

## 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」のページに掲載)

## 電気関係研究室一覧

### 工学研究科

#### 電気工学専攻

複合システム論講座 (荒木研)

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (島崎研)

電磁工学講座 超伝導工学分野

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 (大澤研)

#### 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 (石川研)

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野 (橋研)

電子物性工学講座 半導体物性工学分野

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

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)

#### 附属イオン工学実験施設

高機能材料工学講座 クラスタイオン工学分野 (高岡研)

### 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

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 (森広研)

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 (中村研)

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 (佐藤研)

#### システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野

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 (吉川榮研)

#### 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 (近藤研)

基礎プラズマ科学講座 核融合エネルギー制御分野

#### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野 (野澤研) ☆

応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野 (塩津研)

### 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 (吉川潔研)

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

診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野 (深尾研)

診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (津田研)

開発創成研究系 宇宙圏電波科学分野 (松本研)

開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研)

開発創成研究系 生存圏電波応用分野 (橋本研)

### 京都大学ベンチャービジネスラボラトリー(KU-VBL)

### 国際融合創造センター

#### 融合部門

ベンチャー分野 §

#### 創造部門

先進電子材料分野 (藤田静研)

### 高等教育研究開発推進センター

情報可視化分野 (小山田研)

### 学術情報メディアセンター

複合メディア分野 (中村裕研)

注 § 工学研究科電子工学専攻橋研と一体運営

複合システム論講座（荒木研究室）

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

むだ時間を含むシステムに対する状態予測制御系

自動制御を行う際に制御対象となるシステムには、操作の伝達や測定量の検出に要する時間といった「むだ時間」が存在する場合があります。このようなむだ時間を含むシステムでは、行った操作の結果がすぐにわからないため、単純な制御方法では高い性能を持つ制御系を構成するのが困難です。本研究室では、むだ時間を含むシステムに対する制御法であるスミス制御法、状態予測制御法、モデル予測制御法などを用いた制御系の設計法や解析法に関する研究を行っています。

ここでは、上にあげた制御法のうち、状態予測制御法に関する研究について紹介します。状態予測制御法は、システムの動特性を表す微分方程式を利用してシステムの状態をむだ時間分だけ予測することにより、むだ時間がない場合の状態フィードバック制御と等価な制御を実現する方法です。

状態予測制御系の設計法としては、目標値応答と外乱応答を異なるゲインで調整できる2自由度構成（図1）を与え、目標値応答を決めるゲイン（ $F_0$ と $H_0$ ）と外乱応答を決めるゲイン（ $G$ ）をそれぞれ独立な2次形式評価関数に基づいて最適に設計する方法と、オブザーバについても最適に設計する方法を提案しました[1]。この結果は、むだ時間を除いた制御対象に対して通常の最適設計法でゲインを決めて状態予測制御系を構成すれば、むだ時間を含む制御対象に対して最適な制御系を構成できることを示し

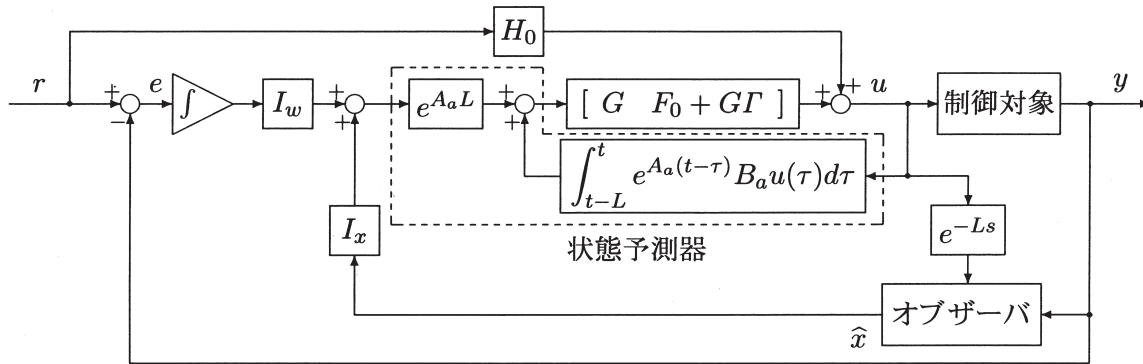


図1. 状態予測型2自由度サーボ系

ています。

また、状態予測制御系におけるモデルの誤差の影響を系の安定性に注目して解析するロバスト安定解析法も提案しています[2]。この方法は、制御対象のゲインとむだ時間のみにモデル化誤差があるとして、系が安定であるためのモデル化誤差の許容範囲を図式的に求めるものであり、ゲイン-むだ時間平面上での安定余裕を得ることができます（図2）。

本研究室で行っている制御技術の医療応用の研究では、生体の薬剤に対する反応などにむだ時間が含まれるため、上で述べた設計法や解析法を利用して望ましい特性を持つ制御システムを構成しています。

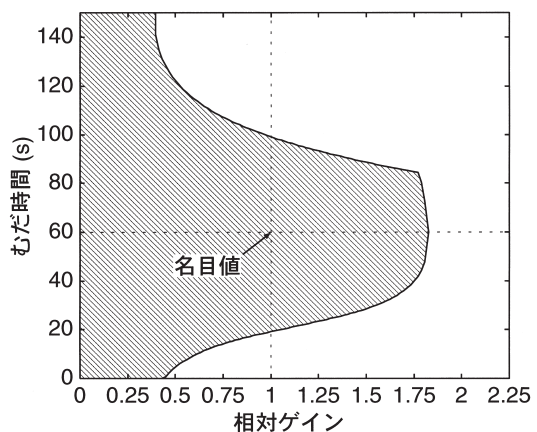


図2. ゲイン-むだ時間平面上の安定領域の例

参考文献

- [1] E. Furutani, T. Hagiwara and M. Araki: IEE Proc. —Control Theory Appl., 149-5, 365/378 (2002)
- [2] E. Furutani and M. Araki: Int. J. Robust and Nonlinear Control, 8-10, 907/919 (1998)

## 電磁工学講座 超伝導工学分野

<http://www-lab04.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.j.html>

## 「高温超伝導かご型回転子を適用した高機能誘導電動機の開発研究」

かご型誘導電動機は、分数馬力電動機から鉄道車両用主電動機まで広く使用されており、電動機の代名詞的存在として位置付けられています。本研究では、上記電動機の2次側かご型巻線を高温超伝導化することにより、更なる高機能化を目指しています。

高温超伝導材料の大きな特長は、ある臨界値（臨界電流）まで抵抗ゼロの電流を流せること、および臨界値以上では通電電流によって抵抗が大きく変化することにあります。従って、高温超伝導材料で閉回路を作ると、臨界電流以上では高抵抗回路になるとともに、それ未満では抵抗ゼロの電流が流れ続けます（これを永久電流モードと呼びます）。また、永久電流モードでは閉回路中に鎖交する磁束は捕捉されます。そこで、高温超伝導材料で誘導電動機のかご型2次巻線を構成すると、始動時の大きな誘導電流に伴う高抵抗によって大きな始動トルクが得られます。さらに、加速とともに誘導電流が減少し、同期速度付近において高温超伝導巻線が永久電流ループを形成することにより、誘導電動機でありながら大きな同期トルクが得られるという高機能化が実現されます。即ち、すべり運転と同期運転の両立が可能となるわけです。このことは、既に非線形等価回路解析によって理論的に明らかにしており、従来型誘導電動機に比較して大きな始動・加速トルクが得られると共に、同期トルクの定量的評価を行いました [1]。そこで図1のように、市販されているビスマス系高温超伝導テープ材を使用した高温超伝導かご型回転子を試作し、回転試験を行いました。その結果、見事に同期回転可能であることを確認しました（図2） [2]。今後は、負荷試験等を行い、詳細な特性検証ならびに最適設計を行っていきたいと考えています。

## 参考文献

[1] G. Morita, T. Nakamura and I. Muta, submitted.

[2] T. Nakamura, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, accepted.

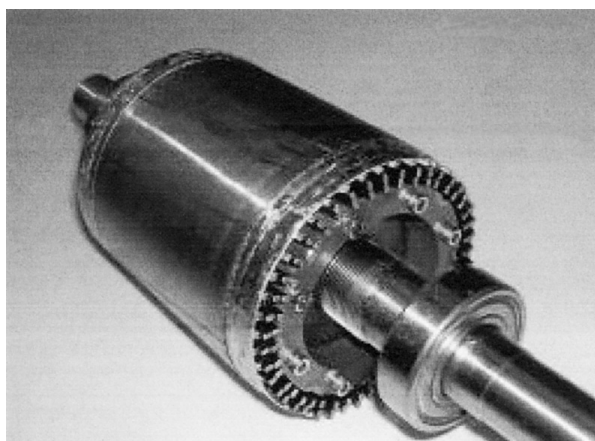


図1. 試作した高温超伝導誘導電動機回転子

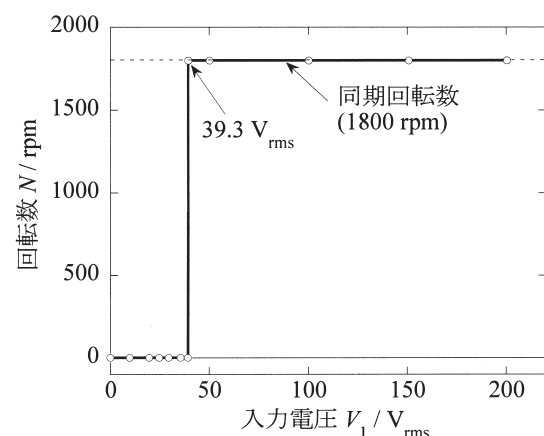


図2. 軽負荷における高温超伝導誘導電動機の回転特性 [2]

## 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://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab03/>

## 「脳機能イメージング技術の統合と高度化」

人間は自らの存在の意味を考え悩む地球上唯一の生物である。さて、それでは考えるとはどのようなプロセスなのだろうか。また、自らの存在といった“意識”に関わる脳のメカニズムはどのようなものなのだろうか。このような脳の高次機能を理解するには、脳のどこが、どのようなタイミングで、如何に、ということをつまらかにすることが必要である。そこでは計測技術をはじめ、コンピュータ技術、信号処理技術、画像技術といった工学分野の研究・開発が重要な役割を担っており、近年の脳科学の進展は、様々な技術革新による新たな非侵襲脳機能計測・解析法の寄与によるところが大きい。

