

cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.2

DECEMBER 1998

[第2号]

.....
巻頭言

名誉教授 高木俊宜

大学の研究・動向

電力システム分野・プラズマエネルギー研究分野

.....
電気教室創設百周年記念講演

関西電力 宮本 一

NTT 浅田和男

NEC 石黒辰雄

新設研究室紹介

シリーズ：研究内容紹介

博士論文概要

学生の声

教室通信

cue : きっかけ、合図、手掛かり、という意味
の他、研究の「究」(きわめる)を意味す
る。さらに KUEE (Kyoto University
Electrical Engineering)に通じる。

巻頭言**生産高（GDP）評価から豊かさ（GHP）評価へ**

広島工業大学 総長 高木 俊 宜



科学技術の目覚ましい発展によって今日の高度経済活動、生活水準を得ることができた反面、人類の消費するエネルギーの総量が地球の自浄能力を超えてしまった。もはや地球は「母なる大地」ではなく「宇宙を漂う地球船」となり、間近に迫った21世紀へこの限られた空間、限られた資源をいかにして引き継いでゆくか科学技術の影の部分と同じ科学技術の力で克服してゆく必要がある。

今世紀最も注目されるものとして、基礎科学では相対性理論、量子力学、科学技術ではトランジスタを原点とした半導体工学があり、医学・バイオ分野では遺伝子工学とその制御を行うところまで到達した。原子・分子オーダーでの制御、ナノテクノロジーなど、今世紀の科学技術の特長は細分化、分析にあるともいえよう。しかし、取り扱う手法は± mmというように誤差範囲をつけて部品を結合させるいわばハードウェア的整合である。

一方、「生物」と人間の作る「物」との機能の決定的な相違の一つに、「外部刺激や時間に対応して積極的に自ら変わる動的機能」がある。寿命予知・予告機能、自己診断機能、自己分析機能、自己修復機能、自浄機能、学習機能、増殖機能などがそれである。

体の異常や外部環境の変化に気付いて適切な処理を探る、あるいは「もう駄目だ」という判断をし寿命を予告する。我々の作っている「物」にこのような機能を持たせられないか。そのためには、自らが検知し（センサ機能）、自らが判断し自らが結論を出して（プロセッサ機能）、自ら指令したり行動を起こす機能（エフェクタあるいはアクチュエタ機能）を併せ有する構造物（スマートストラクチャー）あるいはそれらの機能を自分自身が併せ有する材料（インテリジェント材料）を開発することが必要である。このようなアプローチは現在緒についたばかりである。

しかも生命体では、顔、形は千差万別であり五臓六腑は各人それぞれ寸法、性能が細かなところでは異なっていながら生命体という1つのシステムを形成している。即ちソフトウェア的整合である。

ハードウェア主導の工業生産時代からソフトウェア主体の情報社会主導型の社会へと急激な変化を求

められている今日、分野的に細分化に細分化を重ね結果を得てきた今世紀に対し、学際領域の重要性が強調されている。学際領域の発展によってソフトウェア的な新局面は開かれるであろうが、これも細分化と同じように分野の増大であることは否定できない。それらの成果が得られた後、21世紀の前半は領域の統合化に向かって進まざるを得ない。その後再び新しい概念にもとづく細分化が起こるのである。

今世紀科学の重要な発展に「場の理論」「量子力学の世界」がある。次世代は「ソフトサイドでの場の理論」が注目されるであろう。フィーリングの理論の確立、対人関係での「気」の解明、味覚でいえば「うまみ」の「み」、デジタルでもなくアナログでもないデジアナの世界、21世紀にやりたいことは後を絶たない。

今まで、我が国は、まず、シェア第一主義で戦後の復興を果たし、続いて適正利潤重視型に移って成熟期を迎えた。それに続く爛熟期（やり方を誤れば衰退期）をどう乗り切るか。生産高 GDP-Gross Domestic Products-評価時代から豊かさ GHP-Gross Happiness Products-評価時代になってゆくものと思われる。

大学の研究・動向

電力システムの構築・運用・解析に関わる非線形現象の解明

電気工学専攻電気システム論講座電力システム分野
上 田 皖 亮
ueda@kuee.kyoto-u.ac.jp

1 はじめに

電気電子工学の発展過程において種々の非線形現象が利用されて来た。例えば同期現象が挙げられる；多くの発電機が同じ速度で運転されることや、送受信器の搬送波が同一周波数の発振を持続することである。一方多くの非線形現象が異常現象として回避されて来たのも周知の事実である。例えば、分数調波成分の出現が送電系統における電力伝送を妨げたり、鉄心の磁気飽和特性に基因する鉄共振現象が変圧器の焼損事故をもたらしたことなどである。

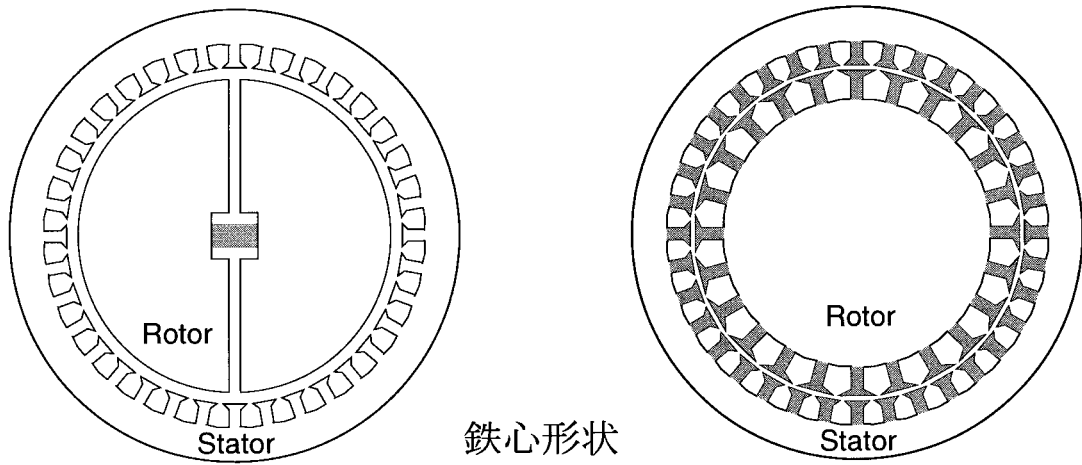
一般に非線形現象は、それらの数式モデルを構築することが容易でないのみならず、数式モデルを解くことが困難ないしは不可能なため、現象の発生メカニズムや性質の系統的な解明が為されているとは言い難い。そのため非線形現象を積極的に利用する場合、あるいは回避する場合においても、経験的・部分的な現象の把握によって個別対処的に目的が達成されているのが実状である。我々の研究室では、電気電子工学に関連するいくつかの代表的な非線形現象の解明とそれらの応用(可能性)について研究を行っている。以下に、数例を挙げ紹介する。

2 同期発電機の実験特性と電力システムへの応用

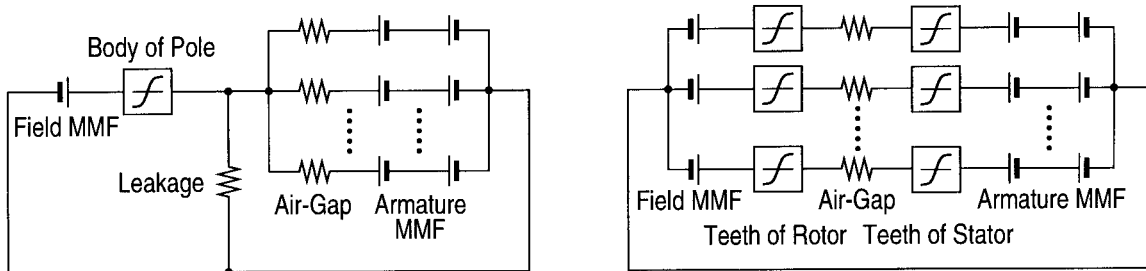
同期発電機は電力系統の要であり、その特性を精密に把握することは電力システムを効率よく安定に運転するために不可欠である。同期機の構造と特性の関係を明らかにして、それを表現する精密なモデルを確立すること、さらにそれを応用して電力システムの性能を向上させる研究を進めている。現在サーチコイルによって内部磁束が観測できる実験用同期発電機を5台、電力輸送の実験を行うための模擬送電線実験設備および負荷装置を保有し、これらを用いた実験によって、理論モデルの検証を行いながら、同期機モデルの精密化の検討を行っている。

同期機の磁気飽和を表現するモデル 同期機の表現モデルとして従来からパークの表現が用いられている。この表現は電流と磁束が比例関係(線形関係)にあるとして導かれている。ところが実際には鉄心の磁気飽和のために、厳密な比例関係は成立していない。一部に飽和を考慮した表現も用いられているが、運転条件によって飽和部位が時々刻々と変化する様子を正しく表現することは出来なかった。すなわち、磁気飽和状態が界磁電流、電機子電圧、両者の合成値の何れにより定まるのか明確な説明のない状況である。

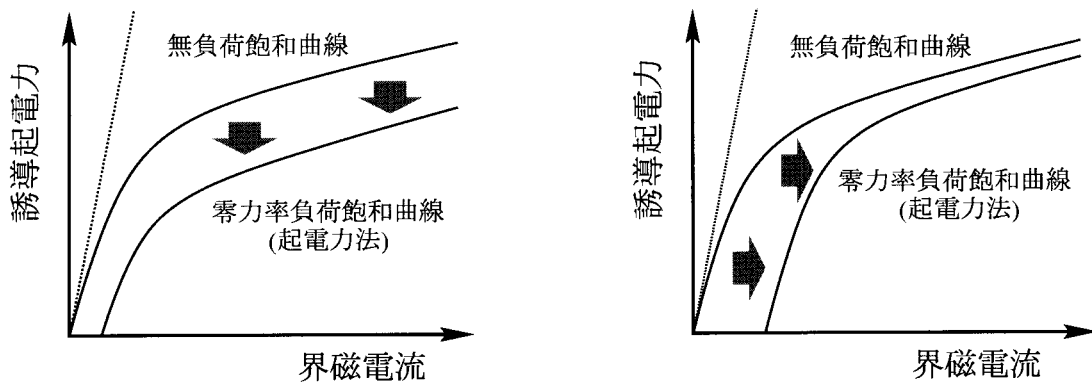
このため、同期機の鉄心形状および巻線構造から機内磁束を表す磁気回路の構築を試みる。ここで鉄心の飽和を磁気回路中の非線形抵抗で表現し、内部磁束の分布を計算するモデルを導く(図1)。これにより端子電圧・電流を計算する表現モデルが導出される。これらにより、界磁電流・電機子電流から電機子磁束・界磁磁束を正しく算定できる表現を得ている^[1]。さらに、鉄心中の飽和部位の場所によって同期機の特性に違いがみられることを明らかにしている。この結果、ある条件を満たす同期機では界磁電流算定法として起磁力法が厳密に成立するものの、一般の同期機の飽和特性は起磁力法で説明し尽くせるものではなく、かなり複雑なことが判明した。



鉄心形状



磁気回路モデル



飽和特性

図1 磁気回路の構成

こうした結果に電力会社の運用者・電機メーカーの設計者も関心を示しており、系統解析技術や同期機の制御技術の向上につながると期待される。今後、計算機による磁界解析手法と合せ、より精密な表現モデルを作るとともに、それらを統一的に表現できる「モデルの標準形式」の確立をめざしている。

電力系統の高調波を抑制する同期機 近年、パワーエレクトロニクススの発達にともない、電力系統に流入する高調波電流が増加している。高調波電流は系統電圧に歪を生じさせ、力率改善コンデンサ等の電力機器に異常音を生じさせたり、焼損事故を引き起こしている。そこで電力系統に不可欠な同期発電機を改良することにより、系統の高調波対策に役立てる方法を研究している。通常、同期機は回転子巻線を直流で励磁しているが、ここでは第6高調波電流で励磁することにより固定子巻線に第5あるいは第7高調波が発生することを利用する。現在までに特殊構造の同期発電機とその制御装置を試作し、実験を進めている。同期発電機は回転子に3相あるいは2相の巻線を持ち、巻線型誘導機あるいは可変速同期機と同様な構造になっている。制御装置は、系統内に設定した検出点の高調波電流を監視しており、観測された高調波電流ベクトルを、同期機の回転子座標上に射影して、励磁電流を算出している。実験室内の模擬送電線にこれらの装置を接続し、高調波負荷から発生した高調波電流が吸収できることを確認した^[2]。

こうした実験室レベルでの成功を踏まえて、現在では同期機を実電力系統に組み込んで実験が出来るように、電力会社・電機メーカーと研究協力体制をしいて検討を重ねている。100kVA クラスの実用化試作機の製作を進めており、配電変電所に仮設して配電線に接続し、高調波を吸収する実験を実施する予定である。

3 パワーエレクトロニクス回路の構成と動作特性に関する研究

パワーエレクトロニクス技術は、産業界では広く使用され基盤技術となっていることは言うまでもない。近年では、大容量・高耐圧の電力用スイッチング素子が開発され、電力系統の種々の制御にパワーエレクトロニクスの技術が適用され始めている。ところが、パワーエレクトロニクス技術というのは、スイッチング動作を基本とする電力回路であり、その動作は不連続に回路を切換えて状態空間を接合することによる、平均的出力の調整を行う技術と言える。この様なスイッチング素子を含むシステムでは、異なる物理法則に基づく時定数の異なる現象が共存し、かつシステムとして必ずしもキルヒホッフの回路法則に従わない。このようなシステムはハイブリッドシステムと呼ばれている^[3]。すなわち、パワーエレクトロニクス回路のスイッチング制御技術を、従来のアナログ回路の連続系の理論で検討することは無理があり、回路設計、システム設計、さらには回路の動作特性の把握には新たな理論構成の枠組みが必要となっている。この基本となるのはスイッチング回路理論や非線形回路理論である。

この様なスイッチング系の理論および数値解析においては、不連続性に伴う解析上の問題点を避けるために種々の工夫が必要である。従来のパワーエレクトロニクス回路に関して主として用いられている解析手法には、スイッチング周期間において平均値によってシステムを線形化して解析する方法や、周期的に回路構成が変化することを考慮したサンプルデータによる解析法がある。特に、状態変数の平均による方法ではスイッチングサイクル間の情報は一切失われ、またモデルからもスイッチング周波数以上の早い現象の情報が消えてしまう。これを、回路方程式からなる状態方程式に基づいて解析を行う際には、理想的なスイッチを仮定するとシステムの右辺が不連続となり、容易に解析を行うことができない。その結果、スイッチ要素が増えたパワーエレクトロニクス回路ではその動作の安定性などを理論的に検証することが難しくなっているのが現状である。また、現実のシステムの構成に際してもこの様な点まで考慮した動的な回路構成論が確立されていない。この様な理由で、パワー

エレクトロニクス技術が回路理論の域にまで達しない状態に留まっていると言っても過言ではない。以上のような状況を考えると、パワーエレクトロニクス回路の解析、およびそのスイッチングの最適化法の確立のためには、システムの動的シンセシスを考慮した理論的取り組みおよびその実システムへの適用が不可欠となっている^[4]。

従来、経験則に従って発展し、熟成期に入ったパワーエレクトロニクス技術を、システム技術としてさらに発展させるためには、ハイブリッドシステムとしての特性を考慮した理論を確立することが不可欠である。同時に、現実の回路に現れるスイッチング現象のダイナミクスを再度見直していく地道な作業が必要となる。本研究では、この様な点に着目し、実際のパワーエレクトロニクス回路のモデルの再検討を始めている。その結果、新たなモデルに基づくパワーエレクトロニクス回路の動作に関して解析的、実験的検討を進め、スイッチングによる非線形性まで考慮した解析的議論を可能にする方向性を得た。最近始めた研究でもあり、その成果はまだまだ未熟な段階ではあるが、今後の一連の研究を通じてパワーエレクトロニクス技術の一層の発展に寄与して行くことを目指している。

4 電気電子回路・システムにおける非線形現象の解明

回路・システムには種々の非線形現象が生じるが、それらの工学的有意性はさておいて、現象そのものの発生機構とそれらの基本的な性質を把握するために行っている研究を紹介する。

カオス現象の発見とカオス理論創造への貢献 1960年代初頭に行っていた、周期信号を注入した自励振動回路に生じる周波数引込現象の研究および鉄共振回路に生じる高調波振動の研究において、アナログ計算機実験により観測していた不規則振動が、二次元非自励方程式系の大域構造に由来するカオス現象の最古の例として世界的に認知されるに至った(図2)。ささやかではあるが、これらは本電気工学教室発信の一成果と自負している^[5]。

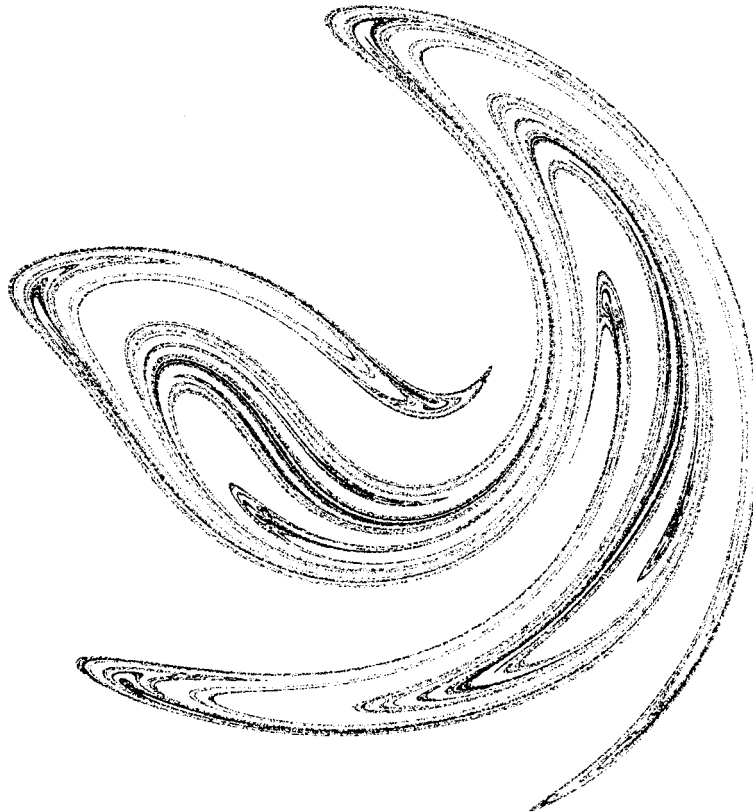


図2 カオスアトラクタ

これにより第三の平衡状態が物理的に存在することが見いだされたが、他の2つ、すなわち平衡点・周期解と比べてその複雑さが注目され、これを情報系に応用することにより複雑系と呼ばれる学問分野が形成されつつある。そこでは物質自身ではなく、その上に仮想的に出現する情報源としての性質が統一的に扱われ、革新的な考え方をもたらすものと期待される。

電力系統の過渡安定問題・電圧不安定現象 電力系統は、発電量と消費量が常時動的平衡状態を保つことによって動作・機能している。したがって、安定状態を維持するためには電力系統の動作特性を熟知しておくことが望ましい。ところが、簡単な構成をした電力系統でも、その数理モデルは連立非線形方程式となり、解の全貌を把握することは困難である。本研究課題では高次元非線形方程式の解の大域構造を解明することが問題解決の核心である。電力系統の過渡安定問題では安定な運転状態を表わすアトラクタの引力圏およびその境界の大域構造(フラクタル状引力圏境)に関連する研究を行っている。また、電圧崩壊現象は引力圏境とカオスアトラクタの大域分岐現象(クライシス現象)によって生じることを系統的に解明しつつある^[6]。

種々の非線形現象(時間遅れ系・生体系)の解明 我々が長年に亘って蓄積してきた経験と数理解析的手法を駆使して、時間遅れをもつ非線形系に生じるアトラクタ・引力圏およびそれらの分岐現象を系統的に解明しつつある。また、心臓の拍動リズムに見られる不規則性の解明およびそれらの数理モデルについても研究を行っている。

参考文献

- [1]高瀬, 上田, 飽和を有する同期機の空隙磁束モデル, 電学論誌D, Vol.116-D, No.8 (1996) 862-867.
- [2]F. Takase, M. Tominaga, Y. Ueda, T. Temma, T. Genji, K. Oku, T. Hira, and A. Ashizawa, Harmonic Compensation Using a Synchronous Machine with Resonant Field Circuits, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.12, No.2, June (1997).
- [3]黒江, パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術_現状と課題_, 電学論誌D, Vol.118-D, No.7/8 (1998) 822-827.
- [4]引原, パワーエレクトロニクスと非線形力学の接点, システム/制御/情報, Vol.41, No.7, (1997) 240-245.
- [5]Y. Ueda, *The Road to Chaos*, (Aerial Press, Inc., 1992).
- [6]H. Ohta and Y. Ueda, Global Bifurcation Caused by Unstable Limit Cycle Leading to Voltage Collapse in an Electric Power System, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol.9, No.6, (1998) 825-843.

