

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自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真空電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野 (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 (高岡研)

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 (佐野研)

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)

学術情報メディアセンター

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）

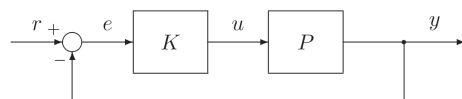
<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「半正定値計画問題の解析解の導出による制御系の性能限界解析」

数理工学的手法に基づいた制御系設計においては、与えられた制御対象に対して制御目的の満足度を定量的に表すための評価関数を導入し、この評価関数を最小（最大）にする制御器を設計する。制御系設計の一例として、図で表される 1 入出力で線形時不変の制御対象 P に対するフィードバック制御系を考えよう。 K は設計すべき線形時不変の制御装置を表している。図における目標値 r から制御偏差 e までの閉ループ伝達関数は感度関数とよばれており、この関数の大きさ（ H_∞ ノルム）が小さいほど目標値追従が良好という意味で望ましいといえる。感度関数に関する性能限界解析問題とは、線形時不変の制御装置 K を適切に設計することにより感度関数の H_∞ ノルムをどこまで低減できるかを、制御対象 P の特徴量を用いて解析的に表現することを問う問題である。

性能限界を解析する問題は、フィードバック制御によって制御性能をどこまで高めることができるかという制御の本質を問う問題であり、複素解析などの手法により古くから研究が盛んである。上記の感度関数の性能限界に関する研究成果も得られており、制御対象 P が不安定零点として 1 位の z のみを、不安定極として 1 位の p のみを持つ場合には、性能限界が $|z+p|/|z-p|$ で表されることなどが示されている。しかし解析解を探索するアプローチには限界があり、感度関数とは異なる様々な閉ループ伝達関数の取り扱いや、制御対象が高位の不安定零点・極を有する場合の扱いは難しいことが知られている。一方、計算機性能の飛躍的な向上にともない、1990 年代以降、制御分野において数値計算の利用を前提とした制御理論が大きく発展した。制御における解析・設計問題を凸最適化問題に帰着させ、数値最適化によって解（制御性能の最適値や最適な制御装置のパラメータ）を求めるといったものである。とくに制御分野の問題は半正定値計画問題（Semidefinite Programming Problem, SDP）と親和性が高く、解析的な求解が困難であった多くの問題を SDP に帰着させることで数値解を得ることができるようになった。個々の制御系設計問題に対しては、SDP を解くことで性能限界を数値的に求めることが可能になったのである。

しかしながら、数値最適化に頼る方法では、制御対象のどのような性質（極・零点の配置、ゲイン・位相特性など）が着目する制御性能に密接に関連するのかを把握することが難しい。また、数値最適化には必ず計算誤差がともなうため、数値最適化による計算結果を厳密な性能限界として採用することには不安も残る。このような背景のもと、当研究室では制御系設計において現われる SDP を“解析的に解く”ための数学的手法に関する研究を行っている。詳細は省略するが、制御系設計において現われる標準的な SDP の Lagrange 双対問題を考え、制御対象の極や零点の情報を用いて双対許容解（可能であれば双対最適解）を具体的に構成するというものである。この手法により、例えば制御対象 P が不安定零点として 2 位の z のみを、不安定極として 2 位の p のみを持つ場合の感度関数の H_∞ ノルムに関する性能限界の下界値を、 z と p の関数として解析的に導出している。表に、この条件を満足する様々な制御対象に対して SDP による数値解と解析的表現による下界値を求めた結果を表しているが、両者はよく一致しており、提案手法により性能限界を表現できていることがうかがえる。SDP の解析解の導出に関する研究は情報幾何の分野と密接に関連することが知られており、本研究の先には深淵な数学の世界が広がっていると思われる。



図：フィードバック制御系

表：SDP による数値解と解析的表現による下界値

	数値解	下界値
制御対象 1	9.736022	9.736022
制御対象 2	44.494947	44.494947
制御対象 3	8.384446	8.384446

生体医工学講座 複合システム論分野（土居研究室）

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

1 型糖尿病患者の食事に対する血糖値変化モデルの研究

1 型糖尿病は、血糖値を下げるホルモンであるインスリンの分泌機能を失うことが原因で高血糖状態となる病気です。1 型糖尿病患者は生命維持のためにインスリンの投与が必要ですが、血糖値を適切な範囲まで低下させられないと脳血管障害、心筋梗塞、神経障害などのさまざまな病気を引き起こすことになり、また低血糖になると死に至る可能性があります。インスリン投与は食事時を含めて日に数回行われますが、とくに食後の血糖値変化は大きく、また食事内容によって異なるため、インスリンの適切な投与量を決めるのは容易ではなく、患者にとって大きな負担となっています。従来食事時のインスリン投与量は主に摂取する炭水化物量に基づいて決定されていましたが、この方法では正確な血糖値調整が行えないので、われわれは食事内容にあわせたインスリン投与を可能とするため、食事内容に基づいて食後の血糖値変化を精確に求められるモデルの研究を行っています。

まず、血糖値変化に直接的な影響のある炭水化物中心の食事について血糖値変化を精確に表せるモデルを構成しました [1]。このモデルは、図 1 のように炭水化物の消化・吸収モデル、皮下投与インスリンの血中への移動モデル、およびグルコース・インスリン代謝モデルの三つからなり、とくに炭水化物の消化・吸収モデルの部分は、図 2 のように炭水化物量とその種類、グリセミック指数 (GI) と呼ばれる血糖値上昇への影響の大きさから決まる実効グルコース量と吸収の速さ、および胃内容排出の遅れを考慮に入れて、食事内容による血糖値変化の違いを表せるようにしました。その結果、図 3 のようにさまざまな食事に対する血糖値変化を精確に表せるモデルを構築できました。

また、食事に含まれる脂質や蛋白質も血糖値変化に影響を及ぼすことがわかってきています。大きな影響としては、脂質についてはインスリンの効果の低下と血糖値上昇の遅れが、蛋白質については血糖値を上昇させるグルカゴンというホルモンの分泌促進による血糖値上昇があります。そこで、これらを考慮に入れた血糖値変化のモデルの検討も進めています [2, 3]。以上のように、精確な血糖値変化のモデルを構成することでより精確な血糖値の予測を可能とし、さらには食事時に望ましい血糖値制御を行えるシステムの開発につなげていきたいと考えています。

参考文献

- [1] C. C. Yamamoto Noguchi, et al.: SICE JCMSI, 7-6, 314/320 (2014)
- [2] 國兼ほか: SCF 15, 115-5 (2015)
- [3] C. C. Yamamoto Noguchi, et al.: IEEE EMBC 2015, 8058/8061 (2015)

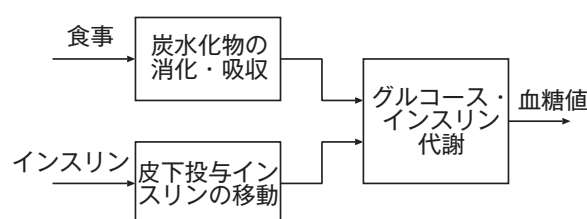


図 1 1 型糖尿病患者の糖代謝モデル

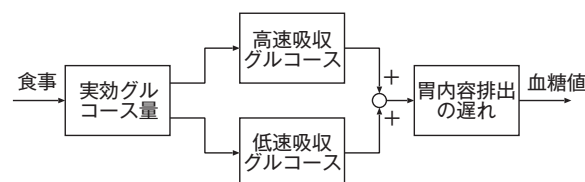


図 2 炭水化物の消化・吸収モデル

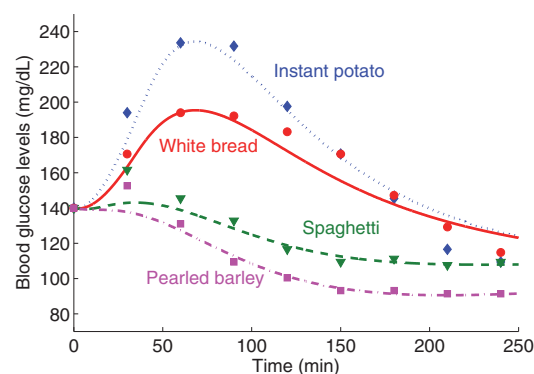


図 3 グリセミック指数の異なる食事に対する血糖値変化（点は測定値、線はモデル出力）

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/>

「機能的 MRI に向けた神経磁場計測法の検討」

ヒトの脳機能を計測する手法として、BOLD 効果を用いた機能的 MRI (fMRI) が広く用いられているが、脳神経細胞が賦活する際に生じる血行動態の変化を捉えるため、実際の脳活動よりも広範な領域を賦活部位として検出することが知られている。それゆえ、脳活動をより直接的に計測するための手法として、脳神経磁場を計測する fMRI (NMFD-fMRI) の実現が期待されている。当研究室ではスピロック撮像法による NMFD-fMRI について検討を進めている。スピロック撮像法は、スピロックパルスと撮像対象に生じる神経磁場との共鳴現象による MR 信号の変化を捉える手法である [1, 2, 3]。

