

## シリーズ：研究内容紹介

このページでは、電気系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。（\*印は新設研究室）

### 電気系関係研究室一覧

#### 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）

**電力工学講座** 電力発生伝送工学分野（宅間研）

電力工学講座 電力変換制御工学分野

**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

電気システム論講座 電力システム分野（上田研）

##### 電子物性工学専攻

**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（橘研）

**機能物性工学講座** 半導体物性工学分野（松波研）

機能物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研）

**量子工学講座** 光材料物性工学分野（藤田研）

量子工学講座 光子電子工学分野

量子工学講座 量子電磁工学分野

##### イオン工学実験施設

**高機能材料工学講座**（山田研）

#### 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）

**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 情報回路方式論分野（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）

#### エネルギー科学研究科

##### 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（吉川栄研）

##### 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 原子エネルギー研究分野（井上研）

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）

#### 超高層電波研究センター

**超高層電波工学部門**（松本研）

レーダー大気物理学部門（深尾研）

数理電波科学部門（橋本研）

**超高層物理学部門**（津田研）

京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー（KU-VBL）

## 研究室研究テーマ紹介

### 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）

#### 「電磁界解析における並列処理に関する研究」

近年、CADシステムの普及などにより、実用的な電気機器（モーターやアクチュエータなど）の設計段階において、数値解析によるアプローチが重要となっています。最近の電磁解析分野では、3次元問題、非線形問題、過渡現象問題などの計算量の多い問題を扱う場合が多くなってきており、計算機にもその大容量性、高速性が求められています。これらの要請に対する解決策の一つとして並列コンピューティングがあげられますが、並列プログラミングは容易でないため、なんらかの並列化支援ツールが求められています。そこで、島崎研究室では、電磁エネルギー工学分野を対象とし、大規模並列有限要素解析を支援するシステムの構築や、並列化連立一次方程式反復解法ソルバの構築を行っています。

#### ①大規模並列有限要素解析支援システム

現在、電磁界問題を対象とした数値解析の多くは有限要素解析をベースにしており、大規模な連立一次方程式を解くことに帰着します。本支援システムでは、分散されたメモリ空間上にこの連立一次方程式の係数行列（剛性マトリクスと呼ばれる）を構築し、これを並列に解くための並列化コードを生成します。ユーザーは支援システムに対して、解析モデルの幾何的情報、境界条件、モデルの物理定数、解くべき方程式の記述を行います。これに対して支援システムでは、解析モデルの領域分割、未知変数の最適な番号付け、分散メモリに対応した剛性マトリクス生成、最適な並列化ソルバ選択などを行い、これらを統合した並列化コードをユーザーに提供します。ユーザーはこの並列化コードを並列計算機やPCクラスタ、WSクラスタといった、分散・並列計算環境において実行します。本システムでは、ユーザーとの情報交換をネット上でインタラクティブにできることを目指しています。

#### ②並列化連立一次方程式反復解法ソルバの構築

前者の研究は、大規模な有限要素解析を行うユーザーを指向したのですが、本研究は現在すでに逐次的な（PCやWSなどの1プロセッサでの）有限要素解析を行っているユーザーを指向したものです。即ち、これまでのコードのソルバ部を並列化ソルバ部に置き換えるだけで並列化を行うもので、その簡便さと汎用性を重視したものです。現在、CG法やGMRES法、BICGSTAB法といった代表的なソルバの並列化コードが完成しております。しかし、逐次型の解析コードにおいては、通常、これらのソルバに対して前処理が施されます。最も一般的な前処理である不完全コレスキー分解前処理は、その並列化が困難であることが知られており、なんらかの方策が必要となります。島崎研ではその方策の一つとして、有限要素法より生ずる疎帯係数行列を持つ連立一次方程式を対象とした場合について、ソルバ内で自動的に係数行列のオーダリングを変更して処理する手法を提案しています<sup>[1]</sup>。本手法を3次元渦電流解析に適用し、約22万自由度の問題に対して、22プロセッサ使用で12倍の速度向上を得ています（図2）。今後はより高い速度向上を得るための並列化アルゴリズムの開発や、Algebraic マルチグリッド前処理などの別の前処理手法を用いた場合について検討を行っていく予定です。

文献[1] T. Iwashita and M. Shimasaki, Proc. IEEE COMPUMAG'99, pp.728-729(1999)

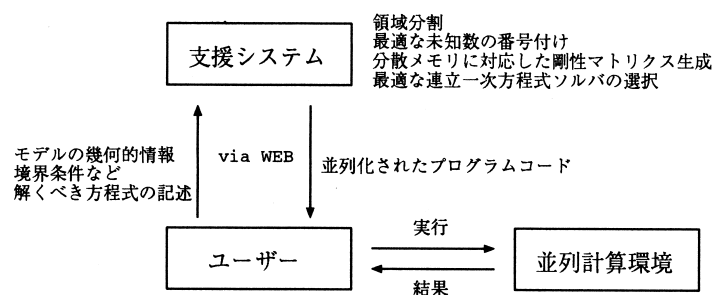


図1 並列化有限要素解析支援システム

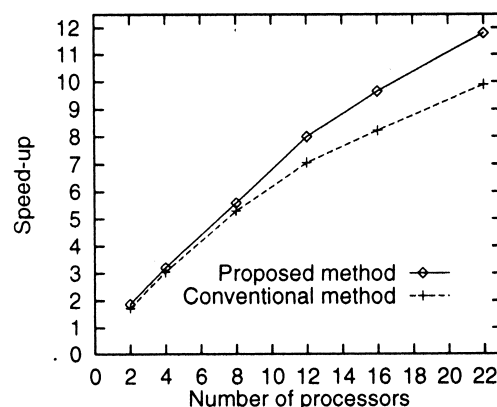


図2 並列化ソルバによる速度向上

電工学講座 電力発生伝送工学分野（宅間研究室）  
「電力系統における内部共振の研究」

わが国の電力系統は富士川を境として、大きく60Hzと50Hzの地域に分かれております。平成11年8月の最大電力は16,749万kWですが、60Hz地域がその54%を、50Hz地域が46%を供給しております。系統構成は地域によって異なり、60Hz地域は九州南端から富士山の麓まで東西に長く伸びた系統であるのに対し、50Hz地域は首都圏を中心とした網状の系統構成となっております。

図1に60Hz地域の系統構成を単純化して示します。500kVの連系線が東西に伸びており、一定区間ごとに発電機が送電線を介してつながっています。母線の矢印は負荷ですが、通常、発電した電気は近くの地域で消費されます。しかし、電力会社間の電気の融通には連系線が用いられ、現在は西から東に向けて電気が流れています。**内部共振**というのは電力系統の動揺が、動揺形態（モード）の相互作用のために拡大する現象です。

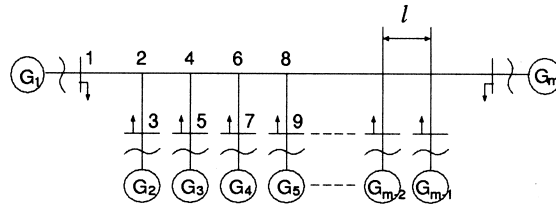


図1：60Hz地域の系統構成

ご承知のように、発電機の回転子は一定の速さで回転しています。火力発電機ならば1分間に3,600回転します。すべての回転子が同じ速さで回転している状態は、ちょうど、高速道路ですべての車が時速90km（少しスピード違反）で走っているようなものです。車と車の距離は一定に保たれ変化しません。車の車間距離は、発電機では回転子の角度差に相当します。しかし、送電線に落雷などがあると、発電機の回転子角が動揺します。その動揺には発電機の相互作用により、図2のような一定の形態（モード）があります。モード1では発電機が東西に分かれて動揺し、モード2では中央と端に分かれて動揺します。

