研究助成
成果報告論文集

（平成30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34回(平成28年度)　研究助成

第34回(平成28年度)研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
1	新しい半導体接合による低電圧スイッチ素子応用と高性能化に関する研究	北海道大学 大学院情報科学研究科 准教授 冨 岡 克 広
2	粒子内原子配列の実空間モデリングによる階層構造科学の創成	筑波大学 数理物質系 教授 西 堀 英 治
3	スピン軌道効果を利用した革新的磁化制御技術の構築	東京大学 大学院理学系研究科 准教授 林 将 光
4	匂い濃縮素子と単原子金属を用いた嗅覚センサ	東京工業大学 科学技術創成研究院 教授 中 本 高 道
5	あらゆる半導体中の電子輸送を″触らず″に″壊さずに″測定する技術の統合開発	京都大学 大学院工学研究科 教授 関 修 平
6	3次元周期極小曲面を有するナノ多孔質グラフェンを用いた新しい物理の開拓の研究について	筑波大学 数理物質系 准教授 伊 藤 良 一
7	電界駆動型磁気デバイスの創製に向けた規則原子配列構造を有する高機能強磁性・強誘電薄膜材料の探索・合成	秋田大学 大学院理工学研究科 准教授 吉 村 哲
8	有機半導体薄膜のスピンコート中における過渡発光寿命の動的測定	山形大学 有機材料システム研究推進本部 准教授 硯 里 善 幸
9	極めて高い動力伝達効率・位置決め精度・耐荷重性および広い可動範囲を実現する球体型全方向駆動歯車の研究	山形大学 工学部 准教授 多 田 隈 理 一 郎
10	手術シミュレータ用フルハイビジョン裸眼立体ディスプレイの画質向上	筑波大学 システム情報系 准教授 掛 谷 英 紀
11	生体組織のための異常透過回折現象を用いる小角散乱X 線撮像法の開発	名古屋大学 大学院医学系研究科 准教授 砂 口 尚 輝
12	原子レベルでの電気化学反応メカニズムの解明に資する液中原子分解能構造・物性同時計測技術の開発	埼玉大学 大学院理工学研究科 助教 小 林 成 貴
13	超短パルスレーザーによる薬品フリーの表面着色加工法の開発に関する研究	東京農工大学 大学院工学研究院 准教授 宮 地 悟 代
14	分子配線を指向した導電性高分子の自発成長	東京工業大学 物質理工学院 准教授 稲 木 信 介
15	超高速・高分解能超音波イメージングに関する研究	富山大学 大学院理工学研究部 教授 長 谷 川 英 之
16	強誘電体をゲートとしたダイヤモンドパワーFETの創出と巨大分極誘起による超低損失動作の実証	金沢大学 理工研究域 准教授 川 江 健
17	螺旋状ナノファイバグレーティングの開発とその高感度光センシングデバイスへの応用	静岡大学 工学部 教授 李 洪 譜
18	複雑流れ問題における超並列計算機を援用した大規模トポロジー最適設計法の開発	大阪大学 大学院工学研究科 助教 矢 地 謙 太 郎
19	柔軟かつ高効率なネットワークの実現を目的とした全光変調フォーマット変換による適応変復調技術の研究	徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 助教 岸 川 博 紀
20	高解像度MRI診断デバイス開発を志向した超伝導マグネット材料のナノ組織制御技術の開発	九州大学 大学院工学研究院 准教授 寺 西 亮
21	宇宙機の軌道力学系の最適制御理論	九州大学 大学院工学研究院 准教授 坂 東 麻 衣
22	超伝導加速器の省エネルギー化に向けた、空間的温度勾配下の超伝導転移が示す磁束トラップ低減現象の研究	総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 助教 久 保 毅 幸
23	人工知能によるカラスの音声分類とそのデータベース自動構築および対話用インタフェースの開発	総合研究大学院大学 学融合推進センター 助教 塚 原 直 樹
24	フェルダジルラジカル系へのキャリアドープによる新規有機磁性導体の開発	大阪府立大学 大学院理学系研究科 准教授 山 口 博 則

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
25	革新的マルチフェロ素子開発のための電子型強誘電体薄膜の電荷秩序相制御	日本大学 理工学部 助教 永　田　知　子
26	修復性を有する複合めっきテクスチャリング表面の潤滑特性	関東学院大学 理工学部 准教授 宮　永　宜　典
27	高熱伝導率を有するナノ流体の界面・熱輸送現象の解明	同志社大学 研究開発推進機構 助教 山　崎　晴　彦
28	構造化照明を用いたフェムト秒・ナノメートルの時空間分解能を有する超解像顕微過渡吸収測定装置の開発	関西学院大学 理工学部 助教 片　山　哲　郎
29	超音波刺激が誘発する神経可塑性の機序解明と耳鳴り抑制への応用	北海道大学 大学院情報科学研究科 教授 舘　野　　高
30	植物細胞内セカンドメッセンジャーのリアルタイム可視化による植物増産基盤技術の構築	東北大学 大学院理学研究科 講師 高　岡　洋　輔
31	数理モデルと脳活動計測による運動記憶形成過程・保持過程に関わる脳内表象の解明とその応用	東京農工大学 大学院工学研究院 特任准教授 瀧　山　　健
32	がん細胞での磁場による薬剤作用の増強メカニズムの解明	金沢大学 理工研究域 准教授 柿　川　真紀子
33	二本鎖DNAによる新規の遺伝子ノックダウン現象の実行因子の解明と生体内での再構築	大阪大学 大学院理学研究科 助教 小　沼　　健
34	老眼補償画像の生成によるグラスレスディスプレイ法の開発	九州工業大学 大学院工学研究院 准教授 河　野　英　昭
35	ヴァーチャル環境が惹起する実在感:立位バランス機能から評価する	上武大学 ビジネス情報学部 准教授 井　田　博　史
36	発光機能をもつ環境応答性金属錯体の分子設計と放射線による殺細胞効果の評価への応用	青山学院大学 理工学部 教授 田　邉　一　仁
37	高齢者の熱中症の低減につながる行動誘発のための情報設計法の構築	宇都宮大学 地域デザイン科学部 助教 糸井川　高　穂
38	半導体の技術革新を促進するM&Aのあるべき形の探求:データベースを用いた統計解析	大阪大学 大学院経済学研究科 准教授 中　川　功　一
39	高学歴女性の再就職に関する実態調査と教育機関をつうじた支援のあり方に関する調査研究	日本女子大学 人間社会学部 教授 大　沢　真知子
40	里海を題材とした海洋教育プログラムの評価:岡山県備前市立日生中学校の事例研究	立命館大学 政策科学部 准教授 桜　井　　良

第33回(平成27年度)研究助成

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
3	生体ナノ材料の構造・機能に着目した加齢性疾患治療法開発	富山県立大学 工学部 教授 村　上　達　也
24	Sb系半導体材料を用いた中赤外線発光素子に関する研究	東京電機大学 工学部 助教 藤　川　紗千恵
25	視線情報を用いた機械操作の熟達メカニズムの分析	早稲田大学 理工学術院総合研究所 研究院講師 亀　﨑　允　啓
37	製品開発エンジニア行動の日中韓比較ーウェアラブルセンサから得られたビッグデータ分析	一橋大学 経済研究所 教授 都　留　　康

第32回(平成26年度)研究助成

No	研　究　テ　ー　マ	代 表 研 究 者
34	映像のバリアフリー化を実現する社会の形成:聴覚障害者および視覚障害者の映画鑑賞実態に関する調査	秋田大学 大学院理工学研究科 助教 中　島　佐和子

【助成 34 -01】

新しい半導体接合による低電圧スイッチ素子応用と高性能化に関する研究

研究者 北海道大学大学院情報科学研究科 准教授 冨岡 克広

〔研究の概要〕

本研究は、ナノメートルスケールの半導体選択成長技術によって、Si/III-V ヘテロ接合からなる新しい半導体接合を形成し、この接合界面で生じるトンネル輸送を応用したトンネル FET で、理論限界の突破（サブスレッショルド係数の急峻化）を図るとともに、キャリア生成技術を工夫することで、トンネル FET の微小電流の欠点を克服しつつ劇的に電流値を増大する高性能化技術を確立した。本技術、素子構造は、既存の集積回路の性能よりも高性能な機能を有したまま、チップ当たりの電力密度を 10^3 W/cm^2 から 10 W/cm^2 以下に削減し、さらに、エレクトロニクス機器・車載機器で普及しているあらゆる分野の電子機器の消費電力を 1/100 にする要素技術や、従来の Si MOSFET を大きく上回る回路電力効率を達成する基本素子を実現した。

〔研究経過および成果〕

本研究のねらいの電子機器の消費電力を 90%以上削減するためには、低消費電力・高性能型スイッチ素子を実現する必要がある。具体的には、電荷の熱拡散機構以外でスイッチングする電子素子を創出し、MOSFET のサブスレッショルド係数の理論限界(60 mV/桁)を突破しなければならない。本研究では、ナノメートルスケールの半導体選択成長技術によって、Si/III-V ヘテロ接合からなる新しい固相界面を形成し、この界面で生じるトンネル輸送を応用したトンネル FET で、理論限界の突破（サブスレッショルド係数の急峻化）を図った。トンネル FET のサブスレッショルド係数の急峻化を実現するには、以下の課題を克服する必要がある。(i) 半導体ナノワイヤの微細化、(ii) ナノワイヤ縦型 FET の高性能化、(iii) 半導体ナノワイヤの真性層形成技術の確立。(i)では、エッチング技術を工夫することで、微細直径を有した半導体ナノワイヤを集積できる技術を確立し、(ii)では、縦型トンネル FET 構造の作製について、3 次元的にソース・ゲート・ドレイン構造からなる縦型 3 端子電極構造の先端プロセス技術を確立するとともに、MOS 界面の平坦化を新しい切り口で確立するとともにゲート酸化膜のスケーリングを評価した。(iii)では、微細ナノワイヤに対して、パルスドーピング技術を考案し、擬似真性層形成技術を確立し、縦型 FET 素子やトンネル FET 素子の作製に導入した。

これらの要素技術の確立を通して、従来の MOSFET のサブスレッショルド係数の物理限界(60 mV/桁)を突破する縦型トンネル FET を実現し、室温で 60 mV/桁以下の急峻なサブスレッショルド係数をもつトンネル FET を作製し、トンネル FET の欠点である微小なスイッチ電流の解決を図った。具体的には、半導体ナノワイヤヘテロ接合界面による変調ドープ構造と Si/III-V 接合界面で、新しい切り口によってトンネル電流を増大する素子構造を提案し、これらの素子を作製することで、急峻なサブスレッショルド係数を維持したまま、電流値が大幅に増大されることを実証した。

<u>(i) 半導体ナノワイヤの微細化技術</u> Si/III-V 接合界面のトンネル FET 素子で急峻なサブスレッショルド係数を実現するためには、接合で純粋なバンド間トンネル輸送を誘起する必要があり、ナノワイヤ選択成長におけるマスク開口部を微細化することで、結晶成長由来のミスフィット転位の発生の抑制を図った。本研究では、ドライエッチングとウェットエッチングを組み合わせることで、直径 20 nm 以下の微細半導体ナノワイヤを Si 基板上に集積する技術を確立した。15 nm の直径の有した InGaAs ナノワイヤについて、コアマルチシェル層からなる変調ドープ構造を形成し、変調ドープ型ナノワイヤ構造の微細化を実現した【図 1(a), (b)】。

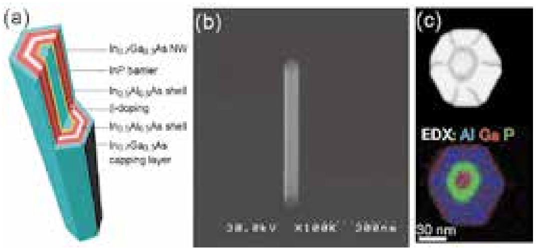


図 1. **(a)** 変調ドープ型ナノワイヤ模式図、(b) 作製結果 SEM 像、(c) HAADF-STEM（上）と EDX 元素マッピング(下)コア直径: 15 nm

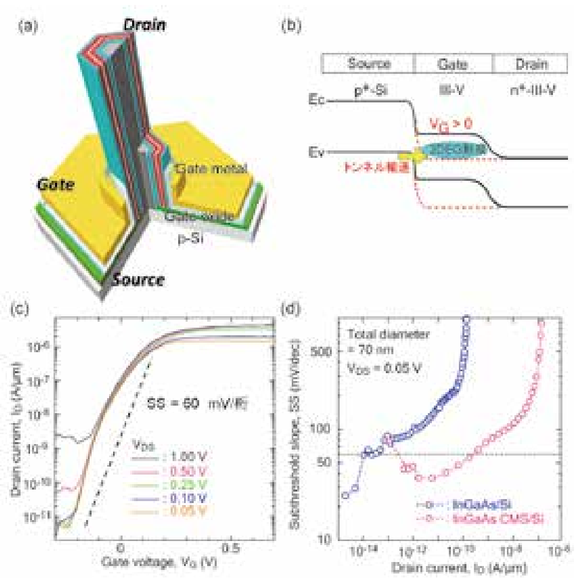


図 2 (a) 縦型トンネル HEMT 素子の模式図、(b) トンネル HEMT のバンドアライメントと動作の概略、(c) トンネル HEMT のスイッチング特性、破線は 60 mV/桁(MOSFET の理論限界)、(d) サブスレッショルド係数とドレイン電流の関係、ドレイン電圧：50 mV。破線が MOSFET の理論限界

(ii) ゲート酸化膜の極薄化と Sn ドープの導入 Si/III-V 固相界面を用いた縦型トンネル FET の高性能化には、半導体ナノワイヤ縦型 FET 素子構造作製技術の最適化や微細化にともなう素子特性を評価し、金属-酸化膜-半導体(MOS)界面の高性能化することが重要になる。そこで、まず、MOS 界面の高性能化の観点から、原子層堆積法について、オゾン原料を導入することでゲート酸化膜の高性能化を図った。ゲート酸化膜は HfAlO とした。Si 基板上に異種集積した InGaAs ナノワイヤからなる縦型 FET 構造のゲート酸化膜厚のスケーリングを評価した。ゲート酸化膜は、等価酸化膜厚(EOT)が 0.70 – 2.76 nm の範囲で変化させた。さらに、テトラエチル錫(TESn)とパルスドーピング技術を導入することで、図 1(a)の変調ドープ層の不純物密度を高くすることで、二次元電子ガスのシートキャリア密度の増大を図った。

(iii) トンネル HEMT の実証 前半までで確立した技術を応用し、InGaAs/Si 固相界面と InGaAs コアマルチシェル構造による変調ドープ構造による二次元電子ガスの生成を、一つのゲート電極で実現できる素子構造を作製した【図 2(a)】。この素子構造によって、InGaAs チャネルのゲート電界で、InGaAs/Si 固相界面のトンネル輸送と、ナノワイヤの二次元電子ガスを同時に生成し、急峻なサブスレッショルド係数を達成しつつ、二次元電子ガスによるキャリア輸送による、高いスイッチング電流の実現を図った【図 2(b)】。この素子は、トンネル輸送と二次元電子ガスからなるデュアルモード型のスイッチ素子になり、トンネル接合に変調ドープ構造を利用する新しいトンネル FET 素子構造になる。作製した素子は、室温で急峻なサブスレッショルド係数を示し【サブスレッショルド係数 41 mV/桁、図 2(c)】、且つ、駆動電圧 50 mV で動作し、単純な InGaAs/Si 固相界面トンネル FET と比較すると、電流値はおよそ 1000 倍に増大する【図 2(d)】。本研究により、トンネル FET の課題であった微小なトンネル電流を、新しい素子構造の提案で解決し、世界に先駆けて、トンネル FET 素子のサブスレッショルド係数の急峻化と電流値の大幅な向上を実現した。

さらに、本研究で作製したトンネル HEMT 素子構造では、従来の Si-MOSFET で構成される回路電力効率（伝達効率）を大きく上回ることを実証した。Si-MOSFET のように SS 係数が物理的に制限される場合、アナログ CMOS 回路や CMOS 回路の電力効率・伝達効率にも理論限界を生じる(理論伝達効率 38.5/V)。さらには、nA オーダーの微小電流領域では、その効率はほぼ 0 になる。一方、本研究のトンネル HEMT 素子は、微小電流領域で、伝達効率を 3000 まで増加できることを実証した。これは、Si-MOSFET では不可能である微小電流領域で、極めて高効率のアナログ CMOS 回路、CMOS 回路の構成が可能であることを示している。これは、例えばニューロン信号など外部のノイズに弱い極微小電流を利用した増幅回路など新しいニューロモルフィック回路への展開が可能であるだけでなく、単電子トランジスタ素子などの極小電流そのものを高い効率で増幅できる新しいアナログ CMOS を実現できることを示している。

〔発表論文〕

1. Katsuhiro Tomioka and Takashi Fukui, "(Invited) Transistor application using vertical III-V nanowires on Si platform" ***ECS Trans.***, Vol. 80, pp. 43 – 52 (2017)
2. A. Yoshida, K. Tomioka, F. Ishizaka, J. Motohisa, "Growth of InGaAs nanowires on Ge(111) by selective-area metal-organic vapor phase epitaxy" ***J. Cryst. Growth***, Vol. 464, pp. 75 – 79 (2017)
3. F. Ishizaka, Y. Hiraya, K. Tomioka, J. Motohisa, T. Fukui, "Growth of all-wurtzite InP/AlInP core-multishell nanowire array" ***Nano Lett.***, Vol. 17, pp. 1350 – 1355 (2017).

【助成 34 -02】

粒子内原子配列の実空間モデリングによる階層構造科学の創成

研究者　筑波大学数理物質系　教授　　西堀　英治

〔研究の概要〕

本研究の目的は、0.001 ナノからミクロンメータスケールの階層的構造をすべて原子配列として観測し、原子の移動が機能を発現する二次電池材料などの高機能化に直結する情報を提供することである。ミクロンサイズの紛体粒子の集合体を利用する Li イオン二次電池等において、単一粒子の表面、粒界、粒子内部すべてを原子の配列および電子分布や静電ポテンシャル分布として可視化し、その動作原理の解明から機能発現の学理構築から高機能化の指針を導出する。この目的のために、粒子の集合体から、各粒子のサイズ、形状分布、表面、内部形状の分布を原子配列として解明する方法を構築する。方法には独自に発案した粒子内原子配列の実空間モデリングによる解析法を用いる。

〔研究経過および成果〕

本研究の目的は、0.001 ナノからミクロンメータスケールの階層的構造をすべて原子配列として観測することである。この第一歩としてナノ材料を対象に研究を開始した。ナノ物質の内部構造を含む微細構造を見る手段として、透過型電子顕微鏡（TEM）、コヒーレント X 線回折（CXD）、単結晶 X 線回折や粉末 X 線回折（XRPD）がある。TEM は、高い空間分解能を実現し粒子の原子配列まで解明できるが、試料の厚さと視野に制限がある。CXD は、光源によって空間分解能を制限されず、10nm から原子レベルまでの構造解明を果たす手段の候補として期待されているが、高い光量を必要で、現時点では 10nm 程度の分解能が限界である。粉末 X 線回折は粒子サイズ・形状、内部構造などの情報を少ない損失で取り出すことができ、工業的重要な一度大量に粉末内の粒子の平均構造を評価できる。このため、粉末 X 線回折を中心に置き、独自粒子内原子配列の実空間モデリングによる解析法を行った。

対象試料は、サイズを変化させた試料を系統的に作成可能なプルシアンブルー類似体 $Na_xMn[Fe(CN)_6]_y3.6(H_2O)$(以下:NMF)の粉末と市販の Co 単体金属とした。NMF 粒子自体が立方体形状を取ることを確認の上、手法の開発と粒子内の原子配列の解明の研究を行った。

X 線回折データの測定は、波長の分散や、空気散乱などの要因を最大限に取り除くために、大型放射光施設 SPring-8 の BL02B2 で行った。測定の X 線の波長は Co が 0.44Å、NMF が 0.5Å とした。

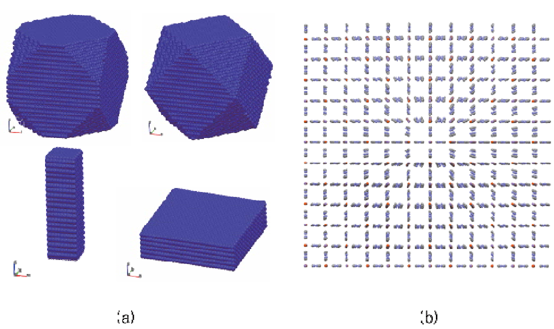


図 1　粒子内の原子配列モデル

データの解析で使用する実空間の粒子モデル

は、粒子内の全ての原子配列を発生させて作成した。図 1 にモデルの模式図を示す。形状と歪の導入法は本研究で開発した。図 1 (a)は様々な形状の Co であり、図 1 (b)は欠陥による放射状に変位を持つ NMF のフレームワークである。

粒子サイズを制御した NMF の理想結晶の粒子モデルを構築しパターンを計算した。計算パターンと実測データの最強ピークの幅を比較し、試料の粒子の平均径を 36nm と見積もった。

格子定数が(a,α)=(10.565Å,91.25°)の 36nm サイズの NMF 粒子に、(1)式の変位による歪を導入した。

$$|\Delta r_i| = \pm A \times \left\{ \exp\left[-\frac{r_{ic}^2}{2(C/(2\log 2))^2} \right] \right\} \qquad (1)$$

ここで、r_i は原子の座標と r_{ic} は欠陥中心からのベクトルであり、A は最大変位量と C は最大変位の半値を制御するパラメータである。欠陥は、中心に向かって近づくように最大約 0.48Å 変位するとした。

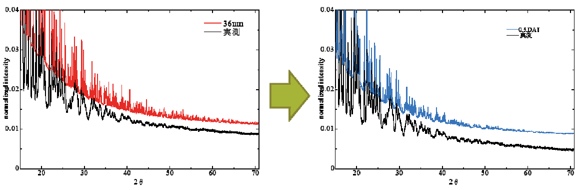


図 1 歪によるパターンの変化

図 2 に計算した強度パターンを示す。回折角 2θ >15° の高角領域を示した。黒は実験データ、赤は完全結晶モデルの計算値、青は歪入りモデルの計算値である。歪により実験データのようにバックグラウンドが上昇し、ピーク頂点が減少した。

実験データの高角域の幅の広がりは格子定数幅による効果と推測し検証した。最大変位が約 0.48Å の欠陥をいれ、格子定数に(a,α)=(10.543～10.595Å, 91.22～91.3°)の幅を持たせパターンを計算し足し合わせた。この強度パターンを図 3 に示す。青は歪入り、紫が足し合わせたパターン、黒が実験データである。幅の広がりの再現に成功した。

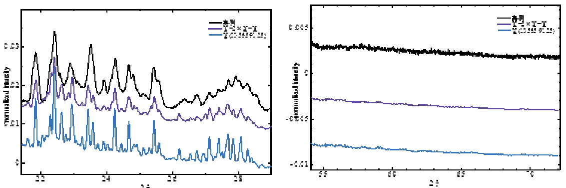


図 3 格子定数分布によるパターンの変化

Co の hcp 相と fcc 相と実験データを図 4 に示す。黒が実験データ、紫が hcp 相と青が fcc 相である。実験データは hcp 相と fcc 相両者のピークが存在した。また、hcp 相の計算で分裂するピークの一部が実験データで一本として観測された。このデータを解析するために hcp 配列と fcc 配列を同時に持つ Co モデルを構築し計算を進めている。

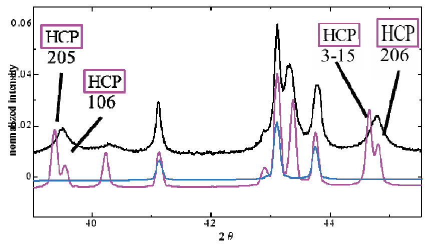


図 4 Co の実験データと hcp, fcc 相の計算値

2016 年から、イタリアとアメリカのグループから立て続けに類似研究の報告が論文および学会発表で見られるようになってきた。MD 計算の効果的な利用や、歪入りの粒子の作成法など参考になる点も多いことから、これらも踏まえて研究計画を立て直し推進する。

〔発表論文〕

1. H. Ozawa, E. Nishibori, and Y. Moriotomo. An approach to identify the atomic arrangement in nanometre-range size. Acta Cryst. A73, C558 (2017).

【助成 34 -03】

スピン軌道効果を利用した革新的磁化制御技術の構築

研究者　東京大学大学院理学系研究科　准教授　林　将光

〔研究の概要〕

物質のスピン軌道相互作用を利用してスピン流を生成し、種々のストレージデバイスに応用できる強磁性体のの磁化制御技術は次世代省エネ技術として注目されている。さらなる技術革新に向けて、効率よくスピン流を生成できる物質・構造の探索や新たな生成技術の確立を目指す研究が活発化している。本研究では大きなスピン流生成効率を実現できる系を明らかにすることを目的として、薄膜ヘテロ構造におけるスピン流生成機構を調査した。非磁性金属/強磁性金属の 2 層膜からなるヘテロ構造において、印加磁場の向きや大きさに依存して抵抗が変化する「スピンホール磁気抵抗」を利用してスピン流生成効率を調べた。その結果、白金(Pt)とコバルト(Co)の 2 層膜で大きな効果が発現することがわかった。また、新たなスピン流の生成機構として、熱流をスピン流に変換する「スピンネルンスト効果」の観測に初めて成功した。

〔研究経過および成果〕

強磁性体の磁化を電気的に制御する技術は、高度なメモリへの応用が期待され、研究が活発化している。従来、外部磁場に依存していた磁化制御が、「スピン移行トルク」という現象を使って電気的に行えることが明らかになり、さらに最近では、薄膜内、または異種物質間の界面におけるスピン軌道相互作用を利用してより効率的な磁化制御が可能となる結果が報告されている。スピン軌道相互作用を利用した新たな磁化制御機構を用いれば、2 次元平面上の磁区構造を自在に制御することができ、様々なストレージデバイスに応用できる高機能な技術として注目されている。しかしながら、現状では磁化制御に必要な電力がまだ大きく、実用化に向けた課題となっている。特に、磁化制御に必要となる「スピン流」と呼ばれるスピン分極した電子の流れをいかに効率よく生成できるかが重要となる。

これまでの研究から、電流をスピン流に変換する「スピンホール効果」は、スピン軌道相互作用の大きい $5d$ 遷移金属で大きな効果を示すことがわかっている。さらに、$5d$ 遷移金属の中でも、スピンホール効果の大きさを表す指標である「スピンホール角」が d 軌道の占有数によって変化することがわかり、物質の電子構造に大きく依存することが明らかになってきた。より大きなスピンホール角を持つ物質を明らかにするため、スピン流生成機構の解明と、新たな物質系の探索が重要な課題となっている。

本研究グループではこれまで電気伝導測定を利用して、薄膜ヘテロ構造における非磁性金属層のスピンホール角を調べてきた。具体的には、非磁性金属/強磁性金属の2層膜からなるヘテロ構造において、印加磁場の向きや大きさに依存して抵抗が変化する「スピンホール磁気抵抗」を利用することで、ヘテロ構造内の非磁性金属層のスピンホール角を決定できる。この測定を通して、スピンホール角が d 軌道の占有数に依存することを明らかにしてきた。

本研究では、これまで報告されているスピンホール角に大きなばらつきのある非磁性金属の白金(Pt)について、スピンホール磁気抵抗を利用して調べた。強磁性金属にコバルト(Co)とアモルファス合金(CoFeB)のどちらかを用いて白金との２層構造を作製し、スピンホール磁気抵抗を測定した結果、強磁性金属に Co を用いると、白金のスピンホール角がこれまで報告されている値や強磁性に CoFeB を用いた時より倍以上大きくなることがわかった[1]。この原因はまだ特定できていないが、得られた実験結果から、Co の中でスピン流を増幅され、大きな磁気抵抗が生じていることが示唆された。このようなスピン流の増幅作用が仮にあるとすれば、学術的にもデバイス応用の観点からもインパクトがあるが、実証するには実験によるさらなる検証が必要である。

また、本研究ではより効率的なスピン流生成機構を明らかにするため、試料に温度勾配を印加して熱流からスピン流を生成できるかを調べた。スピンホール磁気抵抗測定の原理を応用して測定を行なった結果、温度勾配印加によって発生する熱流からスピン流が直接生成されることがわかった。このような熱流−スピン流変換現象は「スピンネルンスト効果」として理論的に予測されたいたが、実験的に観測できたのは初めてである（ドイツのグループと独立に同時期に発表）。熱流から生成されるスピン流は、スピンホール効果によって電流から生成されるスピン流と比較して、生成効率はほぼ同じであったが、スピンの向きが逆向きであった。これらの結果はフェルミ面近傍の電子がスピン流生成にどのように寄与するかを明らかにするものであり、スピン流生成機構の微視的な描像がより詳細に得られた。一方で、スピンネルンスト効果が実証されたことにより、電気が流れない非磁性物質でもスピン流が生成される可能性がある。今後、大きなスピン流を生成できる物質の発見につながることが期待される。

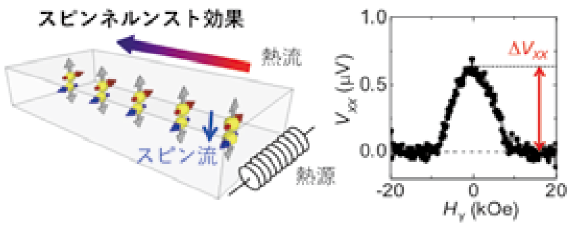


図 1. スピン軌道相互作用が大きいとされる非磁性金属のタングステン(W)と、強磁性金属合金(CoFeB)の2層構造において、スピンネルンスト効果を測定した結果。(左)スピンネルンスト効果がスピン流を生成する様子を模式的に表した図。熱流と直交する方向にスピン流が生成される。(右)熱流−スピン流変換で発生する熱起電力(V_{XX})の印加磁場(H_y)依存性。ゼロ磁場と高磁場印加時の熱起電力の違い(ΔV_{XX})がスピンネルンスト効果の大きさを反映。

〔発表論文〕

1. M. Kawaguchi, D. Towa, Y.-C. Lau, S. Takahashi and M. Hayashi, *Anomalously large spin Hall magnetoresistance in Pt/Co bilayers*, submitted.
2. P. Sheng, Y. Sakuraba, Y.-C. Lau, S. Takahashi, S. Mitani, and M. Hayashi, *The spin Nernst effect in tungsten*, Science Advances 3, e1701503 (2017).

【助成 34 -04】

匂い濃縮素子と単原子金属を用いた嗅覚センサ

研究者 東京工業大学科学技術創成研究院 教授 中本高道

〔研究の概要〕

匂い濃縮素子と電気化学センサを組み合わせた匂いセンシングシステムの研究を行っている。匂い濃縮には弾性表面波素子をペルチェ素子で冷却し、香気成分を濃縮させる原理を用い、その動作を確認した。電気化学センサの部分には電極上に金属原子クラスタを堆積させ、その触媒作用により高感度なセンサを実現することを目指す。現在、金属原子クラスタを堆積させるフローセルとその制御系がほぼ完成し、今後、金属原子クラスタを堆積させてセンシング実験を行う。

〔研究経過および成果〕

1．はじめに

安全安心な社会を実現する上で嗅覚センサは重要である。しかし、視聴覚に関するセンシング技術が成熟分野なのに対して、嗅覚に関する技術はまだ発展途上にある。本研究では安全安心な社会を実現するために、嗅覚センサに焦点をあてる。匂いセンサに関しては、主にセンサデバイスに関する研究が多いが、まだ十分な感度や選択性を有するものは実現されていない。

そこで、本研究では、匂い濃縮素子と単原子状金属を組み合わせて高感度高選択性の嗅覚センサを実現し、安全安心な社会を実現するために実用に供するようなセンサシステムを実現する。

2．実現すべきセンサ素子

高感度なセンサを実現するために、匂いを濃縮する必要がある。通常は多孔質の濃縮材に匂いを吸着させて熱脱着後に別のセンサで検出する方法をとるが、本研究では高い効率で短時間に濃縮するために、図1に示すように基板をペルチェ素子で冷却して香気成分を集める方式をとる。①匂いと共に水分も基板表面に凝結し薄い水膜を構成する。②水分と共に匂い分子を電気化学電極に移動させる。③電気化学電極に電位を印加し、流れる電流を計測する。湿度は通常測定の妨げとなるが、本研究では逆にそれを利用して電気化学センサを実現する。④測定後は、SAW デバイスの SAW ストリーミング現象を利用して水膜を瞬時に取り除き次の測定に備える。

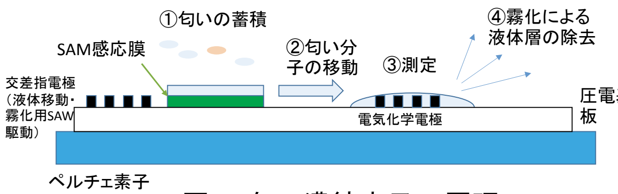


図2. 匂い濃縮素子の原理

この電気化学センサの電極には、金属原子クラスタを堆積させる予定である。金属原子クラスタの堆積により高い触媒活性が期待でき、その結果高感度なセンサを実現できると考えられる。

3. 匂い濃縮素子

上記のような測定系を構築した。SAW デバイスは 61MHz で圧電基板として 128° 回転 Y 板 $LiNbO_3$ X 伝搬を用いた。この SAW デバイスに $120V_{p\text{-}p}$ の RF バースト信号を入力した。この RF バースト信号は FPGA

で発生させた出力を RF パワーアンプを通すことにより生成した。

酢酸ガスを冷却した SAW デバイスに吹き付けて電気化学電極に電位を印加して測定した結果を図2に示す。簡単のために2極のみを電極とする方式を使用して、±1V の範囲を 0.02V/sec で掃引した。また、酢酸ガスは1Mもしくは10Mの水溶液をガラス瓶に入れて、そのヘッドスペースガスをエアポンプを用いて SAW デバイス表面に吹き付けた。PID(Photo Ionization Detector)検出器で測定した結果、1M のっ場合約 85ppm, 10M の場合 1923ppm であった。測定結果を図2に示す。濃度が高くなるに従い、電圧—電流曲線の形状が変化しておりガスを検出することができた。

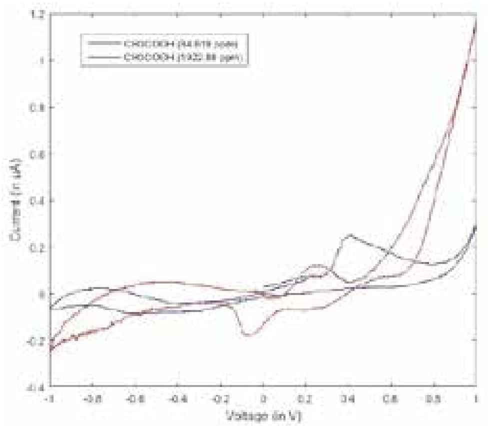


図2. 酢酸ガス導入時の電圧－電流曲線 （酢酸濃度:84.619ppm 及び 1922.86ppm の場合）

4. 電気化学センサ

次に、金属クラスタを堆積させた電極を用いた電気化学セルの実験について述べる。ここでは個々の原子を１層ごとに積み上げて金属原子クラスタを形成し、安定な有機物質であるポリアニリンで金属原子クラスタをアイソレートさせる。ここでは金の金属原子クラスタを堆積させる。金属原子クラスタは触媒として機能する。作用極電極上に金属原子クラスタを堆積させるために、シリンジポンプ、電磁弁、ポテンシオスタット、フローセルから成るシステムを製作した。フローセルの写真を図３に示す。各部分の基本動作は確認した。

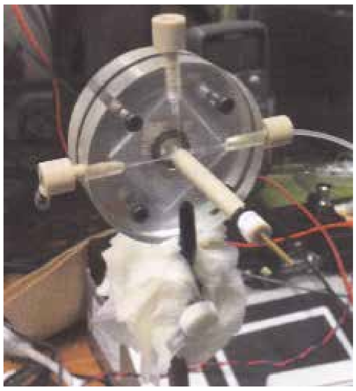


図3. 金属原子クラスタ堆積用フローセル写真

5. まとめ

現在、電気化学センサの部分に注力しており、もうすぐセンシング実験を行える予定である。本年12月まで実験を行い、その結果を報告する予定である。

〔発表論文〕

1. CHAKRABORTY, Parthojit and NAKAMOTO, Takamichi, Preconcentrator and amperometric odor sensing system using SAW device with self-assembled monolayer film, 2017, Sensor Symposium, S-183.
2. CHAKRABORTY, Parthojit and NAKAMOTO, Takamichi, STUDY OF AN ODOR SENSING SYSTEM BASED ON AMPEROMETRIC SENSOR COMBINED WITH PRECONCENTRATOR USING SAW DEVICE, Digital Olfaction Society, 2016, 21-21.
3. Parthojit Chakraborty and Takamichi Nakamoto, Odor sensing system using electochemical sensor combined with preconcentrator based on SAW device, Sensor Symposium, IEEJ, 2016, 26am1-A-4.