ヘリカル系磁場閉じ込め核融合

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門

プラズマエネルギー研究分野

教授 大引 得弘

e-mail:obiki@iae.kyoto-u.ac.jp

助教授 水内 亨

e-mail:t-mizuuchi@iae.kyoto-u.ac.jp

助手 長崎 百伸

e-mail:nagasaki@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

核融合エネルギーは、環境に与える影響の少ない次世代のエネルギー源の一つとして期待され開発研究が進められている。将来の核融合炉としては多くの方式が考えられているが、いずれも技術的・経済的に確立されるまでには至っていない。現在、もっとも有望と思われる、かつ精力的に研究が進められているのは、トーラス型磁場により閉じ込められた高温プラズマの核融合反応を利用する方式である。トーラス型磁場閉じ込め方式にも磁場構造の違いによりいくつかの方式があるが、大別すると、トカマク方式とヘリカル方式がある。このうちトカマク方式の実験装置は、これまで数多くの装置が建設され実験が行われてきた。最近ではヨーロッパ連合の大型トカマク実験装置JETにおいて、D-T核融合反応生成実験が行われ、反応出力約18MWのエネルギーを発生させることに成功している。これにより、制御された核融合反応の実験室的実証は達成されたと言える。しかしながら、トカマク方式を最終的な商用炉とするには物理的・技術的に多くの課題が残されており、今後の更なる研究が必要とされる。

この報告では、トカマク方式での問題点を解決しうる方式であり、本学で提案され、これまで研究が続けられてきたヘリカル型実験装置・ヘリオトロンEでのこれまでの研究成果の概要と今後の計画の概要を述べる。なお、実験装置は講座（分野）単位では運転できないので、複数の分野の研究者で課題ごとに分担して共同で研究を進めている。現在の概略の分担内容は、

プラズマ制御：大引研

プラズマ加熱：佐野研

プラズマ計測：近藤研

である。ここでは主に全般的な閉じ込め研究の概要について説明する。加熱・計測などの観点からの成果については引き続き後の号に報告される予定である。

2. ヘリオトロンE実験の概要

2.1. ヘリオトロン型磁場構造の特徴

ヘリカル方式では、トカマク方式と異なり、プラズマを閉じ込めるためにプラズマ中に大電流を流す必要がない。このため外部磁場コイルに超電導コイルを用いることにより、プラズマの定常維持、すなわち炉の定常運転が可能である。ヘリカル方式の一つであるヘリオトロン磁場は、1958年に、故 宇尾光治京都大学名誉教授により提案された磁場配位である。とくに、ヘリカル・ヘリオトロン磁場は、磁場コイルシステムが他の方式に比して簡単である点の一つの優れた特徴である。

ヘリオトロンE装置に用いられているヘリカル・ヘリオトロン磁場は、基本的には、図1に示す

ような、トーラス放電管の周りを2 = 19で巻く間にトーラスの大周を2回まわって閉じる構造をもつヘリカル導体の作る螺旋磁場、ならびに一对のヘルムホルツ・コイルから作られる垂直磁場とで、プラズマを閉じ込める層状構造を持つ一群の磁気面が形成される。この磁気面の特徴は、大きい回転変換と強いシアを有していることで、プラズマの平衡と安定性に優れている。ヘリオトロンE装置の装置諸元を表1に示す。

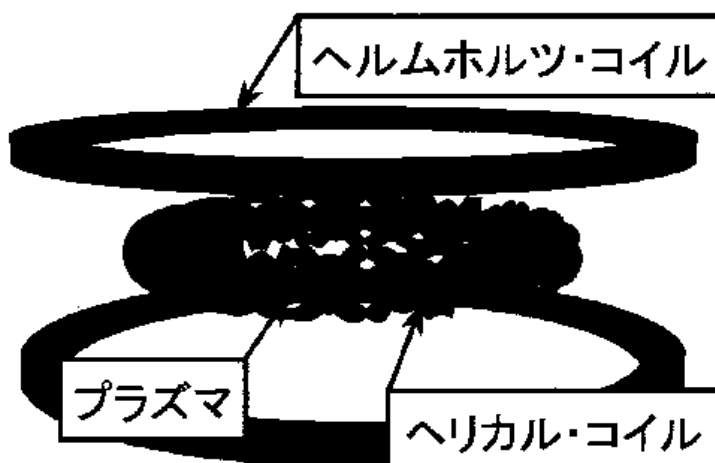


図1 ヘリカルヘリオトロン磁場を作る基本コイル構成。ヘリカルヘリオトロン磁場はヘリカルコイルと垂直磁場を作るヘルムホルツコイルとから構成される。

表1 ヘリオトロンE装置諸元

放電管			
大半径	R		2.2m
小半径	a_w		0.21 ~ 0.41m
閉じ込め磁場最大強度	B_n		2.0T
ヘリカル導体			
トロイダル回転数	ℓ		2
ポロイダル回転数			9.5
コイル電流	I_H		1.16MA
プラズマ持続時間	t		0.5s
電源電力	P_{MG}		330MVA

2.2 . 実験課題とこれまでのおもな成果

ヘリオトロンE装置を用いた実験研究は、定常核融合炉への道を開くため、ヘリオトロン磁場配位による高温高密度プラズマ閉じ込めの原理検証を行うことを目標に開始された。このため、電子サイクロトロン波、中性粒子ビーム入射、イオンサイクロトロン周波数帯高周波を駆使して、無電流プラズマの生成ならびにパラメータ向上を図り、高電子密度、高電子温度、高イオン温度、高ベータ（閉じ込められたプラズマの圧力と閉じ込め磁場の圧力の比）プラズマの実現を試み、その物理を明らかにしてきた。これらの研究により、ヘリオトロンE装置に課せられた目標を達成することができ、世界のヘリカル系核融合研究進展に大きく貢献してきた。さらに、これらの成果は、核融合科学研究所での超伝導大型ヘリカル装置 LHD建設に大きく寄与した。以下では、これまでの

研究における具体的な実験課題とおもな成果を列記する。(詳細については、2年ごとに開催されるIAEA主催の制御熱核融合研究に関する国際会議で報告してきており、その発表論文集が、IAEAより発行されているので、参照されたい。)なお、ヘリオトロンE装置で達成された主なプラズマパラメータの最高値は表2のとおりである。

表2 ヘリオトロンEで達成された最高プラズマパラメータ

プラズマパラメータ	最高値	加熱法
電子密度 (10^{20}m^{-3})	1.8	中性粒子ビーム+ペレット
電子温度 (keV)	3.1	電子サイクロトロン波
イオン温度 (keV)	1.25	中性粒子ビーム
	1.6	イオンサイクロトロン波
平均ベータ値 (%)	2	中性粒子ビーム

2.2.1 . ヘリオトロン磁場構造の実験的検証

トラス型磁場閉じ込め方式においては、プラズマ閉じ込めに適した磁場構造を持つことが基本であるが、現実には、様々な要因で生ずる不整磁場により理想的磁場構造が乱され、良好なプラズマ閉じ込めを阻害される可能性がある。ヘリカル方式では、磁場は外部コイルのみによって作られるので、プラズマのない状態での磁場構造、いわゆる真空磁場構造の計測が可能である。不整磁場による擾乱は、磁力線がトラスを周回するに従い積分的に影響が出てくるので非常に小さな不整磁場の値でも問題となることが多い。そのため、空間各点における磁場成分の実測のみでは、十分な情報を得ることはできない。従来、電子ビームを磁場に沿って周回させ、そのビーム位置を検出することを基本原理とする計測方法が用いられてきた。我々は、蛍光材を塗布したメッシュを真空容器内に設置し、電子ビームが、このメッシュに当たることによって生ずる輝点画像を用いて磁気面形状を可視化する「ビーム・蛍光法」を世界に先駆けて実用化した。

一方、最外殻の閉じ込め磁気面の外部領域の磁場構造は、閉じ込められたプラズマの境界条件の一つであり、閉じ込め磁気面同様、実機での検証が重要であるが、この領域では、上記「ビーム・蛍光法」は必ずしも有効ではない。そこで、閉じ込め領域計測用に開発された「ステラレータ・ダイオード法」を元に、新たに「ビーム・インピーダンス法」を開発し、周辺磁場構造を可視化する方法を試みている。

2.2.2 . 電子サイクロトロン波による無電流プラズマの生成と加熱制御

ヘリカル方式の特徴は、磁気面を形成するためのプラズマ電流を必要としないことであり、この特徴を生かす高温無電流プラズマ生成法として電子サイクロトロン波の利用がもっとも有効である。ヘリオトロンE装置では、28GHz、35GHz、53GHzおよび106GHz帯のジャイロトロンを用い、基本波、第2高調波の電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)による無電流高温プラズマの生成に世界に先駆けて成功した。

さらに、高電力ミリ波伝送システムや入射システムの開発を進め、電子温度分布制御、プラズマ電流制御、MHD不安定性制御など、ECH技術の新たな応用へ向けての研究に取り組んでいる。図2は、プラズマ電流制御ならびに電子温度制御を目指して最近行われた斜入射ECH実験における106GHz ECHシステム図である。コルゲート導波管を用いた伝送路中には、大電力ミリ波用に新たに開発した波形偏波器を設置し偏波面制御を可能とし、集光光学系の後段に可動鏡を設けることで入射角度を自由に設定できる。

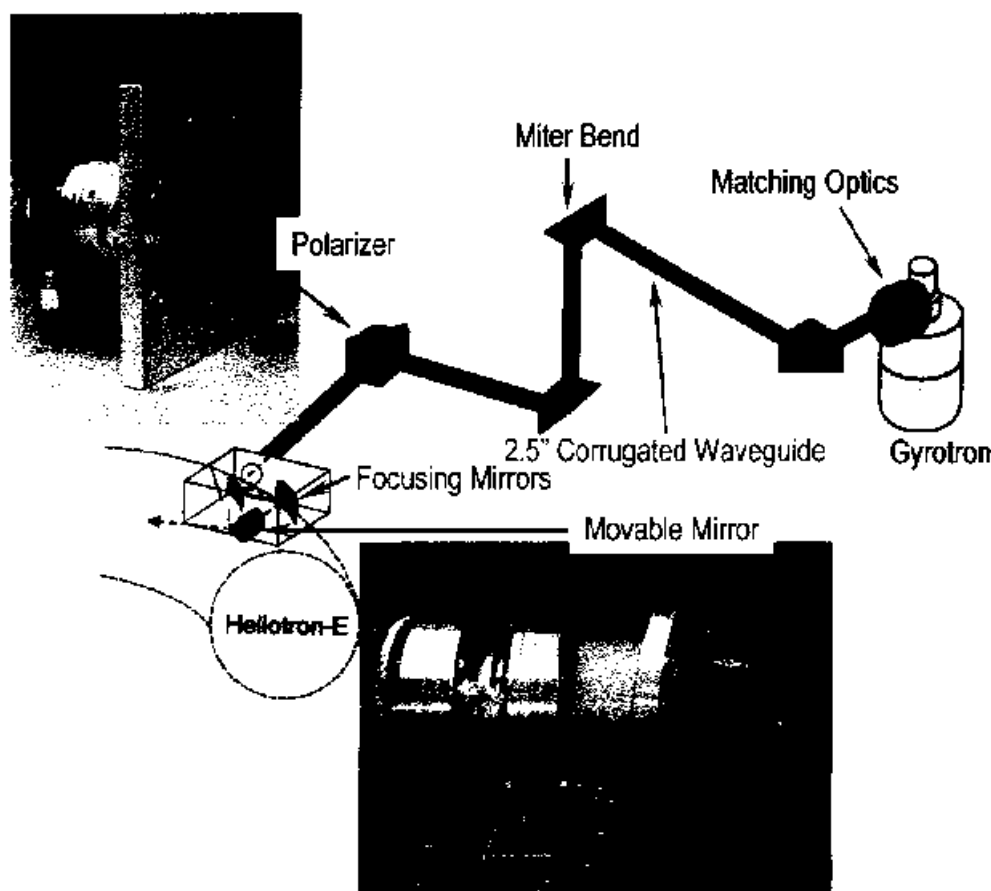


図2 斜入射用106 GHz ECHシステム。図中に挿入してある写真は、高電力ミリ波用偏光器と斜入射用可動ミラーシステムである。

2.2.3 . 中性粒子ビーム入射およびイオンサイクロトロン周波数帯波によるプラズマ加熱

核融合反応を効率良く生じさせるためには、イオンを加熱することが必要であるが、このために、中性粒子ビーム (NB) や、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 波による加熱を試み、高イオン温度の無電流プラズマ閉じ込めを実証した。一方、ヘリカル方式では、磁場のリップルが大きく、とくに粒子間の衝突が少ない高温領域での輸送の研究が重要である。ヘリオトロンE装置では、放電管壁をボロン薄膜でコーティングすることにより不純物発生およびリサイクリングを抑制し、衝突の少ない高イオン温度・低密度プラズマを容易に得られるようになり、理論値との比較研究を進展させることができた。

2.2.4 . プラズマ閉じ込め比例則の確立

このように、ヘリオトロンE装置では様々な加熱法によりプラズマ加熱を試み、それぞれ期待された成果を得ることができた。これらのプラズマのエネルギー閉じ込め時間については一つの経験則にまとめられることが明らかになった。この経験則は、他のヘリカル装置であるATF (米)、W7-A (独)、L2 (露)、ヘリオトロンDR (京大) にも共通するものであり、LHDスケーリングとして核融合科学研究所のLHD装置設計の指針となった。さらに、新たにW7-AS (独) の実験結果を含んだ比例則、ISS95スケーリングへと発展した。

2.2.5 . プラズマ閉じ込め改善

プラズマ閉じ込め比例則から予測される閉じ込め性能は、現在、トカマク方式での比例則L-modeスケージングと同様、核融合炉の実用化には不十分であり、何らかの閉じ込め改善が必要とされる。我々は、(1)磁場配位の最適化、(2)プラズマ分布の最適化、および(3)薄膜作製技術を用いた放電容器内壁の表面改質等により閉じ込め改善を図ってきた。

磁場配位最適化の研究により、磁気軸の内側移動によりヘリカル対称性を回復すると粒子軌道と磁気面とのずれを小さくすることができ閉じ込めが改善されること、しかしこの場合、磁気丘配位となって、プラズマ圧力の上昇に伴ってMHD不安定性が顕著となることが示された。この問題を解決することが、後述する新たな立体磁気軸ヘリオトロン配位への出発点となった。

プラズマ分布制御においては、6連発の水素・重水素ペレット入射装置開発とこれによる密度分布制御、電子サイクロトロン波の入射法の最適化による電子温度分布制御などを可能とし、それらの閉じ込めへの影響が調べられた。プラズマ密度分布制御により、プラズマ中の径方向電場およびその径方向変化の働きによると考えられるイオンの輸送改善（高イオン温度モード）が得られることが示された。

表面改質に関して、我々は、様々な方法を開発してきた。中でも、ECHプラズマを用いた低Z材薄膜コーティング技法を世界ではじめて核融合実験装置に適用し、その有効性を示すことができた。

2.2.6 . ヘリカル・ダイバータの開発

核融合炉にとって、ヘリウム灰制御ならびに熱負荷制御を受け持つダイバータは不可欠の技術である。ヘリオトロン磁場では、閉じ込め領域周辺の磁場構造をダイバータ磁力線として利用するヘリカル・ダイバータが構想されてきた。ヘリオトロンE実験では、周辺プラズマの振舞いが詳しく観測され、ヘリカル・ダイバータの可能性を実証するとともに、解決すべき問題点も明確にできた。ヘリオトロンE装置では、装置の制約上十分な排気性能を持つ、真の意味でのヘリカル・ダイバータを実証することはできないが、LHDにおける実証実験に向けての貴重な基礎データを与えることとなった。

