

研究助成
成果報告論文集
(平成25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29回(平成23年度) 研究助成

第29回(平成23年度)研究助成一覧

自然科学部門

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
1	貴金属・希土類元素フリー高磁気異方性合金を用いたナノスケール磁気抵抗素子の創製	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 准教授 水 上 成 美
2	超小型機械デバイスの低消費電力化に向けたグラフェンの超潤滑メカニズムの微視的解明に関する研究	東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教 石 田 忠
3	随伴変数法に基づく流体場に関する感度解析とトポロジー最適化への適用	京都大学大学院工学研究科 助教 山 田 崇 恭
4	小児成長評価のための小型オープン手専用MRIの開発	筑波大学大学院数理物質科学研究科 助教 寺 田 康 彦
5	電氣的ノイズ刺激を用いたヒト運動制御機能回復・向上システムの開発	立命館大学スポーツ健康科学部 助教 木 村 哲 也
6	高圧STMによる有機導体の圧力効果の研究	北海道大学大学院工学研究院 准教授 市 村 晃 一
7	迅速なメッセージ伝播を活用できるソーシャルメディアからの動的なコミュニティ発見手法の開発	北海道大学大学院情報科学研究科 准教授 吉 田 哲 也
8	高性能可変デジタルフィルタの適応制御手法に関する研究	東北大学大学院工学研究科 助教 越 田 俊 介
9	アトムプローブを用いた異種原子クラスターの観察および極浅活性層形成の制御	東北大学金属材料研究所 助教 清 水 康 雄
10	レアメタルを使用しない太陽電池用新規化合物半導体の創製	群馬大学大学院工学研究科 准教授 尾 崎 俊 二
11	ワイヤで連結された作業機の遠隔駆動による移動型広域作業システムの開発	埼玉大学大学院理工学研究科 助教 程 島 竜 一
12	AFM陽極酸化法による酸化グラフェンナノ構造の作製とその光検出器応用に関する研究	東京大学ナノ量子機構 特任助教 増 渕 寛
13	シリコンフォトニック結晶光共振器によるミセル化カーボンナノチューブの発光増強	東京大学大学院工学系研究科 准教授 加 藤 雄 一 郎
14	太陽光を利用した人工光合成半導体チップの創生	東京工業大学大学院理工学研究科 教授 波 多 野 睦 子
15	光近接場励起輸送デバイスに関する研究	山梨大学大学院医学工学総合研究部 教授 小 林 潔
16	テラヘルツ技術によるガスハイドレート分解メカニズムの解明	名古屋大学大学院工学研究科 助教 竹 家 啓
17	ワイヤレス給電を用いたゼロワイヤーロボットアームの研究	豊橋技術科学大学エレクトロニクス先端融合研究所 ティニエアトラック助教 真 下 智 昭
18	固体中の輸送現象の新しいメゾスケールシミュレーション法の開発	京都大学大学院工学研究科 准教授 松 本 充 弘
19	三次元多孔質アルミニウムの電析法の開発とそのリチウムイオン電池正極集電体への応用	京都大学大学院エネルギー科学研究科 助教 三 宅 正 男
20	自己組織化InAs量子ドットのサイズ制御による1ミクロン帯広帯域光源の開発	和歌山大学システム工学部 准教授 尾 崎 信 彦

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
21	光波回路を用いた集積型多点同時計測用レーザドップラー速度計の基礎検討	香川大学工学部 准教授 丸 浩 一
22	金属化合物中のスピン偏極伝導電子数の構成元素依存性の評価	青山学院大学理工学部 助教 水 崎 壮 一 郎
23	磁界測定法を用いたナノ粒子の安全性評価	北里大学医学部 講師 工 藤 雄 一 朗
24	メカトロニクス系における非線形特性の自動推定と補償	東京工科大学コンピュータサイエンス学部 教授 余 錦 華
25	超高速磁気センサのための表面プラズモン共鳴の巨大磁気応答性と光誘起起電力	日本大学理工学部 助教 芦 澤 好 人
26	ヒト歩行解析に基づく軟弱路面での2足ヒューマノイドロボットの歩行安定化に関する研究	早稲田大学理工学術院 研究院講師 橋 本 健 二
27	細胞代謝活性イメージングゲルシートの開発に関する研究	東北大学大学院工学研究科 助教 長 峯 邦 明
28	認知症予防のための適度な有酸素運動を誘発する足底部硬さ提示デバイスの開発	山形大学大学院理工学研究科 准教授 菊 池 武 士
29	超音波DDS用センサ型マイクロカプセルの開発とその機械特性評価	同志社大学理工学部 准教授 小 山 大 介
30	脂肪由来間葉系幹細胞移植による慢性脱神経治療法の開発	大阪大学大学院医学系研究科 助教 富 田 興 一
31	哺乳類受精卵の機械的刺激感知機構の解明と胚培養に関する影響	岡山大学異分野融合先端研究コア 助教 松 浦 宏 治
32	脳活動計測による手術支援ロボットの操作の直観性の評価に関する研究	早稲田大学理工学術院 研究院准教授 小 林 洋

人文科学部門

No	研 究 テ ー マ	代 表 研 究 者
33	直観的意思決定に関する認知神経メカニズムの解明	京都大学大学院医学研究科 准教授 高 橋 英 彦
34	文科系大学院博士課程の教育プログラムの革新と新たな人材養成モデルの構築に関する総合的研究	東京大学大学院教育学研究科 教授 橋 本 鉦 市
35	新華僑の組織間関係に関する国際実証研究 ——温州人、福建人、広東人のトポロジーとパフォーマンス	一橋大学イノベーション研究センター 教授 西 口 敏 宏
36	我が国農業の未来を創るIT農業者の育成	九州大学大学院農学研究院 准教授 岡 安 崇 史
37	PDA端末を利用する医療技能教育・評価システムの有効性検証	東京女子医科大学医学部 講師 大久保 由美子
38	農山漁村における新たな地域支援人材の育成に関する実証的研究—人的支援施策の導入プロセスと評価軸の検討	法政大学現代福祉学部 准教授 図 司 直 也

※ 所属・職位は報告書の提出時点

【01】 貴金属・希土類元素フリー高磁気異方性合金を用いた ナノトンネル磁気抵抗素子の創製

研究者 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 准教授 水上 成美

共同研究者 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助手 窪田 崇秀

〔研究の概要〕

ギガビット級の不揮発性磁気メモリの実現のためには、ナノサイズでも安定に動作するトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子の高性能化が重要である。それには、高い垂直磁気異方性と低い磁気摩擦を兼備する垂直磁性材料を電極に用いた新しいタイプの TMR 素子を研究する必要がある。本課題では、主に TMR 比を高めることを最重要課題とし、これまで申請者のグループが見出した Mn-Ga 基合金を用い、TMR 素子の作製と評価およびナノ接合の形成に関する研究を行った。

〔研究経過および成果〕

Mn-Ga 合金は高い垂直磁気異方性と低い磁気摩擦を兼備する材料であると同時に、これを電極として用いた TMR 素子は 600% を超す大きな磁気抵抗比 (TMR 比) を発現すると理論的に予測されており、スピニ注入型磁気メモリに非常に適した材料である。しかしながら、本課題開始前の時点で、TMR 比は低温で 20% 程度、室温で数% と非常に小さかった。その原因として、Mn-Ga/MgO 界面における格子のミスマッチなどが考えられた。そこで本課題では、界面原子構造およびその電子構造の変調を狙い、いくつかの磁性元素を挿入した接合を作製し評価を行った。

実験結果①Mn-Ga/Fe/MgO/CoFeトンネル接合

薄膜試料は全て超高真空スパッタ法を用いて作製し、接合形成にはフォトリソグラフィーを用いた。断面の電子顕微鏡観察(TEM)から、作製した接合は比較的良好な界面を有していることが分かった。この接合で評価された TMR 比の Fe 厚み依存性を図1に示す。Mn-Ga 電極が垂直磁化、CoFe 対抗電極が面内磁化なので磁化が反平行にならず TMR 比は過小評価

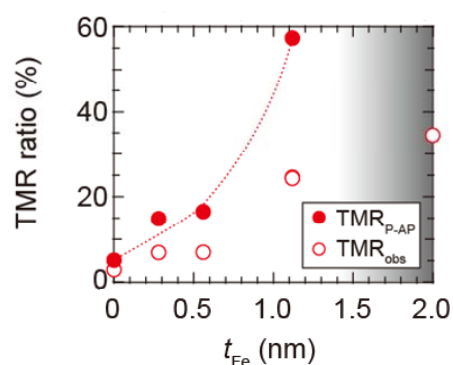


図1 Fe挿入接合のTMR比のFe厚み依存性。観測値をTMR_{obs}、平行・反平行を想定した換算値をTMR_{P-AP}としている。

されているものの、Feが1 nm以上になるとTMR比が急激に増大する傾向があり、最大で室温 24%まで増大することが分かった。磁化の反平行状態が保てる接合であれば、室温で 57%の TMR 比が期待できることが分かった[1]。

②Mn-Ga/Co/MgO/CoFeB垂直磁化トンネル接合

元素の違いによる界面構造や伝導特性の変化について知見を得るため、界面にCoを挿入した接合を調べた。その際、磁性電極の磁化の平行・反平行を

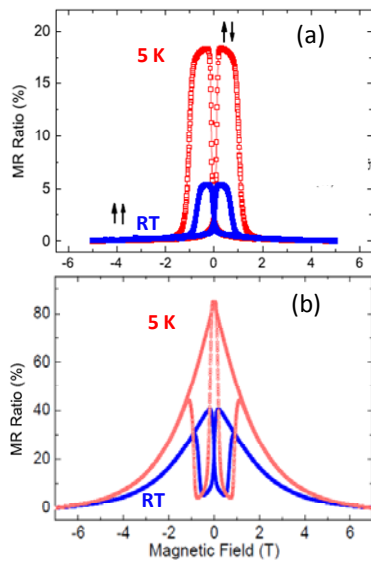


図2 室温および低温のトンネル磁気抵抗曲線 (a) Mn-Ga/MgO/CoFeB 接合、(b) Mn-Ga/Co/MgO/CoFeB 接合。

得るため、対抗電極として垂直磁化する CoFeB を用いた[2, 3]。断面の TEM からは Fe と同様の比較的良好な界面であること、また Co が bcc に近い構造をとっていることが示唆された。図 2 にこの接合の典型的な磁気抵抗曲線を示す。非常に興味深いことに、磁場に対し二段階の抵抗の変化を示している。ゼロ磁場付近では、通常の磁気抵抗曲線をさかさまにしたいわゆるインバース型の TMR を示しているが、高磁場を印加すると、抵抗が緩やかに減少している。この磁気抵抗曲線は、挿入した Co 層と Mn-Ga 層の界面に反強磁性的結合が生じていると仮定するとうまく説明できることが分かったが、そのメカニズムの解明は今後の課題である [2, 3]。この接合では Co の厚みが約 1.5 nm の時に室温で最大 40%、低温で最大 80% の TMR 比を得た。

③Mn-Ga/CoFeB/MgO/CoFeBトンネル接合 同様に元素の違いによる界面構造や伝導特性の変化について知見を得るため、界面にCoFeBを挿入した接合

を調べた。紙数の都合上詳細は記せないが、室温で約 40%の大きさのTMR比を得ている[4]。

成果のまとめ 助成前は室温で数%であったTMR比を様々な界面層について検討した結果、室温で40-60%程度の大きさまで増大させることに成功した。実用レベルにはまだ数倍たらないが、界面の元素種によるTMR比の増大の仕方や磁性の変化の起源が分かれば、さらにTMR比を大きくすることも可能であると考えられる。また、以上の結果に基づいたナノ Mn-Gaトンネル接合の形成も行っており、今後報告する予定である。最後に、本研究を支援して下さいったカシオ財団に深く感謝いたします。

〔発表論文〕

1. Dependence of tunnel magnetoresistance effect on Fe thickness of perpendicularly magnetized $L1_0$ - $Mn_{62}Ga_{38}$ /Fe/MgO/CoFe junctions, T. Kubota, Q. L. Ma, S. Mizukami et al., Appl. Phys. Express 5, 043003 (2012).
2. Magnetoresistance effect in $L1_0$ -MnGa/MgO/CoFeB perpendicular magnetic tunnel junctions with Co interlayer, Q. L. Ma, T. Kubota, S. Mizukami et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 032402 (2012).
3. Annealing Temperature and Co Layer Thickness Dependence of Magnetoresistance Effect for $L1_0$ -MnGa/Co/MgO/CoFeB Perpendicular Magnetic Tunnel Junctions, Q. L. Ma, T. Kubota, S. Mizukami et al., IEEE Trans. Mag. **48**, 2 (2012).
4. Magnetoresistance Enhancement in Mn_xGa_{100-x} /MgO/CoFeB perpendicular magnetic tunnel junctions by using CoFeB interlayer, Q. L. Ma, T. Kubota, S. Mizukami et al., IEEE Trans. Magn. (in-press, 2013).

【02】超小型機械デバイスの低消費電力化に向けたグラフェンの 超潤滑メカニズムの微視的解明に関する研究

研究者 東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教 石田 忠

〔研究の概要〕

マイクロナノ摩擦に伴うエネルギー損失は右肩上がりに増加しており、近年では日本一国だけで年間十兆円規模の損失になっているといわれている。そこで、摩擦によるエネルギー損失を低減することが急務となっている。しかし、近年の機械デバイスはマイクロ・ナノスケールにすることで、従来とは一線を画す機能や性能を実現しており、これらの発展により、摩擦によるエネルギー損失が上昇すると予想される。特にスケール則のためにマイクロ・ナノスケールの摩擦は、マクロスケールの摩擦に比べて影響が大きくなる。そこで、超小型機械デバイスの摩擦低減に伴う低消費電力を目指して、グラフェンやダイヤモンドライクカーボン(DLC)といった超潤滑材の潤滑メカニズムを透過電子顕微鏡(TEM)と微小機械素子(MEMS)を用いて解明することを試みた。DLC は粗い表面でも平坦な表面でも、摩擦界面にナノベアリングを形成し、その潤滑を実現していることがわかった。

〔研究経過および成果〕

本研究では超潤滑材料であるグラフェンや超平坦 DLC のメカニズムを解明するため、MEMS と TEM を組み合わせた実験系を用いた実験を行った。そこで、MEMSの開発とそれを用いた可視化実験の成果についていかに説明する。

1. 超潤滑メカニズムを解明用 MEMS 対向針

図 1 に示すような、MEMS 対向針を作製する。MEMS 対向針は接近用静電アクチュエータと摺動用静電アクチュエータを実装した対向針を備えている。静電アクチュエータは可動電極と駆動電極からなり、可動電極-駆動電極間に電圧を印可することで、静電力により針を動かすことができる。この MEMS 対向針は TEM に挿入可能なため、TEM 内実験を行うことができる。この対向針にグラフェンや超平坦な DLC を成膜することで、それぞれの材料における摩擦特性を評価することを可能とする。以下に、対向針先端へ

の潤滑材の成膜方法を説明する。

1. 1 グラフェン： 集束イオンビーム(FIB)を用いた気相成長(CVD)法によって形成した DLC ナノピラーの先端を FIB で加工する。それを真空アニールによって 450 度まで加熱すると、ナノピラー先端に Ga 球が形成され、冷却すると Ga 球表面にグラフェンが成膜される。図 1(a,b)にその様子を示す。Ga 球表面にグラフェンのような層構造が確認できるが、電子線エネルギー損失分光法を用いて確認したところ、グラフェンの存在は確認できなかった。

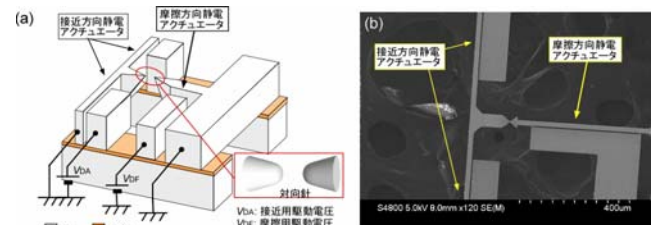


図 1 MEMS 対向針。(a)概略図。(b) 走査電子顕微鏡像。二つの静電アクチュエータを用いて対向針間で摺動実験を可能とした。

1. 2 超平坦 DLC: FIB-CVD 法を用いて、DLC を成膜する。ただし、FIB-CVD 法によって成膜した DLC は表面が nm オーダーで平坦であり、側壁は数十 nm オーダーの凹凸が無数に存在する。そこで、対向針の先端方向からほぼ垂直に Ga ビームを入射し、接触面に超平坦な DLC 面を形成した。図 1(a,b)にその様子を示す。DLC 表面は nm オーダーで平坦であることが確認できた。

2. 超潤滑界面のリアルタイム可視化実験

2. 1 グラフェン: 前章で説明したように Ga 球表面にグラフェンがあることを確認することは困難であったが、摺動実験を行った。その結果、片側針に付着した Ga 球が軽くもう一方の針に接触したところで、対向針間における Ga 球の移動が確認された。これと同時に可動針が 21 nm 移動した。これにより Ga 球と針の付着力は 40 nN 程度であることがわかった。ただし、グラフェンの存在が確認できていないことから、本低摩擦が何に由来するものかは確認できなかった。

2. 2 超平坦 DLC: 従来研究から数十 nm オーダーの凹凸を持つ DLC の摺動実験においては、摩耗粉が集合し DLC ナノボールを形成し、ベアリング効果を発現することで潤滑効果が生じることがわかっていた。しかし、この摩耗粉は数十 nm オーダーの凹凸の破壊に由来するところが大きく、超平坦な DLC における潤滑効果を説明するには至っていなかった。そこで、前章のように超平坦な DLC 表面を持つ対向針を作製し、それを用いて超平坦な DLC 界面の摺動実験を行った。

摺動実験により、超平坦な DLC においても摩耗粉が容易に形成した。一回の摺動によって、直径 10 nm 程度の摩耗粉が 10 個程度形成された。この結果より、摺動を繰り返すことで、摩耗粉の数は多くなり、その

結果として DLC ナノボールが形成されることが容易に予想される。つまり超平坦 DLC においても、従来の DLC 摺動実験同様、ナノボールのベアリング効果によって、超潤滑を発現しているといえる。

3. まとめ

グラフェンや超平坦 DLC の MEMS 対向針を作製し、それを用いて TEM 内摺動実験を行った。グラフェン是对向針自体の作製がうまくいかなかった。一方、超平坦 DLC では、従来の DLC 同様ナノボールのベアリング効果により超潤滑が生じていると考えることができることがわかった。

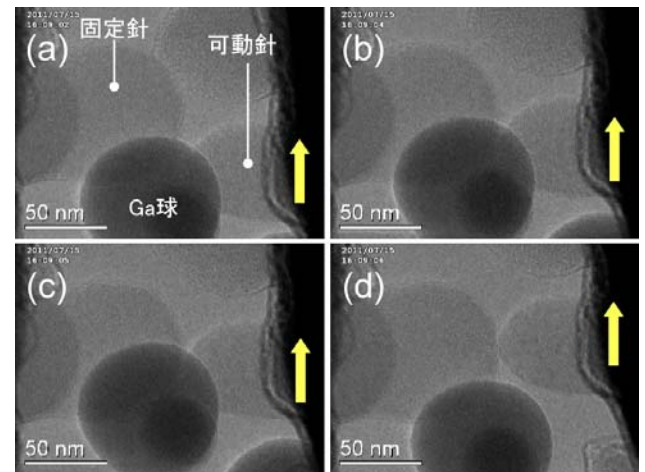


図 2 対向針間における Ga 球の移動。(a)-(c)可動針の移動により、Ga 球が固定針に押し付けられる。(d)可動針から固定針への Ga 球が移動し、それと共に可動針が 21 nm 移動した。

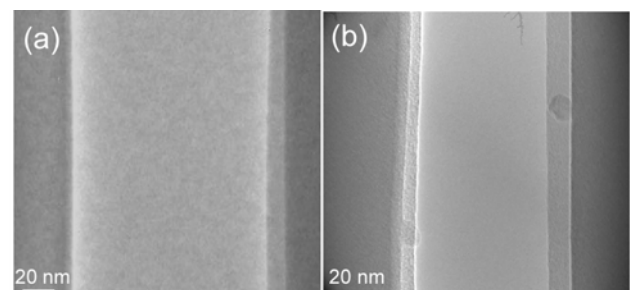


図 3 超平坦 DLC の摺動に伴う摩耗粉の形成。(a)摺動前の超平坦 DLC 対向針先端、(b)摺動後の DLC 対向針における摩耗粉の形成。

【03】 随伴変数法に基づく流体場に関する感度解析とトポロジー最適化への適用

研究者 京都大学大学院工学研究科 助教 山田 崇恭

〔研究の概要〕

構造最適化とは、設計者の勘と経験に基づく試行錯誤に頼らず、構造物の最適な形状を、数学的・物理的根拠に基づいて数値解析により求める方法である。中でも、トポロジー最適化は構造の外形形状だけではなく、穴の数のような形状形態の変更をも可能とする、最も設計自由度が高い方法であり、かつ大幅な性能向上が期待できる方法として、学术界および産業界において、広く認識されている。そこで本申請研究では、流体場のトポロジー最適化を目指して、流体場に対する感度解析手法の開発を行うことを目的とする。なお、本申請研究では、申請者が独自に開発したレベルセット法に基づくトポロジー最適化への適用を目指すため、トポロジー導関数の考え方にに基づき、感度解析を行う。

〔研究経過および成果〕

本研究では、流体問題に対するトポロジー最適化法の構築を目指して、流体場に対する設計感度解析手法を随伴変数法に基づいて開発した。次に、その概要を述べる。

非圧縮性流体は次に示すナビエストークス方程式を満たす。

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は流速、 p は圧力、 Re はレイノルズ数、 $\mathbf{F}$ は外力を表す。トポロジー最適化へ展開するためには、非流体領域と流体領域を識別しながら解析を進める必要がある。本研究では、領域形状の表現方法として、レベルセット法を用いる。すなわち、次式により定義されるレベルセット関数の零等位面により非流体領域と流体領域の形状を陰的に表現する：

$$\begin{cases} 0 < \phi(\mathbf{x}) \leq 1 & \text{if } \forall \mathbf{x} \in \Omega \setminus \partial\Omega \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \text{if } \forall \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -1 \leq \phi(\mathbf{x}) < 0 & \text{if } \forall \mathbf{x} \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 Ω は流体領域、 D は固定設計領域を表す。レベルセット関数の等位面に沿って流体領域と非流体領域を識別しながら最適化を行うためには、逐次有限要素メッシュの再生成を必要とする。三次元問題への展開を考慮すると、手続きは煩雑になる。そこで、本研究では、ナビエストークス方程式を固定設計領域 D へと拡張するため、次式に示す仮想的な外力を考える：

$$\mathbf{F} = -\alpha \mathbf{u} \quad (4)$$

ここで、 α は次式により定義する。

$$\alpha = (\underline{\alpha} - \bar{\alpha}) \chi_{\Omega}(\phi) + \bar{\alpha} \quad (5)$$

なお、 α の下限値は零、上限値は十分に大きい値に設定することにより、壁面上における非滑り境界を表現する。また、特性関数 χ は流体領域で1をとり、非流

体領域で零をとる関数とする.

トポロジー最適化問題は次のように定式化される.

$$\begin{aligned} \inf_{\phi} \quad & J = \frac{1}{2Re} \int_D \|\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T\|^2 + \int_D \alpha(\chi_\phi) \|\mathbf{u}\|^2 \\ \text{subject to} \quad & G = \int_D \chi_\phi - V_{\max} \leq 0 \\ & (\mathbf{U}_0 \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p - \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \alpha(\chi_\phi) \mathbf{u} = 0 \\ & \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

上述の定式化に基づいて, 最適化アルゴリズムを構築した. 最適化アルゴリズムのフローチャートを図 1 に示す.

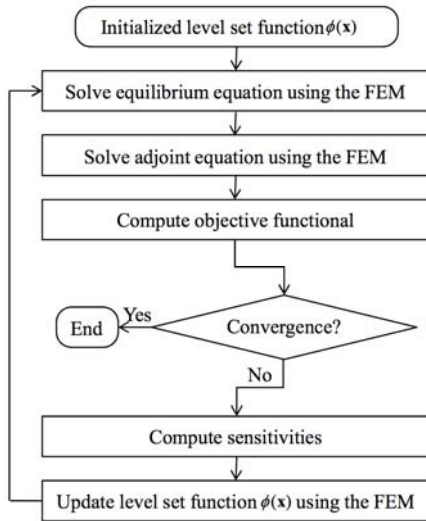


図 1 最適化アルゴリズムのフローチャート

本研究で開発した手法の有効性と妥当性を検証するために, 二次元の設計問題に適用した. ここでは, 図2示すディフューザーの設計問題について考える.

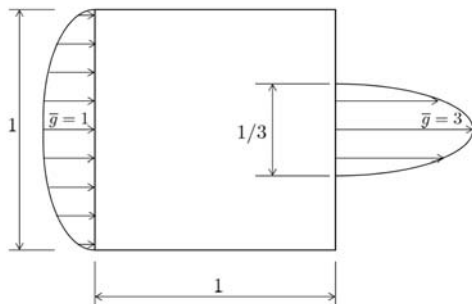


図 2 固定設計領域と境界条件

すなわち, 図中の矩形領域を非流体領域もしくは流体領域により占められているとし, 流体領域に対して体積制約を与えて, 圧力損失が最小となる流路形状を求める問題である. 図3に得られた最適構造を示す. ここでは, 白色領域が流体領域を示し, 黒色領域が非流体領域を表す.

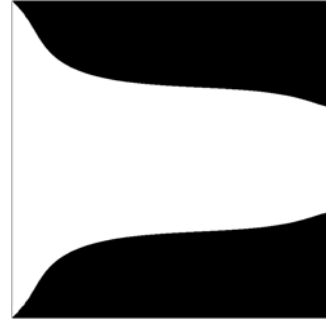


図 3 本研究で構築した方法により得られた最適流路形状

図に示すように, 滑らかで明瞭な最適形状が得られていることを確認することができる. これにより, 本研究で提案した方法論の有効性と妥当性を示すことができた. なお, 本研究で提案する手法は三次元への拡張も可能であり, 設計感度を随伴変数法により導出しているため, 大規模問題への展開も可能であることを注記しておく.

〔発表論文〕

1. Kentaro Yaji, Takayuki Yamada, Seiji Kubo, Kazuhiro, Izui and Shinji Nishiwaki, A Topology Optimization Method Under Oseen Flow Based on the Level Set Method, ICOME/JASCOME Symposium 2012, December 12-14, Kyoto, Japan, No.J02.

【04】 小児成長評価のための小型オープン手専用 MRI の開発

研究者 筑波大学大学院数理物質科学研究科 助教 寺田 康彦

〔研究の概要〕

小児骨年齢の評価は、発達障害の診断などを目的として行われ、現在は単純 X 線で行われている。しかし、これを MRI で行うことができれば、放射線被曝、三次元的評価、軟骨の評価の点で優位性がある。本研究では、まず既存のリウマチ診断用 MRI 装置で小児の手を撮像し、MRI により小児の骨年齢評価が可能であることを世界で初めて報告した。次に、小児の手に合わせてサイズを最適化した小型磁石を用いて、小児専用の小型オープン手専用 MRI 装置を開発した。この装置を用いて多数の被験者計測を行い、骨年齢評価の判定と再現性評価を行った。

〔研究経過および成果〕

まず、既存の MRI 装置によって小児骨年齢評価が可能であるかどうかを検証した。この時用いた MRI 装置は、当研究室で保有しているものであり、大人の手の大きさに合わせて設計されたリウマチ診断用コンパクト MRI である。子どもの左手の骨を三次元的に描出することのできる撮像パラメタの検討、撮像実験を行い(図1)、骨年齢判定法について検討した。

その結果、パルスシーケンスとしては、3D グラジエントエコー法（コヒーレント型）、Dwell time=20ms、TR/TE=40ms/11ms、FA=60°、面内 FOV=200mm×100mm×50mm、撮像時間=2 分 44 秒、画像マトリクスを 512×128×32 が最適であることが分かった。また、撮像中に手が動くとき偽像が生じてしまうため、手専用の治具を使って固定し、さらに撮像中に DVD を上映することにより、手の動きを最小限にとどめた。図 2 が MR 画像の一例であり、すべての骨がきれいに描出されていることが分かる。次に 4.1 歳～15.9 歳までの男女小児

93 人(平均 9.7 歳)に対して、学内の倫理委員会の許可の下に、本人と保護者より書面による同意を得てボ



図 1 リウマチ診断用 MRI を用いた小児骨年齢計測の様子

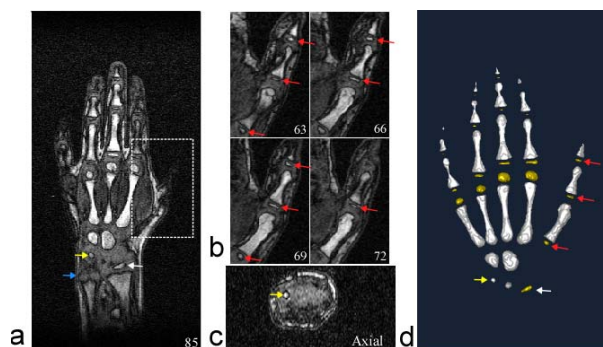


図 2 a-c 5.1 歳の男児の左手の MR 画像. d MR 画像から骨を抽出したもの

ランティア計測を行った。得られたMR画像から、判定者A(整形外科医)は二週間間隔で2回、判定者B(同)は1回RUS法により骨年齢判定を行った。その暦年齢と骨年齢の関係を図3に示すように、これらは高い相関を示した。また、判定者内・判定者間の評価も高い一致を示したことから、MRI による骨年齢評価は有用であると結論づけた[1,2]。

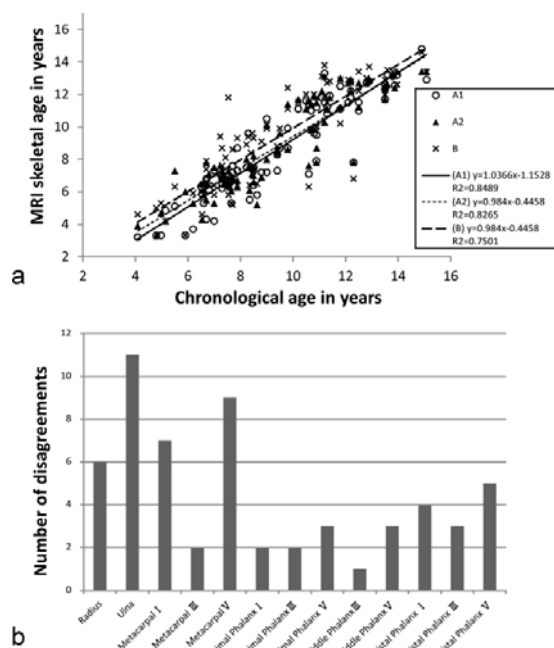


図3 a 暦年齢と骨年齢の関係。 b 骨年齢判定の不一致度

しかし上記の研究で用いた磁気回路は、成人向けに設計されていたため、低年齢児の場合、手が撮像範囲に届きづらく体動アーチファクトを生じた例などがあった。そこで次に、一回り小さいサイズの磁気回路を用いて、小児骨年齢計測用 MRI を新たに開発した(図4)。磁気回路はC型0.3 T 永久磁石(信越化学工業製, Nd-B-Fe, ギャップ幅 12 cm, 40 cm×57 cm×41 cm, 重量 450 kg)を用いた。初期導入時の磁場均一性がひじょうに低く、信号損失が大きすぎてMR画像を取得できなかったのが、磁石シムとシングルチャネル(SC)

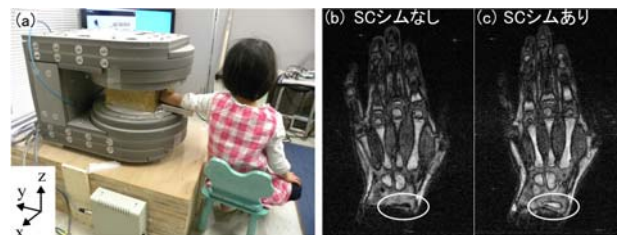


図4 (a)小児骨年齢計測用MRI。(b)(c)SCシムの有無での撮像結果

シムを組み合わせることで静磁場の均一性を高めた[3,4]。さらに、MRI装置の主要な部品である、RFプローブ、勾配磁場コイルも新たに設計、製作し、高画質のMR画像の取得に成功した(図4)。この装置を用いて、3.4歳～15.7歳までの男女小児88人(平均8.8歳)に対してボランティア計測を行った。その結果、MR画像の画質や骨年齢評価の再現性が、リウマチ診断用MRIの場合と同程度に高いことが判明し、さらに、若年齢(3.4歳)の小児の撮像が可能であるなどの利点も確認された。

〔発表論文〕

1. Y. Terada et al., Measurements of child's skeletal age using a 0.3 T open compact MRI system, ISMRM Proc. P1448 (2012).
2. Y. Terada et al., Skeletal Age Assessment in Children Using an Open compact MRI system, Magn. Reson. Med. (2013). doi: 10.1002/mrm.24439.
3. Y. Terada et al., Power optimization of a planar single-channel shim coil for a permanent magnet circuit, Appl. Phys. Express **6** (2013) 026701.
4. Y. Terada et al., Magnetic field shimming of a permanent magnet using a combination of pieces of permanent magnets and a single-channel shim coil for skeletal age assessment of children, Accepted in J. Magn. Reson.

