

## 博士論文一覧

### 【課程博士一覧】

青木克比古	「衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法に関する研究」	平成12年 1 月24日
杉田 寛之	「Numerical Study on Solid-Fueled Pulsed MHD Generator」 (固体燃料パルスMHD発電機の数値解析的研究)	平成12年 3 月23日
田中 俊二	「サンプル値制御系の研究—離散時間線形周期時変系の $H_\infty$ 無限大問題と非一様サンプリング問題」 (Studies on Sampled-Data Control Systems—the $H_\infty$ Problem of Discrete Linear Periodically Time-Varying Systems and Nonuniform Sampling Problems)	平成12年 3 月23日
今田 昌宏	「ウエハ融着法による2次元フォトリソグラフィ結晶レーザーの作製とその動作特性に関する研究」	平成12年 3 月23日
成川 幸男	「Emission Mechanism in Quantum Well Structures Composed of GaN-based Semiconductors」 (GaN系半導体量子井戸構造の発光機構に関する研究)	平成12年 3 月23日
朴 斗哲	「Low Temperature Growth of Polycrystalline GaN-based Thin Films by RF Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition」 (RFプラズマ化学堆積法による多結晶GaN系薄膜の低温成長に関する研究)	平成12年 3 月23日
古川 雄三	「InAs量子ドットのサブバンド間遷移によるテラヘルツ電磁波発生に関する研究」	平成12年 3 月23日
小林 圭	「Applications of Scanning Probe Methods to Surface Investigations on Ultrathin Organic Films」(走査型プローブ顕微鏡を用いた有機超薄膜の表面に関する研究)	平成12年 3 月23日
青木 学聡	「Molecular Dynamics Simulation of Cluster Ion Impact on Solid Surface」 (クラスターイオンの固体表面衝突過程の分子動力学シミュレーション) 「Nanoscale Observation and Analysis of Damage Formation	平成12年 3 月23日

---

瀬木 利夫	and Annealing Processes in Ion Beam Interactions with Surfaces」 (イオン・固体表面相互作用による損傷・回復過程のナノスケール観察と解析)	平成12年 3 月23日
李 原	「Multiuser Detection for Co-channel Interference Cancellation」 (同一チャネル干渉波キャンセルのためのマルチユーザ検出)	平成12年 3 月23日
三浦 健史	「Study of Microwave Power Receiving System for Wireless Power Transmission」 (マイクロ波無線電力伝送におけるマイクロ波受電システムに関する研究)	平成12年 3 月23日
三宅 壮聡	「Computer Simulations of Electrostatic Solitary Waves (ESW)」 (静電孤立波に関する計算機シミュレーション)	平成12年 3 月23日
北垣 次郎	「Design Study of the Staggered Array Undulator for Free Electron Lasers」 (自由電子レーザー用スタガードアレイ・アンジュレータの設計に関する研究)	平成12年 3 月23日
Wu Wei	「A Study on Modeling Plant Operator's Cognitive Behaviors at Man-Machine Interface and Its Experimental Validation」 (マン・マシン・インタフェースにおけるプラント運転員の認知行動のモデル化とその実験的検証に関する研究)	平成12年 3 月23日
石井 裕剛	「人工現実感技術を用いたプラント運転・保守の訓練システムに関する研究」	平成12年 3 月23日
宮下 裕章	「Study on Analytical Modeling of Antenna Arrays for Implementation of Efficient Design Procedure」 (能率的設計法確立のためのアレーアンテナの解析的モデル化に関する研究)	平成12年 5 月23日

青 木 克比古

## 「衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法に関する研究」

平成12年1月24日授与

本論文は、筆者が京都大学博士後期課程社会人コースに入学し、宙空電波研究センター（当時超高層電波研究センター）および三菱電機株式会社にて行った衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの新しい鏡面修整法に関する研究をまとめたものである。衛星通信の需要が増大するに伴い、周波数や衛星軌道の有効利用、衛星通信システムと地上通信システムとの共存や地球局の経済化が求められている。このような背景の下、地球局アンテナに対し、小口径で高効率、低交差偏波、良好な広角放射パターン、所望のビーム断面形状、更にはアンテナ実装面からの機械系との整合性などの要求がなされている。このような要求を満たすために、原理的に能率が良く良好な放射パターンを有するオフセット形複反射アンテナを鏡面修整することが有効と考えられる。

本論文は衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法として、世界的にも新しく考案した鏡面修整関数による開口波面に基づく設計法を論じており、この設計法を基本として 高能率オフセット形楕円ビームアンテナ、低交差偏波オフセット形複反射鏡アンテナ、低サイドローブ形複反射鏡アンテナなど5種類のアンテナを設計・製作し、実測あるいは計算機シミュレーションによりその妥当性確かめたものである。

従来の方法は、主として円形開口アンテナの開口位相・振幅分布に基づくもので、厳密な幾何光学的な解を与えるが、開口条件など境界条件に制約があり楕円開口の設計が困難である上、複雑な連立偏微分方程式を数値的に解くため離散的にしか鏡面座標が求まらないという欠点があった。

これに対し本論文の鏡面修整法によれば、開口形状・開口分布は鏡面修整関数を適当に選択することにより任意のものにし得ることから、設計に汎用性がある上、鏡面座標も関数で与えられるため、任意の点の座標が厳密に決まるなどの利点がある。更に連立偏微分方程式を解く必要はなく比較的簡単なアルゴリズムでアンテナ設計ができる。その適用例として開口径が長径4.7m、短径2.3mの高能率オフセット形楕円ビームアンテナの設計を示しており、その実測性能を通して設計の妥当性が証明されている。このような楕円ビームを有するアンテナ方式は、アンテナの低コスト化・静止軌道の有効利用の観点から小形地球局アンテナの有力な方式となっている。なおこのアンテナは昭和60年通信の自由化を記念し郵政省が発行した記念切手の図柄に用いられた。

またこの開口波面に基づく鏡面修整法に鏡面置き換え法、鏡面分割構成法や平面波合成法を導入することにより、それぞれ低交差偏波特性をもつオフセット形アンテナ、低サイドローブ特性を有するオフセット形アンテナや複ビーム放射のオフセット形アンテナの設計に拡張できる。実際の設計の一例として、鏡面置き換え法を、開口径が長径2m、短径1mの楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナの設計に適用した。このアンテナは衛星通信用の車載用や可搬用アンテナで実用化された。このように本論文に示される開口波面に基づく鏡面修整法は新規性と有効性に富み、かつ汎用性もあることから、今後の開口面アンテナの様々な設計要求に柔軟に対応できるものと期待される。

杉田 寛之

## 「Numerical Study on Solid-Fueled Pulsed MHD Generator」

(固体燃料パルスMHD発電機の数値解析的研究)

平成12年3月23日授与

パルスMHD発電は、オープンサイクルMHD発電の一種で、短時間（～10数秒）ながら大電力（最大600MW）を発生することができる。ロシアでは、「ソューズ」、「ウラル」、「パミール」などのパルスMHD発電システムが建造され、コーラ半島やウラル山脈での地殻構造研究や、カスピ海沿岸部や東シベリア地域における原油・天然ガスの探査、パミール高原や天山山脈における地震研究に用いられてきた。

パルスMHD発電機は、運搬が容易であり、大電力を始動性よく発生することができるといった特徴を有している。さらに、アルミニウムを含む固体ロケット燃料が使用されているため、その燃焼ガスである作動流体は $\text{Al}_2\text{O}_3$ を重量比で30～40%含んだ気液2相流となっている。つまり、気相はセシウムまたはカリウムがシードされた弱電離プラズマ、液相は直径数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3$ 液滴粒子群である。発電機内部では、従来のオープンサイクルMHD発電機と比較して導電率が高く、強いMHD相互作用が生じる。

## (1) 自励式パルスMHD発電システム「パミール-3U」の動作特性解析

パルスMHD発電機の詳細な動作特性解析を行うためには、気相と液相の振舞いをそれぞれ別々に取り扱い、2相間の相互作用を考慮する解析モデルを採用する必要がある。気液2流体モデルを用いて、自己励磁式パルスMHD発電システム「パミール-3U」のシステム動作特性の解析を行った。まず初めに、パルスMHD発電チャンネル（図1）内部の気液2相流の基本的な性質について調べた。さらに、ロシアで行われた発電実験における自己励磁過程の数値シミュレーションを行い、解析モデルの妥当性を確認し、パミール-3Uの動作特性を詳細に調べた。そして、これらの結果に基づいて、より大きな電気出力を持つ新しいパルスMHD発電システムの提案を行った。

(2)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 液滴粒子の衝突結合・分割を考慮した粒子モデルによる発電チャンネルの解析

パルスMHD発電チャンネル内部において、実際の液滴粒子は粒径分布を持っており、その粒径分布は、粒子間衝突結合および、気相から受ける応力による分割によって、流れに沿って変化する。また、前節における気液2相流解析により、粒径が2相流の振舞いに大きな影響を及ぼすことが明らかになっている。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 液滴粒子の衝突結合・分割を考慮した粒子モデルを用いて、パルスMHD発電チャンネルの気液2相流解析を行い、粒径分布の変化と、粒径分布が2相流の振舞いに及ぼす影響を明らかにした。

