

# cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.10      DECEMBER 2002

---

[第10号]

.....  
卷頭言

名誉教授 川端 昭

.....  
大学の研究・動向

電気システム論講座・電気回路網学分野

宇宙電波科学研究部門・宇宙電波工学分野

.....  
産業界の技術動向

オムロン(株) 市原達朗

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。

cueは京都大学電気教室百周年記念事業  
の一環として発行されています。

## 巻頭言

## 元教員のひとりごと

川 端 昭



資源の乏しい日本は、科学技術立国を目指さざるをえない。したがって、技術者・研究者を育成することは、大学に課せられた重要な使命の一つである。しかし最近、「大学院終了の研究者は柔軟性に欠け、期待外れだ」などという民間企業の声を聞くことがある。国の拡充政策で大学院生数を増やしたが、そのために指導が行き届かないのでは、との心配もされている。「企画や実験、データ処理などの実践教育が不十分で、自由な発想ができないのでは」とも指摘されている。

暗記に偏った詰め込み教育で、受験戦争が加熱したという批判に応え、80年代に「ゆとり教育」なる名のもとに、国語・算数・理科などについても学ぶ項目や量を削減する学習指導要領に改訂され、週5日制が実施された。その結果、分数のできない文系大学生の存在などが新聞面を賑わした。中学レベルの問題を間違えるのは、基礎学力が身につけていない証拠で、ゆとり教育の弊害だといわれている。また、大学入試の多様化で、高校で理科や数学を十分に学んでいない理工系入学生も問題視されている。今後さらに、指導要領が改訂され、学習内容の約3割削減、授業時間数の減（年間70時間）、教科横断型の「総合学習」の導入、などが実施されようとしている。これらは、「知識より意欲」を重視した教育を目指したものという。従来より学力は下がるかもしれないが、生まれたゆとりを活かし、問題発見や解決などの新しい学力をつけることを目標としている。このような趣旨には賛成するが、実のある改革が達成されることを切に祈るものである。

さて、これら「ゆとり教育」による学生を受け入れる大学は、社会のニーズに合致する技術者・研究者を育成しなければならない。昔から教員の使命は、教育と研究だといわれていたが、どちらかというところ研究に傾くことが多く、大学教員は教育に不熱心だともいわれた。この原因は、教員としての評価が研究業績に偏る傾向があり、研究論文の完成に多くの時間を割くためと思われる。それでも、昔の学生は向学心に燃え、自分で学び、教員の後ろ姿を見て成長し、社会に巣立っていったように思う。今後は、学力低下で、勉強意欲のない学生をどのように教育すべきかということも大きな課題の一つといえる。

一方、国立大学には独立行政法人化の問題がある。この狙いは、競争原理の導入による研究・教育の活性化と運営の効率化であるといわれている。兼業や能力給の導入なども容易となり、研究・教育のレベルアップが期待できるといわれている。そして、法人化後には第三者機関の評価を受けることが義務づけられ、その結果に基づいて、国からの交付金の配分額が決められるという。この改革を実りあるものとするには、教員の意識改革が不可欠で、自らその道を模索する必要があるように思う。大学が外部の顔色を伺って「受け」のよい研究に走り、基礎研究や教育がおろそかになる恐れもある。大学は、社会が要求する人材を育成し、責任をもって品質保証のできる卒業生を世に送りださねばならない。そのためには、これからは大学教員は、今迄以上に教育に力を入れる必要があり、場合によっては、教育と研究の分業体制をとる必要に迫られるかもしれない。何れにしても、教員の教育に対する業績評価の道を確認する必要がある。いままでの旧態依然たる意識をもったままの大学運営では、教育を疎かにした研究至上主義との批判を受け、大学としての責任を果たすことができないのではと思う。

## 大学の研究・動向

# 電気電子回路システムの基礎研究

工学研究科 電気工学専攻 電気システム論講座 電気回路網学分野  
 教授 奥村 浩 士  
 kohshi@kuee.kyoto-u.ac.jp  
 助教授 久門 尚 史  
 hisakado@kuee.kyoto-u.ac.jp  
 助手 市川 哲  
 ichikawa@kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

電気回路網学は電気工学、電子工学の基礎分野に属している。近年の超集積回路の発展、コンピュータの高速化とメモリーの飛躍的増大、電力や通信システムの高度化と大規模化と共に、電気回路網学は理論面、実際面で日進月歩の状態にある。多様化する電気電子回路システムの中で、当研究室では非線形電気電子回路、分布定数回路および分布集中混在型回路などの回路システムにおける実際問題の解決を目的として、生起する現象の解明、有用な解析法とそのアルゴリズムの基礎的研究をソフト面だけでなく、ハード面においても地道に行っている。ここでは、最近の当研究室の主な研究の課題とその成果について、その概要を簡単に説明する。

## 2. 基礎理論とその応用に関する研究

### 2. 1 インタバルアナリシスの応用 [1, 2]

非線形回路の解析では振動モードの個数を求めることが重要であるが、近年インタバルアナリシスの理論の発展により振動の振幅と位相を定める連立非線形方程式のすべての解を求めることが可能になってきたことにより、この理論を応用した非線形回路のモード解析の研究を行っている。とくに、当研究室が長年行っている非線形三相回路の数学モデルが非線形特性を指数関数で近似すると、ソリトンで有名な戸田格子の方程式で表現され、厳密解すなわちcnoidal波が存在することを明らかにした。

### 2. 2 グレブナ基底の応用 [3, 4]

数式処理ソフトの飛躍的な発展によりグレブナ基底の理論が使えるようになってきた。グレブナ基底の理解にはイデアルの概念を理解しなければならない。ある有限個の多変数多項式に多項式を乗じて和をとった多項式の集合をイデアルという。この場合、有限個の多項式を基底といい、この基底のなかで特に数式処理ソフトで求められる標準基底がグレブナ基底である。この基底の理論は非線形回路網の分類やトランスリニア回路の入出力特性の算出に应用できることを明らかにしてきた。ここでは、新たな応用として提案した非線形回路系の大域分岐現象のモード分解について説明する。

次のような結合係数Dでカップリングされた結合ロジスティック写像を考える。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} cx_1(1-x_1) + D(x_2-x_1) \\ cx_2(1-x_2) + D(x_1-x_2) \end{bmatrix}.$$

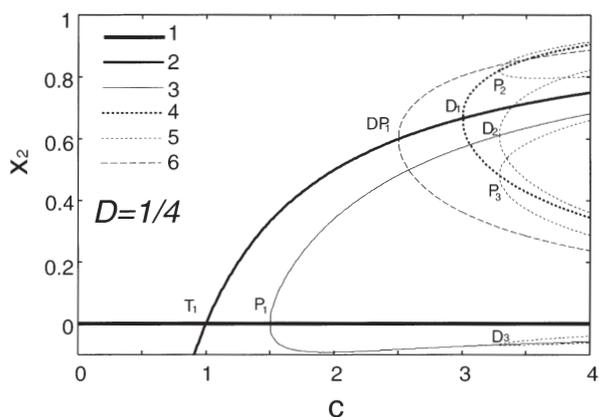


図1 2回反復不動点の分岐図

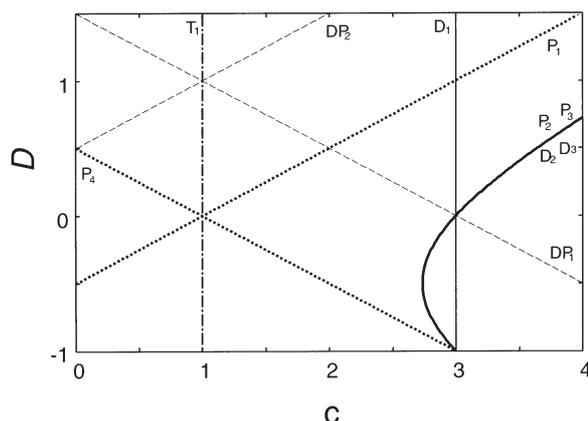


図2 分岐集合

この写像は $x_1$ と $x_2$ を交換しても写像の形がかわらないという対称性をもつ。この写像を2回反復したときの不動点を考える。不動点の集合は代数方程式で表現され、代数多様体となる。この代数多様体を不動点の対称性や周期に基づいて分解することは、代数多様体に対応するイデアルのイデアル商を用いて表現できる。上の写像の2回反復不動点を表す連立代数方程式のグレブナ基底を求め、イデアル商を用いて分解すると、次のように6個に分解されたイデアル基底が得られる； $\langle x_2 \rangle$ ,  $\langle cx_2 - c + 1 \rangle$ ,  $\langle c^2x_2^2 + (-c^2 + (2D + 1)c)x_2 - Dc + 2D^2 + D \rangle$ ,  $\langle c^2x_2^2 + (-c^2 - c)x_2 + c + 1 \rangle$ ,  $\langle c^8x_2^8 + \dots \rangle$ ,  $\langle c^2x_2^2 + (-c^2 + (2D - 1)c)x_2 + (-D + 1)c + 2D^2 - 3D + 1 \rangle$ 。これらのイデアル基底に対応する代数多様体はパラメータ空間での大域的な分岐図を表している。 $D = 1/4$ のときの分岐図を図1に示す。太線、細線はそれぞれ $x_1 = x_2$ と $x_1 \neq x_2$ の対称、非対称解に対応し、実線、点線はそれぞれ1周期点、2周期点に対応する。これはグレブナ基底を用いたイデアル分解により、大域的な分岐図がモード分解できることを示している。

分岐図において異なるモードに対応する代数多様体の交点を分岐点と呼ぶ。分岐点の集合である分岐集合はイデアル和で表され、グレブナ基底を用いて計算できる。図1に現れる各分岐点の分岐集合は、次のようなイデアルで表現される。 $P_1$ :  $\langle c - 2D + 1 \rangle$ ,  $P_2, P_3, D_2, D_3$ :  $\langle c^2 - 2c - 4D^2 - 4D - 3 \rangle$ ,  $D_1$ :  $\langle c - 3 \rangle$ ,  $T_1$ :  $\langle c - 1 \rangle$ ,  $DP_1$ :  $\langle c + 2D - 1 \rangle$ ,  $P_4$ :  $\langle c + 2D - 3 \rangle$ ,  $DP_2$ :  $\langle c - 2D + 1 \rangle$ 。図2は実際に分岐集合を描いたものである。従来分岐集合は数値計算によって求められてきたが、上に述べたようにグレブナ基底を用いることにより、分岐集合を代数的により明確に表現することが可能になった。

### 2. 3 数値逆ラプラス変換 [5]

逆ラプラス変換は複素関数論の応用として線形回路やシステムの理論でよく用いられているのは周知の通りであるが、実際に数値計算でこれを求めて満足できる手法はなく、この課題については長年研究してきた。時間区間  $[0, T]$  の逆変換のデータが欲しいにもかかわらず、 $[0, T/2]$  の時間区間しか得られず、残りの半分の区間に対しては変換値の誤差が極めて大きいため、利用可能なソフトはほとんどなかった。最近、当研究室ではこの困難を克服した実用に耐える手法を開発し、またこのハード化も完成したので、関西TLOを通じて特許出願しているところである。

図3, 4はそれぞれ従来法、提案した手法によって変換された矩形波を示している。従来法では後半で振幅が増大するとともに、各不連続点でギブスの現象が大きく現れている。一方提案手法で変換した場合、時間区間全体にわたって正しい値が得られている。

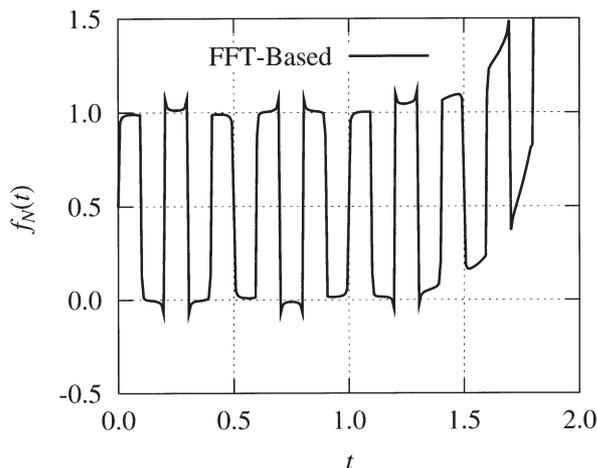


図3 従来法によって変換された矩形波

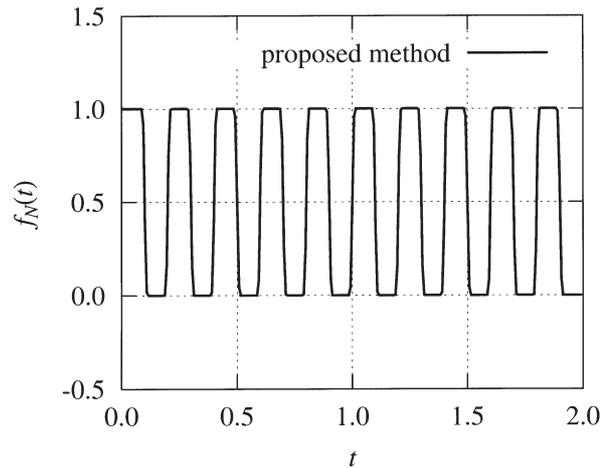


図4 提案手法によって変換された矩形波

### 3. アルゴリズムのハード化に関する研究

CMOS ICが登場し大規模LSIの時代となった今日では、ハードウェア記述言語によりLSI設計ができるようになってきている。このような時代の趨勢のなかで、これまで行ってきた計算アルゴリズムの研究成果をハードウェアで実現しようというのがこの研究課題である。

#### 3. 1 Krawczyk-Moore-Jonesのアルゴリズムのハード化 [6]

FPGA (Field Programmable Gate Array) は再構成可能 (Reconfigurable) な集積回路であり、チップ上に瞬時に論理回路を構成できる。このチップを用いることにより、これまでソフトウェアとしてCPUに計算させていた様々なアルゴリズムを回路として実現し、高速に実行することが可能になる。当研究室では、このチップをAT互換機のPCIバス上に実装することによって、リアルタイムシステムを構築している。

連立非線形方程式のすべての実数解を求める方法として、区間演算を用いたKrawczykのアルゴリズムが知られている。しかしこの方法は膨大な数の区間演算を必要とする。そこで当研究室では大規模並列アルゴリズムを提案し、さらにこのアルゴリズムをFPGAを用いてハード化した。図5はアルゴリズムとハードウェアの構成、図6はFPGA上に円と放物線の交点をKrawczykのアルゴリズムを回路として実装する概念図である。

#### 3. 2 ウェーブレット変換のハード化による伝送線路の故障点標定 [7]

当研究室ではウェーブレット変換と自己相関関数を用いることにより、これまで30~50ミリ秒必要としていた電力ネットワークの故障点検出が、1ミリ秒でできる方法を提案した。そこで、このアルゴリズムを実際にハード化し、電力ネットワークの故障点を検出するシステムの試作機を作成した。このシステムは1個のウェーブレット変換プロセッサと2個の自己相関プロセッサをAT互換機のPCIバス上に実装することにより実時間処理を実現している。

### 4. 分布定数回路システムの解析法の研究

この研究課題においては、電磁界理論に基づく雷サージ現象の研究の一環として、複雑な形状をもつ送電鉄塔の直撃雷による電位上昇を計算する方法を研究している。さらに、近年の大規模集積回路 (VLSI) における高速伝搬信号波形の解析が重要な問題となっている現状を考え、ここでは、当研究