【助成 34 -05】

あらゆる半導体中の電子輸送を”触らず”に”壊さずに”測定する技術の統合開発

研究者　京都大学大学院工学研究科　教授　　関　修平

〔研究の概要〕

本研究では、半導体デバイス界面・変形・固体内における電子輸送特性を、定量的・完全実験的に、かつきわめて迅速に評価できる 3 つのタイプの計測装置開発を行った。1) 半導体材料―固体界面における電荷移動度を選択的に計測する「Time Resolved Microwave Conductivity (TRMC)@*Interfaces*」を用いた界面選択的な電子輸送計測法、2)「TRMC@Interfaces-Impedance 複合計測法」の開発を行い、OFET などの素子構造における電荷の注入、及び電荷の輸送を同時・定量的にかつ簡便に明らかにできることを示した。また、3) TRMC-ESR 複合計測法を用いて、共役高分子骨格上の分子鎖内電荷移動度と伝導種・スピン状態の同時かつ完全実験的定量分析を実現し、特に孤立した電荷ではなく電荷対の状態が高い輸送特性を示すことを見出した。

〔研究経過および成果〕

電子デバイスとしての動作を決定付ける最も重要な特性を電荷移動度とすれば、界面における電荷移動度の計測は半導体材料開発における最重要項目である。素子性能に直結する FET 特性評価[1]は界面における並進電荷輸送を評価する手法として有効であるが、電荷注入と素子構造に強く移動度が左右され、迅速評価においては課題も多い。界面選択的に電荷輸送を評価できるインピーダンス分光法[2]は近年盛んに用いられ、主に極薄膜固体中の移動度計測法である空間電荷制限電流法[6,7]と同様、接合界面に対し直交方向での移動度の計測に有効であるが、絶縁体界面での選択評価には不向きである。ここでは、半導体―絶縁体界面に着目し、時間分解マイクロ波伝導度(Time Resolved Microwave Conductivity, TRMC)法と最も単純な金属―半導体―絶縁体素子(MIS 素子)を組み合わせ、新しい界面移動度迅速診断法として TRMC@Interfaces 法の開発を進めた[14-19]。同時に、キャリアを材料に注入する手法として化学ドープを用いた Chemical Doping (CD)－TRMC の開発を進め、あらゆる分子性物質(界面)中の電荷輸送を解き明かすために、従来の電荷移動度評価法を数桁以上高速化する強力な手段となることを示した。

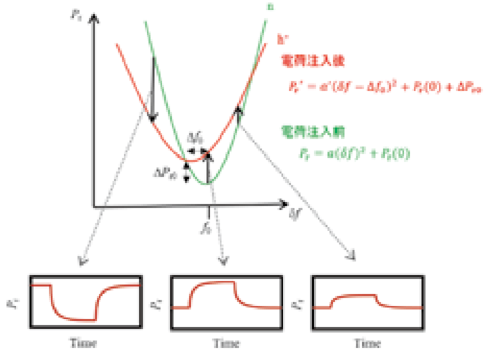


図１　C8-BTBT MIS 素子に電荷を注入する前（緑）と注入した後（赤）の反射マイクロ波強度の模式図。共振周波数 f_0 付近においてローレンツ関数が放物線関数として近似されている。マイクロ波の周波数により、電荷注入による反射マイクロ波信号が異なる時間プロファイルを示す。Q カーブの縦ずれ横ずれがそれぞれ複素誘電率の虚部と実部に対応する。

主な対象となる分子性半導体材料には benzothieno-benzothiophene (BTBT)誘導体を用いた。TRMC 法では、材料の伝導特性を計測するプローブとして、主に 10 GHz 近傍のマイクロ波を使用する。このマイクロ波と電荷の相互作用に

伴う誘電損失は、誘電正接（tanδ）としてあらわされるが、これは電荷の運動特性（伝導度）に直結する誘電率の虚部（ε"）と、電磁波の変動する電場に対して電荷の運動の遅れを表す誘電率の実部（ε′）の比である。正確に電荷の運動特性（伝導特性）を触らずに電磁波のみを用いて計測するためには、このε"のみを正確に測定する必要がある（図１）。

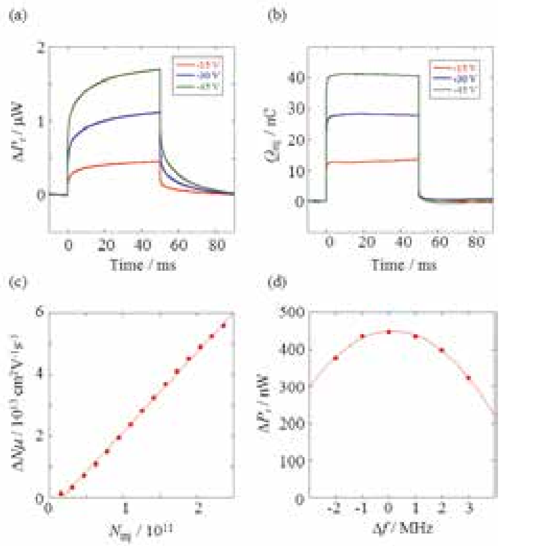


図２　(a)反射マイクロ波信号と (b) C8-BTBT MIS 素子へのゲート電圧印加により誘起される電荷蓄積。どちらも共振周波数における応答を示す。(c) マイクロ波伝導度信号の最大値から見積もられる電気伝導度$\Delta N\mu$と、電流積算より見積もられる注入電荷数 $N_{\rm inj}$ の相関。 (d) -10 V 印加時の、マイクロ波伝導度信号の周波数依存性。

そこで用いるマイクロ波プローブの周波数を変調し、図のような単純な２次 fitting を行うことで、BTBT-絶縁体界面における電荷（正孔）の移動度の定量を周波数変調型 TRMC@*Interfaces* 法を開発して試みた。得られた２次曲線のパラメータから、界面に蓄積された電荷による誘電正接は、

$$\tan\delta = \delta\varepsilon''/\delta\varepsilon' = 0.13$$

と見積もられ、結果的に BTBT 中の正孔の有効質量(m^*)は結晶シリコン中にそれに匹敵する～0.4 程度、また BTBT のヘリングボーン型稠密構造中における電荷トラップの深さE_Tはわずか 9 meV 程度であると見積もられた。同時に行った温度変調測定の結果も踏まえると、分子性半導体でありながら、電荷の輸送特性は明らかに温度上昇によって阻害され、温度Tに対する電荷移動度μの依存性は、$\mu \propto T^{-1.6}$であることが示された。これは、分子半導体であっても、十分にバンド伝導型の輸送機構を実現することが可能であることを示しており、観測された高い移動度$\mu = 430\ \mathrm{cm^2V^{-1}s^{-1}}$を鑑みても有機半導体が無機半導体に十分に匹敵する電荷輸送能を特定の界面構造で示し得ることを示唆している。合わせて本研究では、この TRMC@*Interfaces* のさらなる拡張として、TRMC-Impedance 複合分光法の確立、並びに Chemical Doping-TRMC 法による主鎖共役高分子組織構造中における Polaron Pair の高い電荷輸送特性について指摘した。

〔発表論文〕

1. W. Choi, Y. Tsutsui, T. Sakurai, and S. Seki; Complex Permittivity Analysis Revisited: Microwave Spectroscopy of Organic Semiconductors with Resonant Cavity; *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 153303 (2017).
2. J. Inoue, Y. Tsutsui, W. Choi, K. Kubota, T. Sakurai, and S. Seki; Rapid Evaluation of Electron Mobilities at Semiconductor–Insulator Interfaces in an Ambient Atmosphere by a Contactless Microwave-Based Technique; ACS Omega, **2**, 164-170 (2017).
3. W. Choi, Y. Tsutsui, T. Miyakai, T. Sakurai, and S. Seki; Quantitative evaluation of spatial scale of carrier trapping at grain boundary by GHz-microwave dielectric loss spectroscopy; J. Phys. C. **924**, 012002 (2017)
4. W. Choi, J. Inoue, Y. Tsutsui, T. Sakurai, and S. Seki; In-situ Analysis of Microwave Conductivity and Impedance Spectroscopy for Evaluation of Charge Carrier Dynamics at Interfaces; *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 203302 (2017).

【助成 34 -06】

3次元周期極小曲面を有するナノ多孔質グラフェンを用いた新しい物理の開拓の研究について

研究者　筑波大学数理物質系　准教授 伊藤　良一

共同研究者　東北大学大学院理学研究科　助教 田邉　洋一

〔研究の概要〕

3次元周期極小曲面を持つグラフェンは、周期的連続曲面上で自由電子を束縛されている特殊な状態でありどのような電子デバイスに使えるか検討する上で非常に重要な課題である。近年3次元周期極小曲面を持つグラフェンが 2 次元グラフェンにはない電気特性を示すことが明らかになりつつあり、これら特異な物性を理解することはシリコンデバイスに取って代わる新しい3次元グラフェンデバイスを開発する上で有益な情報となる。本研究では、化学気相蒸着法で作製した3次元周期構造を持つ多孔質グラフェンを用いて電気二重層トランジスタを作製し、グラフェンに特有なディラックコーン型電子状態密度を反映した応答曲線と磁場中での電子の運動について研究を進めた。

〔研究経過および成果〕

3次元周期極小曲面を持つグラフェンは3次元構造を有しているために電気デバイスとしてみた場合、電子の移動経路が非常に特徴的である。まず、既存の3次元グラフェンと呼ばれている材料についてどのような電気特性を持っているか調べた。図1(a)は様々な3次元グラフェンに対して電気伝導度と3次元構造の内部に空いている孔サイズの依存性を調べた結果であるが、それぞれの評価手法が統一されていないためか孔サイズと電気伝導度の関連性を見つけることが出来なかった。また、図1(b)は申請者が作製した3次元グラフェンの孔サイズと温度に依存した電子移動度のまとめたグラフであるが、一般的な化学気相蒸着(CVD)法を用いて作製した2次元グラフェンよりも圧倒的に電子移動度が低いことが明らかとなった。これらの結果から評価方法が正しいのか検証する必要性が生じ、3次元の周期構造を持っている特異な物性の特徴を引き出すには従来方法での解析では難しいことを明確となった。

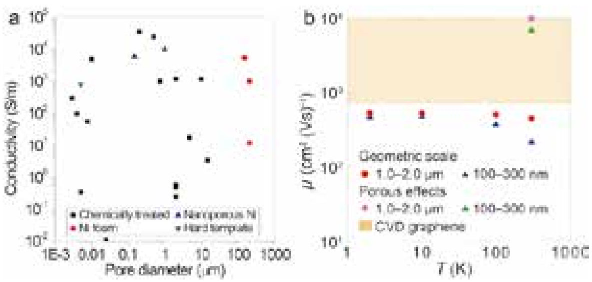


図 1 3 次元構造を持つグラフェンの(a)電気伝導度と(b)電子移動度の孔サイズと温度依存性.

そこで、本研究では電子が3次元構造を持つグラフェンを複雑に運動していることを考慮するために円が繋がった単純な周期構造モデルを考えて磁場中で電子がサイクロトロン運動する状況での 3 次元構造の経路と電子移動度の関係性について考察を行った。図 1 に示したのは3次元構造の曲面を持っているグラフェンの格子であるが、移動経路が波打っているので電子が感じるローレンツ力が局所的に異なるために

正しく電子移動度を計算することが出来ないことが明らかとなった。そこで、電子の移動経路を円と仮定して実効的なローレンツ力を三角関数を用いて表現し、移動度の計算を行ったところ、図1（b）の porous effects に示したように移動度が 5000–9000 cm^2/Vs になることが判明した。このように実際に電子が動く経路を考慮しないと正しい電気特性を評価することが出来ないことを示せた。(発表論文に詳細)しかし、電気伝導度に関しては実際の移動経路と移動距離を見積もることが出来ないため、図1（a）の電気伝導度の規格化の方法は依然として大きな問題であることがわかった。

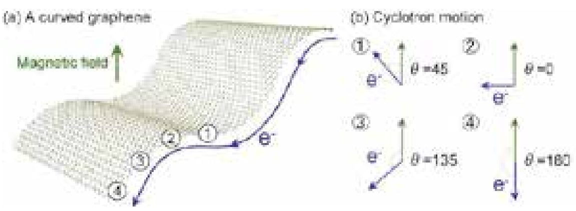


図2　3次元の移動経路を持つ磁場中での電子のサイクロトロン運動.

田邉洋一助教を中心として3次元の準周期構造を持つ多孔質グラフェンを用いた電気二重層トランジスタ作成とその物性解析を進めた。フェルミレベルを変調するためにイオン液体を多孔質内部に吸わせゲート電圧を印加することでキャリア注入が可能とした。図3は窒素ドープを施した3次元グラフェンを用いてトランジスタの性能評価を行ったところ、図3（a）のように幅広いゲート電圧レンジで線形応答を示し、2 次元グラフェンの 100 倍程度のキャパシタンスを持っていることが明らかとなった。3 次元構造体に対して磁場中での電子の挙動を詳細に理解するために、ゲート電圧を変化させながら磁場中でのホール抵抗を測定した結果を図3（b）に示す。ゲート電圧によって挙動が反転している。これは、ディラック電子系に特徴的な両極性伝導として理解することが出来る。また、図2のような曲面を仮定した場合に特徴的な非線形なホール抵抗の振る舞いを電子型と正孔型の二つの領域で観測した。

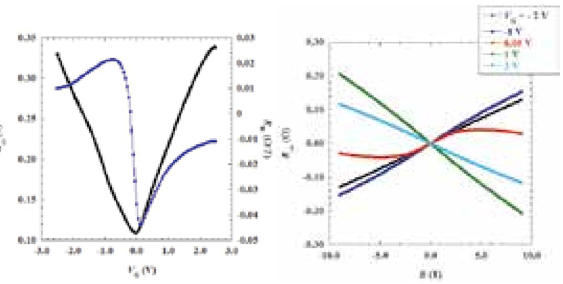


図3　3次元グラフェンを用いた電気二重層トランジスタの挙動.

以上より、3次元周期極小曲面を持つグラフェンの特異な物性が発現するデバイスの探索を行ったが、3次元構造の特異性、つまり、電子の伝導経路の物理的または数学的記述が不完全であるため、特異な物性が出ているのにも関わらず、実験データから抽出することができていないことが明確になった。今後は3次元周期構造体中を伝導する電子の伝導経路の記述を正確にすることで更なる解析方法の発展を目指す。

〔発表論文〕

1．Yoshikazu Ito, Yoichi Tanabe, Katsuaki Sugawara, Mikito Koshino, Takashi Takahashi, Katsumi Tanigaki, Hideo Aoki, Mingwei Chen, Three-dimensional porous graphene networks expand graphene-based electronic device applications, Physical Chemistry Chemical Physics, 2018, DOI: 10.1039/C7CP07667C.

【助成 34 -07】

電界駆動型磁気デバイスの創製に向けた規則原子配列構造を有する高機能強磁性・強誘電薄膜材料の探索・合成

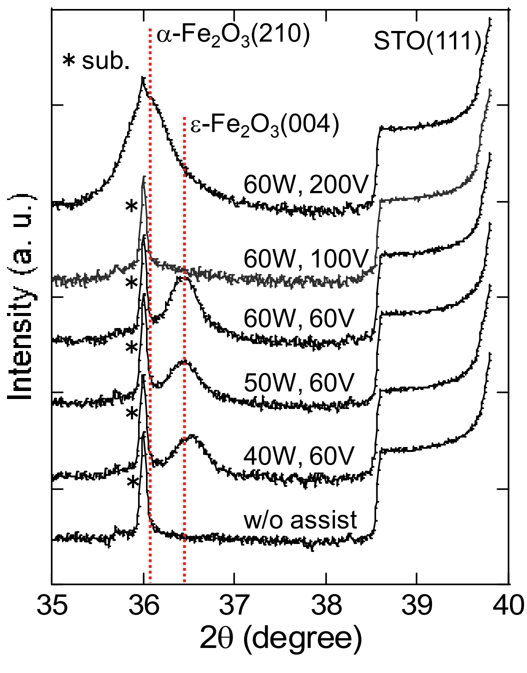
秋田大学 大学院理工学研究科 准教授　吉村 哲

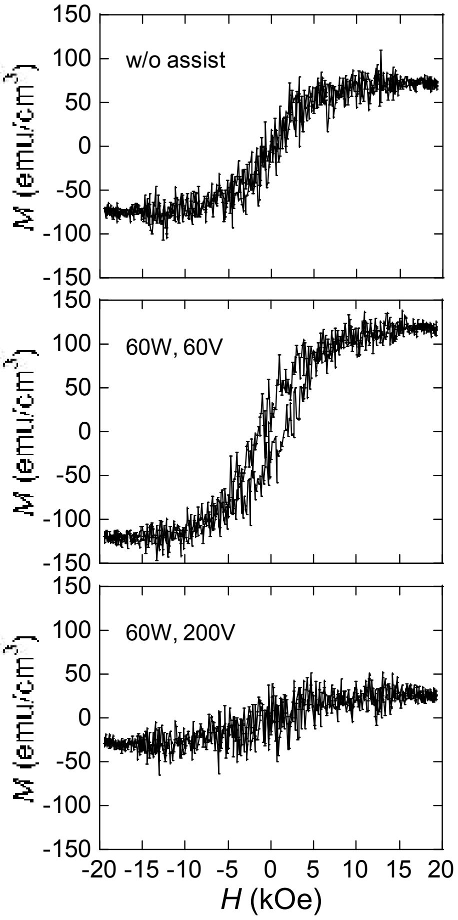
〔研究の概要〕

磁気メモリデバイスの低消費電力化には、極めて小さい電力で磁化反転させることができる方式、およびそれに適した磁性薄膜を新規に用いることが効果的である。その手法の一つとして、磁化を電界で駆動する新しい方式の適用、およびそれに適した高機能な強磁性・強磁性材料の探索およびその高品位な薄膜合成が挙げられる。本手法では、素子構造の簡略化効果もあり、デバイスの使い勝手や性能を飛躍的に向上できる可能性も有る。本研究では、低温で結晶質薄膜を作製することに有効である、成膜中の薄膜へのイオン照射が可能なエネルギーアシスト型のイオンビームスパッタリング法を用いて、準安定相ではあるが、飽和磁化および保磁力の大きな強磁性・強誘電材料でもある、ε 構造の Fe_2O_3 薄膜の合成に成功した。

〔研究経過および成果〕

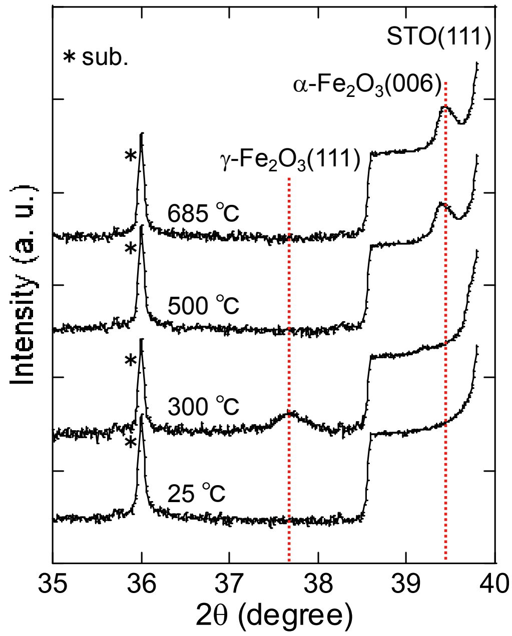
STO(111)単結晶基板上に、α-Fe_2O_3 スパッタンリングターゲットを用い、エネルギーアシスト型のイオンビームスパッタリング法でもって、100 nm 厚の Fe 酸化物薄膜を室温で作製した。成膜に用いるイオンビームには、原料ガスに Xe を用い、電力を 100 W、加速電圧を 1000 V に固定した。アシストに用いるイオンビームには、原料ガスに Ar を用い、電力を 40 - 60 W、加速電圧を 60 - 200 V に変化させた。右図に、種々のアシストイオンビーム照射条件にて作製した薄膜の X 線回折プロファイルを示す。アシストイオンビーム照射を行わない場合、明確な回折ピークは見られず、結晶化していない薄膜が形成されているが、アシストイオンビームの照射電力を増大させるに従い ε 相の形成を示す回折ピーク強度が増大し、60 W において最も大きなε-Fe_2O_3(004)からの回折ピークが見られた。この条件から加速電圧を増大させると、ε-Fe_2O_3(004)からの回折ピークは消失し、代わりにα-Fe_2O_3(210)から回折ピークが見られた。これらのことから、成膜時に適度なアシストエネルギーを付与することにより、準安定相であるε-Fe_2O_3 薄膜の合成が可能であり、必要以上のアシストエネルギーを付与すると、安定相であるα-Fe_2O_3 薄膜が合成されることが判った。次頁の左図に、種々のアシストイオンビーム照射条件にて作製





した薄膜の磁化曲線を示す。アシストイオンビーム照射を行わない場合、明確なヒステリシスは見られないが、60 W の条件においては、大きな磁化と明確なヒステリシスが見られ、さらに加速電圧の増大した場合は、ヒステリシスが消失して磁化も大きく減少した。これらの結果は、アシスト条件が 60 W において強磁性の ε 相が形成され、200 V において反強磁性の α 相が形成されたことを示す X 線回折プロファイルの結果を支持するものである。

ε 相の形成がアシストイオンビーム照射の効果であることを確認するために、一般的な酸化物薄膜の作製手法である、反応性 DC マグネトロンスパッタリング法を用いて薄膜の作製を行った。その結果を上図の X 線回折プロファイルに示す。変化させることができる成膜条件は実質的に成膜温度のみであり、それ



が低いときには低温相である γ 相が、高い時には安定相である α 相が、それぞれ観測され、準安定相である ε 相は形成できなかった。よって、低温でも結晶化を促進させることが可能なエネルギーアシスト型のイオンビームスパッタリング法が、ε 相の形成に効果的であることが判った。

〔発表論文〕

1. S. Yoshimura : ″Fabrication of ε-Fe_2O_3 multiferroic thin films with high coercivity and magnetization for electric-field writing magnetic recording″, Proceedings of International Conference of Materials for Resources (ICMR, Akita, Japan, 2017), pp. 490-493, (2017)

2. S. Yoshimura, Y. Sugawara, G. Egawa, and H. Saito : ″Basic Study of Electric Field Induced Magnetization Reversal of Multiferroic $(Bi_{1-x}Ba_x)FeO_3$ Thin Films at Room Temperature for Magnetic Recording Technology″, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 42, (2018) (accepted)

【助成 34 −08】

有機半導体薄膜のスピンコート中における過渡発光寿命の動的測定

研究者　山形大学　有機材料システム研究推進本部　准教授　　硯里善幸

〔研究の概要〕

塗布プロセスによる機能性薄膜の形成は、得られる膜質の観点から、その膜形成過程は非常に重要である。本研究においては、新たに TCSPC 法(時間相関単一光子計数法)を用いることで、スピンコート中、溶液から固体薄膜に変化する過程の蛍光寿命変化測定に挑んだ。溶質として発光性 MEH-PPV を用いたスピンコートの膜形成過程では、溶液→固体薄膜に変化する際、発光強度・発光寿命のどちらも変化することが確認された。更に発光速度定数 kr、熱失活速度定数 knr を解析することで、固体薄膜に変化する際、構造固定による熱失活の抑制と、分子構造の変化が示唆された。このような動的手法はこれまでになく様々な塗布プロセスにて重要な知見になりうる。

〔研究経過および成果〕

有機 EL の普及に向け、更なる低コスト化が可能な塗布型有機 EL は世代ディスプレイ・照明として期待されている。有機 EL においては「膜質」が重要であり、蒸着膜と塗布膜では膜質が異なることが報告されている。我々はこれまでスピンコート塗布プロセスにおける塗布−乾燥過程に着目し、塗膜から固体薄膜に変化する過程の観察を蛍光強度・スペクトルから明らかとしてきた。

本研究においては、TCSPC 法(時間相関単一光子計数法)を用いて蛍光寿命を測定することで、蛍光寿命の変化から膜形成過程を明らかにすることを目的とした。TCSPC 法は励起光から発光までの時間のヒストグラムから励起寿命を求める方法であり(図1)、微弱光かつ減衰の速い発光に関して、高速に蛍光寿命を測定することが可能である。今回、スピンコート中の連続的な蛍光寿命測定を行うにあたり、図2に示す測定光学系を新規に構築した。励起光源は 405nm レーザーダイオード PLP-10(浜松ホトニクス製)を用い 100MHz にて駆動した。TCSPC 測定ボードは東京インスメンツ製 SPC-130EM を用い、50ms インターバルにて、蛍光寿命を高速測定した。スピンコーターと測定装置はトリガーを用い連動させた。スピンコート塗布溶液としては、塗布溶媒としてトルエンを用い、溶質としてこれまで検討を行ってきた MEH-PPV(分子量 70,000〜100,000)を用いた。またスピンコート塗布雰囲気は窒素下で行った。

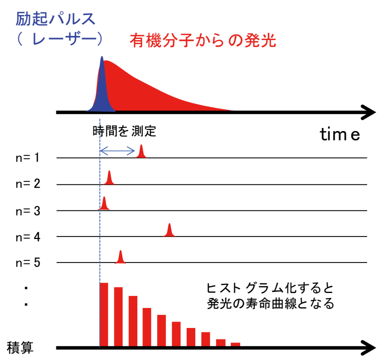


図 1　TCSPC 測定の概念図

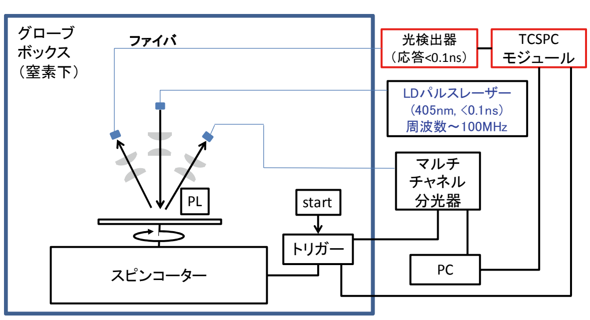


図 2 測定光学系の概念図

これまでの検討結果から、急激に PL 強度が変化する時間領域に発光スペクトルも変化することから、その時間領域が溶液→固体薄膜に変化する過程であると考えている。スピンコート回転数 1000rpm における蛍光寿命減衰の変化を図3に示す。測定はスピンコート開始から20秒後まで50ms間隔にて測定しており、縦軸がスピンコート中の時間、横軸は蛍光寿命測定における時間、濃淡が蛍光強度を表している。

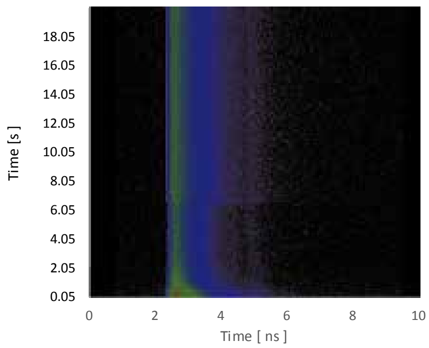


図３　スピンコート中における蛍光寿命測定結果

得られた各減衰曲線はほぼ指数関数的減衰を示し、フィッテイングすることで蛍光寿命を得た。スピンコート中の蛍光寿命変化ならびに発光強度の変化を図4（上）に示す。MEH-PPV 蛍光寿命はおよそ 0.5ns 程度であり、溶液→固体薄膜へ変化する時間領域（6.5秒付近）において、蛍光寿命は 0.47ns から 0.57ns まで変化し、その変化は蛍光強度変化以前から起こっていることが明らかとなった。

蛍光量子収率Φfは、蛍光速度定数 kr、熱失活速度定数 knr、蛍光寿命 τs とおくと式1で表される。

$$\Phi_f = \frac{k_r}{k_r+k_{nr}} = k_r\tau_s \qquad ・・・式1$$

MEH-PPV 薄膜の蛍光量子収率Φf は 0.2 であることを確認しており、発光速度定数kr、熱失活速度定数 knr を算出することが可能である。算出したkr、knr のスピンコート中の変化を図4（下）に示す。非常に興味深いことに、krおよび knr のどちらも膜形成過程において変化していることが明らかとなった。熱失活速度定数 knr は、溶液→固体薄膜への変化する際、高濃度になるため、濃度消光による knr 増大が予想されたが、実際には減少している。これは固体薄膜になることで、構造が固定されることで、熱失活が抑制されたと推測している。すなわち knr の変化に伴う時間が、分子の運動性に関わる時間であり、液相→固相への変化する時間であると考えられる（約 0.5 秒間）。一方で、発光速度定数 kr は、構造的に変化がなければ本来一定の値をとるが 6.5 秒付近で、急激に増加している。これは分子構造の変化を示唆しており、固体薄膜に変化する過程で、急激に分子構造を変化させていると推測している。これらの情報は機能性薄膜全般に非常に重要な知見になりうると考えている。

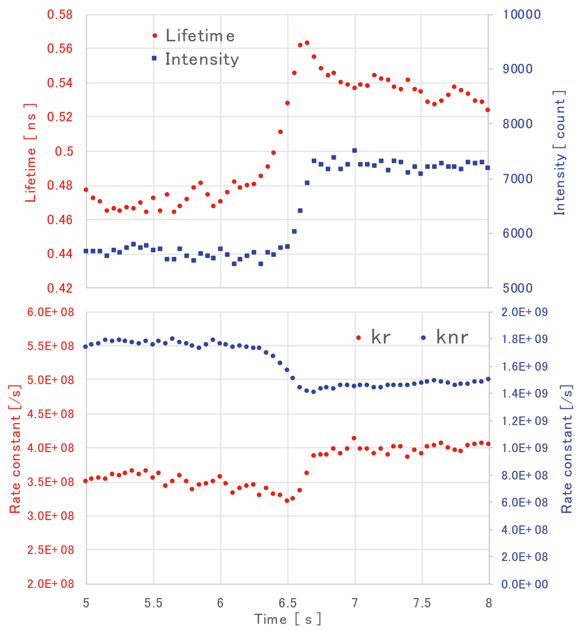


図４　スピンコート中における蛍光寿命および蛍光強度変化（上）ならびに kr および knr の変化（下）

＜本研究は、第 65 回応用物理学会春季学術講演会 17a-D102-6 にて発表予定＞

【助成 34 -09】

極めて高い動力伝達効率・位置決め精度・耐荷重性および広い可動範囲を実現する球体型全方向駆動歯車の研究

山形大学工学部 准教授 多田隈 理一郎

〔研究の概要〕

本研究は、歯車構造により小型・軽量で大出力の球面モータとしての球体型全方向駆動歯車の開発を目的とする。具体的には、直交する方向に歯車構造を持つ内部の球体と、それを支持する外部の球殻とを用いて、球体内部のモータと平歯車および外部球殻側のモータと平歯車により、直交する２方向の回転運動を実現する。本研究の学術的な独自性としては、内部球体および外部球殻のそれぞれにピッチ円までの歯車構造と、それに直交する方向への溝構造とを加工し、駆動用平歯車と噛み合わせ、動力伝達の方向と直交する方向へは、駆動用平歯車が回転軸の方向に、滑らかに溝の中をスライド運動して球体の動きを妨げないという機構により、直交する２方向の回転自由度を一つの球体構造に配置して、「能動的なボールジョイント」を製作するという点が挙げられる。

〔研究経過および成果〕

本研究で当初予定していた、内部の球体を出力軸とする球体型全方向駆動歯車は、無事に設計・製作を完了し、様々な実験を行った。例えば、フォースゲージを用いて出力を計測したり、パウダーブレーキを用いて、継続的に動摩擦抵抗をかけて、内部の球体を出力軸とする球体型全方向駆動歯車の動力伝達効率を計測した。

さらに、外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車を設計・製作し、当初開発していた方式の球体型全方向駆動歯車をさらに発展させ、その可動範囲を拡張させることに成功した。

具体的には、図１の斜視図に示すような外観を持つ、ヨー軸、ピッチ軸周りの回転自由度を有する、球体型全方向駆動歯車を新たに設計・製作した。これは、先に開発した「内部の球体を出力軸とする球体型全方向駆動歯車」と同様に、内部の球体と外部の球殻は、それぞれピッチ円までのインボリュート歯構造を有しており、それぞれ平歯車のインボリュート曲線と、内歯車のインボリュート曲線とを、360°回転させた形状を有している。

この「外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車」は、内部の球体とそれと噛み合う歯車群によってピッチ軸周りの回転運動を生み出し、外部の球殻とそれと噛み合う歯車群によってヨー軸周りの回転運動を生み出す機構となっている。

この、外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車には、主な材料として、軽量で自己潤滑性の高いポリアセタール樹脂を用いた。また、モータを、その周囲の構造に固定する部品と、モータ出力軸の動力が直接伝わる駆動用平歯車には、アルミ合金の A5052 を用いた。

今回、新たに開発した外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車のピッチ軸周りの可動範

囲は 230° 、ヨー軸周りの可動範囲は 360° である。ヨー軸周りには、機構上、無限に回転し続けることが可能であるが、実際には、ピッチ軸駆動用のモータの配線が、球体型全方向駆動歯車の周囲に存在するため､回転角を無制限にすることは、今後の課題である。ただ、歯車構造を用いて球面モータを構成することにより､高い動力伝達効率･位置決め精度･耐荷重性を実現することに加えて､外部の球殻を出力軸とすることにより、広い可動範囲も実現したため､本研究は十分に成功したと結論付けられる。

今後は､ロボットアームの関節機構などに､実際にこれらの球体型全方向駆動歯車を応用していくことを予定している。

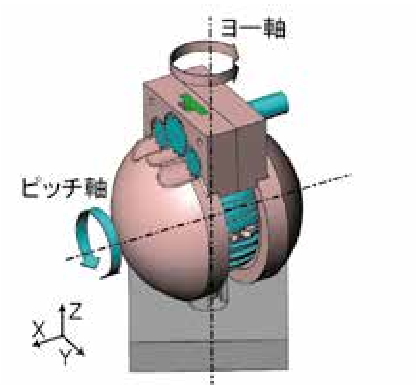


図１　外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車

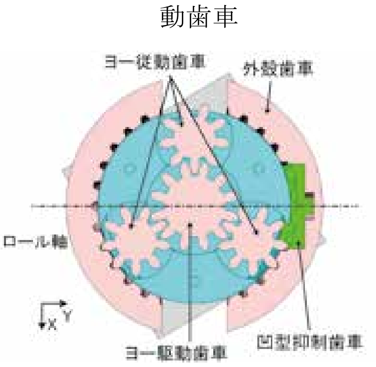


図２　外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車の XY 断面図

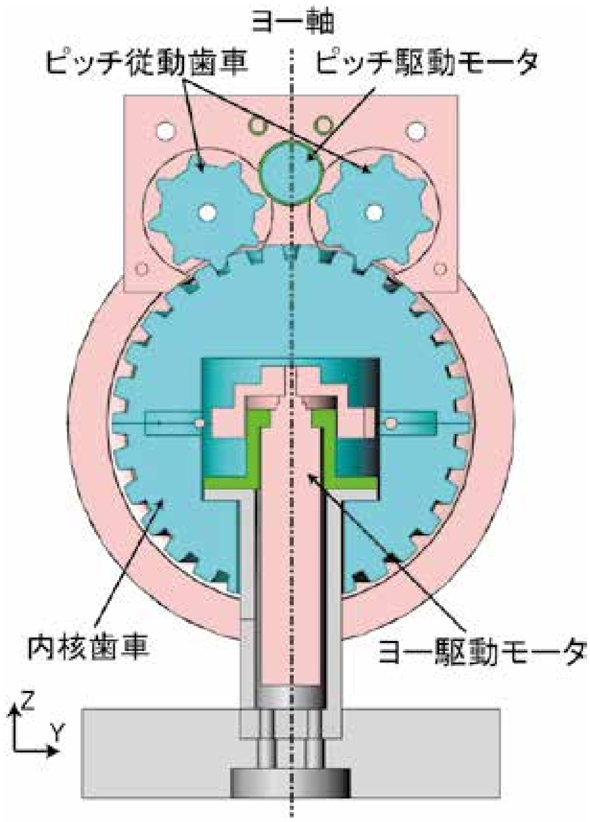


図３　外部の球殻を出力軸とする球体型全方向駆動歯車の YZ 断面図

〔発表論文〕

1. 「球状全方向駆動歯車の研究開発」､多田隈理一郎､日本設計工学会誌､第 52 巻　第 6 号､pp. 383-386.
2. 「2つの回転軸を一体化した球状歯車機構の開発と適用の可能性」､多田隈理一郎､日刊工業新聞社「機械設計」､第 61 巻　第 9 号､pp. 128-131.

【助成 34 -10】

手術シミュレータ用フルハイビジョン裸眼立体ディスプレイの画質向上

研究者　筑波大学システム情報系　准教授　　掛谷英紀

〔研究の概要〕

本研究では、手術シミュレータとして医療現場で利用可能な高解像度裸眼立体ディスプレイシステムの開発と評価を行う。本研究で用いる裸眼立体ディスプレイ方式のプロトタイプシステムは既に完成しており、医学生教育用のシミュレーション装置として実用に至っている。しかしながら、手術のリハーサルなどの医療現場で実際に活用するためには、クロストークの低いより高品質の立体像を提示することが要求される。本研究は、従来装置を改良し、クロストークの低い視域が広く、画面のちらつきなどのアーティファクトが少ないフルハイビジョン裸眼立体ディスプレイの実現とその医療応用を目的とする。

〔研究経過および成果〕

本研究プロジェクトでは、次に挙げる4つの取り組みを行った。

(1) フルハイビジョン裸眼立体視を用いた肝臓手術シミュレータの評価（発表論文1）
(2) 時分割パララックス式裸眼立体表示装置における動画の画質向上（発表論文2,3）
(3) 時分割パララックス式裸眼立体表示装置のクロストークの低減と視域の拡大（発表文献4）
(4) フルハイビジョン空中像裸眼立体ディスプレイの製作（発表文献5）

本稿では、紙面の都合上、(1)～(3)までの研究成果について述べる。

フルハイビジョンの解像度で裸眼立体表示ができるシステムとして、筆者の研究グループでは、時分割指向性バックライト式裸眼立体表示と、時分割パララックスバリア式裸眼立体表示の2つの手法を開発している。前者はクロストーク（右目用の画像と左目用の画像が混ざる現象）が強いものの、そのほかのアーティファクトはほぼないという利点を持つ。後者はクロストークは少ないものの、時間方向の解像度が低いため、観察者の移動時や提示像の動きが激しいときに、ちらつきなどのアーティファクトが発生しやすいという問題がある。

そこで、肝臓手術シミュレータ Liversim をこの2種類の裸眼立体ディスプレイ上に実装し、医学生を対象にして両者を比較するアンケートを行った（図1）。評価項目は、肝臓の変形のわかりやすさ、肝臓の血管走行の把握しやすさなどである。その結果、時分割パララックスバリア方式の方が高い評価を受けた。これにより、クロストークを低減することが立体表示において最も重要な要素になることが示唆された。

図1　医学生による比較実験の様子

次に、時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイで問題となる画面のちらつき低減の問題に取り組んだ。動画提示におけるちらつきを低減する方法として、斜めパララックスバリアのスリット幅を3サブピクセルから2サブピクセルにする(図2)、あるいはピクセルピッチの細かい液晶パネルを使用する方法を提案した。実験の結果、提案手法は観察者が感じるちらつきを有意に低減していることを確認した。また、時分割数を減らす試みも行ったが、こちらは輝度向上には貢献するものの、ちらつき低減の効果は見られないことが分かった。

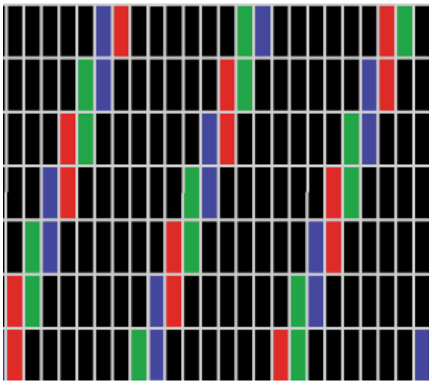


図2　2サブピクセル幅のパララックスバリア

最後に、時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイのさらなるクロストーク低減と視域拡大のため、サブピクセル未満のスリット位置調整を可能にする方式を提案した。具体的には、斜めパララックスバリアの角度を従来の $\tan^{-1} 1/3$ から $\tan^{-1} 1/6$ に変更することで、1/2 サブピクセル単位でのスリット位置の調整が可能になり(図3)、クロストークのない視域が拡大することを実機製作により確かめた。さらに、角度を $\tan^{-1} 1/9$ にすると 1/3 サブピクセル単位でのスリット位置の調整が可能になる。

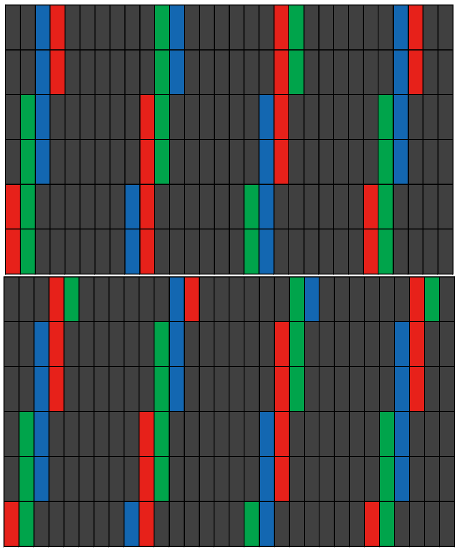


図３　1/2 サブピクセル幅のスリットのシフト

〔発表論文〕

1. Kakeya, H., Yoshida, A., Oshiro, Y. and Ohkohchi N. (2018): A Liver Surgery Simulator Using Full HD Autostereoscopic Displays. ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol. 6, No. 1, pp. 11-17.
2. 掛谷英紀 (2017): 時分割パララックスバリアによる3D動画のちらつき低減，日本バーチャルリアリティ学会第 22 回大会論文集
3. Kakeya, H., Hayashishita, A. and Ominami, M. (2017): Autostereoscopic Display Based on Time-Multiplexed Parallax Barrier with Adaptive Time-Division, Proc. IDW, pp. 853-856.
4. 林下歩樹，掛谷英紀 (2017): 4 時分割斜めパララックスバリア式裸眼立体表示の視域拡大，映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集
5. Takahashi, H. and Kakeya, H. (2017): An Aerial Autostereoscopic Display Using Time-Division Multiplexing Parallax Barrier, SID Digest of Technical Papers, 48, pp. 410-413.

