

研究助成
成果報告論文集
(平成27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31回(平成25年度) 研究助成

No	研究テーマ	代表研究者
1	多機能性エンベロープ型ナノ構造体(MEND)が拓く未来医療	北海道大学大学院薬学研究院 教授 原 島 秀 吉
2	熱-スピン相互変換機能の開拓と熱電応用	東北大学金属材料研究所 准教授 内 田 健 一
3	生体二光子分子イメージング手法の確立による生活習慣病の病態解明	自治医科大学分子病態治療研究センター 教授 西 村 智
4	次世代通信・イメージング装置を拓く、光ファイバー-極細有機非線形光学結晶一体型THz光変換素子の開発	東北大学未来科学技術共同研究センター 准教授 鎌 田 圭
5	超音波マイクロバブルで作る金属ナノ粒子	山形大学大学院理工学研究科 准教授 幕 田 寿 典
6	高速動作スピンドバイス実現に向けた新奇トポロジカル絶縁体スピン偏極材料の開発	東京大学理学系研究科物理学専攻 助教 秋 山 了 太
7	電気および磁気異方性をもつ微粒子によるデジタルサイネージ用電子ペーパー表示剤の研究	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授 鳥 居 徹
8	単一分子トランジスタの作製とその次世代エレクトロニクスへの応用に関する基礎研究	東京大学生産技術研究所 教授 平 川 一 彦
9	高精度な渋滞シミュレーションのための確率セルオートマトンによる交通流特性の推定	東京工業大学大学院知能システム科学専攻 助教 山 崎 啓 介
10	中性子小角散乱法による磁束状態の観測を通じたs波超伝導体におけるパウリ極限状態の検証とその特性研究	お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科 教授 古 川 はづき
11	金属表面プラズモンによる超集束効果を用いた微量液体測定用テラヘルツ波プローブの研究開発	福井大学遠赤外領域開発研究センター 准教授 山 本 晃 司
12	感温塗料を用いた沸騰伝熱面での熱輸送現象の解明	名古屋大学エコトピア科学研究所 准教授 松 田 佑
13	神経電位計測プローブ・アナログフロントエンド融合に向けたアレイ化技術の研究	豊橋技術科学大学大学院工学研究科 助教 秋 田 一 平
14	超小型イオンスラストを用いたイオンビーム中和機構の解明	横浜国立大学大学院システムの創生部門 准教授 鷹 尾 祥 典
15	次世代フィルムコンピュータに向けた部分的再構成可能回路の最適設計・応用設計技術	東京工業大学大学院理工学研究科 准教授 原 祐 子
16	真空中でのビーム工学に技術革新をもたらすplasma windowの基盤技術開発	広島大学大学院工学研究科 教授 難 波 慎 一
17	遅延蛍光型エキサイプレックスにおける励起子拡散に関する研究	九州大学大学院工学研究院 助教 合 志 憲 一
18	表面効果を考慮した光学デバイスのレベルセット形状表現に基づくトポロジー最適化法の開発	信州大学工学部 助教 藤 井 雅留太
19	持ちやすさの向上を目的とした製品形状の最適設計法	首都大学東京システムデザイン学部 助教 茅 原 崇 徳
20	超高速光電子デバイス応用に向けた半導体エピタキシャル構造の非平衡キャリア輸送に関する研究	兵庫県立大学大学院物質理学研究科 助教 長谷川 尊 之

No	研究テーマ	代表研究者
21	運動論的アプローチによるアクティブ粒子の集団挙動に対するシミュレーションモデルの開発	兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究所 准教授 安田 修 悟
22	不整地環境での探査を目的とした弾性球形車輪を用いた全方向移動体に関する研究	千葉工業大学工学部 准教授 青木 岳 史
23	生体内一分子ロックオントラッキングシステム開発	慶應義塾大学理工学部 専任講師 広井 賀 子
24	階層構造文章とズーム操作によるデジタル教科書プラットフォームの研究	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 教授 稲見 昌 彦
25	非侵襲的脂肪プロファイリングイメージの構築とNASHの早期診断への展開	千葉大学大学院医学研究院 講師 丸山 紀 史
26	医用画像を用いた精密膝関節モデルの作成および歩行時の膝関節負荷の解析	東京大学大学院工学系研究科 准教授 山下 淳
27	大脳が障害を受けたあとの効率良いリハビリテーションを探るモデル研究ー成人大脳の可塑性を呼び起こせー	高知大学教育研究部医療学系 准教授 富田 江 一
28	導電性高分子を用いたストレスバイオマーカー分析技術の開発	九州大学大学院システム情報科学研究院 助教 田原 祐 助
29	身体不活動による海馬神経機能の低下を予防するための萌芽的研究	首都大学東京大学院人間健康科学研究科 助教 西島 壮
30	フェムト秒レーザー励起散乱場の制御による細胞接着性表面ナノ構造の作製	慶應義塾大学理工学部 専任講師 寺川 光 洋
31	搭乗者の脳活動解析を用い歩行支援機器Tread-Walkの安心設計に関する研究	九州大学大学院工学研究院 助教 中島 康 貴
32	光技術を応用した生理的セロトニンニューロン活動による扁桃体調節作用の解析	金沢医科大学医学部 助教 山本 亮
33	神経情報処理の入力と出力に関わる神経活動の可視化による定量化	甲南大学理工学部 准教授 久原 篤
34	我が国の法科大学院における法曹以外の人材育成機能および就職支援の在り方に関する研究	弘前大学21世紀教育センター 准教授 田中正 弘
35	人間の質感認知に関わる基軸画像情報ー心理応答に着目してー	山形大学大学院理工学研究科 准教授 永井 岳 大
36	公共空間におけるインタラクティブディスプレイの要因が人間の認知・行動・感情に及ぼす影響の実験的検証	香川大学工学部 准教授 市野 順 子
37	情報科学系大学院生を対象にした社会人基礎力向上教育とその効果計測の方法に関する研究	名古屋大学大学院情報科学研究科 助教 松原 豊
38	相対的年齢効果の実態とメカニズムに関する実証研究	日本女子大学人間社会学部 専任講師 山下 絢
39	強磁場中平衡状態図を指針とした磁場中急冷熱処理によるMn基磁性材料の開発	鹿児島大学大学院理工学研究科 教授 小山 佳 一
40	東アジア企業の人材育成と組織能力形成:エンジニアへの聞き取り調査・アンケート調査による日中韓比較	名古屋工業大学大学院工学研究科 准教授 徳丸 宜 穂

【1】多機能性エンベロープ型ナノ構造体(MEND)が拓く未来医療

代表研究者 北海道大学大学院薬学研究院 教授 原島 秀吉

共同研究者 北海道大学大学院薬学研究院 准教授 秋田 英万、助教 山田 勇磨、助教 中村 孝司

【研究の概要】

本研究は、細胞内動態を自由に制御可能なナノマシンともいうべき革新的技術を創製することを目標とした。1) siRNA については、効率的なエンドソーム脱出能を有する独自に設計した YSK-MEND を開発し、静脈内投与型肝炎治療用 YSK-MEND と、樹状細胞へ効率的に siRNA を導入できる YSK-MEND を確立した。2) pDNA については、KALA-MEND の開発に成功し、人工ベクターとしては世界初の遺伝子導入、抗原提示、細胞傷害性 T 細胞の活性化、抗腫瘍効果の誘導に成功した。3) ミトコンドリア送達システムとして MITO-Porter を開発し、肝臓へ抗酸化薬を送達可能なシステムの開発に成功した。

【研究経過および成果】

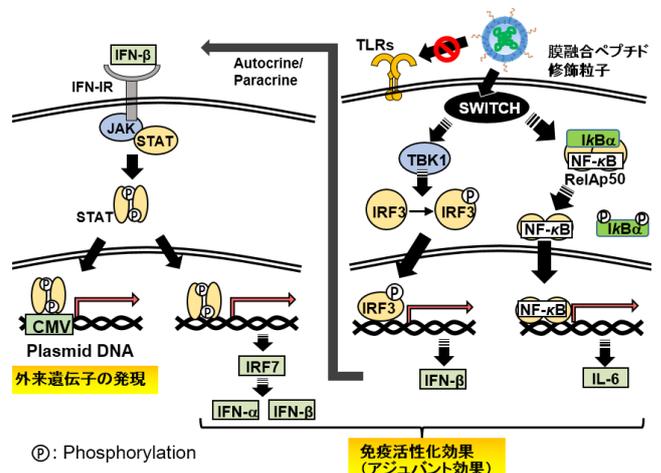
新規融合性脂質を用いた樹状細胞への siRNA デリバリーシステムの開発

我々は全身投与による siRNA デリバリーを目的として、YSK05-MEND の開発に成功した。YSK05 は pH 応答性脂質であり、血中 pH では電気的中性を示し、pH の低下に応じてカチオン性へ変化するように設計されている。その結果、YSK12-MEND は血中でアポリポプロテイン E と結合し、幹細胞の LDL 受容体に認識されることで、肝細胞選択的に取り込まれる。その後、エンドソーム内でカチオン性に変化し、負に帯電するエンドソーム膜との融合を誘起することで、効率的に siRNA を細胞質に送達することが可能である。このように一連の動態を合理的に制御することで、高い siRNA 導入効率を達成することができた。その結果、YSK05-MEND を用いた肝臓への効率的な siRNA デリバリーにより、C 型肝炎ウイルス感染ヒト肝臓キメラマウスにおける C 型肝炎ウイルスの顕著な抑制効果を誘導することに成功し（論文 1）。さらに我々は、第二世代の YSK 脂質として、YSK12 脂質を開発した。In vitro における樹状細胞への siRNA 導入のために、YSK12 は弱い正電荷を帯びており、YSK 脂質の特徴である高い膜融合性活性を示す。マウス骨髄細胞から誘導した樹状細胞を用いて、モデル標的遺伝子 SR-B1 に対する siRNA を YSK12-MEND に搭載し、ノックダウン活性をもとに YSK12-MEND の最適化を行った。その結果、YSK12-MEND の 50% の遺伝子ノックダウンを示す siRNA 濃度 (ED₅₀) は、1.5 nM であり、siRNA 導入試薬で最も効率が高いとされている Lipofectamine RNAi MAX の ED₅₀ (25 nM)

と比べて 10 倍以上のノックダウン効率であった。さらに、Lipofectamine RNAi MAX では、60% 程度までの標的遺伝子ノックダウンであったのに対し、YSK12-MEND では 90% 以上の標的遺伝子ノックダウンを実現した（論文投稿中）。

樹状細胞への DNA ワクチン技術の開発

樹状細胞は免疫応答の開始、制御を司る上で中心的な役割を果たす細胞である。DNA ワクチンの開発には本細胞への効率的な遺伝子導入技術の開発が重要である。樹状細胞への遺伝子導入は極めて困難であったが、中性 pH(7.4)においてαヘリックス構造を有する KALA ペプチドの脂質誘導体を開発し、脂質膜表面に搭載することで、遺伝子発現が劇的に高まることを見出した。さらにその活性は、用いるプラスミド DNA の配列より、CpG 配列を除去することによって劇的に高まることを見出した。KALA ペプチドは元来、遺伝子の核移行を制限する核膜を膜融合によって突破するためのアイデアとして生み出されたものである。従っ



て、KALA の修飾により遺伝子発現効率は劇的に向上したことは、期待通りの結果と言える。しかし、詳細な細胞内動態解析やマイクロアレイ解析によりそのメカニズムを解明した結果、KALA 修飾ナノ粒子は樹状細胞内の細胞質に存在する『スイッチ』分子に作用してシグナル伝達経路を活性化することで樹状細胞を刺激し、さらにその結果として外来遺伝子の核内転写が促進されることが明らかとなった（前頁図）。言い換えると、KALA 修飾粒子は、DNA ワクチン効果に必須な免疫誘導能と遺伝子導入能を兼ね備えていることを意味する（論文2）。

また、免疫活性化メカニズムをさらに明らかにするため、ナノ粒子を構成する各パーツを除いた際の免疫活性化効果を解析した結果、①長鎖の DNA を短くする、あるいは除くこと、②エンドソーム膜との高融合性を有する脂質エンベロップを除くあるいは、融合能の低い脂質に置換すること、③KALA ペプチドの修飾を除くことを一つでもおこなうと、免疫活性化が完全に消失することが示された。従って、KALA 修飾 MEND の構成要素全てが、免疫活性化に重要な要素であることを明らかとした（論文2）。種々の細胞内シグナル伝達系の阻害剤を用いた実験などの結果を総合的に解析すると、KALA 修飾粒子は、その高い膜融合特性により長鎖 DNA を細胞質に放出し、これが細胞質センサーにより認識されることが免疫活性化の引き金となることが示唆される（前頁図）。

さらに、本粒子により遺伝子導入・活性化された樹状細胞を免疫することにより、高い抗腫瘍活性が得られることも実証した。本技術は癌や感染予防を可能とする DNA ワクチン技術へと展開したい。

肝臓ミトコンドリア (Mt)を標的とする *in vivo* デリバリーシステムの開発

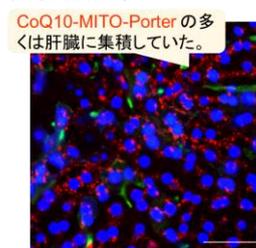
MITO-Porter を用いたミトコンドリア薬物送達を最適化するために、培養細胞 (*in vitro*)を用いて脂質組成の最適化に成功した（論文3）。医薬品として実用化への道を発展させるためには動物実験 (*in vivo*)での検証が必須である。本研究では、MITO-Porter を基盤とする『肝臓 Mt を標的とした分子送達システム』の開発を中心に研究を進めた。

ラジオアイソトープ(RI)標識を施したキャリアをマウスに尾静脈投与後、Mt 単離および RI 検出を行い、Mt 移行性を評価した。種々の検討の結果、

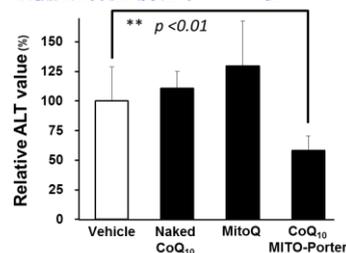
粒子径が小さく[ポリエチレングリコール (PEG) の修飾量の最適化]、正に帯電する粒子[オクタアルギニン(R8)搭載比率の最適化]が肝臓の Mt に集積しやすい事が明らかとなった（肝臓標的型 MITO-Porter)。また、本キャリアをマウスに尾静脈投与し、肝臓の生組織切片を蛍光観察した結果、赤色に標識した MITO-Porter が肝臓に効率的に送達されている様子が確認できた（下図）。

さらに、虚血再灌流障害 (I-RI, ischemia reperfusion injury) を誘発した Mt 疾患モデルマウスを用いて、肝臓標的型 MITO-Porter による Mt 薬物送達における治療効果を検証した。本実験では、I-RI の原因となる活性酸素の発生源 Mt を標的とする今までにないアプローチからの疾患治療を目指した。本実験では、抗酸化分子 CoQ10 を搭

蛍光顕微鏡観察



肝臓虚血再灌流障害時のALT値



載した肝臓標的型 MITO-Porter を構築・投与し、I-RI誘導後に血中の肝障害の指標値である ALT 値を測定した。その結果、未封入 CoQ10 および他の Mt 移行能を有する抗酸化分子(MitoQ)と比較して、強い傷害抑制効果を示した(上図)。これらの結果は、MITO-Porter が *in vivo* 用の Mt 標的型キャリアとして有用である事を示している（論文投稿中）。
謝辞：本研究を遂行するにあたり多大なご支援を賜りました公益財団法人カシオ化学振興財団に深謝申し上げます。

【発表論文】

1. Watanabe T, Hatakeyama H, Matsuda-Yasui C, Sato Y, Sudoh M, Takagi A, Hirata Y, Ohtsuki T, Arai M, Inoue K, Harashima H, Kohara M. *In vivo* therapeutic potential of Dicer-hunting siRNAs targeting infectious hepatitis C virus. *Sci Rep.* 4: 4750 (2014).
2. Miura N, Shaheen SM, Akita H, Nakamura T, Harashima H. A KALA-modified lipid nanoparticle containing CpG-free plasmid DNA as a potential DNA vaccine carrier for antigen presentation and as an immune-stimulative adjuvant. *Nucleic Acids Res.* (in press).
3. Yamada Y, Harashima H. A method for screening mitochondrial fusogenic envelopes for use in mitochondrial drug delivery. *Methods Mol Biol.* 1141:57-66 (2014).

【2】 熱-スピン相互変換機能の開拓と熱電応用

研究者 東北大学 金属材料研究所 准教授 内田 健一

【研究の概要】

本研究は、スピン流を用いた新原理熱電変換の原理解明、及びその応用に向けた基盤技術の確立を目的としている。スピン流を用いた熱電変換は磁性体における熱-スピン変換現象「スピンゼーベック効果」によって実現され、この現象を用いることによって従来技術では不可能だった“絶縁体を用いた熱電変換”を実現できる。本研究では磁性絶縁体におけるスピンゼーベック効果に関する系統的な実験研究を行い、スピン流熱電能の定量的測定手法を確立すると共に、その微視的発現機構の解明に繋がる成果を得た。

【研究経過および成果】

電子が有する電荷の自由度に加えて、スピンの自由度を積極的に利用するスピントロニクスが飛躍的な進展を遂げている。この分野ではスピン角運動量の流れである「スピン流」の生成・検出・制御原理の開拓が重要な研究課題となっている。近年発見されたスピンゼーベック効果は、強磁性体と常磁性体の接合系に温度勾配を付けることで、接合界面近傍にスピン流が誘起される現象である(図1(a))。スピンゼーベック効果は、金属や半導体のみならず絶縁体においても発現するなど、従来の熱電効果には無い様々な特徴を示すことから、次世代熱電変換技術の候補原理としてにわかに注目を集めている。本研究では、熱-スピン相互作用に基づく新しい熱電変換の物理原理や基盤技術の構築を目指し、スピンゼーベック効果に関する系統的な実験研究を行った。

本研究で得られた主な成果は以下の5点である。

(1) スピンゼーベック効果の定量的評価手法の確立

スピンゼーベック効果と従来の熱電効果(異常ネルンスト効果)を分離し、それらの寄与を定量評価するための実験手法を確立した(論文1, 2)。この手法

を用いて、スピンゼーベック効果の研究に主に用いられている Pt/YIG 接合においてはスピン流による熱起電力が支配的な寄与を与えており、異常ネルンスト効果による寄与よりも3桁以上大きいことを示した。

(2) 高温領域におけるスピンゼーベック効果の観測

従来は室温以下でのみ観測されていた Pt/YIG 接合におけるスピンゼーベック効果を、室温からキュリー温度以上の高温領域において測定し、熱起電力の温度依存性を定量評価した(論文5)。その結果、Pt/YIG 接合におけるスピンゼーベック電圧が臨界指数 = 3 の温度依存性に従うことを見出した(図1(b))。この結果は、磁氣的近接効果など静的な磁気特性ではスピンゼーベック効果の物理を記述できないことを

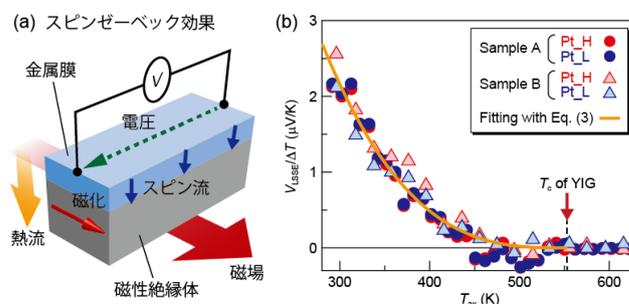


図1 (a) スピンゼーベック効果の模式図. (b) Pt/YIG 接合におけるスピン流誘起熱起電力の温度依存性.

示しており、この現象の微視的起源の解明に対して重要な情報を与えるものである。応用面としては、熱電変換素子は通常高温領域において用いられるため、キュリー温度が高い材料がスピン流熱電変換に適しているという指針が得られた。

(3) スピンゼーベック効果の強磁場応答の観測

これまでの研究によって、スピンゼーベック効果によって生じるスピン流は、強磁性体中のマグノン系と常磁性体中の伝導電子系との間の熱的非平衡性によって誘起されるというメカニズムが得られているが、マグノンによる熱的スピン流生成機構の微視的な理解は得られていないのが現状であった。本研究では、マグノンの自由度を凍結させた高磁場領域においてスピンゼーベック電圧が大幅に抑制される振る舞いを観測し、熱的スピン流生成に強く寄与するマグノンの周波数帯や長さスケールを特定した(論文執筆中)。本成果は、スピンゼーベック効果の発現機構の微視的理解に大きく貢献するものである。

(4) スピンゼーベック効果の界面状態依存性測定

高効率スピン流生成を実現するためには、磁性体/金属界面におけるスピン混成コンダクタンスを最適化する必要がある。本研究では、Pt/YIG 接合を用いてスピンゼーベック効果の界面状態依存性を検証し、酸素雰囲気下でアニール処理を施すことによって作成した高品質な Pt/YIG 界面において高い熱スピン変換効率が得られることを示した(論文8)。

(5) 表面プラズモンを用いた光-スピン流変換

表面プラズモン共鳴を磁性絶縁体中で励起することにより発現する、新しい光-スピン流変換効果の観測に成功した(論文6)。この現象はスピンゼーベック素子に光アンテナを取り付けた構造において発現するため、単一素子において光と熱を同時利用可能な

分散型発電・省エネルギー技術やスピンドバイスの駆動源として利用できる可能性がある。

[まとめと展望]

本研究成果により、スピンゼーベック効果によるスピン流生成機構に関する微視的な情報が得られると共に、熱的スピン輸送現象の定量評価・純粋測定が可能になった。今後これらの実験技術・原理を応用することで、スピンゼーベック効果とスピンペルチェ効果の相反性の検証や高効率なスピン流熱電変換の実現を目指したい。

最後に、本研究を遂行するにあたりご協力頂いた共同研究者の皆様、及び本研究助成を賜りましたカシオ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

[発表論文]

1. T. Kikkawa, K. Uchida, *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 214403 (2013).
2. K. Uchida, *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **26**, 343202 (2014).
3. R. Ramos, M. H. Aguirre, A. Anadon, J. Blasco, I. Lucas, K. Uchida, *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 054422 (2014).
4. J. Lustikova, Y. Shiomi, Z. Qiu, T. Kikkawa, R. Iguchi, K. Uchida, and E. Saitoh, J. Appl. Phys. **116**, 153902 (2014).
5. K. Uchida, *et al.*, Phys. Rev. X **4**, 041023 (2014).
6. K. Uchida, *et al.*, Nat. Commun. **6**, 5910 (2015).
7. S. Daimon, R. Iguchi, K. Uchida, and E. Saitoh, J. Phys. D: Appl. Phys. (in press).
8. Z. Qiu, D. Hou, K. Uchida, and E. Saitoh, J. Phys. D: Appl. Phys. (in press).

【3】 生体二光子分子イメージング手法の確立による生活習慣病の病態解明

研究者 自治医科大学分子病態治療研究センター 分子病態研究部 教授

西村 智

〔研究の概要〕

80年の一生に、ほぼ1回しかおきない心血管イベントを理解するにはどうすればいいのだろうか。どのように生体の血栓イベントは予測できるか。一つの答えは、生体で血栓を誘発し、形成過程を観察することである。我々は二光子顕微鏡によるバイオイメージングと、血栓形成を促す光操作技術を生かし、生体での血栓過程にアプローチした。マルチカラーイメージングでは、生体内で複数の細胞種を染め分けて同定するとともに、機能プローブを組み合わせ、形態と機能の同時観察が可能である。これらの手法を応用し、生体末梢血管による心血管イベントリスク予測が可能になると考えられた。また生体イメージングを用いて生活習慣、特に肥満脂肪組織における慢性炎症機構を明らかにしている。

〔研究経過および成果〕

血栓イメージングの必要性

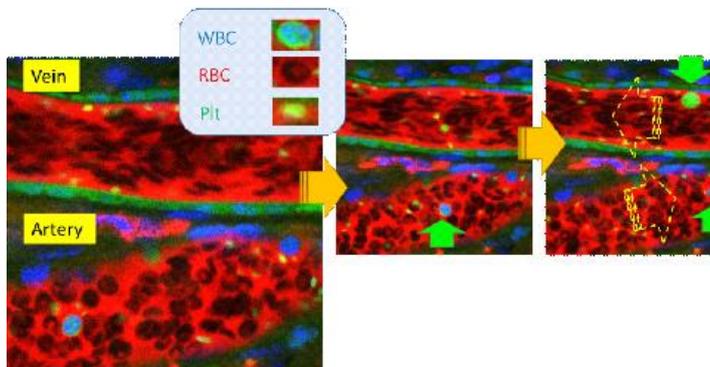
本邦の死因の上位を占める脳・心血管障害の多くは動脈硬化を基盤とした血栓性疾患であり、心血管イベントは確率的に生体内で動脈硬化巣の粥腫が破綻して起きると考えられている。従来、心血管イベント予知を目指した血小板検査については多様なデバイスが開発されてきたが、in vitroによる限定的な検討手法に過ぎず、いずれも生体での血栓性疾患を予測するには至っていない。粥腫(アテローム)の破綻部位においては、血小板は活性化され、血小板血栓が形成される他、凝固系も病態に関与し、心血管イベントの引き金となる。しかし、動脈硬化巣の破綻は偶発的かつ高速に進行する病態であり、実験的にこれらをex vivo、in vitroで再現することは不可能であった。実際に、これら一連の過程には血小板のみならず、各種炎症性細胞、血管内皮細胞とその障害、局所の血流動態変化(血流とずり応力)が関わっている。このよう

な多細胞からなる複雑病変とそのダイナミクスが血栓性病態の本質であり、これらを生体内で検討する手法が、病態理解の上で求められている。その検討を可能にしたのが我々の開発した「生体分子イメージング」手法である。

生体分子イメージングの開発

動脈硬化のように血管が主な傷害の場になる病態だけでなく、血栓症、腫瘍やメタボリックシンドロームにおいても、血流や血管機能といった生体内のダイナミックな変化、組織学的変化に先行する初期の炎症性変化を捉えることが可能な生体内分子イメージング技術は非常に有用である。従来の生体内観察では、透過光による観察が容易な腸間膜の微小循環を用いた研究が主に行なわれてきたが、近年の光学観察系・蛍光プローブの開発により、蛍光物質をトレーサーとして、透過光観察が不可能な厚みを有する脂肪組織をはじめとする実質臓器の血流観察も可能となってい

る。現在、時間・空間解像度も飛躍的に改善し、細胞内小器官レベルでの解析が可能となっており、高速マルチカラー二光子生体イメージングも簡便に行なわれるようになってきている。図1は二光子顕微鏡で観察した、末梢血管での血球動態である。単一血小板が明確に同定されている。マルチカラーイメージングでは、生体内で複数の細胞種を染め分けて同定するとともに、機能プローブを組み合わせ、形態と機能の同時観察が可能である。本研究では、これらの手法を応用し、生体末梢血管による心血管イベントリスク予測への基礎知見を得ている。



「生体イメージング」でみる代謝組織・血管

「生体イメージング」では手に取るように末梢臓器や血管における生体内の各種細胞の動きが分かる。図では、CAG-eGFP マウスに、texas Red Dextran と Hoechst を投与し、高速二光子顕微鏡で精巣表面の動静脈を観察している。

緑矢印は白血球、黄矢印は血流の方向

生体内の血栓形成過程の可視化

現在、「生体分子イメージング」「バイオイメージング」として行われている生体レベルでの生命現象の画像化・可視化は、「(ある一時間の・一個体の)形をみただけ」という形態学から脱却できていないものが大半である。これでは、当然、血栓の形成過程を追うことは

できない。そのために、我々は光操作技術を応用し、血栓を体内に誘導し、ブレイクスルーとしている。光による血栓形成の反応を観察することで、血栓症の基礎メカニズムと背景にある分子機構を明らかにしている。我々は、レーザー傷害による ROS 産生を伴う血栓形成モデルと、上記の生体イメージングを組み合わせ、最初に血栓形成を高速共焦点で観察した。これは、従来の Rose Bengal などの色素を用いた血栓形成に近い。しかし、一方、我々のシステムでは、「血栓形成の観察」と「光刺激による誘導」を同一の光源を用いて行っている。本手法では圧倒的に高い時間・空間解像度が得られるのが特徴である。図 2 のように、ROS 刺激により高い再現性をもって、血管内に血栓を誘導することに成功している。さらに、一血小板が同定できる解像度で、血栓が可視化されたのははじめてのことである。解析に際してはヒト臨床をみすえてマウスだけでなくウサギ、ブタでも行った。

〔発表論文〕

1. Expandable Megakaryocyte Cell Lines Enable Clinically Applicable Generation of Platelets from Human Induced Pluripotent Stem Cells
Nakamura S, Takayama N, Hirata S, Seo H, Endo H, Ochi K, Fujita K, Koike T, Harimoto K, Dohda T, Watanabe A, Okita K, Takahashi N, Sawaguchi A, Yamanaka S, Nakauchi H, **Nishimura S**, Eto K
Cell Stem Cell, 2014 in publication.

【4】次世代通信・イメージング装置を拓く、光ファイバー-極細有機非線形光学結晶一体型 THz 光変換素子の開発

研究者 東北大学未来科学技術共同研究センター 准教授 鎌田 圭

〔研究の概要〕

μ -PD 法を用いたファイバー単結晶作製技術を応用し、融液成長法による BNA 単結晶ファイバー作製の検討を行った。その結果、成長速度 0.1mm/min にて、[010]面を選択制御した約 0.8mm 径のファイバー状結晶の作製に成功した。得られた結晶について X 線ロックンクカーブを測定し、[010]面において 20arcsec 以下の結晶性を確認した。さらに、KTP 結晶を用いた二波長光パラメトリック発振器 (OPO) からの 800-1000 nm の近赤外励起光を用いた THz 波発生システムを用いて、当該 BNA ファイバー単結晶からの THz 波の発生を確認した。

〔研究経過および成果〕

背景: THz 波は、電波天文や分析科学の分野において、広く研究・利用されてきたが、その対象は限定的なものであった。その THz 波技術に、今、新しいセンシング機能が付加され、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなどさまざまな分野における応用が期待されている。しかしながら、これら多種多様な THz 波応用に柔軟に対応できる、実用的な光源や検出器などの要素技術は、未だ十分に開発されていないのが現状である。本提案では、従来の LiNbO₃ 等の無機材料を大きく上回る非線形性を有する、有機非線形結晶 BNA (N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline) を THz 波変換素子として用いる。さらに、マイクロ引き下げ法 (μ -PD 法) による、安価かつワンプロセスの THz 波の発生に好適な <010> 軸に配向した 100 μ m ϕ 程度の BNA 単結晶ファイバー作製技術を確立し、BNA ファイバーを用いた THz 波発生試験を行った。これまでは不可能であった光波-THz 波変換システムの実現に繋げるものである。

実験結果: μ -PD 法を用いたファイバー単結晶作製では、ルツボ材の選択とルツボ形状設計が重要である。このため、始めに、材料と坩堝材の濡れ性を調査し、ファイバー状への制御がもっとも容易な坩堝材および形状を検討した。

図1に、BNA 原料を各ルツボ材からなる板上に熔融させ、各ルツボ材との濡れ角を観察した結果の例を示す。Ir、SUS、Al、Cu といった金属の他、ガラスやナイロンといった材料を検討した結果、ナイロンにて 15° の最適な濡れ角を確認した。本結果を基に、図2に示すように、 μ -PD 法ルツボの、ダイの部分にナイロンを採用し、円筒部に SUS を用いたルツボを設計した。ルツボの SUS 部が高周波誘導加熱により BNA 融点近傍まで昇温される。当該ルツボをのぞき穴の開いた SUS 製のアフターヒーターの上に設置し、当該アフターヒーターは、水冷治具の上に設置し、冷却水の温度を恒温槽で調整することで、結晶育成方向の温度勾配を調整可能とした。

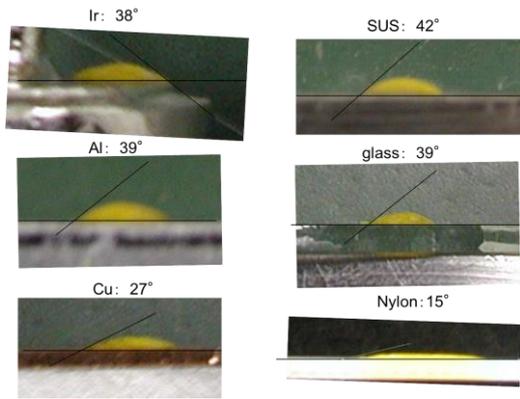


図1 ルツボ材とBNAの濡れ角観察結果

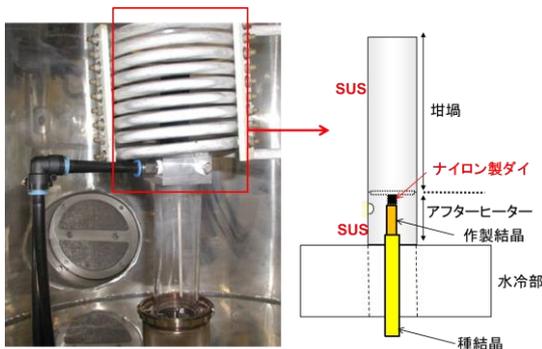


図2 μ-PD法結晶作製時の装置写真と模式図

さらに、BNA原料のTG-DTA測定を行い、 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ heating \rightarrow 30min keep \rightarrow $0.25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ coolingの温度プロファイルにて、融点、凝固点を計測した結果、融点 106°C 、凝固点 62°C を確認した。当該データを基に、結晶育成方向の温度勾配の検討を行った結果、図3に示すように、側面に $[010]$ 配向させた、約 0.8mm 径のBNAファイバー結晶の作製に成功した。図4に作製したBNAファイバー結晶の $[010]$ 面におけるX線ロッキングカーブ測定結果を示す。RIGAKU AT-Xを用い、 $40\text{kV}-30\text{mA}$ Cu-K α 、スリット 0.5mm 角、 $\langle 020 \rangle$ $2\theta = 8.231^{\circ}$ の測定条件にて測定を行い、 19.8arcsec の測定結果が得られた。従来のブリッジマン法による溶液成長法での単結晶の参考値 200arcsec より1ケタ良い結晶性が確認され、溶液成長法による単結晶での参考値:約 30arcsec を上回る結晶性が確認された。

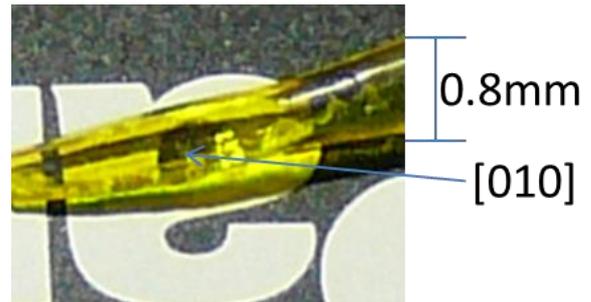


図3 μ-PD法作製BNAファイバー結晶の写真

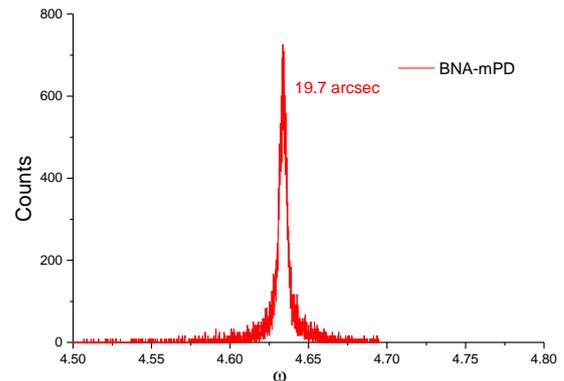


図4 BNA結晶の $[010]$ 面におけるX線ロッキングカーブ測定結果

図5に、Siボロメータを用いて検出されたTHz波(周波数 11THz)の出力パルス列を示す。BNAファイバーによるTHz波の発生を確認した。μ-PD法により作製したBNAファイバー単結晶においても他の育成方法由来のBNA結晶と同様に広帯域にわたって周波数同調可能なTHz波発生が可能であり、今後励起条件を最適化することによってさらなるTHz波発生の高効率化が期待できる。

