

## 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。

### 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

- 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 光量子電子工学分野
- 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 (田丸研)
- 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 電磁エネルギー分野（島崎研究室） 並列計算による電磁界解析

近年、超並列計算機の登場に対応した計算科学、計算工学の必要性が増大している。本研究室では、より高次元・高精度の解析が求められている電気機器の精密解析、導電性プラズマ流体の特性解析等の電磁エネルギー工学分野を対象とし、並列処理に適した解法の研究と超並列計算機を用いることで初めて可能となる大規模計算を行っている。

まず、電磁界解析の中で多大な計算量を必要とする問題として、3次元過渡渦電流解析や移動導体問題が挙げられる。この種の問題は繰り返し計算を主体としており、並列化の効果が大きい。本研究室では、問題に適した新たな解法を探索するとともに、これまでに提唱されてきた並列化解法を効果的に問題に適用する方法について検討を行っている。一方、計算科学の観点から、広く電磁界解析問題一般に対して、並列計算機と研究者間のより良いインターフェースを供給することは重要な課題である。本研究室では、電磁界解析分野において、並列計算機を用いた問題解決環境ソフトウェアの開発に着手している。

次に、並列計算による電磁界解析の応用例として、電磁界解析とエネルギー変換に関わる重要な課題の一つである、電磁流体解析について述べる。本研究室では、高効率・準無公害で大電力を発生するMHD発電機内の電磁流体の解析を並列計算機により行った。MHD発電機内部の解析は、高電力密度の電磁界と高温高速流体との連成問題となるため、膨大な計算量を必要とする。このため、並列計算による計算の高速化が強く望まれている。本研究室では、地殻研究や地下資源探査に威力を発揮するパルスMHD発電機の解析に対して、MPI(Message Passing Interface)方式による並列計算を導入した。電磁界の解析手法としては有限要素法、流体解析の手法としてはTVD法を用いた。並列化の結果、図1に示すように、10プロセッサ使用時に1プロセッサ使用時の8倍、30プロセッサ使用時に13倍に計算が高速化された。この結果は、1プロセッサで行うと1週間必要となる計算が、10プロセッサでは1日、30プロセッサでは半日で完了することを意味する。この並列計算により、図2に示すような境界層剥離を含む電磁流体を発電機ダクト全体にわたって解析することが可能となった。

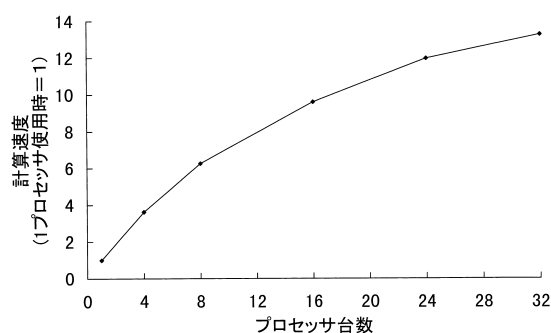


図1 並列化による計算速度の向上

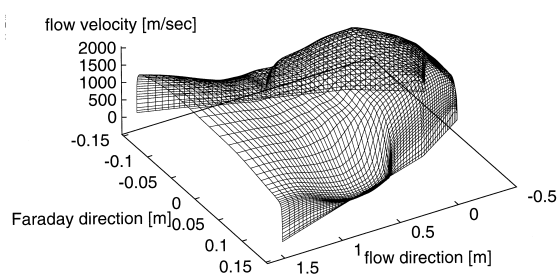


図2 電磁流体の流れ方向速度の分布

## 電力工学講座電力発生伝送工学分野（宅間研究室）

### 「真空中高電圧を維持するために—真空中の支持絶縁物の設計に関する研究」

#### 1. 研究の背景

真空の高電圧機器はいろいろの分野で用いられています。たとえば、電力分野の真空遮断器、高エネルギー分野の電子・イオンビーム発生器や加速器、通信分野のマイクロ波管などが挙げられます。これらの真空機器で一番の弱点となるのが高電圧部分を支える固体絶縁物の存在です。

真空は非常によい（絶縁耐力の高い）絶縁物ですが、固体絶縁物が存在するとその表面に沿った放電が発生して絶縁破壊しやすく、真空だけの場合よりも何分の一かに低下することがあります。また、真空機器だけでなく、宇宙空間での絶縁、たとえば衛星などで使用される太陽電池が太陽風に曝されて帯電し放電するといった問題もあります。したがって、固体絶縁物の沿面放電と絶縁の研究は電気工学から最近の高エネルギー物理学や宇宙分野にも関連する課題です。

#### 2. 沿面放電シミュレーション

沿面が放電しやすい理由はいろいろな説がありますが、概略次のように考えられています。何らかの原因で発生した電子が加速されて固体表面と衝突し、電子（二次電子）を飛び出させて表面を帯電させると同時に、吸着気体を放出させるため局所的に真空が破れて放電を開始するという機構です。この帯電の機構は「二次電子なだれ（S E E A）」と呼ばれています。当研究室ではこのS E E A帯電について次のようなシミュレーションプログラムを開発しました。

- (a) 帯電分布の平衡解を求めるシミュレーション - 固体に衝突する電子と飛び出す電子の数が平衡する条件から定常的な分布を求める。
- (b) 帯電が時間的に進行する状況を求めるシミュレーション - 電子の軌道と二次電子の放出を時々刻々変化させてくり返すモンテカルロ法。

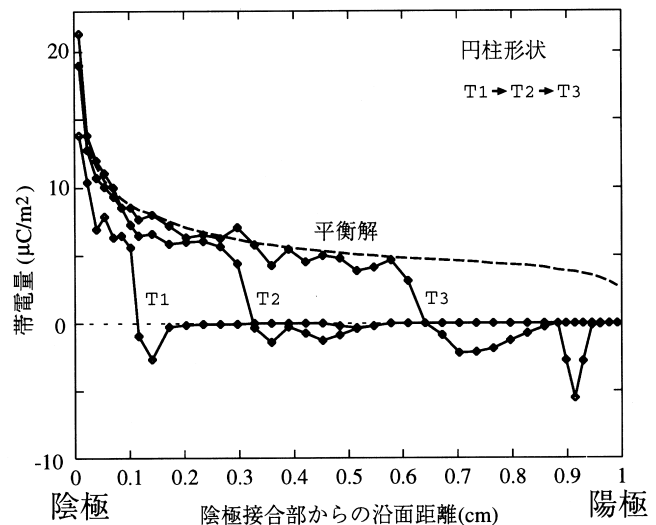
このプログラムによって円柱絶縁物の帯電が陰極から進行し、(a) で求まる平衡解に近づいていくことが明らかになりました。このような進行状況の例を図に示します。これらのシミュレーションの結果は共同研究を行った英国Strathclyde大学の帯電分布の測定結果とよく一致しました。

#### 3. 帯電のオンライン計測

これまで帯電分布の測定は、固体絶縁物に印加した高電圧を一旦下げてから行う必要がありました。当研究室では陰極表面のプロープで高電圧を印加したまま帯電過程を計測する手法を考案し、オンラインで追尾することを可能にしました。この方法によっていろいろな固体絶縁物の種類（アルミナ、アクリル樹脂、テフロン樹脂など）、表面粗さ、形状と帯電状態との関係を明らかにしつつあります。

#### 4. 今後の方向

真空中の固体絶縁物の帯電については、各国でシミュレーション技法の開発が行われるようになり、一方では表面の微細構造と帯電の関係を調べるミクロな研究も進んできています。当研究室のオンライン計測でも表面を滑らかにするとかえって帯電しやすいことが見いだされました。研究の最終の目的は真空中の固体絶縁物の最適な種類、形状、表面処理方法を明らかにすることです。これまでの支持物設計は、主に帯電を考えない電界計算や経験をもとに行われてきましたが、本研究のシミュレーションやオンライン計測の結果を活用して、最適な設計を進めるつもりです。



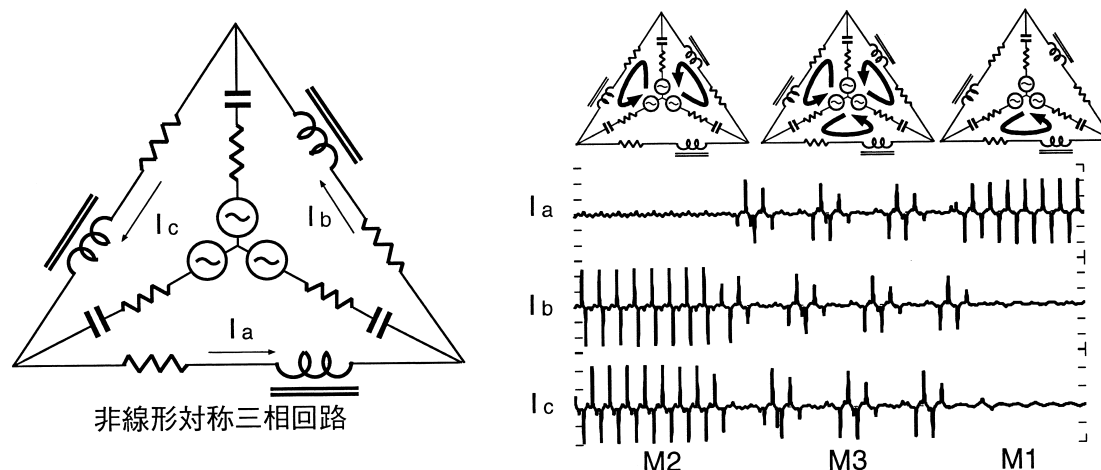
## 電気システム論講座 電気回路網学講分野（奥村研究室） 三相回路における非線形ダイナミクス

