

# cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.6      DECEMBER 2000

---

[ 第6号 ]

.....  
巻頭言

名誉教授 池上文夫

.....  
大学の研究・動向

光材料物性工学分野・プロセスエネルギー学分野

.....  
産業界の技術動向

関西電力 森 詳介

新設研究室紹介

研究室紹介

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

# ある年寄りのたわ言 これからの日本と技術

池上文夫



今の日本のkey words：“失われた10年”“無能な政治家、官僚と金融業界”  
“膨張する財政赤字”“倫理無き社会”“キレル若者”“崩壊する教育”etc .etc . . . 。  
これから日本はどうなるのか？ 日本再生に技術は何をすべきか？ 年寄りにも悩みは深い。

最近、多くの人々がIT革命を日本経済の救世主と期待する。確かにそうだろうが . . . . 経済の現状の実態は？ 技術がどう貢献して日本経済はどう良くなるか？ 貢献の主役である若い技術者や学生諸君に元気を与え鼓舞する論理が欲しい。だが、具体性と定量的な数字が無い議論では全く説得力が無い。

近頃は私も些か自由な時間を持てるようになったので、日本の将来が心配の余り、不本意ながら社会経済の耳学問を始めた。新聞、TV等マスコミの断片的情報に、竹中平蔵、樋口廣太郎、大前研一等の諸氏の系統的な意見を重ね合すと、日本の現状と将来が少しは見え始める。消化不良の情報の寄せ集めでも何かお役に立つかな、と恥を忍んでの拙文である。(誤りのご指摘や、大事な所の抜け落ちなど、是非皆様のご教示をお願い致したい。要は若い人達を元気付ける論理を作りたい。)

- (1) 不良債権：不況の原因はご承知の通りバブル後の不良債権(72兆円?もって?)である。これまでに公的資金の注入、ゼロ金利政策、財政出動、業界の努力(?)などにより、その約70%が処理できたとのこと。残る30%の処理には現状ではあと2年程掛かると言う。
- (2) 日本の経済力：本来(不良債権が無い時)ファンダメンタルスは十分高く、GDP成長率は2%(35年で2倍、20世紀の米国相当)である。不良債権完全処理(2002年?)の後には2%成長になり、日本経済の諸問題は解消するのか? そう甘くはない。まだ次の2つの大問題が残されている。
- (3) 財政赤字：本年度予算85兆円のうち、税の収入は52兆円のみである。歳出の内、地方交付金は15兆円、赤字国債の金利等が22兆円。残りでは公務員の給料が払えないので、公債金32兆円余を借金する(公債依存度：38.4%)。年度毎の赤字はGDPの11%に及び、累積赤字は645兆円(平成12年度末、政府+地方)(国民1人あたりは508万円)に達する。米国の双子(財政、貿易)の赤字時代(レ・ガン)の頃の赤字は6%、また英国が英国病と呼ばれた頃(サッチャー-)の赤字も6%であったとのこと。11%の赤字は遥かに危機的な数字である。財政赤字が増加すると国の信用度が低下して、国債の金利が上昇し更に赤字が増える。
- (4) 年金：1975年には年金受給者1人を7.7人が支えたが(65歳以上の人口/20~64歳の勤労者人口=1/7.7)、少子高齢化のために1995年は4.3人となり、2025年には2人、2050年には1.5人となる。現行制度では、団塊の世代以上には支払った分以上の年金が支給されるが、若者には支払った分の支給はない。高年層は食い逃げ(?)と言われている。年金を払わない若者が増えて事態は益々悪化。年金制度は早晚破産する。更に、日本の人口は2007年をピークに減少、21世紀末には1/2に

なる。人口の減少は税収の減少をもたらす。そこで、2007年までに財政赤字をゼロにするのが目標となる。人口の年齢分布の予測はほぼ確実だから、年金破綻の予測は殆ど確定的事実である。

このような日本経済の危機的現状にも拘わらず、倒産・リストラはあるものの、国民生活はそれ程の実害を受けてはいない。これは1,300兆円の国民の貯蓄（英独仏の貯蓄の総和より大）があるからである。しかし、その半分（645兆円）は借金で、下手をすると国民の資産は半分になる。この借金を孫子の代まで残してはならない。その対策に我々技術者には何ができるのか？

最近IT流行りだが、ITは経済の回復にどれだけ有効なのか？米国のデータが参考になる。コンピュータは1980年台から使われたが、当初は生産性に寄与は無いと言われた。1997年から、商務省はIT関係の統計を整備、年次報告（白書）を発表した（因みに日本には財政白書もIT白書も無い）。米国の統計では、1997年頃から生産性の上昇が見られた。例えば、株価上昇（1996：\$ 6千，1997：\$ 7千）。1999年、米国の経済成長率は6%、その1/3がITの直接効果、間接効果を含めると60%がIT効果と評価された。米国ではITの経済効果は明瞭で、日本でも経済再生に期待されるが、その効果を実現する必要がある。これが出来ねば我々技術者も無能と呼ばれる（!）。

（注）ITは単なる“進歩”でなく何故IT“革命”と呼ばれるか？理由：社会が変革するから。産業革命は継続的な会社を作った。会社の発祥、東インド会社はインドに航海して産物を持ち帰り莫大な利益を得たが、その時点で解散する一時的会社であった。J.Wattの蒸気機関発明で動力による機械文明が生まれ、固定的な機械を資産として、会社が継続的に存在する。株式会社、資本主義の台頭。生産性の急上昇、サラリマン、大量生産、通勤が始まり、男は外で働き女は家庭で、etc…。社会構造や生活スタイルが変革、そこで“産業革命”と呼ばれる。

ITで何が出来るか？“取引コストを限りなくゼロに近づける”ことと言われる。例：電子商取引。ネット販売。携帯端末で買い物、切符・搭乗券にもなる。コンビニが銀行のATMや宅配の代行管理、etc. etc…。卸売り、小売り等の中間流通業者が不要に。SOHO、通勤が減る。会社等の中間管理職が不要に。製造者と消費者が直結、注文生産、不要なものを作らない、廃棄物が減る……。光も影もあるが、社会も生活も変わる。すなわち“IT革命”と呼ぶ価値がある。

資源の無い日本は基本的に高付加価値のモノ造りが生きる道である。IT革命による間接的效果にも勿論期待があるが、ITの直接効果も期待が大きい。1980年代、日本はモノ造りで米国に勝ったが、software、Internet、金融工学で第二の敗戦。マネーは米国に流れるが、米国の貿易赤字は増加、モノ造りの力は衰退。日本にもチャンスが生まれる。例えば、i-mode、EZWeb等で代表される携帯端末のdigital通信技術とcontents、また、PlayStation 2、digitalTV等で象徴されるdigital家電など、日本の得意分野もある。得意分野では、5年、いや3年で米国を超越すとも言う。これらの技術が広帯域のインタネットと組合わされる時、庶民にも利用できる一つの理想的な通信網 極めて民主的な通信網が生まれる。これは若しかすると、今、日本が必要とする社会構造の改革への最短の道であり、これこそ“IT革命”なのかも知れない、という気がする。そのための優れた技術造りと技術の使い方の工夫がこれからの技術の為すべき仕事であろう。

結論：現役の若い人は自分たちの将来のために新技術開発に突進して欲しい。年寄りには“食い逃げ”と言われないように出来る範囲で頑張りましょう。それで日本は良くなる。

**大学の研究・動向****新しい光材料と機能の探索：IT時代へのseedsをめざして**

電子物性工学専攻量子工学講座光材料物性工学分野

教授 藤田 茂夫

fujita@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教授 藤田 静雄

fujitasz@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教授 川上 養一

(ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー兼)

kawakami@kuee.kyoto-u.ac.jp

助手 船戸 充

funato@kuee.kyoto-u.ac.jp

**1. はじめに**

光応用分野の拡大発展に伴い、光を自由に操作する技術の進展が期待されている。本分野では、従来の光材料にはない、物理的に新規な光機能の発現とその応用を目指す立場から、半導体や有機材料などの光材料開発と新機能探索の研究を行っている。とくに、従来操作が困難な短波長光（緑色～近紫外の380～550nmの波長域）の開拓により、操作可能な波長範囲を一気に拡大することを目指している。

近年GaN系半導体の急速な進展により、短波長全域にわたるインコヒーレント光と近紫外域（400nm付近）のコヒーレント光を発生する光デバイスが実現され、大きなインパクトを与えた。また、素子寿命に問題を抱えながら、ZnSe系半導体の研究も進み、GaN系半導体では困難な青～緑色（480～520nm付近）でのコヒーレント光源材料などとして期待されている。これを契機に、短波長の光を自由に操作し、任意の波長域のインコヒーレント、コヒーレント光を得ることが期待されるが、現状では難しい。

このように短波長半導体材料では、物性定数的要因から電子と正孔とがクーロン力で緩く引き合っただけで作った、励起子と呼ばれる状態が安定に存在するという本質的な特徴がある。そのため、光過程において、GaAs系やInP系のような赤色～赤外の材料とは異なる物理的存在が明らかになってきた。例えば、励起子は電子と正孔との相互作用状態であるため、そこから発光に至る確率が非常に大きい。また、短波長材料では、InGaNやZnCdSに見られるように、均一に混り合うというより不均一な混和・組成に基づくポテンシャルエネルギーの低い領域が局所的に発生し、励起子はそのような領域に集まり効率的に発光する。このような短波長材料の特質に着目して、(i) その物理的な機構を詳細な光物性評価により明らかにする、(ii) それを活かし得る新規な半導体材料を開発する、(iii) 磁気や圧電などの他機能との組み合わせによる新規な光融合機能を創出する、(iv) それを活かした新しい応用分野を開拓する、などが本研究分野の目的とするところである。また、次世代の材料開発は、構成元素が資源として豊富に存在し環境負荷が小さく、育成に多大なエネルギーを要しないといった観点が重要になると思われる。そのような意味で、われわれは、酸化物、窒化物といった材料に大きな期待をかけている。このような研究の成果により、次世代に花開くseedsを与えて行くことが本研究分野における研究意義である。

## 2. 短波長光材料の光物性評価・探索

短波長材料は励起子が生成され易く、また二つの励起子の結合体である励起子分子も容易に生成される。そのような場合には分子状態の準位からの誘導放出、あるいは励起子・励起子散乱などの多体効果における非線形過程など、新しい多様な光機能の発現が期待できる。その意味で、弱い励起下とともに強励起下での励起子の振る舞いを光物性的観点から基礎的に解明し、新しい応用に繋げて行くことは重要である。本研究は、励起子の持つ多様な機能性を常温において効果的に発現させるためのナノスコピックな量子構造デザインに対する知見を得ること、それらの応用による先進的な光デバイス実現に寄与する光物性・特性を明らかにすることを目標としている。

このようないわば「励起子工学」の展開には、励起子結合力の大きな材料の探索、低次元閉じこめ構造の作製が重要となる。一方、励起子の位相緩和や誘導放出・自然放出が空間的には非常に微細な量子ナノ構造 ( $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{m}$ ) から、時間的にはサブピコからナノ秒 ( $10^{-14} \sim 10^{-9}$  秒) といった超高速の現象として発現するため、新しい量子物性の解明・探索 のためには、時間・空間分解スペクトロスコピーの開発が重要な研究テーマとして位置づけられる。

対象とする光機能性材料は、半導体のみならず有機分子材料や細胞など広く分布しているので、京大VBL、京大理学研究科をはじめ、阪大産研、京都府医大、阪電通大、ユタ大学等、学内外大学研究機関および日亜化学工業、松下電器、シャープ、住友化学等の民間企業との連携研究を積極的に展開している。

得られた成果の一例を以下に示す。図1に新たに開発された時間・空間分解スペクトロスコピーの装置写真、図2にその模式図を、図3に選択成長GaNのWindow領域のみを選択的に光励起していることを示す顕微鏡写真を示す。また図4にWindow領域 (貫通転位密度:  $10^8 \text{cm}^{-2}$ ) とWing領域 (貫通転位密度:  $10^6 \text{cm}^{-2}$ ) における時間分解スペクトルをいくつかの試料に対してプロットした結果を示す。これらの結果から、貫通転位密度がWing領域に対して2桁も大きいWindow領域でも発光 (PL: photoluminescence) の減衰寿命はそれほど大きく減少しないことが解る。すなわち、GaN中の貫通転位は非輻射再結合中心として働くが、非輻射再結合過程を律速している因子は貫通転位という



図1 顕微-時間分解PL測定装置の全体写真

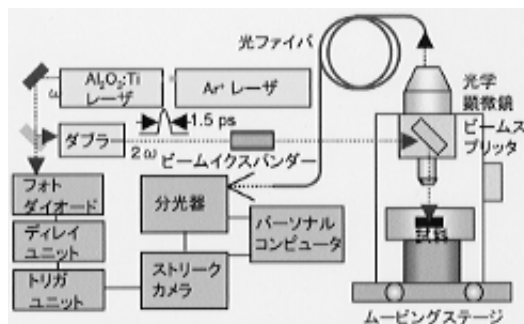


図2 顕微-時間分解PL測定装置の模式図



図3 選択成長GaNエピ膜状への集光拡大図

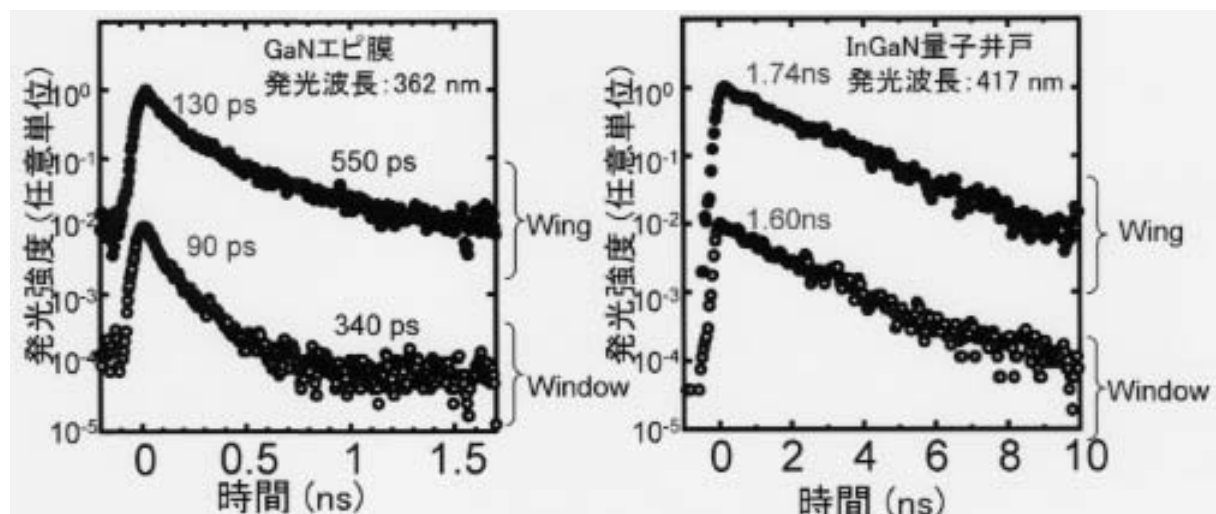


図4 選択成長GaNエピ膜およびInGaN量子井戸のWindow領域で測定されたPL減衰特性

より点欠陥等の他の要因であることを明確に示している。また、InGaN量子井戸においてはGaNに比べて寿命は長くなりWindowとWing領域での減衰寿命の変化はほとんどなくなる。これは励起子の局在化による非輻射再結合中心へのパスが抑制されたものと考えられる。以上の結果は、発光デバイスの構造設計・高性能化に有用な情報を与えた。

近年、発光ダイオード(LED)はディスプレイ用途のみならず、照明用光源として利用しようとする機運が世界的に高まりつつあり、現用LEDの外部量子効率(現状:15%)をさらに高め、蛍光灯の効率(約40%)を凌駕することが目標となっている。このためには、内部量子効率、取り出し効率をさらに高めることが必須となっている。このようにLEDやレーザなどの発光デバイスの高性能化には、活性層内でのキャリア・励起子の輻射(発光過程)および非輻射(非発光、熱放出過程)再結合機構を解明した上で結晶成長・デバイス設計へフィードバックすることが効果的である。本研究室で開発した時間・空間分解スペクトロスコピーはそのための強力なツールとなるものと考えている。

### 3. 酸化物半導体による新光機能の創成

多くの金属酸化物は半導体の性質を持つが、その中でも酸化亜鉛(ZnO)は古くから蛍光体や表面弾性波デバイス用材料として用いられてきた。この「古い」材料ではあるが、その半導体としての性質に目を向けると、他の材料にない多くの特徴を持つ。例えば、(i)励起子が室温でも非常に安定に存在し、多くの光機能に寄与することが期待される、(ii)磁性元素の導入により強磁性的な性質を示すことが考えられ、励起子の関与した磁気光学効果の発現が期待される、(iii)強誘電性、圧電性の機能を合わせ持っている、(iv)可視光に対して透明な電子デバイスに応用が可能である、(v)シリコン基板をはじめ多くの結晶・非晶質基板上に配向性の高い膜ができる、(vi)環境に優しい半導体(環境半導体)の代表である、(vii)生体との適合性がありバイオセンサやバイオ(-TAS(total analysis system))に應用することが期待される、といったことがあげられる。さらに、ZnOにCdやMgを混ぜ合わせたZnMgCdO系は、バンドギャップや結晶構造、さらには電子的・光学的物性が広範囲に変えられるため、上記の特徴を活かした多様な機能デバイス材料として極めて魅力ある材料系となる。表1に期待される応用分野を示す。このような魅力的な機能がこれまで研究の対象とされなかった理由は、結晶成長の技術的な問題で高品質の膜が得られなかったこと、低抵抗のn型しか得られなかったこと、励起子による光物性・光機能などの物理が明確でなかったこと、などの理由によると思われる。

われわれは、ラジカル分子線エピタキシャル成長法、有機金属気相成長法、プラズマ援用化学的気

表1 ZnO系半導体の応用分野

成長温度	基板	結晶成長技術	結晶性	デバイスへの応用
700	サファイア Si ZnO	MBE レーザMBE MOVPE	単結晶 優れた結晶性 優れた光学的 特性	LED, LD, 光検出器 光マニピュレーション ヘテロ接合トランジスタ 複合機能デバイス Siとの集積デバイス バイオセンサ 化学(イオン・ガス・におい) センサ
500				
300	ガラス	レーザMBE MOVPE PECVD スパッタリング	多結晶 優れた配向性 大面積内均一	TFT ディスプレイ駆動デバイス 立体映像装置 画像センサ 大面積紫外線センサ
100	プラスティック	PECVD スパッタリング	多結晶・非晶質 大面積内均一	プラスチック上ディスプレイ 駆動デバイス プラスチック上論理FT プラスチック上センサ

相堆積法、スパッタリング法など種類の異なる成長法を用い、プラスチック基板からサファイア基板まで、室温から800℃まで、といったさまざまな条件での成長を行い、それぞれの条件に応じた成長膜の特質を明らかにして、表1に示したようにこの材料の多様な機能性を多くの場面で活かすことを視点を研究を行っている。この点で、高品質単結晶を唯一の目標としてきた他の材料の開発視点と見方を異にする必要がある。

現在までに、高温で成長した単結晶膜で励起子効果が強く発現し、青色～紫外域の発光デバイスとしての応用が期待されている。とくにZnCdOは図5のように青色発光材料であるが、図6に示すように発光の様子を微視的に見ると、発光波長に局所的なゆらぎがある。この理由を調べるため組成分析を行ってみると、図7のように六角形状の粒界近傍でCd組成が大きくなるという組成揺らぎが生じていることが分かった。Cd組成の大きい所ではポテンシャルが低くなるため、励起子がこのような位置に局在して高效率の発光をするというInGaNと類似またはそれを強調したような効果が生じているのではないかと現時点では考察している。このような不均一性を制御するという視点で、光機能や磁気光機能の制御へと研究を進める予定である。一方、600℃付近でガラス基板上的多結晶膜、50℃付近でプ

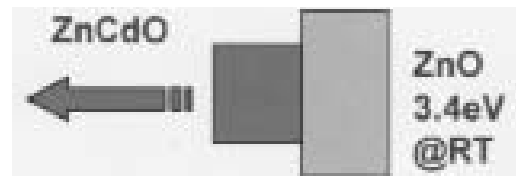


図5 ZnCdO/ZnO構造

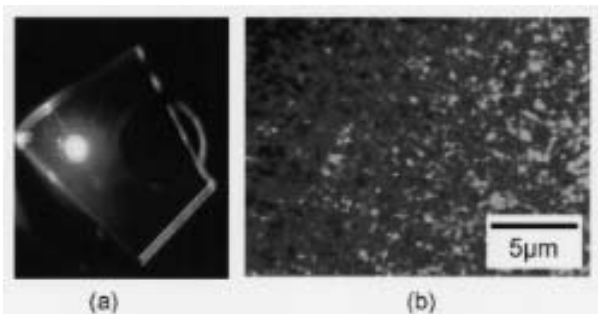


図6 ZnCdOからのPL : (a)試料全面(10mm角)での発光の様子、(b)試料内微小領域での発光の様子(ただし色調を調整して変化を強調してある)

