

研究助成
成果報告論文集
(平成26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30回(平成24年度) 研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
1	イカに学ぶ次世代型透明ディスプレイ技術の開発	京都大学大学院情報学研究科 助教 前川 真吾
2	赤潮原因害藻へテロシグマの産業利用を可能にする基盤技術の確立	岡山大学資源植物科学研究所 助教 植木 尚子
3	超低消費電力のスピンドル生成とその伝送技術の開発	九州工業大学若手研究者フロンティア研究アカデミー 准教授 福間 康裕
4	磁化測定にもとづく光による有機結晶の相状態と物性の制御	室蘭工業大学大学院工学研究科 准教授 飯森 俊文
5	強磁性/非磁性合金の非平衡融体の精密熱物性計測	東北大学大学院工学研究科 助教 杉岡 健一
6	プラスチック上における高品質ゲルマニウム光吸収層の創出と太陽電池応用	筑波大学数理物質系 助教 都甲 薫
7	ランダム金属ナノ構造によるシリコンナノ結晶の自然放出割合の制御	群馬大学理工学研究院電子情報部門 助教 中村 俊博
8	STMナノ分子電子スピン分光による超小型・分子磁気デバイスの創製	千葉大学大学院融合科学研究科 特任准教授 山田 豊和
9	新規希薄磁性体を用いた超低電力にて動作する磁化反転素子の創出	東京大学大学院理学系研究科 准教授 岡林 潤
10	無線エージェントを利用した高スループット・低消費電力・自立分散無線システム	信州大学工学部 准教授 田久 修
11	ナノ磁気ピクセルをもつフルパララックスフルカラー3次元ディスプレイの開発	豊橋技術科学大学大学院工学研究科 講師 高木 宏幸
12	人工的な3次元細胞組織の形成・組み立て加工技術の確立に向けたゲルマイクロマシニング技術の開発	熊本大学大学院自然科学研究科 助教 中島 雄太
13	セル-メカニカルインターフェースにおけるセンシング基礎デバイスの創成	山口大学大学院理工学研究科 教授 南 和幸
14	高感度可視光応答型アクティブプラズモンフィルタの開発	香川大学工学部 助教 山口 堅三
15	世界最高圧力核磁気共鳴測定装置の開発と超高压下強相関電子物性の研究	高知大学教育研究部自然科学系 講師 北川 健太郎
16	薄膜の基盤との結合度合いと表面不純物除去の調査を基にしたSOFC陰極の性能向上に関する研究	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 助教 Sean BISHOP
17	周期構造を有するマグネシウム合金の変形/破壊に関するボトムアップシミュレーション	佐賀大学大学院工学系研究科 准教授 武富 紳也
18	有機ラジカル磁性体による高温分子磁石の開発	大阪府立大学大学院理学系研究科 教授 細越 裕子
19	カルバゾール骨格を有するポルフィリン色素の開発と近赤外吸収特性を利用した電子材料への応用	岡山大学工学部 助教 前田 千尋
20	ナイフ切離タスクの力学的相互作用情報の可視化ならびに対象・スキル別の特徴抽出	東京電機大学理工学部 准教授 大西 謙吾

No	研究テーマ	代表研究者
21	ビオロゲン液晶高分子の合成と光学材料への展開	東京理科大学理学部 助教 中 裕美子
22	皮膚貼り付け型健康モニタリングシートのためのマイクロセンサ集積化技術	早稲田大学基幹理工学部 専任講師 岩 瀬 英 治
23	ペプチドと核酸を用いた無機物質の位置特異的ナノ凝集沈殿法の確立	甲南大学フロンティアサイエンス学部 講師 臼 井 健 二
24	ナノ電気化学顕微鏡を用いた細胞表面の化学物質濃度プロファイルの評価	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教 高 橋 康 史
25	内視鏡下手術支援用高機能治療デバイスロボット融合システム	東京大学大学院工学系研究科 准教授 小 林 英 津 子
26	脳波・NIRSの同時計測による乳児期の睡眠ステージと脳機能ネットワークの関係の解明	東京大学大学院教育学研究科 教授 多 賀 巖 太 郎
27	ナノ流路内の非線形電気インピーダンスによる1分子測定能の高度化	東京工業大学理工学研究科 准教授 山 本 貴 富 喜
28	シリコンナノ構造体によるシングルセル空間分画技術に関する研究	香川大学工学部 准教授 寺 尾 京 平
29	誘電泳動インピーダンス計測法のノロウイルス特異検出法への拡張	九州大学大学院システム情報科学研究院 助教 中 野 道 彦
30	複数の運動学習をもたらす神経機序に関する研究	高知工科大学総合研究所 講師 門 田 宏
31	計算機-生体ハイブリッド神経回路を用いた病態脳における異常な情報伝達機構の解明	東京女子医科大学医学部 助教 竹 内 雄 一
32	高校生の進路選択・職業観形成と効果的教育・生活行動に関する縦断的研究－欧米・アジア5か国との比較－	名古屋大学大学院教育発達科学研究科 教授 寺 田 盛 紀
33	現代日本における労働観と社会意識の変容に関するコーホート分析	京都大学大学院文学研究科 准教授 太 郎 丸 博
34	東日本大震災における遠隔地避難者の社会的ネットワークに関する研究－弱い紐帯の機能とメカニズム	山口大学人文学部 教授 高 橋 征 仁
35	思春期の自己制御能力低下をもたらす生物学的リスク要因の同定	長崎大学大学院医歯薬学総合研究科 教授 篠 原 一 之
36	大学における協同的學生支援プログラムの方法と支援枠組みに関する総合的研究	玉川大学教育学部 准教授 小 島 佐 恵 子

【1】イカに学ぶ次世代型透明ディスプレイ技術の開発

研究者 京都大学大学院情報学研究科 助教 前川 真吾

【研究の概要】

イカは体表の色やパターンを刻々と変化させて、捕食行動や生殖行動などの個体間コミュニケーションを行っている。この体表パターンの制御は体表面に存在する色素胞と呼ばれる細胞内小器官が拡大や縮小をおこなうことで達成されている。本研究では、世界最小のイカ「ヒメイカ」を用いることで色素胞の制御機構の解明を試みた。まず、ヒメイカでも他のイカと同様に色素胞が拡大縮小することで体色が変化するか検討した結果、他のイカと同様に制御されることが明らかとなった。さらに、その制御は脳からの神経が色素胞周囲の筋肉に投射することで達成されていることが明らかとなった。結果として、透明ディスプレイ技術に不可欠なアルゴリズムの構築の基礎知見を得ることができた。

【研究経過および成果】

研究着手の前にアオリイカ (*Sepioteuthis lessoniana*) を用いて予備的な観察を行っていたが、アオリイカを実験室内で飼育・維持することは困難であった。そこで、世界最小のイカ、ヒメイカ (*Idiosepius paradoxus*) に着目した。本研究の開始にあたり、ヒメイカの飼育環境の整備を行った。その結果、通常の実験室では一ヶ月以内に死んでしまうヒメイカを1.5ヶ月間は飼育できるようになった。この環境を利用してヒメイカにおける色素胞の制御および脳からの神経支配に関して研究を行った。まず、他のイカでみられるような体色の変化、すなわち色素胞の変化がヒメイカでもみられるか解析を行った。ヒメイカの捕食時の行動をビデオ撮影し、その体色

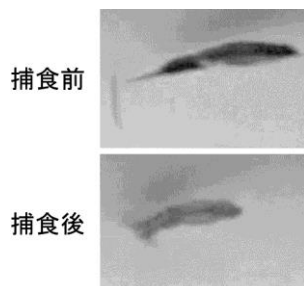


図1 ヒメイカの捕食時の体色変化
上段は捕食直前、下段は捕食後。体色が瞬時に変化している。

変化を調べた結果、ヒメイカにおいては、捕食直前に全身が真っ黒に変化し、捕食後速やかに体色が失われることが明らかとなった(図1)。このことは、捕食直前に色素胞が拡大し、捕食後に急速に縮小することを示している。実際に、麻酔下で色素胞を観察したところ、約1秒で最大まで拡大し、その後ゆっくりと縮小する様子が観察された(図2)。拡大時の速度と縮小時の速度に違いが認められたことから、拡大時と縮小時の制御が異なっていると考えられた。実際に、脳を破壊すると、色素胞は速やかに縮小する。この観察から、脳からの神経投射によって拡大が引き起こされると考えられる。この制御を解析する

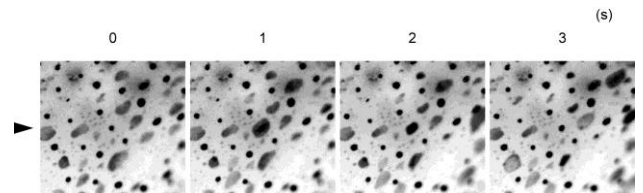


図2 ヒメイカ色素胞の拡縮

矢頭部に存在する色素胞(黒色)が1秒間で拡大し、その後、2秒間で収縮している様子がわかる。

第一歩として、筋肉を構成するアクチン繊維と色素胞の関係に関して解析を行った。アクチン繊維はファロイジンと呼ばれる標識試薬で染色できることが知られており、イカをホルマリン固定し、ファロイジン染色を行った。その結果を図3に示す。ファロイジン染色によって色素胞(図3B 白矢頭)の周囲に放射状にアクチン繊維が配置されている様子が観察された(図3B)。以上の結果は、色素胞の周囲に筋繊維が配置されていることを示している。また、筋繊維が収縮する、すなわち、放射状に配置された筋繊維が一緒に収縮することで、色素胞が拡大し、体色が変化

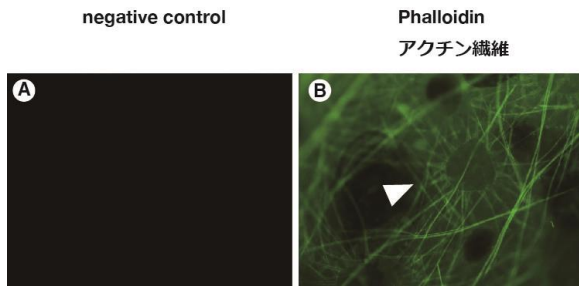


図3 色素胞周辺のアクチン繊維

A) ネガティブコントロール B) ファロイジン染色像。白矢頭で示した色素胞周辺に放射状に配置されたアクチン繊維(緑色の繊維)の存在が認められる。

すると考えられた。次に、中枢神経が制御に果たす役割を明らかとするために、細胞膜染色色素 DiO を用いた神経投射経路の検討を行った。これまで、ヒメイカを用いて DiO や Dil を用いた研究は行われていなかったため、色素の脳への導入方法の確立を試みた。現在までに、ニワトリやゼブラフィッシュに対して Dil が用いられてきたので、その方法の応用を試みた。まず、固形の色素を用いて脳の各領域に色素の導入を試みた。しかし、ヒメイカの体表は多糖類を主成分とする粘液に覆われており、固形の色素

を脳に導入できなかった。そこで、液体の標識試薬を直接、脳に注入する方法に変更した。その概要を図4の A に示した。粘液によって注入は困難であったが、ガラス針を工夫することで、導入が可能となった。実際には背側から針を挿入し、空気圧を用いて DiO 試薬を脳に注入した。注入後、4時間で外套膜上の色素胞の観察を行った。その結果、色素胞を取り囲むように神経—筋接合部が存在することが判

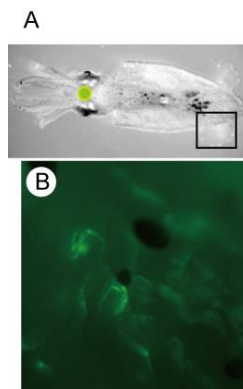


図4 色素胞への神経投射

A) 実験方法の模式図。脳に標識試薬 DiO をインジェクションし(緑部分) □部分の色素胞を観察した。B) 神経終末の様子。中央の色素胞(黒色)の周囲に緑に標識された神経終末が観察できる

明した(図4B)。

図3および図4の結果を考え合わせると、色素胞周囲に放射状に配置された筋繊維に対して、脳神経が接合し、筋肉の制御を行っていると考えられる。また、図2の知見を加えると、神経が興奮し、筋肉が収縮することで、急速な色素胞の拡大が起こることが示唆される。これに対して、色素胞の収縮に関しては、筋繊維が弛緩するのみで積極的な制御が行われておらず、その結果として、収縮は拡大と比べて二倍の時間がかかっていると考えられる。この現象は、色素胞制御の省エネ化とも捉えることができ、透明ディスプレイ技術への応用時も、平時は収縮しており、必要な時に急速に拡大させることで、省エネ化が図れると期待している。今後、さらに色素胞制御を解析し、アルゴリズムを抽出する予定である。

【2】赤潮原因害藻ヘテロシグマの産業利用を可能にする基盤技術の確立

研究者 岡山大学資源植物科学研究所 助教 植木 尚子

〔研究の概要〕

近年、藻類の光合成能を利用して有用物質を生産するというアイデアが注目を集めているが、有用物質を生産する藻類は押しなべて増殖が遅く、大量培養による有用物質生産実用化には長い道のりがある。

当研究グループは、そもそも増殖が早すぎるゆえに害藻とされている赤潮原因藻ヘテロシグマに有用物質産生能を遺伝子工学的的手法により付加すること、さらに増殖速度を任意に調節することを目標とし、(1)ヘテロシグマの遺伝子配列解読、(2)ヘテロシグマへの外来遺伝子導入方法の確立、(3)ヘテロシグマの増殖能の制御機構の解明をめざした研究を行った。

〔研究経過および成果〕

(1) ヘテロシグマの遺伝子配列解読

ヘテロシグマから抽出したゲノム DNA を、次世代シーケンス法にて解読した(オペロン社に外注)。解読には Illumina HiSeq 2000 を用い、ヘテロシグマゲノム DNA をもちいて 8kb Long Jump Distance ライブラリおよびショットガンライブラリを作成し、約 100bp/read、2 ライブラリで 2-3.6 億 read、最終的には、20—18Gb を解読することを目標として実験を行った。この結果、約 24Gb を解読したが、解読の結果、得られた Contig が短く(最大 43kb, 平均 536b)ゲノム配列の解読には至らなかった。得られた結果のうち、とくに Mate-pair reads 間の距離が短かったことから、解読に使われたライブラリの質が最適とは言えなかったと推測される。

そこで、次に PacBio RS (GC-rich 配列解読に有利、解読長が長いのでアセンブリが容易)を利用してゲノム配列解読を行ったところ、良好な結果が得られた。ただし、PacBio RS はエラーが多く、単独で 10Mb を超える全ゲノム配列解読には向か

ないことから、今後は、さらに Illumina HiSeq 2000 による解読を行い、Illumina HiSeq 2000 と PacBio RS から得られた結果を総合して、最終的なドラフトゲノム配列を得ることを目標としている。

私たちは、ヘテロシグマの全遺伝子配列解読を試みることによって、最終的には、コードされる遺伝子産物を推定することを一つの目標としていたが、単にゲノム DNA 配列のみをもとにアノテーションを決定するのは容易ではない上に予想精度も低い。そこで、ヘテロシグマの全 mRNA 配列を RNA-seq にて解読し、その情報を今後仕上げる予定の全遺伝子配列ドラフトと突き合わせることで、前発現遺伝子配列の予測と、遺伝子発現制御領域の同定を目指すこととした。

(2) ヘテロシグマへの外来遺伝子導入方法の確立

ヘテロシグマに外来遺伝子を導入・発現することを最終目標として、ヘテロシグマに特異的に感染する二本鎖 DNA ウイルスである HaV がもつプロモーター・ターミネーター配列をもちいたベクターを構築した。HaV はゲノムサイズが約 300kbp と推定されてい

る巨大なウイルスであり、その配列は部分的にしか解読されていない。そこで、我々はこれまでに解読された配列のうちで、 capsidタンパク質をコードする遺伝子と推定される配列に着目し、この上流と下流の配列を得ることを目標としてゲノムウォーキング法にてクローニングを行った。 capsidの上流配列の 1.5kbp、下流配列 0.5kbp を pUC19 由来ベクターに組み込み、 HaV CP promoter-(Multiple cloning sites)-terminator をもつヘテロシグマ遺伝子発現ベクターを作製した。マーカー遺伝子としてはカナマイシン耐性遺伝子である nptII をもちいて遺伝子導入を行ったところ、弱い G418 耐性が見られた。今後は、(1)で得られるヘテロシグマ遺伝子配列情報をもとに、ヘテロシグマにおいて最適な発現ベクターの構築に加えて、既知のマーカー遺伝子のコドン使用頻度を鑑みた配列最適化をおこない、ヘテロシグマに最適な発現ベクターの構築と、マーカー遺伝子による選別を行うことで、最終的には遺伝子組み換えを可能にすることを目標としている。

(3) ヘテロシグマ増殖制御機構の解明

瀬戸内海で頻繁に発生し、周囲の水産業に多大なダメージを与える「公害」赤潮の正体は、光合成を行う単細胞ラフィド藻であるヘテロシグマの爆発的増殖である。ヘテロシグマは、通常では海水中に生息する多くの光合成を行う植物プランクトンの一部を占めるに過ぎないが、条件が重なると最盛期には一晩に 8 倍、5 日間で 1000 倍近くまで増殖し、『赤潮』を形成する。しかし、実験室において単離・株化されたヘテロシグマを培養すると、標準的な人工海水を用いた場合と、浸透圧 (NaCl 濃度)、栄養塩濃度、温度、照度等を変化させた場合でも、赤潮発生時のような

急激な増殖は見られなかった。つまり、これまでは、実験室における赤潮発生環境条件は再現されていなかったといえる。

一方で、多くの海洋性藻類で、共生菌・共在菌の重要性が示唆されている。そこで、ヘテロシグマに共生・共在する環境微生物の単離・同定に着手したところ、現在までに数種の海洋微生物を単離・同定することができた。このうちの一種である海洋微生物を無菌化したヘテロシグマ培養液に添加したところ、ヘテロシグマは 24 時間に 4 倍以上に増殖した。この知見に基づき、赤潮発生条件における環境微生物の重要性という新しい観点から、ヘテロシグマの急激な増殖のメカニズムについて明らかにしたいと考えている。本研究の進行により、赤潮形成期におけるヘテロシグマの急激な増殖の環境生物学的要因を明らかにするとともに、ヘテロシグマの遺伝子発現パターンの網羅的解析を行うことで、細胞生物学的レベルでの理解をもたらすことができると期待している。

とくに、(3)の結果をまとめたものとして、現在 3 報の論文を執筆中です。貴財団からの研究助成に心から感謝申し上げます。

【3】 超低消費電力のスピンド生成とその伝送技術の開発

研究者 九州工業大学若手研究者フロンティア研究アカデミー 准教授 福間 康裕

【研究の概要】

非局所スピンド注入素子における純スピンド生成効率の向上とその伝送特性の評価を行った。多端子スピンド注入技術を用いて、純スピンドの生成効率を4倍まで向上（一般的な素子構造と比較）できることを明らかにした。また、強磁性体をNiFeからCoFeに変更することで、印加電流に対する純スピンドの生成効率55%を実現した。ハンル効果測定の解析により、NiFe/Ag接合素子ではNiFe/MgO/Ag接合素子よりもスピンドの拡散速度が増加することを明らかにした。ハンル効果測定は、スピンド緩和時間の評価に広く利用されているが、その解析には経験的な速度分布関数が用いられている。接合に依存した速度変化はスピンド緩和時間に大きく影響することを明らかにし、素子構造に依存しない非磁性体中の正確なスピンド伝送および緩和評価モデルを構築した。

【研究経過および成果】

近年、電流を伴わないスピンド角運動量の流れである純スピンドが注目されている。電流に起因した雑音やジュール熱によるエネルギー損失を低減し、情報処理および記憶用電子素子の高性能・低消費電力化が期待できる。

純スピンドは、非局所スピンド注入法により生成できる。図1に、作製した非局所スピンド注入素子の走査型電子顕微鏡像を示す。左側の強磁性体電極1と強磁性体電極2間に電流を印加し、強磁性体のスピンド偏極した電子を非磁性体中へと注入する。そのスピンドの向きは、強磁性体の磁化方向および強磁性体/非磁性体界面における印加電流方向に依存する。電極1と2間の電流方向は反転するために、両者の磁化方向は反平行配列とした。注入されたスピンドは、その緩和時間に対して指数関数で減衰する。しかしながら、スピンド軌道相互作用の小さな非磁性体においては、スピンドの緩和時間は電荷の緩和時間より数桁以上も長く、スピンドは数 μm

以上を伝導できる。このスピンド伝導を右側の強磁性体電極3により電圧信号として検出する。従来の素子構造では、注入側強磁性体電極は一つであったが、本研究では二つに増加した。これにより、従来と比較して、スピンドの生成効率を α 倍に向上できることを明らかにした。

$$\alpha = 1 + 2 \exp(-d_{12} / \lambda_N) + \exp(-d_{12} / \lambda_N) \quad (1)$$

ここで、 d_{12} は注入側強磁性体電極間距離であり、 λ_N は非磁性体のスピンド緩和長である。本実験では、 $d_{12} = 350 \text{ nm}$ 、 $\lambda_N = 930 \text{ nm}$ （銀）であるために、 $\alpha = 2.4$ であ

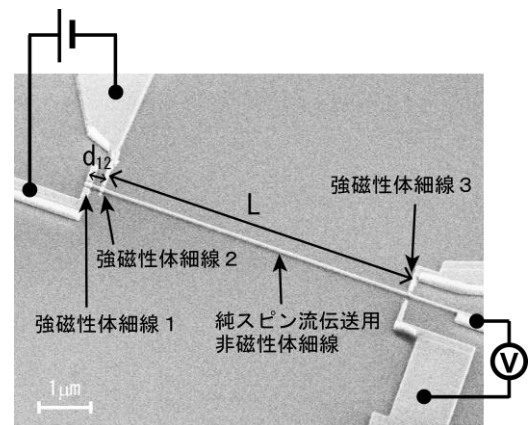


図1 本研究で作製した非局所スピンド注入素子。

った。素子の微細化や非磁性体細線のスピンの緩和長の向上により、更なる効率の改善が可能である。その印加電流に対するスピンの生成効率は、強磁性体細線に NiFe を用いた場合で 44%、CoFe を用いた場合で 55% であった。

非磁性体中のスピンに対して、垂直方向の外部磁場を印加すると歳差運動を誘起することができる(ラーモアの歳差運動)。この運動周波数は外部磁場の強さに依存するために、検出側強磁性体電極位置に到着するスピンの角度や信号強度を解析することで、その速度や緩和に関する情報が得られる(ハンル効果測定)。図2に、(a)測定結果および(b)検出側電極位置におけるスピンの到着時間分布関数を示す。点 は実験値、実線は1次元のスピン拡散モデルにより得られた解析結果である。金属接合あるいはトンネル接合により、顕著な信号の変化が観測される。これらのスピン到着時間分布はハンル効果測定結果に対してフーリエ変換を行うことで見積もった(図2(b))。NiFe/Ag 接合では、NiFe/MgO/Ag 接合よりもスピン拡散速度が増加することがわかった。従来、スピン緩和時間は経験則で得られる分布関数(図2(b)の Empirical model)を用いて決められていたが、金属接合ではこの分布関数が大きく変化しており、正確なスピン緩和時間の算出が困難なことを明らかにした。本研究では、金属接合における強磁性体へのスピン吸収効果を考慮した解析解を算出し、実験結果をうまく再現できることを示した(Spin absorption model)。Ag だけでなく、Mg やグラフェンにおいても本モデルの有効性を確認している。これにより、非局所スピン注入素子におけるスピン緩和を正確に評価することが可能になった。

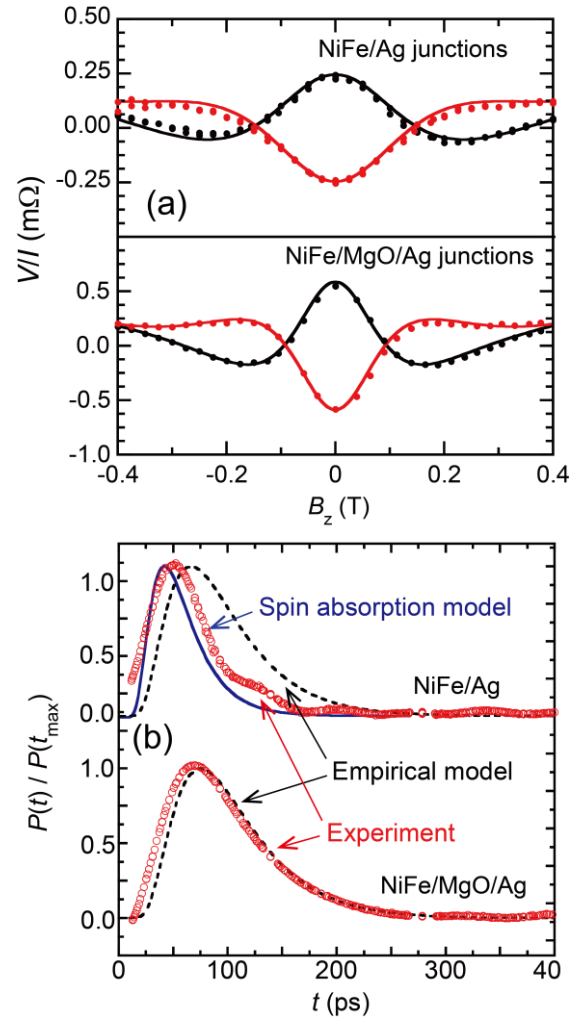


図2 (a) $L=6 \mu\text{m}$ における素子のハンル効果測定結果、(b) 解析により得られたスピン分布関数。

[発表論文]

1. H. Idzuchi, S. Karube, Y. Fukuma, T. Aoki, and Y. Otani, 「Impact of interface properties on spin accumulation in dual-injection lateral spin valves」, Applied Physics Letters, vol. 103, pp. 162403 1-4 (2013).
2. H. Idzuchi, Y. Fukuma, S. Takahashi, S. Maekawa, and Y. Otani, 「Effects of anisotropic spin absorption on the Hanle effect in lateral spin valves」, Physical Review B: Rapid Communications (accepted).

【4】 磁化測定にもとづく光による有機結晶の相状態と物性の制御

研究者 室蘭工業大学大学院工学研究科 准教授 飯森 俊文
共同研究者 北海道大学電子科学研究所 教授 太田 信廣

〔研究の概要〕

有機分子の結晶でありながら金属的な電気伝導をしめす物質である分子性導体は、金属―絶縁体相転移や超伝導など多彩な物理現象の宝庫として知られる。本研究では、分子性導体の磁気物性に着目し、光照射による磁化率の変化について研究を行った。有機超伝導体である κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br および β -(BEDT-TTF)₂I₃ の単結晶を用い、超伝導状態のマイスナー効果に由来する反磁性を観測した。cw レーザー光を照射することにより、反磁性磁化率の大きさが減少することを明らかにした。

〔研究経過および成果〕

光照射によって大きな物性変化を引き起こす物質の探索は、光で制御可能な新しいスイッチング材料の開発へつながることが期待される。また光照射による物性変化の研究は、物質の電子状態やダイナミクスの解明において有用であり、固体物性を理解するうえで基本的な情報を与える。

有機分子の結晶でありながら金属のような電気伝導をしめす物質である分子性導体は、多彩な物理現象の宝庫として知られる。また分子性導体は、分子の電子状態と物性が非常に密接に関連している物質であり、光照射による分子の電子状態や振動状態の変化が物性の著しい変化を引き起こすことが期待される。

Bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene (BEDT-TTF, Fig. 1)は、そのカチオンラジカルが様々な対イオンと塩をつくり、数多くの BEDT-TTF 塩は有機超

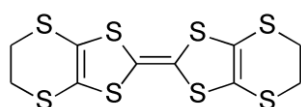


Fig. 1. BEDT-TTF.

伝導体となることが知られている。

超伝導状態を象徴する電気・磁気物性として、ゼロ抵抗とともに完全反磁性（マイスナー効果）をあげることができる。光による超伝導状態の変化を研究するうえで、磁気物性の測定は有力な手法になることが期待される。我々は、有機超伝導体である κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br および β -(BEDT-TTF)₂I₃ の単結晶を用いて、これらの超伝導状態における光作用について、磁気測定をもちいた研究を行った。

磁気測定には、カンタムデザイン社の MPMS 磁気特性測定システムを使用した。試料に光照射を行うために、測定システム専用の試料ホルダーを作成した。レーザー光のガイドとして光ファイバーを使用し、試料は石英ロッドを用いて保持した。試料と石英ロッドは、石英管に収めて用いた。光源には波長 447 nm の cw レーザー光を用い、光強度は ND フィルターによって調節し光パワーメーターを用いてモニターした。

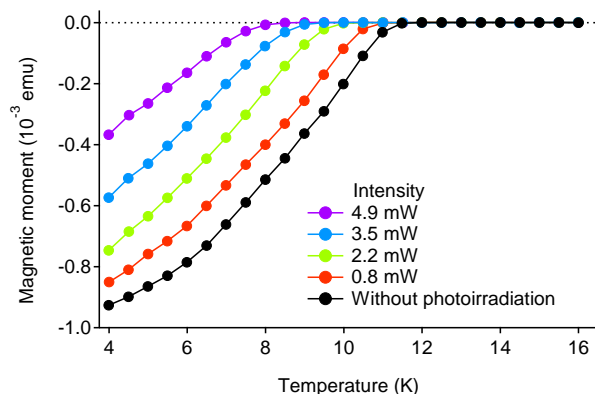


Fig. 2. Temperature dependences of magnetic moment measured with different photoirradiation intensities. Magnetic field was 20 Oe.

1. κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br

この結晶は $T_c \cong 11$ K において超伝導相へ相転移することが知られている。 T_c 周辺の温度において試料の磁気モーメントを測定した結果を Fig. 2 に示す。光を用いずに測定した場合、負の磁気モーメントすなわち反磁性が 11-12 K 以下において観測されており、超伝導状態のマイスナー効果によると考えられる。試料に光を照射しながら測定したところ、反磁性があらわれる温度が低温側へシフトする様子が見かけ上観測される。8.5 K における磁気モーメントに着目し、光による磁気モーメントの変化量と光強度の関係をプロットすると、Fig. 3 に示す結果が得られる。縦軸は、光照射なしの場合の磁気モーメント ($M(0)$) と光照射時の磁気モーメント ($M(I_{ph})$) との差を $M(0)$ で割った値である。光強度が比較的弱いとき、磁気モーメントの変化は光強度に対して線形依存性を示すことがわかる。

2. β -(BEDT-TTF)₂I₃

この結晶は $T_c = 7-8$ K において超伝導相へ相転移することが知られている。 T_c 周辺の温度におい

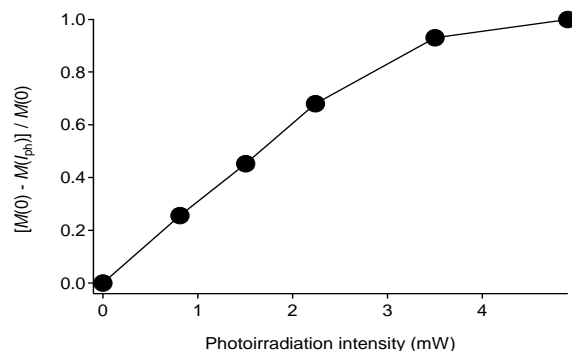


Fig. 3. Photoinduced change of the magnetic moment at 8.5 K as a function of photoirradiation intensity.

て試料の磁気モーメントを測定した結果、マイスナー効果による反磁性が T_c 以下の温度において観測された。光照射時の磁気モーメントを比較することにより、マイスナー効果に由来する反磁性磁化率の絶対値が光によって減少することが明らかになった。

以上をまとめると、有機超伝導体の磁気測定をおこない、マイスナー効果に由来する反磁性磁化率の絶対値の大きさが、光によって減少することを明らかにした。一方、電気伝導度の光による変化についても我々は研究を行っており、超伝導状態においてナノ秒パルスレーザー光を照射すると、電気伝導度が低下し抵抗が増加することをすでに明らかにしている。したがって電気伝導度と磁化率は、お互いに矛盾しない結果を与えていると考えられる。

【発表論文】

1. Iimori, T.; Fujiwara, M.; Ohta, N. Photoirradiation Effect on Magnetic Susceptibility in Organic Superconductors, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **2013**, 578, 44-49.