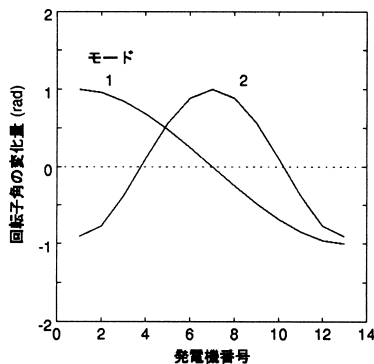


図2：動揺の形態

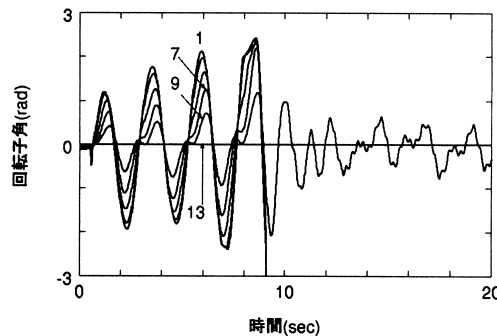


図3：内部共振の解析例

モード1は長周期動揺とよばれ、60Hz系統全体の安定性を左右する重要なモードです。通常、各モードは安定であり、時間の経過とともに動揺は減衰していきます。ところが、動揺の振幅が大きいところでは、二つのモード間に相互作用が生じ、そのためにモードが不安定になって動揺が発散する現象が起きます。内部共振とよばれる現象です。図3は関西電力の大形シミュレータAPSAを使って解析した結果です。本研究室では、この現象についてその物理的原因や抑制方法など基礎的な検討を行なってきました。また、電気学会が作成した詳細な60Hz系基幹系統モデルにより、内部共振が現れることを確認しています。今後は50Hz系についても解析を行なう予定です。

## 電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「伝送線路の事故点検出システムの研究」

### 1. はじめに

電力ネットワークでは落雷や地絡事故によるサージの発生、またコンピュータ回路におけるクロストークなど集中定数回路の理論では解決できない問題が分布定数回路(伝送線路)には数多く存在している。当研究室では、数学の方で盛んに研究されているウェーブレット変換を用いると伝送線路における地絡事故点が極めて高速かつ高精度で検出できることを理論面から明らかにした。最近この理論的成果のハードウェア化に着手した。すなわち、ウェーブレット変換をハード化し、地絡事故点を極めて高速にかつ高精度で検出できるシステムを試作した。ここではこの事故点検出システムの概要を紹介する。

### 2. 試作したウェーブレット変換プロセッサによる事故点検出システム

ハードウェア設計CADであるPARTHENON（本学情報学研究科中村行宏教授が開発）を使用し、SFL言語を用いた動作記述によりウェーブレット変換プロセッサと事故点検出プロセッサを設計し、FPGAを用いてハードウェア化している。

システムの構成は図1のようになっている。計測電圧波形はAD変換され、ウェーブレット変換プロセッサに常時転送される。ウェーブレット変換プロセッサはこの入力データを変換し、各レベルに分解する。分解されたデータはレベルごとに用意された事故点検出プロセッサが受け取り、自己相関を元にして得られた関数値が設定値を越えたときに、CPUに対して割り込み信号を送る。UNIX上の制御システムは、割り込み信号を受けて事故点検出プロセッサからデータを読み出し、画面上に位置を表示する。データ転送は高速伝送が可能なPCIバスを使用している。

### 3. 実用化へ向けて

現実のデータの取得が困難なので、伝送線路を波動方程式で表現し、地絡事故時の送電端のインピーダンスの電圧波形を数値逆ラプラス変換によって求めている。この方法により長さ100kmの線路で地絡を起し、事故点の位置検出に要した時間は最大で1ミリ秒程度である。現在の超高压送電ネットワークは事故が起こってから2乃至3サイクルで事故線路を判定し無電圧にしている。これは一見早いように思えるが、関西地方で言えば事故後34ミリ秒から51ミリ秒かかっていることになる。これに比べれば、このシステムでは極めて高速に事故点検出ができる。この検出法が実用化されれば電力ネットワークの保護システムの動作は極めて高速化されることになる。様々な問題点に直面すると考えられるが、それを克服することによって実用化されるものと思われる。

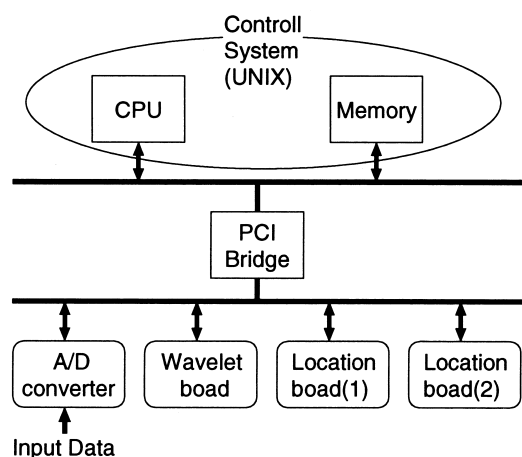


図1：システムの構成



図2：事故点検出システム

## 電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

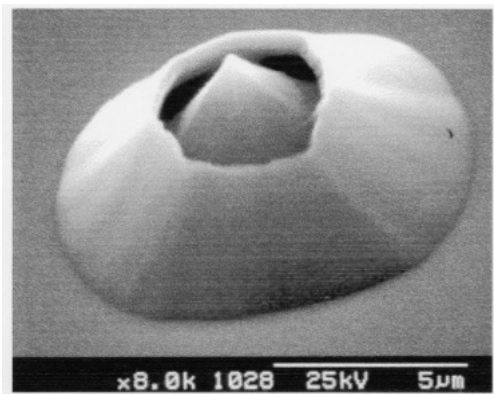
### 「真空マイクロ・エレクトロニクスのための極微電子源に関する研究」

真空マイクロ・エレクトロニクス分野とは、超LSI作製プロセスやマイクロ・マシーニング分野で用いられている光（電子ビーム）露光法、ウエット・エッチング、ドライ・エッチング、薄膜形成などの微細加工法を駆使して、現在の半導体素子とはほぼ同寸法であるミクロン寸法の真空電子デバイスを開発する分野のことです。このような極微真空電子デバイスをマイクロ・バキューム・チューブ（極微真空管）と呼ぶこともあります。それでは、極微真空電子デバイスができると、どのようなことが期待できるのでしょうか。

まず、真空中の電子は半導体中の電子のように格子との衝突をせずに進むので、同じ加速電圧でも10倍から100倍早いスピードで電極間を走行します。したがって、極微真空電子デバイスは半導体より10倍から100倍高速で動作できることになり、テラ・ヘルツ（ $10^{12}$ Hz）デバイス実現への期待が出てきます。真空デバイスですから、大電力動作にも強く放射線などにも誤動作しません。また、ミクロン寸法の極微電子源が実現できると、次のような新しい領域が開かれます。平面上に極微電子源を多数配列し、その前面に蛍光面を配置すれば、厚さが1 - 2 mm程度の超薄型のディスプレイができます。このようなディスプレイは、ブラウン管と同じ優れた特長を備えていますから、液晶のように視野角が狭く応答速度が遅いとか、PDPのように輝度が低いといった欠点はありません。次世代のフラット・パネル・ディスプレイとして大いに期待されています。さらに、2010年頃の超LSIのデザイン・ルールは0.05ミクロンが見込まれていますが、それに対応できる技術としてマルチ極微電子源を用いた電子ビーム露光が注目されています。このように、真空マイクロ・エレクトロニクスは、次世代に向けて数多くの新領域を生み出しつつある分野です。

