

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「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」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

電子物理学講座極微真空電子工学分野(白石研)

電子物理学講座プラズマ物性工学分野

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

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)

デバイス創生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

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(高橋研)

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/>

「非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト制御器設計とその実用性検証」

自動制御工学はさまざまな産業の発展を支える基礎的な学問である。近年、制御すべき対象はますます高度・複雑化しており、より取扱いの難しい対象を制御するための理論構築が求められている。本研究は、そのような要請に応えるための一つの方針として、ロバスト制御と呼ばれる技術のさらなる先鋭化を目指したものである。

現実の制御対象の制御理論に基づく制御においては、その対象を伝達関数や状態方程式でまずモデル化するのが一般的である。しかし、現実の対象は、物理パラメータに関する不正確さや非線形性等の取扱いの厄介な要因を含んでおり、そのような側面を含めて厳密なモデル化を行うことは事実上、不可能である。そのために生じる現実の制御対象とそのモデルの間のずれを、不確かさと呼ぶ。この不確かさの存在を十分に考慮せずに制御器設計を行うと、設計された制御器は現実の制御対象に対しては期待通りの性能を発揮できないといった不都合が生じ、制御系が不安定なものとならざるを得ない。したがって、生じうる不確かさの範囲をあらかじめ見積もった上で、モデルと現実の制御対象の間のその範囲におけるずれに関してはその影響を抑え込んで所望の性能を保証するロバスト性という考え方は、制御の実応用上の観点から大変重要である。

本研究では、より精度の高いロバスト制御を達成するため、非因果的周期時変スケーリングという手法を制御器設計に応用することを検討した。非因果的周期時変スケーリングとは、リフティングと呼ばれる時間的な操作を介して導入されるロバスト安定解析のためのアプローチである。リフティングを用いる際にはリフティング周期と呼ばれる周期をユーザー側で設定することになるが、この周期を大きくとることにより、対応する非因果的周期時変スケーリングに基づくロバスト安定解析の解析精度を向上させることが可能である。本研究では、非因果的周期時変スケーリングの活用がもたらす恩恵を享受しつつ、より性能のよい制御器を設計するための設計法を整備した。ただし、ロバスト性の中でももっとも基本的な性質であるロバスト安定性のみを考慮して制御器設計を行うと、制御系の応答が現実には許容できないほど振動的になってしまう恐れがある。そこで、本研究ではそのような振動の抑制を目的とし、ロバスト安定性だけでなくロバスト H_∞ 性能も同時に考慮するよう上記設計法を整備した。整備した設計法の有効性は、台車型倒立振子を用いた制御実験を通して検証した。本研究で扱った台車型倒立振子（模式図を図1に示す）は振り長が30cm、40cm、50cmから選択可能である。本研究ではこの振り長が40cmを基準として不確かであるとみなし、（30cmから50cmの範囲で）振り長に依らず振子を鉛直上方へ倒立させることの可能な単一の制御器を設計した。その実験結果（台車の移動距離 r に関する応答）を図2に示す。リフティング周期 $N=1$ の結果（破線）は応答が大きく振動しているのに対し、本質的に非因果的周期時変スケーリングを活用した $N=4$ の結果（実線）ではその振動が大きく低減されている。なお、本実験は振り長40cmのもとで行ったが、振り長を30cm、50cmにかえて実験を行っても概ね同様の結果が得られた。

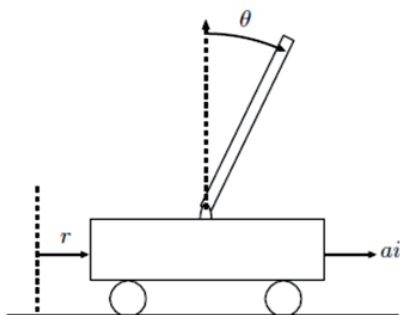


図1：台車型倒立振子の模式図

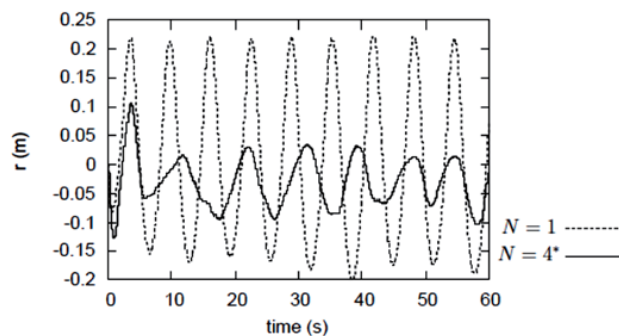


図2：実験結果（台車の移動距離 r の応答）

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/>

「心臓ペースメーカー細胞におけるリズム調節機構の数理的解析」

生物の細胞は、リン脂質の2重層からなる細胞膜で覆われているが、イオンチャネルというタンパク質が細胞膜を貫通しており、そこを特定のイオンが選択的に通過する。イオンがイオンチャネルを通過して細胞内外を移動することで細胞膜内外に電位差が生じる。この電位差（活動電位）が、信号として細胞膜上を、さらには細胞を越えて伝わることで、脳・神経系の情報処理や心臓の律動制御が行われている。このような電気生理現象は、Hodgkin-Huxley (HH) 型の微分方程式で表現することができ、それを用いることで、神経系や心臓の様々な性質を数理的に、システムとして解析することが可能になる。

図1(a)は、(ウサギの)心臓のペースメーカーである洞房結節(辺縁部の)細胞に発生する活動電位の時間波形を示している。Zhangら(2000)によって提案されたHH型モデル(15変数の非線形常微分方程式で記述される)を用いて数値計算した。このような周期的電気信号が心臓各所に適時に伝わることで、心臓の周期的な収縮が制御される。ところが、遺伝的あるいは後天的要因により、ペースメーカー細胞膜上に存在するイオンチャネルになんらかの異常が生じると、心臓のポンプとしての機能に障害が生じる(イオンチャネル病)。図2(b)は、イオンチャネルに変異が生じたとき、ペースメーカー細胞の活動電位がどのように変化するかを纏めた図であり、非線形系の分岐解析を行うことにより得られた。横軸と縦軸は、それぞれL型Ca²⁺チャネルと速い遅延整流性K⁺チャネルの変異を表しており、図中の様々な曲線は、活動電位の性質が変わる境界線を示している。例えば、イオンチャネルの変異が、HBやDC4と記された曲線を越えてarea2に及べば、細胞は周期的活動電位の生成を停止し、ペースメーカーとしての機能を全く停止する。また、250などの数字が記された曲線は活動電位の周期(の等周期線)を表しており、イオンチャネルの変異に伴って、リズムがどのように変調するかが分かる。特に、等周期線が密集する箇所では、チャネル変異に対する周期の感受性が高く、その辺りで生じる変異は重篤な変異であると言える。細胞の電気生理学実験だけでは、このような描像を明らかにすることは難しく、数理的・システム論的研究ならではの産物である。

参考文献

[1] S. Doi, J. Inoue, Z. Pan and K. Tsumoto, *Computational Electrophysiology: Dynamical Systems and Bifurcations*, Springer (2010).
 [2] Z. Pan, R. Yamaguchi, S. Doi: Bifurcation analysis and effects of changing ionic conductances on pacemaker rhythm in a sinoatrial node cell model, *Biosystems*, Vol. 106, 9-18 (2011).
 [3] 潘振興、土居伸二：心臓洞房結節細胞詳細モデルの大域的分岐構造とペースメーカー周期の変動性、*電学論C*, Vol. 131, pp.2138-2147 (2011).
 [4] R. Tsuneki, S. Doi, J. Inoue: Generation of slow phase-locked oscillation and variability of the interspike intervals in globally coupled neuronal oscillators, *Mathematical Biosciences and Engineering*, Vol. 11, pp.125- 138 (2014).

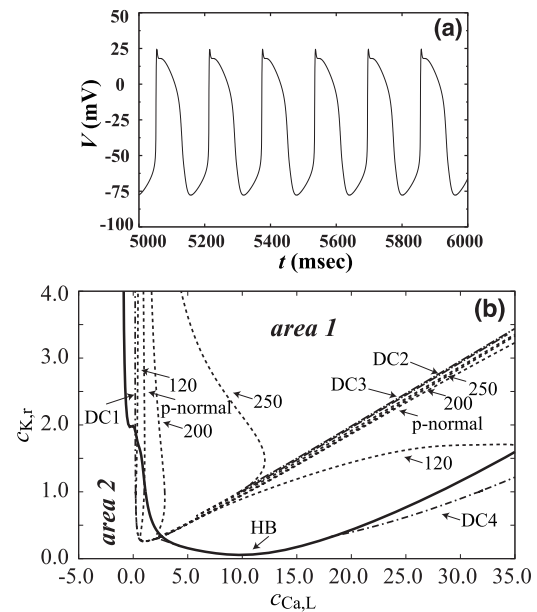


図1 (a) 心臓ペースメーカー細胞の活動電位波形 (b) 2-パラメータ分岐図

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/>

「超高感度な光学的磁気計測により高次脳機能の謎を探る」

人間の脳が有している様々な高次機能の謎を探り、得られた知見を人類の幸福に役立てて行くという学問分野は、今後益々その重要性を増して行くと考えられる。具体的には、システム科学や神経科学などの境界を広げることはもとより、より人間の脳に近い機能をもったロボットなどの知能化機械の実現、人間に代わって安全に自動運転する乗り物の実現といった工学的応用、神経疾患や精神疾患の診断支援、病気や事故で視覚や聴覚といった感覚機能に障害をもった人のための機能代行、リハビリテーションといった医療や福祉分野への応用など、様々な貢献が期待できる。

