

## 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」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

複合システム論講座(土居研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野(松尾研)

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野

電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工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(松重研)

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(吉田研)

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(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

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(野澤研)

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電波科学分野(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)

#### ベンチャービジネスラボラトリー

#### 高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(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)

## 複合システム論講座（土居研究室）

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

## 日帰り手術における麻酔鎮静度・鎮痛度制御の研究

日帰り手術においては、覚醒後の患者の早い回復が求められるため、適切な麻酔状態に維持しながら、薬剤の投与量をできるだけ低減することが望まれます。最近では、体内での代謝が早い麻酔薬 propofol と鎮痛薬 remifentanil が併用されるようになっていますが、これらは相互作用を持ち、また remifentanil には呼吸抑制効果があるため、適切な鎮静・鎮痛状態を維持しながら投与量を低減するにはきめ細かい調整が必要で、麻酔医の負担軽減のためにも自動制御システムの開発が望まれています。われわれは、そのようなシステムの開発を目的として、まだ確立されていない鎮痛度指標について検討するとともに、両薬剤の相互作用を考慮に入れた鎮静度・鎮痛度制御の研究を行っています。

図1に手術中の刺激等による脈拍と脳波に基づく指標である Entropy Difference (ED)[1] の変化の一例を示します。この図からわかるように、強い痛みを感じるときには脈拍や ED のいずれか、または両方の値が大きくなります。そこで、脈拍と ED を組み合わせた鎮痛度指標  $S$  を次式のように構成しました。

$$S = \sqrt{0.0596(P - P_{\min})^2 + ED^2}$$

ここに、 $P$  は脈拍、 $P_{\min}$  は脈拍の最小値です。

次に、図2に示すような薬剤の相互作用とむだ時間（遅れ）を考慮した鎮静度・鎮痛度変化のモデルを考えました。ただし、鎮静度指標としては Bispectral Index (BIS)[2] を、薬物動態モデルとしては両薬剤を併用している文献[3]のモデルを用いることとして、薬剤の相互作用は薬力学モデルで考慮しました。

さらに、このモデルに基づいて予測制御による鎮静度・鎮痛度制御システムを構成しました。このシステムでは、目標値を  $BIS = 50$ 、 $S = 4.5$ 、サンプリング周期を 12 秒とし、最小変更可能量を考慮に入れて薬剤の投与速度を決定します。また、最初 10 分間は通常の麻酔時の投与方法に従い、10 分間のデータに基づいて患者毎に薬の効果を求める同定を行った上で自動制御を行います。シミュレーション結果の一例を図3に示します。モデルに誤差がある場合も含めておおむね適切な制御が行えますが、同定精度が不十分であるため、現在改良を進めています。

## 参考文献

- [1] E. M. Mathews, et al.: Br. J. Anaesth., 98, 785/791 (2007)
- [2] J. C. Sigl and N. G. Chamoun: J. Clin. Monit., 10, 392/404 (1994)
- [3] T. Bouillon, et al.: Anesthesiology, 97, 1350/1362 (2002)
- [4] E. Furutani, et al.: SICE Annual Conference 2010, 223/226 (2010)

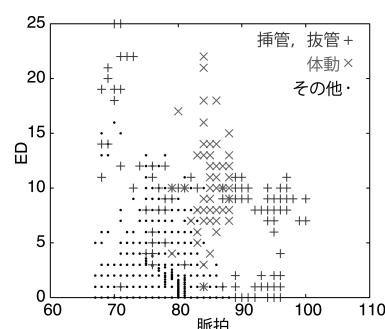


図1: 脈拍と ED の痛みによる変化

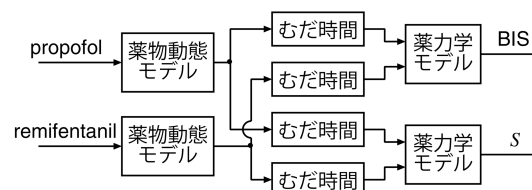


図2: 鎮静度・鎮痛度変化モデル

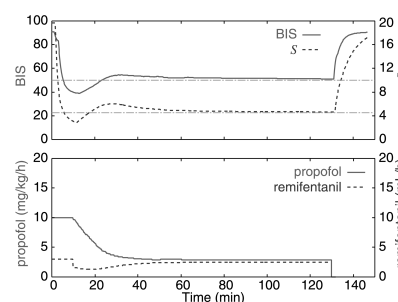


図3: シミュレーション結果

## 電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

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

### 「超高感度光ポンピング原子磁気センサを用いた生体磁気計測」

脳磁図 (MEG) や心磁図 (MCG) 等の生体磁気信号計測は、測定信号が生体組織の導電率の違いに影響されないことから、生体機能の解明や疾患等の診断への応用へ向けた研究が活発に行われている。従来、微弱な生体磁気信号の計測には主に超伝導量子干渉素子 (SQUID) が用いられているが、液体ヘリウムにより極低温状態にする必要があるため、高額な維持コストがかかることが問題となっている。そこで当研究室では、理論的には SQUID を凌ぐ感度を持つとされる超高感度な光ポンピング原子磁気センサ [1] を構築し、それを用いた生体磁気計測に関する研究を行っている。

ここでは光ポンピング原子磁気センサを用いた生体磁気計測の一例として、ヒトの MCG 分布を測定した結果を例示する。MCG は、心臓で生じている電気生理学的活動に伴い発生する磁場を検出することで、心臓の電気生理学的情報を非侵襲的に診断することができる。被験者は図 1 に示す光ポンピング原子磁気センサを組み込んだベッドの上に俯せに寝て、測定位置がセンサセルの真上に来るようにベッド上を移動し計測を行った。参照磁気信号を用いてセンサ感度を計測したところ、生体磁気信号の周波数帯 (DC - 40 Hz) においてはおよそ  $100 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$  のノイズレベルであり、高温 SQUID に匹敵する感度が得られた。図 2 に、本装置を用いて測定した MCG 分布を示す。原子磁気センサには周波数特性があるため、本装置の周波数応答を予め測定し、それにより計測信号を補正した後、0.5 - 50 Hz のバンドパスフィルタにより呼吸等に起因する緩やかな変動と電源ノイズの影響を取り除いた。測定した各点において応答信号が得られ、ある位置において波形が反転している様子が観測される。それぞれの信号は、一般的な MCG 波形の特徴である Q, R, T 波の各ピークを含み、SQUID により観測される波形とほとんど遜色のないものが得られた。また、その空間分布は磁場の湧き出しと吸い込みを明瞭に示し、心室中隔を流れる電流の方向をほぼ同定することができた。以上のように、本研究では超高感度光ポンピング原子磁気センサを構築し、実際にヒトの MCG 分布を観測することでその信頼性を確認した。

今後は MEG への応用や他のイメージングモダリティとの融合による生体機能の統合解析を目指し、ハイブリッドセルによるさらなる高感度化 [2] や MR 信号の遠隔検出 [3] 等に関する研究を進めていく。

#### 参考文献

- [1] 小林 哲生: “高感度光ポンピング原子磁気センサ (解説)”, 応用物理 **80** (3), 211 (2011).
- [2] Y. Ito, H. Ohnishi, K. Kamada and T. Kobayashi: IEEE Trans. Magn. **47** (10), 3550 (2011).
- [3] T. Oida, Y. Kawamura and T. Kobayashi: IEEE Trans. Magn. **47** (10), 3074 (2011).

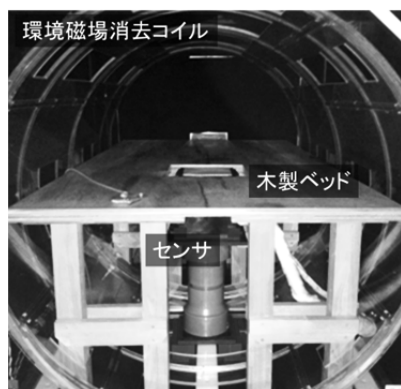


図 1. 実験装置の外観

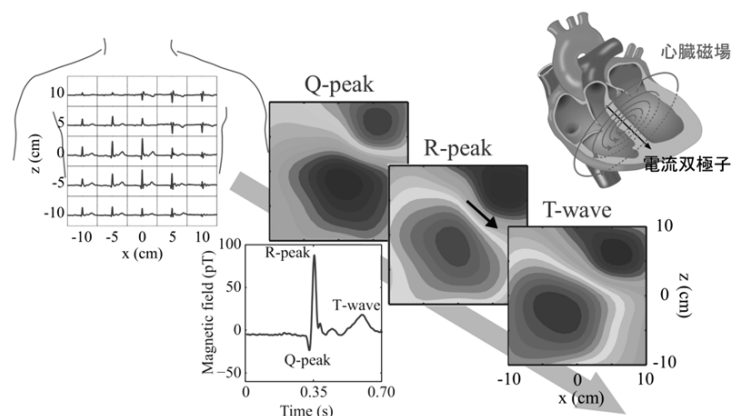


図 2. ヒトの MCG 分布計測の結果

電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研究室)

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

「デジタル機器からの電磁雑音予測のための寄生結合を考慮した等価回路モデル」

携帯電話やパソコンを始めとするデジタル機器は高速かつ多機能化の一途をたどっている。これらのデジタル機器には多くの大規模集積回路 (LSI) が使用されており、LSI の高速スイッチングに応じて大きな電磁雑音が発生する。LSI から発生する電磁雑音は周辺機器へ悪影響を与えたり、LSI 自身の誤動作を引き起こす。このため、LSI やそれを実装する回路基板の低電磁雑音設計や耐電磁雑音設計、すなわち EMC 設計が必要となる。デジタル機器の設計段階で電磁雑音の発生量を予測し EMC 設計を行うにあたり、複雑な構造である回路基板の特性を簡略な等価回路モデルで表現し、回路計算により EMC 設計を行いたい。しかし、機器が高速化・高密度化するにつれて、従来ならば無視できた小さな寄生結合を考慮せざるを得ず、膨大な計算時間を要する電磁界シミュレータに頼っているのが現状である。

