

研究助成
成果報告論文集
(平成29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33回(平成27年度) 研究助成

成果報告論文 一覧

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
1	新規蛍光偏光測定原理に基づくハイスループットタンパク質間相互作用解析システムの開発	北海道大学 大学院工学研究院 教授 渡 慶 次 学
2	微細加工シリコン基板に基づく水溶液中動作型脂質二分子膜デバイスの創成	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 /電気通信研究所 教授 平 野 愛 弓
3	超薄膜アナログフロントエンド回路を用いた微小生体電位計測技術の開発	大阪大学 産業科学研究所 教授 関 谷 毅
4	スーパー・キスによる魚類の春機発動早期化技術の開発	九州大学 大学院農学研究院 教授 松 山 倫 也
5	ヘリコンプラズマによる小型高速TSVエッチャーの開発	東北大学 大学院工学研究科 准教授 高 橋 和 貴
6	有機半導体レーザーへ向けた両極性有機電気二重層トランジスタの開発	東北大学 大学院理学研究科 准教授 下 谷 秀 和
7	電気化学ヘテロ接合界面を用いた1電極フルカラーエレクトロクロミックデバイス	山形大学 理学部 准教授 松 井 淳
8	P2Pインフラを利用した超高耐性・簡易型著作権保護支援システムの提案とCGM産業への応用	筑波大学 システム情報系 准教授 延 原 肇
9	光周波数コム干渉による超高速3次元イメージング技術の研究	埼玉大学 大学院 准教授 塩 田 達 俊
10	触覚と痛覚を備えた柔軟な人工指先デバイスの開発	千葉大学 工学部 准教授 酒 井 正 俊
11	低温共晶融液による低環境負荷型高安全性電解液の設計ガイドラインの構築	千葉大学 大学院融合科学研究科 准教授 城 田 秀 明
12	光パターニング可能な導電性材料の創製	横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授 生 方 俊
13	半導体ZnOを用いたスピン注入素子の研究開発	名古屋大学 未来材料・システム研究所 助教 大 島 大 輝
14	魚の視覚システムを模倣した球形レンズによる水中カメラデバイスの提案	三重大学 大学院生物資源学研究科 准教授 宮 崎 多恵子
15	カスプ磁場中のECR放電を利用した強電離プラズマ生成に関する研究	京都大学 大学院工学研究科 講師 四 竈 泰 一
16	新規高性能半導体接合技術の検討	京都大学 工学部 准教授 田 辺 克 明
17	原子配列制御によるTiNi系形状記憶合金の高強度化と低侵襲デバイスの開発	大阪大学 接合科学研究所 助教 梅 田 純 子
18	大画面ディスプレイ用高解像度ホログラムパターン的高速生成アルゴリズム開発に関する研究	香川大学 工学部 助教 森 裕
19	受動機構による階段昇段可能な大腿義足用膝継手の開発:平地歩行機能と昇段機能の統合	香川大学 工学部 助教 井 上 恒
20	偏光サニャック干渉計を用いた光渦ビームのモードスペクトル測定とモード分離	高知工科大学 システム工学群 准教授 小 林 弘 和

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
21	界面スピン軌道相互作用によるスピン蓄積－電流変換とその制御手法に関する研究	慶應義塾大学 理工学部 特任助教 中 山 裕 康
22	マイクログラビア印刷技術を用いた高分子超薄膜の大量創製とその高機能化	東海大学 工学部 講師 砂 見 雄 太
23	π 電子系を利用した水素・炭素・窒素・酸素原子のみから成る二次電池電極材料の開発	愛知工業大学 工学部 准教授 糸 井 弘 行
24	横波型薄膜共振子を利用した流路一体型質量センサの開発と抗原抗体反応の高感度検出	名古屋工業大学 大学院工学研究科 助教 高 柳 真 司
25	無線部とCPU部のワンチップ化を容易にする2.4 GHz、6 mW動作CMOS RF受信機	大阪工業大学 工学部 特任講師 木 原 崇 雄
26	表面増強ラマン散乱による生体高分子の高感度検出を目指した柔軟に構造制御可能な金ナノ構造体の創製	北海道大学 電子科学研究所 助教 三 友 秀 之
27	新規ヘモグロビンA1cセンサーの開発	東北大学 大学院薬学研究科 助教 佐 藤 勝 彦
28	環境と運動速度の異なるヒト起立動作における全身の筋協調構造の解明	東京大学 工学系研究科 特任助教 安 琪
29	pH応答性電界効果トランジスタと核酸増幅反応による核酸がんマーカーのラベルフリー電氣的計測	東京医科歯科大学 助教 合 田 達 郎
30	脳と体から心を読み解くブレイン・ボディ マシン インターフェイス (BBMI)	北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 准教授 田 中 宏 和
31	神経回路選択的な遺伝子操作技術による皮質線条体ニューロンの解析:行動選択の神経回路メカニズムとは?	新潟大学 超域学術院 特任助教 吉 岡 望
32	経頭蓋磁気刺激の高精度刺激座標推定技術と機能的磁気共鳴画像の融合による運動野活動ダイナミクスの解明	高知工科大学 総合研究所 助教 木 村 岳 裕
33	三次元層流マイクロ流体デバイスによる同軸多層ゲルファイバーを足場とした成熟血管組織作製システムの創成	早稲田大学 先進理工学部 准教授 武 田 直 也
34	「教育活動としての部活動」を実現する指導者を育成するための部活動指導法に関する実証的研究	京都工芸繊維大学 准教授 来 田 宣 幸
35	共同研究型インターンシップの学習過程の定性分析－高度IT人材の育成の普及に向けて	北九州市立大学 国際環境工学部 准教授 山 崎 進
36	電子黒板・デジタル教科書・グラフ電卓を連携させた数学科指導の研究	東京理科大学 理学部 教授 清 水 克 彦

【1】新規蛍光偏光測定原理に基づくハイスループットタンパク質間相互作用解析システムの開発

代表研究者 北海道大学大学院工学研究院 教授 渡慶次 学

共同研究者 東北大学多元物質科学研究所 教授 火原 彰秀

〔研究の概要〕

本研究は、多サンプル同時測定可能な新たな測定原理に基づく蛍光偏光測定システムとハイスループットスクリーニングが可能なマイクロ流体デバイスを組み合わせて、簡便かつ安価なタンパク質間相互作用解析のためのハイスループット解析システムの開発を目的とした。液晶素子とイメージセンサーから構成される蛍光偏光測定システムの高性能化とマイクロ流体デバイスを開発し、ハイスループット解析システムを構築した。タンパク質間相互作用のモデル系により、構築したシステムの性能評価を行ったところ、微量かつ低濃度のたんぱく質試料で、タンパク質間相互作用解析が可能であることを確認した。

〔研究経過および成果〕

タンパク質間の相互作用解析は、創薬のターゲット探索や診断マーカー探索、疾患メカニズムの解明などにおいて重要である。しかし、従来法は測定が煩雑、測定装置が高価、必要な試料量が比較的多いなどの問題点がある。そこで本研究では、我々が開発した液晶素子とイメージセンサーを利用した蛍光偏光測定システムとマイクロ流体デバイスを組み合わせて、簡便かつ安価なタンパク質間相互作用解析システムの開発を目指した。

我々が開発した蛍光偏光測定システムは、液晶素子とイメージセンサー、各種光学部品（レンズやフィルター等）から構成されている（図 1）。液晶素子に印加する電圧の ON-OFF をスイッチングすることで、液晶素子を透過する光（蛍光）の偏光面をスイッチングすることができる。このスイッチング周波数とイメージセンサーの画像取り込み周波数を同期・画像演算することで、蛍光の偏光度を求めることができる。市販の液晶素子は、カラーフィルターや電極などが一

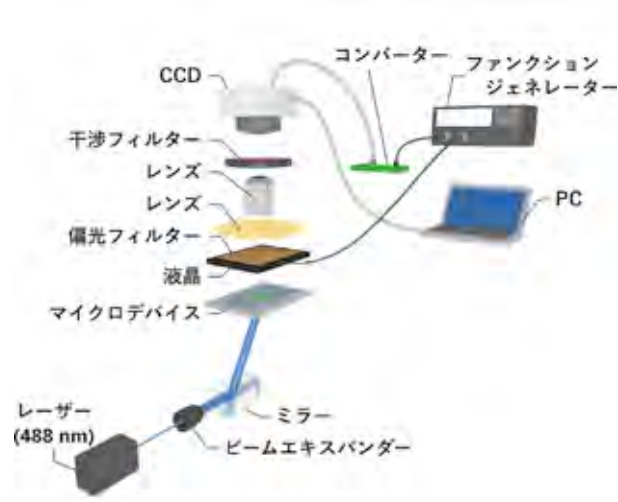


図 1 蛍光偏光測定システム

体化されているため、液晶素子自体の光の透過率がかなり低く、これが測定感度を低下させる最も大きな原因となっていた。そこでカスタムメイドの液晶素子を作製し、透過率を5倍増加させることに成功した。さらに、同期検出における測定アルゴリズム（入力波形や周波数など）についても検討し、最適化した。これらの開発により、測定システムの大幅な性能向上に成

功した。多サンプル同時測定を可能とするため、 5×5 の独立した微小マイクロチャンバーを有するマイクロ流体デバイスを作製した。1 個のチャンバーは、 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ (9nL) のサイズで、チャンバー間の間隔は $100 \mu\text{m}$ である。約 2mm 四方に 25 個のチャンバーがある。図 2 は、画像演算により得られたチャンバーの AC 画像と DC 画像、P 画像(偏光度画像)、蛍光画像である。この測定には、モデル試

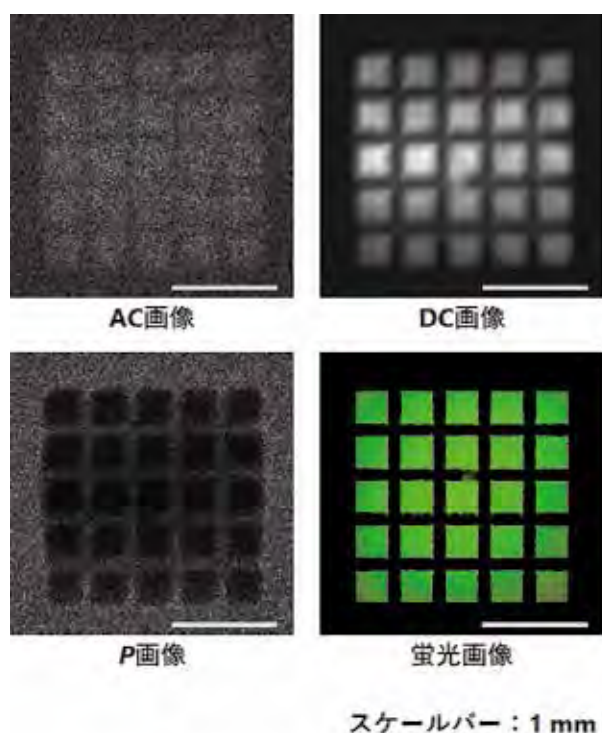


図 2 取得画像

料としてフロオレセイン水溶液を用いた。構築した蛍光偏光測定システムとマイクロ流体デバイスを用いて、 5×5 の微量(9nL)試料の蛍光偏光度を同時に測定できることを確認した。タンパク質間相互作用のモデル試料として、プロスタグランジン E2 の抗原抗体反応(蛍光偏光イムノアッセイ)を用いた。図 3 に本研究で開発した解析システムで測定したプロスタグランジン E2 の検量線を示す。濃度とともに偏光度が減少しており、期待通りの測定ができています。本測定システム

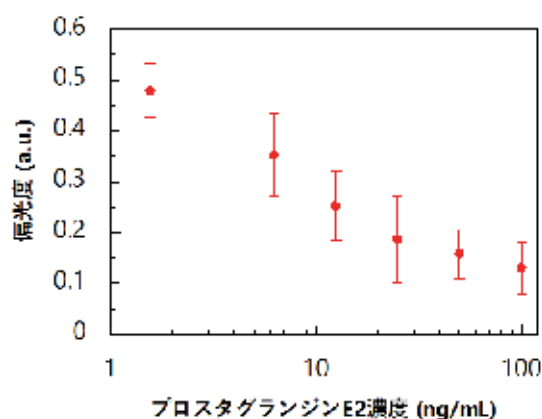


図 3 プロスタグランジン E2 の検量線

は、画像取得面積を広くすることや、あるいはチャンバーサイズを小さくすることで、容易に同時に測定できる試料数を増やすことができます。本研究により、微量試料でタンパク質間相互作用解析が可能な低価格のハイスループット解析システムの基盤技術を構築できた。

今後は、未知のタンパク質間相互作用の測定や創薬ターゲット探索などに応用していく予定である。

〔発表論文〕

1. 若尾撰, 真栄城正寿, 火原彰秀, 渡慶次学, 液晶ディスプレイを利用した蛍光偏光イメージング, ケミカルエンジニアリング, 61, 12-17 (2016).
2. O. Wakao, M. Maeki, A. Ishida, H. Tani, A. Hibara, M. Tokeshi, Fluorescence Polarization-Based Multiple Samples Detection Using Microchamber Array Towards High-Throughput Molecular Interaction Analysis, Micro Total Analysis Systems 2016, 1400-1401 (2016).

【2】微細加工シリコン基板に基づく水溶液中動作型脂質二分子膜デバイスの創成

研究者 東北大学原子分子材料科学高等研究機構/電気通信研究所 教授 平野 愛弓

〔研究の概要〕

本研究では、申請者らが提案してきた安定化脂質二分子膜に基づき、その膜中にイオンチャンネルタンパク質を包埋することにより、新しい高機能バイオセンシングデバイスの創成を目指した。具体的には、近年、薬物による副作用性不整脈の観点から注目されている心筋のカリウムチャンネル(hERG チャンネル)を膜中に包埋することにより、hERG チャンネルに対する副作用を高効率に評価できる薬物副作用評価系の構築を試みた。また、これまでにない新しい試みとして、脂質二分子膜中にチャンネル形成材料として金属ナノ粒子を包埋して電子ナノチャンネルを創成し、これに基づく水溶液中動作型電子デバイスの創成についても検討した。これにより、従来の固体エレクトロニクスとは全く異なる nanofluidic bioelectronics という新しい分野の創成を目指す。

〔研究経過および成果〕

自然界のナノ薄膜である細胞膜は、脂質分子が二層整列した脂質二分子膜を基本構造とし、その中にイオンチャンネル等の種々の膜タンパク質が埋め込まれて構成される。基本構造となる脂質二分子膜の特徴は、極めて高い膜抵抗($>100\text{ G}\Omega$)と流動性を兼ね備えたナノ薄膜であることである。この構造を模した人工脂質二分子膜は、細胞膜モデルとして期待されたものの、その脆弱性が大きな課題であった。最近、我々は、半導体微細加工との融合により安定な脂質二分子膜の形成に成功し¹、脂質二分子膜の応用可能性を拓いた。本研究では、この安定化脂質二分子膜に基づく新しい高機能バイオデバイスの創成を目指し、特に近年、薬物副作用の問題から注目されている心筋のKチャンネル(hERG チャンネル)を対象とした



図1. 本研究で創製する副作用評価チップ

薬物副作用評価系の構築を中心に検討を行った。

hERG チャンネルに対する薬物副作用評価系を構築する際に大きな課題となったのが、脂質二分子膜へのチャンネルの包埋確率が極めて低い($\sim 6\%$)ということであった。² 通常、イオンチャンネルは、脂質膜に包

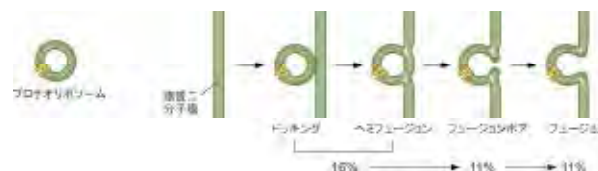


図2. ベシクル融合の模式図

まれたプロテオリポソームの状態で抽出され、あらかじめ形成した二分子膜とリポソームとの膜融合によって脂質二分子膜へと包埋されるが(図2)、この確率が極めて低いことが人工細胞膜系における課題であった。一方、膜融合は、細胞からの物質分泌時のモデル系としても注目され、多くの研究がなされている。特に Zimmerberg らはその中間状態について詳細に検討し、加えられたプロテオリポソームの大半が膜近傍に到達していないことを報告していた。³ 私達は、この論文に着目し、リポソームの脂質二分子膜へのア

クセスを促進することにより、膜融合およびチャンネル包埋を促進できるのではないかと考えた。そこで、膜融合の際に遠心力を負荷できる測定系を構築し、遠心力によるチャンネル包埋促進について検討した。⁴

始めに、微細孔のないシリコンチップを測定系に装着して遠心を行い、遠心後のチップ表面の原子間力顕微鏡により、 $14 \times g$ 以上の遠心力であればチャンネル含有リポソームを脂質二分子膜近傍まで輸送できることを確認した。そこで、hERG チャンネルを対象に、この遠心条件によるチャンネル包埋促進について検討した結果、チャンネル電流を記録できる確率が従来の約 10 倍(67%)に向上し、図 3 のようなチャンネル電流を高確率で記録できるようになった。同様に、他のヒトチャンネルの Nav1.5 チャンネルや GABA_A 受容体の高効率(67%)包埋にも成功した。プロテオリポソームにかかる遠心力を見積もった結果は $10^{-3} - 10^{-2}$ pN であり、近接した二分子膜間の融合に必要な力に比べて著しく小さかった。これにより、遠心力による膜融合促進が、膜融合過程の促進ではなく、プロテオリポソームの脂質二分子膜へのアクセスの促進によるものであることが分かる。すなわち、遠心力により膜近傍にプロテオリポソームが濃縮され、膜融合確率の増大につながったものと考えられる。

上述のように膜系の構築プロセスの向上を達成した一方で、ハイスループット測定系(16ウェル型)の構築も検討した。その結果、これまでに 9 ウェル型のチャンバーでの必要タンパク質量を 20 分の 1 にまで減じたチャンバーを構築し、この測定系でのチャンネル電流の計測に成功している。今後は、これを生物系でよく用いられる 96 ウェル型へと拡大して high throughput なイオンチャンネル測定系を構築し、副作用評価系の実現へと展開したいと考えている。この他の検討としては、脂質二分子膜に基づく新しい水溶液中動作型の電子デバイスの創成を目指し、脂質二分子膜中にナノ粒子を包埋し、その電気特性を評価した。今後は、得られた基礎データに基づいて新規デバイスの創成へと発展させたい。

〔発表論文〕

1. A. Hirano-Iwata, et al., *Langmuir*, **26**, 1949 (2010).
2. A. Oshima, A. Hirano-Iwata, et al., *Anal. Chem.*, **85**, 4363 (2013).
3. J. Zimmerberg, et al., *PNAS*, **94**, 14423 (1997).
4. A. Hirano-Iwata, et al., *Biophys. J.*, **110**, 2207 (2016).

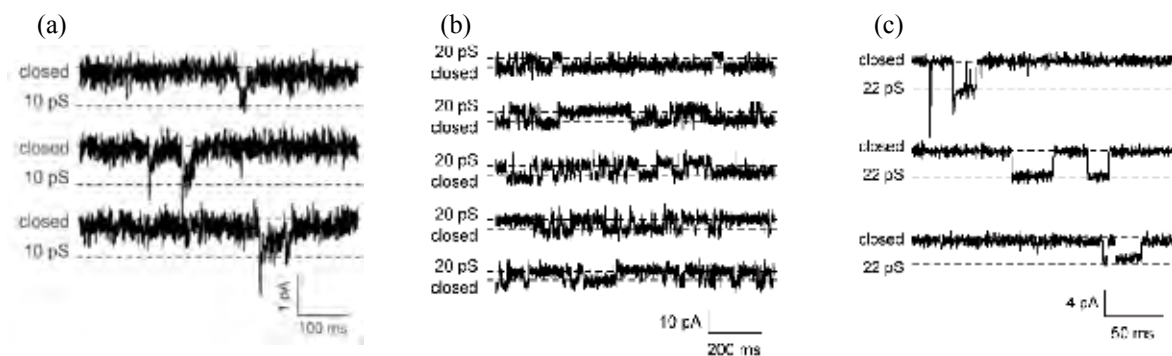


図3. 記録したチャンネル電流の例. (a) hERG チャンネル電流, (b) Nav1.5 チャンネル電流, (c) GABA_A チャンネル電流

【3】超薄膜アナログフロントエンド回路を用いた微小生体電位計測技術の開発

大阪大学産業科学研究所 教授 関谷毅

〔研究の概要〕

超少子高齢社会を迎え、次世代医療・ヘルスケアの研究が盛んに行われている。とりわけ生体の状態検知技術はその根幹であり、柔らかく、動きのある生体を正確に計測する技術開発に注目が集まっている。

本研究では、関谷らのグループが世界に先駆けて開発した「世界で最も薄膜で、最も柔軟性のあるフレキシブルエレクトロニクス技術」[1,2,3]を応用し、超薄膜フレキシブル生体信号計測用アナログフロントエンド回路を搭載した生体電位計測センサシートを開発することを目的とした。脳波および心電計測といった生体活動電位の計測に注力し、超薄膜センサを用いて、ヒトの活動時でも、「違和感なく、自然な生体情報(特に細胞活動電位：脳波、筋電位、心電位、眼電位)を計測できるセンサシステム」の基盤技術開発を行ってきた。

研究背景と目的

ウェアラブルエレクトロニクスの多くは、体温、心拍、加速度などを統合的に計測することで、活動強度や体調などを継続的に把握することができ、健康管理や医療に用いられはじめている。さらに最近では、筋電や心電の計測が可能なパッチ式ウェアラブルセンサが開発され、活動時の計測が始まっている。しかしながら、生体活動に伴う生体電位変化は、あらゆる情報を含むため、とりわけ活動中の筋電に覆い隠され、正確に計測することが容易ではない。そもそもヒトを正確に計測するためには、よりヒトに近い位置にセンサを取り付けることが求められるが、硬いセンサを柔らかい体表に付けると、硬さの違いから違和感が生じるため、柔らかいセンサが好ましい。さらに、微弱な生体信号をノイズに埋もれることなく取り出すためには、アンプ機能を含むアナログフロントエンド回路を生体信号源の直近に配置する必要がある。すなわち高感度のアナログフロントエンドを装着感なく、違和感なく生体へ貼り付けられる柔軟な集積回路技術が必要になる。エレクトロニクスを柔らかいプラスチックフィル

ムなど機械的特性に優れた基材に作製する研究開発は、国内外で精力的に進められており、フレキシブルエレクトロニクスと総称されている。

本研究では超薄膜フレキシブル生体用アナログフロントエンド回路を搭載し、多点に生体電位計測センサノードを配置した 1 μ m 厚みのマルチチャンネルセンサシートを開発する取り組みを進めてきた。

「違和感なく、自然な生体情報(特に細胞活動電位：筋電位、心電位、眼電位)を計測できる柔らかいセンサアレイを生体に直に貼り付け、生体活動の2次元情報を、高感度に計測することを目的とする。

研究成果

関谷らのこれまでの研究成果[1-3]によりすでに作製プロセスが確立している。そこで本研究では、フレキシブル有機トランジスタの TFT 特性モデルを抽出し、高利得、広帯域で動作するアンプの回路設計を行った。数十個の TFT より構成されるフロントエンドアンプにおける設計とシミュレーションにより動作確認を行った後、実際に作製し、その回路動作を確認した。

その結果、有機薄膜トランジスタによるシングルエンドアンプ回路構成において、信号増幅率 500 倍、動作速度 1kHz を確認した。有機薄膜トランジスタの移動度が $1.0\text{cm}^2/\text{Vs}$ であることから動作周波数は 1kHz にとどまるが、生体活動電位の周波数がおよそ 1kHz 以内であることからこれは、脳波や心電を計測する場合には十分な動作速度であることを確認した。

次に、フレキシブル有機センサが生体へ密着し、精度の高い生体信号が取得できるようにするために高導電性ハイドロゲルをコーティングする技術開発を進め、ここでは市販されている薄膜のアクリルアミドゲルを採用した。生体適合性に優れ、かつ密着性に優れていることから安定して生体計測でいることを確認した。

ここで有機センサを生体表面に装着したり、生体内へ展開するためのフレキシブル封止膜の開発が不可欠であった。本研究では、パリレン高分子膜と金属薄膜の積層構造膜により長期間安定してトランジスタ性能を維持できることを確認した。

最後に、フレキシブル生体センサを自立型にするためには、Si テクノロジーにおいてすでに実績のあるメモリ、CPU、無線通信機器との集積化が欠かせない。本研究で開発したフレキシブルアンプおよびセンサの駆動電圧は 2V であるため、駆動電圧の観点からは問題なく集積化が出来る。

本研究では、駆動電圧の整合性という大きな課題をあらかじめ克服していたことから、ここでは、どの程度の通信速度、通信頻度で外部へ情報を送り出すのが良いかなどの通信速度の最適化条件について検討を進めてきた。その結果、脳波計測においては、とりわけ睡眠中や安静時の脳波ではリアルタイム計測であっても 30kbps 程度の通信レートで十分であるこ

とを突き止めた。これは既存の Bluetooth Low Energy (BLE) を使用できることを意味しており、本研究では BLE 無線通信技術を採用した。

本研究では、平田雅之教授(大阪大学 MEI センター、脳外科医)との共同研究により、生体信号取得の最適化の観点から、有機センサと Si-LSI の集積化を行い、フレキシブル生体センサを自立させるシステム開発を行い、その有用性を検証することができた。

(まとめ)

点”ではなく、大面積な“面”センサにより生体計測することで、空間分解能を持つ計測、かつ時間発展計測が可能である。さらに現在のウェアラブルエレクトロニクスは、ヒトの持つ個体差の問題により正確な生体計測が出来ないという本質的な課題がある。

本研究では、多点の生体センサアレイをヒトの表面に広く展開することで、状態を“マッピング(差分読み出し)”することで、この本質的な課題をクリアできる。この研究活動を通して、測定精度の高さのみならず、「違和感なく装着できる次世代ウェアラブルエレクトロニクス」「雑音の多い生体計測の高精度化を実現」することで、生活に密着したエレクトロニクスの新しいあり方を社会に提案することができた。

[発表論文]

1. Tsuyoshi Sekitani, et al., Science, 326, 1516 (2009).
2. Tsuyoshi Sekitani, et al., Nature Materials 9, 1015 (2010).
3. Martin Kaltenbrunner, Tsuyoshi Sekitani, et al., Nature 499, 458 (2013).

本研究に関する論文は現在準備中であり、検証実験終了後に投稿を予定している。

【4】スーパー・キスによる魚類の春機発動早期化技術の開発

研究者 九州大学大学院農学研究院 教授 松山 倫也

〔研究の概要〕

海産魚マサバを対象にして、脳内神経ペプチドであるキスペプチン(Kiss)の構造・機能解析ならびに合成 Kiss の生体内投与による春機発動促進実験を行った。その結果、マサバの Kiss1 コアペプチドの構造、Kiss1 受容体との結合能を明らかにするとともに、GnRH ニューロンが Kiss1 により直接的に制御されていることを、魚類で初めて明らかにした。一方、Kiss1-16 を用いた春機発動促進実験では、想定したものと逆の結果となり、むしろ抑制作用を示した。Kiss1-16 は強いシグナル伝達能があることから、過剰投与による抑制作用の存在がうかがわれた。

〔研究経過および成果〕

1) マサバの内因性キスペプチン分子の同定

これまでに Kiss1 の構造が報告された魚種ではすべて、機能的コアペプチドが 15 アミノ酸残基により構成される Kiss1-15 であるのに対して、マサバのみ、塩基性アミノ酸が Kiss1-10 部位の N 末端側 7 アミノ酸上流に位置することから、機能的ペプチド型として 16 アミノ酸の Kiss1-16 が産生される可能性が考えられた。そこで、マサバ脳内の内因性 Kiss のペプチド型の同定を試みた。4 種合成 Kiss ペプチド(Kiss1-16、Kiss1-15、N 末端がピログルタミル化された pKiss1-15)および Kiss2-12 の混合試料を逆相クロマトグラフィー(RP-HPLC)で分離し、各ペプチドの溶出時間(ピークタイム)を求めスタンダードとした。マサバ約 100 尾の脳の視床下部ホモジネートを超遠心し、上清を限外ろ過して除タンパクを行った。さらに、スタンダードと同条件でマサバ脳抽出液を HPLC により分離し、各ペプチドのピークフラクションを回収し、nanoLC/IT-TOF-MS による分析を行った。しかし、スタンダードと同じペプチドは同定されず、今回のサンプル中に含まれる目的とするペプ

チド含量はきわめて微量であることがうかがわれた。

そこで次に、CHO 細胞に発現させた Kiss1 受容体を用いたレポーター遺伝子アッセイにより、マサバ Kiss1-15 と Kiss1-16 のシグナル伝達強度を測定した。その結果、マサバの Kiss1-16 は Kiss1-15 に対して 100 倍以上のシグナル伝達能を示したことから、機能的コアペプチドは Kiss1-16 であることが強く示唆された(図 1、論文 1)。さらに、マサバを含むサバ科魚類 17 種(サバ属 3 種、マグロ属 8 種、カツオ属 1 種、サワラ属

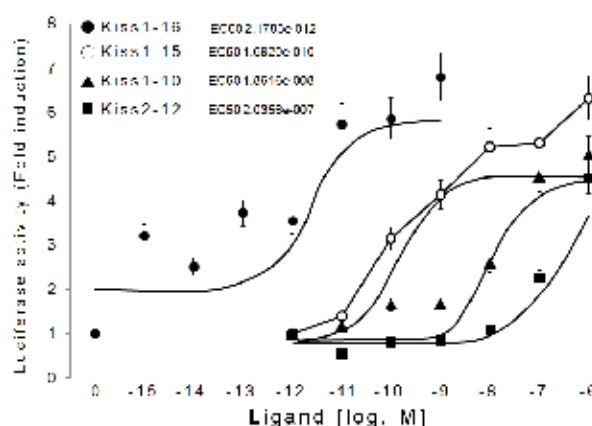


図 1.各種 Kiss1 コアペプチドの Kiss 受容体への結合能
1 種、スマ属 1 種、ハガツオ属 1 種、ソウダガツオ属 2 種)
の Kiss1 の遺伝子クローニングを行い、サバ科魚類の

Kiss1 コアペプチドのアミノ酸配列を調べた。その結果、アミノ酸配列はサバ科内において極めて高い相同性を示したが、開裂を受けるアミノ酸配列の違いにより、マサバ、ゴマサバ、タイセイヨウサバのサバ属 3 種のみが 16 アミノ酸(Kiss1-16)で、それ以外の属では 15 アミノ酸(Kiss1-15)であることが示された(論文 2)。

2) 未成熟マサバへの Kiss1 ペプチド投与実験

マサバの機能的 Kiss1 型である Kiss1-16 の長期的投与が生殖腺の発達に与える影響を調べるために、未発達な生殖腺をもつ雌雄の成魚(2 歳+)を材料として、Kiss-16(1 mM, 10 μ M, 100 nM)および GnRHa(1 mM)を、長期徐放作用のある浸透圧ポンプを用いて腹腔内投与した。2015 年 12 月 1 日に各濃度区 20 尾ずつに対して投与し、3t 水槽で給餌飼育し、2016 年 1 月 14 日に取り上げた。その結果、雄では GnRHa および Kiss1-16(1 mM および 10 μ M)投与群の生殖腺重量と GSI(生殖腺重量比)値が、Sham control 群よりも有意に低い値を示した。また、Kiss1-16 投与群では濃度依存的な生殖腺重量および GSI 値の低下が認められた。雌では、いずれのペプチド投与群においても Sham control 群との間に GSI 値の差は認められなかったが、卵径測定の結果、高濃度の Kiss1-16 投与群で発達の鈍化が認められた。

生殖腺の組織切片を観察した結果、雄では Initial control で 7 割弱が精子形成初期以前のステージだったが、Sham control では全個体が精子形成中期以降のステージに進行しており、1 割強の個体で排精が認められた。一方、Kiss1-16 投与群では濃度依存的に発達の遅延が認められ、1 mM 投与群では精子形成初期の個体が 2 割弱認められた。

雌の Initial control では全個体が前卵黄球期であり、Sham control では 7 割強の個体で卵黄蓄積の開

始が認められた。一方、Kiss1-16 投与群では雄同様に濃度依存的な発達の遅延が認められ、1 mM 投与区において卵黄蓄積を開始した個体は 3 割以下に留まった。

以上の結果より今回の実験では、Kiss1-16 投与による生殖腺発達の抑制が認められ、Kiss1-15 を用いて急速な成熟促進を誘導した我々の先行研究(Selvaraj et al.,2013)とは逆の結果となった。Kiss1-16 による生殖腺の発達抑制作用は濃度依存的に認められたが、Kiss1-16 は Kiss1-15 と比較して、Kiss1 受容体に対して約 100 倍以上のシグナル伝達能をもつ(図 1)ことから、Kiss1-16 の高濃度の投与が逆に抑制効果をもたらしたのかもしれない。

