

## 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
- 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)
- 電子物理学講座 極微真空電子工学分野 (石川研)
- 電子物理学講座 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 クラストイオン工学分野 (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 (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 (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

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）  
 「ストップモデルを用いた磁気ヒステリシス特性のモデル化」

現代社会の電力消費の過半数がモーターによるものであり、また今後、電気自動車の普及が予想されることから、モーターの一層の高効率化ならびに小型軽量化が求められている。しかし、電気機器の鉄心材料である電磁鋼板は磁気ヒステリシス特性を持ち、その中でも、異常渦電流損を含む交流特性や、PWM制御や空間高調波に由来するマイナーヒステリシスループなどを正確に表現することは容易でない。現在、電気機器の設計には電磁界解析が不可欠であるが、ヒステリシス特性の表現精度が不十分なため、解析精度の向上が阻害されている。そこで、本研究室では、ストップモデルおよびプレイモデルを用いた、電磁鋼板の磁気ヒステリシス特性の簡潔で正確な表現手法の開発に取り組んでいる。ここでは、ストップモデルによる表現手法の紹介を行う。

ストップモデルは、磁束密度 $B$ を入力として磁界 $H$ を出力とするのに適したモデルであることから、磁気ベクトルポテンシャルを用いた解析に有用であり、次式のように与えられる。

$$H = \sum_{k=1}^M f_k(s_k(B)) \quad , \quad s_k(B) = \max(\min(B - B^0 + s_k^0, \eta_k), -\eta_k)$$

ここで、 $s_k$ は高さ $\eta_k$ のストップヒステロン（図1）、 $B^0$ と $s_k^0$ は前時点での $B$ と $s_k$ の値、 $M$ はストップヒステロンの数、 $f_k$ は $s_k$ に対する形状関数（一価関数）である。本研究室では、まず、このモデルの数学的な性質を明らかにしてモデルの表現能力の限界を示すとともに、モデルの同定法（形状関数の決定法）を開発した。次に、形状関数の拡張を行うことにより、ストップモデルの表現能力を改良した。また、この改良モデルの数学的な性質を明らかにするとともに、改良モデルの同定法を開発した。さらに、これらのモデルは直流モデルであるので、これを交流特性表現へ拡張する手法を開発した。

無方向性電磁鋼板のマイナーループを含むヒステリシス特性の表現についてはcue 12号にて紹介済みであるので、今回は、方向性電磁鋼板の磁気特性の表現について紹介する。図2と図3は、方向性電磁鋼板(JIS: 30P105)の圧延方向と直角方向の直流ヒステリシス特性の表現結果である。図の上部は従来モデル、下部は改良モデルによる表現である。改良モデルでは、図3のような複雑なヒステリシス特性も精度良く表現できている。次に、交流特性の表現結果を図4に示す。図4の上部と下部は異常渦電流損の考慮の有無の比較である。異常渦電流損の考慮により、交流ヒステリシスループの表現が正確になっていることがわかる。今後の課題としては、モデルのベクトル化が重要である。

参考文献: T. Matsuo, Y. Terada, and M. Shimasaki, IEEE Trans. Magn, 40(4), pp. 1776-1783, 2004, 他。

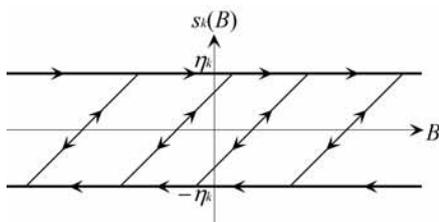


図1 ストップヒステロン

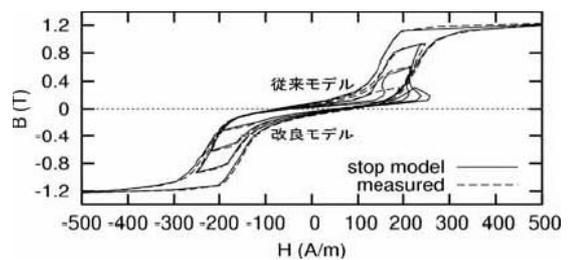


図3 方向性電磁鋼板の直角方向特性の表現

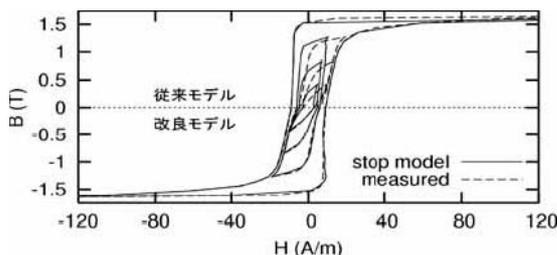


図2 方向性電磁鋼板の圧延方向特性の表現

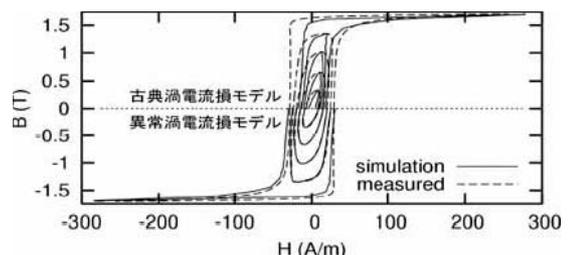


図4 交流ヒステリシス特性の表現

## 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） 「SiCパワースイッチング素子の電力変換回路への適用」

電力の高効率利用や多機能化を目的として、インバータに代表されるパワエレ機器を用いた電力変換制御が広く導入されるようになってきました。これらの機器が電力変換を行なうにはパワーMOS-FET、IGBT等のスイッチング素子が不可欠となります。これらSiを基板材料としたパワースイッチング素子は目覚ましい性能向上を遂げていますが、Siの物性値が持つ限界に近づいてきています。ワイドバンドギャップ半導体の採用によりこの限界を超えることが可能となり、パワースイッチング素子として特にSiCが最も実用化に近い半導体材料として期待されています。SiC素子は、従来のSi素子に比べ高耐電圧・高速・高温動作等の様々な潜在的能力を持っていますが、その真価を発揮させるためには、素子を利用する側である電力変換回路も素子特性に応じた回路設計・実装・制御が必須となります。すなわち、デバイス開発・実装・回路設計の三位一体での研究開発が必要です。我々の研究室では、京都大学21世紀COEプログラム「電気電子基盤技術の研究教育拠点形成」に含まれる事業のひとつとしてSiCデバイス開発を行なっている学内の電子物性工学講座半導体物性工学分野の研究室及び、それとは別にSiCデバイスのモデリング・実装の研究を行なっている米国アーカンソー大学Mantooth教授らの研究グループ、電力変換器のアプリケーションを検討している民間企業と研究プロジェクトを共同して推進しています。ここでは特に、昨夏アーカンソー大学との共同研究において実施した450℃という超高温でのSiC JFETの動作特性実験によって得た結果を紹介いたします。

図1にSiC JFETの高温動作特性試験を行なうために構成した実験装置の概略を示します。SiC JFETを高温動作実験に供するため、Niメッキされた高温パッケージに実装した上で電気炉内に配置しています。素子の各端子は耐熱電線で外部から電源等に結線され、ソース共通接地回路を構成しています。素子の自己発熱による測定中の温度変化を極小とするため、パルスジェネレータで発生させた25  $\mu$ s幅のパルスをゲートドライバ回路を通してJFETのゲート-ソース間に加えています。これら機器はGPIBでPCに接続されており、自動制御・計測が行なえるようなシステム構成となっています。

今回用いたSiC JFETは、ゲート電圧を印加しない状態( $V_{gs}=0$  V)で導通状態であるノーマリ・オンタイプの素子です。図2は450℃において測定した素子の $V_{ds}$ - $I_{ds}$ 特性であり、同図より450℃というSiでは不可能な超高温まで能動素子としての機能を失わず動作可能であることが分ります。また素子をオフ状態に保つために必要なゲート電圧も室温に比べ約1V大きくするだけで済むことも分りました。但し、素子の飽和電流は室温時の約20%まで低下しますので、高温動作回路の設計時には電流容量の設定について十分注意する必要があります。今後は、実験より得たデータを基にして回路設計用のJFETをはじめとするSiCの素子モデリングを行なっていく予定です。

<参考文献> Tsuyoshi Funaki, J. Balda, J. Junghans, A. Kashyap, F. Barlow, A. Mantooth, T. Kimoto, T. Hikiyara "SiC JFET dc Characteristics Under Extremely High Ambient Temperatures", IEICE Electron. Express., Vol. 1, No. 17, pp.523-527, (2004)

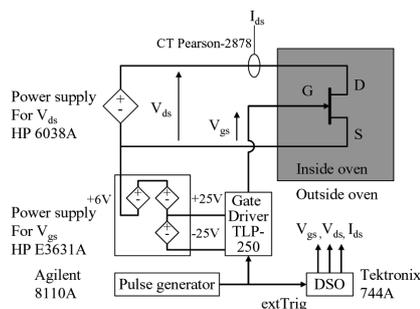


図1. SiC JFET高温特性試験回路構成

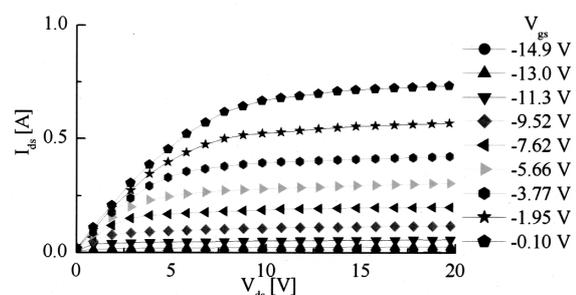


図2. SiC JFETの450℃におけるVds-Ids特性

電気システム論講座 電気回路網学分野  
「可逆論理回路を用いた算術演算」

1. はじめに

通常の論理回路は非可逆です。つまり、入力から出力へは信号は伝わりますが、逆に出力から入力へは信号が伝わりません。それに対し、可逆な論理回路の研究が最近活発に行なわれています。その方向性は2つに分けられ、一つは物理的可逆性を利用して低消費電力回路を設計する研究です。もう一つは、量子計算が可逆計算であるため、量子計算に関連した可逆計算の研究です。当研究室では、可逆回路のもつこれらの特徴を意識しながら新しい可逆回路を提案しています。