本研究では、寄生結合や周辺電磁界による影響を考慮に入れた等価回路モデル化手法を提案し、そのモデルを用いて電磁雑音の予測法を検討している [1]。例えば、図 1 に示すようなインターポーザがプリント回路基板 (PCB) 上に実装される場合を考える。インターポーザや PCB の多くは個別に設計され、その等価回路モデルはある標準の実装状態で求められている。しかし、それらを組み合わせた際には互いの導体が接近するため等価回路モデルの各パラメータは変化し、また個別には生じない相互の寄生結合が発生する。図 2 に示すように、寄生結合を考慮した等価回路モデルでは、回路に従来なかった共振や反共振が発生する。これらの共振によって回路内部に多大な電流が流れ外部へ放射される電磁波が増加したり、図 3 に示すように共振の影響によりクロックジッタが増加するなど LSI 自身の回路動作が不安定になることを示した [2]。現在、寄生結合による共振を表現するためのより精度の高い等価回路モデルや、共振の抑制手法について検討している。

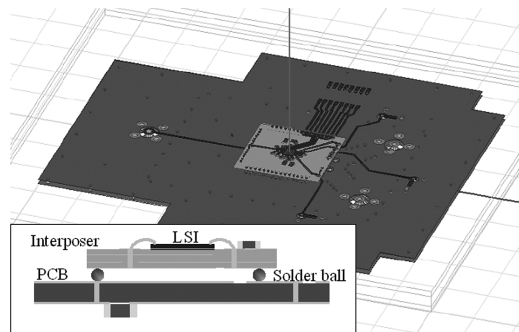


図 1 LSI インターポーザ・PCB の高周波特性計算モデル

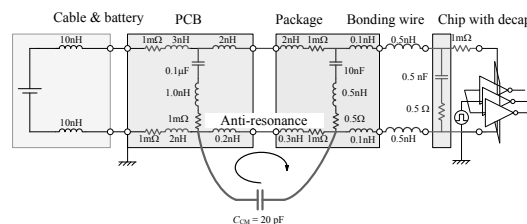


図 2 LSI・インターポーザ・PCB の等価回路モデル

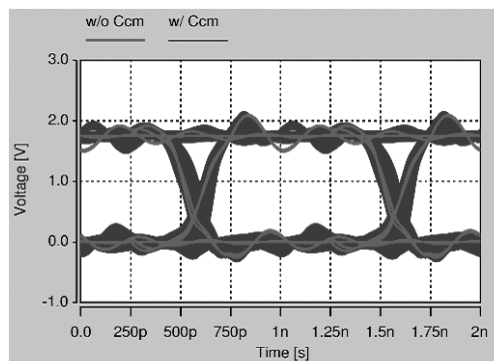


図 3 寄生結合の有無による出力波形の比較

参考文献

[1] A. Matsuda, et. al., “A Method of Package-Equivalent-Circuit Modeling for PCB-Package Co-Design,” Proceedings of ICEP 2010, pp.360-365, Sapporo, Japan, April, 2010.  
 [2] T. Matsushima, et. al., “SI/PI Degradation Due to Package-Common-Mode Resonance Caused by Parasitic Capacitance between Package and PCB,” 8th EMC Compo, S5-3, Dubrovnik, Croatia, Nov. 2011.

## 電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

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

### 「非負システムの解析と設計—凸最適化の視点から」

当研究室では、制御工学に関する総合的研究の一環として、線形時不変システムを対象とした性能解析や制御器設計に関する研究を精力的に行っている。本稿では、経済学や環境学、生物学や人口動態学といった広範な分野で研究対象とされる非負システムに関して、その解析と設計に関する当研究室の取り組みの一端を限られた紙面で紹介することを試みる。

図1は、動特性が  $\dot{x}_1(t) = x_1(t) - 5x_2(t) + u(t)$ ,  $\dot{x}_2(t) = 2x_1(t) - 2x_2(t)$  で表される線形時不変システム  $G$  に対して、制御入力  $u$  を  $u(t) \equiv 0 (t \geq 0)$  としたときの開ループシステムの応答（すなわち、 $t \geq 0$  における状態  $[x_1(t) \ x_2(t)]^T$  の  $(x_1, x_2)$  平面上での軌跡）を表している。ただし初期状態  $[x_1(0) \ x_2(0)]^T$  を  $[1 \ 1]^T$ ,  $[0.1 \ 1]^T$ ,  $[1 \ 0.1]^T$  とした場合の3つの応答を示している。このシステムは安定であるから、時間の経過とともに状態は原点に収束する。しかし状態の過渡応答は必ずしも好ましいものではなく、とくに初期状態が非負である（すなわち初期状態が第1象限に存在する）にもかかわらず、時間の経過とともにまず  $x_1$  が負となり、続いて  $x_2$  も負となって、その後は符号の変化を繰り返しながら原点に収束していることが分かる。一方、このような状態の符号の変化は、制御入力  $u$  をうまく構成することで簡単に回避することができる。図2は、システム  $G$  に対して  $u(t) = -3x_1(t) + 6x_2(t)$  というフィードバック制御を施した場合の応答を示している。このフィードバック制御を施した場合、閉ループシステムは安定となり、かつ初期状態が非負であれば状態も常に非負となることを理論的に保証することができる。

この例では、フィードバック制御を施して閉ループシステムを非負とすることで、状態の符号変化を回避している。一般に、与えられた線形時不変システムが“任意の非負の初期状態および任意の非負の入力に対して、状態および出力が常に非負となる”という性質を持つとき、このシステムは（内部）非負システムであるとよばれる。非負システムの性能を解析する問題、あるいは（必ずしも非負とは限らない）システムに対して閉ループシステムを非負としつつ所望の制御性能を達成する制御器を設計する問題の多くを凸最適化問題（線形計画問題）に帰着できることが知られており、当研究室でも凸最適化理論に基づいた新たな解析・設計手法の開発を積極的に進めている。当研究室の取り組みにより、非負システムの  $L_1$  ゲイン（入出力信号に関する  $L_1$  誘導ノルム）の計算を線形計画問題に帰着できること、またこの  $L_1$  ゲインが、複数の非負システムが結合された大規模非負システムの安定性を解析する上で重要な役割を果たすことなどが明らかとなっている。

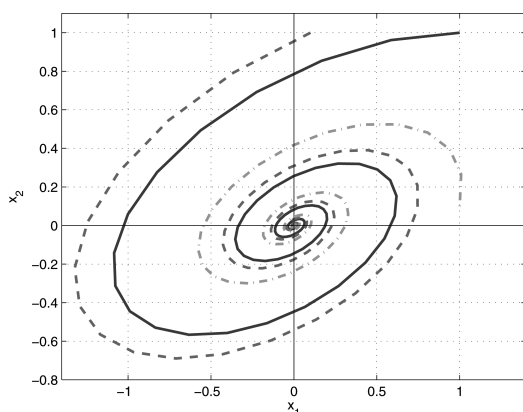


図1：開ループシステムの応答

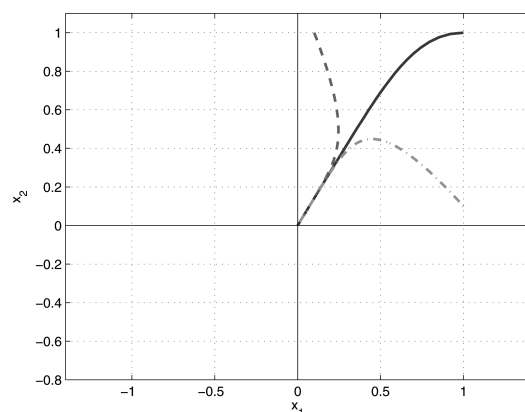


図2：閉ループシステムの応答

## 電気システム論講座 電力システム分野

<http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/gse/ee/powersystem>

### 「ゲインスケジューリング H2 最適制御を用いた SVC による同期発電機の電力動揺抑制設計に関する研究」

当研究室では電力システムの潮流計算や安定度解析手法の開発を行っています。近年取り組んでいる課題として、静止型無効電力補償装置 (SVC: Static VAR Compensator; サイリスタを用いてキャパシタンスおよびインダクタンスを調節することで無効電力を吸収または放出し、無効電力を補償する装置) による同期発電機の各種安定性を考慮した電力動揺抑制に関する研究があります。図 1 に同期発電機を含む電力システムの基本構成を示します。この系が何らかの外乱を受けると発電機と負荷との間で電力動揺という不安定現象が生じ、最悪の場合発電機が脱調まで至ります。この問題を回避するため、発電機の外部端子に SVC を取り付けます。その等価回路は図 2 のようになり、SVC が無効電力を調整して電力動揺が抑制され、一般に系統全体はより安定になります。

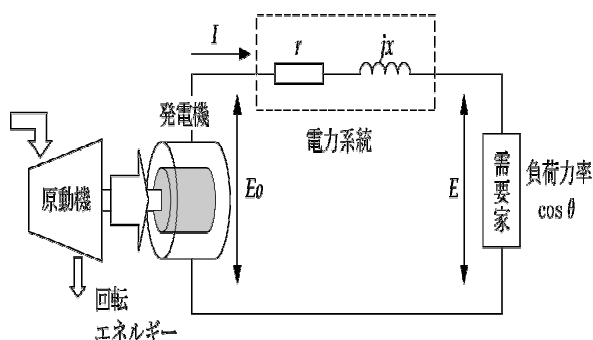


図 1. 同期発電機概念図

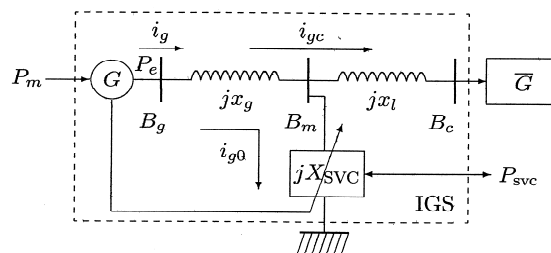


図 2. SVC を持つ同期発電機の等価回路

SVC による動揺抑制を達成するため、これまでに非線形要素の周波数応答特性近似に基づいた SVC 制御律による電力動揺抑制設計などの研究を行ってきました。今年度は H2 最適制御を適用して SVC による H2 ロバスト性能を最小化する動揺抑制設計に取り組んでいます。各種のロバスト性能を考慮した SVC 制御律の開発は電力工学の分野でも最新のテーマになっています。特に H2 最適動揺抑制を実現すれば、発電機の安定化だけでなく外乱による電力品質への影響を最小限に低減することも期待されます。

