

## 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」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 (牟田研)

電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野

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 (奥村研)

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 (橘研)

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 (藤田茂研)

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)

#### 附属イオン工学実験施設

クラスターイオン工学部門 (高岡研)

### 情報学研究科

#### 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 大規模集積回路分野 (小野寺研)

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 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 (英保研)

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

#### エネルギー社会・環境学専攻

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報分野 (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)

#### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野 (塩津研)

応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野 (野澤研)

### 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 (大引研)

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)

### 宙空電波科学研究センター

#### 地球電波科学研究部門

大気圏光電波計測分野 (津田研)

#### 宇宙電波科学研究部門

宇宙電波工学分野 (松本研)

電波科学シミュレーション分野 (大村研)

#### 電波応用工学研究部門

マイクロ波エネルギー伝送分野 (橋本研)

レーダーリモートセンシング工学分野 (深尾研)

### 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

#### 創造部門

先進電子材料分野 (藤田静研) §

#### 融合部門

ベンチャー分野 § §

### 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) § § §

注 § 工学研究科電子工学専攻藤田茂研と一体運営

§ § 工学研究科電子工学専攻橘研と一体運営

§ § § 工学研究科電気工学専攻荒木研と一体運営

## 電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 「数値電界計算法の高精度・高速・大容量化」

数値電界計算技術は電気工学分野において不可欠な基礎技術の一つです。当研究室では表面電荷法・境界要素法等の積分方程式系解法の高精度・高速・大容量化の研究を行っています。特に、高速多重極法 (FMM) ・ツリー法といった高速解法の適用により、 $O(N^2)$  の古典的計算コストを  $O(N \log N)$  から  $O(N)$  にまで削減して高速・大容量化を実現しています ( $N$  は未知数の個数)。計算法に関する研究としてはさらに、FMM用の密連立一次方程式ソルバの前処理手法開発や、空間木構造の階層的相似性を用いた擬似粒子FMMのM2L演算の高速化、辺上で幾何連続接続可能な面要素の開発なども行っています。現在、市販PCでも100万未知数程度の高次要素計算が可能になっています。こうした高精度・高速・大容量性能を活かして、複雑形状系 (特に、大小スケール混在問題) の応用計算を実施しています。図1は多体微粒子系の解析例 ( $14 \times 14 \times 14 = 2744$  体、 $N=1059184$ )、図2は雷雲下の人体形状導体への誘導電荷計算例 ( $8 \times 20 = 160$  体、 $N=775106$ )、図3はSF<sub>6</sub>中沿面リーダ放電の周辺場計算例 (「画素データ→メッシュ：等サイズ変換」を用いた解析の例)、図4は片肺モデル周辺の電磁誘導電流密度の解析例 (多分岐細管系解析の例：血管・リンパ・神経系・染色体などにも有効性が期待) を示したものです。

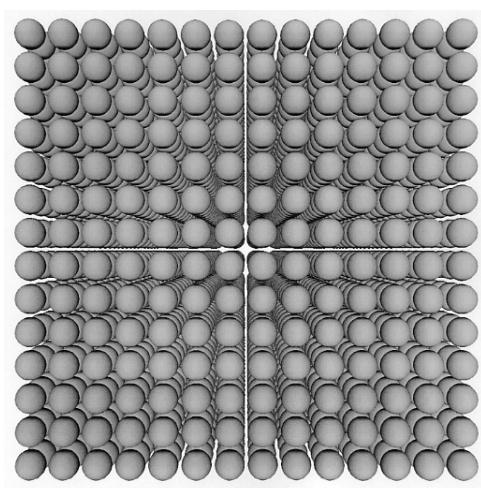


図1 一様電界下の2744体誘電体球

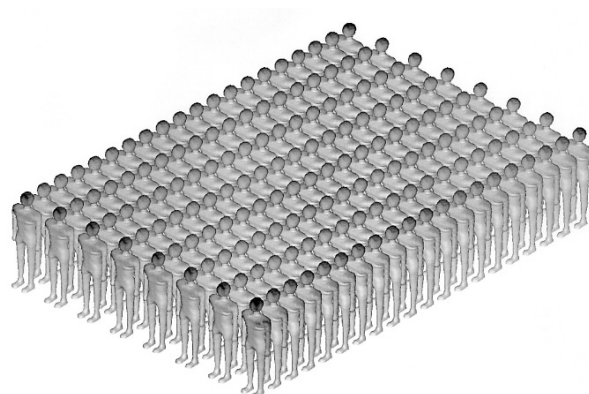


図2 雷雲下の160体人体形状導体

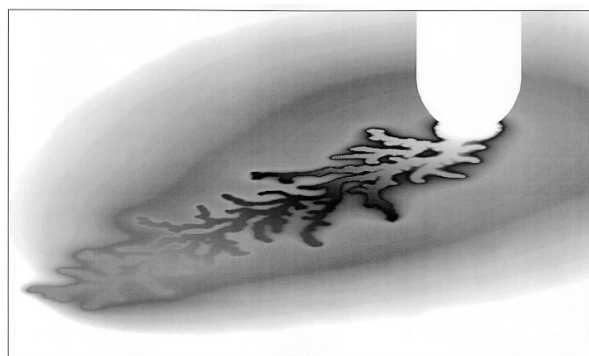


図3 沿面放電周辺場解析  
(画素データ→メッシュ：等サイズ変換の例)

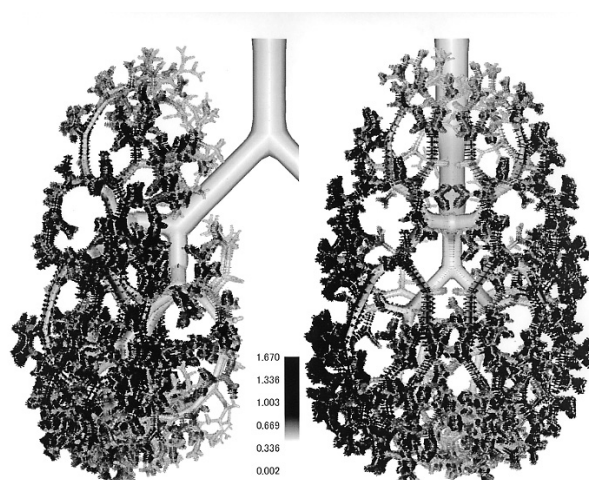


図4 片肺周辺電磁誘導電流場解析 (正面 & 側面図)

## 電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野（引原研究室） 「吸引形磁気浮上搬送系における浮上体の搬送制御」

物体を浮上させて非接触に搬送することは人類の夢の一つです。この様な搬送系では、従来不可能であった高速搬送や長時間運転が可能となります。その代表的な技術に磁気浮上があります。当研究室では、電気エネルギーの一形態である磁力を随意に制御するという観点から磁気浮上システムの研究を行っています。ここでは特に、浮上と推進を兼ねた電磁石による吸引形磁気浮上搬送装置の設計・製作を行い、搬送に伴う浮上物体の力学的挙動について検討した結果を紹介します。

当研究室で製作した磁気浮上実験装置の構成を図1に示します。本磁気浮上装置は電磁石と強磁性体を組合せた吸引制御方式によるものであり、電磁石を複数個使用して浮上した状態で搬送を実現します。この実験システムでは、(1)式に示す浮上体の垂直（上下）方向と移動（水平）方向に対する運動方程式および、(2)式に示す2つの電磁石に対する回路方程式をもとにして、電磁石の発生する磁束を電氣的に制御することにより、浮上体（鉄球）を浮上・移動させることができます。

$$\begin{cases} m \frac{d^2}{dt^2} z = mg + f_{1z} + f_{2z} \\ m \frac{d^2}{dt^2} x = f_{1x} + f_{2x} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{d}{dt} i_1 + M \frac{d}{dt} i_2 \\ e_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{d}{dt} i_2 + M \frac{d}{dt} i_1 \end{cases} \quad (2)$$

但し、 $L_1, L_2$ ：電磁石1、2の自己インダクタンス、 $M$ ：電磁石1、2の相互インダクタンス、 $e_1, e_2$ ：電磁石1、2の印加電圧、 $i_1, i_2$ ：電磁石1、2に流す電流、 $R_1, R_2$ ：電磁石1、2の抵抗、 $m$ ：浮上物体の質量、 $f_{1x}, f_{1z}, f_{2x}, f_{2z}$ ：磁石1、2における移動方向、垂直方向の吸引力。

図2は電磁石の浮上制御により、電磁石から2 mm鉛直下方に浮上体を浮上させた状態を撮影したものです。浮上体を一つの電磁石下において浮上させた状態で静止させることは比較的容易に実現できます。一方、2つの電磁石の磁束制御による浮上体の搬送（移動）は静止状態を維持するのに比べ困難となります。これは、浮上物体が電磁石の中心軸から離れた場合に浮上物体が受ける吸引力が小さくなり、位置に応じて磁束を増減させる必要があるためです。本研究では浮上体の位置を測定すると共に、磁束を制御することで浮上体の移動速度を調整し、適切な搬送を行う制御を実現しています。また実験結果より、浮上体を搬送する軌道によって浮上体がうまく移動する場合と落下してしまう場合の力学的特徴を明らかにし、浮上搬送時の浮上体の軌道が重要な要素となることを示しました。