上記の仮説を検証するために、2017 年 1 月から新たな実験を始めた。2016 年 5 月生まれの当歳魚(0 歳+)を対象にして、Kiss1-16(100 μ M, 10 μ M, 1 μ M, 100 nM)投与区、Kiss1-15(100 μ M, 1 μ M)投与区、GnRHa(100 μ M)投与区を設け、2017 年 1 月 10 日に腹腔内に浸透圧ポンプで投与した。50 日後の 3 月初旬に取り上げ、解析予定である。

[発表論文]

1. Ohga H, Adachi H, Kitano H, Yamaguchi A, Matsuyama M. (2017) Kiss1 hexadecapeptide directly regulates gonadotropin-releasing hormone 1 in the scombroid fish, chub mackerel. *Biology of Reproduction*, 2017, 1-13 doi:10.1095/biolreprod.116. 142083. in press.
2. 赤瀬美子, 大賀浩史, 山口明彦, 太田耕平, 松山倫也. サバ科魚類における Kiss1 コアペプチドのアミノ酸配列. 平成 28 年度日本水産学会九州支大会(長崎)2016 年 12 月 10 日

【5】ヘリコンプラズマによる小型高速 TSV エッチャーの開発

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〕

本研究では、小型・高速のシリコンエッチャーの開発へ向けて、小型・高効率の高周波ヘリコンプラズマ源の開発、および外部磁場構造によるプラズマ密度、ラジカル密度の制御法の開発、それらの技術を用いた高速シリコンエッチャーの開発を行う。高密度プラズマ生成が可能な高周波ヘリコンプラズマ源に磁気フィルタ構造を重畳した際に、定在波ヘリコン波放電が起こることが実験的に明らかになり、磁気フィルタ構造の上流域で局所的な電子加熱が起こり、シリコンエッチングレートを決定するラジカル種を効率よく生成可能であることが分かった。一方で、波動が反射されるために、磁気フィルタ下流域には高周波電磁場が存在せず、低電子温度を実現可能であることが示された。今回開発した小型のヘリコンプラズマ源へと Ar, SF₆ の混合ガスを導入して、8 μ m/min のシリコンエッチングレートを得ることに成功した。

〔研究経過および成果〕

図 1 は、ヘリコン波プラズマ源の下流域に永久磁石対を設置、すなわち磁気フィルタを重畳した際の、磁場構造計算結果である。局所的な磁場ベクトルを矢印で図示しているが、 $z = 250$ mm 近傍にて急激に磁力線が曲げられた構造を取ることが分かる。ここで、ヘリコン波プラズマ源は、プラズマ発生部に相当する絶縁管、高周波電力を印加する誘導結合性アンテナ、およびソレノイドコイル群から形成されている。今回はプラズマ源の動作試験として水素ガスを導入し、周波数 8MHz、最大 4kW を投入可能な高周波アンプを用いてプラズマ生成を行い、プラズマ密度の空間分布計測、ラジカル発生レートを決定する電子エネルギー確率関数、および高周波磁場の計測を実施した。図 2 は、(a)磁気フィルタ重畳時、(b)磁気フィルタ非重畳時の条件下で計測した電子エネルギー確率関数の z 方向分布である。磁気フィルタを重畳した図 2(a)の計測結果を見ると、磁気フィルタが存在する $z =$

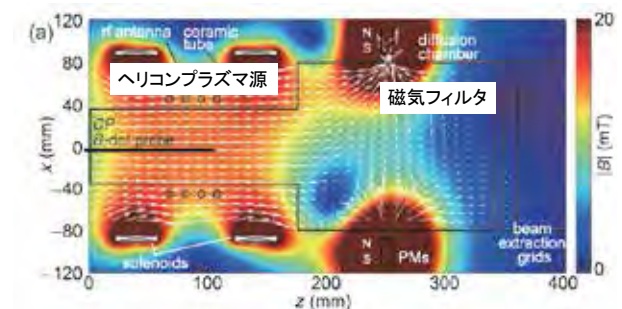


図 1: ヘリコン波プラズマ源へ磁気フィルタを重畳した際の、磁力線構造計算結果。

250mm 近傍にて高温電子が発生していることが分かり、磁気フィルタ非重畳時にはこのような現象は観測されないことが分かる。一方で、磁気フィルタ下流域の $z=300$ mm 近傍では、磁気フィルタを重畳した場合の方が電子温度を低下可能であることが分かった。すなわち磁気フィルタを導入することによって、高温電子発生領域と低電子温度領域を隣接して生成可能であることが明らかになり、基板近傍にて高温電子によるラジカル発生、および低電子温度化によるプラズマダメージの抑制が可能となるため、高速シリコン

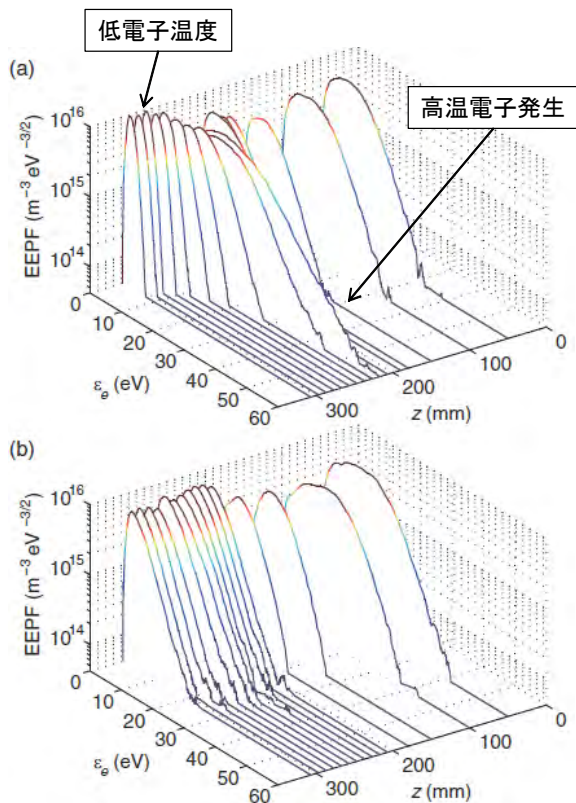


図 2: 磁気フィルタ(a)重畳時, (b)非重畳時における電子エネルギー確率関数の計測結果.

エッチャーの開発につながる知見が得られたといえる. この電子加熱・冷却機構に関しては, 磁気フィルタ構造により高周波電磁場に対するプラズマ屈折率が局所的に変化することで, 定在波ヘリコン波が励起されることが実験的に示された. したがって磁気フィルタ直情にて局所的な波動電磁場が誘起されることによ

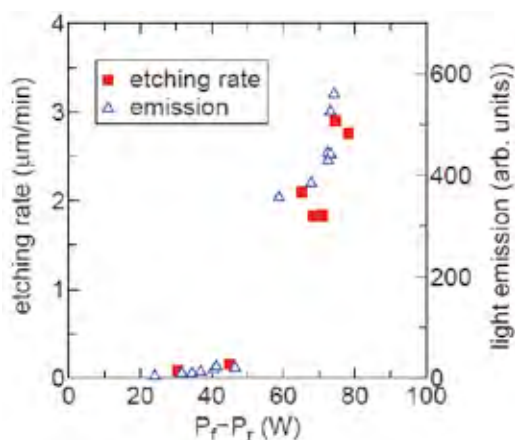


図 3: Ar+SF₆ プラズマ中の F ラジカル発光強度およびシリコンエッチングレートの高周波電力依存性.

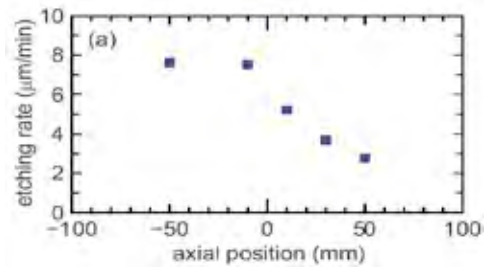


図 4: シリコンエッチングレートの基板位置依存性.

って電子加熱とラジカル生成が促進される一方で, フィルタ内部へは高周波電磁場が浸透しないため, 電子冷却過程が維持されることが明らかになったといえる. また, Ar+SF₆ の混合ガスを導入し, 基板ステージ上に設置したシリコンウエハのエッチング実験を実施した. 高周波電力 50W 以上にて急激なプラズマ密度上昇に付随して, シリコンエッチングに寄与するフッ素ラジカルの自発光が増加することが分かった. また同時にシリコンエッチングレートが増加することも観測された. さらに基板ステージの位置や動作条件を最適化することで, エッチングレートを 8μm/min まで増加させることに成功し (図 4), 本研究期間内の目標値を達成できたといえる. 今後, 実用化を視野に入れた高周波電源を含む装置の小型化や安定動作に関しても開発を進める予定である.

〔発表論文〕

1. K. Takahashi et al., Physical Review Letters, **116**, 135001 (2016).
2. K. Takahashi et al., Plasma Sources Science and Technology, **25**, 055011 (2016).
3. K. Takahashi et al., Physics of Plasmas, **23**, 033505 (2016).
4. K. Takahashi et al., 'Frequency-tuned inductively-coupled and helicon plasma source', to be submitted.

【6】有機半導体レーザーへ向けた両極性有機電気二重層トランジスタの開発

研究者 東北大学大学院理学研究科 准教授 下谷 秀和

〔研究の概要〕

有機発光トランジスタのための新規有機半導体について、トランジスタ特性および光学特性を明らかにした。既存物質のフェニレンーチオフェンコオリゴマーの硫黄原子を酸素原子に置換することにより、キャリアの電界効果易動度を低下させることなく発光効率を増加させられることを明らかにした。また、強励起時にゲインナローイングを起こす発光バンドの本数が有機半導体の種類によって異なる原因が再吸収の強度によるものであることを明らかにした。さらに、有機半導体単結晶を用いた両極性電気二重層トランジスタの開発に成功した。

〔研究経過および成果〕

有機半導体を用いた素子として有機感光体ドラムを始めとして有機 EL など様々なものが実現されている。そのような中で、有機半導体素子として残された大きな課題は電流励起レーザーの開発である。有機半導体は、材料設計自由度の高さから発光効率が高く、かつ紫外から赤外までの幅広い発光波長をカバーする様々な発光材料を容易に開発することができる。しかし、無機半導体に比べ抵抗が高いことから、発光の増幅に必要な電流密度を得るのが難しい。これを克服するために電界効果トランジスタや、その一種である電気二重層トランジスタ構造により静電的にキャリアをドーピングし、低抵抗化を目指す試みがなされている(図1)。本研究では、そのような素子構造で用

いるのに適した新規有機半導体について電氣的、光学的な物性の研究を行った。

図2に本研究に用いた有機半導体 BP2T、BPFT、BP2F の分子構造を示す。これらは電子・正孔の易動度と発光の量子収率の高いBP2Tをもとに設計・合成された分子である。いずれも、アルゴンガスを用いた物理気相輸送法により、厚さ数百 nm の板状の単結晶を作製することができる。これらの単結晶を用いて、トランジスタ特性および光学的特性の測定を行った。

絶縁層にポリメタクリル酸メチルで被覆した二酸化ケイ素を用いて作製した単結晶電界効果トランジスタの電子及び正孔の易動度を表1に示す。BP2T 分子中に2個あるの硫黄を酸素に置換するごとに正孔易動度が増加した。また、BP2F ではn型動作は見られ

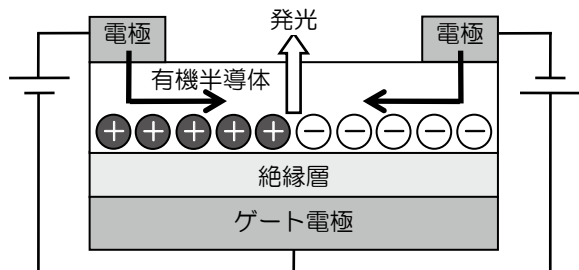


図 1. 有機発光トランジスタの模式図

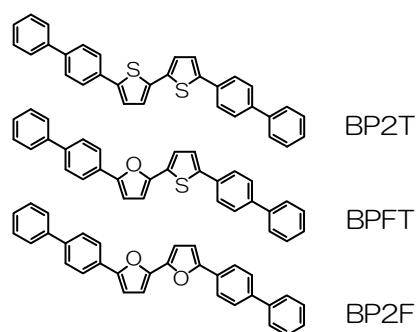


図 2. 本研究に用いた有機半導体の分子構造

表 1. 有機半導体単結晶の電子・正孔の電界効果移動度 (μ_e 、 μ_h) および光励起発光の外部量子収率 (Φ_{ex})

分子名	μ_e (cm ² /Vs)	μ_h (cm ² /Vs)	Φ_{ex} (%)
BP2T	0.011	0.08	38
BPFT	0.013	0.27	51
BP2F	–	0.32	37

なかった。これらは硫黄を酸素に置換することにより、最低空軌道、最高被占有軌道のエネルギー固有値がともに上昇するという計算結果と一致している。

光励起による発光の外部量子収率は BPFT が既存物質である BP2T よりも高い値を示した(表1)。X 線構造解析により、BPFT 分子は血漿中では直線状のものと折れ曲がったものの2種類の形状が交互に並んでいることが明らかとなった。これにより、BP2T や BP2F で見られる H 会合による発光効率低下が起こらないためであると考えられる。

また、図4に示すように強励起時に BPFT 単結晶のみ2本のゲインナローイングピークを持つことが分か

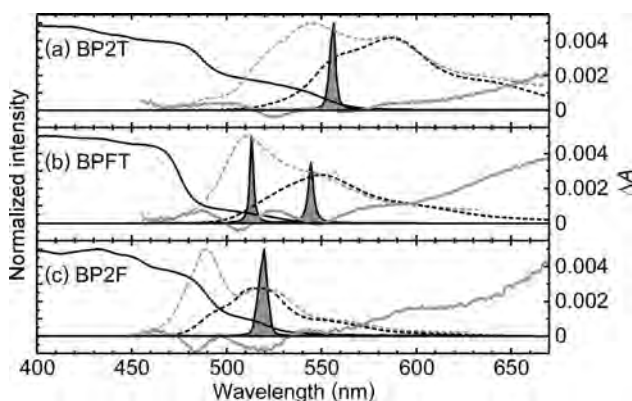


図4. (a)BP2T、(b)BPFT、(c)BP2F の吸収スペクトル (黒実線)、単結晶発光スペクトル (黒破線)、多結晶薄膜発光スペクトル (灰破線)、ASE スペクトル (灰塗り)、過渡吸収スペクトル (灰実線)。

った。これは、BP2T、BP2F では強い再吸収により 0-1 振電遷移による発光の増幅が抑えられるのに対し、BPFT では再吸収が弱いためであると考えられ

る。

以上のように、易動度を低下させることなく発光効率を上昇させた新規有機半導体の開発を行い、その発光特性を明らかにした。また、これらの半導体を用いた両極性有機電気二重層トランジスタの開発にも成功したが、論文、特許の公開前のため詳細は略す。

〔発表論文〕

1. Kazuaki Oniwa, Hiromasa Kikuchi, Hidekazu Shimotani, Susumu Ikeda, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Katsumi Tanigaki and Tienan Jin, “2-Positional pyrene end-capped oligothiophenes for high performance organic field effect transistors”, *Chem. Commun.* **52**, 4800–4803 (2016).
2. Kazuaki Oniwa, Hiromasa Kikuchi, Thangavel Kanagasekaran, Hidekazu Shimotani, Susumu Ikeda, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Katsumi Tanigaki, Tienan Jin, “Biphenyl end-capped bithiazole co-oligomers for high performance organic thin film field effect transistors”, *Chem. Commun.* **52**, 4926–4929, (2016).
3. Hui Shang, Hidekazu Shimotani, Susumu Ikeda, Thangavel Kanagasekaran, Kazuaki Oniwa, Tienan Jin, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Hiroyuki Tamura, Kenta Abe, Miyuki Kanno, Masayuki Yoshizawa, and Katsumi Tanigaki, ”Comparative Study of Single and Dual Gain-Narrowed Emission in Thiophene/Furan/Phenylene Co-Oligomer Single Crystals” *J. Phys. Chem. C*, published online[DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b10827] (2017).

【7】電気化学ヘテロ接合界面を用いた1電極フルカラーエレクトロクロミックデバイス

研究者 山形大学理学部 准教授 松井 淳

〔研究の概要〕

エレクトロクロミズムを用いた表示デバイスは、発光型表示デバイスと比較した場合、消費電力が小さく、大容量の電池を必要としないため、クリーンでコンパクトな次世代のディスプレイ材料として注目されており、多色化への試みがなされている。本研究では申請者が提唱しているポテンシャル勾配に基づく海王構造制御により1電極で多色着色可能なエレクトロクロミック材料を構築した。レドックス伝導を示すルテニウム錯体高分子電解質とエレクトロクロミズムを示すプルシアンブルー(PB)を、静電相互作用を用いた交互積層(LbL)法により階層構造化した。LbLにより階層構造化することで一つの電極電位でPBとその酸化体であるプルシアンイエロー(PY)が同時に存在でき、これより、青、黄色、緑の三色に着色することが可能となった。

〔研究経過および成果〕

エレクトロクロミズムは材料が電気化学反応により酸化または還元することで、着色する現象である。ポリアニリンやポリビオロゲンなどの π 共役系高分子、プルシアンブルーなどの金属錯体、酸化タングステン(VI)などの金属酸化物がエレクトロクロミック材料として広く知られている。材料を選択することで多様な色に着色可能であるため、フルカラー電子ペーパーへの応用が期待されている。例えば、シアアン、マゼンダ、イエローに着色するエレクトロクロミック材料を塗り分け、3つの作用電極を重ねることで、フルカラー着色する手法がリコーにより報告されている。しかし、この方法で作製された素子は素子構造自体が複雑なものとなっており、エレクトロクロミズムの利点であった単純な素子構造が犠牲となってしまう。そこで我々はLangmuir-Blodgett膜を用い、多様な材料をその酸化還元電位に基づいて階層構造化することで、電子移動制御による単一の電極による新規多色エレクトロクロミズムについて報告してきた。しかしながらLangmuir-Blodgett膜は色素の密度が低く視認できるまでのエレクトロクロミズムを示すことが出来なかった。そこで本研究ではより高密度に集積可能な交互積層(LbL)法を用いた階層構造制御により視認

可能な多色エレクトロクロミズム材料の創製を目指した。具体的にはRu錯体含有カチオン性高分子(p(CM/Ru))とプルシアンブルー(PB)ナノ粒子を2層に階層構造化することによるRu/PB界面における電子移動制御を利用した多色エレクトロクロミズム材料を創製した。

p(CM/Ru)は4-(Methacryloylmethyl)-4'-methyl-2,2'-bipyridineとtrimethyl-2-methacroyloxyethylammonium Chlorideを共重合し、その後Ru(bpy)₂Cl₂と還流し配位させることで得た。PBナノ粒子はフェロシアン化カリウムと硝酸鉄(Ⅲ)を反応させることで得た¹³。Ru/PBハイブリッド薄膜はp(CM/Ru)とカウンターポリアニオンとしてポリアクリル酸ナトリウムの組み合わせで交互に3回ずつ浸漬し、その上にPBナノ粒子とカウンターポリカチオンとしてポリエチレミンの組み合わせで交互に3回ずつ浸漬することで作製した。得られた薄膜の電気化学挙動をサイ

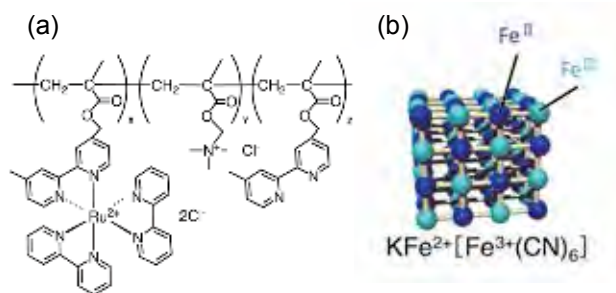
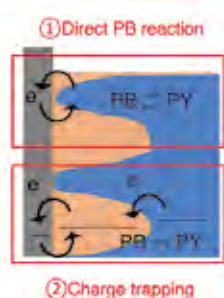


Fig. 1. Chemical structure of (a) p(CM/Ru) and (b) PB nanoparticle.

クリックボルタンメトリー(CV)により測定し、電極反応に伴う色の変化を紫外可視吸収スペクトル測定により評価した。

<結果・考察>

Ru 薄膜、PB 薄膜の CV 測定より、Ru 薄膜では 1.1 V(vs Ag/AgCl)付近に $\text{Ru}^{2+}/\text{Ru}^{3+}$ 由来の酸化還元ピークが、PB 薄膜では 0.1 V(vs Ag/AgCl)と 0.8 V(vs Ag/AgCl)付近にそれぞれプルシアンホワイト/PB、PB/プルシアンイエロー(PY)由来の酸化還元ピークが観測された。一方で、Ru/PB ハイブリッド薄膜の CV 測定では、0.8 V(vs Ag/AgCl)と 1.1 V(vs Ag/AgCl)付近にそれぞれ酸化還元ピークが観測された。これらはそれぞれ PB、Ru 錯体に由来する酸化還元ピークであり、2 層膜においてもそれぞれが酸化還元可能であることを示している。また、1.1 V(vs Ag/AgCl)付近の酸化還元ピークにおいて、還元ピークの電流値はサイクルに依存せず一致しているのに対し、酸化ピークの電流値は 2 サイクル目以降大きく減少した。これは、外膜の PB の一部が Ru の酸化により触媒的に酸化されたためであると考えられる。つまり、LbL 法により構築した 2 層膜では電極と直接酸化還元可能な PB と、Ru 錯体のメディエーションにより酸化される PB の 2 種類が存在することがわかった



Scheme 1 Interfacial electron transfer in Ru/PB film.

(Scheme 1.)。

そこで、2 層膜のエレクトロクロミズム特性について紫外可視吸収スペクトル測定により検討を行った。掃引前は 700 nm 付近に PB 由来の強い吸収が見られた(Fig. 2.(a))。続いて 1.4 (vs Ag/AgCl)V に掃引後、電位を保持した状態の吸収スペクトルは、掃引前の吸収スペクトルと比較して 700 nm 付近の吸収が減少し 420 nm 付近の吸収が増加した(Fig. 2.(b))。これは PB が PY へ酸化されたためであると考えられる。一方、一度酸化した薄膜を 0.5 V(vs Ag/AgCl)まで掃

引し、電位を保持した場合、PB・PY とは異なるスペクトルが観測された。これは、PY の一部が還元せず酸化状態を保持しているため、PB と PY が共存しているためであると考えられる。この結果からも触媒的酸化サイトと直接反応サイトの存在が示唆された。また、その変化は十分に視認することができた (Fig. 2.)。以上の結果より、LbL 法により形成される高分子とナノ粒子の特異的な界面構造により触媒的酸化サイトと直接反応サイトができ、異なる酸化還元状態の PB ナノ粒子が存在できるため多色エレクトロクロミズムが発現し、視認化に成功したと考えられる。

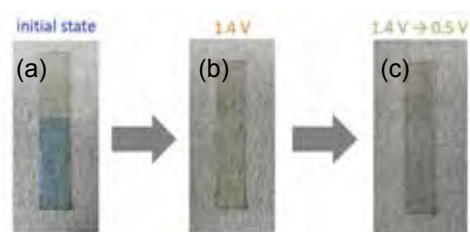


Fig. 2 Photograph of Ru/PB hybrid film measured at (a) initial state (b) 1.45 V (vs Ag/AgCl) and (c) after the potential of 0.25 $\rightarrow$ 1.4 $\rightarrow$ 0.5 V(vs Ag/AgCl).

触媒的酸化サイトの還元方法について検討しており、一度酸化した基板の電位を 0 V(vs Ag/AgCl)付近まで掃引すると、還元電流が観測されるとともに、触媒的電流が再び観測されることがわかった。さらにスペクトルが電位掃引前に戻ることが確認されている。これは系内に存在する酸素がメディエータとして働いているためである。

〔発表論文〕

1. Y. Hashimoto, T. Sato, R. Goto, Y. Nagao, M. Mitsuishi, S. Nagano, J. Matsui, "In-plane oriented highly ordered lamellar structure formation of poly(N-dodecylacrylamide) induced by humid annealing" *RSC Adv.* **7** 6631-6635 (2017).
2. H. Zhu, S. Yamamoto, J. Matsui, T. Miyashita, M. Mitsuishi, "Highly oriented poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) ultrathin films with improved ferroelectricity" *RSC Adv.* **6** 32007-32012 (2016).

【8】 P2P インフラを利用した超高耐性・簡易型著作権保護支援システム

の提案と CGM 産業への応用

研究者 筑波大学システム情報系 准教授 延原 肇

〔研究の概要〕

現行の著作権登録制度は 1) 手続きが煩雑、2) 申請完了までの時間が長い、3) 費用が高いため、大量の電子データを取り扱う CGM(Consumer Generated Media) サービスにおける著作権保護には適用困難である。この問題を解決するため、ブロックチェーン技術を利用した分散型タイムスタンプサービス、およびそれに基づく超高耐性・簡易型著作権保護支援システムを提案する。提案するシステムでは、著作権情報を電子データの関連情報をアドレスとしてブロックチェーンに格納させることで、最大 40 バイトしか格納できなかった点を解消するとともに、ブロックチェーン特有の安全性、手軽さを最大限に活用している。提案手法の有効性を確認するため、Bitcoin のブロックチェーンを利用したシステム実装を行い、提案手法による申請は 0.4 円というコスト及び申請完了まで平均 10 分で完了という結果を得ている。

〔研究経過および成果〕

電子データの改ざんと偽造は痕跡を残さずに比較的容易にできるため、著作権侵害の問題が発生しやすい。それに対して、文化庁による著作権登録制度があるが、現行の制度は、1) 手続きが煩雑、2) 時間が長い、3) 費用が高い、といった問題点がある。これに対する解決策の一つとして、第三者機関であるタイムスタンプ認証局、時刻認証局などにより発行される、電子データの存在性と非改ざん性を証明する信頼できるタイムスタンプ(Trusted Timestamping)という技術がある。しかし、タイムスタンプ認証局のサーバへのハッキングにより時刻が改ざんされた場合、安全性と信頼性の問題が発生する。この問題点に対して、P2P 電子通貨ビットコインのインフラである、ブロックチェーン(Blockchain)による信頼できるタイムスタンプサービスが登場している。このサービスに関しても、最大 40 バイトのデータしか格納できない、といった改善の余地が残されている。

本研究では手軽・安全・安価・即時な分散型タイムスタンプに加えて、格納できるデータ量を増加させる手法を提案することで、超高耐性・簡易型著作権保護支援システムを提案する。具体的には、電子データの要約および関連情報をビットコインの N 個アドレスに変換し、この N 個アドレスに小さい金額を送金する。取引がブロックチェーンに記録される時点はタイムスタンプとする。提案手法により、最大 $N \times 40$ バイトの電子データの格納が実現できる。以下、提案手法の手順をまとめるとともに、図 1: にそのコンセプトを示す。

ステップ 1 : ユーザーはウェブ画面で N 個の情報をを入力する。例えば、入力 1 : 電子データとの名前 ; 入力 2 : 作者の名前 ; … 入力 N : 作品の電子ファイル。

ステップ 2 : 第 1 から $N-1$ の入力は 16 進数に変換し、第 N 個の入力のハッシュ値をハッシュ関数 RIPEMD-160 で計算する。

ステップ3：Base58 というエンコード手法で第1からN個の入力をN個のビットコインのアドレスに変換する。

ステップ4：N 個のアドレスに小さい金額を送金し、特殊な取引をビットコインのネットワークにブロードキャストする。この取引がブロックチェーンに記録された時点は分散型タイムスタンプとする。これで、 $40 \times N$ バイトの電子データのハッシュ値、関連情報（作品名、作者名など）がブロックチェーンに格納されることになる。

ステップ5：取引検索用の ID が出力とする。記録時点以後、この電子データの存在性と非改ざん性を検証することができる。

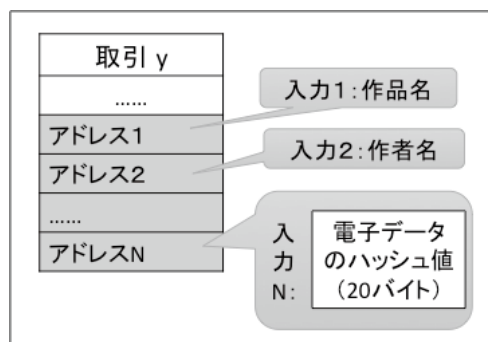


図1：Bitcoin ブロックチェーンにおける著作権情報の格納構造について

実際に、提案システムを著作権の主張のために利用する場合、ステップ4における小さい金額の送金が、申請に必要な金額となる。本研究で提案するシステムを利用した場合に、最小でどのくらいの金額を送金すれば、ブロックチェーンに実際にブロードキャストされ、書き込みがなされるのかを実験的に確認した。具体的には、4つの異なる金額について、4回送金実験を行い(合計16回)、ブロードキャスト時点から記録時点までの時間を記録した(図2)。提案手法の分散型タイムスタンプは平均10分で完了していることがわかる。この場合の最小金額、である、0.00004Bitcoin は、

日本円に換算すると、約0.4円になるので、すなわち、CGM サービス等で著作権を申請する場合には、最低0.4円という非常に安価なコストで、信頼できる著作権保護支援システムを機能させることができることになる。これは、現状の著作権保護のシステムおよび、爆発的に増加するCGM産業に対して、本質的なソリューションを与えることができると結論できる。

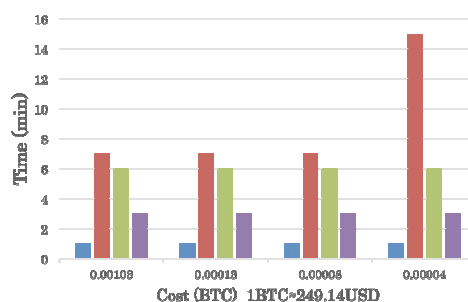


図2：送金金額と承認されるまでの時間

[発表論文]

1. Y. Gao, and H. Nobuhara, 'Intellectual Property Protection using Decentralized Trusted Timestamping Based on the Blockchain,' The 31st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2016), pp. 535 - 538, Okinawa, Japan, Jul. 10 - 13 (2016)
2. 高 月菲, 張 丘平, 延原 肇, ブロックチェーンによる分散型タイムスタンプとその折り紙著作権保護への応用, 情報処理学会 第78回全国大会, 慶應義塾大学, 2016年3月10日-12日
3. 張 丘平, 延原 肇, ビットコインに基づいた貨幣的特性のある新形態ポイントサービスの提案とそのCGMにおける影響のマルチエージェントシミュレーション, 情報処理学会 第78回全国大会, 慶應義塾大学, 2016年3月10日-12日

【9】光周波数コム干渉による超高速3次元イメージング技術の研究

研究者 埼玉大学大学院 准教授 塩田 達俊

〔研究の概要〕

自動車、鉄鋼、ガラスなど製造業の生産ラインでは、品質と信頼性を維持するためには全ての個体で表面や塗装面の欠陥検出が必須であるが、どの業界でも全個体の検査を実現できていない。既存の計測器では検査スピードが遅く広範囲の高分解サンプリング計測が不可能なためである。そこで本課題では大容量体積サンプリング速度を可能にする 3 次元イメージング計測器を実現するために光周波数コムシングルショット断層イメージング技術を応用した計測器の開発を目指した。具体的には、新規光源を開発して高感度化、高分解計測と広範囲計測の両立、光学倍率調整機能を有す断層イメージング、断層構造毎の材料解析といった点に着目して実験的な研究を行った。

〔研究経過および成果〕

1. 新規光源を開発して高感度化^[1]

200GHz 走査ステップを有す離散周波数可変レーザーを開発した。そのレーザーは、レーザー媒質と波長制御部、ファブリー・ペローエタロンを組み込んだリング共振器型に構成した。ここで、ファブリー・ペローエタロンは光周波数コムの様に周波数軸上で等間隔なスペクトルを選択する役割をもつ。図1の様に、上記光源にシングルショット光学干渉計を組み合わせることで、散乱媒質でも鏡面状の試料にも適用可能な表面形状計測が可能であること示した(図2)。

2. 高分解計測と広範囲計測の両立^[2]

光周波数コムシングルショット断層イメージングでは複数の干渉次数を用いることでイメージセンサを用いたシングルショット 2 次元イメージングにおいても深さ方向に計測範囲を拡大することができる。この様な高次干渉を用いたこのシステムには次数判別が必要であり、既に、エタロン長を変化させる方法、エタロンに電界を加えて内部屈折率を変化させる方法、エタロ

ン内の屈折率の波長依存性を利用した手法がある。波長依存性を利用した手法では、2 波長帯域のコム干渉波形から次数を判別するが、走査する手順を排除できるため高速性で優れる。そこで、近赤外と可視のそれぞれの周波数領域で 2 波長帯の最適化ができることを実証した。さらに、複数の波長帯の組み合わせを用いて次数判別の実験を行った。