【05】 電氣的ノイズ刺激を用いたヒト運動制御機能回復・向上システムの開発

研究者 立命館大学スポーツ健康科学部 助教 木村 哲也

共同研究者 神崎 素樹(京都大学)、塩澤 成弘、浜岡 隆文(立命館大学)

【研究の概要】

求心性神経に感覚閾値以下の微弱ノイズ刺激を与え、確率共振の効果から神経制御機能を向上させる手法を検討した。刺激様式の基礎的検討(研究 1,2)の後、3 週間のギプス固定前後でのノイズ刺激の効果を実験的に検証した(研究 3)。ギプス固定後の低強度力調節課題において、ノイズ刺激が運動単位発火活動の静的及び動的特性に効果を与える可能性が示唆された。しかし、力調節機能への安定した効果には、神経細胞の閾値を考慮したノイズ刺激強度の決定方法等、さらなる検討が必要であることが指摘された。

【研究経過および成果】

【研究 1】 本研究は、立命館大学びわこ・くさつキャンパス生命倫理審査委員会に承認された。全被験者は、研究内容の説明を受けた後、署名した(以下同様)。健常若年者 12 名にて、非利き足での足底屈曲力調節課題(40 秒)を 5%最大随意収縮力(MVC)で行った。膝窩より脛骨神経へ電気ノイズ刺激を印加した。神経線維への刺激効果に影響する変数(パルス長(μ s)、周波数帯域(Hz))について、A(250,1-20)、B(250,5-1000)、C(500,1-20)、D(500,5-1000)及び刺激なし条件(Con)の 5 条件を各 3 回行った。刺激強度は活動電位発生域値(MT)の 80%強度とした。力変動の変動係数(CV)、単位時間軌跡長(MV)について、各被験者のCon条件を 1 とした相対値で評価した(表 1)。刺激条件間でCV、MVに有意差は認められず($P>0.05$)、CVはCon条件の値が大きい被験者、即ち固有力調節機能が低い被験者でノイズ刺激の効果が見られた。また、固有力調節機能の高い被験者(Sub.2,5,7)ではD条件で効果が見られた。MVでは、固有力調節機能の最も高い 1 名を除く全員でいずれ

かの刺激条件で効果が見られた。力変動の周波数スペクトル(DFT)を検討した結果、各被験者のCV最小値とCV最小時の低周波パワー(0-1Hz)に正の相関($r=0.94$, $P<0.05$)、及びMV最小値とMV最小時の高周波パワー(1-10Hz)に正の相関($r=0.75$, $P<0.05$)が得られた。即ちCV、MVの変化は各々、力変動の低周波、高周波成分の変化と関連していた。

Sub	CV (%)					MV (N/s)				
	A	B	C	D	Con	A	B	C	D	Con
1	1.33	1.22	1.10	1.31	1	1.10	1.02	1.04	1.07	1
2	0.99	1.27	1.26	0.93	1	0.94	0.99	1.08	0.97	1
3	1.25	1.29	1.21	1.26	1	1.04	0.94	1.02	0.93	1
4	1.15	1.22	1.06	1.05	1	0.97	0.95	0.94	1.03	1
5	0.73	0.80	0.71	0.57	1	0.91	1.04	0.96	1.06	1
6	2.61	1.19	1.22	1.55	1	1.17	0.99	1.04	1.01	1
7	0.67	1.12	0.67	0.57	1	0.97	1.00	1.02	0.96	1
8	0.86	0.84	0.80	0.96	1	1.03	0.81	0.99	1.25	1
9	0.84	1.11	1.00	0.85	1	0.98	1.02	1.03	0.99	1
10	0.96	0.88	1.27	1.15	1	1.12	0.95	1.16	1.05	1
11	0.93	0.80	0.52	0.62	1	0.97	1.06	0.79	0.91	1
12	0.83	0.85	0.78	0.95	1	0.95	0.95	0.94	0.89	1
Mean	1.10	1.05	0.97	0.98	1	1.01	0.98	1.00	1.01	1
SD	0.52	0.20	0.26	0.31	0	0.08	0.06	0.09	0.10	0

表 1. CV、MV の各被験者の結果。Con 条件 CV 絶対値の昇順に被験者を上から配置。太字：各被験者最小値、網掛け：Con 条件より減少。

【研究 2】 健常若年者 8 名にて、脛骨神経に加え、前脛骨筋支配の総腓骨神経も刺激対象とした。拮抗筋のIa線維は主動筋の運動ニューロンへ相反性Ia抑制入力をする。そこで、脛骨神経と総腓骨神経への同時ノイズ入力による相乗効果を検討した。(i)脛骨神経

刺激、(ii)総腓骨神経刺激、(iii)脛骨神経+総腓骨神経同時刺激の3刺激条件及び刺激なし条件(Con)の計4条件とした。刺激様式は研究1のDとし、研究1と同様の力調節課題を行った。しかし、同時刺激の相乗効果は認められなかった($P>0.05$)。

【研究3】 健常若年者9名にて非利き手前腕のギプス固定を3週間行った。ギプス前後にて示指の等尺性外転筋力を測定し、MVC及び5%MVC力調節課題(40秒)を評価した。5%MVCはギプス前後の各MVCを基準とした。電気ノイズ刺激を前腕部皮膚表面より尺骨神経に印加した。研究1の刺激様式Dを用い、強度は40%(0.4)MT、80%(0.8)MTとし、刺激なし条件(Con)を加えた計3条件を各3回行った。ギプス後測定にて6名の被験者よりワイヤー電極筋電図を第1背側骨間筋より記録し、波形の類似性から運動単位(MU)活動電位を分離・抽出した(Spike2 Version 7.02)。5名より計35個のMUを同定し、発火間隔(ISI)の時系列データを得た(図1)。ISIの静的特性をCV、動的特性を時間軸上の長期相関に関するdetrended fluctuation analysis(DFA)(Peng et al. 1995)のスケール指数 α で評価した。MVC(平均値(SD))は、ギプ

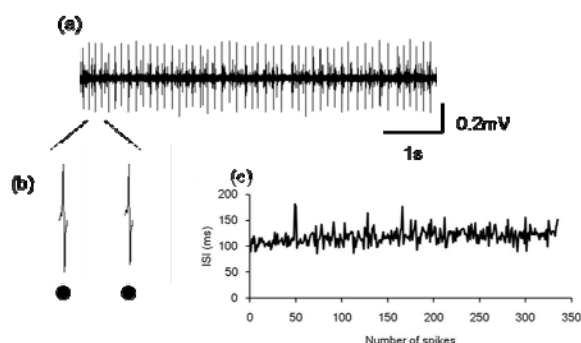


図1. (a) ワイヤー電極筋電図の例(約5秒間)、(b)テンプレートを基に分離したMU活動電位、(c)単一MUのISI時系列変化(40秒)

ギプス固定前	Con	0.4MT	0.8MT
CV (%)	2.99 (0.49)	3.00 (0.43)	3.03 (0.59)
MV (N/s)	0.69 (0.24)	0.70 (0.23)	0.68 (0.27)
ギプス固定後	Con	0.4MT	0.8MT
CV (%)	3.31 (0.75)	3.24 (0.85)	3.33 (0.94)
MV (N/s)	0.63 (0.26)	0.62 (0.26)	0.63 (0.24)

表2. ギプス固定前後での各刺激条件での力調節機能。平均値 (SD)

ス前後で 43.9(8.3)、43.1(10.7)N と変化しなかった($P>0.05$)。力調節 CV はギプス後に増加したが有意差はなく($P>0.05$ 、表2)、刺激条件間の平均値の差も認められなかった($P>0.05$)。背景として、ノイズ刺激への応答様式が被験者間で異なっていた。ギプス後では全被験者でCVもしくはMVを最小にする刺激強度が存在したが、被験者間で一致しなかった。さらに、ギプス固定前後での同一被験者間でもノイズ刺激への応答が異なった。この結果は、ノイズ強度と神経細胞閾値との関係が、ノイズ効果の大きさとその周波数特性に影響すること(Kimura et al. 2012)と関連する。被験者間及びギプス前後で変動する閾値に応じて至適ノイズ強度が変化することから、至適強度の決定方法等、さらなる検討が今後必要である。一方、ギプス後測定の各被験者の MU-ISI について、5名中4名にて0.4MT条件でCVが最小値を示した。この結果は、健常者の通常時での先行研究(Kouzaki et al. 2012)と一致し、ギプス固定後の神経制御機構へのノイズ刺激の効果を示唆する。スケール指数 α も4名にて、0.4MT条件で1(1/fゆらぎ)により近い値を示し、動的特性へのノイズ刺激の効果も期待された。

【謝辞】 研究にご協力頂いた黒澤裕子氏、二連木晋輔氏、小西可奈氏、桑木赳至氏、瀧千波氏、宇野麻衣子氏、林紗希氏、助成を賜りましたカシオ科学振興財団に深く感謝致します。

【発表論文】

1. **T. Kimura** et al. Invited session “Stochastic Resonance in Nervous Systems – Effects of Electrical Noise to a Knee Joint on Quiet Bipedal Stance and Treadmill Walking”. *35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, (発表予定).

【06】 高圧 STM による有機導体の圧力効果の研究

研究者 北海道大学大学院工学研究院 准教授 市村 晃一

〔研究の概要〕

高圧走査トンネル顕微鏡(STM)の装置開発を行った。高圧セルの 100 MPa (1000 気圧)までの加圧試験を行った後、高圧セル内にSTM本体を収納するためのフレームを試行の末製作した。これにより高圧STM装置の完成のめどが立った。これと並行して、低温で電荷秩序を形成する有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の室温・常圧におけるSTM観察を行い鮮明なSTM像を得ることに成功した。このSTM像から、ドナーサイトの同定を行うことができた。さらに、スポットの強度に変調を生じていることから電荷のストライプ構造が見出された。本結果は、転移温度よりかなり高温域で電荷の不均化が起こっていることを示しており、電荷秩序形成に関して新しい知見を与えるものである。

〔研究経過および成果〕

本研究で使用する高圧走査トンネル顕微鏡(STM)の装置開発を行った。本装置は、高圧セル、STM 本体、粗動機構、ヘリウムガス圧発生装置などからなる。まず、高圧セルをヘリウムガス発生装置と接続し、常温で 100 MPa (1000 気圧) までの加圧試験を行った。続いて STM 本体を高圧セル内に収納するためのフレームの製作に取りかかった。このフレームの満たすべき条件として、高圧セル内は狭い空間であること、また収納される STM 本体とのクリアランスも少ないという大きさについての制限がついている。STM 本体が固定されるので剛性が最も重要となるが、これに加えて試料や STM 探針の交換が容易に行えるようなハンドリングの良さも要求される。これらの仕様を満たすべく試作を繰り返し、フレームの完成に至った。現在、このフレームに合う仕様の STM スキャナーを取り付けるなど STM 本体を構築して、高圧 STM 装置系の完成を目指している。

高圧STMの装置開発と並行して室温・常圧下にお

ける有機導体のSTM観察を行い、その電子状態について調べた。試料として有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ (ドナー分子 BEDT-TTF: bisethylenedithio-tetrathiafulvalene) を用いた。この物質は常圧下では 135 K以下で長距離クーロン相互作用による電荷秩序を形成し、金属から絶縁体へと転移する。この電荷秩序形成の形成メカニズムを微視的な視点から解明すべく、STMによる電子状態の観察を行った。296 Kにおいて、単結晶 a - b 面において得られたSTM像(トンネル電流像)を図 1 に示す。様々なトンネル条件の試行の結果、バイアス電圧 50 mV、トンネル電流 0.05 nAのもとで鮮明なSTM像を得ることに成功した。一般的に有機導体では表面の問題から高分解能のSTM像を得ることが難しいとされているが、図 1 ではBEDT-TTFドナー分子が明確なスポットとして観測されている。本物質は、図 2 に示すように、単位格子内にA, A', B, C の 4 つのドナーサイトを有する。得られたSTM像では、単なる周期的配列のみならず、各サイトのスポットの形が異なることが見

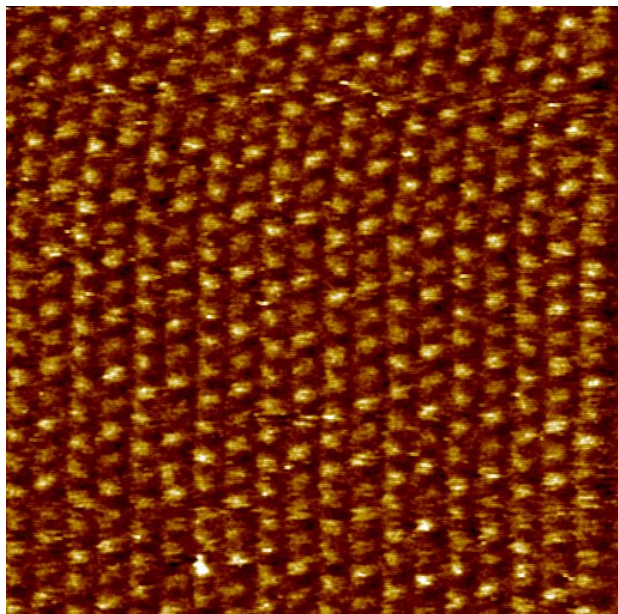


図 1. α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 単結晶 a - b 面で得られたSTM像。温度は 296 K、走査範囲は $9.5 \times 9.5 \text{ nm}^2$ 。

出された。このスポットの形と移動積分との対応から、ドナーサイトを同定することができた。

さらに、 a 軸方向にスポットの明るさがドナーサイトの 2 倍周期で変調していることが見出された。サイト A と B が明るく、A' と C がやや暗く見えている。このことは、図 2 に示すような電荷のストライプ構造が生じていることを意味する。本結果は、STM で観測される微小な領域では、電荷秩序転移温度(135 K)よりもかなり高温の室温(300 K)において、すでに電荷の不均化が生じていることを示すことであり、電荷秩序形成における新しい知見である。

今後は、同じドナー配列を持ちながら電荷秩序を形成しない物質 α -(BEDT-TTF) $_2$ KHg(SCN) $_4$ において同様な測定を行い、これとの比較から転移温度より高温における電荷の不均化の詳細を検証する。さらに、圧力STMの完成後は、圧力をパラメーターとして微視的な電子状態の観測から電荷秩序の発現機構の解明を目指す。

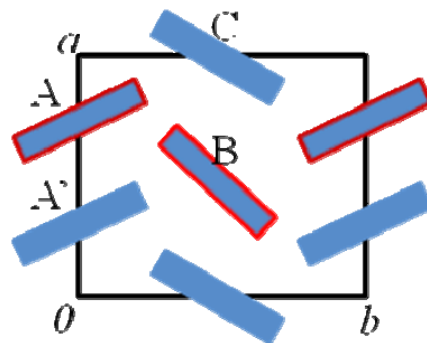


図 2. a - b 面におけるドナー配列の模式図。赤線で囲まれたドナー A と B には電荷が多く、A' と C には少なく分布している。(電荷不均化)

[発表論文]

1. Y. Kawashima, K. Ichimura, J. Ishioka, T. Kurosawa, M. Oda, K. Yamaya and S. Tanda: “Charge Stripe Structure in FeTe”, *Physica B*, **407**, 1796-1798 (2012).
2. K. Katono, K. Ichimura, Y. Kawashima, K. Yamaya, and S. Tanda: “Mixed Density Wave State in Quasi-2D Organic Conductor”, *Physica B*, **407**, 1827-1830 (2012).
3. S. Tsuchiya, J. Yamada, S. Tanda, K. Ichimura, T. Terashima, N. Kurita, K. Kodama and S. Uji: “Fluctuating Superconductivity in the Strongly Correlated Two-Dimensional Organic Superconductor κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu(NCS) $_2$ in an In-Plane Magnetic Field”, *Physical Review B*, **85**, 220506-1-4 (2012).
4. J. Ishioka, T. Fujii, K. Katono, K. Ichimura, T. Kurosawa, M. Oda and S. Tanda: “Reply to ‘Comment on ‘Charge-Parity Symmetry Observed through Friedel Oscillations in Chiral Charge-Density Waves’””, *Physical Review B*, **86**, 247102-1-3 (2012).

【07】 迅速なメッセージ伝播を活用できるソーシャルメディアからの 動的なコミュニティ発見手法の開発

研究者 北海道大学大学院情報科学研究科 准教授 吉田 哲也

〔研究の概要〕

本研究では、コミュニティ発見問題を社会ネットワークの表現行列に対する固有値問題として定式化することにより、ソーシャルメディアからの動的なコミュニティ発見の基礎理論の確立と、この理論に基づくアルゴリズムの開発を行った。この実現のために、コミュニティ発見において標準的に用いられるモジュラリティ指標をネットワークの隣接行列に基づいて定式化し、ネットワークの接続情報とあわせてノード情報に基づくグラフ構造も構築して活用することにより、構築したグラフを正則化項として活用する手法を開発した。さらに、ソーシャルメディアにおけるメッセージはネットワークのリンクに沿って伝播されるため、ネットワークの接続行列に基づく重み付き線グラフを提案した。

〔研究経過および成果〕

近年のネットワーク環境の進展に伴い、Facebook や Twitter などのソーシャルネットワークサービスが新しいコミュニケーションメディアとして広く用いられ、ネットワークを介して様々な情報が広く流通されるようになってきている。

ネットワークからのコミュニティ発見とは、ノード(頂点) 同士のリンク(辺) が多く密な部分ネットワークをコミュニティとして同定する問題である。従来の研究ではノード間の接続関係に基づくアプローチが多かったが、ノード間のリンクは時間とともに変遷する可能性があり、部分的にしか観測できない場合もある。このため、ネットワークに存在する少数のリンクしか観測できない場合にコミュニティを発見することは困難な問題である。

本研究では、ネットワークに存在する少数のリンクしか観測できない状況においても、接続情報とあわせてノード(頂点) に関する情報が得られる場合に、

後者を副次的な情報として活用してコミュニティ発見を行う手法を開発した。具体的には、観測できるネットワークの接続情報が少ない状況におけるコミュニティ発見を半教師あり学習の観点からとらえ、リンク情報とノード情報を統一的に扱うためにノード情報に基づくグラフ構造を構築し、構築したグラフを正則化項として活用してコミュニティ発見を行う手法を開発した。

コミュニティ発見において標準的な評価指標であるモジュラリティ指標 Q は、ネットワークの隣接関係に対する表現行列 $\mathbf{A}$ とネットワークの接続関係に対する null モデルを表現する行列 $\mathbf{P}$ に基づいて下記で定義される。

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} [\mathbf{A}_{ij} - \mathbf{P}_{ij}] \delta(g_i, g_j)$$

ここで、 $\delta(g_i, g_j)$ はノード i, j が共に同じコミュニティに属する場合に1、それ以外は0となる関数を表す。

モジュラリティ Q の最大化は、モジュラリティ行列 $\mathbf{B} = \mathbf{A} - \mathbf{P}$ の最大固有値に対する固有ベクトルを求めるこ

とに対応することが示されている。そこで、ノード情報をコミュニティ発見に対する副次的な情報ととらえて正則化に活用することを考え、観測されたリンク情報とあわせてノード情報を考慮したコミュニティ発見を下記の目的関数の最大化として定式化した。

$$J = \text{tr}(\mathbf{F}^T \mathbf{B}_r \mathbf{F}) + \nu \text{tr}(\mathbf{F}^T \mathbf{W} \mathbf{F})$$

ここで、 $\mathbf{B}_r$ は観測されたリンクの割合 $r \in [0,1]$ のもとでのモジュラリティ行列、 $\mathbf{W}$ はノード情報から構築したグラフ構造に対する表現行列（重み付き隣接行列）であり、 ν はパラメータである。 $\mathbf{F}$ の列ベクトルは、上記の目的関数 J を最大化するために固有値の降順に選択した固有ベクトルである。

実データから構築した共著関係ネットワークに提案法を適用して評価し、他手法との比較を行い、観測できるリンク数が少ない状況下での提案法の有効性を確認した。結果の一例を図1に示す。図1で横軸は観測されたリンクの割合、縦軸はモジュラリティ指標 Q であり、 Q が大きいほど良いコミュニティが発見されたことに対応する。図1より、提案法はリンク数が少ない場合でもモジュラリティ指標が高く、良いコミュニティが発見できたことがわかる。

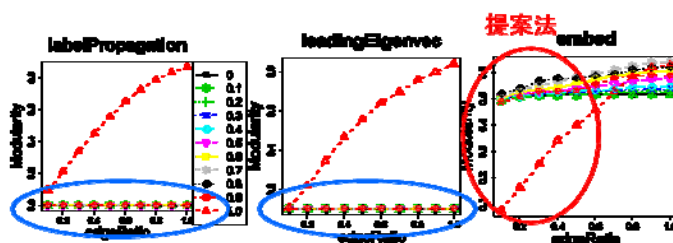


図1 実験結果

また、さらに、ソーシャルメディアにおけるメッセージはネットワークのリンクに沿って伝播されるため、ネットワークにおけるリンクをあたか

もノードのように扱うことにより、既存のノードに基づくコミュニティ発見手法をリンクに対しても適用することが可能となる。そこで、ネットワークの接続行列に基づく重み付き線グラフを提案した。

具体的には、グラフ理論における従来の線グラフはネットワークの接続関係のみから定義されるため、ネットワークのリンクに与えられた重みや、本研究で提案したノード情報に基づく重み付き隣接行列を活用できないという課題がある。そこで、従来の線グラフをネットワークの重みに基づいて拡張し、提案した重み付き線グラフの様々な性質を示した。

〔発表論文〕

1. 吉田哲也, ネットワークのノード情報を考慮した正則化モジュラリティ固有空間法, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 5, No.1, pp. 65-73 (2012)
2. Yoshida, T., Line Graph for Weighted Networks toward Overlapping Community Discovery, In Proc. 4th International Conference on Intelligent Decision Technologies (IDT'12), vol. 2, pp. 404-413 (2012)
3. Yoshida, T., Overlapping community discovery via weighted line graphs of networks, In Proc. 12th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI 2012), Lecture Note in Artificial Intelligence 7458, Springer-Verlag, pp. 895 - 898 (2012)
4. 吉田哲也, 重複コミュニティ発見のための重み付き線グラフ, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 5, No. 3, pp. 79-88 (2012)

【08】 高性能可変デジタルフィルタの適応制御手法に関する研究

研究者 東北大学大学院工学研究科 電子工学専攻 助教 越田 俊介

〔研究の概要〕

データ通信・音声・画像・映像処理などさまざまな信号処理アプリケーションにおいて、デジタルフィルタは非常に重要な役割を果たしている。特に、近年の信号処理技術の発展に伴い、フィルタ特性をリアルタイムで調節できる可変デジタルフィルタの需要が高まっている。可変デジタルフィルタを用いた信号処理として、未知の周波数成分をもつ狭帯域信号の検出システムがよく知られている。本研究ではこれまでの成果として、この狭帯域信号検出システムの構築において、従来は困難とされていた高次の複雑な伝達関数の適応制御を簡単に実現できる手法を提案している。本研究ではこの成果を発展させ、これまで考慮されていなかったハードウェア上の実装に関わる問題を提案手法に採り入れる。すなわち、実装において重要な、高演算精度や低消費電力を達成する高性能可変デジタルフィルタの適応制御理論を確立する。

〔研究経過および成果〕

本研究において、2 件の成果が得られた。以下に、それぞれの成果の詳細について報告する。

1 件目の成果として、本研究では、狭帯域信号検出システムへ適用可能な可変デジタルフィルタのクラスを従来よりもさらに広くできる理論を確立した。これまでの提案手法では、高次の伝達関数を適応制御することは理論的に可能であるが、狭帯域信号の検出システムに提案手法を実際に適用する場合には、用いる可変デジタルフィルタのクラスをバタワース型の特性に限定する必要があった。この理由は、バタワース型の場合はフィルタの振幅特性がリップルを持たず、これによって狭帯域信号検出問題における評価関数が単峰性となり常に最適解が得られるからである。一方、可変デジタルフィルタがバタワース型でない場合には、振幅特性にリップルが生じる可能性があり、評価関数が多峰性となって狭帯域信号検出システムが局所解に収束してしまう恐れがある。そこで本研究

では、この問題を解決できる理論を確立することに成功した。すなわち、可変デジタルフィルタがバタワース型でない場合においても、その伝達関数がある条件を満たすならば、狭帯域信号検出システムは局所解に収束せず常に最適解が得られることを理論的に証明した。この伝達関数についての条件はかなり緩く、実用的に用いられる多くのデジタルフィルタがこの条件を満足する。ゆえに、これまでは利用できなかった多くのクラスの可変デジタルフィルタを、狭帯域信号検出システムに適用できる。例として、可変デジタルフィルタの伝達関数を第 2 種チェビシェフ型とした場合の狭帯域信号検出の収束特性を、従来のバタワース型フィルタの場合とともに示す。図 1 より、どのフィルタも最適解(グラフ縦軸の 0.4 の値)に収束しており、ゆえに、バタワース型でないフィルタでも狭帯域信号検出システムに適用可能であることが実証されている。また、出力信号の S/N 比を測定したところ、第 2 種チェビシェフ型の方が従来のバタワース型よりも優れていることが確認された。

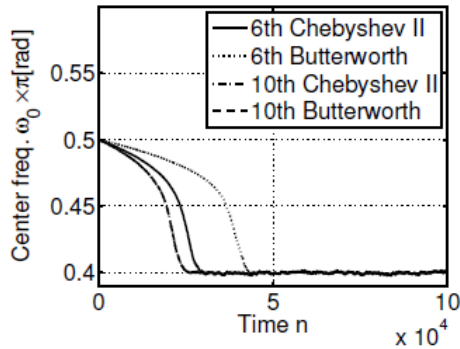


図 1: 狭帯域信号検出システムの収束特性

ス型よりも高いという結果が得られた。ゆえに、この研究成果を利用すると、従来よりも小さいフィルタ次数で高い性能の狭帯域信号検出システムを実現することが可能となり、システムの高精度化・低消費電力化を実現できる。

本研究におけるもう 1 件の成果は、量子化誤差の小さい高精度フィルタ構造に基づく狭帯域検出アルゴリズムの高速化である。この研究では、高精度フィルタ構造として有名な正規化ラティス構造に着目し、この構造を用いた 2 次の可変帯域阻止フィルタによる狭帯域検出システムの検出速度を、従来の手法よりも高速化することに成功した。提案手法の特徴は、従来知られている正規化ラティス構造特有のアルゴリズムと、一般的によく知られている勾配法のアルゴリズムの 2 つを重み付け和によって組み合わせている点にある。このアプローチによって、提案法では、最適化におけるパラメータの平均更新量を従来よりも増加させ、その結果として狭帯域検出の高速化を達成している。従来法と提案法それぞれの平均更新量を図 2 に示す。ここで、図中の LGA と SLA は、従来法として知られている勾配法によるアルゴリズムと正規化ラティス構造によるアルゴリズムの平均更新量をそれぞれ表している。図 2 より、従来法である LGA および SLA と比べて、提案法の平均更新量は大きくなって

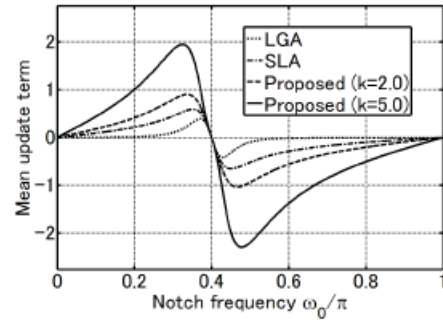


図 2: 平均更新量の比較

いることが確認される。ゆえに、提案法は従来法よりも狭帯域検出を高速に実現できることが実証される。また、前述の通り、提案法は量子化誤差の小さい正規化ラティス構造に基づいているため、提案法を信号処理プロセッサ上に実装した場合には、短いビット長でも高い演算精度で信号処理を実現できる。すなわち本研究成果は、高速な狭帯域信号検出と回路規模の削減を同時に達成可能である。なお、この成果は現時点では 2 次(すなわち低次)の可変デジタルフィルタにのみ適用可能となっているため、今後はこの手法を拡張し、1 件目の成果で述べたような幅広いクラスの可変デジタルフィルタにも適用できるようにする予定である。

〔発表論文〕

1. 坂本英史, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “振幅特性を考慮した高次の可変帯域阻止フィルタに基づく狭帯域雑音除去システム,” 情報処理学会第 75 回全国大会講演論文集, March 2013. (印刷中)
2. 中村紳一郎, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “平均更新量を増加させた正規化ラティス構造に基づく適応ノッチフィルタのアルゴリズムの提案,” 2013 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, March 2013. (印刷中)

【09】 アトムプローブを用いた異種原子クラスターの観察および極浅活性層形成の制御

研究代表者 東北大学金属材料研究所 助教 清水 康雄

〔研究の概要〕

さらなる高性能化・微細化が求められるシリコンデバイス開発において、異種不純物原子間に働く相互作用を利用した極浅接合形成法が注目されている。例えば、 p 型の電気的活性層形成にはホウ素を添加すると同時に、その拡散を抑えるために炭素の添加が有用とされているが、電気的活性に与える炭素の影響は明らかではない。本研究では、原子レベルの位置分解能を有する3次元アトムプローブ法を適用して、シリコンに共注入した異種原子（炭素－ホウ素）のクラスター分布を調べ、広がり抵抗測定法で得られた深さ方向の電気的特性評価結果と結び付けて、電気的活性に対する炭素の影響を明らかにした。

〔研究経過および成果〕

現在、シリコンデバイス開発では、極表面領域における電気的活性層の形成が鍵を握り、この形成には高精度なイオン注入技術とそれに続く熱処理による制御が必須である。この実現には不純物（ドーパント）拡散分布の抑制と電気的活性化の機構を正確に理解し、これらを制御することが急務である。

最近の動向では、活性層形成の有力な方法の一つに異種不純物共注入による拡散抑制技術が注目され、シリコンデバイスへの応用が期待されている。例えば、 p 型活性層形成にはホウ素を添加するが、シリコン中のホウ素拡散は他の主要ドーパントに比べて速く、所望の分布制御は困難である。そこで炭素を添加することによってホウ素拡散源であるシリコン格子間原子を捕獲する特性を利用して、ホウ素拡散を抑えてきた。これまで、3次元アトムプローブ法による実空間解析で、熱処理によって炭素が凝集（クラスター化）し、その近傍にホウ素が取り込まれることが分かり、炭素－ホウ素間の相互作用がホウ素の熱処理による拡散機構を理解する上で重要であることが分かりつ

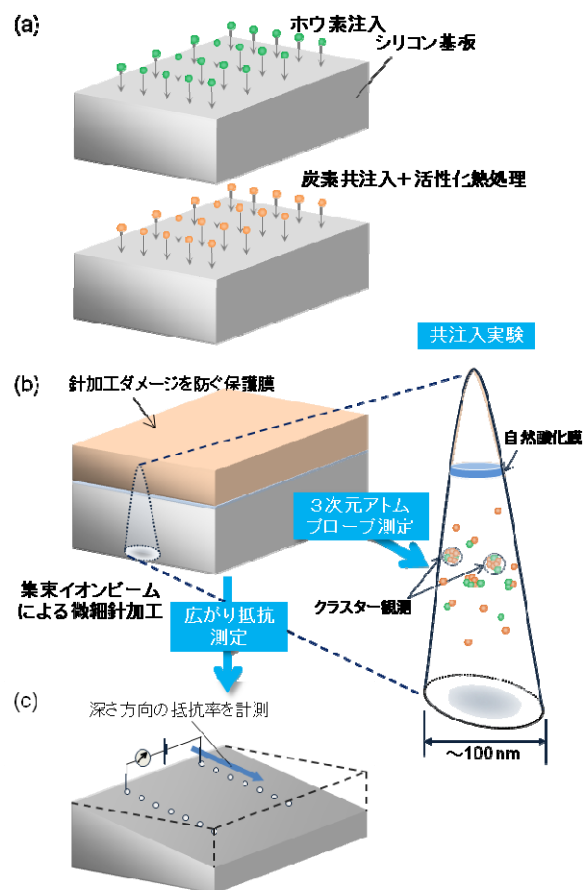


図1：(a) シリコン基板への不純物（ホウ素・炭素）の共注入実験。(b) 3次元アトムプローブによるクラスター観察及び (c) 電気的特性（キャリア濃度）評価を組み合わせた新しい実験体系の概念図。

つある。一方、活性機構について、ホウ素活性化に対する炭素添加の影響は明らかではなかった。本研究では、シリコン中の炭素－ホウ素の組み合わせに着目し、3次元アトムプローブ法による不純物複合クラスターの実空間分布評価と、広がり抵抗測定法による深さ方向の電気的特性評価と結び付けた新しい実験体系(図 1 参照)を確立し、炭素凝集位置・密度とホウ素の電気的活性の相関を調べた。

まず、(100)面のシリコン基板を用意し、ホウ素イオン注入を施した後、炭素イオン注入した試料としていない試料を用意し、熱処理を実施した。これらの試料に対して、3次元アトムプローブ法と広がり抵抗測定法を適用した。

図 2(a)には熱処理後の炭素とホウ素の3次元アトムマップを示す。ここでは、深さ約 40 nm 付近で炭素が

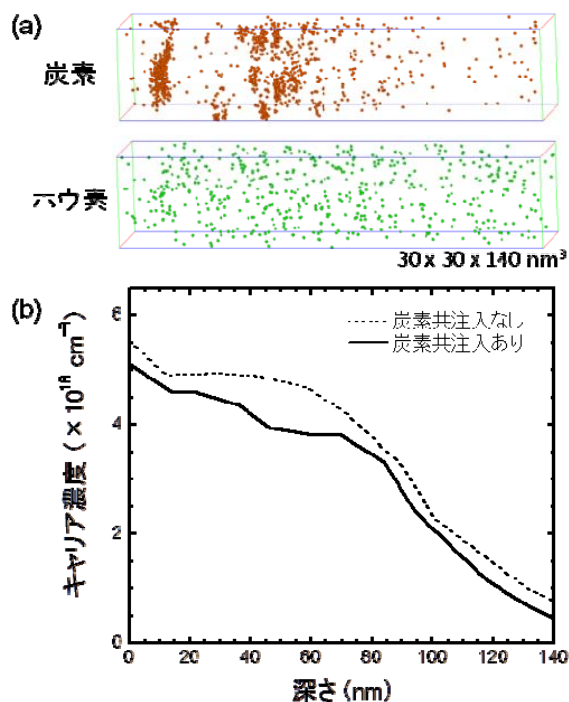


図 2：(a) 共注入した試料（熱処理後）の炭素とホウ素の3次元アトムマップ。(b) 炭素共注入あり／なし試料の深さ方向キャリア濃度分布。(a) と (b) は深さスケールを揃えている。

著しく濃化し、ホウ素も僅かに濃化していることが分かった。この分布と広がり抵抗測定結果(図 2(b))を照らし合わせると、炭素注入していない試料と比べ、炭素共注入によってキャリア濃度が減少している傾向が見られた。これまで、炭素共注入によってホウ素拡散を抑制してきたが、本研究ではキャリア濃度の低下を招くという知見を得た。今後は、炭素のイオン注入条件を最適化することにより、ホウ素の拡散分布抑制と電気的活性化低下を防ぐ方法を見出すことが重要である。

本研究では、3次元アトムプローブ法による実空間分布評価と広がり抵抗測定法による電気的特性評価を照らし合わせることで、炭素凝集化の発見と、その凝集がホウ素の電気的活性に与える影響を明らかにした。ここで確立した実験体系は、今後ゲルマニウムや化合物半導体へも適用範囲を広げることができ、普遍的な新デバイス創製に向けた重要性を見出せると期待できる。

〔発表論文〕

1. 清水康雄, 高見澤悠, 井上耕治, 矢野史子, 永井康介: “シリコン中に共注入した炭素がホウ素活性化に与える影響” 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013 年 3 月 (発表予定).