＜参考文献＞電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会編「磁気浮上と磁気軸受」コロナ社（1993）

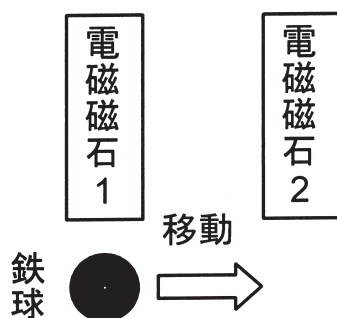


図1. 吸引形磁気浮上搬送装置の構成図

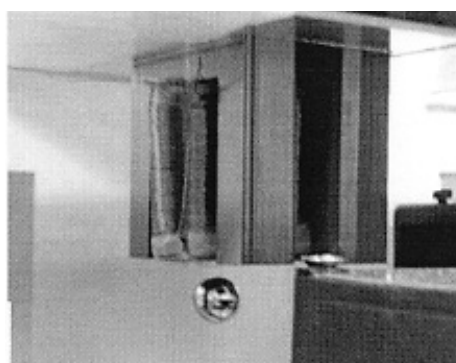


図2. 鉄球の磁気浮上及び搬送実験

## 電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「グレイコードを用いた算術演算回路」

### 1. はじめに

当研究室では精度保証付計算の研究の一環として、グレイコードを用いた算術演算回路の開発にとりくみ、現在では四則演算のアルゴリズムとそのハードウェア化を実現している [1]。グレイコードは A/D コンバータやデジタル回路設計等、様々なところで利用されているが、四則演算がこれまで実現されていなかったため、演算が必要な場合は 2 進数に変換して計算を行なう必要があった。

グレイコードはとなりあうコードが 1 ビットしか異ならないという性質をもつ。図 1 は実数の表現において、2 進コードとグレイコードの比較を表したものである。横軸が実数、縦軸の  $x_i$  は第  $i$  桁を示し、白線部と黒線部はそれぞれ各桁の値 0,1 を示している。例えば、区間  $(1/2, 9/16)$  は 2 進コードで .1000、グレイコードで .1100 と表現される。また、区間  $(7/16, 9/16)$  は 2 進数では表現できないのに対し、グレイコードでは . $\perp$ 100 と表現できる ( $\perp$  は不定を表す)。このようにグレイコードを用いると区間の適切な表現が可能となる。

### 2. グレイコードによる演算

グレイコードによる演算アルゴリズムは通常の 2 進数の場合とは異なり、次に述べるような著しい特徴をもつ。通常の 2 進数による演算は、筆算の場合のように下位桁からの桁上げを考慮して行なうため、上位桁からの計算はできない。しかし、上に示したグレイコードの性質を利用すると、区間の縮小列を適切に表現できるため、上位桁からの計算が実現できる。上位桁からの演算は応用上次のような特徴をもつ。

- ・上位桁から演算することにより、必要なところまで計算して打ち切ることができる。
- ・上位桁からの計算を続けることで任意精度の精度保証付計算ができる。

図 2 は、ある連立一次方程式  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  の解  $x_1$  の精度が入力 ( $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{b}$ ) の桁数の増加とともに向上していく様子を示している。上位桁からの計算により、解を表現する区間（黒線）が徐々に縮小する様子がわかる。真の解は黒線の中に存在するので、必要な精度に応じて計算を打ち切れればよい。

現在では、上に示したグレイコード演算の特徴を生かした応用に関する研究を行なうとともに、グレイコード演算器の小型化に向けた研究を COE 予算の援助により進めている。

<参考文献>

- [1] A. Yonemoto, T. Hisakado, M. Goto, and K. Okumura: "On-line Arithmetic Using Gray Code and Its FPGA Implementation," Proc. ECCTD, Vol. II, pp.317-320, 2003.

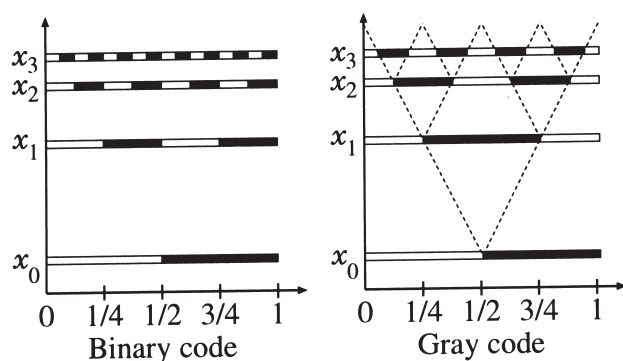


図 1 : 2 進コードとグレイコードの比較

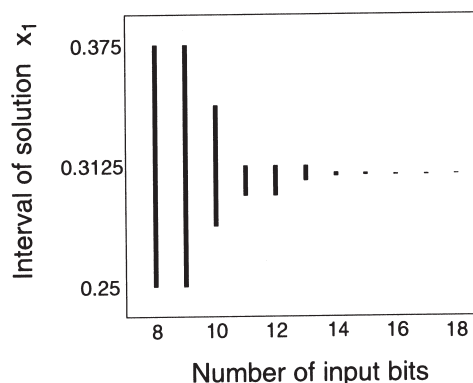


図 2 : 入力桁数の増加に対する解の精度向上

## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

## 「ジョセフソン効果による高温超伝導体の非一様性超伝導状態の研究」

高温超伝導体が発見されて17年が経とうとしている。その発見機構は、従来の超伝導を説明したBCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 機構とは異なるとされながらも、まだ明らかではない。常伝導状態では、電子間の強いクーロン相互作用により、超伝導体自身が、キャリアが存在して導電性を有する部分とスピンが反強磁性的に配列している絶縁性の部分に分かれて自己組織化し、ストライプ構造と呼ばれるエネルギー的に安定な微細斑構造となっていることが知られている。果たして、超伝導状態もこのような不均一な状態になっているのだろうか。これを知ることは、発見機構を明らかにする上でも、高温超伝導の応用に関しても大変重要である。われわれは、これまで当研究室で開発してきた短パルス層間トンネル分光法 [1] を用いてこの問題を検討してきた [2]。

超伝導状態の不均一性を確認することは難しい。超伝導状態では電気抵抗が0となるために、超伝導状態の不均一性に関係する長さや面積などスケールを含む物理量が現れてこないからである。不均一性のスケールが磁場侵入長よりも短い場合、マイスナー効果による差異も少なくなる。このような困難な問題に対して、固有ジョセフソン接合は極めて有効である。

固有ジョセフソン接合とは、高温超伝導体など、層状構造超伝導体で原子層1層程度に薄い超伝導層と絶縁層が交互に積層された構造を指し、それが天然の理想的なトンネル型ジョセフソン接合となっているものである。トンネル型ジョセフソン接合を考えると、ジョセフソン電流は障壁絶縁層の相対する両側が超伝導状態の時にのみ流れる。均一な超伝導体ならば最大ジョセフソン電流は接合の面積に比例するが、もし、不均一な場合には超伝導となる面積分率の自乗に比例することになる。この面積分率は不均一な常伝導状態における導電性分率とほぼ等しいと考えられるので、結果的に超伝導状態が不均一ならば固有ジョセフソン接合の最大ジョセフソン電流は $c$ 軸方位導電率の自乗に比例することになる。また最大ジョセフソン電流は超伝導エネルギーギャップにも比例するので、超伝導ギャップの大きさも合わせて知る必要がある。このような物理量を同時に測定可能な方法が短パルス層間トンネル分光法である。

短パルス層間トンネル分光法では固有ジョセフソン接合を用いる。この方法では通常のトンネル分光で得られるエネルギー電子状態と同時に最大ジョセフソン電流など、 $c$ 軸方向の輸送特性も同時に測定することが可能である。図1は転移温度 $T_c$ が110Kの高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の短パルス層間トンネル分光結果で超伝導ギャップがホールキャリア濃度とともに減少する傾向を示している。同時に得られた $c$ 軸方位導電率、最大ジョセフソン電流密度、常伝導トンネル抵抗などからわれわれは高温超伝導の超伝導状態が非一様である可能性を見出している [2]。

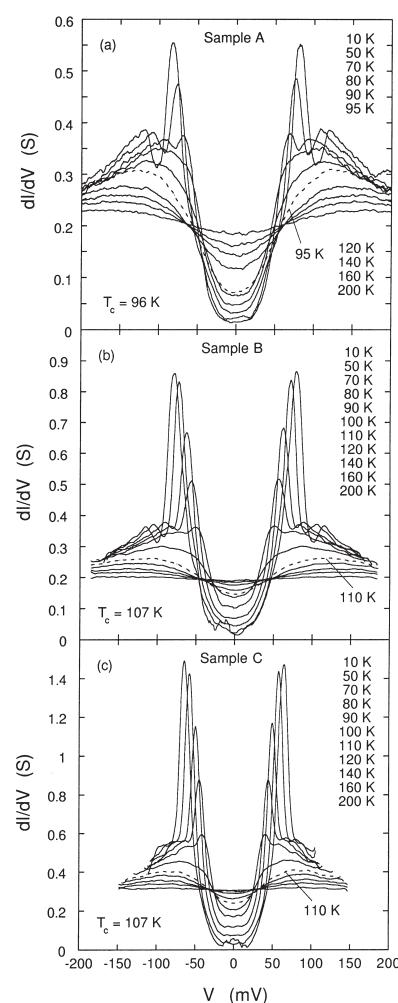


図1  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  短パルス層間トンネル分光結果

[1] M. Suzuki, T. Watanabe, and A. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **82**, 5361 (1999).