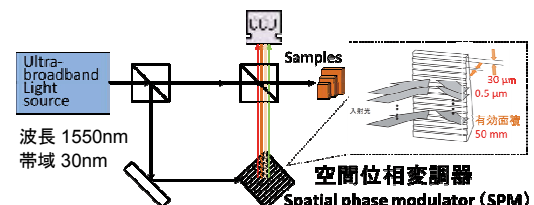


図 1. シングルショットイメージングシステム

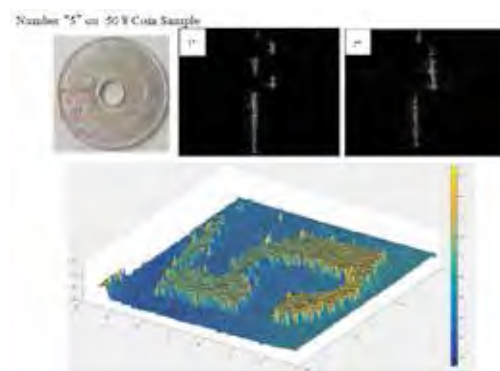


図 2. シングルショットで計測した 2 次元イメージ

3. 光学倍率調整機能を有す断層イメージング^[3]

ミクロン分解能の断層像取得を確認したうえで、図3の様に空間位相変調器の角度調整による光学的な制御でイメージサイズの倍率を16倍の幅で調整することに成功した。

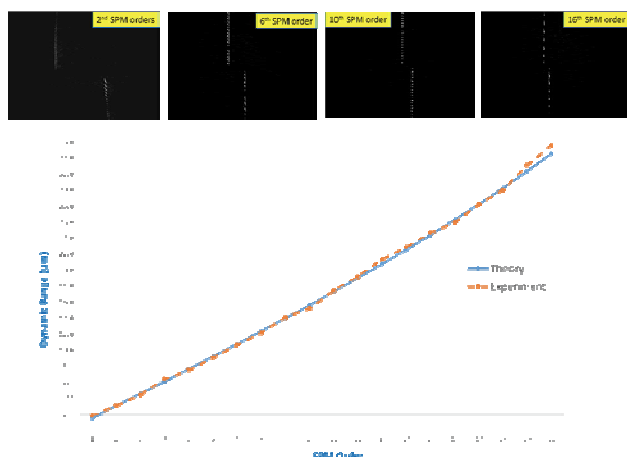


図3. 空間位相変調器の異なる角度毎に測定した100 μm 段差をもつゲージブロックの表面形状(上図)と、計測範囲の角度(SPMオーダーと対応)の関係(下図)

4. 断層構造毎の材料解析^[4]

我々はOCTから得られる干渉信号が試料各界面の反射光によって生成されることに着目し、干渉信号から試料各界面の反射光スペクトルを解析することで深さ構造ごとに分光を行う空間分解分光法を考案した。これまでにゼラチン層やポリプロピレン樹脂とガラスの空間分解分光を行い実証に成功している。しかし、吸収を持つ媒質同士が接する構造を持つ試料については二つの媒質の複素屈折率により反射率及び透過率が変化してしまうため、提案手法が適用できないとされてきた。そこで我々は干渉信号から反射率スペクトルを取り出し、クラマース・クロニツヒ解析(K-K解析)を適用することで上記の構造を持つ試料に対しても空間分解分光が可能ではないかと考えた。K-K解析を用いることで正反射の反射率スペクトルから各媒質の複素屈折率を算術的に求めることができる。そこで、K-K解析の有効性を調べるためフーリエ

ドメインOCT(FD-OCT)の系とK-K解析を用いて模擬試料の複素屈折率スペクトルを求めるシミュレーションを行った(図4)。

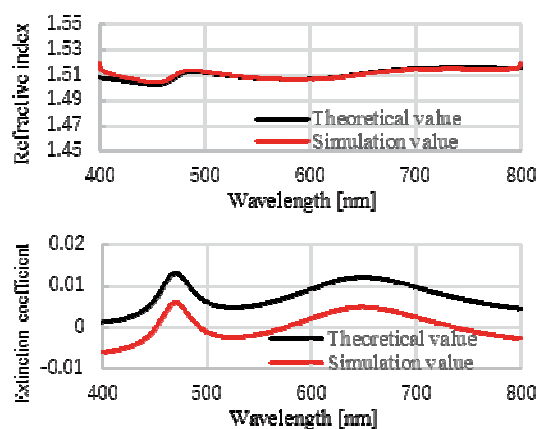


図4. OCT画像情報にK-K解析を組み合わせてシミュレーションで得た屈折率と消衰係数のスペクトル

〔発表論文〕

1. Tuan Cong Truong, Tuan Quoc Binh, and Tatsutoshi Shioda, "Precise profilometry for scattered media and tomography for multiple-layers samples using the Discrete frequency scanning laser," 第64回応用物理学会春季学術講演会, 17a-418-8 (2017).
2. 有谷光、バン クォック トュアン、塩田達俊、「可視2波長領域シングルショット2次元コム干渉による干渉次数判別法」日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016, 31aB6 (2016).
3. Tuan Binh Quoc, Tuan Truong Cong1, Heui-Hyeon Kim, Tatsutoshi Shioda, "2D single-shot profilometry for scattered media using Supercontinuum source interferometry in visible region," The 6th Asia Pacific Optical Sensors APOS2016, Th1A.5 (2016).
4. 郡司 翔平, 大仁田 竜馬, 塩田 達俊, 「FD-OCTとK-K解析による空間分解分光法の基礎検討」第64回応用物理学会春季学術講演会, 17a-418-6 (2017).

【10】 触覚と痛覚を備えた柔軟な人工指先デバイスの開発

千葉大学工学部 准教授 酒井正俊

〔研究の概要〕

自由にデザインしたプラスチック曲面に電子機能を付与する研究として、人工指先デバイスアレイの研究を行った。プラスチックと同程度のヤング率を有する有機半導体を用いた薄膜トランジスタをマトリックス状に配置し、かつ、プラスチックシートの内部応力分布を考慮することによって、内部歪の分布をドレイン電流変化により読み出すことを目指した。実際に人の指から取った型を用いて曲面形成と同時に有機薄膜トランジスタアレイを作製し、スキャン機構によって順次読み出しを行った。わずかな変位を与えるだけで、3次元形状の曲面内に発生する複雑な歪を検出できることを実証した。

〔研究経過および成果〕

私たちの身の回りにあふれるプラスチック製品は、デザイン性の高い曲面により構成されている。このようなプラスチック曲面に電子機能を宿らせる研究として、触覚と痛覚を備えた柔軟な人工指先デバイスの開発を行った。

厚さ $75\mu\text{m}$ の PEN もしくは PET フィルム上に電極パターンを作製し、その上に有機半導体の粉末をパターンニングして厚さ $25\mu\text{m}$ のカバーフィルムをかけ、曲面の型を用いて有機薄膜トランジスタ(TFT)アレイの作製と曲面の成形を同時に行った。型には実際の人間の指から型どりの凹面・凸面の組を用い、加熱・加圧可能なプレスにより指先型に成形した。

このような工程により、有機 TFT は力学的中立面から $25\mu\text{m}$ 分外側の面内に形成される(図 1(a))。このような曲面を凸側から押すと、有機 TFT 面には圧縮応力が発生する。またそのとき、面全体が変形するため、直接的に触れられていない TFT も応力を受ける。その応力分布を検出することによって、指先型が触れた物体の外形や硬さ、手触りなどを検出することがで

きるロボットフィンガーの実現を目標として研究を行った。

図 1(b)はその指先型 TFT アレイの写真である。型どりの本人の指の形にぴったりと適合する。この指先の曲面部分に 88 個の有機 TFT が 2mm ピッチで配置されている。1 個の TFT の大きさは約 $260\mu\text{m}$ 角である。本研究期間で得られた有機 TFT アレイの最大歩留まりは 81%であった。現状では個々の TFT 特性に無視できないばらつきがある。

物体への接触による変形を検出するため、マイクロメータを利用した変形印加機構とドレイン電流の読み出しのためのスキャン機構を設計・構築した。図 2(a)がその写真である。マイクロメーターのロッドにより垂

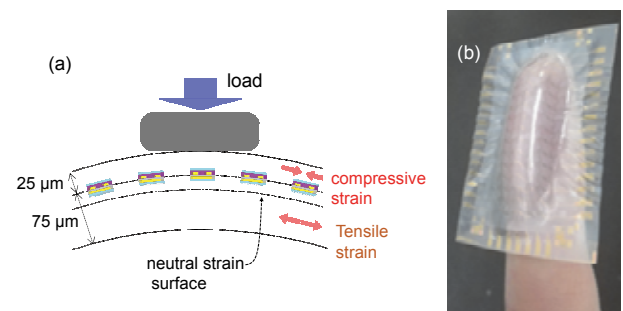


図 1. (a) 曲面有機 TFT アレイの断面構造。(b) 指先型有機 TFT アレイの写真。

直方向に曲面を押すと、曲面の変形を反映した内部歪が発生し、それを TFT 特性の変化として読み取る。TFT 特性の変化は 88 個の有機 TFT のドレイン電流を FET 型の電子リレーで走査してロックインアンプにより読み出す。その変化率($\Delta I_D/I_D$)をマッピングしたのが図 2(b)である。変位に対応してドレイン電流の変化が認められるが、現状では個々の有機 TFT の特性にばらつきが過大なこともあり、歪分布を正しく反映しているという確証のある面分布は得られていない。ただ、個々の有機 TFT に注目してその特性を追跡すると、歪に応じた系統的な特性変化が確かに認められ、その歪分布は単純な予測とは異なることが明らかになった。測定した個々の TFT(T1~T3)のピクセルとマイクロメーターロードとの位置関係を図 2(c)に示す。

図 3 は個々の有機 TFT のドレイン電流を垂直変位 Δh (mm)の印加に対して個別に測定したものである。図 3 の T1 に示す有機 TFT は、 Δh の印加に対して系統的にドレイン電流が増加しており、これは曲面が変形したことによる圧縮歪の効果と考えられる。一方

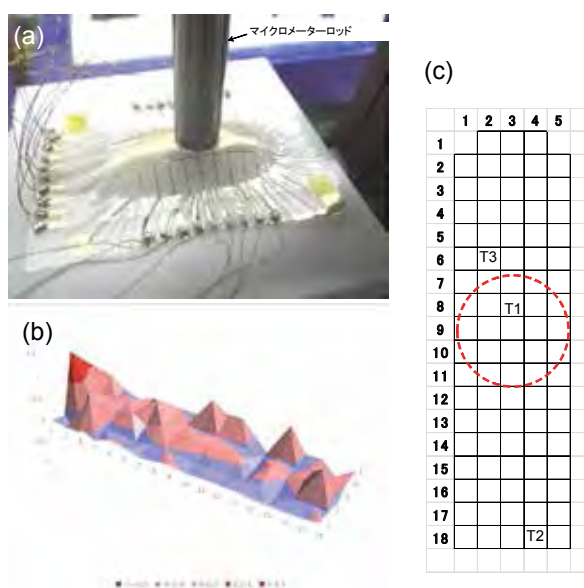


図 2. (a) 微小変位を検出する実験の写真。(b) $\Delta h = 0.8$ mm に対するドレイン電流の変化率の面分布マップ。(c) 個別の TFT 特性を計測したピクセルの位置とマイクロメーターロードによる作用点の位置関係(破線)

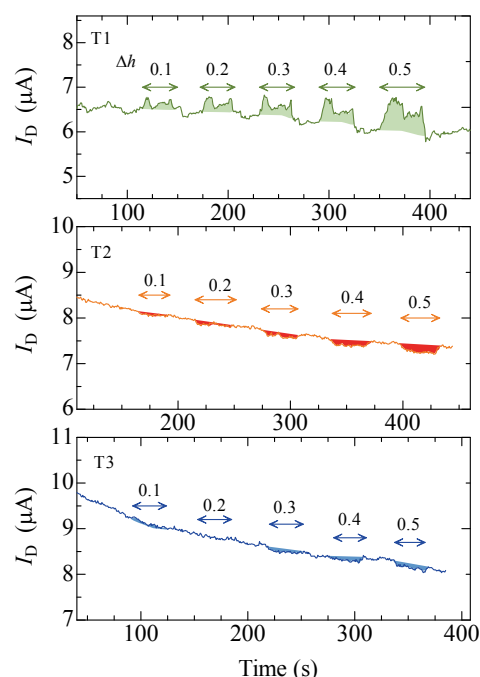


図 3. Δh に対する T1, T2, T3 のドレイン電流の変化

で、図 3 の T2 に示す TFT は Δh の増加に対してドレイン電流が減少する。これは TFT が引張歪を受けていることを示す。TFT が力学的中立面から 25%分圧縮側に配置されているため、2 次元断面として考えた単純な予想では Δh に対して圧縮歪が生じるものと考えていたが、実際には曲面が 3 次元形状をしているため、図 2(c)のように中心部が押されると、曲面の周辺領域には引張歪が発生することが理解できる。ところで興味深いのは、図 3 の T3 のドレイン電流である。この変化は、 Δh が 0.1 mm のときには圧縮歪を検出しているが、0.3 mm 以上では明らかに引張歪を検出している。これは、T3 の位置がマイクロメーターロードの外周のすぐ外側であるため、序盤では圧縮歪が発生するが、ある程度以上に押されるとロードの端で押されることによる局所的な歪が支配的になり、それによる引っ張り歪を受けることを反映している。

[発表論文]

1. Thermal molding of Organic Thin Film Transistor Arrays on Curved Surface. under review

【11】 低温共晶融液による低環境負荷型高安全性電解液の設計ガイドラインの構築

千葉大学大学院融合科学研究科 准教授 城田 秀明

〔研究の概要〕

近年しばしば報道されているリチウムイオンバッテリーの発火事故からも分かるように、安全性の高い二次電池の実現は重要なテーマである。本研究課題では、次世代の液体材料として注目されつつある低温共晶融液（Deep Eutectic Solvent: DES）をターゲットとし、安全性の高い電解液への応用を目指して新規のものを含む DES の調整とキャラクターゼーションを行った。DES は複数の固体を混合してできる共晶性の物質であり、通常の有機溶媒に比べ格段に不燃性が高く、その原料を適切に選ぶことにより環境に優しい物質として扱うことが可能である。本課題では特にアミド分子系とリチウム塩の組み合わせについて注目し、まず室温で液体状態を示す DES となるかどうかを検討し、室温において液体になるものについては液体物性（密度、粘度、電導度）を測定し、DES の構成成分と物性について考察を行った。

〔研究経過および成果〕

本研究課題では、リチウム塩－アミド分子系の低温共晶融液（Deep Eutectic Solvent: DES）に注目した。具体的には選択したサンプルは、リチウム塩としてリチウムトリフレート、リチウムテトラフルオロボレート、リチウムビス（フルオロスルホニル）アミド（ LiNF_2 ）、リチウムビス（トリフルオロメチルスルホニル）アミド（ LiNTf_2 ）、リチウムビス（ペンタフルオロエチルスルホニル）アミド（ LiNPF_2 ）、塩化リチウム、臭化リチウム、ヨウ化リチウムを、アミドとしてアセトアミド（AcAm）、プロピオンアミド（PrAm）、ブチルアミド（ButAm）、バレルアミド（ValAm）、*N*-メチルアセトアミド（NMA）、尿素、チオ尿素、2-ピロリジン、である。

最初に、これらのサンプルが室温で液体になるかどうかの確認を行った。リチウム塩とアミド分子のモル比は 1:3 に固定した。組み合わせとしては 64 種類である。その結果、リチウム塩についてはビス（フルオロアルキルスルホニル）アミドをアニオンとする塩が様々な

アミド中で、またアミドについては一級アミドがより様々なリチウム塩について、室温で液体状態になりやすいことが分かった。尚、これらの組み合わせにおいて、17 種類がこれまでに報告のない新しい室温で液体状態の DES である。

室温で液体の DES について、系統的理解ができるように表 1 に示した組み合わせを選択し、基礎液体物性である密度（ ρ ）と粘度（ η ）に加え、電池の重要な

表 1. DES の 293 K における密度 ρ 、粘度 η 、電導度 σ 。

DES	ρ (g/cm ³)	η (cP)	σ (mS/cm)
LiNTf ₂ /AcAm	1.422	443	0.497
LiNTf ₂ /PrAm	1.336	166	0.856
LiNTf ₂ /ButAm	1.277	323	0.395
LiNTf ₂ /ValAm	1.212	369	0.249
LiNTf ₂ /Urea	1.569	3360	0.0782
LiNTf ₂ /NMA	1.317	340	0.492
LiBF ₄ /NMA	1.133	210	0.752
LiCF ₃ SO ₃ /NMA	1.211	745	0.175
LiNF ₂ /NMA	1.247	104	1.75

性能を示す物性である電導度(σ)について測定を行った。上 4 段は、 LiNTf_2 に対するアミドのアルキル基の効果、1, 5, 6 段は LiNTf_2 に対するアミドの水素結合サイト数の効果、下 4 段は NMA に対するリチウム塩のアニオンの効果を検討することが目的である。

アミド分子のアルキル基の効果については、一級アミドのアルキル基が長くなるほど密度は低下した。一方で、粘度については、アルキル基の長さに単純に対応するものではなく、 PrAm において低い粘度を示すことが分かった。電導度は大まかに粘度の逆数に比例するため、 PrAm が高い電導度を示す理由は粘度によるものだと考えられる。第一級アミドの中で PrAm が最も低い粘度を示す理由は、アルキル基が長くなるほど (i) リチウム塩の濃度 (モル濃度) が下がり粘度が下がるという効果と (ii) 分散力が大きくなり粘度が高くなるという効果があり、それらが相反するため、 PrAm が極小を示したのではないかと考えられる。

アミド分子の水素結合サイトの効果を粘度について見てみると、 $\text{NMA} < \text{AcAm} < \text{Urea}$ であり、水素結合サイトが多いほど粘度が高くなることが明らかになった。一方で、電導度は $\text{AcAm} \sim \text{NMA} < \text{Urea}$ である上に、 Urea 系について NMA と比較すると粘度だけを考慮に入れたに比べて電導度が高くなる。このことから、水素結合サイトの数の増加は DES の粘度を大きくするが、水素結合ネットワークの形成のために電導度を高めることに寄与することが明らかになり、前者の効果が後者のものよりも大きく働くことも分かった。

リチウム塩のアニオンの効果については少し複雑であるが、調べたリチウム塩の中で LiNF_2 が最も粘度が低く、電導度が高くなることが明らかとなった。 DES と似た性質を示すイオン液体において、ビス(フルオロアルキルスルホニル)アミド系のイオン液体は低粘

度を示すことが知られており、これは構造異性体(シソイドとトランソイド)を取るためであると解釈されている。また、 NTf_2 よりも NF_2 をアニオンとしたイオン液体の方が低粘度であることも知られており、 DES についても同様の結果が得られたものと考えられる。一方、 LiBF_4 についてはかなり低い粘度(高い電導度)を示し、 LiNTf_2 のものよりも低粘性・高電導度であった。イオン液体では、 BF_4 をアニオンとするイオン液体の方が NTf_2 をアニオンとするイオン液体よりも粘度が高いことが知られている。このアニオンの違いによる物性への影響は、イオン液体のものとは異なるメカニズムもしくは物理因子が影響していることを示している。

本研究課題で、アミド分子とリチウム塩の組み合わせにより、新規のものを含む DES について特にアミド分子の構造とリチウム塩のアニオンに注目し、液体物性への影響を明らかにできた。今後、ここで得られた知見を基に、組成の影響、他の塩(特に 2 価、3 価のもの)の効果、アミド分子以外の水素結合性分子のマトリックス効果などについてさらに検討を加えたい(電導度の向上など)。加えて、分光学的な実験を行うことで分子レベルでの知見を得て、 DES のより効率的な設計指針の提案を目指したい。

〔謝辞〕

本研究課題は、多胡彰人君(千葉大院生)の協力で進めることができました。また、本課題をサポートしていただいたカシオ科学振興財団に深く感謝いたします。

〔研究成果〕

1. 多胡彰人, 城田秀明 「リチウム塩—アミド系共晶融液の物性: アミド分子における置換基効果」
日本化学会第 96 回春季年会(京田辺, 2016 年 3 月 24-27 日)

【12】光パターンニング可能な導電性材料の創製

横浜国立大学大学院工学研究院 准教授 生方 俊

〔研究の概要〕

パターンニングは現代の科学技術において最も重要な技術の一つであり、その応用範囲は、集積回路の製造、情報記録デバイス、ディスプレイユニット、回折格子デバイス、小型センサー、分化に応じた細胞培養基板など多岐に渡っている。近年、アゾベンゼン基含有高分子薄膜にパターン露光を施すことで、光パターンと一致したナノメートルからマイクロメートルオーダーの規則的な凹凸構造(表面レリーフ構造)が、高分子自身が光に応答して移動することで形成されることが報告されている。本研究では、上記手法を紫外光照射により導電性を示すポリジアセチレンへと重合可能なジアセチレン化合物に適用し、ジアセチレン化合物自身の移動に基づく表面レリーフ構造の形成が可能であることを実証した。

〔研究経過および成果〕

ジアセチレン(DA)化合物薄膜における表面レリーフ(SR)形成を目的とし、側鎖に様々な置換基を有する9種類のDA化合物を用いて、検討を行った。この内、DA1、DA2の構造を図1に示す。

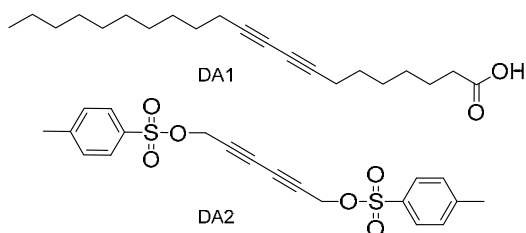


図1 ジアセチレンの構造式

DA1は酢酸エチル、DA2はアセトンを経過して1.1 wt%の溶液を調製した。この溶液から、スピンコート法によって薄膜を作製した。作製した薄膜の紫外光(254 nm)照射による光反応および、加熱やアセトン蒸気曝露による反応を吸収スペクトル変化より観察した。また、パターン露光(波長 254 nm, 強度 0.2 mW/cm², 時間 30 min, 周期 8 μm)を施した後、薄膜に加熱、もしくはアセトン蒸気の曝露を施し、薄膜の様子を光学顕微鏡(OM)および原子間力顕微鏡

(AFM)を用いて観察した。また、モノマーの熱物性を示差走査熱量計(DSC)および加熱時のOM観察により評価した。さらに、DA1において、膜厚、露光エネルギー、加熱条件などを変化させ形成したSRをAFMにより観察した。

作製した薄膜が結晶薄膜であることをOMの偏光観察により確認した。DA1薄膜に30分間の光照射を施すと、極大吸収波長($\lambda_{\max}$)を630 nmに有する吸収帯が生じ、重合反応の進行を確認した。この薄膜をおよそ10℃刻みで10分間ずつ加熱したところ、56℃以上に加熱することで吸収帯は大きく減衰し、 $\lambda_{\max}$ が541 nmへシフトすることが確認された(図2)。

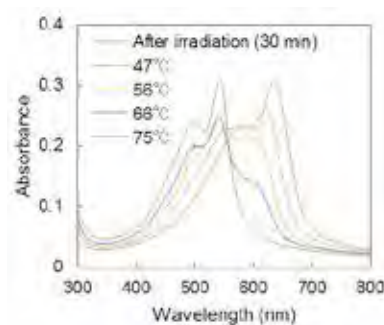


図2 紫外可視吸収スペクトルシフト

同様に光照射後のアセトン蒸気曝露においても、 $\lambda_{\max}$ は 540 nm へシフトした。DA1 薄膜にパターン露光を施しただけでは、SR の形成は確認できなかった。しかし、パターン露光後に 56°C 以上の加熱により干渉色の発現とともに平均高低差 (ΔH) = 80 nm の SR (図 3) を確認した。スリット状に光透過部を有するフォトマスクを用いた実験により、未露光部から露光部への物質移動が起こっていることが確認された。DA1 は融点が 53°C に観察され、融点以上の加熱により SR の形成が生じていることが明らかになった。また、パターン露光後のアセトン蒸気の曝露においても ΔH = 30 nm 程の SR が形成した。

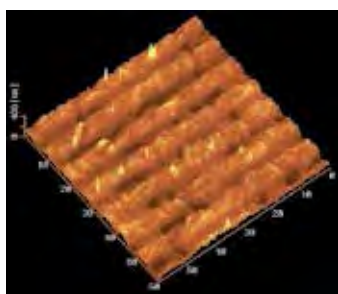


図 3 表面レリーフ構造

一方で、DA2 薄膜では光照射により 600 nm に $\lambda_{\max}$ を有する吸収帯が生じたが、その後の 84°C までの加熱において吸収帯のシフトは観察されなかった。しかし、光照射後にアセトン蒸気を曝露すると、 $\lambda_{\max}$ は 498 nm にシフトした。DA2 薄膜ではパターン露光後に融点である 90°C 以上に加熱を施しても干渉色の発現のみを確認され、明確な SR は観察されなかった。一方、パターン露光後にアセトン蒸気を曝露することにより ΔH = 40 nm の SR 形成が確認された。以上のことから、SR 形成と吸収帯シフトには密接な関係があることがわかった。

次に、DA1 薄膜を用いて SR 形成と各種パラメータ

の関係を調査したところ、 ΔH = 100 nm 以上の SR 形成に最小で 28 mJ/cm² の露光エネルギーで良く、本系は大変高感度に SR が形成されることがわかった。また、得られた SR は空気雰囲気下、室温において少なくとも 120 日間安定に存在し、200°C の加熱下においても形状を保ち、形成された SR の安定性も非常に高いことがわかった。

以上の結果から、DA 系における SR 形成は局所的な光重合、その後の未露光部のモノマーの融解もしくは溶解、およびポリマーのコンフォメーション変化により引き起こされることが示された。また、DA1 薄膜において、高感度かつ高安定な SR 形成に成功した。

〔発表論文〕

1. 岩本陽太, 生方 俊, “ジアセチレン薄膜における表面レリーフ形成”, 2016 年光化学討論会 (2016 年 9 月 9 日–11 日、東京大学駒場第一キャンパス)
2. 岩本陽太, 生方 俊, “ジアセチレン誘導体薄膜を用いた表面レリーフの光形成”, 第 65 回高分子討論会 (2016 年 9 月 14 日–16 日、神奈川大学横浜キャンパス)
3. Youta Iwamoto, Takashi Ubukata, “Photoformation of surface relief in diacetylene derivative films,” 2nd International Conference on Photoalignment & Photopatterning in Soft Materials (PhoSM), (Nov 24–27, 2016, Nagoya, Japan)
4. Youta Iwamoto, Takashi Ubukata, “Photoformation of surface relief gratings on diacetylene derivative film,” The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016), (Dec 13–16, 2016, Fukuoka, Japan)

【13】半導体 ZnO を用いたスピン注入素子の研究開発

研究者 名古屋大学未来材料・システム研究所 助教 大島大輝

〔研究の概要〕

近年、電子スピンを利用したスピン FET などの半導体デバイスが提案されている。本研究では、その実現を目指し、スペーサ層に ZnO を用いた GMR 素子を作製し、その ZnO の厚さを変えて ZnO へのスピン注入の様子を調べた。ZnO スペーサ層の厚さ 3 nm の GMR 素子においても磁気抵抗効果を観測し、スピン依存伝導を確認した。しかし、強磁性 Co の ZnO への拡散の影響を調べるために、熱処理したサンプルについて磁気抵抗効果の測定を行ったが、そのサンプルにおいてはスピン依存伝導を確認することはできなかった。これは強磁性層に使用した Co/Pd の層構造が崩れたためであると考えられる。

〔研究経過および成果〕

近年、電子スピンを利用したスピン FET などの半導体デバイスが提案されている。半導体スピndeバイスを作る上でネックとなるのが、半導体内部へスピン偏極した電子を入れる、「スピン注入」の過程である。通常、強磁性体には Fe などの金属が使用されるが、金属と半導体では抵抗が違いすぎることから、界面で電子の散乱が起き、スピン情報が失われやすい。Fe/MgO 界面に見られるように、酸化物と強磁

性金属の界面はシャープに作製できる可能性がある。

また、ZnO は Co などのドーピングにより強磁性体半導体を形成する可能性がある。そこで、本研究ではスピン FET の実現を目指し、本研究では半導体に ZnO を用いたスピン注入素子の作製を試みた。

まず、マグネトロンスパッタリング法により、図 1 に示すように、Ta(5) / [Pd (1.6) / Co(0.35)]₆ / Zn(0.7) / ZnO (t) / Zn (0.7) / [Co(0.6) / Pd(1.2)]₆ / Ta (5) / AlCu (20) / Ta (10) / SiO₂ / Si sub.の膜構成でサンプルを作製した。強磁性層である上部および下部の Co/Pd 多層膜により半導体スペーサ層である ZnO 層

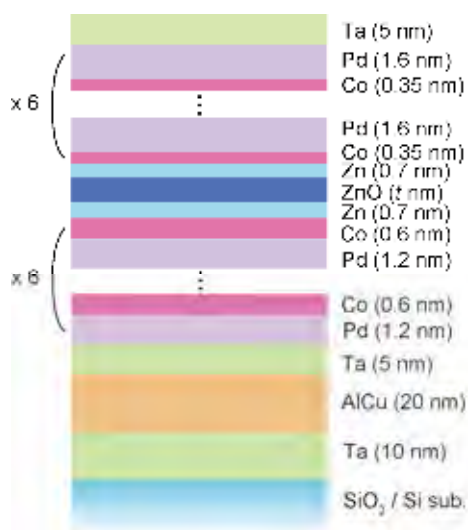


図 1 作製したサンプルの膜構成

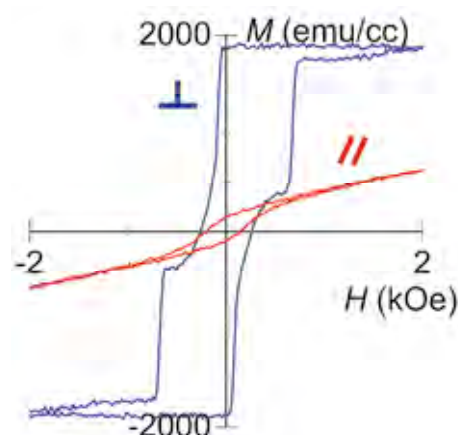


図 2 作製したサンプルの磁化曲線

が挟まれた構造となっている。図 2 に作製したサンプル ($t = 3 \text{ nm}$) の磁化曲線を示す。膜面内方向の磁化曲線が飽和しにくいのに対し、膜面法線方向の磁化曲線はある磁界で飽和している様子が見られ、作製した膜は垂直磁化膜となっていることがわかる。また、膜面法線方向の磁化曲線を見ると 2 段のループとなっているが、これは上部および下部の Co/Pd 多層膜の保磁力が異なり、別々に磁化反転しているからである。このように、磁界により上部および下部の強磁性層の磁化が平行もしくは反平行の状態を作り出せる。

次に、図 3 に示すような CPP (Current Perpendicular to Plane) - GMR (Giant Magneto Resistance) 素子を、フォトリソグラフィ、Ar イオンエッチングなどの手法を用いて作製した。中心のジャンクションの面積は約 $20 \cdot \text{nm} \times 20 \cdot \text{nm}$ である。図のように、四端子法による測定を行うことでジャンクション部分の抵抗を測定した。図 4 (a) に $t = 3 \text{ nm}$ のサンプルの I - V 測定の結果をそれぞれ示す。 I - V カーブは非線形ではなく線形であり、ZnO と金属の界面はショットキー接合ではなく、オーミックな接合となっていると考えられる。この素子を用い、磁気抵抗測定を行った結果が図 4 (b) である。磁気抵抗の値は小さいものの磁化状態に対応して、抵抗の値が変化していることがわかる。この磁気抵抗が生じるためにはスピン偏極した電子が片方