2. 可逆論理回路

通常の可逆回路は入力端子数と出力端子数が等しいものを考えますが、当研究室では図1に示すような3端子の回路を基本に考えています。3端子の回路では、任意の2入力が与えられれば、残りの端子から出力される場合に可逆であると定義します。可逆論理回路を実現するためには、論理が可逆であることと回路が可逆であることの両方が必要になります。

論理について考えてみると、3端子の場合の可逆論理は表1に示す2種類の論理のみが可逆となります。上がExOR論理、下がExOR論理の否定です。次に回路を作ることを考えます。通常のCMOS回路では、入力と出力が対称ではないため、可逆な論理は組めません。そこで、新たに2線式の単調回路を用いて可逆回路を設計する手法を提案しています。

図3はExOR回路の例ですが、3つの端子が対称な構造であることがわかります。

3. 可逆演算回路

可逆回路の応用として開発したのが、可逆演算回路です。例えば、加算回路( $a+b=c$ )可逆回路を用いて作製し、信号の向きを逆にすると減算回路( $a=c-b$ )として動作します。また、乗算回路( $a \times b=c$ )を作製して、信号の向きを逆にすると除算回路( $a=c/b$ )として動作します。

すでに、実際にこれらの演算回路を作製し、その動作を確認しています。現在では、これらの回路の低消費電力性に注目した研究をCOE予算の援助により進めています。

<参考文献>

[1] T. Hisakado, and K. Okumura: "Logically Reversible arithmetic circuit using pass-transistor," Proc. ISCAS, Vol. II, pp.853-856, 2004.

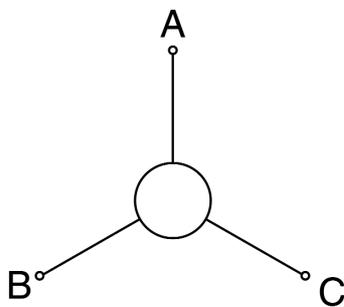


図1: 3端子回路

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

表1: 可逆論理

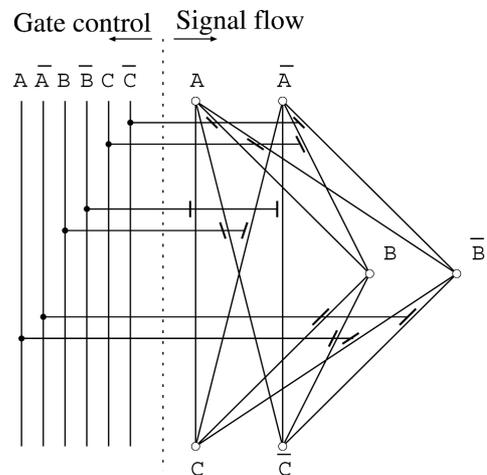


図2: 可逆ExOR回路

## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

## 「高温超伝導体の異常なジョセフソン効果」

超伝導のエレクトロニクス応用ではジョセフソン接合が重要な役割を果たす。高温超伝導体でも、従来の金属低温超伝導体と同様なジョセフソン効果を示すが、最大ジョセフソン電流は従来の超伝導体を用いたジョセフソン接合よりも1桁以上小さい。理論によれば、最大ジョセフソン電流 $J_c$ は低温で $J_c = \pi \Delta / 2eR_N$ である。 $R_N$ は常伝導トンネル抵抗で、トンネル接合の抵抗である。 $\Delta$ は超伝導オーダーパラメータでその自乗が超流動濃度に比例する。従来の超伝導体では $\Delta$ が1meV程度、高温超伝導体では30meV程度である。同程度の接合を作製すれば高温超伝導体の $J_c$ は従来超伝導体のジョセフソン接合よりも10倍以上大きくなるはずであるが、実際には従来超伝導体の場合と同程度かむしろ小さく、したがって理論よりも1桁以上小さい。これは全く異常なことで高温超伝導体特有なこととされるが、まだその理由は明らかになっていない。われわれはこの異常なジョセフソン効果の原因が、高温超伝導体では超伝導状態がナノスケールで不均一であるためであると考え、これを実験的に検証しようとしている。これが明らかになるということは、高温超伝導のジョセフソン効果応用に非常に有意義であるばかりでなく、高温超伝導発現機構を明らかにする上でも極めて重要である。

超伝導の不均一性を実験的に検証することは大変難しい。超伝導のために電気抵抗が至るところゼロになってしまうからである。この困難を解決するために、われわれは固有ジョセフソン接合に着目した。固有ジョセフソン接合は結晶構造そのものであるから、結晶全体を探索することができ、かつ、ジョセフソン電流は接合の両側が超伝導の時のみ流れるので、もし超伝導状態に不均一性が存在すればこれを検知することが可能である。実験では $J_c$ 、 $\Delta$ 、 $R_N$ を求める必要があるが、 $J_c$ は単結晶から微細加工で形成した微小メサ構造を用いて観察できる。また、 $\Delta$ と $R_N$ はわれわれが開発した層間トンネル分光を用いて測定することができる。高温超伝導体として $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ を取り上げ、不均一性が現れやすいと考えられるキャリア濃度の少ない場合（不足ドーピング）を対象とした。試料はSrを一部Laで置換した単結晶である。図1は単結晶の劈開表面に作製した $10\ \mu\text{m}$ 角、厚さ約12nmの微小メサの電流電圧特性で、微小メサの中に固有ジョセフソン接合が8層含まれていることを示している。また、最大ジョセフソン電流も通常の転移温度が最高となる最適キャリア濃度の場合（最適ドーピング）に比較して1桁以上小さい。図2はこの微小メサを用いて測定した層間トンネル分光特性である。トンネル導電率には、最適ドーピングでは大きく鋭い超伝導ピークが観察されるのに対して、不足ドーピングでは小さな肩構造のみが観察されるだけである。また背景に大きな擬ギャップ構造が観察され、それが $T_c$ 以下で突然大きくなることを見いだされた。これらのふるまいは均一な超伝導を考えた場合には説明することができない。しかし、ナノスケールの構造で超伝導の不均一性が存在すれば説明可能である。つまり、これらの実験結果は高温超伝導では本質的なナノスケールにおける不均一超伝導が起こっていることを示している[1]。高温超伝導の異常なジョセフソン効果はこうした全くエキゾチックな不均一超伝導に由来していると考えられる。

[1] Y. Yamada and M. Suzuki, submitted.

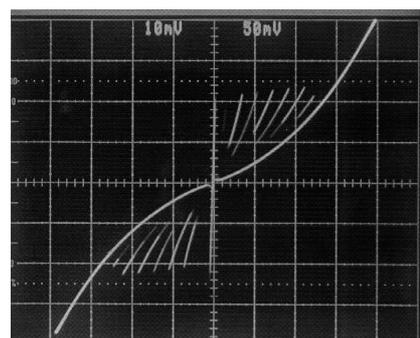


図1 不足ドーピング固有ジョセフソン接合微小メサ( $10\ \mu\text{m}$ 角、12 nm厚、8層)のI-V特性 (0.1 mV/div, 50 mA/div)。

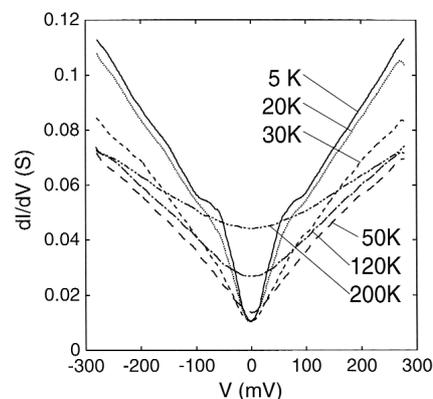


図2 同じ試料のトンネル特性

電子物理工学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）  
「負イオンビーム蒸着による機能性薄膜形成に関する研究」

材料の性質を決定づけるのは、それを構成している原子そのものの性質に依ると思われがちですが、実際には原子と原子の結合の仕方も材料の性質に非常に大きな影響を及ぼしています。例えば、炭素原子の結合によってできる代表的な物質として、黒鉛、ダイヤモンド、フラーレン、ナノチューブなどがあります。この4つの物質は原子同士の結合の仕方である結晶構造が違っただけで、材料の性質が全く異なり、またその商品価値にも雲泥の差があります。つまり、物質の原子間の結合状態はその性質に強く関わっており、これを幅広く制御できれば好みの性質を持った材料を創ることができると考えられます。

普通、ほとんどの材料は熱化学平衡反応によってできており、その反応によって形成された原子間結合状態を私たちはその材料の普遍的原子間結合状態すなわち材料の性質であると考えています。しかし、原子間の結合エネルギー程度の運動エネルギーを持つイオンビームが関わる反応（運動力結合）では、図1に示すように熱化学平衡反応とは全く異なった反応プロセスを経由するので、今まで私たちが当然と考えていたものと異なる原子間結合状態の物質（準安定物質）ができる可能性が高いのです。特に活性な内部エネルギーを持たない負イオンを使用すると、原子間結合形成における運動エネルギーだけの効果を明確に知ることができます。