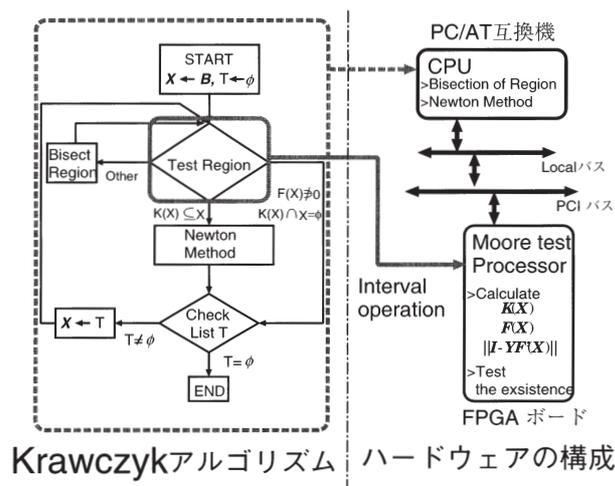


図5. アルゴリズムにおいてソフトで実行する部分とハードで実行する部分を分離。

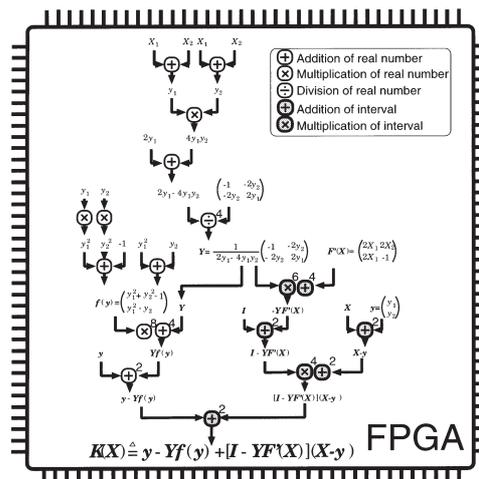


図6. FPGAの再構成可能性を利用し、対象とする方程式もFPGA上に回路として実装。

室で行っている分布集中定数系混在回路の研究を紹介する。

#### 4. 1 分布集中定数系混在回路の数値解析法に関する研究

大規模集積回路（VLSI）における高速伝搬信号波形を解析するにあたっては、以下のような問題点に対応できる汎用性のある解析方法が要請される。

- ・ VLSI回路を線形及び非線形素子からなる集中定数回路部分と分布定数回路である多相伝送線路から構成される複雑、大規模な分布集中定数系混在回路として取り扱う。
- ・ 伝送線路においては周波数依存性を有する損失まで考慮するとともに、配置上の制約から生じる形状の不均一性までを考慮する。
- ・ 電源としては集中電源のみならず線路上の電圧、電流の初期分布や外部からの入射電磁界に起因する分布電源まで考慮する。

回路の過渡応答を求める場合、解析的な手法に基づいた解法には限界があり、上に述べたような複雑、大規模な回路に対しては数値的な解法に頼らざるを得ない。その場合の数値解法としては大きく分けて、時間領域のみでの解析法、周波数領域のみでの解析法、時間、周波数混成領域での解析法の3通りがある。それぞれの領域での数値的な解法はこれまでに種々提案されているが、上に示した全ての要求に対応するには難がある。そこで本研究室では分布集中定数系混在回路網に対する効率のよい高精度な汎用的数値解析法の構築を目的とした研究を行っている。

例として分布電源のある伝送線路の過渡応答の数値逆ラプラス変換による解析をとりあげる。分布定数回路で表される伝送線路部分については、時間領域での解析よりもラプラス変換による複素周波数領域での解析が有効であることがこれまでの研究で明らかになっている。集中定数回路部分が線形時不変素子のみで構成されていればラプラス変換により  $s$  関数に数値逆ラプラス変換法を適用し時間領域での解を求める方法は汎用性の高い方法である。適用例として、図7に示す平行2導体伝送線路

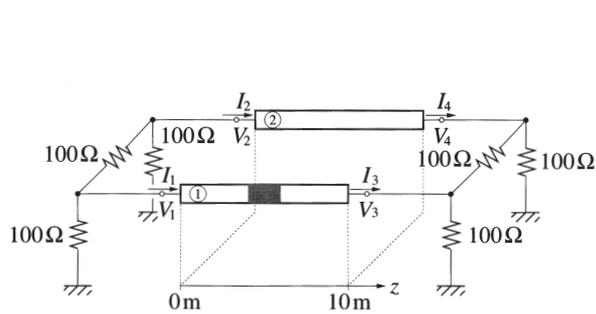


図7 2 導体伝送線路

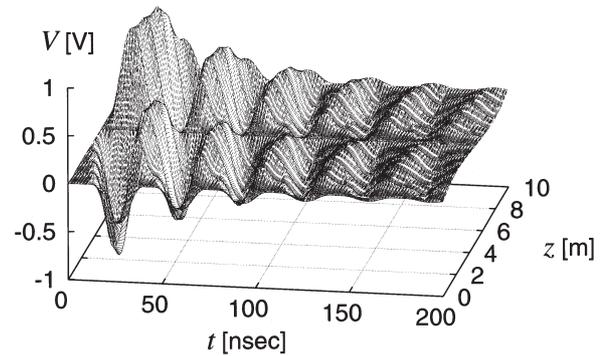


図8 導体1上の電圧分布

の導体1のハッチングで示した $4\text{m} \leq z \leq 6\text{m}$ の区間に単一のパルス状入射電界が印加されたとき、本研究室で開発した方法 [9]、[10] により求めた線路上での電圧分布を図8に示す。

## 5 おわりに

当研究室が行っている最近の研究内容の一部についてその成果とともに紹介した。電気回路網学の分野では多くの基礎的な課題が存在する。時代の進歩を意識し、実際問題への対処を常に視野に入れながら、回路に付随する電磁現象までも含めて、今後もこの分野の基礎研究を着実に発展させていく。

## 参考文献

- [1] 奥村浩士：“最近の回路網解析の話題—区間演算の応用について”，システム/制御/情報，Vol.40, No.9, pp.393-400, 1996.
- [2] T. Hisakado and K. Okumura: “An Approach to Parallelization of Krawczyk’s Method,” Trans. ISICIE, Vol.15, No.9, pp.495-501, 2002.
- [3] K. Okumura: “Classifying nonlinear circuits by Groebner base,” Proc. NDES, pp.276-270, 1998.
- [4] T. Hisakado and K. Okumura: “Mode Decomposition of Global Bifurcation Diagram with Gröbner Bases,” Physics Letters A, Vol.292, pp.263-268, 2002.
- [5] A. Yonemoto, T. Hisakado and K. Okumura: “An Improvement of Convergence of FFT-based Numerical Inversion of Laplace Transforms,” IEEE, Proc. ISCAS, Vol.V, pp.769-772, 2002.
- [6] T. Hisakado, T. Nishimura and K. Okumura: “Hardware Implementation of Moore Test on FPGA,” IEEE, Proc. ISCAS, Vol.I, pp.653-656, 2002.
- [7] 久門尚史、田中宏司、奥村浩士：“ウェーブレット変換による伝送線路の故障点標定システム,”電学論B, Vol.121, No.9, pp.1139-1148, 2001.
- [8] S. Ichikawa: “Investigation on the analysis of transmission line with frequency dependent lossy term”, Proc. ITC-CSCC, July 2002.
- [9] S. Ichikawa and R. Tanaka: “Transient analysis of hybrid system composed of linear lumped elements and frequency dependent lossy transmission lines with distributed sources”, Proc. APCCAS, Oct. 2002.
- [10] S. Ichikawa and R. Tanaka: “Scattering matrix method for transient analysis of hybrid system composed of linear/nonlinear lumped elements and frequency dependent lossy transmission lines with distributed sources”, Proc. NOLTA, Oct. 2002.

# 宇宙開拓時代に向けた宇宙電磁環境探査と電波応用技術の研究

宙空電波科学研究センター 宇宙電波科学研究部門 宇宙電波工学分野  
 教授 松本 紘  
 matsumot@kurasc.kyoto-u.ac.jp  
 助教授 小嶋 浩嗣  
 kojima@kurasc.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

当研究室が所属している宙空電波科学研究センターの源身である工学部附属電離層研究施設は、日本における宇宙科学の黎明期に非常に大きな役割を果たした。故前田憲一先生（京都大学名誉教授）と故大林辰彦先生（東京大学名誉教授）によって率いられ、わが国初の科学衛星「でんぱ」の開発に始まる衛星ミッション、その後の観測ロケット実験などにおいても多大な貢献をしてきた。その研究の流れは、現在に至るまで受け継がれており、当研究室では、宇宙という場所と環境を舞台に「電波」をキーワードとして、理学・工学の両側面より研究を展開している。本研究室が取り組んでいる研究内容は大きく分けて次の3つの柱よりなる：1. 宇宙太陽発電所（SPS）の研究、2. 科学衛星による宇宙空間電磁環境の研究、3. 計算機実験によるプラズマ現象の研究。これらは、いずれも人類が宇宙に本格的に進出していく宇宙開拓時代に向けての研究テーマであり、宇宙空間を「よく理解し、そして、利用する」という観点でお互いにリンクするものである。本稿ではそれぞれの研究テーマについて最新の動向を紹介する。

## 2. 宇宙太陽発電衛星の研究

宇宙太陽発電所（Solar Power Satellite/Station；SPS：図1）は宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波に変換して送電アンテナから地球や宇宙都市の受電所に設置されるレクテナと呼ばれる受電アンテナへ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所である。SPSは宇宙空間に浮かぶ発電所から地上に電力を送らなければならないため、無線による電力伝送技術が重要となってくる。SPSは上空36,000 kmの静止衛星軌道にあり、常に地上から見えている。受電側ではマイクロ波をレクテナと呼ばれる整流アンテナで再び電気エネルギーに再変換して利用する。マイクロ波はISMバンド（産業・科学・医療用バンド）である2.45GHzや5.8GHzの周波数を用いることが検討されている。

SPSは、地球上のエネルギー不足を補い、放射性廃棄物問題を抱える原子力発電所の不足を補い、環境破壊や地球温暖化をもたらす火力発電所に代わる大型基幹電力供給源となり得るものとして1968年に米国のピーター・グレーザーによって提案された。今日深刻になっている温暖化の元凶である炭酸ガス排出抑制の切り札としての価値は当時認識されていなかったが、SPSは温暖化ガス

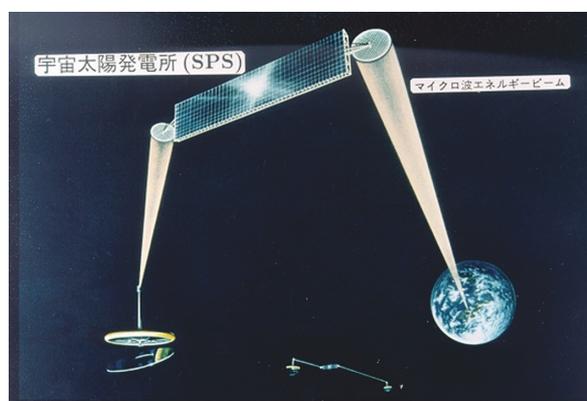


図1 一般的なSPSのイメージ

抑制に大きく貢献する発電方式でもある。例えば石油火力発電のCO<sub>2</sub>排出量は建設時に2g-CO<sub>2</sub>/kWh、運用時に844g-CO<sub>2</sub>/kWhであり、原子力発電のCO<sub>2</sub>排出量は建設時に3g-CO<sub>2</sub>/kWh、運用時に19g-CO<sub>2</sub>/kWhであるのに対し、SPSのCO<sub>2</sub>排出量は建設時に20g-CO<sub>2</sub>/kWhとなるが、運用時には0となるという試算がなされている。



図2 METLAB内部の電波暗室

当研究室ではこのSPSシステムの研究およびその重要技術開発項目である「マイクロ波によるエネルギー伝送」の研究を中心に行っている。特にSPSをターゲットとしたマイクロ波エネルギー伝送技術の開発では、1983年の親子ロケットを使った世界初の宇宙マイクロ波送電実験MINIX、1992年の無燃料飛行機へのマイクロ波送電実験、1993年二回目のロケットによる宇宙マイクロ波送電実験ISY-METSなど大きな成果をあげてきている。そして1996年に設置されたマイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB: Microwave Energy Transmission Laboratory) (図2)は、マイクロ波によるエネルギー伝送実験用にデザインされた国内唯一の電波暗室を備え、そこでは、マイクロ波ビームを目的の位置に自動的に追尾集中させるレトロディレクティブシステムの開発を始め、高効率のレクテナの開発、そして、安価で高出力を得ることのできる位相制御型マグネトロンの開発などを行っている。特に、位相制御マグネトロンでは、アレイアンテナに給電して電力ビーム方向を制御するために必要なアンプの位相制御が困難とされていたマグネ

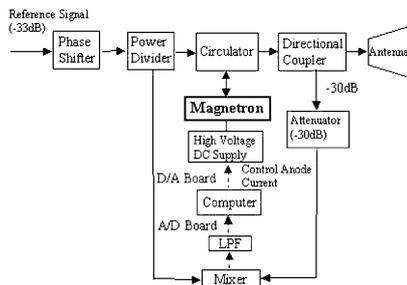


図3 位相制御マグネトロンの回路ブロック図

トロンにおいて、その出力と基準信号との位相比較を行いその結果をアノード電流としてフィードバックをかけるという方式(図3)で実現することに成功し、現在特許の出願中である。本研究成果を用いた位相制御マグネトロンフェイズドアレイSPORTS2.45 (Space Power Radio Transmission System) とSPORTS5.8も2000年度及び2001年度に導入され、現在更なる小型化、位相安定化等の研究を行っている。

### 3. 科学衛星による宇宙空間電磁環境の研究

地球を取り巻く宇宙空間は希薄な電離気体である宇宙プラズマで満たされている。その宇宙プラズマは、そのほとんどの部分において、「無衝突プラズマ」である。「無衝突」ということは、プラズマを構成する粒子同志は直接kineticなエネルギー交換をせず、そこに波動を介在させることになる。また、プラズマは分散性媒質であるため、そこに存在する電波は、光速で伝わる電波だけが存在する真空中と異なり、様々な位相速度、群速度をもつ電波が存在する(モード)。そして、どのモードの電波が励起・観測されるかによって、粒子のkineticなエネルギーがどのようなメカニズムによりエネルギー変換されたのかを知ることができる。当研究室では、科学衛星にプラズマ中での電波現象を観測することのできる「プラズマ波動観測器」を搭載し、宇宙空間中で生起しているプラズマ波動の観測を通して、そこで発生しているエネルギー変換プロセスを明らかにして、宇宙空間中における電磁環境がその場所によって、あるいは、太陽活動や地球に磁気圏活動によってどのような影響を受けるのかを研究している。

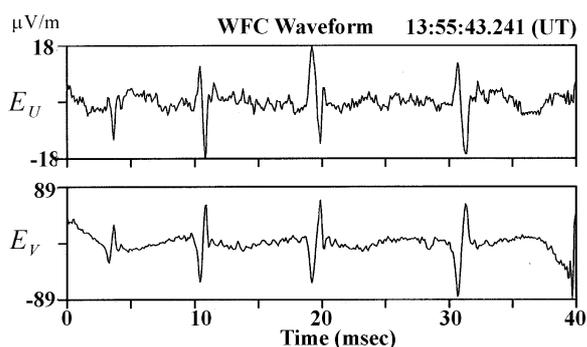


図4 GEOTAIL衛星で観測された静電孤立波 (ESW)

ことである。これまでスペクトルでしか診た事のないプラズマ波動現象が、波形観測によってもっと細かな時間スケールでみる事ができるようになった。その一つの大きな成果が、「静電孤立波の発見」である。図4がGEOTAIL衛星で発見された静電孤立波 (ESW: Electrostatic Solitary Waves) である。電気電子工学の出身者であれば、この波形が周波数空間で見ると広帯域スペクトルに相当することは簡単に想像がつく。しかし、一方で、広帯域スペクトルから、この波形を確信できる人は少ないであろう。実際この波形は従来のスペクトル観測から「広帯域静電ノイズ (BEN: Broadband Electrostatic Noise)」と名づけられていた。その1974年の米国衛星での発見以来、GEOTAILで波形が観測されるまでの20年間このBENは、そのスペクトル観測から、White noise的な波形であると考えられていた。そしてこの「ノイズ」という思い込みが、その発生メカニズムの解明を大きく遅らせてしまった。実際、広い周波数帯の波動へ粒子からのエネルギー変換を実現するモデルを構築することは非常に困難なことであったからである。

そしてこのGEOTAIL衛星によって、広帯域スペクトルが孤立したパルス波形である、ということがわかって以来、その発生メカニズムは磁気圏内部で発生する高速電子ビームに関係することが、後述の計算機実験との共同研究で明らかになるまで、1年とかからなかった。いかに波形観測が大きなインパクトを与えたかは、その後の国外の衛星のほとんどすべてに波形観測器が搭載され始めたことからわかる。そしてその波形観測器がもたらしたのは「ESWの孤立波形は、宇宙空間プラズマ中のいたるところで観測される」という事実であった。

以上のようにGEOTAIL衛星のプラズマ波動観測は、この分野の研究手法に大きなインパクトを与え大きな成功を収めている。一方、現在、当研究室では、次のターゲットを水星におき、その観測計画の準備に入っている。これは、2010年打ち上げ予定の日欧共同水星観測衛星BepiColombo計画で、この衛星に搭載するデジタル化された波動観測器をヨーロッパチームと共同で開発に取り組んでいる (図5)。また、次期磁気圏観測衛星として提案されている複数個の衛星編隊による観測では、極度に軽量化された観測器が必要となるため、現在、プラズマ波動観測器そのものを一つのチップに収めてしまうワンチップ化計画にも取り組み始めているところである。