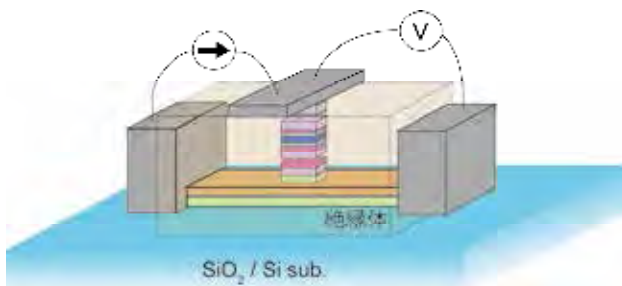


図 3 作製した GMR 素子の構造

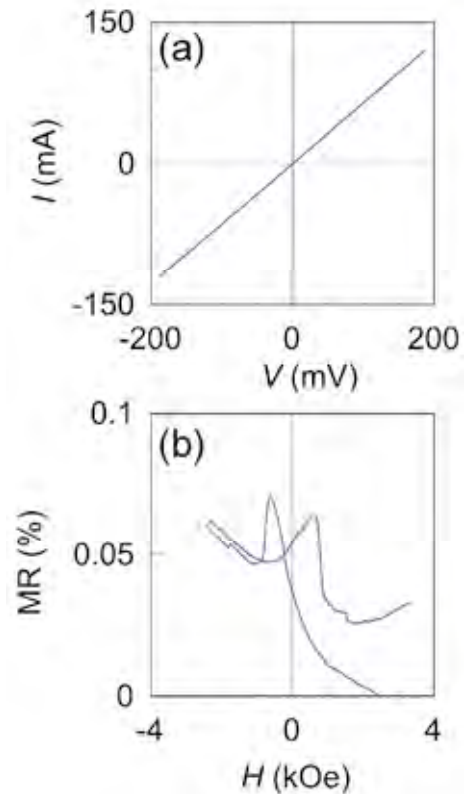


図 4 作製した GMR 素子の (a) I - V 特性、
(b) 磁気抵抗特性

の強磁性層から注入され、それがもう片方の強磁性層にスピン偏極を保ったまま到達しなければならない。したがって、この素子においてスピン注入が実現できたと言える。本研究では、スペーサ層の厚さが 3 nm までの素子においてスピン依存伝導が確認できた。

ZnO への強磁性 Co の拡散の効果を確かめるため、GMR 素子を 200°C で 15 分間熱処理を行った。その素子において磁気抵抗の測定を行ったが、磁気抵抗を確認することはできなかった。これは熱処理による Co/Pd の層構造が崩れたことが原因であると考えられる。今後、これを解決するために、強磁性層に Co 系の合金を用いる予定である。

〔発表論文〕

なし

【14】魚の視覚システムを模倣した球形レンズによる水中カメラデバイスの提案

代表研究者 三重大学大学院生物資源学研究科 准教授 宮崎 多恵子

共同研究者 三重大学大学院生物資源学研究科 准教授 福島 崇志

〔研究の概要〕

魚類の眼の多様な焦点調節システムについてシミュレーションモデルを作成することにより、魚の視覚システムを模倣した新規水中画像取得法の提案を目指した。焦点調節に関わる眼球内の微細構造および水晶体筋と眼球内靱帯の分布を組織解剖学的に計測し、レンズ挙動シミュレーションモデルのパラメータとした。シミュレーションでは水晶体筋を簡易な粘弾性モデルで表現し、水晶体筋を駆動源としたレンズ挙動のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果、レンズの水平移動に関して既往の解剖学的知見との一致が確認されたことから、本モデルの適正性が判断された。今後はシミュレーションモデルを活用したカメラの試作により実用の可能性を検討していく。

〔研究経過および成果〕

魚の眼は人と同じ“カメラ眼”であるが、構造上の大きな違いは水晶体(レンズ)にある。魚の眼のレンズは球形で人のように厚みは変わらず、光の屈折のほとんどはレンズによって行われる。レンズは眼球内空間に複数の靱帯によって保持され、眼球内の腹側に付属した1つの水晶体筋がレンズを移動させることによりピントの微調節が行われる。水中では光の減衰が大きいので、至近距離で物体を視認するのに特化した眼である。魚が視認する物体の大きさや動きは種によって違い、種はそれらを網膜上に結像するのに最も適したレンズ径、靱帯の数と付属位置、そして水晶体筋の形状を進化の過程で獲得している。本課題では魚の視覚システムの多様性と適応性に注目し、焦点調節システムに関わるパラメータを解剖学的に取得することで、動力学解析による眼球内部構造の評価を行った。これにより、魚の眼における結像システムを水中で動く被写体を高精度に撮影することに応用可能かを検証した。

シミュレーションは水晶体筋の形状が異なる以下のA、Bの2タイプについて行った(図1)。

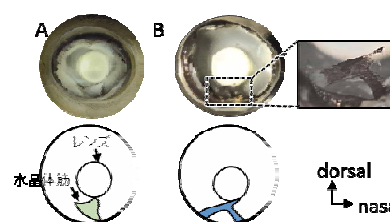


図1. 魚類の眼球内における水晶体筋写真(上)とその模式図(下)。Aは一般的な形状。Bは新たに確認されたλ型水晶体筋。

1. 眼球内構造の詳細解析

①諸形質の計測: 固定標本の眼球を解剖し、顕微鏡下において眼球径、水晶体径、水晶体筋サイズ(辺長さ、脚太さ、開脚角度、面積)を計測した。各魚種3~6個体の平均値をパラメータとして与えた。

②眼球内靱帯の分布: 固定標本の眼球から角膜を除去した後、眼球内部の硝子体を顕微鏡下で丁寧に除去した。眼球を銅板に固着してデシケータ内で30分間乾燥させた後、試料台に乗せて走査電顕観察に供した。眼球を数区画に区分して撮影した記録画像をもとに靱帯の分布位置を確認し(図2)、レンズ稼働制限要素としてシミュレーションに供した。

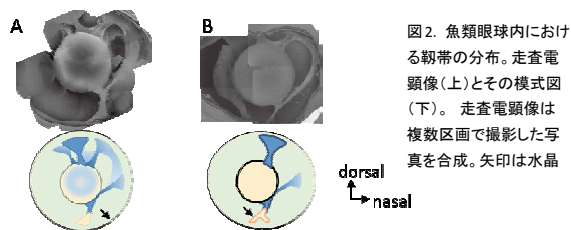


図2. 魚類眼球内における
 靱帯の分布。走査電
 顕像(上)とその模式図
 (下)。走査電顕像は
 複数区画で撮影した写
 真を合成。矢印は水晶

③B タイプ水晶体筋の神経コントロール：固定標本から水晶体筋および周辺組織を摘出し、アセチル化チューブリン抗体で標識を行い動眼神経を検出した(図3)。動眼神経は吻側脚で顕著な進入があることから、レンズは主として吻側脚によりコントロールされていることが示唆された。



図3. Bタイプ的水晶体筋における
 神経の免疫蛍光写真。緑色の蛍
 光が神経を示す。矢印が主神経。

2. シミュレーション

水晶体筋によるレンズ挙動モデル例として、三角型水晶体筋Aのモデルを図4に示す。本シミュレーションでは機構解析ソフトウェア RecurDyn (FunctionBay Co.,Ltd.) を使用した。レンズは球体で作成し、水晶体筋、懸垂靱帯は粘弾性ジョイントで表現した。粘弾性パラメータは、人間の筋肉、靱帯のヤング率(理化学研究所人体物性値データベースより引用)より対象筋肉の寸法をもとに概算された。また、モデルでは、眼球の形態保持、眼球組織のための衝撃防止、眼圧の維持という働きをもつ硝子体の粘性抵抗を考慮している。シミュレーションでは、水晶体筋モデルに力を作用させ、収縮運動をした場合のレンズ変位および速度を算出した。その際、靱帯配置や水晶体筋とレンズの接合位置および水晶体筋形状の違いによる挙動を解析した。その結果、硝子体および靱帯配置の違いによるレンズ振動の抑制効果、水晶体筋形状の違い

による水平変位量の差異が力学的に明らかとなった。ただし、他の研究ではレンズ回転はないと推察されたが、本シミュレーションではレンズ回転の可能性が示唆された。この点については今後の課題である。

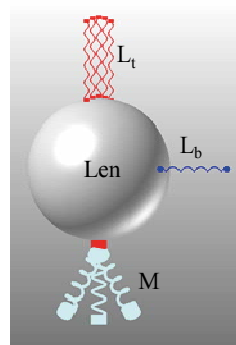


図4. 水晶体筋によるレンズ駆動モデルの一
 例(三角型水晶体筋)。L_t: 懸垂靱帯、L_b:
 背面靱帯、Len: レンズ、M: 水晶体筋

3. 水中での応用についての一提案

今回作成した魚類水晶体の挙動に関するシミュレーションモデルは実際の魚の焦点調節をよく再現しており、魚の眼における結像システムを模倣できる可能性が示唆された。球形レンズの利点は至近距離における物体の検出と多焦点であり、光の減衰が大きい水中での小さな物体の映像取得に有効である。一案として、沿岸海域における赤潮発生モニタリングへの用途を考えている。現予測方法は採水・濃縮、検鏡により判断するもので、迅速性と検出確率の向上が課題である。球形レンズデバイスを用いた船で航走しながらの水質調査は、短時間で広範囲の検出を可能にするのではないかと期待する。

[発表論文]

1. 加藤亜花梨,萩尾 華子,山本 直之,宮崎 多恵子: マハゼの眼球内に確認された新規形状の水晶体筋,日本水産学会秋季大会 (2016).
2. Fukushima T., T. Miyazaki, T. Kato, H. Horio and K. Sato. Fish's lens drive mechanism imitated by using shape memory allow. Proc. the 8th ISMAB. 2016. CD-ROM.

【15】カスプ磁場中の ECR 放電を利用した強電離プラズマ生成に関する研究

研究者 京都大学大学院工学研究科 講師 四竈 泰一

〔研究の概要〕

中性粒子密度に対する電子、イオン密度の割合が数十%に達する強電離プラズマを用いた次世代成膜プロセスが注目を集めている。中性粒子が有意な割合を占める従来の弱電離プラズマと比較して、強電離プラズマ中では磁場や電場を印加することによりイオンの軌道や入射エネルギーを制御することが可能となる。このため複雑な形状のワークへの均一な成膜や、薄膜の化学組成及び組織配向の制御が実現できることが明らかになっている。本研究では大容積かつ定常運転が可能な強電離プラズマ源の開発を目指し、カスプ磁場中の電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) 加熱放電で生成したヘリウムプラズマにおける電離度の空間分布を計測した。

〔研究経過および成果〕

図 1 に装置の模式図を示す。カスプ磁場は、同軸上に置いた一対のコイルに逆極性の電流を流すことで作られる。周辺へ向かって磁場強度が増加する極小磁場構造を持つため、プラズマの交換型不安定性による密度低下を抑制できる。また、等磁場面 (ECR 面) を閉曲面にすることが可能なため、ECR 面を横切る電子は加熱により磁場に垂直な速度が増加し、装置中心部に向かって反射される割合が増加する。この結果、電子の損失が低減され、同時に両極性電場によりイオンの損失も低減される。これらの効果により、発散磁場中の ECR 放電と比較して高い密度、電離度を有するプラズマを得ることが可能である。同

様の特性はミラー磁場と多数の棒磁石によるマルチカスプ磁場を組み合わせることも可能だが、コイル及び磁石との干渉により大きなサイズのポートを利用することが難しい。カスプ磁場はコイル配置が単純なため、大きなポートを利用したワークの出し入れが可能であり、プロセス用途に適している。

本研究ではヘリウム原子発光線の強度を利用して電離度を求めた。発光強度は電子温度・密度、原子の基底状態密度、等の関数となるため、複数の発光線の強度を計測し、計算コード (衝突輻射モデル) による励起状態密度の計算値と比較することでこれらのパラメータを求めることができる。

実験時は装置壁でのヘリウム圧力 5.3, 23, 67 mPa の 3 条件で周波数 2.45 GHz, 電力 800 W のマイクロ波を入射し、プラズマを生成した。装置赤道面に設置した合成石英窓を通してプラズマからの発光を観測した。図 1 に示す円柱座標系で観測は $z = 12$ mm, 装置軸からの距離が 23-120 mm の範囲の 6 視線を用いて行った。装置中心での視線の直径は約 12 mm である。対物レンズで集光した光は光ファイバで

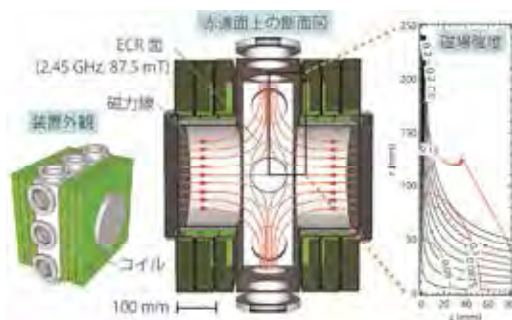


図 1. カスプ磁場中の ECR 放電装置

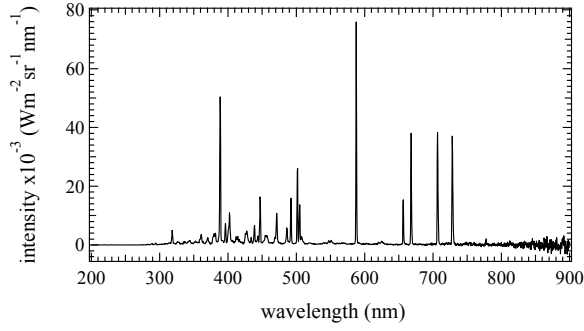


図 2. 発光スペクトル (圧力 23 mPa)

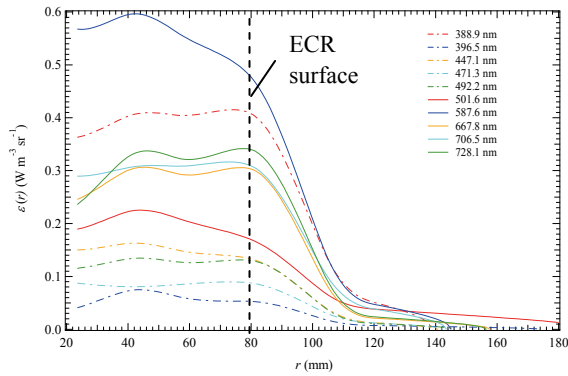


図 3. 放射率の径方向分布 (圧力 23 mPa)

伝送し、分光器 (B&W Tek BTC112E; 波長範囲 200-900 nm, 分解能 1.2 nm) を通して分光し、スペクトルを得た。波長に応じた絶対感度は事前に校正した。得られたスペクトルを図 2 に示す。

得られたスペクトルデータから波長範囲 389-728 nm に存在するヘリウム原子発光線の強度を求めた。強度は視線上に存在する発光の空間積分値であるため、装置の軸対称性を仮定し、アーベル逆変換を用いて放射率の径方向分布へと変換した。放射率の分布を図 3 に示す。図中の破線は ECR 面の位置を示す。

放射率から発光線の励起上準位密度を求め、衝突輻射モデルによる計算結果と比較した。計算コードの入力値である電子温度 (T_e)・密度 (n_e)、原子の基底状態密度 ($n(1^1S)$)、等を非線形最小 2 乗フィッティングのパラメータとして決定した。得られたパラメータの径方向分布を図 4 に示す。計算時間の都合により、

パラメータは $r = 40-120$ mm の範囲の 20 mm 間隔の点でのみ求めた。電離度は n_i をイオン密度、 n_0 を原子密度として以下の式で定義される $DOI = n_i / (n_i + n_0)$ 。本実験では観測されたヘリウム 1 価イオン発光線の強度が小さいことからイオンの大部分が 1 価であると近似できる。このときプラズマの準中性条件より $n_i \approx n_e$ と近似できる。また、原子の励起状態密度は基底状態に比べて 3 桁以上小さく、 n_0 は基底状態密度に等しいと近似できる。以上より、電離度を $DOI \approx n_e / (n_e + n_0)$ と近似して計算した。結果を図 4 に示す。電離度は ECR 面近傍から内部にかけて増加しており、最大 30% 程度に達することが明らかになった。圧力 5.3, 67 mPa の条件でも同様の計測と解析を行い、得られた電離度は最大 20-25% 程度であった。

著者が知る限り、ECR 放電プラズマ中の電離度の研究例は少ないが、発散磁場中では実験、計算により 10% 以下の値が報告されている。今回得られた電離度はこれに対して有意に高く、強電離プラズマ生成における本放電方式の有効性を示している。

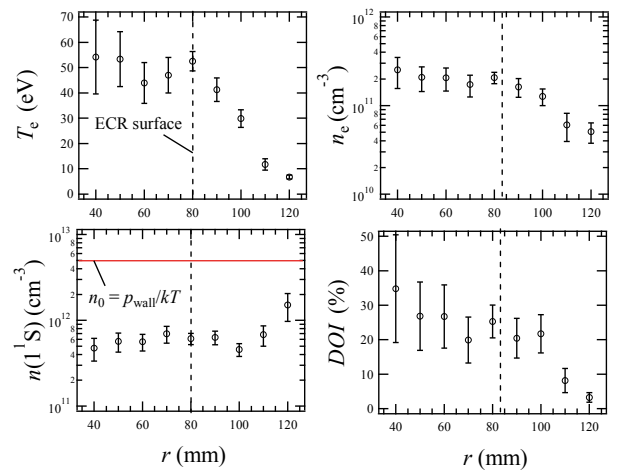


図 4. 電離度の径方向分布 (圧力 23 mPa)

【16】新規高性能半導体接合技術の検討

研究者 京都大学工学部 准教授 田辺 克明

〔研究の概要〕

ナノ光・電子デバイスの高効率化に向け、世界に先駆け単原子層材料をコアとするダブルヘテロ構造の作製に成功した。本構造はウェハ接合技術により形成された Si/グラフェン/Si 積層構造であり、特に材料系の環境負荷の低さと Si クラッドによる電流および光の制御性の高さを利点とする。界面の機械的安定性および層間の電気的接続を確認している。本成果は、次世代の超高速・高密度集積ナノエレクトロニクスの実現に向けた技術的基盤の一つであると言える。

〔研究経過および成果〕

近年、グラフェンをはじめとする単原子層材料を用いた高性能ナノ光・電子デバイスが注目を集めている(A. K. Geim and I. V. Grigorieva, Nature 499, 419, 2013)。このようなデバイスは、特にエレクトロニクスの小型化、すなわち、高密度集積化、また、単原子層材料における高いキャリア移動度を活用した超高速化をもたらすとして期待されている。しかしながら、これまでに実験的デモンストレーションがなされている単原子層材料デバイスは、いずれも、光・電子の閉じ込めの機構・構造を持たない一定のロスを持ったデバイスであった。そこで、本研究では、従来の半導体レーザ、太陽電池等において用いられているダブルヘテロ構造を導入することで、デバイス性能の高効率化を目指すこととした。

本研究における実験手法について述べる。今回作製した構造は、単原子層材料の代表格であるグラフェンを活性材料と想定しコアに置き、シリコン(Si)をクラッドとする Si/グラフェン/Si 積層構造である。p 型 Si 基板上に単層グラフェンが転写されたウェハに、同じ p 型 Si 基板をウェハ接合法により接合することで作製

した。ウェハ接合は、大気中にて、Si 基板に対して垂直な方向の圧力 0.1 MPa、加熱温度 300℃、3 時間という条件(K. Tanabe et al, Sci. Rep. 2, 349, 2012)にて行った。

作製した Si/グラフェン/Si ダブルヘテロ構造について引張強度測定を行ったところ、接合界面は 30 kPa 程度の機械的強度を有していることが分かった。また、電流-電圧測定(図1)において、その直列抵抗値は、10 ohm-cm² 程度であり、図1に示すように、グラフェンの存在しない、p 型 Si 基板同士を接合した参照試料のものと同程度であった。このことから、本ダブルヘテロ構造の層間には良好な電気的接続(高い導電性)が得られていることが分かる。

このように、初めてとなる単原子層材料をコアとするダブルヘテロ構造の作製に成功した。特に、材料系(構成元素が C と Si であること)の環境負荷の低さと Si クラッドによる電流および光の制御性の高さ(電流や光の注入および制御を容易に行うことができる)を特徴として挙げることができる。この新規構造の導入により、単原子材料層中に電子および光を閉じ込めることができるようになるため、デバイス動作の著しい

高効率化が期待される。また、今回の構造のようにシリコンなどをクラッドとすることにより、従来の単原子層材料の片面保持素子構造に比べ、より堅牢でかつ電気的な制御を行いやすい素子をもたらす。さらに、今後の展開として、エピタキシャルリフトオフ (E. Yablonovitch et al, Appl. Phys. Lett. 51, 2222, 1987) や Smart Cut (M. Bruel, Electron. Lett. 31, 1201, 1995) といった薄膜剥離法を用いることで、フリースタANDING・フレキシブル極薄膜半導体/単原子層材料/半導体ダブルヘテロ構造デバイスを作製することも可能である。このように、本研究成果は、超高速変調器 (T. Mueller et al, Nature Photon. 4, 297, 2010)、ナノレーザ (S. Wu et al, Nature 520, 69, 2015) といった単原子層材料を活性物質とする新規高性能ナノエレクトロニクスデバイスの実現につながるものである。

導体ダブルヘテロ構造の作製”, 化学工学会 第 82 年会, 東京, 2017

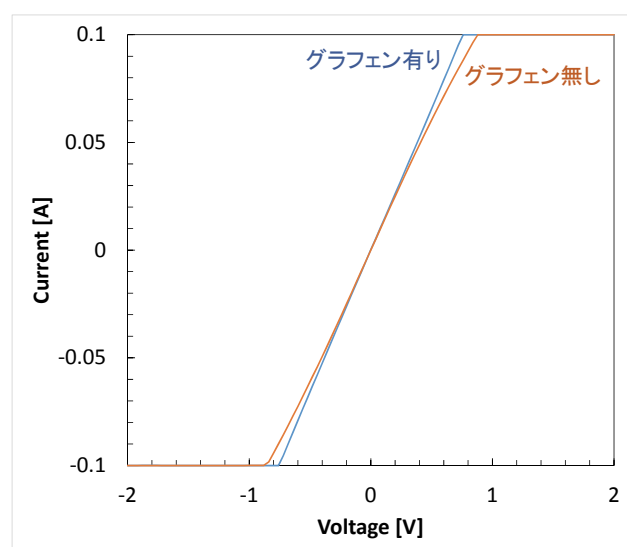


図1. 作製した Si/グラフェン/Si ダブルヘテロ構造、および、Si/Si 参照試料の電流-電圧特性.

〔発表論文〕

1. 内藤壮勘, 田辺克明, “次世代グリーンナノエレクトロニクスに向けた半導体/単原子層材料/半

【17】原子配列制御による TiNi 系形状記憶合金の高強度化と低侵襲デバイス開発

研究者 大阪大学接合科学研究所 助教 梅田 純子

〔研究の概要〕

本研究では、高強度と高回復率を兼ね備えた次世代高機能 TiNi 合金の創製を実現する合金設計手法として、3d 遷移金属元素添加による相変態温度制御と Ti_3Ni_4 微細析出によるすべり臨界応力強化に係る新規な材料設計原理を提案・実証した。粉末冶金法を用いた原子配列・ナノ構造組織制御を基調とし、TiNi 系形状記憶合金において第3金属元素(Fe を選定)の原子固溶と 5~10 ナノメートルの超微細 Ti_3Ni_4 針状化合物の均一分散といった組織制御を行うことで、Ni 原子との置換固溶により結晶格子内に歪み場を形成することでプラトー応力; 906 MPa, 形状回復率; 95.4%の発現に成功した。DSC 解析の結果, Fe 添加 TiNi 粉末合金では, マルテンサイトおよびオーステナイト変態温度が Fe 添加量に対してそれぞれ線形 ($\Delta M=111 \text{ K/at.\%Fe}$, $\Delta A=84.8 \text{ K/at.\%Fe}$) に低下することを確認し, その結果をもとに目標強度を満足するための適正 Fe 添加量を選定した。

〔研究経過および成果〕

(1)原子配列制御に基づく TiNi 系合金設計原理

本研究では、図1に示す合金設計原理に基づき、TiNi 母相を Ni-rich 組成とすることで Ti_3Ni_4 微細析出によるすべり臨界応力の強化を図ると共に、Fe の添加・固溶に伴うマルテンサイト(M)変態温度の低下を利用してプラトー応力の向上を実現した。

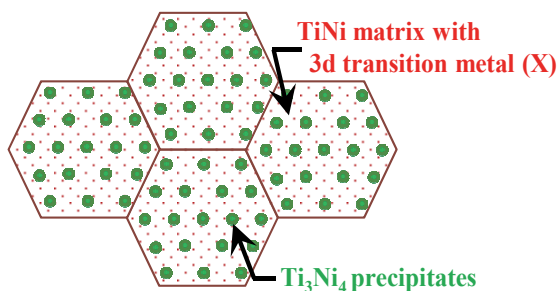


図1. 高強度・高回復率の両立を目指した遷移金属元素固溶 TiNi 焼結合金の組織構造制御

(2)Fe 元素添加 TiNi 粉末合金の組織構造と力学・超弾性特性

本材料プロセスにて作製した TiNi-Fe 粉末合金 (粉末混合比 Ti-50.5 at.%Ni+0, 1.0 at.%Fe, 以下無

添加材, 1.0%Fe 添加材と記す.) の SEM および TEM 組織観察結果を図2に示す。TiNi 母相に約 1 μm の粒子が分散した組織を呈し, 分散する粒子は EPMA による元素分析から $\text{Ti}_4\text{Ni}_2\text{O}$ と同定した。この $\text{Ti}_4\text{Ni}_2\text{O}$ は, 原料粉末に含有する酸素が TiNi 母相と反応することで生成した酸化物であると考えられる。また, TEM 観察では, 両試料共に長さ 50~100 nm, アスペクト比 5~15 の微細な針状析出物が確認でき, 析出物を制限視野回折像よりこの析出物を Ti_3Ni_4 と同定した。

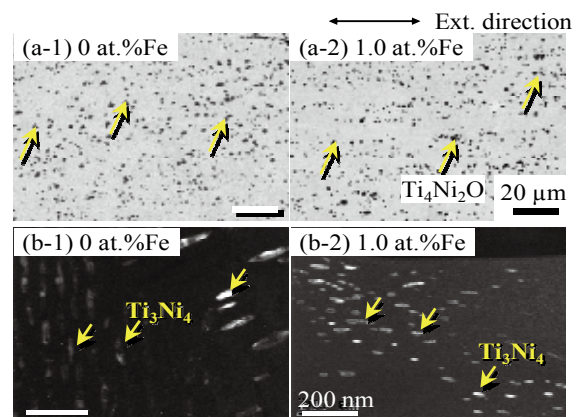


図2. Ti-50.5 at.%Ni+0, 1.0 at.%Fe 系焼結合金の組織構造解析結果 (a); SEM, (b); TEM)

これは先の図1に示したすべり臨界応力強化に資する組織構造であり、すべり変形の抑制が期待できる。また、Ti₃Ni₄の析出形態はFe粉末の添加によってほとんど変化していないことから、両試料のすべり臨界応力は、ほぼ同等であると考えられる。一方、両観察において残留FeやFe系化合物が確認できないことから、添加したFe粉末は固化成形過程にてTiNi母相に完全に固溶したと判断できる。

次に、本試料におけるFe粉末添加量と相変態温度の相関関係を図3に示す。なお、本測定では、Fe元素固溶の影響を詳細に評価するため、0.1, 0.3, 0.5%Fe添加材も作製し、測定を行った。M温度は、Fe添加量の増加と共に線形に低下し、1 at.%Feあたりの低下量は111 Kとなった。また、オーステナイト(A)温度においても、Fe添加に対して線形に低下し、傾きは-84.8 Kとなった。したがって、Fe添加材の相変態温度は、Fe添加量により高い精度で線形的に制御可能であるといえ、Fe添加量の増加に伴うプラトー応力の増加が期待できる。なお、1.0%Fe添加材の変態温度は、DSCの測定限界以下であったため、近似式により算出した。

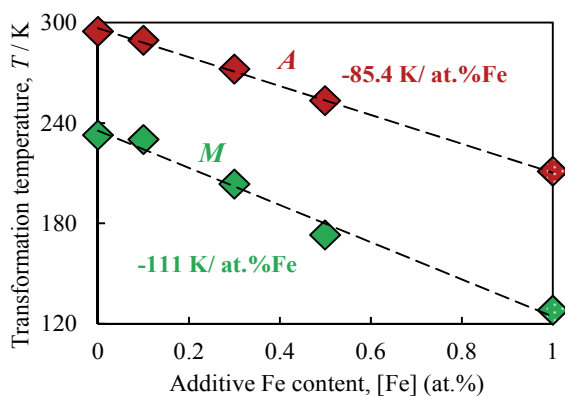


図3. Ti-50.5 at.%Ni+0~1.0 at.%Fe 焼結合金における相変態温度とFe含有量の相関

図4に0~1.0%Fe添加材のヒステリシス試験結果を示す。Fe添加量の増加と共にプラトー応力 σ_p は大

幅に増加し、特に1.0%Fe添加材においては、プラトー応力;906 MPa(無添加材比145%増加)と優れた力学特性を発現した。一般に医療用デバイスに用いられるTiNi系溶製材のプラトー応力は200~400 MPaであることから、従来溶製材を本開発素材に代替した場合、ワイヤー径で25%以上(曲げ応力一定として算出)の縮径化が実現する。また、応力除荷後の残留ひずみより形状回復率を算出すると、無添加材が回復率58.1%であるのに対し、1.0%Fe添加材では95.4%と優れた超弾性特性を発現した。以上の結果より本研究で提案したTiNi-Fe粉末合金は力学・超弾性特性ともに優れる高機能材料であると結論付けられる。

(3) Fe 元素添加 TiNi 粉末合金の高強度発現機構

Fe粉末添加量増加に伴うプラトー応力 σ_p の増加は、緒言にて述べたマルテンサイト変態温度 M の低下に起因すると考えられる。プラトー応力 σ_p は、マルテンサイト変態を誘起する応力であるので、 σ_p と M の関係は、Clausius-Clapeyronの関係より次のように表記できる。

$$\sigma_p = \rho \Delta S (M - T) / \varepsilon_t \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 ΔS は変態エントロピー、 ε_t は変態ひずみ、 T は試験温度である。なお、本研究では、 $\rho = 6.45 \text{ kg/m}^3$ 、 $\Delta S = -0.0385 \text{ J/K}$ とした。式(1)より算出した理論プラトー応力は、無添加材;364 MPa、1.0%Fe添加材;959 MPaとなり、引張試験結果と比較して誤差8%未満の良い一致を示した。したがって、本研究にて開発したTiNi-Fe焼結合金におけるプラトー応力向上の主要因は、Fe元素のNi原子との置換固溶によるマルテンサイト変態温度の低下であると結論付けられる。

【18】大画面ディスプレイ用高解像度ホログラムパターンの 高速生成アルゴリズム開発に関する研究

研究者 香川大学工学部 助教 森 裕

〔研究の概要〕

本研究では、大型液晶ディスプレイ用ホログラムの高速生成アルゴリズムの開発をおこなった。再生する立体像を点光源の集合と考え、物体を構成する点光源数を低減させることによって高速化を実現した。通常、再生点数を減らすと再生像画質は低下してしまうが、再生する点光源の大きさを適切に調節することによって、その劣化の抑制に成功した。また、点光源の大きさを物体情報の局所的な振幅の均一度合いをもとに調節する方法を提案した。提案手法を、異なる再生点数の物体に適用し、その性能検証および再現性をシミュレーションにより評価した。また、8K8K ディスプレイ用の大型ホログラムを作製し、本手法の有効性を調査、実証した。

〔研究経過および成果〕

まず、点光源の大きさを再生物体の情報に応じて適切に選択するアルゴリズムの開発をおこなった。原理確認のため、試験的に 2 次元画像を対象物体とし、 1×1 画素と 2×2 画素の大きさに相当する 2 種類の大きさの点光源を用いた。物体の振幅情報に対する局所平均と元の情報との分散から、局所的な類似度を求め、類似度の高い分布は 2×2 画素相当の大きさの点光源で構成可能と判断するアルゴリズムを構築した。残りの領域は 1×1 画素相当の点光源で構成する。次に、 2×2 画素相当の点光源を再生するためのホログラムの作製方法として、開口縮小とアポダイゼーションフィルタを検討し、それぞれの効果について検証した。それぞれを適用した場合の光源 1 点を再生するホログラムを作製し、ホログラムから再生した点の断面強度プロファイルを図 1 に示す。図 1(b)のアポダイゼーションフィルタの場合が最も急峻に指定した 2×2 画素相当のサイズの点光源を表現できていることがわかる。 2×2 画素の大きさを表現するために開

口サイズは変更せず、アポダイゼーションフィルタを適用するのみとした。

以上を踏まえ、原理確認として、 1×1 画素と 2×2 画素相当の点光源から構成される物体情報をもつホログラムを表 1 に示す条件を用いて作製し、再生像画質を PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)により評価し

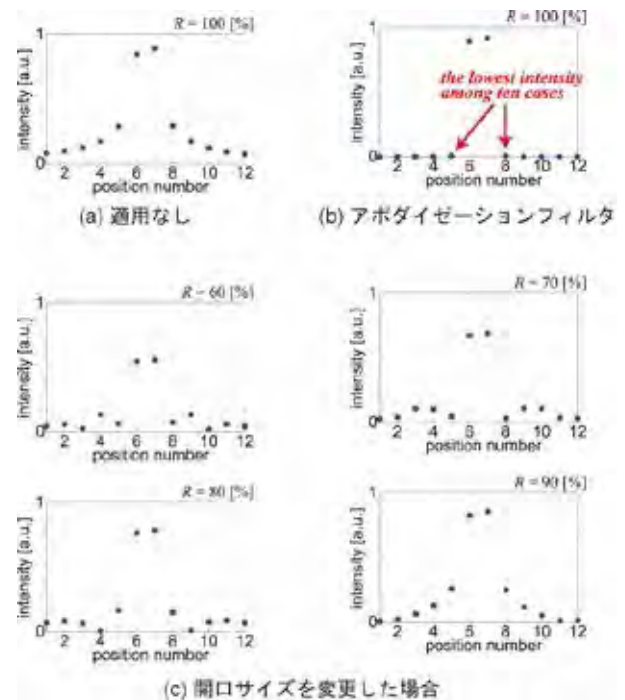


図 1 2×2 画素相当の光点の断面強度プロファイル

表 1 シミュレーション条件

波長	532 nm
画素ピッチ	8 μm
画素数	128 $\times$ 128
球面波の曲率半径	30 mm

た. PSNR は

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{M^2}{\text{MSE}} \quad (1)$$

で与えられ, M は画素値の取りうる最大値 (8 bit の画像では $M = 255$), MSE は元画像と再生画像との平均二乗誤差である. 本手法をいくつかの画像に適用した. 用いた画像と再生像を図 2 に, またそのときの再生点数, 計算時間, PSNR の関係を表 2 に示す. 以上の結果から, 提案手法は PSNR が 30 dB 程度を維持しており, 有効に再生点数を削減できている.