2.3 . 今後の課題と研究計画

上述のように、ヘリオトロンE装置での研究により、ヘリカル・ヘリオトロン磁場配位が、核融合プラズマ閉じ込め方式として有効であることが実証された。しかしながら、これまでの実験成果を詳細に検討するとき、改善すべき点の多いことに気づく。その中でとくに重要なものは、上で述べたような「良好な高エネルギー粒子閉じ込めとMHD安定性の両立がヘリオトロンE装置では困難であること」である。さらに、従来のヘリカル方式の閉じ込め性能が比例則ISS95で規定される以上、核融合炉実現のためには、何らかの閉じ込め改善が必要である。このため、ヘリカル型磁場の最適化へ向けての研究が、最近世界的に活発になってきている。このような状況のもと、ヘリオトロンE磁場配位では研究できなかった方法、すなわち磁場のミラー成分を積極的に利用して粒子閉じ込めの改善を図り、かつ閉じ込め領域全体にわたる磁気井戸によるMHD安定性向上を図るべく、新たなヘリオトロン磁場配位、 $\ell=1$ ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位の研究が開始された。ヘリオトロンE装置以前の装置が平面磁気軸であったのに対し、三次元磁気軸を選択することにより、新たな可能性を広げ、上述の磁場構造最適化方式の実現が可能となる。エネルギー理工学研究所では、この配位を持つ実験装置（ヘリオトロンJ、図3参照）を建設中である。（エネルギー理工学研究所リサーチレポート IAE-RR-98 055、「高度エネルギー機能変換実験装置の研究計画中間報告 - プラ

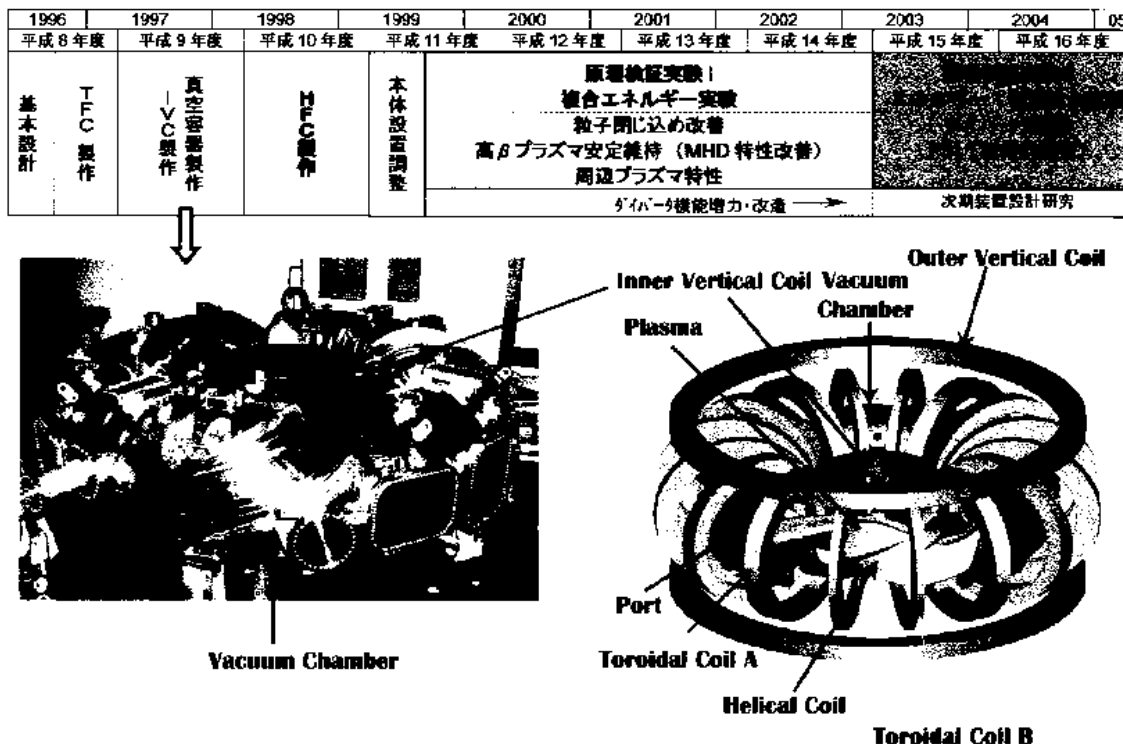


図3 エネルギー工学研究所で建設中の $\ell = 1$ ヘリカル軸ヘリオトロン装置計画ならびに装置模式図
装置諸元

主半径 1.2m
 プラズマ副半径 0.18m
 閉じ込め磁場強度 1.0 - 1.5T

表3 現在計画中（または最近稼働を開始した）立体磁気軸配位プラズマ実験装置概要

プラズマ実験 研究所	W7-AS (NIFS)	TJ-II (CIEMAT)	H-1NF (NIFS)	HXS (NIFS)	Heliotron-J (NIFS)
研究年	2005年～	1997年～	1999年～	1999年～	1999年～
モード形式	M=4ヘリックス (高βプラズマ)	M=4ヘリックス (HFC) + HFC + TFC	M=3ヘリックス (HFC) + HFC + TFC	M=4ヘリックス (ヘリックスモード)	M=4ヘリックス (ヘリックスモード)
大半径 (m)	6.5	1.5	1.0	1.2	1.2
小半径 (m) (標準)	0.05	0.1 - 0.25	0.22	0.15	0.18
磁場 (mT)	54	140	156	144	182
閉じ込め磁場強度 (T)	3.0	1.0	1.0	1.87	1.0 - 1.5
ヘリックス数 (n)	10	9.5	1.0	9.5	9.5
アスペクト比	10	15 - 6	4.5	8	6 - 8
加熱装置	NBI + ECH 20 - 30 MW	ECH: 0.6 MW NBI: 4 MW	ECH: 0.3 MW	ECH: 0.2 MW	ECH: 0.4 MW NBI: 1.5 MW RHF: 2.5 MW
特徴・研究	ヘリックス配位内改良型 HS: 電流低減による 4配位の最適化	回転変換、シフト、縦向き 非可変のプラズマ形状 の制御が可能 特に高ベータ実験を 含む	高回転変換、向きの ピンチ形状、大口径 等磁気軸配位	ヘリックス対称性の確保 による閉じ込め性能 向上に期待	本装置は磁気軸配位 による閉じ込め磁場 配位の最適化を図る
磁場モード図					

ズマ実験装置の基本設計 - 」参照) 本装置の建設は順調に進みつつあり、来年秋頃からプラズマ実験が開始される予定である。

表3に、現在計画中あるいは最近稼動を開始した立体磁気軸配位のプラズマ実験装置の概要を示す。ヘリオトロンJは、磁場配位の制御範囲が広いこと、ヘリオトロンEで用いてきた加熱装置が使えるため、プラズマ体積に比して加熱電力が大きいことなどが特徴で、この分野においても、世界をリードする研究ができるものと期待される。

3. おわりに

ヘリオトロンEでの実験結果は、ヘリカル型磁場閉じ込め方式の長所を認識する動機となり、トカマク方式とならんで将来の実用炉候補のひとつとしてヘリカル方式の研究が進められるようになった。周知のように、ヘリオトロンE装置をスケールアップしたLHD装置が文部省核融合科学研究所の主計画としてとりあげられ、第一期の建設が終了し、本年3月から実験が開始された。ヘリカル方式の閉じ込め実験は、トカマク方式に比べて経験が浅く、装置の規模も必ずしも大きくはない。また、上に述べたように、ヘリカル方式磁場構造の最適化の方法論にも多くの種類があり、どのような構造が最適か、それがプラズマ実験装置として、あるいは核融合炉として実際に実現されるか、などの研究が今後さらに必要である。これらの学理的な研究はそれほど大型の実験装置を必要とせず、大学における研究としてふさわしいものであり、学術的な貢献により大型核融合装置の改善に寄与できるものと考えられる。私たちは、これまでのヘリオトロンEを中心とした研究成果を基盤とし、新たにヘリオトロンJを中心とした研究を推進して行くことによって、核融合エネルギー開発に貢献していこうと考えている。

エレクトロニクス産業・技術の未来

NEC 取締役支配人 石黒辰雄

1. エレクトロニクス産業・技術の発展史

エレクトロニクス産業の範囲は、通産省機械統計の分類に従えば、コンピュータ、通信機器等の産業用電子機器、映像・音声機器の民生用電子機器、および半導体、液晶、一般電子部品等の電子部品を含み、1997年の国内生産額は約25兆円である。

エレクトロニクス産業の成長の歴史を生産額の統計で見ると、図1のように1970年には3兆円強だったが、20年の間に25兆円と年平均10%の高度成長を遂げた。70年代はカラーテレビを中心とする民生用電子機器が主役であり、80年代にはコンピュータ、半導体デバイスが急成長した。しかし、90年代に入ると、91年をピークとして横這いとなっている。これは、民生用電子機器を始めとする量産品の生産が海外にシフトしたことが大きく影響している。一方、90年代はエレクトロニクス産業が質的に大きな転換をし、新たな発展に入ったとも言える。コンピュータ分野では、コンピュータ本体の生産額で見ると、90年頃のメインフレーム主体の構造からPCが7割になる主役交代がされた。PCの国内出荷台数は、700万台に急拡大し、カラーテレビやVTR並みの数量になった。コンピュータ周辺機器も、生産額は約2兆円前後と変わらないものの、PC用の量産品が増え、電子部品もPC用が大きな割合を占めている。通信においても、インターネットの普及発展、携帯無線電話の加入者数急拡大等、ネットワーク変革が進み90年代中頃の生産額増に貢献している。

次に、このような産業発展を支えてきた技術の進歩を振り返る。図3にエレクトロニクス分野の主要要素の開発発展状況を示した。70年代はその基盤となる技術が生まれ育った時代である。LSIのマイクロプロセッサやメモリの開発がPCを生み出し、半導体レーザーの開発は光ファイバー通信、光ディスクの開発を促進した。デジタル化の波は通信分野から始まり、映像音声信号のデジタル符号化技術の進歩は現在のMPEGに繋がり、デジタル革命の基盤となっている。

このように、現在エレクトロニクス産業の主役となっている多くの要素が80年代に発展し、さらに90年代に入り、それぞれに高性能化、小型化、低コスト化が進んだ。それらの技術が相互に関連し組

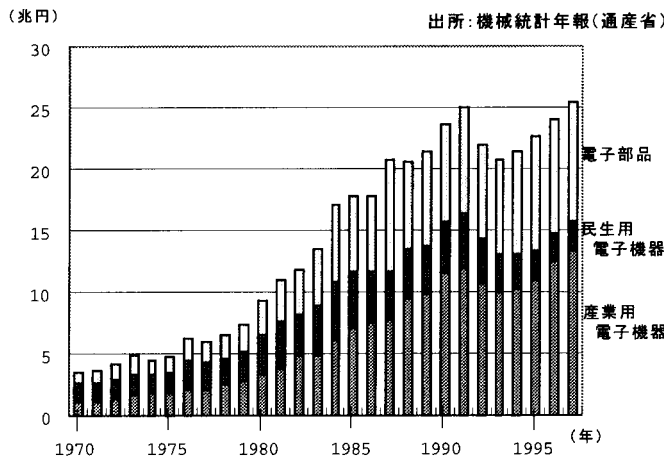


図1 日本電子産業の国内生産額推移

産業用電子機器	13兆3,998億円
電子応用装置	73,721億円
通信機器	43,120
電気計測器	7,965
事務用機器	9,192
民生用電子機器	2兆2,416億円
映像機器	14,940億円
音声機器	7,476
電子部品	9兆8,404億円
半導体	47,631億円
電子管	7,535
液晶素子	8,715
一般電子部品	34,523
電子産業合計	25兆4,818億円

出所: 機械統計年報(通産省)

図2 日本電子(エレクトロニクス)産業の国内生産額(1997年)

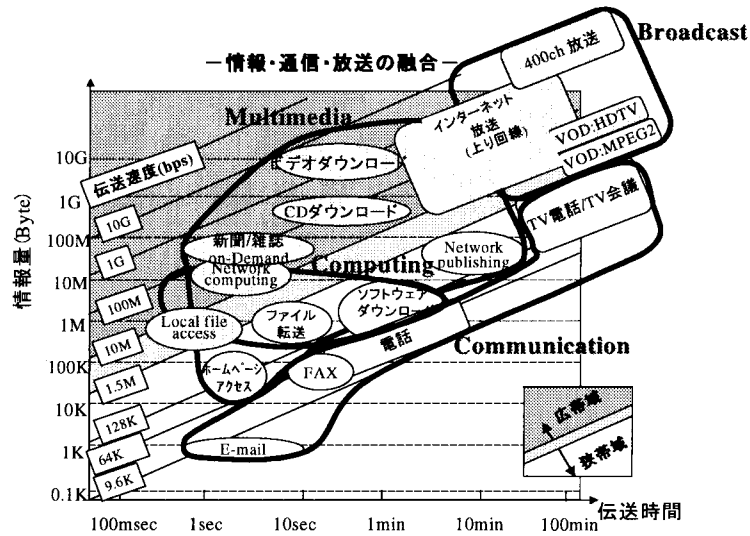


図6 情報メディアマップ

バーがネットワークで自律分散的に繋がる超分散C & Cシステムを構成し、一方、利用には多様なマルチメディア端末が使われる。次にそのような社会において、どのような情報流通が起きるかを考える。

図6は種々の情報メディアの流通する形態をマップに示したものである。情報の量、伝達時間、伝送速度をパラメータとして、電話、テレビ会議などの通信は狭帯域伝送路(N-ISDN)で充分対応できる。デジタルテレビ放送は画質、チャンネル数に応じて数Mbから数Gbの容量が必要となる。パッケージ情報メディアコンテンツのダウンロードでは情報量をどのような時間で伝達するかによって必要な伝送速度が変わる。例えば出版物のネット配送をするNetwork Publishingは狭帯域伝送路で充分だが、オンデマンド、インタラクティブな利用を前提とした場合は数十Mbの広帯域伝送が必要になる。

インターネット放送は広い概念の新しい情報流通メカニズムであり、将来の情報流通の主役となる。現在のインターネットは伝送速度の制約で利用形態が限られているが、適切なコストで十分な伝送容量を提供する次世代インターネットインフラが整えば、情報発信は非常な勢いで広がるであろう。特に、パーソナル、インタラクティブアクセスを可能とするには、発信情報量の飛躍的な増大およびダイナミックなトラフィック変動に対応する広帯域フレキシブルネットワークが必須となる。

3. エレクトロニクス産業・技術の未来

21世紀の情報社会の発展を支えるエレクトロニクス産業の姿を、広帯域ネットワーク、マルチメディア端末、新デバイス、H C Iの例を取り上げて描いてみる。まず、新情報流通を支える日本の広帯域ネットワークインフラとしての光ファイバー通信について述べる。日本の通信、放送サービスの普及発展状況及び将来の予想を図7に示す。

90年代に入り新しいメディアが伸び始め、衛星放送は加入1000万を越え、CATVは670万加入に発展した。携帯電話は3000万を越え、インターネットの利用拡大によってISDN利用者も急増している。これらのネットワークメディアがそれぞれに高速デジタルデータネットワークサービスを提供していくが、これらは主として図6のマップの狭帯域の範囲である。一方、将来の新情報流通を可能とするには、広帯域のネットワークとして、同軸ケーブルか光ファイバーが必要になる。日本では2010年までにF T T Hを全家庭まで普及させることを目標としている。

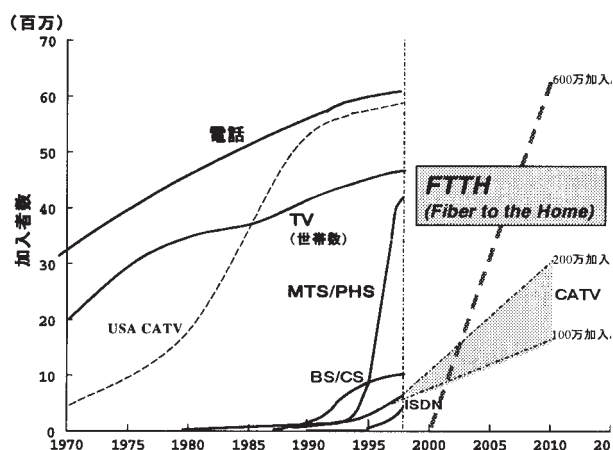


図7 日本の情報通信インフラの発展と将来

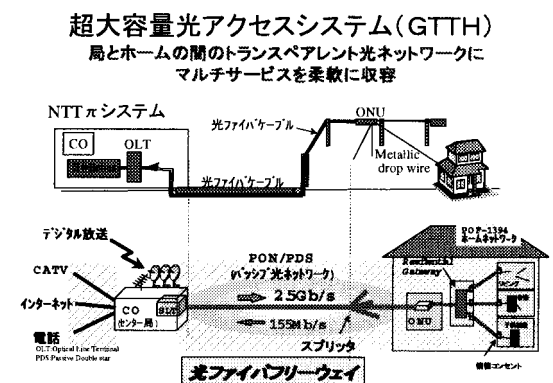


図8 超大容量光アクセスシステム (GTTH)

今年春からNTTは システムという光加入者系の導入を開始した。家庭のすぐ近くの電柱まで光ファイバーを配線しそこから加入者宅までは銅ケーブルを利用するものである。もちろん、必要になれば、家庭までファイバーを届かせることも出来る。このような光ファイバー網をコンピュータ・通信・放送融合時代にふさわしい形態に発展させるべく、我々はGTTHと呼ぶシステムを提案し開発を進めている。(図8) PDSファイバー網で下り2.5Gbps、上り155Mbの超大容量データ伝送が可能となる。放送、ケーブルテレビ、インターネット、マルチメディア通信など種々の情報流通サービスの共通インフラとして将来にわたる発展に柔軟に対応できるシステムと考えている。家庭に設置される光送受信端末ONUの試作品は小さな基板一枚に実装されている。衛星放送受信機と同じように大量の導入により、そのコストを数万円にすることは十分可能と考えられる。

要は、その様なネットワークを総合的に活用できる社会的仕組みが出来るか、一般利用者にどのようなメリットがあるかにかかっている。数百チャンネルのデジタル衛星放送/ケーブルテレビに加え、インターネット放送は予測できない大きな発展の可能性を秘めている。このようなインフラが整備されてこそ情報社会、情報産業が健全に発展するに違いない。1980年代にCATV網を構築した米国と違い、同軸ケーブルがまだ広く普及していない我が国では、ファイバー網の普及が戦略的に有利な選択と考えられる。

情報利用では、情報を見聞きし、蓄え、処理するマルチメディア端末が重要な要素である。当面はPC中心に発展すると思われるが、情報家電、ネットワーク家電からのアプローチも種々企図されており、マルチメディア端末は多様化していだろう。汎用PCは、高機能なパーソナルサーバーと、ポータブル性を高め長時間電池動作可能な携帯ノート型に分かれる。一方、特定用途に特化することにより使い易く、高性能な種々の端末が提供される。

