

研究助成  
成果報告論文集  
(令和3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37回(令和元年度)研究助成

成果報告論文一覧

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
2	いつでも、どこでも、誰でも飲料水を実現する水浄化ナノ薄膜	山形大学 理学部 教授 松 井 淳
3	排水処理技術発展のためのインテリジェント画像活性細胞選抜法を用いた微細藻類の指向性進化法	東京大学 大学院理学系研究科 教授 合 田 圭 介
4	脱炭素化に向けた気候変動政策と再生可能エネルギー政策が日本の経済と産業構造に与える影響の定量評価研究	京都大学 大学院経済学研究科 教授 諸 富 徹
5	CO2フリー燃焼からの高性能伝熱装置の設計・開発	香川大学 創造工学部 教授 奥 村 幸 彦
6	黒潮海流を中心としたアジア圏海洋中微細マイクロプラスチックの環境中挙動国際共同解明	千葉工業大学 創造工学部 准教授 亀 田 豊
7	再生可能エネルギーを利用したデマンドレスポンスに対応可能な電場触媒反応による低温高効率物質変換	早稲田大学 先進理工学部 教授 関 根 泰
8	「平均値」に現れない地球温暖化の実相: マヤ低地の年縞堆積物に刻まれた極端気象の歴史と現代	立命館大学 古気候学研究センター 准教授 北 場 育 子
9	位相シフトエリプソメータを用いた導電性インク塗布プロセスにおけるナノ薄膜の形成メカニズムの解明	東北大学 大学院工学研究科 助教 庄 司 衛 太
10	高速マイクロプローブによるナノ構造中局所電子状態測定手法の研究	東北大学 電気通信研究所 准教授 大 塚 朋 廣
11	界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を用いた神経伝達物質のバイオセンシング技術の創成	群馬大学 大学院理工学府 准教授 藤 沢 潤 一
13	表面プラズモン増強有機太陽電池/熱電複合デバイスの研究	新潟大学 工学部 教授 馬 場 暁
14	市街地自動運転における時間連続な軌道生成と深層学習を連携した適応的走行の実現	金沢大学 新学術創成研究機構 准教授 米 陀 佳 祐
15	非鉛かつ巨大圧電性をもつ他元素ドーパAlN,GaN薄膜の探索と物性評価	山梨大学 大学院総合研究部工学域 助教 鈴 木 雅 視
16	キャリア高調波で自己励磁可能な電動車向け磁石フリーモータの開発と最適な制御手法に関する研究	静岡大学 工学部 助教 青 山 真 大
17	周期流における振動翼の放出渦と推力の関係に関する実験的研究	京都工芸繊維大学 機械工学系 准教授 田 中 洋 介
18	無細胞タンパク質発現系を封入した脂質膜マイクロチャンバによる膜タンパク質のハイスループット機能計測	京都工芸繊維大学 機械工学系 助教 外 岡 大 志
19	フェムト秒誘導ラマン分光法によるフォトクロミック材料の構造化学研究	大阪大学 大学院基礎工学研究科 助教 五 月 女 光
20	量子中継器へ向けた半導体量子ドット電子スピンの多値読み出し手法開発	大阪大学 産業科学研究所 助教 木 山 治 樹
21	アト秒時間域で駆動する光ファンクションジェネレーター	徳島大学 ポストLEDフォトニクス研究所 特任准教授 吉 井 一 倫
22	共振器-プラズモン強結合のダイナミック化と、顕微光コム分光によるその場観察に関する研究	徳島大学 ポストLEDフォトニクス研究所 准教授 山 口 堅 三
23	紫外光渦レーザーパルスを用いた機能性半導体ナノ・マイクロ結晶粒子の創製	九州大学 大学院システム情報科学研究院 准教授 中 村 大 輔
25	メカニカル波動伝搬構造を応用した新しい地中掘進メカニズムに関する研究	九州工業大学 大学院工学研究院 准教授 永 岡 健 司

No	研究テーマ	代表研究者
26	素粒子(ミュオン)の双極子モーメント超精密計測を実現する高精度検出器システムの開発	総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 准教授 岸 下 徹 一
27	センサ・メモリスター一体型においてセンサに向けたメモリスタのリセット特性制御とガス識別実証	富山県立大学 工学部 講師 岩 田 達 哉
28	次世代トランジスタに向けた高信頼性Ge MOS界面に関する研究	東京理科大学 工学部 助教 柯 夢 南
29	ハーモニーの感性情報を活用した和音進行生成インターフェースの開発	日本大学 文理学部 助手 植 村 あい子
30	近赤外分光法による医薬品の非破壊・迅速真贋判定のための分光デバイス非依存型判別システムの構築	武蔵野大学 薬学部 講師 服 部 祐 介
34	心拍誘発脳電位のリアルタイムフィードバックによる運動学習促進支援システムの開発	大分大学 福祉健康科学部 講師 菅 田 陽 怜
35	視-触覚間相互作用に着目した視知覚調節メカニズムの解明と半側空間無視のリハビリテーションへの応用	東京都立大学 システムデザイン学部 准教授 福 井 隆 雄
36	体外から光で制御する血流制御ツールの開発	名古屋市立大学 大学院薬学研究科 講師 家 田 直 弥
37	人間支援デバイスを利用した腎結石治療における「放射線被曝ゼロ」を目指した腎穿刺システムの確立	名古屋市立大学 大学院医学研究科 講師 濱 本 周 造
38	実形状頭部モデルを用いた脳深部ひずみ計測およびアメリカンフットボールにおける脳震盪予防への応用	中央大学 理工学部 助教 小 島 朋 久
39	心筋を用いた熱を有効活用するバイオアクチュエーターの開発	中部大学 生命健康科学部 助教 新 谷 正 嶺
41	仕事に役立つ人文系大学教育の特徴—地方で暮らす若者に着目して—	群馬大学 大学教育・学生支援機構 准教授 二 宮 祐
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
45	保育カンファレンスの問題解決機能を最大化するチェンジ・エージェントの育成に向けた探索的研究	星美学園短期大学 幼児保育学科 准教授 遠 藤 愛
46	ヘッドマウントディスプレイを用いた動画視聴時のユーザー特性の総合的解明	東京都市大学 メディア情報学部 教授 市 野 順 子
47	環境紛争の長期化が人々の行動および認識に与える影響に関する総合的研究—諫早湾干拓紛争を事例として—	立命館大学 産業社会学部 准教授 加 藤 雅 俊

第36回(平成30年度)研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
1	北西太平洋中緯度域の亜熱帯モード水の規模および物理・化学的性質の時間変化と炭素循環における役割	東北大学 大学院理学研究科 助教 高 柳 栄 子
22	塗布型Si半導体を指向した「液体Si—固体Si変換機構」の研究	北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 講師 増 田 貴 史
31	つけ爪型脈波センサの開発 —全生活時間をモニタリング可能な無拘束計測システム—	東北大学 加齢医学研究所 助教 井 上 雄 介
33	アプタマー修飾電極を用いた毒性アミロイドβの電気化学的検出システムの開発	東京農工大学 大学院工学研究院 助教 塚 越 かおり

第35回(平成29年度)研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
5	水産養殖池における水温成層逆転現象と水産病害の実態把握に関する研究	九州大学 熱帯農学研究センター 助教 尾 崎 彰 則



## 【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

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、コバルト (Co) 薄膜に酸化物絶縁体である酸化マグネシウム (MgO) のナノメートルサイズの微粒子を分散させたグラニュー層薄膜材料に着目した。MgO の添加量を様々に変えて高品位なグラニュー層薄膜を作製し、熱から電圧への変換効率が MgO の添加量に依存して大きく増加することを発見した。

#### 〔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、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。

そこで、本研究では、地球上にありふれた元素のみから構成される、強磁性金属と透明酸化物を組み合わせたナノサイズ微粒子を含有するグラニュー層構造を作製し、スピントロニクスの分野で盛んに研究されている熱磁気効果を利用して、低コストで高い熱電変換効率を有する熱電変換素子の開発を目指した。熱磁気効果の一つである“異常ネルンスト効果” (図 1) という効果について、この効果を増大する物理現象や構造制御の

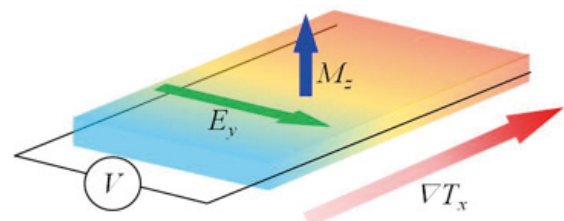


図 1: 熱磁気効果の一つである異常ネルンスト効果の概念図。

手法を応用した。本課題を目的通りに遂行することにより、これまでの熱電素子の原理とは全く異なる高効率な熱電変換システムの構築が図られ、太陽熱エネルギーなどを活用した、卓越した環境発電技術への応用展開が期待できる。本研究では、強磁性体Coと酸化物であるMgOを混合したグラニューラー薄膜を作製し、その異常ネルンスト効果および異常ホール効果を測定し、熱電変換素子の材料としての性能を調べた。

試料の作製は、マグネトロンスパッタ法を用いて $\text{Co}_x(\text{MgO})_{1-x}$ グラニューラー薄膜を酸化マグネシウム(MgO)基板上に作製した。薄膜の膜厚は100 nmとし、Coに対するMgOの添加量を様々に変化させた試料を作製した。作製した試料について、その異常ネルンスト効果を室温で詳細に調べた。薄膜面内方向に熱の勾配を加え、発生するネルンスト電圧を測定した。まず、試料のナノ構造を透過電子顕微鏡で観察した結果、平均粒径数ナノメートルのMgOの微粒子がCo薄膜内にランダムに分散した形態であることが分かった。MgOの微粒子は、その添加量に応じて互いに孤立している構造から連結している構造まで、様々な形態をとることが明らかになった。次に、異常ネルンスト効果の測定の結果、図2に示すように、ネルンスト効果の効率を表す指標の一つであるネルンスト角の大きさが、MgOの添加量の増加に従って増加し、MgOを添加していないCo薄膜におけるネルンスト角の大きさの3倍以上にまで大きく増加することが分かった。また、熱勾配の代わりに電流を印加した場合に定義される異常ホール角について同じ試料で調べた結果、MgOの添加による異常ホール角の増加はほとんど確認されず、大きく減少したこ

とから、本研究におけるグラニューラー構造では熱磁気効果のみが増加することが分かった。これにより、熱電変換効率が大きく増加するグラニューラー材料を用いて素子設計を行うことにより、熱電発電効率を高める可能性が示された。

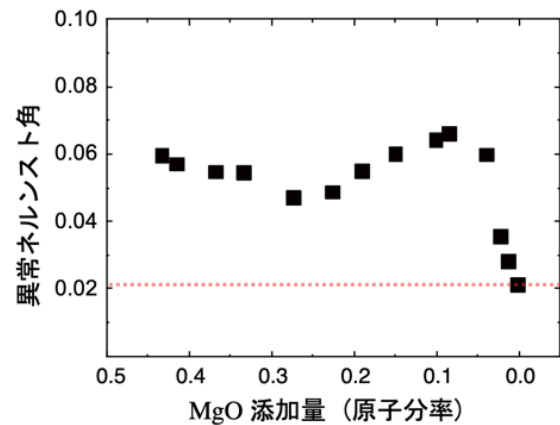


図2:  $\text{Co}_x(\text{MgO})_{1-x}$ グラニューラー薄膜における異常ネルンスト角のMgO添加量依存性。

[発表論文]

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

## 【助成 37 -02】

### いつでも、どこでも、誰でも飲料水を実現する水浄化ナノ薄膜

研究者 山形大学理学部 教授 松井 淳

#### 〔研究の概要〕

ポリドデシルアクリルアミドとポリエチレングリコールからなるブロックコポリマー[p(DDA-*b*-EG)]薄膜の加湿下によるマイクロ相分離構造を検討した。p(DDA-*b*-EG)薄膜を加湿下でアニールするとEGブロックが形成するシリンダーが膜に対して垂直に配向した薄膜を形成する事がわかった。これは pDDA ブロックが加湿下でのアニールにより高度に配向したラメラ構造を形成するためである。この垂直配向シリンダー形成は可逆的であり、水中下でアニールするという簡便な手法で、水浄化膜に最も理想的な構造を形成する、特異な高分子薄膜である。

#### 〔研究経過および成果〕

親水性と疎水性のポリマーが連結されているブロックコポリマーはポリマー間のマイクロ相分離によりスフィア、シリンダー、ラメラと言った多様な自己組織化ナノ構造を形成することが知られている。このような自己組織化構造においてシリンダー構造はその直径が数 10 nm 程度であることから、効率的な水フィルターとしての応用が考えられてきた。そのためには、シリンダーを膜面に対して垂直に配向させる必要がある。しかしながらこのような垂直配向シリンダーは熱力学的には不安定である。これは薄膜界面ではその界面と同じ濡れ性(空気の場合は疎水性、水の場合は親水性)のブロックが偏析するため、結果としてシリンダーが並行に配向した膜となってしまう。このような背景のもと我々はポリアルキルアクリルアミド(pAlkylAm)のような単純な楕円高分子が加湿化でのアニール(加湿アニール)により高度に配向したラメラ構造を形成するという特異な現象を見出している<sup>2</sup>。そこで本研究では、pAlkylAm が加湿化でラメラ構造を形成する特性を利用し、水存在下においても垂直配向シリンダーを形成する薄膜の創製と、その可逆性を検討した。

ポリドデシルアクリルアミドとポリエチレングリコールからなるブロックコポリマーp(DDA-*b*-EG)を可逆的付加開裂連鎖移動(RAFT)重合により合成した(図 1)。



図 1 RAFT 重合による p(DDA-*b*-EG)の合成

高分子は GPC 測定より比較的低い分散度 1.24 を示した。また PEG 末端のメチレンプロトンと DDA のアミドに隣接する  $\text{CH}_2$  のプロトン比を  $^1\text{H-NMR}$  より算出しブロックコポリマーの組成を p(DDA<sub>80</sub>-*b*-EG<sub>45</sub>)と決定した。そこで p(DDA<sub>80</sub>-*b*-EG<sub>45</sub>)の 5wt%トルエン溶液を用い、スピンコート法によりその薄膜を作製した。この薄膜を一般的な熱アニール(大気下、90°C 24h)を行った後、その薄膜表面構造を原子間力顕微鏡(AFM)測定により観察しところ、アモルファスな表面の

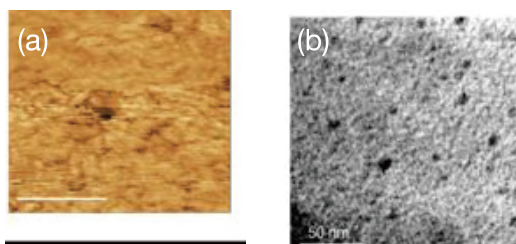


図2 熱アニールした p(DDA-*b*-EG)の(a) AFM 像と(b) 断面 TEM 像

みが観測された(図 2)。これは、より疎水的な DDA ブロックが、疎水性である空気表面に偏析したためである。実際に PEG 部位をルテニウム染色した透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた膜断面観察では、DDA と PEG 間のマイクロ相分離に基づくスフィア構造が観測された。そこで、この薄膜を相対湿度 98%で 80°C, 24h 加湿アニールし DDA ブロックのラメラ構造化を誘起した。薄膜構造を X 線回折により解析したところ、面外に強い Bragg 散乱が3次ピークまで観察され、pDDA が高度に配向したラメラ構造を形成していることが確認された。そこで薄膜表面を AFM 観察したところ、六方最密充填したドット状構造が観測された。これは pDDA のラメラ構造化により、シリンダー構造が膜垂直方向に配向していることを示唆している。そこで、加湿アニールした薄膜の断面 TEM を測定したところ PEG シリンダーが垂直に膜を貫通している様子が観測された(図 3)。98%加湿という水中の同様な環境でシリンダーが垂直に配向することから、

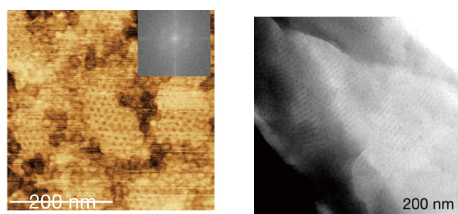


図3 加湿アニールした p(DDA-*b*-EG)の(a) AFM 像と(b) 断面 TEM 像

この薄膜を水処理下膜として応用すると、使用下で理想的な垂直シリンダー構造を自己組織的に形成する。そこで、垂直配向シリンダーを形成した膜を一度、熱アニールによりランダムな構造とした後に、再度加湿下でアニールしその構造の可逆性を検討した。加湿—加熱—再加湿の過程の AFM 像では六方最密—アモルファス—六方最密と構造変化が可逆的に起こることが確認された。膜分離に必要な垂直配向シリンダー構造が水存在下で形成できることと合わせると、本膜は特殊な装置を必要とせず単に塗布するだけで理想的な水浄化膜として働くと考えられ、いつでも、どこでも、誰もが飲料水を手に入れることが可能な分離膜としての応用が期待できる。

[発表論文]

1. Formation of Perpendicularly Aligned Sub-10 nm Nanocylinders in Poly(N-dodecylacrylamide-*b*-ethylene glycol) Block Copolymer Films by Hierarchical Phase Separation, K. Matsunaga, W. Kukai, M. Ishizaki, M. Kurihara, S. Yamamoto, M. Mitsuishi, H. Yabu, S. Nagano, J. Matsui, *Macromolecules*, 53(21), 9601-9610 (2020).

[参考文献]

2. Nanophase Separation of Poly(N-alkyl acrylamides): The Dependence of the Formation of Lamellar Structures on Their Alkyl Side Chains, K. Ebata, Y. Hashimoto, S. Yamamoto, M. Mitsuishi, S. Nagano, J. Matsui, *Macromolecules*, 52(24), 9773-9780 (2019).



【助成 37 -03】

排水処理技術発展のためのインテリジェント画像活性細胞選抜法を用いた  
微細藻類の指向性進化法

研究者 東京大学大学院理学系研究科 教授 合田 圭介

〔研究の概要〕

重金属イオンを含有する汚染水は、世界中で深刻な健康被害をもたらしている。現在、このような重金属イオンを除去するために、物理化学的手法が開発されている。しかしながらこれらの方法はコストや二次汚染の面で問題を抱えており、低コストかつ二次汚染の無い排水処理法が求められている。近年、これらの問題を解決し得る方法として微細藻類を用いた方法が注目されている。微細藻類の重金属イオン吸収能力は現状では水質浄化に十分なレベルではないものの、吸収効率の高い株を発見または創出することにより、環境問題改善に大いに貢献できる可能性がある。そこで本研究では、多数の微細藻類細胞を 1 細胞レベルで高速に画像取得・解析し、実用的な水質浄化能力を有する微細藻類細胞を発見、単離することができるプラットフォームの開発を目的とする。

〔研究経過および成果〕

本研究ではまず、ユーグレナ細胞を単一細胞になるように 96 ウェルプレートに撒き、十分な細胞数になるまで培養し、19 個のクローン細胞集団を取得した。次に、それらに銅イオンを添加してその反応を観察した。具体的には、形態変化を観察するために、オプティクタイムストレッチ (OTS: Optofluidic Time-Stretch) イメージング法 (Lei et al., Nat. Protoc 13, 1603 (2018)) を用いて単一細胞レベルで多数の画像を取得した。また、銅イオン添加後に 2 時間培養し、培養前後の培地に含まれる銅イオン濃度を計測することで、銅イオン吸収率を計算した。最後に、各クローンの銅イオン吸収率と強く相関する形態的特徴を抽出するために機械学習を用いて解析した。

図 1 に形態的特徴を観察した際に取得した単一細胞画像をランダムに抜粋して示す。ここでは、クローン化する前の細胞集団 (Original strain) と、銅イオン

添加後に丸くなる傾向が強かったクローン (Clone 3) および長い形状を維持する傾向が強かったクローン (Clone 13) を代表例として示している。図を見て分

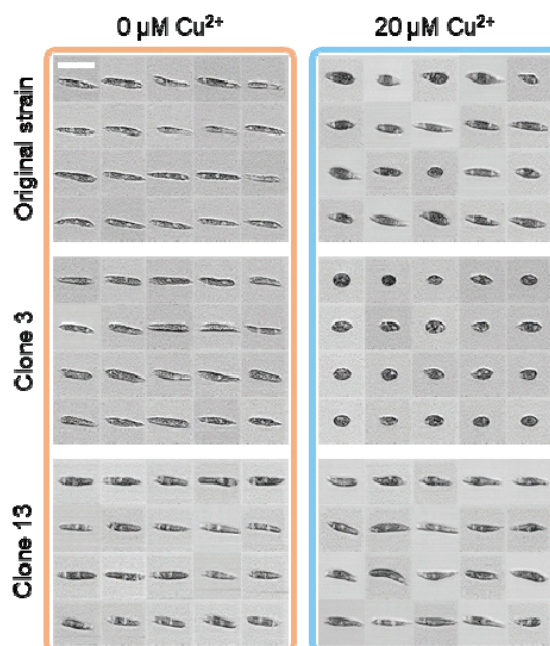


図 1 ユーグレナ細胞の形態観察結果。各条件で 144 画像取得し、ランダムに抜粋して掲載。スケールバーは 40  $\mu\text{m}$ 。

かるように、銅イオン添加前はどの細胞集団も似通った形態的特徴を示している。しかしながら銅イオンを添加すると形状の変化に Colone ごとの特徴が表れた。具体的には、Original strain では様々な形状を示す一方で、Clone 3 では円形、Clone 13 では形状変化が少ないといった特徴があった。図 1 に見せていないクローンもそれぞれの特徴が見て取れた。

図 2 は機械学習により創出したユーグレナのメタ形態的特徴と、各クローンの銅イオン吸収率の関係を示しており、強い相関があることが分かる。さらに詳しく見るために、図 3 にメタ形態的特徴の主な構成要素をメタ形態的特徴の創出時に算出される重み係数を基に示す。ここから分かるように、アスペクト比に関連する形態的特徴が多く含まれている。

以上より、ユーグレナ細胞の銅イオン吸収率を細胞の形態変化という間接的な情報から推定していることが示された。この結果で得られた知見と、形態を基に細胞を分取する手法を組み合わせることにより、銅イオン吸収率の高いユーグレナ細胞を選抜することが可能となる。このような細胞選抜法は、我々のこれまでの研究で開発できており (Nitta et al, Cell 175, 266 (2018); Isozaki et al., Nat. Protoc 14, 2370 (2019); Isozaki et al., Lab Chip 20, 2263 (2020))、これを用いることで高銅イオン吸収細胞を選抜できる。さらに細胞への変異導入プロセスを組み合わせることにより、指向性進化法への適用も可能となり、超高効率銅イオン吸収ユーグレナ細胞の創出も夢ではなくなる。

本研究は、マイクロ流体技術 (Lab on a Chip 技術) を用いて細胞を大量に撮像し、AI 技術を用いて解析した。このような技術は近年 AI on a Chip と呼ばれ大きな注目を集めている (Isozaki et al., Lab Chip 20, 3074 (2020))。この AI on a Chip 技術をフル活用し、

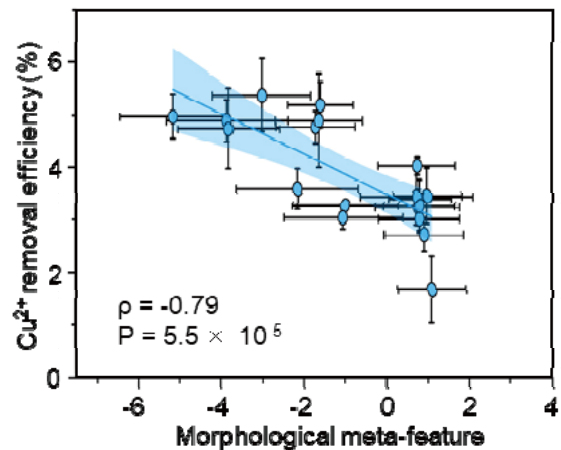


図 2 ユーグレナ細胞の重金属イオン吸収率と機械学習によって創出したメタ形態的特徴の関係

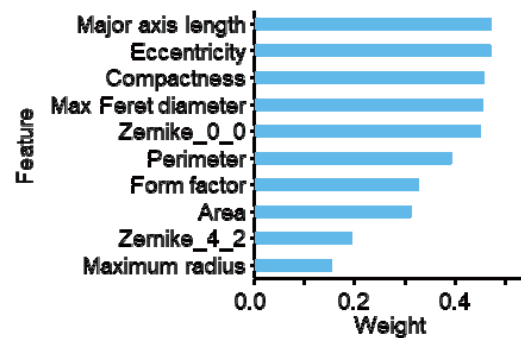


図 3 メタ形態的特徴の主な構成要素

最終目標である実用的な水質浄化能力を有する微細藻類細胞の創出が実現できれば、持続可能な社会の実現の一助になるため社会的意義の大きな研究として今後も力強く推進していきたい。

〔発表論文〕

1. Muzhen Xu, Dan Yuan, Sheng Yan, Cheng Lei, Kotaro Hiramatsu, Jeffrey Harmon, Yuqi Zhou, Mun Hong Loo, Tomohisa Hasunuma, Akihiro Isozaki, and Keisuke Goda, “A cellular morphological indicator toward directed evolution of microalgae for highly efficient wastewater treatment,” 化学とマイクロ・ナノシステム学会第 42 回研究会, online, October 26–28, 2020.

## 【助成 37 -04】

### 脱炭素化に向けた気候変動政策と再生可能エネルギー政策が日本の経済と産業構造に 与える影響の定量評価研究

京都大学大学院経済学研究科 教授 諸富 徹

名城大学経済学部 教授 李 秀ちよる

京都大学大学院経済学研究科 研究員 栗田 郁真

#### 〔研究の概要〕

本研究の目的は、(1)脱炭素化がもたらす日本経済への影響(マクロ経済)、(2)脱炭素化がもたらす産業構造への影響(ミクロ経済)、の2つの視点から定量的な研究を推進することである。(1)については、脱炭素化が日本の経済と産業に対してむしろ正の影響を与え、成長を促し、再生可能エネルギー投資拡大と低炭素技術革新を通じて雇用を増やすという結果を導いた。本研究は経済学的知見に基づいて、日本が積極的な気候変動／再生可能エネルギー政策を採用するための学術的論拠を提供したといえる。(2)については、企業の環境パフォーマンスと経営パフォーマンスの関係を定量的に分析するために、世界53ヶ国に所在する全産業分野の1,119社を対象として2018年における資本・労働・エネルギー・温室効果ガス・売上高に関するデータを収集し、望ましくない産出物を考慮したデータ包絡分析で1,119社の効率値を算出した。

#### 〔研究経過および成果〕

##### ○研究経過

研究(1)では、2050年までの長期での脱炭素化を考慮する際に、日本の経済と電源構成と二酸化炭素排出にどのような影響をもたらすかを定量的に推定するため、欧州で気候変動政策の定量評価に重用されているE3MEグローバルマクロ計量経済モデルを用いることとした。そのために、このモデルの開発・運用に責任を持っているイギリスのケンブリッジエコノメリックスと研究プロジェクト契約を結んだ。

本研究は、発電部門で二酸化炭素の排出が最も多い石炭火力発電、そして放射性リスクのある原発のフェーズアウトをメインの政策シナリオとして設定し、E3MEモデルシミュレーションを行った。2050年までの直線的なフェーズアウトシナリオ(〔発表論文〕1)と、

稼働歴の古い順に2030年、2040年のそれぞれにフェーズアウトさせる場合の複数シナリオを設定、E3MEモデルシミュレーションを行った(〔発表論文〕2、『環境経済・政策研究』投稿中)。

##### ○研究成果

シミュレーションでは、2050年までの長期を想定する場合、いずれのシナリオでも経済に悪い影響は殆ど与えないことが確認された(表1参照)。その主な要因として、石炭火力早期廃止による発電コスト上昇の経済へのマイナス影響より、再エネ発電投資増加など有効需要拡大の経済へのプラス影響が勝ることが挙げられる。

また発電部門の電源構成も、LNG火力と再エネ発電中心に再編することが確認された。そして、石炭火力フェーズアウトシナリオは、発電部門の

二酸化炭素排出量の削減に大きく貢献することも示された（2050年までに2017年に比べて約49%~50%削減）。特に、2030年の石炭火力の早期フェーズアウトシナリオは、一般の予想と異なっており、2040年の石炭火力のフェーズアウトシナリオより経済へプラス効果を与え、さらに全シミュレーション期間中340百万tの二酸化炭素排出削減をもたらすということが判明した。

ただし、石炭火力フェーズアウトシナリオは、経済に悪影響を与えず発電部門の二酸化炭素を排出削減するには有効だが、2050年に炭素中立を達成するにははるかに及ばないことも示唆された。

表1 石炭火力・原発フェーズアウトの経済影響

(単位：％、ベースラインシナリオからの乖離)

指標	2030年		2040年		2050年	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
GDP	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
消費	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
投資	1.1	0.1	0	-0.1	0.0	0.0
輸出	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
輸入	1.2	0.7	1.2	1.2	1.1	1.1
雇用	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
消費者物価	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
発電コスト	6.4	5.5	2.8	3.7	1.9	2.8

出所：本研究のE3MEモデルシミュレーションによる。

本研究(2)は、企業の環境パフォーマンスと経営パフォーマンスの関係を検討するため、資本、労働、エネルギーを投入し、のぞましい産出物として売上高、のぞましくない産出物としてGHGを生み出す企業活動の生産性を評価するデータ包絡分析を行なった。

世界53ヶ国に所在する全産業分野の1,119社を対象として2018年における資本(有形固定資産)・労働(従業員総数)・エネルギー(エネルギー使用量)・GHG・売上高に関するデータを収集し、データ包絡分析のSlacks-Based Measurementモデルを用いて、1,119社の効率値を計算し、24の産業グループごとのその平均値を求めた。その結果、グループ間の平均値は統計上有意な差があり、また、効率値の平均値の低い産業グループにおいてもトップランナーとして高評価

されるような企業が存在することが分かった。次に、同モデルを用いて各企業の非効率性の要因を調べ、いずれの産業グループにおいてもGHGの非効率値が資本・労働・エネルギーの非効率値よりも高いことが明らかとなった。さらに、各産業グループの効率値の平均値と経営指標の平均値の相関係数を計算したところ、各産業グループの効率値の平均値とEBITDA/売上高との間には有意に正の相関があり、「(資本・労働・エネルギー)・GHG・売上高を踏まえた効率値が高いという意味で)生産性が高い産業ほど、(EBITDA/売上高で示される)設備投資を反映した利益率が高い」ことを統計的に実証することができた。

[発表論文]

1. 李秀澈・何彦旻・昔宣希・諸富徹・Unnada  
Chewpreecha (2020), 「石炭火力発電と原発フェーズアウトの日本経済と環境影響分析-E3MEマクロ計量経済モデルを用いた分析」京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ディスカッションペーパー, No.16.
2. 李秀澈・何彦旻・昔宣希・諸富徹・平田仁子・Unnada  
Chewpreecha (2020), 「石炭火力発電と原発早期フェーズアウトの2050年までの日本経済と電源構成、そして二酸化炭素排出影響分析」E3MEマクロ計量経済モデルを用いた分析」京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ディスカッションペーパー, No.25.
3. 栗田郁真 (2020), 「世界53ヶ国の全産業分野における企業の生産性分析」京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ディスカッションペーパー, No.24.



〔研究の概要〕

アンモニアは水素含有量が高く、直接燃焼が可能であることから次世代の CO<sub>2</sub>フリーエネルギー源として注目されている。しかし、アンモニアの燃焼速度はメタンなどの従来の炭化水素燃料と比べて 0.06 m/s 以下と非常に遅く、難燃性を示す。そこで本研究では、先ず新燃料であるアンモニアの燃焼反応と火炎構造を詳細にふまえた上で、低 NO<sub>x</sub> 化、高負荷燃焼、およびボイラー設計へと開発を進めた。最適な燃焼設計を基に、ボイラーの高効率伝熱が図れるとともに装置のコンパクト化・クリーン設計に貢献できる。

〔研究経過および成果〕

図1のように、重管の内側よりアンモニア、水素を別々に 3m/s で噴出し、高速空気流は 8m/s として乱流火炎を生成するバーナーを設計した。高速空気流 (8 m/s) により火炎周辺部に強い乱れを与えることができる。

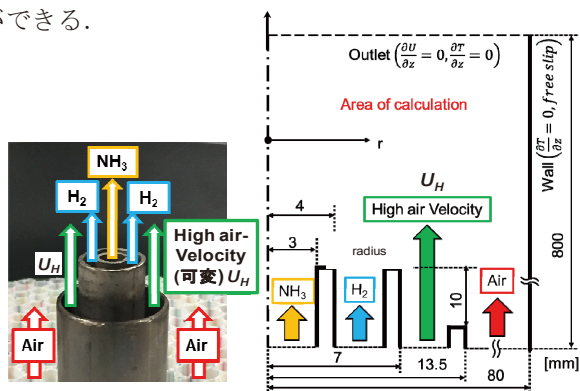


図1 バーナー設計 (3重管構造, U<sub>H</sub>: 可変高速空気)

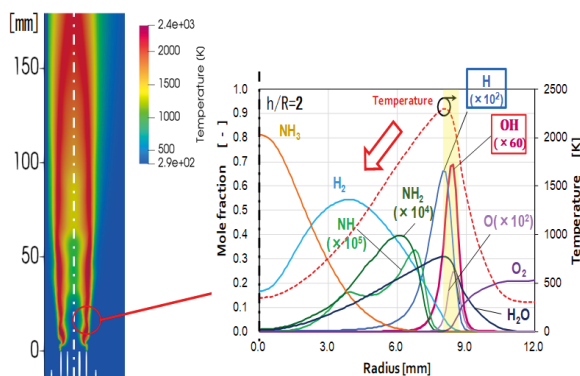


図2 NH<sub>3</sub>の燃焼維持機構 (水素によるラジカル供給)

次世代型のアンモニア燃料の使用において、火炎が安定的に生成することを実験により確認した。図2のように、乱流燃焼場により火炎中央域にまで H<sub>2</sub> 保炎起源の熱および OH, H ラジカルが迅速に供給されることにより安定燃焼が可能となる。数値解析では、RANSモデルを用い、質量・化学種の保存式、Navier-Stokes 方程式、エネルギー方程式、気体の状態方程式を解いた。図3のように、化学種・温度分布ともに実験結果とよく一致し、バーナー設計に利用できるまでコードのチューニングを行った。

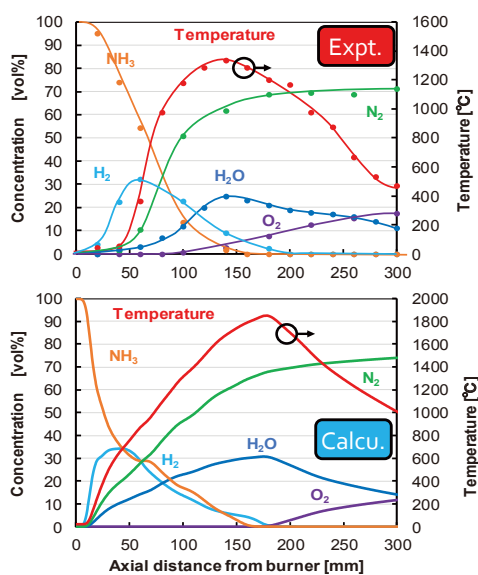


図3 バーナリムからの中心軸上の化学種および温度分布

NO<sub>x</sub>の生成・消滅機構について考察し、バーナーからのNO<sub>x</sub>低減を図った。燃料中のN成分を起源とするFuel NO<sub>x</sub>、および空気中N<sub>2</sub>を起源とするThermal NO<sub>x</sub>を分離・計算することにより、NO<sub>x</sub>の生成領域を明らかにした。図4より、Thermal NO<sub>x</sub>は、リム近傍の水素火炎付近でのみに発生し、Fuel NO<sub>x</sub>に比べて排出量は小さい。Fuel NO<sub>x</sub>について大幅に低減する必用があった。本バーナーでは、水素火炎で包含することでNO<sub>x</sub>還元領域を確保した。図5に、N系の主要な反応パス(NO<sub>x</sub>の生成・消滅)を示す。乱流によりOH、Hラジカルが供給されることでNO<sub>x</sub>生成が促進されるが、同時に燃料であるアンモニアによる還元反応が促進され、窒素へとNO<sub>x</sub>が還元できる。本バーナーの設計コンセプトの妥当性が示された。

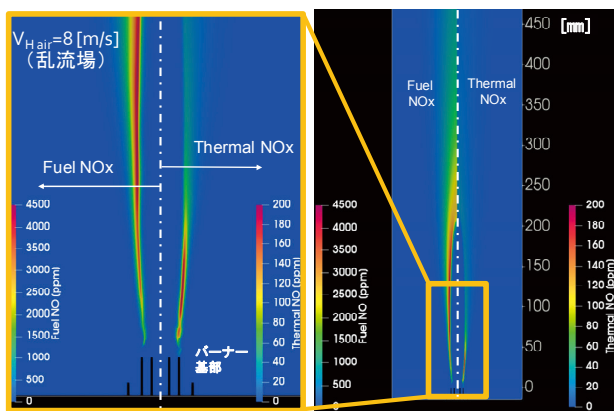


図4 Fuel NO<sub>x</sub> および Thermal NO<sub>x</sub> の分離

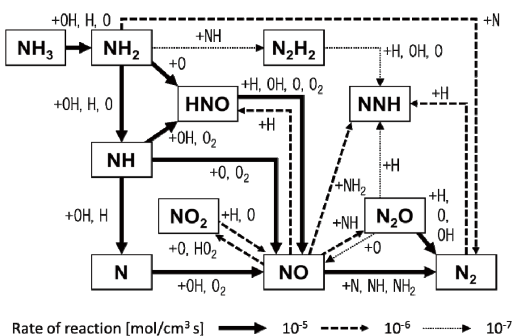


図5 NH<sub>3</sub>の分解およびNO<sub>x</sub>生成/消滅機構

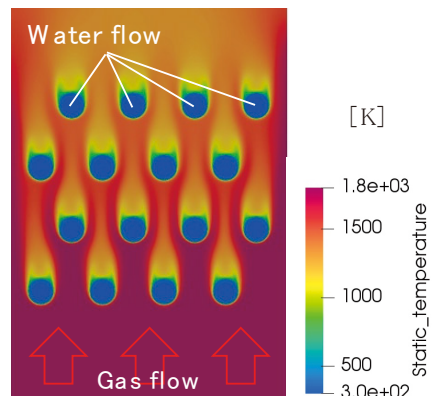


図6 ボイラ内の温度分布(水冷管:千鳥配置)

ボイラ内の水冷管配置の設計例を図6に示す。単純な平行配置ではなく、図6のように千鳥型の配置にすればより高い伝熱量にできることがシミュレートされた。今後、適切なガス温度やH<sub>2</sub>O濃度の設定、相変化の利用を設計に取り込んでいく。