【5】 強磁性/非磁性合金の非平衡融体の精密熱物性計測

研究者 東北大学大学院工学研究科 助教 杉岡 健一

〔研究の概要〕

静磁場重畳電磁浮遊技術を利用し、高温融体 CuCo 合金の垂直分光放射率測定を行った。測定法として、疑似黒体と電磁浮遊した CuCo 合金試料からの放射光を分光器によりそれぞれ測定し、Planck の法則を用いて、さまざまな温度での垂直分光放射率を測定した。CuCo 合金の垂直分光放射率は今回測定した範囲内の組成では、温度に対して、正の依存性を持った。また、Cu の組成が、20-80%の範囲では、放射率は大きく変化しなかった。

〔研究経過および成果〕

1 緒言

単結晶成長プロセス、タービンブレードの精密鍛造及び精密溶接をはじめとして、高温融体材料プロセスの設計・最適化には数値シミュレーションが有効な手段である。正確なシミュレーションの実行には高精度な熱物性値が必要であり、高温融体の熱物性値の高精度測定法の開発が必須である。しかし、高温融体の熱物性値測定は、融体試料の反応性が高いため容器からの汚染の影響を受けやすく、また試料内に発生する流れの影響を受けるため、測定が非常に困難である。そこで我々の研究グループでは、上記の問題を解決した熱物性測定技術として静磁場重畳電磁浮遊技術を開発した¹⁾。今までに、本技術を利用した高温融体の放射率測定、特に比較的低い垂直分光放射率(≈ 0.1)を測定することを目的とし、熔融 Cu の垂直分光放射率測定を行った²⁾。そこで本研究では、本技術を利用した二元系合金の熱物性値測定の検討を目的とし、熔融 CuCo の垂直分光放射率を測定した。

2 実験方法

図 1 に測定に使用した電磁浮遊装置の概略図を示す。まず Ar-H₂ ガス雰囲気下にて、チャンバー内に設置されたグラファイト製の疑似黒体より放射される光子数をスペクトロメーター(本研究での測定波長範囲 780nm< λ <920nm)により測定し、温度を放射温度計により測定した。疑似黒体の温度を、高周波コイルの電流値により調節し、Planck の式に従いスペクトロメーターの校正(光子数と放射輝度の関係の所得)を行った。次に、同装置で電磁浮遊法を用い、純度 99.9999999%の固体 Cu 及び純度 99.9996%の固体 Co から作製した直径 7 mm の固体 CuCo 試料(Cu_xCo_(1-x), x=20,40,60,80)を融解・浮遊させ、測定試料から放射される光子数及び温度を測定し、黒体から放射される光子数との比より放射率を求めた。測定試料の温度調節は、試料に He ガスを吹き付けることにより行なった。測定に際しては、測定試料の移動及び表面振動を回避するために、超電導磁石を用いて鉛直方向に、2.5 T の静磁場を印加した。また、CuCo の液相線温度を利用し、放射温度計の校正を行った。

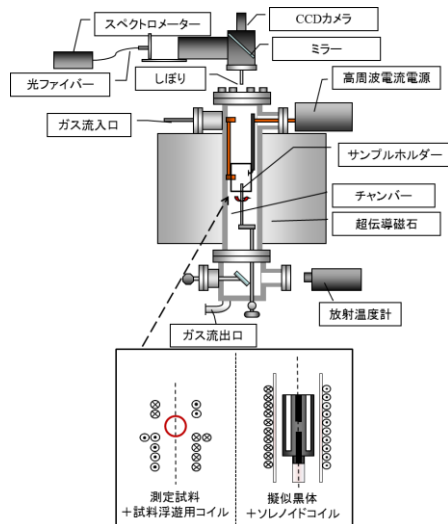


図1 実験装置概略図

3 結果と考察

擬似黒体の出力光子数と黒体の放射輝度は良好な線形関係を示した. そこで, この関係を利用して, スペクトロメーターにより測定される試料の放射光子数から放射輝度 $R_s(\lambda, T)$ を求め, 垂直分光放射率を決定した. 図2及び図3に, 波長 807 nm の各組成における熔融 CuCo 合金の垂直分光放射率の温度依存性及び組成依存性を示す. 図2から, 今回測定した範囲の各組成の垂直分光放射率には正の温度依存性があることがわかる. また図3から, 今回測定した各組成における垂直分光放射率は組成の影響は小さく, Co の垂直分光放射率(≒ 0.3)^[4]に近い値を示すことがわかる. これらの値と純 Cu の放射率を比較すると, 熔融 Cu に Co を僅かに添加すると, 放射率が急激に上昇することがわかる

4 結言

静磁場重畳電磁浮遊技術により, CuCo合金の垂直分光放射率の測定に成功にした。

【参考文献】

- [1] Y.Baba *et al.*, *Meas Sci Technol.* **23**, 045103, 2011.
- [2] R. Kurosawa *et al.* *Meas. Sci. Technol.* **24**, 015603, 2013.
- [3] K. Nagata *et al.*, *ISIJ International.* **37**, 399-403, 1997.
- [4] 高野ら, 第34回日本熱物性シンポジウム 富山, A212, 2013.

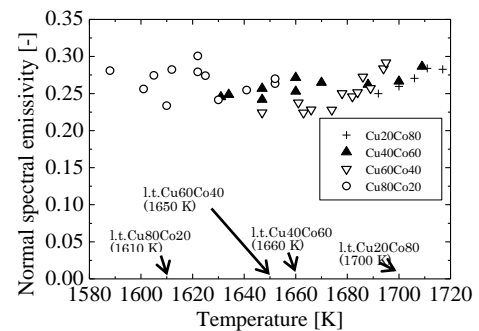


図2 波長 807 nm における熔融 CuCo 合金の垂直分光放射率の温度依存性: l.t.は液相線温度

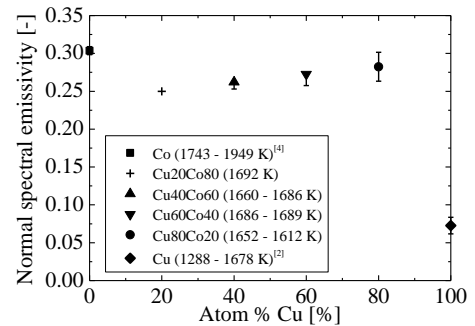


図3 波長 807 nm における熔融 CuCo 合金の垂直分光放射率の組成依存性

【発表論文】

1. Study on the effect of melt convection on phase separation structures in undercooled CuCo alloys using an electromagnetic levitator superimposed with a static magnetic field, K.-I. Sugioka, et al. submitted

【6】プラスチック上における高品質ゲルマニウム光吸収層の創出と太陽電池応用

研究者 筑波大学数理物質系 助教 都甲 薫

〔研究の概要〕

高効率な多接合型太陽電池の低コスト化には、従来用いられている高価な Ge 基板を、安価な絶縁基板上の Ge 薄膜に置き換えることが有効となる。本研究では、安価・軽量・フレキシブルなプラスチック基板上に、Ge 薄膜を高品質形成することを目的として研究を行った。その結果、申請者の独自技術である「Al 誘起成長法」を高度化することによって、ポリイミド基板(耐熱温度:約 400°C)上に、大粒径(約 100 μm)かつ結晶方位の揃った Ge 薄膜を低温形成(325°C)することに成功した。さらに、より安価で一般的なプラスチックであるポリマー(耐熱温度:約 200°C)基板上への展開を目指し、Al 誘起成長における成長促進を図った結果、180°Cもの低温において、結晶粒径が 10 μm、(111)方位配向率が 90%に及ぶ Ge 結晶薄膜を形成することに成功した。多接合型太陽電池のフレキシブル基板展開の可能性を拓く成果である。

〔研究経過および成果〕

申請者はこれまでに、ガラス上における Si 薄膜の低温・大粒径成長技術として実績のある Al 誘起成長(AIC)法を Ge に応用する研究を行ってきた。AIC 法とは、ガラス基板上に Al 層と非晶質 Si 層を堆積して熱処理することによって、Si 原子の Al 層への拡散、固溶、析出との過程を経て Al 層と Si 層の層交換が起き、ガラス基板上に大粒径(10~100 μm)の多結晶 Si 層を得る手法である。申請者は、Al 層と非晶質 Ge 層の界面に拡散制御層を形成すると共に成長温度の低温化を図り、ガラス基板上に大粒径 Ge(111)薄膜を低温(325°C)で形成することに成功している。本研究では、申請者の独自技術である Ge の AIC 法をシリーズとし、プラスチック基板上における大粒径・多結晶 Ge 層の結晶成長技術の構築を目的として研究を遂行した。具体的には、(1)ポリイミド基板上における Ge 層の AIC 成長、(2)ポリマー基板展開に向けた Ge-AIC の極低温化の 2 項目を検討した。

(1)ポリイミド基板上における Ge 層の AIC 成長

ポリイミドは耐熱性(約 400°C)のプラスチックであり、通常の Ge 層の AIC 成長(325°C)に耐え得る基材である。ポリイミド基板上に直接 AIC-Ge 層を形成した場合、良好な結晶成長に必須となる「Ge 層と Al 層の層交換」が誘起されなかった。即ち、ポリイミド基板が AIC 成長に悪影響を与えることが判明した。そこで、SiO₂ 薄膜を緩衝層として基板上に形成し、その上で AIC 成長を行った結果、ガラス基板上と同等の結晶性を有する大粒径(約 100 μm)の Ge(111)薄膜を形成することに成功した(特願中)。フレキシブルな基板上に、大粒径かつ方位の揃った Ge 層を結晶成長した初めての例である。

(2)ポリマー基板展開に向けた Ge-AIC の極低温化

これまで Ge 層の AIC 成長では、325 °Cで 100 時間の熱処理が必要であった。もし、熱処理温度を 200 °Cまで低減することができれば、より安価で一般的なプラスチックであるポリマーへの展開が可能とな

る。そこで、Ge の AIC 成長温度を低温化する手法を検討した。

Ge の AIC 成長の機構を以下に簡単に記述する。

- ①Ge 原子が AlO_x 界面層を通過し、Al 中に拡散。
- ②Al 中の Ge 濃度が過飽和状態に到達。
- ③過剰な Ge 原子が結晶状態で析出。

以上を鑑み、申請者は「Al 中に Ge 原子をあらかじめドーピングしておく、過飽和になるまでの時間を短縮すること」および「界面層を Ge 拡散のより速い材料に変更すること」を着想した。まず、Al 中への Ge 原子ドーピングのため、Al 層の下部に薄い Ge 層 (1-10 nm) を挿入することを検討した。挿入 Ge 層の厚さをパラメータとして AIC-Ge 層の成長温度、および結晶粒径を評価した結果、挿入 Ge 層が厚すぎると (≥ 3 nm) 核発生密度が高くなり、成長は促進できるものの結晶粒径が著しく縮小することが判明した。結果的に、挿入厚さを 1 nm としたときに、成長の促進と大きな結晶粒を両立でき、従来よりも 50 °C 低温となる 275 °C、100 時間との熱処理条件で、平均粒径が約 100 μm に及ぶ(111)面配向多結晶 Ge 層の形成に成功した。

次に、Ge 原子の拡散速度向上のため、界面層を自然酸化 Ge (GeO_x) に変調することを検討した。 GeO_x 層は、Ge 膜 (2 nm) を大気暴露することにより形成した。試料に 300 °C、10 時間の熱処理を施した結果、層交換成長は誘起されたものの、AIC-Ge 層はランダム方位の小さな結晶粒 (約 1 μm) で構成されることが判明した。しかしながら、成長温度を低温化していくことにより結晶性は改善され、225 °C の低温で、平均結晶粒径が 57 μm 、(111)面方位配向率が 94% に及ぶ良好な多結晶 Ge 層の形成に成功した。

以上の「Ge 初期ドーブ」と「 GeO_x 界面」を重畳することにより、180 °C との極低温において、多結晶

Ge(111)薄膜を非晶質基板上に形成することに成功した。結晶粒径は 12 μm まで縮小したものの、従来法で形成した非晶質絶縁体上の Ge 薄膜と比して、温度・粒径・方位制御の点で圧倒的に優れる成果である。ポリマー基板上での成長を実証後、デバイス実証に向けて研究を推進していく。

本研究を支えていただいた貴財団の研究助成に厚く御礼申し上げます。

〔発表論文〕

1. Double-layered Ge Thin Films on Insulators Formed by Al-induced layer exchange process
K. Toko, K. Nakazawa, N. Saitoh, N. Yoshizawa, N. Usami, and T. Suemasu:
Crystal Growth & Design Vol. **13**, 3908 (2013).
2. Low-temperature (180 °C) formation of large-grained Ge (111) thin film on insulator using accelerated metal-induced crystallization
K. Toko, R. Numata, N. Oya, N. Fukata, N. Usami, and T. Suemasu:
Appl. Phys. Lett. Vol. **104**, pp. 022106 (2014).
3. Al-induced Crystallization of Amorphous-Ge Thin Films on Conducting Layer Coated Glass Substrates
K. Nakazawa, **K. Toko**, N. Usami, and T. Suemasu:
Jpn. J. Appl. Phys. (in press).
4. Structural Characterization of Polycrystalline Ge Thin Films on Insulators Formed by Diffusion-enhanced Al-Induced Layer Exchange
R. Numata, **K. Toko**, N. Oya, N. Usami, and T. Suemasu:
Jpn. J. Appl. Phys. (in press).
5. Growth promotion of Al-induced crystallized Ge films on insulators by inserting Ge membranes into Al layers
R. Numata, **K. Toko**, N. Usami, and T. Suemasu:
Thin Solid Films (in press)
6. Orientation control of Ge thin films by underlayer-selected Al-induced crystallization
K. Toko, K. Nakazawa, N. Saitoh, N. Yoshizawa, N. Usami, T. Suemasu (submitted)

【7】 ランダム金属ナノ構造によるシリコンナノ結晶の自然放出割合の制御

研究者 群馬大学理工学研究院電子情報部門 助教 中村 俊博

〔研究の概要〕

本研究では、直径数ナノメートルのシリコン結晶であるシリコンナノ結晶の量子サイズ効果に起因した室温での可視域発光の発光割合の改善を目指して、不均一(ランダム)な形状の金属ナノ粒子で構成されるランダム金属ナノ構造によりシリコンナノ結晶の自然放出割合の制御を試みた。ランダム金属ナノ構造(半連続金薄膜)を堆積したシリコンナノ結晶薄膜の発光時間応答から自然放出割合の分布関数を見積もり、分布関数の平均値・分散の波長依存性を理論計算と比較した。その結果、半局在型表面プラズモンと、ナノ結晶の励起子との相互作用により、自然放出割合が変化したことがわかった。また、両者の相互作用の強さはプラズモン共鳴波長に依存することがわかった。さらに、ランダム金属ナノ構造の不均一な形状に起因した近接電磁場の不均一なゆらぎにより、ナノ結晶の自然放出割合の分散が増加することを見出した。

〔研究経過および成果〕

本研究では、シリコンナノ結晶が示す室温での可視域発光の発光割合の改善を目指して、不均一(ランダム)な形状の金属ナノ粒子で構成されるランダム金属ナノ構造によりシリコンナノ結晶の自然放出割合の制御を試み、ナノ構造内の表面プラズモン励起に着目することで、制御メカニズムの解明を行った。

シリコンナノ結晶として、陽極化成法により作製した140 nm程度の多孔質層を持つ多孔質 Si (PSi)を用いた。PSi 上にランダムナノ構造として、質量膜厚 1~5 nm の金薄膜を堆積させた。堆積させた金薄膜は、不均一な形状をもつ島状ナノ粒子で構成される半連続膜である[Fig. 1(a)]。これらの半連続膜は Fig. 1(b)に

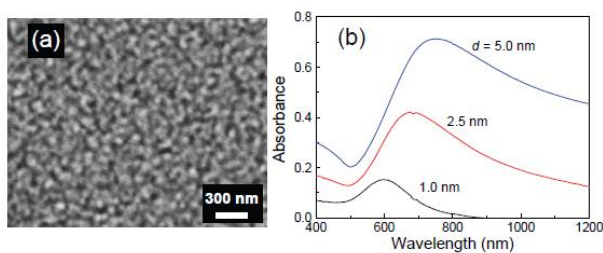


Fig. 1

示すように、表面プラズモン励起に伴う吸収を示す。これらの試料に対して、発光時間応答を測定した。

Fig. 2(a) に発光時間応答の測定結果(波長 660 nm)を示す。図より、半連続膜を堆積することで、発光時間応答の減衰が早くなっていることがわかる。また、半連続膜の膜厚が大きいほど、変化量が大きくなっている。これらの時間応答から、発光遷移割合を見積もるために、遷移割合の対数正規分布を仮定したモデルによりフィッティングを行った。図中の実線がフィッティング結果を示す。図より、フィッティングカーブが実験結果をよく再現していることがわかる。フィッティングから得られた発光遷移割合の分布関数は、半連続膜を堆積することで、分布関数がブロードになり、ピーク位置もシフトした。これは、遷移割合の平均値及び、分散の増加を示唆している。

発光遷移割合の分布関数より、遷移割合の平均値を、発光波長に対してプロットしたものを Fig. 3(a)に示す。図より、波長が長くなるにつれて遷移割合が増加

していることがわかる。また、その値は半連続金薄膜の質量膜厚にも依存し、質量膜厚 5.0 nm においてすべての波長で最大となっている。

以上の結果を解析するために、発光遷移割合の理論計算を行った。理論計算では5層モデル[空気(Air)/半連続金属層(Au)/自然酸化膜(SiO₂)/発光層(PSi)/基板(Si)]を想定した。発光層(PSi)を点双極子として近似を行い、双極子の電場を平面波展開し、各平面波成分と表面プラズモンなどの種々のモードとの結合によるエネルギーの散逸を計算することで、遷移割合の計算を行った。計算では、各層の界面におけるフレネルの反射率を用いるため、各層の誘電関数が必要となる。SiO₂ 及び、Si 層では文献値を使用した。Au 及び PSi 層では、実際に試料に対して分光エリプソメリー測定を行い、直接、誘電関数を求めた。Au 層は半連続膜であるが、ある有効膜厚をも

つ均一な層としてモデル化した。誘電関数には、個々の金ナノ粒子に励起される局在型の表面プラズモン励起が相互に結合したモード(半局在型表面プラズモン励起)にともなう吸収が見られ、吸収共鳴波長は質量膜厚に依存した。

理論計算と実験との比較には、シリコンナノ結晶の発光量子効率(q)をフィッティングパラメータとして扱った。図の挿入図は発光量子効率(\square)を表す。また、発光量子効率から得られる、シリコンナノ結晶の輻射遷移割合(\bullet)、非輻射遷移割合(\square)も併せてプロットした。見積もったパラメータは、文献値($+$)とよく一致しており、妥当と考えられる。

Fig. 3(b) 中の実線で、上で述べた発光遷移割合の理論計算の結果を示す。図より、実験と理論計算結果がよく一致していることがわかる。このことは、上で想定した計算モデルが妥当であり、半連続膜の堆積による遷移割合の変化と波長依存性が、主に薄膜内の半局在型表面プラズモン励起に起因していることを示している。さらに、同様に解析によって、遷移割合の分散の金属膜厚依存性が、ランダム金属ナノ構造の不均一な形状に起因した近接電磁場の不均一なゆらぎを反映していることも明らかにした。

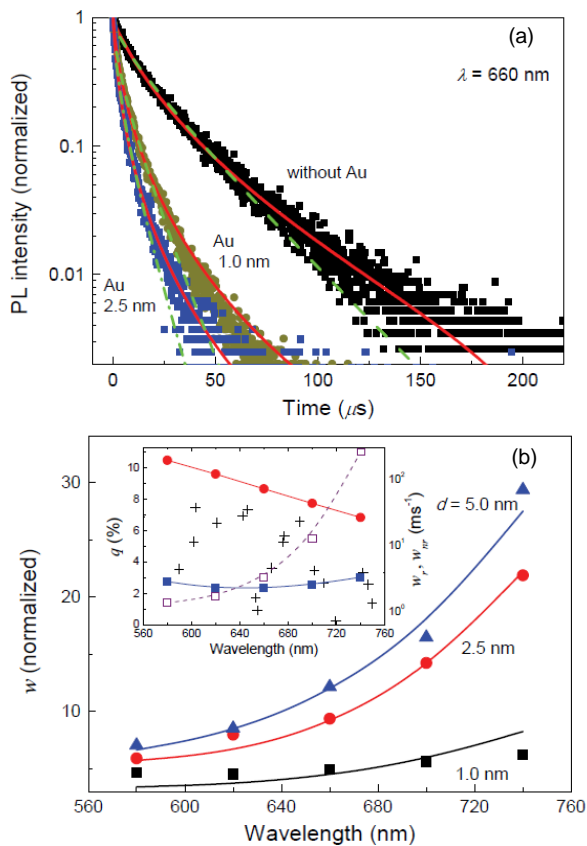


Fig. 2

[発表論文]

1. T. Nakamura, B. P. Tiwari, and S. Adachi, "Strongly modified spontaneous emission decay rate of silicon nanocrystals near semicontinuous gold films," *Optics Express* 20, 26548 (2012).
2. T. Nakamura, T. Moriyama, N. Nabatova-Gavain, and S. Adachi, "Emission decay rate for a light-emitter on thin metal films," *Japanese Journal of Applied Physics* (accepted).

【8】 STM ナノ分子電子スピン分光による超小型・分子磁気デバイスの創製

研究者 千葉大学大学院融合科学研究科 特任准教授 山田 豊和

【研究の概要】

情報社会の急速な発展とそれに伴う大規模な消費電力問題を解決する切り札として、磁気情報デバイスの微細化は待ったなしの状況にある。我々は、大きさ 1 ナノメートル(十億分の一メートル)の単一有機分子を用いた新たな世界最小・磁気情報デバイスの創製と、そのための電子特性の解明を目指してきている。原子分解能を有する走査トンネル顕微鏡を駆使して、単一有機分子1つ1つを観察しながら直接電子測定評価を行う。 π 電子系単一フタロシアニン分子を用いた一連の研究より、単一有機分子の電子状態は、接する基板の電子状態の影響を大きくうけることが分かった。電極材料をうまく選択することで、単一有機分子に新たな電子状態を発現させることに成功した。さらに、これまで単一有機分子デバイスは極低温でなくては機能しないと考えられてきたが、室温でも機能する手法を発見した。

【研究経過および成果】

1ナノメートル(十億分の1メートル)の微小な単一有機分子が、次世代の省エネ・省資源・高機能磁気デバイスとして有益であるかを実証するためには、現在既に実用化している数十ナノメートル以上の分子膜デバイスと同様の検証手法では限界がある。通常分子膜であれば結晶構造はアモルファスのような状態となり、分子と接する基板との電子相互作用は全体の伝導特性に対して小さな影響に留まる。しかし、単一有機分子の場合、これまで無視されてきた基板の原子構造に対する有機分子の吸着構造や、基板と分子との界面で発現する新たな電子スピン構造が、単一有機分子デバイスの伝導特性を決定する重要な鍵となる。

単一有機分子を正確に観察するために、超高真空・極低温 STM(走査トンネル顕微鏡)を使う。この顕微鏡ではプローブとして原子レベルで鋭い探針を使用する。プローブ先端から電子スピンを単一分子に

注入することで、単一有機分子内部の電子スピン状態を直接測定できる。

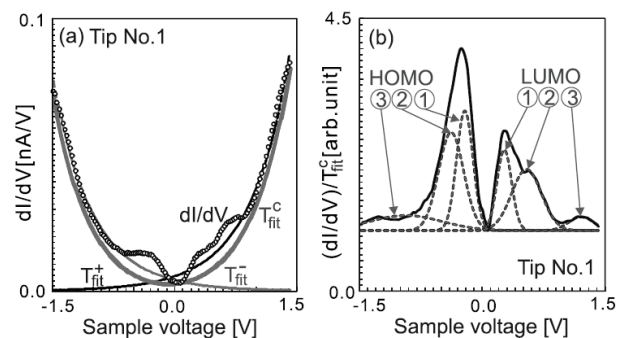


図1 : Cu(111)上の単一有機分子の電子状態再現

電子スピン状態を測定するために、STM では微分伝導曲線を測定する。これを STM 分光測定と呼ぶ。特にデバイス伝導特性はフェルミ準位近傍の電子状態で決まるため、フェルミ準位近傍の電子状態を正確に知ることが重要である。STM 分光では、このフェルミ準位近傍 $\pm 2\text{eV}$ の電子状態を正確に測定できる。これまで微分伝導曲線を測定すれば分子の電子状態が測定できると思われてきた。しかし、我々の精密な STM 分光測定の結果、この手法では誤った電子

状態の情報を得てしまう事がわかった。そこで我々は、測定した微分伝導曲線を、トンネル確率関数で規格化することで微小な電子状態を再現できることを実証した。

図1(a)は実際に Cu(111)上の単一有機フタロシアニン分子から得た STM 分光による微分伝導曲線(○)である。これをフィットしたトンネル確率関数(T)で規格化することで分子の電子状態が再現できる。図1(b)に再現した電子状態を示す。Gaussian 関数フィットによりフェルミ準位近傍に複数の電子状態があることを確認できた。

この新たな分光手法を用いて、単一有機フタロシアニン分子を異なる電極材料に吸着し、電子状態測定を行った。絶縁薄膜基板、貴金属基板、磁性基板という異なる電極材料に分子を吸着した結果、電極材料によって、同じ単一有機分子であっても全く異なる電子状態を有することを発見した。気相では、単一有機分子は HOMO/LUMO 状態を有する真性半導体である。MgO 絶縁体薄膜に吸着した場合、単一有機分子は気相と同じ電子状態を有する。しかし、貴金属 Cu(111)や Ag(001)基板に吸着すると、ギャップはなくなり金属的特性を示した。さらに、磁性 Fe や Mn 基板に吸着した場合、大きな電子相互作用が生じ新たな電子スピン状態を単一分子が有することが分かった。このことは、単一有機分子磁気デバイス創製にむけて、非常に重要な意味をもつ。つまり、単一有機分子の電子状態は電極材料により選択的に制御できることを意味する。

これまで単一有機分子の研究は主に極低温で行われてきた。なぜなら室温で単一有機分子は基板上を熱拡散し膜となり、室温では単一有機分子デバイスは実現できないと考えられているからである。この

事実はデバイス応用にむけて大きな問題である。しかし、我々は本研究を行う中で、特定の電極材料を用いることで、室温でも熱拡散することなく安定な電子スピン状態を発現できることを発見した。これにより、単一有機分子を用いた新たな磁気デバイス創製がより実現に近づいたと考えている。

[発表論文]

1. How contacting electrodes affect single π -conjugated molecular electronic states: LDOS of phthalocyanine nano molecules on MgO(001), Cu(111), Ag(001), Fe(001) and Mn(001), S. Nakashima, Y. Yamagishi, K. Oiso, T. K. Yamada, Japanese Journal of Applied Physics (Selected Topics in Applied Physics: Nano Electronics and Devices: Characterization and Control of Nano Surfaces and Interfaces), 52 (2013) 110115.
2. Recovery of nanomolecular electronic states from tunneling spectroscopy: LDOS of low-dimensional phthalocyanine molecular structures on Cu(111), Y. Yamagishi, S. Nakashima, K. Oiso and T. K. Yamada, Nanotechnology 24 (2013) 395704.

【9】新規希薄磁性体を用いた超低電力にて動作する磁化反転素子への応用

東京大学大学院理学系研究科 准教授 岡林 潤

〔研究の概要〕

超低消費電力にて動作する磁気記録素子の開発を目指したスピントロニクスの研究分野において、微弱な電流で磁化を反転させる材料の開発は必須となっている。室温にて微弱な電流にて磁化反転を実現させる材料開発指針としては、室温にて強磁性を示す強磁性半導体の開発がブレイクスルーとなりうる。本研究では、新規な室温強磁性半導体の作製を目指して、二種類の磁性不純物を同時に添加することによる交換相互作用の利得に着目した物質設計を行った。酸化物半導体 SnO_2 へ 2 元素を共ドーピングにした物質設計を行い、磁気物性・電子物性を調べ、強磁性発現機構には、酸素欠陥準位の磁気分裂が本質であることが判った。そして、この材料系を用いたトンネル磁気抵抗素子の作製を現在進めている。

〔研究経過および成果〕

磁性体を用いた低消費電力動作による記録媒体等の創出を目指したスピントロニクスの研究分野において、トランジスタ動作をスピン制御により行う手法や、電流に代わるスピン流を用いた磁化反転により、ジュール熱によるエネルギー散逸を抑えた磁気記憶素子 (MRAM) 開発などが注目されている。現在、素子化が進められている強磁性金属を用いた室温動作 MRAM 素子では、磁化反転に必要な注入電流密度が 10^6 A/cm^2 程度に大きくなり、発熱が避けられない点が問題となっている。今後克服すべき課題は、消費電力と発熱の低減であり、これらを解決する材料の開発が必要とされている。Fe, Co 等の金属強磁性体を用いた素子の場合には、室温にて動作するが、磁化を反転させるための電力が大きい。一方、半導体 GaAs に Mn をドーピングした希薄磁性半導体を用いた場合は、動作電力を 2 桁下げられるが、強磁性転移温度が室温以下であるために、実デバイスへの応用ができない。この 2 つのジレンマを解消する材料の

開発に申請者は着目している。それには、酸化物の酸素欠陥を利用した大きな交換相互作用が有効となる。本研究では、上記の問題を克服し、室温・低電力の条件にて磁化反転を可能にする材料として、2 種類の遷移金属を共ドーピングした酸化物半導体 SnO_2 をベースとした希薄磁性体に着目する。この材料は、室温で強磁性を示し、希薄に磁性イオンが分布しているため、磁化反転に必要な電力が少なくて済むこと、枯渇の心配のない元素のみから構成できる特徴を有する。本研究では、この材料系の合成法を確立し、室温で低電力にて動作する磁気記録素子を実現させるべく、希薄磁性体を用いた磁気抵抗素子の作製に向けた材料開発を目的とする。

試料の合成には、ゾル・ゲル法と電気化学による堆積法を組み合わせた新しい方法を用いた。この方法により、 500°C 程度の比較的低温での酸化焼成が可能となり、磁性イオンの凝集を抑えることができる。本助成により、加熱雰囲気法の制御法を見出し、酸素欠陥量を制御できる合成法を検討した。

Fe や遷移金属を 5 %程度ドーピングするまでは、母体の SnO₂ のルチル型結晶構造を示した。ドーピングによる X 線回折ピークのシフトから Sn サイトを遷移金属が置換していることが判った。また、透過型電子線顕微鏡にて格子像も確認した。

磁化測定の結果から、図 1 のように、組成により飽和磁化、保磁力を制御できることが判った。特に、Fe と Mn を SnO₂ に共ドーピングした際には、組成の増加に伴い磁化は増加するが、Fe と Ni を共ドーピングした SnO₂ では、Ni の増加により磁化は減少する傾向が判った。これは、Fe と Ni の反強磁性的相互作用の増大に起因している。熱力学的に安定な Mn フェライト (MnFe₂O₄) や Ni フェライト (NiFe₂O₄) が析出した場合には強磁性的相互作用となることから、本実験結果は説明できない。そのため、Sn サイトを置換した Fe や遷移金属が強磁性発現に関与していることが判った。一方、Fe と V を共ドーピングした際には、組成の増加と共に強磁性が抑えられる結果となった。このように、共ドーピングする遷移金属においても、元素により物性が大きくことなることを見出したことも本研究の成果である。また、加熱温度に存して磁化特性が変化するのは、酸素欠陥量の増減に依存することを突き止めた。これらの 2 元素共ドーピングによる材料探索は、今後の材料物性開発に向けて必要な技術となる。

酸素欠陥が誘起する強磁性の実験的証拠を用いて、磁氣的なポーラロン (数ナノメートル径) の形成が考えられる。そして、d 電子数の異なる共ドーピングの際に強磁性が増強されることを考えると、異なる d 電子数の磁性イオン間を酸素欠陥により生成した磁気ポーラロンを介したキャリアの

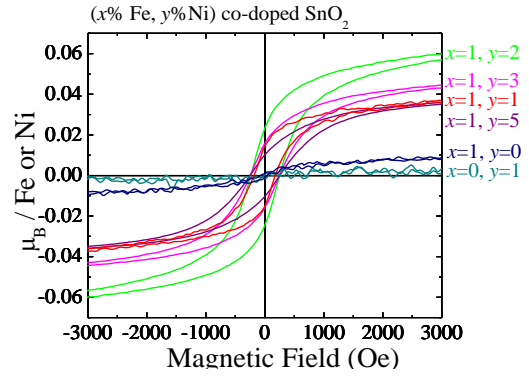


図 1: Fe, Ni を共ドーピングした SnO₂ の磁気特性。

ホッピングが室温での強磁性を安定化させているものと考えられる。これは、異なる d 電子数を持つ化合物中の二重交換相互作用と類似したものと考えられ、磁気ポーラロン間において、キャリアのホッピングによる運動エネルギーの利得が生じているものと考えている。これらのポーラロンの重なりが磁氣的な交換相互作用を増強するものと考えられる。これは、新しい物性物理学の創出に繋がる知見と考えている。

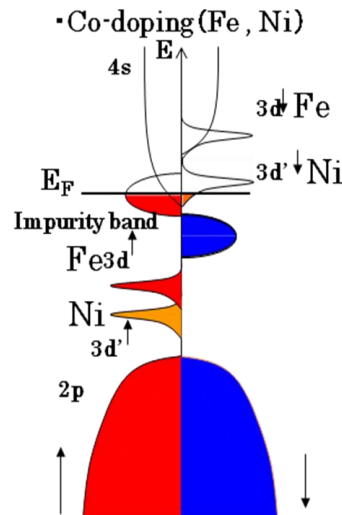


図 2: Fe, Ni 共ドーピング SnO₂ のバンド構造の模式図。

[発表論文]

1. J. Okabayashi et al, Mossbauer study of TM co-doped SnO₂, Hyperfine Interactions **217**, 99 (2013).
2. 岡林潤他、放射光学会 2013.