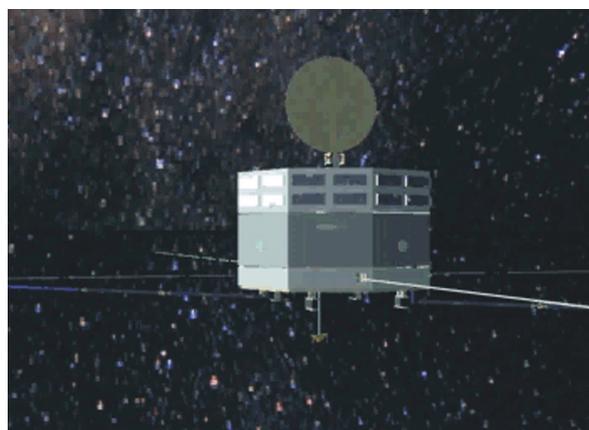


図5 BepiColombo水星探査衛星

現在も健在で貴重なデータを送り続けている我が国のGEOTAIL衛星 (1992年打ち上げ) では、当研究室が中心となって開発した「プラズマ波動観測器 (PWI: Plasma Wave Instrument) が搭載されている。このPWIは従来テレメータ伝送容量の制限から「周波数スペクトル」による観測が主であった衛星観測に一つのブレイクスルーをもたらした。それは、そのテレメータ伝送容量の制限を衛星上に搭載したメモリによって打破し、「波形」を直接観測できる機能である。波形観測の強みは何より「瞬間的な波動の変化」がわかる

#### 4. 計算機実験によるプラズマ物理の研究

当研究室では、プラズマ中での電磁現象を理論的に解析するために、計算機のメモリ空間上にMaxwellの方程式と荷電粒子に対する運動方程式で記述されるプラズマを数値的に実現し、その波動と粒子のエネルギー交換過程と非線形発展を解き進めることのできるソフトウェアを開発してきた。KEMPOと名づけられたその計算機実験用ソフトウェアは、改良を重ね、空間の3次元化、そのモデル内への宇宙構造物の導入などが行え、宇宙における電磁環境をより現実に近いモデルで計算することができるようになってきている。

このソフトウェアを用いて、前述のSPS用にも使われるマグネトロン設計のための計算機実験など工学的側面をもつ研究、と宇宙空間での自然現象を解析する理論的な側面をもつ研究が行われている。ここでは、前述のGEOTAIL衛星で観測されたESWについての計算機実験を紹介する。GEOTAIL衛星による波形観測によりBENがESWという孤立波から構成されていることがわかったが、その孤立波の再現に計算機実験が成功した。それは、ESWの観測域に存在する電子ビームが電子のプラズマ周波数付近に静電波を発生させ、それが非線形発展する段階で孤立したポテンシャル構造に発展していくというものであった。この計算機実験によって再現された波形とGEOTAIL衛星の観測波形を図7に示す。この孤立した波形を計算機実験で再現するには、非常に多くのプラズマ粒子の軌道を長時間にわたって追跡する必要があるが、そこに威力を発揮したのが、当研究センターがもつA-KDK（先端電波科学計算機実験装置）計算機システムであった。これは、32GBytesの主記憶をもつ電波科学専用の計算機実験装置で、これを用いて数週間にわたる計算を実行した結果、観測されたような孤立波形が電子ビーム不安定性の非線形発展の段階で形成されることを突き止めたものである。その後、この計算機実験は更に精度をあげて長時間にわたり遂行され、その孤立したポテンシャルから放射される電磁波現象についてなどの解明も行われている。

#### 5. おわりに

当研究室で行っている研究は、先に述べたように人類の宇宙開拓時代に大きな貢献をすることを目的としている。宇宙空間をクリーンなエネルギーの発電場所として利用する。そして、科学衛星で観測された電磁環境データベースは、宇宙空間を利用していくときの環境アセスメントとして利用できるであろう。また、その観測技術は、SPSのような大規模宇宙構造物周辺の電磁環境をリアルタイムでモニタする用途に利用できるであろう。また、より現実的なモデルを扱える計算機実験ソフトウェアは、実際にSPSなどの構造物を建造する前にどのような環境下で運用できるかを予測することに役立つであろう。我々の研究が将来の人類生存圏を宇宙へと拡大するために大きな貢献をなすことができるよう努力している次第である。

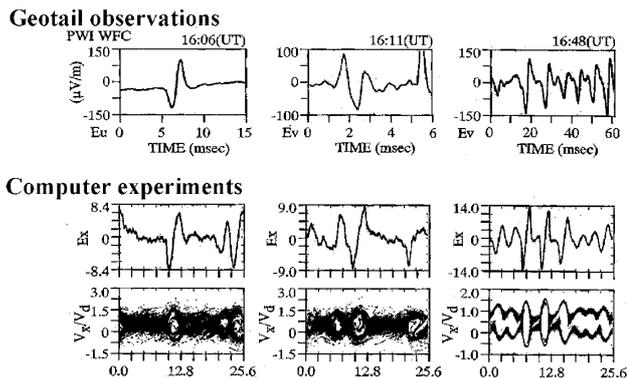


図7 GEOTAIL衛星で観測されたESW波形（上段）と計算機実験により再現された電界波形とその位相ダイアグラム

## 産業界の技術動向

平成14年度電気系教室懇話会講演

# 21世紀、日本の製造業の生き残りを賭けて

—オムロンにおけるケース・スタディ—

オムロン株式会社  
市原 達朗

## 1. はじめに

平成14年10月18日、京都大学電気総合館で行われました電気系教室懇話会にて講演させて頂きました内容の概要を本原稿として寄稿させて頂きます。

私は昭和42年工学部電子工学科を卒業いたしました。卒業研究及び論文作成に当り、藤田茂夫先生に全面的にご指導賜りました。オムロン（当時は立石電機）株式会社入社後は、交通管制システムの開発、米国でのPOSなどのシステム商品の販売、帰国後はシステム商品販売、CADシステム社内利用推進、ワークステーションの研究・開発などを歴任、最近は技術全般の担当をしております。

以下、

- (1) 日本のおかれている状況
- (2) 2000年～2010年
- (3) 目指すべき企業文化

についてお話しします。

## 2. 講演の内容

### 2-1 日本のおかれている状況

日本が、JAPAN AS No.1といわれた1990年以後、凋落の一途を辿っていると考えている人が多いようです。私は、何を相手に比較するかによっては、こういった一般的に言われているほどには悪くないと思っています。特に、大きな財政赤字、貿易赤字に悩んできた米国からとやかく言われる筋合いはないし、また、スイスの調査機関のつけたランキングを見て、どうしてこんな国より日本が下位にランクされるの？という気がします。ただし、この今の日本の低下が続けば、本当に大変な状況に陥ることは事実ですし、ここにおられる皆様が就職するにあたって大変苦労される現状を作り出した一人としては大きな責任を感じています。本質的に、日本がおかしくなったことへの第一の責任は金融業界にあると私は思いますが、製造業にいる私が他の業界を誹謗していても何も好転しませんし、製造業も製造業なりに、ダメな要素も大、ということで私の身の周りの話に戻させて頂きます。

1980年から1990年の時代は、言わば個別最適が巾をきかせた10年でした。ジャストインタイム、QCサークルなど、製造プロセスのごく一部分の最適化が企業の差別化要素となり得た時代です。茶、花を芸術にまで仕上げる能力では日本の右に出るものはなく、この長所が物づくりにも発揮されたのです。しかるに、JAPAN AS No.1と言われ始めた1990年からの10年は、様子はガラッと変わり、全体プロセスをいかに考えるか、すなわち、全体最適化が重要な時代となりました。ベストセラーとなった「ザ・ゴール」の著者が日本のことを、その本の中で揶揄しました。曰く、「この本の説くTOC (Theory of Constraints) を日本人が理解すると、また、アメリカが日本に悩まされることになる。



図1 講演風景

個別最適しか分らぬ日本人にこの本を読ませてはならぬ。日本語への翻訳は許さない」と。このことだけが原因ではありませんが、とにかく1990年～2000年の10年は日本の製造業は大変苦勞させられる10年となりました。

## 2-2 2000年～2010年

2000年から2010年はどうでしょうか？インターネットがその典型的な例ですが、全体最適化に必要なインフラがどんどん開発され、我々にも極めて使いやすい形（コスト・参入条件）で提供され始め、今後の10年は益々その傾向が強くなります。従って、本質的には、物事を一網打尽に、あるいは、システムティックにとらえることが苦手であった我々にも、既に一般的に提供されつつある、こういったインフラを利用するだけで充分に対応が可能となり、我々の欠点が欠点としてのみ云々される時代ではなくなりました。むしろ、これからは、このインフラの上にかに上手く工夫を加えたモノを載せていくかが勝負の鍵となり、元来、その面では優秀な日本人の出番の10年になります。

創造性に関してはどうでしょうか？私はそうは思っていませんが、よく日本人は創造性に欠けると言われます。100歩譲って、もしこの通説が正しいとしても、そのことが決定的に日本を不利に導く10年とはなりません。2020年を予測した米国の「Technology Machine」、あるいは我が国の文部科学省の「2030年の科学技術」など、いずれの将来予測を見ても大した内容はありません。明治初期に100年後を夢みた予測が、新幹線、FAX、テレビ、Eコマース等々、ナンデ100年も前にそれを予測出来たの、と我々が舌を巻く創造的将来像を描いていたのとは比べるべくもありません。現代の日本人が創造性がないというよりも、たまたま今がそういう時期なのだと思います。創造的天才が、芸術、医学、物理学…あらゆる分野でのキラ星の如く出る（revolution）時期と、むしろ小さな工夫の積み重ね（evolution）の重要な時期が自ずから存在する訳で、後者の時代は日本人の特長が活かせる時代です。いずれにせよ、これまでの10年程には、2000年～2010年が日本にとってどうにもならぬ10年ではなくなる、あるいはなくせると考えています。

## 2-3 目指すべき企業文化

「エクセレントカンパニー」というベストセラーが出された10年後、そのほとんどがエクセレントではなくなっていた事実を顧み、企業が本来的に中長期的にエクセレントで持続できる要素は何か？というプラクティカルな研究が、一つはスタンフォード大学、もう一つはハーバード大学により、たまたま同時期に行われました。二つの異なる研究で共通する項目として以下の3つが出ました。

明確なゴール

変化に対するとまどいの少なさ

ビジョンのレベルとその遂行能力

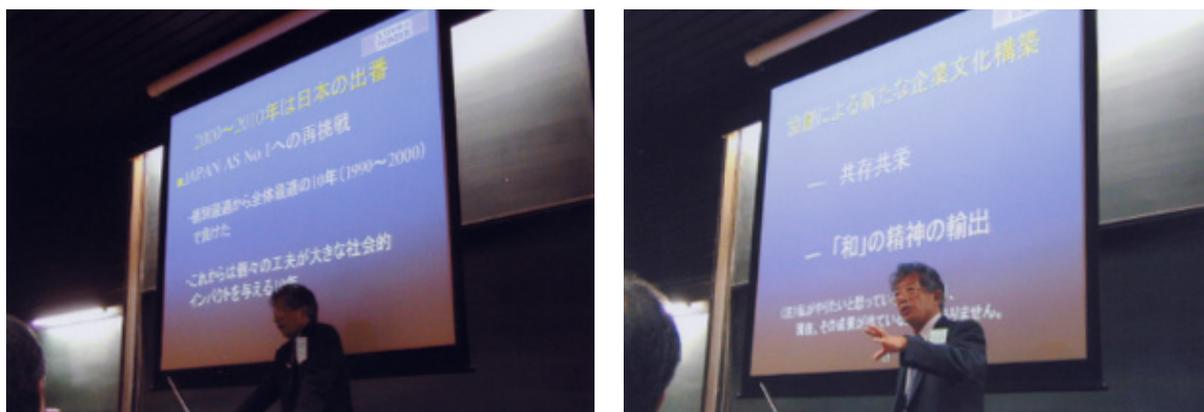


図2 講演風景

オムロンも

1980－1990はコンピュータ

1990－2000はネットワーク

2000－2010はセンサ

と位置付け、2000年—2010年のコアコンピタンスを「センシングアンドコントロール」とし、これに関連する10個のキーテクノロジー分野を定め、ここにリソースを集中することになっています。

技術の面からは、前述した分野を定義していますが、一方、企業文化として最重要視しているのが、ベンチャー企業への再挑戦です。

即ち、ベンチャー企業の持つ要素、

- 顧客との距離
- 自主自立
- 自浄化
- 背水の陣
- 建前でなく本音
- フラット化

といった点からの見直し、挑戦を行っています。例えば、顧客との距離を物理的に小さなベンチャー企業と同じ距離に縮める（例：社長が常に顧客と面談する）ことは不可能ですから、これを情報公開という形で、バーチャルに実現しています。米国で、Federal Express社がUPSなどを一気呵成に抜き去ることができた原理を当てはめようというものです。情報公開は、勿論こういった観点からのみならず、常に見られているということによる自浄作用の促進、パートナー探しの二方向化、グローバル化、さらには、株価のより正当な評価の手段といったメリットを与えるものです。

最後に、今オムロンが一番重要と考えている要素が協創（collaboration for innovation）という考え方です。これは、単にモンロー主義を捨てるといったことのみならず、行過ぎた競争原理（例：maliciousなtake-over）への警告をも含めた概念です。即ち、共存共栄をベースにした21世紀型の経営メカニズムへの挑戦です。共存共栄へのベースが地域的なクラスターであったり、SIG的な、ある共通の興味の対象に集まるグループであったり、補完的に互いの持つ価値をより高いものに昇華させる関係であったり、その組合せにも様々な実態が構成されます。要は、構成メンバー間が相互に信頼できる、よりよい社会につながる仕組みを良しとする文化です。これは明らかに、ユニラテラルな形で強者論理を追求するシリコンバレーあるいはウォールストリートから発信されてきた原理とは異なります。日本が真に復興するためには、本来的により良い社会を創るという原理原則に戻り、自ら

の身を正すことから始めるべきであり、単に他国のやり方の小手先の模倣だけでは、グローバルな市場に日本の特長を発揮することが不可能な時代であることを認識することが必要なのです。個の自主自力の単位は、個人のみならず、学校、企業、村、市、国、いずれの単位でもあるわけです。もし、日本が、例えば「和の精神に基づいた共存共栄」といった、他国からは発信できぬ文化を発信することに失敗したとしたら？我々の孫の時代は、今とは比べものにならぬ位に殺伐とした不幸せな時代に墮落していることでしょう。

最後に、ここにおられる皆様にどんな学生を私が期待しているかを、お話の締めくくりとさせていただきます。

スタンフォード大学のJ.Krumboltzという先生がPlanned Happenstanceということをおられます。ちょうど、ノーベル賞に輝かれた田中耕一氏が「偶然による発見」という表現をされましたが、こういう考え方を大事にしてほしいと思います。よく、先輩や親は「将来何になるの？」と追求してきます。あまり繰り返して言われると「明確にやりたい事が決められない自分はダメ人間なのでは？」と落ち込んでしまいます。大事なことは、あくなき好奇心、諦めないスタミナを持ち、何かのハズミでこれだと分ればその偶然性を人並み以上に大事にすることです。そのためには、先入観を極力持たないように習慣づけることも大切です。

ぜひ我々の手で、明るい展望の持てる社会を作りましょう。

## 研究室紹介

このページでは、電気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。

(\*は「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」のページに掲載)

## 電気関係研究室一覧

### 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
- 電力工学講座 電力変換制御工学分野 (引原研)
- 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 (萩原研)
- 電気システム論講座 電力システム分野 (大澤研)

#### 電子物性工学専攻

- 集積機能工学講座 (鈴木研)
- 電子物理学講座 極微真空電子工学分野 (石川研)
- 電子物理学講座 プラズマ物性工学分野 (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 (藤田茂研)
- 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)

#### 附属イオン工学実験施設

- クラスターイオン工学部門

### 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)
- 通信システム工学講座 知的通信網分野 (高橋研)
- 集積システム工学講座 大規模集積回路分野 (小野寺研)
- 集積システム工学講座 情報回路方式論分野 (中村研)
- 集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤研)

#### システム科学専攻

- システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研)

#### 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・環境学専攻

- エネルギー社会環境学専攻 エネルギー情報分野 (吉川榮研)
- 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
- 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)
- 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)
- レーザ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)

### 国際融合創造センター

- 創造部門
- 先進電子材料分野 (藤田静研) §
- 融合部門
- ベンチャー分野 § §

注 § 工学研究科電子物性工学専攻藤田茂研と一体運営

§ § 工学研究科電子物性工学専攻橋研と一体運営

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）  
 「偏微分方程式の高速並列解法のためのブロック化赤—黒順序付け」

近年、CADシステムなどの普及により、実用的な電気機器、電子機器の設計において電磁界解析に対する数値解析的アプローチの重要性が増しています。電磁界解析における偏微分方程式の境界値問題の数値解析において、偏微分方程式の離散化により大規模連立一次方程式が導かれ、その求解のための計算時間が全体の解析時間の大部分を占めることから、大規模連立一次方程式の高速解法の開発が求められています。また、マイクロプロセッサの発達に伴い、ハイパフォーマンスコンピュータの方式も変化しつつあり、計算機の技術変化に対応したアルゴリズムの開発が重要になっています。偏微分方程式の数値解析から派生する大規模連立一次方程式の高速反復解法として、現在最も広く使われている方法のひとつに不完全コレスキー分解前処理付共役勾配法（ICCG：Incomplete Cholesky Conjugate Gradient法）がありますが、そのアルゴリズムの中に、基本的に逐次的で並列化しにくい前進、後退代入計算が含まれることから、ICCG法の並列化は容易でなく、盛んに研究が行われています。

連立一次方程式の変数の番号付けを変更すると係数行列の形が変化し、並列化の容易さ、収束性が変化します。変数の番号付けをオーダリングと呼び、ICCGの代表的な並列化手法の一つとして並列オーダリングの利用があります。これまでも様々な並列オーダリングが提案されており、たとえば反復法の高い収束性と並列度を同時に実現する優れたオーダリングとして、大きな色数による多色順序付けがあります。我々は、収束性、並列度に加えて、並列化されたアルゴリズムの中の同期点について考慮し、各代入計算の並列実行における同期点の数を1つにし、かつ前述の手法と同程度の高い収束性の得られる並列オーダリングとして、ブロック赤—黒順序付け法を開発しました。本手法は、節点の幾つかをブロック化し、そのブロックに対して赤—黒順序付け法を適用するものです。各プロセッサが幾つかのブロックを担当することにより、代入計算が並列実行されます。ブロックサイズを増加させることにより収束性が改善され、実行計算機のもつ並列度に合わせた最適なブロックサイズを決めることができます。本手法は近年ハイパフォーマンス計算機の主流となっているスカラー並列計算機上での実装において、高い収束性とキャッシュデータの再利用性を持っています。ポアソン方程式の境界値問題に適用し、約100万自由度を持つ差分解析の計算例において、逐次型ICCG法に比べて16CPUで14.3倍の速度向上を達成しています。ブロック化赤—黒順序付け法における節点のブロック分割と色分け、方法の収束性、並列計算の速度向上を図1、2、3に示します。

文献 [1] 岩下武史、島崎眞昭：同期点の少ない並列化ICCG法のためのブロック化赤—黒順序付け、情報処理学会論文誌 第43巻 第4号、893—904, 2002.

