

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、*は「新設研究室紹介」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科 (大学院)

電気工学専攻

先端電気システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野 (北野研) ☆

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創成部門先進電子材料分野 (藤田研)

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野 (松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

エネルギー科学研究科 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (水内研) #

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

国際高等教育院

教養教育部 (小山田研究室)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野 (中村裕研)

システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

ブーストコンバータの離散化双線形モデルに基づく同定と制御

1. ブーストコンバータおよびその制御とは

ブーストコンバータは直流電圧を昇圧するパワーエレクトロニクス機器の一種である。構成 (図1) が簡単なことから広く利用されているが、スイッチング素子を有するため動作の厳密解析は厄介であり、瞬時的に生じるスイッチング動作そのものを扱うかわりにそのタイミングを反映して定まる状態の平均値を通じた近似的解析に基づく、平均値モデルがよく用いられている。本稿では、スイッチング動作を直接考慮した厳密なモデル化について紹介し、実験によるその同定を経て非線形制御を適用することの有効性について一端を紹介する。関連論文はシステム制御情報学会において2016年に論文賞を授与されており、このモデルに基づく制御への期待が小さくないことを示唆しているならば光栄である。

スイッチSのON, OFFを周期的に繰り返すことによって、負荷抵抗Rに関する出力電圧 v は周期定常状態となり、このときの出力電圧の平均値はデューティ比 μ (スイッチング周期 T に占めるON区間の比率) により決まる。素子値を適切な範囲で選ぶとき、ブーストコンバータはスイッチのON, OFFに対応する2つの等価回路に基づいて考察でき、平均出力電圧は $V_{in}/(1-\mu)$ となり昇圧が達成される。ブーストコンバータの制御問題は、各区間におけるデューティ比を時々刻々と適切に定めるためのフィードバック制御則を設計することにより、素子値の不確かさのもとでも適切なデューティ比 (の定常値) と所望の昇圧を達成しつつ、望ましい過渡応答を得る問題であるといえる。

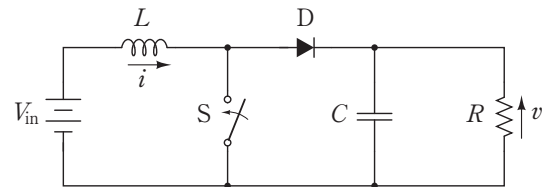


図1: ブーストコンバータ

2. ブーストコンバータの離散化双線形モデルと非線形制御

区間 $[kT, (k+1)T)$ におけるデューティ比を $\mu_k (k=0,1,2,\dots)$ とおく。また、スイッチSがONに切り替わる時刻 kT における状態変数 (キャパシタ電圧 v 、インダクタ電流 i) を x_k 、OFFに切り替わる時刻 $(k+\mu_k)T$ における状態変数を ξ_k とおく。現実の素子に即して (各種損失抵抗に加え) ダイオードの立ち上がり電圧 E_D を考慮したもとの、2つの等価回路から、 $\xi_k = A_1(\mu_k)x_k + B_1(\mu_k)V_{in}$ および $x_{k+1} = A_2(\mu_k)\xi_k + B_2(\mu_k)V_{in} + B'_2(\mu_k)E_D$ という関係が得られる。これらから ξ_k を消去し、スイッチSがONに切り替わる時刻の状態 x_k に着目した離散化された関係式 $x_{k+1} = A(\mu_k)x_k + B(\mu_k)V_{in} + B'(\mu_k)E_D$ 導かれる (スイッチング区間での平均出力電圧についても同様の関係式が得られる)。しかし、このモデルでは制御入力にあたる μ_k が極めて複雑な数式を構成する形で現れ、その非線形性の扱いは制御系設計上、極めて厄介に見える。この点について踏み込んで考察したのが本研究の特徴といえ、 μ_k に関する非線形性は実は1次近似に十分堪える (2次近似であればほぼ正確) ことを明らかにしている。1次近似を適用しても、得られる近似モデルは線形モデルには帰着せず依然として非線形であるものの、この非線形モデルの同定法について論じ、精度の高い同定が可能であることを実験で検証している。 μ_k から w_k および x_k から z_k への簡単な変換 (平行移動) を通じて得られた双線形モデルを

$$z_{k+1} = A'z_k + B(z_k)w_k \quad (w_k \text{ に関して明らかに1次式で, } B(z_k) \text{ も } z_k \text{ の1次式: 双線形}) \quad (1)$$

と表すとき (A' は安定な定数行列になる)、正定行列 Q を与えたもとのリアプノフ方程式 $P = (A')^T P A' + Q$ の解 P と正数 r のもとで、以下の非線形制御則の妥当性が証明されている。

$$w_k = -\frac{B(z_k)^T P A' z_k}{r + B(z_k)^T P B(z_k)} \rightarrow \text{これを } \mu_k \text{ に逆変換} \rightarrow 0 \leq \mu_k \leq 1 \text{ を満たすように飽和動作} \quad (2)$$

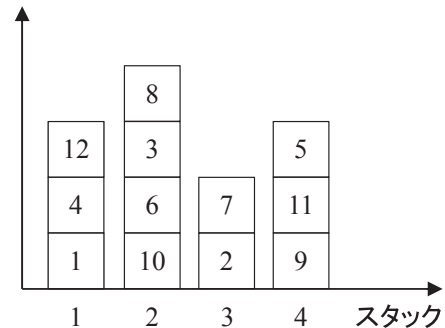
定常偏差を消去する積分補償を含む拡張制御則に関しても、実験を通して有効性を検証している。

生体医工学講座 複合システム分野（土居研究室）

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「ブロック積み替え問題の効率的解法」

ブロック積み替え問題とは、右図のように同じ大きさのブロックが積まれているものとして、番号順にブロックをなるべく早く取り出す問題です。ただし、一番上に積まれたブロックしか動かすことができません。図において、左端の山（各山のことをスタックといいます）の下から2番目に積まれた1番のブロックを取り出す場合、あらかじめその上に積まれた12番、4番のブロックを別の山（スタック）に積み替えておく必要があります。このとき、もし12番のブロックをスタック3に積み替えたとすると、2番のブロックを取り出す



図：ブロック配置の例

際にまた積み替えなければなりません。したがって、うまく積み替えないと、無駄な積み替えが多く発生することになります。そこで、最小の積み替え回数ですべてのブロックを順に取り出そう、というのがブロック積み替え問題の目的です。ブロック積み替え問題はコンテナ積み替え問題とも呼ばれており、港湾などのコンテナターミナルを想定した研究が多く行われています。ほかにも、鉄鋼生産工程における板状の鉄の塊（スラブと呼ばれる）や鉄道車両を想定とした研究も行われています。このように、ブロック積み替え問題は様々な応用が考えられる普遍的な問題です。

本研究室では、このブロック積み替え問題の最適解（最小の積み替え回数でブロックをすべて取り出すことのできる積み替えパターン）を求める研究を行っています。分枝限定法と呼ばれる解探索方法を適用するのですが、積み替えパターンをすべて調べるのではなく、見込みのないパターンは早い段階で調べるのをやめてしまって探索効率を向上させる点に特長があります。たとえば、図の配置について、最小の積み替え回数かどうかはまだわからないものの、6回の積み替えですべてのブロックを取り出せることがわかったとします。そして、12番のブロックをスタック4に積み替えると、少なくともあと6回の積み替えが必要であるとします。この場合、合計の積み替え回数は7回以上になってしまうので、どう頑張っても、今わかっている積み替え回数6回の解よりよい解は求まりません。したがって、このような積み替えは考えなくてよいことになります。このことからわかるように、必要な残り積み替え回数をうまく見積もって、無駄な探索をいかに減らすかが分枝限定法の性能を大きく左右します。そこで、本研究室では、この見積もりの計算方法を工夫することで、従来よりも大幅に計算時間を短縮できることを示しました。今後は、ブロックの積み替えに関する様々な問題を扱っていく予定です。

参考文献

- [1] S. Tanaka and K. Takii: A faster branch-and-bound algorithm for the block relocation problem, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 181-190 (2016)

生体医工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

<http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明を目指して」

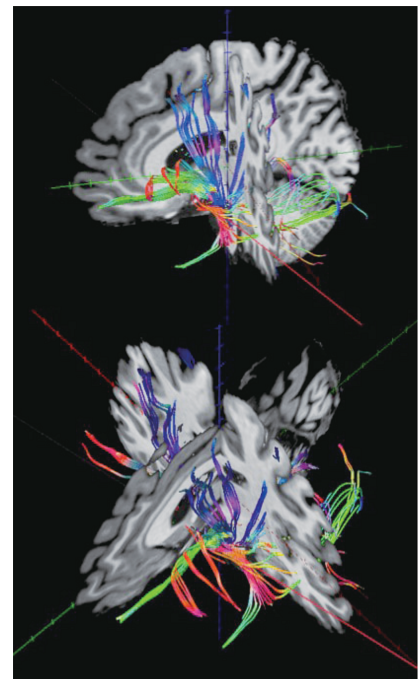
認知、記憶、創造性、意識といったヒト高次脳機能のメカニズムは人類に残された極めて難解な謎の一つであり、その解明は多くの科学者が挑み続けてきた夢である。近年、この夢を実現し、さらに精神・神経疾患の克服や新たな産業の創出に結びつけることを目指す2つのビッグプロジェクトがヨーロッパ (Human Brain Project) とアメリカ合衆国 (BRAIN Initiative) で相次いで開始された。我が国でも、この高次脳機能のメカニズム解明のため、その基盤を構築することを目的として「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト (以降、革新脳プロジェクト)」が開始された。

