的な特異性から一部の関心を集めるものの，活用方法を模索されている。そこで，建物の複雑な屋根裏架構をドローンレースのコースに見立て，「なかなか遺産」認定式が行われた 2022 年 7 月 3 日に，ドローン操縦の専門家によって記念フライトを実施したところ，建物の新しい活用方法として大きな期待を集めた。将来的には，近隣のドローンスクールと連携し，子どもや若者が瞬発力を活かして練習に励むドローンレースと，ドローンを入口に建物や地域の魅力を知るまちづくり学習を併せて開発する予定である。

5. 郡上市石徹白地区におけるまちづくり学習

石徹白地区では地域の深雪時に使う民具「かんじき」の作り手がいなくなり，その継承が途絶えてしまうことが危惧されている。そこで 2022 年 8〜9 月の約1ヶ月間の滞在研究を通して，「かんじき」の作り方やそれを用いた仕事・生活についての記憶を持っている地域住民のお話を集め，地域づくり団体とともに「かんじき」の作り方の再生に取り組んだ。同時に，農山村地域で暮らす子どもたちや山村留学をしてくる子どもたちの日常的な遊びについて観察し，熱中できる遊びを通した子どもたちと地域との接点の形成過程や，信頼する大人の介入の必要について確認した。

6. 終わりに

本研究では，当初ゲームにこだわりの強い子どもや若者を対象としてまちづくり学習を組み上げ，4 つの特徴を抽出した。佐原地区や石徹白地区においては，子どもや若者の関心や熱中できる遊びを用いながら，地域住民と共にまちづくり学習を支える仕組みづくりを検討した。都市部と農山村地域では環境の違いも影響し，学びのあり方として山村留学や交換留学にも期待が寄せられる。都市・農村を含めた複数地域の連携について引き続きの検討が課題である。

＊1 オンラインでつながった仮想世界でプレイヤーが冒険をしたり，ブロックを積み上げて建物等を自由に作ったりすることができるゲーム。

〔発表論文〕 未発表

【助成 37－43】

教員育成スタンダード化政策における女性管理職育成に関する調査研究
―先進的な取組を中心に―

代表研究者　立教大学コミュニティ福祉学部　助教　跡部　千慧
共同研究者　山形大学学術研究院　教授　河野　銀子
共同研究者　和洋女子大学人文学部　教授　田口　久美子
共同研究者　関西福祉科学大学健康福祉学部　教授　池上　徹
共同研究者　北海道教育大学教育学部　教授　木村　育恵

〔研究の概要〕

本研究は、教員の人材育成及びキャリア形成に関する新たな政策である「教員育成指標」が、女性管理職育成に与える影響を明らかにすることを目的としたものである。新型コロナウイルス感染症（Covid-19）感染拡大により、当初予定していたインタビュー調査を中止せざるを得ない状況が続いているが、これまでに、第 1 に「教員育成指標」が登場した政策的背景、第 2 に 2000 年以降の東京都の教育改革の歴史的過程、第 3 に、47 都道府県の「教員育成指標」の分析を進め、さらに第 4 に、新型コロナウイルス感染症（Covid-19）感染拡大下での教員労働の実態を捉えるために、パイロット調査を実施してきた。

本年度は、これまでの成果に基づいて、2023 年 7 月から 8 月に実施するインタビュー調査の準備を進めた。コロナ禍の変化を踏まえながら、「教員育成指標」下における女性のキャリア形成の課題を考察する予定である。

〔研究経過および成果〕

1　問題の背景と研究の目的

本研究の目的は、「教員育成指標」が女性教員の働き方や職能形成、キャリア形成にもたらす影響を捉えることである。

「教員育成指標」は、「教育公務員特例法の一部を改正する法律」（2017 年 4 月施行）によって、都道府県等教育委員会による策定が義務化されたものである。具体的には、初任期（県によっては入職前の教員養成期）からベテラン期、または、管理職期までを見通して教員のキャリアステージを幾つかの段階に区分し、各段階でどのような資質能力を身につけるべきか、教員が達成すべき要件を指標としてかなり細かく設定、規格化しているものである。