[2] Y. Yamada, K. Anagawa, T. Shibauchi, T. Fujii, T. Watanabe, A. Matsuda, and M. Suzuki, Phys. Rev. B **68**, 054533 (2003).

## 電子物理工学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

### 「S—Kチャート法による微小電子源の電界電子放出陰極材料の評価」

真空マイクロエレクトロニクスあるいは真空ナノエレクトロニクスは、現在の微細加工法を駆使して半導体素子とほぼ同寸法であるミクロンあるいはナノ寸法の真空電子デバイスを開発する分野です。この分野は、半導体を遙かに越える超高周波素子、耐環境素子の開発の可能性を持っているばかりでなく、種々の新しいセンサー、超薄型の省電力ディスプレイなど実用的なデバイスへの期待も大きい領域です。このような極微小の真空デバイスを実現するために最も重要なことは、デバイス内部に電子を安定に供給できる極微小の電子源を開発することです。

ナノ寸法の電子源の電子放出の原理としてよく使われるのは電界電子放出です。これは、陰極の先端径が小さくなるほど先端の電界の集中度がよくなり小型化することが性能の向上につながるため、微小電子源に好都合だからです。電界電子放出特性は、ファウラー・ノルドハイムの式からも分かるように、エミッタ（陰極）材料の仕事関数と先端径などの先端構造に強く依存します。どのような材料が微小電子源の電界電子放出エミッタに適するか見極めることは、この分野の進展にとって非常に重要なことなので、当研究室の研究テーマの一つとして電界電子放出陰極材料の評価を行っています。

実際に動作しているエミッタの仕事関数や先端構造を知ることは非常に難しいことですが、当研究室では電界電子放出エミッタの電流—電圧特性から解析する方法を見いだしました。電界電子放出特性を評価する一般的な方法は、図1に示すように、電流、電圧をパラメータとした縦軸・横軸をもつグラフ（F—Nプロット）を描き、その特性が直線的であれば電界電子放出であると評価しています。しかし、この直線の傾きだけでは、材料の仕事関数と先端構造を独立的に知ることができません。F—Nプロットの切片と傾きを横軸—縦軸としたグラフ（S—Kチャート：図2参照）では、仕事関数（右上が低く、左下が高い）と等価的な放出面積（右下が大きく、左上が小さい）が2次元の座標位置によって評価できるようになります。図2中には、種々のxの値を持つNbN<sub>x</sub>エミッタ材料の特性位置を示しています。点に添えた数字は他の方法で測定した仕事関数を示し、点の大きさが小さいものは雑音が少なく安定な材料であることを示しています。S—Kチャートによる評価は、図3に示すように、種々の異なった材料の特性評価にも利用できます。

S—Kチャートによる評価法は、国内の研究機関だけでなく、外国の研究機関においても利用されるようになってきています。

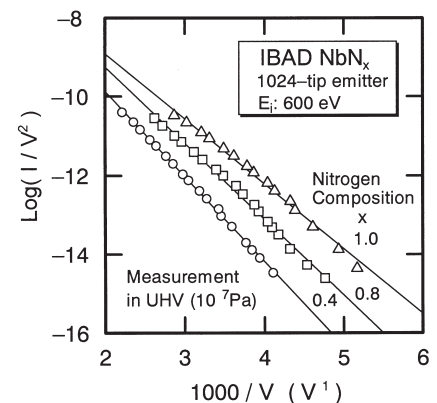


図1 F—Nプロット

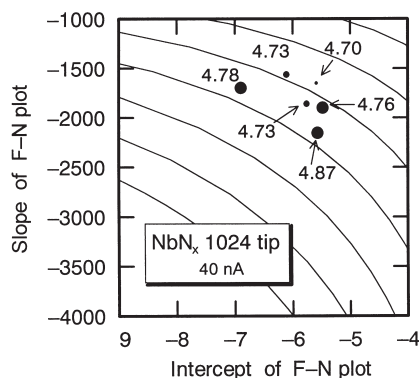


図2 S—Kチャートの例

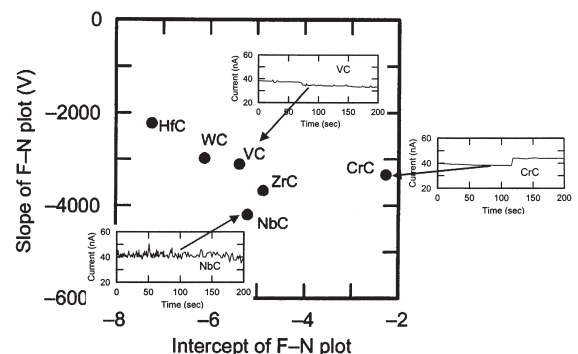


図3 S—Kチャートによる異なる材料の評価

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野

### 「ワイドギャップ半導体SiCを用いた高耐压横型MOSFETの作製」

シリコンカーバイド (SiC) は、高い絶縁破壊電界や熱伝導度を有するワイドギャップ (広禁制帯幅) 半導体であり、これを電力変換用パワーデバイスに適用すれば、現用のシリコン (Si) デバイスの性能を大きく打破する高耐压・低損失・高速の電力変換システムを構築するキーデバイスを実現できると期待されている。このSiCの優れた物性は古くから認識されてきたが、結晶成長、欠陥制御、物性の解明、表面や界面制御、デバイス作製の要素技術などでSiやGaAsに遅れをとってきた。しかしながら、近年、この分野の進展が著しく、3インチウエーハの市販や300V/600V系ショットキーダイオードの市販が始まった。今後、SiCを用いて高速・低損失・高速の電力変換システムを実現するためには、高性能SiCパワースイッチ (トランジスタ) が必須となる。

本研究では、電圧駆動、並列動作が容易、安全動作領域が広いという特長を有するパワーMOSFETに着目した。SiパワーMOSFETでは、耐压の上昇と共にオン抵抗 (直列抵抗) が増大し、300V以上の耐压では実用的ではなくなる。これをSiCで実現できれば、600V～3000V程度の高耐压でも極めてオン抵抗の小さい (電力変換時の損失の小さい) MOSFETを実現できる。大電力用のシステムには、縦型のディスクリートデバイスが使われるが、小～中容量用途には制御回路や駆動回路との集積化が容易な横型デバイスが有利である。そこで、本稿ではSiCを用いた横型パワーMOSFETを目指した基礎研究を紹介する。

図1に、今回作製したSiC横型MOSFETの断面構造を示す。高耐压を維持するために、RESURF (Reduced Surface Field) 構造を採用し、さらにドレイン端での電界集中を緩和するために、LDD (Lightly Doped Drain) 構造を用いた。まず、二次元デバイスシミュレータを用いて構造設計を行った。ドレイン端の電界集中によるpn接合のアバランシェ破壊とゲート端における酸化膜の絶縁破壊を考慮して、RESURF領域、LDD領域の最適ドーピング密度などを決定した。次に、SiC基板上にp型SiC層をエピタキシャル成長し、複数回のイオン注入によって図1の構造を作製した。ゲート酸化膜は高温での熱酸化により形成した。チャネル長は $3\mu\text{m}$ 、チャネル幅は $200\mu\text{m}$ 、ゲート酸化膜厚は130nmである。

図2に作製したSiC MOSFETのドレイン特性の一例を示す。MOSFETはしきい値電圧1.0Vの良好なFET特性を示し、ゼロゲート時に1620Vという高いドレイン耐压を得た。この耐压はRESURF MOSFETとしては最高値である。また、ゲート電界 $2.5\text{MV/cm}$ におけるオン抵抗は $242\text{m}\Omega\text{cm}^2$ となり、Si MOSFETの理論限界を超えることができた。今後は、MOS界面特性の向上によるオン抵抗のさらなる低減が課題である。本研究は、将来の高耐压パワーICの実現に貢献するものと考ええる。