そのような目的のために、研究室では図2に示すような負イオンビーム蒸着装置を開発し、超低エネルギー炭素系負イオンビームを用いた材料形成に関する研究を行っています。例えば、炭素負イオンビーム蒸着では、図3に示すように炭素原子負イオン1個当たりの運動エネルギーが約70eVにおいて、最もダイヤモンド構造に近い（sp<sup>3</sup>結合が最大）炭素膜が形成されます。sp<sup>3</sup>とsp<sup>2</sup>結合の割合は、炭素負イオンの運動エネルギーにより自由に制御することができます。この炭素膜は、基板温度を400℃以上にすると、sp<sup>3</sup>結合がほとんどなくなるので、準安定物質であることが分かります。図4は、CN負イオンビーム蒸着によって作製したCN膜のN/C比のイオンの運動エネルギー依存性です。

研究室では、熱化学平衡反応ではできなかった新しい原子間結合状態をもつ新機能材料を、いろいろな負イオンを用いて作製し、また、その制御法を解明していこうとしています。

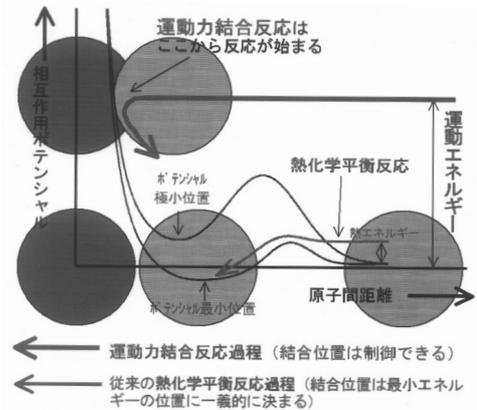


図1. 運動力結合の説明図

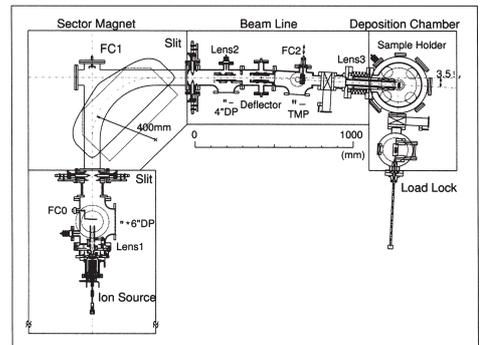


図2. 負イオンビーム蒸着装置

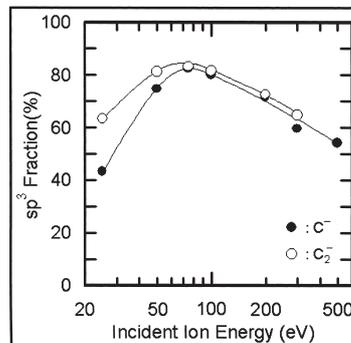


図3. 炭素負イオンビーム蒸着膜

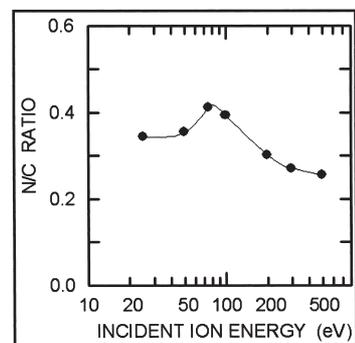


図4. CN負イオンビーム蒸着膜

## 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へのAl, Bイオン注入によるp型領域の形成」

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圧・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。近年のSiC結晶成長およびデバイス作製技術の進展により、300～1200V級ショットキーダイオードの市販が始まったが、物性制御やデバイスプロセスの物理的理解はあまり進んでいない。例えば、SiCパワーMOSFET等を作製するためには、イオン注入によって選択的にp型領域を形成する必要があるが、代表的なアクセプタであるAl, Bのどちらが優れるのか明確になっていない。

本研究では、SiCにAl, Bイオン注入を行い、p型注入層の電気的性質を系統的に評価した。まず低濃度p型SiC成長層へのAl, Bイオン注入により、注入不純物密度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、深さ $0.2 \mu\text{m}$ の矩形分布を形成した。イオン注入は室温で行い、注入後のアニールは $1700^\circ\text{C}$ で1～30分間行った。注入原子の深さ方向分布はSIMS測定、アクセプタ密度はTi/SiCショットキー障壁の容量—電圧 (C-V) 特性により求めた。また、注入層内の深い準位 (点欠陥) はDLTSあるいはICTS測定により評価した。

図1に、Alイオン注入試料のAl原子密度およびAlアクセプタ密度の深さ方向分布を示す。アニールによってわずかな内方向拡散が観測されるが、注入層表面から注入飛程端 (テール部) までの領域に亘ってAlアクセプタ密度はAl原子密度にはほぼ完全に一致する。すなわち、注入されたAlの電気的活性化率はほぼ100%であると言える。DLTS測定により、Alイオン注入層中の深い準位の密度はAlアクセプタ密度より三桁以上低く、注入層は高品質であることが判明した。

図2にBイオン注入試料のB原子密度およびBアクセプタ密度の深さ方向分布を示す。アニールによって著しい外方向拡散と内方向拡散が生じ、矩形分布は完全に消失している。また、深さ $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ の領域でアクセプタ密度の大幅な低下が見られる。ICTS測定によりBイオン注入層中の深い準位を評価したところ、価電子帯上 $0.47\text{eV}$ に正孔トラップ (Dセンター) が存在することが分かった。このトラップ密度の深さ方向分布も同図に示す。Dセンター密度はアクセプタ密度の数分の一と高く、特に深さ $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ の注入飛程端ではB原子密度と同程度に達している。したがって、注入飛程端におけるBアクセプタ密度の低下は、このDセンターによる補償効果であると考えられる。本研究では、Cイオン共注入によるB原子の拡散抑制を確認したが、高密度点欠陥発生の問題は解決されなかった。したがって、p型SiCを形成する際には、Alイオン注入が優れていると結論できる。

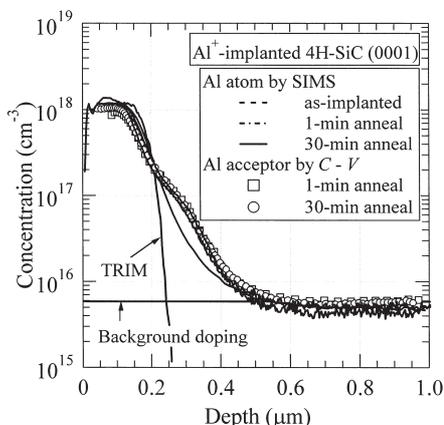


図1. Alイオン注入SiC中のAl原子密度とAlアクセプタ密度の深さ方向分布

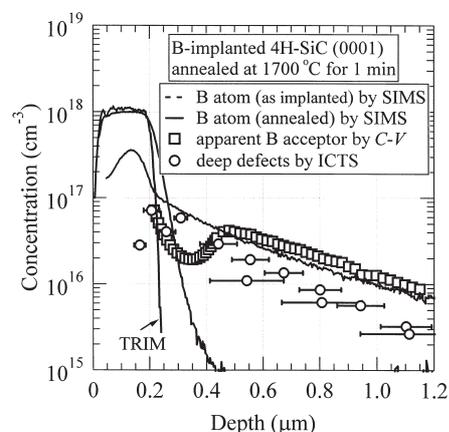


図2. Bイオン注入SiC中のB原子密度、アクセプタ密度、トラップ密度の深さ方向分布

## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 「Ⅲ族窒化物半導体を用いた微小光学素子の作製」

GaNを中心としたⅢ族窒化物半導体によって近紫外～青緑色の発光ダイオードやレーザ・ダイオードが実用化に至り、既にディスプレイ、照明、情報記録などの広い応用分野で強いインパクトを与えている。このⅢ族窒化物半導体の新しい展開として、当研究分野では微細化が一つのキーワードではないかと考えている。というのも、素子を集積化した光回路、三次元的な微小構造を利用した高効率発光素子や多色発光素子などの高付加価値化が可能であると期待されるからである。微細化へのアプローチとしては、大きなものを小さく削り込む微細加工（トップダウン型アプローチ）と最初から小さなものを作製する結晶再成長（ボトムアップ型アプローチ）を試みている。ここでは、前者の結果を中心に報告する。

**微細加工**：微細加工法は複数あるが、ここでは集束イオンビーム（FIB）法を採用した。FIB法はGaイオンを試料に照射しスパッタリングする方法であり、加工損傷が入りやすいという欠点はあるもののマスクレスで簡便にnmオーダーの加工ができるという大きな特長を持っている。まず、加工条件を損傷の低減と加工精度の観点から最適化し、任意の構造が加工できることを平面および円柱構造の作製によって確認した。その後、微小光学素子をいくつか試作した。図1は、平面と曲面の最も単純な組み合わせとしてシリンドリカルレンズをストライプ形状のレーザ共振器端面に作製し、走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した結果である。レーザ光を整形して出射できる可能性があると考えている。また、別の例としてレーザ共振器の端面にエアギャップ/GaN分布ブラッグ反射鏡（DBR）を作製した。そのSEM像を図2に示す。周期によって寸法にばらつきが多少存在するが（エアギャップ：275-305nm、半導体層：260-290 nm）、このばらつきを考慮してもDBRの理論反射率は発振波長である400nm付近において97%であった。通常のレーザ共振器で端面反射鏡としてしばしば用いられる劈界面の理論反射率（17%）と比べて格段の向上が見込める。実際、光励起によりレーザ発振させたところ、DBRのない従来型レーザの発振閾値41 kW/cm<sup>2</sup>に対して、DBRを作製したことにより閾値が30 kW/cm<sup>2</sup>と約30%低減された。この結果を元にDBRの反射率を計算すると62%であった。理論値（97%）には及ばないものの、過去に報告された窒化物系DBRの反射率の中では世界最高の値であった。今後は、FIB加工条件の更なる検討による反射率の向上、新たな光素子構造の試作を行う予定にしている。

**発表論文**：“Fabrication and characterization of GaN-based distributed Bragg reflector mirrors for low lasing threshold and integrated photonics”, T. Kotani, Y. Hatada, M. Funato, Y. Narukawa, T. Mukai, and Y. Kawakami, *Physica Status Solidi* (c) (in press)

**結晶再成長**：再成長法により複数の結晶面上に発光層である量子井戸を作製した。結晶面により発光色が異なり、さらに、従来構造に比べて発光効率の高い面があることがわかってきている。詳細は別の機会に譲り、ここでは発表論文のみ紹介する。

**発表論文**：“Efficient radiative recombination from <11-22>-oriented In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N multiple quantum wells fabricated by the re-growth technique”, K. Nishizuka, M. Funato, Y. Kawakami, Sg. Fujita, Y. Narukawa, and T. Mukai, *Appl. Phys. Lett.* **85**, pp.3122-3124 (2004).