この革新脳プロジェクトは、精神疾患、神経変性疾患、脳血管障害・脳回路回復の三領域における患者脳画像、生理や認知行動データの計測のプロトコルを共通化し、データベース化することを通じて、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路の同定を目指している。そのために革新的な計測・解析技術を開発し、それらを用いて健常者の詳細な脳画像・生理指標を取得し、患者データとマーマセット脳回路マップの対応づけを行うことを目的として進められている。

近年、これらの脳ビッグプロジェクトが主要先進国で相次いで始められるに至った背景には、各国において高齢化社会の到来に伴い、アルツハイマー病などの認知症に代表される神経・精神疾患患者が今後益々増加することが予想され、疾患の早期発見や新薬の開発などにより医療費を抑えたいという財政上の事情がある。一方、科学技術という側面からは、非侵襲的にヒトの脳神経活動を計測・解析・可視化するニューロイメージング手法、中でもMRIを用いた脳機能と白質神経線維の計測・解析技術が、近年急速な進展を遂げたことがプロジェクトの大きな原動力となっている。

当研究室は、これまでこのニューロイメージングの先進的な技術開発を長年にわたって進めてきた[1-3]。上記の革新脳プロジェクトにおいては、臨床研究総括チームの一員として参加し、東京大学附属病院、大阪大学附属病院、広島大学附属病院などと連携して統合失調症を含む複数の精神疾患患者の拡散MRIの臨床画像データを対象とし神経線維束の解析などを実施し、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路を同定することを目指して研究を進めている。右図は脳基底核近傍からトラッキングして得られた神経線維束解析の一例である。このような解析から白質病変の定量評価が可能となる。

ヒト脳機能ネットワークの全容を解明するには、MRIだけでは不十分であり、時空間的に変動する高次脳機能の複雑な仕組みを解明することにはまだ多くの解決すべき技術的課題が残されている。今後、時間分解能と空間分解能の共に優れたイノベティブなニューロイメージング手法の創成を進め健康社会の実現に貢献したい。



- [1] 小林哲生, “超高感度な光学的磁気センサを用いた新たなニューロイメージングに向けて”, Vision, Vol.27, No.2, pp.73-79 (2015)
- [2] 小林哲生, “脳神経磁場イメージングの新たな試み”, シミュレーション, Vol.33, No.2, pp.18-23 (2014)
- [3] Natsukawa and Kobayashi, “Cortical activations associated with determination of depth order in motion transparency depth rivalry: A normalized integrative fMRI-MEG study”, Human Brain Mapping, Vol.36, pp.3922-3934 (2015)

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

<http://bell.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「電力変換機器などから生じる伝導性妨害波の ICT 装置を介した通信ネットワークへの伝達特性評価」

家庭内 LAN など有線ネットワークで使用されるルータやスイッチングハブなどの情報通信 (ICT) 機器は、通信速度の向上や大容量化と同時に、ネットワークのスマート化・高機能化を目指して信頼性の向上が要求されている。通信機器自身が発する電氣的雑音 (妨害波) や外部から伝導してくる妨害波が通信ネットワークに侵入すると、機器の誤動作が起こるだけでなく、通信ネットワーク全体の性能を低下させる。特に、昨今オフィスや家庭内にも広く設置されるようになったパワーエレクトロニクス機器は、電子回路のスイッチングにより電力を制御する際に電氣的雑音を発生し、有線無線を問わず ICT 機器の近傍に大きな妨害波源が存在する状況が発生している。たとえば図 1 に示すように、パワーエレクトロニクス機器が発生する妨害波が電源ネットワークに侵入し (以下、電源系妨害波)、同じ電源供給系に接続された ICT 機器を介して妨害波が通信ネットワークに到達すると、通信性能が悪化する。そのため、ICT 機器は、直接通信ポートに混入する妨害波だけでなく、電源ネットワークから侵入する妨害波からも悪影響を受けない、高い免疫性 (イミュニティ) が求められる。

電子機器の連続伝導性妨害波に対するイミュニティの評価法としては、国際規格である CISPR 24 やその測定法 IEC61000-4-6 がある。これらの規格は、周波数範囲が 150 kHz ~ 80 MHz の伝導性妨害波を対象にしたものであるが、機器の高効率化に伴い妨害波源が広帯域化しているため、適応する周波数範囲の拡張が必要である。

本研究では、電源系妨害波の通信ネットワークへの伝達を高周波帯で観測するため、ネットワークアナライザを用いて、電源系のコモンモード妨害波やディファレンシャルモード妨害波が、通信ネットワークの信号系ディファレンシャルモードとして伝達する割合を測定した。通信機器の代表例として 2 種類のスイッチングハブを測定した結果、図 2 に示すようにイーサネット通信帯域内の 200 MHz 付近で -40dB 程度の伝達があった [1]。これは、振幅が数十 V の妨害波が電源ネットワークに発生した場合、通信が阻害される可能性があることを示唆している。また、回路基板のインピーダンスバランスに着目し、妨害波のモード変換を抑制する回路設計法 [2] を検討している。

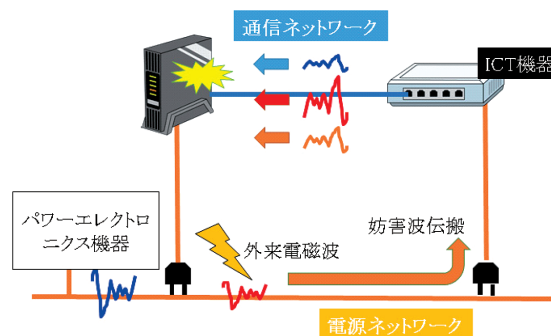


図 1 通信ネットワークへの妨害波の伝達経路

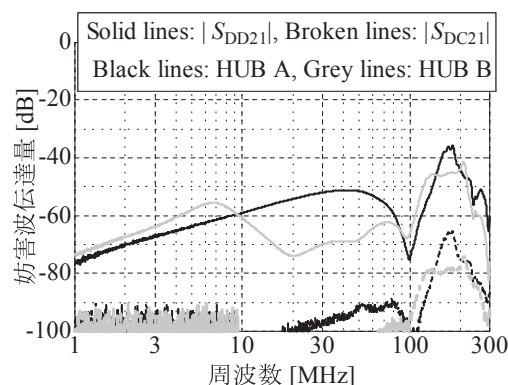


図 2 電源系妨害波の通信ネットワーク伝達量

[1] T. Matsushima, *et al.*, "Mode Conversion and Transfer Characteristics of Conducted Disturbance to Ethernet Device from Power Supply Cable," 2015 IEEE International conference on EMC, pp. 378-381, Dresden, Germany, Aug. 2015.

[2] 豊田他, "通信機器の電源系から混入する妨害波のモード変換抑制回路," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-4-6, Sept. 2016.

電子物理工学講座 応用量子物性工学分野（竹内研究室）

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「一つの量子的なシャッターで二つのスリットを同時に閉じる」

量子力学では、1つの粒子が複数の場所に同時に存在する量子重ね合わせ状態をとることができる。光の波の性質を確認した、「ヤングの2重スリット実験」を、光子を1個ずつ用いて行った場合も、実験を繰り返すと、光子の検出位置の分布は、干渉縞を形成することが知られている。この光子の2重スリット実験は、1個の光子が重ね合わせ状態になり、同時に2つのスリットを通ったと考えないと説明がつかず、量子力学の重ね合わせ状態をもっとも端的に示す実験である。また、通常シャッター1個で一方のスリットを遮断すると、この干渉が失われることもよく知られている。

では、もし2つのスリットの位置に同時に存在する、すなわち「重ね合わせ状態」をとりうるシャッター（量子シャッター）を用いて、このスリットを制御すると、どのようなことが起こるだろうか。2003年に米国とイスラエルの物理学者らは、重ね合わせ状態にある量子シャッターを用いると、その量子シャッターが光子と相互作用したあと別の重ね合わせ状態に変化したばあい、入射した光子はまったくスリットを透過できず、重ね合わせ状態をたもったまま跳ね返されることを理論的に予言した（図1）。これは、たった1つの「量子シャッター」を用いて、複数のスリットを同時に遮断することができるという奇妙な、また驚くべき予言である。しかし、必要な性質を満たす量子シャッターの実現が困難だったため、実験的に実証されていなかった。

我々は光量子回路を用いて2003年の理論提案を初めて実験的に実証した。重ね合わせ状態をとり得る量子シャッターは、光子で実現した。これにより、半透鏡を用いて、高い精度で重ね合わせ状態を作ることができる。しかし、このままでは、シャッターで光子をはじき返すという相互作用を実現することができない。そこで、各スリットに光子で光子を制御することができる光量子スイッチを用いることを考案した。実験ではまず、1個のシャッターで、古典的な限界を超えて、2つのスリットを同時に遮断することが可能なことを確認した。測定の結果、古典的な限界を超えて、光子が遮断できていることを確認した。次に、同時に2つのスリットがシャッターで閉じられていることを確認するために、シャッターで弾き返された光子が干渉することを確認した（図2）。もし、シャッターが片方のスリットしか閉じていなかった場合、決してこのような干渉縞を得ることはできない。我々は、このようにして、2003年の理論提案をはじめて実験的に実証した。本研究は、量子物理学のより深い理解に役立つだけでなく、重ね合わせ状態で、重ね合わせ状態を制御することが可能なことを示すもので、将来の量子コンピュータの実現につながるものであると期待している。

参考文献：Ryo Okamoto and Shigeki Takeuchi, “Experimental demonstration of a quantum shutter closing two slits simultaneously,” *Scientific Reports* **6**, 35161 (2016).