この真空マイクロエレクトロニクス分野における最重要課題は、安定な極微電子源の実現です。普通、電子源といえば、タングステンなどの耐熱金属を加熱することにより得られる熱電子放出によるものを考えますが、極微電子源ではこの方法は使用できません。エミッタ、ゲート、アノードなどの電極が絶縁膜でつながっているため、エミッタだけを独立して昇温することができないからです。したがって、昇温不要で微小領域から電子放出が可能な電界放出陰極または薄膜型陰極が用いられます。研究室では、極微電子源として主として電界放出エミッタ（アレイ）を取り上げ、安定な電子源の実現に向けて研究を進めています。

電界電子放出量を決める主要な要因は、エミッタ材料の仕事関数と表面形状です。電子放出面にガスが吸・脱着すると局部的に仕事関数が変化して雑音の原因になります。電子放出面にイオン衝撃があったり原子が表面をマイグレーションすると表面形状が変わり電界集中の程度が変化して、やはり雑音の原因になります。研究室では、フィールド・エミッタから発生する雑音量にはエミッタの仕事関数と相関があり、仕事関数が低いほど雑音量が少ないことを明らかにしてきました。したがって、雑音の少ない安定なフィールド・エミッタ材料は、低仕事関数で、マイグレーションが少ない高融点で、イオン衝撃に耐える強い原子間結合をもつものによいことになります。研究室では、フィールド・エミッタ材料として最適な材料を探索するために、イオンビーム（アシスト）蒸着法を主として用いて種々の新材料を作製し、それらの電界放出諸特性を測っています。



写真：作製した極微電子源の例

## 機能物性工学講座 半導体物性工学分野（松波研究室）

## 「電子デバイス応用をめざしたⅢ族窒化物半導体の結晶成長の研究」

Ⅲ族窒化物半導体は、可視短波長～紫外領域の発光デバイスが実現できる材料として近年大きな注目を集めている。一方、この材料は、大きなバンドギャップ、高い電子の飽和ドリフト速度という物性を持つので、パワーデバイスへの応用を考えた場合にも、SiやGaAsという既存の半導体が物性の限界で及ばない領域に対して、大きなポテンシャルを持っている。

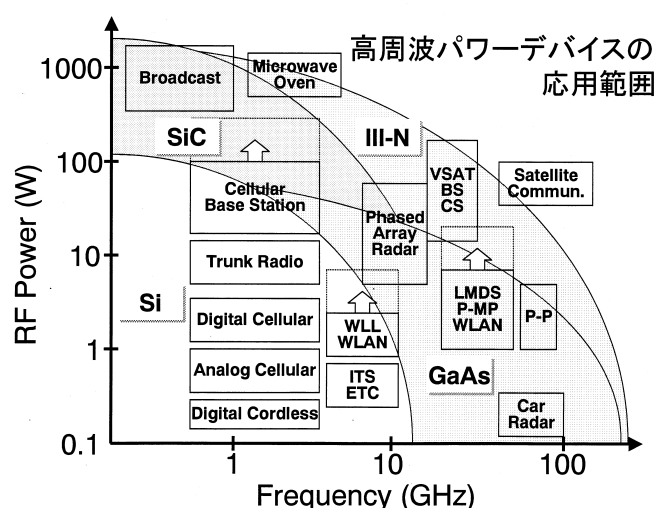
本研究室では、長年にわたりデバイス応用を目指してワイドバンドギャップ半導体シリコンカーバイド（SiC）の結晶成長およびデバイス提示の研究を進め世界をリードしてきた。SiCは大きなバンドギャップ、高い飽和ドリフト速度という特長に加え、酸化プロセスによりSiO<sub>2</sub>が形成可能であり、Siで大成功を取ってきたMOSデバイスへの展開ができるので、低損失パワーデバイスとして熱く注目されている。

一方、Ⅲ族窒化物半導体は、酸化プロセスは使えないものの、AlNとGaNが全域で固溶体を形成するため、バンドギャップエンジニアリングが可能であるという特長があり、最近のマイクロ波帯の高周波デバイスで商業的にも飛躍的な発展を遂げている放送・通信用ヘテロ電界効果トランジスタ（HFET）への展開が可能であるという利点がある。

それぞれの特色からSiCとⅢ族窒化物半導体は、使用用途に応じた住み分けがなされると予想されるが、研究という観点では共通する考え方やアプローチも少なくない。そこで、本研究室では、HFET実現のために必要となる原子層レベルでの構造制御、不純物制御が可能である分子線エピタキシャル成長法に着目し、最終的には高周波パワーデバイスへの応用も視野に入れた、高品質Ⅲ族窒化物半導体結晶成長の実現を目指した研究を行っている。

実験には、MBE、XPS/UPS、FIB/FEBシステムが真空トンネルにより結合された装置を使用しており、XPS/UPSによる成長層表面のその場分析や、FIB/FEBによるその場加工が可能になっている。研究のスタートは4年ほど前であり、日は浅いものの、有機金属Ga原料を用いることで準安定相である閃亜鉛鋅構造型のGaNを優先的に成長できることを見出した。安定相であるウルツ鋅構造に対して閃亜鉛鋅構造は、結晶構造の対称性の高さに基づくいくつかのメリットを有しており、未知の可能性が期待できる。また、結晶成長のメカニズムとしても非常に興味深く、SiCにおけるポリタイプ制御との共通点もありそうだということが最近の研究から分かってきた。

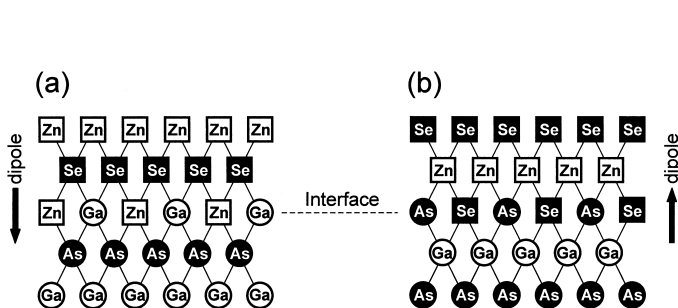
また、最近では、研究室における長年のSiCに関する研究成果を生かすべく、Ⅲ族窒化物とSiCとの融合による高性能デバイスの実現を目指した研究に着手している。なかでも、AlNはSiCとは周期律表で隣同士に位置しているため、格子定数が近く、親和性も高い。SiC上へのAlNの結晶成長が鍵になると考えられる。SiC上のAlNは、SiCデバイスという観点からは、表面パッシベーション膜や絶縁膜としての利用の可能性が、GaN系デバイスという観点では、熱伝導の非常によい基板として、高周波パワーデバイスの電力密度の向上への活用が期待される。



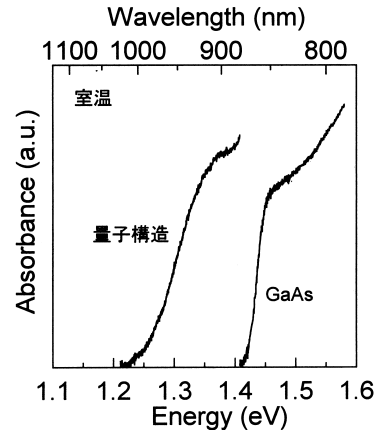
量子工学講座 光材料物性工学分野（藤田研究室）  
 「価電子不整合系半導体ヘテロ構造における物性制御」

レーザーダイオードをはじめ現在の半導体光デバイスの多くは、異なる半導体を積層したヘテロ構造を基本構造としている。ヘテロ構造を用いることにより、光やキャリアをある特定の半導体中に閉じ込め、高い発光効率などを実現することができるためである。これまで、高品質なヘテロ構造を作製するためには、格子定数や価電子の整合を取ることが重要であると考えられてきたが、これに対して本研究室では、格子不整合、価電子不整合、結晶構造不整合などいくつかの不整合系に関する研究を行っている。不整合系には整合系にはない特徴があり、それを活かすことで、新しいデバイスの基礎となりうる特性を開発できるのではないかと考えてのことである。ここでは、価電子不整合系に関する研究を紹介する。