電力系統とくに送電系統における非線形振動の研究は、昭和2年に東京電灯(株)の福島県猪苗代第四発電所と東京市郊外の鳩ヶ谷変電所を結ぶ猪苗代第二送電幹線で起こった異常振動の解明に始まる。この振動は当時の電気試験所の技師であった後藤以紀氏によって不減衰振動と名付けられ、変圧器の励磁特性の非線形性と送電線の容量にもとづく非線形振動であることが明らかにされている<sup>[1]</sup>。また、戦後建設された直列コンデンサ補償系統では、関西電力(株)の30kV系の習子-新宮線、安曇-中舞鶴線での異常現象に見られるように、分数調波振動という非線形振動が起こっている。最近ではフランスの400kV系統で非周期的な共振状態が観測された報告<sup>[2]</sup>があり、カナダ、アメリカでもこの現象が研究されている。このように送電系統における異常振動は複雑多岐にわたっているが、これらの研究の多くは単相回路による近似にもとづいて解析している。当研究室ではこのような現象を多自由度三相回路システムでのダイナミクスという視点から、三相回路のまま取り扱い、現象の対称性の破壊や同期・非同期など異常振動の生成のメカニズムを研究している<sup>[3,4]</sup>。

非線形三相回路(左下図)は三相回路システムの中では最も簡単な回路であるが、単相回路とは異なり、インダクタの非線形カップリングをもつ。このような回路では回路の構造が対称であるにも関わらず、インダクタの非線形性により非対称な現象が発生する。右下図は、振動周期が電源の3倍になる1/3分数調波振動について、電源電圧を徐々に下げていった時のモード変化を示している。はじめは2個のインダクタのみが活発な非対称モード(M2)が発生している。ところが、急に対称なモード(M3)が現れる。これは3個のインダクタのエネルギー循環による対称性の回復といえる。また、これは電源の周波数と振動の周波数のずれた非同期モードの振動である。さらに電源電圧を下げると、急に単相モード(M1)に縮退してしまう。このような、パラメータを変化させたときの急激なモードの変化は分岐現象と呼ばれ、当研究室ではこのような対称性破壊現象や同期から非同期現象への変化という分岐現象を通して、回路のダイナミクスを理論と実験の両方で明らかにしている。

### 参考文献

- [1]後藤以紀；”送電系統の不減衰振動と電氣的不安定状態“，電気学会雑誌，pp.759-771，昭和6年11月。  
 [2]C. Kieny；“Application of the bifurcation theory in studying and understanding the global behavior of a ferroresonant electric power circuit,” Trans. IEEE on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991.  
 [3]奥村浩士、木嶋 昭；”三相回路における非線形振動,” 電気学会論文誌B, 96巻12号、pp. 599-606, 昭和51年12月。  
 [4]久門尚史、山田勉、奥村浩士；”対称三相回路における1/3分数調波振動の単相化現象,” 信学論(A), Vol. J79-A, no.9, pp.1553-1561, 1996.



## 研究室名：電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

### 研究テーマ名：無帯電負イオン注入技術の開発

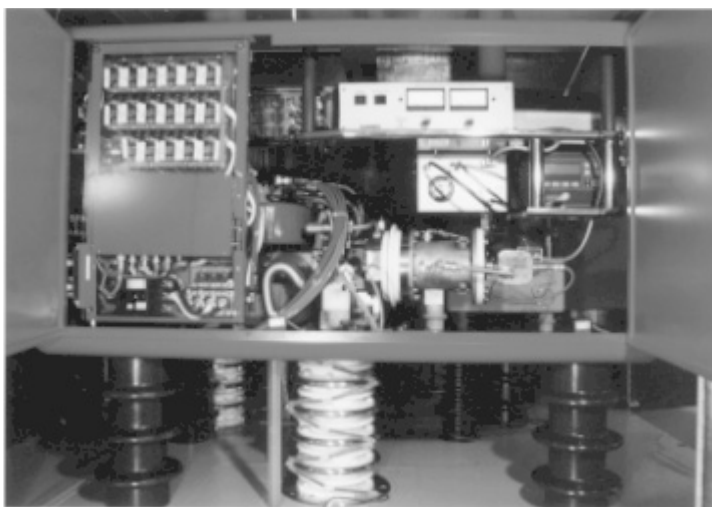
イオンの発生は原子・分子に電子を衝突させて電離するものであるという長年の常識があったため、負イオンを多量に発生することは不可能と考えられてきました。しかし発想を転換して、金属表面と原子・分子との間で電子のやりとりを積極的におこさせる表面効果法によって、正イオンと同量程度発生させることができるようになりました。すなわち、負イオンの発生法として、ターゲット表面にセシウム単原子層を被覆して仕事関数を低下させた面を正イオンでスパッタし、飛び出してきたターゲット材原子に電子を与えて負イオンとする二次負イオン放出法（表面効果法の一つ）について、詳細に調べています。この方法における負イオン生成確率を検討し、最適条件下では多くの金属元素で10~20%の高効率で負イオンを生成できることを明らかにしました。この最適条件を安定に実現できるRFプラズマスパッタ型負イオン源を開発し、種々の元素の負イオンが連続動作でmA級得られるようになりました<sup>[1]</sup>。

このようにして得られた負イオンビームを固体表面と相互作用させると、いくつかの現象が正イオンビームの場合と全く異なります。その一つとして、絶縁された材料に負イオンビームを照射しても、その表面はほとんど帯電しません。この性質を利用すれば、帯電のないイオン注入技術が開発できます。負イオン注入法は、絶縁された材料表面に負イオン注入したときの帯電電位が±数V以内であることから、次世代のULSIやカラー液晶用TFTの作製において低耐電圧のゲート絶縁膜でも破壊がおこらないイオン注入プロセスが可能となる先進技術として注目されています<sup>[2]</sup>。

数keV以上の運動エネルギーに加速した粒子を材料表面に照射すると、二次電子が1個以上放出されます。材料が絶縁されていれば、正イオン照射の場合には表面は注入イオン量とともに正電位に帯電し、イオンの加速電圧まで上昇する間に絶縁物の放電破壊がおこります。粒子が中性か負イオンである場合には、二次電子が表面に戻ることによって電荷の平衡が保たれ表面電位がある値で定常状態になります。照射粒子が中性の場合は、電荷の平衡が保たれるためには全ての二次電子が戻らなければならないので、表面電位は正の数10Vになってしまいます。ところが照射粒子が負イオンの場合は、負イオン1個の入射に対して二次電子1個だけが放出されればよいので、表面の帯電電位は正の数V以内に収まります。照射される材料が絶縁物のときには、表面に電気二重層ができて見かけ上負の数Vに帯電します。いずれにしても負イオン注入においては、材料表面の帯電電位は極めて小さいのです。ところで粉体はそれぞれの粒子が絶縁されていますが、負イオンを使えばそれらが飛散をおこすことなく精確なイオン注入ができるようになります<sup>[2]</sup>。粉体へのイオン注入が容易にできれば、各種の医用材料や触媒材料の形成が可能となり、新しい分野が開けます。このような負イオン注入の現象説明および応用開発のために、現在、写真に示すような実用機に近い負イオン注入装置を開発しています。

[1]石川順三：応用物理,第65巻,6号(1996)pp.587-593.

[2]J.Ishikawa, H.Tsuji and Y.Gotoh:Proc.of IIT-96, IEEE96TH8182 (1997) pp.249-252.