図 2 再生像 (左:元画像, 中央:提案, 右:従来)

表 2 計算時間と再生像画質の関係

		提案手法	従来手法
Lenna	再生点数	7240	16384
	時間 [s]	760	1403
	PSNR [dB]	33.5	41.3
Girl	再生点数	5326	16384
	時間 [s]	572	1349
	PSNR [dB]	33.0	47.3
Parrot	再生点数	5284	16384
	時間 [s]	562	1389
	PSNR [dB]	29.8	41.3

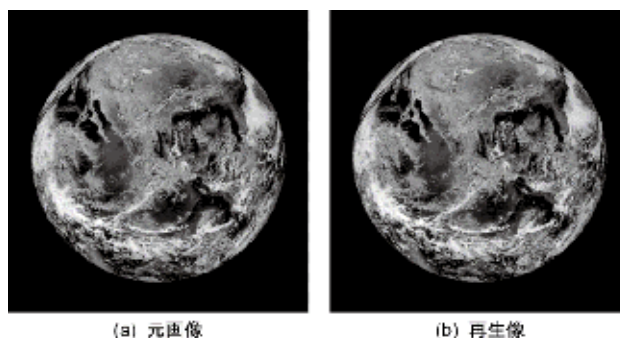


図 3 8K8K ホログラムの再生像

次に同様のアルゴリズムを用い, 8K8K ホログラムを作製した. 元画像と再生像を図 3 に示す. 物体は 8000 $\times$ 8000 画素の 2 次元画像を用い, それ以外の条件は表 1 に示す通りである. 図 3 から, (本稿の表示縮尺では) 目視で全く違いが判断できないほどの画質での映像再生に成功した. このことから, より画素数の多い物体ほど, より大きな点光源での構成が容易であることが分かった. このときの計算時間は 1.3×10^5 秒であり, 再生点数は 17.8×10^6 点であった. 従来法では 64×10^6 (8000 $\times$ 8000) 点を計算するために時間は, おおよそ 5×10^5 秒必要であり, 提案手法により有効に再生点数の削減, および再生点数減少にともなう画質低下の抑制に成功した.

現状では, 2 種類である点光源サイズを, サイズの種類数の増加や, 再生点の形状を円形から楕円形に変化させるなど, 構成する点光源の種類を増やすことによって更なる高速化を図り, また, 実験的にホログラムを再生することにより実際に目で見える映像として評価をおこなっていく.

[発表論文]

1. Y. Mori and T. Nomura, "Fast hologram pattern generation by adaptive point-spread spherical wave synthesis," J. Display Technol., **12**, 815-821, 2016.

【19】受動機構による階段昇段可能な大腿義足用膝継手の開発：平地歩行機能と昇段機能の統合

香川大学工学部 助教 井上 恒

〔研究の概要〕

本研究では、これまで申請者らが開発してきた機械式の義足膝関節(膝継手)における階段昇段機能と、市販されている機械式膝継手で実現されている平地歩行機能について、別々の機構によるこれらの機能を 1 つの機構で実現する機械式膝継手の開発を行うことを目的とした。4 節リンク機構を基本として、歩行状態に応じてリンク長が変化する機構を開発し、前述した 2 つの機能を実現する膝継手を提案した。提案膝継手を試作し、模擬大腿義足を使用した健常者による評価実験を行った結果、手すりを利用することなく平地 - 階段昇段を連続的に行うことに成功した。また、膝継手機能の切替えは歩行状態に応じて自動的に行われた。

〔研究経過および成果〕

大腿部での下肢切断者が歩行能力などを再獲得する場合、一般的に大腿義足が用いられる。大腿義足においては義足膝関節(膝継手)の機能が歩行能力に大きく関係している。膝継手には大きく分けて、電子部品を用いない機械式のものと、電子制御式のものがある。近年、電子制御によって多機能な膝継手が開発・市販されている。その一方、特に経済的発展途上国などに向けた機械式の膝継手の開発においては、従来の機構を樹脂などで作製することでコストダウンが図られてはいるが、多機能化に対する開発は一般的に行われていない。

これまで、申請者らは機械式のメリット(生産コスト、耐久性、使用環境など)を最大限に享受すべく、実現困難とされてきた運動課題を可能にする機械式膝継手の開発に取り組んできた。その結果、従来、電子制御式の膝継手でも非常に困難であった階段昇段を実現する機械式膝継手の開発に成功した。しかし、この膝継手は階段昇段のみ対応して設計されていた。市販されている機械式膝継手で実現されている平地

歩行における安全性は十分得られていなかった。つまり、異なる機能が別々の機構で実現されている状態であった。そこで本研究では、これら 2 つの機能を 1 つの機構で実現する機械式膝継手の開発を行うことを目的とした。

本研究の結果、提案された機構を図 1 に示す。前述した 2 つの機能をもつ別々の 2 つの機構を 1 つに統合するために、市販品で平地歩行用に多く用いられている 4 節リンク機構を基本とし、そのリンクの 1 つの長さが歩行状態によって可変となる機構を設計した(図 1)。平地歩行時ではこの 4 節リンク機構(リンク $L_1 \sim L_4$ 、回転軸 $J_1 \sim J_4$)が維持される。階段昇段時には膝屈曲状態で義足接地することで、回転軸 J_4 はリンク L_3 に設けられた階段昇段用スリット内を移動可能になる。このとき、義足への荷重によってリンク L_3 に長さ変化が生じることになり、それによって膝屈曲状態から膝伸展運動が生じる(図 2)。また、リンク L_3 の長さ変化(歩行機能)の有無の切替えは、義足接地時の膝継手の屈曲角度およびリンク L_3 に作用する重力によって自動的に切替わるよう設計されている。

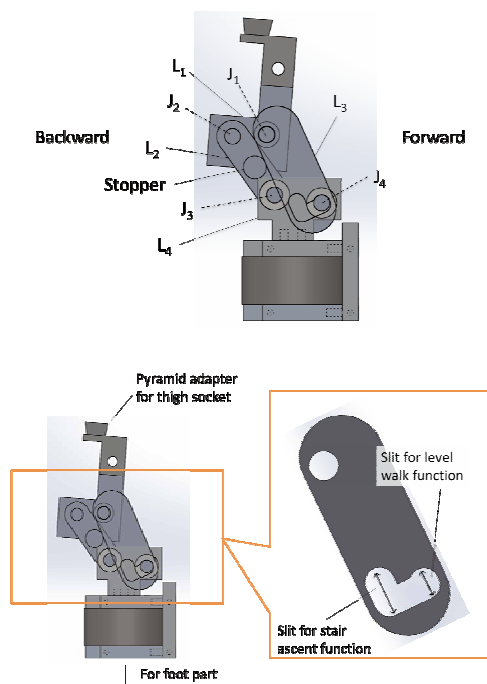
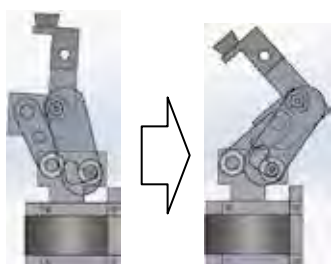
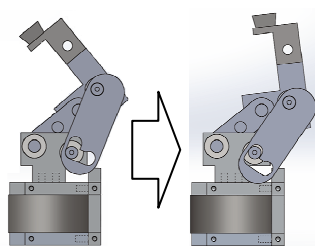


図 1 開発した膝継手の構造（上）と平地歩行／昇段機能切替機構（下）



Full extended knee with level walk function and knee flexion during swing phase



Knee extension with stair ascent function

図 2 提案機構における平地歩行機能および階段昇段機能

提案機構について模擬大腿義足を使用した健常者で評価実験を行った。その結果、開発した膝継手（提案機構の試作機）を使用することで、手すりを利用することなく平地－階段昇段を連続的に行うこと

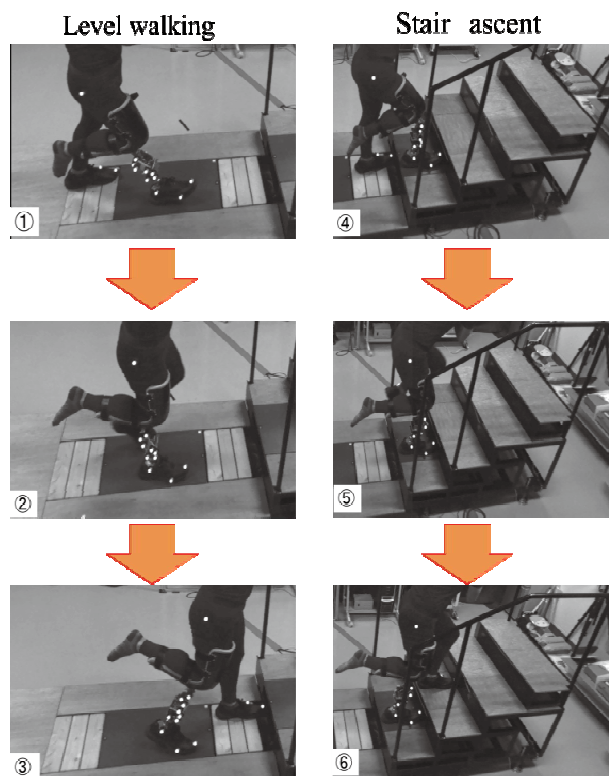


図 3 提案機構を用いることで平地歩行（左列）から階段昇段（右列）への連続的な歩行に成功

に成功した(図 3)。このとき、膝継手機能の切替は歩行状態に応じて自動的に行われた。平地、階段ともに、義足側に自重と同程度の床反力が観察され、試作膝継手が歩行に貢献できることが唆された。

今後の課題として、本研究による立脚期の機械的制御の機構に、市販されている機械式膝継手で実行可能な階段降段および遊脚制御機能を取り入れる。
〔発表論文〕

1. Inoue, K., Tanaka, T., Wada, T., Tachiwana, S., Development of a Passive Knee Mechanism that Realizes Level Walk and Stair Ascent Functions for Transfemoral Prosthesis. Proceedings of 6th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pp.522-527, 2016.

【20】 偏光サニャック干渉計を用いた光渦ビームのモードスペクトル測定とモード分離

研究者 高知工科大学システム工学群 准教授 小林 弘和

〔研究の概要〕

らせん状の等位相面を持つ光渦ビームは、位相のねじれ具合に対応して多数の空間モードを持つ。このモードを利用した応用として、同一波長で多重化通信を可能とする空間モード多重化通信 (SMDM; Spatial Mode Division Multiplexing) が期待されている。本研究では、SMDM に必要となる機能として、光渦のモード分離とモード毎の強度分布測定 (モードスペクトル測定) を高効率に行なうシステムの構築を目的とした。モード分離としては通常のビームと一重らせんの光渦を分離度 10dB 以上で分離することに成功し、モードスペクトル測定では一重らせんの光渦に対して原理検証実験に成功した。

〔研究経過および成果〕

図 1 に示すように、光渦は等位相面 (光波の山の場所) がらせん状で、そのねじれ具合 (一重らせん、二重らせん…) に応じて多数の空間モード (モード番号 $l = 1, 2, \dots$) を持つ。また強度分布はリング型で、断面内に $0 \sim 2\pi l$ まで変化する位相分布を持つ。本研究では図 2 に示すように、同軸に合波された異なる複数のモードの光渦ビームに対して、(a) 各モードへの分離と (b) モード毎の強度分布 (モードスペクトル) の測定を行うシステムの実装を目的とした。

ここでは台形のダブリズム(DP)[図 3(a)参照]を含むサニャック型の偏光干渉計[図 3(b)参照]を共通に用いてモード分離とモードスペクトル測定の二つの機能を実現する。まず偏光サニャック干渉計内では入射点で分離された水平偏光(H)と垂直偏光(V)が対向して同じ光路を伝搬するため、余分な位相が付加されず、干渉強度が安定化される。また、ダブリズムは干渉計内で光渦のモード l 毎に異なる位相差を与えるために利用する。図 3(a)に示すように、ダブリズムに入射した光波は底面で全反射されることで、

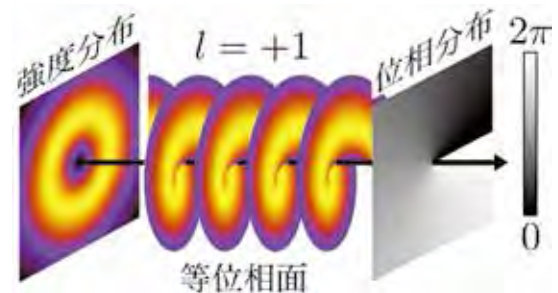


図 1. 光渦の強度分布と位相分布

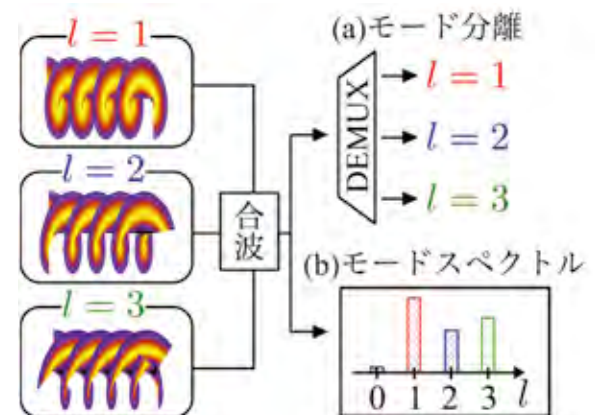


図 2. 異なる光渦の合成波に対する(a)モード分離と(b)モードスペクトル測定

ダブリズムの角度 α に対してビーム断面内の強度・位相分布が 2α だけ回転(+反転)されて出射される。光渦はビーム断面内で $0 \sim 2\pi l$ の位相分布を持つため、回転によって $2\alpha l$ の位相を得ることになる。サニャック干渉計内では水平と垂直偏光が対向してダブリズムに入射するため相対的に $4\alpha l$ の位相差が生じ、この位相差により出射される偏光が変化する。

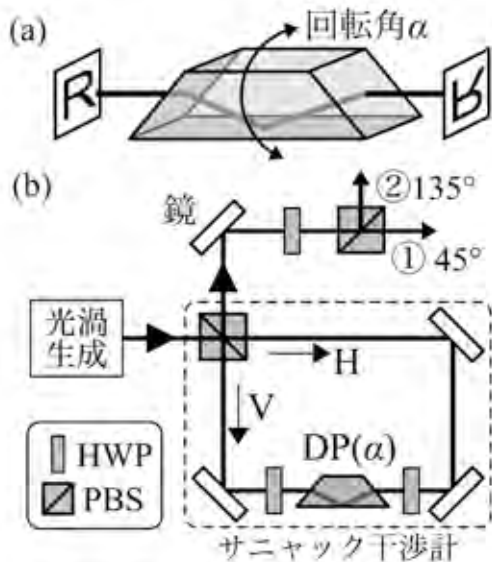


図 3. (a) ダブルプリズム (DP) と (b) 偏光サニャック干渉計 (HWP : 1/2 波長板、PBS : 偏光ビームスプリッタ)

まずモード分離では、入射光として波長 780nm の通常の光ビーム ($l = 0$) と $l = 1$ の光渦を干渉計に入射した。ダブルプリズムの角度を $\alpha = \pi/4$ とすれば、 $l = 0$ に対する水平-垂直偏光間の位相差は 0、 $l = 1$ では π となるため、入射偏光を 45° 偏光とすれば、 $l = 1$ は 135° 偏光となる。したがって偏光ビームスプリッタ (PBS) の手前の 1/2 波長板 (HWP) を 22.5° にすれば二つを分離できる。図 4 は PBS の手前の HWP を回転させながら PBS で反射された光強度を測定した結果である。HWP の角度が 22.5° のとき、 $l = 0$ と $l = 1$ の光強度の比 10.7dB で分離されていることがわかる。

次にモードスペクトル測定では $l = 1$ の光渦を干渉計に入射して、ダブルプリズムの角度を回転させながら 45° と 135° 偏光成分の光強度を測定した。ダブルプリズムによる位相差により、それぞれの光強度は $1 \pm \cos(4\alpha l)$ に比例して変化するため、両者の差を取って位相分布の回転角 $\theta = 4\alpha$ でフーリエ変換 (FFT) を行えば、 l についての分布が求められる。図 5(a) がそれぞれの偏光成分の θ に対する変化、図 5(b) がその

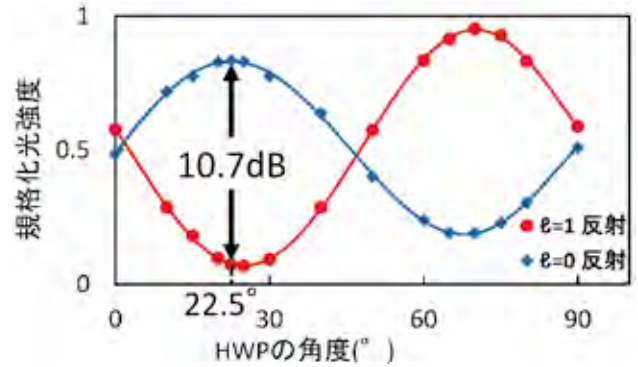


図 1. 通常のビーム ($l = 0$) と光渦 ($l = 1$) のビームの分離 ($\alpha = \pi/4$)

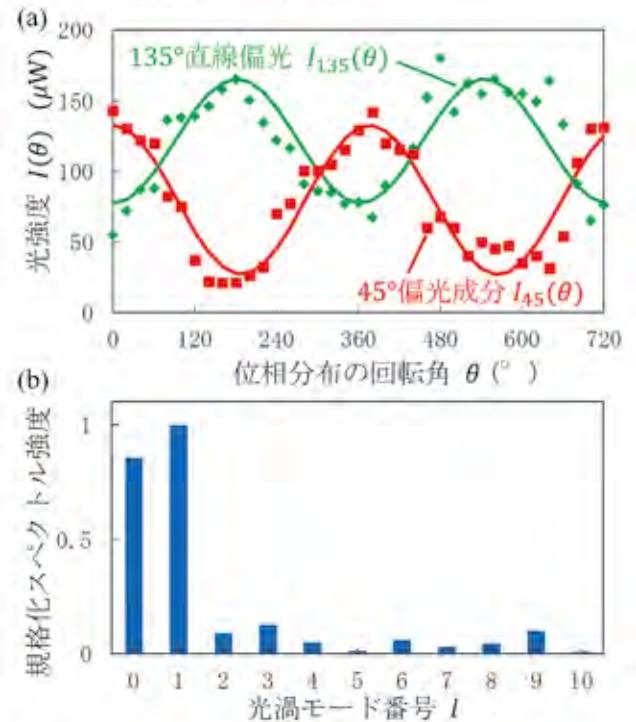


図 5. (a) ダブルプリズムによる位相分布の回転角 θ と光強度の関係 (b) (a) の θ に関する FFT 強度

FFT 強度である。 $l = 1$ でスペクトル強度が最大となっているものの、 $l = 0$ の成分も大きくなっている。これは回転させるダブルプリズムの中心軸とビームの軸が完全には一致しておらず、干渉しない成分が混ざっていることが原因である。

本研究ではモード分離とモードスペクトル測定を同一の偏光サニャック干渉計で実現できることを実証した。より精度の高い結果を得るため、現在はダブルプリズムをシリンドリカルレンズペアに変更して実験を行っている。また通信波長帯の光源を用いて実際に多重化通信を試みる予定である。

【21】 界面スピン軌道相互作用によるスピン蓄積－電流変換とその制御手法に関する研究

研究者 慶應義塾大学 理工学部 特任助教 中山裕康

〔研究の概要〕

本研究課題では、界面スピン軌道相互作用に起因するスピン蓄積－電流変換現象とスピン軌道トルク生成に関する研究を行った。巨大ラシュバスピン分裂を示すことが知られているビスマス/銀を接合した垂直容易磁化薄膜に対して、高調波ホール電圧測定法によるスピン軌道トルク定量手法を用いることで、ビスマス/銀界面に起因するスピン軌道トルクの電氣的生成・検出に成功した。スピン拡散モデルを用いることで、そのスピン蓄積－電流変換効率の定量を行った。さらに本研究課題では、ラシュバ・エデルシュタイン効果を介した新しい磁気抵抗効果「ラシュバ・エデルシュタイン磁気抵抗効果」の観測に初めて成功した。この磁気抵抗効果を利用することで、磁気輸送測定法という比較的簡便な手法による界面スピン蓄積－電流相互変換に関する研究が可能となった。これは界面スピン機能デバイスに関する研究を大きく加速させる研究成果である。

〔研究経過および成果〕

近年、スピントロニクスから派生した「スピンオービトロニクス」と呼ばれる研究領域が出現し、スピン軌道相互作用に起因するスピン軌道トルクを利用した次世代の磁化制御技術として期待されている。この研究領域では、金属超薄膜およびその界面が舞台の一つとなっており、界面スピン軌道相互作用が本質的な役割を果たす。本研究課題では界面スピン軌道相互作用を介したスピン蓄積－電流変換とスピン軌道トルクの検出を目指した。本研究課題の遂行による研究成果は下記の3点に集約される。

1. 垂直容易磁化膜を用いた高調波ホール電圧測定法によるスピン軌道トルクの定量

本研究課題ではまず、高調波ホール電圧測定によるスピン軌道トルクの検出に取り組んだ。試料としては、スパッタリング法により作成した白金/コバルト/白金垂直容易磁化膜を用いた。測定は、ホールバー形状の試料に対して交流電流を印加し、薄膜面内に外

部磁場を掃引しながらロックインアンプを用いたホール電圧の基本波と高調波の同時測定を行った。

コバルト薄膜の上下の白金層の膜厚が同じ場合、上下の白金薄膜におけるスピンホール効果の寄与が互いに打ち消され、コバルト層に与えるスピンホール効果によるスピン軌道トルクが観測されなかった。一方、上下の白金層を異なる膜厚とした場合、有限のスピン軌道トルクが観測された。さらに、白金/コバルト/白金積層構造において誘起されるアンチダンピング型スピン軌道トルクはスピンホール効果による寄与が支配的であり、スピンホール効果及びスピン拡散方程式の枠組みによって記述されることを明らかにした。本研究成果は発表論文2に掲載されている。

2. ビスマス/銀界面に起因するスピン軌道トルク

ラシュバ・エデルシュタイン効果は界面スピン軌道相互作用下に電流を印加すると、界面にスピン蓄積が誘起される現象である。本研究課題では、前節で構築した高調波ホール電圧測定法を用いることで、

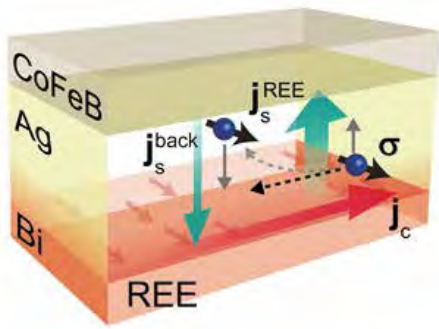


図1. ビスマス/銀/コバルト鉄ボロン積層構造におけるラシュバ・エデルシュタイン効果(REE)とバックフロースピンの模式図.

ビスマス/銀界面におけるラシュバ・エデルシュタイン効果由来のスピノ軌道トルクの定量を目指した研究を行った. Bi/Ag/Pt/Co/Pt および Ag/Pt/Co/Pt 積層構造を作成し, 高調波ホール電圧の精密測定を行った. その結果, Bi/Ag/Pt/Co/Pt 積層構造において, 有限のアンチダンピング型スピノ軌道トルクが確認された. さらにスピノ拡散方程式を用いた解析を行い, ビスマス/銀界面におけるスピノ蓄積-電流変換効率を決定した. 本研究成果は発表論文 1 (及びその supplemental material) において報告されている.

3. ラシュバ・エデルシュタイン磁気抵抗効果の観測

ラシュバ・エデルシュタイン効果の逆過程である逆ラシュバ・エデルシュタイン効果は, 界面スピノ軌道相互作用下にスピノ蓄積を作ると, 界面に電流が誘起

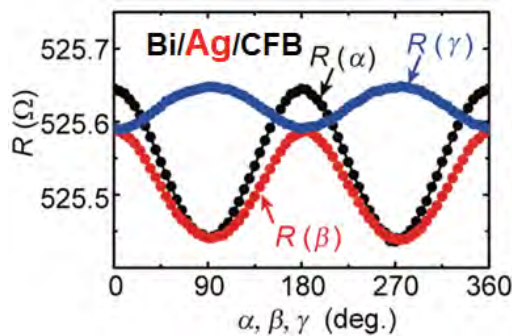


図2. Bi/Ag/CoFeB 積層構造における電気抵抗値の外部磁場角度依存性.

される現象である. 正・逆ラシュバ・エデルシュタイン効果は強磁性/常磁性複合膜において同時に同じ場所で発現させることが可能であり, スピノ流-磁化相互作用と結合させることで, 磁気抵抗効果を発現させることが可能となる. 本研究課題では, この界面スピノ軌道相互作用に起因する新しい磁気抵抗効果「ラシュバ・エデルシュタイン磁気抵抗効果」の観測に初めて成功した[発表論文 1]. この磁気抵抗効果を利用することで, 比較的簡便な電氣的測定による界面スピノ蓄積-電流相互変換に関する研究が可能となった. このような新しい原理に基づいた磁気抵抗効果の発見に繋がったという意味でも本研究課題を遂行できた意義は非常に大きい.

最後に, 本研究助成を賜りましたカンオ科学振興財団に厚く御礼申し上げます.

[発表論文]

1. H. Nakayama, Y. Kanno, H. An, T. Tashiro, S. Haku, A. Nomura, and K. Ando, “Rashba-Edelstein Magnetoresistance in Metallic Heterostructure” *Physical Review Letters* **117**, 116602 (2016).
2. H. An*, H. Nakayama*, Y. Kanno, A. Nomura, S. Haku, K. Ando, “Spin-orbit torques in asymmetric Pt/Co/Pt structures” *Physical Review B* **94**, 214417 (2016). *equal contribution
3. Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S. T. B. Goennenwein, E. Saitoh, G. E. W. Bauer, “Theory of spin Hall magnetoresistance (SMR) and related phenomena” *Journal of Physics: Condensed Matter* **28**, 103004 (2016).

【22】 マイクログラビア印刷技術を用いた高分子超薄膜の大量創製とその高機能化

研究者 東海大学工学部 講師 砂見 雄太

〔研究の概要〕

本研究では、マイクログラビア印刷技術を用いた高分子超薄膜(100 nm 以下の厚み)の大量創製技術の確立と表面パターンニングにより高機能性を有する機能性超薄膜を創製することを目的としている。高分子超薄膜の大量生産技術については、基板フィルムの搬送速度、マイクログラビアロールの回転速度、ドクターブレードの設置角度などの各パラメータが高分子超薄膜の膜厚さに及ぼす影響について実験的に検討した。また、エンボス加工を施した基板フィルムを用いて凹凸を付与した高分子超薄膜を作製した。

〔研究経過および成果〕

本研究では、ロール・ツー・ロール(R2R)生産方式にマイクログラビア方式を組み合わせた手法によって作製する高分子超薄膜の膜厚さおよび大量生産を目的とし、フィルムの搬送速度およびマイクログラビアロール(以下、MG と称す)の回転速度、溶液の濃度が高分子超薄膜の膜厚さに及ぼす影響を実験的に検討するとともに高分子超薄膜の物性(表面粗さ、ヤング率)を測定した。また、高分子超薄膜のさらなる高機能化を図るため、エンボス加工を用いてハニカム構造を有する高分子超薄膜の作製を行った。

図1に本実験に用いた薄膜塗工機の概略図を示す。同機はR2R生産方式を再現した構造になっており、塗工工程には薄膜塗工に優れたマイクログラビア方式を組み込んでいる。本実験では、ローラを介して厚み 100 μm の基板フィルム(PET)を設置し、張力を付与した状態にする。その後、溶液を注ぎ、MG(直径 20 mm)を回転させ溶液をすくい上げた。その際、ドクターブレードをMGに接触させ、溶液量が均一になるように制御を施し、塗工アームを下降させることによりフィルムとMGを近づけ二面間に液だまりを形成して

コーティングを行った。その後、70 [°C]で乾燥させる。本実験では、犠牲膜法を用いたため犠牲膜(PVA)のコーティングを終えた後、犠牲膜の上に高分子超薄膜の材料となるPLLAのコーティングを行った。その後、フィルムを水に浸すことにより、犠牲膜が水に溶解除去され、高分子超薄膜のみを剥離させることができる。剥離させた高分子超薄膜の膜厚さを触針式表面形状測定器により測定した。表面粗さはAFMで、ヤング率は超薄膜を簡易的に測定することが可能なSIEBIMM試験を用いた。これにより、各膜厚さの高分子超薄膜の搬送方向および幅方向のヤング率を測定することを実現させた。

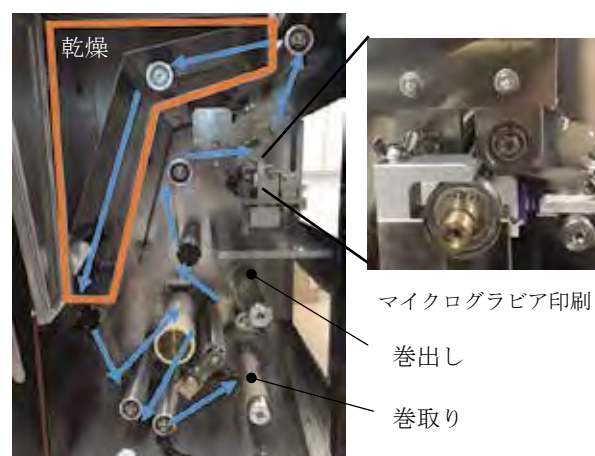


図1 マイクログラビア印刷装置

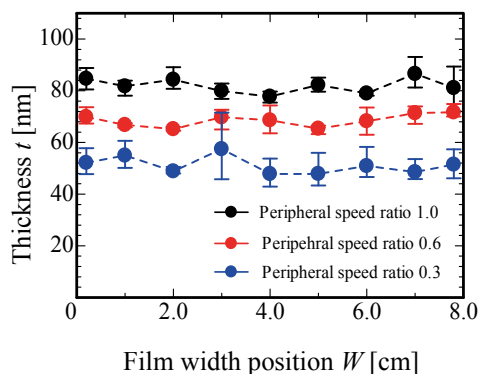


図2 搬送速度とグラビアロールの回転数の比率を変化させた場合の軸方向における膜厚さ

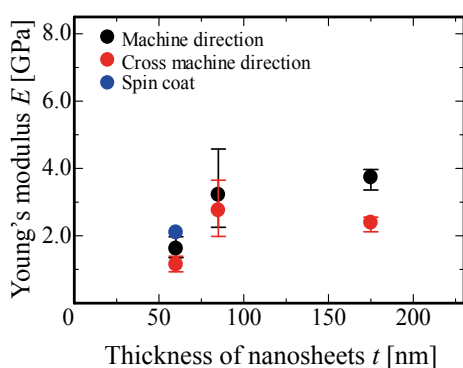
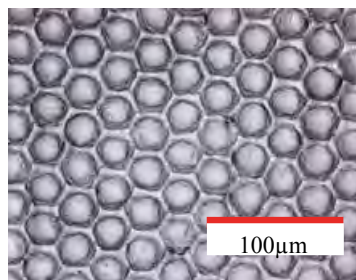