ヘテロ構造の特性を決定する要因のひとつは、ヘテロ界面に生じるバンド不連続量であるが、この物理量は、GaAs-Al(Ga)As系に代表される従来型の、同族の半導体材料によって構成された（つまり、価電子整合系）ヘテロ構造では一定値であり、材料の選択をした時点でバンド不連続量の設計の余地は残されていなかった。これに対して本研究では、II-VI族半導体のZnSeとIII-V族半導体のGaAsによる価電子不整合系ヘテロ構造という新しい構造に注目した。界面に生じるZn-AsやGa-Seといった価電子不整合結合（オクテットでない結合）を積極的に利用したバンド不連続量の人為的な制御を達成し、デバイス設計に新たな自由度を与えることが目的である。その原理を図1に示した。電荷の過不足を持った不整合結合間で電荷が移動するため、結合の相対的位置関係によって界面双極子の向きが反転し、それによってバンド不連続量が変化するのである。このことは逆に、界面での原子位置を制御することができれば、バンド不連続量を制御できる可能性があることを意味している。本研究では、有機金属気相成長法によってヘテロ構造を作製したが、界面での原料の切り替えタイミングを詳細に検討することにより、GaAs上のZnSe、ZnSe上のGaAs、いずれの構造においても、価電子帯のバンド不連続量を0.6から1.1 eVの間で制御することに成功した。[J. Appl. Phys. 82,2984 (1997), 85, 1514 (1999)] さらに、この結果をふまえ、界面でのバンド不連続量を制御しながら、ZnSe、GaAs極薄膜を積層した量子構造を作製し、その光吸収特性を測定した。GaAs量子井戸層の両側でバンド不連続量を異なった値にすれば、井戸内に電界が内包され、実効的な禁制帯幅が小さくなると期待される。禁制帯幅はデバイスの発光波長などを決定する重要な物理量であるから、バンド不連続量の制御を通じて禁制帯幅を制御することの意義は大きいと考えている。光吸収端は禁制帯幅と強い相関を持っているので、これを測定することにより、禁制帯幅変調に成功しているかどうか判断することができる。図2に測定例を示す。参照用に示したGaAs単層膜と比較して量子構造では吸収端が低エネルギー側にシフトしており、確かに禁制帯幅の変調が起こっていることが確認された。また、理論的に検討したところ、ほぼ設計どおりの変調が生じていることもわかった。[Phys. Rev. B, (印刷中)] 本研究では、対象をZnSe-GaAs系に絞ったが、ここでの結果は、ZnS-GaPなど他の価電子不整合系にも普遍的に拡張できる内容であると考えている。



図：1 バンド不連続量制御のモデル



図：2 ZnSe-GaAs量子構造の吸収測定例

## 高機能材料工学講座（山田研究室）

### 「クラスターイオンビームのラテラルスパッタ特性」

数千個の原子の集団からなるクラスターイオンビームと固体表面との相互作用を研究している。このような研究の中で、単原子イオン照射の重ね合せでは得られない非線形照射効果を見出した。また、表面が平坦化されるラテラルスパッタリング現象を見つけた。このラテラルスパッタ特性は、新しいナノスケールの材料プロセスとして応用展開が可能である。ここでは、表面加工プロセスにおけるクラスターイオンビームのラテラルスパッタ特性の研究成果について述べる。

#### 1. 研究の背景

デバイスの高密度、高集積化に伴い、プロセス技術への要求がますます厳しくなっている。特に、ナノスケールの電子デバイスの製作においては、イオン照射時の電荷蓄積によるデバイスの破壊、照射による基板表面の結晶破壊などが重要な問題になっている。また、デリケートな光学薄膜形成の分野では、薄膜の特性はもちろん、付着力、表面・界面特性の改善が望まれている。さらに、従来の単原子イオンビームの照射では、照射に伴い表面の凹凸が増加し、微細加工が困難になっている。このような状況の中で、低エネルギーで高速スパッタ加工が可能で、しかも照射損傷の少ない表面加工が望まれている。

#### 2. 研究の成果

比較的サイズの大きなクラスターイオンを固体表面に照射すると、多体衝突効果のために、入射原子は基板に平行な運動成分を得て基板表面原子を放出させ、高効率のスパッタ作用を示す。また、クラスターイオンでは、低エネルギー照射効果により、照射損傷の少ない表面加工が可能である。

図1はクラスターイオン照射による表面相互作用を示す。クラスターイオン照射特有のラテラルスパッタ効果によって、原子サイズの超平坦面形成が可能になる。この効果は、スパッタ粒子の角度分布の測定や分子動力学法による計算機シミュレーションによって、実験的および理論的にも明らかにしている。また、図2はダイヤモンドの表面平坦化の一例を示す。ダイヤモンドの他に、SiCなどの高硬度炭素系材料、Cu、Au、Niなどの金属、ステンレスなどの合金、さらに多結晶Siなどの半導体でも同様の結果が得られている。

今後、クラスターイオンビームによる高効率スパッタ作用、原子サイズの超平坦面形成作用は、ますます要求される材料プロセスとして、イオンビームの応用分野を広げ、ナノスケールの表面加工プロセスとして展開できると思われる。

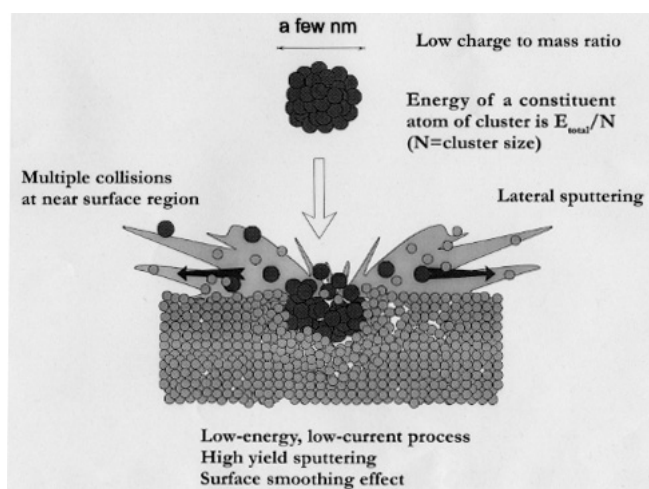


図1 クラスターイオン照射による表面相互作用

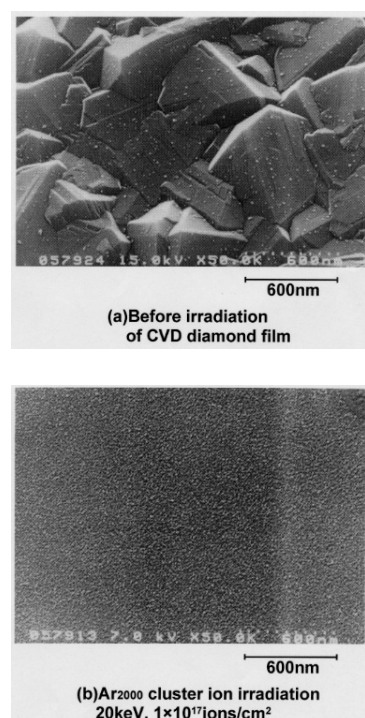


図2 Arクラスターイオン照射前(a)および照射後(b)のCVDダイヤモンド薄膜表面のSEM像（表面粗さ：照射前40nm、照射後8nm）



知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）  
 「視点固定型パン・チルト・ズームカメラ」

1. 背景

近年、セキュリティ・モニタリングをはじめ、遠隔会議・講義さらにはTVスタジオの自動化のために、首振りビデオカメラをコンピュータで自動制御するシステムの開発が盛んに行われている。本研究では、(1)高精度、高解像度の360°全天空全方位パノラマ画像の撮影 (2)移動対象の自動追跡撮影のための首振りカメラとして視点固定型パン・チルト・ズームカメラを開発した。