現在普及している脳機能計測法は、脳神経活動に伴う電磁気量を計測する方法と脳神経活動に伴って変化する血行動態を計測する方法に大別される。前者には脳波（EEG）と脳磁界（MEG）、後者にはポジトロン断層撮像法（PET）、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）、近赤外分光法（NIRS）がある。この他に、局所的磁界に伴う渦電流により脳神経活動を抑制することで脳機能を調べる経頭蓋磁気刺激法（TMS）がある。各計測装置は個別に技術開発が行われている。時間分解能の優れたEEG、MEG計測装置では多チャンネル化による空間分解能の向上が図られている。加えて、MEG計測においては液体窒素温度で動作する高温超伝導SQUIDによる装置の開発が望まれている。fMRIでは、印加する静磁界の増大により更なる空間分解能の向上が図られると共に、静音化やBOLDに代わる機能計測法、例えば perfusion imagingによる血流量変化に基づく機能計測などの試みがある。また、NIRSでも多チャンネル化と信号解析の開発が進んでいる。しかし、各計測法には計測原理に由来する避けられない弱点と限界があり、一つの計測法のみにより、時空間的に変動する脳機能の複雑な仕組みを解明することは困難である。

こうした背景から、近年、異なる計測手法を組み合わせることにより信頼性の高い脳機能計測を行なおうとの機運が高まってきている。基本的には時間分解能の高い手法と空間分解能の高い手法を組み合わせた同時計測が望ましい。しかし、同時計測に関しては計測原理ならびに装置の制約により必ずしも全ての手法が可能な訳ではない。そこで、できる限り実験パラダイムを近づけて異なる手法により計測したデータから、共通の活動を捉えようとするマルチモーダル計測が行われる。我々の研究室では、これまで主に視覚的認知に関わる脳活動をEEG、fMRI、MEGにより計測・解析し、相互の結果を比較・検討するというアプローチでその機構を探ってきた。現在さらに、このマルチモーダル計測を一步進めて、異なるモダリティーによる計測データを同時に扱う解析や、計測原理の異なる装置そのものを融合・一体化するといった脳機能イメージング技術の統合・高度化をめざし、MEG、fMRIならびにMR-拡散テンソル画像の統合解析法の開発を進めている。

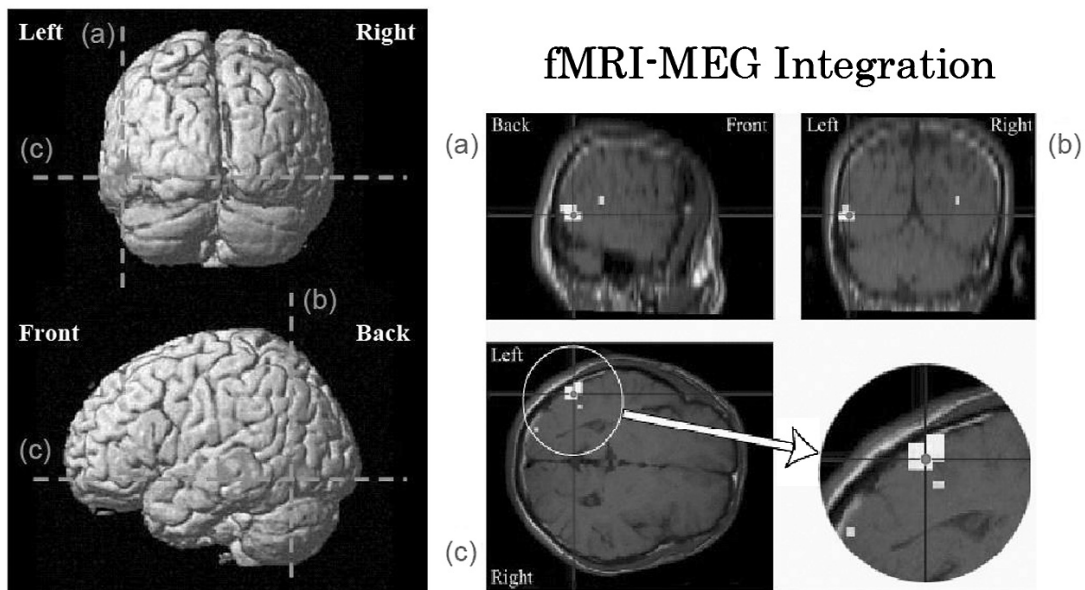


図1. 機能的MRIとMEGの解析により運動刺激を観察中に活動する脳部位をイメージングした例

## 電気システム論講座 電力システム分野（大澤研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/outside/annai/teacher.php?id=42>

### 「GPSによる長周期電力動揺の安定性監視」

わが国の60Hz系統には3秒程度の長周期動揺があり、系統の安定性を決める大きな要因になっています。そこで、この動揺の安定性を測定するため、図1のように九州と関西に二つのPMU（phasor measuring unit）を設置しています。二地点間の電圧位相差の時間的な変動を解析することにより、動揺周波数およびそのダンピングを求めることができます。

図2に最近の測定結果を示します。比較のため、昨年7月28日の測定結果も示しています。夏季は需要が増えるため、動揺周波数およびダンピングが下る傾向にあります。いずれの測定結果もダンピングがかなり低下しているのがわかります。このように周波数やダンピングが変化するにはいくつかの要因が関わっています。

図3と4に需要電力と連系線潮流との関係を示します。昨年5月9日、7月28日、11月17日のデータを中西地域各社からご提供いただきました。図から需要電力や連系線潮流の増加にともなって動揺周波数やダンピングが低下していくのがわかります。図には系統を244機で表した詳細な固有値解析の結果も示しています。送電余裕（ATC）の算出に応用できればと考えています。

- [1] N. Kakimoto, M. Sugumi, T. Makino, K. Tomiyama, "Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement", IEEE Trans. on Power Systems (submitted).

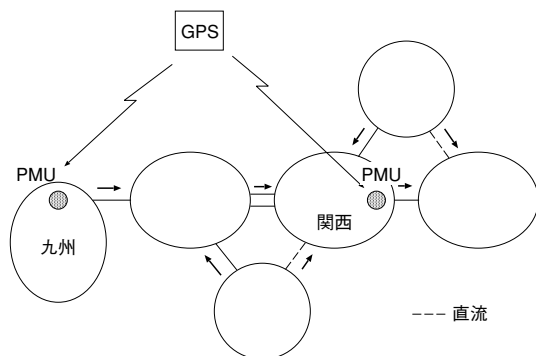


図1. 測定方法

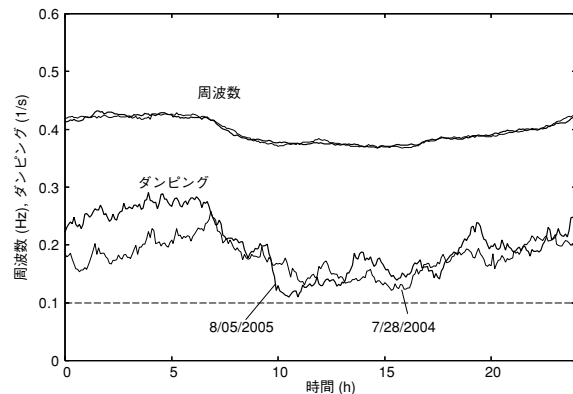


図2. 測定結果（8/5, 2005）

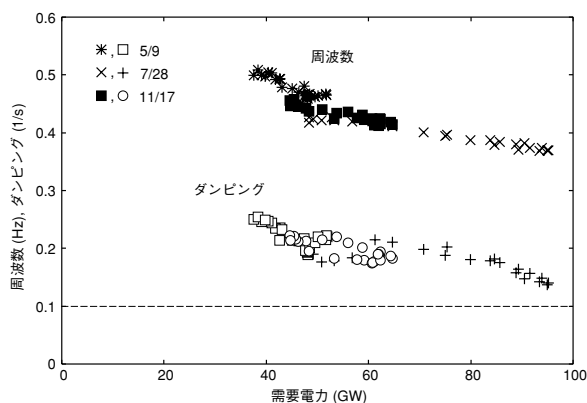


図3. 需要電力の影響（2004）

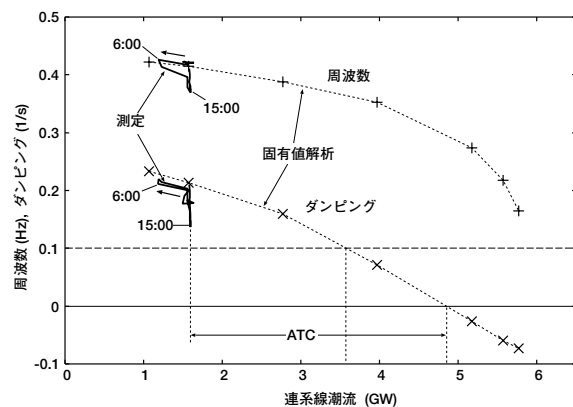


図4. 連系線潮流の影響（7/28, 2004）

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野（橋研究室）

<http://www-lab11.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「マイクロプラズマで構成されたアクティブ型電磁波制御デバイス」

“マイクロプラズマ”とは、ミリメートル以下の微小なプラズマを総称しており、プラズマディスプレイ内のマイクロプラズマのみならず、現在では各種マイクロ加工プロセス源・携帯型マイクロ分析源等に適用範囲を広げて研究が盛んに行われています [1]。当研究室では、プラズマディスプレイ・微小光源・材料プロセス源としての研究に加えて、マイクロプラズマの位置形状制御性と高電子密度である特性に着目した新規デバイス創生の研究に取り組んでいます。具体的には、電子密度の外部制御により、マイクロ波からミリ波・サブミリ波帯での電磁波制御のための誘電率可変媒質としての可能性を追求しています。

まず、マイクロ波の制御に関しては、マイクロストリップ線路上へのミリメートル長のプラズマ生成による電磁波制御素子の提案を行っています。その第一歩として、T分岐素子の1分岐をプラズマで形成し、素子の存在そのものがオンオフ可能な“動的”デバイスが生成可能なことを示しました。図1 (a) にプラズマ分岐が生成されてT分岐が2個形成されている状態を示します。そのとき、図1 (b) のように、プラズマ分岐電流に呼応し、線路上のマイクロ波 (11 GHz) 透過電力の約35%の減衰が確認されました。このように、この動的T分岐素子は有意な大きさの変調作用を示しています。様々な機能性パターンを設計することで、マイクロストリップ線路上の高速可変パターンの形成による新規アクティブ型素子への可能性が拓けてきます。

また、ミリ波からサブミリ波帯の電磁波に対しては、伝播領域にマイクロプラズマの集合体を空間的に制御しながら設置し、電磁波の様々な制御を試みています。まず四角柱状のプラズマを2次元正方格子状に配列させ (図2 (a))、誘電率の周期構造状態を作り出し電磁波の透過現象を測定しています。図2 (b) に、2次元波数面上での等周波数線の理論計算結果と、面上2点での電磁波 (TEモード) の透過波形を示します。格子列方向 (x方向) の場合の伝播について、通常はプラズマ中での減衰を受けて検出透過波強度は減少しますが、周波数が33 GHz (電子密度 $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ の場合のプラズマ周波数に相当) に近づくと、逆に強度が増加します。これは、等周波数線との対応より、電磁波が $k_x$ 軸方向 (x方向) の単一指向性となることによると解釈できます。今後は、マイクロプラズマの2次元配置を機能性を考慮して設計し、時間制御性を利用してアレイのアクティブマトリクス駆動を行い、電磁波出力の強度・周波数・指向性等のパラメータを自由自在に制御できるアクティブ型多機能電磁波アンテナの可能性を追求していきます。

[1] 特定領域研究「プラズマを用いたマイクロ反応場の創成とその応用」<http://plasma.kuee.kyoto-u.ac.jp/tokutei429>.