写真：開発中の負イオン注入装置

## 電子物性工学専攻 機能物性工学講座 半導体物性工学分野 (松波研究室) 酸素ラジカル活用によるSi表面改質、界面電子物性制御とデバイス応用 一次世代Si集積回路用極薄膜ゲート絶縁膜

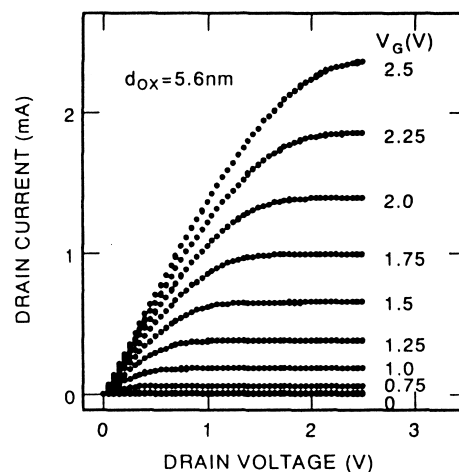
エレクトロニクスを支える半導体の創製、物性解明と制御、デバイス提示の研究を通して、科学・技術の進展に関与するとともに、社会への貢献を果たす努力を重ねている。材料として、シリコン、Ⅲ-V族半導体、ワイドギャップ半導体を対象としている。“Cue”の創刊号でワイドギャップ半導体であるシリコンカーバイド研究の詳細に触れたので、ここでは、シリコン関連の研究について紹介する。

[研究背景]: 現代エレクトロニクスは半導体Siと相性の良いSiO<sub>2</sub>の発展に依っている。特に、集積回路(IC)の主役であるMOS電界効果トランジスタ(MOSFET)においてその役割は顕著である。現行では800~1000℃における熱酸化プロセスを用いて界面を形成しているが、高密度化する大規模集積回路(VLSI)においては素子がますます微細化され、浅いpn接合や極薄膜のSiO<sub>2</sub>膜が必要とされる。現行の高温プロセスでは、不純物の再分布や形成層の歪みがデバイスの歩留まりや信頼性に大きな影響を与えるので、ここに、低温プロセスが強く要求され、プラズマの活用が期待される。しかしながら、放電励起により原子・分子を活性化するとき電子やイオンなどの高エネルギー荷電粒子が現れ、半導体表面に損傷を与えて、MOSFET特性が劣化するという大問題がある。

[研究進捗状況]: マイクロ波励起による酸素プラズマから高エネルギー荷電粒子を除去して、酸素の中性活性種(ラジカル)をSi表面の酸化に活用する方法を提案し、Si基板を直接酸化して膜厚数nmの極薄SiO<sub>2</sub>膜を形成し、電気的特性および界面電子物性を制御することを目指している。プラズマ発光の分光分析によって酸素励起活性種の生成条件を最適化して高品位膜形成速度の向上を図るとともに、SiO<sub>2</sub>膜形成前後の処理条件が膜および界面電子物性に与える効果について調べ、これを酸化膜形成に還元して最適の結果を得る。さらに、MOSFETの試作を行い、実用への展開を図っている。

[研究成果]: 装置は概算要求で設置された「マイクロフォトニクス材料創製装置」の一部を活用している。従来の手作り装置から得られたknow-howを盛り込んだもので、特に、ラジカル発生源に工夫がある。(1)酸素活性種生成のその場観測と酸化速度の制御、(2)酸化膜形成プロセスの最適化を通して、高品質のSiO<sub>2</sub>膜を作製した。(3)電気的特性の測定から、低電界領域での抵抗率は7.5E15ohmcm、絶縁破壊電圧13MV/cmを達成、Fowler-Nordheim型トンネル電流を観測して、高温作製の熱酸化膜と同等の特性を得た。研究室で開発した放電電流過渡分光法により膜内の電子とラップ定量評価、空間分布、エネルギー分布を決定した。(4)界面電子物性の評価から、膜厚4.8nmで2.6E11eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>の界面準位密度、正の固定電荷密度5.5E11cm<sup>-2</sup>を達成した。(5)500℃の低温で作製したSiO<sub>2</sub>膜を用いた反転型n-MOSFETの特性を図に示す(ゲート長30μm、幅250μm)。実効印加電界0.77MV/cmで電子の実効移動度294cm<sup>2</sup>/Vsを得た。低温酸化膜を用いたMOSFETとして最高の性能を示している。

今後の課題は、電子の実効移動度を倍増するために、プロセスの最適化、窒化などによる界面改質、界面電子物性の詳細解析と制御法の確立など、半導体電子物性工学の基本が控えている。フォトリソグラフィ、イオン打ち込みなど半導体デバイス作製工程があるので、研究に時間は掛かるが、若手教育の面では必須事項であろう。要素研究を最終的にデバイス作製に適用できるか否かを検討することの重要性を指摘したい。

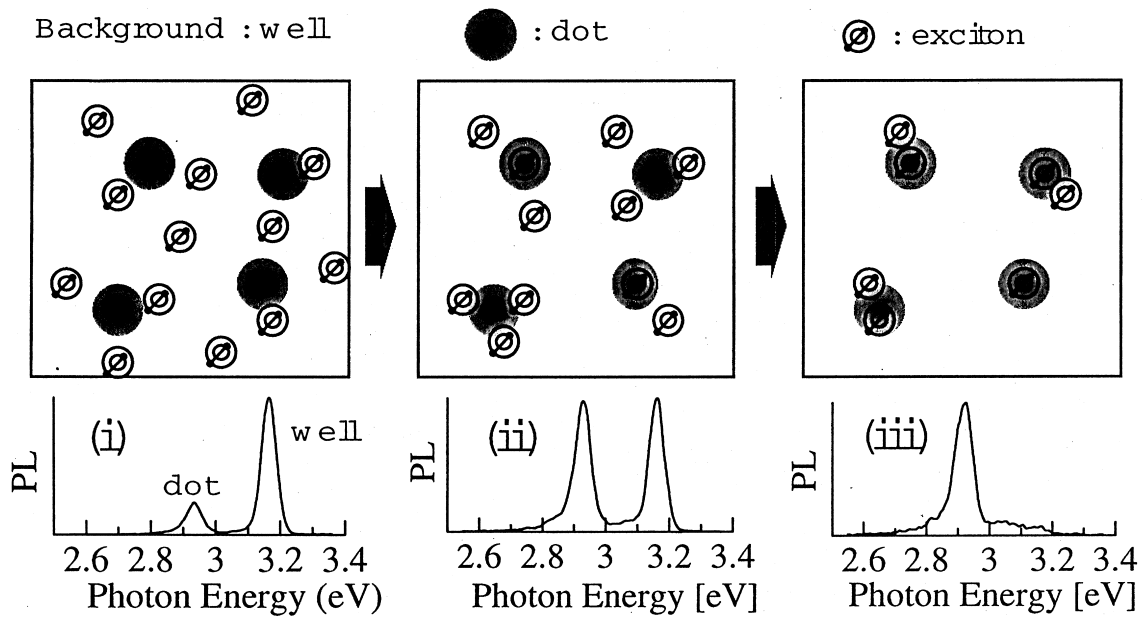


## 量子工学講座 光材料物性工学分野 (藤田研究室)

## 半導体ナノ構造の光物性ダイナミクス

## —電子・正孔対の励起子が織りなす新光機能を探る—

本研究テーマでは、青緑色～紫外域の短波長領域における光機能材料として重要なワイドギャップ半導体において、励起子をナノ構造に閉じこめることによって励起子の安定化を図り、励起子の緩和、非線形光学過程、輻射再結合等の光量子物性の発現と物性の応用による先進的な光デバイスの実現に寄与することを目標としている。今回は、近年進展が著しいInGaN系半導体量子井戸構造の発光ダイナミクス・発光機構解明に関する研究を紹介する。InGaN活性層に光励起で生成した励起子の時間分解スペクトルの実験結果と解析から、InGaN活性層のIn組成に応じてランダムなポテンシャル揺らぎや量子ドットの領域が自然形成されて励起子が局在すること、この励起子の大きな局在化が非輻射的な再結合確率を大幅に減少させ、高い量子効率に寄与することを明らかにした。図に発光機構のモデルを示す。これらの結果は、Applied Physics Letters<sup>1</sup>やPhysical Review B<sup>2</sup>に掲載された。特に(1)の論文は、GaN系半導体におけるマイクロ構造とマクロな光物性との相関を明らかにした結果として注目され、現在、物理学関連の雑誌中で引用件数ランキング(PHYSICS TOP 10)の世界第4位にランキングされている。



In<sub>0.20</sub>Ga<sub>0.80</sub>N量子井戸からの時間分解スペクトルと発光機構の模式図。光励起直後 (i) t=0-0.6ns) では、高エネルギー側の量子井戸からの発光が支配的であるが、時間とともに低エネルギー側の発光帯が立ち上がり、(iii) t>2.0ns) では、低エネルギー側からの発光が観測される。これは、量子井戸中にIn組成の高い量子ドット領域が自然形成されており、励起子がこの領域に捕獲されて効率的に発光するため。

- (1) Yukio Narukawa, Mitsuru Funato, Yoichi Kawakami, Shizuo Fujita, Shigeo Fujita, and Shuji Nakamura: "Role of self-formed InGaN quantum dots for the exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm", Applied Physics Letters, Vol.70, 1997, pp.981-983
- (2) Yukio Narukawa, Yoichi Kawakami, Shizuo Fujita, Shigeo Fujita, and Shuji Nakamura: "Recombination dynamics of localized excitons in In<sub>0.20</sub>Ga<sub>0.80</sub>N - In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N multiple quantum wells", Physical Review Vol.B55, 1997, pp.R1938-1941

## 高機能材料工学講座（山田研究室）

### 「クラスターイオン注入による極浅接合形成」

本研究室では、真空中や低ガス圧領域で原子、分子、クラスター（塊状原子集団）などのイオンビームと固体表面との相互作用に関わる学問分野を研究している。特に、クラスターイオンビームによる固体表面プロセスや材料開発の研究では、新しいイオンビーム応用の展開を計っている（本誌創刊号参照）。本稿では、その中で、クラスターイオン注入による極浅接合形成の成果について述べる。