本研究室では、生体機能工学分野のテーマの一つとして、人間の高度な脳の働きを脳を傷つけずに計測・解析・イメージングする新たな手法の研究を行っている。中でも、脳磁図 (MEG) に代表される極微弱な生体磁気計測と磁気共鳴画像 (MRI) の研究において、基礎から応用にいたる幅広い展開を行っている。今回は、その中から超高感度の新規な光学的磁気計測に関する研究を紹介する。

従来、生体磁気計測においては超伝導量子干渉素子 (SQUID) が使用されてきた。しかし、SQUID は液体ヘリウムにより極低温状態にして動作させる必要があり、装置自体は勿論、高額な維持費が必要であり MEG の普及を妨げる要因の一つとなっている。一方で近年、光ポンピング原子磁気センサ (OPAM) により、 $1\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ オーダの感度を有する SQUID と同レベルあるいは凌ぐ超高感度が達成できることが報告され注目が集まっている。

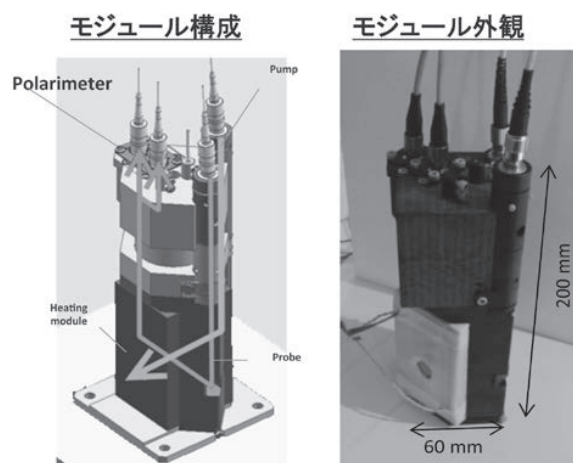
OPAM は生体磁気計測に留まらず、核磁気共鳴 (NMR) 信号の検出や磁気共鳴画像 (MRI) といった生体医工学分野への応用が開始されており、基礎物理学研究をはじめ高感度の磁気センシングが要求される様々な応用分野の進展に大きく貢献すると期待されている。

我々は 2006 年から OPAM の開発をはじめ、OPAM を用いた生体磁気計測の分野では世界的にも先導的な立場にある研究室の一つである。一昨年には、MCG 計測を実現し^[1]、また本年、MEG 計測に成功した。現在、センサのさらなる高感度化^[2]やモジュール化等に加え、OPAM を用いた超低磁場 MRI (ULF-MRI) に関する研究・開発を進めている。図は、文科省「高次生体イメージング先端テクノハブ」プロジェクトによりキヤノンと共に開発中の OPAM モジュールである。今後、ULF-MRI と MEG などの同時計測が行えるマルチモーダルシステムの実現を目指して研究を進めて行く予定である。

SQUID を凌ぐ超高感度を液体ヘリウムなどによる冷却なしに実現できる可能性を秘めた OPAM にはまだ多くの基礎的研究が求められている。将来、理論的に予測されている $\sim 10\text{aT}/\text{Hz}^{1/2}$ オーダの超高感度が達成されれば、脳機能計測に留まらず磁場計測に関連する様々な分野にイノベーションやパラダイムシフトを起こすことが期待できる。

[1] Kamada K, et al., "Human MCG measurements with high-sensitivity potassium atomic magnetometer", *Physiological Measurement*, Vol.33, pp.1063-1071 (2012)

[2] Ito Y, et al., "Development of optically pumped atomic magnetometer using a K-Rb hybrid cell and its application to magnetocardiography", *AIP advances*, Vol.2, 032127-1-5 (2012)



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/>

「メタマテリアルの等価回路」

メタマテリアルとは人工的な構造によって作られた自然界にはない特性をもつ物質のことを言う。たとえば図1のような誘電率 (ϵ) 透磁率 (μ) の平面において通常物質は第一象限にあるが、人工的な構造を構成すると負の誘電率や負の透磁率も実現できる。しかし、所望の性質を示す物質構造を設計しようとする、複雑な構造における電磁現象を把握する必要があり、現在ではまだ手探り状態である。それに対して、複雑な導体構造中の電磁現象を、電気回路を用いて記述することにより、設計への道を開くことを目指している。

Maxwell 方程式では電荷と電流が作る電界と磁界の振舞をおもに扱うが、回路モデルでは電荷と電流の振舞が重要になる。電荷と電流の役割をうまく電気回路に変換できる構造の1つとして、図2左のような導体球と導体線から成る構造を扱う。このような構造では電荷と電流の自分自身への作用以外は、図2右のような点電荷と線電流によるモデルを用いることにより、導体構造と等しいトポロジーをもつ単純な回路モデルを Maxwell 方程式から系統だって導出することができる [1]。

たとえばメタ原子としてよく用いられる図3のような構造では、単純な6次元の常微分方程式で表現される回路モデルが得られる。その周波数特性を電磁界解析 (FIT) と比較したものが図3右であるが、簡単なモデルにもかかわらず、膨大な要素数で解く電磁界解析に近い特性が表現できている。このように、Maxwell 方程式の構造を保った形でモデルを導出することにより電磁界解析よりも大幅に単純化された等価回路モデルが得られ、共振や結合などの電磁現象のメカニズムが明らかになることから、電磁現象の設計に向けた研究を進めている。

参考文献

[1]T. Hisakado, K. Yoshida, O. Wada, "Equivalent Circuit Model with External Coupling for Metamaterial Composed of Wired Metallic Spheres," Metamaterials' 2013, Poster No. 54, Bordeaux, France (September 2013).

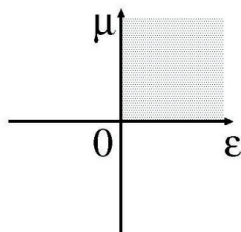


図1 $\epsilon - \mu$ 平面

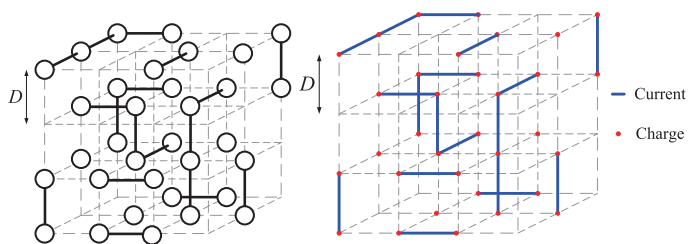


図2 導体線と球から成る構造とそのモデル

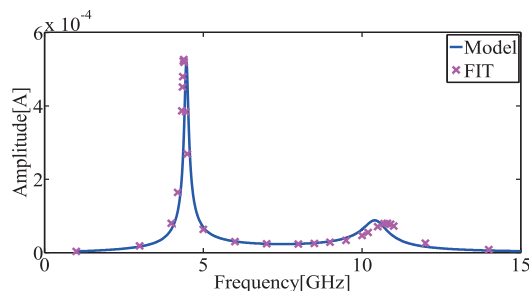
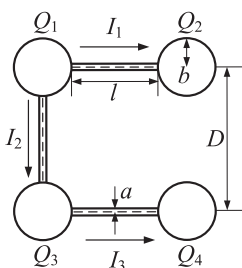


図3 C型構造とその電流 I_2 の周波数特性の電磁界解析 (FIT) との比較
($a=0.01\text{mm}$, $b=1\text{mm}$, $l=5\text{mm}$, $D=7\text{mm}$)

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「プラズマを要素とする非線形メタマテリアルの研究」

当研究室の主な研究対象であるプラズマは、半導体デバイス製造などの材料プロセスにおいて、我が国の産業へ大きく貢献してきました。半導体産業におけるプラズマプロセスの重要性は今後もゆるぎなく、研究開発は依然として盛んに行われています。

一方で、我々の研究室では、さらに次世代のプラズマ工学の主要トピックスとなりうる研究テーマを萌芽的に取り上げています。その一つがプラズマを要素とする電磁波メタマテリアル“プラズマ・メタマテリアル”の研究です。我々が世界に先駆けて2007年に学術雑誌で提案したこのコンセプトは、幸いにもその重要性（パラメータが動的に調整・再構成可能である点など）が認知されてきており、欧州や中国での研究が追随した後、今年に入ってから米国における複数の研究グループ立ち上げの動きにつながってきています。先に本誌 CUE NO.27 でその初期研究結果のご紹介をさせていただきましたが、我々としては、これまで先行してきた優位性を十分生かして、さらに将来的な方向性を示す先導役を務めるべく研究を一層加速しております。

ここでは、プラズマに内在する非線形性を生かして、非線形メタマテリアルを構成する例についてご説明します。非線形メタマテリアルは、メタマテリアルの研究分野の中で、負の屈折率やクロッキング（隠れ蓑）現象の実証に引き続く次の段階の研究として、その重要性が指摘されています。プラズマを伝搬電磁波で生成することを考えた場合、伝搬電磁波の電界とプラズマの密度の間にはフィードバック機構があるため自己無撞着に解析する必要がありますが、逆に言うとこの現象は生来強い非線形性を帯びているとも言えます。

ここでは、実験に先行して行った理論解析に結果 [1] についてご説明します。前述のような伝搬電磁波によるプラズマ生成を想定し、その背景として透磁率が負のメタマテリアル空間を設定しました。すると、得られた比誘電率（注：プラズマ密度がゼロのとき +1、プラズマ密度が増えていくと負の方向に大きな値となる）の電磁波電界強度依存性は、図1のような分岐図として得られました。図中に矢印で示してありますように、電磁波電界強度が大きくなり閾値（図2の点B）を越えると、比誘電率が +1 の状態から -20 程度の負の大きな値に遷移することが見て取れます。逆に、比誘電率が負の大きな値の状態から電磁波電界強度を小さくしていった別の閾値（点A）を越えると、比誘電率が +1 の状態に戻ります。この全体動作は、図2のモデル図に示しますように、履歴現象を伴い、2つの閾値の間の領域では双安定性を示します。最近、この理論予測の妥当性を強く示唆する実験結果も得られてきております。この現象の応用としては、まずは材料プロセス用の高密度プラズマ源として利用を想定していますが、双安定性を利用した数 10W ~ 数 100W 帯の高出力マイクロ波のスイッチング素子としての応用も可能と考えています。

参考文献 [1] O. Sakai, Journal of Applied Physics, vol. 109, 084914 (2011). [2] O. Sakai, S. Iio and Y. Nakamura, Plasma and Fusion Research (in press).