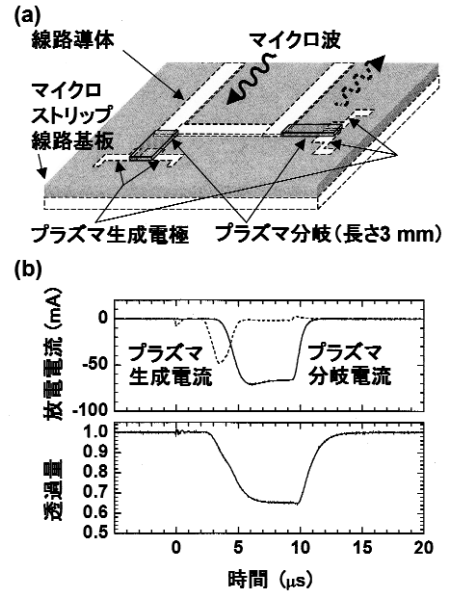


図1 (a) 動的T分岐素子。(b) 放電信号と透過マイクロ波強度の時間変化

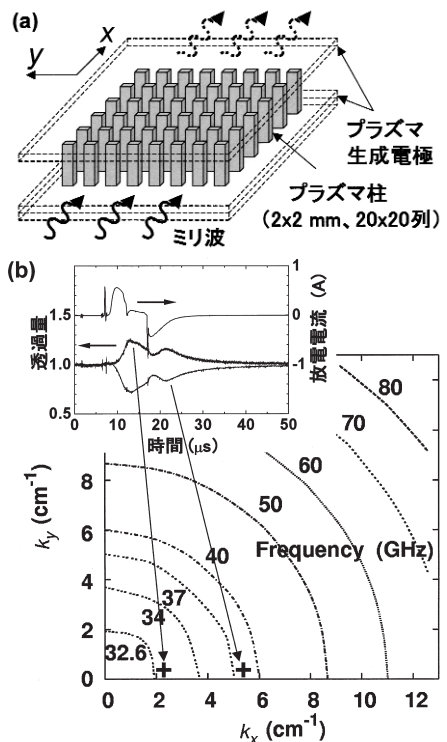


図2 (a) プラズマの2次元アレイ構造とミリ波伝搬制御の概念。(b) 放電信号と透過ミリ波強度の時間変化、および2次元波数面上における等周波数線表示。

## 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/>

## 「走査型プローブ顕微鏡による動作中MOSFETにおける2次元キャリア密度分布解析」

## 1、序

半導体デバイスの微細化に伴う短チャネル効果の発現により、次世代電子デバイス開発の進展が妨げられ、それらの不良動作のメカニズム解明が急務となっている。デバイスの微視的な内部構造の理解から巨視的な電気特性の究明を目的として、これまで電子顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡をはじめ、様々な顕微鏡法が種々の物性を計測可能な手法として提案されてきた。しかし、それらは通常、デバイスの電気特性評価・性能評価とは独立して行われてきたため、これらの相関関係が十分理解されておらず、1次元的な物理モデルに基づく計算機シミュレーションに頼る場合が多かった。そこで、当研究室では、半導体デバイスの動作メカニズムを解明するための有力な手法として、走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy: SPM) を用いた動作中MOSFETの2次元キャリア密度解析法を提案してきた。本稿では、走査型容量顕微鏡 (Scanning Capacitance Microscopy: SCM) を用いてゲート長500nm, n型Si-MOSFETの動作状態における2次元キャリア密度分布計測を行った結果について述べる。

## 2、研究内容

SPMを用いた2次元キャリア密度測定法では、ウェハを壁開し、素子断面を露出させる必要がある。そのため、通常、劈開後にLSIに内蔵されたソース、ドレイン、ゲート各電極に繋がるVia配線は残存せず、素子にバイアスを加え動作させることができない。本研究では、ウェハ内部の任意の半導体素子を劈開後も駆動させるために、評価用断面駆動素子を開発した。集束イオンビーム (Focus Ion Beam: FIB) エッチング法及びFIBアシスト堆積 (FIB-Chemical Vapor Deposition: FIB-CVD) を用いて、劈開後に残存するような空間配置を持つ立体配線構造を形成させる。SCMを用いてこの評価用素子の2次元キャリア密度計測を行った結果を図1に示す。ドレイン電圧を一定に保ち ( $V_d = 1.0 \text{ V}$ )、ゲート電圧を上昇させたところ ( $V_g = 1.0, 2.4, 3.8 \text{ V}$ )、デバイスがOFF状態からON状態に推移する際のチャネル領域における反転層の形成過程を直接計測することに成功した[1]。今後、プローブ顕微鏡のさらなる高性能化、原子レベルで平坦な断面試料作成法、及び断面を介した2次元キャリア密度分布計測の定量化法の確立を試み、次世代のナノ電子デバイス開発における基盤技術とする。

## 参考文献

- [1] K. Kimura, K. Kobayashi, K. Usuda, H. Yamada, and K. Matsushige, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Workshop on the Fabrication, Characterization and Modeling of Ultra Shallow Junctions in Semiconductors, p127-132 (2005).

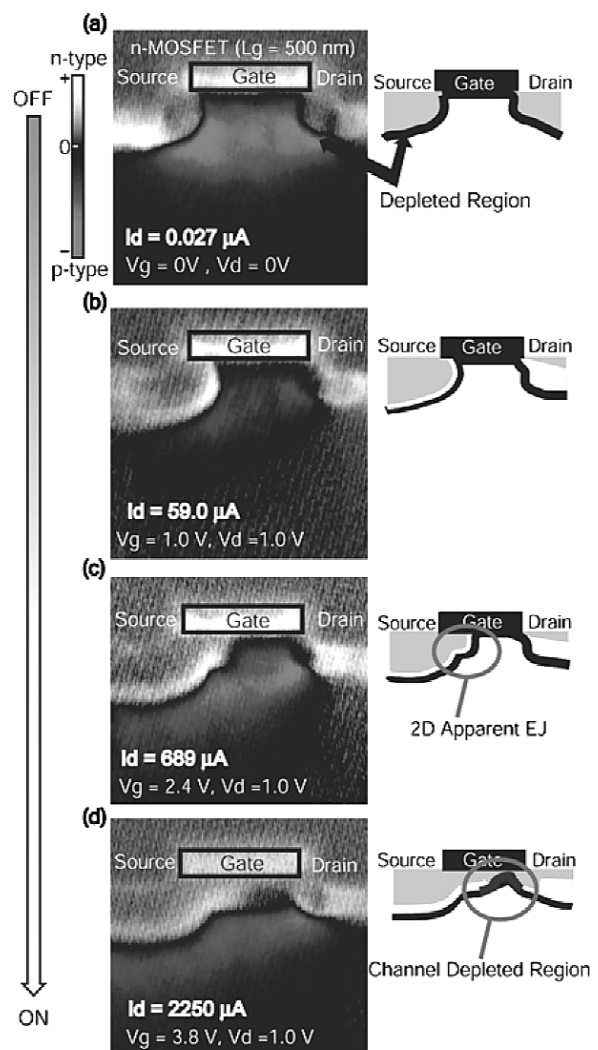


図1. SCMを用いたSi-MOSFET動作状態における2次元キャリア密度分布計測

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/%7Elab05/>

フォトリック結晶の点欠陥を用いた高Q値微小共振器

光の波長程度の大きさをもち、かつ光を強く閉じこめることのできる高Q値微小共振器は、様々な科学・工学分野において非常に重要であり、近年関心が高まっている。その応用可能な分野としては、例えば、超小型波長フィルター、単一光子光源、光バッファメモリー等が挙げられる。これらの応用においては (a) 高い分解能と広い共振モード間隔の実現、(b) 光と物質の相互作用の増強、(c) 長い保持時間と集積度の両立等が要求され、これには高いQ値かつ微小なモード体積をもつ共振器が要求される。しかし一般に共振器サイズが小さくなるほど、共振器の端部に光が到達して光が損失を受ける割合が増加するために、波長サイズの高Q共振器を実現することは容易ではない。一方、周期的屈折率分布からなる新しい光材料フォトリック結晶は内部に光のモードの存在しない周波数帯域 (フォトリックバンドギャップ) をもち、これにより光を吸収損失なく完全に反射できるため、波長サイズの高Q値共振器を実現する方法として注目されてきた。しかしながら、3次元フォトリック結晶では作製上の困難さから来る周期数の制限のために、そして2次元フォトリック結晶スラブではそもそもバンドギャップ効果の及ばない方向があるために、期待されるほど完全な光の閉じこめができていなかった。これに対して我々は2次元フォトリック結晶スラブを用いた共振器の共鳴モードの電磁界分布をフーリエ解析し、その結果、その電磁界の包絡関数形状を制御することで、光の漏れを劇的に減少できることを実証した<sup>1, 2)</sup>。