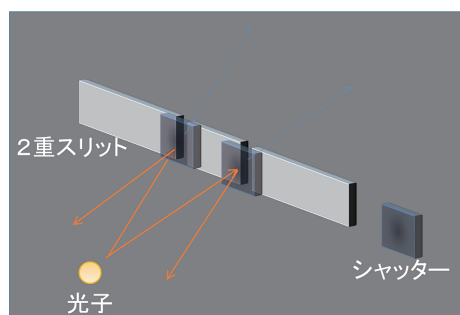


図1. 一つのシャッターが重ね合わせ状態で複数の場所に存在し、光子をはじき返している様子 の概念図。

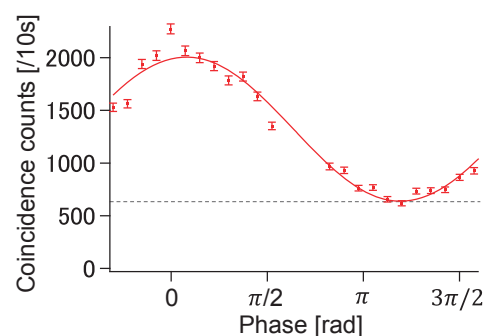


図2. 干渉縞測定結果。

電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

「遷移金属酸化物を用いた抵抗変化型不揮発性メモリ構造の作製と評価」

半導体不揮発性メモリの代表格であるフラッシュメモリは、各種メモリカードやパソコンの記憶装置 (SSD) に応用されていますが、書換え耐性や動作速度には動作原理に基づく限界があります。本研究室では、究極的な小型・高速の不揮発性メモリ候補として、遷移金属酸化物を用いた抵抗変化型不揮発性メモリ (ReRAM) に注目しています。抵抗変化とは、酸化物を特定の金属で挟みこんだ積層構造への電圧印加を繰り返すだけで、高い抵抗と低い抵抗の状態を繰り返す現象で、電圧を印加しなくても各抵抗状態を保持する特性を有しております。ただし、抵抗変化が発現する金属と酸化物の組み合わせが多岐に亘ることもあり、この抵抗変化の普遍的メカニズムには謎が多いのが現状です。

抵抗変化特性の基礎研究として、我々は遷移金属酸化物の一つである酸化ニッケル (NiO) 薄膜を白金 (Pt) 電極で挟み込んだ積層構造 (Pt/NiO/Pt と表します) を作製しています。この構造は多くの研究機関から報告されているのですが、今回、NiO 薄膜の作製を工夫することにより、作製直後の積層構造への電圧印加過程において興味深い量子効果が発現することを見出したので、紹介したいと思います。

従来の Pt/NiO/Pt 積層構造では、電圧印加により 1 つの急激な低抵抗化 (フォーミング) が起こりますが、特定の酸素組成を有する NiO 薄膜を用いると、図 1 (a) に示す 2 段階の低抵抗化 (セミフォーミングとセカンドフォーミング) が見られます。着目すべきは、図 1 (b) のような 2 種類のフォーミング間 (セカンドモード) に量子化コンダクタンス $G_0 (=2e^2/h=77.5 \mu S)$ に基づく離散的なコンダクタンスの変動が見られることであり、NiO 薄膜内に量子ポイントコンタクトをなす導電パスが形成されていることを示唆しています。

そこで、この積層構造を原子レベルの顕微鏡を用いて分析したところ、NiO 薄膜内の柱状結晶間の境界 (粒界) において、酸素組成が明らかに小さくなっていることがわかりました。従来の積層構造では粒内と粒界で組成に顕著な違いが認められないことから、粒界部での酸素空孔 (Vo) が導電パスになっているものと考えられます [1]。セカンドモードにおける同一極性の電圧印加によって、コンダクタンスが増加したり減少したりする点に独創性がありますが、これを制御する物理現象を把握することができれば、抵抗変化のメカニズム解明に大きく前進することが期待されます。

また、柱状および粒状と結晶構造が異なる NiO 薄膜を用いると、Pt/NiO/Pt 積層構造の初期抵抗やフォーミングの特性ばらつき指標が両者で明確な差があることを見出しました [2]。紙面の都合上詳細は割愛しますが、この結果は、図 2 に示すような酸素空孔と導電パスを示唆するものであり、導電パスが粒界に存在しうることを強く支持するものと考えられます。

[1] H. Sasakura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 233510 (2015).

[2] Y. Nishi *et al.*, J. Appl. Phys. **120**, 115308 (2016).

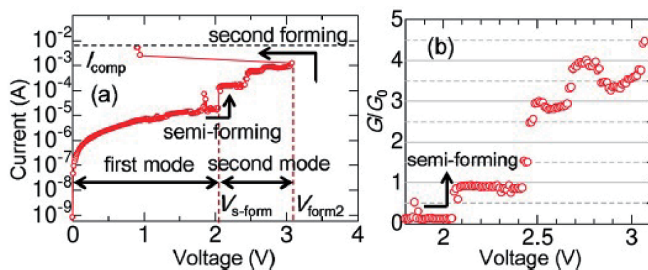


図 1 Pt/NiO/Pt 積層構造の 2 つのフォーミング特性縦軸を (a) 対数電流 および (b) コンダクタンスで表示

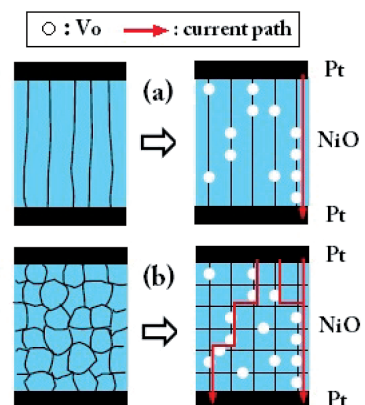


図 2 (a) 柱状および (b) 粒状の NiO 薄膜を有する Pt/NiO/Pt 積層構造の模式断面

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野 (山田研究室)

<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

有機薄膜トランジスタのナノスケールトラップ評価に関する研究

有機半導体をチャンネルとする電界効果トランジスタ (OFET) は、フレキシブルディスプレイの駆動回路などへの応用が期待されている。OFET のデバイス性能の改善に当たっては、そのチャンネル領域となる有機薄膜の構造・材料物性、電極/有機接合界面における構造揺らぎやキャリア注入障壁など、さまざまな阻害要因が存在する。原子間力顕微鏡 (AFM) をベースとするケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) は、試料表面の電位分布をナノスケールで測定する手法であり、上記性能向上の阻害要因を分離して評価する上で極めて有効な測定法となる。本稿では、KFM を用いて、OFET チャンネル部の局所トラップ挙動の可視化に成功した測定例を紹介する。

本測定で使用した OFET のチャンネルには、有機溶媒に可溶で、キャスト法により結晶性の高い有機薄膜の作製が可能なジオクチルベンゾチエノベンゾチオフェン (C_8 -BTBT) という分子を使用した。図 1 に、チャンネル部となる C_8 -BTBT 薄膜の表面電位像を示す。 C_8 -BTBT 薄膜は、分子 1 層に相当する高さ約 3 nm のステップ構造から構成されるが、実際に、表面電位像に見られる、何本もの明るい (電位が高い) 折れ線は、分子ステップ端に対応する。ステップ端が明るく見えるのは、残留溶媒の影響により、ステップ端に電荷がトラップされているためである。一方、図 1 (b) はデバイス動作後の表面電位像であるが、図 1 (a) と比べると、ステップ端の電位は著しく高くなっている。測定された電位から、ステップ端のトラップ電荷密度 (ホール電荷密度) を推定すると、 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ となった。この例では、デバイスの動作後のトラップ電荷が過剰に残留したため、静的な KFM 測定によってもトラップ電荷密度を測定できたが、トラップの緩和が測定時間 (通常は数分から数十分) より速い場合は、測定中にトラップ電荷が減少していくため、トラップ電荷密度の正確な測定は困難になる。このような場合には、ゲート電圧をスイープし、トラップに電荷を出し入れしながらトラップ電荷を可視化する動的な評価法を用いる。図 2 (a) はジナフトチエノチオフェン (DNNT) の薄膜をチャンネルとする OFET の表面形状像である。チャンネル上でゲート電圧 (V_G) を掃引し、表面電位 (V_{SP}) の変化を記録すると、 V_G の掃引方向によって V_{SP} にヒステリシスが現れることが分かった。この電位シフト (ΔV_G) は掃引後に残ったトラップ電荷によって生じたものであるため、走査範囲の各画素点 (64×64) においてゲート電圧掃引 (往復で 740 ms) を行い、 ΔV_G からトラップ電荷密度を計算した結果、図 2 (b) のようなトラップ電荷密度像が得られた。電極近傍ではトラップ電荷が少ないことが分かるが、これは電極近傍のトラップ電荷は電極に近い速やかに排出されるのに対し、電極から遠い部分にトラップされている電荷は、電極近傍での導電率低下により、排出されにくくなるためである。

今後、本手法における測定の時間分解能を改善し、より緩和の速いトラップについても評価するとともに、OFET におけるデバイスのトラップを低減し、より移動度を高める研究を推進していきたい。