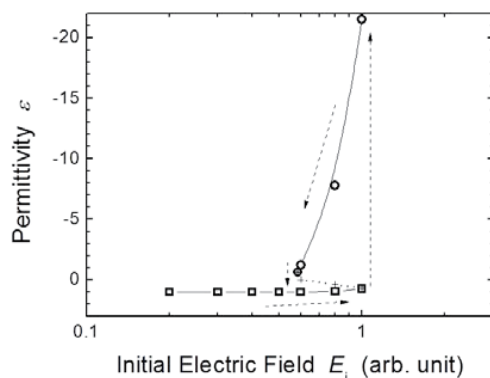


図1. 伝搬電磁波（周波数 2.45 GHz）の電界強度と空間の誘電率の関係 [2]. 図中の矢印は、現象の推移を示す。

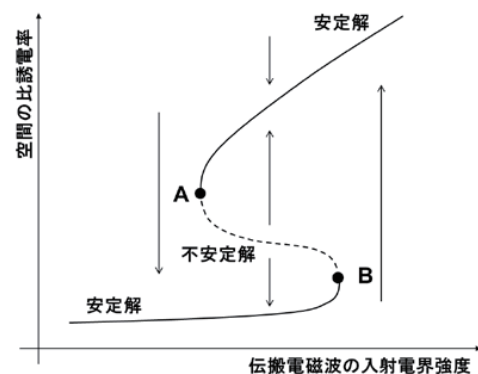


図2. 図1の変化を説明するモデル図（分岐図および位相線図）。点AおよびBが遷移点（サドルノード分岐点）。図中の矢印は、動作点の変化の向きを示す。

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

「原子間力顕微鏡による表面下ナノ構造の非破壊可視化計測」

磁気共鳴あるいは X 線による断層撮像法や超音波診断に代表される非破壊内部診断技術は、通常は破壊／侵襲を伴わなければ観察することのできない内部構造を、透過性のある波動や粒子線を用いて外部から可視化する手法として広く用いられていますが、材料評価や電子デバイス診断の分野においても、破壊したり断面露出したりすることなく、内部の構造欠陥や界面構造あるいは不良箇所などを評価する技術として重要な計測法となっています。しかしながら、使用する波動や粒子線の波長、収束性あるいは検出感度などのために、その空間分解能は $10\mu\text{m}$ – 10mm の範囲にとどまっており、ナノ材料やナノデバイスへの応用が可能な、ナノ空間分解能をもつ非破壊内部診断法の開発が求められています。

一方、原子間力顕微鏡 (AFM) は、試料表面の構造や物性を原子・分子スケールで可視化する測定法であり、既にさまざまな分野で使用されていますが、近年、この AFM を用いて表面下に存在する欠陥や界面などの構造を可視化しようとする研究に注目が集まっており、本研究室においても、これまで行ってきた表面ナノ力学物性に関する研究を基盤として、高分解能表面下可視化技術の開発を進めています。

AFM 探針と試料表面が接触している場合、接触による応力変化は接触部のみならず試料内部に及ぶため、この応力変化は表面下の力学情報を含んでおり、結果的に表面下診断が可能になることが期待されます。実際の接触応力の微弱な変化の測定にはいくつかの方法がありますが、ここでは、接触状態にある探針と試料をそれぞれ異なる周波数 f_1 および f_2 で振動させ、接触力の非線形応答によって生じる差周波信号 ($f_2 - f_1$ 成分) を試料の各点で検出するヘテロダイン・フォース顕微鏡法 (HFM) を用いた測定結果について紹介します。本測定では、ポリイミド基板に堆積・固定した Au ナノ粒子 (直径 40nm) を、ポリマー膜でコートしたモデル試料を用いました。図 1 に HFM 測定系の模式図を示します。探針と試料を接触させた後、試料ホルダーを f_1 (800kHz)、カンチレバーを f_2 (864kHz) で振動させ、その結果生じた探針変位の信号の中から、 $f_2 - f_1$ 成分を検出して画像化します (ヘテロダイン像)。 f_1 および f_2 は、 $f_2 - f_1$ が探針の接触共振周波数付近になるように選んでいます。図 2 に、コートしたポリマーの膜厚が 900nm の場合の観察結果を示します。表面形状像 (左) は比較的凹凸の大きい表面であることを示していますが、この中に Au 粒子があるかを判断することは非常に困難です。一方、図 2 の同時観察されたヘテロダイン像には Au 粒子が明瞭に可視化されていることが分かります。

実は、現状では深層部にある Au 粒子が可視化される理由はよく分かっていません。今後、実用的な表面下診断に向けて本手法をさらに改善・発展させるためにも、コントラスト形成機構を明らかにして行きたいと思います。

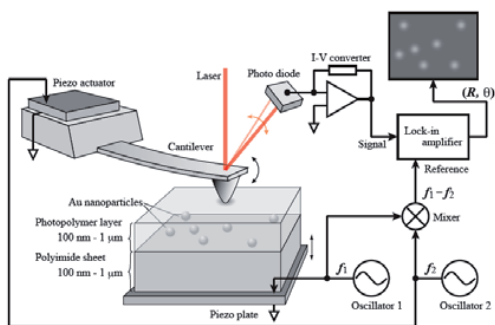


図 1 : ヘテロダインフォース顕微鏡 (HFM) による表面下構造可視化測定の模式図。

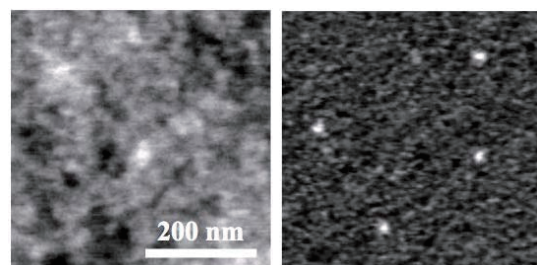


図 2 : (左) 900 nm 厚のポリマーでコートされた表面の AFM 形状像。(右) 同じ領域の HFM 像。表面下 900 nm にある、直径 40 nm の Au 粒子が明瞭に可視化されている (=差周波信号の振幅像)。

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/>

「高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超小型・超低閾値シリコンレーザ」

電子デバイスとして大きな優位性を持つシリコンを基盤材料に用いた光デバイスの研究は、大規模集積回路に将来的に生じるボトルネックを解決するための手段として注目を集めている。そのような研究の中で最も困難とされているのが、光源として使用するレーザ光をシリコンから発生させるための技術である。これはシリコンが間接遷移半導体であり、バンド間遷移による発光確率が本質的に小さいためである。そのような中、2005年にインテル社によってシリコンのラマン遷移を用いた細線導波路型レーザが検討され、室温連続発振が報告されたが、この素子は1cm以上の共振器長をもち20mWを超える励起パワーを必要としていた。また、高い励起パワーに起因するシリコンの非線形光吸収が生じてキャリアが発生し、これによってラマン散乱光が自由キャリア吸収損失を受けてレーザ発振が阻害されるという問題があったため、PiN構造の導入と逆バイアスの印加による生成キャリアの引き抜き機構が必要であった。

これに対して我々は独自の高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器を用いることで従来の10,000分の1の大きさ、(数 μm)で、かつ励起パワーが10,000分の1($\sim\mu\text{W}$)という極微小値で発振するシリコンラマンレーザを実現することに成功した。図1にその構造を示す。この構造はヘテロ構造ナノ共振器をベースとしており、シリコンのラマンシフト量である15.6THzだけ離れた二つの共振モードを形成できる。作製にはSOI(Silicon on Insulator)基板を用い、その上部シリコン層(220nm)に基本格子定数 a を410nmとした構造を形成した。格子定数が $a+\Delta a$ ($\Delta a\sim$ 数nm)と大きくなっている領域に共振モードが形成され、その大きさは数 μm 程度である。高周波数側のモード(波長1428nm)をポンプ光で励起し、ラマン遷移を介して低周波数側のモード(1543nm)にゲインを与える。(動作波長に関しては設計によって幅広く調整可能である。)それぞれの共振モードの損失は非常に小さく、そのQ値は10万および150万と高い。この低損失化には我々がこれまで開発してきた種々の手法が用いられている。共振器によって微小領域に光が閉じ込められることでシリコンの格子振動を介した相互作用が増強されることに加えて、さらに両モードの電磁界分布の対称性および広がり、そしてラマンテンソル対称性のシリコン結晶方位依存性を適切に設計・調整することで高いラマンゲインを達成している。また、微小領域への閉じ込めにもかかわらず非常に低い散乱損失を達成できているため、共振器内の高周波数側モードの光エネルギー密度が低い状態で低周波数側モードのレーザ発振が十分に可能である。そのため、ポンプ光の非線形光吸収の影響が生じる前に発振が達成でき、キャリア引き抜き機構は必要ない。また、高周波数側モードの散乱損失自体も小さいので、外部から入力したポンプ光強度に対する共振器内のポンプ光エネルギー密度が高くなるため、非常に低い入力パワーで発振が可能になる。その結果、図2に示すような μW レベルの低閾値の発振を実現することが出来た。

参考文献

Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, "A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold," Nature, vol. 498, no. 7455, pp. 470–474, Jun. 2013.

