

研究助成  
成果報告論文集  
(令和4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38回(令和2年度)研究助成

成果報告論文一覧

第38回(令和2年度)研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
1	無電極プラズマ推進機による革新的スペースデブリ除去技術の確立	東北大学 大学院工学研究科 准教授 高橋和貴
2	マイクロ流体デバイスによる環境中マイクロ・ナノプラスチック検出技術の開発	九州大学 大学院工学研究院 教授 加地範匡
3	テーラーメイド修飾酵素によるマイクロプラスチック分解技術の開発	北海道大学 大学院地球環境科学研究院 教授 小野田晃
4	ワイルド半金属ヘテロ界面における非従来型磁気メモリ効果の実証	東北大学 金属材料研究所 准教授 藤原宏平
5	ひまわり超高層寒気化モニタリング実現に向けた地上レーザーセンシング用狭帯域フィルタの開発	電気通信大学 大学院情報理工学研究所 准教授 津田卓雄
6	物質表面の局所構造を高空間分解能で計測可能にする新規和周波発生分光法の創出	総合研究大学院大学 物理科学研究科 助教 櫻井敦教
7	触力覚的介入がFoP発生に及ぼす影響	埼玉大学 工学部 准教授 原正之
8	リアルタイム計測歪モデリングで実現する衛星航空機の大変形制御	東北大学 工学部 助教 大塚啓介
9	シリコンフォトニクス技術を用いて、世界初となるチップスケールの光パルス位相測定器の実現を目指す	宇都宮大学 工学部 助教 近藤圭祐
11	金属材料におけるLPSO構造/ミルフィーユ構造による『革新的材料物性増強理論』の高分子材への適用	埼玉大学 大学院理工学研究所 准教授 藤森厚裕
12	超高密度2次元鉄ナノ磁石ハニカム規則配列作製による超省エネ電界書き込み制御型・磁気記憶素子の開発	千葉大学 大学院工学研究院 准教授 山田豊和
13	多彩な伝導様式を示すグラフェンモアレ超格子の作製と量子閉じ込めによる新機能の発現	千葉大学 大学院工学研究院 教授 青木伸之
14	ばね形状の3次元流路を用いた伸縮デバイスの開発	東京大学 大学院工学系研究科 特任研究員 奥谷智裕
15	くさび型SPRセンサとDNAによるVOCの吸着メカニズムの解明と超高感度検出	東京農工大学 工学部 准教授 清水大雅
16	固体量子コンピュータモデルSi:Pの実演に向けた31P核のスピンダイナミクス解明	福井大学 遠赤外領域開発研究センター 助教 石川裕也
17	走査型プローブ顕微鏡によるMEMSの機械電気特性評価	静岡大学 工学部 助教 中澤謙太
18	硫黄の脱離を分子設計の鍵とするn型有機半導体の可溶性前駆体の開発と有機薄膜太陽電池への応用	名古屋大学 工学部 助教 福井識人
19	シリコン技術を基盤とした高感度短波赤外光センサの研究開発	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授 石川靖彦
20	人工分子の軌道を利用した桁違いに速い単一電子スピン量子操作の実証とその物理の研究	大阪大学 産業科学研究所 助教 藤田高史
21	ZnSe系有機-無機ハイブリッド型紫外集積APDの開発	鳥取大学 工学部 准教授 阿部友紀
22	ナノスケール電気振動効果を用いた新奇ナノ分光法の開拓	徳島大学 ポストLEDフォトニクス研究所 准教授 矢野隆章
23	テラヘルツコムを用いたテラヘルツ単一素子イメージング	徳島大学 ポストLEDフォトニクス研究所 特任助教 時実悠
24	ベイズ推定に基づく適応的グループテストのアルゴリズム開発:検体検査の効率化と誤り訂正	総合研究大学院大学 複合科学研究科 准教授 坂田綾香
25	表現力豊かな音声の声質を決める声門流波形と声道伝達関数特徴の解析	富山県立大学 工学部 准教授 MOKHTARI Parham

No	研究テーマ	代表研究者
26	繊維人工筋で駆動される手指用装着型アシスト装置の試作と制御	広島市立大学 大学院情報科学研究科 准教授 小 寄 貴 弘
27	リポソームとナノフォトニック共振器のインタフェース	東京理科大学 理学部 准教授 Sadgrove Mark Paul
29	磁場中多角度光散乱計測システムの開発と痛風診断装置への確立	室蘭工業大学 大学院工学研究科 助教 武 内 裕 香
30	骨組織の材料物性に及ぼす骨髄機能の解明と、骨粗鬆症の治療に向けた応用	東北大学 大学院医学系研究科 特別研究員 荒 井 誠
31	健康環境ミエル化のための室内バイオエアロゾル連続センシング技術の開発	東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 講師 當 麻 浩 司
32	磁化細胞単一操作機構を具備したマイクロ引張デバイスによる細胞-細胞間接着強度の測定	静岡大学 工学部 助教 大 多 哲 史
34	転移性脳腫瘍定位放射線照射における実測線量不確かさを考慮した品質管理手法の確立	京都大学 医学部附属病院 特定助教 小 野 智 博
36	生体の電気素子「イオンチャネル」の電圧感知機構	香川大学 医学部 教授 藤 原 祐 一 郎
37	車いす介助初心者のスキル向上のための車いす介助訓練システムの開発	九州大学 大学院工学研究院 准教授 中 島 康 貴
38	顔見知り看護師の存在による短時間の手術室看護システムの構築-生体的指標を用いて	横浜市立大学 大学院医学研究科 助教 福 田 真 佑
39	3次元Foot Scannerによる子どもの足部の発達評価システムの開発	東都大学 幕張ヒューマンケア学部 教授 山 下 和 彦
40	ポータブル眼科医療機器を利用した遠隔画像診断支援システムの構築	鶴見大学 歯学部 講師 矢 津 啓 之
41	新世代汗中乳酸計測ウェアラブルデバイスを用いた筋疲労の定量化研究	慶應義塾大学 医学部 特任助教 中 島 大 輔
42	骨格筋リポソーム量の減少に着目した模擬無重力に伴う筋萎縮の機序解明と電気刺激による予防効果の検討	日本体育大学 体育研究所 助教 小 谷 鷹 哉
43	大学生のインターンシップは就職後にも効果があるのか-就職・採用におけるマッチング機能の有効性の検証-	北海道大学 高等教育推進機構 教授 亀 野 淳
44	製造業従業員の働きがいと労働生産性の向上を両立させる新たな指標の開発およびその実証研究	金沢大学 融合研究域融合科学系 教授 金 間 大 介
45	ポストGIGAスクールを支える、ICTを用いた学習者中心の教育方法の開発	静岡大学 情報学部 講師 遠 山 紗 矢 香
46	ストーリー中心型教育におけるチャットボットの活用が学習意欲に与える影響に関する開発研究	千葉工業大学 情報科学部 教授 高 橋 暁 子
48	APD(聴覚情報処理障害)に対する教育支援法の実証的臨床研究	愛媛大学 教育学部 教授 立 入 哉
49	批判的思考力の育成と評価を志向した中等数学教材の開発とその実証的研究	高知大学 教育学部 准教授 服 部 裕 一 郎
51	先進医療における日本人のための意思決定支援ツールの開発	東京女子医科大学 医学部 講師 押 淵 英 弘
52	父母の睡眠覚醒パターンから探る妊娠中および産後の家庭支援	東邦大学 医学部 講師 吉 田 さ ち ね
53	衰退都市のコンバージョン--都市縮小時代における都市再開発政策の日米比較	法政大学 社会学部 教授 堀 川 三 郎

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
12	超高感度MEMS熱センサとプラズモニク・メタマテリアルの結合による超高速熱フォノン分光法の開発	東京農工大学 大学院工学府 准教授 張 亜
24	シリコンIC技術を応用したポスト5Gテラヘルツ通信用低損失ポスト壁導波管型配線・共振器の創生	九州大学 大学院システム情報科学研究院 教授 Pokharel Ramesh Kumar
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
32	低出生体重の精密なリスク予測のための、多様な情報を統合し組み合わせの特徴を捉える人工知能の開発	東北大学 東北メディカル・メガバンク機構 助教 水 野 聖 士
33	強力集束超音波を用いた低侵襲ガン焼灼医療における治療効果の次世代型高速シミュレータの開発	筑波大学 システム情報系 助教 金 川 哲 也
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
40	災害対応の経験・教訓をつたえる・つなげる継承手法の開発	東北大学 災害科学国際研究所 准教授 佐 藤 翔 輔
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
44	日本社会における移民の日本語習得に関する縦断的研究—社会科学と認知科学の学際的アプローチによる分析	神奈川大学 国際日本学部 准教授 鈴 木 祐 一

第35回(平成29年度)研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
40	公職選挙法の改正が有権者におよぼす影響の解明	関西外国語大学 外国語学部 准教授 白 崎 護



【助成 38 -01】

無電極プラズマ推進機による革新的スペースデブリ除去技術の確立

研究者 東北大学 大学院工学研究科 准教授 高橋和貴

〔研究の概要〕

地球周辺のスペースデブリは、小型のものを含めると 50 万個以上存在するとされており、デブリの除去技術の開発は喫緊の課題である。デブリを減速し高度を下げることで、大気圏突入による燃焼で処理を行う手法が有効であるが、非接触でそれを実現可能な手法が確立されてない。本研究では、一台の推進機から双方向プラズマ流噴射を実現し、デブリの減速と宇宙機の正味推力の制御が可能な無電極磁気ノズルプラズマ推進機を用いたスペースデブリ除去技術を開発することを目的としている。特に、当該推進方式において、大型デブリの除去を実現するために必要な推進性能が、消費電力 3-5kW、推力 50-60mN、比推力 2000 秒であるとの試算報告があり、この性能を室内実験で得ることを目的としている。

〔研究経過および成果〕

無電極磁気ノズルプラズマ推進機は、高周波プラズマ源によって発生したプラズマ流が磁気ノズル中を膨張する際に、自発的な加速・運動量変換過程を経て噴射されることで推力を発生させる方式であり、無電極構造であることから数 kW 級の大電力でも長期間の作動が可能になると期待されている。これまでの研究で、推進機の上流・下流を開放端として、磁場配位を制御することで、上流・下流へと噴射されるプラズマ流を制御し、結果として、プラズマ流照射によるデブリの減速と、逆方向へのプラズマ流噴射によって推進機の正味の推力をゼロに保つことが可能であり、スペースデブリ除去に有用な方式であることが示されてきた。一方で、数 t 級の大型デブリ除去のためには、推力 50-60mN、消費電力 3-5kW 級、比推力 2000 秒の作動が必要であることが報告されており、当該方式においてこの性能を達成することが求められている。また、宇宙ミッションを遂行する上で、推力ベクトルの制御や高周波システムの制御性の向上等も必要な

技術であり、本研究ではこれらの課題に関して室内実験を中心として研究開発を行った。

これまでの筆者らによる推力モデルでは、大口徑化によって推進性能が向上する可能性が見出されており、本研究では、上述の推進性能を達成するために、直径 10cm の推進機開発を行い、推進性能の評価を行った。

図 1(a)には、推力計測結果の高周波電力依存性を示している。ここでは、燃料となるアルゴンガスの流

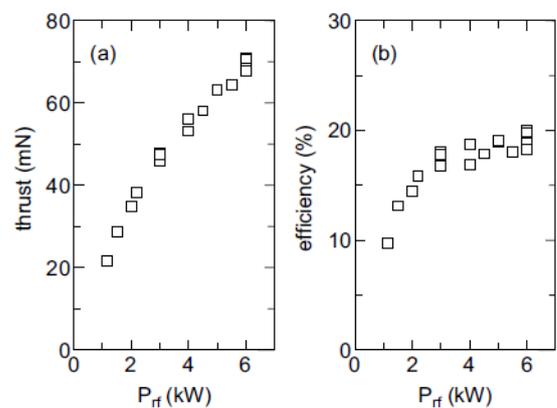


図 1: (a) 推力の高周波電力依存性. (b) 推進効率の高周波電力依存性.



図 2: SPT-X 装置外観.

量は 70sccm としてある. 高周波電力の増加に伴い推力が増加し, 電力 5kW 程度で 60mN の推力が得られていることが分かる. またこれらの結果から見積もられる比推力は 2500 秒以上であり, 目標値を達成することが出来たといえる (発表論文 3).

推進機として高周波プラズマ源を使用する際の大きな課題の一つが, 電源と負荷のインピーダンス整合であり, 産業用プラズマ源では可変コンデンサを用いた整合器が一般的に使用されている. 一方で, 宇宙機の場合には小型化, 応答性, 自律制御等が求められる. そこで今回, 周波数可変アンプと組込み型の制御ボードを内蔵した高周波システムを試作し, 5msec 以内で高速にインピーダンス整合を実現可能な技術開発に成功した (発表論文 1).

また, 発生するプラズマ流の方向を制御し, 減速力および推力のベクトルを制御する機構として, 磁気ノズルを変形させる磁気ステアリング手法の室内原理実証実験にも成功している. これにより, これまでに実証されてきた加速・減速・デブリ除去モードでの軸方向の推力制御に加えて, 水平方向の推力, すなわち推力ベクトル制御機構も搭載可能であることが明らかになり, デブリ除去ミッションへの適用の可能性が

拡大したといえる (発表文献 4,5).

今回の研究では, 一連の実験において, 推進機のテストチャンバーサイズに起因する実験上の制約が課題となるケースが度々生じている. そこで, 直径 1.5m, 長さ 2m の比較的大型のスペースチャンバー (SPT-X 装置) の立ち上げを実施し, さらに推進機開発を進めるための基盤設備を整備し, 今後も推進性能の向上を進める予定である (図 2).

[発表論文]

1. Kazunori Takahashi, Ryoji Imai, Kengo Hanaoka, “Automatically controlled frequency-tunable rf plasma thruster: Ion beam and thrust measurements”, *Frontiers in Physics*, 9, 639010 (2021).
2. Kazunori Takahashi and Hidemasa Hanaoka, “Direct measurement of thrust induced by a magnetron sputtering source”, *Applied Physics Letters*, 118, 154101 (2021).
3. Kazunori Takahashi, “Magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster approaching twenty percent thruster efficiency”, *Scientific Reports*, 11, 2768 (2021).
4. Ryoji Imai, Kazunori Takahashi, “Demonstrating a magnetic steering of the thrust imparted by the magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster”, *Applied Physics Letters*, 118, 264102 (2021).
5. Ryoji Imai, Kazunori Takahashi, “Deflections of dynamic momentum flux and electron diamagnetic thrust in a magnetically steered rf plasma thruster”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55, 135201 (2022).

## 【助成 38 -02】

### マイクロ流体デバイスによる環境中マイクロ・ナノプラスチック検出技術の開発

研究者 九州大学大学院工学研究院応用化学部門 教授 加地 範匡

#### 〔研究の概要〕

本研究では、環境中マイクロ・ナノプラスチックを一個体レベルで正確に大きさ・形状を測定するとともに、その個数をカウントするために、マイクロ流路とイオン電流計測法を組み合わせた高感度検出法を開発した。これらを実現するために、様々な大きさと比重を有するマイクロプラスチックを検出可能なマイクロ流路形状や溶媒条件を検討した。また、実サンプルとして電気ケトルならびにポリプロピレン製乳幼児用乳瓶から回収した純水を測定したところ、極微量ではあるもののマイクロプラスチックが検出された。さらに本研究を通して開発したマイクロ流路とイオン電流計測法を組み合わせた検出技術を単一細胞分析に応用することで、細胞の機械的特性を単一細胞レベルで計測できることを明らかとした。

#### 〔研究経過および成果〕

マイクロプラスチックは、海洋を始めとした環境中に存在するマイクロメートルサイズの微小なプラスチック粒子であり、それ自体の蓄積はもちろんのこと、PCBなどの有害物質を吸着する性質を有することから、環境及び生体への潜在的影響の検証が喫緊の課題となっている。しかしながら、現状では300  $\mu\text{m}$ 以下のマイクロ・ナノプラスチックの存在量が過小評価されていることから、300  $\mu\text{m}$ 以下のマイクロ・ナノプラスチックを簡便・迅速かつ正確に定性的・定量的に解析する手法の開発を目的に、イオン電流計測システムの最適化と実サンプルの分析、さらには単一細胞分析への応用展開を行った。

#### 1. マイクロプラスチック測定に向けたイオン電流計測システムの最適化

モデル粒子として、直径 10  $\mu\text{m}$  の単分散ポリスチレンビーズ(PS) (Polysciences, Inc.) および中位径 11  $\mu\text{m}$  の多分散ポリエチレンビーズ(PE) (住友精化株式会社)を用いてイオン電流計測を行った。PS に関して

は安定的に測定ができたが、PE に関しては水中に安定して分散せずに浮上して凝集してしまった(図 1)。これは溶媒との密度差(PS: 1.04-1.09  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、PE: 0.91-0.92  $\text{g}/\text{cm}^3$ )が原因であると考え、PE に近い密度を有するメタノール(0.79  $\text{g}/\text{cm}^3$ )を溶媒として用いる系と、界面活性剤(SDS: Sodium Dodecyl Sulfate)を添加して安定的に分散させることを試みた。その結果、メタノール-酢酸緩衝液系では 2-4 nA の電流シグナル(ノイズレベル: 2 nA)を計測することができた。また、水溶媒に 0.2(wt)% SDS を添加して電流計測を試みたところ、4-8 nA の電流シグナル(ノイズレベル: 7 nA)を計測することができ、異なる材質のマイクロプラスチックを検出可能であることが示された(図 1)。

#### 2. 実サンプルの分析

電気ケトル(A 社)とポリプロピレン製乳児用乳瓶(B 社)から回収したマイクロチップを電流計測デバイスにて測定しようとしたところ、マイクロ流路部分に詰まる現象が観察された。この状態では電流計測による計測は困難と考え、顕微レーザーラマン分光、走

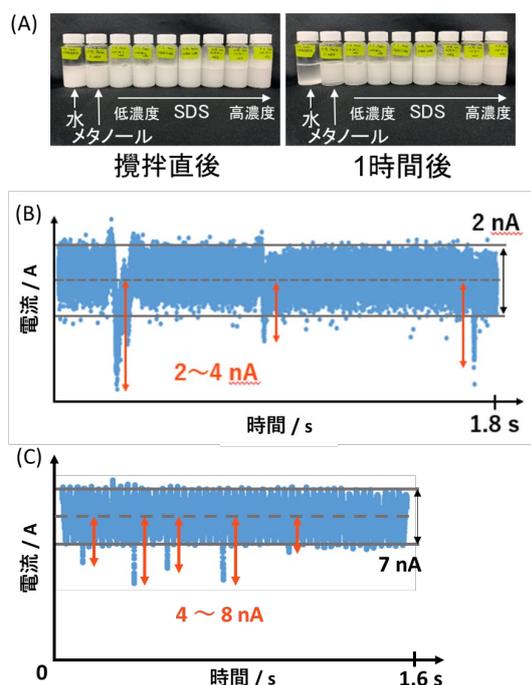


図 1. (A)各種溶媒に PE を添加・攪拌後の様子、(B)メタノール溶液、(C) 0.2(wt)% SDS 水溶液における PE の電流計測シグナル

査型電子顕微鏡 (SEM)、エネルギー分散型 X 線分光にて測定を行った。その結果、電気ケトルからは直径 5-20  $\mu\text{m}$  のものが、ほ乳瓶からは直径 2-20  $\mu\text{m}$  のものが大多数を占めており、大きいものでは直径が 50  $\mu\text{m}$  に達したことから、このような巨大マイクロプラスチックの存在が、マイクロ流路閉塞の原因となっていることが分かった。また、両サンプルとも、800  $\text{cm}^{-1}$  (C-C 結合)、1600  $\text{cm}^{-1}$  (C=C 結合)、3000  $\text{cm}^{-1}$  (C-H 結合) 付近にラマンシグナルのピークが検出されたことから、回収された粒子はマイクロプラスチックであることが確認された。電気ケトルからは、C、O に加え、ほ乳瓶からは検出されなかった Ti、N 成分が検出されたことから、電気ケトル内側底面部分のステンレス部分からマイクロプラスチックが発生した可能性も示唆された。

### 3. 単一細胞分析への応用展開

本研究で構築したイオン電流計測デバイスを用いて、各種細胞のサイズ計測を単一細胞レベルで

行った。その結果、細胞のサイズは細胞種ごとに幅広い分布を有することが分かった。また、同一細胞種内での不均一性を検出するために、細胞の直径よりも小さな狭窄流路を用いることで細胞の機械的特性に基づいた多能性評価を行った。HT-29 (結腸腺がん由来) は、多能性が高い細胞を多く含む細胞種であることが知られていることから、イオン電流計測デバイスにより細胞の大きさと機械的強度を単一細胞レベルで測定することとした。また、多能性の高い HT-29 細胞は、細胞表面に CD44-v9 を多く発現していることが知られている。抗 CD44 や抗 CD44-v9 といった抗体を利用して生化学的に多能性の高い HT-29 細胞を識別するとともに、抗体修飾による細胞サイズ変化を電流計測デバイスで検出できるかどうか検討を行った。その結果、CD44-v9 高発現の HT-29 細胞は、低発現の細胞よりもより高い機械的強度を有していることが明らかとなった [1, 2]。

以上、本計測システムは単一細胞分析に応用することが可能であることから分かつとおり、環境分析やバイオ分析に限らず様々な分野での応用計測が期待されるため、今後も基礎検討と応用展開を力強く推進していく。

[発表論文]

1. M. Terada, S. Ide, T. Naito, N. Kimura, M. Matsusaki, N. Kaji; Label-Free Cancer Stem-like Cell Assay Conducted at a Single Cell Level Using Microfluidic Mechanotyping Devices, *Anal. Chem.*, **93**, 14409-14416, 2021.
2. N. Kaji; A single cell mechanical assay on a chip, e-MSB 2021 (on line), 2021/7/14, 招待講演

## 【助成 38 -03】

### テラーメイド修飾酵素によるマイクロプラスチック分解技術の開発

研究者 北海道大学大学院地球環境科学研究院 教授 小野田 晃

#### 〔研究の概要〕

マイクロプラスチックを効率的に酵素分解するためには、酵素がプラスチックの疎水性表面に効率的に吸着する必要がある。本研究では、親水性の高い分解酵素に、疎水性のマイクロプラスチックの表面に吸着する能力を付与するために、疎水性分子を化学修飾したテラーメイド酵素を作製し、酵素応用によるマイクロプラスチック分解技術を開拓に取り組んだ。独自に開発した、選択性が高く、簡便なタンパク質 N 末端技術を活用して、ターゲットとした分解酵素クチナーゼの N 末端特異的に合成分子や脂質などの天然の疎水性分子を連結したテラーメイド酵素の作製と評価を実施した。

#### 〔研究経過および成果〕

機能性と利便性の高い高分子材料から構成されるプラスチックは、世界で年間約 4 億トンが生産されており、廃棄ごみや洗濯排水による拡散によって海洋汚染の原因になっている。この問題解決に向けて、生物の力を利用したマイクロプラスチックの分解技術が特に期待されている。ポリエステル分解菌をはじめ、生物が持つ分解酵素を活用したプラスチック分解技術は、いずれも有望であるが、以前、分解速度は十分でなく、分解酵素の能力を最大限向上するための技術が求められている。

マイクロプラスチックを効率的に酵素分解するためには、酵素がプラスチックの疎水性表面に効率的に吸着する必要がある。そこで、親水性の高い分解酵素に、疎水性のマイクロプラスチックの表面に吸着する能力を付与するために、疎水性分子を部位特異的に化学修飾したテラーメイド酵素を作製し、酵素応用によるマイクロプラスチック分解技術に取り組んだ。本研究代表者が独自に開発した、選択性が高く、世界で最も簡便なタンパク質 N 末端技術を活用して、ター

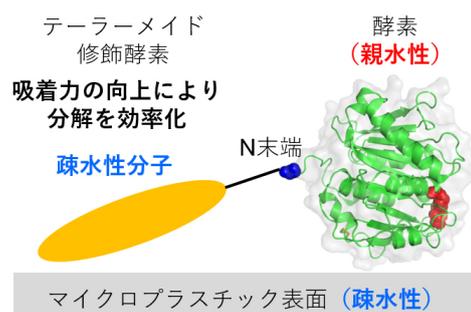


図1 マイクロプラスチック分解のためのテラーメイド修飾酵素

ゲットとした酵素に対して、部位特異的に疎水性分子を連結した分解酵素クチナーゼを作製し、プラスチックであるポリエチレンテレフタレート(PET)への吸着能力と分解能力の向上を目指した。

酵素と目的分子を連結する際には、酵素の構造と機能を保持することが鍵となる。一般的に目的分子を簡便に化学修飾するには、活性エステル等を用いることが多いが、酵素表面の多数のアミノ基に対して修飾反応がランダムに進行する。したがって、酵素反応に関与するアミノ酸残基やその他の重要な残基が化学修飾により影響を受けて、活性低下が懸念される。構造的、機能的に影響の少ない酵素の N 末端に選

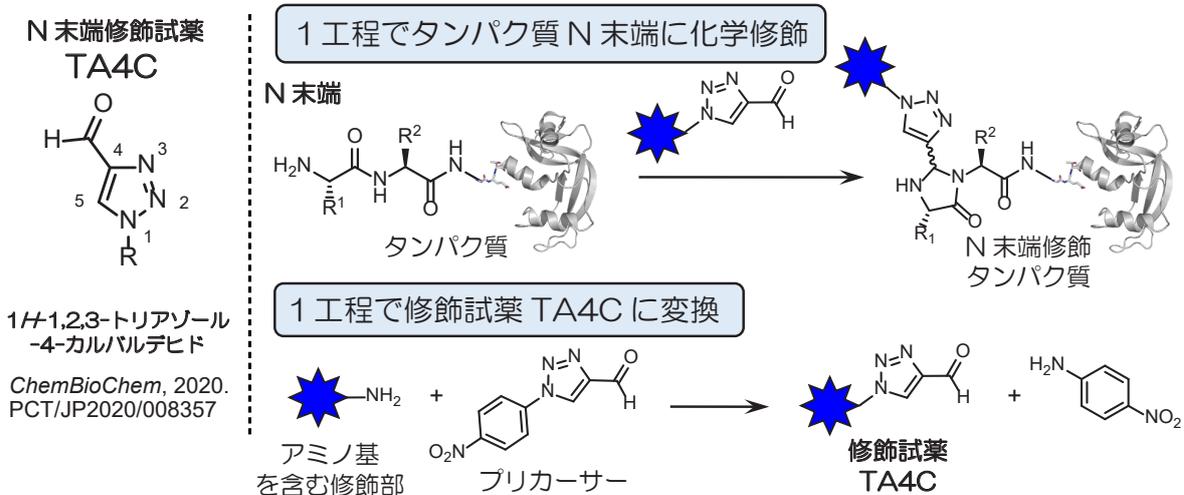


図2 独自開発したタンパク質 N 末端修飾技術

択的に目的分子を修飾したテラーメド分解酵素を作製し、疎水分子を部位選択的に化学修飾したテラーメド酵素を調製すれば大きな意義がある。

本研究では、PET 分解酵素であるエステラーゼの一種クチナーゼの N 末端に、様々な疎水性分子を導入し、PET 表面への吸着能力を大幅に向上したテラーメド酵素の作製を目指した。なお、使用する分解酵素のクチナーゼは、植物の葉などで含まれるワックス成分であるポリエステルのクチンを分解する酵素であり、本研究では Cut1 を使用した。

これまでにターゲットの酵素やタンパク質に対して、機能分子を、精密かつ簡便に化学修飾するために、N 末端に着目してタンパク質修飾技術を開発してきた (ChemBioChem, 2020, PCT/JP2020/008357) (図 2)。N 末端は、フォールディング構造に通常含まれないため、N 末端修飾はタンパク質や酵素の機能に影響を与える可能性が低い点が利点である。また、N 末端の  $\alpha$ -アミノ基は Lys 側鎖の  $\epsilon$ -アミノ基よりも  $pK_a$  値が低いので、N 末端アミノ酸を標的とする修飾が可能である。タンパク質 N 末端に対して特異的に化学修飾する独自の技術の開発に成功した本技術は、高い

N 末端選択性に加えて、末端のアミノ酸の種類に依存しない、かつ1段階で修飾試薬を調製可能であり、1段階でタンパク質修飾可能という特徴をもつ。

Cut1 の N 末端に化学修飾を施して、高速液体クロマトグラフ-質量分析により同定を行った。この修飾 Cut1 の活性を、4-ニトロフェニル酢酸の加水分解活性により評価したところ、native の酵素と同程度であった。以上より、本提案で用いるクチナーゼの N 末端への選択的な化学修飾が可能であること、活性は保持されていることを確認した。

分解酵素を保持したまま、疎水性タンパク質を融合することによって、吸着力のみを向上するアプローチで分解能力顕著に向上した報告例があるが、このような融合酵素は、発現や精製が困難になる確率が高く、実用化へのスケールアップが課題となっている。本アプローチでは、天然酵素を利用するため上記の問題を回避できると期待される。現在、Cut1 に修飾分子のスクリーニングとマイクロプラスチックの分解評価を進めている。

〔発表論文〕 未発表

## 【助成 38 -04】

### ワイル半金属ヘテロ界面における非従来型磁気メモリ効果の実証

研究者 東北大学金属材料研究所 准教授 藤原 宏平

#### 〔研究の概要〕

ワイル半金属のヘテロ界面において、二層の磁化状態を制御することで、界面でのワイル点のスピンのヘリシティマッチングに起因する新奇磁気抵抗効果が発現することが理論予測されている。本研究では、その実験的検証を目標に、ワイル半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  の薄膜に基づくヘテロ界面の形成に向けた要素技術の開発と物性評価に取り組んだ。スパッタリング法により  $\text{Co}_3(\text{In},\text{Sn})_2\text{S}_2$  薄膜を作製し、In 置換に伴う物性変化をフェルミ準位シフトの観点から議論した。さらに、デバイス構造化に向けて、微細加工プロセスを検討した。これらの成果は、フェルミ準位制御に基づく磁気伝導物性へのワイル点の寄与の増強や積層構造およびナノ構造を舞台とする素子化研究への足掛かりになるものと期待される。

#### 〔研究経過および成果〕

固体の性質をバンド構造のトポロジーに基づいて分類しようとする分野はトポロジカル物質科学と呼ばれ、トポロジカル絶縁体の発見以降、新たな物質群の提案が相次いでいる。特に、試料全体に三次元的に広がった線形分散バンドと磁気秩序を有する物質は(磁性)ワイル半金属と呼ばれ、注目を集めている。線形分散バンドの交差するワイル点は、波数空間で磁気単極子に相当する振る舞いを示し、巨大な内因的異常ホール効果や異常ネルンスト効果などの機能物性を示す。現状、バルク試料を用いる研究が先行しているが、薄膜化することで、極薄膜やヘテロ界面、ナノ構造を舞台とする新奇ワイル物性の検証やスピントロニクス素子への展開が期待できる。興味深い理論提案として、小林らは、ワイル半金属のヘテロ界面では、ワイル点のスピンのヘリシティ(磁極の符合とスピン自由度が結合した状態)のマッチング/ミスマッチングにより、従来メカニズムとは異なる磁気抵抗効果が発現することを理論提案している[K. Kobayashi *et*

*al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 073707 (2018)]。これを実験的に検証するには、ヘテロ界面を構成する二層の物質の磁化状態(平行/反平行)を制御することが必要である。これは、異なる保持力をもつ二つの層に磁場を印加することで実現することができる。しかしながら、ヘテロ界面の形成に適したワイル半金属薄膜はこれまでに報告されていなかった。

本研究で着目する  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  はシャンダイト型化合物の一種であり、キュリー温度約 175 K で強磁性転移を示す。最大で、異常ホール角が 0.2 に達する巨大異常ホール効果がバルク単結晶で報告されて以降、その物理的起源が盛んに議論され、角度分解光電子分光などの詳細な物性測定を通してワイル半金属であることが裏付けられた。代表者らは、この物質の薄膜化研究に早くから取り組み、スパッタリング法による薄膜成長を 2019 年に初めて報告し[K. Fujiwara *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 050912 (2019)]、極薄膜における磁気秩序の安定性など、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜を用いた独自の研究成果を報告してきた。

本研究では、異種元素置換した  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜を合成することで、磁化制御可能なワイル半金属ヘテロ界面の作製と磁気抵抗効果の実証を目指した。さらに、デバイス構造化に向けて、微細加工プロセスの確立にも取り組んだ。

RF マグネトロンスパッタリング装置を用い、 $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上に薄膜を形成した。スパッタリングターゲットには、硫化スズ焼結体ディスク ( $\phi 60 \text{ mm}$ ) を用い、その表面に Co 金属および硫化インジウム焼結体片を配置することで、各元素の同時供給を行った。エネルギー分散型 X 線分析により薄膜組成を評価し、Co 金属および硫化インジウム片のサイズと位置を調整することで、組成制御を行った。基板温度  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  で薄膜を堆積し、同温度で  $\text{SiO}_x$  キャップ層を堆積した後、 $800 \text{ }^\circ\text{C}$  で真空中ポストアニールを行った。X 線回折により構造評価を行い、汎用物理特性評価装置を用いて電気輸送特性を評価した。

図 1 に、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  0006 に指数付けられる薄膜回折ピークから求めた  $c$  軸長の In 置換量  $y$  (Sn サイトへの置換を仮定した)を示す。比較のため、バルク試料の報告値も示している。In 置換量の増加に伴い、 $c$  軸長がおおよそ線形に増加していることから、固溶していることが示唆された。これらの  $\text{Co}_3(\text{In},\text{Sn})_2\text{S}_2$  薄膜に対して、電気抵抗率およびホール効果を測定し、電子状態の観点から物性変化を考察した。

$\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜を汎用リソグラフィー手法により微細加工したホールバー構造チャンネルを作製した。電気特性評価の結果、未加工の薄膜試料 (数 mm サイズ) と同等の特性を示すことが分かった。これにより、ワイル半金属の特性を維持したまま  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜をデバイス構造化可能であることが示唆された。

積層構造の形成にも取り組んだが、現状急峻なヘ

テロ界面の形成には至っておらず、積層条件の調整が必要であることが分かった。今後、積層用混晶物質 (置換元素) およびプロセスを工夫するとともに、本研究で確立した微細加工を用いて素子構造化することで、スピンヘリシティ由来の磁気抵抗効果を検証し、磁気抵抗デバイスの実現へと結び付けたい。

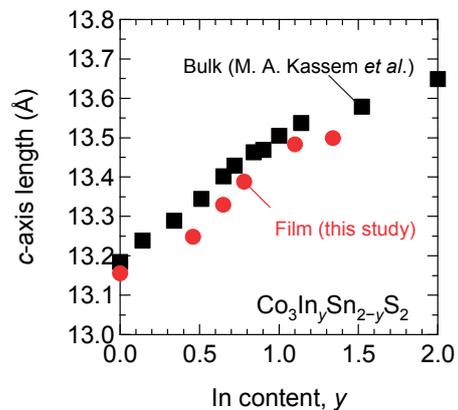


図 1.  $\text{Co}_3\text{In}_y\text{Sn}_{2-y}\text{S}_2$  の  $c$  軸長の In 組成  $y$  依存性。バルクデータ (M. A. Kassem *et al.*, *J. Cryst. Growth* **426**, 208 (2015))。

[成果発表]

1. K. Fujiwara *et al.*, Electrical detection of surface conduction in magnetic Weyl semimetal  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  thin films. 2021 年第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-S302-6, オンライン.

## 【助成 38 -05】

### ひまわり超高層寒冷化 モニタリング 実現に向けた地上 レーザセンシング 用狭帯域 フィルタ の開発

研究者 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 准教授 津田 卓雄

#### 〔研究の概要〕

地球規模の温暖化に伴う超高層領域の大気温度、即ち超高層寒冷化の全球変動をリアルタイムで連続的に捉える環境モニタリングシステムの実現に向けて、(1) 静止軌道衛星ひまわりによる夜光雲モニタリングシステムの開発、(2) 地上レーザセンシングによる日照時大気温度計測の為に超狭帯域フィルタの基礎開発、を中心に研究を進めた。今後、ひまわりによる夜光雲変動と地上レーザセンシングによる夜光雲発生時期（日照時）の大気温度変動の同時観測の実施、両者の対応関係の調査を進めることで、将来的には、夜光雲モニタリングを通して超高層領域の大気温度環境をモニタリングするシステムの実現へと寄与することが期待される。

#### 〔研究経過および成果〕

##### (1) 静止軌道衛星ひまわりによる夜光雲モニタリングシステムの開発

ひまわり 8 号による全球輝度画像データから夜光雲を自動で検出する手法の開発を行なった。手法開発の試行錯誤の中で、輝度値の小さい（暗い）夜光雲も検出する為に、背景光成分に含まれる大気分子のレイリー散乱光成分を再現・除去した後に閾値判定で夜光雲/極中間圏雲による散乱光を抽出する方法を考案し、検出感度を向上させた。

開発した夜光雲の自動検出手法をひまわり 8 号の全運用期間（2015 年 7 月 7 日～現在）の可視 3 バンド（バンド 1（青：470 nm）、バンド 2（緑：510 nm）、バンド 3（赤：640 nm））の観測データに適用して、夜光雲の検出結果をデータベース化した。並行して、ひまわりデータをリアルタイムで定常的に処理し、夜光雲の自動検出結果を電気通信大学のウェブサイト [http://ttt01.cei.uec.ac.jp/himawari/] で公開するシステムを構築した。

ウェブサイトで公開している観測データの例として、図 1 に、2020 年 7 月 1-10 日の 10 日間の夜光雲の検出結果を示す。北半球の夏期における夜光雲の発生を広い緯度範囲（38-81°N）で連続的にモニタリングしており、例えば、5 日周期大気波動の影響に伴う夜光雲が 5 日周期で消長する様子も確認できる。北半球と同様に、南半球のモニタリングも可能であり、現在も継続的に夜光雲/極中間圏雲の発生状況のモニタリングを続けている。

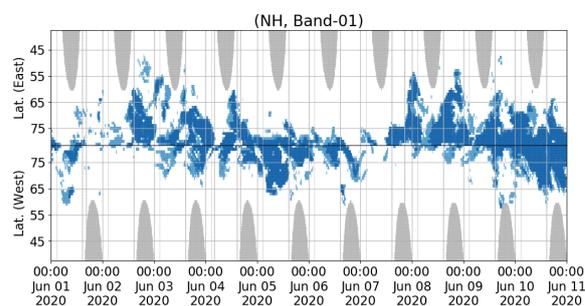


図 1. ひまわり 8 号全球輝度画像のバンド 1（青：470 nm）で、2020 年 7 月 1-10 日（10 日間）に検出された夜光雲。

ひまわり 8 号全球輝度画像から検出した夜光雲データの検証として、夜光雲観測で実績がある NASA の低軌道人工衛星 Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM) による夜光雲観測データを利用した。ひまわりと AIM の同時観測データを選択的に抽出し、夜光雲の発生頻度について比較した結果、両者の変動には非常に良い一致が見られ、本研究で新規開発したひまわり全球輝度画像に適用する夜光雲の検出手法の十分な有効性が示された。加えて、定量的な比較においても一致が見られることから両者の検出感度がほぼ同程度であることも判明した。夜光雲の観測に特化した AIM による低軌道（近距離）からの観測と同程度の検出感度を、ひまわりによる静止軌道（超遠距離）からの観測で達成している点は予想以上の成果である。AIM の夜光雲/極中間圏雲データは広く研究者に用いられており、これまでに多数の実績をあげている。同様に、今後、ひまわり夜光雲/極中間圏雲データも広く活用されていくことが期待できると考える。

以上の研究成果について論文として纏め、学術雑誌にて発表した [発表論文 1]。

## (2) 地上レーザセンシングによる日照時大気温度計測の為に超狭帯域フィルタの基礎開発

夏期極域（日照時）の現象である夜光雲の背景の大気温度を計測する為には、極域で稼働中の地上レーザセンシングシステムに日照時における温度計測の機能を実装する必要がある。その為に、日照時（昼間）の背景光ノイズを大幅に抑制する為の超狭帯域光学フィルタとして、磁気光学フィルタシステムの基礎開発を進めた。

本研究で試作した磁気光学フィルタシステムの外観

を図 2 に示す。フィルタシステムの中心に配置した強磁場・高温状態の Na 原子蒸気セルを通過する際のゼーマン効果と偏光面のファラデー回転を利用して Na D<sub>2</sub> 線の波長を選択的に透過させる磁気光学フィルタであり、透過特性が絶対波長で厳密に決まること、半値全幅 10 pm の超狭帯域であること、高透過率 (> 90 %)、という特徴を有し、本用途に対して十分な性能が期待される。試作フィルタにおいて、強磁場環境は永久磁石で構成した磁気回路で構成し、加熱用ヒーターと断熱材でセルを高温状態で保温できるようにした。今後、試作システムの性能評価実験を進めることを予定している。

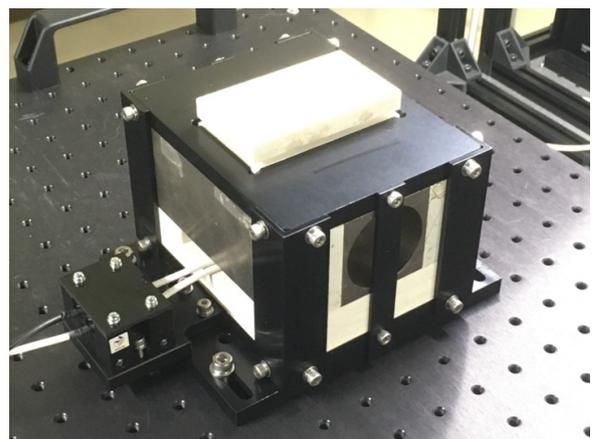


図 2. 試作した磁気光学フィルタシステムの外観。

[発表論文]

1. T. T. Tsuda, Y. Hozumi, K. Kawaura, K. Tatsuzawa, Y. Ando, K. Hosokawa, H. Suzuki, K. T. Murata, T. Nakamura, J. Yue, and K. Nielsen (2022), Detection of polar mesospheric clouds utilizing Himawari-8/AHI full-disk images, Earth and Space Science, 9, e2021EA002076. <https://doi.org/10.1029/2021EA002076>

## 【助成 38 -06】

### 物質表面の局所構造を高空間分解能で計測可能にする新規和周波発生分光法の創出

研究者 総合研究大学院大学 物理科学研究科 助教 櫻井 敦教

#### 〔研究の概要〕

触媒や電極などの表面化学反応のメカニズムを理解するには、物質表面に吸着した分子の局所構造を、直接観測できることが理想的である。和周波発生(SFG)分光法は、表面・界面の情報を選択的に検出できる測定法のため、これまで表面吸着分子の観測に有用性を発揮してきた。しかし従来の遠視野による SFG 測定は、空間分解能が数 100 nm に制限され、得られる信号は多数の分子( $\sim 10^6$  個)の情報を平均化したものであった。本研究の目的は、走査トンネル顕微鏡(STM)の金属探針の先端に生じる近接場を利用して、1 nm 以下の空間分解能をもつ新規 SFG 分光法を創出することである。極低温・超高真空環境下で動作する STM を立ち上げ、自作の鋭利な先端をもつ探針を用いて物質表面の原子構造の観測を行うとともに、その探針先端に超短パルスレーザーを入射させ微弱光を検出できる光学系を構築したことで、近接場超高解像度 SFG 分光を行う準備が整った。

#### 〔研究経過および成果〕

(1)極低温超高真空下における金属表面の原子観察  
液体ヘリウム温度(5 K)、超高真空( $4 \times 10^{-8}$  Pa)で動作する STM を立ち上げ、金属表面の原子構造を観測した。観測対象は金の単結晶の(111)面で、基板表面に対してイオンスパッタリングと 700°C のアニーリングを繰り返し行い、原子レベルで平坦な清浄表面を準備した。この表面に対して STM 測定を行うと、金の原子が明瞭に観測できることを確認した(図 1)。

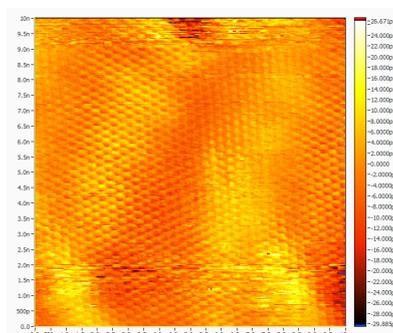


図 1 Au(111)面の STM 像(10 nm×10 nm)。  
原子構造が確認された。

#### (2)鋭利な先端形状をもつ探針の開発

3 端子電極法を利用した電気化学エッチング装置を自作で準備して、鋭利な先端形状を持つ金の探針を作製した。このエッチング装置で探針を作製すると、先端直径 50 nm 程度のもものが、再現性よくできることを走査電子顕微鏡(SEM)の観察から確認している。さらにこの探針にイオンスパッタリングを施すと、先端形状をより先鋭化できることも確認した(図 2)。図 1 の STM 像も、このように作成した金の探針を用いて観測したものである。

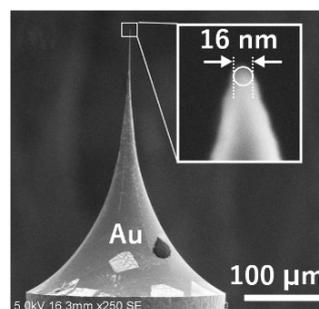


図 2 自作した金の探針の SEM 画像。イオンスパッタを施すことで先端直径が 16 nm まで先鋭化された。

### (3)光学系の構築と微小信号の検出

STM に赤外光と可視光の超短パルスレーザー(時間幅 35 fs)、および可視の CW レーザーを同軸に入射できる光学系を構築し、遠視野での SFG、および蛍光、ラマン測定を行えることを確認した。ただし、当初使用していた 2 枚の球面レンズは収差のため集光効率が低いことが判明したので、収差を取り除いた非球面レンズを独自に設計した。国内のレンズ加工メーカーに製作を依頼し、出来上がったレンズを STM に取り付け測定を行ったところ、従来に比べて信号光強度が 20 倍以上向上した(図 3)。

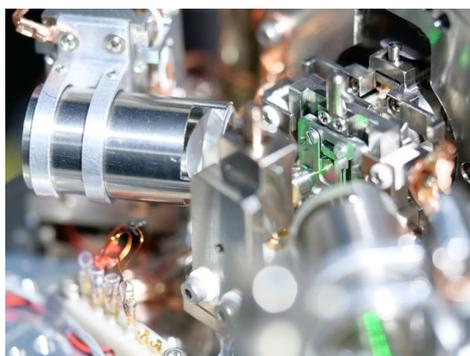


図 3 2 枚の非球面レンズを取り付け、探針の先端にレーザー光を集光させたときの状況

### (4)STM 発光スペクトルの測定

Au 探針を用いて Au(111)基板の STM 測定を行うと、トンネル電流によって表面プラズモンが誘起され、プラズモンの共鳴波長に応じた発光が生じる(STM 発光)。この STM 発光のスペクトルを測定することに成功した(図 4)。STM 発光は探針直下の局所的な領域から生じる光である。それを観測できたことは、外部からレーザー光を照射した際、探針先端に生じる近接場由来の信号を検出できる光学系を構築できたことを意味する。また STM 発光のスペクトルから、探針先端と金属基板の間に生じるプラズモンの共鳴波長を知ることができる。探針の調整によって STM 発光のス

ペクトルを変化させられることも確認している(図 4)。そのため、探針の調整パラメータを制御することで、入射させるレーザー光の波長に最適なプラズモン応答をもつよう、探針を調整できる可能性を示した。

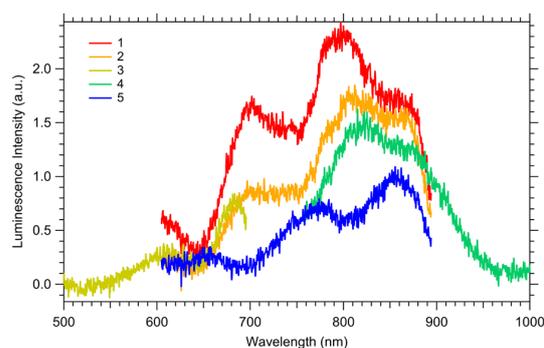


図 4 探針の調整条件を様々に変えた際に観測された STM 発光のスペクトル

### (5)探針増強ラマン分光

Au(111)面に吸着した分子種の STM 像を観測できるようにした状態で、CW レーザー光を入射させると、探針先端の増強近接場に由来するラマン信号を測定することができた(探針増強ラマン分光)。当初、探針先端に光を集光すると、ラマン信号が検出されるべき周波数領域に大きなバックグラウンドが乗ってしまい、観測の障害になっていたが、これは探針の先端付近に存在する不均一な凹凸構造からの散乱が原因であることが分かった。(2)で述べた探針のイオンスパッタリングを施すと、この凹凸を取り除くことができ、信号を覆い隠していたバックグラウンドを著しく軽減させることができた。

以上の研究経過から、近接場超高解像度 SFG 分光を行うための準備は十分整ったと考えており、引き抜き本課題の達成のため、鋭意努力していきたい。

[発表論文]

なし

触力覚的介入が FoP 発生に及ぼす影響

研究者 埼玉大学工学部 准教授 原 正之

〔研究の概要〕

神経変性疾患や認知症などでは、しばしば誰もいない空間で「何か」の存在を知覚 (feeling of a presence: FoP) することがある。極限状態などでは健常者でも FoP を体験しうることから、この体験はヒトの認知機能に深く関わるものと考えられる。本研究では、FoP の発生機序のさらなる解明のために、FoP 実験に適用可能な新しい力提示手法の創出を行い、提案手法による触力覚的介入が健常者の FoP 体験に及ぼす影響を調査した。実験の結果、提案手法の適用が従来手法よりも強い FoP 体験を健常者に引き起こせる可能性があることを示唆した。

〔研究経過および成果〕

1. はじめに

これまでの研究では、リーダフォロワシステムを用いて、視覚・聴覚情報を遮断した状態で自身の背中に非同期で能動的自己触刺激を与えると、健常者でも FoP を体験しうることを明らかにした。本研究では、FoP の発生機序のさらなる理解を目指して、健常者での FoP 体験をより強かつロバストにすることを目標とした。この目標達成のために、FoP 実験に適用可能な新しい力提示手法を提案するとともに、その手法の適用が FoP 体験に及ぼす影響を実験的に調査した。

2. 仮想ロープによる触力覚的介入の提案

登山家における FoP 体験に着目すると、ホワイトアウトや強風などによる視覚・聴覚情報の遮断や疲労などによる認知機能の低下に加えて、ザイル(ロープ)を介した触力覚的なインタラクション(互いに自由に動けたり、引っ張り合ったりすること)も FoP の発生に寄与しているものと考えられる。そこで本研究では、FoP 実験中にリーダロボット側で触力覚的介入を行い、FoP を効果的に引き起こすことを考えた。具体的

には、図 1 に示すように自由空間(灰色の球内部=力提示を行わない空間)の中心位置をもう一方のデバイス位置にリンクし、自由空間の半径とデバイス位置との関係により力提示の ON/OFF を切り替える手法(仮想ロープ)を提案した。協調タスクなどで用いられる従来手法(仮想ばね)を適用した場合、2 台のデバイスは常にリンクされた状態となるが、仮想ロープではデバイス間の距離によって提示力が変わるため、間欠的な触力覚的介入を実現できる。提案手法の有効性を確認するために、図 2(a)に示すように 2 台のハプティックデバイスを用いて、仮想ロープと仮想ばねを適用した場合で力提示実験(同方向に 5 秒間、対向方向に 10 秒間、約 1Hz で左右に操作)を行い、デバイス位置と提示力との関係を調査した。図 2(b)の結果が示すように、仮想ロープを適用した場合は、同方向への操作時に力提示が行われることはなく、

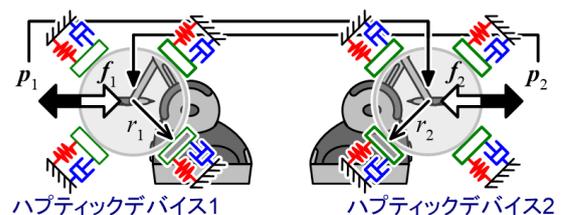
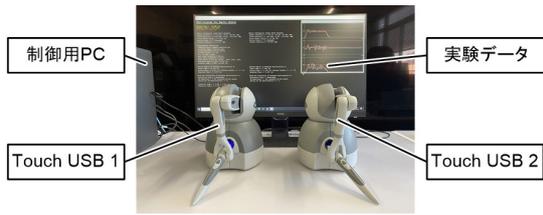
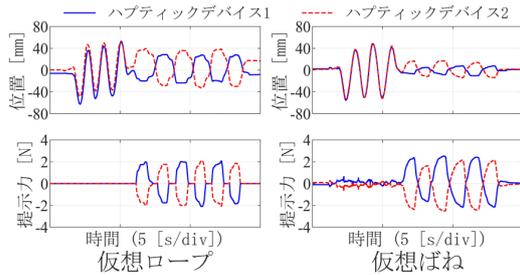


図 1 仮想ロープの実現方法



(a) 力提示性能評価用実験システム



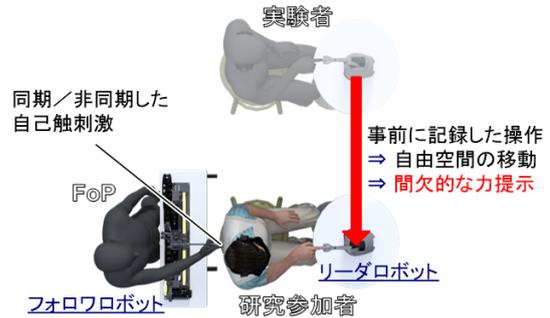
(b) 力提示性能(仮想ロープ vs.仮想ばね)

図 2 仮想ロープによる力提示性能評価

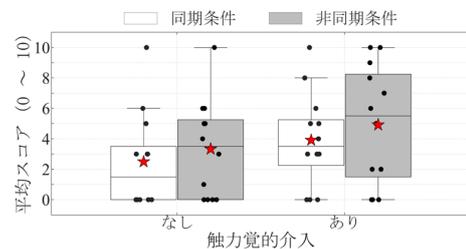
また対向方向への操作時にも自由空間内では提示力はゼロとなっていることが確認できる。一方、仮想ばねを適用した場合には、同方向への操作時においても若干の力提示が行われていることがわかる。

### 3. 仮想ロープによる触力覚的介入を伴う FoP 実験

仮想ロープによる触力覚的介入が FoP 体験に及ぼす影響について、実際に先行研究で使用した FoP 実験システムに仮想ロープを適用して検証した。具体的には、2 分間の FoP 実験を同期性(同期 vs.非同期)と触力覚的介入(ありvs.なし)の計 4 条件で実施し、各試行において FoP 体験を 10 段階リッカート尺度で調査した。本実験では、図 3(a)に示すように、事前に実験者が FoP 実験を実施した際の運動データをもとに触力覚的介入を行った。図 3(b)に、研究参加者 12 名による FoP 実験の結果を示す(赤い星印は平均スコア)。二元配置分散分析により同期性と触力覚的介入の両方で有意な主効果が得られたことから、仮想ロープによる触力覚的介入のあり/なしに関わ



(a) 実験環境および実験方法



(b) FoP 体験の主観的評価結果

図 3 仮想ロープを用いた FoP 実験

らず FoP が体験されたことと、仮想ロープによる触力覚的介入が FoP 体験を強めることが示唆された。

### 4. まとめ

本研究で新たに提案した仮想ロープを FoP 実験パラダイムに組み込むことで、健常者の FoP 体験が強まることを実験的に示した。今後はサンプル数を増やして、この実験結果をロバストなものにしていくとともに、複数人での FoP 実験へと展開していくことを考える。

[発表論文]

1. **M. Hara**, O. Blanke, and N. Kanayama, “Feeling of a presence and anomalous body perception,” Body Schema and Body Image: New Directions, Oxford University Press, 2021.
2. **原正之**, 三木将仁, 金山範明, “実体的意識性の実験的誘起のための新しい力提示手法の提案,” MoViC2021, D06, 2021.