【10】レアメタルを使用しない太陽電池用新規化合物半導体の創製

研究者 群馬大学大学院工学研究科 准教授 尾崎 俊二

〔研究の概要〕

CuInSe₂ 半導体は近年太陽電池材料として使用されているが、その代替材料として、希少金属のインジウム(In)を含まない新規化合物半導体を創製することを研究の目的とした。本研究では、III 族元素の In を IV 族のスズ(Sn)で置換した I₂-IV-VI₄ 族化合物の Cu₂SnSe₄ 半導体を提案し、その基礎電子物性を調べた。まずは、垂直ブリッジマン法によるバルク結晶の育成を行った。得られた結晶は、格子定数が 5.69 Å の立方晶系(空間群 $F\bar{4}3m$)であることがわかった。また、光吸収スペクトル、反射率スペクトル、温度変調反射率スペクトルを測定し、Cu₂SnSe₄ 半導体の光学遷移による臨界点構造を観測した。

〔研究経過および成果〕

1. 結晶成長

Cu₂SnSe₄ 半導体バルク結晶は、三段階の工程を経て成長させた。まず第一段階として、純度 99.9999% の Cu, Sn, Se をモル比 Cu:Sn:Se=2:1:4 に秤量し、石英管内に真空(10⁻⁶ Torr)封入することでアンプルを作製する。このアンプルを電気炉内で 1100°C まで徐々に加熱、24 時間保持後、50°C/h で冷却することで、セレン化を行った。第二段階として、セレン化した試料を粉末状に粉砕し、石英管内に再度真空封入することでアンプルを作製、そのアンプルをゆっくりと回転させながら加熱した。これは、熔融材料をよく攪拌させることにより、組成が均一となるようにするためである。このとき、アンプルの回転速度は 30 rpm とし、1 時間毎に逆回転させている。また、加熱は徐々に 900°C まで上昇させ、その温度で 24 時間保持した。第三段階では、このようにして得られた Cu₂SnSe₄ 多結晶を、垂直ブリッジマン法にて単結晶成長させた。このとき、冷却速度は~1.0°C/h とした。

得られた結晶は粉末 X 線回折(XRD)測定により評

価した。Fig. 1 に測定結果を示す。As-grown 結晶(a)では、PDF データ(c)との比較により、格子定数が 5.69 Å の立方晶(空間群 $F\bar{4}3m$)の Cu₂SnSe₄ 結晶が成長していることがわかる。しかし、Se に起因するピーク

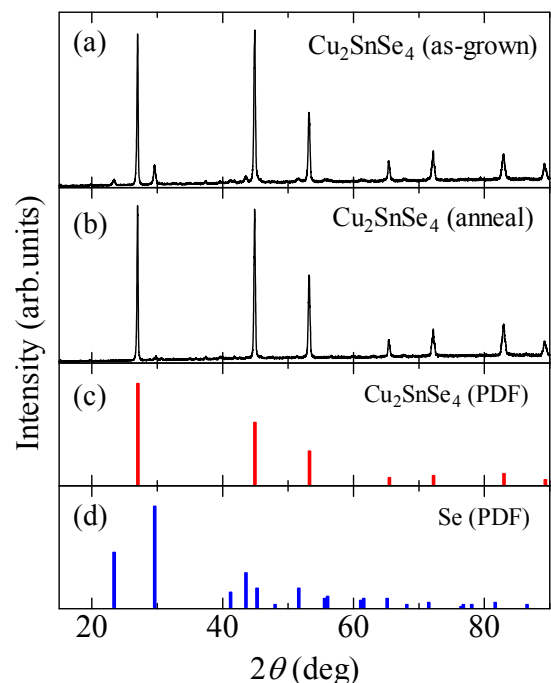


Fig. 1. Cu₂SnSe₄ の XRD 測定結果 (a)as-grown 試料 (b)アニールした試料 (c)Cu₂SnSe₄ の PDF データ (d)Se の PDF データ

が、小さいが $2\theta\sim 29.6^\circ$ に観測されている。この未反応 Se 元素を無くすために試料をアルゴンガス雰囲気中 300°C にてアニール処理を行った。その結果、Fig.1(b)に示すように、アニール処理した試料においては、 $2\theta\sim 29.6^\circ$ に観測されていたピークが無くなっている。このことは、蒸気圧の高い未反応 Se 元素が除去されていることを示している。

2. 光学的評価

光学的評価を行うために、インゴットから切り出した試料の表面を鏡面研磨し、超音波脱脂洗浄を行った後、 Br_2 -メタノール混液を用いてエッチングを行った。Fig. 2 に光吸収スペクトルの測定結果を示す。図からわかるように、 Cu_2SnSe_4 の光吸収係数は、 $1.2\sim 5.2\text{ eV}$ において $10^5\sim 10^6\text{ cm}^{-1}$ と大きいことがわかる。また、

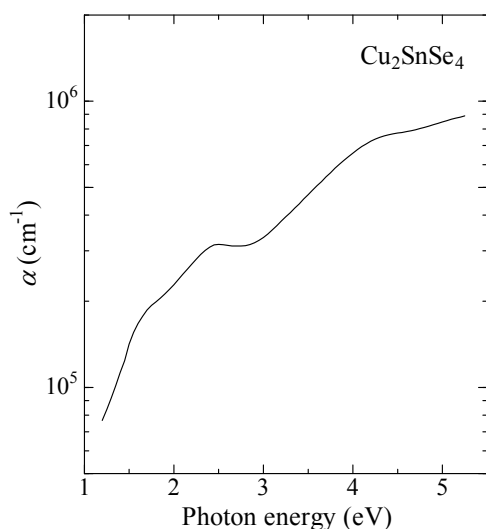


Fig. 2. Cu_2SnSe_4 の光吸収スペクトル

2.3 eV にはエネルギーバンド間光学遷移過程による臨界点構造がピークとして現れている。本研究における 0.9 eV 以上の光吸収測定においては、基礎吸収端(E_g)を観測することができなかった。したがって、 Cu_2SnSe_4 は $E_g < 0.9\text{ eV}$ の半導体である。一方、Zn を

加えた $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 半導体とすることで、 E_g は 1.0 eV となることがわかった。

Cu_2SnSe_4 半導体における電子エネルギーバンド構造を調べるために、温度変調分光測定を行った。その結果を Fig. 3 に示す。反射率スペクトル R では 1.5 eV , 2.3 eV , 4.2 eV に臨界点によるピークが観測され

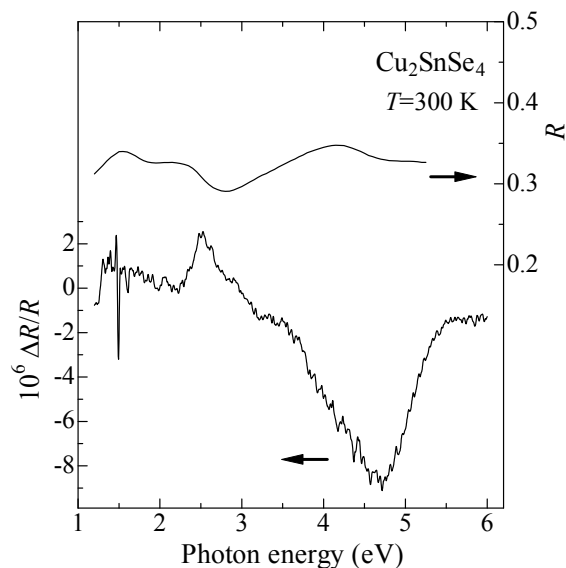


Fig. 3. Cu_2SnSe_4 の反射率スペクトル(R)と温度変調分光スペクトル($\Delta R/R$)

ている。一方、温度変調反射率スペクトルでは、それらのピークがより明確なピークとして観測されている。特に 1.5 eV のピークはシャープに観測されていることがわかる。これは、温度変調反射率スペクトルが、反射率スペクトルの一階微分に対応したスペクトルとなることに起因している。

〔発表論文〕

1. S. Ozaki, and T. Namba: Optical properties and electronic band structure of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ kesterite semiconductor, Physica status solidi (c) 9, 2403 (2012).

【11】ワイヤで連結された作業機の遠隔駆動による移動型広域作業システムの開発

研究者 埼玉大学大学院理工学研究科 助教 程島 竜一

〔研究の概要〕

天井クレーンに代表されるテザー懸垂装置は、軽量で構造が簡単である特長から倉庫などで重量物の搬送作業に用いられており、収納性に優れている特長から広範囲に活動するロボットの移動補助装置としても利用されている。このような背景のもと、大規模空間を短時間で作業するシステムとして、数本のテザーを用いたパレルテザー懸垂機構に関する研究が盛んに行われている。しかし、これらの懸垂機構はテザー端部が環境に固定されているため作業範囲が限られており、また外乱や位置誤差への対応が困難である。そこで本研究では、並走する2機の走行車両間にループ状に架け渡した2本のテザーを利用して往復運動する懸垂装置を用いることで、作業空間に制限のない全く新しい広域作業システムを実現する。

〔研究経過および成果〕

本システムでは、図1のように2台の車両間にループ状に張ったテザーで懸垂する装置を、片側の走行車両上にあるウィンチAとBを駆動することで並走する2台の車両間を移動させる作業システムである。そして、その主な特長は次の二つである。

- 本提案システムは従来のテザー懸垂システムの問題を解決し、作業空間に制限がなく状況に応じてシステムを再構成できるものである。すなわち、ウィンチ機構を走行車両に搭載することにより、テザー基部を移動可能とし、ループ状テザーと片側の車両上にある2台のウィンチ機構の連結・分離により、懸垂装置を鉛直・水平に搬送可能なシステム、または負のエネルギー発生を抑制できるシステムを選択できる。
- 本システムは広範囲の作業を短時間で遂行でき、懸垂装置の交換のみで様々な作業に応用できるため、産業や農業における広域作業の省力化・効率化に貢献できると考えられる。

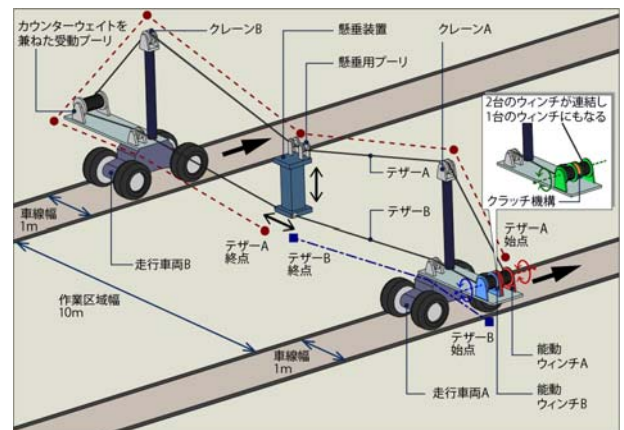


図1 提案する広域作業システム概念

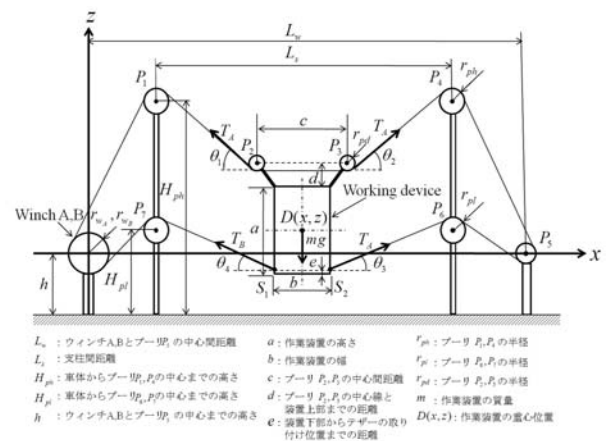


図2 テザー懸垂システムの解析モデル

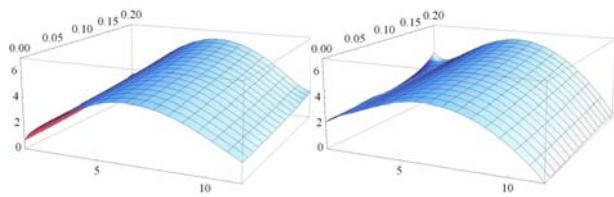


図3 テザー静力学解析の結果

まず、提案するシステムにおいて重要な要素技術となるテザー懸垂システムについて検討を行った。解析モデルを図2のように設定し、逆運動学および静力学解析(図3)を行い、テザー懸垂システムの準静的な運動を定式化した。そして、この運動解析と動力学シミュレーションを基にテザー懸垂システムの実験装置を開発した(図4)。この実験装置を使用して、逆運動学の検証実験(図5)や静力学解析の検証実験を行い、先行して行った解析の妥当性を検証した。そして、テザー懸垂システムを構成するウィンチ機構やテザーを支える支柱やプーリの諸元について知見を得ることができた。

次に、テザー懸垂システムを搭載する協調走行車両システムを開発することとした。市販の大型ラジコン模型自動車を改造し、自立走行のための計算機、マイコンおよびセンサ類を導入してシステムの試作を行った。協調走行システムの制御アルゴリズム開発に関しては基礎研究の段階であるが、並走して直進可能であること、協調走行制御にテザー張力を利用することの有効性を確認することができた。

広域作業システムの実験装置として現段階では未完成な部分もあるが、図6に示すように提案する広域作業システムの実験システムを完成させることができた。今後はジャイロなどのセンサ類の導入や、運動制御アルゴリズムの開発を行い、実用化に向けた実験



図4 テザー懸垂システムの実験装置

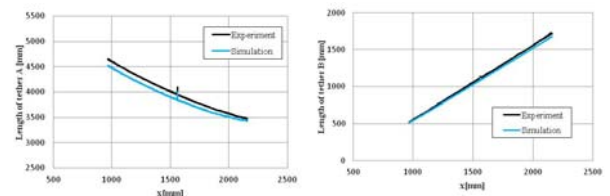


図5 テザー逆運動学の検証実験結果



図6 広域作業システムの試作装置

を行っていく予定である。将来的には牧草地での草刈り作業や、トンネル内壁の劣化度推定、地雷探査作業などへ応用していきたいと考えている。

〔発表論文〕

1. 浦翔太郎, 程島竜一, 琴坂信哉, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男: “テザー懸架型装置と不整地走行車両を用いた移動型広域作業システムの研究”, 日本機械学会関東学生会第51回学生員卒業研究発表講演会, pp.371-372, 2012.

【12】 AFM陽極酸化法による酸化グラフェンナノ構造の作製と その光検出器応用に関する研究

研究者 東京大学ナノ量子機構 特任助教 増淵 寛

〔研究の概要〕

グラフェンは、高いキャリア移動度($\mu = 200,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)・高い光透過率 (97%)・高い柔軟性を有することから、フレキシブル光電子デバイスの構成要素として期待されている。しかしそのバンド構造にはエネルギーギャップが存在しないため、光電子デバイスに応用する際に必要とされる基本物理現象であるフォトルミネッセンスを示さない。本研究では、原子間力顕微鏡 (AFM) リソグラフィー法を利用して、酸化グラフェンを局所生成することで、グラフェン中にバンドギャップを導入する実験を行った。

〔研究経過および成果〕

グラファイトの単分子膜であるグラフェンは、室温において高いキャリア移動度($\mu = 10,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)を示すことから、次世代のエレクトロニクス材料として注目を集めている。しかし、そのバンド構造にはエネルギーギャップが存在しないため、グラフェンを利用したスイッチング素子・光電変換素子が作製できないという問題を有している。グラフェンにエネルギーギャップを形成させる手段として、グラフェンを酸化し、酸化グラフェンを作製する手法が知られる[K. P. Loh et al., Nature Chemistry (2010)]。グラフェンに酸素を付加するとグラフェンの電気伝導を担う π 電子の数が減少し、エネルギーギャップが形成される。エネルギーギャップは酸化度とともに増大する。

申請者は近年、原子間力顕微鏡 (AFM) を利用してグラフェンを局所的に酸化することで、様々な酸化度を有する酸化グラフェンを nm スケールの領域に作製することに成功した。バンドギャップを有する酸化グラフェンを利用することで、グラフェンでは実現し得な

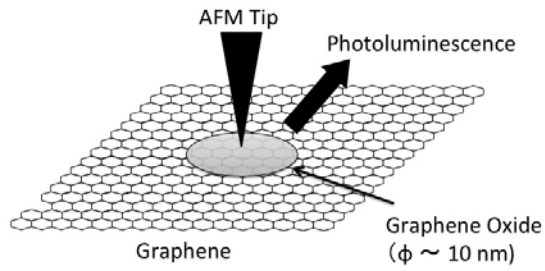
かった、光機能を有する単分子膜素子の実現可能性が高まっている。

本年度は、半導体的特性を有する酸化グラフェンを光吸収層、グラフェンを電子輸送層として利用した酸化グラフェン/グラフェン平面接合型光検出器の実現を目指し、グラフェン/酸化グラフェン/グラフェン面内接合素子の電子物性評価、および酸化グラフェン層のラマン分光・フォトルミネッセンス測定を行った。

単層クグラフェンの作製にはメカニカル劈開法を用いた。電子線リソグラフィー法により金属電極を作製し、原子間力顕微鏡をコンタクトモードで用いてグラフェンに対する局所陽極酸化を行った。陽極酸化を行うことによりグラフェン/酸化グラフェン/グラフェン面内接合素子を作製した。素子の電流-電圧曲線を評価し、酸化グラフェン中にバンドギャップが形成されることに起因する非線形な電流-電圧曲線を観測した。

酸化された領域の物性を評価するために、ラマン分光測定を行った。グラフェンが酸化され、グラフェン中に格子欠陥が導入され、ラマン分光スペクトル中に、

通常のグラフェンでは観測されないDバンド、D'バンド



ドが観測され、さらに、G・2Dスペクトルの半値幅が増大した。DバンドーGバンドスペクトル強度比より、酸化グラフェンの酸化度を見積もったところ、数十%程度の酸化度が得られることが確認できた。

酸化グラフェン素子において、フォトルミネッセンス測定を行った。酸化グラフェン素子は単分子層膜であるため発光強度がきわめて微弱であると考えられる。顕微フォトルミネッセンス測定装置と高感度CCD光検出器を組み合わせ、発光スペクトルの観測を試みた。酸化グラフェンにおいてフォトルミネッセンス測定を行ったところ、 $\lambda \sim 600\text{nm}$ 付近においてフォトルミネッセンスを示唆するスペクトルを得た。酸化グラフェンは 1~4 eV 程度のバンドギャップを有するため、600 nm 程度で発光すると期待される。更なる研究により、発光メカニズムの解明が望まれる。

さらに本研究では、原子間力顕微鏡を用いた局所陽極酸化法でリソグラフィ分解能に 大きな影響を与える、カンチレバーの種類、印加電圧、湿度、掃引速度など、多くの要素のそれぞれの条件に対して系統的な調査と最適化を行った。

以上の結果により、フォトルミネッセンスを酸化グラフェンへの電流注入および光物性の評価が可能となった。AFM局所陽極酸化法と組み合わせることで、光検出器素子の実現可能性を示唆するものであり、今後の研究により更なる発展を目指す。

〔発表論文〕

1. S. Masubuchi, M. Arai, and T. Machida, “Atomic Force Microscopy-Based Local Tunable Oxidation of Graphene”, American Physical Society March Meeting, Boston, USA (2013) (oral).

【13】 シリコンフォトニック結晶光共振器によるミセル化カーボンナノチューブの発光増強

研究者 東京大学大学院工学系研究科 准教授 加藤 雄一郎

〔研究の概要〕

カーボンナノチューブはフォトルミネッセンスや電界発光を示し、よく光るナノ材料として知られており、シリコン基板上で合成可能な材料でもある。一方、2次元フォトニッククリスタル光共振器はモード体積が小さく、共鳴波長が制御可能であり、ナノ材料との相性がよい。そこで、本研究ではカーボンナノチューブの発光増強に適したシリコンフォトニック結晶共振器を設計および作製し、ミセル化カーボンナノチューブを塗布して顕微分光を行うことにより、発光増強を確認した。

〔研究経過および成果〕

単層カーボンナノチューブとは文字通り炭素一層からなる直径 1~3 ナノメートル程度の筒状物質のことである。炭素原子からなる六角形を平面状に並べて蜂の巣格子になっている膜をグラフェンと言うが、単層カーボンナノチューブはこれを巻いて筒にした構造を持っている。この材料の面白いところは、その巻き方によって電子構造が大きく変わり、金属になったり半導体になったりするという点である。このうち、半導体のカーボンナノチューブは、半導体の中でも直接半導体という発光効率の高い部類に属する。また、そのバンドギャップエネルギーもナノチューブのカイラリティに依存し、発光波長としては 700 nm から 2300 nm と通信波長帯を含む幅広い領域に対応する種類が存在することが知られている。さらに、化学気相成長法により Si 基板上で合成できるうえ、長さはミクロン以上になるため電極を取り付けるのが比較的容易であり、デバイス加工上のメリットは大きい。これらの理由からカーボンナノチューブはナノレーザーや単一光子源など、ナノ

オプトエレクトロニクスへの応用の可能性が注目を浴びている。

一方、シリコンフォトニクス of 近年の発展は目覚しく、電子回路と光回路を融合させた光配線などが利用できる新しい情報通信集積素子への応用が期待されている。しかし、シリコンは間接遷移半導体であるため、電子と正孔の再結合による発光は効率が低く、発光素子には適さない。

そこで、本研究では、シリコン基板上に直接合成することができるカーボンナノチューブを用いた発光素子をシリコンフォトニクスと融合することを視野に入れ、ナノ材料の発光増強に実績のあるフォトニック結晶共振器を用いて、カーボンナノチューブの発光を増強することを試みた。

フォトニック結晶は誘電率が周期的に変化する構造を持たせた人工結晶であり、光に対するバンドギャップを持たせて光が進入できないようにすることが可能である。そこに、その周期性を乱す「欠陥」を導入すると、そこに光を閉じ込める共振器を実現できる。この欠陥の形状・大きさや、元となるフォトニック結晶の周期性により共振器の

共鳴波長と偏光特性が決定されるため、所望の共鳴波長を持つ共振器の設計が可能となる。また、光共振器内でナノ材料と光を相互作用させるとき、リング共振器などと比較してモード体積の小さいフォトニック結晶共振器は極めて魅力的である。モード体積が小さい共振器では光のエネルギーがその狭い空間に集中し、電場強度も大きくなって相互作用が強くなるからである。ここではシリコン・オン・インシュレーター（SOI）基板に周期的な穴を開けてフォトニック結晶とした（図1）。

この共振器上に、ミセル化したカーボンナノチューブを塗布し、フォトルミネッセンス測定を行った。上述のように、カーボンナノチューブ同士が束になった状態では光らないため、これを回避するために界面活性剤によりミセル化する方法を用いた。1250 nm より長波長の領域ではSiは発光しないため、この波長領域で共振器モードにおける発光が確認できれば、カーボンナノチューブとフォトニック結晶共振器が光結合しているという直接的な証拠となる。そこで、共振器の基底モードが約1400 nm となるように格子定数 $a = 380$ nm、穴の半径 $r = 100$ nm という設計を選んだ。作製後のフォトニック結晶にナノチューブ溶液を滴下し、スピコートを行うことで表面に塗布した。発光スペクトルを図2に示す。共振器上で取得したスペクトルには、設計どおり1400 nm 付近に共振器の基底モードのピークが観測され、ナノチューブと共振器が相互作用していることを示すデータとなった。未加工部分の発光と比較し、少なくとも50倍程度発光が増強されていると見積もることができている。

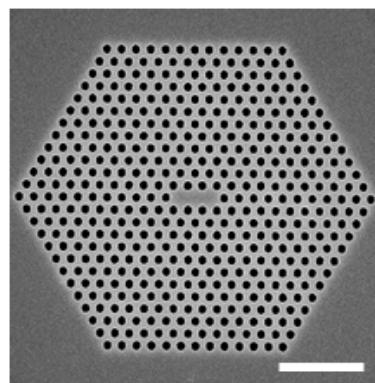


図1：フォトニック結晶共振器の電子顕微鏡像。

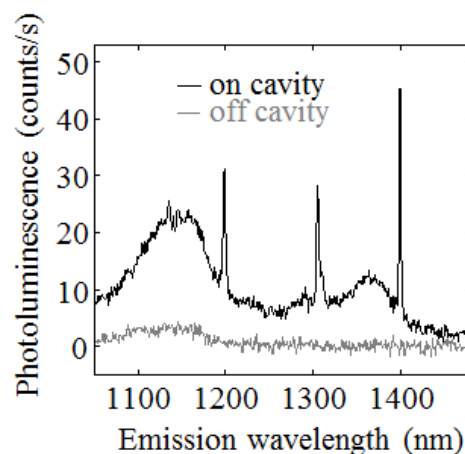


図2：共振器部分と未加工部分におけるフォトルミネッセンススペクトル。

〔発表論文〕

1. R. Watahiki, T. Shimada, P. Zhao, S. Chiashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, S. Maruyama, and Y. K. Kato, Appl. Phys. Lett. **101**, 141124 (2012).
2. R. Watahiki, T. Shimada, P. Zhao, S. Chiashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, S. Maruyama, and Y. K. Kato, Bull. Am. Phys. Soc. **57**, X6.00003 (2012).

【14】 太陽光を利用した人工光合成半導体チップの創生

研究者 東京工業大学電子物理工学専攻 教授 波多野 睦子

〔研究の概要〕

太陽光を用いてCO₂還元、貯蔵・輸送可能なエネルギーに高効率変換する半導体チップを低コストで実現することを最終的な目標とする。カシオ科学振興財団殿のご支援期間に、立方晶 3C-SiC半導体をベースとし、Ptナノ粒子を助触媒として担持したチップを提案し、光利用効率約 0.5%の長寿命化(4 時間以上)を確認し、人工光合成チップの可能性を示すことができた。

〔目的〕

人工光合成は太陽光のエネルギー変換と貯蔵を兼ね備えた役割を担い、低炭素社会を実現する将来の技術として期待されている。本研究は、立方晶 3C-SiC をベースとしたバンドエンジニアリングにより、太陽光の広い波長領域の光吸収を可能とし、固/液体界面での光化学活性反応の促進とキャリア輸送の向上を図ることにより、高効率光合成チップを実現することを目的とする。

〔研究経過および成果〕

図 1 に半導体の伝導帯と価電子帯準位、水及び二酸化炭素の酸化還元電位の関係を示す。人工光合成として次の条件が必要である。①可視光を吸収する $E_g < 3\text{eV}$ 、②伝導帯の位置が還元電位よりも負にあり、励起電子によって還元されない、③価電子帯の位置が酸化電位よりも正にあり、ホールによって酸化されない。本研究では、これらの条件を満たす可能性のある 3C-SiC 半導体をベースとしたチップを提案した。3C-SiC はSi基板上に成長できるため、大面積化、コストの観点から有利である。図2に示すように、溶液中で n 型 3C-SiC 半導体表面に形成される空乏層では、光照射により電子正孔対が生成され、電子はバンドの勾配に沿って半導体内部方向に移動し、

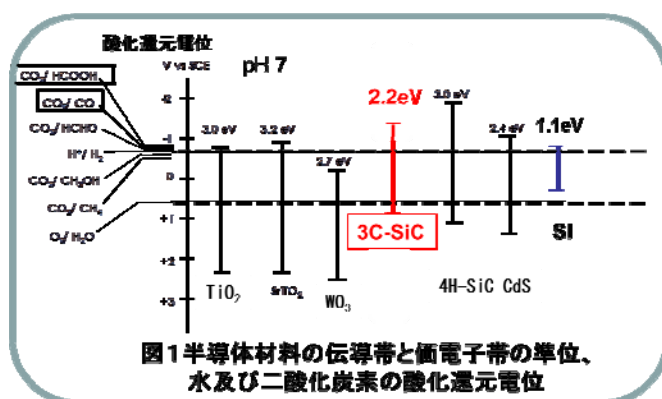


図1 半導体材料の伝導帯と価電子帯の単位、水及び二酸化炭素の酸化還元電位

Al 電極を介して対向電極の Pt に移動し、水を還元させて水素を発生する。正孔は n 型 3C-SiC 電極表面で水を酸化させ、酸素を発生させる。

図3にサイクリックボルタメトリー(CV)特性の 3C-SiCに導入したリンの不純物濃度依存性を示す。擬似太陽光照射による光電流が検出され、不純物濃度が低いほど光電流が大きくなることが確認できた。これは光励起されたキャリアのライフタイムが向上することによる。また可視光の応答性が高いことを確認

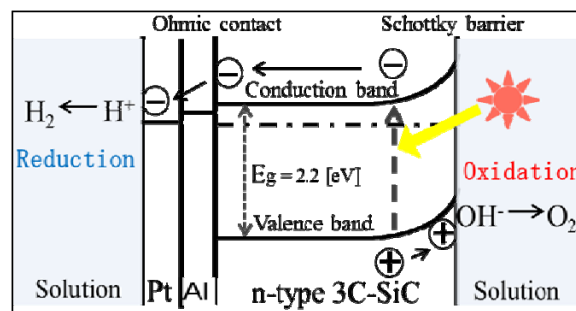


図2 チップの構成とエネルギーバンド構造

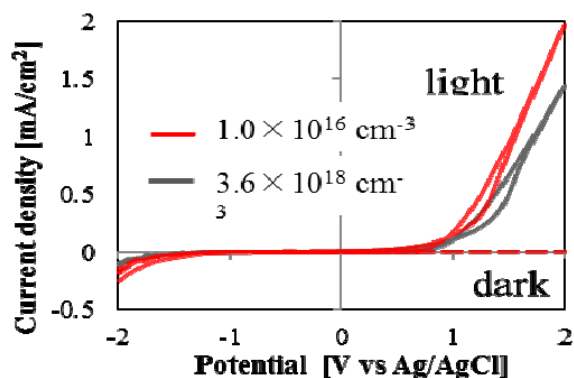


図3 3C-SiCの不純物濃度依存性(CV特性)

し、TiO₂に比べて有利であることがわかった。しかし光利用効率は約 0.02%と低く、n型SiC半導体の表面酸化による寿命低下が問題であることがわかった。

効率と寿命の両方を向上するために、3C-SiC半導体表面にPtナノ粒子(直径 3~5nm)を担持した。この狙いは、発生した電子と正孔の分離の促進、正孔の輸送効率の向上、化学的な安定なPtによる寿命

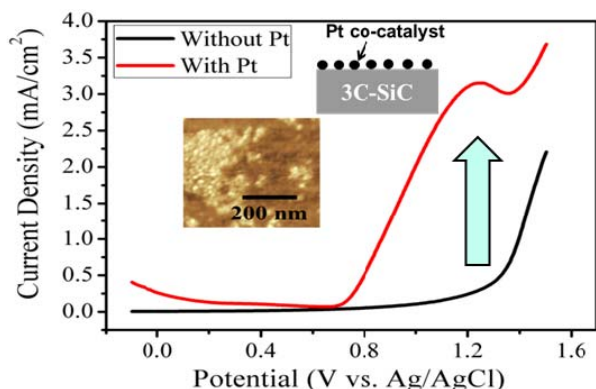


図4 Ptナノ粒子担持による光利用効率向上(CV特性)

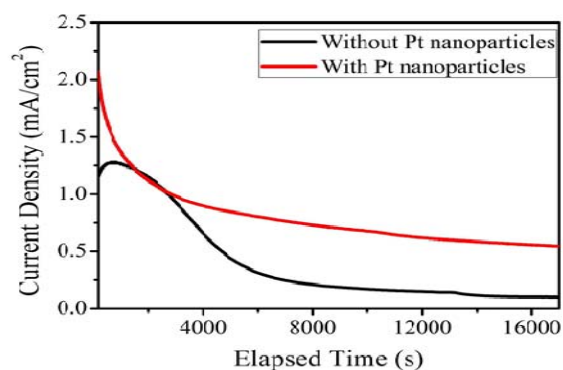


図5 Ptナノ粒子担持による寿命の向上(光電流の時間変化)