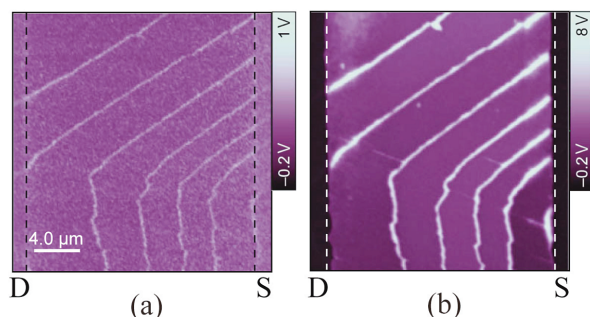


図 1 : (a) FET 動作前および (b) 動作後における C_8 -BTBT 薄膜をチャンネルとする OFET の表面電位像

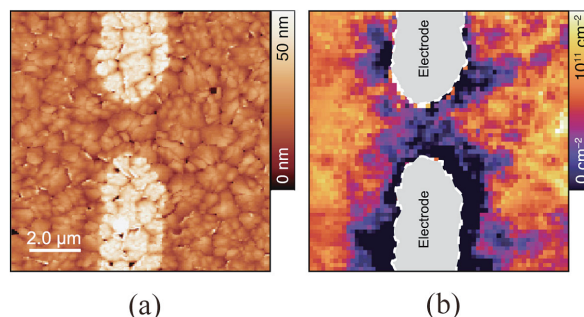


図 2 : DNNT 薄膜をチャンネルとする OFET の (a) 表面形状像および (b) トラップ電荷密度像

量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

チップ上の微小点に保存した光の瞬時転送

将来の量子情報等の高度な情報処理を可能とする光チップを実現するためには、光を微小点に保存するためのナノ共振器の開発、ナノ共振器に保存した光と電子系の相互作用等に基づく光量子演算ユニット等の形成、およびそれらを集積し、複数の演算ユニット間での情報転送の実現など、様々な課題が存在します。これまで、我々は、これらの課題を念頭に、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ独自のフォトニック結晶を用いて、1) 光を微小点に長く保存することの出来る高Q値ナノ共振器の実現、2) ナノ共振器への光の出し入れや光メモリー動作の実現、3) ナノ共振器の集積と強結合状態の形成、等の研究を進めてきました。

今回は、上記、1)-3) に続く展開として、高Q値ナノ共振器に保存した光を、制御光の照射により、別の離れたナノ共振器に、“任意のタイミングで”、“高効率に”転送することに成功した結果について紹介します。この成果は、光量子演算ユニット間の情報転送等を可能するもので、上記の全体目標達成に向けた一歩と言えます。また、これらを複数個集積することで、他の様々な機能の実現も期待されます。

得られた現象は、図1に示すように、ナノ共振器A(=共振周波数 ω_A)に蓄積した光(=周波数 ω_A)を、別のナノ共振器B(=共振周波数 ω_B)へと転送させるものです。転送の際には、共振器AとBの中間に位置する第3のナノ共振器C(=共振周波数 ω_C)へ制御光の照射を行い、その共振周波数 ω_C を $\omega_C \ll \omega_A$ の状態から $\omega_B \ll \omega_C$ へと断熱的に変化させます。これにより、図2に示すように光を共振器Aから共振器Bへと一方向に、高効率(>90%)に、瞬時に(<100ps)転送することに成功しました。これは、光の断熱転送という観点から物理的にも興味深く、かつ上記のような応用にも繋がる成果です。

参考文献

[1] R. Konoike, H. Nakagawa, M. Nakadai, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda: "On-demand transfer of trapped photons on a chip", Science Advances, Vol. 2, no. 5, e1501690, 2016.

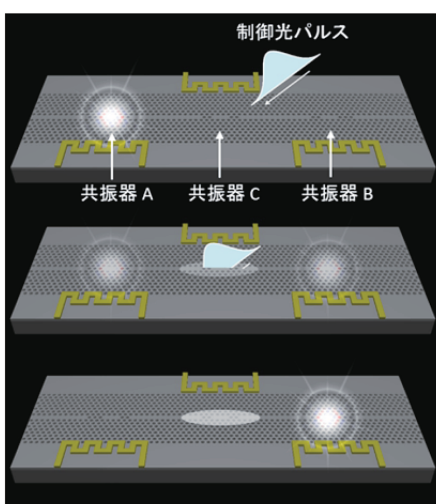


図1：チップ上の微小点に保存した光の瞬時転送の模式図

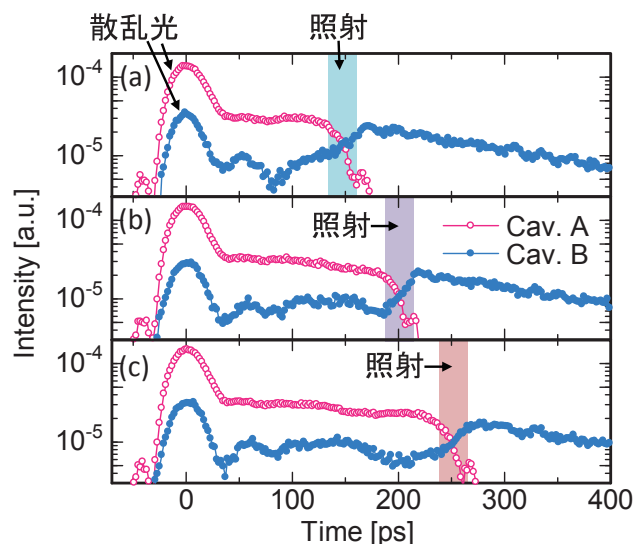


図2：光転送実験の測定結果。それぞれ制御光パルスの共振器Cへの照射タイミングが(a) 150ピコ秒、(b) 200ピコ秒、(c) 250ピコ秒程度に設定してある。

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

<http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「アクアビジョン：水中カメラ・プロジェクタ群による生物の3次元形状・運動計測」

画像メディア分野では「アクアビジョン」と呼ぶ多視点映像を用いた水中生物の3次元形状・運動計測の実現を目指した研究を進めている。これは従来空気中にある人物・建造物を対象として3次元形状・運動計測を行って来たコンピュータビジョンを、より複雑な光学現象が生じる水中世界においても機能するように拡張する技術であり、例えば受精卵の3次元計測による卵割過程の可視化・分析による医学・薬学・生物学への貢献、遊泳する魚の3次元計測による漁業、特に養殖業の情報化など、数多くの応用が期待されている。以下ではその一例として水中カメラ・プロジェクタ群を用いた水中生物の3次元形状・運動計測について紹介する。

まず図1左に示すように、水槽中の生物（金魚）に対して水槽の周囲に置かれたプロジェクタ群でパターン光を照射し、カメラ群で撮影する状況を考える。ここで各プロジェクタはカメラと逆向きに光を入出力する逆カメラとしてモデル化することが可能であり、従来の人物・建造物を対象とした研究では特に被写体に表面テクスチャが乏しい場合に有効であることが示されてきた。そこでこれを水中環境に拡張するために、平行平面屈折層を伴う水中プロジェクタの投影過程のモデル化とそのキャリブレーション手法を確立した。

またこれを受精卵など半透明な被写体の3次元計測へと拡張することを目指して、制御可能な光源としての平面ディスプレイと多視点カメラを備えた撮影環境（図2左）を用いた水中半透明物体の3次元形状計測に取り組んでいる。この研究では光源としてのディスプレイを能動的に制御することで半透明物体の形状とその透過率・散乱係数を高精度に推定することを目指しており、これまでに透過率分布の推定が実現している（図2右）。今後は異方性散乱のモデル化などによる形状計測の高精度化と、顕微鏡環境下での計測環境の構築によって受精卵のようなマイクロスケールにおける半透明物体の3次元計測実現を目指す。



図1：水中生物の実時間3次元形状計測と自由視点映像生成。左：撮影環境。右：計測された3次元形状

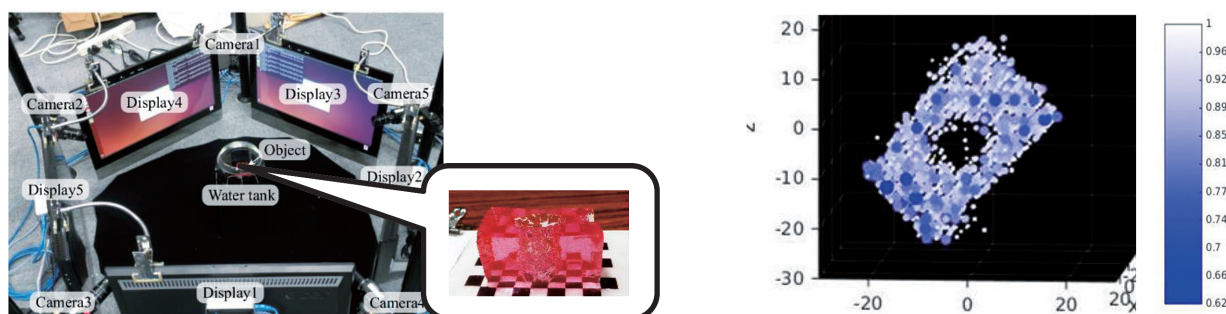


図2：水中半透明物体の3次元形状推定。左：計測環境。右：推定された透過率分布

通信システム工学講座 知的通信網分野

<http://icn.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

ネットワークグラフ表現を用いた通信機会のモデル化

近年、通信端末の普及や記憶装置の低コスト化に伴い、PC (Personal Computer) や、携帯電話、スマートフォン等の通信端末を用い、インターネット接続あるいはアドホック接続により行われる通話や、メールの送受信、SNS (Social Networking Service) 上のメッセージ交換・写真共有といった通信機会を観測したログデータが蓄積されるようになってきている。それらの通信機会のログデータを、人をノード、通信機会をリンクで表現することで、ネットワークグラフでモデル化する取り組みが行なわれている。ネットワークグラフを扱うためには昨今台頭してきている GDB (Graph Database) を用いることが有用だが、登録可能なリンク数に制限がある場合や、分析を高速に行なうために対象とするリンクを間引く必要がある場合などに、どのリンクをより品質が高いと見なすべきかについては十分に検討がなされていない。そこで、本研究 [文献] では、時間的特徴を有するリンクは品質が高いという仮説に基づき、時間的特徴に基づいたリンク形成手法を提案した。さらに、提案手法の有効性を示すために、実データを用いて評価を行った。