図 1 に示すのが、スピロック撮像法のシミュレーション結果であり、上段が実験室座標系、中段が回転座標系における磁化の挙動、下段が磁化の z 軸方向成分の時間変化である。MR 信号は磁化の z 軸方向成分に依存するが、 z 軸方向に神経磁場がある場合、神経磁場がない場合と比べて MR 信号強度が低下するため、これにより脳の賦活部位を検出することができる。

図 2 に 7T-MRI 装置でスピロック撮像法を行った結果を示す。撮像対象には、生理食塩水を満たしたループコイルファントムを用いた。磁場が印加されている場合は、されていない場合に比べてループコイル内の信号強度が低下している。我々は、この手法を用いて 0.2 nT 程度の磁場や、ダイポールファントムに生じる磁場を実験的に検出することに成功している。実際の脳神経磁場は大きさが約 0.1 ~ 1 nT で、周波数が数 Hz ~ 数百 Hz であるので、本研究の結果はスピロック撮像法の脳神経磁場計測への有用性を示すものであるといえる。

本手法では、通常の fMRI で利用される BOLD 効果がノイズとなるため、それを抑制することが必要となってくる。BOLD 効果は静磁場強度が大きければ大きいほど強くなるため、低磁場 MRI で行われることが望ましい。そこで、今後我々は 0.3T-MRI を用いて、さらにこの手法の研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] S. Nagahara, M. Ueno and T. Kobayashi, Adv. Biomed. Eng. **2**, 63-71 (2013).
- [2] 上野、伊藤、小林、電子情報通信学会技術報告 **114** (361), 27-32 (2014).
- [3] 小林、VISION **27** (2), 73-79 (2015).

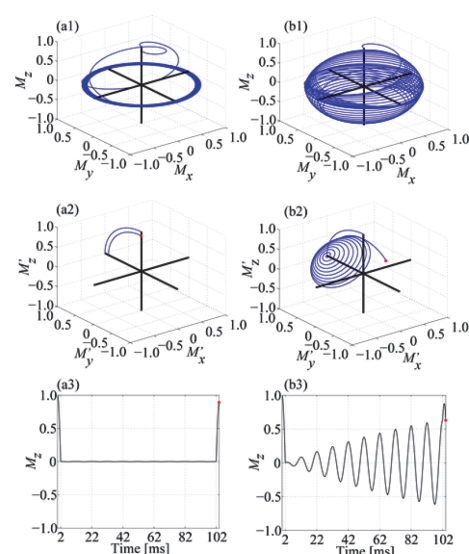


図 1. スピロック撮像法のシミュレーション結果。(a) 神経磁場がないとき。(b) 神経磁場があるとき。

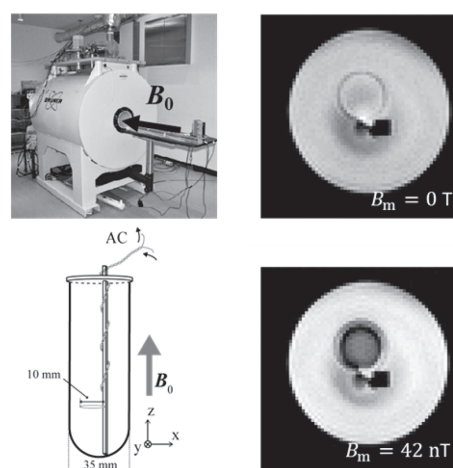


図 2. 撮像実験に用いたファントムとスピロック周波数が 100 Hz のときの撮像結果。

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/>

「高速高周波回路のモデル化と設計法：電子回路の電磁妨害耐性（イミュニティ）」

最近、自動車の衝突防止システムや自動運転システムなどが注目を浴びています。これは、従来のエンジンの電子制御系やエアバッグなどの電気電子制御の安全装置に加えて、たくさんのセンサー系や信号処理・情報処理システムを組み合わせ、メカ（機械）系と電気電子回路・機器系およびデータ処理系の連携による複座なシステムにより構成されています。これらのシステムにとっては、安全性・信頼性の確保が非常に重要な課題となります。たとえば、自動車の外部からレーダーの電波などの意図的な電磁波が飛び込んできたとき、センサー系や信号処理系がこの電磁波に反応して正常ではない出力を出してしまったとすると、もはやシステム全体がどんな応答をするのか分からなくなり、安全性が保たれなくなります。

つまり、複雑なシステムが実際の環境の中で正常かつ安全に動作するためには、周辺の環境に影響されない安定した動作が要求されます。これはもちろん、真夏の高温や真冬の低温の環境でも動作する、という従来の環境安全性能も含まれますが、最近は様々な電波を利用する電子機器が多数使用されており、自動車自体も電波を発して周辺の環境を観測して運転に活用し、また「意図的な電磁放射」では無くても電気自動車の充電用の「無線電力伝送（Wireless Power Transfer）システム」や太陽光発電の電力を利用するための「パワエレ（Power Electronics）システム」など「非意図的な高周波電磁波」を発する機器・システムがたくさんあります。これらの高周波を利用するシステムが多数存在する環境の中で安全かつ安定した動作を保証する性能が、「電磁妨害耐性」です。通常、電気電子系の専門的用語としては、医療分野での病原菌などに対する免疫・耐性（Immunity）という言葉を用いて、電磁妨害に対する「イミュニティ」とカタカナで呼びます。

例えば図1のような自動車の電子制御ユニットやセンサーなどに対しては、国際規格としてイミュニティへの要求があり、その規格を満足する機器・システムのみが使用できる、ということになります。したがって、これらの機器・システムの設計者は、「イミュニティ特性を満足する」ことを確認して設計を行う必要があります。現在までの技術では、このイミュニティ特性には電子部品や回路基板・ケーブルなどの様々な構成要素の特性が影響を与えるため、設計時に十分な性能を確保できているかどうかを確認する手法が確立されておらず、実測に頼っている部分があります。当研究室では、このイミュニティ特性（電磁耐性）を評価するための、回路素子や制御ユニットなどの特性のモデル化と、これを用いて信頼性のある回路・システムを設計するためのシミュレーションに基づいた設計手法の確立を目標とした研究をおこなっています。たとえば、図2は電子制御ユニットなどに良く使用される直流電圧安定回路（Voltage Regulator）ICの電磁耐性（出力電圧変動 $\pm 2\%$ ）の測定結果と、回路素子モデルを用いたシミュレーション結果の比較を示しています。この例では50~100MHz 近辺では比較的低い（10 数 dBm の）高周波電力の入力により出力変動が起きており、シミュレーションにより正しく再現・評価できています。

[1] T. Matsushima, 他, "Macro model of LDO voltage regulator for estimation of immunity to conducted disturbance," IEICE technical report, vol.115, no.114, EMCJ2015-30, pp.73-78, June 2015.