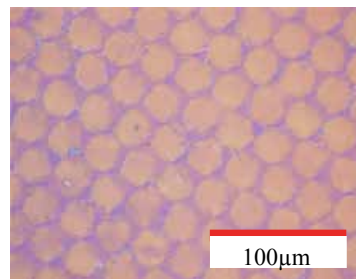
図3 作製した高分子超薄膜のヤング率の測定結果

図2および図3に実験結果の一例を示す。図2は搬送速度とグラビアロールの回転数の比率を変化させた場合の軸方向における膜厚さを示している。同図より、周速比率が小さくなるほどムラが大きく、膜厚が薄いことがわかる。これは、フィルムとMG間に発生する液溜まりへ溶液の供給が追いつかなくなり、液溜まりの溶液量が少なく不安定な状態になるため、搬送方向にムラが発生したと考えられる。また、周速比率が大きい場合、液溜まりへの溶液の供給が多くなるため膜厚が厚くなったと考えられる。したがって、周速比率を大きくすることによって、ムラの発生を抑えることが可能である。

図3に、作製した高分子超薄膜のヤング率を示す。同図より、搬送方向および幅方向で値が異なることが



(a) エンボスローラの表面 (50 倍)



(b) 高分子超薄膜の表面 (50 倍)

図4 レーザー顕微鏡を用いて観察したエンボス加工ローラの表面と表面修飾された高分子超薄膜の画像

わかる。この要因として高分子超薄膜の搬送方向に発生したムラの影響、搬送方向に分子が一軸配向したことが考えられる。

図4は、レーザー顕微鏡を用いて観察したエンボス加工ローラの表面と表面修飾された高分子超薄膜の画像を示している。同図(b)より、エンボスローラの表面構造が高分子超薄膜上にほぼ同様な形状で転写されていることがわかる。

〔発表論文〕

1. 甲斐仁智、砂見雄太、槌谷和義、“マイクログラビア印刷を用いた高分子亮薄膜の大量創製”, 2016 年度日本機械学会年次大会論文集, pp. 1-5., (2016)
2. Yoshitomo Kai, Yosuke Okamura, Hiromu Hashimoto, Yuta Sunami, “Fabrication of Poly (L-lactic acid) Nanosheets Using Micro Gravure Printing”, *Proceedings of the International Conference on Flexible Printed Electronics 2016*, pp. 1., (2016)
3. 砂見雄太、甲斐仁智、岡村陽介、槌谷和義、落合成行、橋本巨、“印刷技術を用いた高分子亮薄膜の創製とその評価”、サステイナブルトライボロジー会議 2016 奄美大島, pp. 1., (2016)

【23】 π 電子系を利用した水素・炭素・窒素・酸素原子のみから成る二次電池電極材料の開発

研究者 愛知工業大学工学部 准教授 糸井 弘行

共同研究者 愛知工業大学工学部 教授 大澤 善美

〔研究の概要〕

電気二重層キャパシタ(Electric double-layer capacitor)は、イオンの物理的な吸脱着を利用して充放電を行う電気エネルギー貯蔵デバイスである。したがって EDLC は充放電に化学反応が伴わないため、急速充放電と優れた寿命特性を有する。しかし EDLC のエネルギー密度はリニウムイオン電池をはじめとする二次電池と比較すると、エネルギー密度が10分の1以下程度と低いことが最大の欠点である。そこで電気二重層キャパシタの電極材料として用いられる活性炭に、酸化還元反応を示す金属酸化物や導電性ポリマーなどのレドックス化合物と複合化した電気化学キャパシタ電極の開発が盛んに行われている。本研究では、レドックス化合物として π 電子に富んだ水素・炭素・窒素・酸素のみからなる有機化合物と極めてシンプルな実験操作により、優れた電気化学キャパシタ電極特性が得られた研究成果について報告する。

〔研究経過および成果〕

本研究では活性炭(AC)にKOH賦活炭(MSP20N、表面積:2070 m^2/g)を用いた。このACは2ナノメートル以下の細孔であるマイクロ孔のみを有するマイクロポラスカーボンである。試料の調製はまず、ACを150 $^{\circ}\text{C}$ 、6 hの条件で真空加熱乾燥し、乾燥後のACの重量を測定した。次に、吸着後の試料におけるヒドロキノン(HQ)の重量が10、20、30%になるように正確に量り取り、ACとともに密閉して24 hかけて150 $^{\circ}\text{C}$ でHQを吸着させた。得られた試料をMSP20N/HQ(X%)(Xは試料中のHQの重量パーセント)と表記する。さらに、これらの試料にアニリン(ANI)を24 hかけて25 $^{\circ}\text{C}$ で飽和するまで吸着した試料を調製した。ANIを吸着させた試料をAC/HQ(X%)/ANIと表記する。比較としてACにANIのみ飽和吸着させた試料も調製した(AC/ANI)。ANIは電解重合によって酸化還元反応を示すポリアニリン(PANI)になるため、HQとPANIの相乗効果による容量の増大が期待できる。

電解重合と電気化学測定は三極式セルを使用し、電解液に1 M H_2SO_4 を用いた。作用極は試料中のACと導電補助剤であるアセチレンブラック(デンカブラック、電気化学工業(株))、バインダーであるポリテトラフルオロエチレン(デュポン(株))の重量比が18:1:1となるように混合してシート状に成形し、SUSメッシュに圧着して作製した。対極はACを使用して作用極と同様の操作で作製した。ACに吸着させたANIの電解重合は、10 mV/s の掃引速度で $-0.1 \sim 0.8$ V(vs Ag/AgCl)の電位範囲における15サイクルのサイクリックボルタンメトリーにより行った。電気化学特性評価は電解重合後のセルをそのまま使用し、 $-0.1 \sim 0.8$ Vの電位範囲で20 A/gから0.2 A/gの電流密度で定電流充放電測定(CD)を行った。

図1にACとHQ、合成した試料のX線回折(XRD)測定結果を示す。HQは結晶構造に由来するシャープなピークが確認できるが、AC/HQはシャープなピークを一切示さないことが分かる。この結果は、HQが

AC の粒子表面に堆積することなく、AC のマイクロ孔内部に吸着して高分散していることを示している。HQ をはじめとするレドックス化合物は一般的に導電性が極めて低いために急速充放電特性が得られにくいとされている。しかし HQ が表面積 $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ 以上もの AC の細孔内部に高分散されることで、導電性の高い AC の炭素表面との接触面積が極めて大きくなり、優れた急速充放電特性が期待できる。

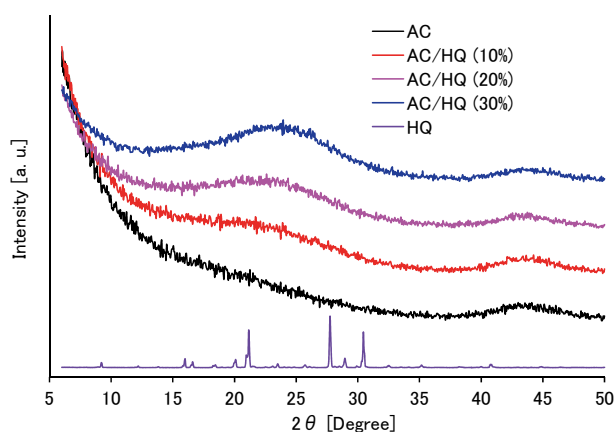


図 1 各試料の XRD パターン

図 2 に定電流充放電測定から得られたレート特性を示す。このグラフは、横軸が充放電速度、縦軸が容量に対応する。尚、電気エネルギー貯蔵デバイスの電極材料の容量を議論する際、実用的観点から、体積あたりの容量の方が重量あたりの容量よりも重要な意味を成す。体積あたりの容量を比較する場合、電極密度を測定する必要があるが、同じ試料であっても電極密度はわずかな圧力の違いによって大きく変化してしまう。しかし本研究で合成した試料は AC のマイクロ孔内部に HQ と ANI が吸着するため、これらの吸着前後で電極体積は変化しない。したがって AC 1グラムあたりの容量 ($\text{F g}_{\text{AC}}^{-1}$) を比較することによって、前述の問題を排除して体積あたりの容量変化の傾向を知ることができる。まず AC のみのレート特性に着目すると、充放電速度の増加と共に容量が低下すること

が分かる。これは AC がイオンの物理的な吸脱着により電気エネルギーを貯蔵・放出するため、充放電速度の増大と共にマイクロ孔内部でのイオンの拡散が追いつかないためである。一方、HQ を吸着した試料は HQ が 10～20%までは HQ の吸着量に比例して体積あたりの容量が大きく増加するが、30%では容量の増加効果が小さい上にレート特性が低下することが分かる。一方、ANI を吸着させた試料においては AC/HQ (20%)/ANI が最大で約 3.5 もの高い体積あたりの容量の増加と優れたレート特性を示し、ANI のみを吸着させた試料よりも高い性能を示した。この結果は、HQ と PANI との組み合わせによる相乗効果により、急速充放電特性を維持しながら効果的に体積あたりの容量を増大できることを初めて示す成果である。

以上の結果から、本研究では水素・炭素・窒素・酸素のみから成る π 電子系に富んだ異なる 2 つのレドックス化合物を用いることで、相乗効果によって急速充放電特性を維持したまま体積あたりの容量の大幅な増加を実現することを示すことができた。

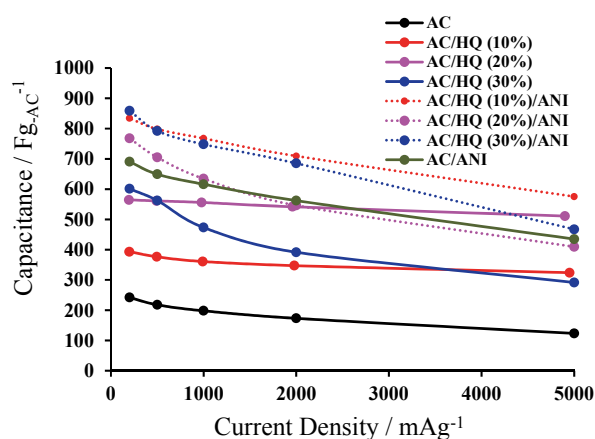


図 2 各試料のレート特性

〔発表論文〕

1. H. Itoi, et al., *Langmuir*, **2016**, 32, 11997-12004.
2. H. Itoi, et al., *ACS Sus. Chem. Eng.*, **2017**, 5, 556-562.

【24】横波型薄膜共振子を利用した流路一体型質量センサの開発と抗原抗体反応の高感度検出

研究者 名古屋工業大学 大学院工学研究科 助教 高柳 真司

〔研究の概要〕

本研究は、在宅での予防医療システムを目指し、リスクマーカーの抗原抗体反応を検出できる横波型薄膜共振子センサ開発を目的とする。本報告では、まず c 軸が基板面に対して平行に配向した ZnO 薄膜を基盤材料とする横波型共振子構造を作製した。そして、微小流路を共振子上に取り付けセンサデバイスを構築した。試作したセンサの共振特性から、共振子に液体を負荷した場合でも共振を維持できることが確認された。さらに、共振子に Biotin を固定し Streptavidin 溶液を流したところ、Streptavidin-Biotin 結合による共振周波数の変化を観測できた。今後は本研究の共振子センサを用いた抗原抗体反応の濃度評価が期待される。

〔研究経過および成果〕

生活習慣病(脳卒中、心臓病、がん)は日本人の死亡原因の上位を占め、その膨大な医療費も社会問題化している。そこで、生活習慣病に関連した生体由来の物質(バイオマーカー)を日常的な指標として観測し、疾患を未然に防ぐことが重要となっている。そのため、尿や血液中に存在するバイオマーカーの量を高感度・高精度で検出できるセンサの開発が求められている。本研究は、横波型薄膜共振子をバイオセンサとして提案し、在宅でも使用可能な簡便性、汎用性に優れたバイオマーカー検出システムの実現を目指している。

本研究では、共振子の圧電薄膜として、 c 軸が基板面に対して平行に配向した ZnO 薄膜を用いる。この c 軸平行配向 ZnO 膜は純粋な厚みすべりモードを励振し、液体を負荷しても振動を維持できるため、バイオセンシングに適している。また、 ZnO 薄膜を Si 基板上に成膜することで、共振子の量産化、センサ駆動 IC や流路とのワンチップ化が期待できる。

図 1(a)に試作した横波型薄膜共振子の模式図、図 1(b)にその表面画像を示す。本共振子は上部電極：

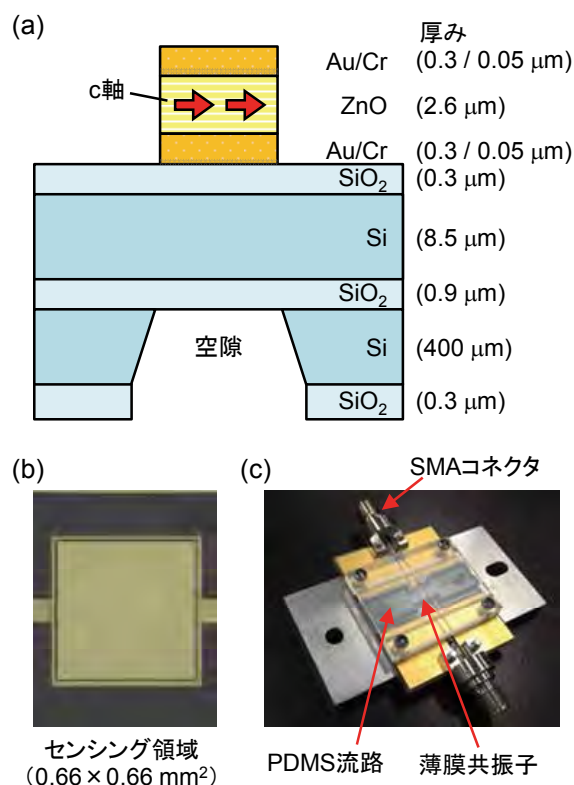


図 1 (a)横波型薄膜共振子の模式図と(b)表面画像および(c)流路実装後の様子

Au/Cr、圧電薄膜： c 軸平行配向 ZnO 、下部電極：
Cr/Au/Cr、補強層： $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$ の多層構造から成る。
さらに、図 1(c)に示すように共振子を実装基板上で配

線し、上部電極に PDMS (ポリジメチルシクロキサン) 微小流路を取り付けた。そして、流路にシリンジポンプ、インジェクタバルブを接続し、送液機構を組み立てた。また、SMA コネクタから高周波ケーブルでネットワークアナライザ (E5071B、Agilent Technologies) を接続し、薄膜共振子の共振特性を計測するシステムを構築した。

本報告では、薄膜共振子を用いた抗原抗体反応検出の模擬として、Streptavidin-Biotin 結合を用いた。まず、共振子の Au 電極上に自己組織化膜 (self-assemble monolayers: SAM) を形成し、SAM との結合により Biotin を固定化した。Biotin 固定後、送液機構により純水を共振子上に負荷し、共振特性を測定した。図 2(a)より、純粋負荷時にも共振のピークが観測され、131.8 MHz 付近に共振周波数 f_0 を持つことが確認できた。通常、 f_0 は共振子に質量が負荷すると低下する。そのため、Biotin に Streptavidin が結合した際の質量負荷を、 f_0 の低下により検出することができる。以降は、この純水負荷時の f_0 を基準として時間変化を計測し、Streptavidin-Biotin 結合の検出を試みた。図 2(b)に f_0 の時間変化の測定結果を示す。ここで、測定開始 5 分後に、5 mg/mL の Streptavidin 溶液 40 μ L を共振子上に流した。すると、純水からの溶液変化により f_0 は一度大きく変動するが、その後、Streptavidin が Biotin と結合するにつれて質量負荷分の f_0 の低下が見られた。最終的に、純水負荷時と比較して約 1.4 kHz 低下して安定した。これは共振子上の全ての Biotin が結合したために、それ以上の質量負荷が起きていないことを示している。以上より、試作した横波型薄膜共振子を用いた抗原抗体反応の検出が示唆された。

今後は Streptavidin 溶液を低濃度にし、濃度によ

る結合量の変化を共振周波数 f_0 の低下量で捉えることができるか検討していく。また、より高感度な計測システムの構築も進める予定である。

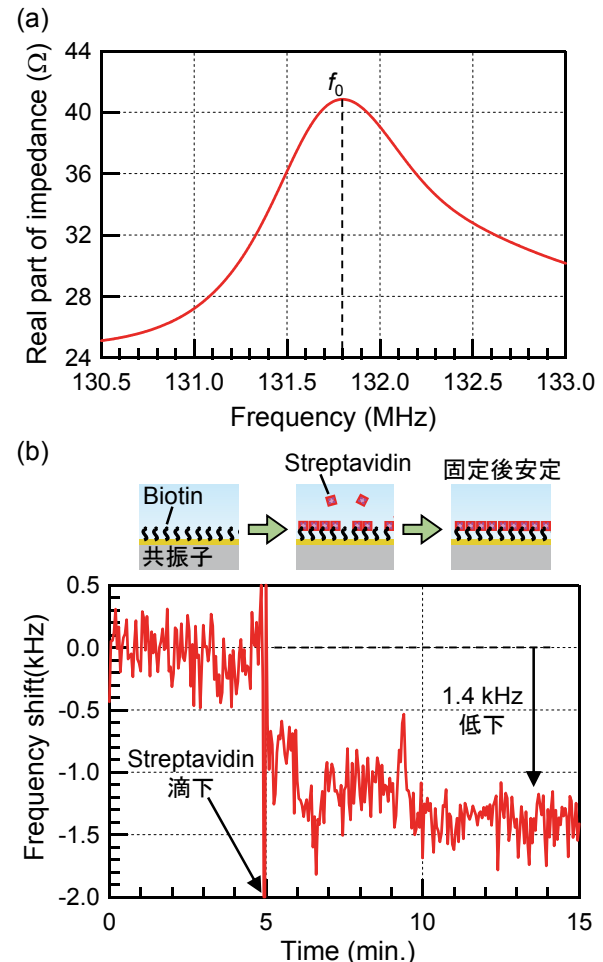


図 2 (a)Biotin 固定後、純水負荷時の共振特性と (b)Streptavidin 滴下による共振周波数 f_0 の時間変化

〔発表論文〕

1. R. Iwanaga, S. Takayanagi, Y. Watanabe, M. Matsukawa, T. Tsuchiya, T. Yanagitani, "Evaluation of viscous liquid using resonance and anti-resonance of thickness-shear mode resonator consisting of c-axis parallel oriented ZnO film," *Abstr. Book 2016 IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, p. 396 (2016).

【25】 無線部と CPU 部のワンチップ化を容易にする 2.4 GHz、6 mW 動作 CMOS RF 受信機

研究者 大阪工業大学 工学部 特任講師 木原 崇雄

〔研究の概要〕

本研究では、最小限のアナログ回路、低雑音増幅器(LNA: Low-Noise Amplifier)と A/D 変換器のみで RF 受信機を構成し、さらにこれらをクロック信号等の影響を受けにくい回路構成とすることで、無線部と CPU 部のワンチップの容易化を目指す。本論文では、これらの要求を満たす LNA として、オンチップトランスを用いた差動ソース接地 LNA と、差動ゲート接地 LNA を取り上げ、これらの設計手法を示す。設計手法により、オンチップトランスに必要な特性(インダクタンス、Q 値)がわかり、仕様を満たす LNA を効率よく設計することができる。

〔研究経過および成果〕

2020 年までに、500 億個の電子機器が無線でインターネットに接続すると予想されており(IoT: Internet of Things)、Bluetooth Low Energy (BLE) 等の無線通信機能を有する MCU(Micro Controller Unit)の需要はこれまで以上に高まっている。1 つのチップ上に無線部(RF: Radio Frequency)と CPU 部を集積する SoC (System-on-Chip) の構成を採ることで、パッケージサイズが小さく、かつ低消費電力動作の MCU を実現できる。しかし、CPU 部のクロック信号が無線部に漏れ込み、その特性を劣化させる。現在の受信機は多数のアナログ回路で構成されており、この劣化解析と改善に多大な時間と人員が費やされている。

本研究では、最小限のアナログ回路、LNA と A/D 変換器のみで RF 受信機を構成し、さらにこれらをクロック信号等の影響を受けにくい回路構成とすることで、無線部と CPU 部のワンチップの容易化を目指す。本論文では、これらの要求を満たす LNA として、差動ソース接地 LNA (CS LNA: Common-Source LNA) と、差動ゲート接地 LNA (CG LNA: Common-Gate LNA) を取り上げ、これらの設計手法を示す。

差動 CS LNA の回路図を図 1 に示す。オンチップトランス(L_1 、 L_2)を用いて、入力単相信号を差動信号に変換している。共振周波数 ω_0 における、電流利得 α_{CS} と雑音指数 F_{CS} は、次式で表される [1]。

$$\alpha_{CS} = \frac{\omega'_T n k L_1}{R_2 + 2\omega'_T L_s} \quad (1)$$

$$F_{CS} = 1 + \frac{R_1}{R_s} + \left| \frac{R_1 + R_s}{j\omega_0 n k L_1} \right|^2 \frac{R_2}{R_s} + \left| \frac{R_1 + R_s}{j\omega_0 n k L_1} \right|^2 \times \frac{2R_{Ls}}{R_s} + \frac{\gamma}{2\alpha_{CS}^2} g_m R_s + \frac{2R_s}{\alpha_{CS}^2 R_{eq,L}} \quad (2)$$

ここで、 R_s は信号源抵抗、 $\omega'_T = g_m/(C_{gs} + C_2)$ 、 n は巻き数比、 k は結合係数、 R_i は L_i ($i = 0, 1$) の寄生抵抗、 R_{eq} は負荷の LC 共振器の等価抵抗を表す。

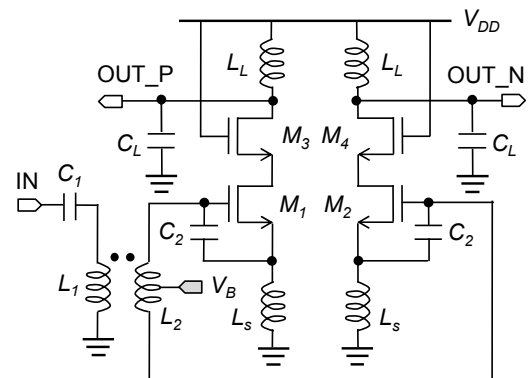


図 1 オンチップトランスを用いた差動 CS LNA

差動 CG LNA の回路図を図 2 に示す。電流利得 α_{CG} と雑音指数 F_{CG} は、次式で求められる [1]。

$$\alpha_{CG} \sim \frac{kg_m}{n(g_m + 1/R_{eq,L2})} \quad (3)$$

$$F_{CS} = 1 + \frac{R_1}{R_s} + \left| \frac{j\omega_0 L_1 + R_1 + R_s}{j\omega_0 n k L_1} \right|^2 \frac{R_2}{R_s} + \frac{\gamma g_m R_s}{2\alpha_{CG}^2} + \frac{2R_s}{\alpha_{CG}^2 R_{eq,L2}} \quad (4)$$

ここで、 $R_{eq,L2}$ は入力 LC 共振器の等価抵抗を表す。

図 3 (左) に、 L_1 に対する α_{CS} 、 α_{CG} の計算結果を示す。 Q_1 が 6 で、 L_1 を 3.5 nH 以上にすると、CG LNA の利得は CS LNA よりも大きくなる。

次に、 L_1 に対する NF_{CS} と NF_{CG} の計算結果を図 3 (右) に示す。 NF を 5 dB 以下にするためには、6 以上の Q 値を持つ L_1 が必要である。また、 L_1 が 4.0 nH 以上の場合、CG LNA の NF は CS LNA よりも小さくなる。

65 nm 薄型 BOX-SOI (SOTB: Silicon-on-Thin-Buried Oxide) CMOS を用いて、これらの LNA を設計し、利得と NF をシミュレーションした。トランスの特性は、電磁界シミュレーター (Keysight 社 Momentum) で求めた。表 1 に、LNA のシミュレーション結果と計算結果を示す。表より、CG LNA が CS LNA よりも優れていることがわかる。さらに、CG LNA の利得と NF

の計算結果とシミュレーション結果は一致しているが、CS LNA の NF では、両結果の差が大きい。これは、解析式を導出する際に用いた等価回路に、トランスの寄生容量を含めていないからである。

本設計手法を用いることで、設計仕様を満たす差動 CS LNA、CG LNA を効率よく設計することができる。

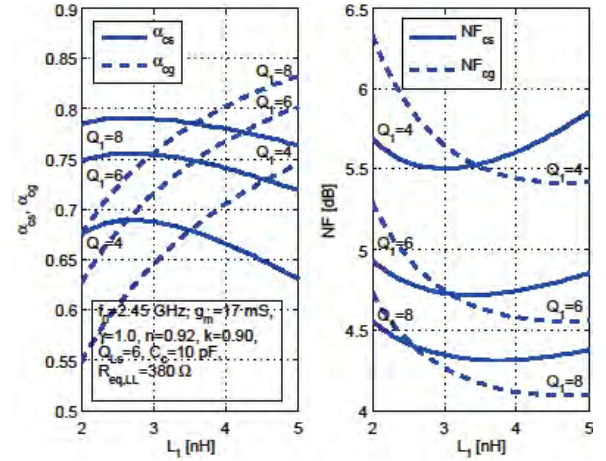


図 3 α_{CS} と α_{CG} (左)、 NF_{CS} と NF_{CG} (右) の計算結果

表 1 LNA の特性

LNA	Transformer		Simulated		Calculated	
	L_1	Q_1	Gain	NF	Gain	NF
	[nH]	[-]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
CS	3.6	5.7	20.4	5.18	21.0	4.80
	5.3	6.2	20.7	5.53	20.8	4.78
CG	3.6	5.7	20.9	4.55	21.0	4.68
	5.3	6.2	21.0	4.42	21.6	4.57

〔発表論文〕

1. Takao Kihara, Shigesato Matsuda, and Tsutomu Yoshimura, "Analysis and Design of Differential LNAs with On-Chip Transformers in 65-nm CMOS Technology", *14th IEEE International NEW Circuits And Systems Conference (NEWCAS)*, Vancouver, Canada, June 2016.

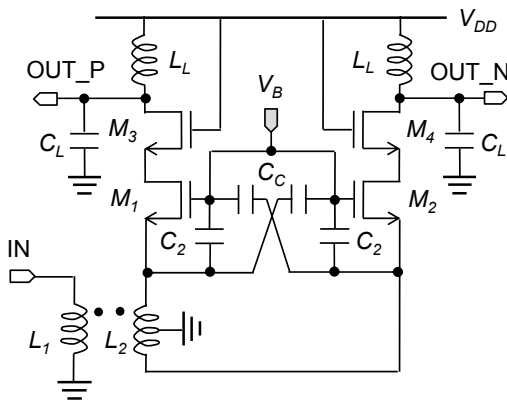


図 2 オンチップトランスを用いた差動 CG LNA

【26】 表面増強ラマン散乱による生体高分子の高感度検出を目指した 柔軟に構造制御可能な金ナノ構造体の創製

研究者 北海道大学電子科学研究所 助教 三友 秀之

〔研究の概要〕

金属ナノ構造体の表面に誘起される局在表面プラズモンは、蛍光やラマン散乱の増強効果を示すことから、センシングデバイスへの応用が検討されてきた。しかしながら、タンパク質などの生体高分子を対象にした測定では、より高感度な検出基板が必要とされている。本研究では、ハイドロゲルの上に金ナノ構造体を作製し、ゲルの膨潤・収縮を利用してナノ構造体間のギャップ距離を動的に制御することにより、生体分子の検出感度の向上を目指した。その結果、ラマン散乱によるタンパク質のシグナル強度を 10 倍増強することに成功した。現在、金ナノ粒子の表面被覆材や構造を最適化することで、さらなる高感度化を進めている。

〔研究経過および成果〕

金属のナノ構造体は、光と相互作用して局在表面プラズモンを示す。特に、金属ナノ構造体表面におけるラマン散乱の増強は表面増強ラマン散乱 (SERS) と呼ばれ、センシングデバイスを指向した関連研究が数多く報告されている。しかしながら、これらの研究の多くは低分子を対象としたものであり、タンパク質や細菌などのセンシングではその感度は低分子の場合に比べて著しく低い。SERSはナノ構造体のギャップ部位、特にそのギャップ間距離が短いほど高い増強効果が期待できるが、ギャップのスケールを小さくすると測定対象物質がギャップ部位に入り込みにくくなるという問題があり、特にタンパク質や細菌などの大きな対象物質に対しては測定が難しくなっていると考えられる。そのため、申請者は外部刺激に応答して膨潤・収縮するハイドロゲルの上に金ナノ構造体を固定化し、ゲルの膨潤・収縮によるサイズの変化によって金ナノ構造体のギャップを動的に

制御することで、効率よくターゲットを金ナノ構造体間に取り込み、SERSを著しく増強可能な高感度検出デバイスの創製を目指している。

これまでに、自己組織化によりガラス基板上に球状金ナノ粒子の集積薄膜を作製し、ハイドロゲル上に金ナノ粒子集積膜を転写することに成功していた。また、濃度の異なるNaCl水溶液を用いてゲルを膨潤・収縮させると、ゲルの膨潤・収縮に応じた消光スペクトルの波長シフトが観測され、金ナノ粒子間の距離が動的に変化することも確認されていた。そこで、本研究では、金ナノ粒子間距離を動的に変化させることによるSERS測定への効果について検討を行った。

金ナノ粒子集積薄膜転写ゲルを用いて hemoglobin (分子量 65 kDa) のラマン分光測定を行った結果、ゲルの膨潤により金ナノ粒子間距離を広げた状態でターゲット分子を添加し、そのままラマン分光測定を行うとシグナルは全く検出されず、また、粒子間距離を狭めたままタンパク

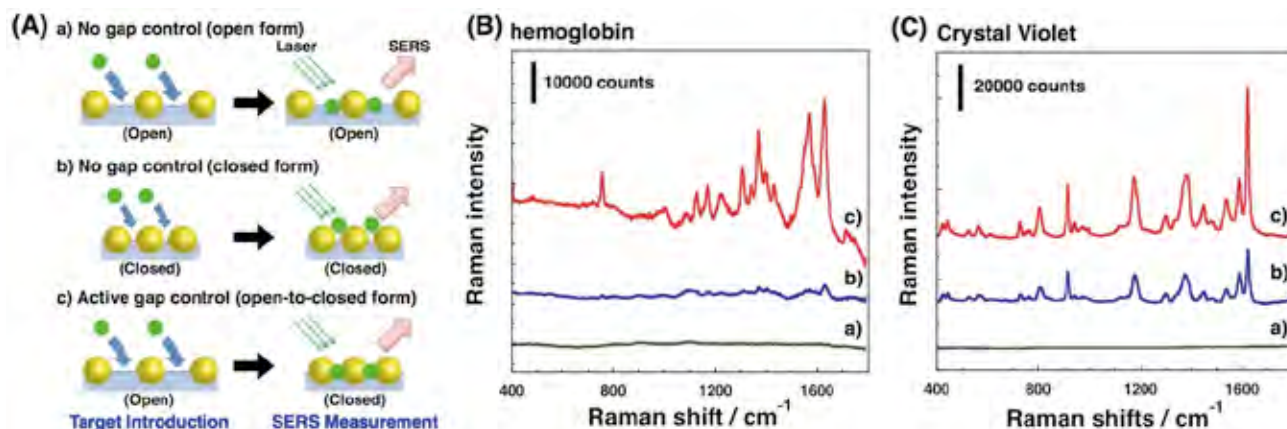


図1. 動的ギャップ制御を利用した hemoglobin および Crystal Violet の SERS 測定

(A)測定方法の模式図；a)ギャップが開いたままの状態での測定；b)ギャップが閉じたままの状態での測定；c)ギャップが開いた状態で対象物質を導入し、ギャップを狭めた後に SERS を測定 (B) hemoglobin の SERS スペクトル (C) Crystal Violet の SERS スペクトル

質を添加しラマン測定を行うと、微弱ながらもプラズモンにより増強されたシグナルが観察された(図1 B-a, -b)。一方、粒子間距離を広げた状態でターゲット分子を添加し、その後ゲルを収縮させて測定を行った結果、著しく増強されたシグナルが観察された(図1 B-c)。この増強効果は粒子間距離を変えなかった場合(図1 B-a, -b)と比べ、10倍以上であった。一方、Crystal Violet(分子量 408 Da)の測定においては粒子間距離を狭めたままターゲット分子を加えた場合と比べ、SERSのシグナル強度が約2倍増大した(図1 C)。これらの結果より、粒子間距離を動的に変化させる本研究の手法は、微細な間隙に入りにくい巨大分子のSERS測定において特に有効であることが明らかになった(発表論文1)。

また、ゲルの体積変化によるギャップ制御について評価するため、有限差分時間領域法(Finite-difference time-domain method; FDTD method)によるシミュレーションを行い、消光スペクトルと比較した。その結果、これまで用いていた金ナノ粒子集積薄膜は、ゲルの膨潤・収縮に応じてギャップサイズは変化するが、その変化は

不均一であり、ギャップ距離制御の効果を最大限に発揮できていないことが示唆された。

そのため、現在、新たな表面被覆分子の合成(論文2)、および三角プレート型金ナノ粒子の調製を行い、より効果的なSERS測定基板の開発を進めている。

[発表論文]