提案システムの構成を図 1 に示す。提案システムは、人をノード、通信機会をリンクとしてネットワークグラフ表現でモデル化する。ノードペア抽出部は、通信機会データ DB を参照することにより、通信機会を生じたノードペアと時刻を時系列で表したデータ系列を生成する。例えば、PC や、携帯電話、スマートフォン等の通信端末を用い、インターネット接続あるいはアドホック接続により行われる通話や、メールの送受信、SNS 上のメッセージ交換・写真共有といった通信機会を扱う。時間領域信号生成部は、前段で生成されたデータ系列に従って時間領域信号を生成する。周波数領域解析部は前段で生成された時間領域信号に対し、フーリエ変換によりエネルギースペクトル密度関数に変換し、リンク品質の評価値を算出する。リンクデータ登録部は、前段で算出された各ノード間の評価スコアを付加してリンクを GDB に登録する。

図 2 に評価結果を示す。ここでは 10% のリンクをマスクし、品質が高いと評価されたリンクを用いてマスクしたリンクの推定を行なう。これは、品質が高いリンクほど全体の構造にとって重要であるという仮説に基づいた評価である。データセットとしてエンロン社の E メールデータセットを用いた。図の横軸は使用しないリンクの割合、縦軸は推定の精度を表す。図から、提案方式 (Spectrum peak) の推定精度が 3 つの比較方式と比べて最も高かった。本結果から、時間的特徴を有するリンクは品質が高いという仮説ならびに提案方式の有効性が示された。

[文献] 杉本, 新熊, " ユーザ間の通信機会の時間特性の評価手法," 信学技報, MoNA, 2016 年 11 月.

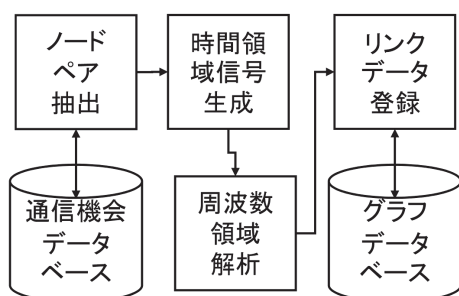


図 1: システム構成

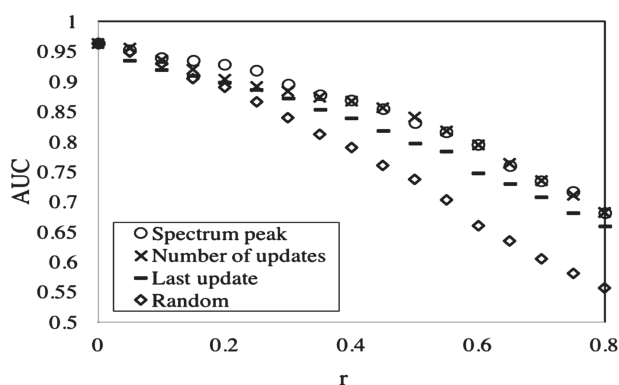


図 2: 評価結果 copyright©2016 IEICE

集積システム工学講座 情報回路方式分野（佐藤高史研究室）

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「近似演算を活用した画像認識向けニューラルネットワークハードウェア」

本研究室では大規模集積回路（LSI）を用いた応用システムの一つとして、画像認識向けハードウェアに関する研究に取り組んでいる。画像認識技術は、車載やロボティクス、医療、セキュリティ用途など、様々な分野において今や欠かすことのできない主要な情報処理技術である。特に近年、これらの画像認識を組み込み機器上で実現することが求められており、限られた電力制約の中で認識精度と処理性能を両立させることが大きな課題となっている。これらを解決すべく、我々はソフト・ハード両面からの検討を行い、ハードウェア実装に適した画像認識アルゴリズムを開発し、電力効率に優れた高性能な組み込み向け画像認識システムの実現を行っている。

高精度な画像認識が行える手法として、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network; CNN）の利用が近年広まっている。CNNは図1に示すように、画像に対して複数のフィルタを用いた畳み込み演算（Convolution: Conv）と、画素値の間引き処理であるプーリング（Pooling: Pool）を繰り返し適用することで、複雑な画像の特徴を効率良く学習することのできる手法である。しかしこの中で行われる畳み込み演算には多大な計算量を要し、ハードウェア化を行う際には消費電力の増大が問題となる。そこで我々は、ハードウェア化に適した近似演算を適用することで、CNNの畳み込み演算にかかるコストを低減させる手法[1]を提案した。提案手法では畳み込み演算とプーリングの組合せに着目し、出力への影響の少ない中間演算に対し近似および省略を行う。図2に示すようにCNNにおいては畳み込み演算とプーリングは順番に行われるが、プーリングでは複数の畳み込み演算結果のうち、最終的に1つの結果のみが出力される。従ってプーリングで選択されない畳み込み演算結果は、出力に直接の影響を与えないこととなる。そこで提案手法では図3のように、まず演算コストの小さい近似演算（AppConv）によりプーリングの出力を予測し、予測結果に基づいて必要な畳み込み演算のみを実行する二段階の計算手法を提案した。これにより、必要な畳み込み演算数をプーリング領域のサイズに応じて（図中の例では1/4に）低減することが可能となる。提案手法のソフトウェア・ハードウェア実装を行った結果、認識精度をほとんど損なうことなく、CNNハードウェアの消費電力を約20%低減できることが示された。

参考文献

[1] T. Ujiie, et al, "Approximated prediction strategy for reducing power consumption of convolutional neural network processor," in Proc. IEEE CVPRW, pp.870-876, 2016.

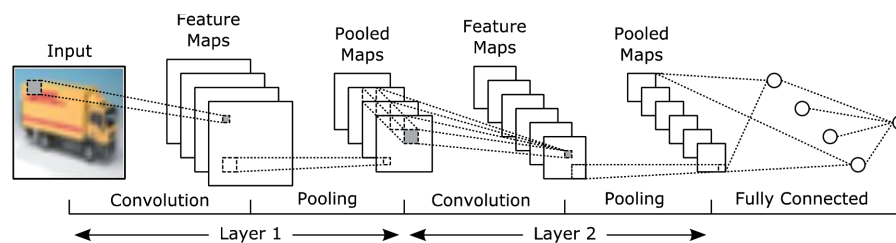


図1 畳み込みニューラルネットワークの例（畳み込み演算とプーリングの繰り返し構造を持つ）

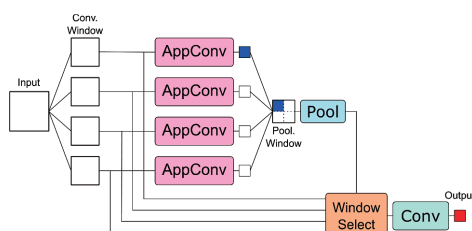


図2 提案手法における畳み込み演算とプーリング（Convが1/4に低減）

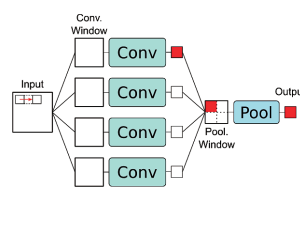


図3 通常のCNNにおける畳み込み演算とプーリング

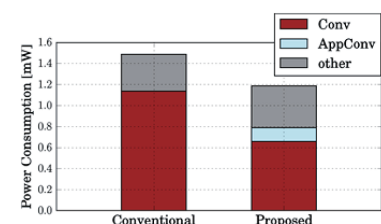


図4 提案手法による電力削減効果（65nm ASIC）

情報学研究科（通信情報システム専攻）超高速信号処理分野（佐藤 亨研）

<http://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「適応型信号処理を用いた低計算量高分解能医用超音波イメージング」

超音波診断装置を用いた医用イメージングは、放射線を使用する X 線 CT や高価な診断装置を必要とする MRI などと比較し、非侵襲かつ低コストな診断方法として、医療現場で幅広く用いられています。しかし、その解像度は CT や MRI に劣るため、高分解能なイメージング方法の確立が求められています。超音波イメージングにおける分解能を向上させる方法は、深さ方向の分解能を向上させる方法と横方向の分解能を向上させる方法の大きく 2 つに分けられます。当研究室では、深さ方向に高分解能な画像をリアルタイムに表示可能な方法を開発しました [1]。一方で、横方向の分解能を向上する高分解能なイメージング方法として、多数の超音波素子に適応型信号処理を適用したイメージング方法が提案されてきましたが、計算量が多く、実際の超音波診断装置に適用できないという課題がありました。

当研究室では、電波を用いた高速な高分解能イメージング方法を確立してきました [2]。電波によるイメージングと超音波イメージングでは、伝搬速度はもちろんのこと、使用する信号の周波数、帯域などが異なり、電波で使用されている方法を応用するには様々なハードルがあります。電波で用いられている方法は、狭帯域信号を仮定し、高速イメージングを実現していますが、医用超音波では一般的に広帯域信号を使用します。この違いを補償するため、全イメージング点に焦点形成を行うなどの信号処理が必要になるため、従来の方法では計算量が膨大になっていました。しかし、医用超音波でも焦点付近のある程度の範囲内では狭帯域信号を仮定しても良いことを発見し、レーダーで用いられている手法を超音波イメージングに応用することで従来の適応型信号処理を用いた方法に比べて、1/8 程度の計算量で高分解能なイメージングが可能となる方法を開発しました [3]。図に商用装置にも用いられている適応型信号処理を用いない方法と提案法を用いて実験によって得られた画像を示します。深さ 20, 30, 40, 50mm 付近にはそれぞれ横方向に近接して置かれた 2 つの点ターゲットが存在します。従来の方法である図 (a) では 2 ターゲットを分離できていませんが、提案法である図 (b) では分離できていることがわかります。今後は、今回提案した方法を実際の医用イメージング環境下で評価し、さらなる精度向上と計算量の低減に取り組みます。