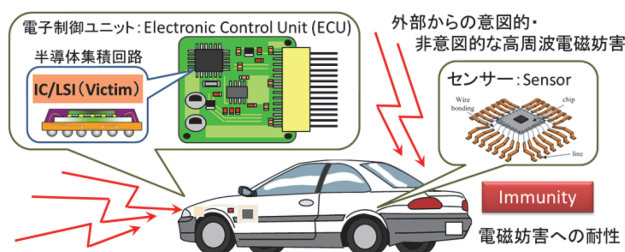


図1：外来の高周波電磁妨害に対する電子回路・機器の耐性(Immunity)

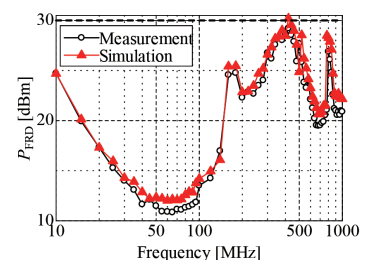


図2：電磁耐性の評価例(定電圧 IC)

電子物理工学講座 応用量子物性分野（竹内研究室）

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

「超広帯域共鳴波長可変ナノ光ファイバ共振器へのナノ発光体の高効率結合」

光は、光子の集まりで出来ています。近年、この光子を自在に制御することで、盗聴不可能な通信を実現する量子暗号通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータの実現に向けた研究が進められています。そこで鍵となるのが、光子を制御するためのデバイスです。特に、人工原子などの単一発光体から発生した光子を、光子の通路である単一モード光ファイバへと結合することは非常に重要な課題でした。

我々は以前、単一モード光ファイバの一部を直径 300nm まで引き延ばしたナノ光ファイバの表面に単一発光体を付着させることで、発生した光子を 7.4% 以上の効率で、光ファイバに結合させることに成功しました。また、ナノ光ファイバに光共振器を組込むことで、結合効率をさらに高めることが可能なことを理論的に提案してきました。

今回、我々は、ナノ光ファイバ上に、集束イオンビーム装置を用いて周期構造を作製、図 1 に示すように共振器構造を組込んだナノ光ファイバブラッグ共振器 (NFBC) を実現しました [1]。また、NFBC に加える張力を調整するだけで、従来の固体微小共振器では困難だった可視光領域で 20nm を超える超広帯域共鳴波長制御を実現できることも見出しました。さらに、NFBC の共振器部分に、単一発光体として量子ドットを付着させることで、図 2 に示す通り、共振器の共鳴波長において、発光強度を 2.7 倍に増強させることに成功しました。この成果から、共振器の共鳴波長にのみ発光する単一発光体を用いた場合、発生する光子の 50% 以上を単一モード光ファイバへと結合できると推定されます。さらに、この効率は、共振器の性能を高めることにより、理論上 100% へと近づけることも可能です。

本研究は、量子暗号通信や光量子コンピュータなどの実現にむけた最大のボトルネックである、100% に近い効率で光子を発生する、オンデマンド単一光子源の実現に向けた大きなステップになると考えられます。

[1] A. W. Schell, H. Takashima, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson and S. Takeuchi, “Highly efficient coupling of nanolight emitters to a ultra-wide tunable nanofiber cavity”, Scientific Reports, **5**, 9619 (2015).

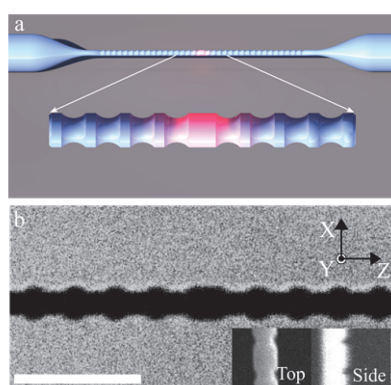


図 1 実現した NFBC。a. 模式図 b. 走査イオン顕微鏡 (SIM) 像。白い線は $1\mu\text{m}$ 。ナノ光ファイバの直径は 270 nm。溝の深さと周期は、それぞれ、45 nm と 300 nm。

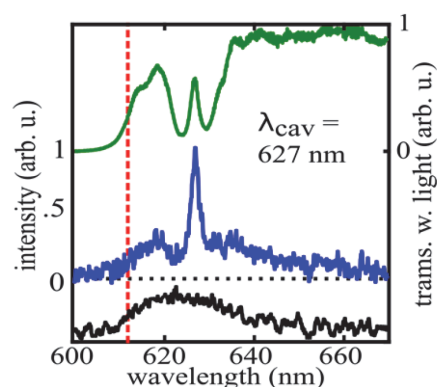


図 2 単一発光体からの発光スペクトル。光ファイバからの出力(青)には、共振器の共鳴波長(緑色線の窪みの中のピーク)に対応した波長で、顕微鏡による検出(黒)にはない鋭い増強ピークが存在する。

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/>

「Ge ナノワイヤの正孔移動度に関する理論的検討」

Si MOSFET を核とした LSI 微細化・高集積化の限界を突破するために、新しいチャネル材料や新規デバイス構造が研究されています。材料に関しては、電子、正孔共に Si より 2 倍以上の高い移動度を有し、かつ Si プロセスとの親和性に優れた Ge が有望です。また、デバイス構造に関しては、ゲートでチャネル側壁を覆ってチャネルの静電制御性を高めるナノワイヤ（量子細線）MOSFET（図 1）が有力と考えられています。したがって、これらを組み合わせた Ge ナノワイヤ（NW）MOSFET は、短チャネル化に強く高いオン電流を達成できると期待されています。しかしながら、ナノワイヤは量子閉じ込め効果によりエネルギーバンド構造がバルク状態から著しく変化するため、有効質量や移動度がナノワイヤの形状や方位に大きく依存することが分かっています。したがって、特に Ge ナノワイヤにおけるキャリア輸送特性の理論モデルを構築し、デバイス作製の指針を与えることが重要です。

本研究では、原子論的アプローチにより Ge ナノワイヤの電子状態とフォノン分散を計算し、正孔-フォノン相互作用や表面ラフネス散乱の影響を考慮して低電界における正孔移動度を算出し、そのナノワイヤ形状・方位依存性を明らかにしましたので紹介いたします。

Ge ナノワイヤのエネルギーバンド構造は最近接 $sp^3d^5s^*$ 強束縛近似法、フォノンの分散関係は原子価力場モデルを用いて計算しました。次に、正孔-フォノン相互作用ハミルトニアンを求め、フェルミの黄金律により正孔の散乱確率を算出しました [1]、この後、ボルツマン輸送方程式を低電界、室温下で解くことで、正孔移動度を求めました。表面のラフネス散乱 (SRS) については、典型的な相関長と粗さを考慮し、そのラフネス形状に応じたポテンシャルの摂動を取り込むことで計算しました [2]。なお、本計算には全て自作の計算プログラムを用いています。断面形状や結晶方位の異なる様々な Ge ナノワイヤについて移動度を計算し、その依存性を調べました。なお、計算したナノワイヤの断面サイズは約 2~10nm です。

図 2 に、(a) フォノン散乱のみ、(b) フォノン散乱とラフネス散乱を考慮した場合の移動度のナノワイヤ形状（幅）依存性を示します。断面形状が正方形に近い場合は [111] ナノワイヤ、長方形の場合は [110] ナノワイヤが高い移動度を示すことが分かりました。これは、量子閉じ込めによる価電子帯構造と有効質量の変化で説明できます。次に、実際の素子で重要となるラフネス散乱の影響に着目すると、フォノン制限移動度の高いナノワイヤほどラフネス散乱の影響が小さく、高い移動度を維持できることが分かりました。移動度の高いナノワイヤでは、輸送方向の p 軌道の寄与が大きく、この方向の有効質量が小さいのに対して、閉じ込め方向（輸送方向と垂直）の有効質量が重くなるためにラフネスによるポテンシャル揺らぎが低減されるからであると解釈できます。当グループでは Ge ナノワイヤの電子移動度の計算も行っており [1]、 n チャネル、 p チャネルデバイスで高い移動度を示す Ge ナノワイヤの方位と形状がほぼ共通であることも見出しています。

[1] H. Tanaka et al., IEEE TED, **61**, 1993 (2014). [2] H. Tanaka et al., IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, 3-5 (2015).