H2 ロバスト性能あるいは H2 ノルムとは、制御対象において関心のある入出力間の周波数応答特性の 2 乗積分によって定義され、対象系統の外乱に対する動揺抑制能力を反映する指標の一つです。この指標が小さければ小さいほど、外乱に対する抑制能力が強いといえます。H2 ノルムを最小化するコントローラは H2 最適制御器と呼ばれます。このようなコントローラを無効電力補償装置 SVC に組み込んで対象系統の同期発電機に実装すれば動揺抑制が可能になります。研究の核心は SVC の動作値を操作する H2 最適制御律を決めることです。しかし、同期発電機の入出力関係を記述する動揺方程式は非線形項を含むため、同期発電機を対象とした H2 最適制御律を確立することは容易ではありません。解決法として動揺方程式を区分的に線形化 [1] して近似し、各近似モデルについて H2 最適制御を適用する設計手法、すなわちゲインスケジューリング (Gain Scheduling) 法を取り入れた H2 最適制御器を提案しています。

#### 参考文献

- [1] J. Zhou, Stabilization of individual generators with SVC designed via phase plane partitioning, IET Control Theory and Applications, vol.4, no. 4, pp. 601-612 (2010)

## 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/>

### 「プラズマを用いた動的メタマテリアル研究」

当研究室の主な研究対象であるプラズマの産業応用としては、主に化学気相成長やスパッタリング過程、そしてドライエッチングといった気相中反応や気相・固相界面反応の利用が盛んに行われてきました。また、古くからの蛍光灯、あるいは最近のプラズマテレビでみられるような発光性の利用も重要な応用分野です。当研究室では、このようなプラズマ応用に加えて、新たにプラズマの電氣的な特性に着目した研究を進めています。ここでは、荷電粒子を含むことで生じる導電性、より広い意味では物質のもつ誘電性に着目すると、プラズマは他の物質状態とは異なる性質を示します。例えば、プラズマはマイクロ波帯で正から負の値にわたって幅広い比誘電率値を示しますし、時間的な可変性も備えています。また、プラズマ生成電力や放電気体圧力を変えることで、誘電率値を複素平面上で制御することができます。このような性質は、近年注目されている“メタマテリアル”という微小な周期構造による特異なバルク性質の実現、例えば透磁率が負の値にわたって設定可能である、という点と組み合わせることで、高機能性を発現する素地があります。我々は、このように従来のメタマテリアル構造にプラズマを組み合わせることで生じる特質について、“プラズマ・メタマテリアル”として提案してきました [1]。

プラズマ・メタマテリアルの様々な可能性・応用性を示すために、当研究室ではこれまでに、負の屈折率状態の実現の確認や擬似表面プラズモン現象への動的性質の付与、プラズマ・メタマテリアルが示す強い非線形性の理論予測等の研究を行ってきています。ここでは、図1を用いて、擬似表面プラズモンに関する研究内容についてご説明します。擬似表面プラズモンとは、金属板へ周期的な穴を開けることで、ある特定の周波数では板面内の開口率に関わらずほぼ100%の電磁波が透過するという現象を理解するために提唱された考え方です。すなわち、周期的な穴開き構造を持つ板は、周期長より十分長い波長の電磁波に対しては一種の負の誘電率を示す材質と言え、特異な巨視的性質を示すという意味でメタマテリアルの範疇にあるとみなせます。当研究室では、この穴の中に微小なプラズマを生成することで、この巨視的誘電率を可変に制御することができることを実験・理論の両面で示しました [2]。

ところで、図1の構造は、別の見方としては、表面プラズモンと同様の現象の発現を通して、メタマテリアルの概念の下に、巨視的には“プラズマ”とみなせる構造を元々示している、とも言えます。このように、メタマテリアルの概念に後押しされる形で新たな“プラズマ”形態を実現することも、当研究室で我々が目指している研究の流れに沿ったものです。そして、実際のプラズマ生成とともに、効果が入り組んだ形で機能性を発揮することができている好例と考えています。

また、プラズマ・メタマテリアル研究全般の中では、メタマテリアルへの動的性質（可変性）を付加することで生じる機能性が明らかとなってきています。構造(空間)自体に潜む創造性という軸に対して、時間軸への制御性をどのように実現してどのように応用するか、という観点を採用して、研究領域を広げていこうとしております。

以上のように、本研究内容は、1つのストーリーに沿って筋立てられる内容というよりは、多分に多面的な要素を含んでいます。プラズマ・メタマテリアル研究は、先に述べたように、当研究室が世界に先んじて提案した概念と言えますが、最近では、欧米およびアジアにおいて、理論および実験研究が多く報告されるようになってきています。当研究室ではその先頭を切って新たな研究展開を図るべく、学術の進展と産業応用への提案の両面で研究を進めていきます。

#### 【参考文献】

- [1] 酒井道, 橋邦英, 「マイクロプラズマによる電磁波メタマテリアル」, 応用物理, 78 巻, pp. 437-441 (2009).  
 [2] D.-S. Lee, O. Sakai and K. Tachibana, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. **48** (2009), 062004.

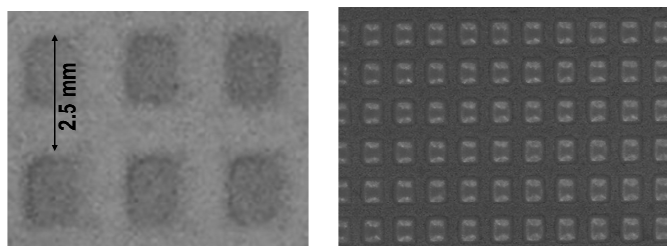


図1. プラズマによる動的なメタマテリアル構造の一例. 擬似表面プラズモン構造 (拡大図, 左) と, 穴内部へ微小プラズマを生成したときの様子 (右).

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

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

「2 探針原子間力顕微鏡による有機半導体薄膜上での電荷注入 / 表面電位計測の実現」

原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy: AFM）は、先鋭な探針をプローブとして試料を観察する顕微鏡法のひとつです。AFMでは、探針－試料間にはたらく種々の相互作用力を、測定領域の局所物理情報として測定していますが、近年、非接触での高分解能測定が可能になったことから、さまざまな試料の構造・物性評価に既に広く用いられています。また、AFMをベースとするいろいろな測定法も発展しており、電子工学分野では、静電気力検出により表面電位を計測するケルビンプローブ原子間力顕微鏡（Kelvin-Probe Force Microscopy: KFM）が、ナノスケール領域の電位計測法として実用化されています。

現在、さまざまな領域でナノ材料やナノデバイスの開発が進み、AFM関連計測による評価はますます重要になっていますが、こうした背景の下、われわれは2本のプローブを有する2探針AFM（Dual-Probe AFM: DP-AFM）を開発しています。このDP-AFMでは、2本のAFMプローブを独立に制御・駆動することができ、これまでの1本のプローブだけしか持たないAFMでは実現できなかった計測が可能となります。ここでは、その計測例の一つとして、一方の探針で有機半導体薄膜に「電荷注入」しつつ、もう一方の非接触探針で、注入領域周辺の「表面電位計測」をした結果について紹介します。

測定対象とした試料は、ペンタコサジン酸（PCDA）というジアセチレン化合物です。PCDAは紫外線や熱による刺激で固相重合してポリジアセチレンとなることが知られており、導電性分子ナノワイヤー材料として期待されています（ただし今回の試料はドーピングしていないため導電性は低い）。今回、絶縁性基板（SiO<sub>2</sub>）上にスピコート成膜したPCDA薄膜グレインについて、重合前後で電子物性がどのように変化するかを評価しました。先ず、図1に示すような測定構成で、探針表面を金コートした「電荷注入」プローブと「電位計測」プローブとを同一のグレイン上に位置決めします。「電荷注入」プローブは、バイアス電圧を加えた状態で試料に接触していますが、接触圧は非破壊測定となるようフィードバック制御されており、一方、「電位計測」プローブが表面上の電位をマッピングします。

図2に、測定された表面形状および表面電位像・ラインプロファイルを示します。モノマー状態の試料の測定では、探針により+1Vのバイアスが加わっていても、PCDA薄膜と基板との間で電位の変化はありません（b, c）。一方、ポリマー状態の薄膜では、PCDA薄膜上で約+1Vの電位変化が検出されました（e, f）。これは、モノマー状態ではPCDAの導電性は極めて乏しいのに対し、ポリマー状態ではジアセチレン共役重合により導電性が向上してホール注入が可能になったことを意味しています。これらの結果は、有機分子系における微視的物性の直接評価が可能になったことを示すだけでなく、DP-AFMによる新規計測手法が実現できたところに大きな意義があり、今後のナノ材料・ナノデバイス計測評価を進めていく上で重要な礎になると考えています。

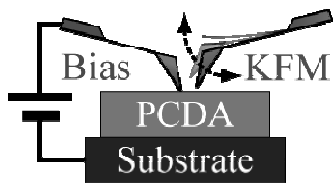


図1. DP-AFMの2探針を用いた測定構成. 一方の探針を「電荷注入」に用い、他方の探針でKFMによる「表面電位計測」をおこなった. 両探針は表面を金でコートしたものを利用した