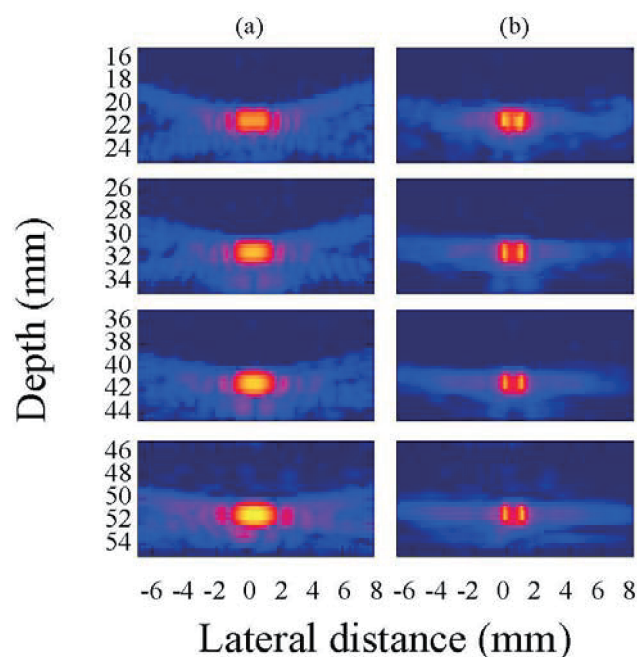


図. 超音波イメージングの実験結果。(a) 適応型信号処理を用いない場合。(b) 低計算量な適応型信号処理を用いた場合。

参考文献

- [1] H. Taki, K. Taki, T. Sakamoto, M. Yamakawa, T. Shiina, M. Kudo, and T. Sato, "High range resolution ultrasonographic vascular imaging using frequency domain interferometry with the Capon method," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 31, pp. 417-429, 2012.
- [2] T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Tsutsumi, and T. Sato, "Meteor Trail Echo Rejection in Atmospheric Phased Array Radars Using Adaptive Sidelobe Cancellation", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol.31, pp.2749-2757, 2014.
- [3] S. Okumura, H. Taki, and T. Sato, "Computational complexity reduction techniques for real-time and high-resolution medical ultrasound imaging using the beam-space Capon method", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.55, No.07KF07, 2016.

論理生命学分野（石井研）

<http://ishiilab.jp>

思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用（脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ）

論理生命学分野では、「学習するシステム」としての「生命」や「知性」の本質を明らかにすることを目的として多岐にわたる研究を進めています。本稿では、当研究室が 2016 年度の後半から参加している「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用（脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ）」と題するプロジェクトについてご紹介します。

本プロジェクトは、日本の誇るスーパーコンピューターである「京」および、その後継として数年後に建設が計画されているポスト「京」（仮称）の膨大な計算パワーを用いる応用課題として脳型人工知能の構築を目標としており、最終的には人間や動物の脳内で生じている認識・思考・意思決定の過程を理解し、柔軟で汎用的な人工知能の実現を狙っています。

我々が知りたいことは脳を構成する大脳・小脳・基底核等の各種主要部品の動作原理です。人間の脳は 1000 億を超える膨大な数の神経細胞と、それらの間にさらに多数（大脳において神経細胞一個あたり平均して一万個程度）の接続関係を持った複雑な構造から成立していることが知られています。しかし残念ながら脳の構造がどれだけ詳細に解ったとしても、それだけで動作原理が解ったとは言えません。これはコンピューターの配線構造が分かっても、応用ソフトが分かるわけではないのと同様です。そこで我々は様々な仮説のもとで全脳の働きをシミュレーションして比較することが動作原理解明のために必須だと考えています。シミュレータ開発を工夫して膨大な計算パワーを効率的に用いることで、脳の動作原理解明に必要な大規模シミュレーションを可能にするのが我々の第一のチャレンジです。

構造決定だけでは足りないと書きましたが、しかし、シミュレーション条件のリアリティを増すために、実は構造決定も大事であり、そのためのデータ解析にも計算パワーを用いています。これが第二のチャレンジです。脳科学では、脳の複雑な構造を知るために各種スケールの顕微鏡画像データや、拡散 MRI 法などによる大量のセンシングデータの集積を進めています。データに基づく局所的な構造決定だけでも大変ですが、局所的に決まった構造モデルを矛盾なく統合する大域的モデルを作ることもまた大変です。我々はとくに後者のために「京」の膨大な計算パワーが役立つと考えています。

一方で、皆様が日々のニュースなどでご存知のとおり、深層ニューラルネットを用いた人工知能技術によって画像・音声・言語などの処理が近年急速に高性能化しており、社会現象を引き起こしつつあります。我々の脳が持つ柔軟で汎用的な特徴をそのまま再現するような人工知能は、こうした近年の技術的発展の延長上にあり得るでしょうか？近年の人工知能の成功は主に巨大データに依存していますが、人間の知能は、必ずしも巨大データに依存せずに高い認識性能に至っています。我々は、人間の知能の柔軟さや汎用性といった特徴を実現するためには、近年までに成功した巨大データを用いるアプローチに加えて、少量の経験に基づいて多様な組み合わせを思考・思索するアーキテクチャが必要と考えています。これが第三のチャレンジです。「京」およびポスト「京」計算機の特徴は多数のノードを 3 次元的なトポロジーで接続するアーキテクチャにあります。こうしたアーキテクチャは多数ノード間で同期通信しながら計算する古典的な並列計算には不向きなのですが、計算開始と終了の時点がはっきりしないような、思考し続ける非同期型の脳型人工知能アーキテクチャにはとても向いていると考えられるのです。我々は、脳の構造に学び、シミュレーションの知見を用い、「京」計算機のパワーで人間らしい知能の秘密を解き明かしてゆきます。

このプロジェクトは沖縄科学技術大学院大学、東大、理研、電気通信大学との共同研究です。今後プロジェクトの進捗等の情報をまとめてゆきますので、ご興味をお持ちのかたはぜひこちらをご覧ください。<https://brain-hpc.jp/>

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野 (中村祐研究室)

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/>

「ヘリカルプラズマにおける乱流拡散の第一原理シミュレーション」

核融合を目指した磁場閉じ込めトラスプラズマ実験は、トラス全体に電流を流すトカマク型と電流を流さないヘリカル型に大別される。ヘリカルプラズマは外部コイルが作る磁場のみで閉じ込めることが可能であり、高温プラズマの長時間保持に有利である。そして、ヘリカルプラズマは軸対称性を持たない三次元磁場閉じ込めトラスプラズマであり、その閉じ込めに対して、この三次元性に関する自由度を用いて流体不安定性の低減およびプラズマの衝突性拡散の改善を実現する磁場配位を探求する研究がなされてきた。京都大学のヘリオトロン J (HJ、図 1) は磁気井戸を形成することにより流体安定性に対して最適化され、W7-X (ドイツの装置) は衝突性拡散に対して最適化されている。また、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) では磁場のねじれである磁気シアを利用して流体安定性を防いでいる。

近年、プラズマの非線形ダイナミクスである乱流によって生じる熱および粒子拡散の改善を目的として、さらなる三次元性の最適化を探求するために磁化プラズマの第一原理シミュレーションがなされ始めている [1, 2]。そして LHD に対して、衝突性拡散の最適化がゾーナル流と呼ばれる構造を効率的に形成することが示された。一方、LHD プラズマ中の乱流に生じる新たな構造形成も示された [3]。

本研究では、磁化プラズマの第一原理シミュレーションコード [4, 5] を用いてヘリオトロン J (HJ) プラズマにおける不安定性および乱流の第一原理数値シミュレーションを行い、3 次元磁場配位の最適化によるプラズマの乱流拡散の低減およびその低減機構の理解を目指す。特に、磁気シアと磁場バンピネス (トラス方向の磁場強度変化) に着目して、HJ における乱流拡散と LHD における乱流拡散を比較した。その結果、HJ プラズマは LHD と同様にイオン温度勾配 (ITG) モードに対して不安定であることを明らかにした。図 1 ように HJ の磁気面は上から見てほぼ四角形となる。このトラスの角かつトラス外側で ITG 不安定性の振幅が大きい。また、ITG 不安定性の揺動は磁力線方向に非常に伸びたモード構造を持つ (図 2)。計算の結果、HJ のような弱磁気シア装置が線形不安定性の観点からは不利であっても大きな乱流拡散を生じるわけではないことを明らかにした [6]。その原因は乱流の非線形性であるゾーナル流生成が強いことである (図 3)。これはゾーナル流生成を利用したヘリカルプラズマの最適化も有用であることを示唆する。一方、磁場配位の三次元性についてバンピネスが強い配位は通常配位と比較して ITG 不安定性が抑制され乱流拡散が低くなることも明らかにした [6]。



図 1: ヘリオトロン J (HJ) プラズマ

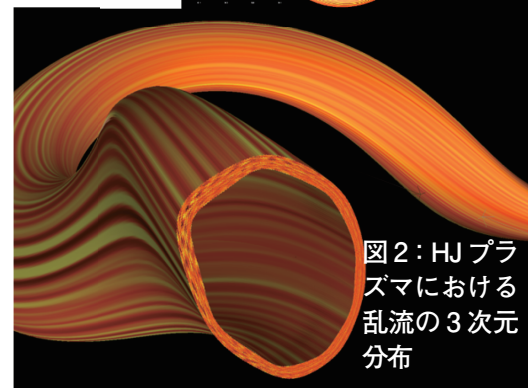


図 2: HJ プラズマにおける乱流の 3 次元分布

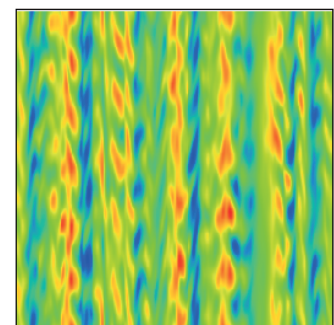


図 3: HJ プラズマにおける乱流の断面図

[1] P. Helander, et al., Nuclear Fusion, 053030, (2015).