【助成 34 -11】

生体組織のための異常透過回折現象を用いる小角散乱X 線撮像法の開発

名古屋大学大学院医学系研究科 准教授 砂口 尚輝

〔研究の概要〕

小角散乱 X 線撮像法(USAXS)は，微小領域に分布する微細構造やマイクロ・ナノ粒子群に対してコントラストを生成する方式である．小角散乱の起源は，微小構造とその外側の屈折率差であり，X 線ビームがそれらの境界を伝播するとランダムな屈折を繰り返し，僅かに発散したビームとなって出射される．この現象を小角散乱と呼ぶ．USAXS は，従来の吸収や位相コントラスト X 線撮像方式では困難であった初期乳癌の特徴である微小石灰化や腫瘤の形成のない段階での早期の微小腫瘍細胞などを描出できる可能性を持っており，生体応用へ向けた研究が精力的に行われている．本研究では，乳房組織内の微小な腫瘍組織を描出するために，従来法よりも高感度な小角散乱に基づく X 線光学系を提案する．提案手法の有効性を理論・シミュレーションおよび高エネルギー加速器研究機構で行われる撮像実験を通して実証する．

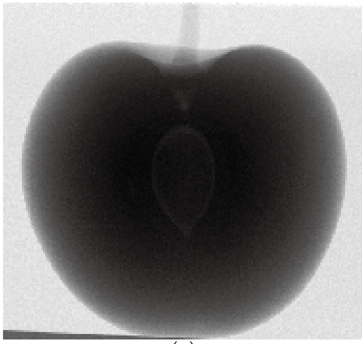
〔研究経過および成果〕

本研究では，(1)X 線小角散乱を高感度に検出するための光学系の設計，(2)光学デバイスの作成，(3)高エネルギー加速器研究機構の放射光 X 線を用いた撮像実験，(4)医学応用への基礎的検討を行う．提案する光学系は，X 線小角散乱を高感度に取得するために， Si 単結晶の異常透過回折現象を用いている．まず，結晶のX線回折強度を結晶の厚さ，X 線エネルギー，回折格子面を変えて理論的に計算し，この研究に最適な条件を導出した．次に，これらのパラメータを基に実際に Si 単結晶インゴットから結晶を切り出した．この結晶から成る撮像システムを高エネルギー加速器研究機構に構築し，各種テストサンプルの撮像実験を行った．ここでは，実際に高エネルギー加速器研究機構でX線撮影されたさくらんぼと木の葉の例を示す．

Fig. 1はさくらんぼの撮影像を表す．(a)は一般的に使用されている吸収コントラスト法に基づく撮影像である．(b)と(c)は提案システムによる撮影像であるが，(c)は X 線の入射幅を制限するタンタルスリットを導入している．また，画像の黒色はサンプル内の小角散乱が大きい個所を表し，白色はサンプル内で小角散乱が生じていない個所を表す．これらの画像を比較すると，(a)では内部の種が薄っすらと確認できる程度であるが，(c)では種から伸びた細かい構造が確認できる．これは，X線ビームの伝搬経路上に多数の繊維が存在することを示唆する．また，提案システムにスリットを入れない場合，(b)のように画像がボケてしまうことが分かった．一方でスリット幅は小さいほど空間分解能が高いものの，検出されるX線光子数は小さくなりS/N が悪化することも分かった．

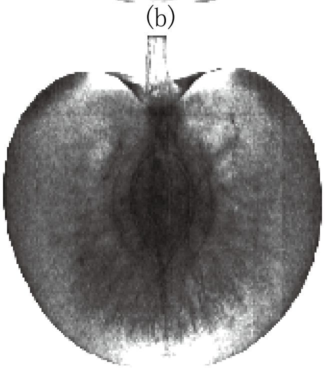
Fig. 2は木の葉の撮影像を表す．Fig.1と同様に(a)は吸収コントラスト像，(b)は小角散乱像（スリット無），(c)は小角散乱像（スリット有）を表す．このサンプルは厚さが 1 mm 以下であり，Fig. 1と比べると非常に薄いため，(a)では吸収コントラストがほとんど生じていない．

辛うじて中心の葉脈を確認できる．それに対して(b)と(c)では細部に至る葉脈まで高コントラストに描出できている．先ほど述べたように濃い色ほど小角散乱が生じていることを表すため，葉脈では散乱が生じにくく，それ以外の黒い箇所には微小な構造（細胞や気孔）が多数あると考えらえる．これを生体に置き換えると，多数の細胞が増殖した腫瘍などを高いコントラストで描出できる可能性があると考えられる．今後様々な生体組織を撮影し，医学応用への検討を進めていく予定である．



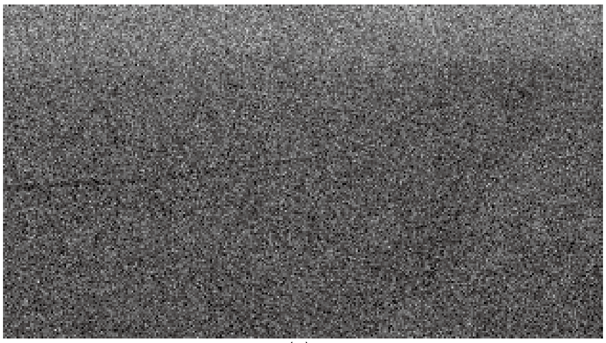
(a)

(b)

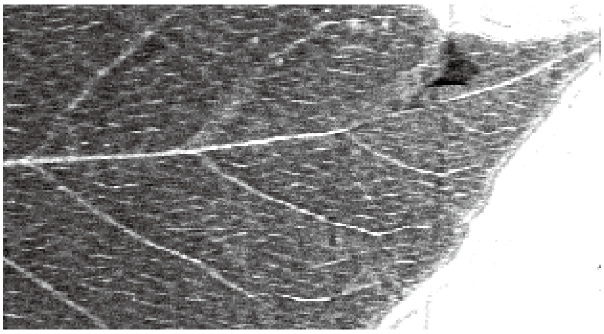


(c)

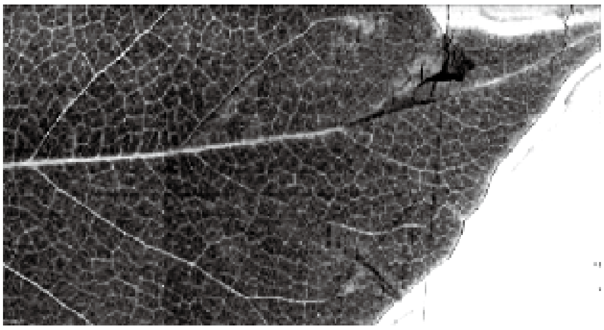
(b)小角散乱像（スリット無），(c)小角散乱像（スリット有）．



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 木の葉の撮影像．(a)吸収コントラスト像，(b)小角散乱像（スリット無），(c)小角散乱像（スリット有）．

〔発表論文〕

［投稿準備中］

【助成 34 -12】

原子レベルでの電気化学反応メカニズムの解明に資する 液中原子分解能構造・物性同時計測技術の開発

研究者 埼玉大学大学院理工学研究科 助教 小林 成貴

〔研究の概要〕

電極－電解液界面で起こる電気化学反応は、電極の表面構造（凹凸、欠陥、不純物など）に左右される一方、反応過程において、電極表面と反応物との電子のやり取りが大きく関与している。そのため、表面構造と電子状態を単一原子・分子レベルで同時に可視化することができれば、電気化学反応メカニズムをより詳細に理解できる。そこで本研究では、表面構造を液中かつ原子分解能で観察できる周波数変調原子間力顕微鏡（FM-AFM）に、表面の電子状態を測定する走査型トンネル顕微鏡（STM）としての機能を付加して、原子分解能を有する液中 FM-AFM/STM 同時計測技術を開発する。

〔研究経過および成果〕

本研究課題では、液中 AFM/STM 同時計測技術を開発することを目的としている。液中で STM 測定を行うためには、溶液を介して金属探針－試料間に流れる漏れ電流を防ぐ必要がある。従来の液中 STM 測定では、先端部以外を絶縁コーティングした金属探針を用いるが、マイクロスケールでの微細構造をもつ AFM カンチレバーにそのようなコーティングを施すことは容易ではない。そこで本研究では、qPlus センサ（F.J. Giessible, Apply. Phys. Lett., **73** (1998) 3956）を用いた。qPlus センサは、音叉型水晶振動子の片方の梁を基板に固定し、もう片方の梁の先端に金属探針を固定したものである。基板に取り付けたピエゾ素子の振動を介して、探針が取り付けられた梁をその共振周波数（f_0）で振動させる。このとき、水晶の圧電効果で共振周波数をもつ交流電流が流れ、それを電圧に変換して、梁の振動振幅を検出する。探針－試料間に力がはたらくと、梁の共振周波数がシフトするため、そのシフト量を検出することで、FM-AFM 測定を行う。qPlus センサは、STM と同じ金属探針を利用できるため、絶縁コート金属探針をそのまま利用することで、液中での AFM/STM 同時測定が原理的に可能となると考えられる。

図1 試作した AFM/STM 同時計測用 qPlus センサ

そこでまず、同時計測用 qPlus センサの作製から取り掛かった。STM 測定用電極を追加した取付基板を試作し、その基板に、水晶振動子を絶縁性接着剤で固定する。水晶振動子の電極を導電性接着剤で取付基板の AFM 測定用の電極を電気的に接触させる。先端部以外を絶縁コーティングした探針は、電解研磨で先鋭化したタングステンワイヤを、加熱して溶融させたアピエゾンワックスに、探針先端からくぐらせることで作製した。長さ約 2 mm に整え、カミソリ刃で、溶

液に触れない部分のワックスを除去した探針を水晶振動子に接着固定し、最後に、ワックスを除去して露出させた金属探針と取付基板の電極を、金線で電気的に接触させた(図 1)。

試作した qPlus センサの動作・性能確認を行うため、液中でマイカの FM-AFM イメージングを実施し、原子分解能でマイカ表面のイメージングができる性能があることを確認した。次に、大気中で AFM/STM 同時イメージングを試みた。観察試料として、導電性のある高配向性グラファイト(HOPG)を用いた。ここでは、諸々の理由により、FM 方式でなく振幅変調(AM)方式で探針－試料間距離制御 AFM で行い、トンネル電流を同時に検出しながらイメージングした。得られた AFM 像(図 2(a))は、平坦な HOPG 表面に吸着物が付着している様子が観察された。STM 像(図 2(b))にも、同様のコントラスがはっきりと表れていた。qPlus センサの振動振幅とトンネル電流の距離依存性を同時に測定してみたところ(図 3)、振動振幅(探針－試料間相互作用力)、トンネル電流ともに、それぞれ典型的な距離依存性を示しており、以上のことから、AFM と STM の同時検出ができていることがわかる。

液中での同時イメージングでは、探針－試料間にトンネル電流を流すために、バイポテンショスタットで探針と試料の電位を電気化学的に独立して制御して、

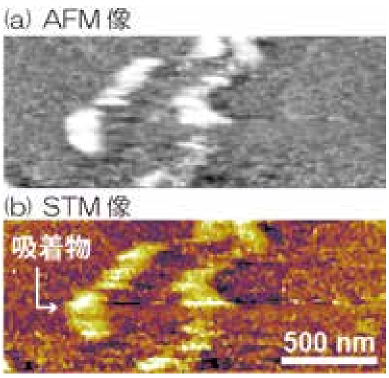


図２　大気中での AFM/STM 同時計測像

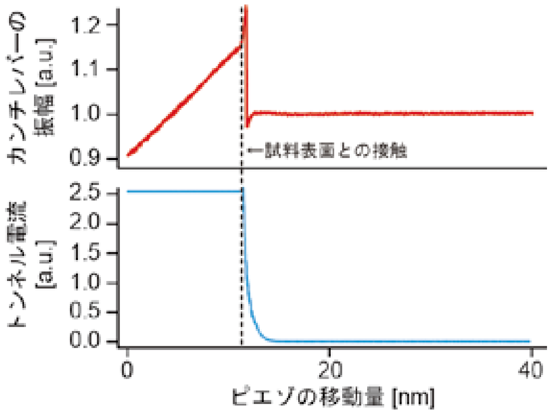


図３　同時測定した qPlus センサの振動振幅とトンネル電流の距離依存性

探針－試料間に電位差を生じさせなければならない。そこで、観察溶液中に参照電極と対向電極を設置できる試料セルを試作した。現在、試作した qPlus センサと試料ホルダを用いて、液中での同時イメージングを試みているが、検出回路内に発生するノイズや、完璧な探針の絶縁コーティング処理の再現性が十分でないことなど、いくつか課題が残されており、これらの解決中である。液中での AFM/STM 同計測を近い将来実現させるべく、今後とも引き続き本研究に精力的に取り組む。

〔謝辞〕

qPlus センサの作製に関してご助言を賜りました京都大学工学研究科の一井崇准教授に深く感謝申し上げます。

〔発表論文〕

1. Naritaka Kobayashi, Hirokazu Saitoh, Ryuzo Kawamura, Hiroshi Y Yoshikawa and Seiichiro Nakabayashi, “Structural Change of Nonionic Surfactant Self-Assembling at Electrochemically Controlled HOPG/Electrolyte Interface”, Journal of Electroanalytical Chemistry, 799 (2017) 444-450.

【助成 34 -13】

超短パルスレーザーによる薬品フリーの表面着色加工法の開発に関する研究

研究者　東京農工大学　大学院工学研究院　准教授　　宮地　悟代

〔研究の概要〕

モルフォチョウというアメリカ大陸に生息する蝶は、翅(はね)の表面にある櫛形の鱗粉が光の干渉を誘起するため、色素などを使わなくても鮮やかな青色を発色している。構造色と呼ばれるこの発色の仕組みは、周期構造体の大きさが可視光の波長(300～750 nm)と同程度かそれ以下であるために起こる。本研究では、高強度フェムト秒レーザーを用いた表面周期構造の形状制御の手法を利用し、発色性がよく、視野角の広い着色表面実現できる微細構造体の作製技術を開発することを目的とした。実験の結果、ステンレス鋼表面に周期 400～500 nm で均一な格子構造を形成でき、レーザーパルスの照射数によって周期を制御できることを示した。

〔研究経過および成果〕

構造色を発現させるためには、可視光の波長である 300～750 nm の周期サイズで均一に配列した周期構造体が必要となる。さらに、この周期構造体の深さも光の波長程度があれば十分な発色が現れることがよく知られている。そのため、本研究では 2012 年に宮崎教授と採択者が開発した 2 ステップ法と呼ばれる新しいレーザーナノ加工法を用い、ステンレス鋼表面にまずは青色領域の発色に必要な均一な構造体を作製するためのレーザー照射条件を探索した。

具体的な方法は以下の通りである。ここで、使用するレーザービームは、Ti サファイアレーザー増幅システムから出力される中心波長 λ = 800 nm、パルス幅 100 fs、最大パルスエネルギー6 mJ の fs レーザーパルスである。加工ターゲットとして表面を鏡面研磨したステンレス鋼(SUS304)を用いた。

まず、図 1(a)に示すように、第 1 ステップとしてステンレス鋼表面に 2 ビームの光干渉によってミクロン周期サイズの干渉パターンを削り取る(アブレーションさせる)。このとき、ビーム 1 をターゲット表面に垂直に、ビームの 2 を入射角 θ で照射するため、干渉パターンの周期は $\lambda/\sin\theta$ となる。さらに図 1(b)に示すように、第 2 ステップとしてその上から重ねて 1 つのビームのみレーザーパルスを照射する。この照射方法によっ

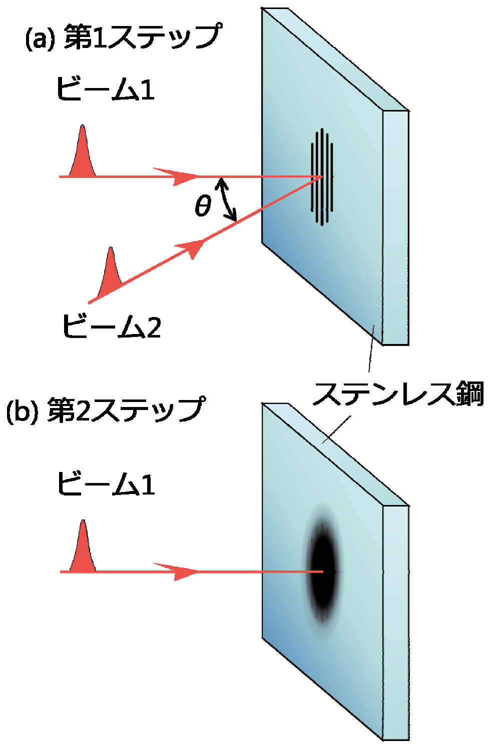


図 1　ナノ周期構造体形成のため実験概要。

て、第 1 ステップで固体表面に形成した均一で規則正しく配列した周期構造が境界条件となって、第 2 ステップで固体表面に励起される電子の集団運動（表面プラズモンポラリトン）に境界条件を与えられるため、均一な微細周期構造体を形成できる。加工後の表面を電子顕微鏡（SEM）で観測した。

実験では、ビーム 2 の入射角度を $\theta = 60°$とした。まず、第 1 ステップによって干渉パターンを作製した。加工表面の SEM 画像を図 2(a)に示す。ビーム1と2はともに水平方向の偏光方向で、レーザーのエネルギー密度（フルーエンスという）を 200 mJ/cm^2 にした。図中では白い線に挟まれ、垂直方向に伸びた幅の狭い帯と、黒くて幅が広い帯の2つが見えるが、後者がレーザーによってアブレーションした部分である。また、周期は 800/sin60° ~ 920 nm となっているのがわかる。

次に、この干渉パターンをつけた表面に第 2 ステップとして、ビーム1のみを照射した。このとき、ビーム1のフルーエンスは 200 mJ/cm^2 にであった。図 1(b)から(d)はそれぞれ、30 パルス、50 パルス、70 パルス重ねて照射した後の表面の SEM 画像である。30 パルス照射後には、周期 410nm で直線性がよく均一なナノ構造が形成されていることがわかる。パルス数を 50 パルスに増加させると周期は 430nm に、70 パルスに増加させると周期は 470nm に増加することがわかる。以上の結果より、入射角を 60°にしたとき、青色を発色させることができる周期 400nm 付近の周期構造体が形成できること、第 2 ステップで照射するパルス数を変化させることによって、周期を制御できることがわかった。この結果は、青色の中でも異なる色彩を示すことが予想される。

さらに、ステンレス鋼を固定しているステージを一定の速度で動かすことによって、上記の構造体を 3 x 3 mm^2 程度の領域に作製できることもわかった。今後、反射光スペクトルが測定可能となる 10 x 10 mm^2 程度にナノ構造体を作製し、ナノ構造体が発色する色彩を計測する予定である。

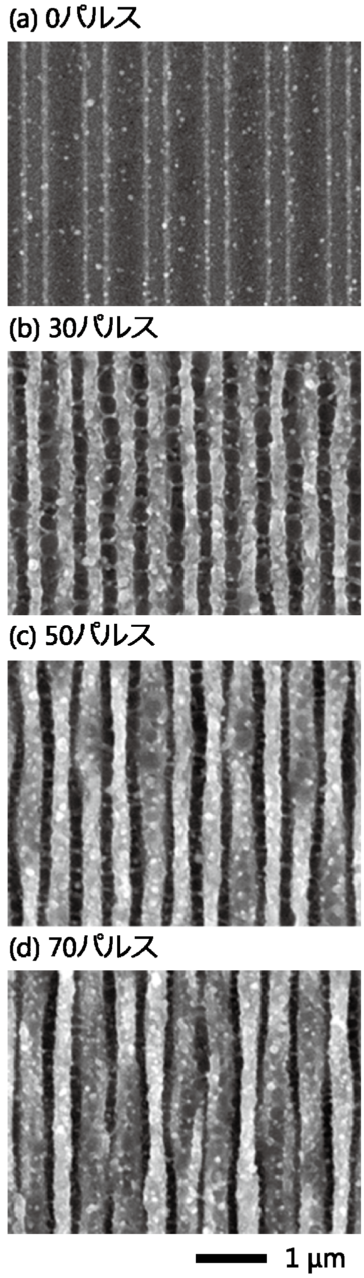


図 2　ステンレス鋼表面に形成したナノ周期構造体の SEM 画像。第 1 ステップ終了後、第 2 ステップでのパルス数が(a)0 パルス、(b)30 パルス、(c)50 パルス、(d)70 パルスである。偏光方向は水平方向である。

【助成 34 -14】

分子配線を指向した導電性高分子の自発成長

東京工業大学物質理工学院 准教授 稲木 信介

〔研究の概要〕

軽量かつ柔軟な有機・高分子材料を用いる分子エレクトロニクス分野への期待は大きいものの、有機分子により回路を描く分子配線の達成には多段階のブレイクスルーが必要である。本研究では、「導電性高分子の自発成長」に着目し、新しい分子配線技術への応用を目的とした。バイポーラ電気化学と呼ばれる手法を駆使し、ワイヤレス電極からの導電性高分子ファイバー自発成長法を確立するとともに、条件最適化により、ファイバー成長次元を制御できることを見出した。本技術はこれまでにない導電性高分子ファイバー合成法であり、分子エレクトロニクス分野への貢献が期待できる。

〔研究経過および成果〕

バイポーラ電極(外部電場により駆動されるワイヤレス電極)の原理に従えば、導電体(微粒子、ワイヤー、板など)の両端において陽極部位と陰極部位を発現させることができる。これまでに、導電性微粒子をバイポーラ電極とした位置選択的な電解めっきに成功しており、ワイヤレス導体上での位置選択的電解反応という機能化法の開発に至った。本研究では、金線をバイポーラ電極とした 3,4-エチレンジオキシチオフェン(EDOT)の電解酸化重合を検討した。

1. 金線をバイポーラ電極とした EDOT の電解重合

まず、交流バイポーラ電解法を用いて、芳香族モノマーの酸化重合を検討した。ガラス基板上に金線(ϕ = 50 μm, 20 mm)を静置し、EDOT、ベンゾキノン(BQ)を含む電解液を用いて交流電圧を印加した(図1)。酸化反応は EDOT の電解重合、還元反応は BQ からヒドロキノン(HQ)への還元を想定し、それぞれの電位からバイポーラ電極発現に必要な電位差(ΔV_{min})を算出した。金線に十分な電位差を印加しながら光学顕微鏡による観察を行ったところ、金線の末端から数本の PEDOT ファイバーが樹枝状に成長する様子が観察され、金線間隔 1 mm を約 90 秒で架橋した。得られた PEDOT ファイバーの SEM 観察を行ったところ、約 3-5 μm のファイバー径を有していることが分かった。

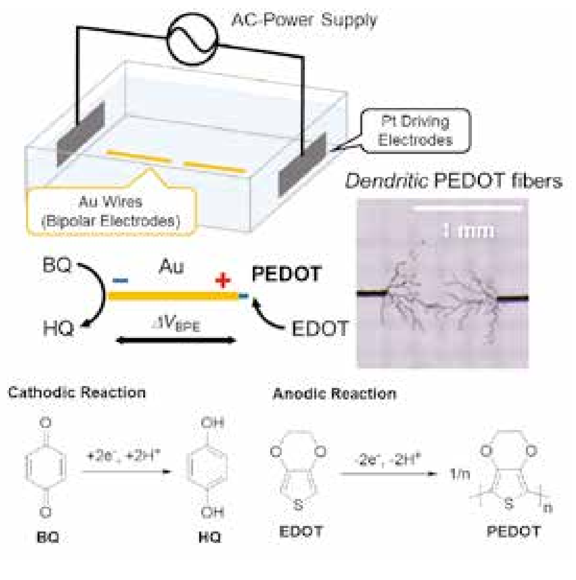


図1. バイポーラ電解重合法による導電性高分子ファイバーの樹状成長

２．微小空間内でのバイポーラ電解重合

PEDOT ファイバーの樹枝状成長は、成長中のPEDOT ファイバー先端が電極として振舞うため、四方から拡散してきた EDOT モノマーが様々な位置で重合したためである。そこで、バイポーラ電極周りのモノマー供給を制限することで、枝分かれの少ないPEDOT ファイバーが作成できると考えた。

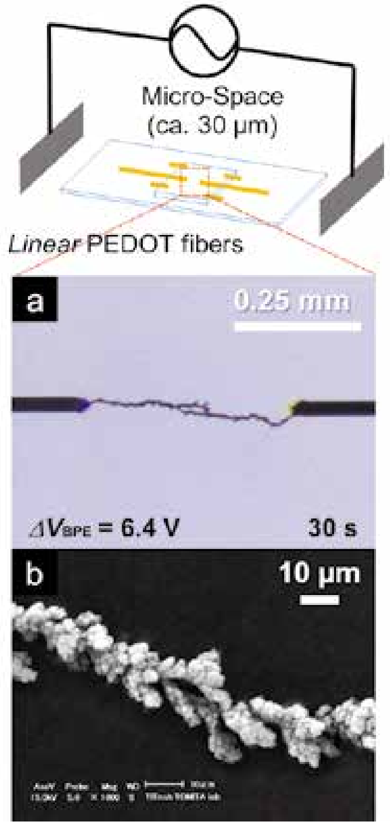


図2. 導電性高分子ファイバーの一次元成長挙動

バイポーラ電極となる金線をカバーガラスで覆い、数十μmの微小空間を作成した。EDOTの交流バイポーラ電解重合を行ったところ、金線両端から直線状のPEDOTファイバーが成長した（図2）。SEM観察により、ファイバー径は 10 μm 程度であり、細かな枝分かれ構造を有しながらも、電場方向に一次元成長していることが分かった。微小空間の導入によりモノマーの供給を制限した結果、ファイバー側面からはPEDOT が成長しなかったためである。モノマー濃度の効果、マイクロ空間の厚みの効果について種々検討し、上記考察を裏付ける結果を得ている。

また、本研究で得られた直線状 PEDOT ファイバーを用いた金線の架橋（配線）についても種々検討したところ、金線の配置と印加電場方向を工夫することで、選択的な金線間の配線に成功した（図3）。本技術は導電性高分子の自発成長を用いた回路形成技術への応用展開が期待される。

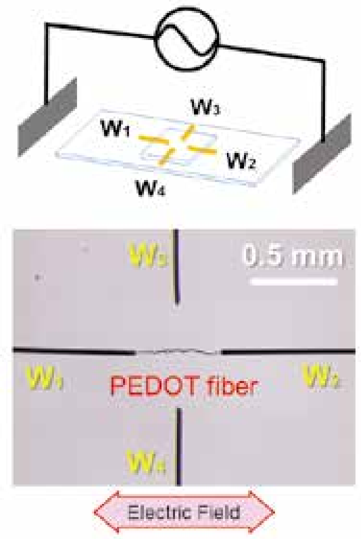


図3. 分子配線技術への応用

〔発表論文〕

1. Masato Ohira, Yuki Koizumi, Hiroki Nishiyama, Ikuyoshi Tomita, Shinsuke Inagi, Synthesis of Linear PEDOT Fibers by AC-bipolar Electropolymerization in a Micro-space *Polymer Journal*, 2017, *49*, 163-167.
2. 小泉裕貴，稲木信介，バイポーラ電解重合法による導電性高分子の合成
高分子論文集，74，6 号，460-472 (2017)

【助成 34 -15】

超高速･高分解能超音波イメージングに関する研究

研究者　富山大学大学院理工学研究部　教授　　長谷川英之
共同研究者　明星大学　名誉教授　　八木　晋一

〔研究の概要〕

距離分解能は，超音波イメージングにおける画質に関係する要素の1つである． 本研究では，超音波Bモード画像における距離方向分解能を向上させるため，超音波散乱強度の最尤推定に基づくフィルタを検討した．提案したフィルタは，用いる超音波イメージングシステムの点拡がり関数をもとに空間分解能を向上させる．しかし，超音波エコー信号波形は伝搬媒質の周波数依存減衰により変化するため，提案したフィルタの性能は画像化対象の減衰特性に依存する可能性がある．そのため，減衰特性の影響を低減する手法についても検討を行った．提案法により得られる B モード画像を，従来法により得られる画像と比較することで性能評価を行った．その結果，提案手法により距離分解能が大幅に向上することが確認された．

〔研究経過および成果〕

1．背景

超音波診断は，実時間かつ非侵襲的に体内の画像を生成することができる診断方法である． 空間分解能は，生成される医用画像の質を決定付ける要素の 1 つであり，空間分解能が優れた画像は診断を正確にする．本研究グループでは，最尤推定法を用いて画像化対象内の超音波散乱強度分布を推定することで，超音波断層像の距離分解能を向上させる手法を開発した．

2．原理

本研究では，超音波散乱強度の推定に用いるエコー信号の離散モデル$\mathbf{s}_n$を定義する．

$$\mathbf{s}_n = \mathbf{Hz} + \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで，$\mathbf{z}$は$\mathbf{s}_n$の発生に寄与する超音波散乱強度ベクトルであり，$\mathbf{n}$ は信号に重畳するノイズベクトルである．また，$\mathbf{H}$ は測定装置の送受信特性行列である．

最尤推定法により，散乱強度の推定値$\hat{\mathbf{z}}$が得られる．

$$\hat{\mathbf{z}} = \frac{\mathbf{K}^{-1}\mathbf{H}}{\mathbf{H}^H\mathbf{K}^{-1}\mathbf{H}}\mathbf{s}_n \quad (2)$$

3．実験結果

超音波画像評価用ファントムおよび 40 代男性健常者の頸動脈を用いた実験により，提案法の評価を行った．使用したファントムには，点とみなせるターゲットが配置されている．この点ターゲットからのエコーの半値幅は，従来法: 0.444 mm，提案法: 0.099 mm であり，提案手法により距離分解能が大幅に改善することが示された．

図 1 に，頸動脈からの超音波エコーを処理することにより得られた B モード断層像を示す．図 1(a) は通常のバンドパスフィルタから，(b) は水中のワイヤーからのエコーにより推定した送受信特性行列を使用した最尤推定フィルタから，(c) および(d) はそれぞれ，各素子の受信エコー全体から推定した送受信特性および受信エコーを 2 領域に分割して推定した送受信特性行列を使用した最尤推定フィルタから得られ

た頸動脈のB モード画像である. 図1 に示したB モード画像のダイナミックレンジは, 見え方が同様となるように調整してある. 従来法(a)に比べ, 提案法(b)は距離分解能が向上するとともに, 断層像の横方向の連続性も向上している. さらに, 伝搬減衰特性を考慮するために受信信号から送受信特性行列を推定した提案法(c) および(d)は, (a) および(b)に比べ, 頸動脈後壁が明確に描出されていることが分かる.

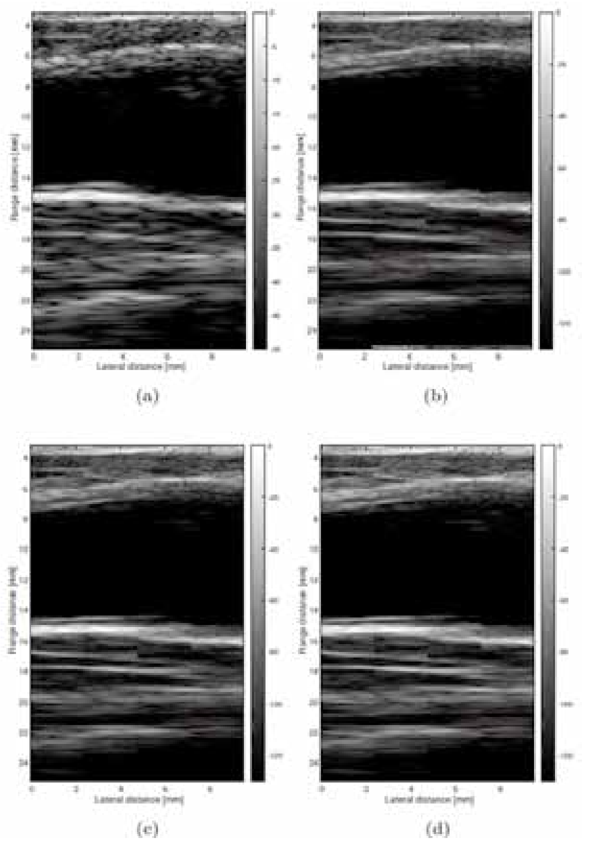


図 1: ヒト頸動脈の長軸 B モード断層像. (a) 従来法. (b) 提案法(水中ワイヤからのエコーにより送受信特性行列を推定). (c) 提案法(受信信号全体から送受信特性行列を推定). (d) 提案法(2 分割した受信信号から送受信特性行列を推定).

4. まとめ

本報告では, 超音波の伝搬に伴う減衰を考慮した最尤推定フィルタを提案した. 伝搬による減衰を考慮することにより, B モード画像の距離方向における分解能, および深達度が向上した.

〔発表論文〕

【査読付き論文】

1. H. Hasegawa, “Improvement of range spatial resolution of medical ultrasound imaging by element-domain signal processing,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 7S1, pp. 07JF02, 2017.

【国際会議発表論文】

1. H. Hasegawa and M. Mozumi, “Maximum likelihood estimation of scattering strength for high range resolution ultrasound imaging,” 2017 IEEE Int. Ultrason. Symp. Proc., 2B-3, 2017.
2. H. Hasegawa, “Study on improvement of spatial resolution in element domain for high-frame-rate ultrasound,” Proc. 37th Symp. Ultrason. Electron., 1P5-5, 2016.
3. M. Mozumi and H. Hasegawa, “Estimation of transmit-receive response of ultrasound system for high range resolution imaging,” Proc. 38th Symp. Ultrason. Electron., 2P5-1, 2017.

【国内会議発表論文】

1. 長谷川英之, “超音波イメージングにおける距離分解能向上に関する検討,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1127-1128, 2017.
2. 長谷川英之, “最尤推定法と複数信号弁別法による高フレームレート超音波の距離分解能向上,” 超音波医学, vol. 44, p. S450, 2017.
3. 茂澄倫也, 長谷川英之, “送受信特性の推定と距離分解能向上手法への適用,” 電子情報通信学会技術報告, vol. 117, no. 111, pp. 13-17, 2017.