#### 1. 研究の背景

現在、イオンビームを利用したデバイス制作技術は、高度に発展し、その技術水準は限界にまでに達している。しかしながら、デバイス制作技術の要求はさらに高く、必要なイオンビーム技術は、もはやその限界を超え始めた。例えば、超LSIなどのイオン注入プロセスでは、浅いイオン注入技術の開発が、切実な問題になっている。また、マルチメディアや携帯端末などの需要を満たすためには、高速で集積度を高くすることのできる超LSIの開発が火急の課題とされ、各国が技術開発にしのぎを削っている。このような微細な素子を実現するためには、半導体内に低抵抗で浅い接合を形成するための不純物導入技術の開発がキーポイントとなる。これまでの半導体への不純物導入技術には、単原子・分子イオンを注入する方法が用いられてきた。しかし、単原子・分子イオンを注入する従来の方法で浅い接合を形成するには、低エネルギーのイオンビームを使う以外に方法はないが、低エネルギーイオンビームでは大電流を得ることが原理的に困難であり、開発の大きな障壁になっていた。したがって、従来技術の延長でない斬新な新技術の開発が求められていた。

#### 2. 研究成果

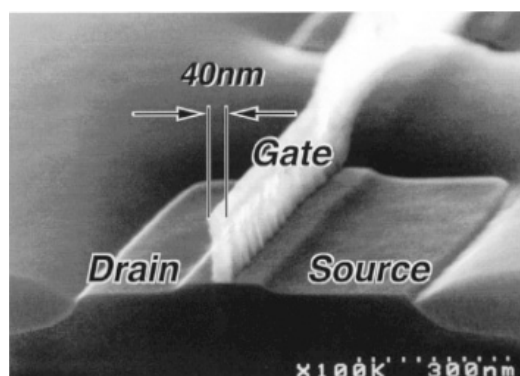
イオン工学実験施設が独自に開発を進めてきたクラスターイオン注入法を用いて、半導体への不純物導入を行った。本注入法は、クラスター状の原子を固体に注入するという革新的なアイデアに基づく新技術である。クラスターイオンと固体との相互作用においては、従来の2体間衝突の線形和では説明できない超高密度照射によって引き起こされる特異な非線形相互作用が生ずる。さらに、クラスターイオンビームプロセスの特徴には、超低エネルギー照射効果が得られる（ほとんど基板内の結晶を破壊せずに表面原子に作用する）、少ない電流で大量の原子が注入できる（数十から数千倍）、加工速度が速い（スパッタ率が高い、数十から数百倍以上）、絶縁物の加工が可能である（少ない電荷で多くの原子が輸送できる）などがある。

このような特徴を持つクラスターイオンビームによる不純物注入を超微細素子に応用した結果、図に示すように、 $0.04\mu\text{m}$ のゲート電極の長さを持つ次世代の超微細MOSトランジスタの試作に成功した。具体的には、n型シリコン基板上に3nmのゲート酸化膜を形成し、その上にポリシリコン膜を蒸着した。電子ビーム露光法、反応性エッチング法によって $0.04\mu\text{m}$ 幅のゲート電極を形成した。不純物となるホウ素原子を導入するために、10個のホウ素原子を含むクラスターイオンを加速電圧2kVで注入し、浅い注入層を形成した。その後、 $900^\circ\text{C}$ で10秒間加熱し、注入したホウ素を電気的に活性化させp層を形成し、ソース・ドレイン電極とした。このソース・ドレイン電極をできるだけ浅く形成することが、超微細デバイスを実現するために不可欠である。技術展開予測によると、2012年頃に生産される超LSIに搭載されるトランジスタの製造技術が模索されているが、本研究の成果によってその指針が示された。

一般に半導体業界には、ムーアの法則といわれる半導体チップの性能が18ヶ月で2倍に向上するという定説がある。しかし、微細化が進み $0.1\mu\text{m}$ 以下のデバイスの世界では技術的限界に達し、壁にぶつかることが予測されている。本研究の成果は、これらの予測を打破する新しいイオン注入プロセス技術と評価されている。

#### 3. 今後の展望

クラスターイオンビーム技術は、巨大原子集団ビームを用い、従来のイオンビームプロセスがもつ技術の限界を打開し、さらに広いイオンビームプロセス分野を提供しようとするものである。浅いイオン注入による $0.1\mu\text{m}$ 以下の超LSIのMOSトランジスタの製作に、世界で初めて成功するとともに、数ナノメートル以下の表面荒さに平坦化加工できる超精密加工技術への応用や、低基板温度で結晶性の良い平坦な薄膜形成への応用も広がっている。このように、クラスターが、今までにない超高密度で固体表面に衝突したとき生ずる種々の非線形現象が新しい科学の領域を開き、また新しい材料創製技術と融合して、技術の新分野を開きつつある。



試作した超微細MOSトランジスタ



情報学研究科 知能情報学専攻 知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）  
 構造化瞳を持つ多重フォーカス距離画像センサ

1. 背景

有限の開口径を持つレンズで撮影された画像では、対象までの3次元距離情報が像のボケとして現れる。このため、画像中のボケの度合いを評価し、それが最小となるようなフォーカス値を求めることにより、3次元距離を計測することができる。この原理は Depth from Focus (DFF) 法と呼ばれ、オートフォーカス・カメラなどで使われている。

しかし、DFF法ではフォーカスを少しずつ変えながらボケの大きさを評価し、最適なフォーカス値を求める必要があり、実時間性、距離計測精度の面で問題があった。これに対し最近では、異なるフォーカスで撮影された2、3枚の画像から、ボケ現象の光学的モデルに基づいて3次元距離を推定する方法 (Depth from Defocus (DFD法))が提案されている<sup>[1]</sup>。

2. 研究成果

本研究では、DFD法に基づいて、対象の3次元情報とボケのない完全合焦画像をビデオレートで撮影でき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>[2][3]</sup>

まず、フォーカスの異なる3枚の画像をビデオレートで撮影するカメラとして、通常の3 CCDカメラを次のように改良した多重フォーカスカメラを開発した (図1)。(1)入射光を光の波長に依存せず丁度1/3ずつに分けるような分光プリズムを用いる。(2)3枚のCCDを光軸方向に±1mm程度ずつずらしてプリズムに固定する。

次に、計測精度を向上させるために、レンズの前方焦点位置に空間的な開口パターンを持った構造化瞳を設け (実験では、光軸を中心に複数のピンホールを等間隔に配置した構造化瞳を用いた)、画像に現れるボケに空間的な構造を持たせる。構造化瞳を用いると、フォーカス変化に伴ってボケの空間的構造が変化し、その度合いを評価することによって、対象までの3次元距離が精度良く計測できる。

図3は構造化瞳付き多重フォーカスカメラで撮影された3枚の画像、図2は計算された3次元距離画像を表す。

本研究で開発した構造化瞳付き多重フォーカスカメラは、(1)単一カメラ：ステレオ計測のように複数のカメラが要らない。(2)受動型：レーザ距離計測装置のように光の照射が要らない。(3)ビデオレートでの距離計測が可能。(4)3次元距離画像と完全合焦画像が同時に得られる。といった特長を持ち、多様な分野での応用が可能である。

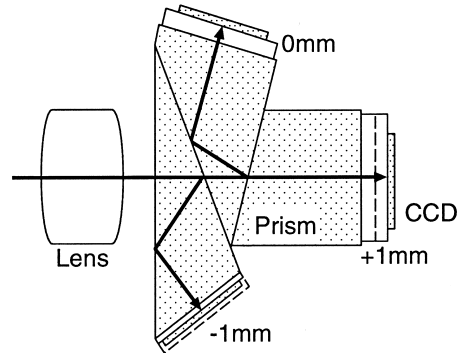


図1：多重フォーカスカメラ

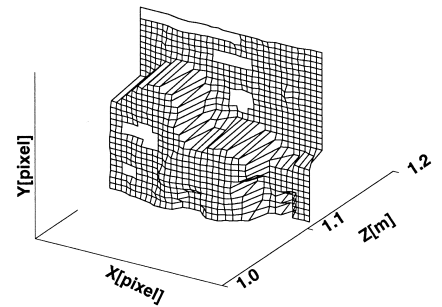


図2：3次元距離画像



図3：入力画像

参考文献

- [1] M.Subbarao and G.Surya: Depth from Defocus: A spatial domain approach, International Journal of Computer Vision, Vol.13, No.3, pp.271-294, 1994.
- [2] 竹村岳, 松山隆司:多重フォーカス画像を用いた実時間3次元距離計測,情報処理学会論文誌, Vol.39, No.7, pp.2149-2158, 1998
- [3]日浦慎作, 松山隆司:構造化瞳を持つ多重フォーカス距離画像センサ,画像の認識・理解シンポジウム講演論文集I, pp.353-358, 1998.