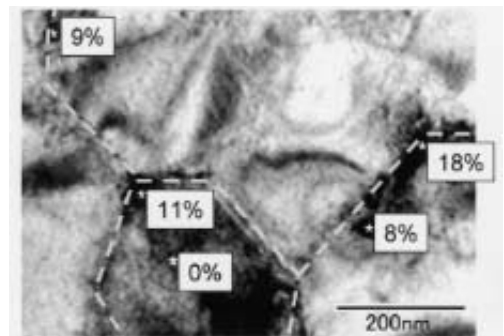


図7 ZnCdO/ZnOの走査型透過電子顕微鏡像と微小領域におけるCd組成測定結果



ラスティック基板上的非晶質膜が得られ（図8にポリエチレンテレフタレート（PET）基板上的ZnOの写真を示す）、透明の薄膜トランジスタ、大面積光センサなどへの応用に向けた特性が実現されつつある。

この研究分野は、半導体のみならず、誘電体、蛍光体、電極、超伝導、酸化物バルク結晶などの研究を背景とした多様な研究者が集まり、新たな組織の構築がなされつつある。NEDO地域コンソーシアム研究開発事業「ZnO半導体薄膜デバイスの開発」が本年度より3年計画で開始され、われわれも推進委員会のメンバーとして活発な研究活動に参加しているなど、次世代へのseedsを求めにふさわしい新しい研究体制が進みつつある。このような動きの中で、われわれは常に先導的であり続けることを念じ研究に励んでいる。



図8 PET上に50℃で作成したZnO膜

#### 4．GaN系半導体とGaAs、Siとの機能融合

GaN系半導体は、緑色～近紫外域に光の機能を持ち、今後もその特長を活かしたデバイスや応用分野の拡大が図られることは予測される。この機能を、GaAs系半導体の持つ赤色～赤外域での光機能と超高速の電子機能、またSiの電子機能と融合させることを目的として、GaAs基板上への高品質GaN系結晶の育成、およびウエハ融着によるSiデバイスとの集積化についての研究を行っている。本研究の特徴は、(i) 熱膨張係数差の少ないGaN/GaAs構造を利用する、(ii) 350 程度の温度でSiとの融着を行う手法を用い、すでにSi集積回路が形成されたウエハ上にGaNデバイスを集積できる、といったことが可能であることの基礎的な実証実験に成功している。

#### 5．有機薄膜の光機能

有機薄膜は優れた光機能を持ち、多様な材料が存在し、化学的手法で物性設計が可能であるという特徴がある。また、薄膜作製が簡単に行え、大面積化も容易である。これらの特徴は、エレクトロルミネセンス（EL）デバイスに応用され、実用化のレベルにある。われわれは、材料の光物性と電子物性を基礎的に解明し、それをもとにした構造設計によって新機能・高機能デバイスにつなげるという立場で研究を行っている。これにより、(i) 界面における薄膜形成過程の観察と制御、(ii) キャリア輸送過程のモデル化、(iii) 半導体ダブルヘテロ構造の概念を有機薄膜に持ち込む新構造の提案と高効率化の達成、(iv) ドーピングによる電子物性制御、などの成果を得てきた。最近では白色有機ELデバイスの研究を行い、図9のような明るい発光を実現している。



図9 白色有機ELデバイスの発光の様子（蛍光灯照明下で撮影）

#### 6．まとめ

本研究分野における研究の一端に関して、次世代に向けた材料研究の意義を含めて説明を加えた。スペースの都合で割愛せざるを得なかったが、短波長発光材料の応用分野の開拓に対して、医療用や高演色性発光など新光源としての利用を念頭に置いた応用研究も行っている。材料研究の醍醐味は、自らの手によって「もの」を作り出すことであって、研究に携わる学生諸君も、まさに「もの」作りの原点をかいま見ることに面白さを感じてくれるようである。その意味で「もの」作り研究ほど実践的・教育的なものはないと信じている。文字どおり自分の手で作り上げた材料が、思いもよらない機能を発現して、世の中の役に立ってくれる、そんな情景を学生諸君と共有できることを念じて、苦楽を共にする日々が続いている。

# 核融合炉用超電導マグネットの高磁場化、小型化をめざした 超流動ヘリウム冷却特性の研究

エネルギー科学研究科 エネルギー応用化学専攻  
応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野  
教授 塩 津 正 博  
shiotu@uji.energy.kyoto-u.ac.jp  
助教授 白 井 康 之  
shirai@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

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。

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。コイル捲線には、強い磁場下で大きな臨界電流密度を持ち機械的強度も大きいニオブチタン等の金属系の超電導線が使われており、それらの臨界温度が低いため液体ヘリウム冷却が必要である。普通の液体ヘリウム（常流動ヘリウム）を2.17K以下に冷却すると、全く異なった性質を持つ量子液体である超流動ヘリウムとなる。超流動ヘリウム（He II）は、粘性がなくコイル捲線間の狭い隙間にも自由に浸透出来ること、局所的に熱が発生した場合に熱を強制的に取り去る性質がある等、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、加速器等に用いられる大容量超伝導マグネットの小型化のための有力な冷却材として期待されている。

超流動ヘリウム冷却超電導マグネット設計には、超流動ヘリウムの冷却特性の正確な理解が必要である。これまでに側面を断熱した管内に満たされたHe II中を熱が軸方向に一次的に流れる場合（1次元チャンネル）における静的並びに動的冷却特性が理論的並びに実験的に明らかにされてきた。しかしながら、He II中の捲線内では2次元ないし3次元冷却が行われることが予測され、2次元ないし3次元冷却設計基準の確立が必要であるが殆ど手付けられていなかった。

当分野では、He II中の捲線内で起こりうる定常及び非定常熱入力に対し各々の2次元ないし3次元冷却特性を解明し、一般的な冷却設計基準を確立することを目標として実験的並びに理論的研究を進めている。

## 2. 超流動ヘリウム

### 2.1 ヘリウム4の状態図

ヘリウム（ヘリウム4）の圧力Pと温度Tの関係を示す状態図を図1に示す。ヘリウムは、他のクライオゲンや水等の通常液体と、以下の点で著しく異なっている。

- 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。
- 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（2.173 K、50.52 mbar）からはじまり、点（1.77 K、30 bar）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。

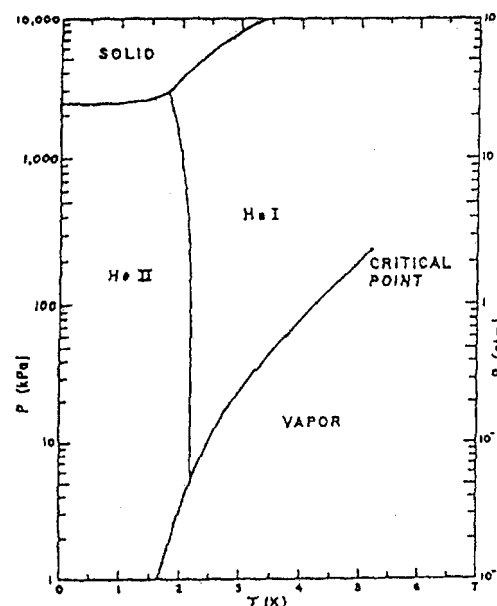


図1 ヘリウム4のPT状態図

### 2.2 超流動現象と二流体モデル

He IIは、熱あるいは物質移動に関して、はっきりとした特異性を示し、そこで観察される現象は古典的な熱流体工学では全く取り扱えない。超流動現象を説明するため、London、Tisza、Landau等によって二流体モデルが提案された。このモデルではHe IIを相互作用の全くない二つの成分、スーパー成分とノーマル成分の理想的な混合と考える。ノーマル成分は普通の粘性流体のようにふるまい、スーパー成分だけが超流動性を示す。スーパー成分は粘性が零であるがエントロピもまた零である。従って、スーパー成分だけではエネルギーを輸送できない。このモデルによって、発見当初は不可解であった多くの現象に納得のいく定性的説明が与えられた。

定常状態における一次元チャンネル中の熱移送は二流体モデルで次の様に説明される。伝熱面近傍の液中で温度勾配が出来ると局所的にノーマル成分の比率が増加し、それを他の部分における比率と同一にするよう伝熱面に向かってくるスーパー成分と伝熱面からエントロピーを持って離れていくノーマル成分の対向流による一種の強制対流によって熱が除去される。スーパー成分の流れとノーマル成分の流れは等しく質量の移動は発生しない。熱流束が大きくなるに従い両成分の相対速度が大きくなり、ある臨界値を越えると、スーパー成分に渦糸が発生し、ノーマル成分との間に相互摩擦を生じるようになる。この熱流束以下の領域を層流領域、それ以上の領域を乱流領域と呼ぶ。乱流領域では、伝熱面から距離xだけ離れた位置における温度勾配 $dT/dx$ と、その点のチャンネル断面における熱流束 $q$  [ W/m<sup>2</sup> ] の間に、次式の関係がある。

$$-dT/dx = f(T)q^3 \quad (1)$$

ここで、Tは温度、 $f(T) = A_n / (\rho_n s^4 T^3)$ 、 $\rho_n$  はそれぞれノーマル成分とスーパー成分の密度、sは単位質量あたりのエントロピーである。この式は、Gorter-Mellink式と呼ばれている。 $f^{-1}(T)$  は、常流動液体の場合の熱伝導率と良く似た働きをする液の物性値の関数で、圧力と温度に依存する。

## 3. これまでの研究経過

### 3.1 円柱試験発熱体における熱伝達特性

まずプールHe II中の種々な直径の充分長い円柱状試験発熱体から熱が半径方向に放射状に拡がる場合の熱伝達特性について研究を行った。実験は飽和条件及び大気圧下の加圧超流動条件で行ったが、

ここでは冷却特性の優れた加圧超流動条件の結果のみを説明する。

加圧超流動ヘリウム中の円柱発熱体における定常熱伝達曲線の一例を図2に示す。定常臨界熱流束(図中 $q_{st}$ )に至る迄は非沸騰域でその熱伝達は極低温域に固有な一種のインピーダンス不整合によるKapitza Conductanceに支配されている。 $q_{st}$ に至ると熱伝達が極端に悪化し僅かな熱流束上昇によって発熱体表面温度が大きく上昇しKapitza Conductance領域から膜沸騰領域へ連続的に移行する。臨界熱流束点は、図1のPT状態図で、発熱面近傍の液が大気圧に於ける線上の値 $T$ に到着し、超流動性を失って熱伝達が急激に悪化する点と考えられる。今、半径 $r_0$ の円柱発熱体がバルク温度 $T_B$ のHe II中に支持されており、その表面熱流束を $q_0$ とする。He II中の円柱中心から任意の半径 $r$ の円周上で1次元チャンネルのGorter-Mellink式が成り立つと仮定すれば、 $2 r_0 q_0 = 2 \int_{r_0}^r q(r) \cdot dT / dr = f(T) q(r)^3$ が成立するから、臨界熱流束は、次式で与えられる。

$$q_{st} = \left[ \frac{2}{r_0} \frac{T}{T_B} \frac{1}{f(T)} \frac{dT}{dr} \right]^{1/3} \quad (2)$$

しかしながら、種々の直径の円柱を用い、液温度を広範囲に変えて求めた臨界熱流束実験結果は、(2)式より40%程度低い値を示した。実験結果に基づいて次の表示式を提示した。

$$q_{st} = 0.58 \left[ \frac{2}{r_0} \frac{T}{T_B} \frac{1}{f(T)} \frac{dT}{dr} \right]^{1/3} \quad (3)$$

実験結果と(3)式の比較を図3に示す。実験結果が20%以内で記述されている。修正係数0.58が、2次元熱輸送における $f(T)^{-1}$ の減少を記述していると考え、 $f(T)^{-1}$ は1次元の場合の約20%( $=0.58^3$ )になる。熱が2次元的に広い空間に拡がっていく場合に、粘性を持つノーマル成分の流れに渦が発生して熱輸送が阻害される等の原因で等価熱伝導率のはるかに小さくなると推察された。

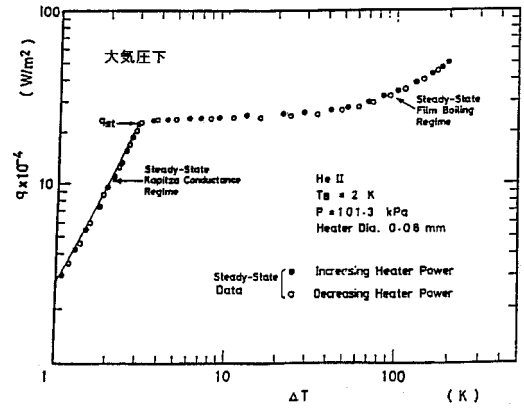


図2 加圧超流動ヘリウム中の円柱発熱体における定常熱伝達曲線

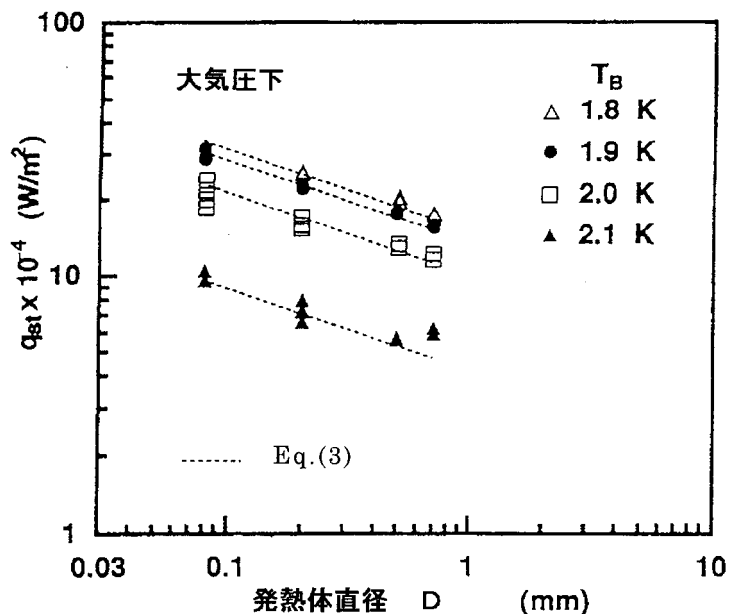


図3 臨界熱流束実験結果と(3)式の比較

### 3.2 ダクト一端の平板発熱体における熱伝達特性

次に、平板発熱体がダクト中において熱の拡がり方が制約を受ける場合について、研究を行った。

FRP板で構成された図4に示すような長さ100mmの方形ダクト一端のFRP板上にマンガン板を接着し片側断熱した発熱体を大気圧下のプールHe II中に支持した。ダクトは断面積の異なる4種類を用い、ダクト断面と試験発熱体との面積比 $A_d/A_h$ を1.0~3.5迄変えた。

図5は、臨界熱流束実験結果を $T_b$ に対してダクト断面積の発熱体表面積に対する比 $A_d/A_h$ をパラメータとして示す。図示するように、 $T_b$ が一定の場合、 $q_{st}$ は $A_d/A_h$ の増加と共に増加して $A_d/A_h=2.6$ 以上で一定値に漸近する傾向を示している。この一定値は、同一実験条件下におけるダクトが無い場合、つまり広いプール中の同一寸法平板発熱体における臨界熱流束実験結果と殆ど一致している。超流動ヘリウム中では、熱が周囲に均等に伝わりやすいと思われるのに、発熱体巾の僅か2.6倍の拡がりを許容しただけで臨界熱流束が広いプール中の値と一致してしまうのは、驚きである。熱の拡がりによる等価熱伝導率 $1/f(T)$ の減少効果が大きいためであろうと考えられる。

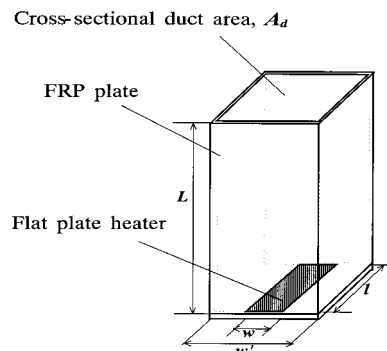


図4 ダクト一端の平板発熱体

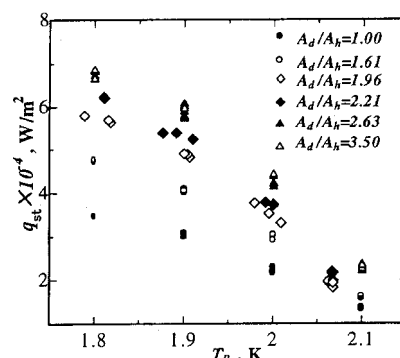


図5 ダクトにおける臨界熱流束実験結果とバルク液温の関係

### 3.3 二次元数値解析

上述のような熱の拡がりがある場合の臨界熱流束とその機構を明らかにするため、二流体モデルの基礎方程式を差分法で解いて、定常臨界熱流束や過渡的な熱入力に対する膜沸騰に移行するまでの時間を求める数値解析を行っている。非線形が強い為幾多の困難があったが、最近、定常及び過渡共実験結果と良く一致する解が得られるようになってきている。例えば、図5に示すダクトの臨界熱流束実験結果は全て対応する条件の数値解と5%以内で一致している。図6は、臨界熱流束点における $A_d/A_h=1.6$ のダクト右半分の全流体速度ベクトル（スーパー成分とノーマル成分の速度ベクトル和）と温度分布を示す。予測したように試験発熱体近傍の熱の拡がり部で大きな渦が発生している。

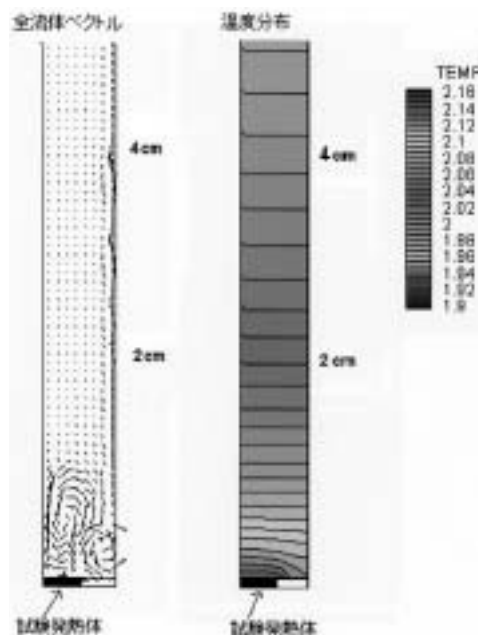


図6 臨界熱流束点における全流体の速度ベクトル（スーパー成分の速度ベクトル和）と温度分布（計算値）

### 4. おわりに

超流動ヘリウム冷却は、核融合炉、大型加速器、超電導エネルギー貯蔵装置等の大容量超電導マグネットの高磁場化、小型化に重要な技術として期待されている。今後、さらに広範囲な条件下で実験を行ってデータベースを提供すると共に、それらのデータに裏打ちされた2次元更には、3次元の数値解析コードを提供したいと考えている。

# 電力自由化と系統運用

関西電力株式会社  
森 詳 介

## 1. はじめに

経済分野の規制緩和の流れは1970年代後半より世界的に広がりを見せていたが、電力等のネットワーク型公益事業においては規模の経済性が存在するため自然独占が成立すると考えられており、地域独占、垂直統合の事業が認められるかわりに政府により事業規制を受け、料金等は認可を受けることが必要であった。

しかしながら1980年代に入り、技術革新により、少ない投資でサービス提供が可能となってきたこと、競争原理の導入による経済の活性化を図る動きが顕在化してきたことから、電気事業においても競争導入が可能な発電、販売分野での規制緩和が始まった。

このような背景のもと、わが国でも本年3月21日より電力小売り供給の部分自由化が開始されたが、本稿では、この電力自由化と自由化が系統運用に与える影響について紹介する。

## 2. 欧米における規制緩和

欧米においてはわが国よりも電力自由化が先行しており、欧州では、まず英国においてサッチャー政権のもとで国営事業の分割民営化が進められ、電力においても1990年から分割民営化が実施され、同時に電気事業の自由化が開始された。

その後、自由化は北欧地域に拡大し、さらにEU域内の市場単一化を目指すEU指令が1997年1月に発効したことにより、EU諸国等も段階的に電力の自由化が進んでいる。

欧州における規制緩和の進展状況は図1のようになっている。

一方、米国の方では、卸発電市場から規制緩和が始まったが、そのきっかけとなったのが1978年のPURPA法（Public Utility Regulation Policy Act）による再生可能エネルギーを使用する小規模電源とコージェネレーターからの余剰電力の購入義務づけであった。その後、卸発電市場での競争を促す各種法規則の制定を経て、1996年、送電網への完全なオープンアクセスが義務づけられ、卸市場は完全に自由化されるとともに州単位で小売市場の自由化が進んだ。