## 【助成 38 -08】

### リアルタイム計測歪モデリングで実現する衛星航空機の大変形制御

研究者 東北大学 工学部 助教 大塚啓介

#### 〔研究の概要〕

コロナ・災害に伴う通信観測の需要増に伴い、大気圏内を年単位で飛行し続ける衛星航空機の実用化が期待されている。衛星航空機の超細長翼は従来航空機にありえない大変形が発生する。無人の衛星航空機が飛行し続けるには、設計段階での高効率な解析に加えて、実運用中にリアルタイム計測される変形量と数値モデルを用いた大変形制御が必要となる。「大変形時でもリアルタイム計測できる歪を変数とするモデリング法」を構築することが本研究の目的である。衛星航空機の細長形状に着目し、幾何学曲線理論との類似性から得られる【ベクトル・歪変換式】で、これまで大変形解析で用いられてきたモデルのベクトル変数を歪に変換する。ベクトル・歪変換によって得られた歪変数モデルは大変形解析のベンチマーク問題において、研究代表者の知る限り世界最高の解析性能を示した。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. 研究背景と研究経過

コロナ・災害に伴う通信観測の需要増に伴い、大気圏内を年単位で飛行し続ける衛星航空機の実用化が期待されている(図1)。衛星航空機の超細長翼は従来航空機にありえない大変形が発生する。2003年にNASAの試験衛星航空機が墜落して以来、数値モデルを用いた大変形解析の研究が活発化してきた。無人の衛星航空機が飛行し続けるには、設計段階での高効率な解析に加えて、実運用中にリアルタイム計測される変形量と数値モデルを用いた大変形制御が必要となる。解析精度の実証実験で用いられるベクトル変位計測のためのカメラ・レーザ変位計は構造物の外部に設置しなければならず、実運用中に使えない。一方で、埋め込み式の無線・光ファイバ歪センサの発達によって、「歪」は大変形時でも計測が容易になってきている。

上記の背景から、本研究では「大変形時でもリアル

タイム計測できる歪を変数とした新たなモデリング法」の構築を目指した。本助成期間に①モデリング理論の構築②大変形解析性能の検証③実証実験に向けた実験装置の製作の3つを行った。

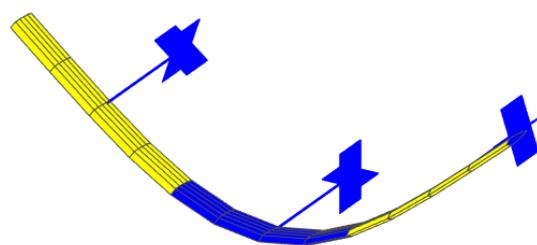


図1 衛星航空機概念図

##### ① 理論構築に関する研究成果

衛星航空機の細長形状に着目し、幾何学曲線理論との類似性から【ベクトル・歪変換式】を導出した。この式を用いて、これまで大変形解析に用いられてきたモデルのベクトル変数を歪変数に変換する。この結果、リアルタイム計測できる歪変数でモデルが記述

できることに加えて、静解析で高計算負荷となる剛性行列が一定となり、高効率に静解析が行える。

## ② 大変形解析に関する研究成果

提案手法を用いて、片持ち梁のロールアップを静解析した。ロールアップは片持ち梁の自由端に特定の曲げモーメントを作用させた際に真円になることが数学的に明らかにされている大変形ベンチマーク問題である。少ない要素分割数で真円を得られるほど、モデルの静解析の性能が高いと言える。図2に示すように提案手法は僅か2要素分割で真円が得られた。これは研究代表者の知る限り、世界最高の解析性能である。さらに、数式処理ソフトを利用して、事前計算できる数式処理を全て行ってからコーディングすることで、解析速度を向上させることができた。

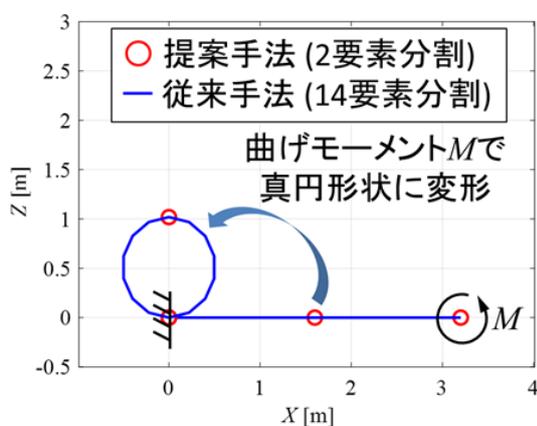


図2 梁のロールアップ

## ③ 実証実験に関する研究成果

提案モデルの解析精度実証のために研究室に小型風洞を建造した。最大風速は 20 m/s、風速の乱れも 0.2 m/s 以下と実証実験を行うために十分な性能が得られた。柔軟翼モデルは風洞吹き出し口に鉛直に配置される。翼モデルを電動回転テーブルに固定することで、精密に迎角を変更し、多様な飛行状態を模擬できるようにした。歪センサに加えて、レーザ変位

計と圧電センサを準備し、多角的に計測できる環境を整えた。また、圧電センサは電圧を印加することで変形制御のためのアクチュエータとしても使用できる。当初、圧電電圧と計測変位(歪)に位相遅れが生じたため、制御への適用は難しかった。しかし、電圧計測ユニットやボルテージフォロワ回路などの導入を行い、試行錯誤した結果、概ね位相遅れの問題を解決することができた。

## 2. 結言

今回の研究助成で「歪モデリング法」を完成させ、提案モデルが優れた大変形解析性能を有することを示した[発表論文 1]。今後は実証実験の成果発表を行う。

[発表論文]

1. **Otsuka, K.**, Wang, Y., and Makihara, K., “Absolute Nodal Coordinate Formulation with Vector-Strain Transformation for High Aspect Ratio Wings,” *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 16, No. 1, 2021, Paper 011007.
2. **Otsuka, K.**, Wang, Y., and Makihara, K., “Three-Dimensional Aeroelastic Model for Successive Analyses of High-Aspect-Ratio Wings,” *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 143, No. 6, 2021, Paper 061006.
3. **Otsuka, K.**, Del Carre, A., Palacios, R., “Nonlinear Aeroelastic Analysis of High-Aspect-Ratio Wings with a Low-Order Propeller Model,” *AIAA Journal of Aircraft*, (in press).

【助成 38 -09】

シリコンフォトニクスを用いて、世界初となるチップスケールの  
光パルス位相測定器の実現を目指す

研究者 宇都宮大学工学部 助教 近藤 圭祐

〔研究の概要〕

近年、レーザー加工や光周波数コム、LiDAR など、光短パルスの産業・学術応用が広がっている。短パルス発生器、増幅器、ならびにそれらを用いた装置の開発、維持、校正には短パルス測定器が必要である。短パルスの時間的特性を詳細に知るためには、パルスの振幅と位相を測定することが望まれる。既存のパルス振幅・位相測定器は自由光学系から成り、大型、精密なアライメントが必要、機械的に脆弱、低感度であり、使い勝手のよい機器とはいえない。本研究ではシリコンフォトニクス技術を用いて、チップサイズのパルス振幅・位相測定器の実現を目指す。これは、シリコン導波路の Sagnac ループ内に非線形光検出器アレイが集積された構造をもつ集積型光相関器と、マイクロリングなどの集積型波長フィルタで構成される。提案デバイスは小型ゆえに、軽量、堅牢、高感度で、取り回しがよく、場所を選ばない光パルス測定を可能にすると期待される。

〔研究経過および成果〕

本研究提案の光パルス振幅・位相測定器では、シリコン導波路の Sagnac ループ内に非線形光検出器アレイが集積された構造をもつ集積型光相関器を用いるが、これはパルス幅の測定レンジがあまり広くないという課題があった。これを解決するために、図 1 に示すような、長さの異なる非線形光検出器アレイをもつ光相関器を複数集積したデバイスを製作した。ここでの光検出器はシリコン導波路上に形成した pn フォトダイオードである。これは通信波長帯の光に対しては二光子吸収による電流を検出するので、非線形光検出器として動作する。測定パルスはシリコン導波路を伝搬し、光路切替スイッチによりいずれかの光相分岐されたパルスは光検出器アレイの両端から同時に入射される。すると、交差するパルスの自己相関が導波路に沿った二光子吸収電流の分布として現れ、これを光検出器アレイで計測すると相関

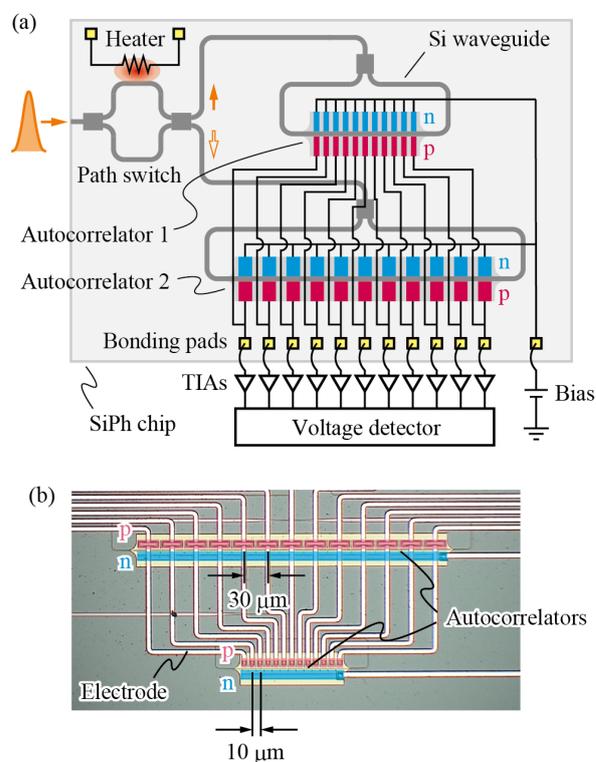


図 1 パルス幅測定レンジ切替機能を備えたオンチップ光相関計。(a) 模式図。(b) 製作したデバイスの上面写真。

関器に導波させられる。その後、ループの入り口で二波形が得られる。パルス幅の測定レンジは光検出器アレイの全長で決まるため、長さの異なる光検出器アレイを集積し、これらを光路スイッチで切り替えることで測定レンジの拡大を実現した。光検出器アレイから並列に出力される電流を読み出して相関波形をビデオレートで表示するための電子回路を設計し、プリント基板回路 (PCB) 上に集積した。

図 2 に示すように、光相関計チップを同 PCB 上に実装し、ここにレンズドファイバを用いて測定パルスを入射して相関波形を測定した。図 3 は製作したデバイスで測定された相関波形である。長さが同じパルス測定したが、光路スイッチを切り替えることで見かけのパルス幅が変化したため、測定レンジの切り替えができていたと確認できた。今回は原理実証のために、光検出器アレイの要素数を 11、アレイ全長の数を 2 つだけとして製作したが、これらを増やすことは容易であるため、測定レンジのさらなる拡大が可能である。

光パルスの振幅と位相を測定するためには、先のオンチップ光相関器の Sagnac ループの片経路に波長可変フィルタを導入してパルスの特定の波長を通過させ、この通過波長を走査しながら、相関波形を計測する必要がある。この波長可変フィルタとして、シリコンチップに集積可能なマイクロリングフィルタを設計した。図 4 にその CAD 設計図を示す。白い線がシリコン導波路である。特定の波長のみがリング導波路で共振し、通過していくため、波長フィルタとなる。これと一緒に集積したマイクロヒータでシリコンの屈折率を温調することで、通過波長の走査を行う。今後、これと光相関チップを組み合わせることで、チップスケールパルス振幅・位相測定器の実証に取り組む。

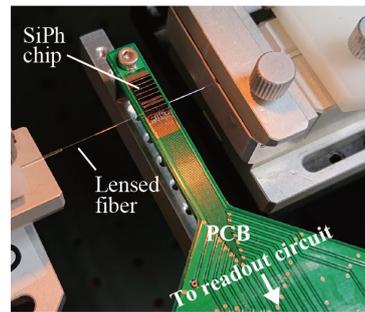


図 2 PCB に集積した光相関計チップ。

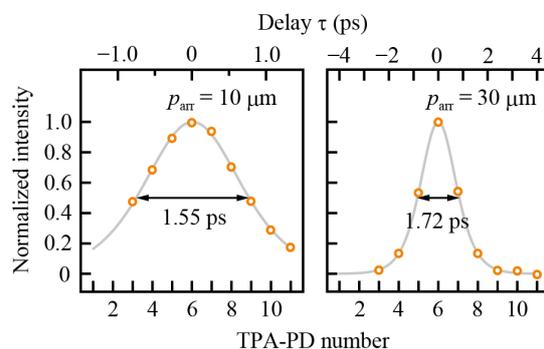


図 3 製作したデバイスで測定された相関波形。 $p_{arr}$  は光検出器アレイのアレイピッチ。

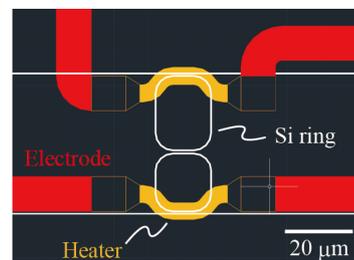


図 4 マイクロリングフィルタの CAD 設計。

[発表論文]

1. K. Kondo and H. Oshima, Ultracompact autocorrelator with pulse-width-range switch function integrated on a silicon photonic chip, *26th Microoptics Conference*, no. N-1, Sep. 2021.
2. 大嶋, 近藤, 二光子吸収フォトダイオードアレイ付き導波路型光相関計のパルス幅測定レンジ切り替え機能の実証, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, no. 11a-N207-9, 2021 年 9 月.

【助成 38 -11】

## 金属材料における LPSO 構造/ミルフィーユ構造による『革新的材料物性増強理論』の 高分子材への適用

研究者 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授 藤森 厚裕

〔研究の概要〕

Mg 合金の分野で提唱された革新的材料強化理論である「LPSO 構造/ミルフィーユ構造」を、高分子材料やその複合材にも適用可能であることを立証するため、①ミルフィーユ構造形成により、力学物性が強化された高分子複合体の創出、②硬軟ナノ粒子層積層体(「ナノ・ミルフィーユ構造体」と呼称)の調製と評価による、物性増強挙動の解明、という 2 つの観点での研究進行を実施した。この結果、フッ素樹脂中で、カーボンナノチューブがミルフィーユ状の構造形成、更には高倍率延伸によりキック導入された状態構築による力学物性の増強が確認された。加えて、キック導入ナノ・ミルフィーユが、変形環境下に於いて優れた秩序維持特性を発現することが明らかになった。

〔研究経過および成果〕

今世紀に入り、機械工学/金属材料の分野に於いて、従来の常識を打ち破る革新的な学説が生まれた。LPSO 構造(Long Period Stacking Ordered structure; 長周期積層構造)と称されたその構造体の力学物性は、従来、柔らかい軽量金属と認識されていた Mg 合金の従来の降伏強度を遥かに凌駕するものであり、この合金の適用範囲を大幅に拡大する新素材となった。

この LPSO 構造についてはその後、「ミルフィーユ構造」などの呼称も加わり、数々の国家レベルの大型プロジェクトに展開する中で、普遍的な学説として、①他の金属材料には適用可能か? ②セラミックス材料には、適用可能か? ③高分子/繊維/プラスチック材料には適用可能か? …等がアクティブに研究展開されている。本申請課題は、③に重きを置きつつ、①~③に通じる普遍的な学理の検証を目的とした。

図 1 上図に示すように、高分子と無機ナノフィ

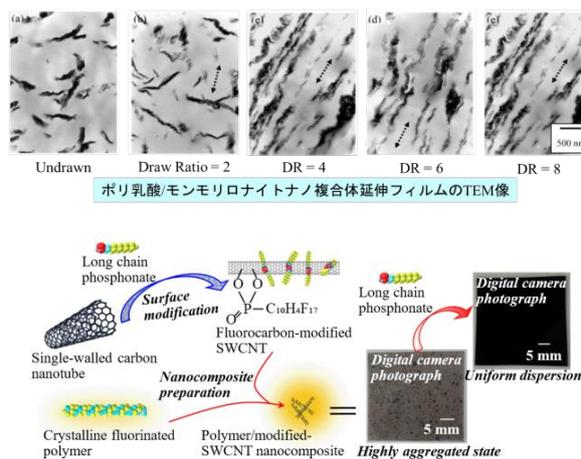


図 1. (上) 延伸によりミルフィーユ状に層状化する PLLA/clay nanocomposite の TEM 像. (下) PVDF/有機化カーボンナノチューブ複合材の調製と分散化: ナノチューブの表面修飾とデジカメ像による分散化確認.

ラーの複合材料のうち、長軸方向に発達した特殊形状フィラーは、複合材料調製後、簡便な延伸加工によってミルフィーユ状の形態が達成できる。今回はフッ素樹脂の中でも強誘電性が報告されているポリフッ化ビニリデン(PVDF)と単層カーボンナノチューブ(SWCNT)のナノ複合材を用いて、延伸による力学物性の増強挙動を検討した(図 2 下図)。この結果、ミル

フィーク構造形成前の未延伸状態に於けるヤング率の値が 1980 MPa から、ミルフィーユ構造形成後の 7 倍延伸では 6308 MPa まで、革新增強されることが判明した。このときの最大応力値も 44 MPa から 368 MPa まで増加した。7 倍延伸は、硬軟のナノ周期に加え、座屈状の「キンク」が導入された LPSO ライクな構造であるが、硬軟のナノ周期のみが形成されている 3 倍から 5 倍延伸程度でヤング率が 5000 MPa 程度に留まっていることから、キンク導入の重要性も同時に示された。

さて、このキンクの重要性については、硬軟ナノ粒子層の交互積層体である、「ナノ・ミルフィーユ」構造体を用いた、独立の研究で実証することが出来た。ポリスチレンナノ粒子と、有機修飾マグネタイトナノ粒子のそれぞれ単粒子膜を交互積層した「ナノ・ミルフィーユ」に対し、これらを乗せた樹脂基板ごと延伸加工処理と施すと(図 2)、キンク導入前は 1.5 倍延伸でほぼ層状秩序が消失したのに対し、キンクの導入は 1.5 倍の変形には確実に耐え、1.75 倍までその秩序を維持した。これは、粒子層間にキンク導入による層間摩擦が加わることにより、力学変形に対する秩序の維持を示したとも考えられる。従って、こうした高

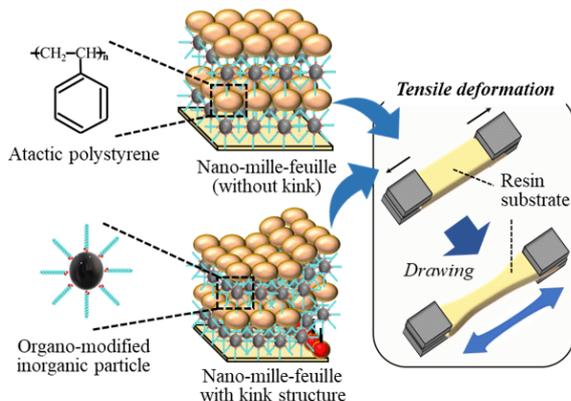


図 2. キンク導入前後におけるナノ・ミルフィーユの変形時秩序維持実験.

分子と無機素材の各種複合材料系に於いて、従来の力学的特性を 3 倍以上にも高めた素材の創出と、更にナノ粒子層で簡易モデル化したキンク導入ナノ・ミルフィーユ構造体の系で、学説としてのキンクの重要性/層間摩擦の必須性が同時に証明された。この検証により、将来、柔らかくて軽量な高分子系素材が、金属に代わって車体材料などに活用される可能性が生まれ、燃費がよく、事故によって失われる命も保全される自動車のボディ材に革新が起こる可能性がある。また、近年のマイクロプラスチック問題の解決の糸口とされながら脆さが問題となる生分解性プラスチックも、ミルフィーユ構造の導入により実用に足る、力学強度を発現できる可能性が得られたらう。

[発表論文]

1. T. Hayasaki, Y. Yamada, X. Kai, AA. Almarasy, S. Akasaka, A. Fujimori\*, "Study on the Improvement of Dispersibility and Orientation Control of Fluorocarbon-Modified Single-Walled Carbon Nanotubes in a Fluorinated Polymer Matrix.", *Polym. Compos.*, **2021**, 42(9), 4845-4859. (DOI: 10.1002/pc.26194)
2. T. Ohashi, N. Kikuchi, A. Fujimori\*, "Regularity maintenance properties under deformation of kink-introduced Nano-mille-feuille structures derived from interfacial friction.", *J. Phys. Chem. C*, **2021**, 125, 22766-22777. (DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c05386)
3. S. Hirayama, T. Hayasaki, AA. Almarasy, H. Yabu, M. Tokita, A. Fujimori\*, "Influence of Uniaxial Orientation of Fluorinated Polymer/Phosphonate-Modified Needle-Like Nanofiller Composite by Drawing.", *Polym. Compos.*, **2020**, 41(8), 3062-3073. (DOI: 10.1002/PC.25598)

## 【助成 38 -12】

### 超高密度2次元鉄ナノ磁石ハニカム規則配列作製による超省エネ電界書き込み制御型・磁気記憶素子の開発

研究者 千葉大学 大学院工学研究院 准教授 山田 豊和

#### 〔研究の概要〕

情報は「1」「0」信号に変換され磁石の向きNS極で保存されている。2021年と比較し2030年には世界の情報量は1000倍以上に増大する。限られた電力と資源で情報社会発展を実現するには、革新的な情報記憶媒体の開発が必要である。そこで、世界最小・超高密度(磁石サイズ2-3 nm)・極薄(厚さ0.4nm)ナノ磁石ビットパターン膜の開発を目指した。真空基板表面で、前駆体有機分子を用いて二次元ハニカム格子を作製し、これに磁性金属を蒸着した。2021年度、遷移金属と分子格子は電子的結合をしない事、磁性金属吸着でも分子共有結合は保持されることを確認した。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究は、全て、超高真空中で実施した。超高真空・室温・走査トンネル顕微鏡(STM)装置、超高真空・室温・紫外光電子分光装置(UPS)、エックス線光電子分光(XPS)装置を用いて実施した。

#### 基板の選定・清浄化

申請時点の2020年度、我々はAu(001)やAu(111)基板表面上に、1,3,5-tris(4-bromophenyl)benzene:トリスプロモベンゼン(TBB)分子を、基板温度室温にて真空中で昇華した。室温で吸着しただけでは、TBB分子のままであるが、基板を真空加熱(430 K)すると、TBB分子からBr原子が脱離する。Br脱離したTBB分子はAu基板表面を熱拡散する。別のBr脱離したTBB分子と衝突し、新たなC-C共有結合を形成する。このウルマン反応が繰り返されることで、数十nmサイズの共有結合性有機分子構造体(COF: covalent organic framework)が実現する。

Au基板は有機分子の表面合成で広く使用されてきた。不活性で酸化せず、安定に清浄な表面が得や

すいからである。しかし、磁性的な観点では、鉄FeやコバルトCoなどの遷移金属磁石に比べて、Auは表面エネルギーが極めて低い。そのため、Auの表面析出や表面合金形成が発生し、磁気特性を乱す。

本研究では、安定な面直磁気異方性を有することが分かっている、Cu(111)基板表面上の磁性金属ナノ島に注目した。Cu(111)表面で安定に均一なCOFが作製できる条件の確立と、作製したCOFへの磁性金属吸着によるCOF破壊や変形の有無、さらにCOFの格子穴の中で遷移金属が選択的に成長するかの確認を実施した。

準備槽で基板処置や製膜を行った後、超高真空を保持したまま解析槽に移動しSTM/UPS/XPS測定を行った。Cu(111)基板表面の清浄化と原子レベルでの平坦化処理を実施した。アルゴンスパッタと加熱処理サイクルを実施した。Cu(111)表面で得たSTM形状像は、100 nmサイズの広い原子テラスと、単原子ステップ(段差約200 pm)を示した。

### Cu(111)基板表面への TBB 分子蒸着と COF 作製

TBB 分子(白い粉)をアルミナ坩堝に入れ、導入槽(加熱中  $10^{-6}$  Pa)にて昇華した。100 mm 直上の水晶振動子(QCM)で昇華レートを得た。本研究では、昇華レート 0.15 nm/min、るつぼ温度 122.8 °C を使用した。ただし、有機分子の密度や z-impedance は不明のため、QCM パラメータ値: 密度 1 g/cm<sup>3</sup>, z-impedance 1 を使用した。TBB 分子を約 0.4 nm 厚さ分だけ基板温度「室温で」Cu(111)表面に蒸着した。Au 基板と異なり、室温にもかかわらず Cu(111)表面上で STM 形状像は、不規則な多角形格子(大きさ数 nm) を示した (Fig.1a)。すでに、ウルマン反応が生じたことを示唆した。

この表面を、超高真空内にてポストアニールした(約 430 K, フィラメント電流 1.8A, 4.4 V, 8 min)。ポストアニール後の表面で得た STM 形状像は、大きさ数 nm サイズの六角形が規則配列したハニカム形状 COF を示した (Fig.1b)。Cu(111)上の全 TBB 分子がウルマン反応したと思われる。ただ、COF は表面全体に広がらず、大きさ数十 nm の島が確認できた。

STM 形状像をフーリエ変換した FFT 像は、六回対称スポットを示した。低速電子線回折(LEED)でも、同様の六回対称スポットを確認した。均一性の高い COF が作製できたことを示唆する。作製した COF 島の UPS/XPS 測定を実施した。UPS 曲線から、ポストアニール前の TBB 分子の HOMO ピークをフェルミ準位下 -2.2 eV に確認した。また、-2.7 eV 近傍の Cu(111) d-band が TBB 吸着により大きく変化することが分かった。

### ハニカム格子 COF への Co 蒸着

作製したハニカム格子に、0.01 ML (monolayers: 原子層) Co (flux 9.5 nA, 6 s) を蒸着した。結果を

Fig.1c-e に示す。Fig.1c の STM 像から、COF と単原子層厚さの Co が共存していることが分かった。また、COF 穴の中に Co 粒が存在した。一方で、Fig.1d のように、COF 下に Co が潜り込みクラスター成長するケースも確認した。Fig.1e は、COF と Co 島がそれぞれ独立に成長する領域を観察した。これらは、エネルギー的には、COF と遷移金属は混合せず、分離した方が安定な事を示唆する。UPS 結果でも、Co 3d 状態と TBB 分子 HOMO 状態は混成しないことを確認した。

本研究より、Co 吸着しても COF は保持され、COF 格子内の穴で成長する事が分かった。ただし、COF と基板間の結合は弱い為、Co が COF 下に潜り込むことも判明した。

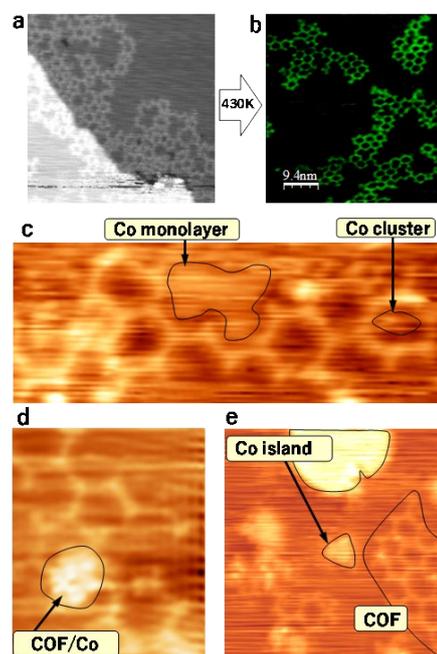


Fig.1 (a) TBB 分子を Cu(111)基板温度 300 K で蒸着した表面の STM 像:  $50 \times 50$  nm<sup>2</sup>, +2 V, 10 pA。 (b) (a)の表面を真空にて 430 K 加熱した後の表面の STM 像:  $50 \times 50$  nm<sup>2</sup>, -2.5 V, 10 pA。 (c-e) COF/Cu(111)に 0.01 ML Co を蒸着した表面の STM 像。(c)  $20 \times 7$  nm<sup>2</sup>, (d)  $9 \times 11$  nm<sup>2</sup>, -2 V, 23 pA。(e)  $25 \times 25$  nm<sup>2</sup>, -2 V, 41 pA。

## 【助成 38 -13】

### 多彩な伝導様式を示すグラフェンモアレ超格子の作製と量子閉じ込めによる新機能の発現

研究者 千葉大学大学院工学研究院 教授 青木 伸之

#### 〔研究の概要〕

本研究では、1枚のグラフェンを半分に切断して1° 程度の角度をつけて重ねることで形成されるツイスト型2層グラフェンを作製し、モアレ長周期構造形成による新しいグラフェン系での特徴的なバンド構造を利用し、「スプリットゲート構造による量子閉じ込め効果」を付加することで、その中における特異なキャリアの振る舞いを明らかにすることを目的として研究を進めた。これまで問題となっていた角度緩和の問題に関しては達成し、低温磁気伝導特性からツイスト型2層グラフェン(TwBLG)となっていることは確認できたものの、マジックアングルで期待される超伝導や Mott 絶縁体といった物性の観測にまでは至らなかった。その原因は試料作製時に混入するバブルの存在によって多くの部分でツイストされていない領域ができてしまい、TwBLG の領域が分断されてしまうことで、完全な超伝導状態や絶縁体状態が実現されなかったと考察し、積層化技術の改善を図った。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では、1枚のグラフェンを半分に切断して1° 程度の角度をつけて重ねることで形成されるツイスト型2層グラフェン(TwBLG)を作製し、モアレ長周期構造形成による新しいグラフェン系での特徴的なバンド構造を利用し、「スプリットゲート構造による量子閉じ込め効果」を付加することで、特異なキャリアの振る舞いを明らかにし、それを利用した量子デバイスの実現を目指した。本研究では、これまで問題であった設定角度からのズレ(角度緩和)の問題を解決するため、従来使用してきた手動による試料作製方法を見直し、XYZ  $\theta$  に対して0.5ミクロンステップで動く電動ステージを導入することで、高精度な位置決めと角度制御を図った。作製した試料の一つを図1に示す。この試料は、TwBLG を上下の六方晶窒化ホウ素(hBN)でカプセル化し、原子間力顕微鏡(AFM)によってバブルの位置を確認し、バブルが少ない領域を狙って電子線描画を行い、 $\text{CHF}_3/\text{O}_2$  ガスによるプラ

ズマエッチングによってホールバー形状に成形し、エッジコンタクトによって電極を取り付けた。この試料では、角度緩和を考慮して作製時に角度を1.30°で積層したが、この試料の低温でのゲート電圧特性(図2(a))を見ると、超格子ギャップ((キャリア密度  $n = \pm 1.2 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ , 矢印で示した位置)位置から1.26°であることが確認され、角度緩和は0.04°と僅かであることがわかった。マジックアングルと言われる1.08°に対しては+0.18°まで迫ることができた。しかし、この試料における満充填(モアレ超格子に対して4つの電子で満たされた状態)に対応する超格子ギャップ

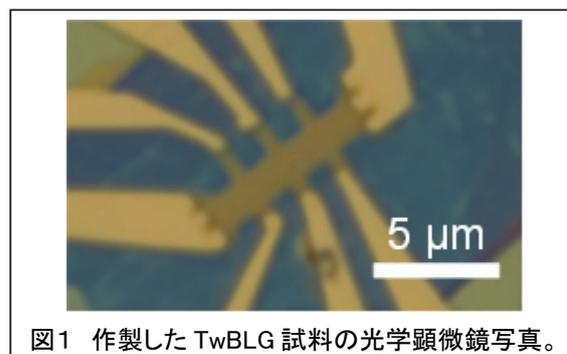


図1 作製した TwBLG 試料の光学顕微鏡写真。

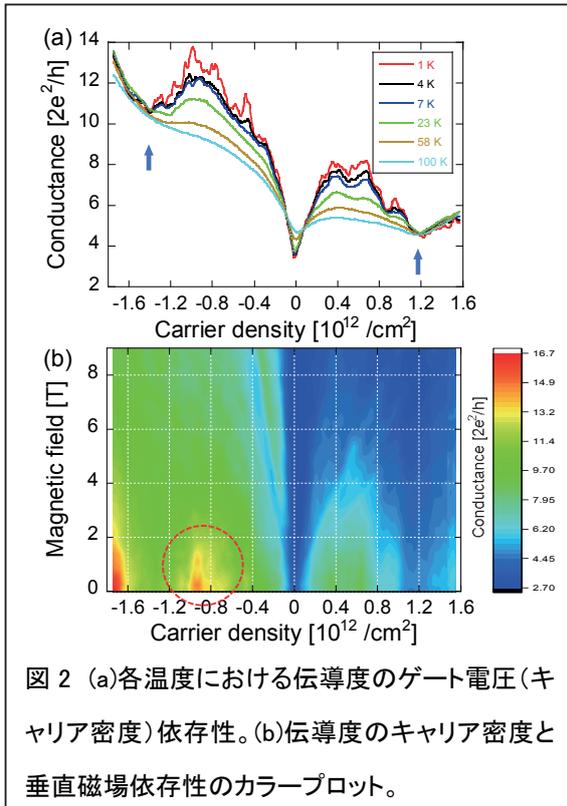


図 2 (a)各温度における伝導度のゲート電圧(キャリア密度)依存性。(b)伝導度のキャリア密度と垂直磁場依存性のカラープロット。

の位置(キャリア密度  $n = \pm 1.2 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ , 矢印で示した位置)では, 伝導度の極小が観測されたものの, バンドギャップが開いていることで期待される絶縁体状態となっていない。また, 超格子ギャップの半分のキャリア密度 ( $n = \pm 0.6 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ ) においては, 半充填状態となることから Mott 絶縁体状態となることが期待されるものの, この試料では伝導度の減少はほとんど確認できていない。また半充填状態の近傍では超伝導の発現も期待されるが, 伝導度の極大が確認されたものの超伝導状態とはならなかった。しかし, 図 2(b) に赤丸で示すように, 垂直磁場を印加していくと, 伝導度の極大領域はドーム状に減衰していく様子が確認された。以上の結果から, この試料では確かにマジックアングルに近い角度でグラフェンがツイストされて積層化されているものの, 不均一性のために期待される物性が観測できていないと考えられる。

その原因としては, バブルの存在によってマジックアングル TwBLG で期待される特性が阻害されているものと考えた。バブルの原因は, 主にグラフェン表面に付着した有機物による汚染と, 積層する際の気泡の 2 種類が考えられる。そのため, 前者の解決には機械剥離をしてからの試料作製時間の大幅な短縮, 後者にはレンズ構造の採用と温度制御によって徐々に接近させることで, 気泡を押し出しながら積層化する方法の導入で解決を図った。その結果, 図 3 のようにバブルの排除を達成し, BLG 試料(ツイスト無し)において室温で  $29,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  の高移動度を確認し, 大幅な改善を図ることができた。今回の研究期間内ではマジックアングル TwBLG で期待される特異な物性の観測ができなかったが, 今後この手法を導入して TwBLG を作製し, スプリット型ゲート構造を用いた量子伝導現象の観測を進めて行く。

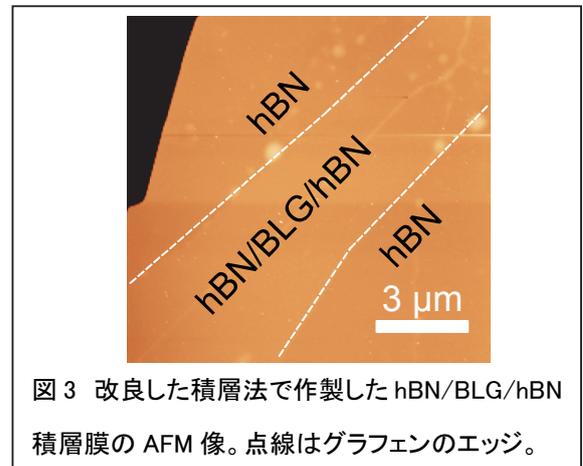


図 3 改良した積層法で作製した hBN/BLG/hBN 積層膜の AFM 像。点線はグラフェンのエッジ。

[発表論文]

1. Kohei Sakanashi, Peter Krüger, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Gil-Ho Kim, David K. Ferry, Jonathan P. Bird, and Nobuyuki Aoki: Signature of spin-resolved quantum point contact in p-type trilayer WSe<sub>2</sub> van der Waals heterostructure, *Nano Letters*, **21**, 7534-7541 (2021).

## 【助成 38 -14】

### ばね形状の3次元流路を用いた伸縮デバイスの開発

研究者 東京大学大学院工学系研究科 特任研究員 奥谷 智裕

#### 〔研究の概要〕

ばね構造は構造的に伸縮し、復元力があるため、伸縮性や耐久性を有する電子デバイス応用が期待される。本研究では、柔らかい材料を用いた自己保持型のばね構造を設計し、ヒステリシスの小さい柔らかいばね型電子デバイスを開発した。ばね型電子デバイスは、液体金属を流路内に充填した芯と、3D プリントされたエラストマー製の鞘からなる芯鞘構造で構成される。ばね型導体は 655%のひずみでは約 10.1%の抵抗増加であった。さらに、ばねのコイル構造によって誘起されるインダクタンスは、200%以下の伸張領域で減少した。200%の伸縮を 1000 回繰り返しても電気特性の変化が少なく、高い耐久性を示した。柔らかい材料で構成されたばね型電子デバイスは、ソフトロボット用の高耐久性かつ伸縮可能なセンサに貢献することが期待できる。

#### 〔研究経過および成果〕

まず、ばね型電子デバイスを実現する前に、エラストマーライク材料(ヤング率:  $3.09 \pm 0.16$  MPa)でのばね構造の実現性を調べた。ばね構造を決めるパラメータであるコイル直径  $D$ 、配線直径  $d$ 、ピッチ幅  $p$ 、巻き数  $N$  に対し、ピッチ幅  $p$  は配線直径  $d$  よりも 0.75 mm 高い値で設定し、配線直径  $d$  を 4 mm、巻き数  $N$  を 8 と固定し、コイル直径  $D$  を変化させて、エラストマーライクのばねを光造形型 3D プリンタで作製した。 $D/d$  の値が大きくなると自重による変形の影響が大きくなり、ばね構造を維持するのが難しかった(図 1)。

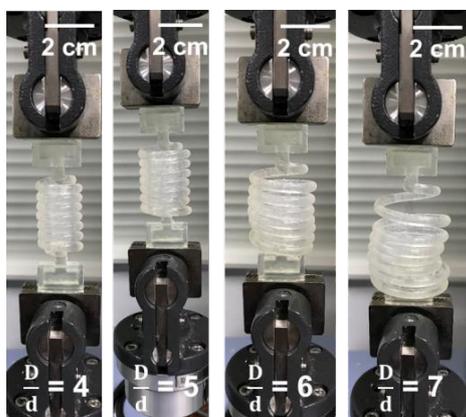


図 1 自重によるばねの変形

$D/d$  が小さいとき、エラストマー材料でもばね構造を自重変形の影響を小さくしつつ、作製できることがわかった。そこで、 $D/d$  を 3 ( $D = 12$  mm,  $d = 4$  mm) と設定し、ばね型電子デバイスを作製した。内部に直径 1.8 mm の流路を設計したばねを、3D プリンタで造形し、その後内部の流路に液体金属 (EGaIn) を封じ込めた。LCR メータを用いて、伸長に対する電気特性の変化を調べた。ここでは、巻き数が 16 のときのばねデバイスを 655%伸長させた(図 2(a))。図 2(b)に、伸長に対する 1 MHz での電気抵抗値の変化を示す。抵抗値は、伸長 655% (50 cm) で約 10.1%増加した。

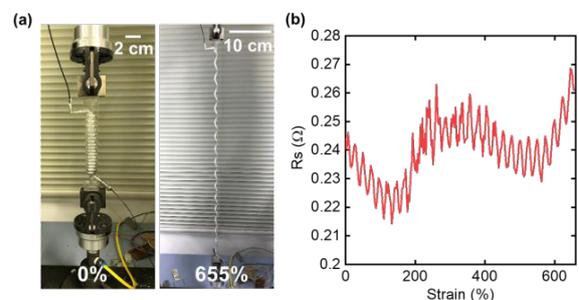


図 2 ばねデバイスの伸長 (a)伸長時の写真

(b)伸長における電気抵抗変化

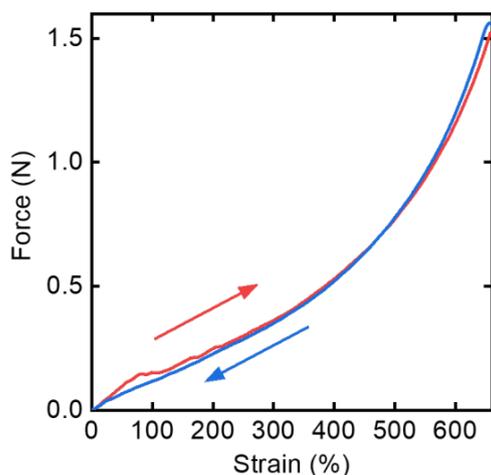


図 3 ばねデバイスの伸縮における機械特性

また図 3 に示されるように、ばねデバイスは 1.55 N の力で 655%の伸長が可能な柔らかさを有しつつ、ばねの構造変化による伸縮はヒステリシスの小さい機械特性を示した。この結果は、ヒステリシスの小さい電気特性にも貢献した。

さらに、ばねのコイル構造はインダクタンスを生じさせる。伸長による構造が変化することで、このインダクタンスの値が変化する。そこで、インダクタンス型ひずみセンサを実装した。200%の伸縮を 1000 回繰り返したところ、繰り返し伸縮において、特に 150%以下の領域の伸縮におけるインダクタンス特性に影響は見られなかった(図 4)。この結果は、ばね型センサが高い繰り返し耐久性を有していることを表している。

[発表論文]

1. **Chihiro Okutani**, Tomoyuki Yokota, Hiroki Miyazako, Takao Someya, “Three-dimensional printed spring-type electronics with liquid metals for highly stretchable conductors and inductive strain/pressure sensors,” *Advanced Materials Technologies*, accepted.
2. [Oral] ○**Chihiro Okutani**, Takao Someya,

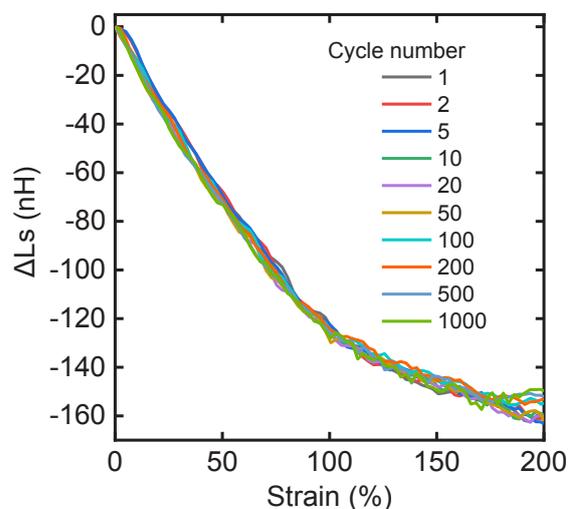


図 4 ばねデバイスの 200%繰り返し伸縮におけるインダクタンス変化

Tomoyuki Yokota, “Highly reliable spring-type strain/pressure sensor with inductance change,” 第 3 回フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクス若手研究者の会, 5E, Online, 2021.12.28.