2次元フォトリック結晶スラブは誘電体スラブ (薄板) に2次元の周期性 (空気穴) を導入した構造であり、スラブの上下に十分に屈折率の低いクラッド (空気) が存在していることが特徴である。この構造に、図1 (a) のように局所的に欠陥 (点欠陥) を導入すると、そこでは光の存在が許容され、微小共振器として動作する。この共振器では、面内方向においてはフォトリックバンドギャップ効果によって光は完全に閉じこめられるが、上下方向に注目すると、誘電体と空気の屈折率差による全反射によって閉じこめられる光の成分と、全反射条件を満たさず上下方向の放射される成分とが存在する。図1 (a) は我々が検討した共振器の主要な電界成分の分布であり、図1 (b) はその2次元フーリエ変換である。図1 (b) 中の灰色の内は、面内方向の波数ベクトルが空気中の伝搬モードと整合しうえるため上下への漏れが生じる領域を表す。図1 (c) はこれを改良した共振器である。共振器両端の穴を僅かに外側にシフトしてある。これにより図1 (d) に示されるように、漏れ領域内の成分が大幅に減少している。これは電界分布をx方向において穴の間隔の2倍程度の周期をもつ基本正弦波とその包絡関数に分けて考えることで説明できる。周期から分かるようにフーリエ空間において基本波は漏れ領域の外に存在するが、包絡関数の畳み込みによってそれが広がり、漏れ領域に入る成分が生じる。穴のシフト (=周期性の乱れ) によってバンドギャップ効果が弱まり、包絡関数が実空間において広がることによって、フーリエ空間においては広がり減少した結果、漏れ成分が減少している。図2はその実験結果である。穴をシフトさせることにより、Q値の逆数に対応する共振ピーク半値幅が大幅に減少し、最大で固有Q値45,000という値が得られた。また計算によって得られた共振器体積は媒質内波長の三乗程度であり、発表時点<sup>1)</sup>において体積あたりのQ値として世界最高の値であった。その後、さらなるQ値の増大にも成功し<sup>3)</sup>、これら発表を機に、高Q値微小共振器およびその応用の研究が大幅に加速された。

- 1) Y. Akahane, T. Asano, B.S. Song, and S. Noda: Nature, vol.425, pp.944-947, 2003.
- 2) T. Asano and S. Noda: Nature, vol.429, doi:10.1038, 2004.
- 3) B. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane, Nature Materials, vol.4, pp.207-210, 2005.

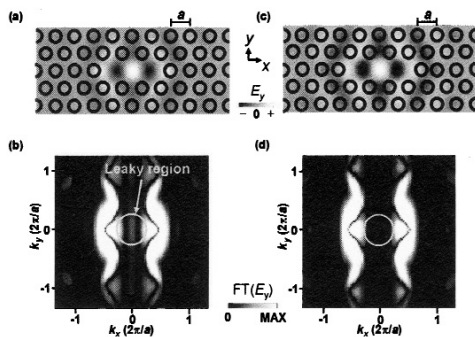


図1. 2次元フォトリック結晶スラブを用いた共振器の空気穴配置および電界分布とその2次元フーリエ変換 (灰色の内は漏れ領域を表す)、(a)、(b) 基本となる共振器、(c)、(d) 両端の穴をシフトした改良型共振器

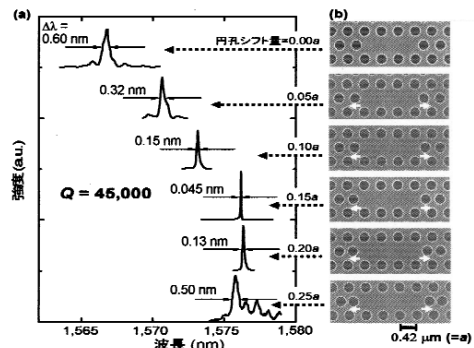


図2. 穴シフト型共振器の実験結果、(a) 共振スペクトル、(b) 共振器のSEM写真



## 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/>

## 「電子回路による波動伝搬のシミュレーション」

近年、光速を越える群速度や非常に遅い群速度といった、光の群速度に関する研究が盛んに行われている。我々は以前、光速を越える群速度と物理的に等価な、負の負群遅延を発生させる電子回路について研究を行った[1]。この回路に適当な電気パルスを入力すると、同じ形のパルスが負の遅延時間で出力される。つまり、出力パルスの方が入力パルスより先に出力される。これは、一見奇妙で因果性を破っているように思えるが、実際は因果性の破れには関係しない問題である[2]。

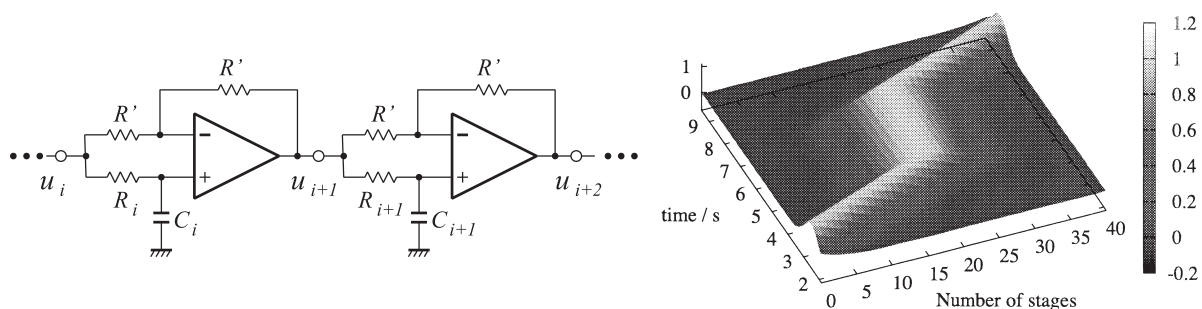
一方、遅い光に関しては、媒質中を電磁気誘導透明化（Electromagnetically Induced Transparency, EIT）を用いて光の群速度を極端に遅くする方法や、光を完全に停止（正確には断熱過程で光の状態を原子の集団スピンの状態に転写）させる方法が考案された。光の量子状態をも媒質中に集団スピンとして保存することができる上、必要なときに光として取り出せる。この技術は（量子）光メモリーとして注目されている。

本研究室では、この非常に遅い光伝搬現象にも目を向け、包絡線の形を変えない波動伝搬を集中定数回路で表現する方法を考案した。オールパスフィルターとして知られる回路を、下図（左）のように縦続接続すれば、波動伝搬をシミュレートできる[2]。 $i$  段目の回路に着目したとき、回路の伝達関数は

$$H_i(\omega) = \frac{1 - i\omega T_i/2}{1 + i\omega T_i/2}, \quad T_i = 2C_i R_i$$

であり、 $1/T_i$  よりも小さい周波数に帯域制限された信号に対して、時定数  $T_i$  が一段あたりの遅延時間になる。抵抗値は回路ごと、そして時間ごとに変えることができるように設計している。それにより、遅延時間  $T_i$  は場所の関数にもなり時間の関数にもなる。これはEITの実験において、カップリング光（制御光）の強度を変え、群速度を変えることに相当する。光を止める実験を回路でシミュレートすることも可能で、その場合は回路定数を一斉に変えて、一段あたりの遅延時間を極めて大きくすればよい。下図（右）がその実験結果を表している。横軸を回路段数、縦軸を時間として、回路の出力値をプロットしている。 $t < 4$  では、回路一段あたりの遅延時間は0.08s にしている。この間では電気信号は一定の速度で回路間を伝搬していることが分かる。時刻  $t = 4$  s に一斉に遅延時間を約20倍の1.6sにすると、信号はほとんど停止状態となる。 $t = 7$  s で再びもとの遅延時間に戻すと、信号は再び伝搬を開始する。

EITの実験と同様にこの回路の実験においても入力パルスの周波数帯域は決まった値より狭くする必要がある。この条件を満たさないパルスを入れると光の実験の場合も回路の実験の場合も同じように波形の減衰と著しい変形がもたらされる。このように、回路でEITにおける光の伝搬をシミュレートできる上、回路では、パラメータを簡単かつ自由に変えることができるという利点があるため、時間的および空間的に同時に群速度を変化させるなど、光伝搬の実験では困難なことも実現できる。



および空間的に同時に群速度を変化させるなど、光伝搬の実験では困難なことも実現できる。

[1] T. Nakanishi et al., Am. J. Phys., 70, 1117 (2002).

[2] M. Kitano, et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 9, 43 (2003).

[2] T. Nakanishi et al., Am. J. Phys., 73, 323 (2005).

知能メディア講座 言語メディア分野  
<http://www-lab25.kuee.kyoto-u.ac.jp/>  
 「モンゴル語の機械処理の研究」

近年、世界中の様々な言語が計算機上で扱えるようになりつつあり、それに伴って、世界の多様な言語についての自然言語処理の研究が行なわれるようになってきました。しかし、言語解析プログラム等に関する研究が盛んに行なわれている言語は、英語・中国語・日本語や、ヨーロッパ・アジアの主要な言語に限られています。そのような中で、本研究室では、2005年3月に修士課程を修了したモンゴル人留学生Sanduijav Enkhbayar君とともに、モンゴル語の機械処理の研究を行ないました。

現代モンゴル語で使われる文字はキリル文字です。モンゴル語では、自立語の語幹に対して格を表す語尾や動詞の活用を表す語尾・接続助詞等が結合したものが句を構成し、ヨーロッパ言語と同様に、空白で区切られた句の列により文を構成します。そこで、まず最初に実現すべきモンゴル語機械処理として、名詞・動詞の語幹に格を表す語尾や動詞の活用を表す語尾・接続助詞等を結合させて、名詞句・動詞句を生成する(図1の例参照)プログラムを作成しました[2]。

また、図2の日本語・モンゴル語間の句対応の例から分かるように、モンゴル語の語順は日本語と同じSOVで、動詞が文末に位置し、日本語と同様、その他の句の語順は比較的自由です。このように、モンゴル語と日本語の間では、文の構造がかなり類似しているため、英語・日本語のように文の構造が異なる言語対と比べて、自動翻訳の問題がかなり易しくなることが予想されます。そこで、モンゴル語・日本語の双方において文法現象の中心を担う機能表現に注目し、モンゴル語・日本語間の機能表現の翻訳の難易度について分析を行ないました[1]。その結果、日本語からモンゴル語への機能表現の翻訳においては、7~9割という高い割合で、文脈に依存せず一意に訳が決められることが分かりました。例えば、図1に示すように、日本語の「てくる」という機能表現は、文脈に応じて様々な意味・用法を持っていますが、モンゴル語においても、この多様な意味・用法を単一の機能表現によって表現することができ、日本語側での多義性を保持したままモンゴル語に翻訳できます。

モンゴル語の機械処理の研究は、世界的にもあまり例がなく、今回の研究の成果は非常に貴重なものであると言えます。今回の研究の成果をふまえて、モンゴル語の電子化テキストや、日本語・モンゴル語間の対訳テキストを蓄積して、その分析を進めていくことにより、日本語・モンゴル語間の自動翻訳等の応用技術が実現できると期待しています。

参考文献

[1] Sanduijav Enkhbayar, Takehito Utsuro, and Satoshi Sato. An analysis of translation equivalents of Japanese-Mongolian functional expressions. In Proceedings of the Asian Symposium on Natural Language Processing to Overcome Language Barriers, pp. 9-16, 2004.  
 [2] Sanduijav Enkhbayar, 宇津呂武仁, 佐藤理史. 音韻論的・形態論的制約を用いたモンゴル語句生成・形態素解析. 自然言語処理 (言語処理学会論文誌), Vol.12, No.4, 2005.