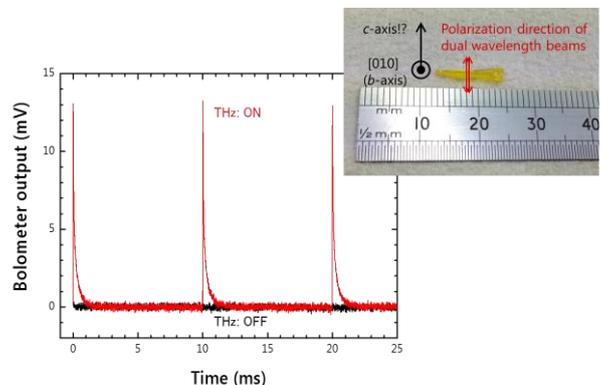


図5 THz波(11THz)の出力パルス列

【5】超音波マイクロバブルで作る金属ナノ粒子

研究者 山形大学大学院理工学研究科 准教授 幕田 寿典

【研究の概要】

触媒、粉末冶金などに利用される金属ナノ粒子のニーズは年々高まっており、金属ナノ粒子をより小さく効率的に生成できる製法が求められている。本研究では、独自の手法である“熔融金属相と水相の二相を作り、熔融金属相中で超音波を用いてマイクロバブルを発生・振動させることにより、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の金属ナノ粒子を容易に生成する”方法について、更に収量の増加や径の微細化を図り実用的な材料に近づけるため、供給ガス流量の変更や界面活性剤の添加を行い、生成条件の違いが金属ナノ粒子生成に及ぼす影響について評価した。

【研究経過および成果】

本研究は、熔融金属相中で超音波を用いてマイクロバブルを発生・振動させることにより、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の金属ナノ粒子を容易に生成する方法において、生成する金属ナノ粒子の量の増加や径の微細化を目指したものである。生成手法の詳細を次に示す。

まず、実験装置については、図1に示すように、熔融金属を満たす容器、加熱用のホットスターラー、マイクロバブル発生装置で構成される。

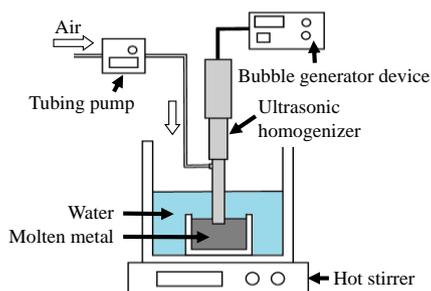


図1 実験装置概要

生成手順としては、 $\phi 90 \times 60$ のビーカーに融点 60°C の低融点金属(U アロイ 60)170g、ガラス円筒容器に純水を 120mL 入れ、ホットスターラーにより温度を 95°C に保つ。チュービングポンプの流量を 25mL/min にし、熔融金属内に 2mm 挿し込んだ中空

ホーンに空気を供給しながら、超音波を印加してマイクロバブルを熔融金属内に発生させた。熔融金属内の気泡発生には超音波ホモジナイザー(UH-50, SMT)に内部がガス通過可能な超音波中空ホーン(出口内径-外径; 2.6mm-6mm)を取り付けたマイクロバブル発生装置を用いた。超音波マイクロバブルの発生に伴い、中空ホーン近傍から微細な熔融金属液滴が水相に分散する。その分散液を室温で静置することにより熔融金属液滴が凝固し、図2の電子顕微鏡画像に示すような金属ナノ粒子が生成される。

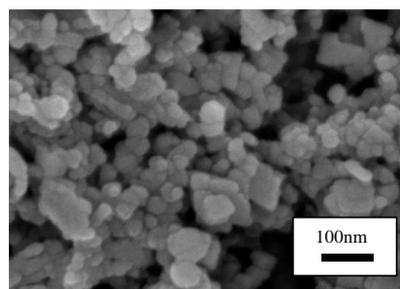


図2 金属ナノ粒子の電子顕微鏡画像

本報告では今回は前述の生成手順(Case 1)において、供給気体の流量を 15mL に下げた条件(Case 2)、および純水に変えて界面活性剤としてポリビニルアルコールを 2% 添加した水溶液に変えた条件(Case 3)での金属ナノ粒子生成結果について報告する。

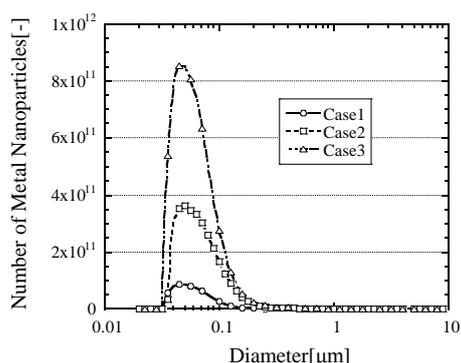


図3 各条件での粒度分布

図3にレーザー回折式粒度分布測定装置(LMS-2000e, セイシン)を用いて測定した Case 1～Case 3 の金属ナノ粒子の粒度分布を示す. 図3に示すように各条件でのピークは全ての条件で50nmに存在し, 平均値も60nm とほぼ同じであった. ピーク値を比較すると, Case 1 と比べ Case 2 は4倍, Case 3 は10倍へと増加した. また, 1μm 以下の収量については Case 1, Case2, Case3 でそれぞれ, 53mg/L, 175mg/L, 429mg/L となり, Case 1 と比較すると, Case 2 は3倍, Case 3 は8倍に増加した. 金属ナノ粒子の収量が増加した理由として, 流量を低下により, 大気泡の発生頻度が減少し, 粒子生成のトリガーとなるマイクロバブルの発生が安定化したこと, 界面活性剤の添加により表面張力が低下し飛び出しが容易になったことが考えられる.

以上の結果より, 流量の最適化および界面活性剤の添加によって, 数値目標としていた1. 平均 200nm 以下, 2. 分散液中の 1μm 以下の粒子濃度が 200mg/L 以上という目標を上回ることに成功した.

また, 3つ目の目標として掲げていたナノ液滴放出挙動の撮影については, 不透明である金属中の気泡の位置が特定しにくいことと飛び出し現象そのもののランダム性により, 溶融金属からの飛び出しの撮影は

出来なかったものの, 図4に示すように高速度カメラ(FASTCAM SA1.1, Photron)で水中の気泡を超音波印加した際の気液界面を撮影した画像より, 超音波の強制振動を水に印加することによって, 気泡の収縮挙動に付随して水相から空気相へ向けて勢いよく液滴が飛び出すことが確認できた. 溶融金属の際にも類似した現象が置き, 微細な溶融金属液滴が上部の層へ放出されたものと考えられる.

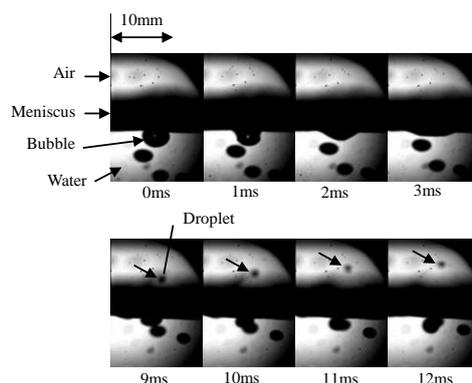


図4 界面からの液滴の飛び出し

本研究では当初の数値目標をほぼ達成し, 従来法より微細で収量の高い金属ナノ粒子の生成に成功した. また, その過程で内部に多数の空洞を有するポーラス金属の生成にも成功した. 今後もこれらの材料の高効率生成および応用に関する研究を進める予定である.

【発表論文】

1. 佐々木登子, 幕田寿典, 超音波マイクロバブル発生装置を利用した金属ナノ粒子生成法, 日本機械学会東北学生会第44回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, 2014, p. 175-176.
2. 片寄礼夏, 幕田寿典, 超音波マイクロバブル発生装置を用いて作るポーラス金属, 日本機械学会東北支部第50期秋季講演会論文集, 2014, p. 73-74.

【6】 高速動作スピンドバイス実現に向けた新奇トポロジカル絶縁体スピン偏極材料の開発

研究者 東京大学理学系研究科物理学専攻 助教 秋山了太

〔研究の概要〕

本研究ではバルク部が絶縁体でありながら、表面がスピン偏極した金属的伝導を示すトポロジカル絶縁体の一種である、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe について、その薄膜成長の最適化を行い良質な単結晶を得ることに成功した。さらに、磁場中低温電気伝導測定において弱反局在効果を観測した。これはトポロジカル表面状態に特徴的な現象の一つで、スピンを反転するような後方散乱の抑制によって生じる。また、最適化した SnTe 薄膜作成条件においてヨウ素ドーピングを行なったところ、キャリア密度、移動度、位相コヒーレント長が変調することを見出した。最近の他グループの報告[1]では移動度は最大で $800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、位相コヒーレント長は 500 nm であったが、本研究では条件によっては移動度は最大で $3500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度、位相コヒーレント長は 700 nm 程度にまで高まった。これはヨウ素が Sn 欠陥を補償するなどして結晶性が改善したことによると考えられる。

〔研究経過および成果〕

本研究ではトポロジカル絶縁体の1種であるトポロジカル絶縁体を扱っている。トポロジカル絶縁体とは、バルクは絶縁体でありながら、表面では金属的なスピン偏極バンドが生じており、そこを質量0のディラック電子が輸送される物質である。表面トポロジカル状態は、バンド分散で言うとディラックコーン状となっており、さらに $k = 0$ 以外の k においてはアップスピンとダウンスピンが非縮退となっている。そのため、 k によってスピンの向きが固定されており (spin momentum locked)、表面では純スピン流が流れている。そのため、きわめて高い移動度とスピン偏極電流という2つの大きな特徴を併せ持っており、革新的な物質として、スピントロニクスなどへの応用が期待されている。

本研究では、分子線エピタキシー装置(MBE)を用いて薄膜単結晶を作製した。典型的な(高速電子線回折)RHEED 像と(原子間力顕微鏡)AFM 像を図1(a), (b)に示す。RHEED 像より、表面は原子層レベルで平坦であることがわかる。また、AFM 像よりマクロに

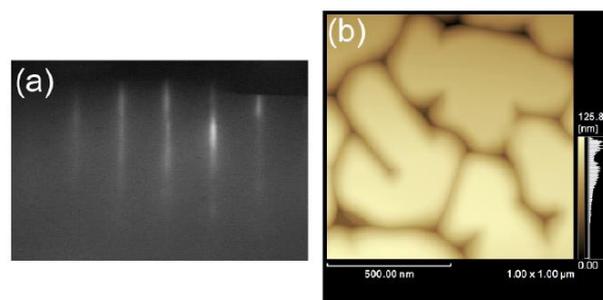


図 1 (a)[1-10]方向入射の RHEED 像 (b)(111)表面の AFM 像

は表面は $2\text{--}300 \text{ nm}$ 程度のドメインを形成した特徴的な構造を持っていることがわかる。X 線 $2\theta\text{--}\theta$ スキャンからは、SnTe が(111)単結晶薄膜であることがわかっている。

次に、電気伝導の観点からトポロジカル表面状態を観測することを目指した。トポロジカル表面状態を有する2次元表面において、左回りに散乱されて一回りするような電子の経路を考えると、時間反転(鏡映)対称性よりその逆経路をたどる電子も存在する。トポロジカル表面では電子は任意の経路を1周するとベリー位相 π だけのずれを生じる。この位相差のために

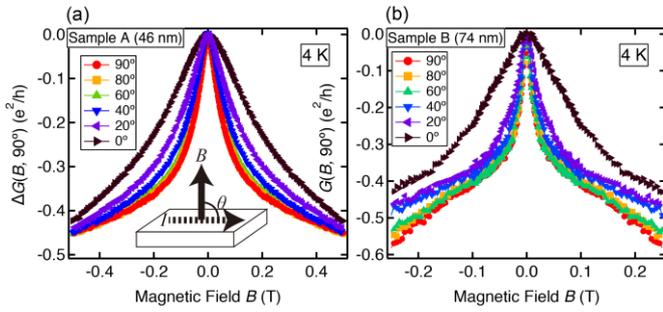


図2 膜厚が(a)46 nm (b)74 nm のサンプルにおける弱反局在効果。電流と磁場のなす角 θ を変化させると信号が変化している。

電子は干渉を起こし、電子の反局在が生じる。つまりトポロジカル(結晶)絶縁体には弱反局在効果(WAL)が現れる。図2に4 K において観測されたWALを示す。(a),(b)は膜厚が異っており、それぞれ46 nm, 74 nm である。WALはバルクのスピン軌道相互作用など3次元効果によっても生じうるため、トポロジカル表面状態による2次元 WAL であるかどうかを検証することが必要である。そのための1つの方法として磁場と電流のなす角度を回転してWALを測る方法がある。つまり、図2(a)の θ が 90° のときは2次元成分+3次元成分、 θ が 0° のときは3次元成分のみであるといえるため、前者から後者を引き算すれば2次元成分が求まり、それを図3に示す。それぞれの θ のときの2次元WALが一つの曲線に収斂している。これは表面に2次元伝導成分が存在することを示している。また、膜厚が薄いほうが厚い方よりもより高磁場までWALが残っており、より外場に対してWALが

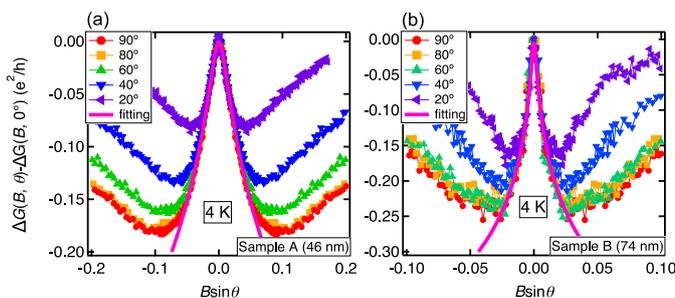


図3 抽出された2次元WAL

鈍感であることを示す。WALの温度依存性は、薄い試料の方は電子-電子散乱が、厚い資料の方は電子-フォノン散乱が強いことがわかった。また表面での移動度は、薄い試料 ($561 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)の方が厚い試料 ($1565 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)よりも低いことがわかった。これは、薄い試料の方が表面伝導の割合が高いにもかかわらず電子-電子散乱が強く効いていることを示唆しており、これはトポロジカル表面伝導の本質であることが考えられる。

また、Sn欠陥を埋めてキャリア密度を低くする試みとしてヨウ素ドーピングを行なった。その結果、最適条件下では表面移動度は図4のように厚い試料で $3500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ まで改善し、バルクキャリア密度は $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ほどと、1/10程度まで減らすことができた。特に

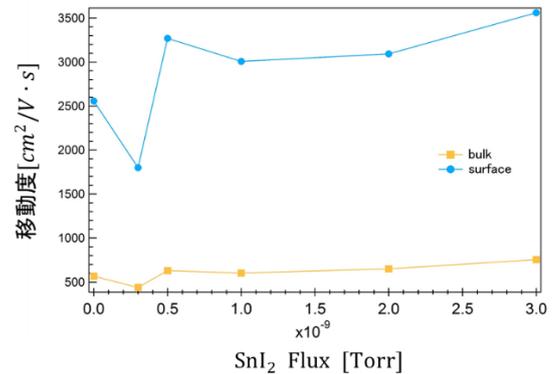


図4 厚い膜における移動度とSnI2フラックス(ヨウ素ドーピング量)の関係

表面移動度については最近のSnTe(001)での報告の値の5倍程度であり、さらなる成長条件の最適化によってバルクキャリアを減らし、表面伝導を優勢にすることができると考えられる。

[発表論文]

1. R. Akiyama, K. Fujisawa, R. Sakurai, and S. Kuroda, Weak antilocalization in (111) thin films of a topological crystalline insulator SnTe, Journal of Physics: Conference series **568**, 052001 (2014). [ArXiv1408.4226]

【7】 電気および磁気異方性をもつ微粒子による デジタルサイネージ用電子ペーパー表示剤の研究

研究者 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授 鳥居 徹

【研究の概要】

電気異方性を有する二色微粒子の回転によって表示を行うツイストボール式電子ペーパーは、低消費電力の電子表示材として知られている。本研究においてはこの二色微粒子に電気異方性に加えて磁気異方性を付与することで、磁石を用いて容易に手書きによる書き込みを行うことができる電子ペーパーを開発した。磁気異方性は二色微粒子の半球に磁性ナノ粒子を添加することによって実現した。磁性ナノ粒子の超常磁性によって残留磁化のない二色微粒子を合成することができ、これによって高い書き込みの保持性を実現することができた。本研究の成果は電子黒板などに応用可能であると考えられる。

【研究経過および成果】

電気および磁気異方性を有する二色微粒子の合成は図1のような構造をもつガラス製微小流路を用いて行った。顔料によって着色した白黒二色のアクリルモノマーと界面活性剤を添加した水を微小流路に流すことにより微小流路内で二色液滴が生成され、この二色液滴を重合槽で熱重合することによって二色微粒子を得た。黒色のアクリルモノマーには予め磁性ナノ粒子と電荷制御剤を添加し、二色微粒子に電気および磁気異方性を付与した。この製法では、二色の混合を防止するために材料条件の検討が必要で

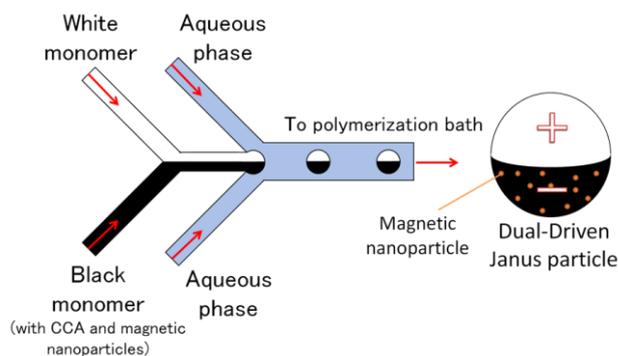


図1. 微小流路による二色液滴生成の模式図

あるが、粘度の調整などによって二色の混合をある程度防止し、図2のような二色微粒子を得た。この二色微粒子の平均粒径は142 μm であり、粒径のばらつきを示す変動係数は2.4%であった。

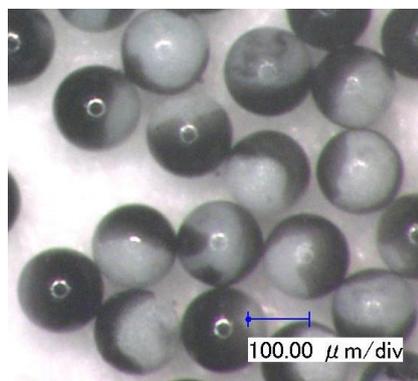


図2. 微小流路を用いて合成した電気および磁気異方性を有する二色微粒子

この二色微粒子をシリコンゴム中に封じ込め、透明電極で挟みこむことによってツイストボール式電子ペーパーを作製した。作製した電子ペーパーは図3に示すように磁石による手書きの書き込みが可能であ

った。また、書き込み後に電圧を印加することによって書き込んだ文字を消去することも可能であり、従来の電圧による表示の切り替えに加えて磁気による書き込みを可能にしたツイストボール式電子ペーパーを開発することができた。現状ではコントラストが不十分であるが、粒子の顔料濃度の向上、二色の混合の

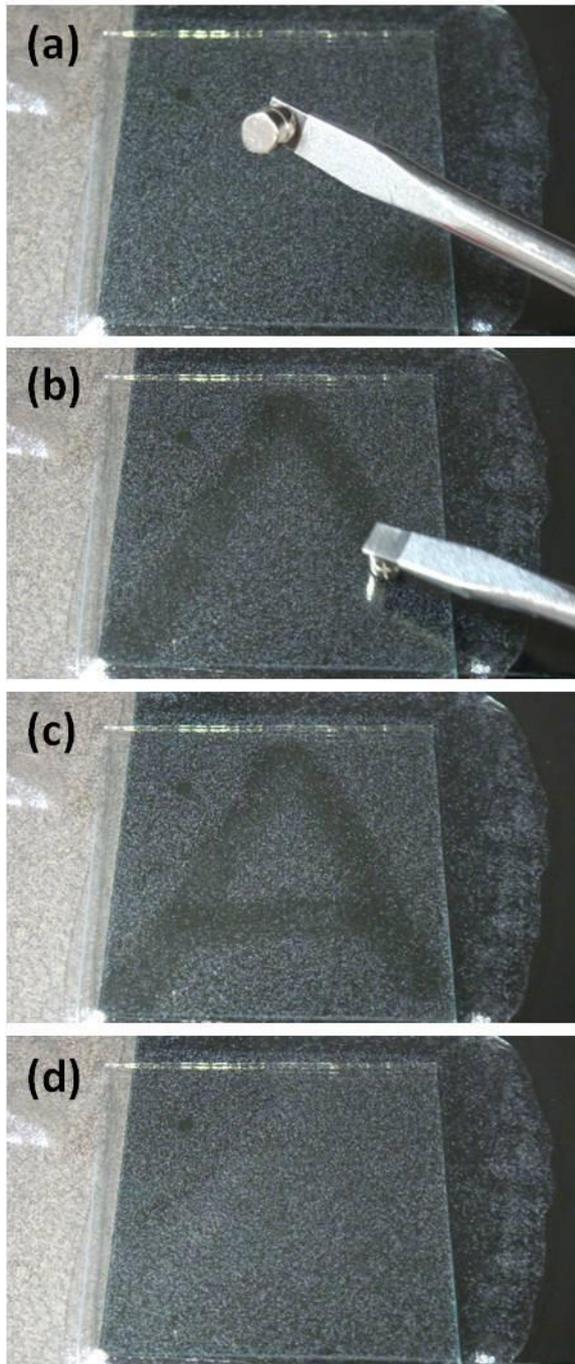


図 3. 磁石による手書きの書き込みと電圧印加による文字消去の様子

防止、電子ペーパー中の粒子密度の向上などによって改善が可能であると考えられる。

本研究で開発した電子ペーパーは非常に簡素な構造のために大型化が容易であり、電子黒板などへの応用が期待される。この電子ペーパーを用いることで省電力、軽量で高い視認性を持った電子黒板を低価格で製造することが可能になると考えられる。

[発表論文]

1. 駒崎友亮、鳥居徹「圧電フィルムを用いたツイストボール式電子ペーパーの電池レス駆動装置」、『第 6 回 マイクロナノ工学シンポジウム』、22am2-E8、松江、2013 年 10 月
2. Y. Komazaki, T. Torii, “Synthesis of Electric and Magnetic Dual-Driven Janus Particles for Electronic Paper,” 13th International Conference on Microreaction Technology (IMRET13), pp. 102, Budapest, Hungary, June, 2014
3. Y. Komazaki, T. Torii, “Newly Discovered Property of Electric and Magnetic Dual-Driven Twisting Ball Display,” the Society for Information Display (SID) Display Week 2014, pp. 1344-1347, San Diego, USA, June, 2014
4. Y. Komazaki, T. Torii, “Writable Electronic Paper Based on Twisting Ball Type Electronic Paper,” The 20th International Display Workshops (IDW’13), pp. 1340-1343, Sapporo, Japan, December, 2013
5. 駒崎友亮、鳥居徹「電気異方性と磁気異方性の両方を有する電子ペーパー用 2 色微粒子の作製」、『化学とマイクロ・ナノシステム学会 第 27 回研究会』、29、仙台、2013 年 5 月

【8】 単一分子トランジスタの作製とその次世代エレクトロニクスへの応用に関する基礎研究

研究者 東京大学生産技術研究所 教授 平川一彦

〔研究の概要〕

単一分子の量子状態を金属電極により電氣的に制御・読み出すことができる単一分子トランジスタの作製と物性の研究を行った。単一分子トランジスタ作製では、微小金属電極の通電断線の機構を明らかにし、1分子スケールのギャップを再現性よく作製する基盤技術を確立した。さらに、作製した単一分子トランジスタの電気伝導について詳細な検討を行い、分子に内包されている単一原子の振動モードの高感度検出、分子の充放電による分子軌道の制御、さらに高輝度テラヘルツ電界の集光と光子支援トンネル効果の観測など、原子スケールのナノメートル構造に特異な新しい現象の観測に成功し、単一分子デバイスの発展に繋がる知見を得た。

【研究の背景】 VLSI はスケーリング則に従い微細化の一途をたどり、このままの割合でスケーリングが続けば、2030年頃にはチャンネル長は1 nmを切り、分子レベルの寸法に達してしまう。一方、活性層がナノメートル領域に入ると、その電子状態は量子力学的によく記述された離散的なものになり、その状態を金属電極により電氣的に制御・読み出すことができれば、演算や記憶を司る情報処理デバイスに、全く新しい展開をもたらすことができるであろう。

本研究では、ナノ量子系として単一分子に着目し、単一分子を活性層とするトランジスタの精密な作製技術の確立とその伝導特性やダイナミクスの研究を行った。

【単一分子トランジスタの作製】 我々は単一分子伝導の理解と高機能性の探索には、トランジスタ構造が重要と考え、ゲート電極を形成することができる通電断線法の高度化を中心に研究を進めた。

通電断線法は、エレクトロマイグレーション効果を利用して金属を断線させる方法である。我々は、フィードバック通電により、金属コンタクトから制御性よく原子を1個ずつ剥離させることに成功した。さらに金属

原子が剥離する条件を詳細に検討し、数十原子という極微細金属コンタクトでは、通電断線が1電子から1原子への運動エネルギーの移動という、極めて単純な機構で進行することを見いだした。この知見を利用して、通電断線時の発熱も制御しつつ、1 nmを切る幅のギャップを再現性よく作製することに成功した。以下に、作製した単一分子トランジスタの伝導とダイナミクスについて得られた成果を述べる。

【フラーレン内包単一原子のダイナミクス】 フラーレンは炭素原子がカゴのような形状に配位している分子である。我々は、これまで金ナノギャップ電極とC60フラーレン分子からなる単一分子トランジスタを作製し、C60分子を介して電子が1個ずつ伝導する単一電子トランジスタとして動作することを明らかにしてきた。本研究では、フラーレンがそのカゴ状分子の中に金属原子を取り込むことができることに注目し、Ce原子を1個包含したCe@C82分子を活性層とする単一分子トランジスタの伝導を調べた。

Ce@C82分子トランジスタにおいても電子が1個ずつ伝導する特性が得られたが、その励起スペクトルを詳細に検討したところ、C82カゴ分子内にあるCe原

子が bending と stretching の2つのモードで振動していることに由来する特徴を明瞭に見ることができた。このことは、電流-電圧測定という標準的な測定でも、1原子の運動を検出できるほど高感度であることを示している。Ce は磁性を持った原子であり、今後、Ce 原子が持つスピンを利用した高機能デバイスの開発に繋がる成果である。(発表論文1)

【分子の帯電状態と分子軌道の制御】 1分子の中に存在する電子の個数は分子軌道やエネルギー準位に大きな影響を与える要因である。我々が作製している単一分子トランジスタでは、ゲート電界を用いて単一分子中に存在する伝導電子の数を制御することができる。今回、金よりも反応性が高い強磁性 Ni 電極を有する C60 分子トランジスタを作製し、その伝導が電子数の変化により、どのように変化するか検討した。その結果、ゲート電圧を印加しない状態では、C60 分子と Ni 電極は弱いトンネル結合となるのに対し、正のゲート電圧を印加して、C60 分子内に電子を1個過剰に導入すると、C60 分子と Ni 電極は強く結合し、軌道混成が起きることが明らかになった。さらに、このとき素子のトンネル磁気抵抗を測定したところ、弱結合領域では-80 %程度の磁気抵抗が観測されるのに対し、強結合状態では-10,000%程度の巨大な磁気抵抗が観測された。この結果は、分子トランジスタの特性を、1個の電子の出し入れで大きく変化させることを意味しており、半導体デバイスにはない極めて特異な現象である。(発表論文2)

【単一分子とテラヘルツ電磁波の相互作用】 単一分子トランジスタにおける特徴的なエネルギーや時間(分子振動周波数、エネルギー準位間隔、トンネル時間など)はテラヘルツ電磁波の領域にあり、単一分子とテラヘルツ電磁波の相互作用は物性解明や制

御に非常に重要である。しかし、テラヘルツ電磁波の波長は 100 μm 程度あり、1 nm 以下のサイズの単一分子とは相互作用断面積が極めて小さい。

我々は、単一分子トランジスタにおけるソース・ドレイン電極をテラヘルツアンテナとして用いることにより、2.5 THz のテラヘルツ電磁波を単一 C60 分子に集光し、その伝導の様子調べた。テラヘルツ電磁波の強度が数十 mW 程度になると、テラヘルツ光子を吸収・放射してトンネルする過程に対応するコンダクタンスが観測された(光子支援トンネル効果)。さらに、そのコンダクタンスを解析することにより、単一分子の位置で誘起されるテラヘルツ電界の大きさを見積もったところ、100 kV/cm 以上の強電界が誘起されていることがわかった。この 10^5 倍にも上る電界増強はナノギャップ電極のプラズモン効果によるものであり、1 nm 以下の極微領域の非線形ダイナミクスの研究に非常に有効であることがわかった。(発表論文3)

【発表論文】

1. N. Okamura, K. Yoshida, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Electron transport in endohedral metallofullerene Ce@C82 single-molecule transistors", *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 043108 (2015).
2. K. Yoshida, I. Hamada, and K. Hirakawa: "Effects of electron charging and magnetization configuration on the electronic properties of single molecule transistors", 投稿中.
3. K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa: "Terahertz field enhancement and photon assisted tunneling in single molecule transistors", 投稿予定.

【9】高精度な渋滞シミュレーションのための確率セルオートマトンによる交通流特性の推定

研究者 東京工業大学大学院 知能システム科学専攻 助教 山崎 啓介

【研究の概要】

国土交通省によると交通渋滞がもたらす経済損失は年間 12 兆円におよび、その緩和や解消を目指し多くの研究が行われている。近年では分岐や合流、信号のない道路においても減速・加速などの個々の車の挙動が原因で渋滞が発生することが明らかになった。こうした自発的な渋滞現象を説明するため多くの理論的・実験的な研究が行われており、様々な数理モデルが提案された。本研究ではその中のひとつである確率セルオートマトンを扱う。交通流を的確に再現するためにはモデルのパラメータを決定する必要がある。しかしながら従来の研究では経験的な設計に依存しており、何故そのパラメータが観測データを再現できるかの説明がされていない。そこで本研究では交通流データから統計的な手法を用いてパラメータを推定することで、個々の車の運転特性を客観的に抽出し、高精度なシミュレーションを実現するための基礎となる研究を行った。

【研究経過および成果】

確率セルオートマトンは高速道路などで発生する渋滞現象を定性的に再現できることが知られている。このセルオートマトンはパラメータを有しており、渋滞現象の再現性はパラメータの設定に大きく依存する。しかしながら従来の研究ではパラメータ設定は経験的に手動で行われており、再現性の評価も主観的であった。これはこの研究分野が交通流を表現するモデルを提案し、そのシミュレーション結果が所望の渋滞現象の特徴を捉えているか否かを議論するアプローチをとっているからと考えられる。こうしたモデルからデータへの方向性は順問題のアプローチと呼ばれる。本研究で行ったアプローチはデータからモデルへの方向性をもつ逆問題のアプローチである。つまり再現したい交通現象のデータから最適なモデル構造やパラメータを推定するものである。これまで確率オートマトンはそのモデルが模倣対象とする運転行動によって様々なものが提案されてきたが、パラメータを推定

するという観点での研究は存在しなかった。

本研究が主に対象としたモデルは Zero Range Process (ZRP) と呼ばれる確率セルオートマトンである。これは車間距離によって最適な速度を変化させるモデルであり、データからパラメータを推定することにより、運転者がどのような車間距離での走行を好むかを抽出することができる。本研究ではまず ZRP を統計モデルとして記述しなおすことでパラメータ推定方法を提案することに成功した。またシミュレーションによりデータを生成し、推定精度を実験的に検証した。

精度を解析する際、逆問題のアプローチに特有の問題も明らかになった。実際の車両の走行を考慮すると運転者によって最適な車間距離のとり方は異なるはずである。つまり各車両が異なるパラメータを持つ。この設定では一定の区間を通過する状況において推定に十分なデータが得られない。例えば高速車両の前方に低速車両がある場合、両者の車間距離は小さくなり、大きな車間距離のデータが採取できない。

こうしたデータからは車間距離が大きい場合に対応するパラメータを推定することは原理的に不可能となる。

そこで本研究では車両を幾つかの典型的なグループに分け、同一のグループ内では異なる車両においても運転行動つまりパラメータが同じであるという仮定の下で推定を行った。つまり速い車両が自由に走行したデータと前方の低速車両により走行が阻害されたデータとを同じグループの車両として統合する。阻害された高速車両は車間距離の小さいデータを有し、自由走行の高速車両は車間距離の大きいデータを有するが、これらを統合することで全ての車間距離に対応するパラメータを推定できる。

これはグループ分けとパラメータ推定を同時に行う情報処理であり、統計学や機械学習でクラスタリングと呼ばれるものである。確率モデルに基づくクラスタリング手法は EM アルゴリズムを用いた最尤法、パラメータの事後確率を利用したベイズ法、ベイズ法の近似法である変分ベイズ法などが知られている。本研究ではこれらのクラスタリング手法を世界で初めて確率セルオートマトンに適用し、車両のグループ化とパラメータ推定を統計的に行う手法を提案した。またシミュレーションでのデータに対し、精度良くパラメータ推定が行えることを実験的に検証した。

さらにシミュレーションでのデータだけではなく、実際の高速道路を走行する車両についてクラスタリングを行う研究にも着手している。具体的には高速道路をビデオカメラで定点観測し、デジタル動画処理により通過する車両の座標を抽出する。抽出された座標を基に確率セルオートマトンでのクラスタリングを施すことで、車両を幾つかのグループに分類するものである。今後はこうした実車両の走行動画のデータベ

ースを整備し、車両が従う速度制御則についてのより深い分析を進めていく予定である。

〔発表論文〕

1. 山崎啓介, “多種粒子 TASEP を表現する混合分布モデルと統計的粒子クラスタリングについて”, 日本応用数理学会論文誌, 24(4), pp.357-372, 2014
2. Keisuke Yamazaki, “The Optimal Hyperparameter for Bayesian Clustering and its Application to the Evaluation of Clustering Results”, Proc. of SCIS-ISIS2014, pp. 961-965, 2014.
3. Fumito Nakamura, Keisuke Yamazaki, “Two Statistical Methods for Grouping Vehicles in Traffic Flow Based on Probabilistic Cellular Automata”, Proc. of SCIS-ISIS2014, pp. 956-960, 2014
4. 山崎啓介, “変分ベイズ法における潜在変数推定の精度について”, IBIS2014 ワークショップ, 2014
5. 中村文士, 山崎啓介, “交通流モデル ZRP における変分ベイズ法について”, IBIS2014 ワークショップ, 2014
6. 中村文士, 山崎啓介, “交通流映像からの速度決定則のモデル化とグループ分け”, 電子情報通信学会 ITS 研究会, to appear