3. [Poster] ○**奥谷智裕**, 宮廻裕樹, 横田知之, “ソフトロボティクス応用に向けたエラストマーばねの構造安定性と引張変形の解析”, COMSOL Simulations WEEK 2021 Tokyo , Online , 2021.12.3-10.
4. [Oral] ○**Chihiro Okutani**, Tomoyuki Yokota, “Ultrastretchable and Durable Conductive Wiring with Liquid Metal Injected in 3D-Printed Spring-type Channel,” The 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE2021), 2Rm401-08-03, Online, 2021.9.28.
5. [Poster] ○**奥谷智裕**, 神保泰俊, 横田知之, “光造形式 3D プリンタを用いたマイクロ流路作製技術”, 第 33 回東京大学工学部・工学系研究科技術発表会, Online, 2021.3.12.

## 【助成 38 -15】

### くさび型 SPR センサと DNA による VOC の吸着メカニズムの解明と超高感度検出

研究者 東京農工大学 工学部 准教授 清水大雅

#### 〔研究の概要〕

表面プラズモン共鳴(SPR)センサは小型・軽量、非標識、ハイスループットといった特徴を持ち、標的とするたんぱく質を水相にて特異的高感度に検出するバイオセンサに応用されている。一方、気体分子の検出には、高い屈折率分解能が必要であること、特異的検出が難しいという問題がある。医療、農業等の観点から重要な揮発性有機化合物の検出を目的とし、くさび型 SPR センサに DNA を修飾し揮発性有機化合物の高感度検出を試みた。基板面内で膜厚が異なるくさび型金薄膜の上に 2 種類の DNA を自己組織化単分子膜(SAM)とともに修飾し、濃度数十 ppm から数百 ppb のエタノールとサリチル酸メチルのガスを検出した。DNA と SAM の組み合わせによって、エタノールとサリチル酸メチルの応答が異なることが明らかになった。これらは親水性と疎水性の違いによるものと見られる。今後、検出限界を検証し、揮発性有機化合物の高感度検出を目指す。

#### 〔研究経過および成果〕

表面プラズモンポラリトン(SPP: Surface Plasmon Polariton)は金属表面の自由電子の集団振動と電磁波が結合した系であり、外部光による SPP の励起条件が、金属表面の屈折率変化に敏感に変化することは表面プラズモン共鳴(SPR: Surface Plasmon Resonance)センサとして、小型・軽量、非標識のバイオセンサに応用されている。様々な分野で揮発性有機化合物(VOC)の検出を実現するセンサの需要が高まっている。SPR をガスセンサに応用するためには 2 つの課題がある。1つ目はガス分子による屈折率変化が小さいことから高感度化が必要なこと、2 つ目は特定のガス分子と結合する分子認識素子がなく、ガス分子の選択的検出が困難なことである。

本研究では、特定のガス分子を検出するために DNA を修飾した SPR センサによるガス分子吸着特性を評価した。感度を向上させるために、くさび形状をもつ Au 薄膜により SPR センサを高感度化し、エタノールとサリチル酸メチルの検出特性を評価し、吸着メカニズムを検証した。

製膜したくさび型 Au 薄膜に、濃度をそれぞれ 10  $\mu$ M に調整した SEQ1, SEQ2 と呼ばれる DNA の溶液を塗布し、乾燥・洗浄し DNA を固定化した。また、Au 表面へのガス分子の非特異吸着を防ぎ、DNA によるガス分子吸着特性を評価することを目的として、DNA 塗布前に OH 基と COOH 基で末端された混合 SAM 膜を形成した試料を図 1 のように作製した。

ガス分子吸着特性を評価するため、親水性のエタノールと疎水性のサリチル酸メチルの検出実験を行った。微量ガス発生装置により、窒素ガスをキャリアガ

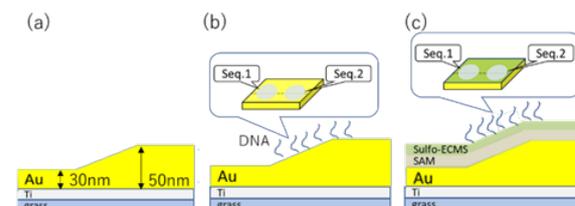


図 1 (a) くさび型 Au 薄膜 (b) DNA を固定したくさび型 Au 薄膜 (c) 混合 SAM 膜上に DNA を固定したくさび型 Au 薄膜

スとして各ガスを発生し 2 L/min. で供給した。波長 632 nm の p 偏光を入射光とし、レンズで集光することで角度分散を与え、ガラスプリズムにマウントした試料に入射した。反射光を CMOS カメラで撮影し、反射光の角度依存性に相当する輝度分布を画像として取得・解析し、信号変化を評価した。各ガス検出時の信号変化を図 2 に示す。ガス導入直後から1分後にかけて、信号が大きく減少した。これは、試料表面の水蒸気などの不純物が飛ばされたためと考えられる。ガス導入後10分を経過すると、DNA 固定試料の信号が DNA が固定化されていない試料よりも大きくなった。SEQ1, SEQ2 がエタノールとサリチル酸メチルを吸着

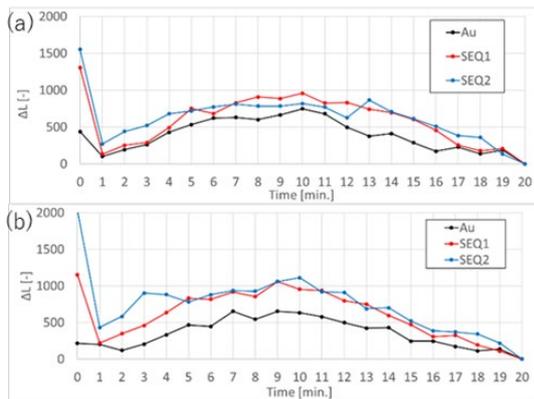


図 2 DNA/Au 試料の信号変化(a)エタノール(90ppm) (b)サリチル酸メチル(158ppb)

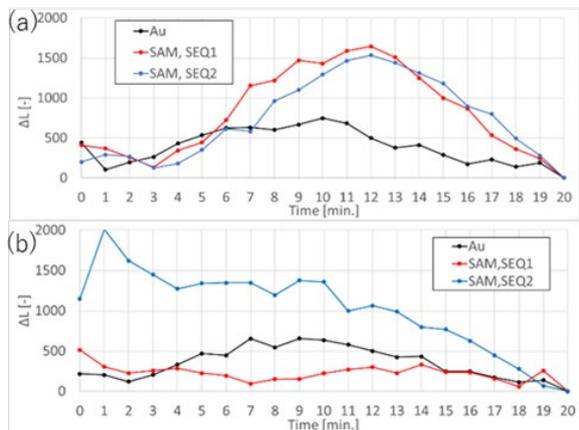


図 3 DNA/SAM/Au 試料の信号変化(a)エタノール(90ppm) (b)サリチル酸メチル(158ppb)

したと考えられる。図 3 に DNA/SAM/Au 試料の信号変化を示す。図 3(a)より SAM 修飾により、エタノール検出時の信号が増大したことが分かった。図 3(b)より SAM 修飾により、サリチル酸メチル検出時の信号が SEQ1 では小さく、SEQ2 では大きいことが分かった。SAM はエタノールを吸着する特性をもち、SAM とともに修飾した DNA では、SEQ1, SEQ2 の配列の違いでサリチル酸メチルに対する応答が異なった。このことから DNA や SAM の組み合わせによりガスを選択的に検出できる可能性があることがわかった。信号の大きさはエタノール濃度 4~90 ppm の範囲内では一定であった。サリチル酸メチルも同じ傾向が見られた。測定した濃度の範囲内では、表面に吸着されるガス分子の濃度が飽和したためと考えられる。今後、検出限界と更なる高感度化を検証する。

〔発表論文〕

1. Shogo Suzuki, Takumi Maeda, Takahiro Ogura, Shoma Suzuki, Terunori Kaihara and Hiromasa Shimizu, “Modulation of surface plasmon resonance by magnetization reversal in Au / Fe / Au trilayer and wedge structure for achieving higher refractive index sensitivity”, Japanese Journal of Applied Physics, 58, SBB106 (2021).
2. Hiromasa Shimizu, Takahiro Ogura, Takumi Maeda, and Shogo Suzuki, “A Wedge-Shaped Au Thin Film: Integrating Multiple Surface Plasmon Resonance Sensors in a Single Chip and Enhancing the Figure of Merit”, Frontiers in Nanotechnology, 3, 724528 (2021).

## 【助成 38 -16】

### 固体量子コンピュータモデル Si:P の実演に向けた $^{31}\text{P}$ 核のスピンダイナミクス解明

研究者 福井大学遠赤外領域開発研究センター 助教 石川 裕也

#### 〔研究の概要〕

固体量子コンピュータ (QC) デバイス候補である希薄ドープ半導体 (Si:P) の実用化に向けた重要な課題は、量子ビットとして扱う  $^{31}\text{P}$  核のスピンダイナミクスに関連する情報の取得である。初期化等の演算実施には、 $^{31}\text{P}$  核の磁気的な挙動を知る必要があるが、希薄さのため核磁気共鳴 (NMR) による直接観測例は無い。本研究では  $^{31}\text{P}$  核の希薄さを克服する手法として、電子スピン共鳴 (ESR) による動的核偏極効果を用いた NMR (DNP-NMR) により  $^{31}\text{P}$  の核磁化を熱平衡状態に比べ相対的に増幅させることで直接観測に挑戦した。高効率なミリ波照射及び高感度な NMR 測定が可能な平面型コイル (meanderline) を組み込んだ ESR/NMR 二重磁気共鳴用共振器を開発し、Si:P が QC として機能する超低温・高周波領域 ( $T \leq 300 \text{ mK} \cdot H > 3 \text{ T}$ ) において  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定により  $^{31}\text{P}$  核スピンの直接観測に世界で初めて成功した。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究の目的は、Kane により提案された Si:P モデルを用いた量子コンピューティング実演に向け量子ビットとなる  $^{31}\text{P}$  核スピン信号を DNP-NMR 効果による直接観測を世界に先駆けて行い、 $^{31}\text{P}$  核のスピンダイナミクスを明らかにすることである。目的達成に向け、本研究では、超低温・高周波領域 ( $T \leq 0.3 \text{ K} \cdot H > 3 \text{ T}$ ) において使用可能な二重磁気共鳴用共振器を開発し、DNP により  $^{31}\text{P}$  核の偏極度を上げる事により核磁気共鳴信号の直接観測を目指した。

本研究では、図 1 に示すような、Fabry-Pérot 型共振器(FPR)内に平面型コイルを組み込んだ二重磁気共鳴用共振器を開発した。FPR は球面-平面の 2 枚のミラーによって構成されており、平面側のミラー下部に矩形型の NMR コイル”meanderline”を設置したものである。測定対象である Si:P 試料は厚み  $260 \mu\text{m}$  ほどの平板形状をしているため、効率良く NMR 用 RF を入射するため meanderline の

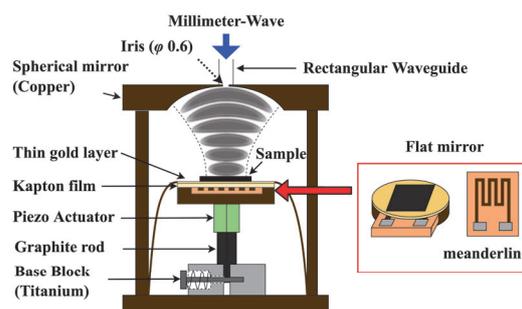


図 1. FPR 内に平面型コイル”meanderline”を組み込んだ二重磁気共鳴用共振器の概要。

開発を行った。ESR/NMR 双方の条件を満たす鍵となるのは、試料下部の平面ミラーとして用いているカプトンフィルム上にスパッタした Au の膜厚である。ミリ波及び RF による薄膜の Skin depth は抵抗値の逆数によって決まるため、ESR の側面からは 1 K 以下の超低温領域においてミリ波が完全反射、 $Q$  値(Quality Factor) の高い膜厚が必要である。一方 NMR 感度向上のためには高い RF の透過性が求められる。膜での電磁波エネルギーロス低減のため、膜厚が薄いことが要求され ESR の要求とトレードオフの関係となる。1 K 以下の超低温

領域において最適な膜厚を選定するため、膜厚の異なる Au 製薄膜を製作し、液体 He 温度領域における NMR エコー強度の温度依存性を調べた。その温度依存性から、最適な Au 製薄膜の膜厚は  $1.6 \times 10^2$  nm とわかった。meanderline コイルの製作は紙フェノール PCB を基板とし、CNC フライスによりコイル製作を行った。テフロン片を用いた  $^{19}\text{F}$ -NMR によりエコー信号が最大となる導線幅  $w$  と導線間隔  $c$  の比率は  $w:c = 1:2$  であり、本研究に最適なコイルの仕様が決定された。

開発した FPR 共振器を  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  希釈冷凍機に組み込み測定を行った。130.15 GHz 及び 220 mK での Si:P における  $^{31}\text{P}$  核による ESR スペクトルを図 2 に示す。ここでは超微細相互作用によって分割された 2 本の共鳴線を観測し、青線は高磁場の ESR スペクトル (H-Line) の全体を磁場変調により DNP 操作を行った直後のものである。このスペクトル強度の差から、熱平衡状態に比べ約 83%核が偏極していることがわかった。DNP 状態の  $^{31}\text{P}$  核スピンの対し ENDOR 測定を行った結果を図 3 に示す。139.03 MHz 近傍で強度が上昇していることから、この周波数において  $^{31}\text{P}$  核磁化が緩和したことがわかった。ENDOR 測定により得られた NMR 周波数を用いて  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR を行った結果を図 4 に示す。NMR 測定は DNP 操作を行った直後に 5 回の NMR 測定を連続して行った。最初の測定(#1)のみがスピンエコー信号が得られると予想される時間(約 25  $\mu\text{s}$ )に変化が現れ、他の測定では変化がなかった。これは 1 度の NMR 測定により DNP 状態が破壊され、熱平衡状態に戻った事に対応する。 $^{31}\text{P}$  核による NMR 信号を明確にするため、#2-5 の平均をバックグラウンドとして #1 から差し引いたものを挿入図に示す。明確な変化が得られたことから  $^{31}\text{P}$  核の

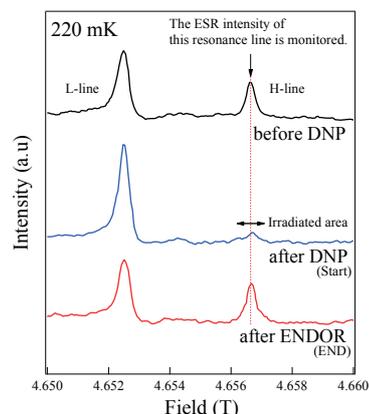


図 2. 130 GHz, 220 mK における ESR スペクトル。

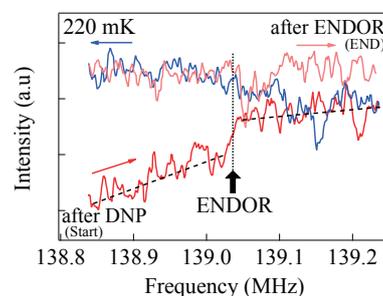


図 3. 220 mK における ENDOR 測定。

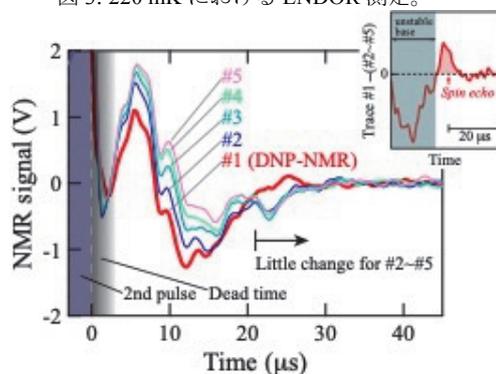


図 4. 139.03 MHz, 220 mK における  $^{31}\text{P}$ -DNP-NMR 測定。

NMR による直接観測に成功したと考えられる。

[発表論文]

1. [Yuya Ishikawa et al.](#), Applied Magnetic Resonance **52**, pp.305-315, (2021).
2. [Yuya Ishikawa et al.](#), Applied Magnetic Resonance **52**, pp.317-335, (2021).
3. 笈田 智輝, 藤井 裕, [石川 裕也 et al.](#), 日本赤外線学会誌 第 31 巻, No.1, (2021).

## 【助成 38 -17】

### 走査型プローブ顕微鏡による MEMS の機械電気特性評価

研究者 静岡大学工学部 助教 中澤 謙太

#### 〔研究の概要〕

本研究では、走査型プローブ顕微鏡によって MEMS の機械電気特性を評価することを示すことを目標とし、ひずみ印加機構を搭載した原子間力顕微鏡とケルビンプローブフォース顕微鏡による動作中のピエゾ抵抗センサの変位分布、電位分布の計測を行った。開発したひずみ印加機構によって MEMS センサ内のダイヤフラムを変形させ、ピエゾ抵抗センサに印加するひずみを調整した。圧縮ひずみを印加させるに従い、ピエゾ抵抗素子の抵抗値が変化することを計測することができた。

#### 〔研究経過および成果〕

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)は、輸送機器や携帯機器で数多く使用されている。MEMS は機械的に変形などの動作を利用していることが特徴である。変形や振動といった機械的動作を検出するためにピエゾ抵抗効果がしばしば利用されている。例えば、ダイヤフラム型の圧力センサや慣性センサなどに用いられている。ピエゾ抵抗効果は、素子に印加されたひずみに比例して抵抗値が変化するというものである。不純物拡散によって製作することができるため、MEMS 製作プロセスとの親和性が高い。ピエゾ抵抗効果を用いた MEMS センサの感度は、ピエゾ抵抗センサの配置、形状が強く影響する。ピエゾ抵抗効果を用いたセンサは一般的に、変形させた際に抵抗値の変化を計測するという評価が行われている。

微細なデバイスを微視的に観察・評価する手法として、走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope: SPM)がある。SPM では先鋭化された探針で測定試料を走査することで表面形状や物性の微視的な顕微計測が可能である。SPM として表面形

状が可能な原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM)と表面電位分布が計測可能なケルビンプローブフォース顕微鏡 (Kelvin-probe Force Microscope: KFM)がある。これまでに、SPM を用いてトランジスタやダイオードなどの電子デバイスを動作環境下で計測する手法が提案されている。同様に SPMを用いることでピエゾ抵抗センサの形状と電位の変化から、センサの機械的挙動と電氣的挙動の計測することができる。

本研究では、走査型プローブ顕微鏡によって MEMS の機械電気特性を評価することを示すことを目標とし、ひずみ印加機構を搭載した SPM による動作中のピエゾ抵抗センサの変位分布、電位分布の計測を行った。

本研究でのピエゾ抵抗センサの変位分布と電位分布の計測手法を図 1 に示す。本研究では、差圧センサに集積されたピエゾ抵抗センサを試料として使用した。AFM は探針試料間に作用する相互作用力を検出し、表面形状を取得する。KFM は静電気力の計測を基にして試料の表面の電位分布を取得する。ひずみを印加する前後で AFM, KFMによって試料表面を

走査し、表面形状と表面電位の変化から、ピエゾ抵抗センサの変位と抵抗値の変化を評価した。

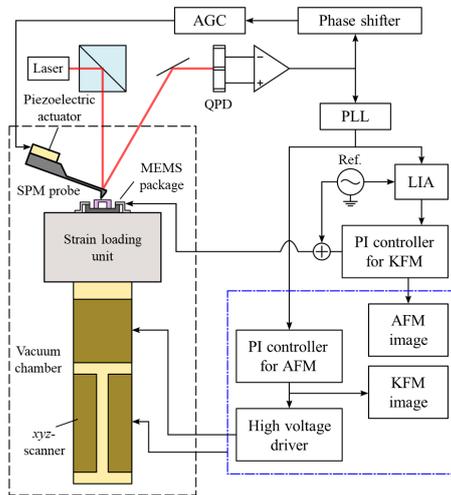


図 1 計測装置概要

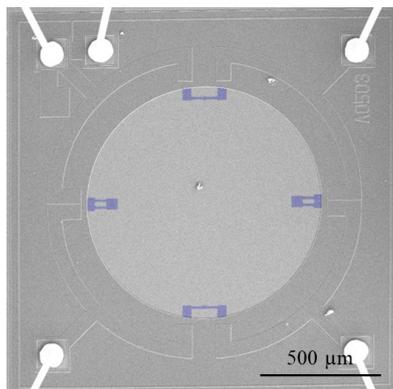


図 2 EBIC 画像を重畳した SEM 画像

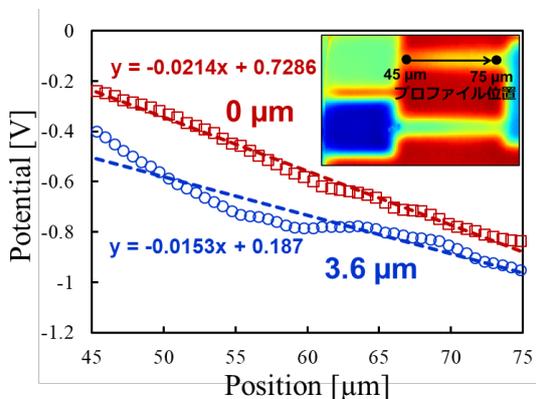


図 3 表面電位計測

本研究では、ピエゾ抵抗センサが集積された市販の差圧センサ(2SMPP-03, OMRON)を計測した。ピエゾ抵抗センサはダイヤフラム上に4個製作されており、ブリッジ回路を形成している。ピエゾ抵抗センサはひずみの変化量を大きくするためにダイヤフラムの周辺部に製作されている。

まず、Electron Beam Induced Current (EBIC) によるピエゾ抵抗素子の形状と位置を同定した。図2にはSEMとEBIC像を重ね合わせたものを示す。EBICではpn接合部に電子が入射することで電流が発生する。今回の素子ではピエゾ抵抗素子の直下で接合があるために、ピエゾ抵抗素子の形状と位置がわかる。4個のピエゾ抵抗素子があることがわかる。ピエゾ抵抗素子の細くなっている部分が主にひずみによる抵抗値が変化する部分となる。

アクチュエータで変位させることで、上に凸方向に変形している。よって、意図した圧縮ひずみを印加できており、変位が大きくなると圧縮ひずみも増加していると考えられる。電位プロファイルには最小二乗近似直線を示している(図3)。最小二乗近似直線の傾きが素子全体としての抵抗率と考えることができ、印加された圧縮ひずみが大きくなると抵抗率が小さくなるのがわかり、これは原理と傾向が一致する。また、最小二乗近似直線から大きく外れている個所もあり、マイクロにみると抵抗率分布が存在することを計測することができる。

[発表論文]

1. K. Nakazawa, T. Tanaka, T. Uruma, and F. Iwata, "Evaluation of displacement and surface potential of a micro-piezoresistor by a Kelvin probe force microscope," *ICSPM28*, S5-36 (2020)

## 【助成 38 -18】

### 硫黄の脱離を分子設計の鍵とする n 型有機半導体の可溶性前駆体の開発と 有機薄膜太陽電池への応用

研究者 名古屋大学工学部 助教 福井 識人

#### 〔研究の概要〕

代表者は最近、独自に開発した「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」に光や熱を加えると、硫黄が脱離し、代表的な n 型有機半導体であるペリレンビスイミドへと変化することを明らかにした。本研究ではこの「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」を代表的な n 型有機半導体であるペリレンビスイミドの可溶性前駆体として活用するとともに、これを利用した有機薄膜太陽電池を開発することを目的に研究を行った。その結果、(1)「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」が熱変換型可溶性前駆体と光変換型可溶性前駆体のいずれとしても機能することを実証するとともに、(2)「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」を大スケールで合成する新たな経路を確立した。加えて、研究を遂行する過程で想定外の成果にも恵まれ、論文として報告するに至った。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. 熱変換型可溶性前駆体としての利用

代表者が創出した「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」(図1)は、(1)有機溶媒に対して優れた溶解性を示すとともに、(2)光や熱によって n 型有機半導体であるペリレンビスイミドへと変化する。これらは可溶性前駆体に求められる条件を満たしている。そこで硫黄挿入型ペリレンビスイミドを可溶性前駆体として用い、有機薄膜トランジスタを作製することにした。

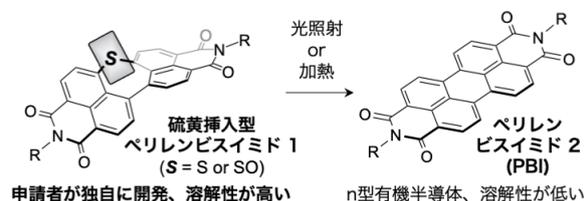


図 1. 硫黄挿入型ペリレンビスイミド

「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」のクロロホルム溶液(濃度: 5 g L<sup>-1</sup>)を基盤に滴下し、これを 30 秒間、回転数 2000 rpm でスピコートした。その結果、「硫黄

挿入型ペリレンビスイミド」の薄膜が基盤上に成膜された。その後基盤を 230 度で 5 分間加熱することで、硫黄脱離反応を進行させた。最後に、得られた薄膜の上に金電極を蒸着させ、目的とする素子を得た。

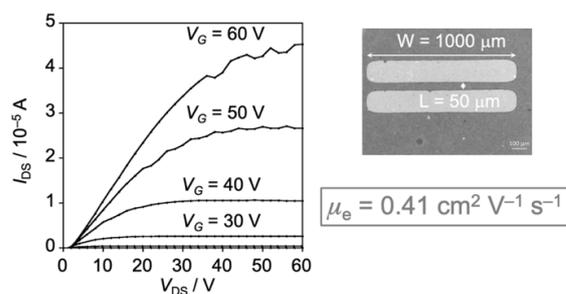


図 2. 作製した有機電界効果トランジスタの外観と素子特性

得られた素子の伝達特性を評価した(図2)。その結果、移動度が最大 0.41 cm<sup>2</sup> V<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> の n 型有機半導体として機能することが明らかとなった。なお、従来の真空蒸着によって成膜されたペリレンビスイミド薄膜の移動度は 0.60 cm<sup>2</sup> V<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> と報告されている。すなわち、真空蒸着に匹敵する移動度を溶液プロセスによ

って実現することができた。なお、素子は合計 12 個作製したが、平均の移動度は  $0.13 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  で、偏差は  $0.13 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  であった。再現性の向上が今後の課題になると考えられる。

## 2. 光変換型可溶性前駆体としての利用

「1. 熱変換型可溶性前駆体としての利用」では、熱による硫黄脱離反応によって半導体薄膜が与えられることを実証した。一方、熱による変換では基盤の制約が大きく、特にプラスチックなどのフレキシブル基盤上への成膜を考慮した際には適切とは言い難い。そこで光変換によるペリレンビスイミド薄膜の作製についても検討を行なった。すると、得られた素子の移動度は  $0.08 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  であった。これは熱変換の場合と比べると低い。ただし、いくつか素子を作ったところ、移動度のばらつきは熱変換と比べて低かった。

## 3. 多様性指向型合成法の開発

検討当初の「硫黄挿入型ペリレンビスイミド」の合成経路(図 3a)は、生成物の構造多様性の拡張と合成の大スケール化には適切ではない。そこで図 3b に示す新規合成経路を開発した。これにより、工程数は7に短縮されるとともに総収率は 14%に改善した。また、大スケール化も可能で、硫黄挿入型ペリレンビスイミドを最大 1.4 g 得ることができた。また、イミド基上の置換基を最後のステップに導入することも可能となった。そこで、第一級アルキル基、第二級アルキル基、ベンジル基、フルオロアルキル基ならびにアリーール基といった様々な置換基をイミド窒素上に持つ類縁体を計 12 種類創出した。

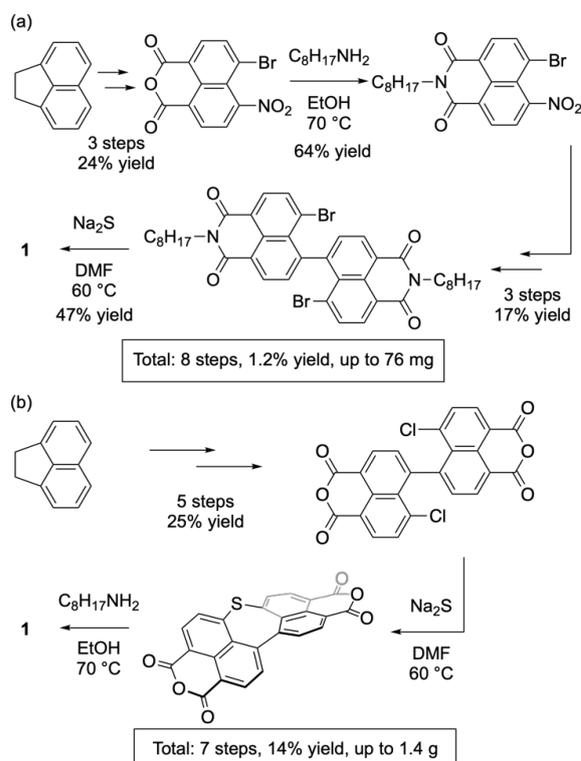


図 3. (a)最初に開発した合成経路と(b)新たに開発した合成経路

## 4. 想定外の成果

上記の研究を行う過程で想定外の成果として代表者は、炭素挿入型ペリレンビスイミドの開発<sup>1)</sup>を行った。この成果は Wiley-VCH 社発刊の *Angew. Chem. Int. Ed.* 誌(2020 年インパクトファクター = 15.336)に掲載されている。

[発表論文]

1. M. Odajima, K. Tajima, N. Fukui, H. Shinokubo, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 15838.

## 【助成 38 -19】

### シリコン技術を基盤とした高感度短波赤外光センサの研究開発

研究者 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授 石川 靖彦

#### 〔研究の概要〕

光通信用に開発してきた Si 上 Ge 受光デバイス技術を基盤とし、波長 0.8-1.7  $\mu\text{m}$  の短波赤外領域の Si 系高感度光センサの研究開発を行っている。課題は自由空間伝搬光(垂直入射)に対して受光効率が低いことにある。受光効率増大には厚膜化した Ge 層(数ミクロン)の利用が有効であり、新たに提案したトレンチ埋込結晶成長による厚膜 Ge 形成の有効性を実証した。格子ひずみを増強した Ge 層を用いた受光器の検討も進め、1.60  $\mu\text{m}$  以上の波長域で受光効率が増大する特性を得た。

#### 〔研究経過および成果〕

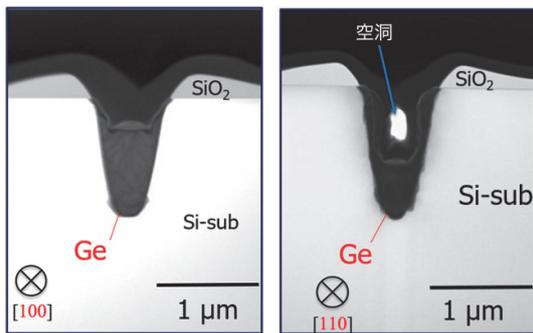
光通信用に開発してきた Si 上 Ge 受光デバイス技術を基盤とし、波長 0.8-1.7  $\mu\text{m}$  の短波赤外(SWIR: short-wave infra-red)領域の Si 系高感度光センサの研究開発を行なっている。自動運転・監視用のレーザーレーダーや、非破壊の内部観測機能を活かしたセンサ展開が期待される。光通信用の導波路型 Ge 受光器では SWIR の典型波長 1.55  $\mu\text{m}$  において 80%以上の受光効率を達成できるが、センサ応用で必要となる自由空間光(垂直入射)の受光に対しては効率が低い点に課題がある。受光効率増大の手法としては、(1)Ge 厚膜化、(2)バンドギャップ収縮による光吸収増大、(3)アバランシェ増倍、(4)多重反射やプラズモン共鳴を利用した光吸収増強が考えられる。本研究では、「(1)Ge 厚膜化」および「(2)バンドギャップ収縮による光吸収増大」を検討した。

「(1)Ge 厚膜化」に関しては、例えば受光効率を 70%に高めるには 3  $\mu\text{m}$  の厚膜が必要であるが、Ge 層の結晶薄膜形成が長時間となることに課題がある。従来にない方法として、トレンチ埋込結晶成長による厚膜化を検討した。Si(001)ウエハ面内の[100]方向

(通常と 45 度傾いた方向)に沿って、サブミクロン幅・数ミクロン深さのトレンチを形成し、Ge の結晶成長を行う。側壁の(100)面でも、底面の(001)面と同様な速度の結晶成長が起こる(標準的な[110]方向に形成したトレンチ側壁では結晶成長は抑制される)。すなわち、横方向成長を積極的に利用することで、数ミクロン深さのトレンチを短時間で埋込むことができることになる。

実際にトレンチ埋込結晶成長を行った結果を図 1 に示す。透過電子顕微鏡(TEM)により断面を観察した。Si(100)ウエハ表面に幅が約 0.6  $\mu\text{m}$ 、深さが約 1.0  $\mu\text{m}$  のトレンチを形成し、超高真空化学基層堆積法により膜厚 0.5  $\mu\text{m}$  ((001)平坦面の場合)の Ge をエピタキシャル成長した。図 1(a)の[100]トレンチでは内部が Ge で埋め込まれているのに対し、図 1(b)の[110]トレンチでは 0.5  $\mu\text{m}$  ほどに制限されている。図 1(a)の[100]トレンチでは、期待していたとおり、側壁の(100)面でも底面の(001)面と同様な速度の結晶成長が起こり、短時間で厚い Ge を形成できることが実証できた。Ge 中の結晶欠陥(転位)は、従来の膜状の Ge 層と同様、成長後の高温熱処理(800°C程度)で低減

できることもわかった。受光器応用では Ge の占有面積を増大する必要があるため、トレンチを隣接・繰り返し形成したアレイ構造を準備している。Ge 結晶成長後の構造を確認するとともに、pin 接合を形成した受光器へ応用し、受光特性の取得を進める予定である。



(a) [100]トレンチ (b) [110]トレンチ

図 1 トレンチ埋込 Ge 層の断面 TEM 像

「(2)バンドギャップ収縮による光吸収増大」に関しては、Si-on-quartz (SOQ) ウエハ上 Ge 層の利用を実施した。石英を下地基板とすることで、Ge 層中の引張格子ひずみが 0.3%以上に増強される(熱膨張係数差に起因:標準的な Si 基板を用いた場合は約 0.2%)。光吸収端が約 1.65  $\mu\text{m}$  に長波長化する結果、受光の高効率化が期待できる。図 2 に受光スペクトル(Ge 膜厚:0.5  $\mu\text{m}$ )を示す。Si 上 Ge 受光器に比べ、SOQ 上 Ge 受光器は測定した全波長域(1.46-1.64  $\mu\text{m}$ )で受光効率が増加した。1.50  $\mu\text{m}$  以上での受光効率増加はひずみ増強による光吸収増大の効果である。1.50  $\mu\text{m}$  以下では多層構造による反射率抑制が寄与している解釈できる。Ge 上へ無反射膜を形成することで 1.50  $\mu\text{m}$  以上の波長域でもさらに受光効率を向上できることを示唆している。

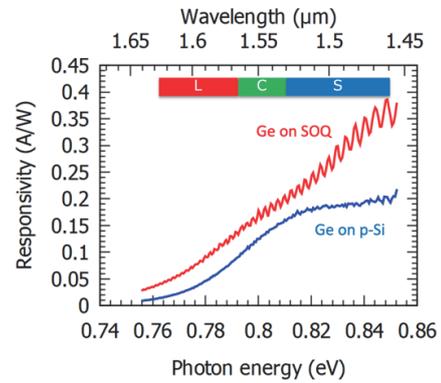


図 2 SOQ および Si 上 Ge 受光器の受光特性

上記の成果は、応用物理学会学術講演会で口頭発表しており、データを補強して学術誌へ論文投稿することを予定している。詳細は割愛するが、Ge 結晶成長および受光器応用に関して 2021 年に以下の論文を発表した。支援に感謝する。

[発表論文]

1. Riku Katamawari, Kazuki Kawashita, Takeshi Hizawa, and Yasuhiko Ishikawa: “Si-capping-induced surface roughening on the strip structures of Ge selectively grown on an Si substrate”, J. Vac. Sci. Technol. B 39 (4), 042204 (2021).
2. Yasuhiko Ishikawa, Kyosuke Noguchi, Mayu Tachibana, Kazuki Kawashita, Ryota Oyamada, Kazumi Motomura, Shuhei Sonoi, Riku Katamawari, and Takeshi Hizawa: “Selective Epitaxy of Submicron Ge Wire Structures for Photodetectors and Optical Modulators in Si Photonics”, ECS Trans. 104 (4), pp. 147 - 155 (2021).

## 【助成 38 -20】

### 人工分子の軌道を利用した桁違いに速い単一電子スピン量子操作の実証とその物理の研究

研究者 大阪大学産業科学研究所 助教 藤田 高史

#### 〔研究の概要〕

情報素子の大規模集積化の観点で、次世代の情報技術である量子コンピュータの基盤として半導体中の電子スピンの注目されている。単一電子スピンは、状態として2つの準位(↑スピン、↓スピン)をとり、極低温の条件では情報源として良く定義されている。この単一の物理量を量子力学的に扱うことで、情報を並列に処理でき、指数関数的な計算量の増大が期待される重ね合わせ状態を作ることができるが、現状では量子状態の破壊を防ぐために、材料の開発から考え直されている。本研究では、これまで単一スピンに関しては着目されていなかった分子軌道を独自に利用し、重ね合わせ状態の準備時間を高速化することを目的としこれに成功した。これは、既存の材料系においても広く量子的な機能を活かせる新たな物理的手法の提供を意味する。

#### 〔研究経過および成果〕

電子スピンの2状態を量子力学的に扱う場合、エネルギーを失う縦緩和時間( $T_1$ )と、量子力学的な位相の整合性が取れなくなる横緩和時間( $T_2$ )が良く現れ、通常  $T_1$  の方が圧倒的に長い。量子コンピュータへの応用の観点では  $T_2$ 、とりわけ答えを得るために必要とする繰り返し測定毎に発生する揺らぎも取り込んだ位相緩和時間( $T_2^*$ )が議論の対象となる。本研究で用いる GaAs を材料とした場合は  $T_2^* = 20$  ns、最近開発が進められている Si の場合は  $T_2^* = 2$   $\mu$ s が報告されている。この開発により万能型量子コンピュータとして量子誤り耐性を持たせるために必要な 99% のスピン操作精確性が得られている。

一方で、精確性の議論でもう一つ大事な性質がスピン操作速度である。例えば、重ね合わせ状態を作る最も単純な量子演算を実現する時間( $T_{\pi/2}$ )は、微小金属コイルを隣接させることで発生する振動磁場を利用して  $T_{\pi/2} = 100$  ns 程度、特殊な形状をした微小磁石を用いて  $T_{\pi/2} = 2.5$  ns が報告されている。このよう

な追加の物質を使わない場合のスピン操作、つまり半導体材料内部の物理的な相互作用のみ用いる手法( $T_{\pi/2} = 200$  ns 程度と遅い)も存在しており、その将来的な利便性から本研究ではこの相互作用(固体特有のスピン軌道相互作用)を高めて利用することに注力した。

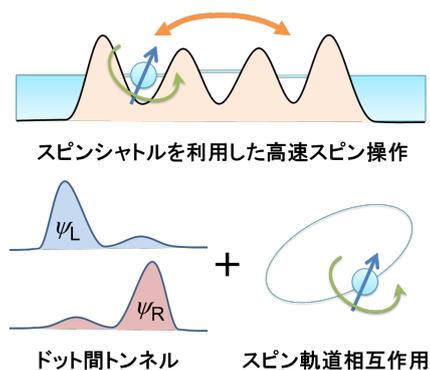


図1. 分子様軌道と内部スピン軌道相互作用を組み合わせたスピン操作の概念図

半導体中の電子スピンを単一レベルで閉じ込め、測定し、スピン操作するためには、適切に設計され、微細加工されたナノスケールの半導体-金属電極の構造、いわゆる「量子ドット」が必要である。20年以上

前から近年まで、量子演算用に開発されてきた量子ドットは、単一量子ドットや2重量子ドットで完結する量子操作を研究の対象としてきた。私の先行研究ではこの範囲を拡張し、3重や4重量子ドットで空間的に電子スピンを移動させる電気的な手法を研究し、最近ではスピンを移動させながら位相情報を98-99%保つ「スピンシャトル」法を見出した。この独自技術を活用して、先述のスピン操作速度の向上を目指した(図1)。

スピンシャトル法を、スピン軌道相互作用を介してスピン操作に用いるために、先行研究と比較して特に次の点を考慮した。1. スピン軌道相互作用を効果的に利用するため半導体結晶方位に対して適切に配置した1次元量子ドット、2. 電子スピン操作を可能にする共鳴周波数(NMRと似た原理)よりも十分に速い量子ドットの中のトンネル効果図。これらの新要素を取り入れるために、試料の再設計と、広範精密な電圧制御が必要であったため、本助成を活用させていただき、厚く御礼申し上げます。

実験は、量子測定用の極低温を長時間実現する無冷媒希釈冷凍機システムの上に、量子ドットの制御やスピンの操作・測定を可能にする、定電圧から20GHz帯までの多端子合波システムを中心とした環境を構築しながら利用させていただいた。

本実験は当初、2重ドット(例えるなら1電子水素分子軌道)での高速化されたスピン操作の兆しが得られていたものの、桁違いの高速化を得る段階になってスピン信号の消失や、理論的に想定していた相互作用の強さが実際には得られない振る舞いを見せていた。

継続して量子ドットの条件や印加電圧の環境などを調べ、数値シミュレーションとも照らし合わせていっ

た結果、予想に反して3重量子ドットになって初めて信号の消失なく40倍のスピン操作速度(Accelerated spin resonance)を達成することが明らかになった(図2)。

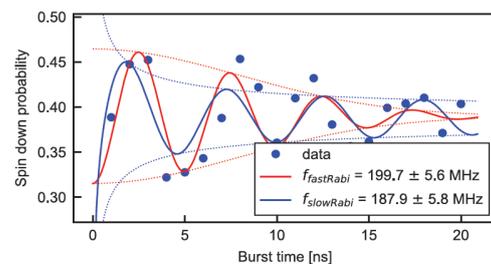


図2. 達成された桁違いに速いスピン操作

物理的には、電子スピンを移動させる距離に比例してスピン操作速度が向上するものと予測されていたが、今回得られた実験結果から初めてそれ以外の要因、例えば、印加高周波の熱が信号強度を減らす効果、反対に極端に強いトンネル効果によってその悪影響が緩和される効果(Noise robustness)、2重ではなく3重量子ドットの分子様の軌道にしか存在しない安定な領域による効果などを定量評価できた。

これらの性質は、様々な半導体材料やナノ構造における電子スピン制御の新たな指標となる可能性を秘めており、将来的な新奇物性研究や多体量子状態発現に寄与するものと考える。

[発表論文]

1. **T. Fujita**, Y. Matsumoto, A. Ludwig, A.D. Wieck, A. Oiwa, “Accelerated electric-dipole spin resonance in a quantum dot array” (2021). *Recent Advances in Semiconductor Qubits* 招待講演等
2. Y. Matsumoto, **T. Fujita** et al., “Noise-robust classification of single-shot electron spin readouts using a deep neural network” *npj Quantum Information* **7**, 136 (2021).

ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型紫外集積 APD の開発

研究者 鳥取大学工学部 准教授 阿部 友紀

〔研究の概要〕

紫外光検出器は医療、火災検知、天文学などの様々な分野での応用が期待されており、ワイドバンドギャップ半導体である GaN, SiC, ZnSe 等を用いたアバランシェ・フォトダイオード(APD)が次世代型の紫外光検出器として研究されている。本研究で開発する APD 素子は、ZnSe を増倍層とし正孔輸送材料の PEDOT:PSS を窓層に使用した有機-無機ハイブリッド構造で、低暗電流および低動作電圧かつ集積化に素子間分離加工を必要としないといった特長をもっている。本研究では、さらなる暗電流低減と増倍率向上を目指して最適増倍層膜厚を模索した。また、成長基板上に集積化した 10 素子 1 次元 APD アレイを作製したので報告する。

〔研究経過および成果〕

1. 増倍層膜厚の最適化

作製した PEDOT:PSS/ZnSe 有機-無機ハイブリッド紫外 APD の素子構造を図 1 に示す。n-GaAs 基板上に MBE 法を用いて i-ZnSSe/n-ZnSSe/n-ZnSe を成長させた。増倍層となる i-ZnSSe の膜厚は 0.3~0.9 $\mu\text{m}$ とした。その後スピコーティングおよびフォトリソグラフィで PEDOT:PSS を窓層としてパターンニングした。

図 2 に暗電流特性および増倍率特性の典型例を示す。増倍層膜厚を増加するにしたがい、ブレイクダウン電圧  $V_B$  は増加しているが電界強度は 1.0MV/cm(0.3 $\mu\text{m}$ )から 0.68MV/cm(0.9 $\mu\text{m}$ )に低減している。次に、各増倍層膜厚での暗電流値(ブレイクダウン電圧の 95%時)と最大増倍率を図 3 に示す。図 3 より増倍率厚 0.5 $\mu\text{m}$  の素子のブレイクダウン前の暗電流の平均値は 0.56nA であり、ほかの増倍層厚の素子より低い値を示した。最大増倍率は 0.5 $\mu\text{m}$  の素子で 2430 倍を観測した。また、最大増倍率の平均値についても増倍層厚 0.5 $\mu\text{m}$  の素子が最も高く、890 倍を達成した。以上より、最適化増倍層膜厚は 0.5 $\mu\text{m}$  であることが分かった。

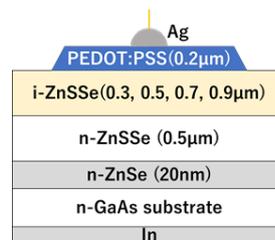


図 1: ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型 APD の構造

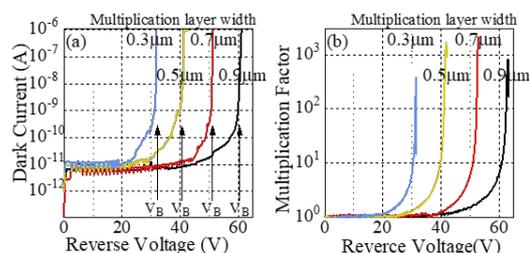


図 2: ハイブリッド APD の(a)暗電流および(b)増倍率

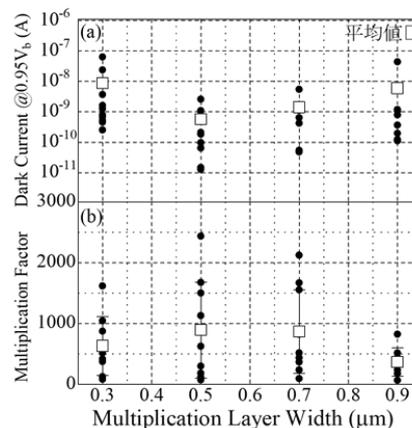


図 3: (a)暗電流(ブレイクダウン電圧の 95%時)および (b)増倍率の増倍層膜厚依存性

## 2. デバイスプロセスおよび APD アレイの特性

上述した APD 素子は、PEDOT:PSS 窓層上に Ag ペーストにて Au 線をボンディングしていたため、歩留まりが 6 割程度であった。そこで、PEDOT:PSS 窓層上に Au 外部電極を形成した APD アレイを作製した。

図 4 に作製した APD アレイの表面図、断面図、および全体像を示す。まず、PEDOT:PSS 窓層上に保護膜として SU-8 絶縁膜を形成し、その後フォトリソグラフィで Ti/Au 電極を形成した。Ti/Au 電極形成後の表面の顕微鏡写真は図 5 に示すように、パターン通りに形成できていることがわかる。

作製した APD アレイの表面写真と暗電流特性を図 6 に示す。用いた APD ウェハの特性より暗電流は大きいものの、微小なリークが発生している #07 を除いて約 28V でシャープなブレイクダウンを観測した。複数の APD アレイを作成したところ、歩留まりは 8~9 割であった。増倍率特性についても測定できた 6 素子の平均値は 320 倍を達成した。

[発表論文]

- 辻裕哉, 藤井祐太, 吉田健太郎, 中村海輝, 宮崎竜一, 山本隼平, 有本志優, 近添大輝, 又野陸哉, 阿部友紀, 市野邦男, 赤岩和明, "ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型紫外 APD アレイの開発", 2021 年度応用物理・物理系学会中国四国支部学術講演会, Gp-4, 2021 年 7 月
- 辻裕哉, 宮崎竜一, 中村海輝, 又野陸哉, 近添大輝, 有本志優, 阿部友紀, 市野邦男, 赤岩和明, "ZnSe 系有機-無機ハイブリッド紫外 APD アレイの開発~増倍層膜厚の最適化~", 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 26p-E301-4, 2022 年 3 月

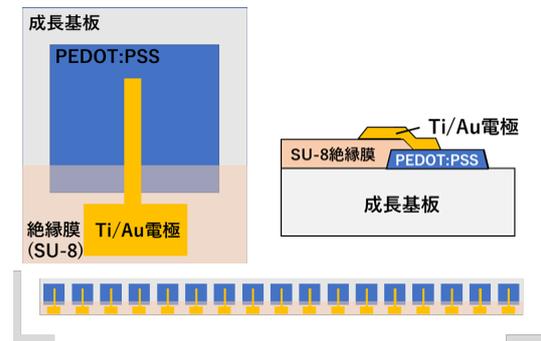


図 4: ZnSe 系ハイブリッド APD アレイの構造

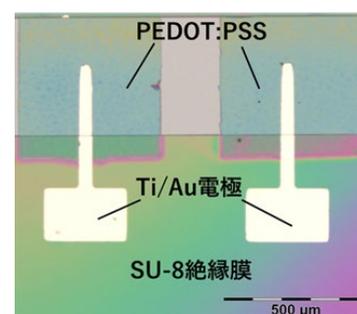


図 5: ZnSe 系ハイブリッド APD アレイの表面写真

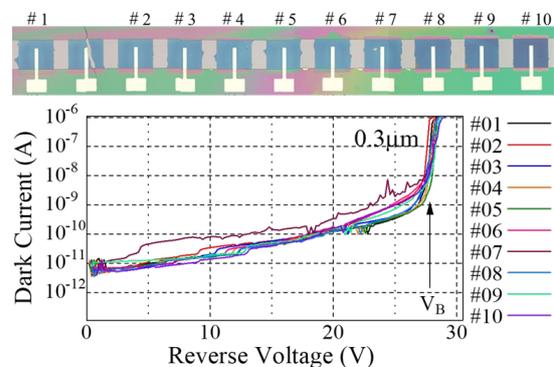


図 6: ZnSe 系ハイブリッド APD アレイの暗電流特性

【助成 38 -22】

## ナノスケール電気摂動効果を用いた新奇ナノ分光法の開拓

研究者 徳島大学 ポスト LED フォトニクス研究所 准教授 矢野 隆章

### 〔研究の概要〕

本研究では、ナノメートルスケールの空間分解能と分子機能制御能力を兼備する革新的ナノ分光計測手法を開発した。先鋭な金属プローブ探針を試料分子に接触させ、探針下の試料分子に局所的な機械的もしくは電氣的摂動を印加した。さらに、この金属プローブにレーザー光を照射し、プローブ先端に生成した光増強場をナノ光源として利用し、プローブ直下の分子のラマン散乱を検出することによって、摂動下の分子の機能・物性変化をその場分光分析した。

### 〔研究経過および成果〕

2000 年代中頃から、貴金属ナノ構造近傍に誘起された局所光増強場(局在表面プラズモン)を利用した表面・界面物性の高感度分光分析が国内外で精力的に行われている。このナノ分析法は、生体分子等のバイオ材料・量子構造等の半導体材料・触媒等のグリーン材料といった最先端材料のナノ分析に応用されている。我々はこの研究分野において高空間分解能でナノ分光センシング・イメージングを行う研究開発を先進してきた。しかしながら、従来のナノ分光計測法は全て物質固有の構造および物性を受動計測することにとどまっているのが現状であった。そこで本研究では、図 1 にしめすように、分子スケールの電氣的摂動効果をプローブとした分子物性・機能制御能を具備した新奇ナノ分光法を確立することを目標とした。

本研究の代表的な成果として、金属プローブ探針先端で分子に外的摂動効果を印加することによって異性化反応を誘起した事例を図 2 に示

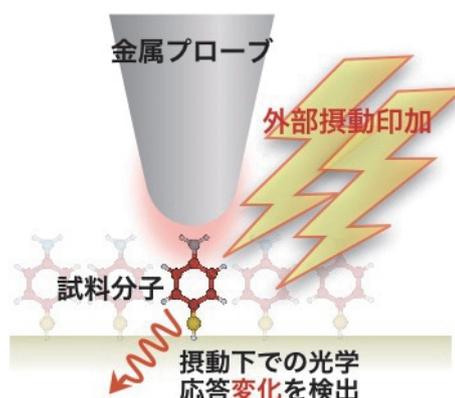


図 1 分子物性・機能制御能を具備したナノ分光法の原理

す。システアミン分子に銀探針を接触させてラマンスペクトルを測定するとトランス体由来の振動モード(ピーク)が支配的に観測されたが、1.2nN 程度の応力を印加するとトランス体のピーク強度が減少し、ゴーシュ体のピーク強度が増加した。この結果は、プローブ探針先端直下のシステアミン分子が、応力印加による機械的摂動効果によってトランス体からゴーシュ体に回転異性化したことを示している。応力印加効果を取り入れた量子化学計算解析を行った結果、

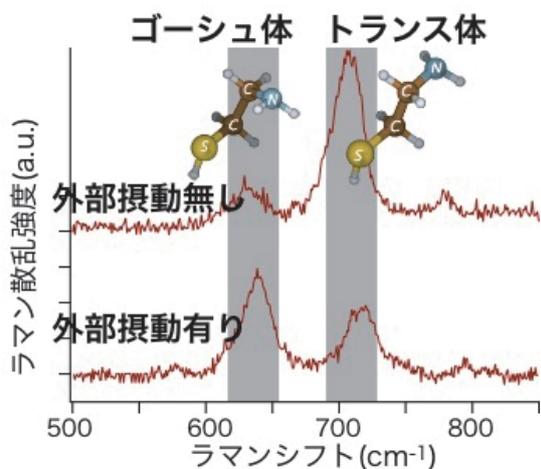


図2 外部振動下での異性化反応結果

機械的振動効果によってトランス体とゴースト体間のエネルギー障壁が変調されたことが原因で回転異性化が誘起されたことがわかった。

さらに、応力印加による機械的振動だけでなく、金属プローブ探針下で試料分子（アミノチオフェノール）に電圧を印加し電氣的振動を加えることによってアミノ基をニトロソ基に変化させることに成功した。また印加電圧に依存して可逆的な変化が誘起されることがわかった。本成果をまとめて論文投稿予定である。

上述の外部振動印加による分子機能・物性制御を実現するために、分光装置の改良も行った。具体的には、ピエゾスキャナと制御回路を用いて、金属ナノ探針-基板間に電圧を印加できるAFMヘッドを自作した（図3）。また、電圧印加時の誘導電流も測定できる機能を付加し、電気測定も行える仕様を実現した。さらに、不透明の導電性基板を使用するため、斜め上方から光を入射しラマン散乱を検出する入射・検出用光学系具体的には新規なレーザー走査型機構を開発した。また、レーザー光を照射した際の金属プローブ先端の温度を高精度で分光計測する手

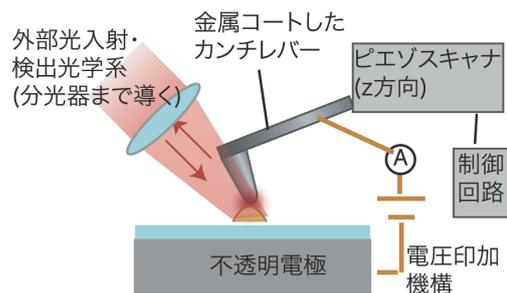


図3 外部振動印加機能を具備したナノ分光システム

法も開発し、試料に熱ダメージを与えることなくナノ分光計測を行うことが可能になった。さらに、金属プローブの形状を最適化することによって、単一分子検出可能な分光計測感度を実現した。金属探針の熱ドリフトを実時間補正する機構も独自開発し、長時間安定的にナノ分光計測可能なシステムを実現した。

以上の研究成果により、任意の場所とタイミングで分子機能を局所的に誘発・制御することが可能となり、今後は機能性ナノ材料開発・分子パターンニング技術への応用が期待される。

[発表論文]

1. Taka-aki Yano, Takuo Tanaka, "Plasmon-enhanced vibrational nanoscopy for molecular imaging and analysis," SPIE: Optics and Photonics, Aug. 1-5, 2021, San Diego. USA.
2. Ryo Kato, Taka-aki Yano and Takuo Tanaka, "Multi-modal vibrational analysis of blend polymers using mid-infrared photothermal and Raman microscopies," *Vib. Spectro.* **118**, 103333 (2022).

テラヘルツコムを用いたテラヘルツ単一素子イメージング

研究者 徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所 特任助教 時実 悠

〔研究の概要〕

多次元空間分散素子(Virtually imaged phased array: VIPA)は近赤外光の分光用途で開発され、現在では二次元スキャンレスイメージングに利用されている。VIPA 素子と回折格子を組み合わせる事で、周波数情報を空間情報に変換できる。テラヘルツ帯 VIPA を開発する事で反射光/透過光を分光計測する事で単一検出素子による、スキャンレスな二次元空間情報が取得可能である。

〔研究経過および成果〕

VIPA 素子は近赤外領域で通信用の分光素子として開発され、近年では光コムと組み合わせた二次元スキャンレスイメージングに利用されている。図 1 に示す様に VIPA 素子と回折格子を組み合わせることで、光スペクトルを空間的に展開可能である。展開された光をサンプルに照射し、反射光/透過光を単一素子検出器で取得する。検出光を分光する事でサンプル面での空間情報を再生可能である。これまでの研究では近赤外デュアルコムを光源に用いて顕微鏡応用がなされている。本研究ではテラヘルツ時間分光分光 (THz-TDS)を用いた VIPA イメージングを目標とする。

これにより単一素子検出器を用いたスキャンレス THz イメージングが可能となる。このため、THz 帯で動作可能な VIPA 素子の開発を行った。

1. THz-VIPA 素子の数値計算による設計

THz-VIPA の設計を行い Q 値の評価を行なった。THz-VIPA を構成する共振器ミラーとしてテラヘルツ波を一部透過一部反射可能な高抵抗シリコンと金属ミラーのパラメータを用いた。周波数を共鳴トンネルダイオードの周波数である 0.43 THz に設定し、透過特性を計算したところ、角度、周波数依存性を持つ共鳴が確認できた。またこれらのモードでの Q 値は約 10

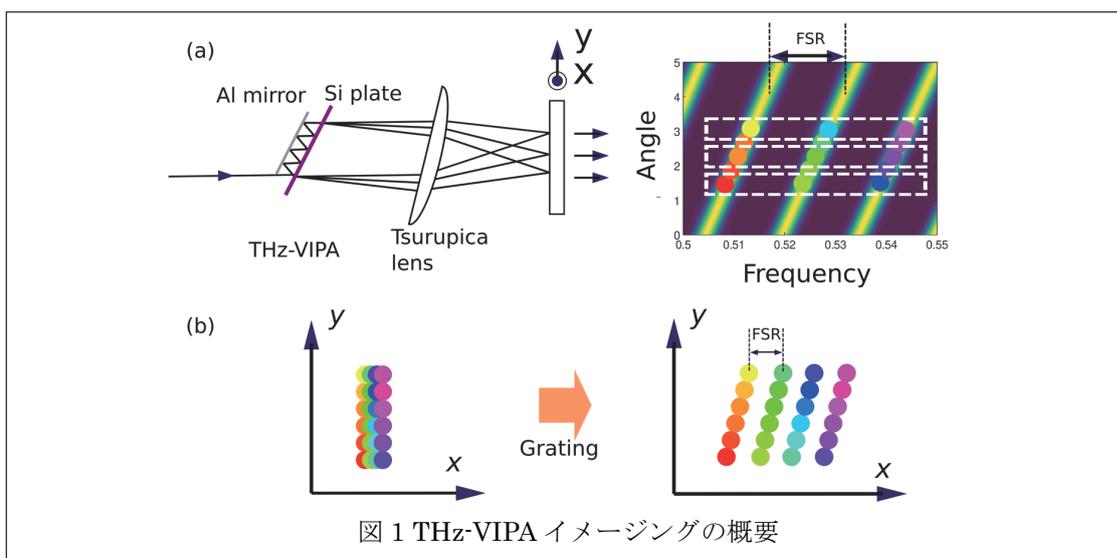
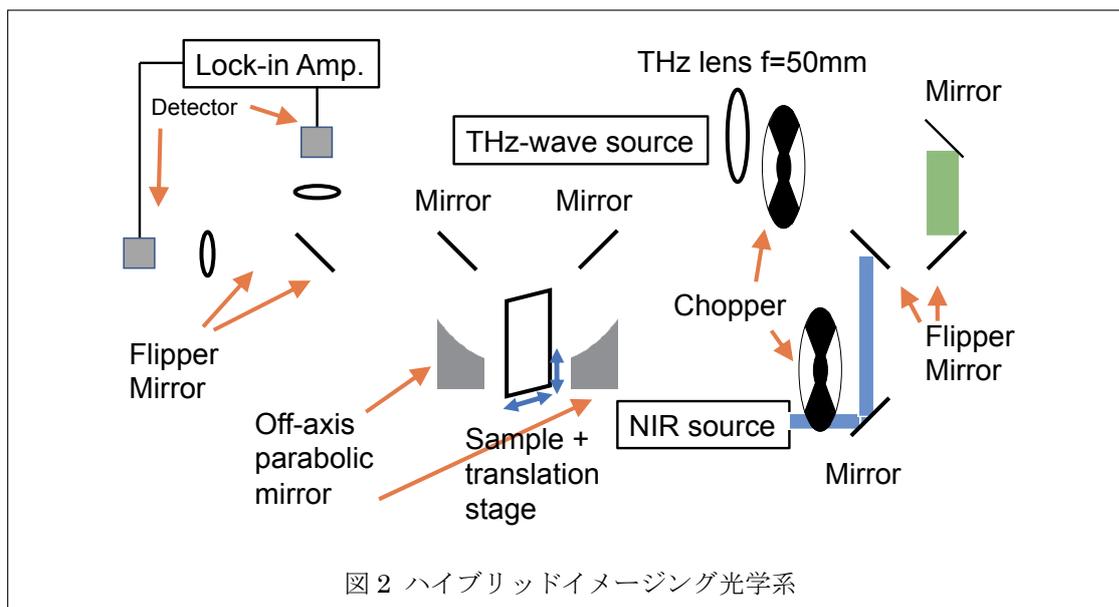


図 1 THz-VIPA イメージングの概要



以下と見積もられた。近赤外 VIPA は 100 程度であるのに対して、低い値が得られた。これは高抵抗シリコン板のテラヘルツ反射率が低い為である。フィネスの低下は水平方向の分解能の低下につながる。

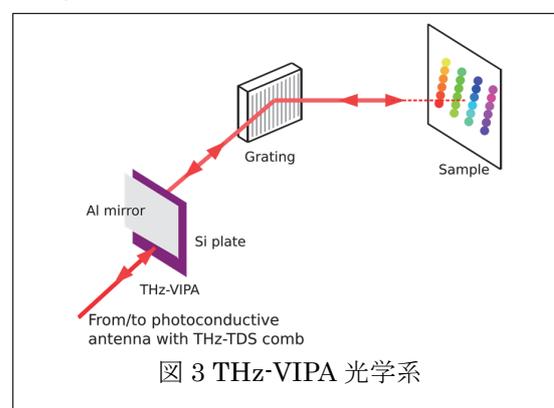
## 2. THz-近赤外ハイブリッドイメージング光学系構築

近赤外帯の VIPA の特性は既知であるが、THz 帯 VIPA 特性については未知である。実験によって両者を同等の光学系で評価し、設計にフィードバックをかける事が THz イメージング系構築への近道である。このため、THz-近赤外ハイブリッドイメージング光学系を構築した[1]。光学系は、THz 波と近赤外光が光学系を共用しており、フリップパーによって切り替えが可能である。THz 波と近赤外光が THz 波の発生には共鳴トンネルダイオード(0.43 THz)を用い、近赤外光の発生には外部共振器型半導体レーザー(186.7 THz, 1.607  $\mu\text{m}$ )を用いた。

THz 波と近赤外光は波長が 2 桁以上異なるため、共用光学系では波長依存性のある誘電体膜ミラーやレンズを使用できない。このため金属ミラーと放物面鏡

を用いた。光学系を確認するため、サンプル面に移動ステージを設置し、イメージングを行った。THz 波と近赤外光で同様の画像を取得可能であることを確認した。この光学系における空間分解能は THz 波で 1104  $\mu\text{m}$ 、近赤外光で 44  $\mu\text{m}$ 、であった。

今後は構築した光学系の近赤外光源を THz-TDS、光コムに交換する事で検証を進める。さらに図の THz-VIPA 光学系を組み込むことによって THz-VIPA と近赤外 VIPA の比較を行い、設計にフィードバックをかける。



[発表論文]

1. Y. Tokizane, *et. al*, Appl. Opt., **60**, B100 (2021).

【助成 38 -24】

ベイズ推定に基づく適応的グループテストのアルゴリズム開発:

検体検査の効率化と誤り訂正

研究者 総合研究大学院大学 複合科学研究科 統計科学専攻 准教授 坂田 綾香

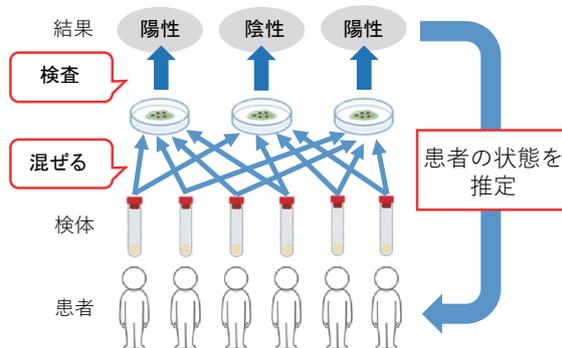
〔研究の概要〕

血液学的検査や遺伝子検査などの検体検査は、多くの医療機関において日常的に行われている。通常時は、患者数に対して十分な医療資源が用意されているが、一方で感染症の爆発的流行が起きた場合、膨大な患者集団を相手に、同じ検査を何度も行う必要性が生じる。検査を速やかに行い、患者に適切な処置を施すことが必要であるが、大きな時間的・資源的コストを伴う検体検査は、医療のボトルネックとなりうる。そこで 1943 年に経済学者の Robert Dorfman はグループテストと呼ばれる効率的な検査法を提案した。この方法は、患者から採取した検体を混ぜ、混ぜ合わせた検体に対して検査を行う方法であり、混ぜ合わせた検体数を患者数より少なくすることで、検査回数を減らすことができる。本研究では、このグループテストの実用化において重要な数理的課題の解決に取り組んだ。

〔研究経過および成果〕

【はじめに】

グループテストとは、図1に示すように患者から採取した検体を混ぜ合わせ、混ぜ合わせた検体(プール)に対して検査を行う方法である。プールの数は患者の数より少なく設定することで、個別検査よりも検査数が少なくなるように抑える。しかし、プールに対する検査結果から患者の状態を推定するための数学的プロセ



〔図 1〕 グループテストの概略。6 人の患者の状態を 3 回の検査から特定する例。

スが必要となる (図 1)。この推定法について、これまでさまざまな研究が行われてきた。

【研究目的】

実際の検体検査にはある確率でエラーが起こる。このエラーは検査の検出限界や、検体採取の失敗などに起因する。従来研究では、数学的に理想的な状況下で必要なプール数の見積りなどの議論がされてきた。一方で本研究ではグループテストの実用化を目指すという立場から、検査に確率的エラーが含まれることを考慮して推定プロセスをベイズ推定により定式化して、その場合に妥当な計算量で推定を実行するアルゴリズムの開発を目指す。また、グループテストの性能はプールの作り方にも依存するが、適応的グループテストと呼ばれる、これまで得られている検査結果を踏まえたプールの作り方をベイズ推定の枠組みで定式化し、近似アルゴリズムを導入して計算コストを削減する。

## 【研究成果】

### (1) 「不確実性」を用いた適応的グループテスト

広く用いられる適応的グループテストは binary splitting と呼ばれるものである。この方法では、陰性と判断されたプールに属す患者を非感染者と確定させ、一方で陽性と判断されたプールを分割し、再検査する方法である。陰性のプールに属す患者を再検査しないことが、検査数の削減に大きな効果を持つ。しかし検査結果が偽陰性であった場合も二度と検査されないため、検査に誤りが含まれる場合には偽陰性の修正に限界がある。そこで本研究では、ベイズ推定の枠組みで、予測分布を用いた適応的テスト方法を開発した。この方法を用いると、グループテストによる検査の誤り訂正能力が極めて高くなることを示した。(発表論文 1)

### (2) カットオフ値評価について

ベイズ推定では、患者の状態に関する事後分布を元に推論が行われる。事後分布は連続的な値をとるが、一方で患者の状態(陽性=1, 陰性=0)は離散的な値である。したがって、グループテストにおいてベイズ推定を用いる場合には、事後分布から離散変数を決定することが必要である。このような連続値から離散値を決める問題は、医学検査のさまざまな場面で現れる。例えば、ある疾患のマーカーの血液内の量から、その疾患に罹患しているかどうかを決めるには、ある閾値(カットオフ値)を超えれば罹患しているとし、超えなければ罹患していないと決める必要がある。カットオフ値に依存して偽陰性と偽陽性が決まるが、これらの値が許容できる範囲となるようにカットオフ値が決められることが多い。しかし、偽陽性と偽陰性からカットオフ値を決めるには、患者の状態がすでにわかっている必要がある。つまり、偽陰性の定義は「陽性の人の中で

誤って陰性と判断された人の割合」であるため、これを正しく評価するにはあらかじめ患者の状態がわかっている必要がある。偽陽性も同様である。一般には、gold standard と呼ばれる、患者の状態を高い精度で特定する標準的検査手法と比較することで、任意の検査におけるカットオフ値を評価することが多い。しかし、新興感染症など、そのような標準的検査手法がない場合には gold standard との比較からカットオフ値を決定することができない。

本研究では、ベイズ決定理論の枠組みをグループテストに適用することで、患者の状態が未知の場合でも、偽陰性と偽陽性の推定値からカットオフ値を決定できることを示した。また、グループテストにおいて既存研究で用いられていたカットオフ値は、偽陽性を優先的に抑える効果を持ち、結果としてテストの偽陰性が大きくなってしまいう問題点を明らかにし、その修正法を提案することに成功した(発表論文 2, 3)。

[発表論文]

1. Ayaka Sakata, “Active pooling design in group testing based on Bayesian posterior prediction”, *Physical Review E* **103**, 022110 (2021)
2. 坂田綾香, 樺島祥介 「ベイズ的グループテストのカットオフ値評価と ROC 解析」 統計数理 (採択決定)
3. Ayaka Sakata and Yoshiyuki Kabashima, “Decision Theoretic Cutoff and ROC Analysis for Bayesian Optimal Group Testing”, arXiv:2110.10877 (2021) (IEEE Transaction on Information Theory に投稿中)

【助成 38 -25】

表現力豊かな音声の声質を決める声門流波形と声道伝達関数特徴の解析

代表研究者 富山県立大学工学部 准教授 MOKHTARI Parham

共同研究者 富山県立大学工学部 講師 森川大輔

共同研究者 富山県立大学工学研究科 大学院生 平野雄大

共同研究者 富山県立大学工学研究科 大学院生 河口竜馬

〔研究の概要〕

This research aimed towards automatic analysis and synthesis of speech that is rich in expressivity. In line with the classical source-filter model of speech production, we sought improvements in the performance of algorithms designed to separate the influence of the glottal flow and the vocal-tract on the speech signal. We improved a formant-estimation algorithm based on rhamonic subtraction, and investigated the effects of pre-emphasis on glottal flow estimation. We also recorded and will soon release version 1 of a Japanese database of laryngeal voice qualities.

〔研究経過および成果〕

Aiming toward physiologically relevant analysis, modelling and synthesis of expressive human voices, our research prioritizes automatic estimation of vocal-tract resonances (formants) and the laryngeal source (glottal flow) from the acoustic speech signal.

For automatic estimation of the formants, we improved a previously proposed rhamonic subtraction algorithm [1]. Formant estimation accuracy usually degrades for speech at higher than normal fundamental frequency ( $f_0$ ). One reason for this degradation is that the harmonics of high- $f_0$  speech are more separated from each other and do not properly represent the spectral envelope. Recent previous work by other researchers proposed a method of suppressing the effect of the harmonics by subtracting the corresponding rhamonics in the

cepstral domain. However, we noted that rhamonics often fail to be removed properly because of the sample-to-sample variation in the cepstrum. We then improved the algorithm, by extending the length of the cepstral windows used to suppress the rhamonics. As a result, we showed more accurate estimation of formants on a publicly available dataset (OpenGlott Repository 3). We also constructed a GUI (Fig. 1) to visualize both conventional and new formant estimation results.



Fig.1 Formant Estimation GUI [1]

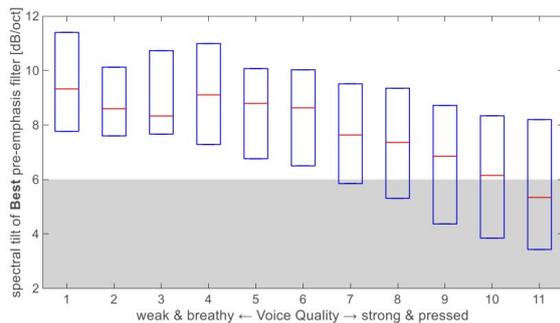


Fig.2 Best pre-emphasis vs voice quality [2]

For automatic estimation of glottal flow, Mokhtari had previously proposed IOP-IAIF, where the speech signal is first adaptively pre-emphasized. The aim of IOP (iterative optimal pre-emphasis) was to make the overall spectral slope relatively flat, so that the next step of spectral envelope estimation could more accurately model the vocal-tract transfer function. Here, we noticed that even IOP-IAIF has difficulty in yielding a reasonable estimate of the glottal flow for speech sounds that are far from a *modal* voice quality. We therefore conducted a basic investigation [2] to find the best amount of pre-emphasis needed to most accurately estimate the glottal flow in a range of voice qualities from weak or breathy to strong or pressed. For this, we used speech samples kindly provided by Dr. Brad Story (USA) and synthesized by a computational vocal-tract model, for which the glottal flow is known (the glottal flow is not directly measurable in natural human speech). The results, part of which are shown here in Fig. 2, indicated that breathy voice requires a greater amount of pre-emphasis (up to nearly 12 dB/oct, which cannot be achieved by conventional 1<sup>st</sup>-order methods, as indicated by the grey area in Fig. 2), while pressed voice can require even less than 6 dB/oct. We also

reported the dependence on vowel type and  $f_0$  [3].

Finally, in this project we aimed to record a Japanese multi-speaker database of laryngeal voice qualities, that could be useful for both basic and applied research in this field. Due to restrictions imposed by the ongoing Covid-19 situation in Japan during 2021, recordings were delayed until late in the year. Nevertheless, as of this writing, version 1 of the database includes the voices of 16 Japanese talkers (10 male and 6 female) in 9 laryngeal voice qualities and 3 vocal efforts. The speech data were carefully recorded with a reference microphone setup in a sound-proof room, then manually segmented and voice-quality labelled [4]. We plan to release the data online for the benefit of the research community.

[発表論文]

1. 河川竜馬、モクタリパーハム、森川大輔(2021.6) 「ラーモニック減算法を用いたフォルマント周波数の自動推定法の検討」、情報処理学会研究報告、Vol.2021-SLP-137 No.22、5 pages.
2. 平野雄大、モクタリパーハム、森川大輔(2021.9) 「プリエンファシスの適用回数が IAIF に基づく声門流推定の精度に与える影響」、日本音響学会講演論文集、939-940.
3. 平野雄大、モクタリパーハム、森川大輔(2021.9) 「音声のスペクトル傾斜モデリングが IAIF に基づく声門流推定の精度に与える影響」、日本音響学会音声研究会資料 Vol.1 No.2 SP-2021-26、135-137.
4. Mokhtari P., Morikawa D. (2022.3) “Introducing a Japanese multi-talker database of laryngeal voice qualities,” 日本音響学会講演論文集.

## 【助成 38 -26】

### 繊維人工筋で駆動される手指用装着型アシスト装置の試作と制御

研究者 広島市立大学大学院情報科学研究科 准教授 小寄 貴弘

#### 〔研究の概要〕

繊維人工筋は、ナイロン繊維をコイル形状に加工することによって作製できるアクチュエータである。この人工筋は、加熱により筋肉のような収縮運動を生じ、柔軟、高い出力重量比、低コストといった特長を備える。しかしながら、繊維人工筋には、収縮過程の特性と伸長過程の特性の間にヒステリシスが発生し、制御性能に大きな影響を及ぼす問題がある。そこで本研究では、繊維人工筋を手指用装着型アシスト装置へ応用し、制御システムを構築するため、繊維人工筋が持つヒステリシス特性に対し、機械学習手法の一つである Extreme Learning Machine を用いたモデリングを試み、得られたモデルの性能を実験により検証した。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では、フロロカーボンとナイロンのハイブリッド繊維と、比較的径が小さく、銀メッキが施された導電性ナイロン糸を束ねてコイル形状に加工し、熱処理を行うことにより、高強度、軽量、低コストといった特長を備え、かつ、通电による加熱で駆動できる繊維人工筋を製作した。したがって、入力電圧の大きさに繊維人工筋の変位を調節可能である。しかしながら、入力電圧と繊維人工筋の変位の関係にはヒステリシスが生じ、制御精度に影響を及ぼす。

これまでに、繊維人工筋のヒステリシス特性に対し、数式モデルを適用した研究があるが、ヒステリシスループの形状が動作条件に依存して変化するため、学習能力を備えたモデルが有効と考えられる。一方、ピエゾアクチュエータや McKibben 型人工筋のヒステリシスに対し、機械学習を用いたモデリングを行った研究がある。そこで本研究では、Extreme Learning Machine (ELM) を用いて繊維人工筋のモデリングを試みた。

ELM は、Single-hidden Layer Feedforward neural

Network (SLFN) の一種である。ELM では、入力層と隠れ層間のパラメータはランダムに設定する。また、隠れ層と出力層間のパラメータは擬似逆行列により解析的に求めることができる。本研究では、繊維人工筋に印加する電圧を入力、繊維人工筋の変位を出力とし、過去の入出力履歴から、現在時刻の出力を推定できるように ELM を学習させる。

本研究で構築した実験装置を図 1 に示す。作製した繊維人工筋の両端に電極を取り付け、一端をフレームに固定し、他端に重りをつり下げた。繊維人工筋を駆動するための電圧は、PC から D/A 変換器を介してアンプに出力され、繊維人工筋へ印加される。織

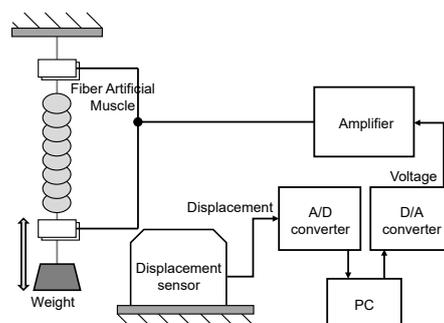


図 1 実験装置

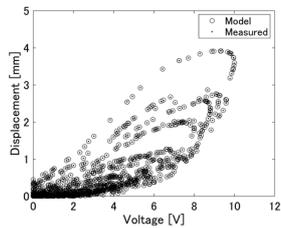


図2 実験1の結果

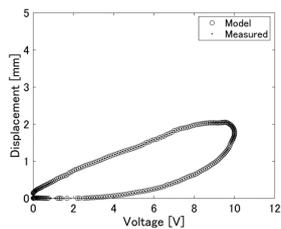


図3 実験2の結果の例

維人工筋の変位はレーザ変位センサで検出され、A/D変換器を通してPCに取り込まれる。

実験1では、繊維人工筋に加える電圧を正弦波状とし、静的な特性を想定して周期を長く設定し、振幅を増加させたときの変位を測定した。得られた測定データを、ランダムに学習用データセットと検証用データセットに分け、学習用データセットを用いてELMの学習を行い、検証用データセットを用いて誤差を算出した。測定値とモデル出力の誤差の評価にはMAE (Mean Absolute Error)を用いた。

本研究のモデリング方法を適用して学習を行い、検証用データセットに対して推定を行った結果を図2に示す。図2では測定値を●で、モデル出力を○で示している。また、モデリング誤差を表1に示す。結果より、モデル出力は測定値を近似できており、ELMにより繊維人工筋のモデリングが可能であることが確認できた。

次に、実験2では、繊維人工筋に加える正弦波状入力電圧の振幅を固定し、周期を増加させた場合

表1 誤差と学習時間

	実験1 誤差 [mm]	実験2 誤差 [mm]	学習時間 [ms]
ELM	$2.54 \times 10^{-3}$	$2.46 \times 10^{-2}$	3.21
SVM	$6.45 \times 10^{-3}$	$5.28 \times 10^{-2}$	88.1

(すなわち動作速度を変えた場合)の変位を測定した。測定結果からテスト用データセットを作成し、実験1で学習済みのELMに与え、誤差を算出した。得られたモデル出力と測定値の一例を図3に、モデリング誤差を表1に示す。図3より、動作速度を変えた場合のデータに対しても、精度良く近似できている。

また、実験1、実験2において、ELMの比較対象としてSupport Vector Machine (SVM)を用いた。性能比較のため、SVMを用いてモデリングを行い、実験1と実験2の誤差と学習時間を求めた結果も表1に示している。表より、ELMのほうが、特に学習時間がかなり短いという結果を得た。以上の結果に基づき、本研究のELMに基づくモデリング手法を適用して得られるモデルを、繊維人工筋の制御に応用するとともに、学習をオンライン化し、モデリングと制御を同時に行うシステムを開発中であり、図1の装置により基本性能は確認できた。

今後は、本研究で得られた結果を、繊維人工筋を用いた手指用装着型アシスト装置へ発展させる研究を進める。

[発表論文]

1. 小寄貴弘, 岡本亮, 李仕剛, ヒステリシス特性を有する繊維人工筋の機械学習モデル構築, 第30回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 45-46, (2021)

## 【助成 38 -27】

### リポソームとナノフォトニック共振器のインタフェース

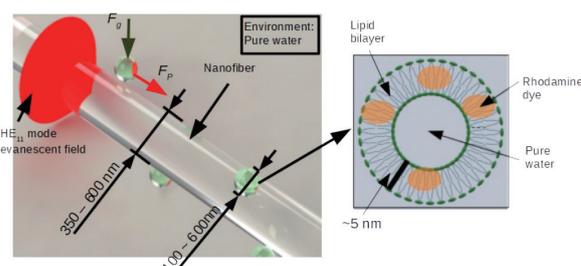
研究者 東京理科大学 理学部 准教授 Sadgrove Mark Paul

#### 〔研究の概要〕

Liposomes are biological nano-particles made from lipid bilayers. Liposomes have the same structure as cells, but they do not have a cell nucleus. For this reason, liposomes make an excellent test platform to develop manipulation techniques for living cells, and other bio-particles such as exosomes. In this research project, the applicant's goal was to create a nanophotonic platform to **i)** Transport and trap liposomes on a nanowaveguide (optical nanofiber) and **ii)** couple the liposomes to a nanowaveguide cavity. These novel techniques could provide new opportunities for diagnosis of diseases, or the realization of biological systems in quantum regimes.

#### 〔研究経過および成果〕

**Background:** Liposomes are biological nano-particles made from lipid bilayers as shown in Fig 1. Liposomes have the same structure as cells, but they do not have a cell nucleus. For this reason, liposomes make an excellent test platform to develop manipulation techniques for living cells, and other bio-particles such as exosomes. Use of nanowaveguides will allow the development of integrated optical circuits for trapping, transport and analysis of nanoparticles. This method could allow new miniaturized technology for analysis of bio-nanoparticles. However, for bio-nanoparticles such as liposomes, two large problems exist: **i)** particles adhere to the nanowaveguide surface and **ii)** particles are very difficult to trap because of very low refractive index. In this research project, we proposed the creation of a nanophotonic platform to **i)** Transport and trap liposomes on a nanowaveguide (optical nanofiber) (see



**Figure 1 :** *Concept of trapping and transporting of liposomes using an optical nanofiber.*

Figure 1) and **ii)** couple the liposomes to a nanowaveguide cavity. Below, we will detail our achievements related to this project.

#### Research results

In December 2021, we reported the first use of an nanowaveguide (an optical nanofiber) to transport Liposomes. These liposomes had a sub-micron diameter (size distribution shown in Fig. 2(a)), making them the same size as liposomes used for typical applications in medical drug development, etc. Our method of manipulation is very simple, as shown in Fig. 2(b). An optical nanofiber (diameter 300 ~ 550 nm)

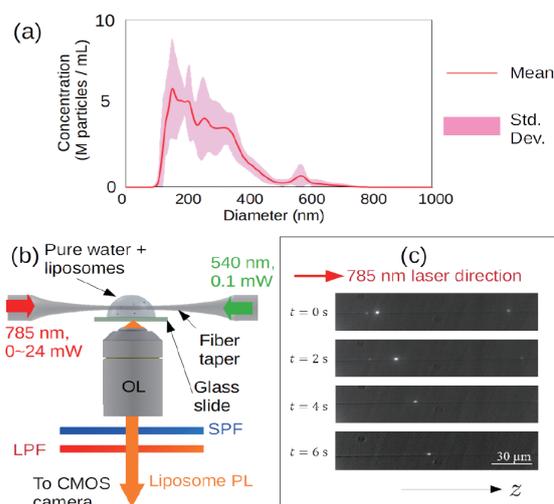
made from a commercial optical fiber is placed in a droplet of water containing liposomes. The liposomes are optically trapped in the evanescent field of the nanofiber by injecting a 785 nm laser into the fiber. A 540 nm laser is also introduced to make the dye-tagged liposomes photoluminescence (PL) so that they can be imaged. Optical trapping and transport are viewed as shown in Fig. 2(c) where a liposome moves along the fiber in the same direction as the optical mode. These images are focused using an objective lens (OL) and recorded on a standard CMOS digital camera. Our results showed that thinner nanofibers performed more efficiently to trap and transport liposomes, with 360 nm diameter fibers showing higher transport speeds and longer trap times compared to a 550 nm diameter fiber. We also analyzed the experiment theoretically, and our results suggested that most of the observed behavior could be explained by optical forces as opposed to heating effects. These results were reported in *Optics Letters* in 2021 [1] and at conferences in the same year [2–4]. Our future plans involve the use of bottle resonators which we realized in 2021 [5]. We plan to trap liposomes near to the resonator using a taper trap [6].

[発表論文]

1. Optical transport of sub-micron lipid vesicles along a nanofiber T Yoshino, D Yamaura, M Komiya, M Sugawara, Y Mitsumori, M Niwano, A Hirano-Iwata, K. Edamatsu, M Sadgrove, *Optics Express* **28**, 38527–38538 (2020).
2. Liposome manipulation using the evanescent field of an optical nanofiber M Sadgrove, A Suda, R

Matsuyama, M Komiya, T Yoshino, D Yamaura, Yasuyoshi Mitsumori, K Edamatsu, A Hirano-Iwata, *Optical Manipulation and Its Applications 2021*, AW4D. 4 (2021).

3. Some topics in nano-particle transport using nanofibers M Sadgrove, Metanano (2021).
4. Optical manipulation of low index contrast nanoparticles with a nanofiber Akiyoshi Suda, Risa Matsuyama, Mika Shimura, Maki Komiya, Ayumi Hirano-Iwata, Mark Sadgrove, *Pacificchem* (2021).
5. 共振器を用いたキラルな単一光子源に向けて 白根森斗, Mark Sadgrove, *日本物理学会 2021 年秋季大会* (2021).
6. Optically induced sieve effect for nanoparticles near a nanofiber taper M Sadgrove, T Yoshino, M Sugawara, Y Mitsumori, K Edamatsu *Physical Review Applied* **16**, 044034 (2021).



**Figure 2** (a) *Liposome size distribution.* (b) *Experimental setup.* (c) *Frames of movie showing liposome trapping and transport.*

## 【助成 38 -29】

### 磁場中多角度光散乱計測システムの開発と痛風診断装置への確立

研究者 室蘭工業大学 助教 武内 裕香

#### 〔研究の概要〕

痛風の原因となる尿酸ナトリウム結晶は最大 0.5 T の磁場中で配向する。結晶懸濁液は磁場をかけると光の透過率や反射率が変化する。この現象を診断に利用するには、結晶に励起光を照射した時の多角度からの散乱光の情報を収集する必要がある。本研究では自動ステージを用いた磁場中多角度光散乱計測システムを構築し、多角度からの散乱強度分布と結晶混濁液の濁度の関係に着目し実験を行った。観測のための光検出器を高感度のものに交換した結果、試料の濁度によって磁場の効果、およびその角度分布は大きく異なることが明らかになった。光強度変化を大きく検出したい場合、検出角度は前方側が適している。また、前方からの検出が難しい場合、後方側からの検出が望ましい。

#### 〔研究経過および成果〕

現在、痛風の診断は患部から穿刺して顕微鏡で観察する方法が主流であるが、患者に負担をかけずに診断を行うためには、原因物質である尿酸ナトリウム(MSU)結晶の存在を非侵襲的に確認する方法が求められている。先行研究においてMSU結晶が、永久磁石程度の静磁場下で「磁場配向」することを明らかにし、結晶の懸濁液に光を透過すると、磁場のON-OFFで光強度が変化することを報告した。この現象を利用し、生体透過性の高い近赤外光を体外から照射し磁場で疾患が疑われる部分の光強度を変化させ、体内の結晶の有無を評価することを目指している。診断の際、近赤外光を対象の関節に照射するが、測定領域が厚いと検出された光は透過できないため散乱光を考慮する必要がある。MSU結晶のサイズはマイクロオーダーであり、入射光の波長と比較して大きい粒子のため、前強い散乱を起こすミー散乱によって説明される。さらに、MSU結晶は構造異方性が高いため、球形

粒子のそれとはまた異なり、配向状態においてはさらに複雑である。本研究では自動ステージを用いた磁場中での多角度光散乱計測システムの開発および異方性結晶がもたらす散乱強度分布を明らかにする。特に、散乱強度分布と結晶の濁度の関係に着目した。

まず、磁場中での多角度光散乱計測システムを構築した。図1(a)に示すように円筒形のセルホルダーに、光ファイバーを用いてセルに励起光を導入し、散乱光を検出器に導いた。セルホルダーは静的光散乱法の装置を参考にしており、光ファイバーを多角度(10方向)に配置した。レーザー光(785 nm)と光ファイバーをセルホルダーに接続し、懸濁液中の結晶に照射し、入射光を試料に平行に当てて散乱光を検出した。試料からの散乱光は、 $\theta = 10^\circ \sim 150^\circ$ の位置に入射方向から15°間隔で10本の光ファイバーを設置して検出した。セルホルダーを極間60 mmの電磁石中に設置し、磁場印加前後の散乱光を計測した(図1(b))。図1(c)に示すように

自動ステージでファイバーホルダーを等間隔に移動させることにより、全角度範囲からの散乱光を1個の光検出器に導き、短時間でほぼ同時に検出を行った。光電変換した信号は、アンプ、デジタルマルチメーター、およびパソコンを使用して計測した。試料の透過率が67%、24%、2.4%、0.3%に調製された4つの試料を用いて実験を行った。

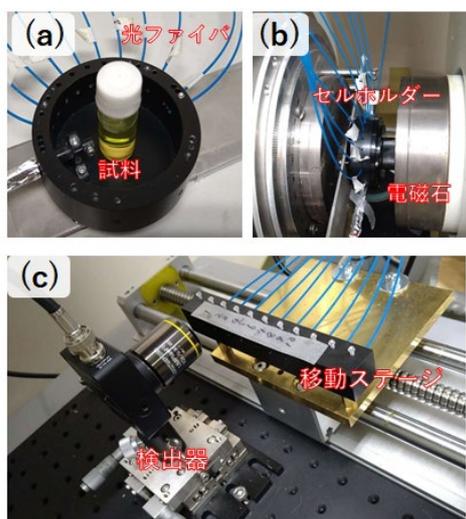


図1 磁場中多角度光散乱計測システム

図2は、磁場を印加しない状態で、入射光を照射したときの散乱強度分布である。入射光の波長に比べて大きい粒子では、回折による前方散乱が生じ、その強度は前方、側方、後方の各方向で一様ではなく、一般には粒径に対して波長が極めて小さい場合はほぼ前方にのみ光が散乱する。これは Mie 散乱と呼ばれるが、得られた散乱光強度の角度分布も Mie 散乱に分類されるものであった。ただし、濃厚溶液の場合、散乱強度は角度による依存性は小さくなった。これは多重散乱の影響で Mie 散乱の理論を適用できていないためと考えられる。

図3は、磁場(0.5 T)を印加した場合の散乱光強度を、無磁場の場合(図2)と比較してプロットしたものを示

す。磁場の効果は、試料の濁度によってその効果が異なった。透過率 4.6, 24, 67%の試料では前方で磁場印加により光強度は大きく減少し、角度依存性は比較的同じ傾向を示した。一方、透過率 0.3%の試料では、他の試料と比較すると、特に前方でその効果は大きく異なり光強度は増加した。以上より、光強度の変化を大きく検出したい場合、前方からの検出が適しているが、その際、試料により光強度の増減は異なる。また、側方からの検出は散乱強度も弱く、濁度によっては磁場効果も弱くなるため、前方からの検出が難しい場合は、後方からの検出についても検討する余地があることがわかった。

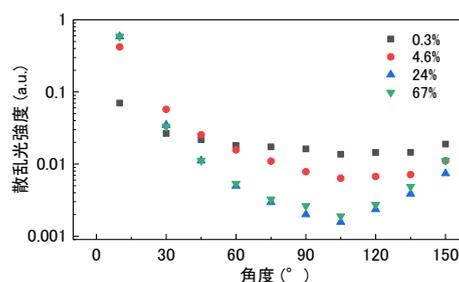


図2 無磁場下の散乱光強度の角度分布

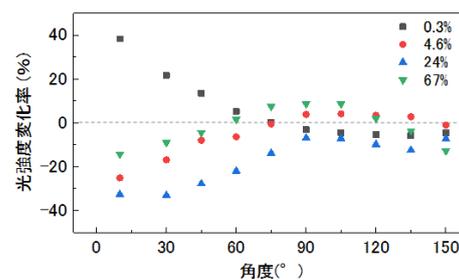


図3 磁場印加時の光強度変化の角度依存性

[発表論文]

1. 武内 裕香、浜崎 亜富、松田 瑞史

“弱磁場を利用した痛風診断の可能性”

第 82 回応用物理学会秋季学術講演会、講演論文集、12p-N324-8

## 【助成 38 -30】

### 骨組織の材料物性に及ぼす骨髄機能の解明と、骨粗鬆症の治療に向けた応用

研究者 東北大学大学院医学系研究科 分子代謝生理学分野

日本学術振興会 特別研究員 PD

荒井 誠

#### 〔研究の概要〕

本研究では長期的な方向性として、超高齢化社会を迎え今もなお増え続けている骨粗鬆症や骨折を抑え、健康寿命を延伸することを見据えている。そしてそのために、骨組織の強度を構成する因子として骨組織内部の骨髄、特に骨細胞の源である間葉系幹細胞に注目して、その役割を調べることを目的とした。骨折などのために手術(大腿骨頭置換術など)を受ける患者を対象として、手術の際に摘出される大腿骨近位部を検体として使用し、そこから間葉系幹細胞を単離・培養することで、個々の患者由来の間葉系幹細胞を得た。そしてその細胞を用いて網羅的な遺伝子発現解析を行った。今後は、年齢、既往歴、骨密度、血清マーカーなど同時に取得している臨床情報と遺伝子発現プロファイルとを統合することで、骨代謝・骨強度に関連する遺伝子や臨床的特徴を抽出することを計画している。

#### 〔研究経過および成果〕

骨粗鬆症とは、骨の脆弱性が増し、骨折の危険性が増大する疾患である。近年、その有病率は高齢化の進行とともに増加の一途をたどっている。

本研究では、超高齢化社会を迎え今もなお増え続けている骨粗鬆症や骨折を抑え、健康寿命を延伸することを長期的な方向性として見据えている。そしてそのために、骨の源である骨髄中の間葉系幹細胞に注目し、その機能を調べることを目的とした。

総合病院国保旭中央病院(千葉県旭市)において大腿骨近位部骨折や変形性股関節症のために股関節の手術を受ける患者(女性)を対象とした。患者・家族に研究の説明をし、同意を得た上で、手術の際に摘出される大腿骨頭を回収した(図1)。なお、当該機関における倫理審査委員会の承認は研究開始前に受けている。

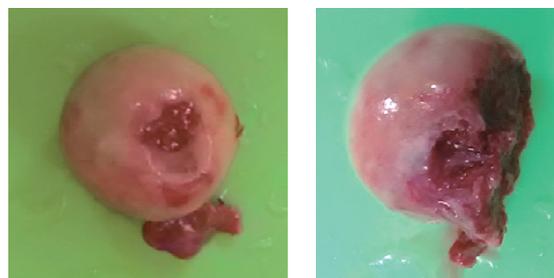


図1:手術で摘出された大腿骨頭

得られた大腿骨頭をいくつかの断片に切断し、内部の海綿骨の部分を骨切りばさみを用いて更に小切片に細断した。そして海綿骨の小切片を一定量使用して酵素処理を繰り返し、骨の表層の細胞を単離した。(図2)