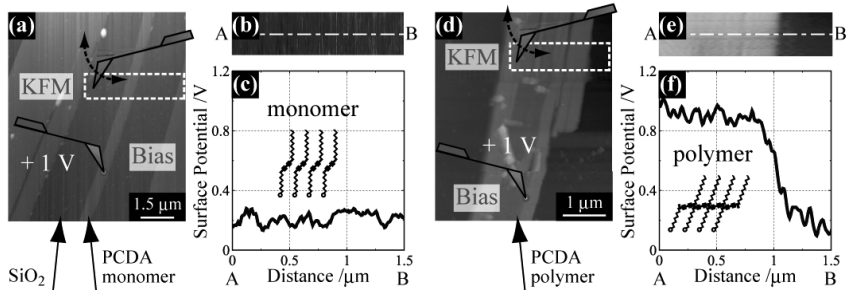


図2. 測定対象としたPCDAモノマー / ポリマーの表面形状（a / d）および四角破線領域の表面電位像（b / e）とそのラインプロファイル（c / f）. ポリマー状態のPCDAで印加バイアスに対する表面電位変化を測定することができた



## 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/>

## 「離れた光ナノ共振器間の強結合の実現とその動的制御」

フォトニック結晶は、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもつ新しい光学材料であり、固体結晶中の周期的なクーロンポテンシャル分布によって電子の分散曲線にバンド構造が生じるのと同様に、光子の分散曲線にバンド構造が生じることを特徴とする。本研究室ではこのフォトニック結晶の特異なバンド構造を用いて、新規な光の制御を実現することを目標に様々な研究を行っている。その中から以下では最近実現された、光波長の数十倍離れた光ナノ共振器同士を強く結合させ、かつその結合を共振器の光子寿命より短い時間で変化させて結合状態を動的に制御する技術について紹介する。

光を波長の3乗程度の極微小領域、すなわち光ナノ共振器に強く閉じ込めることは、光を用いた量子演算や、光を光のまま蓄えることが可能な光メモリーなど、将来の通信・情報処理のための高機能光回路の実現にとって鍵となる技術である。これまでに単体の光ナノ共振器への光閉じ込めは実現されていたものの、複数の光ナノ共振器間で光を自在に交換する技術は存在しなかった。今回、我々は図1に示す2つの共振器 A, B の中間に導波路を配置した構造を考え、導波路から外部環境へ光が逃げるのを抑えるために導波路の両端を反射鏡 C, D で閉じると、この導波路が結合振子において振動を媒介する棒と同様に、ナノ共振器間での光の交換を媒介し得ることを提唱した。そして、導波路の伝搬時間や位相を適切に設計することで、導波路部への光の散逸を抑えつつ、ナノ共振器部に光を集中させた状態のままで、ナノ共振器間の光のやり取りを実現できることを理論的に明らかにした。また実験的にも、図2に示すように83 $\mu\text{m}$ も離れた光通信帯域の共振器間で光が超高速(周期54ps)に何度も交換される様子を確認した。さらに、その交換を外部制御光パルスを用いて任意のタイミングで切断することにも成功した。これらの成果は次世代高機能光回路実現に向けた大きな一歩を踏み出すことに成功したものとして2011年12月12日(日本時間)に英国科学雑誌「Nature Photonics (ネイチャー・フォトニクス)」の電子版において公開された。

光を波長の3乗程度の極微小領域、すなわち光ナノ共振器に強く閉じ込めることは、光を用いた量子演算や、光を光のまま蓄えることが可能な光メモリーなど、将来の通信・情報処理のための高機能光回路の実現にとって鍵となる技術である。これまでに単体の光ナノ共振器への光閉じ込めは実現されていたものの、複数の光ナノ共振器間で光を自在に交換する技術は存在しなかった。今回、我々は図1に示す2つの共振器 A, B の中間に導波路を配置した構造を考え、導波路から外部環境へ光が逃げるのを抑えるために導波路の両端を反射鏡 C, D で閉じると、この導波路が結合振子において振動を媒介する棒と同様に、ナノ共振器間での光の交換を媒介し得ることを提唱した。そして、導波路の伝搬時間や位相を適切に設計することで、導波路部への光の散逸を抑えつつ、ナノ共振器部に光を集中させた状態のままで、ナノ共振器間の光のやり取りを実現できることを理論的に明らかにした。また実験的にも、図2に示すように83 $\mu\text{m}$ も離れた光通信帯域の共振器間で光が超高速(周期54ps)に何度も交換される様子を確認した。さらに、その交換を外部制御光パルスを用いて任意のタイミングで切断することにも成功した。これらの成果は次世代高機能光回路実現に向けた大きな一歩を踏み出すことに成功したものとして2011年12月12日(日本時間)に英国科学雑誌「Nature Photonics (ネイチャー・フォトニクス)」の電子版において公開された。

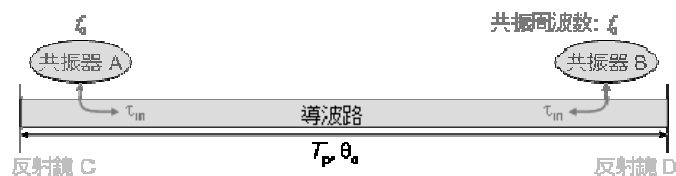


図1. 導波路を介した結合共振器モデル

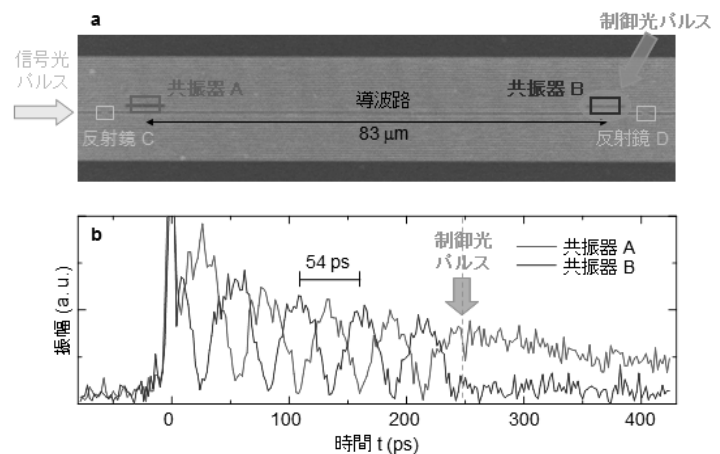


図2. 離れた共振器間の強結合とその切断の実証

## 参考文献

- [1] Y. Sato, Y. Tanaka, J. Upham, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda: "Strong coupling between distant photonic nanocavities and its dynamic control", Nature Photonics, vol. 6, no. 1, pp. 56-61 (2012).

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

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

## 「結合共振メタマテリアルを用いた第二次高調波の増強」

メタマテリアルとは電磁波や光の波長に対して十分小さい人工構造の集合体をさす。このような人工構造体は連続媒質として見なすことができ、構造及び材質を工夫することで誘電率、透磁率、旋光性などの媒質パラメータを自由に変化させることができる。Pendry らはメタマテリアルによる人工磁性媒質を提案する際に、そのメタマテリアルの共振周波数付近の電磁波を入射すると、人工媒質中の小さな領域にエネルギーが集中することを示した [1]。この領域に非線形要素を配置すると媒質の非線形性を効率的に発現させることができる。現在メタマテリアルを用いた第二次高調波の発生に関して、マイクロ波、赤外領域など幅広い周波数帯域で研究がなされているが、どの研究も Pendry らが提案した基本波に対する共振現象を利用したものである。本研究では、基本波で共振する構造と二倍周波数付近で共振する構造を結合させた二重共振回路を基本とするメタマテリアルを提案した [2]。

実験に用いたメタマテリアルのユニットセルの構成を図 1 (a) に、それぞれの共振器の構造については図 1 (b) (c) に示す。一次側共振器は I 型のパターンを用いた。非線形容量をもつ素子としてはショットキーダイオード (Rohm RB886G) を用いた。メタマテリアルの測定系には  $yz$  平面に平行な 2 枚の銅板からなる平行平板導波路を用いた。この導波路では電界は  $x$  方向を向く。送信、受信アンテナは基本波、第二次高調波に対して平坦な特性を得るためにダイヤモンド型ダイポールアンテナを用いた。測定対象物を平行平板導波路中に配置し、単一周波数の電磁波をメタマテリアルに照射し、透過波の第二次高調波成分の強度を測定した。また、共振器間の結合の強さは両者の距離  $d$  を変えることで制御することができる。図 1 (d) は 6.8GHz における第二次高調波の強度を  $d$  ごとにプロットしたものである。図中に二次側共振器がない場合の第二次高調波強度レベルも示している。共振器間距離  $d$  を減らすほど大きな第二次高調波がえられることが分かる。実験では  $d = 1\text{mm}$  のとき、二次側共振器がない場合に比べて、7dB 高い第二次強調波の発生効率を実現した。

## 参考文献

- [1] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2075 (1999).  
 [2] T. Kanazawa, Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano: Appl. Phys. Lett. 99, 024101, (2011).

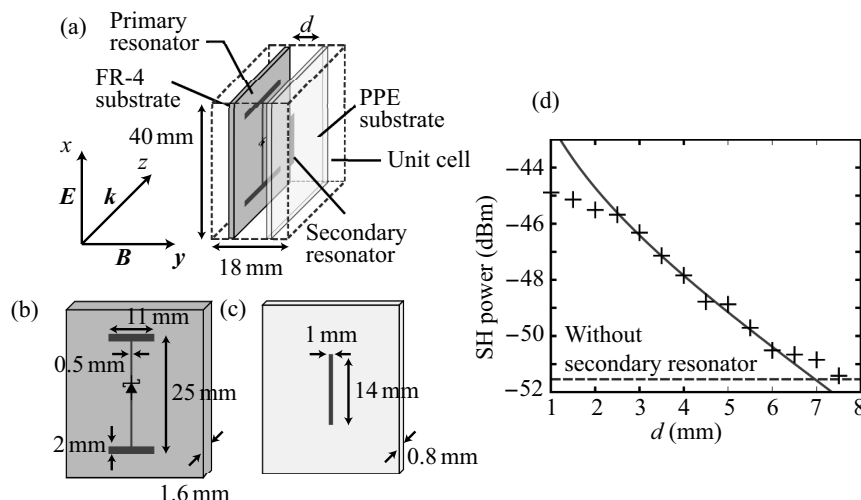


図 1 : (a) ユニットセルの構成 . (b) 一次側共振器の構造 . (c) 二次側共振器の構造 . (d) 放射される第二次高調波強度 .