## (3) 粒子モデルを用いた発電チャンネル内部の気液2相流2次元解析

気相を流体として取り扱い、液相に粒子モデルを適用することによって、MHD発電チャンネル内部における気液2相流の振舞いの時間依存2次元解析を行った。特に、液滴粒子の大きさによる気液2相間の相互作用の違いが、境界層剥離や衝撃波、液滴粒子の発電チャンネル壁への衝突などに及ぼす影響を明らかにした。（図2）

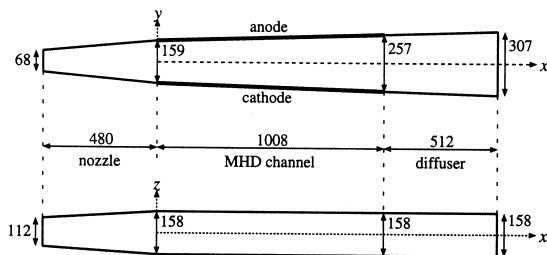
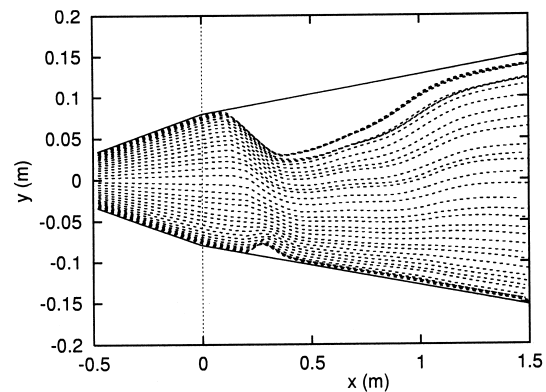


図1 Pamir-3Uの発電ダクト

図2 液滴粒子（直径5 $\mu\text{m}$ ）の飛跡

田 中 俊 二

「サンプル値制御系の研究 — 離散時間線形周期時変系の  $H_\infty$  無限大問題と非一様サンプリング問題」

(Studies on Sampled-Data Control Systems — the  $H_\infty$  Problem of Discrete Linear Periodically Time-Varying Systems and Nonuniform Sampling Problems)

平成12年 3 月23日授与

サンプル値制御系とは、連続時間の制御対象をコンピュータなどの離散時間の制御装置で制御する系を指す。近年、コンピュータ技術の急速な発展により、サンプル値制御系の重要性が高まってきており、その設計・解析に関する研究も盛んに行われている。このような背景のもと、本論文では、サンプル値系に関わる 2 種類の問題について研究を行った。

まず、1つ目の問題として、離散時間の周期時変システムに対する  $H_\infty$  問題を扱った。周期時変系として扱える現実のシステムは数多くあり、例えば、マルチレートサンプル値系や人工衛星の姿勢制御システムなどがこれにあたる。

本論文では、離散時間周期時変  $H_\infty$  問題の解法として、新たな手法を提案した。この手法では、離散時間周期時変  $H_\infty$  問題における閉ループ系の  $H_\infty$  ノルムの下界値(パフォーマンスの上界)を、離散時間時不変  $H_\infty$  問題の解(閉ループ系の  $H_\infty$  ノルムの下界値)を用いて表している。本手法を用いることにより、よく知られている離散時間時不変  $H_\infty$  問題の解法をそのまま用いて、閉ループ系の  $H_\infty$  ノルムの下界値を求めることが可能となった。

2つ目の問題は、サンプリングが不等間隔であるようなサンプル値系の問題である。サンプル値系の理論は、主としてサンプリングが等間隔で行われるようなシステムを対象としてきたが、マルチレートシステムを代表とする、サンプリングが不等間隔なシステムに対する研究も行われてきている。本論文では、サンプリングが不等間隔であるようなサンプル値系の問題として、サンプリング間隔が周期時変のシステム、および、サンプリングがランダムに失敗するようなシステム(アンリライアブルサンプリングシステム)を対象とした研究を行った。

サンプリング間隔が周期時変のシステムを扱う主目的は、サンプリングのタイミングが制御性能にどのように影響を与えるかを調べることである。本研究では、サンプル値系のロバスト安定化問題を対象とし、サンプリングのタイミングとロバスト安定性の関係について研究を行った。数値計算より、プラントが複素極を持たない場合には、不等間隔のサンプリングを行っても、ロバスト安定性を改善できない、という結果が得られた。しかし、複素極を持つときには、不等間隔のサンプリングでロバスト安定性を改善できる場合があった。等間隔のサンプリングでプラントを離散化した場合、離散化されたプラントが不可安定・不可検出になってしまうケースがあり、不等間隔のサンプリングでロバスト安定性を改善できるのは、この現象に強い関連があるものと思われる。さらに、プラントが複素極に加えて不安定零点を持つ場合には、不等間隔のサンプリングでロバスト安定性を改善できるケースが増加することも判明した。

以上の結果は数値的なものであり、理論的な知見は今のところ得られていないが、不等間隔なサンプリングでロバスト安定性を改善できる場合とできない場合の判定方法について、一定の指針を与えている。今後、より理論的な解析を行い、不等間隔なサンプリングを用いてロバスト安定性の改善を行うような制御系の構成法を研究していくことが必要ではないかと考えられる。

一方、アンリライアブルサンプリングシステムは、先に述べたように、サンプリングが必ずしも成功するとは限らず、時々ランダムに失敗してしまうようなシステムである。これは、サンプルしたデータの処理に時間がかかり、次のサンプリングまでに間に合わないため、結果的にサンプルしたデータが失われてしまう、というような状況などを想定している。本論文では、このようなシステムに対し、最小分散推定を行うフィルタを構成する方法を提案した。さらに、このフィルタが大域的漸近安定となるための条件を、サンプリングがどの程度成功する必要があるかということに関連した形で示した。そして、このフィルタを用いて構成した制御系の有効性を、数値例を通して確認した。

## 今 田 昌 宏

### 「ウエハ融着法による2次元フォトニック結晶レーザの作製とその動作特性に関する研究」

平成12年3月23日授与

近年の情報化社会の進展に伴い、今後、伝送・記録すべき情報量が飛躍的に増大すると予想される。これに対応するためには光デバイスのさらなる高機能化・高性能化が必要不可欠である。このような景のもとで光エレクトロニクス分野に革新をもたらすと期待されているのがフォトニック結晶である。固体結晶において原子の周期ポテンシャルによって電子に対してバンド構造が形成されるのと同様に、フォトニック結晶は、内部に周期的な屈折率変化を形成することで光のエネルギーに対してフォトニックバンド構造を形成する。このフォトニックバンド構造を用いることによって、フォトニック結晶内部における光の発生・伝搬を抑制・制御することが可能になるため、フォトニック結晶を発光デバイスに応用することで従来にはない高機能発光デバイスの実現が期待される。しかしながら現在、フォトニック結晶を発光層と融合する技術や、フォトニック結晶におけるレーザ発振モードの解析などの研究は全く行われていない。そこで著者は、ウエハ融着法によってフォトニック結晶と発光層を融合し、2次元フォトニック結晶面発光レーザを実現すると同時に、フォトニック結晶におけるレーザ発振現象を解明することを目的として研究を行った。

まずフォトニック結晶レーザの理論検討として、2次元フォトニック結晶における光の回折現象について検討を行い、2次元的なブラッグ回折が内部で生じること、またこれによって全ての方向が結合してコヒーレントなレーザ発振が期待されることを明らかにした。また平面波展開法による理論計算より、2次元フォトニック結晶中に4つの共振モードが存在すること、また各モードの電界分布について検討し2次元フォトニック結晶共振器における共振モードを明らかにした。次にウエハ融着法によって半導体内部に空気/半導体周期構造を形成した場合の周期構造形状や融着界面の電気的特性について評価を行い、1) 融着の際にマストランスポートと呼ばれる原子の再配列現象が生じること、2) マストランスポートの度合いは融着条件などに依存すること、3) マストランスポートによって回折格子形状や融着界面の電気的特性が改善されること、を示した。さらにウエハ融着法によって実際に1次元空気/半導体回折格子内蔵型分布帰還型(DFB)半導体レーザを試作し室温連続発振を達成することで、本研究で提案したデバイス作製方法が実際の発光デバイスに適用可能であることを示した。これらの結果を踏まえて実際に2次元フォトニック結晶と発光層を一体化した2次元フォトニック結晶面発光レーザを試作し、はじめて室温発振を達成した。さらに発振スペクトル・近視野像・遠視野像などを評価した結果、大面積かつ狭射出角なレーザ発振が実現されていることを、また顕微分光測定よりデバイスが2次元大面積においてコヒーレントにレーザ発振していることを示した。さらに電界分布の理論計算結果を実験によって得られた偏光特性の面内分布と比較することで、2次元フォトニック結晶レーザの発振モードとフォトニックバンド構造の対応を明らかにした。今後の課題としては、フォトニック結晶中に意図的に格子欠陥を導入することによってデバイスの偏光特性を制御すること、あるいはより小型化することで低閾値化を目指すこと、などがあげられる。