図 2: 加温・振盪させながら酵素処理反応を複数回行う

得られた細胞懸濁液に対して更に溶血処理や洗浄を行った後に、フィブロネクチンでコーティングしたディッシュ上に播種し、間葉系幹細胞培養用の培地で培養した。コンフルエントにならないように 1~2 回継代し、一定数の細胞を回収した。

細胞は ISOGEN で回収し、その後 RNA を抽出した。得られた RNA を用いてマイクロアレイ用のプローブを作成し、Clariom S array (Affymetrix) チップを用いてマイクロアレイ解析を行った。(図 3)

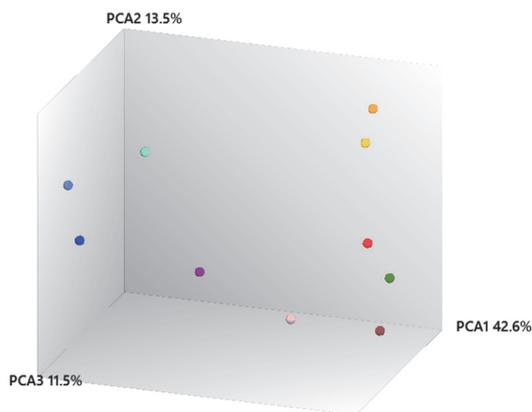


図 3: マイクロアレイの結果を用いた主成分分析。1 つの点が 1 つのサンプルであり、この図では 10 サンプルの結果を示す。

なお、初代培養の結果得られた細胞がたしかに間葉系幹細胞であることは、フローサイトメトリーを用いて確認した。

こうして骨組織由来の間葉系幹細胞の網羅的な遺伝子発現情報が得られた。

図 3 では 10 サンプルの結果を示したが、既により多くのサンプルを回収しているため、今後はそれらのサンプルの解析も進めてデータを統合する予定である。

また、これらの患者では間葉系幹細胞の初代培養を行う他にも、年齢、手術に至った病名(骨折もしくは変形性股関節症)、骨密度、併存疾患、内服薬など様々な臨床情報も取得している。今後はそれらの臨床情報を間葉系幹細胞の遺伝子発現プロファイルと統合することで骨代謝や骨強度に関連する遺伝子や臨床的特徴の抽出を行う計画である

[発表論文]

1. 未発表

## 【助成 38 -31】

### 健康環境ミエル化のための室内バイオエアロゾル連続センシング技術の開発

研究者 東京医科歯科大学生体材料工学研究所 講師 當麻 浩司

#### 〔研究の概要〕

アレルギーやウイルスなどの生物由来の微小粒子であるバイオエアロゾルは、密閉空間となる屋内環境中において長時間浮遊し続けるにも関わらず、知覚することができないために暴露を防ぐことが難しい。本研究ではこのようなバイオエアロゾルを連続計測し、健康環境のミエル化を導くセンシング技術の開発を目的とした。はじめにセンサシステムを多孔質ポリマー薄膜、光ファイバ、分光器から構築した。次に多孔質ポリマー薄膜に金属コーティングを施すことで局在型プラズモン特性が得られ、屈折率に応じた波長スペクトル変化を観察した。最後に濃度の異なるグリシン水溶液を負荷したところ、濃度に応じた光強度変化が得られ、屈折率変化を用いた非標識なバイオエアロゾルセンシングの可能性が示された。

#### 〔研究経過および成果〕

アレルギーやウイルスなどの生物由来の微小粒子であるバイオエアロゾルは、密閉空間となる屋内環境中において長時間浮遊し続けるにも関わらず、知覚することができないために暴露を防ぐことが難しい。さらに屋外とは異なり、マスクなどを装着せずに無防備な状態で過ごす屋内では、無意識のうちにバイオエアロゾルに接触・吸引することで体内に取り込まれ、アレルギー疾患やウイルス感染症に罹患するリスクが高まる。したがって屋内において「見えない」バイオエアロゾルを「ミエル化」することで、ヒトにバイオエアロゾルの存在を認識させ、掃除や換気、消毒などの暴露回避を促すことがバイオエアロゾルを原因とした疾患予防に重要である。しかしながら、センサの感度や選択性、繰り返し使用に課題があり現在までにそのようなモニタリングシステムは実現していない。そこで本研究は、密閉空間となる室内のバイオエアロゾル濃度を成分ごとに連続的に計測し、環境状態変化をミエル化することで意識的な暴露回避を促し、健康的な屋内環境を築くバイオセンサ技術の開発を目的と

した。

はじめに連続計測用のセンサシステムを構築した。本システムは、バイオエアロゾルを効率よく捕捉することを期待した多孔質ポリマー薄膜、光ファイバ、分光器から構成される。捕捉したバイオエアロゾルを非標識に測定できるよう、多孔質ポリマー薄膜に局在型表面プラズモン特性を持たせるため、ポリドーパミンによる金属ナノ微粒子の固定化およびスパッタリング法による金属コーティング 2 種類の方法を試行した。まずポリドーパミンによる金属ナノ微粒子の固定化では、ポリマー薄膜をドーパミン溶液中に浸漬しポリドーパミンを薄膜表面にコーティングした。その後、金属ナノ微粒子溶液中にポリマー薄膜を浸漬し、超純水にてリンスを行ったところ、金属ナノ微粒子が全て除去され、固定化されなかった。ポリドーパミンのコーティング時間や金属ナノ微粒子の浸漬時間を延ばしてみたが、同様に固定化されなかったため、次にスパッタリング法による金属薄膜コーティングを検討した。多孔質ポリマー薄膜表面に数ナノメートルの金属薄

膜を成膜したところ、青緑色の呈色が見られた。そこで反射率スペクトルを空气中で測定したところ、波長 530 nm にピークを持つスペクトルが得られ、見た目と一致する結果となった(図1)。これは金属コーティングによる局在型表面プラズモン共鳴によるものと考えられ、次にポリマー薄膜のポアサイズの影響を調べた。ポアサイズが 0.1  $\mu\text{m}$  および 5  $\mu\text{m}$  のポリマー薄膜に対しても同様にスパッタリング法にて金属薄膜コーティングを施し、反射率スペクトルを観察したところ、図1に示すように 0.5  $\mu\text{m}$  以外では明瞭なピークが得られなかった。これはポアサイズの違いにより金属のコーティングの程度に違いがあることが原因であったと考えられるが、詳細については今後調べることにした。

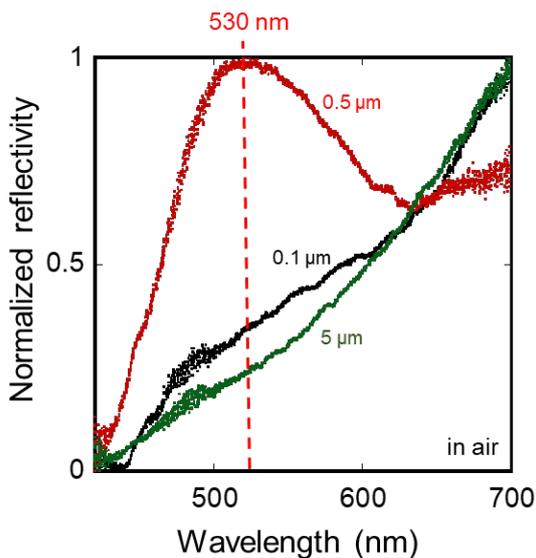


図 1 3 種のポアサイズ (0.1  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ ) のポリマー薄膜における反射率スペクトル

先述の結果より、今回は最もプラズモン共鳴が生じたポアサイズ 0.5  $\mu\text{m}$  のポリマー薄膜を用いて、センサ特性評価を行った。実験では濃度の異なるグリシン水溶液をサンプルとし、それぞれを金属コーティングしたポリマー薄膜へ負荷した際の光強度変化を観察した(図2)。測定の結果、グリシン水溶液の濃度に

応じた可逆的な光強度変化が得られ、屈折率変化によるバイオエアロゾルの非標識測定の可能性が示唆された。

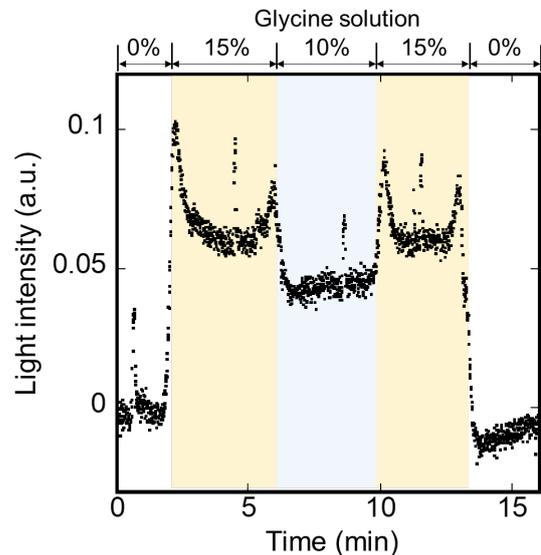


図 2 3 種の濃度 (0%, 10%, 15%) のグリシン水溶液に対するセンサ出力応答

[発表論文]

1. 金 志壕, 三木 大輔, 吉村 直之, 當麻 浩司, 荒川 貴博, 谷津田 博美, 三林 浩二, “ダニアレルゲン Der f1 の高感度かつ繰り返し計測を可能とする SAW 免疫センサ”, 第 81 回分析化学討論会予稿集, C2011, 2021 年 5 月.
2. 金 志壕, 飯谷 健太, 當麻 浩司, 荒川 貴博, 三林 浩二, “ダニアレルゲン Der f1 の繰り返し on-site 計測のための SAW 免疫センサ”, LIF2020-2021 予稿集, pp412-413, 2021 年 9 月.
3. 里村 結衣, 加藤 実里, 倉田 香菜子, 吉村 直之, 飯谷 健太, 當麻 浩司, 荒川 貴博, 谷津田 博美, 金森 きよ子, 三林 浩二, “酵素沈殿増幅を用いた高感度なダニアレルゲン Der f2 用 SAW 免疫センサ”, 生体医工学シンポジウム予稿集, 2A-30, 2021 年 9 月.

【助成 38 -32】

磁化細胞単一操作機構を具備したマイクロ引張デバイスによる  
細胞-細胞間接着強度の測定

研究者 静岡大学工学部 助教 大多 哲史

静岡大学工学部 准教授 菊池 将一

東京工業大学物質理工学院 助教 倉科 佑太

静岡大学工学部 助教 中澤 謙太

〔研究の概要〕

血球系の細胞を除く大部分の細胞は、接着性細胞である。体内で足場に細胞外マトリックスを介して接着しており、また細胞同士も相互に接着して存在している。このような接着性細胞が接着していない場合には、生細胞でも増殖することができないこと(Byrne et al., Mathl. Comput. Modelling, 1996)が知られている。このように、増殖や分化などの細胞特性は接着性と極めて密接に関係している。このため、本研究では、細胞の接着力を実験的に数値化し、細胞の接着性と細胞特性の関係性や細胞接着メカニズム解明に寄与する知見を得ることを最終目標とし、その準備として、計測用基板材質の選定と、単一細胞を基板先端への誘導し培養可能な基板形状の最適化を実施した。

〔研究経過および成果〕

本研究では、細胞間の接着強度を計測するためのシステム構築の足掛かりとして、図 1(a)のように、先端にマイクロサイズの突起のある基板上で、その突起部に単一細胞を誘導する技術の確立を実施した。

―基板の準備― 研究開始当初はシリコン基板上で細胞誘導を行うことを想定していたが、取り回し易さから、細胞誘導の段階では倒立型の顕微鏡により観察を行うことにした。しかし倒立顕微鏡では光源と対物レンズの間に基板が挟まれる形になるため、光を透過する透明な基板を用意する必要がある。このため、光が透過し強度のある OSTE (Off Stoichiometry Thiol Enes)ポリマー(Yasuga *et al.*, *Lab on a Chip*, 2018)を使用することとした。本研究では、図 1(b)のように基板先端の突起部分の形状に関わるパ

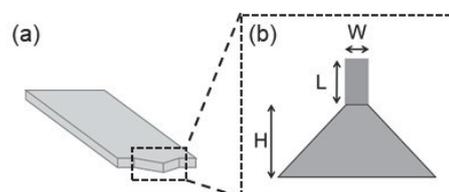


図 1、基板の設計

ラメータ(W: 突起部分の幅、L: 突起先端の長さ、H: 突起付根部の長さ)を変化させた OSTE 基板を複数パターン作製し、細胞誘導具合と基板形状の依存性を評価した。

―細胞誘導実験手順―  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ナノ粒子にポリエチレンイミン(Polyethylenimine: PEI)を表面修飾することで、細胞への取り込み効率を向上させた材料(Ota *et al.*, *J. Nanopart. Res.*, 2013.)を用意した。この PEI 修飾磁性ナノ粒子をヒト間葉系幹細胞(Mesenchymal Stem Cells: MSC)に添加し、取り込ま

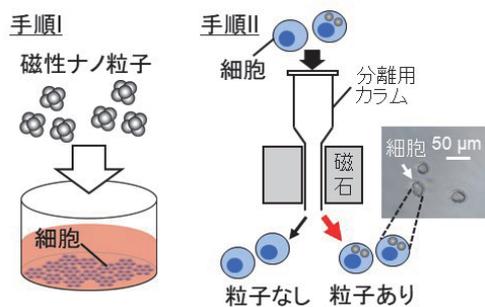


図2、磁性ナノ粒子を取り込んだ細胞の分離

せることで、細胞に磁場に対する応答性を付与した(図2、手順I)。さらに、磁気分離を実施することで、磁性ナノ粒子を含む細胞のみを分画した(図2、手順II)。また、基板上的細胞位置を明瞭化するために、磁気分離前に細胞をカルセインにより蛍光染色した。磁気分離後の細胞が混合した液をマイクロピペッターで吸入して、基板上的滴下し、磁石により基板先端に誘導する実験を実施した。

PEI修飾磁性ナノ粒子の細胞への添加量に関する検討も実施した。添加量2, 20, 100  $\mu\text{g}$  について実施したが、何れも磁石による誘導は行えた。また、添加量20, 100  $\mu\text{g}$  の際には、細胞表面に凝集した粒子が付着している様子も顕微鏡により観察されたが、2  $\mu\text{g}$  では明らかな付着は確認されなかった。細胞表面に余分な粒子が付着することで、誘導の際の立体障害を招く可能性もあるため、添加量2  $\mu\text{g}$  で実施することが適切であると判断した。

—細胞誘導実験— 図3にOSTE基板上における磁場による誘導を実施した際の顕微鏡観察画像をである。本報告では、 $W=50\ \mu\text{m}$ 、 $L=0\ \mu\text{m}$ 、 $H=200\ \mu\text{m}$ (基板(i))と、 $W=200\ \mu\text{m}$ 、 $L=50\ \mu\text{m}$ 、 $H=50\ \mu\text{m}$ (基板(ii))について示した。基板(i)に対して基板(ii)は、突起先端が伸びておりかつ、先端部分の幅が広いという特徴がある。基板(i)では、細胞が基板先端付近まで

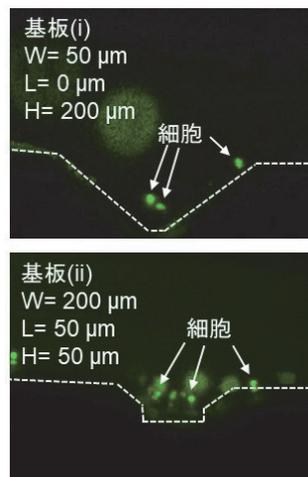


図3、細胞誘導の様子

誘導されていることが分かった。対して基板(ii)では、先端に突き出した箇所には全く細胞が到達していないことが分かった。これは、細胞は基板に滴下した液滴内と移動するため、液が浸透しない位置には、細胞は到達できない。基板(ii)のような、鋭く先端に突き出るような構造では、表面張力の影響で液が浸透しなかったと考えられる。また基板(i)についても、基板の表面加工の粗さのため、細胞が完全には基板先端まで到達していないと考えられる。このため、基板の面方向の観察のみではなく、厚み方向の観察も行い、厚み方向の形状評価も必要であると言える。

本研究から、液の表面張力を考慮した際の適切な基板形状の条件出しを行えた。今後は細胞引張試験に必要な単一細胞誘導のための基板形状の最適化を行い、細胞間接着強度の計測へと展開する。

【助成 38 -34】

転移性脳腫瘍定位放射線照射における実測線量不確かさを考慮した品質管理手法の確立

研究者 京都大学医学部附属病院 放射線治療科 特定助教 小野 智博  
 共同研究者 京都大学医学部附属病院 放射線部 川田 晃平  
 京都大学大学院 医学研究科 人間健康科学科専攻 准教授 中村 光宏  
 京都大学医学部附属病院 放射線治療科 助教 宇藤 恵  
 京都大学大学院 医学研究科 医学専攻 教授 溝脇 尚志

〔研究の概要〕

現在、転移性脳腫瘍に対する定位照射の適用が広がっているが、極小病変に対する小照射野の X 線の挙動は複雑であり、患者に投与される線量に不確かさ生じる。この不確かさを軽減する手法として IAEATRS-483 より本研究では、小照射野における照射線量の不確かさを軽減し患者の実投与線量をより確かに評価する出力補正係数を報告したが、定型照射野のみしか対応されず、照射野が連続的に変化する実患者における照射プランへの適用法は明らかにされていない。本研究では実照射プランに出力補正係数を適用する手法を開発し、その有用性を多種類の検出器を用いて評価した。開発した手法を用いて照射プラン毎に出力補正係数を算出し、それを補正することで多種類の検出器間の応答のバラつきが軽減されることを明らかにし、より確かな患者実投与線量評価の可能性を示唆した。

〔研究経過および成果〕

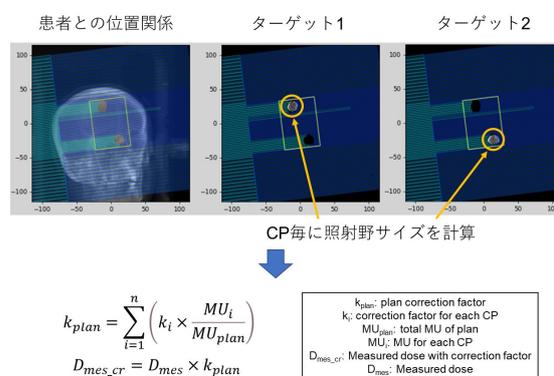
研究計画書に基づき、「ターゲット毎の照射野形状検出アルゴリズムの開発」及び「多種類検出器を用いた実測線量評価」について研究を遂行した。

1.方法

ターゲット毎の照射形状検出アルゴリズムの開発

照射プランの機器制御情報が格納されている DICOM データから照射形状に関わる情報及びターゲット(腫瘍)の位置情報を抽出する。図 1 に照射形状検出の手順を示す。プログラム言語として Python を用いてアルゴリズムの開発を行った。患者 CT 画像、標的位置、照射プラン位置を可視化し、照射中の各制御点(Control Point: CP)における照射野とターゲット位置関係を解析した。各照射野は放射線治療装置リニアック搭載のマルチリーフコリメータ(Multi-leaf

collimator:MLC)により形成され、照射野サイズは等価照射野サイズとして算出した。図 1 中に示す式に則り、複数ターゲットを対象に CP 毎に照射野サイズから出力補正係数を算出し、測定線量に補正を行うアルゴリズムを開発した。



照射野サイズから出力補正係数を算出し、測定線量に補正を行う

図 1 照射形状検出手順

## 多種類検出器を用いた実測線量評価

実測線量評価には、小照射野の検出器として IAEA TRS-483 に推奨されている 5 つの検出器(電離箱検出器;CC01, 3D pinpoint、ダイオード検出器; SFD、EDGE、ダイヤモンド検出器;microDiamond)を用いた測定を実施した。また、治療計画装置における計算値(XVMC)も比較対象とした。測定には水等価の球体ファントムを用いた。本ファントムを用いた出力補正係数の適用の有用性を評価するため、定型照射野に対する検出器応答を示す出力値(OutPut Factor: OPF)を評価した。次に、実臨床プランにおける有用性を評価するため、当院にて実施した臨床症例 15 例、22 ターゲットを対象に実測線量を評価した。各々の評価について実測値のバラつきを評価するため、実測値の中央値を比較対象とした。

## 2. 結果

### OPF の評価

図 2 に(a)出力補正なしの OPF,(b)出力補正ありの OPF,(c)出力補正なしの測定中央値との差、(d)出力補正ありの測定中央値との差を示す。測定中央値との差は出力補正なしで 4.3%以内、出力補正ありで 3.3%以内であり、出力補正係数の適用により OPF の検出器間のバラつきが軽減されることを確認した。

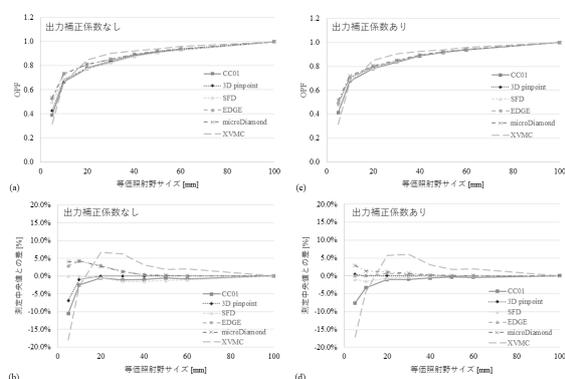


図 2 OPF の比較

## 実臨床プランにおける線量の比較

図 3 に実照射プランにおける(a)出力補正なしの相対線量,(b)出力補正ありの相対線量,(c)出力補正なしの測定中央値との差、(d)出力補正ありの測定中央値との差を示す。測定した検出器のうち、CC01 と EDGE に関しては出力補正ありにて測定中央値との差が大きくなったが、SFD と microDiamond は補正係数なしで  $8.8 \pm 3.0\%$  と  $8.9 \pm 2.1\%$ 、補正係数ありで  $2.9 \pm 2.8\%$  と  $0.8 \pm 1.9\%$  となり、補正係数の適用により測定中央値との差が軽減された。

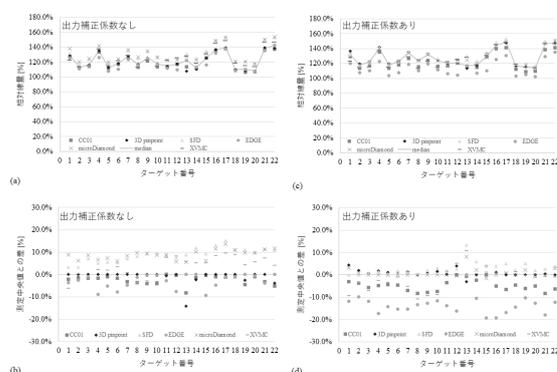


図 3 実臨床プランにおける線量の比較

## 3. 結論

実照射プランに出力補正係数を適用する手法を開発し、その有用性を多種類の検出器を用いて評価した。適切な検出器を選択すれば測定値のバラつきが軽減されることが示された。実照射プランにおける患者への実投与線量のより確かな評価が期待される。

[学会報告]

1. T Ono, M Nakamura, M Uto, T Mizowaki. Small-Field Dosimetry in Single-Isocenter Stereotactic Irradiation for Brain Metastases Using a Detector-Specific Field Output Correction Factor. 63th American Association of Physicists in Medicine Annual Meeting, July 25-29, 2021 on line

【助成 38 -36】

## 生体の電気素子「イオンチャネル」の電圧感知機構

研究者 香川大学医学部 教授 藤原 祐一郎

共同研究者 香川大学医学部 講師 川鍋 陽

### 〔研究の概要〕

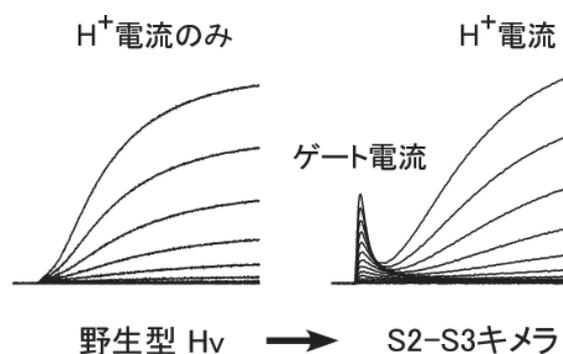
脳や心臓の活動に代表されるように、細胞膜を介した電氣的シグナリングは我々の生命活動にとって重要な役割を果たしている。その電気活動を発生させ制御する中心的な役割を担う分子が電位依存性チャネルである。しかしながら、電位依存性チャネルが膜電位を感受できる分子機構の詳細、特に分子構造の変化は未だに明らかになっていない。本研究は、電気生理学的手法、光学的観測手法を用いて、電位センサーの動きをダイナミックに解析し、電位依存性チャネルが膜電位を感じ取るメカニズムを分子構造のレベルから明らかにすることを目的に行った。最小単位の電位依存性チャネルとして機能する、電位依存性 H<sup>+</sup>チャネル (Hv チャネル)を用いて研究を進め、全ての電位依存性チャネル共通に成り立つ原理の理解を目指した。

### 〔研究経過および成果〕

イオンチャネルが膜電位を感知する原理を理解するために、膜電位変化に伴う電荷の移動が観測されないにもかかわらず電位依存的な出力を発揮する電位依存性 H<sup>+</sup>チャネル (Hv) を詳細に解析した。変異導入により電荷の移動が観測された変異体 Hv チャネルをベースに、膜電位入力から構造変化、電荷の移動、ゲートの開口から H<sup>+</sup>電流出力に至る一連の過程を、電気生理学的手法、光学的観測手法を用いてステップごとに解析した。Hv チャネルの生理的修飾因子である細胞内外 pH や亜鉛イオン、脂質分子が膜電位を感知する機構に与える影響を解析した。

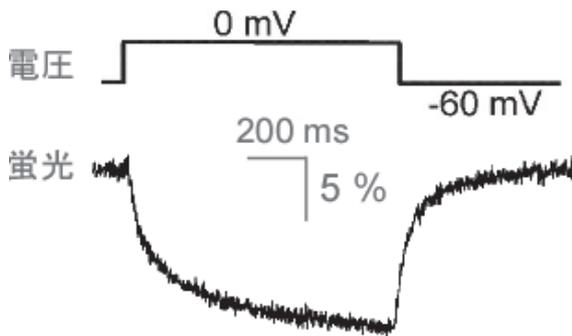
電位依存性 H<sup>+</sup>チャネル (Hv) は、他の電位依存性チャネルの電位センサーに相同性の高い 4 回膜貫通タンパク質である。H<sup>+</sup>は 4 本のヘリックスの間をすり抜けて透過する。一般的な電位依存性チャネルの電位センサードメインでは H<sup>+</sup>が漏れ出たりすることはなく、Hv チャネルの電位センサーのユニークな点である。

研究者は、Hv チャネルの電位センサードメインに変異を導入することにより H<sup>+</sup>透過性を保持しながらゲート電流を観測出来る変異体を作成することに成功し、アフリカツメガエル卵母細胞二本刺し膜電位固定法および HEK 細胞を用いたパッチクランプ法により解析を行った。さらに点変異を導入して解析を行ったところ、H<sup>+</sup>電流が消えゲート電流のみを生じる変異体を得ることに成功した。



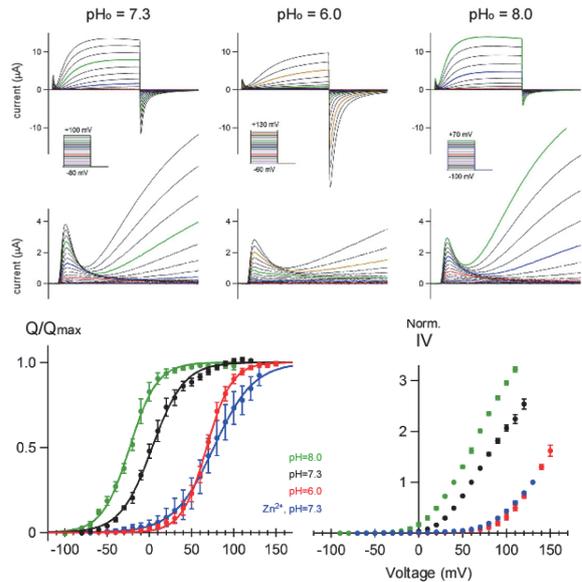
野生型 Hv および変異体 Hv に対して、電位センサーに Cys 残基を導入する点変異体を作成し、アフリカ

ツメガエル卵母細胞に発現させ、蛍光プローブ Alexa488-maleimide 試薬を結合させ、卵母細胞二本刺し膜電位固定法による膜電位コントロール下に電位センサーの動きをプローブから発せられる蛍光シグナルの変化により測定し、定量的に解析した。これにより、ゲート電流を観測することで電位センサーの動きを推定する間接的な解析から脱却し直接電位センサーの構造変化をとらえることに成功した。本手法をさらに発展させ、他の電位センサー分子に付加した蛍光プローブから発せられる蛍光シグナルをパッチクランプ下に解析することに成功した。本研究で得られる電圧感知機構の概念の幅広い応用を可能にすることが期待できる。



Hv チャンネルは細胞内外の pH 濃度に応じて、電流-電圧関係がシフト(膜電位閾値が変化)することが知られている。また、細胞外  $Zn^{2+}$ により活性化閾値が高くなりチャンネル電流が阻害される。これらの性質は、生体防御における活性酸素産生、射精後の精子の運動開始において、有効に働く生理的な Hv チャンネルの修飾機構であることが知られている。

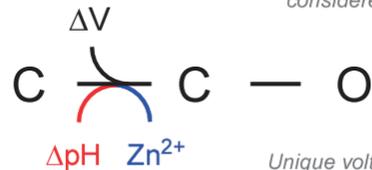
野生型 Hv および変異体 Hv に対してツメガエル卵母細胞二本刺し膜電位固定法により細胞外 pH と細胞外の  $Zn^{2+}$ 濃度をコントロールした条件下で、ゲート電流、 $H^+$ 電流の各種電気生理学的パラメーターを解析した。



Hv チャンネルは炎症性脂質メディエーターにより活性化することが知られている。脂質を投与して膜電位の感受性に与える影響をパッチクランプ法により解析を行い、膜電位感知・チャンネル開口に脂質が結合することの必要性を明らかにした。

(1) Kinetic Model

Voltage sensing and  $H^+$  permeation can be considered separately



Unique voltage sensor dependent on pH

Hv チャンネルの開閉において、膜電位感知ステップと開口ステップは分離でき、pH や  $Zn^{2+}$ などの活性化修飾因子は膜電位感知ステップに作用するというモデルが得られた。この膜電位感知機構の概念は広く一般の蛋白質に応用できる期待が持てる。

[発表論文]

1. Kawanabe A., Fujiwara Y., "Cytoplasmic structural changes of voltage-sensing phosphatase detected by patch clamp fluorometry" The Journal of Physiological Sciences, Vol.71 Suppl 1, p140 (2021)

## 【助成 38 -37】

### 車いす介助初心者のスキル向上のための車いす介助訓練システムの開発

研究者 九州大学大学院工学研究院 准教授 中島 康貴  
共同研究者 九州大学大学院工学研究院 教授 山本 元司

#### 〔研究の概要〕

車いすを押す介助動作では、熟練者と初心者においてその疲労などの身体負担が大きく異なり、初心者における負担軽減は急務である。本研究では、車いす介助における初心者と熟練者の車いす操作の力学特性の違いを解析し、初心者と熟練者の車いす操作を表現した介助力学モデルを構築した。また、構築したモデルに基づいて、初心者の身体負担を軽減する車いす介助訓練システムの開発を行った。具体的には、介助者が車いすを操作する力を計測可能なデバイスを製作し、それを用いて介助初心者と熟練者がもつ車いす操作時の力学特性を計測した。その結果から、初心者と熟練者によって異なる車いす操作の特徴について、生体がもつインピーダンス特性を基礎とした介助力学モデルを構築した。評価実験では、提案する介助力学モデルを考慮した車いす操作が可能なハンドルを用いることで、初心者の身体負担の軽減が可能であることが示唆された。

#### 〔研究経過および成果〕

近年の超高齢化に伴い、高齢者の介助は我々の生活の身近にあり、その負担軽減が強く望まれている。特に介助の中でも、移動介助は生活に密接に関わるものであり、その負担軽減は急務である。これまでに車いすを操作する介助者の身体負担軽減に関する研究は様々行われているが、著者らは運動歴などのヒトがもつ運動特性の違いが身体負担に及ぼす影響に注目している。この車いす介助においても、勤務歴の長い理学療法士など車いす介助の経験が多い介助熟練者はエネルギー効率が良い車いす操作を学習し、その際の身体負担は介助の経験が少ない初心者と比べて、小さくなっている可能性があると考えている。そこで、本研究では、身体負担が小さいと仮定される熟練者の車いす操作を規範とした車いす介助訓練システムを開発し、初心者が身体負担を軽

減する車いす操作を習得できる方法を提案することを最終目標とする。

研究の一段階目として、介助熟練者と初心者の車いす操作時の身体負担の違いについて車いすを押す力の観点から検討を行った(図 1)。ここでは、初心者と比べて熟練者が車いすを定常速度で押した際の矢状面方向の力の積分値が小さくなることを実験から確認し、初心者と比べて熟練者の身体負担が小さいことを明らかにした(図 2)。また、両者の車いす操作時の様子を観察し、身体負担を小さくする要因として、車いすを定常速度で操作中の肘関節の屈曲角度の変化量の違いが挙げられた(図 3)[発表論文 1]。

次に、上記で見られた特徴の要因を詳細に検討するために、車いす操作中の介助者と車いすの前後方向の位置の変化に注目した。ここでは、介助者が自身と車いすの位置に基づいて、車いすを押す力を調

整していると考え、それらの影響をインピーダンス特性の基礎式(1)を用いて表現した。

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = -F \quad (1)$$

$F$  は介助者が車いすを前後方向に押す手先の力 [N]、 $x$  はその手先の位置 [m]、 $M$ 、 $B$ 、 $K$  はそれぞれ車いすを操作中の介助者の上肢の慣性係数、粘性係数、剛性係数と仮定している。このモデルのパラメータを決定するために、介助者が車いすに与えた力の実測値  $F_M$  とモデルによる力の推定値  $F$  との 2 乗平均平方根 (RMS) が最小になるように重回帰分析を行った。その結果から、初心者とは熟練者と比べて、インピーダンス特性の中で剛性係数の値が特に小さいことが確認された。

最後に、提案した介助力学モデルを用いて、初心者の身体負担が軽減可能か評価実験を行った。実験では、提案する介助力学モデルを考慮した手法として、インピーダンスを調整可能なハンドルを製作して用いた。その結果から、提案する手法を用いることで、車いすを押す力が軽減されることが確認され、車いす介助における初心者の身体負担の軽減が可能であることが示唆された。

[謝辞]

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援を賜りました公益財団法人カシオ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

[発表論文]

1. 實松建吾, 柏木昭彦, 山道菜未, 本田功輝, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 介助熟練者と初心者における車椅子を押す力と肘関節角度に注目した車椅子操作の特徴解析, 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講

演会 (SI 2021), pp. 1576-1580, 2021.

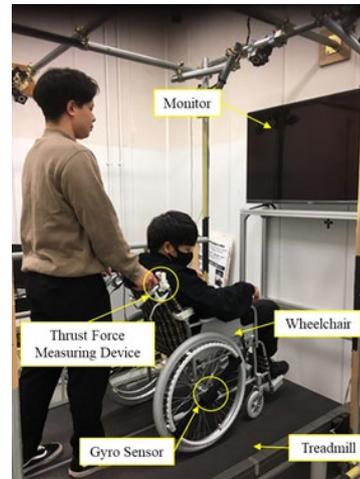


図1 トreadミル上における車いす操作実験

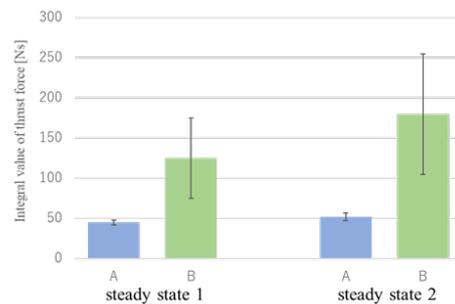


図2 熟練者(A)と初心者(B)の身体負担の比較

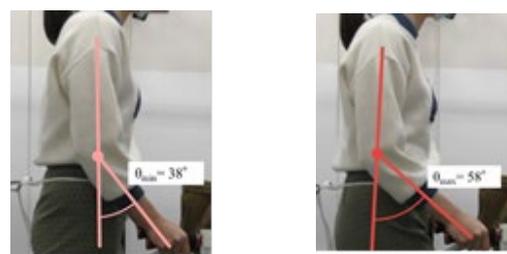


図3A 熟練者の肘関節の屈曲角度の変化の様子

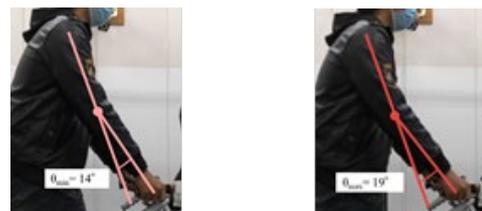


図3B 初心者の肘関節の屈曲角度の変化の様子

## 【助成 38 -38】

顔見知り看護師の存在による短時間の手術室看護システムの構築-生体的指標を用いて-

研究者 横浜市立大学大学院医学研究科 助教 福田 真佑

横浜市立大学大学院医学研究科 教授 赤瀬 智子

横浜市立大学大学院医学研究科 助教 立石 由起子

横浜市立大学大学院医学研究科看護学専攻博士前期課程 岩佐 葵

### 〔研究の概要〕

手術を受ける患者は複雑な心理状態にあり、手術室に入室した患者の複雑な心理状態は身体へ影響を及ぼす可能性がある。看護師が事前に患者と面識を持つことは、手術室内での患者の不安に対する心理的援助になり得ることが示唆されていることから、手術担当看護師が事前に面識を持つ効果に着目した。まず手術室内の患者の複雑な心理状態を明らかにし、それに対する手術担当外回り看護師が事前面識を持つ効果を明らかにした。手術を受ける患者の複雑な心理状態は、病棟出棟時から麻酔導入時まで平常状態が保たれており、手術を受ける患者が平常状態あるいはストレス状態にない場合は、手術を受ける患者の複雑な心理状態に対する手術担当外回り看護師の事前面識効果は低いことが示唆された。

### 〔研究経過および成果〕

【背景・研究目的】 手術を受ける患者は、様々な不安を強く感じている<sup>1)</sup>。日本手術医学会は手術担当看護師による術前訪問の実施、顔見知り看護師の存在の重要性を提唱している。手術室看護師は、患者が手術室に入室してから麻酔導入されるまでの非常に短い時間の中で、患者の心理的援助を行う必要があるが、患者の心理状態を主観的に評価することは困難である。これまで、術前から手術担当看護師が患者と顔見知りになることが患者の心理状態に与える影響について明らかになっていなかった。そこで、情動と密接に関係する自律神経活動を測定することで、顔見知り手術室看護師による患者への心理的援助の効果を可視化することを目的とした。

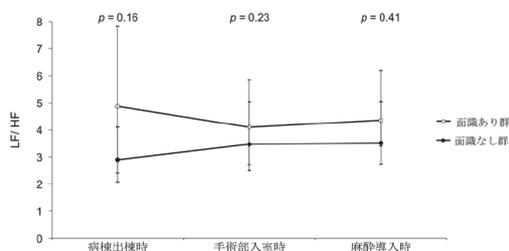
【方法】 本研究は単施設における前向き横断研究で、A 大学附属病院で全身麻酔による予定手術を受ける患者を対象とした。病棟出棟時、顔見知り手術室看護師と対面する手術部入室時、麻酔導入時にウェ

アラブルデバイスを用いて自律神経活動指標(交感神経活動指標 LF/HF)を測定した。手術担当外回り看護師による術前訪問が行われた者を面識あり群、手術室看護師による術前訪問が行われた者を面識なし群として、各時点での LF/HF を二群比較した。統計解析は SPSS ver.27 (IBM, NY, USA)を用いて、Friedman 検定(対象者の各時点の推移)、Mann-Whitney U 検定(各時点の2群比較)を行った。本研究は所属機関の研究倫理委員会の承認を得て実施した(B201200003)。

【結果】 対象者 60 名のうち、面識なし群は 35 名、面識あり群は 25 名で、人数以外の対象者の背景に差は認められなかった。病棟出棟時、手術部入室時、麻酔導入時における対象者 60 名の LF/HF は、病棟出棟時は 3.43(2.28-5.52)、手術部入室時は 3.73(2.49-5.21)、麻酔導入時は 3.81(2.77-5.32)で 3 時点の間に差は認められなかった( $p=0.98$ )。次に、各時点における 2 群の LF/HF の中央値(四分位範

図)を図 1 に示す。

図 1 病棟出棟時、手術部入室時および麻酔導入時の 2 群の LF/HF



病棟出棟時は面識なし群が 2.90 (2.15-4.11)、面識あり群が 4.87 (2.43-7.82)であった( $p=0.16$ )。手術部入室時は面識なし群が 3.47 (2.29-5.04)、面識あり群が 4.10 (2.72-5.85)であった ( $p=0.23$ )。麻酔導入時は面識なし群 3.51 (2.70-5.05)、面識あり群が 4.36 (3.41-6.19)であった( $p=0.41$ )。病棟出棟時と手術部入室時の各群の中央値の差は面識なし群は+0.57、面識あり群は-0.77 であった。

【考察】 病棟出棟時から麻酔導入時にかけて LF/HF は変化しなかった。これは、手術前 30 分と手術室内で不安に変化が見られなかった研究<sup>2)</sup>と同様の結果であった。本研究と同じ時刻に測定した健康な大学生の LF/HF は  $3.58 \pm 2.1$  であった<sup>3)</sup>。ストレス負荷のない状態で測定された先行研究の LF/HF の値と本研究の値が同様であったことから、手術室内における患者の心理状態は平常状態であったと考えられた。各時点の 2 群の LF/HF には差は認められなかった。しかし、各群の病棟出棟時と手術部入室時の中央値の差は、面識なし群は+0.57、面識あり群は-0.77 であった。安静時よりもストレス状態では LF/HF が上昇<sup>4)</sup>し、ストレスが軽減すると LF/HF が減少する<sup>5)</sup>。よって病棟出棟時から手術部入室時において面識なし群の中央値が正の方向に変化したことは、手術部入室時の事前面識のない看護師との

対面は交感神経活動の増強に影響し、反対に、面識あり群の中央値が負の方向に変化したことは、手術部入室時の事前面識のある看護師との対面は交感神経活動の減弱に影響した可能性が考えられた。

[発表論文] 投稿準備中

[引用・参考文献]

- 1) 長澤美佐子. (2002). 手術を受ける患者の術前術後における不安の変化-STAI (日本語版) を用いて-. 山梨医科大学紀要, 19, 97-100.
- 2) Fauzia A Khan, & Nazir, S. (2007). Assessment of pre operative anxiety in patients for elective surgery. Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology, 23(3), 259-262.
- 3) Cui, X., Tian, L., Li, Z., Ren, Z., Zha, K., Wei, X., & Peng, C. K. (2020). On the Variability of Heart Rate Variability—Evidence from Prospective Study of Healthy Young College Students. Entropy, 22(11), 1-26.
- 4) Attar, E. T., Balasubramanian, V., Subasi, E., & Kaya, M. (2021). Stress Analysis Based on Simultaneous Heart Rate Variability and EEG Monitoring. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 9 (January), 1-7.
- 5) Kim, H., Kim, D. J., Kim, S., Chung, W. H., Park, K.-A., Kim, J. D. K., Kim, D., Kim, M. J., Kim, K., & Jeon, H. J. (2021). Effect of Virtual Reality on Stress Reduction and Change of Physiological Parameters Including Heart Rate Variability in People With High Stress: An Open Randomized Crossover Trial. Frontiers in Psychiatry, 12(August), 1-11.