【発表論文】

1. Y. Okumura, T. Hori, F. Akamatsu, T. Kitano, T. Tsubota, N. Matsuda, Numerical simulation of ammonia burner with hydrogen flame stabilizer, 31st International Symposium on Transport Phenomena, Paper No.29, 6pages, 2020 [査読有]
2. 松田, 坪田, 奥村, 北野, 堀, 赤松, 水素保炎型アンモニアバーナーのNO<sub>x</sub>反応解析, 第58回燃焼シンポジウム講演論文集, No. P113, 4 pages, 2020年(日本燃焼学会主催)
3. 奥村, アンモニアの火炎構造に関する実験的研究:CO<sub>2</sub>フリー燃焼への検討, 第30回環境工学総合シンポジウム, No.309, 4 pages, 2020年(日本機械学会主催)
4. 坪田, 松田, 奥村, 北野, 堀, 赤松, 水素保炎型アンモニア乱流拡散火炎の燃焼構造, 第29回日本エネルギー学会大会, No.5-02, pp.146-147 2020年(日本エネルギー学会主催)

## 【助成 37 -06】

黒潮海流を中心としたアジア圏海洋中微細マイクロプラスチックの環境中挙動国際共同解明

研究者 千葉工業大学創造工学部 准教授 亀田 豊

共同研究者 名桜大学国際学群 教授 田代 豊

近畿大学工学部 講師 苅部 甚一

Feng-Chia University, Dept. of Environmental Engineering and Science,

Associate Professor, LIN, Justin Chun-Te

Xiamen University, Dept. of Environment

Professor, Xinhong Wang

### 〔研究の概要〕

黒潮海流を中心とした海洋中の  $20\ \mu\text{m}$  ～  $5\text{mm}$  までの微細なマイクロプラスチック (MPs) 汚染状況を世界で初めて調査し、その汚染特性を把握するとともにウェブサイトでネット公開するシステムを構築した。さらに、世界の海洋における微細 MPs 汚染状況把握可能な、輸出入の外航船を利用した民間運輸業との地球規模共同サンプリングネットワークの構築に世界で初めて成功した。その結果、助成期間中で世界の海洋 100 地点における海水中の微細 MPs 試料を採取した。さらに、黒潮海流域を含むアジア地域すべての地点からマイクロプラスチックが  $28\sim 1210$  個/ $\text{m}^3$  検出され、海流や発生源の位置関係から濃度分布が著しく不均一で閉鎖性があることが示唆された。また、低濃度水域ほど数十  $\mu\text{m}$  の MPs が優占しており、 $20\ \mu\text{m}$  未満の MPs が地球海洋全体に微細化拡散していることが明らかとなった。本成果は地球規模の海洋中 MPs 将来汚染予測に大きく貢献すると思われる。

### 〔研究経過および成果〕

#### 1. はじめに

海洋におけるマイクロプラスチック (MPs) 汚染問題は世界的に大きな問題となっているが、実はその知見は様々な面で限られているのが現状であり未解明と言っても過言ではない。例えば、現在の調査はごく限られた水域でのみ実施され、特にホットスポットと呼ばれるアジア海域圏では全域を調査した事例は存在しない。また、対象とする MPs も約  $300\ \mu\text{m}$  以上のみであり、水生生物により生態リスクの高い数十  $\mu\text{m}$  レベルの MPs 調査は行われていない。さらに、限られた調査事例も調査方法が多様であることもあり、一

つのデータベースとして整理されていないため、海洋全体の汚染状況の把握は困難となっている。しかし、MPs 問題の解決には世界全体あるいは世界の地域別の戦略的対策が必須である。そこで、本助成研究では、 $20\ \mu\text{m}$  以上の MPs の自動分析方法を開発し、この方法により世界の海洋における  $20\ \mu\text{m}$  以上の MPs の存在状態や環境中挙動を解明するビッグデータを作成するとともに、研究者や企業がデータを閲覧し議論できるプラットフォームの構築を行った。

#### 2. 研究方法

計画では黒潮海流付近による助成者の直接現地調査であったが新型コロナウイルスのために不可能と

なった。その代替手法として、日本郵船株式会社の輸出入用外航船を調査船として航路上の海水中MPsを採取する方法に変更した。外航船乗組員に作成した調査方法マニュアルを渡し、助成期間中に図1に示す調査地点合計100サンプルのMPs試料を収集した。採集したサンプルは千葉工業大学にて開発した顕微FTIRを用いた $20\mu\text{m}$ 以上のMPs自動分析法により、MPsの濃度、サイズ分布及びポリマー組成を測定した。得られたデータのウェブ公開のため、ビッグデータマッピングシステムも開発した。

### 3. 得られた成果

図2に黒潮海流付近のMPsの濃度及び組成分布を示す。北赤道海流から黒潮を経由しアリューシャン列島に至るまでMPs濃度が増加していく傾向が見え、アジア地域からのMPsの排出の影響が示唆された。また、海流や渦による濃縮水域も発見された。これらのデータはマッピングシステム(<https://www.casio.kamedalab.com/>)で閲覧及びデータの追加が可能となっている。 $20\mu\text{m}$ 以上の微細MPsの存在特性を評価した結果は世界初となる。さらに、図4に示すように調査地点データから、MPsの高濃度水域ではサイズが大きく、低濃度地域ではミディアン径が $20\mu\text{m}$ まで低下する傾向が見られ、海洋中で排出される大きいMPsが、次第に $20\mu\text{m}$ 未満まで細粒化して全海域に拡散していることが示唆された。

### 4. 今後の展開

現在、この研究成果及び研究体制を世界的なネットワークに拡充し、「海のデジタル化(海の見える化)プロジェクト」に発展させることが笹川平和財団及び日本郵船株式会社の協力で決定した。今後は、マイクロプラスチック以外の汚染物質や地球温暖化の影響等をビッグデータとして取り込み、それによるシミュ

レーション機能も加え、企業、研究者、行政等による新しい世界的な海洋環境評価組織を誕生させる予定である。



図1 外航船による海洋中MPs調査地点

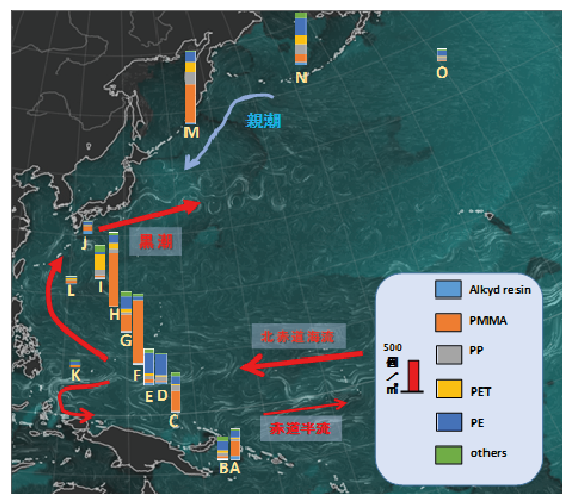


図2 黒潮海流付近のMPs濃度及び組成分布

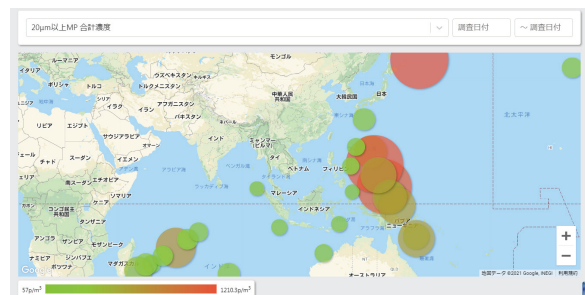


図3 調査結果を表示するデータマッピングシステムウェブページ

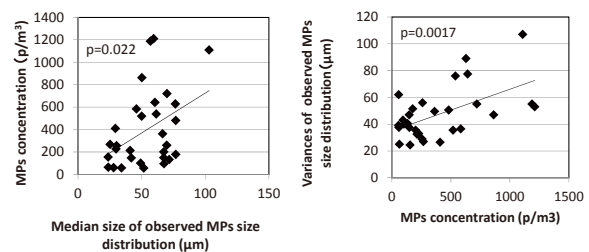


図4 海水中MPsの濃度に対するサイズ分布の分散及びミディアン径との関係



## 【助成 37 -07】

### 再生可能エネルギーを利用したデマンドレスポンスに対応可能な 電場触媒反応による低温高効率物質変換

研究者 早稲田大学先進理工学部 教授 関根 泰

#### 〔研究の概要〕

再生可能エネルギーを用いて、150℃以下の低温で外部から電場を印加した触媒反応を進め、再エネ電力と低位熱からオンデマンドで付加価値の高い基礎化学品を効率よく創出することを狙った。電場触媒反応により CO<sub>2</sub> を活性化することで、反応を低温域で高活性・高選択的に進めることができた。CeO<sub>2</sub> を担体として担持金属を検討した結果、5wt%Ru/CeO<sub>2</sub> が電場中で高活性を示した。そこで 5wt%Ru/CeO<sub>2</sub> を用いて温度変化試験、W/F 変化試験、原料ガス組成比変化試験、分圧変化試験を行い、反応機構及び電場印加効果を解明した。さらに、*in-situ* DRIFTS 測定によって反応雰囲気下での触媒表面の反応種を検討した。

#### 〔研究経過および成果〕

最初に、本目標にふさわしい触媒の担持金属を探るため、各種金属を担持した触媒を調製し、二酸化炭素の電場による 150 度での活性化を検討した。その結果、試した全ての金属(Ru, Ni, Co, Cu, Fe, Zn, Ga)で CO の生成を確認できたものの、高い活性を示したものは Ru, Ni, Co のみであった。電場を印加しない従来の系において Ru, Ni, Co を担持した触媒については担持金属が持つ H<sub>2</sub> の吸着解離能などにより、高い活性を示すことが報告されているため、従来の熱触媒反応で活性を示さない触媒は電場触媒反応でも活性を示さないことが分かった。5wt%Ru/CeO<sub>2</sub> 触媒において最も高い CO<sub>2</sub> 転化率(17.4%)及び CH<sub>4</sub> 選択率(96.4%)を示した。一方、担持量を減らした 0.5wt%Ru/CeO<sub>2</sub> 触媒では CH<sub>4</sub> 選択率が大幅に減少した。そこで低温での電場 CO<sub>2</sub> 転換において 5wt% Ru/CeO<sub>2</sub> を最適な触媒として詳細な検討を行った。

反応活性の温度依存性を評価するために、温度変化試験を行った。熱反応では 430 K よりも高い温

度域で活性が発現するのに対し、電場を印加することで 350 K 程度の低温域でも反応が進行した。CH<sub>4</sub> 選択率は温度上昇に伴い増加したが、445 K よりも高温域では選択率 98%で頭打ちとなった。一方、熱反応では 570 K 以下で CH<sub>4</sub> 選択率はほぼ 100%であったが、それより高温域では CO が検出された。アレニウスプロットによりみかけ活性化エネルギーを算出した結果、従来の熱触媒反応では 86.7 kJ mol<sup>-1</sup> となり、従来の文献値に近い値を示した。一方、電場触媒反応の見かけ活性化エネルギーは 12.5 kJ mol<sup>-1</sup> と算出され、熱触媒反応と比べて大きく低下した。以上の結果から、電場メタネーションは従来の熱触媒反応とは異なる反応機構で進行していることが考えられる。

CH<sub>4</sub> 及び CO 生成速度への影響を見るために、H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比変化試験を行った。結果より、電場印加時では量論比(H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> = 4)と一致した時に CH<sub>4</sub> 生成速度が最大となった。しかし、H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比の減少に伴い CH<sub>4</sub> 生成速度は低下するとともに CO 生成速度が増大し、最終的には RWGS の量論比(H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> = 1)にな

った時、CO 生成速度は CH<sub>4</sub> 生成速度よりも大きくなった。一方、従来の熱反応の系では H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比の減少に伴い CH<sub>4</sub> 生成速度は同様に低下したが、CO の生成は確認できなかった。したがって、熱反応では CO が生成しても電場印加時とは異なり、脱離できず金属表面に吸着したままの状態であると考えられる。電場印加により CO<sub>2</sub> の反応次数については負から正の値に増大するという挙動が見られた。熱反応では反応中間体である CO が Ru 表面に強く吸着し、負の次数を示すことが報告されており、電場を印加することでこの CO による被毒が解消された。さらに、電場印加時において CO<sub>2</sub> の反応次数(0.69)は H<sub>2</sub> の次数(0.51)よりも大きいことから、電場反応において CO<sub>2</sub> 消費速度は RWGS の反応速度に依存し、RWGS により生成した CO は速やかに水素化された。

触媒表面の反応種を調べるために、*in-situ* DRIFTS 試験を行った。電場印加時において原料ガスの H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比により反応選択性が変化したため、H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比を変化させてスペクトル測定を行った。その結果、電場印加時では H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比の減少に伴い配位数の小さい Ru サイトに吸着する CO の吸収バンド(1975 cm<sup>-1</sup>)と気相中の CO による吸収バンド(2100 cm<sup>-1</sup>)の増加が確認できた。このことから電場印加により低配位数の Ru サイトが CO までの生成パス、すなわち RWGS の活性点になっていると考える。さらに、Ru 表面上に吸着する CO が反応の活性種かを検討するために、H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> =1 の系において反応後に H<sub>2</sub> ガスのみを供給し、スペクトルを測定した。熱反応では配位数の大きい Ru サイトに吸着した CO の吸収バンド(2025 cm<sup>-1</sup>)のみの減少が見られたが、電場印加時には配位数の小さい Ru サイト由来のピークも減少した。電場を印加した反応では高配位数の Ru サイトだけで

なく、従来の熱触媒反応で活性点ではない低配位数の Ru サイトも RWGS の活性点となり、中間体である CO 生成が促進されるため二酸化炭素活性化が促進された。

これらをまとめると、5wt%Ru/CeO<sub>2</sub> が電場反応において最も高い活性を示し、5wt%Ru/CeO<sub>2</sub> 触媒への電場印加時では従来の熱反応では活性を示さない 353 K 程度の低温域で反応が進行し、見かけの活性化エネルギーは従来の熱反応で算出された 86.7 kJ mol<sup>-1</sup> と比較して、12.5 kJ mol<sup>-1</sup> と大幅に減少した。電場中では RWGS により生成される CO を中間体として経由する反応パスをとっており、分圧変化試験による反応次数の算出から、電場中では従来の熱反応で CO の強い吸着による Ru 表面の被毒が電場印加により解消された。*In-situ* DRIFTS 試験より、電場メタネーションでは従来の熱触媒反応で活性点とされている高配位数の Ru サイトだけでなく、低配位数の Ru サイトも RWGS の活性点となり、全体のメタネーションが促進されることが分かった。このように、本研究によって再生可能エネルギーを用いた低温電場反応の可能性を示すことができた。

[発表論文]

1. Kensei Yamada, Shuhei Ogo, Ryota Yamano, Takuma Higo, Yasushi Sekine, Low-temperature conversion of carbon dioxide to methane in an electric field, *Chemistry Letters*, 49(3), 303-306, 2020. doi: 10.1246/cl.190930
2. Yasushi Sekine, Ryo Manabe, Reaction mechanism of low-temperature catalysis by surface protonics in an electric field, *Faraday Discussions*, in press.

[doi: 10.1039/C9FD00129H](https://doi.org/10.1039/C9FD00129H)

【助成 37 -08】

「平均値」に現れない地球温暖化の実相：  
マヤ低地の年縞堆積物に刻まれた極端気象の歴史と現代

立命館大学 古気候学研究センター 准教授 北場 育子  
東京大学 総合研究博物館 特任研究員 大森 貴之  
岡山理科大学 基盤教育センター 准教授 那須 浩郎  
アリゾナ大学 人類学部 教授 猪俣 健  
アペリストウイス大学 地理・地球科学教室 教授 Henry Lamb

〔研究の概要〕

現代文明が直面する危機として、地球温暖化にともなう気候の不安定化(=極端気象の増加)が注目されている。長期的な視点で見た時、気候はどんな時に不安定化し、文明にどんなダメージを与えるのだろうか。この問いに答えるために、メキシコのマヤ文明の遺跡内にある湖で掘削調査をおこない、全長6.5 m の準連続な堆積物を手に入れた。堆積物の 上部 2.8 m は、年縞堆積物であり、マヤ文明がさかんに盛衰していた時代のほぼすべてをカバーしていることがわかった。得られたボーリングコアの精密対比をおこない、深度管理のためのプラットフォームを構築、年縞堆積物の分析に特化した装置の改造などをおこなった。過去の極端気象を数週間の時間分解能で復元する準備が整った。

〔研究経過および成果〕

本研究の目的は、1) マヤ文明の遺跡の中にある湖(サン・クラウディオ湖)から過去9000年分の年縞堆積物(1年に1枚積もる薄い地層)を採取すること、2) 年縞に記録された過去の気候・気象変動の歴史と極端気象の実像を明らかにすること、3) 気候の不安定化によって文明が受けたダメージを実証的に検討することである。

2020年3月、サン・クラウディオ湖でボーリング調査をおこない、全長6.5m(ボーリングコア67本)の準連続な堆積物を得ることに成功した(図1)。堆積物の上部2.8mが年縞堆積物であった。その下には砂混じりの粘土層が堆積していた。

地層に含まれる大型植物化石を洗い出し、放射性

炭素年代測定をおこなった。これによって、年縞はマヤ文明がさかんに盛衰した時代をほぼすべてカバーしていることが明らかになった。得られた地層の最下部は、紀元前8000年以前にさかのぼることもわかった。

採取したボーリングコア67本すべてについて、岩相と年縞パターンにもとづき、精密対比をおこなった。年縞堆積物については誤差1mm以内、粘土堆積物については誤差1cm以内の精密さですべての地層を共通深度軸の上に落とし込んだ(図1)。さらに、誰がどの地層を分析しても、上述の精度で地層の上下関係が瞬時にわかるようなプラットフォームも整備した。

年縞を構成する白縞・黒縞それぞれについて、鉍物分析をおこなった結果、白い縞は乾季に、黒い縞は

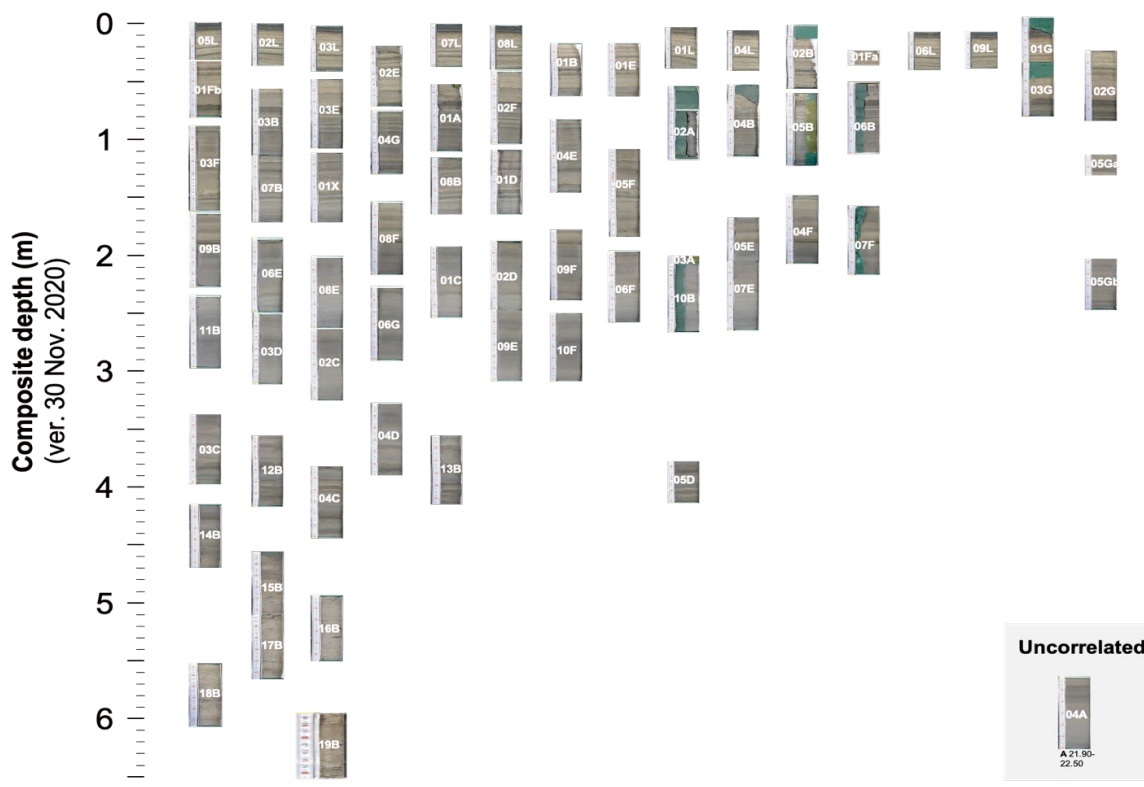


図1 サン・クラウディオ湖で採取した堆積物

雨季に堆積した可能性が高いことがわかった。つまり、年縞の中を細かく分割して分析すれば、ある年のある季節に降った雨の量や極端気象(干ばつ・大雨)の記録を復元できる。

得られた堆積物は、アベリストウイス大学所有の蛍光 X 線分析装置(Itrax)をもちいて、元素の含有量を測定する予定であった。元素の変動パターンをもとに、1) 年縞の枚数を数え、放射性炭素年代の制約として用いることで、高精度な年代モデルを構築すること、2) ある年に降った降水量を数週間スケールで明らかにすることを目指している。これを達成するために、Itrax に新たなシステムを導入し、年縞の分析に最適化した。これによって、厚さ 300 $\mu\text{m}$  にも満たない年縞から、数週間スケールの良質な「気象」変動の記録を取り出せるようになった。しかし、新型コロナウイルス感染症拡大防止のため、ラボが閉鎖されてしまったため、分析

を行うことができなくなってしまった。コロナ禍がおさまリ、アベリストウイス大学が研究活動を再開し、渡航制限が解除され次第、蛍光 X 線分析をおこなう。

まとめると、当初目標の堆積物の採取は達成したが、新型コロナウイルスの影響により、これに続く分析・解析は、ほとんどおこなうことができなかった。しかしながら、年縞から、マヤの歴史記録(碑文)と比較しうるレベルの精密な年代軸を手に入れ、気象変動を復元するための下準備は完璧に整った。ひとたび分析を開始することさえできれば、当初目標を速やかに達成できると確信している。

[発表論文]

なし



## 【助成 37 -09】

位相シフトエリプソメータを用いた導電性インク塗布プロセスにおけるナノ薄膜の形成メカニズムの解明

研究者 東北大学大学院工学研究科 助教 庄司 衛太

### 〔研究の概要〕

本研究の目的は、ナノ粒子分散液の導電性インクへの応用を鑑み、本プロセスにおいて重要な現象である動的濡れについて、その微視的な挙動を明らかにすることである。本研究では、申請者が開発した位相シフトエリプソメータを用い、純溶媒およびナノ粒子を含む懸濁液の接触線近傍のナノマイクロ液膜の膜厚分布を測定した。得られた膜厚分布より、動的濡れの特徴量として接触角と接触線の先に存在するナノ薄膜(先行薄膜)の長さを求め、濡れ現象で重要な無次元数 Capillary 数に対する依存性を評価し、ナノ粒子の影響を議論した。

### 〔研究経過および成果〕

本研究では、申請者が開発したナノ薄膜の二次元膜厚分布を動的に測定することができる位相シフトエリプソメータを用い、純溶媒およびナノ粒子を含む懸濁液の接触線近傍の膜厚分布を測定することにより、その濡れ挙動の違いを明らかにすることを目的とする。具体的には、測定した膜厚分布より接触角  $\theta_a$  [deg]と先行薄膜長さ  $L_p$  [m]を求め、濡れ現象において重要な無次元数 Capillary 数  $Ca$  ( $Ca = \mu U / \sigma$ ,  $\mu$ : 粘度[Pa·s],  $U$ : 接触線移動速度[m/s],  $\sigma$ : 表面張力[N/m])に対する依存性を評価し、微視的な濡れ現象に及ぼすナノ粒子の影響について議論する。

試料として溶媒には動粘度 20 cSt のポリジメチルシロキサン (PDMS), ナノ粒子には PDMS 修飾  $\text{SiO}_2$  ナノ粒子(一次粒子の平均粒径: 14 nm), 基板には Si 基板を用いた。実験では、試料ステージに設置した Si 基板上に、純 PDMS および濃度 1 wt% で調整したナノ粒子懸濁液の試料を 0.5  $\mu\text{L}$  滴下し、基板上の拡張液滴の固気液三相接触線近傍の液膜を位相シフトエリプソメータで観測した。

図 1 に Si 基板上に滴下した PDMS および懸濁液の液滴接触線付近について、位相シフトエリプソメー

タによる可視化結果を示す。各画像は、エリプソメトリの解析パラメータの一つである S 波と P 波の位相差  $\Delta$  の分布を示している。可視化画像では接触線は円形には見えないが、これは試料への光の入射角が  $70^\circ$  であるためであり、実験中に液滴の接触線は円形を保ったまま放射状に拡張していることを確認した。可視化画像からナノ粒子の存在が液滴の拡張速度を低下させ、拡張する液滴の接触線付近の表面形状を変化させたことは明らかである。また、可視化画像はマイクロメートルの膜厚に対応する干渉縞領域、ナノスケールの膜厚(先行薄膜)領域に対応する干渉縞のない輝度変化のみの領域に分けられる。これら干渉縞および輝度変化の解析を通じて、膜厚を測定した。

図 2 に  $\theta_a$  と  $Ca$  の関係について、実験結果および Cox-Voinov 則による予測値を示す。図 2 では、Cox-Voinov 則における巨視的代表長さ  $h_0$  および微視的な代表長さ  $h_m$  の比  $h_0/h_m$  を 10 および  $10^6$  と設定した予測値をそれぞれ示している。純 PDMS と懸濁液の実験結果の傾きは、両試料ともに Cox-Voinov 則で示される  $Ca^{1/3}$  の傾きとほぼ同じとなり、純 PDMS は  $h_0/h_m = 10$ , 懸濁液は  $h_0/h_m = 10^6$  と設定した

Cox-Voinov 則に良く一致した。これは懸濁液の接触線近傍のエネルギー散逸が純 PDMS よりも大きいことを示唆する。また、両試料で比較すると、懸濁液の  $\theta_a$  は純 PDMS よりも大きく、懸濁液の  $\theta_a$  のばらつきは大きくなった。このばらつきは、実験ごとの懸濁液ナノ粒子位置の違いに依るものと考えられる。すなわち、ナノ粒子が接触線領域に存在する場合のみ、接触線付近の液膜形状にナノ粒子の影響が顕れると考えた。

図 3 に、 $L_p$  と  $Ca$  の関係について、実験結果および断熱先行薄膜理論による予測値を示す。理論予測においては先行薄膜の先端膜厚に理論平衡膜厚  $h_e$  を用いるが、Å スケールとなる  $h_e$  の正確な測定は位相シフトエリプソメータでは難しい。そのため、先行薄膜の先端膜厚を  $h_e + 2 \text{ nm}$  とし、図 3 には先端膜厚を  $h_e + 2 \text{ nm}$  とした理論値も示している。純 PDMS と比較すると懸濁液は全体的に小さな  $Ca$  にシフトしているものの、同様な  $Ca$  依存性を示し、両試料ともに  $h_e + 2 \text{ nm}$  とした理論値に近い値を示した。よって、本実験の膜厚範囲および  $Ca$  範囲においては、ナノ粒子を添加した懸濁液のナノ薄膜の形成メカニズムは断熱先行薄膜の理論で説明できることが示唆された。断熱先行薄膜理論に従うと、本測定では正確に測定できなかった膜厚を有する液膜が数百  $\mu\text{m}$  から数 mm の範囲に広がっている可能性がある。しかし、断熱先行薄膜の理論では連続流体を仮定しているため、 $h_e + 2 \text{ nm}$  以下の膜厚領域を正しく記述できているかについてはさらなる検討が必要である。また以上の結果から、ナノ粒子の存在は液滴全体の拡張を抑制するが、先行薄膜内にナノ粒子がほぼ存在しない場合には先行薄膜長さに影響を与えない、すなわち先行薄膜長さ  $L_p$  は接触線速度  $U$  によって決定されることが示唆された。

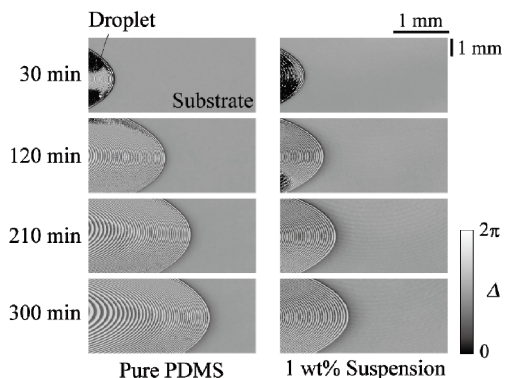


図 1: 位相シフトエリプソメータを用いた Si 基板上の純 PDMS と懸濁液の液滴接触線近傍の可視化結果

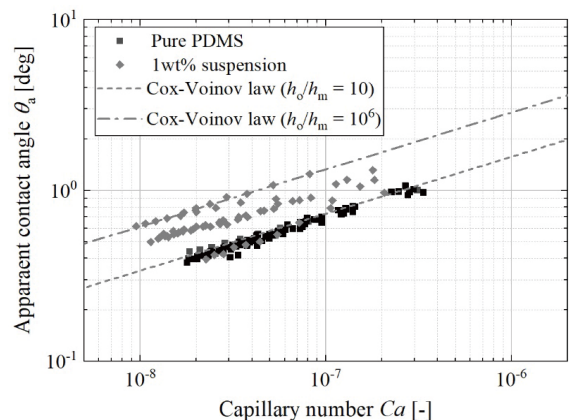


図 2: 接触角  $\theta_a$  と Capillary 数  $Ca$  との関係

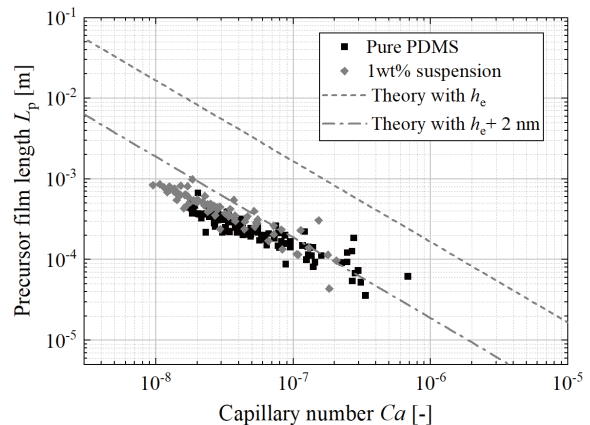


図 3: 先行薄膜長さ  $L_p$  と Capillary 数  $Ca$  との関係

[発表論文]

1. 庄司衛太, 金子峻大, 米村建哉, 久保正樹, 塚田隆夫, 小宮敦樹, 「Si 基板上的 SiO<sub>2</sub> ナノ粒子 / PDMS 懸濁液の微視的濡れ挙動の測定」, 第 57 回日本伝熱シンポジウム, (2020).

## 【助成 37 -10】

### 高速マイクロプローブによるナノ構造中局所電子状態測定手法の研究

研究者 東北大学電気通信研究所 准教授 大塚 朋廣

#### 〔研究の概要〕

ナノ構造中の局所的な電子状態、およびそのダイナミクスの理解は、物性科学やナノサイエンス等の基礎科学、各種センサーやエレクトロニクスデバイス等への応用の両面で重要性が増している。一方、半導体微細加工技術の進歩により、半導体量子ドット等の人工量子系を作製し、その内部準位を活用した新しい測定が可能となってきている。本研究では、ナノ構造中の局所的な電子状態を直接的に調べることで半導体量子ドット等を用いた局所電子状態プローブ、電子状態のダイナミクスを明らかにするための高速電気測定手法を組み合わせた高速マイクロプローブについて、その測定手法の研究を行った。そして、ナノ構造中の局所電子状態を測定し、ナノ構造内部で生じる電子状態の詳細について、マイクロで動的な視点から調べた。

#### 〔研究経過および成果〕

固体ナノ構造中の局所的な電子状態を調べるためには、局所状態を直接検出できるマイクロなプローブが有用となる。このようなマイクロなプローブとして、これまで半導体量子ドット等の人工量子系を活用したプローブを開発してきた。半導体量子ドットは電子を微小領域に閉じ込めたデバイスで、微小静電容量に伴う単電子効果や、サイズ量子化に伴う量子効果が発現し、内部に離散的な準位が形成される。またこの準位は、半導体量子ドットの金属電極に印加する電圧により制御することができ、人工量子準位として活用することができる。半導体量子ドットを測定対象に結合させ、この人工準位への電子の移動を調べ、信号を解析することにより、局所的な電子状態の情報を得ることができる。

本研究では、この半導体量子ドットを用いたプローブを活用した測定手法について研究を行った。このプローブ動作においては、半導体量子ドット内の準位への電子の移動を、単一電子のレベルで電氣的に検出することが重要となる。近年ではこの単一電子

レベルでの電荷の検出を、高周波を活用した高速電気測定により行うことが可能となっており、局所電子状態のダイナミクスまで調べることができるようになってきた。この状況をさらに発展させるためには、測定に影響するノイズの解明等が重要となる。そこで高周波を活用した高速マイクロプローブ測定系を構築し、デバイス、高周波共振器、高周波測定回路を含めた、全測定系におけるノイズの詳細を調べた。高速マイクロプローブ測定系からの信号を、高速デジタルを用いて実時間で高速に測定し、この測定データに対して高速フーリエ変換を施して解析を行った。この結果、ノイズ強度の周波数依存性を調べることができ、ここで観測された特徴的な周波数特性を、高周波共振器、高周波測定回路を取り入れたモデルにより再現し、解析した。

また測定されたノイズ強度には、測定回路だけでなく、半導体量子ドットプローブ試料中で生じるノイズの影響も含まれる。このノイズについても解析を行い、半導体量子ドットの制御電圧依存性を精密に調べた。この結果、ノイズ強度が制御電圧に依存する現象を

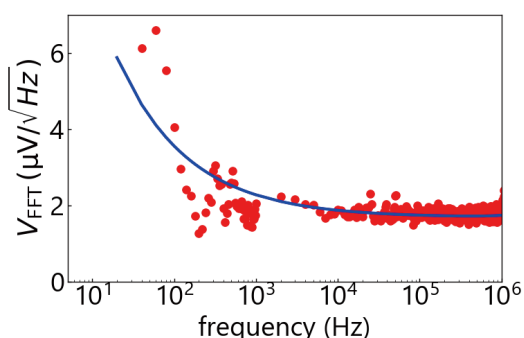


図 高周波高速電気測定におけるノイズ (赤) とモデル解析 (青) の結果

観測し、プローブ感度とノイズとの間の関係性を明らかにした。さらに実データの解析においては、積分操作が行われるが、ノイズの周波数特性を反映して、積分時間に応じて主要なノイズ要素が変化することを明らかにした。これらの結果を活用し、高速マイクロプローブ測定を改良した。

そしてこの測定手法を活用して、半導体ナノ構造中の局所スピン現象および量子状態ダイナミクスの測定を行った。半導体量子ドット内に形成される準位の中には、スピン依存性を持つものが存在する。このスピン依存準位への電子の移動を調べることにより、半導体量子ドットが結合している領域の局所的なスピン状態を調べた。さらにこのスピン状態として少数電子スピンを用いることにより、スピンの量子力学的状態まで測定を行うことができる。半導体 2 重量子ドット中の 2 電子状態を用いて形成される量子状態について測定を行い、量子状態の高感度高速測定を実現した。また量子状態を半導体量子ドットのパラメータを通して制御し、時間発展させ、そのダイナミクスについて電氣的ポンププローブ手法と組み合わせて高速な測定を行った。この結果、コヒーレンス振動等の量子系のダイナミクスについて観測し、その物理解明を進めた。

さらにここで開発してきた測定手法は、従来からの半導体ナノ構造だけでなく、新しい材料の電子物性解明においても有用となる。そこで新しい材料にもこの測定技術を活用した。窒化ガリウムは大きなバンドギャップを持ち、パワーデバイスや高周波デバイスにも魅力的な材料である。窒化ガリウムヘテロ構造のデバイスに測定手法を活用することにより、多重量子ドットの形成とこれによる電子輸送現象を観測した。この解析により、不純物等によるポテンシャル変調等の量子ドット形成のメカニズムを明らかにし、材料評価につながる知見を得た。

これらの結果は、固体ナノ構造中の局所電子状態の新しい測定手法を進展させ、局所電子状態についての新しい知見を得るものであり、今後のナノ構造を活用したエレクトロニクスデバイスの開発等においても有用になると考えられる。

[発表論文]

1. “Gate voltage dependence of noise distribution in radio-frequency reflectometry in gallium arsenide quantum dots”,  
Motoya Shinozaki, Yui Muto, Takahito Kitada, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takumi Ito, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Seigo Tarucha, and Tomohiro Otsuka,  
arXiv:2012.04177.
2. “Formation of quantum dots in GaN/AlGaN FETs”,  
Tomohiro Otsuka, Takaya Abe, Takahito Kitada, Norikazu Ito, Taketoshi Tanaka, and Ken Nakahara,  
Scientific Reports 10, 15421 (2020).



## 【助成 37 -11】

### 界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を用いた神経伝達物質の バイオセンシング技術の創成

群馬大学 大学院理工学府 准教授 藤沢 潤一

#### 〔研究の概要〕

界面電荷移動遷移は、有機化合物が無機半導体ナノ物質表面に化学吸着することで起きる電子遷移であり、無色有機化合物の可視光吸収および直接電荷分離という特徴を有する。本研究では、界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱に着目し、神経伝達物質のバイオセンシングのための要素技術の開拓を目的に研究を行った。一番目の研究成果は、界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を示す無機半導体として、酸化亜鉛(ZnO)を見出したことである。二番目の研究成果は、神経伝達物質であるセロトニンの基本構造であるインドールが界面電荷移動遷移を発現することを実証したことである。両成果とも、界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を用いた神経伝達物質の低コスト・簡便な検出方法の創成のための重要な研究成果である。

#### 〔研究経過および成果〕

界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を用いた神経伝達物質のバイオセンシングのための要素技術の開拓を目的に、界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を示す無機材料と有機材料の開拓を行った。

#### (1) 界面電荷移動遷移を示す無機材料の開拓

界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を示す無機材料はTiO<sub>2</sub>に限定されており、応用研究を展開するためには、無機材料の開拓が必要である。ZnO は表面増強ラマン散乱を示すことが報告されているが、そのメカニズムおよび界面電荷移動遷移の発現に関しては、未だ明らかになっていない。そこで、本研究では、ZnO に着目して研究を行った。化学吸着基を有する様々な有機化合物との組み合わせを検討した結果、チオール化合物がZnO ナノ粒子表面に硫黄原子を介して配位結合することで、図 1(a)と(b)

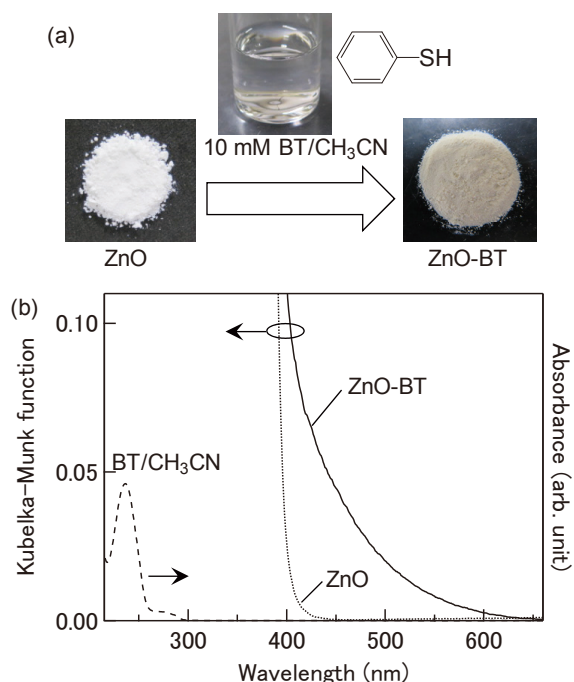


図 1. (a) ZnO ナノ粒子のベンゼンチオール(BT)吸着による発色と(b)界面電荷移動吸収の発現。

に示すように、ZnO が淡橙色に発色し、約 620 nm よりも短波長側の可視領域でブロードな吸収帯が発現す

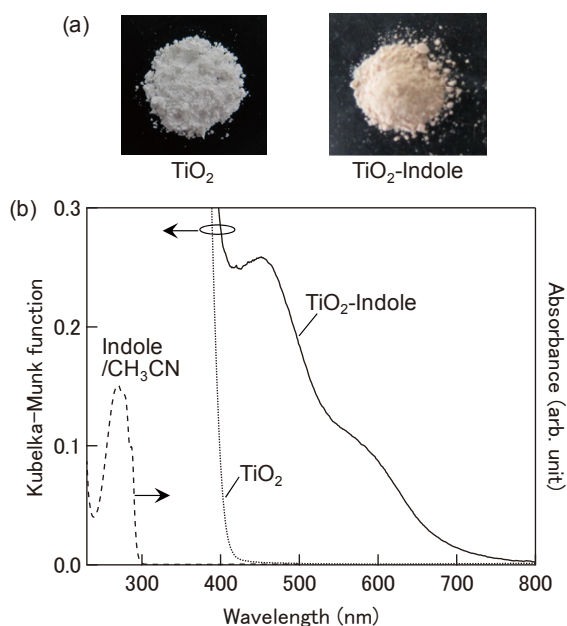


図 2. (a)  $\text{TiO}_2$  ナノ粒子のインドール吸着による発色と(b)界面電荷移動吸収の発現.