- (1) 名詞語幹  
xvvxэд (子供)
- (2) 名詞語幹 + 複数語尾  
xvvxлvдл (子供達)
- (3) 名詞語幹 + 複数語尾 + 格語尾  
xvvxлvдлтэй (子供達と一緒に)
- (4) 名詞語幹 + 複数語尾 + 格語尾 + 再帰所属語尾  
xvvxлvдлтэйгээ (自分の子供達と一緒に)

図1. 名詞の語形変化の例

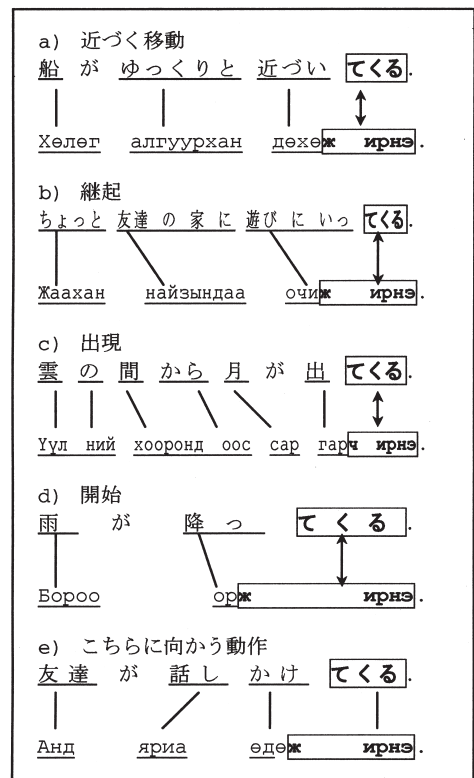


図2. 日本語機能表現「てくる」のモンゴル語訳における多様性保持

## 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/index-jp.html>

### 「3次元ビデオによる無形文化財の高精度デジタル化」

#### 1. 3次元ビデオとは

3次元ビデオは、CGによる仮想的・人工的な3次元アニメーションではなく、ダンスやスポーツをする人間、自然界の動物などの生の姿・形・色の時間的変化を3次元的にそのまま記録した実写映像で、実世界における対象の振る舞い・動作を余すところなく記録した実写3次元映像メディアである。3次元ビデオという名前からイメージされるのは映像が飛び出して見える立体映像であり、3次元ビデオは立体ディスプレイ用の特殊なコンテンツだと思われるかもしれないが、通常の2次元のディスプレイを使った場合でも、3次元ビデオを使えば、視聴者が映像を鑑賞する位置や方向、視野をその場でインタラクティブに変えることができる。このようなインタラクティブ性は3次元ビデオの持つ大きな特徴であり、映像の楽しみ方を従来の受動的なものから能動的なものへと変えるものと期待される。

#### 2. 研究成果

現在のシステムでは以下の方法で3次元ビデオの撮影・生成を行っている。

1. 撮影対象を取り囲むように配置された多数のカメラ（図1（a））を用いて、対象の多視点ビデオを撮影する（図1（b））。
2. 撮影されたビデオフレーム画像から対象のシルエットを抽出する（図1（c））。
3. 各カメラの投影中心を中心としてシルエットを3次元空間に逆投影し視体積を求める。この視体積の積集合をもって対象の3次元ボクセル表現を求める（図1（d））。
4. 得られたボクセルデータの表面に小さな3角形の面を張り、対象の表面形状を表す3次元メッシュを求める（図1（e））。
5. 4. で得られた3次元形状は、彫刻の荒削りのようなもので、形が角張っており、細かな凹凸が復元されていない。そこで、3次元メッシュがゴムのような弾性を持っていると考え、各3角形の頂点の位置が真の対象表面に張り付くようにメッシュの変形を行う（図1（f））。
6. 各3角形面上のテクスチャや色は多数のカメラによって写されているため、その面が最もよく写っている画像を選び、その画像上のテクスチャ・色を面に張る（図1（g））。

以上の処理で、1フレームの3次元ビデオが生成される。動画を作るには（1）～（6）の処理を繰り返せばよい。現在研究室では、3次元ビデオの技術を使って、能や日本舞踊などの伝統舞踊や職人の技を3次元的に記録・保存する無形文化財のデジタルアーカイブの構築を進めています。

#### 参考文献

- [1] T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and S. Nobuhara. Real-time 3d shape reconstruction, dynamic 3d mesh deformation and high fidelity visualization for 3d video. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 96, pp. 393-434, Dec 2004.

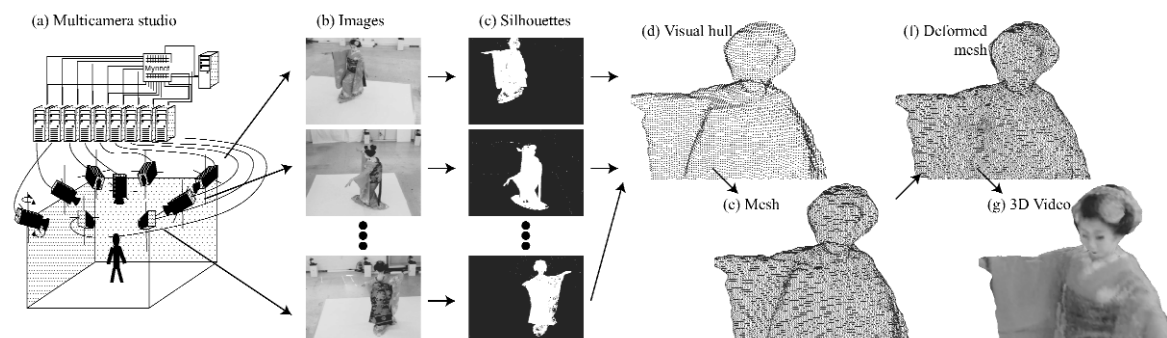


図1. 3次元ビデオの生成過程

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/index.html>

「マルチコードによるチャンネル割当て・伝送レート制御を行う無線マルチキャスト方式」

第三代携帯電話などCDMA（Code Division Multiple Access）移動通信システムにおいて動画サービスが利用され始めています。伝送レートの向上や移動局（MS:MobileStation）の計算性能・表示性能の向上が背景にあります。一方、有線アクセス網では、同一の動画を複数ユーザに配信するマルチキャスト技術が研究開発されており、これを用いることで、1対1で動画転送を行うのに比べ冗長なパケット転送が低減され帯域利用効率が向上します。移動通信においても、無線マルチキャストと呼ばれる同様の方式が検討されています（図1）。ただし、単一のチャンネルで全てのMSをカバーしようとする、通信路品質が最低のMSでも動画を正常に受信できるように全体の伝送レートを下げる必要があります。低い伝送レートでは低品質の動画しか伝送できず、無線マルチキャストを行う利点が損なわれます。そこで我々は、同一の動画を受信するMSを高品質動画チャンネル（Hch）を受信するグループと低品質動画チャンネル（Lch）を受信するグループに分割することを考えました。また、2つのチャンネルにCDMAの多重コードを共有させ（図2）、境界より上側をHch、下側をLchに割当てて、チャンネル割当てと伝送レート制御を一元的に行います。この方式では、HchとLchとは周波数が等しく時間同期しているため、MSのチャンネルが切り替わっても瞬断が生じません。一方、コード数が多いほど伝送レートは高くなりますが、所要の通信路品質は高くなり、一定の動画品質を確保するのに必要な受信電力が大きくなります。2つのチャンネルは多重コードのみならず送信電力も共有しているため、適切な多重コード・送信電力割当てが性能に大きな影響を与えます。そこで、我々はMCAP（MultiCode Assignment algorithm for P-MP transmission）という方式を提案しました [1]。MCAPは、2つのグループの通信路状況や利用可能な残りコード数、利用可能な残り送信電力で場合分けを行い、それぞれの場合に応じてMSの入れ替え、コードの増減および送信電力の増減を行います。図3のシミュレーション結果から、利用可能な総コード数が16の場合、従来の単一チャンネルしか用いない方式に比べ、提案方式が2.1～4.1倍の伝送レートを達成できることが分かります。なお、今後は、無線LAN（Local Area Network）への適用を検討する予定です。

[1] 中村博志, 新熊亮一, 高橋達郎, “マルチコードによるチャンネル割り当て・伝送レート制御を行う無線P-MP伝送方式,” 信学論B, vol.J88-B, no.6, pp.1067-1077, Jun. 2005.