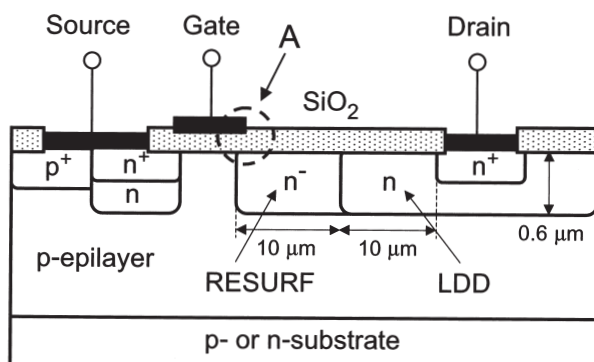


図1 SiC横型MOSFETの断面構造

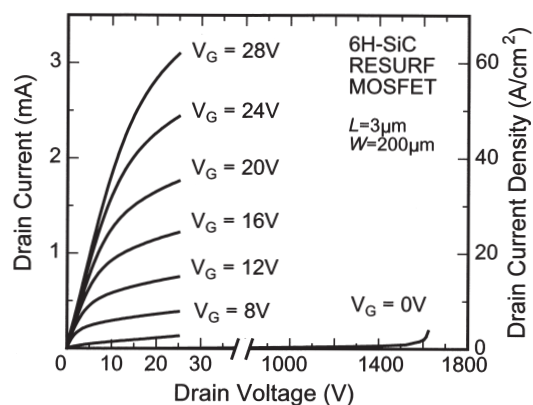


図2 作製したSiC横型MOSFETのドレイン特性

## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野（藤田茂夫研究室）

## 「窒化物系歪み量子構造における電界制御に基づいた発光効率の向上」

GaNを中心とした窒化物半導体によって、既に紫外－緑色領域での発光ダイオード（LED）やレーザーダイオード（LD）が実用化され、信号機の光源、白色LED用光源、ブルーレイディスク用光源、医療機器用光源、など様々な分野において応用が広がっている。発光波長を拡大できれば、さらに大きな応用分野（＝市場）の開拓につながると期待され、AlGaIn（短波長用）やInGaIn（長波長用）の研究は現在の最重要課題の一つとなっている。ここで問題となるのは、AlN、GaN、InNの間に存在する格子定数差である。AlN-GaNの格子不整は約2%であり、一方、InN-GaNのそれは11%にも達する。したがって、発光素子の基本形である量子井戸構造を、例えばInNを井戸層、GaNを障壁層として作製した場合、格子不整に耐えてInNが歪むか、あるいは耐えることができず欠陥が導入される。歪みも欠陥も発光効率を低下させるため、結果として高効率の発光を得ることが難しくなる。当研究分野では、歪による発光効率の低下をいかに避けるかを理論的に検討し、その実現に向けた基礎的な実験を行っている。

GaNをはじめInN、AlNは全てイオン結合の傾向が強く、結晶が歪むとイオン結合に起因した分極のバランスが崩れピエゾ電界が発生する。ピエゾ電界の有無による量子井戸構造のバンドの変化を電子と正孔の波動関数とともに図1に示した。ピエゾ電界がないとき（a）は、電子と正孔の波動関数（存在確率に関連）は位置的に良く重なっているため両者は効率よく再結合し、発光効率は高まる。一方、ピエゾ電界があると（b）、電界によってバンドに傾きが生じ、電子と正孔の波動関数が反対方向の井戸－障壁界面に押し付けられるため、両者の重なりが小さくなる。このことは、両者が同じ位置に存在する確率が減る、つまり再結合確率が低くなることを意味しており、結果として発光効率の減少につながる。GaN/InGaIn(3nm)/GaN量子井戸構造を例にとり、ピエゾ電界の大きさを結晶軸（c軸）の傾きの関数として計算した結果を図2上段に示す。同図下段はピエゾ電界の存在の結果として、再結合確率がいかに変化するかを計算した結果である。既に述べたようにピエゾ電界が大きい（小さい）と再結合確率は小さく（大きく）なる。通常のデバイスは結晶軸傾斜0度（c軸配向）であるから、大きなピエゾ電界を内包し、再結合確率が低いことが分かる。一方で、結晶傾斜角を37度か90度とできればピエゾ電界が0となり、歪による発光効率の低減を避けることができると期待される。

実際に作製するために、われわれのグループでは、GaAs{114}B基板を利用することを提案している。というのも、有機金属気相成長法によりGaAs{11n}基板（ $n=1,2,3,4,8$ ）上にGaNの結晶成長を試みたところ、{114}B基板上で、最も構造的・光学的に優れたGaNが作製でき、しかもそのとき結晶軸が約30度傾くことがわかったからである。図2を見ると、結晶軸傾斜30度の場合は、c軸配向（＝0度）と比べて、ピエゾ電界が抑えられ、再結合確率が增加することがわか

る。したがって、この基板を用いて発光素子が作製できれば、再結合確率を著しくは損なうことなく、In組成やAl組成を増やし、波長領域の拡大が可能になると期待され、現在、その実現に向けた実験研究を行っている。

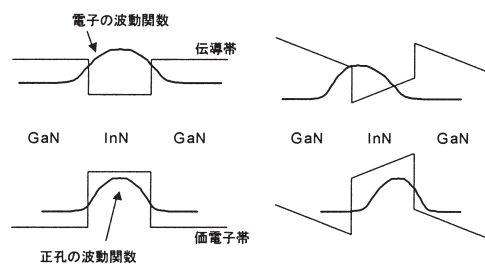


図1：ピエゾ電界がない場合（a）とある場合（b）のバンドと電子・正孔の波動関数の様子

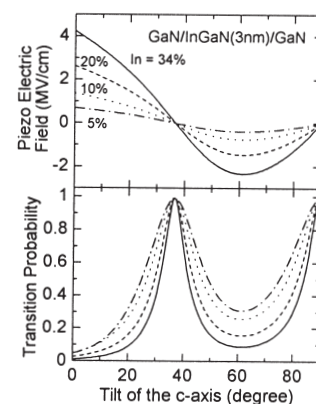


図2：ピエゾ電界と再結合確率の結晶軸（c軸）傾き依存性

## クラスターイオン工学部門（高岡研究室）

### 「液体クラスターイオンと固体表面との相互作用の研究」

#### 1. 研究の背景

原子、分子あるいはクラスター状のイオンを生成する場合、これまでは主に固体材料や気体材料がイオン発生源のソース材料として用いられており、液体材料はあまり検討されていませんでした。液体材料には、有機化合物のように、多種・多様な構造や化学的性質を有した物質が存在します。したがって、種々の異なる化学的性質を持つ液体物質のクラスターイオンを用いることによって、例えば、固体表面の親・疎水性や潤滑性などの制御や付加・置換反応による表面改質を行うことができます。また、クラスターイオンと固体表面との相互作用はフェムト秒からピコ秒の瞬時の多体衝突過程であり、クラスター自身の化学的特性を併用することによって、瞬時の化学反応を制御することができます。さらに、クラスターイオンの運動エネルギーを利用することができるので、固体表面の特定の原子結合を切断したり、表面を局所加熱したりすることが可能となります。当研究室では、種々の化学的性質を持った液体有機化合物を用いて、液体クラスターイオンの生成および固体表面へのイオン照射効果の解明を目的として研究を行っています。

#### 2. 研究の成果

開発したクラスターイオンビーム装置を用いて、液体クラスターを生成することに成功しました。特に、液体の有機化合物の中でも比較的構造が簡単で分子量の小さいエタノールを用い、生成したエタノールクラスターイオンのサイズ分布や各種基板への照射特性を明らかにしました。図1は液体クラスターソースの概略図です。加熱された液体物質の蒸気は、液体ソースの一端に接続されているノズル喉部の小孔を通して真空中に噴射されます。このとき、断熱膨張によって塊状分子集団すなわちクラスターが生成されます。さらに、生成されたクラスターは、電子衝撃によってイオン化され、減速電界法によってサイズ分離された後、加速されて基板に照射されます。

図2は、生成したエタノールクラスターのサイズが95以上のクラスターイオンを、シリコン（Si）基板および酸化シリコン（SiO<sub>2</sub>）膜に加速電圧を変えて照射して、シリコン基板および酸化シリコン膜がそれぞれスパッタされた深さを示します。図に示すように、シリコン基板については、加速電圧の増加と共に、スパッタされた深さは急激に増大しているのがわかります。また、スパッタリング率を計算すると、加速電圧が9 kVでは178atoms/ionの値が得られ、従来の単原子のアルゴンイオンビームによるスパッタリング率に比べて、100倍以上のスパッタリング率が得られています。また、酸化シリコン膜に比べて、シリコン基板のスパッタリング率は7倍以上と大きく、エタノールクラスターイオンによる化学エッチングが優先的に生じていることがわかります。

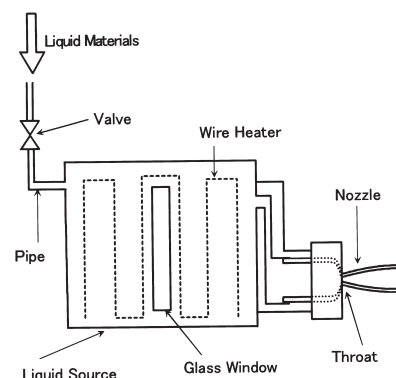


図1 液体クラスターソースの概略図

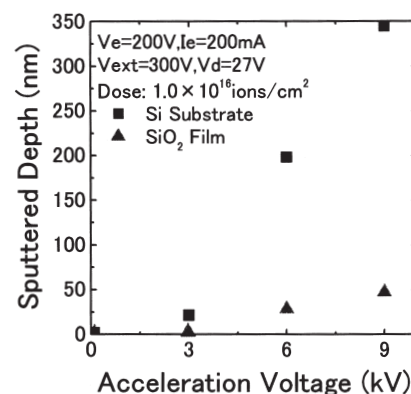


図2 Si基板およびSiO<sub>2</sub>膜のスパッタ深さの加速電圧依存性

## 知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室） 「3次元ビデオの生成・編集・表示」

### 1. 3次元ビデオとは

3次元ビデオは、コンピュータグラフィックスによる仮想的な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次的にそのまま記録した実写立体ビデオ映像で、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究極の映像メディアである。我々は、3次元ビデオという新たな情報メディアを開拓し、デジタルテレビ放送、広帯域インターネットを活かした21世紀における映像メディア技術および文化を産み育てることを目的として研究を進めている。