【10】 無線エージェントを利用した高スループット・低消費電力・自立分散無線システム

研究者 信州大学工学部 准教授 田久 修

〔研究の概要〕

スマートフォンなどのセルラーシステムに対して低コスト化を実現する基地局の自立制御機能と、高いスループット(伝送容量)を実現する基地局間でのエージェント packets 交換について検討した。まず、比較対象として高コストな複数基地局連携運用時の伝送容量を評価した。次に、消費電力の削減に有効な基地局機能の停止(スリープ)を適用した際の伝送容量を評価し、伝送容量の劣化を抑制するエージェント packets 交換によるスリープ計画を検討した。シミュレーション評価を利用し、エージェントとスリープを併用した低消費電力と高い伝送容量を両立するセルラーシステムを考察する。

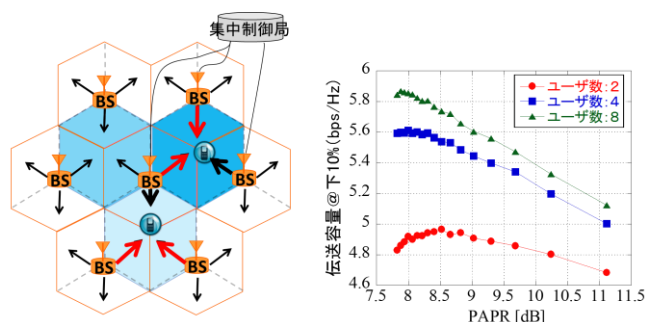
〔研究経過および成果〕

1. はじめに

近年、スマートフォンの普及が進み、インターネットを利用したアプリケーション(ソーシャルネットワーク、ナビゲーションなど)が普及し生活に浸透している。よって、無線サービスを提供する携帯電話会社は、携帯電話網の安定的な整備が求められる。しかし、基地局増設が高コストであることや運営に必要な電力消費が大きくなること安定した携帯電話網への課題となっている。

本研究課題では、低コストでかつ電力消費を削減するエージェント型の基地局運用について検討を進めた。エージェント型の基地局運用とは、基地局間の相互関係の情報を記したエージェント packets を交換することで、システム全体の効率的な運用を目指すと同時に、相互連携を簡易にすることで運用コストを抑える方法である。本課題では、有効性検証の1つとして、基地局を定期的に停止するスリープ機能とエージェントを併用した無線システムを検討する。

2. 基礎比較検討(完全連携セルラーシステムに



(a) 基地局(BS) 連携セルラーシステムの構想(光ファイバなどでBS間を接続して並列伝送を実現し高速大容量化)

(b) 評価結果. 電力増幅器の有効電力を決定するPAPRを適切に制御することで、最大10%程度の伝送容量の拡大が可能

図1 集中制御型セルラーシステムにおける検討

における消費電力の削減と大容量化検討)

図 1(a)に示すように、複数基地局間で自由に情報が交換できる連携システムを検討する。ここで、基地局送信機の消費電力の 1/4 を占める増幅器に着目する。増幅器から出力できる有効電力は変調信号の振幅変動 (PAPR) が小さいほど高い。消費電力削減を狙い消費電力一定の条件で PAPR を変化させたときの基地局連携システムの伝送容量を評価した。評価結果を図 1(b)に示す。結果から、最適な PAPR の値が存在するため、電力消費の有効活用には、PAPR の制御が必要不可欠であることがわかった。

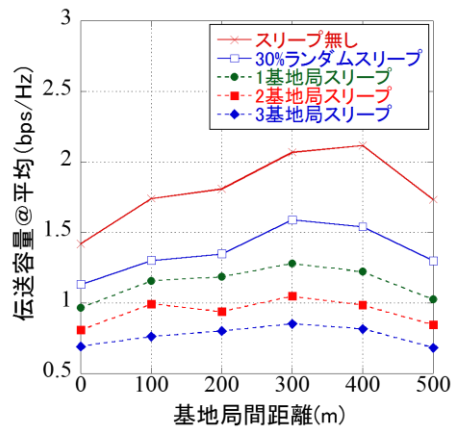


図3 スリープ適用による伝送容量低下が認められる。特に複数の基地局が同時にスリープした場合には大幅な伝送容量の低下が認められる。

3. 自立型セルラーシステムにおけるスリープ制御機能

2 節の連携システムと対称的に、各基地局が自立したセルラーシステムを検討する。消費電力の削減効果を評価するため、一定の停止機能であるスリープ機能を適用した。図2に結果を示す。図の横軸は、基地局間の配置間隔を示し、エリア内に無作為に基地局を配置した際に、基地局間が近接する最小の距離を示している。図の“スリープ30%”は評価期間中の三割の時間がスリープした場合を示している。結果より、スリープの適用によってスループット低下が認められる。その理由として、1～3の近接基地局が同時にスリープした結果をみると、伝送容量が大きく劣化していることがわかった。これは図3にあるように、基地局は相互のエリアを変えられるため、ある基地局が停止すると周辺基地局がエリアを拡大し、不通となるエリアを抑制する。しかし、複数の基地局が同時に停止した場合、起床する基地局のエリアが過剰に広がるため、スループットが低下した。そこで、周辺基地局の間でスリープのスケジュールを交換するエージェントパッケージを利用して、複

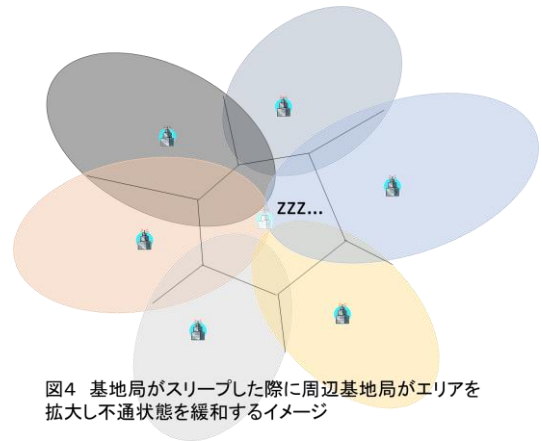


図4 基地局がスリープした際に周辺基地局がエリアを拡大し不通状態を緩和するイメージ

数基地局の同時スリープを回避する方法が有効であることがわかる。このようにエージェントとスリープを併用するシステムが導出され、現在、達成する伝送容量の評価を進めている。

[発表論文]

1. Osamu Takyu, et al., “Resource Block Assignment to Reduce Peak to Average Power Ratio in Multi-User OFDM”, IEICE Trans. Commun. (Conditional Accepted)
2. Ryo Myoenzono, Osamu Takyu, et al., “Effect of PAPR Reduction to BS Cooperation MIMO Systems under Multi-Cell Environment,” IEEE RWS2014, pp.127-129, January 2014.
3. 妙円 諒, 田久 修 他, “動的RB割り当てによる PAPR 低減法を適用した基地局連携 MIMO システムにおけるマルチセル環境評価,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-106, 2013 年 3 月
4. 妙円 諒, 田久 修 他, “マルチセル環境における基地局連携 MIMO システムによる PAPR 低減法の適用効果”, 電子情報通信学会無線通信システム研究会(RCS), pp.67-71, 2013 年 6 月
5. 下畑 宏次, 田久 修 他, “セルラーシステムにおけるスリープ制御の検討” 電子情報通信学会総合大会 2014 年 3 月(投稿済み, 発表予定)

【11】 ナノ磁気ピクセルをもつフルパララックスフルカラー3次元ディスプレイの開発

研究者 豊橋技術科学大学大学院工学研究科電気・電子工学系 講師 高木 宏幸

【研究の概要】

自然な3次元像を再生する表示技術としてホログラフィディスプレイがある。広視野角のディスプレイ開発にはナノスケールの磁気ピクセルが重要となる。これまで我々は磁区に着目し1 μm の磁気ピクセルのディスプレイを開発し、視野角30度の3次元ディスプレイを開発してきた。しかしながら、再生像は緑単色のみであった。本研究では、磁気光学3次元ディスプレイのカラー化の基礎研究として、光の3原色の加法混合による中間色の再生を目的とした。赤(R)緑(G)青(B)各波長に対し磁性体膜厚を設計し、空間分割方式の再生系を用いた中間色の表示を行った。表示した像についてガモット図を用いて中間色の評価を行った。これらの結果をもとに、最終的にRGのカラーの3次元像を再生した。この結果から、フルパララックスフルカラー3次元ディスプレイの基礎が確立できた。

【研究経過および成果】

【背景】

自然な3次元像を再生できる表示技術としてホログラフィが注目されている。我々は、ホログラムの表示に磁気光学効果を使用した磁気光学3次元ディスプレイの開発を行ってきた。磁性膜に可視光領域で優れた磁気光学特性を示す希土類置換型イットリウム鉄ガーネット(BiDy:YIG)を使用することで、広視野角の緑色単色像が再生できている。しかしながら、これらは緑単色の参照光で、緑用に設計された磁性体の単色光の再生像であった。

本研究では、磁気光学3次元ディスプレイのカラー化の基礎研究として、光の3原色の加法混合による中間色の再生を目的とした。赤(R)緑(G)青(B)各波長に対し磁性体膜厚を設計し、空間分割方式の再生系を用いた中間色の表示を行った。表示した像についてガモット図を用いて中間色の評価を行った。これらの結果をもとに、最終的にRGのカラーの3次元像

を再生した。

【実験方法】

マトリクスアプローチ法を用いて、磁性膜への入射光に対する1次回折光の比である光利用効率が最大となる膜厚を求め、各色のホログラムを再生するための磁性体膜厚を設計した。照明光源の波長は、R:633 nm, G:532 nmである。RGの中間色の表示を行うため、Fig. 1に示すRG合成用空間分割方式の再生系を構築した。各色の像を磁性膜から再生し、光学的に合成することで中間色を表示した。磁性膜の材料はBiDy:YIGであり、イオンビームスパッタ装置を用いて各色の設計膜厚で形成した。作成した磁性膜にはRGそれぞれの像を再生できるホログラムを記録した。再生像の中間色を評価するために、赤色と緑色の合成像について照明光源の強度を変化させてsRGBの色域を持つカメラで撮影を行った。撮影像から抽出したRGB256階調値をもとに、デバイスで

表示可能な色域を示す Yxy 表色系ガモット図を作成した. 以上の結果をもとに 3D-RG 合成像の表示を試みた.

【実験結果】

磁性膜の膜厚は, R:2.0 μm 以上, G:1.9 μm であり, それぞれの光利用効率 は R : 1.83×10⁻² %, G : 3.58×10⁻² %となる. この磁性膜を用いて, 同じ輝度の色を再生する場合, 磁性膜前でのレーザーのパワー密度の比は, R:G = 4.93:1 となる.

RG 合成像について, 作成したガモット図を Fig. 2 に示す. RG 合成による中間色が sRGB における緑色・赤色の間の直線上に現れた. これは赤色と緑色のみを合成したためであり, 本方式で中間色が再生できた. この結果をもとに RG 合成で表示した 3 次元像を Fig. 3 に示す. 表示像は, RG 単色および中間色である黄色を持つ球が再生できている. 今回の結果から, 磁性膜に記録されたホログラムを用いてフルパララックスの RG カラー像の再生ができた. 本結果に青色による再生像を加えることで, 表示可能な色域は現在一般的に用いられている sRGB の規格を満たすことができると考えられる. 今後は, 今回得た知見をもとに, 青色の像の再生を行いフルパララックスフルカラー 3 次元ディスプレイを開発する予定である.

〔国際会議〕

1. K. Nakamura, K. Kudo, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim, M. Inoue, “Colorization of magneto-optic dimensional displays with magnetic garnet films”, Intermag2014, HV-02, Germany (2014).

(採択済み)

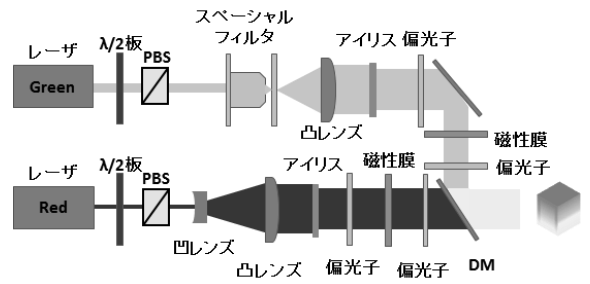


Fig. 1 空間分割方式再生系

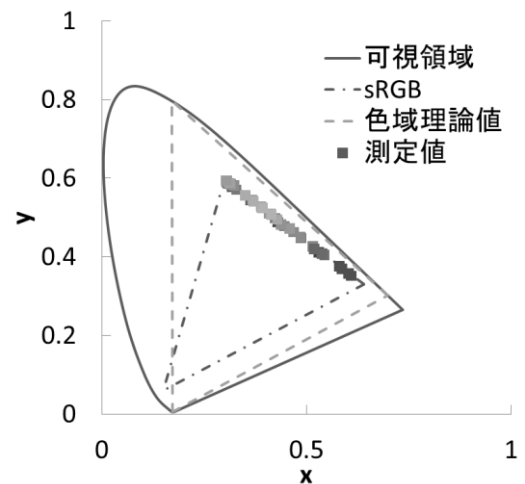
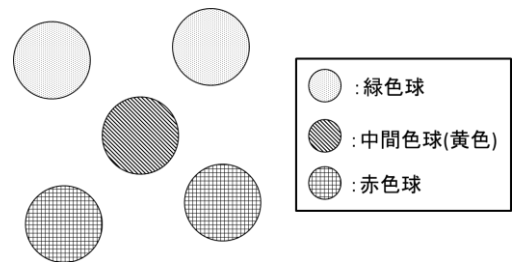
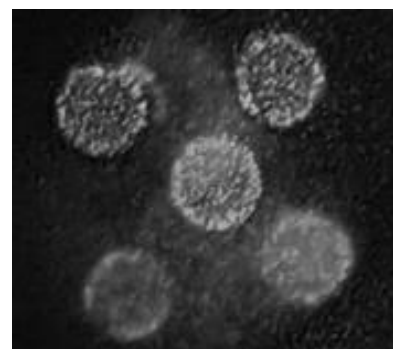


Fig. 2 ガモット図

(Yxy 表色系)



(a) 3D 再生モデル



(b) 3D-RG 再生像

Fig. 3 RG 再生像

【12】 人工的な 3 次元細胞組織の形成・組み立て加工技術の確立に向けた

ゲルマイクロマシニング技術の開発

研究者 熊本大学大学院自然科学研究科 助教 中島 雄太

〔研究の概要〕

自分の細胞を使って疾患のある細胞や臓器、組織を再生する再生医療、あるいはそれらを生体外で形成し移植する移植医療において、単一細胞やディッシュ内で 2 次元培養された細胞群から 3 次元細胞群 (組織) を形成する技術の開発が非常に重要である。本研究では、人工的な 3 次元細胞組織の形成・組み立て加工技術を確立するための基礎的な技術である、ゲルマイクロマシニング技術を開発した。具体的には、通常のマイクロマシニング技術を応用し、細胞の接着性や非接着性を有するゲル材料のコーティング・パターンニング方法の開発、パターンニングした材料上での細胞培養評価、培養途中での培養面の加工評価を行った。その結果、ゲル材料のパターンニングに成功し、このパターン沿って細胞のパターンを形成できることを実証した。また、任意のタイミングでゲル材料の分解・除去を行うことで、細胞培養中にも随時、培養面を加工することが可能であることを示した。

〔研究経過および成果〕

本研究では、細胞非接着材料として使用可能なアルギン酸ゲルを使ってゲルマイクロマシニング技術を実現するための検討を行った。以下に、その詳細について説明する。

①ゲル材料のコーティング・パターンニング方法

アルギン酸ナトリウム水溶液のスピコーティングと塩化カルシウム水溶液へのディッピングによりガラス基板上にアルギン酸ゲル薄膜を成膜することに成功した。この手法を用いることにより、基板全面に均一な膜厚のゲル薄膜を形成できることがわかった (図 1)。

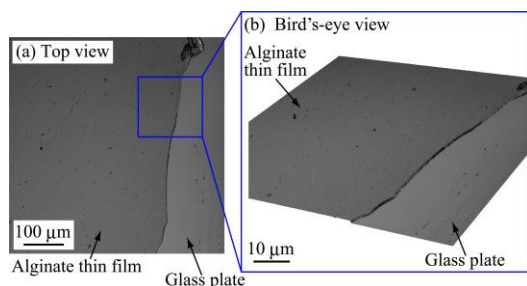


図 1 成膜したアルギン酸ゲル薄膜

アルギン酸薄膜の膜厚は、アルギン酸ナトリウム水溶液をスピコーティングする際の回転数により制御することが可能であり、回転数が高くなるにつれて膜厚が薄くなることを示した。

次に、一般的なフォトリソグラフィと同様に、成膜したアルギン酸ゲル薄膜の上にフォトレジスト (OMR-83) をパターンニングし、OMR-83 のパターンをマスクとして EDTA を用いてアルギン酸ゲル薄膜のエッチングする工程を試みた。ガラス基板上に形成したアルギン酸ゲル薄膜のパターンを図 2 に示す。この場合、OMR-83 のパターンとアルギン酸ゲル薄膜のパターンとの誤差が 20~50 μm となり、50 μm 以上のパターンを形成することができた。しかし、50 μm 以下のパターンはエッチング工程中に消失してしまうため形成できないことが分かった。

②細胞培養評価と培養途中での加工評価

アルギン酸ゲル薄膜パターンが形成されたガラス基

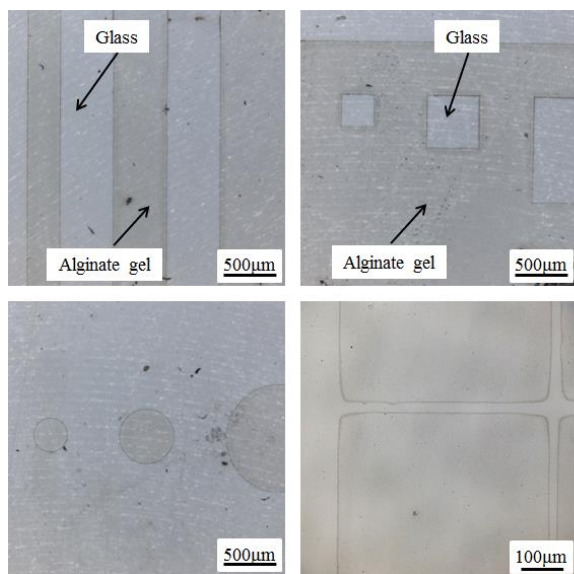


図 2 形成したアルギン酸ゲル薄膜のパターン

板の上に細胞を播種することで、細胞接着とパターン形成の様子を観察した。播種された細胞は、アルギン酸ゲル膜の細胞接着阻害効果によりアルギン酸ゲルのパターンが形成された部分には接着せず、アルギン酸ゲルパターンが形成されていない部分にのみ接着し、細胞のパターンが形成された。図 3 に形成された細胞マイクロパターンを示す。開発した技術を使ったアルギン酸ゲルパターンの形成により、様々な形状の細胞マイクロパターンを形成することができた。細胞を接着させる領域においては、 $20\mu\text{m}$ 四方の細胞接着領域に単一細胞のみを接着させることが可能であり、細胞 1 つ分の幅に相当する $20\mu\text{m}$ 幅の細胞ラインを形成できることがわかった。しかし、細胞を阻害する領域においては、アルギン酸ゲル薄膜パターンが $50\mu\text{m}$ 以下の場合、アルギン酸ゲルのパターンが細胞に埋め尽くされ、細胞非接着面を形成することができなかった。したがって、細胞が接着しない領域を形成するには、アルギン酸ゲル薄膜のパターンを $50\mu\text{m}$ よりも大きな寸法にする必要があり、本技術により、その寸法パターンを形成することが可能である。

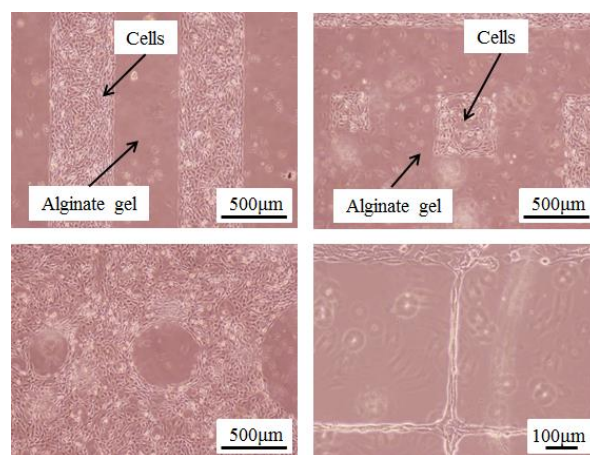


図 3 細胞マイクロパターン

次に、細胞のパターン形成後に、アルギン酸ゲル薄膜を除去し、除去した部分にも細胞が接着することを確認した結果を図 4 に示す。アルギン酸ゲルを除去すると、除去した部分に細胞が徐々に接着した。このように、細胞のパターニング後の任意のタイミングでアルギン酸ゲル薄膜を除去することで、細胞の培養中にも培養面を随時加工でき、任意の 3 次元形状を有する細胞組織を作り出せる可能性が示された。

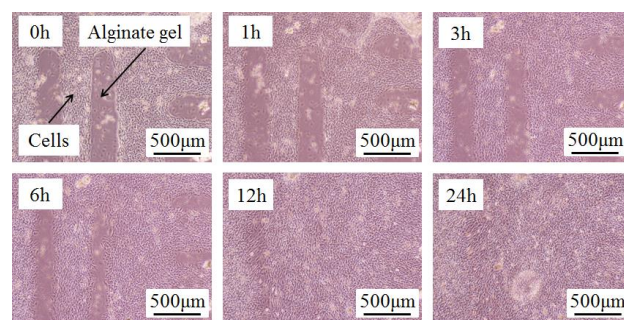


図 4 細胞培養中の培養面の加工

[発表論文]

1. 中島雄太、妹尾亘、南和幸、“アルギン酸ゲルパターンを用いた細胞マイクロパターン形成技術”生体医工学シンポジウム 2013、1-4-03、2013.
2. 引地勇氣、中島雄太、他、“細胞マイクロパターン形成技術のためのアルギン酸ゲル薄膜パターンニング”バイオエンジニアリング講演会、2014.

【13】 セルーメカニカルインターフェースにおけるセンシング基礎デバイスの創成

研究者 山口大学大学院理工学研究科 教授 南 和幸

【研究の概要】

周囲の環境に対する細胞応答の解明は、生物学的にも、医学的にも、バイオメテックなデバイスを実現するという観点からは工学的にも重要な課題である。これまで様々な方法で周囲環境を介した単一細胞の機能評価が行われている。しかし、自然な環境で単一細胞への力学的刺激と細胞発生力の計測、すなわち単一細胞を対象とした力学的なアクチュエーションとセンシング＝セルメカニカルインターフェース技術は未完成である。

そこで本研究では、単一細胞が発生する力を、環境変化を介して測定するセンシング基礎デバイスを創成することを目的として、細胞接着可能で細胞への力学的刺激が付与可能な柔軟性を持つと共に、歪み測定用のマイクロマーも内蔵した土台(足場)の製作を試みた。製作プロセスの検討、開発により試作することができた。

【研究経過および成果】

1. マイクロマー付き足場の製作プロセス

図1に製作を試みるマイクロマーを配置した柔軟なシリコンの足場＝シリコンチャンバーの構造を示す。

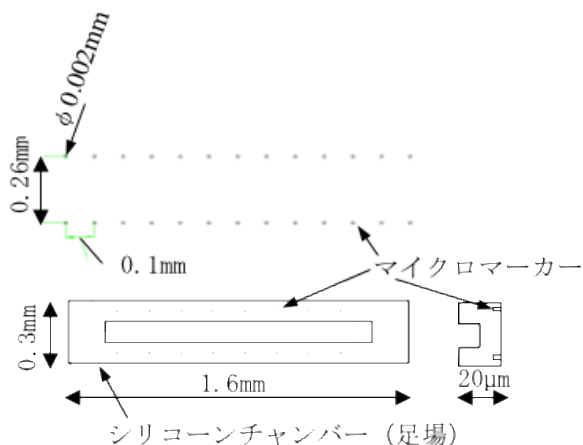


図1 マイクロマー付きシリコンチャンバー

マイクロマーは直径 $2\mu\text{m}$ 、高さは $2\mu\text{m}$ または $10\mu\text{m}$ であり、長手方向に 0.1mm 間隔で配置されている。マイクロマーは厚膜レジス

トで形成し、モールドイングによりシリコン内に埋設する。図2に製作プロセスチャートを示す。まずガラス基板上に犠牲層の Ge をスパッタし、フォトリソグラフィによりパターニングする(図2(1))。次に厚膜レジストをスピコートし、露光を行う(図2(2))。厚膜レジストを現像することによりポスト形状のマイクロマーが形成できる(図2(3))。別途で製作したシリコンチャンバー形状の空洞を有するシリコンモールドをガラス基板に位置決め・固定し、シリコン液を注入して硬化させる(図2(4))。硬化後、シリコンモールドを外す(図2(5))。この後、細胞培養の直前にシリコンチャンバー浮かせて可動状態にするために過酸化水素水で Ge をエッチングする。

上記の製作プロセスの妥当性を検討している中で、厚膜レジストのポストが剥がれ落ちるという問題が生じた。これはガラスとの接触面積がきわめて小さい場合に、表面清浄度の不均一性により

生じたものと考えられた。このため、図2(2)の厚膜レジストのスピニング前に酸素ラジカルとエキシマランプによる洗浄工程を加えることにより問題を解決することが出来た。

(1) Geスパッタ、パターニング



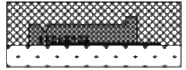
(2) 厚膜レジストコーティング、露光



(3) 現像



(4) シリコンモールドニング



(5) 離型

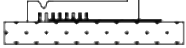


図2 製作プロセスチャート

2. 細胞伸展マイクロデバイスへの組み込み

柔軟な足場を評価するためには変形させる機構が必要なため、本申請者らが開発した細胞伸展マイクロデバイスに取り付けることにした。図3にマイクロマー付きシリコンチャンバーを取り付けた細胞伸展マイクロデバイスを示す。細胞伸展マイクロデバイスは伸展刺激を受ける細胞の

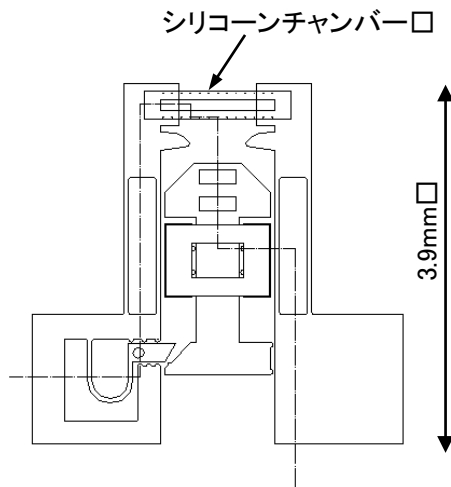


図3 細胞伸展マイクロデバイス

リアルタイムその場観察を可能とするマイクロデバイスであり、細胞に刺激を与えるためにシリコンチャンバーを引き延ばすための平行板バネのアームを備えている。

3. 製作結果

図4に製作したマイクロマー付きシリコンチャンバーの光学顕微鏡写真を示す。シリコンチャンバーの一端が細胞伸展マイクロデバイスのアーム先端に支えられていることが分かる。したがって、本研究で考案した製作プロセスにより、駆動機構に設置した状態でマイクロマー付きシリコンチャンバーが製作できることが確認できた。

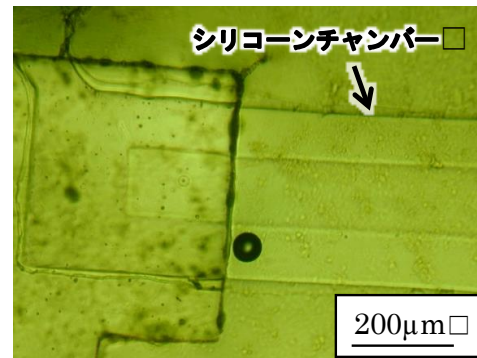


図4 製作したマイクロマー付きシリコンチャンバー

5. 今後の課題

今回製作したシリコンチャンバーを細胞伸展マイクロデバイスにより伸展させ、その時のマーカの変位を確認すると共に、細胞培養時における視認性を確認することが必要である。さらには、より薄いシリコンチャンバーの製作プロセスを開発して、シリコンチャンバーの柔軟性を格段に向上させることが今後の課題である

【14】 高感度可視光応答型アクティブプラズモンフィルタの開発

香川大学 工学部 助教 山口 堅三

鳥羽商船高等専門学校 電子機械工学科 准教授 藤井 正光

〔研究の概要〕

NEMS アクチュエータで変調可能な金属サブ波長格子を構成し、プラズモン共鳴波長を電気信号で変調可能なプラズモンチップを開発した。本チップを用いたナノサイズな可変カラーフィルタとして、アクティブプラズモンフィルタを提案した。本フィルタは、可視光領域にて約 60 nm の共鳴波長の可変化に成功した。また、2 次元 FDTD 法による数値計算から、構造を制御することで、光学特性の向上を明らかにした。さらに、蝶の構造色を本フィルタに採用することで、波長選択性と色再現性の更なる向上が期待される。このことから、共鳴波長の可変技術を活用した高機能・高集積化な次世代光電子集積デバイスや高感度マルチチャンネルセンサを実現できる。

〔研究経過および成果〕

金属に光を入射すると、金属内の電子と光の表面を介した相互作用により、金属表面に光増強場(表面プラズモン(Surface Plasmon: 以下、SP とする))が発生する。SPは、光の回折限界以下の領域に光エネルギーを閉じ込めることから、ナノスケールでの光の操作と光電界増強を可能とし、光通信システムを始めとするナノ光デバイスや高感度センシング、画像及び記録化技術としての応用が期待されている。

我々は、微小電気機械システム(Nano/Micro Electro Mechanical System: 以下、NEMS/MEMS とする)技術を用いて、SP の動的光学特性を電氣的に制御可能なプラズモンチップを開発した[1, 2]。図 1 に、開発したプラズモンチップの概念図を示す。プラズモンチップは、金属格子を楕型 NEMS アクチュエータ機構で駆動するもので、金属の梁を両端で固定するアンカー部と弾性変形するサスペンション部、サブ波長格子となるグレーティング部から成る。金属グレーティングは、SP を励起するナノ構造として働き、共鳴波長

を持つが、本構造に電圧を印加すると、グレーティングギャップ部に静電引力が働き、グレーティング部がたわみ、周期構造が変化することで SP 共鳴波長を自由に制御できる(図 1(b)参照)。そこで、本波長選択性を利用した可変カラーフィルタを単一試料・単一構造で実現可能なアクティブプラズモンフィルタ(Active Plasmon Filter: 以下、APF とする)を提案した。

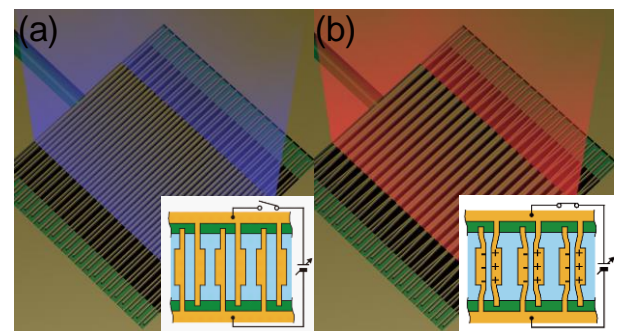


図 1 チップの概念図. 電圧印加(a)前と(b)後.