ることがわかった。光電子収量分光測定および密度汎関数理論 (DFT) 計算による電子状態解析により、この可視域の吸収帯は、吸着した BT の HOMO から ZnO 伝導帯への界面電荷移動遷移であることが明らかになった。この研究により、これまで報告されていた ZnO の表面増強ラマン散乱効果が界面電荷移動遷移に起因していることが明らかになった。[1]

## (2) 界面電荷移動遷移を示す有機材料の開拓

現在、多く種類の生体分子が神経伝達の機能を有していることがわかっている。表面増強ラマン散乱による神経伝達物質の検出を行うためには、代表的な神経伝達物質の界面電荷移動遷移による表面増強ラマン散乱の実験データが必要不可欠である。すでに、ドーパミン等のカテコール系神経伝達物質の表面増強ラマン散乱に関しては報告があるが、それ以外の神経伝達物質に関してはまだ報告例がないのが現状である。そこで、本研究では、まだ報告例が

ないセロトニンに着目した。セロトニンは、窒素原子を含むインドール骨格に、水酸基やアミノエチル基が付加した有機化合物である。本研究では、まず、インドールにおける界面電荷移動遷移について検討を行った。図 2(a)と(b)に示すように、溶液浸漬法により、 $\text{TiO}_2$  ナノ粒子表面にインドールを吸着させることで、 $\text{TiO}_2$  ナノ粒子が橙色に発色し、800 nm から全可視領域に渡って、界面電荷移動吸収を示すことがわかった。さらに、赤外吸収分光により、インドールは窒素原子を介して、 $\text{TiO}_2$  表面に化学結合することで、界面電荷移動吸収が発現することが示された。本結果は、セロトニンの界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱検出に向けた重要な成果である。[2]

以上、本研究では、界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を用いた神経伝達物質のバイオセンシングの要素技術の創成を目的に、界面電荷移動遷移を示す無機材料と有機材料を開拓することに成功した。今後、界面電荷移動遷移に基づく表面増強ラマン散乱を用いて、低コストで迅速な生体分子検出の実現が期待される。

[発表論文]

1. J. Fujisawa, N. Kaneko, and M. Hanaya, Interfacial Charge-Transfer Transitions in ZnO Induced Exclusively by Adsorption of Aromatic Thiols, *Chem. Commun.*, **2020**, 56, 4090-4093.
2. J. Fujisawa, Interfacial Charge-Transfer Transitions between  $\text{TiO}_2$  and Indole. *Chem. Phys. Lett.*, **2020**, 739, 136974.

## 【助成 37 -13】

### 表面プラズモン増強有機太陽電池／熱電複合デバイスの研究

代表研究者 新潟大学工学部 教授 馬場 暁

共同研究者 新潟大学工学部 助教 ラートバチラパイボーン チュティパーン

#### 〔研究の概要〕

表面プラズモンは、金属薄膜表面近傍や金属ナノ構造中で生じる自由電子と、特定の波長の光の相互作用により共鳴して励起することができる。このため、特定の波長で入射光の電界が数十倍以上に増強され、光吸収は著しく増加する。これにより、太陽電池などの光電変換デバイスではフォトキャリア増加に起因する高効率化に関する研究も行われてきている。さらに、近年、表面プラズモン励起時に発生する熱を利用した研究が注目を浴びている。本研究では、表面プラズモン効果で有機太陽電池の高効率化を行うとともに、有機太陽電池の金属電極上表面プラズモンの励起で発生した熱を熱電デバイスと組み合わせることで利用することを目的とした。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では、金属微粒子、グレーティング構造それぞれにおいて可視～近赤外域における表面プラズモン励起の確認を行った後、逆型有機薄膜太陽電池にプラズモニック構造を作製して評価・検討を行った。更に、プラズモン励起のエネルギーにより得られる熱を利用した熱電デバイスも組み合わせることで、より効率的なデバイスの検討を行った。図1に作製したITO ガラス/TiO<sub>2</sub>/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au の構造の逆型有機薄膜太陽電池を作製した。まず、ITO ガラス基板を塩酸で1 cm × 1 cmの電極構造となるようにエッチングすることで下部電極とした。その上に順に、電子輸送層の酸化チタン(120 nm)、光電

変換層の P3HT:PCBM (120 nm)、正孔輸送層の PEDOT:PSS (70 nm)をそれぞれスピンコート法により製膜、さらにその上に、真空蒸着法を用いて Au 薄膜 (150 nm)を堆積し上部電極とした。プラズモニック構造は PEDOT:PSS に金微粒子を混合(図1(左))、または BD-R をテンプレートとしたナノインプリンティング法によりグレーティング構造を形成(図1(右))することで作製した。また、Au 電極上に導電性グリースを用いて熱電デバイスを貼り合わせることで複合デバイスとした。逆型有機薄膜太陽電池のプラズモニック構造の有無によるI-V 特性の測定結果より、図1の両方の逆型有機薄膜太陽電池において、プラズモニック構造がない通常の逆型有機薄膜太陽電池よりも高い変換効率が得られることが分かった。

次に、疑似太陽光照射により得られる光熱を熱電デバイスにより測定を行った図2は PEDOT:PSS との金微粒子比 6:1、8:1、16:1 のデバイスの場合の測定結果であり、8:1と16:1の場合に金微粒子を含有することで熱電龍の増加が観測された。特に6:1のデバイ

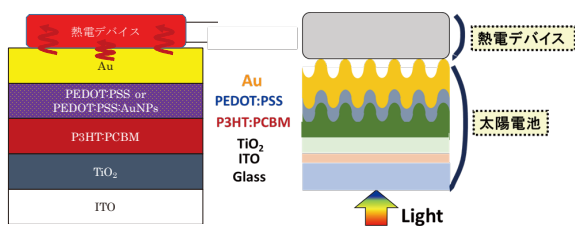


図1 作製した素子構造（金微粒子含有構造(左)、グレーティング構造(右)）

スで最も大きな熱電流の増加が観察でき、金微粒子が無い場合の熱電流 1.41 mA に比べて 1.68 mA の熱電流が発生した。また、温度上昇は、金微粒子がない場合の  $\Delta T = 5.1^\circ\text{C}$  に比べて、 $\Delta T = 6.1^\circ\text{C}$  の熱が発生した。このデバイス特性の改善は PEDOT:PSS: 金微粒子のプラズモニック構造により金電極/PEDOT:PS: 金微粒子界面で局在表面プラズモンが励起し、励起したプラズモンが散逸する過程で熱として失われるため、金電極裏面に貼り合わせた熱電デバイスの電流が増加したことによると考えられる。

次に、図 3 にグレーティング構造の有り無しそれぞれ

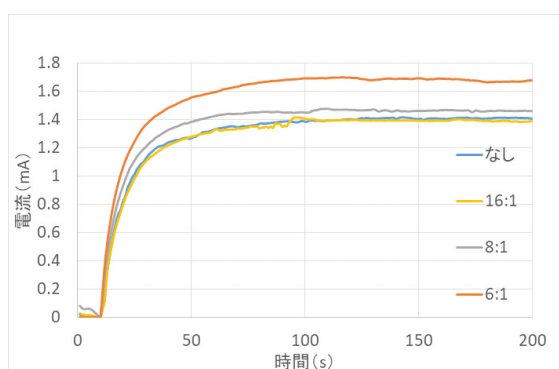


図 2 金微粒子含有デバイスへの疑似太陽光照射による熱電デバイスの電流-時間特性

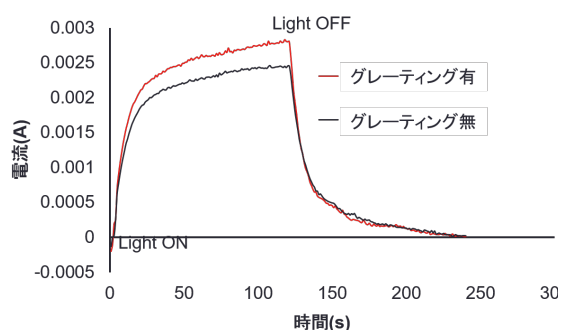


図 3 グレーティング構造を有するデバイス（とフラット構造デバイス）への疑似太陽光照射による熱電デバイスの電流-時間特性

れの場合の逆型有機太陽電池の熱電流特性を示す。グレーティング構造を有する場合と、通常のフラット構造の場合では、グレーティング構造を有する場合に熱電流の増加が観測された。このことから、伝搬型表面プラズモンの励起についても、電極で発生する光熱を向上できることが分かった。この場合は、グレーティング金電極/PEDOT:PSS 界面で生じる伝搬型表面プラズモン励起により大きな電場が発生し、一部は熱として減衰するため金電極裏面に貼り合わせた熱電デバイスの電流が増加したと考えられる。

このように、局在型プラズモン、伝搬型表面プラズモン、何れの場合でも有機太陽電池の電極で発生する光熱が向上し、熱電流として取り出すことが可能であることが示された。局在型プラズモンと伝搬型表面プラズモンを同時に励起することができれば、さらなるデバイスの効率向上が得られることが考えられる。そこで、現在我々は金属微粒子からなるグレーティング構造を作製して、光熱特性の評価・検討を行っている。今後はこの構造を用いた表面プラズモン増強有機太陽電池/熱電複合デバイスへの応用を行い、更なるデバイス特性の向上を目指す予定である。

最後に、本研究に対するご支援を賜りましたカシオ科学振興財団に心より御礼申し上げます。

[発表論文]

1. Siriporn Anuthum, Chutiparn Lertvachirapaiboon, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Kontad Ounnunkad, and Akira Baba “Fabrication of Plasmonic Photothermal Metal Nanoparticles Film”, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 14a-PB6-12, 2020 年 3 月 (みなし発表)



## 【助成 37 -14】

### 市街地自動運転における時間連続な軌道生成と深層学習を連携した適応的走行の実現

研究者 金沢大学 新学術創成研究機構 准教授 米陀 佳祐

#### 〔研究の概要〕

自動車の市街地自動運転において、一般自動車・歩行者等が混在する環境下での調和の取れた走行の実現が必須である。本申請研究では、時間連続性を保証し、教師あり学習によって多様な交通環境に柔軟に適応可能な軌道生成方法の実現を目的とする。従前よりロボティクススペースで実施される軌道生成方法を基本とし、軌道最適化時の目的関数の役割として推奨される軌道を軌道生成 DNN が出力するシステム設計を行う。この目的の達成のために、本報告では深層学習により車両挙動を予測するプランナーの設計を行った。道路の経路情報及び周辺物体の情報を参照することで自車挙動の推定精度を改善可能な点を検証した。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. 緒言

自動運転分野における深層学習の活用例としては、画像認識をはじめ周辺環境の認識に主に利用されており、その認識結果をもとに自動運転自動車の運転制御を行なっている。しかし最近の新たな取り組みとして、深層学習の技術を自動運転自動車の軌道計画及び運転制御に応用し、熟練ドライバーの運転行動を模倣するような取り組みが行われている[1]。また模倣学習は人間の行動などを模範するように学習を行う手法であり、教師あり学習と同じく正解データに基づいて学習を行う。この取り組みにより従来のルールベースの軌道計画手法に比べ、様々な走行パターンに応じた軌道を各々作成するコストを抑えられ、逐次的に適切な軌道計画を実現できると考えられる。先行研究では、自動運転自動車周辺の他車の情報、道路情報、走行経路を同じ俯瞰図で表し、抽象度の高い情報に加工したデータを用いた Deep Neural Network (DNN) を基にした自動運転自動車の軌道計画が報告されている[1]。本報告では、抽象度の高い自動運転自動車周辺の環境情報である障害物マ

ップを用い、DNN を基にした障害物回避を目的とする自動運転自動車のパスプランナーの開発を行う。そして入力データの構成が異なる 3 つのパスプランナーを用いて、入力情報の違いによる予測精度の比較を行った。

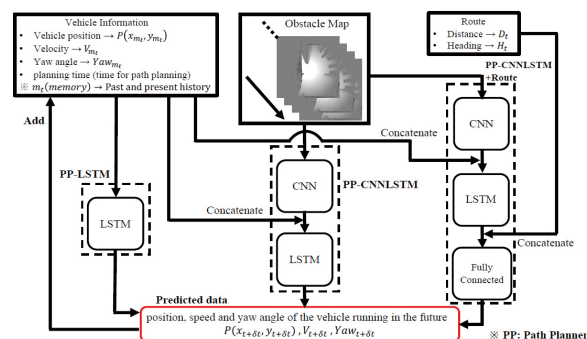


Fig1. Schematic of path planner based on DNN

##### 2. DNN を基にしたプランナーの開発

本研究で開発しているパスプランナー(PP)の概要図を Fig.1 に示す。Fig. 1 では、過去及び現在を含む自車の走行位置、速度、ヨー角、障害物マップ、そして走行経路情報を入力としており、長期的な時系列情報を保持可能な Long Short-Term Memory (LSTM)を用いて軌道計画を行う。以下に示す 3 種類のモデルを構築した。

- PP-LSTM: 車両の運動状態から LSTM により起動情報を出力
- PP-CNNLSTM: PP-LSTM に周辺障害物情報を Convolutional Neural Network として追加
- PP-CNNLSTM+Route: PP-CNNLSTM に走行経路情報を追加

時系列処理を行う入力データについては、現在を含む過去 2 秒間のデータを 200[msec]のサンプリング周期で記録したものを取り扱っている。また本手法では、平均絶対誤差(MAE)を用いて正解データとの誤差を求める損失関数と障害物マップ上で車両と障害物との衝突判定を行いそれに伴って罰則を与える 2 種類の損失関数を定義した。

### 3. データ収集と数値計算実験

本研究で入力データとして用いる障害物マップは、自動運転自動車に搭載される LIDAR の 3 次元点群データから生成される占有格子地図を採用した。周辺に移動物体が存在しない環境にて停止車両に近づきながら横方向に約 1[m]のばらつきをもって回避するような走行データを収集した。また障害物を回避しないシーンにおいては停止車両の横を通り過ぎるような走行データの収集を行った。

実験結果として入力データと DNN の構成が異なる各パスプランナーの予測精度を MAE で評価を行った結果を Table 1 に示す。Table1 にて MAE(lat)及び MAE(lon)の項目はそれぞれ、自車の横方向移動量及び縦方向移動量を対応する。実験結果より PP-CNNLSTM+Route の軌道計画時刻での MAE の値は、横方向の移動量についてはPPCNNLSTMと同等の精度があり、縦方向の移動量についても大幅に MAE の値が減少していることが確認できる。これは走行経路の情報が入力として追加されたことで障害

物マップ上の障害物と自車の位置関係が明示になり、予測精度が向上したと考えられる。しかし、障害物を回避するシーンでの縦方向の移動量の MAE 及び障害物を回避しないシーンでの横方向の移動量の MAE のそれぞれの値が PP-LSTM より大きくなっており、走行データを新たに収集しての DNN の再学習が必要だと考えられる。

### 4. 結言

本研究では、抽象度の高い自動運転自動車周辺の環境情報として障害物マップを用い、DNN を基にした静止障害物回避を目的とする自動運転自動車のパスプランナーを開発して計画軌道の推定精度を評価した。今後の課題として、移動物に対する DNN の拡張及び生成した DNN の出力とロボティクススペースの軌道計画法を結合して車両挙動への影響を評価する点があげられる。

### 参考文献

- [1] Mayank Bansal, Alex Krizhevsky, Abhijit Ogale, "ChauffeurNet: Learning to Drive by Imitating the Best and Synthesizing the Worst", RSS, 2018

Table 1 Evaluated results of proposed method and baseline method (uniform velocity motion, U.V.M.)

	Model	obstacle avoidance	straight running
MAE(lat) [m]	PP-LSTM	0.310	0.047
	PP-CNNLSTM	0.226	0.204
	PP-CNNLSTM+Route	<b>0.222</b>	<b>0.132</b>
	U.V.M	0.546	0.040
MAE(lon) [m]	PP-LSTM	0.232	0.187
	PP-CNNLSTM	0.865	0.684
	PP-CNNLSTM+Route	<b>0.280</b>	<b>0.160</b>
	U.V.M	0.328	0.334

## 【助成 37 -15】

### 非鉛かつ巨大圧電性をもつ他元素ドーパ AlN,GaN 薄膜の探索と物性評価

研究者 山梨大学 大学院総合研究部工学域 助教 鈴木 雅視

#### 〔研究の概要〕

AlN, GaN 圧電薄膜は MEMSs の電気⇄機械のエネルギー変換の源として広く用いられている。しかし、鉛系材料の PZT と比較すると圧電性が小さい。本研究では、AlN および GaN 薄膜の圧電性を増幅する安価な他元素ドーパ材の探索に向け、スパッタ法による他元素ドーパ AlN,GaN 膜の形成、結晶構造評価、数 100MHz 以上高周波領域での電気機械結合係数  $k_t^2$ 、音速評価を行った。本論文では新たに電気機械結合係数の増幅が確認できた CrAlN 膜について詳細を記す。Cr<sub>0.01</sub>Al<sub>0.99</sub>N 膜の  $k_t^2$  は純 AlN の約 1.35 倍となり、圧電性増幅を確認した。これまでに圧電性増幅が報告されている希土類 Sc をドーパした AlN と比較するとその増幅率は大きくっており、Cr ドーパは安価で AlN 圧電膜 MEMs のさらなる性能向上に繋がると考えられる。

#### 〔研究経過および成果〕

AlN, GaN は「機械損失、誘電損失が小さい」、「高いキュリー温度」、「有害物質である鉛が含まれていない」、「窒化物半導体デバイスとのモノリシック化が可能」等の特徴を有し、MEMS 用の圧電薄膜として有望である。欠点は鉛系 PZT 材料より圧電性が小さいことである。2008 年、AlN 薄膜への Sc ドーパにより圧電性が大きくなることが秋山らにより報告された。この発見以来、様々な研究機関より Yb, MgZr 等他金属元素ドーパによる AlN, GaN 薄膜の圧電性増幅が実証され、他元素ドーパ窒化物薄膜を用いた MEMs 開発も国内外問わず盛んに行われている。しかし、Sc, Yb はレアメタルであり非常に高価である。MgZr は二元素ドーパとなるので、濃度制御が難しいといった問題点がある。そこで、本研究では、AlN および GaN 薄膜の圧電性を増幅する安価な他元素ドーパ材の探索を目的とし、スパッタ法により様々な元素をドーパした AlN, GaN 膜を形成、結晶構造評価、数 100MHz 以上高周波領域での電気機械結合係数  $k_t^2$ 、

音速評価を行った。本論文では、圧電性増幅が確認できた CrAlN 膜について記す。

CrAlN 膜は RF マグネトロンスパッタ法により形成した。ターゲットには Cr インゴットを Al ターゲット上に配置したものを用い、Cr インゴット量は調節することで Cr 濃度を制御した CrAlN 膜を基板上に成長させた。

作製した AlN 及び CrAlN 薄膜の結晶配向性を  $2\theta$ - $\theta X$  線回折法を用いて評価した(図 1)。すべての試料で  $36^\circ$  付近の (0002) AlN ピークが観察された。これにより c 軸配向薄膜が形成されていることが確認できた。また、(0002)AlN ピークは Cr 濃度が増加するにつれ低角側へシフトしており、c 軸長さが Cr ドーパにより伸長することがわかった。Cr 濃度 16% で顕著であるが、Cr をドーパすることで  $2\theta=40^\circ$  付近にピークが現れた。これは AlN 結晶内に Cr が固溶せず、薄膜中に形成された CrN 粒によるものと考えられる。

次に薄膜表面に上部電極膜を形成することで薄膜音響共振子を作製し、その周波数特性から CrAlN 薄膜の圧電性評価を行った。

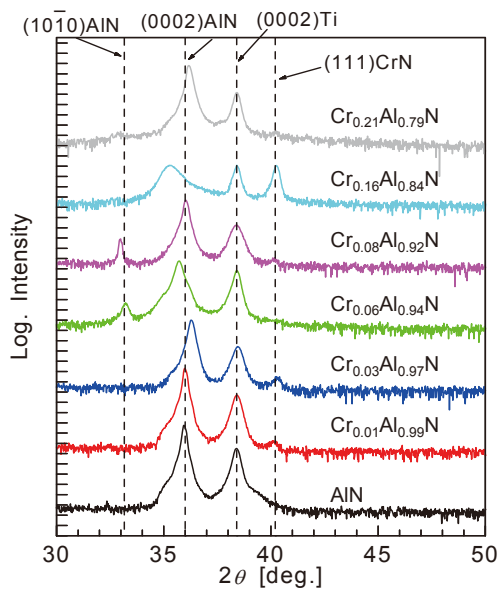


図1 Cr<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N 薄膜の 2θ-θXRD パターン

図2にCrAIN膜のCr濃度に対する電気機械結合係数  $k_t^2$  と縦波音速  $V_L$  を示す。図2(a)より、AIN膜への1-4%程度の低濃度Crドーピングによって  $k_t^2$  が増加することがわかった。特に、Cr濃度1.23% CrAIN膜の  $k_t^2 = 5.91\%$  は純AIN膜の約1.35倍であった。一方、Cr濃度  $x=4\%$  以上は、Cr濃度の増加とともに  $k_t^2$  は減少した。さらに、8%以上では音波励振は観察されなかった。これは薄膜がAINの性質が絶縁性からCrドーピングにより導電性へと変化したことに起因する。図2(b)より、縦波速度  $V_L$  はCr濃度の増加とともに減少した。この  $V_L$  の減少は、 $k_t^2$  の増幅が確認されている他の他元素ドーピングScAIN膜と同様の傾向である。

最後にScAIN薄膜の  $k_t^2$  と比較したものを表Iに示す。低濃度ドーピングについて、ScAINはSc濃度5%時、 $k_t^2 = 4.8\%$  と報告されている。それに対し今回の報告であるCr濃度1.2%時の  $k_t^2 = 5.9\%$  でありScドーピングより高い増幅率を示した。高Cr濃度においても導電性が発現しないCrAIN膜が形成できれば、ScAIN膜より高い圧電性が得られると期待できる。

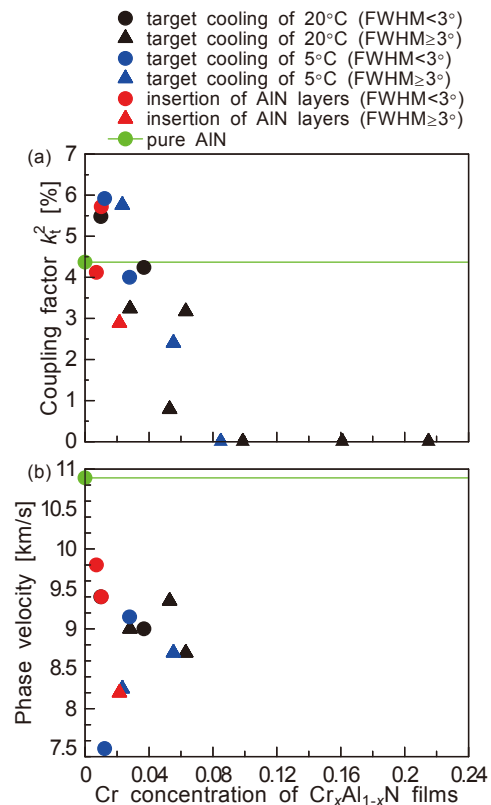


図2 Cr濃度に対する(a)電気機械結合係数  $k_t^2$ , (b) 縦波音速  $V_L$

表I AIN, CrAIN, ScAINの  $k_t^2$  の比較

	AIN	CrAIN		ScAIN	
conc.	---	1.2%	21%	5%	28%
$k_t^2$	4.3%	5.9%	---	4.8%	7.4%

[学会発表]

1. T. Takano, R. Hayakawa, M. Suzuki, S. Kakio, "Increase of electromechanical coupling coefficient in c-axis oriented AlN films by chromium doping at low concentrations, The 41<sup>st</sup> Symposium on Ultrasonic electronics, 2020/11/25.
2. 高野, 早川, 鈴木, 垣尾, Crドーピングc軸配向AIN薄膜の圧電特性, 第49回EMシンポジウム, 2020/10/6..

他学会発表2件, 論文1報査読中(21/1/29 現在)

## 【助成 37 -16】

### キャリア高調波で自己励磁可能な電動車向け磁石フリーモータの開発と 最適な制御手法に関する研究

研究者 静岡大学工学部 助教 青山 真大

#### 〔研究の概要〕

資源の乏しい我が国において、電気の効果的な利用の拡大を図り、我が国経済の健全な発展と国民生活の向上を図るためには、1 つの可能性として製造業や自動車産業など様々な分野で広く使われている“モータ”の高効率化を実現することが重要である。本研究では、モータ駆動システム上、不可避に発生する空間高調波およびキャリア高調波を界磁エネルギー源として利用できる技術基盤の構築に挑戦する。その第一歩としてそれらの高調波をモータ性能向上に利用できる技術を試作による実機検証によって確認し、その駆動特性を明らかにした。

#### 〔研究経過および成果〕

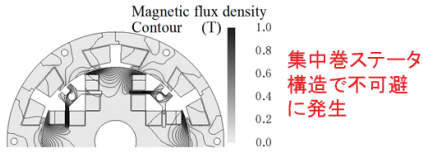
モータの小型化と銅損を低減できる集中巻構造が広く採用されている。一方、集中巻ステータ構造上不可避に発生する第 2 次空間高調波はモータ損失（鉄損）の発生源となっており、如何に低減するかが技術課題となっていた。さらに一般にモータドライブシステムは PWM 電圧制御駆動されるが、その際に制御上不可避に発生するキャリア高調波もモータ損失（鉄損）の発生源となっていた。本研究は、従来の損失を低減するという研究手法とは異なるアプローチを行い、損失の発生源となっていた高調波成分をモータ性能向上に利用することを企図するものである。図 1 に電磁界シミュレーションにより可視化した第 2 次空間高調波とキャリア高調波を示す。この高調波磁束がロータ上に配置されたロータ巻線に鎖交することで同期駆動するモータにおいてはそれらの高調波成分は非同期成分となるため、誘導起電力が発生する。その誘導起電力を図 2 に示すように、ダイオード整流回路を介して整流することでロータ巻線に界磁電流を得る

ことができ、ロータを自励で磁化させることが可能になる。本研究では、将来的な磁石フリーモータへの発展を見据えて、まずは従来構造から磁石量を半分にした図 3 に示す構造の試作機を製作し、高調波成分によって自励原理で磁化して性能向上できることを確認した。実機検証は 3 段階のステージで行うこととした。第 1 ステージでは、磁石量を半分に削減した箇所ロータ巻線を配置し、ダイオード整流回路結線し、不可避に発生する高調波成分を利用してトルクおよび効率特性が向上することを実証した。第 2 ステージでは、ロータ巻線のダイオード整流回路にインピーダンス調整用のコンデンサを付加し、LC 共振原理によってロータの磁化量を共振周波数近傍で向上できることを実証した。現在は第 3 ステージの段階であり、第 3 ステージではキャリア周波数と共振する LC 共振回路をロータ巻線ダイオード整流回路内に付加し、キャリア周波数と空間高調波の双方によってモータ性能向上を実現する。

図 4 に上記の実機検証結果を示す。同図にてト



### 第2次空間高調波



### キャリア高調波

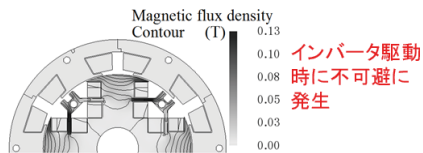


図1. 電磁界シミュレーションによる高調波磁束可視化

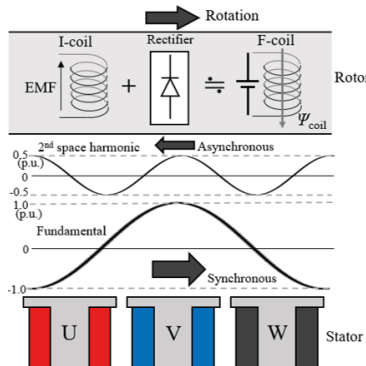


図2. ダイオード整流による自励原理

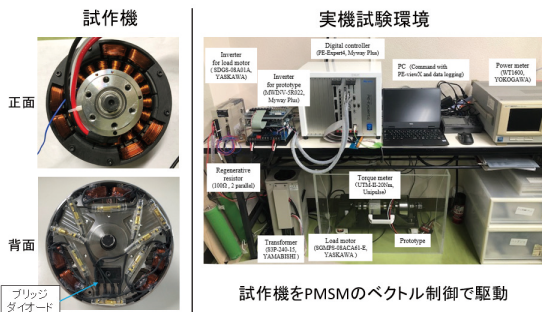


図3. 試作機および試作機評価システム

ルク特性向上および高効率領域拡大により、第1ステージの目標を達成した。発表論文 No.3 にて LC 共振周波数近傍によるトルク特性向上を確認でき、第2ステージの目標を達成した。図5に電磁界解析シミュレーションによる第3ステージに事前検討結果を示す。同図から、電磁界解析シミュレーションにおいては第3ステージに目標を達成できる見込みである。

今後の予定は、現在実機検証中の第3ステージに

おける駆動評価結果をまとめる。それらの研究成果を基盤として当該原理で駆動するモータの設計指針を明らかにし、磁石フリー化構造の磁気回路構築に取り組む。電動車用モータの要求仕様で試作を行い、実機検証することでその技術基盤を確立させ、査読学術論文への投稿、共同研究先の公募や技術展示への出展を行い、本研究成果を広く社会へ発信していく。

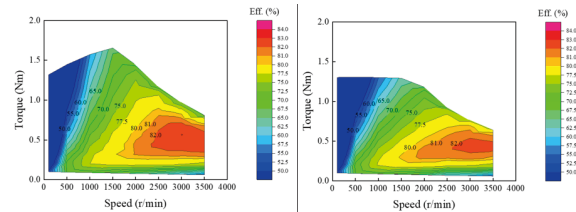


図4. 効率マップ実機評価結果(左:提案, 右:比較対象)

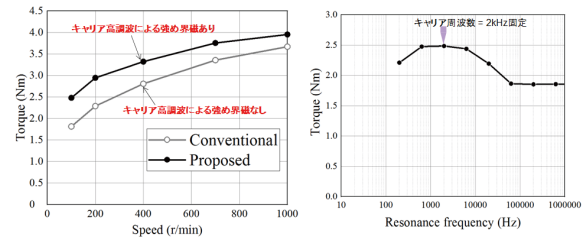


図5. キャリア高調波利用による性能向上検証

[発表論文]

1. 熊井巧・**青山真大**:「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータの提案と実機検証」, 電気学会論文誌D, Vol.141, No.4, pp.1-12 (採択決定, 2021年4月号)
2. **青山真大**・熊井巧:「空間高調波自励式巻線界磁形同期モータにおける可変速特性の考察」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, MD-21-025, Jan. 2021.
3. 熊井巧・**青山真大**:「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC共振利用における低速性能向上」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, MD-21-024, Jan.2021.

## 【助成 37 -17】

### 周期流における振動翼の放出渦と推力の関係に関する実験的研究

研究者 京都工芸繊維大学機械工学系 准教授 田中 洋介

#### 〔研究の概要〕

本研究は、港湾施設の保守点検に用いる魚型自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) の水中運動高機動化を目的とする。とくに素過程をモデル化した周期流における振動翼について、放出渦と推力の関係を中心に研究を行った。得られた結果は、周期流と振動翼の振動周波数比が増加すると放出渦の渦間隔が狭まり、周期流の影響が推進力に対して小さくなることが明らかになった。さらに、周期流と振動翼の周波数比が等しいときに相対位相差を変化させると、 $\Delta\phi=0.75\pi$  と  $1.75\pi$  で揚力係数が 0 になることがわかった。

#### 〔研究経過および成果〕

日本国内では高度成長期に多くの港湾施設が開港されてきた。老朽化に伴い適切な維持管理計画の策定が増加し、根拠となる現状把握が重要な位置を占めることになる。現状では、作業員やダイバーによる目視が中心に行われており、遠隔操作型の無人潜水機の利用も進んでいる。今後は安全強化、省人化、低コスト化が求められており、自立型無人潜水機に対する期待と関心が高まっている。本研究では、港湾部における魚型ロボットの水中機動を念頭において素過程をモデル化した周期流における振動翼について実験を行った。

本実験は図 1 に示す回流水槽中で実施した。この装置の観測部には任意の周波数で振動する NACA0012 翼を設置し、翼断面周囲の速度場を画像計測の 1 つである PIV (粒子画像流速測定法) で 2 次元速度場を計測する観測システムが備わっている。断面部は水槽下部に設置したミラー越しに高速度カメラによって記録される。また、翼回転部の支持棒に揚抗計を取り付けているため、翼に生じる推力と揚力が測定可能である。さらに、港湾部の複雑な流れを

模擬した周期流はファンクションジェネレータをポンプのインバータと接続することで実現している。

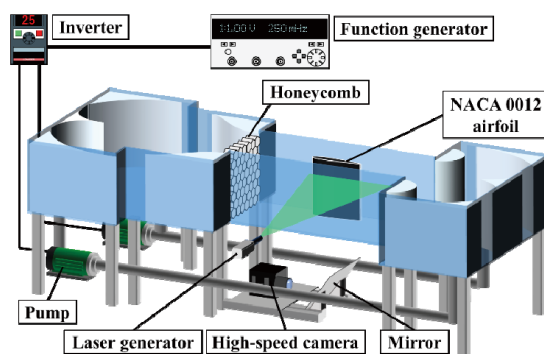


図 1：周期流を発生する回流水槽と振動翼周囲流の粒子画像流速測定法の観測システム

発表論文 1 では翼から放出される渦と推力の関係を調査した。振動周波数と周期流の周波数比を 1 倍から 3 倍に変化して観察した結果、PIV で得られた速度場を周波数解析することで周期流の影響が相対的に小さくなり定常流中での渦放出の傾向に漸近することがわかった。同様の傾向は揚抗計から得られた推力でも確認された。

この結果から示された周期流の影響が大きい周波数比が 1 付近では、魚型ロボットが港湾部の観測などで静止に近い状態であり、水中機動の中でも重要で

ある。そこで、発表論文2では、図2に示す振動周波数と周期流の周期の位相差 $\Delta\phi$ に着目して実験を行った。

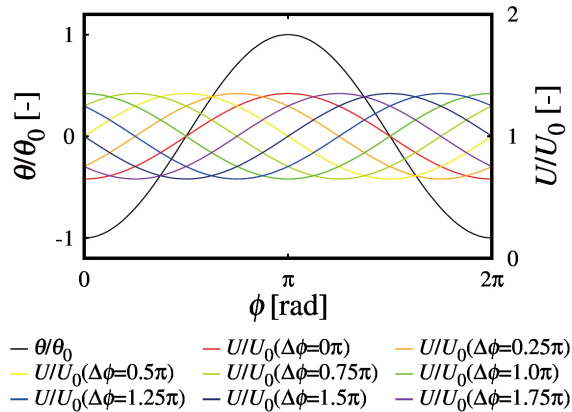


図2：周期流に対する振動翼の位相差の変化

まず PIV を用いて図3に示す振動翼が振り下ろされた迎角0度の位相平均速度場に着目した。図中の赤は流れに順方向、青は逆方向を示しており、位相差が $\Delta\phi=1.0\pi$ から $1.5\pi$ にかけて翼後縁部に逆流する領域が観測される。とくに翼の上面と下面で対称でないため、流れと垂直な方向に不釣り合いが生じることが考えられる。

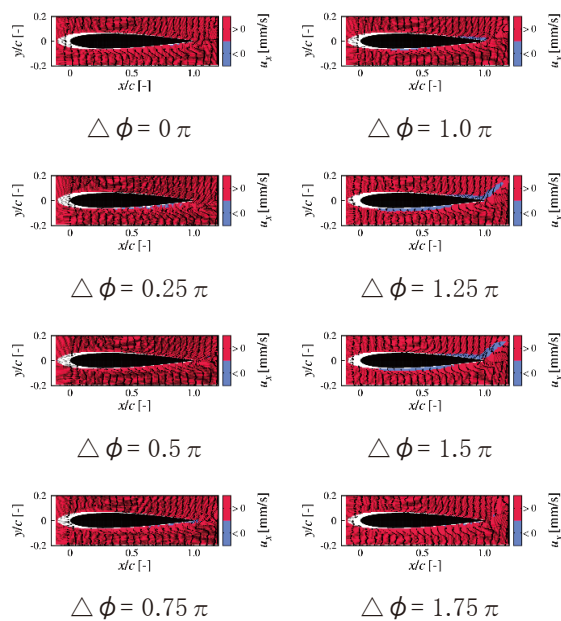


図3：位相差ごとの振動翼周りの流れ方向

この影響を調べるために、図4に示す揚力係数について測定した。振り下ろしに対応する位相差で、揚力係数の平均値が0から離れていることがわかる。一方で、 $\Delta\phi=0.75\pi$ と $1.75\pi$ で値は0付近になっている。このことは、位相差を利用することで周期流中の魚型ロボットの位置を制御出来ることが期待できる。

今後は、位相差だけではなく周期流と振動翼の振幅比にも着目して揚力係数や推力係数の測定を実施する。

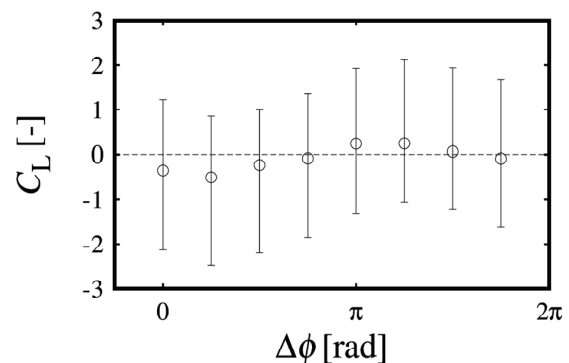


図4：位相差と揚力係数の関係

[発表論文]

1. Yoshitaka Isoda, Yohsuke Tanaka, Shigeru Murata, “Experimental Study on the Influence of Frequency Ratio on Thrust and Vortex Structure of a Pitching Wing in a Periodic Flow”, Advanced Experimental Mechanics, Vol.5, pp. 38-43, 2020. DOI: 10.11395/aem.5.0\_38.
2. Yoshitaka Isoda, Yohsuke Tanaka, Takuma Sadanaga, Shigeru Murata, “Influence of Phase Differences between Periodic Flow and Angle of Pitching Wing on Lift Coefficient”, The 17th International Conference on Flow Dynamics , OS18-27, Miyagi (online), October 2020.