の向上である。図4に示すように、過電圧は 1.2Vから 0.6V低減し、光電流が増大し、光利用効率は約 0.5%に向上した。また印加電圧ゼロでの光誘起電流が検出された。さらに図5に示すように、Ptナノ粒子の担持によりSiC半導体の酸化が抑制され、長寿命化(4 時間以上)が図れることを確認した。現在ガスクロマトグラフィのリアルタイム計測により、CO₂還元の基本データを取得している。

以上示したように、3C-SiC 半導体の人工光合成チップの応用の可能性を示すことができた。今後は、固/液体界面での光化学反応やキャリア輸送を解明し、図 6 に示すステップで光利用効率向上を図り、優位性を明確にしていく。

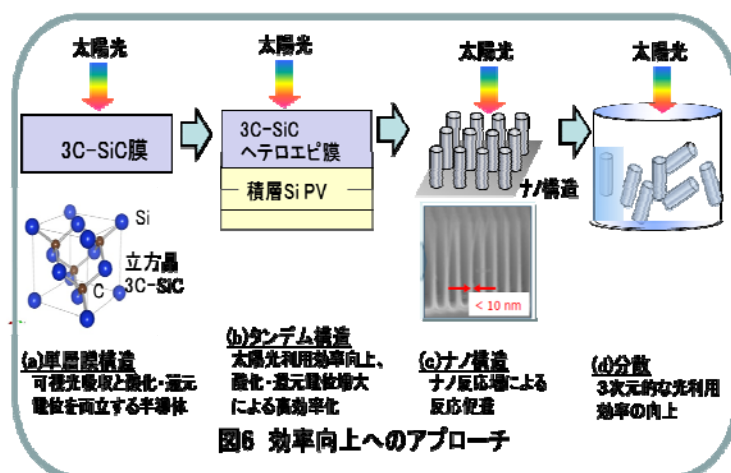


図6 効率向上へのアプローチ

〔発表論文〕

1. 2012 年春季第 58 回 応用物理学関係連合講演会
2. 2012 International Education Forum on Environment and Energy Science
3. 2013 MRS(Material Research Society) Spring Meeting
4. IEEE EDS WIMNACT-37: Future Trend of Nanodevices and Photonics.
5. 2013 年春季第 60 回 応用物理学関係連合講演会

【15】 光近接場励起輸送デバイスに関する研究

研究者 山梨大学大学院医学工学総合研究部 教授 小林 潔

特任助教 石川 陽

教授 堀 裕和

助教 内山 和治

〔研究の概要〕

電子デバイスの配線と発熱問題、光デバイスの微小化とエネルギー消費の問題に焦点をあて、これらの問題を解決する環境エレクトロニクス要素技術の確立を目指し、光近接場を励起光源に用い、キャリアの物質内での直接移動（電流）のない励起移動過程により作動させ、ナノ空間で機能するデバイス原理を検討した。希薄磁性2重量子井戸からの外部磁場依存近接場発光を初めて観測し、励起移動経路が自発的に形成されることを見出した。また、配列制御された量子ナノ構造における超放射は、各ナノ構造の初期量子相関に起因する現象であることを初めて示すと同時に、スピン移動励起過程における環境系の多重構造が重要であるという新知見を得た。これらは、環境(リザーバ)系の構造によりナノ空間で自動的に配線され、自発機能をもつデバイス(リザーバコンピューティング)の可能性を示唆している。

〔研究経過および成果〕

本研究では、電子デバイスの配線と発熱問題、光デバイスの微小化とエネルギー消費の問題に焦点をあて、これらの問題を解決する環境エレクトロニクス要素技術の確立を目指した。具体的には、回折限界の影響を受けない光近接場を励起光源に用いることにより、可視光レーザーの波長より遙かに小さいナノ空間で機能するという特徴をもつデバイスで、キャリアの物質内での直接移動（電流）のない励起移動過程により作動させるデバイス原理を検討した。また、励起移動の電子、あるいは光子の内部自由度であるスピンに焦点をあてることにより、理論実験両面から、配線が不要で消費エネルギーを最小に押さえる基本デバイス要素の基礎研究を実施した。

図1に示すように、ZnO ナノディスクが1次元方向

に制御されて9層配列された系を用いて、自然放出の寿命と発光強度の励起光強度依存性を調べた。測定結果は、協同現象としての超放射であることを示しており、半数のナノディスクに生じた初期量子相関に起因する現象であることが理論的に明らかになった[1]。これから、励起レーザーのコヒーレンスが、光近接場を介して物質系に量子相関として転写され、系全体の協同現象が発現したと考えられる。

図2(a-b)にその概略図を示したように、独自開発

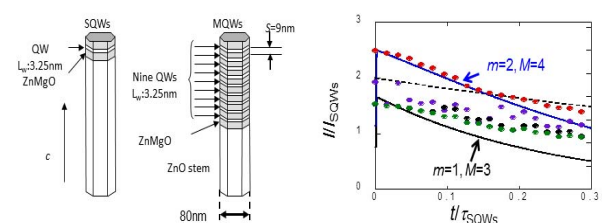


図1. 1次元に配列制御されたZnOナノディスクからの超放射の時間発展を示す実験結果(○印)と理論予測(実線) [1]

したナノスケールの絶対位置再現性をもつ走査型トンネル電子顕微鏡 (STM) 支援の近接場光学顕微装置 (SNOM) を用いて、図2(c)に示すように、トポグラフィック像を確認しながら、外部磁場を0~9T の範囲で印加させながら、希薄磁性半導体2重量子井戸 (DQW) からの近接場光を初めて観測した[2]。そのデータ解析から、図2(d)に示すように、薄色の経路を経由して矢印で記した部分まで励起移動が起こり発光していることが見て取れる。この結果は、環境に依存した試料の多様な共鳴励起エネルギー変化やフォノン、さらにはキャリアのスピンの依存した光近接場励起移動過程に起因していると考えられる。

一方、この実験に呼応して、DQW 内の励起子と光近接場との相互作用に対する全量子論モデルを基にしたスピン励起移動ダイナミクス理論の構築を行った。この理論モデル構築に際して、光子、電子正孔励起、格子振動に起因する場の量子ゆらぎと相関が本質的になることを強く意識して、ナノ領域から励起光の一波長メゾ領域に及ぶダイナミクスの記述に、従来の単一无限系としての熱浴系ではなく、時空間に局在した階層的環境系の重要性を指摘した[3,4]。この考察により、環境系を通して着目系のダイナミクスが決定される、すなわち系の制御が可能になるという方法論に新知見が得られた。また、第一段階の実験結果との比較検討課題として、スピン励起移動情報を含む DQW からの発光の円偏光度の時間依存性を取り上げ、励起子と光近接場の有効相互作用の強さを議論した。また、光近接場による励起移動過程・量子井戸内のフォノン緩和過程・光パルスによる励起過程など複数の時間スケールの競合が重要となることを明らかにした。

以上実験理論両面から、新しい光電子機能デバイ

スの原型として、環境(リザーバー)系の構造によりナノ空間で自動的に配線され、自発機能をもつデバイスの素過程の一面が明らかになった。

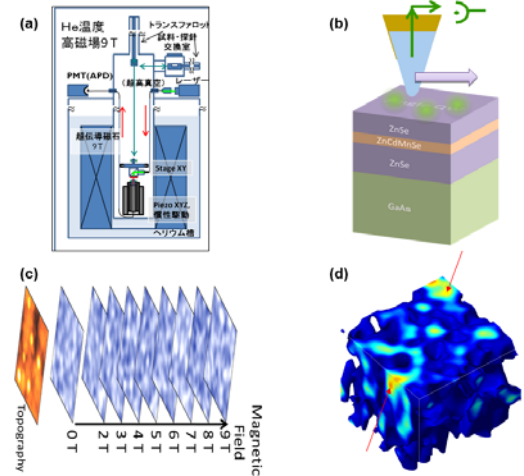


図2. (a) 独自開発 STM 支援 SNOM 装置の概略図, (b) 計測概略図, (c) トポグラフィック像と DQW からの外部磁場依存発光 SNOM 像, (d) 外部磁場に依存した励起移動過程

〔発表論文〕

1. T. Yatsui, A. Ishikawa, K. Kobayashi, A. Shojiguchi, S. Sangu, T. Kawazoe, M. Ohtsu, J. Yoo, and G.-C. Yi, Appl. Phys. Lett. **100**, 233118 (2012).
2. K. Uchiyama, S. Kubota, T. Matsumoto, K. Kobayashi, and H. Hori, submitted to The 9th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics (APNFO2013).
3. T. Suwa, A. Ishikawa, T. Matsumoto, H. Hori, and K. Kobayashi, Phys. Scr. **T151**, 014054 (2012).
4. T. Suwa, A. Ishikawa, K. Uchiyama, T. Matsumoto, H. Hori, and K. Kobayashi, The 12th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics, and Related Techniques, 144 (2012).

【16】 テラヘルツ技術によるガスハイドレート分解メカニズムの解明

研究者 名古屋大学大学院工学研究科 助教 竹家 啓

〔研究の概要〕

エネルギー、環境を取り巻く問題は現代社会が持続可能な発展を行うための最重要課題である。これらの課題において近年、ガスハイドレートと呼ばれる材料が注目を集めている。ガスハイドレートは密度や構造が氷と似ていることから、従来の観測手段では平衡状態、非平衡状態において氷との識別に困難さが伴い、未だ解明されていない現象が存在する。本研究では、テラヘルツ時間領域分光法による観測を行いガスハイドレートと氷の定量的、定性的な識別を行うと共に、多様なガスハイドレートのテラヘルツ波帯での基本特性を算出することをねらいとしている。さらに、テラヘルツ技術の高い時間分解能を利用して、動的なプロセス、例えば分解や生成におけるリアルタイム観測での評価の実現を目指し、ハイドレート基礎研究における新たな観測手段として確立する。本年度は分析のための光学系の構築を行い、分光装置の評価を行った。

〔研究経過および成果〕

ガスハイドレートは水分子とガス分子から構成される固体結晶のことであり、その構造は水素結合によって構築された籠状のネットワークにガス分子がトラップされることで構成される。体積に換算して約 170 倍のガスを結晶内部に包蔵することが可能であるため、新規天然ガス輸送手段としてもその利用が期待されている。このような結晶の生成は比較的高圧、低温の環境下で実現され、中でもメタンを内包するメタンハイドレートは世界各地の海底堆積物中や極限地域の凍土の下に存在が確認されている。日本の排他的経済水域にも多量のメタンハイドレートの存在が観測されており、天然資源としての利用が実現すればわが国に齎す利益は計り知れないものとなる。

ガスハイドレートは幅広い分野において様々な研究がなされており、その構造、熱安定性や応用利用のための研究成果は広く報告されている。しかしガスハイドレートの特性には不明瞭な点が未だに存在

している。例えば、熱力学的に不安定な環境でガスハイドレートが準安定化する自己保存効果や、結晶成長における核生成の速度などについては未解明な部分も多く残されている。また、結晶構造の骨格をなす水素結合のネットワークと密接な関係がある領域での誘電率や屈折率の研究について、報告はもとより検討すらほとんどなされていない。

テラヘルツ光は 10^{12} 領域の振動数を持つ電磁波であり、そのエネルギーは比較的軽い分子の運動に相当する。また氷と水に対して感度が大きく異なることから水分子の相変化を追跡できる有効な光である。テラヘルツ技術の一つである時間領域分光測定を用いることで、試料の光学特性についての物性値を抽出することが可能である。そこでテラヘルツ技術を用いた新たな観測手段を確立するために本研究を行った。

本期間における研究経過を以下に述べる。テラヘルツ時間領域分光光学系の構築を行い、低温でのテラヘルツ分光および低温で試料交換が可能な分

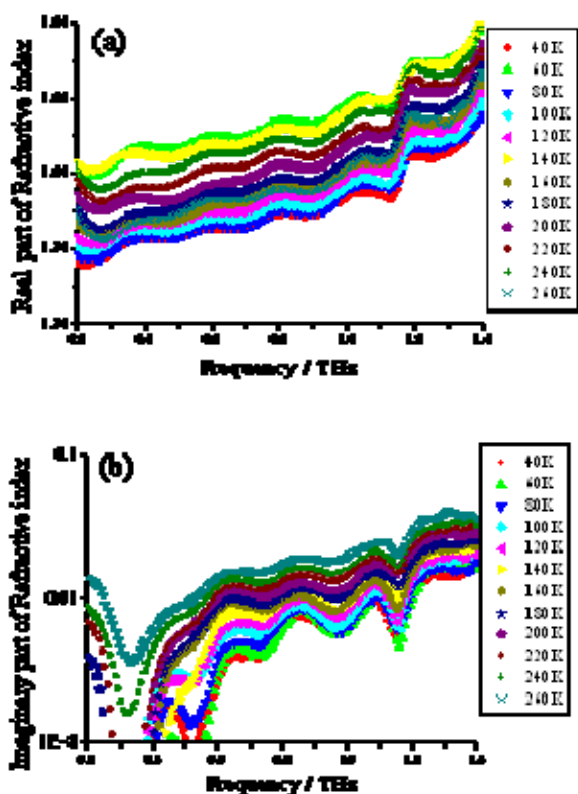


図. テラヘルツ時間領域分光法による氷の観測結果
(a)複素誘電率の実部、(b)複素誘電率の虚部

光用冷凍器を光学系に導入した。

まず始めに、ガスハイドレートと構造、性質が似ている氷の測定を行った。小型環境試験機を用い氷を厚み数 mm のペレット状に成長させ、その誘電特性を測定した。測定範囲は 0.1~1.2THz、温度領域は 40~273 K である。図に測定した氷のテラヘルツ帯での複素誘電特性を示す。複素どちらも周波数増加に伴い値の上昇が観測され。温度依存性に関しても、温度上昇に伴って値が増加することが観測された。これまでに氷の誘電特性に関して、テラヘルツ帯での観測は体系的に行われておらず、広い温度領域における観測はこれが初めてである。ほかの周波数領域での観測結果等と比較して信頼性のある観測結果が得られた。さらに、その後 THF ハイドレートを同様に調整し、分光測定を行った。THF ハイドレートは他のガスハイドレートと比較して独自の吸収ピークを

持ち、吸収率が高いことが特徴的である。この試料を氷と同様に分光測定したところ、明らかに氷より大きな吸収係数が算出された。このことは本調整法で THF ハイドレートが作成できていることを示している。

上記の結果をまとめると、本光学系で氷およびガスハイドレートを正しく評価できることが示せた。今後はハイドレート作成のための高圧容器等を用い様々なガスハイドレート作成し、順次測定を行う予定である。ガスハイドレートの安定性はゲスト分子によって異なる。調製した各ガスハイドレートを平衡温度以上に保持しながらテラヘルツ分光測定を行うことで、光学定数、吸収スペクトルの推移を観測しながら分解速度、構造変化を観測する。また、テラヘルツ帯の水素結合化合物の誘電率は結晶構造の分極やプロトン移動と関係することから相変化における結晶構造の変化といった基礎物性についても研究を行う。メタンハイドレートにおける自己保存効果には過冷却水が過渡的に存在することも示唆されているので、この検証も行う。

〔発表論文〕

1. Naohiro Kobayashi, Takashi Minami, Atsushi Tani, Mikio Nakagoshi, Takeshi Sugahara, Kei Takeya, Kazunari Ohgaki, "Intermolecular Hydrogen Transfer in Isobutane Hydrate", *Energies*, Vol.5(6) pp.1705-1712, 2012
2. Kei Takeya, Takashi Fukui, Kodo Kawase, Masayoshi Tonouchi, "Terahertz time domain spectroscopy of hydrogen bonded materials" *International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology* 2013, Submitted

【17】 ワイヤレス給電を用いたゼロワイヤーロボットアームの研究

豊橋技術科学大学エレクトロニクス先端融合研究所

テニユアトラック助教 真下 智昭

〔研究の概要〕

本研究は、外部から送る超音波によってエネルギーを伝送しアクチュエータを駆動するロボットアームの開発を目的としている。フレームワークとして、まず超音波モータを用いた三自由度のロボットアームを試作しおよび駆動実験を行った。超音波モータは、高応答性、高精度、静粛などで知られるアクチュエータであり、ロボットアームとしての使用に適している。本報告では、アームを新しく開発した上で、PI フィードバック制御システムを構築し、応答性と精度について実験で明らかにした。応答性の実験では、最高速度から 3 ミリ秒で静止することができるなど、非常にユニークな特長を示している。

〔研究経過および成果〕

高齢化社会における生活支援を目的として超音波モータを用いたロボットアームが期待される。超音波モータを用いる理由は、高精度、高応答性、静粛であるなどの特長に加え、安全性を実現することである。例えば、もしロボットアームが運動中に危険や異常を検知すれば、ステータとロータ間の摩擦を使った急ブレーキをかけ、その後瞬時に、超音波モータに定在波を発生させてバックドライバブルの状態に切り替えることができる。これはロータイナリーシャが小さく、摩擦によるブレーキトルクが大きい超音波モータだからこそ実現できる安全性である。このとき、どの程度バックドライバブルであるかはステータとロータ間の押し付け力の大きさによるが、押し付け力が小さければほとんどフリージョイントのような状態も実現可能である。そのような急ブレーキ動作が実際に可能であるのか実験で確認する。

図1は、試作したロボットアームである。直列に、

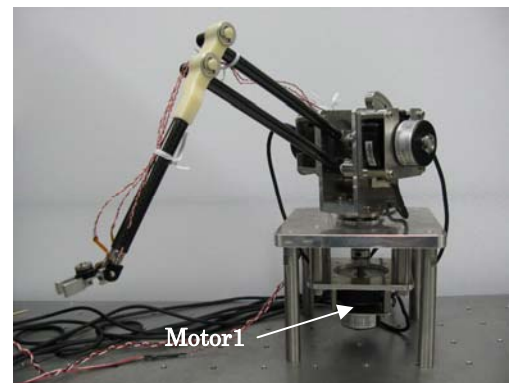


図1 超音波モータを用いたロボットアーム

関節とリンクが垂直につながる垂直多関節型のロボットであり、アームを軽量化するために平行四節リンクを採用している。それぞれのリンクの長さは約200mmの小型ロボットアームである。図のように、三個の超音波モータを取り付けており、ハンド部を除いて合計3自由度である。アームの自重を補償するためにカウンタウェイトを採用しており、重力から影響を受けることなくアームの運動を評価できる。

試作したロボットアームを用いて、超音波モータの起動時および停止時における応答性を調査す

る。角速度の制御は、周波数を変えることによって行う。角速度はモータの出力軸に取り付けたエンコーダから算出し、このときのサンプリングタイムは1ミリ秒である。実験では、垂直軸周りにロボットを回転させるMotor1の挙動を観察する。目標角速度として（最高角速度である）135rpmとなるステップ入力を与えられ、さらに0.2秒後には停止する時の、Motor1の応答を図2に示す。ステップ入力を与えられ（ここで、周波数は共振周波数である）、Motor1は回転しはじめ、約50ミリ秒で目標角速度に到達することがわかる。電磁モータは最高速度に達するまで1秒以上かかるものも多いが、それと比べ非常に短い時間で最高速度に到達している。その後、停止させるために速度指令値をゼロにしたとき（周波数が共振周波数から大きく離れたとき）には、最高速度から、わずか約3ミリ秒で停止することができている（図2上）。これは、もしロボットアームが人にぶつかった場合でも、人に与える衝撃をはるかに軽減できることや瞬時に危険を回避できること、などの安全性を実現できることを意味する。

次に、フィードバック制御を用いてMotor1の位置決め制御を行った。図3は、目標角度として $\pi/2$ radを交互に与えたとき、Motor1をPI制御で駆動させた結果である。PI制御における、比例ゲインと積分ゲインはそれぞれ、 $G_p=0.3$, $G_i=0.04$ である。目標角度に対し、わずかなオーバーシュートなく目標角度に収束していることがわかる。アームのように比較的大きいものを駆動させる場合であっても、PI制御が効果的であることがわかる。

ワイヤレス給電技術については、試作機を用いて、超音波によるエネルギー電力伝送の実験を行

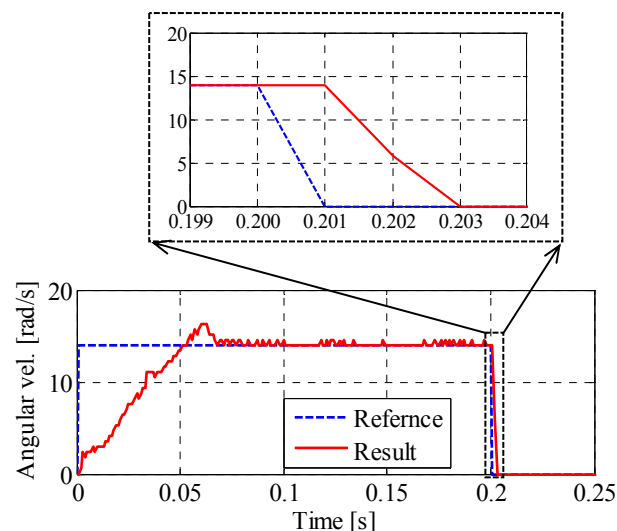


図2 応答性実験結果

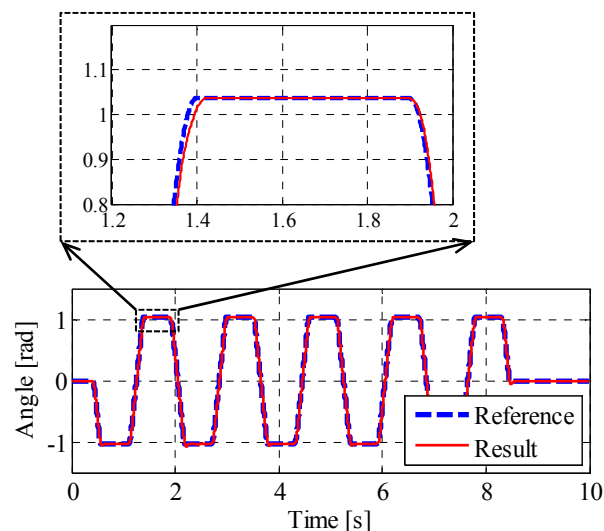


図3 ステップ応答実験結果

い、伝送距離、効率などの基礎的な物性の調査を行っている。空気中では実用的な電力伝送は困難であったが、水中では、最大10%程度とまずまずの伝送効率が得られており、今後、超音波受信機の形状および材料などを最適設計することにより、効率の向上を目指す。

〔発表論文〕

1. 山下貴仁, 真下智昭, 寺嶋一彦, 武居直行, 超音波モータを用いた生活支援用ロボットアームの開発, 第30回 日本ロボット学会 学術講演会, 札幌, 2012年9月.

【18】 固体中の輸送現象の新しいメゾスケールシミュレーション法の開発

研究者 京都大学工学研究科 准教授 松本 充弘

〔研究の概要〕

金属や半導体中の熱エネルギー輸送の解析を行うため、Boltzmann 輸送方程式に基づくメゾスケールでのエネルギー輸送シミュレーション手法を開発した。主なエネルギーキャリアであるフォノンと電子について、それぞれ緩和時間近似に基づく Boltzmann 方程式を基礎方程式とし、状態密度・分散関係・緩和時間についての簡単なモデルと組み合わせることで、拡散的輸送から弾道的輸送までをシミュレートできるコードが構築できた。さらに、熱電変換材料への応用のため、界面での散乱透過モデルとフォノン-電子連成モデルの検討を行った。

〔研究経過および成果〕

1. はじめに 微細化し単位面積当たりの発熱量がますます増大する電子デバイスの熱制御・熱設計や、微小な熱流を電流に変換する熱電変換素子の高効率化を目指した基礎研究として、本研究では、ナノメートルからサブミリメートルまでの広い空間スケールにおける固体中のエネルギー輸送ダイナミクスを解明するための概念の確立とシミュレーションツール類の整備を行なおうとしている。フォノンや電子の輸送を Boltzmann 輸送方程式に基づいて解析し、希薄気体ダイナミクスのアナロジーから、フォノン流体や電子流体についての新しい原理の発見と応用を図る。

- フォノンダイナミクスを Boltzmann 輸送方程式 (BTE) に基づいて解析する手法を開発する。
- 同様に、電子を BTE で扱う手法を開発する。
- 界面での散乱透過モデルとフォノン-電子の相互作用を考慮した連成モデルを構築する。

という順で、研究を進めた。

2. フォノンダイナミクスのモデル開発 分布関数 $N(\vec{r}, \vec{k}; t)$ について、緩和時間近似による BTE を

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial N}{\partial \vec{r}} = -\frac{N - N^{eq}}{\tau(\omega)} \quad (1)$$

とする。フォノンは Bose 統計に従い、熱平衡分布は

$$N^{eq} = \frac{D_p(\vec{k})}{\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1} \quad (2)$$

である。状態密度 D_p と分散関係 $\omega(\vec{k})$ を適切に与えることで、フォノンモデルを構築した。2 次元系の熱輸送解析を行い、系のサイズ(特徴的長さ)とフォノンの平均自由行程の比が小さくなるにつれて、拡散的輸送から弾道的輸送に遷移することが示され、モデルが概ね妥当であることが検証できた。

3. 電子ダイナミクスのモデル開発 本研究では電子も古典力学的粒子として取り扱うため、式(1)と同じ形の BTE を仮定する。フォノンとの違いは、電子が Fermi 統計に従うことであり、平衡分布は

$$N^{eq} = \frac{D_e(\vec{k})}{\exp\left(-\frac{\hbar\omega - \mu - e\phi}{k_B T}\right) + 1} \quad (3)$$

を用いる。ここで、 μ は電子の化学ポテンシャル(フェルミエネルギー)であり、温度依存性がある。電位 ϕ は電子の密度に対する Poisson 方程式から求める。自由電子モデルに対する状態密度 D_e と分散関係 $\omega(\vec{k})$ を用いたテスト計算により、電子の挙動を定性

的に再現できることがわかった。しかし、電気伝導度などを定量的に扱うためには、自由電子モデルでは不十分であり、モデルの改良が今後の課題である。

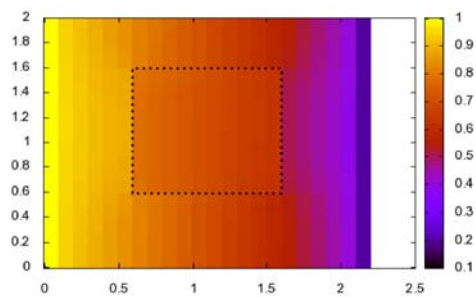
4. 界面モデルの開発 フォノンと電子の平均自由行程は大きく異なることが多い。このことを利用して、多結晶材料やミクロスケール組織化材料を用いた熱電変換材料が提案されている。このような系のシミュレーションを行うには、フォノンや電子の界面での散

乱・透過をうまくモデル化する必要がある。ここではまず、界面入射流束に対して透過係数 α を仮定するという単純なモデルを調べた。図1に示すように、系のサイズが平均自由行程を下回ると弾道的輸送が顕著になり shadow effect があらわれる。定量的な解析を現在行っているところである。

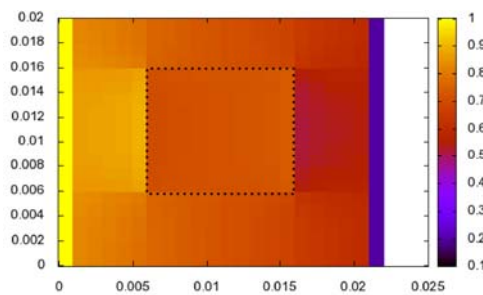
5. フォノン－電子連成モデルの開発 熱電変換材料のシミュレーションのためには、連成モデルが必要である。まだ構築中の段階であるが、熱電性能指数の重要な要素である電気伝導率 σ と熱伝導率 κ を調べることができる(図2)。

[発表論文]

1. 今西, 進藤, 正尾, 松本, 「ボルツマン方程式に基づく固体中のエネルギー輸送解析」, 第 49 回日本伝熱シンポジウム(2012.5, 富山) B343.
2. M. Matsumoto, Y. Masao, H. Imanishi, T. Shindo, T. Yamada, K. Izui, and S. Nishiwaki, “Numerical Optimization of Microscale Structure for Thermoelectric Generator”, ECCOMAS Int. Conf. Numerical Heat Transfer (Sept., 2012, Wroclaw, Poland) 8-2.
3. H. Imanishi, Y. Masao, and M. Matsumoto, “Analysis of microscale energy transport in solid based on Boltzmann equation”, 3rd Int. Forum on Heat Transfer (Nov., 2012, Nagasaki).
4. 今西, 倉田, 正尾, 松本, 「固体中のミクロスケールエネルギー輸送解析:フォノン－電子連成手法の開発」, 熱工学コンファレンス (2012.11, 熊本) B113.
5. 今西, 倉田, 正尾, 松本, 「ボルツマン方程式に基づく固体中のエネルギー輸送解析」, 第 26 回分子シミュレーション討論会 (2012.11, 福岡) 247P.



(a) 拡散的輸送領域.



(b) 弾道的輸送領域.