今、関心を呼んでいるのは、情報を見る道具に特化した「情報ビューワー」であり、米国で活発に開発が進められている。日本でも電子ブックや電子書籍などが開発されている。生活者にとって、情報を受取り見ることが大部分の行動である。紙のメディアが有している良さを維持しつつ、電子メディアで実現される使い良さを狙いとする。電子ビューワーのキーデバイスはフラットパネルディスプレイである。雑誌等A4サイズの印刷文書の小さな文字まで読める精細な表示をするためには、現在のPC用のものよりも2倍ほど高い200dpi程度の解像度が必要であり、表示デバイスの試作が行なわれている。

ホームサーバー、あるいは、セットトップボックスが情報家電、ネットワーク家電の大きな市場となると期待されている。ホームサーバーの代表的機能として磁気あるいは光ディスクを利用したビデ

オファイルがある。図9に示すように90年代における磁気ディスクの面記録密度は10年で2桁進歩と大幅な向上を遂げた。このトレンドでいけば2000年頃には10Gb/s記録が実用化され、光ディスクを凌ぐ勢いである。さらに記録密度を高める研究が産学協同機構SRCやASETで進められている。光記録においても、近接場を使い100Gb/sを目指すナノメータ光ディスクプロジェクトが始まる。近い将来、ファイルメモリの容量が100GBを越え、数十時間のビデオ信号記録が可能となる。ホームサーバーに録画された放送から、見たいものを見たい時間に見る、パーソナル番組で楽しめる時代になるであろう。

シリコンLSIはエレクトロニクス産業全ての基盤であり、LSI技術進歩は回路の微細化による集積度向上の歴史である。将来の技術開発、製品開発のロードマップも微細化の進歩を基に描かれている。(図10)量産技術ではSiLSIの微細化の限界は0.05μm(50nm)辺りではないかとされているが、3年毎に1世代、2分の1になると仮定して2010~2015年頃にこのレベルに至ることになる。

サブ0.1μm時代のトランジスタのゲート絶縁酸化膜の厚さは1nm、Si原子数にして5個ほどになる。また、チャンネルの深さは20nm程度になり、その中にある不純物数は100個というオーダーになり、ゆらぎの増加が問題となってくる。その先はSiの世界の延長が続くか、全く新しい世界が出現するか分からないが、10年前には、ミクロンのオーダーで論じられていた電子デバイスがナノメーターの世界、分子原子の姿を意識する世界に入る。マイクロエレクトロニクス時代からナノエレクトロニクス時代へ移行しているのである。

基礎研究の分野では、ナノテクノロジー、ナノサイエンスと呼ばれる領域に関心が集まっている。カーボンナノチューブは炭素原子が六角形の構造を単位として直径数nmのチューブ形状となったものである。1991年にNECの基礎研究所の飯島主席研究員によって発見されたが、カーボンナノチューブは五角形、七角形の要素を入れることにより竹籠を編むように自由な形の構造を作れる可能性があり、また、他の元素と組み合わせた多重構造も可能である。21世紀の科学技術は原子を自由に扱い、新しい材料を創り出すだろう。未知の世界が広がっているこのような微細な世界ではスーパーコンピュータによる計算科学が有効な手段になる。最近科学技術庁で開発が始められた地球シミュレータは数十テラフロップスの計算パワーを持つ。これは計算科学の分野にも有力なマシンとなるであろう。

最後に、HCIに関連して情報科学に関連する話題について触れる。情報通信サービス、端末機能の高度化につれてその使い方が難しくなっていく。ユーザーインターフェースが重要というのが共通認識であり、音声入力有力な手段となるとの期待も高まっている。我々も、NUI(Natural User

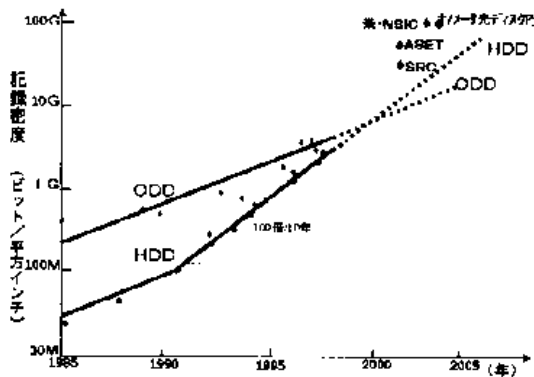


図9 大容量ファイルの記録密度トレンド

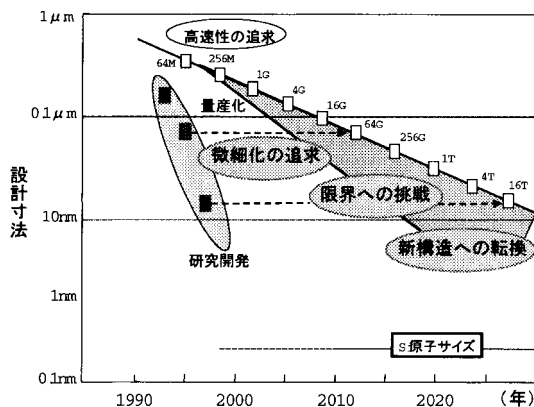


図10 LSI微細化のロードマップ

Interface)の実現を目指し、重点研究テーマとして取組んでいる。人間のやって欲しいことをその意図を理解して実行してくれるインターフェースという意味である。これは、コンピュータの知的能力を高めて、コンピュータを人間に近づけると言うことである。

最近、チェスやオセロでは人間の名人をコンピュータが負かしてしまった。一方日本の将棋では、パソコン用対局ソフトが幾つも売り出され、レベルもアマチュアの有段者クラスとされている。レベルが向上したこととともに、そのようなプログラムが基本的には個人あるいは数人で開発されていることも興味深い。このことは我々に幾つかの問題を提示している。コンピュータには難しいとされてきた知的能力とは何か、高度な判断をしているとは何か、コンピュータの記憶力と処理能力が高まれば自ずから解決することなのか、自然言語処理、音声認識などはまもなく強力なものが出来上がるのか。人間に易しい知的なインターフェースをどのようにして実現するか基本に立ち返り取り組まねばならないと考えている。

4. むすび

21世紀の産業経済、社会生活の豊かな発展が技術革新にかかっていることは世界の共通認識である。世界の潮流は基礎技術開発の役割を大学に大きく期待し、産学連携の促進策が広く議論されている。研究成果を実用に繋げることは、一つの企業の中でも、研究所と事業部門間にある難しい課題であり、各社各様に長年苦労してきている。大学と産業界の関係はもっと難しい。これは基本的なスタンスの違いが大きいからである。最近、産官学協力の問題について議論する機会が多いが、図12のように産学官の共通接点は「将来の人間社会に役立つ」という視点ではないかと考えている。将来への洞察力をもってテーマを定め、新しい技術・システムの概念提案とそれを構築する理論体系、評価基準の確立のためには、常に社会の進歩に先行していることが必要であり、ビジョンを共有し、正しい社会システムを作っていくために健全な関連性 (Relevance) をもって進むことが重要である。そのために必要な新しい産官学の協力体制を確立しておかなければならない。

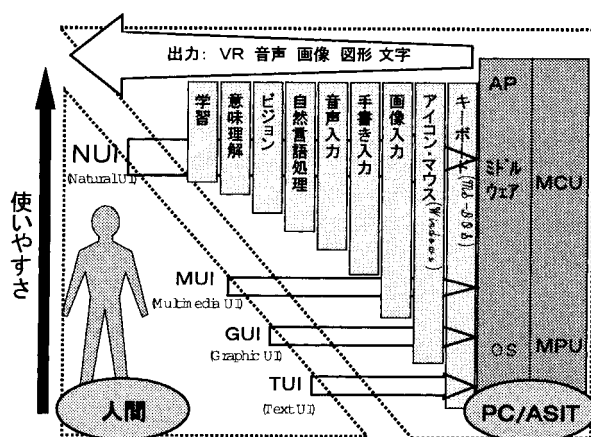


図11 HCI: 情報ターミナルのユーザーインターフェース

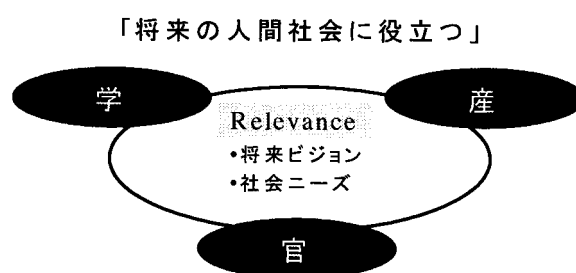


図12 産官学連携の視点

新設研究室紹介

複合システム論講座（荒木研究室） 「複合システム論を携へて医療の現場へ」

教授 荒木 光彦、講師 倉光 正己、講師 古谷 榮光

本年7月1日に荒木が本講座担任教授、古谷が本講座所属の講師となり、新たな視点から研究態勢を整えつつあります。荒木と古谷は、従来、電気システム論講座自動制御工学分野において「自動制御工場から病院まで」という標語の下で研究活動を行っていました。この「病院まで」の部分が「複合システム論」というアパートに引っ越してきたと考えていただくのがわかり易いと思います。したがって、当面の使命は、「複合システムの理論を発展させつつ、その成果を応用して医療に貢献する」ことです。ただし、「複合システム論」も「医療」も非常に広範囲のテーマを含んでおり、実際には、その中の極く一部分だけしか扱えません。以下、現在のテーマを説明します。

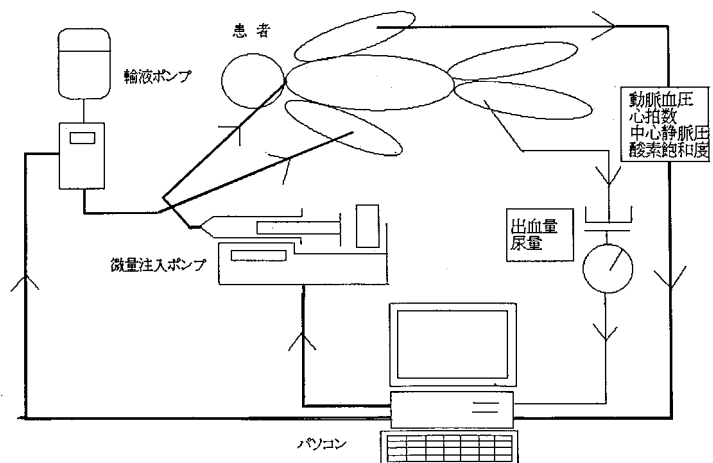
まず、「複合システム論」の意味ですが、これは「システムを部品としてより大きなシステムを構築するための理論体系」という程度のもので、荒木自身の博士論文が「複合システムの安定理論」であったのですが、そこでは部品として使うシステムが均質の場合を扱っていました。しかし、最近では、質の違うシステムを組み合わせる問題が研究者の興味を引いております。本研究室でも、「医療への貢献」というもう一つの課題との連携を保ちつつ、その方向での理論展開を試みたいと考えています。具体的には、スケジューリングやモデリングと制御とを同時に含むシステム論というあたりを中心として、従来から本講座で扱っていたカオス現象の解析をも含めて展開していきたいと考えております。

つぎに、「医療への貢献」ですが、現在扱っているテーマを列挙しますと、

1. 手術中の患者の低血圧制御（すでに20例以上の臨床応用に成功しています。）
2. 集中治療室における手術後の血糖値自動制御システム（開発段階です。）
3. 麻酔深度の計測と静脈麻酔の自動制御（基礎研究の段階です）
4. システム論に立脚した病期分類法の確立（サンプルとした病気については実用的結果が出せるような方法が出来つつあります。）

5. 看護婦さんのスケジューリング問題（プロトタイプを作っています。）

となります。この分野では言うまでもなく、医学者との協力関係が重要であり、それによってテーマも制約されます。幸いなことに、現在、優秀な外科医のグループをパートナーに得て外科系医療に関連したテーマを中心に研究を進めています。そのため、我々の研究成果が医療に役立っていることをかなり直接的に実感することが出来、そのことが研究の励みにもなっております。



医療への応用を目的とした生体の自動制御

電気システム論講座 自動制御工学分野

「動的システムを料理する：制御理論とその工学応用」

助教授 萩原 朋道

制御技術が重要な役割を果たす工学分野を挙げれば、枚挙にいとまがない。サーボ系の分野やプロセス制御の分野は、古くからもっとも代表的なものであるが、これらの分野をはじめとする幅広い分野を応用対象とし得る横系的性格は、制御技術の特徴の1つと言える。今般、医用分野を対象とした応用の積極的展開を目的として、荒木光彦教授が複合システム論講座へ異動されたことに伴い、突然、スタッフ一人での研究体制ということとなり、戸惑っているが、基本的には従来の研究姿勢を維持したいと考えている。すなわち、現在の、あるいは将来にわたる制御技術の幅広い応用分野を究極的視野に入れつつ、以下の3つのカテゴリーの研究を、バランスをとりながら堅実に進めたいと考えている。

1. さまざまな分野への制御技術の応用を支え、それら共通の基盤となるべき動的システムの数理解析、
2. 制御技術の基礎となるべき制御理論の整備・構築、
3. 実験室レベルでの、または計算機シミュレーションに基づく工学的応用

より具体的な研究内容は概ね以下の通りである。すなわち、理論的研究の最も中心である2.としては、これまで通り、デジタル制御系の制御理論（現代的サンプル値制御理論）や2自由度最適制御系の設計理論を中心に研究を行いたい。その基礎および応用として、1.では線形システム理論的研究を、また3.では空気圧サーボ実験装置での位置決め制御などを行う予定である。

通信システム工学講座伝送メディア分野（森広研究室）

「マルチメディア通信を支えるフレキシブルな通信情報システムをめざして」

教授 森広 芳照

21世紀のマルチメディア通信サービスでは、大容量のテキストデータ、画像データを超高速に伝送出来るだけでなく、“いつでも”、“どこからでも”アクセスできるユビキタスネットワークが必要となります。

また将来の基幹網として電話の様なストリーム型情報とインターネットの様なメッセージ型情報の両方を統合して転送する事が出来るATM（非同期転送網）が世界のキャリアから注目されています。

ATM網は中継網としてはすでにその構築が進められていますがこれをアクセス系とくに無線アクセス系に適用するには多くの技術的課題が残されています。

“いつでも”、“どこからでも”を実現するためには伝送メディアとして無線システムの利用が必須です。このため、無線を意識したアクセス網と中継網の最適な構成法、インターネットや電話網等の有線系ネットワークとPHSや携帯電話等のワイアレス網との相互接続方式やこれらの統合方式、あるいは光ファイバ網等の地上網とLEO（低軌道衛星システム）を含む衛星網との統合方式、等について研究します。

また、それらを支える新しいネットワーク技術、回線制御技術、多元接続技術、データ伝送技術、変復調・誤り訂正技術等の基礎技術も研究対象となります。

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（橋研）

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 - (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。

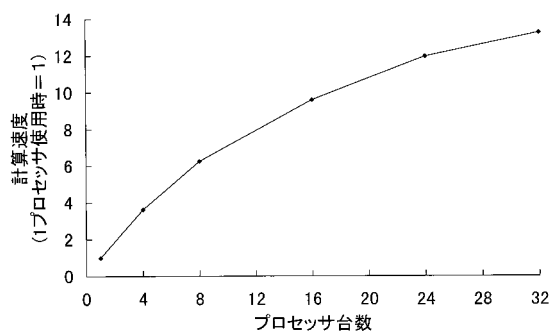


図1 並列化による計算速度の向上

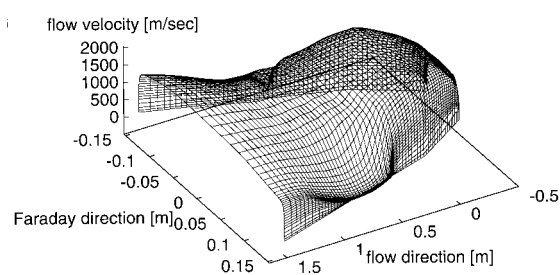


図2 電磁流体の流れ方向速度の分布

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。

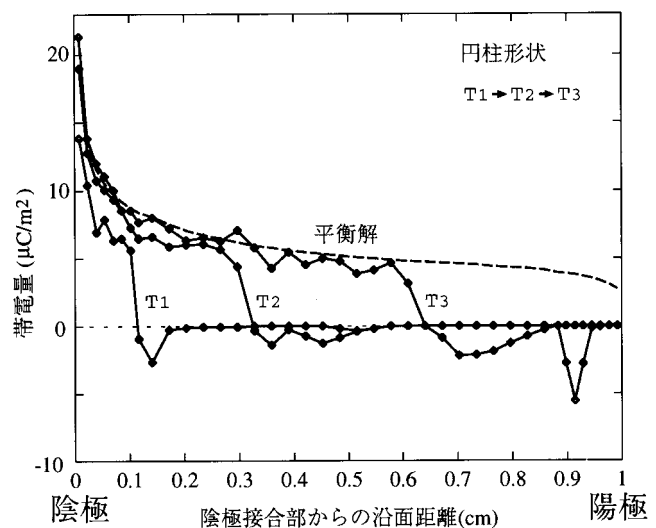
このプログラムによって円柱絶縁物の帯電が陰極から進行し、(a)で求まる平衡解に近づいていくことが明らかになりました。このような進行状況の例を図に示します。これらのシミュレーションの結果は共同研究を行った英国Strathclyde大学の帯電分布の測定結果とよく一致しました。

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。



帯電シミュレーションの例

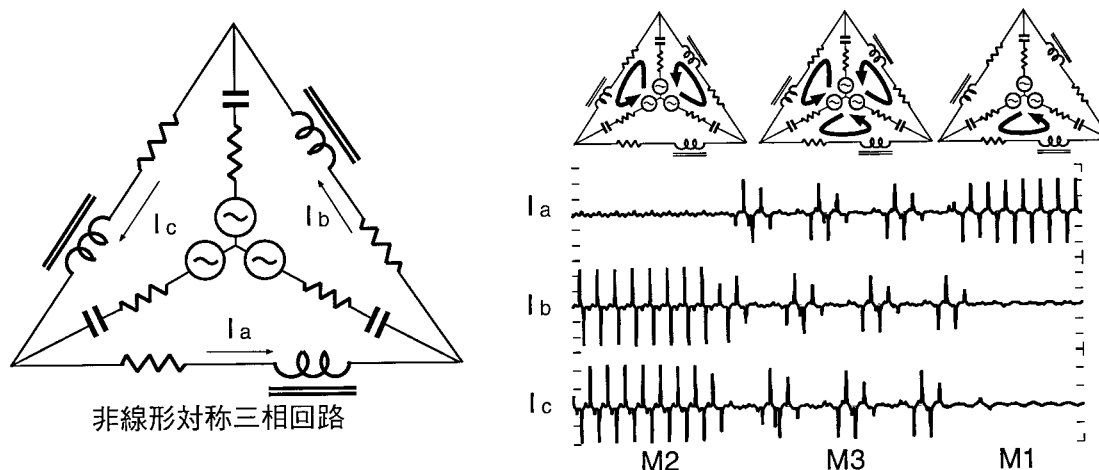
電気システム論講座 電気回路網学講分野（奥村研究室） 三相回路における非線形ダイナミクス