【10】 中性子小角散乱法による磁束状態の観測を通じた s 波超伝導体におけるパウリ極限状態の検証とその特性研究

研究者 お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 教授 古川 はづき

〔研究の概要〕

超伝導状態の電子対が s_{\pm} 対称性を持つと考えられている KFe_2As_2 におけるパウリ極限状態について調べる目的で、外部磁場を ab 面内にかけた場合の磁束状態における磁場の空間分布の異常を、中性子小角散乱法により検証する実験を計画した。測定は、スイスの Paul Scherrer Institut (PSI) 内の中性子散乱実験施設 SINQ の小角散乱装置 SANS-I で平成26年5月と10月に実施した。結果として、 KFe_2As_2 の磁束格子の異方性の磁場方向依存性を観測し、それを Ginzburg Landau 曲線にフィッティングすることで、系の異方性定数が 0.4T で 3.7、1T で 6.9 であることを明らかにした。本研究は継続中であり、次回の実験で印加磁場をほぼ $[100]$ 軸方向にかけた場合の強磁場 ($H \sim H_{c2}$) 領域における磁束中の磁場分布の異常に関する検証を行う予定である。

〔研究経過および成果〕

物質の電気抵抗が“ゼロ”になる超伝導体は、低損失大電力送電線や電力貯蔵、デバイスなど、エネルギー環境問題と経済社会に大きな波及効果をもたらすことからグリーン・イノベーション(環境・資源・エネルギー)分野で発展が期待される革新技术の一つであるが、本格的な実用化には『より高温で超伝導を示す新材料』や『より高い性能を持った新物質』の開発が課題である。また、他方で、基礎研究面においては『超伝導発現機構』や『超伝導特性原理』の解明が重要であり、そのための精度の高い系統的な研究の実施が求められている。

2008年に日本の科学者らにより発見された鉄系超伝導体については、1986年に発見された高温超伝導銅酸化物と同様、従来型の超伝導に比べ超伝導転移温度がかなり高いことから、超伝導対称性、および、ギャップ構造についての基礎物理学的な研究がこの数年間で非常に多くなされてきた。そして、そ

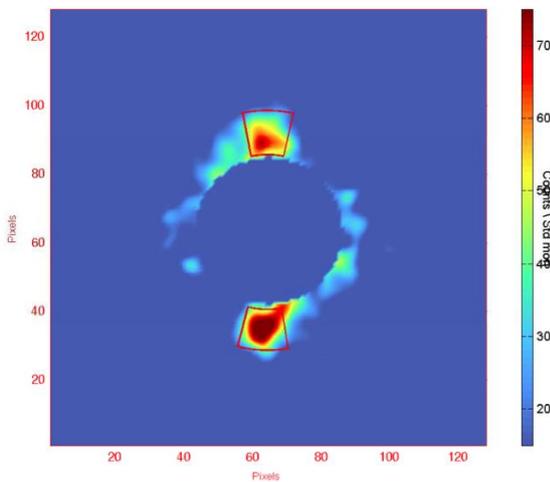
の結果として、磁気揺らぎを媒介とする超伝導発現機構説が重要視され、超伝導電子対の対称性として拡張 s または s_{\pm} である可能性が強く主張されている。

今回提案課題の研究対象である Fe 系超伝導の 1 つである KFe_2As_2 は、 T_c が 3.6K の超伝導体で、鉄系超伝導体としては数少ないクリーンで良質な単結晶試料の育成が可能な物質である。特に最近では、一辺が 10mm を優に超える薄片型の単結晶が作成されるようになった。この物質については、外部磁場をこの物質の ab 面内にかけた場合に上部臨界磁場 (H_{c2}) が同じ条件下の超伝導転移温度 (T_c) の 2 倍以上となることから、系がパウリ極限状態にある可能性が指摘されている。パウリ極限状態下の超伝導の磁束相では、(d 波超伝導体の $CeCoIn_5$ で観測されたような) 超伝導体内の磁場の空間分布の異常、FFLO 状態や磁気秩序の出現が期待され、 KFe_2As_2 についてもこれらの可能性の検証が期待されている。なお、 KFe_2As_2 については、電子対が s_{\pm} 対称性を持

つことが最も強く主張されており、これが真実であれば、本研究が s_{\pm} 対称性を持つ超電導体での初めての磁束状態におけるパウリ常磁性効果の検証となり、この点でも本研究の推進が望まれる。

これらを研究背景とし、我々は、外部磁場を ab 面内にかけた場合の KFe_2As_2 の磁束状態における磁場の空間分布の異常を中性子小角散乱法により検証する研究を計画した。

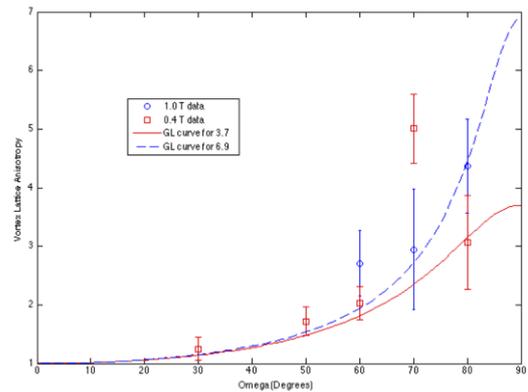
KFe_2As_2 の単結晶試料は、共同研究者である独立行政法人産業技術総合研究所の李・木方氏により作成された。申請者が所属するお茶の水女子大学では、電気抵抗／比熱測定装置 (PPMS) を用い、 H_{c2} と T_c の印加磁場方向依存性を調査した。また、中性子小角散乱実験はスイスの Paul Scherrer Institut (PSI) 内の中性子散乱実験施設 SINQ の小角散乱装置 SANS-I で 5 月と 10 月に行った。



T=50mK, H=1T の磁束格子の散乱パターン

上図は、印加磁場を KFe_2As_2 の c 軸から [100] 軸方向に 70 度の方向にかけた場合の磁束格子からの中性子回折パターンを表す。図は 128×128 の二次元 position-sensitive 検出器上の中性子のカウント数を色で表している。中心から上下に少し離れたところに

現れた赤黒い領域が磁束格子からの散乱スポットを表す。系の異方性と散乱条件を反映して、この測定条件ではこの 2 箇所のみが散乱の磁気ブラッグピークであり、これらの観測事実と印加磁場の大きさからこの条件下での磁束格子の異方性パラメータを決定することができる。



KFe_2As_2 の磁束格子の異方性の磁場方向依存性

次の図は KFe_2As_2 の磁束格子の異方性の磁場方向依存性を表す。前図のような測定により決定された磁束格子の異方性パラメータが印加磁場の方向によりどのように変化するかを示したデータであり、これらを Ginzburg Landau 曲線にフィッティングすることで得られる異方性定数は 0.4 T で 3.7、1 T で 6.9 であることを明らかにできた。

今回の実験では、装置の不調もあり、本来の目的である印加磁場をほぼ [100] 軸方向にかけた場合の強磁場 ($H \sim H_{c2}$) での実験にたどり着けなかったが、すでに次のマシンタイムが獲得されており、平成 27 年度に追加実験を実施する予定で準備を開始している。

【発表論文】

1. S.J. Kuhn et. al., Vortex Lattice Anisotropy and Pauli Limiting in KFe_2As_2 , American Physical Society March Meeting 2015, San Antonio, Texas, USA

【11】 金属表面プラズモンによる電磁波の超集束効果を用いた、 微量液体測定用テラヘルツ波プローブの研究開発

研究者 福井大学遠赤外領域開発研究センター 准教授 山本晃司

〔研究の概要〕

テラヘルツ波による検査応用研究を推進することを目的として、液体試料をチューブで移送した状態で、簡便にテラヘルツ波検査を行うことが可能となる、微量液体測定用のテラヘルツ波プローブを開発することを目的としている。金属テーパー構造結合金属平行平板導波路を用いることで、テラヘルツ波は回折限界を超える空間に閉じ込めることが可能となり、微量試料の測定が可能となる。そのため、液体を金属導波路内に導入するため必須となるチューブなどの誘電体が金属導波路に対してテラヘルツ波伝搬モードに与える影響を、実験および理論的に明らかにした。

テラヘルツ波 (THz 波) は、ミリ波と赤外線の間領域 (0.1 ~ 10 THz) に位置する電磁波であり、電波と光の両方の性質を兼ね備えている。金属平行平板導波路 (metal parallel-plate waveguide MPPWG) を TEM モード伝搬させた THz 波を調べることで、金属平行平板間の媒質の誘電率を測定することができる。波長よりも狭いギャップの金属平行平板導波路に対して、自由空間を伝搬した THz 波を効率よく金属平行平板間にカップリングさせることは回折限界によって困難であるが、金属平行平板導波路に金属テーパー構造を結合させることで、自由空間から金属平板間に効率よく THz 波をカップリングさせることが可能となる。

本研究では、金属テーパー構造を結合した MPPWG に対して、金属平行平板間に配置した誘電体による伝搬モードに与える影響を、金属平行平板間に空気と薄膜試料からなる 2 層の誘電体が存在する構造 (図1) に対して実験的および理論的に調べた。

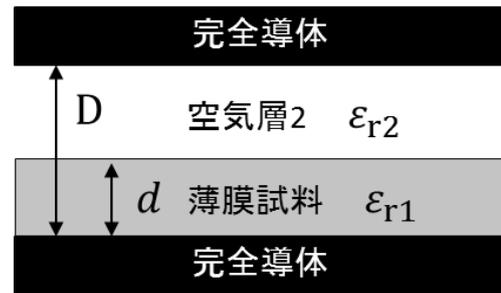


図1 金属平行平板導波路に挟まれた 2 層誘電体のモデル

2 層誘電体を挟んだ金属平行平板導波路における TM モードの固有値方程式は次式で表わされる。

$$\left(\frac{k_{c1}}{\epsilon_{r1}}\right) \tan(k_{c1}d) - \left(\frac{k_{c2}}{\epsilon_{r2}}\right) \tan(k_{c2}(D-d)) = 0$$

ここで、 ϵ_{r1} は誘電体の比誘電率、 ϵ_{r2} は空気の比誘電率、 d は誘電体の厚さ、 D は金属平行平板間のギャップ幅である。また、

$$k_{c1}^2 = \epsilon_{r1}k_0^2 - \beta^2, \quad k_{c2}^2 = \epsilon_{r2}k_0^2 - \beta^2$$

であり、 β および k_0 は、それぞれ TM モードおよび空気の伝搬定数である。

厚さ 50 μm のテフロン、金属平行平板間のギャップが 166 μm とした MPPWG に対して実験的および理論計算により導出したテフロンの誘電率の実部を図 2 に示す。TM₀ モードがシングルモード伝搬する周波数帯において、バルクで測定したテフロンの誘電率とよく一致していることが分かる。金属平行平板導波路におけるテラヘルツ波伝搬は、誘電体 2 層モデルによって取り扱うことが可能であることが分かった。

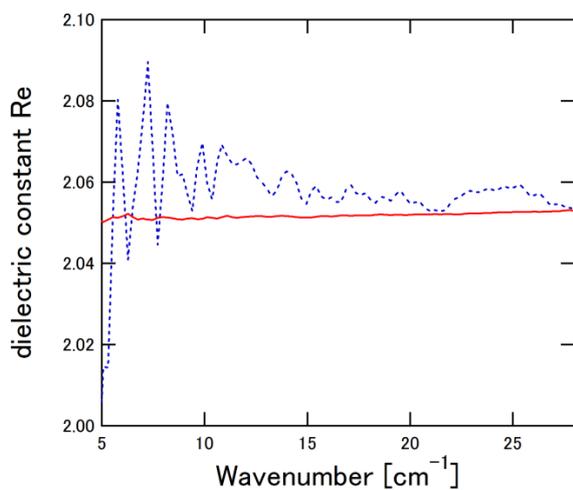


図2 テフロンの誘電率スペクトル。点線：バルク測定より得られた誘電率、破線：誘電体 2 層モデルの MPPWG を用いた測定により得られた誘電率。

一方、透過したテラヘルツ波に関して、20 cm^{-1} よりも低周波数領域ではバルクのテフロンの吸収から期待される透過率減衰と一致していたが、20 cm^{-1} よりも高い周波数領域ではバルクのテフロンによる吸収からのずれが大きくなることが分かった。テフロン 1 層を挟んだ MPPWG の透過測定から得られたテラヘルツ波の透過率スペクトルは、TM₀ モードがシングルモード伝搬する周波数帯に対して、バルクのテフロンの吸収による減衰と一致することを実験的にわかっている。従って、バルクのテフロンによる吸収による減衰からのずれ

た分は、金属平行平板を透過することによる減衰では説明することはできない。金属平行平板間が 2 層誘電体となることで、1 層誘電体のときと比較して、金属平行平板導波路に対する入射または出射効率が変化することが示唆された。

[発表論文]

1. Gil Nonato C. Santos, Eduardo B. Tibayan, Gwen B. Castillon, Elmer Estacio, Takashi Furuya, Atsushi Iwamae, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, “Tin Oxide-Silver Composite Nanomaterial Coating for UV Protection and Its Bactericidal Effect on Escherichia coli (E. coli)”, *Coatings* **4**, 320-328 (2014).
2. Stefan Funkner, Katsuya Saito, Gudrun Niehues, Yoshiki Yazawa, Takashi Furuya, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, “Utilization of chirped laser pulses to measure stimulated Raman scattering of organic liquids in the terahertz regime,” *Applied Physics Letters* **105**, 021103 (2014).
3. Satoshi Tsuzuki, Daiki Takeshima, Tomoya Sakon, Tetsuya Kinoshita, Tomohiro Nagase, Kazuyoshi Kurihara, Kohji Yamamoto, Fumiyoshi Kuwashima, Takashi Furuya, Elmer Estacio, Kodo Kawase, Michael I. Bakunov, Masahiko Tani: “Highly sensitive electro-optic sampling of terahertz waves using field enhancement in a tapered waveguide structure” *Applied Physics Express* Vol. 7, 112401.

【12】 感温塗料を用いた沸騰伝熱面での熱輸送現象の解明

研究者 名古屋大学エコトピア科学研究所 准教授 松田 佑

愛知工業大学工学部機械学科 教授 江上 泰広

兵庫県立大学工学研究科機械系工学専攻 准教授 河南 治

〔研究の概要〕

空調機や冷却機器では、冷媒の相変化を用いその機能を発現させるため、沸騰現象及びそれに伴う熱輸送現象に関する知識がその高効率化には極めて重要である。特に固気液三相界面位置の時間的・空間的变化は伝熱面温度分布に対して支配的因子と考えられており、これらの間の関係を明らかにすることが強く求められている。そこで、感温塗料(TSP)による温度分布計測法に着目した。TSP では、色素分子に光を照射する際に発せられるルミネッセンスが熱消光される原理を利用する。また、TSP は一般に光学的透明性が高く、従来の IR カメラでは不可能であった気泡挙動と温度分布の同時計測の実現が期待できる。本研究では、TSP を用い、またステレオビューアを適切に設計することで、温度分布と気泡挙動を同時計測可能な実験システムを構築し、その有効性を示した。

〔研究経過および成果〕

本研究では、沸騰伝熱面での気泡挙動・温度分布の同時計測を実現するために、感温塗料(TSP: Temperature-Sensitive Paint)による、温度計測法に着目した。TSP では、機能性分子(色素分子)に光を照射する際に発せられる蛍光が熱消光される原理を利用する。すなわち、色素分子が放射するルミネッセンスの強度(発光強度)が温度によって変化するため、発光強度を測ることによって温度を計測することができる。色素分子を混合したポリマー膜を固体表面に塗布し、その発光強度分布変化を CCD や CMOS カメラで計測することで、温度分布を計測することができる。また TSP は光学的な透明性が高く、適切に波長分離してカメラ撮影することで温度分布と気泡挙動を同時計測可能とすることが期待できる。

このような実験システムの構築のため、本研究では、

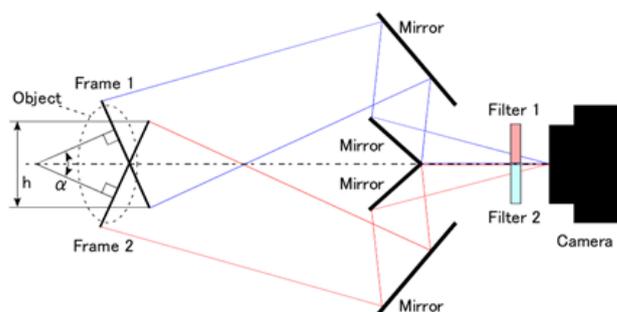


図1 ステレオビューア概略図

カメラ前に光学フィルターを設置することで、気泡挙動、温度分布計測に相当する波長を撮影

ステレオビューアを TSP 計測に応用することに着目した。通常のスレオビューアは 1 台のカメラで、立体視を行うための視差を変えた 2 画像を撮影する。本研究では、設計段階で 2 画像間の視差を画像 1 画素以下になるようにミラー配置を設計することに加え、光学フィルターを設置することにより、TSP の発光を除いた気泡挙動画像及び、TSP の発光のみを撮影する温度分布画像を撮影するシステムを構築した。図 1 にス

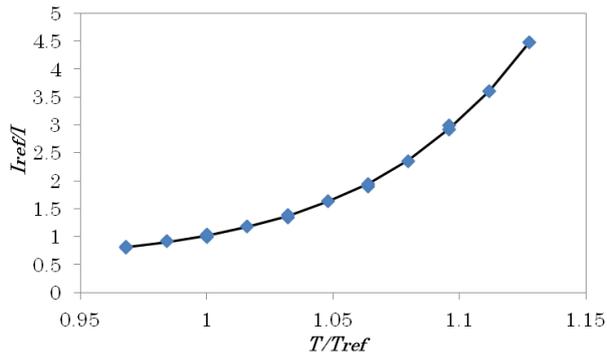


図2 TSP 較正実験結果
点：実験点，線：式(1)でのフィッティング

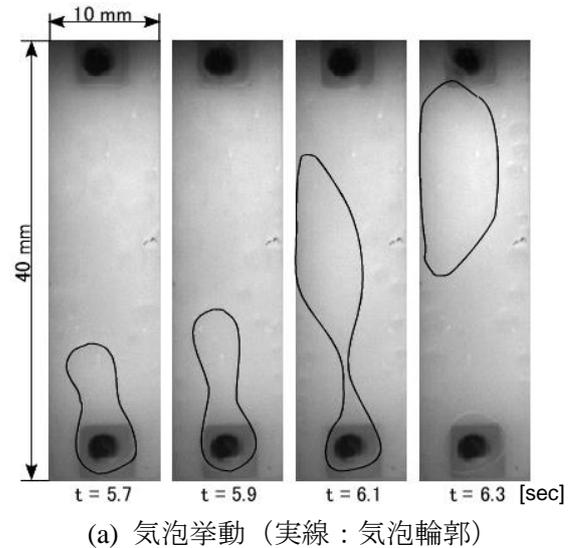
テレオビューアの概略図を示す。これにより、1画素の精度で気泡界面の位置と温度分布の位置合わせが可能となった。

次に、TSPの温度較正を行った。これは、予め既知の温度に対してTSPの発光強度を観測する。図2に較正実験の結果を示す。本研究で用いたTSPの発光強度と温度間の関係は、下記の式で良くフィッティングできた。

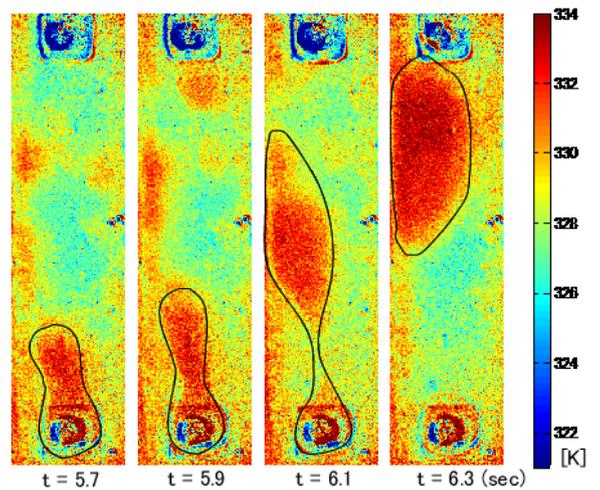
$$\frac{I_{ref}}{I} = a \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^b + c \quad (1)$$

TSPの発光強度を I 、温度を T である。また添え字 ref は参照状態を表し、 I_{ref} は $T_{ref}=313\text{ K}$ での発光強度を表す。また a, b, c は実験データをフィッティングして得る較正係数である。本研究では、 $a = 0.47$ 、 $b = 17.6$ 、 $c = 0.54$ であった。

作製した実験システムを用いて、実際に強制対流沸騰下での温度分布・気泡挙動の同時計測を行った。図3に結果を示す。図から分かるように、気泡と温度分布の同時計測に成功した。また、気泡内の温度が、液体中よりも上昇していることが確認できた。また気泡内温度は気泡の成長と共に上昇しており、気泡内でドライアウトしているものと考えられる。



(a) 気泡挙動 (実線：気泡輪郭)



(b) 温度分布 (実線：気泡輪郭)

図3 気泡挙動・温度分布同時計測結果
(a) 気泡挙動，(b) 温度分布

[発表論文]

1. T. Tamakoshi, Y. Matsuda*, O. Kawanami*, Y. Egami, T. Tao, H. Yamaguchi, I. Honda, T. Niimi, 46. Simultaneous measurement of temperature distribution and bubble behavior in surface boiling using TSP and stereo-viewer, *The 16th International Symposium on Flow Visualization, ISFV16-1132* (2014). 査読有. *: corresponding author.

【13】 神経電位計測プローブ・アナログフロントエンド融合に向けたアレイ化技術の研究

研究者 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 助教 秋田 一平

【研究の概要】

Brain-Machine Interface (BMI)は、ヒトの失った身体的機能を補完する技術としてその応用が期待されており、長期使用のためには完全埋込み型の神経電位計測システム実現が必須となる。本研究は、そのような応用に向けた電極アレイのための、超高密度信号処理回路(アナログフロントエンド:AFE)の開発を目的としており、特に、低消費電力化と小型化に焦点を当てている。まず、研究代表者が提案しているデジタル補正技術に基づくアナログ回路の高精度化手法について、その指導原理を明らかにした。また、本技術を神経電位アンプのみならず、A/D変換器への応用を試みることで、AFE全体の低消費電力化、小型化、高精度化を実現した。いずれの場合も5~10倍程度の精度改善を達成できることを試作LSIの評価を通じて確認している。最後に、これらの技術を基盤としたAFEアレイLSIの設計・試作について報告する。

【研究経過および成果】

【背景】

数十 μV 程度の微小な神経電位を計測することを考えた場合、そのための計測用センサデバイス(神経電極)の高性能化のみならず、その後の適切な信号増幅・処理を実行するためのリニアLSIは必要不可欠である。特に、LSIの製造ばらつきに起因する神経電位アンプのオフセット電圧の低減は必要不可欠な要求であり、一般にこれを補償するための比較的大規模なフィードバック系を組まなければならない。神経電位アンプのように、1チップ上に多チャンネル用意する必要があるような応用においては、チップ上で小面積にオフセット除去するための新たな回路技術を実現することは必要不可欠である。

本研究では、デジタル補正技術に基づくオフセット除去手法を以って、高精度神経電アンプのアレイ化実現を目指し、また、AD変換器における比較器へ適用し、有効性を確認することと、これに基づくアレイ

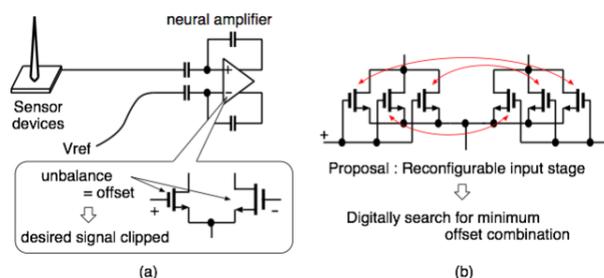


Fig.1 神経電位アンプにおける高精度化回路技術例：(a) アンプ入力段におけるオフセット電圧の影響. (b) デジタル補正技術を用いた再構成可能入力段化技術確立を目的としている。

【神経電位アンプの検討】

図1(a)の概略図に示すような神経電位計測システムにおいて、使用されるアンプの差動入力段における素子ばらつきに起因する特性ミスマッチ(オフセット電圧)により、出力に大きな誤差が生じることが問題となる。このとき、神経電位のような数十 μV 程度の微弱電圧を入力として想定した場合は、せいぜい数 μV 程度のオフセット電圧に抑えなければならない。本研究で提案した手法は、図(b)のように差動入力段の素子を多数分割して、それぞれを組換可能(再構成可能)な状態にしておくことで、個々の素子が比較的大きな

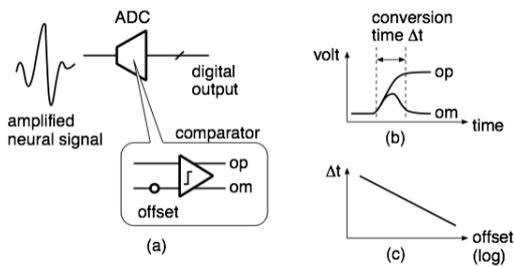


Fig.2 デジタル補正技術を用いた再構成可能入力段のAD変換器への適用(a): (b) オフセット電圧の時間遅延検出手法と(c) それらの関係概略

オフセット電圧を有していても差入力間のオフセット電圧が最小になるようにデジタル補正を行うことで、高精度かつ小チップ面積な神経電位アンプを実現可能となる。また、十分な精度を実現するための詳細な指導原理を明らかにした。

【AD 変換器の検討】

図 1 に示した再構成可能な差動入力段を AD 変換に利用される比較器(コンパレータ)に適用した例を図2に示す。比較器は、アナログ信号をデジタル信号変換する際に利用される回路素子であり、入力電圧差を検出してその大小を判別することで、デジタルの 0/1 を決定する重要な回路ブロックである。そのため、神経電位アンプ同様、ここにオフセット電圧が存在すると、誤判定が生じアナログ・デジタル変換結果に大きな誤差が発生してしまう。非線形回路である比較器に本提案技術を適用する際、線形回路である神経電位アンプと異なり、オフセットの検出方法に工夫が必要である。本技術においては、これを解決するために図 2(b)に示すように、比較器の判定確定時間が、オフセット電圧に依存する(図 2(c))ことを利用して、この時間計測を行うことで正確なオフセット電圧の計測と正確なデジタル補正技術を実現した。これにより、高分解能な AD 変換器実現への見通しを得た。

【多チャンネルシステムの設計】

以上の要素技術の知見に基づいて、多チャンネ

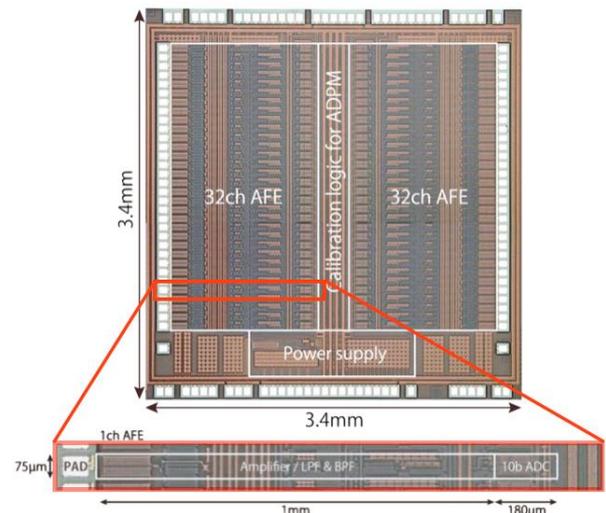


Fig.3 アナログフロントエンド (AFE) アレイLSIのチップ写真

ル神経電位計測システムに向けた、アナログフロントエンド(AFE)アレイ LSI の設計を行った。本試作 LSI は各チャンネルに神経電位アンプ、特性可変フィルタ(低域通過フィルタ/帯域通過フィルタの相互切り替え)、低消費電力 AD 変換器等を備えており、また、これらの回路における特性を所要仕様内に維持するためのデジタル補正回路を搭載している。

今後は、チャンネル数の増大、低消費電力化、高機能・高性能化、無線通信機能の追加、センサデバイスとの実装技術の開発などに取り組む予定である。

【発表論文】

1. Ippei Akita, Makoto Ishida, "A chopper-stabilized instrumentation amplifier using area-efficient self-trimming technique," *Analog Integr. Circuits Signal Process. (AICSP)*, vol.81, no.3, pp.571-582, Dec. 2014.
2. Okazawa Takayuki, Ippei Akita, Makoto Ishida, "A digitally calibrated dynamic comparator using time-domain offset detection," *Analog Integr. Circuits Signal Process. (AICSP)*, vol.81, no.3, pp.561-570, Dec. 2014.

【14】超小型イオンスラストを用いたイオンビーム中和機構の解明

研究者 横浜国立大学大学院システムの創生部門 准教授 鷹尾 祥典

【研究の概要】

イオンスラストは推進力を生み出すイオンビームとそのイオン源、および、イオンビームを電子ビームにより電氣的に中和する中和器(電子源)から構成されるが、イオンビームが電子によって中和される機構については未だによく分かっていない。本研究は、これまで超小型イオンスラストを対象に開発してきた粒子計算モデルを利用し、荷電粒子であるイオンと電子の挙動を詳細に解析した。その結果、これまで実験で直接観測することが難しかった、加速電極下流のビーム引き出し領域において空間電荷効果が軽減されていること、中性粒子が電子と衝突して電離することで低エネルギーのイオンが生成されていることを明らかにした。

【研究経過および成果】

イオンスラストは、高比推力と高精度な推力制御が可能なことから、小惑星探査機「はやぶさ」に代表される深宇宙探査のメインエンジン、静止軌道衛星の南北制御、そして、50 kg 級の超小型人工衛星の軌道制御に至るまで幅広く利用されている。

一般に、イオンスラストは推進剤ガス(Xe 等)を放電室でプラズマ化し、そのうちイオンをグリッド電極システムでビームとして引き出す一方、イオン排出に伴う宇宙機の帯電を防ぐため、グリッド下流では中和器を用いた電子放出が行われる。またイオン化されない推進剤の中性粒子も下流に排気される。このように、イオンスラスト下流ではイオン・電子および推進剤ガスの中性粒子が複雑に相互作用しながら中和現象が生じており、かつ、それが希薄なプラズマなため、実験的に計測することが難しい。そのため、中和機構の詳細については未だによく分かっておらず、中和器の最適な配置等は数多くの試行錯誤によって決まっているのが現状である。

著者はこれまで高周波誘導結合プラズマ源(ICP:

Inductively Coupled Plasma source) を利用した超小型イオン推進機の研究開発を数値計算および実験の両面から行ってきた。プラズマ生成からイオンビーム加速に至るまでは密接に連携しているため、これらを同時に解析できることが望ましい。本スラストは直径 1 cm、長さ 1 cm と従来のものより体積が 1000 分の 1 以下となり、計算時間の大幅な削減が可能である。これを利用し、プラズマの生成からイオンビーム加速までを、非物理的な仮定を行わずに統一解析が可能な粒子計算モデルを構築してきた。本研究ではこの計算モデルに中和電子を追加し、イオンビーム引き出しにおける中和電子の効果を解析できるようにすることで、中和機構の詳細を解明する足掛かりとする。

本研究で用いる粒子計算手法は ES PIC (Electrostatic Particle-in-Cell) であり、荷電粒子(電子およびイオン)と背景中性ガス粒子との衝突を Monte Carlo 法(MCC: Monte Carlo Collisions)によって加味している。モデルの詳細に関しては発表論文 1、2 に委ねる。

解析の一例として、図1に高周波周波数 100 MHz、吸収電力 0.1 W、放電室圧力 0.5 Pa、スクリーン電極電位 1000 V、加速電極電位 -100 V の基本計算条件における結果を示す。

イオン密度分布を見ると、イオンビームが加速電極システムにより集束され、加速電極下流直後で最もイオン密度が上昇している様子が分かる。ただし、イオン密度分布が示すように、加速電極システムによりイオンが加速される状況においても中性粒子との衝突が発生し、低エネルギーイオンが生じていると考えられる。その結果、宇宙空間に出て行ったイオンの一部が加速電極に戻って来ている様子も捉えられている。

中和電子を投入することで、電極下流におけるポテンシャルの低下が見られ、加速電極下流のビーム引き出し領域において空間電荷効果が軽減されていることが分かる。なお、加速電極がマイナスに設定されていることから、中和電子はそのポテンシャルに弾き返されている様子も確認できる。

イオンエネルギー分布を見ると、中和電子を投入することにより、電子が投入される位置 (20~30 mm) において、イオンエネルギーがやや減少している様子が分かる。これはイオン源から流れてきたイオン化されていない中性粒子が電子と衝突することにより電離し、低エネルギーのイオンが生成されていることが原因であると判明した。

加速電極下流の電子温度分布を見ると、電子密度が高くなっているコアの周囲、イオンビームの縁において周囲よりも温度が高くなっている。この電子温度の上昇については、現在のところ明確な原因はよく分かっておらず、今後の研究で明らかにしたい。

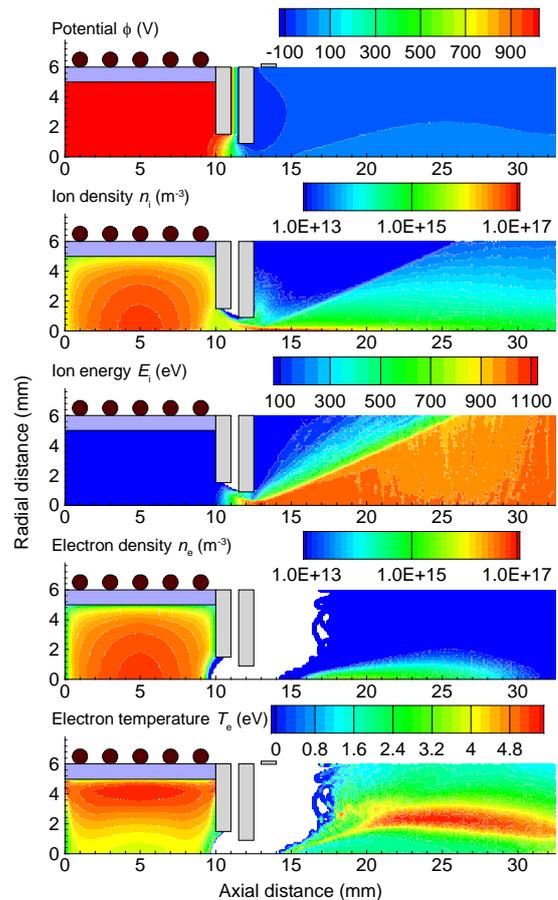


図1 基本条件における解析例。

電子は移動度が大きいので、電子の動きを広くにわたって調べる必要がある。今後、計算領域をさらに拡張して解析を行い、また、実験結果との比較検証を行うことで計算結果の妥当性を確認する予定である。

【発表論文】

1. 鷹尾祥典、山田郁美、江利口浩二、斧高一：超小型イオン推進機のイオン源からビーム引き出しまでの数値解析、第46回流体力学講演会／第32回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演集、2014、JSASS-2014-2130-A
2. 鷹尾祥典：イオンビーム引き出しにおける中和電子の効果、第58回宇宙科学技術連合講演会講演集、2014、JSASS-2014-4707

【15】次世代フィルムコンピュータに向けた部分的再構成可能回路の最適設計・応用設計技術

研究者 東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授 原 祐子

【研究の概要】

現在、シリコンデバイスに取って代わる新たなデバイス(ポストシリコンデバイス)の開発が進められており、低温で製造可能なプリンタブルデバイスは製造・応用の両面で高い期待を得ている。しかし、製造技術は未熟で動作不良率が未だ高く、大規模・複雑な CPU は製造が困難である。本研究では、従来のスペアなどを用いた空間冗長化手法に代わり、部分的に再構成可能な回路を用いて機能冗長性を実現することで、より高い面積効率で製造ばらつきによる歩留まり低下や経年劣化による故障を柔軟に吸収する回路設計手法を構築した。

【研究経過および成果】

現在、研究・開発されているポストシリコンデバイスは、低温で製造可能なもの(プリンタブルデバイス)等、資源・エネルギー問題の改善が期待されている。しかし、従来の CMOS に比べて製造技術は低く、安定して製造することは未だ困難である。これらのポストシリコンデバイスを使用する場合、回路規模が大きくなるほど製造が困難になるため、故障率が非常に低い場合には有効であった従来の空間冗長化(スペアの搭載)は、却って回路の信頼性を損ねる恐れがある。

本研究では、設計回路の耐故障性を改善し、ポストシリコンデバイスによる回路設計を加速するため、PPC (Partially Programmable Circuit) という新たな論理回路モデルを採用する(図1)。PPC は ASIC に部分的に再構成可能回路(Look-Up Table; LUT)を組み込み、回路中に故障があれば機能的に等価な論理を再構成し、予め挿入した冗長結線を使用することで故障を回避する。汎用的な LUT は ASIC の論理ゲートに比べ面積が大きい。少ない面積オーバーヘッドで耐故障性の高い PPC を構成するには、LUT の縮小(カスタマイズ)および設計パラメータの探索アルゴ

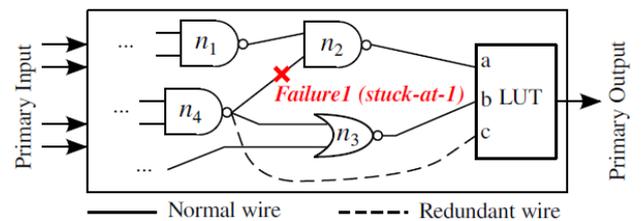


図 1: Partially Programmable Circuit

リズムの開発が必要である。

本研究では、まず、挿入した LUT が必要最低限の再構成可能性を実現しつつ、冗長な部品を削除することで、LUT の面積を削減する手法を開発した。ある LUT が図 2 に示す 5 つの論理関数を実現すれば十分である場合には、それらを統合して Final. Conf に対応する論理関数を作成し、その他の部品は削除する。図 2 の例の場合、LUT は図 3(a)から図 3(b)となる。図 4 に示す通り、この手法を適用した PPC は、従来の空間冗長化回路より少ない面積オーバーヘッドで同等の耐故障性を実現できた(論文[3][5])。

さらに、LUT および冗長結線の挿入箇所の探索を行うアルゴリズムを開発した。単一の PPC へ複数の LUT を挿入する場合、冗長結線の挿入箇所を全数探索すると、実際には採用されない解が多く含まれることが分かった(論文[2][4])。また、各 LUT に対して

	c		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		
a	b		0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	
0	0	*	1	0	1	*	1	1	*	*	*	*	M	1									
0	1	*	*	1	*	*	1	*	*	*	*	*	1	1									
1	1	1	*	1	*	1	0	1	*	*	*	1	1	M									
1	0	0	0	0	0	0	0	0	*	*	*	0	0	0									
				Conf ₀		Conf ₁		Conf ₂		Conf ₃		Conf ₄		Final Conf.									