## 【助成 37 -18】

無細胞タンパク質発現系を封入した脂質膜マイクロチャンバによる

膜タンパク質のハイスループット機能計測

研究者 京都工芸繊維大学機械工学系 助教 外岡 大志

### 〔研究の概要〕

人工脂質二重膜を用いた膜タンパク質の物質輸送機能計測手法の中でも、蛍光計測を用いた計測手法は、電荷の移動を伴わない物質輸送の計測（電氣的に中性な物質の輸送や等電荷物質の対向輸送の計測）が可能であるため汎用性が高く、近年積極的に研究開発が進められている。また、人工脂質二重膜による膜タンパク質の蛍光計測システムを無細胞タンパク質発現系と組み合わせることにより、マイクロ液滴内部で任意の膜タンパク質を発現させ、その膜タンパク質をそのまま機能計測するという手法が提案されており、これを用いれば、膜タンパク質の合成から輸送機能計測までを一つのデバイス中で短時間に行うことができる。しかし従来法は、 $\alpha$ ヘモリシンや EmrE といった膜タンパク質の物質輸送を検出するまでに1時間程度の時間がかかっており、膜タンパク質の薬剤スクリーニングへの応用を考えると更なる高速化が必要である。本研究では、膜タンパク質の物質輸送機能計測の高速化に向けて必要となる技術開発を行った。

### 〔研究経過および成果〕

先行研究においては、脂質二重膜に貫通孔を形成する膜タンパク質の物質輸送の検出に1時間程度の時間がかかっていた。この計測システムは、脂質分子を分散した油中でマイクロ水滴を接触させ、それらの接触界面に脂質二重膜を形成している。また、水滴中には無細胞タンパク質発現系が封入されており、DNA から合成された膜タンパク質が脂質二重膜に導入される。片方の水滴中に酵素が、もう片方の水滴中に基質が含まれており、膜タンパク質が基質を輸送すると、もう片方の水滴内で基質が分解されて蛍光物質が生成される。これを蛍光観察することにより物質輸送が検出される。このような原理で膜タンパク質の物質輸送機能を計測する際に、検出までの時間を短縮するためには、マイクロ水滴の体積を小さくすることによって、生成される蛍光物質によるマイクロ水

滴内濃度を大きくする必要がある。また、基質として使用される物質の分子量を小さくすることにより、膜タンパク質により形成された貫通孔を通過する速度が上昇し、その結果、一定時間経過後までに輸送された基質による濃度上昇は大きくなる。従来研究においては、基質としてフルオレセインジ- $\beta$ -D-グルクロニド(約 1 kDa)を使用している。

これら 2 つの観点からの考察に基づいて、本研究では、より体積の小さい水滴を用いて脂質二重膜に囲まれた空間(脂質二重膜マイクロチャンバ)を形成

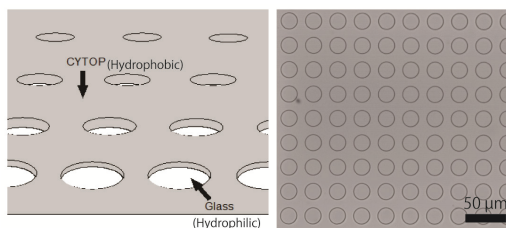


図 1、作製した基板の概略図と顕微鏡画像

し、カルシウムイオンを基質とした膜タンパク質の輸送機能計測が可能なシステムの構築を目指して研究を行った。

まずは、より体積の小さい水滴、具体的には約 160–630 fL の体積の微小水滴を利用して、脂質二重膜マイクロチャンバを作製した。作製方法は以下の通りである。まず、微小水滴をパターンニングするための基板を作製した(図 1)。この基板は、ガラス基板上に形成したサイトップ層を、フォトリソグラフィ技術を用いて、直径 10–20  $\mu\text{m}$  の円形にエッチングすることにより作製した。サイトップ層の厚さは約 2  $\mu\text{m}$  で親水性のガラス表面が露出している。サイトップは疎水性、ガラス表面は親水性であるため、脂質を分散した油中で水溶液を基板表面に沿って動かすと、親水性部分に微小な水滴をアレイ状に作製することができる。その上部から、さらに別の水溶液を接触させると、水溶液同士の接触界面に脂質二重膜が形成されることが知られている。この方法を参考に、本研究では、無細胞タンパク質発現系の溶液を用いて微小水滴と脂質二重膜の形成を行った(図 2)。この結果、無細胞タンパク質発現系を封入した体積が 160–630 fL の脂質二重膜マイクロチャンバを得た(図 3)。

次に、基質をカルシウムイオンとして脂質二重膜を介した物質輸送を検出するためのシステムを考案した。本システムは、赤色カルシウムイオン蛍光指示薬(Rhod-2)を用いる。微小水滴形成時に、無細胞タンパク質発現系の溶液中に Rhod-2 も混合しておくことにより、脂質二重膜マイクロチャンバを作製する。膜タンパク質により形成された貫通孔によって、脂質二重膜マイクロチャンバ外からカルシウムイオンが内部に輸送されることにより、チャンバ内部の Rhod-2 とカルシウムイオンが結合し、蛍光強度が上昇する。この蛍

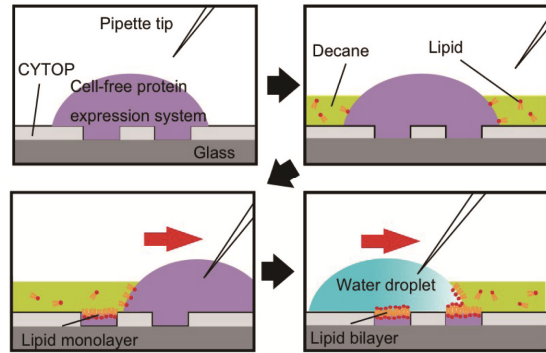


図 2、無細胞タンパク質発現系を封入した脂質二重膜マイクロチャンバアレイの作製方法



図 3、無細胞タンパク質発現系を封入した脂質二重膜マイクロチャンバアレイの顕微鏡画像

光強度上昇を計測することにより、脂質二重膜を介した物質輸送を検知できると考えられる。これまでに無細胞タンパク質発現系の存在下でカルシウムイメージングを行った例はないため、本研究では、これを実現するための条件検討を行った。その結果、脂質二重膜マイクロチャンバ内に無細胞タンパク質発現系と共に Rhod-2 を 67  $\mu\text{M}$ 、エチレンジアミン四酢酸を 1 mM 加えた場合に、1 mM のカルシウムイオンにตอบสนองして蛍光強度の上昇を検出できることが示された。今後、更なる条件検討を行うことにより、より低濃度のカルシウムイオン濃度でも検出できるようになると期待される。また、本研究で作製した、カルシウムイメージングに使用可能な体積が約 160–630 fL の人工脂質二重膜マイクロチャンバにより、カルシウムイオンチャンネル等のカルシウムイオンを輸送する膜タンパク質の物質輸送機能を高速に検出できる可能性がある。

## 【助成 37 -19】

### フェムト秒誘導ラマン分光法によるフォトクロミック材料の構造化学研究

研究者 大阪大学大学院基礎工学研究科 助教 五月女 光

#### 〔研究の概要〕

光照射に伴い可逆的な異性化反応を示す化合物はフォトクロミック材料とよばれ、様々な光機能性材料へ応用が期待される分子系である。この分子系の構造ダイナミクスを明らかにすることを目的として、振動スペクトルを通じて構造追跡が可能なフェムト秒誘導ラマン分光装置を構築した。製作した分光装置の性能を評価するとともに、試料系の探索のために行った中赤外域の時間分解分光測定の結果から、励起状態における連続的な構造変化および周囲の溶媒分子との衝突による冷却過程を経ながら生成物へ至ることがわかった。一方、フェムト秒誘導ラマン測定においては現状の信号対雑音比では反応途中の励起状態に由来する信号を得ることは難しかったものの、同様に励起状態における構造変化が予測されるナノカーボン材料では、分子骨格の変形に起因する信号を明瞭に捉えることに成功した。

#### 〔研究経過および成果〕

フォトクロミック化合物とは光照射により可逆的な異性化反応をおこす分子系であり、反応の前後では色調などの光物性だけでなく、誘電率や酸化還元電位といった様々な物性変化を伴う。中でもジアリールエテンとよばれる分子群は高い熱的安定性や繰り返し耐久性のため単一分子光メモリーや光スイッチング材料といった光機能性材料への応用が期待されている(図1)。

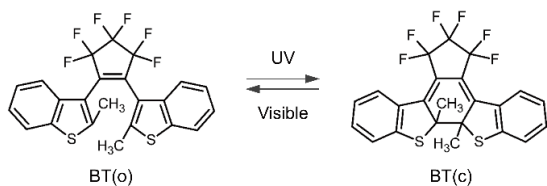


図1. ジアリールエテンのフォトクロミック反応

このフォトクロミック反応は、光励起により生成した電子励起状態において進行するため、励起状態における反応ダイナミクスを観測、解明することは、より優れた光機能性材料を設計するうえで重要な課題である。このような動機から、我々を含め極短寿命の励起状態

分子を検出できる過渡吸収分光法を用い、ジアリールエテン誘導体のダイナミクス研究が進められている。しかし、この分光手法は励起状態分子の電子状態に関する知見を与えるものの、反応の進行とともに時々刻々と変遷していく分子構造をとらえることは検出選択性の問題から難しい。現状、この特異な異性化反応を特徴づける構造情報が欠落しており、ダイナミクスの包括的な理解が進まないことが課題である。このような背景のもと、本研究では、フォトクロミック反応ダイナミクスを電子状態と分子構造の両面から明らかにするために、反応途中にある分子の構造をフェムト秒( $10^{-15}$  秒)の時間分解能で検出可能なフェムト秒誘導ラマン分光(FSRS)装置を開発した。

図2に新規に構築したFSRS装置の概略図を示す。現有のフェムト秒レーザー光源の出力を3つに分け、1つ目の光パルスは電子遷移を誘起しフォトクロミック反応を開始させるためのActinic pump光に変換した。2つ目の光パルスは回折格子とスリットを用いたフィル

ターにより  $10\text{ cm}^{-1}$  程度まで狭帯域化し、誘導ラマン過程を誘起するための Raman pump 光とした。3つ目の光パルスはサファイアプレートに集光照射することにより、800–950 nm の広帯域白色光に変換し、誘導ラマンスペクトルを観測するための Raman probe 光とした。シクロヘキサン溶媒などを標準試料とした測定から、製作した測定装置はおよそ  $10\text{ cm}^{-1}$  の波数分解能をもっていること、分子構造の変化が鋭敏に現れる  $300\text{ cm}^{-1}$  から  $1900\text{ cm}^{-1}$  の波数領域で測定が可能なることを確認した。

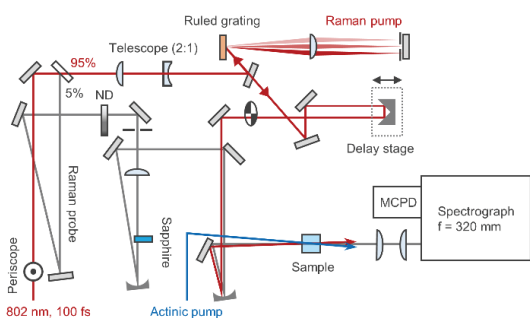


図2. フェムト秒誘導ラマン分光装置の概略図

次に、FSRS 測定により構造ダイナミクスの観測が容易なジアリールエテン誘導体を探るために、中赤外域の時間分解吸収分光を用いて予備的な測定を行った。図3にジアリールエテン誘導体の時間分解赤外スペクトルを示す。光励起直後に、基底状態にある反応物の濃度減少を意味する負の信号とともに、励起状態の生成を示す正の信号が観測された。この正の信号は時間の経過とともに  $14\text{ ps}$  で減衰し、 $1274\text{ cm}^{-1}$  に新たな振動ピークが立ち上がってくる様子が確認された。これはフォトクロミック反応の生成物がこの時間スケールで進行することを意味している。特筆すべきは、励起状態の振動ピークが単調に減衰するのではなく、有限の励起状態寿命の中で高波数側へシフトしながら減衰する点である。このスペクトル挙動は、反応物から生成物へ励起状態のポテンシャルエネル

ギー曲面上を進行する中で、連続的な分子構造の変化や周囲の溶媒分子との衝突による冷却過程が進行していることを示している。この観測結果は査読付き国際雑誌にて成果発表を行うとともに、掲載された巻の front cover に選定された。

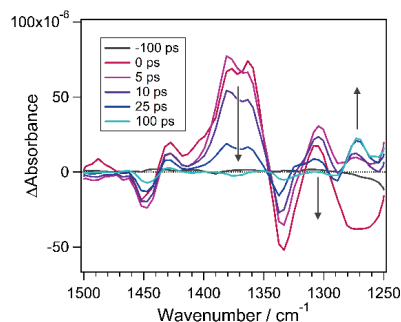


図3. ジアリールエテン閉環体の時間分解赤外スペクトル

上記の結果に基づき、ベンゾチオフェンタイプのジアリールエテン誘導体の FSRS 測定を行った。基底状態のラマンスペクトルには、 $1595\text{ cm}^{-1}$  に電子環状反応を起こす中央の6員環の C=C 二重結合伸縮振動モードに由来するピークが観測されたが、励起光を導入して分子を励起状態へ遷移させた場合には、現状の信号対雑音比では反応途中の励起状態に起因する信号は観測されなかった。一方、ジアリールエテンと同様に、励起状態における構造変化が期待されるナノカーボン材料のひとつであるシクロパラフェニレンの測定では、光励起後から分子骨格の変形と考えられる信号が観測された。今後さらなる計測装置の改良を進め広範なフォトクロミック分子系の構造ダイナミクスの解明に適用する。

[発表論文]

1. [Hikaru Sotome\\*](#), Hajime Okajima, Tatsuhiro Nagasaka, Yuka Tachii, Akira Sakamoto, Seiya Kobatake, Masahiro Irie, Hiroshi Miyasaka\*, *ChemPhysChem*, **2020**, *21*, 1524–1530 (Front cover に選定).



## 【助成 37 -20】

### 量子中継器へ向けた半導体量子ドット電子スピンの多値読み出し手法開発

研究者 大阪大学産業科学研究所 助教 木山 治樹

#### 〔研究の概要〕

本研究では、GaAs/AlGaAs 横型量子ドットを用いて、4つの2電子スピン固有状態全てのシングルショット読み出しに取り組んだ。スピン読み出しでは、従来用いられてきたスピナー重項/三重項読み出しと単一電子スピン読み出しを組み合わせた。スピナー重項と三重項  $T_0$  については読み出しに成功したが、 $T_+$ と  $T_-$ に関してはスピン緩和のために読み出しが精度が低く、今後の改善が必要である。また、高スピン状態読み出し実験結果の解析にも取り組んだ。高スピン状態の緩和がスピナー重項や三重項の緩和と比べて 10 倍程度速いことが分かった。この速い高スピン緩和について、厳密対角化法による緩和レートの計算から、電子相関の寄与が示唆された。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では、スピン閉塞現象を利用したスピナー重項/三重項読み出しと、単一電子スピンのゼーマン分裂を利用したアップスピン/ダウンスピン読み出しを組み合わせ、4つの2電子スピン固有状態全てのシングルショット読み出しおよび単一量子ドット内におけるスピン緩和ダイナミクスの観測に取り組んだ。

試料として、GaAs/AlGaAs ヘテロ基板を用いて横型四重量子ドットを作製した(図1)。図1下側の4つの量子ドットの内、安定した動作を示した左から2つの量子ドットを用いた。また、図1上側には量子ドット電荷計を2個作製した。電荷検出は高周波反射測定法を用いた。測定は、超伝導マグネットを有する無冷媒希釈冷凍機を用いてベース温度 15mK、電子温度 160mK で行った。

スピン閉塞を用いたスピナー重項/三重項読み出しでは、準安定電荷状態への変換による高忠実度化の手法[P. Harvey-Collard, Phys. Rev. X **8**, 021046 (2018)]を採用した。初期状態の準備では、2 つの電子を 2 次元電子面からドットにトンネルさせた。このと

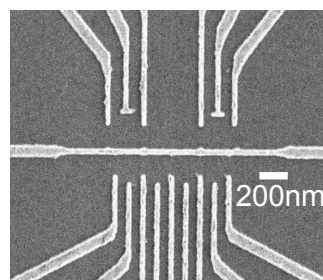


図1. GaAs/AlGaAs 横型四重量子ドットの電子顕微鏡写真。

き、4つの2電子スピン固有状態をランダムに生成することを意図したが、1電子スピン読み出し実験よりスピン偏極しており、アップスピン( $\uparrow$ ):ダウンスピン( $\downarrow$ ) = 6:4 ~ 7:3程度でトンネルすることを確認した。

多値スピン読み出しでは、初期状態に対してまずスピナー重項/三重項読み出しを実行し、次に各電子に対して1電子スピン読み出しを実行した。各スピン読み出し{一重項/三重項読み出し, 1電子スピン読み出し①, 1電子スピン読み出し②}の結果が{一重項, (任意), (任意)}, {三重項,  $\uparrow$ ,  $\uparrow$ }, {三重項,  $\uparrow$ ,  $\downarrow$ }, {三重項,  $\downarrow$ ,  $\downarrow$ }のとき、それぞれ一重項  $S$ 、三重項  $T_+$ 、 $T_0$ 、 $T_-$ と判別される。



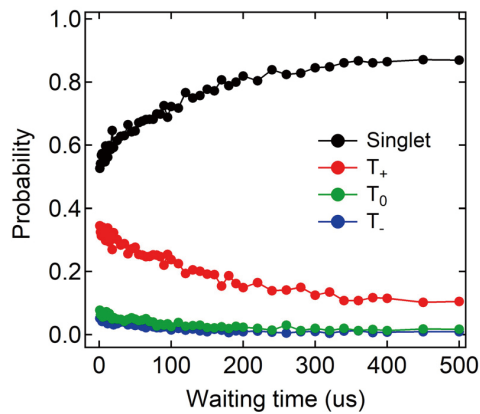


図 2. 2 電子スピン固有状態多値読み出し実験で得られた各スピン状態確率の待機時間依存性。

緩和ダイナミクスを測定するために、初期化後の待機時間に対するスピン状態確率を測定した(図 2)。一重項(Singlet)と  $T_+$  に関しては、 $T_-$  から一重項への緩和が観測できている。一方、 $T_0$  と  $T_-$  に関しては、期待される値よりも小さな確率が得られた。これは、緩和時間が数百マイクロ秒程度であると推察されるのに対し、スピン測定時間が 200 マイクロ秒であったため、スピン緩和によるものであると考えられる。2 電子スピンは多準位系であり、また角運動量選択則により異なる緩和ダイナミクスを示すと期待されたが、今回の実験では明確な違いは観測できなかった。今後、実験条件の改善が必要である。

本研究では、量子ドット中の電子スピン状態の内、これまで報告例の少ない高スピン状態についても生成・読み出し手法および緩和ダイナミクスの研究を行った。既に実験を完了していた高スピン生成・読み出しの実験結果について、解析と理論的考察を行った。

図3に、3電子高スピン状態  $Q_{3/2}$  (スピン角運動量  $S = 3/2, S_z = +3/2$ ) と 4電子高スピン状態  $F_{+2}$  (スピン角運動量  $S = 2, S_z = +2$ ) の緩和レートの磁場依存性を

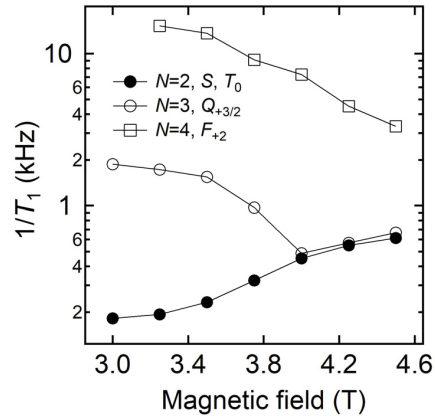


図 3. 高スピン状態  $Q_{+3/2}$ 、 $F_{+2}$  の緩和レートの磁場依存性。

示す。2電子スピン一重項  $S$  や三重項  $T_0$  の緩和レートも比較のために載せてある。 $S$ 、 $T_0$  の緩和レートは磁場に対して単調増加するのに対し、 $F_{+2}$  は単調減少、 $Q_{+3/2}$  は 4.0T で極小を示した。これは各励起エネルギーの磁場依存性を反映している。

図3の結果から、2電子スピン一重項  $S$  や三重項  $T_0$  の緩和と比べて、高スピン状態の  $Q_{+3/2}$  や  $F_{+2}$  の緩和が一桁程度速いことが判明した。この緩和レートの違いの起源として、我々は電子相関の寄与に着目した。2電子スピンの緩和に関して、電子数の増加とともに緩和レートも増大することが報告されており、電子相関によるスピン軌道相互作用の増強によるものと推測されている。本研究では、同一電子数でも高スピン状態の緩和の方が  $S$  や  $T_0$  の緩和より速いことが実験的に確かめられており、スピン配置の影響が大きいことが示唆されている。本研究では既に厳密対角化法を用いた計算により、速い高スピン緩和の定性的な再現に成功している。

[発表論文]  
無し。

## 【助成 37 -21】

### アト秒時間域で駆動する光ファンクションジェネレーター

研究者 徳島大学ポストLED フォトニクス研究所 特任准教授 吉井 一倫

#### 〔研究の概要〕

人類はこれまで光の波長，位相，偏光そして強度を利用し様々な光技術を発展させてきた．しかし，未だ応用できていない光の自由度が「電場波形そのもの」である．モノポール，矩形波などの任意光電場生成のためには，いわゆる光と呼ばれる波長域（赤外—可視—紫外）すべての位相と振幅を制御しなければならない．このような超広帯域光の伝搬には物質が本質的に持つ分散により時間波形の拡がりに伴うため，現実の任意光電場発生は極めて困難である．筆者らは，超広帯域に渡る離散スペクトル群に対し光を空間的に分離することなく，どれだけ物質中を伝搬させても必ず任意電場を発生できる原理を発見した．本研究ではこの原理を適用した「光ファンクションジェネレーター」を開発する．

#### 〔研究経過および成果〕

##### ■研究目的

本研究で申請者は，J 級のエネルギーを持つナノ秒パルス光を基本波光とする第 5 次高調波までのハーモニクスを対象に，新規のスペクトル振幅・位相操作手法を適用し，パルス幅約 400 as の任意電場波形を整形できるの光ファンクションジェネレーター (Optical function generator: OFG) の開発を第一の目的とする．既存の OFG では約 100  $\mu$ J 程度に制限されていた出力を 1000 倍以上の 300 mJ まで高出力化することを目指す．

このアト秒 OFG の実現により，これまで真空中や固体試料のごく表面近傍でのみ行われてきた 1 サイクル以内の光電場と物質との相互作用が，固体試料の深部や，異なる結晶接合界面，光平面導波路中や光ファイバーの伝送先，また液体中の金属粒子やイオン，さらには生体試料中などあらゆる透明媒質の内側で行えることを世に示す．装置の複雑・高価さと限られた相互作用環境を理由に

これまでごく一部の研究グループでしか行われていなかったアト秒科学が，他分野の研究者にとって身近に広く展開されていくことを目指す．

##### ■研究内容

1. 提案した振幅・位相操作原理の正当性の実証
2. 振幅・位相操作原理を用いた OFG の構築

##### ■研究状況

1. 本原理の正当性の実証

周波数間隔 125 THz の 7 本のモードで構成される帯域 750 THz の離散スペクトルを対象に本研究構想と同様の振幅・位相制御を行い，SPIDER-DS 装置にてパルス幅を評価した．その結果，分散媒質長に対する位相の変化は計算と非常によく一致する周期構造を示した．強度時間波形のピーク値がフーリエ変換限界の 98.8%まで回復し，パルス幅 1.2 fs で 8.02 fs 周期で繰り返すパルス列の発生に成功した[1] (図 1)．この結果は，本 OFG が実現可能であることを強く支持する．

2. 振幅・位相操作原理を用いた OFG の構築

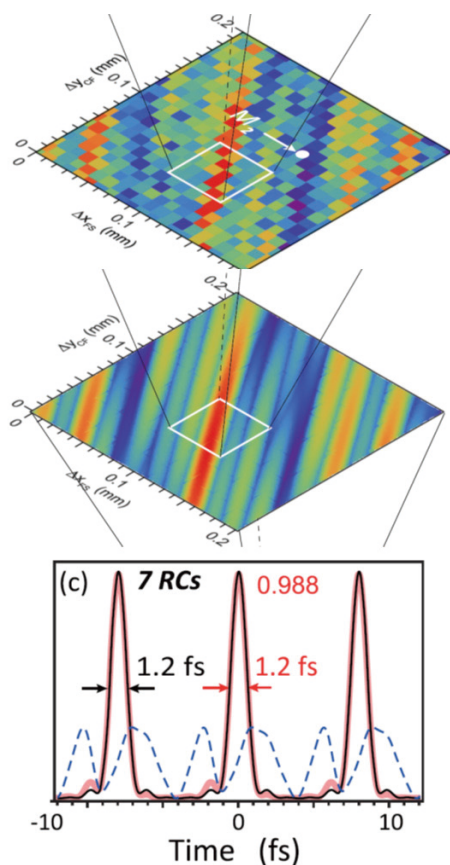


図1. 新規の光波形制御技術の実証実験結果. 物質長に対するパルスピーク強度の変化(上: 実験値, 中: 計算値). 下: 最短パルス位置でのパルス波形 (測定値). 論文[1]より引用.

本申請で提案している OFG の構築を行っている. 現状の実験セットアップ写真を図2に示す. 本申請予算は特に振幅・位相制御部の開発に用いられた.

- ①注入同期型 Q-switched Nd:YAG ナノ秒パルスレーザー
- ②注入同期用シードレーザー光源&キャビティ制御システム: シード光源として用いる予定の波長 1064 nm ヨウ素安定化半導体レーザーを開発した[2].
- ③エルビウム添加モードロックファイバーレーザーを基本光源とした光周波数コム

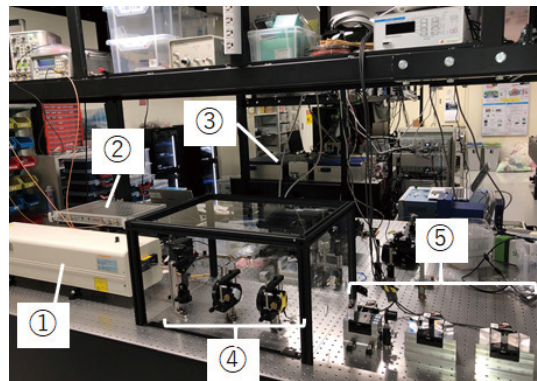


図2. 徳島大学に構築した光ファンクションジェネレーターのセットアップ写真.

- ④高調波発生用非線形光学結晶: 第2, 3次高調波用に KTP 結晶を, 第4次高調波用に BBO 結晶を設計し組み込んだ.
- ⑤振幅・位相制御部: 振幅制御部は複屈折媒質である水晶のくさびペアと偏光子から構成される. 位相制御部は等方媒質である合成石英プリズムペアと CaF<sub>2</sub>プリズムペアから構成される. それぞれのプリズムは数十 nm オーダーの精度と数十 mm オーダーの掃引長を有する高精度自動ステージにて移動される.

今後は引き続き OFG 開発の残り部分を遂行していく. 特に, 5倍波発生部を早急に開発する. その後, パルス幅計測のための SPIDER-DS 装置の開発と電場波形計測装置の開発を進める.

[発表論文]

1. C. Zhang, K. Yoshii, D. Tregubov, C. Ohae, J. Zheng, M. Suzuki, K. Minoshima, M. Katsuragawa, *Physical Review A*, **100**, 053836-1-10 (2019).
2. K. Yoshii, H. Sakagami, H. Yamamoto, S. Okubo, H. Inaba, and F.-L. Hong, *Optics Letters*, **45**, 129-132 (2020).

## 【助成 37 -22】

### 共振器-プラズモン強結合のダイナミック化と、顕微光コム分光によるその場観察に関する研究

徳島大学ポストLED フォトニクス研究所 准教授 山口 堅三

#### 〔研究の概要〕

金とPNIPAMから成るMIM共振器を作製し、温度変調による光共振特性の可変化を実現した。これをフリースペクトルレンジで定量すると、非加熱と加熱状態におけるそれぞれの共振器長は 40.6  $\mu\text{m}$  と 27.0  $\mu\text{m}$  と見積もった。これにより、温調制御でPNIPAMの共振器長を変化可能な動的光学素子の開発に成功したと言える。そこで、金ナノ粒子分散 PNIPAM をスピコート法で成膜することで、先述よりも薄い MIM 共振器を作製した。金ナノ粒子分散 MIM 共振器中の単一金ナノ粒子からの温度変調散乱光測定より、光共振特性の可変化を観測した。このシフトは、金ナノ粒子分散 PNIPAM で形成した NPoM の温度変調散乱光特性と定性的に一致したことから、共振器-プラズモン強結合の動的光特性の観測に成功したと考える。

#### 〔研究経過および成果〕

共振器は、単一波長の光を閉じ込め、動作するよう設計されている。このため、温度や湿度などの外的要因に大きく左右される。一方で、刺激応答性ポリマーのような外部刺激により先の要因を制御できればと考えた。本研究では、金属/誘電体層/金属 (metal/insulator/metal 以下 MIM) 共振器内にポリ N-イソプロピルアクリルアミド (以下 PNIPAM) を組み合わせることで、共振器長を温度で可変可能な動的光学素子の開発を第 1 の目的とした。さらに、金属微粒子 (nano particle 以下 NP) を金属薄膜上に散布した (NP on mirror 以下 NPoM) の狭空間への光閉じ込めに着目し、先の動的 MIM 共振器と組み合わせた、共振器-プラズモン強結合の動的光学特性を明らかにすることを第 2 の目的とした。これにより、例えば NPoM の狭空間にレーザーの利得媒質を閉じ込めれば、増強場による表面プラズモン (surface plasmon 以下 SP) の誘導放出を可能とする SPASER (SP amplification by stimulated emission of radiation) の開

発設計指針を得ることができる。

金 (20 nm) / ゲルマニウム (2 nm) / カバーガラスの M 層と、PNIPAM の I 層から成る MIM の 3 層構造によるファブリ・ペロー型 (Fabry-Pérot 以下 FP) 共振器を作製した。ここで、M 層は、真空蒸着法で成膜し、SEM と AFM で薄膜表面を評価した。M 層成膜後は、紫外線照射併用オゾン処理で薄膜表面の濡れ性を向上させた。I 層の PNIPAM は、1.0 w/v% の水分散で調製した後、M 層へ適量滴下し、別の M 層で挟み、MIM 共振器とした。作製した共振器を温度制御し、試料からの反射光を計測した。

図 1 の SEM 像より、隙間のない (島状でない) 薄膜形成を確認した。AFM 像より、表面粗さの小さい平坦な膜であった。図 2 の MIM 共振器の温度制御とその反射光特性より、構造由来の複数の共振ピークとその共振間隔の広がり可変性を確認した。

MIM 共振器の共振器長 (I 層) を温度で可変可能な動的 MIM 光共振器を実現したことから、金 (20 nm) / ゲルマニウム (2 nm) / カバーガラスの  $M_1$  層と、直



径 100 nm の金ナノ粒子分散 PNIPAM の I 層、金 (100 nm) / ゲルマニウム (2 nm) / カバーガラスの M<sub>2</sub> 層から成る M<sub>1</sub>IM<sub>2</sub> の 3 層構造による FP 型共振器を作製した。ここで、直径 100 nm の金ナノ粒子分散液を溶媒として、5.0 w/v% の PNIPAM を調製し、スピコート法により M<sub>2</sub> 層上へ I 層を成膜した後、M<sub>1</sub> 層で挟み、共振器とした。作製した試料の M<sub>1</sub> 層側から光を入射し、温度変調散乱光特性を評価した。

図 3 より、単一の NPoM の散乱光特性をベースとし、これに MIM 共振器の構造由来の複数の共振ピークと、その共振間隔の拡がり、さらに温度変化に伴うスペクトルのレッドシフトを確認した。

以上のことから、金と PNIPAM から成る MIM 共振器を作製し、温度変調による光共振特性の可変性を実現したことから、第 1 の目的である共振器長を変化可能な動的光学素子の開発に成功した。また、PNIPAM 中に金ナノ粒子分散した金ナノ粒子分散 MIM 共振器を作製し、その単一金ナノ粒子からの温度変調光共振特性の可変性を観測したことから、第 2 の目的である共振器-プラズモン強結合の動的光特性の観測に成功した。

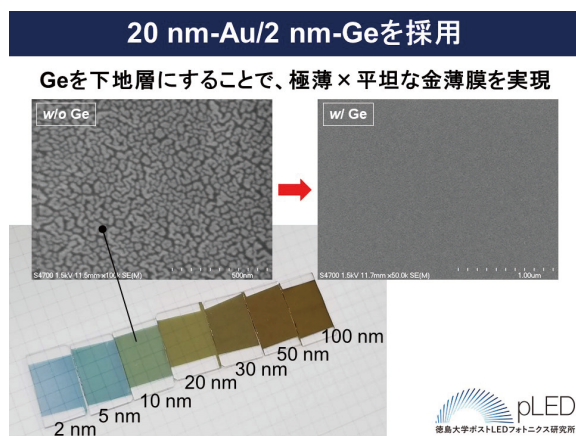


図 1 金薄膜の表面から MIM 共振器の金膜厚を決定

### 温度変調型 MIM 共振器を開発

共振器長は、0.67 倍 (40.6 μm @ 膨潤、27.0 μm @ 収縮)

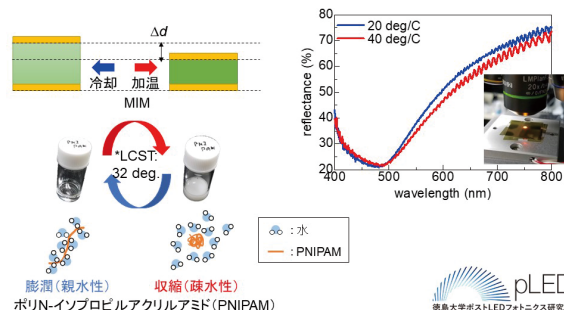


図 2 MIM 共振器の反射光スペクトル

### 金ナノ粒子分散温度変調型 MIM 共振器を実現

共振器-プラズモン強結合の動的光特性の観測に成功

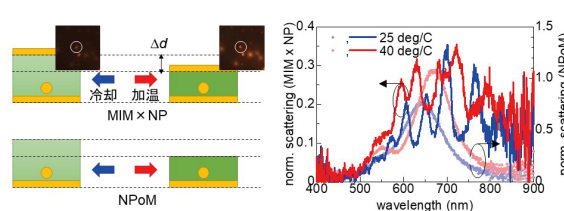


図 3 金ナノ粒子分散 MIM 共振器の温度変調散乱光特性

[発表論文]

1. 関洋伸、山口堅三、原口雅宣、岡本敏弘、  
“温度応答性高分子 (PNIPAM) による熱可変型光共振器の作製と評価”、  
2020 年度応用物理・物理系学会中国四国支部  
合同学術講演会、Bp-4、2020 年 8 月



## 【助成 37 -23】

### 紫外光渦レーザーパルスを用いた機能性半導体ナノ・マイクロ結晶粒子の創製

研究者 九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授 中村 大輔

#### 〔研究の概要〕

本研究では紫外光渦を導入したレーザー照射光学系を構築し、複数種の半導体材料を対象としてナノ・マイクロ結晶粒子の合成を行った。可視波長レーザーでは加工が困難なワイドギャップ半導体 (ZnO) において高効率に円環状の表面加工を実現し、ナノ結晶粒子の合成に成功した。また、 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:Nd}$  および ZnO については赤外光渦によってマイクロ結晶球合成を達成した。さらに、光渦を物質に照射した際のレーザー生成プラズマのダイナミクスを解析するため2次元輻射流体シミュレーションを行ない、レーザー生成プラズマに起因する表面質量移動過程の再現を世界で初めて実証した。

#### 〔研究経過および成果〕

パルスレーザーを集光照射することで瞬間的に物質を融解・蒸発・プラズマ化することが可能である。レーザーアブレーションといわれるこの現象を利用した金属や半導体のナノ・マイクロ粒子合成が盛んに研究されている。その中で、我々はレーザーによる物質の融解現象に着目し、球体形状と結晶構造を併せ持つ微結晶粒子の合成技術を開発している。さらに、軌道角運動量をもつ光渦を用いた融解物質の飛翔制御と合成される微結晶粒子のサイズ制御に成功している。本研究では、赤外光の光渦および光子エネルギーの高い紫外光の光渦を導入したレーザー照射光学系を構築し、新たな機能性半導体ナノ・マイクロ結晶粒子の実現を目指して複数種の半導体材料を対象としてナノ・マイクロ結晶粒子の合成を行った。実験において、レーザー光源にはNd:YAGレーザーの第三高調波(波長 355 nm, パルス幅 10 ns)を用いた。光渦生成には螺旋位相板と 1/4 波長板を用いて直線偏光ガウスプロファイルのレーザー光を円偏光光渦に変換した。図 1 に光渦変換前後のビーム断面

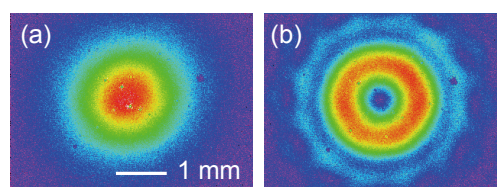


図 1 光渦変換前後のビーム断面プロファイル  
(a)変換前, (b)変換後.

面プロファイルを示す。光渦変換後は円環状の強度分布となっていることが分かる。この光渦パルスエネルギー 55  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  にて焦点距離  $f=50\text{ mm}$  のレンズを用いて半導体表面に集光照射した。その後、表面の照射痕を Scanning electron microscope (SEM) にて観察した。まず、ワイドギャップ半導体である ZnO を対象として、石英基板上にパルスレーザー堆積法で作製した ZnO 薄膜(膜厚 400 nm)に対して紫外光渦パルス照射した。その結果、図 2(a) に示すように円環状の強度分布に対応した照射痕が得られ、その加工深さは、最も深い位置においてほぼ膜厚に対応していた。図 3 に ZnO および  $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:Nd}$  に対してレーザー照射することで合成された粒子の SEM 像を示す。いずれも結晶構造をも

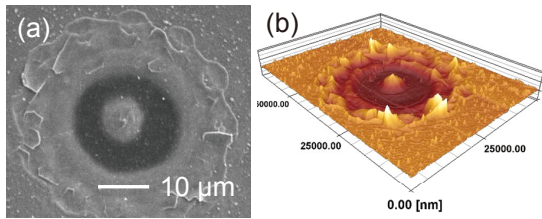


図 2 光渦照射後の ZnO 薄膜表面の  
(a)SEM 像, (b)AFM 計測による 3D 表示.