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野 (吉田研究室)

### 無線信号処理による移動通信の周波数不足解消

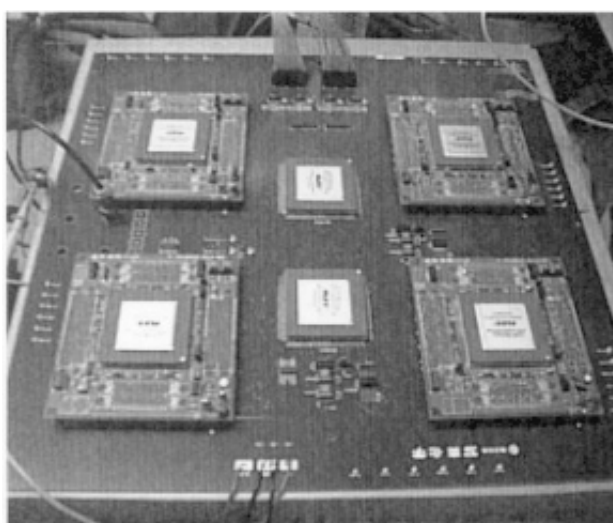
#### — 干渉キャンセラの理論、計算機実験、試作 —

テレビ、ラジオしか身近な無線通信システムが存在しなかった長い歳月を経て、コードレス電話、衛星放送、ページャ(ポケットベル)、カーナビゲーション(GPS)、携帯電話、PHSが次々と開発され、急速に普及している。本研究は2010年頃に予定される第4世代携帯電話システムや高度道路交通システム(ITS)に向けて、限られた資源である周波数の有効利用を無線信号処理の高度化によって実現することを目標としている。

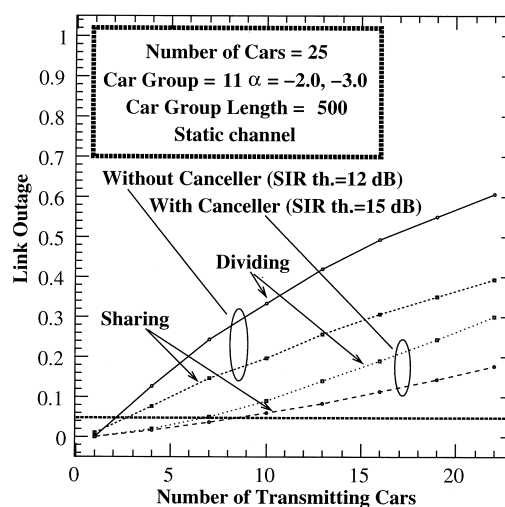
技術の進歩により、我々は非常に高い周波数帯域(ミリ波)まで通信に利用できるようになったが、電波の伝わり方の点からは、移動通信にはVHFやUHF等の比較的低い周波数帯域が適している。しかしこれらの周波数は様々な用途に既に利用されており、新しいサービスがこの周波数帯域に周波数の割り当てを受けることは難しい。このため、既存のわずかな周波数帯域を有効利用することが最も重要な課題となっている。

第3世代携帯電話システムの実用化を目前に控え、次々世代(第4世代)携帯電話システムの研究が開始されている。この第4世代システムでは再び時分割多元接続(TDMA)が候補となっている。これは、周波数帯域確保の観点等から符号分割多元接続(CDMA)でのこれ以上の高速伝送が難しいこと、並びに、CDMAでは基本的なチャンネル間直交度が不足していることに起因する。多元接続方式としてTDMAを用いると、電波の反射、回折によって生じる多重経路伝搬に起因する遅延波(エコー成分)、および、近隣での同一周波数再利用によって生じる同一チャンネル干渉波が最大の問題となる。本研究では、これらへの対策として最尤系列推定理論とトレリス符号化変調を利用した、遅延波等化能力を持つ干渉キャンセラの研究を行っている。

この方式によれば、セルラー方式携帯電話システムの周波数利用効率を約2倍に改善できる。現在、基本的な特性を実験的にも確認するため、ハードウェア試作を進めている。さらに、高度道路交通システム(ITS)の車車間通信への適用も検討中であり、基礎的な検討結果では約3倍の周波数利用効率を得られている。今後は、将来の究極的な無線通信システムである全無線自律分散ネットワークへの適用も含め、システム構成上の観点からも研究を進めていく予定である。



試作中の干渉キャンセラ  
(16個の130kゲートFPGAで構成されている)



車車間通信システムに適応した場合の干渉キャンセラの効果  
(通信失敗割合5%において約3倍の車が送信できる)

## 集積システム工学講座大規模集積回路分野（田丸研究室） 「集積回路の高速・低消費電力化設計技術の開発」

集積回路は、現代の高度情報化社会を支えるキーデバイスである。1958年に集積回路が誕生して以来、集積規模は3年の間に約4倍という驚異的な割合で増え続けてきた。現在、1チップ上に集積可能なトランジスタ数は1,000万を越えており、10年後には5億を越えると予想されている。このような大規模集積化を達成するためには、克服すべき数多くの課題が存在する。現在、集積規模を制限する第一の要因と考えられているものが消費電力(熱)である。携帯機器用集積回路の需要急増にも伴い、あらゆる設計段階での低消費電力化設計技術が求められている。また、集積回路の動作速度を制約する要因として、配線における信号の遅延時間が支配的となってきた。配線の細密化により配線容量と配線抵抗が増加し、配線での遅延時間が急増している。

そこで本研究室では、次世代ASIC(Application Specific IC:専用集積回路)の高速・低消費電力化設計技術として、新しい物理設計手法を研究している。本研究は次の二点に特徴がある。第一点は、設計対象毎に論理ゲートのライブラリを最適生成する事である(オンデマンドライブラリ)。第二点は、レイアウト設計と論理設計の一部を統合した設計工程(詳細設計と呼ぶ)を考え、所定の動作マージンを確保しつつ、動作速度、消費電力、回路面積の全てを最適化設計する事である。

ライブラリの特性は、回路特性に直接影響する。設計対象の回路規模や要求特性は多岐に渡るため、ライブラリへの要求仕様も設計対象毎に異なる。従来は、予め設計されたライブラリを用いていた。この場合、完成回路に冗長部分が含まれることは不可避である。オンデマンドライブラリでは、設計対象に対して必要十分なライブラリを供給しようとするものである。ここでの必要技術は、生成ライブラリ動作特性の高速な評価手法である。これまでのように特性評価に多大な時間を要すれば、オンデマンドではライブラリを生成できない。我々は、出来る限り解析的な取り扱いにより特性評価を評価する手法を開発した。本手法は、回路シミュレーションによる数値的な特性解析に比べ、5%程度以内の誤差で、約1,000倍高速に解析することができる。現在、解析精度をより向上すべく検討を続けている。

また、詳細設計技術として、論理ゲートの駆動能力を最適化する事により、高速・低消費電力化を図る技術を開発している。配線などによる負荷が大きい場合、駆動力の大きい論理ゲートを用いることにより高速化が図れる。一方、駆動力の大きい論理ゲートは、寸法が大きく消費電力も大きい。更に、そのゲートを駆動するゲートの負荷も増加するため、前段での遅延時間が増加する。これらの効果を大局的に勘案し、回路中の各論理ゲートの駆動力を適切に設定することにより、高速化と低消費電力化を同時に達成する事が出来る。本研究では、回路動作にグリッチやハザードと呼ばれる不要な信号遷移が多数含まれる事に注目し、最適化過程においてこれらの削減をも図ることにより、更なる低消費電力化が可能であることを示した。図1に、あるベンチマーク回路の高速・低消費電力化のを図った結果を示す。右上の点は、全てのゲートを最小駆動力とした回路の遅延時間と消費電力を示している。従来は、この回路が最も低消費電力であると考えられていた。開発手法では、不要な信号遷移を削減することにより、遅延時間を40%程度削減しつつ、更に消費電力の少ない回路が実現できる。

現在、開発手法を実装するASIC設計システムの開発を進めており、実用回路を用いた設計実験を計画している。

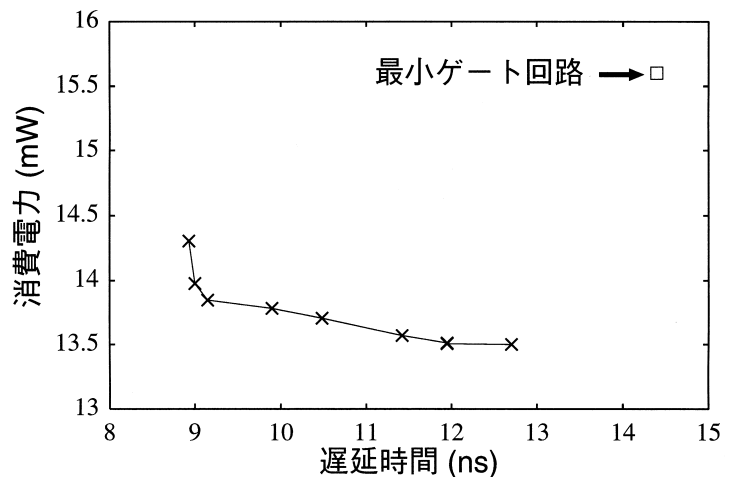


図1. C5315と呼ばれるベンチマーク回路の高速・低消費電力化結果

## システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研究室) 音符列データからのピアノ演奏動作の生成

教授 英保 茂、助手 関口 博之

近年のCPUの性能向上と低価格化により、3次元CGのリアルタイム作成・表示が安価なパソコン上で実行できるようになった。3次元動画CGは、3次元物体の形状把握のみならず、物体の複雑な運動を迅速かつ容易に理解するためのツールとしても有用であるため、その応用分野は今後ますます多岐にわたると考えられる。本研究ではこの応用の一つとして、複雑かつ高速な手指の動きが要求されるピアノ演奏動作を、3次元動画CGによって練習者にわかりやすく提示するシステムの開発を目指している(図1)。英保研ではこれまでに任意音符列からの演奏動作の自動生成、3次元CGによる動画表示、演奏表情の実現等に関するアルゴリズムの開発を行ってきた。<sup>†</sup>