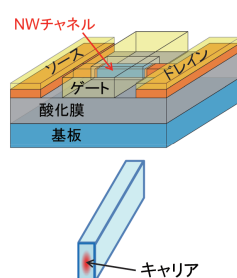
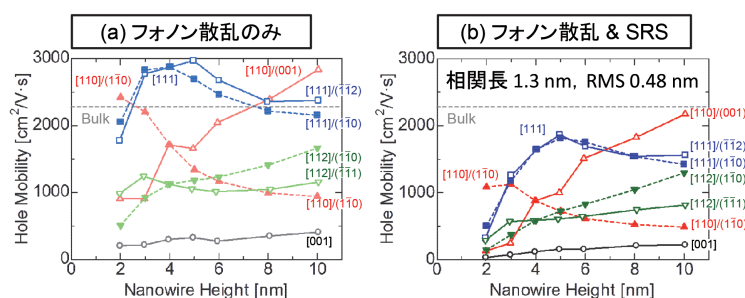


図 1 ナノワイヤ MOSFET の模式図

図 2 Ge ナノワイヤの正孔移動度の形状・方位依存性
(a) フォノン散乱のみ、(b) フォノン散乱+ラフネス散乱

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/>

「単一モード高出力フォトニック結晶面発光レーザー」

半導体レーザーはその誕生以来これまでに、波長域の広帯域化や応答速度の高速化などの波長軸、時間軸における目覚ましい性能向上が成し遂げられている。その結果、情報通信・光記録分野を中心に広く利用され、社会に大きく貢献している。今後は製造、医療、生命化学といった分野への展開も期待されるが、そのような応用においては、従来は十分に進んでいなかった光出力を軸とした研究開発が鍵となる。一般に半導体レーザーの出力は、その光出射面の面積に比例して最大値が決まる。しかしながら、従来の半導体レーザーでは、出射面積拡大に伴って高出力時の横モードが多モード化して出射光ビームの品質が低下するため、集光したときのスポットサイズが拡大してしまい、製造加工分野等の高い光密度を要求する分野への応用に不向きという問題があった。

1999年に我々はビーム品質の劣化を最小限に抑えつつ高出力化が可能なフォトニック結晶を用いた新規なレーザの基本概念を提案し、その基本動作の実証に成功した。その後、デバイス物理の詳細な理解、性能向上へのフィードバック、出力ビームの形状・偏光の制御、様々な波長への展開、ビーム操作機能の付与といった、様々な可能性・機能性を次々に実現してきた。さらに今回、図1に示す再成長によるフォトニック結晶構造の埋め込み、直角三角形穴形状のフォトニック結晶の採用、穴形状の立体的制御等を組み合わせることにより、図2(a)に示すような室温連続条件において1.5Wというワット級の出力を達成することに成功した。図2(b)のスペクトル特性から、単一波長で動作していることも分かる。また、図2(c)には様々な駆動電流における遠視野像を示している。電流を増やすと僅かながらビーム広がり角の増大が見られるが、それでも3度以下という狭放射角の動作が得られていることが分かった。なおビーム品質の指標である M^2 は出力0.5W程度までは1.0であり、非常に高いビーム品質が得られている。このような半導体レーザにおける高ビーム品質かつワット級動作の実現は、加工製造分野への応用に向けた重要な礎となる成果であるだけでなく、波長変換、光励起、バイオ、分析などの幅広い分野へも応用の裾野が広がるものと考えられる。

参考文献：K. Hirose, Y. Liang, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama, and S. Noda, “Watt-class high-power, high-beam-quality photonic crystal lasers,” *Nature Photonics* **8** (2014) 406.

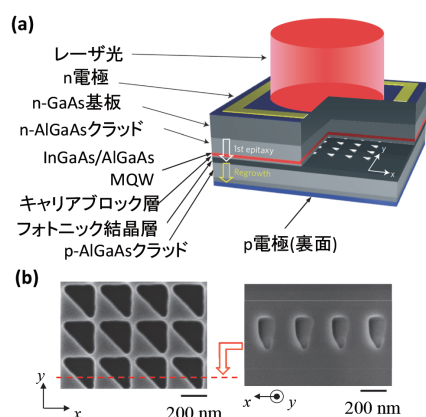


図1：高出力フォトニック結晶レーザーの構造

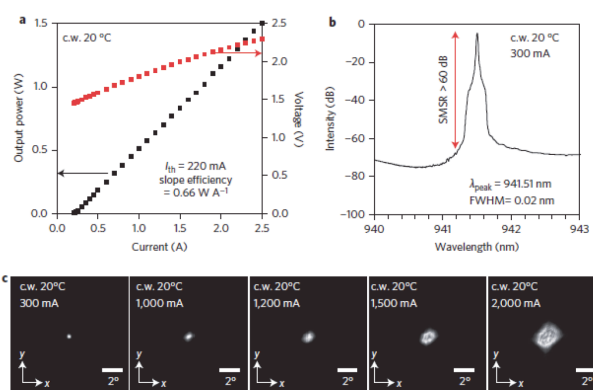


図2：レーザー発振特性

量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「真の電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアル」

メタマテリアルとは電磁波の波長に対して十分小さい構造体の集合体を指し、自然の媒質にはない電磁波の応答を実現できることから注目されている。構成要素が電磁波に対して応答することで媒質のように振る舞うので、要素1つ1つはメタ原子と呼ばれることがある。一方、電磁誘起透明化現象（以下EIT現象）は元々原子系で研究されてきた現象で、コントロール光と呼ばれる補助的な電磁波の入射によって、媒質が狭帯域で透明化するという現象である。この透明化帯域内で光の群速度が非常に遅くなるという性質があり、光の媒質への保存、いわゆる「光メモリ」といった応用が広く研究されている。このEIT現象を人工原子系であるメタマテリアルで模擬するという研究が近年盛んに行われている。これらの研究では、EIT現象に特有の狭帯域透過現象やそれに伴う低速伝搬が実現されているが、元々の原子系のEIT現象とは異なり、電磁波の保存に不可欠なEIT現象の動的制御が実現できていなかった。これに対して我々は、直流電場を加えることでEIT現象を制御する方法を考案し、マイクロ波領域で電磁波の保存と再生を実現した [1]。しかしながら、この方法においても透明化現象は電磁波の入射で誘起されるわけではなく、本当の意味でのEIT現象とは言えない。

これに対して、我々は原子系のEIT現象と全く同様に、補助的な電磁場（コントロール波）を入射することでメタマテリアルを透明化する方法を考案した [2]。図1(a)にその概念図を示す。同図左のように通常は電磁波を吸収するが、コントロール波が入射している場合にはメタマテリアルが透明になり、被測定波は透過する。この現象は、非線形光学現象であるために、メタマテリアルにも非線形要素が必要となる。研究では、基礎原理を示すために作成の容易なマイクロ波領域で動作するメタマテリアルを設計した。図1(b)にその基本構造を示す。構造は基本的には金属で形成されているが、可変容量ダイオード（図中varactorと表示）が導入されている。可変容量ダイオードは、通常のキャパシタンスと異なり、印加されている電圧に応じて容量が変化するためここで非線形効果が生じる。実験においては、導波路内にメタマテリアルを設置し、コントロール波がある場合とない場合で被測定波の透過率を測定した。実験結果である図1(c)が示すように、コントロール波を入射することでメタマテリアルの透過率が狭帯域で増加していることが分かる。検証は、マイクロ波領域で行ったがこの研究を発展させることで光領域でも同現象が実現できると考えており、光メモリのメタマテリアルによる実現も可能であると期待している。

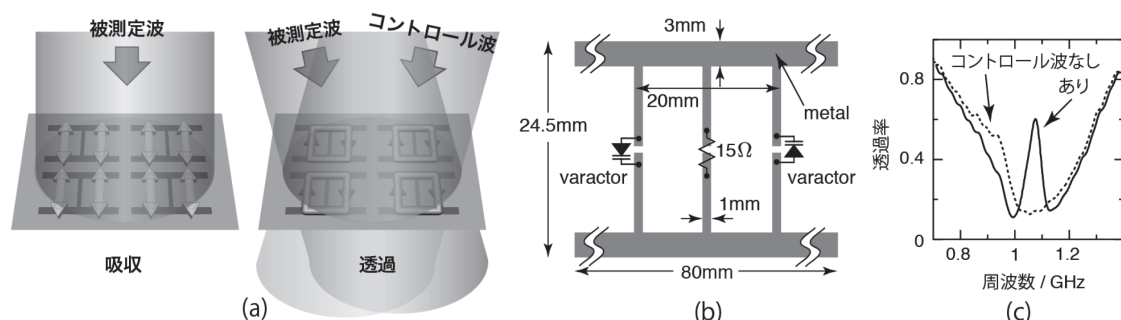


図 1 (a) 概念図 (b) 単位構造 (c) メタマテリアルの透過率（点線：コントロール波のない場合。実線：パワー 11dBm、周波数 480MHz のコントロール波が入射している場合。）

[1] T. Nakanishi, T. Otani, Y. Tamayama, and M. Kitano, “Storage of electromagnetic waves in a metamaterial that mimics electromagnetically induced transparency,” *Phys. Rev. B*, vol. 87, no. 16, p. 161110 (2013).

[2] T. Nakanishi and M. Kitano, “Implementation of Electromagnetically Induced Transparency in a Metamaterial Controlled with Auxiliary Waves,” *Phys. Rev. Appl.* vol. 4, no. 2, p. 024013 (2015).