図1. 界面での反射透過があるフォノン系の定常温度分布の例。透過係数 $\alpha = 0.5$ の場合。

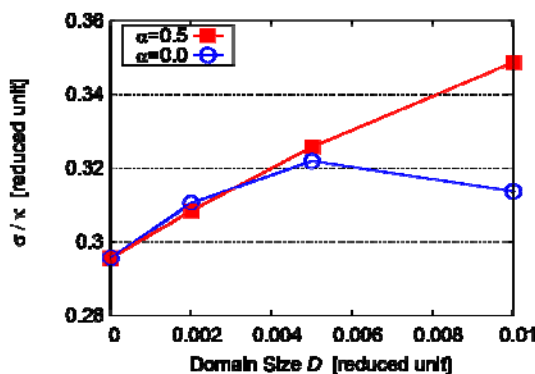


図2. パラメタ σ/κ の粒界サイズ依存性の例。

【19】 三次元多孔質アルミニウムの電析法の開発とその リチウムイオン電池正極集電体への応用

京都大学大学院エネルギー科学研究科 助教 三宅 正男

〔研究の概要〕

現行のリチウムイオン電池の正極集電体にはアルミニウム箔が利用されている。このアルミニウム箔を、アルミニウム多孔体に置き換えることで、リチウムイオン二次電池が高出力化・高容量化することが期待されている。しかし、現時点では、電池集電体に利用可能なアルミニウム多孔体を安価で製造する技術は存在しない。そこで、本研究では、電池集電体として利用可能なアルミニウム三次元多孔体を、有機溶媒浴からのアルミニウム電析技術を利用して作製する新しい方法の開発を行った。また、得られたアルミニウム多孔体をリチウムイオン電池の正極集電体に用い、充放電特性の評価を行った。

〔研究経過および成果〕

1. 三次元多孔質アルミニウムの電析

三次元多孔構造を有するアルミニウム層を、ジメチルスルホン-塩化アルミニウム浴からの直接電析法およびテンプレート電析法の 2 種類の方法によって作製することを試みた。

1.1 直接電析

Al 電析の際に、高電流を印加することで、三次元多孔構造を有するアルミニウム層を直接電析することを試みた。浴に添加剤としてジメチルアミン塩酸塩を加えると、基板上で Al の電析と同時に気泡が発生し、この気泡を取り囲むように Al が電析するため、三次元の広がりをもつ孔を有する Al 電析物が得られた。AlCl₃ 濃度、添加剤濃度および電析電流密度の最適化を行った結果、AlCl₃ 濃度および添加剤濃度が、DMSO₂ : AlCl₃ : (CH₃)₂NH·HCl = 10 mol : 1.5 mol : 0.5 mol の場合に、もっとも大きな孔をもつ Al 電析膜が得られた。また、電流密度の増大とともに、Al 電析物中の孔の径は大きくなった。本研究で

は電流密度を最大で 10 A cm⁻² とすることで、最も大きな孔をもつ Al 電析膜が得られた (図 1)。しかし、得られた Al 多孔体は、表面 SEM 画像から明らかに、空隙部分よりも Al 層部分が多い。また本

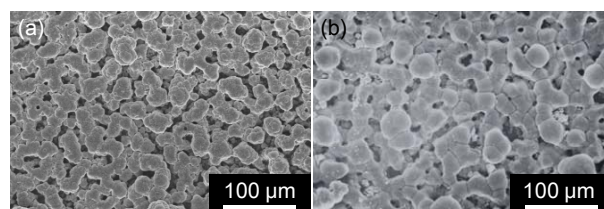


図 1 DMSO₂ : AlCl₃ : (CH₃)₂NH·HCl = 10 mol : 1.5 mol : 0.5 mol の浴から得られた電析物の SEM 画像。電流密度 (a) 4 A cm⁻², (b) 10 A cm⁻², 通電時間 60 s

法では、空隙径の制御も困難であった。

1.2. テンプレート電析^[1]

上記の作製法で得られた Al 多孔体よりも、空隙率の高いものを得るため、Na₂SO₄ 粉末をテンプレートに用いた電析による作製を検討した。本法では、Al 多孔体を電析するためのテンプレートとして浴に難溶かつ水溶性の塩である Na₂SO₄ 粉末を利用した。Na₂SO₄ 粉末粒子を浴に充填した状態で Al 電

析を行うと、粒子を内包する Al 層が基板上に形成される。電析後、水洗によって、 Na_2SO_4 粉末を溶解除去することで、 Na_2SO_4 粉末粒子の形状を反映した Al 多孔体が得られる (図 2)。電析電位および Na_2SO_4 粉末の粒径を様々に変化させ、析出する Al の構造形態への影響を検証した。

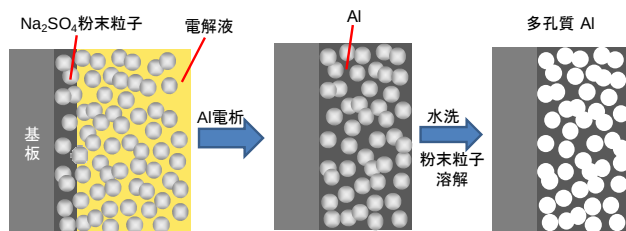


図 2 Na_2SO_4 粉末をテンプレートに用いた Al 多孔体の作製プロセスにおける基板近傍の模式図

電析電位を変化させて電析を行った結果、電位 -0.6 V の場合に Al 多孔体が得られることが分かった。そこで、電位を -0.6 V に固定し、 Na_2SO_4 粉末粒子の粒径を変化させて電析を行った。その結果、 Na_2SO_4 粉末粒子の粒径とほぼ同じ径の孔をもつ Al 多孔体が得られ (図 3)、 Na_2SO_4 粉末粒子の粒径によって Al 多孔体の孔径の制御が可能であることが明らかとなった。図 4 に示す断面 SEM 像からも、三次元多孔構造をもつ Al 層が形成されたことが確認できた。

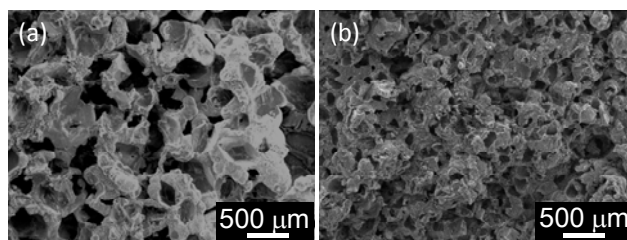


図 3 異なる粒径の Na_2SO_4 粉末をテンプレートに使用して作製したポーラスアルミニウムの表面の SEM 画像。 Na_2SO_4 の粒径 (a) $200\text{ }\mu\text{m}$ 以上、(b) $75\sim90\text{ }\mu\text{m}$ 電析電位： -0.6 V 、通電時間： 10 h

各粒径の Na_2SO_4 粉末を用いて作製した Al 多孔体の空隙率を表 1 に示す。得られた Al 多孔層の空隙率は、孔径によらず $55\sim65\%$ であることが明

らかとなった。

2. 充放電特性

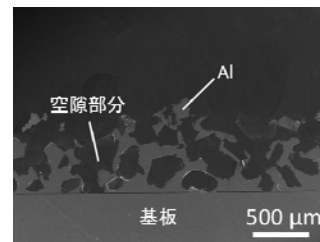


図 4 作製した Al 多孔体を樹脂埋め後、切断および研磨によって形成された断面の SEM 画像

表 1 異なる粒径の Na_2SO_4 粉末をテンプレートに使用して作製したポーラスアルミニウムの空隙率および膜厚

粒径 (μm)	空隙率 (%)	膜厚 (μm)
10 以下	65	28
30 以下	59	25
75~90	58	416
165~200	62	833
200 以上	55	930

上記のテンプレート電析法によって形成された三次元多孔質アルミニウム内に Li イオン電池の正極活物質 (LiCoO_2) を充填することで、電池正極を作製し、その充放電特性の評価を行った。その結果、多孔質アルミニウムを集電体に用いた場合、通常の Al 箔を集電体に用いた場合と比べて、同一放電速度において高い放電容量を示すことが確認された。

3. まとめ

三次元多孔質アルミニウムの新しい作製法として、有機溶媒からの電析法を利用する 2 つの方法を確立した。得られた多孔質アルミニウムを Li イオン電池の正極集電体に用いると、箔を用いた場合と比べて放電時の容量が向上することが確かめられた。

〔発表論文〕

- [1] 山下瑛, 塩見卓, 三宅正男, 平藤哲司, "硫酸ナトリウム粉末をテンプレートに用いたジメチルスルホン浴からの多孔質アルミニウムの電析", 表面技術協会第 126 回講演大会。

【20】 自己組織化 InAs 量子ドットのサイズ制御による1ミクロン帯広帯域光源の開発

研究者 和歌山大学システム工学部 准教授 尾崎 信彦

〔研究の概要〕

本研究は、GaAs 基板上 InAs 量子ドット(QD)の発光波長を $1\mu\text{m}$ 帯へ制御し、中心波長 $1.05\mu\text{m}$ で広帯域な発光スペクトルを持つ光源への応用を目指した。MBE 法により QD を成長した後、In フラッシュ法と呼ばれる手法により発光波長制御を行った。In フラッシュ法とは、QD 成長後に QD 高さ以下の膜厚の GaAs キャップ層を積層し、基板温度を短時間で昇降温(In フラッシュ)させ、QD の高さをキャップ層厚に揃える手法である。これにより、もともと $1.2\sim 1.3\mu\text{m}$ であった QD 発光中心波長を $0.9\sim 1.2\mu\text{m}$ の範囲に精度良く短波長化させることに成功した。また、キャップ層厚減少に伴い発光強度が減少傾向を示したが、In フラッシュ時の昇温度の適正化によって発光強度減少を抑制できることも明らかにした。これらの知見をもとに、中心波長と発光強度を制御した複数の In フラッシュ QD 層を積層成長し、中心波長約 $1.05\mu\text{m}$ 、帯域 92nm の広帯域発光を示す基板作製に成功した。

〔研究経過および成果〕

近赤外光は生体組織に対して透過率が高く非侵襲であることから、近年医療イメージングへの応用が進んでおり、その一例として光干渉断層計(OCT)がある。OCTは広帯域(低コヒーレンス)な光源を用いた光干渉計により、生体などの断面構造を非侵襲に観察可能なイメージング技術である。OCTの深さ方向分解能を決定するのは光源のコヒーレンス長 $l_c=0.44\lambda_0^2/\Delta\lambda$ であり、スペクトル帯域幅 $\Delta\lambda$ が広く、中心波長 λ_0 が短いほど分解能が向上する。また、生体内では水やヘモグロビンによる光吸収・散乱があり、これらが最も少ない波長 $1.05\mu\text{m}$ を発光中心波長とする光源を用いれば、より深い到達深度を得られる。そこで本研究では、OCTの分解能向上と高到達深度に寄与する波長 $1\mu\text{m}$ 帯の広帯域光源開発を目指し、In フラッシュ法を用いた自己組織化InAs-QDの発光波長制御と広帯域化の検討を行った。

サンプル作製には分子線エピタキシー(MBE)法を用いた。GaAs 基板上に、平均高さ 4.5nm 、密度 $4.6\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ のInAs-QDをS-K成長モードによって自己組織的に成長させた後、GaAs-cap層を $1\sim 5\text{nm}$ 程度の様々な厚み(d_{cap})で堆積させ、基板温度を短時間で昇降させる(Inフラッシュ)ことでQD高さをGaAs-cap層厚に制御した。例として、図 1(a),(b)に $d_{\text{cap}} = 1.2\text{nm}$ でInフラッシュを行ったサンプル表

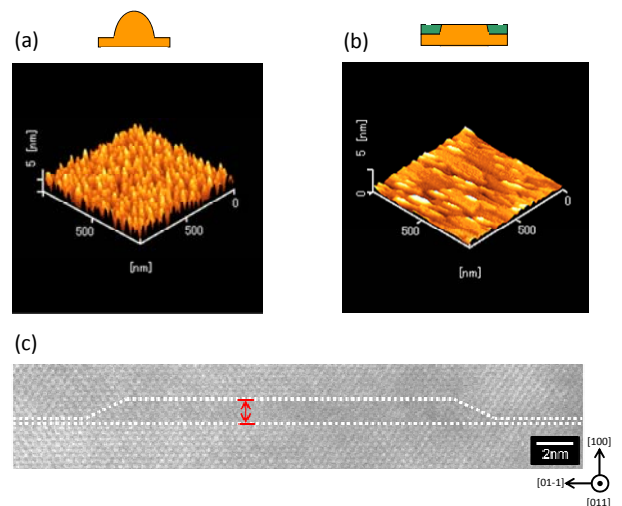


図1 自己組織化 InAs-QD 成長時(a)と In-flush 後(b)の表面 AFM 観察像。(c)In-flush 後に GaAs 層で埋め込んだ QD の断面 HRTEM 観察像

面のInフラッシュ前後のAFM観察像を、図 1(c)にInフラッシュした後にGaAs積層によって基板内に埋め込んだIn-flushed-QD(白点線内)の断面HRTEM観察像を示す。

埋め込んだIn-flushed-QDは室温でのPL測定により光学評価を行った。図2に、 d_{cap} を変えて作製したIn-flushed-QDのPL発光スペクトル例を示す。 d_{cap} によって発光中心波長が制御されており、目的である波長約 $1.05\mu\text{m}$ を中心に約 200nm の帯域に渡って発光中心波長の制御が可能であることが示された。

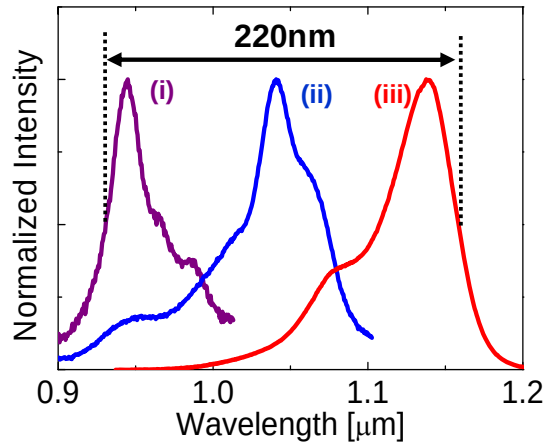


図2 様々なcap層厚によりIn-flushを行ったInAs-QDのPLスペクトルの例。 d_{cap} = (i) 1.0 nm, (ii) 1.7 nm, (iii) 3.1 nm

一方、 d_{cap} の減少に伴って発光強度が減少する傾向が見られた。これは、In-flushによる基板温度上昇時にQDの構造劣化や非発光中心の導入が起きたことが原因と考えられる。すなわち、GaAs-cap層厚がある程度厚い($d_{cap} > 3\text{nm}$)場合、In-flush時の温度上昇によるInとGa原子の相互拡散はcap層内のQDに殆ど影響を与えないが、GaAs-cap層厚が薄くなるにつれ、InとGa原子の相互拡散がcap層内のQDにも影響を与えられとされる。そこで、In-flush時の基板温度上昇値 ΔT (In-flush過程での基板到達最高温度(T_{max})とGaAs-cap層成長温度(T_{cap})との差)を変化させ、PL発光強度に及ぼす影響を調べた。 ΔT を $33^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ とした各サンプルからのPL発光強度と発光中心波長をプロットしたものを図3に示す。 d_{cap} は全て 2.04nm とした。 ΔT を低くすることで、発光中心波長は約 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ からほぼ変化せず、一方で、PL発光強度は最大で3倍程度増加することが分かった。

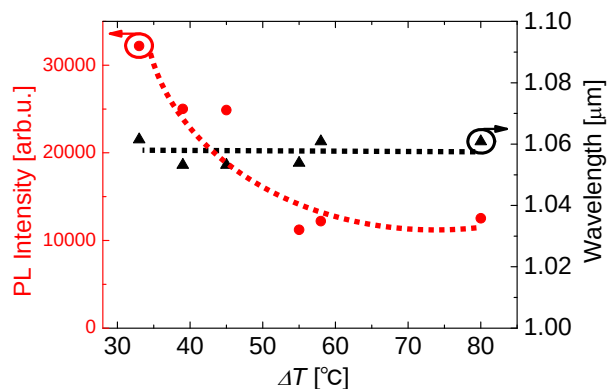


図3 In-flush 時の基板温度上昇値 ΔT に対するPL 発光強度と発光中心波長の変化

ΔT を低くすることによって、In-flush 時の QD の構造劣化や界面への非発光中心導入を抑制でき、発光中心波長は変化せずに、発光強度の減少を抑えることが出来た。

以上の結果を踏まえ、本研究の目的である中心波長 $1.05\text{ }\mu\text{m}$ で広帯域な発光スペクトルを持つ光源開発のために、複数のIn-flushed-QD層を積層した基板作製を行った。異なる d_{cap} と ΔT でIn-flushを行った3層のInAs-QD層(それぞれの d_{cap} と ΔT は下層から順に、 $d_{cap} = 2.37\text{nm}$, $\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$ 、 $d_{cap} = 2.04\text{nm}$, $\Delta T = 38^{\circ}\text{C}$ 、 $d_{cap} = 1.36\text{nm}$, $\Delta T = 32^{\circ}\text{C}$)を積層成長し、各QD層から均等な発光強度の寄与が得られるようにした。作製した基板の室温PL測定結果を図4に示す。

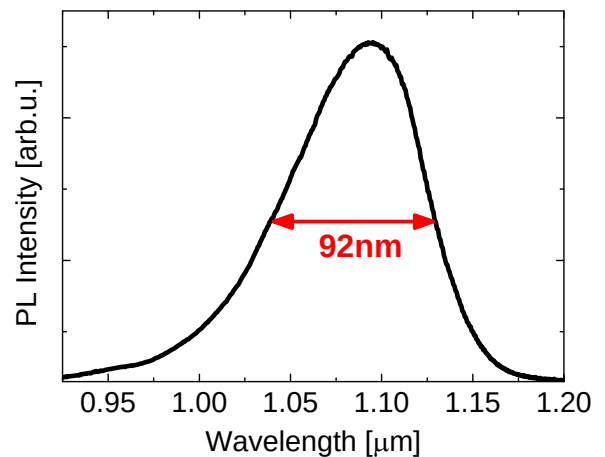


図4 異なる d_{cap} 、 ΔT でIn-flushを行ったQD層を3層積層したサンプルからのPLスペクトル

発光波長を $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯に制御しつつスペクトル半値幅約 92nm が得られた。QD単層のスペクトル半値幅が約 $40 \sim 50\text{nm}$ であるのに対し、 40nm 以上広帯域化され、スペクトル形状はスムーズなガウシアン形状に近いものが得られた。これは、OCT光源として使用した場合に光軸分解能約 $5.7\text{ }\mu\text{m}$ となり、有用な光源素子として応用できる可能性を示す結果である。

〔発表論文〕

1. Yuji Hino, Nobuhiko Ozaki, Shunsuke Ohkouchi, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, J. Cryst. Growth, DOI: 10.1016/j.jcrysgr.2012.12.077
2. 日野雄司、尾崎信彦、大河内俊介、池田直樹、杉本喜正、電子情報通信学会技術研究報告(信学技報)112 巻 327 号 ED2012-89, pp.113-116
3. 日野雄司、尾崎信彦、大河内俊介、池田直樹、杉本喜正、第 23 回光物性研究会論文集 pp.337-340

他に、国際会議1件、国内会議6件の発表を行った。

【21】 光波回路を用いた集積型多点同時計測用レーザドップラー速度計の基礎検討

研究者 香川大学工学部 准教授 丸 浩一

〔研究の概要〕

レーザドップラー速度計 (Laser Doppler velocimeter; LDV) は非接触かつ空間分解能の高い流体・固体速度計測方法として様々な産業分野で利用されている. 特に, 多点同時計測用 LDV は, 速度分布及び速度相関を非接触かつ高精度に測定できる方法として幅広い応用が期待されている. 我々は光波回路で構成したアレイ導波路回折格子 (Arrayed waveguide grating; AWG) を用いることにより多点同時計測可能かつ波長変動による速度誤差を低減した集積型多点同時計測用 LDV を提案している. 本研究では, 本 LDV 実現のための技術開発として, (1) 光伝搬解析による特性検討, (2) 光波回路素子の設計, (3) 実験による原理検証, を行った.

〔研究経過および成果〕

(1) 光伝搬解析による特性検討

集積型 LDV を実現するためには, 光波を導波構造から空間に出射して測定点に集光させるため, 集積型 LDV の素子端に導波路－空間結合系を形成する必要がある. 図 1 に本研究で提案する導波路－空間結合系の構造を示す. チャンネル導波路からの光波をスラブ導波路で拡散し, 導波路端から空間に出射する. このとき, 湾曲した端面からなるスラブ導波路レンズ構造により, 空間伝搬するにつれてスラブ導波路に平行な横方向に集光する. また, シリンダレンズを用いて縦方向にも集光する. この結果, 測定点での縦・横両方向の集光を実現する.

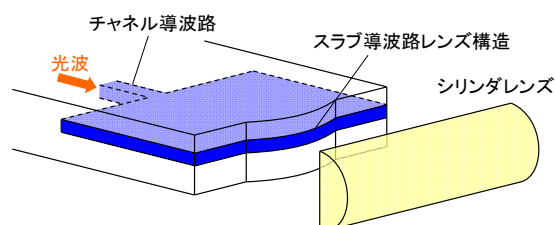


図 1 導波路－空間結合系の構造

まず横方向の集光を確認するため, 2次元ビーム伝搬法 (Beam propagation method; BPM) を用いて横方

向電界分布の計算を行った. 図 2(a)にスラブ導波路長 $300\text{ }\mu\text{m}$, 導波路端の曲率半径を $75\text{ }\mu\text{m}$ としたときの結果を示す. チャンネル導波路からの距離 $Z=1.2\sim 1.4\text{mm}$ の付近で集光していることが分かる. 次に縦・横両方向の集光を確認するため, 3次元 BPM による計算を行った. シリンダレンズの曲率半径を変化させたところ, 曲率半径 $60\text{ }\mu\text{m}$ のときに $Z=1.2\sim 1.4\text{mm}$ 付近で集光スポットが最小となった. $Z=1.2\text{mm}$ での伝搬方向に垂直な断面内の電界分布を図 2(b)に示す. 本研究で提案した導波路－空間結合系を用いることで空間中の測定点での集光が可能となることが分かった.

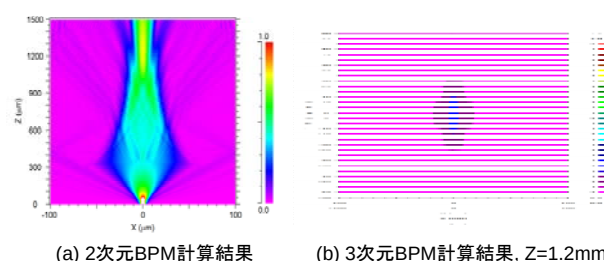


図 2 電界分布計算結果

(2) 光波回路素子の設計

Si 系光導波路を想定し, 集積型多点同時計測用

LDV 実現のための光波回路設計を行った。図 3 に回路構成を示す。本 LDV では、AWG を 3 回路用いる。波長の異なる複数の半導体レーザ (LD) から出力した光は、2 個の入力側 AWG を通過し、測定点で集光する。測定点での散乱光は出力側 AWG を通過後にフォトダイオード (PD) で受光する。AWG の分散特性を利用することで複数点同時計測を可能とする。

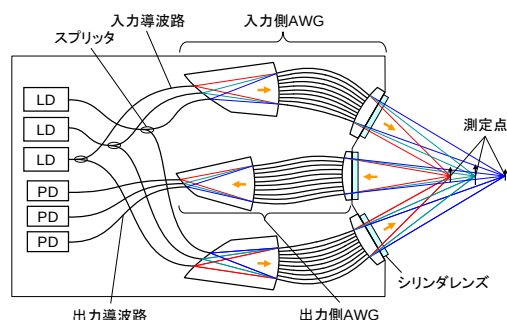


図 3 集積型多点同時計測用 LDV の構成

本構成に基づいて測定点配置を検討した。Si 系光導波路を想定し、スラブ導波路等価屈折率を 3.06、スラブ端アレイ導波路間隔を $3\mu\text{m}$ 、2 個の入力側 AWG の出力端間隔を 10mm、配置角度を 15° と仮定した。主回折光の出射角度範囲を考慮し、測定点位置を計算した。その結果、波長 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ の LD を用い、 $-1\sim 1^\circ$ の角度範囲で入力側 AWG の入力導波路を配置した場合、6.0mm の範囲で測定点を配置できることが分かった。

(3) 実験による原理検証

AWG を空間光学用回折格子で置き換えた光学系を構築し、速度計測の原理検証を行った。実験系を図 4 に示す。波長を 1530nm と 1570nm に設定した 2 台の波長可変レーザからの光を角度差 2° で 2 個の透過型回折格子 (格子間隔 $3.33\mu\text{m}$) に入射した。それぞれの 1 次回折光を回転ターゲットに入射し、散乱光を反射型回折格子 (格子間隔 $1.67\mu\text{m}$) に入射し、その回折光を 2 台の PD (PD1, PD2) で受光した。

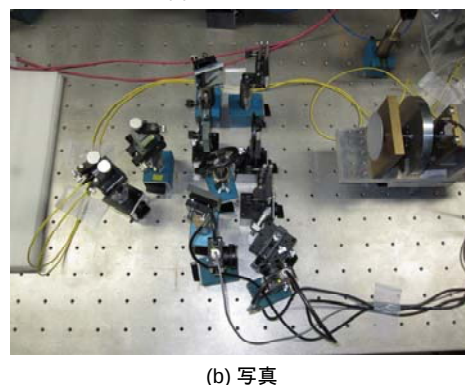
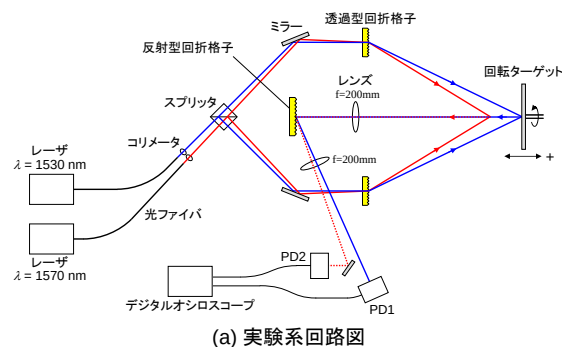


図 4 実験系

回転ターゲット位置を光軸方向に移動しながらビート信号スペクトルを測定した結果を図 5 に示す。PD1 では $193\sim 196\text{mm}$ 、PD2 では $173\sim 175\text{mm}$ の範囲のみにスペクトルピークが認められた。このことから、異なる 2 点の速度計測が可能であることが実証できた。

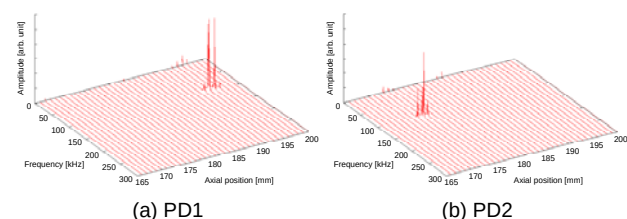


図 5 ビート信号スペクトル測定結果

〔発表論文〕

1. K. Maru, "Non-mechanical dual-axis scanning laser Doppler velocimeter," IEEE Sens. J., Vol. 12, No. 8, pp. 2648-2652, Aug. 2012.
2. K. Maru, "Demonstration of two-point velocity measurement using diffraction grating elements for integrated multi-point differential laser Doppler velocimeter," 投稿中

【22】 金属化合物中のスピン偏極伝導電子数の構成元素依存性の評価

研究者 青山学院大学理工学部 助教 水崎 壮一郎

〔研究の概要〕

金属化合物中のスピン偏極した伝導電子数の構成元素依存性の評価法の確立を目指した研究活動の一環として、放射光を用いた金属化合物の電子状態の解析研究と、金属化合物合成による電気伝導特性と磁気特性の変化と構成元素との相関の研究を行なった。放射光を用いた研究では、X 線磁気コンプトン散乱実験を用いて磁性金属化合物中の局在電子と遍歴電子の構成元素の依存性を評価し、遍歴電子と局在電子の間の相関を明らかにした。一方で、金属化合物の構成元素を一部置換することで、構成元素組成に依存した強磁性金属-強磁性半導体-常磁性金属転移の磁気特性及び電気伝導特性の変化を見出した。

〔研究経過および成果〕

金属化合物中の伝導電子を含めた遍歴電子と磁気特性との相関、および、遍歴電子と局在電子の磁気的な相関を明らかにする研究の一環として、以下の 2 点に着目した研究を遂行した。

1: 放射光を用いた金属磁性体内の遍歴電子と局在電子の分布測定

2: 磁気及び電気伝導特性の構成元素依存性

特に、本研究は、ホイスラー型結晶構造を持つ金属化合物を研究対象にした。ホイスラー合金は古くから研究されている。多くの 3d 遷移金属元素を主成分としたホイスラー合金は、強磁性ハーフメタルをはじめとして、半導体、半金属、弱強磁性、反強磁性などの興味深い物性を発現する三元系金属間化合物として知られている。

「放射光を用いた金属磁性体内の遍歴電子と局在電子の分布測定」

伝導電子は遍歴電子の一部であることから、遍歴電子と局在電子の電子スピンの相関を、放射光を用

いた金属化合物内の電子状態解析実験で評価した。

実験は SPring-8 で行なった。図 1 に示した測定結果は、磁性体金属内の全電子の上向きスピンを持つ電子と下向きスピンを持つ電子数差の運動量分布を表す。この電子の分布を解析することで、局在電子と遍歴電子の各総電子数と相互関係が評価できる。実験で得られた電子分布は、理論から予測した電子分布

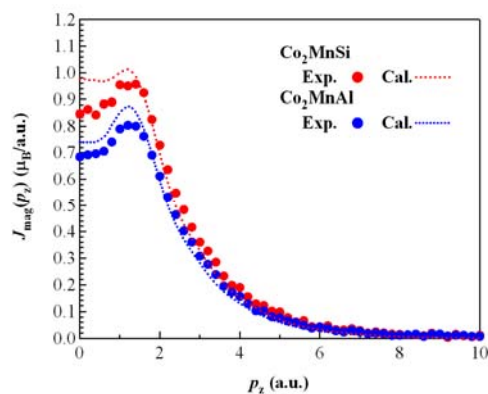


図 1 放射光によって評価した金属化合物中の全電子のスピン偏極状態の電子運動量分布と一致した。

本研究手法で解明した各金属化合物の遍歴電子と局在電子は、遍歴電子数の局在電子数との比例関係を示した(図2)。局在電子数は金属化合物の構

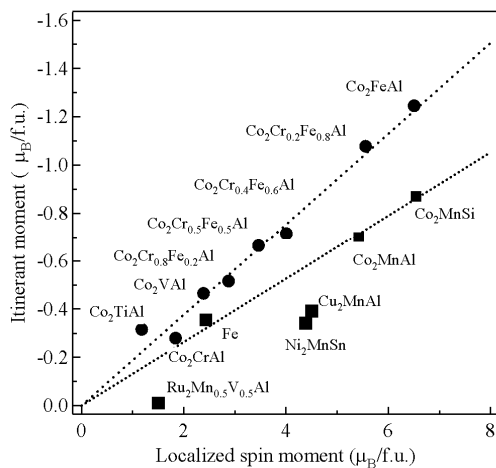


図 2 放射光によって評価した各金属化合物中の局在電子モーメントと遍歴電子モーメントの関係

成元素の的確な調整・調合で制御することができるため、本研究成果は、金属化合物の構成元素の調整による調合が、金属化合物内のスピン偏極した遍歴電子数の総量の制御法の実現の可能性を示唆している。

「金属化合物中のスピン偏極伝導電子数の構成元素依存性の評価」

金属化合物 $\text{Co}_{2-x}\text{Ru}_x\text{FeSi}$ および $\text{Co}_{2-x}\text{Ru}_x\text{TiSi}$ の電気伝導特性と磁気特性の評価をした。 Co 元素が誘起する磁気モーメントを減少させるために Ru を置換し、遍歴電子と局在電子の相関を研究した。本研究の結果、金属化合物 $\text{Co}_{2-x}\text{Ru}_x\text{FeSi}$ は Ru 組成の変化により強磁性・反強磁性転移および金属・半導体転移が観察された。この強磁性・反強磁性転移は、 Co 近傍及び Fe 近傍の電子状態の変化と、それに伴う Fe 元素が持つスピンモーメントの配列による電子状態の乱れが原因と思われる。 Ru 置換によって誘起された磁性の乱れは、 Fe 近傍の電子状態に強い影響を及ぼした結果、金属化合物の電気伝導特性を半導体にしたと考えられる。本研究成果は、金属化合物の磁気特性

を担う局在モーメントと、電気伝導特性を担う遍歴電子の間に生じる相互作用の存在を示唆している。

次に、 Fe 元素に変えて非磁性元素 Ti を選び金属化合物 $\text{Co}_{2-x}\text{Ru}_x\text{TiSi}$ を用いることで、 Co 元素の電子状態が磁気特性及び電気伝導特性への影響を評価した。この金属化合物は Ru 組成の変化により強磁性から常磁性に磁気特性が変化した。この変化に付随して、本金属化合物においても金属-半導体転移が観察された。この現象は、 Co 及び Ru 元素の磁気的な電子状態の変化が、電気伝導性に強く影響していることを示唆している。この2つの化合物を研究することで、 Co 元素の電子状態が Ru 元素に強く影響され、磁気的な特性と電気伝導性の間に強い相関の存在を明らかにした。

本研究期間では、伝導電子数の定量法の提案には至らなかった。しかし、本研究活動の一環として得られた成果より、1: 金属化合物内の遍歴電子と局在電子のスピンモーメントの相関に注目した物質開発の可能性、及び、2: 金属導電性を持つ金属化合物への構成元素の微小置換による金属-半導体転移誘起を利用した金属-半導体接合素子の実現の可能性を見出した。

〔発表論文〕

1. S. Mizusaki, A. Douzono, T. Ohnishi, T. C. Ozawa, Y. Noro, Y. Nagata, Metal-insulator-metal transition in Ti substituted antiferromagnetic Ru_2MnGe Heusler alloy, Journal of Alloys and Compounds 553 (2013) 389-394.