ピアノ演奏においては1) 広大な打鍵範囲をカバーするために高速な手指の移動が必要、2) 鍵盤数が多く、その間隔が狭いため正確な打鍵動作が必要、3) 手指の動作可能方向・範囲に数多くの制約を持つ、等の理由により、5本の指を駆使した合理的な動作が要求される。本システムにおける演奏動作の生成アルゴリズムは、与えられた音符列を演奏するための最適な指使いと手指の移動経路を自動的に算出する。

手の移動量を抑えるために、ある鍵盤を打鍵する時の手の存在範囲(図2の各矩形領域)を各指毎に求め、一連の打鍵に対する手の存在範囲の重なり合いを最大にする指使いを採用した。最終的な手の移動経路は全ての手の存在範囲を通り、かつ変位量が最小となる3次N-スプライン曲線として算出している(図2の曲線)。

この結果をもとに仮想空間内に構築した手オブジェクトの各瞬間毎の位置、姿勢、指形状を決定することで演奏動作を実現する(図3)。同空間内の鍵盤オブジェクトは指との重なりを受けて沈み込み動作を行い、同時に打鍵音を発生する。音量は押下の際に鍵盤オブジェクトに加えられる運動エネルギーに応じて定められる。

本システムによる演奏結果は手指動作のシミュレーションを介して得るため、発音タイミングや音量に自然なバラツキを持つ、「人間的」な演奏結果を得ることが可能である。特にピアノ演奏における表情付けは「弾き方(タッチ)」の変化によって行われることが多く、これをシミュレートすれば従来の自動演奏では困難であった演奏表現の実現も可能になると考えられる。現在、指の動作速度や押下力の変化を考慮した表現付加手法について検討を進めている。<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 本研究に関し、情報処理学会第55回大会奨励賞、同第56回大会優秀賞受賞

<sup>††</sup> 本システムで自動生成した演奏は <http://www.image.kuass.kyoto-u.ac.jp/intr/onpu.html> で閲覧可能\*

※ MPEGが再生可能なブラウザ環境(IE4.0等)またはソフト(Microsoft MediaPlayer2等)が必要

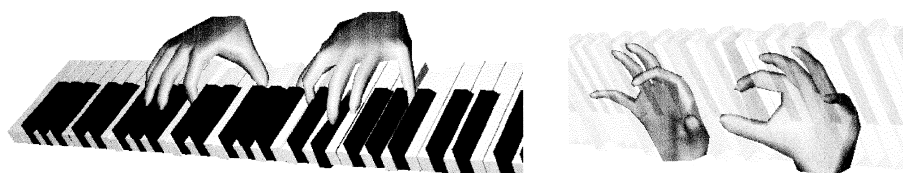


図1 演奏シミュレーションの3次元動画表示

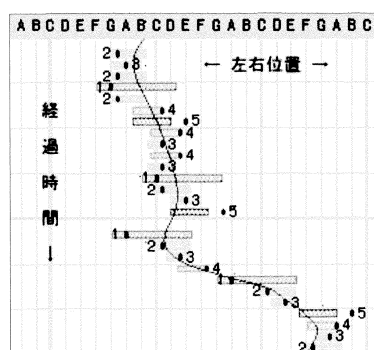


図2 指使い、手の移動経路算出結果

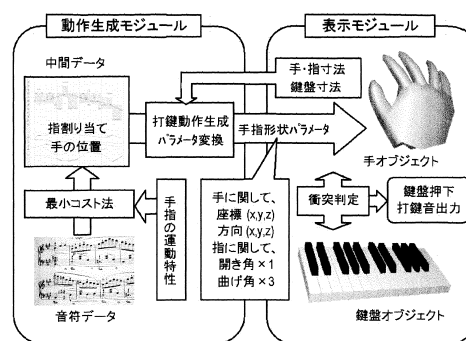


図3 システム構成と各メッセージの流れ

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）  
 「頭部装着型インタフェースデバイス（HIDE）の開発とその応用」

現在のパソコンはますます小型になり、高性能になってきた。その結果、デスクトップパソコンからノートパソコン、ハンドヘルドコンピュータへと、室内からアウトドアに至るまであらゆる場面で利用されている。コンピュータが小型になってきたため、特に両手を用いて作業するとき、情報を簡単に入力し、取得できる便利なコンピュータが待望されるようになってきた。このようなコンピュータには、MITやカーネギーメロン大学の身体装着型コンピュータ(Wearable Computer)があるが、これらは、コンピュータの操作に片手を用いるため、まだ両手で自由に手作業するには不便である。

そこで、本研究室では、ハンドフリーでバリアフリーなコンピュータの実現を目指し、手作業の妨げにならない情報の表示・機器の操作を実現するヒューマンインタフェースとして、頭部装着型インタフェースデバイス(HIDE)を開発した<sup>[1][2]</sup>。HIDEには次のような特徴がある。

- 両手を用いずに、視線や音声などで機器の操作を行える。
- 映像情報をシースルーで眼前に表示し、同時に外界の視野も確保できる。
- 専用のコンピュータを用いないので、汎用性がある。

HIDEの全体構成を図1に示す。視線データは、強膜反射法を用いて計測する。強膜反射法とは、角膜(黒目)と強膜(白目)の反射率の違いを利用するもので、赤外線LEDから眼球に弱い赤外光を照射し、その反射光を赤外線フォトトランジスタで計測し、視線の方向を検出する方法である。

HIDEの応用としては、複雑なメンテナンス作業の支援やナビゲーションシステム、手の不自由な障害者のための支援等が考えられる。本研究室では、HIDEのカーナビへの応用版として、GPSを取り付けたプロトタイプを作成した。その概念図を図2に示す。このシステムは、音声入力や視線の向きだけで画面を切り替えたり、シースルー画面にマップ情報を提示するほか、ドライバーの瞬目を監視していて、居眠りの気配があると警告音で休憩を促す等のユニークな機能を有している。

本研究は、京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー(VBL)の若手研究者助成金を頂いて研究を進めています。

参考文献

[1]二階堂義明 他：頭部装着型インタフェースデバイス(HIDE)の試作と機能評価,計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会,News and Report 13-2,pp.351-358(1998)  
 [2]梅田直樹 他：頭部装着型インタフェースデバイス(HIDE)の開発とその応用, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会,第14回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集,pp.305-310(1998)

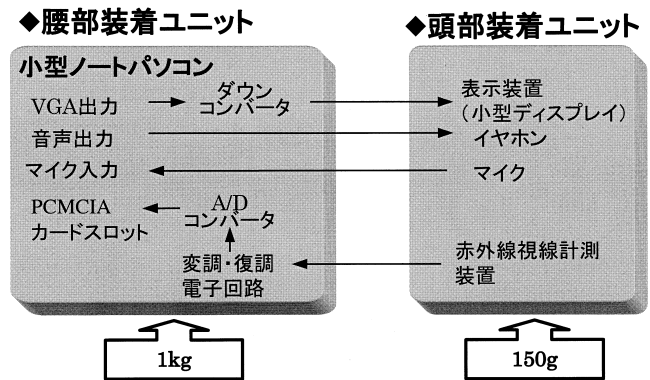


図1 HIDEの全体構成



図2 カーナビへの応用

## 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超伝導マグネットの安定性にかかわる超流動ヘリウムの定常及び非定常冷却特性」

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、強い磁場を必要とする。この強い磁場生成に必要な電力を核融合発電出力に比して著しく小さい値とするには、超伝導マグネットの利用が不可欠であり、核融合炉心の研究開発の進展と並行して、液体ヘリウム冷却大型超伝導マグネットの研究開発が、日本をはじめ欧米諸外国で取り組まれている。一方、揚水発電所に相当する日負荷平準化用の電気エネルギー貯蔵装置として貯蔵効率が非常に高い超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）が注目され、近年その概念設計が内外で行われるようになった。こうした概念設計では、電磁力を岩盤で支えるためSMESを地下に設置し、冷凍経費の比率を下げ高効率化をはかるため0.3-10GWhといった大容量のものが提案されている。この様な、核融合炉並びにエネルギー貯蔵装置用の大型超伝導コイルの研究開発にとって装置の小型化と、その安定化が最も重要な研究開発の目標である。

液体ヘリウムは、図1の圧力と温度の関係を示す状態図からわかるように、大気圧下で4.2Kの沸点を持つが、他の極低温液体や水等の通常液体と、以下の点で著しく異なっている。a) 3重点がない。固体状態を得るためには、液体の温度を十分に低くするだけでなく圧力も加えなければならない。b) 液体領域は $\lambda$ 線によって二つの領域 He I 相とHe II 相に分けられる。 $\lambda$ 線は、 $\lambda$ 点(2.173K, 50.52 mbar)からはじまり、 $\lambda'$ 点(1.77K, 30bar)に終わる。He I 相は通常の粘性流体であるが、He II 相では超流動現象が存在し液の基礎的性質が大きく変化する。He II は粘性が無いためコイル巻線の狭い隙間にも自由に入り出来、局所的な加熱箇所から熱を排出する機能がある等、常流動ヘリウム(He I)に比し、革新的に優れた安定な冷却特性を持ち核融合実験装置や超伝導磁気エネルギー貯蔵装置に用いられる大容量超伝導マグネット小型化のための有力な冷却材として期待出来る。