米国での自由化の特徴として最初に全面自由化に踏み切ったカリフォルニア州を例にとると、発電部門と送電部門の分離、市場支配力の緩和を目的とした大手電力会社への発電所売却義務、独立した系統運用組織であるISO（Independent System Operator）の設立、卸電力の公設プール市場であるPX（Power

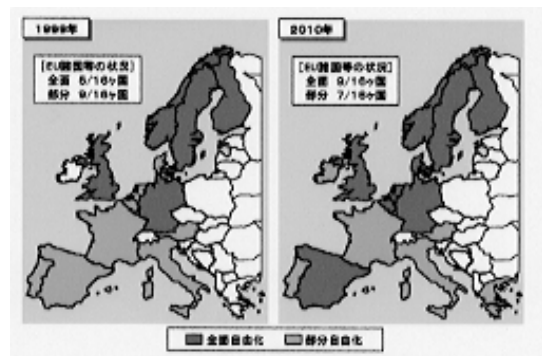


図1 欧州における規制緩和の進展状況



図1 欧州における規制緩和の進展状況 (2000年8月現在)

Exchange) の設立などが挙げられる。

米国における規制緩和の進展状況は図2のように、主に料金水準の高い州を中心に全米のほぼ半数で法整備済みであり、全面自由化あるいは部分自由化が行われている。

自由化後の料金水準は、1997年から1999年の間に全米平均では3.6%低下、全面自由化されたカリフォルニア州では7.8%低下しており、マクロ的には自由化のコストダウンメリットはあったものと評価されている。

### 3. 日本における規制緩和

わが国では、電源立地の困難化、設備関連コストの増大、円高による電気料金の内外格差の拡大といった課題を抱えているわが国の電気事業が安定供給の確保と効率的な電力供給システムの構築を両立させることをねらいとし、1995年4月に電気事業法が改正、同年12月に施行された。

具体的な改正内容としては、電力卸入札制度の導入により誰もが卸発電事業へ参入することを可能としたこと、料金規制や電気設備の保安に係わる規制を見直したことなどである。

電力卸入札のこれまでの実績は、全国で666万kWの募集に対し、応札はその4.3倍の2,834万kWにもほり活況を示したことから、卸発電事業の自由化は一定の効果をあげている。

その後、世界的な電力市場の自由化の流れもあり、さらなる規制緩和への圧力が強まる中で、1996年に第二次橋本内閣が掲げた「6大改革」の一つである経済構造改革で電気事業における規制緩和をさらに進めることが表明され、「経済構造の変革と創造のためのプログラム」とその行動計画が発表された。

1997年7月、これを受けて電気事業審議会に基本政策部会および3つの小委員会を設置し、さらなる規制緩和について審議が開始された。

この中では、エネルギーセキュリティー、環境、供給信頼度、ユニバーサルサービスの4つの公益的課題と自由化を両立させるという基本的な考え方のもとに議論された結果、全面自由化、プール市場に移行するのは、原子力開発の困難化、地球環境問題への影響等が懸念され、当面は特段の支障はないと考えられる部分自由化が現実性が高い、との結論に至った。

具体的には、全需要の約3割となる受電電圧2万V以上かつ使用最大電力2千kW以上の需要を自由化すること、また、約3年後には更に拡大するかなどについて検証することとなった。

この審議会の結果を受けて、電気事業法が1999年5月に改正され、本年3月21日より新制度がスタートしている。

今回の自由化により、規制分野のお客さまは従来どおり関西電力から電力を購入していただくことになるが、自由化対象のお客さまは関西電力の他に新規参入する電気事業者であるPPS (Power Producer and Supplier) と呼ばれる特定規模電気事業者や他地域の電力会社からも電力を購入することが可能となる。なお、PPSや他電力からの自由化対象のお客さまへの供給は電力会社の送電線を利用した託送による供給となり、この制度を接続供給と呼んでいる。(図3)

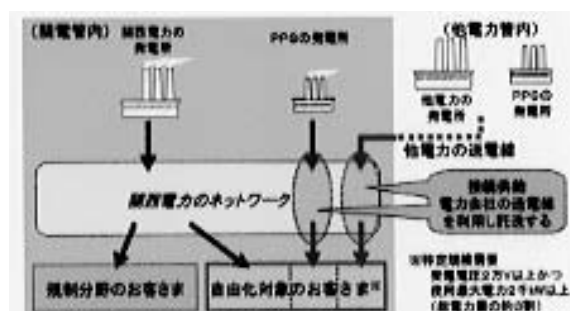


図3 自由化部門の制度概要

平成12年10月時点で、PPSとして届け出た事業者が3件で供給力の合計は約13万kW、これらPPSからの相対契約によりお客さまに供給しているPPSは1件で使用電力の合計は約3万kW、更に、供給先を入札により選ばれたお客さまが5件、このうち通産省はPPSであるダイヤモンドパワーが落札し、すでに供給を開始している。

ちなみに、このような状況の中、わが国でもオイルショック直後の1980年以降、効率化の成果を受け、電気料金の引き下げを続けており、関西電力の場合、先般の料金改定の結果、1980年に対し75%のレベルにまでなっている。

#### 4. 系統運用の現状

関西電力管内の季節ごとの代表的な1日の需要は図4のように季節ごと時間ごとに大きく変化し、年間の最小時には年間の最大時の3割程度にまで減少する。

一方、図5は関西電力の主要電力系統を示したものである。電源から需要に電力を安定的かつ効率的に輸送できるように、また電源開発地点の変動や需要の偏在への柔軟性を確保するように二重外輪系統で構築している。

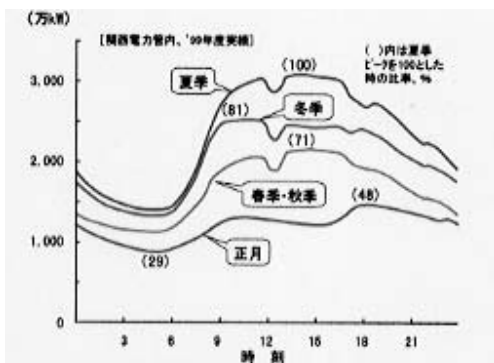


図4 季節別1日の電気の使われ方

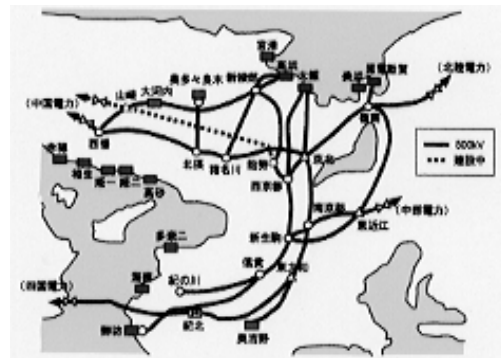


図5 関西電力の主要電力系統

3

電力会社は、これらの需要に対して電源から送電ネットワークに至る全体を一体的に扱い、信頼性を確保した上で経済性を考慮した系統運用を行っており、この信頼性の指標となる品質として、周波数、電圧の適正値の維持、停電の回避などがある。図6で送電線制約時の電源持ち替えについて説明すると、通常は安い電源の出力をあげていき、足らざるを高い電源で供給するといった経済運用を行っているわけであるが、この結果、送電線の運用限度を超えるような潮流となることが予想される時には経済性を若干犠牲にして安い電源を抑制し、その分高い電源の出力を増やし送電線の潮流を運用限度内に抑制するといったことを行っている。



図6：送電線制約時の電源持ち替え

このような運用を行うにあたっては、長期から年間、月間、週間、翌日、そして当日に至るまで綿密な事前調整を実施している。常に適正な予備力を確保するための電源の点検停止時期の調整、数年スパンに亘る信頼度を考慮した上での流通設備の停止作業の実施時期の調整、発電機の特長や使用燃料などを考慮した経済的な運転スケジュールの算定、潮流計算・系統安定度計算などによる予定潮流での安定運用可否の事前検討などを実施している。

更に、万一の事故発生時に備え、迅速な事故復旧ができるように日頃からシミュレータによる事故想定訓練を実施している。

#### 5. 自由化の系統運用への影響

前述のように、これまでは電力会社が電源から流通設備まで計画的かつ一体的に扱い、系統運用を行ってきた。部分自由化が開始された現状においても、電力会社がほとんどの需要に供給する間



は実運用上大きな問題はないと考えているが、自由化が進展すると、周波数維持、需給バランス、予備力確保、連系線運用などの面において影響が出てくるのが懸念される。

#### (1) 周波数維持

負荷変動に応じ発電機出力を調整し周波数を維持する役割は電力会社が担っているが、従来、60Hzで交流同期連系している西日本6社のうち、関西電力以外の5社は周波数と連系線潮流を同時に検出して発電機出力を調整するTBC (Tie-Line Bios Control) 制御を行い、関西電力は各社の調整未達分 (= しわ分) も含めた負荷変動分を調整する形となるFFC (Flat Frequency Control) 制御により行っていた。

この背景には、電力会社間連系が開始した1963年(昭和38年)当時、全系容量が小さい中で系統容量比が大きく出力調整能力のある電源を持つ関西電力が周波数に対して最終的な責任を持たざるを得なかったという技術的経緯があった。

今回、自由化が開始するにあたり、60Hz系容量も連系当時の7倍と大きくなり各社とも電源の調整能力が確保されている一方、PPSなどからは電力会社が周波数を維持する役割に対する費用としてアンシラリーサービス料金を設定しており、こうした中で電力会社間でも公平性を担保しておこうということで、60Hz系6社で協議の結果、自由化が進んでいる欧米と同様の全社同じTBC制御で本年4月より運用を開始している。

なお、制御方式を変えたあとでも周波数の仕上がりに従来と大きな差は出でならず、全社TBC制御の安定性には問題がないことを確認している。

#### (2) 需給バランス

従来の日々の運用の中では、電力会社は経済的な電源運用を行うため、3分先の需要を予測し、これに対して並列されている火力発電機の総燃料費が最小となるような各発電機への出力配分を中央のコンピュータで自動的に算出し、発電機に出力値を指令している。(ELD: Economic Load Dispatch)

自由化が進展し、各発電機の出力が市場での価格により決定されるようになると、理論的には全費用の最小化とはならないことになる。

#### (3) 予備力確保

従来、電力会社がエリア内の需要に対し供給責任を果たすべく供給力を一体的に確保してきた。長期計画では、電力会社が想定した10年程度先までの需要にもとづき予備力を確保した供給力を調達するため電源開発などを行い、また年間計画では電源の点検停止時期の調整により必要予備力を確保している。

自由化が進展すると、供給責任の所在がなくなり、各社は自社の販売計画に応じた電源調達しか行わなくなり、予備力不足となる可能性が懸念される。自由化が進んでいる米国の1998年度長期計画では、1998年には16%強の予備力が年々低下し、2007年では10%強まで低下する見通しとなっている。

カリフォルニアでは予備力が一定の基準を下回ると緊急宣言が発動され、逼迫度合いに応じ、節電の呼びかけ、調整契約負荷の遮断、輪番停電の実施が行われることになっているが、本年6月から8月には21回の節電呼びかけと13回の調整契約負荷遮断が行われた。更に6月14日には、ローカル的ではあるが、サンフランシスコ・ベイエリアにおいて輪番停電にまで至った。この日は40度を超える猛暑による需要の急増と電源のトラブル停止が重なり、エリア外からの送電線の潮流も運用限度一杯で受電できず、供給力が不足し、のべ9.7万軒の輪番停電が行われた。

#### (4) 連系線運用

従来、連系線の運用は電力会社間での融通などの事前契約により潮流が決定することから、長期的な予定値が容易に把握でき、これをもとに系統解析などの事前検討により運用限度を設定し、この範

困に収まるように電源、流通設備の点検や作業による停止時期を計画的に調整してきた。

自由化が進展し、市場により電源運用が直前に決定するものが増えると、事前の予定潮流の把握が困難となり十分な事前検討ができず信頼度維持が困難となる可能性が出てくる。

潮流が予定から大きく変わったことにより大停電に至った例として1996年7月に発生した米国西部での停電事故がある。当初西部地区に至る連系線の計画潮流は安定に運用できる値であったが、当日は西部地区が快晴・高気温で需要が急増する一方、北西部では豊水で安価な水力の電気を大量に供給可能という中で、この電力を西部地区が大量に受電し、計画を大きく超える重潮流となった。このような状況のもとで、樹木接触による送電線事故にRy故障が重なり、オレゴン南部の電圧低下、系統分離と事故が拡大していったのである。



図7 米国西部停電事故の概要

なお、翌日の7月3日にも同様の事故が発生したが、この時は一部の負荷遮断でくい止めたものの、やはり停電となった。

これらの事故の要因としては、今述べた予定外に重潮流となったことや、競争激化に伴うコスト削減の影響、会社間・部門間の協力・協調関係の弱体化の影響などがあるとされている。

## 6. その他の影響

以上、自由化による系統運用への影響について紹介したが、その他にも設備計画や価格などへの影響が懸念される。

### (1) 設備計画

設備計画に必要な長期的・確定的な需要想定が困難になること、責任の所在があいまいになりトータルの適正な設備計画を推進する母体が不在となること、リードタイムの長い設備建設は投資リスクが大きくなること、などがある。

### (2) 価格

競争下では何れかの断面で寡占状態となり、このような場合には市場支配力を有する事業者が増大し価格が高止まりとなる可能性が考えられるが、前述の需給逼迫に関連した今夏のカリフォルニア州における電力価格の高騰を例として紹介する。

カリフォルニア州の電力供給体制は図8のように大手3社が主な供給会社となっており、その市場は図9のように、1日前、1時間前に電力取引を行う卸電力公営プール市場であるPXと、実際の

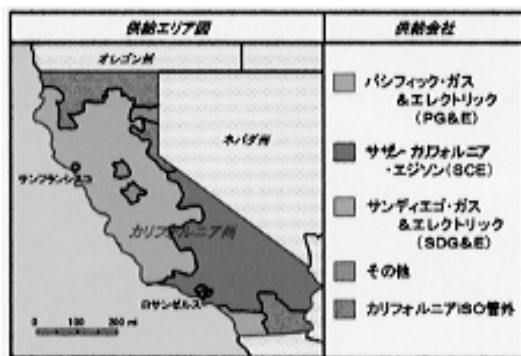


図8 カリフォルニア州電力供給エリア

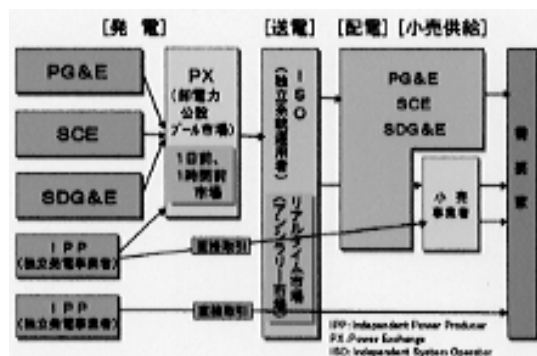


図9 カリフォルニア州電気事業の市場構造

需要と取引量の差分を調整するためリアルタイムの電力取引を行う独立系統運用者であるISOが中心となっている。

なお、大手3社は、発電する電力は全てPXに入札し、小売りする電力は全てPXから購入することが義務づけられている。

このPXにおける1日前卸電力価格の本年6月から8月の変動状況は、図10のようにプライス・キャップ（上限価格）に張り付く高騰を頻発しており、この結果、6月平均価格、7月平均価格ともに昨年の8月平均価格を大きく上回った。

一方、家庭用電気料金は、自由化移行措置として大手3社は固定料金制度となったが、SDG&E社では昨年でこの措置を終了させ卸電力価格に連動した料金となっており、昨年の7月は値下げ出来たものの、今年の7月にはこの影響で大幅な値上げとなった。また、固定料金を続けているSC E社とPG&E社では卸電力価格が高騰する中で、これを小売価格に転嫁できず大幅な差損が発生している。なお、2社の差損の回収方法については現在係争中である。

この電力価格高騰の背景として、電源建設が市場任せとなっていること、コスト削減の余り電源投資を遅らせること、事業者が新規投資を抑制し短期利益を追求すること、発電所の老朽化や保修計画が事業者任せであること、更にコストではなくプライスによる入札やPX、ISO、私設市場など複雑な市場構造によりゲーミングを助長する仕組みとなっていることなどが言われている。

## 7. おわりに

従来、日本の電力供給は電力会社による一体的な系統運用により、信頼性と経済性を両立してきた。これは、部分自由化後においても大部分の需要に電力会社から電気を供給している間は実運用上大きな問題は発生することはないと考えている。

しかしながら、さらに自由化が進展し、市場により個々に電源運用が決定されることになると、ネットワークから最適な運用とならない、必要予備力の確保が困難となる、計画的な運用が困難となる、電力価格の高騰を招く、などの可能性があり信頼性および経済性を損なう恐れがある。

このような流れの中で、全体最適により確保してきた信頼度をどのように担保すべきか、日本の電力風土に適応する電力供給形態の構築も含め検討していく必要がある。

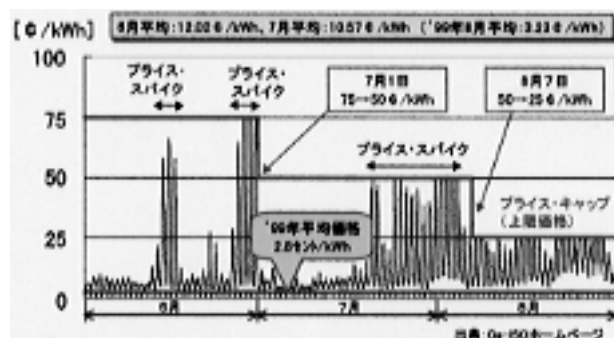


図10 卸電力価格の変動状況  
(PX 1日前市場、2000年6月～8月)

## 新設研究室紹介

### 量子工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室） 「次世代フォトニクス・デバイスの研究」

通常、電子は粒子として、光は波としてとらえられているが、ナノメートル領域では、電子は波としての性質（電子波）を示し、光は粒子としての性質（光子）を示すようになる。本研究室では、このような極微な構造中での電子および光の振る舞い、すなわち光量子電子効果の物理的基礎から応用までを研究の対象とする。

現在は、特に、光分野で革新をもたらすような新しい構造・デバイスの開発を目的として、以下に示すフォトニック結晶およびそのデバイス応用、超高速光 光変調デバイス、量子ドットテラヘルツデバイス等の研究を積極的に進めている。これらは、今後の情報化社会を支えるキー材料・デバイスを提供するものと確信する。

#### 1．3次元フォトニック結晶と超小型光チップ：

3次元的な周期的屈折率分布を設けた物質（フォトニック結晶）においては、光子のエネルギー - に対して、完全バンドギャップが形成される。この結晶中に人為的な欠陥や発光体を導入することにより、光を自在に操作することが可能となり、究極的には超小型光チップ等の開発へとつながる。本研究室ではこの新しいフォトニック結晶に関する研究を理論および実験面から積極的に押し進めている。（例えば、S.Noda, et al, "Full Three-Dimensional Photonic Bandgap Crystals at Near-infrared Wavelengths", Science, vol.289, pp.604-606, 2000）

#### 2．2次元フォトニック結晶と光機能デバイス：

周期的な屈折率分布を2次元面内のみに設けた結晶、すなわち2次元フォトニック結晶においても、2次元面内の光閉じ込め・制御を利用することにより、各種の機能デバイスが実現可能である。本研究では、2次元フォトニック結晶レーザ、2次元欠陥利用デバイス等の独自の新しい機能デバイスの研究を行っている。（例えば、S.Noda, et al, "Trapping and Emission of Photons by a Single Defect in a Photonic Bandgap Structure", Nature, vol.407, pp.608-610, 2000）

#### 3．超高速光 - 光制御：

現在、光の制御には電気的手法が用いられているが、大容量の情報処理においては、容量・抵抗積で決まる時定数の制約から電気的には処理しきれなくなる。本研究では半導体量子井戸のバンド間およびサブバンド間遷移を同時に用いるという独自の光量子非線形光学効果を用いた超高速光 - 光制御の研究を行っている。（例えば、T.Asano, et al, "Pump-probe measurement of ultrafast all-optical modulation based on intersubband transition in n-doped quantum wells", Appl. Phys. Lett., vol.77, pp.19-21, 2000）

#### 4．量子ドットによるテラヘルツ電磁波発生：

電子を100 以下の3次元極微領域（量子ドット）に閉じ込めることにより、とり得るエネルギーを完全に離散化させることが可能となる。その結果、これまで非発光パスが主であった量子準位間遷移を、発光性の電子遷移として用いることが可能となる。つまり、高効率のサブバンド間発光デバイスの実現が期待される。発生する光の周波数はテラヘルツ域となるため、これまでデバイスが皆無であった周波数領域に新たなデバイス展開が期待できる。（例えば、S.Noda, "Mode assignment of excited states in self-assembled InAs/GaAs quantum dots", Phys. Rev. B, Vol.58, pp.7181-7187, 1998）