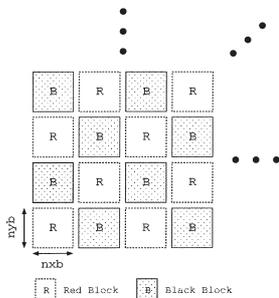


図1 ブロック化赤—黒順序付けにおけるブロック分割と色分け

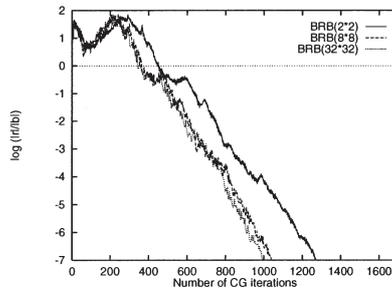


図2 ブロック化赤—黒順序付け法の収束性

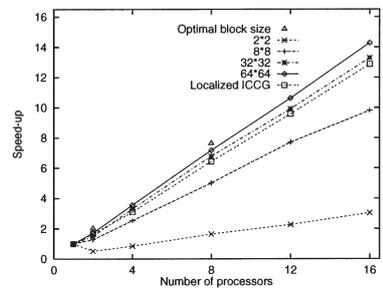


図3 ブロック化赤—黒順序付け法による速度向上

## 電力工学講座 電力発生伝送工学分野

### 「サイリスタ制御直列コンデンサによる軸ねじれ共振の抑制」

サイリスタ制御直列コンデンサ (TCSC) は、図1のようにリアクトルの電流をサイリスタで制御することにより、直列コンデンサの等価的なリアクタンスを変えるものである。送電線のリアクタンスを補償することにより、送電線の輸送能力を向上させるとともに、ループ系統における電力潮流を連続かつ高速に制御する。直列コンデンサで問題となる発電機の軸ねじれ共振 (SSR) の抑制にも効果があり、この性質はTCSCを実系統に適用する上できわめて重要である。本研究室ではTCSCのSSR抑制効果について解析を行ったので、その結果を報告する。

図2は点弧角を変えたとき、発電機の振動に対する電氣的なダンピングトルクを調べたものである。点弧角が $180^\circ$  のときはリアクトルに電流が流れず、振動周波数25Hzあたりに負の急峻なピークが見られる。発電機軸系にはいくつかの固有振動があるが、その周波数が25Hz近傍にあるとSSRが発生する。つぎに点弧角を小さくしていくと $165^\circ$ 、 $160^\circ$ あたりでピーク値が小さくなるのがわかる。 $180^\circ$  のときと比較してかなり小さくなっており、SSRの抑制に効果があることが確認できる。しかしながら、ダンピングトルクは依然として負であり、発電機軸系のダンピングがこれに比べて小さいとSSRが起きる。

図3はサイリスタの点弧角を $165^\circ$  のまわりで軸振動に比例して変化させたときの電氣的なダンピングトルクを示したものである。図より、ゲインを大きくするにしたがって、ダンピングトルクが負から正に変わっていくことがわかる。図4は発電機の軸振動の時間変化をシミュレーションしたものである。ゲインが0、すなわち制御がないときは、軸振動が時間とともに大きくなっていくが、ゲインを1.5にすると減衰するのが観察できる。以上により、適切な点弧角の制御により、SSRを抑制できることが明らかになった。

[1] N. Kakimoto, A. Phongphanphane, "Subsynchronous Resonance Damping Control of Thyristor-Controlled Series Capacitor", IEEE Transactions on Power Delivery, 2003 (掲載予定)

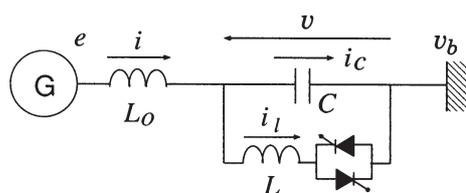


図1 TCSC補償系統

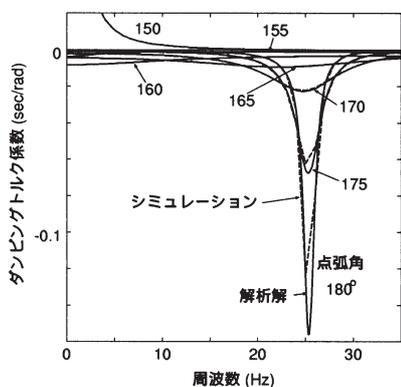


図2 点弧角とダンピングトルク

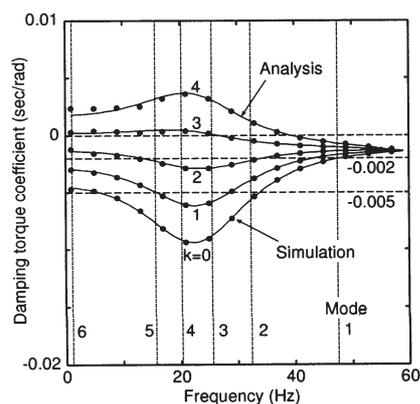


図3 点弧角制御の効果

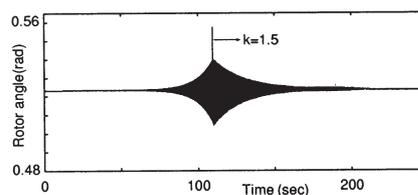


図4 軸振動の時間変化

電工学講座 電力変換制御工学分野 (引原研究室)  
 「実時間DFTによる電力用交直変換器の制御」

電力系統は60Hz若しくは50Hzの一定周波数の交流で運用されています。交流の状態量として位相・周波数及び振幅があり、電力系統においては連系された同期発電機の回転子角・回転速度及び励磁によって自律的に決まっています。「インバータ」という呼称で知られているGTOやIGBT等の半導体素子で構成された静止形電力変換器を交流系統に連系する場合、スイッチ素子のON/OFF及びその位相で入出力電力が定まりますが、変換器自身は発電機における回転子の慣性に相当するものを有していないため、外部より位相情報を与える必要があります。高性能な変換器制御の実現には、位相検出の精度を高くすると同時に、電力系統に接続された様々な機器が発生する高調波や三相不平衡状態に対してもロバストであることが必要となります。このような変換器制御に要求される性能を満たす位相検出方式として、実時間離散フーリエ変換 (DFT) による交流系統電圧の位相検出を提案し、開発を行っています。

我々が提案している制御系のコア部分の処理フローを示したものが図1となります。三相交流では相回転が定義でき、三相各相の成分を相回転と同回転方向の正相成分・逆回転方向の逆相成分・三相で共通な零相成分に分けることができます。正相成分のみの場合が三相平衡状態であり、逆相成分が重畳された場合が不平衡となります。正・逆相成分だけ取り出すためにまずクラーク座標変換により  $\alpha\beta$  相成分を取り出します。逆回転方向の成分は負の周波数成分と等価となるので、 $\alpha\beta$  相成分をフーリエ変換して正・負の周波数成分を抽出することで正・逆相成分を求めます。また、高調波成分に対しても同様に、各高調波の周波数で正・逆回転する成分をフーリエ変換により抽出し、正・逆相成分として求めます。そして、周波数成分毎に変換器電流制御を行う周波数領域での制御演算を行い、実際の変換器出力電圧指令値を時間領域で再合成して出力します。大容量の電力用変換器では、損失低減のためにスイッチング周波数を低くしますが、出力制御可能な周波数成分もその半分以下の周波数しか期待できません。提案方法では制御対象となる状態量を各周波数成分に分解するため、制御対象とする周波数成分を変換器の出力制御可能な領域のみに特定することが可能となります。図2に本制御方式を適用した変換器を、電力用アクティブフィルタとして5次高調波成分の拡大抑制に使用した実験結果を示します。同図から、本制御を適用した高調波補償により高調波拡大量を1/4以下に低減できることが分ります。

なお、我々が提案している変換器制御方式の有効性の検証は、大学内の小規模模擬電力系統モデルを用いた実験だけでなく、電力会社等の所有する大規模電力系統解析シミュレータを用いた実験でも実施しており、産学連携を行っています。

<参考文献>特願2002-224106「自励式変換器の制御方式」

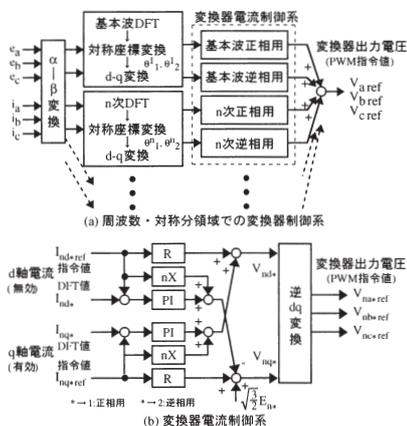


図1 実時間フーリエ変換を適用したインバータ制御系

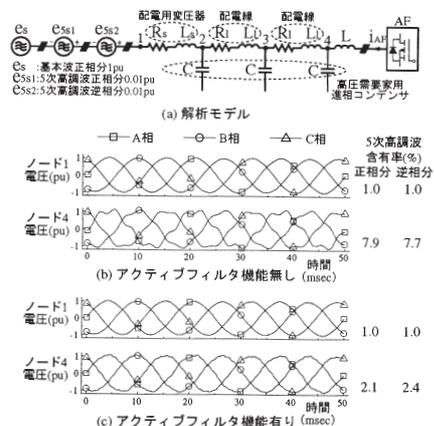


図2 提案制御方式による高調波拡大現象の抑制効果

## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

### 「コヒーレント・トンネルデバイスの研究」

古典力学においては、粒子は自分のエネルギーより高い障壁を越えることはできない。一方、量子力学では、自分のエネルギーよりも高い障壁でも越えることが確率的に許され、障壁の厚さが非常に薄くなると、粒子はかなりの割合で（通常0.01%から0.1%）通り抜けることができるようになる。これがトンネル効果と言われる純粋な量子効果である。

トンネル効果はエサキダイオードやジョセフソン素子などへ応用される。最近では走査型トンネル顕微鏡が耳目に新しいが、これもトンネル効果を応用している。トンネル効果を応用したこれまでのデバイスは、電子がトンネルするか否かを検知し、その多寡から機能性を抽出するものである。電子が障壁界面で散乱され、それまで電子が有していた情報を失っても、トンネル電流として検出するかぎり問題はなかった。しかし、トンネルする際に以前の情報を失うということはあまりにも惜しい。電子が情報を失わずに保持したままトンネルすれば、その情報を加味した、新しい機能的なデバイスが可能になる。したがって、電子が情報を保持したトンネル効果を実現することは質的に新しい応用展開が考えられ大変興味深い。電子の有する情報とは、スピンの状態とトンネル方向に垂直な面内における運動量である。スピンと運動量が保持されたままのトンネルをコヒーレント・トンネルと呼ぶことにしているが、このコヒーレント・トンネルを実現することがしたがって大変重要である。このコヒーレント・トンネル効果を利用したコヒーレント・トンネルデバイスは私が着任以来提唱しているもので、私どもの研究室では数年前からこのコヒーレント・トンネルの研究とそのデバイス化の研究を進めている。コヒーレント・トンネルデバイスが実現できれば、たとえば不揮発性高密度高速メモリなどへの応用が可能なスピントンネルデバイスや量子的な重ね合わせ状態を実現するキーデバイスなどが可能であるばかりでなく、その応用の展開は計り知れないものがある。

では、どのような場合にコヒーレント・トンネル効果が起こるのであろうか。実はこの実現が大変難しい。コヒーレント・トンネルにはトンネル障壁の界面が原子の大きさのスケールで平坦であるか、少なくとも幾何学的で周期的であることが要求される。このような障壁界面の形成というものは現在の最先端真空薄膜技術をもってしても実現はおぼつかない。ところが、実はそういう理想的なトンネル接合界面が自然界に存在していることが高温超伝導の研究から4年前に明らかになった [1]。層状結晶構造を有する遷移金属酸化物にはそうしたトンネル接合が自然に含まれているものが存在している。例えば、ビスマス系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ や巨大磁気抵抗材料と呼ばれるマンガン系酸化物強磁性体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ がそうである。いずれも10年少し前に発見され大変興味を注がれた物質である。高温超伝導体の場合には、理想的なジョセフソン接合となることが確認されている。層状構造マンガン系強磁性体の場合にはコヒーレント・スピントンネル接合が予想されている。このような機能を有する物質は最近集積機能材料と呼ばれるようになった。

私どもの研究室では $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ と $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ のマンガン系強磁性体のエキタキシャル薄膜を形成してコヒーレント・スピントンネルを確認することと、それを用いたコヒーレント・トンネルデバイスの実現へ向けて研究を進めている。これまでに $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ の品質の高いエキタキシャル薄膜が実現している。現在は $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ のエキタキシャル薄膜の成長方位制御に努力しているところである。この研究のキーテクノロジーはエキタキシャル薄膜積層化と考えられる。しかし、その装置購入費がなかなか得られず、ユーティリティなど劣悪な研究環境で苦戦を強いられているが、桂キャンパスに移転すれば少なくとも後者は解決することになっている。

#### 参考文献

- [1] M. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82, 5361 (1999) .