[2] A. Ishizawa, et al., Nuclear Fusion, 043024 (2015).

[3] A. Ishizawa, et al., Phys. Plasmas, 055905, (2014).

[4] A. Ishizawa, et al., Nuclear Fusion, 053007 (2013).

[5] A. Ishizawa, et al., J. Plasma Physics, 435810203 (2015).

[6] A. Ishizawa, et al., IAEA-FEC, TH/6-2, (2016).

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

「プラズマを測るため、プラズマでレーザーを作る？」

本研究室では、荷電粒子と電磁場を精緻に制御することにより、磁場閉じ込め核融合、自由電子レーザー、小型核融合装置による高エネルギー粒子の発生・利用、等について研究を進めています。本小文では、磁場で閉じ込められた超高温プラズマ中の計測器開発について紹介します。

磁場閉じ込め核融合は、数々の優れた利点を有することから理想的なエネルギー源として長年研究されてきました。現在、国際協力下、フランス建設中の国際熱核融合実験炉ITERの運転開始が迫っており、核燃焼プラズマの実現が近づいています。さて、核融合反応の安定的維持の為には、一億度ものプラズマを計測する必要があります。我々の研究室で実験しているヘリオトロンJ装置においても、数千万度のプラズマが生成されています。このような熱いプラズマを、どのように計測するのでしょうか？

他分野同様、計測手法としては、受動的計測と能動的計測があります。前者はその名の通り高温プラズマ自身が発する電磁波や粒子を、受動的に（“受けて”）計測する手法です。これは、例えば星の観測と同じで、星が発する光を望遠鏡なりカメラで“受けて”観測する手法と同じ系統に属します。

一方、能動的計測手法は、こちらから能動的（“わざと”）高温プラズマに“何か”、プラズマ自身に影響を与えない程度に導入し、プラズマと相互作用し外に出てくる“何か”を計測する手法です。イルカやコウモリが超音波を放射し、その反射波から対象物の位置を同定することも能動的計測に属すると言えます。プラズマに入射するものとしては、当然計測量によって異なり、様々な波長の電磁波や、様々な種類、エネルギーの荷電粒子などがあります。

古くから使われているプラズマの能動的計測手法の一つが「干渉計」です。電磁波の光路を2つ準備します。片方はプラズマに入射されプラズマを通過し、他方はプラズマを通過しません。プラズマの存在によって生じる屈折率の違いから、両者の電磁波にはずれ（位相差）が生じ、それを計測することで密度を計測できます。干渉計といえば、エーテルの流れを計測しようとしたマイケルソン・モーリーの実験が有名ですが、昨今話題となった重力波の検出器も巨大な干渉計によって空間の歪みを検出するものです。多様な分野で使われています。

さて、ここで問題は、プラズマが高密度であればあるほど、屈折率が大きく変化することで電磁波が曲がって想定通りの光路から逸れたり、さらに高密度になるとプラズマ伝搬が不可能になることです。高密度プラズマでは、屈折を抑える為、より高い周波数の電磁波が必要になります。

最近、ヘリオトロンJでは中型装置でありながら、ITERプラズマにも迫るような超高密度プラズマの生成に成功しています。この高密度領域では、これまでのGHz以上、THz領域の電磁波が必要とされます。ここで発振器のスイッチON！でTHz波が必要なパワーだけ得られたら苦労は無いのですが、干渉計に利用できるレベルの出力を発する市販品の光源は存在しません。どうするか？自分たちで作るしかありません。そこで所謂ガスレーザーの一種である、およそ1THzの電磁波を発するHCN（シアン化水素）レーザーを組み立てることになりました。つまり、プラズマを計測するため、プラズマを使ってレーザーを作る、という、説明をし辛いことをやるわけです。幸い、30年程前に、HCNレーザーは先人たちによって研究されており、色々な論文もありました。しかし実際にものを作るとなると論文は書かれていないノウハウがあり、四苦八苦しながら組み立てることになりました。予想外のところで放電して焦げたり、熱で水漏れしたり、設計を変更したり、と、泥臭い失敗を繰り返しながら、ようやくヘリオトロンJ装置におけるテラヘルツ波の干渉計を構築し（図1）高密度プラズマ計測に成功した時には感慨深いものがありました。その過程で、ある博士課程の学生O君が大変頑張ってくれました。

勿論、我々にとって、プラズマの計測器開発はただの過程・手段でしかありませんが、この計測器が稼働したことによって、これまで計測できなかったヘリオトロンJの超高密度領域のプラズマの時間応答がわかるようになりました。これは小さな一歩ではありますが、大きな飛躍でもあります。今後は、この干渉計システムの高性能化・多視線化をすすめ、プラズマの密度分布やプラズマ中の揺らぎ計測に利用する予定です。これによって、現在建設中のITERや将来の炉設計に役立つ超高密度プラズマの物理解明や制御手法の確立が期待されます。

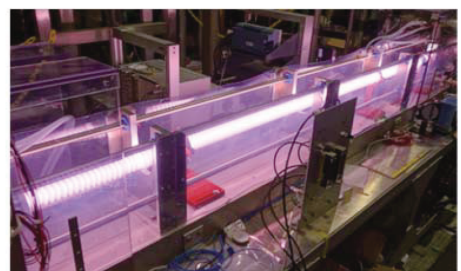


図1. 開発したHCNレーザーの写真

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

「日本全国の GPS 受信機網を用いた電離圏電子数の 3 次元トモグラフィー解析」

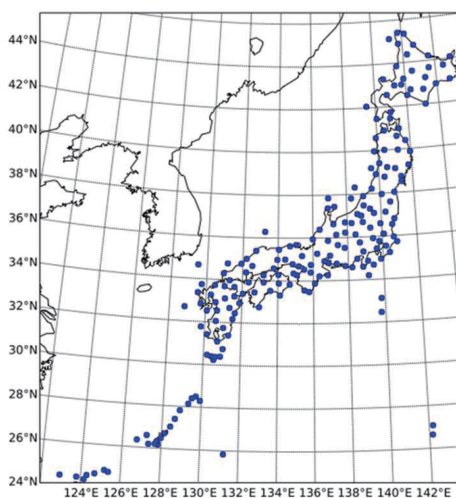
全地球測位システム（Global Positioning System: GPS）は高度約 20200km にある GPS 衛星からの電波を用いる測位システムである。GPS は航空機ナビゲーションの利用が始まっており、現在開発中の自動車の自動運転の重要技術でもある。GPS は、2 周波数を利用することで電離圏中の電波伝搬に伴う測位のずれを補正する。即ち、周波の電波遅延の差から伝搬路の全電子数（Total Electron Content: TEC）が観測できる。GPS 衛星を用いた TEC 観測（以後では GPS-TEC 観測）は、電離圏の研究に広く用いられている。特に我が国においては、国土地理院が電子基準点の稠密観測ネットワークシステム GEONET を運用中である。これを用いて 1300 点を超える地点からの GPS-TEC 観測データが蓄積され、電子密度の水平分布のために用いられてきた。これに対して当研究室では、理学研究科および電子航法研究所と共同して、電子密度の 3 次元分布を明らかにするトモグラフィー解析を開発してきた。この技術は、医療分野で CT スキャンとして大きな成功を取っている。しかし GPS-TEC では観測方向が上下に強く縛られるため全方向にわたる透過データが得られず解析は困難である。

我々の解析では、領域を 3 次元化した上で拘束条件付き最小二乗法を用いている。この手法では、 $J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2 + \lambda \|\mathbf{Wx}\|^2$ で定義されるコスト関数を最小化することで電子密度分布ベクトル \mathbf{x} を求める。測定値ベクトル \mathbf{b} 、観測条件を表す行列 \mathbf{A} である。コスト関数のうち、 $\|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2$ は最小二乗誤差を表し、 $\|\mathbf{Wx}\|^2$ は拘束項であって、両者は係数 λ （ハイパーパラメタと呼ばれる）でつなぎ合される。拘束項は問題に即して選択され、我々は「ある格子点と上下前後左右の隣り合う格子点（6 点）の電子密度の差が広がらないように拘束する」とした。この手法は初期値を用いない点に大きな特徴があるが、拘束項とハイパーパラメタという人工的な係数の決め方が難しい。我々も数年にわたり試行錯誤をしてきた。本研究では昨年度までに大きな進歩があり、拘束項と λ の決定手法が固まるとともに、データ取得からトモグラフィー解析までがひとつのシステムにまとめられた。計算の高速化にも取り組んで、いわゆる PC LINUX を用いてデータ取得から解析終了までを 5 分以下とすることに成功した。