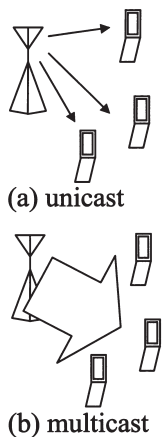


図1. 無線マルチキャスト

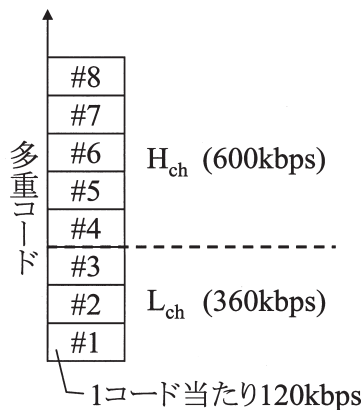


図2. チャンネルとコード割当て

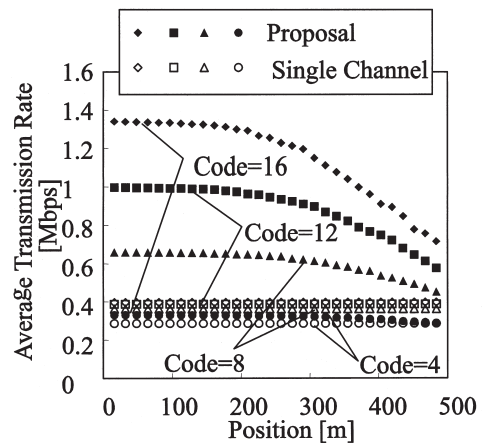


図3. 平均伝送レート

## 集積システム工学講座 情報回路方式分野（中村研究室）

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

## 「JPEG2000符号化方式の組込み向け実装法」

画像を統一的に符号化し取り扱うことを目的として2001年1月に標準化された静止画符号化標準JPEG2000は、高圧縮・高機能の特長とし、幅広い新規画像利用分野への応用が期待されている。ここでは、さまざまな形態や性能の機器、サーバ、ネットワーク、端末が存在し、状況に応じたさまざまな要求仕様のもとでのシステム設計が必要となる。そこで中村研究室では、さまざまな組込み機器における実装上の制限及び、アプリケーション上の要求に応じて、それに最適な実装を容易に実現可能なデザインフレームワークを提案している[1]。概念図を図1に示す。本デザインフレームワークを用いれば、プロセスやチップサイズなどの設計上の制限と解像度や処理速度などの要求性能からそれに最適な実装が得られる。

ここでJPEG2000の符号化手順について簡単に説明する。入力画像はまずタイルと呼ばれる矩形領域に分割され、各タイルは独立に離散ウェーブレット変換（DWT; Discrete Wavelet Transformation）される。DWTが施された画像は量子化され、符号化ブロックと呼ばれる矩形領域に分割される。符号化ブロックはEBCOTと呼ばれる処理によって圧縮される。復号化はこの逆の手順となる。これらの処理のうち最も処理に時間を要するのはEBCOTおよびDWTである。提案デザインフレームワークでは、このEBCOTおよびDWTに関して、ソフトウェア実装、プロセッサに専用命令を追加して高速化したソフトウェア実装、専用ハードウェア実装が用意されており、これらを機器やアプリケーションの要求、設計上の制限などに応じて選択的に用いる。特に高い性能が要求される場合は複数の専用ハードウェアモジュールを搭載することも可能である。

一方、タイル分割は、符号化の並列化及びDWTに要するローカルメモリ量の削減という観点では有効であるが、図2のように伸張画像においてタイル境界（タイルノイズ）が目立つという問題があり、タイル分割は高画質が求められる場面では望ましくない。しかし、タイル分割を行わずに画像全体に対してDWTを適用する場合、莫大なローカルメモリ量を要する。そこで、中村研究室では、株式会社メガチップスLSIソリューションズと共同で、上述のデザインフレームワークをベースとし、タイル分割せず画像全体に対してDWTを行う際に必要となるローカルメモリ量を削減する手法を検討し、ノンタイリングに対応するシステム構成のJPEG2000コーデックLSIを開発した（図3）。本JPEG2000コーデックLSIは6400万画素といった超高解像度画像をノンタイリング処理する世界初のLSIである[2]。

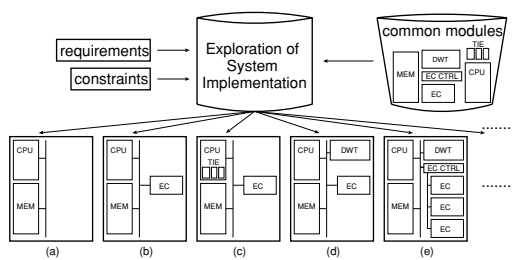


図1. JPEG2000符号化システムのためのデザインフレームワーク（概念図）



図3. ノンタイリングJPEG2000コーデックLSI



図2. タイル分割による画像の劣化

## 参考文献

- [1] H. Tsutsui, T. Masuzaki, Y. Hayashi, Y. Taki, T. Izumi, T. Onoye, and Y. Nakamura, "Scalable design framework for JPEG2000 system architecture," in *Proc. ACSAC2004*, pp.296308, Sep. 2004.  
 [2] “高圧縮のノイズ解消 JPEG2000 対応画像用 LSI,” 日刊工業新聞, 2004 年 10 月 27 日.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤研空室）  
<http://www-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/>  
 「波形劣化した光強度変調信号に適用可能な誤り率推定法」

近年、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有望視されているのが、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。

伝送システムの場合、誤り率が $10^{-9}$ 以下と要請されますが、（光パワーなどの）経時劣化を考慮に入れ、導入時には（光パワーなどを増加させて）マージンをもたせ誤り率が大きく下回るように設定されます。例えば、光パワーを3 dB増加すると誤り率が $10^{-17}$ になります。この誤り率を測定するためには、伝送速度10 Gbit/sの場合に115日もかかってしまいます。さらにマージンを確保するためには、現実的な測定時間ではなくなってしまいます。

そこで受信機において、デジタル信号の0、1を識別するためのしきい値を変化させ、1秒以下で測定可能な誤り率の範囲（例えば $10^{-3} \sim 10^{-9}$ ）の誤り率の振る舞いから最適しきい値における誤り率を推定する方法が提案され、広く用いられてきました。当研究室でもその改良版を提案しました[1]。これら従来法では、光増幅器の発生する雑音をガウス雑音と近似していましたが、実際にはガウス雑音でないため、それによる誤差が出ることも指摘されていました。

また、光ファイバの直径は数十 $\mu\text{m}$ 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、非線形効果が起こり、波形劣化が生じてしまいます。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。

雑音特性を正確に評価し、上記のように波形劣化が生じた場合においても正確に誤り率を推定できる方法が望まれていました。当研究室では、雑音特性を詳細に調べ、波形劣化を適切に表現することにより波形劣化した信号にも適用可能な誤り率推定法を提案しました[2]。対象とするのは、デジタル信号の0、1を光の有無に対応させて送信し、光電変換素子で電気信号の有無を得る、強度変調—直接検波方式です。これは標準化された方式で、世界の長距離系はほとんどこの方式になっています。

従来法との比較結果を下に示します。図1より、ファイバ入力小さく、非線形効果による波形劣化が少ない場合には従来法（改良版）が大きくずれます。また、図2より、ファイバ入力大きく、非線形効果による波形劣化が大きい場合には従来法が大きくずれます。提案法は波形劣化の大きさによらず誤り率を正確に推定していることがわかります。

参考文献

- [1] S. Norimatsu and M. Maruoka, J. Lightwave Technol., Vol.20, No.1, pp.19-27, 2002.
- [2] 乗松、亀澤、信学論 Vol.J87-B, No.2, pp.1994-2005, 2004.

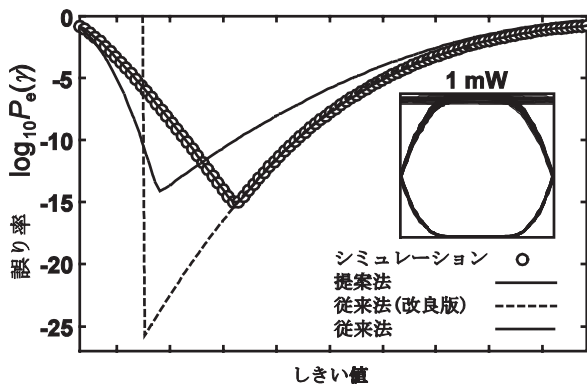


図1. 受信波形と、しきい値—誤り率曲線  
 (ファイバ入力1 mW)

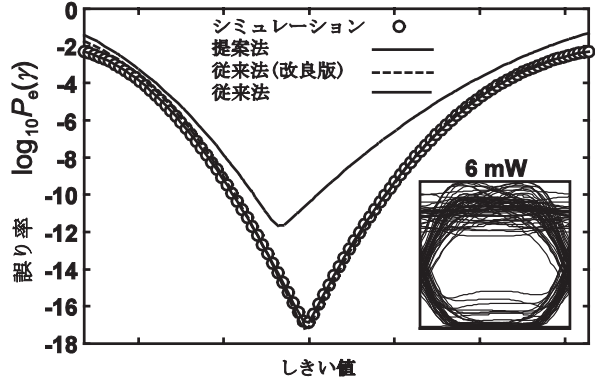


図2. 受信波形と、しきい値—誤り率曲線  
 (ファイバ入力6 mW)

情報学研究科 システム科学専攻 システム情報論講座 画像情報システム分野  
<http://www.image.kuass.kyoto-u.ac.jp/>  
 「冠動脈造影映画の時空間イメージモザイク」

冠動脈造影映画は、心筋に栄養を送る冠動脈の形態を調べるためにX線を用いて動画像として撮影される2次元投影像である。図1に冠動脈造影像の一例を示す。冠動脈造影映画を撮影するにあたり、造影剤注入後に造影血管部分が視野に収まるように医師が患者台を動かすことがある。また血管の各部位において造影の程度は刻々と変化していく。たとえば、図1左側と右側では撮影視野が異なり、また、造影剤の入り方が異なるために血管の描出のされ方が異なっている。

そこで当研究室では、血管を一覧できる広視野画像を作成することにより、診断の補助を行ない、また、血管の3次元再構成や他のモダリティとの融合処理に利用する、といったことを目的に研究を行なっている。いわゆる、イメージモザイク処理に相当するが、動きのある被写体を対象にしているため、他には見られない多くの工夫が必要になる（時空間イメージモザイクと呼んでいる）。

目的を達成するためには、結局は画像の位置合わせと合成を行なうことができれば良い。しかしながら、本課題の場合には重ね合わせたい対象自身が二つの意味（血管の動きと造影剤の動き）で時々刻々変化することと、背景領域に位置合わせマーカーとなるような特徴が得られにくいということが問題となる。本研究においては、以下の段階的な方法を取ることでこれらの問題を解決し、違和感の無い動画表示に成功している。

- (1) 時空間投影像による動きの粗推定と補正（図2、3、4）。
- (2) 時空間断面像（図5）を用いた心周期の推定。
- (3) 同一心相画像群（時間的に離れている）をひとまとまりとした詳細な位置合わせ。
- (4) 代表的な一心拍画像群（時間的に連続）の選択と其中での詳細な位置合わせ。
- (5) 全体位置合わせ、背景画像推定、画素値補正と合成。

以上の処理を行ない最終的に広視野画像を合成表示する（図6）。合成表示においては、血管全体が常に観測できるモードと、造影剤の流入により血管が徐々に可視化されるモードの二つを用意している。

なお、以上の各段階においては、投影の方法や位置合わせ評価関数についての工夫が必要であるが、詳細は省略した。また、本研究は国立循環器病センターとの共同研究である。

#### 【参考文献】

原口亮他、冠動脈造影のイメージモザイク、信学技報、vol.105, No.303, pp.35-40 (2005)