## 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/japanese/index.html>

### 「オンデマンド型電力ネットワーク」

本研究室では、数年前から「エネルギーの情報化」（本誌 No.23, pp.3-8, 2010）という新たな電力エネルギーマネジメントの考え方、すなわち、電力の供給者視点に立ったスマートグリッドではなく、家庭／オフィス／工場／地域コミュニティといった需要家サイドにおけるスマートな電力エネルギーマネジメント方式を提唱し、それを実現するための研究開発を進めています。

「エネルギーの情報化」を実現するためキーアイデアとして、「オンデマンド型電力ネットワーク (Energy On Demand: EoD)」があります。EoDは、消費者の電力需要に合わせて供給者（電力会社）が発電量を制御するという従来の電力制御方式を抜本的に変えようとするもので、予め定められた積算電力量やピーク電力の上限値（随時変更可能）に合わせて電気機器が使用する電力を調整するというもので、「節電率保証付き」の電力マネジメントシステムが実現できます。基本的な仕組みは、図1に示すように、1) 使用者が家電のスイッチを入れると、まず「電力要求メッセージ」が電力マネージャに送られ、2) 電力マネージャが、家電からの要求電力やその優先度、現在の使用電力、積算電力量およびピーク電力の上限値、に基づいて電力供給の可否や供給する電力を調停し、3) 供給可能な場合は、供給可能電力を家電へ知らせ電力供給を行います。

2011年度前半には、先に開発した京都市内にある1LDKのスマートマンションルーム（本誌 No.25, pp.24, 2011）において計測された実生活データに基づき、EoDシステムを用いて一日生活した場合のシミュレーション実験（図2）や、6台の家電を用いた小規模な実験システムによるテスト運用を行い、EoDシステムの基本的な機能の検証を行いました。2012年1月からはスマートマンションルームにEoDシステムを実装し、実生活実験を行ってシステムの有効性を検証する予定です。また、2012年度には生活パターンの学習・データマイニングに基づく家電の優先度の決定や、蓄電池や太陽光発電などの複数電源のマネジメントについても検討し、京田辺市の1戸建て住宅（3LDK）の京エコハウスにおいて実生活実験を行うと共に、複数の企業と連携して商用化を目指して研究開発を行う予定です。

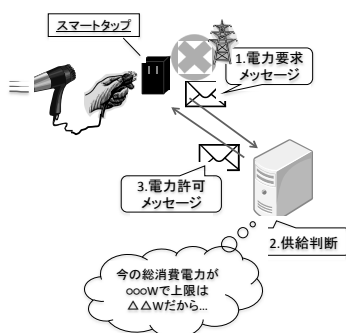
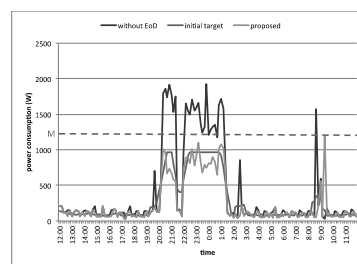
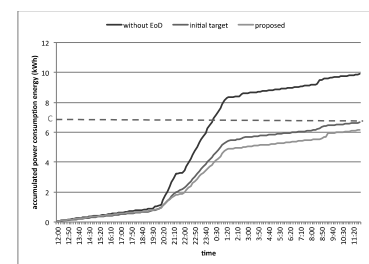


図1 EoD システム



瞬時的消費電力の変化  
M: 瞬時電力の制限値 (1200W)



積算消費電力の変化  
C: 瞬時電力の制限値 (30%減)

図2 EoD システムによる消費電力制御シミュレーション結果  
青線: 実生活で使用された電力  
赤線: 生活スタイルを守りつつ、積算電力量 30% 減 (右図 C)、最大瞬時電力 1200W (左図 M) の制限を満たすように調整された電力使用計画  
緑線: 生活シミュレーション結果

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>

「移動経路上の無線通信リソース共用メカニズムの研究」

スマートフォンに代表されるような高度なアプリケーションを利用可能なモバイル端末が普及したことで、モバイルネットワークのトラフィックはますます増加しています。携帯電話ネットワークは広い通信範囲を提供しますが通信容量は大きくないため、モバイル端末が発生させるトラフィックを携帯電話ネットワークのみで収容することは困難です。そこで、無線LANなど、分散的に配置された無線リソースを有効に活用して、トラフィックを分散的に収容する必要があります。無線LANは携帯電話ネットワークとは異なり、通信範囲はスポット的であるものの通信容量は大きいという特徴があります。

こういった分散的な無線リソースは、多数のユーザによって共用されます。本研究では、この問題を数学的に定式化しました。具体的には、個々のユーザは移動開始点（Start）から移動終了点（Goal）までに通信量を最大化したいと考えますが、あるユーザが無線資源を利用することで他のユーザが利用可能な無線資源は減少し、通信量も減少します。つまり、複数のユーザに全体として効率的に無線資源を利用させることができる何らかのメカニズムが必要になります。また、ユーザ間の公平性についても考える必要があります。

本研究は、複数ユーザによる移動経路上の無線通信リソース共用のための協力メカニズムを提案しています。このメカニズムでは、後から移動するユーザが自分より先に移動していた他のユーザの移動経路を考慮して、自分の移動経路を決定します。この時、全ユーザが移動開始点から終了点に得られる通信量の相乗平均が最大化されるように経路を決定します。相乗平均の最大化を目的にした理由は、全体的な効率とユーザ間の公平性を両立させるためです。通信ネットワークの研究分野では、従来から複数のパケットやフローを対象とした経路制御の問題に取り組まれています。また、自動車や歩行者のナビゲーションは実用化もされており、長きにわたって検討されています。本研究は、ユーザを無線のスポットに一定時間停止させる、といった制御も行う点でこれらの研究とは異なります。

図1に示すような単純な格子点マップを用いて協力的手法の有効性を定量的に検証しました。自身の通信量の最大化のみを行う非協力的手法を用いた場合およびすべてのユーザが最短経路のみを選択する場合との比較を行います。各ユーザは制限時間内に移動開始点から終了まで移動し、AP-1かAP-2に滞在している時間のみ通信が可能です。AP-2の経路を選択すると、図の $w$ 分追加の移動時間必要となり、APでの滞在時間が短くなり通信量が減少します。図2に追加移動時間に対するユーザの通信量を示しています。通信量は最大が1.0となるよう正規化されています。図から、協力的手法を用いた場合の通信量が最も多いことが分かります。また、追加移動時間が長い場合においても、非協力的手法に比べ高い有効性を示しています。非協力的手法、協力的手法の両方において、AP-1が混雑するとユーザはAP-2の経路を通るようになりますが、協力的手法を用いた場合の方が、全体の効率性と公平性を考えてユーザはAP-2の経路をより積極的に選択します。

以上のように、提案メカニズムは有効ですが、今後はユーザが示された経路に従わない場合など、より現実的なモデルでの評価が必要です。

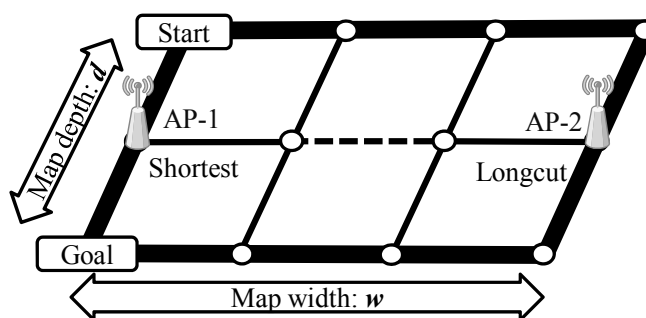


図1：格子点マップ

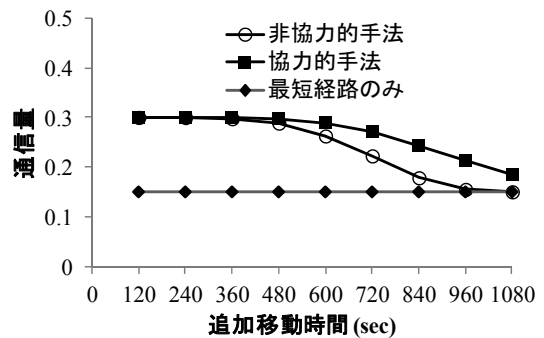


図2：追加移動時間に対する通信量

## 集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤高研究室）

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

## 「重点的サンプリングを用いたランダムウォークによる線形回路の高速解析」

電子機器の消費電力低減のため、集積回路（LSI）の低電源電圧化が進んでいる。一方で、微細化による配線抵抗の増加や電流密度の増大により電源電圧降下の影響が大きくなっている。電源網はLSIの性能や信頼性にかかわる重要な要素であり、設計の各ステップで電圧降下解析を何度も実施することで設計の最適化や検証が行われる。電圧降下解析は、抵抗、容量、電圧源、および電流源等で近似される線形回路解析であり、連立一次方程式  $Gv=i$  を解くことに帰着されるが、そのサイズが極めて大きくなることから、高速化と省メモリ化が強く求められている。ここで、 $v$  は連立方程式の解である節点電圧ベクトル、 $G$  はアドミタンス行列、 $i$  は電流ベクトルである。