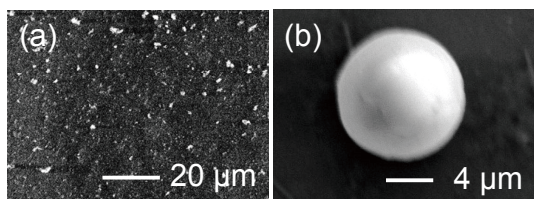


図 3 ナノ・マイクロ粒子の SEM 像. (a)ZnO  
ナノ粒子, (b) Sr<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:Nd マイクロ粒子.

つ粒子であることを確認し, 照射条件を制御することでナノ・マイクロ粒子の合成に成功した.

さらに, 光渦を物質に照射した際のレーザー生成プラズマのダイナミクスを解析するため 2 次元輻射流体シミュレーションを行った. 計算においてねじれ構造形成の実績のある Si に対して真空中にて 1064 nm の円環状強度分布をもつナノ秒パルス (17 ns) を照射する条件とした. 図 4 にレーザーパルスのピーク時における Si 密度分布と電子温度分布を示す. 図 4(a)からわかるように Si 表面に円錐状構造物の形成が確認される. これは, 円環状強度分布の高い強度領域から中心に向かうレーザー駆動圧力によってもたらされたものと考えられ, 円錐構造物の隆起高さは実験結果に近い値であった. この表面の質量移動によってマイクロ粒子形成と直線飛翔がもたらされていると推測される. 次に, Si 表面に形成されるレーザー生成プラズマに着目すると図 4(b)に示すよ

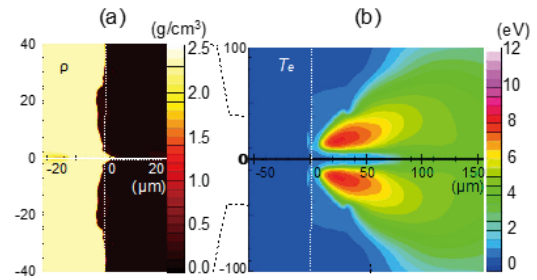


図 4 円環状強度分布のレーザーパルスを Si 表面に照射した際のパルスピーク時における (a)密度分布と (b)電子温度分布.

うに円環状強度に対応して高温のプラズマが形成されていることがわかる. また, 興味深いことに圧力分布や電子密度に関してはプラズマの膨張に伴い光軸上が非常に高くなる時間領域があることが示された. 光渦生成プラズマ中の微粒子形成においてプラズマ分布が大きく影響するが, 従来のガウス分布レーザー光では実現できない微粒子合成の可能性がこのシミュレーション結果から示唆された. 本研究成果は光渦レーザーによるナノ・マイクロ結晶粒子合成の技術基盤構築に大きく貢献するものであり, 今後様々な材料に適用して応用展開を図る予定である.

[発表論文]

1. Daisuke Nakamura, Ryohei Tasaki, Miki Kawamoto, Hiroki Oshima, Mitsuhiro Higashihata, Hiroshi Ikenoue, Toshitaka Wakayama, Atsushi Sunahara, Takeshi Higashiguchi, “Silicon twisted cone structure produced by optical vortex pulse with structure evaluation by radiation hydrodynamic simulation”, Scientific Reports, 10, 20512 (2020)

他、国際会議 2 件(招待講演 1 件)、国内会議 2 件

## 【助成 37 -25】

### メカニカル波動伝搬構造を応用した新しい地中掘進メカニズムに関する研究

研究者 九州工業大学大学院工学研究院 准教授 永岡 健司

#### 〔研究の概要〕

本研究では、極限環境へのロボット技術の応用に向けたブレイクスルーテクノロジーの一つとして、地中に埋没して掘進移動が可能なロボットシステムの研究開発をおこなう。効率的な掘進動作の実現に向けて、砂の排出と推進を連動させた掘進メカニズムの創成が必要となる。そこで、本研究では、まず回転運動で一次元の波動伝搬を生み出すメカニカル波動伝搬構造を三次元的な蠕動運動に変換する試作初号機を製作し、その性能について実験的に明らかにした。次いで、得られた知見を元に、類似の蠕動作用をよりシンプルに作用させる機構として、マルチスクリュ式の掘進ロボットを開発し、実験によって地中への掘進が可能であることを示した。

#### 〔研究経過および成果〕

既存の移動ロボットの未踏領域である地中において、掘削推進運動(=掘進)が可能な埋没型ロボットシステムを実現することは極限作業でのロボット応用に向けて大きなブレイクスルーをもたらす可能性がある。そこで本研究では、地中掘進メカニズムの実現に向けて最も重要な技術課題として、砂の排出と推進を連動させた前衛的な掘進機構、メカニカル波動伝搬構造(Zarrouk *et al.*, *Bioinsp. Biomim.*, 2016)に着目し、一次元的な波動伝搬を三次元的な蠕動運動に拡張して地中掘進する機構の実現可能性について研究を進めてきた。

本研究で開発したメカニカル波動伝搬機構の試作初号機を図 1 に示す。回転モータに接続した回転部品を介して、リンク機構で波動を逐次伝搬させるユニット機構を応用して、土砂のような粒状体を内外部搬送可能なメカニカル波動伝搬構造を設計・製作した。単一モータの回転動作によって三次元的な蠕動運動に似た動作を生み出すことが可能な構造となっている。本試作初号機の性能評価をおこなうため、リン

ク機構を覆うように柔軟カバーを取り付け、複数の直径と材質の粒状体(プラスチック、アルミナ、ガラス)に対する水平搬送実験をおこなった。実験結果として、粒状体直径に対する波動 10 周期当たりの粒状体の搬送体積を図 2 に示す。これより、粒状体の直径が小さいほど搬送体積が多くなることが読み取れ、粒状体の直径が小さいほど搬送体積が多くなる、かつ比重ではなく摩擦係数が小さいほど搬送体積が多くなる特性を有することが実験的に確認できた。その一方で、これら一連の実験から得られた知見として、三次元的に土砂で拘束された地中を掘進する場合には、螺旋部品とリンクにおける構造的複雑さと強度に課題があることが明らかになった。

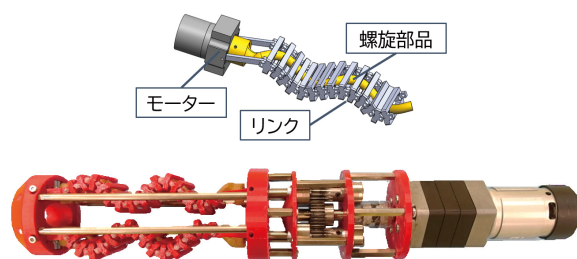


図 1:メカニカル波動伝搬機構の試作初号機  
(上:ユニット機構 CAD モデル, 下:組図外観)

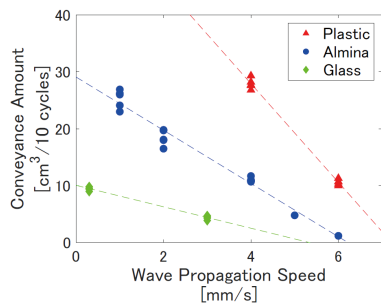


図 2:メカニカル波動伝搬機構(初号機)による粒状体の水平搬送実験の結果

以上の試作初号機の検討結果を踏まえて、地中のような周囲からの拘束力が強固に働く環境下では、よりシンプルな機械構造が重要との考えから、円筒形状に螺旋スクリューを巻き付けた構造をベースとして複数配置することで、土砂に対してメカニカル波動伝搬に類する作用を与える、新たな地中掘進メカニズムの機構設計と実機開発に取り組んだ。

本研究で設計開発したマルチスクリュー式掘進ロボット試作機を図 3 に示す。重量 2.1kg、全長 28cm、最大直径 20cm であり、3 つの側面スクリューはそれぞれ同じ回転モータを内蔵した独立駆動型かつ省スペースな機械設計とした。先端スクリューについては、反トルクの低減のため側面スクリューとは螺旋が逆巻きに配置し、本体中央のベースに固定した回転モータによって駆動する。開発したロボット試作機の掘進性能の基礎評価実験を実施した。実験環境および実験中の様子を、同じく図 3 に示す。本実験では、鹿沼土(細粒、粒径 1-2mm)で充填した土壌層を対象環境とした。また、月惑星での応用を想定して、ロボット本体に作用する垂直荷重をキャンセルさせ、かつ掘進開始時(特に完全埋没に至るまでの期間)のモータ反トルクを手動でキャンセルさせた条件下で初期動作試験を実施した。本実験の結果、試作機は完全埋没状態まで掘進することが可能であることが確認できた。最終的に



図 3:マルチスクリュー式掘進ロボット試作機(上:外観, 左下:実験環境, 右下:実験の様子)

は、完全埋没状態から 10cm 程度の垂直掘進を実現することが確認できた。特に今回の実験を通じて得られた知見として、効率的な地中掘進を実現する上では、前方土壌の排出(空間生成)と前進力の生成のバランスが重要であり、前進力を大きくする(重力負荷を大きくするなど)ことは掘進動作の妨げになることが明らかとなった。前進を抑えながら「ゆっくり進む」、という新たな開発指針を示すことができたといえる。

今後は、本研究で得られた結果を踏まえて、螺旋スクリューのシンプル構造を基軸としたメカニカル波動伝搬メカニズムを発展応用させて、「ゆっくりと前進する」地中掘進メカニズムの創成に向けて、研究開発を継続していく予定である。

[発表論文]

1. 赤星美彩子, 永岡健司: 月・惑星掘削探査のための波動伝搬機構を用いた土砂搬送メカニズムの基礎検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 講演論文集, #2P1-B07, 2020.



## 【助成 37 -26】

### 素粒子(ミュオン)の双極子モーメント超精密計測を実現する 高精細検出器システムの開発

研究者 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科 准教授 岸下 徹一

#### 〔研究の概要〕

本研究は、ミュオンの磁気双極子である  $g-2$  を世界最高感度で測定することを目的として、実験のカギとなるシリコンストリップセンサーを読み出すための高精細なエレクトロニクスを開発することにある。要求性能としては、ミュオンの崩壊事象を捉えるために高いタイミング精度と優れた雑音特性を持ったアナログ性能と、実験環境に適した消費電力や、多チャンネル性が求められる。そこで本研究では、先端半導体プロセスを用いてカスタム ASIC(特定用途向け集積回路)を試作し、評価試験で実験要求を全て満たすことを確認したのち、実機用エレクトロニクスの量産製作を行った。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究で開発する高精細エレクトロニクスを自分たちの手で開発するために、まず設計環境の整備に取り組んだ。今回のチップは、アナログ回路とデジタル回路が組み合わさった混載チップであるが、過去の開発では、デジタル部は Verilog HDL 言語までの記述を自分たちで行い、レイアウトは主に外注していた。しかしこの手法では、回路検証とレイアウトの修正が柔軟に行えない。そこで東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)を経由してライセンス提供されている Cadence 社の CAD ツールの中から、開発に用いる Silterra 社の 180 nm CMOS テクノロジーと相性の良い検証ツールを選択し、(1) Verilog HDL 言語を用いて全体の動作仕様を決定したのち、(2)トランジスタ群で構成されているスタンダードセルに置き換える回路合成を行い、そして(3) レイアウトを自動生成し、(4) 寄生容量などを加味したモデルによるタイミング検証を実行する、といった開発に必要な一連のプロセスを自分たちで実行できるようにした。

次にアナログ回路に関して、より高い性能を実現

するために SPICE シミュレータを用いて既存の回路構成に修正を加えた。ミュオン  $g-2$ /EDM 実験では、ストリップセンサーに荷電粒子が大量に通過した際に最大 1.4 MHz/strip という高計数率環境になることから信号のパイルアップによるエレクトロニクスの不感時間を下げるために、50 ns 以下の信号立ち上がり時間、100 ns 以下の信号幅、5 ns 以下の time-walk (出力される信号の立ち上がり時間が入力される信号強度にどの程度依存するか)の度合いが要求される。また雑音に関しても低雑音信号処理( $ENC < 1600e^-$ )が必須である。こうした数ある要求性能の中でも 5 ns 以下という“time-walk”の値が効率的な飛跡検出のカギをにぎる最重要パラメータである。実機量産を開始する前に、要求性能を満たしたチップが実現できるかを、実機と全く同じ仕様の試作チップで実証した。

図 1 に試作したチップの写真を示す。チップサイズ 6.5 mm x 7.2 mm のチップ左側に 128 チャンネルのストリップセンサーを並列に信号処理するためのアナログ回路が縦方向に並び、タイミング信号が発生したイベント情報を保持するためのメモリをはじめとする



デジタル回路がチップ右側に配置されている。チップの評価試験は、4 チャンネルおきに、実験で用いるシリコンストリップセンサーと同程度の模擬的な検出器容量 33 pF をアナログ回路の入力部に接続し、合計 32 チャンネルの分布として評価した。図 2 に time-walk 性能の結果を示す。測定値は、 $0.38 \pm 0.16$  ns となっており、実験要求である 5 ns を大幅に達成していることが実証され、精度の高いミューオン検出が期待できる結果となった。同様に雑音特性に関しても、要求値である 1600 e<sup>-</sup>(rms)という換算雑音電子数に対して  $1547 \pm 75$  e<sup>-</sup>という値を確認している。またその他の機能も仕様通りの動作を確認できたため、次のステップとして、量産チップの製作を開始した。評価試験で得られた結果に関しては、米国の電気・電子学会誌に論文として投稿し、出版されている。また、高エネルギー加速器研究機構の素核研ニュースとしても取り上げられている。

(<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2020/03/20200309/>)

ミューオン g-2/EDM 実験で用いるシリコンストリップセンサーは、高エネルギー素粒子・原子核実験において幅広く用いられている汎用検出器であり、本研究で開発したストリップセンサーの信号処理回路は回路パラメータを適切に調整することで別の物理実験に応用していくことが可能である。これまでは、こうした先端半導体集積回路技術を全面的に活用した読み出しシステムの開発は、欧米が先行しており、日本は完成された検出器システムを借りて実験を行うことが多かったが、本研究によって日本においても自分たちの手で実験に合わせた測定器システムが開発できる環境が整えられつつあると認識しており、本研究で得られた知見を将来の物理実験のための開発に

活かせると期待している。

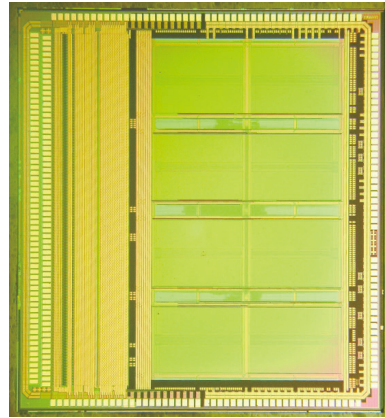


図 1: 本研究で開発したシリコンストリップ読み出し用フロントエンドエレクトロニクス

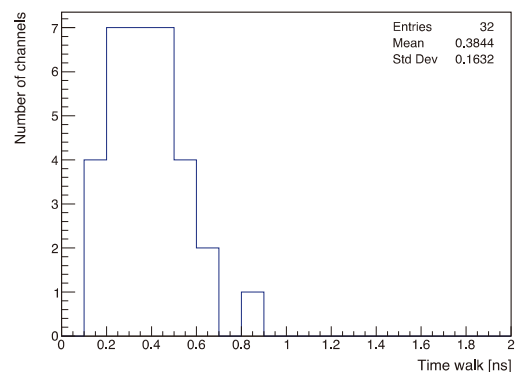


図 2: 128 チャンネル中 32 チャンネルの time-walk 性能のばらつき。当初の実験要求値は 5 ns であった。

[発表論文]

1. “SliT: A strip-sensor readout chip with subnanosecond time walk for the J-PARC muon g-2/EDM experiment”, T. Kishishita et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.67, pp.2089–2095, 2020.
2. “Development of Front-end ASIC for Silicon-strip Detectors of J-PARC Muon g-2/EDM Experiment”, Y. Sato et al., Nucl. Instr. Meth. A, vol.969, 164035, 2020.

【助成 37 -27】

センサ・メモリスター一体型においセンサに向けたメモリスタのリセット特性制御とガス識別実証

研究者 富山県立大学工学部 講師 岩田 達哉

〔研究の概要〕

Pt/TaO<sub>x</sub>/TiO<sub>2-z</sub>/TiO<sub>y</sub>/Pt 積層型メモリスタにおける素子構造によるリセット特性の制御指針を得るべく、TiO<sub>y</sub> 層堆積時の酸素流量並びに TiO<sub>2-z</sub> 層の膜厚を変えた素子を作製し、これらが素子特性へ及ぼす影響を評価した。作製素子がアナログリセットを生じる電圧範囲( $\Delta V_{\text{Reset}}$ )を評価したところ、TiO<sub>y</sub> 層堆積時の酸素流量と TiO<sub>2-z</sub> 層の膜厚がともに大きくなるほど  $\Delta V_{\text{Reset}}$  が大きくなることがわかり、両者の組み合わせによって柔軟に  $\Delta V_{\text{Reset}}$  が制御可能であることを見出した。さらに、XPS による組成の深さ方向分析および化学結合状態分析の結果から、 $\Delta V_{\text{Reset}}$  の違いは、TaO<sub>x</sub>/TiO<sub>2-z</sub> 界面近傍における Ti の酸化状態に関連することが示唆された。

〔研究経過および成果〕

本研究では金属酸化物メモリスタのセンサ時系列データ処理応用に向け、これまでに TaO<sub>x</sub> を抵抗変化層、TiO<sub>y</sub> (y: 0~1) を酸素保持層としたメモリスタにおいて TiO<sub>y</sub> 層の組成がアナログリセット特性に影響することを明らかにしている。本稿では図 1 に示す TaO<sub>x</sub> と TiO<sub>y</sub> 層の間にさらに TiO<sub>2-z</sub> 層を挿入した素子を作製し、TiO<sub>y</sub> 層の組成および TiO<sub>2-z</sub> 層の膜厚が素子特性に及ぼす影響を評価した。なお、Pt を電極材料として用い、上部 Pt と TaO<sub>x</sub> の界面には接着層として膜厚 5 nm の Ti を挿入している。TaO<sub>x</sub>、TiO<sub>y</sub>、TiO<sub>2-z</sub> の各層は反応性スパッタリングにより堆積し、TaO<sub>x</sub> は Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ターゲットを用いて堆積した。一方、TiO<sub>y</sub>、TiO<sub>2-z</sub> は Ti ターゲットを用い、堆積時の酸素流量を制御することで、TiO<sub>y</sub> は金属モード、TiO<sub>2-z</sub> は酸化物モードの条件下

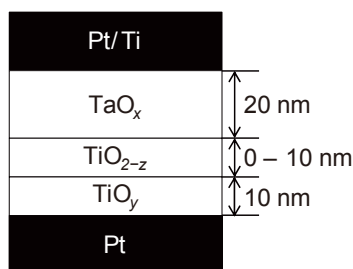


図 1: 作製素子の断面模式図

表 1: 素子の作製条件

		TiO <sub>y</sub> 堆積時酸素流量		
		0 sccm	0.6 sccm	1.1 sccm
TiO <sub>2-z</sub> 膜厚	0 nm	#1	#2	#3
	5 nm		#4	
	10 nm		#5	

で堆積した。さらに、TiO<sub>y</sub> 堆積時の酸素流量並びに TiO<sub>2-z</sub> の膜厚を様々に変化させ素子を作製した。表 1 に素子の作製条件とそのラベルを示す。

図 2 に #5 の電流-電圧 ( $I - V$ ) 特性の例を示す。ただし、初期低抵抗化過程であるフォーミングについては記載していない。図 2 の電圧は上部電極に対する極性を表し、負バイアスを印加すると、約 -1.5V で低抵抗化(セット)が生じ、一方で、正バイアスを印加すると約 0.86 V から 1.8 V の範囲で徐々に電流が減少(抵抗が増加)するアナログリセット特性が見られた。本稿では  $\Delta V_{\text{Reset}}$  を図 2 に示したアナログリセット特性を生じる電圧範囲として定義し、 $\Delta V_{\text{Reset}}$  の素子による違いを評価した。図 3 に  $\Delta V_{\text{Reset}}$  を素子ごとに示す。

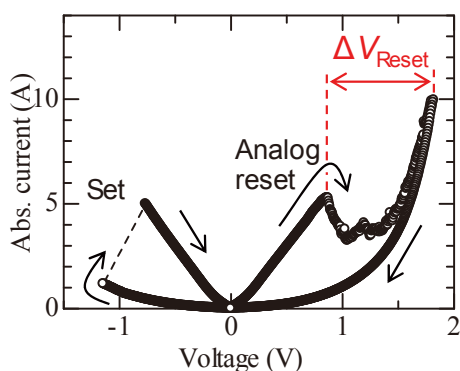


図2 作製素子の典型的な  $I-V$  特性

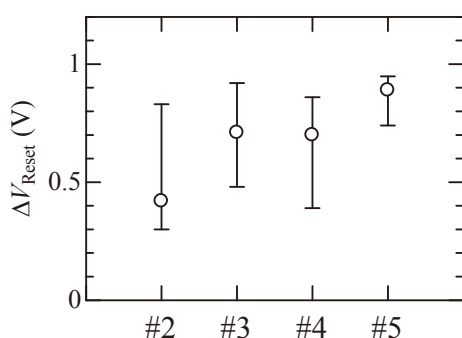


図3: 素子ごとの  $\Delta V_{\text{Reset}}$ . プロットは中央値を、エラーバーは最大および最小値を表す。

ただし、#1 については、初期抵抗が小さく、図2に示したようなアナログリセットが見られなかった。まず、#2と#3を比較すると、 $\Delta V_{\text{Reset}}$ の中央値はそれぞれ0.42 V、0.71 Vであり、 $\text{TiO}_y$ 堆積時の酸素流量を大きくすることで $\Delta V_{\text{Reset}}$ の増加が見られた。一方、#2、#4、#5を比較すると、 $\text{TiO}_{2-z}$ の膜厚が大きくなるとともに、0.42 Vから0.89 Vまで大きくなり、 $\text{TiO}_y$ の組成に加え、 $\text{TiO}_{2-z}$ なる高酸素組成層の導入によっても $\Delta V_{\text{Reset}}$ を大きくすることが可能であることが分かった。

次に、このような $\Delta V_{\text{Reset}}$ の違いが生じた理由を検討するため、#2、#4、#5についてXPS深さ方向分析を行った。その組成プロファイルを図4に示す。ただし、評価試料には上部Pt/Tiを形成していない試料を用いた。まず、#2においては、 $\text{TaO}_x/\text{TiO}_y$ 界面近傍で $\text{TaO}_x$ の酸素組成が減少している(還元されている)ことが分

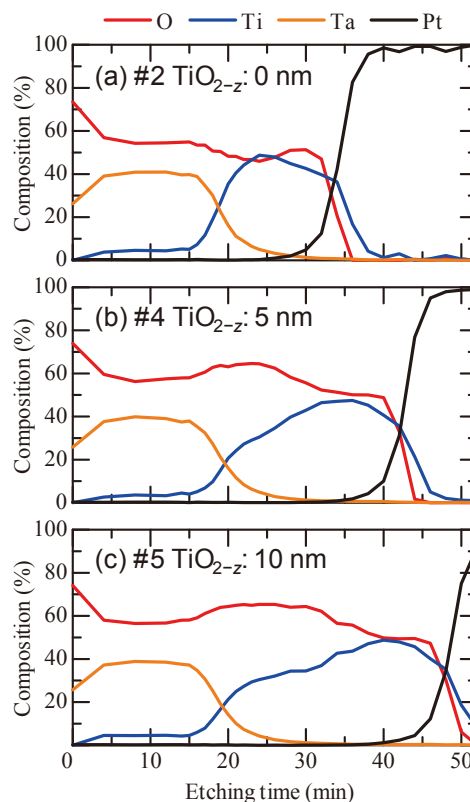


図4: 各素子の組成の深さ方向プロファイル。

かった。対して、 $\text{TiO}_y$ 層の組成はおよそ1:1であり、 $\text{TiO}$ 相として存在していると考えられる。一方、#4、#5においては、界面近傍における $\text{TaO}_x$ の還元は見られず、界面近傍での組成比はおよそ $\text{Ti}:\text{O} = 1:2$ であった。界面近傍のスペクトルを詳細に評価すると、 $\text{Ti}^{2+}$ と $\text{Ti}^{4+}$ すなわち、 $\text{TiO}$ 相と $\text{TiO}_2$ 相が混在しており、さらに、#5のほうが $\text{Ti}^{4+}$ の存在比が大きいことも分かった。 $\text{TiO}_{2-z}$ の膜厚によって顕著に $\Delta V_{\text{Reset}}$ の違いが見られたことを踏まえると、本結果は界面近傍における $\text{Ti}^{2+}$ と $\text{Ti}^{4+}$ の存在比が $\Delta V_{\text{Reset}}$ に影響することを示唆する。

以上の結果は、 $\text{TiO}_y$ 層の組成に加え、高酸素組成層である $\text{TiO}_{2-z}$ 層の界面への導入による、より精密な $\Delta V_{\text{Reset}}$ の制御につながるものである。

[発表論文]

1. 岩田達哉, 吉河武文, 澤田和明, Chemical Sensors, vol.36, no.4, 127-133, 2020.

【助成 37 -28】

次世代トランジスタに向けた高信頼性 Ge MOS 界面に関する研究

研究者 東京理科大学工学部 助教 柯 夢南

〔研究の概要〕

CMOS デバイスの次世代チャンネル材料としての Ge の重要な問題は、高品質のゲートスタックの形成です。ここで、1nm 以下の EOT と約  $10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  の低  $D_{it}$  によるプラズマ後酸化によって実現された  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GeO}_x/\text{Ge}$  構造は、有望なゲートスタック構造です。ただし、残りの問題の 1 つは、大量の遅い準位の存在です。本研究は、C-V 曲線のヒステリシスを使用して  $N_{st}$  を評価することを  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GeO}_x/\text{p-Ge}$  MOS 界面明確に研究しました。C-V ヒステリシスを注意深く調べると、小さな正のゲートバイアス ( $< V_{th}$ ) での遅いトラッピングは、ホールトラッピングにのみ起因することがわかります。一方、大きな正のゲートバイアス ( $> V_{th}$ ) の下では、遅い電子トラップが遅いトラップ特性にさらに影響を与えることがわかります。

〔研究経過および成果〕

図 1 に、プラズマ酸化プロセスを用いた厚さ 1.5nm の  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GeO}_x/\text{p-Ge}$  のプロセスフローと構造を示します。電子遅い準位は  $\text{GeO}_x$  に存在し、 $\text{GeO}_x/\text{Ge}$  界面の近くにあり、これらの電子トラップは n-Ge だけでなく p-Ge MOS 界面の C-V ヒステリシスに寄与する可能性があります。p-Ge MOS 界面での C-V スキャン中に電子遅い準位が実際に発生するかどうかを調べるために、ここでは、C-V スキャンの保持時間の影響を調べます。C-V 測定中の  $V_{stop}$  ( $V_{min}$ ) および  $V_{start}$  ( $V_{max}$ ) ポイントでの保持時間は、一定の  $V_{stop}$  および  $V_{start}$  値の下で変化します。つまり、バックスキャン中の遅い準位の占有率は、長時間の電

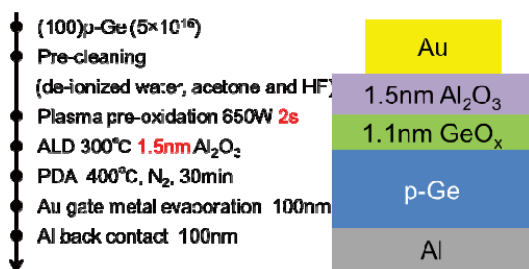


図1 1.5nm  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GeO}_x/\text{p-Ge}$  のプロセスフロー。

氣的ストレスによってわずかに変化します。

電子遅い準位は p-Ge MOS 界面のフォワードスキャン中に発生するため、p-Ge MOS 界面の遅い準位密度を定量的に評価するには、CV ヒステリシスを使用して  $N_{st}$  を計算するために電子と正孔の遅い準位を区別することが非常に重要です。したがって、 $V_g$  を最大電圧 ( $V_{start}$ ) と最小電圧 ( $V_{stop}$ ) の間で繰り返しスキャンし、 $V_{start}$  を増加させながら、新しい測定を提案する必要があります。実験結果を図 2 に示します。

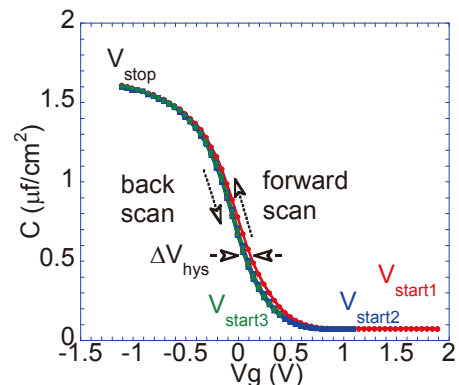


図 2 同じ  $V_{stop}$  と増加する  $V_{start}$  を使用したサイクルスキャンの C-V 曲線。

ここでは、図 2 から抽出したフォワードスキャンとバックスキャンの VFB の値を、図 3 の  $V_{start}-V_{FB}$  の関数と

してプロットします。フォワードスキャンの  $V_{FB}$  は、 $V_{start}$  電圧がより大きい場合でも増加し続けることが確認されています。この p-Ge MOS 界面では約 0.84V である  $V_{th}$  は、電子遅い準位密度の増加 ( $N_{st-e}$ ) を反転電子フィールドの関数として決定できることを意味します。バックスキャンの  $V_{FB}$  はほとんど変化せず、高い正の電圧でわずかに増加します。この現象は、後方 C-V スキャンが大量のトラップされた電子遅い準位の影響をわずかに受ける可能性があることを示しています。つまり、p-Ge のホール遅い準位密度を正確に測定するには、 $V_{start}$  を小さくする必要

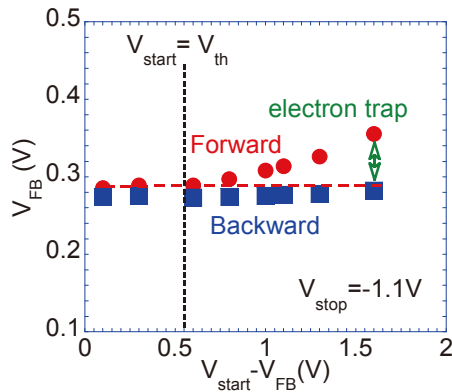


図3 同じ  $V_{stop}$  と増加する  $V_{start}$  を使用したフォワードおよびバックスキャンの  $V_{FB}$  値。

があります。同様の  $N_{st-e}$  が観察されます。これは、電子の遅い準位が正の電圧によってのみ影響を受けることを意味します。この現象は、図4に示すように、p-Ge MOS 界面の電子と正孔の遅い準位密度を区別できることを示しています。p-Ge の電子トラップ密度は n-Ge MOS 界面の電子トラップ密度と同じです。これも参考としてプロットされていますが、正孔の遅い準位密度 ( $N_{st-h}$ ) は  $V_{start} < V_{th}$  を使用して測定できます。 $N_{st-h}$  と比較すると、かなり高い  $N_{st-e}$  が観察されます。これは、p-Ge 測定の  $V_{start}$  を慎重に決定する必要があることを意味します。これらの結果は、遅いトラップへの電子トラップの時定数が広く分布して

おり、n-Ge の蓄積領域や p-Ge MOS 界面の反転領

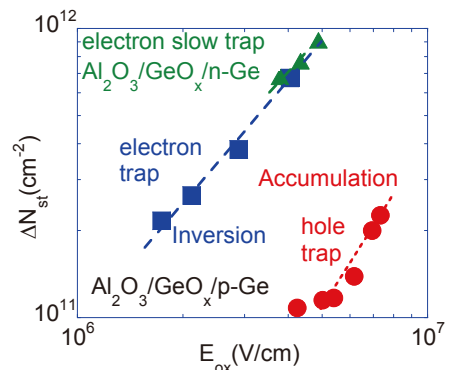


図4 p-Ge MOS 界面の電子場の関数としての正孔と電子の遅いトラップ密度。n-Ge MOS インターフェースの電子スロートラップ密度も参照としてプロットされています。

域に関係なく、伝導帯側付近に非常に長い時定数のトラップが存在することを示しています。一方、 $V_{stop}$  ホールドタイムでわずかに増加したホールトラッピングは、 $Al_2O_3/GeO_x/p-Ge$  界面の電子遅い準位よりもはるかに近い  $N_{st-h}$  を検出し、時定数が長いことを意味します。また、これらのホールトラップは  $Al_2O_3$  および  $Al_2O_3/GeO_x$  界面の近くに存在することも報告されています。

結論、正孔と電子の遅いトラップを区別するための新しい測定手順が提案され、p-Ge ゲートスタックに適用されました。強い反転ゲートバイアスで明らかな電子遅い準位は、 $N_{st-E_{ox}}$  の関係を理解する上で非常に重要であり、有効な電子と正孔の遅い準位密度は、それぞれ p-Ge MOS 界面で評価できます。

[発表論文]

1. **M. Ke**, M. Takenaka, and S. Takagi, "Contributions of electron and hole slow traps to hysteresis in C-V characteristics of  $Al_2O_3/GeO_x/p-Ge$  MOS capacitors", 50th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference, San Diego, CA, Dec 11-14, 2019.



## 【助成 37 -29】

### ハーモニーの感性情報を活用した和音進行生成インターフェースの開発

研究者 日本大学文理学部 助手 植村 あい子

#### 〔研究の概要〕

本研究では、アマチュアがハーモニーの響きを手掛かりに楽曲生成ができる簡便なインターフェース作成に向けて、和音進行のスタイルをコントローラとして Variational Autoencoder (VAE)の潜在空間に着目し、リハーモナイズされた楽曲を用いて、和音進行生成のモデルの構築と基礎検討を行った。Long short-term memory (LSTM)で和音の時間方向の接続を考慮し、メロディを条件として組み込むことで、モーフィングベースでの和音進行生成を行うことができた。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では、初心者がハーモニーの響きを手掛かりに簡単に楽曲生成ができるインターフェース作成に向けて、リハーモナイズされた楽曲を用いてモデルの構築と楽曲生成を行う。リハーモナイズとは、メロディはそのままにある楽曲の和音進行を変更することで楽曲の雰囲気に変化をつけることをいう。リハーモナイズされた楽曲は、楽曲間で機能と声はある程度共通するものの、聴いた際の印象が異なるという特徴がある。そこで、ハーモニーは「和音の進行・連結に関する情報（機能と声）」と「印象を左右する感性的な情報」から成り立つと仮定し、リハーモナイズされた曲を用いてモデルの構築を行う。

本研究では和音進行のスタイルのコントローラとして VAE の潜在空間に着目し、モーフィングベースの和音進行生成に取り組んできた。しかし、和音の響きは和音の時間方向の接続を考える必要があり、それがモデルに組み込まれていなかった。また、リハーモナイズでは同一のメロディにフィットさせるという制約がある。これらを解決するために、Long short-term memory (LSTM)とメロディを条件とすることで、モデル

を改良した(図 1)。

2 つの和音進行の潜在変数をそれぞれ  $z_1$ ,  $z_2$  とすると、モーフィングした曲の潜在変数  $z$  は以下のように表される。

$$z = (1 - \alpha)z_1 + \alpha z_2$$

この  $\alpha \in [0, 1]$  を操作し  $z$  をデコードすることで新たな和音進行を得ることができる。童謡「あしたのあしたのまたあした」について、原曲  $z_1$  とフランス風スタイル  $z_2$  のモーフィング例を図 2 に示す。

評価実験では、「The Water Is Wide」18 スタイルと「あしたのあしたのまたあした」6 スタイルの MIDI データを用いて、原曲  $z_1$  とそれ以外のスタイル  $z_2$  について  $\alpha$  を 0.1 刻みで変化させ得られた 242 曲を分析した。JSymbolic<sup>1</sup>を用いて曲ごとに標準的な major と minor の三和音、dim と aug, M7, 7th, 標準的ではない和音、同時発音数が 4 音以上の和音、垂直方向の不協和音の割合を算出した。その平均値を図 3 に示す。提案モデルでは、標準的ではない和音や垂直方向の不協和音の割合が低いことを確認した。

また、和音進行のピッチクラスについて安定性を調

<sup>1</sup> <http://jmir.sourceforge.net/jSymbolic.html>

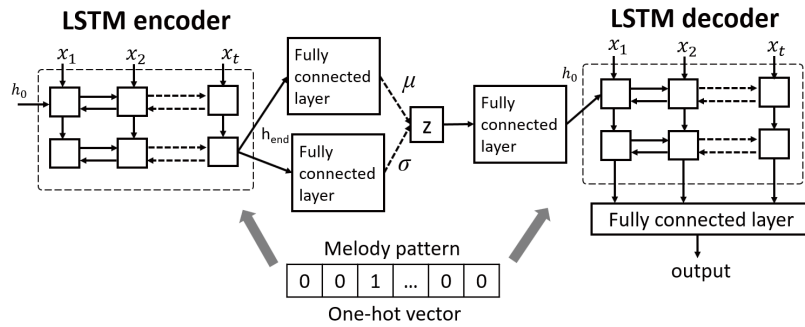


図1 提案モデル



図2 モーフィングによる和音進行生成例

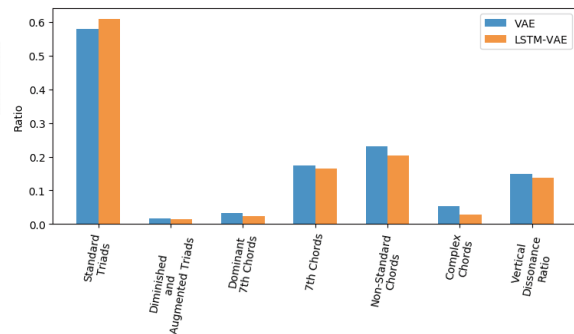


図3 生成された和音進行の評価

べるために、ピッチクラスヒストグラムのエントロピーを算出した。VAE モデルでは 2.54, 提案モデルでは 2.46 となった。提案モデルでは時間方向の接続情報が保たれ、従来法より提案モデルの生成結果のピッチクラスが安定していることが確認できた。

加えて、潜在変数は変えずにメロディ条件のみを変更したところ、入力スタイルを反映している和音進行が得られた(発表論文 1)。

本研究では、LSTM とメロディ条件を用いることで、VAE ベースのモデルを改善し、モーフィングベースの和音進行生成を行った。また、メロディの条件を変更することにより、音楽的な質感を維持したままコード進行を変化させることができた。これらは潜在空間を可視化し、潜在空間上にプロットされた和音進行を操作することで探索しながら好みの進行を探すようなイ

ンターフェースへの応用が期待できる。

今後は、音楽的制約を取り入れ、不協和音を抑制するようなモデルを検討し、インターフェースの作成を行いたい。

[発表論文]

1. Aiko Uemura and Tetsuro Kitahara, "Morphing-Based Reharmonization using LSTM-VAE," Proceedings of The 2020 Joint Conference on AI Music Creativity, 2020 年 10 月.
2. Mio Kusachi, Aiko Uemura, Tetsuro Kitahara, "A Piano Ballad Arrangement System," Proceedings of The 2020 Joint Conference on AI Music Creativity 2020 年 10 月.