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^[1]。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きている。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^[2]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^[3,4]。

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3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

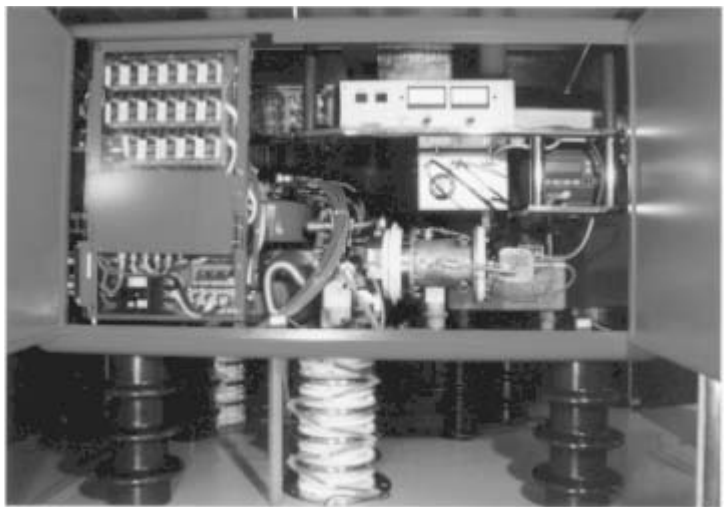
イオンの発生は原子・分子に電子を衝突させて電離するものであるという長年の常識があったため、負イオンを多量に発生することは不可能と考えられてきました。しかし発想を転換して、金属表面と原子・分子との間で電子のやりとりを積極的におこさせる表面効果法によって、正イオンと同量程度発生させることができるようになりました。すなわち、負イオンの発生法として、ターゲット表面にセシウム単原子層を被覆して仕事関数を低下させた面を正イオンでスパッタし、飛び出してきたターゲット材原子に電子を与えて負イオンとする二次負イオン放出法（表面効果法の一つ）について、詳細に調べています。この方法における負イオン生成確率を検討し、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^[1]。

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^[1]。

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^[2]。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解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
 - 次世代Si集積回路用極薄膜ゲート絶縁膜 -

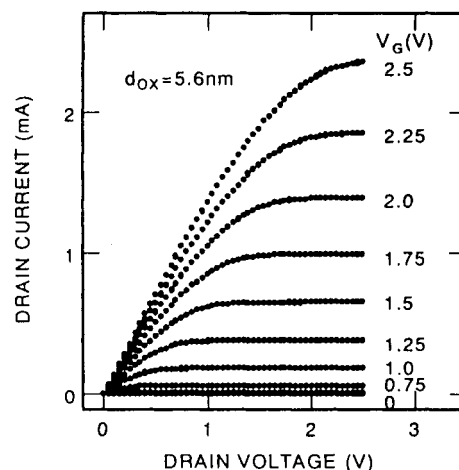
エレクトロニクスを支える半導体の創製、物性解明と制御、デバイス提示の研究を通して、科学・技術の進展に関与するとともに、社会への貢献を果たす努力を重ねている。材料として、シリコン、Ⅲ-Ⅴ族半導体、ワイドギャップ半導体を対象としている。“Cue”の創刊号でワイドギャップ半導体であるシリコンカーバイド研究の詳細に触れたので、ここでは、シリコン関連の研究について紹介する。

[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SiO₂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SiO₂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SiO₂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、SiO₂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。

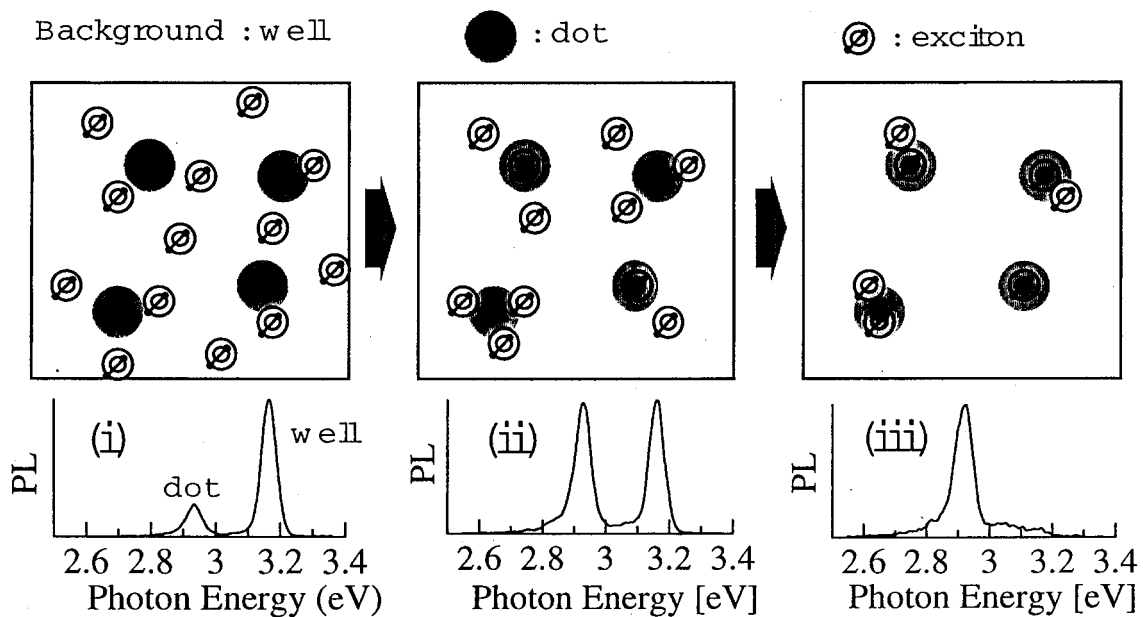
[研究成果]: 装置は概算要求で設置された「マイクロフォトニクス材料創製装置」の一部を活用している。従来の手作り装置から得られたknow-howを盛り込んだもので、特に、ラジカル発生源に工夫がある。(1)酸素活性種生成のその場観測と酸化速度の制御、(2)酸化膜形成プロセスの最適化を通して、高品質のSiO₂膜を作製した。(3)電気的特性の測定から、低電界領域での抵抗率は7.5E15ohmcm、絶縁破壊電圧13MV/cmを達成、Fowler-Nordheim型トンネル電流を観測して、高温作製の熱酸化膜と同等の特性を得た。研究室で開発した放電電流過渡分光法により膜内の電子とラップ定量評価、空間分布、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⁻¹cm⁻²の界面準位密度、正の固定電荷密度5.5E11cm⁻²を達成した。(5)500℃の低温で作製したSiO₂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294cm²/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InGa_N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。InGa_N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、InGa_N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 Letters¹やPhysical Review B²に掲載された。特に(1)の論文は、Ga_N系半導体におけるミ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_{0.20}Ga_{0.80}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だけ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 InGa_N 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_{0.20}Ga_{0.80}N - In_{0.05}Ga_{0.95}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

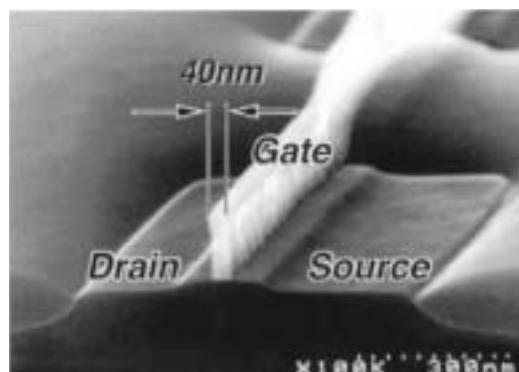
イオン工学実験施設が独自に開発を進めてきたクラスターイオン注入法を用いて、半導体への不純物導入を行った。本注入法は、クラスター状の原子を固体に注入するという革新的なアイデアに基づく新技術である。クラスターイオンと固体との相互作用においては、従来の2体間衝突の線形和では説明できない超高密度照射によって引き起こされる特異な非線形相互作用が生ずる。さらに、クラスターイオンビームプロセスの特徴には、超低エネルギー照射効果が得られる（ほとんど基板内の結晶を破壊せずに表面原子に作用する）、少ない電流で大量の原子が注入できる（数十から数千倍）、加工速度が速い（スパッタ率が高い、数十から数百倍以上）、絶縁物の加工が可能である（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℃で10秒間加熱し、注入したホウ素を電氣的に活性化させ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、異なった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^[1]。

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。^{[2][3]}

まず、フォーカスの異なった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。

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.

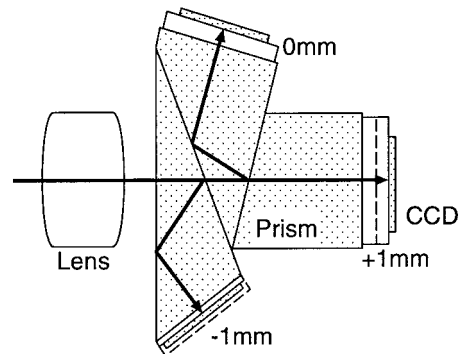


図1：多重フォーカスカメラ

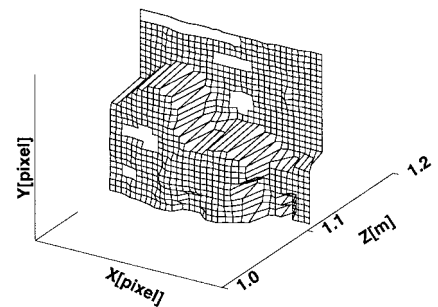


図2：3次元距離画像



図3：入力画像

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

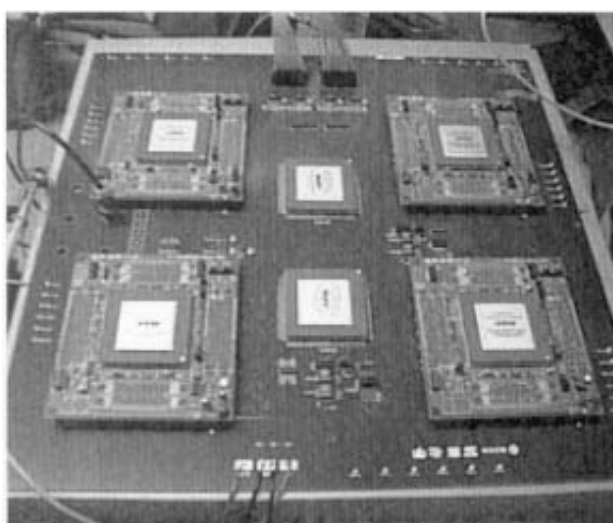
- 干渉キャンセラの理論、計算機実験、試作 -

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。

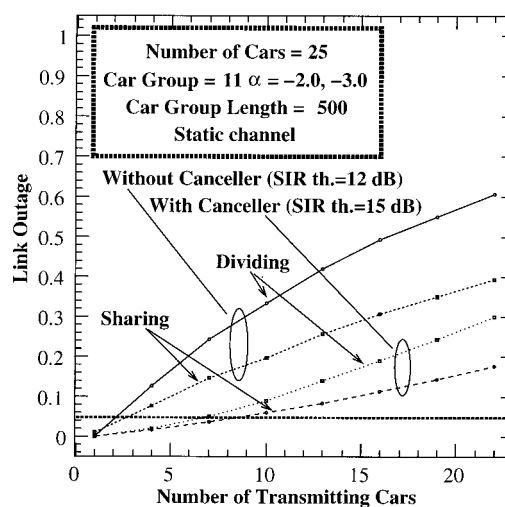
第3世代携帯電話システムの実用化を目前に控え、次々世代(第4世代)携帯電話システムの研究が開始されている。この第4世代システムでは再び時分割多元接続(TDMA)が候補となっている。これは、周波数帯域確保の観点等から符号分割多元接続(CDMA)でのこれ以上の高速伝送が難しいこと、並びに、CDMAでは基本的なチャンネル間直交度が不足していることに起因する。多元接続方式としてTDMAを用いると、電波の反射、回折によって生じる多重経路伝搬に起因する遅延波(エコー成分)、および、近隣での同一周波数再利用によって生じる同一チャンネル干渉波が最大の問題となる。本研究では、これらへの対策として最尤系列推定理論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

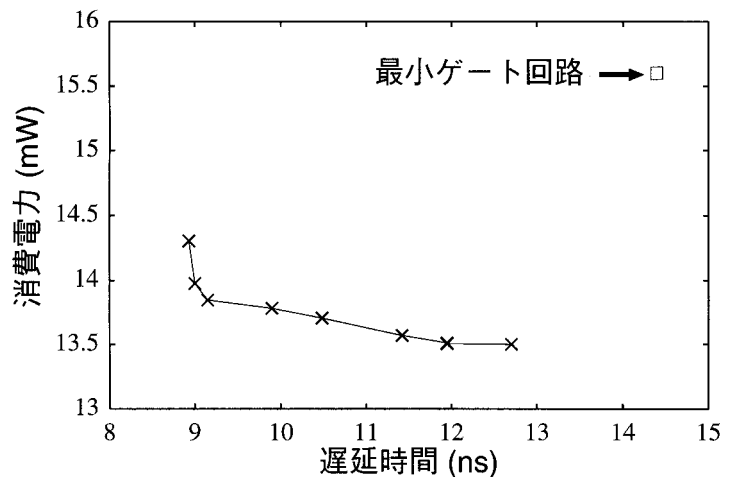


図1 . C5315と呼ばれるベンチマーク回路の高速・低消費電力化結果

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。[†]

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。^{††}

† 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

†† 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

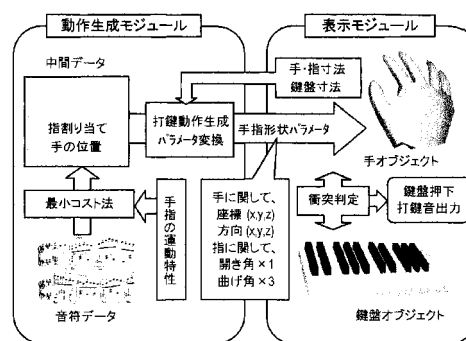


図3 システム構成と各メッセージの流れ

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^{[1][2]}。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)

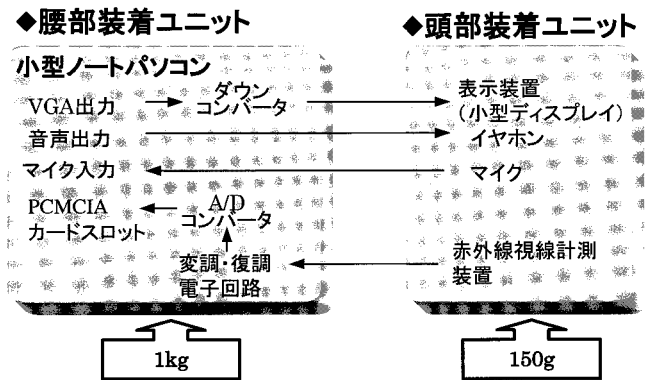


図1 HIDEの全体構成

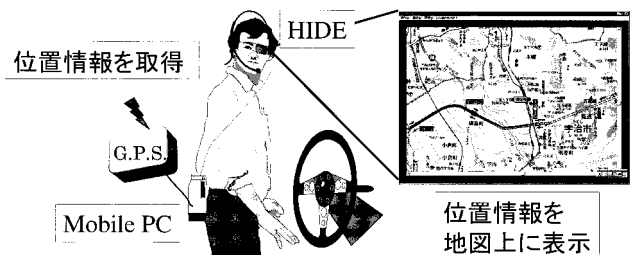


図2 カーナビへの応用

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準化用の電気エネルギー貯蔵装置として貯蔵効率が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) 液体領域は線によって二つの領域 He I 相と He II 相に分けられる。線は、点(2.173K, 50.52 mbar)からはじまり、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捲線の狭い隙間にも自由に出入り出来、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捲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ラの大型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 中の捲線内では、定常・非定常熱入力に対し2次元ないし3次元な冷却が行われ、1次元な冷却特性に比し、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次元な冷却設計基準の確立が望まれるが殆ど手がつけられていなかった。本研究室では、He II 中の捲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、先ず、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。

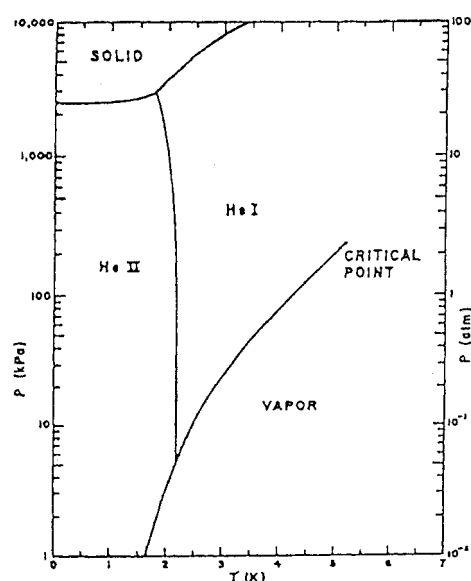


図1 HIDEの全体構成

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-³He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（重水素と三重水素ガス）を用いた実験で 10^9 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、 5.0×10^6 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として、球形状の一部分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。

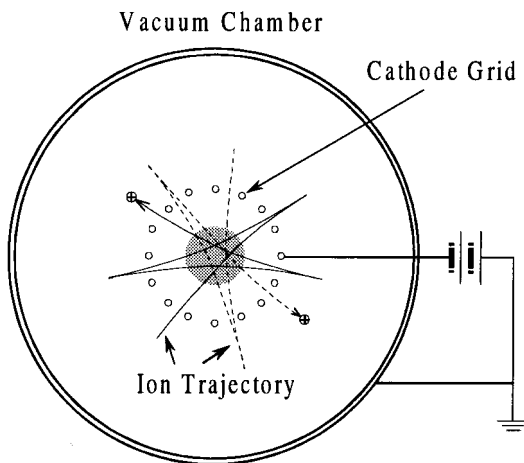
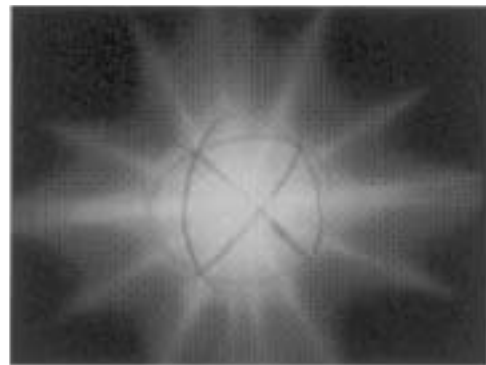