図 2: LUT の論理関数の統合

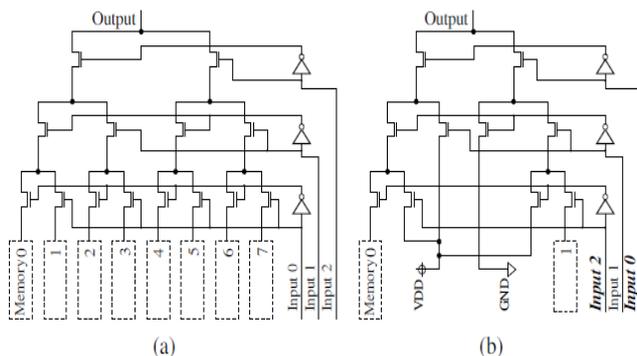


図 3: (a) 汎用的な LUT, (b) カスタマイズ後

効果的な(より多くの故障を回避できる)冗長結線の挿入箇所は、LUT のファンインコーンの中で LUT から3段以内に集中しており、回避可能な故障も同領域に集中しているという知見を得た。すなわち、LUT の挿入位置に対して、効果的な冗長結線の挿入箇所および回避可能な故障は比較的局所的な空間を探索すれば十分であることが分かった。これらの知見を生かし、探索範囲および故障回避の可否の判定領域を限定するアルゴリズムを開発した。PPC の耐故障性を損ねず、図 5 に示す通り、生成時間を約70%削減することができた(論文[1])。

今後は、本研究成果によって生成した演算器等を実用的なプロセッサに組み込み、さらなる発展・応用を目指す。

〔発表論文〕

1. 都築ら, "PPC における LUT 挿入位置最適化の定量的評価," 情報処理学会 DA シンポジウム, pp.67-72, 2014 年 8 月.

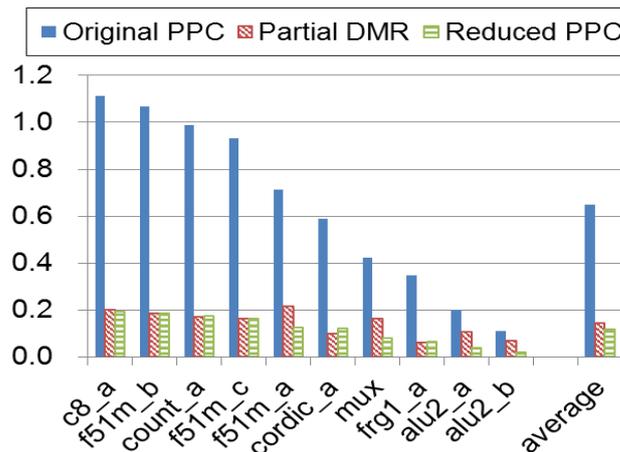


図 4: 等しい耐故障性を実現する際に要する面積オーバーヘッド (対オリジナル回路)

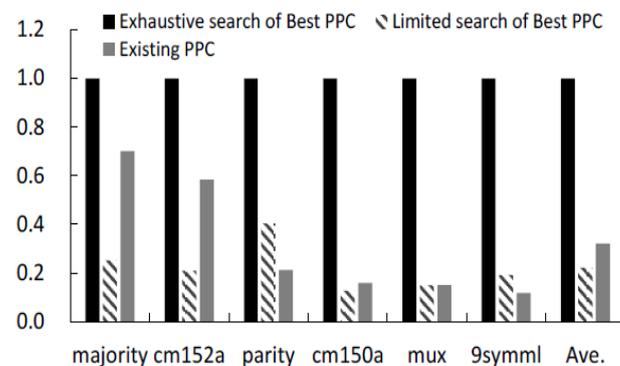


図 5: PPC の生成時間(対全数探索時間)

2. S. Sanae et al., "Better-than-DMR Techniques for Yield Improvement," International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, p.34, May 2014.

3. S. Sanae et al., "Novel Area-Efficient Technique for Yield Improvement," Electronic System-Level Design towards Heterogeneous Computing, Mar. 2014.

4. 早苗ら, "PPC に基づく高歩留まり回路の発見的設計手法," 情報処理学会デザインガイア, pp. 27-32, 2013 年 11 月.(優秀発表学生賞受賞)

5. 早苗ら, "Partially-Programmable Circuit の歩留まり向上のための LUT 最適化手法," 情報処理学会 DA シンポジウム, pp. 27-32, 2013 年 8 月.

【16】 真空中でのビーム工学に技術革新をもたらす plasma window の基盤技術開発

研究者 広島大学大学院工学研究科 職名 教授 氏名 難波慎一

【研究の概要】

大気と真空を隔てる新しい真空インターフェースとして期待されている高性能プラズマウィンドウを開発し、原理実証実験を行った。50 分間の連続プラズマ運転に成功し、電極の損耗がないことが確認された。また、分光計測からプラズマの電子温度は 20 A 時で 1 eV、密度は $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と世界最高性能クラスであることが判明した。今後、100 A まで放電電流を増加させることで電子温度 4 倍以上、密度 6 倍以上の高密度プラズマを発生させ、数年以内でプラズマウィンドウの実用化を目指す準備を進めている。

【研究経過および成果】

プラズマウィンドウは熱プラズマによって生成される高温高密度プラズマの圧力と大気圧力が均衡し、さらに高温ガス・プラズマの高い粘性により放電ガスの流れが大幅に抑制されることにより実現される。本研究ではプラズマ性能向上を目指し、改良型アーク放電(カスケードアーク)である TPD 型放電(Test Plasma by Direct current discharge)に着目した。これにより、従来のアーク放電源よりも高温・高密度プラズマ(目標電子温度:5 eV, 電子密度: 10^{17} cm^{-3} 以上)

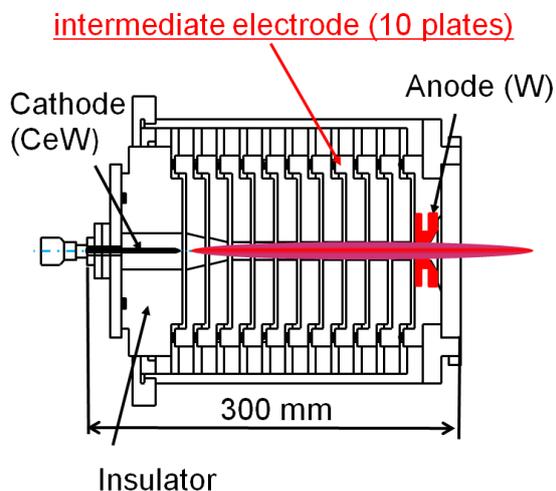


図1 TPD型カスケードアーク放電概略図。

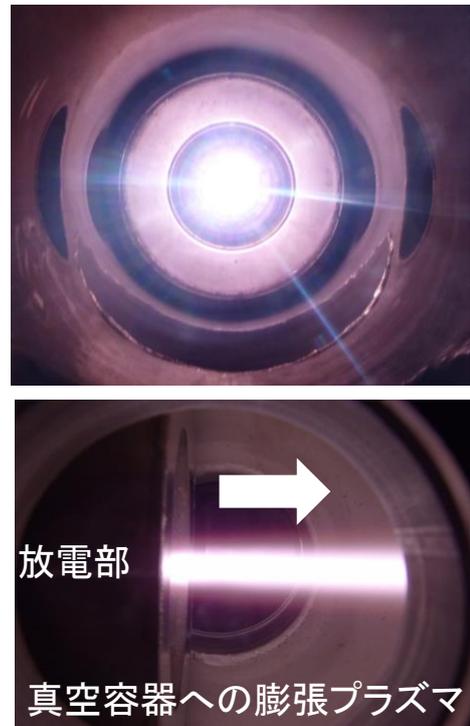


図2 エンドポート、横方向から見たプラズマ。を発生させ、プラズマウィンドウとしての大幅な高性能化を図ることを目的として装置開発を行った。

図1に装置概略を示す。陰極 3.2 mm 径 CeW ロッド、陽極は W、陰極・陽極間には Mo 製の中間電極を 10 枚設置した(フローティング)。陽極・中間電極の穴径は 3 mm で水冷されている。放電電流は最大で 100

Aであるが、電極冷却が十分ではなく20 A以下で実験を行った。図2に実際にプラズマを点火した際の写真を示す。グロー放電からカスケードアークに移行すると極めて強烈な発光を伴うプラズマが発生する。発生したプラズマの特性を調べるために、本研究では可視分光器を用いて計測したスペクトルを解析した。プラズマの電子温度は中性アルゴンのボルツマンプロットから、電子密度はAr I 4s-5p: 430 nmのシュタルク拡がりから評価した。

図3に放電部アルゴンガス圧力と放電電流の関係を示す。プラズマ発生直後に放電部のガス圧力が急激に上昇している。これはプラズマプラグイン効果によるもので、高温高密度プラズマの発生に伴い中性ガスとプラズマの粘性が増大したことでガスの流れが大きく抑制されたことを意味する。さらに電流値を増加させるとこの影響は大きくなり、膨張室と放電部の圧力比は最大で約1/140倍となった。高温ガスの粘性係数が高まったと考え、簡単な見積もりにより平均ガス温度は約1100 Kまで上昇したことになる。

一方、可視分光計測の結果、電流10 A時の電子温度は0.9 eV、20 Aで1.0 eVであることがわかった。

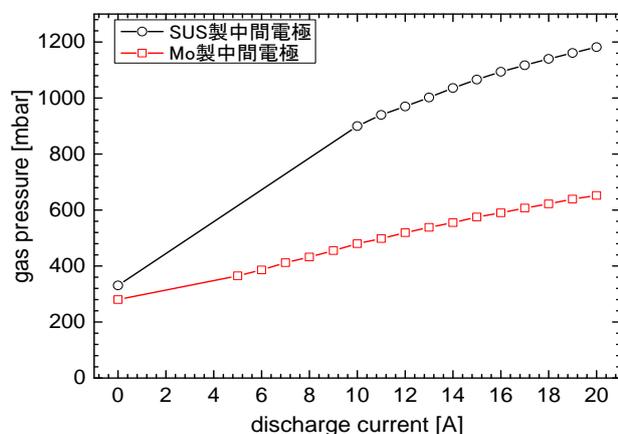


図3 放電部ガス圧力の電流値依存性。

さらにこの時の電子密度は10 Aで $4.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、20 Aで $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と決定することができた。今回のような低電流放電にかかわらず、極めて高い温度・密度のプラズマを発生させることができた。今後、より大型の冷却設備を有するクーリングタワーを整備し、放電電流を100 Aまで上昇させることにより世界最高性能のプラズマウインドウを実現する。さらには、数年以内で大気真空インターフェースとしての産業応用・実用化を目指す。

[発表論文]

1. “アルゴンカスケードアーク源の開発とその特性評価”, 難波慎一, 藤野脩平, 松岡雷士, 電気学会研究会資料 PST-14-009 pp. 43-46 (2014).
2. “TPD型放電を用いた大気圧カスケードアークプラズマの発生”, 難波慎一, 藤野脩平, 松岡雷士, 遠藤琢磨, 田村直樹, 日本物理学会春年次大会 2014.3.29 (東海大学).
3. “Development of high-temperature and high-density plasma source by a cascade arc discharge”, S. Namba, S. Fujino, K. Kozue, L. Matsuoka, T. Endo and N. Tamura, Plasma Conference 2014, 21PB-102 (CD-ROM).

【17】 遅延蛍光型エキサイプレックスにおける励起子拡散に関する研究

九州大学大学院工学研究院応用化学部門 助教 合志 憲一

【研究の概要】

有機 EL 素子において、励起三重項状態からの強いリン光が観測される Ir(ppy)_3 等のイリジウム錯体を用いて高い EL 発光効率が実現されている。近年、イリジウム錯体を用いずに、高い EL 発光効率を実現するための方法として、励起三重項状態を励起一重項状態へ逆項間交差(RISC)させ、RISC によって生じる遅延蛍光を EL に利用する方法が提案されている。これまでの研究において、ドナー性分子とアクセプター性分子間で形成される分子間励起状態であるエキサイプレックス状態が高い RISC 効率を有しており、遅延蛍光を発することを報告してきた。本研究においては、この遅延蛍光型エキサイプレックスの励起子拡散に関する研究を行った。

【研究経過および成果】

三重項励起子注入層、エキサイプレックス形成層、及び、三重項励起子検知層からなる積層薄膜を用いて励起三重項状態の励起子拡散距離の定量化を行った。図 1 に、本研究に用いるサンプル構造の模式図を示す。サンプルは様々な膜厚 L のエキサイプレックス形成層が三重項励起子注入層と三重項励起子検知層に挟まれる積層構造を有している。ここで、三重項励起子注入層には青色のリン光材料 FIr6 を、三重項励起子検知層には緑色のリン光材料 Ir(ppy)_3 を用いた。三重項励起子注入層が薄膜表面にある場合、光励起によって表面の青色リン光材料において形成された三重項励起子が、エキサイプレックス層を三重項励起子が拡散し、中間の緑色リン光材料へとエネルギー移動するため、 Ir(ppy)_3 の発光が強くなる。従って、エキサイプレックス形成層の膜厚 L を変化させることによって、エキサイプレックス中の三重項励起子の拡散距離が検知できる。

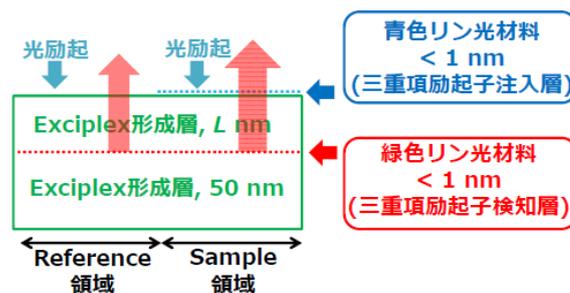


図 1: 本研究に用いたサンプル構造

図 2 に三重項励起子注入層である FIr6 薄膜の積層層によって増加した Ir(ppy)_3 の発光強度の割合をエキサイプレックス層の膜厚に対してプロットした図を示す。この得られた実験データを指数関数によってフィッティングすることによって遅延蛍光エキサイプレックスの三重項励起子は $\sim 2.8 \text{ nm}$

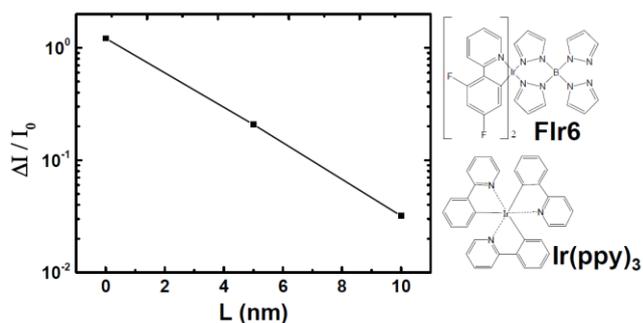


図 2: エキサイプレックス層の膜厚に対する FIr6 によって増加した Ir(ppy)_3 の変化率

程度と見積られ、エキサイプレックスの三重項励起子の拡散は小さいことが示唆された。見積られた拡散距離には、Fir6 から Ir(ppy)₃ への直接のフェルスター型エネルギー移動も含まれている可能性があると考えられる。そこで、別の手法によっても、エキサイプレックスの三重項励起子拡散について検討を行った。

蛍光色素 TBRb をドナー性分子 m-MTDATA とアクセプター性分子 PPT で構成されるエキサイプレックス形成層にドーピングした薄膜の発光特性について検討を行った。図 3 に TBRb の濃度がそれぞれ異なる TBRb : m-MTDATA : PPT = x : 5 : 95-x (モル比) のフォトルミネッセンス(PL)スペクトル、過渡 PL 特性、及び PL 量子収率を示す。TBRb をドーピングすることによって 500nm 付近のエキサイプレックス発光は著しく減少し、560nm 付近の TBRb の発光が強くなる。それに伴い PL 量子収率も向上する。エキサイプレックスの発光スペクトルと TBRb の吸収スペクトルの間には大きな重なりがあり、エキサイプレックス一重項励起子から TBRb の一重項励起状態へのエネルギー移動が起きると考えられる。また、エキサイプレックスの PL 量子収率に比べて、TBRb の PL 量子収率は高いため、TBRb のドーピングによって混合薄膜の PL 量子収率が増加していると考えられる。加えて、過渡 PL 特性において、TBRb からの遅延蛍光が観測された。これはエキサイプレックスの三重項励起子が RISC によってエキサイプレックスの一重項励起子に変換後、TBRb へのエネルギー移動していることを意味する。TBRb の濃度が 2mol% に増加させた場合においても、この遅延蛍光は観測された。TBRb の濃度が 2mol% 程度の場合 TBRb

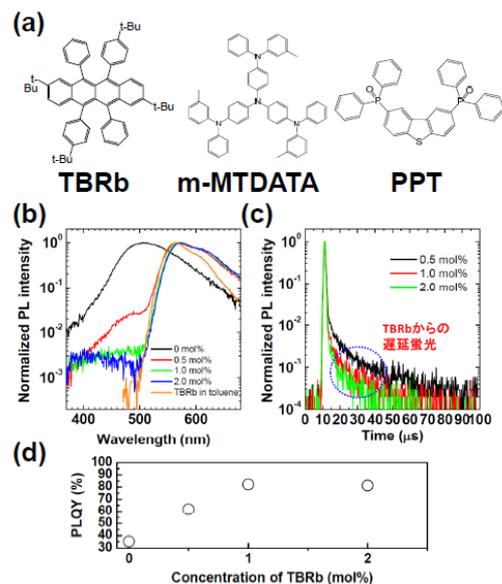


図 3: TBRb : m-MTDATA : PPT 混合膜(x mol% : 5 mol% : 95-x mol%)における光学特性。(a)分子構造、(b)PL スペクトル、(c)過渡 PL 特性、(d)PL 量子収率

の平均分子間距離は~4 nm である。エキサイプレックス間の三重項励起子距離が 2 nm より大きい場合、エキサイプレックスの三重項励起子は蛍光材料 TBRb の三重項状態へエネルギー移動して、遅延蛍光を発することなく励起子は消光すると考えられる。従って、過渡 PL 特性の結果はエキサイプレックスの三重項励起子拡散距離が~2 nm 以下であることを示唆する。

遅延蛍光型エキサイプレックスの EL 発光効率を更に向上させる方法として、エキサイプレックスから放射確率の高い蛍光色素へエネルギー移動させることが考えられる。そのためには、エキサイプレックスから蛍光色素へのフェルスターエネルギー移動は発光効率を低下させるため、抑制する必要がある。本研究によって、エキサイプレックスの三重項励起子拡散が十分に短いことが明らかになった。従って、エキサイプレックスから蛍光色素へエネルギー移動を利用して、有機 EL 素子の高効率化が原理的には可能であると考えられる。

【18】 表面効果を考慮した光学デバイスのレベルセット形状表現に基づく トポロジー最適化法の開発

研究者 信州大学工学部 助教 藤井雅留太

〔研究の概要〕

本研究ではウィスパリングギャラリーモードなど、表面近傍での光学現象を利用した光学デバイスのトポロジー最適化手法を開発した。レベルセット形状表現に基づいたトポロジー最適化をベースとして明瞭な誘電体の境界を得ることにより、トポロジー最適化の過程で表面近傍での光学現象を考慮した設計手法を開発した。開発した表面近傍での光学現象を考慮したトポロジー最適化手法により、ウィスパリングギャラリーモードを利用したマルチディスク共振器のトポロジー最適化を行った。最適化により得られたマルチディスク共振器は初期構造と比較し、およそディスク内の電場強度がおよそ5倍となり、Q値でおよそ4倍の改善が見られた。

〔研究経過および成果〕

近年、金属や誘電体の表面近傍での光学現象に強い注目が集まっている。ウィスパリングギャラリーモードや表面プラズモンモラリトンなどの光学現象が代表的であり、それら表面近傍での光の挙動を利用したディスクレーザーやプラズモニック結晶など、従来のデバイスから大きく性能を向上させたデバイスが提案されている。これらのデバイスの性能はその構造に強く依存するため、デバイスの適切な設計が性能の向上に不可欠である。

最適設計手法は数学的根拠に基づき、所望の性能を実現することが可能なデバイスの形状や形態を設計する手法であり、その中でもトポロジー最適化は構造内に新しい孔の創出を許容することが可能であり、従来の最適化手法と比較して最も自由度の高い最適化手法である。それゆえ、これまでになかった高性能なデバイスの設計が可能となり得る。一方で、トポロジー最適化により得られる最適化構造はグレースケールと呼ばれる誘電体と空気の間媒質を含むため、グレー

スケールを含む最適化構造を作成することは困難であった。

本研究では有限要素モデル化の際に誘電体境界を正確に求めることで、トポロジー最適化の過程において誘電体境界付近での光学現象を正確にシミュレーションし、境界付近での光学現象を考慮した光学デバイスのトポロジー最適設計法を開発した。誘電体境界付近の格子内において格子点上に与えられる異符号のレベルセット関数を線形に補完することで、レベルセット関数がゼロとなる誘電体境界を求め、その境界に沿って有限要素モデルを作成した。

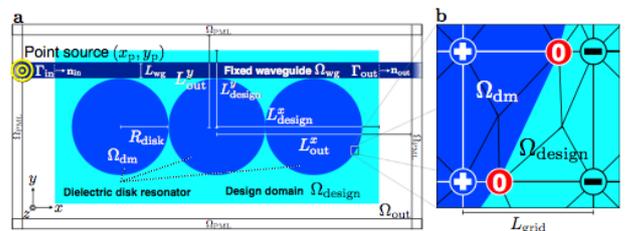


図1. 最適化スキームとレベルセット関数から得た誘電体境界
図1に本研究で最適化したマルチディスク共振器の最適化スキームを示す。導波路内に光源を想定し、導波路内を伝搬する光をディスク内に取り込む。その

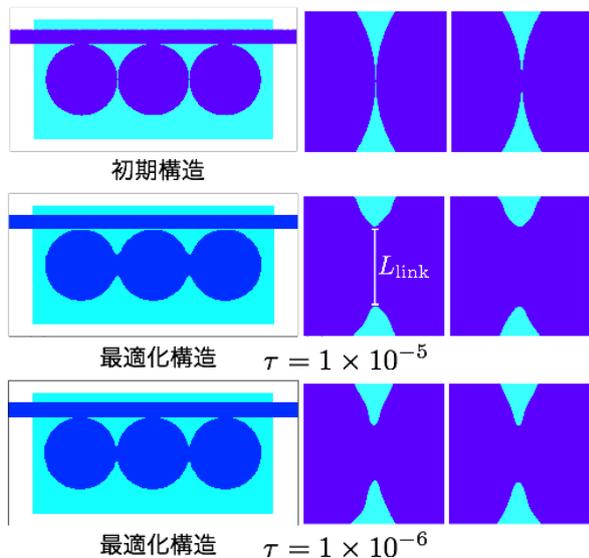


図2. 初期構造と最適化構造：全体とディスク間のリンク部際、ディスク内の電場強度が最大となるよう、トポロジー最適設計を行った。

図2は最適化の際の初期構造と得られた最適化構造を示している。初期構造トポロジー最適化により得られた最適化構造を比較すると、全体構造に大きな変化は見られなかった。しかし、ディスク間のリンク構造が変化しており、隣接するディスクどうしが滑らかにつながっている。単体ディスク内でのウィスパリングギャラリーモードの共振にはディスク間で反射が必要であり、マルチディスク全体でのウィスパリングギャラリーモードが連結した回路による局在を高めるにはディスク間における透過が必要となり、両者は競合する。このリンク構造の幅は誘電体内での波長と同スケールであり、ディスク間における透過と反射の適切な割合を実現していると考えられる。

図3は初期構造と得られた最適化構造内での電場とその強度を示している。誘電体表面に沿ったウィスパリングギャラリーモードがディスク間で連結し、回路を形成しているのが観察される。ディスク内の電場強度は初期構造と比較して4.8倍、5.4倍まで高めることが可能となった。図4に共振周波数付近での導波路

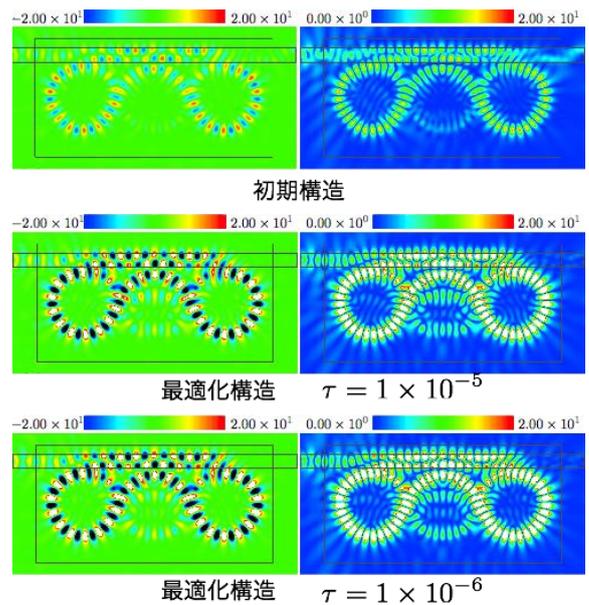


図3. 構造内の電場（左）と強度（右）

の透過率を示す。共振器の性能を示す指標であり、共振の鋭さを示すQ値は初期値と比較して4倍まで向上することができた。

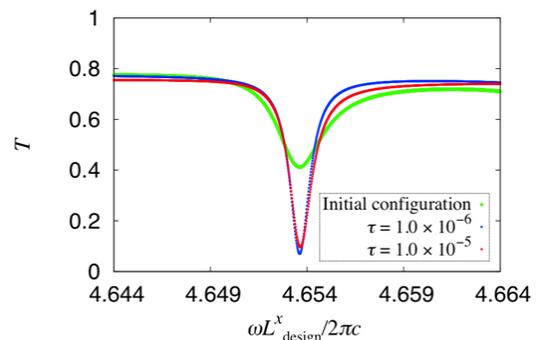


図4. 共振周波数付近での透過率

〔発表論文〕

1. G. Fujii, T. Ueta, M. Mizuno, and M. Nakamura, Topology optimized multiple-disk resonators obtained using level set expression incorporating surface effects. Optics Express (submitted).
2. Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta, Mamoru Mizuno, and Masayuki Nakamura, Level set-based topology optimization for whispering gallery mode resonator circuits incorporating surface effects, Proceedings of META 2014, pp. 182, Analytical and numerical modelling.

【19】 持ちやすさの向上を目的とした製品形状の最適設計法

研究者 首都大学東京システムデザイン学部 助教 茅原 崇徳

【研究の概要】

使用者が持ちやすいと感じる最適な製品形状を設計する手法について検討を行った。本研究では、機械や道具のハンドル部を想定した把持物体の上面直径、下面直径、断面の楕円率、および中心軸の傾斜角を形状パラメータとして設定し、形状パラメータが持ちやすさに与える影響を定量的に評価した。その結果、形状パラメータ間に交互作用が存在することを確認した。そこで、形状パラメータの交互作用を考慮して持ちやすさ評価関数の応答曲面を作成し、作成した応答曲面を最適化して持ちやすい最適形状を求めた。さらに、導出した最適形状のモックアップを作成して実証実験を実施し、応答曲面から得られた最適解の妥当性を確認した。

【研究経過および成果】

人間が使用する工業製品の多くは手を用いて操作されるため、持ちやすさを向上させることは製品価値を高めることに大きく寄与する。本研究では、機械や道具のハンドル部を想定した物体を対象とし、持ちやすい把持物体の最適形状を求めた。

はじめに、把持物体の形状を変化させる形状パラメータを設定し、二水準要因実験により持ちやすさの主観評価を計測し、形状パラメータの交互作用の有無を確認した。設定した形状パラメータは上面直径 d_U 、下面直径 d_L 、断面の楕円率 e 、および中心軸の傾斜角 θ の 4 つである(図 1)。上面直径と下面直径は 30, 50 mm、楕円率は 1.0, 0.5、傾斜角は 0, 30° の二水準とした。被験者は男子学生 5 名であった。

主観評価値を分散分析した結果、2 つの交互作用 ($d_U \times \theta$ と $e \times \theta$) の影響が有意水準 5% で有意であることを確認した。したがって、持ちやすい最適形状を求めるためには各形状パラメータを単独で最適化するのではなく、形状パラメータの交互作用を考慮して最適形状を求める必要があることが明らかになった。

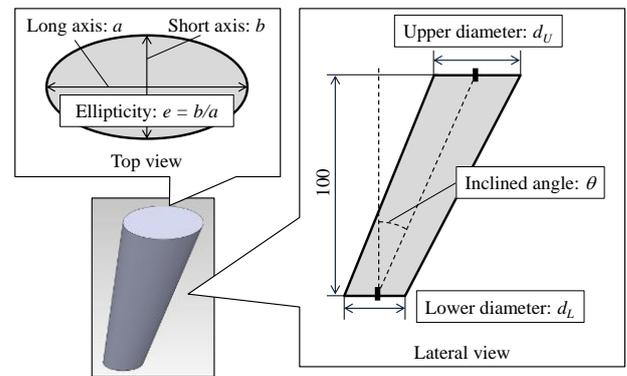


図 1 本研究で設定した形状パラメータ

次に、形状パラメータが持ちやすさに与える影響の非線形性を考慮するために三水準で実験を行った。なお、実験条件数を削減して効率的に実験を実施するために、実験計画法における直交表 L_{27} に基づいて実験条件を決定した。上面直径と下面直径は 30, 40, 50 mm、楕円率は 1.00, 0.75, 0.50、傾斜角は 0, 15, 30° とした。被験者は男子学生 6 名と女子学生 6 名の計 12 名であった。

持ちやすさに対する個人差の確認を目的として、計測した主観評価値をクラスタ分析した結果、被験者が 2 つのクラスタに大別されることを確認した。しかし、出現した 2 つのクラスタと被験者の人体寸法との間に

明確な関係は確認できなかった。

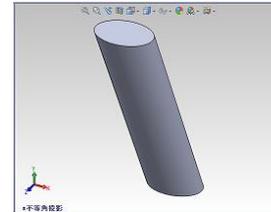
4 つの形状パラメータを説明変数とし、交互作用を考慮した二次多項式により被験者全体、第一クラスタ、および第二クラスタの主観評価値の応答曲面を作成した。応答曲面を最適化して求めた最適形状を表 1 と図 2 に示す。第一クラスタの最適形状は、上面直径よりも下面直径が大きく、断面は円に近い形状である。このため、掌を含む手全体が把持物体と接触する。つまり、第一クラスタの被験者は接触面積が最大となる形状を持ちやすく感じると考えられる。第二クラスタの最適形状は、下面直径が小さく、断面は扁平な楕円である。このため、指の腹が掌と対向し、指先がより大きな力を発揮できる。したがって、第二クラスタの被験者はより大きな握り力を発揮できる形状を持ちやすく感じると考えられる。なお、各最適解の持ちやすさは直径 40 mm の単純な円筒と比較して 20~30% 改善されていることを確認しており、本研究で提案した手法により持ちやすい形状を導出できていると考えられる。

応答曲面から得られた最適形状の妥当性について検討するために、被験者全体と第一、第二クラスタの最適形状のモックアップを作製して主観評価を計測した。その結果、応答曲面から得られた結果と比較的精度よく一致していた。したがって、応答曲面から求めた最適形状は妥当であると考えられる。

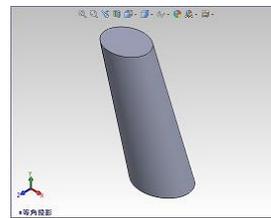
本研究を通して、実験計画法を応用して持ちやすい最適形状を効率的に導出する手法を提案することができた。今後は、筋電図などの客観的な生体信号を用いて持ちやすさの評価の信頼性を高める手法の検討や、既存の製品の形状データから持ちやすさに影響を与える形状パラメータを効率的に選定する手法について検討を行う予定である。

表 1 被験者全体と各クラスタの最適解

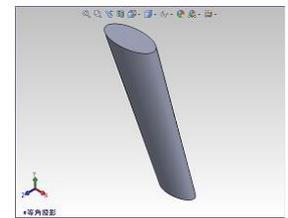
Design variable	All	First cluster	Second cluster
d_u [mm]	39.9	40.6	43.3
d_L [mm]	37.6	50.0	30.0
e	0.737	0.815	0.500
θ [°]	20.0	19.4	23.9