2. 研究成果

一般に首振りカメラでは、パン：水平方向の回転、チルト：垂直方向の回転、の機能を備えており、異なった方向を向けて撮った複数枚の画像を張合わせてパノラマ画像を合成したり、対象の動きに合わせてカメラを回転させることによって移動対象を自動的に追跡しながらその映像を撮ることができる。しかし、通常的首振りカメラでは、回転によって画像上の対象の見え方が変化する（運動視差が生じる、図1左）ため、(1)カメラを回転させながら撮影した画像群を継目無く張合わせたり、(2)画像処理の結果に基づいてカメラの回転制御を行うには複雑な計算が必要となる。

運動視差が生じるのは、カメラの回転中心と画像の投影中心がずれているためで、この両者を一致させれば簡単な画像処理によって上記の(1)(2)が実現できるようになる（図1右）。

本研究では、(1)カメラの回転中心と画像の投影中心を一致させるためのカメラキャリブレーション法、(2)任意のビデオカメラを搭載でき視点固定型パン・チルトカメラを実現するためのカメラ雲台、(3)カメラを回転させながら撮影した画像群から1枚の全天空全方位パノラマ画像を高速に合成するソフトウェア（図2）、(4)市販の首振りビデオカメラを視点固定型パン・チルト・ズームカメラとして利用し移動対象を実時間で自動追跡するカメラシステムを開発し、その実用的有効性を示した<sup>[1][2]</sup>。

参考文献

- [1] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司：視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No.6, pp.1182-1193, 1998  
 [2] 松山 隆司, 和田 俊和, 物部 祐亮：視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた実時間対象検出・追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.8, pp.3169-3178, 1999

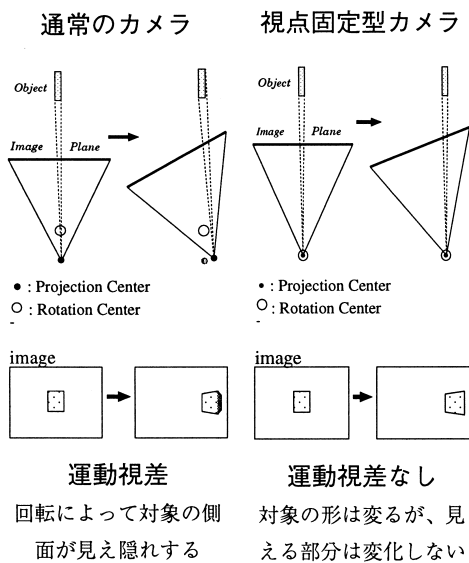


図1：視点固定型カメラ

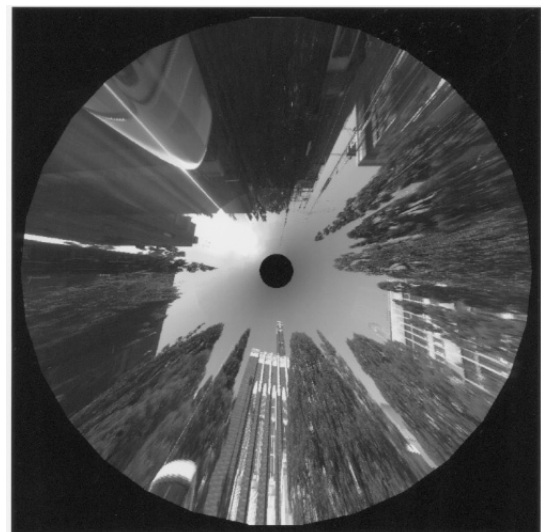


図2：京大時計台の全天空全方位パノラマ画像

## システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研究室) 「核医学心筋画像と冠動脈造影像の重ねあわせと表示」

本研究では、心筋梗塞に代表される虚血性心疾患の診断支援のために、SPECT (Single Photon Emission CT) などの核医学心筋画像と冠動脈造影像との重ね合わせ表示を行う。

核医学心筋画像は、患者の体内に注入した放射性薬剤の分布をCTの原理により画像化することにより得られる。空間分解能は低いものの、2次元断面像を積み重ねた3次元画像である。詳細は省略するが、心筋の元気さを表した画像が得られる。図1にSPECTによる心筋画像の一例を示す。図1には、左心室心筋を輪切りにした断面像 (心短軸断面) の系列を示したが、臨床では、図2のようにして作成される Bull's Eye Map という表示形式が好んで用いられる。これは、心尖 (しんせん = 心臓の先の尖った部分) を中心とした極座標  $(r, \theta)$  上に心筋を展開表示したものである。空間情報の一部を失うが、心筋全体を一覧できるという利点がある。

冠動脈造影像は、心筋に栄養を送る冠動脈の形態を調べるためにX線により撮影される2次元の投影像である。図3に冠動脈造影像の一例を示す。虚血性心疾患は何らかの原因でこの冠動脈に狭窄 (きょうさく) を生じ、心筋への血流が不足することにより引き起こされる。重度の狭窄により心筋への血流が遮断されるなど、最悪の場合には心筋は回復不能なダメージを受ける。これが心筋梗塞である。従って、狭窄の程度と心筋の元気さとは密接な関連があり、治療計画の上で冠動脈造影像が必要不可欠である。

通常の診断過程では、医師はこれらの画像を別々にあるいは並べて観測することにより、冠動脈の形態の変化と心筋の元気さとを対応付けて判断を下す。しかしながら、冠動脈の3次元の走行に個人差があることや、冠動脈造影像が2次元投影像であるなどの理由により、この作業は簡単ではない。本研究では、冠動脈造影像と核医学心筋画像の空間的な位置を合わせた重ね合わせ画像を作成して診断過程を支援する。

臨床的な理由により、これらの画像の位置合わせに利用できる情報にはさまざまな制限がある。このため本研究では、撮影された画像に映し出されている情報や医学的解剖学的知識を主として利用することにより重ね合わせを実現する方法を開発した。具体的には、冠動脈が心筋の表面を走行していること、心筋の短軸断面がほぼ円輪で近似出来ることなどを利用している。図4に最終結果の重ね合わせ像を示す。このような表示方法の有用性が医師により確認されたので、現在、臨床での実用化を目指したシステムを開発中である。また、当研究室ではこの例以外にも、複数医用画像の重ね合わせとそれを利用した解析に関する研究を進めている。

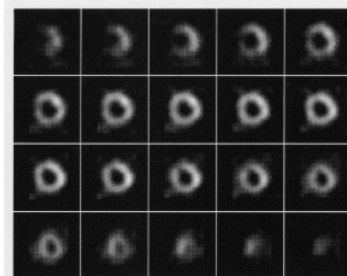


図1 SPECT像 (心短軸断面像)

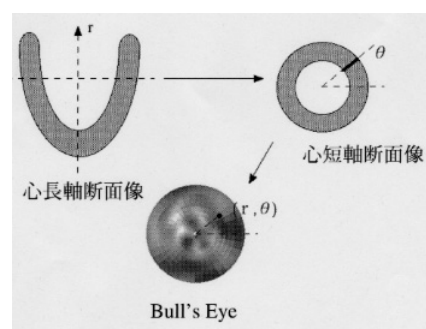


図2 Bull's Eye Mapの作成法

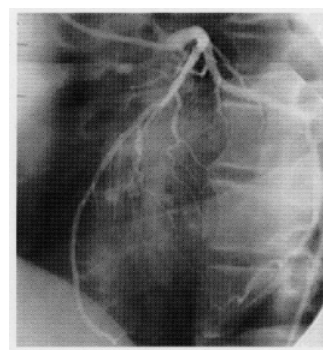


図3 冠動脈造影像

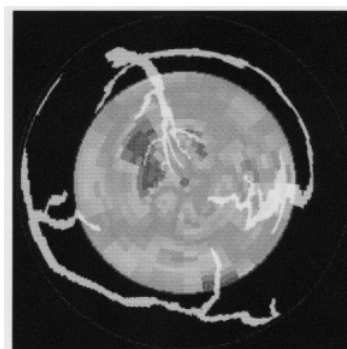


図4 冠動脈造影像と核医学心筋画像の重ね合わせ表示の例

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室） 「動作開始電流調整可能な超伝導限流器の研究」

本分野は、1996年に発足した新しい研究室である。先進的なエネルギー機器における工学的極限状態での熱科学的諸問題の解決からその応用を中心として電気工学と機械工学の境界領域を研究領域としている。具体的には、核融合炉のダイバータから電子機器までにおける高密度除熱、核融合炉用やエネルギー貯蔵用大型超伝導マグネットの液体ヘリウムあるいは超流動ヘリウム冷却特性、高温超伝導線材の液体窒素冷却特性、及び超伝導マグネットのエネルギー機器応用などに関する研究を進めている。本稿では、その内の一つとして超伝導故障電流限流器について簡単にご紹介する。