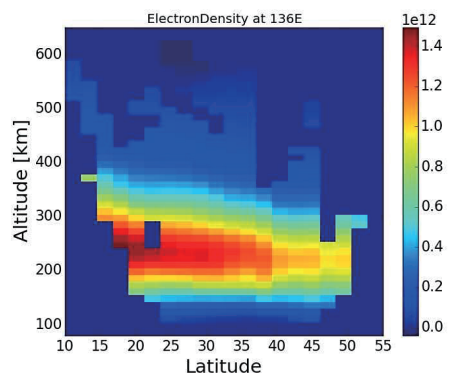
現在は 3 次元トモグラフィー解析を利用するための研究を進めている。ひとつは、電子航法研究所が全国 200 点から得ているリアルタイムデータを用いたトモグラフィー解析である。2016 年 4 月から 15

分毎の自動解析を始め、<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/> から結果を公開している。一方、GEONET が 1996 年から現在までに蓄積したデータ全体のトモグラ

フィー解析を大型計算機で一気に行う予定である。今後は、解析結果の妥当性のチェックを進める一方、実利用を模索していきたいと考えている。



リアルタイムデータが得られる GEONET 観測点の分布。



トモグラフィー解析による電子密度の緯度高度分布の例 (2012 年 5 月 23 日 7UT)。

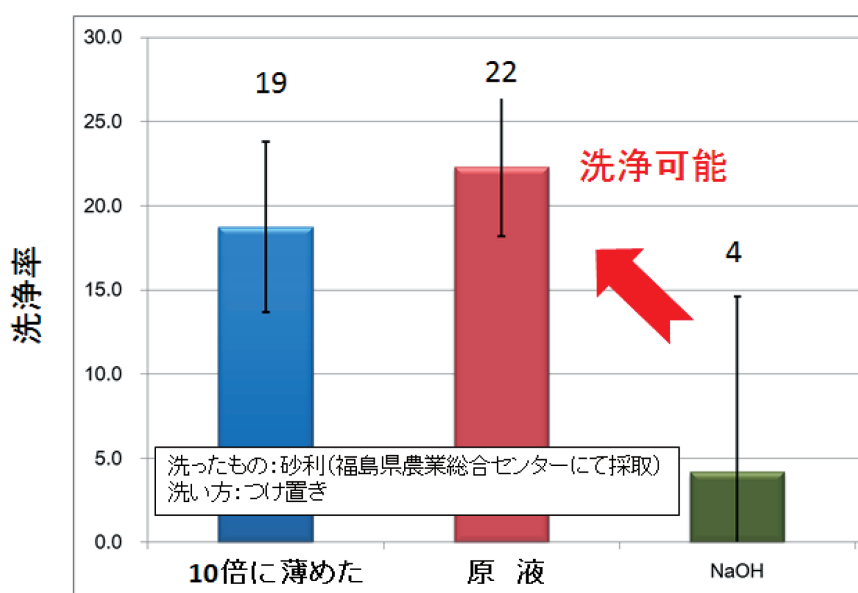
生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野（山川研究室）
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/yamakawa-lab/index.html>
 「放射性セシウムの吸着特性に関する研究（東日本大震災復興関連研究）」

2011年に発生した福島原発事故由来の放射性セシウム（Cs-137）は、半減期が約30年であり、土壌から農作物へと移行してしまうと、食物連鎖により上位の生物の内部被曝につながる。そのため、地域復興、農業再生に向けた環境の除染作業が行われていることは周知の通りである。現状の除染方法は表面（表土や草木）の剥ぎ取りであるが、全ての被洗浄物に対して最適というわけではない。将来の対策技術開発としても、洗浄方法の多様化が今後必要である。

我々の研究グループでは、これまでにケイ酸塩系洗浄剤が除染に有効であることを見いだしてきた。この洗浄剤を用いることにより、不織布や砂礫からの放射性セシウムの除染が可能である。また、界面活性剤が含まれないため、泡立ちを抑えることができ、工業的な利用が容易だという特徴がある。さらに、廃液を酸またはアルコールで中和することによって固液分離が可能であること、放射性セシウムは固体に含まれることを同様に見いだしており、しばしば問題となる廃棄物の減容化という課題もクリアできる。

しかしながら、このケイ酸塩系の洗浄剤の洗浄メカニズムについては不明な点が多く、これを明らかにすることにより、高効率な洗浄法の考案が可能となると考えている。ひいては除染方法の多様化や、事故への備えとなるため、エネルギー確保の観点からも重要だといえる。

洗浄メカニズムの解明にはセシウムの洗浄前後の付着状態についての解析が必須であるが、濃度が数ppm程度と低いため、特定の核に着目した情報を得ることのできる放射光を用いたXAFS測定を行っている。XAFS測定には超高感度測定が必要であるので、SPring-8において行っており、粘土鉱物、土壌へのセシウムの固定化/脱離挙動に関する知見を得つつ、ケイ酸塩系の洗浄剤の洗浄原理について確認してきている。



けん化によって、油分を水溶性にした

Figure 1 非界面活性剤系洗浄剤による洗浄

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「電磁波の生体影響評価研究」

二十世紀末から今世紀に入って、我々の生活環境には電磁波があふれるように飛び交っている。特に、世界中で携帯電話や無線LANの利用、携帯電話基地局の新設などが急速に進展したことが主な要因となっている。その他、高圧送電線、家庭内の電化製品、医療現場での電磁波、空港のセキュリティーチェックなどがある。さらに電気自動車の電波によるワイヤレス給電（無線エネルギー伝送）の急速な普及が近い将来に予想される。近未来社会では、人が生活する上で、定常磁場、低周波、中間周波、高周波、さらにミリ波やテラヘルツ波など、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。電磁環境は目に見えないこともあり、このような背景から、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。

そこで、電磁環境における生体影響の評価、メカニズム解明と理解が大きな社会的要請となっている。当研究室では、これまで、研究室の宮越順二特任教授や小山真特任講師らと共に、電磁波ばく露による細胞や遺伝子レベルでの明確な応答を定量的に解析し、線量-効果関係に基づくしきい値の推定ならびに電磁波に対する分子生物学的な応答のメカニズム解明を目的として研究を行ってきた。影響評価の観点からは、遺伝毒性（染色体異常、遺伝子突然変異、DNA損傷など）、遺伝子発現やシグナル伝達機構などの電磁場応答の有無やその機構について研究成果を発表してきた。（参考文献参照）図1には、電磁環境の生体影響評価研究の1例を示す。まず、共鳴送電による無線エネルギー伝送による電磁環境を細胞培養インキュベーター内に構築する。ばく露評価もあわせて行う。このシステムを用いて、発がん性に関与する細胞遺伝毒性（染色体異常、小核形成、DNA鎖切断など）への影響評価を行う。一方、世界保健機関（WHO）の推奨研究となっている電磁環境の免疫機能への影響について、免疫担当細胞のサイトカイン分泌や貪食能などを解析する。得られた成果は、電磁波の生体影響を議論する基礎資料となる。さらに、WHO、国際がん研究機関（IARC）や非電離放射線防護委員会（ICNIRP）のメンバーとして国際的評価会議に参加し、貢献してきた。

携帯電話をはじめとして、ワイヤレス給電の分野でも、工学的技術の進歩は目を見張るものがある。その一方、電磁波は新しい環境因子として、社会的に注目されることも考えておかなければならない。電気自動車のワイヤレス給電システム（走行中も含む）など、非接触エネルギー伝送技術をはじめとして、近い将来の電磁波利用は高まるばかりである。このように増加の一途をたどる将来の電磁環境を考えると、電磁波の安全性を科学的なデータから判断するため、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、研究を推進してゆく必要があると考える。

【参考文献】

1. K. Mizuno, N. Shinohara, J. Miyakoshi. Expression of heat shock proteins in human fibroblast cells under magnetic resonant coupling wireless power transfer. *Energies* 8, 12020-12028 (2015)
2. K. Mizuno, N. Shinohara, J. Miyakoshi. In vitro evaluation of genotoxic effects under magnetic resonant coupling wireless power transfer. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 7;12 (4):3853-63. (2015)
3. S. Koyama, E. Narita, N. Shinohara, J. Miyakoshi. Effect of an intermediate-frequency magnetic field of 23 kHz at 2 mT on chemotaxis and phagocytosis in neutrophil-like differentiated human HL-60 cells. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 17;11 (9):9649-59. (2014)

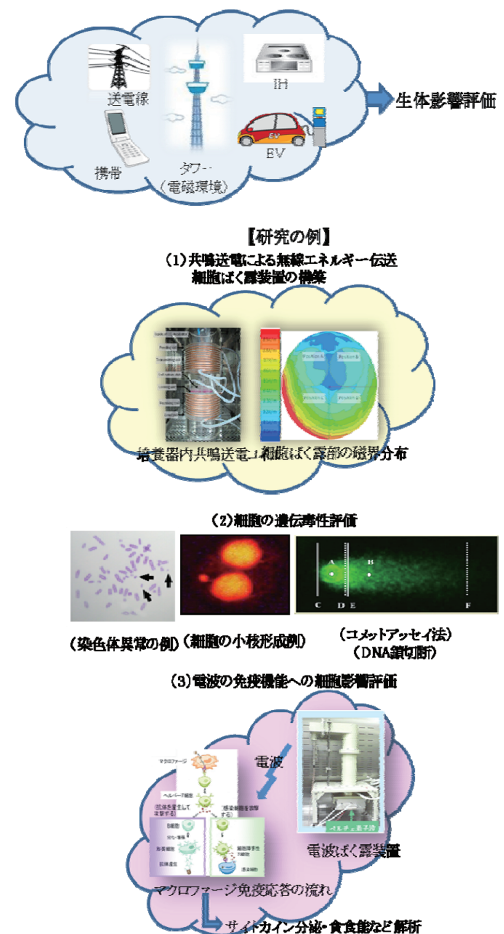


図1 電磁環境の生体影響評価