【助成 34 -16】

強誘電体をゲートとしたダイヤモンドパワーFET の創出と巨大分極誘起による超低損失動作の実証

研究者　金沢大学理工研究域　准教授　川江　健

〔研究の概要〕

強誘電体 VDF-TrFE をゲート、バルクダイヤモンドをチャネルとした MFS 型 FET の創出に取り組んだ。作製されたデバイス構造は良好なゲート特性および FET 特性を示す事が確認された。特にゲート構造部に対する CV 特性に関して、VDF-TrFE とダイヤモンドの界面に予期せぬ干渉層（低誘電率な絶縁層）が一切存在しない理想的な MFS 構造が形成された事を世界で初めて実証した。また、当該デバイス構造を用いる事により、室温で 0.87mA/mm の最大オン電流が得られた。この値は従来報告の 10 倍超であり、強誘電体をゲートとする事により、バルクダイヤモンドチャネルに対して高効率なキャリア誘起が可能である事を実証したものである。

〔研究経過および成果〕

（研究背景と目的）

大きなバンドギャップに基づいた高い絶縁破壊電界、優れた熱伝導性、キャリア移動度を有するダイヤモンドは、次世代のパワーデバイス材料として有力視されている。一方、ワイドギャップ半導体としてダイヤモンドを用いる際、本質的な問題として深い不純物準位が挙げられ、この事は室温における効率的なキャリア誘起が困難（オン抵抗を低減出来ない）であるという課題がある。この問題に対して、研究代表者は「巨大分極誘起が可能な強誘電体をゲートとした FET 構造」を創出する事による問題解決を提案する。

これにより、ダイヤモンドのパワーデバイス応用に向けた本質的な課題の解決を図り、次世代のパワーデバイスに求められる性能実現に向けた新しい学術的アプローチに基づいた問題解決の実証に取り組んだ。

（実験方法）

低濃度 B ドープバルクダイヤモンド上にソース・ドレイン電極を形成した。その後、CSD 法を用いて強誘電体 VDF-TrFE ゲートを堆積し、最後にゲート電極を形成して MFS 型 FET 構造とした。

作製されたデバイス構造に対し、ゲート特性および FET 特性の検証を行った。

（実験結果および考察）

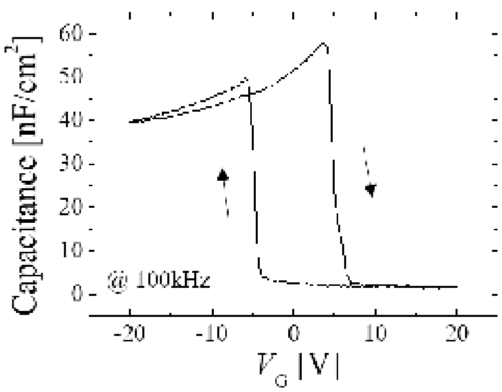


図 1 MFS 型ゲートに対する CV 特性

図 1 に VDF-TrFE ゲート構造に対する CV 特性を示す。観測された特性は通常の MOS 構造における振る舞いとは異なるが、詳細を解説する。まず、プラスバイアス域とマイナスバイアス域に着目すると容量値が大きく変化している事が分かる。この振る舞いか

ら、プラスバイアス域ではチャネルは空乏化されており、マイナスバイアス域はチャネル蓄積状態にあると理解できる。次に、特性全体に明瞭に現れているヒステリシス特性は VDF-TrFE の強誘電性に基づくものである。また、蓄積領域に着目すると、通常の MOS 構造で観測されるバイアス電圧に依存しない一定値の容量が観測されず、非線形な振る舞いが見られる。この点について、蓄積状態における強誘電体ゲートは電気的には平行平板型の強誘電体キャパシタと見なす事が出来る事から、平行平板型強誘電体キャパシタで観測される非線形な振る舞い(PV 特性の微分形)が反映されたものと言える。この事は、VDF-TrFE とダイヤモンド界面に予期せぬ絶縁層(I 層)が形成されているとすれば、その容量成分が重畳されて蓄積領域で一定値となって観測される事となる。つまり、観測された特性からは「界面に予期せぬ絶縁層が一切形成されていない、理想的な MFS 型構造が形成出来た」と言えるものであり、世界で初めてほぼ理想的な MFS 型キャパシタの CV 特性を実証した結果と言える。

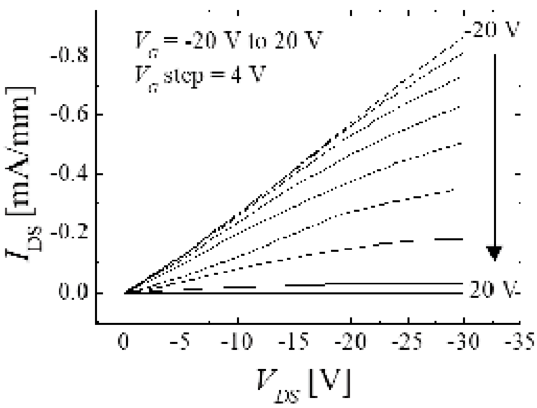


図 2 MFS 型ダイヤモンド FET の I_{ds}-V_{ds} 特性

図 2 に VDF-TrFE をゲートとした MFS 型ダイヤモンド FET の I_{ds}-V_{ds} 特性を示す。エンハンス型の p チャネル FET として動作する事を確認した。また、観測された電流 on/off 比および最大電流密度は 10^3、0.87mA/mm が室温で得られた。ここで、観測された最大電流密度に関して、Umezawa らが作製した同様の低濃度 B 添加ダイヤモンド層をチャネルとした MES 型 FET 構造において報告されている値と比較すると約 10 倍となっている事が分かった。この結果について、VDF-TrFE の巨大分極により室温であっても効率的にキャリアがチャネルに誘起された事実に基づくものであると推察する。以上より、強誘電体をゲートとする事により、ダイヤモンドの深い不純物準位に対しても強誘電体ゲート構造が高効率にキャリアを誘起可能である事を実証した。

〔発表論文〕

1. R. Karaya, T. Kawae *et al.*, B-doped diamond field effect transistor with ferroelectric vinylidene fluoride-trifluoroethylene gate insulator
   Jpn. J. Appl. Phys., 56, 10PF06 (2017)
2. T. Kawae, Diamond field effect transistor with ferroelectric gate structure (Invited Talk)
   Collaborative Conference on Materials Research (CCMR2017), Jeju, Korea
3. 森 陽介、川江 健 他、P(VDF-TrFE)をゲートとしたボロンドープダイヤモンド FET
   第 34 回 強誘電体応用会議
4. 柄谷涼太、川江 健 他、強誘電体をゲート絶縁膜としたホウ素ドープダイヤモンド FET 構造の作製 (2)、第 64 回 応用物理学会春季学術講演会

【助成 34 -17】

螺旋状ナノファイバグレーティングの開発とその高感度光センシングデバイスへの応用

研究者　静岡大学工学部　教授　　李　洪譜

〔研究の概要〕

螺旋状ファイバグレーティング(HLPG)は光軸に沿って周期的なスクリュータイプの屈折率変調があるファイバ回折格子であり、波長分割多重(WDM)及び軌道角運動量(OAM)モード多重光ファイバ通信システムや光ファイバセンシングシステム等に不可欠なデバイスである。本研究では、炭酸ガス(CO_2)レーザを持つ通常の単一モード光ファイバに HLPG の新しい製作法を開発した。従来の製作法と比較して、必要な装置が極めて簡単であり、安価しかも高効率なため実用化は可能である。また、応用として我々はカスケードした二つHLPG（CHLPGs）による温度、ねじれ及ひずみを同時測定出来るファイバセンサーを提案し、その方案の妥当性と有用性を実証した。従来のねじれ検出システムとは異なり、提案した方法はねじれ大きさの測定だけではなく、ねじれ方向の識別も可能である。

〔研究経過および成果〕

● 炭酸ガスレーザによる HLPG の作製

図 1 に示すのは本研究で開発した螺旋状 HLPG 製作装置である。ここで、集光レンズを用いて直接

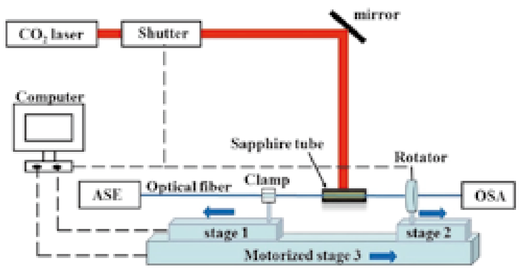


図 1　CO_2レーザによる HLPG の製作装置

ファイバを照射する方法とは異なり、特別に設計されたサファイアチューブ結晶管を使用する。CO_2 レーザ光を用いて直接結晶管を照射するによって、管内温度は均一的に900度以上まで上昇する。結晶管内で加熱したファイバはステージ 1 及び 2 を移動することによって細線化出来、さらにステージ 3 の移動と回転モーダーの回転をするによって、ファイバの細線化(ナノファイバ)と螺旋状 LPG 作製を同時に実現する。本研究では、直径数十µm の螺旋状ファイバ回折格子の作製を初めに成功した。 図2に示すのは試作したHLPGの顕微鏡写真であり、HLPGの表面で螺旋構造を有することを明らかにした。

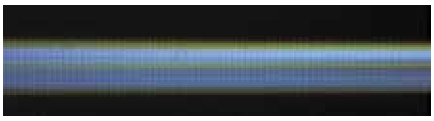


図2　作製した HLPG の顕微鏡写真

● CHLPGs による温度・ねじれ・歪みセンサー

図3に示すのは本研究で提案した温度・ねじれ・歪み同時測定センサーである。ここで、センシング素子としては、異なるヘリシティを有する 2 つ HLPGs が直列されている。即ち左のcHLPは時計回りヘリシティを持つものであり、一方右のccHLPGは反時計回り

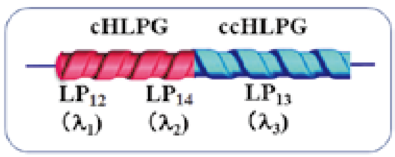


図 3　カスケードした HLPGs の構造図

ヘリシティを持つものである。図 4 は作製した CHLPG の透過スペクトルである。この図により、波長 1340-1620 nm 帯域に 3 つの損失-ディップが存在することを分かった。この損失ピークの波長変化は HLPG 周囲に加える温度やねじれや歪などと強く依存している。その関係は下記の式を表す。

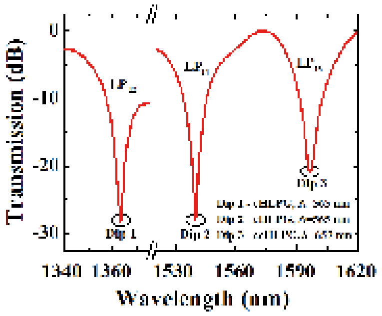


図 4　直列した HLPGs の透過スペクトル

$$\Delta\lambda = \Delta\Lambda \cdot (n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}) + \Lambda \cdot \Delta(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}) \qquad (1)$$

ここで，n_{eff}^{core} はファイバコアの実効屈折率，n_{eff}^{clad} はクラッドの実効屈折率である。HLPG のヘリシティ方向と同じ方向を回転させるとき、HLPG の周期Λは小さくなり、式(1)より損失ピークは波長の減少方向にシフトする。また、HLPG のヘリシティと逆の方向に回転させると、HLPG の周期は大きくなる。したがって損失ピークは波長の増加方向にシフトすることが分かる。一方、式(1)により、HLPG の温度を上げると、熱膨張効果よりグレーティング周期ΔΛが大きくなる。また、熱光学効果より実行屈折率 $\Delta(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad})$ が大きくなる。結果として損失ピークは波長の増加方向にシフトすることが分かる。また、HLPG に引張荷重をかけた場合、弾性変形により HLPG 周期は大きくなるが、ファイバ直径の減少による実効屈折率の減少量 $\Delta(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad})$ のほうが効果的であるため、損失ピークは波長の減少方向にシフトすると考えられる。図 5 に本研究提案した cHLPGs による温度・ねじれ・ひずみセンサーの実験系を示す。ねじれ・歪み・温度の同時測定センサーを可能にするため、まずねじれ、歪み、及び温度に対してそれぞれの感度と応答性を調べました。ねじれ角が-360 から 360° まで、歪みが 0 から 2500με まで、温度が室温 21℃から 100℃までの範囲でそれぞれ損失ピーク波長のシフト量を調べ、良好な線形性があるといえる、また、ねじれ、歪み、温度の応答は 0.082 nm/rad/m、0.25 pm/με、0.048 nm/℃という結果となった。今迄報告されたデータを比較すると、ねじれ、温度の応答性に対して、比較的良い性能を示していることが分かった。今後課題として、ナノ HLPG の新しい設計法と作製法を開発し、そして超高感・超高速ファイバセンサーの実現を目指す。

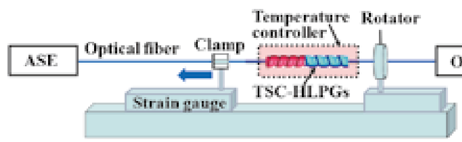


図5 カスケードした二つ HLPG による温度・ねじれ・ひずみセンサーの実験系

〔発表論文〕

1. R. Subramanian, C. Zhu, H. Zhao, and H. Li, "Torsion, strain, and temperature sensor based on helical long-period fiber gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.* DOI:10.1109/LPT.2017. 2787157 (2018). In Press.
2. H. Zhao, C. Zhu, R. Subramanian, and H. Li, "Comprehensive analysis for the consecutively-cascaded single-helix long-period fiber gratings with opposite helicities," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 54, No. 1, pp. 1-6 (2018).
3. H. Zhao, P. Wang, C. Zhu, R. Subramanian, and H. Li, "Analysis for the phase-diffusion effect in a phase-shifted helical long-period fiber grating and its pre-compensation," *Opt. Express,* Vol. 25, No. 16, pp. 19085-19093 (2017).
4. P. Wang, R. Subramanian, C. Zhu, H. Zhao, and H. Li, "Phase-shifted helical long-period fiber grating and its characterization by using the microscopic imaging method," *Opt. Express,* Vol. 25, No. 7, pp. 7402-7407 (2017).

【助成 34 -18】

複雑流れ問題における超並列計算機を援用した大規模トポロジー最適化法の開発

研究者　大阪大学大学院工学研究科　助教　　矢地　謙太郎

〔研究の概要〕

本研究では、流体問題を対象としたトポロジー最適化において、超並列計算機を援用することで、これまで単一のコンピュータでは明らかにすることができなかった複雑な最適化構造の創出を目指した。具体的な設計例題として、三次元熱流体におけるヒートシンクの熱交換量最大化問題を扱い、並列化計算に適した数値アルゴリズムを開発した。流れ場の計算には並列計算に適していることで知られる格子ボルツマン法（LBM）を採用した。また、設計感度の算出の際に行う随伴解析についても LBM を利用することで、極めて並列性の高いアルゴリズムを開発した。そして、開発した最適化アルゴリズムによって、高解像度の大規模トポロジー最適化をヒートシンクの熱交換量最大化問題に適用し、三次元的に複雑に入り組んだ流路構造が最適化構造として優位になることを明らかにした。

〔研究経過および成果〕

トポロジー最適化とは、数理的な最適化理論と数値解析に基づき、構造物の最適な形状と形態（トポロジー）を導出する最も設計自由度の高い構造最適化手法である。この方法は機械構造物の剛性や安定性の向上を目的とした研究をはじめとして、これまでに様々な物理現象を扱った最適化問題への展開が成されている。

幾多の物理現象の中で、トポロジー最適化の流体問題への展開については比較的新しく、2003 年にその基礎的な方法論が提唱されている。この研究を皮切りに、トポロジー最適化を流路設計に応用した試みがこれまでに多数報告されている。中でも、ヒートシンクといった熱流体デバイスへの応用に関しては、一般に既存の製品が単純な流路形状を採用していることから、抜本的な性能の改善が期待できるとして近年注目を集めつつある。

他方、流体を対象としたトポロジー最適化では、流れが時間的に変化しない、すなわち定常流を仮定した研究が大半を占めており、より現実に近い非定常流を対象とした研究についてはほとんど成されていない。これは、最適化の際に設計変数を更新するために必要となる感度を取得する際、各時間ステップの流れ場の情報を常に保存する必要があるため、計算コストが膨大になるためである。特に、トポロジー最適化によって実際に最適化構造を導出するためには、数百から数千回の反復計算を通常要する。これは流れ場の計算を何度も行うことに相当し、現状、一台のコンピュータでは非常に限られた自由度のもとでの最適化問題しか扱うことができない。

本研究では上記課題に対し、スーパーコンピュータを利用した大規模トポロジー最適化法を開発し、これまで単一のコンピュータでは求めることができなかった極めて設計自由度の高い条件のもとでの最適化構造の導出を目指し研究を行った。具体的には、まず並列化計算に適した流体解析手法である格子ボルツ

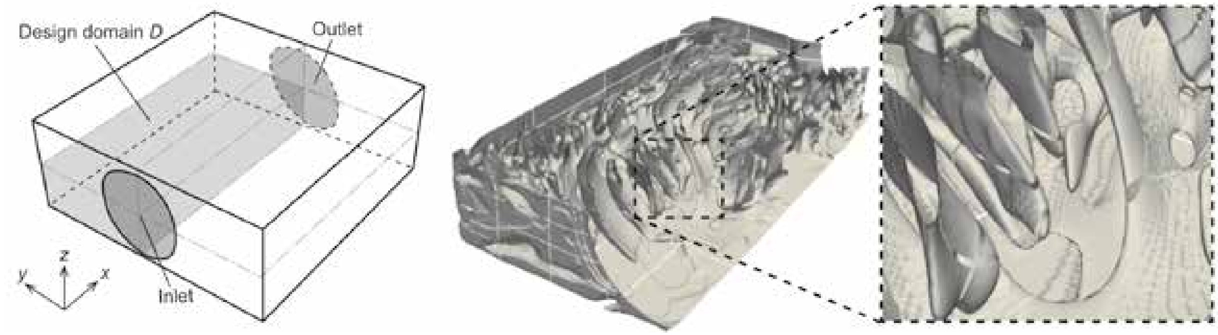


図 1 三次元熱流体におけるヒートシンクの熱交換量最大化問題：（左）設計モデル、（右）最適化構造

マン法（LBM）に基づくトポロジー最適化法の構築を行った。LBMを用いたトポロジー最適化については、2016年に研究代表者がまとめた学位論文の内容をもとに大規模計算に適したアルゴリズムを構築し、スーパーコンピュータを用いて並列性能を検証した。その結果、5120 万節点の解析領域を対象とした大規模トポロジー最適化問題においても、導入する計算ノード数にほぼ線形に比例して高速化が可能であることを明らかにした。

この結果をもとに、提案手法をヒートシンクの熱交換量最大化問題へ適用した。図 1 に問題設定ならびに得られた最適化構造をそれぞれ示す。図からわかるように、複雑に分岐した構造が最適化結果として得られた。これは、流体と固体の表面積が可能な限り大きい方が熱交換をより効率的に行うことができるためである。このような特徴は、研究代表者が過去に行った二次元熱流体におけるヒートシンクの熱交換量最大化問題と同様であるが、図 1 の結果は三次元的に流路を複雑に張り巡らせることが、ヒートシンクのさらなる高性能化を狙って設計する上で重要な因子であることを示唆している。また、大規模計算によって非常に高い設計自由度のもとで最適化を行うことで、幾何学的に複雑な最適化構造を高い解像度で捉えることに成功した。これは大規模並列化計算によって成し得ることであり、本提案手法によって、格子点不足によって許容される劣解の生成を本質的に回避することができることを明らかにした。

得られた成果は国内学会において発表をすでに行っており、さらに、構造最適化分野において著名な雑誌である Structural and Multidisciplinary Optimization に採択された。

本研究の次年度以降の展望としては、提案手法を乱流問題や、より具体的な流路デバイス、更には製造性を制約条件として考慮した工学的な応用例題への展開が考えられる。

〔発表論文〕

1. 矢地謙太郎, 荻野正雄, 陳聰, 藤田喜久雄, “三次元非定常熱流体を対象とした大規模トポロジー最適化法”, 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会, No. 312 (2017).
2. Yaji K., Ogino M., Chen C. and Fujita K., “Large-scale topology optimization incorporating local-in-time adjoint-based method for unsteady thermal-fluid problem”, Structural and Multidisciplinary Optimization, accepted, (2018).

【助成 34 -19】

柔軟かつ高効率なネットワークの実現を目的とした
全光変調フォーマット変換による適応変復調技術の研究

代表研究者　徳島大学　大学院社会産業理工学研究部　助教　　岸川　博紀

共同研究者　徳島大学　大学院社会産業理工学研究部　教授　　後藤　信夫

〔研究の概要〕

我が国の通信データ量は年々増加しており，ネットワークには更なる大容量化と柔軟性･高効率性の実現が求められる．本研究では，所望の伝送容量や伝送距離に応じて光信号を最適化する変調フォーマット変換技術の確立を目的とする．特に伝送可能距離と伝送容量のバランスが良い 8QAM に関する変換技術に注目し，二つの BPSK 信号のベクトル合成と，一つの OOK 信号との光信号処理を用いて 8QAM 信号に変換する原理を考案した．計算機シミュレーションによる特性評価の結果，信号点配置を 8QAM 信号に変換することができ，またビット誤り率特性よりエラーフリーのフォーマット変換が実現可能であることを実証した．

〔研究経過および成果〕

1. 研究背景と目的

我が国の通信データ量の状況は，総務省報道資料より 2015 年 11 月時点の総ダウンロード量は前年比 52.8%増の約 5.4 テラビット毎秒と年々増加している．このような通信を支えるネットワークへの要求条件である大容量化と柔軟性，高効率性を実現する技術としてエラスティック光ネットワーク技術がある．その要素技術であり，所望の伝送容量や伝送距離に応じて光信号を最適化する適応変復調技術の実現が課題である．本研究ではこの課題を解決するため，変調フォーマット変換技術の確立を目的とする．特に，将来の 400 ギガ･1 テラ級伝送に適した伝送方式であるが，技術が未確立である直行振幅変調(QAM)に関するフォーマット変換技術を確立することを目指す．伝送可能距離と伝送容量のバランスが良く，信号点が 8 つある方式の 8QAM に関する変調フォーマット変換技術を対象とする．

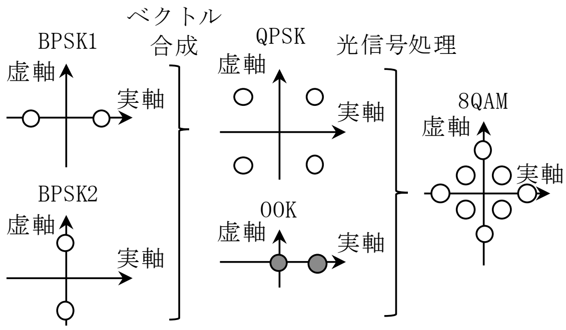


図1.　二つのBPSK信号から変換されるQPSK信号と
一つのOOK信号から8QAM信号へ変換する原理

2. 変調フォーマット変換原理

図 1 に，二つの 2 相位相変調(BPSK)及び一つの振幅変調(OOK)信号から 8QAM への変調フォーマット変換法の原理を示す．二つの BPSK 信号は，我々が報告した変換法に基づき遅延干渉計(DLI)によるベクトル合成を用いて QPSK 信号に変換する．その QPSK 信号と，異なる周波数の OOK 信号が WDM 合波器で多重化され，半導体光増幅器(SOA)に入力される．SOA では，OOK 信号のマーク(高光強度)パルスにより相互位相変調(XPM)と相互利得変調(XGM)が生じ，QPSK 信号に影響を与え，QPSK 信号の位相は XPM

の影響により回転し，QPSK 信号の振幅は XGM の影響を受け減衰する．この結果，8QAM の内側の信号点を形成する．また OOK 信号のスペース(低光強度)パルスが入射すると，QPSK 信号の位相および振幅はそのまま維持され，8QAM の外側の信号点を形成する． このように 8QAM への変調フォーマット変換が達成される．

3. 特性評価

図 2 に特性評価のための計算機シミュレーション構成図を示す．BPSK 信号は線幅 100kHz，周波数 f_{s1}=193.1THz であり，2^{15}−1 疑似ランダムビットシーケンス(PBRS)によって 10Gbit/s で変調される．DLI を用いて変換された QPSK 信号のパワーは-3dBm である．OOK 信号は線幅 100kHz，パワーは−0.5dBm，周波数 f_{s2}=193.2THz であり，2^{15}−1 PRBS によって 5Gbit/s で変調される．ビット誤り率(BER)計算するため ASE ノイズを付与し光信号対雑音比(OSNR)を設定する．その後 WDM 合波器で合波し SOA で変換された 8QAM 信号をコヒーレント検出し，デジタル処理する．

図 3 に OSNR に対する BER 特性を示す．破線は，log10(3.8×10^{-3})=−2.42 のエラー訂正閾値(FEC thr.)を意味する．変換された 8QAM 信号の BER は，OSNR が 11dB を超えると FEC 閾値を下回り，エラーフリーのフォーマット変換が行えることを表している．

図 4 に OSNR=16dB のときの BPSK と 8QAM のコンスタレーションを示す．8QAM の外側の信号点は XPM の影響で位相回転している様子が見られる．OOK と QPSK から 8QAM 信号へのフォーマット変換が達成できたと言える．今後は実験的に実証するとともに，本手法の逆変換にあたる 8QAM から BPSK，OOK への変換手法を検討する予定である．

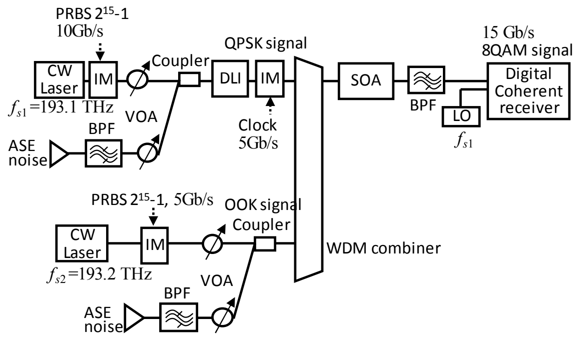


図2．特性評価系の構成図．

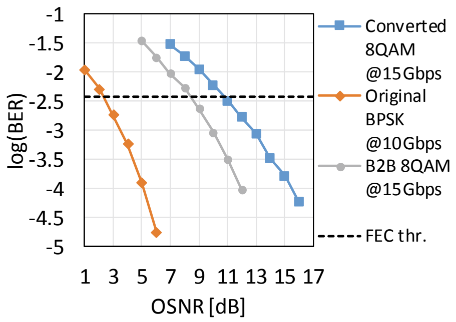


図3． 光信号対雑音比OSNRに対する
ビット誤り率BER特性．

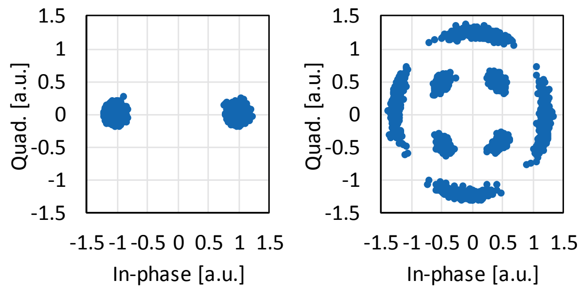


図4．変換前BPSKと変換後8QAMの信号点配置．

〔発表論文〕

1. 岸川 博紀，後藤 信夫，“BPSK 信号および OOK 信号から 8QAM 信号への変調フォーマット変換の検討，” 電子情報通信学会総合大会，東京，2018 年 3 月発表予定．

2. Masaki Uetai, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, Optics & Communications Taiwan, International Conference 2017, No.2017−FRI−S0204−O004, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 2017.

3. Masaki Uetai, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, The 22nd OptoElectronics and Communications Conference, No.P3−157, Singapore, Jul. 2017.

【助成 34 -20】

高解像度 MRI 診断デバイス開発を志向した超伝導マグネット材料のナノ組織制御技術の開発

研究者　九州大学大学院工学研究院　准教授　　寺西　亮

〔研究の概要〕

MRI 診断デバイスへの応用を志向して、$YBa_2Cu_3O_y$（YBCO）超伝導薄膜線材の磁場中での臨界電流密度(J_c)の高性能化のための、薄膜組織の成長制御に取り組んだ。YBCO 薄膜は、有機金属塩の塗布熱分解法にて作製し、膜中に磁束のピン止め点として $BaHfO_3$（BHO)を導入した。磁場中での J_c の高性能化には、BHO の粒径を微細化することが不可欠であることから、本研究では、薄膜結晶化のための熱処理時の膜の成長機構を考察し、組織をナノレベルで制御するための指針を明らかにすることを研究目的とした。成長過程の調査から、薄膜組織を制御して BHO を微細化するには、Ba 源となる BaO を低温域で膜中に効果的に生成させること、またその後は YBCO の結晶化温度よりも低温域で BHO の結晶化を行うことが重要であることが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

Y および Ba の三フッ化酢酸塩と Cu のオクチル酸塩を Y : Ba : Cu = 1 : 1.5 : 3 のモル比で溶媒に溶かし、これら金属の総イオン濃度に対してモル濃度で 1 mol%となるように Hf 塩を添加した出発溶液を準備した。これを $CeO_2/LaMnO_3/MgO/Gd_2Zr_2O_7$/Hastelloy 基板上にスピンコートし、酸素下で昇温速度 5 K/min で 703 K まで昇温した後、同条件で塗布と焼成を 2 回繰り返して仮焼膜を得た。その後、中間熱処理として BHO が結晶化すると考えられる 823 K まで一旦昇温させて炉冷する2段階熱処理を導入し、その後、昇温速度 5 K/min で 1053 K まで昇温して 150 min 保持して結晶化し、YBCO 薄膜を得た（膜厚約 0.6um）。

中間熱処理の導入試料および導入なし試料断面の走査透過型電子顕微鏡（STEM）像とエネルギー分散型X線分光分析（EDS）マップを図.1 および 2 にそれぞれ示す。母相は Y、Ba、Cu、O から構成されるが、いずれの試料においても Y-O、Y-Cu-O、Cu-O 等の異相が観察された。また膜中に微細な粒子が分散し

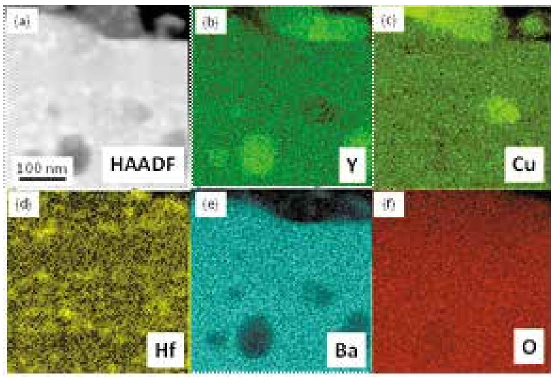


図 1　中間熱処理ありで結晶化熱処理した YBCO 薄膜の(a) STEM 像および EDS マップ.

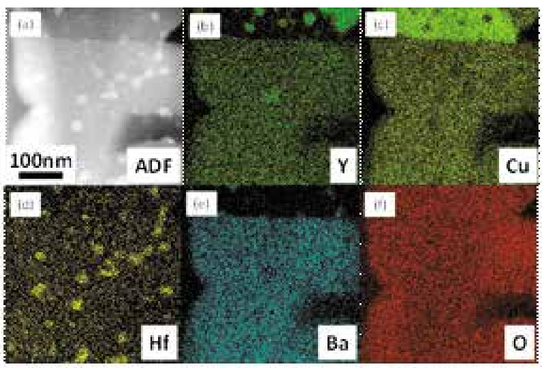


図 2　中間熱処理なしで結晶化熱処理した YBCO 薄膜の(a) STEM 像および EDS マップ.

ているのが確認され、Ba、Hf、O の EDS マップからこれらの粒子が BHO であることが示唆された。顕微鏡

像から BHO の平均粒径を計測し、また試料厚みを 100 nm と仮定して数密度を試算した。前者については、中間熱処理導入あり試料およびなし試料で、それぞれ 15 nm および 19 nm、後者についてはそれぞれ 9.0×10^{21} m^{-3} および 2.6×10^{21} m^{-3} であった。また BHO の粒径分布を図 3 に示す。これらの結果から、中間熱処理の導入で BHO の粒径が小さくなり、数密度が増加することが分かった。

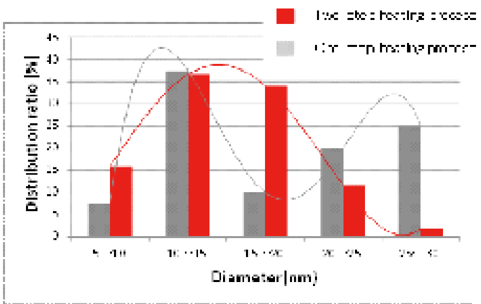


図 3 BHO 粒子直径のヒストグラム.（中間熱処理あり及びなし条件をそれぞれ Two-step 及び One-step と表記した）

そこで、中間熱処理中の急冷試料を作製して、BHO 微細化のメカニズムを考察した。急冷試料は中間熱処理後、中間熱処理後に 823 K まで昇温、中間熱処置後 YBCO の結晶化温度 1053 K まで昇温、の 3 条件で作製し、それぞれ試料(A)、(B)、(C)とした。試料(A)の電子線回折(SAED)図形と STEM-EDS マップからは、Cu が粒状や帯状に偏析している様子が確認されたが、この熱処理段階では BHO 粒子は未だ形成されていなかった。SAED 図形から BaF_2、CuO、HfO_2、BaO の回折点が確認された。BaF_2 は仮焼膜中にも存在することが報告されていることから、試料(A)では、Ba 化合物について導入ガスに含んだ水蒸気による BaF_2 の分解反応が起こり、一部で BaO が生成していることが示唆された。試料(B)では、SAED 図形からは BHO の回折点が認められ、(A)から(B)の温度条件間で BaO と HfO_2 の反応による $BaHfO_3$ の生成が起こることが示唆された。その一方で、EDS マップでは Cu の偏在がより顕著であることが示されたが、BHO 粒子は未だ観察されなかった。よって、BHO は微細な核として存在していると考えられる。試料(C)では、EDS の結果から Ba と Hf からなる粒子の存在が顕著に観察され、試料(B)で核生成した微細な BHO が、試料(C)の温度域で粒成長したと考えられる。急冷試料の組織観察をまとめると、BHO の微細化に必要な熱処理時に「BHO の Ba 源となる BaO を低温域で膜中に効果的に生成させること」、「BHO の結晶化を YBCO の結晶化温度よりも温度域で行うこと」が重要な指針であることが明らかとなった。

自己磁場(B = 0)から 7 T の磁場中で 77 の温度下での Jc を測定した。両者とも自己磁場中では約 3 × $10^6 A/cm^2$ の Jc を示し、磁場強度の上昇に伴い Jc は低下した。2 Tまでは両者の Jc に違いは殆ど無かったが、高磁場では中間熱処理導入試料の値が導入なし試料を上回り、7 T では約 1 桁の差が現れた。BHO の微細化が促進したことでピン止め点の数密度が増加し、磁場中で捕えることのできる磁束の本数の増加や、磁束 1 本あたりに働くピン止め点の数の増加などがJc向上の要因として考えられる。

〔発表論文〕

1. H. Horita, R.Teranishi, K. Yamada, K. Kaneko, Y. Sato, K. Otaguro, T. Nishiyama, T. Izumi, S. Awaji, Miniaturization of $BaHfO_3$ nanoparticles in $YBa_2Cu_3O_y$ coated conductors using a two-step heating process in the TFA-MOD method, Superconductor Science and Technology, 30 (2017) 025022(8pp).

【助成 34 -21】

宇宙機の軌道力学系の最適制御理論

研究者　九州大学大学院工学研究院　准教授　　坂東　麻衣

〔研究の概要〕

多体力学系と低推力宇宙機が組み合わさった場合はさらに複雑な問題であるが，低推力が盛んに使われるようになった現在，軌道工学のもっとも重要な問題である．しかしながら，現在のこの問題に対するアプローチは数値的な手法が主な手段である．本研究では最適制御理論の解を用いた解析的なアプローチをとることで，個々の最適軌道ではなく，その背後に存在する最適に制御された力学系の構造そのものとの関係を明らかにした．さらにその結果を応用し，多体力学系の多様体を用いた軌道遷移問題の拡張として低推力宇宙機のエネルギー最小軌道を求めた．

〔研究経過および成果〕

１つの天体の重力のもとでの運動を考える２体問題に対して，重力を及ぼす天体が２つ以上の問題は多体問題とよばれる．2001 年に NASA により打ち上げられたジェネシスミッションでは多体力学系の性質を積極的に利用することで効率的な軌道が実現され，２体問題では実現しえない特殊かつ有用な軌道が存在することが明らかとなった．ジェネシスでは人工的な推力は考慮されていないが，近年「はやぶさ」に搭載されたイオンエンジンに代表される低推力連続加速を行う宇宙機（以下，低推力宇宙機）が増加している．しかしながら，従来軌道工学で対象としてきた天体の重力の他に，常に人工的な推力が加わる運動となるため，これまでの軌道工学の理論を適用することができない．さらに，従来の化学推進によるインパルス型の推力に比べ，推力がとても小さく軌道を大きくかえることができないため，複雑な多周回軌道を設計する必要があるが，一般的な方法がなく試行錯誤により設計が行われている．

本研究では，最適制御理論の考え方を多体力学系のダイナミクスと融合することで，惑星の重力と低推力を利用した効率的な宇宙機軌道の設計法を示した．具体的には，線形化の仮定のもと，最適制御理論の一種である最小エネルギー制御問題の解を利用することで，低推力により移動可能な領域を明らかにする．

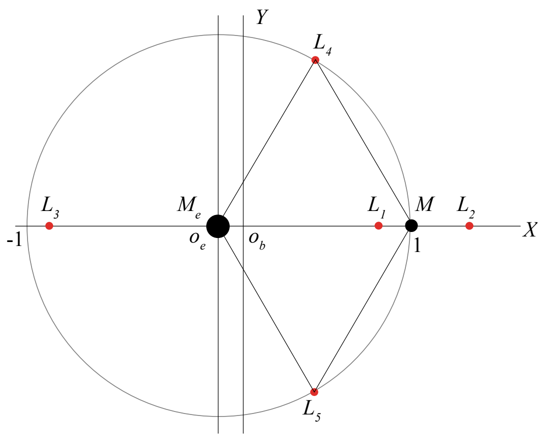


図 1　円制限三体問題の平衡点

本研究では，円制限三体問題の L1, L2 平衡点とその間の軌道移行を考える(図1参照)．図 2 に最小エネルギー制御により L1 点へ移行する際に必要な消費エネルギーのレベルセット集合を示す．同様に，図 3 には最小エネルギー制御により L2 点から移行する際に必要な消費エネルギーのレベルセットを示す．こ

の時，図２と図３に示すレベルセット集合はそれぞれ平衡点（図中の原点）の安定多様体方向，不安定多様体方向に長軸をもっていることが明らかとなった．このことは，安定多様体方向の初期値であれば入力を節約して原点へ移行できるという直感的な理解と一致する．

次に，上記の構造を踏まえ，出発点と目標点の間に中間点を設定し，それぞれの経路に対して最小エネルギー制御を用いた移行軌道を考えた．図4に示すような L1 点と L2 点の間に経由点を設け，L2 点から経由点，経由点から L1 点への最小エネルー移行を組み合わせた軌道移行を考えた．図4，5のレベルセットは図2と図3のレベルセットの重ね合わせを表している．提案手法を直接移行する場合と消費エネルギーの観点から比較を行った．その結果，出発点と目標点の両方の力学的な性質を利用したエネルギー効率の良い軌道移行が可能であることが明らかとなった．今後は周期軌道間の移行，システム間の移行に拡張を行う．

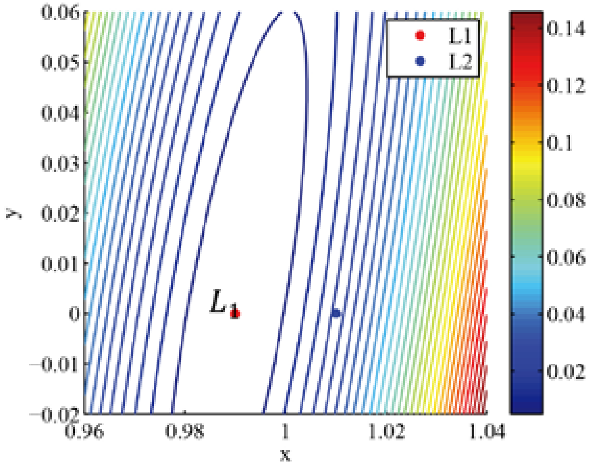


図 2　最小エネルギー制御のレベルセット集合（L１点）

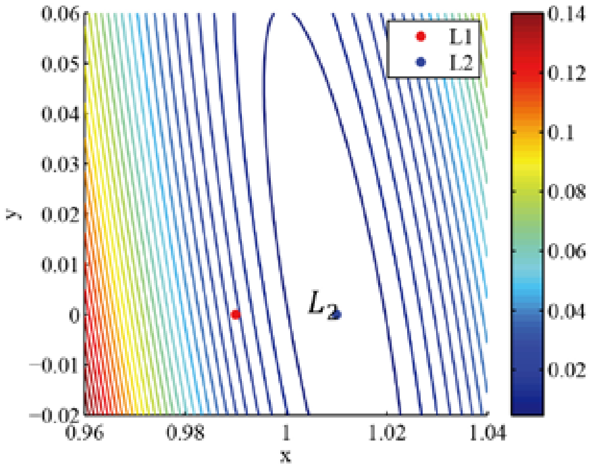


図 3　最小エネルギー制御のレベルセット集合（L２点）

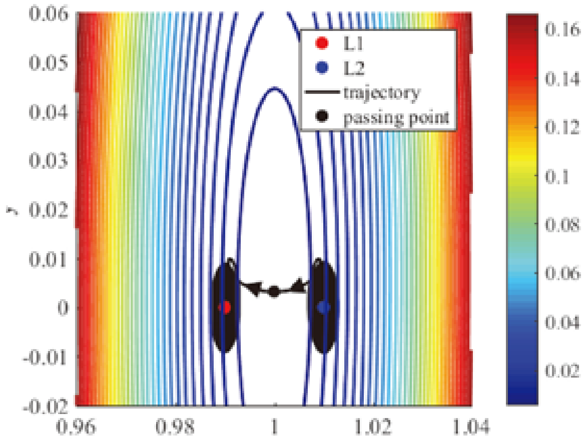


図 4　最小エネルギー制御を組み合わせた軌道移行（L２点から中間点を経由して L1 点）

〔発表論文〕

1. 大島 侑記，坂東麻衣，外本伸治，最小エネルギー制御を利用した三体問題における低推力軌道移行，第４回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，2017 年 3 月．
2. 大島 侑記，坂東麻衣，外本伸治，円制限三体問題における最小エネルギー制御，第 61 回宇宙科学技術連合講演会，1S08，2017 年 10 月

【助成 34 -22】

超伝導加速器の省エネルギー化に向けた、空間的温度勾配下の超伝導転移が示す磁束トラップ低減現象の研究

研究者 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 助教 久保 毅幸

〔研究の概要〕

超伝導加速空洞の残留抵抗の主な要因は、超伝導転移の過程でトラップされた量子化磁束である。最近になって、ニオブ空洞の磁束トラップは空間的温度勾配下での超伝導転移により大幅に低減できることが発見されたが、その物理は殆ど理解されていない。更に、空洞の製作方法すら確立されていない新規材料においては、未だ実験すら行われていない。この現象の物理を理解するため、様々な条件・材料で繰り返し実験できるような試験片用実験装置が求められていた。我々は、そのような試験片用の実験装置を実現し、世界で初めて、ニオブ空洞実験による先行研究の結果を試験片による実験で再現した。これにより、我々は、窒化ニオブ等、空洞実験が不可能な新規空洞材料の温度勾配下磁束排除現象の研究を行うための基礎を築くことができた。