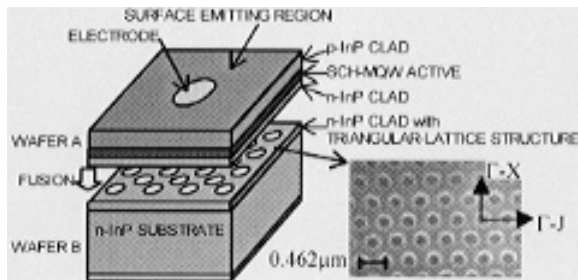


図1 2次元フォトニック結晶レーザの模式図、付図は作製した三角格子構造の融着前の平面SEM写真

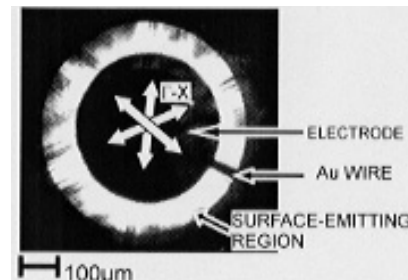


図2 発振時の近視野像。電極上の矢印は6つの透過な $\Gamma$ -X方向を表す

成川 幸男

## 「Emission Mechanism in Quantum Well Structures Composed of GaN-based Semiconductors」

(GaN系半導体量子井戸構造の発光機構に関する研究)

平成12年3月23日授与

本論文は、可視から紫外域にわたる短波長発光デバイス材料として重要なGaN系半導体の発光・吸収のダイナミクスを、時間分解フォトルミネッセンス (PL) や白色光ポンプ・プローブなどによって測定し、それらの結果と半導体結晶の微視的構造との関係を明らかにすることによってこの材料系の発光機構を解明し、発光ダイオードや半導体レーザーなど光デバイスの一層の高効率化、高性能化に対する基礎的知見を得ることを目的として行った研究を纏めたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 光物性評価の基準となる試料として、サファイア基板上にエピタキシャル成長させたGaN単層エピ膜において、励起子分子発光を観測しその発光ダイナミクスを明らかにしている。また、発光効率がエピ膜中の貫通転位ではなく、点欠陥等による非輻射再結合中心に支配されていることを明らかにしている。
2. 三元混晶InGaNを活性層とする量子井戸構造において現れる大きなストークスシフトは、Inの組成が大きい量子ドットの領域の自然形成に基づくものであることを明らかにし、これが励起子の強局在をもたらすことを実験的に示している。
3. InGaN 量子井戸においは、In組成の増大に応じて励起子は二次元から0次元的に閉じ込めの次元性が変化することを明らかにするとともに、励起子を0次元的に閉じ込める強局在系により、発光ダイオードの高効率化が実現し得ることを示している。
4. InGaN系レーザー構造において、活性層のIn組成が20%と大きな試料では量子ドットの領域の高次の準位で、10%という小さな試料では非局在準位で、それぞれ利得が発生することを示し、利得発生機構がIn組成に大きく依存することを明確に示している。

以上を要するに本論文は、ダイナミックな光物性評価手法を用いてGaN系半導体の発光機構を、量子ドットの領域での励起子の局在と局在の次元性など結晶のマイクロ構造に由来する再結合過程という観点から明らかにしたもので、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。今後、これを積極的に利用すれば、InGaN量子ドットのポテンシャル深さ制御による多波長発光が可能となるものと期待される。

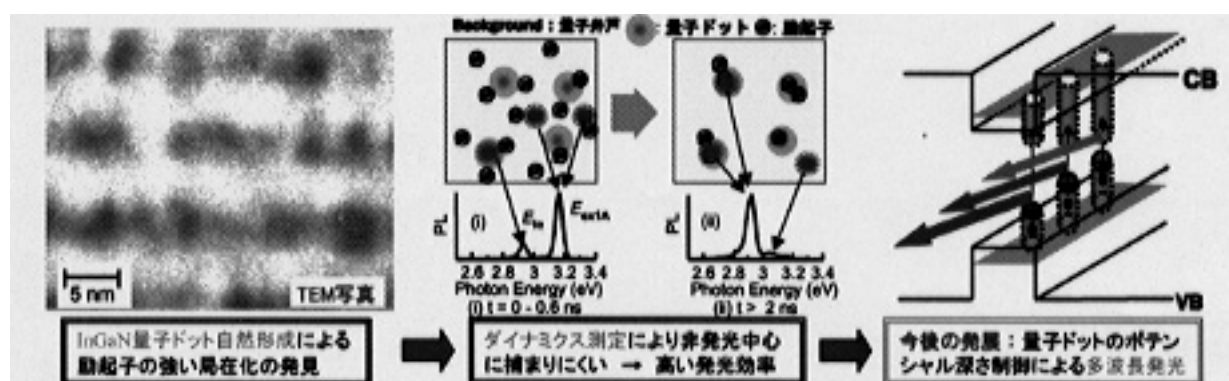


図 InGaN/GaN系における励起子局在効果の発見と新規多波長発光デバイス開発への展開

朴 斗 哲

「Low Temperature Growth of Polycrystalline GaN-based Thin Films  
by RF Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition」

(RFプラズマ化学堆積法による多結晶GaN系薄膜の低温成長に関する研究)

平成12年 3月23日授与

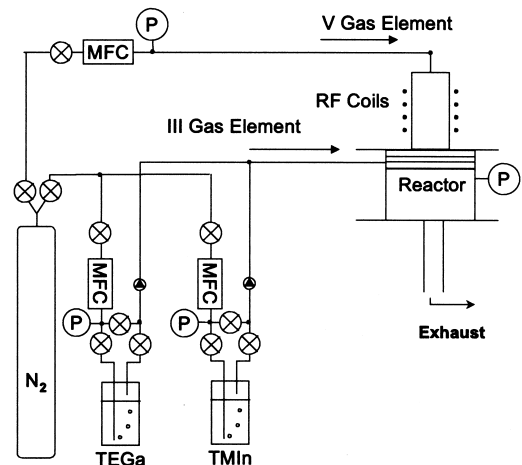
最近になって、GaN系半導体を用いることにより、緑色から紫外にわたる光の短波長領域における半導体発光ダイオードが実用化され、紫外での半導体レーザーも実用のレベルに達している。このような光デバイスの急速な進展を見たのは、GaN系半導体が高い発光効率を示すなど、優れた光機能を持つためである。一方、GaN系半導体は、従来の光デバイスに用いられているGaAsなど他の半導体材料に比べ、きわめて多数の結晶粒界や欠陥を含むにも関わらず、このような高い発光効率を示すという点で、非常に特異な材料であると考えられている。それならば、発光デバイスに用いられている単結晶相に限らず、多数の結晶粒界を持つのも同意である多結晶相においても、GaN系半導体の光機能を得ることができる可能性がある。本研究は、そのような発想に基づき、多結晶相によって基板材料の制約から離れて新しい大面積発光デバイス、光電子集積回路への展開を図ることを意図し、多結晶GaN系半導体の低温成長における成長機構の解明と成長膜の物性評価を行ったものである。

基板として用いたのは、酸化インジウム錫透明導電膜付きガラス基板およびシリコン基板である。前者の場合ガラスの歪点から、後者の場合デバイスが作製されたシリコン上に形成するという観点から、成長温度の上限は650℃とした。このような低温成長法として、RFプラズマ援用気相堆積法が最適なことを提案し、装置の設計、製作、改良を繰り返しながら、基板温度、ガス流量等の成長条件とGaN薄膜の配向性との関連をまず明らかにした。多結晶相では配向性を意図的に制御できることが望ましいが、その一方法として、透明導電膜表面の窒素プラズマ処理を提案し、処理の条件を変化させることによってそれを達成した。また、成長温度より低い温度で成長したGaN緩衝層を用いることによって、配向性の優れたGaN薄膜の形成が可能となった。また、シリコン基板上では、ZnO緩衝層を用いることが高品質の多結晶GaN薄膜作製にとって望ましいことを見だし、バンド端ホトルミネセンスが主要かつ顕著な多結晶GaN薄膜の低温成長に成功した。

さらに、成長速度および成長膜の配向性とプラズマ状態の分析結果とを比較検討して、GaN薄膜の成長機構を提唱した。また、原料である窒素ガスの励起により生じる窒素イオンがGaN薄膜の配向性を損なわせる要因であることがわかったため、成長装置内にイオン除去電極を設けてプラズマ領域に電界を加えることで、その配向性を向上させた。

引き続き、InNおよびInGaN薄膜の成長を行い、GaNからInNにわたる混晶膜の組成制御が同一の基板温度によって可能なこと、Inの付着係数がGaに比べて大きいことを実験的に明確にした。また、Inの導入により配向性が向上することを示し、それがIn-N結合の柔軟性に起因することを提唱した。さらに、InGaN/GaNヘテロ構造の低温成長も実現しえた。

このように、本研究により、多結晶GaN系薄膜の低温成長が実現し、配向性と光学特性の制御によって、光エレクトロニクスにおける新しい発光デバイス実現の可能性を示した。