## 通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

ネットワーク分野の技術進歩にはめざましいものがあります。1987年に開催されたISS '87 (International Switching Symposium) で21世紀初頭の技術を予測するセッションがありました。当時スイッチングノードでは8 Mbps程度で情報のスイッチングが行われていました。デバイス技術の進展をもとに予測すると数Gbpsと予想されましたが、現実はそれを超える10Gbpsのシステムが実用に供されています。開発中のシステムを含めると40Gbpsと予測を1桁上回る結果になっています。これはインターネットとモバイルを両輪とするネットワーク利用の増大が技術進歩を加速していると見ることができます。ネットワークそのものの研究や、ネットワークシステムを支える周辺分野の技術進歩に加えて、ネットワーク利用の質的・量的な拡大がネットワークの絶え間ない進化を促す最大の原動力であると考えられます。また、ネットワークシステムの研究開発のスタイルも、大規模・大組織による一貫した研究開発から、多数の小さなアイデアをオープンな形でつなぎ合わせる形態に変わりつつあります。研究開発の主役が、大企業のキャリア中心から、ベンダー・ベンチャー企業や大学を含む、多様なプレーヤーの集合へと変化しています。すなわち、ネットワークの研究が、我々大学にも身近なものになってきているわけです。

当研究室は、進化しつづける次世代マルチメディアネットワークを研究対象としています。次世代マルチメディアネットワークは、高速・広帯域化、QoS保証、モバイル、ミドルウェア機能、ユーザによるプログラマブル化などその実現に向けたさまざまな課題があります。研究を進めるにあたっては、「技術」と「ターゲットネットワーク」を組み合わせたアプローチをする計画です。縦系にあたる技術として、システム構築技術を含むシステムアーキテクチャ、プロトコル、トラフィック性能評価などがあり、横系のターゲットシステムとして、マルチメディアネットワーク、モバイルネットワーク、フォトリックを含む高速ネットワークなどがあります。縦系の技術は、ネットワークを実現する方法論として、どんなターゲットネットワークにも必要な技術分野ですが、技術内容はターゲットネットワークに合わせて進化させていく必要があります。また、「ターゲットネットワーク」は時代の要請と整合したものにする必要があります。ネットワークの分野は、ビジネスとして成長する分野に集中的な研究開発リソースが投入され、その結果として著しいコストパフォーマンスの改善が図られ、そこに新たな研究テーマが生まれてくるという特長があります。いわば、ユーザを投票者とする多数決によって、技術が方向付けられると言えなくもありません。当研究室は、時代の要請を少し先取りするようなターゲットネットワークの選定とその研究を進めたいと考えます。当面の研究の柱として、「モバイルアクティブネットワークアーキテクチャーの研究」を立ち上げています。テストベッドを構築し、理論と実験のバランスをとりながら研究を進めます。

当研究室は全くの新設研究室で、これからの進め方はフレキシブルです。皆様からのご意見・ご批判をお聞かせください ( takahasi@kuee.kyoto-u.ac.jp )

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室） 「生体の物理特性と機能の計測に関する研究」

医学・医療には画像診断装置や病院情報システムを始めとした数多くの情報システムが用いられている。従来の画像診断では、X線画像におけるX線吸収率、超音波診断における音波の反射率、核磁気共鳴法におけるプロトン密度（水分含有量）など、各画像診断法の性質に依存した指標が画像として描出されるにすぎなかったが、近年では生体固有の機能や物理特性を計測するという、より本質的な診断法に進歩しつつある。本研究室では磁気共鳴画像法（MRI）を中心に、生体の機能や物理特性の計測に関する研究を進めるとともに、その実用化を目指して医用VRシステムの開発を行っている。

### 1．生体機能の計測

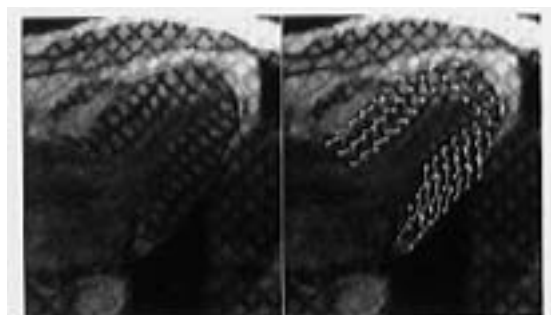
MRIを用いた生体機能計測では、脳や心臓を対象としている。脳機能画像ではfunctional MRIと呼ばれる撮影法を用いて脳細胞の活動に伴う局所的な組織血流や組織酸素分圧の変化をとらえ、また心機能画像では心筋の壁運動を動画として描出する。これらのMRI画像に様々な画像処理の手法を適用して統計学的な解析を行い機能診断に結びつけるが、より微細な変化を抽出する方法の開発や解析処理の自動化を進めている。図に心機能の解析処理を行った画像を例示する。これは特殊なMRIの手法を用いて与えた格子状の磁氣的標識が心臓の収縮に伴って変形する様子から、心筋の表面のみならず筋層内部の運動も判定する方法である。心臓が最も拡張したときに印可した直線の標識が収縮時に変形した画像（図左）と半自動的に抽出した格子点の軌跡（図右）を示している。多数の格子点を数十フレームの動画画像について追跡する必要があるため、高速かつ正確に処理できるシステムの開発を行っている。

### 2．生体物理特性の計測：組織弾性率の計測

生体物理特性の計測としては、MRIを用いた新しい手法である弾性率測定法(MRE lastography: MRE法)の開発研究を進めている。生体に外部から振動を加えると、組織の硬さ（弾性）によって振動波が伝播する速度が異なることを利用し、ヤング率や剛性率を非破壊的に測定する方法であるが、従来では生体組織から得ることができなかった新しい物理特性計測法として注目され、組織の硬度が増す肝硬変や腫瘍の存在診断、また軟化を示す組織壊死の診断に期待されている。1.5Tの極めて高い磁場環境で稼動する振動装置の開発や、臨床用のMRI撮影装置におけるMRE撮影の方法論に関する研究を行っている。

### 3．医用VRシステム：sensible human

生体組織の弾性率を計測するMRE法の開発とともに、これを表現する医用VRシステムの試作も京大病院医療情報部と協力しながら進めている。従来の医用VRシステムはトポロジカルな画像情報のみから構成されているため、手術の際に最適となる到達経路のシミュレーションを行うなどの用途に限られているが、MRE法により得られる弾性情報を加味し、触れることができる仮想人体(sensible human)の構築を目指している。実際に人体から得られた弾性情報を触覚として表示することにより、高度な現実感を提供するVRシステムとして診療への支援を期待している。



心筋を格子状に標識したMRI画像と収縮期における壁運動の軌跡

## 宙空電波科学研究センター 宇宙電波科学研究部門 電波科学シミュレーション分野（大村研究室）

本研究室は、宙空電波科学研究センターに所属しています。その研究テーマの一つとして、宇宙空間プラズマ中の様々な電波現象を計算機の上で再現し解析する宇宙プラズマ計算機実験を行っています。宇宙空間はイオンと電子からなるプラズマで満たされており、その中で生起する電磁現象はマクスウェル方程式とプラズマの荷電粒子の運動方程式を組み合わせることで解き進めることにより、再現することができます。粒子モデルで現実的な速度分布をもったプラズマを実現し、宇宙空間の一部を切りだしたモデル領域を計算機の上で実現するためには、極めて多くの粒子の運動を追跡しなければならない、計算速度も超高速であるのみならず、メモリー空間としても十分に大きな主記憶を持った専用計算機が必要です。本研究では、宙空電波科学研究センターで全国共同利用の設備として運用している先端電波科学計算機実験装置（主記憶32ギガバイト）を利用して計算機実験を行っています。本稿では、その一例として磁気リコネクションの計算機実験を紹介します。地球の周りには地球の固有磁場と太陽から噴出す超音速のプラズマ流（太陽風）とが相互作用して吹流しのように後方に伸びた磁気圏という閉じた領域が出来ていますが、この太陽風プラズマの流入、磁気嵐、オーロラ等の一連の磁気圏活動において非常に重要な役割を果たしていると考えられているのが、磁気リコネクション過程（磁力線のつなぎ換え）です。最近の衛星観測では、磁気圏の尾部に存在する磁気リコネクション領域において、静電孤立波やラングミュア波の発生が観測されています。これらの波は、反平行磁場にはさまれたプラズマシート付近に存在する電子ビームによって励起されると考えられ、この電子ビームを生成する物理機構として磁気リコネクション過程が有力視されています。本研究では2次元電磁粒子コードを用いて、図1のような2次元の空間を設定して、磁気圏尾部の構造をモデル化し、初期条件として反平行に配置した磁力線がX-pointでつなぎ換えられ、図2のような磁場構造形成されてゆく物理過程を再現し、実際に電子の加速が起こることを確認することに成功しました。磁力線方向に流れる電子のドリフト速度の空間分布（図3）を調べて、その加速機構について詳しい解析を行っています。

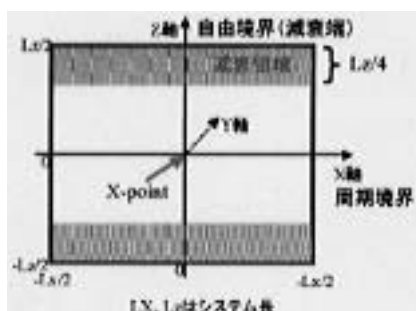


図1 シミュレーション空間

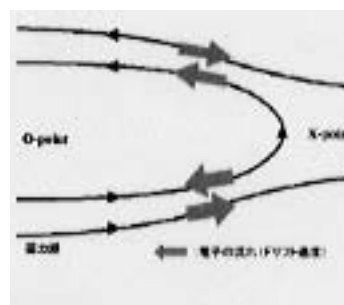


図2 磁気リコネクションと電子加速の概念図

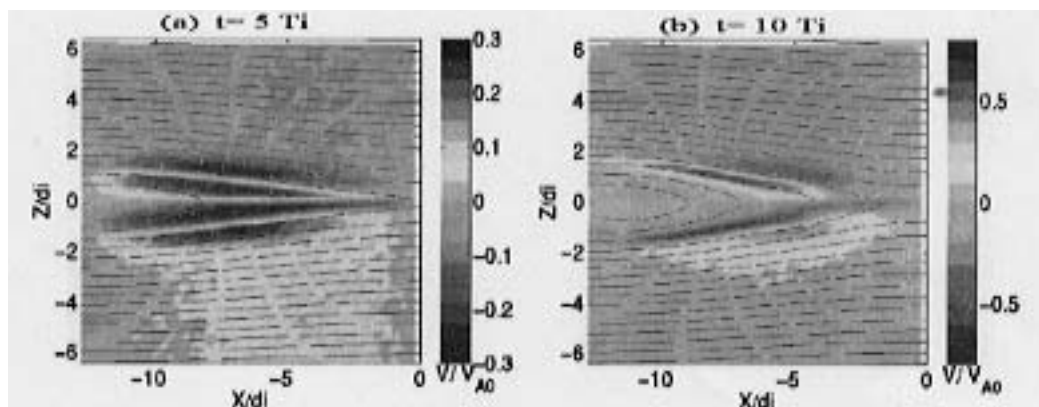


図3 電子のドリフト速度の空間分布

## シリーズ：研究内容紹介

このページでは、電気系関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

( \*印は「新設研究室」、 は「大学の研究・動向」のページに掲載 )

## 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

#### 電子物性工学専攻

**集積機能工学講座** (鈴木研)

**電子物理学講座** **極微真空電子工学分野** (石川研)

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野 (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** **光子電子工学分野** (野田研) \*

量子工学講座 量子電磁工学分野 (北野研)

#### イオン工学実験施設

**高機能材料工学講座**

### 情報学研究科

#### 知能情報学専攻

知能メディア講座 言語メディア分野

**知能メディア講座** **画像メディア分野** (松山研)

#### 通信情報システム専攻

**通信システム工学講座** **デジタル通信分野** (吉田研)

通信システム工学講座 伝送メディア分野 (森広研)

**集積システム工学講座** **大規模集積回路分野** (小野寺研)

集積システム工学講座 情報回路方式論分野 (中村研)

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤研)

**通信システム工学講座** **知的通信網分野** (高橋研) \*

#### システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研)

**システム情報論講座** **医用工学分野** (松田研) \*

### エネルギー科学研究科

#### 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)

### 宙空電波科学研究センター

#### 地球電波科学研究部門

**大気圏光電波計測分野** (津田研)

**グローバル大気情報解析分野**

#### 宇宙電波科学研究部門

宇宙電波工学分野 (松本研)

**電波科学シミュレーション分野** (大村研) \*

#### 電波応用工学研究部門

マイクロ波エネルギー伝送分野 (橋本研)

レーダーリモートセンシング工学分野 (深尾研)

京都大学ベンチャー・・ビジネス・ラボラトリー - (KU-VBL)



## 研究室紹介

### 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）

#### 「強磁性体媒体におけるヒステリシス渦電流場の解析」

強磁性体材料は、電気機器の分野では鉄心材料、磁気記憶の分野では磁気ヘッドや記憶媒体など、電気工学の分野で広く用いられている不可欠な材料である。ところが、有限要素法などを用いた電磁界解析の際には、ヒステリシス特性表現の困難さから、強磁性体のヒステリシス特性は無視されることが多かった。しかし、電気機器の解析の際には、ヒステリシス損や残留磁気などのヒステリシス特性の評価は重要である。そこで、最近、プライザッハモデルやその他のヒステリシスモデルを用いた電磁界解析が試みられているが、電磁界解析に適したヒステリシスモデルは未だ確立されていない。特に、実際の強磁性体はベクトルヒステリシス特性を持っているため、磁界ベクトルと磁束密度ベクトルの関係を与えるベクトルヒステリシスモデルの開発が必要である。

本研究では、プレイヒステロンまたはストップヒステロンの重ね合わせとしてベクトルヒステリシスモデルを構成し、そのモデルを用いて簡単な渦電流解析を行った。プレイヒステロンモデルのヒステリシス特性は静的スカラプライザッハモデルによる特性と等価であるが、プレイヒステロンモデルの方が記憶容量が少なく済み、アルゴリズムも簡略である。また、ストップヒステロンモデルは、プレイヒステロンモデルと同等の簡略性を持ち、かつ、磁束密度から磁界を直接求めることができるため、磁気ベクトルポテンシャルを用いた有限要素法解析の際に有効であると考えられる。

ストップヒステロンの重ね合わせにより構成したヒステリシス特性の例を図1に示す。図1の磁気特性を持つ消磁された鉄心(図2)に対して、交流電界(50Hz)を断面に垂直に印加した場合の磁界変化を解析した。図3に磁界と磁束密度の分布の例を示す。図3では、渦電流のため内部への磁界の浸透が妨げられており、同図(b)では、残留磁束のため、中心付近の磁束密度は磁界や表面付近の磁束密度と逆方向になっている。図4に鉄心を通る全電流(強制電流と渦電流の和)の変化を示す。図4には、消磁状態から開始した場合とともに、大きな直流電界を印加して鉄心を偏磁させてから交流電界を加えた場合も示している。図4より、偏磁により大きな突入電流が流れることがわかる。このように、解析では、渦電流の効果や、ヒステリシス特性による残留磁束などの効果を表示することができた。今後、実際の機器に即した3次元電磁界解析や、ベクトルヒステリシスモデルに関する更なる検討が必要である。

参考文献：T. Matsuo, Y. Osaka, M. Shimasaki, IEEE Trans. Magn.,36, 1172(2000).

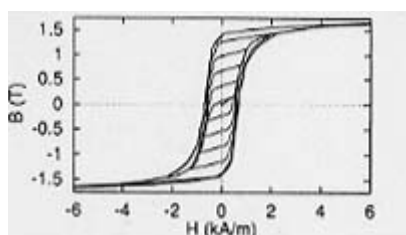


図1 ヒステリシス特性

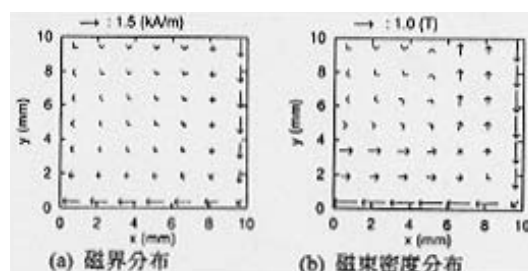


図3 渦電流解析結果(電界振幅1V/m,t=17msec)

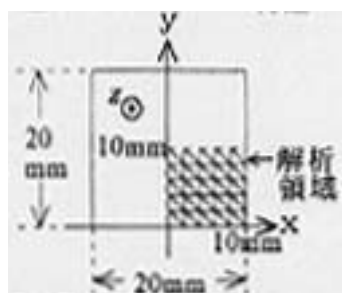


図2 解析対象と解析領域(導電率1MS/m)

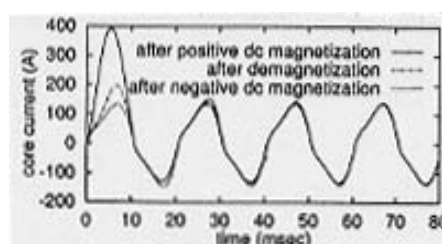
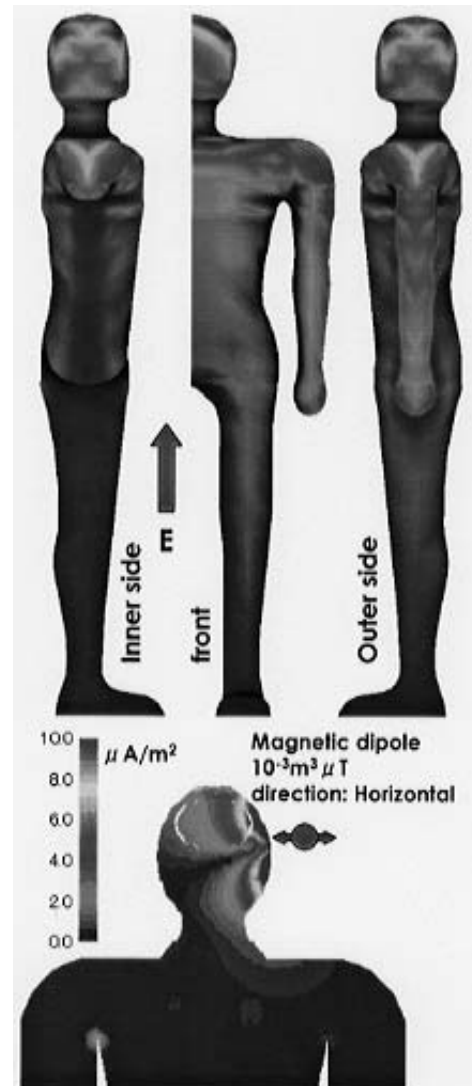
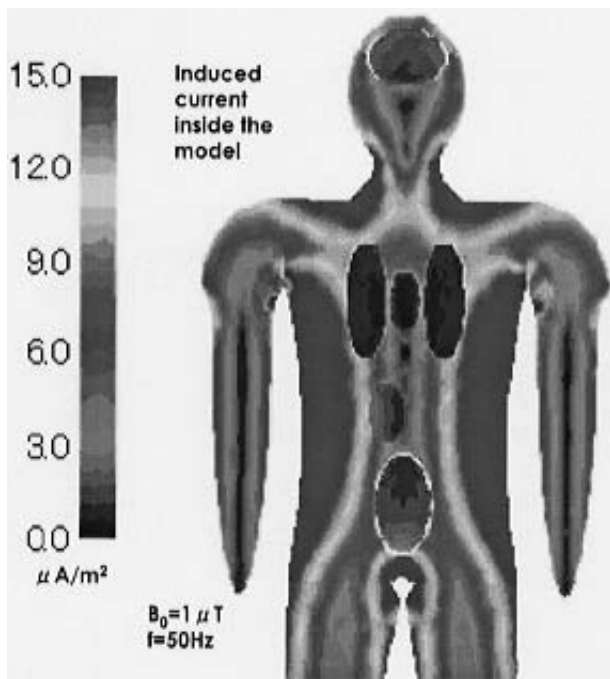