### 2. 研究成果

現在開発中の実時間3次元ビデオ撮影システムは、人物の周囲に配置された25台のビデオカメラと30台のPCを持つPCクラスタから構成されている（図1）。各PCにはそれぞれ我々が開発した視点固定型パン・チルト・ズームカメラが備えられており、移動する対象を実時間で追跡してその映像を撮影することが可能である。

システムでは以下の方法で3次元ビデオの生成を行っている。

- (1)各PCにおいて、カメラで撮影されたビデオフレーム画像（図3最上段）から背景差分によって多視点から見た対象のシルエットを抽出する（図3上から2段目）。
- (2)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、得られた視体積の積集合によって対象形状の3次元ボクセル表現を求める（図3上から3段目）。
- (3)視体積交差法で得られたボクセルデータの表面に3角形パッチを張ったのち、パッチの頂点位置を移動させることによって正確な対象の表面形状を求める（図3下から2段目）。
- (4)パッチ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、パッチ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・色をパッチに張る（図3最下段）。
- (5)以上の処理で、1フレームの3次元ビデオが生成され、動画を作るには（1）～（4）の処理を繰り返せばよい。

図2はダンスをしている女性（一人）の姿を撮影した3次元ビデオを、3次的にコピーし、京大の時計台を写した360°全方位画像を背景として編集した3次元ビデオ作品で、対象を見る視点の位置・移動法、ズーム倍率を視聴者がその場で対話的に指定できる。また、対象の3次的な運動が克明に記録されているため、スポーツや踊りにおける動作分析がより正確に行える。

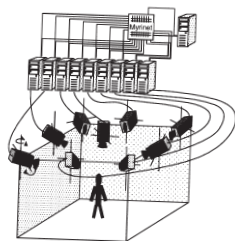


図1 3次元ビデオ撮影システム

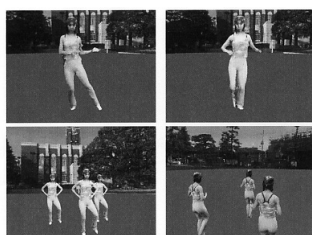


図2 編集された3次元ビデオ

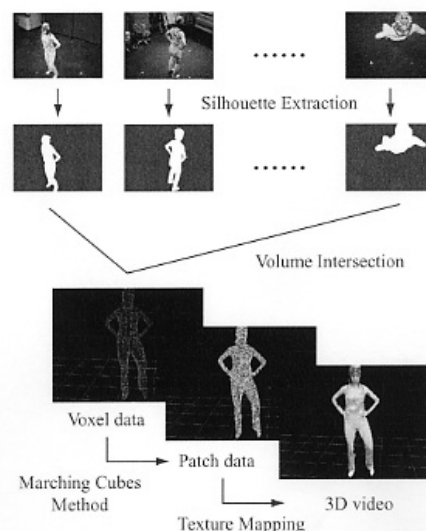


図3 3次元ビデオの生成プロセス

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室） 「ブロック暗号を利用した暗号用ハッシュ関数の安全性の解析」

近年のインターネット、携帯電話網の急激な普及により、様々な社会活動が通信ネットワーク上で行われる高度情報化社会が到来しつつある。それらの活動を安全かつ円滑に行うためには、セキュリティを保証するための暗号技術が不可欠である。

暗号用ハッシュ関数（cryptographic hash function）は、任意の長さの入力を固定長の出力に変換する関数であり、例えば、デジタル署名を行う際のメッセージの圧縮など、様々な暗号方式で利用される重要な要素の一つである。このような暗号用ハッシュ関数は、同じ出力を与える入力が多数存在するが、以下の二つの性質を満たすことが要求される。これらの性質（の少なくとも一方）を満たす暗号用ハッシュ関数を安全であると呼ぶ。

- (1) ある入力を与えられたとき、その入力と同じ出力を与える別の入力を見つけることが難しい。
- (2) 同じ出力を与える相異なる入力の組を見つけることが難しい。

暗号用ハッシュ関数は通常図1のように、圧縮関数と呼ばれる固定長の入出力をもつ関数  $f$  の縦続接続により構成される。圧縮関数の構成法の一つとして、これまでに、DES（Data Encryption Standard）やAES（Advanced Encryption Standard）のようなブロック暗号を利用した構成法が提案されている。このような構成法は、安全なブロック暗号を用いることにより安全な暗号用ハッシュ関数が構成できるという期待に基づいている。いくつかの例を図2に示す。なお、この図で四角形がブロック暗号の暗号化関数であり、この中の三角印への入力が暗号化関数の秘密鍵に対応する入力である。

図2の例のように、圧縮関数がブロック暗号の暗号化関数を1回だけ用いて構成される暗号用ハッシュ関数の安全性については、これまでに次の二つの結果が知られている。一つは理想的な仮定の下での結果であり、暗号化関数が真のランダム関数であるという仮定の下で、図2の例を含む圧縮関数からなる暗号用ハッシュ関数が上述の(1)、(2)両方の意味で安全であるということが証明されている。もう一つは現実的な仮定の下での結果であり、暗号化関数が擬似ランダム関数であるという仮定の下では、上述の(2)の意味での安全性を証明することはできないということが知られている。ここで、擬似ランダム関数であるということは、ブロック暗号が現実的な時間で解読できないことを示している。

われわれは、暗号化関数が擬似ランダム関数であるという仮定の下で、反例を示すことにより、(1)の意味での安全性を証明することができないことを明らかにした。現在は、圧縮関数が暗号化関数を2回用いて構成される場合についての検討も進めており、これについてもいくつかの結果を得ている。

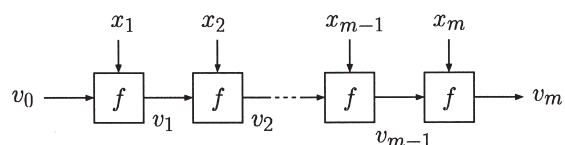


図1：圧縮関数を用いた暗号用ハッシュ関数の構成

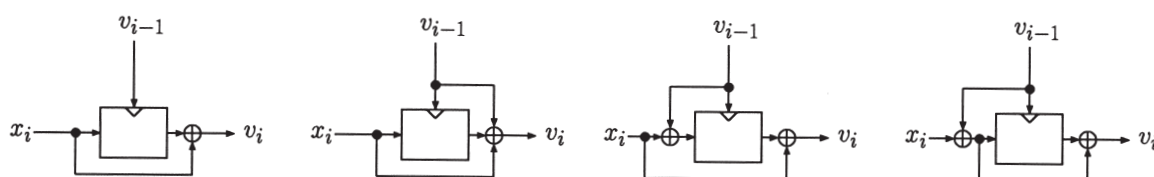


図2：ブロック暗号を利用した圧縮関数の構成例

## 集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研究室） 「高性能スタンダードセルライブラリの開発」

現在のシステムLSIやASIC（Application Specific Integrated Circuit）の設計では、セルと呼ばれる論理ゲートに相当する部品を用いた設計が一般的です。このようなセルベース設計では、品質の高いスタンダードセルライブラリを用いて設計することが高性能な回路設計に必須となっています。当研究室では、これまでにセルのレイアウトを自動生成するシステム（VARDS）を開発してきました。このシステムを利用し、必要に応じて機能拡張することにより0.18 $\mu\text{m}$ プロセス、0.35 $\mu\text{m}$ プロセス向けのスタンダードセルライブラリを開発しました。開発したライブラリは東京大学に設置されている大規模集積システム設計教育センター（VDEC）を通じて公開されており、日本の多くの大学におけるLSI設計に利用されています。

では、開発したライブラリの詳細について説明しましょう。セルライブラリの特徴を表す指標にセル高さがあります。高さの高いセルは、内部のトランジスタの寸法を大きくとることが出来るため駆動力が高く、大規模高速回路の設計に適しています。一方、高さの低いセルでは、トランジスタ寸法が小さく容量が小さいことから、低消費電力小面積回路の設計に適します。0.35 $\mu\text{m}$ 向けのライブラリでは、設計者が設計したい回路の性質にあわせてライブラリが選択できるよう、高さが14配線ピッチ、9配線ピッチの二つのライブラリを開発しました（図1参照）。セルライブラリに含まれるセルの構成として、論理の種類と駆動力の種類の二つの軸があります。近年は、相対的に配線負荷が回路性能に影響を与えるようになってきているため、駆動力の種類が豊富にあることが高性能な回路設計に不可欠となっています。開発したライブラリでは、インバータやバッファなどの基本セルで11種類、他の論理ゲートについても3－8種類程度と豊富な駆動力を提供し、高性能回路設計に貢献しています。また、トランジスタ寸法が非常に小さいセルも含ませており、低電力回路の設計にも有効なライブラリとなっています。ライブラリの公開には、正常な動作の確認が不可欠です。誤りがあった場合、ライブラリ利用者の設計したLSIすべてが動作しなくなるためです。公開を行なう前に、シリコン上でスタンダードセルの正常動作を確認するためにテスト回路を設計、製造、評価しました（図2参照）。論理の検証、動作の検証を行ない、正常な動作を確認しました。初期に公開したライブラリにはCADツールへ与える情報に関していくつか問題がありましたが、利用者からのフィードバックを元に多少の修正を行なうことで解決できました。研究成果を研究室内だけにとどめておくのではなく、外部に発信、提供する取り組みも行なっています。