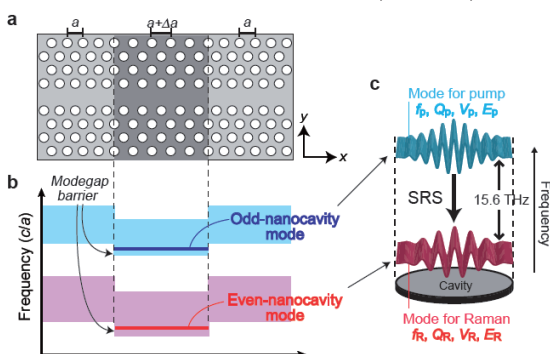


図1：シリコンラマンレーザの原理図

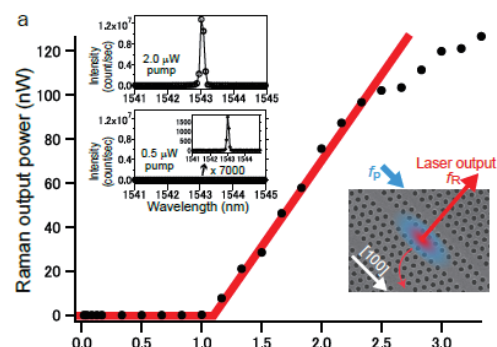


図2：シリコンラマンレーザの発振特性

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>

「メタマテリアルを用いた電磁波の保存と再生」

光を含む電磁波より速く伝搬するものはこの世の中にはないとされ、その性質は通信を含め幅広い分野で利用されています。しかし、光の速度を遅くすることは意外に難しく、屈折率の高い透明な媒質（例えばガラス）中でも真空中の光速の数分の1にしか減速されません。それに対して電磁誘起透明化現象（EIT現象）といわれる現象を用いると、群速度と呼ばれる光パルスの伝搬速度を極めて遅くすることができます。ナトリウム原子気体を用いた実証実験では、光パルスの伝搬速度を17m/sまで減速することに成功しています。さらに、EIT現象を動的に制御することにより、光パルスを媒質中に停止させることも可能となります。その逆過程により、停止した光パルスを再進行させることも可能です。このような、光の保存および再生の技術は「光メモリ」を実現するものとして応用の観点からも盛んに研究されています。

EIT現象は上記のように、元々原子系を用いて実現されていますが、この現象をメタマテリアルで実現する研究が近年注目を集めています。メタマテリアルとは、金属や誘電体で構成される波長以下の構造の集合体のことを指し、「負の屈折現象」など電磁波に対して特異な応答をする「媒質」として機能します。この波長以下の構造体は、いわば人工的な原子のように振る舞うことから「メタ原子」と呼ばれることがあります。メタマテリアルの特長の一つとして、スケラビリティがあり、同じような設計方針で、マイクロ波のような低周波数の電磁波から、光のような高周波数の電磁波まで同様の効果を実現することができます。このことが、対象となる電磁波の波長が決まっている自然の原子ではなく「メタ原子」によってEIT現象を実現することの大きな利点となります。

EIT現象を実現するメタマテリアル（以下EITメタマテリアル）の研究は、2007年頃から始まり、それ以来あらゆる波長帯で様々なEITメタマテリアルが提案および実現され、原子系のEIT効果と同様に、電磁波パルスの進行速度の減速も実験的に実証されています。しかしながら、電磁波パルスのメタマテリアル中での保存および再生はこれまで報告されていませんでした。パルスの保存再生には、EIT効果を動的に制御する必要があります。そこで、我々は、図1(a)に示すようなEITメタマテリアルを提案しました。構造の内部にバクタイオードという電圧で容量を制御できる素子が入っており、これによりEIT現象の動的制御が可能となっています。図2(b)がこのメタマテリアルの透過スペクトルです。バクタイオードに印加される電圧が-0.4VのときにはEIT効果特有の鋭い透明化現象がおこっていますが、-3.6Vのときにはそのような現象は起こっていません。このようなEIT現象の切り替えを利用することで、電磁波パルスの保存再生に成功しました[1]。本研究では、メタマテリアルの作成が容易なマイクロ波領域で実証しましたが、更なる高周波化も可能であると考えています。

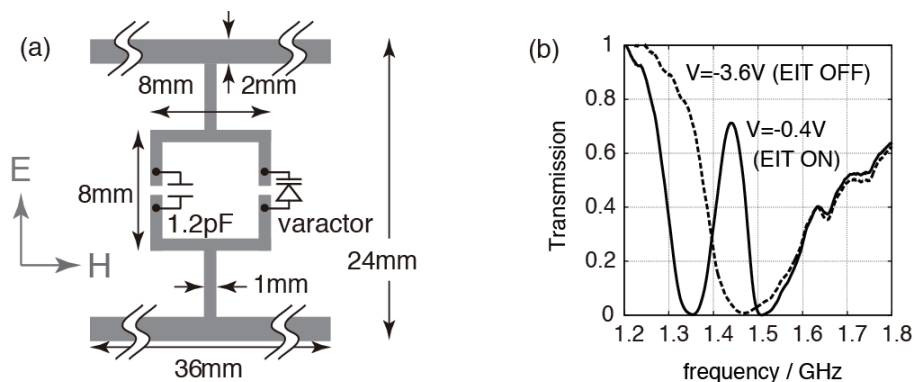


図1 (a) 電圧可変 EIT メタマテリアルの構造 (b) 透過率

参考文献 [1] T. Nakanishi et al. Phys. Rev. B, 87, p. 161110 (2013).

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/>

「アクアビジョンの開拓に向けて：水中生物の実時間3次元計測と自由視点映像生成」

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。以下ではその第一歩として行った研究として、水中生物の実時間3次元計測と自由視点映像生成について紹介する。

まず図1左に示すように、水槽中の生物(金魚)を水槽の周囲に置かれたカメラ群で撮影する状況を考える。ここで水槽の形状が未知であるとすると、水槽壁面での屈折をスネルの公式など物理法則に沿って記述し、撮影画像と水中空間の関係を解析的に計算する手法は現実的ではない。そこでカメラの各画素と、対象が存在する水中の光線との対応関係を写像関数として学習し、途中の屈折過程については明示的には扱わない手法(図2)を開発して任意の水槽形状内の物体計測モデルを確立した。

続いて視体積交差法と呼ばれる手法によって3次元形状を復元する。これはカメラの投影中心を頂点、シルエットを断面とする錐体(視錐体)を各カメラで作成し、その交差領域をもって対象形状とする考え方であり、上記の投影モデルでは視錐体のうち水中部分のみを取り出した視錐台を作成して交差領域を計算することに相当する(図3)。

最後にこの処理をGPU上にて実装することで、入力多視点映像から3次元形状を実時間で計算し、これを任意の方向から表示することで自由視点映像生成を実現した(図1右)。今後は水中光線のモデル化と解析の双方について研究を深め、屈折・反射・透過・散乱を伴う複雑な生物(例：クラゲ)についても扱うことができる計算体系の確立を目指す予定である。

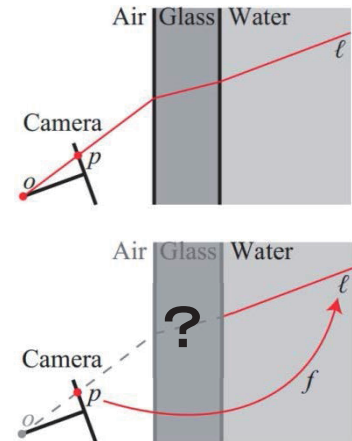


図2：屈折を伴う投影過程のモデル化。上：物理法則に基づく方法、下：水中光線と画素との対応付けに基づく方法

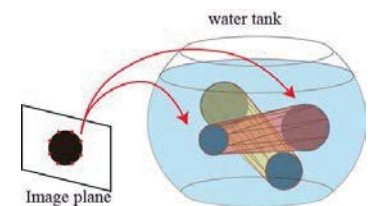


図3：視体積交差法による3次元形状復元

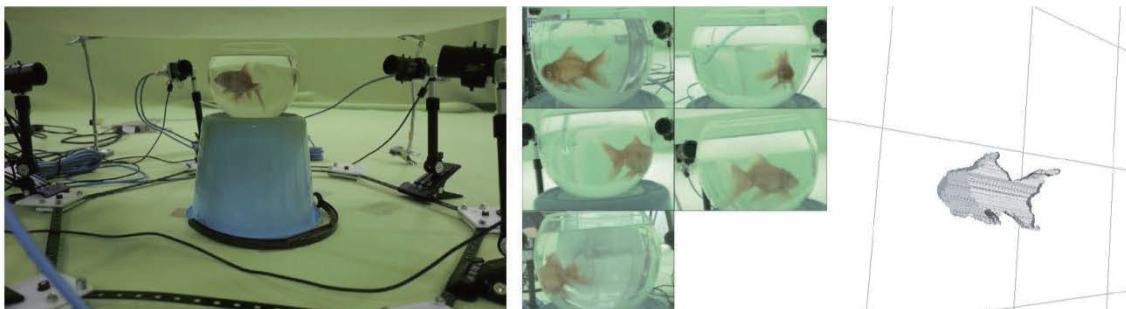


図1：水中生物の実時間3次元形状計測と自由視点映像生成。左：撮影環境。中央：撮影画像の例。右：計測された3次元形状

通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

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

「モバイルクラウド実現のための異種資源協調利用機構」

近年のモバイル端末の普及は目覚ましく、モバイルアプリケーションを通して様々なサービスが提供されています。一方で、モバイル端末の計算資源や帯域などの通信資源は限られており、サービスや通信品質の制約となっています。本研究では、モバイルユーザ間で協力し、分散的に計算や通信を行う機構をモバイルクラウドと呼び、計算・通信資源の共有メカニズムについて検討しています。

スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末は様々な“資源”を持っています。それは、CPUやGPUなどの計算資源、Wi-FiやLTEなどの通信資源、メモリやSSDなどのストレージ資源、カメラやGPSなどのセンサー情報資源です。これらの“資源”をいかに効率的に共有するかが問題となります。

図1にモバイルクラウドのレイヤモデルを示します。ベースとなるのは無線ネットワーク技術です。端末（ノード）と他の協調端末（クラウド）は、無線ネットワークを通して情報や資源をやりとりします。

次に位置するのが資源共有技術です。豊富な計算資源や通信資源があっても、それらを提供および享受する技術がなければ成り立ちません。三層目は、資源共有制御技術です。モバイルクラウドでは、他のユーザの端末の資源を利用するので、利用効率はもちろん、公平性を考慮した制御が必要になります。こうした制御なしでは、不正に利得を得るユーザが多数現れ、システムが成り立たなくなります。

最上位に位置するのがコンテキスト管理です。コンテキストとは、端末の状態や状況を表す情報のことで、例えば、現在位置やアプリの現在の使用状況など“今”に関することから、移動履歴や通信履歴など過去に関する情報も含まれます。こういった情報は、各レイヤの制御技術の性能向上のみならず、サービス提供者にフィードバックされ、個々人に適したサービス利用が可能となります。

このように、本研究では、基礎となる無線通信技術から、人の行動や心理とも関係の深いコンテキスト技術まで、通信技術という枠を超えて包括的に研究を進めており、情報化社会の一躍を担っています。

参考文献

T. Nishio, R. Shinkuma, T. Takahashi, and N. B. Mandayam, “Service-Oriented Heterogeneous Resource Sharing for Optimizing Service Latency in Mobile Cloud”, in Proc. of ACM Mobile Cloud'13 in Conjunction with MobiHoc 2013, India, July 2013.

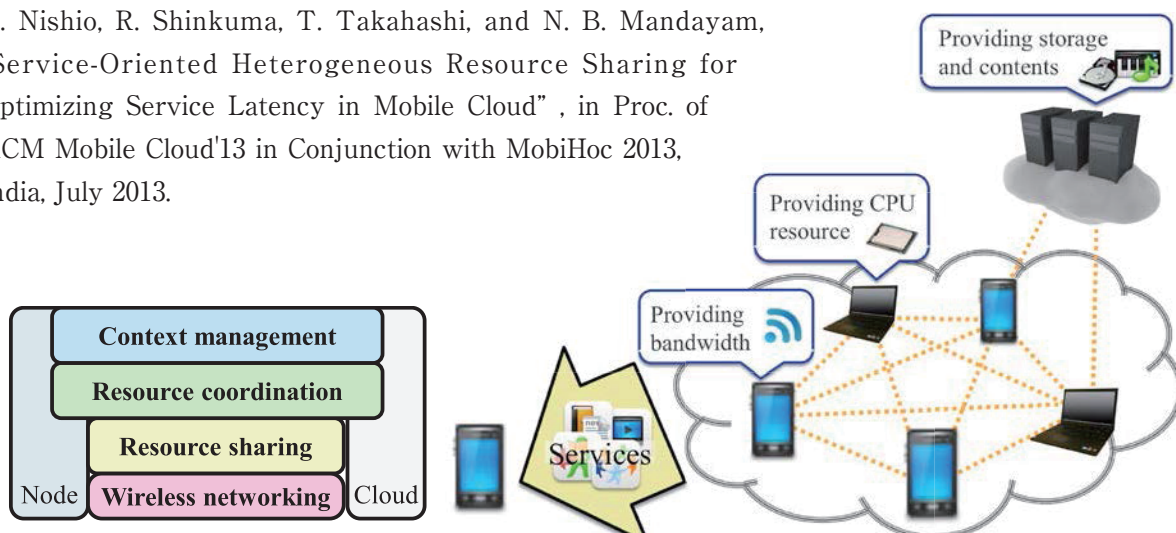


図1：モバイルクラウドコンピューティングのレイヤモデルおよびシステムモデル

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://www.asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「多値信号伝送におけるファイバ非線形効果の誤り率への影響の高速評価法」

インターネットの普及に伴う加入者系伝送路の光化の進展により、長距離光伝送システムの大容量化がさらに望まれています。このようなシステムとして実際に用いられている構成は、図1に示すような光ファイバによる光パワー損失を光増幅器で補償する光多中継システムです。このような構成にすることで、国内はもちろん太平洋を横断するような距離も伝送できます。この光増幅器間を1スパンと呼びます。また、光ファイバの有効利用のため、波長の異なる光それぞれに異なる種類の信号を載せ、図1のようにそれらすべてを1本の光ファイバで伝送します（以下では、各々を“チャンネル”と呼びます）。

しかし、光ファイバの直径は数十 μm と非常に細く、光増幅器により光ファイバ内の光パワー密度が増大するため、非線形効果が起こって波形がなまり、デジタル信号の「0」「1」の判定に誤りが生じてしまいます。多くの光増幅器を用いると、さらに非線形効果の影響が大きくなってしまいます。このような誤って受信される確率である“誤り率”でシステムの性能を示しますが、非線形効果の影響が大きくなると誤り率の劣化につながります。伝送速度を増大させることは光パワーの増加を伴いますので、非線形効果の影響は今後益々増加することになります。

以上のようなシステムを設計する場合、伝送路である光ファイバの種類を変え、ファイバ非線形効果が起こりにくい組合せをシミュレーションにより求めます。1チャンネルだけの伝送であればよいのですが、複数チャンネルのシステムでは信号の組合せを変えてシミュレーションを行う必要があります。伝送距離により数時間～数日もかかります。

そこで、高速に誤り率への影響を評価する方法を提案してきました。これは従来の信号の送り方（デジタル信号の「0」「1」に対し光の「なし」「あり」）に対する方法でした。現在は、強度や位相の組合せによる光の1つの状態で、複数のデジタル信号を表すことができる多値信号を用いて、高効率化が進められています。しかし、信号の形式が異なるために、従来の方法を多値信号へそのまま適用することができませんでした。複数チャンネルの場合の非線形効果の影響が雑音を増加させたように見なせることと、特定の光状態への影響が大きいことを見出し、これらを利用して、計算機内で適切な雑音を発生させ、その影響を計算することで、シミュレーションよりも高速に誤り率への影響を評価できることを示しました [1]。図2に結果の一例を示します。縦軸は誤り率に対応する Q 値で示しており、大きいほど誤り率が良くなります。横軸はスパン数で、1スパン 80km で示しています。22スパン程度まで提案法が有効であることが分かります。これより長い伝送では別の非線形効果が効いてきますので、十分な長さと考えられます。また、計算に要する時間は、シミュレーションにかかる時間の 7/100 となります。これにより、伝送路の設計において容易に最適な構成とすることが可能となります。

図1は長距離光ファイバ伝送系の構成を示しています。左側には複数の光送信機があり、それぞれ異なる波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の光を送信しています。これらは一本の光ファイバに結合され、途中に光増幅器が設置されています。この光増幅器間の距離を1スパンと呼びます。右側には複数の光受信機があり、それぞれ異なる波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の光を受信しています。

図1：長距離光ファイバ伝送系状

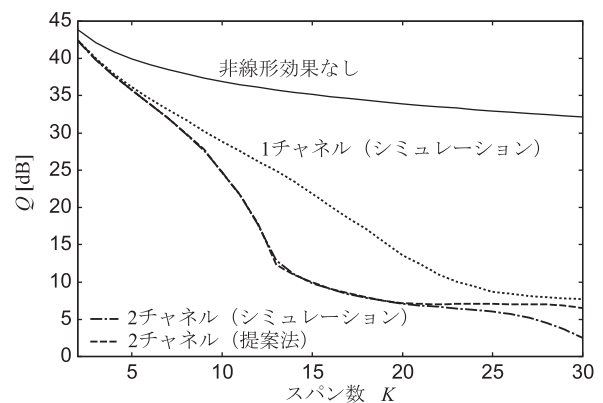


図2：スパン数に対する Q 値

図2に結果の一例を示します。縦軸は誤り率に対応する Q 値で示しており、大きいほど誤り率が良くなります。横軸はスパン数で、1スパン 80km で示しています。22スパン程度まで提案法が有効であることが分かります。これより長い伝送では別の非線形効果が効いてきますので、十分な長さと考えられます。また、計算に要する時間は、シミュレーションにかかる時間の 7/100 となります。これにより、伝送路の設計において容易に最適な構成とすることが可能となります。

参考文献

[1] 阿形、乗松、信学論 Vol.J95-B, No.2, pp.155-167, 2012.