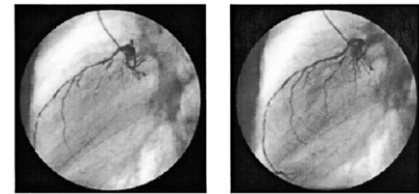


図1. 冠動脈造影像

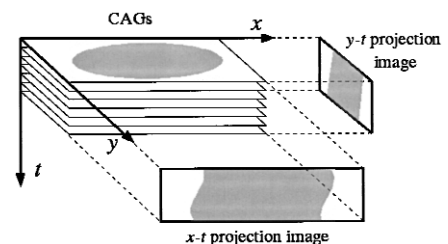


図2. 時空間投影画像の作成



図3. 時空間投影画像の例



図4. 動き粗推定に基づく補正結果



図5. 時空間断面像



図6. 時空間イメージモザイクによる広視野冠動脈造影像（二つの動画観測モードを持つ）

## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野（近藤研究室）

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

### 「ヘリカル系プラズマにおける統合コード開発」

#### 1. 研究の背景・目的

将来の核融合炉実現を目指す高温プラズマのヘリカル系磁場閉じ込め研究では、並列／ベクトル計算機やPCクラスターなどの計算機や大規模な三次元数値解析プログラムの発展、およびプラズマ診断技術の進展により、実験で得られた個々の物理現象について詳細な理論解析が可能となってきている。このため、次の課題として、これらを輸送・加熱・平衡・安定性などの観点から統合的に解析する必要性が指摘されている。これらの問題に取り組むには、時空間的にマイクロなスケールからマクロのスケールまでを含む多階層シミュレーションを行う必要がある。本研究では、プラズマの輸送コードをマクロスケールのコアモジュールとし、必要に応じて取捨選択できるモジュール群を有機的に組み合わせたソフトウェアシステムを構築することで、ヘリカル系プラズマ実験のための統合シミュレーション環境を開発・整備することを目的としている。ここでは、ITER計画を背景とした、トカマクプラズマに対する統合コードと相補的に開発を進めることで、最終的にはこれらを統一した一般トラスプラズマに対する統合コードへと発展させ、欧米における統合コード開発計画に対して国際的競争力を持つことを目指している。

#### 2. 研究の内容

本研究は、自然科学研究機構核融合科学研究所との共同研究、21世紀COEプログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」の研究テーマの一つとして平成16年度より進めているもので、昨年度はモデリングやモジュール間インターフェースの検討、入れ子状の磁気面を仮定せずに三次元MHD平衡を計算できるHINT2コードの開発、圧力の高いプラズマにおいて自発的に流れる電流（ブートストラップ電流）の解析コードの整備等を研究組織メンバーの共同作業で行ってきた。今年度以降は、これらの研究成果と研究体制をさらに発展させることにより、ユーザーフレンドリーなソフトウェアシステム開発を目指し、その成果となるモジュール群を順次公開する予定である。また、ユーザーの計算機利用環境はローカルなPCからスパコンまであり、計算プログラムモジュールもローカルな計算機によるスカラー計算機向きのモジュールからベクトル計算機向きのモジュールまでであるので、幅広い計算機環境で利用できることを考え、これらをネットワーク環境の下でモジュールごとに分散処理することを検討する。さらに、実験データとの比較検討を、各モジュールプログラムもしくはその統合であるシミュレーションシステムの改良に反映させることも本研究の特徴である。ここで開発された統合コードによるシミュレーションの結果は、プラズマ実験計画の策定や総合的で精度の高い実験データ解析に用いることができ、トラスプラズマの閉じ込めに関する物理の解明に寄与する。また、将来的には実験データ解析モジュールを開発することにより、実験データ解析ツールとしても利用できる。

今年度の具体的な研究として、プラズマ電流分布の時間発展のシミュレーションを行っている。ヘリカル系プラズマに対するこれまでの輸送シミュレーションでは正味のプラズマ電流は考慮されていなかったが、実際には有限のプラズマ電流が観測されている。ところが、観測されたプラズマ電流は多くの場合非定常なので、電流の駆動機構を同定することは容易でない。ここでは、統合シミュレーションの一つの適用例として、実験で得られたプラズマ密度、電子・イオン温度分布の時間発展を用いて、プラズマ電流分布の時間発展のシミュレーションを行い、実験結果と比較することにより、プラズマ電流に対するブートストラップ電流・ビーム駆動電流の寄与を明らかにする。具体的にはブートストラップ電流やビーム駆動電流を含むプラズマ電流の時間発展をMHD平衡と矛盾せずに行う小規模な統合シミュレーションを行う。この成果は、輸送コードにおけるプラズマ電流の時間発展計算サブプログラムを改良するために用いられ、ヘリカル系プラズマの輸送シミュレーションに活用する。



## エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野 (吉川潔研究室)

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

「慣性静電閉じ込め核融合中性子・陽子源の研究」

慣性静電閉じ込め核融合 (Inertial Electrostatic Confinement Fusion: IECF) とはイオンを球形状中心に加速・集束させ核融合反応を起こさせるもので、ビーム・ビーム衝突核融合の一種です (図1、2)。すなわち、球形の真空容器 (陽極) とメッシュ状球殻陰極との間でグロー放電を起こさせると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を通過し球中心に集束し衝突して核融合反応を生起します。その際、電子はイオンの作るポテンシャル (仮想陽極) により同じく球中心に加速されイオンの空間電荷を一部中和し、中心部の凸状電位分布の中心を凹ませより多くのイオンが核融合に関与できるように作用すると考えられています。

このIECF装置は、コンパクトで制御性に優れた理想的な中性子・陽子源として、非破壊検査や癌検査、人道的地雷探知など様々な分野での応用が期待されています。

本研究室では、既に直径35 cmの装置で $1.1 \times 10^7$  n/secのD-D中性子の定常発生を実証しました。また、分光的計測方法 (レーザー誘起蛍光法) により陰極中心付近の局所電界強度分布の直接的な測定に成功し、イオンの形成する仮想陽極の内側に仮想陰極が形成された電位二重井戸構造の存在を証明して、三十年に渡った論争に終止符を打ちました。

現在、科学技術振興機構事業で、このIECFによるD-D反応中性子による高性能地雷探査技術の研究・開発 (図3) を、国内7機関と共同で進めています。そのために必須の超小型で、アフガニスタンの過酷な環境に耐え、かつ高中性子束のIECF中性子源の開発に取り組んでいます。

図4の超小型装置 (直径20 cm) で既に $4 \times 10^6$  n/sの極めて安定な定常中性子発生をグロー放電のみで達成しましたが、核融合反応率をさらに高めるための、マグネトロン方式イオン供給機構をグロー放電と併用する新方式を提案して実験を行っています。また、この中性子源と模擬地雷物質とを用いた探知予備実験を行い、(模擬) 爆薬中の窒素原子による中性子捕獲ガンマ線を検出することで、(模擬) 地雷の有無を同定できることが実験的に確かめられました。

一方で、IECFは、D-D反応よりも起こりにくいものの反応生成物として高エネルギー陽子の得られるD-<sup>3</sup>He核融合反応を用いることで、例えばPET癌検査用同位元素生成など、陽子源としての先端応用も期待されています。本研究室では本年中にこのD-<sup>3</sup>He核融合反応実験も開始する予定で、現在そのための装置・計測器の準備を進めています。

真空容器 (陽極 V=0V)

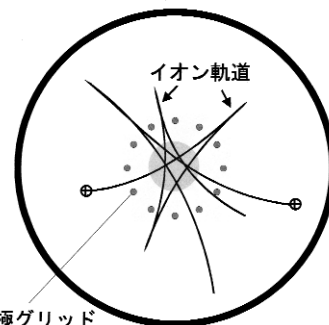


図1. IECF装置の概略図



図2. 陰極付近の放電の様子

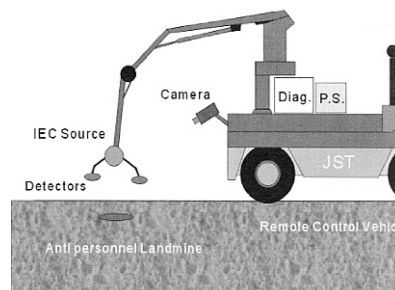


図3. IECF中性子源を用いた対人地雷探知：中性子捕獲ガンマ線を検出して地雷の種類をも同定可能です。

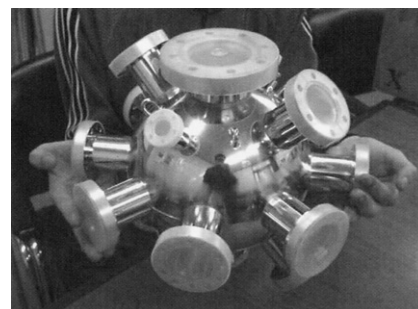


図4. 地雷探査用の超小型IECF中性子源 (直径20cm)

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/student/laboratory/top.html>

「立体磁気軸装置における磁場配位の最適化」

磁場閉じ込め方式による核融合による発電を達成するためには、高温・高密度のプラズマをある一定時間以上閉じ込める必要があります。プラズマの“効率良い閉じ込め”には、エネルギー閉じ込めを良くすることと、粒子閉じ込めを良くすることの両面があり、お互いが密接に関係しています。具体的には、前者は入力パワーに対するプラズマの蓄積エネルギー比の改善であり、後者は供給する燃料の制御性、および核融合反応によって生成する高速イオンの閉じ込めの改善です。高速イオンの良好な閉じ込めはプラズマの自己加熱効率の増加にとって非常に重要です。

高速イオンの閉じ込め・輸送はプラズマを閉じこめる磁力線の形（磁場配位）に強く依存します。特に、磁場強度の変動（リップル）に起因する高速イオンの損失を抑えるため、今まで色々な工夫がなされてきています。例えば国際熱核融合実験装置（ITER）で知られるトカマク型の閉じ込め装置では、磁場強度の変動そのものを少なくする為の装置開発・構造材研究が行われています。

私達は現在、ヘリオトロンJという装置で、高いプラズマ圧力下で高速イオンの良好な閉じ込めを目指した、磁場配位の最適化の研究をしています。トカマク型装置との大きな違いは、プラズマの生成・維持にプラズマ電流を必要としないため、電流が起因する不安定性が原理的にないことです。この装置のプラズマは図1に示すようにツイストしたドーナツ形状をしており、プラズマの中心位置が周方向に変化しているため立体磁気軸装置に分類されます。ヘリオトロンJの最大の特徴は、トーラス方向に長周期のリップルを積極的に導入し、その周期の中に局所的に磁場強度の空間的な変動を抑えた領域を設ける（準等磁場配位）ことで粒子閉じ込めを改善することを目指している点にあります。理論研究から、準等磁場配位ではリップル強度の制御が、高速イオン閉じ込めに重要な役割を持つことが予測されています。