## 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ナノ超微粒子形成と単電子メモリデバイスへの応用」

21世紀は環境にやさしく、省エネルギーを目指すべき時代と言われています。ところが、コンピュータの消費電力は毎年増え続け省エネルギー政策に逆行しているのが現状です。コンピュータ使用の増加が避けられないとすれば、より省エネルギーの（メモリー）デバイスの開発が急務です。その候補として単電子メモリーがあり極低温で動作するものが研究されていますが、実用的には室温で動作できるものでなければ汎用性がありません。単電子メモリーデバイスの最重要課題は、損傷のない二酸化シリコン超薄膜中の超微粒子（2-3nm径）形成です。イオン注入法は超微粒子元素の注入量、深さ制御が非常に優れているので単電子メモリーの超微粒子形成法として最も期待されている方法ですが、唯一の欠点は正イオンの電荷の帯電によって誘電体が絶縁破壊によって損傷を受けることでした。石川研究室では、絶縁材料表面に帯電がほとんど生じない負イオン注入法を開発しており、この負イオン注入法を用いて二酸化シリコン超薄膜中にナノ超微粒子形成を行い、室温で動作可能な単電子メモリーデバイスを目指そうとしています。

負イオン注入では、負電荷をもつ負イオンを絶縁物に照射したとき、その表面から同じ負電荷をもつ二次電子が放出されるため、表面に電荷がほとんど溜まらず帯電しない特長があります。負イオン注入時の絶縁物の表面電位は負の数eVです。正イオン注入ではイオンの加速電圧（数十kV）まで帯電する可能性があるのに比べると、負イオン注入では桁違いに帯電電圧が低く絶縁膜の絶縁破壊も生じない優れたイオン注入法です。一方、室温で動作する単電子メモリーデバイスを実現するためには、絶縁膜中に形成した超微粒子に室温でクーロンブロッケード現象を生じさせなくてはなりません。そのためには超微粒子に一個の電子が導入されたときの帯電電位が、室温の熱エネルギーより十分高い必要があります。その条件は、超微粒子の静電容量すなわちその大きさが十分小さいことで、直径が数nm以下であることなのです。

図1に、シリコン基板上に熱酸化法で形成した50nmの厚みの二酸化シリコン膜中に、30keVに加速した銀負イオンを $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 注入し、500℃でアニールした試料の断面TEM写真を示します。銀イオンの注入深さである約25nm付近に、直径3nm程度のナノ超微粒子が整然と数多く形成されていることが分かります。このように、ナノ超微粒子を形成した薄膜の両端に電極を付け室温において電流・電圧特性を測ると、図2のようなステップ状の特性が観測されました。研究室では、さらに、イオンの種類の最適化、アニール処理の最適化、デバイス構造の最適化などを行い、室温動作が可能な単電子メモリーデバイスの開発を進めていく予定です。

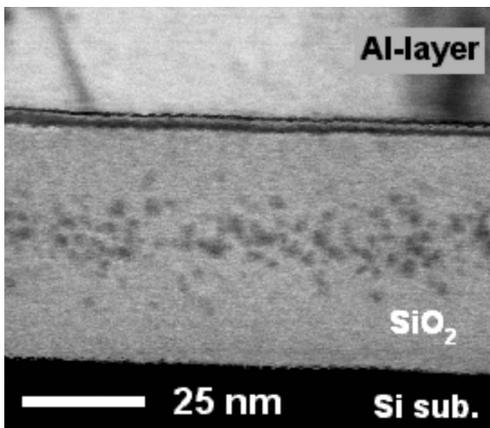


図1 ナノ超微粒子の断面TEM写真

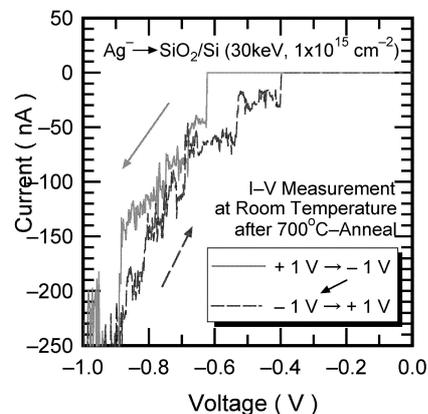


図2 銀超微粒子膜の電流・電圧特性

## 機能物性工学講座 半導体物性工学分野 (松波研究室)

## 「パワー半導体シリコンカーバイドの高品質エピタキシャル成長」

ワイドギャップ半導体シリコンカーバイド (SiC) は、その優れた物性のために、とりわけ大電力を扱うパワーデバイスの分野で、既存のシリコン (Si) 半導体を凌駕する高性能デバイスを実現できると期待されている。SiCは、化学的には同一組成でありながら結晶構造の異なる多型 (ポリタイプ) 現象を示すことでも有名である。ポリタイプ現象は、科学的には興味深いのが、SiCを電子デバイスとして用いるべく結晶成長を行う場合には、異種ポリタイプの混入が問題となる。1987年に我々は、工業的に当時唯一入手可能であった{0001}面に数度のオフ (傾き) を導入することで、異種ポリタイプの混入のない高品質エピタキシャル成長が可能であることを見出した (ステップ制御エピタキシー)。こうして得られた高品質エピタキシャル成長層を用いて作製したショットキーダイオードは、Siを大きく凌駕する高性能を示した。これにより、世界でSiCの電子デバイス応用研究が急速に進展し、現在ではSiCを用いた600V耐圧のショットキーダイオード、ならびにMES型電界効果トランジスタの市販が始まっている。

今後のSiCの発展を考える上で、SiCのエピタキシャル成長には、高品質を保ちつつ高速成長が求められる。例えば、電力系統制御に用いられるパワーデバイスには20kV以上といった高耐圧が要求され、この耐圧を実現するために250  $\mu\text{m}$ 以上もの厚さの超高純度エピタキシャル成長層が必要となる。この要請に対して本研究では、高速成長に適した縦型ホットウォール・タイプの結晶成長装置を導入した。この結晶成長装置により、60  $\mu\text{m}/\text{h}$ という高速成長、あるいは不純物密度 $10^{12}\text{cm}^{-3}$ 台という世界最高水準の高純度層の成長に成功した [1]。これらの成果は、SiCパワーデバイスの電力系統制御のような大電力制御への応用可能性を示している。より実用に近い方面からは、エピタキシャル成長層の膜厚と不純物ドーピング密度の均一性が求められており、この目的に適した横型ホットウォール・タイプの結晶成長装置も導入している。ステップ制御エピタキシー発明当時から用いてきた横型コールドウォール・タイプの結晶成長装置においては、その優れたドーピングの制御性を活かして、1層あたりの膜厚が0.2  $\mu\text{m}$ という多重pn接合を作製できた [2]。このような薄い多重pn接合を用いることで、今後、電子デバイスの特性を飛躍的に向上させる超低損失の超接合デバイス [3] への展開が期待できる。

このように、SiCのエピタキシャル成長技術は目覚ましく進展しているが、その一方で、エピタキシャル成長における諸現象の解明も、大学の重要な役割の一つである。その一例として本稿では、(0001)近傍面 (ほぼオフなし) へのエピタキシャル成長 [4] を取り上げる。SiCは、エピタキシャル成長基板を作製する際の表面研磨工程で入る研磨傷の除去が難しい。最近になって、SiCの研磨技術が向上し、原子レベルで平坦な (研磨傷の見られない) 基板が入手可能となった。こうした原子レベルで平坦な基板に、横型コールドウォール成長装置内で適切な基板前処理を施し、そのまま適切な成長条件・成長プロセスで成長を行うと、0.2度オフ基板 (ほぼオフなし) であっても、異種ポリタイプの混入の見られない、平坦な成長層が得られた。原子間力顕微鏡 (AFM) で見た6H-SiC成長表面を図に示す。表面は原子レベルで平坦であり、均一かつ周期的な単位格子高さのステップが形成されている。とりわけ6H-SiCにおいては、基板の構造欠陥によると思われる表面荒れを除いて基板のほぼ全面で、このように平坦な表面が得られた。しかも、本研究では3.5  $\mu\text{m}/\text{h}$ という実用的な成長速度においても、このように原子レベルで平坦な表面が実現できた。不純物ドーピングを行っても、同様に原子レベルで平坦な表面が得られたので、今後は電子デバイスへの展開が期待できる。

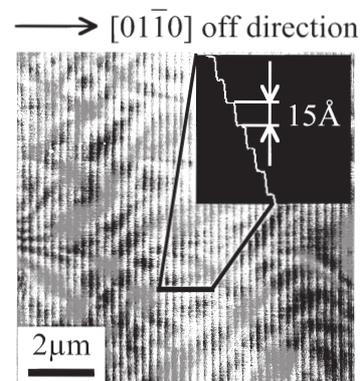


図 成長表面のステップ構造 (AFM像)

[1] K. Fujihira, T. Kimoto, and H. Matsunami: Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 1586-1588.

[2] J. Suda, S. Nakamura, M. Miura, T. Kimoto, and H. Matsunami: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) L40-L42.

[3] 三浦峰生、中村俊一、須田淳、木本恒暢、松波弘之: 平成14年秋季 第63回応用物理学会学術講演会予稿集 25a-P7-12.

[4] 中村俊一、木本恒暢、松波弘之: 平成14年春季 第49回応用物理学関連連合講演会予稿集 28a-ZR-10.

量子工学講座 光材料物性工学分野（藤田茂夫研究室）  
 「近接場光学法による窒化物半導体ナノ構造の発光機構解明」

近年の窒化物半導体の研究進展はめざましく、InGaN量子井戸を活性層とする発光ダイオード（LED）が開発され、カンデラクラスの橙、黄、緑、青、紫色のLEDが実用化されるに至っている。今後、これら発光デバイスへ期待される性能はますます大きくなって行くことが予想される。例えば、LEDの応用範囲を広めるためには効率をさらに高めることが必要であり、蛍光灯の効率が一つの大きな目標となるであろう。

われわれの研究によれば、InGaN活性層からの発光と吸収の間のエネルギーシフトが大きく、発光に関与していると思われる励起子の局在化が観測された。この局在化は、結晶中に自然形成したInリッチな組成揺らぎによって生じたナノサイズのポテンシャルトラップによるものと考えている。このような機構は、励起子やキャリアの活性層面内で生成されてから輻射（発光過程）または非輻射再結合（非発光・発熱過程）するまでの移動距離（拡散距離）を非常に小さくしているものと考えられるため、励起子が貫通転移等の非輻射中心へ捕獲される確率を抑制するように働く。しかし過剰なIn組成不均一は新たな非輻射再結合中心を形成する可能性があり、実際、青緑色より長波長域にて外部量子効率の低下が問題となっている。

このように、励起子再結合の空間・時間分解発光ダイナミクス（図1にその概念図を示す）によってナノスケピックなレベルで発光に関与する局在中心や非輻射再結合中心を同定し、試料の微細構造と発光特性との相関を明らかにすることは、LEDの更なる高量子効率化の糸口を解明するものと期待される。現在までに、InGaN系量子井戸構造の空間マッピング発光測定に関して、カソードルミネッセンス法や近接場光学顕微鏡（SNOM）を用いた顕微分光法による報告が数例ある。これらの報告では、数100nm程度のIn組成揺らぎによって生じた発光波長の不均一を観察しているが、この値は、キャリア・励起子の拡散長に起因した分解能の限界によるものと考えられる。これまでのSNOMによる測定で多くの場合に問題であったのは、光励起はファイバー先端に開けた微小開口から行いフォトルミネッセンス（PL）測定はファーフィールドで行うために、微小領域を光励起しても拡散によって広がった空間領域からの発光を測定してしまう点であった。これに対して光励起とPLプロービングを同一の微小開口 [イルミネーション-コレクションモード (ILモード)] で行えば、拡散長に律速されず、微小開口を小さくすればいくらかでも小さい空間からの発光を観測することができる。しかしながら、高スループットのファイバープローブを設計・加工することが困難なために、特に可視短波長から紫外域では非常に困難な技術であった。

当研究室では、近年、関連企業との共同研究によって短波長域のSNOM技術を開発し、世界で初めてILモードでInGaN量子構造の空間分解PL測定（空間分解能：100nm）[Jpn. J. Appl. Phys. 40, 110, (2000)] に成功した。またごく最近、空間分解能：30nmの定常（CW）PL測定と、空間分解能：300nmでの時間分解PL測定を行い、キャリア・励起子の再結合の空間・時間ダイナミクスに関してより詳細な知見 [Appl. Phys. Lett. (2002) in press] を得るに至っている。図2に測定の一例を示す。局在に伴う発光強度の分布と、それを裏付ける発光再結合寿命のラインスキャン結果が得られている。

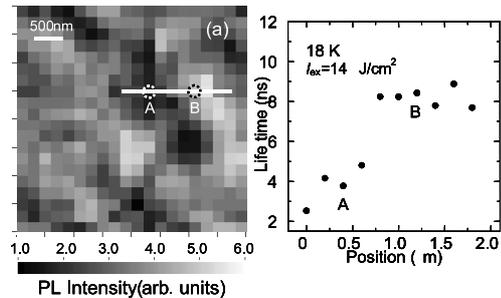
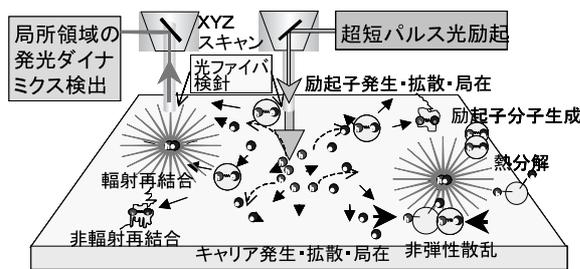


図1 空間・時間・波長分解スペクトロスコピーの概念図 図2 (a) SNOM-PLマッピングと (b) 近接場時間分解PLによる発光寿命

## クラスターイオン工学部門

### 「液体多原子イオンビームの生成と照射効果の研究」

#### 1. 研究の背景

近年のエレクトロニクスデバイスの高集積化・超微細化に伴い、それを構成する材料の表面・界面の特性はデバイスの特性に大きな影響を及ぼしています。このような超微細領域の表面・界面の特性を制御するナノプロセス技術として、イオンビーム技術は様々な工学応用分野で用いられています。その中で、種々の材料のイオンを生成する場合、これまでは主に固体材料や気体材料がイオン発生源のソース材料として用いられており、液体材料は検討されていませんでした。液体材料をソース材料として利用する方法は、固体材料と違って流体であるため連続的に供給でき、さらに流量制御ができる特徴があります。また、液体物質には、有機化合物のように、多種・多様の構造や化学的性質を有した物質が存在します。したがって、種々の異なる化学的性質をもつ液体物質を用いることによって、例えば、固体表面の親・疎水性や潤滑性などの制御や付加・置換反応による表面改質を行うことができます。さらに、多原子で構成された液体分子イオンを加速・照射することによって、固体表面衝突時に液体特有の流動性やイオンの運動エネルギーを活用した表面平坦化などの新しい表面加工法が期待できます。当研究室では、種々の化学的性質を持った液体有機化合物を用いて、液体多原子イオンビームの生成およびイオン照射による固体表面改質をナノレベルで行い、電子・光学デバイスへの応用を行うことを目的として研究を行っています。

#### 2. 研究内容

アルコール系やパラフィン系の液体多原子イオンビーム生成装置の開発を行い、それぞれのイオンビーム特性を明らかにしました。図1は、エタノールを電子衝撃によってイオン化して引き出した後、直交電磁界 (ExB) によって質量分離したイオンビームの強度を示します。水酸基やアルキル基を持ったイオンビームが得られているのが分かります。一方、パラフィン系の液体材料としてオクタンを用いた場合のイオンビームの質量分離特性を図2に示します。種々のアルキル基を持ったイオンビームが得られているのが分かります。これらの質量分離した種々のイオンビームをシリコンやポリカーボネートなどの基板表面に照射し、照射表面の親水性や疎水性を調べた結果、イオン照射によって形成される欠陥や水酸基の増大によって表面の親水性が増大し、アルキル基の増大によって疎水性が増大することが分かりました。

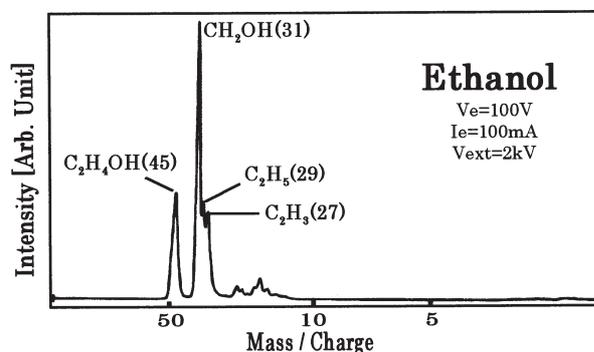


図1 エタノールイオンの質量分離特性

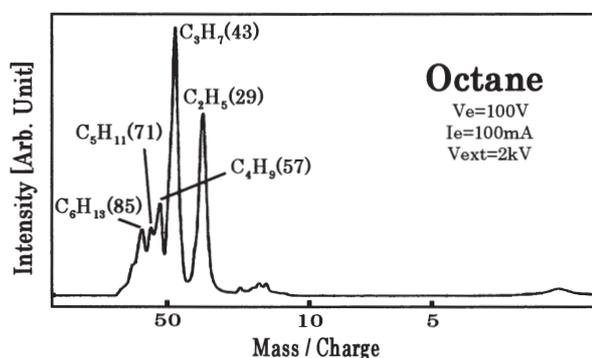


図2 オクタンイオンの質量分離特性

知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研究室)

「装着型アクティブ・ビジョンセンサによる3次元注視対象の検出」

1. 背景

本研究では、視線測定装置とコンピュータ制御可能な2台の首振りカメラで構成される装着型アクティブ・ビジョンセンサを開発した。このセンサを使えば、システムが装着者と視点を共有することができ、装着者が注視している対象の3次元位置や形状を認識することができる【1】。

2. 研究成果

開発したセンサを図1、図2に示す。視線測定装置としては、非接触型で、瞳孔/角膜反射法を実装したNac製EMR-8を用い、右眼の視線情報を獲得する。カメラは、コンピュータ制御によって、パン(水平回転角度 $\pm 30^\circ$ )、チルト(垂直回転角度 $\pm 15^\circ$ )方向に、カメラの撮像系全体を物理的に回転することができる。