これまで、APF の作製と、可視光領域における約 60 nm の共鳴波長のシフトに成功した。しかしながら、反射光効率は 50%程度に留まっている。このため、本技術の実用化には至っていない。本研究では、数値計算による APF の最適化構造の検討し、90%以上の反射光効率の実現を目的とした。

有限差分時間領域 (Finite-difference time-domain:以下、FDTD とする)法を用い、APF の金属グレーティングとそのギャップ (G_v , G_e)のサイズ及び金属膜厚を制御することで、最適な条件を見出した。図 2 は、TM 偏光入射時における任意のギャップ幅 (G_v , G_e)に対応した反射光スペクトルを示す。図 2 に示すように、波長 600 nm から 800 nm 領域において、反射光ピークが得られた。本ピークは、APF のギャップ G_v が小さくなる (印加電圧が大きくなることに相当する)に従い、長波長側へ大きくシフトし、反射率が顕著に増加した。また、共鳴ピーク波長の電界強度分布スナップショットより、金属表面への垂直な電気力線やその表面で電界増強を観測したことから、SP の励起を示唆した。このように、一定周期の金属スリットアレイで、ギャップ幅 (G_v , G_e)の比を変えると、共鳴波長のシフトや反射率(透過率)が変化する原因は、SP 共鳴モードの変化であることを明らかにした。

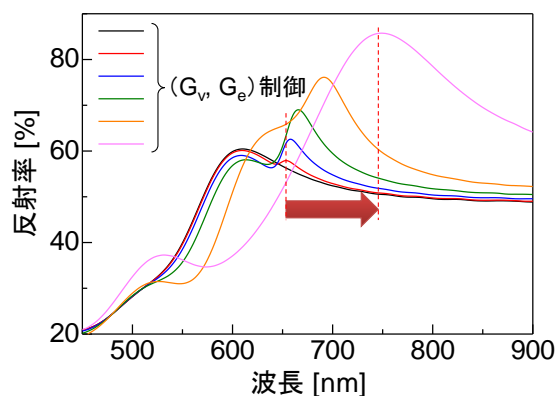


図 2 高反射率な APF の反射光スペクトル(計算).

本研究では、波長選択性と色再現性の更なる向上として、蝶の構造色に着目した。ここでは、可視光領域での波長変調を実現するため、同領域全域に鱗粉を持つミヤマカラスアゲハ (*Papilio maackii*:以下、*Pm*)蝶に注目した(図 3(a)参照)。そこで、本構造をチップに適用すれば、SP 共鳴波長の波長可変範囲を拡大できると考えた。*Pm* 蝶の構造色は、鱗粉の表面

(図 3(b)及び(c)参照)と内部構造(図 3(d)参照)に由来することを明らかにした。これらのことから、チップ表面に凹凸やリッジ (R_g) 及び内部を多層膜に形成することで、光学特性の向上が期待される。

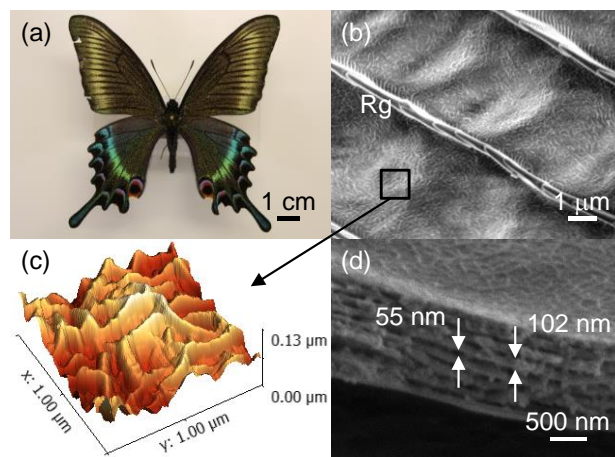


図 3 *Pm*蝶の (a)実体像、鱗粉の表面形状(b)SEM 像と(c)AFM 像、並びに切断した断面 SEM 像(d).

[発表論文]

1. **K. Yamaguchi** et al., “Electrically driven plasmon chip: Active plasmon filter.” *Applied Physics Express* **7** 012201/1-012201/3 (2014)
2. **山口 堅三**, 『プラズモンチップ～次世代光電子集積デバイスから光センサ用材料としての可能性～』 *MATERIAL STAGE* (1) 64-67 (2014)
3. **K. Yamaguchi** et al., “Electric Field Characteristics of Active Plasmon Filter.” *The 9th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, Ext. Abstr.*, 49-50, Singapore, July 4th, 2013
4. **K. Yamaguchi** et al., “Active Plasmon Devices.” *CLEO-PR&OECC/PS 2013, Ext. Abstr.*, 2 pp., Japan, July 3rd, 2013
5. **K. Yamaguchi** et al., “Characterizing Active Plasmon Filter.” *The 6th International Conference on Surface Plasmon Photonics, Ext. Abstr.*, p.553, Canada, May 30th, 2013

【15】 世界最高圧力核磁気共鳴測定装置の開発と超高压下強相関電子物性の研究

代表研究者 高知大学教育研究部自然科学系 講師 北川 健太郎

〔研究の概要〕

核磁気共鳴(NMR)法は、磁性と超伝導を両方微視的に測定できることから遷移金属化合物の低温物性研究に盛んに用いられてきた。NMR に圧力による物性制御を組み合わせることにより、高温超伝導体などの磁性・超伝導研究を精密に行うことが出来る。我々はこれまでに 10 GPa(万気圧)級の実践的な超高压下 NMR 技術を初めて開発することに成功し、鉄系高温超伝導体を研究してきた。本研究では、より高圧力(13 GPa)、より低温(<1 K)の NMR 技術の開発、他の測定手段での圧力下実験等を行い、4f 電子系化合物の新しいタイプの超伝導の研究に有用な実験技術の開発に成功した。

〔研究経過および成果〕

本計画では、超高压技術の改良(高压化、簡単化)を行うこと、強相関電子系化合物等に対し先端の超高压 NMR 実験を行うことを目指した。超高压技術の改良の、「誰でも使える小型圧力装置」の実現に関しては大きな進展があり、13GPa 超まで安定して多数の電気配線と光ファイバーを非常に歩留まり良く導入する配線方法を開発することができた。その結果、元々 NMR 測定用に開発してきた本技術が、電気抵抗測定・ac 帯磁率測定・ac 比熱測定に非常に有効であることとなった。その理由は、極低温まで使用可能な程度に小さく、良好な静水圧性を持ち、簡単に使用可能な配線方法と試料室サイズを持つ技術が 10 GPa 級としては他に全く存在しないからで、実際、東京大学物性研究所上床研究室によって本装置を用いて多数の成果が出始めている。一例として、強四重極秩序およびそのゆらぎに関係した超伝導状態を持つと言われている Pr 化合物の $\text{PrTi}_2\text{Al}_{10}$ の高压化相図を完成させることに利用された(図1、論文 1)。

より高い圧力の発生を目指した改良としては、非線形弾塑性接触構造解析を行い実際の実験データと

ほぼ同じ荷重-圧力曲線を再現することに成功し、試料室体積を増大させるために最適なガスケット形状を計算させることが可能となっている。実際の最高圧力トライ実験ではこれまで多数のアンビルが破壊されてしまっており、非常に開発効率が悪かったが、このような計算により今後の装置改良は非常に加速す

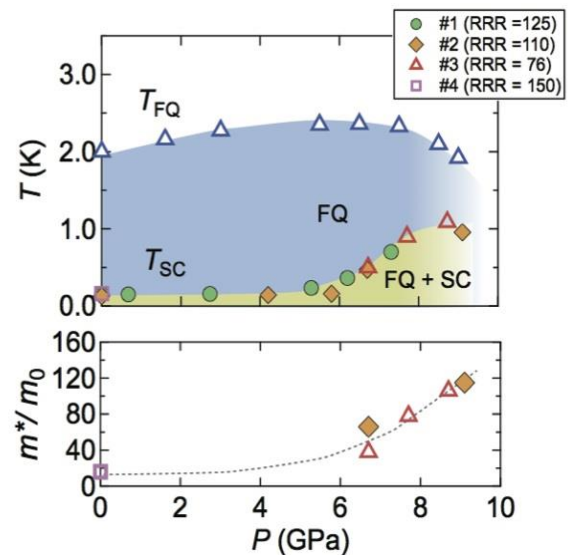


図 1: $\text{PrTi}_2\text{Al}_{10}$ の高压下相図[1]。強四極子相(FQ)内部に超伝導相(SC)が存在し、有効質量の増大(下図)などから強四極子ゆらぎに関係した超伝導の発現が示唆される。

るはずである。

超高圧 NMR 測定を高知大学において行うため、横磁場無冷媒 7T 超伝導マグネットを用いた NMR システムを立ち上げた。長期間安定して低温実験を行うために、He ガス用マスフローコントローラーを導入し、温度制御を自動化した。また、コンパクトな真空中ダブルコンデンサボトムチューニング NMR プローブを作成し、ステッピングモータと同軸リレーによる自動同調を実現した。これにより今後の超高圧 NMR 実験が飛躍的に高速化するはずである。さらなる発展として、極低温での超高圧実験を目指して、 ^3He のハンドリングシステム、循環式 ^3He 冷凍 NMR プローブ、 $\phi 22$ に小型化した超高圧セル(図 2)を開発した。これにより、前述の $\text{PrTi}_2\text{Al}_{10}$ の様な新しい超伝導状態の超高圧 NMR による微視的解明を今後進める予定である。

[発表論文]

1. Heavy fermion superconductivity under pressure in the quadrupole system $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$
K. Matsubayashi, T. Tanaka, J. Suzuki, A. Sakai, S. Nakatsuji, K. Kitagawa, Y. Kubo, Y. Uwatoko, JPS Conference Proceedings 誌、Proceedings of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013) 掲載決定
2. Phase diagram and superconductivity of NaFeAs studied by single-crystal ^{75}As -NMR under pressure up to 7.3 GPa
Kentaro Kitagawa, Yuji Mezaki, Kazuyuki Matsubayashi, Yoshiya Uwatoko, and Masashi Takigawa,
JPS Conference Proceedings 誌、Proceedings of



図 2: 本研究期間に開発した、循環式 ^3He 冷凍 NMR プローブ (上) と小型化超高圧セル (下)。これらの組み合わせにより、世界初の超高圧・極低温 NMR 実験が可能になる。

the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013) 掲載決定

【16】 薄膜の基盤との結合度合いと表面不純物除去の調査を基にした SOFC 陰極の性能向上に関する研究

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 助教 Sean Bishop

〔研究の概要〕

In this research, in situ optical transmission relaxation (OTR) measurements were used to examine the electrode kinetics of $\text{Pr}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$ thin films under conditions similar to the cathode operation in solid oxide fuel cells (SOFCs). Electrode kinetics were found to degrade significantly over time and surface sensitive techniques were used to identify a significant concentration of impurities (Si, K, Na, and Ca) on the surface and are believed to be the source of electrode performance degradation. Additionally, it was found that La oxide added to the electrode surface improves electrode kinetics by over 10x. It is believed that the enhancement arises from scavenging of impurities on the surface.

〔研究経過および成果〕

Introduction

Solid oxide fuel cell (SOFC) cathodes and oxygen storage materials used in automotive emissions catalysts rely on rapid exchange of oxygen between the lattice and atmosphere. Often, these electrode kinetics are measured by electrical or electrochemical methods on thin films, where, due to the small film thickness, surface exchange rather than diffusion dominates. However, the presence of a contact metal, required for electrical relaxation measurements, could potentially impact the oxygen exchange kinetics by its catalytic activity and thereby mask the inherent activity of the film itself. To overcome this technical barrier, we successfully introduced an optical method for the study of SOFC electrode reaction kinetics on “un-contacted” thin films of $\text{Pr}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$ (PCO). In this technique, the relaxation time for a change in oxidation state of the film following a step change in oxygen partial pressure ($p\text{O}_2$) is monitored through changes in transmission of light through the film, called optical transmission relaxation (OTR), see figure 1.

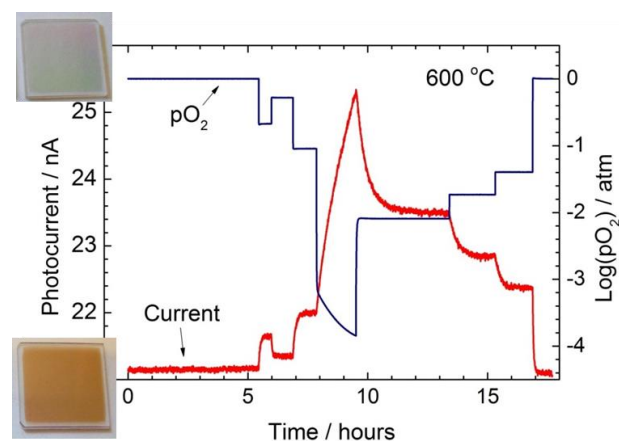


Figure 1: Change in optical transmission (i.e. measured photocurrent) of a thin film with step changes in oxygen partial pressure ($p\text{O}_2$).

In these measurements, significantly lower oxygen exchange rates than those expected based on our electrical measurements on similar films were found. In this research, we examined the surface chemistry of these thin films using secondary ion mass spectrometry (SIMS) and high resolution transmission electron microscopy (TEM) in an attempt to understand the source of the degradation in electrode reaction kinetics with time. Additionally, we developed a new method to treat the surface of these films to dramatically improve electrode kinetics.

Results and Discussion

In the first part of this project, we examined the surface chemistry of a thin film which displayed very poor electrode kinetics. A SIMS depth profile is shown in figure 2. The sample in the figure had exhibited decreasing electrode kinetics during the course of several days of OTR measurements at 300 - 400 °C. Later, the sample was heated to 600 °C and electrode kinetics were significantly lower than that previously found by more conventional electrical measurements. The SIMS depth profile clearly shows a large amount of K, Na, Si, and Ca impurities at the surface of the film, extending approximately 60 nm into the film. In comparison, a newly deposited film did not show any impurity accumulation at the surface.

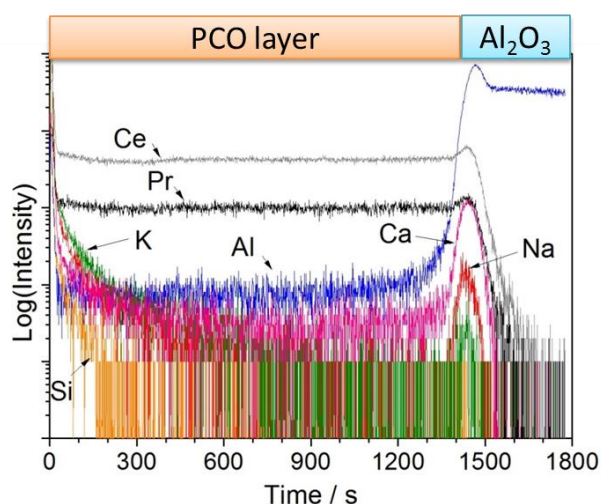


Figure 2: SIMS depth profiles for a post-OTR measured PCO thin film (see reference 1).

The impurity build-up at the surface is believed, at present, to be the primary source for previously measured degradation in oxygen surface exchange coefficient with time for this film. It is well known that Si (present in figure 2) significantly increases oxide ion grain boundary resistance and as well as blocking oxygen exchange at the surface, whilst surface CaO coverage has been shown to have a deleterious effect on surface oxygen exchange in yttria stabilized zirconia (a similar fluorite oxide), and has previously been observed on ceria based oxide surfaces.

In the second part of this project we developed a new method to enhance the electrode kinetics by using a surface treatment of La oxide. Previous researchers have found that La oxide

deposited on other state-of-the-art SOFC electrodes improves performance, though the origin of the improvement is not well understood. In this case, we used pulsed laser deposition (PLD) to deposit La oxide on the surface of a PCO film which had previously been aged during OTR measurements and thus displayed very slow electrode kinetics. The results of OTR before and after treatment are shown in figure 3. The electrode kinetics were enhanced by over 10x after the treatment. However, the treatment works only for a < 24 hours under testing conditions, after which TEM showed a dense La oxide layer ~10 nm thick on the surface. The improvement in electrode kinetics is believed to arise from a scavenging of impurities by La, thus opening free surface of PCO to reaction with oxygen. New methods to stabilize this improvement as well as identifying the source of impurities is underway.

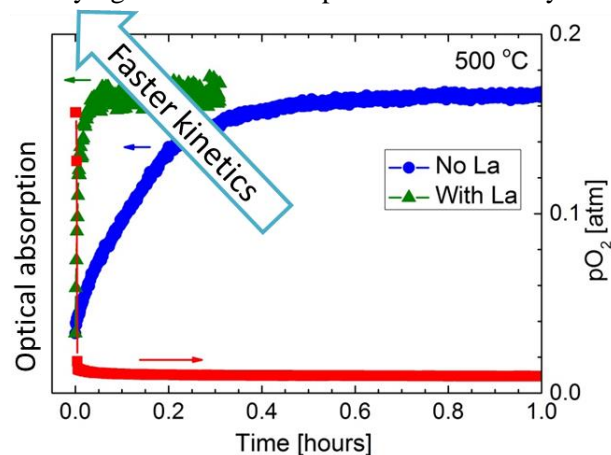


Figure 3: Addition of La to the film surface after aging dramatically increases the oxygen exchange rate (see reference 2).

[発表論文]

1. "Observation of surface impurities in $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{O}_{2-\delta}$ thin films following optical absorption relaxation measurements", S. R. Bishop, J. Druce, J. J. Kim, J. Kilner, and H. L. Tuller, ECS Transactions, ECS Transactions, v. 50, no. 27, pgs. 35-38 (2013).
2. "Compensation for Oxygen Exchange Rate Limiting Impurities on a $\text{Pr}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$ SOFC Electrode Materials", S. R. Bishop, J. Druce, J. Kilner, T. Ishihara, and K. Sasaki, ECS Transactions, v. 57, no. 1, pgs. 2003-2007 (2013).

【17】 周期構造を有するマグネシウム合金の変形/破壊に関するボトムアップシミュレーション

研究者 佐賀大学大学院工学系研究科 准教授 武富 紳也

佐賀大学大学院工学系研究科 准教授 只野 裕一

〔研究の概要〕

近年我が国で開発されたシンクロ型 LPSO(Synchronized Long-Period Stacking Ordered)構造を有するマグネシウム合金は、濃度変調と構造変調が同期した特異な周期積層型規則構造によって強化された高強度軽量構造材料として注目を集めている。LPSO 構造は母材となるマグネシウム層中に析出することから、母材との相互作用が変形/破壊特性に与える影響も大きい。本研究では原子シミュレーションを用いてマグネシウムの基本特性を評価し、得られた結果をもとにボトムアップ的にスケールの大きな解析へと結合することで、LPSO 構造マグネシウム合金の変形/破壊特性の解明を目的とした研究をおこなっている。

研究背景・目的

マグネシウム合金は軽量かつ高強度で、高いリサイクル性を有するため次世代材料として注目されている。例えば、近年我が国で開発されたシンクロ型 LPSO(Synchronized Long-Period Stacking Ordered)構造を有するマグネシウム合金は、その新奇な周期構造によって強化された高強度軽量構造材料として注目を集めている。この合金は濃度変調と構造変調が同期した特異な周期積層型規則構造を有しているが、その構造安定性や力学特性、変形/破壊特性といった基本的特性は未だ明らかにされていない。また LPSO 構造は母材となるマグネシウム層中に析出することから、母材との相互作用も変形/破壊特性に大きな影響を与えられられる。本研究では原子シミュレーションを用いてマグネシウムの基本特性を評価し、得られた結果をボトムアップ的にスケールの大きな解析へと結合することで、LPSO 構造マグネシウム合金の変形/破壊特性の解明を目的として実施している。得られた結果の一部を以下に概説する。

マグネシウムの弾性係数

原子シミュレーション手法のひとつである分子動力学法を用いて、マグネシウムの弾性係数に及ぼす結晶方位と温度の影響を調べた結果を図 1 に示す。0K では弾性係数に異方性はほとんど存在しないが、有限温度下では異方性が顕在化し、特に c 軸方向とその他の方向では傾向が大きく異なることがわかった。

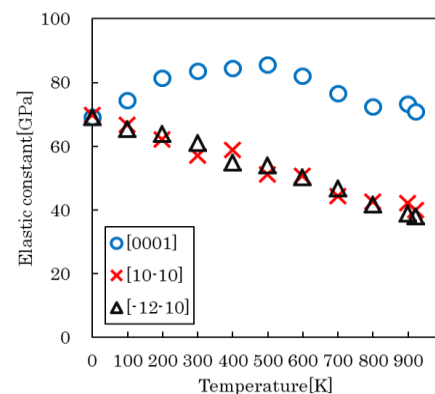


図 1 弾性係数の温度依存性

マグネシウムの表面エネルギー

分子動力学法を用いて、マグネシウムの表面エネルギーに及ぼす温度の影響を調べた結果を図 2 に

示す. 表面エネルギーについても c 軸方向に垂直な (0001) 底面のみが他の面とは異なる傾向を示す. (0001) 面は表面エネルギーが比較的低下しているものの温度依存性は低いことがわかった.

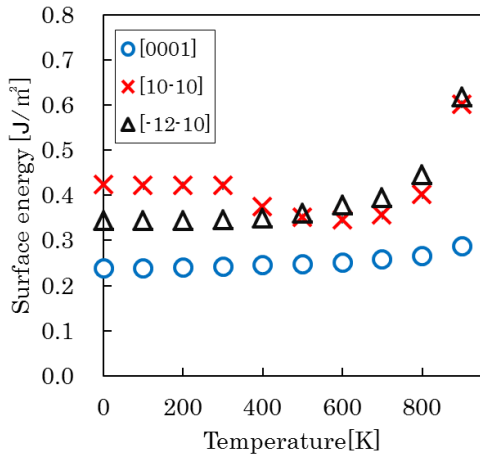


図 2 表面エネルギーの温度依存性

マグネシウムの双晶変形機構

マグネシウムの変形ではすべり変形と同様, 双晶変形も重要な役割を果たす. hcp 構造を有するマグネシウムでは変形双晶形成過程でシャッフルと呼ばれる複雑な

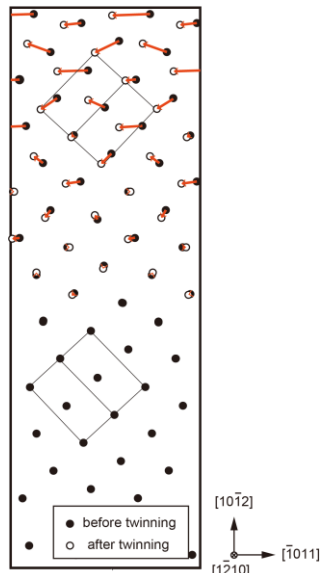


図 3 変形双晶のシャッフル機構

原子の移動が生じる上, 双晶界面の原子構造も明らかでない. 分子静力学法を用いて, 双晶面にせん断ひずみを作用させた結果, 図 3 に示すような原子の運動によって変形双晶が形成されることがわかった.

マグネシウム周期構造の安定性

構造変調と濃度変調を考慮した周期構造マグネシウム合金の構造安定性を評価するため, 18R 構造に原子を積層 (構造変調) させたモデルを作成した. この構造に c 軸方向のひずみを負荷することで, 周期構造中の fcc 相に析出する添加元素のミスフィットひずみを模擬した解析を行い, 系のエネルギーを評価することで構造安定性を評価した. 得られた結果を図 4 に示す. hcp 構造の c 軸方向の積層距離を緑で, fcc 構造の積層周期を青で示す. 本結果より hcp と fcc の中間程度のひずみが負荷された場合に最も安定な構造となることが示された.

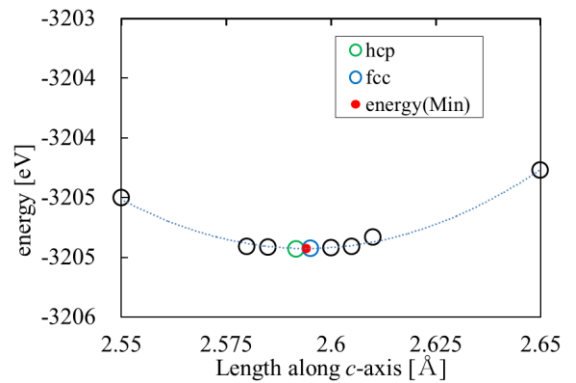


図 4 系のエネルギーのひずみ依存性

〔発表論文〕

1. マグネシウムの線膨張率・表面エネルギーの温度依存性に関する原子シミュレーション, 池田将郎, 武富紳也, 萩原世也, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会講演論文集 CD-ROM
2. 二軸応力下における HCP 金属の塑性不安定解析, 只野裕一, 平田彰太郎, 第 62 期日本材料学会学術講演会講演論文集, 419
3. マグネシウム合金の非線形に関する定量的検討, 只野裕一, M&M2013 材料力学カンファレンス論文集, OS0411

【18】 有機ラジカル磁性体による高温分子磁石の開発

研究者 大阪府立大学大学院理学系研究科 教授 細越 裕子

〔研究の概要〕

高温分子磁石の開発研究として、室温で強磁性的な挙動が報告されているラジカル電荷移動錯体の純良化と磁気測定を行った。この物質は自発磁化が極めて小さいことから、その磁性の起源が本質的なものであるか議論があったが、本研究では試料作成条件の検討により、酸素が重要な役割を果たすことを示すと同時に、自発磁化の大きさを 100 倍増大させることに成功した。また、新しいラジカル電荷移動錯体の合成に取り組んだ。アミンを含む新しい有機ラジカルの合成に成功した。 π 共役系を拡張することにより、結晶中でも分子の平面性を保つことに成功した。分子骨格の類似したラジカルアニオンとの電荷移動錯体の合成を検討している。

〔研究経過および成果〕

有機ラジカルを用いた強磁性体は 1991 年に始めて我が国で実現された[1]。軽量性と加工性に優れる有機磁石の応用展開性は高く、強磁性転移温度の向上が望まれている。本研究では、室温で弱いながらも強磁性挙動を示すことが報告されている有機ラジカル電荷移動錯体の試料作成方法と強磁性挙動の関連を明らかにし、強磁性成分を増大させる試料作成条件を明らかにした。電気伝導性を有機ラジカル結晶に付与することは、伝導電子を媒介とした強い磁気相関が期待でき、高温分子磁石の実現につながると考えられるので、新しいラジカルカチオンの開発を行った。アミンを含む新しい有機ラジカルを設計し、合成と物性評価を行った。

テトラシアノキノジメタン(TCNQ)は還元反応によりラジカルアニオンを形成し、電気伝導性をもつ電荷移動錯体を形成することが知られている。このセシウム塩およびアルキルアンモニウム錯体において、室温で強磁性的挙動が報告されているが[2]、強磁性成分は 1%にも満たない小さなもので、その本質と磁

性発現機構に興味を持たれている。研究者は、グローブボックス中の不活性雰囲気下で試料を作成することにより、強磁性成分が減少することを報告している[3]。

本研究では、試料合成方法を種々検討し、詳細な磁気測定を行うことで、室温強磁性成分の生成に酸素が重要であることを明らかにした。合成した試料を無磁場あるいは磁場が印加かされた中で、室温から低温へ冷却し、温度を上昇させながら磁化の温度依存性を測定した。室温強磁性成分を含む試料について、強磁性磁化が飽和する磁場を印加した。その結果、50 K 以上の磁化が、磁場中冷却により増大することを明らかにした。酸素雰囲気下で粉砕することで、磁化成分が 100 倍増大することを観測した。磁化の温度依存性から、この物質中で、TCNQ ラジカルアニオンは二量化していると考えられるが、試料表面が酸化されることが、磁性発現と関連していると思われる。

カチオンラジカル種の開発として、アミンを含む安定有機ラジカルの合成を行った。トリフェニルフェルダジルラジカルの 3 位のフェニル基を 2-ピリジン、4-

ピリジンで置換した安定有機ラジカルを合成した。2-ピリジン置換体は新規化合物であり、4-ピリジン置換体同様、錯形成能があることを確かめた。

さらに 4-フェニルピリジンに 2 つのニトロニトロキシンドラジカルを置換した新しい安定ピラジカルを合成した。 π 共役系を拡張することにより、結晶中でも分子の平面性が保たれ、分子平面を積層させた結晶構造を形成した。分子内および分子間磁気相互作用による一次元の形成が示唆され、実際、磁化率挙動もこのモデルで理解することができた。しかしながら、低温における磁化の磁場依存性は、励起エネルギーに 2 つのギャップが存在することを示唆するものであった。構造相転移の可能性が示唆されるため 40 K の低温において単結晶構造解析を行ったが、この温度では構造変化はみられなかった。単結晶を用いた強磁場中の電子スピン共鳴実験を低温まで行い、低温磁気構造を検討している。この分子は TCNQ と大きさが似ていることから、現在、錯体形成を試みている。

アミンにニトロニトロキシンドラジカルを 3 つ置換したトリラジカルを合成し、ヨウ化メチルとの反応によりカチオンラジカル化を試み、質量分析によりカチオンラジカルの生成を確認した。今後、単結晶を育成し、その磁気構造を明らかにしてゆく。

アミンにニトロキシンドラジカルを 3 つ置換したトリラジカルを合成した。 π 共役を利用した平面性分子を合成し、結晶中で分子を積層させたスピントラジカル構造を実現した。溶解度の問題から錯体合成にはまだ成功していない。

以上、TCNQ 錯体の室温強磁性について、結晶粒径や酸素と磁性成分の相関を明らかにした。アミンを含む複数の安定有機ラジカルの合成に成功した。これらの電荷移動錯体の磁性を今後検討してゆく。

[引用文献]

1. M. Tamura, Y. Nakazawa, D. Shiomi, K. Nozawa, Y. Hosokoshi, M. Ishikawa, M. Takahashi, and M. Kinoshita, *Chem. Phys. Lett.*, **186**, 401 (1991).
2. T. Sugimoto, K. Ueda, S. Endo, N. Toyota, T. Tada, K. Nishimura, M. Kohama, K. Shiwaku, K. Yamamoto, T. Yamaguchi, Y. Suenaga, M. Munakata *Chem. Phys. Lett.* **288**, 767 (1998).
3. M. Inokuchi, K. Suzuki, M. Kinoshita, Y. Hosokoshi, K. Inoue, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **380**, 251 (2002).