システム情報論講座 論理生命学分野

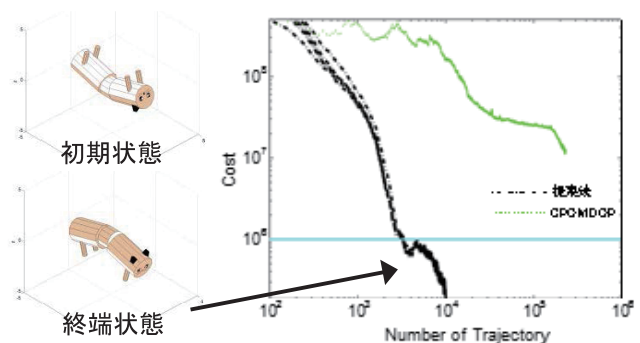
<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

「強化学習による非ホロミックシステムの制御」

当研究室では、不確実な環境に対して適合するシステムとしての「生命」と「知性」の計算原理を明らかにすることを目的に、多岐にわたる研究を行っています。その一環として、未知の環境においても環境に対する試行を繰り返すことで適切な制御則を学習するシステムの研究を行っています。ここでの適切な制御則とは、鉄棒の蹴上がりの際の、腰を曲げ伸ばしして勢いをつけて腰を持ち上げる運動のように、特定のタスクをこなすのに必要なものです。ヒトは必ずしも鉄棒と自身との関係の正確な力学的性質を知らないものの、試行を繰り返すことで、すなわち経験に基づき、適切な制御則を学習することができます。

このような経験に基づく制御則の学習を数理的に表現するものとして強化学習があります。通常、強化学習では、次状態が現状態とその時点での行動によって（確率的に）決定されるというマルコフ性を想定し、制御則は方策と呼ばれる状態の関数として定義されます。そのため、状態空間が大きい、あるいは方策が状態空間において複雑な形状となる問題に対しては、学習が困難になります。効率的な学習のために、しばしば方策の実効的自由度を下げることが行われますが、方策の表現能力が低いと勾配法などで求められる局所解の性能が低くなってしまふといった問題がありました。一方で、初期状態が状態空間のごく一部に限局するような問題も豊富に存在します。われわれは、その点に着目し、初期状態が固定していることと、外乱が無視できることを前提として、方策を状態に依存せず時刻のみに依存する関数として定義し、その方策に対する強化学習法を開発しました。例として、ネコを模擬した2つの連結した円柱の姿勢制御（図）を行いました。ネコは仰向けの状態からでも、その空中での姿勢制御により、うつ伏せの状態に変えることができ、この「ネコひねり」システムは非ホロミックシステムの一つと考えられます。ネコひねりシステムにおいて、仰向けの状態からうつ伏せの状態への制御を考える場合、5次元の状態変数によって一意に状態を記述することができますが、その5次元の実数空間に限定したとしても従来型の強化学習法による制御則の学習は容易ではありません。一方で、初期状態を固定すると、われわれの新しい学習法が使えます。図では、状態空間の一部しか訪れない場合においても安定な学習を行える従来型の強化学習法(GPOMDP)とわれわれの手法による学習過程を示しています。横軸は試行数、縦軸は学習された制御則による試行あたりのコスト（小さいほど良い）を表しますが、われわれの手法によれば従来法よりも大幅に効率良く適切な制御則が学習できていることがわかります。

初期状態の固定と、無視できる外乱という仮定は非常に強い制約を与えることとなりますが、現実問題では特定の初期状態からの制御で十分な場合は、数多く存在します。また、例えば、蹴上がりの途中の状態など通常、経験しない初期状態から続きの行動を遂行することは熟練した体操選手でも難しいことから、ヒトは状態の関数として運動を学習しているのではなく、特定の状態からの一連の運動系列を学習しているように思えます。このような現実問題の特徴を活かした学習法の開発により、未知多自由度システムの制御などの工学応用のみならず、ヒトのような多自由度システムにおける素早く柔軟な運動学習のメカニズムの理解を追求していきたいと考えています。



図：提案法と従来法(GPOMDP)によるネコひねり運動の学習過程の比較 横軸は試行回数、縦軸は試行あたりのコストを表す。従来法は提案法の100倍近い試行回数を用いても適切な制御が学習できていないことがわかる。

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野（中村祐司研究室）

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

「ヘリオトロン」における新古典フローと粘性の解析

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトラスプラズマの閉じ込めに関して実験と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

磁場閉じ込めプラズマの閉じ込め性能を決める重要な要素として、プラズマの輸送過程が挙げられます。超高温プラズマを真空容器内といった比較的狭い領域に閉じ込めるため、プラズマの温度・密度分布には急峻な勾配が存在します。これらの勾配は「熱力学的力」と呼ばれ、プラズマ粒子やエネルギーの外向きの流れをもたらします。たとえば、一様磁場中ではプラズマ中の荷電粒子はローレンツ力によって磁力線に巻き付きませんが、荷電粒子同士のクーロン衝突を考慮すれば磁力線を横切る粒子拡散が起るため、磁力線に垂直方向に密度勾配があれば、密度の高い方から低い方へと粒子の流れが生じます。このような衝突性の粒子輸送は「古典輸送」と呼ばれます。さらにトラスプラズマのように磁場に非一様性があるとドリフトと呼ばれる粒子の磁力線を横切る運動が生じ、これが衝突性輸送を増大させます。これは「新古典輸送」と呼ばれています。実際のトラス型磁場閉じ込めプラズマでは様々な微視的不安定性により渦ができ、この渦による対流が「乱流輸送」をもたらしており、特にプラズマの周辺に近い領域ではこの乱流輸送がプラズマの閉じ込め性能を支配していると考えられています。

近年、多くのプラズマ磁場閉じ込め装置において、「閉じ込め改善モード」と呼ばれる乱流輸送が抑制された状態が見つっています。この乱流抑制には大きな渦を引きちぎり、小さな渦に分裂させるような強い流れが重要な役割を果たすため、プラズマ中のフローとその大きさを決める粘性の研究が様々な装置においてなされています。京大エネルギー理工学研究所にあるヘリオトロン装置でも、プラズマ中に不純物として存在する炭素イオンが荷電交換再結合時に放出する光を分光学的に測定することにより、炭素イオンのフローが計測されています。我々の研究室ではこのプラズマ中のフローを新古典輸送理論に基づき理論解析を行っています。

前述の通りプラズマの径方向の輸送現象では、多くの場合乱流輸送が支配的ですが、新古典輸送の影響も無視できず、とくに磁力線方向の運動量保存に関係した物理量、たとえばブートストラップ電流と呼ばれる自発電流や磁力線方向のフロー・粘性は新古典輸送理論で説明できると考えられています。しかし、ヘリオトロン装置のような非軸対称で複雑な形状を持つプラズマ中に、水素、重水素、不純物など多種のイオンが存在し、さらに中性粒子ビーム入射などによる外部からの運動量源も存在する場合、新古典輸送解析も大変難しくなり、複雑な数値解析が必要となります。

我々の研究室ではこの理論解析に成功し、実験で観測された炭素不純物のフローが外部運動量源を考慮すれば新古典輸送理論で説明できることを初めて示すことができました（図1に実験で得られた磁力線方向のフローと計算結果（実線）の比較を2ケース示す）。今後、これらの成果を大型ヘリカル装置の実験解析に適用するとともに、その物理メカニズムを明らかにしていく予定です。

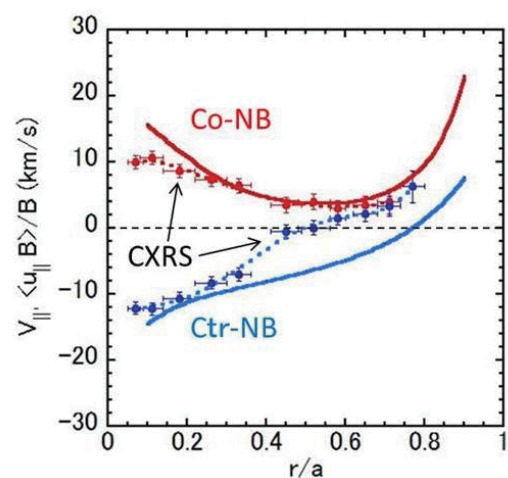


図1

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

「揺らぎが生み出す高温プラズマ中の電磁場の構造」

本研究室では、荷電粒子と電磁場を制御することにより、核融合プラズマの生成・制御とその計測を通じた物理研究、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生、小型の核融合装置を用いた高エネルギー粒子の発生と利用について研究を進めています。本小文では、核融合を目指し生成された高温プラズマ中の電磁場の揺らぎ計測について紹介します。

磁場閉じ込め核融合は、(1) 燃料が無尽蔵、かつ地域的偏在性がない、(2) 炭酸ガスを排出しない、(3) 生来的な安定性（暴走しない）、など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、国際協力の下においてフランスに建設中の国際熱核融合実験炉 ITER は数年後の運転開始が迫っており、誰も見たことがない核燃焼プラズマの実現が近づいています。この核燃焼プラズマでは、核反応によって生成される 3.5MeV の高エネルギーのヘリウム粒子によって加熱・維持されます。しかしながら、発生した高エネルギー粒子自身がプラズマ自身と相互作用することで、高速イオン励起不安定性と呼ばれる大きな揺らぎが発生し、閉じ込めを劣化することが予測されています。実際にプラズマ中に高エネルギービームを入射して、揺らぎを意図的に誘起する模擬実験でその物理が調べられてきました。

本研究室においても、磁場閉じ込め装置ヘリオトロン J 装置を用いて、高温プラズマに高エネルギービームを入射し、高速イオン励起不安定性に関する実験を行っています。この不安定性が観測された放電の磁場の揺らぎの信号を図 1 に示します。高速イオン励起不安定性が、およそ 0.5ms の短い周期で発生していることがわかります（図 1 上）。このとき、この揺らぎと同期して、プラズマ中の径電場が変化する現象が見出されました（図 1 下）。径方向の電場が変わるといことは、プラズマにとっては周方向への流れ構造が変化することに相当します。プラズマ中の流れが変わると、微細な揺らぎ構造が影響を受け、プラズマの閉じ込め性能が変化する可能性があることを意味しており、興味深い現象です。また、プラズマ内部の高速イオン励起不安定性の構造を、プラズマ中の密度の揺らぎを計測可能なビーム放射分光という手法によって明らかにしました。不安定性によって磁場の構造が揺らぐことで、図 2 に示すような密度の揺らぎが生まれていると考えられます（ここで、実際にはプラズマは単純な円形ではありませんが、簡単のため円形断面としています）。揺らぎの強度と構造は時間的に刻一刻と変化し、らせん状の構造が形成され、そして消失していきます。高速イオンとプラズマの非線形的な相互作用の結果、このような複雑な挙動が周期的に繰り返されていると考えられます。