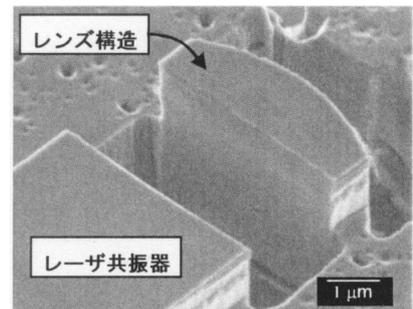


図1. FIBによって試作した微小光学素子の例：シリンドリカルレンズ

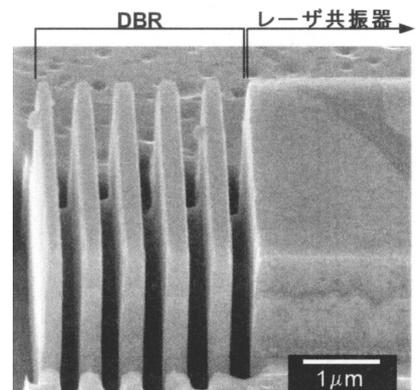


図2. FIBによってレーザ共振器端面に作製したDBRのSEM像

## 高機能材料工学講座 クラスタイオン工学分野（高岡研究室） 「クラスタイオンビームによる光触媒材料創製の研究」

### 1. 研究の背景

クラスタイオンビーム蒸着法では、数十個から数千個の塊状原子集団であるクラスタをイオン化し、加速して基板に照射して薄膜を形成するので、基板に入射する原子の運動エネルギーを自由に制御できます。特に、クラスタイオン照射では、従来の原子状のイオンビームでは得られない照射効果（例えば、高密度照射効果、多体衝突効果、超低エネルギー照射効果など）を活用でき、低基板温度での高品位な薄膜が形成できます。一方、チタン酸化物（ $\text{TiO}_2$ ）は、ルチル型、アナターゼ型、ブルッカイト型の結晶構造をもつ半導体材料であり、特に光分解反応や光親水性など、優れた光触媒特性を示す材料として注目されており、さらに、防曇カガミや防露ガラス、防カビタイル用薄膜材料として、光学、環境、医用分野などに幅広く応用されています。当研究室では、このような特徴をもつ  $\text{TiO}_2$  薄膜を酸素クラスタイオンビーム援用蒸着法によって作製し、高活性な光触媒材料の開発を行っています。

### 2. 研究の成果

$\text{TiO}_2$  薄膜表面にバンドギャップに対応する波長より短い紫外線を照射すると、紫外線は吸収され、表面に水酸基ラジカルが生成されます。この水酸基ラジカルは極めて強い酸化力をもつため、 $\text{TiO}_2$  薄膜の表面に付着した有機物などを  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  に分解します。このような  $\text{TiO}_2$  薄膜の光分解反応を明らかにするために、メチレンブルー水溶液を用いてその透過特性を調べました。具体的には、波長660nm付近の吸収強度について、 $\text{TiO}_2$  薄膜の光分解反応による変化を調べました。図1は、種々の基板温度で作製した  $\text{TiO}_2$  薄膜を浸漬したメチレンブルー水溶液の吸収強度が、紫外線（波長が360nmの紫外線）の照射時間によって変化する様子を示します。なお、基板温度を室温から200℃まで変えて作製した  $\text{TiO}_2$  薄膜は非晶質状態であり、基板温度300℃で作製した薄膜はアナターゼ型とルチル型の混在した多結晶状態です。図に示すように、基板温度300℃で作製した薄膜では、ルチル型の  $\text{TiO}_2$  (100) 単結晶基板の場合と同様に、紫外線照射時間の増加と共に、吸収強度の変化は増加し、光分解反応が促進されているのが分かります。

$\text{TiO}_2$  薄膜の光親水性を明らかにするために、接触角測定を行いました。図2は、基板温度を変えて作製した  $\text{TiO}_2$  薄膜の接触角の紫外線（波長が254nmの紫外線）の照射時間依存性を示します。基板温度を室温から200℃まで変えて作製した  $\text{TiO}_2$  薄膜では、紫外線照射による接触角の時間変化はなく、約75°のままです。一方、基板温度300℃で作製した薄膜では、紫外線照射時間の増加と共に、接触角は15°まで大きく減少しています。なお、ルチル型の  $\text{TiO}_2$  (100) 単結晶基板については、接触角の変化はありません。これらの結果から、紫外線の照射時間を増加することによって超親水性の表面が形成されていることが分かります。

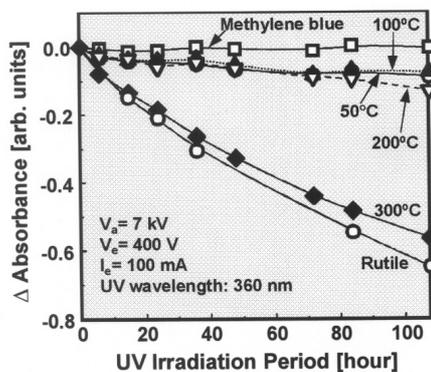


図1 吸収強度の紫外線照射時間依存性

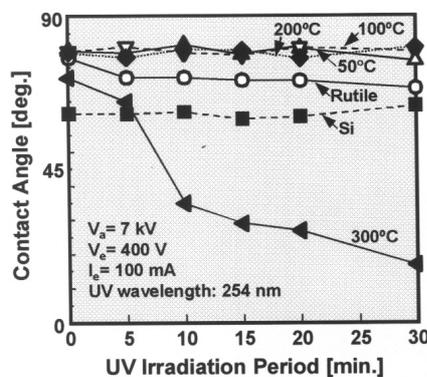


図2 接触角の紫外線照射時間依存性

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

「装着型アクティブ・ビジョンセンサによる3次元注視対象の検出」

1. 背景

本研究では、視線測定装置とコンピュータ制御可能な2台の首振りカメラで構成される装着型アクティブ・ビジョンセンサを開発した。このセンサを使えば、システムが装着者と視点を共有することができ、装着者が注視している対象の3次元位置や形状を認識することができるようになる<sup>[1]</sup>。

2. 研究成果

開発したセンサは図1の様な外観である。視線測定装置としては、非接触型で、瞳孔/角膜反射法を実装したNac製EMR-8を用い、右眼の視線情報を獲得する。カメラは、コンピュータ制御によって、パン（水平回転角度±30°）、チルト（垂直回転角度±15°）方向に、カメラの撮像系全体を物理的に回転することができる。視線測定装置で検出された、装着者の右眼の視線方向と2台のカメラでそれぞれ撮影された画像が計算機に入力され（図2）、視線情報とステレオカメラの立体視を組み合わせた、これまでにない新しい視覚情報の獲得を行うことができる。

たとえば、人の視野は広く、視線は高速に移動し、かつ、視線中央部では解像度も高いため、人の視点での画像取得においては視野・空間解像度・時間解像度のバランスを取ることが課題である。このセンサを用いて視線の移動を解析した結果に基づいて、人が注目している対象に合わせて最適な映像を取得する機能を開発した。人の視線が何かを長時間注視している場合には、注視対象までの距離を考慮した撮像倍率を設定し、撮像対象とその周囲の映像を高解像度で取得する。また、人の視線が次々と移動している時には、人の視線の動きに追従して広い視野の映像を取得する。

また、人が手に何かを持って観察しているときに、人が観察している短時間の映像から手持ち物体の3次元モデルを生成する手法を開発した。そのためには、人が手で持った物体は、その一部は必ず手によって覆い隠されてしまい、全部を同時に見ることができないという問題と、人が見ている時間が限られており十分多くの映像を取得できないという問題を解決しなければならない。物体表面の特徴点をステレオカメラで三次元的に追跡し、三次元空間内での物体の移動を解析すると、手持ち物体の映像シーケンスを物体の回りを手とカメラが別々に移動しているシーケンスへと変換できること、その際、手の動きがランダムであり手と物体との分離ができなくても、複数の映像を統合することで手を消去できることを理論的に示した。図3に示すような手持ち物体の映像から、図4に示すような形状モデルを生成することができた。