研究に用いたプラズマ援用気相堆積装置の概要



古川 雄三

## 「InAs量子ドットのサブバンド間遷移によるテラヘルツ電磁波発生に関する研究」

平成12年3月23日授与

近年、電子技術と光技術の境界にあるテラヘルツ(THz)領域は、周波数拡大の目標とされ、さらには通信工学と物性科学・生命科学等の科学技術の融合領域としての多面的な発展も期待されている。本研究では、未開の周波数領域であるTHz領域の電磁波発生に、InAs量子ドットのサブバンド間発光緩和を利用することを提案し、その可能性の検証とデバイス実現のための基礎的知見を得ることを目的に研究を行った。得られた結果は以下通りである。

本研究で用いたInAs自己形成量子ドットの作製には、MBE法とOMVPE法の2つの成長法を利用し、量子ドットの構造を明らかにすることで、成長面内の形状異方性と成長法特有の成長速度異方性が一致することを見出し、成長法による量子ドットの形成過程の差異を明確にした。

サブバンド間発光の応用に不可欠な量子準位について検討を行った。大きな格子歪を有するInAs量子ドットにおける歪分布と量子準位を、3次元有限要素法を用いて解析的に求めるとともに、バンド間発光の成長面内の偏光特性が量子準位の同定に応用し得ることを示した。さらに、サブバンド間発光強度の見積りに有効な手法として、モンテカルロ法を用いた電子分布解析法を確立した。

量子準位の同定結果をもとに量子ドットからのTHz電磁波強度を理論的に見積もり、サブバンド間発光によるTHz電磁波が検出可能な強度であることを明らかにした。さらに、実際にTHz電磁波の観測を行い、理論結果との比較から、サブバンド間遷移に伴うTHz電磁波発生の存在を初めて明らかにし、THz電磁波の発生源としての可能性を示した。

続いて、THz領域の発振器を実現する技術として、カスケード的電子注入法について検討し、サブバンド間発光強度の増大や反転分布の形成に有効であることを示した。さらに、この注入法実現に垂直配列量子ドット構造を適用することを提案し、構造の形成条件と歪エネルギーの関係を実験的理論的に明確にするとともに、THz領域の発振器実現の可能性を明らかにした。

以上のように本論文は、InAs量子ドットのサブバンド間遷移に伴うTHz電磁波発生の存在を実証し、THz領域の発光デバイスの実現、さらにはカスケード的電子注入法によるTHz発振器の実現のための有用な情報を提供したものである。今後、これを利用したTHz領域発光デバイスが実現されれば、新たな科学技術の融合領域であるTHz領域の発展に大きく貢献することが期待される。

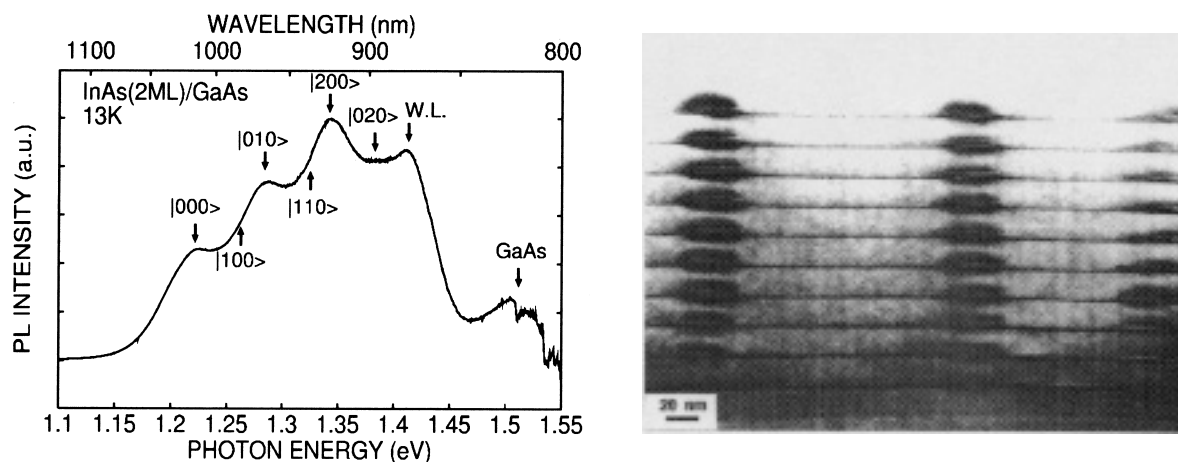


図: InAs量子ドットの量子準位の同定とカスケード的電子注入を可能にする量子ドットの垂直配列構造

小林 圭

## 「Applications of Scanning Probe Methods to Surface Investigations on Ultrathin Organic Films」

(走査型プローブ顕微鏡を用いた有機超薄膜の表面に関する研究)

平成12年3月23日授与

個々の分子の有する光・電子機能を利用したナノスケールの電子素子（分子電子素子）は、次世代のナノスケール電子素子の有力な候補として注目されている。この分子電子素子を実現するためには、有機超薄膜の配向制御技術の確立や、無機材料との界面における電子物性の理解などが必要不可欠である。こうしたナノスケール領域での材料評価においては、分子系を実空間で直接に観察、制御、操作する手段となりうる、走査型トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡（AFM）に代表される走査型プローブ顕微鏡（SPM）技術が有効であり、広く利用されている。しかしながら、STMは、AFMに比べて高分解能での観察が可能なものの、試料が導電性を持つ必要があることから対象とされる分子系が限られている。また、非接触原子間力顕微鏡（NC-AFM）をはじめとし、高分解能化技術が急速に発達してきているAFMに関しても、有機超薄膜に関する研究への応用例はまだ非常に少ない。

本研究では、有機分子系試料の観察に適するSPM技術の開発を行い、またその技術を用いて有機超薄膜の高分解能観察を行い、分子の配向特性や電子物性をナノメートルスケールで評価した。

まず、新しいSPM技術であるNC-AFMに関しては、探針－試料系の運動方程式の数値積分によりカンチレバー探針の共振特性を計算し、試料－探針間距離と周波数シフトとの関係を導いた。さらに、NC-AFMの動作の安定化のため、周波数検出回路を新規に開発した。本研究では、STMとNC-AFMによる実験結果を比較しやすい分子系として、Si(111)-7x7基板表面上のフラーレン分子薄膜およびチオール系分子のAu(111)基板表面上の自己組織化単分子膜（SAMs）を対象とした。

フラーレン分子薄膜については、単分子層以上のフラーレン分子薄膜においてSTMに匹敵する分子分解能を得ており、その観察結果についてNC-AFMの動作メカニズムに関する考察を行った。また、フラーレン薄膜の電子物性に大きな影響を与えるSi(111)表面－フラーレン分子界面における電荷移動に関する知見を得るため、NC-AFMによりKelvin法を用いた局所表面電位測定を試みた。その結果、フラーレン単分子膜領域および多層膜領域間ではそれらの表面電位に差があることを見出し、Siダンダリングボンドからフラーレン単分子膜への電荷移動に関する知見を得た。

次に、チオール系分子のAu(111)基板表面上の自己組織化単分子膜（SAMs）を対象として、SPMを用いて高分解能観察及び局所的な電気的特性の測定を行った。まず、アルカンチオール単分子膜のSTM像観察により、分子が基板にほぼ垂直に配向した最密パッキング構造や、基板にほぼ平行に配向したストライプ構造といった、分子配向特性について詳しく解析を行った。また、両末端にチオール基を有するアルカンジチオールSAMsのSTM像観察を行い、アルカンチオールSAMsのSTM像と異なるストライプ構造を確認し、フーリエ赤外分光反射吸収法（FT-IR-RAS）による分子配向解析も行い、その平行配向構造を明らかにした。

青木学聡

「Molecular Dynamics Simulation of Cluster Ion Impact on Solid Surface」

(クラスターイオンの固体表面衝突過程の分子動力学シミュレーション)

平成12年3月23日授与

イオンビームプロセスは、個々の原子を真空中でイオン化し、電界で加速したのち、固体表面に照射することにより、固体材料および照射原子の配置を制御し、極微構造を形成する技術である。中でも、イオン注入技術はLSIの製造において重要な役割を担うキープロセスの一つであり、現在のLSIの高速化、高集積化を進める原動力となっている。微細な半導体デバイスの作製には浅い領域へのイオン注入は不可欠であり、次世代のLSIプロセスでは50nm以下のp<sup>+</sup>層の形成が必要とされる。また、回路を構成するSiウェハは年々巨大化しており、イオンビームの更なる低エネルギー化、及び大電流化が求められている。一方、LSIプロセス以外の分野では、SiCやダイヤモンド、高温超伝導体を始めとする数多くの新材料の創製と、デバイスへの応用に関する研究が盛んに行われている。これらの新材料に対してもイオンビームプロセスは、薄膜形成やドライエッチングなどの分野において重要な役割を果たしている。今後更に多様化するデバイス・材料に対して、イオンビームプロセスの更なる高機能が必要となる。