〔研究経過および成果〕

超伝導加速空洞は現代の粒子加速器の核となる構成要素である。空洞内部には共鳴周波数のマイクロ波が閉じ込められており、空洞を通過する荷電粒子は、その電場成分により加速される。空洞性能を示すパラメーターの一つに「超伝導マイクロ波表面抵抗Rs」がある。Rs は2つの成分から成る。一つ目は励起準粒子のマイクロ波吸収に起因する抵抗で、温度 T に指数関数的に依存し T→0K で消失する。もう一つは残留抵抗と呼ばれ、T→0K でも残る抵抗である。主な要因は、空洞が冷却され超伝導転移する際、環境磁場が「量子化磁束」の形で材料内の欠陥等にトラップされる事にある(通常、大きさμT程度の磁場は殆ど全てが排出されずにトラップされる)。空洞にマイクロ波を入れると、トラップされた磁束が振動し損失に寄与する。磁束のトラップを防ぐため、空洞は磁気シールドで囲まれているが、僅かに残る環境磁場がトラップされることで数nΩの寄与を生む。これはT=2K におけるRsの数十%、場合によっては殆ど全てを担っている。磁束トラップの低減は、最重要課題の一つである。

米国エネルギー省フェルミラボのロマネンコ氏が、ニオブ空洞を空間的温度勾配下(10-100 K/m)で超伝導転移させる事で磁束トラップを大幅に低減できる事を発見した[A. Romanenko et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 234103 (2014)]。その後、世界中で追試が行われ同じ現象が確認されているが、その物理は殆ど理解されていない。熱処理や表面処理への依存性、ニオブ以外の材料でも同じ事が起こるのか等、不明な点が多数ある。しかしながら、空洞実験には莫大な費用がかかり、背後の物理を理解する上で不向きである。更にニオブ以外の材料となると空洞を製作できず、実験すらできない。

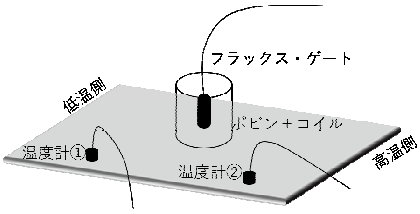


図１　実験装置概略

本研究では、空間的温度勾配下超伝導転移による磁束トラップ低減の物理を理解する上で有益な、試験片用実験装置を開発し、この装置を用いてニオブ試験片の温度勾配下磁束排除実験を行った。

我々が開発した実験装置の概要を説明する（図1）。超伝導試料はクライオスタット内におさめられ、GM 冷凍機で数 K まで冷却される。その際の温度変化は低温側と高温側の2点でモニターされる。クライオスタット内の環境磁場は磁気シールドによって 0.2 μ T 程度まで遮蔽されている。試料には制御された磁場（10-30 μ T 程度）を印加できるよう、コイルを巻いたボビンが取り付けられている。

図 2 はニオブ試料を用いた実験結果の一例である。横軸は時間を表し、黒線はフラックスゲートで測った磁束密度、赤線と青線はコイル左右の温度である。磁束密度がある時刻で急に減少しているのが見える。これは超伝導転移により磁束が材料外部へと弾き出され、フラックスゲートが見ている磁束密度が減少し

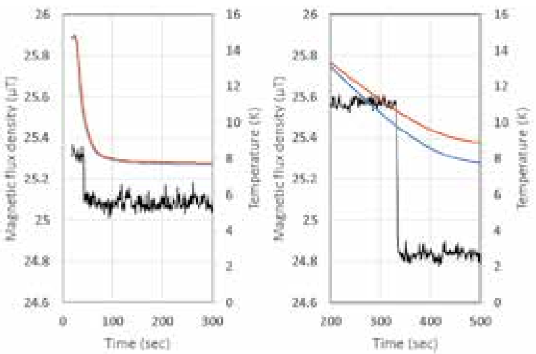


図２　実験結果の例

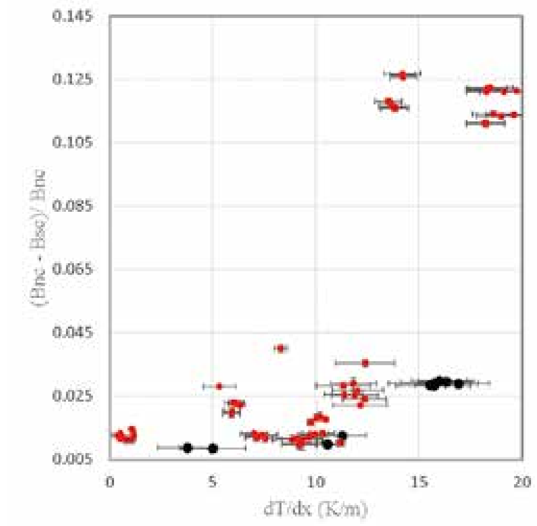


図３　温度勾配の関数としての磁束密度変化

たことを示している。左の図では温度勾配は約 5K/m で、磁束密度の変化率は 0.009 程度である。一方、右の図ではそれぞれ 17K/m 及び 0.029 である。

温度勾配を変えて実験を繰返すことで、変化率と温度勾配の関係が分かる。図 3 の黒丸は 750 度、赤丸は900度アニールを行ったニオブ試料の実験結果である。温度勾配の増加に伴い磁束排除が促進されている。15-20K/m では、900度アニール試料の変化率は750度アニール試料の 4-5 倍に増幅されている。これは空洞実験による先行研究の結果と一致する[S. Posen et al., J. Appl. Phys. **119**, 213903 (2016)]。

我々は、空洞を製作できないような新規材料の温度勾配下磁束排除現象の研究を実施する基礎を築いた。今後、この装置を窒化ニオブ等に適用していく予定である。

〔本研究と関連する発表論文〕

1. T. Kubo, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 053G01 (2016).
2. S. Huang, T. Kubo, and R.L. Geng, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 082001 (2016).
3. 本研究に関する論文は投稿準備中である。

【助成 34 -23】

人工知能によるカラスの音声分類とそのデータベース自動構築および対話用インタフェースの開発

研究代表者　総合研究大学院大学　学融合推進センター　助教　　塚原　直樹
共同研究者　シンガポール国立大学　リサーチフェロー　末田　航
共同研究者　株式会社　CrowLab 取締役　永田　健
共同研究者　立命館大学　助教　井本　桂右
共同研究者　シンガポール国立大学　Yifang Yin
共同研究者　Leapmind 株式会社　脇坂　琢也

〔研究の概要〕

カラスによる様々な被害を防ぐため、カラスの鳴き声を再生する対策法がある。しかし、これまでの対策法は一方通行の音声再生であり、双方向の情報伝達である「対話」となっていないため、賢いカラスには効果が限定的であった。そこで、音声コミュニケーションを行うためのインタフェースを構築することを目的として、カラスを鳴き声によって認識する機械学習を用いたソフトウェアを開発した。本ソフトウェアによって解析すると、カラスの鳴き声に対しては、カラスの鳴き声と判断する指標となる評価値が高くなることが確認された。また、解析する音声断片に鳴き声が部分的に含まれる場合には、音声の分析長を 100ms よりも 500ms とした方が評価値を高く出す傾向があった。一方で、カラス以外の鳥の鳴き声に対しても、多くの種でカラスと同程度の高い評価値が得られたことから、今回のモデルは、カラスを特異的に識別する精度を示すには至らなかった。

〔研究経過および成果〕

カラスによる被害として、農作物被害は約 21 億円（農林水産省）にのぼる他、配電トラブルや、糞害、騒音など多くの被害が報告されている。これらの被害を防ぐため、様々な対策がなされているが、効果が一時的であるなどの理由により、多くの問題が未だ解決に至っていない。カラスは鳴き声をコミュニケーション手段とする社会性の高い動物である（相馬ら 2003）。特に、カラスは鳴き声をもとに、見知らぬ個体か既知の個体かを判別することもわかっている（Kondo ら 2012）。このようなカラスのコミュニケーション能力を利用し、鳴き声によってカラスの行動を制御できる可能性がある。申請者らは鳴き声を用いたカラス対策として、カラスが逃避する際の鳴き声をカラスに向かって再生し、カラスの自発的な逃避を促す対策法を考案した（塚原ら　特許第 5135507 号）。しかし、このような鳴き声による対策法は、状況によって効果が確認できないこともあった（Tsukahara ら 2015）。

これまでの鳴き声による対策法の効果が限定的である理由の一つに、情報伝達が一方通行の音声再生であり、対話となっていないことが挙げられる。賢いカラスに対しては、インタラクティブな対応が行動をコントロールする鍵となると思われる。そこで、カラスとの音声コミュニケーションを行うためのインタフェースを

構築することを目的として、カラスを鳴き声によって認識する機械学習を用いたソフトウェアを開発した。

まず、レコーダー(LS-100, Olympus)を用いて収録したカラスの鳴き声や YouTube などから取得したカラスの鳴き声について、個々の鳴き声の開始と終了のタイミングのアノテーションを行った。その結果、51 個の音声ファイルに対して 3275 個の鳴き声がアノテーションされた。これらの音声ファイルから抽出された分析長 100ms と 500ms のスペクトログラムを入力データとし、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)と畳み込み再帰型ニューラルネットワーク(CRNN)の 2 種類の機械学習モデルに対して学習を行った。音声の分析長を 100ms とし CRNN によって学習したモデルを用い、検証データ用のカラスの鳴き声に対して音声識別を行った結果、カラスの鳴き声が含まれる時刻において、評価値が高い値を示すことが確認できた(図1)。

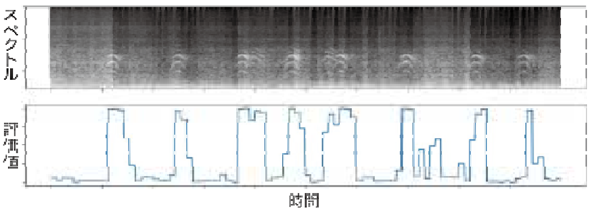


図1. カラスの鳴き声に対するCRNNによる音声識別の結果。上段は音声スペクトル、下段はソフトウェアがカラスの鳴き声であると判断する指標となる評価値の時間変化を示す。

モデル間での性能の比較を行ったところ、解析に用いた音声断片にカラスの鳴き声が部分的にだけ含まれる場合には、音声の分析長を 100ms よりも 500ms とした方が、また、CNN よりも CRNN を用いた方が、高い評価値を出す傾向にあった。カラスの鳴き声に対する特異性を評価するため、鳥の鳴き声のデータベースである xeno-canto(http://xeno-canto.org)より取得した、日本に生息する鳥の鳴き声(277 種)に対しても解析を行った。その結果、多くの種でカラスと同程度の高い評価値が得られ、鳥の鳴き声の中からカラスを識別するだけの特異性はないことが示された。

今回のモデルは、カラスを特異的に識別する精度を示すには至らなかったものの、被害現場によっては実用性を発揮できる可能性がある。そこで、実際の現場での使用を想定し、今回のモデルを組み込んだインタフェースを現在開発中である。今後は、教師データを増やし、より高精度のモデルの構築を目指す。

〔講演・展示〕

(1) Entertainment Computing 2017、「特別企画 ドローンとエンタテインメントとカラス」、2017 年 9 月、東北大学(宮城県)

(2) JASPA コラボレーションフェア 2017、「カラス対策を目的としたドローンの開発」、2017 年 5 月、品川フロントビル(東京都)

(4) Pechakucha Night “Drone to tricks crow”, 2017 年 11 月 ArtScienceMuseum(シンガポール共和国)

(5) InnovFest unbound 2017, “TalkingDrone”, 2017 年5月, Marina Bay Sands (シンガポール共和国)

〔メディア出演〕

(6) 日経新聞、2017 年 12 月 19 日

(7) NHK 総合「おはよう日本」、2017 年 10 月 25 日

(8) NHK WORLD、2017 年 10 月 23 日

(9) 日本テレビ「スッキリ」、2017 年 9 月 20 日

(10) Yahoo!ニュース、2017 年 9 月 19 日

(11) 日本農業新聞、2017 年 9 月 19 日

(12) 読売中高生新聞の「News English 300」、2017 年 7 月 20 日

(13) The Japan News、2017 年 5 月 18 日

(14) テレビ朝日「スーパーJ チャンネル」、2017 年 5 月 12 日

(15) 読売新聞、2017 年 5 月 2 日

【助成 34 -24】

フェルダジルラジカル系へのキャリアドープによる新規有機磁性導体の開発

研究者　大阪府立大学大学院理学系研究科　准教授　　山口　博則

〔研究の概要〕

フェルダジルラジカルは非平面分子骨格で非局在型のスピン密度を持つことから、多彩な量子磁気モデルの実現が可能であることが近年実証された。本研究では、フェルダジルラジカルによって実現される量子状態に伝導キャリアをドープすることで、新規有機磁性導体を開発することを目的とした。フェルダジルラジカルをカチオン化して、様々なアニオンと組み合わせることで、多種多様な塩を合成することに成功した。TCNQ との塩である (p-MePy-V)(TCNQ)・$(CH_3)_2CO$ においては、これまでに報告例のない量子磁気モデルを実現するとともに、半導体的振る舞いも観測することができた。

〔研究経過および成果〕

フェルダジルラジカルでは、ハロゲン元素置換を行うことで、分子軌道の形状とその重なりを制御することができ、多彩な量子磁気モデルの設計が可能になる。本研究のベースとして、元素置換と磁気モデル形成との相関に関する知見を深めて、設計性拡張を進めた。その一例として、新規有機ラジカル系 α-2,3,5-Cl_3-V を合成し、S=1/2 の歪んだ正方格子の実現に成功した(H. Yamaguchi *et al*., Phys. Rev. B **95**, 235135 (2017))。磁化および比熱の測定結果を正方格子モデルで定量的に説明することができ、磁気相互作用の大きさを見積もることができた。また、量子モンテカルロ法を用いたシミュレーションを行うことで、正方格子における歪の効果を検証し、本系の歪の大きさに関する知見も得られた。さらに、電子スピン共鳴測定を行うことで、磁気異方性の大きさも見積もることができ、それに起因した磁気転移による不連続的な振る舞いも定量的に説明することができた。

本筋となるフェルダジルラジカルへのキャリアドープの手法としては、フェルダジルラジカルにアルキル基を修飾することでカチオン化を行った。それを様々なアニオンと組み合わせることで、新規塩の合成に取り組んだ。本研究では、π 共役型、直線型、正八面型の 3 分類のアニオンとの塩を合成することに成功した。中でも π 軌道の重なりが生じる π 共役系アニオン TCNQ との塩である(*p*-MePy-V)(TCNQ)・$(CH_3)_2CO$ においては、量子磁気モデルの形成と半導体的振る舞いを観測することができた。図 1 のような単結晶試料を獲得することができており、X 線構造解析の結果、$(CH_3)_2CO$ を含んでいることが明らかになった。結晶中では$(CH_3)_2CO$ は 2 パターンにディスオーダーして

図 1: (*p*-MePy-V)(TCNQ)・$(CH_3)_2CO$ の結晶写真

いるとともに、スペーサーとしての役割も担うこと分かった。得られた結晶構造を基に第一原理計算を行ったところ、フェルダジルラジカル間に 4 種類の磁気相関が予想された。それらは図 2 のような S=1/2 の正方格子を形成していると考えられた。さらに、J_1-J_3 は反強磁性的である一方で、J_4 は強磁性的であることから、磁気相関の競合を引き起こすフラストレーションの存在も明確になった。このような磁気モデルは fully frustrated 正方格子と呼称されて、これまでに報告例が無く、本系によって初めて実験的に実現することに成功した。二次元正方格子特有の強い量子揺らぎの効果により、新奇量子状態の発現が期待される。一方、TCNQ ラジカルは 1000 K を超える非常に強い磁気相関によって、反強磁性一次元鎖を形成していると考えられた。

(*p*-MePy-V)(TCNQ)・$(CH_3)_2CO$ の磁化率に関しては反強磁性体特有の振る舞いが観測された。TCNQ からの寄与は一桁程度小さいと予想されることから、観測された磁化の振る舞いはフェルダジルラジカルからの寄与であると考えられた。100 K 付近にブロードピークが見られ、低温では急激な減少が観測された。これは最も強い反強磁性相関 J_1 によってシングレットが形成され、エネルギーギャップを持つ valence-bond-crystal (VBC)が実現していると考えられた。20 K 以下で見られた温度低下に伴う増加は、常磁性不純物によるものと考えられ、約 1%以下の僅かな量であると判断できた。比熱測定においては、低温で指数関数的な減少が観測されており、磁化率と同様に VBC の形成とそれに伴うエネルギーギャップの存在が示唆された。電気抵抗の測定からは、室温での抵抗率は $2.8\times10^4\Omega$cm であり、活性化エネルギーが 0.2 eV の半導体であることが明らかになった。π

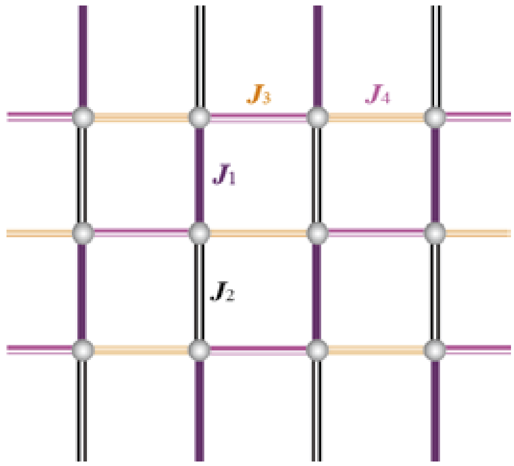


図 2: (*p*-MePy-V)(TCNQ)・$(CH_3)_2CO$ において *p*-MePy-V が形成する S=1/2 fully frustrated 正方格子.

軌道の重なりは TCNQ が顕著であることから、半導体を形成しているのは TCNQ の一次元鎖であると考えられた。実際に活性化エネルギーの大きさは、他の TCNQ 系半導体とも非常に近い値であることが分かった。今後は、圧力などの外部パラメータを変化させた場合の伝導特性の変化を調べていく予定である。

本研究を通してフェルダジルラジカルをベースとした様々な新規化合物を合成することに成功した。中でも TCNQ との塩である(*p*-MePy-V)(TCNQ)・$(CH_3)_2CO$ においては、ユニークな量子磁気モデルの形成と半導体的振る舞いが観測された。フェルダジルラジカル系へのキャリアドープの観点から、非常に重要な知見を得ることができた。

〔発表論文〕

1. H. Yamaguchi, Y. Tamekuni, Y. Iwasaki, R. Otsuka, and Y. Hosokoshi, "Magnetic properties of a quasi-two-dimensional S=1/2 Heisenberg antiferromagnet with distorted square lattice", Phys. Rev. B **95**, 235135 (2017)

【助成 34 -25】

革新的マルチフェロ素子開発
のための電子型強誘電体薄膜の電荷秩序相制御

研究者　日本大学理工学部　助教　　永田　知子

〔研究の概要〕

電子の極性な分布のみに起因する強誘電体“電子型強誘電体”$YbFe_2O_4$において、単相強誘電相実現のための薄膜作製および、革新的な次々世代素子開発のためのバルク研究を行った。薄膜作製はパルスレーザー堆積法により行い、X 線回折実験により結晶構造を評価した。平坦な表面を持ち、単相で配向性が高く、双晶を含まない単結晶薄膜の作製に成功した。また、バルク研究においては、単結晶試料を用いて X 線回折実験と磁気測定を行い、電荷秩序構造が磁気秩序化により変調を受けることを見出した。

〔研究経過および成果〕

電子の極性な分布のみに起因する強誘電体“電子型強誘電体” $R$$Fe_2O_4$（$R$: 希土類）は、その全く新しい原理から世界中から注目された。しかし、バルクでは強誘電相の 10 倍以上の体積を占める反強誘電相が存在するため、より精密な議論のためには、単相強誘電相薄膜を作製することが必須課題である。また、反強誘電相が共存するバルクにおいてではあるが、通常の誘電体とは異なる電子型強誘電体であるが故の産業的魅力も明らかにしてきた。たとえば、超高速・極省電力分極反転が可能であること、格子を介さない直接の電気磁気効果によるマルチフェロイック特性などである。これらの特性は、電子型強誘電体が次々世代の革新的素子開発に不可欠であることを示す。このようなバルク研究と薄膜化による単相強誘電相化により、革新的な次々世代素子の開発につなげることが本申請課題の目的である。

化学等量性の良い $YbFe_2O_4$（YFO）単相膜を作製するにあたり、パルスレーザー堆積（PLD）法において非常に重要なパラメータである、レーザーのエネルギー密度、基板温度、ターゲットと基板間の距離、酸素分圧のパラメータについて条件出しを行った。この結果、世界で初めて単相で双晶を含まない高品質の YFO 薄膜の作製に成功した。

また、本研究の産業的目的である次世代素子の開発に向け、バルク研究も並行して行った。単結晶試料を用いた X 線回折実験と磁気測定から、電荷秩序構造が磁気秩序化により変調を受けることを見出した。これは古くからの議論を収束させ、電荷とスピンのカップリングを示すものである。

以下にこれら2点の主な研究内容・成果を述べる。

(1)　YFO 薄膜の作製

Al_2O_3(0001)基板上に PLD 法を用いて成膜した。YFO の電荷秩序構造は化学当量性に強く依存するため、還元雰囲気で成膜する必要がある。試料 A は 2.6×10^{-4} Pa、試料 B は 1.0×10^{-4} Pa で成膜した。

X 線回折実験・面直 2θ-θ スキャンから、試料 A, B ともに単相 YFO 薄膜であること、面直方向の配向性が高いことを確認した。また、図 1 に示す面内 φ スキャンから、試料 A, B ともに面内方向の配向性も高いこ

とがわかった。特に、より還元の強い環境で成膜した試料 B は双晶を含まない単結晶であった。また、表面の高低差は 50 nm 程度と通常の薄膜としては荒いものの、報告されている RFe_2O_4 薄膜の中では比較的平坦であった。単相であり、双晶を含まず比較的平坦な YFO 薄膜の報告は本報告が初めてである。

酸素分圧の異なる状態で作製した試料 A, B を比較すると、ロッキングカーブの半値幅は試料 B のほうが小さく、より結晶性が高いことがわかった。また、試料 A, B の面内の格子定数はバルクより拡大しており、試料 A のほうがより大きかった。バルク研究から、面内の格子定数の拡大は Fe イオンの酸化を意味することがわかっている。つまり、より還元側で成膜した試料 B のほうが化学当量性が良いことがわかった。しかし、電荷秩序を形成する YFO 薄膜作製のためには、さらなる低酸素分圧下での成膜が必要であることもわかった。

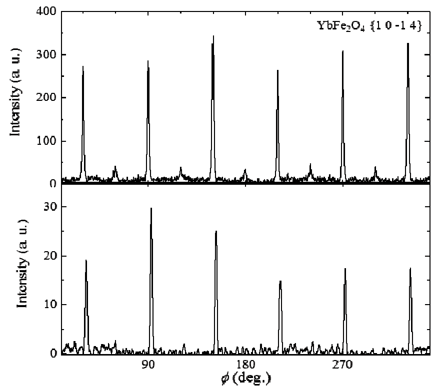


図 1 試料 A(上)および B(下)の{1 0 -1 4}面の φ スキャンプロファイル。試料 B で特に配向性が高いことがわかった。

(2) 磁気秩序化による電荷秩序構造の変化観察

広範囲の逆格子空間観察により、(*n* *n* 3*m*), (*n*/3 *n*/3 3*m*), (*n*/3 *n*/3 3*m*+3/2)および(*n* *n* 3*m*+3/2)の反射が観測された(*n* および *m* は整数)。(*n* *n* 3*m*)はファンダメンタルピークであり、(*n*/3 *n*/3 3*m*)および(*n*/3 *n*/3 3*m*+3/2)は電荷秩序の形成を示す。(*n* *n* 3*m*+3/2)反射の起源は古くから議論されつつも明らかにされていなかった。

(*n* *n* 3*m*+3/2)付近では、280 K 以上で *h* *h* 方向にインコメンシュレート反射が観測され、280 K 以下ではコメンシュレート反射が出現した。インコメンシュレート反射は温度低下とともにコメンシュレート反射に吸収され、250 K 以下でコメンシュレート反射のみが観測された。この温度変化は、280 K 以上での短距離秩序の形成、280 K 以下での長距離秩序の形成を意味する。このような温度変化は磁気秩序の形成過程と一致するため、(*n* *n* 3*m*+3/2)反射は磁気秩序に起因することが強く示唆される。

インコメンシュレート反射は、電荷秩序の形成を示す(*n*/3 *n*/3 3*m*)付近にも観測され、その温度変化は(*n* *n* 3*m*+3/2)付近の反射と同様であった。これは電荷秩序構造が磁気秩序化により変調を受けることを意味する。また、インコメンシュレート反射は(*n*/3 *n*/3 3*m*)付近に観測されたが(*n*/3 *n*/3 3*m*+3/2)付近には観測されなかった。これは、2つの反射が示す電荷秩序構造の対称性の違いから説明できる。

これらの結果は、古くから明らかでなかった反射の起源を明らかにするものであり、また、興味深い電荷とスピンのカップリングを示すものでもある。これらの内容について現在論文投稿中である。

〔発表論文〕

1．永田 知子、小野寺 巧、山本 寛、岩田 展幸. 信学技報 vol. 117, CPM2017-28, pp. 35 (2017).

〔国際会議発表〕

1．International Union of Materials Research Societies - The 15th International Conference on Advanced Materials (2017).
2．27th Annual Meeting of MRS-J. (2017).
3．26th Annual Meeting of MRS-J. (2016).

【助成 34 -26】

修復性を有する複合めっきテクスチャリング表面の潤滑特性

研究者 関東学院大学理工学部 准教授 宮永 宜典

〔研究の概要〕

本研究では, Ni-P-SiC 複合めっき皮膜で覆われたテクスチャリング表面の潤滑特性について検討している. まず, SiC 粒子の酸修飾処理方法によって, Ni-P-SiC 複合めっき皮膜内での粒子の共析状態, および機械的特性を制御できることを明らかにしている. 次に, 溝形状のテクスチャリング表面に Ni-P-SiC 複合めっきを被覆したときの潤滑特性を検討している. その結果, Ni-P-SiC 複合めっきが成膜されたテクスチャ面は, 同じテクスチャ形状を持つ非めっき面よりも良好な潤滑特性を示すことを明らかにしている.

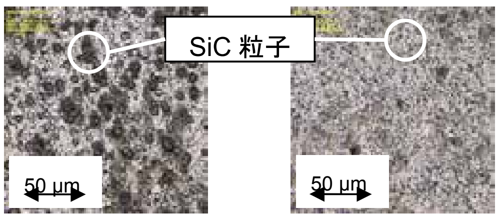
〔研究経過および成果〕

Ni-P-SiC複合めっきでは, Ni-P皮膜内にSiC粒子を共析させている. 無電解めっき法で成膜されるので, 複雑な形状の要素部品の表面に用いられる. また, 優れた耐摩耗性を持つため, 機械のしゅう動面に成膜される.

Ni-P-SiC複合めっきは, 基板表面に均一な厚さで成膜されるため, 寸法管理が容易である. したがって, μm単位の精度が求められるテクスチャリングと併用できると期待される. しゅう動面にテクスチャを加工すると, 流体潤滑状態で摩擦特性が改善される. しかしテクスチャには, 表面が損傷するとその効果が低下するという欠点がある. そこで, 表面に耐摩耗性が高いNi-P-SiC複合めっきを成膜して, テクスチャ面の損傷を防ぐ方法が考えられる.

本研究では, まず, 2 種類の酸溶液を用いて SiC 粒子の酸修飾処理を行い, Ni-P-SiC 複合めっき皮膜内での粒子の共析状態, および機械的特性を評価した. 次に, Ni-P-SiC 複合めっき皮膜によるテクスチャ表面の潤滑特性を検討した.

図1にNi-P-SiC複合めっき皮膜の表面観察画像を示す. 表1にめっき皮膜の算術平均粗さR_a, 焼入れ後のビッカース硬さHV, ならびに摩擦係数の比較を示す. 塩酸で修飾されたSiC粒子は, めっき皮膜内で塊状に共析した. 一方, 硝酸で修飾されたSiC粒子は, めっき皮膜内で分散して共析した. この皮膜の表面粗さやビッカース硬さは相対的に小さくなった.



(a) 塩酸修飾 (b) 硝酸修飾

図2 表面観察画像の比較（136 μm × 136 μm）

表2 めっき皮膜の諸性質の比較

	算術平均粗さ Ra [μm]	ビッカース硬さ HV	摩擦係数
塩酸修飾	0.9	815	0.07
硝酸修飾	0.3	808	0.23

次に，図２のようにテクスチャを施した試験片をSUS304の平板に対して潤滑油中でしゅう動試験を行った．なお本研究では，テクスチャは黄銅にエッチングで加工し，そのうえから無電解めっき法でNi-P-SiC皮膜をコーティングした．

図６にNi-P-SiC複合めっきが成膜されたテクスチャ表面とされていない表面（非めっき面）との摩擦係数の比較を示す．本実験で設定された全ての接触荷重およびしゅう動速度の条件で，めっきが成膜されたテクスチャ面は非めっき面と同等以下の摩擦係数を示した．本実験の範囲では，めっきが成膜されたテクスチャ面は，同じテクスチャ形状の非めっき面と同等以上の潤滑特性を示すことが確認された．

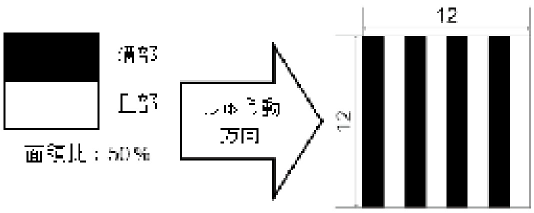


図2　テクスチャ形状ならびにしゅう動方向（溝深さ30μm）

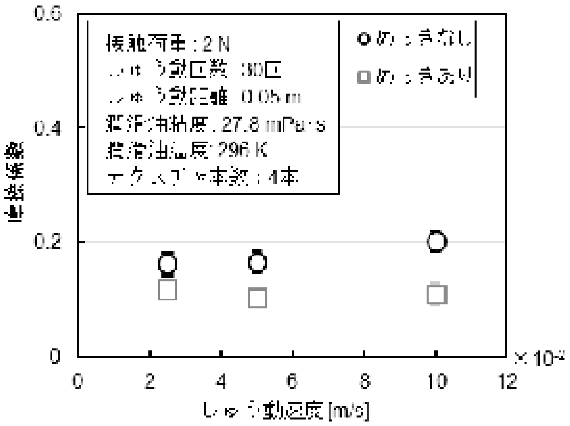


図3 Ni-P-SiC複合めっきが成膜されたテクスチャ面と非めっき面の摩擦係数の比較

本研究により以下のような結果が得られた．

(1) Ni-P-SiC複合めっきは，SiC粒子の酸修飾処理の方法によって，粒子の共析状態が変化する．結果として，めっき皮膜の表面性状および機械的特性が変化する．

(2) Ni-P-SiC複合めっきが成膜されたテクスチャ面は，同じテクスチャ形状を持つ非めっき面と同等の潤滑特性を示す．

〔発表論文〕

1. Norifumi Miyanaga, Shigeaki Minamikawa and Jun Tomioka, Effect of Acid Washing of SiC Particles on Dispersing and Friction Properties of Ni-P-SiC Composite Plating, Key Engineering Materials, 739(2017), 143-147.

2. Norifumi Miyanaga, Shigeaki Minamikawa, Katsuhiko Tashiro and Hideo Homma, Effect of Acid Washing of SiC Particles on Dispersing and Friction Properties of Ni-P-SiC Composite Plating, 6th MSST, 2017.

3. Norifumi Miyanaga, Shigeaki Minamikawa and Jun Tomioka,., Frictional Properties of Ni-P-SiC Composite Coating in Water Lubrication, 18th NORDTRIB, accepted.

4. Norifumi Miyanaga, et al., Measurements of Friction Characteristics of Ni-P-SiC Plating under Water Lubrication, 6th ASIATRIB, accepted.

5. 宮永宜典, 他３名, 異なる酸洗浄法を用いたSiC複合めっきの摩擦特性, 電気学会, 電子・情報・システム部門大会講演論文集, 2017, 779－782.

【助成 34 -27】

高熱伝導率を有するナノ流体の界面･熱輸送現象の解明

同志社大学　研究開発推進機構　助教　　山崎　晴彦

〔研究の概要〕

高熱伝導率を有するナノ流体を用いて、表面張力により引き起こされる界面不安定現象に着目し、より高効率な熱輸送デバイスを開発する目的の下、高熱伝導率を有するナノ流体の界面駆動に関する研究を行った。高熱伝導率を有するナノ粒子として、銀ナノワイヤを用い、その分散濃度および温度を変化させた際の表面張力を計測し、ナノ流体の表面張力の熱力学特性について調べた。その結果、ナノ流体の表面張力と温度の関係は線形関係があり、ナノ流体の表面過剰エネルギーの変化がマランゴニ効果を起こし、ナノ流体の表面に波動が生まれることを明らかにした。

〔研究経過および成果〕

本研究では高熱伝導率を有する銀ナノワイヤを用いたナノ流体を用いて、ナノ流体を用いた熱輸送装置への応用を目指し、その基礎特性を調査するものである. その高熱伝導率を有するナノ流体の特徴として、ナノ流体を鉛直平板により加熱すると, 対流に先立って加熱側から冷却側に向かって界面を濃色の筋が流動することが観察された(図１斜線内)。つまり、流体界面に温度勾配や濃度勾配を与えると, 表面張力差が誘起され, 界面に沿って物質移動が起こる。

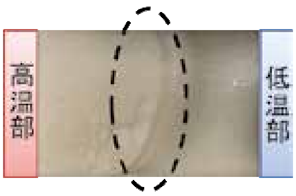


図1　ナノ流体の界面現象

流体界面の一次元運動方程式は、表面張力を用いて次式で表すことができる。

$$\frac{1}{\rho/\gamma}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \qquad (1)$$

ここで、ρ は密度、γ は表面張力である。式(1)から表面張力の変化がナノ流体の特異な波動に起因することがわかる。次に、表面張力の温度依存性を最大泡圧法により計測を行った。図 2 に常温環境下における銀ナノワイヤ流体の表面張力を示す. また、サンプル 1、2、3 はそれぞれ銀ナノワイヤのアスペクト比が異なり、それぞれ 57、363、125 である。母液として、エタノールとイソプロパノール(IPA)の混合液を用い、また銀ナノワイヤの質量混合割合はそれぞれ図中に記す通りである。

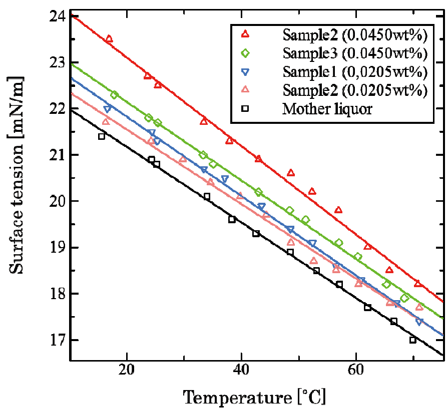


図２　銀ナノワイヤ流体の表面張力

図2より、いずれのナノ流体の表面張力も温度増加に伴い一次関数的に減少することが確認できる。また、

ナノワイヤの混合割合が増加するほど、表面張力も増加することが確認できた。これは次式で表されるギブス･デュエムの式より、

$$d\gamma = -S_s^{\gamma} dT - \sum_i \Gamma_i d\mu_{si} \qquad (2)$$

明確である。ここで、S_s^{γ}はエントロピー、Γ は表面吸着量、μ は化学ポテンシャルである。次に図2に示す表面張力と温度の関係が一次関数より定義でき、また、表面張力の変化量は温度変化に依存しないことから、傾きを表面過剰エントロピー(m=-S_s^{γ})、切片を表面過剰エネルギー(a=$U-\Sigma\mu\Gamma$)とし、整理する。ここで、U は内部エネルギーである。図3に表面過剰エネルギーの変化量をナノ流体の質量濃度でまとめた結果を示す。図3より、表面過剰エネルギーは濃度の増加に従って増加することがわかる。準静的な過程を考慮すると、内部エネルギー占めるエネルギーとして、ファンデルワールスのポテンシャルが考えられ、ナノ流体のファンデルワールスのポテンシャルを導出すると、次式で表される。

$$\Delta a = \frac{\pi}{4} b^4 A n^2 \overline{f(h)} \qquad (3)$$

ここで、b はナノワイヤが相互作用する距離、Aは hamaker 定数、n は数密度、$\overline{f(h)}$はナノワイヤのサイズに依存する変数、h はナノワイヤ間距離である。式(3)より、表面過剰エネルギー増加量は濃度の増加に対して、2次関数的に増加することがわかる。次に、表面過剰エントロピーと表面過剰エネルギーの相関を調べるために、図4に横軸に表面過剰エネルギー、縦軸に表面過剰エントロピーの結果を示す。図4より、表面過剰エントロピーと表面過剰エネルギーには強い相関があり比例定数 2.3 の比例関係にあることがわかった。以上のことを整理すると、ナノ流体の表面張力は式(4)でまとめられる。

$$\gamma = 47.6 + \Delta a - (77.4 + 2.3\Delta a)T \qquad (4)$$

現状、式(3)に示す表面過剰エネルギーを算出するためには、ナノ流体の内部構造を数値計算により、明らかにする必要があるが、式(4)を式(1)に代入することにより、ナノ流体の界面現象を説明でき、新たな熱輸送装置を研究開発することが期待できる。

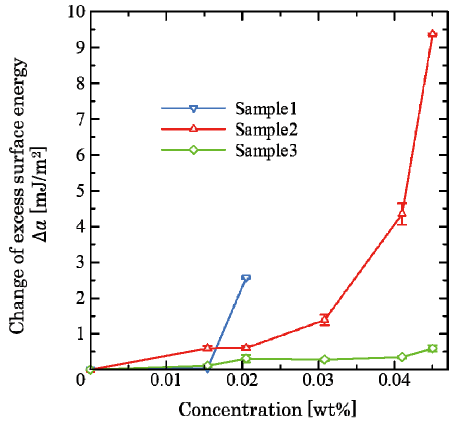


図3 表面過剰エネルギーの変化量

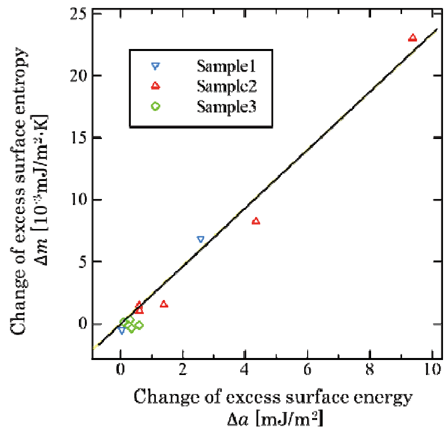


図4 表面過剰エネルギーと表面過剰エントロピーの変化量の相関図

〔発表論文〕

1. Y. Kishi, H. Yamasaki, B. Jeyadevan and H. Yamaguchi, “Surface Tension and Surface Energy of Silver Nanowire Ethanol Dispersion”, Proceedings of 7th International Workshop of Energy Conversion, pp. 99-102, 2017.