## 【助成 37 -30】

### 近赤外分光法による医薬品の非破壊・迅速真贋判定のための 分光デバイス非依存型判別システムの構築

研究者 武蔵野大学薬学部 講師 服部 祐介

#### 〔研究の概要〕

低・中所得国における偽造医薬品の多くは、感染症に用いられる抗生剤や抗マalaria薬など、このような国々において需要の高い医薬品がほとんどである。このような医薬品による健康被害を防ぐために迅速かつ簡便に判別でき、誰でも使用できる使いやすく安価なシステムが必要である。本研究では、このようなシステムを開発するため、汎用性のある分光データベースの構築と、そのデータベースを利用した低価格分光デバイスによる判別が可能か検討を行った。しかし、データベースのデータと判別用のデバイスデータが異なるため、データの補正が必要であることである。結果として、不良品の判別は難しく、より高精度なデバイスが必要である。一方で偽造品は80%の精度で検出が可能であった。今後、データベースの拡張とより様々な薬剤への応用が必要である。

#### 〔研究経過および成果〕

新興諸国における低・中所得国では、医薬品市場に意図的に偽造品を流通させている事例が増えている。WHO の報告によると、全体の 10.5%が偽造医薬品あるいは不良品とされており、それらによる健康被害が懸念されている。国際的な規制当局等が品質、供給プロセスを管理するべきであるが、低・中所得国においては十分に機能していないと考えられる。早急な監視体制の強化が必要であるが、消費者自身あるいは薬剤師によって、現場で判別することも健康被害を防ぐために重要である。近赤外分光法を用いた非破壊分析は以前から行われているが、このような国々においては、次のような条件が求められる。1) 安価である、2) 小型・携帯可能である、3) 迅速かつ正確な判別が可能である。

本研究では、医薬品の近赤外分光データのクラウドデータベースを構築し、多変量解析・機械学習による判別分析が可能な IoT プラットフォームの構築を目

的とする。世界的に問題とされている偽造医薬品は、抗生物質、抗マalaria薬、抗結核薬などの感染症に関する薬剤が主である。そこで、今回の研究では、WHO の必須医薬品や耐性菌を作らないため、小児の肺炎など感染症に用いられる amoxicillin を対象とし、近赤外分光法を用い、偽造医薬品を判別可能な判別モデルの構築と適用のためのプラットフォームの可能性を検討した。また、より汎用性を高めるため、高性能な分析装置だけでなく、小型で安価な携帯型分析装置による判別性能についても検証を行った。

本論文は、アジア9ヶ国、アフリカ5ヶ国から入手した合計 14 製品の amoxicillin カプセル剤について、近赤外スペクトルを取得し、スペクトルデータベースに基づいた判別を行うシステムの可能性と最適な判別方法について検討したので報告する。

データベースの構築には、高性能な分光器として FT-NIR (MPA, ブルカー・オプティクス) を用いて測定したスペクトルを採用した。判別用のスペクトルデ

ータは、小型の波長分散型 (Wavelength dispersive spectrometer: WD) NIR分光器(NIRONE-S1.4, S1.7, S2.0, S2.2, Spectral Engines)を用い測定した。

分光データに基づく判別分析の前に、液体クロマトグラフィー (HPLC) による各製品の有効成分分析を行った。その結果、12 製品については、1 カプセル当たりの表示量に対してほぼ 100% の含有量が確認された。しかし、1 製品については表示量の 84%、1 製品については、有効成分がまったく検出されなかった。そのため、前者は不良品、後者は偽造品とし、分光データに基づいた予測判別を試みた。

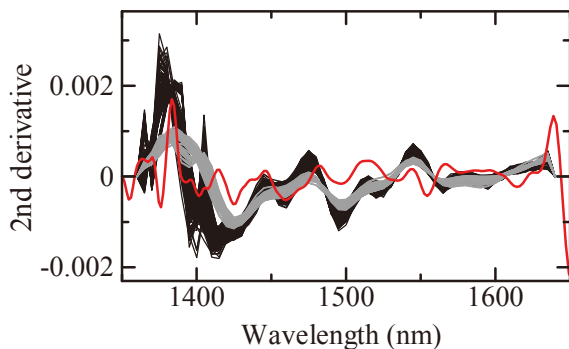


図 アモキシシリンカプセルの WD-NIR(S1.7)(灰色)と波長へ変換後の FT-NIR(黒)スペクトル。赤はアモキシシリン原末のスペクトルを示す。

予測モデルの構築には、FT-NIR データを波数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) から波長 (nm) に変換し、WD-NIR: NIRONE 各モデルに対応した波長間隔に補正を行った。得られたスペクトルを図に示す。全体的に FT-NIR スペクトルのピークの方が WD-NIR スペクトルと比較してシャープであり、アモキシシリンのピークが確認された。

補正後、判別分析法として、主成分分析 (PCA) とサポートベクターマシン (SVM) による判別予測モデルを構築し、WD-NIR データを用いて判別予測を行った。PCA を行った結果、S1.7 と MPA のスペクトル間に主成分スコアの類似性が見られた。PCA では、

明確な判別分析が行えないため、PCA で得られた主成分スコアについて SVM を行った。

表に FT-NIR データに基づいた予測モデルを構築し、WD-NIR データによる不良品と偽造医薬品の予測判別の結果を示す。

表 WD-NIR による予測判別結果 (S1.7)

	$N_{\text{PC}}^*$	検出数	誤検出	検出漏れ
不良品	3	0	22	15
	4	0	25	15
	5	3	11	12
偽造品	3	12	0	3
	4	9	0	6
	5	12	0	3

\*予測判別に使用した主成分 (PC) の数

不良品の検出は、15 データ中 3 にとどまり (20%)、誤検出も見られた。しかし、偽造品は、15 データ中 12 が正しく検出され (80%、検出漏れ 20%)、誤検出はなかった。不良品に含まれていたアモキシシリンは 84% であり、正規品との差を判別するには、今回の方法では精度不足していた。この原因は、予測モデル (FT-NIR) と予測用データ (WD-NIR) が同一ではないためではなく、WD-NIR スペクトルの分解能などが十分ではなかったと考えられる。したがって、不良品を正確に判別するためには、破壊的試験や FT-NIR スペクトルによる精度の高い方法が求められる。

一方、不良品については高い確率で予測判別が可能であった。今後、データを増やし予測精度の改善と他薬剤を用いたデータベースの拡張を目指す。

[発表論文]

1. Y. Hattori, Y. Hoshi, Y. Ichimura, Y. Sugiura, M. Otsuka, *Appl. Spectrosc.*, inpress.

## 【助成 37 -34】

### 心拍誘発脳電位のリアルタイムフィードバックによる運動学習促進支援システムの開発

研究者 大分大学福祉健康科学部 講師 菅田 陽怜

#### 〔研究の概要〕

内受容感覚は、人間における感情の本質的な根源であるとされる一方で、内受容感覚の鋭敏さが身体の適切な制御能力の高さと関連することも知られている。そこで、本研究では「内受容感覚が変化すれば運動機能もそれに続き変化する」という仮説のもと、内受容感覚の指標の一つである心拍誘発脳電位(HEP)に焦点を当ててその科学的検証を行った。その結果、HEP成分をリアルタイムでフィードバックし、それを制御するトレーニングを課すことによって、運動学習能力を向上できる可能性が示された。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. はじめに

近年の研究で身体内の臓器や生理状態についての感覚として「内受容感覚」という言葉が使用されている。この内受容感覚は、人間における感情の本質的な根源であるとされる一方、内受容感覚の機敏さは身体内のモニタリング能力、すなわち身体の適切な制御能力の高さを意味することが報告されている。このことは、内受容感覚の変化に従属して運動機能が増加する可能性があることを示している。そこで、本研究では、内受容感覚の指標の一つである心拍誘発脳電位(heartbeat-evoked potential; HEP)に着目し、一次運動野から得られる HEP の脳波リアルタイムフィードバックシステムを開発し、同システムを用いて HEP のリアルタイム制御トレーニングを行なうことで運動学習能力が変調されるかを検証することを目的とした。

##### 2. HEPリアルタイムフィードバックシステムの構築

8チャンネルワイヤレス生体計測装置(ポリメイトミニ AP108)を用いて、HEP のリアルタイムフィードバック

システムを構築した。脳波データは MATLAB API により、リアルタイムで Matlab にて収録できるよう設定した。脳波は国際 10-20 法に準じて C3 領域から計測し、HEP を抽出するための心電図は鎖骨下にて計測した。参照電極は左の耳朶とした。心電図の R 波を自動で検出プログラムを実装し(図1)、R 波を基準(0 ミリ秒)として-100~500 ミリ秒の脳波を Matlab にリアルタイムで取り込み HEP をリアルタイムで解析し被験者に視覚フィードバックするシステムを構築した。

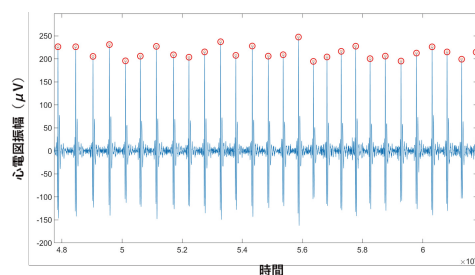


図1 心電図 R 波の自動検出

##### 3. HEP 計測予備実験

構築した HEP フィードバックシステムの信頼性を検証するために、人を対象として、HEP の計測実験を行った。対象は 21 歳の健常者とし、安静時の脳波および心電図データを 5 分間計測した。R 波の自動検出



機能を確認後(図2A)、HEPが検出できているかを調べるために、R波を基準として切り出された脳波の加算平均波形を算出した。その結果、R波検出後の300~400ミリ秒後に、HEPの成分を確認することができた(図2B)。

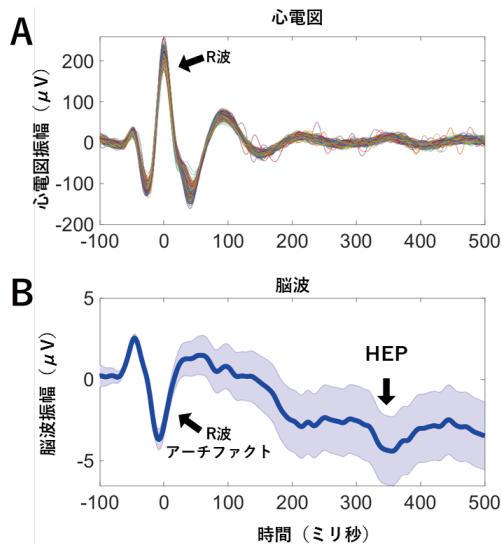


図2 心電図Rと脳波HEP成分

- A. 計測された5分間の心電図について、R波を基準に重ね書きした図。
- B. R波を基準に切り出された286回分の脳波を加算平均した図。

#### 4. HEPリアルタイムフィードバックが運動学習に及ぼす影響

HEPリアルタイムフィードバック制御が運動学習能力を変調するかを明らかにするために、実際の健常者1名を対象とした実験を行なった。HEP計測の予備実験で得られた結果をもとに、5回分のR波を検出し、その200~300ミリ秒後の脳波5回分を移動平均しながら被験者に棒グラフでリアルタイムに5分間フィードバックした。被験者には棒グラフの意味は告げず、その棒グラフをマイナス方向に大きくするよう指示を行った。HEPが運動学習に及ぼす影響を調べるために、HEP制御トレーニング前後にはボタン押し運動学習課題(系列反応時間課題)を実施した。まず、HEPの

振幅については、安静状態のHEPと比較して、HEP制御トレーニング時にはマイナス方向にHEP振幅が増大する傾向がみられた(図3A)。また、HEPフィードバック後にはボタン押しの運動学習のパフォーマンスが向上する傾向がみられた(図3B)。

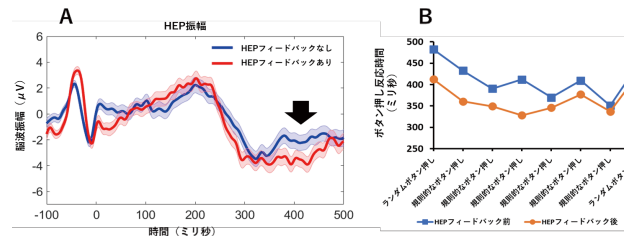


図3 HEPフィードバックによる変化

- A. フィードバックの有無によるHEPの差。
- B. HEP制御トレーニング前後の運動学習課題のパフォーマンス(下に行くほどパフォーマンスが良好)

#### 5. 結論

HEPリアルタイム制御トレーニングを行うことにより、運動学習能力が向上する可能性が示された。今後は更に被験者数を増やすことで、結果の信頼性向上につなげていく必要がある。

[発表論文]

1. Role of beta-band resting-state functional connectivity as a predictor of motor learning ability. **Sugata H**, Yagi K, Yazawa S, Nagase Y, Tsuruta K, Ikeda T, Nojima I, Hara M, Matsushita K, Kawakami K, Kawakami K. *NeuroImage* 210 116562-116562 2020
2. Off-line effects of alpha-frequency transcranial alternating current stimulation on a visuomotor learning task. Harada T, Hara M, Matsushita K, Kawakami K, Kawakami K, Anan M, **Sugata H**. *Brain and Behavior* e01754 2020

## 【助成 37 -35】

### 視-触覚間相互作用に着目した視知覚調節メカニズムの解明と 半側空間無視のリハビリテーションへの応用

研究者 東京都立大学システムデザイン学部 准教授 福井 隆雄

国立精神神経医療研究センター病院身体リハビリテーション部 部長 水野 勝広

#### 〔研究の概要〕

COVID-19 の感染拡大の影響で実験実施に制限のある中, (i) VR 環境における疑似触覚生成, (ii) 周波数の高低判断におけるプリズム適応の影響について予備的検討を行った. (i)に関して, 提示された接触物体の色が暖色である場合に, 寒色に比べ, 疑似触覚強度が大きくなることが確認され, 色の持つイメージ(温冷感)が疑似触覚強度に影響を与える可能性が示唆された. また, (ii)に関して, 聴覚間隔二等分判定課題におけるプリズム適応の影響を検定した. その結果, プリズム適応自体は生じていたが, 課題への影響は認められず, Michel et al. (2019)が示したように, 特定の参加者(音楽経験者など)に関する限定的なものであることが示唆された.

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. VR 環境における疑似触覚生成

日常的な物の操作を行う際に重要な感覚である触覚について, さまざまな研究が行われており, 視覚刺激のみが変化するにも関わらず, 物理的には存在しない触覚を経験する, 疑似触覚(pseudo-haptics)と呼ばれる現象に関する研究が近年増えている. 例えば, Lécuyer et al. (2004)は, マウス移動速度に対するモニター上のカーソルの移動速度を小さく(大きく)することにより, 凸(凹)の感覚を経験させることに成功した. また, Watanabe (2013)は視覚映像の背景の速度を調節することにより(指先に)衝突感を生成させ, 速度の変化量が大きい程, 疑似触覚の強度が大きくなることを示した. Suzuki & Fukui (2019)は, 図 1 のように, HMD(ヘッドマウントディスプレイ)を装着し, 提示されている手腕モデルと同様の姿勢になるように実験参加者に求め, 接近物体の速度が, 手腕モデルに接触

する際の減速変化を操作し, その減速変化割合が大きいほど, 疑似触覚の主観的評価値が大きいことを示した. 本検討では, 接近物体の色が疑似触覚強度にどのように影響するかを検討した.

本実験には, 右利きの大学生 11 名(うち女性 5 名, 平均年齢 [± SD]: 22.1 ± 0.8 歳)が参加した. 本実験は, 東京都立大学日野キャンパス研究倫理委員会の承認を受けた. 図 1 に示す通り, 物体が秒速 23 deg/s で手に接近し, 手腕モデルに接触する位置にて速度が減少する映像を提示した. 接触物体の色を

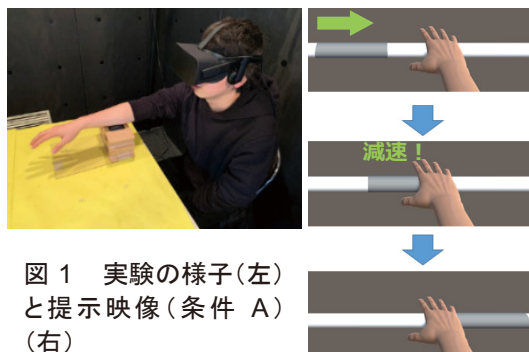


図 1 実験の様子(左)と提示映像(条件 A)(右)

暖色[RGB(240, 30, 30)], 寒色[RGB(160, 220, 255)], 灰色[RGB(126, 126, 126)]であり, 各条件ブロック化し, 参加者間でカウンターバランスを行った. 速度変化は, 初めの速度から1/10, 3/10, 5/10, 7/10, 10/10になる5条件であり, ランダムに提示した. 接触物体が右手に接触した際に, 右手に何か違和感のようなもの(擬似触覚)を感じたかを5件法(1: 全く感じない, 5: とても強く感じる)で回答してもらった.

接触物体の速度変化(5水準)と接触物体色(3水準)を要因とする2要因分散分析を行ったところ, 主効果について, 2要因とも有意であった(速度変化:  $F(4, 40) = 119.695, p < 0.001$ , 接触物体色:  $F(2, 20) = 5.393, p = 0.013$ ). 交互作用について, 有意差はなかった[ $F(8, 80) = 1.860, p = 0.078$ ]. 多重比較(Ryanの方法)の結果, 寒色に比べ暖色である場合に擬似触覚強度が大きくなることが確認され, 色のイメージ(温冷感)が擬似触覚強度に影響を与える可能性が示唆された.

## 2. 周波数の高低判断におけるプリズム適応の影響

プリズム適応とは, 光学的偏位を引き起こすプリズムを着用しポインティング課題を行うと, その光学的偏位の方向にポインティングエラーを引き起こすが, 試行を重ねていくうちに正確にターゲットをポイントすることができるという現象である. そして, プリズムを取り除くと, ポインティング動作はプリズムの光学的偏位とは逆方向にシフトする(e.g., Redding et al., 2005). このプリズム適応法は, Rossetti et al. (1998)以来, 損傷半球の対側空間に対して注意を向けることが難しい半側無視患者様のリハビリテーション法として活用されてきた. 近年, Michel et al. (2019)は, 聴覚周波数にも, 低周波数が左側, 高周波数が右側といった

マッピングが存在するかという点に着目し, プリズム適応後に聴覚刺激の高低判断が変化するか検討し, 音楽経験を持つ参加者のみにその変化が生じることを示した. 本研究では Michel et al. (2019)の追試実験を行った.

本実験には, 右利きの大学生11名(うち女性3名, 平均年齢[±SD]: 22.0 ± 0.9歳)が参加した. 本実験実施にあたり, 首都大学東京(現東京都立大学)日野キャンパス研究安全倫理委員会の承認を受けた. 聴覚刺激は基準となる2つの聴覚周波数(AF: 700, 1300 Hz)とターゲットとなる15の聴覚周波数(TAF: 800, 850, 900, 920, 940, 960, 980, 1000, 1020, 1040, 1060, 1080, 1100, 1150, 1200 Hz)を用意した. Pre フェイズ・プリズム適応フェイズ・Post フェイズの順で実験を行った(図2). Pre フェイズとPost フェイズは, ランダムに再生されるTAFが上限・下限のAFのどちらに近いかを回答する聴覚間隔二等分判定課題とポインティング課題(開ループ)から構成された. プリズム適応フェイズでは, プリズム適応を行った. 二等分判定課題について, 各TAFによる回答から主観的等価点(Point of Subjective Equality: PSE)を算出した. 実験の結果, プリズム適応自体は生じていたが, 聴覚間隔二等分判定課題についてPre, Post条件間のPSEに有意差が認められなかったことから, プリズム適応の聴覚間隔二等分判定課題への影響は, Michel et al. (2019)が示したように, 特定の参加者(音楽経験者など)に関する限定的なものであることが示唆された.



図2 実験の流れ

【助成 37 -36】

体外から光で制御する血流制御ツールの開発

名古屋市立大学大学院薬学研究科 講師 家田 直弥

〔研究の概要〕(5~8行程度)

体内をくまなく巡る循環器系は生体機能を維持するための重要な器官の一つであり、その恒常性の破綻は様々な疾患の原因になる。一酸化窒素(NO: nitric oxide)はL-アルギニンから生合成され、血管内皮弛緩作用によって循環器系を制御するシグナル分子であり、NOの発生を制御できる系は生物実験におけるツールとしてだけでなく、循環器系疾患の新規治療法として期待できる。これまで、様々な光制御 NO ドナーが開発されてきたが、その制御光の波長や化合物の毒性といった問題があり、個体における血流制御を達成した光制御 NO ドナーはまだ開発されていなかった。本研究では、申請者が開発してきた可視光制御 NO ドナーの動物個体への応用や、制御光の更なる長波長化を行い、動物個体において血流を光制御できることを示した。

〔研究経過および成果〕

一酸化窒素(NO: nitric oxide)は生体内で生合成され、血管拡張を起こすシグナル分子の一種であり、その発生を任意に制御することのできる系は、NOの生理活性を精査するためのツールとしてだけでなく、新しい循環器系疾患の治療法としても期待できる。申請者はこれまで、NOの生理活性を時空間制御する目的で、独自の光反応に基づく光制御 NO ドナー群を開発してきた。これらの化合物は、NOを放出するN-nitrosoaminophenol構造と、光を吸収するアンテナ部位からなり、アンテナ部位の構造を変えることによって制御光を変化させることができ、これまで様々

な色の光で制御可能なNOドナーを開発してきた<sup>1,2</sup>。これらの化合物が動物個体でも応用可能かを調べるために、可視光の中で最も生体透過性が高い光である赤色光で制御可能なNOドナーであるNORD-1 (Fig. 1)を用いて、血管平滑筋の光制御が可能かを

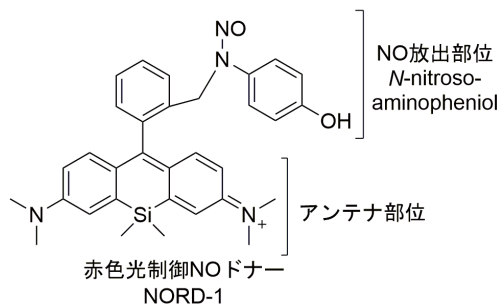


Fig. 1 赤色光制御 NO ドナー-NORD-1

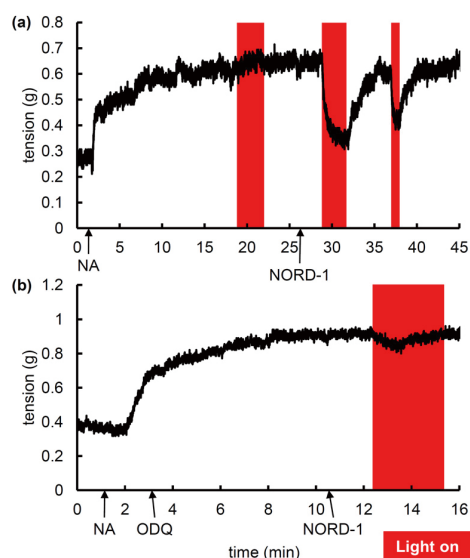


Fig. 2 ラット大動脈切片の弛緩反応の光制御; sGC 阻害剤である ODQ 非存在下での光照射 (a) と、ODQ 存在下での光照射 (b). NA: noradrenaline.

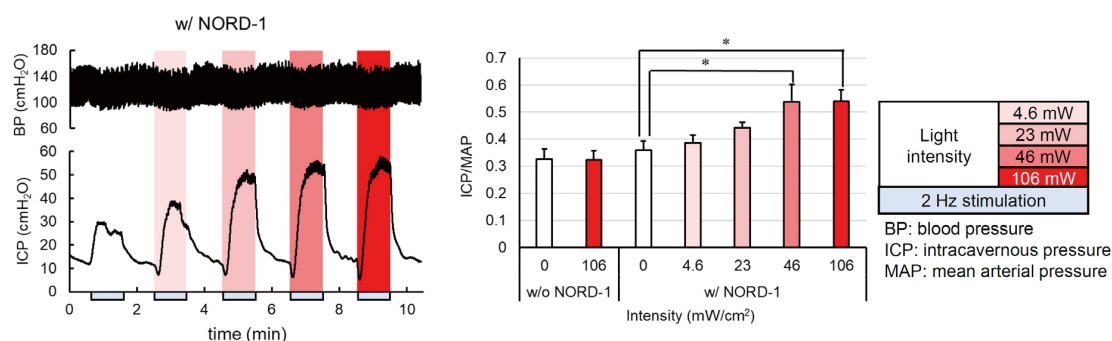


Fig. 3 ラットの海绵体の弛緩制御とそれによる血流量の変化；ラットの海绵体に NORD-1 の溶液を注入し、電気刺激と同時に赤色光照射を行い、全身血圧と海绵体血圧を測定することによって血流量の変化を評価した。

検討した。

NO は平滑筋の可溶性グアニル酸シクラーゼ (sGC) を活性化させることによって平滑筋の弛緩を起こすことが知られており、ラットの大動脈切片を用いて、平滑筋の弛緩が光制御できるかを調べた (Fig. 2)。大動脈切片を NA (noradrenaline) によって収縮させた後に、赤色光照射を行ったが、血管弛緩は見られず、NORD-1 を投与した後に光照射を行うと、顕著な血管弛緩が確認された。また、sGC の阻害剤である ODQ を投与すると、この弛緩反応はほぼ抑制された。このことから、NORD-1 から発生した NO が sGC に作用し、平滑筋の弛緩を起こすことが示唆された。

さらに、NORD-1 を用いて、動物個体でこの弛緩作用を制御可能か検討した (Fig. 3)。哺乳動物の海绵体の平滑筋も NO によって支配されており、弛緩によって海绵体血流量が増大する。ラットの海绵体に NORD-1 の溶液を注入し、外部から赤色光照射を行いながら海绵体の血圧測定を行った。血流増大のイニシエーションとして、弱い電気刺激が必要だったものの、赤色光照射によって、照射していないときと比べて血流量が増大し、血流量は照射する赤色光の強度に依存して大きくなった。さらに、この血流量の増大は NORD-1 を投与しなかったラットでは全く確認さ

れず、NORD-1 から生じた NO によって血流増大が起きたことが示唆された。

以上のように、申請者が独自に開発した赤色光制御 NO ドナーを用いることによって NO による血管弛緩を制御することに成功し、さらに *in vivo* において血流制御をすることに成功した。現在、他の組織の平滑筋の光制御や循環器系疾患の病態モデル動物を用いて、機能制御や症状改善に用いることができるか、さらなる検討を行っている。

[発表論文]

1. Naoya Ieda, and Hidehiko Nakagawa  
Synthesis, evaluation, and biological applications of visible-light-controllable nitric oxide releasers  
*Methods in Enzymology*, 640, 37–61 (2020).
2. Naoya Ieda, Yuji Hotta, Ayaka Yamauchi, Atsushi Nishikawa, Takahiro Sasamori, Daisuke Saitoh, Mitsuyasu Kawaguchi, Kazunori Kimura, and Hidehiko Nakagawa.  
Development of a red-light-controllable nitric oxide releaser to control smooth muscle relaxation *in vivo*  
*ACS Chem. Biol.*, 15, 2958–2965 (2020).



【助成 37 -37】

人間支援デバイスを利用した腎結石治療における  
「放射線被曝ゼロ」を目指した腎穿刺システムの確立

研究者 名古屋市立大学大学院医学研究科 腎・泌尿器科学分野 講師 濱本 周造  
河瀬 健吾、田口 和己、岡田 淳志、安井 孝周  
名古屋工業大学 電気・機械工学科 服部 将大、中村 匡徳

〔研究の概要〕

大きな腎結石に対する治療の第一選択は、経皮的腎砕石術 (PNL) とされている。PNL の成功には、正確な腎穿刺が必要である。腎穿刺は、X 線透視と超音波を使用して行うことが多いが、最近になって職業被曝による放射線性皮膚障害や放射線性白内障が多数報告されるようになった。そこで、以下の3つの研究から人間支援デバイス(コンピューター、ロボット)を用いた「放射線被曝ゼロ」を目指した腎穿刺システムの確立を目指した。

【研究1】3D 腎盂形態モデルの尿流シミュレーションを用いた最適穿刺腎杯の選定

【研究2】VR (Virtual Reality) による術前腎穿刺シミュレーションの確立

【研究3】ファントムモデルに対するロボット支援腎穿刺システムの確立

〔研究経過および成果〕

【研究1】3D 腎盂形態モデルの尿流シミュレーションを用いた最適穿刺腎杯の選定

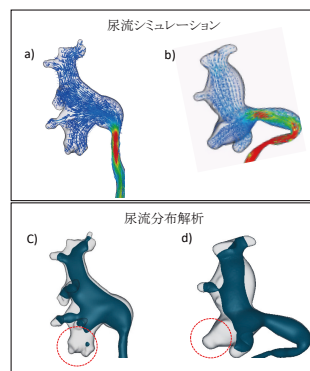
① 腎盂形態と結石形成リスク因子との関連解析：

2018 年 6 月から 2019 年 8 月に名古屋市立大学病院を受診し、CT で単発の腎結石を認めた 177 名の結石存在部位を3群(上、中、下腎杯)に分類し、その分布を評価した。結果、上腎杯 12%、中腎杯 52%、下腎杯 36%と、大きく形成される腎結石は、中・下腎杯に多く、上腎杯には少ないことがわかった。

② 尿流動態シミュレーションから考える最適穿刺腎杯の選定：

腎結石を認める造影 CT の腎盂の 3DCT を構築し、CFD (Computational Fluid Dynamics) 法を用いて、尿流動態シミュレーションを行なった。CFD の計算条件として、尿を非圧縮性ニュートン流体とし、密度を  $\rho = 1054 \text{ kg/m}^3$ 、粘性係数を  $\mu = 7.0 \times 10^{-4} \text{ Pas}$  とした。1 日尿量は 1500ml として計算し、 $5.0 \times 10^{-4} \text{ L/min}$  を尿の体積流量として与えた。流入面を全ての腎杯に、

流出面を尿管に、モデルの z 軸下向きに  $9.8 \text{ m/s}^2$  の重力加速度を与え、CFD 解析には、



SCRYU/Tetra V14 (Cradle) を用いた。結果、腎盂内の流れは尿管の速い部分でも  $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

程度であった。また、腎盂内部から尿管に至るまでの部分において、渦のような特徴的な流線は見受けられず、流線がモデルの形状に沿って流れている様子が確認できた(上図 a,b)。一方、尿流の流速分布は、下腎杯では遅く(赤点線丸印)、上腎杯では速い傾向にあった。

①②の結果に基づき、結石ができやすく、排石されにくい腎杯は下腎杯であり、最適な穿刺腎杯は下腎杯であることが示唆された。

## 【研究2】VR(Virtual Reality)による術前腎穿刺シミュレーションの確立

経皮的腎砕石術(PNL)を予定している患者のCT画像から各臓器に分けたポリゴンファイルを作成し、HoloEyes社の専用サイトにアップロードし、VR画像を作成した。専用のコンピューター、VRゴーグル(を用いて、仮想VR空間内に入り、腎結石、腎血管、周囲臓器の位置を確認し、多人数にてカンファレンスを行い、腎穿刺ラインを策定した(下図)。これにより理想とする穿刺ラインを選択できるようになっている。現在、前向き観察研究にて、本シミュレーションの有効性を評価している(IRB No. 60-20-0024)。

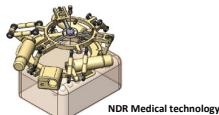


VR画像を用いた腎穿刺シミュレーション

## 【研究3】ファントムモデルに対するロボット支援腎穿刺システムの確立

経皮的腎砕石術における腎穿刺は、治療成績に関わる重要なステップである。透視ガイドや超音波ガイドでの施行において術式の様々な改良が試されているが、治療成績は術者の経験・修練に基づく結果が多い。その中で、近年、人口知能を利用した透視同期型のロボット支援装置が開発された。本研究で

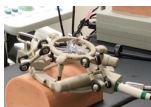
ロボット支援腎穿刺システム



超音波+X線透視下穿刺



ロボット支援腎穿刺



は、腎ファントムモデルを使用し、ロボット支援透視ガイド腎穿刺(RA群)の有効性を超音波+X線透視下穿刺(US群)と比較した(左図)。ロボット支援腎穿刺システム(ANT-X)は、NDR medical

technology社(シンガポール)と共同開発した。方法:名古屋市立大学病院の泌尿器科医15名において、RA群とUS群での腎穿刺を比較した。18G穿刺針を使用し、標的への穿刺成功は透視にて確認し、同一術者において各群同日に手技を施行した。針穿刺回数、デバイス準備・穿刺・透視時間を記録、解析した。結果:穿刺成功率はRA・US群で各々100・71%であった( $p=0.021$ )。穿刺時間中央値はRA群でUS群に比べ25%短く(35 vs 46秒,  $p<0.001$ )、デバイス準備時間中央値はRA群で長かった(93 vs 31秒,  $p<0.001$ )。透視時間中央値はRA群で38秒、US群で7秒であった( $p<0.001$ )。さらに施行医の自己評価では、RA群での視野・安全性・満足度のスコアが高値であった。またRA群における指導医の術時間がレジデントと比べ短かった( $p=0.045$ )。結論:ロボット支援透視ガイド腎穿刺は安全かつ、超音波ガイドに比べ正確であることが分かった(論文1,2)。現在、この結果をもとに、特定臨床研究にて、本システムの有効性を実臨床で検証している(CRB 01-01B-01-19015)

[発表論文]

1. Taguchi K, Hamamoto S, Okada A et al. Robot-Assisted Fluoroscopy Versus Ultrasound-Guided Renal Access for Nephrolithotomy: A Phantom Model Benchtop Study. J Endourol 2019, 33: 987-994
2. Taguchi K, Hamamoto S, Kato T et al. Robot-assisted fluoroscopy-guided renal puncture for endoscopic combined intrarenal surgery: a pilot single-centre clinical trial. BJU Int 2021, 127: 307-310

## 【助成 37 -38】

### 実形状頭部モデルを用いた脳深部ひずみ計測および アメリカンフットボールにおける脳振盪予防への応用

研究者 中央大学理工学部 助教 小島 朋久

#### 〔研究の概要〕

本研究はアメリカンフットボール競技時にどのようなメカニズムで脳振盪が発生するかの詳細を明らかにするために、実形状頭部モデルを用いて従来困難であった脳深部ひずみの測定を可能にするシステムを構築することを目的としている。構築したシステムによる測定結果を臨床スポーツ医学の分野において蓄積された知見により解釈することで、アメリカンフットボール競技時における脳振盪発生を防ぐための指針を示すことを目指す。流体の速度計測手法である粒子画像流速計(PIV法)を応用し固体のひずみ測定手法であるDIC法と組み合わせて用いることによって、脳モデルの材料となる透明ゲル内部の任意断面におけるひずみ分布の可視化・計測手法を確立した。また脳および頭部の力学的挙動を再現可能なモデルの作製を試み、実形状頭部モデルを作製するための知見を得るとともに、アメリカンフットボール競技時の選手の姿勢が重要であることを明らかにした。

#### 〔研究経過および成果〕

衝撃力が付加された際の脳モデル深部の任意断面上におけるひずみを測定するシステムを構築するために、まず透明ゲル内部の任意断面におけるひずみ分布の可視化・計測手法の確立に取り組んだ。流体の速度計測手法である粒子画像流速計(PIV法)を応用し、固体のひずみ測定手法であるDIC法と組み合わせて用いることによって透明ゲル内部のひずみを測定し、計測方法の妥当性を検証した。立方体形状のゲル材料試験片をシリコンオイルで満たした水槽内に設置し、単軸圧縮試験を行った。試験片にはトレーサ粒子を混入させてあり、試験中に側面からシートレーザを照射することで内部断面内のトレーサ粒子を発光させ、トレーサ粒子の移動を可視化した(図1)。可視化したトレーサ粒子の像を高速カメラで撮影し、得られた動画のフレーム画像をDIC法で処理することにより、試験片内部断面のひずみ分

布を得た。水槽とシリコンオイルを用いたのは、屈折率一致による像の歪み除去と、試験片が撮影方向へ変形することによる光の屈折の影響を抑制するためである。

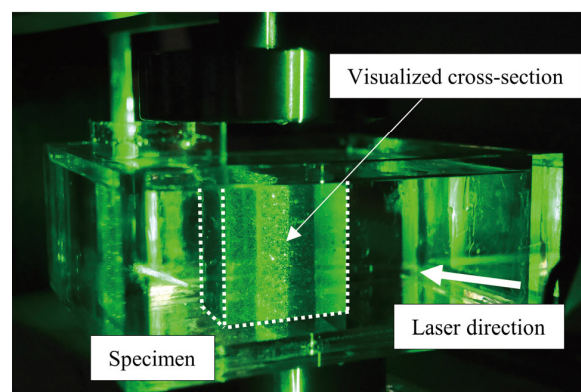


図1 ゲルの内部断面の可視化の様子

DIC測定により得られたひずみを工学ひずみと比較することで値の妥当性を確認した。DIC測定結果の上端および下端近傍のひずみは境界に近いゆえの

誤差を含んでいたものの、測定した圧縮方向ひずみは変形の大きい40%圧縮状態でも工学ひずみとの差が13%であった。以上より、提案手法によりゲル内部のひずみを精度よく測定できており、透明ゲル内部の任意断面におけるひずみ分布の可視化・計測手法を確立できたと言える。

次にMRI画像から作成された高精細な人の脳の3Dイメージを3Dプリンタで造形して元型とし、脳モデルを成型するためのシリコン型を作製するとともに、脳の力学的挙動を再現可能なモデルを作製するための課題を明らかにした。



図2 造形した脳の元型

さらに人体の頭部重量と等しい質量に調整した頭部マネキンにヘルメットを被せて落球により衝撃荷重を付与し、ヘルメットのひずみと頭部マネキンに発生する加速度を測定し考察を行った。衝突時に脳振盪が発生するとされる荷重文献値と同等の衝撃荷重が発生するよう球の大きさを決定した。また頭部マネキンの頭頂部に球が衝突する場合と、マネキンを傾け、前頭部に球が衝突するようにした場合の2種類について試験を行った。前者は現在アメリカンフットボールで禁止されているスピアリングタックルを行った場合の衝撃条件に近く、後者は現在推奨されているヘッズアップの形でヒットした場合の衝撃条件に近いものである。試験結果より実形状頭部モデルを作製す

るための知見が得られるとともに、実際の競技時には衝突時の姿勢や、衝突対象を視認することによる頸部の筋肉の緊張度合い等が重要であることが示唆された。

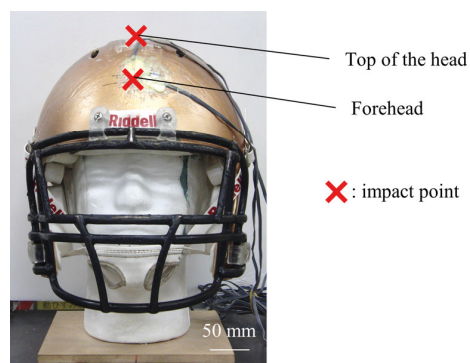


図3 使用した頭部モデル

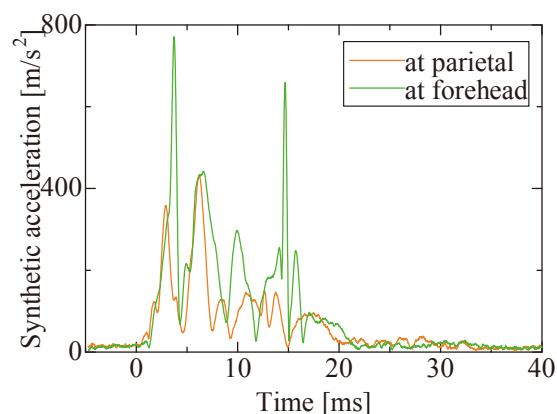


図4 頭部モデルに発生した加速度の時間履歴

[発表論文]

1. 小島朋久, 中村匠, 辻知章, 納富充雄, 藤谷博人, PIV法とデジタル画像相関法を応用したゲルの内部ひずみ測定法, **実験力学**, Vol.21, No.1, 2021.(印刷中)
2. 小島朋久, 府川正樹, 納富充雄, 藤谷博人, デジタル画像相関法を用いたゲルの内部ひずみ測定, **第51回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集**, Vol.1, pp.15-16, 2020.