我々は、ランダムウォーク（RW）法に着目して、実用上十分な近似解を高速に求める取組みを行っている。RW法は、上記連立方程式を行列  $G$  の分解により直接解くのではなく、図1の手続きに従い回路ネットワーク上をランダムに移動するサンプルを用いて、確率的に解く手法である（図2）。RW法には、高い並列性、省メモリ、インクリメンタルな解析が可能、という特徴がある。一方、精度がサンプル数の2乗に依存する収束性の遅さが課題となっており、高精度な解を求めるには計算量の削減が必要となる。

そこで、重点的サンプリングを用いる高速化手法を提案する[1]。重点的サンプリングでは、推定値の分散を小さくするよう移動確率を変更する。例えば図3において、図中の式の様に確率を変更すれば分散はゼロとなり、理想的には1つのサンプルを用いるだけで電圧の推定が可能である。任意回路に対する理想的な確率変更は、全節点電圧値を事前に知る必要があり現実には実現できない。ここで、少数のサンプルによるRW法で粗い解を高速に求められることを利用し、少数サンプルでの推定電位の計算と推定電位を用いた確率変更を交互に繰り返すことで逐次的に確率を更新することで、推定精度を効率よく向上できる。

商用プロセッサの電源網回路を提案手法と従来のRW法とで解析した計算時間を、解析節点数を横軸として図4に示す。回路特性から従来手法でも高速に解析できる#4以外の回路について、数桁の高速化が実現できている。図4 #1の回路について、解析精度（許容誤差）と処理時間の関係を図5に示す。提案手法では、精度を1桁改善するために必要なサンプル数  $M$  を  $M^2$  から確率変更の回数を  $r$  として  $(M/r)^{2r}$  のオーダーに改善しており、従来よりも大幅に少ないサンプル数で高精度かつ高速な解析が可能となる。

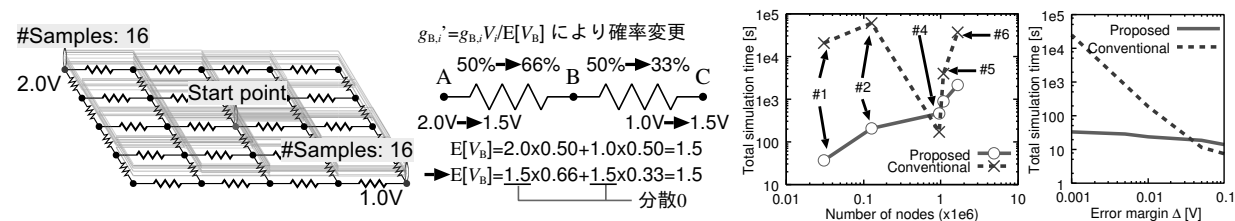


図2：サンプルのランダムな移動の軌跡の一例

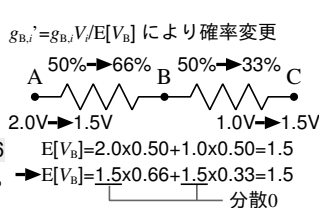


図3：重点的サンプリングにおける確率変更

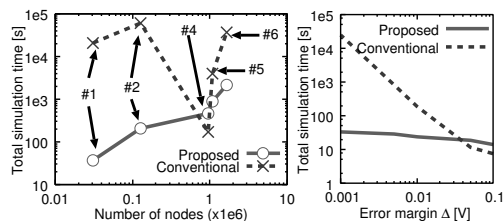


図4：解析時間の比較

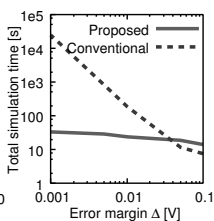


図5：解析精度と処理時間の関係

## 参考文献

- [1] T. Miyakawa, K. Yamanaga, H. Tsutsui, H. Ochi, and T. Sato, "Acceleration of random-walk-based linear circuit analysis using importance sampling," in *Proc. GLSVLSI 2011*, May 2011, pp. 211-216.

## 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-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「乳癌スクリーニングのための相関を用いた医用超音波微小石灰化検出法」

我々の研究室では、超音波を用いて安全・安価な乳癌スクリーニングを実現するための技術開発を行っている。現在乳癌スクリーニングにはマンモグラフィが用いられており、マンモグラフィは乳癌に併発する微小石灰化をX線で検出する。しかし、マンモグラフィには放射線被曝による発がんの危険性があること、若年女性では乳腺組織により微小石灰化の検出が困難であることから、一般的には若年女性には乳癌スクリーニングの対象外となっている。超音波診断装置を用いて微小石灰化を検出することにより放射線被曝の危険が無く安全に乳がん検診を行うことができ、若年女性を含めた安全な乳癌スクリーニングの実現が期待できる。

当研究室で開発している超音波微小石灰化検出技術は、超音波が乳房内の微小石灰化を通過する際に生じる超音波波形の変化を測定する。現在音響陰影の有無に基づいて医用超音波を用いた結石診断が行われているが、検出できるのは大きさ数mmの大きな結石のみである。音響陰影は他の超音波診断で用いる指標と異なり、結石表面での反射で生じる後方散乱波の信号強度ではなく、結石後方へ伝搬する超音波信号強度を調べている。小結石や微小石灰化は遮蔽の効果が小さく音響陰影は発生しないが、これは回折など前方散乱の効果により結石後方にも超音波が到達するためである。前方散乱波と送信波は位相が一致しないため、小結石後方へ伝搬する信号の強度変化が顕著となる前に位相の変化が大きくなる。よって、信号の強度変化よりも位相変化を検出する方が高い感度を得られる。当研究室では結石後方へ伝搬する信号の位相変化を検出可能するため受信信号の横方向の相関をとり、相関の低下により微小石灰化を検出する手法を提案し、有限差分時間領域法に基づくシミュレーション実験により微小石灰化を検出可能であることを示した[1]。また、商用の超音波診断装置を用いて微細銅線や微細銅円筒を埋め込んだ微小石灰化ファントムの断層像を作成し、提案法の有効性を確認した[2, 3]。図は微細ワイヤーを埋め込んだ石灰化ファントムの超音波断層像と、提案法で描出された微細ワイヤーである。音響陰影が無くワイヤー表面からの反射強度も大きくは無いが、相関を用いた提案法はワイヤーの検出に成功している。今後はより高度な信号処理によりさらに検出能を改善することを目標としている。

（日本生体医工学会 科学新聞賞受賞）

## 【参考文献】

- [1] Hirofumi Taki, *et al.* : J. Med. Ultrasonics. **37** (3) : 129-135, 2010.  
 [2] Hirofumi Taki, *et al.* : J. Med. Ultrasonics. **38** (2) ; 73-80, 2011.  
 [3] Hirofumi Taki, *et al.* : Proc of 17th International Meeting of ESGO, Milan, 2011.

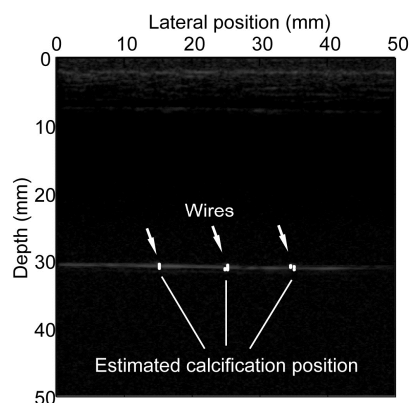
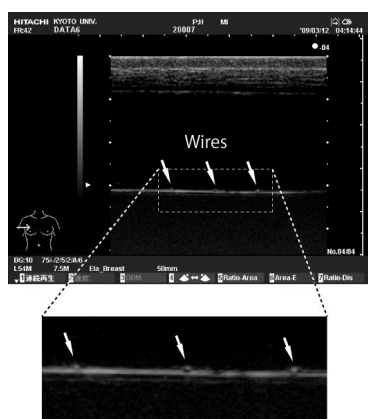


図 微細ワイヤーを埋め込んだファントムの超音波断層像(左)と提案法で描出された微細ワイヤー(右)

## 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>

### 「非軸対称トーラス型プラズマの磁場閉じ込めに関する理論・シミュレーション解析」

太陽のエネルギー源である核融合エネルギーを地上で利用する人工太陽炉を実現するには、燃料を制御熱核融合反応に必要な一億度以上に加熱する必要がある、このような状況では物質はプラズマ状態になっています。したがって、人工太陽炉実現には、このような超高温プラズマを閉じ込める必要があります。プラズマは荷電粒子の集合体なので、これを閉じ込める手段として磁場を用いた方法が検討されています。そのための方法として、主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トーラスプラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位（MHD 平衡）をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトーラスプラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、有望な磁場閉じ込め方式として挙げられます。我々の研究室では、これらの磁場閉じ込め超高温プラズマにおいて、プラズマ形状や磁場強度の非軸対称性が閉じ込め性能に及ぼす影響を実験解析と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

プラズマ中に大きな電流を流すトカマク方式では、理想的には回転対称性のある軸対称な磁場配位でプラズマを閉じ込めることができますが、実際の装置では主たるコイルが回転方向（トロイダル方向）に離散的に設置されているため、わずかではありますがトロイダル方向に磁場強度の非一様性が存在し、この非軸対称性が核融合反応生成物であるアルファ粒子や高エネルギー粒子の損失をもたらす恐れが指摘されています。また、プラズマの様々な制御のため、非軸対称な制御用コイルを設置したり、低放射化構造物として強磁性体を設置することでも非軸対称性がもたらされます。通常、これらの影響は摂動として軸対称磁気流体力学（MHD）平衡に重畳され様々な解析が行われていますが、これらは MHD 平衡そのものに影響を与える恐れがあり、三次元 MHD 平衡解析が必要とされます。

一方、基本的には外部コイル系に流す電流のみで閉じ込めに必要な磁場構造を作り出すヘリカル系プラズマでは、閉じ込めに適した軸対称磁場構造は外部コイルだけではできないため、最初から非軸対称な構造を持っています。このため、ヘリカル系プラズマ研究の当初から三次元 MHD 平衡をどのように解析するかが議論されており、近年は数値計算手法の進展とコンピュータの発展により精度の高い三次元 MHD 平衡計算プログラムが開発されています。また、得られた MHD 平衡をもとに MHD 安定性、新古典輸送解析など様々な解析が行われています。