視線測定装置で検出された、装着者の右眼の視線情報と2台のカメラでそれぞれ撮影された画像が計算機に入力される(図2)。装着者の右眼の視線情報は、右カメラで撮影した画像に重ね書きされるようになっている。

この重ね書きを実現するために、EMR-8には、右眼球の回転中心を原点とする視線角度座標系と右カメラのカメラ座標系とを、同一平面上の点を用いてキャリブレーションするアルゴリズムが提供されている。しかし、このアルゴリズムでは、「装着者から校正に用いる点が存在する面までの距離はそれほど遠くなく、かつ、装着者が見ている点は、常に、その面上に存在する」ことを前提としている。このため、見ている対象までの距離が変化するような日常生活環境下では、画像上に重ね書きされる点は、装着者が実際に見ている点から大きくずれるという問題が生じる。

この問題を解決するために、本研究では、2台のカメラによってステレオ視を実現させることによって、見ている点までの奥行きを算出し、その奥行きに応じて、重ね書きする点を補正する自動キャリブレーションアルゴリズムを考案した。この補正により、見ている点の奥行きが変わるような現実的な環境下でも、正確にその視線情報および注視点の3次元位置を検出することが可能になった。

装着者からの奥行きが1.7mである平面上の点を用いて視線角度座標系と右カメラのカメラ座標系とを校正し、次に、装着者から平面までの奥行きを1.7mから5.7mまで0.5mずつ順に移動させ、提案手法による補正を行わない場合と行った場合とで視線検出精度を評価した(図3)。この結果、提案手法による補正の妥当性とその有効性が確認されている。

また、このセンサによって得られる装着者の視線情報から、その人が注視しているかどうかを計算機が判断し、3次元シーン中の注視している領域を平面凸多角形として抽出し、その3次元情報を獲得する手法を考案した。

参考文献

【1】 杉本晃宏、中山章弘、松山隆司：視線情報とステレオ視を用いた注視領域の抽出、ヒューマンインタフェースシンポジウム、pp.441-444, 2001.9

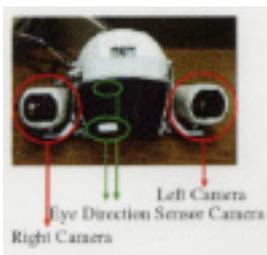


図1 センサのヘッド部

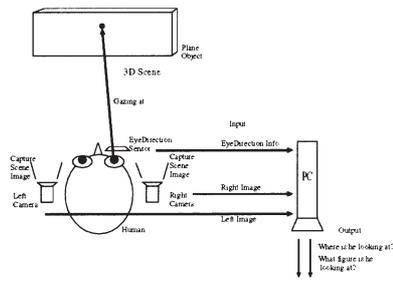


図2 装着型アクティブ・ビジョンセンサの構成

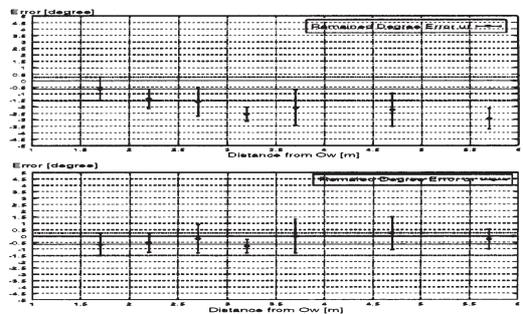


図3 検出された注視点の誤差 (上) 補正しない場合 (下) 補正した場合 横軸：奥行き距離 縦軸：誤差

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室） 「マルチホップ接続によるCDMAセルラシステムの特性改善」

近年、情報のマルチメディア化に伴い無線通信の伝送速度は飛躍的に伸びている。実用化が始まった第3世代移動通信システムIMT-2000の無線伝送方式W-CDMAでは、従来の約40倍の速度を実現しており、今後さらなる高速化が計画されている。一方、速度の向上は送信電力の増大を伴うが、端末の最大送信電力には限りがある。従って、より高速の通信を実現するには、現在500m～1kmといわれる基地局の間隔をより短くする必要がある。また、現在のセルラシステムにおいては端末と基地局との間は直接接続を行うことが原則である。従って、端末と基地局の間に建物などの障害物がある場合や地下鉄構内など、基地局からの電波が通じない場所では通信が困難となる。

本研究では、既存のセルラシステムが持つこれらの問題を根本的に解決する一つ的手段として、端末間のマルチホップ接続（今回は2ホップ）通信を提案している。基地局との間の伝搬損が極めて大きな端末は、近くの別の端末に中継を依頼し、その中継端末を介して基地局と通信を行うことによって、総送信電力の低減が見込める。この中継に用いる周波数としては、利用効率の観点から既に使用している周波数帯を利用することが望ましい。しかし、無計画な周波数再利用は既存の通信に深刻な干渉を与える可能性がある。また、CDMAセルラシステムにおいては干渉電力がユーザ容量に反比例する特性を持つため、送信電力を低減できたとしても干渉の増加によってユーザ容量が減少する可能性があり、これを避ける必要がある。

図1のように、基地局と端末間に2ホップの中継接続を行った場合、セル内で基地局が受ける干渉は端末と中継端末間の通信の分だけ増加してしまう。しかし、他のセルの基地局に与える干渉電力は適切な経路を選択することで減少させることが可能である。提案方式においては、端末から基地局に至る経路として、中継端末を含む各区間の送信電力の総和が最小となる経路を選択することにより、隣接セルへの干渉を低減できること、そしてその結果、セル内からの干渉電力とセル外からの干渉電力の和、すなわち総干渉電力を2割程度削減できることを確認した。この環境下における上りリンクでの送信電力を図2に示す。端末の送信電力は直接接続時に比べて10分の1以下になることが確認された。現在、さらに中継段数を増やした場合等について研究を進めている。

（参考文献）

山本高至、村田 英一、吉田 進、他、“移動局間中継導入によるDS-CDMAセルラシステムの容量および送信電力に関する検討,” 信学技報、RCS2002-20, pp. 15-20, Apr. 2002.

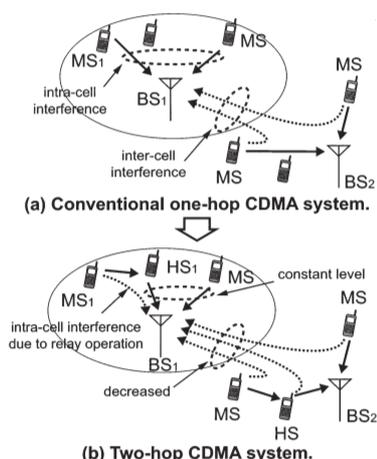


図1 上りリンク干渉電力の変化

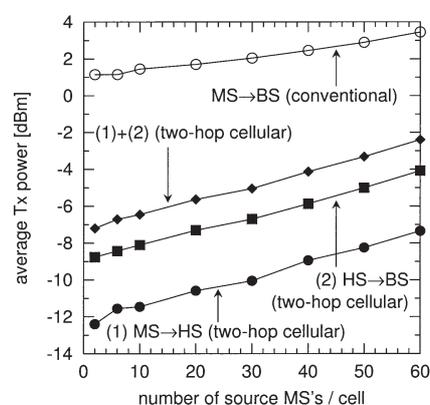


図2 上りリンク平均送信電力特性  
MS：移動機、HS：中継端末、BS：基地局

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）  
 「C言語を用いたハードウェアソフトウェア協調設計」

集積回路の集積度は、2年3倍という「ムーアの法則」にしたがって、上昇してきている。すでに、1つのLSI上に1億個ものトランジスタを集積したLSIも出現している。このような大量のトランジスタを効率よく設計するためには、計算機が必須であり、計算機の発達がLSIの発展を生み、さらにそのLSIが計算機を発達させるという好循環を産み出している。現在の計算機とCADを用いれば、世界初のプロセッサである4004を設計するのは、学生実験程度の簡単な演習となる。

計算機の処理能力の発達により、順調にその設計効率をあげているようにも見えるが、設計生産性は2年3倍には上がっておらず、設計能力と、生産能力の差は年々開く一方である。デジタル回路の設計においては、初期のトランジスタレベルの設計から、ゲートレベル、ハードウェア記述言語を用いたRTL (Register Transfer Level) での設計と、その抽象度を上げてきた。RTL設計では、設計者はレジスタと呼ばれる記憶素子をクロック毎にどのように動作させるかを言語により記述し、レジスタ間の論理は論理合成により自動的に回路を得る。現在の大規模なLSIでは、このRTLの記述量も、もはや人間の手におえない程度まで肥大化しており、更なる設計の抽象化が求められている。

設計の抽象度をあげるために、ソフトウェアの設計に用いられているC言語をハードウェアの設計に利用しようとする動きが近年活発である。我々の研究室では、SystemCと呼ばれるC++のクラスライブラリとして実装された「システムレベル記述言語」を実際のLSIの設計に応用するための研究を行っている。手始めとして、SystemCの動作レベルの記述からの回路合成に、シャープ株式会社の開発した「Bach処理系」を利用した。動作レベルとは、RTLと異なり、クロックの概念のない記述であり、動作合成では、その記述の各処理をどのクロックサイクルで行うか、各処理をどのように演算器に対応させるか等を行う。提案手法は、SystemCにより、ハードウェアとソフトウェアを同じ言語処理系で記述できるために、検証が非常に容易である。図1に、提案手法の設計フローを示す。

携帯機器向けの動画圧縮規格として、近年注目を浴びているMPEG-4の設計を提案手法を用いて行った。WS、PC上のMPEG-4のソフトウェアのうち、ボトルネックとなっている部分を専用ハードウェアに置き換えることにより、スペックを満たすシステムの設計を行った。MPEG-4の処理において、もっとも処理量が多いのが、DCT（離散コサイン変換）である、このDCTのC言語によるソフトウェア記述を、ハードウェア向きに変更し、Bachにより動作合成を行った。図2にSystemCによるDCTの記述例を示す。この一連の設計をわずか1人月により行うことができ、提案手法の有効性を示すことができた。

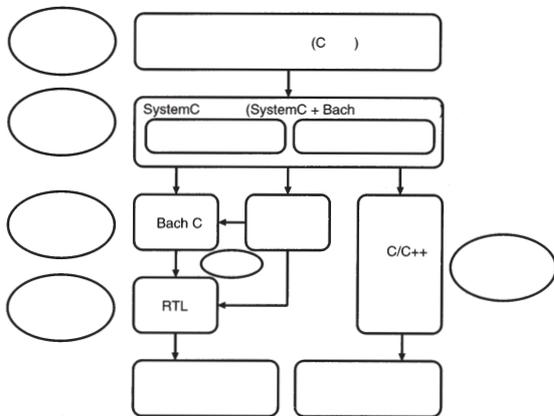


図1 提案する設計フロー

```
void dct::entry(){
    sc_int<18> tmp0, tmp1, tmp2, tmp3;
    sc_int<18> tmp4, tmp5, tmp6, tmp7;
    sc_int<18> tmp10, tmp11, tmp12, tmp13;
    sc_uint<6> ctr; sc_uint<8> i; sc_int<16> data[64];
    while(true){ /** データ転送 **/
        for(i = 0; i < 64; i++){
            data[i] = receive(dct_in);
        }
        /** DCT処理 (C記述を再利用) **/
        for (ctr = 0; ctr < 8; ctr++) {
            tmp0 = data[0+8*ctr] + data[7+8*ctr];
            tmp7 = data[0+8*ctr] - data[7+8*ctr];
            tmp1 = data[1+8*ctr] + data[6+8*ctr];
            tmp6 = data[1+8*ctr] - data[6+8*ctr];
            tmp2 = data[2+8*ctr] + data[5+8*ctr];
            tmp5 = data[2+8*ctr] - data[5+8*ctr];
            tmp3 = data[3+8*ctr] + data[4+8*ctr];
            tmp4 = data[3+8*ctr] - data[4+8*ctr];
            ... <中略> ...
        }
        for(i = 0; i < 64; i++){
            send(dct_out, (TYPE)data[i]);
        }
    }
}
```

図2 DCTモジュールのSystemC記述例

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室） 「生体情報シミュレーション」

### 1. 研究の背景

当研究室では、今年度より生体情報のシミュレーションに関する研究を行っている。近年、細胞内部の微細構造であるイオンチャネルやポンプ等の機能が急速に解明されており、従来定性的にしか把握されていなかったそれらの機能が定量的にモデル化されるようになってきている。当研究室では、心筋細胞の精密な数理モデルの研究を行っている医学部生理学教室と共同で、生体組織、特に心臓の機能をモデル化してシミュレートする研究を進めている。

生体組織のシミュレーションに関する研究は、世界的にも緒についたばかりであり、アメリカ、ニュージーランドなどで全身の臓器に関するシミュレーションのプロジェクトが計画されはじめたところである。特にアメリカのプロジェクトはポストゲノム計画として、フィジオーム（Physiome）プロジェクトと称して大規模に研究が進められようとしている。

このような生体機能のシミュレーションは、機能や構造の最適性などが理解されていない生体組織の機能を解明するツールとなるばかりでなく、薬物に対する反応を評価できるため、創薬支援などに応用できると期待されている。また、医師が治療方針を決定する際に、投薬の影響をシミュレートできるため、患者一人一人に合わせた投薬計画をたてることが可能であり、オーダーメイド医療の強力なツールとなることが期待されている。

### 2. 心臓シミュレーション

当研究室では、心臓を対象として、臓器全体の運動機能を再現するシミュレーションモデルの構築を行っている。

心筋細胞を含む一般の細胞には、細胞膜上に各種のイオンチャネルやポンプと呼ばれる構造があり、Ca Na Kイオンは、それぞれの濃度とATP濃度などに従って、これらの構造を通じて細胞内外でやり取りされ、細胞の状態を変化させている。また、心筋細胞などに特有の構造として筋小包体と呼ばれる、Caイオンを蓄えておく構造や、アクチンフィラメント、ミオシンフィラメントと呼ばれる、収縮力を発生させる構造が存在する。これら単一細胞レベルの構造は、それぞれ特有の微分方程式でモデル化されており、現在利用している、医学部生理学教室で構築している京都モデルと呼ばれる心筋細胞モデルでは独立変数および方程式の数がそれぞれ50個程度になっている。

心臓という臓器全体をモデル化する場合、この心筋細胞を臓器一つ分並べれば良いことになる。しかしながら、心筋細胞一つの収縮率が15%程度であるのに対して、左心室内腔の体積変化率は70%にも及び、単純に心筋細胞を並べただけでは心臓の機能が再現できないことがわかる。実際には、心筋はシート状の構造をしており、シート間の結合は若干ゆるくなっていると考えられており、さらに、心臓の内壁部のシートと外壁部のシートでは心筋細胞の配向方向が異なることがわかっている。このような構造によって、心臓全体の収縮運動は、全体として回転運動を伴いねじれるように収縮しているといわれている。しかしながら、このような運動を実現する心筋細胞の配向構造はまだ完全には解明されておらず、本研究では、MRIによる断層像（図1、2）や顕微鏡を用いた組織学的研究によって明らかにされている心筋細胞のらせん配向情報などを用いて実際の運動を再現する心臓モデルの構築を行っている（図3）。



図1 胸部MRI断層像

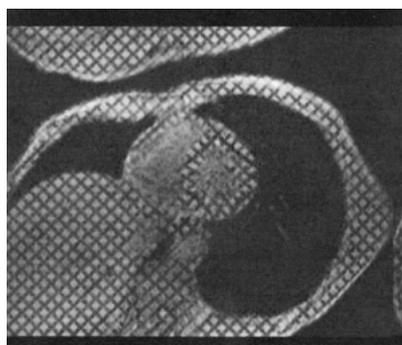


図2 MRI tagging画像



図3 心臓の有限要素モデル

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）  
 「キャラクタエージェントを用いたネットワークコミュニティの実験」

パソコンやネットワークの利用が日常的な情報化社会では、社会に開かれたオープンネットワークであるインターネットを利用して人間同士が情報交換を行う「ネットワークコミュニティ」の形成が注目されている。当研究室では、「エネルギー・環境問題」に関する社会的啓蒙のため、誰もが自由にアクセスでき相互に意見交換できるWebサイトを目標に、「シンビオ社会研究会ホームページ」の構成を進め、情報提供を行っているが、さらに、様々な人たちが参加しやすく活発に意見交換できる場の提供を検討している。本稿では、ネットワークコミュニティの活性化のために、「社会的エージェント」を導入したネットワークコミュニティ実験を紹介する。