He II 冷却大容量超伝導マグネットにおける巻線の機械的不安定等による局所的パルス状熱擾乱に基づく超伝導状態の不安定性を理解し解決するためのデータベースとして、定常冷却特性と共に数ミリ秒以下の熱入力パルスに至る非定常冷却特性の一般的解明が必要である。これまで、He II の入った側面断熱一次元チャネルの1端を加熱した実験結果に基づく静的並びに動的冷却特性とそれを記述する理論モデルが報告されており、フランスでは、こうした研究成果に基礎をおく設計基準によって、核融合実験装置トールスープレの大型He II 冷却超伝導マグネットを初めて完成し成功をおさめた。

しかしながら、He II 中の巻線内では、定常・非定常熱入力に対し2次元ないし3次元的な冷却が行われ、1次元的な冷却特性に比し、その特性が向上していることが予測される。従って2次、3次元的な冷却設計基準の確立が望まれるが殆ど手が付けられていなかった。本研究室では、He II 中の巻線内で起こりうる定常・非定常熱入力に対し各々の2次元ないし3次元的な冷却特性を解明し、一般的な冷却設計基準を確立することを目標として、まず、He II 中の種々の直径の水平円柱導体や種々の大きさの平板導体における定常並びに非定常冷却特性に関する実験的研究と共に理論的研究を並行して行い、他国におけるこの分野の研究にさきがけて数多くの新しい知見を公表している。

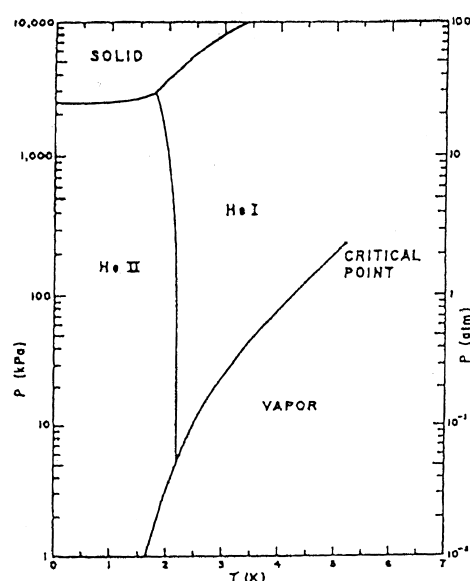


図1 HIDEの全体構成

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）  
 慣性静電閉じ込め方式プラズマの研究

（本研究は吉川潔研究室との共同研究です）

静電慣性閉じ込め核融合(Inertial Electrostatic Confinement Fusion; IECF)は図1に示すような球形の真空容器にイオンビームを静電場を用いて半径方向に閉じ込め、中心付近でビーム・ビーム及びビーム・バックグラウンドガスの衝突による核融合反応を起こさせるものです。IECFは、(1)形状が単純である、(2)非マクスウェル分布のビーム衝突核融合であるので、高いイオンエネルギーを必要とするD-<sup>3</sup>Heなどのアドバンスド燃料を用いることが可能である、などの特徴を持っています。

これまでの実験研究では、1967年に米国のHirschがD-T（重水素と3重水素ガス）を用いた実験で10<sup>9</sup>n/sの中性子の発生を観測したのが最大です。その後1970年代中旬まではいろいろな研究機関でこの実験結果の追試と電位井戸の計測が試みられましたが、(1)Hirschの実験結果を再現できなかったこと、(2)大出力になると電極の冷却が困難と考えられ、核融合炉への展望が難しいことなどから、1970年代後半以降核融合研究の中心がトカマク研究となる中で研究が中断していました。しかし、1990年代になり、カスプ磁場中への電子ビーム入射により仮想的な電極を作る方法がbussardにより提案され、またトカマク以外の研究方向が注目されたこともあり、米国で研究が再開されました。

エネルギー理工学研究所では、1992年頃よりこのIECFの研究を始め、1次元計算機シミュレーションに引き続き、1995年からは球形真空容器を用いた実験を開始しました。現在までに、重水素ガスを用いたでは、5.0×10<sup>6</sup>n/sのD-D中性子を観測しています。現在は、閉じ込め性能を向上を目指して、シミュレーションでは原子過程の考慮/多次元化などのコードの高度化を、また実験では高電界中でのシュタルク効果を用いた電界強度を測定する準備を進めています。

平成8年度に新設された当井上研究室は、吉川（潔）研究室との共同で本研究を進めており、その中で、本研究室独自の研究して、球形状の一部を取り出した円筒形状の装置を設計制作しており、本年度中には実験を開始する予定です。この研究では、陰極を接地電位とすることで、陰極内部の電界のプロープ計測を試みると共に、将来的には軸方向に磁場を印可してその影響を調べる計画です。

現在の研究結果は、核融合炉を展望するには非常に小さいものですが、小型・簡単な装置で核融合中性子を発生できることから、放射性同位体を用いた中性子源の置き換えなどの応用を検討しています。

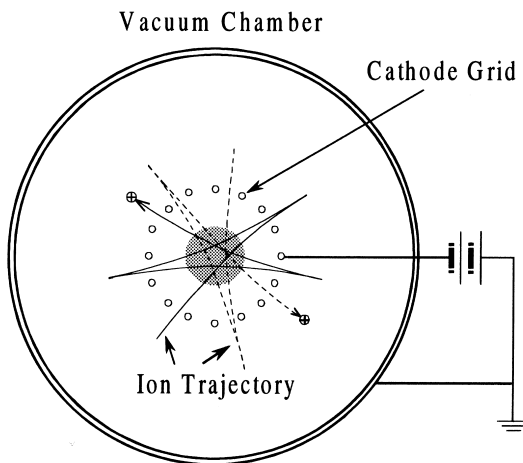
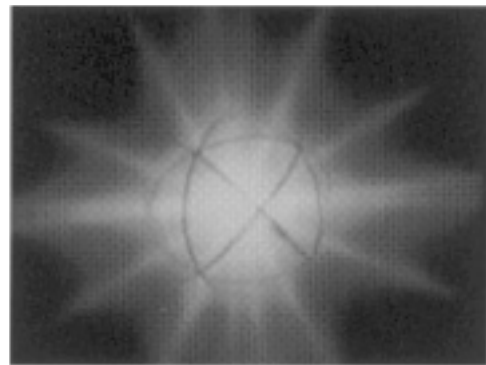


図 IECFの概念

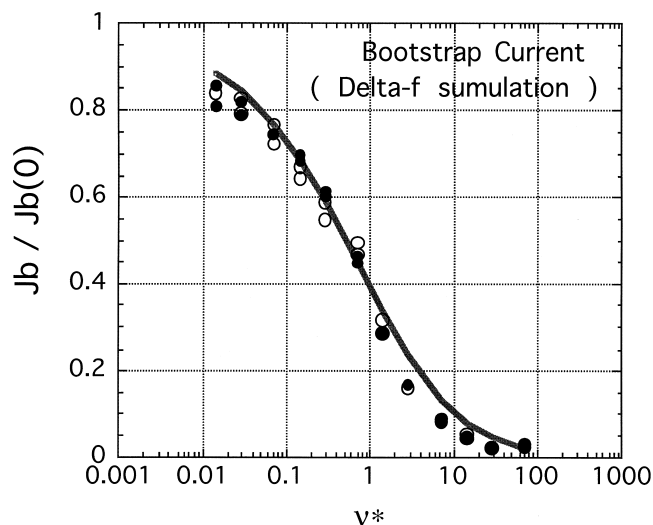


放電の一例

## 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） 「Delta-f 法を用いたプラズマ輸送シミュレーションコードの開発」

[1] 研究目的：最近トラスプラズマの新古典輸送の重要性が再認識されつつある。それは、新古典理論が輸送係数の基準（下限）を与えるからだけでなく、理論の仮定が破れるような条件での重要な現象が少なくないからである。新古典プラズマ輸送では、従来からモンテカルロ法が重要な役割を果たしてきた。複雑な配位を扱うことができ、解析的な理論で扱えない領域にも適用できるなどの利点がある一方、モンテカルロ法には計算時間がかかりすぎる問題が知られていた。ここでは、このような従来のモンテカルロ法の問題点を解消することを目的として、ノイズの低減に効果があり粒子シミュレーションの新しい技法として注目されているdelta-f アルゴリズムを用いて、トラスプラズマ輸送、特に新古典輸送に関連した問題を調べるシミュレーションコードを開発している。ステラレータなどの3次元ヘリカル配位における輸送シミュレーションへの応用を目的としている。