図 IECFの概念

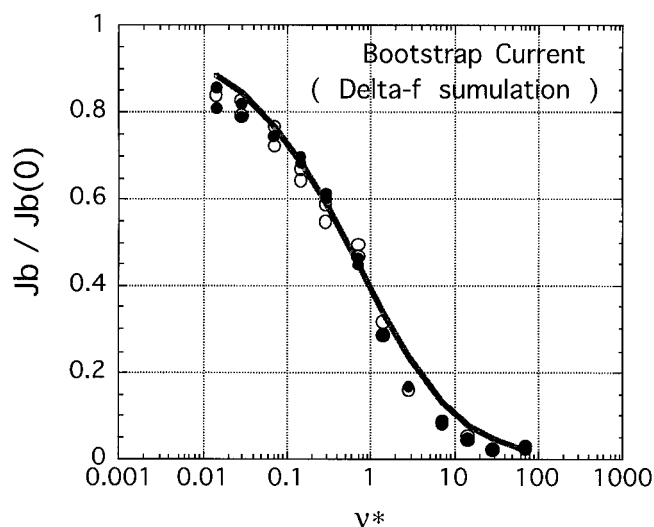


放電の一例

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さ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

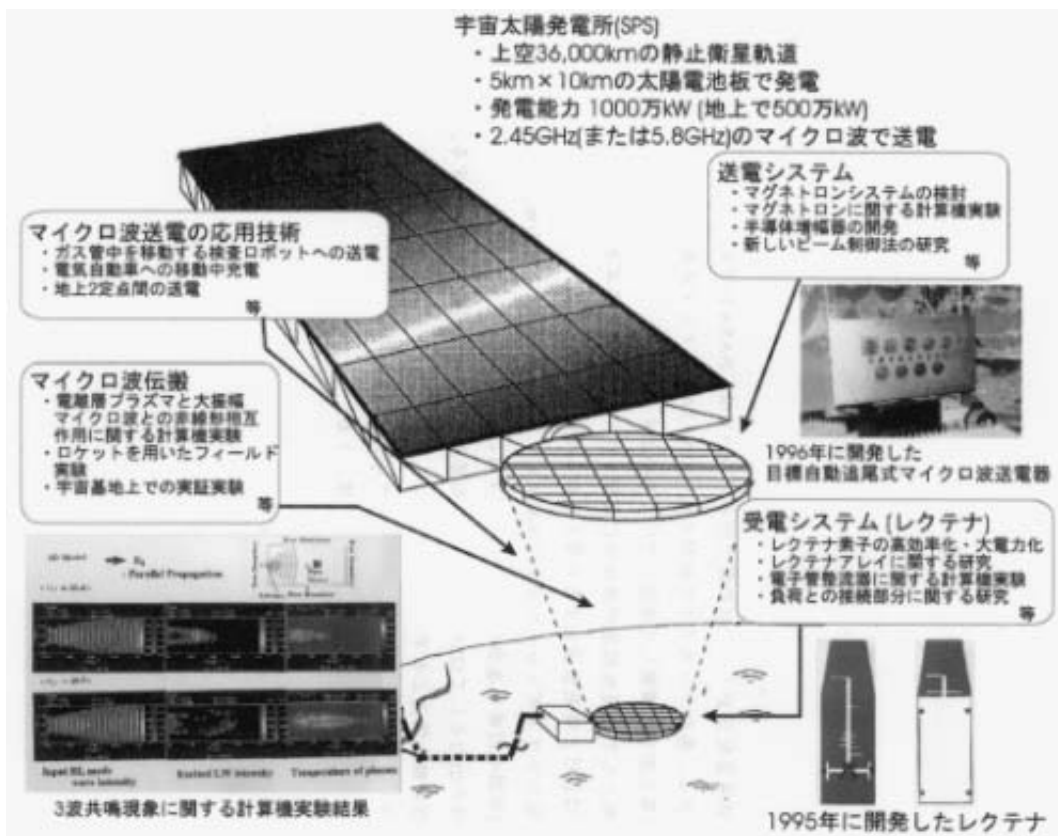
- (1) K.Hanatani, Stellarator transport simulation using delta-f Monte Carlo algorithms, Joint conference of 11th international stellarator conference and 8th International Toki conference (September, 1997); Journal of Plasma Physics and Fusion Research (JPFR) Series 1, (1998) 472.
- (2) 花谷 清, delta-f 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電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）

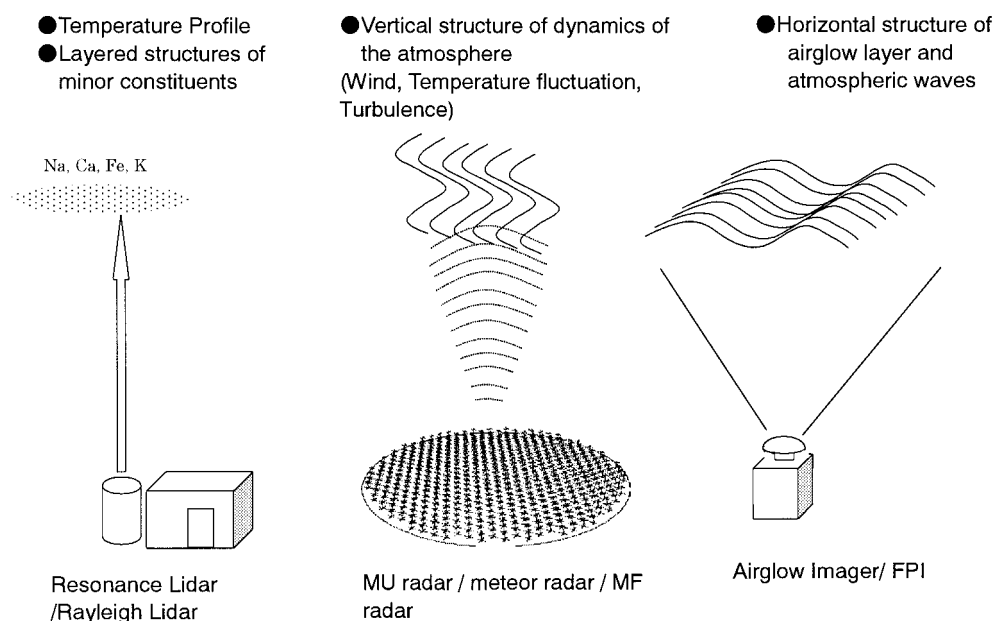
電波と光学の複合観測による地球大気環境上部のリモートセンシング

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 - 偏移で飛跡周辺の風速が分かります。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。



博士論文一覧

【課程博士一覧】

西野 克志	Crystal Growth of 3C-SiC on Lattice-Matched SiC Substrates and Its Photoluminescence (格子整合したSiC基板上への3C-SiCの結晶成長およびそのフォトルミネセンス)	平成9年11月25日
増田 開	Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement (数値解析コードの開発及びその適用によるクライストロン高効率化の研究)	平成10年3月23日
Jiri Stetina	Corpus Based Natural Language Ambiguity Resolution (コーパスに基づく自然言語の曖昧性解消)	平成10年3月23日
森 信介	テキストコーパスからの確率的言語モデルの推定	平成10年3月23日
森江 隆史	アナログLSIの設計方法の保存と再利用に関する研究	平成10年3月23日
岩下 武史	Study on Stabilization of Large-Scale Coal-Fired Linear MHD Generators (大型石炭燃焼直線型 MHD 発電機の安定化に関する研究)	平成10年3月23日
浅野 卓	量子井戸のサブバンド間遷移の短波長化と超高速光制御光変調に関する研究	平成10年3月23日
田 崇	プラズマ励起有機金属気相エピタキシーによるGaInN/GaNの成長とその特性に関する研究	平成10年3月23日
高 賢哲	Fabrication and Optical Properties of Low-Dimensional Quantum Structures in ZnCdSe Semiconductor System (ZnCdSe系半導体低次元構造の作製と光物性に関する研究)	平成10年5月25日
西田 貴司	rfマグネトロンスパッタ法によるLiNbO ₃ 薄膜の作製とその弾性表面波特性に関する研究	平成10年5月25日

西野克志

「Crystal Growth of 3C-SiC on Lattice-Matched SiC Substrates and Its Photoluminescence」

(格子整合したSiC基板上への3C-SiCの結晶成長およびそのフォトルミネセンス)

平成9年11月25日授与

情報化社会の基盤は、Siを中心とした半導体技術である。Siは多くの優れた性質を持ち、集積回路を初め様々な分野で使用されているが、Siの物性から来る性能の限界が存在し、新たな半導体材料が求められている。特に、Siのパワー電子素子の性能は限界に近付き、新しい材料に強い期待がもたれている。その候補としてSiCが注目されている。

SiCには、その結晶構造に1次元方向の原子の積み重なり方が異なるポリタイプ(結晶多形)が多数存在する。唯一の立方晶である3C-SiCは、大きな電子移動度を持つ材料として注目されてきたが、高品質の大型単結晶が作製できない。3C-SiCの大型単結晶を得るために異種基板を活用せざるを得ないが、大きな問題が存在する。3C-SiCは主にSi基板上に作製されているが、Siと3C-SiCには格子不整合が約20%、熱膨張率の差が約8%存在するため、得られた結晶中には多数の欠陥が存在し、高品質化は困難であると考えられている。6H-SiC基板上では、成長層には双晶の一種であるdouble positioning(DP)が存在し、成長層表面に多数のDP boundary(DPB)が見られるという新たな問題が生じる。

著者は、これらの難点を克服して高品質の3C-SiC単結晶を作製するために、15R-SiCポリタイプを基板に用いるとDPBの少ない3C-SiCが得られるとの予測の基に、常圧熱CVD(chemical vapor deposition: 化学気相堆積)法による結晶成長を行った。原料ガスは SiH_4 、 C_3H_8 で、キャリアガスには H_2 を用いた。典型的な成長温度は1500 である。図に成長した結晶表面の写真を示す。モザイク状パターンがDPBであり15R-SiC基板上成長層では6H-SiC基板上成長層より極端に少なくなっていることが分かる。また、成長に伴ってDPBが減少していく。この結果を基に提案したDPB減少モデルを用いると、成長に伴う個々のDPB面積の減少を半定量的に説明できた。電気的、光学的評価の結果、15R-SiC基板上の3C-SiCはSi基板上の成長層より高品質であることが判明した。

3C-SiCの結晶成長において基板として最適なものは3C-SiCである。そこで、成長速度の大きな昇華法により、基板として使用可能な3C-SiCの大型結晶成長を試みた。3C-SiCは低温で安定であり、2000 程度の高温を要する昇華法で3C-SiCが得られたという報告は極めて少ない。3C-SiCを得るためにはより低温で成長する必要があるが、あまり温度が低すぎると原料SiCが昇華しない。そこで長いつぼを使用することにより、原料温度を2100 程度に保ったままで、種結晶温度を1800 以下に低く抑え成長した結果、DPBは存在するものの、平坦な表面を持つ3C-SiCが得られた。DPBの存在しない領域は、最大で15R-SiC基板上に成長した3C-SiCの2倍程度であった。次に、昇華法で作製した3C-SiC基板上にCVD法による3C-SiCの結晶成長(ホモエピタキシャル成長)を行った。電気的、光学的評価を行ったところ、成長層は15R-SiC基板上に成長した3C-SiCと同様、Si基板上成長層より高品質であった。

15R-SiC基板上の3C-SiCとホモエピタキシャル成長の3C-SiCの、詳細なフォトルミネセンス特性を解析した結果、成長層が非常に高品質であることが確認できた。

これらの成果は今後の3C-SiCの物性研究ならびに応用研究への大きな足掛かりになる。

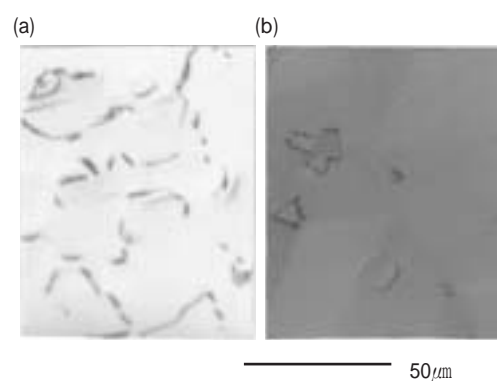


図 (a) 6H-SiC基板上(b)15R-SiC基板上成長3C-SiC

増田 開

「Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement」

(数値解析コードの開発及びその適用によるクライストロン高効率化の研究)

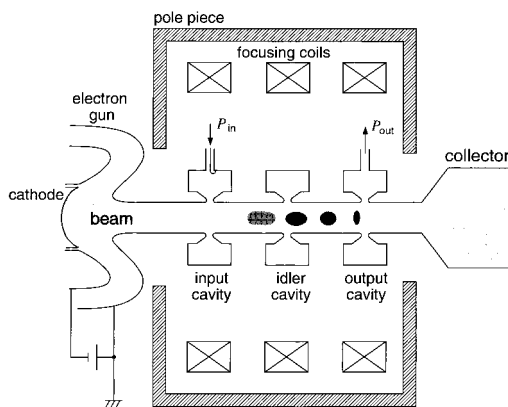
平成10年3月23日授与

クライストロンは、1939年に発表された電子ビームの速度変調を用いたマイクロ波増幅管で、最も一般的などころではTV放送などに用いられています。クライストロンは左下図のように、電子銃、複数の共振空洞、並びに使用済みの電子ビームを処理するコレクターで構成されており、電子銃で生成された直流ビームは、先ず入力空洞で速度変調を受け、ドリフトチューブと呼ばれる領域を走行する間に集群し、最終段の出力空洞にマイクロ波を励起します。MW級の大出力のクライストロンは、これまで粒子加速器研究やプラズマ加熱研究などの学術研究や軍事研究といった経済性においてあまり制約されない分野で主として用いられてきました。また、ジャイロトロンなどの他のマイクロ波管と比べて原理的に高効率(60%程度)であるため、その高効率化はさほど重要視されてきませんでした。しかし近い将来においては、自由電子レーザーや放射性廃棄物の消滅処理などにおいて粒子加速器の大規模な工業利用が進むと予想され、したがって、それらの高周波電源としての大出力クライストロンの高効率化は、それら工業利用の成立性に密接に関わっており、必要不可欠となっています。

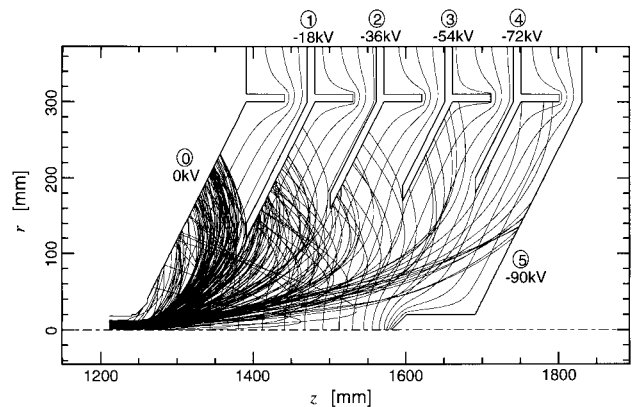
そこで私は、クライストロンの解析に必要な軸対称二次元の磁場計算コード・共振空洞固有モード計算コード・時間依存の粒子シミュレーションコードなどを開発して実機測定結果との比較によって検証し、それらを用いて以下の二つの方法によるクライストロン高効率化の可能性を検討しました。

第一に、電子銃における加速エネルギーの40%程度のエネルギーを有する使用済み電子の、直接エネルギー変換による回収が考えられます。すなわち、従来水冷コレクタで熱として廃棄されてきた使用済み電子の運動エネルギーを、逆電界を印加することにより回収するという方法です。このエネルギー回収型コレクタを、ドリフトチューブへの戻り電子の無いように、また二次電子損失の少ないように設計し(右下図参照)回収効率38%、総合効率70%以上が得られることが分かりました。

高効率化のもう一つの方法として、従来の電子銃に代えて中空ビームを生成するホローカソードを用いる方式が考えられます。一般にクライストロン共振空洞の電界強度は、ビームの中心から離れるほど強くなる分布となっており、中心付近のビームは空洞電界と効果的な相互作用を行えません。そこで、中空ビームを用いれば全てのビームをより効果的に相互作用させることができ、同じ入力電力でより大きい高周波出力を得ることができる可能性があります。シミュレーションの結果、ある最適なホロー半径のビームを用いた場合に、効率は従来の60%から67%にまで改善されることが分かりました。



クライストロンの断面模式図



エネルギー回収型コレクタ内の電子軌道

Jiri Stetina

「Corpus Based Natural Language Ambiguity Resolution」

(コーパスに基づく自然言語の曖昧性解消)

平成10年3月23日授与

The automation of the processing of natural language would inevitably bring enormous benefit to mankind. Devices capable of interpreting human commands to machines, intelligent dialogue systems, natural language interfaces to databases, text analysis systems, knowledge extraction systems, machine translation and many others constitute the ultimate goals of the current research in Natural Language Processing (NLP).

The fundamental problem that must be solved before a successful NLP system is put to work, is the clarification and accomplishment of language understanding. Natural language understanding, however, involves the resolution of many linguistic phenomena, particularly natural language ambiguities, which in turn requires the application of a wide range of knowledge. Acquisition of this knowledge constitutes the main difficulty of all NLP systems. Recent research in NLP has focused on the extraction of the relevant knowledge from a large training corpora. Corpus-based statistical NLP, however, usually suffers from a sparse data problem and from an insufficient or inadequate use of linguistic knowledge.

This work presents a framework in which a large semantic dictionary facilitates the statistical processing of language through the application of machine learning techniques, reduces the sparse data problem, and provides additional linguistic knowledge in the form of paradigmatic semantic relations.

A resolution of both the structural and semantic natural language ambiguities is attempted and experimental results are compared with other major approaches.

Prepositional phrase attachment is selected as the most frequent and the most difficult representative of structural ambiguity and a new supervised learning method for prepositional phrase attachment is presented. The utilization of the large semantic dictionary leads to an accuracy which is higher than the accuracy of any existing method and which is very close to human performance for the same task -- over 88% correct prepositional phrase attachments.