(a) 被験者全体



(b) 第一クラスタ



(c) 第二クラスタ

図 2 最適解の CAD モデル

〔発表論文〕

1. Chihara, T., Ohyama, S., Seo, A., Shape optimization of grasped object for improving ease of grasping, 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, Paper No.0123, Gyeongju, Korea, May 25-29, 2014
2. 茅原崇徳, 大山修斗, 瀬尾明彦, 持ちやすさの向上を目的とした把持物体形状の最適設計, 日本機械学会 第 11 回最適化シンポジウム 2014, Paper No.1201, IT ビジネスプラザ武蔵, 2014 年 12 月 12-13 日 (in CD-ROM)
3. 茅原崇徳, 大山修斗, 瀬尾明彦, 持ちやすさの向上を目的とした把持物体の形状最適設計, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.820, DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0391, 2014.12

【20】 超高速光電子デバイス応用に向けた半導体エピタキシャル構造の 非平衡キャリア輸送に関する研究

研究者 兵庫県立大学大学院物質理学研究科 助教 長谷川尊之

〔研究の概要〕

静電場を印加した半導体に光励起されたキャリアは、フォノン散乱がほとんど生じない数百フェムト秒の間、飽和速度以上に加速する。この高速なキャリア輸送過程は、同じ時間スケールで生じる光学応答(キャリア励起に起因した過渡反射率変化)の応答時間を高速化する。本研究では、キャリア輸送過程が超高速光学応答に及ぼす効果を超高速分光法によって包括的に調べ、超高速光応答材料への応用の観点から、超高速光学応答の制御に関する指針を得ることを目的とした。

〔研究経過および成果〕

光通信技術の発展に向けた超高速光応答材料の開発が精力的に行われている。半導体を用いた従来の研究では、複雑なナノ構造を主対象にしており、高い作製技術が必要であった。本研究で対象としたアンドープ GaAs/n 型 GaAs (*i*-GaAs/*n*-GaAs) エピタキシャル構造は、*i*-GaAs 層に厚みに依存する電場が生じており(図1(a))、*i*-GaAs 層の光励起電子は *n*-GaAs 層に向けて輸送される。このキャリア輸送過程を *i*-GaAs 層厚で制御することで、超高速の光学応答が生じることを先行研究で明らかにした。本研究では、光励起条件を幅広く変化させ、キャリア輸送による超高速光学応答の制御について包括的に調べた。

試料は、有機金属気相成長法によって作製した *i*-GaAs(*d* nm)/*n*-GaAs(3 μm, $n_D=3\times 10^{18}$ cm⁻³) 構造である。*i*-GaAs 層の内蔵電場強度は、*d*=100, 200, 500, 1200 に対して、49, 28, 12, 6 kV/cm である。光応答特性の観測は、Ti:sapphire レーザー(~70 fs)を光源とした反射型ポンプ・プローブ法を用いた。図1は、*i*-GaAs(*d* nm)/*n*-GaAs 試料、及び *i*-GaAs バルク試料

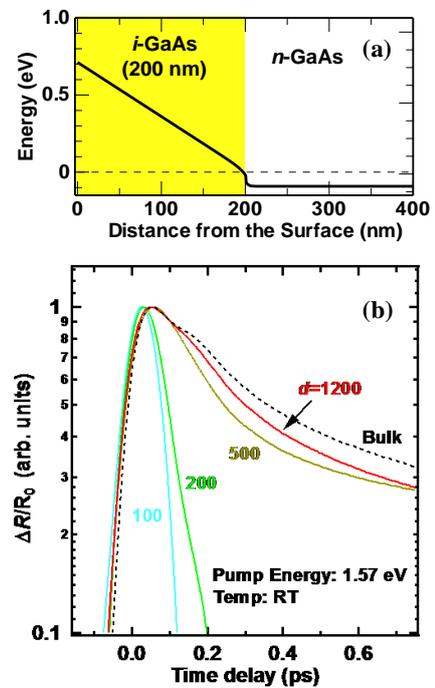


図1 (a) 伝導帯底のポテンシャル構造の計算結果
(b) 室温における過渡反射率変化の測定結果

における室温かつ励起光エネルギー1.57 eV での過渡反射率変化を示す。キャリア輸送の効果は、1 ps 以下の時定数をもった速い成分に現れる。図1(b)より、*d* が 200 nm 以下になると、減衰時間が極端に短くなることが示されている。この振る舞いは、*i*-GaAs 層が薄い(内蔵電場強度が高い)ことにより、フォノン散乱

が生じないバリスティックな輸送過程が支配的になることを反映している。以下では、3つのアプローチからキャリア輸送効果について調べた結果を述べる。

(a) 励起光強度依存性

全試料の過渡反射率変化を励起光強度に対して測定した結果、減衰時間は励起光強度にほとんど依存しないことが分かった。この実験事実は、キャリア輸送効果が、キャリア間散乱やキャリアによる内蔵電場の遮蔽に影響を受けないことを示している。

(b) 励起光エネルギー依存性

$d=200$ 試料の超高速性は、約 1.7 eV の励起光エネルギーにおいて消失することが分かった。この振る舞いは、伝導帯の Γ バレーからエネルギーの高いLバレーへの励起電子の散乱(谷間散乱)に起因していると考えられる。Lバレーに散乱された電子は、有効質量が大きくなるため、速度が低下する。

(c) 試料温度依存性

(b)で示唆された谷間散乱は、フォノン密度および電場強度が高いほど確率が大きくなると予測される。本試料では、*i*-GaAs 層におけるフォノン密度および内蔵電場強度の両方が、試料温度の上昇にともなって高くなる。したがって、温度が高いほど谷間散乱の確率が大きくなる。谷間散乱を考慮したモンテカルロシミュレーションから、 $d=200$ 試料における電子平均速度は、層厚が薄いことを反映して、極低温から室温の範囲で大きく変化しないのに対し、 $d=500$ 試料では、温度上昇につれて低下することが示された。図2は、過渡反射率変化の温度依存性の測定結果である。尚、挿入図は減衰時間を温度に対してプロットしたものである。 $d=200$ 試料では、全温度領域で高速な光学応答(短い減衰時間)が観測された。一方、 $d=500$ 試料では、温度上昇にともなって応答時間が長くなる

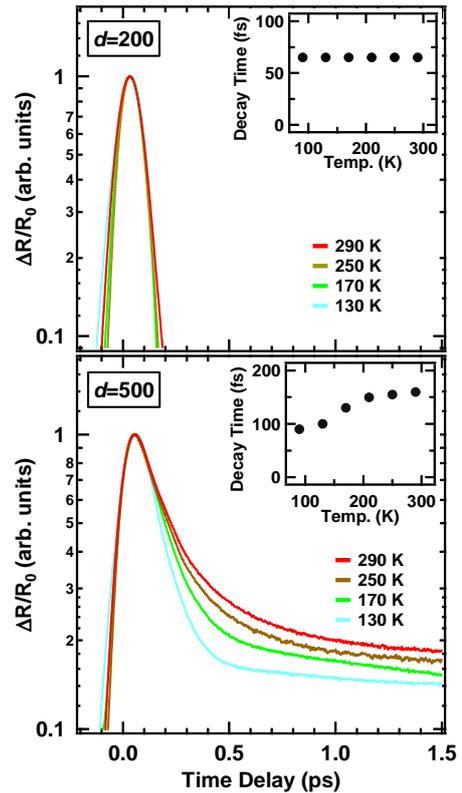


図2 過渡反射率変化の試料温度依存性の測定結果

ことが観測された。これらの実験結果は、シミュレーションの結果と整合が取れている。つまり、 $d=500$ 試料では、温度上昇につれて谷間散乱が支配的になり、輸送速度が低下する。その結果、減衰時間が長くなったと考えられる。以上に述べた(a)(b)(c)の結果から、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造の超高速光学応答を制御するためには、谷間散乱の確率を決める物理量を制御することが有効であることが分かった。

[発表論文]

1. T. Hasegawa *et al.*, "Ultrafast optical responses caused by nonequilibrium transport process of carriers in GaAs epitaxial structures" P06, International Symposium on Recent Progress of Photonic Devices and Materials (2014/11, Kobe).

【21】 運動論的アプローチによるアクティブ粒子の集団挙動に対する シミュレーションモデルの開発

研究者 兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科 准教授 安田 修悟

〔研究の概要〕

航空宇宙工学やマイクロ工学における非平衡気体の振舞いを記述する理論として古くから運動論(ボルツマン方程式)が有名である. 最近, この運動論を微生物や細胞の集団が造る流体现象や, 昆虫や小動物の群れ運動を記述するモデルとして用いる研究がいくつか報告されている. 本研究では, 運動論を基にした走化性バクテリアに対するモンテカルロシミュレーション法を開発した. 開発したモンテカルロシミュレーションは, 走化性バクテリアのマイクロチャネルにおける集団移動(バクテリア密度の走行波)を精度よく再現することに成功した.

〔研究経過および成果〕

近年の細胞工学や再生医療の急速な発展と関連して, 最近, 細胞や微生物が示す複雑な流体现象についての研究が世界的に盛んに行われている. 細胞や微生物(これらをアクティブ粒子と呼ぶ)は一様な環境下においても自らの駆動力によって対称性を破った持続的な運動や変形を起し, その結果, それらの個体の集団挙動では, 個体の大きさをはるかに超える大規模な協調運動や複雑な構造形成が生じる. 例えば, バクテリアの集団移動やバイオフィーム形成などがある.

このような生物流体を記述する数理モデルとしては, 1970年代に Keller & Segel が提唱した走化性バクテリア集団に対する反応・拡散モデルが有名である. このモデルは, 流体の巨視的な物理量の変化を連続変数として記述する連続体モデルであり, モデルに含まれるパラメータを調整することによって実験結果を上手く再現できることが報告されている. しかしモデルに含まれる複数のパラメータは実験や理論からは直接求めることができないという問題がある. 一方, 個体の

運動や個体間の相互作用に適切なルールを定め, 多数の個体の運動を追跡するマイクロモデルも幾つか提唱されているが, 生物の運動は個体によって分布(バラつき)があり, また確率的でもあるため, 個体の運動ルールを決めることが一般に困難である. 流体を構成する個体の多様性(分布)や運動における確率的な過程を取入れたメゾスケールモデルの構築, ミクロな運動とマクロな現象の階層間を相互接続する問題は未解決な重要課題である.

近年, 運動論モデル(ボルツマン方程式)を用いてアクティブ流体を解析する研究が欧米を中心に幾つか報告されている. [1-5] 運動論モデルでは, アクティブ粒子の速度分布や個体の特徴・性質(大きさや年齢など)のバラつきを分布関数を用いて表し, その分布関数の時間発展を記述するモデルである. 例えば, 文献[3]では, バクテリア懸濁液をモニタリングして観測した走化性バクテリアの運動に関する統計データを元に, 運動論モデルを導出し, それを用いて, 実験で観測される, マイクロ流路におけるバクテリアの集団移動現象(バクテリア濃度の1次元走行波)

を再現することに成功している。

文献[3]で導出されたボルツマン方程式は、より複雑な走化性バクテリアの集団挙動を記述できるモデルであると考えられるが、このモデルの数値解析は非常に困難であり、このモデルをより一般的な問題に適用するためにはより簡便で効率の良いシミュレーション手法の開発が必要とされる。そこで本研究では、文献[3]で導出されたモデルを基に、より一般的な問題にも適用することが可能なモンテカルロシミュレーション法の開発を行った。

モンテカルロシミュレーションの詳細は、[学会等での成果発表]1 の講演原稿において参照されたい。開発したモンテカルロシミュレーションは、走化性バクテリアのマイクロチャネルにおける集団移動(バクテリア密度の走行波)を精度よく再現することができた。例えば、密度走行波の移動速度については実験のものとの差が、僅か3%以下であり、シミュレーションが実際のバクテリアの集団挙動を精確に再現できるものであることが実証できた。

先に述べたようにアクティブ粒子集団に対する運動論モデルの数値研究は、欧米において幾つかの先行研究はあるものの、国内においては著者の知る限りまだ前例がない。本研究のこれまでの成果については、[学会等での成果発表]で示す 1 件の国内学会での発表、3 件の国際会議やワークショップでの発表(うち 2 件は招待講演)を行っており、特に最近になって少しずつ注目を持たれるようになってきている。現段階での結果としては、まだ多くのものがなく、また解決すべき課題も幾つか残している状況ではあるが、本研究では、今後、発展する可能性のある新たな研究分野を開拓することにつながる第一歩を踏み出したという点で、重要な研究成果を挙げることがで

きたと考えている。

参考文献

- [1] B. Perthame, *Transport Equations in Biology* (Birkhäuser Verlag, Basel, 2007).
- [2] J. Satragosti, et. al., *PLoS Comput. Biol.* **6**, e1000890 (2010).
- [3] J. Satragosti, et. al., *PNAS* **108**, 16235 (2011).
- [4] D. Saintillan and M. J. Shelley, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 178103 (2008).
- [5] B. Ezhilan, M. J. Shelley and D. Saintillan, *Phys. Fluids* **25**, 070607 (2013).

[学会等での成果発表]

1. 安田修悟, “運動論に基づく微生物集団挙動のモンテカルロシミュレーション”, 第28回数値流体力学シンポジウム(東京), 2014年12月.
2. Shugo YASUDA, “A Monte Carlo Simulation on the basis of the kinetic theory for chemo-tactic bacteria”, International Conference on Mathematical Modeling and Applications 2014 (Tokyo), January 2015. [Poster]
3. Shugo YASUDA, “A Monte Carlo simulation on the basis of the kinetic theory for chemo-tactic bacteria”, Seminar series on Fluid Dynamics for Non-equilibrium phenomena (Kyoto), January 2015. [Invited]
4. Shugo YASUDA, “A Monte Carlo simulation on the basis of the kinetic theory for chemo-tactic bacteria”, Mathematical Analysis on Fluid Dynamics and Conservation Laws (Tokyo), February 2015. [Invited]

【22】 不整地環境での探査を目的とした弾性球形車輪を用いた全方向移動体に関する研究

研究者 千葉工業大学工学部 准教授 青木 岳史

〔研究の概要〕

本研究では不整地環境で全方向移動を実現し、かつ小型・軽量・安価で製作可能な小型全方向移動体 Eggbeater の開発を目的とする。不整地環境で全方向移動が可能であると、踏破する障害物へのアプローチ方法の選択肢が増えるため移動性能向上への効果が高いと考える。しかし従来研究されてきた全方向移動機構は複雑な構成であるために小型移動体へ適応させることが難しく、また移動時に衝撃吸収を必要とする不整地環境での使用は困難であった。そこで本研究では新たに弾性球形車輪を提案し、弾性球形車輪搭載した脚機構で構成する Eggbeater の開発を行ってきた。本助成金の研究では、実環境下の走行に必要な(a)安定した不整地走行と障害物へのアプローチ方法の構築、(b)障害物踏破のための動作の確立、(c)耐衝撃性能と移動性能を両立し実環境で使用できる機体の試作を目標として研究を進めた。

〔研究経過および成果〕

1. Eggbeater2 の開発

先行研究で開発した 3 輪型全方向移動ロボット Eggbeater は弾性球形車輪によって全方向移動を実現した。弾性球形車輪は駆動軸に対し平行に超弾性ロッドを配置して球型を形成し、ロッドの線方向に対しては滑りやすく、車輪の垂直方向に対しては滑りにくい特性によって車輪の駆動力を地面へ伝達することができる。そして 3 つの車輪の回転方向と速度を制御することにより全方向移動が可能となる。Eggbeater は摩擦特性を利用して全方向移動を実現しているため、進行方向を 1 方向へ決めて直進するよりも、全車輪で常に同程度の滑りが発生するように自転しながら直進の方がロッドに編摩耗が発生しにくく耐久性などの観点から車輪に好ましいと考える。また Eggbeater で踏破できる段差の高さは弾性球形車輪の直径の 2 割程度と低く、段差踏破のために新たな機構の付加が必要であった。そこで常に自転運動を伴いながら移

動を行い、外界センサによって求めた踏破する障害物の位置情報を用いて、1 脚ずつ障害物へ車輪を乗り上げさせる踏破動作について検討を行った。図1に示す Eggbeater2 は本研究で試作した全方向移動体であり、直径 100mm の球形弾性車輪を 4 輪持つ。Eggbeater2 は 90 度の角度で 2 輪を配置した 2 つの胴体部から構成し、この胴体部を中央の能動自由度で連結して相対的に回転させる事ができる。各車輪は 1 軸の能動自由度で構成する脚を持ち、常に胴体を水平に保つように姿勢を制御することができる。

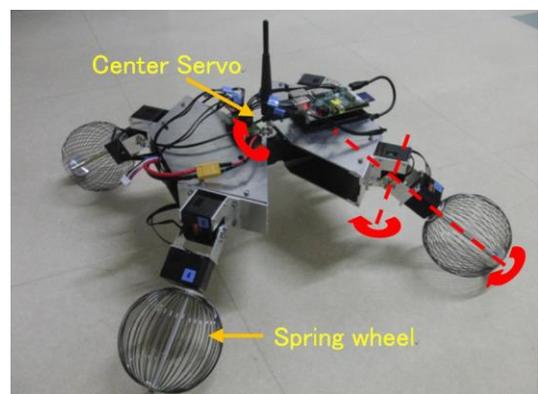


図1 Eggbeater2

また胴体部中央の能動自由度を回転させる事により1脚を遊脚とした場合でも重心を支持3角形内に保つことができる。これにより段差に対して車輪を持ち上げる事ができ、図2に示す動作実験より車輪径と同程度の高さの段差を踏破できる事を確認した。

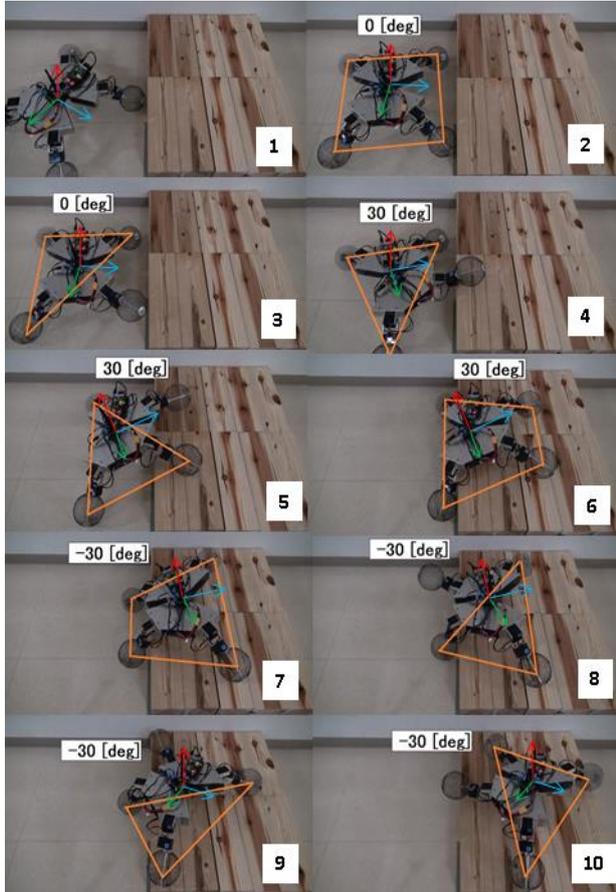


図2 Eggbeater2による段差踏破実験

不整地で安定した全方向移動を行うためには、車輪の接地条件や地面との摩擦の状態による影響を補正する必要がある。しかし内界センサだけでは並進運動や横方向への滑落を検出する事が困難であり、周辺環境から自己位置を推定し、目標軌道からのずれを常に補正する制御システムの導入が必要不可欠である。Eggbeater2ではセンサシステムの拡張を考慮して制御用計算機としてRaspberry Piを採用した。これまでに姿勢センサによる胴体部の姿勢制御とヨー方向の自転運動の補正を行った。さらに本研究で

は自己位置推定のためのSLAMの導入準備として、超音波センサを用いて段差検出を行い、自律的に段差踏破を行うシステムの構築を行った。今後は精度の良い自己位置推定の確立と、連続した段差踏破が行えるように姿勢の制御と障害物踏破のための動作の確立を進めたい。

2. Eggbeater-FMの開発

Eggbeater2と同様に、段差踏破のために静的に遊脚を作ることができる4輪での移動体の開発を行った。開発したEggbeater-FMは砂地での運用も想定してこれまでの弾性球形車輪とは異なるタイプの構造とし、メカナムホイールと同じ動作を可能とする車輪を開発した。また胴体部中央に捻転機構を配置し、脚車輪として遊脚を作る事により段差や障害物の踏破を実現した。

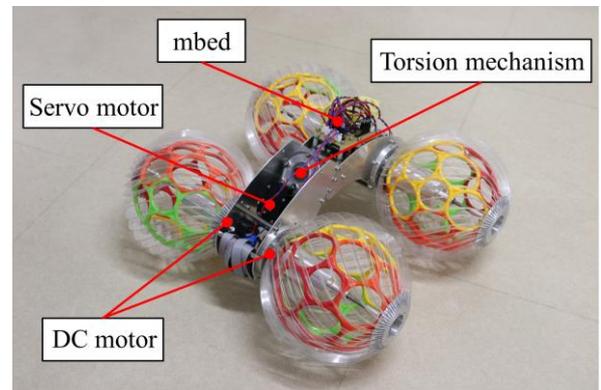


図3 Eggbeater-FM

【発表論文】

1. 石川, 青木, 嶋岡: "弾性球形車輪を用いた不整地移動体の開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A1-D05, 2015
2. 松川, 青木: "弾性球形車輪を用いた四輪移動体の開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A1-D06, 2015

【23】 生体内一分子ロックオントラッキングシステム開発

研究者 慶応義塾大学工学部 専任講師 広井賀子
慶應義塾大学工学部 准教授 舟橋 啓
ケンブリッジ大学グループリーダー Viji M Draviam
慶應義塾大学基礎理工学研究科 仲井佑一郎
群馬大学工学部 准教授 奥 寛雅
基礎生物学研究所 准教授 野中茂紀

【研究の概要】

微小管は染色体の分離においてダイナミックに運動しながらその役割を果たす。微小管上には多くのタンパク質複合体が存在し、そのいくつかは微小管の伸長に必要なチューブリン分子のリクルートやガイダンスの役目を果たしている。チューブリン結合タンパク質 EB1 の含まれた複合体 plusTips は微小管の新調する先端に結合している。plusTips は微小管とともに分裂機の細胞でダイナミックな動きを見せるが、分裂期の細胞には厚みがあるため、z 方向の動きを正確に捉えなければその動態の詳細を知ることが出来ない。本研究では立体的にダイナミックな動きをすることが予想される分裂期の微小管の動きを中心に、分子の動きを細胞内であるままに捉え、正確にその軌跡を追跡することが可能なイメージングシステムと、解析用のソフトウェアを開発することを目的とする。

【研究経過および成果】

電気式焦点可変レンズを顕微鏡に組み込み、焦点距離をプログラムにより制御するシステムの構築を実現した。

このシステムで目標とする z 軸方向時空間分解能を実現できるか検証を行った。

また、細胞内で運動する分子複合体の 3 次元トラッキングを可能にするシステム構築を目指し、細胞内でのタンパク質複合体観察が正確に行えるか検証した。他、細胞観察用の顕微鏡に組み込んだ場合の基本的な性能を表す各パラメータの測定を以下のように行った。

(1)空間分解能の検証

PSF, FOV などの計測により検証

(2)時間分解能の検証

光シート顕微鏡システムを利用した stabilization time の計測

(3)数十 ms、数十 nm の時空間分解能で焦点面を動かせ、細胞内画像を取得できるか微小管染色を行った細胞観察により検証

(4) 細胞内微小構造を最も明瞭に観察出来る電流値の同定

(5)動く分子複合体を最も明瞭に観察できる電流値の

同定微小管プラス端結合タンパク複合体の観察により検証

以上の結果をまとめた成果を現在 AIP Review of Scientific Instruments に投稿、2017 年 1 月 20 日付で発表した。

今後、共焦点イメージングにおいて蛍光タンパク質の褪色を防ぐため、ディスクの回転速度を上げて撮影する条件などを検討して行く。

同時に、細胞への蛍光タンパク質の遺伝子導入条件によるイメージング結果への影響も詳細に検討する。ソフトウェアとしては 2 次元トラッキング用のプログラムを現在改良中である。また、新しいアルゴリズムでのプログラム開発を検討しており、リニア・アサインメント・プロブレムをベースにした独自のソフトウェア開発を計画している。

【発表論文】

1. Nakai, Y., Ozeki, M., Hiraiwa, T., Tanimoto, R., Funahashi, A., Hiroi, N.*, Taniguchi, A., Nonaka, S., Boilot, V., Shrestha, R., Clark, J., Tamura, N., Draviam, V., and Oku, H. "High-speed microscopy with an electrically tunable lens to image the dynamics of *in vivo* molecular complexes". (2015) AIP Review of Scientific Instruments, 86, 013707, doi: 10.1063/1.4905330

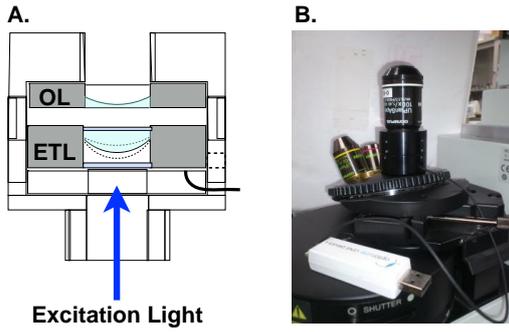


Figure 1. 電気式焦点可変レンズ EL-10-30 を Olympus ix-81 に組み込んだ。アダプターは独自に設計、作成した。

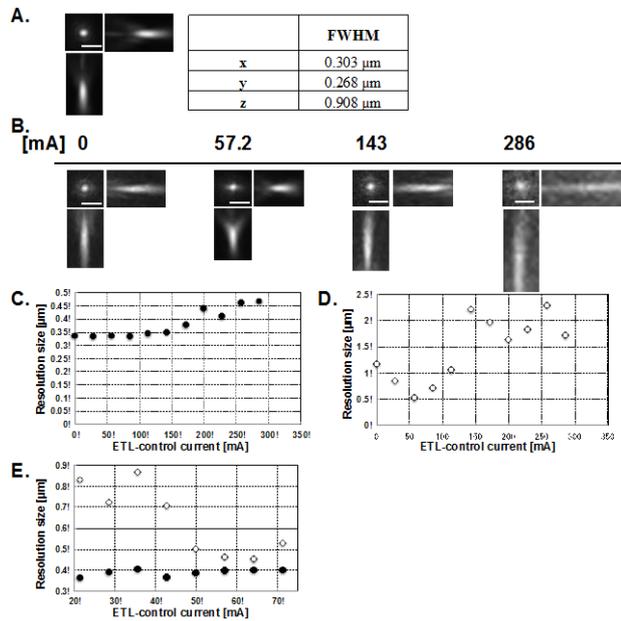


Figure 2. Point Spread Function(PSF)測定結果。A は EL-10-30 を組み込んでいない場合のコントロール。B は組み込んだ場合の蛍光ビーズの x-y-z 像。C は xy, D は z の解像度。E はそれらの一部を詳細に調べた結果。

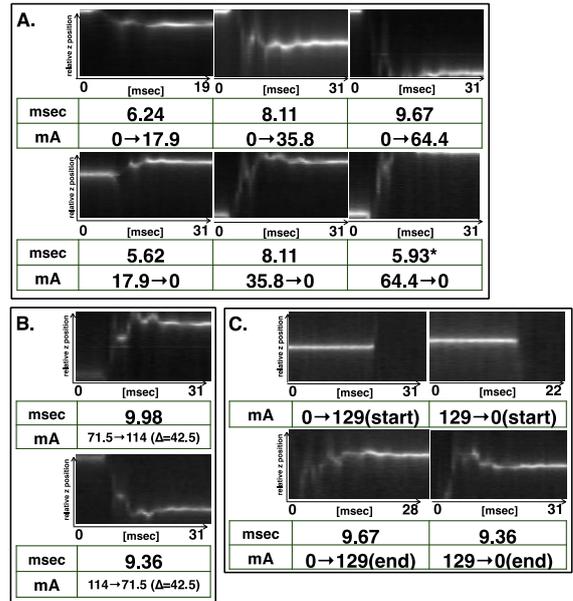


Figure 3. 電気式焦点可変レンズの整定時間測定結果。焦点移動のための電流値変更に伴って生じるレンズ面の振動が収まるまでにかかる時間を光シート顕微鏡を用いて測定した。

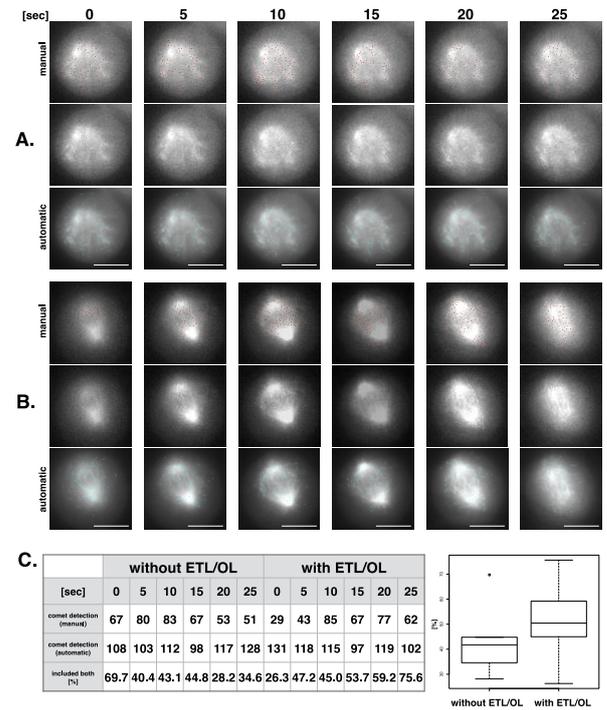


Figure 4. ヒト子宮頸癌由来上皮系細胞 HeLa に mKate2-EB3 を強制発現させ、ソフトウェアを用いた方法とマニュアルの両方で、ETL を取り付けた場合のデータと取り付けていない場合のデータでのコメット検出を検証した。

【24】階層構造文章とズーム操作によるデジタル教科書プラットフォームの研究

研究者 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 教授 稲見 昌彦

【研究の概要】

2011年に文科省が打ち立てた「教育の情報化ビジョン」や「学びのイノベーション」政策に基づき、現在2020年度を目標としたデジタル教科書/教材の環境整備や研究、実証実験などが盛んに行われている。本研究は、この指針の中でも、特に「子どもたち一人一人の学習ニーズに柔軟に対応でき、学習履歴の把握・共有等を可能とする」というビジョンを実現するための教科書システムの研究を行った。

本研究では、個々人の興味や理解度に合わせた情報提示が出来る電子教科書として、教科書を詳細度によって階層化し、ズーム操作によって直感的に詳細度を変更(拡大・縮小)出来る TLOD Textbook を開発し、実際にそのシステム上で閲覧出来る簡単なコンテンツを作成した。また、ログ取得機能及びログビューワーを実装し、生徒がどのように教科書を閲覧しているか、教師が把握出来るようにした。

【研究経過および成果】

本研究では、デジタル教科書システムを制作するにあたり、大別して3つの機能・プログラムを実装している。タブレット端末上で教科書を実際に閲覧し、そのログを記録することが出来る「教科書ビューワー」、XML文書として記述された教科書データを読み込み解析する「教科書パーサー」、教科書ビューワーより生成された閲覧ログをビジュアライズし把握しやすくする「ログビューワー」である。実際には、教科書ビューワーと教科書パーサーはひとつのアプリケー

ションとして統合されており、タブレット用のアプリとして端末上で動作させることが出来る(以降、教科書ビューワーと教科書パーサーを合わせて「教科書アプリ」とする)。ログビューワーは別ソフトとしてデスクトップ用ソフトとして開発している。以降、それぞれの特徴と機能について述べる。

教科書アプリでは、ePub形式を参考に定義された専用のXML文書を読み込み、図1のように表示することが出来る。通常の電子書籍同様、左右にフリップする動作によってページをスライドすることが可能で



図1. iPad上で動作する教科書ビューワーの画面キャプチャ

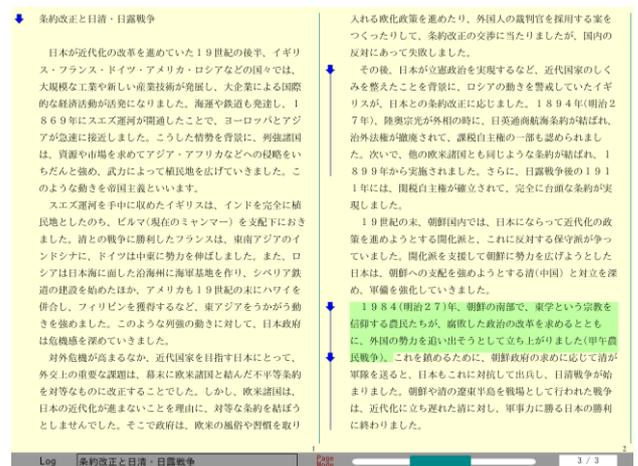


図2. 図1の緑部分を拡大し1階層移動した様子

あり、ズームが設定されている文書・画像上でピンチ操作を行うことで、その文書・画像を意味的にズーム、即ちより詳細に/簡潔に記された階層に移動することが出来る。ズームの際には、ピンチ操作を行った座標を基点としてズームイン/ズームアウトのアニメーションを伴った階層切り替えが行われるため、ユーザーは該当の文章が拡大されたのか縮小されたのか、またズームされたことによってどのような記述に変化したのかを感覚的に捉えることが出来る。これにより、例えば歴史の教科書などでは、概要レベルの階層を読んで流れの大枠を掴んだ後、ポイントとなる事件でズームインを行い詳細を理解したり、ズームアウトを行い年表化して一覧することでその事件の位置付けを行ったりすることが容易になる。

また、今回はハイパーリンクによる情報提示機能も実装した。ハイパーリンクが設定された文書をタップすることで、教科書内部の別の文書や外部 Web サイトに移動することが出来る。これにより、固有名詞等の文脈に依存しない事柄はハイパーリンクで説明し、文脈に依存する内容についてはズームによって拡大縮小出来る。これらを使い分けることでより適切な情報提示が可能となる。

その他、特徴的な点として、ページ送りのインターフェースが挙げられる。画面の半分で 1 ページとなるよう文章・画像を自動レイアウトし、それを紙の教科書同様横方向にスクロールして読み進める、スクロール形式とページ形式の中間の形式を開発した。これにより、従来の紙の資料との併用が容易になるだけでなく、従来のスクロール形式では行えなかったページ番号による授業進行が行え、またズーム時のアニメーション遷移を自然に行うことが出来る。

最後に、ログ機能について述べる。本アプリは、前

から後ろへと一方向に読み進めるだけでなく、ズームにより詳細度を変更し、階層を往来しながら読むことが出来る。この「読み方」の情報をログとして取得し、csv 形式で保存している。記録出来る対象は、読み始めの時間、読んでいる教科書の種類、読んでいる箇所(最初のページを 0%、最後のページを 100%として割合で取得)、読んでいる階層、利用したズームイン/ズームアウト、利用したハイパーリンクの 6 つであり、ユーザーがどの箇所を良くズームしたのか、どの部分を読み返していたのかなどを把握することが出来る。