【23】 磁界測定法を用いたナノ粒子の安全性評価

北里大学医学部衛生学 講師 工藤 雄一郎

〔研究の概要〕

近年、ナノテクノロジーの進歩によりナノ粒子と呼ばれる微小粒子の開発が進んでいる。これらのナノ粒子は、まだ安全性の評価が確立されていないものが多い。未知の物資なので第2のアスベストになるのではという危惧する声もある。そこで、今回は、今後使用量が増加するナノ粒子の代表物質であるフラーレン（C60）について肺磁界測定法を行い安全性を評価した。ラットの気管内にフラーレン（C60）を投与し、1年間観察した。その結果、観察期間内で異常はみられなかった。以上のことから投与1年後までフラーレン（C60）の肺障害性はなく安全が高いことが示唆された。今後は他のナノ粒子について磁界測定法を中心にした安全性評価を進めていきたいと考えている。

〔研究経過および成果〕

目的:近年、ナノテクノロジーの進歩によりナノ粒子と呼ばれる微小粒子の開発が進んでいる。代表的な物質であるフラーレンやカーボンナノチューブは半導体や化粧品などに使用されている。これらの物質の健康影響は、呼吸器系さらに心臓血管系および中枢神経系などへ移行しこれらの臓器への影響が報告されているが、未解明の部分も多い。

そこで、今回は、今後使用量が増加するナノ粒子の代表物質であるフラーレン（C60）について肺磁界測定法を行い安全性を評価した。

方法: 6～10週齢の雄Wistarラット(各群7匹)に対し、シリコンチューブをラットの気管内に挿入し、あらかじめ分散されたフラーレン（C60）を100 μ g/mlおよび200 μ g/mlを1日1回投与した。またコントロール群には生理食塩水を0.3ml投与した。曝露実験終了1日後にラットにジエチルエーテルで吸入麻酔し、フラーレン（C60）曝露

群とコントロール群両方に、気管内にカテーテルを挿入し、四三酸化鉄3mgを生理食塩水0.2mlに懸濁し注入した。今回の実験で使用した四三酸化鉄の幾何平均径は0.26 μ mであった。その後、ネンブタール（ラットの体重100gあたり0.15ml）を用いて腹腔内麻酔した。麻酔後、ラットの胸部を50mTで1秒間胸部を磁化し、磁化後の残留磁界をフラックスゲート磁束計を用いて20分間測定した。試料台は12秒間に1回プローブ上を通るようになっている。測定は、曝露実験終了1日後、3日後、14日後、28日後、以後1ヶ月ごとに1年後まで行われた。磁化後20分間の残留磁界を測定すると緩和の程度を示す曲線が表される。また外部磁化終了後2分までの残留磁界を対数変換するとほぼ直線になるので、この直線とY軸の交点をB0とした。従って、外部磁化中止t秒後の残留磁界をB、磁化直後の残留磁界をB0、緩和係数を λ とすると $B=B_0 e^{-\lambda t}$ となり、この式から緩和係数（ λ ）を求めた。さら

に各測定日の残留磁界最大値（ $t=0$ 分値）の0日目を100%として求めたクリアランス曲線を作成した。残留磁界値はパソコン上に出力した。

結果：磁化直後の残留磁界を100%として磁化後20分間の残留磁界をプロットし緩和曲線を作成したところ、緩和は曝露終了1日後から1年後の何れもフラレーン（C60）曝露群とコントロール群ともに迅速に認められた。20分値は、両群間に有意差はみられなかった。磁化後2分間の緩和係数は、どの測定日においても、フラレーン（C60）曝露群とコントロール群間で有意差は認められなかった。各測定日の磁化直後の残留磁界値を曝露終了1日後を100%としてプロットし、クリアランス曲線を作成したところ、フラレーン（C60）曝露群とControl群ともに迅速に減衰した。また、どの測定日においてもフラレーン（C60）曝露群とControl群間に有意差は認められなかった。

考察：肺磁界測定法の原理は、磁性粒子が滞留した肺に外部から磁化をかけると、外部磁化を中止後、肺から微弱な磁界（残留磁界）を計測することができる。残留磁界は時間とともに急速に減衰する。この減衰を緩和と呼ぶ。これは、肺胞マクロファージに貪食された四三酸化鉄が、外部磁化により磁化され一方向に配列し、外部磁化を止めると細胞骨格により食胞がランダムに回転して、残留磁界は急速に減衰すると考えられる。しかし、肺障害性のある有害物質が投与されると、その物質が物理的、化学的に細胞骨格に影響を与える。そのため、食胞の回転が悪くなり、磁性方向が失われにくくなることで、緩和が遅延すると考えられる。緩和は、生体のみでみられ、剖検肺や死亡した動物肺ではみられない。よって、肺磁界測定

法は、非侵襲的に同一個体の肺障害性評価が可能である。また、外部磁化直後の残留磁界を経過を追って測定すれば、肺内滞留酸化鉄量の推移（クリアランス）を推定することもできる。肺を障害する物質を同時に投与すると酸化鉄のクリアランスも遅延するので、投与物質が肺障害性を示すかどうかの評価に用いられる。緩和係数は細胞障害性の程度を表し、この値が大きい程細胞障害性が低く、小さい程細胞障害性が高いと言える。本実験で得られた緩和曲線では、フラレーン（C60）曝露群とControl群間に有意差は認められず、両群とも緩和は迅速であった。フラレーン（C60）は、細胞骨格による食胞の回転が速やかに行われたため、緩和は迅速であったと考えられる。緩和係数は残留磁界が急速に減少する2分間で測定し、この値が大きい程緩和が迅速である。緩和係数も、フラレーン（C60）曝露群とControl群間に有意差は認められなかったことから、緩和曲線の結果と同様、フラレーン（C60）曝露後も食胞の回転は速やかに行われたと考えられる。

クリアランス曲線では、フラレーン（C60）曝露群における残留磁化鉄量の磁化直後の残留磁界値は、Control群と同様、時間の経過とともに減衰し、両群間に有意差は認められなかった。このことから、フラレーン（C60）曝露による肺障害性はなかったと考えられる。以上のことから、本研究ではフラレーン（C60）の安全性が高いことが示唆された。今後は、他の種類のナノ粒子について、磁界測定法を中心に安全性評価をさらに進めていきたいと考えている。

〔発表論文〕

特になし。

【24】メカトロニクス系における非線形特性の自動推定と補償

研究者 東京工科大学コンピュータサイエンス学部 教授 余 錦華

共同研究者 産業技術大学院大学創造技術専攻 教授 橋本 洋志

〔研究の概要〕

本研究は、著者らが先に提案した等価入力外乱手法を拡張し、メカトロニクス系に存在する非線形特性を自動的に推定し補償する新しい非線形制御手法を確立することを目的としている。本手法は、従来の手法と違い、制御対象の非線形特性を外乱と見立て、等価入力外乱という概念に基づき、等価入力外乱の自動推定と補償を実現する非線形制御システムの新しいフレームワークを構築し、メカトロニクスシステムの新しい設計法を提案し、各種非線形特性に対してシミュレーションによりその有効性を検証する。さらに、協調作業実験システムを設計・製作し、実機検証を行う。

〔研究経過および成果〕

メカトロニクス系には、ヒステリシス、不感帯や非線形摩擦などの非線形特性が存在し、各種振動を引き起こし、制御系の性能低下を招く。このような非線形特性の影響を抑えるため、従来から、非線形特性のモデリングを行い、その逆モデルを構築することにより非線形特性の補償を行ってきた。しかし、モデルのパラメータが駆動条件に強く依存するため、精度よく推定するのは難しい。また、非線形特性が変わると構造の再設計を余儀なくされる。このように、各種非線形特性の統一した取扱い方が確立されていなかったため、非線形特性の構造とそのパラメータの自動推定を行うことは非常に難しいとされてきた。

従来の問題点を根本から克服するために、本研究は、等価入力外乱手法を非線形特性推定に拡張し、図1に示す非線形特性の自動推定・補償を行う制御システム構成を提案する。

等価入力外乱とは、出力に対して、実際の外乱と同じ効果をもたらす制御入力端の入力信号である。

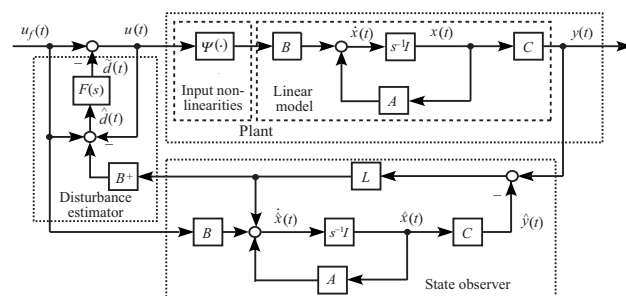


図1 等価入力外乱手法に基づく非線形特性の自動推定・補償システム構成

図1において、制御対象は

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B\Psi(u) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

である。ただし、式(1)において、 $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ は制御対象の状態であり、 $y(t) \in \mathfrak{R}$ は出力であり、 $u(t) \in \mathfrak{R}$ は制御入力である。また、 $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$, $C \in \mathfrak{R}^{1 \times n}$ は定数マトリクスであり、 $\Psi(\cdot)$ は入力非線形である。

制御対象に対して、以下のことを仮定する。

仮定1：制御対象の線形部分(A, B, C)の極とゼロ点はすべて複素平面の開左半平面にある。

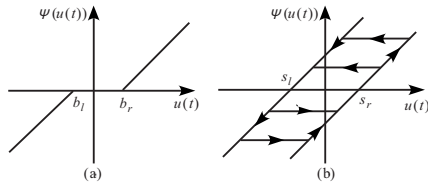


図 2 不感帯とヒステリシス

仮定 2 : 制御対象の線形部分 (A, B, C) は可制御可観測である。

仮定 3 : 入力非線形特性は不可測である。

本研究では, 入力非線形特性を

$$\Psi(u(t)) = u(t) + d(u(t)) \quad (2)$$

と線形部分の $u(t)$ と非線形部分の $d(u(t))$ に分解する。まず, 制御対象のオブザーバーを以下のように構築する。

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu_f(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)] \quad (3)$$

それを用いて, $d(u(t))$ を推定すると,

$$\hat{d}(t) = B^+L[y(t) - C\hat{x}(t)] + u_f(t) - u(t) \quad (4)$$

を求め, さらに, 以下のローパスフィルター

$$F(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (5)$$

を用いて非線形特性の低周波数成分 $\tilde{d}(t)$ を抽出して補償する。この補償法の安定性について, リアプロフ関数を構築し証明した。また, この手法の有効性について, 不感帯とヒステリシスという二つ代表的な非線形特性を用いて検証した (図 2)。一例として, 制御

対象 $A = \begin{bmatrix} -4 & -5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 7 \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ に制御入力

$u_f(t) = 6\sin 2\pi/3$ を印加したとき, バックラッシュ $s_l = -0.5$ と $s_r = 0.5$ に対して, その自動推定・補償効果を図 3 に示す。バックラッシュがない場合の制御出力を基準に, それからのずれを Error としている。図 3 から明らかに, 本制御手法を適用することにより, バッ

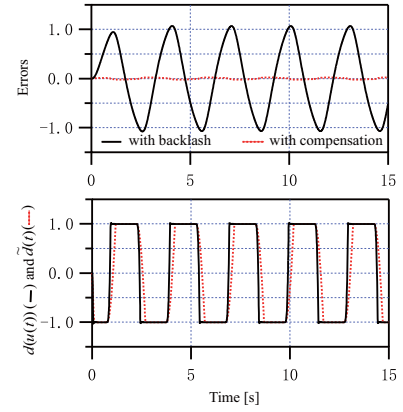


図 3 バックラッシュの自動推定・補償効果

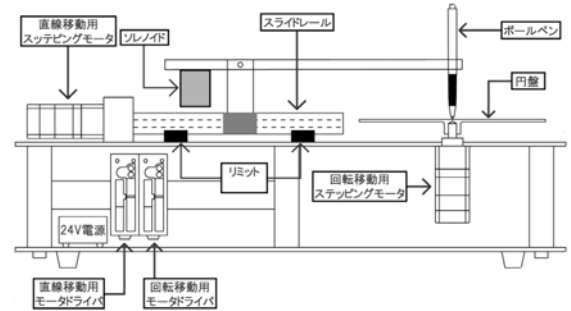


図 4 協調制御実験システム

クラッシュに対応する等価入力外乱が精度よく推定され, その推定値を用いることにより, その影響を 2%まで抑えることができた。

本手法を実験により検証するために, 協調制御実験システムを構築した (図 4)。現在システムのハードウェアとソフトウェアの環境構築は完成し, これから実験検証を行う予定である。

〔発表論文〕

1. Liyu Ouyang, Jinhua She, Min Wu, and Hiroshi Hashimoto, Compensation of Unknown Input Dead Zone Using Equivalent-Input-Disturbance Approach, *Proceedings of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp. 605-609, 28-31 July, Rome, Italy, 2012.

【25】超高速磁気センサのための表面プラズモン共鳴の巨大磁気応答性と光誘起起電力

研究者 日本大学理工学部 助教 芦澤 好人

日本大学理工学部 教授 中川 活二

〔研究の概要〕

磁気ストレージ分野では、磁気ディスク(HDD)の高記録密度化に加え、記録及び再生速度の高速化が求められている。現状の磁気信号記録・再生技術では、強磁性体の磁化が角運動量を有するため、強磁性共鳴周波数(～GHz)以上の高速化が原理的に困難を窮する。未だ高速化に関する新たな原理や手法が見出されておらず、新規に開発する必要があるため、表面プラズモンを用いる磁気センシング技術の開発を目指して研究を行っている。

〔研究経過および成果〕

ストレージ分野では、高記録密度・高速記録の実現に向けた次世代磁気記録方式の研究が活発化している。高速記録の必要技術としては、光誘起磁化反転現象を活用する研究が活性化してきている。しかしながら、再生技術すなわち磁気センシング技術においては、スピンの角運動量を有するために強磁性体に存在する強磁性共鳴周波数が磁化の追従可能な最高周波数となるため、高速化の上限が決定してしまう。この強磁性共鳴限界に対する打開策がまったく見出されていないため、再生技術が高速化のボトルネックとなる。社会のニーズに合わせて磁気ディスクの再生周波数は高速化しており、強磁性共鳴周波数に近付いているため、早期に新たな高速再生の手法を確立することが極めて重要である。

磁気ディスク(HDD)の高速再生技術は、現行のトンネル型磁気抵抗効果(TMR)や試料垂直方向の巨大磁気抵抗効果(CPP-GMR)等の磁気抵抗型再生方式を用いた場合、センサ部の強磁性共鳴周波数の数 GHz が高速化の限界となる。その為、より高速化

可能な物理現象に基づく新たな再生手法の開拓及びその確立が求められる。新規原理に基づいたナノ空間における磁気センシング技術の基礎を早期確立するため、本研究では、近接場光を用いた局所磁化情報の超高速センシングを可能とするための外部磁界による表面プラズモン共鳴の制御手法の確立を目的とした。

1) 磁気表面プラズモン信号の大出力材料 ～Voigt配置における巨大表面プラズモン効果の導出

薄膜試料を表面プラズモン励起層と表面プラズモン磁気制御層とに機能を分離した多層構造とすることにより、表面プラズモンを用いた磁気情報の検出手法を見出し、さらに表面プラズモン共鳴の磁気応答性が、Voigt配置の不活性モードの場合に大きな効果が期待されることを示してきた。その為、表面プラズモン制御に用いる強磁性体における誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} と ϵ_{zz} の差が大きい材料の探査が必要である。そこで、信号大出力材料探査として、磁化平行方向および垂直方向の誘電率成分の差を大きくすることを念頭に材料探査を行った。

従来報告されている金属強磁性体材料を用いる場合、誘電体基板から入射した光は非磁性貴金属プラズモン励起層、磁性金属プラズモン制御層を通過し、再度非磁性貴金属層と空気層との界面において表面プラズモンを励起する。しかし、磁性体を誘電材料とすることにより、高い誘電率が期待されると同時に、表面非磁性金属をプラズモン励起に適する厚さに制御可能になることに着眼し、誘電性強磁性材料として、 CoFe_2O_4 薄膜、及び ZnFe_2O_4 、 NiFe_2O_4 薄膜の作製に取り組んだ。さらに、結晶配向面に依存する誘電率を活用も可能とするため、単結晶基板上において、上記薄膜をエピタキシャル成長させて、その構造評価を行った。

図1には、 SrTiO_3 (110)面及び MgO (110)面単結晶基板上に作製した CoFe_2O_4 薄膜の X 線回折プロファイルを示している。いずれの基板上に作製した CoFe_2O_4 薄膜も(110)面配向していることが判り、エピタキシャル成長していることを別途確認した。図1には NiFe_2O_4 及び ZnFe_2O_4 薄膜のプロファイルも併せて示している。同様に(110)面エピタキシャル成長していることが確認される。結晶性の観点では CoFe_2O_4 薄膜よりも ZnFe_2O_4 や NiFe_2O_4 薄膜の方が良好であった。

図2には、作製した CoFe_2O_4 薄膜の可視光領域における誘電率の実部 ϵ_1 及び虚部 ϵ_2 を示している。実部 ϵ_1 は緩やかな変化で 2～3 程度を示す。一方、虚部の ϵ_2 は波長 500 nm 以上で減少する。このことから、長波長領域においては、プラズモンによる減衰が抑制できることが期待される。

2) 表面プラズモン励起信号の電気的検出手法の開発 ～光誘起起電力の検出

電気信号を用いる表面プラズモン励起状態の検出は、現在用いている反射光強度を用いる手法よりも

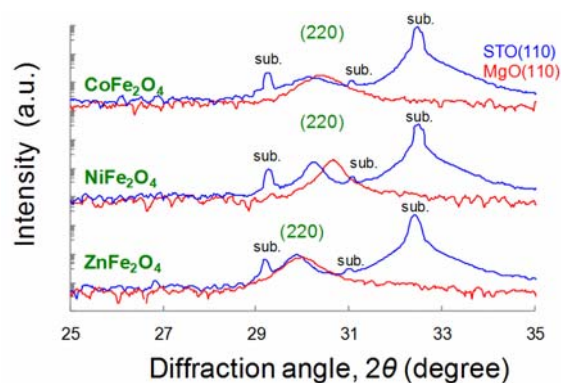


図1 X 線回折プロファイル

省スペースかつ制御の容易なセンサの実現を促進する。その為には、まだ詳細の明らかにされていない表面プラズモン励起時に発生及び増幅される光誘起起電力効果について、定量的な評価が求められる。そこで、マイクロメートルオーダーで位置制御可能なポジショナ及びプローバを用いた表面プラズモン励起時の薄膜中の起電力の直接測定を試みている。

金属表面における表面プラズモンによる光誘起起電力の観測には、観測用試料の形状及び光スポット形状を考慮する必要がある。薄膜試料を種々の方向の異なるスリット形状に加工し、各方向における電位分布を計測する必要があると考えられる。また、光スポット径は光誘起起電力現象の発生源の大きさに相当する。発生する起電力の機構によっては、本現象の観測容易さがスポット径に依存する可能性がある為、今後継続して測定を続ける必要がある。

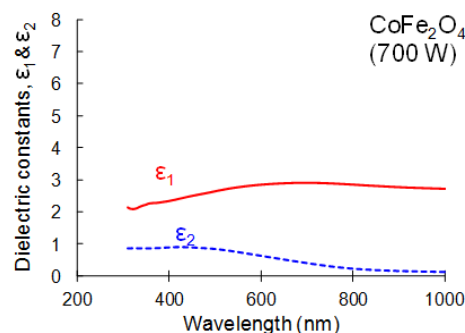


図2 CoFe_2O_4 薄膜の誘電率特性

【26】 ヒト歩行解析に基づく軟弱路面での2足ヒューマノイドロボットの歩行安定化に関する研究

代表研究者 早稲田大学大学院創造理工学研究科 研究院講師 橋本 健二

共同研究者 早稲田大学創造理工学部 教授 高西 淳夫

〔研究の概要〕

本研究ではヒト歩行解析に基づき歩行安定化制御を開発し、2足ヒューマノイドロボットの軟弱路面での歩行実現を目的とする。まず本研究で実施した歩行解析結果より、剛体路面歩行時と軟弱路面歩行時において重心の左右揺動に有意差がないという知見が得られた。そこで、重心位置を安定化する制御法を開発し、2足ヒューマノイドロボットを用いて歩行実験を行った。その結果、ウレタンスポンジ(密度 $22 \pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$)の軟弱路面上において足踏み動作と前進歩行を実現し、本提案手法の有効性を確認した。

〔研究経過および成果〕

本研究ではまず、三次元動作分析装置VICONを用いて、ヒトの軟弱路面における自由歩行を計測した。被験者は成人男性 6 名とし、被験者の平均身長は $1670 \pm 42[\text{mm}]$ 、平均体重 $61.0 \pm 3.5[\text{kg}]$ である。なお、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を受けている。被験者が歩行する軟弱路面としては、中程度に柔らかいウレタンスポンジ(密度: $150 \pm 30[\text{kg}/\text{m}^3]$)と極めて柔らかいウレタンスポンジ(密度: $22 \pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$)の2種類を用意した。ウレタンスポンジの大きさは長さ $4000[\text{mm}] \times$ 幅 $1000[\text{mm}] \times$ 高さ $100[\text{mm}]$ である。また比較対照のために、剛体路面においても歩行運動を計測した。

計測の結果、「剛体路面と軟弱路面において、重心の左右動揺に有意な差がない」という知見を得た。このことから、ヒトは軟弱路面歩行時に重心位置を左右方向に安定化しているものと考えられる。重心の左右動揺を安定化するためには、「着地位置を変更する」か、「足関節や股関節で補償トルクを発生する」などの方法が考えられるが、歩隔に有意差がなかった

め、足関節や股関節で補償トルクを発生し、床反力を調整しているものと考えられる。そこで、この知見に基づき、重心位置を安定化する制御法を開発した。これは次の2つのポイントからなる。

- ・片脚支持期には足関節でトルクを発生し、重心位置を安定化する。
- ・両脚支持期には各足の床反力を目標床反力に収束させるように脚長を修正し、重心位置を安定化する。

提案手法を評価するために、本制御法を2足ヒューマノイドロボットWABIAN-2Rに実装し、評価実験を行った。軟弱路面としては人体計測でも使用した密度 $22 \pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$ の極めて柔らかいウレタンスポンジを使用する。ロボットの歩行パターンに関しては、剛体路面を歩行するものとして事前に作成し、足上げ高さは $50[\text{mm}]$ とした。評価実験に先立ち、これまで剛体路面歩行時に用いていた歩行安定化制御で軟弱路面での歩行を試みたところ、転倒することを確認している。

まず、剛体路面と軟弱路面での重心の動揺を比較

するために、それぞれの路面において足踏み動作実験を行った。実験の結果、図1に示すように軟弱路面での足踏み動作に成功した。この際の歩行周期は $0.9[s/step]$ である。図2に左右方向の重心動揺の全振幅を示すが、剛体路面歩行時と軟弱路面歩行時で有意差がないことから、軟弱路面歩行時にも重心位置が安定化されていることが確認できる。

次に前進歩行実験を行った。このときの歩行周期は $0.9[s/step]$ で、歩幅は $200[mm/step]$ である。図3に示すように前進歩行を実現し、左右方向の重心動揺に関しても剛体路面歩行時と比較して有意差がないことを確認している。以上の実験結果より、本提案手法の有効性が確認された。

〔発表論文〕

1. Hyun-jin Kang, Kenji Hashimoto, Kosuke Nishikawa, Egidio Falotico, Hun-ok Lim, Atsuo Takanishi, Cecilia Laschi, Paolo Dario and Alain Berthoz, “Biped Walking Stabilization on Soft Ground Based on Gait Analysis,” Proceedings of the fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 669–674, Rome, Italy, June, 2012.
2. 橋本健二, 姜賢珍, 中村真志, 西川浩介, Egidio Falotico, Cecilia Laschi, Paolo Dario, Alain Berthoz, 林憲玉, 高西淳夫, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発(第15報:歩行解析に基づく軟弱路面歩行安定化制御と軟弱路面での歩行実現),” 日本ロボット学会第30回記念学術講演会予稿集, 4K1-5, 北海道, 2012年9月.
3. Kenji Hashimoto, Hyun-jin Kang, Masashi

Nakamura, Egidio Falotico, Hun-ok Lim, Atsuo Takanishi, Cecilia Laschi, Paolo Dario and Alain Berthoz, “Realization of Biped Walking on Soft Ground with Stabilization Control Based on Gait Analysis,” Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2064–2069, Vilamoura, Algarve, Portugal, October, 2012.

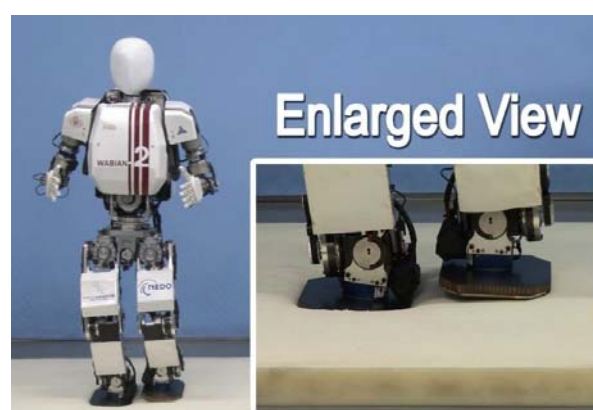


図1 軟弱路面での足踏み動作実験

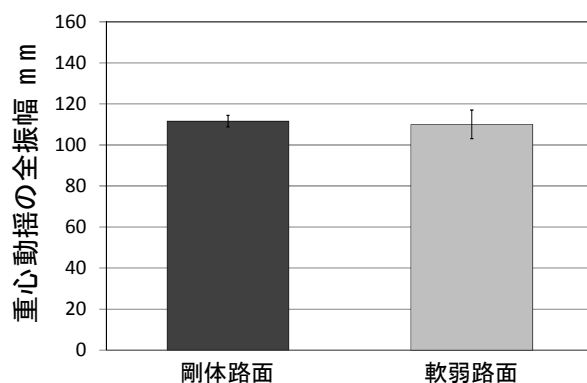


図2 左右方向の重心動揺の全振幅

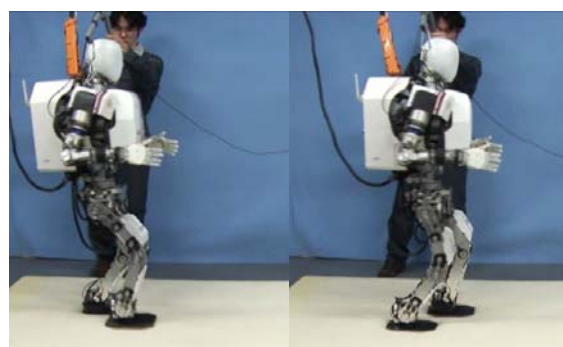


図3 軟弱路面での前進歩行実験

【27】細胞代謝活性イメージングゲルシートの開発に関する研究

研究者 東北大学大学院工学研究科 助教 長峯 邦明

〔研究の概要〕

本研究では、細胞、組織表面に貼るだけで簡便にその代謝活性を可視化出来る、独創的なセンサゲルシートを開発した。センサ素子には、細胞の代謝産物濃度に応じて色が変化する微粒子を作製し、それをゲル表面にパターニングすることでセンサシートとした。本研究では筋肉細胞の酸素消費活性をイメージングする目的から酸素センサゲルシートを作製し、細胞近傍の酸素濃度分布を可視化することに成功した。本成果は、例えば筋肉細胞を対象とした2型糖尿病機構の研究、及び薬剤開発ツールとして更なる発展を遂げると期待できる。

〔研究経過および成果〕

1.背景

運動中の筋肉細胞による血糖制御、に関連して細胞の代謝活性を調べることは、2 型糖尿病の機構解明、及び治療薬開発に必須である。代謝産物の検出は評価の簡便性から、代謝産物が分泌、あるいは消費された培養培地を採取し、マルチウエルプレート等での蛍光染色や呈色反応による可視化、定量する手法が広く普及している。しかし、(1)代謝産物の分泌／消費量は極微量なため高感度計測法を要すること、(2)色の制限のため1サンプルあたりの測定項目数が制限され、スループットが低いことが欠点であり、解決が望まれている。

本研究では、細胞、組織表面に貼るだけで簡便にその代謝活性を可視化出来る、独創的なセンサゲルシートを開発した。センサ素子には、細胞の代謝産物濃度に応じ色が変わる微粒子を用い、それをゲルシート表面にパターニングした。細胞表面に直接貼り、分泌された代謝産物を培地中に拡散する前にその場で検出することで高感度計測を目指した。また、複数センサ微粒子をゲル表面に適切にパターンするこ

とで、たった1色のシグナルでもその位置情報から複数項目の代謝産物を同時検出できるセンサを目指した。本研究では原理実証のため、ゲルシートへの酸素センサ微粒子パターン技術を確認し、得られたシートで筋肉細胞の酸素消費活性を計測した。

2.実験

2.1.酸素センサ微粒子の作製

テトラヒドロフラン(THF)溶液に直径 5 μm のポリスチレン微粒子を懸濁し、超音波処理により微粒子を膨潤させた。そこへ酸素応答性りん光プローブの platinum octaethylporphyrin (PtOEP)を添加し、膨潤した微粒子内に取り込ませた。その後、THF を揮発させることで微粒子を元のサイズまで収縮させ、PtOEP 包含微粒子を得た。

2.2.センサゲルシート作製

センサゲルシートは、天井に透明 ITO 電極、床に平板 Pt 電極を配置したチャンバ内で作製した。床の Pt 電極は絶縁被覆により中央 1mm 角のみ露出させた。チャンバへセンサ微粒子を導入後、天井と床の電極間に交流電場(5 Vpp, 100 Hz)を印加することで交流電気浸透流と呼ばれる溶液の流れを引き起こし、

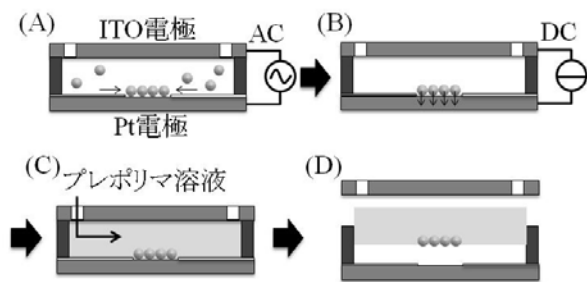


図 1 センサ微粒子パターンニング方法.

ビーズをPt電極露出部へパターンニングした(図1(A)). Pt電極に正の直流電位を印加することで負に帯電したポリスチレン微粒子をPt電極表面に固定化した(図1(B)). 固定化された微粒子は溶液の流れでは剥離しないため、微粒子の導入、パターンニング、固定を繰り返せば原理上センサのマルチパターンを形成できる。最後にポリアクリルアミドのプレポリマー溶液をチャンバへ流し込み、UV硬化させることで酸素センサゲルシートを得た(図1(C、D)、図2(A)).

2.3.筋肉細胞の酸素消費活性イメージング

筋肉細胞は、細胞接着領域を制限したシャーレを用いて培養し、幅 250 μm のライン状にパターンニングした。酸素センサゲルシートを細胞パターン上に貼り、リン光を観察した。

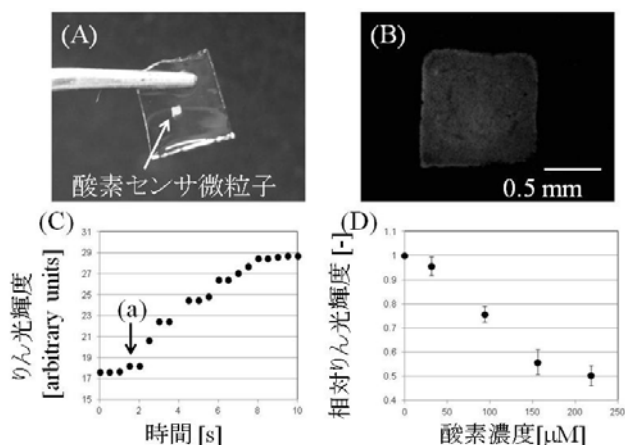


図 2 (A) センサゲルシートの写真. (B) 酸素センサ微粒子のりん光イメージ. (C) センサ応答の経時変化. (D) センサ応答の酸素濃度依存性.