[発表論文]

1. 宮外浩嗣、山口博則、岩瀬賢治、小野俊雄、下川統久朗、細越裕子、強磁性相互作用を含む新規梯子格子磁性体の低温物性、日本物理学会 2013 年秋季大会、25pPSB-26、2013 年 9 月 25 日、徳島。
2. 菊地健太郎、山口博則、小野俊雄、鈴木修一、岡田恵次、松尾晶、金道浩一、細越裕子、三角形スピン配置のニトロキシンドラジカル系有機磁性体 TNOTOT の磁気特性、日本物理学会 2013 年秋季大会、25pPSB-39、2013 年 9 月 25 日、徳島。
3. 天谷直樹、山本隆将、山口博則、小野俊雄、松尾晶、金道浩一、細越裕子、新規三角形トリラジカル TNOBPA における変形三角スピントラジカル構造と磁性、日本物理学会 2013 年秋季大会、25pPSB-47、2013 年 9 月 25 日、徳島。
4. 菊地健太郎、山口博則、小野俊雄、松尾晶、金道浩一、野尻浩之、細越裕子、交互一次元鎖モデル p-PyPhBNN の磁気測定、日本物理学会第 69 回年次大会、27aPS-80、2014 年 3 月 27 日、神奈川。

【19】カルバゾール骨格を有するポルフィリン色素の開発と 近赤外吸収を利用した電子材料への応用

研究者 岡山大学工学部 助教 前田 千尋

〔研究の概要〕

多環式 π 共役系化合物は広い共役系を有しており、豊富なパイ電子を利用した電子材料として期待されている。その中でもポルフィリン類縁体は光化学、超分子化学、錯体化学、分子触媒など様々な分野で注目されている化合物群である。本研究ではカルバゾール骨格を組み込んだ新規拡張系ポルフィリンの開発を行い、その電子状態を実験および計算化学により明らかにした。一般的なポルフィリンは可視領域での光吸収を示すが、カルバゾールを組み込むことで共役系が拡大し近赤外に達する光吸収を示す。このような骨格に修飾を施すことで光物性の制御や応用への展開が可能となる。具体的にはエチニル基やシアノ基の置換基導入や核置換を行いその効果を明らかにした。

〔研究経過および成果〕

カルバゾール骨格を有するチアポルフィリン**1**は4つのベンゾ環が縮環しており強い近赤外吸収を示す(図1)。さらなる π 共役系の拡張を目的としてフェニルエチニル基またはフェニルエチニルフェニルエチニル基を導入した化合物**2-5**を合成し、吸収スペクトルおよびDFT計算により評価した。フェニルエチニル

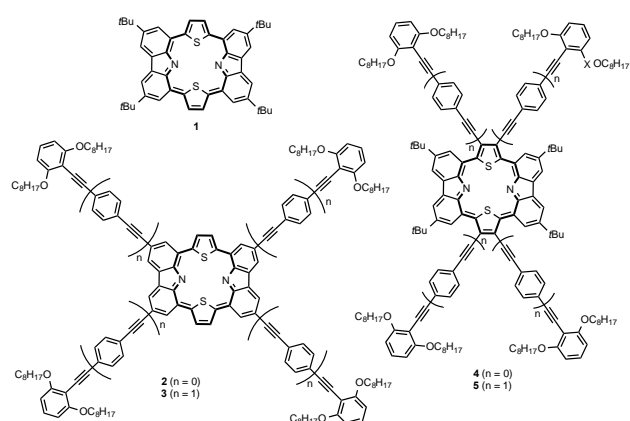


図1 1-5の構造

基を導入した**2**、**4**は**1**(1049 nm)と比較してその吸収が長波長シフトし、それぞれ 1125、1110 nm に達した。

一方フェニルエチニルフェニルエチニル基を導入した**3**、**5**ではそれ以上の長波長シフトは見られず、また末端のフェニル基に関して DFT 計算から得られた HOMO の係数が小さいことから、2つ目のフェニルエチニル部分の効果はほとんど無いことがわかった(図2)。またこれらは弱いながら近赤外(1140 nm)の発光

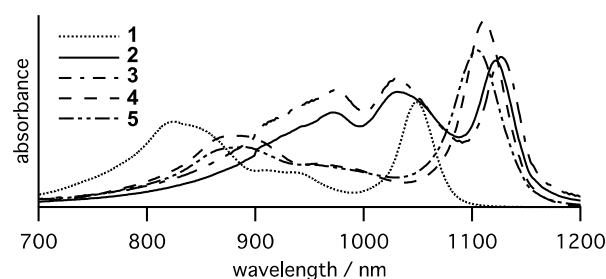
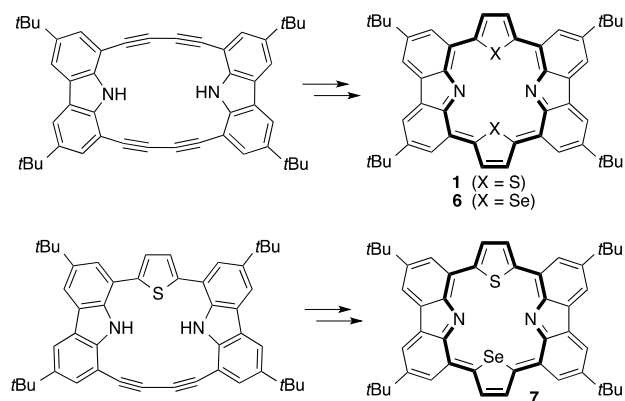


図2 1-5の近赤外吸収スペクトル

を示すことを見出した。¹

ポルフィリン中心部のヘテロ原子を変化させた核置換ポルフィリンは電子状態や配位形式が変化する。通常核置換ポルフィリンの合成はピロールの代わりにチオフェンやフランなどを原料として用いるが、本研究ではマクロサイクル形成後の環化反応の条件を

変えることで様々な核置換ポルフィリンを合成できる。これまでに硫黄をセレンに核置換したセテナポルフィリン**6**の合成に成功しているが、段階的な合成により2



式1 1、6、7の合成

つの硫黄の片方のみを核置換した**7**を得ることに成功した(式1)。**6**、**7**の最大吸収波長はそれぞれ 1090、1064 nm であり硫黄からセレンへの核置換による効果が確認された。また**7**においてセレンから硫黄に分子内電荷移動が起きることを明らかにした。²

また**1**、**6**にエチニル基及びシアノ基を導入した化合物**8**–**11**を合成した(図3)。予想通りエチニル基を

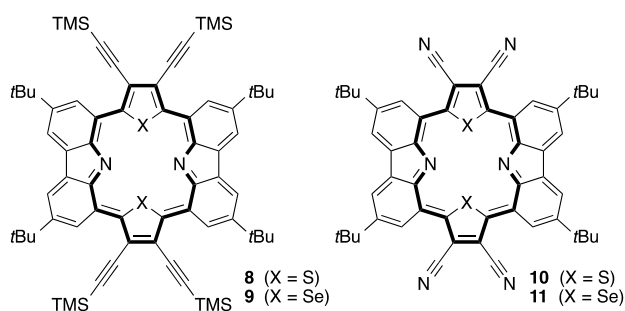


図3 8-11の構造

導入した**8**、**9**の吸収は長波長シフトし、**9**の最大吸収波長は 1141 nm に達した(図4)。一方でシアノ基を導入した**10**、**11**は無置換体**1**、**6**と比較しても短波長シフトを示した。一般的なポルフィリンはシアノ基導入により長波長シフトを示すことから特異な置換基効果だと言える。励起エネルギー計算を行ったところ、最大波長の吸収はHOMO-1からLUMOへの遷移が支

配的であり、シアノ基を導入した化合物**10**、**11**では

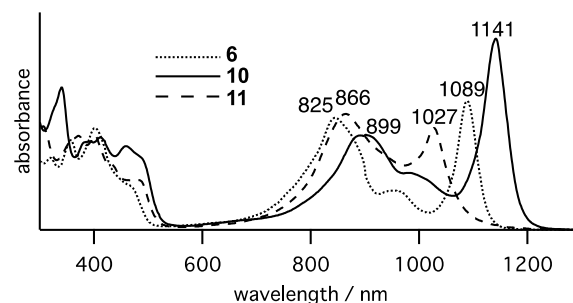
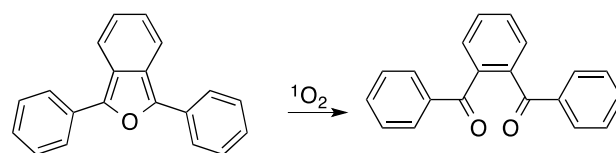


図4 6、9、11の近赤外吸収スペクトル

HOMO-1 が安定化しており、そのために吸収の短波長シフトが起きたと推察した。³

近赤外吸収色素は光線力学療法の観点からも有用である。そこで**1**と**6**の一重項酸素発生能を検討した。ジフェニルベンゾフラン(DPBF)の分解により一重項酸素の発生を検討したところ、**6**は**1**の2倍程度の効率を示した(式2)。これは硫黄をセレンに核置換したことによる重原子効果のため三重項への系間交差が起こりやすくなったためと考えている。しかし報告されているフタロシアニン類と比べてその効率は低くさらなる検討が必要である。



式2 DPBFの一重項酸素との反応

以上のように本研究を通して種々の新規ポルフィリンの合成を行い、それらの性質を各種測定およびDFT計算から評価した。

【発表論文】

1. C. Maeda, M. Masuda, N. Yoshioka, *Org. Lett.* **2013**, *15*, 3566.
2. C. Maeda, M. Masuda, N. Yoshioka, submitted.
3. C. Maeda, K. Kurihara, M. Masuda, N. Yoshioka, manuscript in preparation.

【20】 ナイフ切離タスクの力学的相互作用情報の可視化ならびに対象・スキル別の特徴抽出

東京電機大学理工学部 准教授 大西 謙吾
産業技術総合研究所 主任研究員 永田 和之

〔研究の概要〕

外科手技教育支援を目標としたメス手技トレーニング用ハプティック装置の開発を進めた。本研究では、厚さや粘弾性などの物理特性が異なる多層構造物を切る際の、メスの動きやメスと切離対象間で生じる力を装置のセンサ信号で測定し、力や仕事量などの物理量の関係で表現することで、対象を切るという現象のスキルを定量化し、コンピュータグラフィックスやロボットのアームで提示することを目指す。双方向力覚計測型外科メス用ハプティックレコーダを試作し、切離対象の特徴抽出能力の評価実験として、柑橘類の果皮にメス刃先を入刀する段階のメスに加わる力と仕事量の関係を調べた。そして、モデル化を行うに十分な能力があることが確認された。

〔研究経過および成果〕

本研究では、外科手術用メスによる切離タスクをハプティック装置で記録、モデリング、視覚・力覚教示するシステムを構築することで、メス手技トレーニング用ロボットシミュレータの開発を目指す。本プロジェクトでは切離タスクのモデリングを主課題とし、ハプティックレコーダの試作、ならびにメス切離対象切離動作間の力学的相互作用の特徴抽出のためデータ蓄積を進めた。

前試作機では薄膜の切離タスクを刃先移動量と刃先移動方向にステージに加わった力から疑似仕事量を算出して試行間の比較を行った。本研究では、切離対象は厚みがあり、刃先の力により変形を伴いながら、弾性や粘性による抵抗力が生じつつ切れると仮定し、双方向力覚計測型外科メス用ハプティックレコーダを試作した。刃先のステージ垂直方向の微小な移動に対し十分な感度を持たせるよう高分解能のポテンシオメータを装備し、ツールの刃先に生じる力とステージに加わる力を計測するため替刃とホルダー

の間に薄型6軸力覚センサを、ステージの下に力覚センサを設けた。また、メス型ツールはメスの基本である把持方法 3 種類、鉛筆把持法、弦把持法、食卓ナイフ法に対応できるように設計・製作を行った(図 1 参照)。

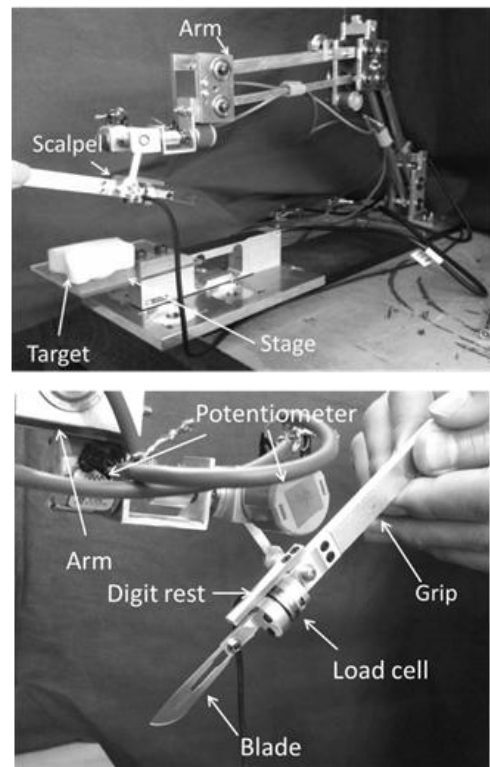


図1. 双方向力覚計測型外科メス用ハプティックレコーダ

さらに、センサ信号処理速度向上のためデジタル信号処理コントローラを配置し、PCはデータの記録と可視化に限定した構成とした。さらに、切離タスクモデルとして、メスの切離対象に対する仕事量 W_t と切離対象のステージに対する疑似仕事量 W_q をそれぞれセンサ信号から算出し、これらの差となる差分仕事量 dW を求めた。

双方向力覚計測型外科メス用ハプティックレコーダの切離タスクのモデリング能力の評価として、切離対象を柑橘類7種類(甘夏, 文旦, 伊代柑, メロゴールド, オレンジ, グレープフルーツ, ポンカン)の果皮とし、切離タスクは入刀時と限定し、測定データの分散を検証する実験を行った。

実験は、切離タスクとしてメスの長軸と対象物の表面と直角になる姿勢でナイフ先端を長軸方向に移動し切り込むこととした。メスの把持形態は鉛筆把持とし、切離量を 5mm に揃えるためにアームにガイドと移動量 5mm で機械的に停止するリミッタを設けた。変位速度は電子メトロノームにより、60Hz を提示し、2 秒間で 5mm の移動と一定速度とした。操作者は 1 名で、実験前に十分な練習を課し、指定した動作が安定して行えるようにした後、測定を行った。物試験片は一定の寸法とするため型抜きで切り出し、ステージ上に固定した。サンプリング周期 10ms で力覚センサとポテンシオメータの信号を同期測定・記録した。なお、操作者には測定信号の視覚提示は行わなかった。

図 2 に各対象の 2 または 3 試行分の結果を示す。横軸をナイフの長軸方向に加わった力、縦軸を差分仕事量として、1 試行のナイフ長軸方向力が最大値を取るまでのデータを表示した。試行回数が少ないことから、各柑橘果皮の特徴までは述べられないものの、各柑橘果皮での差分仕事量の分散はナイフ長

軸方向力が 0 から 4N の範囲では概ね 2Nmm の範疇で、全ての柑橘果皮で顕著な差がなく測定ができています。また、ナイフ長軸方向の力の最大値は各柑橘果皮の試行によって差がある形で測定ができています。これらのことから、双方向力覚計測型外科メス用ハプティックレコーダは、メス一切離対象一切離動作間の力学的相互作用のモデリングと特徴抽出を行う計測システムとしての能力を備えていることが示唆された。

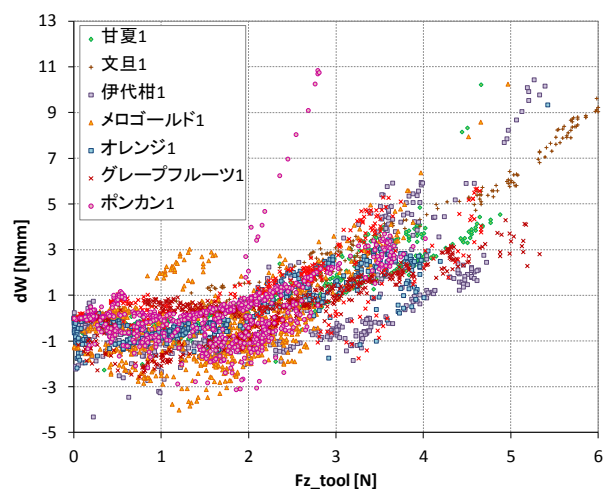


図 2. 柑橘類7種類の測定データ

今後は、切離対象を表皮から皮下浅部の組織構造の異なる果実や野菜とした測定を行った後、食肉の部位別での実験を行い、さらに、メスとしては刃先形状の異なる替刃でそれぞれに適した把持形態での測定を行う。さらに、切離動作としては、刃先を入れる段階から刃先を抜く段階までを測定し、これらの特徴抽出とモデリング手法について検討する。なお、本実験では、ナイフ長軸方向力と差分仕事量との関係についての考察としたが、測定データは刃先移動量・姿勢角度変化、ナイフの荷重、ステージの荷重も多次元量として計測しており、多次元の信号からの特徴抽出と、熟練者の切離スキルを定量的に表現する方法を検討し、初心者への教育に向けた、視覚ならびに力覚提示手法について検討を行う。

【21】ビオロゲン液晶高分子の合成と光学材料への展開

研究者 東京理科大学理学部第二部 助教 中 裕美子

【研究の概要】

ビオロゲンは、電気、光など様々な外部要因によって可逆的な酸化還元反応が誘起されることが知られており、機能材料におけるアンテナとなり得る化合物である。ビオロゲンの最大の利点は、高い耐光性、酸化還元反応に対する耐久性である。したがって、ビオロゲンを液晶性高分子に組み込み光応答部位として用いれば、耐久性の高い光機能材料の創製が期待できる。光応答部位となるビオロゲンを側鎖に有する高分子に液晶性を付与することができれば、協同現象、自己組織化、長距離秩序などの液晶の特異的性質と光応答性を併せ持つ新規光機能性材料の創製が見込まれる。本研究では、新規光機能性材料の創製を最終課題とし、オプトエレクトロクロミック効果を示すビオロゲンを側鎖に導入した液晶性高分子の合成を目的としている。本論文では、液晶性の発現を目指し、側鎖にビオロゲンを有するポリマーを合成し、その液晶性および光応答性の評価を行った。

【研究経過および成果】

これまでにビオロゲン部位を有するポリマーにおいて、液晶性の発現は報告されていない。本研究では、液晶性の発現を目指し、側鎖にビオロゲンを有するポリマーを合成し、その液晶性および光応答性の評価を行った。まず液晶性発現を目指して、ビオロゲンのN位にアルキル鎖を結合させたビオロゲンモノマー (A11V12) を設計した (Figure 1)。得られた A11V12 を大気下で DMF に溶解させると、溶液は青色に着色

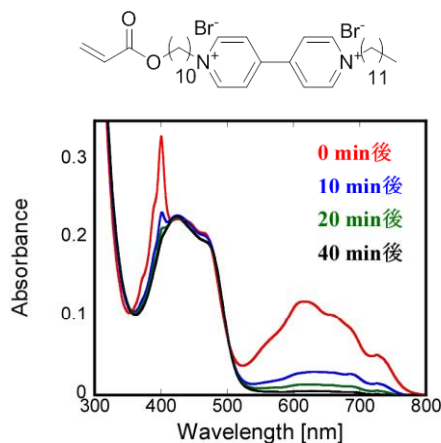
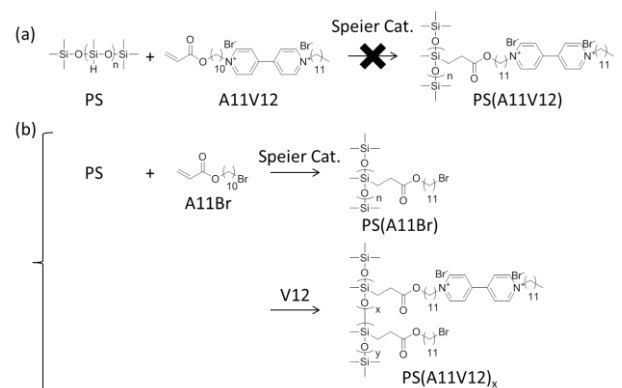


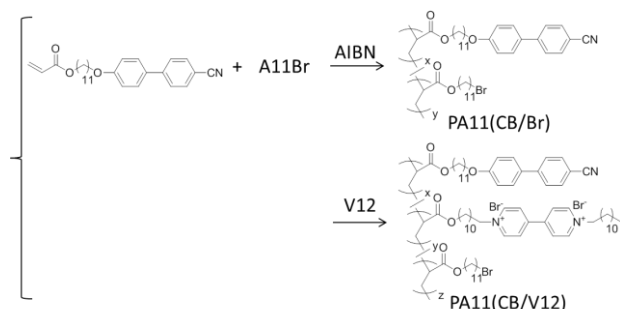
Figure 1 (a) A chemical structure of viologen monomer (A11V12). (b) Change in absorption spectra of A11V12 in DMF under atmosphere.

し、時間の経過とともに減色した。紫外可視吸収スペクトル測定を行ったところ、波長 600 nm 付近のピークの減衰が観察された。これは、ビオロゲンが DMF 溶液中でラジカルカチオンになり、大気中の酸素によって酸化しジカチオンとして存在することを示している。次に、ビオロゲンを側鎖に導入した二種のビオロゲンポリマーの合成を試みた。ひとつは、ガラス転移温度 (T_g) が低く、側鎖型液晶高分子において液晶性発現が期待されるポリシロキサンを骨格としたポリマーである。まず、ポリシロキサンと A11V12 のヒドロシル



Scheme 1 Synthetic routes of polysiloxane containing viologen moieties in the side chain.

化反応を試みたが、ビオロゲンを側鎖に有するポリマー (PS(A11V12)) を得ることができなかった (Scheme 1(a))。Scheme 1(b) に示すように、ヒドロシリル化反応によりアルキルスペーサーを導入した後、ビオロゲンを導入することにより、目的のビオロゲンポリマー (PS(A11V12)_x) を得ることができた。PS(A11V12)_x の熱物性を評価したところ、分解温度 (約 220 °C) 以下において液晶性を確認できなかった。ふたつめに、一般的なラジカル重合法により、ポリアクリレート骨格のビオロゲンポリマーの合成を試みたが、ポリマーを得ることができなかった。これは、生成されるビオロゲンポリマーの溶解性が低下し、重合の進行が抑制されるためと考察した。そこで、ポリマーの溶解性向上と液晶性発現を目指して、シアノビフェニルとビオロゲンのコポリマー (PA11(CB/V12)) を合成した (Scheme 2)。得られたポリマーの分解温度は 270 °C であり、側鎖にビオロゲンを有するポリシロキサン PS(A11V12) より熱耐久性が高いことがわかった。シアノビフェニル (CB) とビオロゲン (V12) のコポリマー ([CB] : [V12] = 8 : 2, $M_n = 6,300$, $M_n/M_w = 1.2$) において、70°C 付近に T_g が観測され、液晶相に由来する相転移は確認されなかった。合成した (PA11(CB/V12)) の光応答性について評価を行った。PA11(CB/V12) の DMF 溶液に波長 365 nm の紫外光を照射すると、波長 600 nm 付近のピークが消失し、



Scheme 2 Synthetic routes of poly(acrylate) containing viologen moieties in the side chain.

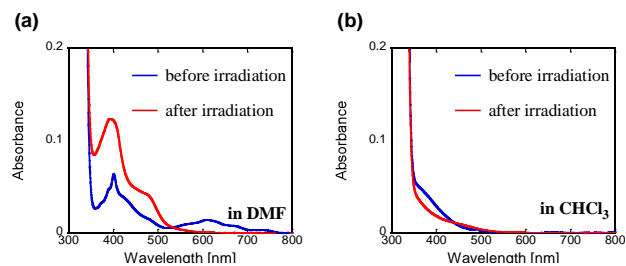


Figure 2 Change in absorption spectra of PA11(CB/V12) (a) in DMF (3.0×10^{-4} g/ml) or (b) chloroform (1.0×10^{-5} g/ml) before and after irradiation with UV light.

波長 400 nm 付近のピーク強度が増大した (Figure 2(a))。還元剤である亜ジチオン酸ナトリウム水溶液をビオロゲンポリマーの DMF 溶液に添加すると、同様のスペクトル変化が観測された。したがって、紫外光照射によってビオロゲンが還元されていることが示唆された。また、ビオロゲンポリマーのクロロホルム溶液に紫外光を照射すると、わずかに波長 400 nm 付近の吸光度の上昇が見られた。DMF 溶液中と比較すると変化は小さいが紫外光照射によって、還元反応が進行している可能性が高い。次に、ガラス基板上に PA11(CB/V12) のクロロホルム溶液を滴下し、加熱乾燥後ガラス基板でポリマーを挟み、サンプルフィルムを作製した。Figure 3 に示すように透明性の高いフィルムを得ることができた。今後、紫外光照射による光応答性および光誘起屈折率変化について検討を行う予定である。

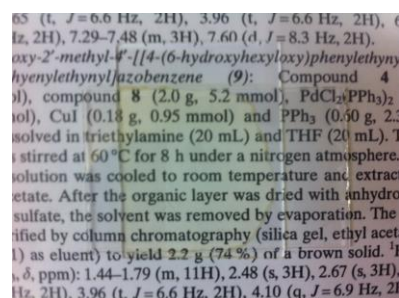


Figure 3 Photograph of PA11(CB/V12) film.

【発表論文】

1. Y. Naka, T. Marushita, T. Sasaki, Synthesis of side-chain viologen polymers and their photoresponsive behavior, *In preparation*

【22】 皮膚貼り付け型健康モニタリングシートのためのマイクロセンサ集積化技術

研究者 早稲田大学基幹理工学部 専任講師 岩瀬 英治

【研究の概要】

本研究では、絆創膏のような皮膚貼り付け型の健康モニタリングシートの実現を目指したセンサチップ集積化技術の確立を目的とした。薄膜フレキシブルシート上において、250 μm 角の LED ベアチップから 3.0 mm 角の IC チップまでとサイズが 10 倍以上異なるチップを全て転写位置精度 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内で転写できることを示した。また実証デバイスとして、3 軸加速度センサを集積し埋め込んだ、シート部の厚さ 250 μm の皮膚貼り付け型センサシートを作製し、運動による加速度が計測できることを示した。

【研究経過および成果】

1. 目的および背景

近年、健康に対する人々の意識が高まっているだけでなく、糖尿病患者の増加など生活習慣病への対策が課題となっている。そのため、常時装着して健康情報をモニタリングすることへのニーズが高まっている。現在でも、腕時計型やポータブルな健康モニタリングデバイスが商品化されている。しなしながら、絆創膏のように常時装着していても装着している人があまり気にならずに健康をモニタリングできるデバイスはこれまでにない。

そこで本研究では、絆創膏のような皮膚貼り付け型の健康モニタリングシートの実現を目指したセンサチップ集積化技術の確立を目的とする。非侵襲な皮膚表面からのセンシングでも、加速度による活動量計測の他、体温計測や、赤外線を用いた血中酸素飽和度計測・脈波（脈拍）計測などが可能である。

このようなデバイスの実現を考えたとき、全て半導体微細加工技術や MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術により一体で作ること

も可能であるが、それでは製作プロセスが複雑になり、その結果歩留まりの低下やコストの増加が考えられる。そのため本研究では、別途作られたベアチップなどを薄膜フレキシブルシート上に転写技術により集積するアプローチを用いる。これは、量産化やコスト・当該技術の他への汎用性を考えると非常に優位である。

2. 異種サイズのチップ集積化技術

異なる基板で作成した MEMS チップを一つの基板に集積する手法として、PDMS (poly(dimethylsiloxane)) シート上にチップを集積する「スタンピング転写」という手法がある (Fig. 1)。

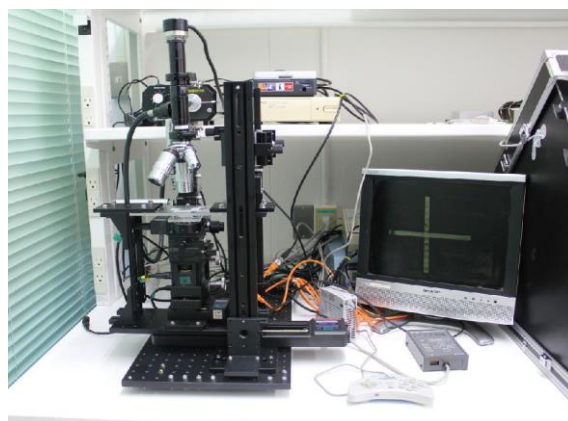


Fig. 1 スタンピング転写セットアップ

Table 1 転写位置精度

	LED チップ	チップコン デンサ	センサ IC チップ
$X [\mu\text{m}]$	-0.8 ± 7.0	-1.1 ± 11.5	0.1 ± 10.7
$Y [\mu\text{m}]$	-2.0 ± 12.7	-4.5 ± 8.3	1.9 ± 9.9
$\theta [^\circ]$	1.0 ± 0.7	0.7 ± 0.8	0.7 ± 0.6

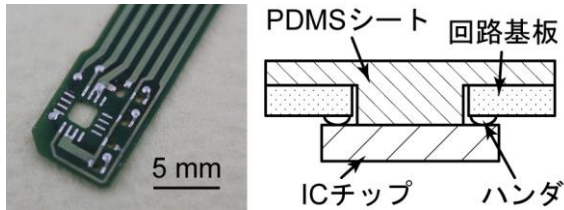


Fig. 2 回路基板へのスタンピング転写

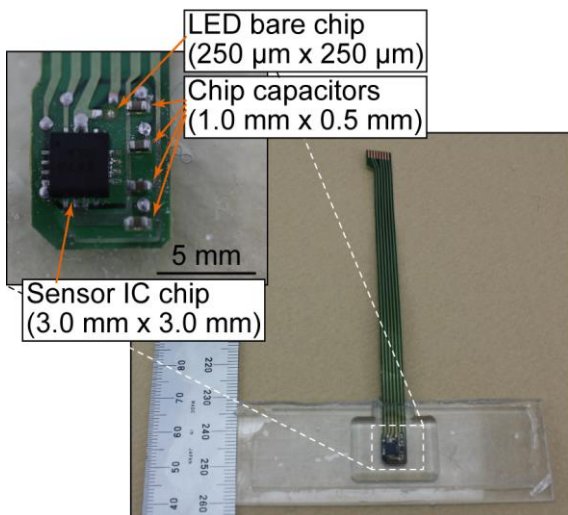


Fig. 3 フレキシブルシート基板への集積

本研究ではこれを発展させ、1 mm 以下の薄くフレキシブルな PDMS シート上にサイズが異なるベアチップや IC チップを配置することを目指した。その結果、250 μm 角の LED ベアチップ、1.0 mm \times 0.5 mm のチップコンデンサ、3.0 mm 角のセンサ IC チップとサイズの異なるチップを全て転写位置精度 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内で転写できることを示した (Table 1)。また、これらの実証デバイスとして、シート部の厚さを 250 μm とし、3 軸

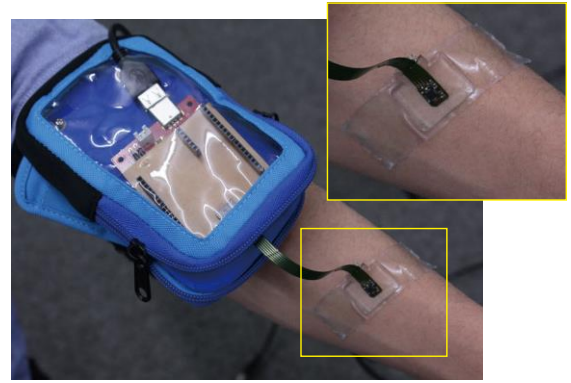


Fig. 4 身体装着時のシステム全体写真

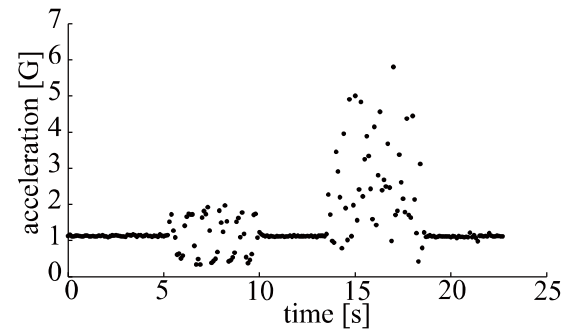


Fig. 5 活動モニタリング

MEMS 加速度センサを集積し埋め込んだ、皮膚貼り付け型のセンサシートを作製した (Fig. 2, Fig. 3)。Fig. 2 に示すように、穴をあけたフレキシブル回路基板の穴から PDMS シートの一部を突出させることにより、スタンピング転写による実装を行った。作製したセンサシートを身体に貼り付け、運動による加速度が計測できることを示した (Fig. 4, Fig. 5)。Fig. 5 は、約 5~10 s の間で 1 秒間に 1 回腕振りを、約 14~19 s の間で 1 秒間に 3 回腕振りを行ったときの計測結果である。