## 【助成 38 -39】

### 3次元 Foot Scanner による子どもの足部の発達評価システムの開発

研究者 東都大学 幕張ヒューマンケア学部 教授 山下 和彦

#### 〔研究の概要〕

子どもの足部は軟骨で構成され、小学校期に骨化が進み、骨格の基礎が完成する。しかし、子どもの足部の評価は行われておらず、計測方法も確立していない。そこで本研究では、スマートデバイスを用いた足部骨格計測システムを開発し、子どもの足部の特徴を明らかにすることを目的とした。

対象者は8～12歳の680人とした。足部3D計測の評価項目は、足長、前足部幅(横アーチ)、舟状骨高(内側縦アーチ)、拇指角、足部骨格のずれ等とした。結果の一例として、踵幅は小学校期にほぼ発達は完了したが、個人差が大きいことがわかった。拇指角は、足部骨格のずれと関係し、外反母趾の発生メカニズムに関連する可能性が示唆された。本研究により足部骨格を定量的かつ簡便に計測でき、予防や発達評価が可能となった。

#### 〔研究経過および成果〕

外反母趾の発生率は18-65歳で23%と報告される。外反母趾の発生には様々な要因があるが、その一つが内側縦アーチにある。内側縦アーチは10歳ごろまで発達すると報告されるが十分なコンセンサスは得られていない。柔軟性の高い扁平足は外反母趾に加え、腰痛、足の痛みを有する可能性が高い。

小児の足部骨格は軟骨で構成され、発達過程で硬い骨に変化する。そのため、小児の足部は足長、足囲、踵の幅、中足部の回内の状況など特性は様々であるが十分に明らかではない。足部の特徴量を評価する手法として、疫学研究や小児を対象とした研究では、倫理的配慮からX線が使いにくいいため、足部の外観から寸法を計測したり、フットプリントを用いる研究が多い。しかし、ノギスやインクマットなどによる計測では、一貫性のない結果が示されている。

そこで本研究では、小児の足部の特徴を明らかにするためにスマートデバイスを用いた足部3D計測システムを開発することを目的とした。さらに足底圧分

布計測器、下肢筋力計測機を用い、足部骨格、筋力、足底部の発達の観点から特徴量の抽出を試みた。

#### ・実験方法

対象者は、小学校3～6年生を対象に680人とした(表1)。計測項目は、開発した足部3D計測、下肢筋力計測のための足指力、足底部の形状を評価する足圧分布とした。

表1 計測対象者の人数

	3年生	4年生	5年生	6年生
男子	183	69	38	45
女子	186	84	47	28
合計	369	153	85	73

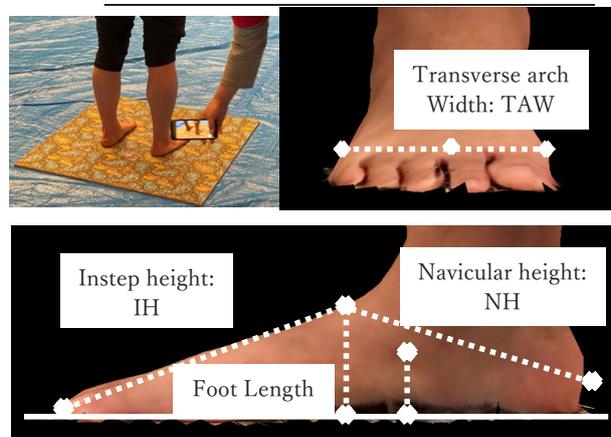


図1 子どもの足部3D計測の外観と出力の一例

足部の特徴の着目点は、①踵から第2趾先端の距離(足長)、②横アーチに関する第1中足骨頭から第5中足骨頭の距離(前足部幅)、③床面から中足部の最も高い位置の高さと中心線からのずれ(足部高、骨格のずれ)、④舟状骨の高さ(舟状骨高)、⑤床面における踵の接地の幅(踵幅)、⑥拇趾先端-第1中足骨頭-踵の角度(拇指角)とした。

本研究は、東都大学の研究倫理委員会の承認を得て行った(承認番号:R0306)。すべての対象者および保護者には実験開始前に研究の趣旨の説明を行い、署名を得た。

・結果と考察

結果の一例として、図2に足長に対する踵幅、図3に骨格のずれと拇指角の関係を示した。踵幅は男女ともに $5.6 \pm 0.49$  [cm](mean $\pm$ SD)であった。踵幅は40歳以上の大人の平均が5.8 [cm]であることから、踵の

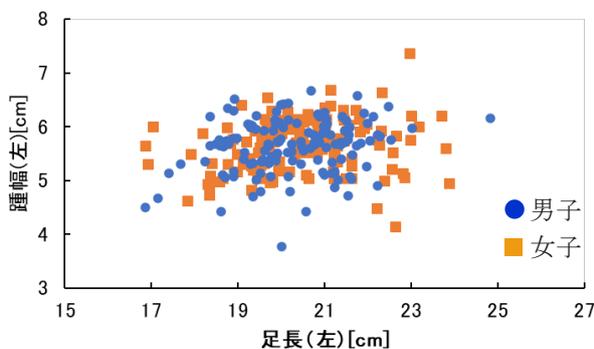


図2 足長に対する踵の幅の計測結果

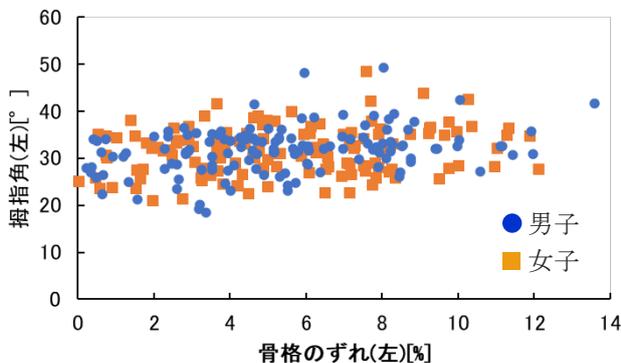
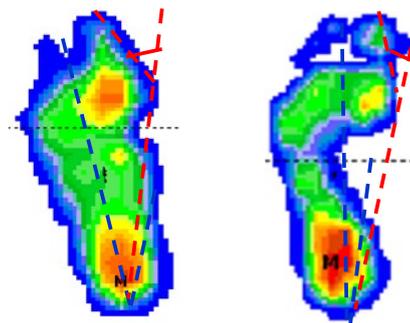


図3 足部の骨格のずれに対する拇指角



a.外反母趾で舟状骨が下がっているタイプ b.正常なタイプ

図4 外反母趾と正常タイプの足圧分布

幅は8歳でほぼ発達完了することがわかった。しかし、個人差が大きく3 [cm]以上であった。

外反母趾に関連する拇指角は中足部の骨格のずれと相関があることがわかった。外反母趾のメカニズムは明らかになっていないが、拇指角の増大は、中足部を構成する内側楔状骨、足根中足関節(第1TMT関節)と関係することが疑われている。

中足部のずれと舟状骨のずれ・高さには相関が高い。図4の外反母趾のタイプのように、立位や歩行により中足部の動きが大きいことが外反母趾のリスクを高める可能性が推察された。

本研究により足部骨格を定量的かつ簡便に計測でき発達評価が可能となった

[発表論文]

1. Yamashita T, Yamashita K, Sato M, Kawasumi M, Ata S: Foot-surface-structure analysis using a smartphone-based 3D foot scanner, Med Eng Phys, 95(9), 90-96, 2021
2. 山下和彦, 山下知子, 阿多信吾, 佐藤満: 外反母趾のリスク評価のための足部形状 3D 計測システムの開発, LIFE2020-2021, 2021
3. 山下知子, 山下和彦, 阿多信吾: 足部 3D 計測システムと足底圧分布計測による足部骨格の比較, 第60回日本生体医工学会, 59, p.369, 2021

【助成 38 -40】

ポータブル眼科医療機器を利用した遠隔画像診断支援システムの構築

研究者 鶴見大学歯学部 講師 矢津 啓之

〔研究の概要〕

研究者らは、“Smart Eye Camera 眼診療機器 (SEC)”という、スマートホンアタッチメント型のポータブル眼科医療機器を開発した。本研究の目的は、①ポータブル眼科医療機器の有用性を証明すること、②撮影された画像データから眼科画像診断プログラムを作成し、眼科疾患の早期発見に繋がるシステムを作成すること、であった。結果として、①ヒト臨床研究における有用性を証明(既存機器との診断率・重症度判定などの比較検討研究を行い、疾患単位で証明)、②アフリカ(ケニア)において NPO 団体と組みながら SEC を提供し画像集積及び実証、を行ったので報告する。

〔研究経過および成果〕

①ヒト臨床研究における有用性を英文論文で 3 本(うち 1 本は筆頭著者)、国内学会で 1 本、国際学会で 1 本(筆頭演者)発表した。

<英文論文>

・2021 年 2 月、前房深度と隅角の評価において、SEC が従来の固定式細隙灯顕微鏡や前眼部光干渉断層計(AS-OCT)と同様に信頼できることを証明した(参考文献1)。SEC は従来の細隙灯顕微鏡と高い相関性を示した( $r=0.814, 0.919$ )。また、AS-OCT との評価においても高い相関性を示した( $r=0.641, 0.764$ )。

・2021 年 3 月、アレルギー性結膜疾患(ACDs)の評価において、SEC が従来の固定式細隙灯顕微鏡と同様に信頼できることを証明した(参考文献 2)。眼表面の臨床所見(眼瞼結膜充血・腫脹・濾胞・乳頭・巨大乳頭、眼球結膜充血・浮腫、輪部トランスス斑・浮腫、角膜上皮障害)の各スコア(0-3 点)を評価した。結果、各医療機器で評価した臨床所見のスコアは有意に相関した( $r=0.918$ )。また、両群間で再現性が示された(重み付け  $\kappa$  係数=0.631)。

	眼瞼結膜		眼球結膜		角膜	合計	
	充血	濾胞	充血	浮腫	上皮障害		
右眼	$\kappa$	0.78	0.88	1.00	1.00	0.63	0.73
	95% 信頼区間	0.70-0.85	0.83-0.94	-	-	0.46-0.81	0.67-0.78
左眼	$\kappa$	0.78	0.87	0.81	1.00	0.73	0.45
	95% 信頼区間	0.71-0.85	0.72-0.86	0.75-0.87	-	0.65-0.82	0.39-0.51
両眼	$\kappa$	0.78	0.83	0.89	1.00	0.72	0.63
	95% 信頼区間	0.75-0.82	0.80-0.87	0.86-0.91	-	0.66-0.77	0.60-0.66

(表 1) ACDs の評価における両医療機器間での再現性の一致

・2021 年 4 月、ドライアイの評価において、SEC が従来の固定式細隙灯顕微鏡と同様に信頼できることを証明した(参考文献 3)。SEC は従来の細隙灯顕微鏡と非常に高い相関性を示した(角膜フルオロセイン染色スコア(CFS);  $R=0.92$ 、涙液層破壊時間(TFBUT);  $R=0.89$ )。また SEC を使用したドライアイ診断性能は Area Under Curve(AUC)=0.93 と非常に高い精度を示した。

<国内・国外学会>

・2021 年 2 月、第 45 回角膜カンファレンスにて、ドライアイの評価について発表し、その後英文論文にまとめた(参考文献 3)。

・2021 年 5 月、国際学会では最大規模である The Association for Research in Vision and

Ophthalmology にて、ACDs の評価について発表し、その後英文論文にまとめた(参考文献 2)。

・2020 年 8 月に発表した、核白内障の診断における SEC と従来の固定式細隙灯顕微鏡の同等性を証明した研究が評価され、2021 年 6 月に日本抗加齢医学会若手研究者賞を受賞し、2022 年の同学会において記念講演をする予定となっている。

②COVID-19 の影響もあり、国内の神津島にのみ出向できた。国外はアフリカ(ケニア共和国)へ協力者に出向していただき、日本とアフリカでの遠隔診療の実証を行った。

〈神津島〉

2021 年 11 月、NPO 法人ファイトフォービジョン(FFV)の活動の一環で、SEC と眼底鏡を神津島に持参し、受診を希望された患者さんの診察と、現地医師に眼科診療の実際を指導した。また、神奈川県横浜市内の医療機関医師にご協力いただき、同時間内での遠隔診療の実証も行った。



(写真 1) 現地医師に SEC 使用を指導している様子  
〈アフリカ(ケニア共和国)〉

2021 年 11 月、第 75 回日本臨床眼科学会にて、「スマートホンアタッチメント型眼科医療機器を用いたアフリカへの遠隔医療相談の展開」を発表し、学術展示優秀賞を受賞した。ケニア共和国の Kisii Eye Hospital に SEC を導入(協力者を派遣し持参)、SEC の使用方法の確認をリモートで実施、そして SEC に内蔵されたアプリを介してアフリカで撮影された動画

を日本で確認し、現地医師とディスカッションを実施した。



(写真 2) ケニア共和国と日本間で  
ディスカッションしている様子

〔発表論文〕

1. Shimizu E, **Yazu H**, Aketa N, Yokoiwa R, Sato S, Yajima J, Katayama T, Sato R, Tanji M, Sato Y, Ogawa Y, Tsubota K. A Study Validating the Estimation of Anterior Chamber Depth and Iridocorneal Angle with Portable and Non-Portable Slit-Lamp Microscopy. *Sensors (Basel)*. 2021 Feb 19;21(4):1436. doi: 10.3390/s21041436.
2. **Yazu H**, Shimizu E, Sato S, Aketa N, Katayama T, Yokoiwa R, Sato Y, Fukagawa K, Ogawa Y, Tsubota K, Fujishima H. Clinical Observation of Allergic Conjunctival Diseases with Portable and Recordable Slit-Lamp Device. *Diagnostics* 2021, 11(3), 535.
3. Shimizu E, **Yazu H**, Aketa N, Yokoiwa R, Sato S, Katayama T, Hanyuda A, Sato Y, Ogawa Y, Tsubota K. Smart Eye Camera: A Validation Study for Evaluating the Tear Film Breakup Time in Human Subjects. *Transl Vis Sci Technol*. 2021 Apr 1;10(4):28.

## 【助成 38 -41】

### 新世代汗中乳酸計測ウェアラブルデバイスを用いた筋疲労の定量化研究

研究者 慶應義塾大学医学部 特任助教 中島大輔

#### 〔研究の概要〕

本研究は一定負荷の運動中に得られた汗乳酸濃度が、疲労状態ではどのように変化するかを明らかにすることを目的とした横断的研究である。男性 17 名 (平均年齢  $20.6 \pm 0.8$  歳) が、休憩を挟み 2 回連続で一定負荷運動 (ピークパワーの 25% の運動負荷にて実施) を行った。試験 1 は疲労困憊するまで、試験 2 は 10 分間だけ行った。各テストで主観的疲労感 (顔面評価スケールを用いた数値評価)、汗乳酸を測定した。(結果) 疲労状態である試験 2 では試験 1 と比べ汗乳酸排泄曲線は左方偏移すなわち汗乳酸濃度が早く上昇し、汗乳酸のピーク値および一定濃度値 (2、3、4  $\mu$  A) が有意に早く計測された ( $p < 0.01$ )。(結論) 汗乳酸濃度は疲労状態では上昇しやすいことが判明した。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1 緒言

近年、ウェアラブル型バイオセンシング技術の進歩により、医療・ヘルスケア・スポーツ施設などで得られるデータを用い生理情報を評価・推定できる手法開発が進んでいる。バイオセンシングの対象となる様々なバイオマーカーの内、汗は容易に計測可能で特に汗乳酸測定は他の採血などの方法と比較し非侵襲かつ連続測定が可能であるなどの利点がある。

本研究ではウェアラブル汗乳酸センサを用い疲労後の汗乳酸の変化を評価した。

##### 2 方法

平均年齢 20.6 歳の健康な男性 17 名が本研究に参加した (平均年齢  $20.6 \pm 0.8$  歳、週 3 回以上の定期的な運動を行っている)。一定負荷運動テストにおける疲労の汗乳酸への影響を検証するため、先行研究 (Sassi et al., 2006) に従い本研究を実施した。

自転車エルゴメータを用い徐々に運動負荷を上昇させる運動負荷試験を 2 度実施した。運動負荷試

験 1 (all-out まで運動負荷試験を実施) にて乳酸濃度を連続計測。15-20 分の休憩の後、10 分で試験を終了することを除き運動負荷試験 1 と同様のプロトコルで運動負荷試験 2 を行い、汗乳酸濃度を計測した。またこの過程で主観的疲労感 (顔面評価スケールを用いた数値評価: NRS) も計測した。以上の研究により、より '疲労している' と考えられる運動負荷試験 2 において汗乳酸濃度が早く上昇するかを検討した。

##### 3 結果

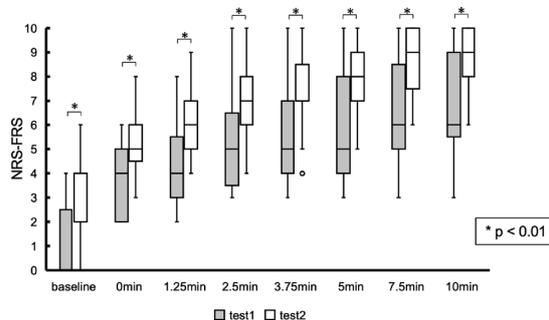


図 1 : 試験 1 から試験 2 への客観的疲労度 (NRS) の変化。NRS-FRS : 顔面評価尺度による評価。

まず NRS の検討結果を図 1 に示す。試験 1 から

試験 2 への NRS は、どの運動時点での値も試験 1 から試験 2 へ有意に増加した。この結果は試験 1 での一定負荷運動が疲労を引き起こすことを示している ( $p<0.01$ )。

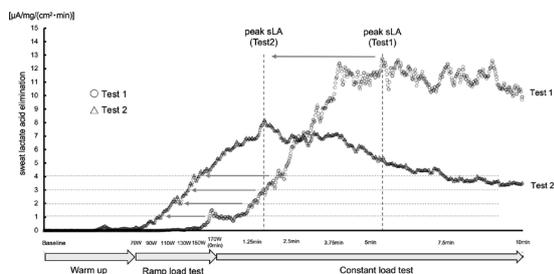


図 2：試験 1 と 2 間の汗乳酸濃度変化代表例。

### s LA: 汗乳酸濃度

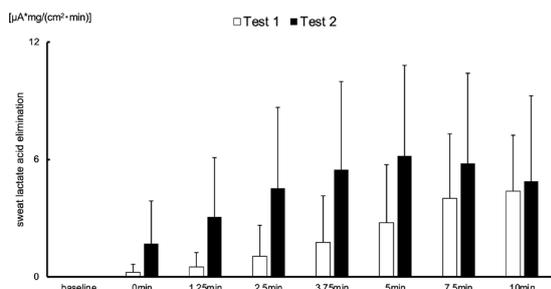


図 3：試験 1 と 2 間の汗乳酸濃度変化。

次に汗乳酸濃度変化の代表例および結果を図 2.3 に示す。図 2 のように、試験 1 よりも試験 2 にて汗乳酸が早く上昇することが示された。

## 4 考察

今回 NRS を用い定量的に確認した疲労状態下一定負荷運動を行うと、疲労していない状態と比べ汗乳酸が早期上昇することを示した。今回の汗乳酸計測手法を用いると、運動チーム内の複数の選手の評価を簡便かつリアルタイムに行うことができる。そのため、例えば試合当日のウォームアップ時の各選手の状態を休息日と比較するなど、コンディション管理に有用な可能性がある。又、疲労状態を感知することで、疲労の結果生じるけがの予防への応用が期待される。

※当報告の図は文献 2 より引用した。

※当報告の詳細な内容は文献 2 に記載している。

[発表論文]

1. 血中乳酸を用いた疲労度変化と汗中乳酸の疲労評価有用性の検討:美濃地駿介, 中島大輔, 森末隆史, 岩渕修平, 前田裕太, 大川原洋樹, 澤田智紀, 松本守雄, 中村雅也, 名倉武雄  
第 36 回日本整形外科学会基礎学術集会
2. Okawara H, Sawada T, Nakashima D, Maeda Y, Minoji S, Morisue T, Katsumata Y, Matsumoto M, Nakamura M, Nagura T. Kinetic changes in sweat lactate following fatigue during constant workload exercise. *Physiol Rep.* 2022 Jan;10(2):e15169. doi: 10.14814/phy2.15169. PMID: 35043587; PMCID: PMC8767313.

【助成 38 -42】

## 骨格筋リボソーム量の減少に着目した 模擬無重力に伴う筋萎縮の機序解明と電気刺激による予防効果の検討

研究者 日本体育大学 体育研究所 助教 小谷 鷹哉

### 〔研究の概要〕

近年、骨格筋のリボソーム量が骨格筋量に影響することが示唆されている。一方で、骨格筋への力学的負荷の減少はリボソーム量の減少を誘発することは知られているが、その予防方法はほとんど検討されていない。本研究では模擬無重力モデルである後肢懸垂マウスに EMS(骨格筋電気刺激)を行い、リボソーム量の減少メカニズムおよび EMS によるリボソーム量の減少に対する予防効果を検討した。6 日間の後肢懸垂によりリボソーム量の減少が観察されたが、毎日の EMS によりリボソーム量の減少が予防できることが明らかとなった。リボソーム合成に関わる因子の変化を検討した結果、後肢懸垂+EMS はリボソーム合成を制御する p70S6K を活性化、rRNA 合成を制御する UBF の減少を抑制することが明らかとなった。後肢懸垂によるリボソーム量の減少の抑制に EMS が効果的であることが明らかとなった。そのメカニズムとして、リボソーム合成の低下の予防が関与している可能性が示唆された。

### 〔研究経過および成果〕

近年、骨格筋の量的制御に骨格筋リボソーム量が重要となることが注目されている。そこで本研究では、模擬無重力モデルとして用いられるマウス後肢懸垂モデルにおいて、模擬無重力によるリボソーム量の減少の予防に電気刺激が有効か否かを検討した。9 週齢の雄性 C57/BL6J マウスを 2 週間の予備飼育後、通常飼育群(n=6, SED: sedentary)と後肢懸垂群(n=6, HU: Hindlimb Unloading)に分け 6 日間飼育した。後肢懸垂群の右脚の下腿三頭筋には、電気刺激(EMS: Electrical Muscle Stimulation)を 1 日 1 回計 5 日行った。後肢懸垂は図1のように、マウスの下半身を吊り下げて行った。



図 1. マウス後肢懸垂の様子

EMS は先行研究を基に、右足関節を 0°C でトルク測定装置に固定し、下腿三頭筋部に電極を貼り 100Hz の周波数で等尺性収縮を惹起した。1 日の EMS のプロトコルは、3 秒収縮 7 秒弛緩を 5 回で 1 セットとし、3 分のセット間休憩を挟んで計 5 セット行った。6 日目(最後の EMS から 24 時間後)に下腿三頭筋の一つである腓腹筋を摘出し、解析を行った。摂餌量については、通常飼育群と後肢懸垂群で有意な差は観察されなかった。腓腹筋の重量について、後肢懸垂+EMS の右腓腹筋(HU+EMS)群は、後肢懸垂のみの左腓腹筋(HU)群と比較して、有意に高値を示した(図 2)。この結果より、毎日の EMS は後肢懸垂による骨格筋萎縮に対する抑制効果があったと考えられる。

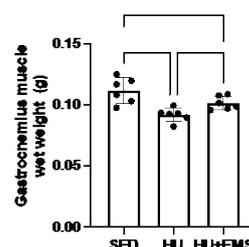


図 2. 腓腹筋湿重量  
平均値±標準偏差  
\*  $P < 0.05$

次にリボソーム量について、リボソームは複数のリボソーム RNA(rRNA: ribosomal RNA)およびリボソームタンパク質(rp: ribosomal protein)で構成されているため、リボソーム大サブユニットの構成要素である 28S rRNA および rpL10 を、リボソーム小サブユニットの構成要素である 18S rRNA および rpS3 の解析を行った。その結果、28S rRNA、rpL10、rpS3 の量は HU 群が SED 群および HU+EMS 群と比較して有意に低値を示し、18S rRNA も減少傾向が観察された。HU+EMS 群と SED 群の間に差は観察されなかった(図 3)。これらの結果より、後肢懸垂によるリボソーム量の減少の予防には、EMS が有効であることが示された。

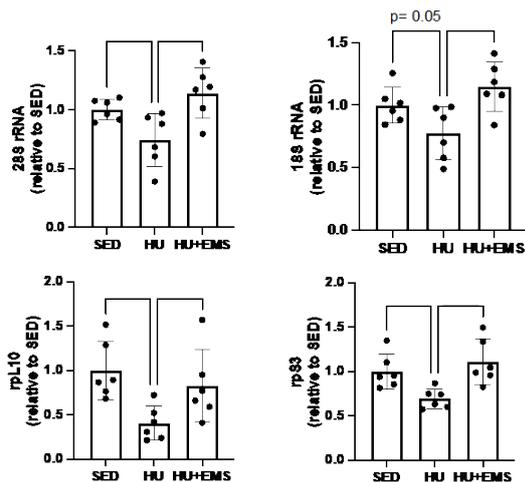


図 3. リボソーム量  
平均値±標準偏差、\* $P < 0.05$

次に、EMS がリボソーム量の減少を予防したメカニズムについて検討した。先行研究では、骨格筋萎縮時ではリボソーム合成が低下することが報告されている。そこで、リボソーム合成の活性化を制御する因子である p70S6K、rRNA の転写を制御する因子である UBF や Cyclin D1、c-myc について Western Blot により解析を行った(図 4)。p70S6K のリン酸化量は、HU+EMS 群が SED 群および HU 群と比較して有意に高値を示

した。Cyclin D1 タンパク質量は HU 群で SED 群と比較して減少傾向が観察された。UBF タンパク質量は、HU+EMS 群が HU 群と比較して有意に高値を示し、HU+EMS 群と SED 群の間に差は観察されなかった。これらの結果より、EMS は後肢懸垂によるリボソーム合成の低下の予防に効果的であることが示された。

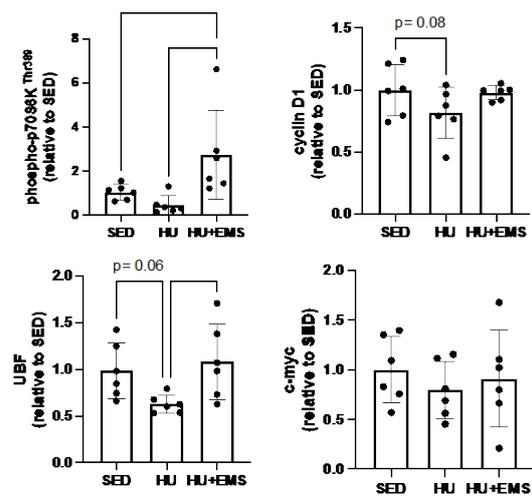


図 4. リボソーム合成に関わる因子  
平均値±標準偏差、\* $P < 0.05$

本研究結果から、模擬無重力モデルにおけるリボソーム量の減少の予防には EMS が効果的であり、そのメカニズムとしてリボソーム合成に関わる因子の低下を予防している可能性が示唆された。近年、技術の発展により EMS 機器がサイズや価格の観点からも容易に手に入るようになってきている。本研究では、模擬無重力モデルである後肢懸垂モデルでのリボソーム量の減少抑制に EMS が有効であることが示されたが、ギプス固定や神経損傷、加齢や疾患などに伴うリボソーム量の減少の予防にも効果的である可能性が考えられる。将来的に、本研究の結果は老若男女が容易に実施できる EMS による効果的な筋萎縮予防方法の確立に繋がることを期待される。

〔発表論文〕なし

## 【助成 38 -43】

### 大学生のインターンシップは就職後にも効果があるのか —就職・採用におけるマッチング機能の有効性の検証—

研究者 北海道大学高等教育推進機構 教授 亀野 淳

#### 〔研究の概要〕

本研究は、インターンシップの就職・採用における有効性を検証することを目的として実施し、まず、理論的・政策的背景の整理を行った上で、その有効性が入社後も継続するのかを定量的に把握するため、入社約3年後の大卒従業員を対象としたアンケート調査を実施した。その結果、インターンシップ先の企業や業種に就職した者とそうでない者を比較することにより以下の3点を明らかにした。(1)前者の方が後者よりも、社風、人間関係などで入社時の社内認識度が高かった。(2)入社時に人事制度についての認識度が高い者は離職傾向が低かった。(3)前者の方が後者よりも離職割合がやや低かったが、その傾向はインターンシップ先企業への就職よりもインターンシップ先業種への就職の方が顕著であった。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. はじめに

日本の現行の就職・採用システムでは、就活日程の早期化、大学教育の形骸化、インターンシップの短期化などの歪みが生じており、こうした労力を双方が過大に負担しながらも決して満足する結果が得られておらず、新たなマッチング機能の構築が急務であるといえる。その一手段としてインターンシップが活用できないかという視点で研究を実施した。

##### 2. 研究目的

これまでのインターンシップにおける採用や就職への効果についての研究は、そのほとんどは就職・採用時に着目してきたものであり、入社後の影響についても、特定業界、個別企業についての分析である。

そこで、本研究では、主に、就職後3年後に着目してインターンシップの有効性が入社後も継続するのかを定量的に検証することを目的とする。特に、就職

時における学生側からみた情報の非対称性をインターンシップで軽減し、就職者のリアリティショックを軽減する効果があるのかどうかを明らかにするため、以下の3つの仮説を設定した。

- ①インターンシップ先の企業や業種に就職した学生は入社時の社内把握の認識度より高い。
- ②入社時の社内把握の認識度が高いほど離職や離職意向は低い。
- ③インターンシップ先の企業や業種に就職した学生は離職や離職意向が低い。

##### 3. 研究方法

本研究では、まず、これまでの日本の政策動向や国際比較により日本のインターンシップは実態として「就職・採用目的」として実施されていること(亀野 2021a)、及びその理論的背景を経営学の理論等を援用し整理を行った(亀野 2021b)。その上で、2018年4月に四年制大学を卒業し民間企

業に就職した者を対象として、2021年3月に株式会社クロス・マーケティングを通じてインターネット上の質問紙により995名の回答を得た。

#### 4. 分析結果

入社時の社内認識度（計25項目）についての回答をインターンシップ先の企業や業種に就職した者とそうでない者で有意な差があるかを統制変数でコントロールした重回帰分析によると、社風、人間関係などで有意な差がみられたが、その他の項目ではあまり差がなかった。したがって、仮説①については、一部のみ支持された。

次に、入社時の社内認識度を3年以内に離職した者と離職していない者で比較すると、離職していない者の方が社内認識度は高く、特に、年次有給休暇の取得のしやすさ、労働時間制度など人事制度に関するものが高くなっている。つまり、入社時に人事制度について認識度の高い者は離職が少なくなっているといえる。したがって、仮説②はおおむね支持された。

さらに、インターンシップ先の企業や業種への就職の有無と、実際の離職や離職意向に差があるのかをみると、実際の離職の有無ではインターンシップ先の企業や業種に就職した者の方が離職割合は低くなっており、その傾向は企業よりも業種の方が大きくなっている。また、離職をしていない者の転職意向も同様の傾向がみられた。これを、重回帰分析結果でみると、インターンシップ先企業への就職の有無では明確な差がみられなかったが、インターンシップ先の業種に就職した場合は、ある程度有意な差がみられた（表1）。つまり、仮説③はおおむね支持された。

表1 インターンシップ先の企業や業種への就職と離職との関係  
（ロジスティック回帰分析）

		モデル①	モデル②
		B	B
定数		0.218	0.032
性別（男性1：女性0）		0.315	0.275
学部（文系1：理系0）		-0.096	-0.004
業種ダミー （基準：製造業）	情報通信業	-0.254	-0.304
	卸売業、小売業	-0.708 †	-0.708 †
	金融業、保険業	0.143	0.064
	医療、福祉	-0.652	-0.789
	その他	-0.371	-0.414
規模ダミー （基準：1～99人）	100-299人	0.478	0.528
	300-999人	0.981 **	1.000 **
	1000-4999人	0.963 **	0.986 **
	5000人-	1.165 ***	1.169 ***
IS先企業への就職の有無		0.421	
IS先業種への就職の有無			0.619 **
n		544	544
Nagelkerke R2 乗		0.083	0.097

（注） †：p<0.1、\*：p<0.05、\*\*：p<0.01、\*\*\*：p<0.001

従属変数：離職（離職0：継続勤務1）

独立変数：IS先企業への就職の有無（IS先企業に就職あり1）

IS先業種への就職の有無（IS先企業に就職あり1）

#### 5. 考察と今後の課題

仮説①～③については、一部支持された。ただし、インターンシップ先の「企業」への就職では支持されず、「業種」への就職では支持されるという傾向がみられた。今後は諸外国との比較やインタビュー調査、さらには企業側への調査などを実施し、インターンシップの就職・採用に係る活用状況やその方策をより深めていきたい。

〔発表論文〕

1. 亀野淳(2021a)「日本における大学生のインターンシップの歴史的背景や近年の変化とその課題—「教育目的」と「就職・採用目的」の視点で—」『日本労働研究雑誌』、第733号、pp.4-15
2. 亀野淳(2021b)「企業側からの視点によるインターンシップ研究の発展可能性に関する一考察」『インターンシップ研究年報』、第24号、pp.61-69

## 【助成 38 -44】

### 製造業従業員の働きがいと労働生産性の向上を両立させる 新たな指標の開発およびその実証研究

研究者 金沢大学融合研究域融合科学系 教授 金間 大介

#### 〔研究の概要〕

本研究は主に地方における労働集約的性質の強い製造業に従事する従業員を対象に、彼らの働きがいと労働生産性の向上を両立させる仕組みを開発し、社会実装することを目的とする。これはSDGsのゴール8『働きがいも経済成長も』の実現に直結する。本研究の結果、働きがいと労働生産性を両立させる新たな指標の開発に成功した。また、協力企業においてその成果の実証試験を繰り返し、将来的に新製品や新サービスに実装することで広く社会に普及させていくための目途が立った。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. はじめに

日本の労働生産性の低さが指摘されて久しい。OECD データに基づく 2018 年の日本の時間当たり労働生産性(就業 1 時間当たりの付加価値額)は、46.8ドル(購買力平価(PPP)換算)で、米国の 74.7ドルのおよそ 6 割強しかない。これは OECD 加盟 36 カ国中 21 位であり、主要先進 7 カ国で見ると、データが取得可能な 1970 年以降、最下位の状況が続いている。

業種で見ると、製造業はサービス業に比べ高い水準を保っているものの、総出荷額約 300 兆円、総従業員数約 750 万人の巨大産業において労働生産性を高めるインパクトは大きい。特に食料品や生産用機械器具など、作業の主要箇所人手を要する労働集約的産業では労働生産性が上がらず、またこれらの多くは地方に立地していることから、当該地域の経済成長を阻む要因となっている。そのことが結果的に地域の労働力確保の足かせとなり、昨今の人材不足に拍車をかけている。

他方、働きがいに関する指標においても、日本は諸外国に比べ低い水準にある。『ベター・ライフ・インデックス』(OECD)、『世界のエンゲージメントと職場環境実態』(Steelcase 社)など、世界各国で比較可能ないずれの調査においても日本は世界最低水準にある。例えば Steelcase 社の報告では、職場環境満足度において日本は世界 20 カ国のうち最低で、他のどの国よりも職場への不満が強く、また職場環境に対する愛着も低い。

このような問題意識を受け、本研究は主に地方における労働集約的性質の強い製造業に従事する従業員を対象に、彼らの働きがいと労働生産性の向上を両立させる仕組みを開発し、社会実装することを目的とする。これはSDGsのゴール8『働きがいも経済成長も』の実現に直結する。

##### 2. 調査研究方法

本研究は、工学的アプローチと社会科学的アプローチを組み合わせた、文理融合のプロセスを採用している。

##### 2.1. 工学的アプローチ

北陸地方に拠点を置く一製造業の協力の下、当該企業の従業員の了承を得た上で、彼らの作業状況や動作、導線などをカメラ等のセンサーによって取り込み、データとして抽出する。同時に、実際の作業結果の記録も取得し、データベース化する。

## 2.2. 社会心理学的アプローチ

従業員の心理や主観をアンケートやインタビュー等を通してデータ化していく。主な質問項目は労働中の満足度や集中度、労働前後の時間も含めた幸福感であり、様々な問いかけを組み合わせることでこれを指標化していく。

## 2.3. 両アプローチの統合とデータベース化

以上の2つのアプローチから得られたデータを、改めて1つのデータベースとして統合する。こうすることで、各従業員の詳細な動作や作業結果と、その時々々の満足度や幸福度を1つのデータセットとして分析することができる。

## 3. 結果と考察

図1に、本研究で想定した働きがいと労働生産性に関する関係を示す。図左にある各要素が、最終的に働きがいや労働生産性に寄与するかどうかを、上記の調査研究の方法から得られたデータセットを用いて検証した。その結果を表1と図2に示す。

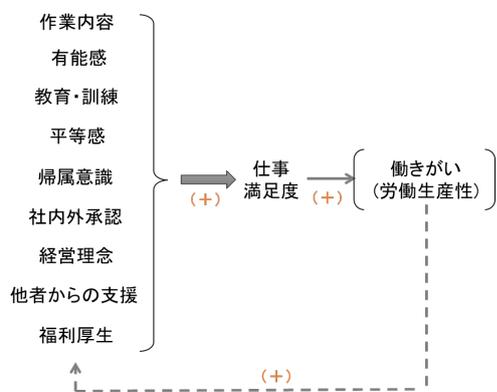


図1 働きがいの各指標と仕事満足度の関係

表1の結果から、本研究で想定したほぼすべての要素が働きがいの代理変数とした仕事満足度に正の影響をもたらすことが明らかとなった。

また、表1等の結果を受け、工場現場のマネージャーらが把握しやすいように改良、可視化した結果が図2である。このように表現することで、学術的な知見を持たない実務家にとっても研究結果を直感的に理解することが可能となる。

説明変数: 仕事満足度	係数	標準誤差	t値	標準化係数	説明変数: 働きがい	係数	標準誤差	t値	標準化係数
社員タイム	0.157	1.611							
フレックスタイム	0.280	0.708							
女性タイム	1.050	0.993							
継続年数	-0.039	0.044							
リーダータイム	-0.355	0.840							
有能感(実用)	0.861 ***	0.183	4.70	0.424					
教育・訓練					0.968 ***	0.227	4.27	0.424	0.474
同僚					0.889 ***	0.206	4.32	0.424	0.474
上司					1.022 ***	0.182	5.62	0.424	0.474
平等感					0.888 ***	0.183	4.85	0.424	0.474
帰属意識					0.959 ***	0.153	6.27	0.424	0.474
Observations								33	
Adjusted R <sup>2</sup>	0.568				0.491				
F-statistic	19.05				19.05				

説明変数: 仕事満足度	係数	標準誤差	t値	標準化係数	説明変数: 働きがい	係数	標準誤差	t値	標準化係数
社員タイム									
フレックスタイム									
女性タイム									
継続年数									
リーダータイム									
他者からの支援	1.013 ***	0.184	5.49	0.424					
社内外承認					0.900 ***	0.172	5.23	0.424	0.474
経営理念					1.120 ***	0.200	5.60	0.424	0.474
福利厚生					1.202 ***	0.199	6.04	0.424	0.474
Observations								33	
Adjusted R <sup>2</sup>	0.489				0.521				
F-statistic	19.05				19.05				

表1 働きがいと労働生産性に関する分析結果

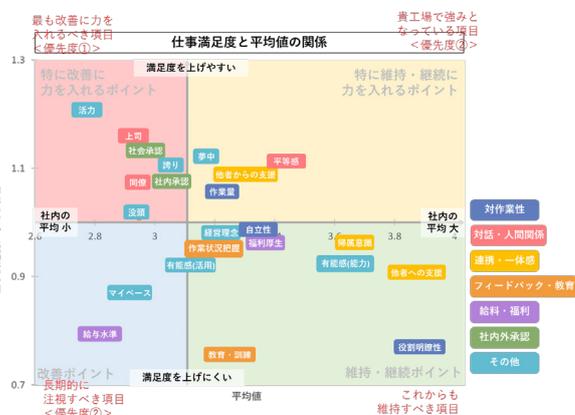


図2 働きがいと労働生産性に関する各指標の可視化例

〔発表論文〕

1. 金間大介「製造業における働きがいと労働生産性を計測するための新たな指標開発に関する研究2021年度」研究・イノベーション学会年次学術大会(2021)

## 【助成 38 -45】

### ポスト GIGA スクールを支える, ICT を用いた学習者中心の教育方法の開発

研究者 静岡大学情報学部 講師 遠山紗矢香

#### 〔研究の概要〕

本研究では「ポスト GIGA スクール」、つまり GIGA スクール構想による児童生徒の 1 人 1 台端末配布後の日本において、主体的・対話的で深い学びを実現するために ICT を活用する教育方法を、学校現場の教師とともに整備することを目的とした。具体的な検討対象として、STEAM 教育・ICT 活用による生徒を取り巻く状況の変化・教師の支援の 3 点を抽出し実践研究や調査、意見交換を行った。その結果、1.ICT は学習者の「できること」を増幅すること、2.ICT を教師がどのように活用するかが学習者を方向付ける可能性があること、3.学習者が主体的に活用することに ICT の意義があること、が示された。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では「ポスト GIGA スクール」、つまり GIGA スクール構想による児童生徒の 1 人 1 台端末配布後の日本において、主体的・対話的で深い学びを実現するために ICT を活用する教育方法を、学校現場の教師とともに整備することを目的とした。このために、ICT を活用した教育をすでに展開している地域の先導的な小学校等教師らと大学の間の既存の連携関係を活かして実践研究を推進した。なお、本研究期間においては、新型コロナウイルス感染症対策のため、筆者を含む研究参加者は県外への出張ができかねる状況であった。また、緊急事態宣言下では学校への訪問も不可能となったため、オンライン会議やメール等でのやりとりを活用しながら研究を推進した。

本研究ではポスト GIGA スクールにおける主体的・対話的で深い学びの実現を志向するうえで重要な検討対象として、STEAM 教育・ICT 活用による生徒を取り巻く状況の変化・教師の支援の 3 点を抽出した。これらに迫るために、具体的には[1]~[3]の 3 項目に沿って検討を進めた。以下では各成果を報告する。

#### [1] 1 人 1 台端末を活用した STEAM 教育の実践研究

1 人 1 台端末は学習者が主体的に知識を得たり、得た知識を統合したり、学習者なりの表現をしたりする活動を強力に支援する。こうした学習者主体の活動として近年注目されているのは STEAM 教育である。STEAM 教育では学習者が中心となって、単一の教科に閉じることなくプロジェクト型の学習を進める形態が広く知られている。本研究では STEAM 教育として、1 人 1 台端末を活用して小学校 5 年生児童が総合的な学習の時間を核としながら、教科横断的な学習を進めていく実践研究の推進を行った。

授業作りは浜松市立雄踏小学校の菊地寛教諭が主となって行い、遠山は ICT 活用場面を中心とした学習活動の設計において意見を述べた。授業内ではものづくり教育として児童がデザインを行う場面があったが、絵を描くのが得意でない児童も ICT を用いてデザインを何度も試作して周囲の児童と意見し合う活動を通じて、思い通りのデザインへと近づけることができた。本授業の成果は、一般社団法人日本教育情報化振興会 ICT 夢コンテストにて「GIGA スクール

下における地域の産業を取り入れたSTEAM教育の「実践と効果」として優良賞を受賞した。

## [2] 1人1台端末の活用による、生徒の学校生活の変化に対する調査

学校での1人1台端末の日常的な活用は、授業だけでなく生徒の自宅学習やオンライン学習、生徒同士のコミュニケーションの在り方にも影響を与える。本研究ではGIGAスクール構想よりも前から1人1台端末による学習環境を実現していた静岡聖光学院中学校・高等学校と連携して調査を実施した。

調査において、生徒に対しては、学年等が異なる生徒8名に対して各1時間弱、ICTを活用した授業や学校生活全般についてインタビュー調査を行った。教師については担当教科や年代等が異なる7名の方へのインタビュー調査を通じて、授業でのICT活用の様子を尋ねた。これらから得られた情報を踏まえて生徒対象のアンケート調査を作成し、同学校の協力を得て生徒317名の回答を得た。

アンケート調査の結果、1人1台端末は生徒にとってなくてはならない文房具の1つとして存在していることが示唆された。一方で、普段授業等でどのように1人1台端末を活用していたかによって、生徒の受け止め方が異なっていた傾向も示された。本調査の結果は2021年10月22日に同学校で開かれた「ICT公開研修会」にパネリストとして登壇した際に一部を紹介した。

## [3] 1人1台端末活用の利点と課題の共有

[1]と[2]で連携した先生方や、以前からICTを活用した実践について相互に情報共有を行ってきた先生方を招いて、10月24日にオンラインシンポジウムを開催した。1と2やその他の学校からは、1人1台端末が導入されても学校によってその在り方は様々だと

いう情報が得られていたため、シンポジウムでは、所属校のICT環境、その環境を活用した実践例、実践を通じて直面した課題について意見を共有することで、今後児童生徒の学びを促すためにどのようなICT環境や授業設計が求められるのかを展望した。

シンポジウムには、小学校から高等学校までの管理職を含む先生方10名、および教員志望等の学生2名が参加した。ICTのより良い活用方法は児童生徒からのヒントが有益に働くことも多いため積極的に活用していくのが重要であること、先生やアプリから知識を伝達するための道具ではなく子どもが主体的に学びを進める道具として端末を位置づけるとともに、持ち帰りや教室での端末の保管場所も含めて端末活用の敷居を下げることの重要性が議論された。また、既存のデジタル素材の中から、生徒の学習を特に推進すると期待できるものを教師が選定して生徒へ提案することも、1人1台端末時代における教師の仕事の在り方としても有効であることが示された。さらに、高等学校での1人1台端末の導入推進は必須だという見解も出された。成果はwebサイトにて公表した。

以上より、[1]ICTは学習者の「できること」を増幅すること、[2]ICTを教師がどのように活用するかが学習者を方向付ける可能性があること、[3]学習者が主体的に活用することにICTの意義があること、が示された。これらが、今後1人1台端末が整備されていくと考えられる高等学校も含めて無理なく当たり前のこととして定着していくことを願いながら、今後も実践研究を進めていく予定である。

〔刊行物〕

1. 菊地寛・遠山紗矢香(2022). 生活に活かすプログラミング教育. 『たのしい学校 60号』, pp.24-25, 大日本図書.

## 【助成 38 -46】

ストーリー中心型教育におけるチャットボットの活用が学習意欲に与える影響に関する開発研究

研究者 千葉工業大学情報科学部 教授 高橋暁子

明治学院大学心理学部 准教授 根本淳子

新潟大学教育・学生支援機構 特任准教授 竹岡篤永

### 〔研究の概要〕

本研究では、大学教育におけるソフトウェア開発技法科目を題材に、GBS 理論に基づきシナリオ型教材を開発した。本教材のメインとなるシナリオ展開の部分は、LINE チャットボットとして開発した。学習者の発言(テキスト文)や選択に応じて、次のストーリー展開が変わる点に特徴がある。また、シナリオ展開の前には使命・カバーストーリー・役割を説明する導入部を用意し、シナリオ展開後は個別に異なる結末を返すこととした。3 名の協力者による形成的評価の結果、操作性に大きな問題がなく、学習者の動機づけに寄与する可能性が示唆された。

### 〔研究経過および成果〕

#### 1.はじめに

ストーリーを用いたシナリオ型教材の開発が、e ラーニングの発展とともに盛んになっている。シナリオ型教材の理論的基盤としては、Goal-Based Scenario (以下 GBS) 理論がよく用いられている。本研究では、大学教育におけるソフトウェア開発技法科目を題材に、GBS 理論に基づきシナリオ型教材を開発した。

#### 2.GBS 理論に基づく全体設計

本研究の対象は、大学 3 年生を対象としたソフトウェア開発技法を学ぶ科目である。本教材は当該科目の授業 3 回分の内容に対応させる。GBS を用いてシナリオ型教材を設計するには、学習目標・使命・カバーストーリー・役割・シナリオ操作・情報源・フィードバックの 7 つの要素が必要である。表 1 に本研究における 7 要素の位置づけを示す。

#### 3.開発教材

本教材を利用する際に、最初に使命・カバーストーリー・役割を説明する Web ページを開発した。図書館

という、大学生が理解しやすい舞台を設定し、現実世界の文脈では大学生が助言を求められることはまずないので、架空の世界からの SOS を受ける形でアドバイザーという役割に就任することとした。

学習目標は、GBS においては学習者に明示しないこととなっているため、本教材上にも明示しない。ただし、対面授業においては毎回目標を提示する。

シナリオ操作として、9 つのシーンを用意した。1 シーンは 5~10 分程度の短いもので、授業 1 回分の事前学習につき、3 シーンを提供することとした。本研究では、シナリオ操作において学習者にとって身近なメッセージングアプリケーションである LINE を用いた(図 1)。チャットボットによって、学習者の発言(テキスト文)や選択に応じて、次のストーリー展開が変わる。架空の登場人物と疑似的なメッセージ交換をすることで、テキストをメインとしたシナリオ操作でも十分な没入感が得られるのではないかと考えた。

フィードバックは、一定の区切り(3 シーン)毎に、シナリオ操作画面からリンクを張られた Web ページとし

で提示した。情報源としては、いつでも教科書が閲覧できるとともに、シナリオ操作画面で「ヘルプ」と発言することでヒントが得られる。

### 3. 形成的評価

3名の大学生を被験者として、形成的評価(1対1評価)を実施した。各自のスマートフォンを用いて1シーンを体験したのち、アンケートに回答してもらった。

アンケートの結果、全体的な操作性(5件法;5が非常に良い)に関しては全員4と評価した。一方、文字入力が必要な場面で入力待機状態に気づかないといった意見が出た。動機づけに関しては、ARCS動機づけモデルに基づく4質問(各5件法;5が非常に良い)をしたところ、それぞれの平均は興味が4.3、関連性が4.6、達成感が3.6、満足感が4.3となり、高評価であった。以上から、本教材の操作性に大きな問題がなく、動機づけに寄与する可能性が示唆されたが、今後、協力者を増やして検証していく必要がある。

[発表論文]

1. 高橋暁子, 根本淳子, 竹岡篤永 (2021) シナリオ型教材におけるチャットボット活用の提案. 第46回教育システム情報学会全国大会論文集, pp.13-14

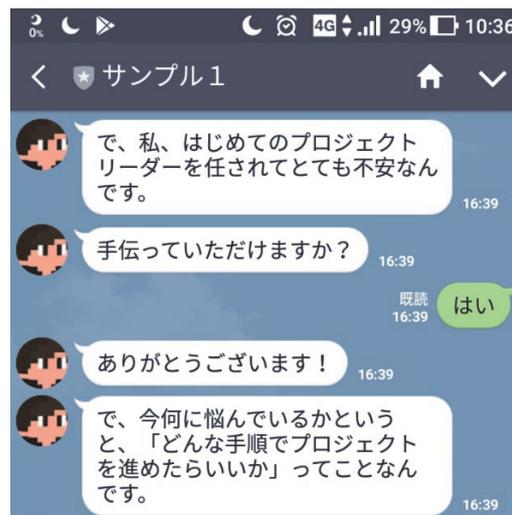


図1 シナリオ操作画面

表1 GBS要素と本教材の対応

要素		本教材：図書館再開発プロジェクト	ツール
シナリオ文脈	使命	プロジェクトマネージャーに降りかかる諸問題に対して、適切な助言をし、プロジェクトを成功に導く（問題点を改善した図書館を稼働させる）こと。	Web ページ
	カバーストーリー	架空の世界で、図書館再開発プロジェクトが発足する。初めてプロジェクトマネージャーに任命されたA氏は、問題が起こるたびに学習者に助言を求める。	
	役割	学習者は、図書館開発プロジェクトのプロジェクトマネージャーA氏へ助言をするアドバイザー。	
学習目標		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 代表的なソフトウェア開発プロセスモデル（ウォーターフォールモデル、アジャイルプロセスモデルなど）の利点と欠点を、具体例を挙げて説明できる</li> <li>2. 未知のソフトウェア開発事例を読み、用いられているプロセスモデルを指摘することができる</li> </ol>	本教材上には明示されない
シナリオ操作		全9つのシーンで構成される。シーン終盤での助言選択により、次に選択されるシーンが変化する。不適切な助言を一定数行うと、強制終了となる。学習者はいつでも最初のシーンからやり直しができる。	LINE チャット
シナリオ構成	フィードバック	ある区切りまで終了する（または強制終了する）と、行動選択に応じたフィードバック画面が表示される。フィードバック画面では、不適切な行動選択に対してはなぜ不適切だったかを解説し、適切な行動選択のヒント（情報源）を提示する。	Web ページ
	情報源	学習者はいつでも「ヘルプ」と発言することで、該当するシーンのヒントとなる資料を読むことができる。	Web ページ 教科書

## APD(聴覚情報処理障害)に対する教育支援法の実証的臨床研究

研究者 愛媛大学教育学部 教授 立入 哉

### 〔研究の概要〕

近年、新たな聴覚障害として、聴覚情報処理障害、APD (Auditory Processing Disorder) の存在が指摘されている。APD とは「聴力閾値の悪化はないものの、騒音下に語認識に特異的に困難が生じる障害」と定義されている。APD 児は聴力閾値に問題がないため、聞こえにくいという形で気付かれることがなく、教室での聞こえにくさの結果による学習の遅れや困難が現れることによって気付かれている。結果、学習障害児として対症療法的な対応が行われており、APD に対する原因療法的な教育的支援が行われていない。本研究は、APD がある児の早期発見、早期教育支援、APD に対する原因療法的な教育的支援を行ったので報告する。

### 〔研究経過および成果〕

APD がある児に対する原因療法による教育支援を開始するためには、1) 早期に APD がある児を発見し、2) スクリーニングで発見された児の APD 症状を精査し、3) APD に直接効果がある訓練プログラムを実施し、成果を評価することが必要である。今回の研究では下記の成果 1 と、成果 2 を得ることができたので報告する。

#### ●成果 1 : 小学校児童を対象にした APD スクリーニングアプリの開発

APD がある児を通常の学校検診で発見することが困難であり、APD 症状を早期に把握して、適切な APD に対する原因療法的な教育支援を行う必要がある。そこで、雑音下で 3 つの数字を聞き取り、タブレット上に回答することで、自動的に 50% の聴取が可能となる音声と雑音の音圧差 (SN 比) を求められるアプリを開発した。ギガスクー