This work also presents a new general supervised word sense disambiguation method based on a relatively small syntactically parsed and semantically tagged training corpus. The described method, hierarchical disambiguation, exploits a full sentential context and all the explicit semantic relations in a sentence to identify the senses of all of that sentence's content words. The utilization of the semantic dictionary and combination of the syntactic and semantic information leads to an overall accuracy of 80.3%, which exceeds the accuracy of a statistical sense-frequency based semantic tagging, the only really applicable general disambiguating technique.

All methods and algorithms described in this work are experimentally verified and the results are presented in comparison with other approaches.

森 信 介

「テキストコーパスからの確率的言語モデルの推定」

平成10年3月23日授与

自然言語を研究対象とする言語学は、伝統的に研究者の内省に基づく定性的かつ主観的な議論に終始する傾向があり、近代科学の条件を満たしていなかった。これは、言語現象が複雑であるだけでなく、言語がそれ自身のみでは本質的に普遍的でないことに起因する。このような背景のもと1948年にシャロンは情報理論を確立し、この理論に基づいて自然言語を確率的現象としてとらえる極めて数理的な立場を提案した。つまり、自然言語をある情報源からの記号列とみなし、言語に対する仮説をその情報源に対する予測力という基準で評価するという方法である。このため、言語に対する仮説は必然的にその言語のアルファベット列を定義域とする確率分布として表現される。このような仮説は、確率的言語モデルと呼ばれる。

この枠組では、言語に対する仮説はアルファベット列から確率値への写像として表現されることだけが条件である。最初のモデルは、シャノンによる連続する n 文字(n -gram)の頻度を利用するモデルである。具体的には、ある自然言語に属する文を大量に集めたコーパス中に、その言語を記述するために用いられる文字がどのように出現するかを観測し、その結果に基づいてモデルのパラメーターを決定する。このとき、注目する文字列の長さ n が大きくなる程よい近似となることが示せる。

一方、1956年にチョムスキーは、自然言語の記述を目的として、3つの形式的な言語モデルを提案した。これらは、シャノンの立場とは異なり、自然言語を集合としてとらえている。この立場でのある言語の記述は、その言語のアルファベット列を要素とする集合を、その言語に属するアルファベット列(文)と属さないアルファベット列(非文)とに峻別する。これは、言語のアルファベット列を定義域とし、真偽を値域とする関数とみなすこともできる。このようなモデルは現在、形式言語理論として知られている。これらには、シャノンの確率的言語モデルでは捕らえられなかった離れた要素の関係を記述することができる文脈自由文法や文脈依存文法などが含まれる。さらに、このようなモデルに確率の概念を導入するという拡張が提案されている。

本論文では、自然言語を確率的現象としてとらえる立場を踏襲し、様々な確率的言語モデルの予測力の評価と自然言語処理への応用について述べる。確率的言語モデルとしては、確率正規文法(n -gramモデル)と確率文脈自由文法を用いる。文字や形態素や文節を予測単位として、これらの文法を用いた日本語の確率的言語モデルを推定する。さらに、予測単位をクラスと呼ばれるグループに分類し、予測力を向上する方法を提案する。これにより、確率的言語モデルの応用としての自然言語の認識や解析の精度が向上する。応用例として、形態素解析と構文解析について述べる。

森 江 隆 史

「アナログLSIの設計方法の保存と再利用に関する研究」

平成10年3月23日授与

集積回路技術の目覚ましい進歩により、IC(Integrated Circuit)の集積度は10年で100倍と言う驚異的な勢いで増大しており、今やシステム全体を一つのシリコンチップに搭載したSLSI(System LSI)も実現可能となってきた。

MD, DVD, 携帯電話, デジタルカメラ, ムービーなど、市場にでまわっている多くの機器は、デジタル回路とアナログ回路の双方から構成されている。これらの製品では信号処理のデジタル化がすすめられているが、無線信号や光ファイバ中の信号、ディスク上の信号などは、すべてアナログ信号であり、これを扱えるアナログ回路なくしては、これらの製品を実現することはできない。システムを1チップ化するためには、デジタル、アナログ双方の回路を効率的にLSI化することが不可欠である。デジタルLSIの設計の分野では、CAD (Computer Aided Design)および自動設計環境が整備されており、効率的な回路設計が可能になっている。これに対し、アナログLSIの設計のCAD技術はまだ未熟で、現在でも熟練設計者が専門知識や設計ノウハウに基づいて人手で設計を行っている。この結果、システム全体でアナログ回路が占める割合は低いにもかかわらず、設計コストや設計期間の多くがアナログ回路設計に費やされるという問題を引き起こしている。

本研究では、設計方法の保存・再利用化という新しい効率的なアナログLSIの再利用設計手法を提案した。従来の再利用設計は、図1(a)に示すように、熟練設計者が設計した回路を保存し、そのライブラリ化を図る。しかし、仕様が変われば同じ回路は当然使用できないため、再利用率が上がらず、結局人手による修正や再設計が必要となる。

これに対し、提案手法では、図1(b)に示すように、熟練設計者がいかに回路を設計したのかという設計方法を再利用する。一度回路を人手で設計し、その設計方法が獲得できれば、異なる仕様が与えられた場合や、新たな製造プロセスが開発された場合にも、設計方法を再利用することによって回路を迅速に自動設計することができる。

本研究では、アナログLSIの回路設計と素子レイアウト設計に対し、本設計手法の実現方法を考案し、実際にCADを試作して(図2)その有効性を確かめた。

オペアンプ規模のアナログLSIの設計実験により従来の人手設計と設計時間を比較した。その結果、設計時間を数時間から数十分に大幅に削減できることを確認した。提案手法では、設計者の設計過程より、できるだけ効率良く設計情報を保存するために、不確かな設計方法の表現を導入したり、その情報に基づいて、解探索を行い、効率良く設計をする手法などを導入することで、再利用率を高めている。

今後の課題は、より大規模な回路への手法の適用や、再利用率の更なる向上である。

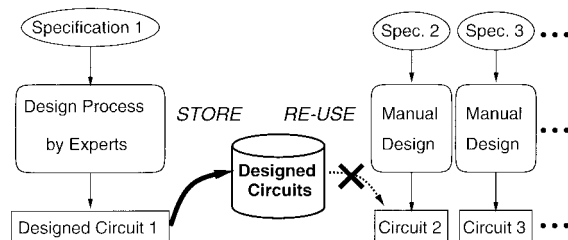


図1 従来設計手法と提案設計手法

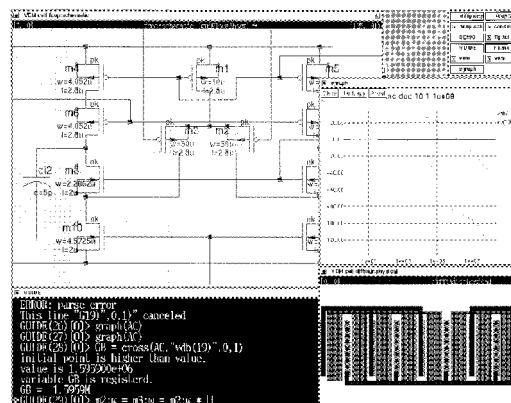


図2 試作CAD GUIDEの使用例

岩 下 武 史

「Study on Stabilization of Large-Scale Coal-Fired Linear MHD Generators」 (大型石炭燃焼直線型 MHD 発電機の安定化に関する研究)

平成10年3月23日授与

オープンサイクルのMHD発電機は、図1のように、導電性を持った高温の燃焼ガスを磁界内で高速に流すことにより発電を行う直接発電の一つで、従来のタービン発電機の前段に取り付けることによりシステムの総合熱効率を上げることができます。MHD発電システムは、NO_x、SO_xの除去が容易であり、石炭を直接燃焼して50～60%の高い効率を得られることから、今後エネルギー供給源として期待される石炭を高効率低公害に利用する手段として注目されています。アメリカ、ロシアではすでに熱入力50～250MWのパイロットプラント級の発電実験に成功しており、この間に発電機の大型化を阻害するなんら重要な現象は発見されていません。従って、オープンサイクルMHD発電技術は熱入力1000MW以上の商用規模級の実験を行う段階にあるといえます。そこで、我々の研究グループでは、商用規模MHD発電機に関して、MHD-汽力複合システムの概念設計や発電機内プラズマの解析的研究を行ってきました。その過程において、大型の石炭燃焼MHD発電機の動作が不安定となる可能性が新たに発見されました。ここでの不安定とは、発電機に若干の外乱が入った場合に、衝撃波を発生するなどして流体の諸量が設計点を大きく逸脱することをいいます(図2参照)。そこで、本論文では、直線形のMHD発電機(図1のような筒状のもの)を対象とし、発電機を安定化させる方策について検討を行いました。

MHD発電機は、超音速流体を用いる超音速機と亜音速流体を用いる亜音速機に大別されます。

超音速機を対象とした解析では、負荷電流中や流れの中の擾乱の成長について検討を行い、負荷電流や電極電流に対して適当な制御を行うことにより発電機を安定化できることを示しました。

一方、亜音速機を対象とした解析では、まずチャンネル内に生ずる波動の局所的な成長率を調べ、従来提案されてきた音速に近い流速を持つ高亜音速型の発電機が不安定となり易い事を示しました。次に、本論文では新たに、チャンネル内で比較的低いマッハ数を持つ発電機を提案しました。そして、この発電機が、高亜音速型の発電機と同等の出力を有すること、ディフューザの性能の観点から有利であること、電極電流に特別な制御をすることなく安定な動作を行うことを示しました(図3参照)。本論文ではさらに、この亜音速MHD発電機を他励式インバータを介して電力系統に接続した場合について、発電機の安定性、動作特性について調べました。その結果、MHD発電機がインバータを介して安定に定格出力を系統に供給できることを示しました。また、系統に地絡故障などの事故が起きた場合でも、インバータの点弧角を制御することにより、発電システムを定格状態に戻すことができることを示しました。

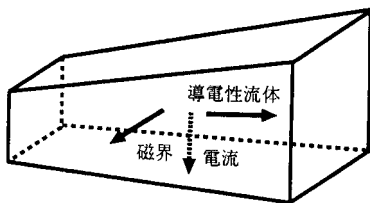


図1 MHD発電機

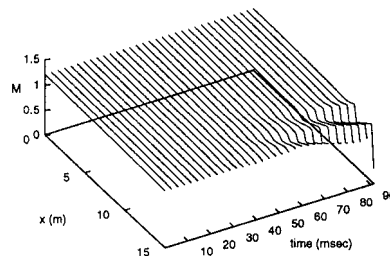


図2 不安定な流れ
マッハ数分布

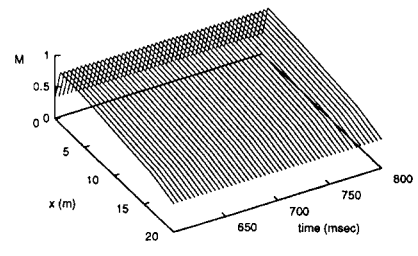


図3 安定な流れ
マッハ数分布

浅野 卓

「量子井戸のサブバンド間遷移の短波長化と超高速光制御光変調に関する研究」

平成10年3月23日授与

今後の社会においては、産業基盤・社会基盤としての情報通信網の役割がますます大きくなり、近い将来1~10テラビット/秒レベルの信号伝送・信号処理技術の確立が必要となると考えられる。しかしながら、現在利用されている半導体レーザ光を外部電気変調器で制御するシステムでは、数10ギガビット/秒程度の通信速度が限界と言われており、テラビット/秒以上の通信速度を得るには、電気的回路を用いない超高速の光制御技術が要求される。そのような方法の一つとして、光(制御光)によって物質の電子状態を変化させることで、他の光(信号光)に対する吸収あるいは屈折率を変化させる、すなわち光によって直接光を制御する方式が考えられる。この場合、外部的な電気回路を用いないため、物質の特性をそのまま活用できる。よって、応答速度が十分に早い電子状態を用いれば、超高速の光制御が実現できると考えられる。

このような背景のもと、私はテラビット/秒レベルの光情報通信網実現の一助となるべく、サブバンド間遷移を利用したピコ秒(~サブピコ秒)程度の超高速光制御光変調デバイス(図1)の実現を目標に研究を行ってきた。半導体量子井戸中に電子の量子化エネルギー状態(サブバンド)が複数存在する場合、光吸収を伴うサブバンド間の電子遷移が可能になる。このサブバンド間遷移は、励起された電子がフォノン散乱過程を通して初期状態に緩和できるため、ピコ秒(~サブピコ秒)程度という非常に短い緩和特性をもつ。本研究ではまず、通常利用されるAlGaAs系量子井戸における長波長(~10 μm)のサブバンド間遷移を用いた光制御光変調を自由電子レーザによって実証する研究を行ない、ピコ秒程度の超高速光-光スイッチングが可能であることを示した。また、実用性をより高めるため、従来では4 μm 以上であった遷移波長を短波長化する研究にも取り組んだ。エネルギー的に深い量子井戸を構成できる独自の新材料系(GaAs基板上のInGaAs/AlAs)を導入することで、波長1.9 μm までの短波長化を達成し、サブバンド間遷移デバイスの光ファイバー通信網(1.55 μm)への適用に見通しをつけた。さらに、この短波長化サブバンド間遷移が従来の長波長のそれと同様に、超高速の緩和時間をもつのか否かを明らかにすることを試みた。極短光パルスを用いてサブピコ秒レベルの時間分解能での緩和時間測定を行ない、遷移波長2.5 μm において緩和時間が2.7 ps程度との結果を得た(図2)。これにより、短波長化サブバンド間遷移が超高速の応答特性を持つことを初めて実験的に明らかにした。今後は、この短波長化サブバンド間遷移を用いた変調デバイスの実現を目指すとともに、より高速な応答が期待できる窒化物半導体への展開も計画している。

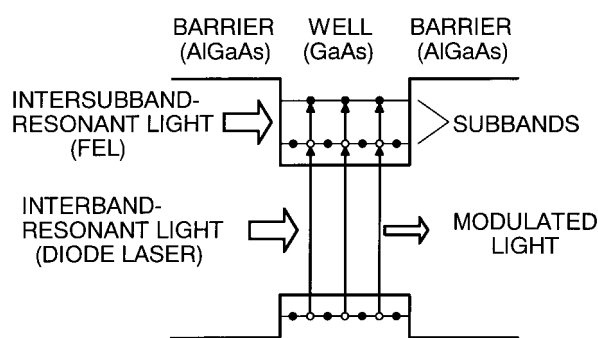


図1：サブバンド間遷移を用いた光制御光変調の原理。制御光によって電子をサブバンド間励起することで、バンド間遷移に共鳴する信号光に対する吸収の大きさを変調する。

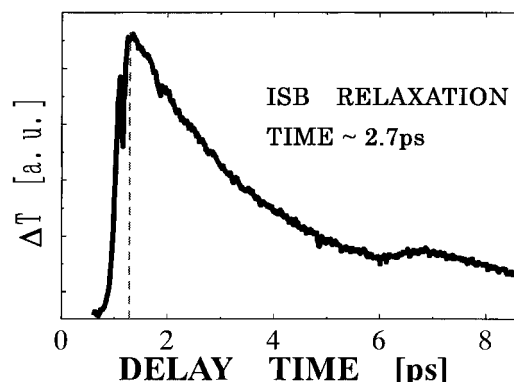


図2：短波長化サブバンド間遷移の緩和特性。遷移波長2.5 μm において緩和時間2.7psという超高速の応答が観測された。

田 崇**「プラズマ励起有機金属気相エピタキシーによるGaInN/GaNの成長とその特性に関する研究」
平成10年3月23日授与**

発光ダイオード(LED)、あるいはレーザーダイオード(LD)といった、半導体による発光素子(デバイス)は、その発明以来われわれの生活に深く浸透し、情報化社会における情報の記録、伝達の上で大変重要な役割を担っている。その半導体発光デバイスの重要なトピックの一つが、次世代の光記録や情報伝達を担う青色発光デバイスの実用化である。特に、90年代に入ってからその結晶成長技術が大きく進歩したGaInN/GaN系半導体は、青色発光デバイスの材料の中でも最も注目されている材料である。

現状のGaInN/GaN系材料の結晶成長技術には、克服しなければならない本質的な問題点がいくつか指摘されている。そのなかでも、GaNおよびGaInNの適性成長温度が大きく異なる(GaNは1000 以上、GaInNは700~800)ことは、将来的に原子レベルの積層構造を実用化していく上で大きな問題となると考えられる。本研究では、この温度差の問題を解決するため、プラズマ励起有機金属気相エピタキシー(プラズマ励起OMVPE)という結晶成長技術を導入し、従来のOMVPE法では困難であった、GaInN/GaN異種接合構造の同一温度成長に取り組んだ。

本研究で用いたプラズマ励起OMVPE法の最大の特徴は、結晶成長のための窒素源として、従来のアンモニアガスの変わりにプラズマ励起N₂を採用している点である。アンモニアの分子は化学的な安定性が高く、これが従来のOMVPE法において結晶成長の温度を高くしなければならない要因の一つとなっていた。これに対し、プラズマ励起OMVPEでは、プラズマ放電を用いて窒素を励起し、反応可能な状態にしてから供給するため、基板温度がそれほど高くなくても良い結晶性のGaNやGaInNを成長できると期待される。

本研究では、発光デバイスの基本構造であるGaN/GaInN/GaN二重異種接合構造を、プラズマ励起OMVPEを用いて同一温度で成長することを大目標に据え、以下のようなことを明らかにしていった。

1. プラズマ励起OMVPE法を採用することによって、従来のOMVPE法よりも低い温度における良質なGaNの成長をめざした。その結果、800 においてもGaNの成長が可能であることを実証した。
2. GaNの成長温度のさらなる低温化をめざし、プラズマ励起N₂によるサファイア基板の窒化処理を検討した。その結果、550 という非常に低い温度におけるGaNのエピタキシャル成長に成功した。
3. GaInNの成長においては、従来の方法では困難であった680 における全組成GaInNの成長を実現した。さらに、Inの取り込みの温度依存性が小さいことを見出し、プラズマ励起OMVPE法が組成制御性の面でも有利であることを示した。
4. 研究の最終過程においては、GaN/InN/GaNを含む全組成GaN/GaInN/GaN二重異種接合構造の成長を680 において実現し、プラズマ励起OMVPE法による青色発光デバイスの成長が可能であることを実証した。

高 賢 哲

「Fabrication and Optical Properties of Low-Dimensional Quantum Structures in ZnCdSe Semiconductor System」

(ZnCdSe系半導体低次元構造の作製と光物性に関する研究)