3. まとめ

本研究で実現した、薄膜フレキシブルシート上における異種サイズのチップ集積化技術は、センサやデバイスの種類に依存しないものであり、本研究の汎用性は非常に高い。

【23】 ペプチドと核酸を用いた無機物質の位置特異的ナノ凝集沈殿法の確立

研究者 甲南大学フロンティアサイエンス学部 講師 白井 健二

〔研究の概要〕

近年、ナノバイオテクノロジー研究が興隆し、有機分子と無機分子を融合させた機能性材料が開発されている。このような開発の一手法として、バイオミネ랄ゼーションの利用が挙げられる。ミネ랄ゼーション(無機物凝集沈殿)の自由自在な制御が実現すれば複雑な構造の構築ができ、それを基に新機能の発現につなげることが可能となる。そこで本研究では、シリカナノ凝集沈殿を題材として、未だ制御が困難である、凝集沈殿における有機分子と無機分子の配置・位置制御を目標とした。具体的には、DNA の両末端付近と相補的に結合するペプチド核酸(PNA)配列を持つシリカ沈殿ペプチドを設計・合成し、DNA と複合させ、ペプチド部分のみにシリカの凝集沈殿を促すことで、ナノ構造体の形成を試みた。今後、本システムを用いれば、ペプチド配列を変えることでDNA 上の様々な位置に様々な無機物沈殿が可能となり、凝集沈殿のより高度な制御が期待できる。

〔研究経過および成果〕

1. PNA 含有ペプチドの設計・合成

本研究で用いるペプチドは、2つの配列からなる。一つは特定の無機物を沈殿できるペプチド配列、もう一つはDNAとの相補的な結合ができるペプチド核酸(PNA)配列である。PNA は、主鎖にペプチド構造、側鎖に核酸塩基を配置した人工ペプチドで、DNA と相補的な塩基を配置することでDNAと配列特異的に結合することが知られている。無機物沈殿配列には、以前から検討を続けている、既報のシリカの沈殿配列(M. R. Knecht et al., Chem. Commun., 18, 3038 (2003))を選択した。また、比較的簡便な沈殿の検討を行えるカルシウムの沈殿を促進する配列(H. Kumagai, et al., Faraday Discuss., 159, 483 (2012))も本研究では検討した。PNA 配列は、原子間力顕微鏡(AFM)や透過型電子顕微鏡(TEM)などの観測のしやすさを考慮して、数百 nm 鎖長のDNAの両端で相補的に結合するような配列を設計した。以上より、

まずは、シリカの沈殿凝集をDNA末端に選択的に起こさせ、ダンベル型のナノ構造体を構築すること(図1(a))を本研究の目的とした。ペプチドの合成は、Fmoc固相合成法で行い、脱樹脂後、HPLCで精製、凍結乾燥を行い、白色粉末を得た。アミノ酸分析、MALDI-TOF MSで同定を行った。

2. ペプチドのみを用いた無機物凝集沈殿

合成したペプチドのみを用いて、シリカ、カルシウム沈殿を行った。動的光散乱装置(DLS)、AFMなどを用いて沈殿物の大きさ、形状などを解析した。シリカにおいては、PNA配列を付与すると、既報のペプチドのみの沈殿よりもさらに形のそろった球状の沈殿を得ることができた。カルシウム沈殿においては、飽和炭酸カルシウム溶液の作成法や沈殿時間などの検討を行ったが更なる最適化が必要であり、現在、鋭意研究中である。

3. ペプチドとDNAを用いた位置特異的凝集沈殿

PNA 含有シリカ沈殿ペプチドを用いて、その PNA と相補的な配列を両端にもつ DNA を加えて相互作用させ、その上でシリカをペプチドのみに沈殿させ、ダンベル型のナノ構造体の作成を試みた。最適化を行った結果、AFMでは再現性良く、数百 nm のひも状の物体の付近に数十 nm の球状物体があるダンベル構造が観測された(図 1(b))。さらに TEM-EDS(エネルギー分散型 X 線分光分析)においても、ひも状の物体と球状の沈殿物が存在することが分かり、その沈殿物がシリカであることを確認した。また、PNA 結合部位のない DNA を用いた場合では、ダンベル構造は見られなかった。さらに、DLS や電気泳動などでも、DNA にペプチドが結合し、シリカが沈殿していることを裏付ける結果が得られたことから、本研究の目的であるダンベル型ナノ構造体を作成することに成功した。以上の成果は、発表論文のほか国際学会で2回、国内学会で3回発表を行っている。

現在、さらに複雑な無機物の位置特異的沈殿の試みとして、2種の無機物の位置特異的沈殿を行っている。まずは、PNA 含有シリカ沈殿ペプチドを用いたシリカ沈殿、次いで、DNA へ別の無機物を沈殿させることを試み、DNAにはカルシウムを沈殿させることを検討している。AFMやTEMにて、現在2種の沈殿方法の最適化を検討している。また、得られたナノ構造体を焼成し、新たな無機物構造体を作成することも検討している。

4. まとめ

以上のように本研究は、核酸上の指定の場所に多種多様の無機物を特異的に凝集沈殿させる方法を確立し、ナノレベルでの高度な無機物集積を目指し

ている。本方法は、既存の粒子を集積させる技術よりもさらに高度なナノ集積体の構築が可能となり、日本のナノテクノロジーの更なる発展のブレイクスルーになると考えられる。これを応用すれば、ナノ電子回路、ナノ半導体、ナノ合金の構築が可能となり、ナノバイオエレクトロニクスという新たな技術領域の開拓が可能になると考えられる。最後に、本研究を支援して下さったカシオ科学振興財団に深く感謝いたします。

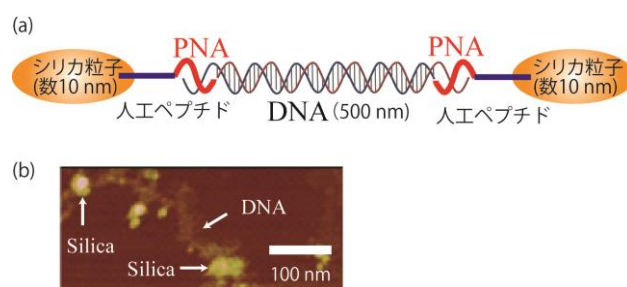


図1 (a) 本研究の概念図。(b) AFM 観察結果。

【発表論文】

1. K. Usui*, K. Nagai, H. Nishiyama, T. Tsuruoka, S. Fujii, "A PNA Peptide for the Control of Site-Specific Silica Precipitation on DNA", *Peptide Science*, 2012, 375-376.
2. K. Usui*, H. Nishiyama, K. Nagai, T. Tsuruoka, S. Fujii, K.-Y. Tomizaki, "Control of Site-Specific Silica Precipitation Using PNA Peptides and DNAs", *Peptides*, 2013, 162-163.
3. K. Usui*, K. Nagai, H. Nishiyama, A. Yamada, T. Tsuruoka, S. Fujii, K.-Y. Tomizaki, "Site-Specific Silica Mineralization on DNA Using a Designed Peptide", *Preparation*.

【24】 ナノ電気化学顕微鏡を用いた細胞表面の化学物質濃度プロファイルの評価

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教 高橋 康史

〔研究の概要〕

細胞の表面は、光学顕微鏡では確認できないサブ μm スケールで、ダイナミックに動いており、細胞内外での物質のやり取りを行っている。電気化学測定では、酸素、神経伝達物質、一酸化窒素、ATP、グルタミン酸など、様々な物質が検出できる。さらに、微小電極を用いて、細胞表面を走査しながら、化学物質の検出を行う走査型電気化学顕微鏡(SECM)は、化学物質の2次元濃度プロファイルを取得可能であり、生細胞の評価に非常に有効である。我々は、ナノ電極とナノポジショニングシステムを有する走査型ナノ電気化学顕微鏡(nanoSECM)を開発し、細胞膜界面での物質のやり取りや、ナノ電極を細胞内に挿入して細胞内化学物質の検出を行った。

〔研究経過および成果〕

ナノカーボン電極を利用した局所センシング

ナノ電極は、これまで集光イオンビームやスパッタリングなどのハイテク機器を利用して、3日ほどかけて作製されてきたが、我々が開発したガスバーナーとボタンガスを利用して、わずか3分に短縮し、電気化学の世界に大きなインパクトを与えた。このナノ電極はサイズそのものが小さいため、これまで困難とされてきた微小閉鎖空間(酵素を内包した液滴⁴、細胞内¹⁰)に電極を挿入し、その空間内の化学物質の検出を行った。今回使用したナノ電極は、細胞の大きさの1/1000であり、侵襲性の低い計測を実現した。実際に、酵素を内包した液滴内では、内包した酵素と電気化学応答に相関がみられ、また、電極を細胞内へ挿入することで、細胞内の化学物質を特定はできていないが非常に高い電流応答を得ることができた。

また、内部をガラス壁で2つに隔離された θ 型のガラス管を利用して、2つの独立したカーボン電極を一本のガラス管内に有するデュアル電極を作製した。この電極を利用して、2種類の化学物質を同時に検出することを可

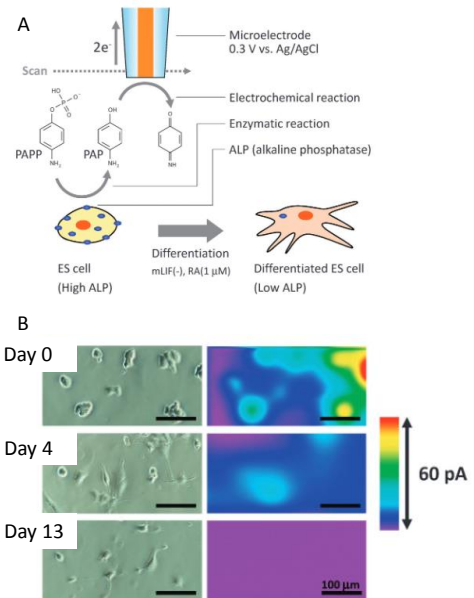


図1 (A)微小電極を利用したES細胞の分化状態の評価
(B)分化誘導を施したES細胞のSECMイメージ
分化の進行とともにアルカリフォスファターゼの発現状態が減少していることを電流イメージとして可視化した。

能とした。⁷ さらに、ナノ電極では、局所的な化学物質の定量が可能なることから、これまで困難とされてきた圧力や電圧を印加して、ナノピペットを利用して試薬を局所インジェクトした際の試料近傍での化学物質の定量評価を行った。⁸

ここまでナノカーボン電極による化学物質の検出に

関して記載をしてきたが、 θ 型カーボン電極では、局所的に非常に高い電位勾配を形成することが可能であり、このことで細胞の電場破碎することができる。さらに、細胞破碎後、破碎に使用したピペット型電極を利用して、細胞を回収し、遺伝子発現状態の評価を行い、これまで困難であった接着性の強い細胞や組織からの単一細胞の回収及び遺伝子発現評価に成功した。⁹

ES 細胞の分化状態の評価

微小電極を利用することで細胞表面の酵素について、発現状態の経時変化を測定することが可能である。特に再生医療で近年注目されている ES 細胞などは、未分化マーカーとして利用されている酵素であるアルカリフォスファターゼの発現状態が分化の進行とともに減少することが知られており、この発現状態を電気化学的にモニターすることで、単一細胞レベルで分化の進行度合いを評価することに成功した(図1)。一般的な未分化マーカーである Nanog の発現と相関を得られ、電気化学的に単一細胞レベルで分化状態が評価可能であることが示された。⁷ さらに電極をアレイ状に配置し、分化の進行状態を簡便に測定可能な電気化学デバイスの開発にも成功した。⁵

電気化学的なアルギニン酸ゲル培養法の開発

電気化学では、電極反応を利用して局所的に pH を変化させることが可能である。海藻から抽出されるアルギニン酸は、細胞にやさしい化学物質であり、pH を低くすることで、繊維状のゲルを形成する。この特徴を活かして、微小電極を利用して電気化学的に局所的に pH を調整することで細胞培養用のマイクロウェルの作製を行った。この手法を利用すると任意の位置、任意のタイミングでゲルを形成することが可能であり、2種類の細胞を同時に培養する共培養環境を簡便に作り出すことが可能である。^{2,3}

[発表論文]

1. Matsumae, Y., Arai, T., **Takahashi, Y.**, Ino, K., Shiku, H. & Matsue, T. *Chem. Commun.* **49**, 6498-6500 (2013).
2. Ozawa, F., Ino, K., Arai, T., Ramon-Azcon, J., **Takahashi, Y.**, Shiku, H. & Matsue, T. *Lab Chip* **13**, 3128-3135 (2013).
3. Ozawa, F., Ino, K., **Takahashi, Y.**, Shiku, H. & Matsue, T. *J. Biosci. Bioeng.* **115**, 459-461 (2013).
4. Ino, K., Ono, K., Arai, T., **Takahashi, Y.**, Shiku, H. & Matsue, T. *Anal. Chem.* **85**, 3832-3835 (2013).
5. Ino, K., Nishijo, T., Kanno, Y., Ozawa, F., Arai, T., **Takahashi, Y.**, Shiku, H. & Matsue, T. *Electrochemistry* **81**, 682-687 (2013).
6. Ino, K., Goto, T., Kanno, Y., Inoue, K.Y., **Takahashi, Y.**, Shiku, H. & Matsue, T. *Lab Chip* **14**, 787-794 (2014).
7. McKelvey, K., Nadappuram, B.P., Actis, P., **Takahashi, Y.**, Korchev, Y.E., Matsue, T., Robinson, C. & Unwin, P.R. *Anal. Chem.* **85**, 7519-7526 (2013).
8. Babakinejad, B., Jonsson, P., Cordoba, A.L., Actis, P., Novak, P., **Takahashi, Y.**, Shevchuk, A., Anand, U., Anand, P., Drews, A., Ferrer-Montiel, A., Klenerman, D. & Korchev, Y.E. *Anal. Chem.* **85**, 9333-9342 (2013).
9. Nashimoto, Y., **Takahashi, Y.**, Takano, R., Miyashita, K., Yamada, S., Ino, K., Shiku, H. & Matsue, T. *Anal. Bioanal. Chem.* **406**, 275-282 (2014).
10. Actis, P., Tokar, S., Clausmeyer, J., Babakinejad, B., Mikhaleva, S., Cornut, R., **Takahashi, Y.**, Córdoba, A. L., Novak, P., Shevchuk, A., Dougan, J., Kazarian, S., Gorelkin, P., Erofeev, A., Yaminsky, I., Unwin, P., Schuhmann, W., Klenerman, D., Rusakov, D., Sviderskaya, E., Korchev, Y., *ACS Nano*, *accepted*.

【25】内視鏡下手術支援用高機能治療デバイスロボット融合システム

研究者 東京大学大学院工学系研究科 准教授 小林 英津子

〔研究の概要〕

本研究では高機能治療デバイスと鉗子ロボット技術との統合を目的として、小型 USAD 用回転型アクチュエータの開発を行った。超音波モータは円筒型 PZT に 4 分割電極を貼り付け、90 度ずつ位相をずらして交流電圧を加えることにより発生する振動を回転動作に変更する、円筒型回転アクチュエータを採用した。作成したアクチュエータは、外径 12 mm の小型 USAD を内部に収めることが可能とし、直径 20mm、長さ 79mm にて実現した。また固定保持力 5N、回転速度 15rpm を実現した。

〔研究経過および成果〕

1. 背景と目的

腹腔鏡下手術で用いられるエネルギー鉗子の中で超音波凝固切開装置 (Ultrasonically Activated Device, 以下 USAD) は、患部の切開と凝固が同時に行える装置であり、有用である。しかし一般的な USAD は直線的な形状であるため、作業自由度の不足より、術者の負担が大きい。そこで、我々は高機能治療デバイスと、鉗子ロボット技術との統合の一環として、小型 USAD 用回転機構を開発した。

2. 小型 USAD と超音波モータ

回転の対象である小型 USAD は、外径が 12 mm、長さが 57 mm である。本研究では、小型 USAD 用回転機構として、超音波モータを用いることとした。超音波モータによる回転機構としては円筒型超音波モータを採用した。円筒型超音波モータは、振動子の外側に配置した 4 分割した電極に、位相が 90° ずつ異なる電圧をかけることでたわみ振動を起し、この振動を摩擦によってロータに伝え回転させる。

今回固定保持力は、臓器を把持した時安全に操

作可能な、成人臓器の 1/3 に当たる量に耐えられる値として 5N と想定した。回転速度は術者が操作するにおいて容易に感じる速度として 15rpm とした。

ステータとして用いた円筒形圧電セラミックス(富士セラミックス, C213)の寸法は、外径 12 mm の小型 USAD が内部によく収まる値として、内径 13 mm、外径 14 mm、長さ 25 mm とした。ロータとの接触面を線接触にする為、45° のテーパ加工をした。このステータは両端自由 1 次自由振動モードを用いるため、振動の節になる 2 点に O-ring を用いて円筒型振動子を固定した。

ロータは SUS 材質であり、ステータと同様に接触面を R9.5 球面加工した。ネジにより回転対象である小型 USAD に固定されている。ステータとロータの間に与圧を与える機構として薄いウェーブスプリングを採用し、摩擦軽減の為に、固定にテフロンを用いた。ロータの軸固定のため、ベアリングを前後に配置した。円筒型超音波モータの構成を Fig. 1 に示す。また、試作した超音波モータを Fig.2 に示す。小型 USAD 挿入後全体の大きさは、直径 20mm、長さ 79mm となった。

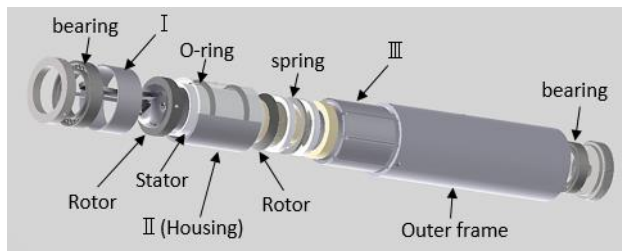


Fig. 1 円筒型超音波モータの構成

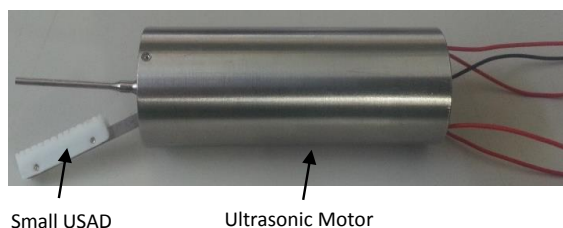


Fig.2 回転機構を適用した小型 USAD

3. 評価実験

与圧が高くなるほど、固定保持力は高くなり、回転トルクも高くなる。本実験では、要求仕様である固定保持力 5N に焦点を当てて与圧を調節した。その後、回転速度 15rpm が得られる電圧を求め、その時の発生トルクを評価することにした。

与圧による固定保持力を測定した結果を Fig.3 に示す。必要とする固定保持力 5N を得るために、スプリングにより約 300gf の与圧が必要であった。次に回転速度を測定した結果、60Vp-p を印加した時 15rpm の回転速度が得られた。また、引加電圧に対するモータのトルクを計測した。60Vp-p の時、自身が回転するのに十分な 2Nmm の発生トルクを実現した。

5. 考察とまとめ

超音波モータを用いた小型 USAD 用回転機構の開発及び評価を行った結果、十分なトルク、スピードを持ちつつ、直径 20mm、長さ 79mm のサイズを実現した。回転機構に超音波アクチュエータを用いる利点と

しては、体外からの動力伝達が必要ないため、多自由度鉗子の先端でも高い制御性が得られることであり、他の高性能デバイスとの統合も可能である。

一方、挿入するトローカルの直径が最大 15mm であることを考えると、本システムはさらなる小型化が必要である。本機構では回転機構として占めている直径方向厚さが約 8mm であるため、直径方向にスペースを取らない新しい駆動方式を検討する必要がある。またアクチュエータだけでなく USAD 自体の更なる小型化が必要である。我々は、本研究の一部にて USAD 本体の小型化を検討している。今後は USAD 及びアクチュエータのさらなる小型化を進めていく。

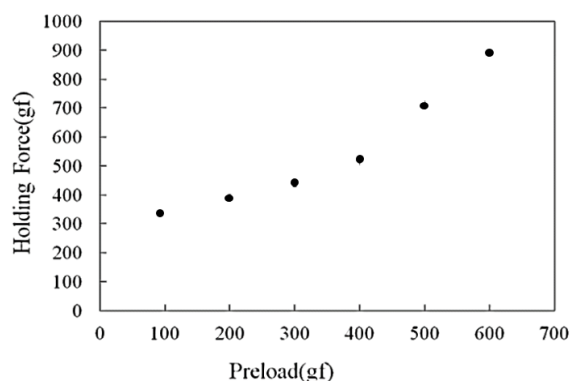


Fig. 3 与圧による固定保持力の変化

【発表論文】

1. Etsuko Kobayashi, Sakamoto Hisashi, Woojin Choi, Takeshi Morita, Takefumi Kanda and Ichiro Sakuma, Multi Degrees of Freedom Forceps for Ultrasonically Activated Device using Ultrasonic Motor The first CIRP conference on BioManufacturing:pp70-73,2013
2. 崔宇鎮, 安藤岳洋, 神田岳文, 佐久間一郎, 小林英津子, 超音波モータによる超音波切開凝固装置用回転機構の小型化、精密工学会 2014 年度春季大会 (発表予定)

【26】 脳波・NIRS の同時計測による乳児期の睡眠ステージと脳機能ネットワークの関係の解明

研究代表者 東京大学大学院教育学研究科 教授 多賀 巖太郎

共同研究者 玉川大学脳科学研究所 准教授 佐治 量哉

【研究の概要】

乳児期における睡眠ステージと脳機能ネットワークの関係を解明するために、生後 3 ヶ月児を対象とした脳波・NIRS (near-infrared spectroscopy) の同時計測をおこなった。その結果、動睡眠においては脳の異なる領域が同期して活動をするのに対して、静睡眠においては領域間で異なる位相を持ちながら非同期的な活動をするのが明らかになった。また、本テーマを深めるためには、新生児期を含む乳児期の睡眠ステージそのものを詳細に理解する必要性が生じたため、生後 2 ヶ月児を対象とした比較的長い時間の脳波計測、および新生児期における脳波の統計数理的解析に取り組んだ。

【研究経過および成果】

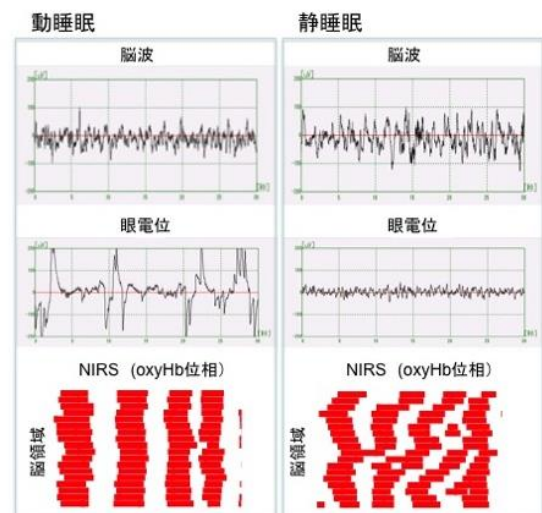
本研究では、主に睡眠中の乳児の脳活動に関して NIRS と脳波の同時計測を実施した。また睡眠中の乳児の脳活動を詳細に理解するために、新生児を含む乳児の脳波のみの計測および解析にも取り組んだ。

1. 睡眠中乳児の脳活動の NIRS と脳波の同時計測
目的: 乳児の睡眠には、脳波の活動パターンが異なる動睡眠 (成人の REM 睡眠に対応) と静睡眠 (成人の NREM 睡眠に対応) の間の状態遷移があることが知られてきた。しかし、それぞれの状態における脳の機能的ネットワークがどのように異なるのか明らかにされていない。本研究では、発達初期の基本的な行動や脳機能が現れる 3 ヶ月児に焦点をあて、NIRS と脳波の同時計測により、睡眠状態に応じた機能的ネットワークの違いを明らかにすることを目的とした。

方法: 生後 3 ヶ月児 57 名を対象とした。東京大学の実験室において、入眠した乳児の頭部 (前頭、側頭、頭頂、後頭を含む領域) に 94 チャンネルの NIRS のプローブを装着した。また、頭頂部に脳波電極を装着するとともに、眼電位電極も装着した。自然睡眠状態

で 15 分程度の計測を行った。計測終了後に、3 名の評定者 (実験者を含む) が、脳波、眼電位、ビデオ映像を用いて、睡眠状態を動睡眠・静睡眠・覚醒に分類した。分類された状態ごとに、NIRS で取得された酸素化ヘモグロビンおよび脱酸素化ヘモグロビンの相対変化に関して、94 チャンネルの時系列データの分析を行った。信号変化のゆらぎの大きさ、チャンネル間の時間相関や位相同期による機能的ネットワーク、酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの変化の位相差等の定量化を行った。

結果: 32 名の乳児の睡眠中のデータを取得した。



他の25名は、入室後1時間程度の間に入眠しなかった、あるいは計測開始直後に覚醒したという理由で、計測データを得ることができなかった。32名の睡眠状態は、動睡眠のみ20名、静睡眠のみ4名、動睡眠と静睡眠を含む8名に分類された。分類されたデータごとに、位相同期度を比較したところ、動睡眠では領域間の同期度が高く、静睡眠では領域間の同期度が低いことが顕著に見いだされた(下図)。

考察:本研究では、0.01Hz から 0.1Hz の時間スケールで変動する脳血流動態から、脳活動の領域間の同期性を定量化することで、脳の機能的ネットワークを推定した。その結果、動睡眠では、大域的に同期した活動をするのに対して、静睡眠では、領域間で異なる位相を持ちながら非同期的な活動をすることが明らかになった。今後はこれらの機能的ネットワークの違いが、脳の初期発達においてどのような役割を担っているのかを明らかにしていく。本研究の成果は、XIX Biennial International Conference on Infant Studies (Berlin, Germany, July 3-5, 2014)にて報告する予定である。

2. 睡眠中乳児の脳波計測による睡眠ステージの遷移と脳の機能的ネットワークの解明

目的:乳児期に特徴的な睡眠周期の順序性や睡眠段階の遷移が、脳機能の発達にどのような影響を与えているのかは全くわかっていない。本研究では、睡眠周期の変化、睡眠ステージの遷移前後における脳の機能的ネットワークを明らかにすることを旨とする。

方法:前頭極部から頭頂部までを覆う頭皮上9部位(Fp1,Fp2,F3,F4,C3,Cz,C4,P3,P4)から自然睡眠時の脳波を記録した。脳波はサンプリング周波数500Hz,0.5Hzのハイパスフィルタ、100Hzのローパスフィルタ、50Hzのnotchフィルタを使って記録し、

NREM-REMの1周期に相当する全睡眠を記録した。結果:39名の2ヶ月児(生後80-90日齢)が参加した。そのうち自然睡眠へと導入することができたのは28名(72%)であった。しかし、17名は 5.7 ± 3.5 分で中途覚醒をしたため、計15名から、40分超の自然睡眠を記録することができた。眼視判読の結果、14名で睡眠ステージの遷移を確認することができた。特にNREM1からNREM2への遷移は入眠後約 19.5 ± 6.3 分で生じていること、その後はNREM2-3へと遷移するがREMへはあまり遷移しないことも確認できた。今後、統計数理解析を通して、睡眠ステージの遷移前後における脳機能ネットワークの変化を明らかにしていく予定である。

3. 早産児脳波の発達的变化

目的:早産児の脳波の特徴量を抽出し、妊娠週数に応じた変化を明らかにすることを目指した。

方法:12名の早産児を対象とし、22週-44週の時点で、前頭部および後頭部の6チャンネルの脳波を計測したデータ(計測時間15分から80分間)を用いて解析を実施した。それぞれの時系列のヒルベルト変換を行い、信号の包絡線を求め、振幅の変化に関する確率密度関数を得た。

結果と議論:脳波の振幅の確率密度関数は、32週では対数正規分布に、40週ではガンマ分布に良くフィッティングできることが明らかになり、脳波の特徴の変化を妊娠週数の関数として表せることが示唆された。本成果は学術論文として投稿中である。

【発表論文】

1. Saji R et al. Probability distributions of the electroencephalogram envelope of preterm infants. (submitted)

【27】 ナノ流路内の非線形電気インピーダンスによる 1 分子測定能の高度化

研究者 東京工業大学理工学研究科 准教授 山本 貴富喜

【研究の概要】

界面の構造を知ることは、空間のほとんどが界面となるようなナノ流路内の物理現象を理解する上で非常に重要となる。例えば、固液界面には電気二重層と呼ばれる局所的なイオン分布が巨大なキャパシタンスを形成するため、これが液中での高感度な電流測定を阻害する一因となっている。ところが、流路幅が電気二重層厚さオーダーとなるナノ流路では、流路幅が狭まるにつれて互いの向かい合う電気二重層が重なり合い、見かけ上の電気二重層が消失することが様々な実験や理論計算から示唆されている。従って、電気二重層の消失効果を利用すれば、ナノ空間での特殊なイオン分布構造を利用した測定系や操作系の実現が可能となる。しかしながら、これまでの実験的な電気二重層の評価はいずれも流路の入口と出口間における流動現象や電流測定から求められたもので、ナノ流路内の電気二重層を直接測定した例は皆無である。そこで本研究では、ナノ流路内の電気二重層を電気インピーダンス測定によって直接測定し、電気二重層が消失する効果の実証と、その過程の定量的評価を行なった

【研究経過および成果】

図 1,2 に作製した測定用ナノ流体デバイスを示す。ナノ流体デバイスは、ナノ流路とそれを挟むように配置された電極対を有しており、均一な電場を形成するために測定電極対は基盤内に埋め込まれている。基板は 0.1nm 厚さの高純度シリコーンゴム膜でシールされた構造となっている。

ほぼ等しい水和イオン半径 (K^+ :0.133nm, Cl^- :0.130nm)を有するため、アニオンとカチオンでほぼ等しい水和半径を有する KCl 水溶液をサンプル溶液として利用した。測定電極をインピーダンスアナライザ(SI 1260, Solartron Analytical)へと接続し、印加電圧 50mV で、100Hz から 10MHz の周波数範囲にて測定した。KCl 濃度は 1M, 1mM, 1 μ M, 1nM と変化させつつ、幅 107nm のナノ流路内で電気インピーダンス測定を行なった結果を図 3 に示す。ナノ流路内の電気化学現象

は、電気二重層キャパシタ C_{edl} と電荷移動抵抗、そして

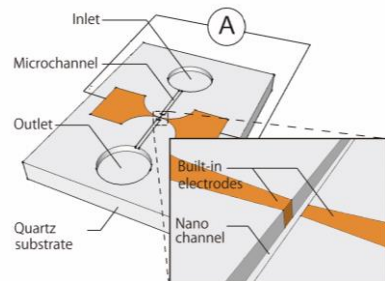


図 1 ナノ流体デバイス

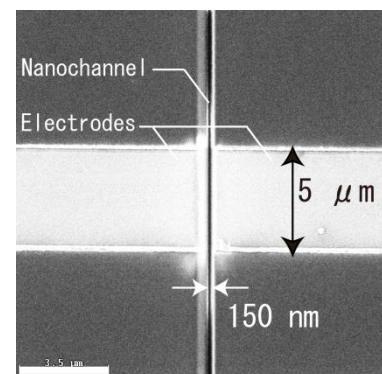


図 2 測定部(ナノ流路+電極対)の SIM 像

溶液抵抗 R_{sol} とギャップキャパシタ C_{gap} で構成される等価回路で表すことができる。 C_{edl} と電荷移動抵抗は電極の表面粗さやイオンの吸着を鑑みて CPEs でモデル化を行なった結果を図 3 の実線に示す。図 3 を見て分かるように、今回の測定と等価回路は良い一致を示すため、本等価回路は物理モデルとして利用することが出来ることが明らかである。