[2] シミュレーション法とコード開発の現状：delta-f 法は、分布関数を既知のバックグラウンドとそれからのズレ（delta-f）に分割し、与えられたドリフト運動論方程式から、マーカ粒子の従う characteristics と時間的に変化する重みの従う方程式を導き、それらを連立させて時間発展を追う新しいシミュレーション技法である。バックグラウンドも含む全分布関数からではなく輸送に直接寄与する部分だけからマーカー粒子をサンプルするのでノイズの低減や計算効率の改善が可能になる。現在までに、計算スキームとして線形化delta-f 法（Dimits-Lee scheme）および非線形 characteristics 法（Parker-Lee scheme）に基づいてプロトタイプの delta-f コードを試作した。またステラレータ配位を扱えるように磁気座標系における drift Hamiltonian を用いて定式化したコードを使って、トカマク配位およびモデル・ステラレータ配位についてそれぞれベンチマークをおこない、解析的に知られている解と良く一致することを確認した（図はトカマクプラズマにおけるブートストラップ電流の衝突周波数依存性を示す）。さらにテスト粒子のランダムウォークにもとづいた従来のモンテカルロ・シミュレーションとの比較もおこない、特にブートストラップ電流については著しく計算ノイズを低減できることを明らかにした。今後、(1) 現実的な heliotron 配位や advanced stellarator 配位に適用し、また (2) 衝突項の取り扱いを改良して、本格的な輸送シミュレーションコードに発展させてゆくことを計画している。



[3] 本研究テーマに関する発表

- (1) K.Hanatani, Stellarator transport simulation using delta-f Monte Carlo algorithms, Joint conference of 11th international stellarator conference and 8th International Toki conference (September, 1997); Journal of Plasma Physics and Fusion Research (JPFR) Series 1, (1998) 472.
- (2) 花谷 清、delta-f 法をもちいた新古典プラズマ輸送のシミュレーションII、物理学会秋(神戸大学) 8pYN-8、(1997年10月)
- (3) K.Hanatani, Stellarator transport simulation using delta-f Monte Carlo Methods, US-Japan Workshop on Stellarator Concept Improvement (held at Princeton Plasma Physics Laboratory), Jan.27-29, 1998

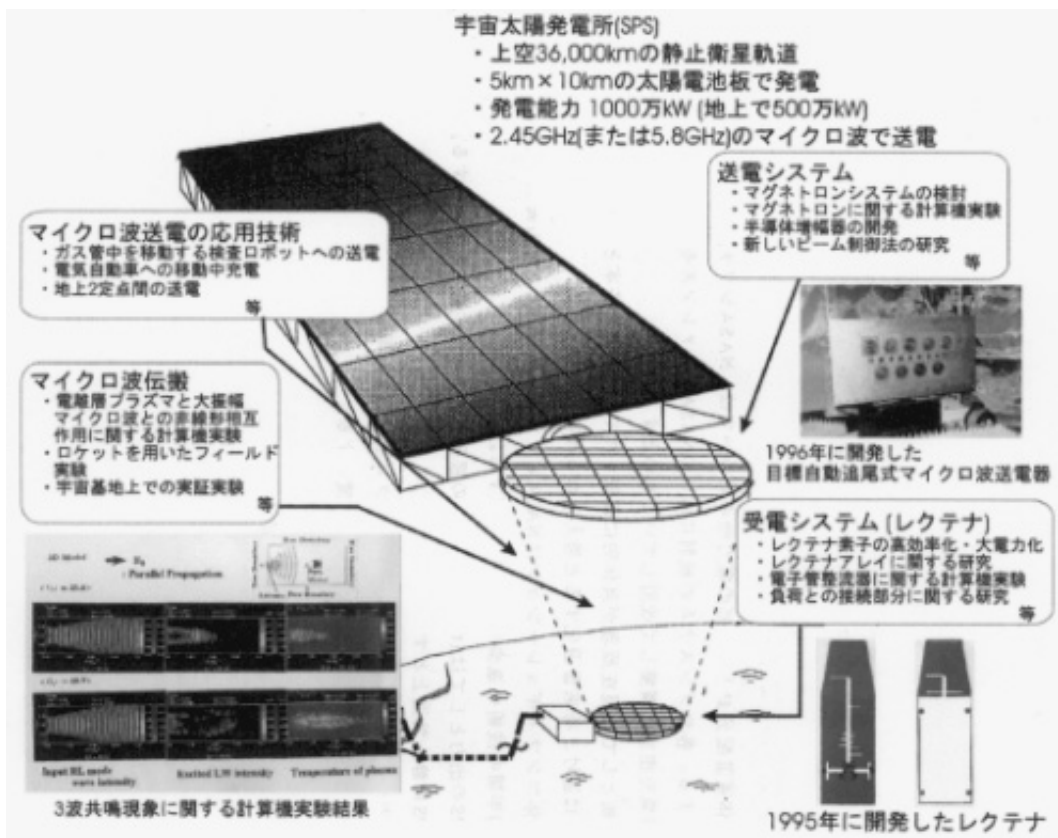


## 超高層電波研究センター 超高層電波工学部門（松本研究室）

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マイクロ波無線送電及び宇宙太陽発電衛星に関する研究に関して紹介します。

人類を未来のエネルギー危機から救う手段の一つとして、現在考えられているのが宇宙太陽発電です。これは、宇宙空間に巨大な太陽電池パネルを築き、マイクロ波によってそこで発電されたエネルギーを地上に伝送しようとするものです(下図参照)。マイクロ波によるエネルギー伝送の概念は古く、今世紀初頭のN. Teslaにまで逆登ります。研究が本格化するのは第2次世界大戦後アメリカにおいてであり、特に重要な研究は60年代から70年代にかけてW. C. Brownによって行われています。SPSは1968年に概念が提案され、1980年にはアメリカのNASA/DOEによって詳細なシステム設計が行われました。その後、当研究グループが行った1983年のマイクロ波送電ロケット実験頃から日本でも盛んに研究が行われるようになり、現在は多くの研究機関で研究が行われています。近年は最新技術を応用したマイクロ波送受電システムの開発や新しいビーム制御方式の研究等が盛んに行われています。SPSやマイクロ波送電に関する国際学会も数年に一度開催されており、世界的に研究が活発に行われています。

本研究室では主としてマイクロ波送電技術開発とプラズマ中の伝搬問題に関して研究を行っています。これまで無燃料マイクロ波給電飛行機実験(MILAX)、宇宙空間マイクロ波伝送ロケット実験(ISY-METS)等多くの実証実験を実施し、現在は国際宇宙ステーション上での送電実験を検討中です。本研究室で進行中の研究は、受電素子や送電システムの基礎開発、応用技術研究、計算機によるシミュレーション等、多岐にわたっています(下図参照)。



## 超高層物理学部門 (津田研究室)

### 電波と光学の複合観測による地球大気環境上部のリモートセンシング

地上100km付近の大気は中間圏界面領域と呼ばれていますが、気象現象などの影響を強く受ける地球大気と太陽活動の影響を強く受ける宇宙空間の遷移領域であり、地球物理学的に非常に興味深い領域です。近年はこの高度の大気の下層の地球環境変動にも非常に敏感に反応して変動することが指摘され、その観測の重要性が急浮上してきました。当研究室では、従来から行なっているレーダー(電波)観測に加え、光学観測との複合観測で新しいリモートセンシングを展開しています。

- 電波観測 乱流散乱、中波(MF)の分反射、電子の非干渉散乱などの電波散乱体がこの領域には存在しますが、流星飛跡による散乱を用いると昼夜の別なく連続的に観測が可能です(流星レーダー観測)。これは、地球大気に突入する流星が高度80-110kmに残す電離飛跡をVHF電波のレーダーで測定する技術で、反射電波のドップラー-偏移で飛跡周辺の風速がわかります。我々の研究室では、反射電波の減衰時定数から大気分子拡散係数や温度変動の測定法を開発し、大型レーダーであるMUレーダーや小型の流星レーダーに応用してきました。この温度変動のセンシング技術は大変注目されています。
- 光学観測 近年の光電子デバイスの発達によって光学によるリモートセンシングは急速に発展しました。一つは、冷却CCDカメラを利用した大気光イメージ観測です。大気光とは高度80km~300kmの大気が種々の高度で種々の波長の発光をする現象で、主に夜間の微弱な大気光が観測対象になります。中間圏界面付近のいくつかの高度で、大気密度の水平分布を観測することができます。当研究室では、極地研究所と共同で直径20センチの巨大魚眼レンズと最新の冷却CCDを用いた大気光観測用イメージャを開発し、信楽MU観測所で自動観測を行ない、取得画像をデータ解析して大気水平構造を調べています。もうひとつはライダー(レーザーレーダー)で、中間圏界面領域にわずかに存在する金属原子の共鳴散乱を観測します。大気微量成分の分布の他、大気温度や運動を測定することもできます。現在、都立大および信州大のライダーグループとの共同観測で金属ナトリウムの観測を進めています。
- 複合観測とネットワーク観測 レーダーは、大気の力学現象を高度方向に詳細に観測し、光学イメージャ観測は水平構造を詳細に観測します。さらに、ライダー観測では、大気の化学組成を観測します。これらの観測の複合により、中間圏界面の物理化学過程の解明を目指します。また、国外の観測点とのネットワーク観測でグローバルな大気構造の研究を国際協同で進めております。現在、中間圏界面国際協同観測システム(PSMOS計画)という国際プロジェクトが1998年から5ヶ年の計画で進行中です。当研究室の津田敏隆教授が運営委員として参加しており、また本年3月には同計画の国際シンポジウム(DYSMERシンポジウム)を京大で開催するなど、国際研究計画を主導する役割を果たしております。