1. H. Mitomo, K. Horie, Y. Matsuo, K. Niikura, T. Tani, M. Naya, K. Ijiro: “Active Gap SERS for the Sensitive Detection of Biomacromolecules with Plasmonic Nanostructures on Hydrogels”, *Adv. Opt. Mater.*, **4**(2), 259-263 (2016)
2. R. Iida, H. Mitomo, Y. Matsuo, K. Niikura, K. Ijiro: “Thermoresponsive Assembly of Gold Nanoparticles Coated with Oligo(Ethylene Glycol) Ligands with an Alkyl Head”, *J. Phys. Chem. C*, **120**, 15846-15854 (2016)

[謝辞]

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人 カシオ科学振興財団に心より感謝申し上げます。

【27】新規HbA1cセンサーの開発

研究者 東北大学大学院薬学研究科 助教 佐藤 勝彦

〔研究の概要〕

本研究ではフェニルボロン酸とフェロセンを組み合わせた新規化合物を合成し、溶液中における電気化学的特性を検討し、糖類が共存した際の影響について検討した。その結果、合成した新規化合物はフェロセン部位に起因する酸化還元応答を示し、糖が共存するとボルタモグラムの酸化還元電位がシフトすることが判明したことから、糖を有するHbA1cに対する検出素子として有望であることが分かった。次に、この化合物をチオール誘導体として、金電極表面に自己組織単分子膜として固定化することに成功した。この修飾電極は固定化された化合物のフェロセンに起因する酸化還元応答を示した。また、糖溶液中ではボルタモグラムの酸化還元電位の変換が観測された。しかし、この電極の応答は不安定で測定を繰り返すと徐々に低下することがわかった。今後、修飾電極の安定性を改善し、センサーとしてHbA1c試料に対する応答を検討することが課題である。

〔研究経過および成果〕

本研究はフェニルボロン酸とフェロセンを組み合わせた新規化合物を電極表面に固定化して、HbA1c（糖で修飾されたヘモグロビン）を検出するための電気化学センサーの開発を目的とした。はじめに、新規化合物(1、図1)の合成を行った。この化合物は分子内に糖結合部位としてフェニルボロン酸、電気化学活性種としてフェロセン部位を有し、さらに電極への固定化の足場となるカルボン酸残基を有している。化合物1は、アミノメチル安息香酸、フェロセンアルデヒド、およびブロモメチルフェニルボロン酸を原料として3工程により合成することに成功した。同様にしてボロン酸残基がメタ位に置換した化合物(2)も合成した。

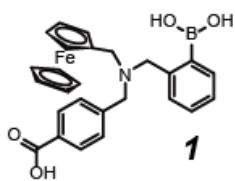


図1 化合物1の化学構造

はじめに、均一溶液中での化合物1および2の電気化学特性を調べた。これらの化合物を緩衝液/メタノールの混合溶媒に溶解し、サイクリックボルタンメトリー(CV)および微分パルスボルタンメトリー(DPV)を測定した。図2に化合物1のDPVの結果を示す。化合物1は約0.27V付近に極大を有する酸化ピークが観測された。これは化合物1のフェロセン残基の電気化学酸化によるものである。一方、溶液中にフルクトースを添加するとその濃度に応じてピーク電流が減少し、0.35V付近に新たなピークが観測された(図中に添加したフルクトース濃度を示した)。このように、化合物1がフルクトース濃度に依存した応答を示すことが明らかになった。HbA1cはヘモグロビンにフルクトース残基が結合しているため、化合物1を検出素子として用いてHbA1cセンサーを作製できることが示唆される。図2に示したDPV応答が観測されるのは、化合物1のフェニルボロン酸部位にフルクトースが結合したことに起因すると考えられる。具体には、

フェニルボロン酸部位にフルクトースが結合することにより、化合物**1**のB原子とN原子が相互作用してN原子からB原子への電子供与が起こりN原子に隣接するフェロセン部位の電子密度が低下したために酸化電位が高電位側へシフトしたと推測される。分子中でB原子とN原子間の距離が遠い化合物**2**ではフルクトースを添加してもDPVの変化がほとんど観察されなかったことも、この推測を支持する。

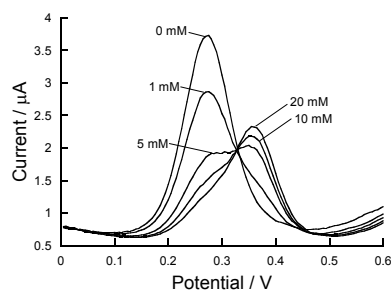


図2 化合物**1**のフルクトース共存時のDPV

次に、化合物**1**および**2**を金電極に固定化してHbA1cセンサーを作製することを検討した。そのために、化合物**1**および**2**のカルボン酸部位にアミド結合によりシスタミンを導入して、ジチオール誘導体とした。化合物**1**のシスタミン誘導体をメタノール溶液として、この溶液に表面に金微粒子を析出させたグラッシーカーボン電極を一晩浸漬して、電極上の金微粒子表面に化合物**1**の自己集合単分子膜を形成した。グラッシーカーボン電極への金微粒子の析出は、常法により塩化金酸溶液中で電解還元により0価金を調製することにより行った。このようにして作製した化合物**1**修飾電極からの化合物**1**の還元脱離反応を行って化合物**1**の表面被覆率を評価したところ、化合物**1**がおよそ 1.5×10^{-10} mol/cm² 固定化されており、ほぼ単分子状態であることが明らかになった。

そこで、化合物**1**修飾電極のセンサーとしての電気

化学特性を明らかにするために、緩衝液中でのフルクトース共存および非共存下のDPVを測定した(図3)。

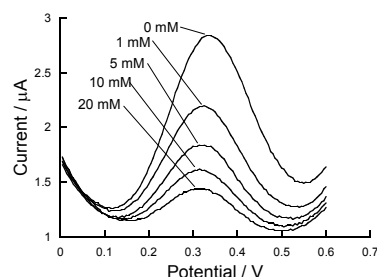


図3 化合物**1**固定化電極のフルクトース応答性

フルクトースの存在しない緩衝液中では 0.3V付近に酸化電流が観測された。これは、電極に固体化された化合物**1**のフェロセン部位の酸化に起因する応答である。従って、予想したように電極に化合物**1**が固定化されたことが明らかになった。一方、緩衝液中に1～20mMのフルクトースを添加すると電流値が濃度に応じて低下した。即ち、作製したセンサーがフルクトースに応答することが明らかになった。化合物**2**を固定化した電極ではこのような応答を示すことはなかった。HbA1cはヘモグロビンの分子表面にフルクトースを有するので、化合物**1**を固定化したセンサーはHbA1cに応答するものと考えられる。しかし、このセンサーは安定性が低く、使用を繰り返すと電流値が徐々に低下することが判明し、現時点では再現性のある特性を得ることができない。今後、化合物**1**の化学構造の改良および電極への固定化法の検討により安定なセンサーを実現し、HbA1cへの応答を検討する予定である。

〔発表論文〕

なし

【28】環境と運動速度の異なるヒト起立動作における全身の筋協調構造の解明

研究者 東京大学工学系研究科 特任助教 安 琪

〔研究の概要〕

現在のわが国は超高齢社会を迎えており、ヒトの運動機能改善は喫緊の課題である。本研究では日常生活動作の中でも起点となる起立動作に着目し、ヒトがどのように関節自由度よりも多い冗長な筋を制御して異なる環境において運動を達成する仕組みを解明することを目的とした。運動制御理論の中でも筋シナジー仮説に着目し、実際に異なる環境における起立動作の計測実験によって、筋シナジーを抽出し、ヒトは4つの筋シナジーの振幅と継続時間を変化させていることを明らかにした。また独自に構築した4リンク11筋モデルの神経筋骨格モデルを利用した順動力学シミュレーション実験では、実際にヒトが個別に筋を制御することなく、4つの筋シナジーから運動が生成されることを示し、さらに異なる起立動作の戦略も生成されることがわかった。

〔研究経過および成果〕

起立動作はヒトの日常生活において起点となる重要な動作である。ヒトの身体には関節の自由度よりも多くの冗長な筋が付着しており、それらを巧みに制御して、日常生活においても異なる高さの椅子や異なる運動速度においても立ち上がることができる。この適応的な運動生成メカニズムの解明に対して、本研究では筋シナジー仮説と呼ばれる、ヒトが個別の筋を制御しているのではなく、協調して活動する筋群の組み合わせによって生成されているとする仮説を用いて、起立動作を解析し、適応的な運動制御メカニズムを明らかにする。

運動制御メカニズムの理解のために、本研究では座面高の異なる椅子からの起立と、運動速度の変化筋シナジーにどのような影響を与えるかを調べた。ここでは健常若年者を対象に、筋活動、身体軌道、床反力の計測を行い、特に筋活動から筋シナジーを抽出した。その結果座面高や運動速度が異なるヒトの起立動作においても、4つの筋シナジーが存在する

ことが分かった。各筋シナジーはそれぞれ役割を持っており、筋シナジー1は上体の前屈、筋シナジー2は離床と重心の前方移動、筋シナジー3は全身の伸展、筋シナジー4は姿勢の安定化を行っている。それらの協調して活動する筋群は非常に類似していたが、それらの時系列重み変化では振幅が異なり、椅子の高さが低くなるにつれて高い振幅が必要になることが分かった。一方で異なる運動速度に対しても、筋群は類似していたが、時系列重み変化の時間方向を変化させて、継続時間を変えることで、異なる運動を達成していることが分かった。

一方で、このような計測実験から得られたデータを解析するのみでは、運動達成のための必要条件を同定することしか出来ず、十分条件の確認が出来ない。これに対して本研究では独自に構築した4リンク11筋モデルの神経筋骨格モデルを利用して、順動力学シミュレーション実験を行い、実際にヒトが個別に筋を制御することなく、4つの筋シナジーから起立動作が生成可能であることが示された。

さらにこのような神経筋骨格モデルを利用したシミュレーション実験では転倒などを含めて、実際にヒトでは計測できない状況を再現することができる。本研究では、筋シナジーのパラメータを変化させた時の起立動作の変化を調査した。先の計測実験では、ヒトが筋シナジーのパラメータの一つである振幅を調整することができることが示唆されているため、本シミュレーション実験でも、振幅を変化させたときの運動を調べた。その結果、各筋シナジーが弱まった時に上体の前屈が減ることや後方へ転倒する、身体が持ち上がらないなどの影響を定量的に調べることができた。このように本順動力学シミュレーション実験では、安定して立つことができる筋シナジーの条件と後方・前方に転倒する条件が分かった。これらの情報は高齢者や運動疾患を有する患者の運動と対比させて、運動疾患の原因を推定するのに有効である。

本研究では、計測実験を行ったのちに、それらの知見をもとにして神経筋骨格モデルを構築し、順動力学シミュレーションによって、計測実験で得られた知見を検証した。しかしこれらのアプローチは相互に関連し、発展させていくものであり、今後はさらに順動力学計算によって得られた運動が実際に高齢者や運動障がいを持つ患者に見られるかを調べ、改めて運動計測に基づく解析をし、運動メカニズムの解明に努めることが重要である。

〔発表論文〕

1. Ningjia Yang, **Qi An**, et al., “Muscle Synergy Structure using Different Strategies in Human Standing-up Motion”, *Advanced Robotics*, Vol.31, No.1, January 2017.
2. Yuki Ishikawa, **Qi An**, et al., “Gait Analysis of Patients with Knee Osteoarthritis by Using Elevation Angle: Confirmation of the Planar Law and Analysis of Angular Difference in the Approximate Plane”, *Advanced Robotics*, Vol.31, No.1, January 2017.
3. **Qi An**, Hiroshi Yamakawa, et al., “Temporal Structure of Muscle Synergy of Human Stepping Leg During Sit-to-Walk Motion”, *Proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Intelligent Systems (IAS-14)*, Shanghai (China), 2016/Jul. (**Best Conference Paper Award Finalist 受賞**)

【29】 pH 応答性電界効果トランジスタと核酸増幅反応による核酸がんマーカーのラベルフリー電氣的計測

研究者 東京医科歯科大学 助教 合田 達郎

〔研究の概要〕

バイオマーカーの高感度検出はがんや疾病の早期診断・発見につながる重要な課題である。近年、合成分子であり、分子設計が容易な核酸アプタマーを用いたバイオセンシングが開発されているが、アプタマーは抗体に比べて結合親和性が低い。そこで、アプタマーに核酸増幅を組み合わせた方法が報告されてきた。しかし、核酸増幅の導入によりアッセイの複雑化、装置の大型化が懸念され、その場診断(ポイント・オブ・ケア)には適していない。そこで本研究では、標的認識したアプタマーに恒温核酸増幅反応である Helicase dependent amplification (HDA)を施し、さらに、核酸増幅で生成される H^+ を電氣的に検出する電位計測デバイスを組み合わせることで、光学系を用いない安価かつ小型なポイント・オブ・ケア用デバイスの実現を目指した。

〔研究経過および成果〕

＜恒温核酸増幅＞

アプタマー配列を含む標的 DNA の核酸増幅をおこなった(Fig. 1)。モデル実験としてがんマーカーであるトロンビンを用いた。Table 1 に使用したトロンビン認識アプタマー配列を含んだ標的 DNA およびプライマー配列を示す。Biohelix から購入した IsoAmp III Universal tHDA Kit を用い、Real time HDA 蛍光検出にて核酸増幅条件を最適化した。tHDA mixture と template (10 nM~1 fM)、IsoAmp@Enzyme IIIを氷上で混ぜ、HDA サンプルを作製した。StepOnePlus Real-Time PCR System を用いて、65 °C、60 min で増幅させた。

標的 DNA 濃度 1 pM までは再現性良く増幅した(Fig. 2)。一方、標的 DNA を含まないサンプルも 20 分後から非特異的な増幅が見られたが、10 pM、1 pM と比べて増幅の立ち上がり時間が遅いため区別することが可能であった。

＜pH 計測＞

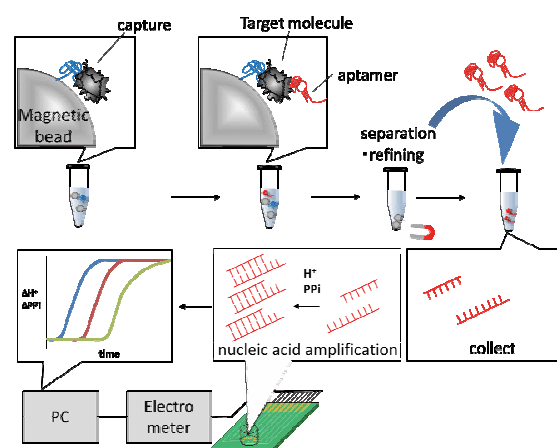


Fig. 1 Electrical detection of isothermal nucleic acid amplification for DNA aptamer as element for target recognition

サンプル量が 40 μ L と少量なため、通常の pH 応答ガラス電極の使用が困難である。そこで、熱酸化法で作製した Ir/IrOx を微小 pH 応答電極に用いた。Ir ワイヤー (Φ 0.3 mm)と Au ワイヤー (Φ 0.6 mm)をそれぞれ 0.5 cm、1.5 cm ずつ接合し、 Li_2CO_3 で Ir 部分を覆い、870 °C で酸化させ Ir/IrOx 電極を作製した。pH は電位計測法で測定した。エレクトロメーター (KITHLEY 社製 6517B)に Ir/IrOx 電極と参照

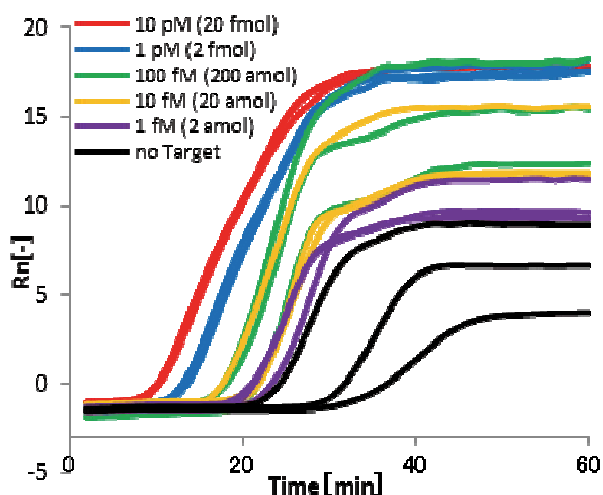


Fig. 2 Fluorescence monitoring of real-time HDA amplifications

電極 Ag/AgCl を接続し、pH 9.0、pH 4.0、pH 7.0 で校正した。Ir/IrOx 電極の pH 応答を確認し、ネルンスト式の傾きが -59.3 mV/pH と 65°C での理論値である -67.0 mV/pH と近い値が得られた (Fig. 3)。蛍光試薬を除いて調製した HDA サンプルを用い、polymerase を加え、1 h、 65°C で増幅させた際の電位応答を計測した。

この Ir/IrOx 電極を用いて、核酸伸長酵素反応に由来するプロトン産生による測定溶液の pH 酸性化を確認した。標的 DNA 濃度 1 nM、no Enzyme、no Target で経時的な電位測定をしたところ、標的 DNA 濃度 1 nM において $\Delta[\text{H}^+]$ が増加した (Fig. 4)。<今後の課題>核酸アプタマーの恒温増幅反応を電位計測によって確認する原理証明実験には成功した。一方で、測定の再現性には改善の余地がある。

核酸増幅反応は指数関数的に増幅するため、増幅開始時の標的 DNA 濃度が少しでも異なると結果に大きく影響するが、マイクロピペットを用いた手動による操作ではこの点を克服することが困難であった。今後は、マイクロ流路を用いた半自動核酸増幅操作法を検討し、測定精度の向上に取り組む予定である。

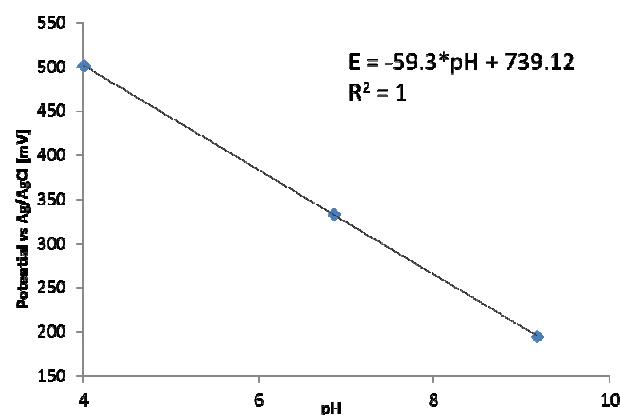


Fig. 3 Potential/pH response of the Ir/IrOx microelectrode

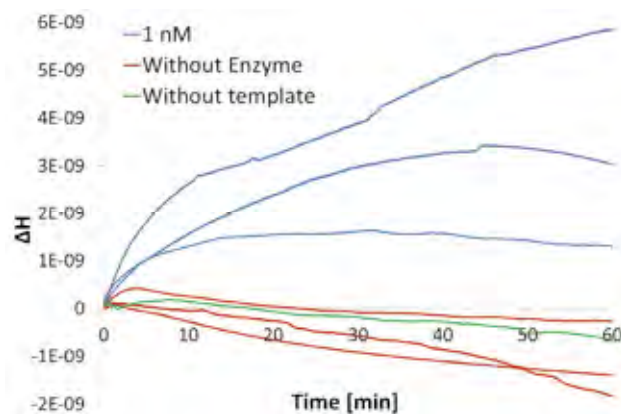


Fig. 4 pH responses of the real-time HDA for aptamers in potentiometry

Table 1. DNA sequences of the thrombin recognition aptamer and HDA primers

Name	Sequence
HDA aptamer	5'-CGT GAT TAG ATT GAG GGA AAT TGT GAG AGT CCG TGG TAG GGC AGG TTG GGG TGA CTT TTT TCA GTA TGT GTT ATG GGC CAA GT-3'
HDA Forward primer	5'-CGT GAT TAG ATT GAG GGA AAT TGT GAG-3'
HDA Reverse primer	5'-ACT TGG CCC ATA ACA CAT ACT GAA AAA-3'

【30】 脳と体から心を読み解くブレイン・ボディ マシン インターフェイス (BBMI)

研究者 北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 准教授 田中 宏和

〔研究の概要〕

本研究に関して、(1) 到達運動課題時の脳波・身体運動同時計測、(2) 認知課題時の脳波・瞳孔同時計測、そして(3) 脳波から事象タイミングを抽出する解析法に関する研究を行った。(1)では、高密度脳波信号から手先の運動方向に関して系統的に脳活動が変調する運動方向選択性を見出した。(2)では、作業記憶課題時の脳波・瞳孔信号から、課題の成功・不成功を弁別できることを示した。(3)では、脳波信号の再帰的パターンとそのタイミングを抽出する信号解析法を提案し、数学的に定式化した。これらの成果は、脳波と身体生理信号を組み合わせるブレイン・ボディ マシン インターフェイスの基礎となる。

〔研究経過および成果〕

本研究課題の目的は、脳信号と身体生理信号からヒトの内部状態、つまり「心」を読み解く技術を開発し、ブレイン・ボディ マシン インターフェイスの基礎技術を確立することである。その目的に、本年度は以下三テーマに関して研究を行った。

(1) 到達運動課題時の脳波・身体運動同時計測

本研究テーマでは、サル電気生理実験で知られている神経活動と比較できる形でヒト非侵襲脳波計測の可能性を探るため、到達運動時の脳波・身体運動同時計測を行った。手先の運動方向に対して系統的に神経活動が変調を受ける運動方向選択性という性質がサル電気生理実験の結果から知られている。サル電気生理実験と同様の課題をヒトで行い、高密度脳波計測と身体運動計測を行った。体動雑音除去・独立成分分析・双極子信号源推定など最新の信号解析を行ったあと、各信号源が運動方向に従いどのように活動を変化させるかを調べた。その結果、サル電気生理実験で知られているより、より広い領域に渡り運動方向選択性がみられることが分かった。また、

脳波の高時間解像度を駆使して、運動開始前後に運動方向選択性が動的に変化する様子を捉えることができた。この結果は、ヒト非侵襲脳波計測により脳内の身体運動表現を調べるのに、サル電気生理実験と比較可能な時空間精度を持つことを示した点で重要であると考えられる。既に国際プロシーディングス・国際学会発表を終えており、学術雑誌に投稿中である。

(2) 認知課題時の脳波・瞳孔同時計測

本研究テーマでは、比較的安価な脳波計(emotiv EEG)と視線計測装置を用いて、脳波と瞳孔径の変化から認知課題の成功・失敗を予測できるかどうかの検討を行った。認知課題として、短時間表示された視覚刺激を覚えた後に視覚刺激に関する質問に答える作業記憶課題を用いた。作業記憶課題では記憶量に応じて脳波もしくは瞳孔径が変化することが知られているが、その両方を同時計測し組み合わせた先行研究はない。そこで、視覚刺激提示後の記憶保持期間の脳波信号と瞳孔径から、機械学習の手法を用いて正しく記憶できているかどうかを判別する解

析を行った。その結果、脳波信号のみもしくは瞳孔径のみで個別の弁別器を構築した場合に比べて、脳波信号と瞳孔径の両方を用いて統合した弁別器を構築した場合のほうが高い弁別成績を示すことが分かった。この結果は、ヒトの内的状態を推定するうえで脳波信号と身体生理信号を組み合わせる本アプローチが有効であることを示した点で重要であると考え。今後は本予算で購入したモーションキャプチャ・生理信号計測装置を用いて筋電などの生理信号を計測したり、VR キットを用いて他の認知課題(知覚検出課題・意思決定課題・感情想起課題)を試したりして、研究をさらに広げる予定である。

(3) 脳波から事象タイミングを抽出する信号解析法

本研究テーマでは、外部事象とは必ずしも同期しない認知機能に関する脳活動を抽出する解析法に関して研究を行った。感覚刺激呈示や運動出力といった外部事象のタイミングに合わせて、脳波信号を加算平均することで平均波形を計算するのが従来の脳波信号解析法であった。しかし、意思決定・運動意思・感情想起などといった高次認知機能は必ずしも外部事象に同期しておらず、そのため外部事象のタイミングから直接推定することはできない。そこで、「ある認知機能に対応する脳波信号は同じ波形を示す」という仮定のもとに、繰り返して起こる脳波成分を抽出する信号解析法を提案した。具体的には、脳波空間フィルタと時間窓を最適化して、再現性を最大にするような多チャンネル脳波の時空間フィルタを構成する最適化問題として定式化した。提案手法の予備検証として、シミュレーションデータを用いて提案手法の有効性を確認した。この結果は、脳波の繰り返し成分を抽出する提案手法が、ヒトの内的状態を推定する

手法として適用できることを示唆している。今後は提案手法を実データに適用し、上記(2)で得られた脳波データから知覚検出・意思決定・感情想起などの高次認知機能が推定できるかどうかを検証する。

本研究は脳波と身体生理信号を組み合わせた新規のブレイン・ボディ コンピュータ インターフェイスを提案する挑戦的なものである。上記のように大きく前進することができたのは、カシオ科学振興財団による寛大な支援のおかげである。ここに心からの感謝を申し上げる。

〔発表論文・講演〕

1. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S. (2016). Coordinate Systems in the Motor System: Computational Modeling and EEG Experiment. In *Advances in Cognitive Neurodynamics (V)* (pp. 85-92). Springer Singapore. (査読有)
2. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S. (2016). Temporal dynamics of directional tuning and reference frames in human reaching task revealed with high-density EEG, the 1st International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (EmboSS 2016). (査読有・一般講演)
3. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S. (2016). Directional tuning and reference frames revealed by noninvasive EEG in humans: a computational MoBI study, The 31st International Congress of Psychology, Yokohama. (査読有・招待講演)
4. Tanaka, H. (2016) Computational Mobile Brain/Body Imaging, The International MoBI Workshop, San Diego, U.S.A. (基調講演)

【31】神経回路選択的な遺伝子操作技術による皮質線条体ニューロンの解析

:行動選択の神経回路メカニズムとは？

研究者 新潟大学 超域学院 特任助教 吉岡 望

〔研究の概要〕

本研究では、ウイルスベクターを用いた神経回路選択的な遺伝子操作技術を駆使して、大脳皮質から線条体に神経入力する皮質線条体路の生理機能を解析した。初めに、化学遺伝学による皮質線条体路の神経活動操作システムを構築した。さらに皮質線条体路を構成する皮質線条体ニューロンについて、投射様式の異なる2つのサブタイプを区別して遺伝子発現誘導するシステムも構築した。最後に細胞標的法によって皮質線条体路を選択的に破壊したマウスにおいて種々の行動課題を実施して、皮質線条体路が行動選択時の意思決定に関わることが明らかになった。

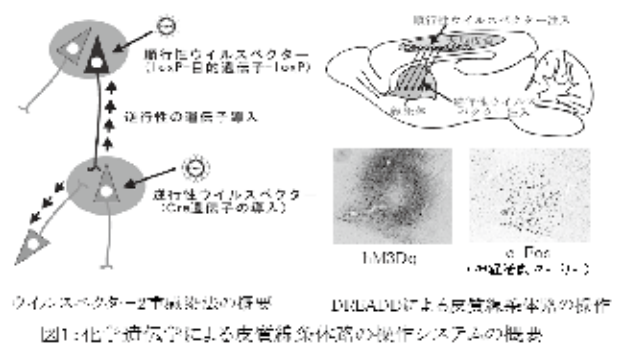
〔研究経過および成果〕

本研究では、行動制御における皮質線条体路の生理的意義を明らかにするために、以下の研究課題に取り組んだ。

- 1) 化学遺伝学による皮質線条体路の神経活動操作システムの構築
- 2) 皮質線条体ニューロンのサブタイプ選択的な遺伝子発現システムの構築
- 3) 皮質線条体路に関する行動生理学的解析

初めに、皮質線条体路の神経活動を化学遺伝学によって操作するために、Designer Receptors Exclusively Activated by Designer Drug (DREADD) を皮質線条体路のみで発現させるシステムを構築した。DREADD は、クロザピン N-オキシド (CNO) が特異的に作用する改変型ムスカリン受容体であり、神経活動を興奮させる hM3Dq と抑制する hM4Di がある。皮質線条体路に DREADD を発現させるために、2 種

類のウイルスベクターに感染した神経細胞のみで目的遺伝子を発現させる二重感染法を用いた。Cre リコンビナーゼを導入する逆行性レンチウイルスベクターを線条体から逆行性に感染させた上で、Cre 依存的に hM3Dq を発現するアデノ随伴ウイルス (AAV) ベクターを大脳皮質に注入することで、皮質線条体路で特異的に hM3Dq を発現するマウスを作製した。このマウスに CNO (3mg/kg) を腹腔内投与すると、hM3Dq を発現した皮質線条体ニューロンにおいて神経活動マーカーの c-Fos が発現誘導することを組織学的に確認した (図 1)。



次に、皮質線条体路を構成する皮質線条体ニューロンに関するサブタイプ選択的な遺伝子発現系を構築した。皮質線条体ニューロンは、脳梁を越えて両側の線条体に投射する交差性投射型と錐体路を下りながら片側の線条体に投射する錐体路投射型の2種類のサブタイプがある。今回、ウイルスベクター二重感染法を応用して、交差性投射型と錐体路投射型の皮質線条体ニューロンを区別して、遺伝子発現させるシステムを構築した(図2)。

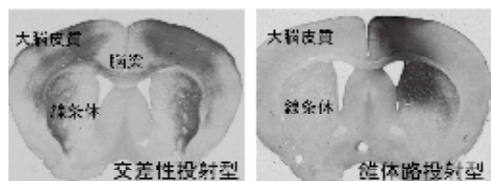


図2 二重感染法による皮質線条体ニューロン選択的な遺伝子導入
Cre/loxPシステムにより、ウイルスベクターに二重感染した皮質線条体ニューロンに目的遺伝子を発現させたマウス脳の組織切片。2種類の皮質線条体ニューロンのそれぞれに遺伝子導入できた。

先に確立したDREADDによる神経活動操作法とサブタイプ選択的な遺伝子発現系を組み合わせることで、交差性投射型の皮質線条体ニューロンのみでc-Fos 発現誘導することを確認しており、サブタイプ選択的な神経活動操作が可能となった。

最後に、皮質線条体路の行動生理学的な役割を明らかにするために、皮質線条体路を選択的に破壊したマウスにおいて種々の行動課題を実施した。今回、皮質線条体路を破壊するためにイムノトキシンによる細胞標的法を用いた。この手法では、モノクローナル抗体と緑膿菌毒素の融合蛋白質であるイムノトキシンによって、抗原分子を発現する標的細胞のみを破壊できる。逆行性レンチウイルスベクターを線条体から感染させて皮質線条体ニューロンにイムノトキシンの抗原分子を発現させた上で、大脳皮質の一次運動野(M1)にイムノトキシンを注入した。その結果、M1に分布する皮質線条体ニューロンが著名に破壊された(図3)。

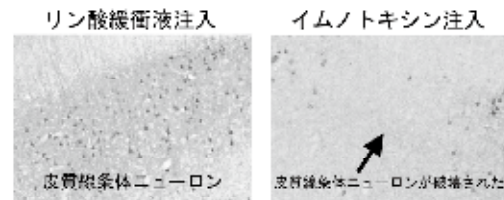


図3 リン酸緩衝液を注入した大脳皮質には、皮質線条体ニューロンが破壊されるが、イムノトキシンを注入した大脳皮質では、皮質線条体ニューロンが破壊された。

M1 に由来する皮質線条体路を破壊したマウスにおいて運動機能および認知機能を調べるために、自発運動量、運動学習、フットプリント、道具的条件付け等の行動課題を実施した。今回、M1 に由来する皮質線条体路を破壊したマウスでは自発運動量は変化せず、フットプリントによる歩行試験でも正常であった。さらにローターロードテストによって協調的運動と運動学習においても異常がないことを示した。従って、M1 に由来する皮質線条体路を選択的に破壊しても運動機能は障害されないと考えられた。次に、皮質線条体路の認知機能を検証するためにオペラント学習装置による道具的条件付けを実施した。提示したレバーを押した際に報酬を与える学習課題を実施した場合、対照群と神経路破壊群のマウスはレバー押し学習を同様に獲得した。一方で、レバー押し学習を繰り返した際に生じる意思決定の自動化に異常が生じることが分かった。以上の結果から、M1 に由来する皮質線条体路は運動制御には関与しないが、行動選択時の意思決定において重要な役割を担うと考えられた。

〔発表論文〕

1. 吉岡 望、加藤 成樹、小林 和人、皮質線条体路による意思決定の制御機構-神経回路選択的な操作システムの開発から-、平成28年度 生理研研究会「行動を制御する神経ネットワーク機能の解明に向けて」、2016年、愛知