参考文献【1】 K. Sumi, A. Sugimoto, and T. Matsuyama:Active Wearable Vision Sensor: Recognition of Human Activities and Environments, Proc. of International Conference on Informatics Research for Development of Knowledge Society Infrastructure, pp.15-22, Kyoto, 2004.3

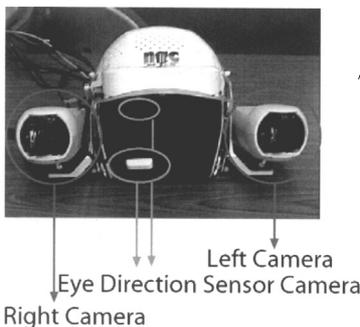


図1. センサのヘッド部

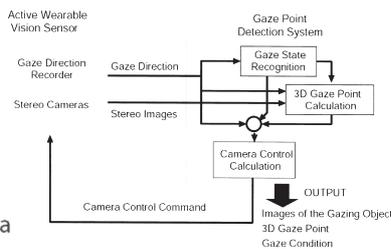


図2. アクティブカメラ制御系



図3. 装着ビジョンから見た手持ち物体の映像



図4. モデリング結果

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室） 「ゲーム理論を用いた無線アドホックネットワークの解析」

近年、携帯電話や無線LANに代表される無線ネットワークの発展やインターネットの普及により、あらゆる場所に無線デバイスが遍在するユビキタスネットワークの実現が現実味を帯びている。このような無線ネットワークを実現する重要な技術として、無線端末自身に中継機能を持たせマルチホップ伝送により情報を伝達する、無線アドホックネットワークが注目されている。現在の無線LANにおける無線伝送は、有線ネットワークに接続されたアクセスポイントと端末間の直接伝送であるが、このアクセスポイントをマルチホップ伝送を用いて接続すれば、有線ネットワークの導入が難しい場所にも無線LANの導入が可能になると考えられる。無線LANの標準化を行うIEEE 802.11委員会においても無線メッシュネットワークとして標準化が進められており、産業界でも注目度の高い技術である。

ところで、周知の通り周波数資源の有効利用が無線通信技術の大きな課題であり、一般には基地局等による集中的なアクセス制御を行えば、高い利用効率を得られる。一方、無線デバイスの密度が増加すると、最適なアクセス制御は計算量が膨大になることが知られている。このため、各無線デバイスが自律分散的に周波数資源を有効に利用できる制御方式が望まれる。

本研究では、無線アドホックネットワークにおいて、各無線デバイスが周波数有効利用を目的として、通信経路、ならびに伝送速度を分散制御によって適応的に決定する状況を評価した。このような場合、最適な通信経路や伝送速度は、他の無線デバイスがどのような通信を行うかによって左右される。これは、制御決定主体がシステム内に複数存在することが原因であり、経済学で用いられるゲーム理論を導入することによって解析が可能と考えた。具体的にはノードをプレイヤー、選択しうる経路を戦略、各戦略に対するスループットを利得とした場合に、各プレイヤーが自分勝手に自己の利得の最大化を追求する限り、必ずしもネットワーク全体の利得の最大値とは一致しない局所最適点（いわゆるナッシュ均衡点）に落ち着く可能性があり、このナッシュ均衡点を用いた評価を試みた。

例えば図1のような無線デバイス配置の場合には、矢印で示す経路が均衡状態にある。様々な無線デバイス配置に対して、このような均衡状態にある経路を用いた場合の平均スループットを、集中制御の場合と比較したものを図2に示す。集中制御の場合、無線デバイス間の直接伝送（図2中（1））の代わりにマルチホップ伝送（同（2））を導入することでスループットが増大する。これを分散制御（同（3））によって実現すると、送信電力が高い場合はスループットが低下する反面、送信電力が低い場合は集中制御を行った場合に近い、高いスループットが得られることが確認された。現在、伝送速度制御、経路制御に加えて電力制御を行った場合等の検討を進めている。

（参考文献）山本高至、吉田進、“マルチホップ無線ネットワークにおける自律的経路選択法の解析” 信学技報RCS2003-338、pp.29-32、March 2004

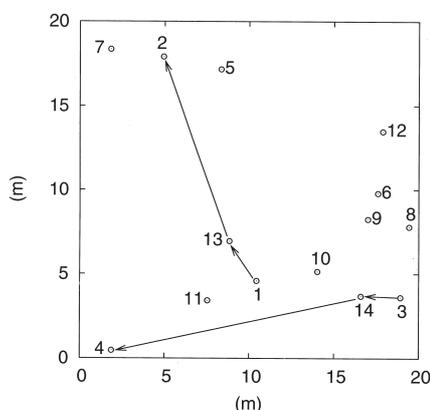


図1. 分散適応経路制御の結果例

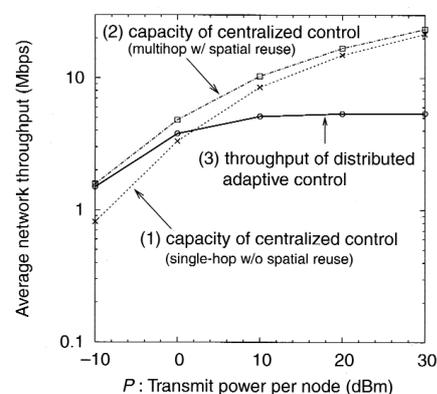


図2. 分散適応経路制御によるスループット特性

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）

「ハードウェアを共有化して消費電力あたりの性能をあげる並列プロセッサ」

近年の集積回路の向上により、プロセッサの性能は飛躍的に上昇してきた。集積度に応じたハードウェアの投入により、これまでは性能向上が続いてきたが、それも限界に近づきつつある。全体としての処理能力を向上させるため、複数のプロセッサを一つのLSI上に搭載するオンチップマルチプロセッサが一般化しつつある。INTEL社のプロセッサにおいても、Hyper Threadingと呼ばれるオンチップマルチプロセッサ技術が用いられている。これは、ハードウェアを一部共有化することで、面積を2倍にすることなく、性能を2倍近くまで向上させる技術である。

Intel社のX86互換プロセッサに用いられているHyper Threading技術は、ハードウェアにより命令レベルの並列性を抽出するSuper Scalar プロセッサ向けである。Super Scalar プロセッサは、ハードウェアを用いるために、ハードウェアの規模が大きくなる。一方、コンパイラによりソフトウェアであらかじめ並列性を抽出しておき、実行時には並べられた命令列を単に並列に実行する方式を、VLIW (Very Large Instruction Word) と呼ぶ。本研究では、VLIWプロセッサにおいて、並列実行に用いるハードウェアを共有するResource-Shared VLIW Processor (RSVP) アーキテクチャ (図1) の提案を行ない、その性能分析、ならびに0.18μm プロセスにおいて、2並列のRSVPのLSI (図3) の試作を行なった。

集積回路の微細化により、ハードウェアが停止しているときには消費電力が0であるというCMOS回路の常識が崩れ、リーク電流と呼ばれる回路が静止しているときの電流が支配的になるとうしている。このような環境下では、ハードウェアの面積が大きいほど、リーク電流による電力が支配的となる。研究においては、現在の最新プロセスである90nmのパラメータから、ロードマップにしたがって、スケーリングを行なった場合の消費電力あたりの性能について考察を行なった。図2にその結果を示す。25nm プロセスにおいては、RSVP が3割程度消費電力あたりの性能が向上していることがわかる。

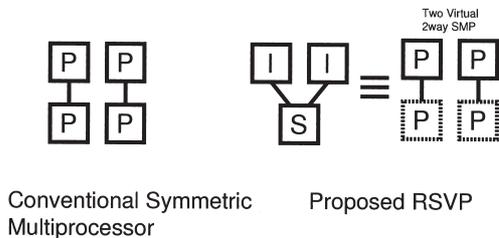


図1: RSVPの基本アーキテクチャ

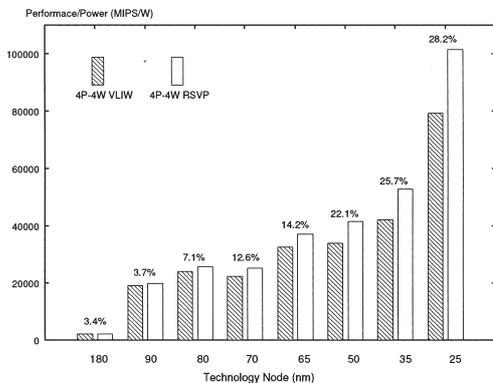


図2: 通常のVLIWプロセッサと、提案のRSVPプロセッサにおける消費電力あたりの性能。ロードマップにしたがってスケーリング

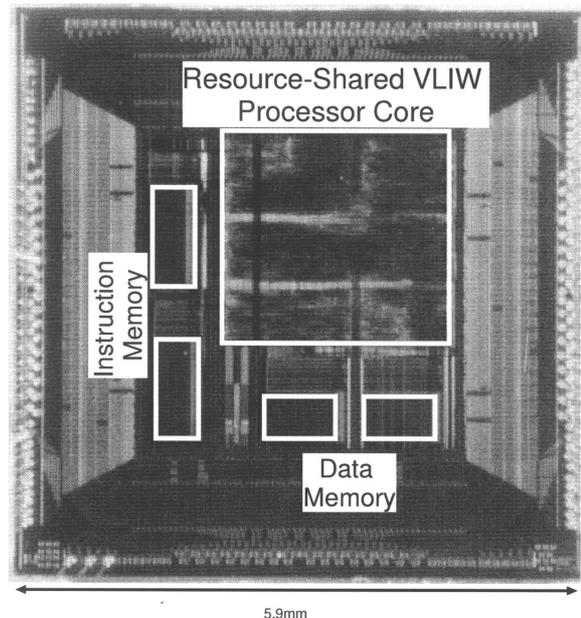


図3: 0.18μm プロセスにて試作を行なったLSIのチップ写真

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室） 「MRIを用いた生体組織弾性率の計測」

当研究室では、情報技術を医学・医療に応用するいくつかの研究課題に取り組んでいるが、ここでは本学再生医科学研究所と共同で開発を進めている核磁気共鳴画像法（MRI）を用いた生体組織弾性率測定法（MR Elastography）について紹介する。