図4 鉄心電流

## 電力工学講座 電力発生伝送工学分野（宅間研究室） 「数値電界計算法の性能向上とその電力工学分野への応用」

数値電界計算技術は電気工学分野において不可欠な基礎技術の一つです。当研究室では表面電荷法・境界要素法に代表される境界分割型の解法について、計算技術の向上を図るとともに、高電圧・電力工学の諸問題への適用を行なっています。主な適用対象は、高電圧機器（最大電界の推定と絶縁性能評価）・3重点電界の計算（特異点近傍電界の評価）・帯電電荷測定（電荷分布測定法と放電開始への影響調査）・放電モデリング（モデリングと絶縁破壊の評価）・人体内誘導電界および誘導電流計算（商用50, 60Hz電磁界の影響調査）などです。高電圧放電分野の計算対象は、多くの場合電界集中を防ぐために曲面形状に加工されており、また人体の計算では必然的に曲面を取り扱う必要があることから、高度なサーフェスマデリングと連携した境界分割型の電界計算法が適しています。また、放電現象が関連する計算対象では、電界（電位ではなく）に対して高い計算精度が要求され、この点でも境界分割型の解法が有利です。今回は、人体モデル内外の電界・電流分布の計算結果を図面にして紹介いたします。商用高電圧（送電線周辺など）による静電誘導（右上図）・電磁誘導（左下図）および商用家電製品（ヘアドライヤー）による電磁誘導（右下図）の例です。遺伝子レベルでの電磁界の影響調査は目的ではありませんが、マクロなレベルでの基本資料の提供という意味で重要な知見を与えております。



### 図の解説：

「右上」垂直方向一様電界下の体表誘導電界強度分布（赤が強電界部）。人体モデルは一様誘導媒体仕様。

「左下」水平前後方向一様磁界下の体断面誘導電流分布（赤が大電流部）。

人体モデルは内臓（脳・心臓・肺など）毎に一様導電性媒体仕様。

「右下」水平左右方向ダイポール磁界による体断面電流分布（赤が大電流部）

人体モデルは左下図と同じ。

## 電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「非線形回路に対する代数幾何学的アプローチ」

### 1. はじめに

当研究室では非線形回路に対する代数幾何学、特にGröbner基底の応用に関する研究を行っている。Gröbner基底は多項式環のイデアル基底であり、B.Buchbergerが指導教官の名前に因んで名付けたが、広中平祐氏がそれよりも前に「特異点解消」の論文の中で標準基底として定義しその存在を証明したものである。近年の計算機代数の進歩により、実際に数式処理を用いて計算し、応用することが可能になってきている。ここでは、非線形回路の分類と大域分岐図の分解についてGröbner基底の応用を紹介する。

### 2. 回路の分類

非線形回路における様々な現象を調べるためには、これまでは個々の回路についてそれぞれ解析を行う必要があった。ところが回路の決定方程式が代数方程式として表現できる場合は、Gröbner基底がイデアルの標準形となることを利用すると、それらの回路を分類することができる[1]。例えば、交流電圧源、抵抗、キャパシタ、非線形インダクタそれぞれ1個ずつからなる回路をすべて考えると8種類の回路が得られるが、基本調波に基づいてGröbner基底を求めることにより、5種類に分類できる。このような分類を用いると、同一グループに属する回路の解析は代表的な回路を1個解析するだけでよくなり、効率よい解析ができる可能性がある。

### 3. 大域分岐図の分解

非線形の回路解析には分岐理論がよく用いられるが、これは特異点近傍での解析である。したがってパラメータ空間上での大域的な分岐現象はこの方法では扱えない。それに対しGröbner基底を用いて消去イデアルを求めると、分岐図が代数曲線として表現でき、大域分岐現象を解析することが可能になる。また、因数分解等を用いて代数曲線を分離することにより、分岐点での特異点を取り除くことが可能となる[2]。例えば図1に示す回路において1/3分数調波振動の分岐図を求めると図2のようになる。図中実線は対称解、点線は非対称解を示しているが、これは状態変数 $u_3$ と電源電圧 $E$ の14次式で表現される分岐図を4次式と10次式に因数分解して求めたものである。このように大域分岐図を分解することにより、対称性破壊分岐点 $P_1, P_2, P'_1, P'_2$ での特異点を取り除くことができる。

#### <参考文献>

- [1]K.Okumura,"Classifying Nonlinear Circuits by Gröbner base,"Proc. of NDES'98, pp.267-270, 1998.  
[2]T.Hisakado and K.Okumura,"Algebraic Representation of Bifurcation Phenomena with Gröbner Bases," Proc. of NOLTA 2000, Vol.2, pp.767-770,2000.

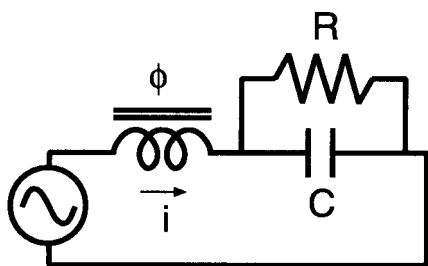


図1 非線形RLC回路

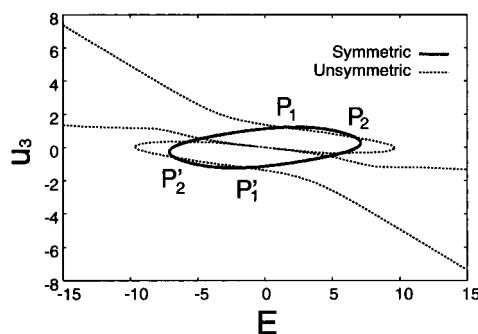


図2 1/3分数調波の分岐図

## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

### 「固有ジョセフソン接合を用いた高温超伝導トンネル分光研究」

#### 1. 固有ジョセフソン接合とは

高温超伝導は、質的な面でも量的な面でも従来の低温金属超伝導とは随分様相を異にしている。質的には、発現機構も異なるし、超伝導秩序パラメータの対称性も異なる。量的には超伝導転移温度  $T_c$  が高いことはもちろん、コヒーレンス長は非常に短く、磁場侵入長は長く、それらの異方性は非常に大きい。そのために電気的磁氣的性質は準2次元的な振る舞いを示す。極端な場合には、準2次元の超伝導層が積層された構造と等価になる。層状結晶構造を有するビスマス系高温超伝導体はまさにそのような物質で、超伝導層間がジョセフソン効果で結合されており、天然の理想的なトンネル型ジョセフソン接合を形成している。この接合は一般に固有ジョセフソン接合またはイントリンシックジョセフソン接合と呼ばれている。図1にはビスマス系高温超伝導体の  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  の結晶構造を示す。2重の  $\text{CuO}_2$  層が超伝導層で厚さが約0.3nmあり、これが1.2 nm厚さの絶縁層で隔てられており、超伝導層/絶縁層/超伝導層(SIS)型のトンネル型ジョセフソン接合を形成している。この接合が15nm間隔で積層されている。この固有ジョセフソン接合は、直流に対しては従来の単一のトンネル型ジョセフソン接合同様に振る舞い、高周波に対しては全く異なる振る舞いを示す。いずれの場合も、高温超伝導の理解のための物理面やエレクトロニクスへの応用面で非常に興味深く注目されている。ここでは当研究室で進めている、固有ジョセフソン接合を利用したトンネル分光による高温超伝導の物性研究を紹介する。

#### 2. 層間トンネル分光

トンネル分光は超伝導の電子状態を探るのに非常に有効であり、普通SIS型のトンネル接合が使われる。高温超伝導ではまだSIS接合ができていないが、ここでかわりに固有ジョセフソン接合を使うことができる。ただし、固有ジョセフソン接合は多数の接合が積層されているために、そのまま測定しても発熱や接合数の不明確さのため正確な分光ができない。そこで、ビスマス系高温超伝導体単結晶の表面から微細加工により10  $\mu\text{m}$ 角、厚さ約30nmの微小部分を微細加工で切り出し、その部分のトンネル特性を測定した。10Kから220Kまでの温度範囲で測定した結果を図2に示す。また図2の挿図にはオシロスコープで観察した低電流領域の  $I$ - $V$  特性を示す。11本の電流ステップが観察され測定している微小部分には実際11のジョセフソン接合が含まれているということがわかる。この方法で高温超伝導体のSIS接合特性を初めて観察することができ、トンネル分光に応用した。これを層間トンネル分光と呼ぶ。

#### 3. 得られた理解

図2に示されたトンネル特性からいろいろな事実が明らかにされた。詳細な説明はスペースがないので省略するが、超伝導エネルギーギャップが約50meVで  $T_c$  で消滅すること（消滅しないという主張もある!）、常伝導トンネル抵抗の温度依存性から電子対形成の媒介相互作用はフォノンではなく電子電子相互作用であること、などである。この手法の研究はまだ始まったばかりで今後ますます発展するものと考えられる。

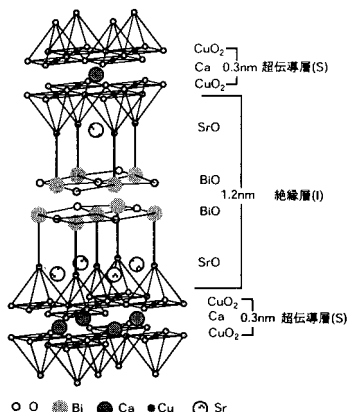


図1 固有ジョセフソン接合と高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  の層状結晶構造。

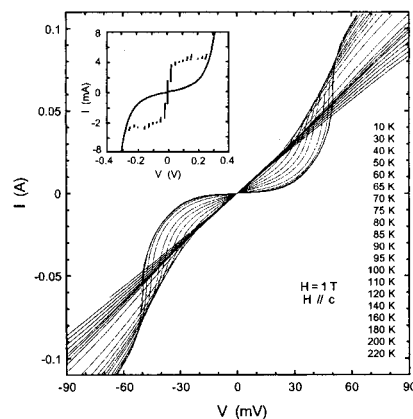


図2 11層の固有ジョセフソン接合の電流圧特性。挿図は低電流領域のオシロスコープ像。

## 電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

### 「負イオン注入による高分子材料の生体適合性制御と人為的神経回路網形成」

近年、医用高分子材料の表面にイオン注入処理により、材料表面の生体適合性制御ができることが明らかになってきた。実際、ポリウレタン、シリコンゴム、ポリスチレンなどの高分子材料表面に正イオン注入を行うことによって、材料表面の血液適合性や牛血管内皮細胞の接着性を向上できるなどの報告が行われている。さらに、イオン注入法を駆使すれば、高分子材料表面の抗菌性や選択的細胞接着性など生物高機能性を付与することも期待できる。高分子材料の表面状態はイオン注入条件、すなわち注入エネルギーやドーズ量などに依存するが、イオン注入に正イオンを使用すると、表面の大きな帯電電位のためイオンが減速され、精確なエネルギーで注入されなかったり、精度よくドーズ量を計測できなくなったりする。しかし、本研究室で開発してきた負イオン注入法を用いると、絶縁物表面の帯電が非常に少なく、このような注入条件の不明確さはなくなり、精度の高いイオン注入が可能となり、高分子表面の生体適合性を非常に精確に制御できる。

図1は、ポリスチレン表面に、20 keVのAg<sup>-</sup>負イオンを  $3 \times 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup> 注入した領域（図中左側の色の濃い部分）と未注入領域に、ヒト血管内皮細胞を培養し、表面への細胞接着特性を観測した位相差顕微鏡写真である。負イオン注入領域の生体適合性が向上し、細胞がしっかりと接着している様子が分かる。このように、負イオン注入によって、高分子材料表面の生体適合性を自由に制御できることが分かる。

高分子材料表面の負イオン注入領域に選択的に細胞を接着できる成果を進展させて、研究室では、高分子材料表面に人為的に神経回路網を構築するための研究を行っている。図2は、スピンコートしたポリスチレン膜上にパターン化したAg<sup>-</sup>負イオン注入（図1と同じ注入条件）領域へのPC12h神経細胞の接着の様子を示す。パターン化した形状（約60 μm幅の線状）内に、神経細胞が接着するとともに、黒い筋状の分化・伸展した神経突起も観測できる。このような方法を用いれば、人為的に神経回路網を構築できる可能性がある。それを用いて、将来は、神経細胞の情報伝達や蓄積機能などの解明、さらには、生体神経と外部半導体回路のインターフェースとして神経制御による次世代の義手・義足の開発に繋がりたいと考えている。

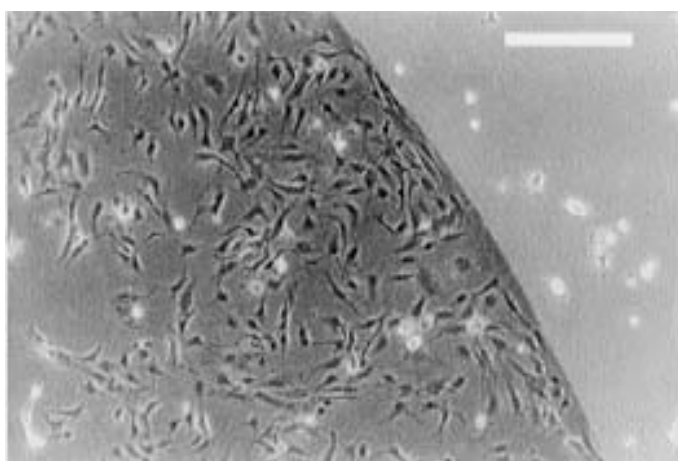


図1 ポリスチレン上にAg<sup>-</sup>負イオン注入した表面へのヒト血管内皮細胞の接着の様子（左側が注入領域）

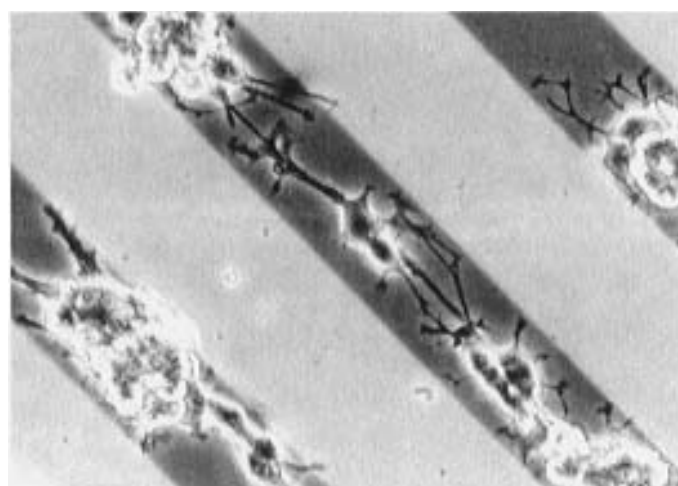


図2 スピンコートポリスチレン膜上にパターン化したAg<sup>-</sup>負イオン注入領域へのPC12h神経細胞の接着の様子（色の濃い線が注入領域）

## 機能物性工学講座 半導体物性工学分野（松波研究室） 「ワイドギャップ半導体SiCを用いた高性能パワーデバイス」

電力需要は増加の一途をたどっており、電気エネルギーの高効率利用が電気電子工学の分野における大きな課題となっている。現在、電力変換をハードウェアで支えているのは半導体Siのパワーデバイスである。しかしながら、Siパワーデバイスは、その物性上の制限のために理論的性能限界に近づきつつあることが指摘されており、より高出力化、低損失化、高速化を実現できる新しい半導体材料を用いたパワーデバイスの開発が不可欠とされている。ワイドギャップ半導体であるSiCは、現用のSiに比べ、絶縁破壊電界強度が約10倍、熱伝導率が約3倍という優れた物性を持つので、これをパワー半導体デバイスに適用すれば、小型化、高速化が実現できるとともに、熱損失をSiデバイスの1/10以下に低減でき、デバイスの動作上限温度を300～400℃まで増大できるなど、各種の電気機器、システムの大幅な効率向上と高性能化が期待できる。

SiCパワーデバイスの実現には高品質の結晶成長技術が必要である。本研究室では、独自の技術によって高品質のSiC単結晶を成長させ、これを電子デバイスに適用する研究を続けてきた。近年、結晶成長装置と成長条件を改善することによって、残留キャリア密度が $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ (n型)で厚さ30  $\mu\text{m}$ 以上のSiC成長層を得る技術を確立した。成長層中の深い準位密度も $10^{12} \text{cm}^{-3}$ 程度と少なく、少数キャリア寿命は200 nsで約6  $\mu\text{sec}$ 以上と長いことから、成長層が高品質であると言える。

まず、pn接合ダイオードをエピタキシャル成長により作製した。活性層となるn層の厚さは31  $\mu\text{m}$ 、ドナー密度は $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ である。作製したダイオードの電流-電圧特性を図1に示す。ダイオードは優れた整流性を示し、4200Vの高耐圧を達成した。順方向特性から求めたオン抵抗は $4.6 \text{m}\Omega \text{cm}^2$ であり、同耐圧のSi pinダイオードと比べて5倍以上優れている。

次に、パワーMOSFETの基礎となる反転型MOSFETを作製して評価した。従来はSiC(0001)面が用いられてきたが、MOS反転層のチャネル移動度が非常に小さい(室温で $10 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 以下)という問題が明らかになった。しかし、新たにSiC(11 $\bar{2}$ 0)面を用いることで大幅に特性を改善することができた。図2にSiC(0001)面および(11 $\bar{2}$ 0)面上に作製したMOSFETのチャネル移動度の温度特性を示す。(11 $\bar{2}$ 0)面上MOSFETでは室温でのチャネル移動度が $96 \text{cm}^2/\text{Vs}$ と高く、温度上昇に伴ってフォノン散乱によって移動度が減少するという半導体デバイス本来の温度依存性が得られている。

今後は、パワー半導体デバイス作製に必要な要素技術をさらに発展させ、最終的には、Siパワー半導体デバイスの限界を大きく打破する、小型、高耐圧、低損失のSiCダイオード、縦型の電界効果トランジスタなどを試作し、実用への指針を提言したい。

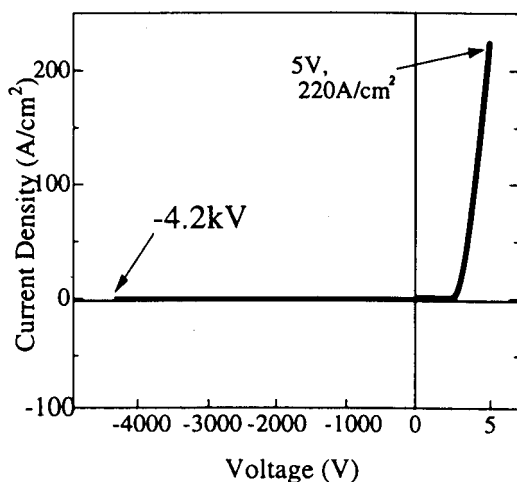


図1 SiC pnダイオードの電流-電圧特性

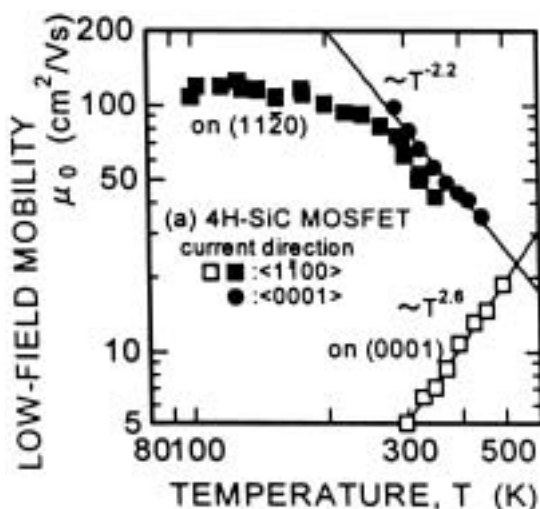


図2 SiC MOSFETのチャネル移動度の温度依存性

## 高機能材料工学講座（イオン工学実験施設）

### 「クラスターイオン援用蒸着法による高品位薄膜形成」

原子、分子、あるいはクラスター状のイオンビームと固体表面との相互作用を研究している。このような研究の中で、イオン照射による損傷形成やその回復過程のダイナミクス、および薄膜形成におけるイオン照射効果などを原子・分子レベルで明らかにしてきた。ここでは、クラスターイオンビーム援用蒸着法による薄膜形成の研究成果について述べる。

#### 1. 研究の背景

原子や分子をイオン化して固体表面に照射する表面改質技術は飛躍的な発展を遂げ、多くの工業分野で応用されている。しかしながら、半導体産業に代表される今日の目覚ましい技術発展の中で、デバイスの高密度、高集積化に伴い、プロセス技術への要求がますます厳しくなっており、さらなる低エネルギーのイオンビーム技術の開発が求められている。巨大原子集団であるクラスターイオンは、従来の単原子イオンでは得られない超低エネルギー効果を有する。また、クラスターイオンは固体表面に衝突すると、固体表面に超高压、超高温照射効果を与える。さらに、酸素などの反応性ガス分子からなるクラスターイオン照射では、強い酸化反応効果が低基板温度で得られる。これらの効果は、良質な薄膜を低基板温度で形成するのに有効である。

#### 2. 研究の成果

ガスクラスターイオン援用蒸着法を考案し、低抵抗・高透過率のITO薄膜の形成を行った。図1は作製したITO薄膜のAFM像を示す。酸素クラスターイオンビームが照射された薄膜は、表面が極めて平坦な透明導電膜が形成されていることが分かった。酸素クラスターイオン照射による酸化反応効果の促進およびラテラルスパッタによる超平坦化効果の促進によると考えられる。