ここで述べてきたように、高温のプラズマ中には電磁場の揺らぎが発生し、多彩な構造が形成され、それがプラズマの閉じ込めに直接的、或いは間接的に影響します。揺らぎを研究することで、プラズマの振舞いを解明することが本研究室のひとつの課題です。

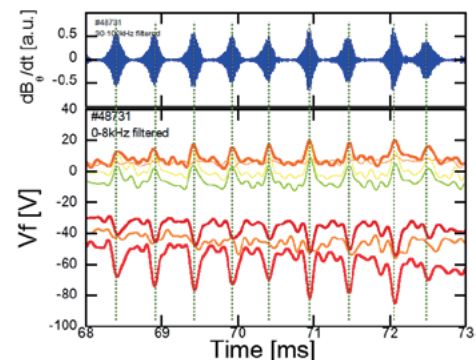


図 1(上) 磁気プローブ信号。再帰的に高速イオン励起不安定性が観測されている。(下) ラングミュアプローブで計測した浮遊電位信号。不安定性と同期して電位が変化している。

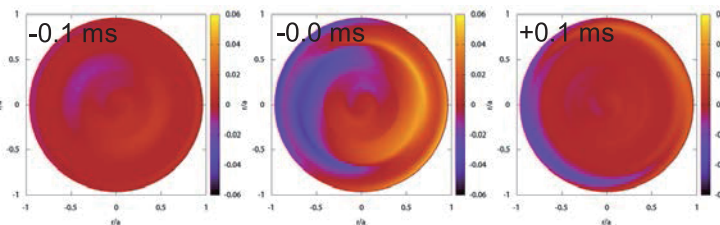


図 2 ビーム放射分光計測によって計測したあるプラズマ断面の密度の揺らぎの二次元構造。不安定性の典型的な平均的な (-0.1, 0, +0.1ms), 不安定性が発生するたびに、らせん状構造が形成され、また消失していく。

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/>

「環状磁場に閉じ込められたプラズマの回転を探る」

私たちの研究室では、磁場閉じ込めによる高温高密度プラズマ生成・維持に関する基礎研究を進めています。現在は、他の関連研究室と協力して、本学創案によるヘリオトロン型磁場配位にさらなる工夫を取り入れた先進ヘリカル磁場配位であるヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位を用いたプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いた研究を行っています。本稿では、ヘリオトロンJプラズマの回転に関する研究を紹介し、本研究の最近の成果に関し、李炫庸博士が彼の博士学位論文概要として本誌に紹介していますので、合わせてご覧下さい。

ヘリオトロン型磁場もその一種である環状磁場による磁場閉じ込め核融合プラズマ研究においては、クーロン衝突に起因する（粒子／エネルギー／運動量等の）輸送が支配的な場合を既述する新古典理論を実験的に検証するため、実機プラズマの巨視的流を探ることは重要テーマの一つです。さらに、このような巨視的流の存在がプラズマの電磁流体力学的安定化及び閉じ込め性能向上に重要な役割を果たしていると考えられ、プラズマ流の決定機構について、その理論的・実験的研究が進められています。特に減衰機構に関しては、磁場リップル強度が重要な要素と考えられ、この観点からの研究が注目されています。バンピー（ミラー）磁場成分を第3の制御因子とするヘリオトロンJでは、その磁場制御性によりミラー磁場成分のみを変化させることができ、これによる磁場リップル強度の違いが、磁場に平行なプラズマの巨視的流（平行プラズマ流）の駆動・減衰に及ぼす影響を調べることが可能です。プラズマ流計測には、プラズマ中のイオンが発する線スペクトルのドップラーシフトを用いますが、高温プラズマでは、殆どのイオンが完全電離しているため、中性粒子ビーム入射（NBI）による中性粒子との荷電交換反応（CXR）により生じる水素様イオンからの線スペクトルを利用します。本研究では、プラズマ加熱用NBIを利用し、C+6 から生じたC+5からの可視光（529.05nm）を観測します。図1に荷電交換再結合分光（CXRS）計測システムを示します。CUE（29号）に紹介したビーム放射分光（BES）システム同様、ヘリオトロンJの特徴を活かす観測視線の採用で、高空間・時間分解で平行プラズマ流分布計測が可能です。

図2は、NBI入射方向の異なる2条件下での平行プラズマ流速とNBIによる付加運動量の径方向分布例です。付加運動量の大きなプラズマ中心部（ $0 < \rho < 0.3$ ）では、その付加運動量の方向と矛盾しない平行プラズマ流が観測されています。一方、外部運動量入力の際に無いプラズマ周辺部では、正方向の平行プラズマ流が確認され、外部からの運動量付加によらないプラズマ流駆動機構の存在が示唆されています。また、リップル強度が違っても、同じ付加運動量下でも異なるプラズマ流速となることも観測され、リップル強度の減衰に及ぼす影響を調べる手掛かりを得ています。

これらの観測を理解するため、詳細な数値シミュレーションが中村（祐）研の学生さんにより進められています。また、実験面では、次のステップとして、磁場に垂直方向のプラズマ流の計測に向け、準備を始めています。

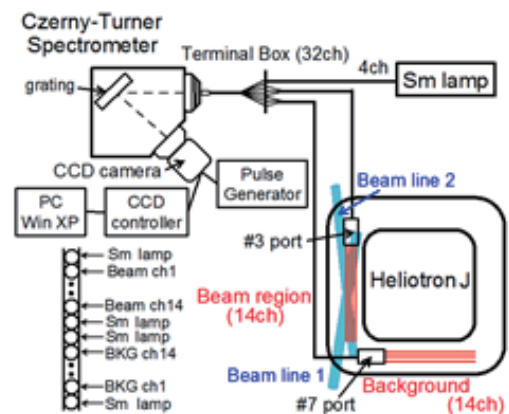


図1 ヘリオトロンJ用CXRSシステム

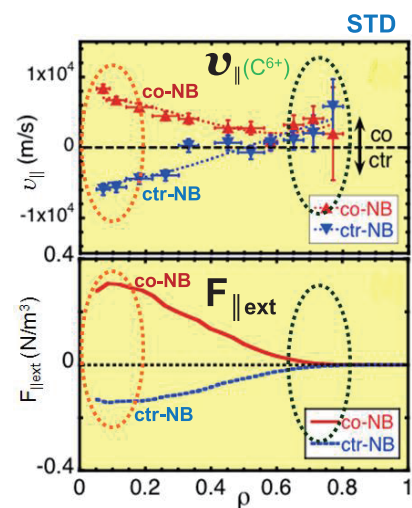


図2 NBI入射方向が異なる2例（co、ctr）における平行プラズマ流速（ v_{\parallel} ）とNBIによる付加運動量（ $F_{\parallel \text{ext}}$ 、計算）の（規格化）径方向分布：標準磁場配位

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>

「MU レーダーイメージング観測による大気乱流特性の国際協同研究」

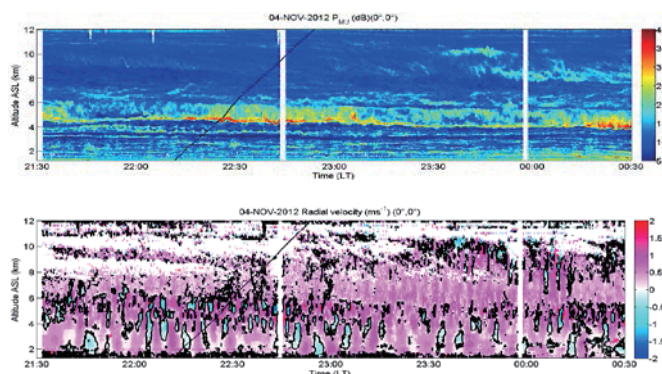
乱流混合は熱や物質の鉛直輸送に寄与する重要なプロセスであるが、そのスケールが極めて小さいことから観測が難しい現象の一つである。気象予報モデルにおいても乱流を直接解像することはできないため、パラメータ化して取り扱われており、観測から定量的に評価することが求められている。当研究室ではフランスのトゥロン大・LATMOS と協同で大気乱流の観測的研究を続けている。2000年に実施したMUTSI（MU radar, Temperature Sheets and Interferometry）観測キャンペーンでは、高度分解能20cmの超高感度ラジオゾンデとMUレーダーとの同時観測から、厚さ10m以下という従来の常識を越える極めて薄い乱流薄層が多重に存在するという驚くべき姿を明らかにし、従来の下層大気における乱流渦による鉛直拡散過程の再考察を迫った。

地上から上空に向けて電波を発射し、大気の乱れに散乱されて戻ってくる電波を受信することで、上空の風向風速等を高時間分解能で測定する大気レーダーは、大気乱流からの散乱エコーを観測すること、時間・空間的に連続観測可能である点で、大気乱流の観測装置として優位にあるが、従来空間分解能に限界があった。世界最高性能の大気観測用大型レーダーであるMUレーダーでは、2004年に高機能化への改修が行われ、レーダーイメージング（映像）観測が可能となった。その後、イメージング観測手法の開発・改良が重ねられ、現在ではレンジ分解能が飛躍的に向上した観測が可能となっている。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。例えば、風速の変化が大きいところでは、ケルビン・ヘルムホルツ不安定により乱流が発生することが知られているが、雲底下で持続的に乱流が存在する様子がMUレーダー観測によりイメージ化されている。