ヘリオトロンJは配位選択の自由度が高く、配位のある一つの特徴だけを変化させて、その効果を詳細に調べるといった、従来の装置では困難であった実験が可能となっています。図2は磁場配位の基本性能（磁場強度・安全係数・プラズマ体積等）を変えずにリップル強度のみを変化させた配位で、高速イオンの挙動を調べた実験の結果を示しています。電子サイクロトロン加熱（ECH）プラズマに対して高速の中性粒子ビーム入射（NBI）を行い、プラズマ中でイオン化された高速イオンの粒子束の時間変化を計測したものです。図中のシンボルで○、■、●の順にリップル強度を強くしており、リップルの強度が強くなるにつれて高速イオンの減衰が改善されていることが分かります。

今後はこれら実験結果を元にデータ解析や数値計算をすすめ、より良い磁場配位の探求を進めていく予定です。

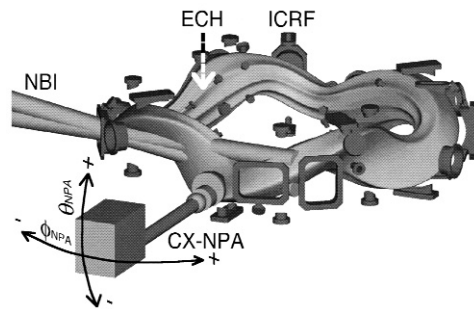


図1. ヘリオトロンJプラズマの鳥瞰図、及び各種加熱・計測装置

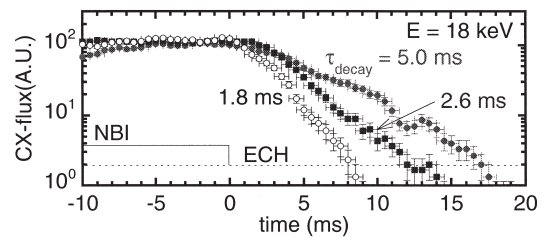


図2. リップル強度を変化させた際の、高速イオンの減衰過程

## 診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（深尾研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/rader-group/fukao-lab.html>

### 「MUレーダーと小型VHFレーダーの同時観測による中緯度電離圏E-F領域結合の研究」

地球大気の上層では、太陽からの紫外線により大気分子が一部電離し、電離圏が形成されている。電離圏は高さによってE領域（高度100～150km）・F領域（高度250km以上）と分類され、それぞれ時として不安定現象を生じる。電離圏沿磁力線イレギュラリティ（Field-Aligned Irregularity; FAI）と呼ばれるこの現象は、短波通信や衛星通信に影響するとして研究されてきたが、最近では、GPSによる精密測位への悪影響が問題とされている。

我々はMUレーダーを用いて中緯度における電離圏FAIの研究を進めており、E領域F領域それぞれに中緯度特有の特徴的な現象を発見してきた。E領域のFAIエコー（E-FAI）はスプラディックE層中に誘起される分極電場に起因すると考えられている。一方、F領域のFAIエコー（F-FAI）は中規模の伝搬性電離圏擾乱（Traveling Ionosphere Disturbance; TID）との一致性が観測されており、TID中の電子密度勾配が生み出す分極電場が原因と考えられる（Sato et al., 2001）。分極電場は電離圏では数百kmにわたってほとんど減衰せずに伝搬するため、E-FAIとF-FAIの相互作用が予想される。そこで2004年5～9月の間にFERIX（F- and E-Region Ionospheric Coupling Study）と呼ばれる観測キャンペーンを実施した。図1に示すように、滋賀県甲賀市信楽町にあるMUレーダーを用いてF領域のイレギュラリティを観測し、それと同一磁力線上に存在するE領域イレギュラリティを、山形県酒田市に移設した小型VHFレーダーを用いて同時観測した。磁力線で結ばれたE・F領域FAIの同時・同領域観測は、世界で初めての試みである。

観測期間中、酒田からのE領域観測は毎夜行い、一方でMUレーダーによるF領域観測は計29夜に行った。29夜のうちE領域のFAIは毎夜観測されたが、F領域のFAIは14夜に観測された。E・F領域で同時観測された例について、エコーの空間位置を決定し、F領域FAIを磁力線に沿ってE領域高度である100kmに投影し、E領域FAIとの対応関係を比較したところ、10夜について関連が確認された。更に図4に示すように、F領域FAIがあるときE領域FAIの形状は細分化しF領域FAIと同位置あるいはその周辺に発生して共に西向きに移動する。これらの結果からE・F領域FAIのカップリング現象が実証された。

#### 参考文献

Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, M. Kubota, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Tsugawa, M. Ishii, T. Sakanoi, S. Miyazaki, Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 689-692, 2001.

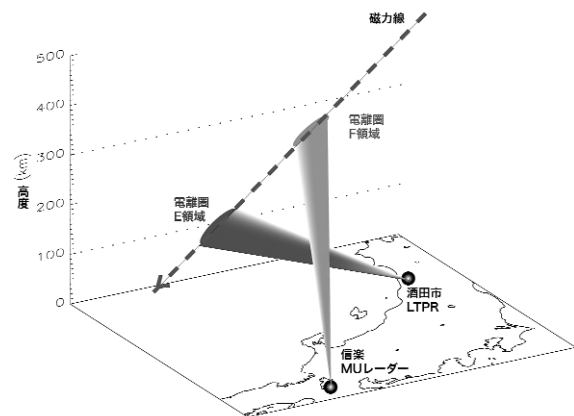


図1. FERIXのレーダー観測概要。MUレーダーによる16ビーム観測でF領域FAIを観測し、同一磁力線上のE領域FAIを酒田市に設置した小型レーダーで干渉計観測した。

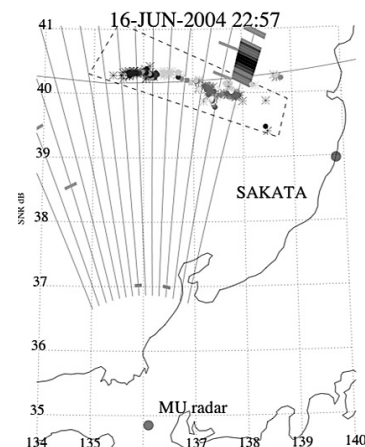


図2. E・F領域のFAIエコーの水平分布。F領域エコーの位置を矩形のコンターで示し、E領域エコーを点列の集合で示す。どちらも色が濃いほど強度が強い。F領域FAIの出現に伴いE領域FAIの構造が細分化し、両者が同じ速度で西向きに移動することがわかった。

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 (橋本研究室)  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/labo-h.html>  
 「自己ビーム制御アレイとその太陽発電衛星の位相同期システムへの応用」

当研究室では、電波をエネルギー伝送媒体として利用し、エネルギー・環境問題の一つの解である太陽発電衛星 (SSPS) の研究をはじめ、マイクロ波を応用した新しい生存基盤に関する研究開発を行っている。電気工学専攻の協力講座である同じ研究所の松本研究室、大村研究室と協力し、マイクロ波応用工学、電波工学、通信工学、科学衛星による波動観測、信号処理、計算機シミュレーションといった研究も行なっている。

本稿では、SSPSにも応用することができるマイクロ波送電システムに関する研究について述べる。具体的には、SSPSの送電アンテナはkmのオーダーで素子数も億のオーダーの巨大なものとなり、一つの基準発信器からの信号を分配することは不可能である。この問題を解決する一つの方法として行なったものである。

SSPSにおいては、受電点からパイロット信号を送信し、その到来方向に送電するレトロディレクティブ方式がとられる。一方、SSPSのような大型システムでは、多数のユニットから成り立つ。その場合、ユニット毎ではレトロディレクティブ方式により、信号の到来方向にビームを向けるように動作するが、ユニット間の基準の位相が揃う保証はなく、最悪打ち消しあうこともあり得る。そのために、ユニット間の位相同期をとることができるシステムを提案した。地上から送信されたマイクロ波を動力源とする成層圏無線中継用飛行機に用いられたSHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) システムの自己ビーム制御方式を、元の方式で使われていた高度計を不要とし、かつ高速に収束するように改良しIQ法と名づけた。本方式では、送電用のアンテナ素子毎に位相を直交4方向に変化させ、それに伴う受信信号の強度変化を元に、正しい位相の値を推定し、これを繰り返すことによりアンテナアレイとしての正しい指向性を得るものである。この方法そのものは、小規模のアレイのビーム制御に応用可能である。

IQ法を、基準位相を合わせることができないような、多数のユニットからなる大規模なフェイズドアレイシステムの位相制御について、ユニット内では従来からのレトロディレクティブ方式でビームを向け、それらの基準となる位相の同期を取ることに応用した。その結果をシミュレーションにより評価した。図1は10素子のアンテナからなり、黒線で示すように、初期状態ではレトロディレクティブ方式ユニット毎ではある方向のビームを形成するように位相が揃っていた。これに本方式を適用すると10のユニットが、(のこぎり波状の) 灰色の線で示されたように、システム全体で位相が揃えられる。しかし、一つ一つのユニットの位相を順に更新していくのでは、位相が統一されるまで非常に時間がかかるといった短所があるため、更新操作を一部重畳させた方法によっても同期が取れ、高速化が図れることも示した。

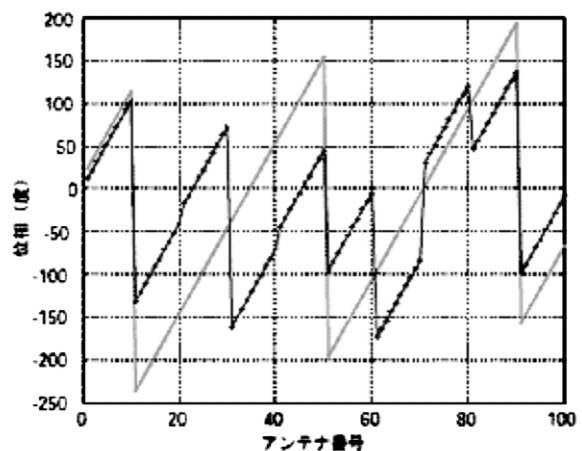


図1. ユニット型SPSにおけるIQ法適用前 (黒) 後 (灰) での基準信号の位相