本論文では、これらの要求に対する次世代のイオンビームプロセスとして、原子集団であるクラスターをイオンビームとして用いるクラスターイオンビーム法を提案し、クラスターイオンの固体表面への衝突過程を分子動力学法による計算機シミュレーションによる解析を行った。その結果、クラスターイオンの衝突において、単原子(モノマー)イオンとは異なる現象、すなわち非線形現象が生じることを示した。

クラスターイオンの衝突過程は衝突するクラスターのエネルギーおよびクラスター構成原子数(クラスターサイズ)により異なることを示した。ArクラスターのSi(001)表面への衝突では、クラスターサイズが数十から数千、1原子あたりのエネルギーが数10eV/atomから数keV/atomの領域でモノマーイオンと異なる非線形衝突現象が生じることを明らかにした。この領域では、クラスターの注入深さは総加速エネルギーの等しいモノマーに比べて浅く、1原子あたりの加速エネルギーの等しいモノマーに比べて深くなる。また、クラスターの衝突を受けた基板表面にはクレーター状の大規模な損傷領域が形成されることを示し、クレーター形成時に縁の部分の基板原子が表面に対し水平方向に脱離するラテラルスパッタリング現象を明らかにした。

クラスターイオン衝突の工学的応用としてホウ素クラスターの注入シミュレーションを行い、浅いイオン注入の実現を検討した。ホウ素(B)10個からなるB<sub>10</sub>クラスターを総加速エネルギー数keVでSi(001)に衝突させたところ、総加速エネルギーが1/10のBモノマーと等しい注入深さが得られることを示した。一方、B<sub>10</sub>の衝突では、Bモノマーに比べ1原子あたり数倍の量のアモルファス状損傷領域が基板表面付近に集中して形成され、これらの欠陥は低温アニールにより容易に回復し、また増速拡散の原因といわれる点欠陥が生じないことを明らかにした。

クラスターによる反応性スパッタリングについて検討するため、フッ素クラスターの衝突シミュレーションを行った。シリコン表面にフッ素分子30個からなる(F<sub>2</sub>)<sub>30</sub>クラスターを衝突させると、高密度でフッ素分子が入射するため表面に多量の反応前駆体が形成され、揮発性物質であるSiF<sub>4</sub>などの形成が促進され、低損傷で高いスパッタ率が得られることが明らかになった。

これらの研究結果は、新しい材料創製技術として工学的応用が検討されているクラスターイオンビームプロセスの基礎理論を構築するものである。この結果、クラスターイオン注入法により従来の単原子イオンビームプロセスではできなかった、高品質な薄膜形成、表面加工、イオン注入が期待される。

瀬 木 利 夫

「Nanoscale Observation and Analysis of Damage Formation and Annealing Processes in Ion Beam Interactions with Surfaces」

(イオン・固体表面相互作用による損傷・回復過程のナノスケール観察と解析)

平成12年 3 月23日授与

イオンビーム技術は薄膜形成・微細加工・注入など広い分野で活用されている重要なプロセス技術である。今後この技術が高機能薄膜形成やナノスケールデバイス作製に応用されるためには各プロセスにおいて固体表面へのイオン照射効果を明らかにすることが重要である。イオンアシストを用いた薄膜形成においては、イオンが薄膜形成初期に基板に与える欠陥や成膜中に膜に与える損傷などを明らかにすることは高品位な膜を形成するために重要と考えられる。また最近の半導体プロセスにおける注入の低エネルギー化及び極浅接合形成や構造の超微細化に伴い、イオン照射による結晶中の欠陥のみならず、表面欠陥の生成やアニールによる回復過程の解明も半導体デバイス作製に重要となっている。一方、多数の原子の塊であるクラスターを用いるクラスターイオンビームでは、従来の単原子(モノマー)イオンビームでは得られない高密度照射効果や低エネルギー効果により表面平坦化や浅い接合形成及び単結晶薄膜成長が実現されている。

このようなクラスターイオンや単原子イオンと固体表面原子との相互作用を原子・分子レベルで解明するためには1個のイオンが形成する基板上の照射跡を解析する事が必要である。本研究では高温に保った表面の走査型トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscopy, STM)観察が可能で、イオン照射及び高温STM観測を全て超高真空中で行うことができる高温STM装置と結合した超高真空型クラスターイオンビーム照射装置を開発した。本装置では、従来行えなかったイオン衝突による損傷形成とその回復過程のダイナミクスや薄膜形成に対するイオン照射効果等をナノレベルで解析できる。また、これまで明らかにされていなかったクラスターイオン衝突による高密度照射効果や多体衝突効果のメカニズムを解析することが可能である。

本論文では、まずXe単原子イオン衝突によってSi(111)表面に形成される表面欠陥を観察し、600℃以下の低温アニールによる空孔クラスターの形成やその移動・変形のダイナミクスを明らかにした。また、650℃以上の高温アニールでは格子間Si原子と再結合する表面欠陥の回復が主な動的過程であることを明らかにした。次に、クラスターイオン衝突特有の損傷形成メカニズムとそのアニール過程を調べるため、クラスターサイズ1000以上の巨大クラスターイオンとSi表面原子との衝突により形成された欠陥をSTM観察し、単原子イオン衝突では起こり得ない多体衝突効果による巨大なクレーター状の衝突跡が形成されることを示した。また、このようなクレーターは比較的低い温度でのアニールにより回復することや、クラスター特有の照射効果を引き起こす閾クラスターサイズは約10原子/クラスターであることを明らかにした。さらに、薄膜形成におけるイオン照射効果についても詳細に検討し、上記のイオン衝突及びそのアニール過程と密接な関係を持つことを示した。具体的には、単原子イオン照射では照射後のアニールによるベークンシーの挙動が島成長に対して大きな影響を持つが、クラスターイオン照射では照射による表面変位原子数が十分大きいために、アニールしない場合でも島成長に対して大きな影響を持つことを明らかにした。

以上のように本研究では、イオン衝突跡を原子レベルで解析することによって、単原子イオン及びクラスターイオンの固体表面衝突過程、及びイオン照射表面のアニール過程を、ベークンシーの生成とその拡散、及び衝突エネルギーの授受の点から明らかにし、イオンビーム照射による表面プロセスへの応用に向けて、イオン照射とそのアニールによる表面改質のメカニズムを示したものである。これにより、イオン衝突時におけるイオンと基板原子との相互作用とそのアニール過程への理解が大きく前進し、微細加工や表面平坦化及び薄膜形成といった応用面の研究が促進されるものと考えられる。さらに、今後反応系におけるイオン照射効果の解明などにより、イオンを用いた表面プロセスの高効率化が加速することが期待される。

李 原

## 「Multiuser Detection for Co-channel Interference Cancellation」

(同一チャネル干渉波キャンセルのためのマルチユーザ検出)

平成12年3月23日授与

近年、移動体通信は目覚ましい発展を遂げている。利用者数の急激な増加はセルラ方式移動体通信システムに対してより高い加入者容量を要求してきた。従って、制限された周波数資源でより多くのトラヒックを収容できる無線通信技術の研究は重要な研究課題となっている。

従来の時分割多元接続方式(TDMA)では、通信品質を大幅に劣化させる要因となる同一チャネル干渉波はセルラ方式の周波数利用効率を制限する主因の1つである。近年、同一チャネル干渉波が存在する条件でも通信が行える同一チャネル干渉波キャンセルの研究が注目を集めている。しかし、セルラシステムにおいて、現在の干渉キャンセルの性能をより一層向上させるためには、様々な問題を解決すべきことが分かった。

私の博士課程では、所望信号と他のユーザからの干渉信号を同時検出するマルチユーザ検出を用いた同一チャネル干渉波除去方式について研究を行った。私の研究は異なるユーザに対して異なるトレリス符号化変調を用いて干渉除去を行う干渉キャンセルについての理論解析から始まった。理論解析から得られた干渉キャンセルについての理解に基づいて、良い符号化の設計法として一意に復号できる符号化を提案した。一意に復号できる符号化を用いると、マルチユーザ検出の誤りの主因となる問題点を解決できる。

しかし、従来方式では干渉除去能力が限られていた。最も良い符号化を使っても、その特性がチャネル容量より離れている。更に、干渉キャンセルの特性を向上させるために、私は繰り返し干渉キャンセル(IIC)を提案した。IICの送信機は、トレリス符号化とユーザごとに異なるインタリーブから構成される。受信機では、ターボ復号として知られている軟判定を行う繰り返し復号アルゴリズムを用いた。IICによって、干渉キャンセルの誤り率特性が大幅に改善され、チャネル容量に近い特性が得られた。

最後に、セルラシステムにおける干渉キャンセルの応用について検討を行った。従来TDMAの方式では、過剰な同一チャネル干渉を減らすために隣接するセルに異なる周波数帯域を割り当てる必要があった。そのため、周波数再利用効率が大きく制限される。周波数利用効率を向上させるために、セルラ方式のサイトダイバーシティ技術とIICを結合した干渉除去方式について検討を行った。提案干渉キャンセルの有効性を試すために、全てのセルが同じ周波数帯域を用いた簡単な一次元のセルラシステムを使ってコンピュータシミュレーションを行った。その結果より、信頼度の高い通信が可能であることを確認した。