この csv ファイルは図 3 のようにログビューアーで閲覧することも出来、グラフとして視覚的に捉えることが出来るようになっている。



図 3. ログビューアーのキャプチャ

【発表論文】

1. 武田 港, 望月 茂徳, 川村 健一郎, 稲見 昌彦: “TLOD Textbook : 階層構造と Semantic Zoom を利用したデジタル教科書”, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, 2014, 158-161 (2014-09-12)

【25】 非侵襲的脂肪プロファイリングイメージの構築と NASH の早期診断への展開

研究者 千葉大学大学院医学研究院消化器腎臓内科学 講師 丸山紀史

千葉大学フロンティア医工学センター

山口 匡

千葉大学医学部附属病院消化器内科

関本 匡

〔研究の概要〕

高周波超音波顕微鏡システムを使用して脂肪酸の音響特性を検討した。まず、脂肪酸単独ならびに脂肪酸処理培養細胞での検討では、オレイン酸が他の脂肪酸(パルミチン酸、オレイン酸、パルミトオレイン酸、リノール酸、 α リノレン酸)に比べてインピーダンスが有意に低いことが示された。また肝組織におけるインピーダンスも脂肪化によって遅くなり、線維化の進展では逆に高値となった。インピーダンスという音響パラメータを検討することで、超音波による脂肪酸組成の識別と線維化の程度を評価することが可能となり、脂肪肝や非アルコール性脂肪肝(NASH)に対する新たな診断学が構築される。

〔研究経過および成果〕

1. 研究の方法

(1) 脂肪酸単独での音響特性の検討

ポリプロピレンチューブに至適溶媒で溶解した各種脂肪酸 1.5ml(パルミチン酸、オレイン酸、パルミトオレイン酸、リノール酸、 α リノレン酸)を静置し、超音波顕微鏡(AMS-50SI 改、本多電子)で観察した。各脂肪酸につき 3 回の計測を行い、その信号平均値を解析した。

(2) 脂肪酸処理細胞での音響特性の検討

① 培養細胞に対する脂肪酸処理の適正条件設定

Huh7 cell を使用し、35mm dish に 500,000cells/well を培養した。まずパルミチン酸について、既報(Mol Cell Biochem 2009)に従って 500 μ M を選択し 1-12h で培養した。各培養時間毎に、PCR にて IL8 の発現を検討した。次いで、最大発現時間において、脂肪酸濃度別(100-1000 μ M)での IL8 発現を検討した。

② 脂肪酸処理細胞モデルに対する脂肪酸染色

上記①で得られた適正条件下で、5 種の脂肪酸(パルミチン酸、オレイン酸、パルミトオレイン酸、リノール酸、 α リノレン酸)による各種脂肪酸処理後の培養細胞をホルマリン固定し、オイルレッド染色施行後に顕微鏡で観察した。

③ 超音波顕微鏡による観察: 固定後の試料に対して、超音波顕微鏡で異なる 5 箇所計測を行い、その平均値を算出した。

(3) マウスモデルでの検討

STAM マウスを購入し、コントロール、6 週、8 週、10 週齢で安楽死させ、摘出肝における音響学的特性の検討を行った。

2. 研究成果

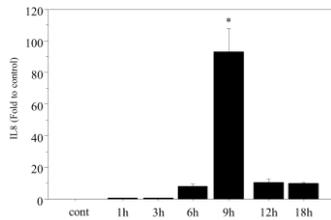
(1) 超音波顕微鏡の周波数条件: 本システムは、80MHz と 250MHz の二種の周波数を選択可能であるが、in vitro での実験条件においては 80MHz が計測に適切であった。

(2) 脂肪酸の音響学的特性: 脂肪酸のインピーダンス

(Mrayl)は、オレイン酸 1.49 ± 0.01 、パルミチン酸 1.55 ± 0.003 、パルミトオレイン酸 1.91 ± 0.01 、リノール酸 1.56 ± 0.03 、 α リノレン酸 1.51 ± 0.01 であり、オレイン酸が最も低いことが示された。

(3) 脂肪酸処理細胞での音響特性の検討

①脂肪酸処理細胞における IL8 の発現:パルミチン酸 500 μ M を使用した場合、9 時間の培養時間において IL8 が最大発現を示した。



また 9 時間の培養時間では、500 μ M の条件が最も高い IL8 発現を示した。以上から、培養細胞での脂肪酸処理条件は、500 μ M、9 時間培養とした。

②脂肪酸染色:オイルレッド染色により細胞内外の脂肪の存在を確認した(画像:パルミチン酸処理細胞)。

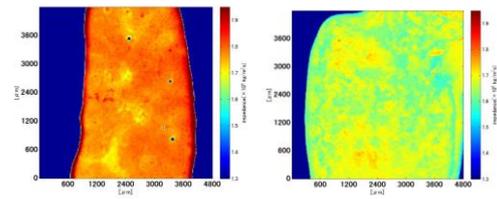


③超音波顕微鏡による信号分析:各種脂肪酸処理後の細胞モデルにおけるインピーダンスは、オレイン酸 1.47 ± 0.04 、パルミチン酸 1.65 ± 0.03 、パルミトオレイン酸 1.65 ± 0.03 、リノール酸 1.64 ± 0.03 、 α リノレン酸 1.67 ± 0.03 であった。すなわち、脂肪酸単独での信号計測結果と同様に、オレイン酸処理モデルでインピーダンスが有意に低値であった($p < 0.01$)。

(4) マウス肝での検討:

コントロールでは 1.72 ± 0.02 、脂肪肝では 1.69 、脂肪肝炎では 1.66 ± 0.04 であり、コントロールに比べ脂肪肝炎(NASH)では有意に低値であった($p = 0.0047$)。一

方、線維化肝のインピーダンスは 1.7 ± 0.04 であった(下図:左、正常、右、脂肪肝炎)。



3.考察:NASH 肝における脂肪酸組成ではオレイン酸が有意に高率であると報告されている(J Hepatol2008)。本研究は、オレイン酸における音響学的特徴が他の脂肪酸と異なることを明らかにした。またマウスモデルにおける検討でも、肝組織のインピーダンスは脂肪化の進行によって遅くなり、オレイン酸の関与の可能性が示唆された。一方、線維化の進展によってインピーダンスは高値となった。以上のように、超音波信号分析は脂肪酸組成の識別と線維化の程度を評価することが可能であり、NASH 診断学の構築に有用であると考えられた。

4.結語:超音波信号分析は、脂肪酸組成と肝線維化程度の推定に有用と考えられた。今後、NASH の診断に対して、本法の応用による非侵襲的脂肪酸プロファイリングの展開が期待される。

【発表論文】

1. Inoue K, Yoshida K, Mamou J, Kobayashi K, Maruyama H, Yamaguchi T. Speed of sound analysis of 80 MHz and 250 MHz by observation fiber and fatty rat liver tissue. Journal of the Acoustical Society of America, under the preparation of revised version
2. 山口 匡、丸山紀史、他.NASH における脂肪酸特定に向けた音響物性解析.第 88 回日本超音波医学会学術総会にて発表予定(抄録受理済)

【26】 医用画像を用いた精密膝関節モデルの作成および歩行時の膝関節負荷の解析

東京大学大学院工学系研究科 准教授 山下 淳

教授 浅間 一

〔研究の概要〕

変形性膝関節症の対策は重要な課題であり、膝関節内部の負荷測定が求められている。しかし、生体内で直接計測することは難しい。そこで本研究では、医療画像を用いて精密な膝関節モデルを構築し、シミュレーションによって歩行時に膝関節にかかる負担の解析を行った。具体的には、靭帯付着位置の個人差による影響や、歩容の個人差によって、膝関節にかかる負荷の変化を調べ、どのような場合に膝関節に大きな負荷がかかるのかを明らかにした。また、膝関節実形状の精密模型を製作し、製作した模型を用いて、ヒトの動作時の膝関節の接触圧力分布測定を行い、膝関節負荷の解析を行った。

〔研究経過および成果〕

変形性膝関節症とは加齢による筋肉の衰えや膝の酷使などにより発症する疾患であり、膝関節の軟骨のすり減りやそれによる骨の変形の結果、痛みや関節可動域の制限が発生する。高齢化の進行とともにこの疾患の患者数の増加が予想されるため、早急な対策が求められる。しかし変形性膝関節症の病因論には諸説あるがまだ定説はない。変形性膝関節症の発症には加齢に加えて慢性的な機械的刺激による一次性的のものが多く、発症・進行メカニズムの解明には日常生活において膝関節内にかかる詳細な圧力分布や変形を測定することが重要である。しかし、生体内にある膝関節を直接計測することは難しい。

そこで本研究では、医療画像を用いて精密な膝関節モデルを構築し(図 1)、シミュレーションによって歩行時に膝関節にかかる負担の解析を行った。具体的には、逆動力学シミュレーションにより、前十字靭帯前側部、前十字靭帯後側部、後十字靭帯前側部、後十字靭帯後側部、外側側副靭帯の 5 本の靭帯に関して、大腿骨

への付着位置を変化させたときに膝関節にかかる負荷を解析した。また、外反歩行、正常歩行、内反歩行と歩容を変化させたときに膝関節にかかる負荷を解析した(図 2)。

解析の結果、靭帯の付着位置が変化することによって歩行中において膝に最大負荷がかかる瞬間が変化す

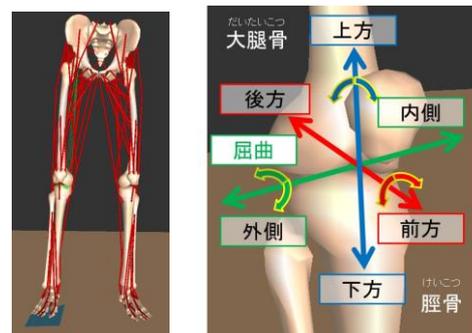


図 1 構築した膝関節モデル

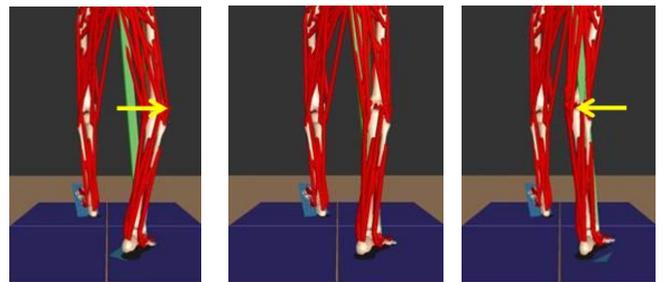


図 2 外反歩行、正常歩行、内反歩行

ること、正常歩行と比較して外反・内反歩行が膝関節にかかる負荷が大きいことが明らかになった。

また、膝関節実形状の精密模型を製作し、製作した模型を用いて、膝関節負荷の解析を行った。膝関節については、ヒトの医用画像(CT・MRI 画像)から得られる3次元データに基づき、3Dプリンタを用いて大腿骨、脛骨、軟骨、半月板からなる精密模型を作製した(図3)。膝関節の運動については、ロボットマニピュレータにより関節角度を変化させ、力はエアシリンダで負荷をかけることで、動作時の時間経過に対する膝関節の角度と関節間力の変化を再現した(図4)。エアシリンダと、その出力を検出するための力センサを大腿骨圧縮方向とせん断方向に取り付けて、膝関節模型にかかる負荷を計測した。

膝模型を用いた実験により、膝関節の角度に応じた圧力分布測定が可能となり、例えば角度45degのときには膝関節内側では半月板上と中心部に、外側では後方に圧力が分布するなどの結果を得た。

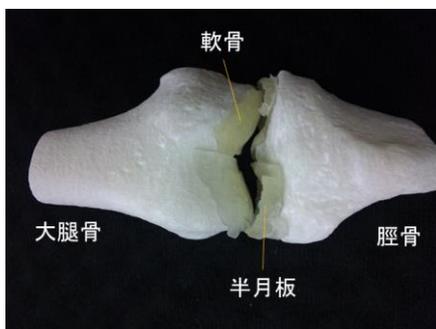


図3 膝関節の精密模型

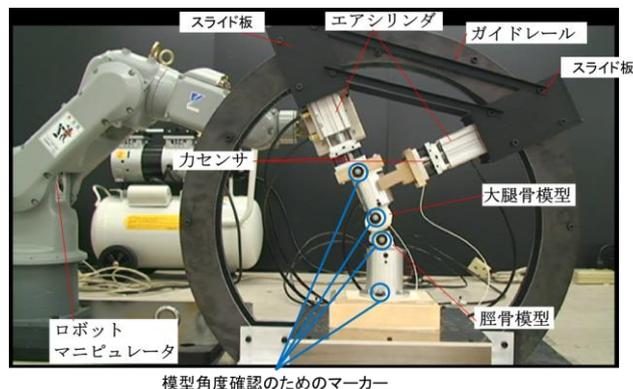


図4 膝関節模型の駆動装置

以上、医用画像を用いて精密膝関節モデルを作成し、膝関節負荷の定量的解析手法を構築した。

〔発表論文〕

1. 花谷 耕平, 山川 博司, 石川 雄己, Qi An, 山下 淳, 浅間 一: “膝関節実形状模型を用いたヒトの起立動作時の負荷計測”, 2014 年度精密工学会春季大会 学術講演会 講演論文集, pp.887-888, 2014.
2. 石川 雄己, Qi An, 中川 純希, 戸島 美智生, 岡 敬之, 安井 哲郎, 山下 淳, 浅間 一: “Elevation angle を用いた膝疾患患者術前後歩容の解析”, 2014 年度精密工学会春季大会 学術講演会 講演論文集, pp.889-890, 2014.
3. 石川 雄己, 安 琪, 中川 純希, 戸島 美智生, 安井 哲郎, 岡 敬之, 芳賀 信彦, 山下 淳, 浅間 一: “Elevation angle の近似平面を用いた変形性膝関節症患者の歩容解析(平面法則の有無と近似平面の角度差を用いた検討)”, 日本機械学会 2014 年度年次大会 講演論文集, J1620202, pp.1-4, 2014.
4. 石川 雄己, Qi An, 中川 純希, 戸島 美智生, 安井 哲郎, 岡 敬之, 井口 はるひ, 真野 浩志, 芳賀 信彦, 山下 淳, 浅間 一: “平面法則と主成分分析を用いた変形性膝関節症患者の歩行解析”, 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会 2014 講演論文集, pp.865-867, 2014.
5. 花谷 耕平, 山川 博司, 石川 雄己, Qi An, 山下 淳, 浅間 一: “膝関節実形状模型を用いたヒトの起立動作時の負荷計測システムの開発”, 精密工学会誌, Vol.81, No.1, pp.99-104, 2015.

【27】 大脳が障害を受けたあとの効率良いリハビリテーションを探るモデル研究

— 成人大脳の可塑性を呼び起こせ —

研究者 高知大学 教育研究部 医療学系 基礎医学部門 解剖学 准教授 富田 江一

共同研究者 高知大学 教育研究部 医療学系 基礎医学部門 解剖学 教授 由利 和也

〔研究の概要〕

脳卒中などの脳疾患は、障害が残ることが多く、疾患後のリハビリテーションは重要である。申請者は、末梢部位を頻回に使うリハビリテーションを行う際に、同時に大脳の可塑性を高めることで、障害からの回復がよりスピーディになると考え、それを実証するモデル研究を推進してきた。実際には、遠近感の認知に重要な第一次視覚野上の眼優位カラムをモデルとして注目してきた。視覚系の発達した哺乳類の第一次視覚野では、同側・反対側の眼から視覚入力を受ける神経細胞は別々に「同側・反対側眼優位カラム」として集まっている。申請者は、1) 自身が単離した同側眼優位カラム特異的シヤペロンは成人期に眼優位カラムの過度の可塑性を防ぐバリアとして働いている、2) 成人期に、同シヤペロンの発現や機能を低下させると、眼優位カラムの可塑性が再出現して、同時に行っているリハビリテーションの効果を高めることができるという、2つの仮説を立てて順に証明してきた。

〔研究経過および成果〕

1. 背景と研究のねらい

脳卒中などの脳疾患は、障害が残ることが多く、疾患後のリハビリテーションは重要である。本研究では、末梢部位を頻回に使うリハビリテーションを行う際に、同時に大脳の可塑性を高レベルに発現させる作用を直接大脳に施すと、障害からの回復がよりスピーディになるのではないかと考え、それを実証するモデル研究を推進している。実際には、遠近感の認知に重要な大脳皮質第一次視覚野上の眼優位カラムをモデルとして研究を行った。視覚系の発達した哺乳類の第一次視覚野では、同側・反対側の眼から視覚入力を受ける神経細胞は別々に「同側・反対側眼優位カラム」として集まっている。申請者は、発生期から発達期にかけての眼優位カラム形成や成人期における眼優位カラムの維持に関わる可能性が高い、同側眼優位カラムに特異的に発現しているシヤペロン(同側

眼優位カラム特異的シヤペロン)の単離に成功している。本研究では、まず同シヤペロンは成人期において眼優位カラムの過度の可塑的变化を防ぐバリアとして働いている可能性があるのか組織学的に検証した。続けて、眼優位カラムの可塑性を測る片眼遮断実験を利用して、同シヤペロンの発現や機能を低下させることで、眼優位カラムの可塑性が再出現して片眼遮断からの回復がスピーディになるか検討している。これが証明できれば、効率よいリハビリテーションを編み出すことになり近づくこと大いに期待している。

2. 同シヤペロンが眼優位カラムの過度の可塑的变化を防ぐバリアとして機能するかを組織学的に検証

片眼遮断実験を利用して検証する。若年期の動物に片眼遮断を施すと、遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムは縮小し、非遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムは拡大する。同シヤペロンが眼優位カラムの過度の可塑的变化を防止するバリア機能を

持つならば、その発現パターンは片眼遮断によっても変化せず、片眼遮断前の眼優位カラムパターンに一致すると考えられる。実際、若年期の動物を片眼遮断すると遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムは縮小し、非遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムは拡大した(図 1 の赤)。反対に、同シャペロンの発現パターンは、ほとんど変化せず、遮断前の眼優位カラムパターンを反映していた(図 1 の緑)。さらに、大腦表面に平行な向きで非常に広い領域を対象として、この結果の確証実験を行った。その結果、片眼遮断後でも、シャペロン発現部位と非発現部位のサイズは変化せず互いにほとんど差がない、つまりそれぞれ遮断前の同側と反対側眼優位カラムに一致していることが証明できた(図 2)。現在は各々の眼優位カラムのサイズを描出する画像解析法を考案中であり、統計学的にも確認を行う。以上、同シャペロンは眼優位カラムの過度の可塑的变化を防ぐバリアとして機能する可能性が高いことが組織学的に証明できた。

3. 第一次視覚野において同シャペロンの発現や機能を低下させることでリハビリテーションの効果を高めることができるかを検証

片眼遮断を行って、遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムを縮小させ、非遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムを拡大させた後、遮断する眼を交替させ片眼遮断から回復させる。回復中に同シャペロンの機能を阻害するインヒビターを第一次視覚野に投与し、コントロール動物に比べ片眼遮断からの回復がスピーディであるかを検証中である。その場合、リハビリテーションがより効果的であると結論できる。

[発表論文]

1. Tomita K, Sperling M, Cambridge SB, Bonhoeffer T, Hübener M. A molecular correlate of ocular

dominance columns in the developing mammalian visual cortex. *Cereb. Cortex* 23: 2531-41 (2013).

2. Ishino Y, Hayashi Y, Naruse M, Tomita K, Sanbo M, Fuchigami T, Fujiki R, Hirose K, Toyooka Y, Fujimori T, Ikenaka K, Hitoshi S. Bre1a, a histone H2B ubiquitin ligase, regulates the cell cycle and differentiation of neural precursor cells. *J. Neurosci.* 34: 3067-78 (2014).
3. Goto T, Tomikawa J, Ikegami K, Minabe S, Abe H, Fukanuma T, Imamura T, Takase K, Sanbo M, Tomita K, Hirabayashi M, Maeda K, Tsukamura H, Uenoyama Y. Identification of hypothalamic arcuate nucleus-specific enhancer region of kiss1 gene in mice. *Mol. Endocrinol.* 29:121-9 (2015).

シャペロン

BDNF: 片眼遮断により拡大したカラムを反映

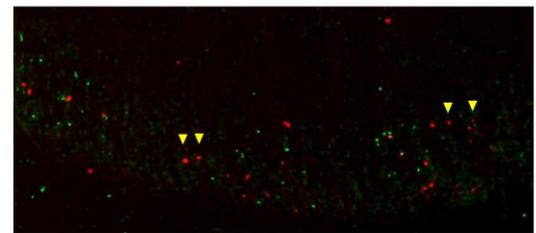


図1. 片眼遮断によるシャペロンの発現への影響 (断面図)
片眼遮断により非遮断側の眼から入力を受ける眼優位カラムは拡大したが、シャペロンの発現部位の拡大は認められない。



図2. 片眼遮断後のシャペロンの発現パターン (大腦表面に平行な方向) シャペロン発現部位と非発現部位のサイズはほぼ同じ

【28】 導電性高分子を用いたストレスバイオマーカー分析技術の開発

研究者 九州大学 大学院システム情報科学研究所 助教 田原 祐助

〔研究の概要〕

現代社会はストレス社会であり、長期的なストレスや疲労の蓄積により、うつ病、慢性疲労症候群、心的外傷後ストレス障害 (PTSD)などを発症するといった深刻な社会問題を抱えている。現在、唾液バイオマーカーとストレス性疾患との関連性が医学系・疫学系研究者を中心として報告されており、特にステロイドホルモンであるコルチゾールや唾液アミラーゼ活性値がストレス性疾患の指標として注目されている。本研究は、ストレスバイオマーカーとして注目されている唾液コルチゾールと唾液アミラーゼ活性値を、短時間で簡便に測定可能な導電性高分子を用いた新規計測技術の開発を目的とした。

〔研究経過および成果〕

導電性高分子を用いたコルチゾール検出の検討

コルチゾールの検出は、電気化学インピーダンス計測 (EIS) による定量を試みた。センサ性能として、測定範囲 0.1–30 ng/ml, 検出感度 1 ng/ml を最終的な目標としている分子認識素子として高い特異性を有する抗体と、金電極上に導電性高分子であるポリアニリンを修飾し、抗体の高密度化を期待してセンサ電極を作製した。ポリアニリンは、電気化学重合により合成し、重合条件 (電界, 時間) を調整することで、ポリアニリンの異なるモルフォロジーを有する修飾電極を作製することができた (図1)。

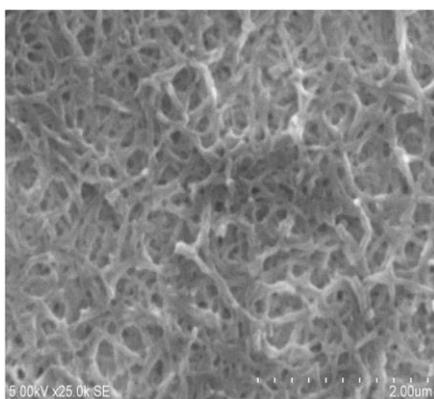


図1 ポリアニリンの SEM 画像

作製したポリアニリン電極に、アミンカップリング法によりコルチゾール抗体を固定化し、酸化還元プローブとしてフェリシアン化カリウムとフェロシアン化カリウムを用い、コルチゾール標準液を用いた EIS 測定を行った。しかしながら、電極 Lot 毎のバラツキが大きく、抗体固定化量のコントロールが不十分であり、経時的なインピーダンスの変動が見られたためことから、定量には至らなかった。今後は、電気化学重合、ドーピング方法、抗体修飾方法等の最適化を行う必要があると考えられる。

次に、金ディスク電極に、自己組織化単分子膜 (SAM) を介して抗体を修飾した電極を用い、コルチゾール標準液を用いた EIS 測定を行った。測定は三電極で実施し、印加電圧は 5 mV, 測定周波数は、100kHz – 0.05Hz とし、酸化還元プローブとしてフェリシアン化カリウムとフェロシアン化カリウムを用いた。SAM は、アルカンチオールを用いた。等価回路から電荷移動抵抗を算出した結果、コルチゾール濃度の増加と共に、電荷移動抵抗の増加を確認で

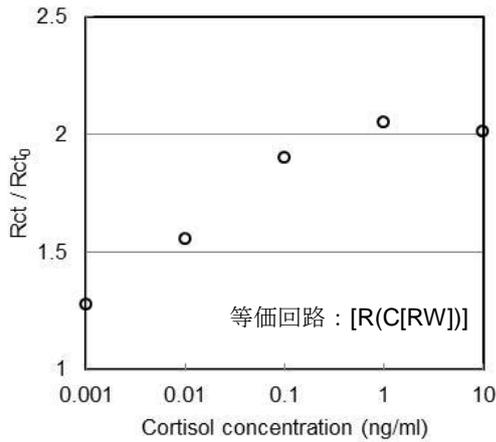
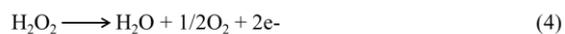
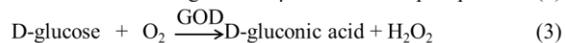
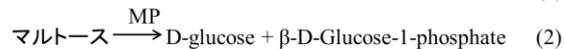
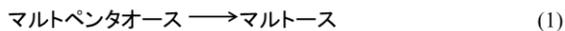


図2 コルチゾール標準液に対する電荷移動抵抗きた(図2). しかしながら, 電極 Lot 毎のバラツキが大きかった. また, SAM に用いるアルカンチオール種や, 抗体固定化量によって, インピーダンスの経時的な増減が確認された. 酸化還元プローブの濃度や電解質濃度によっても, SAM 剥離によるインピーダンスの減少が確認された. 今後は, 酸化還元プローブや電解質の種類や濃度を最適化し, 経時的な安定性を確保する必要がある.

アミラーゼ活性測定系の確立

アミラーゼ活性測定は, 下記の酵素反応を用いた測定系を検討した.

唾液アミラーゼ



MP; マルトフォスフォリラーゼ
GOD; グルコースオキシダーゼ

ヒトの唾液アミラーゼ活性値は, 10–200kU/l である. 唾液アミラーゼ (唾液 100 μ l) と基質であるマルトペンタオースを 1 分間反応させたと仮定すると, 得られるマルトース濃度は, 35–700 μ g/ml となる. この濃度範囲で測定可能なアンペロメトリックなマルトースセンサを構築することで, アミラーゼ活性

測定法の可能性について検討した. 作用電極には, 白金ディスク電極を用い, 電極上にアニリンと poly(2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid) を電気化学重合で合成した. 次に, グルコースオキシダーゼ(GOD)とマルトフォスフォリラーゼ (MP)を適量混合し, グルタルアルデヒドを用い, ポリアニリン上に固定化した. 測定は三電極式で行い, 0.6 V (v.s. Ag/AgCl)の定電圧を印可し, スターラーで攪拌しながら 10 ml の PBS 溶液に対して既定濃度になるようにマルトース溶液を滴下した. 作製した酵素センサは, マルトース濃度の上昇 (0-2000 μ g/ml)と共に添加後 1 分程度で, 検出電流の増加を確認できた(図3). 低濃度領域において, さらなる高感度化が必要であるが, MP の固定化濃度を上昇させることで容易に可能であると考えられる. また, GOD と MP の比率を変えることで, 線形性の向上が期待される. 今後は, 検討した酵素膜を用い, 血糖測定器に使われているようなディスポーザブルタイプのフラットチップを試作し, 実唾液を用いたセンサの評価を実施する. また, ポリアニリン重合体の電気化学特性を評価し, 酵素膜の最適化を実施する予定である.

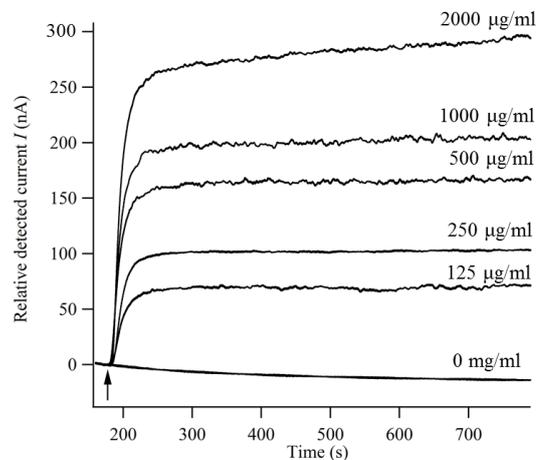


図3 マルトース添加に対する検出電流

【29】 身体不活動による海馬神経機能の低下を予防するための萌芽的研究

研究者 首都大学東京大学院人間健康科学研究科 助教 西島 壮

〔研究の概要〕

機械化により我々の身体活動量は著しく減少した。また、受験や就職といったライフステージの変化も身体活動量を減少させる契機となる。身体活動量の減少は、生活習慣病だけでなくうつ病を代表とする精神疾患への罹患リスクも高める可能性が指摘されている。我々はこれまで、マウスの身体活動量を減少させると、記憶・学習機能を担う海馬の神経新生が低下することを報告した(Nishijima et al., Behav Brain Res, 2013)。そこで本研究は、この身体活動量の減少に起因する海馬神経新生低下の予防を目指し、その有効な運動条件を明らかにすることを目的とした。本年度はその第一歩として、特に運動の頻度に着目して実験的検証を進めた。

〔研究経過および成果〕

方法: 実験には雄性 C57BL/6 マウスを用いた。実験期間を通じて通常ケージで飼育する対照群(8 匹)と、継続的な運動の中断により身体活動量を減少させる運動中断群(32 匹)を設定した。運動中断群は、4 週齢から 8 週間、回転ホイール付きケージで飼育し自発走運動を行わせ、12 週齢時に通常ケージに移すことで運動を中断した。運動中断後は、夜間にトレッドミルを用いた低～中強度の強制走運動(15m/分、60分/日)を、異なる頻度(0、1、3、5回/週、各8匹)で行わせた(図1)。運動中断から5週後に麻酔下で脳を摘出し、免疫組織化学的手法により海馬神経新生を評価した。また、運動中断がケージ内での終日活動量に影響するかを確認するため、運動中断後は週に1回、終日(11:00～翌 9:00)の活動量を赤外線ビーム式活動量測定装置でケージごと記録した。



図1. 実験デザイン

結果: 新たに生まれた幼若神経細胞の指標となるダブルコルチン(DCX)陽性細胞は、通常飼育群と比較し運動中断・週0回群で有意に少なく($P < 0.01$)、先行研究と同様に運動中断による身体活動量の減少は神経新生を低下させることが確認された(図2)。そしてこの神経新生の低下は、週3回および週5回の強制走運動を行うことで通常飼育群と同程度まで回復した。週1回ではその効果は認められなかった。

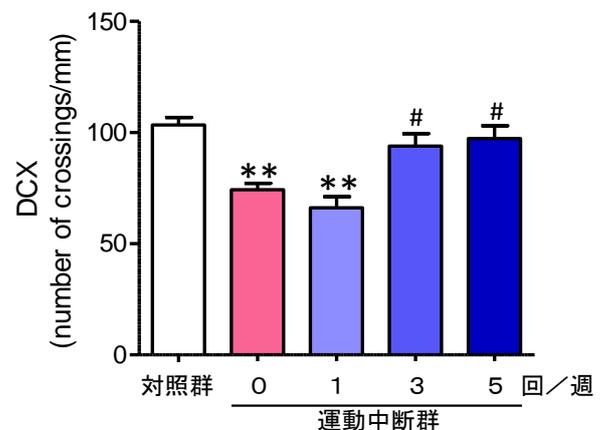


図2. 運動中断による身体活動量の減少がDCX陽性幼若神経細胞数に及ぼす影響
Mean \pm SE, $n = 8$ /group, ** $P < 0.01$ vs 対照群, # $P < 0.05$ vs 週0および1回群

活動量の結果は、運動中断直後(1週目)から5週目までの変化量で示した(図3)。本実験では1ケージにつきマウスを4匹ずつ群飼育したため各群のケージ数は2となり、統計的解析を行うことはできない。しかしながら、運動中断・週0回群ではケージ内での活動量が顕著に減少し、週3回および週5回群では活動量の減少が抑えられる傾向が認められた。興味深いことに、この活動量の変化パターンは神経新生の結果(図2)とほぼ一致していた。

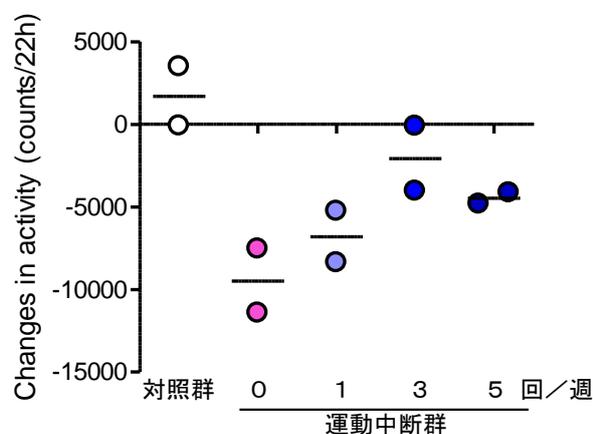


図3. 運動中断による身体活動量の減少がケージ内活動量に及ぼす影響

考察: 本研究により、継続的な運動の中断に起因する海馬神経新生の低下は、週3回以上の強制走運動により予防できることが明らかとなった。さらに運動中断後のケージ内における活動量の結果から、運動中断あるいは強制走運動という実験的介入は、マウスの活動性にも影響を及ぼす可能性が初めて示唆された。すなわち、強制走運動を週3回行ったことによる海馬への好影響は、運動自体の効果に加えて、マウスの活動性を高めたことによる間接的効果も合わせて発現した可能性が考えられる。

これまで実験動物を対象とした研究から、運動が

海馬の神経機能に様々な好影響を及ぼすことが明らかにされたが、そこではケージ内における身体活動量の関与は全く検討されていない。一方、ヒトを対象とした疫学研究からは、日常的な歩行を含む身体活動量の減少がうつ病や認知症の危険因子であることが指摘されており、身体活動量を高めることの必要性が主張されている。

一般的に、健康増進のために運動を行うということは、その運動自体によって得られる効果と考えられている。一方、本研究により、定期的な運動(週3回程度)の実践は、生体の活動性を高め、それにより身体活動量を増加させるといった付加的効果もある可能性が新たに示された。今後は、個体の活動性に影響を及ぼす外的要因にも着目し、脳の健康増進にむけた研究を進めていくことが重要であると考えられる。

[発表論文]

1. Nishijima T, Kamidouzono Y, Ishiizumi A, and Kita I, An increase/decrease in physical activity influences structural and functional adaptive changes in the hippocampus. Symposium "Impacts of active experience on brain morphology and function", 92th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan, Kobe, March 2015.
2. 西島 壮、石泉篤史、上堂菌好夏、北 一郎、「自発走運動中断による海馬神経新生の低下は週3回以上の強制トレッドミル走運動で予防できる」、第70回日本体力医学会大会、和歌山市、2015年9月(発表予定)

【30】 フェムト秒レーザー励起散乱場の制御による細胞接着性表面ナノ構造の作製

研究者 慶應義塾大学理工学部 専任講師 寺川光洋

【研究の概要】

ナノスケールの表面構造は細胞接着と細胞機能に影響を与えることが知られている。本研究では、フェムト秒レーザーによる生分解性ポリマーの高細胞接着表面微細加工技術の創出を目的として研究を行った。フェムト秒レーザーにより発生させたミー散乱遠方場を利用すれば、材料表面にナノスケールの周期構造を作製できる。この方法は単位時間の加工可能面積が大きく、概形形成後に必要箇所のみ加工できる特長を有するものの、その生成原理については未解明な点が多く、作製される構造の制御は難しい。そのため、まず初期生成過程について格子欠陥や不純物欠陥が生成に寄与していることを明らかにした。次に、得られた知見を基に生分解性ポリマー表面に対して周期構造を作製できることを実証した。