3. 結果と考察

3.1. センサゲルシートの酸素応答性の評価

図 2(B)に、水中(溶存酸素濃度 150 μM)に浸漬した酸素センサシートのりん光イメージを示す。酸素プローブ PtOEP のりん光は酸素存在下において消光するため、ビーズ近傍の酸素濃度が低下するとりん光強度が増加する。図 2(c)に脱酸素剤の亜硫酸ナトリウム添加時のりん光強度の時間変化を示す。亜硫酸ナトリウム滴下(図 2(C-a))直後からりん光強度は増加し、 6.3 ± 1.2 秒($n=3$)で応答が定常に達した。また、図 2(D)よりりん光強度は溶存酸素濃度依存的に変化し、酸素センサとして機能することが示された。

3.2. 筋肉細胞の酸素消費活性イメージング

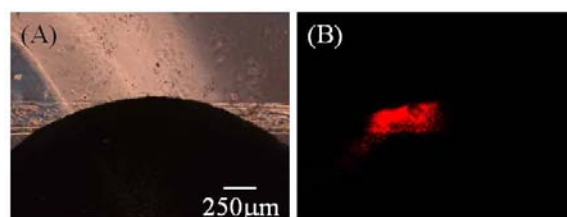


図 3 筋肉細胞ラインパターンに貼り付けた酸素センサゲルシートの光学(A)、及びりん光イメージ(B)。

図 3 に、筋肉細胞ラインパターン上に貼った酸素センサシートの位相差像(A)、りん光イメージ(B)を示す。細胞が周囲においてりん光強度の増加が観察された。また、10% エタノール添加により細胞を死滅させたところりん光強度が減少したことから、りん光応答は細胞の酸素消費に由来することが示された。

以上、センサゲルシートの作製法確立と細胞計測を実現した。今後は計測対象を追加し(pH、サイトカインなど)、筋肉細胞の運動と糖代謝の関連性を詳細に研究できるツールとして発展させる予定である。

[発表論文]

1. K.Nagamine, S.Ito, M.Takeda, S.Otani, M.Nishizawa, *Electrochemistry*, 80(5) 318-320.

【28】 認知症予防のための適度な有酸素運動を誘発する足底部硬さ提示デバイスの開発

研究者 山形大学大学院理工学研究科 准教授 菊池 武士

〔研究の概要〕

視覚、聴覚に続く第三の情報提示手段として、近年、力触覚提示に関する研究開発が盛んにおこなわれている。しかし、国内外の関連研究はそのほとんどが手指を対象としたものであり、足底部へ力触覚刺激を与えるデバイスに関しては研究が少ない。しかし通常我々は、分厚い靴底を介してでも点字ブロック等の路面形状を認識することが可能であり、また正常な歩行には足底部からの力刺激が不可欠である。本研究では、耐環境性の優れた機能性材料の一種である磁性エラストマー (Magnetic field sensitive elastomer) を用い、認知症予防のための適度な有酸素運動を誘発する足底部硬さ提示デバイスの開発することを目的とする。

〔研究経過および成果〕

1. 足部感覚入力による環境認知モデルの検討

足底部の力触覚が外環境を理解するのに必要な接触部位と応力を個別の接触点および複数の接触点の相互作用やその時間変化に関して調査し、認知に必要な情報のモデル化を行う。

まず、足底面における圧力感覚が、床面の環境情報の中でどのような情報に強く関連しているのかを調査するため、被験者

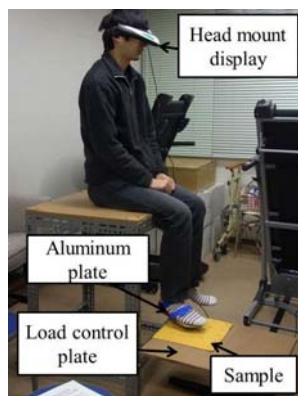


図 1 実験風景

(健常男子 10 名, 22-24 才)にHMDを装着させて視聴覚を遮り、足部の感覚入力(足底面の圧力覚, 振動覚, 足関節の角度変化)の単独もしくは複数を使用して床面サンプルの形状, もしくは素材を知覚できるか試験した。

実験結果より、床面形状の認知に対して圧覚情報

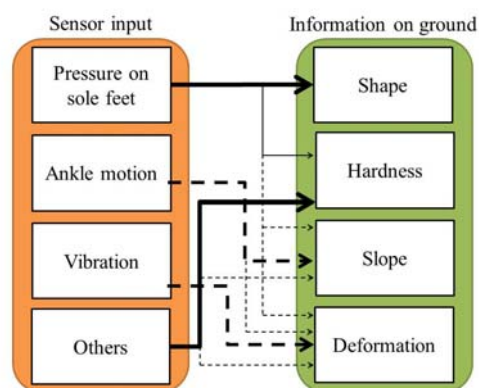


図 2 足部感覚入力による環境認知モデル

が大きく寄与しており、その他の感覚入力はほとんど影響していないことが明らかとなった。また、床素材の硬さに対する認知機能に対しても圧覚が一部寄与していることも考えられる結果となった。すでに他の研究者が確認している事項等を考慮し、図 2 のような足部による環境認知モデルを考案した。

2. 足底部硬さ提示デバイスの開発

磁性エラストマー (MSE) を可変摩擦要素として用いることにより、新規な触覚提示ユニット(図 3)を開発し、その力学特性を調査した(図 4)。今後、図 3 のユニットを多数使用し、足部に様々な触覚を提示可能なFootデバイスを開発する。

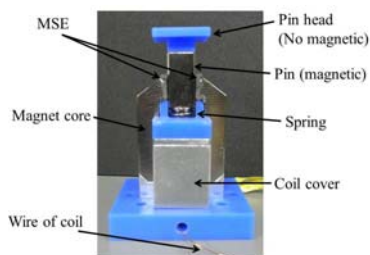


図 3. MSEを用いた触覚提示ユニット

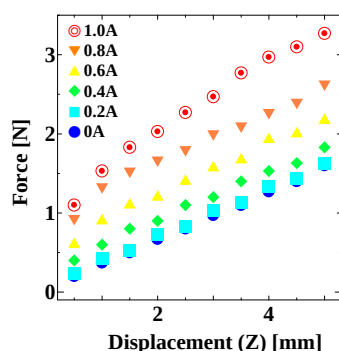


図 4. 触覚提示ユニットの力学特性

〔発表論文〕

1. Takehito Kikuchi, Human Friendly Mechatronics System with Functional Fluids and Elastomers, Technological Advancements in Biomedicine for Healthcare Applications (Edited by Jinglong Wu), IGI Global, pp.94-101 (2012)
2. Yasunobu Masuda, Takehito Kikuchi, Wataru Kobayashi, Kento Amano, Tetsu Mitsumata, and Suguru Ohori, Design and Evaluation of Unit for Haptic Device on Foot, Proceedings of the 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.541-545, (2012).
3. Yasunobu Masuda, Takehito Kikuchi, Wataru Kobayashi, Tetsu Mitsumata, Suguru Ohori, Design of Unit for Haptic Device on Foot, Proceedings of The 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.1709-1714, (2012).
4. Yasunobu Masuda, Takehito Kikuchi, Masao Sugiyama, Tetsu Mitsumata, Suguru Ohori, Measurement of Plantar Pressure for Development of Haptic Device on Foot: Effects of Groove Width and Sole of Shoe, Proceedings of The 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction, pp.725-726, (2012).
5. Takehito Kikuchi, Yasunobu Masuda, Masao Sugiyama, Tetsu Mitsumata, Suguru Ohori, Measurement of Plantar Pressure and Development of Prototype for Haptic Device on Sole of Foot with Magnetic Field Sensitive Elastomer, Proceedings of the IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.1188-1193, (2012).
6. 増田恭伸, 菊池武士, 小林渉, 天野健人, 三俣哲, 大堀優, 磁性エラストマーを用いた力触覚デバイスの開発及び評価, 第 18 回ロボティクスシンポジウム, in press (2013)
7. 天野健人, 増田恭伸, 菊池武士, 三俣哲, 大堀優, 磁性エラストマーを用いた足踏みハプティックデバイスのための磁場印加法の実験的検討, 計測自動学会東北支部 第 275 回研究集会, 275-5 (2012)
8. 増田恭伸, 菊池武士, 杉山正雄, 足底圧分布提示デバイス開発のための足底圧の評価, 日本機械学会 2012 年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, 1A2-A04 (2012).
9. 増田恭伸, 菊池武士, 杉山正雄, 三俣哲, 大堀優, 足底圧分布提示デバイス開発のための磁性エラストマーの評価, 第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.597-600 (2012)

【29】 超音波 DDS 用センサ型マイクロカプセルの開発とその機械特性評価

研究者 同志社大学理工学部 准教授 小山 大介

〔研究の概要〕

本研究では、ドラッグデリバリシステム(DDS)への応用を目的とした、生体適合性を有するポリ乳酸製センサ型マイクロカプセルを開発し、超音波による振動・破壊に関する機械的特性について検討した。ダブルエマルジョン法によりカプセル生成を行い、生成過程における各種パラメータ(試料の配合比、攪拌速度など)の影響について検討し、超音波照射によって破壊可能なカプセルの開発に成功した。レーザドップラ振動計によって、超音波照射下におけるカプセルの微小振動を測定し、カプセル径・照射音圧・振動振幅値の関係性を明らかにした。カプセル破壊の周波数特性を測定し、周波数と共振カプセル粒径の関係を明らかにし、膜の機械的弾性を定量的に評価した。薬液を想定した蛍光色素をカプセル内に封入し、駆動条件によりその放出量を制御できた。

〔研究経過および成果〕

マイクロカプセルを用いた超音波 DDS は、周囲に弾性膜を有し、中空で内部に薬液と気泡を内包した3層構造の粒径が μm オーダのカプセルを①血流内に投与、②超音波を用いて患部付近で捕捉、③強力超音波によりカプセルを破壊し患部付近のみに薬液を放出するという3段階で構成され、効率的な局所的薬物投与が期待できる。本研究では、生体適合性を有し、低音圧で破壊可能なマイクロカプセルの開発を行った。さらにカプセルの周囲膜弾性の定量的評価、カプセル内包物の放出について検討した。

膜材質として生体適合性を有するポリ乳酸を用い、下記のダブルエマルジョン法によりカプセルを生成した。まずポリ乳酸 0.5 g と塩化メチレン 20 ml を混合する。水 4 ml に薬液の代用である蛍光色素を 0.02 mg 加え、ホモジナイザを用いて乳化する。ポリビニルアルコール水溶液(0.2 wt.%) 100 ml を加え、ホモジナイザで攪拌する。これに水 200 ml を加え、マグネチックスターラを用いて 5 時間低回転で攪拌し水/油/水エ

マルジョンを生成する。最後にフリーズドライによりカプセルを中空にする。図1は作製したカプセルの電子顕微鏡画像である(平均粒径 15.3 μm)。生成過程の各種パラメータ(配合比、攪拌速度、攪拌時間など)によって、カプセル径、膜厚等が制御できた。

作製したカプセルに超音波を照射し、その振動および破壊特性を検討した。水中に超音波定在波を発生し、カプセルを捕捉した。捕捉したカプセルの振動をレーザドップラ振動計によって観測した結果、超音波周期に同期したカプセル膨張収縮運動が観測され、930 kHz, 100 kPa, カプセルの粒径が 30 μm の時、振動振幅値は 30 nm であった。

周波数 700 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 音圧振幅値 400 kPa の超音波を 90 秒間連続照射し、破壊特性につ

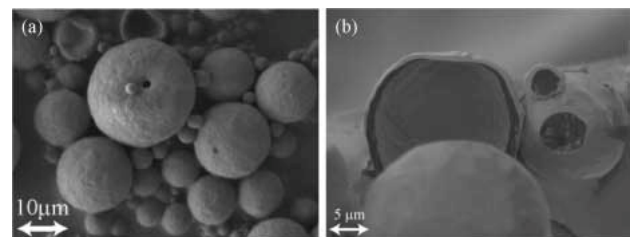


図 1 (a) カプセルの電子顕微鏡画像と (b) その断面像

いて検討した。図2は超音波照射前後のカプセルの様子であり、超音波によってカプセルが崩壊し、内包物が放出されていることがわかる。図3はカプセルの破壊率分布であり、その粒径分布はピークを持ち周波数依存性がある。カプセルの崩壊は、膨張収縮によって生じる周囲膜の断裂を意味し、破壊率のピーク粒径は超音波周波数に対するカプセルの共振粒径と考えられる。2 MHz, 1 MHz, 700 kHz での共振粒径はそれぞれ 15, 20, 25 μm であり、破壊率は 5.4, 20, 38%であった。粒径と共振周波数について、周囲に膜を持たない気泡の理論値と比較した場合、カプセルの膜の弾性によって、気泡に比べて共振周波数は2～6倍程度増加した。これらの関係より、超音波による人体への負荷が小さいより低い音圧でカプセルを破壊することができる。

図4は1 MHz, 400 kPa の場合に、連続超音波および、オン・オフを繰り返すバースト波(繰り返し周波数0.2 Hz)を照射した際の色素濃度の時間変化である。

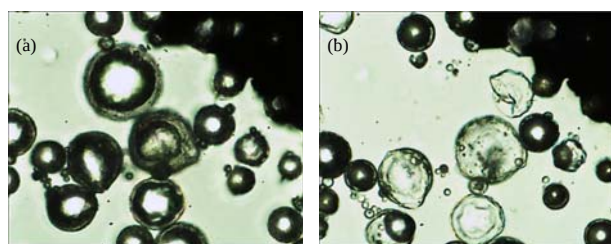


図2 (a)超音波照射前と(b)照射後のカプセル

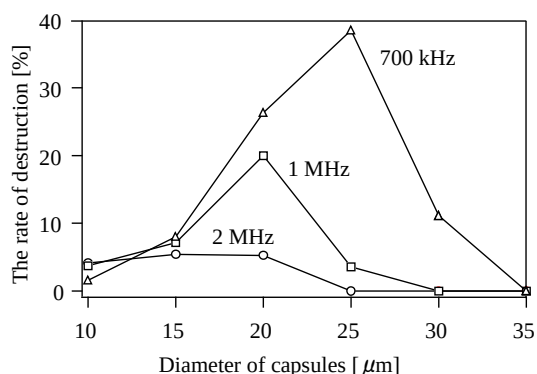


図3 カプセルの破壊率分布

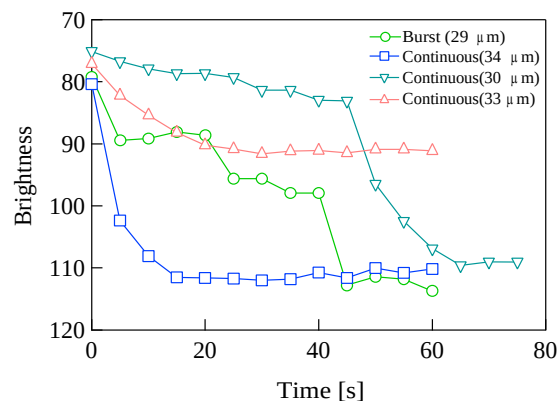


図4 蛍光色素放出量の経時変化

連続波照射の場合、時間の経過に伴い内部色素を放出し、濃度は徐々に低下したが、バースト波照射の場合は音波照射に同期して濃度が減少している。これより、カプセル崩壊後に、超音波照射条件を制御することにより、内包物の放出量を時間的に制御できることがわかる。

[発表論文]

1. H. Tabata, Y. Kato, K. Yoshida, D. Koyama, K. Nakamura, Y. Watanabe, Fabrication of polylactic acid microcapsules and release of the internal hydrophilic substance under ultrasound irradiation, Book of Abstracts of International Symposium on Ultrasound in the Control of Industrial Processes, p.30, (2012.4)
2. 田畑拓, 末松周, 吉田憲司, 小山大介, 中村健太郎, 渡辺好章, 超音波照射によるマイクロカプセルの破壊及び内包物放出過程の観測、電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波 111(158), pp.91-95 (2012.11)
3. H. Tabata, Y. Kato, K. Yoshida, D. Koyama, K. Nakamura, Y. Watanabe, Destruction of polylactic acid microcapsules under ultrasound irradiation, submitted.

【30】 脂肪由来間葉系幹細胞移植による慢性脱神経治療法の開発

研究者 大阪大学大学院医学系研究科 器官制御外科学講座 形成外科 助教 富田 興一

〔研究の概要〕

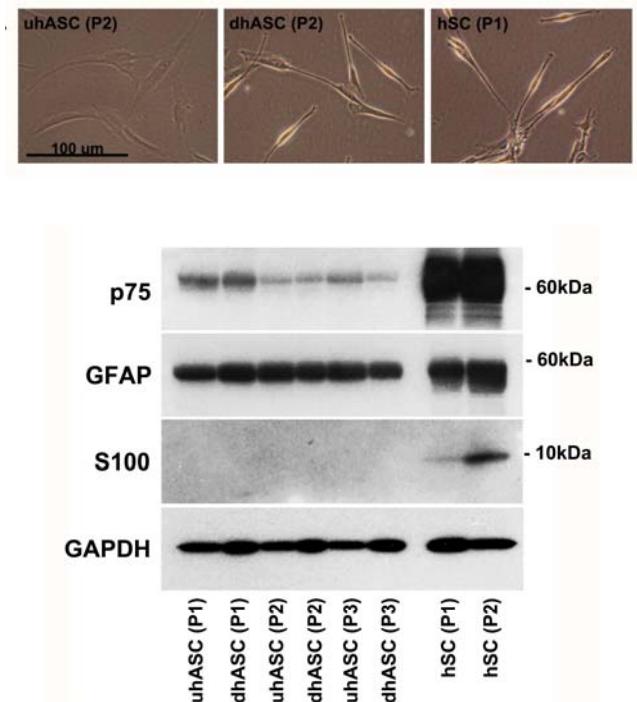
末梢神経系はある程度の再生能を有するが、実際の末梢神経損傷において完全な機能回復が得られることは殆どない。特に上位神経損傷例や、損傷から再建手術までの期間が長い例においては、再生支持細胞であるシュワン細胞(SC)活性の経時的低下によりその機能回復の程度は特に低い。そのような例においては、活性度の高い自家 SC 移植が有効である可能性が考えられる。しかし、自家 SC はドナー神経の犠牲や長期にわたる培養期間などの問題より臨床応用の障壁が高く、新たな SC 細胞源が望まれる。我々はこの候補として体制幹細胞で多分可能を持つことで知られる脂肪組織由来間葉系幹細胞(ASC)に注目した。本研究においては ASC より SC 様細胞(dASC)への分化を試み、その特性を末梢神経由来 SC と比較検討することで dASC を用いた新たな末梢神経損傷治療法開発を試みた。

〔研究経過および成果〕

再建手術を受けた 3 名の患者から書面での同意のもとに得られた脂肪組織よりヒト ASC (hASC) を抽出し、ヒトシュワン細胞様細胞 (dhASC) への分化誘導を行った。その特性を 2 名のドナーより採取したヒト末梢神経由来シュワン細胞 (hSC) と比較・検討した。

何れのドナー由来の hASC においても、骨髄由来間葉系幹細胞と似た表面抗原 (CD29・CD44・CD90 陽性、CD45 陰性) を認め、骨芽細胞及び脂肪細胞などへの多分化能を有していた。BME、レチノイン酸存在下において数日間培養を行った後、グリア細胞増殖因子、b-FGF、PDGF、フォルスコリンを含む培地にて分化誘導を行うことにより、線維芽細胞様形態の未分化 hASC (uhASC) は細長い紡錘形の hSC 細胞様細胞 dhASC へと変化した (図 1)。

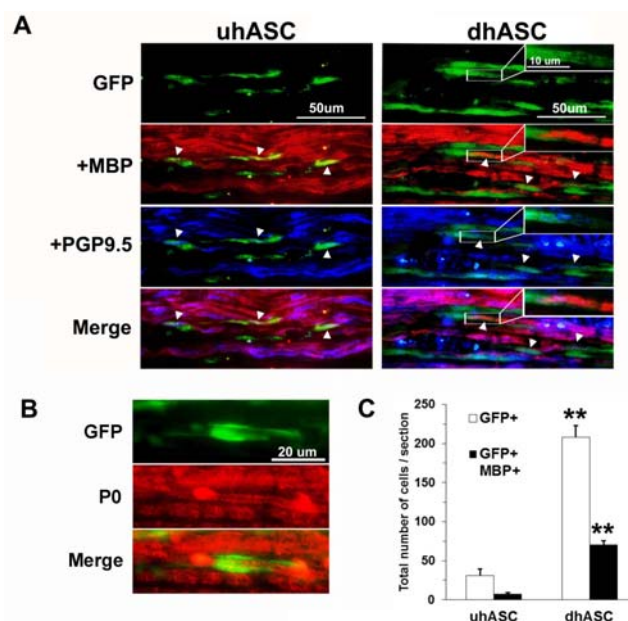
hASC と dhASC は共に SC マーカーである p75 及び GFAP を発現していたが、S100 は殆ど発現していな



かった (図 2)。またこれらのマーカー発現は

uhASC と dhASC との間で有意な差を認めなかった。それぞれの細胞を 48 時間培養した conditioned medium において、ELISA 法により主要な神経栄養因子量を評価したところ、dhASC は uhASC に比べ有意に NGF、BDNF、GDNF を多く分泌し、その程度

は hSC と同等またはそれ以上であった。またこれらの結果を裏付けるように、神経細胞 NG108-15 との共培養において、dhASC 群および hSC 群では uhASC 群に比して有意に優れた神経細胞突起伸長効果を示した。さらに in vivo における uhASC、dhASC の移植後動態を検討する目的で、それぞれの細胞にレンチウイルスベクターにより GFP 標識を行った後、予め圧挫損傷を加えておいたヌードラット坐骨神経遠位側への異種細胞移植を行った。細胞移植後 8 週目において、細胞移植部では多数の GFP 陽性 dhASC の生着を認め、さらに PGP9.5 陽性再生軸索上において GFP 陽性 dhASC はミエリン蛋白 MBP 及び P0 を発現していた。(図 3、A と B)。一方で、uhASC 移植では僅かに GFP 陽性の生着細胞とミエリン蛋白発現細胞を認めたものの、それらの数は dhASC 移植に比して有意に少なかった(図 3、A と C)。



(図 3)

ラット骨髄由来間葉系幹細胞のグリア系細胞分化に用いられるプロトコールにより、hASC は hSC と同等またはそれ以上の神経栄養因子分泌能及び

神経細胞突起伸長効果を持つ dhASC へと分化することが明らかとなった。In vitro においては phenotypic マーカー解析の結果から、dhASC の SC への完全な分化は起こっていないことが示唆される。しかしながら、細胞移植実験においてはミエリン蛋白、特に末梢神経に特異的である P0 を再生軸索上に発現していることから in vivo の環境が dhASC の SC への完全分化を促しているものと考えられる。一方で、uhASC 移植ではその in vivo での SC への分化効率および生存率が共に著しく低いことから、実際の hASC を用いた臨床応用においては dhASC へ分化誘導を行った後に、移植を行うことが必要と考えられる。

[発表論文]

1. Glial differentiation of human adipose-derived stem cells: implications for cell-based transplantation therapy. Koichi Tomita, Tomas Madura, Yasuo Sakai, Kenji Yano, Giorgio Terenghi, and Ko Hosokawa *Neuroscience* in press.
2. Differentiated adipose-derived stem cells promote reinnervation of rat skin flaps. Koichi Tomita, Akimitsu Nishibayashi, Kenji Yano, and Ko Hosokawa submitted.

【31】 哺乳類受精卵の機械的刺激感知機構の解明と胚培養に関する影響

研究者 岡山大学異分野融合先端研究コア 助教 松浦 宏治

〔研究の概要〕

卵管蠕動モデルとなる空気圧アクチュエータを組み込んだマイクロ流路を用いた受精卵培養と細胞内カルシウム濃度変化を計測した。＜1＞胚盤胞到達率および胚盤胞内細胞数が培地を移動させた群で有意に増加した。＜2＞受精卵が回転する場合よりも速く移動させた際または圧縮した際に受精卵全体の蛍光強度の増加が観察された。

〔研究経過および成果〕

直径 100 μ m の哺乳類受精卵はマイクロ流路である卵管内で5日間かけて卵管蠕動の動きに伴って子宮へ移動しながら発育する。マイクロ流路内で受精卵を移動させながら培養することによって、生理的なメカニカル培養環境の一部を体外培養で再現できる。卵管蠕動に伴う受精卵に負荷されるメカニカルストレス(MS)について、負荷されたMSとその細胞内応答の同時計測を目的として、シリコーンエラストマー poly(dimethylsiloxane) (PDMS) 製の厚さ 0.1 mm の薄膜を含むマイクロ流路と空気圧アクチュエータを組み込んだ卵管蠕動モデルとなる培養システムを開発した。空気圧を制御するアクチュエータをインキュベータの外側に設置し、マイクロチャンバーをインキュベータ内に設置する。厚さ 0.1 mm のPDMS薄膜が空気圧によって上下することによって、培地用流路内の流体が移動する(図A)。アクチュエータの駆動速度によって負荷されるMSを変化させるために、受精卵を流体移動によって並行移動、圧縮できる(図B)。図Aに示されるこのシステムを用いて、＜1＞マウス二細胞期から胚盤胞への発育評価、および ＜2＞マウス胚盤胞の細胞内カルシウム濃度($[Ca^{2+}]_i$)変化とその

時に負荷されたMSを同時計測した。

＜1＞二細胞期から胚盤胞への発育を、当システムを駆動して流路内の培地を動かした際(dynamic)とそうでない場合(static)と比較した。胚盤胞到達率においては駆動した培養区において有意に上昇した(dynamic, 74% (n = 126); static, 62% (n = 118); $P < 0.05$)。胚盤胞内細胞数の平均についても有意に上昇した(dynamic, 83 ± 3 (n = 54); static, 76 ± 3 (n = 51) ($P < 0.05$))。従って、マウス受精卵の最大移動速度が 0.2 mm/sとなる条件では、胚盤胞到達率および胚盤胞内細胞数が上昇することが確認された。負荷されたシェアストレスはアポトーシスを起こす値(1.2 dyne/cm²)よりも小さく、MSが適度に負荷されていることと、流路内の培地移動速度が上昇し老廃物拡散が流路内で促進されたためと考えている。従って、このシステムを用いることによって、数日間培養時のMS応答および受精卵発育の評価が可能である。

＜2＞当該システムを用いて、マウス胚盤胞におけるMSと $[Ca^{2+}]_i$ について同時評価した。 $[Ca^{2+}]_i$ を反映する蛍光色素Fluo-4 AMを融解したマウス胚盤胞に

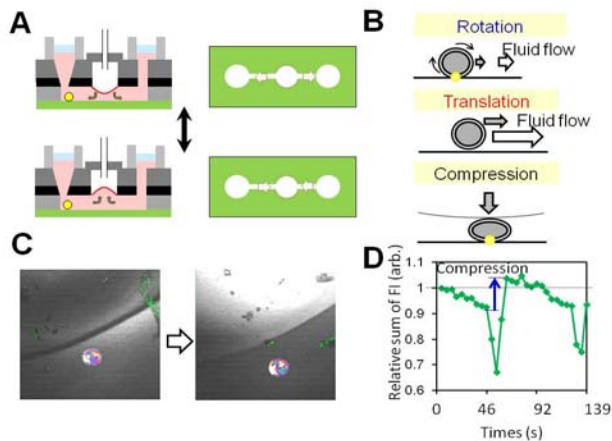


図 (A) 本実験で用いたマイクロ流路構成の模式図。赤色は PDMS 薄膜を、桃色は培地を、水色は蒸発防止用のミネラルオイルを示す。矢印は PDMS 薄膜の動きに伴う培地移動の方向を示す。

(B) 培地・受精卵移動の模式図。上から「回転」「並行移動」「圧縮」を示す。黄丸印は接地していることを指す。

(C) 圧縮前後に伴う受精卵の画像。色は蛍光強度の違いによる変化を示す。

(D) 圧縮に伴う受精卵全体の蛍光強度変化。撮影開始から 46 秒後と 66 秒後を比較した際に約 10% の蛍光強度上昇が観察された。

添加し、マイクロ流路内に導入した。流路内で「回転」「並行移動」「圧縮」に伴う MS を負荷した状態の胚盤胞について共焦点蛍光顕微鏡観察を行った。直径 0.1 mm 程度の胚盤胞全体を通過するように 10 μ m の焦点位置間隔で計 10-11 フレームの蛍光画像を時間分解能 0.2 秒で撮影した。

受精卵が「回転」した際には最大蛍光強度変化は殆ど観察されなかった。40 μ m/s で「並行移動」した受精卵については (シアストレスは 0.01 dyne/cm² と概算)、非常に短い時間であったが最大 10% 増加した。今後、観察時の時間分解能を上昇させて、応答の時間変化を計測する。「圧縮」時の歪は約 20% 程度であり、応力-歪関係は 25% 程度までは線形に近似できることから、圧縮に伴う力は 0.5-2.0 μ N と見積もられた。この際、共焦点撮影面内平均蛍光強度および蛍光強度の総和は 10% 程度増加した。従って、[Ca²⁺]_i の変化は「並行移動」または「圧縮」が起こる際に観

察された。流体移動に伴うシアストレス、または、圧縮に伴う各細胞の伸展を高倍率で観察することにより、受精卵の MS 応答についてより詳細な知見が得られると考えられる。受精卵内の細胞を高倍率で観測するためには受精卵を固定する必要がある。この目的を果たすために、我々は顕微授精で用いられる受精卵固定用のガラスピペットを PDMS 流路に組み込む方法を発見した。最終的には初期胚のステージごとの応答とイオンチャネル等のメカノセンサーとの関連について評価することを目指す。

【発表論文】

1. Matsuura, K. Watanabe, K. ; Kodama, M. ; Kuroda, Y. ; Naruse, K., 2011 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2011): "Development of observation system to investigate both intracellular calcium concentration and mechanical stimuli to mammalian embryos" Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2011 International Symposium on Date of Conference: 6-9 Nov. 2011, 99 - 104 Best Paper Award
2. K. Matsuura, J. Li, Y. Kuroda, K. Watanabe, M. Kodama, H. Funahashi and K. Naruse , International Embryo Transfer Society 38th Annual Conference (IETS38): " Comparison between static and dynamic culture results using a novel air actuation system " Reproduction, Fertility and Development 24(1) 2012, 156-156 Selected for Outstanding Presentation
3. 松浦宏治、成瀬恵治、「Dynamic Culture System による受精卵発育促進とその機構解明」、日本哺乳動物卵子学会誌 (Journal of Mammalian Ova Research) 28(2011), 174-179
4. K. Matsuura and K. Naruse, Use of Silicone Elastomer-Based Microfluidic Devices and Systems in Reproductive Technologies, Advanced Elastomers - Technology, Properties and Applications, (2012), Intech, 243-262

【32】 脳活動計測による手術支援ロボットの操作の直観性の評価に関する研究

研究者 早稲田大学理工学術院 研究院准教授 小林 洋

早稲田大学理工学術院 教授 藤江 正克

早稲田大学先進理工学研究科 修士生 三浦 智

〔研究の概要〕

本研究は、マスタ・スレーブ型手術支援ロボット操作者が感じる直感的な操作性の評価手法に関する研究である。手術支援ロボット操作者の脳活動を計測し、操作者が感じる直感的な操作性を定量化する手法を提案する。従来手法と比べて、機械的な精度向上に傾倒したロボット設計ではなく、操作者の操作感覚を設計指針に導入可能なため、より操作性の高いロボット開発が可能となる。提案手法の波及効果は医療福祉分野に留まらず、操作を要するすべての道具・ロボットに適用可能である。本研究では脳活動計測を用いて、ロボットの眼と手の位置関係を導出する実験を行った。実験の結果、ある特定の眼と手の位置関係でロボットを操作した際に、操作者の脳内血中ヘモグロビン濃度が有意にピークを示して上昇した。

〔研究経過および成果〕

マスタ・スレーブ型手術支援ロボットは高い低侵襲性を実現できることから、国内外で広く普及してきた。ロボット手術では、体性感覚による操作感と視覚で確認したスレーブの動きとを整合させて手術するため、視覚と体性感覚の情報に整合性をもたせるべく、ロボットの眼と手の位置関係が重要であると言われている。しかし、従来の評価手法では、操作者の感じる直感的な操作性を定量的に評価することができないため、直感的な操作が可能なロボット開発は難しいという問題点がある。操作者の感覚は脳活動で生成されるという知見を基に、本研究ではロボット操作者の脳活動を計測し、直感的な操作性を定量化する手法を提案する。実験の目的は、操作者の脳活動を定量化し、ロボットの眼と手の位置関係を導出することである。

実験では、ハンドコントローラを動かして仮想アームでタッチングを実施する被験者の脳内血中ヘモグ

ロビン濃度を、光トポグラフィを用いて計測した。実験の様子を Fig. 1 に示す。実験条件では、視点を中心とした際の仮想アームの取り付け位置を変化させた。

実験の結果、13 名中 10 名の被験者が、ある特定の眼と手の位置関係において有意に脳内血中ヘモグロビン濃度が上昇し、ピークを示した。脳内血中ヘモグロビン濃度がピークを示す眼と手の位置関係は、操作者にとって最も直感的に操作できる最適解であ

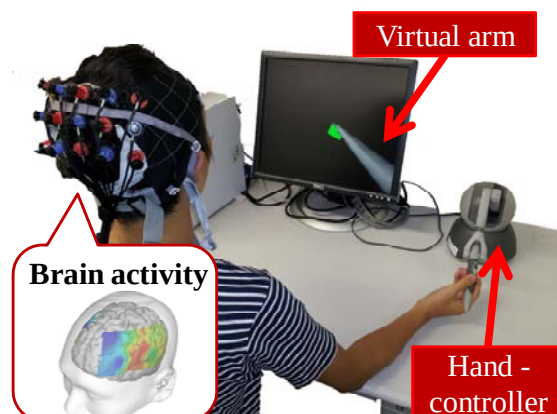


Fig. 1 Proposed method

ると考察した。今後は、脳活動から導出される最適解の再現性検証と、手術などの複雑なタスクに対応可能な計測手法の提案が必要となる。

〔発表論文〕

1. Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Masatoshi Seki, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurement to Identify Hand-Eye Coordination”, in Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’12), 4546-4552, St. Paul, MN, USA, 14-18 May 2012
2. 三浦智, 小林洋, 関雅俊, 野口建彦, 粕谷昌宏, 横尾勇樹, 藤江正克, “脳活動計測に基づいた直感的な操作性評価”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH) 2012, 1P1-O02, 浜松, May 2012
3. Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurement to Determine Immersive Reality”, in Proceeding of the 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC’12), 337-343, San Diego, Aug. 2012.
4. 三浦智, 小林洋, 川村和也, 中島康貴, 関雅俊, 野口建彦, 粕谷昌宏, 横尾勇樹, 藤江正克, 脳活動計測に基づいた手術支援ロボットの直感的な操作性評価, 日本機械学会 2012 年度年次大会, J165033, 金沢大学 角間キャンパス, 金沢, 9 月 9-12 日, 2012 年
5. Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Yuki Yokoo and Masakatsu G. Fujie, “Configuration of Slave and Endoscope in Surgical Robot based on Brain Activity Measurement”, in Proceeding of SCIS-ISIS 2012, 1195-1200, Kobe, Nov. 2012.
6. Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, Yasutaka Nakashima, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo, Masakatsu G. Fujie, “Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurement to Clarify Immersive Reality”, Journal of Robotics and Mechatronics, Accepted, Vol. 25, No. 1, 2013

【33】 直観的意思決定に関する認知神経メカニズムの解明

研究者 京都大学大学院医学研究科 准教授 高橋 英彦

【研究の概要】

高度な意思決定には、情報を時間をかけて処理する熟慮的な意思決定に加えて、瞬時の直感的な意思決定も重要である。膨大な情報量の中で、いくつも代替がある商品の中から直観的に購入するなど、我々は、日常的にも直観を利用する。そこで本研究では多属性意思決定課題を用いて、素早い直観的な意思決定の認知メカニズムを検討した。情報の探索のごく初期過程においては属性内探索が多く、素早い直感的な意思決定（選択肢の絞り込み）には、属性をベースとした情報探索が中心で、後期の熟慮する段階で選択肢内で探索していくことが示された。今後、脳活動やアイカメラなどの生理学的指標との関連も検討していきたい。

【研究経過および成果】

方 法

実験参加者：健常者 54 名、平均年齢 21.1 歳
(SD=1.0)

刺激：10 の属性によって特徴付けられる仮想的な企業を8社設定した。属性は「安定性」「会社の雰囲気・社風」「社会貢献度」「自分がやりたいことができる可能性」「規模」「通勤の便利さ」「年収」「休暇の取りやすさ」「知名度」「福利厚生」であり、それぞれが「高い／低い」といった2水準によって特徴付けられた。また、優越した企業が無いようにした。

課題：上述の素材を用い、多属性意思決定課題を作成した(図1)。全選択肢を同時に提示し、制限時間を設けず自由に情報探索させ、最も望ましい企業の選択を求めた。実験画面はタッチパネル上に表示され、各パネルを押すことによって、属性値を見ることが出来る。新たな情報を取得すると、それまで開いていたパネルは閉じられ、情報の取得ごとに反応時間などが記録される。

本課題の指標として(A)情報探索時間(一つ目のパネルを開けてから、選択肢の決定パネルを押すまでの時間)(B)情報探索回数(何度パネルを開けたか)などの基本的な指標に加えて(C)情報探索の方向性に焦点を当てて解析した。

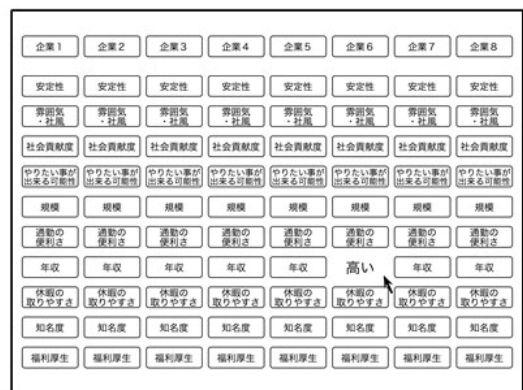


図1 情報モニタリング法の模式図

実験参加者が行った情報取得の一つずつを、探索の方向に基づき、属性内探索と属性間探索に分類し解析した。また、情報探索過程を探索時間に基づいて前期段階、中期段階、後期段階の3段階に分けた。

情報探索の方向性のうち、属性間探索数を従属変数とした分析を行ったところ、情報探索過程の3段階による主効果に有意差が認められた ($F(2,106) = 19.78, p < .001$)。情報探索過程の前期段階と中期段階、前期段階と後期段階の間に0.1%水準で有意差が認められた。属性内探索数を従属変数とした分析を行ったところ、情報探索過程の3段階による主効果に有意差が認められた ($F(2,106) = 32.82, p < .001$)。情報探索過程の前期段階と中期段階、前期段階と後期段階の間に0.1%水準で有意差が認められた。属性間探索数は、情報探索過程の後期において最も多く、前期において最も少なかった。反対に属性内探索数は、情報探索過程の前期において最も多く、後期において最も少なかった。情報探索過程の初期段階では選択肢数を絞り込むために属性をベースとした情報探索を行い、選択肢を絞り込んだ後は選択肢をベースとした情報探索に切り換えたということが示唆される。

情報の探索のごく初期過程においては属性内探索が多く、素早い直感的な意思決定（選択肢の絞り込み）には、属性をベースとした情報探索（モニターを横に探索）が中心で、後期の熟慮する段階で選択肢内で探索していくことが示された。先行研究で前頭葉眼窩面が損傷した患者では属性内探索に障害があることが示されており、このような素早い直感的な意思決定には前頭葉眼窩面が関与していることが予想される。

今後、多属性意思決定課題を遂行中の脳活動や眼球運動の記録を進める。また、統合失調症患者などの精神神経疾患患者を対象に、同課題を施行し、患者の意思決定障害についても検討していく予定であ

る。さらに、意識に上らない意思決定やそれらへの情動への影響を検討するより大きなプロジェクトの枠組みで本課題を改変（選択肢に情動値を加える、選択に制限時間を設ける）して検討していきたい。

〔発表論文〕

1. Takahashi H. Monoamines and assessment of risks. *Curr Opin Neurobiol* 2012;22(6):1062-7
2. Takahata K, Takahashi H., Maeda T, Umeda S, Suhara T, Mimura M, Kato M. It's Not My Fault: Postdictive Modulation of Intentional Binding by Monetary Gains and Losses. *PLoS One*. 2012;7(12):e53421
3. Takahashi H., Takano H, Camerer C, Ideno T, Okubo S, Matsui H, Tamari Y, Takemura K, Arakawa R, Yamada M, Eguchi Y, Murai T, Okubo Y, Kato M, Ito H, Suhara T. Honesty mediates the relationship between serotonin and reaction to unfairness. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2012) 109(11):4281-4284
4. Takahashi H., Fujie S, Camerer C, Arakawa R, Takano H, Kodaka F, Matsui H, Ideno T, Okubo S, Takemura K, Yamada M, Eguchi Y, Murai T, Okubo Y, Kato M, Ito H, Suhara T. Norepinephrine in the brain is associated with aversion to financial loss. *Mol Psychiatry* (2013) 18 : 3-4
5. Takahashi H., Sassa S, Shibuya T, Kato M, Koeda M, Murai T, Matsuura M, Asai K, Suhara T, Okubo Y. Effects of sports participation on psychiatric symptoms and brain activations during sports observation in schizophrenia. *Transl Psychiatry* (2012) 2 e96.