【助成 34 -28】

構造化照明を用いたフェムト秒・ナノメートルの時空間分解能を有する超解像顕微過渡吸収測定装置の開発

研究者 関西学院大学理工学部 助教　片山 哲郎

〔研究の概要〕

電子受容体分子と電子供与体分子が数十 nm 程度のサイズで不均一に相分離したバルクヘテロ構造を持つ有機系太陽電池では、実用化の一つの壁といわれた 10%を超える光電変換効率が報告されているが、いまだ実用化に至らず、光耐久性の問題と大面積化に伴う光電変換効率の低下の問題を抱えている。その本質的な原因となる化学反応過程は試料の不均一性により明らかでなく、光劣化や大面積化に伴う光電変換効率の低下を抑えるような合理的分子設計指針は提出されていない。本研究はこの不均一性を克服する**超解像技術を組み合わせた過渡吸収分光法により、100 nm 以下のバルクヘテロ接合層の相分離構造を持つ π 共役高分子における電荷捕捉、光退色の反応因子を明らかにし、**光耐久性と大面積化に伴う光電変換効率の低下の問題を解決することを目的とし、超解像過渡吸収顕微鏡の装置開発を行った。

〔研究経過および成果〕

光を用いた測定には電子顕微鏡と比べて非侵襲で有機物試料を観測できるという大きな利点がある。一方で、光（電磁波）には回折限界が存在し、波長の半分以下に集光することは原理的には不可能である(Abbe, 1873)。そのため可視光を用いた場合には 200 nm 程度が最小の集光サイズとなる。超解像技術は、このサイズを下回るための光学的な手法であり、光物理過程をうまく組み合わせることにより飛躍的な空間分解能の向上ができる系もある。例を挙げると、光物理過程をうまく組み合わせた手法としてドーナツ型の脱励起光を励起サイトに照射し、誘導放出で強制的に励起状態を失活させ、ドーナツの中心のみを発光空間にする STED（Stimulated emission depletion）法(Hell, *Opt. Lett.*, 1994)と、励起光を縞模様(モアレ)に構造化し、励起空間を固定することで、発光部位を特定する SIM(Structure illumination microscopy)法(Gustafsson, *J. Microsc.*, 2000)がある。しかし、これらすべての手法は励起状態の発光を観測しており、比較的発光収量の高い分子(蛍光ラベル)のみしか観測できず、得られる情報は試料の構造に限られる。一方、顕微過渡吸収測定手法(手法に詳細を記述する)は励起状態だけでなく、①カチオン、アニオン、ラジカルなどのすべての化学種を観測可能であり、②試料の構造のみならず試料内の微小領域における光化学反応を直接観測できるという大きな利点があり、手法開発は分光手法の裾野を広げるだけでなく、基礎化学の発展にも寄与することが期待される。そこで SIM を過渡吸収顕微鏡に応用可能である装置の開発を行った。

図 1 に光の回折限界以下のサイズの試料である $CH_3NH_3PbBr_3$ ナノ粒子をスライドガラス上に散布した試料に対する顕微鏡下における全反射散乱像および時間分解散乱ダイナミクスを示す。信号強度からこの時の時間分解能は約 120 fs,空間分解能

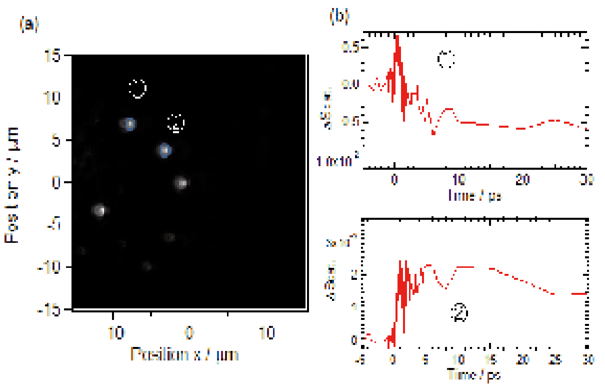


図 **1.** (a) 全反射散乱顕微鏡を用いた $CH_3NH_3PbBr_3$ NPs の散乱イメージング (b) それぞれの点の過渡吸光度の時間変化 (λ_{ex}= 480 nm, λ_{obs}= 515 nm).

は約 1 μm 程度であった。各点における励起状態ダイナミクスは異なっており[1]、信号の正負の違い粒径によるスペクトル形状の違いが直接観測された。

次に本助成金で導入した位相変調器を用いた光学系を示す(図 2)。この光学系では励起光を位相変調器に反射させることでレーザー波面の位相を変調し、対物レンズで集光した場合、特徴的な回折格子像を作製する。

実際の画像を図 3 に示す。図 3(a)は集光している光であり、(b)-(d)は位相変調した励起光である。集光点から左下の位置に回折光が観測され、回折光の位置は位相により変化を示した。

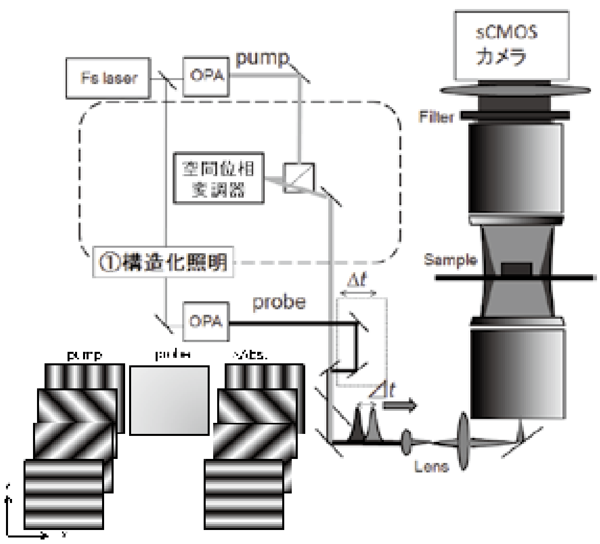


図 2. 空間位相変調器を導入した広視野フェムト秒光過渡吸収顕微鏡の装置図

この回折光を図 2 に示す形状で集光し過渡吸収測定を図 1 で示したペロブスカイト試料に対して行った。しかし、回折光は通常用いている励起光と比べ 50 分の 1 以下の強度であるため、十分な信号強度が得られず、現在、高感度 C−MOS 検出器を導入することで S/N を向上し、有機薄膜系、および有機微粒子系 [2] に対しても応用可能とすべく装置を改良している。今後、空間分解能を向上させた装置をもちいてバルク−ヘテロ構造体の有機薄膜試料の測定を遂行していく予定である。

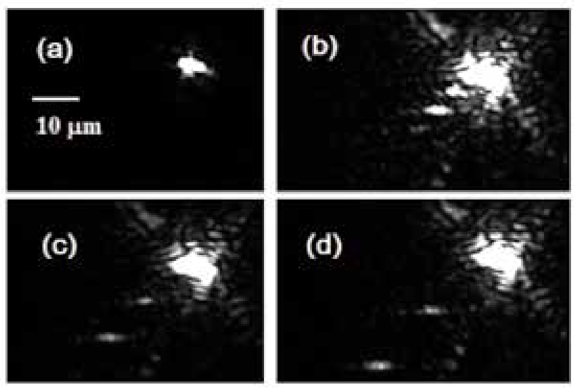


図 3. (a)位相変調前の集光点における画像, (b)-(d)変調器の位相を変えて回折光の位置を変えた画像

〔発表論文〕

1. “Unravelling the ultrafast exciton relaxation and hidden energy state in $CH_3NH_3PbBr_3$ Nanoparticles” T. Katayama, et al [Submitted]
2. "Femtosecond Excited-State Dynamics of Fullerene-C_{60} Nanoparticles in Water." Y. Ishibashi, M. Arinishi, T. Katayama, H. Miyasaka, T. Asahi,**Phys. Chem. Chem. Phys.**, 20 (2018), 958-966

【助成 34 -29】

超音波刺激が誘発する神経可塑性の機序解明と耳鳴り抑制への応用

研究者 北海道大学大学院情報科学研究科 教授　舘野 高

〔研究の概要〕

研究課題では，侵襲的な神経刺激法の代替として，低侵襲的な脳の超音波刺激法とその装置の開発を目指した．まず，モデル動物脳に応用する超音波刺激システムを構築した．次に，その有効性を検証するために，麻酔下の動物頭部に超音波の電圧―機械的振動変換器（振動子）を置き，大脳皮質体性感覚野上の頭蓋に超音波刺激を印加した．この外部刺激に応じて，体性感覚野が投射する顔面のヒゲを動かす条件を探索し，実際にヒゲの動きを確認した．本研究課題で構築したシステムは，ヒトの聴覚神経活動の修飾と耳鳴り等の聴疾患治療への基礎的実験であり，将来的な応用の実現可能性が見出された．

〔研究経過および成果〕

「耳鳴り」は外界からの物理的音圧変動がない状態で生じる音知覚とされ，臨床での主要な耳疾患である．近年の調査に対して「耳鳴り」がすると答えた人の割合は，3.0%であり，65 歳以上の年齢では 6.6%にも及ぶ．本研究課題では，超音波を用いて低侵襲的に脳内の聴覚皮質を刺激し，シナプスの可塑性（長期抑圧）現象を利用して,「耳鳴り」に関連する神経活動の生起を抑制する方法の技術的基盤を確立するとともに，その細胞レベルでの生理学的な機序の解明を目指した．

本研究課題の期間前半では，薬剤投与（サルチル酸ナトリウム）による耳鳴りモデル動物を利用して，聴覚中枢系の音情報処理における耳鳴り様現象の機序を解明しようと試みた．まず，モデル動物の in vivo（生体内の）聴覚皮質に対して，フラビンタンパク質蛍光イメージング法を用いて，経頭蓋で耳鳴り関連神経活動を記録した．その結果，対照群に対して，耳鳴りモデル動物（マウス）では，聴覚皮質の周波数地図における 10 - 20 kHz の周波数領域で神経活動応答が有意に上昇することを見出した　([1]Yanagawa et al., 2017 で発表). この活動の変化は，ヒトにおける耳鳴りの周波数帯域に大凡一致していた．

また, この現象の生理学的なメカニズムを理解するために，in vitro（生体外，シャーレ内）の脳スライスを用いて，サルチル酸の聴覚皮質における影響について生理学的実験結果を基に解析した．実験では，マウスの聴覚皮質を 400 μm の厚さにスライスした後に，平面型多電極配列基板で電気的刺激による神経細胞の誘発細胞外電位を計測した．その結果，耳鳴りモデル動物の薬剤の投与下

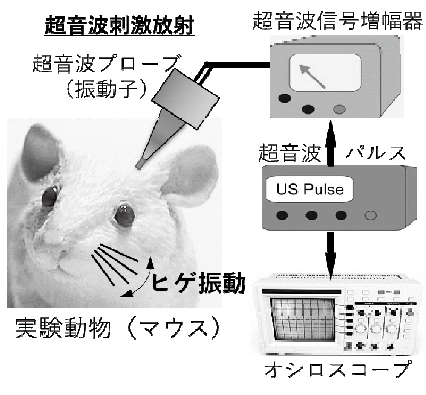


図 1: 超音波印加システムの概略

では，脳スライスの皮質各層で誘発活動が有意に低下することが判明した（[2] Namikawa et al, 2017 で発表）．この結果は，聴覚皮質に投射する皮質下（下丘や視床等）の部位で神経活動が増加し，皮質下の活動が通常は抑制されている聴覚皮質の活動を誘発する生理的な機序を示唆している．今後は，本研究で得られた結果の機序について，さらに単一神経細胞のレベルで詳細に明らかにしたい．

本研究課題期間の後半では，振動子から 0.5 W 以下の弱い超音波の機械的振動（周波数 0.5 MHz のバースト様振動）を頭蓋上から低侵襲的に耳鳴り関連脳領域に放射する刺激システムを構築した．本システムの構成は，超音波バースト発生器（DF1906, NF 回路），超音波信号増幅器（ZCA5064, RAD 社），超音波振動子（V301，オリンパス社），オシロスコープ，およびマウス頭部の固定器（SDMS-16，成茂科学）から構成される（図 1）．超音波刺激実験は，麻酔下のマウス頭部を固定器具で固定し，体性感覚野（顔面のヒゲに投射）付近に 1-2 秒の継続時間をもつ超音波刺激をマウス頭頂部で頭蓋上から印加した．電圧は 0.1 – 1.0 V（約 40 倍利得）で超音波バースト（パルス数，150 回）の刺激を印加した場合に，刺激印加の直後の 50 ms 以内にマウス顔面のヒゲが小さく動く（振動する）様子が観察された（図 2）．この現象は，超音波振動によるマウス体性感覚野の神経活動誘起を示唆し，その後，末梢系の神経と筋にその信号が順次伝達され，顔面のヒゲ（図 1）が動いたと考えられる．

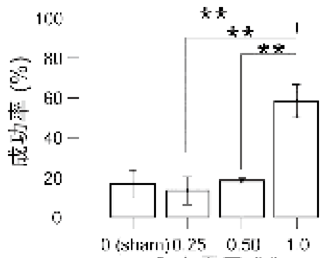


図 2: 超音波刺激電圧とヒゲ振動の成功率 (** $p<0.01$)

後半の課題では，解決すべき課題がいくつか残されている．まず，印加している超音波刺激の大きさを定量化する必要があり，センサ部の利用が不可欠である．また，印加している超音波が実際に脳活動を誘起しているかを確認するために，直接的に脳活動を計測する必要がある．さらに，体性感覚野のみでなく，聴覚皮質の活動誘起が可能かを検証する必要がある．上記の残された課題は，今後の研究において着実に解決し，そこで得られた結果は，順次，外部発表する計画である．

〔発表論文〕

1. Y. Yanagawa, K. Takasu, H. Osanai, T. Tateno, Salicylate-induced frequency-map reorganization in four subfields of the mouse auditory cortex, Hearing Research, Vol. 351, August 2017, pp. 98-115 (2017)
2. M. Namikawa, A. Sano, and T. Tateno, Salicylate-induced suppression of electrically driven activity in brain slices from the auditory cortex of aging mice. Front. Aging Neuroscience 9:395 (2017)

〔口頭発表〕

1．戸田聖人，長内尚之，舘野　高，耳鳴り誘導剤投与下のラット聴覚皮質における音刺激誘発電位応答のスペクトル解析，平成 29 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会，講演論文集 p，123，PS2-3，高松市，サンポートホール高松，平成 29 年 9 月 6 日

【助成 34 -30】

植物細胞内セカンドメッセンジャーのリアルタイム可視化による植物増産基盤技術の構築

研究者　東北大学大学院理学研究科　講師　　高岡　洋輔

〔研究の概要〕

植物の生長や分化等の生命現象を分子レベルで理解する上で、細胞内で起こるシグナル伝達をリアルタイムで時空間的に可視化する技術が必要不可欠である。ただし、これを実現するためのツールとして、動物細胞で確立されてきた各種センサー分子が、植物細胞では実用性にかける事が多く、植物における動的なシグナル伝達挙動はほとんど解明されていないのが現状である。本研究では、植物細胞で有用なケミカルセンサーの設計指針を確立することを目指し検討を行った。リンカー構造などが異なる様々なセンサーを設計・合成し、溶液中での物性評価と細胞導入率の検討等を行った結果、分子の会合特性が植物細胞への導入効率を制御する一つの要因であることを突き止めた。これらの成果は、今後の植物細胞への分子プローブの効率的導入に重要な知見になる事が期待される。

〔研究経過および成果〕

動物細胞で有用な小分子インジケーターの多くが、植物では利用が難しいことにより、植物細胞での細胞内シグナル伝達の解析は未解明の部分が多く残されている。植物細胞は一部のモデル植物を除いて遺伝子導入が困難であることも、解析を難しくする要因である。このような背景から申請者らは、植物細胞内で利用可能な、セカンドメッセンジャーの代表格であるカルシウムイオンを検出するインジケーターを開発し、植物細胞内カルシウム動態の可視化を目指して検討を開始した。その過程で、植物細胞への分子導入に関する新たな知見を得たので、下記に詳細を述べる。

動物細胞で有用なカルシウムインジケーター分子設計は極めて合理的で、カルシウムイオンと結合する配位子を蛍光団と直結させることで、配位子とイオンとの錯形成を蛍光波長や強度変化で検出する事ができる。この配位子は中性条件で負に帯電し細胞膜を透過しないが、エステルで保護される事で細胞膜を容易に透過する。ひとたび細胞内に入るとエステラーゼによる分解を受け、再び負に帯電して細胞内に留める事ができる。ただしそれは動物細胞に限った話であり、植物ではこれが利用可能な戦略ではない。その要因は、植物細胞に特有の組織：硬い細胞壁と、栄養などを蓄えるための小器官である液胞によると考えられる。実際に我々の実験でも、従来利用されてきたカルシウムインジケーターはほとんどが「細胞壁」を通らないか、その疎水性の高さゆえか「液胞」に局在化し、目的の細胞質に留める事が難しい事が確認された。故に我々は、「植物細胞質内にインジケーターを送り届ける技術」として、細胞質に発現するタンパク質と、それに対応する小分子リガンドとの特異的な分子認識を利用した。すなわち、「小分子リガンドを連結したカルシウムインジケーター」を細胞の中に導入できれば、小分子が細胞質のタンパク質に認識される事で、その局在を制御できる。標的タンパク質には、

植物／動物細胞に限らず普遍的に細胞質に発現する事が知られている FKBP12 を利用し、免疫抑制剤 FK506 の合成アナログ(SLF)をリガンドとして選択した。SLF と、汎用的な蛍光カルシウムインジケーターである CaGreen-1 を連結した分子を用いて、実際にモデル植物培養細胞(タバコ由来 BY2)で、カルシウムイオンの流入の可視化に成功している(図 1)。[1] ただし、今後様々な実用植物へ展開するには、さらなる細胞導入率の効率化や、細胞内局在制御などに問

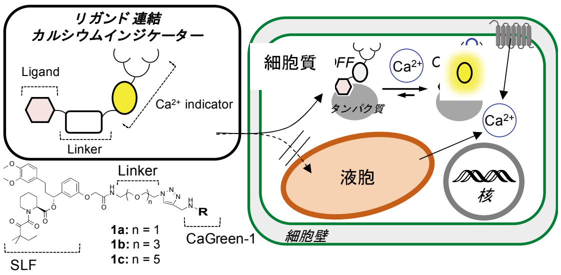


図 1. リガンド連結カルシウムインジケーターによる植物細胞への導入と局在制御の模式図。

題が残されていた。

興味深いことに、SLF と CaGreen-1 との間のリンカー構造を3種類検討したところ、リンカー長が短くても長くても全く細胞壁を透過しなかったが、中間の長さの分子(1b)だけが細胞壁を透過した。これらの分子は、疎水的な SLF リガンドと、比較的親水的なカルシウムインジケーターから成るため、水中で自己集合する可能性が考えられた。そこでこれら分子の会合特性を調べたところ、全ての分子は予想通り水中で会合した。ただし、臨界凝集濃度(CAC)は細胞導入が認められた 1b のみ低く、1a, 1c は低濃度から会合している事が確認された。すなわち、分子の会合特性が細胞透過性を制御しており、会合しないようにうまく設計することで植物への分子送達が可能になる事が示唆された。[2]

また、標的タンパク質である FKBP12 については、共有結合でラベルする新規方法論の開発も合わせて実施した。具体的には、タンパク質とリガンドとの相互作用に基づくラベル化(アフィニティーラベル化)では、ラベル化効率の低下や非特異的な相互作用の起こりやすいタンパク質表面を狙ったアプローチがほとんどであるが、相互作用界面に反応基を配置する事で、効率的なタンパク質ラベルが起こることを見出した(図 2)。[3] この効果は細胞内の方が顕著であり、細胞内タンパク質の効率的ラベル化方になりうることが示唆された。種々の検討の結果、この高効率の一因は細胞内分子クラウディングにあることが示唆された。これらの知見は、細胞内タンパク質ラベルにおける重要な知見であるだけでなく、植物細胞内への分子の局在制御に向けた新たな戦略を提示するものとして期待される。

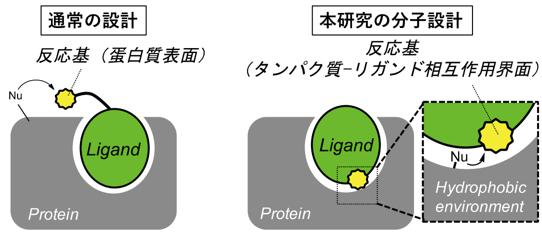


図 2. タンパク質–リガンド相互作用界面を狙ったアフィニティーラベル化剤設計の模式図。

〔発表論文〕

1. Y. Takaoka, M. Shigenaga, M. Imai, Y. Nukadzuka, Y. Ishimaru, R. Yokoyama, K. Nishitani, M. Ueda, *Bioorg. Med. Chem. Lett. 26*, 9-14 (2016).

2. Y. Takaoka, M. Imai, M. Shigenaga, M. Ueda, *Tetrahderon 73*, 3079-3085 (2017).

3. Y. Takaoka, Y. Nukadzuka, M. Ueda, *Bioorg. Med. Chem. Lett. 25*, 2888-2894 (2017).

【助成 34 -31】

数理モデルと脳活動計測による運動記憶形成過程・保持過程に関わる脳内表象の解明とその応用

研究者　東京農工大学大学院工学研究院　特任准教授　瀧山 健

〔研究の概要〕

本研究では、1. 身体運動学習に関わる脳活動を計測するセットアップの構築、2. 実際の計測、そして 3. 数理モデルに基づく効果的なフィードバック方法の構築を目的とした。1年間の研究期間の後、上述の 1.と 2.の目的は達成でき、3.に関連して運動関連成分を抽出するための機械学習手法を構築した。具体的には、筋電と脳波の同時計測が可能なセットアップを構築したこと、指示信号の後に指を動かす運動時における筋電と脳波を計測したこと、そして筋電と関連する脳波成分を抽出するための機械学習手法を構築した。

〔研究経過および成果〕

高齢化社会、東京オリンピック開催が差し迫っている昨今、運動の上達過程(運動学習)に関する脳内機構の解明は急務である。運動学習過程を予測・再現するための数理モデルが提案され(Thoroughman et al.,2000,Nature)、サル電気生理実験から運動の上達に運動野の神経活動変化が関わることが明らかにされてきた(Li et al., 2001, Neuron)、しかしながら、未だに運動学習の脳内機構は明らかでなく、近年になり様々な実験結果を統一的に説明できる数理モデルの提案 (Takiyama et al., 2015, Nature Comm)やヒトを対象とした運動学習中の脳波計測(Tan et al., JNS, 2014)が報告され始めた。

一方、脳波を積極的に応用する流れが盛んである。認知課題に関連する脳波活動を被験者にフィードバックし該当する脳波成分を高めてもらうトレーニング(ニューロフィードバックトレーニング[NF])を行うことで、認知課題のパフォーマンスが向上する(Zoefel et al., 2010, NeuroImage)。しかしながら、未だに NF により運動学習能力が向上する例の報告は数少ない。

本研究では、上記の背景を受け、1. 身体運動学習の過程と脳波を同時計測するためのセットアップ、2. 実際の計測、そして 3. 数理モデルに基づく効果的なフィードバック方法の構築を目的とした。1年間の研究の後、上記 1.、2.を完了させ、3.に関連して運動実行時の筋活動と関連する脳波を抽出する機械学習手法の提案に挑んだ。その概要を下記に記す。

1. 身体運動学習の過程と脳波を同時計測するためのセットアップ構築: 本助成金の元、身体運動学習過程と関連する脳波を同時に計測する実験セットアップの構築を行った。具体的には、脳波の計測精度を低下させる頭部の動きを固定するための顎台、そして本研究室で所有している身体運動学習過程を計測するための力覚デバイスが干渉しない実験セットアップの構築を行った。高さが可変な電動机に、特注により極力高さを低くした顎台をセットすることにより、実験協力者の身長に合わせ、頭部の動きを極力抑

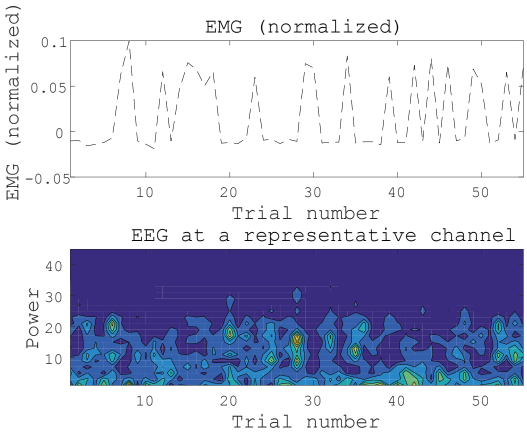


図 1: 運動開始時の筋電(EMG)と脳波(EEG)

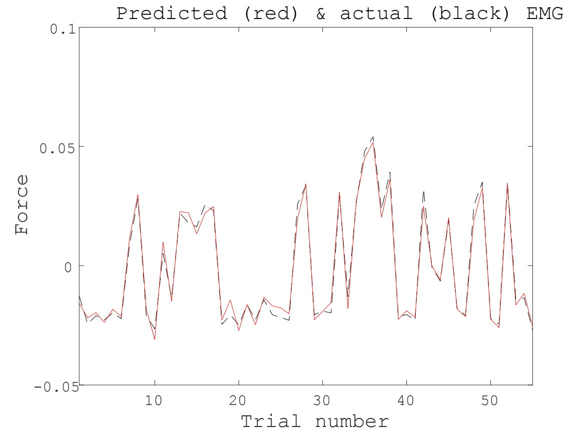


図 2: 運動開始時の筋電(黒線)と主成分回帰により予測した筋電(赤線)

えたまま力覚デバイスを操作することが可能となった。加えて、筋活動を計測するため、本助成金の元、筋電計を購入した。

2. 実際の計測: 第1に脳波を高精度に計測するため、頭部の動きを抑えることが可能な指の動きを計測した。筋活動の情報を担う脳波成分を抽出した後、その成分をフィードバックすることにより、学習速度を変容可能であることが期待される。モニターに表示される視覚キューに合わせ、人差し指に力を加えてカーソルを操作する課題を行った。その際に、脳波(8ch)、そして人差し指の運動に寄与する筋肉(第一背側骨間筋)に合わせ筋電(1ch)を計測した。図 1 に筋電、そして頭頂付近の運動に関連した脳領域(Cz)の脳波を示す。独立成分分析を用いて眼球運動に伴う脳波成分の除去を行い、運動開始に同期した各周波数帯のパワーを示している。パワーの値は試行毎に異なり、筋電の値も試行毎に異なる。従って、筋電の試行間変動と関連する脳波の試行間変動を抽出することにより、筋活動と関連する脳波成分を抽出できることが期待できる。

3. 筋活動と関連する脳波を抽出する機械学習手法: 運動実行のタイミングにおける脳波 X、筋電の値 y の関係性を y = Xw として記述できる最も妥当な w を推定することにより、脳波 X の筋電 y への寄与率を議論することを検討した。X は 8 チャネルかつ 23 周波数成分存在するため 104 次元、y は 1 次元、合計で 55 試行計測している。脳波はチャネル数より少ないソースから生成されている波形を冗長に計測しているものと考えられている。従って、第1に脳波データ X を主成分分析により次元圧縮を行い、その後に最適な w を推定する主成分回帰手法を利用した。これにより、脳波データから筋電データを予測できること、そして筋電データに大きく寄与する脳波成分の抽出が可能となった(図 2)。

今後は、脳波を高精度に計測可能な、人差し指の運動に基づく運動学習課題を構築し、上記により抽出された脳波成分の変化を議論する。そして、適切なニューロフィードバック方法の構築、脳疾患患者への応用を行っていく。

【助成 34 -32】

がん細胞での磁場による薬剤作用の増強メカニズムの解明

研究者　金沢大学理工研究域　准教授　柿川　真紀子

〔研究の概要〕

本研究では，ヒトがん細胞での薬剤作用における交流磁場曝露影響と，その薬剤作用への磁場影響メカニズムについて検討した。具体的には，ヒトがん細胞に肺がん細胞 A549 における抗がん剤シスプラチンの殺細胞作用を，60 H，50 mT 磁場曝露群と非曝露群で測定し，比較結果から磁場による薬剤作用への影響を明らかにした。さらに，培養液中に残る（細胞外）の薬剤活性から，磁場曝露による薬剤の細胞内への取り込み量の変化を測定し，磁場曝露による薬剤作用の増強メカニズムについて検討を行った。

〔研究経過および成果〕

これまでの研究結果において，大腸菌細胞やヒト細胞での薬剤作用が交流磁場曝露により増強されたことから，ヒトがん細胞で磁場による薬剤作用の増強が確実であれば，がん組織に交流磁場を曝すことで薬剤の効能を標的部位で高めることができ，投薬量を減らして，副作用を抑えられる可能性がある。この磁場と薬剤の併用療法の確立に向けて研究を進めており，本研究ではヒトがん細胞（肺がん A549 細胞株）での薬剤作用への影響測定と，薬剤作用増強における交流磁場曝露の影響メカニズムを検討した。

なお，これまでの大腸菌細胞での薬剤作用への磁場影響の結果より，周波数は 60Hz 付近が効果的であり，磁束密度に依存して作用増強率が高くなることから，これをもとに，本研究での磁場曝露条件は周波数 60 Hz，磁束密度は現有装置で最も高い設定値として 50 mT を実験に使用した。なお，磁場曝露装置は細胞培養用のインキュベータ内に設置し，比較対象とする非磁場曝露群と薬剤反応時の細胞の培養温度は同じ 37℃であることを確認した。

肺がん細胞 A549 における抗がん剤シスプラチン作用への磁場影響結果を図 1 に示す。シスプラチン作用により反応時間に依存して，細胞の生存率は減少するが，60 Hz，50mT 磁場曝露下でシスプラチンを作用させた方がより生存率は減少した。この結果をもとに，シスプラチンのみの生存率に対する，シスプラチンと磁場曝露群の生存率の相対比を縦軸としたグラフを図 2 に示す。反応時間 1 時間以降において相対比は 1 以下となり，反応時間 2，4 時間では磁場曝露により細胞の生存率が 40％減少していることがわかる。

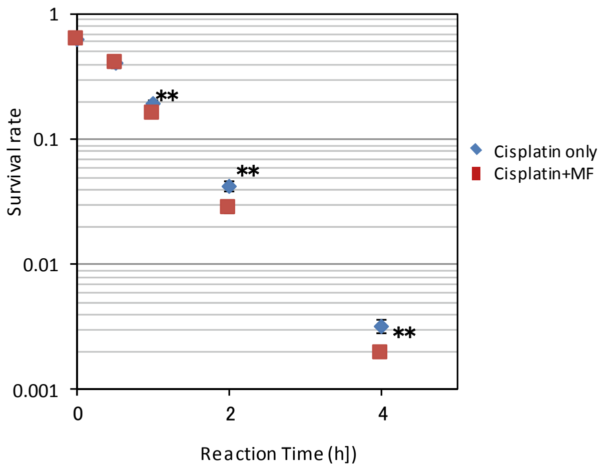
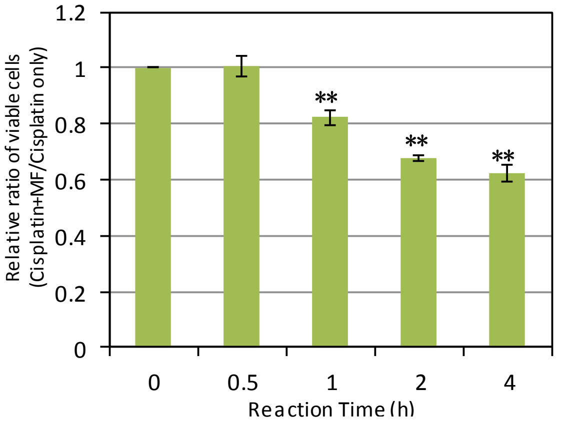


図 1. 60 Hz, 50 mT 磁場曝露時および非曝露時のヒト肺がん細胞 A549 でのシスプラチン作用における細胞生存率

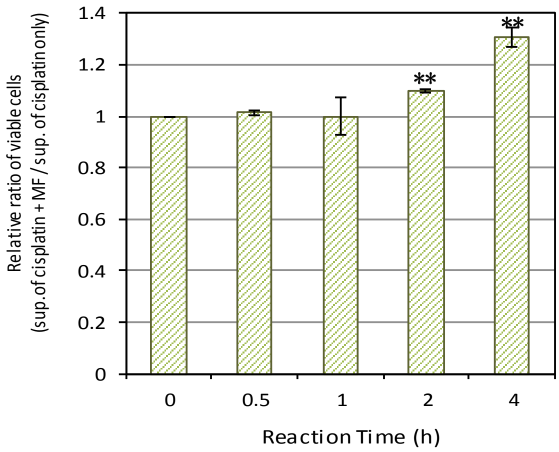


n=6, **p<0.001

図 2. ヒト肺がん細胞 A549 のシスプラチン作用における 60 Hz, 50 mT 磁場曝露影響

また，統計処理を行ったところ反応時間 1，2 ,4 時間において，それぞれ p= 0.0003，0.0004，0.001 となり，有意差が認められた。この結果より，ヒト肺がん細胞において，60 Hz，50 mT 磁場は抗がん剤シスプラチン作用を高め，細胞生存率は非曝露群に比べて 40％減少させることが明らかとなった。

次に，この磁場による抗がん剤作用の増強メカニズムについて検討を試みた。ヒトがん細胞への抗がん剤作用の測定では，細胞培養液に抗がん剤を添加するが，すべての薬剤が細胞内に取り込まれるわけではなく，いくらか培養液中に残る。この培養液中に残る（細胞外）の薬剤活性により，薬剤の細胞内への取り込み量への磁場曝露の影響を測定した。具体的には，同数の A549 細胞を播いた培養ディッシュ 2 セットにそれぞれシスプラチンを 10 µl/ml として添加し，一方を磁場曝露槽に，他方を非曝露槽に入れて反応後，細胞に取り込まれずに残る薬剤を含んだ培養液を回収して，新しい細胞に加え，その細胞生存率から培養液中に残る薬剤活性を測定した。その結果を図 3 に示す。縦軸は磁場曝露群の培養液に残る薬剤（細胞に取り込まれなかった薬剤）活性について，非曝露群を 1 として相対比で示している。



n=6, **p<0.001

図 3. 磁場曝露群と非曝露群の培養液中に残るシスプラチンの活性比較

この結果から，反応 2, 4 時間の磁場曝露群の培養液による新しい細胞の生存率は 1.1，1.3 と非曝露群より生存率が高い，つまり培養液中に残る薬剤活性は非曝露群よりも低いことがわかる。この結果は磁場曝露群では培養液中に残る薬剤が少なくなることを示し，この反応時間 2，4 時間の値については，統計処理から有意差（p=0.0004，0.0032）も認められた。

以上の本研究の結果より，60 Hz, 50 mT 磁場はヒト肺がん細胞 A549 のシスプラチンの殺細胞作用を増強し，2～4 時間曝露反応では薬剤のみよりも細胞生存率をさらに 40％減少させることが明らかとなった。また，この磁場の薬剤作用増強のメカニズムとして，磁場は細胞膜に影響を与えて，細胞内への薬剤取り込み量を増加させ，結果として薬剤の作用を増強していることが示唆された。

〔発表論文〕

1．遠藤裕哉，松居大輔，山田外史，柿川真紀子，多剤耐性がん細胞における抗がん剤作用とその取り込み量への交流磁界影響評価，第 41 回 日本磁気学会学術講演会，20pA-1 （2017）

【助成 34 -33】

二本鎖 DNA による新規の遺伝子ノックダウン現象の実行因子の解明と生体内での再構築

研究者　大阪大学大学院理学研究科　助教　小沼 健

〔研究の概要〕

申請者らは、脊索動物のオタマボヤにおいて「二本鎖 DNA を注入すると、その配列特異的に遺伝子発現が抑制される現象」を見出し、DNA 干渉 (DNAi)と命名した。この DNAi の作動機序について明らかにすることを試みた。とくに、標的 mRNA の分解が起きることに着目し、RNA 干渉 (RNAi)のしくみを参考に研究を進めることで、以下 2 点を明らかにした。(1)注入した二本鎖 DNA から、小分子 RNA が合成されることが示唆された。おもしろいことに、その塩基配列の特徴は、既存のどのガイド鎖の知見とも異なる可能性がある。(2) RNAi ではガイド鎖の小分子 RNA と核酸分解酵素のアルゴノート（AGO）が複合体を形成し、ガイド鎖に相補的な配列の RNA を分解する。AGO を同定するため、候補タンパク質とガイド鎖の結合を検出する実験系を確立した。このように、新たな遺伝子ノックダウン現象の研究を開拓することに成功し、今後さらなる展開が期待される。

〔研究経過および成果〕

1.　背景と目的

申請者らは、脊索動物のオタマボヤにおいて、二本鎖 DNA を注入すると、その配列特異的に遺伝子発現が抑制される現象を見出し、DNA 干渉 (DNAi)と命名した[1]。これは多細胞動物で初の DNAi の発見例である。DNAi のしくみは不明であるが、ゲノム上への塩基配列の挿入や変異を伴わないことから、Cas9-CRISPR などのゲノム編集とは一線を画するしくみといえる[2]。また DNAi は、近縁種のマボヤでは機能しないことが分かっており[1]、オタマボヤに特有の現象である。その作動機序を明らかにすることで、遺伝子ノックダウンの原理や、その細胞内進化の理解につながる新たな研究領域を開拓できると期待される。

本研究ではとくに、DNAi における「標的 mRNA 分解のしくみ」に着目し[1]、RNA 干渉 (RNAi)と比較するという戦略を立てた。RNAi では二本鎖 RNA から (1)ガイド鎖となる小分子 RNA が合成され、(2)核酸分解酵素であるアルゴノート(AGO)と複合体を形成することで、ガイド鎖と相補的な配列をもつ RNA を分解する。本研究では、DNAi においてもこれらが関わっているかを検証した。

2. 成果

主な成果として、(1)ガイド鎖の合成、(2) AGO の解析法の確立の 2 点がある。以下、これらを述べる。

2-(1): 二本鎖 DNA からの小分子 RNA 合成

オタマボヤの卵巣に二本鎖 RNA もしくは二本鎖 DNA を注入することで、RNAi や DNAi を引き起こした卵や胚が得られる。Total RNA を抽出し、Simple miRNA Detection Kit (BioDynamics Laboratory 社)をもちいて小分子 RNA の有無を調べた。

その結果、DNAi を引き起こした卵において、小分子 RNA に由来する PCR 産物が検出された (図 1)。その塩基配列をシーケンスしたところ、注入した二本

鎖DNA断片に由来する配列がみられた。この結果は、EGFPとBrachuryという2つの異なる遺伝子どちらでもみられた。以上より、DNAi では「注入した二本鎖DNAに由来する小分子RNA合成」をともなうことが分かった。RNAiと同様に、DNAiにおいても小分子RNAが合成され、標的mRNA分解のためのガイド鎖となる可能性が考えられる。

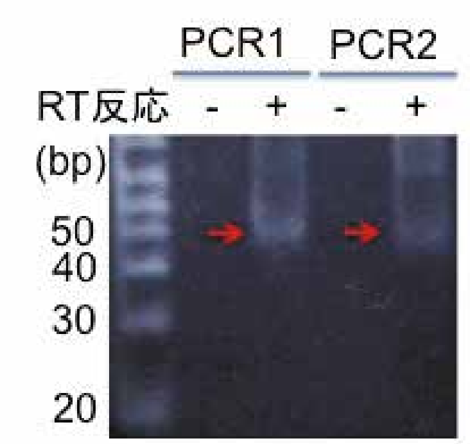


図1　DNAiにおける小分子RNA合成。
EGFPのDNA断片を注入した個体でRT-PCRを行った。矢印がPCR産物。2つの異なる配列を増幅したもの(PCR1とPCR2)。