本研究では、こうした国の政策に先んじて教育改革を行なってきた東京都に着目し、一般教員、とりわけ新たな職位に就いて管理職キャリアの流れに乗っている教員を対象に、インタビュー調査を実施することを計画している。新型コロナウイルス感染症（Covid-19）の感染拡大により、本年度における調査の実施は困難であったが、これまでに着手した 4 つの分析――①「教員育成指標」が登場した政策的背景、②2000 年以降の東京都の教育改革、③47 都道府県の「教員育成指標」、④新型コロナウイルス感染症（Covid-19）感染拡大下での教員労働の実態――を踏まえて、2023 年 7 月から 8 月に実施する調査の準備を進めた。以下では、これまでに明らかになったことをまとめる。

2 「教員育成指標」が登場した制度的背景

「教員育成指標」は、一連の教員養成改革に位置づくものである。中央教育審議会 2015 年(184 号)答申では、スタンダードを作成することによって、教員養成改革を遂行しようとする方向性が打ち出された。こうした動向を踏まえて、文部科学省が示したモデルに沿った「教員育成指標」を都道府県教育委員会と大学等が協働で策定することが要請されるにいたった。現行の制度では、国が策定した指針を参酌して「教員育成指標」を策定することが義務づけられている。

3 東京都の教育改革

東京都では、2000 年に、「能力開発型人事考課制度」を導入し、給与と連動したかたちでの教員評価制度を導入してきた。さらに、2003 年の「主幹教諭」に始まり、国に先駆けて、新たな職種を導入し、階層式の教員組織を構築してきた。

「教員育成指標」に関しては、策定義務化(2017 年 4 月)に先立ち、2017 年 2 月に東京都教育委員会が、教員育成協議会を設置し、2017 年 7 月に東京都の「教員育成指標」を策定した。

4 東京都の「教員育成指標」の特徴

東京都の「教員育成指標」には、3 つの特徴がある。第 1 に、入職 11 年目以降の「指導教諭」「主幹教諭」段階の中に、新たに「教育管理職候補者」のステージを盛り込んだことである。

第 2 の特徴は、東京都の「教員育成指標」における「教員が身につけるべき力」の指標項目が、教員で 5 指標 41 項目と多いことである。素案の段階での 19 項目から策定段階では 41 項目と、項目が 2 倍以上に増えたことになる。

第 3 に、「教員育成指標」と研修が連動していることである。教育行政が管理するシステム上で、教員個々人が、行政から示された研修を、どれだけこなしたのかの履歴が蓄積されていく仕組みになっている。

5 コロナ禍の実態を踏まえた調査計画

コロナ禍における教員の教育活動と生活の実態を捉えるために、2020 年 12 月から 2021 年 1 月に、アンケートとインタビューによるパイロット調査を実施したところ、教職においても、女性がコロナ禍によるマイナスの影響を受けている可能性があることが示唆された。今後のインタビュー調査においては、子育てや介護を抱え、2020 年の全国休業時に出勤できなかった女性教員と、その女性教員の代わりに校務を担った男性教員の間でのキャリア形成にいかなる差が出ているのかに注視する必要がある。同時に、現場の教員に、「教員育成指標」は、どのように受け止められ、キャリア形成に影響しているのかも解明していく。

〔発表論文〕

1. 木村育恵・跡部千慧・村上郷子・河野銀子・田口久美子・池上徹・井上いずみ・高野良子「教員育成指標は教員の働き方に何を及ぼすか――教員版・ジョブ・ディスクリプションの課題」『北海道教育大学紀要(教育科学編) 』第 72 巻第 1 号, 11-19 頁,2021 年 8 月
2. 跡部千慧・木村育恵・河野銀子・池上徹・高野良子・村上郷子・田口久美子・井上いずみ「ジェンダーの視点からみたコロナ禍における教員生活及び教育活動の実態と課題――教員を対象にしたパイロット調査をもとにして」『国際ジェンダー学会誌』第 19 号, 2021 年 12 月

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5年5月1日　発行