25

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/>

仮想モバイル事業者間の周波数資源共有メカニズム

仮想モバイル事業者 (MVNO: Mobile Virtual Network Operator) は、自身の物理的な通信インフラやライセンスバンドを所有せずに、モバイル通信事業を提供する事業者である。仮想モバイル事業者は、通信インフラやライセンスバンドを所有するモバイル事業者 (MNO: Mobile Network Operator) からこれらを借りてサービスを提供している。仮想モバイル事業者は利用者の利用形態やニーズに合わせて柔軟に料金体系を設定できるため、モバイル事業市場を活性化する存在として期待されている。しかしながら、スマートフォンの普及などによりモバイルデータトラフィックは増え続けているため、仮想モバイル事業者は限られた周波数を効率的に利用することを求められている。そこで、我々は、NFV (Network Functions Virtualization) というネットワーク機能の柔軟な共用・分割を可能にする技術を前提に、仮想モバイル事業者間で周波数資源を共用するメカニズムを提案した [1]。ゲーム理論のナッシュ交渉解に基づいた確率で互いに協調することで公平な周波数資源の共用が実現される。

図1のとおり、仮想モバイル事業者はモバイル事業者から通信インフラを借りて、仮想的なモバイル通信サービスを提供している。図2のように、2つの仮想モバイル事業者は通常時は、それぞれのサービスと契約する利用者からの周波数資源要求 (BR: Bandwidth Request) を受け付ける。ただし、一方の仮想モバイル事業者に対する周波数資源要求が過度になると、他方の仮想モバイル事業者に対して協調を要求する。協調を求められた仮想モバイル事業者はある確率で協調を受け付け、図のCのスイッチをONにして、周波数資源要求を受け入れる。図3が周波数資源要求の発生率に対する受け付け確率であり、ゲーム理論のナッシュ交渉解に基づいて求められている。この確率に従って協調を行なうことで、仮想モバイル事業者間で常に公平な資源共有が可能である。

[1] W. Liu, R. Hu, R. Shinkuma, and T. Takahashi, "A Fair Resource Sharing Mechanism between Mobile Virtual Network Operators, IEICE Trans. Commun, vol.E98-B, no.11, Nov. 2015.

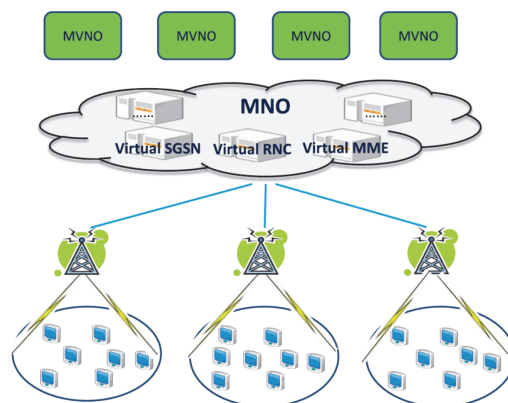


図1：仮想モバイル事業者

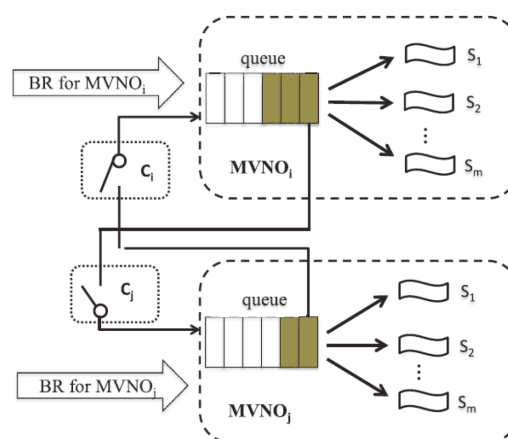


図2：仮想モバイル事業者間の資源共用モデル

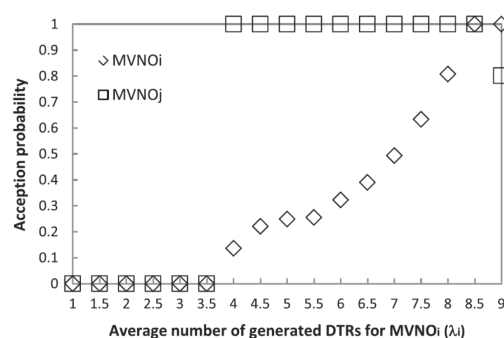


図3：資源要求の負荷に対する受け付け確率

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/>

「デバイス特性推定に基づく適応型動作周波数テスト」

大規模集積回路（LSI）の普及に伴い、その信頼性の確保が重要な課題となっている。正しく動作しない LSI は、社会に大きな影響を与えることにもなりかねない。個々の LSI が正しく製造されたか否かを確認することをテストといい、LSI の信頼性を確保するための重要な工程となっている。LSI におけるテストは、LSI チップの入力ピンにテストパターンを印可し、その応答を期待値と比較することで行われる。現在は、全てのテスト対象チップ（DUT）に対して同じテストパターンを与える固定的なテストが主流である。一般に、固定的テストのテストパターンは様々な最悪条件を想定して作成されるが、製造プロセスの微細化に伴う素子特性ばらつきの増大によりテストパターンが増加してテストに大きなコストを要するようになってきた。そこで我々は、適応型テストと呼ばれる新たなテスト手法に注目している。適応型テストは、DUT の特性に応じてテストパターンを動的に変更するテスト手法であり、これによりテストコストの大幅な削減が期待される。

本研究室では、特性ばらつき推定に基づく適応型動作周波数テストを提案している [1,2]。動作周波数テストは、クリティカルパスの動作周波数が製品規格内であることを確認するテストである。適応型動作周波数テストの概念図を図 1 に示す。提案手法では、トランジスタの特性ばらつきを事前に測定または推定し、これを元に DUT 毎の回路性能を推定する。推定した回路性能に応じ、DUT 毎に最適なテストパターンを用いて動作周波数テストを行う。従来の動作周波数テストでは特性ばらつきによらず常に悲観的な条件を想定するため、多くのクリティカルパスを考慮する必要がある。結果として、数多くのテストパターンが必要となっていた。提案手法では、特性ばらつきを元に DUT に適するテストパターンを選択して用いることで、テスト品質を損なうことなくパターン数を削減しテストコストを下げる。例えば、推定特性ばらつきにより DUT が高い周波数まで動作可能であることが分かれば、製品規格を下回る可能性は低い。このためテスト対象パスを限定でき、テストコストを低減できる。

提案した手法を用いて、テスト対象パスを 10 クラスタにまとめた結果の例を図 2 に示す。似た特性ばらつきを持つ DUT 間ではテストすべきパスが類似することを利用して、パスをまとめることでクラスタを作成する。図 2 の横軸と縦軸は nMOS トランジスタと pMOS トランジスタのしきい値電圧のばらつきを示しており、同色の領域には同じテストパターンを用いる。右下は動作周波数が低くなるためにテスト対象パスが多い。左上はその逆である。多くの DU において、悲観的な場合に対してずっと少ないパスをテストすればよいことが分かる。適応型動作周波数テストの効果を表 1 に示す。テストパスを 10 クラスタとする場合には、固定型テストと比べ、テスト品質を変えないままテストパターン数の期待値を 94% 以上削減できた。

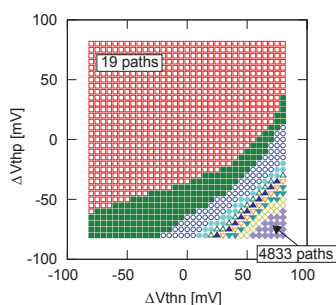
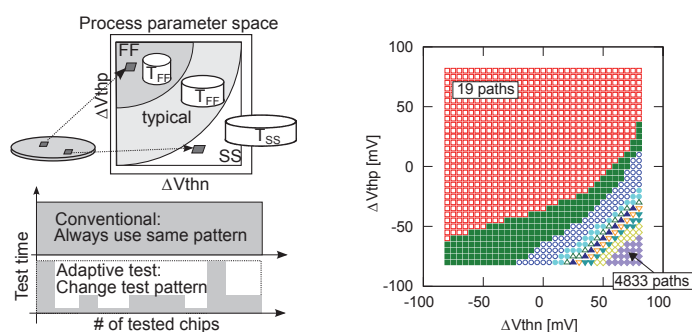