図 4 に電気二重層厚さの溶液イオン濃度依存性を示す。流すサンプル溶液の KCl 濃度を 1nM から 1M と変えながら、56 から 815nm 幅のナノ流路内にて電気インピーダンス測定を行なった。

電気二重層厚さは、図 3 中に示す等価回路のコンデンサ成分から計算した。実線は電気二重層厚さの理論値を与えるデバイ長をプロットしたものである。図 4 から、電気二重層はイオン濃度の減少と共に厚くなり、最終的に一定になっていることが分かる。これは電極対に形成される電気二重層が重なり合い、ナノ流路内が電気二重層で満たされているためだと考えられる。

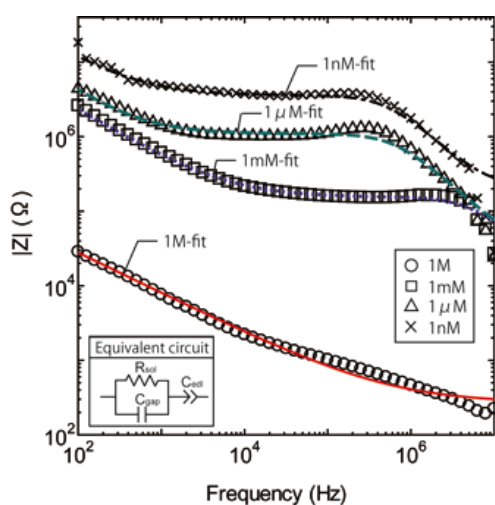


図 3 電気インピーダンス分光(実線は等価回路を用いてフィッティングを行なったもの)

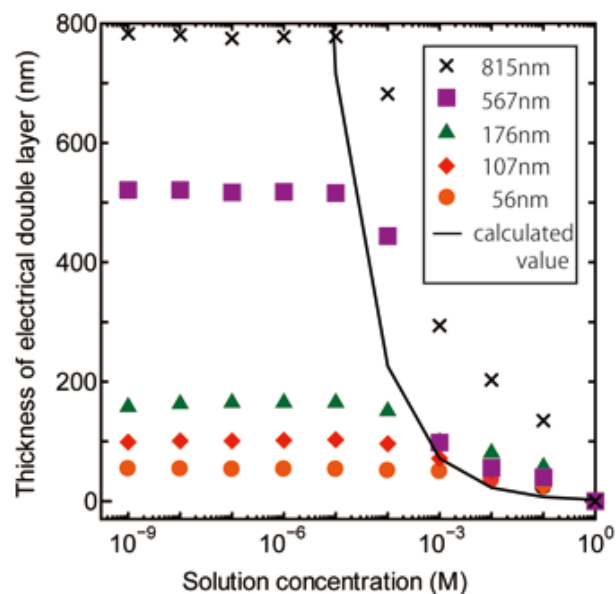


図 5 電気二重層厚さの溶液イオン濃度依存性

本研究では、電気二重層厚さよりナノ流路幅が小さい時、電極対に形成される電気二重層が重なり合い、ナノ流路内が電気二重層で満たされることで、見かけ上電気二重層が消失することを実験的に実証することに成功した。本研究では静的な構造の測定に留まったが、今後は流れがあるような場合における電気二重層の構造や、水和半径の影響などの定量的評価を行なっていく予定である。

[発表論文]

1. P. Porpin, Katsuo Mogi, R. Hatsuki, T. Yamamoto, "Direct evaluation of the electrokinetic properties of electrolytes in a nanochannel using electrical impedance spectroscopy", *ACS NANO*, submitted.
2. P.Pungetmongkol, R.Hatsuki, T.Yamamoto," ELECTRICAL EVALUATION OF HYDRATED DIAMETER DEPENDENT THICKNESS OF ELECTRIC DOUBLE LAYER IN NANOCHANNEL", *Transducers 2013*, June 16-20, 2013, Barcelona. Spain

【28】 シリコンナノ構造体によるシングルセル空間分画技術に関する研究

研究者 香川大学工学部 准教授 寺尾 京平

〔研究の概要〕

再生医療や基礎生物学の分野では、細胞内の構造の非対象性を計測し、制御することが鍵になる。しかし、従来の細胞を集団として扱う技術では集団平均された情報しか得られず、1個の細胞(シングルセル)内の物質の空間的な分布について定量的に計測する適切な実験技術が存在していない。本プロジェクトはこの課題を解決するためナノ加工・操作技術を応用し、細胞内の物質の空間分布を取得するための物理的な細胞前処理技術の開発に取り組んだ。シングルセルを複数の領域に区画化し、さらに物理的に分割する技術(シングルセル空間分画技術)を提案し、研究期間内に物理的区画化分割の原理の実証まで達成した。

〔研究経過および成果〕

細胞内の物質分布・構造の非対象性(細胞極性)は多くの細胞に見られ、細胞機能の発現や生物の非対称な構造形成に深く関わっていることが知られている。そのため、それら細胞内の構造の非対象性を計測し、制御することが鍵になると考えられる。しかし、従来の試験管実験のように細胞を集団として扱う技術では集団平均された情報しか得られず、1個の細胞(シングルセル)内の物質の空間的な分布について定量的に計測する適切な実験技術が存在していない。本プロジェクトはこの課題を解決するためMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術開発で培われたナノ加工・操作技術を応用し、細胞内の物質の空間分布を取得するための物理的な細胞前処理技術の開発に取り組んだ。シングルセルを複数の領域に区画化し、さらに物理的に分割する技術(シングルセル空間分画技術)を確立し、細胞空間分画を個別に計測することで細胞内の物質の2次元分布像の取得に繋げることを目的とした。特に期間内では、物理的区画化分割の原理実証まで達成することを目

標とした。図1に提案する細胞空間分画方法を示す。細胞サイズよりも微小なナノレベルの刃状の構造体を細胞に押し付けることで、細胞を物理的に切断する手法である。このとき、細胞が微小な断片に一括で分割されると共に空間的に区画化されることになる。

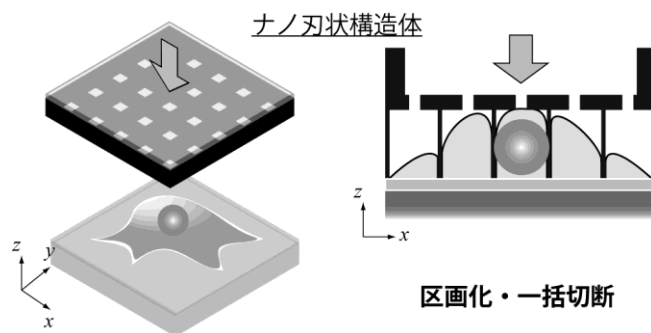


図1. 細胞空間分画概念図。

本研究では以下の課題に取り組み、細胞空間分画の原理検証を行った。

- ・ナノ構造体作製技術の確立：超高精度電子線描画装置とICP-RIE装置を利用したMEMSプロセスにより、加工条件を最適化しながら、3次元的な格子・短冊・ハニカム構造を作製した。6 mm x 6 mmの領域内に幅500 nm、高さ10 μmのサイズのナノ刃状構造を均一に作製した(図2a)。

・細胞分割用装置の試作と実証：顕微鏡ステージ上でナノ構造体を細胞に接触・物理的に押しこむ装置を試作すると共に、細胞と構造体の接触を確実にするため、柔軟なシリコン樹脂をコートした細胞培養基板を作製した。その上に細胞を培養した後、さらにそれをコラーゲンゲルで包埋した状態で細胞分画操作を行った（図2b）。

・細胞分割の実証：ヒト由来の培養細胞（HeLa細胞）をCalceinにより蛍光染色することで可視化し、細胞分画操作前後での蛍光像の比較から、細胞の物理的な分割を検証した。その結果、分画操作後には分画デバイスの格子サイズと同程度の小さな細胞断片が得られたことから、分画が実証されたと考えられる（図2c）。

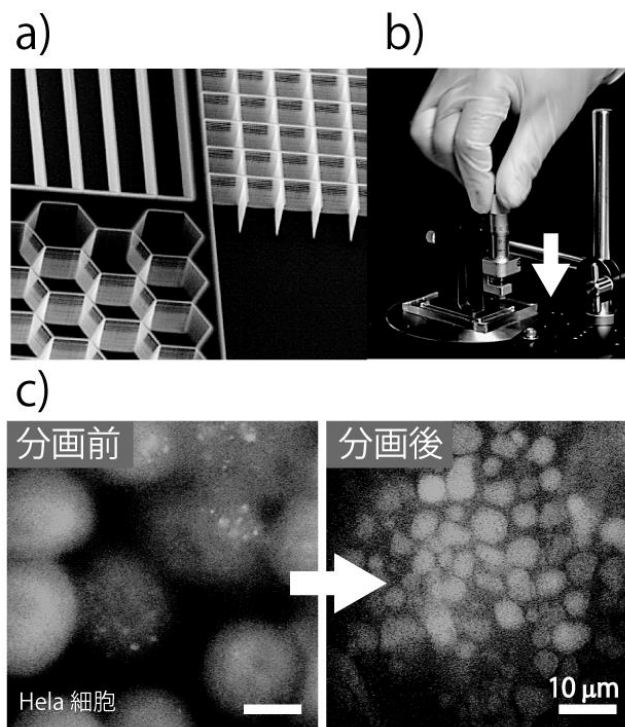


図2. 細胞空間分画デバイス及び分画実験結果.
a) 細胞分画用刃状ナノ構造体, b) ナノ構造体の押圧機構, c) HeLa細胞の空間分画操作前後の蛍光像.

本研究課題では、比較的単純な物理的分割についてナノ構造体の製作条件と分画装置の検討を進め、モデル細胞での切断実証に至った。細胞空間分画技術については新しいアプローチであり、実用化に向けては研究開発すべき要素技術やシステム化には多くの課題がある。しかし、実現された場合、幅広い細胞種・計測対象に対して、これまでは定性的であった細胞内の物質分布を詳細に定量化することが可能となり、細胞内の非対称な物質分布に関するシングルセル計測ツールとして細胞極性の理解に寄与することが期待される。

【発表論文】

1. 寺尾京平, 竹村佑人:”細胞空間分画装置および微細構造刃”, 国立大学法人香川大学, 特願2013-160041, 出願日:2013年8月1日
2. 今井啓輔, 鈴木孝明, 高尾英邦, 下川房男, 松岡達, 小寺秀俊, 寺尾京平: “細胞クラスター内における細胞間相互作用の解明に向けた単一細胞薬剤刺激デバイス”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会バイオマイクロシステム研究会予稿集, pp.15-19 (BMS-13-038) (2013).
3. K. Terao, M. Gel, A. Okonogi, A. Fuke, T. Okitsu, T. Tada, T. Suzuki, S. Nagamatsu, M. Washizu, H. Kotera: “Subcellular glucose exposure biases the spatial distribution of insulin granules in single pancreatic beta cells”, *Scientific Reports*, accepted.

【29】 誘電泳動インピーダンス計測法のノロウイルス特異検出法への拡張

研究者 九州大学大学院システム情報科学研究所 助教 中野 道彦

共同研究者 九州大学大学院システム情報科学研究所 教授 末廣 純也

〔研究の概要〕

本研究は誘電泳動インピーダンス計測法(DEPIM)によってノロウイルスを検出することを目的に行った。まず、ノロウイルスの誘電泳動特性について調べた。その結果からノロウイルスの電気的特性を計算した。他のウイルスとの電気的特性の違いによって、ノロウイルスを特異的に検出する可能性を示した。さらに、DEPIM でノロウイルスを測定したところ、50 ng/ml を数十秒で検出できることを示した。また、ノロウイルスの特異かつ高感度な検出のために、核酸増幅法(PCR)と DEPIM を組み合わせることを考えた。PCR は特異性が高く、高感度であるが、増幅 DNA の検出に手間がかかる。DNA 結合に伴って微粒子の誘電泳動特性が大きく変化することを見だし、この現象を利用して、PCR 後の DNA を 10 秒程度の計測で検出出来ることを示した。

〔研究経過および成果〕

はじめに

本研究では、ウイルス性感染症の原因ウイルスのひとつであるノロウイルスを電気的に検出する方法について検討した。そのために誘電泳動インピーダンス計測法(dielectrophoretic impedance measurement、DEPIM)を応用した。以下に、その結果を報告する。

誘電泳動インピーダンス計測法 (DEPIM)

誘電泳動とは、不平等電界中に置かれた誘電体粒子に働く力で、その大きさは粒子と溶媒の電気的性質の違いに依存する。誘電泳動インピーダンス計測法(DEPIM)はその誘電泳動を利用した微粒子計測法で、溶液中の細菌を検出する手法として開発された。DEPIM は、(1)誘電泳動によって対象を微細電極に捕集、(2)捕集に伴う微細電極のインピーダンス変化を計測、という手順で行う。

DEPIMによるノロウイルス検出

まず、ノロウイルスの誘電泳動特性を調べた。組換えノロウイルスキャプシド(非感染性のウイルス粒子)を蛍光染色して、微細電極上で誘電泳動を発生させ、その特性を計測した。種々の条件で誘電泳動を測定することで、対象粒子の電気的特性を計算出来る。ここでは、種々の条件において誘電泳動力がゼロになる印加電圧の周波数「クロスオーバー周波数」を測定し、その測定結果からノロウイルスの電気的特性を計算した。その結果、ノロウイルスの電気的特性はそれぞれ、表面導電率:0.11 nS、ゼータ電位:77 mV、比誘電率:77であるという結果を得た。アデノウイルスやロタウイルスと比較したところ、表面導電率が一桁近く低かった。この電気的特性を利用して、ノロウイルスを他のウイルスや細菌と分離して検出できる可能性が示された。

次に、DEPIM によるノロウイルスの検出を試みた。図 1 は、種々の濃度におけるノロウイルスの検出結果である。50 ng/ml のノロウイルスを数十秒で検出できることを示した。これは、検出時間が 15 分の簡易検査法であるイムノクロマト法と同程度の感度である。

PCR の迅速化への応用

ウイルス検査では、特異的にそのウイルスを検出することが何よりも重要である。そこで、DEPIM 法と抗原抗体反応の組合せが考えられる。しかし、DEPIM によるノロウイルスの検出感度は 50 ng/ml であり、イムノクロマト法と同程度ではあるが、高感度とは言えない。抗原抗体反応を組み合わせても、特異性は確保出来ても感度の上昇は見込めない。そこで、特異的かつ高感度なウイルス検査法である核酸増幅法 (polymerase chain reaction、PCR) に DEPIM を応用することを考えた。PCR は対象ウイルスの遺伝子から特異的に DNA を増幅する。しかし、その DNA の検出に手間と時間が掛かる。そこで、DEPIM を応用して、PCR 後の DNA 検出を短時間化することを試みた。

DEPIM による DNA 検出のために、微粒子の誘電泳

動を利用することを考えた。微粒子に DNA を結合することで、その微粒子の誘電泳動特性が大きく変わることを見いだした。即ち、微粒子のみでは微細電極に捕集されないが、DNA が結合することで微細電極に捕集されるようになる。これを利用して、DNA を迅速に検出した。図 2 は、合成ノロウイルス RNA から逆転写 PCR によって DNA を増幅し、その DNA を検出した結果である。10 秒程度の計測で DNA を検出できた。本法によって、PCR によるノロウイルス検査を飛躍的に短時間かつ簡便に行えるようになる。

【発表論文】

1. M. Nakano et al., "Observation of dielectrophoresis of norovirus capsid," Proc. of 2013 International Symposium on Information Science and Electrical Engineering, p.33
2. M. Nakano et al., "Detection of norovirus and rotavirus by dielectrophoretic impedance measurement," Proc. of the 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology, pp. 347-378.

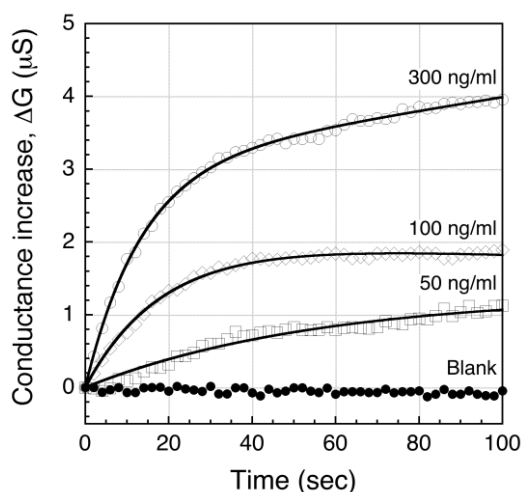


図 1 DEPIM によるノロウイルスの検出

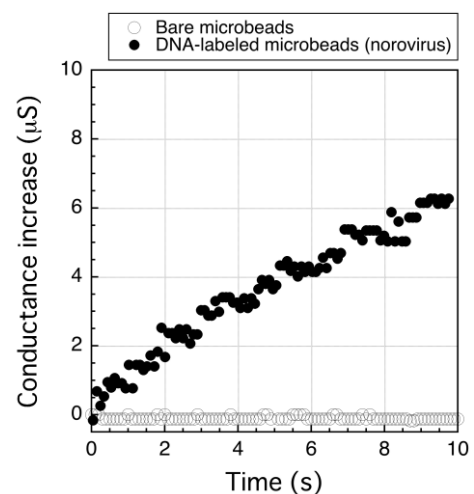


図 2 DNA 結合微粒子の DEPIM

【30】 複数の運動学習をもたらす神経機序に関する研究

研究者 高知工科大学総合研究所 講師 門田 宏

【研究の概要】

本研究では、脳の活動状態をフィードバック情報としてトレーニングすることにより複数の運動学習をもたらす神経機序を明らかにしていく研究活動の一環として、機能的磁気共鳴画像装置 (fMRI) を用いて屈曲と伸展の二つの運動を行っている時の脳活動の検討と、経頭蓋磁気刺激装置 (TMS) を用いてトレーニング前後で脳活動状態がどのように変化するかを検討を行った。その結果、二つの運動に関わる脳活動は、活動パターンから分離が可能であること、トレーニングによって皮質脊髄路の興奮性が変化することが示唆された。

【研究経過および成果】

本研究では、脳の活動状態をフィードバック情報としてトレーニングすることにより複数の運動学習をもたらす神経機序を明らかにしていく研究の一環として、以下の2つの研究を行った。

1 つ目の研究は、どのような情報をフィードバックとして用いることができるか明らかにするために、複数の運動を行っている時の脳活動を機能的磁気共鳴画像装置 (fMRI) により検討した。2 つ目の研究は、脳の活動状態をフィードバック情報としてトレーニングすることにより脳活動がどのように変化するか経頭蓋磁気刺激装置 (TMS) を用いて皮質脊髄路の興奮性の変化から検討した。本研究では、対象とする運動は手首の屈曲動作と伸展動作、対象とする筋は橈側手根屈筋 (FCR) と橈側手根伸筋 (ECR) とした。

1. 屈曲/伸展動作に関わる脳活動の違いを検証

複数の脳の活動状態をフィードバック情報として利用する時、条件ごとに脳活動部位が分離できる場合は部位の情報をそのまま用いてトレーニングを進めることができる。しかし、脳活動部位が同じ場合は、脳活動パターンなどによる分離を行う必要がある。そこ

で本研究では、複数の運動を行っている時の脳活動について活動部位およびパターンの検討を行った。

被験者はジョイスティックを操作して屈曲および伸展動作を行った。課題遂行中の脳活動は fMRI (Siemens verio, 3 テスラ) により撮像した。脳画像の解析には SPM8 を用いた。

解析の結果、屈曲動作時の脳活動部位は伸展動作時の脳活動部位と重なっており、部位の違いとしては、二つの動作に関わる脳活動を分離することが難しいことが明らかとなった。次に、脳活動のパターンから分離が可能であるかどうか、Brain Decoder Toolbox を用いて解析を行った。その結果、一次運動野 (M1) のみの活動情報を用いた場合は 87.5%、全脳の情報を用いると 95.83% の正答率で分離できることが明らかとなった。これらの結果から2つの運動は、脳活動パターンによって分離が可能であると考えられる。

2. ニューロフィードバックによるトレーニング

ニューロフィードバックトレーニングをすることによって脳活動が変化するかどうかを TMS による運動誘発電位 (MEP) の変化から検証を行った。

MEP の記録は、被験者が何も考えない安静状態および手首の運動をイメージしている状態の 2 条件で行った。ニューロフィードバックトレーニングでは、まず手首の屈曲伸展運動を行う時に活動する脳部位を同定し、その部位の活動度合いを棒グラフで表示した。そして、被験者には棒グラフが出来るだけ大きくなるように努力するよう教示した。

図 1 はニューロフィードバックトレーニングを行っている時の最後のセッションの脳活動である。M1 に活動が見られない被験者と見られる被験者に分かれた (threshold $P < 0.001$ uncorrected, cluster $P < 0.05$ corrected)。

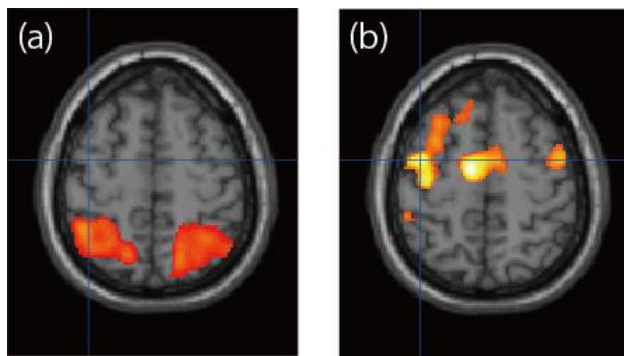


図 1 ニューロフィードバックトレーニング時の脳活動。(a)活動の見られなかった被験者。(b)活動が見られた被験者。

図 2 はニューロフィードバックトレーニング後の FCR の MEP の振幅の変化である。MEP はトレーニング前を 100%として正規化している。トレーニング中に脳活動の見られなかった被験者ではトレーニング後の MEP は減少しており ($P \leq 0.05$)、この減少は 30 分続いた ($P < 0.05$, 30 分後イメージを除く)。一方、トレーニング中に脳活動の見られた被験者では、直後の MEP は増加していた ($P < 0.05$)。これらの結果から、ニューロフィードバックトレーニングによって皮質脊髄路の興奮性を変化させることができ、トレーニング中

の脳活動から変化の方向性が予測できることが示唆された。

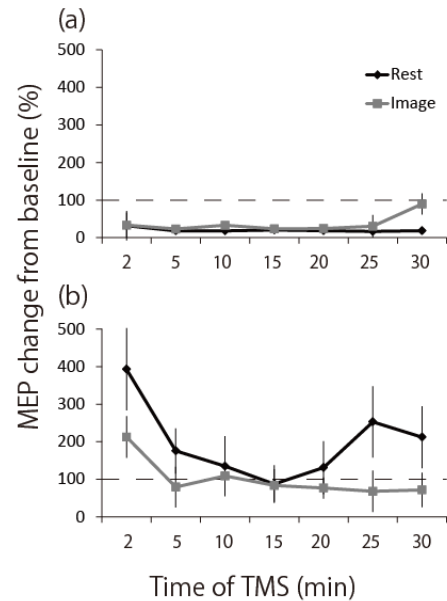


図 2 トレーニング後の MEP の経時変化。(a) トレーニング時に運動野の活動が見られなかった被験者、(b) トレーニング時に運動野の活動が見られた被験者

本研究では、ニューロフィードバックを用いて複数の運動学習を行うまでには至らなかった。しかし、本研究の一環として、脳活動部位およびパターンの解析による分離、およびニューロフィードバックによって皮質脊髄路の興奮性の変化をもたらすことが明らかとなった。

【発表論文】

1. Kadota, H. and Matsuzaki, K. Neural correlates of selective visual and auditory attention for directional movement. Society for Neuroscience, 456.15, 2013.
2. Yamanaka, K., Kadota, H. and Nozaki, D. Long-latency TMS-evoked potentials during motor execution and inhibition. Frontiers in Human Neuroscience, 7, pp1-11, 2013.

【31】計算機-生体ハイブリッド神経回路を用いた病態脳における異常な情報伝達機構の解明

東京女子医科大学医学部 助教 竹内 雄一

【研究の概要】

病態時における異常なシナプス伝達が、脳内神経細胞をどのように発火させ、疼痛などの症状を生じるのかは分かっていない。そこで本研究では、計算機-生体ハイブリッド神経回路(ダイナミッククランプ法)の実験系を構築し、シミュレーションにより再構築した病態時のシナプスコンダクタンスを生きた神経細胞に注入して、その影響を検討することを目的とした。現在、専用ソフトウェア SM2 の導入、SM2 言語による内因性膜・シナプスコンダクタンスの記述に成功しているが、ハードウェア(DSP ボード)のトラブルにより、実験系の完全構築には至っていない。今後、新規 DSP ボード用に SM2 ソフトウェアをバージョンアップして生体で検討を進めることが望まれる。

【研究経過および成果】

緒言

末梢神経切断により、脳内視床核の神経細胞は複数の新たな求心性線維入力(S-, W-線維)を受けるようになる(図1)¹⁾。新規入力線維の形成するシナプスでは伝達物質の受容体構成が通常と異なるが、このような異常なシナプス特性がシナプス後部の神経発火にどのような影響を与えるかは分かっていない。そこで本研究では、まず計算機-生体ハイブリッド神経回路(ダイナミッククランプ法)^{2,3)}の実験系を構築し、その影響を検討することを目的とした。

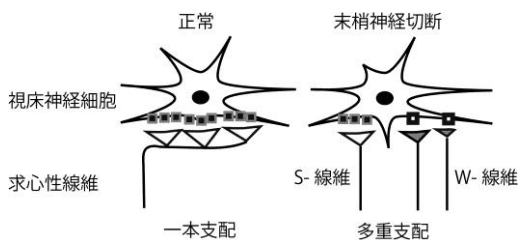


図1. 末梢神経切断による求心性線維多重支配化

材料・方法

ダイナミッククランプシステム: ダイナミッククランプシステムとして、イオンチャネル特性記述の自由度が高く、かつリアルタイム性に優れた SM2 システム(Cambridge Conductance)を用いた⁴⁾。パッチクラン

プアンプとして Multiclamp700A(MDS)、データ取得用ハードウェア・ソフトウェアとして、ITC-18(HEKA)・IgorPro(Wavemetrics)をそれぞれ用いた(図2)。

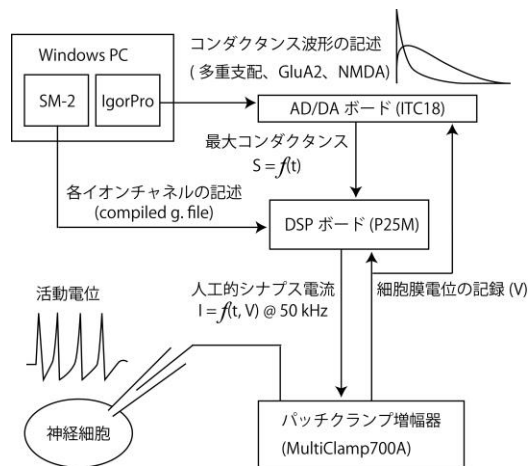


図2. SM2 および IgorPro ソフトウェアを用いたダイナミッククランプ法模式図

視床神経細胞モデルの構築・記述: 細胞膜等価回路に、内因性膜コンダクタンスおよびシナプスコンダクタンスを SM2 言語により記述・導入した(図3)。

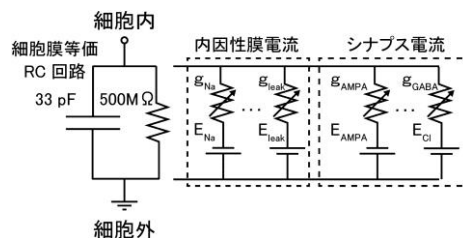


図3. 視床神経細胞等価回路

結果

ダイナミッククランプ法システムの導入・開発: ダイナミッククランプ法専用ソフトウェア SM2 を購入・導入し、刺激・データ取得制御環境である IgorPro ソフトウェアの設定(発表論文)を SM2 用書き換えた(図4)。

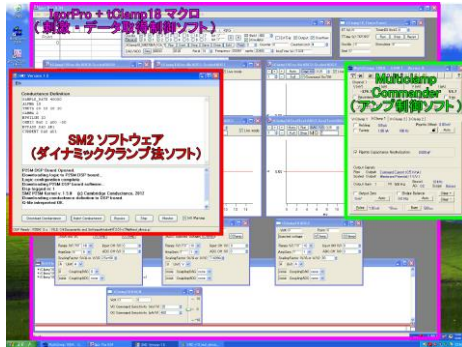


図 4. SM2 ダイナミッククランプ法実験環境

視床神経細胞モデルの構築: 単純な RC 回路(図3)に視床神経細胞の膜特性を付与してモデル神経細胞として用いるため、Rhodes および Llinás らの論文⁵⁾にしたがって電位依存性 Na チャネル、遅延整流性 K チャネル、T 型 Ca チャネル、過分極誘発陽イオンチャネル、シナプス外 GABA_A 受容体のコンダクタンス他を、SM2 言語で記述・導入した。

シナプスコンダクタンスの構築: 電位依存性および非依存性 AMPA 受容体、NMDA 受容体、および GABA_A 受容体を介するシナプスコンダクタンスを構築した(図5)。その際、コンダクタンスのキネティクス、電位依存性、ピーク値、および AMPA 受容体/NMDA 受容体比は、Takeuchi らの実測値を基にした¹⁾。

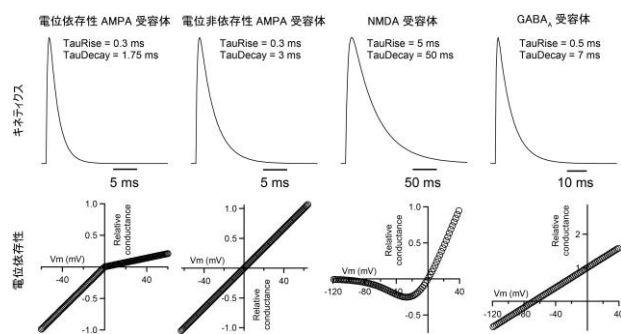


図5. 視床神経回路内シナプスコンダクタンスの構築

求心性シナプス入力パターンの作成: 求心性シナプス入力パターンは入力頻度の逆数がポアソン分布に従うように作成した(図6)。

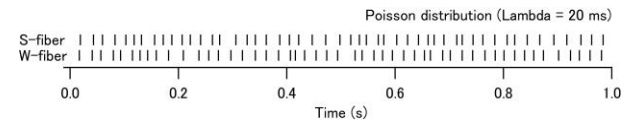


図6. 求心性シナプス入力パターンの例

病態時の視床における異常な情報伝達の解析: 構築したモデル神経細胞に、病態時を模したシナプスコンダクタンスを注入し、その発火特性を検討しようとしたが、未だシステムが上手く動作していない。

考察

システムの動作不良は、販売中止に伴いやむを得ず中古で購入した DSP カードの故障による可能性が高い。現在、National Instruments 社 X シリーズ DAQ カード用に新バージョン SM2 の開発が進んでいるので、引き続き開発者と密に連絡を取って、要望を伝える必要がある。X シリーズを用いた実験環境を整えたところで、生体での実験に移行したい。

参考文献

- (1) Takeuchi, Y., et al. (2012) J Neurosci 32, 6917-6930.
 - (2) Robinson, H.P. & Kawai, N. (1993) J Neurosci Methods 49, 157-165.
 - (3) Sharp, A.A., et al. (1993) J Neurophysiol 69, 992-995.
 - (4) Robinson, H.P. (2008) J Neurosci Methods 169, 271-281.
 - (5) Rhodes, P.A. & Llinás, R. (2005) J Physiol 565, 765-781.
- [発表論文]
Takeuchi, Y., et al. (2014) J Neurosci 34, 1258-1270.