私たちの研究室ではこのようなヘリカル系プラズマに対する解析で培われたノウハウを活かして、トカマクプラズマの非軸対称性に起因する影響を調べるとともに、より高性能なヘリカル系磁場配位の探求を行っています。

## エネルギー材料学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

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

## 「ビット直列・ワード並列方式機能メモリにおける検索型ソーティング」

ランダムアクセス可能な不揮発性半導体メモリとして実用化が期待されている強誘電体メモリ (FeRAM) の新規応用分野開拓の一例として、情報処理における基本動作である検索・ソートの高効率化について回路シミュレーションを含む理論的研究を行っている。

強誘電体メモリには各種セル構造が知られている。本研究ではチェーン FeRAM のメモリセル構造を主に想定した調査研究を行っているが、これは本研究で考えている機能メモリでは局所データ線が行方向にまた局所ワード線が列方向に配列するがチェーン FeRAM も同じ配列となっている。従って、メモリセルおよびマトリクス構造はそのままデコーダなどの周辺回路を追加すればよいので機能メモリを研究する上で都合のよいセル構造になっているという観点からである。

今までの研究成果によりビット直列・ワード並列方式機能メモリを用いることにより検索・ソートの演算回数が大幅に減少することが分かった。処理時間が演算回数で表されるということは計算機の構成面からいえば機能メモリやメインメモリをキャッシュメモリと同等の位置に置くことになるが、これらを CPU や MPU などのプロセッサまたはシステム LSI 上に集積することは規模や性能面でかなりの制限がある。メインメモリはともかく機能メモリをキャッシュメモリと同等の性能を期待するにはスケールリング則に従ったダウンサイジングが必要であるがそのためには強誘電体キャパシタの分極が面積に依存するが膜厚に依存しないので 2 次元構造に代わり 3D 構造にする方法が有力である。

しかし一方で現実のシステムを考えると機能メモリやメインメモリをプロセッサとバスラインで接続するのが実用化への近道である。バスライン接続にもいくつかの方式があるが機能メモリではヒットしたデータのアドレスを CPU に返す機能が必要になるのでアドレス/データバス多重化方式 (PCI 機能搭載) プロセッサを想定して考え、機能メモリやメインメモリとプロセッサ間との伝送に関して電力遅延積 (PDP) は同等と考える。

一回当たりの演算および伝送にかかる PDP を比較するとそれは負荷容量の大きさの違いに等価であり、伝送を考慮する必要のある場合演算回数よりも伝送回数を少なくする方式が望ましいことになる。伝送回数を少なくするソーティングアルゴリズムについて機能メモリを用いた検索とソート組み合わせ方式を考え、従来の演算回数を少なくするアルゴリズムでは伝送回数が少なくとも  $O(n \log n)$  回必要であるのに対し、 $O(n)$  回に減少することが出来ることを見出し、それを定量的に評価するため伝送線の駆動にトライステート出力バッファを用いた系および検索・ソートを同時に行うロジックを ADL で設計した内部演算回路の両者について SPICE シミュレーションしている。

究極的にはプロセッサ上あるいはシステム LSI 上などに機能メモリを、できればメインメモリも、集積することが望ましく、今後も 3D 構造、機能メモリの分割処理アルゴリズムやメモリ容量最適化などより一層の研究が要求される。



## 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](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

### 「核融合反応を利用した高エネルギー粒子の発生と利用」

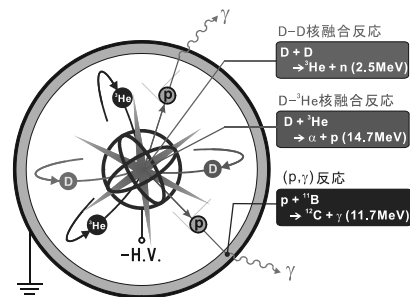
本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・高精度に制御することにより 21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、加熱・電流駆動システムの開発、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生や、ここで紹介する小型の核融合装置を用いた高エネルギー粒子の発生と利用の研究を行っています。

核融合反応の結果として生成される陽子や中性子などの粒子は極めて高い運動エネルギーを持ちます。例えば、ヘリウム-3 と重水素との核融合反応を利用すると、従来は陽子加速器によってしか得られなかった 14.7 MeV もの高いエネルギーを持つ陽子を生成することができます。このような核融合反応は僅か百 keV 程度の運動エネルギーをヘリウム-3 や重水素のイオンに与えることで生起できます。つまり、核融合エネルギーを利用することで、外部から与えるエネルギーを遙かに超える高いエネルギーの粒子を右上図のような小型装置で生成することができます。

この装置は、プラズマの慣性静電閉じ込め (Inertial Electrostatic Confinement: IEC) と呼ばれる方式で、重水素や三重水素、ヘリウム-3 などのイオンを中心に加速・集束して核融合反応を起こさせるものです。球形の真空容器 (陽極) とメッシュ状球殻陰極との間のグロー放電で生じたイオンは陰極に向かって加速され、メッシュ状陰極の中心に集束して核融合反応を起こします。この IEC 方式の大きな特徴は、プラズマを加熱するのではなく、静電界で直接的にイオンを加速していることにあります。そのため、核融合反応の生起に必要なエネルギーを比較的容易にイオンに与えることができます。残念ながらイオンや電子の閉じ込め性能は原理的に低いために効率 (核融合出力/投入電力) は低く制限されますが、小型で簡便な装置で核融合反応を起こすことができるため、発電以外の様々な利用が可能です。例えば、重水素同士、重水素とヘリウム-3、ヘリウム-3 同士などの核融合反応の基礎研究が、この IEC 方式の装置で行われています。これらの核融合反応は、最も簡単に起こる重水素と三重水素との核融合反応と比べて、安全性などの面で優位であるものの技術的難易度が高く、先進燃料核融合と呼ばれています。

我々の研究室では、約 15 年前に我が国では初めて IEC 方式の実験研究に着手し、動作メカニズムの解明や高性能化の研究、先進燃料核融合の実験やその計測技術の開発などを進めてきました。現在では、毎秒 1 億回を超える重水素同士の核融合反応を定常的に起こすことが可能になり、発生した高エネルギー粒子の利用、その中でも特に中性子のセキュリティー分野などへの応用の研究も進めています。

核融合を中性子発生源として利用することの利点は、放射性物質を使わず安全に、定常から数マイクロ秒の単パルスまで自由度の高い時間構造で、しかもエネルギーの揃った中性子束を発生できることにあります。IEC 方式を用いれば、このような中性子発生がポータブル装置で可能です。我々は、このような特長を有する IEC 中性子源を用いた爆薬探知技術の開発を進めてきました。この技術は、従来の金属探知機や X 線検査機器では検知が困難なプラスチック爆弾や禁止薬物などの検知への応用が期待されています。また昨年度からは、テロリストによる核弾頭の国内への持ち込みを阻止するための特定核物質探知装置の開発にも取り組んでいます。



慣性静電閉込 (IEC) 核融合装置

基礎プラズマ科学講座 核融合エネルギー制御分野（水内研究室）

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

「磁場閉じ込め核融合プラズマの高性能化のための Nd:YAG トムソン散乱計測の開発」

当研究室では磁場閉じ込め核融合装置によって核融合炉を実現するために磁場閉じ込めプラズマを制御する研究を行っています。プラズマ内部の温度、密度を制御することはプラズマの閉じ込め性能の向上に重要な課題です。そのためにはプラズマ内部の温度分布、密度分布を知ることが必要です。プラズマ閉じ込め性能の改善は放電中に非常に早いタイムスケールで突然起こるものがあります。そういった現象をとらえるには高速にプラズマ中の分布計測が行える計測器が必要です。

そこで高繰り返し発振が可能な Nd:YAG レーザーを用いたトムソン散乱計測装置の開発を行ってきました。トムソン散乱計測はプラズマ中にレーザーを入射し、プラズマ中の電子からのトムソン散乱光を計測することによってドップラーシフトから温度を散乱光量から密度を知る方法です。当研究室の研究対象である核融合プラズマは非常に高温（1keV 約一千万度）ですのでプラズマ中に計測器を挿入して測定することが難しく、またプラズマから発生する光も少ないのでプラズマ中にレーザーを入射する能動計測が求められています。

今回、開発しているトムソン散乱計測装置はプラズマの斜め下方からレーザーを入射しプラズマからの後方トムソン散乱光を水平方向から検出する配置を採用しています。検出効率をあげるため大型の凹面鏡（直径 80cm）によって散乱光の集光を行います。25 台のポリクロメータ（分光器）でレーザー光のドップラー広がりを見測することによって空間 25 点、約 1cm の空間分解能でプラズマ分布を計測することができます。放電時間、約 200ms の Heliotron J 装置で生成されるプラズマを計測するため 550mJ、50Hz の Nd:YAG レーザーを二台使用しレーザービームを合成することによって 100Hz（10ms）の時間間隔でプラズマ分布の時間発展を計測します。

トムソン散乱計測法の歴史は古くレーザーが開発されて間もなく高温プラズマに適応する研究が始まりましたので、今では古典的な計測法です。しかし電子のトムソン散乱断面積は小さく高パワーのレーザー装置を用いたとしても微小光の検出技術が不可欠です。10ns 程度のパルス幅の短いレーザーを用いるため高速信号処理技術も必要になってきます。したがってプラズマの高性能化に必要な計測が行えるように計測器の性能を向上させるためには新しい研究開発が必要です。今回散乱光を分光計測するために開発したポリクロメータは干渉フィルターを用いた方式で検出器としてアバランシェフォトダイオード（APD）を使用しています。通常の APD は波長 1μm 以上の遠赤外領域では量子化効率が低下するために Nd:YAG レーザーのトムソン散乱計測には用いることができません。今回使用した APD は、この帯域の量子化効率を増強してあります。ポリクロメータの構造を図 1 に示しました。散乱光はカスケード方式によりリレーレンズによって 5 つのチャンネルに分配されます。最後のチャンネルはポリクロメータの較正に用います。最新の高速オペアンプによる前置アンプが APD の近くに組み込まれており信号を高速に処理することができます。