**研究の背景と概要** 電力系統は、大容量化・大規模化が進んでおり、系統安定度のため系統連系を進めると短絡容量が増え事故時の遮断器の負担が大きくなるというトレードオフの間隙をぬった系統設計が行われている。この問題を解決する機器としての限流器は、常時運用時には、インピーダンスを持たないが、系統事故時には事故電流がある値を超えるとインピーダンスを発生しこれを限流するものである。特に、超電導・常電導相転移を利用した故障電流限流器は、常時インピーダンスをほぼゼロとできることと過電流の検出機構が要らないなどの特長を持つ。

限流器に要求される仕様について検討を行った結果、動作開始電流値に比較的高い精度が必要な場合があることが明らかとなった。この要求を満足するために動作開始電流値の調整可能な超電導限流器を提案し、試作限流器を用いて基礎的な動作検証実験を行った。

**動作開始電流調整可能な限流器** 提案する超電導限流器の基本構造は、2つの超電導コイルを同軸円筒状に配置した変圧器型超電導限流器であり、内側が1次コイルで系統に接続され外側が2次コイルで両端は短絡されている。1, 2次コイルは、電氣的に絶縁されているので、電圧階級なども別々に設計でき、限流インピーダンスは1次コイル、動作開始電流値は、2次コイルのS-N転移電流値と1次・2次コイル間の磁氣的結合によって決まる。試作限流器の断面図を示す。2次コイルのみを図-右に示すようにスライドでき、動作開始電流値を微調整できる。大幅な変更では、2次コイルのみを交換することで対応できる。

待機状態では1, 2次コイルともに超電導状態にあり、系統側から見た限流器のリアクタンスは小さい。系統事故時には2次コイルのみが常電導転移して系統側から見たリアクタンスが増加し故障電流を抑制する（動作状態）。この時、1次コイルは超電導状態に保たれているように設計する。ある大きさの回路電流 $i_{FCL}$ が流れている状態で、模擬事故を起こして試作限流器を動作させ、過渡状態での動作開始電流値を測定した。波形の例を図に示す。試作限流器は、 $i_{FCL}$ がスライド距離に応じた動作開始電流値に達したときにシャープに限流を開始していることが確認された。また、事故を解消したあと電流遮断による超電導限流器の復帰特性を測定した結果、100ミリ秒以下の電流遮断で待機状態に復帰することを確認した。抵抗型限流と異なり、限流中の熱発生が小さいので良好な復帰特性が得られていることが確認された。これは、現用遮断シーケンスにおいても十分短い時間での動作である。

**発表論文** 1] K. Fujikawa, et al.; Proc. of 15th International Conference on MT-15, pp.571-574, Sep. 1998, Science Press, ISBN 7-03-006720-7 2] K. Fujikawa, et. al.; IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.9, No.2 pp.1351-1354 3] Y. Shirai, et. al.; IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.9, No.2 pp.1381-1394

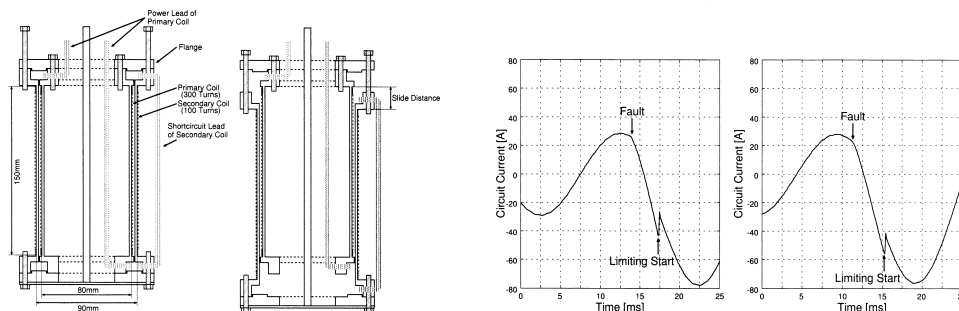


図 試作限流器の断面図（スライド無し[左]、有[右]）とそれぞれの実験波形

## エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野（井上研究室） 「放射ダイバータの研究」

自己点火条件に達した核融合炉では、核融合により生成されるアルファ粒子によるプラズマ加熱パワーと制動輻射などの系外への損失パワーが等しくなります。例えば、国際協力で設計された国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER）では、アルファ粒子加熱パワー300MWの内、約100MWがプラズマ中心部よりの制動輻射やシンクロトロン放射で放出され、残りは周辺から逃げる粒子により、ダイバータへと排出されます（図1）。しかしながら、このままではダイバータへの熱負荷が過大であり、長時間運転での工学的信頼性を確保するためには、熱負荷を5MW/m<sup>2</sup>以下（ITERの場合、合計で50MW以下）に低減する必要がありますとされています。この目的で、原子番号の大きいXe, Ar, Krなどの元素を、ダイバータ周辺やプラズマ表面に注入し、線輻射パワーを100MW程度まで増大させることが検討されています。

当研究室では、プラズマ周辺部へ不活性ガスのアイスペレットを撃ち込んで、表面全体で光らせることにより、輻射エネルギーを増大させる方法について検討を行っています。これまでの研究では、入射した不純物ペレットがプラズマにより蒸発する過程を計算するペレットコードと、不純物による放射損失を考慮できるように改造した一次元エネルギー輸送コードの組み合わせにより、プラズマ性能を変化させることなく、どれくらいの量の不純物までプラズマ表面（プラズマ半径の1/5付近）へ入射可能であるかを調べています。

キセノンを入射した場合の、不純物密度の電子密度に対する割合とプラズマの閉じ込め時間・電子温度・輻射パワーの変化の計算例を図2に示します。この例では、プラズマのパラメータを大きく変動させることなく、輻射パワーを増大させることができます。図示した割合以上に注入するとエネルギーバランスが崩れ、プラズマを維持できません、また不純物を注入し始めるタイミングも重要であることがわかっています。