### 三 浦 健 史

## 「Study of Microwave Power Receiving System for Wireless Power Transmission」

(マイクロ波無線電力伝送におけるマイクロ波受電システムに関する研究)

平成12年 3 月23日授与

本論文の目的は、宇宙太陽発電所の重要技術要素であるマイクロ波送電技術の確立とその派生応用技術の開発を目指し、マイクロ波受電システムの高効率化を図ることである。システム構築を通じて効率低下の原因を探り、素子開発及び改良を進めてきた。マイクロ波送電技術をロボットや電気自動車の電力供給に応用するためには、限られた狭い面積で大電力を受電することが可能でなければいけない。これまでに1素子でマイクロ波電力10W以上を受電できる素子は報告されていない。図1に受電素子であるレクテナの構成を示す。本研究では、大電力マイクロ波受電が可能なレクテナを開発するために、1つのアンテナに複数の整流回路を組み合わせた。大電力用レクテナはアンテナ部で受けたマイクロ波電力を電力分配器により8分配し、8つの整流回路で直流電力に変換する。電力分配器は単純に組み合わせると回路寸法が大きくなるため、新たに5層基板からなる両面電力分配器を開発して小型化を図った。これらの設計により、入力電力16Wにおいても65%近いマイクロ波-直流変換効率が得られた。

次に、受電システムにおけるレクテナの接続法が変換効率にどのように影響を与えるか明らかにするために、レクテナ2素子を用いた実験および解析を行った。これまでの報告で、入力電力の異なる素子を直列に接続した際に変換効率が大きく低下する現象が指摘されてきた。本研究では、その原因が出力特性図上の動作点の動きから説明できることを示した。また、レクテナ素子の特性を従来の線形モデルから非線形抵抗モデルに置き換えることにより、出力電力低下率や負荷特性を高精度で予測できることを明らかにした。この成果は、レクテナアレイの最適な接続法の検討や最適負荷抵抗の決定、故障診断に有用なものとなる。

マイクロ波送電システムのシステム効率は主に図2に示す3つの要因で決まる。直流電力からマイクロ波電力への変換効率(DC-RF変換効率)、送電アンテナから受電システム面上へとエネルギービームを集中させる効率(電力収集効率)、マイクロ波電力を直流電力へと変換する効率(RF-DC変換効率)である。電力収集効率はアンテナの大きさ、開口面上の電界分布、送電距離から算出できるものであり、ホーンアンテナを送電アンテナとした場合について定式化を行った。DC-RF変換効率の高いマグネトロンを用いた実験及び電力収集効率とRF-DC変換効率向上に主眼をおいた実験を行い、それぞれの効率を求め、現状における問題点を明らかにした。この結果をもとに、新たなレクテナ素子の開発と接続法に関する考察を進め、システム効率全体を向上させるためのシステム構成の検討を行った。

結論ではこれらの成果をまとめ、マイクロ波無線電力伝送システムの実用化に向けた問題点を効率以外の観点から示した。

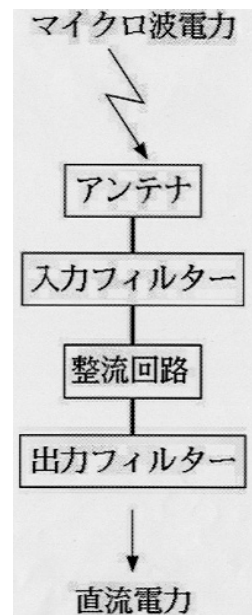


図1 レクテナの構成

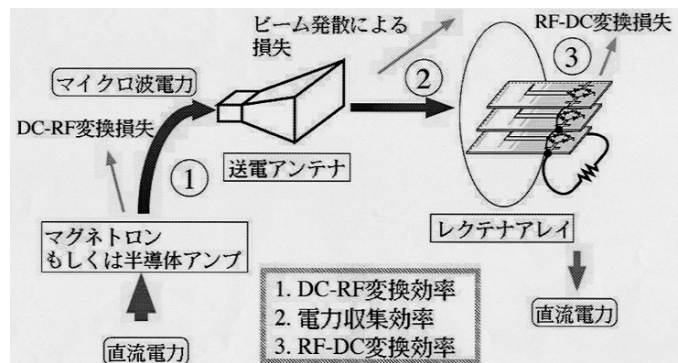


図2 システム効率を決める要因

## 三宅 壮 聡

## 「Computer Simulations of Electrostatic Solitary Waves (ESW)」

(静電孤立波に関する計算機シミュレーション)

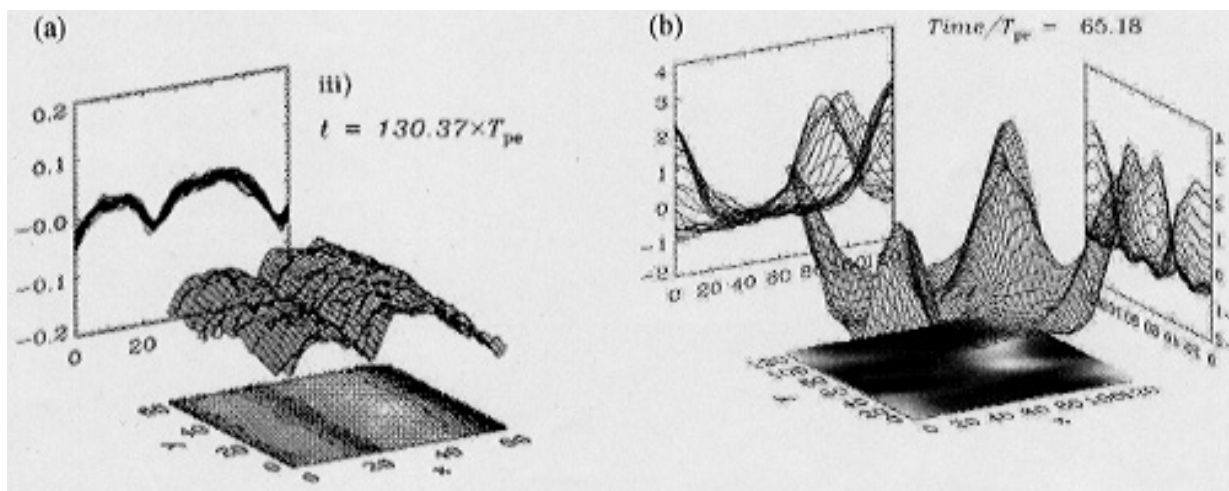
平成12年 3月23日授与

本研究は、GEOTAIL衛星観測によって発見された空間的に孤立したパルス状の波形を持つ静電波(静電孤立波:ESW)の形成メカニズムを、計算機シミュレーションによって明らかにしたものである。静電孤立波は地球磁気圏尾部をはじめ、オーロラ域等様々な領域で確認されている。磁気圏尾部で観測される静電孤立波は外部磁場に垂直方向に一樣な1次元構造を持つものに対し、オーロラ域で観測されるものは孤立した2次元構造を持っている。このような空間構造の違いは1次元シミュレーションでは再現出来ないため、静電孤立波の形成メカニズムをより正確に再現するために2次元シミュレーションを行う必要がある。そのために2次元静電粒子コードを新たに開発、また近年の計算機の並列化に対応して粒子分割法を用いたシミュレーションコードの並列化が行われた。

本研究では、まず1次元の計算機シミュレーションを行い、静電孤立波が外部磁場に平行な電子ビーム不安定非線形発展によって形成されることを明らかにしている。またイオンの状態を様々に変化したシミュレーションを行い、静電孤立波が安定に形成される条件を特定している。

次に2次元シミュレーションの結果、静電孤立波の空間構造は初期電子ビーム不安定性の強度と外部磁場強度及びイオンダイナミクスの影響によって決定されることを明らかにしている。磁気圏尾部で観測される1次元構造の静電孤立波は高温の背景電子に非常に弱い低温の電子ビームが入射する不安定性によって励起される。この弱電子ビームによる不安定性は磁場に平行方向の成長率が高く、1次元的なポテンシャルを励起する。更に電子のサイクロトロン運動による拡散によって磁場に垂直方向のポテンシャルエネルギーが熱エネルギーに変換され、1次元ポテンシャル[図(a)]が形成されることを明らかにした。

一方、オーロラ域で観測される2次元構造の静電孤立波は二流体不安定性に代表される、非常に強い電子ビーム不安定性によって励起される。この二流体不安定性は磁場に平行方向だけでなく、斜め方向の成長率も高く、2次元的なポテンシャルが励起される。これらのポテンシャルは上記の電子ダイナミクスにより、1次元ポテンシャルを形成しようとする。しかしポテンシャルのエネルギーが強いため、イオンの影響を強く受けて磁場に垂直方向に伝搬する低域混成波とカップリングを起こす。その結果ポテンシャルは磁場に垂直方向に分割され、孤立した2次元構造[図(b)]になることを示し、計算機シミュレーションによって静電孤立波の2次元構造の形成過程を明らかにした。



計算機シミュレーションによって再現された静電孤立波のポテンシャル構造 (a): 1次元静電孤立波, (b): 2次元静電孤立波

北 垣 次 郎

## 「Design Study of the Staggered Array Undulator for Free Electron Lasers」

(自由電子レーザ用スタガードアレイ・アンジュレータの設計に関する研究)