表 1：適応型テスト結果

# of clusters	Test quality[%]	Expected # of test patterns
1 (固定)	83.53	164
3	83.60	9.41 (94%)
5	83.11	5.54 (96%)
10	83.56	3.07 (98%)

図 1：提案する適応型テスト 図 2：パスまとめ上げ結果の例

参考文献

- [1] M. Shintani et al., "A Variability-Aware Adaptive Test Flow for Test Quality Improvement", IEEE Trans. CAD, 2014.
- [2] T. Uezono et al., "Path Clustering for Adaptive Test", Proc. of IEEE VTS, 2010.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

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

「ミリ波レーダーを用いた遠隔生体情報モニター」

疾病の予防や健康管理のために、呼吸数や心拍数などの生体情報（バイタル）データを定常的にモニターすることが重要となっています。特に一拍ごとの心拍間隔を表す瞬時心拍数の変動量は、老化や睡眠時無呼吸症候群の重要な指標とされ、突然死の予防などの観点からも注目されている他、睡眠中など安静時には変動が大きくなることから、居眠り運転の防止などにも利用できると期待されています。従来の心電計に加え、アップルウォッチや衣服型のセンサーなど、装着型のバイタルモニターは多様化しつつありますが、就寝時の装着に対する抵抗感や乳幼児への装着の困難などがあり、遠隔モニターに対する社会的要請が強くなっています。

当研究室でパナソニック社と協同して進めている、ミリ波超広帯域（UWB）ドップラーレーダーを用いた心拍の高精度な遠隔計測システムの開発について、その現状を紹介します。従来のCW波もしくはインパルス波を用いた手法に対して、開発した手法は不要波の抑圧能力を有し、複数の人が存在する環境でも正確な心拍の測定が可能である点が大きな特徴です。レーダーと心電計の同時計測実験により、開発した手法が瞬時心拍数を高精度に計測する能力を有することが明らかとなりました [1]。図1は心電計電圧およびレーダー受信信号の位相変化の例を示します。レーダー信号位相の1ラジアンの変化は、約0.9mmの目標距離変化に対応します。レーダー信号位相の変化は呼吸による変位が卓越しますが、心電計に見られる鋭いピーク（R波）に対応する微小な変動が重畳しています。この成分を新たに開発した信号処理手法 [2] により抽出し推定した瞬時心拍間隔を、心電計のR波の間隔と比較した結果を図2に示します。心電計による瞬時心拍には呼吸周期に対応した周期的な変動が見られますが、これがレーダーによって極めて高精度に再現されていることがわかります。

参考文献

- [1] T. Sakamoto, R. Imasaka, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, "Accurate heartbeat monitoring using ultra-wideband radar," IEICE Electronics Express, vol.12, no.3, pp.1-7, 2015.
- [2] T. Sakamoto, R. Imasaka, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, "Feature-based correlation and topological similarity for interbeat interval estimation using ultra-wideband radar," IEEE Trans. Biomed. Eng., in press, 2015.

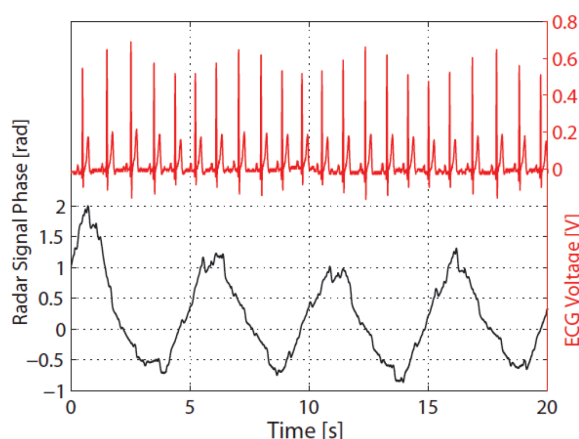


図1. 心電計電圧（上線および右軸）およびレーダー受信信号位相（下線および左軸）時系列の例

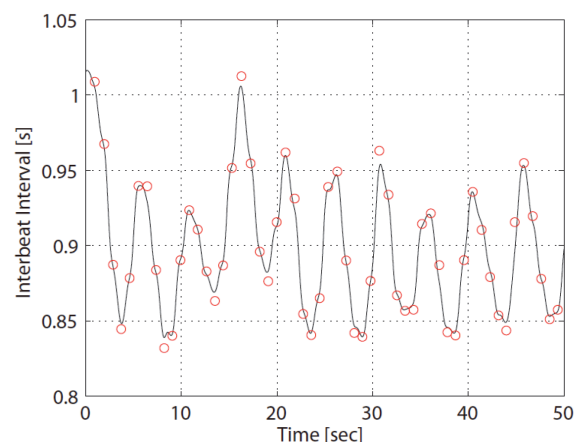


図2. 心電計（黒線）及びレーダー（丸印）による瞬時心拍間隔変動の測定例

システム情報論講座 論理生命学分野（石井研究室）

<http://ishiilab.jp>

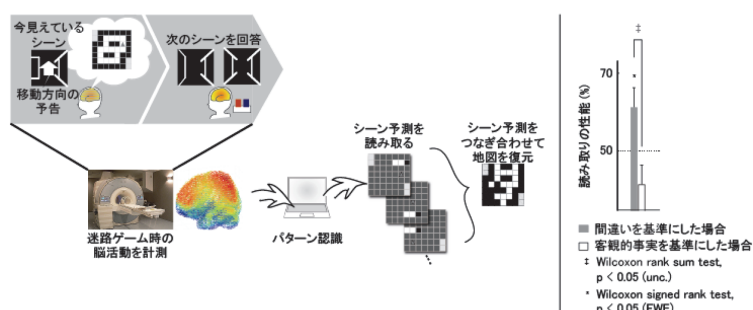
パターン認識で脳活動から思い込みを解読

当研究室では、知性の数理解理解を目指しています。昨今、機械学習など機械の知が注目を集めています。私たちは、機械の知を活用した、自然な知（脳）の理解に取り組んでいます。人間の脳の優れた点の1つに、将来を見通す、予測する力があります。職場や家などの目的地に向かう時、もう少し行くと右手にコンビニが見える、その先にポストがあって、というように、やがて出現するシーンを思い描きながら移動していきます。見るより先にシーンを予測し備えることで、素早く適切な移動が実現できます。もし、他者の予測を知ることができれば、脳の認知メカニズムの解明に繋がるだけでなく、予測の間違いから適切でない行動をとってしまうことを予防するなど、生活の質向上へ活かせると考えています。しかしながら、予測は各人の脳の中にしかない個人的・主観的なもので、直接計測することはできません。そこで、機械の知の1つであるパターン認識、特に画像など多変量のデータから特徴を学習して特定のクラス（例えば、風景や人物など）に振り分ける技術、を用いることにしました。これまでに、今見えている画像や夢の内容を脳活動からパターン認識する研究がされてきましたが、予測のように主観に関わる情報の読み取りは成功していませんでした。

私たちは、迷路ゲームに取り組んでくれる実験参加者を募り、ゲーム中に機能的磁気共鳴画像（fMRI）を撮像しました。fMRIは、脳の活動の変化を記録した、数万要素からなる三次元画像の時系列データです。予測を担う脳の領域では、シーンを予測しているときに、予測したシーンによって異なる活動パターンを示すと考えられます。どのシーンを予測しているのかを、fMRI 脳活動を入力としてパターン認識で見分けることを試みました。

各シーンを表現する脳活動の特徴を学習したパターン認識器は、学習に用いたデータではないデータであっても正しく分類することができました。さらに、予測が間違っている時の脳活動からは、客観的事実とは異なる予測、つまり、「思い込み」を読み取ることができました。また、迷路内の各地点で得られた脳活動から読み取ったシーンの予測を迷路上に配置してつなぎ合わせることで、脳内にある地図の復元に取り組みました。実験に用いた3種類の地図のいずれでも7割以上のマスで実際の地図と同じ構造でした。読み取った地図は、シーン予測の正答率が高い実験参加者ほど実際の地図に近いものでした（ $r = 0.05, p < 0.05$ ）。このことは、実験参加者ごとのシーン予測の巧みさは、脳活動パターンのシーン間での違いの程度によって説明できることになります。