ル構想を受け、小学校児童が教室でインターネット回線に接続されたタブレットを 1 人 1 台持つようになったため、アプリによる APD の集団検診を行えた。小学校児童の協力を得て基準値 (+1dB) を求めることができた (図 1)。今後、APD スクリーニングアプリとして利用促進を図りたい (成果発表=文献 1)。

[http://www.h-tachi.com/DTT\\_1dbStep/index.html](http://www.h-tachi.com/DTT_1dbStep/index.html)

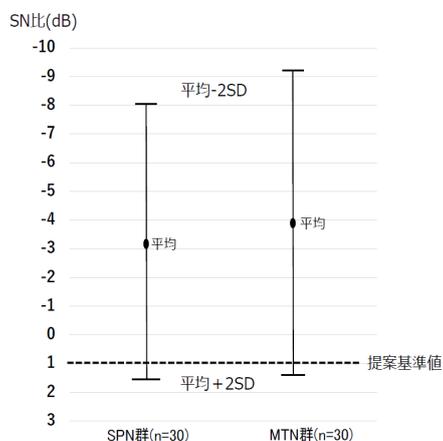


図1 50%正答率となる平均SN比±2SDと提案基準値

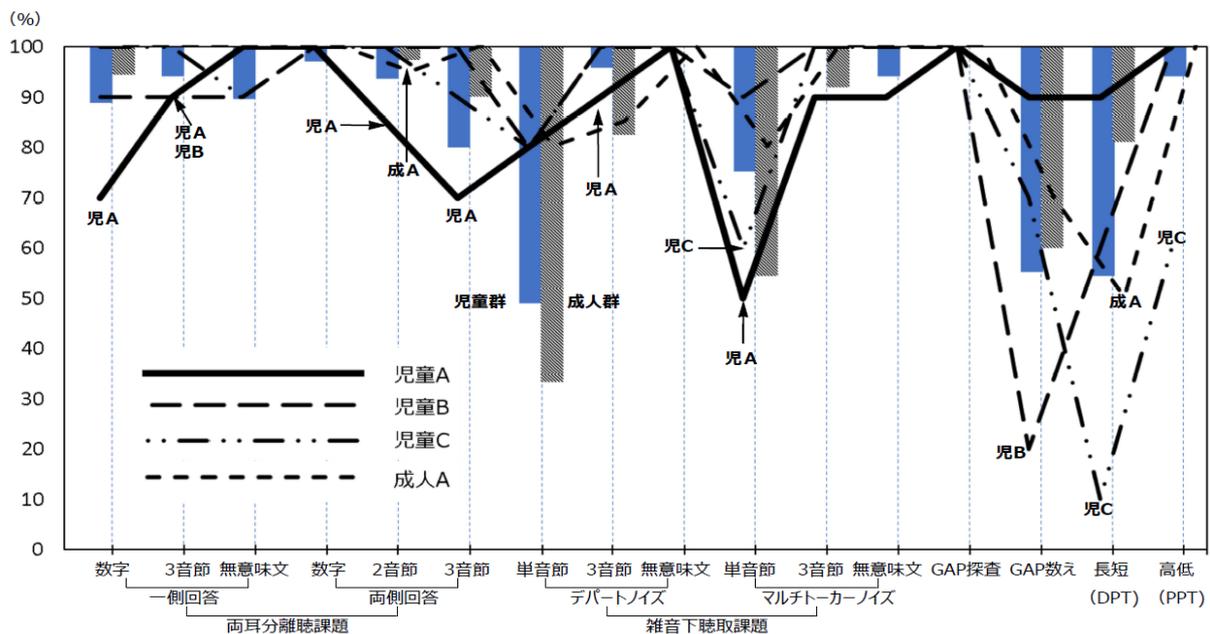


図2 児童群(左側)・成人群(右側)の基準値下限と除外被験者の結果 (雑音下聴取課題のSN比は児童 -10dB, 成人-15dB)  
外れ値となっている箇所にラベルを打ってある。折れ線は除外した4名の結果であり、うち太線が8項目について外れ値となった児童Aの結果  
シェード部分より低値であれば平均-2SDより低値、シェードがない部分は一つでも不正解のとき基準値以下となる

●成果2：APD 評価(精査)アプリの適応

作成した iPad 上の APD 評価(精査)アプリを  
中四国の拠点耳鼻咽喉科にて実施できるように  
した。これらにより発見・紹介された APD 児者  
に対し、愛媛大学教育学部において雇用了言語  
聴覚士によって成人1例，児童例3例について，  
APD 症状を検出できた(図2)(論文2)。

●成果3：DIID トレーニングツールの臨床応用

訓練への協力の同意が得られた小児例に週1回  
の DIID トレーニングを行った。結果，DIID トレ  
ーニングにより語音の音源への集中が可能とな  
る(本人いわく「雑音下での聞き取りのコツを学  
べた」となり有意に成績が向上した(論文3)。  
貸出可能な訓練用 iPad に限りがあり，本人に  
iPad を購入していただく必要があり，その出費に  
見合う成績向上のエビデンスを明確にする必要  
がある。DIID 訓練は継続中であり，明確なエビ

デンスを得るには至っていないのが今後の課題  
である。

※DIID=Dichotic Intensity Increase Difference  
：アメリカ・EU 圏で広く用いられている APD  
ハビリテーション法の一つ

[発表論文]

1. 立入 哉：APD スクリーニングを目標とし  
た日本語版 DTT の試作. *Audiology  
Japan* 64 : 527-527,2021
2. 立入 哉，中村麻弥，八田徳高：APD (聴  
覚情報処理障害) 評価アプリの試作とその  
適用. *Audiology Japan* 65 : 印刷中,2022
3. 八田徳高，立入哉：聴覚情報処理機能訓練  
アプリを適応した1例. 第66回日本音声  
言語医学会学術講演会,2021

## 【助成 38 -49】

### 批判的思考力の育成と評価を志向した中等数学教材の開発とその実証的研究

研究者 高知大学教育学部 准教授 服部 裕一郎

広島大学附属中・高等学校 教諭 井上 優輝

埼玉大学教育学部 准教授 松原 和樹

高知大学教育学部 講師 袴田 綾斗

大学入試センター 試験問題調査官 久富 洋一郎

#### 〔研究の概要〕

本研究の目的は中学校高校数学教育に焦点をあて、批判的思考力の育成と評価を志向した中等数学教材を開発し、実践を通してその有効性を検証することである。研究の結果、社会的オープンエンドな問題「60秒チャレンジの新ルールを提案しよう」を開発し、授業実践では、生徒自らが主体的に各々の社会的価値観に基づく新指標を作成する様相を特定することができた。またルーブリックを用いた一連の評価活動は、生徒の批判的思考を一定程度捉える機能を果たすことができた。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究は、中学校高校数学教育に焦点をあて、批判的思考力の育成と評価を志向した中等数学教材を開発し、実践を通してその有効性を検証することを目的とした。授業実践では、ルーブリックを用いて複数の教員が生徒の成果物(レポート)を評価し、また授業内においても生徒同士の相互評価活動を行った。本研究における教材開発の理論的基盤は、「社会的オープンエンドな問題」の枠組みに依拠し、数学教育における批判的思考力の捉え方については以下の定義(広義の批判的思考力)を暫定的に設定した。《与えられた問題について、表面的な相違に惑わされず本質を見抜き、自身の価値観に基づいて構成した数学的モデルを根拠に解決案を提出すること。また、他者の解決案に対して、その妥当性や信頼性を判断しながら、自身の解決案を更により良いものへ修正しようとする。》

本研究では、社会的オープンエンドな問題「60秒

チャレンジの新ルールを提案しよう」を開発し、国立大学附属高校2年生1クラス(男子23名、女子17名、計40名)において、2021年6月23日4限、6月28日4限、6月29日2限において計3時間の授業を実践した。高校生に取り組みさせた中心的課題は以下である。

K小学校で『学年対抗60秒チャレンジ』が行われる。本年度も今までと同じルール(学年平均が60秒に近い学年が優勝)のままで良いのだろうか?『学年対抗60秒チャレンジ』の新しいルールを検討・提案せよ。

「60秒チャレンジ」とは、個人が目をつぶってストップウォッチをスタートさせ、60秒経ったと思ったときストップし、60秒に近いタイムを目指すというゲームである。このゲームは実際の小学校で現実的にレクリエーション大会として開催された。授業は高校生を対象に、学年対抗で競わせた生データを用いて展開した。データは2大会分収集されており、そのうちの1大会において、1年生が2位となっていた。その1年生デー

タは散らばり具合が他学年より大きい特徴を持っていた。授業では、「平均値」を優勝の指標として採用することの妥当性を検討させることがねらいとされた。授業を実施したクラスの8グループによる指標の改善案は以下の7通りのアイデアで分類される結果となった(ア:小数第一位切り捨ての問題点を考慮する, イ:外れ値を考慮する, ウ:平均値評価の問題点から絶対偏差を考える, エ:区間を設定して重みを付ける, オ:区間の重みに学年間で差を設ける, カ:区間の幅を学年ごとに調整する, キ:特別ポイント(ぴったり賞など)を設ける)。また本研究では、生徒のワークシートを以下のルーブリック(表1)によって評価した。生徒の重視した価値観を見取り、生徒が発揮した批判的思考力の成果を特定することを試みた。生徒のワークシートの具体や評価結果の詳細については、[発表論文]を参照頂きたい。

表1 ルーブリックによる評価

S	A	B	C
Aを満たしており、かつ、いくつかの異なる観点から根拠が明示されている。教員・小学生という異なる対象にとってわかりやすいように工夫している、などの優れた点が含まれている。	考えたルールがよいと判断される根拠がわかりやすく説明されており、それを多くの人が受容可能であると判断した根拠も含まれている。	考えたルールがよいと判断される根拠を何らかの形で説明できている。	記載がない 大きな誤りを含む など

本授業では、高校生達によって小学生をより楽しませようとルールをより良いものに改善しようとする様相が見られ、またそれは他者の意見を建設的に取り入れ、自己改善に努める批判的思考として特定された。このことは生徒の授業後のアンケート記述を図1の共起ネットワーク図<sup>1)</sup>で示した際、「話し合う」と「改善」が共起されていることから特徴づけることができる。また、数学的により洗練されたルールを創造しようと批判的思考を働かせるグループが多数見られた。平均値を採用することの問題点、データの小数点以下を切り捨てることの問題点、また外れ値に着目する点等

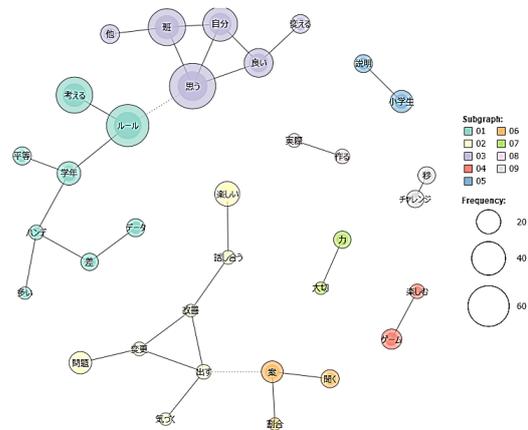


図1 共起ネットワーク

は表面的にデータを俯瞰するだけでは指摘できず、まさに複眼的・熟慮的に数学的考察を行った結果である。また、低学年のためにハンデをつけるという思いやりの価値観に基づいた改善案は、60秒チャレンジが学校のレクリエーション大会として皆が楽しめるというコンセプトを実現するために数学が方法として使われている。各々の社会的価値観に基づいて様々な数学的モデル(指標)が構成され、他者の考えを共有する教室を創造できたことは、本授業が生徒の批判的思考力を育む授業として一定程度機能したことを示している。

[註1]フリー・ソフトウェア KH coder を用いて作成。集計単位は文、最小出現数 5 以上の単語を対象、語一語の間の jaccard 係数上位 30 組を edge として描画。

[発表論文]

1. 服部裕一郎・井上優輝・松原和樹・袴田綾斗・久富洋一郎(2021)「批判的思考力の育成と評価を志向した中等数学教材の開発とその実践—「60秒チャレンジ」の新ルールを提案しよう—」, 全国数学教育学会第55回研究発表会【鳴門教育大学】オンライン 発表資料(2021.12.11 発表)

## 【助成 38 -51】

### 先進医療における日本人のための意思決定支援ツールの開発

研究者 東京女子医科大学医学部 講師 押淵 英弘

#### 〔研究の概要〕

米国で開発された包括的な心理社会的評価(SIPAT)の日本語を作成し、その信頼性、妥当性を検討とした。東京女子医科大学病院にて臓器移植が検討され心理社会的評価面接を受けたレシピエントの匿名化されたカルテ情報を元に評価者が日本語訳 SIPAT および心理尺度 J-PACT を評価した。なお、本研究は本学倫理委員会の承認を得た。日本語訳 SIPAT 合計得点の評価者間一致率は高く、日本語訳 SIPAT 合計得点と J-PACT の最終評価得点との尺度間一致率も強い相関を認めた。また、移植に関する臨床経験での一致率に差はなかった。以上より日本語訳 SIPAT は移植面接の経験を問わずに一定の心理社会的評価を可能とすることが示唆された。日本語版 SIPAT によってレシピエントの抱えている心理社会的問題点を特定し、早期介入に繋げることが可能になり、移植予後の改善への寄与が期待される。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 【目的】

移植前の心理社会的脆弱性と移植後の心理社会的なアウトカムの間には強い関連があると言われており、臓器移植レシピエント候補者(以下レシピエント)の心理社会的評価は移植予後予測の上で非常に重要である。しかし、移植前に心理社会的・行動的側面をスクリーニングする手法は整備されていない。2012年に米国で包括的な心理社会的評価を目的とした The Stanford Integrated Psychosocial Assessment for Transplantation(SIPAT)が開発された。SIPAT は現在各国語に翻訳されその信頼性、妥当性が検証されており、今後移植前の心理社会的評価において広く利用されると期待される。本研究では日本語訳 SIPAT を作成し、その信頼性、妥当性を検討することを目的とした。

##### 【対象および方法】

東京女子医科大学病院にて腎臓・肝臓・心臓のいずれかの臓器移植が検討されているレシピエントを対象とした。評価者は精神科医と臨床心理士4名であり、移植に関する臨床経験3年以上を Expert、3年未満を Novice とした。評価者は匿名化されたカルテ情報を元に各々独立して日本語訳 SIPAT および Psychosocial Assessment of Candidates for Transplantation 日本語版(J-PACT)を評価した。日本語訳 SIPAT 合計得点の評価者間一致率をピアソンの相関係数で算出した。日本語訳 SIPAT 合計得点と J-PACT の最終評価得点との尺度間一致率をスピアマンの相関係数で算出した。なお、本研究は本学倫理委員会の承認を得た。

### 【結果】

2018年9月～2020年9月までに心理社会的評価面接を受けた111名のレシピエントを対象とした。評価者4名の評価者間一致率の中央値は0.86(Expert間0.89、Novice間0.86)だった(表1)。評価者4名の尺度間一致率の中央値は-0.66(Expert-0.66、Novice-0.67)だった(表2)。

表1)

日本語版 SIPAT スコアの評価者間信頼性(ピアソンの相関係数)			
	評価者 B	評価者 C	評価者 D
評価者 A	0.89	0.9	0.85
評価者 B		0.88	0.82
評価者 C			0.85

値は、日本語版の SIPAT を使用して各評価者が記録したスコア間の相関関係を示しています。

評価者 A と B は専門家であり、評価者 C と D は初心者でした。

表2)

SIPAT スコアと J-PACT 最終評価の間の同時妥当性	
評価者 A	-0.62
評価者 B	-0.71
評価者 C	-0.7
評価者 D	-0.58

値は、日本語版の SIPAT を使用して各評価者が記録したスコアと J-PACT の最終評価との相関関係を示しています。

### 【考察】

日本語版 SIPAT の評価者間一致率は高く、日本語版 SIPT と J-PACT の尺度間一致率も強い相関を認め、Expert、Novice で差がなかった。このことから日本語版 SIPAT は評価者の移植面接の経験を問わずに一定の心理社会的評価を可能とすることが示唆された。

### 【結論】

日本語版 SIPAT の高い評価者間信頼性、尺度関連妥当性が検証された。この SIPAT 日本語版を移植前心理社会的評価に利用することで、レシピエントの抱えている心理社会的問題点を特定し、早期介入に繋げることができる。ひいては移植予後の改善への寄与が期待される。

### 〔発表論文〕

1. Satoko I, Oshibuchi H, Tsutsui J, Kobayashi S, Takano K, Sugawara H, Kamba R, Akaho R, Ishida H, Maldonado J, Nishimura K. Psychosocial Assessment of Transplant Candidates: Inter-rater Reliability and Concurrent Validity of the Japanese Version of the Stanford Integrated Psychosocial Assessment for Transplantation. J Acad Consult Liaison Psychiatry. 2021 Dec 2:S2667-2960(21)00183-X. doi: 10.1016/j.jaclp.2021.10.004. Epub ahead of print. PMID: 34863909.

## 【助成 38 -52】

### 父母の睡眠覚醒パターンから探る妊娠中および産後の家庭支援

研究者 東邦大学医学部 講師 吉田 さちね

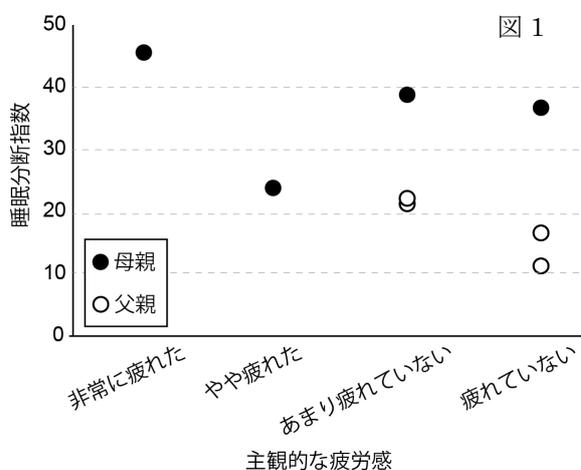
#### 〔研究の概要〕

子育て支援は、少子高齢化が進む日本社会の持続に直結する課題である。核家族化が進み、共働き家庭が増えている昨今では、経済的支援に加えて、就労と子育ての両立支援も欠かせない。両立支援には、父母の相互理解を深めることが肝要である。そこで本研究では、妊娠期および乳幼児を育児中の核家族を対象に、ウェアラブルデバイスを用いた活動量計測を行った。育児ストレスや希望する支援タイプに関するアンケート調査も実施した。新型コロナウイルス感染症の感染拡大と重なり、妊娠期と産後の両実験に継続的に参加する父母の確保に大きな困難が生じ、当初の予定より実験数が大幅に減少した。参加者数を増やしながらいずれも比較検討する予定である。予備的なアンケート調査より、母親は1日の中でも時間帯によって希望する支援ニーズが変遷する傾向があり、潜在ニーズ抽出にはスマートフォンを使ったデジタルフェノタイピング手法が有効と考えられる。

#### 〔研究経過および成果〕

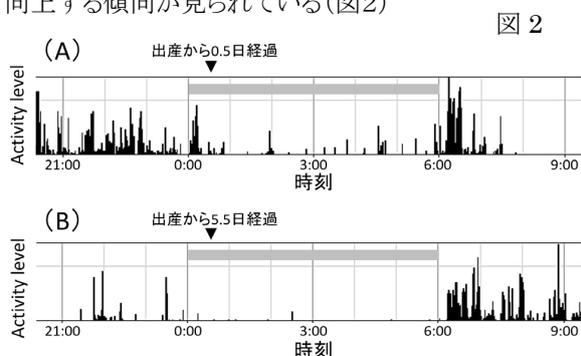
妊娠期および出産後の父親・母親にウェアラブルデバイスを装着して生活してもらい、個人の睡眠覚醒パターンの変遷、父母間での比較を試みた。本研究期間は、新型コロナウイルス感染症の感染拡大とそれに伴う外出自粛期間と重なり、産前・産後の参加者の安定的な確保が困難となった。さらに、同一家庭における一週間でも出勤とリモートワークの割合が変りやすく、また勤務時間も日によって変化しており類似条件でのデータ収集が困難な事態となった。本報告論文では、現段階で少数の計測事例より得られた傾向をまとめる。試行したデバイスは、シャツセンサ HEXOSKIN ウェアラブル心電・呼吸・加速度センサ (キッセイコムテック) および腕時計型の MotionWatch 8 (CamNtech) である。シャツセンサは、胸部の裏地にあるセンサ部分を皮膚に密着させる必要があり、シャツの上から専用のバンドを巻いて着用する。しかし、妊娠期の母親参加者にとって締め付け感を不快に

感じるケースが多く、使用を中断した。そこで MotionWatch8 のみを使い、在宅勤務中の妊娠7か月期の父母、および別の家庭において出産直後の母親のデータを取得した。MotionWatch8は、3軸加速度計で睡眠解析もできるため医学や心理学研究で用いられている。妊娠7か月期の父母の勤務日において、センサ装着日は毎回、就床前に主観的な身体疲労度を4段階のリッカート尺度を用いて評価してもらった。睡眠解析と合わせた結果を示す(図1)。



この父母の場合、勤務日4日間の平均睡眠時間(標準偏差)は、母親 7.03(1.35)時間、父親 6.48(1.53)時間であった。妊娠7か月期にある母親は主観的な疲労感尺度の分散が大きい傾向が見られた。主観的に「非常に疲れた」と感じる日も「疲れていない」と感じる日も睡眠分断指数は40前後となっており、父親よりは高い値となる傾向が見られた。

また別家庭からの出産直後のデータ取得より、夜間の育児支援者の有無で母親の睡眠の質が大きく向上する傾向が見られている(図2)



出産12時間後、入院中の母親の睡眠分断指数は62となっており0時～朝6時の間に断続的に活動レベルが上がっていることが分かる(図2A)。退院後、産婦の母親からの支援を得られた本ケースでは、0時～朝6時の活動レベルは低い状態を維持しており、睡眠分断指数も14.8と下がっていた(図2B)。引き続き父親も含め計測人数を増やし、長期的に記録を続けて特徴を抽出する。

子育てと就労の両立支援には、父親と母親それぞれの支援ニーズを把握することが重要である。両立支援の難しさの1つは、支援ニーズが可視化しづらい上、そのニーズも子の成長とともに変わってしまう点である。そこで現在、第一子が0歳と2～3歳時点で父母が欲しい支援ニーズについて、それぞれ13家庭および11家庭に予備調査を行っている。途中経過

としては、0歳児がいる父母のニーズ内訳は大きく異なる傾向にあった。母親が“日中”に希望する支援ニーズは、1位が「育児代行(46%)」、2位が「話し相手がほしい(38%)」、3位が「家事代行(15%)」となった。一方、父親は最多が「育児代行(80%)」で次いで「家事代行(20%)」となった。0歳児がいる母親が“夜間”に希望する支援も日中と同じく、多い順に「育児代行」、「話し相手がほしい」、「家事代行」であった。父親では、「家事代行」と「育児代行」が半々となった。

2～3歳児になると、父母の支援ニーズの内訳は似ており、日中も夜間も最多が「育児代行」となり、「話し相手がほしい」という回答は無かった。こうした傾向より、父母の支援ニーズの抽出には、スマートフォンを使って、回答頻度や、早朝・深夜といった時間帯を問わずにその時欲しい支援を表明して、各家庭の父母のニーズ特性を明らかにするデジタルフェノタイピング手法が有効であることが示唆された。引き続き、父母の協力を得て、デジタルフェノタイピング用の支援ワード選定を行い、チャットbotなどの支援ツール開発への貢献を目指す。

#### [発表論文]

1. S. Yoshida & H. Funato, Physical contact in parent-infant relationship and its effect on fostering a feeling of safety, *iScience*, Vol. 24, Issue 7, 2021

## 【助成 38 -53】

### 衰退都市のコンバージョン——都市縮小時代における都市再開発政策の日米比較

研究者 法政大学社会学部 教授 堀川 三郎

#### 〔研究の概要〕

本研究は、「都市が衰退しはじめた時、一体、どのようにして都市を再活性化させるのか」について探究することを目的としている。そのために、北海道小樽市における小樽運河保存問題と、アメリカ・セントルイス市における旧郵便局舎およびセンチュリー・ビル保存問題を取り上げた。小樽市運河港湾地区で筆者が実施した景観定点観測調査データの分析によると、小樽は歴史的景観を売りにしていながら、それが急速に減少してきているということが明らかになった。セントルイス事例については、コロナ禍のために現地調査が実施できず、資料解読に止まったものの、1960年代から2000年代にかけての社会的対立構造の一端がみえてきた。

#### 〔本研究の問いと目的〕

「都市が衰退しはじめた時、一体、どのようにして都市を再活性化させるのか」「変化をいかにコントロールするのか」——本研究はこうした一連の問いに答えるための日米比較研究であり、都市縮小時代の都市政策を考えるための、基礎的な社会学的研究である。転換期にある日本の都市問題・都市政策をアメリカと比較し、より深い理解を得ることを目指している。

本研究では、北海道小樽市とアメリカはミズーリ州セントルイス市での景観保存問題を取り上げる。前者の小樽の事例は、衰退から観光都市にコンバージョンして蘇った優等生といわれる事例である。もう一方のセントルイスの事例はアメリカの都市再開発史上、そのコンバージョンをめぐって二度も全米の注目するところとなった事例であるが、管見のかぎり、ほとんど研究がなされていない。本研究はその空白を埋め、日本の都市再開発政策および景観保存政策への示唆を得ようとするものである。筆者が小樽で行ってきた研究手法を援用し、米国の保存運動に対する質的インタビュー調査を実施することによって、地域住

民にとっての歴史的環境の意味付けと、保存／再開発政策の策定過程を浮き彫りにする。都市社会学と環境社会学をコアに、建築学と歴史学の知見を重ねて分析するところに方法的独自性がある。

#### 〔研究経過および成果〕

先ず、北海道小樽市の港湾地区再開発政策とまちづくりについて、「小樽運河保存運動」参加者への系統的なインタビュー調査を行うことによって、当時の事実関係、運動の展開、それに対する小樽市行政の対応、さらには政策の質的変容を、一定程度、明らかにすることができた。得られた重要な知見のひとつは、市行政の施策とその変容過程は、法などの制度の記述だけでは説明し切れない、ということであった。小樽運河を埋め立てて道路を建設するという再開発事業は、都市計画関連諸法や市の規則、内規にしたがって執行されていたにも関わらず、10年近く、市が保存運動と論争を継続していたことは、首長の政治的信念の形成まで遡って考察する必要があることを示していた。

さらに、筆者が 1997 年から実施している景観定点観測調査のデータ分析によれば、小樽が 900 万人を超える観光入り込み数を誇っていた 1990 年代から 2020 年代にかけて、運河沿いの景観が大きな変化を遂げてきたことが明らかになった。このデータの語るころは、小樽は運河とその周辺の石造倉庫群といった歴史的景観を売りにしていながら、それが急速に減少してきているということだ。「運河論争」で厳しい対立と分裂という、地域コミュニティにとって高いコストを払ってもたらされた観光都市・小樽は、皮肉なことに、自らが守ろうと闘ってきた景観自体を失っていることが明らかになってきた。こうした成果は、1 冊の英文書籍 (Horikawa, 2021b), 3 本の論文 (堀川, 2021a; Horikawa, 2021c; 堀川, 2021d) という形で刊行することができた。

次にセントルイス事例の研究に関しては、先にも述べたように、主に文書解読を行った。そこで見えてきたのは、このセントルイス中心市街地の再開発問題は、2 回、大きな社会的対立を顕在化させたということである。1960-70 年代の 1 度目の「旧郵便局舎」保存問題については、地元のセントルイス景観協会 (Landmarks Association of St. Louis, Inc.) およびミズーリ州立歴史協会 (State Historical Society of Missouri) の議事録やアーカイヴスを複写して解読を進めてきている。こうした文書資料や当時の新聞切り抜きの収集による年表作成を進めつつある。暫定的ではあるものの、見えてきたのは、地元セントルイスの保存運動と全米レベルの運動との緊密な協力関係である。

2 度目の保存問題(「センチュリー・ビル」)に関わった当事者達への系統だったインタビューは、コロナウイルス禍で行うことができないでいる。そのため、当面

は行政側の文書資料によって、事態の推移を跡付けていく他はない。また、開発を進めた側のナショナルトラスト関係者、セントルイス市の行政官僚、ミズーリ州および首都ワシントンにある連邦一般調達局 (General Services Administration) 関係者から入手した文書資料の解読を進めているが、研究成果の公刊にまでは至っていない。ある程度見えてきたのは、第 1 回目の対立とは対照的に、地元セントルイスの保存運動と全米レベルの運動との深刻な対立関係であった。コロナ禍の終息を待って現地に飛び、鋭意、調査を進めたいと考えている。

[発表論文]

1. 堀川三郎 [2021a] 「観光のパラドクスと地域コミュニティ: 小樽の観光まちづくりの教訓」『世界』(岩波書店) 第 940 号 (2021 年 1 月号), pp.115-126.
2. Horikawa, Saburo [2021b] *Why Place Matters: A Sociological Study of the Historic Preservation Movement in Otaru, Japan, 1965-2017*. Cham, Switzerland: Springer.
3. Horikawa, Saburo [2021c] “Do as Democracy Demands: The Irony of Historic Preservation Movement and Its Relevance in Popular Sovereignty in Postwar Japan,” in Helen Hardacre, Timothy George, Keigo Komamura and Franziska Seraphim, eds., *Japanese Constitutional Revisionism and Civic Activism*, pp.279-289, Lanham, MD: Lexington Books.
4. 堀川三郎 [2021d] 「歴史的環境保存と記憶: 集合的記憶はどこに位置づくのか」『日仏社会学会年報』第 32 号, pp.39-55.

## 【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、熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に実現することを目的として、Si/Co多層膜の異常ネルンスト効果を調べた。Co単層膜と比較して、熱伝導率の低減とネルンスト係数の増大が確認された。

#### 〔研究経過および成果〕

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

どの新機能の発現が期待されている。

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

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

cobalt film) も作製した。構造評価には、走査型電子顕微鏡法(SEM)、ラマン分光を用いた。熱伝導率測定には2 $\omega$ 法を用いた。Co単層膜およびSi/Co多層膜のSEM像を確認したところ、各層の膜厚が設計値通りに20 nmで均一に積層されていることが分かった。また、試料の熱伝導率を測定したところ、Si/Co多層膜は、参照用のCo単層膜よりも30倍程度低い熱伝導率を示した。これは、熱伝導率の低いSiを挿入した効果であると考えられる。それぞれの膜の磁気特性を測定した結果、Fig. 1(a)に示すように、どちらの試料の磁化曲線も類似したものとなった。また、飽和磁化の大きさもほとんど一致する結果となった。これらの試料について、その異常ネルンスト効果を室温で調べた。薄膜面内方向に温度勾配を加え、発生するネルンスト電圧を測定した。異常ネルンスト効果の大きさは、異常ネルンスト係数( $Q_s$ )により見積もった。その結果、Fig. 1(b)に示すように、多層膜の $Q_s$ はCo単層膜のそれと比較して、2.6倍程度大きい値となった。このように多層膜における異常ネルンスト効果が増大する要因として、磁性/非磁性界面において、近接効果により僅かな磁性拡散層が非磁性層内に生じ、異常ネルンスト効果が増大

する効果が提案されているが、バンド構造が変調される効果や界面における散乱の効果も寄与するという報告もあり、議論が続いている。本研究で観測された増大効果の要因も明らかにはなっていないが、金属/半導体の多層構造における異常ネルンスト効果の増大はこれまでに報告が無いため、さらなる現象の解明が待たれる。いずれにしても、本構造を用いることにより熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に達成することができることが明らかになった。この結果は、金属・半導体のハイブリッドナノ構造を用いて熱電変換素子の設計を行うことにより、熱電変換効率を高められる可能性を示している。

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

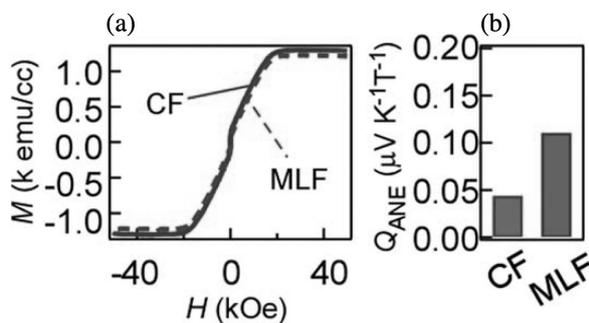


図 1: CF (コバルト膜) および MLF (多層膜) の特性。  
(a) M-H 曲線 および (b) 異常ネルンスト係数 ( $Q_{ANE}$ )。

## 【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〕

超効率な水分離膜の創製を目指し、生体の脂質二分子膜類似構造を水存在下で自己組織的に形成できる両親媒性高分子と、親水性高分子とのブロックコポリマー薄膜を構築した。このブロックコポリマーは加湿下でアニールする事で親水性高分子ブロックがナノシリンダーを形成し、垂直に配向する事を見いだした。さらに、より高速での垂直ナノシリンダー形成を目指し、基盤となる両親媒性高分子の高速ラメラ構造化を試みた。高分子薄膜を塗布した基板を水中にいれ、マイクロ波を数十秒照射すると高度に配向したラメラ構造を形成する事がわかった。本手法は家庭用電子レンジでマイクロ波を照射しているため、どこでもある実験装置を用い、簡便かつ高速で高配向膜を構築できる手法である。

#### 〔研究経過および成果〕

生体は脂質二分子膜の高いパッキング性によりイオン他の透過を阻止するとともに、水のみを透過する水チャンネルタンパク質(アクアポリン)により、細胞内の水の量を制御している。さらに欠陥形成した場合は自己修復することで常に分離能を保っている。最近我々は、汎用なくし形ポリマーである poly(N-alkylacrylamide) が加湿下でガラス転移温度以上でアニールすると生体膜と類似の高いパッキング性を有するラメラ構造へと自己組織的に構造形成する事を見いだした。そこで、本研究では poly(alkyl acrylamide) と親水性のポリエチレングリコール(PEG) とのブロックコポリマー(pDDA-b-PEG, 図 1a) を合成し、ブロックコポリマーのマイクロ相分離により形成される、シリンダー構造と pDDA のラメラ

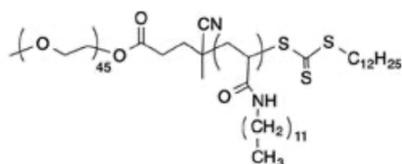


図 1 p(DDA-b-PEG)の化学構造

構造化を組み合わせることで、PEG からなるナノシリンダーを垂直に配向させることを試みた。pDDA-b-PEG のスピコート膜の表面構造を AFM、断面を透過型電子顕微鏡(TEM)で解析したところ、均一な表面と内部に PEG が球状に存在していることが示された(図 2 a,b)。これは疎水性の pDDA が表面に偏析するためである。一方でこの薄膜を加湿下でアニールすると、表

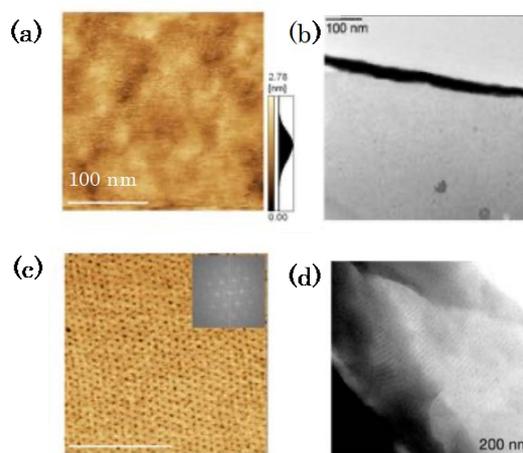


図 2 p(DDA-b-PEG)スピコート後(a, b)および加湿アニール後(c, d)の AFM(a, c) 及び断面 TEM 像(b, d).

面にドットパターンが形成され、断面 TEM よりそのドットが垂直に配向したシリンダーの頭部出ることが確認された(図 2c,d)。これより、熱力学的に困難な垂直配向シリンダー薄膜を加湿アニールにより容易に形成させることが出来た。この垂直配向シリンダー膜は自律膜として取り出すことが可能である。一方でこの垂直配向シリンダーの形成させるためには長時間(24h 以上)のアニールが必要であるといった問題点がある。より高速にシリンダー膜を形成させるためには、その駆動力である pDDA のラメラ構造の高速形成が必須である。そこで、マイクロ波を用いた加湿アニール法を考案した。マイクロ波を用いた薄膜の加湿アニール法は、家庭用電子レンジ (JM-FH18A, Haier Corp.) を用いた。シリコン基板に成膜した薄膜は基板ごと水中に入れ、マイクロ波を照射した。薄膜を作製後溶媒を真空により揮発させた膜の XRD 測定では  $q = 2.23 \text{ nm}^{-1}$  付近の低角側に pDDA のドデシル鎖が凝集したアルキルナノドメインに由来するブロードな回折ピークが観察された (図 3)。続いて Si 基板を水中に沈めマイクロ波を 15 秒間照射すると pDDA の lamellar 構造に由来するシャープなブラッグ回折ピークを観測した。さらに、マイクロ波を 30 秒間照射すると pDDA の lamellar 構造に帰属される複数の強いブラッグ回折ピークが観測された。一方で、マイクロ波の照射時間が 60 秒を経過するとブラッグピークの半値幅が広くなり、lamellar 構造が緩和したことが観察された。これは水だけでなく Si 基板もマイクロ波を強く吸収し全体が高温になるためである。すなわち、マイクロ波照射により水分子と Si 基板が急激に加熱されることで一般的な熱アニールよりも高速に高分子鎖の運動性が増加し、さらに水分子が pDDA の親水性アミド部位に吸着する事で疎水性側鎖との相分離力が増大シラ

メラ構造を迅速に形成する。しかしながら、加熱温度や時間が長くなると高分子鎖の運動性が配向力に打ち勝ってしまいランダム構造へ戻ると考えられる。以上の結果は数十秒家庭用電子レンジで“チン”することで簡便、高速に垂直ナノシリンダーの形成が可能であることを示唆している。

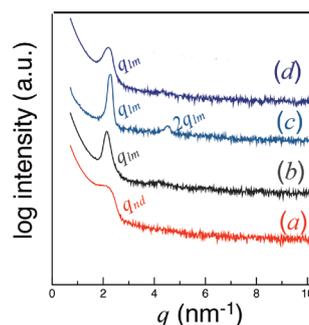


図 3 p(DDA) スピンコート膜の XRD パターン。それぞれ、(a) 無処理膜、(b) 15 s マイクロ波照射、(c) 30 s マイクロ波照射、(d) 60 s マイクロ波照射したもの。

[発表論文]

1. K. Matsunaga, W. Kukai, M. Ishizaki, M. Kurihara, S. Yamamoto, M. Mitsuishi, H. Yabu, S. Nagano and J. Matsui, *Macromolecules* 53, 9601–9610 (2020).
2. A. Niinuma, M. Tsukamoto and J. Matsui, *Langmuir* 37, 5393–5398 (2021).
3. M. Ohke and J. Matsui, *Macromol. Chem. Phys.* (2022) in press

## 【助成 37 -12】

# 超高感度 MEMS 熱センサとプラズモニック・メタマテリアルの結合による超高速熱フォノン分光法の開発

研究者 東京農工大学 准教授 張 亜

### 〔研究の概要〕

我々は、プラズモニック・メタマテリアル構造と高感度熱センサの結合によって、フォノンの分光測定を実現することを目指している。本研究では、メタマテリアル構造を設計・作製し、フェムト秒レーザーパルス照射による超高速フォノンを励起・検出した。反射金属膜付き2層メタマテリアル構造を用いて、基板の吸収による表面共鳴に及ぼす影響を低減した。また、2波長(800nm, 400nm)ポンプ・プローブ光学系を構築し、励起光と検出光の干渉を除去することによって、高信号雑音比のフォノン分光系を実現した。当該分光系を用いて、メタマテリアル構造に励起されたフォノンスペクトルを測定し、共鳴と非共鳴の場合異なるフォノンパルスは示された。これにより、プラズモン構造は超高速フォノン励起に有効であることを示した。

### 〔研究経過および成果〕

ギガヘルツ・テラヘルツ周波数帯の超高速フォノンは、固体中の熱輸送の主なキャリアであることが知られている。フォノンを研究することは、熱輸送の物理的解明、及び半導体デバイスの熱設計に非常に重要な意義がある。本研究では、プラズモニック・メタマテリアル構造をフォノン分光に応用することを目指して、より効率的超高速のフォノン励起することを目指している。

図1 (a) は、2層プラズモニック・メタマテリアル構造の概要図をしめしている。半導体基板(Si/SiO<sub>2</sub>)の上に、100nmの薄い金膜を蒸着し、その上に約200nmのSiO<sub>2</sub>膜を堆積し、最後に電子線描画・真空蒸着を利用して、2次元周期的ナノ金属(銀)短線を作製した。この金属短線表面は特定の波長帯で入射光に対して表面プラズモン共鳴を形成し、二重表面プラズマ構造となる。一層目の金属は半導体基板中の光吸収がプラズマ共鳴に与える影響を除去するこ

とができる。図1(b)に作成した表面プラズモン共鳴構造の顕微鏡写真とSEM写真を示す。図に示すように、入射光の偏光が変化した場合、試料の色は明確的に変った。これは、表面プラズマ共鳴の偏光選択性を示した。

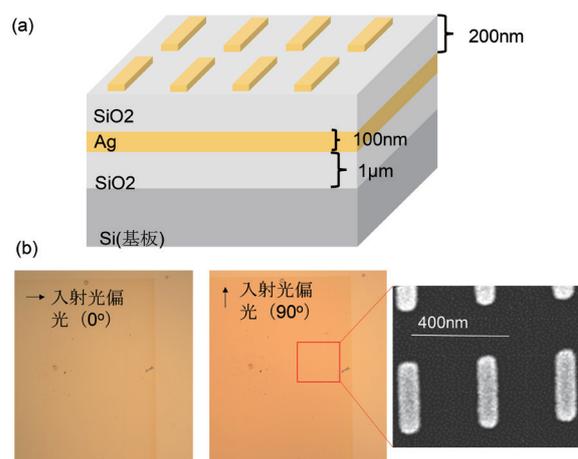


図1 (a) 2層プラズモニック・メタマテリアル構造の概要図。(b)顕微鏡写真とSEM写真

図2にメタマテリアル構造の可視光近赤外帯域での反射スペクトルを示す。図2示すように、入射光の偏

光が金属短線と一致した場合、400 nm 帯の透過率が著しく低下し、この構造が 400 nm の入射光に対して強い表面プラズモン共鳴による光吸収が示された。

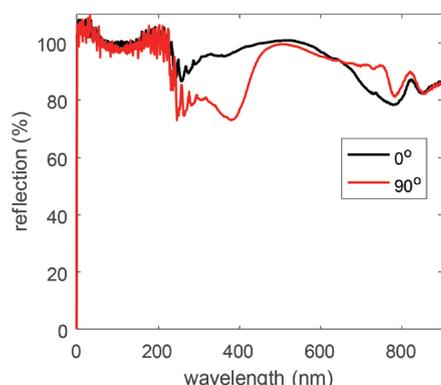


図 2 表面プラズモニック・メタマテリアル構造の可視光近赤外帯域での反射スペクトル

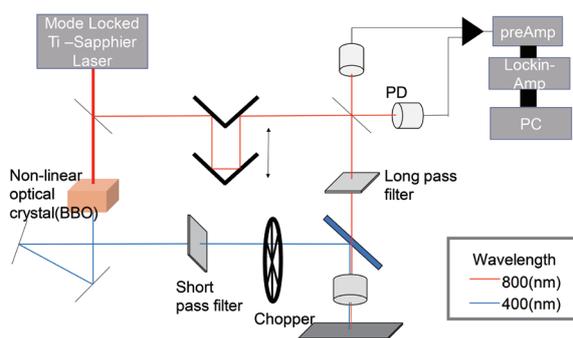


図 3 二波長ポンプ・プローブ光路の概要図

作製されたメタマテリアル構造のフォノン励起の特性を測定するために、我々は、二波長ポンプ・プローブ光路を構築した(図3を参照)。800 nm サファイアフェムト秒レーザは、非線形 BBO 結晶によって 400 nm の超短パルス(約 100 fs)を生成する。400 nm および 800 nm の超短パルスは、それぞれフォノンのポンプ光およびプローブ光として使用され、同軸光路を介して 50 倍の対物レンズによって被測定試料の表面に集束される。ポンプ光パルスは試料の表面で超高速フォノン発振を励起し、プローブ光パルスは試料表面の反射率変化を測定することで励起されたフォノン振

動を測定する。

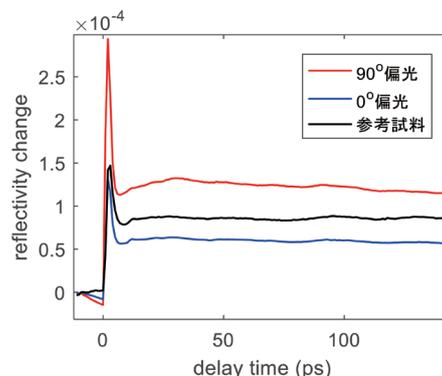


図4ポンプ光は入射した時に、プラズモニック・メタマテリアル構造と参照面のプローブ光反射率変化

図 4 はメタマテリアル構造のフォノン励起の測定結果を示す。青色線と赤色線はそれぞれポンプ光が 0° 偏光と 90° 偏光が入射したときの表面プラズモン構造の表面反射率変化を示し、黒色線は参考試料(すなわち図 1(a)に表面の金属短線がない構造)の表面反射率変化を示している。図4に示すように、90° 偏光は入射されるとき、フォノンパルスの強度は、0° 偏光及び参照面の場合より2倍大きくなった。これは、メタマテリアル構造の表面プラズモン共鳴吸収はフォノンの励起に有効であることをしめしている。今後、メタマテリアル構造の周波数・偏光選択性を利用し、様々な新規な材料や構造のフォノン透過スペクトルの測定を実現する。

一方、メタマテリアル構造によるフォノン信号の増幅は 2 倍しかない、期待していた数十倍の増幅は現れなかった。現在のメタマテリアル設計はポンプ光(400nm)の共鳴構造、プローブ光(800nm)の共鳴構造とならないため、励起したフォノンを効率的検出できていない可能性はある。将来は、ポンプ光・プローブ光 2 波長で共鳴する新しいメタマテリアル構造の作成は必要がある。

## 【助成 37 -24】

### シリコン IC 技術を応用したポスト 5G テラヘルツ通信用低損失ポスト壁導波管型配線・共振器の創生

研究者 九州大学大学院システム情報科学研究院 教授 ポカレル ラメシクマール

#### 〔研究の概要〕

Beyond 5G 移動通信、防犯用イメージング、宇宙 IoT (Internet of Things) など超高速ワイヤレスブロードバンド通信システムや高度安心安全システムの実現に向け、ミリ波やテラヘルツ波を利用する技術の開発が世界的に注目を集めている。そのコアとなるオンチップ共振器には、より高い周波数の発振性能はもとより、高い Quality(Q) 値を満たすことが求められる。更に、その共振器を既存のシリコンプロセスで試作し、CMOS 集積回路に内蔵できれば、より安い価格で利用範囲が大きく拡大する。しかし現状では、既存の CMOS プロセスで試作した 60GHz 帯のオンチップ共振器の負荷 Q-値は 1-2 程度に留まっている。本研究は、SIW 型共振器を設計し、既存の CMOS プロセスで試作した。提案の設計技術の有効性を確認した。

#### 〔研究経過および成果〕

従来 PCB などのプロセスで用いられてきた低損失な Surface Integrated Waveguide (SIW) 共振器を低コストかつ高周波無線通信において有効な CMOS プロセスで実現するのは本研究の課題であった。これを CMOS プロセスで実装できれば、他のアナログ回路や通信回路と集積化ができ、利用範囲が大きく拡大する。これにより、高性能なミリ波やテラヘルツ波通信が CMOS チップで可能となり、システムのコストが大幅に削減できる。なお、従来の設計手法だと、このような構造のチップ面積が大きい、かつ試作に様々な問題が生じるため、あまり究明されてない現状であった。本研究では、その低損失の SIW 共振器を CMOS 技術で試作ができることを示した。

まず、銅板のうち二つをグラウンド (GND) と

上部の金属板として使用し、via で電氣的に接続することで CMOS を用いた SIW を設計することを提案した。導波管モードからマイクロストリップ (MS) モードに変換するため、tapper 構造を採用した。これにより提案配線の損失は従来型の MS や Coplanar Waveguide (CPW) 型配線より半分小さくなることを電磁界シミュレーションより確認した。更に、Quarter モード (QM) SIW (QMSIW) は共振器に適応される小型化手法を採用し、面積を更に小型にした。電界の対称面に沿って四分割した構造をとる。Ridge 構造による小型化は SIW 導波路と SIW 共振器のいずれにも適応され、全体的なサイズを変えないまま共振周波数を下げることができ。これにより構造のリアクタンスが変化し、QMSIW から相対的にサイズを縮小させることができる。更に、トップメタルに Complementary Split

Ring Resonator (CSRR)をエッチングすることで、サイズを変化させないまま約 40GHz 共振周波数を下げることに成功した。CSRR は Ridge と同じく、サイズの変化なく共振周波数を下げることができるため、相対的なサイズの縮小につながる。図 1 (b)に 0.18 $\mu$ m CMOS プロセスを用いて設計した立体構造を示す。