図2は基板温度300℃で作製したITO薄膜のSn濃度依存性を示す。作製されたITO薄膜はSn濃度が5%で低抵抗になり、 $8.4 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ の低抵抗な透明導電薄膜が形成されていることが分かる。また、それ以上のSn濃度ではSnがキャリア電子の散乱体になり、抵抗率は増大している。

低抵抗・高透過率のITO薄膜形成を通して高品位薄膜が低基板温度で形成できることを実証した。さらに、ガスクラスターイオン援用蒸着法による超高度薄膜形成の研究も進んでおり、今後、様々な要求に応える材料プロセスとして、クラスターイオンビームの応用分野を広げ、展開できると思われる。



図1. 酸素クラスターイオン照射部分と未照射部分のITO薄膜表面のAFM像

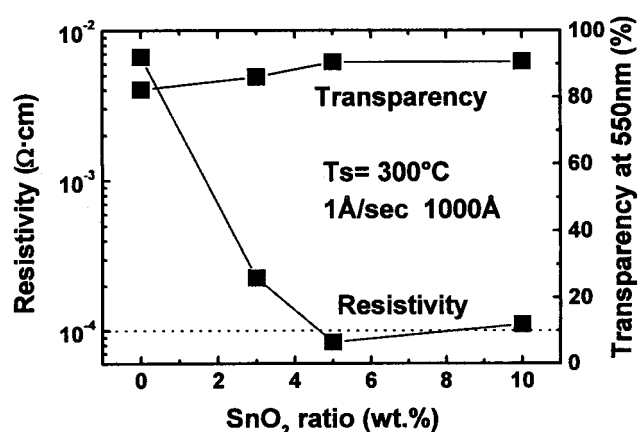


図2. 作製されたITO薄膜の抵抗率および透過率のSn濃度依存性

## 知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室） 「移動対象の自動追跡・映像撮影システム」

### 1. 背景

ここ数年、セキュリティ・モニタリング、交通監視をはじめ、遠隔会議・講義さらにはTVスタジオの自動化のために、首振りビデオカメラをコンピュータで制御し、人や自動車を自動追跡してその映像を撮影するシステムの開発が盛んに行われている。本研究では、昨年の本誌で紹介した視点固定型パン・チルト・ズームカメラを利用した移動対象の自動追跡・映像撮影システム【2】を紹介する。

### 2. 研究成果

システムのタスクは、(1)シーン中に現れた対象を検出し、(2)パン・チルトを制御しながら対象を追跡すると同時に、(3)ズームを制御して対象の像をできるだけ高解像度で撮影する、というものである。

視点固定型パン・チルト・ズーム（FV-PTZ）カメラ【1】は、パン・チルト・ズームを変化させてもその投影中心が移動しない首振りカメラであり、図1に示す背景差分による対象の検出・追跡システムが容易に構成できる。具体的には、

1. 対象のいないシーンの全体像を、FV-PTZカメラの首を振りながら撮影し、得られた画像群を1枚の広角パノラマ画像として記録する。（図1右中央の画像。FV-PTZカメラでは、継ぎ目のないパノラマ画像が容易に合成できる。）
2. 対象検出・追跡時は、画像撮影時のパン・チルト・ズーム値を基に、パノラマ画像から現在の観測画像と一致する画像を切り出し、それを背景画像とする。
3. 観測画像と背景画像の差を計算し、変化領域の有無により対象の存在を判断する。
4. 対象が存在する場合は、変化領域の面積と重心を求め、それらを対象の大きさと位置とする。また、時間的に連続する2フレームの観測画像に背景差分を適用し、対象位置の変化量から対象の移動角速度を求める。
5. 得られた対象の位置・大きさ・運動情報を基にパン・チルト・ズームを制御し、(2)からの処理を繰り返す。
6. 対象が存在しないときは、予め決められた軌跡に沿ってカメラの視線を制御し、対象を探す。

ラジコン自動車を実験室（約4m四方）内で人間が適当に操縦し、高さ約2.5mの位置から床面を見下ろすFV-PTZカメラによってその検出・追跡を行った結果を図2に示す。

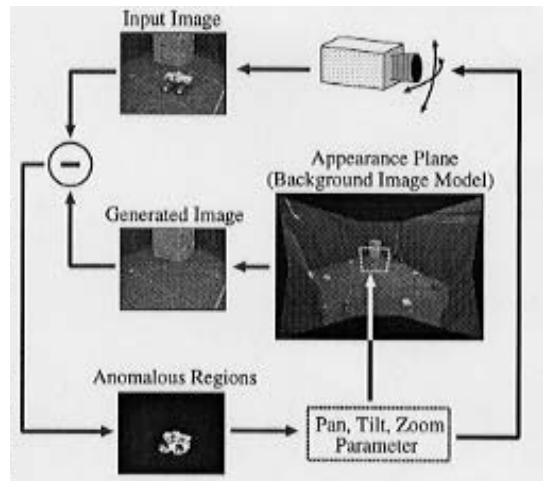


図1 FV-PTZカメラを用いた対象検出・追跡法

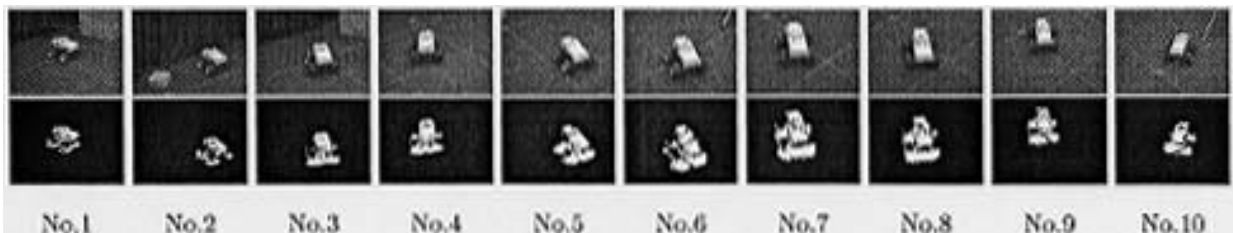


図2 ラジコン自動車の追跡結果(上段:入力画像、下段:差分画像)

### 参考文献

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



## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室）

### 「アダプティブアレーアンテナと干渉キャンセラの統合による移動通信の誤り率改善」

近年、移動通信とインターネットが結びついたサービスの需要が急速に伸びている。快適な無線インターネットサービスの実現には、高速広帯域の大容量移動通信サービスの実現が急務である。次世代移動通信システム（IMT-2000）の無線伝送方式としてDS-CDMA（直接拡散符号分割多元接続）の採用が決まり、日本では来年5月からW-CDMA方式を採用した商用サービスの開始が予定されている。

DS-CDMA方式では、各利用者に固有の拡散符号と呼ばれる広帯域信号が割り当てられ利用者の識別が行われる。ところが、同時に同一周波数帯域を用いるため、各利用者間の拡散符号の相互相関に起因して他局干渉が発生する。この結果、多元接続可能な利用者数に制限が生じる。他局干渉を抑圧する方法としてこれまでに様々な技術が検討されているが、中でもアダプティブアレーアンテナやレプリカ減算型干渉キャンセラは優れた他局干渉抑圧能力を示すことが知られている。

アダプティブアレーアンテナは干渉波の到来する方向にヌル点を向けることにより他局干渉を効果的に抑圧できるが、所望波と同じ方向から到来する干渉波やアンテナ素子数以上の干渉波すべてを抑圧することはできない。一方、レプリカ減算型干渉キャンセラは他局信号の受信予測値（レプリカ）を作成し、それを受信信号から差し引くことにより他局干渉を抑圧する。このレプリカの精度は受信信号の仮判定精度（等価的には他局干渉量）に大きく依存する。

本研究では、図1のように両者を組み合わせることにより相乗的な改善効果が得られる方式を狙っている。まずアダプティブアレーアンテナで他局干渉をできる限り抑圧し、その後の信号に対してレプリカ減算型干渉キャンセラを適用する。本方式では、レプリカ減算型干渉キャンセラにおける受信信号の仮判定精度を高めることができ、より大きな他局干渉の抑圧が期待できる。提案方式のビット誤り率特性（計算機シミュレーション）を図2に示す。レイリーフェージング伝搬路においても、アダプティブアレーアンテナあるいはレプリカ減算型干渉キャンセラを単独で用いる場合に比較して、特性が大きく改善されることが確認された。現在、両者間の最適な機能分担などについても研究を進めている。

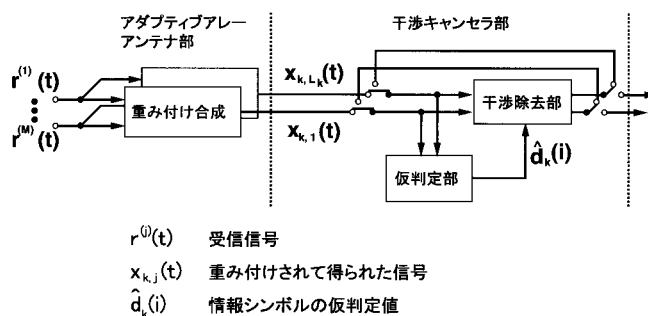


図1 アダプティブアレーアンテナと干渉キャンセラの統合

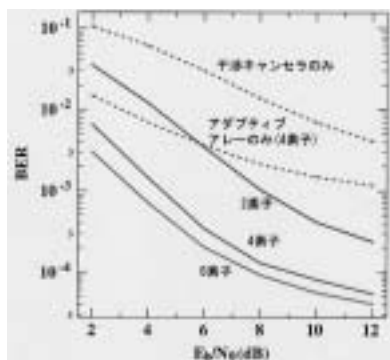


図2 アンテナ素子数を变化させた場合のレイリーフェージング伝搬路におけるビット誤り率（BER）特性

## 集積システム工学講座 大規模集積回路分野(小野寺研究室) 「実時間動画像圧縮伸長アルゴリズムとハードウェア」

ビデオCD用のMPEG1に始まった動画像の標準圧縮規格は、TV・BSデジタル放送、DVD記録用のMPEG2、低ビットレート用のMPEG4が標準化されている。動画像の圧縮には、画像の持つフレーム内とフレーム内の相関を用いる。MPEGでは、フレーム内の相関の圧縮にDCT(離散コサイン変換)を用いる。DCTはFFTの一種であり、画面から切り出した矩形領域の垂直、水平の周波数成分を取出す。相関が大きい場合、高周波成分は0を持つ確率が高く、その成分を切り落とすことにより圧縮を行う。フレーム間の相関を圧縮するには、現在のフレームの矩形領域が、前のフレームのどの部分にもっとも近いかを探索する動き補償を用いる。探索範囲を広げれば、動き補償の精度は上がるが、計算量は非常に大きくなる。

DCTは、その計算量が非常に大きい。我々はフレーム内の相関の圧縮に、ベクトル量子化(Vector Quantization、VQ)を用いた動画像圧縮アルゴリズムならびにそのハードウェアの研究を行っている。ベクトル量子化は、画面から切り出した矩形の領域(入力ベクトル)をあらかじめ用意した有限個の矩形領域のパタン(参照ベクトル)のもっとも近いもののインデックスに置き換えることにより圧縮を行う。例えば入力ベクトルが8ビット16次元( $4 \times 4$ の矩形領域に相当)であり、64個の参照ベクトルを用意した場合、圧縮率は、 $16 \times 8 / (\log_2 64) = 21$ となる。VQは、圧縮処理はほぼDCTと同じ計算量が必要であるが、伸長は送信されたインデックスを参照ベクトルにおきかえるテーブルルックアップと呼ばれるメモリ参照の処理だけで行われるので、圧倒的に計算量が少なくなる。

我々はVQに動き補償を組み合わせ、29.2kbpsの低ビットレート下で、每秒10枚のQCIF( $176 \times 144$ )サイズの動画像を送信できるFRMSHVQ(固定レート階層化ベクトル量子化)アルゴリズムを提案し、低消費電力で実時間にFRMSHVQを実行できるLSIの開発を行ってきた。1996年には、ベクトル量子化を参照ベクトル並列に行うために、SRAMに演算機能を付加して並列プロセッサとしたFMPP-VQ(図1)の試作ならびにPCとFMPP-VQを使った実時間動画像圧縮伸長システムの試作を行った。FMPP-VQは入力ベクトルと参照ベクトルとの距離を64個上で並列に求めることで、ベクトル量子化の高速化を図っている。このシステムでは、VQのみを専用プロセッサFMPP-VQ上で行い、その他の処理はPCのCPU側で行っている。FMPP-VQでは100mWと低消費電力化が達成できたが、その他の処理はPC上で行われるので、システム全体としての低消費電力化は不可能である。次に、FRMSHVQアルゴリズム全体を高速化するために、16並列のデジタル信号処理量プロセッサ(DSP)であるVP-DSPを1999年に設計試作した。図2にそのチップ写真を示す。VP-DSPは、動き補償とベクトル量子化を16並列に行うことにより高速化を行う。FRMSHVQは乗算を必要としないので、乗算器を省くことにより、大幅に小面積化を図った。VP-DSPは実時間動画像圧縮に必要な25MHzで49mWという低消費電力を達成した。

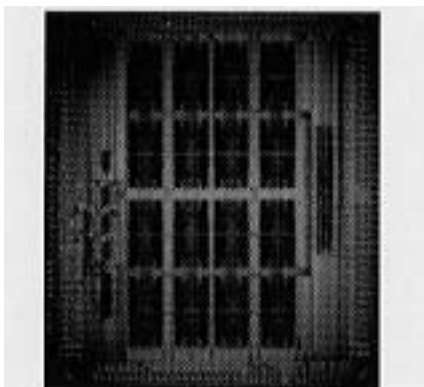


図1 FMPP-VQのチップ写真(0.7  $\mu$ mプロセスで試作)

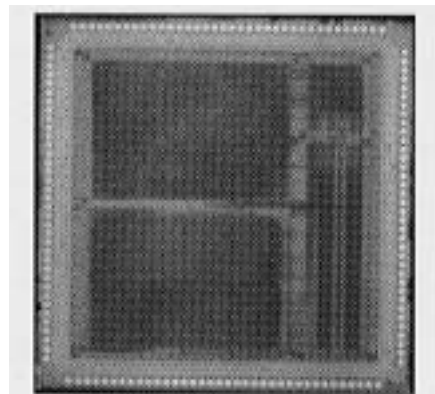


図1 VP-DSPのチップ写真(0.35  $\mu$ mプロセスで試作)

## 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） 「アフェクティブインタフェース」

### 1. アフェクティブインタフェースとは

アフェクティブインタフェースとは、人間と機械の間に位置するヒューマンインタフェースに感情を扱う機能を持たせたものであり、人間の感情に適応することで機械と人間の円滑なコミュニケーションを実現するものである。アフェクティブインタフェースには、人間の感情を認識する入力チャネルと人間に感情を提示する出力チャネルがある。本稿では顔表情によるアフェクティブインタフェースの基礎技術として、入力チャネルである顔表情認識、および出力チャネルである顔表情合成の研究を紹介する。

### 2. 顔表情認識

顔表情認識では、図1に示すようにカラーCCDカメラで撮影された顔表情からリアルタイムで表情の種類とその強さを認識する。顔表情認識には様々な手法が提案されているが、この研究では心理学分野における表情研究の知見を利用するとともに認識処理のリアルタイム性とロバスト性に着目して、顔画像から顔器官上に設定した18の特徴点の位置を画像処理により検出し、その時間変化から顔の上部・中央部・下部における基本6表情(喜び、驚き、怒り、悲しみ、恐怖、嫌悪)と無表情(中立)の強さをファジー推論する方法を開発した。また、

被験者実験により、各ビデオフレームにおいて90%以上の高い認識率とリアルタイムでの処理(平均31.8ms)を確認した。

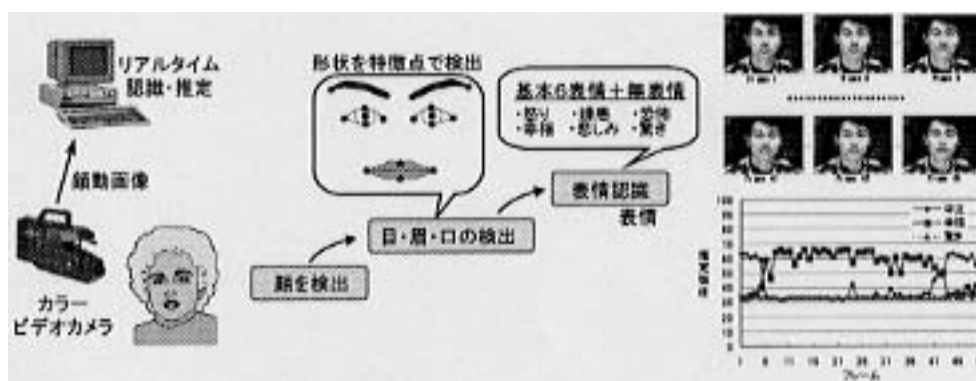


図1 顔表情のリアルタイム認識手法と認識例

### 3. 顔画像合成

人間の顔表情は、皮膚の下にある表情筋の弛緩・収縮によって顔面皮膚が移動し表出される。顔画像合成では、図2に示すように3D顔ポリゴンモデル上に29の仮想的な表情筋を設定し、その弛緩・収縮による皮膚表面の移動をリアルタイムで模擬することによりアニメーションとして表示する。この研究では、自然な表情の合成のために、基本6表情表出時の各表情筋の収縮量と時間変化パターンを被験者実験により求めている。

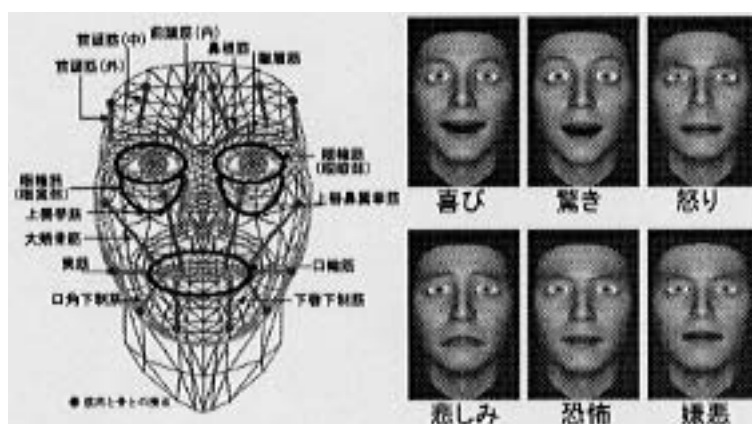


図2 3Dポリゴンモデル上に配置した表情筋モデルと表情合成例

## 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） 「トーラス系装置からの荷電粒子引き出しの研究」

電場の加わったプラズマ中の荷電粒子は、電場による加速を受けると同時に動摩擦力による減速を受けますが、動摩擦力は粒子の速度の二乗に反比例するので、ある大きさの以上の速度を持つ粒子は、動摩擦力を振り切って電場により際限なく加速されることとなります。このような加速は、とくに速度の大きな電子が受けやすく、加速によって速度分布の重心よりどんどん離れていく電子は、逃走電子 (runaway electron) と呼ばれています。ヘリカル装置やトカマクなどのトーラス状のプラズマ閉じ込め装置では、閉じ込めているプラズマ中で逃走電子が発生すると、その電流値は数MAも達することもあり、磁場で閉じ込めきれなくなった電子が装置壁面などに衝突すると、不安定性によるプラズマ閉じ込め効率の低下だけでなく、装置の損傷なども引き起こすため、その対策が重要となっています。

一方、近年、高エネルギー電子は、殺菌、害虫駆除、汚染物質の分解、材料加工などに多方面において利用が始められていますが、これまでの電子源では数十A程度の電流の電子ビームしか得られていません。そのため、工業的な大量処理を行うためには、更なる大電流電子源の開発が望まれています。

そこで、本研究では、プラズマ閉じ込め装置から制御された状態で逃走電子を引き出すことによって、大電流電子源として利用することが可能であるかを検討しています。具体的には、比較的コイル間の間隙が大きく、引き出し点を作りやすいと考えられるヘリカル装置を対象として、逃走電子をガイドする引き出しコイルの位置・形状について、プラズマ閉じ込め磁場への最小とするものを、磁場および電子の軌道計算により、探索しています。

図1はコイルの配置例を示していますが、実際の引き出しコイルであるC・Dの閉じ込め領域への影響をうち消すために多くのコイルを必要としています。また、応用を考えて図2のように円周の特定の部分のみに引き出す様に配置をする場合には、コイルへの電流フィードの影響が大きくその最適化が必要でした。現在は実証実験が可能な小型装置の検討を進めています。