【32】 高校生の進路選択・職業観形成と効果的教育・生活行動に関する縦断的研究 —欧米・アジア5か国との比較—

研究者 名古屋大学大学院 教授 寺田 盛紀

【研究の概要】

本研究は、学術的には、青年期の初期段階にある高校生に焦点を当て、欧米・アジア諸国との比較で、わが国高校生の進路選択・職業観形成の過程と効果的教育・生活行動をパネル調査やインタビュー調査等により実証的・縦断的に解明することを目的とした。そのことを通して、それぞれの生徒や国、学校種(普通校と職業校)にとって効果的かつ適切なキャリア教育のあり方を探ることを企図している。

【研究経過および成果】

研究の具体的課題として、2013年中に以下の2つのことを実施した。第1に、2009年と2011年に日本及びアメリカ、ドイツ、韓国、中国、インドネシアの海外5か国の高校生の進路選択と職業観形成に関して実施した2回のアンケート調査(2009年の回答者約2000人を2011年に約1000人を追跡)の結果(変化・発達)と、教育・学習活動、生活行動上における影響要因を分析すること。第2に、アンケート調査結果から現段階で定量的に確認されている各国の高校生の変化に作用している特徴的教育・生活活動を生活時間調査を通じて実施・分析した。

【結果その1:2年間の職業観の変化】

まず、第1の課題について、要点を摘記する。

職業観自体の反復効果:アメリカの第1尺度(自己実現・生活享受志向)、ドイツと中国の第2尺度(社会・奉仕志向)などの反復主効果において有意な低下傾向が見られた。他方、インドネシアの第1尺度、第4尺度(リーダー富有家志向)、日本の第1尺度、韓国の第3尺度(経済・安定志向)の反復主

効果では有意に向上している。

効果的出来事の有無の効果:6か国全体では、普通教科での学習(第1尺度と第2尺度)、職業高校での専門学習(第2から第4尺度)、アメリカの普通教科での学習(第3尺度)、テレビ・映画(第1と第2尺度)、ドイツの校外体験学習・企業実習における3尺度、インドネシアの労働行政の就職指導における第3と第4尺度、日本の学校の就職指導における第3尺度、韓国の職業高校での専門学習における第2と3尺度、中国のアルバイトにおける第2と第4尺度などの主効果において、有意なプラス効果が見られる。

交互作用:交互作用においては、有意な低下傾向が目立つけれども、インドネシアの職業高校での専門学習における第4尺度、韓国のボランティア活動における第3尺度では、有意な上昇傾向が見られた。

このように、高校生の職業観全体や個々の因子が時間が経つと向上するという単純なものでないこと、受験が近づけば逆に職業観自体が低下してしまうこと、また、効果的な生活・学習活動という点で、普通教科や職業教科の学習、校外・企業

体験学習、就職指導、主に家庭での余暇の過ごし方やアルバイトなどの役割が明らかになった。

【結果その2：高校3年生の生活時間調査の結果】

つぎに、2012年6月(ドイツのあるギムナジウム生男子1名、女子4名)、同年7月(韓国普通校の男子5名、女子4名、工業校の男子4名、女子1名)、そして本助成機関中の2013年11月(日本の普通校男女各3人、工業校の男子5名、女子2名)に対して行った生活時間調査の結果を示す。

学校種別比較

比較分析という点では、国の差異よりも学区種による差異がひじょうに顕著であった。日韓両国の普通高校生、今回はいずれも進学校であったが、そういう学校の生徒は、平日、週末(はそれ以上に)とも、自宅ないし、塾での受験準備学習に生活時間のほぼすべてを費やしている。韓国は日本以上にその傾向が強い。

それに対して、日韓とも、工業校生はずいぶん自由な時間を、ときに何をすることも定かではないことに多くの時間を費やしている。

国別比較

この点では、やはり日韓両国とドイツの間では、同じ普通校生徒の場合でも、大きな違いが見られた。ドイツの最終学年生は学校の外、家庭では、もちろん塾などは存在しないのであるが、あまり自主学习をすることはない。帰宅後昼食を取り、ゆったりと多様な生活をする。この点は、日韓両国の工業高校生に近いといえる。しかし、日韓の工業高校生ほど、TVやPC、携帯電話・スマートフォンに首っ引きというほどでもない。

生活時間の使い方と職業観形成との関連

どの国も、また日韓の工業校生を含めて、平日にアルバイトをする生徒は少なかった。しかし、韓国の工業校生の1人が金曜日夜からの徹夜アルバイトをしたり、ドイツや日本の工業校生で、平日特定日に数時間のアルバイトをする者が見られる。また、韓国やドイツの一部の生徒が、週末教会のミサに通ったり、長時間の教会活動に参加したりしている。とくに、結果1にみられるように韓国の生徒の経済・安定志向が2年間の間に有意に増加したことに対して今回の生活時間記録に見られるようなアルバイト経験やボランティア活動経験の有無が一定の作用をしていると考えられる。

職業観形成の変化において、日本の生徒の自己実現志向の増大は普通校の受験勉強中心の生活(普通校生)や何もしない(何をしているかはっきりしない)時間を含む自由時間中心の生活(工業校生)が作用していることが推測される。

また、ドイツの生徒に見られる自由時間中心の生活は、多様で豊かな人間形成に資するものと考えられるけれども、それは必ずしも社会奉仕志向や経済・安定志向の向上につながっていない可能性もあるという解釈を可能にした。

【発表論文】

「自己評価」欄に記した2つの論文に加え、下記を執筆、印刷中。寺田盛紀(2014, 近刊) 高校生の職業観形成に対する教育・生活活動の作用に関する比較研究—日・独・韓3か国における高校3年生の生活時間の事例調査結果から—名古屋大学大学院教育発達科学研究科 生涯学習・キャリア教育研究センター紀要, 第10号。

【33】 現代日本における労働観と社会意識の変容に関するコーホート分析

代表研究者： 京都大学 文学研究科 准教授 太郎丸 博

共同研究者： 桃山学院大学 講師 阪口 祐介

立命館大学 ポスドク・フェロー 田麿 裕祐

立命館大学 准教授 柴田 悠

同志社大学 専門調査員 宮田 尚子

〔研究の概要〕

現代日本における労働観と社会意識の変容について、さまざまな側面から研究を続けてきたが、論文が掲載決定となり、成果の公開できる性役割意識の変化について報告する。若者の性役割意識の保守化が繰り返指摘されてきたが、実際には、保守化したのは最近の出生コーホートだけでなく、古いコーホートも同様であることがわかった。保守化が起こった時期は、2000年ごろと考えられる。また、コーホート間で比較した場合、むしろ最近のコーホートのほうが平等主義的であるが、最近になるほどコーホート間の性役割意識の差は小さくなることがわかった。ただし、1973～2000年ごろの間には性役割意識の平等主義化があり、それはコーホート交代ではなく、個人が意識を変化させることによって生じていることがわかった。

〔研究経過および成果〕

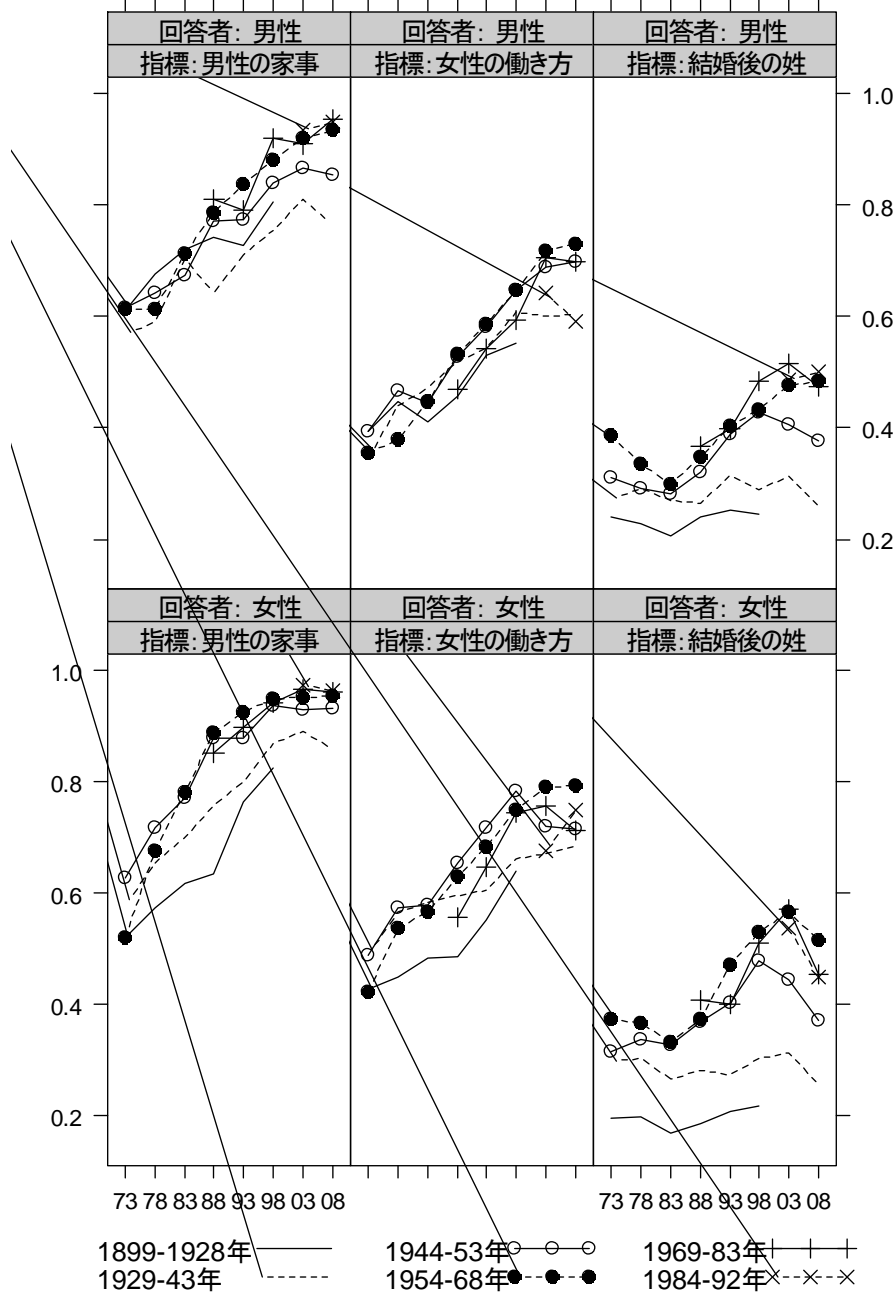
NHK 放送文化研究所の「日本人の意識」調査データを用いて、1973～2008年の人々の意識や価値観の変容を、年齢、出生コーホート、時代の効果を考慮しながら分析してきた。生活目標、労働観、生活満足度、宗教意識、政治意識、日本への愛着といった事項に関する意識の変化を研究してきたが、ここでは、論文が掲載決定となった性役割意識の変容に関する研究成果を報告する。

この研究の目的は、性役割意識がいつ頃どのような変化を見せるのか、その変化は何によって引き起こされているのか、そして新しいコーホートは本当に保守的であるのかについて検証することにある。

先行研究では、性役割意識は1970～1990年代にかけては時代の変化とコーホート交代の双方の影響によって弱まるが、2000年代に入ると新しいコーホー

トの女性で保守化傾向が見られると言われている。しかし、記述統計の解釈に留まっていたり、長期的な変化を捉えていなかったり、女性のみ分析になっており、男女双方の長期にわたる意識の変化について、時代、コーホートや関連する諸要因を統制して分析した研究は存在しない。

そこで、本稿では、上記の点について検討した。性役割意識の指標として、(a) 男性が家事や育児に参加することに賛成か、(b) 女性が結婚・出産後に働くことに賛成か、(c) 夫婦別姓に賛成か、という3つの指標をもちいた。男女別、出生コーホート別に性役割意識の変化をみると、次のページのグラフのようになる(数値が大きいほど、性役割意識は弱く平等主義的)。また、線形要因分解とロジスティック回帰分析を行った結果、(1) 性役割意識は男女とも2003年までは弱まる(平等主義的になる)が、それ以降は変化が停滞



したり保守化すること、(2) 学歴、職の有無、ライフステージを考慮に入れて分析すると、新しいコーホートは男女とも保守的ではないこと、(3)2003 年以降の意識の変化はコーホート交代ではなく、時代の影響(つまり個々人が意識を変化させること)によって社会全体が保守化することで生じており、この時代の影響は平均教育年数、有職者の割合、ライフステージの分布の変化とは別のものであることが明らかになった。2003 年以降は新自由主義改革が本格的に推進され、

収入の低い人々が増加した時期とも重なっていることから、全体的に人々の生活の安定が失われた結果、性役割意識が伝統主義的な方向に変化したという可能性が考えられる。

〔発表論文〕

1. 永瀬圭・太郎丸博, 2014, 「性役割意識のコーホート分析: 若者は保守化しているか?」『ソシオロジ』179 号, pp. 19-33.

【34】 東日本大震災における遠隔地避難者の社会的ネットワークに関する研究

—弱い紐帯の機能とメカニズム

研究者 山口大学人文学部 教授 高橋 征仁

〔研究の概要〕

2011年3月に発生した東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、東日本を中心に30万人以上の避難生活者が生み出された。このうち、西日本地区などへ生活拠点を移した遠隔地避難者は、数こそ少ないものの、パーソナリティや社会的ネットワークという点においては、極めて特徴的な傾向—弱い紐帯の活用—を示している。これらの点を具体的に明らかにすべく、本研究においては、沖縄県と岡山県、山形県の避難者の比較研究を行った。その結果、①社会的資源や情報に対する探索活動、②ネットワークの更新頻度の高さ、③自分の人生に対する自己構築性の回復等の社会的ネットワークの特性が見いだされた。これらの知見は、危機の時にこそ「弱い紐帯」の有効性が発揮されるというM.グラノヴェッターらの先行研究とも符合している。

〔研究経過および成果〕

東日本大震災における避難者の研究は、東北や関東地区でのものが多く、西日本地区での避難者に照準を合わせた研究は極めて少ない。しかしながら、西日本地区における避難者は、その数の少なさとはいずれに、震災前の生活を一新し、積極的に活動していく傾向がみられる。こうした傾向は、ネットワーク研究の分野においては、「弱い紐帯の強み」仮説として知られている。M.グラノヴェッター(1973)やN.クリスタキス(2009)らによれば、流動性の高い社会状況においては、地域や所属集団を異にする「弱い紐帯」が独自の強みを発揮するという。こうした「弱い紐帯」の強みが、なぜ、どのようにして発揮されるのか、本研究では、遠隔地避難者の調査研究を通じてこの点を明らかにすることを試みた。

本研究では、その具体的方法として、A 遠隔地避難者やそれを取り巻く社会的ネットワークに関するイ

ンタビュー調査と、B 沖縄県と岡山県、山形県の3県における震災避難者を対象とする調査票調査(合計200名)を実施した。B調査に関しては、当初、福岡県と沖縄県の2件を対象地として予定していたが、福岡のインフォーマントの転出や岡山県における避難・移住者の増加傾向などを踏まえて、沖縄県と岡山県、山形県の3県比較の調査設計の方がより適切であると判断した。

これらの調査を通じて、山形県や新潟県の近県避難者が震災以前の間人関係を色濃く継続しているのに対して、沖縄県や岡山県の避難者は震災を機に社会的ネットワークを大きく更新していることがわかった。このような関係の継続性の違いは、社会的資源や情報の制約、ネットワークの閉鎖性、心理的な揺らぎの継続などとも関連する傾向がみられた。既存の社会的ネットワークを基盤とした「強い紐帯」は、物理的・社会的・心理的距離の近さゆえに移動の容易さ

をもたらすが、同時に関係の強さゆえに、選択の幅や機会を制約してしまい、問題の長期化をもたらす面がみられた。

これとは対照的に、沖縄県や岡山県などの遠隔地避難者たちは、避難にあたっての物理的・社会的・心理的距離が大きく、様々な障害にぶつかっていた。しかしながら、社会的資源や情報に関する探索活動を活発に行うことで問題を解決し、新しいネットワークを構築・展開していく傾向も見られた。遠隔地避難者の中には、避難者という立場から支援者という立場に切り替えて支援活動をする者も少なくない。

パーソナリティ・レベルでいえば、遠隔地避難者の特徴として、①新奇性の高さ、②人間関係の多面性、③新しいライフスタイルへの挑戦といった要素を指摘できる。新しい経験に対する耐性の高さが、被災経験や地理的移動に対する免疫を作り、新しい人間関係の広がりをもたらしていると考えられる。仕事や組織に縛られない、新しいライフスタイルへの挑戦に熱心なのも、遠隔地避難者の方である。遠隔地避難者の方の心理的ストレスが低いことは、研究計画時から想定していたものの、その差は予想よりはるかに大きかった。

遠隔地避難者にみられるこうしたパーソナリティ特性は、次のような社会的ネットワークの特性とも密接に関連していた。すなわち、①社会的資源や情報に対する探索活動の活発さ、②社会的ネットワークの更新頻度の高さ、③他者支援を通じた自律性や自分の人生に対する自己構築性の回復などの特性である。ただし、遠隔地避難者でも、家族関係の破たんなどの問題を抱えるケースでは、こうした利益は得られない。

これらのことからすると、「弱い紐帯の強み」は、社

会的ネットワークにおける自由や自発性にその基盤があり、それが多様性や創発性をもたらしていくと考えられる。いわば「遊び」の余地があるからこそ、既存の制約を抜け出して、自分の人生を新たに組み立て直していくことが可能になると予想される。こうした点こそが、震災後の生活復興や人生復興にとっての重要な要素であると考えられる。

しかしながら、こうした予想が適切であるのか否かについては、今回のデータだけで結論付けることはできない。パーソナリティ特性と社会的ネットワーク、レジリエンスの相互関連について、今後も継続的に調査研究を行っていく必要があるだろう。

また今回得られた知見については、近地避難と遠隔地避難の長所短所として一般化し、防災・減災システムの再構築に役立つものとして洗練していく必要がある。東京電力福島第一原子力発電所の事故は、いまだに収束のめどが立っておらず、地震活動の活発化によって新しい困難がもたらされる危険性も決して低くはないのである。

〔発表論文〕

1. 高橋征仁, 2013a, 「沖縄県における原発事故避難者と支援ネットワークの研究1～弱い絆の強さ」『山口大学文学会志』63: 79-97.
2. 高橋征仁, 2013b, 「弱い絆の強さ—沖縄県における原発事故避難者レポート」『建築雑誌』vol128, No1646: 6-7.
3. 高橋征仁, 2014, 「社会学におけるコンコルドの誤謬—フクシマ問題に寄せて」『西日本社会学会年報』No12: 95-104.

【35】 思春期の自己制御能力低下をもたらす生物学的リスク要因の同定

研究者 長崎大学大学院医歯薬学総合研究科・神経機能学 教授 篠原 一之

【研究の概要】

思春期は、大脳皮質において成熟した機能領域と未成熟な機能領域が同時に存在するため、脳機能に不均衡化を生じる。一方、これに加え、第二次性徴に伴い、脳機能・形態の性的二型化も急激に進行するため、思春期は“未成熟な神経ネットワークの中で、機能・形態の性的二型化が急激に進行する”という極めて特異な変革を遂げる時期にあると言える。しかしながら、思春期の特異な神経発達的全容解明がこれまでに殆ど行われてこなかったため、この時期特有な問題行動をもたらすリスク要因の解明も遅れている。そこで、本研究では、思春期に特有の自己制御能力低下には、成熟途上にある脳機能の不均衡に由来したリスクがあるとする仮説の下、不均衡化を加速し、この時期特有の問題行動をもたらすリスク要因の解明を目的とした。

【研究経過および成果】

本研究では、小学生～若年成人を対象に、自己制御能力計測、内分泌機能計測、遺伝子多型計測、環境因子計測を実施し、これらを基に、自己制御能力低下をもたらす思春期特有のリスク要因を解明することを目的とし、以下の研究を行った。

思春期の範囲は広く、また成長途上であるため、年齢によって、第二次性徴やホルモンの分泌等が大きく異なる。そのため、対象者は、タナーの発達段階とその年齢区分を考慮し、サブグループに分けた。タナーの発達段階のⅠ度、Ⅱ度に相当する年齢の小中学生70名、Ⅲ度に相当する年齢の中中学生27名、Ⅴ度に相当する年齢の高校生79名の3つの発達群を対象に、頬粘膜及び唾液試料の採取、PCを用いた行動課題による自己制御能力の測定を行い、その発達の变化を調べた。

①顔認知課題 A: 他者の顔画像の視線方向を弁別させる課題を行い、顔画像の視線が自分に向けられた

ものであるかどうかの意識の強さの評価を行った。その結果、[発達群]と[視線の逸れ方]に、有意な交互作用が見られ、小学生は、中学生・高校生に比べ、微妙な視線方向の弁別能力が低いことがわかった。

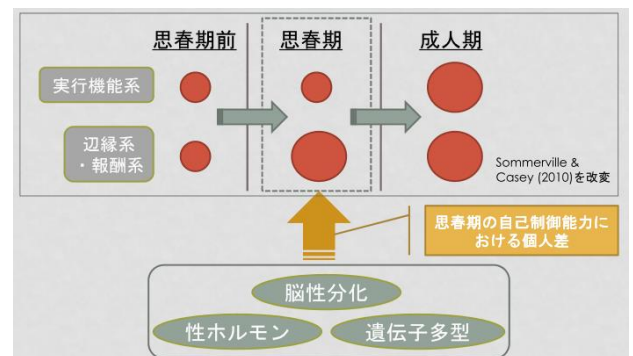


図 思春期の脳機能の不均衡化と本研究の仮説

②顔認知課題 B: 他者の顔画像が表出する情動を認知する際、表出された情動が視野のどちらにあった場合の方が認知できるかを弁別させる課題を行い、他者の表情認知時における脳の半球優位性の評価を行った。その結果、[発達群]と[情動]に、有意な

交互作用が見られ、中学生・高校生の快情動処理は左半球優位だった一方、小学生では快表情・不快表情処理のいずれにも有意な半球優位性は見出されなかった。

③意思決定課題:報酬を伴うゲーム課題を行い、ゲーム試行中の長期的に得な意思決定の学習能力の評価を行った。その結果、[発達群]と[長期的に得な意思決定の学習が生じるまでの試行数]の交互作用に有意傾向が見られ、自己制御能力課題における学習曲線の群間比較では、中学生において、長期的に得な意思決定の学習が、他の2群に比べ、遅れる傾向にあることがわかった。

以上①～③の行動課題成績の暫定的分析の結果、思春期前期～中期を境に、重要な社会的刺激である表情・視線の処理様式に変化が起こる可能性が見出された。また、思春期中期には、目先の報酬につられて長期的に損な意思決定を行う傾向が、他の年齢群よりも強い傾向にある可能性が示唆された。思春期中期は、性ホルモン分泌が最も急激に増加する時期である為、自己制御能力低下が思春期の成熟に関連している可能性が考えられる。

今後の計画として、各年代の健常集団のデータ取得を継続して行い、思春期における自己制御能力の定型的な発達を明らかにし、これを行った上で、同年代のプレクリニカル集団(医学的には正常範囲だが僅かな異常を認める)を対象としたデータ取得も行う予定である。一方、これまで実施した対象者からは生体試料として、頬粘膜・唾液を採取済みであることから、次なる段階として、性ホルモン受容体、神経伝達物質受容体等の遺伝子多型解析、男性ホルモン(テ

ストステロン)、女性ホルモン(17βエストラジオール)等の内分泌機能の解析を行う。代表者は、これまでも5-HTTLPR 遺伝子多型と衝動性、17βエストラジオールと思春期の孤独感、テストステロンと思春期の衝動性の関連性を示してきたことから、同様な視点から今回測定した行動傾向との関連性を分析し、行動傾向の発達過程に脆弱性をもたらす因子の探索を進めたい。

[発表論文]

1. Nishikawa S, Nishitani S, Fujisawa TX, Noborimoto I, Kitahara T, Takamura T, Shinohara K: Perceived parental rejection mediates the influence of serotonin transporter gene (5-HTTLPR) polymorphisms on impulsivity in Japanese adults. PLoS One, 7:e47608,2012
2. Fujisawa TX, Nishitani S, Obara T, Shinohara K: Loneliness depends on salivary estradiol levels in adolescent females. Neuro Endocrinol Lett, 33:525-529,2012
3. 17. Fujisawa TX, Nishitani S, Ishii S, Shinohara K: Differential modulation of impulsive behavior by loneliness and testosterone in adolescent females. Neuro endocrinol lett, 32:836-840 ,2012
4. Fujisawa TX, Shinohara K: Sex differences in the recognition of emotional prosody in late childhood and adolescence. J Physiol Sci, 61:429-435, 2011

【36】 大学における協同的學生支援プログラムの方法と支援枠組みに関する総合的研究

玉川大学教育学部 准教授 小島 佐恵子

千葉大学 普遍教育センター 准教授 白川 優治

〔研究の概要〕

本研究の目的は、大学における協同的な学生支援プログラムに着目し、その方法と支援の枠組みに関して理論的・実証的な側面から総合的に研究を行うことである。協同的學生支援プログラムとは、教職員・学生・大学とその他の機関等がともに力を合わせて学生の変化・成長を支援するプログラムのことを指している。今回は近年文部科学省の競争的資金配分の1つであるGP(Good Practice)事業で取り上げられた学生支援の事例がどのようなものであったかを俯瞰し、協同的プログラムの範囲(内容・方法)はどのようなものか、また支援の枠組みにも関連する成果の評価はどのようにになっているのかを分析・検討した。

〔研究経過および成果〕

今回研究の対象としたGP事業は、文部科学省による大学への競争的配分資金の一つであり、「国公立大学を通じた大学教育改革の支援」として、大学の「優れた取組」(Good Practice)に対して補助を行うものとして、平成15年に開始された。その中で、学生支援の事例は一定の位置を占めてきた(表1)。

が選定された。その後、平成21年度には「大学教育・学生支援推進事業(テーマB:学生支援推進プログラム)」が開始され、とくに、不安定な雇用に対応するべく、就職支援の強化が全面に押し出され、結果として私立の高等教育機関が400件選ばれた(しかし、平成22年11月の行政刷新会議の事業仕分け対象事業となり、平成23年度で終了した)。

表1 学生支援とGP事業

GP名	採択件数(大学・短大・共済*)
平成15年度「特色ある大学教育支援プログラム」	30件(学生支援**：8)
平成16年度「特色ある大学教育支援プログラム」	58件(学生支援**：7)
平成17年度「特色ある大学教育支援プログラム」	47件(学生支援**：8)
平成18年度「特色ある大学教育支援プログラム」	48件 (教育課程・方法以外**：9)
平成19年度「特色ある大学教育支援プログラム」	59件 (教育課程・方法以外**：18)
平成19年度「新たな社会的ニーズに対応した学生支援プログラム」	70件
平成20年度「新たな社会的ニーズに対応した学生支援プログラム」	23件
平成21年度「大学教育・学生支援推進事業」 (テーマB:学生支援推進プログラム)	400件

*=「主として学生の学習及び課外活動への支援の工夫改善」に関するテーマ
**=「主として教育課程・方法の工夫改善」以外(一部学生支援の取組を含む)
文部科学省IPより作成

平成15-19年度の「特色GP」では、学生支援に関する取組は、多くても全体の1割強程度の採択であった。しかし、平成19-20年度の「新たな社会的ニーズに対応した学生支援プログラム」(以下、学生支援GPとする)では、大学・短期大学に加え、高等専門学校も対象となり、平成19年に70件、平成20年に23件

現在までに2つの選定事例を対象に分析を行った。

1)平成20年度「学生支援GP」に採択された4年制大学16校と、2)平成21年度「大学教育・学生支援推進事業」学生支援推進プログラムに採択された400校のうち、『優秀事例集』(日本学生支援機構2013)に掲載された21校である。1)では、『事例報告集』(日本学生支援機構2008)のうち、「プログラムの概要」「趣旨・目的」「独自性」の項目を対象とし、採択の基準である「入学から卒業まで」の「組織的・総合的」な支援としてどのような支援が、誰によって、どのように行われているのかに着目し、分類した。その結果、支援の内容は、①キャリア形成、②全人的

成長, ③ネットワーク形成, ④地域貢献, ⑤不登校支援の5つに分類できた。それぞれの主な支援者は, 教職員(大学)だが, 地域住民, 自治体, 卒業生, 企業, 初・中等教育機関, NPO/NGO, 退職高校教員なども見られた。そして, 学生支援は, すなわち教室内で学んだことを活かす実践的な力の育成(仕事を得るための情報を得ること, 災害時のケアができること)を育成すべく, 正課と正課外の中間に位置づけ, 教育と学生支援が融合するように進められていることがわかった。さらに, 学生支援の優れた事例には, 日本の学生支援に従来見られていた, 意欲の低い学生の底上げ(与える学生支援)から中間層(自ら主体的に動くことはあまりない層)への働きかけやその層を伸ばすこと(育てる学生支援)が多いこともわかった。

次に, そのような支援の成果はどう捉えられたのか。平成21年度の事例のうちの『優秀事例集』を用いて, 学生支援の成果の検討を行った。この年度の実例は, その達成度の明確化が採択の基準となっているためである。その「プログラムの成果」に書かれた「自己評価の観点」, 「到達目標の達成」, 「具体的な成果」について, 書かれていた内容と件数を整理した。3項目に書かれていた内容は, 「就職率の向上」「資格取得率の向上」「態度・志向性の向上」「満足度の向上」「諸能力・スキルの向上」「価値観の変化」「マナー改善」「学力・文章力の向上」という8つの観点に分けられた。中でも「具体的な成果」として多く挙げられているのは, 学生の「態度・志向性の向上」であることがわかった(図1)。

今回の分析を通して, 近年の優れた学生支援は, 大学の構成員のみならず, 多くのステイクホルダーを巻き込み, さらに, 意欲の低い学生の底上げから, 自ら動くことが少ない中間層への働きかけと彼らの成長

を意図したものが多いことが多くなっていることがわかった。そして, それらの「成果」としては, 「就職率」「資格取得率」とどまらず, 学生の「態度・志向性の向上」という変化が「成果」として評価されていることが明らかになった。

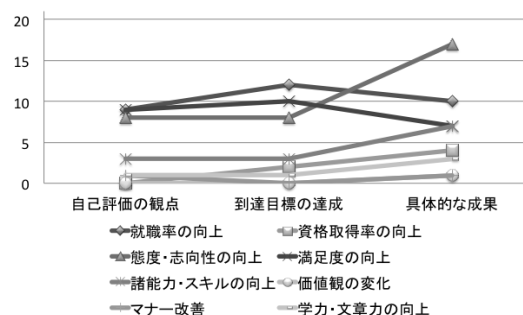


図1 『優秀事例集』に見る学生支援の「成果」の評価の観点

以上の分析はまだ途中経過であり, これらを統合し, 枠組みを探るため, さらに事例を増やしながら検討する予定である。

[参考文献]

独立行政法人日本学生支援機構 (2008) 『平成20年度「新たな社会的ニーズに対応した学生支援プログラム」事例集』。

独立行政法人日本学生支援機構 (2013) 『「大学教育・学生支援推進事業」学生支援推進プログラム優秀事例集』。

[発表論文]

1. Saeko Kojima, 2013, Frameworks of Collaborative Partnership Programmes between Students and Staff in Japanese Higher Education: A comparative study with the US case, *10th International Workshop on Higher Education Reform (HER) Workshop Proceedings*, 244.
2. 小島佐恵子, 2014, 「国内事例にみる学生支援の評価—GP事業を例に—」『大学教育学会誌』Vol.36(1) (印刷中)。

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26年5月1日 発行