これまでは、壁と通路しかないシンプルな迷路を用いてきましたが、今後はパターン認識技術の洗練化により、複雑なシーンやシーン以外へと対象を広げていきます。客観的事実と異なる主観の読み取りは、言語化困難な視覚イメージを脳活動から読み取り共有する、といったコミュニケーションツールとしての発展が期待されます。なお、この研究は主に鹿内友美（博士後期課程）が実施しました。



シーンを読み取る。読み取れるのは移動後に見えてくる前方の3つのマスの状態である（左図）。実験参加者が間違ったシーンを選択した時は、正解のシーンではなく間違ったシーンが読み出される（右図）。

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

核融合プラズマにおけるプラズマ着火のモデリング

核融合発電はほぼ無尽蔵な資源である重水素を燃料としており、将来のエネルギー源として期待されている発電方式です。核融合には、さまざまな閉じ込め方式の検討が行われており、その中の一つとして、トカマクと呼ばれる磁場閉じ込め方式があります。従来は常伝導コイルを用いてプラズマ実験が行われてきましたが、定常運転を可能とするべく、近年、超伝導コイルが用いられるようになってきました。超伝導トカマクは常伝導トカマクに比べトロイダル電場が低いため、真空容器壁等の状況によってはプラズマ着火が行えない可能性があります。例えば、現在、日本原子力研究開発機構（JAEA）・那珂核融合研究所にて建設が進められている JT-60SA トカマクは超伝導コイルを用い、トロイダル電場が 0.5 V/m に制限されており、プラズマ着火が難しい状況が考えられます。この問題を解決するため、我々の研究室では、JAEA との共同研究で電子サイクロトロン共鳴加熱（Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH）を用いた予備電離を提案しています。予備電離とは、プラズマ生成前の重水素ガス中の少数の電子を加熱し、前もって中性粒子を電離させることで、電子サイクロトロン周波数のマイクロ波を電子に共鳴吸収させることで行われます。0次元及び1次元モデルを用いた数値計算の結果、図1に示すように、プラズマ着火のために ECRH パワーに閾値が存在し、約 1MW 程度の EC パワーが必要であること、また、初期密度に強く依存するものの、エラー磁場や炭素・酸素といった不純物量への依存性は弱いことを明らかにしました。この結果は、JT-60SA だけでなく ITER、KSTAR といった超伝導トカマクにも適用でき、プラズマ着火に関する普遍的な物理過程が明らかになるものと期待しています。

トカマクと同じ磁場閉じ込め方式の一つであるヘリカル系においても信頼性あるプラズマ着火は重要な課題です。近年、中型ヘリカル装置であるヘリオトロン J において、2.45GHz マイクロ波アシストにより中性粒子ビーム（NB）入射によって生成・維持できることが実験的に確認されました。NB 入射によるプラズマ着火物理過程を調べるために、0次元モデルを構築し、実験結果との比較を進めています。図2のように中性粒子の遮蔽効果を取り入れた0次元モデルの数値解析を行ったところ、ターゲットプラズマ密度閾値の実験結果を再現しました。このモデリングはドイツで建設中の大型ヘリカル装置 W7-X にも適用可能で、垂直入射 NBI によるプラズマ生成の可能性を示せると考えています。

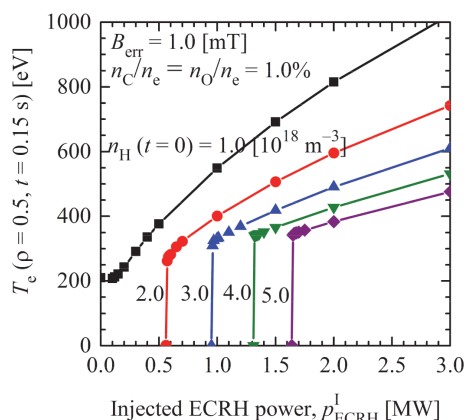


図1 JT-60SA トカマクにおけるプラズマ着火の ECRH パワー依存性

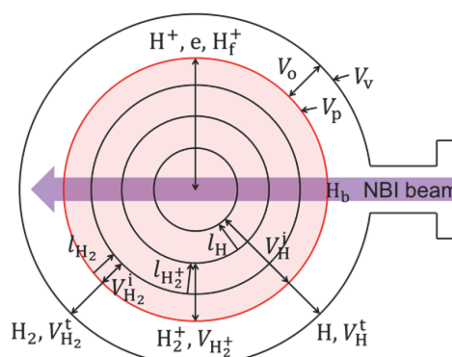


図2 ヘリカル系における NBI プラズマ着火の原子・分子分布モデル

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

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

先進ヘリカルプラズマの閉じこめ改善 —電子内部輸送障壁の形成—

私たちの研究室では先進ヘリカル磁場プラズマ閉じ込め実験装置（Heliotron J）を用いて、核融合炉実現に向けた磁場閉じ込めプラズマ制御の研究を行っています。プラズマ閉じ込めの性能向上には、閉じ込め劣化の一因であるプラズマ乱流の抑制が重要な課題です。乱流抑制のためには、いくつかの方法が知られています。ヘリカルプラズマでは特にプラズマ流により乱流抑制が可能です。図1はイオン、電子の粒子束とプラズマ中の径電場の関係を表しています [1]。両極性拡散条件によりイオンと電子の粒子束を常に等しくするための径方向電場が生成されます。電子とイオンの温度がほぼ等しい場合は負の電場が生成されますが、イオン温度に比べて電子温度が高い場合は図1のように大きな正の径電場となります。そこで、電子サイクロトロン波（ECW）によりプラズマ中心部を電子加熱し電子温度がイオン温度に比べて高い状態を作り出すことで正の径電場をプラズマ内部に形成、この径電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 流でプラズマ乱流を抑制できることが期待されます。この場合、プラズマの中心領域において局所的に拡散が低減しますので電子内部輸送障壁と呼ばれます。CHS 装置 [2] 等による先行研究により、電子内部輸送障壁形成が可能なことは実験的に確かめられています。そこで、立体磁気軸を持つ先進ヘリカル装置、Heliotron J において、中心部 ECW 加熱により内部輸送障壁の形成条件を調べる実験を行いました。

図2は、この時の電子温度分布（(a)、(c)）、密度分布（(b)、(d)）です。これらは、Nd:YAG トムソン散乱計測装置を用いて計測しています。ここでは ECW 入射（330kW）によりプラズマ中心を加熱しました。図（a）、(b) はプラズマの線平均電子密度 $1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の場合、図（c）、(d) は $1.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の場合です。電子密度が僅かに高い場合の電子温度分布（c）に比べ、電子密度が低い場合の電子温度分布（a）は中心部電子温度が高く約 2keV に達し、プラズマ小半径 $r/a \sim 0.2$ 付近に急な電子温度勾配が見られます。一方、急勾配が形成されている領域の外側では、図（a）と（c）に見られるように、電子温度に大きな違いは見られません。これらの結果は電子密度が低い場合、ECW 加熱によりプラズマ中心領域でのみ輸送特性が変化し閉じ込め性能が向上したことを示しています。また障壁形には電子密度に閾値が存在し、密度が閾値より下がる時、遷移的に障壁が形成されることもわかりました。これらは、先行研究 [2] と類似の特徴であり、Heliotron J プラズマにおいても電子内部輸送障壁が形成されることが確認されました。今後、形成条件の詳細な研究を行い、プラズマ閉じ込め性能の制御性向上を目指したいと思います。

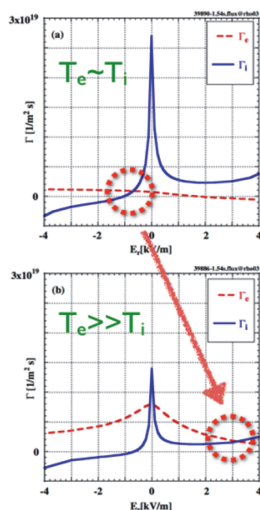


図1 電子(Γ_e)、イオン(Γ_i)の粒子束の径電場に対する依存性(a)は電子温度とイオン温度が、ほぼ等しい場合、(b)は電子温度がイオン温度に比べて高い場合 [1]