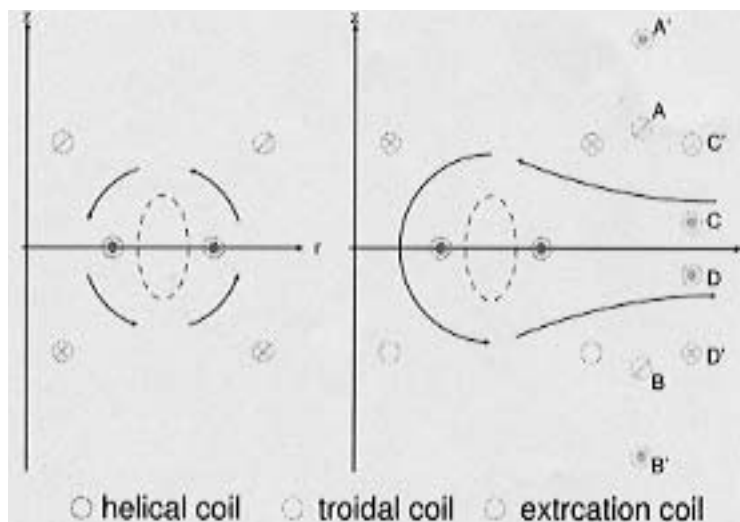


図1 引き出しコイルの配置と磁力線

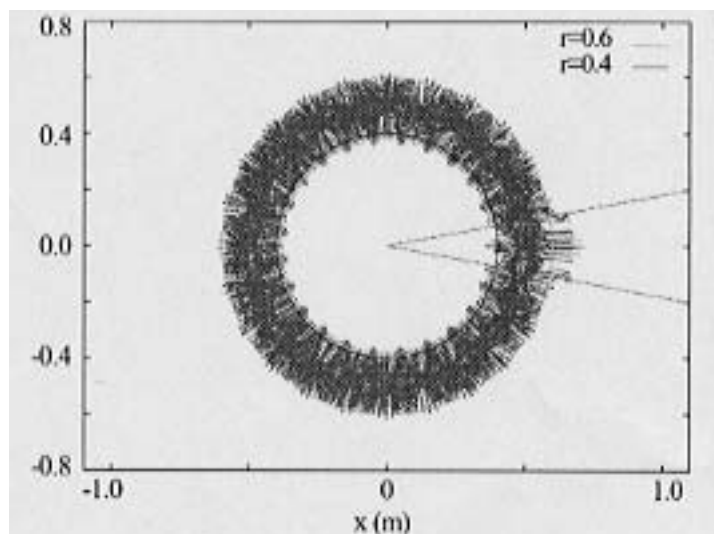


図2 引き出しコイルを一部に付けたときの磁力線の計算例

## 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） 「ヘリカル軸ヘリオトロンの最適化」

複合系プラズマ研究分野では、従来研究を進めてきたヘリカル・ヘリオトロン配位（ヘリオトロンE装置）に、ヘリカル磁気軸を導入することによって、新しいパラメータ領域のプラズマを実現し、そのコアプラズマの閉じ込め性能を実験的に明らかにすることによって、ヘリカル磁場配位の最適化のための新たな知識基盤を獲得することを目的とした研究（ヘリオトロンJ装置）を展開したところです。ヘリオトロンJ装置の諸元はプラズマ大半径：1.2 m、平均プラズマ小半径：0.15～0.20 m、磁場強度：1.0～1.5 T、低磁気シアをもつ回転変換：0.3～0.8、プラズマ周辺部の磁気井戸：～1.5%、加熱装置として0.5 MW(53GHz)-ECH、1.5 MW-NBI、2.5MW-ICRFを用意しています。

現在、この方面の世界の新しい研究動向として、(1) 準対称系（対称性の方向の運動量が運動の恒量になることにもとづく）と(2) quasi-isodynamic(omnigenous)系（磁気面上での縦の断熱不変量が一定であることにもとづく）の開発があります。準ヘリカル対称系としては、米国ウィスコンシン大学のHSXの実験が昨年より開始されました。準軸対称系としては、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所及び核融合科学研究所が、電流駆動型の準軸対称系（NCSX, CHS-qa）の設計研究を進めています。一方、quasi-isodynamic系では、ドイツのマックス・プランク研究所で建設中のW7-X及び米国オークリッジ国立研究所が設計研究を進めているQOS装置があり、ヘリオトロンJの研究計画は、これらの世界の研究計画と相補的・補完的な位置づけにあります。

平成12年10月までに得られたヘリオトロンJの実験成果としては、(i)当初計画に則って平成12年3月、閉じ込め装置としての建設及び立ち上げを完了したこと（図1参照）、(ii)2ヶ月間の総合通電試験において、コイル系の通電性能を検証し終えたこと、及び(iii)平成12年7月から開始された第1期の第2高調波53GHz-ECH実験において、200～400kWのECH加熱入力に対して、プラズマ内部エネルギーとして、約0.7 kJを既に達成し（図2参照）ヘリカル系における標準的なエネルギー閉じ込め比例則（ISS95比例則）に、ほぼ近い値まで得られた点などがあげられます。装置性能の比較として、例えば、同じヘリカル軸装置であるスペインのTJ-II装置のECH実験（平成12年10月のIAEA会議報告）との予備的な比較では、ECH加熱入力400kWに対して、両装置とも略同一の内部エネルギー密 $1 \text{ kJm}^{-3}$ が得られており、今後の詳細な比較検討が楽しみです。これら以外に、ヘリオトロンJの弱磁（300 G）での、真空磁気面測定を行い、物理設計で計画された閉じ込め磁気面の健全性を確認しました。これらの成果は、本研究計画を円滑に遂行するうえで、基盤となるものと考えています。

[文献] 佐野史道、大引得弘、花谷清、水内亨、岡田浩之、長崎百伸、近藤克巳、若谷誠宏、中村祐司、中須賀正彦、別生栄、横山雅之、“ヘリカル軸ヘリオトロン装置（ヘリオトロンJ）実験計画”，J. Plasma and Fusion Research, 75 (1999) 222 - 229 .

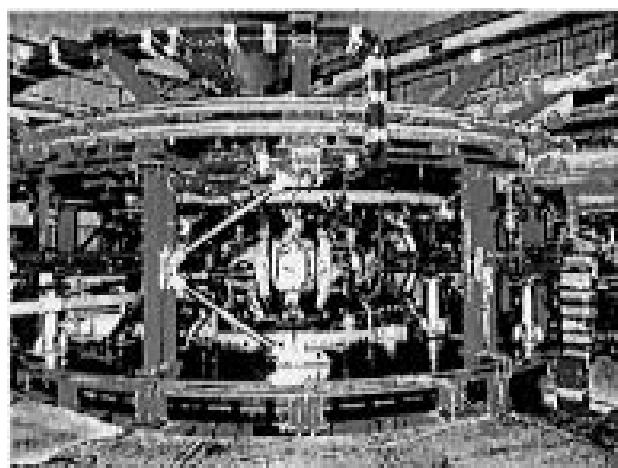


図1 ヘリオトロンJ装置

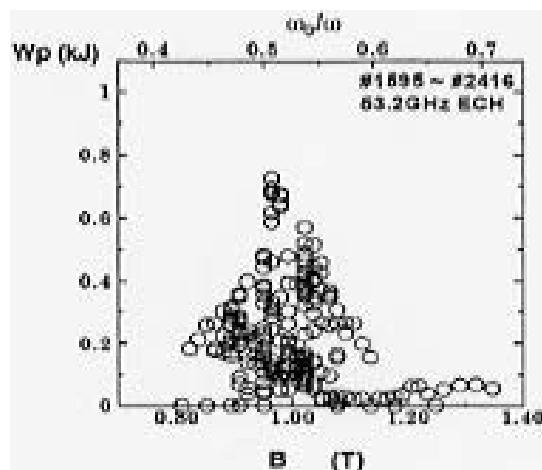


図2 ECH加熱実験における内部エネルギー

## 地球電波科学研究部門 大気圏光電波計測分野（津田研究室） 「ライダー（レーザーレーダー）による地球大気の観測」

当研究室では、電波・光・音波など大気中を伝搬する波動現象を用いて地球大気の物理パラメータ（風速、温度、湿度 etc.）を計測するリモートセンシング技術を開発し、また実際に地球大気の観測に用いて研究を行っております。さらに計測した物理現象を解釈するためのモデリング（計算機シミュレーション）も行っております。さて、本年3月に当センターの信楽MU観測所（滋賀県信楽町神山）に新たにライダー（レーザーレーダー）システムを開発し導入いたしました。今回はこのライダーシステムについて報告します。

宙空電波研究センターの信楽MU観測所では、世界有数の高性能大型大気観測レーダーであるMUレーダー（46.5MHz, 1 MW出力）を用いて、1984年の開所以来地上から上空500kmまでの地球大気の運動を観測し、地球大気環境変動にかかわる大気の性質を明らかにしてきました。ところが、長期的な地球大気環境変化の舞台である10-100kmの中層大気の中でもオゾン層などが存在する20-60kmの大気についてはMUレーダーの巨大な電力の電波をもってしても大気からの散乱電波が大変微弱であり、十分に精密な観測を行うことができませんでした。そこで、レーダー観測を補完するために、レーザー光線を用いたレーダー装置であるライダー（レイリー/ラマン・ライダー）を設置しました。この観測装置は、Nd:YAGレーザーの強力な光（532nm, 600mJ, 50Hz）を鉛直上方にむけて発し、大気からの散乱光を受信します。受信には、口径82cmと35cmの大小2つの望遠鏡を用いており、合計4系統のフォトンカウンティング（光子計数）システムを備えています。窒素や酸素分子からのレイリー散乱光を受信することで、高度30kmから90km前後までの大気の密度や温度を測定するほか、607nmの窒素分子の振動ラマン散乱、および660nmの水蒸気の振動ラマン散乱を受信することで、地上30kmまでの温度や、対流圏（高度約10kmまで）の水蒸気プロファイルを測定することが可能です。中層大気の温度は地球温暖化にともなう変化が観測で敏感に現れることが明らかになっており、精密かつ継続的な観測が求められている重要な観測対象です。水蒸気の観測はMUレーダーによる対流圏の風速・温度観測と同時に行うことで種々の気象擾乱現象の解明に貢献するものと期待されます。

ライダーシステムは7月までに調整が行われ、8月から観測に用いられていますが、この夏はちょっとしたUFO騒ぎが信楽町でおこりました。観測所から鉛直上方に発せられる緑色のレーザー光が町内から目撃され、とくに雲があるとミー散乱光で数km先でも見られたようです。本ライダーは、可視光を用いるライダーでは国内でもっとも強力なレーザー光を発していますから、目撃されるのももっともなことです。信楽町、阿山町両町の役場を通じて広報したおかげで、現在では観測所への問い合わせがなくなりました。みなさんも晴れた夜に信楽町周辺を通られるときはちょっと車を止めてレーザー光で観測が行われていないか確かめてみてください。



ライダーでの観測風景(手前はMUレーダーアンテナ)

## 地球電波科学研究部門 グローバル大気情報解析分野 「GPS受信網を用いた電離圏全電子密度の水平構造の研究」

地上から宇宙空間に至るまで連続に存在する大気は、その上部においては太陽放射に含まれる紫外線・X線によって一部がイオンと電子に分れ、プラズマになっています。このうち高度100～1000 kmの領域は「電離圏」と呼ばれています。(F層、E層と呼ばれる成層構造をなすことから「電離層」とも言われます。)電離層反射を用いる短波通信が国際通信の主役であった時代は過ぎ去ってしまいましたが、衛星通信に対してもシンチレーションを生じる等影響は大きいものがあります。また電離圏は、地球大気が宇宙環境と交わる領域であって、太陽放射による地球環境変動を解き明かす上でも重要です。現在建設が進められている国際宇宙ステーションの軌道が高度330～480 kmであることから分かるように、この領域は、人類の新しい生存空間として今拓かれつつあるといえます。さて、衛星利用の一形態としてGPS衛星を用いた測位が知られています。最近の自動車ナビゲーション装置の普及や受信機の小型化は驚くべきものですが、実は日本には、国土地理院によって全国千地点以上にGPS受信機が設置され、1994年から30秒毎のデータが蓄積され続けています。平均的な地点間距離が25 kmというこのGEONET(国土地理院GPS連続観測システム)は、その受信機分布の密度と規模の両面において世界一のネットワークであり、その測位データは主として地殻変動あるいは地震研究のデータベースとして活用されています。最近の火山噴火でも、地殻変動の観測に活躍しています。図1に示すように、GPS衛星からの電波は地球大気を通過して地上で受信されるため、電離圏を通過する際の伝搬遅延が測位結果に誤差をもたらしますが、GPSシステムは、個々に電離圏の影響を受けた2周波の電波を用いることで、この誤差を補正しています。逆にいうと、このデータを用いることで、電離圏の全電子数(TEC; Total Electron Content)を測定することが可能です。GPS衛星から受信機までの伝搬パス上のTECを求め、中心高度の代表値とすることによって、日本上空の電離圏プラズマの密度分布がくまなく調べられます。図2に、GEONETデータに基づくTECの水平分布(変動分)を示しますが、この例では夜間のF層高度に波長約100 km、周期約30分の波動が現れて南西方向に伝搬している様子がわかりました。電離圏の波動現象の水平構造をこのような細部にわたって観測可能なシステムは今まで存在しませんでしたので、この成果は国内外の研究者から驚きの声を持って受け止められました。現在、国土地理院、京都大学理学部地球物理教室及び名古屋大学太陽地球環境研究所と共同で、TEC推定方法に関する研究や種々の波動現象の研究を推進するとともに、30秒毎に取得され続ける膨大なデータをデータセンターから自動的に受信してTECデータに変換する、自動データ取得システムの開発を行っています。

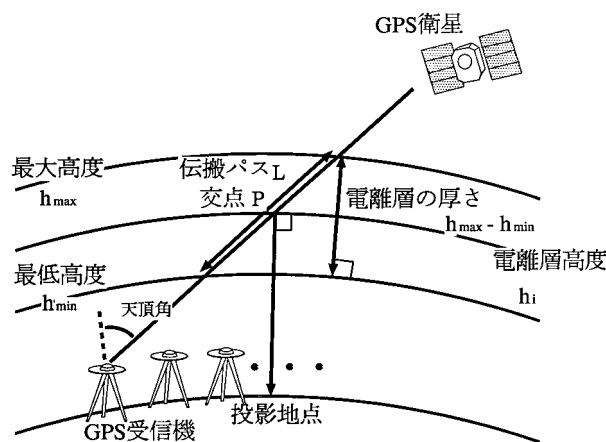


図1 GPSを用いた電離圏全電子数測定概念図

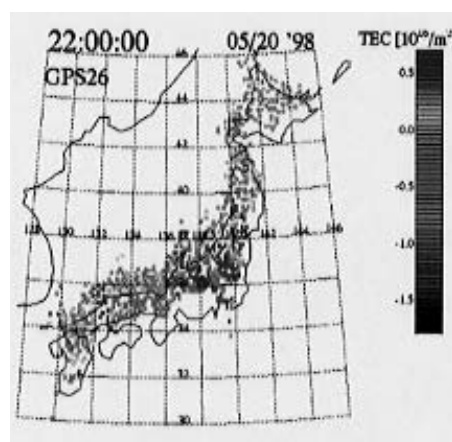


図2 日本上空の電離圏全電子数(変動分)の水平分布

## 宇宙電波科学研究部門 宇宙電波工学分野 (松本研究室) 「北極上空でのロケットによるプラズマ波動観測」

当研究室は、宇治の宙空電波科学研究センター及び大学院情報学研究科通信情報システム専攻に所属し、来るべき21世紀の人類宇宙開拓の時代に向けて、太陽系空間電磁環境や宇宙太陽発電所 (SPS) の研究など、理学、工学の両面から宇宙科学・宇宙電波工学の研究を行なっています。本稿では研究テーマの一つである「科学衛星・ロケットによる宇宙空間におけるプラズマ波動観測」に関する研究で、2000年11月に北極圏での打ち上げを予定している「SS-520-2ロケット実験」について紹介します。

多くの方はすでにご存知かもしれませんが、太陽からは電気を帯びた風が地球に向かって吹いてきています。この太陽風が絶えず、地球に向かって吹き付けているわけですが、地球固有にもっている磁場がこの太陽風が大気や大地に直接吹き付けることをさえぎってくれています。この地球の磁場に守られた領域のことを「地球磁気圏」と呼びます。この地球磁気圏の中で唯一、太陽風に対するバリアが弱く口を開いたようになっている領域があります。これが、北極と南極上空に形成されている「カスプ」という領域です (図1参照)。このカスプ領域では、太陽風プラズマが入りこんできているばかりでなく、逆に、そこから地球大気が大量に宇宙空間に向かって「流出」している現象も起きています。そこから

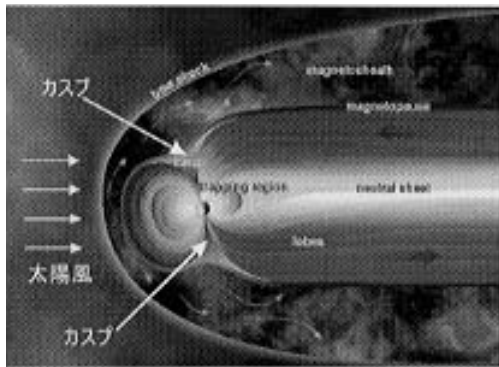


図1 地球磁気圏とカスプ領域

流れだしているのは主に、酸素原子と水素原子がイオン化したもので、特に酸素イオンのように重い粒子がどうして地球から宇宙空間に向かって流れ出しているのかが謎になっています。そして、最近のレーダーなどによる地上観測で、その酸素イオンを宇宙空間に押し出している(加速している)しくみがカスプの中で高度1000km程度に存在しているようだ、ということがわかってきました。そこで私達は、文部省の宇宙科学研究所と共同でロケット実験SS-520-2を計画し、本年(2000年)11月の打ち上げに向けて観測機器の開発、試験を行い、その準備をすべて完了しました。この実験では、ノルウェーのニューオールソンという北極圏

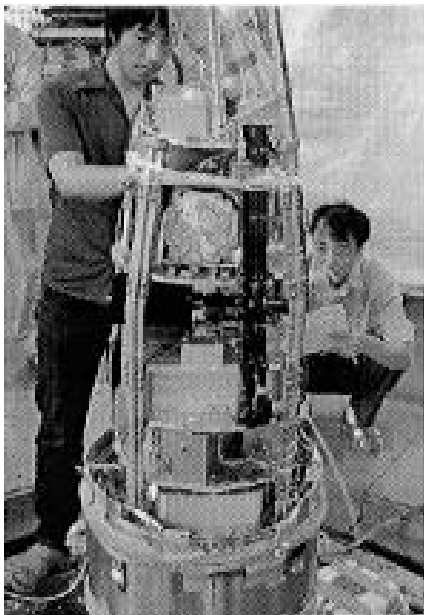


図2 組み立て・試験中のSS-520-2ロケットの観測機搭載部

の発射場に我々日本の観測ロケットをセットし、高度1000kmのカスプに向けて発射します。私達が開発した「プラズマ波動観測機」は、これまでにない新しい技術を取り込み、CPU/DSPを搭載したコンピュータ制御の受信機になっています(図2)。高度数100mで10mの長さのアンテナと1m四方のループアンテナを展開してそれらによって、酸素イオンを押し出しているプラズマ波動を観測します。ロケットは打ち上げてから約10分で高度1000kmに到達し、その後は10分かけて落下、最後は北極の海に落ちます。その間の観測データは電波で地上に送られます。打ち上げ予定は11月25日。北極地方は日が24時間昇らない真冬です。私達はこの発射に向けて現地での準備に11月中旬から入ります。恐らくこの記事が印刷されて配布されている頃には、私達のロケットは無事に打ち上げられ、データを地上に送り届けた後、北極の海底で役割を終えて眠っていることでしょう。



## 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 $H$ 無限大問題と非一様サンプリング問題」 (Studies on Sampled-Data Control Systems the $H$ 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
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) 自動式パルス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）

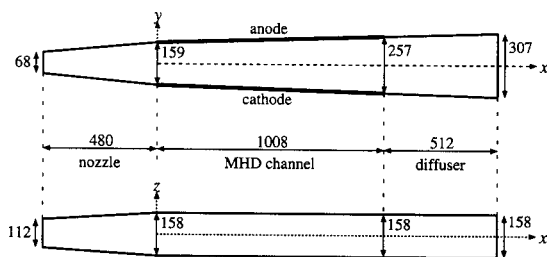
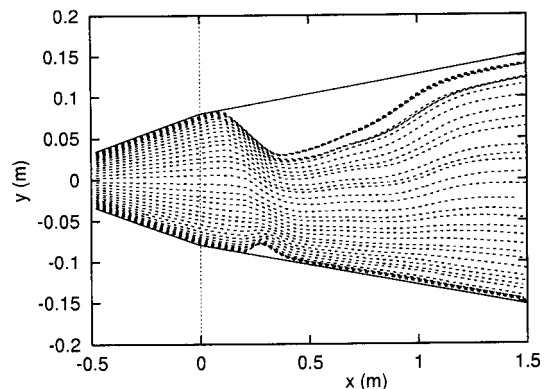