生体組織の硬さを表す弾性率（ヤング率や剛性率）は、主として骨や軟骨などの比較的固い組織を対象に、採取した標本を力学的な方法で計測し、外傷に対する強度や骨粗鬆症などの疾病における強度変化が計測されてきた。また、軟部組織については触診による評価を行い、肝硬変の程度や硬く変化した腫瘍の広がりなどの診断に利用されてきた。しかし、触診は医師が自らの手指を用いて感覚的に評価するものであり、曖昧な診断指標にすぎなかった。この様な生体組織の弾性率をMRIにより定量的に計測する試みがMR Elastographyである。

MR Elastographyは1995年にMayo Clinicの研究グループによって考案された方法で、生体の表面から与えた数十Hzの微細な振動が深部に伝播する際に組織の弾性率によって振動波の伝播速度が異なることを利用し弾性率を定量化する。従来のMR Elastographyでは、数cm程度の大きさの接触面を持つプローブを皮膚に密着させ、皮膚に平行に振動させることによって横波として深部へ伝播して行く振動波を画像化し、剛性率を計測している。しかし、この様に波源が局在すると振動波は球面状に広がるため、伝播の方向によっては横波だけではなく縦波が混在することになり、ヤング率と剛性率を広範囲で独立に計測することができなかった。そこで、当研究室では振動波が人体の深部組織へ平面状に伝播して行くようなベッド型振動発生装置を開発している。現在は、寒天状の弾性モデル物質を計測するための小型プロトタイプが完成した段階であるが、ベッド型振動発生装置では、モデル物質全体に振動波が均等に伝播して行く様子を確認している。

図1, 2に、従来のプローブ型およびベッド型振動発生装置を用いて撮影したMR Elastography画像を示す。プローブ型振動発生装置を用いて得られたMR Elastography画像では、プローブから深部へ垂直に伝播して行く振動波は横波、表面に広がる振動波は縦波であり、これら以外は両者が混在していることになる。縦波は横波に比べて伝播速度が大きいため、振動波の広がりには扁平な球面状になっていることに注意されたい。剛性率は横波の波長から算出されるが、この様な振動の伝播ではプローブ面から垂直な方向の部分しか剛性率を計測できない。しかし、ベッド型振動発生装置を用いて撮影したMR Elastography画像では、振動波が平面状に伝播して行く様子が確認でき、広範囲にわたって効率よく剛性率を計測できる。今後、全身を振動させるようベッド型振動発生装置を大型化して行く予定であるが、MRI撮影装置内の高磁場中という特殊な環境下で稼働させるためには、様々な工夫が必要と考えられる。

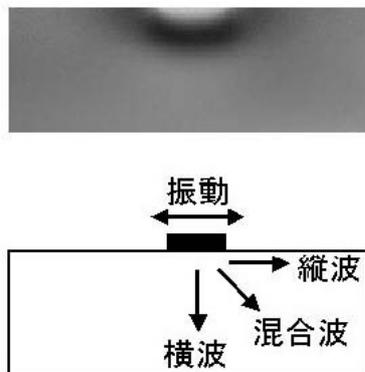


図1：プローブ型振動発生装置を用いて得られたMR Elastography

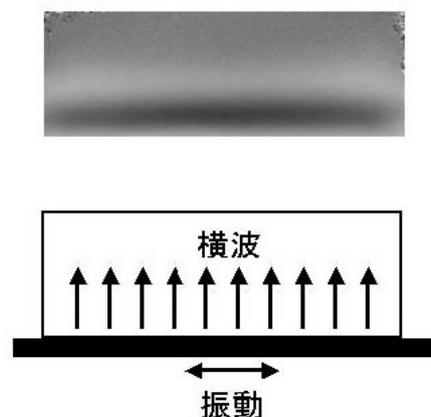


図2：ベッド型振動発生装置を用いて撮影したMR Elastography

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（吉川榮研究室）  
 「マルチレベルフローモデルに基づくプロセスシステム分析支援システムの研究」

発電プラントや化学プラントのようなプロセスシステムの中での各種の物質とエネルギーの流れを、図式的に意味表現するための機能論モデルであるマルチレベルフローモデル（Multilevel Flow Model: MFM）を基本概念にして、知識工学、マルチメディア表現およびネットワーク技術を統合したプロセスシステムの分析支援システムの開発を、次の3つの視点に着目して進めている（図1参照）。

- シンボルレベルの開発支援 プロセスシステムの持つ機能や目標など意味を表すシンボルを重視して表現することによって、ヒトに心理的に分かり易くより高い操作性を実現する。
- 異常兆候指向の支援 プロセスシステムの異常の検知や診断を直観的で分かり易くする。
- カスタマイズ化できるシステム開発 個別の対象システムに応じ、そのオペレーション支援のための各種概念機構や処理内容をグラフィカル手法によってカスタマイズする。

以上のような人間中心の概念に基づいて、グラフィカルインタフェースを駆使したプロセスシステムの分析支援のために、マルチレベルフローモデルスタジオ（MFMS）の開発を進めている。開発したMFMSは、主として3つのコンポーネントから成る（図2参照）。すなわち、1) 各種の物質とエネルギーの流れで構成されるプロセスと、その目的、挙動、機能、構造に着目して図式表現するMFMモデルの編集およびその更新管理を支援するための知的エディター、2) MFMモデルの持つ情報構造をデータベースとして表わすために拡張マークアップ言語に基づいて知識ベース化したファイル構造に変換するKB化したMFMモデル、そして3) MFMモデルを構築した後に、診断やモニタリングおよび運用手順を生成するための各種のアプリケーションプログラムを構築し組み込むためのエクゼキュータの3つである。このようにMFMSにより生成されるMFMモデルは、対象システムの基本的な機能的、構造的および振る舞い特性を表現するばかりでなく、それを基本として対象システムから逐次データや信号を取り込んで、状態認識や異常状態の影響の分析、運転手順のガイダンスなどのさまざまな用途のアプリケーションプログラムを生成するために必要な情報や機能も含んでいる。

以上のように開発したMFMSを用いて、本研究室では、これまでにコジェネレーション用の小型ガスタービンシステムの故障監視支援システムや原子力発電所のオンライン異常監視診断システムを作成し、その機能を検証している。

なおこのような研究は、内外のMFMモデル研究の典型であるプラント診断への応用研究であるが、MFMの持つ意味論的な表現機能を活用して大規模なエネルギー環境システムの種々の多角的な問題の評価分析のために応用をはかっている。その実例としてガス事業の規制緩和と政策導入による我が国の天然ガス供給インフラ発展の傾向分析や、原子力政策の重要課題である核燃料サイクルシステムの分析のような新たな問題にもMFM手法を適用する新たな方向の研究を最近進めている。



図1 人間中心の開発

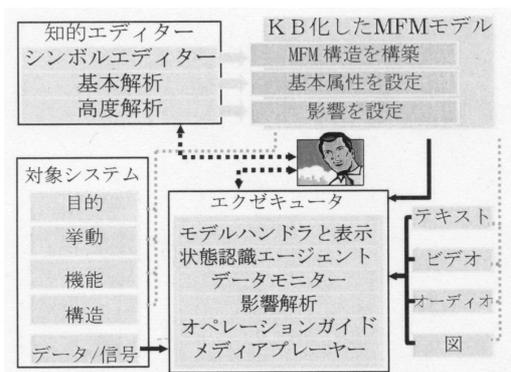


図2 マルチレベルフローモデルスタジオ

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室） 「SMESを用いた電力系統の固有周波数のオンライン把握」

近年の電力自由化や循環型エネルギーによる環境保全という社会のニーズによって、電力系統には太陽光発電や風力発電、マイクロガスタービンなどの小型で制御性に富む分散型電源と呼ばれるエネルギーシステムが導入され、その数は今後ますます増加するものと考えられる。分散型電源の導入によって、複雑になる系統の固有周波数を把握することは電力系統の運用上、有用なことである。固有周波数をもとめる方法としては、現在オフラインでのシミュレーションによる方法があるが、系統は時々刻々と変化しているためオンラインによる測定方法が望まれる。そこで本研究では、超電導エネルギー貯蔵装置（SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage）を用いて、系統の固有周波数の把握をオンラインで行うことを提案し、アナログ型電力系統シミュレータにおいて、模擬SMES（図1）を用いて実験を行った。模擬装置は、電力系統に対して有効電力と無効電力を独立に、また高速でやりとりできるというSMESの特性を示すよう作成されている。

図2に検討に用いた電力系統を示す。発電機G1～G4の出力を変化させることにより、系統の運転状態を変化させ実験を行った。固有周波数を把握する手法は、SMESより電力系統に微小なある周波数の正弦波状の電力変動を与え、この周波数が系統の固有周波数と一致するとき、変動に対する系統の応答（送電線1の潮流）は励振電力とほぼ90度位相がずれたものとなることがわかっている。上記の2信号の位相差を、ロックインアンプを用いて測定、フィードバックすることにより、位相差が常に90度となるようSMESの励振周波数を制御するものである。このように系統の固有周波数とSMESの励振周波数を一致させるよう制御することで、系統の固有周波数を追従把握できる。図3の実線は発電機1～4の出力上昇時に追従させたSMESの励振電力周波数である。図中黒丸はそれぞれの出力点の定常状態で求めた系統の固有周波数を示す。発電機出力が上昇して系統の運転状態が安定限界に向かい、固有周波数が低下していく様子がオンラインで追従把握できていることがわかる。