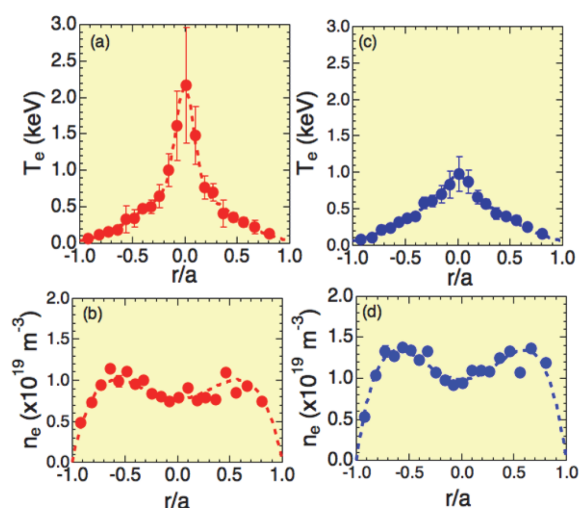


図2 ECH プラズマの電子温度分布・密度分布。(a) (b) は低密度、(c) (d) は高密度のプラズマに対する計測結果。低密度の場合中心領域で電子温度分布がピークする。

参考文献

- [1] M.Yokoyama et al, "Core electron-root confinement (CERC) in helical plasmas" Nucl. Fusion **47** (2007) 1213-1219
- [2] T.Minami et al, "Increased understanding of neoclassical internal transport barriers in CHS" Nucl. Fusion **44** (2004) 342-349

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>

「無人小型航空機と MU レーダーによる大気乱流の同時観測実験」

MU レーダーは、イメージング（映像）観測により高レンジ分解能での観測が可能である。乱流混合は熱や物質の鉛直輸送に寄与する重要なプロセスであるが、そのスケールが極めて小さいことから観測が難しい現象の一つである。世界最高性能の大気観測用大型レーダーである MU レーダーは現在のところ乱流を最も正確に映像化でき、それらの発生・発達・形成メカニズムや、メソ～総観規模現象との関連を研究する上で最も強力な測器である。

2015 年 6 月に、米コロラド大及び仏トゥーロン大・LATMOS と協同で、コロラド大で開発された無人小型航空機（UAV）を用いて、MU レーダーとの同時観測実験（ShUREX（Shigaraki, UAV-Radar Experiment）キャンペーン）を行った。UAV は、小型（両翼幅 1m）、軽量（700g）、低コスト（約 \$1,000）、再利用可能、GPS による自律飛行可能で、ラジオゾンデセンサーを流用した 1Hz サンプルングの気温・湿度・気圧データに加えて、100 Hz の高速サンプルングの気温センサーによる乱流パラメータの高分解能データを取得可能である。UAV の離着陸は、信楽 MU 観測所から南西へ約 1km の利用休止中の牧草地を借用して行った。UAV は自ら滑走して離陸することはできないため、図 1 に示すようにゴムで引っ張って離陸させる方法（Bungee 法）か、ヘリウムを詰めた気象気球で上空に持ち上げ適当な高度に達したところで切り離す方法（Balloon 法）で行う。UAV と地上との間の通信は無線 LAN によって行われ、ゾンデ気象センサーによる 1Hz サンプルングデータその他、GPS による位置情報など UAV の飛行状態に関するデータをリアルタイムに得る。飛行方法は予め離陸前にプログラムしておくが、状況に応じて離陸後に飛行方法を変更することも可能である。着陸はいわゆる胴体着陸により行う。

図 2 に MU レーダーのレンジイメージングモードで得られたエコー強度の時間高度変化を示す。8 時 10 ～ 40 分頃の下層の三角形状のエコーは UAV によるものである。高度 4 ～ 5km の雲底付近で強いエコー（乱流）が観測されている。現在、MU レーダーと UAV の観測データを詳細に解析しているところである。大気乱流は至るところに存在し、人間生活に及ぼす影響も小さくなく、航空機の安全運航のためにもその観測・予測は重要な課題である。



図 1. UAV の離陸の様子。（左）Bungee 法。（右）Balloon 法。

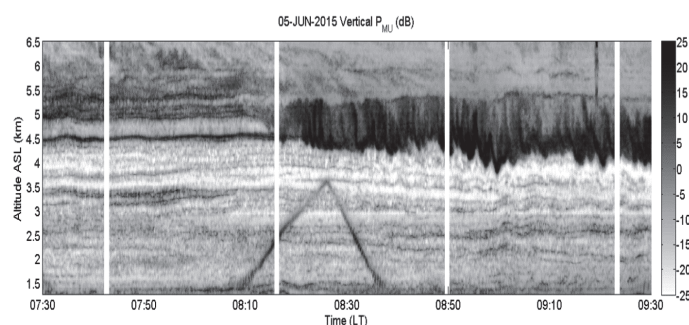


図 2. 2015 年 6 月 5 日 7 時 30 分～9 時 30 分に MU レーダーレンジイメージングモードで得られたエコー強度の時間高度変化。

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://space.rish.kyoto-u.ac.jp/people/yamakawa/>

「宇宙由来危機に取り組む ～地球接近小惑星とスペースデブリ～」

1908年、直径約100メートルの隕石がシベリア上空8キロほどで爆発したと推定され、半径30キロ程度の森林が炎上しました。爆発は大気圏突入時の加熱や圧力、振動などで発生し、もしこれが大都市で起きたら、大きな被害が出るでしょう。数十メートル級の隕石が地球に落ちる確率は100年に一度ぐらいと言われています。実際に、2013年、ロシア上空に飛来した隕石は、直径約17メートルで、上空約20キロで爆発したと推定され、多くの方が負傷しました。この例に見られるように太陽を周回する小惑星が、将来、地球に衝突すると推定された時、工学的にどのように対応できるかについて研究をしています。以前であればScience fictionの話で終わったでしょうが、小惑星の観測技術、軌道推定技術、そして、宇宙技術の進歩によって、地球衝突の可能性を検知でき、なおかつ、衝突回避の対応ができる可能性が高まっています。このような取り組みは、諸外国ではplanetary defenseと呼ばれ、国連の宇宙空間平和利用委員会においても議論がなされている状況です。対策は非常に単純で、小惑星に何らかの外力を与えることでその軌道を僅かに変更させ、その結果として、数年あるいは数十年先の地球との衝突を回避するのです。極短い時間で軌道を変える手法として、小惑星近傍あるいは表面で爆発物を使う手法、あるいは、高速で宇宙機を衝突させることで運動量を与える手法が提案されています。爆発現象は制御ができず、また、小惑星が破壊によって多数の破片と化す可能性があり、お勧めできません。当研究室では、高速で宇宙機を衝突させる手法を中心に検討をしています。高い衝突速度を実現するために、太陽光を利用するソーラーセイル推進や、太陽風を利用する帯電セイル推進の利用の可能性を探っています。同じ軌道変更でも、微小な力を長時間与えることも考えられています。これは、時間は要するものの軌道変更を高精度で調整できるメリットがあります。例えば、小惑星に向けてのイオンビーム照射、レーザ照射、小惑星近傍への宇宙機配置による重力牽引等、さまざまな手法が提案されています。当研究室では、重力牽引手法の効率化のために積極的帯電によって静電気力を付加する手法を研究しています。

小惑星は自然現象ですが、もう1つの宇宙由来危機は、人間が作り出した宇宙ごみ、スペースデブリです。使い終わったロケットや人工衛星などのスペースデブリは、10センチ以上のものだけで、2万個ほど地球を周回しています。現に国際宇宙ステーション（ISS）は年に数回、スペースデブリとの衝突を避けるため軌道を変えており、また、故障した人工衛星が活動中の人工衛星に衝突する事故も起きています。これら宇宙ごみの増加に伴い、運用中の人工衛星や国際宇宙ステーションの安定的な利活用のために、未知スペースデブリの発見と、既知スペースデブリの定常的観測、さらに、積極的なスペースデブリの低減は、緊急の課題となっています。当研究室では、レーダーによる観測を通して、宇宙ごみの軌道推定ならびに宇宙ごみの種類を判別する手法に関する研究を行っています。具体的には、京都大学生存圏研究所の大型大気観測レーダーであるMUレーダーによる観測を通して、数m規模の大型のスペースデブリのスピン状態等の推定原理について研究しています。また、1mm前後の微小なスペースデブリに注目して、その軌道推移の検討を行うことで、人工衛星との衝突リスク予測における新たな指針を与えることを考えています。さらに、軌道上望遠鏡によるスペースデブリ観測の可能性やスペースデブリの積極的な低減、つまり、大気圏再突入の手法も検討しています。



地球接近小惑星やスペースデブリが存在する
地球周辺の宇宙環境（山口皓平氏提供）