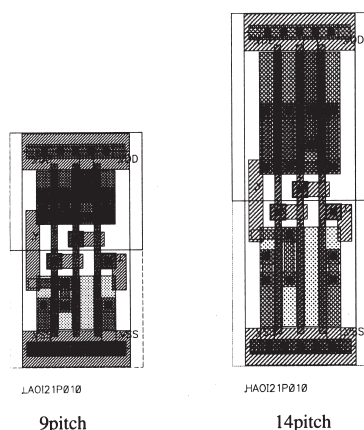


図1 高さの異なるセルレイアウトの例（AOI21ゲート、0.35 $\mu\text{m}$ プロセス）

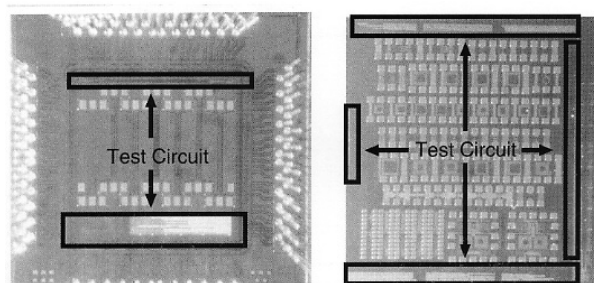


図2 動作検証用に試作したチップの写真（左：0.18 $\mu\text{m}$ プロセス、2.8mm□、右：0.35 $\mu\text{m}$ プロセス、4.9mm□）

## エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（吉川榮和研究室） 「拡張現実感技術を用いたプラント保守作業支援システムの開発」

近年、電力自由化等の影響で、発電プラントの信頼性・安全性の向上と運転管理コスト軽減の両立が求められるようになった。そこで最近情報技術の適用によりプラント保守管理の合理化が検討されているが、当研究室では、IT技術を用いてプラント保守作業を支援することを目的として、拡張現実感技術を用いたプラント保守作業支援システムの開発を進めている。

拡張現実感技術とは、図1、図2に示すようにHMD（ヘッドマウントディスプレイ）等のデバイスを装着した作業員の視界中に、コンピュータを用いて合成した人工物を重畳して表示することにより、あたかも目の前に人工物が存在しているかのような感覚を提示する技術である。この技術の特徴は、作業員が作業環境内を動き回っても、常に視界中の適切な位置に作業支援情報が提示されるため、従来の紙やディスプレイを用いた情報参照方法と比べて、直感的に作業対象箇所や危険箇所の情報を参照できることである。

この拡張現実感技術を用いたプラント保守作業支援システムを実現するためには、作業員が見ている位置・方向を高精度・リアルタイムに計測するトラッキング技術が不可欠であり、これまでの技術では作業環境に位置が判るマークなどを貼っておき、これを基点に位置・方向を計算する手法のため、事前に多数のマークを作業環境に設置しておかねばならない。そこで、当研究室では、システムの運用性を向上させるために自然特徴点とジャイロ・加速度センサを併用したマークレスのトラッキング技術を開発している。この技術が実現されると、拡張現実感技術の適用可能範囲が大幅に広がることになり、医療・産業・教育・娯楽などの様々な分野で拡張現実感技術が利用されるようになることが期待できる。

一方、実際の現場作業に拡張現実感技術を適用するためには、個々の現場に応じて適切なインターフェースを設計することも重要である。当研究室では、各種HMDやPDA、TabletPC等の情報参照機器を用いて保守作業支援システムを実現した場合の、作業員ワークロードを各種ユーザビリティ評価実験を通して定量的に計測する研究も行っている。

さらに、当研究室では、RFID（Radio Frequency IDentification）と拡張現実感技術を連携させることにより、プラントの系統隔離作業を対象に、支援システム使用時の作業の直感性と信頼性を両立させるための手法の開発も行っている。

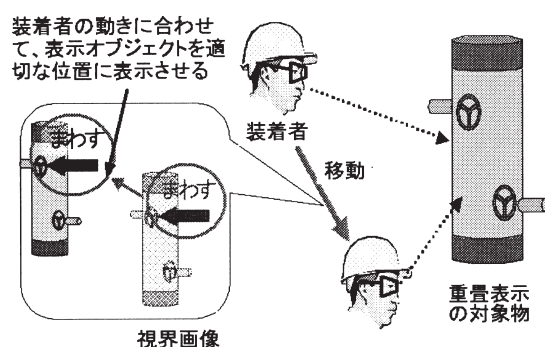


図1 拡張現実感を用いた重畳表示

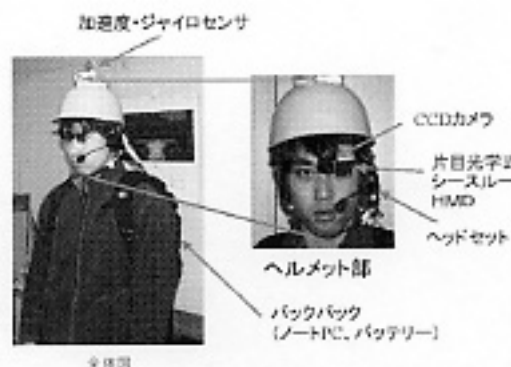


図2 システム外観

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室） 「超流動ヘリウム冷却LHDコイルの安定性」

化石燃料に代わる将来のエネルギー源として期待されている核融合炉においては、一億度に近い超高温プラズマを閉じ込めておくために強い磁場を必要とし、超電導マグネットの利用が不可欠です。核融合科学研究所のLarge Helical Device (LHD) は超電導コイルを用いた世界最大規模のヘリカル型プラズマ実験装置であり、そのヘリカルコイルは4.4Kの液体ヘリウム (He I) で冷却されています。コイルの更なる安定化・高磁場化のためには、1.8Kの超流動ヘリウム (He II) で冷却することが考えられます。超流動ヘリウムは粘性がないためコイルの隅々まで浸透し、熱を強制的に排出できるなど優れた冷却特性を有し、冷媒温度が低いことによる臨界電流密度の向上と相俟って超電導マグネットの安定化・高磁場化を実現する冷却材として期待されています。本研究では、実機ヘリカルコイルを超流動冷却した場合の性能改善を予測するために、実際にヘリカルコイルに用いられている導体を使って小型の試験コイルを製作し、He I冷却とHe II冷却を比較して安定性試験を行っています。図1に示したのは導体の断面図です。

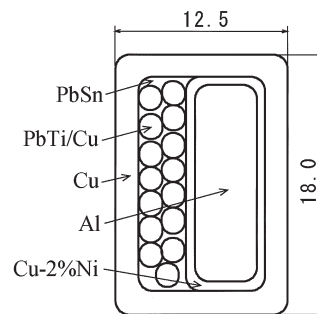


図1 LHD導体の断面図

設計製作した試験コイル（図2）は、半径160cm、高さ260cmで、ボビン上部で導体の両端を接合した短絡コイルとなっています。これは数十kAにも及ぶ臨界電流を持つLHD導体に外部電源から電流を供給するのが難しいため、試験コイル外周に設置された外部磁場印加用超電導マグネット（内径20cm、最大磁場7T）から電磁誘導を応用して電流供給を行うためです。つまり、外周マグネットの電流を増加させることで、試験コイルに数十kAもの試験電流を誘起させます。実験は、外部磁場印加用マグネットに通電することで試験コイルに一定の磁場及び電流を与えた後、試験部に取り付けたヒータによりパルス状の熱入力を与えて常電導の芽を作り、この常電導部で通電電流によるジュール熱が発生し、熱の伝播と共に常電導部が伝播する過程を導体に設置した電位タップや温度計により観測します。そして、熱入力遮断後に、超電導に回復するか、あるいは常電導部が残るかのしきい値となる通電電流を限界電流として試験コイルの安定性を考察します。

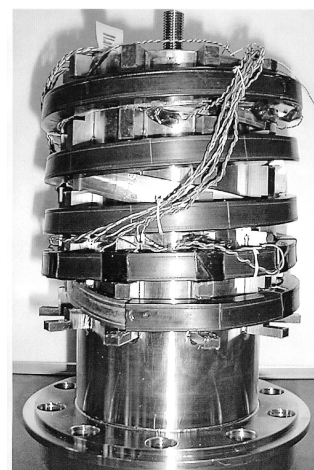


図2 LHD試験コイル

この導体は図1に示すように左右対称な構造をしていないため、ある電流と磁場の範囲で、短い長さの常電導部が一時的に進行波のように片側だけに伝播し、消滅するという興味深い現象が起こります。図3は試験結果の一例を示しており、 $I_{r1}$ がヒータ部付近だけに常電導部が発生し、ヒータを切ると超電導に回復する領域の最大電流を示しており、 $I_{r2}$ 以上では常電導部が両側に大きく伝播します。この二つの電流値の間に挟まれた領域で片側伝播が観測されます。 $I_{r2}$ を基準として安定性を考察した場合、常流動冷却から超流動冷却に移行することで、LHD導体の安定性は大きく改善されることが分かります。今後、更に低い温度領域での安定性を明らかにすると共に、何故片側伝播のような現象が起こるのか解析することを計画しています。