平成12年3月23日授与

自由電子レーザ (Free Electron Laser ; FEL) とは、アンジュレータと呼ばれる装置により生成された周期的な磁場中に光速近くまで加速された電子ビームを入射して蛇行させることにより発生する放射光と電子ビームとを共鳴的に相互作用させることにより得られるコヒーレント光のことです。ここで自由電子とは、特定のエネルギー準位に束縛されていない電子ビームを構成する電子のことを指しています。

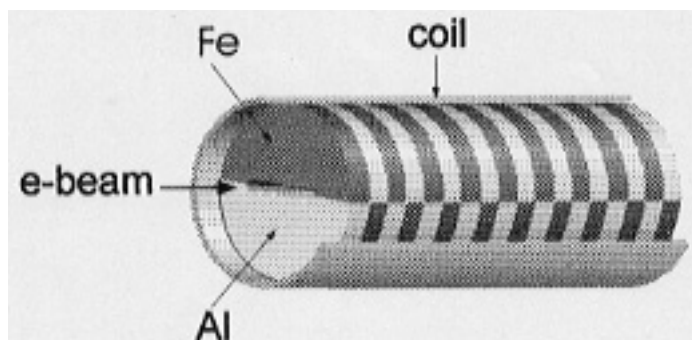
このFELの発振波長は周期磁場の強度、周期長、電子ビームのエネルギーに依存するため、原理的にはマイクロ波領域からX線まで連続的に変化させることができ、一つの装置で異なる波長のレーザを発振させることが可能であるという特徴を持っています。またFELは電子ビームのエネルギーを直接電磁波のエネルギーに変換するため使用済みの電子ビームのエネルギー回収、再利用が容易であるため高効率化が可能で、さらにレーザ媒質がないため絶縁破壊が起こらず高いピークパワーが得られます。

世界初のFEL発振が達成されて約20年たった現在では、アメリカ、ヨーロッパ、日本、韓国などでFEL施設が建設され、リニアック、電子蓄積リングを用いた多くのFEL発振が報告されており、生医学、生物物理、物性研究などに利用されています。

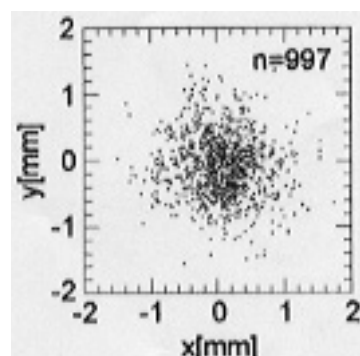
FELをより普及させるためには、安定、安価、小型であることが必要ですが、一台の装置でカバーできる波長領域を拡大することも重要です。この波長領域の拡大は周期的磁場の強度を変えることで可能ですが、従来の永久磁石を用いたアンジュレータでは機械的に磁石の配置を変更する必要があるため波長の可変性に制約があります。そこで、ソレノイドコイル中に周期的に配置された鉄片によって周期的磁場を生成する装置であるスタガードアレイ・アンジュレータを用いて、コイル電流の制御により磁場強度を制御するという手法が考えられました。このスタガードアレイ・アンジュレータは、コイル内に鉄片を含むためその磁化の非線形性を考慮した解析をする必要があります。本研究では新たに開発したシミュレーションコードを用いてその特性を解析し装置全体の最適化を行いました。このコードの特徴は、3次元の計算が出来、非線形性を考慮した解析が行えるという点にあります。

装置の高効率化のために最適化された磁気帰還回路を装置外部に取り付けることで、電子ビームの閉じこめ性能を15%向上させ、自発放射光強度に関しても50%の向上の可能性が示されました。

また、さらに装置を構成する鉄片の形状を最適化する事で、電子ビームの閉じこめ性能が向上し、装置に入射する電子の99%以上が失われずに装置内に閉じこめられ、それに伴って自発放射光の強度もさらに10%の向上が見込まれるという結果が得られました。



スタガードアレイ・アンジュレータの概略図



入射電子数が1000個の時の装置出口での電子ビーム断面図



Wu Wei

「A Study on Modeling Plant Operator's Cognitive Behaviors at Man-Machine Interface and Its Experimental Validation」

(マン・マシン・インタフェースにおけるプラント運転員の認知行動のモデル化とその実験的検証に関する研究)

平成12年3月23日授与

近年の計算機自動化技術の発展により、プラントシステムをマン・マシン・システム全体として見ると、その中での人間の役割は、機械を手動制御する操作者から、自動化された機械システムの動作状態を監視し、機械システムの自動機能が故障したときに手でバックアップするシステムの監視者へと変貌してきている。積極的な自動化技術の導入は、運転員の負担を減少させると共に、確かに機械システムの故障そのものは著しく減少したが、最近は人的要因によるトラブルが顕著になってきた。自動化の拡大によって、システムが大規模になり複雑化しすぎると、人間の理解の範囲を超え、システムがブラックボックス化して、システムへの過度の依存が緊急事態への対処能力をかえって低下させる。そのため、TMI-2事故やチェルノブイル事故などのように、人的要因による大事故の発生が懸念されている。マン・マシン・システム全体としての安全性・信頼性を向上させるには、高度な技術システムを運用管理する人間側への対策、即ち人的要因対策の一層の向上が望まれている。

本研究では、原子力プラントシステムを対象に、その人的要因に着目し、マン・マシン・システム全体の安全性・信頼性を向上させるための基礎研究を行った。マン・マシン・システムの中の要素として、マン・マシン・インタフェースにおける運転員の認知行動をモデル化（ヒューマンモデル化）し、人間を含むマン・マシン・システム全体の挙動（人間機械相互作用）を計算機によりシミュレーションを行う手法を開発し、その実験的検証を行った。具体的には、原子力プラントに異常が発生した場合の運転員の認知行動のモデル（図1参照）を構築し、計算機によるシミュレーション実験と実験室規模の被験者実験との対比により、そのモデルの妥当性を検証するとともに、その手法をもとに、原子力プラントの確率論的安全評価法で用いられる人間信頼性解析法に必要な時間—認知信頼性曲線を数値シミュレーションで導出して、被験者実験で得られたデータと比較することによって、人間の振るまいの確率的変動の予測にも、提案するシミュレーション手法が適用できることを示した。（図2参照）

以上の研究により、従来、莫大な経費と時間を要する実験で導出されているHCR曲線を、安価で短時間の数値シミュレーション実験により導出できる見通しを得るとともに、プラント中央制御室のマンマシンインタフェースの新しい設計方法の展開への基盤を確立した。

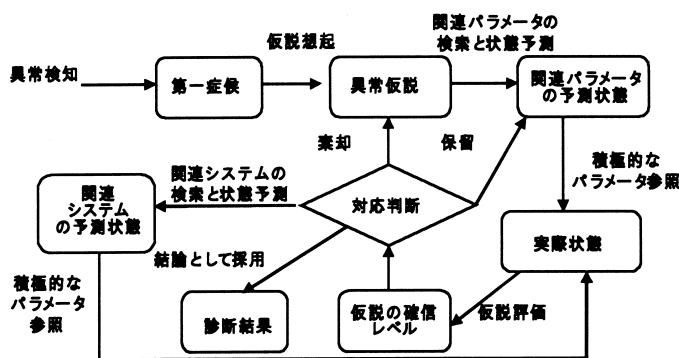


図1 運転員の異常診断過程のモデル化

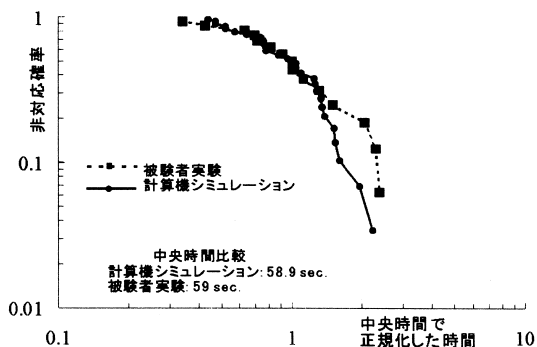


図2 時間認知信頼性曲線の導出とモデルの検証

## 石井 裕剛

### 「人工現実感技術を用いたプラント運転・保守の訓練システムに関する研究」

平成12年3月23日授与

本論文では、安全・安価にプラントの運転や機器の保守作業を体験できる新しい訓練環境である、人工現実感技術を用いた訓練システムの構築法に関する研究を行った。

まず、人工現実感技術を用いた機器保守の訓練環境として、原子力発電プラントの構成機器の1つであるスイング式逆止弁の分解作業を対象に訓練システムを開発した。本研究では、訓練システムで取り扱える作業の範囲を、作業手順書等に示された正しい手順に限定せず、間違っただけでも作業を行うことを可能にすることにより、訓練生が自らの判断で、自由に作業を行える訓練環境の構築を試みた。しかし、訓練生の作業の自由度を上げるに従って、仮想空間内の機器や工具の動きの管理が複雑になる。そこで、本研究では、機器保守の作業中の機器や工具の動きを、物体の状態が順次変化していく離散並行的状態変化と捉え、ペトリネットを用いてモデル化する新たな手法を開発し、機器保守の訓練環境を構築する際に適用した。さらに、訓練生が機器保守の作業を行う際の教示機能として、仮想空間内で機器保守の作業を自動的に実演する自動実演機能のための次手順の評価アルゴリズムを考案し、機器保守の訓練システムに実装した。以上の研究を通じて、作業の自由度が非常に高い機器保守の訓練環境を構築するための新たな手法を提案し、実際に訓練環境を構築することによって、その有効性を確認すると共に、人工現実感技術を用いた訓練システムの有用性を確認し、同時に問題点の抽出を行った。