## 【助成 37 -39】

### 心筋を用いた熱を有効活用するバイオアクチュエーターの開発

研究者 中部大学 生命健康科学部 生命医科学科 助教 新谷 正嶺

#### 〔研究の概要〕

生体分子はスケールの為は無視できない熱揺らぎを積極的に利用して機能を創出していると考えられている。私は、心筋細胞を体温程度に温めると、細胞内部の筋節が拍動に近い振動数で収縮と弛緩を繰り返す熱筋節振動現象を発見したことから、筋節およびその内部分子が熱揺らぎを巧みに利用して心拍を支えているとの仮説を得た。この仮説を検証するため、心筋細胞アクチュエーターの実験計測とその分子メカニズムの数理モデル推定を行った。その結果、心臓から分離した心筋細胞アクチュエーターを温めて生じた熱筋節振動は、心臓の心拍周波数(5-7Hz)と異なる低周期(1.4Hz)で細胞内カルシウム濃度に変化しているにも関わらず、心拍周期で振動する、収縮リズム恒常性を備えていることが分かった。また、その分子メカニズムを推定した数理モデルから、心臓が拍動毎に速やかに拡張する際、この熱筋節振動の性質を利用しているとの予測を得た。

#### 〔研究経過および成果〕

生体分子は大きさがナノスケールと小さいため、自身の熱揺らぎや、周りの水分子等の衝突の影響を無視できず、確率的な動きをする。しかし、生体分子は熱揺らぎの影響を受けて、低効率にしか働けないのではなく、むしろ高効率に機能している。例えば、ATP を合成する F1-ATPase など、1 分子計測の結果から、エネルギー効率が 100%であるとの主張がされている。100%が本当かどうかはさておき、生体分子は熱揺らぎの中、巧妙に機能を発揮している。

生体は、この生体分子が、ネジやボルトなどの人工的な機械の部品ではなく、生物構造の一部として、互いに相互作用をしながら、分子集合体、細胞、臓器といった集合体を形成している。そのため、生体組織の仕組みを明らかにするためには、バラバラに分解した計測を行うに留まらず、この階層間相互作用を検証する必要がある。生体の熱の利用の仕方に関しても、生体分子 1 分子の計測だけでは全貌が見えない。実

際、私は近年、ラットの心臓から分離した生きた心筋細胞を体温程度に温めると、細胞内部の筋節が拍動に近い振動数で収縮と弛緩を繰り返す熱筋節振動現象(HSOs; Hyperthermal Sarcomeric Oscillations)を発見したが、この HSOs の周期や性質は 1 個のミオシン分子の早くてかつ確率的な挙動からは推定できないものであった。この HSOs は、心臓の生体階層性から創発した現象である。

私は本研究で、この HSOs の性質をより詳しく調べ、数理モデルを利用してその分子メカニズムを推定することで、心臓が熱をどのように利用しているのか、心拍の仕組みの解明に挑戦した。具体的には、ラットの心臓から分離した心筋細胞を、温度依存で HSOs を可逆的に発生させる心筋細胞アクチュエーターとして計測し、その特性を再現する数理モデルの開発を試みた [1]。

まず、分離心筋細胞(アクチュエーター)では、心臓の心拍周波数(5-7Hz)と異なる低周期(1.4Hz)で細



胞内カルシウム濃度が変化しているにも関わらず、熱筋節振動周波数は、心拍周波数と同じであった。なお、熱筋節振動は、ラットの体温である 37°C で約 5 Hz で生じており、41°C に温めると振幅が大きくなり振動が顕在化した。この 41°C のとき、温度上昇に伴い振動周波数は 7.6 Hz に増加した (Fig. 1)。熱筋節振動は、カルシウム濃度変化とともに振幅や波形を大きく変えるものの、周期は一定に保たれることから、筋節はリズムの恒常性を維持するメカニズムを備えていることを発見した (Fig. 1)。私はこの性質を収縮リズム恒常性 (CRH; Contraction Rhythm Homeostasis) と命名した [1]。この性質は、心臓の、熱の利用の仕方を含めた、メカニズムの理解への足掛かりとなることが期待される。

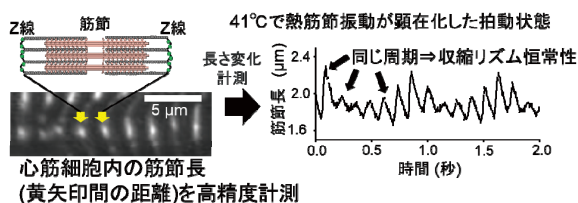


Fig. 1 熱筋節振動の実験計測の概要図

そこで、この性質を再現する、数理モデルの構築を試みた。筋節内の力を発生する分子であるミオシンが確率的に状態を変えることを考慮し、複数の筋節を連結した数理モデル (Washio, Shintani et al., Scientific Reports, 2019) に、温度の影響を付加することで、熱筋節振動が恒常性 (CRH) を備えていることを再現した (Fig. 2)。

心臓の収縮は心筋細胞内のカルシウム濃度変化によって制御されていると考えられている。心筋細胞内の収縮末期におけるカルシウム濃度の減少は遅いにもかかわらず、心臓は、速やかに弛緩・拡張し、新たな血液の充填を行うという一見矛盾した現象がなぜ起こるのかこれまで理解できていなかった。今回の研

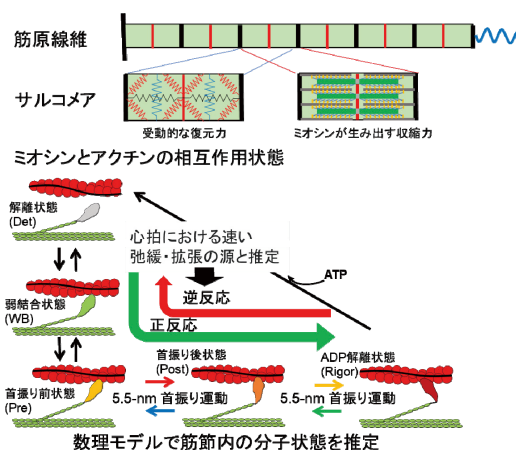


Fig. 2 構築した数理モデルの模式図

究で明らかになったように熱筋節振動によって、筋節はカルシウム濃度が高いときでも速やかな伸展を行うことができる。心臓の拡張期において、熱筋節振動でみられた速い伸展が起こっているものと考えれば、この矛盾は解消する。さらに拡張期には、逆反応が起こることによって ATP 消費が減少し、エネルギー消費の観点からも心拍が効率的であることが予想された。

[発表論文]

1. Mechanism of contraction rhythm homeostasis for hyperthermal sarcomeric oscillations of neonatal cardiomyocytes., [Shintani SA](#), Washio T, Higuchi H., Scientific Reports 10(1) (2020).
2. Single-cell temperature mapping with fluorescent thermometer nanosheets., Oyama K, Gotoh M, Hosaka Y, Oyama TG, Kubonoya A, Suzuki Y, Arai T, Tsukamoto S, Kawamura Y, Itoh H, [Shintani SA](#), Yamazawa T, Taguchi M, Ishiwata S, Fukuda N., Journal of General Physiology 152(8) e201912469 (2020).
3. Thermal Activation of Thin Filaments in Striated Muscle., Ishii S, Oyama K, [Shintani SA](#), Kobirumaki-Shimozawa F, Ishiwata S, Fukuda N., Frontiers in physiology 11 278 (2020).

【助成 37 -41】

仕事に役立つ人文系大学教育の特徴—地方で暮らす若者に着目して—

群馬大学 大学教育・学生支援機構 准教授 二宮 祐

〔研究の概要〕

人文系学部・学科を卒業した若者 25 名を対象として聞き取り調査を実施した。学生時代に経験した授業のうち、現在の仕事で役立っていると回答されるものは専門的知識に関するものと、汎用的知識に関するものに分類することができる。前者は心理学、社会学、教育学といった一部に自然科学や社会科学を含むものであり、後者は、PC 操作、日本語ライティングや、外国語を活用するためのキャリア教育などである。また、フィールドワークや実習の経験が役に立つと主張されていて、そのことは従来の研究では指摘されてこなかった知見である。

〔研究経過および成果〕

1. はじめに

1.1. 研究の背景

2015 年、文部科学省から国立大学に対して「人文系や社会科学系の学部・学科の廃止、転換」が通知されたことがと報じられた。同省によってその報道は本来の意図とは異なると主張されるものの、文系廃止論は収束せず私立大学にまで波及している。また、18 歳人口の減少に関連して、仕事に関する知識を提供していないとして地方人文系私立大学を不要とする主張が行われている。他方、キャリア支援を担う専門家や地元産業界からは、地方における大学の存在意義について肯定的な見解が示されることもある。

そこで、地方私立大学の人文系学部・学科の卒業生に着目して、企業・官公庁などで働く若手社会人を対象とした聞き取り調査を実施する。地方に生きる若者にとっての人文系教育の主観的な職業的意義を明らかにすることを目的とする。

1.2. 聞き取り調査の概要

調査は 2020 年 2 月から 2020 年 9 月まで実施した。東北・北海道、中国・九州地方の合計 7 大学の教員

に対して、主に卒業後 3 年目の人文系学部・学科出身者の紹介を依頼する機縁法を採用した。さらに、その対象者へ知人の紹介を依頼するスノーボールサンプリングを行った。表 1 は対象者の一覧を示したものである。東京、大阪などの大都市部において実施されてきた同様の調査に比べて小売業の割合が高いことが特徴的である。

表1 人文系学部出身若者調査の対象者と調査時期

大 学 番 号 種 別	大学所在地	卒業時期	業種	勤務地
1 私	中国・九州	2018年3月	メディア業	中国・九州
2 私	中国・九州	2018年3月	不動産業	中国・九州
3 私	中国・九州	2018年3月	運輸業	中国・九州
4 私	東北・北海道	2018年3月	小売業	東北・北海道
5 私	中国・九州	2018年3月	不動産業	中国・九州
6 私	東北・北海道	2018年3月	公務	東北・北海道
7 私	東北・北海道	2018年3月	飲食業	東北・北海道
8 私	中国・九州	2018年3月	運輸業	中国・九州
9 私	東北・北海道	2018年3月	公務	東北・北海道
10 私	中国・九州	2018年3月	小売業	中国・九州
11 私	中国・九州	2018年3月	小売業	関東
12 私	中国・九州	2016年9月	IT業	中国・九州
13 私	中国・九州	2019年3月	IT業	関東
14 公	中国・九州	2018年3月	IT業	関東
15 公	中国・九州	2018年3月	公務	国外
16 私	東北・北海道	2016年3月	製造業	東北・北海道
17 私	東北・北海道	2016年3月	建設業	東北・北海道
18 公	中国・九州	2019年3月	エネルギー業	中国・九州
19 公	中国・九州	2015年3月	運輸業	国外
20 公	中国・九州	2019年3月	メディア業	中国・九州
21 公	中国・九州	2013年3月	製造業	中国・九州
22 私	中国・九州	2019年3月	小売業	中国・九州
23 私	中国・九州	2018年3月	サービス業	中国・九州
24 私	中国・九州	2019年3月	小売業	中国・九州
25 私	中国・九州	2016年3月	公務	中国・九州

1人につき約60～90分程度、半構造化面接法によって話しを伺った。主な内容は、学生時代の印象に残っている授業、今の仕事に役立つような授業、ゼミナールや卒業論文執筆の経験、現在の仕事内容、キャリアについての見通しなどについてである。

## 2. 大学での授業の経験

### 2.1. 専門的知識と汎用的知識

まず、仕事で役立っていると回答されるものは専門的知識であり、心理学、社会学、教育学といった一部に自然科学、社会科学が含まれる分野が挙げられる傾向がある。芸術学、史学などは挙げられないものの、文化人類学、ジェンダー論が言及されることもある。このことは人文学の「幅広い」分野を学習できる特徴に関係している。次に、汎用的知識に関するものであり、PC操作、日本語ライティング、語学力を活用するためのキャリア教育などである。これらは比較的新興の分野であり、研究者からは批判の対象とされることもあるものの、若者からは役立つと評価されているのである。他方、25名のうち数名はすべての授業が仕事には役立っていないと回答している。

### 2.2. フィールドワーク・実習・卒業論文

人文系と社会科学系の両者を含む文系大学教育に関する先行研究が示してきたのと同様に、ゼミナールや卒業論文の経験が現在の仕事に役立っていると回答している。8名がゼミナールへ、7名が卒業論文へ言及しているのである。それらを通じて論理的思考、プレゼンテーション、ディスカッション、日本語ライティングなどのトレーニングができたという。工学の分野における「研究室教育」に対応するものであろう。

また、商店街や山村でのフィールドワーク、博物館や児童施設などにおける実習の経験が役に立つとい

うのは人文系の特徴である。たとえば、「年配の人の話を聞いて、数名で、そこから掘り起こせみたいな、価値観の違いとか」(番号15)というフィールドワークの経験や、「博物館ですとレイアウトとか、どう展示したら来館して下さる方にうまくわかるようになるか(略)いまのお店のレイアウトに関して、ちょっと生かせるのかな」(番号07)という実習を評価している。フィールドワークや実習は現在の職業とはまったく異なる内容であるものの、役に立つと評価するのである。これらは教育学の概念である「真正の評価」に関係している。すなわち、地域社会や職場など現実世界の課題に取り組むことこそが重要であるというものである。

## 3. 考察と課題

経験を通じて学習が進むという仮説は経営学においても指摘されてきた。「クオンタム・リープ・エクスペリエンス」や「一皮むけた経験」といったものである。いずれも、中高年層を対象とした調査を通じて典型的なリーダーシップの特徴を明らかにしたものである。

人文系におけるフィールドワークなどの実際の経験が卒業後の小売業などの仕事に役立っているという認識は従来の研究では指摘されてこなかった。「経験学習論」の若者に対する適用可能性の検討、大学教育における「真正の評価」論の理論的検討、人文系におけるフィールドワークではない「座学」の位置づけの検討が残された課題である。

[発表論文]

2021年度に論文執筆を行う予定である。なお、2020年11月4日に全国の大学教職員、大学院生約50名を対象とした「高等教育論セミナー2020秋『若者の仕事と大学教育—人文系学部・学科出身者の語りから』」を開催して、本研究の中間報告を行った。

## 【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—

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

#### 〔研究の概要〕

本研究では、「女性管理職育成に関する検討」をする事前の研究として、「教員育成指標」にみる昨今の教員政策の制度改革が教員の働き方にいかなる影響を与えるのかを検討した。日本の教員養成や育成の改革は、新自由主義的な政府の影響下でスタンダードベースのシステムを強く求める世界的な潮流と符号しつつ、矢継ぎ早に進行し、「教員育成指標」の策定が義務付けられてきた。

本研究の分析により、昨今の同僚性が失われている組織構造において、「教員育成指標」は、“一人でがんばりたい先生”の手掛かりになり得ることが明らかとなった。一方、同指標は、教員のワーク・ライフ・バランスに影響を与え、キャリア形成上の障壁となりかねないことが示唆された。

#### 〔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、教員育成政策の目玉である「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光と影を検討することである。

2016年の女性活躍推進法の施行以来、各分野において女性の活躍推進に関する計画を策定することが求められるようになってきた。他方、同時期に、教員のキャリア形成過程の可視化システムとして、2017年より「教員育成指標」の策定が、都道府県等教育委員会に義務化された。これは、教育公務員特例法の一部改正によるものである。

では、この「教員育成指標」は女性活躍推進に寄与するのだろうか。以下では、「教員育成指標」が、教員の働き方にいかなる影響を与えるかを検討する。

##### 2 教員のキャリア形成・育成をめぐる政策背景

###### (1) 教員養成・育成改革の政策動向

「教員育成指標」は、教員養成・育成改革のひとつに位置づけられる。教員養成・育成改革は主たる担い手である国立の教員養成大学・学部の改革と、教員の資質能力の向上という2つの側面から行われている(油布 2018)。

教員養成・育成改革の流れの中で、現職教員の育成については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至った。なお、「教員育成指標」は、国が策定した指針を参酌して策定することが義務づけられている。すなわち、教員の養成だけでなく、育成に対する統制も強化されたことになる。

## (2)「教員育成指標」の特徴

「教員育成指標」には、次のような特徴がある。第1の特徴は、官制主導で一元的に教員の育成を規格化・標準化しているという点である。「教員育成指標」は、先述のように、国の指針を参酌して策定することが求められているが、その際、当事者である教員が主導するのではなく、教育委員会と大学等との協議や調整により進められていく(小柳 2017)という特徴がある。こうした官制主導の他律的な標準化は、新自由主義的な政府の影響下でスタンダードベースのシステムを強く求める世界的な潮流と符号している。

第2の特徴は、教員のキャリア形成に監視的である点である。諸外国は指標を倫理綱領に近いものとして当事者と協働で作成する一方、日本は当事者の関与が極めて薄く、「あらゆるキャリアステージを通じて、具体的で細かい活動を指標に組み込んで」(子安 2017:40)教員としてのありようを管理していこうとする特徴がある。

## (3)「教員育成指標」の問題点

こうした「教員育成指標」特徴からは、教員の育成やキャリア形成に関して、3つの問題が指摘できる。

第1に、教員としての活動や職能形成を細かく指標に組み込み、行動の到達目標がチェックリスト化されている教員育成指標が、実質的に教員のキャリア形成に対して統制のための監視として機能しかねないという問題がある。

第2に、監視的な指標は、教員としての成長やキャリア形成に深刻な事態を及ぼしかねない。規格化された行動目標モデルとしての「教員育成指標」が教員のキャリア形成や職能形成の自律性を許容しないものとして運用されることに注意を払う必要がある。

第3に教員のライフ・ワーク・バランスの確保についても無視するものになりかねない。「熟達モデルの単線化」(子安 2017)とも言えるスタンダードは、教員育成指標に定められた時期に示された資質能力を獲得できるものしかすくいあげない懸念がある(木村・河野 2017)。

## 3 「教員育成指標」の光と影

「教員育成指標」の光としては、昨今の同僚性が失われている組織構造において、「教員育成指標」は、“一人でがんばりたい先生”の手掛かりになることが指摘できる。

一方、こうした「指標」は、教員育成指標に定められた時期に示された資質能力を獲得できるものしかすくいあげない危険もはらむ。これが、「教員育成指標」の影の部分である。ワーク・ライフ・バランスにも影響するため、キャリア形成上の障壁となりかねない。

以上のように、「教員育成指標」によって「だれが」「どのように」育成されるのかを、ジェンダー視点から注視していくことが必要である。学校現場では「教員育成指標」がいかに解釈され、個々の教員の働き方に影響を与えているのか、女性管理職の育成につながるのかは、今後の課題である。

### [発表論文]

1. 跡部千慧・木村育恵・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, 2020, 「教員育成指標によって教員の働き方はどう変わるのか—教職におけるジョブ・ディスクリプションの課題」『国際ジェンダー学会 2020 年大会 発表要旨』



## 【助成 37 -45】

保育カンファレンスの問題解決機能を最大化するチェンジ・エージェントの育成に向けた探索的研究

研究者 星美学園短期大学幼児保育学科 准教授 遠藤 愛

### 〔研究の概要〕

本研究は、保育カンファレンスの効果を最大化するチェンジ・エージェントの育成を目指して、保育カンファレンス中に進行役が実践する調整行動を面接調査により特定することを目的とした。保育所の職員研修担当の経験がある保育者5名を対象として半構造化面接を実施し、回答内容をテキストデータ化して、KJ法による調整行動のカテゴリ化を行った。その結果、保育者が実践する調整行動の約4割が、協議中の「参加者の発言の促し」であり、参加者の自発的発言が生じないという問題に注力していた。また、参加者の「表面化しない葛藤への対応」など、調整行動の約3割は、保育カンファレンス実施前後にも実践されていることが明らかとなった。

### 〔研究経過および成果〕

**研究目的** 社会構成主義の観点では、組織の構成員の自発性を引き出し、組織全体の学習性を高める人材として、チェンジ・エージェント(以下、CAと表記)の役割が注目されている。保育の分野でCAは、とりわけ児童理解を目的とした「保育カンファレンス」においてその存在意義が期待されている(松井, 2009)。保育カンファレンスは、参加する保育者全員の乳幼児理解が深まり具体的な実践の示唆を共有できる機能を有している。しかし保育者間で葛藤が生じたり、議論が雑談に終始するなどの混乱状況がその機能を阻害している。この混乱状況を解消するために保育カンファレンスの進行役の調整行動が注目されているが、この調整行動の具体的な示唆は得られていない。本研究では、この進行役がCAの役割を担う人材としてとらえ、進行役を経験した保育者に面接調査を行い、保育カンファレンス中の調整行動について明らかにすることを目的とした。

### 研究成果

**(方法)** 保育所で主任または園長として職員研修の運用を経験したことのある保育者5名が本研究に参加し

た。それぞれ個別に半構造化面接を行った。質問項目は主に、①園内の保育カンファレンスの運用方法、②開催する意義や有用性、③実施する際の課題と困難、④進行役としての工夫、⑤事例提供者や参加者に行っている配慮、⑥協議中に生じる参加者間の衝突や葛藤への対応の6項目であった。面接時間は30分程度であった。面接でのやりとりは、ICレコーダーを用いて音声データを記録した後、すべてテキストデータ化し分析対象とした。進行役が保育カンファレンスの際に行う調整行動について、2名の評定者がテキストデータを読み込みKJ法による分類を行った。

**(結果)** 2名の評定者で調整行動にまつわる回答をエピソード単位で切片化したところ、全部で42の切片が得られた(1人あたり7~11)。これらの切片について評定者間で協議し分類したところ、全部で15の下位分類に分けられた。その後内容の類似性から統合し、最終的に7つのカテゴリを得た。図1は、これらの7つのカテゴリの回答数をグラフ化したものである。

各カテゴリの回答の割合は、①「参加者の発言の促し」(16切片, 38.1%)、②「攻撃的発言への介入」(5切片, 11.9%)、③「情報提供・共有」(6切片,

14.3%), ④「表面化しない葛藤への対応」(6切片, 14.3%), ⑤「事例提供者への個別的対応」(4切片, 9.5%), ⑥「事前の情報確認」(3切片, 7.1%), ⑦「個人情報保護の強調」(2切片, 4.8%)であった。

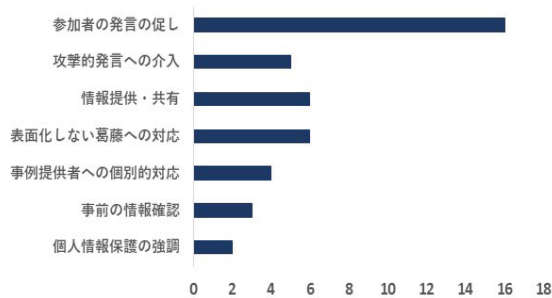


図1 カテゴリごとの回答数

また、「保育カンファレンスを実施する際の課題や困難は何か」という質問に対し、参加者5名全員が「参加する保育者から意見や発言がでないこと」と回答した。さらに「協議中に生じる参加者間の衝突や葛藤に対してどのように対応していますか」との質問に対し、5名中4名が「衝突や反対意見などがほとんど生じない」と回答し、「攻撃的発言への介入」については、万が一そのような発言が出た場合の対応として回答したということであった。さらに、うち3名は「その場では不満や反対意見はでなくとも、協議が終わった後に特定の保育者同士で反対意見を話すのを耳にする」と回答した。よって、こうした協議中には「表面化しない葛藤」に対して、「進行役が話を聞き形を変えて事例提供者に伝える」、「反対意見を言う保育者と個別に話す」などの調整行動を行っていた。

図2は、進行役の調整行動が行われる機会について、保育カンファレンスの実施前、実施中、実施後の3つに分類しその回答数をグラフ化したものである。調整行動は、実施前(3切片, 7.1%), 実施中(29 切片, 69.0%), 実施後(10 切片, 23.8%)と、全体の約3割は、保育カンファレンス実施前後に実践された。

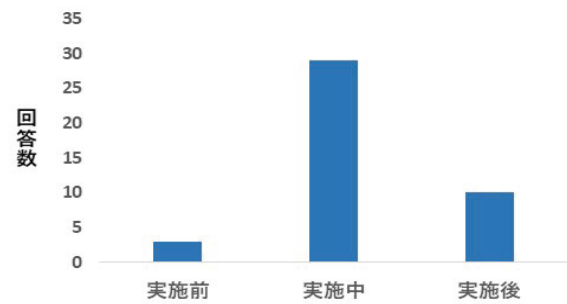


図2 調整行動の実践機会

本面接調査にて、すべての調査対象者が保育カンファレンス中に「保育者から意見や発言がでない」という問題を解消するための調整行動に多くの注意が払っていることがうかがえた。一方で、保育者間の直接的な意見のぶつかり合いに対する調整行動を有しているものの、実際には使われないことが多かった。それよりも、事例提供者と個別的に協議したり、他保育者の協議中には表面化しない葛藤に対応するなど、保育カンファレンス実施前後にも調整行動を行っていることがうかがえた。

[発表論文]

1. 遠藤愛(2020)幼稚園の特別支援教育コーディネーターにおける担任支援. 日本保育学会第73回大会(奈良教育大学, オンライン開催.) 口頭発表
2. 遠藤愛(2020)保育カンファレンスの進行役が行う調整行動の予備的検討—特別支援教育コーディネーターへのインタビュー内容の分析—. 日本特殊教育学会第58回大会(福岡教育大学;オンライン開催). ポスターP11-2.
3. 遠藤愛(印刷中)幼稚園における個別の指導計画の運用プロセスへの支援—園内支援体制の変化に着目して—. 発達人間学研究 20, (2020年11月発行)\* 査読あり

【助成 37 -46】

ヘッドマウントディスプレイを用いた動画視聴時のユーザー特性の総合的解明

研究者 東京都市大学メディア情報学部 教授 市野 順子

共同研究者 工学院大学情報学部 准教授 浅野 裕俊

〔研究の概要〕

360 度動画(パノラマ映像)は、従来の動画と比べてより肯定的な感情を引き出すこと、ヘッドマウントディスプレイ・コンピューター・モバイルデバイスなど多くの一般的なデバイスで視聴できること、動画制作に要する機材や人件費が安いことなどから、マーケティングや情報伝達の手段として、他の VR 技術より一般的なものになりつつある。本研究は、普及が進みつつあるヘッドマウントディスプレイ(HMD)と、今後普及が見込まれる全周囲プロジェクション型ディスプレイ(CAVE)の2種類の没入型ディスプレイを用いて、360度動画視聴時のユーザーの認知特性を、認知のパフォーマンスとプロセスの両方の観点から、多面的に検証した。その結果、CAVEの方が、動画視聴中にはユーザーに適度な認知負荷がかかり(鼻部皮膚温度が下降し)、動画視聴後に行った動画に関する記憶テストの点数が高いことが定量的に示された。

〔研究経過および成果〕

1. 研究課題

本研究では、没入型ディスプレイを用いた 360 度動画視聴時のユーザーの認知特性を解明するために、以下の研究課題を設定した。

- RQ1** : 没入型ディスプレイのタイプが異なると、360 度動画の視聴時のユーザーの認知特性は異なるか？
- RQ2** : 360 度動画のジャンルが異なると、ユーザーの認知特性は異なるか？

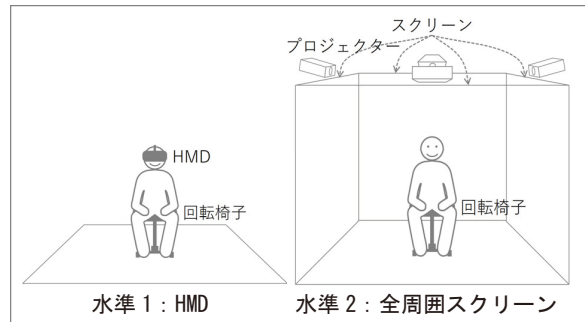
2. 実験方法

**実験要因** 上表の研究課題 RQ1 を検討するために要因 1 を扱い、RQ2 を検討するために要因 2 を扱う。

実験要因 (独立変数)		水準	
要因1	ディスプレイタイプ	水準1	HMD
		水準2	CAVE (全周囲スクリーン)
		水準3	CAVE-G (視界を狭くしたCAVE)
要因2	動画ジャンル	水準1	ドキュメンタリー
		水準2	アニメーション

**実験環境** 要因 1(ディスプレイタイプ)の 2 水準の実験環境を以下に示す。

**参加者** 15名(男性12、女性3)の大学院生または学部生が実験に参加した。平均年齢は 23.1 歳だった。



**評価指標** 上述した各研究課題を、認知のパフォーマンスとプロセスの両方の観点から、多面的に検討するために、以下の評価指標を導入した。

	評価指標	具体的な計測項目
認知のパフォーマンス (動画視聴後の認知の状態)	再認記憶	再認率 (内容の記憶を問う課題での正解数の割合)
	再認反応時間	内容の記憶を問う課題の回答に要した時間
認知のプロセス (動画視聴中の認知の状態)	覚醒度 (脳の活発さ)	脳波 (θ波・α波・β波) 含有率 (覚醒した状態ではα波が減衰し、θ波が前頭部に出現する)
	認知負荷 (精神的な大変)	鼻部皮膚温度の変化量 (認知負荷が高い状態では、血流量の減少によって鼻部皮膚温が下降する)
	見直し行動	見直し率 (360度動画空間の前方だけでなく左右や後方までを見回した頻度割合)

3. 実験結果

主に水準間で有意差の見られた評価指標に関する結果を以下に要約する。

### 3. 1. 認知のパフォーマンス

**ディスプレイタイプ** CAVE は HMD よりも再認を有意に促した(下図 a 左)。

**動画ジャンル** ドキュメンタリはアニメよりも、再認を有意に促した(下図 a 右)。

### 3. 2. 認知のプロセス

**ディスプレイタイプ** すべてのディスプレイで鼻部皮膚温度は時間経過とともに下降したが、中でも特に CAVE の下降量が大きく、HMD との差は有意であった(下図 b)。また、HMD は CAVE よりも見回し行動を有意に促進した(下図 c)。

**動画ジャンル** アニメはドキュメンタリよりも、前頭部側で  $\theta$  波が多く出現したことから、アニメはドキュメンタリよりも覚醒を促すことがわかった。また、アニメはドキュメンタリよりも見回し行動を有意に促進した(下図 c)。

## 4. 考察と結論

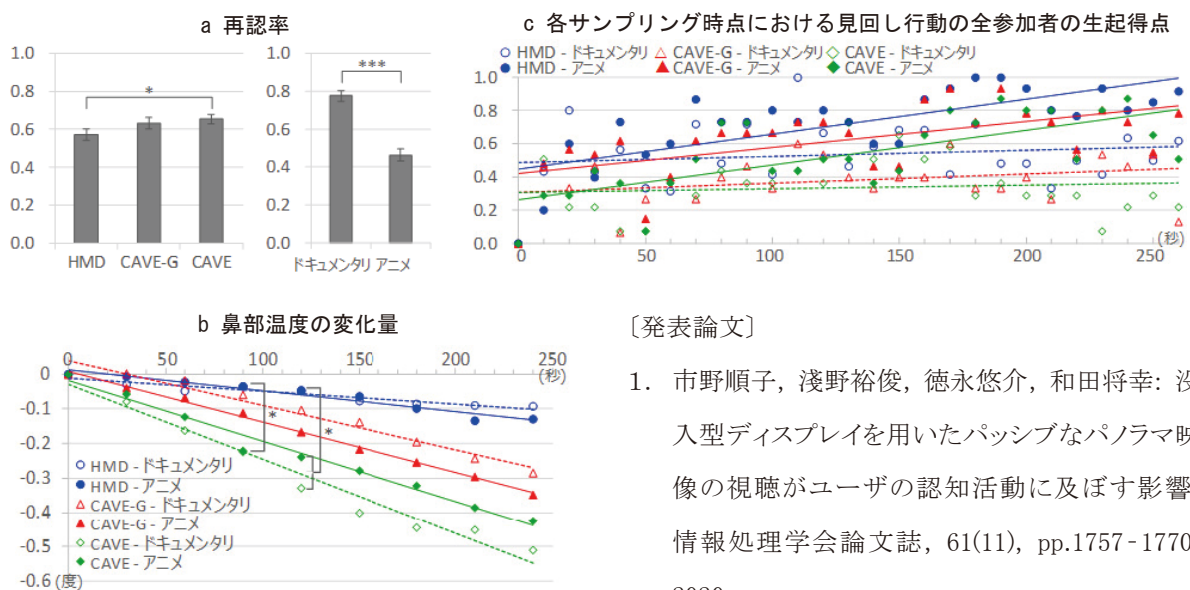
### 4. 1. ディスプレイタイプ (RQ1)

認知負荷(鼻部皮膚温度、下図 b)、再認記憶(下図 a 左)いずれも、CAVE が HMD より高かった。認知負荷は、高すぎたり低すぎたりすると認知のパフォー

マンスが低下し、中程度だと向上することから、CAVE の認知負荷は、認知のパフォーマンスの向上に寄与する中程度(適度)であったと考えられる。以上より、RQ1 に対する答えは、「CAVE ユーザーは、360 度動画をそれほど見回さないが、適度な認知負荷を感じ、その内容をよく覚えている。一方、HMD ユーザーは、360 度動画をよく見回すが、認知負荷をあまり感じず、その内容をよく覚えていない。」となる。

### 4. 2. 動画ジャンル (RQ2)

覚醒度はアニメよりドキュメンタリの方が低く、再認記憶はアニメよりドキュメンタリの方が高かった。覚醒度は、高すぎたり低すぎたりすると認知活動のパフォーマンスが低下し、中程度だと向上することから、ドキュメンタリの覚醒度は、認知のパフォーマンスを向上させる中程度(適度)であったと考えられる。以上より、RQ2 に対する答えは、「ドキュメンタリを視聴するユーザーは、360 度動画をよく見回さないが、適度に覚醒し、その内容をよく覚えている。一方、アニメを視聴するユーザーは、360 度動画をよく見回し、過度に覚醒し、その内容をよく覚えていない。」となる。



[発表論文]

- 市野順子, 浅野裕俊, 徳永悠介, 和田将幸: 没入型ディスプレイを用いたパッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響, 情報処理学会論文誌, 61(11), pp.1757-1770, 2020.