今後、さまざまなタイプの分散型電源が導入された場合の電力系統の運転状態・安定性のオンライン把握を検討していく予定である。

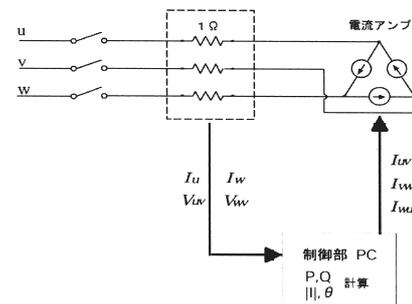


図1 模擬SMES

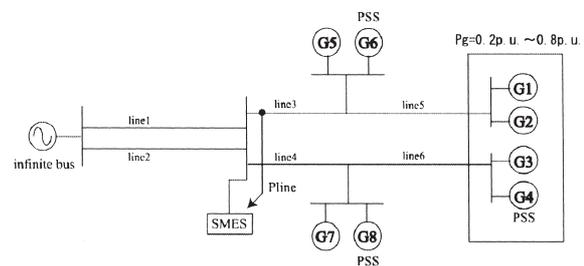


図2 対象模擬電力系統（シミュレータ）

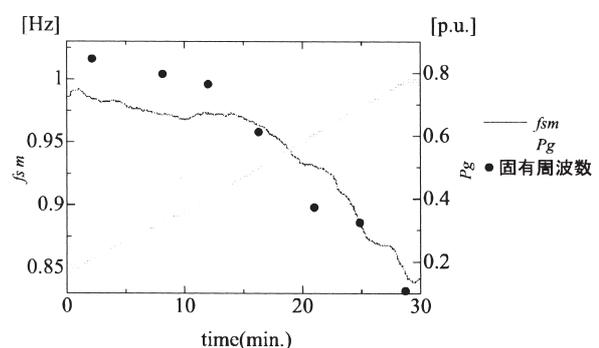


図3 実験結果

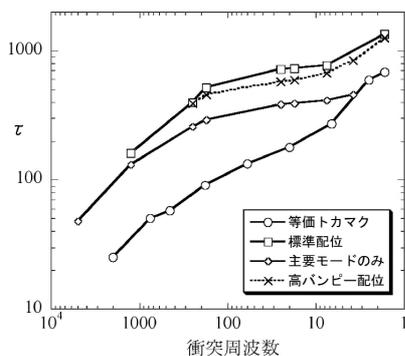
## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研究室) 「ヘリオトロンJ」における粒子閉じ込めのモンテカルロ・シミュレーション

プラズマの閉じ込め性能を評価する上で拡散係数や閉じ込め時間は有用な指標である。しかしロスコーン損失の存在する系では、磁気面ごとの局所的な拡散係数の評価が、直接軌道損失が存在するため困難であるという原理的問題があった。そこで本研究では閉じ込め時間に注目し、定常状態における荷電粒子のグローバルな閉じ込め時間を計算できるコードを開発すること、そしてヘリオトロンJの磁場配位に適用して閉じ込め性能の評価をおこなうことを研究目的とした。

案内中心軌道解析への準備として、フーリエ解析によりヘリオトロンJ 標準配位の磁場スペクトルを計算してデータ化した。この磁場スペクトル・データをもとに、磁気座標系における単一粒子案内中心軌道解析のコードを走らせた。コードの検証のために、粒子損失割合を求めるために単一粒子計算コードを拡張して、モンテカルロ法による多粒子シミュレーション・コードを開発した。計算例として、まず500個のイオン(数100eV~1keV)を磁気軸近傍から入射し追跡して、損失すれば再度入射する。入射のピッチは $\pm 0.5$ をランダムにとる。定常状態(すべての粒子が少なくとも1回損失)の時間の数倍まで追跡し、単位時間あたりの損失粒子数をカウントして損失割合を計算する。なおシミュレーションに含まれる粒子のクーロン衝突はピッチ角散乱のみでエネルギー散乱は考慮していない。

トカマク・モデル磁場のリップル有/無を使って閉じ込め性能の違いを確認することで計算コードの検証をおこなった。その結果、トロイダル・リップルの有るトカマクで相対的に閉じ込め性能が悪いことが確認できた。またヘリオトロンJの標準的な配位に等価なトカマク・モデルを使って計算をおこない、この値をヘリオトロンJ 磁場配位の閉じ込め性能の比較基準とした。ヘリオトロンJ 標準配位に適用した結果、ヘリオトロンJの配位に対して人為的にバンピー成分を高めたものに適用した結果、高次モードを省略し主要モードのみを残した配位に適用して得た閉じ込め時間 $\tau$ の衝突周波数依存性を図に示す。

ヘリオトロンJのフーリエスペクトルには、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場に特徴的なヘリシティ成分、トロイディシティ成分、バンピー成分などの主要モードがあらわれる。閉じ込め時間の計算結果では、リップル有/無2種類のトカマクモデルにおいて、トロイダル・リップルによる損失を原因とする差が $\tau$ において確認できて、今回開発した計算コードの動作が検証された。ヘリオトロンJ 標準配位では等価なトカマクのプラトー領域の値よりも0.1~0.2倍程度、閉じ込め時間が小さい。これは磁力線に沿った磁場強度変化のリップルによる粒子損失に起因すると解釈できる。またトロイダルコイル電流値を下げた高バンピー配位で閉じ込めが改善されていることが分かった。人為的に磁場データのバンピー成分のみを高めた配位でも改善がみられた。これらの結果から、バンピー成分が粒子軌道の磁気面からのずれを抑える働きがあることを、今回開発した計算コードによる閉じ込め時間の評価で確認した。フーリエ・ハーモニクスの中の主要モードのみを残して高次モードを省略した配位では、標準配位に比べて閉じ込め時間の20~40%程度の改善が見られた。



以上まとめると、軌道損失の存在する系において、拡散係数を求める代わりにグローバルな閉じ込め時間 $\tau$ を評価するコードを開発した。また開発した計算コードをモデル磁場で検証したのちヘリオトロンJに適用した。バンピー成分が閉じ込め性能に寄与していることが、今回の閉じ込め時間計算コードによる評価で確認できた。また高次モードが閉じ込めに影響すること、人為的に磁場スペクトル(バンピー成分)を変化させると改善がみられることを確認した。これによって拡散係数の計算とは異なる閉じ込め時間による評価方法を確立することができた。

## 開発創成研究系 宇宙圏電波科学分野（松本研究室） 「次期科学衛星ミッション用チップ型波動粒子相関計の開発」

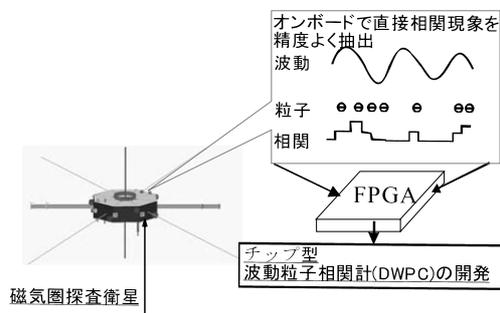


図1: チップ型波動粒子相関計

波動成分である電波を媒体として、粒子同士がエネルギーの授受を行うためです。つまり逆に言うとこれらの場の量を観測することによって、そこで発生しているエネルギー変換過程を知ることができます。宇宙での環境というのは、これら電磁気的な現象が顕著にみられる環境なのです。このことからちょうど地上で風を観測したりするのと同じで、人類の生存圏として宇宙空間を利用する上で、そこでの電磁気的なエネルギー交換過程を把握することは、非常に大切なことです。

特に電波(波動)とのエネルギー交換過程を波動-粒子相互作用と呼びますが、これを宇宙に打ち上げた観測装置でとらえることは、さほど簡単なことではありません。特に電子の運動が関与するような「速い現象」に対してはなおさらです。たとえば、地球周辺の宇宙空間で、電子とエネルギー授受をする典