【32】経頭蓋磁気刺激の高精度刺激座標推定技術と機能的磁気共鳴画像の融合による 運動野活動ダイナミクスの解明

代表研究者 高知工科大学総合研究所 助教 木村 岳裕
共同研究者 九州大学大学院医学研究院 研究支援推進員 廣永 成人

〔研究の概要〕

磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging; MRI) 装置で撮像した脳構造画像上に、非侵襲的な脳刺激法である経頭蓋磁気刺激 (Transcranial Magnetic Stimulation; TMS) の刺激部位を高精度に推定するシステムを開発した。光学式マーカを使用した既存システムは誤差がセンチ単位近かったが、3D スキャナを使用した新システムは、誤差 1mm 未満の高精度なものであった。開発したシステムを用いて、大脳皮質運動野に対して TMS マッピングを実施し、指先から前腕、上腕までの体部位局在を確認し、それらの座標を高精度に求め、機能的 MRI 実験に対する応用可能性を見出した。

〔研究経過および成果〕

1. TMS 高精度刺激座標推定技術の開発と精度検証
目的:TMS は頭皮上から刺激をするため、どの脳領域を刺激しているのか直接確認することができない。刺激座標を推定する既存システムは、被験者頭部と TMS コイルのそれぞれに光学式マーカを装着し、マーカ同士の相対的位置関係から MRI 構造画像上の刺激領域を推定するものである。リアルタイム性を持ったナビゲーションシステムとして神経科学領域で広く使用されている。だが、マーカと MRI 構造画像を登録する際に、3D デジタイザを手動で使用するためセンチ単位近い誤差が避けられなかった。そこで本研究では非接触型の 3D スキャナを使用し高精度の刺激推定システムを構築することを目的とした。
方法:TMSコイルの設計情報から数理モデル(図1A)を作成し、3D スキャナ(VIVID910; コニカミノルタ社)で撮影したポリゴンデータを数理モデルに登録し(図1B)、TMS コイルモデルを作成した(図1C)。

次に、被験者頭部を 3D スキャナで撮影し(図 2A)、額から鼻の部分抜き出し、FreeSurfer software を使用して事前準備した MRI 構造画像に登録し、MRI モデルを作成した(図 2C)。その後、TMS コイルを設置した状態の被験者頭部のポリゴンデータを取得し(図 2B)、MRI モデルとの顔領域同士に登録した。MRI モデルに登録された TMS コイル部分を、事前作成したコイルモデルで補完し(図 2D)、コイルの中心から脳構造へベクトルを伸ばし(図 2E)、交点を TMS の刺激座標として推定した(図 2F)。画像同士の登録と誤差計算は Rapidform XOR(Geomagic 社)を用いた。
結果:TMS コイルモデル作成時のポリゴン登録の平均誤差は $0.0900 \pm 0.0804\text{mm}$ であった(図 1D)。MRI 構造画像と顔表面のポリゴンデータの平均誤差は $0.521 \pm 0.085\text{mm}$ であった(図 3A)。TMS のポリゴンデータと TMS コイルモデルの平均誤差は $0.276 \pm 0.100\text{mm}$ であった(図 3B)。積算誤差は 0.887mm であり、1mm 以下の精度を持つことを確認した。

2. 経頭蓋磁気刺激マッピングと体部位局在座標

目的:開発したシステムを使用し、左半球一次運動野への TMS マッピングから得られる生体応答と刺激座標からシステムの妥当性検討を行うことを目的とした。

方法:左一次運動野の指先領域を中心とした 1cm グリッド、25 か所への TMS マッピングを実施し、右腕の 7 か所の筋肉(示指、親指、小指、前腕(伸筋/屈筋)、上腕(伸筋/屈筋))に筋電図電極を装着し、運動誘発電位(MEP)を計測した。このとき 25 か所の刺激は開発したシステムを用いて刺激座標を求め、MRI 構造画像上に反映させ、運動野 TMS の生体応答である MEP 振幅値との整合性を検討した。

結果:25か所の刺激位置のうち運動野(図4左、赤色領域)に刺激がされた際に、顕著な MEP 振幅が確認された(図4右)。また、上腕の MEP の分布は指先と比較して頭頂側に集まった。

考察:指先と上腕の領域は脳構造上約 2cm の距離があることが先行研究で明らかにされており、今回再現することができた。解剖学上の刺激座標と生体応答の整合性があり、システムの妥当性が検証された。

3. 体部位局在座標と機能的 MRI 実験への応用

今後:運動時の機能的 MRI 実験において、共に活動するためこれまで困難とされていた運動野と体性感覚野の活動の正確な切り分けや、身体の支配領域に応じた信号変化の検討などに応用し、身体運動の活動ダイナミクスを明らかにしていく予定である。

[発表論文]

1. Hironaga Naruhito, Mitsudo Takako, Gunji Atsuko, Iwata Makoto, Kimura Takahiro. Accurate localization of TMS stimulation points via TMS-MRI co-registration using 3D laser scanning. (Under Review)

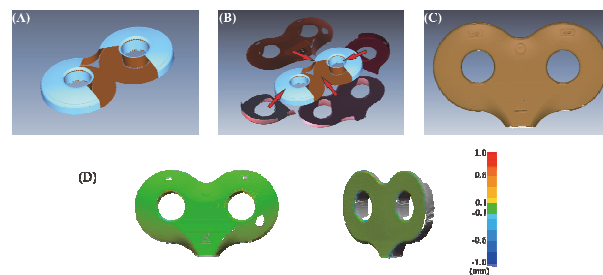


図1. TMS コイルモデルの作成手順と誤差マップ

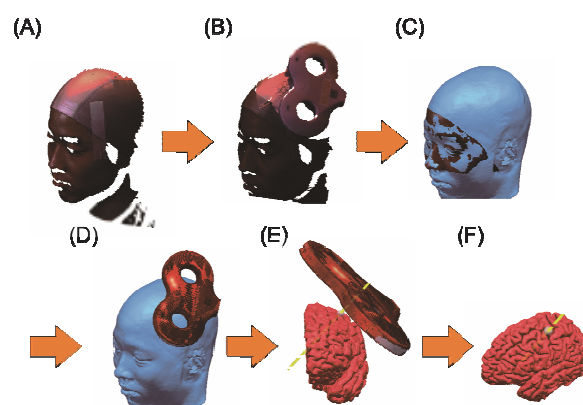


図2. ポリゴンデータから刺激座標推定まで

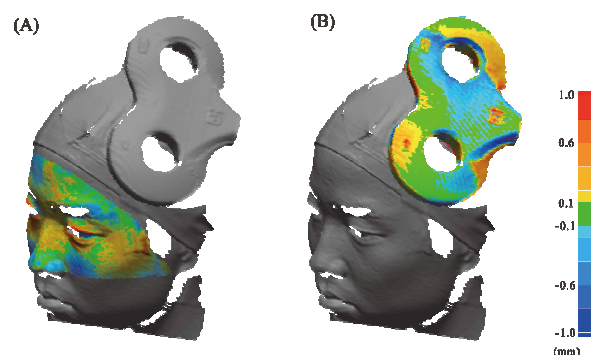


図3. 画像登録時の誤差マップ

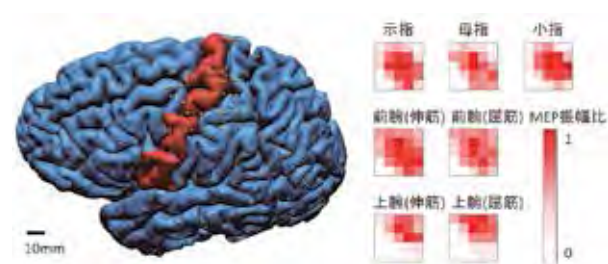


図4. TMS マッピングの刺激座標と MEP 振幅の分布

【33】 三次元層流マイクロ流体デバイスによる同軸多層ゲルファイバーを足場とした 成熟血管組織作製システムの創成

研究者 早稲田大学 先進理工学部 准教授 武田 直也

〔研究の概要〕

本研究では、工学的手法により in vitro で血管内皮細胞から再生成熟血管組織を作製するためのシステム構築を目指し、これを達成するための基盤技術となる次の 4 項目を実現した。【1】細胞を内包した長大な多層ゲルファイバーを安定して作製できる新たなマイクロ流体デバイスを開発した。【2】ゲルファイバーへの細胞接着性分子の導入による血管内皮細胞のゲル材料への接着性向上を達成した。【3】周皮細胞による血管組織の裏打ちを模して、他細胞との共培養により血管内皮細胞の接着・伸展性が向上することを示した。【4】血流のように力学的な流れストレスを血管内皮細胞に負荷させながら大面積での培養が可能な自律駆動型灌流培養システムを構築して、流れストレスにより血管内皮細胞の配向制御を達成した。これら成果は、再生血管組織を有する大きく厚い三次元再生組織の構築に寄与すると期待される。

〔研究経過および成果〕

移植治療におけるドナー不足の解消のため、工学手法により細胞を組上げて in vitro で再生生体組織を作製する研究が期待されている。生体に移植可能な三次元生体組織・臓器を実現するには、血管組織を組織・臓器全体に張り巡らせて、厚く大きな組織内部の細胞にまで酸素・栄養を連続的に供給する必要がある。著者らは、長大な再生成熟血管組織を作製する手法として、マイクロ流体デバイスにより血管内皮細胞を内包したゲルファイバーを作製し、成熟・管腔化を誘導するアプローチが有効と考えた(図 1)。

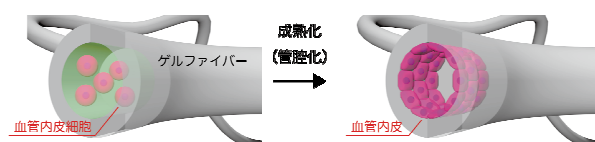


図 1. ゲルファイバー培養場による血管作製の模式図。

そこで、まずは細胞内包層や接着層から成る長大な多層ゲルファイバーが作製可能な、新型マイクロ流

体デバイスを開発した。本デバイスにより、血管内皮細胞を内包した重層ゲルファイバーを再現よく作製することに成功した。また、流量の制御により各層の厚みを変化させることも達成した。次に、担持した血管内皮細胞の接着性を向上させ、管腔化を誘導するため、ゲルファイバーへの細胞接着分子の化学的修飾を試みた。その結果、細胞が接着・伸展した様子が見出した。また、周皮細胞による血管組織の裏打ちを模して、他細胞種と共培養を行い、血管内皮細胞の接着・伸展性の向上を確認した。

著者らは、血管組織の成熟化を誘導する手法として、上述の細胞接着分子や他種細胞の導入以外に、実際の血管組織のような流れストレスの負荷に着目した。マイクロ流体デバイスは、これまでに、このような流れストレスを与えながら細胞を培養するシステムとしても応用が研究されてきているが、マイクロチャンバ

ーで構築される細胞培養場は閉鎖系でありかつ面積が小さいために、移植を目的とした大きな三次元組織の培養には不向きである。そこで、開放系かつ大きな培養面積をもつ、新たな培養システムを開発した。

本システムは、吸水性に優れた紙(ペーパータオル)の上に高い細胞接着性を示すゼラチン製の直径約 $1\ \mu\text{m}$ のマイクロファイバーを重ねた培養基材を基盤技術とする。紙の毛細管現象ならびに高低差をつけた二つの培養液チャンバーを繋ぐことで生じるサイフォン原理を利用して自律的に培養液を駆動させ、ファイバー上に接着させた細胞に流れストレスを負荷する仕組みである(図 2)¹。ゼラチンマイクロファイバ

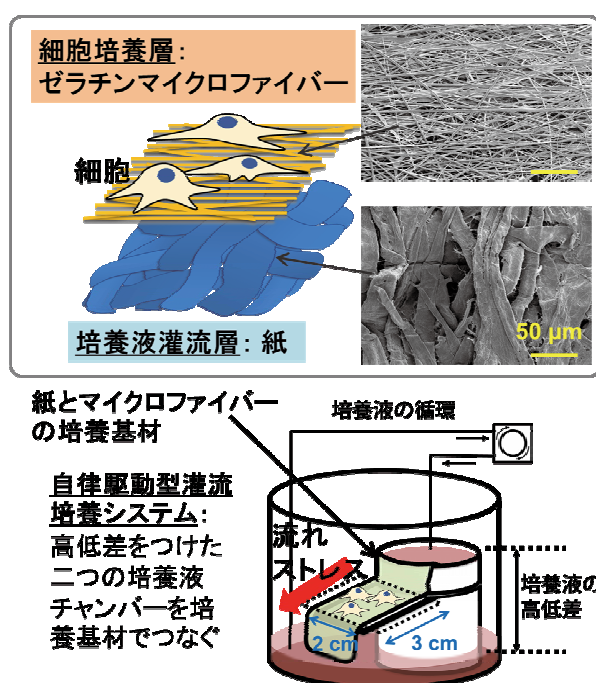


図 2. 紙とゼラチンマイクロファイバーからなる培養基材の模式図と走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像(上). 自律駆動型灌流培養システムの模式図(下).

ーはグルタルアルデヒドで架橋し、培養液への溶解を防ぐと共に紙基材への接着を増大させる工夫を施した。培養場は開放系であり、紙の大きさを変えることで培養場の大きさも自由に設定できる。実験によ

り、培養基材が繋ぐ二つの培養液チャンバーの高低差を変化させることで、培養液の駆出量(すなわち流れストレス)を容易に制御できることを見出した。この自律駆動型灌流細胞培養システム系を用いて血管内皮細胞への流れストレス負荷を試みたところ、流れストレスをかけない静置培養と比較して細胞形態がより流れ方向に配向し、さらに内部の細胞骨格であるアクチン線維も分子レベルで流れ方向に配向することが、画像解析等から明らかとなった(図 3)。以上のように、コスト的にも優れる本灌流培養系による流れストレスが、血管形成誘導に重要な細胞の配向性制御に有効なことを明らかにした。

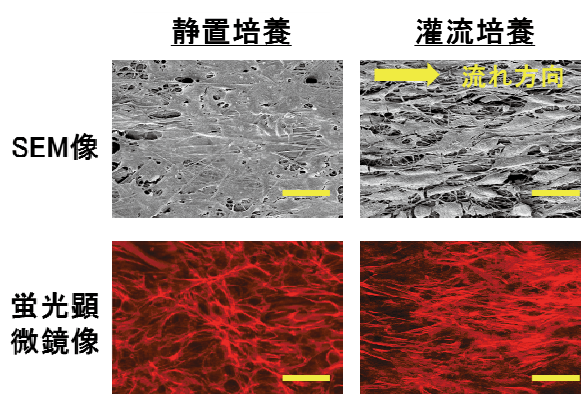


図 3. 流れストレスによる血管内皮細胞の形態ならびにアクチン線維の配向制御を示す SEM 像(上)と蛍光顕微鏡像(下). 静置培養(流れストレスなし; 左)、灌流培養(流れストレスあり; 右).

[発表論文]

1. Ai Ozaki, Yoshinori Arisaka, Naoya Takeda, Self-driven perfusion culture system using a paper-based doublelayered scaffold, *Biofabrication* 2016, 8(3): 35010.

【34】「教育活動としての部活動」を実現する指導者を育成するための 部活動指導法に関する実証的研究

研究者 京都工芸繊維大学 准教授 来田宣幸

共同研究者 群馬大学 准教授 吉田浩之

〔研究の概要〕

部活動は、学校教育の中で実施されてきたが、制度的基準や教育的意義の規定がなく、現場裁量に委ねられてきた。そこで、本研究では、部活動を教育活動として位置づけ、指導者育成に必要な基礎的データの収集と実際の運用による実証的研究から構成される一連の研究を実施した。まず、横断的調査によって部活動による学習目標となるカテゴリーを再構築した。次に、部活動指導者へのヒアリング調査を実施し、教育指導プログラムのプロトタイプを構築し、実際に中学校で縦断的に調査を実施した。その結果、部活動いごち尺度に基づいた心理教育的援助サービス実施の指導法の有用性が示唆された。

〔研究経過および成果〕

学校教育の中でおこなわれている「部活動」には、人間としての豊かな能力の涵養が期待されているが、近年、部活動では様々な問題点が顕在化するようになった。その背景には、部活動が教育活動の一環として長く存在してきたにもかかわらず、制度的基準や教育的意義の規定がなく、現場の裁量に委ねられてきた点がある。学習指導要領にも、部活動の教育目標・内容の記載はなく、教育活動と位置づけられているとは言い難い。そこで、本研究では、部活動を教育活動として位置づけるために必要となる学習指導と生徒指導の観点から部活動指導システムを構築するための基礎的データの収集と実際の運用による実証的研究から構成される一連の研究を実施した。

まず、全国の中学生および高校生(5,735 名)を対象とした横断的調査を実施した。使用した質問紙調査は、来田・吉田(2013)によって開発された部活動の「学習目標到達度尺度」と「部活動いごち尺度」

であった。得られたデータを用いて評価尺度を再構築したところ、従来までは「競技力・専門性向上」、「チームメイトとの親和」など10の因子を想定していたが、部活動を通して獲得したい個人としての目標と集団としての目標の観点から6カテゴリーに整理することができた。個人の目標としては「専門性・競技力向上」、「精神面の向上」、「ルール・マナーの習得」の3つの因子が抽出され、他者に働きかける集団に対する目標としては「友人関係の構築」、「他者への支援」、「集団への貢献」の3つの因子が抽出された。

これら6つの要素は、第一義的な部活動の目標であると考えられる競技力や専門性の向上だけでなく、そのプロセスにおいて努力や精神的な側面から向上を図り、社会生活の中で必要となるルールやマナーの習得も大きな教育目標の1つであると捉えることができる。また、部活動は学校教育の中で機会の少ない他学年共同集団での貴重な活動であるため、自分の活躍や向上だけでなく、他者や集団に対する働き

かけも重要な取り組みと認識され、他者に対する優しさと厳しさを学ぶ大切な場面と捉えられる。また、部活動いごこち評価を用いることで、部活動に対する不適応を早期に発見できる可能性が見いだされ、質問紙を用いた自己評価による部活動に対する取り組み評価の仕組みを試行的に構築することができた。

次に、部活動指導者へのヒアリング調査や情報交換を通じて、実際の部活動場面での活用の方策を検討し、その成果を踏まえて生徒の自己評価を継続的に実施する実証的調査を開始した。公立中学校の生徒 209 名を対象として、8 ヶ月にわたって継続的に調査を実施した。調査の内容は部活動いごこち尺度と「Q-U アンケート」を使用した。その結果、部活動存在感得点および不安感得点は時期、性別ともに交互作用はなく、不安感得点では時期に有意な主効果があり、1 月から 7 月にかけて徐々に値が低下した。これらの結果から本尺度は年間変動は小さく、安定しており、信頼性が高いといえる。また、その中でも不安感の低下傾向にあったことから、集団としての適応感の促進や集団としての成熟等を示したと考えられる。

また、心理教育的援助サービスの観点から、存在感得点または不安感得点のいずれかが全国基準値を下回った生徒を二次的援助サービスが必要な生徒とし、存在感得点および不安感得点のどちらも全国基準値を下回った生徒を三次的援助サービスが必要な生徒と評価することとした。その結果、男女とも 30～40%の生徒が存在感または不安感に課題があり、個別対応となる二次的支援を実施する必要が認められた。また、特別な対応が必要となる三次的援助対象者は 5%程度であり、時期による全体に対する人数割合については大きな変動は認められなかった。

さらに、Q-U アンケートの結果に基づいて、学級に

おける個別的支援が必要となる生徒と部活動において個別的支援が必要となる生徒の関係を検討したところ、学級で個別的支援が必要な生徒はそうでない生徒と比較して 3.36～3.52 倍、部活動において支援が必要となるリスクが高いことが明らかとなった。このことから、部活動指導者と学級担任との連携が非常に重要であるといえ、学校として部活動指導に関する情報を顧問と担任が共有するシステムの構築が不可欠であることが明らかとなった。

しかし、一方で、学級では個別的支援が必要のない学級満足群の生徒であったとしても、そのうち 20～25%の生徒は部活動において存在感または不安感に課題を有し、個別での支援が必要と思われる状況にあった。このことは、学級の様子だけでは部活動における生徒の様子を十分に把握できない可能性を示唆するものであり、近年、いじめ自殺や不登校の原因となっている部活動内での不適応の兆しを学級担任は見逃してしまう危険性があるといえる。また、部活動は顧問による閉鎖的な集団となることが多く、部活動指導を少数の顧問の責任として実施するのではなく、学級担任や学年集団等の学校組織として連携することの必要性が高いといえる。

また、追跡調査の結果に基づき、前月との評価の変化の推移図を作成した。その結果、個別的・特別的支援が必要でない「満足群」から、20%弱が要支援群に移行し、その中でも特に不安感が強くなる生徒が多く、不安感の変化に対しては早期対応が重要となる可能性を示唆した。

〔成果発表〕

1. 吉田浩之・来田宣幸、中学生を対象とした部活動における集団への適応感の研究、日本応用心理学会第 83 回大会発表論文集、23

【35】共同研究型インターンシップの学習過程の定性分析－高度IT人材の育成の普及に向けて

研究者 北九州市立大学 国際環境工学部 准教授 山崎 進

〔研究の概要〕

本研究の目的は、共同研究型インターンシップの関係者にインタビュー等を実施し、学生たちがどのような学習・思考のプロセスを経て知識／スキル／態度を獲得したのかを明らかにすることである。研究アプローチとしては、数ある学習研究の方法論の中から、エンゲストロームの活動理論に着目した。本研究で得られた仮説は次の通りである。1)ある人が高度な問題解決能力を有するかインタビューで判定するには、その人が経験した技術に関する質問をし、その回答に思い入れや興味・関心、語彙、得た教訓が含まれている量で判別できる。2)プログラムコード中の各関数の複雑度の平均値と最大値が小さいほど、プログラミングの経験値が高い。3)徒弟制で起こる、主に人同士のコミュニケーション齟齬によるトラブルを予防・解決するIT支援は、今後10年程度の技術進歩では実現できない。

〔研究経過および成果〕

本研究では、次の3群からなる被験者を対象とした。

- P群:学部4年～博士前期課程2年の3年間、共同研究型インターンシップを含む研究活動に取り組んでいたプログラマ志望の修了生群計3名
- Q群:共同研究型インターンシップに1～2年間取り組んでいた学部4年生および博士前期課程1年生計5名
- R群:共同研究型インターンシップに取り組んでいない博士前期課程1年生計4名

P群に対し、グループ全員で非構造化インタビューを行った。Q群とR群については、個別に半構造化インタビューと、Arduino と C 言語による組込みシステムのプログラミング課題を実施した。

インタビューについては、本学の研究倫理ガイドラインに従い、被験者に対し実験前に、実験内容の説明の後、録音の承諾を書面で得た上で、インタビューの

録音を行った。録音内容をテキスト起こしし、エンゲストロームの活動理論[1]を踏まえて定性分析を行った。Q群とR群に対して行った半構造化インタビューでは、P群のインタビューの分析結果を踏まえて、あらかじめ次のような設問を問うた。

Q1:課題の仕様書を読んだ時、何を考えたのか。また、疑問に思ったことはあったのか

Q2:ソフトウェアとハードウェアを構築する必要があったが、どのように実装しようと思ったのか

Q3:ハードウェアを実装する時、困ったことはあったか。そして、どのように解決したのか。また工夫したことはあるのか

Q4:ソフトウェアを実装する時、困ったことはあったか。そして、どのように解決したのか。また工夫したことはあるのか

Q5:変数や関数に対してどのような考えを持っているか

Q6:可読性を意識してコーディングを行ったのか

Q7:コード中のコメントについて考えていることはあるか

Q群についてはさらに次の設問を問うた。

Q8:共同研究型インターンシップに参加して行ったことはどのようなことか

Q9:共同研究型インターンシップに参加して学んだことや得たものはどのようなものがあるか

Q10:再び共同研究型インターンシップの形式で活動をしたいと思うか

Q11:プロフェッショナルのエンジニアとともに作業を行って、考えたことや得たことはあるのか

プログラミング課題については、静的解析ツール SourceMonitor [2]を用いて、ソフトウェアメトリクスを集計した。本研究で分析したメトリクスは、ソースコードの行数、関数の複雑度の最大値と平均値、ブロックのネストの深さの最大値と平均値、関数の数である。以上の実験とさらなる文献調査の結果、3つの仮説を得た。それぞれについて説明する。

1)ある人が高度な問題解決能力を有するかインタビューで判定するには、その人が経験した技術に関する質問をし、その回答に技術や経験への思い入れや興味・関心、語彙、得た教訓がどのくらい含まれているかで判別できる。

P群・Q群は明らかにR群と比べて、技術や経験について内容も伴った上で雄弁に語れた。本実験のように、適切なプログラミング演習課題を経験させた上で前述のような設問を決めてインタビューをすれば、プログラミングを含む問題解決能力を推量できる。

2)共同研究型インターンシップを経た学生はそうではない学生と比べて、プログラムコード中の各関数の複雑度の平均値と最大値が小さい。したがって、これらのメトリクスを取ることで、プログラミングの経験値を推

察できる。

この方法で、プログラミング演習において、簡便な事前評価を実現できる。プログラムをこの方法で事前にふるい分けた上で、目視で精査すれば効率良く評価できるであろう。

3)徒弟制で起こる、主に人同士のコミュニケーションの齟齬に由来するトラブルを、未然に防いだり解決したりするIT支援は、今後10年程度の技術進歩では実現できない。

現行のAI技術では、文章の読解能力が十分得られない。また、人間のコミュニケーションには「空気を読む」非言語コミュニケーションのウェイトが大きいので、人間の言動・感情に関わるセンシング・分析の技術が必要になるが未発達である。このままでは、コンピュータが人間同士のコミュニケーションを十分な精度で認識するのは無理であろう。

もし徒弟制的教育において、現状よりも多くの弟子を指導する場合、同時多発的にこの種のトラブルが発生すると、コンピュータや人工知能は役に立たないので、人間が事態を収集するしかない。このリスクに備えた範囲で弟子の数を制限した方が賢明である。

〔発表論文〕

未発表

〔参考文献〕

[1] ユーリア エンゲストローム, 拡張による学習 --- 活動理論からのアプローチ, 新曜社, 1999. 原著: Learning by Expanding: An Activity-Theoretical Approach to Developmental Research, Cambridge University Press.

[2] Campwood Software, SourceMonitor, Version 3.5, <http://www.campwoodsw.com/sourcemonitor.html> (2017年2月3日アクセス)

【36】電子黒板・デジタル教科書・グラフ電卓を連携させた数学科指導の研究

研究者 東京理科大学 理学部 教授 清水克彦

〔研究の概要〕

本研究では、電子黒板、デジタル教科書、数学ソフトウェア・グラフ電卓を連携させた数学科指導を実現するための教材と指導法の開発を行うことを目的とした。通常の授業で設置しやすい簡易型の電子黒板と指導者用のデジタル教科書を用いて、操作指導用のグラフ電卓のエミュレータを数学ソフトウェアとして利用し、デジタル教科書のページとエミュレータを同時に投影し、ICT を用いて容易となる学習場面として指摘されている「思考の可視化」「瞬時の共有」「試行の繰り返し」を行う教材を、3つの単元で開発した。その一部を理科大グローバルサイエンスキャンパスの講義で実施し、参加した生徒の感想や参観した教職志望者による分析から有効性を確認できた。

〔研究経過および成果〕

本研究では、文科省の答申等から推進が期待される電子黒板とデジタル教科書と、教育では普及が遅い数学ソフトウェア等をそれらの利用の推進を目指して、それらを組み合わせて利用することで新しい可能性を実現する教材を開発することを目的とした。

本開発の電子黒板・デジタル教科書の選定

1)電子黒板の選定:本開発では、端末の準備に時間が掛からず、安価である U 社の「e-黒板アシスタント eB-S」システムを利用することとした。機能としては、投影・書き込み・画面拡大、スクリーンショット等が中心であった。

2)デジタル教科書の選定:本開発では、数学ソフトウェア等の使用を考慮し、授業者が使用することを前提として、指導用デジタル教科書を導入することとし、K 社と S 社の数学 I,A,II,B を導入した。また、利用が比較的多くなされている中学校のデジタル教科書も導入し、機能等を分析した。機能としては、教科書の提示、問題のみの提示、ノート・書き込み機能・クラス別保存・若干の数学シミュレーション等が中心であった。

電子黒板・デジタル教科書をベースとしたグラフ電卓、 数学ソフトウェアの利用教材の開発

ICT の活用により容易となる学習場面として、「ICT を活用した教育の推進に関する懇談会」報告書(中間まとめ)(2014)では、次の三つを挙げている。・【思考の可視化】・【瞬時の共有化】・【試行の繰り返し】

チョークと黒板の授業では、上記の学習場面の導入は容易ではない。本開発では、この 3 点が容易に実現できるような電子黒板とデジタル教科書をベースとした数学ソフトウェアを利用した教材開発を目指した。また、電子黒板上へ同時に提示する方法では数学ソフトウェアとしてグラフ電卓のエミュレータが適していることを見出した。本開発では、デジタル教科書の例題や問題をもとに、教科書の展開に沿いつつ、数学ソフトウェア上で係数変更、別の数値での実行、データの変化などを行い上記3つの学習場面を実現する指導を行う教材の開発を進めた。本開発ではこのような教材の開発を数学 A「整数の性質」・数学 I「データの活用」・数学 II「二次関数」「いろいろな関数」の3つの単元の一部で開発した。

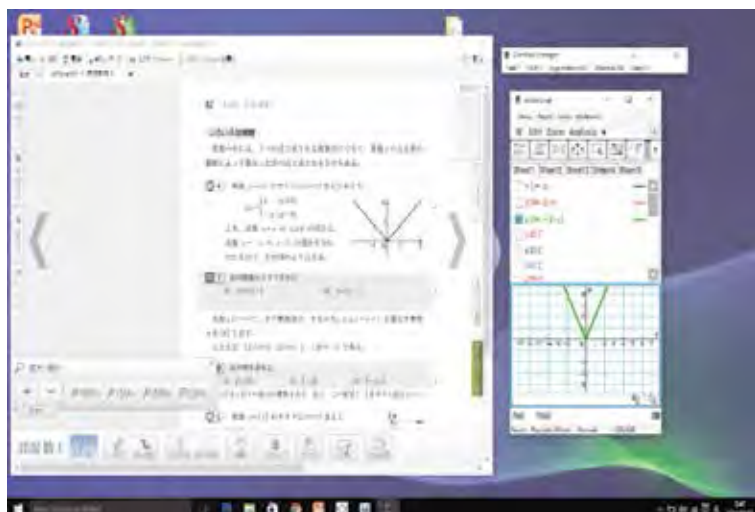


図1 デジタル教科書と ClassPad のエミュレータを電子黒板に同時に投影した画面図

図 1 では「いろいろな関数」における絶対値関数のグラフを教科書の例題から係数を変化させたグラフをエミュレータに描画させ、確認を行っている。ここでは教科書の例題に関連する「試行の繰り返し」が実現されている。教科書の拡大機能のみならず、電子黒板の書き込み機能による気づきの記録、スクリーンショットによる試行結果の記録とその再生による比較などを用いると「瞬時の共有」や「思考の視覚化」が容易にできることを確認できた。この「いろいろな関数」の教材を、JST による理科大グローバルサイエンスキャンパスの講義の一部として実施した。教科書の問題からはじまる絶対値関数のグラフの探求において、生徒の感想を見ると「電子黒板を用いて(値を変え、関連性を認識できたことを指摘し)、絶対値を含んだ一見難しそうな関数も実は単純であったことなどに気付いて理解が大幅に深まりました」「(理解が深まり、規則性を見出すことができたことを指摘した後)従って、そのような学習を行いやすくするために、電子黒板・デジタル教科書・グラフ電卓等を用いてみることも一つの手段である」等の効果を確認できた。非常勤講師を務

める院生の分析からも、このような利用の有用性が指摘されている。このように本研究では ICT を連携した数学科指導の可能性を示すことができたと思われる。成果は、以下の論文以外にも数理解析研究所の研究集会、統計数理研究所の研究集会、数式処理学会の講演、シンポジストとしての提案等で発表を行った。

〔発表論文〕

1. 清水克彦(2016)「電子黒板とデジタル教科書をベースとした数学ソフトウェア等の利用教材の開発」日本数学教育学会秋期研究大会発表収録,p.546
2. 清水克彦他(2016)「電子黒板・デジタル教科書とグラフ電卓・数学ソフト等を用いた高校数学科の授業の提案1ー数学 A「整数の性質」における数値計算機能の活用ー」, Teacher Teaching with Technology, Vol.20,pp.46-51
3. 清水克彦他(2016)「電子黒板・デジタル教科書とグラフ電卓・数学ソフト等を用いた高校数学科の授業の提案 2ー2 次関数・絶対値関数におけるグラフ機能の活用ー」, Teacher Teaching with Technology, Vol.20,pp.74-79
4. 清水克彦他(2016)「電子黒板・デジタル教科書とグラフ電卓・数学ソフト等を用いた高校数学科の授業の提案 3ー数学 I「データの分析」相関における統計機能の活用ー」, Teacher Teaching with Technology, Vol.20,pp.122-127
5. 清水克彦他(2017)「電子黒板とデジタル教科書をベースとした数学ソフトウェアの利用教材の開発」数理解析研究所講究録「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」掲載予定

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
平成29年5月1日 発行