平成10年5月25日授与

大量の情報を超高速に処理し伝送する、それを記憶あるいは記録する、さらにマン・マシーンインターフェイスの担い手として情報を高品質に表示するといった光エレクトロニクスの技術開発は、21世紀に向けたマルチメディアの高度化・高機能化に不可欠となっており、その中核を担うのが半導体レーザや発光ダイオードを始めとする半導体光機能デバイスである。近年のワイドギャップ半導体を中心とする光機能材料研究の急速な発展によって、短波長発光デバイス、とくに緑色から青色さらに青紫色発光デバイスの実用化を見るに至り、ここに超高密度大容量光記録装置(次世代DVD)やレーザディスプレイ、大型フルカラーフラットパネルディスプレイ、照明光源等への応用が期待されるようになってきた。このような状況において、コンパクトな半導体光デバイスのより一層高い発光効率・量子効率の追究はあらゆる用途に不可欠である。高効率化のための研究の一つの方向性として、低次元量子構造と励起子を利用することが有望である。なぜなら低次元量子構造に閉じ込められた励起子は、大きな発光再結合確率を持つ可能性があるためである。このような観点に立って、本研究では、緑から青色領域に対応するバンドギャップを持つII-VI族半導体ZnCdSe系半導体を取り上げ、この材料系では従来困難とされてきた量子井戸構造、量子細線構造、量子ドット構造などの低次元量子構造を、新しい作製技術によって構築すること、および、それらの量子構造の構造評価と励起子光物性を明らかにすることを目的として研究したものである。

結晶成長は分子線エピタキシャル(MBE)法を用いた。まず、超高真空下で劈開させたGaAs(110)劈開面上へのZnSeのヘテロエピタキシャル成長を行い、成長形態と成長条件との関係を詳細に調べ、平坦な二次元薄膜成長の最適化条件を見出した。すなわち、(110)面は(001)面とは異なり二種類の原子が共存する無極性面であるため、成長温度や原料の供給比、さらには初期に供給される元素の種類といった成長条件が膜質に大きく影響すること、結晶成長モードが二次元から三次元になる臨界膜厚の制御が可能であること、さらに、超高真空下で劈開した清浄なGaAs(110)面が、ZnSeの二次元的成長モードに極めて有効であることを示した。これらの成果をもとに、GaAs(110)劈開面上にZnSe/ZnCdSe単一歪み量子井戸構造を作製、フォトルミネッセンス発光線の半値幅を調べ、それが活性層のZnCdSeの混晶揺らぎによる限界値に近いこと、量子井戸の界面の揺らぎが少ない高品質な構造であることを示した。さらに、作製された量子井戸構造は強い面内偏光特性を持つことを見出し、理論的結果との比較検討を行って、その偏光特性が活性層の歪みによって増幅されることを明らかにした。これらの結果から、このような量子井戸構造を偏光素子として応用し得ることや、従来困難であった面発光レーザの偏光制御が(110)面を基板に用いることによって可能であることも示した。次に、GaAs(110)劈開面上のZnCdSe系半導体の自己組織化ナノ構造構築に対する成長条件の検討を行った。(110)劈開面上に格子定数が大きいZnCdSeを成長させると、格子不整合性に起因した歪みの緩和過程の面内異方性により、表面にリッジや島などナノ構造が形成され、さらにリッジ状の構造上に島構造が自己整列する新しい現象を発見し、自己形成した量子ドットの二次元的な位置制御の可能性を示した。さらに得られたリッジ状構造を利用してCdSe/ZnCdSe量子細線を作製し、強い一次元性の光学的特性を観察して、自己形成法による量子細線の新しい作製法の可能性を示した。三次元閉じ込め構造である量子ドットの作製に関しては、GaAs(110)劈開面上にZnSeを成長した後、大きい歪みを持つCdSeを成長させることによって、いわゆるS-Kモードによる自己形成量子ドットの作製に初めて成功した。その構造の光物性評価から、三次元的に閉じ込められた強い励起子発光線を観測し、顕微フォトルミネッセンス測定から、その発光が各量子ドットからの発光であることやその発光の二次元的分布に対する知見を得た。今後は、これらの成果をもとに低次元量子構造を活性層とするデバイスへの展開が望まれる。これが実現すれば、ZnSe系発光デバイスの高効率化に大きく寄与するものと考えられる。

西田 貴司

「rfマグネトロンスパッタ法によるLiNbO₃薄膜の作製とその弾性表面波特性に関する研究」 平成10年5月25日授与

はじめに - 情報通信と材料研究 現在、携帯電話が広く普及するようになった。また、BSや最近ではCS等の衛星放送も特に珍しくはなくなり、最近では車載GPSを使ってドライブをすることや、もうすぐ地球規模で使える衛星電話“イリジウム”も利用できるようになるだろう。このように、移動体通信や衛星通信等の新しい通信手段が日常生活に大いに役立つ、さらには欠かせないものとなった。このような機器は昔からあるにはあった。しかし、サイズやコスト的にみても日常生活に使えるものではなく、特殊業務や軍事用など限られた範囲でだけ使われていた。それが、今日普及しているのは、通信技術をはじめとして集積回路技術や新材料の開発、回路実装にいたるまでの、幅広い技術の結合の成果である。そのため、通信関連の研究・開発は多くの分野にまたがって、幅広く行われている。そのため、本研究は新しい強誘電体材料の研究であるが、特にこの情報通信を意識した研究となった。

最近の強誘電体(機能)材料研究 - 材料の薄膜化 強誘電体とは「電場を加えないでも、誘電分極を保ちうるような物質」(広辞苑)であるが、応用的には環境からの多種の刺激(電界、温度、圧力等)に敏感に反応する材料、つまりセンサの材料である。また、電界、温度、圧力等それぞれに反応するのでパラエティに富んだ使い方ができ、センサ以外に記憶素子、信号処理素子等の色々な素子が作られている。本研究タイトルの「弾性表面波」素子もその一つで、通信機器には必ず使われるキーデバイスである。

素子の性能はおおまかには使う材料で決まる。そのため、多種の物質を混合する、混合比を色々変える等々して、おびただしい種類の「強誘電体材料」が考え出され、研究されてきた。しかし、研究の最近のトレンドは、材料をごく薄くする技術(薄膜化)や複数の材料の組み合わせ(複合化)である。この場合、組み合わせる材料と製作条件をうまく選ぶと、各材料それぞれの性質の良い所が引き出されて、一挙に性能向上が図れるためである。

ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)薄膜 - 未開の薄膜材料 しかし、品質の良い薄膜を作るのはなかなか手間がかかる。そのため、うまく薄膜化されている誘電体材料は残念ながらまだ少ない。具体例をあげれば、良質な膜が容易に得られる酸化スズ(ZnO)の薄膜や、最近期待が集まっている新メモリ素子(強誘電体メモリ)向けのジルコンチタン酸鉛(PZT)薄膜に研究が集中している。それで、本研究では薄膜化が進んでいない新しい材料：ニオブ酸リチウムに取り組んだ。

ニオブ酸リチウムは古くからよく知られていて、この分野では「おなじみの材料」である。しかし、様々な変わった性質を持っているので研究対象として面白い所がいまだに沢山残っている。また、この材料を機器に使うと優れた性能が得られるということで最近また使われだしたことや、薄膜化ができればなお良いと思われるが「薄膜」としての研究もまだまだ浅いということもあるので、古いが新しい材料と私は思っている。このような材料なので初期に多くの研究者が取り組んだが、薄膜化は難しかった。具体的には、Li組成の把握が難しい、分極の不整(マルチドメイン)による機能の消滅、良い膜が得られる基板が少ない、ことなどが問題であった。また、ニオブ酸リチウム薄膜の研究は主に光応用の観点で進められてきたので、本研究のような圧電(弾性表面波)応用に関するデータは少ない。

研究はこれらの問題に対応したものになった。弾性表面波応用のデータとして、薄膜に組み合わせる基板で特性がどのように変化するか?集積回路との一体化を目指したSi、安価なガラス、光回路との一体化を目指したサファイア、超高速化が見込めるダイヤモンド薄膜基板等、それぞれについて詳細に調べ、薄膜化により大幅に性能改善ができることを明らかにできた。また、強誘電体薄膜の作製法として多くのメリットがある「rfマグネトロンスパッタ法」で実際に膜の作製を行い、上記の各種基板上に膜を作ることができることを実証した。この研究で特に悩まされたのは先に触れた「分極の不整(マルチドメイン)」の問題であった。しかし、悩まされた分だけの結果は得られた。rfマグネトロンスパッタ法に改良を加えることより、分極をコントロールできることがわかったからである。これで、マルチドメイン解消のメドがたった。

おわりに - 今後の研究課題 研究結果は基本的な成果だけであるので、実用には、もっと複雑な構造を持つ実際の素子の作製や基礎的には成膜機構や薄膜の分極のメカニズムについてさらに突っ込んで調べる必要を現在強く感じている。とはいえ、本研究からニオブ酸リチウム薄膜は弾性表面波素子材料に有望であることがわかり、さらに実現のメドをつけることもできた。ささやかかもしれないが、本研究が弾性表面波素子材料の発展に寄与できれば幸いである。

【論文博士一覧】

山下 睦雄	誘導コイル結合型高周波放電を利用した金属イオンの発生とその応用	平成9年11月25日
斉藤 徹	低速イオン散乱分光を用いた実時間観察によるⅢ - V族半導体へテロ界面形成過程に関する研究	平成9年11月25日
下田 宏	認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法の高度化に関する研究	平成10年1月23日
田 正豊	海底光増幅中継システムにおける障害探査技術に関する研究	平成10年1月23日
菊池 純	集積回路製造プロセスにおけるシリコン表面のドライ洗浄技術の研究	平成10年1月23日
白藤 立	Radical Kinetics and Its Control in Chemical Vapor Deposition of Amorphous, Microcrystalline and Poly-crystalline Silicon Thin Films (アモルファス、微結晶および多結晶シリコン薄膜の化学気相堆積におけるラジカル反応過程とその制御に関する研究)	平成10年1月23日
杉村 領一	Logic Based Japanese Sentence Analysis (論理に基づく日本語解析)	平成10年1月23日
山田 奨治	ユーザー指向のインタフェース評価メトリクスと脳波インタフェースに関する研究	平成10年3月23日
有田 睦信	多孔質Siの構造・物性制御と電子デバイス高性能化への応用に関する研究	平成10年3月23日
近藤 将夫	高効率エミッタシリコンバイポーラトランジスタの研究	平成10年3月23日
長野 信治	収束イオンビーム直接蒸着装置の開発とその応用に関する研究	平成10年3月23日
三木 良雄	超高速プロセッサ設計向けディレイ検証システムに関する研究	平成10年3月23日
上坂 達生	LSIのデザインルールチェックの高速化に関する研究	平成10年3月23日
太田 博文	同期発電機空隙磁束のオンライン計測と電力系統の動的挙動に関する基礎研究	平成10年5月25日

廣井 和男	非線形制約条件を考慮したPID型制御アルゴリズムとその燃焼制御への応用に関する研究	平成10年 5月25日
石神 敏彦	HIDランプの封入物の発光と反応に関する研究	平成10年 5月25日
米田 昌弘	プラズマエッチング技術の半導体デバイスへの応用に関する研究	平成10年 5月25日
山尾 泰	デジタル移動通信携帯機用送受信回路の研究	平成10年 5月25日
中村 孝	フローティングゲート構造を有する強誘電体メモリに関する研究	平成10年 7月23日
長崎 昌司	高電圧架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブルの技術開発に関する研究	平成10年 7月23日
豊島 秀雄	InGaAs歪混晶層の分子線エピタキシャル成長と高速電子デバイスへの応用に関する研究	平成10年 9月24日
今泉 昌之	MgZnSSe系 II-VI 族半導体のガスソース分子線エピタキシャル成長と青緑色レーザダイオードへの応用に関する研究	平成10年 9月24日
岡本 真吾	High Conversion Efficiency and Highly Stable a-Si:H Solar Cells (高効率・高信頼性a-Si:H太陽電池に関する研究)	平成10年 9月24日
石崎 俊雄	携帯電話用高周波デバイスの小形化と高性能化に関する研究	平成10年 9月24日

学生の声

テーマ：留学生の三つの戦い

電子通信工学専攻 吉田研究室 博士課程 陳 嵐

日本に来ている私費留学生の多くは、三つの戦いに直面していると言われています。それは、生活との戦い、日本語との戦いそして研究との戦いです。すなわち、母国からの仕送がほとんどない私費留学生は、第一に、物価の高い日本でアルバイトに頼った生活という難関と戦わなくてはなりません。第二に、生活と研究に支障をきたさないように、日本語という難関と戦わなければなりません。そして第三に、留学の主な目的である研究及び学位の取得という難関と戦わなくてはなりません。

この三つの難関と同時に戦って行かなければなりません。私の経験から言わせてもらいますと、第三の難関を中心に戦って行けば、第二と第一の難関も次第に解決していくと思います。つまり、研究室を戦場に、関連文献を読んだり、研究室の日本人学生と活発にディスカッションを行ったりすることで、研究成果を一日も早く挙げることができます。それと同時に、研究論文の執筆、学会発表などを通じて、日本語の読み書き及び話す能力が向上し、第二の日本語の難関を突破することができます。そして、第三と第二の戦いの成果（研究実績と日本語の上達）を備えて、奨学金、研究奨励金などに申請し、採用されれば、それにより、生活費をまかなうことができ、安心して、研究により一層専念することができます。また、一サイクルとして、最終の目標である良い成果で学位を修得することにつながります。当然ながら、三つ目の研究を最初の難関として戦う間には、信念が必要ですが、この信念が生涯にわたって役立つと思います。私は、この三つの難関と戦いながら、留学生活の最大の目標に向かって、頑張っていきたいと思っています。

「日本へ留学」

電子物性工学専攻 光量子研究室 博士課程 1 回生 チュティナン・アロンカーン

私は小さい頃から日本にあこがれていました。私の父は仕事の関係でよく日本に行っていました。その度、日本の大きなりんごや電子ゲームを買ってくれました。私の中のイメージでは日本は先進国で、何もかもがすごいものでした。お恥ずかしいながら、日本の大きなりんごはきっとバイオエンジニアリングのおかげに違いないと本気で思っていました。(実際日本に来てみると、果物や野菜が気温が低いせいとかタイより大きいことに気づいたのですが)。そして、私は不思議に思いました、日本は同じアジアなのになぜ他の国より速く成長できるのか。

高校の時、外国へ留学するという雰囲気は何となくありました。アメリカと日本、どちらに留学しようかと迷う中、私は日本を選びました。日本は同じアジアだから、きっとアメリカよりタイと近い文化や考え方を持っているだろうと思いました。それから、日本に来て日本語学校での一年間を経て京都大学に入学しました。私にとってはびっくりしたことに、学部の時、勉強するからには「優」をとろうという人があまりにも少なかったです。これでは日本が先進国になれる理由が理解できませんでした。しかし、研究室に入ってみると、学部の時とはまるで違った場所かのように皆は考えられないほど研究に熱心でした。そして、こういった真剣な研究は最近始まったばかりではなく、昔から日本人の性格に入っていたことがわかりました。東芝はエジソンが電球を発明してから10年も経たない内に電球を売り出していることをご存知でしょうか。また、大丸という会社は280年以上も前から創業して今まで続いていることを考えると、日本がアジアの中で唯一先進国になれることが理解できます。タイではこの間までは急激な経済成長を遂げていました。しかし、バブルが弾けると、技術の積み重ねという基盤がないため、いとも簡単に経済危機に陥ってしまうことを実感させられました。

今後、日本で学んだ知識、技術、研究の仕方、考え方そのものを活かしてタイの発展に貢献したいと思っています。

教室通信

京都大学工学部電気教室創設百周年記念行事

京都大学工学部電気工学科は、1898年（明治31年）京都帝国大学理工科大学電気工学科として発足して以来、本年をもって創立100周年を迎えることになった。これを記念して9月26日に京都の都ホテルを会場として記念行事が行われ、約500名の出席者が盛大に100周年を祝った。記念行事は第1部として記念式典が行われ、主催者側から電気電子工学科長藤田茂夫教授の挨拶の後、京都大学長尾 総長、東京大学大学院工学系研究科羽鳥光俊教授、大阪大学大学院工学研究科西原浩教授から祝辞が述べられた。また洛友会会長近藤文治名誉教授より「電気教室100年に思う」というお話があり、最後に記念事業実行委員会幹事木村磐根名誉教授より記念事業の経過報告が行われた。第2部として記念講演会が行われ、関西電力（株）副社長宮本一氏より「21世紀のエネルギーと環境」、日本電信電話（株）副社長浅田和男氏より「デジタルネットワーク社会における日本の役割」、日本電気（株）取締役石黒辰雄氏より「エレクトロニクス産業・技術の未来」の3件の講演が行われた。これらの講演の内容は各講演者に原稿をお願いして本誌に掲載した。第3部は記念パーティが行われ、出席者一同100周年を祝うとともに、新たな100年への発展を願い初秋の京都の夕べを楽しんだ。100年前1学科2講座から出発した電気教室は、現在電気関係教室として、学部の電気電子工学科、大学院の工学研究科電気工学専攻、電子物性工学専攻、イオン工学実験施設、情報学研究科通信情報システム専攻、知能情報学専攻、応用システム科学専攻、エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻、エネルギー基礎科学専攻、エネルギー応用科学専攻、超高層電波研究センター、エネルギー理工学研究所、京都大学ベンチャービジネスラボラトリなどに所属する約40の研究室からなる大グループに発展し、日夜教育・研究に注力している。

編集後記

「cue」第2号をお届け致します。上記の通り今年には教室創設百周年という大きな節目にあたり、新世紀に向けて教室と社会を結び架け橋としての情報誌編集の責任を痛感しております。まだまだ軌道に乗ったとは言い難い小誌に皆様のご助力を御願い致します。御意見などがございましたら cue@kuee.kyoto-u.ac.jpへご遠慮なくどうぞ。最後に、記念事業に奔走する合間を縫ってご執筆頂いた各位に深く感謝します。（T.S.記）

お詫びと訂正

「cue」創刊号に以下の通り誤植がございました。ご執筆者ならびに関係各位にご迷惑をおかけしましたことを深くお詫びして訂正致します。

頁	行	誤	正
1	11	密室な	密接な
3	3	1世紀	21世紀
3	18	Cive	Give

発行日：平成10年12月

編集：電気電子広報委員会

田丸 啓吉、奥村 浩士、佐藤 亨、
萩原 朋道、野田 進

発行：電気電子広報委員会

〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp

印刷・製本：株式会社 田中プリント