次に、上記の機器保守の訓練システムを開発する際に抽出した「人工現実感技術を用いた機器保守の訓練環境の構築には、そのプログラミングに専門的な知識を要し、非常に多くの労力が必要になる」というソフトウェア作成上の問題を解決するために、機器保守の訓練環境の構築支援システムを開発した。まず始めに、構築支援システムのユーザとして、プログラミングについては専門知識を持たないインストラクタを仮定して、そのための構築支援システムの設計と開発を行った。具体的には、以下の3つの特徴を持つ構築支援システムの開発を目指して研究を進めた。(1) プログラミングを全く行わなくても自由に機器保守の訓練環境を構築できる。(2) 計算機や数学等に関する高度な知識を持たない人でも容易に訓練環境を構築できる。(3) 訓練環境を構築する際に必要な情報は全てGraphical User Interfaceを介して短時間で入力できる。その結果、プログラミングによる従来の訓練環境の構築法に比べ、非常に短時間で機器保守の訓練環境を構築できる支援システムの開発に成功した。

一方、これまでに開発された、人工現実感技術を用いた原子力発電プラントの運転員を教育する訓練システムは、仮想空間内にプラントの制御室を構築し、その中で訓練生自らが制御盤を操作することによって、訓練を行う方式のものが大半であった。そこで、本研究では、この訓練方式をさらに発展させ、プラント監視制御行動中の運転員の行動を人工現実感技術を用いて総合的に情報可視化する手法を開発し、プラント運転の教育訓練に応用する研究を行った。具体的には、プラント運転員の行動と思考過程を計算機上で模擬できるヒューマンモデルを用いることにより、仮想空間内に自らの判断でプラントの異常診断と対応操作を行う仮想運転員を構築し、訓練生がこの仮想運転員の運転作業の様子を観察することにより、プラント運転に必要な知識と技能を修得する、新しい訓練方式の体験型教育システムを開発した。具体的には、(1) 訓練シミュレーションを実行する際の計算負荷を分散させるために、教育システムを分散型シミュレーションシステムとして設計し、(2) 仮想空間を描画する際に、訓練生の視点と描画対象との距離に応じて描く詳細度を変化させるLevel Of Detail (LOD) の手法を採用した。また、(3) 3次元モーションキャプチャシステムを用いて人間の動作を計測し、仮想運転員の動作データベースを作成し、必要に応じてそれらを変形することにより、歩行動作と、機器を操作する動作を自由に合成できる人体モーションの合成技術を開発した。

以上、本研究では、人工現実感技術を用いた機器保守の訓練環境及び、プラント運転の訓練環境を構築するための新たな手法を提案し、具体的な訓練課題に対する訓練環境の構築、及び、訓練環境の構築支援システムの開発を通して、その有効性を確認した。

宮 下 裕 章

「Study on Analytical Modeling of Antenna Arrays for  
Implementation of Efficient Design Procedure」

(能率的設計法確立のためのアレーアンテナの解析的  
モデル化に関する研究)

平成12年 5 月23日授与

複数の素子アンテナを同時に励振して様々な形のビームを形成するアンテナをアレーアンテナと呼び、レーダー、通信等の用途に広く供されている。アレーアンテナの設計段階は、素子アンテナ設計、給電回路設計、相互結合・周囲干渉の影響解析に分類される。一般的にアレーアンテナには膨大なパラメータがあり、各設計段階において、アンテナ動作特性のパラメータ依存性を把握する必要がある。本論文では、解析的な手法を用いて支配的パラメータを簡潔な関係式で抽出し、見通しの良い設計法の確立を試みている。扱う対象は、筆者が三菱電機および京都大学情報学研究科博士後期課程（社会人コース）において研究を行った現実のハードウェアである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

まず、新形式のコリニアアレーアンテナである「電磁結合同軸ダイポールアレーアンテナ」を提案した。これは、非接触給電を用いるというアイデアに基づいた従来形式より製作性に優れたアンテナで、移動通信用基地局や境界層レーダーへの適用が期待できる。複素関数論を用いた積分方程式解法を適用し、素子アンテナの動作特性を記述する簡潔な解析に閉じた近似式を導出し、設計法を確立している。本研究は素子アンテナ設計の規範例と位置づけられる。

次いでモノパルスパターンが形成可能な新形式の高効率平面アンテナである「ラジアルラインモノパルス平面アンテナ」を提案した。これは、平行平板導波管（ラジアルライン）を4点給電するというアイデアに基づき、代表的な目標追尾法であるモノパルス追尾に供される低姿勢平面アンテナを実現したものである。本アンテナは、移動体衛星通信等への用途に適している。モード展開法を用いて、アンテナ給電部の動作特性の簡潔な表現式を得るとともに、アンテナ最大利得を実現する設計法を確立している。本研究は給電回路設計の規範例と位置づけられる。

さらにアレーアンテナ面間結合解析法、および任意形状アンテナ結合への拡張を行った。これは、周囲構造からの散乱波の影響を含めてアンテナ相互干渉を高速に計算する手法である。波動方程式の高周波漸近解法である幾何光学的回折理論を用いて散乱波を表現することにより、簡潔なアンテナ相互結合表現式を得ている。本解析法を用いれば大素子数（数千素子以上）からなるフェーズドアレーアンテナの相互結合も実時間で計算される。本理論は、一次近似の範囲で任意形状のアンテナ間結合に拡張され、アンテナ相互結合表現式は二つのアンテナが互いを見込む方向の放射パターン積に空間伝達関数等に乗じたものと解釈される。本研究は相互結合・周囲干渉の影響解析と位置づけられる。

以上の成果により、アレーアンテナ開発の各段階に見通しの良い設計法が得られ、本論文の目標は達成されている。近年のアンテナ開発は実験や数値計算によるカットアンドトライで行われることが多いが、元来アンテナの動作特性はマクスウェル方程式から数学的に予言でき、有効な設計法は解の物理解釈を通じて確立されると考えられる。本論文はそれを明快に実証したものである。

## 【論文博士一覧】

中島紀伊知	「X線回折によるIII-V族混晶半導体超格子構造の構造評価に関する研究」	平成11年11月24日
松尾 二郎	「高活性ビームによる表面反応ダイナミクスの研究」	平成11年11月24日
岡田 浩之	「Study of Fast Ion Production and Confinement in Ion Cyclotron Range of Frequency Heating of Heliotron E」 (ヘリオトロンE装置のイオンサイクロトロン加熱による高速イオンの生成と閉じ込めに関する研究)	平成11年11月24日
福島 和則	「反応性クラスタイオンビーム法による酸化チタン薄膜作製と応用に関する研究」	平成12年 1 月24日
田野 哲	「移動通信における高速等化アルゴリズムに関する研究」	平成12年 1 月24日
前原 直	「トカマク核融合装置における低域混成波電流駆動システムに関する研究」	平成12年 1 月24日
船戸 充	「Control of Interface Properties in ZnSe-GaAs Heterovalent Hetero-structures Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy」 (有機金属気相成長によるZnSe-GaAs価電子不整合ヘテロ構造の界面物性制御)	平成12年 3 月23日
太田 宏	「高品質高信頼度ATM網構成技術に関する研究」	平成12年 3 月23日
梅比良正弘	「TDMA衛星通信におけるバースト変復調技術の研究」	平成12年 3 月23日
村田 英一	「Nonlinear Co-channel Interference Cancellation Technique for Digital Mobile Communications」 (デジタル移動通信のための非線形同一チャネル干渉波キャンセル技術)	平成12年 3 月23日
長谷川義孝	「二自由度動揺方程式系における引力圏構造のハミルトニアン運動に基づく考察」	平成12年 5 月23日
七原 俊也	「数理計画法を用いた電力システムの需給計画に関する研究」	平成12年 5 月23日
富山 勝幸	「系統解析のための負荷モデルに関する研究」	平成12年 5 月23日
米谷 晴之	「回転機における大規模電磁界解析技術の実用化研究」	平成12年 5 月23日

---

久良木 億	「シンクロトロン放射光励起による窒化シリコン薄膜CVDの研究」	平成12年 5 月23日
奥 哲	「III-V族半導体の反応性ビームエッチング技術の開発と光デバイスへの応用に関する研究」	平成12年 7 月24日
向井 剛輝	「Growth and Characterization of Self-Assembled InGaAs/GaAs Quantum Dots and Their Application to Lasers」 (InGaAs/GaAs 自己形成量子ドットの成長と評価およびレーザーへの応用)	平成12年 9 月25日