今後は、現在のコードでは考慮できていない不純物の拡散・中性ガスの輸送のモデル化、ペレット溶解計算へのプラズマパラメータ変動の反映などを進めていく計画です。

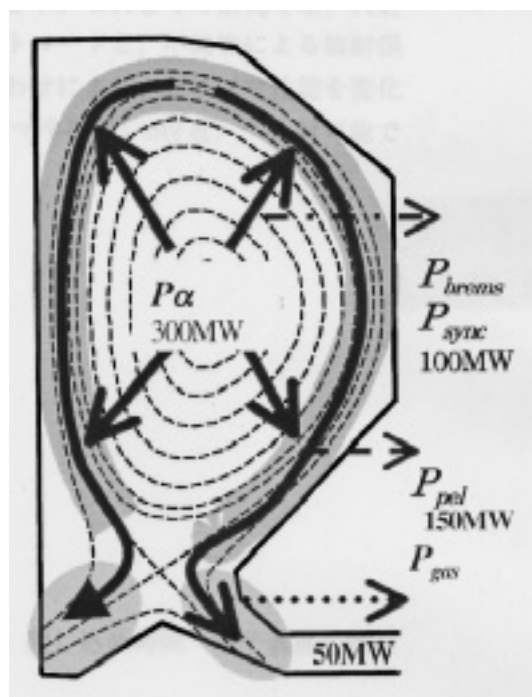


図1 ITERにおけるエネルギーフローの模式図

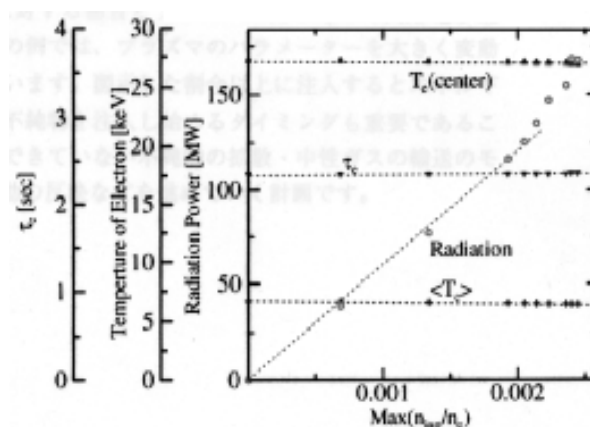


図2 キセノン原子密度の電子密度に対する割合を変化させたときの、閉じ込め時間・電子温度・輻射パワーの変化

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)  
 「TVトムソンシステムを用いたプラズマの温度・密度の2次元計測」

当研究室ではエネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターで行われているヘリオトロン・プラズマ実験に対する実験・解析・理論的研究に主眼を置いている。プラズマ物理の探求のためにはプラズマのパラメータを正確に測定する必要がある。プラズマパラメータに対称性が存在すれば計測に必要な次元も減少するがそうでない場合には2次元、3次元の計測も要求される。本研究ではプラズマの1放電によってプラズマの電子温度・電子密度の1次元分布、多放電によって2次元分布を計測し、同時に電子の速度分布関数を求めている。トムソン散乱計測は単色光であるレーザーをプラズマに入射し、その散乱光を計測してドップラー広がりから温度、さらに散乱強度の情報を加えて電子密度を局所的に求める。トムソン散乱装置の装置構成は、単色入射光としてのレーザー（ルビー、YAG）、レーザーからプラズマ実験装置までの入射光学系、プラズマ中での散乱光を検出しその波長分布を測定する測定装置（分光器とTVカメラシステムあるいは光電子倍增管）からなる。ルビーレーザーを用いたヘリオトロンE装置でのプラズマ温度の2次元分布の測定例を図.1に示す。この場合にはプラズマ磁気面の中心は理論計算では $x = -4\text{cm}$ であり、温度分布の最大値位置がプラズマの磁気軸と一致していることが分かる。

以前は検出器として光電子倍增管を用いてきたが、その検出器では空間分解能、波長分解能に限界があったため、現在はフレーミングカメラと冷却CCDカメラを検出器として整備を進めている。CCDカメラは $1000 \times 1000$ ピクセルでこれらを2分割して用いている。空間軸では1000点、波長方向で500点の測定チャンネルが得られる。図.2はカメラシステムを分光器出口に設置して得たルビーレーザーのトムソン散乱光分光像である。縦軸が空間軸、横軸が波長軸に対応している。左部分にはレーザー入射時間の像が入り、右には校正用にプラズマの背景光のみ入っている。各像の中央には水素プラズマ中の水素原子からの $H\alpha$ 光が現れている。左図の左端部にレーザー入射光の迷光が見られる。散乱光は左図の入射光と $H\alpha$ 光を除いた部分にうっすらと現れている。この分光像はヘリオトロンEプラズマのものであるが、本年度から新しいプラズマ閉じ込め装置ヘリオトロンJ装置実験が開始される。さらに高精度の温度・密度測定を行い、プラズマの加熱・閉じ込め実験に寄与するとともにプラズマの物性解析の基礎となるデータを蓄積するべく、新実験装置のための入射・集光光学系を開発しつつある。

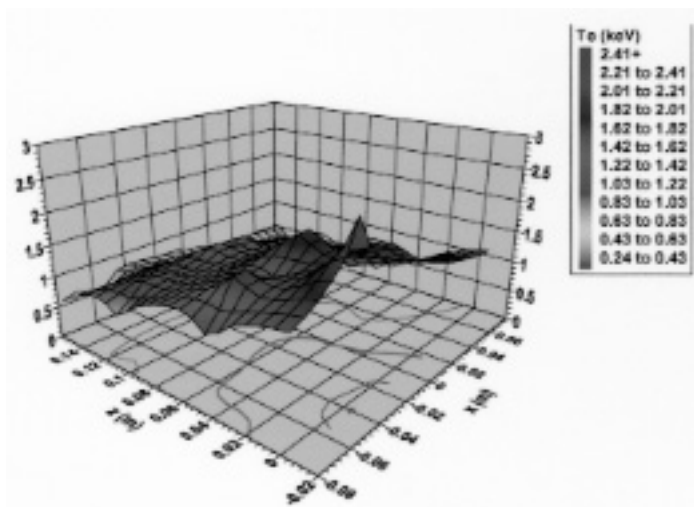


図.1 ヘリオトロンEプラズマの電子温度分布

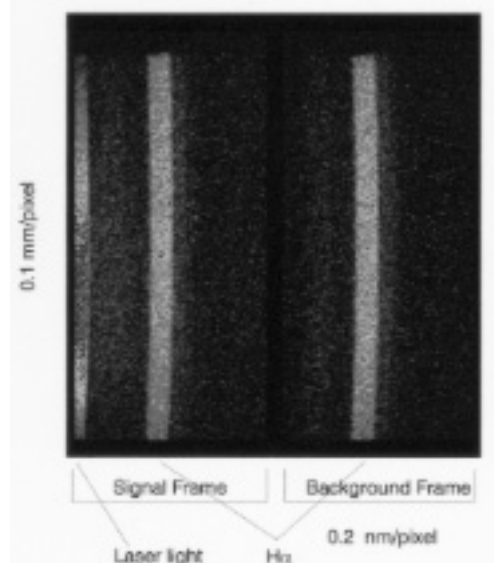


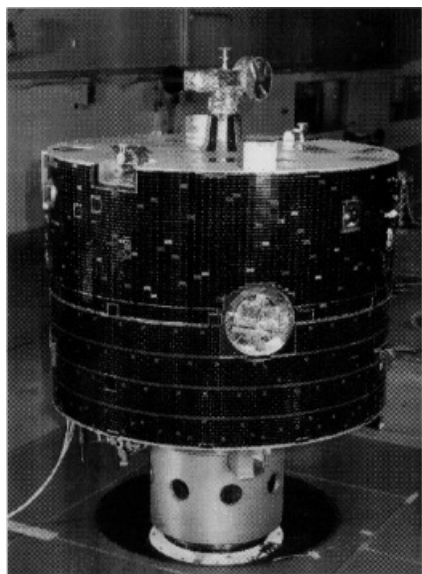
図.2 プラズマからの散乱光（左部分）と背景光（右部分）

## 超高層電波研究センター 超高層電波工学部門（松本研究室） 「科学衛星による宇宙空間におけるプラズマ波動観測」

当研究室は、宇治の超高層電波研究センター及び大学院情報学研究科通信情報システム専攻に所属し、来るべき21世紀の人類宇宙開拓の時代に向けて、太陽系空間電磁環境や宇宙太陽発電所(SPS)の研究など、理学、工学の両面から宇宙科学・宇宙電波工学の研究を行なっています。本稿では研究テーマの一つである「科学衛星による宇宙空間におけるプラズマ波動観測」に関する研究を紹介します。