【研究経過および成果】

フェムト秒レーザーにより生成できる材料表面の微細構造は照射レーザー波長の半分以下の周期をもつ高空間周波数構造と照射レーザー波長程度の周期をもつ低空間周波数構造に大別される。低空間周波数構造は表面プラズモンと入射光の干渉によって生成するとの仮説が広く受け入れられているが、高空間周波数構造の生成については多くの議論が未だなされている。本研究では、結晶内の格子欠陥や金属イオン等の不純物欠陥において局所的なレーザーアブレーションが生じ、それが起点となり微細構造が生成されるとの仮説を立て、実験的に検証を行った。結晶内の欠陥が微細構造の生成起源となるならば、レーザー照射径内に多くの欠陥が存在する場合は生成閾値がその欠陥のアブレーション閾値程度まで減少すると考えられる。材料表面にフェムト秒レーザーを照射した際の生成閾値のスポット径依存性を Fig.1 に示す。スポット径が広がるにともない生成閾値の減少が見られ、スポット径 50 μm では 15 μm に比べ二分の一程

度まで減少した。この結果は初期生成過程において核となる散乱体が必要であり、欠陥の局所的なアブレーションが微細構造生成に寄与すること示している。すなわち、欠陥の数およびその配置により作製される構造の制御が可能であることが示唆された。

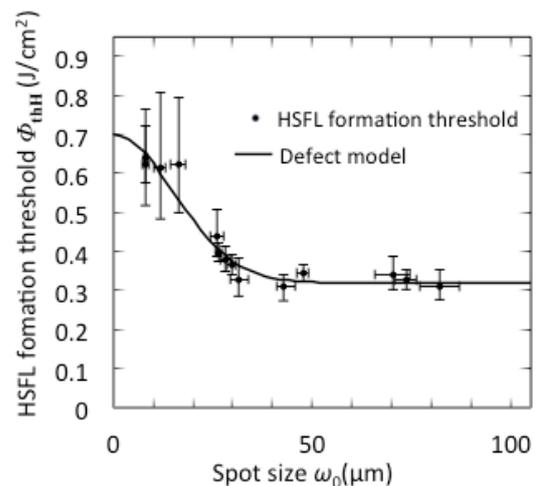


図 1 微細構造生成閾値のレーザースポット径の依存性。実線は欠陥モデルの理論値を示す。 $\Phi_{\text{H}} = 0.7 \text{ J/cm}^2$ 、 $\Phi_{\text{dH}} = 0.32 \text{ J/cm}^2$ として理論曲線を計算。

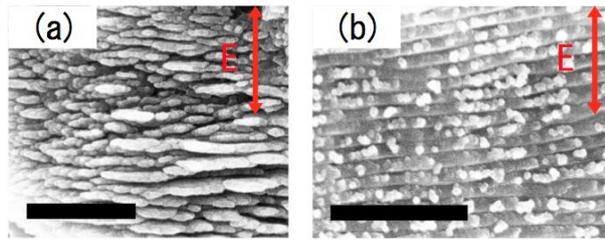


図2 フェムト秒レーザー照射後の PLLA 表面。走査型電子顕微鏡により観察。(a) 800nm、1.0 J/cm²、10000 パルス、(b) 400 nm、0.30 J/cm²、3000 パルス。スケールバーは 1 μm。

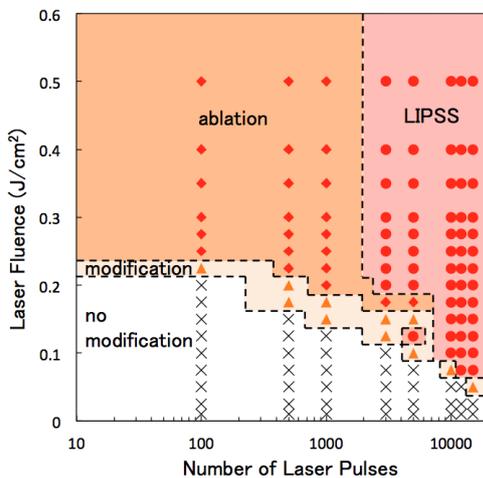


図3 フェムト秒レーザー照射後の PLLA 表面状態。アブレーションを伴うもの(◆)、微細構造生成(●)、改質(△)、改質なし(×)。

生分解性ポリマーは生体内において異物反応が小さく生体適合性に優れるため、組織再生足場材料への応用が期待されている。応用に向けて細胞と接触する材料表面の形状と特性を最適化する必要がある、本研究では生分解性ポリマーの表面に上記微細構造を作製することを試みた。ポリ-L-乳酸(poly-L-lactic acid、PLLA)表面に垂直にフェムト秒レーザーを照射し微細構造を作製した。図2にパルス幅 100 fs として(a)中心波長 800 nm、レーザーフルエンス 1.0

J/cm²、10000 パルスの条件および(b)中心波長 400 nm、レーザーフルエンス 0.30 J/cm²、3000 パルスの条件により作製した構造の走査型電子顕微鏡画像を示す。いずれも偏光方向に対して垂直な微細構造が作製され、平均周期は(a)約 150 nm、(b)約 100 nm であった。アブレーション痕を伴わない整った微細構造を大面積に作製するために、パルス幅、繰り返し周波数、レーザーフルエンス、パルス数、レーザー波長、等の条件最適化を試みた。図3にレーザー波長 400 nm においてレーザーフルエンスとパルス数を変化させた際の照射後の表面状態を示す。表面改質の有無、アブレーション痕の有無、微細構造の有無に基づき分類した。この結果から、微細構造が作製されるためには表面改質が可能なレーザーフルエンス以上で多パルス(3000パルス以上)照射する必要があることが明らかになった。現在、レーザー照射による生分解性の変化および細胞接着性についても研究を進めている。

【発表論文】

1. 矢田周平, 清水九史, 小原豪, 寺川光洋, “フェムト秒レーザーによる PLLA 表面へのナノ構造作製,”レーザー学会東京支部研究会, 2014 年
2. H. Shimizu, S. Yada, G. Obara, M. Terakawa, “Contribution of defect on early stage of LIPSS formation,” Optics Express, Vol. 22, pp. 17990-17998 (2014).
3. S. Yada, M. Terakawa, “Surface nanostructure formation on biodegradable polymer film by ultraviolet femtosecond laser irradiation,” 9-th International Conference on Photo Excited Processes and Applications (ICPEPA-9) (2014).

【31】 搭乗者の脳活動解析を用いた歩行支援機器 Tread-Walk の安心設計に関する研究

九州大学 大学院 工学研究院 助教 中島康貴

早稲田大学 理工学術院 教授 藤江正克

早稲田大学 創造理工学研究科 博士後期課程 三浦智

〔研究の概要〕

我々は、トレッドミル上の歩行者の歩行速度を推定し、速度を増幅してタイヤが回転する歩行支援機器 Tread-Walk を開発している。Tread-Walk 搭乗者の歩行速度と Tread-Walk の速度が異なるため、搭乗者に心理的な負担がかかることが課題である。本研究では Tread-Walk 搭乗中の脳機能を、ウェアラブル光トポグラフィを用いて解析したところ、速度増幅率が 1.5～2.0 の際に脳活動が有意に賦活した ($p < 0.05$)。我々は速度増幅率 1.5～2.0 において Tread-Walk 搭乗者は最も安心感を得られると結論づけた。

〔研究経過および成果〕

超高齢社会を迎えた我が国では、被介護者の自立による円滑な社会の循環を目指し、移動支援機器による高齢者の支援が望まれている。「Winglet: トヨタ」や「Segway: Segway Inc.」などの移動支援機器が普及しつつあるが、従来の移動支援機器を使用すると高齢者は外出時の歩行頻度が減るため、移動支援機器を使用した分だけ下肢の筋力低下を招くという問題点がある。そこで我々は移動支援機器であると同時に歩行支援機器でもある Tread-Walk を開発した。Tread-Walk はトレッドミル上を歩行している人の歩行速度をエンコーダの電流値から推定し、速度を増幅してタイヤを回転させるシステムである。

Tread-Walk は少ない筋力で速く遠くに進めるので外出を促進するという利点がある反面、Tread-Walk 搭乗者は歩行速度とタイヤの回転速度が異なるため、操作時に違和感が生じるという欠点がある。そのため、Tread-Walk の操作では歩行速度が増幅されるので乗っていて楽しいという高揚感がある反面、増幅速度

が速過ぎると操作に不安感を覚える。操作時の安心感を定量的に評価するためにはしばしば発汗やアンケートなどの官能指標が用いられるが、いずれも定性的かつ主観的という問題点がある。本研究では Tread-Walk 搭乗者の脳機能を測定し、搭乗者の安心感を定量化することで、Tread-Walk の適切な速度増幅率を導出した (Fig. 1)。

実験では、Tread-Walk 上を歩行する搭乗者の頭部にウェアラブル光トポグラフィ WOT-220 を装着し、リアルタイムに脳機能を測定した。ウェアラブル光トポ



Fig. 1 Tread-Walk with wearable fNIRS

グラフィは近赤外線を照射し、脳血流内の酸素化ヘモグロビン濃度を測定するため、脳波計に比較して頭皮の筋電などによる外乱に強い。計測部位は前頭前野内側部(国際 10-20 法で Fp1, Fp2)を選択した。前頭前野内側部は経験則から随意行動を達成すると活性化するという性質を有するため、Tread-Walk 搭乗者の歩行時において能動的に Tread-Walk を操作していると知覚可能な場合に賦活する。

Tread-Walk 操作時のタスクは 15[m]まづは直進し、左旋回した後に再度直進してスタート地点に戻り、最後に左旋回をして終了とする (Fig. 2)。Tread-Walk の速度増幅率は 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 の 5 条件である。試行回数は 1 被験者当たり 5 試行実施し、被験者は 5 名で実験を行った。

取得した酸素化ヘモグロビン濃度の生データに 5 次の Butter Worth ローパスフィルタ ($f < 0.1$ [Hz]) をかけ、計測ノイズや脈拍等の生体ゆらぎを除去した。また、タスクの前後 10[s] を最小二乗近似でベースラインとし、一次線形補正を行った。そして、各データにおける効果量を脳機能の指標として用いた。

実験の結果を Fig.3 に示す。速度増幅率が 1.5 の際に被験者 2 名において有意に前頭前野内側部が賦活した ($F(4,10) = 21.299, p < 0.01$) ($F(4,10) = 4.066, p < 0.05$)。また、速度増幅率が 2.0 において被験者 2 名は有意に前頭前野内側部が賦活した ($F(4,10) = 3.478, p < 0.05$) ($F(4,10) = 5.994, p < 0.01$)。残りの被験者 1 名は速度増幅率が 1.5 で最大となったが、有意な賦活は見られなかった。これらの実験結果から、速度増幅率が 1.5~2.0 において Tread-Walk 搭乗者は安心感を持って快適に操作できていると考えられる。

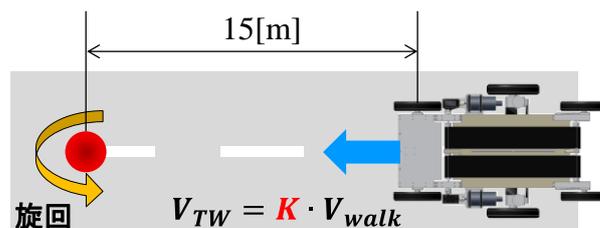


Fig. 2 Experiemental Course

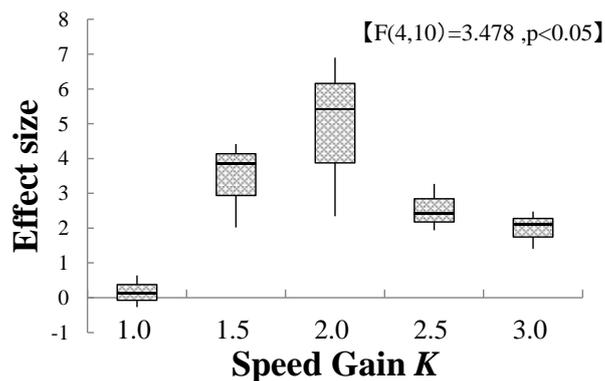


Fig. 3 Result of the subject.

[発表論文]

1. Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, **Yasutaka Nakashima**, Masakatsu G. Fujie, "Brain Activity Analysis for Design of Surgical Robot", Italy-Japan Workshop 2014, Tokyo, Japan, Dec., 11, 2014 (Student Competition First Place Award)
2. 三浦智, 小林洋, 川村和也, **中島康貴**, 藤江正克, "直感的な手術支援ロボットの開発を目指した脳内における身体化モデルの構築", Motor Control 研究会, 筑波, Aug. 7-9, 2014

【32】 光技術を応用した生理的セロトニンニューロン活動による扁桃体調節作用の解析

研究者 金沢医科大学医学部・生理学 I 助教 山本 亮

〔研究の概要〕

扁桃体におけるセロトニンの興奮性調節作用が、その亜核によって異なることは知られている。本研究ではセロトニンによるラット扁桃体外側核ニューロンの脱分極作用のイオン機構を精査した。セロトニンは静止膜電位を約 5mV 脱分極させた。薬理学的手法により、この脱分極には 5-HT_{2C} 受容体が必要であることを明らかにした。また、voltage clamp 実験により、この電流は GIRK 電流の抑制と TRPC 電流の増強であることを明らかにした。GIRK 電流の抑制には膜からの PIP₂ の枯渇が、TRPC 電流の増強には PI3-Kinase cascade の活性化が関わっていた。この一連の興奮性調節は扁桃体外側核でのみ観察され、亜核特異的なセロトニンの扁桃体興奮性調節作用が、恐怖学習や不安行動の適切な発現に必要である可能性を示唆している。今後、光遺伝学を用いて、セロトニン作動性線維のより生理的な作用を明らかにしていく。

〔研究経過および成果〕

緒言

扁桃体外側核と外側基底核は恐怖学習とその消去に必須である。これらの核は背側縫線核からセロトニン作動性入力を強く受けており、扁桃体でのセロトニン濃度変化は恐怖反応や、ストレス応答に重要な役割を果たしていると考えられている。我々は扁桃体外側核と外側基底核とにおけるセロトニンの作用が異なることをすでに報告しており、本研究ではより詳細なイオン機構を解明することを目的とした。

材料・方法

生後3~4週の Wistar rat から脳薄切切片 (300 μm) を作成し、顕微鏡下 (BX51WI、Olympus) で扁桃体外側核、外側基底核を確認し whole cell patch clamp 電気記録を行った。

過分極側での I-V relationship を得るためには、-50mV に電位固定し、-50mV から -130mV へ 320ms の voltage ramp を用いた。脱分極側での I-V

relationship を得るためには、-70mV に電位固定し、-70mV から +20mV へ 2.25s の voltage ramp を用いた。

直列抵抗の 80% は補正し、記録中に 15% 以上変化した場合は記録を破棄した。

結果

顕微鏡下で同定した扁桃体外側核および外側基底核興奮性ニューロンから current clamp mode で膜電位記録を行いセロトニンを投与したところ、外側核では約 5mV の脱分極が観察されたが、外側基底核では膜電位変化は観察されなかった。

この脱分極のイオン機構を精査するため、voltage clamp mode で -50mV に電位固定し、voltage ramp を与え、セロトニン投与前と後で比較し、生じた電流の I-V relationship を観察した。その結果、約 -105mV 付近に逆転電位を計測した (図1、赤線)。この電流は 5-HT_{2C} 受容体の阻害薬によって消失したことから、5-HT_{2C} 受容体がセロトニン誘因性脱分極に必須であると考えられる。逆転電位からカリウム電流の抑制の

関与が想定されるため、Barium を用いてカリウム電流の影響を除外し、残った電流の I-V relationship の変化を観察したところ、図1の赤線から黒破線へと変化した。この電流の特性を調べるために-70mV に電位固定し voltage ramp を用いて I-V relationship を調べたところ、逆転電位は-20mV 付近で外向き整流性が見られた(図1、黒破線)。これは Transient Receptor Potential C (TRPC)チャネルの電流特性と近似している。TRPC チャネルの関与を確認するために各種 TRPC チャネル阻害剤を用いて電流を測定したところ、いずれの場合にもこの電流は抑制された。また、PI3-kinase の阻害剤も同様にこの電流を抑制した。つまり、セロトニンは 5-HT_{2C} 受容体→PI3-kinase→TRPC というカスケードで TRPC チャネルを活性化していると考えられる。

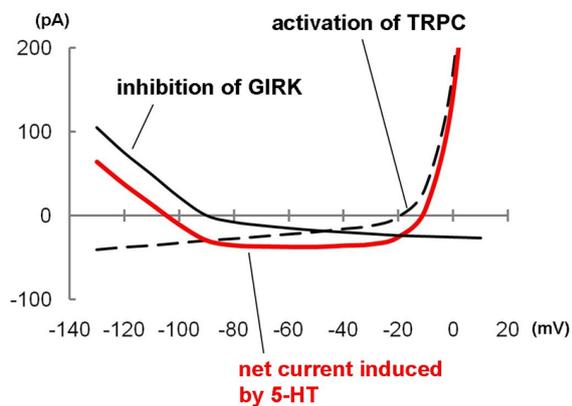


図1、セロトニン誘因性脱分極の電流構成。TRPC 電流の増強(黒破線)、GIRK 電流の抑制(黒線)、正味の電流(赤線)。

Barium-insensitive 電流は以上の結果より TRPC 電流と考えられる。ここで Barium-sensitive のカリウム電流がどの K チャネルに依拠しているかを明らかにするために、PI3-kinase 阻害剤存在下で I-V relationship を観察した。その結果、図1の黒線が得られた。この電流特性は G-protein coupled inwardly rectifying potassium (GIRK) チャネルが抑制された場合とほぼ

相似である。この電流が GIRK 電流の抑制によるものであれば膜の PIP₂ に影響を受ける。これを確認するため、PIP₂ 合成阻害剤の影響を確認したところ、この K 電流のセロトニンによる抑制は増強された。すなわちこの K 電流は GIRK であると言える。

以上より、セロトニンによって誘起される脱分極は図1に示される 2 種類の電流によって構成されていることが明らかになった。また、その細胞内カスケードを図2に示した。

このセロトニンによる扁桃体外側核の興奮性調節機構は恐怖反応や不安行動の発現に密接に関わっていると考えられる。今後、光遺伝学を用いて、in vitro 電気生理、in vivo 行動実験を組み合わせ、セロトニン作動性ニューロンの生理的な扁桃体興奮性調節機構について精査することを計画している。

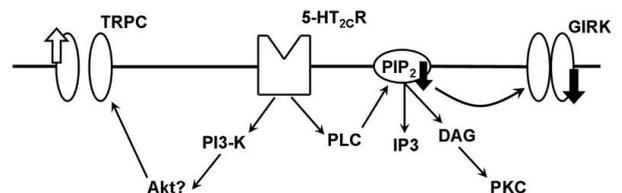


図2、セロトニン誘因性脱分極の細胞内シグナルカスケード。PI3-kinase、Akt を介して TRPC 電流が増強される。また、PLC が PIP₂ を膜から枯渇させることで GIRK 電流が抑制される。

[発表論文]

Yamamoto R., Hatano N., Sugai T., Kato N. Serotonin induces depolarization in lateral amygdala neurons by activation of TRPC-like current and inhibition of GIRK current depending on 5-HT_{2C} receptor. *Neuropharmacology* 82:49-58, (2014).

【33】 神経情報処理の入力と出力に関わる神経活動の可視化による定量化

甲南大学理工学部 / 統合ニューロバイオロジー研究所 准教授 久原 篤

甲南大学大学院 自然科学研究科 研究員 宇治澤 知代

甲南大学理工学部 / 日本学術振興会 特別研究員 RPD 太田 茜

〔研究の概要〕

感覚や記憶の脳神経メカニズムを理解することは、現代社会においても重要な課題である。本研究では、シンプルな神経系をもつ線虫 *C. elegans* において最先端の光技術を用いることで、個体の温度応答を制御する神経細胞の特性をとらえた。その結果、新規の現象としてフェロモン受容ニューロンによる温度感知の分子生理学的な機構が見つかった (Ohta, Ujisawa et al., *Nature commun.*, 2014)。さらに、生命科学解析に加え、従来の温度神経細胞活動の可視化技術を発展させる解析もおこない、特にトラッキングシステムを用いたカルシウムイメージングや新しい温度制御装置の開発に取り組んだ。

〔研究経過および成果〕

背景

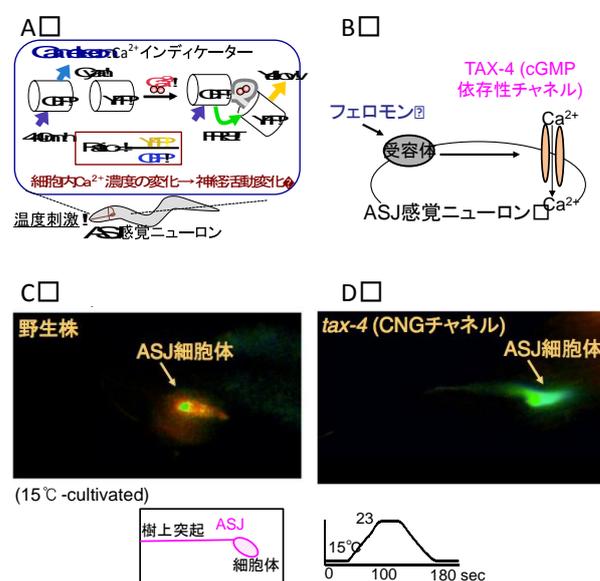
認識や記憶学習の脳神経メカニズムを理解することは、神経疾患等の医療面において重要な課題である。しかし、人間の脳は約 1000 億個の神経細胞をもつため、それらが組合わさってできる神経ネットワークは天文学的なものとなる。*C. elegans* は、シンプルな神経系をもつため神経解析に利点があり、最先端の光技術などを導入した神経情報処理の解析に利用されている。神経細胞の生理的・物理的性質は、人間から線虫まで広く保存されているため、本研究で得られる解析技術の基盤は、将来的に人間の脳情報処理の計測に応用されることが期待されている。

結果と考察

3D 可変製の顕微鏡ステージに、電圧により温度を変化させることができるペルチェ素子を内蔵し、温度変化に応じた、神経回路の活動を細胞トラッキングにより測定した。実験系としては、温度適応に関与することが示唆されていた、頭部に一対存在する ASJ 感覚ニューロンをもちいた。野生株の ASJ 感覚ニューロン

にカルシウムインディケーター遺伝子である *yc3.60* (図 1A) を発現させ、温度刺激による細胞内カルシウム濃度の変化を測定したところ温度変化に応じたカルシウム濃度変化が観察された (図 1C)。一方、温度適応に異常をもつ cGMP 依存性チャネル TAX-4 の変異体では、温度応答が観察されなかった。このことから、TAX-4 は温度応答に関与していることが示唆された。また、生物学的解析に加え、最新の温度制御装置のプロトタイプの開発も行った (図 2)。

図1 ASJ 感覚ニューロンのカルシウムイメージング



- A. 遺伝子によってコードされるカルシウムインディケータであるカメレオン遺伝子(yc3.60)
- B. ASJ 感覚ニューロンにおけるフェロモンと温度の情報伝達に関わる cGMP 依存性チャネル(TAX-4)
- C. 野生株の ASJ 感覚ニューロンに yc3.60 を発現させた系統に 15°Cから 23°Cの温度刺激を与え、その際の細胞内カルシウム濃度の変化を測定。
- D. *tax-4* 変異体の ASJ ニューロンに yc3.60 を発現させた系統に 15°Cから 23°Cの温度刺激を与え、その際の細胞内カルシウム濃度の変化を測定。

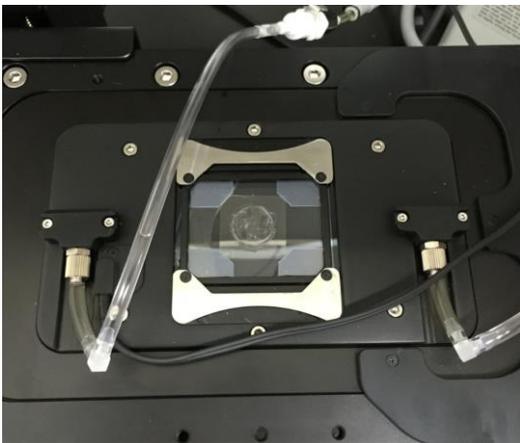


図 2 顕微鏡ステージ上に装着された塩化インジウムスズ素材の温度制御装置のプロトタイプ機

まとめ

トラッキングソフトとカルシウムイメージング解析から、フェロモン感覚ニューロンとして知られている ASJ 感覚ニューロンが、温度も感知することを同定した。また、他の解析結果と統合すると、頭部の 1 対の感覚ニューロンで受容された温度情報が、体内の腸等の組織に伝達され、低温への適応を制御することが見つかった。この結果は、従来の温度適応の概念からは見つかっていない新しいものであった(Ohta, Ujisawa et al., *Nature commun.*, 2014)。本解析から開発が進んでいる装置をより発展させることで、今後、神経情報処理の新規の概念がさらに明らかにされると考えられ

る。また、開発中の温度制御装置やトラッキング装置に関してはさらなる改良により、汎用性の高いものになると考えられる。

謝辞

本研究助成を頂きました公益財団法人カシオ科学振興財団の関係者各位に心より感謝申し上げます。また、本研究に協力頂きました甲南大学工学部生体調節学研究室の構成員に感謝申し上げます。

【発表論文】

1. Ohta, A., Ujisawa T., Sonoda S., Kuhara, A.
Light and pheromone-sensing neuron regulates cold habituation through insulin signaling in *C. elegans*
Nature commun., 5: 4412, doi: 10.1038/ncomms5412, 2014
2. Ujisawa T., Ohta, A., Okahata M., Sonoda S., Kuhara, A.
Cold tolerance assay for studying cultivation-temperature-dependent cold habituation in *C. elegans*
Protocol Exchange, doi:10.1038/protex.2014.032, 2014
3. Ujisawa T., Ohta, A., Kuhara, A.
Long-term calcium imaging of ASJ sensoryneuron controlling cold tolerance in *C. elegans*
Protocol Exchange, doi:10.1038/protex.2014.034, 2014
4. 久原 篤
線虫 *C. elegans* における温度と神経を主軸とした生体調節学, 比較生理生化学, Vol.31 No.3, p131-132, 2014

【34】我が国の法科大学院における法曹以外の人材養成機能 および就職支援の在り方に関する研究

研究者 弘前大学21世紀教育センター 准教授 田中正弘

【研究の概要】

本研究は、我が国の法科大学院における法曹(裁判官, 検察官, 弁護士)以外の人材養成機能に着目する。法科大学院は、学校教育法で規定される「専門職大学院であって、法曹に必要な学識及び能力を培うことを目的とする」(「法科大学院の教育と司法試験等との連携等に関する法律」平成14年法律第139号)。よって、法科大学院は法曹養成に特化した教育機関であることが法的に求められている。しかしながら、司法試験合格率が近年25%程度で低迷しているため、法科大学院の修了生の多くは法曹になれない状況となっている。そこで、本研究は、法科大学院における法曹以外の人材養成機能および就職支援の在り方を議論し、その意義を示す目的で、質問紙調査や訪問調査を実施した。

【研究経過および成果】

司法試験合格率が25%程度で低迷していることや、法科大学院の志願者・入学者が急速な減少傾向にあることを鑑みて、法科大学院の校数や学生定員が過大であると判断した政府は、法科大学院の組織を見直す狙いで法曹養成制度関係閣僚会議の設置を2012年8月21日に閣議決定した。そして、この閣僚会議の下に、法曹養成制度検討会議が設置された。この検討会議の議論の成果は、「取りまとめ」(2013年6月26日)として公表されている。

「取りまとめ」は、法科大学院にとって、存続に関わる厳しい提言内容を含んでいる。その提言内容とは、①法科大学院の定員削減、②法科大学院の自主的な組織見直し(統廃合)、③それらを実行しない法科大学院への法的措置(政府の制裁)である。ここでの法的措置が何を意味するのかわからないが、法的措置の施行を閣僚会議が2013年7月16日に正式決定したことの影響は、甚大であった。というのも、2015年4月の学生募集を断念した機関が13校

(2014年7月1日現在)も出たからである。その結果、最大74校存在した中から20校が脱落し、(2015年度以降も学生を受け入れる機関は)54校となった。

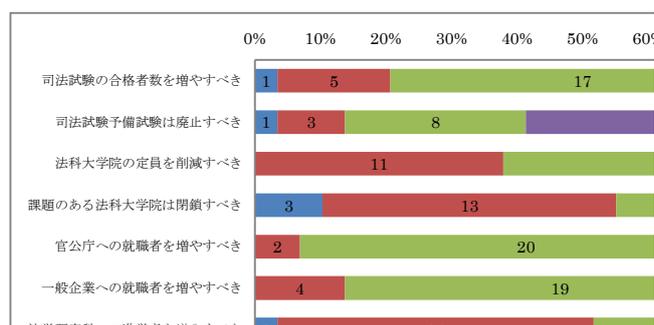
法科大学院の廃止は痛みを伴う決定であるため、避けられる限り、避けるべき決定といえる。とはいえ、何の対処も施さずに問題を放置したままでは、法科大学院の制度自体が社会の信頼を損なってしまう。その上、司法試験の年間合格者数が削減されていくことが予想される中で、法科大学院の現在の規模を保持しようとする、司法試験の不合格者を大量生産することになってしまう。そこで、本研究は、修了生の就職(特に、法曹以外の就職)支援制度の充実を、法科大学院の生き残り策として提案することを試みた。そして、就職支援制度の現状を調べる目的で、独自の質問紙調査と訪問調査を実施した。

具体的に、「法科大学院の就職支援制度に関する現状調査」という質問紙調査を、2014年4月～5月に実施した。調査の対象は、同年4月までに学生募集停止を公表した法科大学院15校を除く、全59校で、

回答した機関は29校、その回収率は49.2%となった。また、法科大学院(明治大学, 専修大学, 東北大学, 成蹊大学, 愛知学院大学)への訪問調査を2014年10月に行った。

質問紙調査の結果の一例として、法科大学院の課題に関する項目ごとに4件法で尋ねたところ、表1のような結果を得られた。

表1：法科大学院の課題 (n=29)



「官公庁への就職者を増やすべき」や「一般企業への就職者を増やすべき」の質問に、それぞれ26校(92.9%), 24校(85.7%)という圧倒的多数が、「あてはまる」と答えた。官公庁や一般企業への就職は、法曹の職域拡大と、司法試験不合格者の就職先確保という、二つの側面がある。一つ目の法曹の職域拡大は、法科大学院の量の維持という観点で重要である。事実、自由記述欄にも下記の指摘があった。

今後の方向としては、司法試験合格者の官公庁・企業・教育研究機関等での活躍の場が広がり、そのこともふまえて司法試験の合格者数を増やすほうへ事態が進んでいく(法科大学院修了生就職支援の問題がそのような状況のなかに位置づけられる)ことが望ましいと考えます (A17)。

二つ目の不合格者の就職先確保は法科大学院の多様化の観点から重要である。事実、不合格者の就職を組織的に支援する工夫の一つとして、成蹊大学「法科大学院は、地元自治体との連携強化の

計画を立て、『自治体法務』担当という新しい職域の開拓を試みた」(成蹊大学法科大学院訪問調査：2014年10月21日)。

司法試験不合格者の活躍の場は未開拓である。彼らの能力を不合格という事実のみで判断して、高度な法的素養を持つ高学歴人材の活用を怠れば、我が国は深刻な人材の損失に直面することになる。自由記述欄にも同様の意見が付されていた。

司法試験に合格できなかったという事のみをもって、新卒大学生に比べ就職活動が難しくなる、不利に扱われるという事実は問題であると思う。勉強量、知識、働く意欲の高い者が、適切な場で働ける社会になることを強く望む (A14)。

法科大学院は法曹養成に特化した専門職大学院であるという認識の下では、法曹の急激な需要拡大・職域拡大が見込めない場合に、法科大学院の校数・定員が過大であると批判されても仕方がない。しかし、法科大学院は高度な法的素養を身につけた人材を養成する専門職大学院という定義が新たに成り立つのであれば、現在の校数・定員は、必ずしも過剰とはいえない。換言すれば、現状規模を維持するには、法曹以外の職域にも修了生を輩出できるような就職支援制度の迅速な整備が不可欠である。

【発表論文】

1. Masahiro Tanaka, 2014, “A Study on the Employability of Law School Graduates in Japan”, SRHE Annual Research Conference, Conference Programme & Book of Abstracts, 49.
2. 田中正弘(2015)「法科大学院の人材養成機能と就職支援—組織廃止を強要する政策提言への反論—」『21世紀教育フォーラム』第10集(印刷中)。

【35】人間の質感認知に関わる基軸画像情報 -心理応答に着目して-

研究者 山形大学大学院理工学研究科 准教授 永井 岳大

〔研究の概要〕

ヒトの視覚認知における様々な物体表面特徴(質感)の重要性の比較を目的とし、素材カテゴリ認知における応答時間や呈示時間の影響といった高次質感認知の時間特性を心理物理実験により測定し、さらにその時間特性を光沢感、ざらざら感などの様々な知覚的表面特徴との関係性から解析した。その結果、素材カテゴリ判断における応答時間や刺激呈示時間が短いときには、視覚的な表面特徴(光沢感、透明感など)との関係性が強く、応答時間や刺激呈示時間が長いときには、非視覚的な表面特徴(ざらざら感、重さ感など)との関係性が強かった。これらの結果は、表面特徴によって視覚認知処理における重要度が異なる可能性を示している。表面特徴によって、高次質感認知との関係性、あるいはその処理負荷や処理時間が大きく異なると考えられる。

〔研究経過および成果〕

従来の視覚情報からの質感認知に関する研究から、単純な画像統計量よりも、光沢感・ざらざら感などの表面特徴知覚量が物体素材認知の重要な手掛かりであることが示唆されている(Hiramatsu et al., 2011)。しかし、表面特徴間の脳内処理機序の違いはほとんど議論されておらず、その処理機序や関連画像成分の解明が急務である。本研究では、様々な表面特徴の重要度を素材認知との関係性から定量化し、視覚情報に基づく表面特徴処理機序の理解のための枠組みを構築することを目的とした。複数の実験を行ったが、本論文では、2種類の物体が同じ素材カテゴリに属するかを判断する素材カテゴリ弁別課題遂行における応答時間に着目した実験を紹介する。

実験刺激は暗室中に設置されたCRTモニタに呈示され、7種類の素材カテゴリ(金属、樹脂、ガラス、布、皮革、木、石)からなる131種類の実物体サンプルの写真により構成された。各刺激は2種類のサンプル(刺激の左右)と2種類の露光時間(刺激の上下)の

写真計4枚から構成されていた。刺激内のサンプルの組合せ数について、同一素材カテゴリのサンプルの組合せを523、異素材カテゴリのサンプルの組合せを525とした。

本研究では、素材認知と表面特徴の関係性に着目するため、事前に各物体の写真に対する表面特徴の心理量を計測した。対象とした表面特徴は明るさ感、色鮮やかさ感、光沢感、透明感、模様感、ざらざら感、冷暖感、硬さ感、重さ感の9種類であった。被験者は物体写真を1枚ずつ観察し、各表面特徴について7段階で評定した。10名の被験者の評定平均値を表面特徴の心理量と定義した。

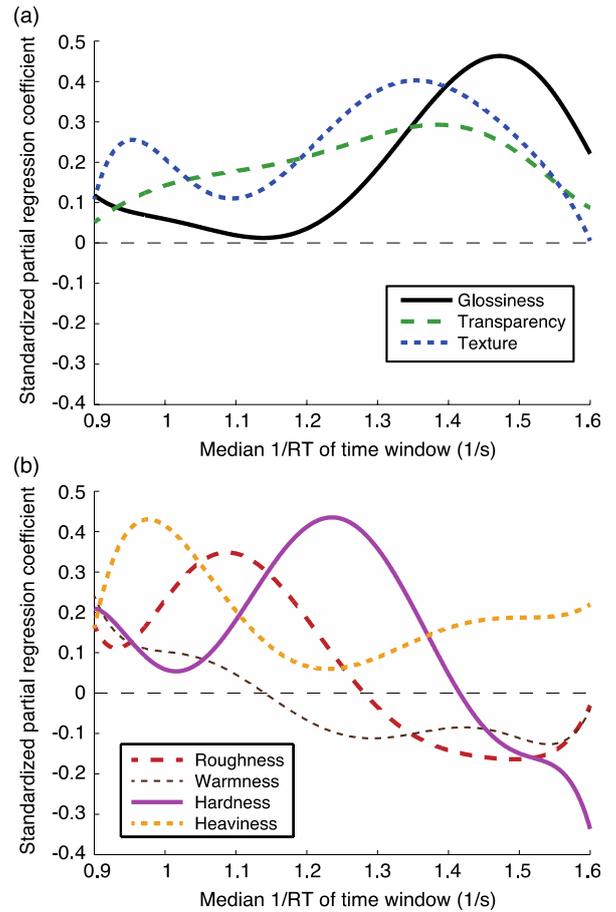
各試行において、被験者がマウスボタンをクリックすると、刺激が500ms間呈示された。被験者は左右の写真のサンプルが同じ素材カテゴリに属するか否かをマウスクリックにより二肢強制選択で応答した。なお、被験者には、「刺激呈示開始後なるべく早く、かつ正確に応答する」ように教示した。

結果として、全サンプル組合せ、全被験者の平

均正答率は 88.4% であり、比較的易しい課題であったことがわかる。そこで、異素材カテゴリ組合せ刺激に対する正答試行のみを抽出し、課題難易度と関連する応答時間に着目する。

素材カテゴリが異なれば表面特徴の心理量の差も大きく異なることが予想されるため、サンプル間の表面特徴心理量の差と応答時間の関係を解析した。具体的には、様々な応答時間範囲において、表面特徴の心理量差を説明変数、応答時間の逆数を目的変数として、重回帰分析を行った。分析結果として、各表面特徴の標準化偏回帰係数に対し近似した 6 次多項式関数を図に示す。この関数のピークが現れる応答時間帯に着目すると、短い応答時間（およそ 800 ms 以下）については、光沢感や模様感など視覚情報に強く依存する表面特徴において応答時間との関係性が高い（図(a)）。一方、遅い応答時間（およそ 800 ms 以上）については、重さ感や冷暖感など触覚情報に強く依存する表面特徴において応答時間との関係性が高い（図(b)）。この結果から、「表面特徴」として多種多様に考えられるものが、素材認知との関わりの強さにより分類できる可能性がある。

同様の結果は、刺激呈示時間の影響においても見られた。すなわち、短時間呈示時の素材カテゴリ認知と関係性が強いのは視覚情報に強く依存する表面特徴のみであった。本研究から、様々な質感特徴の視覚処理における重要度を定量化する手法が確立され、また実際に 9 種類の表面特徴を重要度に基づき 2 グループに分類することができた。これは、今後詳細な画像成分と表面特徴認知の関係性を理解するための大きな枠組みを与える成果だといえよう。



図：(a) 光沢感、透明感、模様感の標準化偏回帰係数。(b) ざらざら感、冷暖感、硬さ感、重さ感の標準化偏回帰係数。

[発表論文]

1. Takehiro Nagai, Toshiki Matsushima, Kowa Koida, Yusuke Tani, Michiteru Kitazaki, & Shigeki Nakauchi: Temporal properties of material categorization and material rating: Visual vs non-visual material features. *Vision Research* (in press).
2. 永井岳大, 松島俊樹, 鯉田孝和, 谿雄祐, 北崎充晃, 中内茂樹: 素材カテゴリ認知の時間特性—質感属性との関係に着目して—. 映像情報メディア学会 HI 研究会, 熊本, 2014年11月28日. 映像情報メディア学会技術報告, 38(46), 13-16, 2014.