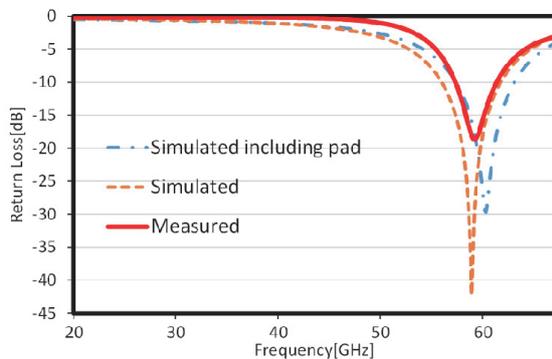
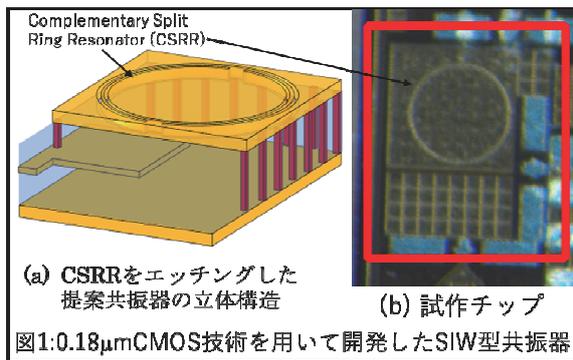


図 2 : 測定とシミュレーション結果との比較

それをレイアウトに変更し、0.18 $\mu$ m CMOS プロセスで試作したチップを図 1 (b) に示す。そのチップを評価し、実測結果を図 2 に示す。実測結果との比較のために Pad を含んだ HFSS シミュレーション結果・共振器単体の HFSS シミュレーション結果も合わせて示す。実測結果によると、反射係数ピーク値は 59.2GHz において-18.71dB であり、シミュレーション結果と一致した。CSRR をエッチン

グすることで本来の面積から約 98%の面積縮小に成功した。測定用パッドを含めた最終的なサイズは 432.5 $\mu$ m $\times$ 355 $\mu$ m でかなり小型化に成功した。負荷 Q 値が 46.72 という結果であり、従来型の LC 共振器の Q 値より大幅に改善できた。設計段階で目標としていた約 60GHz での共振が確認できたことより、CMOS プロセスを用いた小型 SIW 共振器の設計という点では、ほぼ理想的な結果が得られた。

今後、提案の共振器を用いてフィルタや発振器、アンテナなどのアナログ回路に応用することで、ミリ波を含むテラヘルツ波という次世代無線通信においては、高性能のフロントエンドの開発ができることが期待される。

〔発表論文〕

- [1] S. K. Thapa, B Chen, A Barakat, K Yoshitomi, and R.K. Pokharel, "Miniaturized Slot-Loaded SIW Resonator and Its Application to C-band Low Phase Noise and high power Oscillator," *Proc. of 2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 161-164, Jan. 2021.
- [2] S. K. Thapa, B. Chen, A. Barakat, K. Yoshitomi, and R. K. Pokharel, "X-Band Feedback Type Miniaturized Oscillator Design with Low Phase Noise Based on Eighth Mode SIW Bandpass Filter," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, (Under Second Revision)
- [3] K. Matsuo, S. K. Thapa, A. Barakat, and R. K. Pokharel, "High Q-factor Cavity Resonator in CMOS Technology for Millimeter wave Applications," *Nature Electronics* (投稿準備中)

## 【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。これまで、偽造医薬品の判別精度は 80%程度、不良品の判別は 20%以下であったが、今回、判別分析アルゴリズムとハイパーパラメータの最適化を行うことで、偽造医薬品は 100%、不良品についても約 70% の確率で判別が可能であることが示された。

#### 〔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(NIR)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。

NIR などのスペクトルデータによる判別分析には、参照データ(データベース)に基づいた判別が行われるが、通常、参照データと未知試料のテストデータは、同じデバイスで測定されたデータあるいは、同程

度のクオリティである必要がある。そのため、NIR の使用、デバイスの選択にはデータベースによる制約があり、選択肢が限られコスト面での課題となっている。

本研究では、安価なポータブルデバイスによる判別性能を検証するため、医薬品の NIR データのデータベースとテストデータで異なるデバイスを用い、偽造医薬品の判別分析のアルゴリズムとハイパーパラメータの最適化を行った。

試料には、アジア、アフリカから入手した合計 15 製品の amoxicillin (AMX) カプセル剤を用いた。各試料に含まれる AMX 含量は、HPLC (Shimadzu), ODS カラムを用いて定量した。

参照スペクトルは、フーリエ変換型(FT)NIR 分光器(MPA, ブルカーオプティクス)を用いて測定した。判別用のテストデータは、小型の波長分散型(WD) NIR 分光器(NIRONE-S2.0, Spectral Engines)を用いて測定した。

HPLC による分析の結果、13 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。

得られたスペクトルの処理、解析には、Python と scikit-learn ライブラリーを用いた。まず、FT-NIR データを波数 (cm<sup>-1</sup>) から波長 (nm) に変換し、WD-NIR に対応した波長間隔に補正を行った後、標準化、1 次微分、中心化による処理を行った。

解析には、まず主成分分析 (PCA) を行い、デバイスに依存した成分 (PC1) を除いた主成分 (PC2 ~ PC14) を用い、7 種類のアプローチによる判別を試みた。ハイパーパラメータの最適化には、グリッドサーチ機能を用い、網羅的に最適値を探索した。

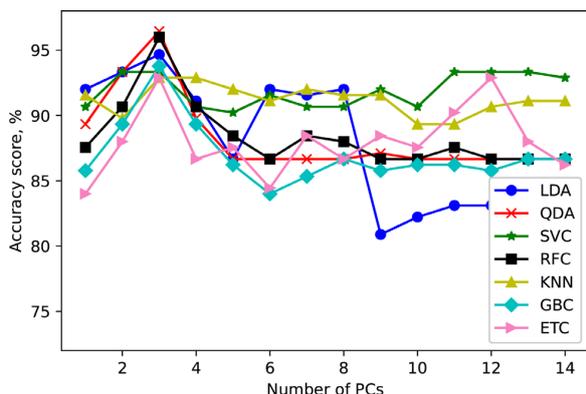


図1 各アプローチと最適ハイパーパラメータによる判別精度と主成分数の関係

図1に7種のアプローチと各最適パラメータによる判別精度 (Accuracy score) と、判別に用いた主成分数の関係を示す。いずれのアプローチにおいても主成分数3が最適であった。特に、Quadratic discrimination analysis (QDA), Linear discrimination analysis (LDA), Random forest classification (RFC) が高い精度であった。これらのうち、不良品と偽造医薬

品の判別精度について検証をおこなったところ、全体の精度では高い結果を示していたこれらのアプローチ (LDA, QDA, RFC) は判別精度が低く、一方で、K-nearest neighbors classification (KNN), Gradient boosting classification (GBC), Extra trees classification (ETC) において高い精度で不良品、偽造品の判別が可能であった。図2に KNN による偽造医薬品と不良品の判別精度を示す。

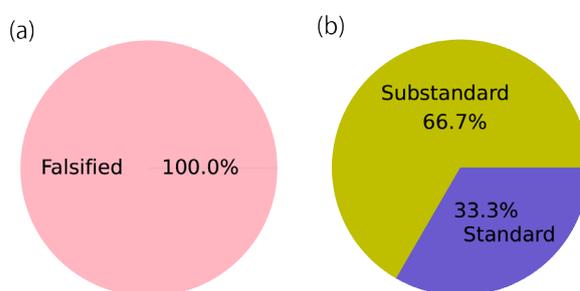


図2 KNN による偽造医薬品 (a) と不良品 (b) の判別精度

これまで、偽造医薬品の判別精度は高かったが、不良品の判別精度は低く、実用化は難しかった。しかし、今回、アプローチとハイパーパラメータを最適化することで不良品の判別精度も高く、実用性が十分にあることが示された。

不良品は有効成分含量が 80% 程度であり、標準品との区別が難しい。そのため、100% 不良品と判定されることよりも、複数のアプローチによる検証、また得られた判別精度に基づいて、ユーザーが判断する必要がある。今後、サンプル数、さまざまなデバイスによるデータを取得し、検証を進め、実用化に向けたデータの集積を行う。

[発表論文]

1. Y. Hattori, Y. Hoshi, Y. Ichimura, Y. Sugiura, M. Otsuka, *Appl. Spectrosc.* 75, 1251-1261 (2021).

## 【助成 37 -32】

### 低出生体重の精密なリスク予測のための、多様な情報を統合し組み合わせの特徴を捉える人工知能の開発

研究者 東北大学東北メディカル・メガバンク機構 助教 水野 聖士

#### 〔研究の概要〕

低出生体重は、全新生児の約 10%に見られ、児の幼年期、青年期、中年期の、ライフコース縦断的に、健康に重要な影響を及ぼす重要な疾患であり、低出生体重は母親の生活習慣の他に母親、父親の遺伝因子の関与が知られている多因子疾患である。そこで、大規模ゲノムコホート調査である東北大学東北メディカル・メガバンク計画三世代コホート調査参加者の二万人以上の妊婦の生活習慣情報、妊娠中の臨床情報、ゲノム情報の組み合わせを入力にとるマルチモーダルな深層学習モデルを構築し、高精度に低出生体重の予測を行う早期予測モデルの構築を行った。

#### 〔研究経過および成果〕

本研究では、東北大学東北メディカル・メガバンク計画三世代コホート調査でリクルートされた妊婦 21,646 人から収集された生活習慣情報、ゲノム情報および時系列の臨床情報である胎児超音波検査情報から、これらの情報の組み合わせを入力にとる、高精度な低出生体重の早期予測のための人工知能開発のために、(1) 調査票情報、医療情報、ゲノム情報の人工知能での取り扱いのための前処理手法の検討および、(2) 調査票情報、医療情報、ゲノム情報の組み合わせを入力にとり学習を行うマルチモーダル深層ニューラルネットワークの構築を目標に研究を実施した。

(1) 調査票情報、医療情報、ゲノム情報の人工知能での取り扱いのための前処理手法の検討

妊娠前および妊娠早期の生活習慣情報と食習慣情報を含む調査票情報は、欠損値を多くもち、様々な分布の変数を含む。また、ゲノム情報は変数の数が

数千万と超巨大である超高次元性をもつことから、そのまま人工知能で学習することができない。また、胎児超音波検査情報は、できるだけ早期の低出生体重の予測のために、妊娠早期の検査情報を使用した学習が求められる。本研究では、調査票情報については、多重代入法による欠損値補完と、scaling などによる分布の変換を実施した。ゲノム情報は変数選択のために、フィルター法とアルゴリズムによる変数選択を組み合わせ、次元を対象者数以下にまで圧縮した。また、胎児超音波情報は妊娠早期のデータをトレーニングデータとしてその後の値を予測した胎児超音波情報予測データを作成し、実データとの大きな乖離がないことを確認した。

(2) 調査票情報、医療情報、ゲノム情報の組み合わせを入力にとり学習を行うマルチモーダル深層ニューラルネットワークの構築

前処理の完了した生活習慣情報、胎児超音波情報、

ゲノム情報を統合し学習を行うマルチモーダル深層ニューラルネットワークの構築を行った。マルチモーダル深層ニューラルネットワークモデルは、それぞれの情報種別のデータを入力にとる深層ニューラルネットワーク(DNN)と、結合層、さらに結合した特徴量から学習を行う DNN を繋げたモデルを構築した。構築したマルチモーダルニューラルネットワークの概念図を図 1 に示した。学習ではデータセットの 1/10 を検証用データとし、残り 10-fold のクロスバリデーションを行う、internal-external cross validation を実施した。マルチモーダル深層ニューラルネットワークの実装は、Chainer version 5.0.0 にて行った。

本研究で構築した、生活習慣情報、胎児超音波情報、ゲノム情報の3つのモーダルのマルチモーダル深層ニューラルネットワークの低出生体重の予測性能は、最大でF1スコアが0.93と、高精度な予測モデルが構築できた。3つのモーダルの深層ニューラルネットワークモデルの F1 スコアおよび、これらの 2 つの組み合わせを入力による深層ニューラルネットワークモデルの F1 スコアを図 2 に示した。

本研究では、大規模ゲノムコホート研究で収集された様々な種類のデータの深層学習への適用のための技術的な取り扱い方法の検討および、前処理後の生活習慣情報、医療情報、ゲノム情報を入力にとるマルチモーダル深層ニューラルネットワークモデルを開発し、低出生体重の高い予測性能を示すモデルを構築することができた。今後は、予測精度の向上のために、胎児超音波情報以外の妊婦検診情報や、検体検査情報などのデータの追加の検討や、低出生体重群を予後やリスク因子の異なる、早産(在胎週数37週未満)および満期産(在胎週数 37 週以上)に層別化した集団での予測モデルの構築、さらには、ブラッ

クボックスモデルであるマルチモーダル深層ニューラルネットワークの、局所近似モデルによる解釈など幅広い研究に発展させていきたい。

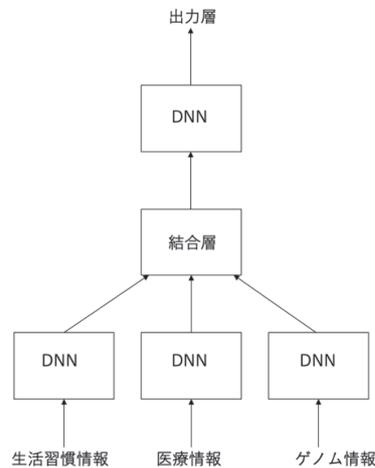


図 1. 構築したマルチモーダル深層ニューラルネットワークモデルの概念図

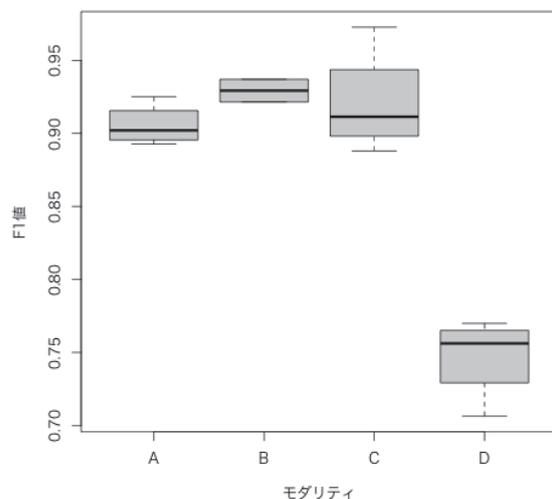


図 2. マルチモーダルモデルの低出生体重予測性能。A : 生活習慣情報-胎児超音波情報-ゲノム情報, B : 生活習慣情報-胎児超音波情報, C : 生活習慣情報-ゲノム情報, D : 胎児超音波情報-ゲノム情報

[発表論文]  
なし

【助成 37 -33】

## 強力集束超音波を用いた低侵襲ガン焼灼医療における治療効果の 次世代型高速シミュレータの開発

研究者 筑波大学システム情報系 助教 金川 哲也

### 〔研究の概要〕

強力集束超音波と気泡を用いた低侵襲的な腫瘍焼灼治療の効果を予測すべく、従来の高計算負荷のシミュレータの代替策となりうる簡易シミュレータを構築し、その有効性を調べた。約 10 連立の複雑な非線形偏微分方程式に、理論近似を施し、僅か 1 本の非線形性の弱い方程式へと帰着させた。導かれた方程式を数値的に解いた結果、腫瘍焼灼の実応用に即した温度上昇値が観測された。

### 〔研究経過および成果〕

ガンは人類の死因第一位であり、切開手術不要な低侵襲治療法が切望されている。ガン治療法の一つに、強力集束超音波 (HIFU: High Intensity Focused Ultrasound) による加熱焼灼治療法がある。これは、超音波のエネルギーを焦点近傍に集束させることで、正常な細胞を傷つけずに、腫瘍のみをピンポイントで加熱し壊死させるという治療法であり、体に傷跡を残さない意味で、精神的にも肉体的にも負担の少ない治療法といえる。さらに近年、患部に気泡を注入し、その振動を利用することで、超音波の発熱効果が劇的に向上することが注目されている。気泡を上手く利用すれば、体の深部に存在する腫瘍や、超音波を反射・吸収する骨や脂肪の奥に存在する腫瘍にも、十分な HIFU のエネルギーを届けることが可能になる。

HIFU 治療の効果を調べるための人体実験は事実上不可能であるため、ウサギやマウスを用いた動物実験やササミ肉などを用いた生体模擬組織の実験がなされている。しかし、人体と動物それぞれのガンの間に存在する乖離は大きい。そこで、人体を模擬可能な「人体シミュレータ」が期待されているが、人体組

織の複雑性ゆえに、計算時間が極めて長いという欠点を有する。一刻を争う患者が、次々と病院に運ばれてくるとき、シミュレータは、患者に対して治療指針を医師に速やかに与えるべきである。ゆえに、計算機性能の飛躍的向上を待つことなく、実用上致命的に長い計算時間を根源的に短くすべきである。

本研究では、この長計算時間を大幅に短縮すべく、「新たな HIFU シミュレータ」の創成を目的とする。現存シミュレータの計算時間の長さは、軟・硬組織といった連続体の基礎方程式系が、強い非線形性を示し、その運動全てを記述するからである。しかし、そもそも音の非線形性は弱く、基礎方程式の中に含まれる音の要素は、実は極めて小さい。加えて、現存シミュレータには、計算過程にブラックボックスを有し、どの式のどの項が、どのような物理から、この温度上昇値を招いたのかという点に不透明が残る欠点も有する。

KZK 方程式という非線形方程式を用いた数値解析が、長年、HIFU の治療効果予測に用いられてきたが、KZK 方程式は気泡を含まない単相媒質に限られていた。そこで本研究では、KZK 方程式を、まず気泡を含む媒質に拡張し、その数値解を求めた。約 10 本

程度の気泡の力学に基づく基礎方程式系に対し、理論近似を行い、HIFU 伝播の本質のみを記述する 1 本の KZK 方程式を導き<sup>(1)</sup>、それを数値的に解いた結果、医療応用に即した温度上昇値が観測された<sup>(2)</sup>。

関連する成果として、超音波診断用の造影剤<sup>(3,4)</sup>に関する解析を行い、治療と診断の統合に向けた数理的基盤を増強させた。更なる応用への足掛かりとして、気泡振動の熱的効果<sup>(5,6)</sup>、気泡分布の非一様性<sup>(7)</sup>、気泡に働く抗力<sup>(8,9)</sup>に関する基礎的解析も行った。

本成果は、公益財団法人カシオ科学振興財団の助成を受けたものであり、深謝申し上げます。

[発表論文]

1. 加賀見俊介・金川哲也，“気泡を含む液体中における集束超音波の熱的効果に着目した弱非線形波動方程式の導出,” 混相流, Vol. 35 (2021), 356-364. [10.3811/jjmf.2021.026]
2. Kagami, S. and Kanagawa, T., “Weakly nonlinear propagation of focused ultrasound in bubbly liquids with a thermal effect: Derivation of two cases of Khokolov–Zabolotskaya–Kuznetsov equations,” *Ultrasonics Sonochemistry* (2022), in press. [10.1016/j.ultsonch.2022.105911]
3. Kikuchi, Y., Kanagawa, T. and Ayukai, T., “Physico-mathematical model for multiple ultrasound-contrast-agent microbubbles encapsulated by a visco-elastic shell: Effect of shell compressibility on ultrasound attenuation,” *Chemical Engineering Science* (2022), in press.
4. Kikuchi, Y. and Kanagawa, T., “Weakly Nonlinear Theory on Ultrasound Propagation in Liquids Containing Many Microbubbles Encapsulated by Visco-Elastic Shell,” *Japanese Journal of Applied*

*Physics*, Vol. 60 (2021), SDDD14. [Spotlights 選出][2022 年 2 月 22 日時点でダウンロード回数 10,265 回][10.35848/1347-4065/abebba]

5. Kanagawa, T. and Kamei, T., “Thermal Effect inside Bubbles for Weakly Nonlinear Pressure Waves in Bubbly Liquids: Theory on Short Waves,” *Physics of Fluids*, Vol. 33 (2021), 063319. [10.1063/5.0045145]
6. Kamei, T., Kanagawa, T. and Ayukai, T., “An Exhaustive Theoretical Analysis of Thermal Effect inside Bubbles for Weakly Nonlinear Pressure Waves in Bubbly Liquids,” *Physics of Fluids*, Vol. 33 (2021), 053302. [10.1063/5.0028655]
7. Kanagawa, T., Ayukai, T., Kawame, T. and Ishitsuka, R., “Weakly Nonlinear Theory on Pressure Waves in Bubbly Liquids with a Weak Polydispersity,” *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 142 (2021), 103622. [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103622]
8. Kanagawa, T., Ayukai, T., Maeda, T. and Yatabe, T., “Effect of Drag Force and Translation of Bubbles on Nonlinear Pressure Waves with a Short Wavelength in Bubbly Flows,” *Physics of Fluids*, Vol. 33 (2021), 053314. [10.1063/5.0042625]
9. Yatabe, T., Kanagawa, T. and Ayukai, T., “Theoretical Elucidation of Effect of Drag Force and Translation of Bubble on Weakly Nonlinear Pressure Waves in Bubbly Flows,” *Physics of Fluids*, Vol. 33 (2021), 033315. [Featured Article 選出][10.1063/5.0033614]

## 【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(旧首都大学東京)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〕

昨年度に引き続き、COVID-19 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の検討を行った。(i)に関して、手腕モデルに接近する物体が接触する際の速度変化率を操作し、疑似触覚の主観的評価にどのような影響を与えるかを検討するため、従来研究に比べてより速度変化率の大きい95%、99%を設定して実験を行ったが、90%との間に有意差は認められなかった。また、(ii)に関して、プリズム適応を用いた聴覚間隔二等分判定課題における課題パフォーマンスと感覚処理に関する質問紙(青年・成人感覚プロファイル)回答との関連を検討した。その結果、最初に行った周波数の高低判断課題のパフォーマンスが個人の感覚処理特性に有意な関連が認められた一方で、プリズム適応による行動変化と感覚処理特性間の関連は大きくなかった。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. VR 環境における疑似触覚生成

昨年度に引き続き、図 1 に示す実験セットアップ、提示映像を用いて実験を行った。Suzuki and Fukui (2019)は、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。しかし、速度変化率を90%より大きくした場合に主観的評価値がどのように変化するかは不明である。そこで本研究では90%より大きな速度変化率条件を設定し、その主観的評価値を評価した。

本実験には、右利きの男性大学生 10 名(平均年

齢  $[\pm \text{SD}]$ : 22.8  $\pm$  1.5 歳)であった。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で速度が減少する映像を提示した。移動物体が手腕モデルと衝突した際に 3 秒間、速度変化率 50%、90%、95%、99%で減速し、その後、もとの速度に戻った。速度変化率 50%、90%、95%、99%の 4 条件は速度変化なし条

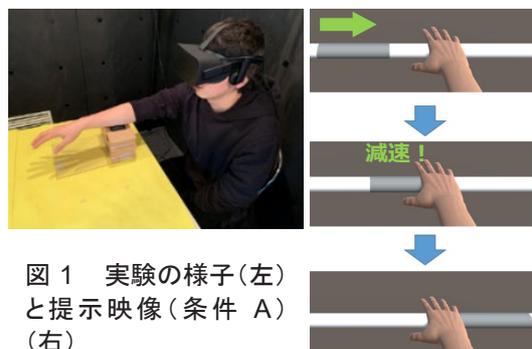


図 1 実験の様子(左)と提示映像(条件 A)(右)

件との試行回数が1:4になるようランダムに提示した。20 試行を1 セットとして10 セット(計 200 試行)提示した(図 2)。流れてくる移動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)を感じたかどうかを1から5の5件法(1: 全く感じない, 5: とても強く感じる)で主観的な評価をし、各試行後に口頭で回答してもらった。速度変化を要因として1 要因分散分析を行った結果、速度要因の主効果が認められた [ $F(4, 36) = 10.768, p < 0.001$ ]。また、多重比較(Ryanの方法, 有意水準5%)の結果、50%以上の各条件と減速しない0%条件との間で有意差が認められたが、50%, 90%, 95%, 99%の各条件間では有意差が認められなかった。本結果が速度変化率の各条件の出現確率によるのか、速度変化率90%ではほぼ最大の主観的評価値が得られるのか、今後詳細に検討を行う必要がある。

## 2. 周波数の高低判断課題における個人特性の影響

本実験の手続きについて、(昨年度の成果論文の再掲となるが)下記に記す。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。本分析では、参加者の課題パフォーマンスと質問紙回答の関連を検討した。質問紙として、個人の感覚処理特性を評価する、Dunn (2002)により開発された青年・成人感覚プロフィール(Adolescent/Adult Sensory Profile: AASP)の日本語版(萩原ら, 2015)を用いた。本質問紙は「低登録(感覚刺激に対する反応や定位が起こりにくい状態。感覚の鈍感さを指す)」、「感覚探求(特定の感覚刺激を過剰に入力しようとする行動)」、「感覚過敏(刺激に対する過剰な反応)」、「感覚回避(刺激のある環境を回避する行動)」の4象限から構成される。本分析では「感覚過敏」に着目した。Pre・Pos の PSE 差(X1)と基準との差(TAF の真ん中の条件である1000 から Pre フェイズの PSE を引いたもの)(X2)を独立変数に、AASP の感覚過敏のスコアを従属変数に設定した重回帰分析を行い、決定係数0.639で有意であった(重回帰式: 感覚回避 = 41.43 + 0.09 X1 - 0.99 X2)。X2からのパスは有意な影響を示し、PreにおけるPSEが基準よりも大きいほど感覚回避の値も大きくなり、小さければ感覚回避の値も小さくなることが示された。一方で、X1からのパスは有意ではなかった。これらの結果から、Pre フェイズの周波数高低判断課題のパフォーマンスが個人の感覚処理特性に有意な関連が認められた一方で、プリズム適応による行動変化と感覚処理特性間の関連は大きくなかった。



図2 実験の流れ

## 【助成 37 -40】

### 災害対応の経験・教訓をつたえる・つなげる継承手法の開発

研究者 東北大学災害科学国際研究所 准教授 佐藤 翔輔

#### 〔研究の概要〕

自治体職員にとって、「災害対応の経験」を未経験職員に伝承することは極めて重要である。本研究は、被災した自治体に対する実態把握調査・参与観察を通して、未経験の職員に対する「災害対応の経験」の継承方法の実態を体系的に明らかにするとともに、被災自治体での実践・検証を通じた効果的な継承方法の設計・提案した。継承実態を把握するために、過去の被災歴のある自治体に対して質問紙調査を行った。その結果、多くの被災自治体は記録資料の整理を行っているものの、災害の未経験職員に災害対応の経験や教訓を伝える研修は盛んには行われていないこと把握した。調査結果や各地方公共団体への参与観察を通して、各団体と連携し、災害対応経験の伝承のためのガイドブック、実際の体験の語りや記録誌を活用した研修手法を作成した。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1. 過去の被災自治体に対する研修事業に対する質問紙調査(発表論文 1, 2)

過去 30 年以内に大規模地震災害で被災した自治体(県及び市町村)において、継承の基礎となる災害対応の実態(事実)や課題を明文化した記録についてどのようなものを作成しているか、また、記録を生かし、実態(事実)や課題を伝わりやすくする工夫としてどのような研修や訓練等を実施しているか、他の自治体等へどのように記録として整理した内容を伝えているかについて、質問紙調査で把握した(144 件送付のうち、74 件から回答を得た(回収率 51.4%))。

調査データの分析の結果、1)多くの被災自治体は記録資料の整理を行い、災害対応の課題や教訓の継承の基礎材料が揃っていること、2)災害の未経験職員に災害対応の経験や教訓を伝える方法として防災訓練や防災研修は、記録資料を作成している割合に比べると少ないこと、3)職員向け防災研修が階層別に実施する工夫がされていること、などが明らかに

なった。

##### 2. 自治体参与観察にもとづく災害対応経験の伝承手法の設計と実装

###### 2.1 仙台市役所(発表論文 3, 成果物 1)

東日本大震災から 10 年が経過し、仙台市役所では、東日本大震災以降に職員となった者が 2020 年 3 月時点で 3 割を超え、災害の経験と教訓を継続的に継承する仕組みづくりが課題になった。一方で、過去の経験や教訓だけを単独で伝えようとしても、今を生きる職員意識や社会状況との乖離が生じ、本事業が目指す目的を達成することはできず、加えて業務時間中に伝承のみを目的とした研修の機会をつくるのが現実的ではなかった。そこで、震災の経験と教訓の伝承を実現する手段として、震災体験に特化したものではなく、日々の業務との一体性を確保した取組みを目指し、「職員間伝承プログラム」を作成した。

本プログラムはガイドブックの形式で、庁内での活用に加え、他自治体への提供や、市ホームページへの掲載などを通じて市民団体や民間企業の方々にも

活用いただくことを想定している。それぞれの組織や地域に応じ、災害エスノグラフィー（証言記録）さえあれば、本ガイドブックのワークシートを活用し、対話の場をつくることのできる構成としている。

## 2.2 東北自治研修所(成果物 2)

東北地方の地方公共団体の職員を対象にした研修機関である東北自治研修所において「行政課題研修『風水害を想定した災害対応コース』」を設計し、24名の受講生に実装した(2022年1月19日～21日)。近年、風水害が東北地方でも多発してきていることを受けて、今年度から新たに開設されたコースである。本コースでは、「被災自治体の経験を聞く・学ぶ」というコマを設けました。実際の災害対応の業務の経験を体験した職員に語ってもらい、それをもとに質疑応答やグループワークを行う形式を採用した。初となる今回は、2019年台風19号を事例に、宮城県庁から行政職(災害対策本部)、土木職(現場事務所)から1名ずつ、大郷町から本庁災害対策本部、大崎市から現地災害対策本部からと合計4人の方に体験談を語っていただいた(図4)。これをもとにした質疑応答とグループワークを実施した。

コース実施の結果、他の座学に対する評価は5点満点中、4.2～4.6であったのに対して、体験談を採用したコマは県職パートで4.7、市町パートで4.9と高い評価を得た。

## 2.3 気仙沼市役所(成果物 3)

気仙沼市危機管理課が発行した「気仙沼市 東日本大震災 災害対応記録集」は、東日本大震災時の災害対応について、現場で従事された貴市職員の想いや悩みのほか、今後の災害対策に生かすことのできる教訓も多く記載されている。東日本大震災当時の災害対応の教訓を、現在の(特に震災時には職員で

はなかった若い世代の)職員にも知ってもらいことを目的に、研修方法を設計し、15名の新規採用職員に対して実装した(2022年1月17日、図5)。

本研修は、前述の記録誌を用いた事前ワークを行い、研修当日に当時の体験者に対して質問を行う対話の形式をとっている。その後、「1年後までに自分がやること」の宣言文を記入してもらう。受講生には、1年後からその宣言内容に対するフィードバックを得る予定である。

[発表論文]

1. 秋元康男, 佐藤翔輔, 紅谷昇平:被災自治体の災害対応の課題・教訓を継承するための記録の作成及び訓練・研修の実施に関する実態把握, 地域安全学会論文集, No. 37, pp. 279-288, 2020.11.【査読付き論文】
2. 秋元康男, 佐藤翔輔:発災から25年経過した災害対応の経験・教訓の継承に関する実態分析—阪神・淡路大震災の被災自治体を対象にして—, 地域安全学会梗概集, No. 48, pp. 31-32, 2021.5. 【一般論文】
3. 柳谷理沙, 鈴木由美, 佐藤翔輔, 田中聡, 重川希志依:自治体職員が行う災害エスノグラフィー調査・編集・活用のプロセスの確立:仙台市職員間伝承プログラムの開発, 地域安全学会東日本大震災特別論文集, No. 10, pp. 47-50, 2021.8. 【一般論文】
4. 成果物 1:仙台市職員間伝承ガイドブック 災害の経験に学ぶ-From 3.11ガイド, 2021.6
5. 成果物 2:東北自治研修所「行政課題研修『風水害を想定した災害対応コース』」, 2022.1.
6. 成果物 3:気仙沼市役所・令和3年度第3回新規採用職員研修. 2022.1.

## 【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〕

本研究は、教員の人材育成及びキャリア形成に関する新たな政策である「教員育成指標」が、女性管理職育成に与える影響を明らかにすることを目的としたものである。これまでの分析により、「教員育成指標」は、昨今の同僚性が失われている組織構造において、“一人でがんばりたい先生”の手掛かりになり得る一方、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。

本年度は、新型コロナウイルス感染症(Covid-19)感染拡大下での教員労働の実態を捉えるために、パイロット調査をした。本調査の結果、教職においても、女性がコロナ禍によるマイナスの影響を受けている可能性があることが示唆された。子育て等で学校を離れている女性教員を周辺化し、キャリア形成に困難をもたらす結果を招きかねない。今後、「教員育成指標」と、コロナ後の教員労働の実態を接続していく予定である。

#### 〔研究経過および成果〕

##### 1 問題の背景と研究の目的

本研究の目的は、教員育成政策の目玉である「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影響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の策定が求められてきた。他方、同時期に、教員のキャリア形成過程を可視化する「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(2017年)。

昨年の研究において、「教員育成指標」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”の手掛かりになる一方、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とを指摘した。

女性教員の働き方や職能形成、キャリア形成に引き付けると、「教員育成指標」のもつ危険性は、ワーク・ライフ・バランスに影響し、キャリア形成上の障壁となりかねない。こうした教員のジェンダー問題を考える上で避けて通れないのが、2020年からの新型コロナウイルス感染症(Covid-19)の感染拡大である。女性がコロナ禍によるマイナスの影響を受けていることは、内閣府男女共同参画局「コロナ下の女性への影響と課題に関する研究会」が2020年11月19日に行った緊急提言等によって明らかになっている。

2020年3月には、新型コロナウイルス感染症の感染拡大に伴い、学校教員は一斉臨時休業に直面し

た。長期の休業の間、自身の子どもだけでなく、児童生徒を受け入れる側としての問題も抱えた教員たちは、どのような状況に置かれ、仕事と家庭責任を遂行してきたのかをパイロット調査をもとに考察する。

## 2 パイロット調査の概要

まず実態把握として機縁法で Web アンケート調査を実施した。調査期間は 2020 年 12 月 1 日から 2021 年 1 月 17 日であり、回答者数は 113 人であった。本研究のメンバーが機縁で調査を依頼し、さらにそこで協力してくれた教員からも協力を依頼してもらった。

さらに、アンケート調査において、インタビュー調査への協力を表明した教員 8 人に対し、2021 年 2 月 20 日、21 日、23 日に Web 会議システム Zoom を用いたインタビュー調査を実施した。

## 3 パイロット調査の結果

調査からは、次の 4 点が明らかとなった。第 1 に、臨時休業中の学校において、育児・介護役割を担っている教員（現状では多くは女性教員）は、職務と家庭責任の「板挟み」という困難に直面していた。なかには離職にまで至った教員もいた。

第 2 に、家庭責任によって出勤日数の減った教員に代わり、若手男性教員が積極的に校務を担うという事実が見いだされた。積極的に校務を担った教員の中には、任用形態上は脆弱な立場である新任教員もいた。本調査では、出勤日数の減った教員は女性、若手教員は男性であり、教員経験年数や任用形態よりも、家庭責任の有無やジェンダーが学校内でのメンバーシップの承認に影響した。

第 3 に、家庭責任によって仕事を抑制せざるを得なくなった教員（本調査ではすべて女性教員）が周辺

化されてゆく現実には、他の教員によっても認識され、懸念として表現された。本調査では、その認識と懸念を示したのは若手男性教員だった。

第 4 に、女性教員は、コロナ禍であろうがなかろうが、育児や介護と教職の両立の困難さに直面するが、本調査では、主任が女性である場合に、介護を抱える女性教員に対する配慮があったことが明らかとなった。ただし、非常時の主任としての判断に性別による差があるか否かはさらに検討が必要である。

以上のように、本調査からは、教職においても、女性がコロナ禍によるマイナスの影響を受けている可能性があることが示唆された。コロナ禍は、子育て等で学校を離れている女性教員を周辺化し、キャリア形成に困難をもたらす結果を招きかねない。今後、子育てや介護を抱え休業時に出勤できなかった女性教員と、代わりに校務を担った男性教員の間でのキャリア形成の差の出方を解明すると同時に、「教員育成指標」がもたらす影響との関連も考察したい。

〔発表論文〕

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

【助成 37 -44】

日本社会における移民の日本語習得に関する縦断的研究  
—社会科学と認知科学の学際的アプローチによる分析

研究者 神奈川大学国際日本学部 准教授 鈴木 祐一

共同研究者 東北大学大学院国際文化研究科 准教授 鄭 媽婷

〔研究の概要〕

本研究は、日本で生活する移民の日本語コミュニケーション能力の獲得を支える脳内メカニズムの一端の解明を試みた。具体的には、(意識的に使える)明示的知識と(意識を伴わない)暗示的知識を司る神経基盤を中心に脳イメージング(MRI)実験を行った。まず、日本語をコミュニケーションのために使う際には、必ずしも暗示的知識を基盤とせず、意識的に使える明示的知識が高速化していることが重要であった。そして、そのような明示的知識の習得は、認知適性(言語構造を分析する力やIQ)の高い者が特に得意であった。一方で、日本への滞在が長くなると、無意識に使える暗示的知識が徐々にコミュニケーション能力を支えるようになる傾向が見られた。これらの行動データ結果は、脳解析からも一部支持を得たが、予測とは異なる発見も得られた。

〔研究経過および成果〕

自然な環境(日本社会での日本語習得)において、明示的・暗示的学習と知識の発達プロセスを脳科学の観点から調べた研究はほぼ皆無であった。そこで、日本語習得に必要な認知神経基盤を明らかにするために、日本で生活する移民(留学生)を対象にして、日本語コミュニケーションに関与する脳領域とその脳活動パターンを調べた。新型コロナウイルスの影響により、当初予定していた実験計画を延期せざるを得なかったが、万全の感染対策を行いつつ、合計で48名の実験参加者を確保することができた。

行動データとしては、日本語の文法知識(能力)を測るために、(a)明示的知識テストとして、文法性判断タスクと(b)暗示的知識テストとして単語モニタリングタスクを実施した。前者は、文法的なエラーを探して見つけた上で、なぜ間違っているかを説明する能力を測定し、後者は、音声で聞いた文の中の文法的な

エラーを瞬時に検知する能力を測るテストである。同時に、日本語の習得の個人差要因も調べた。具体的には、(1)日本滞在歴、(2)日常生活における日本語の使用量、(3)日本社会との交流関係の強さをアンケート・インタビュー調査によって測定した。最後に、移民の認知的特徴を(a)記憶能力、(b)言語分析力、(c)IQ、(d)暗示的パターン識別能力の4つの観点から測定した。

まず、行動データの分析結果を報告する。明示的知識テストのスコアは、日本語を話している際により高度な(複雑な)言語形式を使う力と統計的に有意な正の相関が見られた。さらに、日本語を正確に、かつより洗練された形で書く能力とも有意な相関が見られた。一方で、暗示的知識テストのスコアは、日本語を話す・書く能力との相関は一切見られなかった。以上の結果から、日本語を正確に話したり書いたりするためには、必ずしも暗示的知識が基盤になっているわ

けではなく、意識的に使える明示的知識が高速化していることが重要である可能性を示している。一方で、暗示的知識テストの信頼性に関しては、まだ研究の蓄積が少なく今後の研究成果が待たれる。

次に、明示的知識の習得は、認知適性(言語構造を分析する力や IQ)の高い者が特に成功している傾向が見られた。これは先行研究で明らかになっている知見と一貫した発見となっており、大人の外国語習得においては意識的に分析する能力が重要だということを示唆している。さらに、認知適性は、日本語を話す際に複雑な言語形式を使えるようになるために重要な役割を果たしていた。

そして、(1)日本滞在歴、(2)日本語の使用量、(3)日本社会との交流関係の強さという「経験」の要因の影響を探索した。その結果、日本への滞在が長くなるほど、明示的知識だけではなく、暗示的知識テストの得点が増えることが明らかになった。このことは、日本への滞在が長くなるにつれて、日本語使用の経験値が十分に蓄積され、徐々に日本語を意識せずとも使えるようになってくることを示唆する。特に、(明示的・暗示的両者の)文法知識は、話す際の言語的な複雑さに役立つようであった。文法知識と、話す際の流暢さや正確さの間に有意な相関は見られなかった。

上記の行動データ分析結果をベースとして、コミュニケーション中の脳活動を解析した。具体的には、明示的知識に関連すると考えられる海馬・下側頭葉周辺領域と、暗示的知識を支える大脳基底核の活動を中心に仮説を立て、分析を行った。まず、行動データおよび仮説と一致した部分として、日本への滞在が長い学習者において、日本語でのコミュニケーション中に、海馬傍回の活動が減少することが確認された(図 1)。このことは、日本に滞在しながら日本語を習

得する過程で、意識的な認知神経システムから、無意識な認知神経システムへの切り替わりが起こっていることを示す間接的な証拠と考えられる。仮説とは異なり、大脳基底核などの暗示的知識システムと関連する脳領域との関連性が発見されなかった。一方で、明示的知識テストの得点は、会話中の左側頭極の活動と統計的に有意な(負の)相関を示した(図 2)。左側頭極は、社会的場面に合わせて意味を生成することに関連するとされている。そのため、言語知識という認知的発達とともに、コミュニケーションに不可欠と考えられる社会的認知の重要性が同時に示唆された。以上、学際的な研究手法を用いることで、日本語コミュニケーション能力を支えるメカニズムの一端を明らかにすることができた。

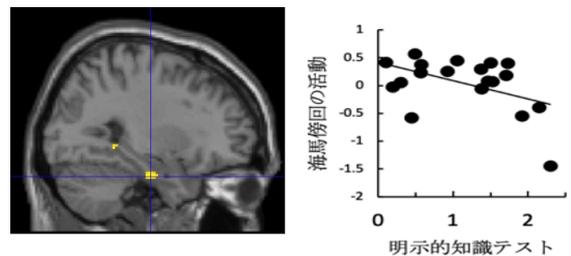


図 1. 明示的知識テストと海馬傍回の活動との相関

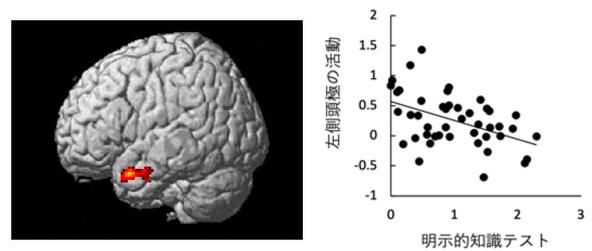


図 2. 明示的知識テストと左側頭極の活動との相関

[発表論文]

1. 鈴木祐一. (印刷中).「外国語の熟達化を支える認知神経メカニズム:Krashen の「学習」・「習得」のその先」『ことばの科学研究』

他論文 1 報査読中

【助成 35 -40】

## 公職選挙法の改正が有権者におよぼす影響の解明

研究者 関西外国語大学外国語学部 准教授 白崎 護

### 〔研究の概要〕

2019年参議院議員選挙の公示期間前後におけるパネル世論調査に基づき、インターネットの利用が政治意識の分極化を導く過程と程度を解明する。自民党の党派性に偏るインターネット環境と、自民党以外の党派性（中立も含む）を含むインターネット環境を比較した場合、前者の環境に置かれる効果は以下の通りである。政党に対する感情温度では、立憲民主党に対する世間の注目に隠れる形となった立憲国民党、そして地域政党の性格が強い維新の会について公示期間前後の変化を認めた。また政策をめぐる意識では、第1回調査において大半の回答者より選挙での主要争点と見なされなかった「外国人労働者の受け入れ」・「沖縄県普天間基地の県内移設」について公示期間前後の変化を認めた。つまり、公示日前は全国の有権者にとって関心や知識が薄いため形成途上にあった類の意識が、インターネットでの公示期間の報道や情報検索を経て有意に変化する。

### 〔研究経過および成果〕

調査内容を記す。第25回参議院議員通常選挙に関して、市場調査会社のマクロミルにインターネットでの2波のパネル世論調査を委託した。主な目的は、公示期間におけるインターネットとの接触が、政党に関する感情温度（温度）や政策に関する態度および投票などの政治的な意識と行動へおよぼす影響の解明である。母集団は、18歳以上の同社の登録モニタである。公示日12日前の6月22日に第1回調査票を配信し、4121名の回答を得た6月29日に調査を終えた。投票日翌日の7月22日に第2回調査票を配信し、2266名の回答を得た8月1日に調査を終えた。

主な分析結果を記す。まず、政党に対する感情温度の分析結果を記す。自民党の党派性に偏向したインターネット環境では、自民党の党派性と他の政党の党派性をともに認知するインターネット環境、また

は自民党の党派性と中立性をともに認知する環境と比べ、国民民主党と日本維新の会に対する感情が悪化する。経済と防衛に関する主要な公約を見ると、国民民主党は消費税増税・9条改憲・普天間基地移設に関して自民党の政策に反対した。維新の会は消費税増税に反対する上、9条改憲において自民党と同調するわけではない。また、両党ともに日米地位協定の改定を公約に掲げる点で自民党と異なる。業績や候補者の人柄など公約以外の要因、また右に挙げた以外の公約も感情温度を左右しうる。だが、公示期間にメディアや政治主体が発する選挙関連情報の大半は主要政策である。その点で、分析結果は各党の主要な公約と矛盾しない。だが、立憲民主党や共産党も消費税・9条改憲・日米地位協定に関して自民党の政策に反対する点に鑑みると、これらの政党に対する感情温度に有意な変化を検出しない結果は一貫性を欠くかに思える。これは、自民党と明確に対

立する野党第 1 党の立憲民主党と古参の共産党に抱く感情が公示日以前から固定化しており、両党と自民党との距離につき公示期間のインターネット接触に基づき新たな印象を形成しがたいと思われる。

次に、外国人労働者受け入れの争点につき記す。改正出入国管理法により、単純労働分野を中心とする「特定技能」保持者の受け入れが始まる。本分析が扱う政党のうち、共産党は外国人の人権保護の観点より技能実習制度の廃止や出入国管理法のさらなる改正を求めた。他の政党は、外国人の人権保護と多文化共生のための措置を前提として改正出入国管理法を受容しており、当争点は総論として合意争点と言える。分析結果によれば、自民党の党派性に偏向したインターネット環境では、受け入れ拡大に反対する意識、そして受け入れ拡大に反対する世論の認識の双方が強化される。だが、法改正を主導したのは自民党である。それにもかかわらず公示期間前後で外国人労働者の受け入れに対する懸念が増した理由として、法改正に伴う外国人労働者の劣悪な労働環境に焦点を当てた公示期間前後の報道が主要なマスメディアで相次いだ点を予想できる。つまり、当該争点に関する重要性の認識に変化が生じていないので投票を左右する争点ではないものの、受け入れ拡大を進める自民党の態度に対して報道を機に強い危機感を抱いたのではないか。この予想が妥当ならば、マスメディア報道に触発されたインターネットでの情報検索の結果として得られた情報が自民党に好意的な内容だと認識される場合も、受け入れ拡大を危ぶむ回答者の意識は逆に強化されることになる。同時に、他の人々も自身と同様の危機感を共有するという世論認識の強化は、マスメディア報道を契機として望ましくない帰結を予想する第三者効果と思われる。

[発表論文]

1. 「党派性を帯びたインターネット環境が有権者の政治意識におよぼす影響 -2019 年参議院議員選挙の分析-」(単著)『研究論集』(関西外国語大学編)113 号 169-187 頁 査読有 2021 年 3 月.
2. 「新しい政治のなかの市民運動」『現代日本政治の展開 -2 つの戦後から現代へ-』第 3 章(共著) 79-98 頁 森本哲郎編著 法律文化社 2021 年 1 月.
3. 「選挙と投票行動」『現代日本政治の展開 -2 つの戦後から現代へ-』第 6 章(共著)142-159 頁 森本哲郎編著 法律文化社 2021 年 1 月.
4. フェイクニュースとメディア環境」(単著)『研究論集』(関西外国語大学編)112 号 331-349 頁 査読有 2020 年 9 月.
5. 「カウンターデモクラシーにおけるメディアの役割」(単著)『研究論集』(関西外国語大学編) 111 号 165-178 頁 査読有 2020 年 3 月.
6. 「マスメディアに対する選択的接触 -2019 年参議院選挙の分析-」(単著)『政策と調査』(埼玉大学社会調査研究センター)18 号 43-64 頁 査読有 2020 年 3 月.
7. 「カウンターデモクラシーとソーシャルメディア -2016 年参議院選挙の分析-」(単著)『研究論集』(関西外国語大学編)110 号 117-134 頁 査読有 2019 年 9 月.
8. 【学会発表】「インターネットが政治意識に影響する条件 -制度と環境-」 2021 年度日本公共政策学会研究大会(防衛省の依頼に基づく招待講演)2021 年 6 月.

本冊子のPDFを掲載しています  
<https://casiozaidan.org/naiyou/past/>

---

公益財団法人 カシオ科学振興財団  
〒151-8543 東京都渋谷区本町一丁目6番2号  
TEL (03) 5334-4747  
令和4年5月1日 発行

---