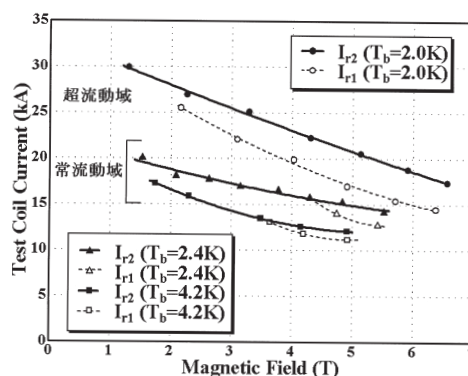


図3 安定性試験結果  
(熱入力125W、パルス幅100ms)

## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野（佐野研究室） 「ヘリオトロンJ装置のECHプラズマにおけるH-mode特性の解明」

ヘリオトロンJ装置（標準回転変換0.557、大半径1.2m、小半径0.1-0.2mの低磁気シア・ヘリカル軸ヘリオトロン配位）における高温プラズマ閉じ込め研究では、次世代のヘリオトロン磁場の開拓を目指して、高温プラズマの更なる閉じ込め改善を達成するための新たな概念開発実験を展開することを、その主要な研究目的としている。今回の報告では、最近見いだされたECHプラズマの閉じ込め改善モード（H-mode）について紹介する。

H-modeの閉じ込め改善は当初、ドイツのASDEXトカマク（Wagner, 1982）で発見され、その後、他の多くのトカマク及びステラレータでも見い出されるに至った。現在、核融合を目指した高温プラズマ閉じ込めの改善にとって1つの必要条件と認識されている。しかし、その発生メカニズムの解明や効果的な制御法の開発については多くの課題が残されたままとなっている。高磁気シアを特徴とするヘリオトロンE装置（1980-1997）では明確なH-modeによる閉じ込め改善が見い出されなかった実験事実を背景として、新たに構築された低磁気シア・ヘリオトロンJ装置での関連する実験結果が期待されていた。

これまでのヘリオトロンJ装置の70GHz, 0.4MW ECH実験では、通常モードでの閉じ込め特性として、国際ステラレータ比例則（ISS95）を凌駕する良好な閉じ込め特性を明らかにしてきたが、今回ECHパルス印可中での強いガスパフ運転によって、ある特定の回転変換ウィンドウでH-modeが生起することが発見された。図1にその典型的放電を示す。回転変換0.542の配位のECHプラズマ及び回転変換0.623の配位のECHプラズマの2つの放電でのプラズマエネルギー $W_p^{\text{diam}}$ 、線積分プラズマ密度 $n_e L$ 、 $H\alpha$ 信号、SOL領域のイオン飽和電流 $I_{\text{sat}}^{\text{SOL}}$ 信号の時間変化を示す。ECH印可中の速い時間スケール（<1ms）で、粒子及びエネルギーの閉じ込め状態の自発的な遷移が発生し、エネルギー閉じ込め時間の時間スケール（10数ms）において、H-mode閉じ込めの特徴である $H\alpha$ 信号（及びイオン飽和電流 $I_{\text{sat}}^{\text{SOL}}$ ）の急激な減少と、プラズマ密度 $n_e L$ の上昇、プラズマエネルギー $W_p^{\text{diam}}$ の上昇が観測された。とくに回転変換0.542のECHプラズマの詳しいデータ解析によれば、エネルギー閉じ込めのISS95比例則に対する改善度 $H_{\text{ISS95}}$ は1.5を超えることが明らかとなった。この配位は、いわゆるセパトリックス放電であるが、一方、回転変換0.623の配位は、放電管壁に対して部分リミッター配位となっている。現在、回転変換0.623のECHプラズマについてはHISS95の増加が少ない。H-modeの発生がある特徴的な回転変換に制限されること、またH-mode遷移に閾値パワーまたは閾値プラズマ密度が存在すること等、トカマク等と異なるプラズマ物理、あるいはトカマク等と共通するプラズマ物理の問題が提供されており、国際会議等でのホットな話題として討論されている。その後、NBI-onlyプラズマ及びECH+NBIプラズマにおいてもH-modeが見い出されたので、これらについての統一的な理解を目指した実験を進めているところである。

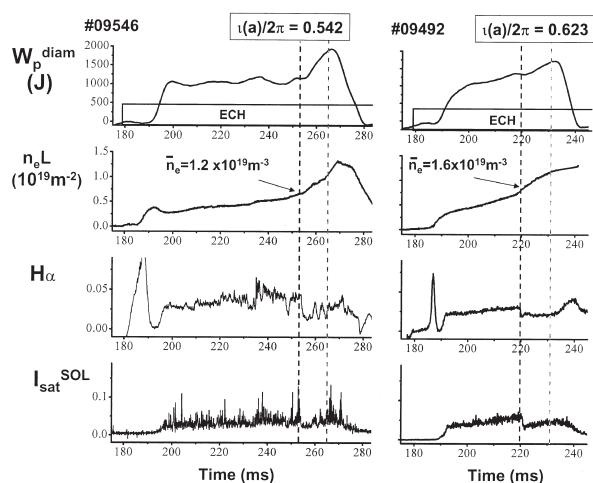


図1 回転変換0.542の配位のECHプラズマ及び回転変換0.623の配位のECHプラズマのプラズマエネルギー $W_p^{\text{diam}}$ 、線積分プラズマ密度 $n_e L$ 、 $H\alpha$ 信号、SOL領域のイオン飽和電流 $I_{\text{sat}}^{\text{SOL}}$ 信号の時間変化。t=252及び220msでH-mode遷移が発生している。

## 地球電波科学研究部門 大気圏光電波計測分野（津田研究室） 「GPS掩蔽法を用いた富士山、航空機からの地球大気計測」

近年、毎年のように集中豪雨による被害が報告されていますが、もし発生時期・場所が正確に予測できれば防災に貢献できると思いませんか？それには、地表付近の水蒸気の動態を詳細に観測する必要があります。本研究室では、電波・光・音波に関する最新の電子技術を用いた地球大気の精密観測技術の開発を行っており、そのひとつとしてGPS（汎地球測位システム）電波を利用した気圧、気温、水蒸気量の観測技術を開発しています。今回はこの研究を紹介します。

カーナビなど皆さんの生活に深く浸透しているGPSですが、我々は精密な位置決定をする場合に大きな誤差源となる大気によるGPS電波の伝搬遅延（大気遅延）を、GPS掩蔽法による全天候型、機器校正不要の大気観測に利用しています。GPS掩蔽法は、図1に示すように横に向けたアンテナで地表をかすめるようにして到達した微弱なGPS電波を受信し、その伝播経路を大気遅延長、及びGPS衛星と受信機の幾何学配置から求めることで、大気屈折率（気圧、気温、水蒸気量に依存）を優れた精度・高度分解能で観測できます。GPS掩蔽法に関しては、低軌道衛星を用いたグローバルな大気観測はすでに実用段階に入っています。しかし、集中豪雨などの予測のためには、特定の領域（水蒸気の量が多い地表付近など）において時間・空間的に密な大気観測が必要です。この場合、低軌道衛星からよりも、孤立峰の山頂、あるいは航空機からのGPS掩蔽観測の方が適しています。この観測手法を開発すべく、我々は富士山測候所の南面にGPSアンテナを横向きに取り付け、2001-2003年の夏期間中にGPS掩蔽観測実験を行ってきました。同時に解析ソフトウェアの開発も進め、これらの観測データから大気遅延長、伝播経路の偏角を順に解析し、大気屈折率プロファイルを導出することに成功しました。一事例を図2に示しますが、これは山頂からのGPS掩蔽観測では世界で初めてとなる成果の一部です。富士山近傍（浜松）のラジオゾンデ観測値（点線）と比較しても、よく一致しています。また、大気屈折率プロファイルから1次元変分法を用いて推定した気温、湿度、気圧プロファイルも示していますが、高度3.8kmではラジオゾンデ観測値よりも富士山測候所の観測値（黒丸）に近い値であることが分かります。ここでは示していませんが、台風が接近し、強風・強雨時の観測事例もあり、この観測手法が全天候型であることも実証できています。今後は実用化を念頭に、解析事例を増やし、統計的に精度検証を行うと共に、より低高度域までの観測を可能にするために観測技術の改良を進めていく予定です。また2003年10月から航空機からのGPS掩蔽観測実験が開始されました。航空機からの観測手法が確立できれば、民間航空機で定常観測を行うことで莫大な数の観測データの取得が期待できます。将来的には数値予報の局所モデルへ同化することで、集中豪雨等の予報精度向上への貢献を目指していきます。