【36】 公共空間におけるインタラクティブディスプレイの要因が 人間の認知・行動・感情に及ぼす影響の実験的検証

研究者 香川大学工学部 准教授 市野 順子

〔研究の概要〕

インタラクティブディスプレイの角度がシングルユーザーに与える影響を探る。実地に近づけることを目指した実験室実験において、1 つの展示室内に垂直・水平・斜めの 3 種類の平面ディスプレイを配置し、ユーザーを認知・行動・感情の側面から包括的に検証した。認知の側面から見ると、年齢によって傾向が異なっており、若年齢層のユーザーは垂直、中年層は斜め、高年齢層は水平のディスプレイ上に提示された情報の内容を最も理解・記憶した。感情の側面から見ると、年齢に関係なく、ユーザーは、斜めのディスプレイが、最も目に止まりやすく、最もじっくり閲覧しやすく、最も内容を理解・記憶しやすく、最もインタラクションしやすく、最も好む、と評価した。また行動的側面に関しても、有意差は見られなかったものの感情的側面の結果と概ね類似した結果が得られた。

〔研究経過および成果〕

■ 研究課題

本研究では、博物館・美術館において映像資料の展示を行う際の、ディスプレイの角度の効果に関して、以下の研究課題を設定した。

RQ1:どの角度のディスプレイが目に止まりやすいか？ RQ2:どの角度のディスプレイがじっくり閲覧しやすいか？ RQ3:どの角度のディスプレイが内容を理解・記憶しやすいか？ RQ4:どの角度のディスプレイがインタラクションしやすいか？ RQ5:角度の異なるディスプレイをどのように体験するか？
--

■ 実験設計

実験環境 部屋の中央に、角度条件が異なる 3 台のディスプレイを設置した。角度条件は、垂直・水平・斜めの 3 種類であった。3 台のディスプレイは、すべて同一のタッチパネル一体型の 40 型液晶ディスプレイを用いた。

参加者 美術館を訪れる人は年齢、性別、職業など様々だが、これにできるだけ近似させるために、42 名の参加者を一般から募集した。平均年齢は 34.0 歳（最年少 18 歳、最年長 57 歳）であった。

実験手順 参加者には、展示室内を歩いて、普段、美術館で観覧しているときと同様に自由に滞在してもらおう依頼した。実験の最後に、主観評価アンケートと、展示映像の内容に関する再認テストを行った。

データ収集 5 つの研究課題に対し、認知・行動・感情の側面から包括的に検討するために、表 1 に示すデータを集めた。

■ 実験結果

実験結果を表 1 にまとめる。実験結果を総括すると、ディスプレイの角度は、ユーザーの認知および感情に影響を与えることが明らかとなった。ユーザーの行動に関しては、有意差は認められなかったものの感情的側面の結果と概ね類似した結果が見られた。

目に止まりやすい角度 RQ1 に関して、主観評価値の結果から、斜めのディスプレイが最もユーザーの目に止まりやすく、水平のディスプレイが最も目に止まりにくいことがわかった。また、入室直後の接近確率に

表 1 実験結果のまとめ

認知	行動	感情
RQ1	接近確率 n.s. (T > V > H)	主観評価値 T > V > H
	滞在時間 n.s. (T > V > H)	主観評価値 T > H > V
RQ2	歩行時間 n.s. (H > T > V)	
	ページ到達率 n.s. (T > V > H)	主観評価値 T > V > H
再認成績		
全体: n.s. (V > T > H)		
RQ3	若年齢層: V > T > H	
	中年年齢層: T > H > V	
	高年齢層: H > V > T	
RQ4	タッチ頻度 n.s. (T > H > V)	主観評価値 T > H > V
	ページ到達率 n.s. (T > V > H)	
	接触確率 n.s. (T > V > H)	
RQ5		主観評価値
		魅力 T > H > V
		心的負荷 T > H > V

V: Vertical, H: Horizontal, T: Tilted
下線: 多重比較検定において統計的有意差が認められたペアを含むもの

においても、統計的有意差はないものの、同様の傾向が見られた。これらの結果から、例えば、展示ストーリー上の特定のエリア全体のコンセプトを提示する場合や展示施設全体のメッセージを伝えたい場合など、来館した多くの人に立ち止まって目を通してもらいたい情報を提示する場合は、ディスプレイを斜めに設置することが適切であることが示唆される。

閲覧しやすい角度 RQ2 にして、主観評価値の結果から、斜めのディスプレイがユーザーにとって最もじっくり閲覧しやすいことがわかった。また、滞在時間、ページ到達率においても、統計的有意差はないものの、同様の傾向が見られた。これらの結果から、関心のある一部の人に時間をかけて閲覧してもらいたい情報を提示する場合は、ディスプレイを斜めに設置することが適切であることが示唆された。

理解・記憶しやすい角度 RQ3 に関しては、ユーザーの認知と感情の結果が一致しなかった。全ユーザーの平均値で見ると、感情的側面の結果からは斜めのディスプレイが、認知的側面の結果からは垂直のディスプレイが、ユーザーにとって最も内容を理解・記憶しやすいと判定された。認知的側面の結果を年齢層別で見ると、それぞれ結果が異なっていた——若年齢層は垂直、中年年齢層は斜め、高年齢層は水平のときに、ディスプレイに提示された情報を最も理

解・記憶した。企画している展示空間が対象としている年齢層をある程度限定できる場合は、これらの結果を参考にして、空間の設計を行うことができる。

インタラクションしやすい角度 RQ4 については、主観評価値の結果から、斜めのディスプレイがユーザーにとって最もインタラクションしやすいことがわかった。また、統計的有意差はないものの、全ユーザーの平均値を見ると、タッチ頻度、ページ到達率、入室直後の接触確率の結果からも同様の状況が伺えた。これらの結果から、インタラクティブ性の高い映像資料を展示する場合は、ディスプレイを斜めに設置することが適切であることが示唆される。

好感の持てる角度 RQ5 に関して、2 種類の主観評価値の結果から、ユーザーは、斜め、水平、垂直の順で、好むことがわかった。対象物の魅力の程度をたずねた評価項目の結果からは、斜めのディスプレイが、水平と垂直のディスプレイと比べて、ユーザーにとっては極めて魅力的に映っており、水平と垂直のディスプレイは、概ね同じ評価であった。これらの結果から、エンターテインメント性の高い体験を来館者に提供したい場合は、ディスプレイを斜めに設置することが適切と考えられる。

〔発表論文〕

1. 市野順子他: 博物館・美術館におけるディスプレイ角度がユーザーの認知・行動・感情に与える影響, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J96-D, No.11, pp.2846-2859, 2013.
2. 市野順子他: インタラクティブパブリックディスプレイの角度要因はパーソナルスペースに影響を及ぼすか?, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎(HCS)研究会, vol.114, no.273, HCS2014-70, pp.61-66, 2014.10.

【37】 情報科学系大学院生を対象にした社会人基礎力向上教育と その効果計測の方法に関する研究

研究者 名古屋大学大学院情報科学研究科 助教 松原 豊

特任准教授 高嶋博之

准教授 吉田則裕

研究員 舘 伸幸

〔研究の概要〕

産業界は、情報系学生に対して主体的に活動できる能力を要求している。この要求に応えるために、我々はPBL(Project-Based Learning) を発展させた OJL (On the Job Learning) という手法で、大学院生を対象に組込みシステム技術の教育を実施している。OJL では、仮想の技術課題ではなく、企業の持つ実際の開発テーマを題材にしたソフトウェア開発プロジェクトの中で、仕事(開発)の進め方を学生に体験学習させる。本研究では、OJL の学習達成度を判定する指標を設計し、それに基づく教育効果の測定を試行した。

〔研究経過および成果〕

OJL による教育とその評価にあたっては、経済産業省の組込みスキル標準 ETSS(Embedded Technology Skill Standards)を参考に、インストラクショナル・デザインを用いて、目標行動と評価基準を定義した。さらに、評価基準に基づいて合格基準を設計した。

1. 目標行動

学生が実践力を身につけるためには、仕事の進め方だけでなく、ETSS に定義されている能力を総合的に修得し、実際に仕事を進める経験が必要である。OJL において学生に期待する行動(目標行動)として以下の 2 項目を設定した。

- a. 企業の開発テーマ固有の技術要素に関わる課題を、最適な開発技術や開発プロセスを駆使することで解決する。
- b. 計画の立案と運用の管理技術を理解し、レビューや日常業務において、最適なコミュニケーションなどのパーソナルスキルを発揮する。

2. 教育フレームワーク

学生は、図1 に示す OJL の教育フレームに基づいて、開発テーマプロジェクトに参加する OJL のプロジェクトには、学生の他に、大学教員が、企業からは管理者と開発担当者がそれぞれ参画する。

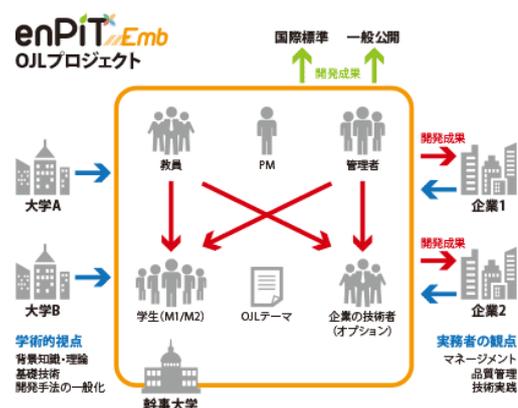


図1 OJL の教育フレーム

教員は学術的な立場から学生を指導し、企業の管理者と開発担当者は、システム開発課題を提供するとともに、実践的な開発手法や管理手法の指導を行う。さらに、プロジェクトには、専任の PM(Project Manager)を置き、プロジェクトのマネジメントを通じて

学生の実践力を育成する。プロジェクトを進める中で、学生はPMから、あらゆる助言を得ることができる。

3. 合格基準

合格基準については、目標行動 a と b に関する達成度として、以下の項目を総合的に評価した。

- I. プロセス計画の立案と実施状況
- II. プロセスを遵守した開発行動の実行状況
- III. 開発成果物に対する評価
- IV. 合宿への参加状況

4. 実施結果

評価は、2013年10月からOJL基本コースに参加した31名(学部4年3名, 修士課程1年27名, 修士課程2年1名)を対象とした。このうち、合格基準に達したのは27名であった。合格判定は、担当教員や企業担当者の意見も参考の上、PM全員で決定した。受講者31名のうち23名から回答が得られたアンケート結果の一部を図2に示す。

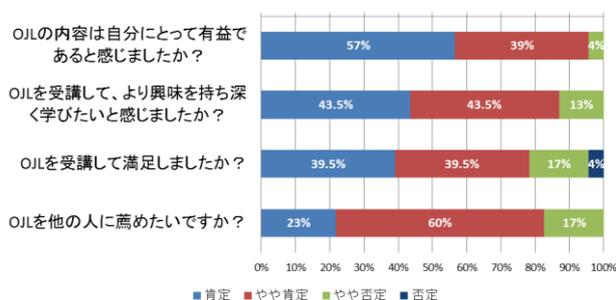


図2 受講者アンケート結果

「OJLの内容が有益であったか」に関して96%、「より深く学びたいか」に関しては87%の受講生が肯定した。さらに、満足度の肯定的な意見は78%であった。やや否定的な意見の理由として、開発内容や週報提出の負担が大きいという意見が得られたものの、ほとんどの受講生にとって有意義であったことが評価できた。

より詳細に学生の意見を聞くために、男女各1名の学生に対して、30分程度のインタビューを実施した。

OJLで身に付いた能力として、両名ともに、スケジュール管理能力と、書いたり伝えたりするコミュニケーション能力を挙げていることから、目標行動bに関する教育効果を読み取ることができた。以上の評価結果から、OJLの合格基準を満たした学生の能力向上が見受けられる一方で、次の2つの課題が残った。

- a. その能力向上がOJLによるものかどうか
 - b. 実際の職場でOJLの目標行動を実践できるか
- aについては、基本コース合格者27名のうち、21名が継続して受講した発展コース(2014年4月~9月)修了後に、基本コースと発展コースの成果を比較することで、OJLの教育効果を詳細に分析する予定である。bについては、OJL受講者に対して、就職後にインタビューを実施し、評価する予定である。

本研究の成果について、一部ではあるが、学会と学術論文誌にて発表することができた。最後に、本研究に関して、協力、議論、助言等頂いた方々に心より感謝申し上げる。

【学会発表・論文】

1. 舘伸幸, 山本雅基, 吉田則裕, 高嶋博之, 海上智昭, 安藤友樹, 松原豊, 本田晋也, 高田広章, “OJLによる実践的組込みシステム教育”, 日本ソフトウェア科学会学会誌(採録決定)
2. 舘伸幸, 山本雅基, 吉田則裕, 高嶋博之, 海上智昭, 安藤友樹, 松原豊, 本田晋也, 高田広章, “OJLによる実践的組込みシステム教育”, 日本ソフトウェア科学会第31回大会, 2014年9月
3. 松原豊, 安藤友樹, 吉田則裕, 舘伸幸, 高嶋博之, 海上智昭, 山本雅基, 本田晋也, 高田広章, “OJL(On the Job Learning)を中心とした実践的産学連携教育”, 組込みシステムシンポジウム2014(ESS2014), 2014年10月

【38】 相対的年齢効果の実態とメカニズムに関する実証研究

研究者 日本女子大学人間社会学部 専任講師 山下 絢

〔研究の概要〕

本研究は、相対的年齢効果(relative age effects)をテーマとし、その実態とメカニズムに関して、実証的な見地から検討を行うと同時に、政策的対応について検討した。その結果、相対的年齢効果の実態は、程度の問題はあるものの、各国において相対的年齢効果が確認された。またそのための政策的対応として、例えば、米国では、Academic Redshirting(就学時期の延期)が導入されていることを明らかにした。そして、Academic Redshirting の利用は、保護者の社会経済的地位と関連があることが実証されていることなどを示した。

〔研究経過および成果〕

本研究は、相対的年齢効果(relative age effects)をテーマとし、その実態とメカニズムに関して、実証的な見地から検討を行うと同時に、政策的対応について検討した。研究は、(1)先行研究のサーベイ、(2)米国教員へのインタビュー調査、(3)学会での資料収集を通じて、研究は遂行された。その研究成果の一部は、日本教育行政学会第49回大会において、報告を行った。

相対的年齢効果とは、早生まれの子どもが、学力(テスト得点)、教育達成(学歴)、スポーツにおいて、平均的に見た場合にポイントが低い状況を表す概念である(森・川口 2007, 山下 2013)。

相対的年齢効果の実態としては、例えば日本においては、短期効果(学力)、長期効果(教育年数)ともにその存在が知られている。また、国際比較の観点からは、効果の程度に差はるものの、日本だけではなく、韓国、台湾、香港、シンガポールの東アジア諸国においても相対的年齢効果が確認

されている(小塩・北條 2012)。

このような相対的年齢効果にみられる不平等を是正するための議論も行われているが、米国においては、1つの方策として、入学年度を1年ずらして入学することが可能になっている州がある。こうした入学年時期を遅らせて入学することは Academic Redshirting(〔子どもが精神的知的肉体的に未発達なため〕幼稚園の入園を1年遅らせる、『英辞郎〔第七版〕』)として知られている。Academic Redshirting については、日本の教育学では、検討されてきた概念ではないが、諸外国においては実証研究の蓄積がなされている。

以下では、Academic Redshirting について、本研究が検討した点について述べる。Lincove&Painter(2006)、Bassok&Reardon(2013)をもとに、検討を行った。

まず、Academic Redshirting の利用/実施状況

については、約6%がRedshirtを行っていることが明らかになり、また、利用率も増加していることが明らかになった(NCES : National Center for Education Statistics)。

次に、Academic Redshirtingの利用と社会経済的地位に焦点をあて、Academic Redshirtingを利用している特徴に関する先行研究のレビューを行った。その結果、社会経済的地位とAcademic Redshirtingの利用状況との関係については、社会経済的地位が高い場合ほど、入学時期を遅らせている傾向にあることが確認された。また男女差で見た場合は、男児の方が、入学時期を遅らせていることが確認された。そして人種の観点から見た場合は、特に黒人と白人で見た場合、白人の方が、Academic Redshirtingを利用している傾向が確認されている。これらのことから、家族の教育戦略とAcademic Redshirting¹の利用との相関関係が示唆された。

そしてAcademic Redshirtingの効果については、Academic Redshirtingを利用することによって、学力得点の状況や年収に対してどのような違い見られるのか、その効果に関する先行研究のレビューを行った。その結果、短期効果の観点からは、リーディングについては、Redshirtingを利用した場合が、得点が高くなっているということが確

認されている。次に算数・数学においては、Redshirtingを利用した場合の方が、得点が高いことがわかり、リーディングの時と同様にRedshirtingの効果を実証されていた。次に、長期効果としての観点からは、シングルマザーになっているか否か、中退率、大学への進学の有無、賃金を被説明変数として設定した場合、Academic Redshirtingを利用した群と利用しなかった群を比較した場合には、長期効果で見た場合にRedshirtingの効果は確認されていなかった。

この問題を教育政策の観点からどのように扱えば良いのだろうか。現実的な問題としてその入学時期の最適な線引きは難しいと思われる。加えて、Academic Redshirtingが利用可能な環境が整備された場合においても、入学時期の判断は個人に委ねられているため、家庭の教育戦略とも結びつきやすく、結果として、新たな教育格差問題を引き起こす可能性が示唆される。

【発表論文】

1. 山下 絢 (2014)「米国における Academic Redshirting-相対的年齢効果に対する政策的対応-」『日本教育行政学会第 49 回大会要旨録』(於:東京学芸大学), pp.108-109
2. 山下 絢 (2015)『相対的年齢効果の実態とメカニズムに関する実証研究(カシオ科学振興財団研究助成最終報告書)』(3 月刊行予定)

【39】 強磁場中平衡状態図を指針とした磁場中急冷熱処理による Mn 基磁性材料の開発

研究者 鹿児島大学大学院理工学研究科 教授 小山佳一

〔研究の概要〕

磁場中熱処理によって高温で強磁性相を誘起させ、それを急冷することにより、新しい磁性材料の合成が期待される。そのためには磁場中急冷炉が必要であるが、フランスのグループを除き磁場中急冷に関する報告はない。本研究は、磁場中急冷炉のプロトタイプを製作し、装置の評価、磁場中急冷による Mn-Bi 合金の合成を実現することを目的に研究を開始した。強磁場超伝導マグネット中に非磁性ヒータとその直下に急冷用水冷熱浴を配置し、磁場 8 T(テスラ)を印加したまま、温度 500°Cから 100°Cに約 20 秒で急冷することに成功した。これを用いて、Mn-Bi 磁石材料の磁場中急冷合成に成功した。

〔研究経過および成果〕

平成 25 年 2 月に非磁性ヒータユニットを購入、磁場中急冷炉の本格的開発に着手した。ヒータ内の温度勾配や試料温度約 500°Cのときのヒータ外側温度など、ヒータ特性を入念に調査し、ヒータ周りの冷却循環機構などの最終設計に着手した。同時に Mn 基磁性材料(Mn-Bi)を製作し、強磁場実験に備えた予備実験も開始した。平成 25 年 7 月までに、試作機1号炉が完成した。1号炉を磁場中で評価し強磁場中での磁性試料固定法も解決するとともに、温度コントローラー、熱電対モジュール及び低温恒温水槽を購入し、平成 26 年 1 月までに試作2号炉を完成させた。2号炉を東北大金属材料研究所強磁場センターに輸送し、10 T(テスラ)までの強磁場実験に成功、磁場中で Mn-Bi 磁石の溶解・凝固する温度が磁場で制御できることを確認した。この成果を基に、平成 26 年度 9 月に急冷特性の優れた 3 号炉を開発した。

図 1 に磁場中急冷炉の概略図を、図2に本助成で製作した磁場中急冷3号炉を、図3に実際に磁場中急冷をしている写真を示す。本研究で開発した磁場

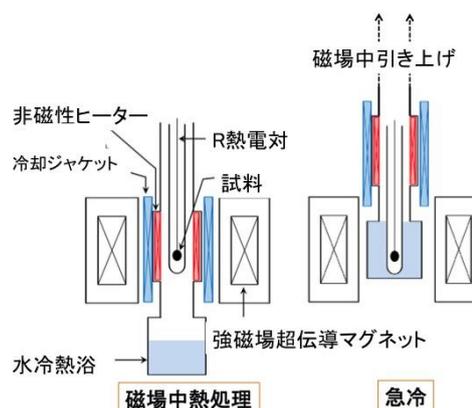


図 1 磁場中急冷炉概略図

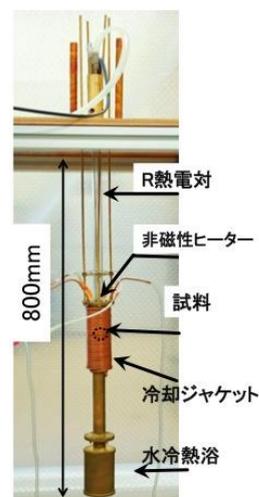


図 2 磁場中急冷 3 号炉

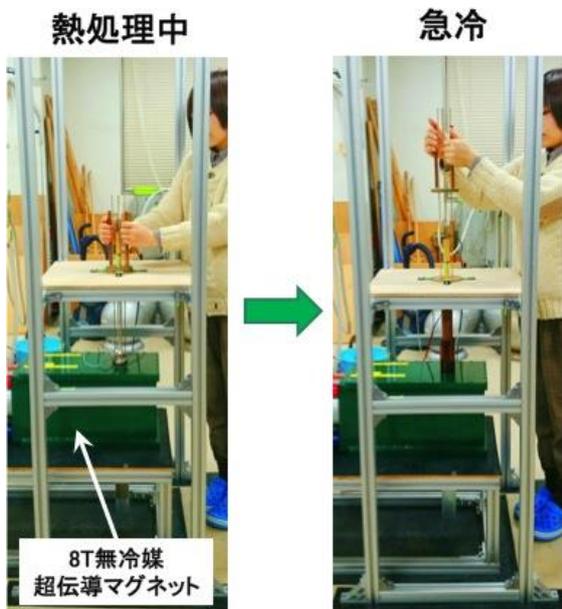


図3 磁場中急冷3号炉操作写真

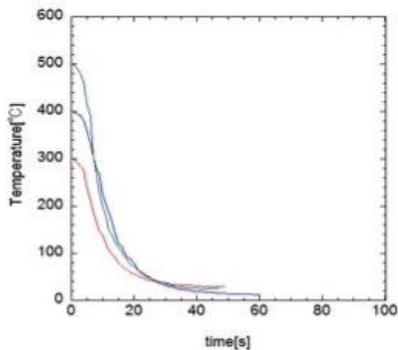


図4 磁場8T中急冷特性。500°Cから100°Cまで約20秒で急冷できる。

中急冷炉は極めてコンパクトで50mm室温空間ポアを持つ世界中の強磁場マグネットに装着可能である。一般に、強磁場中で金属製の炉を移動させると、強い電磁力を受けるが、図3からでも分かるように、本装置は強磁場中で手動により炉の移動が可能である。鹿児島大学で行った磁場8Tまでの性能試験結果の1例を図4に示す。図から分かるように磁場8Tを印加したまま、試料温度を500°Cから100°Cに約20秒で急冷することに成功した。

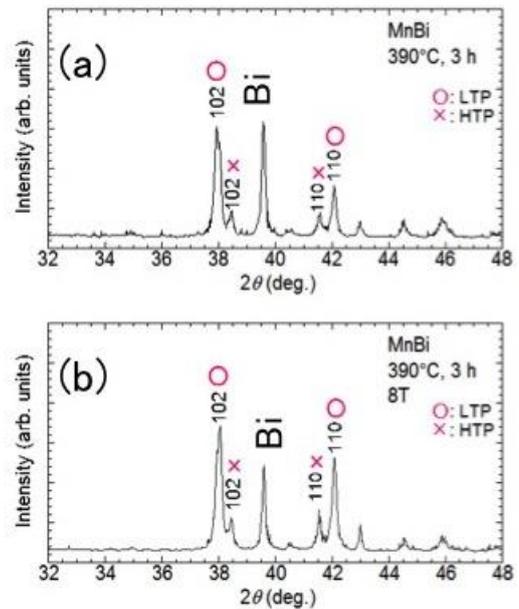


図5 Mn-Biのゼロ磁場中急冷(a)と磁場8T中急冷(b)した試料のX線回折パターン図

図5にMn-Bi磁石材料のゼロ磁場中急冷した試料(a)と磁場8T中急冷した試料のX線回折パターン図を示す。図より、8T磁場中急冷したときの試料(b)もMn-Bi(高温HTP)相が出現していることが分かる。従来の徐冷法ではHTP相は出現しなかった。つまり、得られた結果は磁場中急冷することにより、Mn-Bi高温相(HTP)を磁場中でクエンチすることができることを示しており、本研究の当初の目的は達成された。

現在、本装置はさらに世界最高磁場中急冷炉を目指して改良を進めており、本研究で培われた実験装置と実験手法は世界的にユニークものに発展すると期待している。

【発表論文】

1. 山下美咲、アベ松賢一、三井好古、小山佳一：「磁場中急冷炉の製作と評価」、第120回日本物理学会九州支部会概要原稿集(2014年12月6日、崇城大学、熊本) pp35.

【40】 東アジア企業の人材育成と組織能力形成： エンジニアへの聞き取り調査・アンケート調査による日中韓比較

研究者 名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻 准教授 徳丸 宜穂

〔研究の概要〕

製品開発に関する既存研究では、開発プロセスで実際に発生した問題とリーダー・メンバーによる解決行動との関係、および開発成果との関係などについて、産業横断的かつ国際的な定量分析が行われていない。本稿では、日本・中国・韓国のエンジニア個人を対象にしたアンケート調査データに基づき定量分析を行い、以下の3点を析出した。第1に、担当内で発生した問題を現場レベルで解決しようとするのは日本であり、上位組織で解決しようとするのは中国である。韓国は日本に近い。第2に、担当外の問題解決のための協力という意味でのエンジニア個人の能動性は日本で最も高く、韓国で最も低い。中国はその中間である。第3に、担当内問題解決の組織レベルは、いずれの国のどの開発成果に対しても有意な影響をもたないのに対し、担当外問題解決での能動性は、いずれの国の開発組織レベルでの開発成果に対しても正で有意な影響をもつ。

〔研究経過および成果〕

アジアは長らく「世界の工場」として発展してきたが、近年では「世界の開発拠点」としての段階に入りつつある。こうした発展に照応して、アジア各国の企業が製品開発プロセスをどのように組織しているのかが重要な研究テーマとして急浮上してきた。本稿は、観察単位を企業から個人へと降ろすことによって、3か国の製品開発プロセスの類似性と差異をさらに明確にする試みである。具体的には、エンジニア個人の問題解決行動に着目することによって課題に接近する。周知のように、小池(2005)は、仕事一般を「ふだんの作業」と「ふだんと違った作業」とに分けることができるとし、「問題への対応」と「変化への対応」とをこなす技能(知的熟練)の重要性を強調した。また、設計を問題解決活動とみなした Simon(1969)を嚆矢として、製品開発を一連の問題解決行動として理解することは、

Clark and Fujimoto(1991)を先駆とする製品開発研究が共有する視点である。以上から、問題解決行動に着目することは製品開発プロセスの深部に分け入るために適切なルートだといえよう。

本稿の目的は、日本・中国・韓国のエンジニア個人を対象にしたアンケート調査結果に基づき、製品開発プロセスで実際に発生した問題と、リーダー・メンバーによる実際の問題解決行動を具体的に明らかにした上で、問題解決行動が開発成果に及ぼす効果を定量的に示すことにある。

分析の結果、本稿は次のことを明らかにした。

(1)既存研究では、製品開発を問題解決活動として捉え、そのインプット、プロセス、成果の相互関係を分析してきた。しかし、既存研究には、以下のような問題があった。①発生している問題を具体的に捉えていない、②発生した問題に対してどのような解決活動

が開発組織のリーダーとメンバーで現実になされているのかを明らかにしていない、③問題解決活動が開発成果に及ぼす影響を国際的かつ産業横断的に把握していない、という問題がそれである。本稿では、具体的に発生した問題、実際に行われた解決行動、および開発成果について日中韓の国際的観点から産業横断的に把握した点に貢献がある。

(2)具体的に発生した問題を担当業務内と担当業務外に分けて捉えると以下ようになる。担当業務内では、日本と中国では「不具合」が多く、韓国では「仕様変更」が多かった。メンバーとリーダーでは直面する問題が異なり、韓国ではリーダーが「予算不足」「人員不足」と答える割合が高かった。また、問題解決方法としては、問題解決がなされる組織レベルに対応して、日本や韓国では開発現場に委ねられるときにはエンジニア個人が主に対応し、リーダーなどのより上位の組織が関与するときは、上司との打合せ時間が増えるという関係にあった。なお、中国では、全体的に上位組織での問題解決が多かった。他方、担当業務外では、日本のメンバー・リーダーは「不具合」、中国のメンバー・リーダーと韓国のメンバーは「仕様変更」、韓国のリーダーは「不具合」を挙げた回答者が最も多かった。また、担当外問題解決に関与するかどうか、関与するとすれば自発的かどうかを示す「能動性」指標を採ると、すべての問題において最も能動性が高かったのは日本であった。

(3)開発成果は、個人レベルと組織レベルとでは異なる。また、問題解決活動は、個人レベルと組織レベルの開発成果に対して異なる影響をもつ可能性があり、開発成果をどのレベルで捉えるかはきわめて重要である。本稿ではエンジニア個人のレベルの成果として、①担当業務の納期の短さ・正確さ、②開発コスト、③

製品品質の3つの側面について尋ねた。開発組織レベルの成果については、以上の3指標に加えて、個人レベルには当てはまりにくい、④総合的な商品力と顧客満足度についても尋ねた。そして、いかなる問題解決行動が、製品の開発成果を向上させうるかに関して定量的分析を行った。その結果、担当内問題解決の組織レベルはいずれの国のいずれの開発成果にとっても有意な影響をもたないのに対し、担当外問題に対する能動性は、すべての国において開発組織レベルの開発成果に正で有意な影響をもつことが明らかとなった。

しかし、残された課題がある。第1に、問題解決の組織レベルやエンジニアの行動が3か国で異なっているという分析結果がどのように生み出されたのかの分析は行うことができなかった。これは聞き取り調査の課題である。第2に、問題解決行動と開発成果の関係に対して、製品アーキテクチャがもつ意味を深く分析する必要がある。先行研究は製品開発組織と製品アーキテクチャの間にある関係を明らかにしてきたので、こうした分析の拡張はぜひ必要である。

〔発表論文〕

1. 都留康・徳丸宜穂・中島賢太郎・福澤光啓, 2014, 製品開発プロセスにおける問題発生と解決行動: エンジニア個人レベルでの日中韓比較, 一橋大学経済研究所 Discussion Paper Series A No. 613.
2. 都留康・徳丸宜穂・中島賢太郎・福澤光啓, 2014, 製品開発プロセスにおける問題発生と解決行動: エンジニア個人レベルでの日中韓比較, 『経済研究』第65巻第2号(所収決定済み, 10月刊行予定).

公益財団法人 カシオ科学振興財団
〒151-8543 東京都渋谷区本町一丁目6番2号
TEL (03) 5334-4747
平成27年5月1日 発行