2-(2): AGOとガイド鎖の複合体形成の検出

DNAi を駆動するタンパク質について知見を得る第一歩として、AGO に着目した。オタマボヤのゲノムには AGO のホモログが7種類存在する。この中から、(1)のガイド鎖、すなわち小分子RNAと複合体を形成するものを特定する実験系の構築に成功した（詳細は文献2をご覧下さい)。

具体的には、FLAGタグで標識したAGOを哺乳類細胞に発現させ、その溶解液中で小分子 RNA と結合させたのち、FLAG タグの免疫沈降により AGO を精製した。AGO に小分子 RNA が結合していれば、RT-PCR により検出できる。この発想のもと、ヒトAGO2をもちいて条件検討を行いオタマボヤのAGOをもちいて解析を開始した段階である。

3. まとめと展望

本研究を通じて、DNAiの特徴である標的mRNA分解のしくみの一端が見えてきた。たとえば RNAi と同様に、(1)小分子 RNA の合成をともなうことから「二本鎖 DNA からの小分子 RNA 合成」というしくみを内包することが分かった。現在、合成される小分子RNAの特徴や、注入された二本鎖DNAから小分子RNAが作られる過程を明らかにするため、small RNA-seq解析を計画している。

さらに、(2)AGOと小分子RNAの複合体形成を調べる実験系を確立した。これにより、DNAi の実行因子となるタンパク質を得ることができれば、それを足掛かりとして、DNAiをになう分子複合体の構成タンパク質を同定することが可能になると期待される。これらを通じて、オタマボヤの細胞内で DNAi が駆動されるしくみを理解し、DNAi を他の生物に再構築することを目指していきたい。これらの試みが上手くいけば、将来的にはCas9-CRIPSPRのような様々な研究分野に貢献する技術となるかもしれない。この稿を通じて、一人でも多くの方に興味を持って頂ければ幸いである。

末筆ではありますが、このような萌芽的な課題への挑戦をサポートして頂いた、カシオ科学振興財団の皆様に心よりお礼を申し上げます。

〔発表論文〕

1. Omotezako T et al. (2015): Proc Biol Sci 282(1827): 20150435.
2. 小沼ら (2018): 日本応用酵素協会雑誌: 印刷中.

【助成 34 -34】

老眼補償画像の生成によるグラスレスディスプレイ法の開発

研究者 九州工業大学 大学院工学研究院 准教授 河野 英昭

〔研究の概要〕5―8行

高齢者の視覚機能は年齢とともに徐々に変化しており，一般的に，高齢者が知覚する画像は，若者と異なる．同じ画像を同じように知覚させるために原画像とは異なる画像を高齢者に提示する必要がある．本研究では，老眼の画像フィルタに対する逆特性を生成する方法を提案する．提案法は，直列結合した 4 層のニューラルネットワークのモデルで構成される．この 4 層のニューラルネットワークは，機能の面から 2 つのブロックに分割される．上層は画像変換のシミュレーションモデルであり，下層は，逆特性を得るための学習モデルである．この提案する枠組みの性能は，老眼のための事前画像変換によって評価を行なった．

〔研究経過および成果〕

はじめに

本研究では，老眼の視覚の逆特性を取得することにより，老視者が健常者と同様の画像を知覚できるような画像を生成するための画像変換方法を提案する．提案手法は，4 層のニューラルネットワークを用いている．このネットワークを用いることで，老視者にとって視認性が改善された画像を効果的に得ることができる．また，いくつかの実験により従来手法との比較を行うことで提案手法の有効性を示す．

方法

老視者に画像を通常通りに知覚させるためには，適切に変換された画像を老視者に提示する必要がある． 図 1 に，提案手法の概要を示す．提案手法では，老眼の視覚特性をモデル化した老眼シミュレーションモデルを用いる．本研究では，老眼の視覚特性はガウシアンフィルタによってモデル化されると仮定する．

主な問題は，老眼の逆視覚特性モデルを表す逆

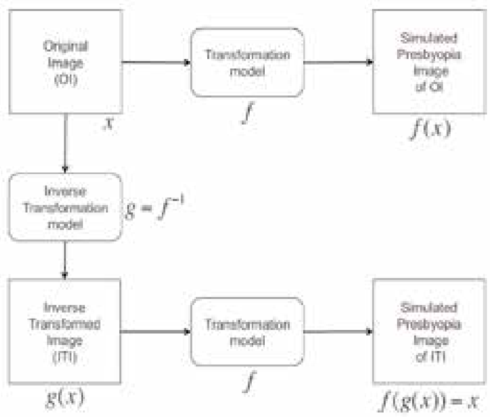


図１： 提案手法の概要

変換モデルを生成することである．この目的のために，老眼シミュレーションモデルと老眼の逆視覚特性モデルとを接続する階層型ニューラルネットワークを構築する．ニューラルネットワークの入力および出力は画像の画素値であり，ニューラルネットワークはバックプロパゲーションにより学習される．

最初に，老眼のボケ効果をガウシアンフィルタによってシミュレーションした画像を用意する．次に，元画像および上記のボケ画像を，2 層ニュ

ーラルネットワークの入力および教師としてそれぞれ使用し学習させる．学習の結果，老眼シミュレーションモデルを得ることができる．

老眼の逆視覚特性モデル，つまり老眼補正モデルは，前述の老眼シミュレーションモデルを含めた 4 層のニューラルネットワークを用いることによって得ることができる．4 層のニューラルネットワークの 3〜4 層目のニューラルネットワークのパラメータ，すなわち重みとバイアスは老眼シミュレーションモデルを使用している．このモデルのパラメータは，トレーニング中は更新されない．つまり，パラメータが更新されるのは，第 1 層から第 3 層の間のみである．このネットワークに元画像を入力と教師の両方として適用することにより，ネットワークの第 1 層から第 3 層において老眼補正モデルを生成することができる．

実験結果

提案手法の有効性を確認するために，評価実験を行った．図２（a）に示す 72×96 ピクセルのペンギンの画像を用いた．

実験で使用したニューラルネットワークのユニット数は，入力層では 72×96，出力層では 72×96 である．

また，老眼補正モデルと老眼シミュレーションモデルとを接続した 4 層ニューラルネットワークの各層のユニット数は，入力層で 72×96，第 2 層で 500，第 3 層で 72×96，出力層は 72×96 である．老眼補正モデルは 4 層ニューラルネットワークの第 1 層から第 3 層に配置されているため，各層のユニット数は入力層で 72×96，中間層で 500，出力で 72×96 層である．各モデルの活性化関数としてシグモイド関数を使用している．

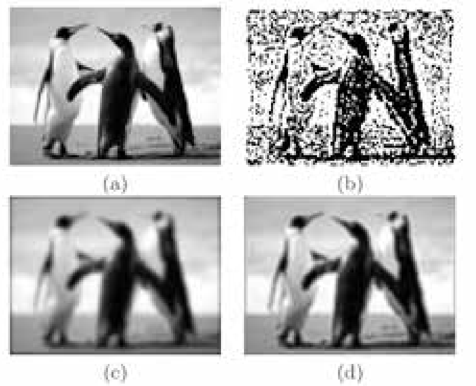


図２： ペンギン画像の提案手法実験結果 (a)元画像 (b)老眼補正画像 (c)元画像の老眼シミュレーション画像 (d)老眼補正画像の老眼シミュレーション画像

学習の処理時間は約 3 分であり，テスト画像の出力の処理時間は約 3 秒であった．実験結果に示すように，実際に老眼補正によって得られた画像は元の画像と比較して 2 値化された画像のようになっているが，図 6（d）に示される画像より，提案手法は従来の方法よりも優れていると言える．

おわりに

本研究では，老眼シミュレーションモデルの逆特性を生成する方法の提案をした．今後は，別の色変換に適用する研究も進めていく．

〔発表論文〕

1. 河野英昭，佐野智紀，ニューラルネットワークを用いた老眼画像処理，映像情報メディア学会情報センシング研究会(IST), pp.27-30, 2017.
2. 佐野智紀，折居英章，河野英昭，末竹規哲，ニューラルネットワークを用いた色弱者のための画像色変換とそのパラメータの検討，信学技報 116(482), 1-6, 2017.

【助成 34 -35】

ヴァーチャル環境が惹起する実在感:立位バランス機能から評価する

研究者　上武大学ビジネス情報学部　准教授　井田　博史

〔研究の概要〕

本研究は，主に姿勢筋活動の分析から，立位動作外乱に対して発揮される姿勢調節方略を明らかにし，またVR の視環境がどのようにその調節方略に影響を及ぼすのかについて，惹起される実在感を考慮しつつ検証することを目的とした．これを達成するために，以下の２つの到達目標を設定した：目標①「単純脚上げ動作における姿勢調節の評価」，目標②「障害物踏み越え動作中の姿勢調節に対する実環境とVR 環境との比較」．目標①では，片脚立位の脚振り上げ運動における姿勢調節方略が，歩行開始の踏み出し運動での方略とは顕著に異なることを示した．また目標②については，VR 環境では実環境と異なる障害物回避動作パターンが生成し，また姿勢筋活動が低減することを明らかにした．

〔研究経過および成果〕

ヴァーチャルリアリティ（VR）の技術が広く認知されるようになり，リハビリテーションやフィットネストレーニングの用途でもその応用が図られている．一方，ヒトの運動機能に関して従来から関心の高い研究課題の 1 つとして，立位バランスを保持するための姿勢制御がある．入力される視覚情報の量および質が，姿勢外乱発生前の予測性姿勢調節（Anticipatory Postural Adjustments, APAs）および発生後の代償性姿勢調節（Compensatory Postural Adjustments, CPAs）に作用することが明らかにされている（Mohapatra et al., 2012, Clin Neurophysiol）．また近年では，APAs にさらに先行して発揮される初期姿勢調節（Early Postural Adjustments, EPAs）も含めて，随意運動遂行中の姿勢調節方略を検証した報告もみられる（Lee & Aruin, 2013, Exp Brain Res）．

本研究テーマでは，主に姿勢筋活動の分析から，動作外乱（脚上げ）に対して発揮される姿勢調節方略を明らかにし，さらにVR の視環境がどのようにその調節方略に影響を及ぼすのかについて，VR が惹起する実在感を考慮しつつ検証を行う．このテーマに対して，目標①「単純脚上げ動作における姿勢調節の評価」および目標②「障害物踏み越え動作中の姿勢調節に対する実環境とVR 環境との比較」の２つの到達目標を設定した．以下，それぞれの目標について，研究の経過と成果をまとめる．

1. 目標①の研究成果「単純脚上げ動作における姿勢調節の評価」

この目標課題の予備的研究（井田，2015，日本体力医学会大会）では鉛直上方への足部挙上を動作課題としたが，ここでは歩行運動と関連づけるため，足部を前方へ出す脚振り上げを分析対象として採用した．また目標②とも関係づける意味で，障害物の踏み越えについても比較対象に含めた．

実験には若年健常成人 24 人が参加した．実験参加者は床反力計の上に支持側の足を置いて両脚で立ち，片脚の単純振り上げ（立位保持），平地踏み出

し（移動），障害踏み越え（移動）の各動作課題を行った．姿勢筋の活動量を評価するため，EPAs 相（-550 ms～-150 ms），APAs 相（-150 ms～+50 ms），CPAs 相（+50 ms～+250 ms）それぞれにおける各被験筋の筋電図積分値を求めた．

単純振り上げ課題が平地踏み出し課題と異なる筋活動量を示したのは，前脛骨筋の EPAs 相から APAs 相，内側腓腹筋の APAs 相から CPAs 相，大腿二頭筋の EPAs 相と CPAs 相，そして脊柱起立筋の EPAs 相から CPAs 相までであった．一方，単純振り上げ課題が障害踏み越え課題と異なる筋活動量を示したのは，前脛骨筋の EPAs 相と内側腓腹筋の CPAs 相のみであった．これらの結果は，片脚立位の脚振り上げ運動は，支持側のバランス制御方略において，歩行開始中の踏み出し運動とは顕著に異なることを示唆する．一方，障害物の踏み越え運動は，脚振り上げ運動に比較的類似した方略で遂行されている可能性が示唆される．ここで得られた知見は，歩行中の動的バランス制御機能を立位保持のための動作外乱応答と関連づけていく上で，有益な示唆を与え得る．

2. 目標②の研究成果「障害物踏み越え動作中の姿勢調節に対する実環境と VR 環境との比較」

この目標課題については以前から検証を進めていたが，本研究助成によりすべての解析結果を総括し，また補足実験のデータも追加して包括的な議論を行った．実環境とVR環境とで障害物のスケールや設定速度などを近似させ，衝突回避動作中の姿勢調節方略について比較した．

実験には健常成人 10 人が参加した．実験参加者は，床反力計の上に両脚で直立し，床上を接近してくる障害物を片脚の足部挙上により回避する動作課題を，実環境とVR環境とで行なった．VR環境はヘッドマウントディスプレイ（HMD）もしくは 3D プロジェクタを用いて呈示された．姿勢筋活動量は，目標①と同様にして，EPAs 相，APAs 相，CPAs 相における各被験筋の筋電図積分値により評価した．また，床反力と足部の加速度も計測した．

HMD 条件における足部挙上の最大加速度は，実条件および 3D プロジェクタ条件と比較して，有意に小さかった．また，HMD と 3D プロジェクタの両 VR 環境条件において，実条件と比べて姿勢筋活動の低減がみられた．これは APAs 相および CPAs 相において特に顕著であった．姿勢筋活動の開始時点は，EPAs 相から APAs 相にかけて分布していた．これら VR 環境条件で生じた運動パターンの変化と筋活動の変調は，惹起される実在感とあわせて，VR リハビリテーションの開発にあたって考慮されるべきであろう．

〔発表論文〕

1. Ida H, Mohapatra S, Aruin A (2017). Control of vertical posture while elevating one foot to avoid a real or virtual obstacle. Experimental Brain Research, 235(6), 1677-1687.
2. Ida H, Mohapatra S, Aruin AS (2017): How does three-dimensional information affect postural control in stepping over an obstacle? MOVEMENT 2017, Oxford, UK.
3. 井田博史（2017）：障害物回避をともなう踏み出し運動における姿勢調節方略．第 72 回日本体力医学会大会，愛媛県松山市．
4. 井田博史（2018）：運動制御能力を高めるヴァーチャル環境を利用したトレーニング．体育の科学，68(1)，26-31．東京：杏林書院．

【助成 34 -36】

発光機能をもつ環境応答性金属錯体の分子設計と放射線による殺細胞効果の評価への応用

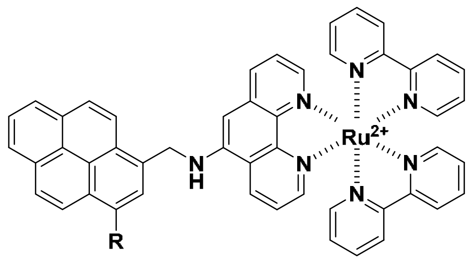
研究者　青山学院大学理工学部　　教授　　田邉　一仁

〔研究の概要〕

放射線による癌治療効果を向上すべく、細胞内酸素濃度変化を可視化する分子プローブを開発した。本研究では、酸素応答性のりん光を発するルテニウム錯体にさらなる化学修飾を加え、酸素感受性の向上を目指した。具体的には、長寿命の三重項励起状態を実現するため、ルテニウム錯体の配位子にブロモピレン基を導入した誘導体(Ru-BrPy)を新たに合成し、その機能を調べた。その結果、Ru-BrPy は従来のルテニウム錯体よりも高い酸素応答性を示すと共に、細胞に速やかに取り込まれ、酸素応答性の発光を示すことを明らかにした。

〔研究経過および成果〕

現行の放射線療法は必ずしも最適な照射条件で進められていないことがわかってきた。放射線療法は、がん部位に直接放射線を照射することで殺細胞効果を得るものであるが、その効果は、組織内の酸素濃度に大きく依存することが知られる。放射線治療は充分な酸素濃度をもつ腫瘍には高い殺細胞効果を示す一方で、酸素濃度が低い場合にはその効果は約3分の1程度に弱まる。これまで、腫瘍は酸素濃度が低いと言われてきたが、近年、腫瘍内の酸素濃度は必ずしも低酸素状態で一定ではなく、短い時間間隔で変動していることが示された。すなわち、腫瘍内の酸素濃度が高まった時点で放射線を照射すれば非常に効果は高いが、酸素濃度が低い時点で照射しても治療効果は限られる。本研究では、腫瘍内の酸素濃度を発光をモニターするだけでリアルタイムに計測する診断システムを構築することを目指した。これまでに我々のグループではルテニウム錯体の酸素依存的なりん光発光を活用した酸素検出プローブの開発を進めてきた。その研究過程で、ルテニウム錯体と同程度のエネルギーレベルの三重項励起状態を示すピレン基を配位子に導入するとりん光の酸素応答特性が向上することを見出してきた。本研究では、さらなる酸素感受性の向上を目指した。



Ru-BrPy : R = Br
Ru-Py : R = H

Figure 1. Chemical structures of ruthenium complexes.

りん光の酸素感受性は、ルテニウム錯体の三重項励起状態の寿命に大きく依存する。すなわち、長寿命化すれば酸素感受性は向上する一方、短寿命化すれば感受性は下がる。ピレン基の導入による酸素感受性の向上は、ルテニウム錯体－ピレン間のエネルギー移動とピレン基の長寿命励起状態に起因して生じると考えられている。そこで本研究

では、ピレン基を、異なる三重項エネルギーをもつ他の官能基に変換し、ルテニウム錯体のりん光の酸素感受性が変化するか調べた。

ブロモ基を備えたピレンはピレンそのものと比較してやや低い三重項エネルギーを持つ。そこで、この官能基を備えたルテニウム錯体(Ru-BrPy)を合成した。参照化合物として、無置換ピレン基を備えたルテニウム錯体(Ru-Py)も併せて合成し、物性を比較した。

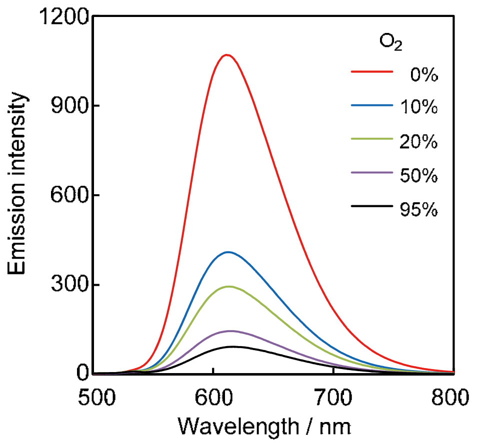


Figure 2. Emission spectra of Ru-BrPy in aqueous solution under different oxygen concentraiton (0% O_2: red line, 10% O_2: blue line, 20% O_2: green line, 50% O_2: purple line, 95% O_2: black line). The spectra were measured with excitation at 450 nm.

各 Ru 錯体の発光スペクトルを水溶液中の酸素濃度を変えて測定したところ、いずれの場合も、酸素濃度の増加に伴うりん光強度の減少が確認できた。また、酸素感受性を Ru-Py と比較したところ、酸素添加時の相対的な発光強度が Ru-BrPy の方が弱かったことから、酸素感受性が向上したことがわかった。この結果は、エネルギーレベルの低いブロモピレン基の導入によってルテニウム錯体のりん光寿命が長寿命化したことを示唆している。

次に、ブロモピレン基を備えた Ru 錯体を用いて細胞実験を行った。ヒト肺がん細胞 A549 に Ru-BrPy を投与し、24 時間インキュベーションした後、蛍光顕微鏡で細胞を観察した。その結果、Ru-BrPy は細胞内に浸透し発光することが確認できた。また、細胞内の酸素濃度を変えたところ、低酸素条件下に晒した細胞で強く発光することを明らかにした。これらの結果から、Ru-BrPy は細胞内の酸素濃度の変化を検出できる分子プローブとして機能することが示された。

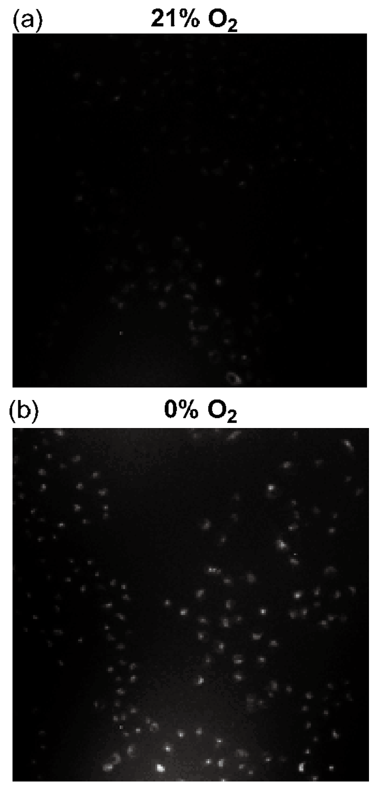


Figure 3. Emission images of A549 cells as incubated with Ru-BrPy. The cells were incubated with each ruthenium compexes and then the medium was replaced by PBS which were kept under the different oxygen concentrations (a : 21% O_2, b: 0% O_2).

〔発表論文〕

1. Phosphorescent Ruthenium Complexes with Bromopyrene Unit that Enhance Oxygen Sensitivity, Kurihara, R.; Ikegami, R.; Asahi, W.; Tanabe, K. under review.

【助成 34 -37】

高齢者の熱中症の低減につながる行動誘発のための情報設計法の構築

研究者　宇都宮大学地域デザイン科学部　助教　　糸井川　高穂

〔研究の概要〕

本研究では、高齢者の熱中症予防を目指し、高齢者の熱中症予防行動の誘発に効果的な情報の設計法を検討することを目的とした。本研究は、高齢者を対象としたアンケート調査と実験で構成しされている。アンケート調査で、高齢者が日頃熱中症に関する情報を入手している経路やその内容、熱中症予防行動に対する動機や実行可能性を調査した。実験では、アンケート調査に基づき、情報伝達媒体、情報発信者、情報の内容のフレーム、情報の内容の社会規範の 4 因子について 3 水準設定し、熱中症予防行動としてのエアコンの使用の誘発の可能性のt高さを検証した。本研究の成果として、高齢者の熱中症予防行動の誘発に向けた情報に関する各因子、水準毎の行動誘発の効果を性別毎に示した。すなわち、行動誘発の可能性の高い因子、水準を採用して情報を設計することにより、熱中症予防としての高齢者のエアコンの使用の可能性を高めることができる。

〔研究経過および成果〕

1. 初めに

熱中症による救急搬送は、毎年 4～5 万件に上る。その半数は、65 歳以上の高齢者である。「エアコンを使う」ただそのことだけのことで、何万人もの高齢者の健康・命を守ることができる。

高齢者のエアコンの使用を誘発する情報の提供「媒体」および情報の「内容構成」を明らかにし、その知見に基づきポスターや防災メールの「内容構成」を設計し、高齢者の熱中症の発症を低減することが、本研究の目的である。

2. 方法

本研究ではアンケート調査と実測を行った。アンケートは、高齢者を対象とした教育機関の学生 300 名を対象とした。実測は、高齢者を対象とした教育機関の学生のうち、男女各 15 名を対象とした。

アンケートでは、性別、年齢など個人の属性に加え、熱中症予防情報の入手経路と入手情報の内容、熱中症対策の実施可能性およびその理由等を収集した。実測では、アンケートに基づき効果を得られると推定した情報伝達媒体、内容、フレーム、社会規範を、直交表を用いて組合せて設計した情報について、心拍変動のうち高周波成分のパワーHF に基づき、行動誘発の可能性を検証した。

本研究のアプローチにより、情報の設計に関する各因子、水準について、行動誘発に効果的な組み合わせを採用することが可能となる。さらに、情報伝達媒体が定められている場合であっても、他の因子について行動誘発に効果的な水準を選択することにより、行動誘発の可能性を高めた情報を設計することが可能となる。

3. 研究の成果

本研究では、行動変容に効果的な情報設計法を明らかにすることにより、高齢者の熱中症を予防する

ことを目的とした調査および実験を行った。

本研究により、主に以下が明らかになった。

1. 熱中症情報は、テレビ・ラジオ、対面、回覧板、ポスター等を介して提供されることが多かった。
2. 狭いカテゴリーの内容で構成された情報は記憶に残りやすい。具体的には、天気予報の中での熱中症予防情報の提供や防災メールなどの特定の情報を提供する媒体を介して提供される情報の内容は、記憶に残りやすい。
3. 幅広いカテゴリーの内容で構成される広報誌・回覧板、ポスター、対面を介して提供される情報の内容は、記憶に残りにくい。
4. 実施されやすいのは、頻繁に見聞きする対策および実施が簡単な対策であった。
5. 実施されにくい熱中症対策は、情報を入手する頻度の低い対策であった。
6. 情報伝達媒体および情報の内容の行動変容への影響の大きさは、男女により大きく異なることが分かった。その一方でポスター・広報を介した情報提供が、行動誘発への影響が小さいことに性差は見られなかった。
7. 男性は専門性の高い人を介した情報提供により熱中症予防行動が促されやすく、女性は実施が容易な方法による熱中症予防行動を好む。

さらに、本研究で検討した情報設計に関する因子、水準について、行動誘発の可能性を高める程度をそれぞれ明らかにした（図1）。これにより、高齢者の熱中症を予防することを意図した情報の設計が容易となった。

〔発表論文〕

1. 糸井川高穂：高齢者の熱中症の低減につながる行動誘発のための情報設計法の構築、日本建築学会学術講演梗概集、2018 年 9 月発表予定
2. 糸井川高穂：高齢者の熱中症予防行動誘発のための情報設計法の提案、日本建築学会環境系論文集、査読中

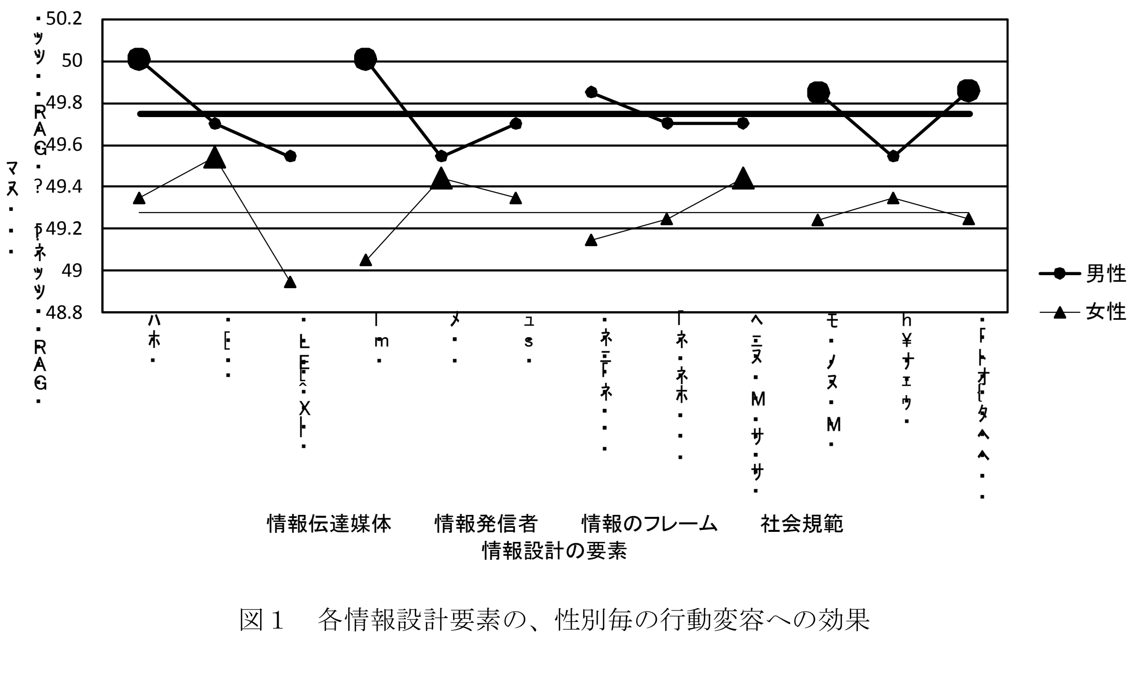


図１　各情報設計要素の、性別毎の行動変容への効果

【助成 34 -38】

半導体の技術革新を促進するM&Aのあるべき形の探求:データベースを用いた統計解析

研究者 大阪大学大学院経済学研究科 准教授 中川 功一

〔研究の概要〕

近年のハイテク産業では、技術的イノベーションの促進のため、M&A が積極活用されるようになっている。このときM&Aには2つの目的がある:新技術領域の「探索」と、既存技術領域の「深化」である。本研究では半導体産業のデータを用いて、いかなるときに探索型M&Aが、またいかなるときに深化型M&Aが行われるかを分析した。ポーターの競争戦略論を理論ベースに用いて推定を行ったところ、企業は利益を上げやすい競争条件において深化型を採用しやすく、利益が上がりにくい競争条件において探索型を採用しやすいことが明らかとなった。

〔研究経過および成果〕

オープン・イノベーションが叫ばれる現在、技術獲得を目的とした M&A がハイテク産業における企業の戦略手段として積極活用されるようになっている。既存研究では、この M&A が新技術領域の探索を行うもの(exploration)と、既存技術領域の深耕を行うもの(exploitation)の2つに分類することができ、かつそれぞれのタイプの M&A が狙ったような効果を実現できていることを明らかにしている。

先行研究に残った課題として、企業が M&A をどのような条件のもとで使い分けているのかが明らかになっていない。本研究ではそれを推定するために、ポーターの競争戦略論を用いて分析を行った。すなわち、競争戦略論の枠組みでは「企業は利益最大化をしようと行動する」「企業の行動はその企業が置かれた競争環境によって決まる」とする前提のもとで、競争環境によって企業行動とその結果としての利益を推定しようとする。この枠組みを用いて、本研究では、1) 現在の事業領域の市場規模が大きい時、2) 現在の市場シェアが大きい時、3) 現在の事業領域への利益依存が強い時に、企業は現市場から得られる利益を確保しようとすべく、深化型M&Aを採用しやすい(それらの条件が逆となる場合には、探索型 M&A が採用されやすい)とする仮説を立案した。

実証分析おいては、本研究では半導体産業を分析フィールドとした。データ収集期間は 2001-2013 年とし、製品品売上データに関しては、IHS CLT データベースを利用した。財務データについては各社の有価証券報告書を利用し、買収データについては各社のプレスリリースを利用した。最終的にデータ利用可能な 89 件の M&A が分析対象となった。このうち 47 件が深化型、42 件が探索型に分類された。

分析においては探索型を 1、深化型を 0 とし、これを従属変数としたロジスティック回帰分析を行った。結果は表の通りである。結果はすべての仮説が 5%以上の有意確率で支持されるものであった。すなわち、企業は競争戦略論の推定するように、利益を最大化するようにして M&A のタイプを選択していることが明らかとなったのである。

この結果からは、企業は利益を上げやすい状況では探索活動を避けがちであることが示唆される。自由な探索が可能となるだけの経済的余裕があるにも関

わらず、企業はそうした時には探索には積極的に行動を起こさず、利益ポテンシャルが悪化してから探索しがちであることが示唆されたのである。

表．ロジスティック回帰結果

Dependent variable: *探索型* ＝1, 深化型 ＝0.	Model 6	
	Beta	Sig.
Intercept	4.320	0.080†
Control variables		
企業規模	0.019	0.406
R&D 集中度	–3.577	0.249
World GDP 成長率	0.186	0.374
Hypothetical variables		
市場規模	–12.139	0.048*
市場成長率	–0.176	0.945
売上集中度	–4.196	0.001**
相対市場シェア	–1.887	0.028*
AIC	97.92	

n = 89. All two-tailed tests.
*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001.

〔発表論文〕

1．中屋雅夫・中村文亮・中川功一（2017）「半導体企業の収益性：売上高、取扱製品群数およびビジネスモデルによる差異 ―2001 年～2013 年の世界半導体主要 58 社のパネルデータ分析より」Discussion Papers In Economics And Business, Osaka University, 17-04.

2．Nakagawa, K. and Nakaya, M. (2017) Competitive positioning as a predictive factor of explorative and exploitative technological acquisitions: Evidence from the semiconductor industry. Proceedings of PDMA Research Forum 2017.

3．Nakamura, F. and Nakagawa, K. (2017) Individual development performance after being acquired: Evidence for social capital effect from semiconductor industry. Proceedings of PDMA Research Forum 2017.

【助成 34 -39】

高学歴女性の再就職に関する実態調査と教育機関をつうじた支援のあり方に関する調査研究

研究者　日本女子大学人間社会学部　教授　　大沢真知子

〔研究の概要〕

日本の女性労働者の特徴は、育児期に労働力率が低くなるM字の形をしていることから、多くの研究は、女性側に問題があると考え、女性の意識や、両立環境などにその原因を求めてきた。しかし、近年になるほど、キャリアの先がみえないなどで転職する女性が増えており、結婚や出産での離職を予想して男性と同じような育成の機会を与えない企業の育成のやり方に問題があることが明らかにしなっている。

本研究では、離職・転職・再就職のメカニズムを探るとともに、再就職に成功するための要因を探った。また、社会人大学や資格がどのように再就職の成功に影響しているかを探った。

〔研究経過および成果〕

本研究では、高学歴女性が離職に至るメカニズムを探った。

分析には、2011 年に日本女子大学現代女性キャリア研究所(RIWAC)が行った「女性とキャリアに関する調査」を使用し、加えて、インタビューを行った。

図1は、初職をやめた理由を結婚・出産要因と出産などの家庭要因と仕事要因とに分けて、出生年別に見たものである。これを見ると、就職氷河期世代と言われるバブル崩壊後に入社した世代で仕事要因が家庭要因を上回っていることがわかる。仕事要因には、仕事が合わなかった、仕事に希望が持てなかったといった理由が含まれている。

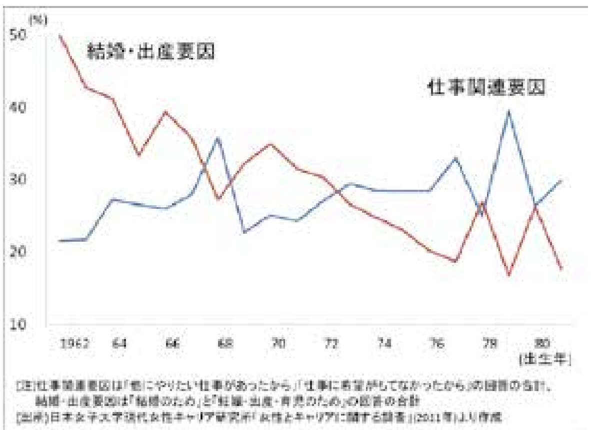


図1　高学歴女性の初職を辞めた理由の出生年別変化

興味深いのは、学卒時にキャリア意識が高い高学歴女性ほど、仕事上の理由でやめていることである。学卒時に、好きな仕事がしたいという高いキャリア志向を持っていた女性の37.1%が離職し1年未満に転職しているのに対して、仕事にはこだわらないが仕事と家庭を両立させたいと回答した女性の離転職職確率は26.3%となっている。また、できれば仕事にはつきたくないという女性は21.4%である(図2)。

図2　学卒時の理想の働き方別に見た就労パターン

なぜ学卒時にキャリア意識の高い女性ほど離職しているのだろうか。企業側の説明は、女性の離職率が高く、せっかく仕事を教えてもすぐやめてしまうので投資のもとがとれないということである。しかし、本研究の成果が示しているのは、そうではなく、機会が与えられないことによって、離職しているのである。これを経済学では予言の自己成就という。また、キャリア意識の高い仕事へのコミットメントの高い女性ほど離職しているので、やめて欲しくない女性の離職を促進していることで逆選択が起きているということである。

日本では再就職市場（転職市場）が整備されていない。そのために、転職後の処遇は転職前よりも悪くなっている場合も多い。高学歴女性の転職の前後で処遇、仕事のやりがい、仕事と家庭の両立、人間関係がどのように変化したのかを見たものである。

図3の転職型とは、1年未満の離職期間を経て再就職したもの、また、1年以上の離職期間を経て再就職したものは再就職型と分類している。

これを見ると、転職型の方が、再就職型よりも処遇、仕事のやりがい、仕事と家庭の両立の3項目で良くなったと回答している割合が高くなる。他方、人間関係では再就職型の方が満足と回答している割合が高い。ここから、離職期間が短いほど、再就職後の条件が良くなっていることがわかる。

図3　転職・再就職の評価

最後に資格が再就職にどの程度役に立っているかを見た。分野別に資格を活かしている就職している人の割合を見ると、高い順に、医療系（61%）、福祉系（51.2%）、法律系（44.9%）となっている。

しかし、就職に活かせる資格に資格取得者が集中しているわけではなく、それほど再就職には活かされない資格を取得しているケースがある。例えば、教員免許などは、取得者は多いが、その数に対して活かしている人は少ない。

日本の女性が資格を取る場合に、二つの意図があり、一つは、再就職のために難関の資格を習得するためであり、もう一つは、何かあった時に役に立つ「保険」としてとりあえず持っているという場合である。

調査の結果とインタビューから、資格があることが重要なのではなく、確かなキャリアビジョンのもとに資格を取ることが、再就職を成功させる鍵になることがわかった。

〔発表論文〕

1. 大沢真知子「企業コミュニティの再構築とワークライフバランスの導入」『日本労働研究雑誌』59巻、9月号、2017 年。
2. 大沢真知子「女性の活躍は保護から戦力の時代に」『保健の科学』59巻、10 月号、2017 年。〇〇
3. 大沢真知子「女子学生の成長を支える教育とは何か」『IDE 現代の高等教育』2～3 月号、2018 年
4. ‘Key determinants of successful labor market re-entry among highly educated women in Japan’（盧回男との共著論文）2018 Association of Asian Studies 学会にて発表予定
5. 大沢真知子『21世紀の女性と仕事』左右社、2018 年。

【助成 34 -40】

里海を題材とした海洋教育プログラムの評価:岡山県備前市立日生中学校の事例研究

研究者　立命館大学政策科学部　准教授　　桜井　良

〔研究の概要〕

人手をかけることで生物生産性と生物多様性が高くなった沿岸海域と定義される里海がわが国では全国に存在し、その持続的な保全管理のためには、地域住民を含む一般市民の里海の理解や保全活動への積極的な参加が必要である。本研究では、生徒が漁師と共に地元の里海の維持管理に携わる海洋教育に取り組む岡山県備前市立日生中学校に焦点を当て、同プログラムの教育効果を中学生及び卒業生(高校生)への聞き取り調査から明らかにした。定量的調査及び定性的調査の結果、中学生は高学年になるほど多様な言葉で日生の海、人と海とのつながり、そして漁師について説明できるようになっていること、また 3 年生では多くが日生の海に愛着を感じるようになっていることが分かった。また、一部の卒業生は高校生になってもアマモの研究を独自に行っており、同海洋教育プログラムが生徒のその後の人生にも影響を与える可能性があることが分かった。

〔研究経過および成果〕

我が国には、人手をかけることで生物生産性と生物多様性が高くなった沿岸海域と定義される里海が全国に存在し、海洋環境を持続的に管理してきた歴史がある。昨今、海洋汚染や漁師の減少など様々な課題に直面し、今後も里海を保全していくためには、里海について理解や関心を深めるための教育がこれまで以上に必要とされている。特に将来里海の管理を担っていく可能性がある沿岸地域の子どもへの教育は重要である。しかし、学校教育現場では、海洋教育を担当できる教員や教材が不足しているため、海洋教育の推進のためには、カリキュラムや国内の先進事例を蓄積するとともに、その価値や効果について理論構築をすることが求められている。本研究では、海洋環境の持続的な保全及び利用を行うための海洋教育の役割や意義を提示することを目指し、体験型海洋教育プログラムが中学生の意識や行動の変化に与える影響を明らかにした。

岡山県備前市日生町は漁師が積極的に海の保全管理を行ってきた里海を有することで広く知られており、同町に位置する日生中学校では、漁業組合や NPO などとの連携のもと全学年を対象とした総合学習として海洋教育に取り組んでおり、里海の保全を行う先進的な取り組みとして注目を集めている。具体的には、カキの種付け作業、アマモの種の選別・播種作業、そして漁師への聞き書き学習など体験型の教育プログラムが年間を通して行われている。本研究では日生中学校を対象として、里海の保全を目指す一連の教育プログラムが生徒に与える教育効果を明らかにし、海洋教育の意義を明らかにした。まず、日生中学校における海洋教育プログラムを生徒の反応や表情に注目しながら参与観察を行った。次に聞き取り調査を行い(n=108)、学年ごとの生徒の日生の海に対する意識や理解、地域への思い入れの違いについて、更に海洋教育を受ける中で生じた意識の変化を調べた。また、卒業生(高校生)に対する聞き取り調査を実施し(n=5)、同海洋教育プログラムが生徒の卒業後の人生に与える影響について調べた。

聞き取り調査の結果は定性的・定量的に分析し、高学年になるほど多様な言葉で人と海とのつながりについて、また経験に基づいて日生の海について説明できるようになっていることが明らかになった。日生の海の印象としては、1 年生は「汚れている」という回答が多かったが、3 年生は「数十年前はアマモが減り、赤潮が増えたが、漁師さんがアマモの取り組みをして元通りになってきた」など、歴史的背景を踏まえながら説明できる生徒が複数名いた。日生の海に対する親しみについては、1, 2 年生ともに親しみを感じる生徒と感じない生徒の割合は同程度であったが、3 年生はほぼ全ての生徒が親しみを感じていた。また 3 年生は大半の生徒が日生の海が好きだと答えており、その理由としては、「海洋学習で海の活動ができるから」、「地元を象徴するものだから」といった回答がよせられた。授業の感想としては「重労働・大変だった」、「漁師の大変さが分かった」という回答が2, 3年生ともに多かった。海の授業を受ける前後の気持ちの変化については、「海を大切にしたいと思うようになった」、「海に興味を持った」、「ゴミを海に捨てないようになった」、「漁師に感謝を感じるようになった」、「魚を大事に食べるようになった」といった回答が多かった。また「自分たちが動いたら地元の海が再生する」、「今度は自分が海を守る番だと思うようになった」など、今後も海の保全に自分事として取り組みたいという意欲を示した生徒が多かった。

テキストマイニングの形態素解析の結果、2, 3 年生と1年生との間で多く抽出された単語に違いがあり、2, 3 年生は「カキ」「アマモ」「漁師」「きれい」といった単語が多く出現した一方、1 年生では「捨てる」「汚い」という言葉が多く抽出された。

また、一部の卒業生は高校生になっても自主課題研究としてアマモの研究を独自に行っており、同海洋教育プログラムが生徒のその後の人生にも影響を与える可能性があることが分かった。

本研究から、日生中学校の海洋教育は、一部の生徒の意識や態度に変化を与え（「海やアマモの大切さを知った」など）、更に行動にも変化をもたらしていた（「海にポイ捨てをしなくなった」）ことが分かった。更に、高学年になるほど日生の海に対する親しみや愛着がある生徒が多くなっており、生徒の語りから、複数年にわたり継続して地元の海の管理に携わり、人々と交流してきたことが、意識に変化を与えたことが推測できる。

日生中学校の海洋学習は、地域をベースに学校と住民など関係者が連携する ESD（持続可能な発展のための教育）の一つの例であるといえ、更に里海を舞台に地域づくりに貢献している点で従来の海洋リテラシー教育とは異なる「里海教育」と呼べる。日生中学校の「里海教育」は学校と地域が連携して行う沿岸域の持続可能な管理のモデルケースといえる。

〔発表論文〕

1. 桜井良．2017．里海を題材とした中学生への海洋プログラムの教育効果測定．環境教育 26(3) 67.
2. 桜井良．2017．里海を題材とした中学生への海洋学習プログラムの教育効果．日本環境学会第43回研究発表会発表予稿集 68-69.
3. 桜井良．2017．里海教育プログラムの評価：中学生に対する事前・事後調査より．日本環境教育学会第28回年次大会研究発表要旨集 86.