MUTSIの後も、MUレーダーに加えて、Kaバンド雲レーダー・Xバンド気象レーダー・レイリーライダー・ラジオゾンデ等を用いた観測キャンペーンをたびたび実施してきた。今年度も11月初めに、フランスからの3名に加え、アメリカから2名の研究者が参加し、信楽MU観測所において約1週間の観測キャンペーンを実施した。今回は特に最近国内メーカーで開発された約30cmの高高度分解能で気温プロファイルを取得可能なラジオゾンデ気球を同時放球する実験を行った。現在そのデータ解析を進めており、大気乱流特性の実態に迫りつつある。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。今後は、より普及型の1.3GHz帯小型大気レーダーへのイメージング観測技術の応用や、赤道大気レーダーを用いた熱帯域大気乱流研究にも発展させたい。



信楽 MU 観測所の MU レーダー（アンテナ直径 103m, 送信出力 1MW）



2012年11月4日にMUレーダーイメージングモードで観測された（上）エコー強度、（下）鉛直流の時間高度変化。斜めの線はラジオゾンデの観測高度を表す。

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>

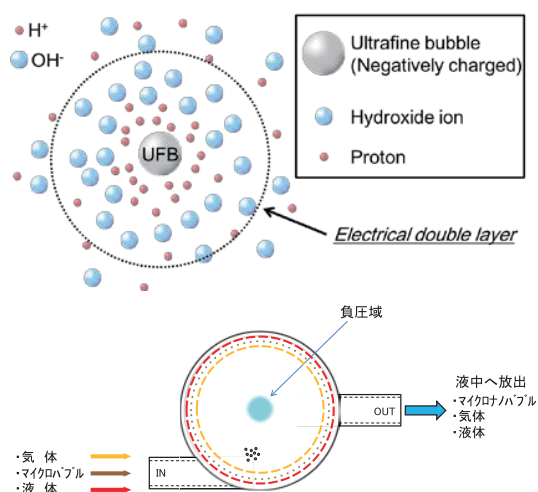
「微細気泡水のもつ電気諸特性と理論的な考察」

気泡の入った水は、我々にとってとても身近な存在です。例えば、炭酸水は二酸化炭素からなる気泡を含んでいますし、金魚などを飼う水槽や泡風呂など、気泡を水中に存在させる装置も多くあります。これらの気泡は、浮力によって水面へ浮上し、最終的には消滅しますが、その大きさ（直径）は、数ミリ程度の大きさであると言われています。ところが、気泡の大きさがマイクロメートルサイズになると、浮力が減少して水中に滞留する時間が大きくなり、また表面張力が大きくなることでミリサイズの気泡とは異なった性質を示す事がわかってきています。また、ナノサイズまで小さくなる微細気泡（以下微細気泡とします）になると、目視で確認出来ない大きさでもあることから、その特性について様々な推測や仮説が多く生まれ、研究分野としてとても面白い課題になっています。

微細気泡を使った応用例としては、現在既に医療分野や洗浄分野で利用されつつありますが、私たちは2011年度の東日本大震災にて発生した原発事故の際、環境浄化技術として微細気泡を用いて放射性セシウムの除染技術研究を行ってきました。現場利用にて即対応可能な技術であり、また実証試験を行った際も通常の水を用いるより高い効率で除染が可能である事がわかりましたので、現在もその研究を続け、実証研究を行っています。また、福島県における連携研究として、微細気泡を利用した農業利用試験も並行して行っています。具体的には、観葉植物の着色・延命効果や、農作物の放射性セシウムの吸収率に関する研究、また大規模水耕栽培に利用可能な技術としての企業との共同研究など、様々な応用研究も行っています。

微細気泡は先に述べたように目に見えない大きさ（ナノメートルサイズ）であり、濃度も水分子の数量やその他のイオン濃度と比較すると非常に個数が少なく、基礎的な研究の際に指標となるべき測定方法が技術的にはまだ確立されていません。水中に含まれる微細気泡の計測には、一般的にはレーザー散乱によるブラウン運動解析から推定される粒径分布と濃度分布が良く用いられていますが、確かにレーザー散乱により濃度分布として計測は可能ですが、不純物による散乱の効果や、統計的な問題から、絶対値としての濃度測定は原理上不可能です。私たちが実証している除染や農業などの応用技術についても、基礎データとしては相対的な変化と実験結果の比較を行っているだけであり、微細気泡の基礎研究としては、より正確なデータを用いて研究を行う必要があります。

微細気泡の基本的な特性としては、負に帯電して水中に存在している事がわかっており、圧壊や縮合による気泡消滅・浮上に対する安定性を維持するためには、理論的にはかなり大きな帯電量が必要だと考えています。また、帯電による正負イオン（純水中だと水素イオンと水酸化物イオン）との相互作用も予想されます。そのため、私たちは、濃度の低い微細気泡を精度良く測定し、その物理化学現象を正しく理解するため、微細気泡が存在する水や水溶液の電気伝導度と誘電率に着目し、基礎研究を開始しています。微細気泡濃度が低くても、帯電による電氣的な相互作用は感度良く測定が可能であり、実際の測定でも違いをみる事が出来ています。今後は、基礎データと応用研究とを結びつける新しい理論について構築し、今後の実用化への貢献をしていきたいと考えています。



気液混合剪断方式によるナノバブルの生成。
IN 側から気体と液体、それらを混合させ発生させたマイクロバブルを、ポンプ圧力でナノバブル発生器に送る。遠心力により、マイクロバブルが剪断されナノバブルが発生する。

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>

「マイクロ波無線電力伝送用受電整流回路の効率特性改善」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Satellite/Station) [1] の実現を目指し、SPS で用いるマイクロ波無線電力伝送技術を中心に研究開発を行っている。特に近年マイクロ波無線電力伝送技術を SPS 以外に様々応用をする研究も行っており、電気自動車の無線充電や無線給電による新しいセンサーの共同研究等を行っている [2]。

マイクロ波無線電力伝送は送電されたマイクロ波をアンテナで受電し、ダイオードを用いた整流回路で直流変換する (図 1)。この受電整流アンテナをレクテナと呼ぶ。レクテナの整流変換効率はダイオードの V-I 特性に起因する入力マイクロ波強度依存性と、接続負荷依存性を持つ。最適なマイクロ波入力強度と最適な接続負荷の場合は非常に高い整流変換効率 (2.45GHz で最高 90% 程度) を持つが、マイクロ波入力強度が強すぎるとダイオードがブレイクダウンを起こし、逆に弱すぎるとダイオードの立ち上がり電圧を超える電圧がダイオードにかからなくなるため、効率が極端に低下する。回路に接続された負荷によっても同様の特性を持ち、レクテナはいわば内部抵抗が数百 Ω の直流電源のような動作となり、非常に使いづらい電源となってしまう。そこで当研究室ではレクテナの整流回路にさらに特性を考慮した DC-DC コンバータを接続し、出力インピーダンスのアクティブなコントロールを行うことで整流変換効率特性の改善を図った [3]。周波数は 2.45GHz を使い、図 2 のシングルシャント整流回路に図 3 の buck-boost DC-DC コンバータを接続した。図 4 がその整流変換効率特性である。整流回路単体よりも RF-DC-DC 変換回路の整流変換効率特性が格段に改良されていることが分かる。

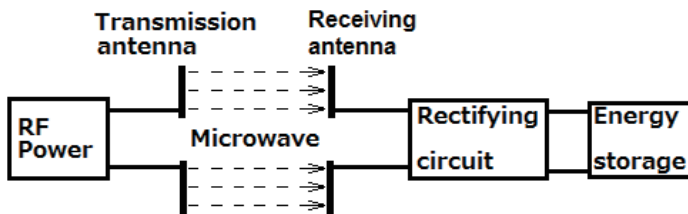


図 1 マイクロ波無線電力伝送の原理

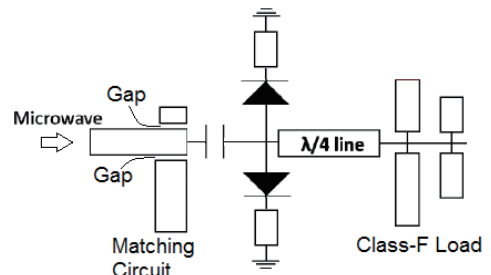


図 2 実験に用いたレクテナ整流回路

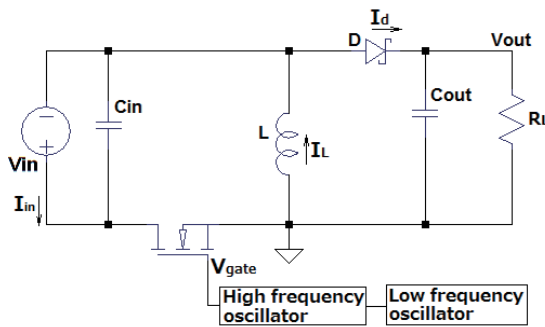


図 3 実験に用いた buck-boost DC-DC コンバーター

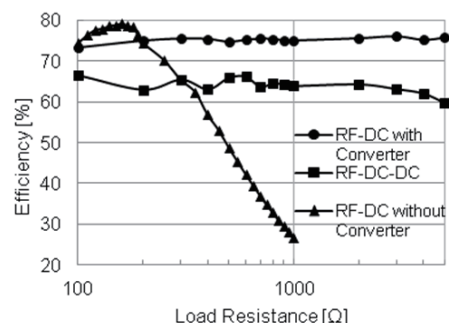


図 4 整流変換効率の比較

【参考文献】

[1] 篠原 (監著), “宇宙太陽発電 (知識の森シリーズ)”, オーム社, 2012.7
 [2] 篠原, 小紫, “ワイヤレス給電技術”, 科学技術出版, 2013.2
 [3] Huang, et al. “Study on a Low-power Rectenna Using DC-DC Converter using the Maximum Power Point Tracking Method”, IEEE Trans., MTT, in print