【34】 文科系大学院博士課程の教育プログラムの革新と 新たな人材養成モデルの構築に関する総合的研究

研究者 東京大学大学院教育学研究科 教授 橋本 鉦市

共同研究者 東京大学大学院教育学研究科 大学院生 齋藤崇徳・加藤靖子・千田恭平

〔研究の概要〕

本研究は、理工系に比してこれまで調査・分析が限られてきた人文・社会科学系の博士課程院生に焦点を絞りながら、特に大学院重点化以降に大きく拡大を遂げてきたその制度・組織の変容を踏まえた上で、最近の就職状況と研究者市場からの能力要件を分析し、若手研究者のトランジションにおける課題の一端を解明することを目的とした。具体的には、①JREC-IN（科学技術振興機構研究人材データベース）に掲載された各研究機関の公募情報から、博士院生らの若手研究者にどのような要件や能力などが期待されているか、またその勤務条件はどのようなものか、などの応募条件について定量的な分析を行うとともに、②博士課程院生へのインタビュー調査を行ってその現状を描き出し、将来的なインプリケーションを提示した。

〔研究経過および成果〕

わが国の大学院教育は 1990 年代の高等教育改革の最重要項目のひとつとして挙げられ、大学院重点化のもとで量的整備が急速に進められた。文科系大学院の博士課程については、ここ 20 年余りの間に在籍者数は 2 倍以上にふくれ上がった。こうした急激な量的拡大に伴って、喫緊の課題となっているのは就職状況の改善であるが、文科系のアカデミックポストの現状やそこで求められる就職要件の変容については十分な調査研究がなかった。そこで本研究では、JREC-IN（科学技術振興機構研究人材データベース）に掲載された各研究機関の公募情報と、文科系若手研究者へのインタビューなどから、その就職実態と能力要件について調査・分析を進めた。

まず JREC-IN の公募から、雇用形態、任期制のタイプ、任期付き常勤職の雇用期間、要求学位、学位の代替条件について、機関別、創立年別、

職階別、分野別でどのような特徴があるか分析を行った。その結果、人文学・社会科学のような伝統的な領域よりも新しい領域において任期付き常勤職の割合が高くなっている、創立年の古い機関の方が任期なし常勤職の割合が高くなっている、私立大学や短期大学では 3 年が一般的な最長任期である、公立大学を除き任期なし常勤職の方が任期付き常勤職よりも博士学位を要求する傾向が強い、創立年の古い機関では国公私立大学全てにおいて博士学位を要求する割合が高い、修士以上の学位を要求する求人では半数近くが代替条件として研究に関するものを指定している、などのことが明らかになった。

次に、公募の文書の中に書かれている条件をコード化し、公募を出している機関の創立年、機関の種類、学問分野、公募している職種、任期の有無、学位条件とそのコードがどのように関連しているかについて分析を行った。その結果、全体的

に教育や研究に関する条件が多く提示されている、創立年の古い機関や国立大学あるいは博士以上を要求する公募においては今もなお若手研究者に研究についての能力を求めている、創立年が新しい機関では若手研究者に幅広い条件を提示している、などの傾向が明らかになった。若手研究者の要件として様々な内容が公募の中で言及されており、それは公募を出している機関および公募の性格によって規定されている面があると言えよう。

このように、本研究では文科系若手研究者の市場参入の進路・就職のあり方そのものについて定量的に分析した結果、以下のようなインプリケーションが得られた。現代日本の研究者市場は、新しい「ポスト近代」的なトランジションのあり方一般と、研究者市場独自の研究を中心とした「業績主義」的な従来の就職のあり方との混合的な形態にあり、大学に雇用される研究者において古くから存在してきた研究と教育という理念に加えて、若年層特有の「ポスト近代」的な理念という三つの問題群を強く反映している状況にあると言える。次に、文科系若手研究者の職業へのトランジションについて、その現状を質的に明らかにするため文科系博士課程院生にたいしてインタビュー調査を行い、以下のような点を明らかにした。

まず、博士院生らの研究生活および将来への展望の形成が、指導教員との関係性や非公式的・慣習的に形成されているゼミナールの仕組みなどの文化的要因によって形成されているという点である。とくに、教員の個性および学生が持つ教員との個人的関係性の築き方が重要な要素となっていた。将来の展望などについても大学院生にどのような情報を提供するか、またどのように水路付け

るかについても教員によって多様であった。このような文化的要因による多様性が文科系大学院生の研究生活に生じる原因は、標準化され得ない専門性の高い学問内容・活動が行われているためであると考えられる。また研究の「成功」、そして「就職」の可否は個人の資質を含め非常に不確定なものとして考えられていることが垣間見られた。さらに、大学院生の生活は純粋な学問活動に近いものとして理解されているために、言い換えれば標準化された大学教育に関わる活動というよりは学問に関する活動として位置づけられているがゆえに、大学としての統制が及んでいないことがそのような状況を生んでいる点も浮かび上がった。

すでに先行研究においては大学タイプや専攻分野による研究生活の差異が指摘されてきたが、本研究の定性的分析では、そのような制度面の違いに加えて、文科系博士院生の個人的な関係性によって形作られる「風土」のような文化的側面が、研究生活および学位取得への展望の多様性の原因となっていること、また将来展望の不確定性を増幅させていることが明らかになった。

〔発表論文〕

1. 橋本鉦市・齋藤崇徳・加藤靖子・千田恭平「研究者市場における文科系博士院生の就職要件—JREC-IN による公募情報の分析—」『東京大学大学院教育学研究科紀要』第 52 巻、2013 年 3 月(近刊)
2. 橋本鉦市編『文科系大学院博士課程の教育プログラムの革新と新たな人材養成モデルの構築に関する総合的研究(カシオ科学振興財団研究助成最終報告書)』、2013 年 3 月(近刊)

【35】新華僑の組織間関係に関する国際実証研究 ——温州人、福建人、広東人のトポロジーとパフォーマンス

代表研究者 一橋大学イノベーション研究センター 教授 西口 敏宏

共同研究者 龍谷大学 准教授 辻田 素子

〔研究の概要〕

温州人とはほぼ同時期に欧州に進出した、他地域出身の新華僑にも、異国の地で個人的に成功した企業家はいるが、彼らは、成功に至るプロセスにおいても、成功したのちも、同郷人とのつながりは温州人ほど強固ではなく、外部から有用な情報を得るたびに、同郷人の仲間に伝えるという慣習も希薄だった。つまり、他地域出身の中国人社会にも、「ジャンプ型」戦略をとる企業家は一定数存在したが、「ジャンプ型」が、同郷の「現状利用型」および「動き回り型」と緊密に連携し、前者が外部から入手した情報や利得を後 2 者に伝え、いわばそのおすそわけをする「近隣効果」はほとんど確認できなかった。温州人社会は、そのネットワークが全体としてスモールワールド化しているがゆえに、「現状利用型」や「動き回り型」であっても繁栄できたと推察される。

〔研究経過および成果〕

筆者らは 2004 年以降、国内外で活動する中国浙江省の温州人企業家に着目し、彼らの繁栄と、彼らを取り巻くネットワークの構造や機能、ソーシャル・キャピタルとの関係を考察してきた。その過程で、ネットワーク戦略の分類法を再考し、(1)直近の人間関係を適宜利用し、しかも、ほぼそうした直接的な関係に留まったまま活動する「現状利用型」(passive recipient)、(2)既存の人間関係をベースにするとはいえ、適度にランダムなリワイヤリング(情報伝達経路のつなぎ直し)を積極的に行う「動き回り型」(activist)、(3)同様に既存の人間関係をベースにするが、他方でまったく新規に独力で遠方に及ぶ人間関係を構築する「ジャンプ型」(jumper)の 3 類型を新たに提起した。

他方、筆者らは、温州人企業家に対する独自調査を継続する中で、(1)温州人を取り巻くネットワークは

全体としてスモールワールド化しており、(2)既存の人間関係を必要に応じて活用する「現状利用型」よりも、既存の人間関係をベースとするが、適度にランダムなリワイヤリングを積極的に行う「動き回り型」や、全く新規に人間関係を構築する「ジャンプ型」のほうが繁栄している、といった仮説を構築した。

本研究はこうした仮説の検証を企図したもので、筆者らは、2012 年 3 月 23 日～31 日にかけて、イタリアのフィレンツェ、プラート、エンポリ、ナポリ、ローマの 5 都市とハンガリーのブダペストを訪問し、現地で活躍する新華僑の実態を調査した。限られた日程ではあったが、意大利羅馬華僑華人貿易総会(在ローマ)、意大利福建総商会(同)、ハンガリー華人婦人連合会(在ブダペスト)、ハンガリー福建同郷会(同)の各同郷団体、さらに温州大学の張一力教授や周歡懷講師らの協力を得て、イタリアで温州人 28 人、福建人 5 人、ハンガリーで温州人 4 人、福建人 2 人、

東北人 2 人の計 41 人の経営者に、どのような人や組織といかなる関係を構築しているのか、起業や事業転換にあたりどのようなネットワークをいかに活用しているのかといった観点から、1〜2 時間程度のセミストラクチャード形式のインタビューを行った。

この現地調査により、次の 2 つの成果が得られた。

第 1 に、福建人に関する一定量の独自データを新たに入手でき、少なくとも改革開放後に欧州に進出した福建人社会では、温州人社会の特徴とされる、(1) すぐれた情報伝達特性を持つネットワーク、(2) 最低限の生活保障や起業に必要な経営資源獲得手段として機能する豊かなソーシャル・キャピタル、(3) 企業家精神を最重要視する規範のいずれもが相対的に脆弱であることが示唆された。さらに、温州人社会に比べ繁栄の度合いが低いことも明らかになった。

第 2 に、筆者らがこれまで蓄積してきた在欧州の温州人に関する独自データとの比較により、彼らのトポロジーやパフォーマンスの経時的変化を分析することが可能になった。2008 年秋のリーマン・ショック以降、欧州経済が不振を極める中、中国製品の輸入販売やメイド・イン・イタリー製品の製造販売等で繁盛していた欧州在住の温州人企業家も苦境に陥り、商売替えや中国への U ターンが目立っていた。

最後に、本研究全体を通じて得られた知見を、以下に述べておく。温州人は、福建省をはじめとする他地域出身の新華僑とは明らかに異なる価値基準や行動規範、社会構造を持っており、1980 年代から 2008 年頃までの欧州には、温州人の価値基準や行動規範、社会的構造に合致し、その成長を助ける好条件が重なり合っていた。移民が移民を呼び込む累積性を可能にした欧州への出稼ぎや移住の歴史、資本主義経済の浸透と経済のグローバル化、安価で勤勉な

移民を活用する欧州の分断された労働市場、中国の経済的発展と安価な中国製品を求める欧州市場などである。そうした環境下で、温州人企業家が行う適度のランダム性を持った頻繁なリワイヤリングと、その効果を同郷人社会内に一気に拡散させる、深い信頼で結ばれたメンバー間の優れた情報伝達特性、さらに、その帰結としてのネットワーク全体の競争優位こそが、持続的な集団的繁栄の好循環を生み出していたのである。温州人社会は、コンピューター・シミュレーションによって数学的に描出されたスモールワールドのトポロジーの理念型に接近する極めて優れたネットワークであったと想定できる。

しかしながら、温州人の経済的繁栄を支えたソーシャル・キャピタルは、結局のところ、血縁や同郷縁をベースとする原初的な段階にとどまっており、近年の温州人の苦境は、彼ら自身を繁栄に導いた、まさにその価値基準や行動規範、社会的構造そのものに起因している可能性が強く示唆される。

なお、2012 年夏以降、西口は、米国の MIT に長期滞在し、ネットワーク論や組織間関係論に関する理論的研究を進めている。最先端の研究動向や知見を含む本研究の成果は、有斐閣から 2013 年に出版を予定している著作に反映させる。

【発表論文】

1. 西口敏宏・辻田素子「温州人企業家の成功への道——ネットワークとソーシャル・キャピタルの活用」WP#12-03 一橋大学イノベーション研究センター（2012/03/07）
2. 辻田素子・西口敏宏「福建人のネットワークとソーシャル・キャピタル——在日福清人を中心に」WP#12-05 一橋大学イノベーション研究センター（2012/03/15）

【36】我が国農業の未来を創る IT 農業者の育成

九州大学大学院農学研究院 准教授 岡安 崇史

〔研究の概要〕

本研究は、著者らが開発中の情報化農業支援システム「Agri-eye」の圃場環境情報計測システムと農作業履歴入力システムを一般農家に試験提供し、農業へのIT導入を实践し得る農業者(IT農業者)の育成を図ることを目的としている。本研究を実施した結果、協力農家は、携帯電話、スマートフォン等の携帯端末を用いて、圃場環境情報(温湿度、日射量、土壌水分、CO₂濃度)の確認や農作業情報の入力を行うことが可能となり、①圃場巡回の回数削減や、②収集した情報を農作業の改善に利用できることなどを示した。一方、農作業記録のためのWebアプリケーションは、①農作業中のデータ入力が困難、②入力回数が多いなど、入力インタフェースに関する改善意見が寄せられ、実用化にはさらなる改善が不可欠であることがわかった。以上のように限定的な内容ではあるが、一般農家にも農業へのIT導入のメリットを示すことができたと考える。

〔研究経過および成果〕

図1に情報化農業支援システム「Agri-eye」の概念図を示す。Agri-eyeは、ITを活用して農業生産に必要な様々な情報を収集・利活用することにより、農作業の最適化、農業資材の削減、新規就農者育成などを支援することを目的としている。

図2に圃場環境情報計測装置の構成を示す。同装置は、温湿度、日射量、土壌水分、CO₂濃度等の

センサ、データ計測・送信ボードおよび電源・ネットワーク供給装置から構成される。計測データは、データ計測・送信ボード内でメーカデータに変換され、3G回線を用いてインターネット上のメ

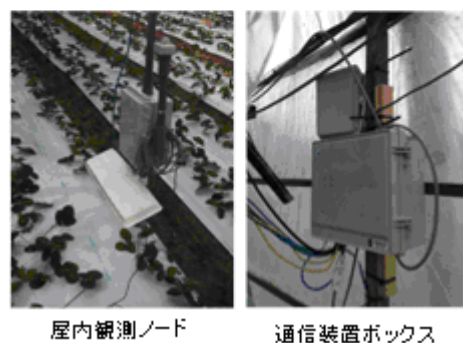
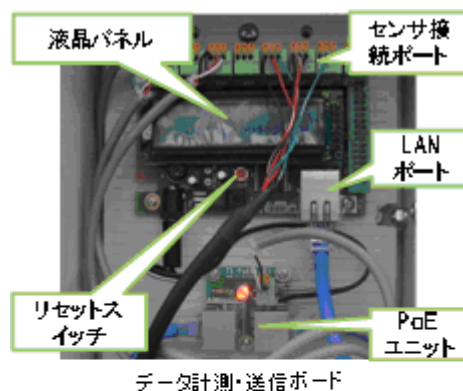


図2 圃場環境情報計測装置の構成

ールサーバーへ送信された後、Agri-eyeデータベース内に格納される。利用者は、PCや、携帯電話、スマートフォン等の携帯端末で利用可能なWebアプリケーション経由で圃場環境情報の参照、分析等が行える。

図3は携帯端末を用いた農作業入力画面の一例を示す。図はハウスきゅうり栽培農家の農作業情報入力の画面構成例を示している。同アプリでは、農家自らが圃場環境情報を確認しながら、農作業の実施や農作業の適期判断を行える機能を提供している。また、入力された農作業履歴情報は、同Web画面上で直ちに確認できると同時に、他の農家との農作業履歴情報の共有も可能にしている。

上記システムを用いた実証実験は、福岡県糸島市の農家協力の下、平成24年1月から現在に至るまで実施中である。協力農家は、きゅうりおよび

イチゴ栽培農家とした。

図4にイチゴハウス内環境の経時変化を示す。本図から明らかなように、ITの利用によって、ハウス内環境の変化を容易に数値化できるので、CO₂濃度による日射量と作物の光合成の関係の把握や、ハウス内温度の適正制御が可能となった。

協力農家へのIT導入に関するアンケートを実施したところ、①圃場環境情報に応じた作物生育状態の変化を常に観察するようになった、②圃場環境情報に対応してハウス内環境の制御を行うようになったとのコメントを得た。一方、農繁期の農作業履歴の入力は極めて困難であるとの理由から、ユーザインタフェースについては改善してほしいとの要望も寄せられた。このように、一般農家でもIT導入した新たな農業生産活動への取組が十分に行えることを示した。

〔発表論文〕

1. Andri, N.P., Okayasu, T., Inoue, E., Hirai, Y. and Mitsuoka, M.: Development of Actuation Framework for Agricultural Informatization Supporting System, Proc. IFAC2013 Bio Robotics Conf., 2013.



(a) 現在の圃場環境情報 (b) 作業項目の表示



(c) 作業項目の入力 (d) 作業履歴の表示

図3 携帯端末を用いた農作業入力画面の一例

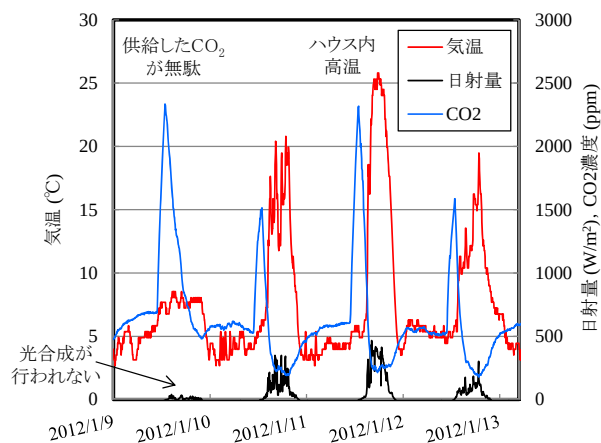


図4 イチゴハウス内の環境変化

【37】 PDA 端末を利用する医療技能教育・評価システムの有効性検証

研究者 東京女子医科大学医学部 講師 大久保 由美子

〔研究の概要〕

効率的かつ実践的な臨床的思考力および臨床技能教育のために新たな評価法の有機的組み合わせによるコンピタンス教育システムを開発した。本研究で開発する臨床実践力教育を既存の教育と複合して経時的に関連づけて実施し、新たなコンピタンス達成評価を組み合わせ、高質な臨床実践教育および臨床教員への負担減少を目的に IT を導入した。学生が初診患者を診察し症例報告を行う中で、自己および指導者からのフィードバックを反復して経験し評価を意識しながら実習することで、臨床技能・臨床推論能力が向上し学習意欲が高まった。PDA 端末を用いて学生と教員が学生の実技記録を共有し、観察、省察を繰り返すことによる医療技能教育・評価システムの有効性が認められた。

〔研究経過および成果〕

2 年間の前向き介入研究で、横断的・縦断的解析を行った。介入として総合診療科の臨床実習に参加した医学生に PDA 端末を利用した新たな教育を行い、問題解決能力、臨床推論能力、技能、態度、学習意欲を後述する各種法で評価する。臨床前教育の充実、臨床実習での IT 利用の双方向性学習を通じ、ミニテストと即時フィードバックを反復する組み合わせ学習法が、臨床前教育および臨床実習を統合し学年縦断的に累進型の臨床的問題発見・解決に必要な臨床的思考能力を育成するかを検証した。

本学では問題基盤型学習テュートリアル教育を行っている。最近臨床実習前の 4 年生を対象に臨床推論能力開発を目的としたチーム基盤型学習法 (Team-Based Learning ; TBL)を開始し、一般の講義ではレスポンスアナライザーを用いた双方向性教育を取り入れ、その効果を認めた(発表論文 1,2)。今回、既存の言語化試験 (Script Concordance Test ; SCT)を基に臨床現場での思考および判断能力を測定す

るための評価法を作成した (同 3)。臨床実習前に TBL、学生同士のロールプレイ、模擬患者との医療面接訓練、シミュレーターを用いた医療技能訓練、SCT を組み合わせ反復することで、問題発見、解決、グループや専門家の判断を通じた臨床的な思考、臨床技能、態度を学習させた。学生は 4 年次に全国共用試験の客観的臨床能力試験 (Objective Structured Clinical Examination ; OSCE)に合格した後、5 年次より臨床実習に進む。本研究で学生 (5、6 年生)は介入群と対象群に分けた。介入群は総合診療科での実習で実際の初診患者を毎日診察し、診察場面を臨床教員に観察・各種臨床能力を評価されフィードバックを得る臨床技能評価法 (mini clinical evaluation exercise ; mini CEX) を受ける。さらに学生は担当症例を複数の臨床教員にプレゼンテーションしフィードバックを得る様子をビデオ録画され、学生と指導教員が録画を PDA で共有・観察し互いに段階評価と省察を加えた。介入群 (教育期間別に 1 週群、3 週群)と対照群で臨床能力を比較した。介入群

は自由記載の実習評価および上達項目などを自己評価した。

介入群と対象群では、臨床実習前4年時のTBL、SCT、OSCEの成績に差はなかった。介入群のmini CEXスコアは実習日数とともに上昇した(図1)。

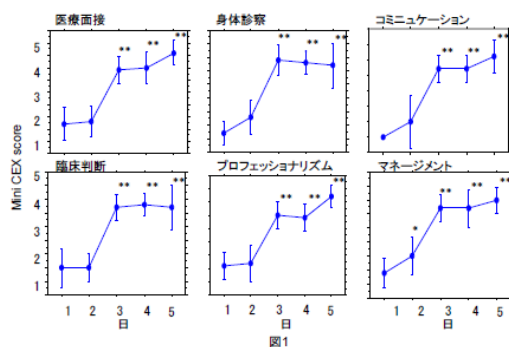


図1

臨床推論能力を測定するSCTは、介入後で有意に

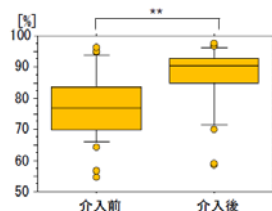


図2

上昇した(図2)。さらに対象群に比し1週群では差がみられなかったが3週群では有意にSCTの得点が高かった(図3)。

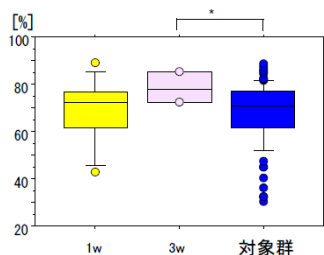


図3

臨床実習終了時の6年

生に実技による臨床技能・態度を評価するOSCEを行ったところ1週群では差がみられなかったが3週群では有意にOSCEの得点が高かった(図4)。

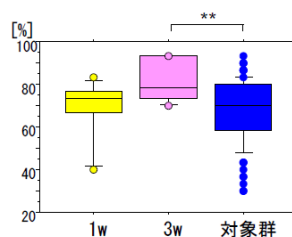


図4

症例プレゼンテーション

およびフィードバックの記録を学生および教員が観察した段階評価は、実習日数とともに上昇した。自由記載の実習評価ではPDAを用いた自己省察とフィードバックは学生の満足度が高く、臨床推論能力訓練として有意義で学習意欲を高めたとする意見が多かった。上達項目は医療面接(88.9%)、身体診察(61.1%)、臨床判断(48.1%)であったが、難しかったものは臨床判断(78.3%)、マネージメント(37.0%)であった。

研究期間の半分を経過した段階でPDA端末を利用した医療技能教育・評価システムは良好に機能しており、さらに評価を重ねていく。

【発表論文】

1. Team-based learning (TBL) for clinical reasoning in students with problem-based learning (PBL) tutorial experiences. Tohoku J Exp Med 227 (1)23-29, 2012
2. レスポンスアナライザーを用いた超能動授業 — チーム基盤型学習での応用 —。大学時報 336 (1)68-73, 2011
3. 臨床推論能力試験としての Script concordance test (SCT)の有用性の検討。第43回日本医学教育学会大会 医学教育 42(補冊)60, 2011
4. 外来臨床実習で学生が習得する能力。第44回日本医学教育学会大会 医学教育 43(補冊)106, 2012

【38】 農山漁村における新たな地域支援人材の育成に関する実証的研究

—人的支援施策の導入プロセスと評価軸の検討

研究者 法政大学現代福祉学部 准教授 図司 直也

〔研究の概要〕

わが国の条件不利地域である農山漁村を対象に、2000 年代後半から国が主導して、「集落支援員」や「地域おこし協力隊」といった地域支援の外部人材導入事業が、ソフト面での地域振興の手法として施策化され、各地で積極的な導入が図られている。その一方で、関係機関や受入地域の状況を見る限り、人的支援施策の成果の検証とそれを踏まえた将来展望の提示はほとんど進んでいない。また、市町村合併等により受入主体となる行政と集落の現場との距離が広がり、人的支援の導入・活用策や支援後のビジョンのないままに導入されるケースが少なくない。そこで本研究では、人的支援施策の導入プロセスの整理を通して、今日展開する外部からの地域支援人材の役割や成長過程を明示すると同時に、受入地域における変化やその兆候を捉え、人的支援施策が持続するために有効な評価軸を検討する。

〔研究経過および成果〕

本研究では〔Ⅰ．人的支援施策の導入プロセスの整理→Ⅱ．外部からの地域支援人材の役割・成長過程の明示→Ⅲ．受入地域における変化・兆候の捕捉→Ⅳ．人的支援施策が持続するために有効な評価軸の検討〕の順で進める作業計画を組んでいたが、1 年間でⅢの半ばまで進める結果となった。

Ⅰ．では、人的支援施策の実績および関連文献調査をもとに、人的支援施策の政策的位置づけと人的支援施策の特徴について整理した。このうち、人的支援施策の特徴は以下の 4 点にまとめられた。以下、協力隊や支援員を「地域サポート人材」と称する。

第 1 に、「人」を政策対象に据えている点である。導入時を起点として、1 年 1 年の協力隊や支援員の行う活動内容のみならず、サポート人材自身の技術面、さらにはコミュニケーション能力や地域に向き合う姿勢といった内面においても、様々な経験を積み重ね

て、少しずつ成長があるはずである。このような「サポート人材の成長や変化」を把握するためにも、受入担当者の緊密なマネジメントが求められている。

第 2 に、サポート人材の絶え間ない関わりによる「地域の変化」が期待されている点である。今回の事業は、外部人材の関わりから内発性の喚起を期待するものと言え、サポート人材と地域とが関わり合うプロセスからどのような地域側の変化が生まれるかも大きな焦点となる。

第 3 に、サポート人材が関わる主体が多岐にわたる点である。地方自治体が事業の受け皿になっている点は、従来の補助金事業と同じではあるが、協力隊や支援員が直接関わる行政主体は、市町村合併の影響から本所一支部間で分かれたり、また、現場での取り組みや課題解決に向けた活動から、受入担当部署を超えて、部署横断的な関わりになったりする。また、地域の様々な組織団体や NPO などと一緒にな

って活動することもあり得る。サポート人材は、まさに地域に関わる「遊軍」であり、このような「遊軍」人材に対して、彼らの活動を自治体の受入担当者がどのように把握し、関係機関と連携してサポートできるのか、マネジメント体制のあり方も大きな焦点となる。

第 4 に、事業年数が複数年度にわたる点である。地域おこし協力隊の場合は最長 3 年間、集落支援員の場合は年限設定がないことから、単年度での事業報告に留まらず、経年的な変化を含めたプロセスでの把握が求められることになる。

次いでⅡ. では、人的支援施策を導入する地方自治体において、関係主体にヒアリング調査を実施し、そこから地域サポート人材に期待される役割を整理した(表参照)。

ひとつの方向性は、既に展開している地域活動に対して新たな外部主体が関わりを持つ「中間支援活動」から、地域との新たな出会いから信頼と刺激を得、そこに新たな活動や仕事を起こそうとする「価値創造活動」へと展開するサポート活動であろう。徳島県三好市における協力隊の活動には 2 つの傾向があり、田舎暮らしを経験してみたいという理由で応募した協力隊は、「中間支援活動」を重ねながら地域に馴染み、他方で農山村の地域資源を活かして新たな仕事を起こし、「生業」に高めていこうとする協力隊は、「価値創造活動」に重点をおく傾向が見られた。総じて、協力隊に応募する都市からの U・I ターン者には、この「中間支援活動」と「価値創造活動」のいずれか、もしくは両方を求める志向が見受けられる。受入地域としても、協力隊には、任期中にこの 2 種類の活動を通して現場と関わり、地域住民と接して、それぞれの定住環境を整えていくことを期待しているはずであろう。

もうひとつの方向性は、現場の実情を捉えて、住民

相互や行政との間に立って情報共有や話し合いの機会に繋げていく「中間支援活動」を軸としたサポート活動である。もともと、地元精通している「集落支援員」に期待される役割であり、徳島県三好市における導入は、まさにこの流れに沿ったものであった。しかし、実際には、和歌山県高野町では、担当範囲が限定されたり、日常生活の空間と重複したり、担当集落との距離が近すぎてしまうと、住民個別の「生活支援活動」にまでサポート領域が拡大し、公私の区別がつきにくくなる危うさも孕んでいた。その点で、本来、生活支援は行政や社協など既に担うべき側面でもあり、「中間支援活動」に従事するサポート人材は、あくまで補完的な立場に留まることが望ましい。高野町のように、個別の生活支援に関わる事項に関しては、家族や身内を視野に入れたサポートの場づくりの検討を行政から当事者に促すなど、導入の際には予め支援員の役割を明確に地域側に伝えることにも留意すべきである。

【表】地域サポート人材に期待されている役割

地域が求めるサポートの方向性	価値創造活動	中間支援活動	生活支援活動
徳島県三好市	地域おこし協力隊 (U・I ターン者)	集落支援員 (地元精通者)	
和歌山県高野町 (むらづみ支援員)	細川地区 (I ターン者)	桜ヶ丘集落 / 湯川集落 (I ターン者) / (U ターン者)	
望ましい サポート人材 (試論)	「地域おこし協力隊」タイプ (U・I ターン者ベース)	「集落支援員」タイプ (地元精通者ベース)	(他組織・家族との連携も)

資料：現地ヒアリング(徳島県三好市・和歌山県高野町共に、2012年1月に実施)を基に、筆者作成

Ⅲ. については、現在、現地調査にむけた準備作業を進めている段階にあり、Ⅳ. での総括を含め、研究期間後も本研究の残された課題として、今後も作業を継続させていく予定である。

【発表論文】

図司直也「農山村における地域サポート人材の役割と受け入れ地域に求められる視点」『JC 総研レポート』23, 2012 年

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25年5月1日 発行