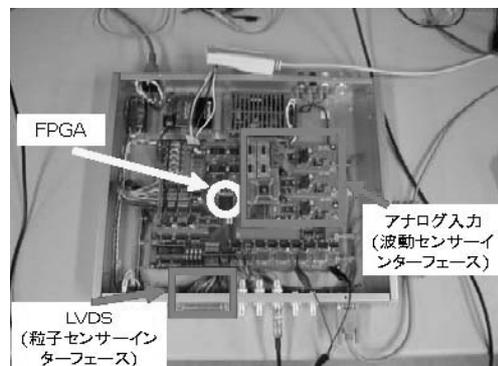


図2: チップ型波動粒子相関計の試作器

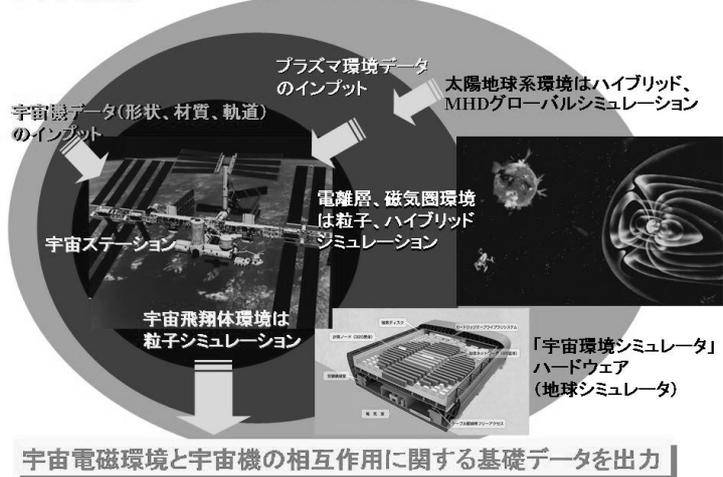
型的な波動の周波数は、5kHz程度です。時間にして、200マイクロ秒の周期です。波動観測器はこの波動をとらえますが、エネルギー授受の相手となる電子の観測器から求まる速度分布関数の時間分解能は、そのセンサーの仕組み上、がんばっても数10msecです。ここに2桁の時間分解能の差があり、これらのデータを使って波動-粒子相互作用を定量的に議論することは、なかなか難しいものです。そこで私たちの研究室では、衛星の機上で、波動の「観測波形」と、粒子一個々々の観測パルスとの直接相関をとることにより、通常、地上で「波形データ」と「速度分布関数」の比較によって解析している波動-粒子相互作用を、更に時間分解能をあげて観測する装置の開発を行っています。しかも将来の軽量化衛星への発展を考え、FPGAチップ内に基本処理をすべて含めてしまうため、本装置を「チップ型波動-粒子相関計」と呼んでいます(図1)。現在、概念設計、動作原理確認のためのシミュレーションなどを終え、試作品の開発に取り組んでいます。試作品では既にハードウェアの開発は終了し、現在、FPGA 内部に組み込む、「波動の帯域を制限するフィルタ」、「非同期で入ってくる粒子パルスの取り扱いと波動との相関計算」、「内部で発生する時間遅れの補正」などの諸機能の構成が終わり、基本動作確認を行っているところです(図2)。現在の開発品は、試作品とはいえ、実際に衛星で利用するプラズマ粒子計測器、プラズマ波動計測器が接続できるようにインターフェース部も実際のものに合わせて製作されており、FPGA内論理が完成次第、プラズマチャンバー内に設置された粒子計測器からのデータを使った動作チェックを行う予定です。

## 開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室） 「宇宙環境シミュレータの開発」

人類の持続的発展を維持するためには、その生存できる領域を拡大してゆく必要があり、宇宙開発・宇宙利用を進めてゆくことは不可欠です。宇宙は宇宙プラズマと呼ばれる希薄な電離気体で満たされており、この宇宙プラズマ空間中に生起する様々な現象を定量的に理解する上で、宇宙プラズマ計算機シミュレーションは非常に有効な研究手段です。これまで宇宙プラズマシミュレーションは、衛星観測により発見された様々なプラズマ現象の詳細解析用ツールとして主に用いられてきました。本研究では、それを発展させた形で、宇宙開発・宇宙利用に不可欠な飛翔体環境の定量理解とその宇宙技術開発へのフィードバックを目指し、工学的かつ実際の宇宙仮想実験が出来る数値チェンバーである「宇宙環境シミュレータ」のプロトタイプ構築を目標としています。この試みにより、これまでの宇宙プラズマ物理学の深化のための学術的なシミュレーションから、将来のエネルギー問題の解決策として検討されている宇宙太陽発電衛星等、将来の宇宙利用・技術開発に対して基礎的データを得ることが出来るシミュレーションへの質的変換をはかることを目指しています。宇宙環境における飛翔体特性の定常解はプラズマシミュレーション以外でも得られますが、宇宙プラズマ特性を考慮した相互作用、非定常な応答等の解析には、宇宙プラズマ中の電子運動論の効果を取り入れた粒子モデルのプラズマシミュレーションが不可欠です。本研究では、これまでの宇宙プラズマシミュレーションの知見を最大限に利用し、これに衛星やステーションなどの飛翔体や宇宙利用に関連する工学的要素をシミュレーションモデル内に取り込むことにより、宇宙プラズマ環境との相互作用を可能な限り正確に取り入れた形で飛翔体環境のシミュレーションを行うことを目指しています。

「宇宙環境シミュレータ」では、主に3次元の電磁粒子シミュレーションを行います。この解析ツールにおいては、宇宙プラズマを構成している電子およびイオンの個々の運動方程式を解き、それをもとに電流密度を計算して、電磁界のマクスウェル方程式を解き進めます。従来のスーパーコンピュータシステムでは、電離層領域の高々約25m立法の3次元空間モデルしか扱うことができず、衛星の壁面などの一部しかモデル空間に取り込めません。電離層モデルでは、最低限10m立方体ほどの空間領域を扱う必要です。また静止軌道領域では宇宙太陽発電衛星などの大型建造物を想定するとkmオーダーの空間領域がシミュレーション空間として必要になります。これらの空間領域を計算機内の仮想空間に実現し、その空間において十分な宇宙プラズマ粒子数を取り扱うためには、10テラバイト近い主記憶容量が必要となります。これを実現するために、世界最速レベルの「地球シミュレータ」を用います。現在、地球シミュレータを用いて、イオン推進エンジンからの排出重イオンによる地球磁気圏への影響に関するシミュレーション解析を行っています。また、これと平行して、非構造格子シミュレーションコードの基本設計とそれによる飛翔体近傍環境解析も行いつつあります。これは、宇宙航空開発研究機構（JAXA）の衛星帯電解析ツール（MUSCAT）開発プロジェクトとも関連しており、宇宙プラズマ環境における衛星帯電の厳密解を検証する役割を担っています。

### 宇宙環境シミュレータ 概念図



## 国際融合創造センター 創造部門 先進電子材料分野（藤田静研究室） 「酸化亜鉛半導体による融合機能の創成」

次世代のデバイスに求められる機能はますます多様化し、そのためには先進的かつ多様な機能を持つ材料の開発、さらには材料の持つ機能の融合により新しい機能を創り出すという指針に基づいた材料研究が強く望まれる。この観点から現在われわれが着目している材料の一つが酸化亜鉛（ZnO）である。ZnOは、バンドギャップが室温で約3.4eVの直接遷移型のバンド構造を持ち、紫外領域の光機能を持つ。この材料は、古くから圧電体、光導波路、蛍光体などに用いられてきたが、最近の成膜技術の進歩から、新規多機能材料としての特徴が明らかになってきた。例えば、(i) 導電体、半導体、圧電体、誘電体として多様な電子物性を示す、(ii) 励起子や励起子分子の結合エネルギーが大きく、高効率の発光、非線形光学効果を用いた光応用が期待できる、(iii) 可視領域で透明のため、透明のデバイスを作製できる、(iv) Mnなど磁性元素のドーピングにより、励起子と磁性との相互作用に基づく光磁気効果が期待される、(v) Si上に配向の優れた膜が得られ、新しい光電子集積素子への応用が期待できる、といった点である。また、酸化物の多くは環境に優しい材料で、Znは地球上に多く存在する元素であることから、環境負荷の少ないデバイス材料としての意義も高い。以下に、この分野に関するわれわれの研究内容について記す。

- (1) **酸化亜鉛系半導体のバンドギャップエンジニアリング** ZnOの機能を活かすためには、MgOとの混晶化によりバンドギャップを制御し、多層構造を作製することが不可欠である。しかし、ZnOとMgOの結晶系の相違から、MgZnO混晶の組成制御が困難である。われわれは、分子線成長による精密な成長制御のもとで、バンドギャップを3.4eVから4.45eVまで制御することに成功し、紫外光（とくに自然界に存在しない波長270nm以下のソーラブラインド光）検出器としての機能を示した。また、ZnO/MgO超格子により擬似的なMgZnO混晶としてバンドギャップを4.6eVまで拡大しえた。さらに、ダブルヘテロ、FETなどのデバイス応用について研究を進めている。
- (2) **酸化亜鉛半導体ナノ構造の制御** 酸化亜鉛ナノ構造の特徴を活かし、ナノ構造間の近接場光伝播を用いたナノ光回路やナノ電子デバイスへの応用が期待されている。しかしそのためにはナノ構造の位置、サイズを制御することが不可欠である。われわれは、集束イオンビームを用いて基板表面を数nmの深さにナノエッチングを行うというトップダウンテクノロジーとZnOナノドットの自己形成というボトムアップテクノロジーの融合により、エッチングされた位置に選択的にZnOナノドットを形成するという技術を開発した（図参照）。またそのサイズはエッチング深さで制御できる。今後、光・量子機能の創成と応用に向けた研究を展開する予定である。
- (3) **酸化亜鉛透明導電膜の新規成膜技術** インジウム資源の枯渇の問題から、ITOに代わりZnO透明導電膜の開発が待望されている。われわれは、安全な原料を用いた気相法により大面積基板に対応可能な新しい成膜技術の研究を行っている。

酸化亜鉛は今後広い分野で応用が見込まれる基盤材料であり、われわれの研究も、科学研究費補助金のほか、知的クラスター創成事業「京都ナノテククラスター」、高知県地域結集型研究開発事業等、事業化・産業化を念頭に置いたプロジェクトのもとで推進している。また、国際融合創造センターで化学工学、材料工学等を専門とする他教員との交流を持ちながら研究を進めている。

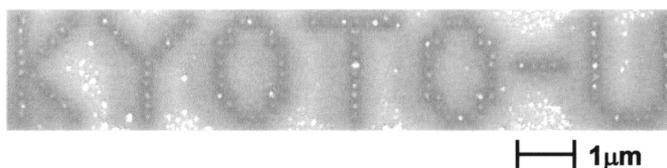


図 位置の制御されたZnOナノドット