【助成 33 -03】

生体ナノ材料の構造･機能に着目した加齢性疾患治療法開発

富山県立大学　工学部　教授　　村上　達也

〔研究の概要〕

加齢黄斑変性(AMD)は、失明に至る後眼部難治疾患であり、加齢が最大のリスクファクターである。本研究では、世界初の AMD 点眼治療法を開発することを目的として、生体ナノ材料(高比重リポタンパク質(high-density lipoprotein, HDL))に注目した。HDL の構成タンパク質(apoA-I)に様々な cell-penetrating peptide (CPP)を融合し、さらに様々な構造のリン脂質と混合することで HDL 変異体ライブラリーを作製した。さらにタンパク質とリン脂質との混合比を変えることで 10-25 nm の間でサイズも制御した。蛍光性モデル薬物を用い、その後眼部送達効率を指標としてスクリーニングし、HDL 変異体構造を最適化した。最適化された HDL 変異体に抗血管新生薬(pazopanib, Pzp)を内包させて AMD モデルマウスに点眼すると、顕著な治療効果が得られた。

〔研究経過および成果〕

HDL 変異体の後眼部への点眼ドラッグキャリアとしての可能性を検証するため、apoA-I の C 末端に CPP の 1 つである TAT ペプチドを有し、リン脂質として 1,2-dimyristoyl-sn-glycero-3-phosphocholine を含む HDL 変異体を作製し、モデル薬剤として蛍光色素 coumarin-6 を内包させた。この複合体(HDL/TAT)を正常マウスに点眼し、30 分後に眼球を摘出し、その凍結切片における後眼部網膜の coumarin-6 蛍光を観察した(Figure 1a)。視神経乳頭周囲に coumarin-6 蛍光が検出され、DMPC-HDL/TAT 点眼時の蛍光強度は、TAT のない点眼製剤(DMPC-HDL)のそれよりも高かった(Figure 1b)。このことは、点眼により HDL は後眼部へ coumarin-6 を送達でき、TAT ペプチドはその送達効率を改善できることを示唆する。

これらの結果を基に、後眼部への coumarin-6 送達効率を指標として HDL 変異体の構造を最適化することを試みた。具体的には、リン脂質として 1,2-

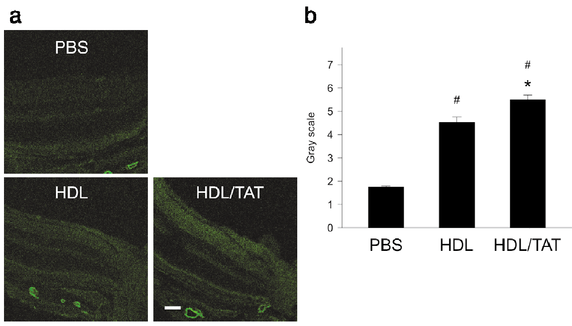


図 1. HDL 点眼による後眼部への物質輸送
a.マウス後眼部の coumarin-6 蛍光画像, b. 後眼部での coumarin-6 蛍光強度(the mean ± standard error)　Bar, 50 µm.

dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine 、1,2-distearoyl-sn-glycero-3-phosphocholine を、CPP として octaarginine、Penetratin (PEN)を用いた。CPP を TAT に固定して 3 種類のリン脂質を評価した結果、検討した中で最も長いアルキル鎖を有する HDL/TAT が最も良好な結果を示した。次にリン脂質を DSPC に固定し、3 種類の CPP を評価すると、PEN を含む変異体が最も送達効率が高くなった。尚、これ

らの変異体の構造および物性に大きな違いはなかった(Data not shown)。

ドラッグキャリアのサイズもまた送達効率の重要な決定因子である。10，15，20，25 nm の平均粒子径を有する 4 種類の PEN 結合 HDL を、HDL 再構成時のタンパク質／脂質混合比を調節することで作製した。Coumarin-6 を用いて同様の実験を行うと、15 nm の HDL 変異体が最も高い送達効率を示した。この変異体を HDL/PEN と表記し、以後の実験に用いた。

最後に、抗血管新生薬 pazopanib (Pzp)を用いて、Pzp 内包 HDL/PEN (Pzp@HDL/PEN)の前臨床試験を行った。AMD モデルマウスとして、laser-induced choroidal neovascularization (CNV)マウスを用いた。比較対象として、Pzp 内包 ssLip (Pzp@ssLip)と臨床試験が行われたことのある Pzp 内包シクロデキストリン(Pzp@Captisol)を用いた。AMD モデルマウスに 1 日 2 回、1 週間各種サンプル点眼後に眼球を摘出し、CNV エリアを免疫染色した。治療効果判定は CNV エリアを定量解析することにより行った。Figure 2 に示すように、Pzp@HDL/PEN 点眼群で顕著な CNV エリアの減少が見られた。この効果は他の 2 つの点眼製剤よりも高かった。興味深いことに、CNV エリアの減少は Pzp を内包させていない HDL/PEN でも見られた。以上の結果から、HDL/PEN は AMD モデルマウスに対して Pzp を治療域濃度のレベルで後眼部へ送達し、自身も治療効果を示すドラッグキャリアであることが明らかになった。

眼組織の1つであり、網膜への移行ルート上に存在する強膜は、サイズ依存的な物質浸透性を示し、抗体程度までの大きさ(~10 nm)の物質であれば浸透させることが知られている。また AMD の病態には、慢性炎症、酸化ストレスが含まれる。従って、今回明らかとなった Pzp@HDL/PEN の他の点眼製剤に対する優位性は、HDL の構造(ドラッグキャリアとしては最小の部類)と機能(抗炎症作用、抗酸化作用、等)に起因すると考えられる。今後、薬物内包 HDL/PEN 点眼は、AMD を含む様々な後眼部難治疾患への応用が期待される。

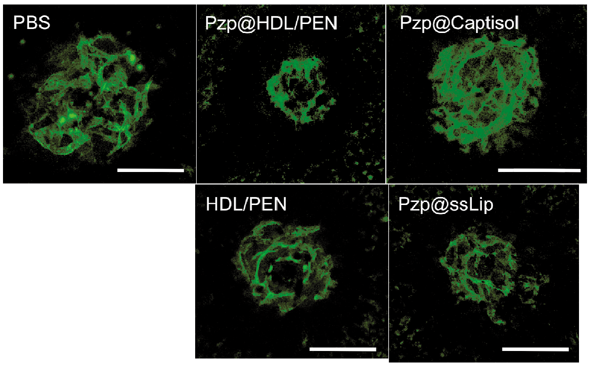


図 2. 薬物内包 HDL 点眼の前臨床試験
図はマウス後眼部の脈絡膜新生血管(CNV)エリアを示す。抗血管新生薬(pazopanib, Pzp)を原薬として用い、各種点眼製剤間で比較した。 Bar, 100 μm.

本研究成果は、京都大学大学院医学研究科眼科学(辻川 明孝 教授)との共同研究に基づくものです。

〔発表論文〕

Kenji SUDA, Tatsuya MURAKAMI*, Norimoto GOTOH, Ryosuke FUKUDA, Yasuhiko HASHIDA, Mitsuru HASHIDA, Akitaka TSUJIKAWA, and Nagahisa YOSHIMURA, High-density lipoprotein mutant eye drops for the treatment of posterior eye diseases, *Journal of Controlled Release*, in press (2017), http://authors.elsevier.com/sd/article/S0168365917308702

【助成 33 -24】

Sb 系半導体材料を用いた中赤外線発光素子に関する研究

研究者　東京電機大学工学部　助教　　藤川　紗千恵

〔研究の概要〕

波長 3～15μm の中赤外線から遠赤外線波長領域は，各種物質の吸収領域でありガス検知や人命救助等の応用が期待される。しかし，現在その領域における波長選択可能で高輝度な発光光源は存在しない。そこで本研究では、Ⅲ-Ⅴ族半導体結晶の中で一番エネルギーバンドギャップが小さい InSb に新たに窒素を導入した InSbN 結晶を発光層に用いることで，更なる低エネルギー化を行い InSb 発光層では発光不可能な 5-15μm の発光素子を開発することを目的とする。

〔研究経過および成果〕

有機金属気相成長（metal organic chemical vapor deposition : MOCVD）法を用いて、InSbN の作製を行った。結晶成長材料には、trimethylindium-di-I –propylamineadduct (TMI n -adduct) 、trimethyl antimony (TMSb) 、ammonia (NH3) を使用した。試料は、SI-GaAs(001) JUST 基板上に成長した。まず、酸化膜脱離として GaAs 基板の基板温度上昇時に H_2、N_2、TMSb(Sb)を各々用いてフローを 10 分間行い、表面状態にどのような影響を与えるのかを調査した。図 1 には、ノマルスキー型微分干渉顕微鏡で観察した(a)GaAs 基板、(b)H2 フロー、(c)N2 フロー、(d)Sb フロー後の表面写真を示す。H_2 フローと N_2 フローではほとんど差がなく、Sb フローでは表面に欠陥と思われる凹凸が多数確認された。図 2 は、AFM 測定により観測した(a)GaAs 基板、(b)H2 フロー、(c)N2 フロー、(d)Sb フロー後の表面像を示す。走査範囲は、500nm×500nm で行った。AFM 像より、H_2 を用いた場合に RMS(自乗平均粗さ)が一番小さいことがわかり、Sb フローでは、RMS 値が 2 倍程悪化したことが観測された。さらに、走査範囲 20μm×20μm で測定した Sb を用いた表面の RMS については，AFM の針が飛んでしまう程の大きな凹凸が見られた。

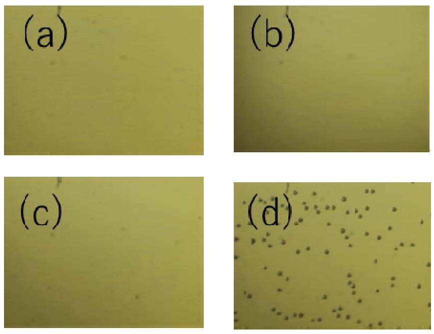


図 1、ノマルスキー型微分干渉顕微鏡観察写真
(a)GaAs 基板表面、(b)H_2 フロー、(c)N_2 フロー、(d)Sb フロー

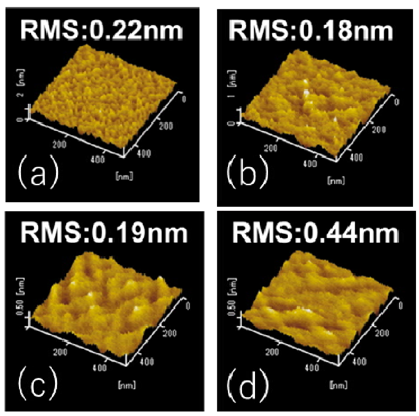


図 2、AFM で観察した表面像
(a)GaAs 基板表面、(b)H_2 フロー、(c)N_2 フロー、(d)Sb フロー

次に、各々のフロー条件上に H_2、N_2、Sb フローによる InSb 薄膜の成長を行った。図 3 に各フロー条件における AFM で観察された InSb 薄膜表面像を示す。

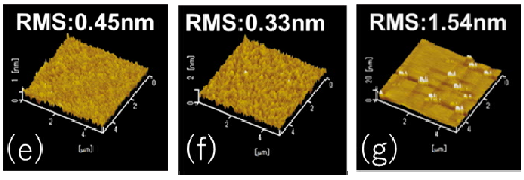


図 3、AFM で観察した InSb 表面像
(e)H_2 フロー、(f)N_2 フロー、(g)Sb フロー

図 3 より，H_2 と N_2 フローを行った表面にはほとんど凹凸が確認できないのに対し，Sb フローで成長した InSb 表面には明らかな凹凸が確認された。

図4は、Sb脱離で成長を行ったGaAs基板上InSb薄膜の XRD 測定の(004)2 θ - ω スキャンによるスペクトルを示す。図 4 より、結晶ピークは 56.8°であり、InSb 薄膜の結晶ピークの文献値である 56.7°付近にピークが観察された。

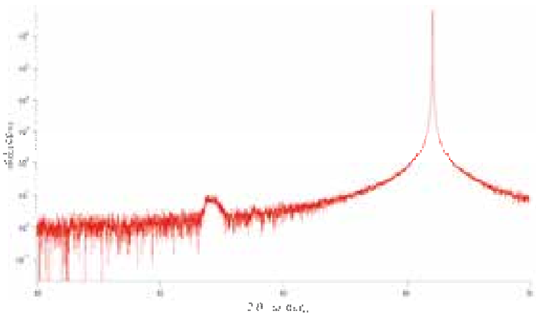


図 4、GaAs 基板上 InSb 薄膜の XRD 測定の(002)2 θ - ω スキャンによるスペクトル

次に、InSb 薄膜に NH_3 を導入して InSbN 薄膜の作製を行い、NH_3 流量を変化させて試料の各特性の評価を行った。

図 5 は、GaAs 基板上 InSbN 薄膜の XRD 測定の(004)2θ-ω スキャンによるスペクトルを示す。InSbN のピークが InSb のピークからシフトしており、窒素が導入されていることが確認できた。また、NH_3 の流量が 25,100,500sccm では結晶ピークが観察されたが、NH_3 の流量が 2000sccm 以上になると結晶ピークが観察されなかった。これは、閃亜鉛鉱型構造からウルツ鉱型構造に変化したものと考えている。また、図 5 より，InSbN のピークは InSb よりもわずかに右側にピークしており格子定数が小さくなっていることがわかる。このことから、結晶内に窒素が導入されてボーイング効果が発生し結晶のバンドギャップが狭まっていると考えられる。 しかし、InSb 薄膜同様、InSbN 薄膜の結晶ピークも強度があまり出ていない。この原因としては、In と Sb フローの流量が少ないこと、成長時間が短いことなどが考えられる。また、半値幅が広いことやピークが 2 つ観察されたことについても、InSb および InSbN 以外の不純物が結晶内に混在している可能性が考えられる。

以上の結果より、まだ最適化が必要であるが InSbN 薄膜が作製可能であることが明らかとなり、中赤外から遠赤外線発光が可能であることが示唆できた。

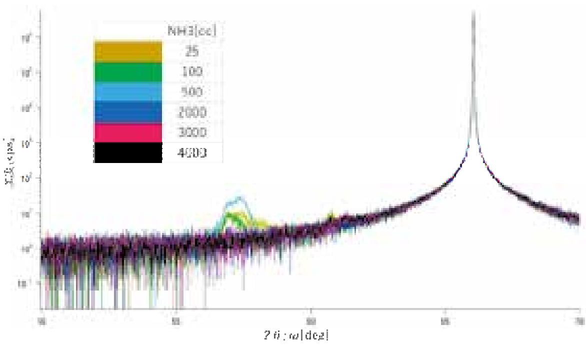


図 5、GaAs 基板上 InSbN 薄膜の XRD 測定の(002)2 θ - ω スキャンによるスペクトル

【助成 33 -25】

視線情報を用いた機械操作の熟達メカニズムの分析

研究者 早稲田大学 理工学術院総合研究所 研究院講師 亀﨑 允啓

〔研究の概要〕

視線計測装置を用いて作業中の視線情報を計測し，そのときの作業効率や作業安全性との対応関係を多元的に分析することで，視線情報と機械操作の熟達のメカニズムを客観的に明らかにする．そのために，まず，(1) VR シミュレータを用いて，視線情報と作業パフォーマンス(作業効率など)との関連性分析のための基礎理論の検討を行う．次に，(2)実映像での評価を行うための小型スケールモデルを開発し，(1)で開発した基礎理論の評価を行う．以上のプロセスから，視線情報を利用した機械操作の熟達度評価手法の有用性を検証する．

〔研究経過および成果〕

カメラ映像を用いた遠隔操作システムにおいて，作業の高効率化が課題となっているが，そのボトルネックの1つに「カメラ映像から適切な情報を抽出する認知技術不足」が挙げられる．そこで，本研究課題では，遠隔操作時のオペレータの視線を視線計測装置にて計測し，当該作業における視線情報と作業効率や作業安全性との対応関係を分析する．これによって，オペレータの視線と機械操作の熟達のメカニズムを定量的に明らかにすることを目的とする．以下に，本研究によって得られた研究成果について概説する．

1．分析手法

本研究課題で対象とする視覚提示システムは，図1に示すように6つの映像モニタを有している．研究者が保有しているVRシミュレータ(図1)，および新たに開発したスケールモデル(図2)を用いて，オペレータの作業中の視線情報(どのモニタ，どの位置など)を計測し，作業パフォーマンス(作業時間，環境との誤接触回数など)との関連性を，統計的手法を用いて分析し，視線情報におけるどの物理量が機械操作の熟達と関連しているのかを定量的に捉える．視線計測は，視線計測装置(QG-PLUS XL，80fps)を用いて行った．モニタ上の座標だけでなく，視線の移動パターンや停留箇所(時間)の算出も行うことができる．以下に提案する分析手法について述べる．

(0)状態ごとの分析： 分析の際は，「どのような作業状況で見たか」というコンテキストが極めて重要になることから，機体移動/物体把持/高負荷時などの状態に分類する手法(研究者が開発してきた状態分類技術)と組み合わせて，視線関連情報を細分化する．

(1)相関分析： 機械操作の熟練度を表す作業時間の短さや誤接触回数の少なさと，視線関連情報について相関分析を行う．これにより，静的な関連付け(効率がよいときはこのような視線になる)がなされる．

(2)経時的分析： 熟達機序の解明には，動的な関連付けが必要となる．そこで，時系列処理に基づく微分的要素を抽出し，その変化傾向を捉えることで，操作の変化(つまり，熟達)を創発する飽和条件を導く．

(3)注視パターンによる分析： 6画面の視線をそのまま分析することは難しいため，階層クラスタ分析の1つであり，ノイズに対して頑強な「ウォード法」を用いて注視パターンをクラスタリングする．この視線パター

図１ VR シミュレータと操作インタフェース

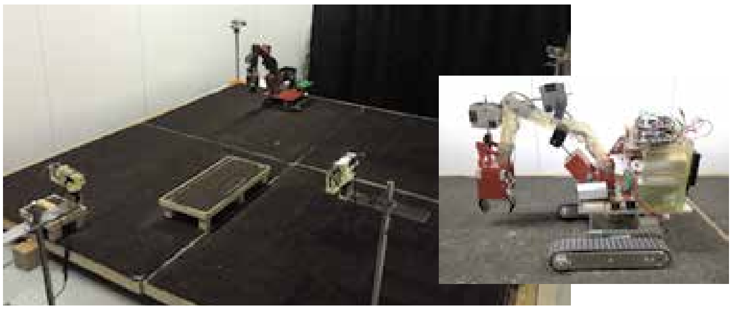


図２ 開発したスケール環境とスケールモデル

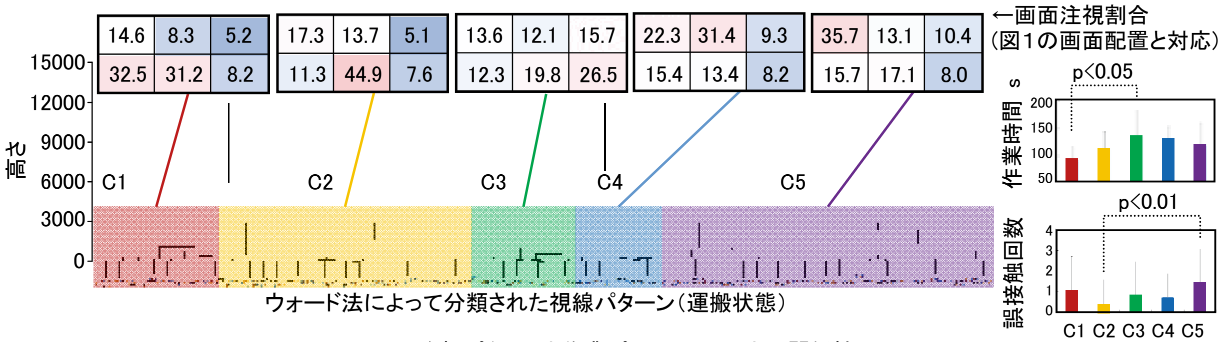


図３ 注視パターンと作業パフォーマンスとの関係性

ンと作業パフォーマンスとの関連性を分析する.

2. 視線情報と作業パフォーマンスの関係性

分析の結果，熟達モデルの構築にとって重要な以下の知見が得られた.

(1)相関分析： 作業時間の短さと手先拡大映像(図1：画面①)の注視時間割合，誤接触回数の少なさと危険回避映像(図1：画面②)の注視時間割合に正の相関があることが分かった.

(2)経時的分析： はじめのうち，オペレータの視線パターンは大きなばらつきを有するが，2～3 回の試行で固定されてしまうことが分かった.

(3)注視パターン：作業パフォーマンスと高い相関を有する注視パターンが存在すること(図3)，さらに，それらが状態に応じて異なることが分かった.

3. まとめと今後の展望

提案した視線分析手法を用いることで，熟達モデルの構築にとって重要な知見が得られた. これらを用いることで，遠隔操作訓練時の熟練度の評価や，熟達を早めるための情報支援を提供できると考えている. 質の高いオペレータの確保は，災害復旧・復興の早期化と密接に関連することから，社会的にも貢献できると予想される. また，自動車の運転支援や手術支援ロボットなどの人間機械系への応用も期待される.

〔発表論文〕 論文：計 10 件，招待講演：計 1 件

1. 亀﨑，佐藤，楊，岩田，菅野：遠隔操作オペレータの環境把握性を高める非映像化情報の可視化と推奨注視映像への誘導，Robotics Symposia，50-55，Mar. 2016.

2. R. Sato, M. Kamezaki, S. Sugano, and H. Iwata: Gaze pattern analysis in multi-display systems for teleoperated disaster response robots, IEEE SMC, 3534-3539, Oct. 2016.

3. R. Sato, M. Kamezaki, S. Niuchi, S. Sugano, and H. Iwata: A pre-offering view system for teleoperators of heavy machines to acquire cognitive maps, IEEE SSRR, 61-66, Oct. 2017.

【助成 33 -37】

製品開発エンジニア行動の日中韓比較―ウェアラブルセンサから得られたビッグデータ分析

研究者　一橋大学 経済研究所 教授　都留 康
共同研究者 一橋大学イノベーション研究センター准教授 中島賢太郎
静岡県立大学経営情報学部講師 上原克仁

〔研究の概要〕

本研究では，定量的な対面コミュニケーションデータベースを構築するため，ウェアラブルセンサによって，法人顧客向けソフトウェア・サポート業務を行う企業の２つの事業所の社員同士の対面コミュニケーション行動を収集した．このデータを用い，まず，ソシオグラムによってコミュニケーション・ネットワークの構造を明らかにした．次いで，各社員の成果データ（生産性）を用い，コミュニケーションが個人および事業所の生産性に与える影響を分析した．その結果，コミュニケーション・ネットワークの結節点を意味する「媒介中心性」の上昇は事業所の成果に頑健に正で有意な影響をもつことが示された．

〔研究経過および成果〕

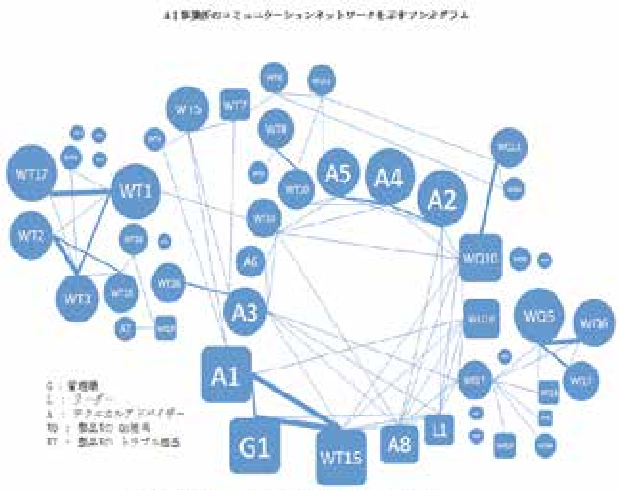
知的業務においてコミュニケーションは重要である．知的生産のためには他者の知識に学ぶことは必須であるし，日々生じる問題の解決を情報交換によって図ることができる． しかし，コミュニケーションについての定量的把握は困難であり，聞き取り調査や質問紙調査によるデータの収集がこれまで中心となっていた．こうした調査方法では，主観に左右されないデータを得ることはむずかしい．また，聞き取り調査や質問紙調査では，一時点の横断面データによる分析であることがほとんどであり，コミュニケーションおよび成果指標の両者に相関する個人の観測されない特性の統計的制困難であった．

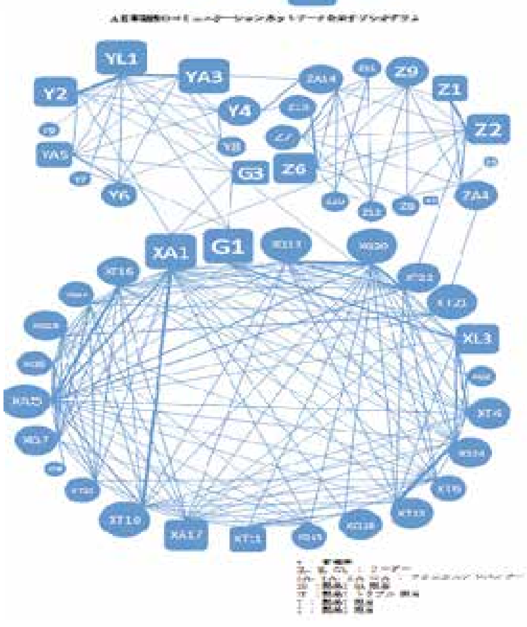
近年，センサ技術の向上により，個人間のコミュニケーション行動のリアルタイムでの収集が可能となった．その端緒となったのは日立製作所によって開発されたウェアラブルセンサであり，これを用いたコミュニケーションの状況把握や，それが生産性に与える影響への研究が近年行われるようになっている．本研究では，法人顧客向けソフトウェア・サポート業務を行うA社の，所在県の異なる２事業所を対象に,日立製作所のウェアラブルセンサによって社員間のコミュニケーションの計測をそれぞれ20日間行った．そして，得られたコミュニケーションの客観的データとA社から入手した詳細な業務成果データをもとに，社員間のコミュニケーションが，社員個人，お

よび事業所の生産性に与える影響について，実証的に明らかにした．

本研究の主な結果は以下の通りである．

(1)まず，コミュニケーション・ネットワークの構造を描いたグラフから，紐帯の本数や密度など，2 事業所間で大きな違いが観察された（2 事業所の図参照）．





(2)また，雇用形態における正規・非正規を問わず，対面コミュニケーションにおいて媒介的な役割をしている担当者が各事業所に存在することが確認された．

(3)さらに，得られたコミュニケーションデータおよび A 社より提供された各社員の業務成果データを用い，社員の固定効果を制御した推定を行った．その結果，社員のコミュニケーション・ネットワークにおける中心性，特に，コミュニケーション・ネットワークの結節点に位置していることを示す指標である「媒介中心性」の上昇が，その社員が主導する業務の成果を向上させることが示された．これは，知的業務におけるコミュニケーションが知識・情報交換であるがゆえに，直面した問題に対し，適切に他の社員からコミュニケーションによって情報収集することが重要だとの解釈を示唆する．

〔発表論文〕

1. 中島賢太郎, 上原克仁, 都留康（2018 年）「企業内コミュニケーション・ネットワークが生産性に及ぼす影響―ウェアラブルセンサを用いた定量的評価」『経済研究』第 69 巻第 1 号, pp.18-34

2. Kentaro, Nakajima, Katsuhito, Uehara, and Tsuyoshi, Tsuru "Impact of Workplace Communication Networks on Productivity: A New Approach Using Wearable Sensors," Society of Labor Economists 第 23 回トロント大会にて 2018 年 5 月発表予定

3. 都留康，徳丸宜穂，福澤光啓，中島賢太郎（2018 年）「製品開発における上流工程管理と人材マネジメント―開発成果に対する効果の検証」『経済研究』第 69 巻第 1 号, pp.35-54

【助成 32 -34】

映像のバリアフリー化を実現する社会の形成:
聴覚障害者および視覚障害者の映画鑑賞実態に関する調査

研究者 秋田大学大学院 理工学研究科 助教　中島 佐和子

〔研究の概要〕

聴覚や視覚に障害を有する方々の映画館における映画鑑賞実態を調査した。聴覚障害者は邦画参加率が、視覚障害者は洋画参加率が一般と比べて低かった。しかし、邦画と洋画の両方を含めた映画参加率は 55.3%から68.4%と一般と同程度に高かった。視覚と聴覚の両方に障害を有する盲ろう者は、調査対象者の56.0%が盲ろうになってから映画館で映画を鑑賞した経験があると回答した。さらに上映会での実践を通じて、盲ろう者の社会参加を促す機会としての映画館での映画鑑賞の可能性と役割、情報支援技術の有用性について知見を得た。

〔研究経過および成果〕

研究背景と目的

日常生活を豊かにし楽しく文化的な活動を行う上で映画やテレビ鑑賞は欠かせない。一方で、加速化する高齢者人口の増加を背景に様々な身体特性を有する人々(聴覚障害や視覚障害等)の割合が増加している。映画鑑賞のバリアフリー化への障害当事者からの期待は非常に高く、高齢者や障害のある人たちへの情報保障という観点も含めて、その実現がいち早く望まれる。しかし現状では、これらの人々が映像コンテンツを自由に鑑賞できるシステムは充分に整備されていない。特に、視覚と聴覚の障害を併せ有する盲ろう者の映画鑑賞については、未だ可能性の議論にさえ至っていない。そこで本研究では、聴覚障害者、視覚障害者および盲ろう者の映画鑑賞実態を調査し、映画のバリアフリー化に必要な今後の課題とその社会的インパクトを定量的に得ることを目的とした。

研究成果

1.　聴覚障害者および視覚障害者に対する調査

聴覚障害者および視覚障害者の映画参加率(過去 1 年間に映画館で映画を観た回数)は一般とほぼ等しく(55.3%から 68.4%)、高いニーズを確認した. 一方、聴覚障害者は邦画の比率が(25.3%)、視覚障害者は洋画の比率が(29.7%)一般の 54.9%と 45.1%(2017 年映連調べ)に比べて低いという現状を確認した。

2.　盲ろう者に対する調査と映画上映会の実践

娯楽や芸術表現の多くは視覚や聴覚を通して訴えるものが多く、盲ろう者にとっての娯楽の在り方、とりわけ芸術に触れる機会はこれまで大きく阻害されてきたといえる。本研究では、盲ろう者の映画館での映画鑑賞実態を把握すると同時に、盲ろう者を対象に長編映画(韓国ドキュメンタリー映画、約 87 分)を用いた字幕および音声ガイド付き映画上映を実施した。盲ろう者 26 名に対する聞き取り調査の結果、上映会以前にも、全体の 56.0%が盲ろうになってから映画館で映画を鑑賞したことがあると回答した。本調査では、「盲ろうになって以降」の映画鑑賞経験について質問していることから、1 年間の映画鑑賞回数で比較すると、聴覚障害者や視覚障害者に比べて盲ろう者の映画館での映画鑑賞率は低いと考えられ

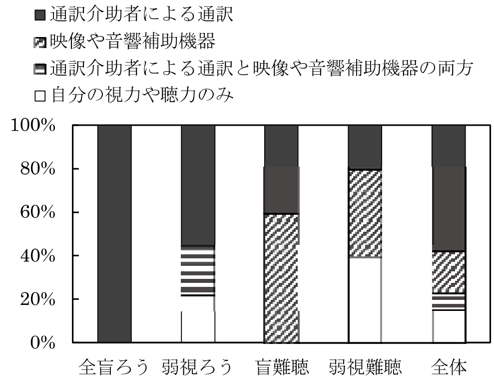


図 1 映画鑑賞時の情報取得手段

る。しかし、盲ろうになってからも映画鑑賞を続けている盲ろう者も多く、映画館での映画鑑賞に対する興味やニーズの高さを確認できた。

上映会では、通常の映画上映に加えて、盲ろう者が映画鑑賞するために最低限必要な、個別モニタやヘッドホンなどの従来型の映像や音響補助機器の設置、通訳・介助員のための座席位置や明るさの調整が必要であった。映画鑑賞時の情報取得手段を図 1 に示す。また、手話（触手話を含む）・指点字等の通訳を介した情報取得や限られた視力や聴力による鑑賞は集中力を要し疲労も蓄積しやすいため、休憩という配慮も必要であった。しかし、これらの工夫を施した結果、上映時は全体の 26.9%が個別モニタやヘッドホンなどの従来型の映像や音響補助機器を利用し、また、50.0%が字幕または音声ガイドのどちらか一つでも利用できた。さらに、上映会での映画体験に対しても障害の状態によらず有意にポジティブな反応を得た（表 1）。弱視ろう、盲難聴、弱視難聴の盲ろう者では 42.1%が、「他者との場の共有や交流」という映画館ならではの良さを自発的に感じることができた（表 1）。

以上より、聴覚障害者や視覚障害者に対しては、音声ガイドや字幕の提示技術やシステムを整えることで映画館での映画鑑賞機会の増加が期待できる。一方、

表 1 上映会での映画体験に対するコメント（抜粋）

極性 [1]	障害状態	コメント
4	弱視ろう	一人で家で DVD をみるよりも、大勢で一緒に見た方が楽しい。鑑賞後に感想も話し合えるので良い。
	弱視難聴	映画館で見るという味わいがよかった。同じ映画を大勢で見るのがいい。家で大音量では見れないので。
5	全盲ろう	本は疲れて読めないので、今日の方が絶対に良かった。10 年ぶりでとても心配だったが、とても感動した！手話が出てくる映画だったら回数が増える。バリアフリー映画なら見てみたい。
	盲難聴	映画館の良さは音が良い。家では小さい。音以外にも、体で体感したりするから、盲ろう者は体で感じるものがあれば良い。外に出るということが良い。メールを見たり手間をかけるのは楽しみになる。終わった後はみんなで話すから楽しくて活力になる。

(1) ブラインド分析により得られたコメントのポジティブ・ネガティブ度。数値が高いほどポジティブ度が高い。

盲ろう者に対しては、その可能性を見出した段階ではある。しかし、通訳などの盲ろう者特有の情報取得の在り方を確認しながら技術で補える部分を積極的に考慮することで、映画というコンテンツや映画館という空間が、他者との交流を通じて世界と繋がる糸口になり得ると確認できた。

〔発表論文〕

1. 中島佐和子，大河内直之，水流源彦，山上徹二郎，“盲ろう者を対象とした映画上映の可能性と予備的調査”，信学技報，115(491), WIT2015-100, pp. 65-70, 2016.
2. S. Nakajima, N. Okochi, N. Iizumi, M. Tsuru, K. Mitobe and T. Yamagami, “The Possibility and Challenges for Deaf-Blind Individuals to Enjoy Films in Theater”, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (JACIII)*, 21(2), pp. 350-358, 2017.

以下URLよりカラー版PDFをダウンロードできます

http://casiozaidan.org/naiyou/past/

公益財団法人　カシオ科学振興財団
〒151-8543　東京都渋谷区本町一丁目6番2号
TEL（03）5334-4747
平成30年5月1日　発行