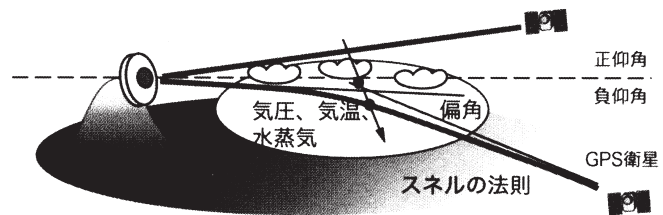


図1：富士山頂からのGPS掩蔽法観測概念図

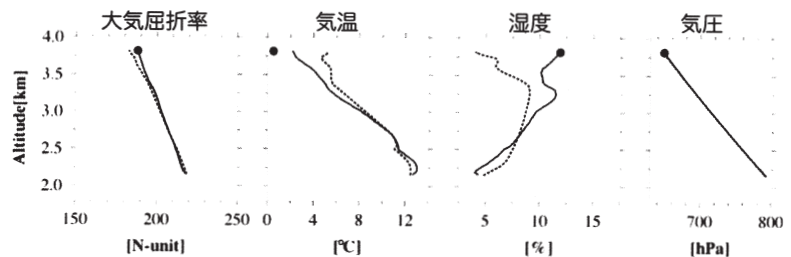


図2：2001年9月23日19時（UT）に得られた大気屈折率、気温、湿度、気圧プロファイル。実線がGPS掩蔽法、点線が浜松のラジオゾンデ、黒丸が富士山測候所の観測値を示す。

## 宇宙電波科学研究部門 宇宙電波工学分野（松本研究室） 「水星プラズマ波動探査計画」

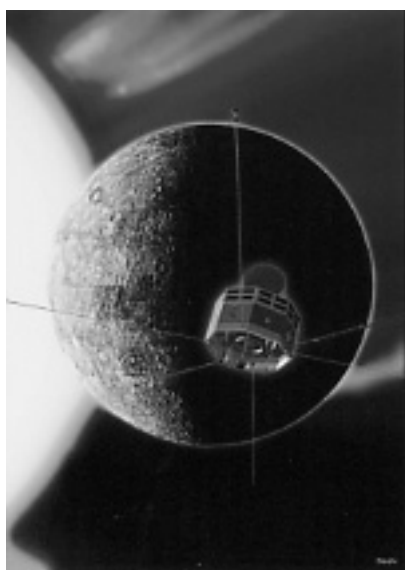


図1：MMO衛星と水星  
(CG by C. Noshi)

ご存知のように、水星（Mercury）は、太陽に一番近い惑星です。太陽と水星の距離は、おおよそ太陽と地球の距離の1/3程度です。この水星を日欧共同で衛星を打ち上げて観測しようという計画が現在進行しています。BepiColombo水星探査ミッションです。BepiColomboとは水星軌道の研究で成果を上げたイタリアの応用数学者の名前にちなんでいます。BepiColomboミッションは、水星の地形を主に探査するために、水星近傍の極軌道をとるMPO（Mercury Planetary Orbiter）、水星の磁気圏を探査するMMO（Mercury Magnetospheric Orbiter）、そして、水星表面に着陸するMSE（Mercury Surface Element）から構成されます。このうちMMO衛星の開発・運用を日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）が担当することになっており、また、そこに搭載される「プラズマ波動観測器」を、現在、私たち松本研究室を中心とする日欧共同チームが提案しています。水星はMariner10によって1974年に初めて観測が行われ、水星が固有の磁場をもっていることなどの重要な発見がなされましたが、Flybyによる2回の観測のみで十分なデータが得られていません。しかも、Mariner10には水星周辺で

のプラズマ波動、直流電場を観測するプラズマ波動観測器を搭載しておらず、その周辺でのプラズマ波動・電場現象については、まったく探査されていません。従って、もし、私たちの開発した観測器が認められれば、人類初のプラズマ波動観測が水星磁気圏で行われることになります。

これまでの研究でかなり理解が進んでいる地球磁気圏と比較すると、水星磁気圏は「脆弱な固有磁場」、「高動圧の太陽風」、「プラズマ圏の欠如」、「太陽風と惑星表面との直接相互作用」などを、その特徴としてあげることができます。これらの特徴をプラズマ波動観測の立場で捉えてみると、「脆弱な磁場と高動圧太陽風による高ベータプラズマ中での強非線形現象による波動の励起、そしてそれによるエネルギーの散逸」、「希薄なプラズマ大気と太陽風との相互作用による波動の励起」、「太陽風が直接惑星表面まで到達するような場合、惑星表面に雲のように存在する光電子との相互作用」、また、「スパッタリングにより放出される重イオンとの太陽風との相互作用」、「脆弱とはいえ閉磁力線に捕捉されたプラズマ粒子からの電磁波放射」、「Mariner10でみつけたサブストーム的な磁気圏構造のダイナミックな変動とConvection電場の変化、およびそれによる極域への粒子注入による電波放射」などの研究項目が挙げられ、プラズマ波動観測は、このミッションで重要な役割の担うことになります。私たちは、すでにフランス、スウェーデン、ハンガリー、オランダのチームと共同で装置を開発する体制を整え、これまでに4回にわたって国際会議を京都で行っており、プラズマ波動観測器のデザインをほぼ終えたところです。

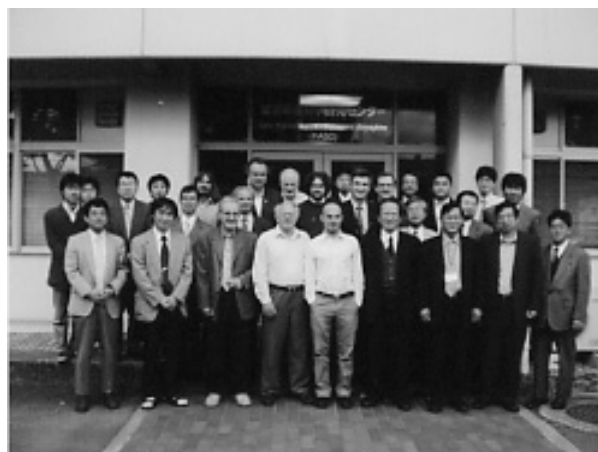


図2：4回目を数えた日欧プラズマ波動チーム会議

## 宇宙電波科学研究部門 電波科学シミュレーション分野（大村研究室） 「プラズマ噴射時の宇宙飛翔体環境に関する計算機シミュレーション」

本研究室では、太陽－地球環境に生起する様々な電磁現象の解析を大規模な計算機シミュレーションによって行っています。国際宇宙ステーションの構築にみられるように人類の宇宙利用が盛んになりつつあり、宇宙環境が宇宙利用においてどのような影響を与えるかという観点からも研究を進めています。宇宙空間は真空ではなく、イオンと電子からなる希薄な電離気体である宇宙プラズマで満たされています。そのため、宇宙空間における電磁現象は真空の場合と違い複雑なものとなり、理論的な手法で解析するのは非常に大変です。そこで、我々は、膨大な数のプラズマ粒子により形成される宇宙プラズマ空間を仮想的に計算機メモリ内につくり、その中で宇宙プラズマの支配方程式であるマックスウェル方程式と運動方程式を時空間で逐次解き進めることにより、対象とする宇宙空間における様々な現象の再現を行います。本稿では、その一例として宇宙飛翔体に搭載されたプラズマ噴射装置（イオンエンジンや電位制御装置）のオンオフ時における周辺宇宙環境の過渡応答に関する計算機シミュレーションを簡単に紹介します。

近年は実用目的からプラズマを積極的に放出する宇宙飛翔体（宇宙機）が数多く出現しており、国際宇宙ステーションがその電位制御に採用したプラズマコンタクターや、イオンエンジン・アークジェットなど各種電気推進機などの装置がこれに相当します。こうしたプラズマ装置からの能動的なプラズマ放出は、宇宙機周囲に人工プラズマ分布を作り宇宙機自身の電位を変動させ、更には自ら放出プラズマの入射を受けるというダイナミックな干渉現象を引き起します。本研究では、このような背景のもと、プラズマ粒子モデルの計算機シミュレーション手法により、能動的プラズマ装置を持つ宇宙機と周囲プラズマ環境の同時評価を行います。特にプラズマ装置の立ちあげ、停止、あるいは突然故障などに伴う非定常なプラズマ干渉や帯電放電の過渡プロセスを重点的に解析します。図にはその一例として、密度の薄い宇宙プラズマに置かれた飛翔体搭載のプラズマ噴射装置からイオン（正電荷）ビームを放出した場合の宇宙機環境の応答を示したものです。プラズマ装置内でアルゴンなどを電離させ加速し船外に放出するケースであり、負電荷である電子はプラズマ装置に残されたままです。本来なら、帯電を避けイオンを中和するため中和器から電子放出も行いますが、このケースでは、中和器が動作しない場合を想定しています。イオン放出開始後、電子がプラズマ装置に残されるため、その電位は時間と共に減少しています。放出イオンもプラズマ装置から離れていきますが、ある時間経過すると、プラズマ装置の帯電（負電位）により放出イオンはその電位バリアを乗り越えられなくなり逆流が起こります。最終的には放出イオンのほとんどがプラズマ装置に戻ってくることになり、その電位は一定値に落ち着きます。この電位が定常値に至るまでにプラズマ装置近傍でイオンダイナミクスが大きく変化しますが、これにより宇宙機を含め宇宙環境にどのような影響があるのかという点について解析を進めています。このような宇宙機環境変化の理解は、宇宙機の対プラズマ環境対策設計に必要不可欠であり、宇宙開発のあらゆる側面において非常に有効な基礎データになることは明らかなです。欧米ではすでに宇宙機環境に関する計算機シミュレーション解析が行われていますが、日本でも我々を中心にして独自の宇宙環境シミュレータの構築を目指しています。

イオン噴射時のプラズマ装置電位変化と放出イオン分布