図1 Pamiir-3Uの発電ダクト

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  $H$ 無限大問題と非一様サンプリング問題」

(Studies on Sampled-Data Control Systems the  $H$  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  $H$  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  $H$  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  $H$  問題における閉ループ系の  $H$  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  $H$  問題の解(閉ループ系の  $H$  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  $H$  問題の解法をそのまま用いて、閉ループ系の  $H$  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נס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נס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נס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、大面積かつ狭出射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。

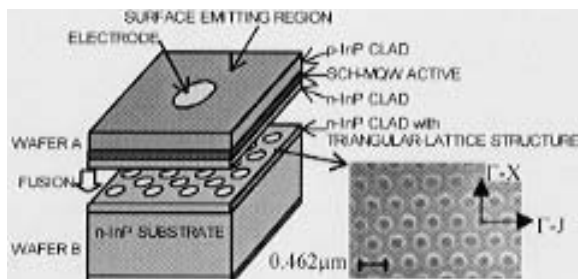


図1 2次元フォトニック結晶レーザの模式図、付図は作製した三角格子構造の融着前の平面SEM写真

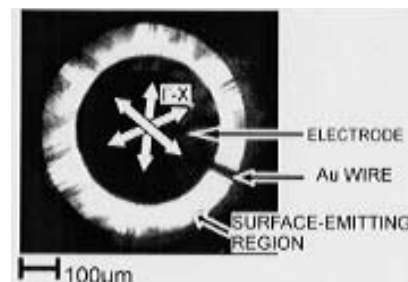


図2 発振時の近視野像。電極上の矢印は6つの透過方向 - X方向を表す

## 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。

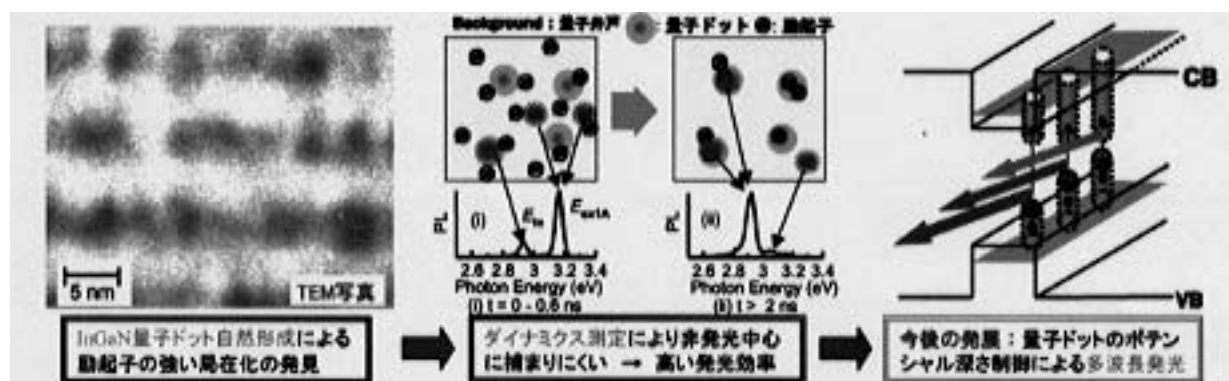


図 InGaN / GaN系における励起子局在効果の発見と新規多波長発光デバイス開発への展開

## 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

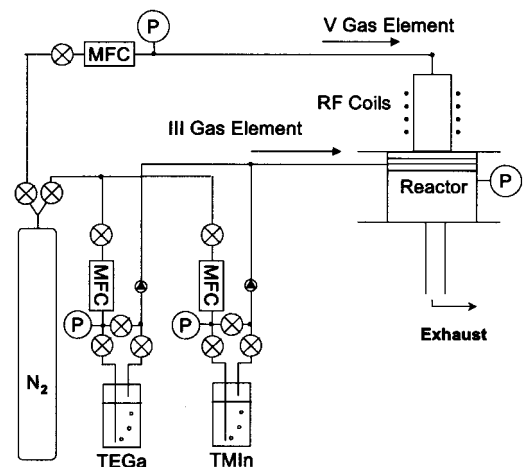
最近になって、GaN系半導体を用いることにより、緑色から紫外にわたる光の短波長領域における半導体発光ダイオードが実用化され、紫外での半導体レーザーも実用のレベルに達している。このような光デバイスの急速な進展を見たのは、GaN系半導体が高い発光効率を示すなど、優れた光機能を持つためである。一方、GaN系半導体は、従来の光デバイスに用いられているGaAsなど他の半導体材料に比べ、きわめて多数の結晶粒界や欠陥を含むにも関わらず、このような高い発光効率を示すという点で、非常に特異な材料であると考えられている。それならば、発光デバイスに用いられている単結晶相に限らず、多数の結晶粒界を持つと同意である多結晶相においても、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。

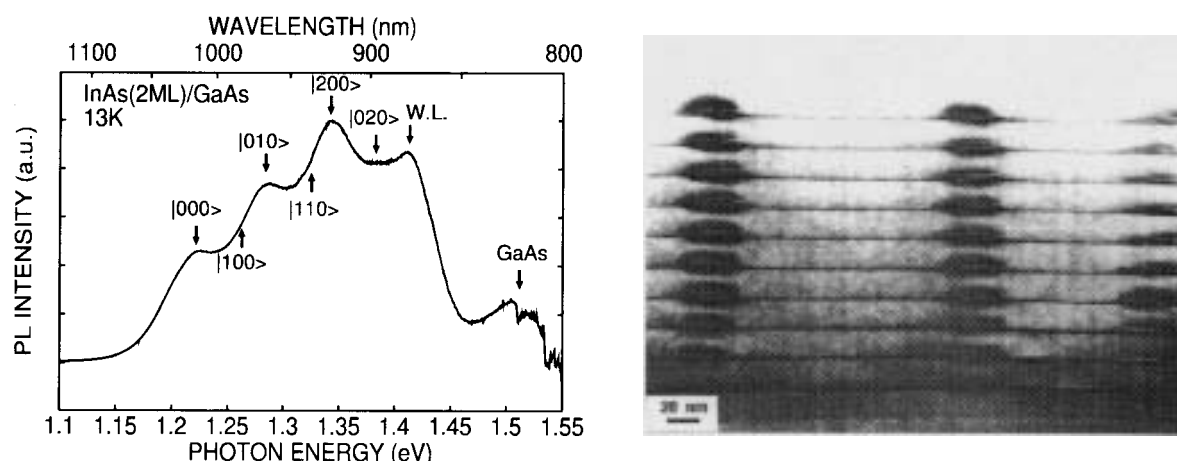


図: InAs量子ドットの量子準位の同定とカスケード的電子注入を可能にする量子ドットの垂直配列構造

## 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ISPM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ダング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カ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、ベーカ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-直流変換効率を得られた。

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。

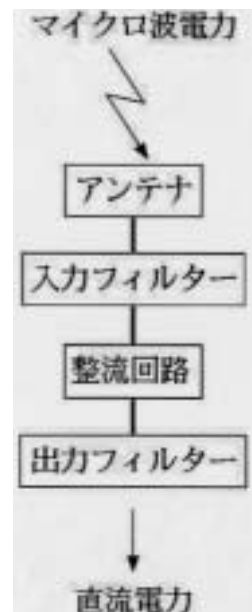


図1 レクテナの構成

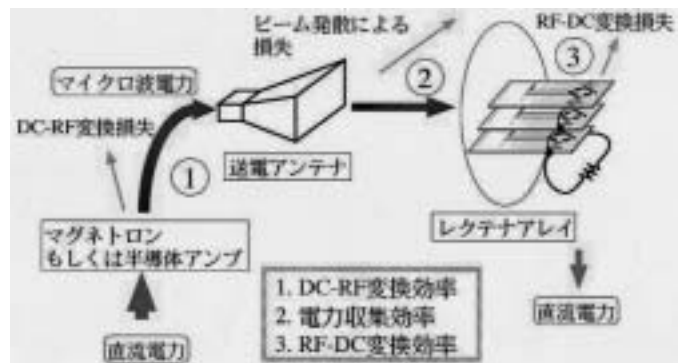


図2 システム効率を決める要因

### 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)

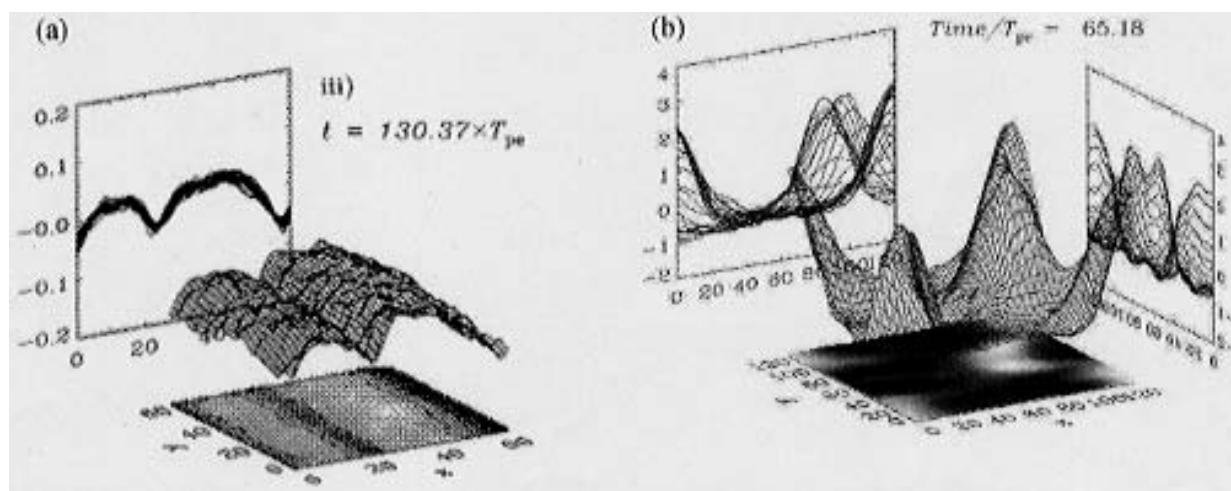
平成12年3月23日授与

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させ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日授与

自由電子レーザー (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。

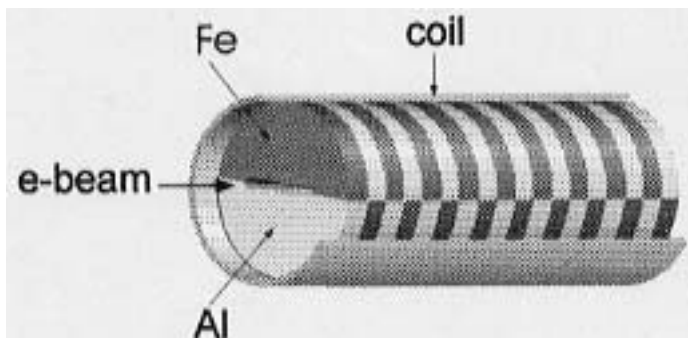
このFELの発振波長は周期磁場の強度、周期長、電子ビームのエネルギーに依存するため、原理的にはマイクロ波領域からX線まで連続的に変化させることができ、一つの装置で異なる波長のレーザーを発振させることが可能であるという特徴を持っています。またFELは電子ビームのエネルギーを直接電磁波のエネルギーに変換するため使用済みの電子ビームのエネルギー回収、再利用が容易であるため高効率化が可能で、さらにレーザー媒質がないため絶縁破壊が起こらず高いピークパワーが得られます。

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。

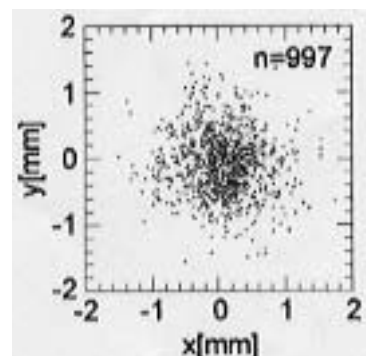
FELをより普及させるためには、安定、安価、小型であることが必要ですが、一台の装置でカバーできる波長領域を拡大することも重要です。この波長領域の拡大は周期的磁場の強度を変えることで可能ですが、従来の永久磁石を用いたアンジュレータでは機械的に磁石の配置を変更する必要があるため波長の可変性に制約があります。そこで、ソレノイドコイル中に周期的に配置された鉄片によって周期的磁場を生成する装置であるスタガードアレイ・アンジュレータを用いて、コイル電流の制御により磁場強度を制御するという手法が考えられました。このスタガードアレイ・アンジュレータは、コイル内に鉄片を含むためその磁化の非線形性を考慮した解析を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。

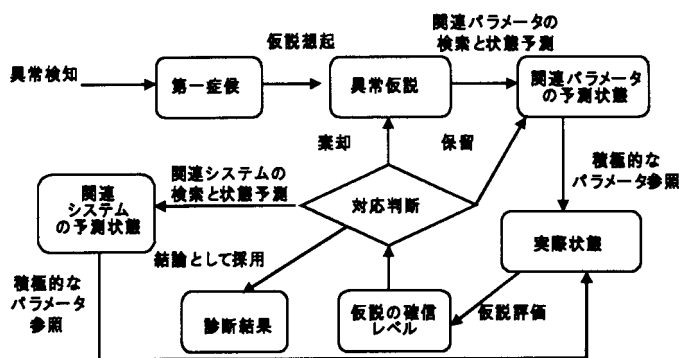


図1 運転員の異常診断過程のモデル化

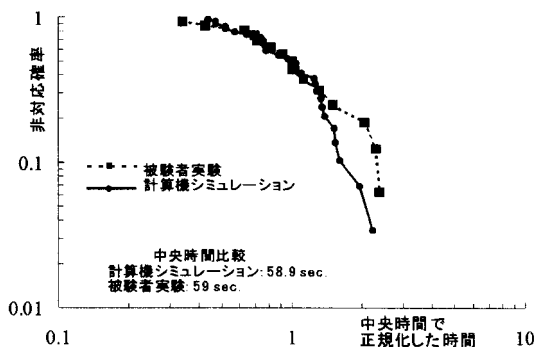


図2 時間認知信頼性曲線の導出とモデルの検証

## 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、間違った手順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の形で抽出し、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	「反応性クラスティ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への応用)	平成12年 9月25日

## 学生の声

### 「日本での留学」

電気工学専攻 発送配電研究室 博士課程 Boonchai TECHAUMNAT

私は四年前に初めて日本に来ました。日本で留学することは全く考えていませんでしたが、タイの大学の先生に推薦して頂いたおかげで日本に来ることが出来ました。

四年間の日本の留学では様々な思い出が出来、一生忘れられないと思います。最初の頃は日本語を話すことが出来なくて不自由を感じました。早く上手になりたいと日本語専門学校にも通いましたが、なかなか上達しませんでした。幸い日本の先生および研究室の友達がとても親切で、だんだんと日本の生活に慣れていきました。

日本に来てから、タイでは考えていなかったことに幾つか気が付きました。日本はタイと同じアジア国ですが、気候からしてかなり違いがあります。タイは亜熱帯国で一年中暑いですが、日本は季節によってかなり気候が変化します。その季節の変化から時間の経つことを知らせてもらえることがうらやましいです。

更に違う環境で住んでいることでタイと相違することが沢山あります。それらについて考えみたら、かなり面白くなりました。どちらの方が良いか正しいかという問題より、なぜこういう風に違うかと深く考えたら、少しずつ理解できるようになりました。

私は「数値電磁界計算」について研究していますが、それ以上のこともたくさん勉強になりました。研究の仕方、研究についての物事の考え方、技術の知識なども身につきました。卒業後は帰国してタイの大学に戻りますが、日本で学んだことを全力で国に役立たせていきたいと思います。

### 「短縮」という制度について

電子物性工学専攻 松重研究室 博士後期課程1年 福間 剛士

現在、博士課程への進学を経済的な理由により断念する学生は多い。確かに、27歳にもなって無収入でかつ授業料を年間50万円近く払わなくてはならないという状態は、多くの人にとって受け入れ難い選択肢であろう。

このような現状を打開するためのアプローチには次の2つが考えられる。それは博士課程の学生の増収を図るものと、博士号を若年期に取得し得る制度の導入を図るものである。前者の代表例としては、日本学術振興会特別研究員を挙げることができる。しかし現在、このポストの採用可否は進学と就職の決定を迫られる時期より後に通知されるため、進学を決める根拠にはなり得ない。一方、後者の例としては、近年大学に導入された「短縮」という制度を挙げることができる。これは通常より短い期間で、単位の取得、卒業研究、学位論文の執筆をすべて行って卒業する制度である。

私は平成12年の10月に、修士課程を短縮して博士課程へと進学した。これは京大電気系では初めてのことであった。この短縮という制度には、博士課程への進学に対する経済的デメリットを軽減すること以外にも、重要な意味がある。これまで京大電気系の修士課程には、事実上「頑張った人も、頑張らなかった人も仲良く2年で卒業」といった風潮があった。しかし、短縮制度が一般的なものとなれば、「努力次第でより早く卒業」といった状態になるだろう。前者は社会主義に、後者は資本主義に似ている。少なくとも、「どちらがアウトプットを吐けるか?」という点に関しては過去の歴史を振り返れば明らかだろう。

私は多くの学生が短縮できるようになるべきだとは全く思っていない。多くの学生に「頑張れば短縮できる」という認識を持って、充実した研究生生活を送って欲しいと願っている。

## 教室通信

### 宙空電波科学研究センター発足について

宙空電波科学研究センターは、平成12年4月1日、超高層電波研究センターが改組され新しく発足致しました。『宙空』は一般には馴染みの薄い言葉ですが、大空とそれに連なる惑星間宇宙を包含する領域を意味します。本センターは特に電波を共通の研究手段或いは対象としていることが特色です。宙空を占める地球大気や希薄な宇宙プラズマの諸現象の解明、及び電波の新たな利用手法の確立を行い、宙空電波科学という新しい学問体系の創造と、社会からのニーズに応えうる人材の育成を目指します。

宙空電波科学研究センターは3研究部門6研究分野2外国人客員分野で教官総数は20名（内3名は外国人客員研究員）の構成となります。まず地球電波科学研究部門（大気圏光電波計測分野、グローバル大気情報解析分野、大気循環科学分野（外国人客員））では、大型大気レーダー『MUレーダー』（滋賀県信楽町）を始めとする電波・光学設備を中心に、グローバルな観測データや数値モデルを用いた地球大気の電波観測と研究が行われます。一方、宇宙電波科学研究部門（宇宙電波工学分野、電波科学シュミレーション分野、宇宙電波環境科学分野（外国人客員））では、『電波科学計算機実験装置（KDK/A-KDK）』や文部省宇宙科学研究所の科学衛星・ロケットを用いた惑星間宇宙の電波探査や電波環境研究が推進されます。また電波応用工学研究部門（マイクロ波エネルギー伝送分野、レーダーリモートセンシング工学分野）では、『マイクロ波電力伝送実験システム（METLAB）』を用いたマイクロ波エネルギー送受電基礎技術と、先端的な大気レーダーリモートセンシング技術の開発、並びに、それらの利用手法の確立が目指されます。さらにスケールの大きな宇宙太陽発電システムの研究や、A-KDKとMUレーダー/赤道における大気レーダーによる国際共同研究の推進は関連部門が協同して当たることになっています。また、本年度中に『宇宙太陽発電所発送受電システム』が導入される他、『赤道大気レーダー』も初めて赤道直下のインドネシアに設置される予定になっています。新センターとなって、これらの設備を中心とする国際的な共同研究により、独創的な宙空電波科学研究を一層進展させてゆきたいと願っております。

本センターの教官は情報学研究科通信情報システム専攻および理学研究科地球惑星科学専攻の構成員であり、積極的に大学院教育に貢献しています。また従来通り電気電子工学科の学部学生の教育・卒業研究指導にも当たっております。関係各位には、従前にも増して新センターを支えていただきたく、変わらぬご理解とご支援をお願いすると共に、学生の進路指導・就職等につきましてもこれまで同様にご配慮くださいます様よろしくお願い申し上げます。

## 編集後記

今世紀最後の発刊となります「cue」第6号を皆様にお届けいたします。1998年6月の創刊号からこれまでの短期間におきましても、電気系関係教室では種々の新設講座が開設され組織名の変更や改組も多く見られます。「cue」は来世紀も情報発信を続けて参りますので、皆様のご支援・ご協力をよろしくお願い申し上げます。（Y.K.記）

## おわびと訂正

cue第5号の「学生の声」欄(49ページ)におきまして、編集上の不手際により著者の方のお名前を誤って掲載してしまいました。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ここに訂正させていただきます。

=====

誤：美舩 健殿

正：美舩 健

=====



発行日：平成12年12月

編集：電気電子広報委員会

藤田 茂夫、奥村 浩士、小野寺秀俊、  
萩原 朋道、川上 養一、木本 恒暢、  
垣本 直人、尾上 孝雄

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