干渉フィルターの透過帯域の設計は実際の計測をシミュレーションするプログラムを作成して行いました。その結果を図 2 に示しています。目標とする 10eV から 10keV のプラズマ温度領域に対して十分な量の検出光子数が検出可能で、またプラズマの温度、密度に対して 3% 以下の測定精度で計測可能という結果が得られています。

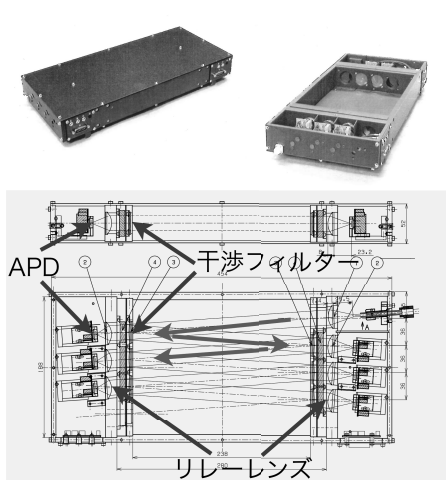


図 1 トムソン散乱計測のためのポリクロメータの構造

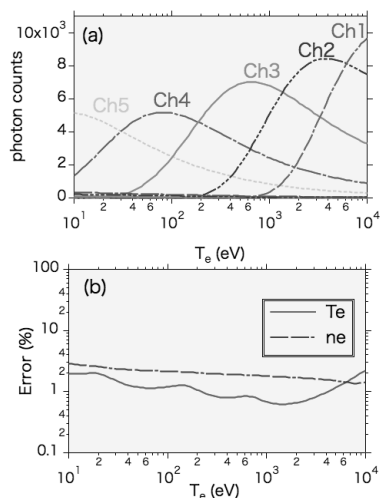


図 2 ポリクロメータの性能シミュレーション

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>

「航空安全運航のためのウィンドプロファイラーによる乱気流検出・予測技術の開発」

航空機の安全運航に重大な支障をもたらす要因として、種々の気象現象が挙げられるが、中でも大気中の乱気流が原因となっている事故件数は全体の半数以上であり、特に重傷者を伴う事故原因の6割を乱気流が占めている。乱気流は、航空機自体に防止装置が装備可能な着氷現象などとは異なり、機体の改良・改善で対処し得るものではないため、乱気流の発生を早く検出・予測し、航空機が回避行動を取る、あるいは乗員・乗客がその揺れに備える必要がある。現状では空港周辺を除いて乱気流の観測データはパイロットからの機上気象報告 (Pilot Weather Report; PIREP) のみであるが、PIREP ではパイロットの主観も入るため、精密に乱気流の有無を常時把握できる新たな観測機器の開発が待たれている。東京国際空港の再拡張事業や成田国際空港の滑走路延長事業等による航空交通量の大幅な増大・過密化も見込まれ、航空機の安全運航を維持していくことが益々重要課題となっている。

乱気流の有効な観測手段として、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ウィンドプロファイラー（晴天大気観測用測風レーダー）があり、当研究室では、その技術開発や気象観測への応用研究を行っている。現在、図1に示すように、(a) 地上付近から航空機の巡航高度（約10km）までを一挙に観測可能な次世代の標準となる1.3GHz帯ウィンドプロファイラーを開発する、(b) (a)で開発されたウィンドプロファイラーの観測データから、乱気流を定量的に検出する手法を確立する、(c) (b)のウィンドプロファイラーによる乱気流観測データとメソスケール気象予測モデルの結果を比較し、乱気流の発生予測精度を向上させることを目指して、情報通信研究機構、気象庁、日本航空との共同研究が進行中である。

気象庁が2001年に気象予報業務のために現業運用を開始したウィンドプロファイラー31台から成るネットワーク（Wind Profiler Network and Data Acquisition System; WINDAS）では、当研究室で開発された高度5km程度までを観測可能なウィンドプロファイラー（下部対流圏レーダー）が使用されている。本研究で開発されるより高性能化したウィンドプロファイラーが、数年後に更新の時期を迎える次期WINDASのプロトタイプになると期待される。また、本研究により、乱気流の予測精度が向上することで、航空機の安全な運航に寄与するものと期待される。

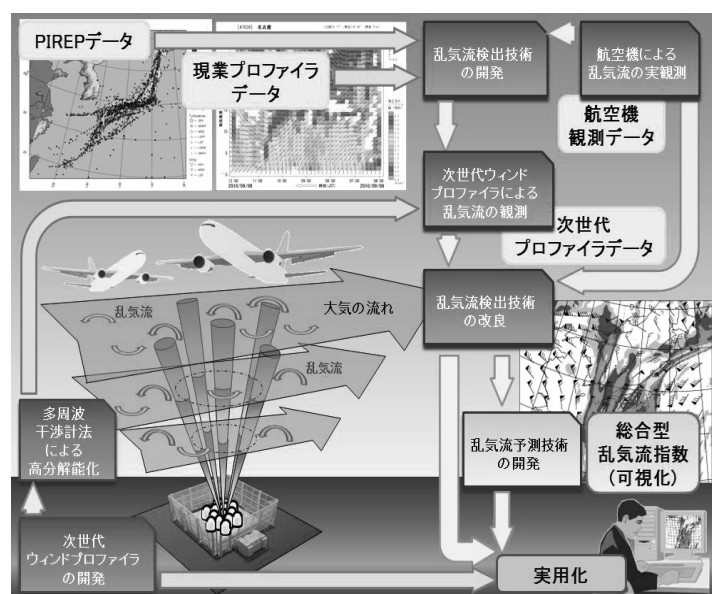


図1. ウィンドプロファイラーによる乱気流検出・予測技術の開発

## 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>

### 「木質バイオマス前処理用マイクロ波照射装置の研究開発」

当研究室では、マイクロ波をエネルギー伝送媒体として利用した宇宙太陽発電所の研究開発や地上でのマイクロ波無線電力伝送応用の研究開発を行っている。更に2004年度の生存圏研究所発足以降は、マイクロ波を利用した新たな融合研究領域として、マイクロ波照射加熱による材料創生に関する研究開発を行なっている。本稿では、木質バイオマスからのバイオエタノール生成を目指した前処理用マイクロ波照射装置の研究開発について述べる。本研究開発は、本学農学研究科に属する生存圏研究所バイオマス変換分野および鳥取大学と民間との共同で実施しており、2008年度より現在までNEDO／バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発に採択されている。

木質バイオマスは主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンと呼ばれる組織で構成されており、バイオエタノール原料としては主にセルロースが利用される。しかし、木質バイオマスはリグニンがセルロースへの酵素糖化を阻害するような構造をもつため、何らかの手法によりセルロースを露出して酵素糖化率を高める必要がある。この処理プロセスのことを「前処理」と呼び、前処理の高効率化・低コスト化が木質由来バイオエタノールの商業化にとって重要な課題となる。この課題に対し、本研究開発ではマイクロ波を用いた誘電加熱に着目した。誘電加熱は電磁波が物質内に伝搬・浸透しながら被加熱物を加熱するため物質内部を直接加熱できるという利点があり、マイクロ波照射加熱による前処理の短時間化が期待できる。本研究開発の目的は、木質バイオマス前処理用マイクロ波照射装置の開発による前処理の高効率化・高速化・量産化・低コスト化である。研究開発方法としては、被加熱物（木質バイオマス、水もしくは有機溶媒、酸の混合物）の誘電率測定、誘電率測定データを取り込んだ3次元電磁界シミュレーションによる装置設計、プロトタイプによる実証試験を実施している。

図1に開発した連続式マイクロ波照射装置プロトタイプの写真を示す。連続式マイクロ波照射装置は、被加熱物が金属パイプ（図中央の金属直方体内部）を通過する間にマイクロ波を連続的に照射することが可能である。また、複数のマイクロ波照射口を設置することで、被加熱物の処理量、流量、処理時間等に応じたマイクロ波照射部の増減が可能である。本プロトタイプのマイクロ波源としては、マイクロ波出力5kWの2.45GHz帯マグネトロンを3台用い、反応温度に応じた電力調整を行っている。現状の装置能力としては、生成されるエタノールのエネルギー量に対して投入される電力消費量の方が1.6倍程度となっており、電力消費量の低減が喫緊の問題である。この問題に対する解決策として、被加熱物中の木質バイオマス重量比の改善、および装置全体の断熱構造の見直しや熱回収システムの検討が挙げられる。

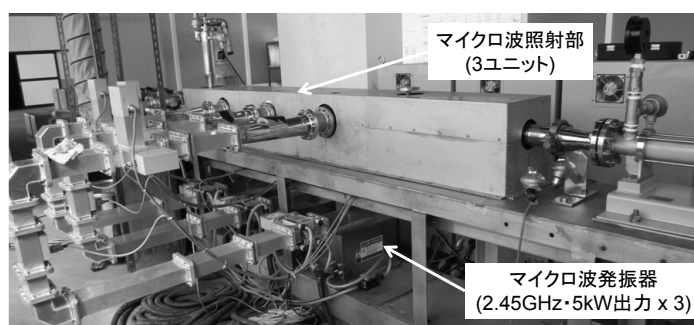


図1 連続式マイクロ波照射装置プロトタイプの写真

#### 【参考文献】

T. Mitani, M. Oyadomari, H. Suzuki, K. Yano, N. Shinohara, T. Tsumiya, H. Segoe and T. Watanaebe, "A Feasibility Study on a Continuous-Flow-Type Microwave Pretreatment System for Bioethanol Production from Woody Biomass", 日本エネルギー学会誌, vol.90, no.9, pp.881-885, Sep. 2011.