## 【助成 37 -47】

### 環境紛争の長期化が人々の行動および認識に与える影響に関する総合的研究 — 諫早湾干拓紛争を事例として —

研究者 立命館大学 産業社会学部 准教授 加藤 雅俊

#### 〔研究の概要〕

本研究の目的は、諫早湾干拓紛争を事例として、環境紛争の長期化が人々の行動および認識に与える影響を明らかにすることにある。本研究では、諫早市および雲仙市に在住の18歳以上の男女合計2,100名(無作為抽出)を対象としたアンケート調査を行い、「諫早湾干拓事業がもたらした影響」に関する認識を調査した。その結果、地域住民は、諫早湾干拓事業により、防災機能の高まりや利便性の向上などを感じる一方で、経済的効果や地域統合の効果を実感できていないだけでなく、地域分断が生じているという認識を有していることが明らかとなった。さらに、このような負の影響に関する認識を有しながらも、諫早湾干拓事業そのものへの評価は時間の経過のなかで、好転していることも示された。この結果は、現状への不満や不安を感じながらも、受け入れようとする地域住民の姿を示唆している。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究の目的は、諫早湾干拓紛争を事例として、環境紛争の長期化が人々の行動および認識に与える影響を明らかにすることにある。

これまで諫早湾干拓紛争に関する人文・社会科学の先行研究では、法律学を中心に、紛争が長引いてしまった現行法制度の問題点が明らかにされる一方(「特集:諫早湾干拓紛争の諸問題」『法学セミナー』766号、2018年)で、社会学者やジャーナリストを中心に、開門を求める漁民をはじめとした直接的当事者の紛争に関する見解が詳細に検討されてきた(開田奈穂美「地域開発問題における問題の変質とアクターの「入れ替わり」に関する考察」『年報科学・技術・社会』20号、2011年、永尾俊彦『ルポ諫早の叫び』岩波書店、2005年)。これらの先行研究は、紛争の法的側面や直接的当事者の見解を明らかにする点で大きな意義がある一方で、地域住民などの間接

的当事者の見解を軽視していることに加え、紛争が長期化することに伴い認識が変化する可能性を軽視しているという問題点が残されていた。

本研究は、これらの先行研究の課題をふまえて、カシオ科学振興財団からの助成金に加え、その他諸機関からの研究資金も活用し、地域住民が諫早湾干拓事業の影響に対してどのような認識を有しているのかを明らかにするため、諫早市および雲仙市に在住の18歳以上の男女合計2,100名(諫早市1,600名、雲仙市500名)を対象としたアンケート調査を行った。

アンケート調査は郵送法を採用し、2020年9月1日から10月31日にかけて実施し、731票(諫早市556票、雲仙市175票)の回答を得た。有効回収率は、34.8%であった(諫早市34.7%、雲仙市35.0%)。なお、質問項目は、諫早湾干拓紛争に加え、市町村合併がもたらした影響など、地域が抱える諸問題への認識と、それへの処方箋を考察する上での手がかりと



なる地域資源を尋ねている。ここでは、特に、諫早湾干拓事業の影響に関する認識と、紛争の長期化の影響に関する認識を紹介する。なお、紙幅の関係で、詳細な数値などについては言及することができない。また、調査結果の概要については、2021年初夏の頃には、著者が所属する機関のブログ「Sanshaの風景」を通じて発信していく予定であり、そちらを参照してほしい(<http://www.ritsumei.ac.jp/ss/blog/>)。

調査結果として注目すべき点として、第一に、「諫早湾干拓事業が生活・自然環境および社会環境に与えた影響」について、諫早市と雲仙市の住民は、低地の排水改善、高潮への対策、河川氾濫の防止などの「防災機能の向上」、干拓堤防道路がもたらした「利便性の高まり」、そして諫早湾・有明海や自然環境への意識の高まりなどの「地域(問題)への関心の向上」も感じている。その一方で、地域経済を豊かにしたり、地域に活力を生んだという「経済的効果」や、地域の一体感や誇りを生んだという「地域統合の効果」については実感していない。加えて、地域間の対立や農業者と漁業者の対立を生んだという「地域分断の誘発」も感じている。このように、地域住民は、諫早湾干拓事業に関して、両義的な評価(すなわち、防災機能の向上と利便性を感じる一方で、経済的効果や地域統合に関する効果を感じない)を下していることが分かる。

第二に、「諫早湾干拓干拓事業に関する認識の変化」に関して、長期にわたる事業のなかで(事業の着工が1989年、完成が2007年)、「良いものへと変化した」という回答が、「悪いものへと変化した」という回答を大きく上回った。これは、諫早湾干拓事業に関して、上記のように複雑な思いを抱えつつも、現状を受け入れる形で認識が変化していることを示唆している。

以上の調査結果は、大規模公共事業により引き起こされた環境紛争が人々の社会認識に様々な影響を与えているだけでなく、紛争の長期化に伴い、認識自体が変化していることを示している。重要な点は、諫早湾干拓事業にネガティブな印象を持ちつつも、干拓事業への評価自体が好転していることにある。これは、現状に対して、批判的な見解を持ち続けることの難しさ(言い換えれば、平穏な日常生活のために、現状を受容していくことの必要性)を示唆しており、長期化とともに環境紛争が沈静化していく可能性(少なくとも間接的当事者においては)を含意している。

アンケート調査の本格的な分析はこれからであることに加え、アンケート調査では明らかにできない機微を検討するためにはインタビュー調査も不可欠である。このように、本研究には残された課題は多いが、今後の研究展開の端緒となる重要な成果を残すことができた。なお、このアンケート調査は社会的にも注目されており、長崎県内の新聞各紙(長崎新聞、西日本新聞長崎県版、朝日新聞長崎県版)で報道された。

[発表論文]

1. 加藤雅俊、樫澤秀木、開田奈穂美 2021(近刊予定):「諫早湾干拓事業の影響に関する地域住民の認識—諫早市民と雲仙市民を対象としたアンケート調査から見えること—(仮)」、『建築ジャーナル』2021年4月号。
2. 加藤雅俊 2021(近刊予定):「現代社会における紛争処理システムの構築に向けて—諫早湾干拓紛争を手がかりとして—(仮)」、『立命館大学人文科学研究所紀要』127号。
3. 加藤雅俊 投稿予定:「困難を抱える地域における地方活性化の可能性と課題—大規模公共事業と市町村合併を越えて—(仮)」、『横浜法学』

## 【助成 36 -01】

### 北西太平洋中緯度域の亜熱帯モード水の規模および物理・化学的性質の時間変化と 炭素循環における役割

研究者 東北大学大学院理学研究科 助教 高柳 栄子

#### 〔研究の概要〕

地球表層における長期的なフィードバック機構の理解において、海洋の位置づけは重要である。しかし、海洋表層・深層と比較して海洋中層域の水塊に関する知見は少なく、それらが数十年～万年スケールの気候変動にどのような役割を果たしているのかに関する理解は十分に得られていない。そこで本研究では、北西太平洋中緯度に分布する北太平洋亜熱帯モード水に注目し、琉球列島周辺に分布する表層堆積物中に含まれる腕足動物 *Basiliola lucida* の地球化学データから、過去約 3 万年間(最終氷期～現在)の亜熱帯モード水の物理・化学的性質の時間変化を明らかにする。そして、それらが大気との熱交換や炭素循環に与える影響を定量的に見積もり、様々な気候条件下での亜熱帯モード水の役割を評価する。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. 研究背景

北西太平洋中緯度域の亜表層～中層域には北太平洋亜熱帯モード水(以後、亜熱帯モード水と称す)が分布していることが知られている。北太平洋亜熱帯モード水は、水温が 14～20°C、ポテンシャル密度が 24.5～25.9 $\sigma\theta$ (1024.5～1025.9 kg/m<sup>3</sup>)、塩分が 34.6～35.0 で特徴づけられる。北緯 137 度線における長年の海洋観測や最新技術を搭載した ARGO による海洋各層での実測データにより、亜熱帯モード水は他の海域と比較して多量な熱および CO<sub>2</sub> を吸収していることが明らかになり、近年の地球温暖化における亜熱帯モード水の役割が注目されている。しかし、上記の海洋観測結果は 1900 年以降に限られており、それ以前の亜熱帯モード水の挙動や時間変化についてほとんど明らかにされていない。本研究は、海洋表層堆積物中の含有化石の古海洋環境記録を抽出し、

亜熱帯モード水における過去 3 万年間の水温および全炭酸の時間変化を復元することを目的とした。

##### 2. 研究試料および研究方法

琉球列島周辺の水深約 200～400 m で採取された腕足動物化石 *Basiliola lucida* を研究試料として用いた。試料は超純水中で超音波洗浄後、殻を半分に分断し、片方を同位体分析用、もう片方を放射性炭素同位体年代測定用として用いた。粉末化した試料は、東北大学にある炭酸塩自動前処理装置(Carbonate Device Kiel-III; ThermoQuest)と同位体比質量分析計(DeltaV Advantage; Thermo Fisher Scientific)を用い、炭素・酸素同位体比分析を行った。測定精度は、それぞれ、 $\delta^{13}\text{C}$  が $\pm 0.02\%$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  が $\pm 0.04\%$ であった。放射性炭素年代測定は、東京大学大気海洋研究所の横山祐典教授の研究室に依頼した。得られた結果は、ベイシアン年代モデルと補正曲線 Marine13 を用

いて暦年代を算出した。琉球列島の  $\Delta R$  値は  $23 \pm 40$  とし、地域的なリザーバー効果を補正した。

### 3. 結果

#### 3-1 *B. lucida* 化石の炭素・酸素同位体比

*B. lucida* 化石の  $\delta^{13}\text{C}$  値および  $\delta^{18}\text{O}$  値の範囲は、それぞれ、 $2.05\text{‰} \sim 4.61\text{‰}$ 、 $-0.13\text{‰} \sim 2.16\text{‰}$ であった。

#### 3-2 *B. lucida* 化石の放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代

*B. lucida* 化石の  $^{14}\text{C}$  年代の範囲は、現在(modern)～約 29,500 cal year BP(最終氷期)であった。

### 4. 考察

#### 4-1 最終氷期～現在の亜熱帯モード水の水温変化

*B. lucida* の  $\delta^{18}\text{O}$  値を用いた海水温の復元は、Takayanagi *et al.* (2013) が導出した *B. lucida* の地質温度計 ( $T(^{\circ}\text{C}) = 18.51 - 3.27 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{BL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ ) を用いて算出した。氷床量の変化に伴う生息水深の  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$  値の時間変化は LR04 カーブを用いて補正した。その結果、最終氷期～後氷期、完新世、1950 年以降の亜熱帯モード水の水温は、それぞれ  $16.9 \sim 19.0^{\circ}\text{C}$  (水深 149～261 m)、 $14.4 \sim 19.1^{\circ}\text{C}$  (水深 199～397 m)、 $16.2 \sim 17.8^{\circ}\text{C}$  (水深 252～317 m) となり、先行研究で観測された北太平洋亜熱帯モード水の水温  $14 \sim 20^{\circ}\text{C}$  (水深 100～400 m: Masuzawa, 1969; Suga *et al.*, 1997) と調和的であった。また、同一水深での水温の変化はほとんどなかった。これは、亜熱帯モード水の水温は少なくとも過去約 3 万年間は変化しなかったことを示している。

#### 4-2 最終氷期～現在の亜熱帯モード水の 대기 $\text{CO}_2$

#### 吸収量の変化

Takizawa *et al.* (2017) の算出方法に従い、*B. lucida* の  $\delta^{13}\text{C}$  値からモード水中の全炭酸を復元した。その結果、*B. lucida* の  $\delta^{13}\text{C}$  値から推定された最終氷期～後氷期、完新世、1950 年以降の亜熱帯モード水の全炭酸は、それぞれ  $1414 \sim 1746 \mu\text{mol/kg}$  (水深 149～261 m)、 $1635 \sim 1919 \mu\text{mol/kg}$  (水深 199～397 m)、 $1948 \sim 2064 \mu\text{mol/kg}$  (水深 252～317 m) となり、最終氷期～現在に向けて全炭酸が上昇傾向にあり、特に近年の増加が顕著であった。また、1950 年以降の復元結果は、Oka *et al.* (2015) が報告している 2002～2013 年の亜熱帯モード水の全炭酸の観測結果 ( $1995 \sim 2025 \mu\text{mol/kg}$ ) と調和的であった。前節で亜熱帯モード水の水温が過去 3 万年間変化していなかった点を考慮すると、全炭酸の変化は大気  $\text{CO}_2$  濃度の変化と密接に関係していると考えられる。

### 5. 結論

本研究では、琉球列島周辺の表層堆積物中より採取された *B. lucida* 化石から最終氷期～現在の北太平洋亜熱帯モード水の物理・化学組成の復元を行った。その結果、最終氷期～現在にかけて、亜熱帯モード水の水温は変化せず、全炭酸は増加傾向にあることが示された。これは、亜熱帯モード水が気候変動に対して負のフィードバック機構として作用していることを示唆している。

#### 引用文献

Masuzawa, J. (1969) *Deep-Sea Res.*, Oka *et al.* (2015) *J. Oceanogr.*, Suga, *et al.* (1997) *J. Phys. Oceanogr.*  
Takayanagi *et al.* (2013) *Geochim. Cosmochim. Acta.*  
Takizawa *et al.* (2017) *Geochim. Cosmochim. Acta.*

## 【助成 36 -22】

### 塗布型 Si 半導体を指向した「液体 Si—固体 Si 変換機構」の研究

北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 講師 増田 貴史

#### 〔研究の概要〕

私たちが創出した「液体 Si」とは、常温常圧で液体、脱水素化により固体 Si(半導体 Si)となる材料である。本研究は液体 Si—固体 Si 変換(固体 Si 化)の反応機構の解明を初年度の目的とした。初年度成果を踏まえ本年度(2年目)は、1.材料開発(p 型液体 Si の合成)と、2.プロセス開発(非加熱の固体 Si 化)へと展開を広げた。材料面では、B-H と Si-H 結合間でルイス酸・塩基型の活性種を経て脱水素縮合反応を誘起できることを明らかにした。この経路を活用し Si-B 結合を持った「p 型液体 Si」を合成し、それが p 型半導体 Si の前駆体となることを実証した。プロセス面では、電子線誘起型の反応活性種を活用することで固体 Si 化の必要温度を 360°C から 25°C へと引き下げることに成功した。更に半導体 Si の 3 次元印刷を達成した。本研究は液体 Si 固有の特徴を引き出し、これまでの Si の科学と工学に新しい展望をもたらすだろう。

#### 〔背景〕

Si はエレクトロニクスで重要な材料の 1 つである。Si デバイスの出発物質には従来、固体 Si(ウェハ)と気体 Si(シラン)が用いられてきた。一方で「液体 Si」といった概念は研究されていなかった。そこで我々は「液体 Si」を創出した。この材料は脱水素化により半導体 Si に変換できる。しかしこの変換機構が明らかでなく、液体 Si に係る学術と工学の展開を遅くしていた。本研究は「液体 Si→固体 Si」変換(固体 Si 化)の機構を解明することを初年度の目的とした。そして本年度(2年目)は、初年度の成果に基づく発展研究として、液体 Si に係る新規材料(p 型液体 Si)の合成と新現象(室温による固体 Si 化)の実証を目的とした。

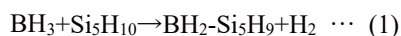
#### 〔実験〕

材料開発とプロセス開発の 2 つに取り組んだ。材料面では、密度汎関数法(DFT)と分子軌道法(MO)を用いて液体 Si(CPS: cyclic Si<sub>5</sub>H<sub>10</sub>)と BH<sub>3</sub> 間の反応機構を解明した。その知見に基づき、Si-B 結合を持

った水素化ケイ素化合物(p 型液体 Si)を合成した。プロセス面では液体 Si に対する電子線誘起型の反応活性種を活用し、非加熱での固体 Si 化に取り組んだ。そして計算と実験に基づき、この変換現象と固体 Si の特徴を解析した。

#### 〔結果〕

材料開発: 図 1 は DFT 計算で得た液体 Si と BH<sub>3</sub> 間の反応のエネルギープロファイルである。この図は(1)式に示す脱水素縮合反応が進行し得ることを示す。



反応には 2 つの経路があり、エネルギー障壁が小さい順に P1 (赤線)、P2 (青線)とした。P1 のエネルギー障壁は 10 kcal/mol 以下であり、この反応は室温で進行可能である。電荷分布の解析では、BH<sub>3</sub> と液体 Si がそれぞれ Lewis 酸・Lewis 塩基として働くことが明らかとなった。その際 Si から B へと電荷移動が起こり、それが静電的相互作用を生み僅かな安定構造(反応複合体)を形成する。この構造では BH<sub>3</sub> と液体 Si

の間で(脱水素化の起点となる)架橋水素が形成される。従って B の強い電子吸引力が、(1)式に示す脱水素縮合反応の原因となっている。実際に(1)式に基づいて合成した反応生成物をインクジェット法で製膜したところ、良好な p 型半導体 Si 薄膜を得ることができた(図示せず)

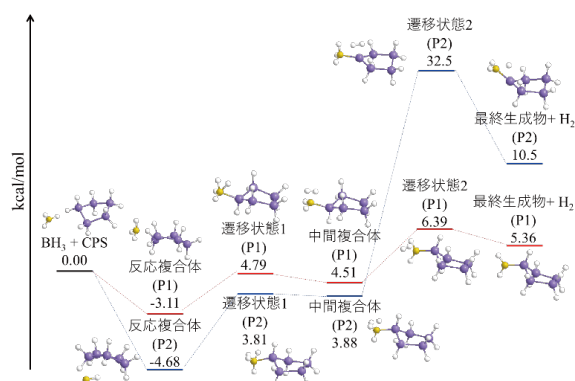


図 1 DFT 計算で予測された CPS と BH<sub>3</sub> の反応のエネルギープロファイル。縦軸は出発物質に対するエンタルピーを示す。P1 (赤) と P2 (青) の 2 つの経路が得られた。反応のエネルギー障壁は P1 で 9.5 kcal/mol、P2 で 37.6 kcal/mol であった。

プロセス開発: 図 2 は液体 Si に電子線を照射する実験概要図と、得られた固体 Si パターンの SEM 像である。液体 Si に電子線を照射することで、良好なパターン状の Si アレイを得ることができた。電子線の走査法を制御することでパターン形状を設計可能であり、ナノサイズの半導体 Si の 3 次元印刷を実現した。この時、得られた固体 Si のサイズは照射する電子線の直径の 2 倍程度であった(今回用いた電子線の最小寸法は 50nm なので、最小の Si ドットの直径は 100nm である: 図示せず)。断面 TEM-EDX 分析は、この固体 Si が高純度 Si であることを明らかにした(図示せず)。電子線が照射された液体 Si 内にはラジカルカチオンが生成する。DFT 計算に基づき、このラジカルカチオンが基底状態の液体 Si と反応してラジカルとカチオンの 2 種類の反応活性種を導くことを明らかにした。そして

このラジカル反応によって 70ps 以内に固体 Si 化が進行することを明らかにした。更に上述の p 型液体 Si や、n 型液体 Si でも同様の現象を確認した。

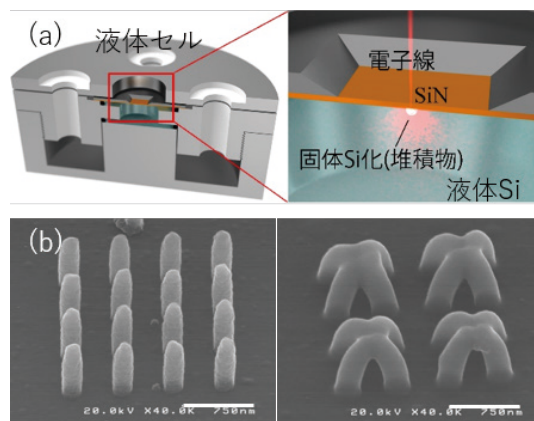


図 2(a) 液体 Si が封入された液体セルと、電子線照射時のイメージ (b) 得られた固体 Si パターン。電子線を走査することで半導体 Si の 3 次元印刷が可能とした。スケールバーは 750nm

#### [結論]

液体 Si 反応活性種の解析を通し、新材料(p 型液体 Si)や新プロセス(非加熱の固体 Si 化現象)といった液体 Si 固有の特徴を見出した。

#### [論文]

1. T. Masuda, et al, Nanotechnology (2021)  
DOI:10.1088/1361-6528/abe0e9
2. T. Masuda, et al, J. Mater. Chem. C (2021)  
(※revision 対応中)

#### [発表]

1. 中山菜初, 他, 応用物理学会北陸信越支部学術講演階, B09, 2019/12/5  
他 7 件(内、受賞 1 件、注目講演に指定 1 件)

#### [特許]

1. 増田貴史, 他「微小構造体及びその製造方法」  
特願 2021-004101.



## 【助成 36 -31・前年掲載の差し替え】

つけ爪型脈波センサの開発 — 全生活時間をモニタリング可能な無拘束計測システム —

研究者 東北大学加齢医学研究所 助教 井上 雄介

### 〔研究の概要〕

装着感のないセンシングデバイスを実現するために、つけ爪型デバイスの改良・ヒトを対象とした実験・解析によるノイズ除去を行った。センサの基板の改良によってフレキシブル化と小型化を実施した。ヒトを対象とした研究では装着感と身体動作時のノイズ除去、圧力センサとしての評価を行い、リハビリへの応用の可能性を示す結果を得た。全生活時間で心拍を計測可能なデバイスの実現に向けた有用な結果を得た。

### 〔研究経過および成果〕

【背景】 入院患者や寝たきりの方のみならず、新生児や運動中のアスリートなどにおいてもバイタルサインをモニタリングすることは重要であり、心電図やパルスオキシメータ、緑光脈波計など様々な方式が用いられている。心電計は胸部への電極貼り付けが必須であることや、パルスオキシメータや緑光脈波計などの指を挟み込むタイプのセンサは低血圧時に挟む圧力によって計測が困難になるなどの課題がある。さらに、これらの手法は計測時に機器との間にケーブルがあるか、ワイヤレスのデバイスであっても装着感があることが大きな課題で、日常生活に支障を来すことや、装着感があることで無意識に抜去してしまい計測できなくなるという課題がある。本研究では装着感のないセンシングデバイスの開発とそれを応用した新たなアイデアに挑戦する。“つけ爪”を応用した皮膚に触れないウェアラブルセンサを開発し、在宅医療用遠隔モニタリングデバイスとして実用化する事で、在宅医療の向上に寄与することを本研究の最終的なゴールとして研究をすすめることとした。

【研究経過】 われわれは装着感のないセンシングデバイスを実現するために、つけ爪型デバイスの改良・

ヒトを対象とした実験・解析によるノイズ除去を行った。本研究は 3 大学による共同研究で、デバイス改良は香川高等専門学校、ヒトを対象とした実験は東北大学、解析は東京大学がそれぞれ主体となって実施した。それはら完全に独立して実施したのではなく、各実験においてはそれぞれの拠点に参集して共同で実施した。

デバイスの改良に関しては、実装する素子サイズを変更することと、実装基板をガラスエポキシの素材からポリイミドの樹脂性基板に変更することで改良をおこなった。ガラスエポキシ基板は 2mm 程度の板厚を用いることが一般的であるが、我々は 0.5mm の厚さの基板を用いてより薄く小サイズ化を図った。さらにポリイミドの基板に改良することで、厚さは約 60  $\mu\text{m}$  (ポリイミド基板 25  $\mu\text{m}$  + 銅箔 35  $\mu\text{m}$ ) まで薄くした。ポリイミド基板は薄いだけでなくフレキシブルであることが有用であった。爪は平坦ではなく長軸方向と短軸方向にそれぞれ丸みを帯びており、さらに個人差が大きい。本デバイスは光の受光強度によって結果を得ており、光路の一部である爪への受発光角度は重要であると考えているので、フレキシブル基板と堅いリジッドな基板による計測結果の違いと、爪の形状の個人

差については今後さらに調査していく予定である。

ヒトを対象とした研究に関しては東北大学大学院医学系研究科倫理委員会への申請と承認を経て実施した(2019年2月18日承認 2018-1-864:温度センサ・衣服型センサとつけ爪型脈波計の装着感の評価研究)。20歳以上の健常者を被験者として実施し、つけ爪型センサの装着感について問診票、アンケート、循環応答と精神生理反応について定量的に評価した。アンケートに関しては主観で5段階評価で回答を求め、他のセンサとの比較を実施した。循環応答による定量的な評価は連続血圧計、心電計(必要に応じ胸部誘導あるいは、四肢誘導で取得)、呼吸数を用いて計測した結果を東北大学の吉澤らが開発した $\rho$  MAX 手法 (DOI:10.1109/VSM.2001.969762) を用いて定量的に解析した。

試験は①安静状態(120秒)、②椅子に座る、ベッドに横になるという日常動作(120秒)、③安静状態(120秒)の合計6分間で行った。この試験を既存のセンサと開発したセンサとでそれぞれ行い比較した。

現在までに4例の試験を行い、定量評価では既存のセンサに比べてストレスを感じているという結果は出ず良好な結果であったが、例数が少ないため個人差を正しく反映しているとはいえないため実験数と対象年齢を広げて実験する必要があると考えている。主観的な評価に関してはいずれも既存のデバイスに比べて装着感や違和感がないことが示された。

圧力センサとしての脈波計測は、把握時のセンサ出力変化(脈高)を利用する方式である。脈波計測という観点ではノイズでしかない把握時の出力変化を有効な情報として活用を試みるものである。試験をすすめるうちに東京大学が実施するノイズ除去手法と非常に相性が良いことがわかってきた。指を動かした

ときのノイズを切り分けることで心拍の真値をとろうとするアルゴリズムは、ノイズとして除去された部分が圧力が計測されるタイミングとなるためである。そこで東京大学においてもヒトを対象とした倫理申請を行い、承認され(東京大学工学部研究倫理委員会 KE18-12 変更申請)、東北大学と共同で研究を進めた。これまでの研究でわかったことは、静止した状態から把握したかどうかを検知すること自体は可能であるが、複数の事象が生じたときにそれを切り分けることは大変困難であると言うことである。物体を把握したときに脈波の脈高が減少する。これは物体を握るための圧力によって、爪へ流れ込む血流が減少するために生じるものと考えており、把握時ににぎりこむ力と、脈高に反比例する傾向が見られたことからこの類推は妥当性があると考えている。一方で、脈高は手の上げ下げによっても変化することがわかり、あらゆる条件下でも出力波形だけから圧力を検知するには至っていない。現状では把握以外のすべての動作を廃した状況での圧力計測に成果をえているので、これを臨床応用することを検討している。札幌医科大学の研究者と検討しているのはリハビリへの応用である。手の神経麻痺患者は自分で手を動かすことができるが、皮膚からのフィードバックがないため、握り混む力をコントロールすることができない。神経麻痺の患者に適切な圧力を音で伝えることが可能となれば、ガラスのコップや柔らかいものなどを適切な力で握ることができるように訓練できる可能性がある。

今後は未成年から高齢者までの広い年代で研究を進めるべくヒトを対象とした試験の倫理申請を3拠点の他施設共同研究として審査中である。本助成によって得られた結果をより広く医療と生活に応用できるよう今後も研究を進める予定である。

## 【助成 36 -33】

### アプタマー修飾電極を用いた毒性アミロイドβの電気化学的検出システムの開発

東京農工大学大学院工学研究院 助教 塚越 かおり

#### 〔研究の概要〕

認知症の原因疾患であるアルツハイマー病は、アミロイドβ(Aβ)が形成する水溶性の凝集体Aβオリゴマー(Aβ<sub>o</sub>)の細胞毒性が発症に寄与していると考えられており、抗体医薬を中心に国内外の製薬会社がAβ<sub>o</sub>を標的とした医薬品の開発に取り組んでいる。将来、このような新規医薬品を用いて効果的な治療を行うためには、投薬時期の決定や治療効果の判定時にバイオマーカーとしてAβ<sub>o</sub>を測定する技術が必須となる。そこで本研究ではAβ<sub>o</sub>を迅速に測定可能な電気化学的検出システムの構築を目指し、毒性Aβ<sub>o</sub>に結合する新規リガンドの開発を行い、さらに申請者が既に獲得しているリガンドであるAβ<sub>o</sub>結合DNAアプタマーを組み合わせたバイオセンシングの開発を試みた。

#### 〔研究経過および成果〕

#### 毒性Aβ<sub>o</sub>に結合する新規リガンド・アルカリホスファターゼ融合プリオンタンパク質(PrP-ALP)の調製手法の改良

筆者は、細胞性プリオンタンパク質(PrP)が脳内でAβ<sub>o</sub>と特異的に結合して神経細胞障害に関わるシグナル伝達を活性化すること、PrPはモノマーや線維には結合しない特異性を有していることに注目した。以上の報告は、PrPがAβ<sub>o</sub>の毒性に関わる特徴を認識して結合する毒性Aβ<sub>o</sub>リガンドとして有用であることを示唆している。そこでPrPに酵素であるアルカリホスファターゼ(ALP)を標識し、毒性Aβオリゴマーを認識するリガンド、アルカリホスファターゼ融合プリオンタンパク質(PrP-ALP)の開発を行ってきた(図1)。ALPは基質としてpアミノフェニルリン酸を脱リン酸化することで、電極活性を持つ生成物を作ることができるので、ALPを標識酵素とすることで電気化学検出センシングが可能となるので、本研究におけるリガンドとして用いた。

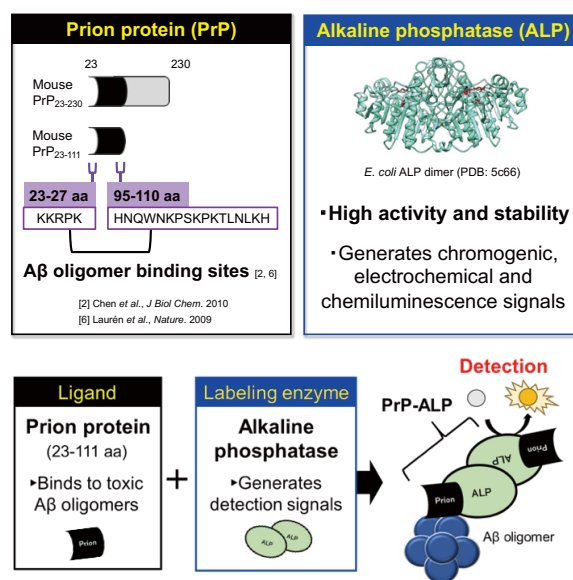


図1. 筆者が開発した新規毒性Aβ<sub>o</sub>リガンド・アルカリホスファターゼ融合プリオンタンパク質(PrP-ALP)の概要図

PrP-ALPは大腸菌を用いた組み換え生産により獲得し、C末端につけたアフィニティータグを用いて精製することで精製品を獲得している。しかし、これまでアフィニティータグ精製による収量が低いことが課題であり、センサー構築に十分な量のリガンドを得ること

が困難であった。そこで PrP-ALP 本体とアフィニティータグの間にリンカーペプチドを挿入する遺伝子改変を行い、収率を向上することで、以降のセンサー構築に十分な量の PrP-ALP を得ることに成功した。

#### PrP-ALP を用いた毒性 A $\beta$ センシング手法の開発

筆者はこれまでに A $\beta$  を特異的に捕捉可能な DNA アプタマーを報告している (Tsukakoshi et al., *Anal Chem* 2012) ので、DNA アプタマーを電極などに固相し、A $\beta$  を捕捉させた後、PrP-ALP を加え A $\beta$  特異的に電気化学活性が得られるセンシング系の構築を試みた。しかし予想外に、アプタマーと PrP-ALP が相互作用してしまい、A $\beta$  が存在しなくても ALP 由来のシグナルが出るのがわかった。これは、アプタマーが核酸であるゆえに負電荷を帯びること、PrP の A $\beta$  認識部位に塩基性アミノ酸であるリジンが多く含まれるために、静電相互作用で非特異的な結合をしてしまったと考えられた。

そこで A $\beta$  に結合する抗 A $\beta$  抗体をアプタマーの代わりに用い、PrP-ALP の特異性のみで A $\beta$  を検出す

る実験系を新たに構築した。いくつかの A $\beta$  を捕捉する抗体と、ポリプロピレンプレート・化学発光基質を用いて探索的に実験を行った。結果、A $\beta$  の 1-16 アミノ酸を認識する抗体と 500 nM の A $\beta$  試料、PrP-ALP の全てを添加した際に、化学発光強度が顕著に上昇した。このことから、PrP-ALP と抗 A $\beta$  抗体で A $\beta$  をサンドイッチ検出できることが分かった。同様の手法で、種々の濃度の A $\beta$  を検出した。その結果、A $\beta$  の濃度が増加するに従って化学発光が上昇した一方で、モノマー試料に対する化学発光の上昇は見られなかった (図2)。このことから本系は、A $\beta$  を A $\beta$  モノマー試料に対して高い特異性で検出できることが分かった。本実験における、A $\beta$  の検出限界 (LOD) は 35 nM と算出された。酸化還元によってシグナル増感が可能な基質と電気化学測定 の原理を用いることで、さらなる高感度化を目指すことが期待できるので、今後本研究で見出した抗体・PrP-ALP を用いて電気化学センシングの開発を進めていく。

[発表論文]  
なし

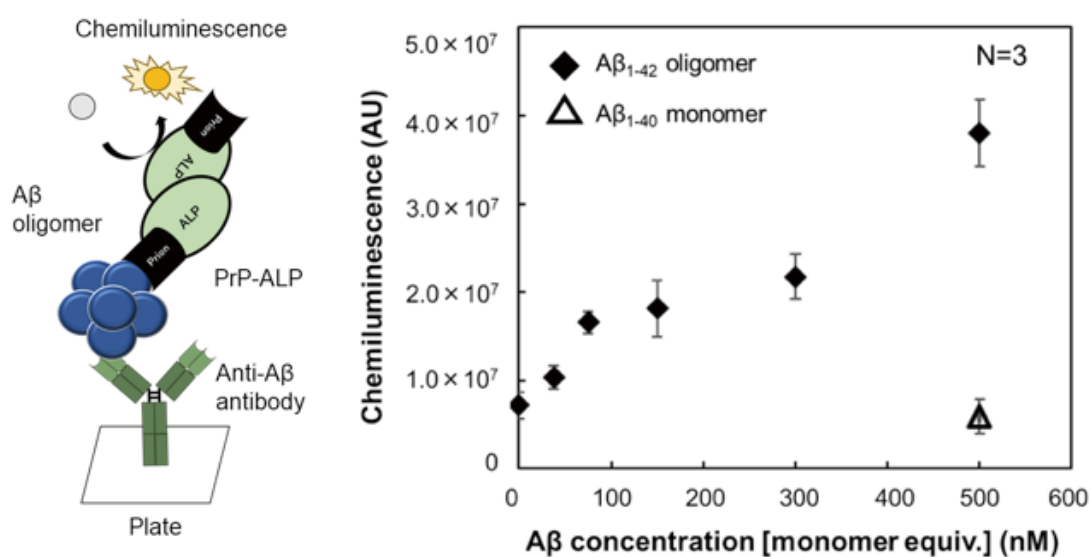


図2. 抗 A $\beta$  抗体と PrP-ALP を用いた新規毒性 A $\beta$  検出アッセイの結果。

## 【助成 35 -05】

### 水産養殖池における水温成層逆転現象と水産病害の実態把握に関する研究

研究者 九州大学熱帯農学研究センター 助教 尾崎 彰則

#### 〔研究の概要〕

研究者らは、曝気循環を行わない熱帯雨季の塩水養殖池において、雨季特有の降雨による塩分成層状態 3 成層化および 3 成層化後の熱塩対流による塩分濃度勾配層の断熱効果が、下層高塩分層に蓄熱を誘発し水温成層逆転現象が発生することを明らかにしている。この水域蓄熱は、高水温に伴う水質汚濁、病原微生物の増加、養殖物への生理的ストレスなど、養殖生産性にきわめて危険なリスクになると考えられる。本研究では、これらのリスクのうち、水域蓄熱と病原微生物増減の相関関係の解明を目的として、実験水域における気象変動・水環境変動の連続観測および定期的に採取した水サンプルのメタゲノム解析を実施した。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. 観測対象水域・方法

観測は、タイ・カセサート大学水産学部クーロンワン水産研究所が管理するミルクフィッシュ(*Chanos chanos*)およびバナメイエビ(*Litopenaeus vannamei*)を養殖対象とした 2 つの実験水域(22×23×1.2 m)で、2019 年 7 月 1 日～9 月 30 日(雨季期間)に行った。連続観測(10 分間隔)項目は、水温・塩分濃度鉛直分布・水深変動、定期観測(週 5 回 12:00～13:00)項目は、水質鉛直分布(DO, pH, ORP, NTU)および定期採水(10 日間隔, 上層, 中層, 下層)である。なお、水域水管理は、人工的な曝気循環を行わない粗放管理養殖とした。したがって、実験開始後の塩分濃度および水位は、気象条件に依存する。

##### 2. 研究成果

###### 2-1 気象変動・水環境変動の連続観測

図 1 に観測実施期間の気象変動を、図 2 に水温および塩分鉛直分布変動コンター図を示す。図 2 のバナメイエビ養殖池の水温変動より、8 月 7 日～17 日および 9 月 18 日～27 日において、水域中層から下層

にかけて蓄熱が発生し、水温成層状態が逆転していることがわかる。この期間の塩分濃度状態は、蓄熱が発生する数日前より継続した降雨により 3 成層化した状態であり、熱塩対流による塩分濃度勾配層の断熱が起こる条件がそろっていた。一方、ミルクフィッシュ

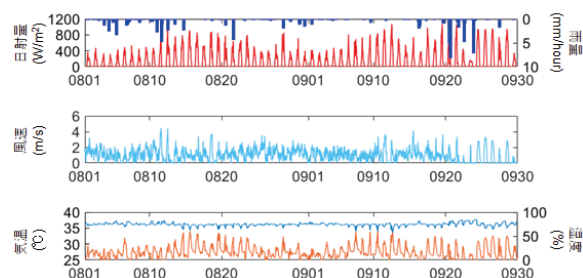


図 1 観測実施期間の気象変動

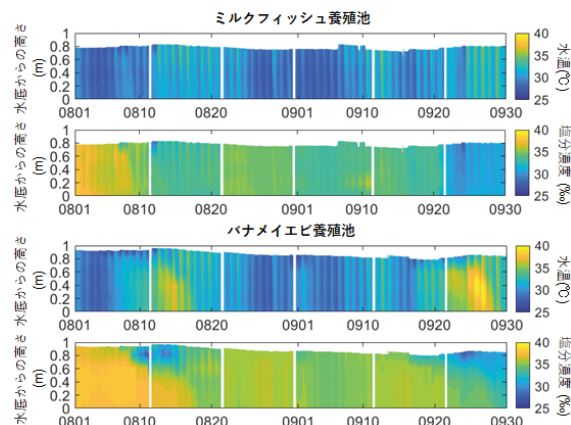


図 2 観測実施期間の水温・塩分濃度変動



養殖池では、降雨による塩分成層の3成層化は出現せず、蓄熱現象も確認されなかった。これは、ミルクフィッシュの遊泳行動が、降雨後の塩分成層形成を阻害したためであると考えられる。このことから、本研究が対象とする熱帯塩水養殖池の水域蓄熱現象は、養殖物の鉛直遊泳が起こりにくい、貝類、甲殻類、海藻などの養殖池に起こりうる現象であると言える。

## 2-2 水サンプルのメタゲノム解析・主成分分析

定期採水した水サンプルについて、16S rRNA 細菌叢解析を行った結果、ミルクフィッシュ養殖池で 135 属、バナメイエビ養殖池で 138 属を特定した。また、得られた細菌属の量と環境変動値(気象・水温・塩分・水質)との相関関係を明らかにするために、主成分分析を行い検討した。なお、水サンプルのサンプリング間隔が 10 日間であったことから、主成分分析に用いた環境計測値は、サンプリング前 10 日間の平均値および積算値(日射量・雨量)を採用した。図 3 に、主成分分析結果を示す。図 3 より、細菌属と環境変動値との相関関係はそれぞれの池で異なることがわかる。特に、蓄熱が起こったバナメイエビの養殖池では、水温と NTU のスコアが近いことから、水温上昇に伴い濁りが生じたことがわかる。また、水温と細菌属については、*Francisella* 属、*Synechocystis* 属 *PCC-6803* および *Cyanobiaceae* 属が水温とのスコアが近い。このうち、*Francisella* 属は、病原性グラム陰性細菌であり、水産病との関連では、メガイアワビ、ホタテガイの感染症の原因菌として報告されている。今回の観測期間における、*Francisella* 属の存在比は、それぞれの養殖池でそれほど高いものではないが、特に 9 月の蓄熱発生時には、ミルクフィッシュ養殖池では存在しないのに対し、バナメイエビの養殖池では、蓄熱前後の期間で 7 倍に増加していた。

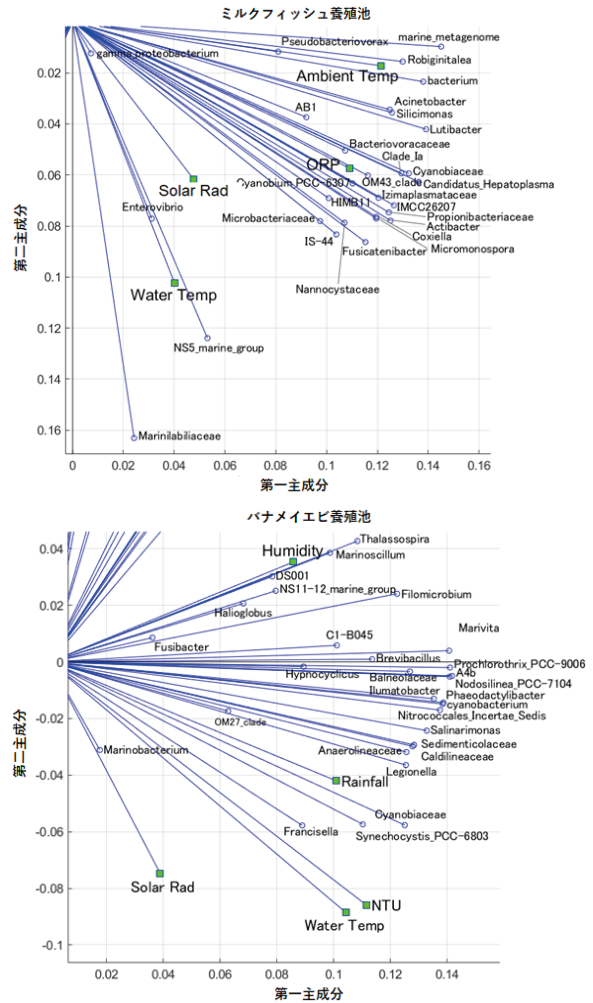


図 3 主成分分析結果抜粋  
(水域内計測項目は 0.0~0.5m の平均値)

以上本研究から、水温成層逆転現象と特定の病原微生物との相関性が明らかになった。今後は、本研究成果を礎として、継続的に観測・解析情報を蓄積することにより、網羅的に水温成層逆転現象と水産病害との関連について究明していく。

[発表論文]

1. Characteristics of water quality variation under heat storage in closed salinity ponds in the tropics  
A. Ozaki, P. et al., 2021 ASABE Annual Int. M.
2. 熱帯塩水養殖池における水域蓄熱現象に関する現地観測, 尾崎 彰則他, 土木学会論文集 B1(水工学) 75(2), 679-684, 2019

以下URLよりPDFをダウンロードできます  
<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3年5月1日 発行

---