1. 社会的エージェント

社会的エージェントは、ある種の社会的存在となるシステムであり、単なる知的システムとしてだけでなく、感情的要素や、性格、心理学、社会学を含めた総合的な観点から研究され、インタフェースへの導入などが検討されている。本研究では、社会的エージェントの実際の形態として「キャラクタエージェント」を選択し、人間のもつ社会的知性と社会的エージェントのインタラクションによって生じる効果をねらい、ネットワークコミュニティに社会的エージェントを導入した。コミュニティ内でのキャラクタエージェントの利用方法は、図1に示すように、(1) ユーザ自身の代理として発言する「アバタ」、(2) ユーザに自動的に働きかける「ナビゲータ」とした。

2. ネットワークコミュニティ実験

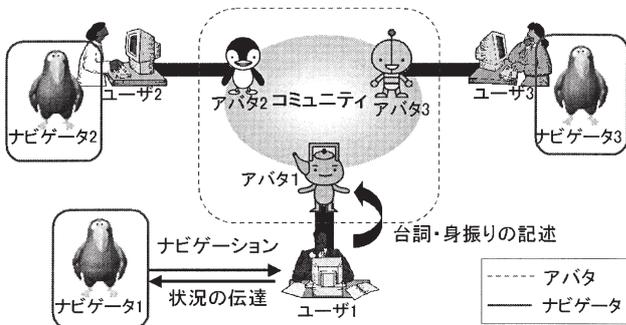


図1 提案するネットワークコミュニティの概要

「アバタ」と「ナビゲータ」を導入し、意見交換ができる掲示板システム「シンビオコミュニティシステム」を開発し、被験者実験を行った。年齢・性別・職業・居住地の異なる16人の被験者に2週間話し合ってもらい、アンケートに回答してもらった結果を統計分析すると、以下の点が示された。

- ・アバタには「親和性」、ナビゲータには「有用性」の印象要因が大きい(図2)
- ・ネットワークコミュニティへの肯定的評価は、ナビゲータの有用性とは相関が高いが、アバタの親和性とは相関が低い
- ・「エネルギー・環境問題」のように、意見が広がりにくいテーマの場合、ネットワークコミュニティ全体としての「ナビゲーション」のあり方の検討が重要である

ネットワークコミュニティの活性化のために社会的エージェントを利用し、コミュニケーションの形態やコミュニティの形成への考察が深められ、今後の情報化社会における新たなコミュニティ生成のための応用が期待される。

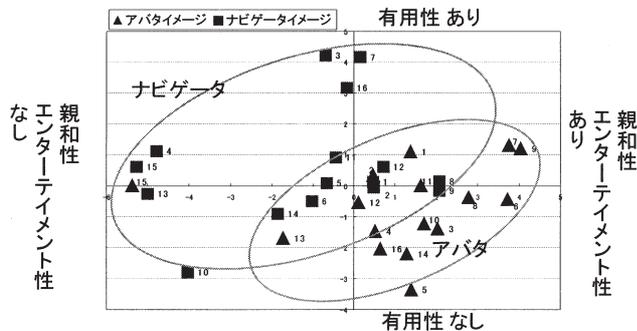


図2 被験者実験の分析結果 (SD法による主成分分析)

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室） 「超流動ヘリウム冷却超電導マグネットの安定性」

化石燃料に代わる将来のエネルギー源として期待されている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し、超電導マグネットの利用が不可欠である。大型超電導マグネットは通常、液体ヘリウム（He I：常流動；常圧で沸点4.2K）を冷媒とするが、これをさらに2.17K以下まで冷却すると相転移を起こし超流動ヘリウム（He II）と呼ばれる量子液体となる。超流動ヘリウムは、粘性がないのでコイルの隅々まで浸透し、熱を強制的に排出できるなど優れた冷却特性を有し、冷媒温度が低いことによる臨界電流密度の向上と相俟って超電導マグネットの小型化・高磁場化を実現する冷却材として期待されている。

本研究では、超流動ヘリウム冷却超電導マグネットにおける巻線の機械的不安定に起因する局所的擾乱に対する安定性評価基準を確立するため、コイル巻き線の局所的加熱による常電導転移が拡大伝播するか否かを指標として、超電導体の冷却安定性の外部磁場、ヘリウム温度、およびヒータ入力に対する依存性を評価することを目標とする。

設計製作した大型加圧超流動実験用クライオスタット（図1）は、内径45cm、高さ157cm、液体ヘリウム容量150Lで、容器内部はFRP製のλプレートによって仕切られ、上部が自由液面を持つHe I槽、下部が自由液面を持たないHe II槽に分かれている。He II槽内には、外部磁場印加超電導マグネット（内径20cm、最大磁場8T）が設置され、その中に試験体が固定される（図2）。

本装置の完成検査を兼ねた最初の実験では、直径0.86mmのNbTi/Cu複合多芯ホルマル線（銅比6.5）をSUS製ボビンに巻きつけた試験体を用いた。コイル中央部の巻線上には、ヒータと電位タップ及び小型測温素子を設けた（図2）。実験は、外部磁界印加用マグネットに通電して一定磁場を与え、試験体に定電流を流した後、ヒータによりパルス状熱入力（パルス巾100ms）を与えて常電導の芽を作り、この常電導部で通電電流によるジュール熱が発生、熱の伝播と共に常電導部が伝播する過程を電位タップにより観測した。そして、熱入力遮断後に、超電導に回復するか、あるいは常電導部が残るかの閾値となる通電電流を限界電流として、試験体の安定性を考察した。図3は、様々な液温、磁場に対して求めた限界電流である。なお、塗りつぶし記号は、試験体の臨界電流を示している。常流動ヘリウム冷却から超流動ヘリウム冷却に移行することで、超電導線の安定性は大きく改善されることがわかった。今後は、実際の核融合装置に使用されるような大型導体を含む種々の試験体を用いて、常流動冷却と超流動冷却を対比して冷却安定性評価を行い、超流動冷却の有効性を定量的に明らかにしたいと考えている。

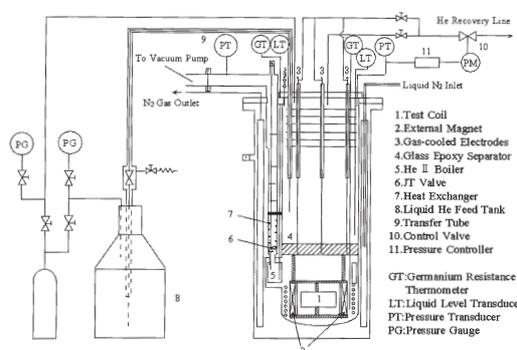


図1 超流動ヘリウム冷却超伝導マグネット試験装置

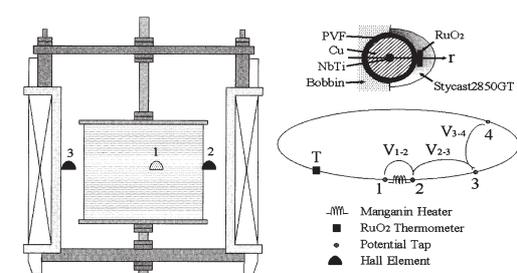


図2 試験体コイル、外部マグネットと測定点

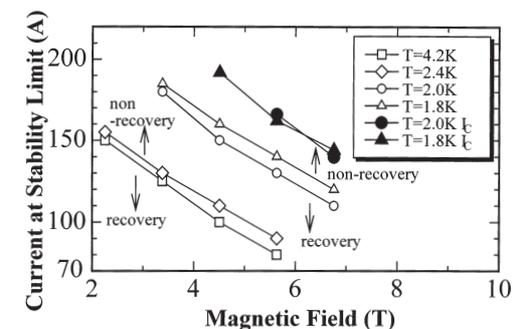


図3 安定限界電流の磁場及び液温依存性

エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野  
「プラズマ・イオン注入の粒子シミュレーション」

構造材料の表面処理は、古くは、メッキに始まり、今日でも主流である窒化・浸炭処理が開発され、表面機能向上を目指して、熱化学反応としてCVDによるセラミック膜が登場し、低温化の要求が高まり物理反応としてPVDが開発されてきました。その後、PVDで形成された膜の密着性を高める方法として、高エネルギーのイオンを打ち込むイオン注入とPVDを併用した手法が開発されています。しかし、イオン注入ではイオンビームの指向性のため、立体形状へのイオン注入は困難でした。

プラズマ・イオン注入 (Plasma Immersion Ion Implantation:PIII) は、高密度プラズマ中に設置した加工対象材料にパルス的に負高電圧を印加することで、材料周囲に形成されるプラズマシースの電界によりイオンを加速して基材に注入する技術です。イオン加速に、プラズマシースを用いるため、イオンビーム注入に比較して、平面形状以外へのイオン注入が可能とされていますが、これまでは利用出来るプラズマ密度の制約 ( $\sim 10^{10}\text{cm}^{-3}$ ) から準平面的なもの以外への適用は困難とされていました。一方、核融合のプラズマ加熱装置の一つである中性粒子入射装置の開発を通して、高密度大容積のプラズマ生成技術 ( $\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ) が得られており、この技術の利用による、より複雑な形状へのプラズマ・イオン注入の適用と産業応用の研究が、当研究所とイオン工研・産総研などとの共同で始められようとしています。ここでは、超潤滑性を目標として、図1に示すようなCUP形状内面へのダイヤモンドライクカーボン (DLC) 膜の生成を目標としています。

本研究は、このような応用のために必要となるプラズマ密度や印加電圧波形形状などの技術的課題を明確にするために行っているものです。

定常状態でのシースの厚さは、チャイルド・ラングミュアの式で与えられますが、 $10^{12}\text{cm}^{-3}$ のプラズマでも $\sim 77\text{mm}$ と厚く、また、シースを通してのイオン供給が少ないことから、PIIIでは、電圧をパルス的に印加して、シース形成の過渡状態を持ちることから、粒子シミュレーション手法を用いてこの過渡現象を追いかけています。図2は、プラズマ密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$ 、印加電圧  $-50\text{kV}$  の際のイオン衝突量の時間発展を横軸を基材表面に沿った座標に取って表したものです。イオンプラズマ振動周期 ( $\sim 67\text{ns}$ ) の数倍間では内面でもほぼ均一に入射されていますが、これ以後の時間ではシースの成長で内面への入射が不均一になることから、プラズマ密度を増加させると電圧パルス形状への要求が厳しくなることが明らかになりました。

今後は、イオンエネルギーの分布などを考慮した打ち込み量・深さなどの関係を求めて、最適なパラメータを探すとともに、実験との比較検討を行っていく計画です。

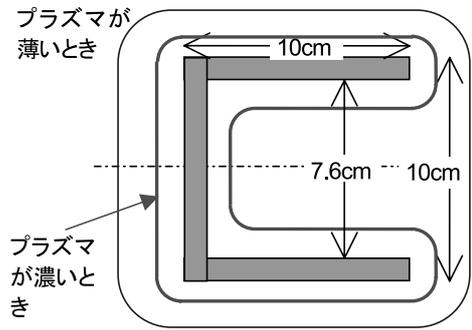


図1 プラズマ密度とシース形状

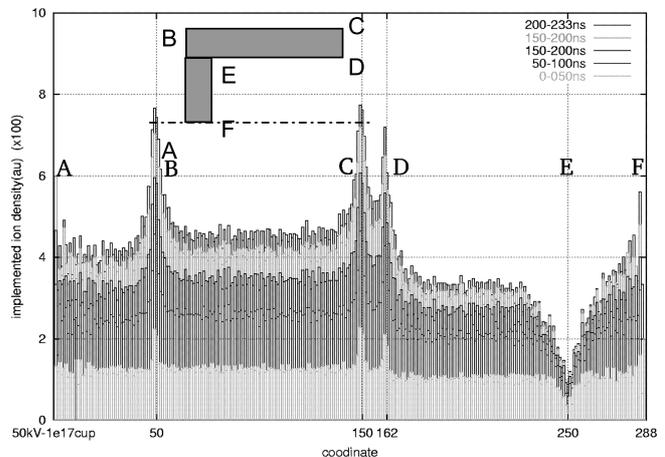


図2 イオン注入量の時間発展

## 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） 「トーラスプラズマのトロイダル電流に関する研究」

当研究室ではエネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターで行われているヘリオトロンJ装置を用いたトーラス磁場による高温プラズマ閉じ込めに対する実験・解析・理論的研究に主眼を置いている。プラズマ内を流れるトロイダル電流（トロイダル方向はトーラスに沿う方向）は、例えばトカマク型装置では閉じ込め磁場を形成するために必須であり、ヘリカル系装置では磁場配位変化を引き起こし閉じ込め特性を変化させる場合がある等の理由から、様々な閉じ込め方式の下で研究されている。トロイダル電流の発生機構は、トカマクでの外部からの印加磁束変化によるもの他に、入射ビーム或いは高周波に起因するもの、電子が磁場の弱い領域に‘捕捉’されることが原因で流れるブートストラップ電流等がある。ヘリオトロンJ装置はヘリカル系装置のひとつであり、プラズマ閉じ込め磁場が外部コイルによる磁場のみに形成され、閉じ込め磁場形成にトロイダル電流を利用するわけではないが、ブートストラップ電流は自発的に流れる可能性がある。磁場配位の最適化によってこの電流を抑制することがヘリオトロンJ装置の基本概念のひとつでもある。この研究ではヘリオトロンJ装置におけるトロイダル電流の発生機構の解明とその制御を研究目的にしている。

トロイダル電流計測はロゴスキーコイルによって行う。ヘリオトロンJ磁場を構成する6組のコイルの中、内部垂直磁場コイル電流を制御しトロイダル方向の磁場成分変化を制御した場合、図1のようにトロイダル電流方向が逆転する。プラズマ生成は70GHz、400kWの電子サイクロトロン加熱を用い、入射高周波はトロイダル電流を生成しないトロイダル方向に対し垂直に入射したものである。閉じ込め磁場を逆転した場合には電流方向が完全に逆転していることも確かめられた。これらの性質はブートストラップ電流の性質と同一であり、理論予測からも同様の傾向が示されている。

電子サイクロトロン加熱（ECH）ビームの入射方向を変化させるとECH高周波によって加速される電子のモーメントによってトロイダル電流が誘起される。プラズマの電子密度が低い条件で入射角に対するトロイダル電流の変化は図2のように、垂直入射を境にして方向を逆転する。電子密度が高くなるとブートストラップ電流の寄与の方が大きくなり、方向逆転は現れない。ただし、電流の絶対値変化は高密度領域でのECHビームによる電流駆動の可能性を示している。ただし、これらの実験で得られた電流値はトカマク型装置でのECHによる駆動電流値と比較すると小さいことが確認された。トロイダル電流とプラズマ閉じ込めとの関係については今後の研究課題の一つである。

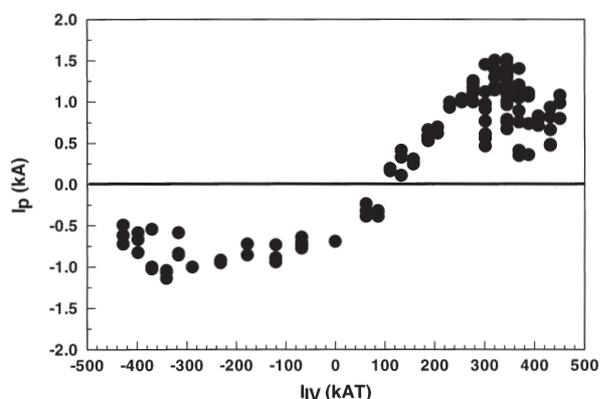


図1 内部垂直磁場電流値とトロイダル電流

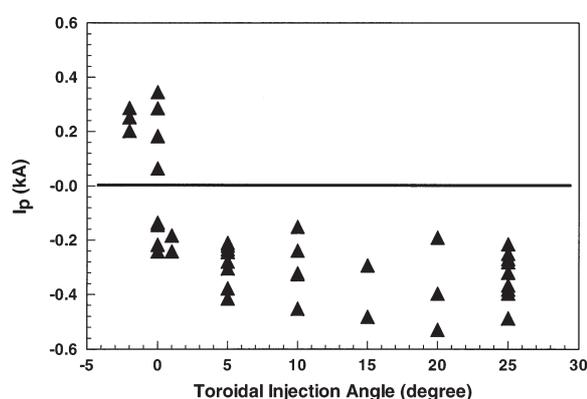


図2 ECHビーム入射角度とトロイダル電流  
(0° はトーラス軸に対し垂直)

## 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） 「大気重力波の数値シミュレーション」

当研究室では、電波・光・音波を利用して、地表面から高度100km以上に至る、幅広い領域の大気現象を観測している。高度80-100kmの大気中では、オゾンや酸素原子等を介した反応に伴う発光現象「大気光」が見られる。近年発達が著しいCCD素子を用い、魚眼レンズと狭帯域フィルターを通して観測することで、大気光のイメージングが行える。その結果分かってきたことは、この高度領域の大気は、大気重力波という、浮力を復元力とする波動に満ちており、大振幅化した波長数10km程度の重力波が、グローバルな大気の流れや温度構造をも左右するということである。これまでの観測から、重力波は熱帯から極域まで幅広く見られることが知られている。

この大気重力波の発生、伝播、作用を究明するため、当研究室では数値シミュレーションを用いた研究を行っている。重力波の発生源として重要なものの一つに、積乱雲がある。積乱雲は、例えば夏の激しいわか雨を引き起こすことで知られるが、積乱雲に伴う激しい鉛直流や凝結熱は大気成層の平衡を乱し、非平衡分が重力波として水平・鉛直に伝播する。大気密度は高度と共に指数関数的に減少するため（高度100kmで地表の数100万分の1である）、重力波の振幅は逆に指数関数的に増加する（単純計算では約1000倍になる）。大振幅化した波動は不安定化して碎ける。碎波の身近な例としては、海岸に押し寄せて碎ける白波を挙げることが出来よう。碎波が起ると、波動が輸送してきたエネルギーや運動量が解放され、大気の温度と流れを変える役割を果たす。

上記の一連の過程を数値シミュレーションで研究するため、シビアストーム等を研究に用いられる「メソモデル」の鉛直カバー範囲を大幅に伸ばし、世界初の、地表面から高度100kmまでをカバーする3次元雲分解シミュレーションを行った。「雲分解」とは、グリッド間隔1km前後の高分解能計算により、モデルの中で雲（今の場合積乱雲）を陽に再現する計算のことをさす。なお、天気予報で用いられる全球・領域モデルのグリッド間隔は数10km以上であり、雲は陽に分解されないため、各グリッド内で発生するであろう積乱雲の統計的な性質を何らかの方式で予測する方法がとられている。

シミュレーションの結果、大気光観測で良く見られる間隔10km前後の縞模様「リップル」の再現に成功し（図を参照）、そのメカニズムを明らかにした。今後、観測と連携を取りつつ、重力波の励起メカニズムや伝播特性、そして大気光に見られる様々なパターンを解き明かしていくつもりである。

参考文献：Horinouchi, T., T. Nakamura, and J. Kosaka, Convectively generated mesoscale gravity waves simulated throughout the middle atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 2002.