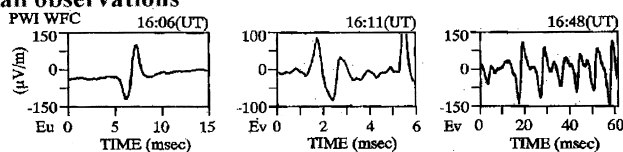
惑星間空間や惑星の上層大気は、いわゆる気体が電離した「プラズマ」状態にあります。宇宙空間に存在するこの宇宙プラズマは、基本的に無衝突プラズマであり、そこでのエネルギーの散逸は「波動」を介して行われます。そのため、宇宙空間には、プラズマ波動が多数存在しており、それらを測定することによって、そこで発生しているミクロな物理プロセスを解析することができます。当研究室では、文部省宇宙科学研究所と協力して地球周辺や惑星に科学衛星を送り込み、そこで発生したり伝搬してきたりするプラズマ波動を観測しています。地球周辺でのプラズマ波動観測は、当センターが電離層研究施設の時代より行ってきた研究ですが、そのプラズマ波動観測も1992年に打ち上げられたわが国の衛星Geotail（ジオテイル）によって、世界を一歩リードするに至りました。このGeotailは、その名が示す通り「地球の尻尾」を観測する衛星です。「地球の尻尾」とは、太陽と反対方向に伸びる地球磁場領域のことをいいます。このGeotail衛星に、世界で初めて波形観測データ捕捉用メモリを衛星内部にもつ「波形受信機（WFC: Wave-Form Capture）」を我々は搭載しました。地上で測定を行っている方々は驚かれるかもしれませんが、これまで世界的にみてもプラズマ波動観測では、「スペクトル」のみの観測が一般的でした。これは、観測データを地上に送信するテレメータの伝送容量に限界があったからです。Geotailではオンボードのメモリを搭載することによりこのテレメータの制限を緩和し、波形によるプラズマ波動観測に成功し、その結果、1974年以来、その発生原因で議論が繰り返されてきた「広帯域静電ノイズ（BEN: Broadband Electrostatic Noise）」が実は波形でみると、孤立的なパルス波の集まりであるということを示すことに成功しました。そして計算機実験との共同研究により、その孤立波は電子ビームの非線形発展によってできる「電子の泡」であることも示すことに成功しました。このGeotailによる宇宙空間の「電子の泡」の発見は世界中の研究者の注意を喚起し、その後、多くの科学衛星によって、この「電子の泡」は宇宙プラズマの至るところで発生している現象であることがわかってきました。

現在我々の研究室では、これまでの地球周辺での観測経験を活かし、火星、水星などの惑星周辺でのプラズマ波動観測にも取り組んでいます。

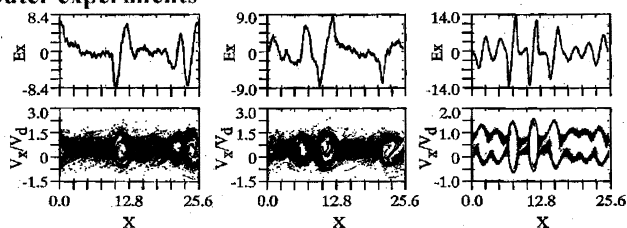


科学衛星GEOTAIL（文部省宇宙科学研究所にて）局さ1.6m、直径2.2m

### Geotail observations



### Computer experiments



Geotail衛星で観測された孤立波形（上段）と計算機実験によって再現された波形（中段）及びその波形に相当する電子の泡（下段）

## 超高層電波研究センター 超高層物理学部門（津田研究室） 「GPS電波を用いた地球大気の計測」

GPSとは地球を周回する衛星からの電波を受信して位置を定める衛星測位システムであり、最近では民生用途にも広く活用されている。GPSによる位置推定では一般に変調コードを解読する方法が用いられる。しかし、搬送波位相を用いれば数cm程度という高精度の位置測定が可能であり、地殻変動の検出や地震・火山噴火予知に応用されつつある。

GPS電波は電離層や大気を通過して地表に達するため、伝播遅延が測位誤差の原因となる。ここで電離気体の屈折率には分散性があることから、GPSでは2周波を用いることで電離層遅延を補正している。また、乾燥大気による伝播遅延長（天頂角により数mから20m程度）は地上気圧から推定できる。しかし、水蒸気による遅延（気象条件により数cmから20cm程度）は、水蒸気分布が大きく時間空間変化するために正確には補正できず、測位精度を追求する上で重要な課題となっている。逆に、伝播遅延から水蒸気情報を得て、気象予報モデルの精度向上に利用する研究が、測地学、電波工学、気象学の学際的分野（GPS気象学）として近年注目を集めている。GPS電波の伝播遅延から測定できるのは、大気中に含まれる水蒸気の積分量（可降水量と呼ばれる）である。従来、可降水量は気球により一日に2回程度求められていたが、GPSではこれと同等の精度で連続的に測定できる<sup>[1]</sup>。

GPS受信機は国土地理院により約20km毎に全国の約千ヶ所に設置されており、定常観測が行なわれている。この観測網から可降水量の時間空間変化が正確に得られ、天気予報モデルの精度向上に貢献している。また大学・研究所等により稠密なGPS観測キャンペーンも行なわれ、集中豪雨等の気象擾乱の解明が進められている。さらにトモグラフィ解析により水蒸気の三次元分布の推定も試みられている。

ところで、もう一つのGPS大気計測法として、低高度の傾斜軌道上を周回する小型衛星（LEO）にGPS受信機を搭載し、地球大気をかすめて伝播してくるGPS電波を解析して、大気温度や湿度の高度プロファイルを推定する新技术（GPS掩蔽法）が考案されている<sup>[2]</sup>。LEOから見てGPSが地平線に没する際に、時間とともにGPSからLEOへ到達する電波が通過する大気層が厚くなり、GPS電波の伝播遅延量も時々刻々増大する。この遅延量の時間変化から大気屈折率の高度変化が算出できる。さらに、非電離の乾燥大気として扱える高度領域（約5kmから約60km）においては、屈折率から大気温度が一意に求まる。一方、低高度の湿潤大気においては、標準大気モデルの温度プロファイルを併用すれば湿度が推定できる。GPS掩蔽法により既存の定常気球観測に匹敵する空間間隔で地球全体の温度プロファイルを継続的に観測できると期待されている。

そもそも1960年代にNASAが打ち上げた惑星探査機からの電波を用いて、金星をはじめとする惑星大気の構造や惑星の輪の研究が行なわれてきた。この方法を地球にも応用することは、1980年代初頭よりロシアの研究者によって理論的検討が重ねられてきた。近年、衛星軌道が十分な精度で決定できるようになるに至って、この方法の実現が具体化した。NASAが1995年4月にGPS掩蔽法の検証実験を行い、高度45km以下で大気温度が約1kmという優れた高度分解能、かつ1K程度の精度で求められた。このデータは未解明であった赤道域の対流圏界面の温度構造の季節経度変化、ならびに大気大循環に大きな影響を与えるとされている大気波動のグローバルな分布特性の解明に活用されている<sup>[3]</sup>。

### 参考文献

- [1] 吉原貴之, 津田 敏隆, 平原和朗, GPSキャンペーンデータを用いた高時空間分解能による水蒸気変動の推定, 月刊地球「GPS: 汎地球測位システム」, 号外25巻, 96-101, 1999.
- [2] 津田敏隆, 「GPS掩蔽法」, 気象研究ノート第192号, 第11章, 159-178頁, 日本気象学会, 1998.
- [3] 津田 敏隆, 西田真啓, GPSが捕えたグローバルな大気の振舞い, 月刊地球「GPS: 汎地球測位システム」, 号外25巻, 108-113, 1999.