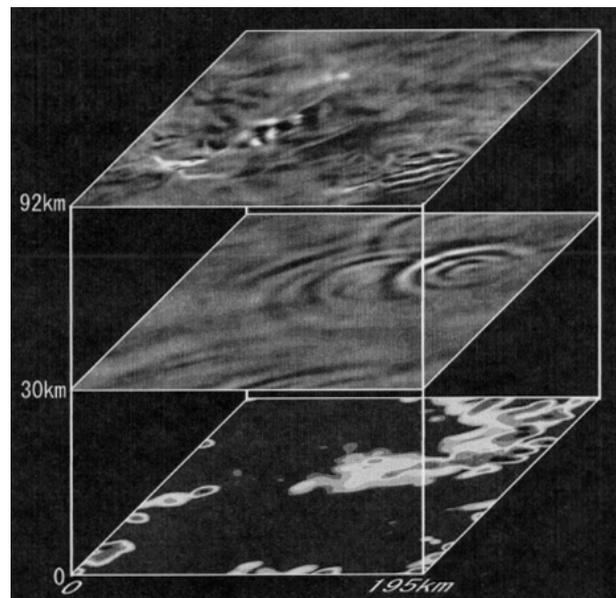


図 数値シミュレーション結果のスナップショット。地表における降水と、高度30, 90kmにおける鉛直風速。値のスケールは両高度で異なり、30kmにおける鉛直風擾乱の振幅は1m/s以下であるのに対し、90kmでは数10m/sに達する。高度30kmでは重力波が波紋状に広がっている。90kmにおける右下隅の縞模様はより波長の大きい重力波の碎波による擾乱「リップル」である。

## 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） 「電気推進エンジンによる地球磁気圏の電磁環境の擾乱」

本研究室は、宇治キャンパスにある宙空電波科学研究センターの宇宙電波科学研究部門の一分野として活動しており、全国共同利用設備として導入されている先端電波科学計算機実験装置（A-KDK）を使った計算機実験を中心として研究活動をしています。大学院教育においては、工学研究科電気工学専攻の電波工学協力講座として学生の研究指導を担当しています。本稿では、A-KDKを使った計算機実験プロジェクトのテーマの一つである「電気推進エンジンによる地球磁気圏の電磁環境の擾乱」について紹介します。

宇宙空間はイオンと電子からなるプラズマによって満たされています。宇宙空間のプラズマは希薄であり、無衝突なものとして扱うことができます。特に、地球周辺の宇宙空間は強い地球磁場の影響により太陽から流れてくる太陽風プラズマを遮り、地球大気起源のプラズマが閉じ込められた磁気圏という領域が形成されています。この磁気圏プラズマの空間においては、クーロン衝突による効果よりも、電磁力学的な電子とイオンの運動による効果が支配的であり、同時に高エネルギーの電子やイオンから放射される様々な電磁波が磁気圏を満たしています。さらにこれらのプラズマ波動と高エネルギー粒子は複雑に相互作用して、無衝突プラズマであるにも拘わらず異常電気抵抗を生み出し、オーロラの発光や磁気嵐に代表されるダイナミックな地球磁気圏の変動において重要な役割を果たしています。

このようなプラズマ波動現象は、理論では解析することが難しい複雑な非線型現象であり、ここで計算機実験が非線型解析の有力な方法として登場します。当研究室では、これまで長年にわたって開発、改良が続けられたKEMPOコードと呼ばれる、電子・イオンを共に粒子としてその運動方程式を解いてゆく、電磁粒子コードを使った研究を主として行い、磁気圏における様々な現象を解析し成果を上げています。今後、粒子コードによる研究に加えて、新たな研究の展開の一つとして、ロケットに搭載されるイオンエンジンからの大規模な重イオンビーム放出による地球磁気圏プラズマへの広範囲な電磁的な影響を調べるため、電子を流体、イオンを粒子として運動を解き進めるハイブリッドコードを用いた計算機実験で解析しようとする試みがスタートしました。

現在、電気推進エンジンを使用した宇宙機は、宇宙空間で太陽発電衛星（SPS）を建設する際に、低軌道（LEO）から静止軌道（GEO）へ大量の物資を効率的に輸送できる方法の一つとして注目されています。しかし過去の研究においては、電気推進エンジンからのアルゴンイオン等の重イオンビームの放出による磁気圏プラズマへの影響が予想されており、イオンエンジン大規模作動時における重イオンビームと低周波プラズマ波動との相互作用に関して線形解析が行われ、ビームの挙動や、重イオンビームの拡散等について議論が行われています。しかし、背景プラズマの加速、加熱といった現象や、電磁波と重イオンビームの非線型な相互作用までは研究されておらず多くが未知の分野です。図1のように2次元のシミュレーション空間を用意し、中心付近にイオンエンジンに見立てた内部境界から重イオンビームを注入します。この結果、図1のように磁力線が曲げられ、磁場が弱くなったところに、磁場と平行方向に重イオン（図3）と磁気圏のプラズマ（図4）の両方が加速して動いていくことがわかりました。この流れの速度が大きくなれば、プラズマの不安定な状態を作り出して、電波を成長させ、その電波による非線型現象を起こす可能性があります。現在この磁力線に平行方向に加速するメカニズムと、重イオンビーム速度が大きくなった場合の非線型現象の解析を進めています。

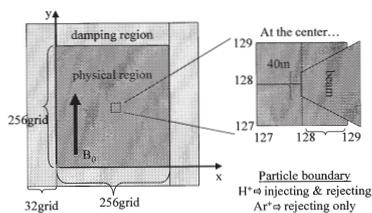


図1 シミュレーション空間

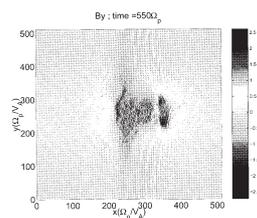


図2  $t=550$ （時間はプロトン gyro 周期の逆数で規格化）の磁力線と同じ方向の磁場強度（磁力線成分を含む）

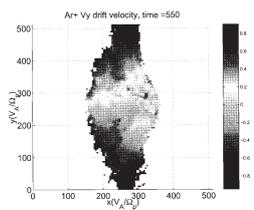


図3 図2と同じ時刻での重イオンの磁力線に平行方向のドリフト速度

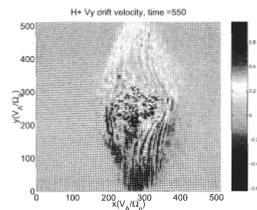


図4 図2と同じ時刻での磁気圏プラズマの磁力線に平行方向のドリフト速度

## 博士論文概要

### 【課程博士一覧】

周 軍	「Harmonic Analysis of Linear Continuous-Time Periodic Systems」 (線形連続時間周期系における調和解析)	平成14年3月25日
蛭原 義雄	「LMI-Based Multiobjective Controller Design with Non-Common Lyapunov Variables」 (非共通のリアプノフ変数を用いた線形行列不等式に基づく多目的制御器設計)	平成14年3月25日
山向 幹雄	「A study on reaction mechanisms in chemical vapor deposition of (Ba,Sr) TiO <sub>3</sub> films for Gbit-scale DRAM capacitors」 (ギガビットスケールDRAMキャパシタ用 (Ba,Sr) TiO <sub>3</sub> 薄膜の化学気相成長における成膜反応機構に関する研究)	平成14年3月25日
百瀬 俊	「Spectroscopic Study on Metalorganic Chemical Vapor Deposition Mechanisms of Barium Strontium Titanate Films」 (チタン酸バリウムストロンチウム薄膜の有機金属化学気相堆積過程に関する分光学的研究)	平成14年3月25日
沖野 裕丈	「強誘電体PZTのMOCVD薄膜における電気的特性に関する研究」	平成14年3月25日
大前 邦途	「非線形光学分光法を用いたGaN系半導体の光物性に関する研究」	平成14年3月25日
勝田 稔三	「生体画像情報精度向上のための撮像システムの解析と構築」	平成14年3月25日
大林 史明	「エネルギー教育のための情報ネットワーク利用による学習支援法に関する研究」	平成14年3月25日
山本 倫也	「エネルギー技術の教育と訓練のための分散型仮想環境の構成手法に関する研究」	平成14年3月25日
達本 衝輝	「Heat Transfer from Flat Plates in Pressurized He II」 (加圧超流動ヘリウム中の平板発熱体における熱伝達特性)	平成14年3月25日

---

堺 公明	「高速炉の冷却系に関する伝熱・流動研究」	平成14年3月25日
古本 淳一	「Observation of Turbulence Echo Characteristics and Humidity Profiles with the MU Radar-RASS」 (MUレーダー・RASSによる乱流特性および水蒸気プロファイルの観測)	平成14年3月25日
浜津 享助	「Development of Doppler Radars for Studying Aviation Weather in Terminal Area」 (ターミナルエリアの航空気象研究のためのドップラーレーダーに関する開発的研究)	平成14年3月25日
黒部 憲一	「Inherent Electrical Properties of Polycrystalline Silicon Solar Cells and Application for Thin Film Structures」 (多結晶シリコン太陽電池に固有な電気特性の解明と薄膜構造への応用)	平成14年5月23日
永里 善彦	「企業における社会との共生型事業展開のための社会情報技術の適用方法に関する研究」	平成14年5月23日
Tri Wahyu Hadi	「A study of tropical sea-breeze circulation using boundary layer radar data」 (境界層レーダーを用いた熱帯の海陸風循環の研究)	平成14年7月23日
種田 和正	「Internet Traffic Control for Best-Effort and Guaranteed Services」 (ベストエフォートおよび保証サービスのためのインターネットトラフィック制御)	平成14年9月24日

周 軍（萩原教授）

「Harmonic Analysis of Linear Continuous-Time Periodic Systems」  
（線形連続時間周期系における調和解析）」

平成14年3月25日授与

周期時変の特徴のある機器、設備および産業プロセスが急速に社会の様々な面に現れてきた。例えば、日常生活に欠かせない交流発電機、運輸や救援活動に重要な役割を果たしているヘリコプタなどである。実際には、周期時変システムの例は、我々のまわりをとりまく自然界にも数え切れないほど存在している。周期時変制御系の研究はすでに制御理論の重要な分野の一つとなっている。本研究は、周期関数のFourier解析に基づいて作用素理論の視点から、一般的な有限次元線形連続時間周期系（以下ではFDLCPシステム：finite-dimensional linear continuous-time periodic systemと略称）における解析問題について論じたものである。この解析法を簡単のため調和解析法と呼ぶ。調和解析法を取り入れる動機は、線形システムの周波数応答に関する考察からである。よく知られているように、LTI (linear time-invariant) システムの周波数応答は、入力が正弦波のとき定常状態での出力も正弦波となり、両者の周波数が同じであることに基いて定義されているが、FDLCPシステムではシステムの周期性のために、このような性質が成り立たない。すなわち、角周波数 $\omega_u$ の正弦波入力に対するFDLCPシステムの出力には無限個の角周波数 $\omega_u + k\omega_h$ （ここで $k$ は整数； $\omega_h$ はシステムの周期に対応する角周波数）をもつ正弦波成分が含まれるという現象が起きる。もう少し厳密に考えると、角周波数 $\omega_h$ の入力正弦波だけでなく、 $\omega_u$ に $\omega_h$ の整数倍を加えた異なる角周波数の入力正弦波であった場合にも、上と全く同じ無限個の正弦波成分がシステムの出力には含まれることになる。このことに着目すれば、周期系に対しても $l_2$ という無限次元のHilbert空間上で周波数応答作用素が定義できる。本論文では、そのようにして定義した周波数応答に基づいてFDLCPシステムの性質を解析することを目的としている。特に、周波数応答作用素の基本性質とそれに関連する $H_2$ ノルムと $H_\infty$ ノルムの定義、並びに、各々のノルムの時間領域計算式と周波数領域計算式間での等価性の証明が与えられている。一方、FDLCPシステムの漸近安定性に関する調和リアプノフ方程式という作用素型リアプノフ方程式も同じ調和解析法によって導かれている。調和リアプノフ方程式は無次元LTIシステムの作用素リアプノフ方程式の形になっているため、理解しやすく、物理的な意味が明確になる。これによって、FDLCPシステムの漸近安定性の本質的な時不変特性が明らかにされた。調和リアプノフ方程式のもう一つの重要な役割は、FDLCPシステムの性能指標である $H_2$ ノルムの計算公式が、この方程式に基いて与えられることである。

これらの理論成果の数値計算とそれに関連する収束性の議論も本研究の重要な内容となっている。具体的には、調和リアプノフ方程式を用いて、FDLCPシステムの近似モデルに基づく安定判別法が提案される。 $H_2$ ノルムと $H_\infty$ ノルムの計算法についても考えている。ここで、 $H_2$ ノルムと $H_\infty$ ノルムはそれぞれシステムのLQG (Linear Quadratic Gaussian) 最適制御に関する指標とシステム入出力のゲイン特性を示すシステムの性能指標という実質的な意味があるが、周波数応答が無限次元作用素であることから、ノルムの値を直接計算することは不可能となる。そこで、本論文では周波数応答の斜め打ちきり法という新たな方法も導かれている。この方法では、FDLCPシステムの $H_2$ ノルムと $H_\infty$ ノルムをある有限次元LTIシステムの $H_2$ ノルムと $H_\infty$ ノルムの計算問題に変換し、漸近的に任意精度で計算できる。この方法の利点は周波数応答作用素の行列表現がFourier解析から容易に計算できるため、計算に必要な有限次元LTIモデルが簡単に得られることである。このような考え方はFDLCPシステムの $H_2$ ノルムと $H_\infty$ ノルムを一定の範囲内に抑える $H_2$ または $H_\infty$ 設計問題を解決する上で重要な意味を持っている。

蛭原 義雄 (萩原教授)

## 「LMI-Based Multiobjective Controller Design with Non-Common Lyapunov Variables」

(非共通のリアプノフ変数を用いた線形行列不等式に基づく多目的制御器設計)

平成14年3月25日授与

制御系の構築においては、所望の制御仕様を満足するように制御器 (controller) を設計することが重要な問題となる。制御仕様とは、設計者が制御器の設計時に考慮すべき条件であり、機械システムにおいては高い応答性を実現することや正確な位置決めを可能とする

ことなどが例としてあげられる。近年制御系に要求される制御性能はよりいっそう高度なものとなっており、そのような高度な制御仕様を達成すべく数値最適化手法を用いた制御器の設計に関する研究が盛んに行われている。本論文は、数値最適化手法に基づく制御器の設計において重要な役割を果たしている線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality; LMI) に関して、それを複数の制御仕様を同時に満足する制御器を設計する問題 (多目的制御器設計問題) に適用する上で解決すべき課題の制御理論の見地からの考察を行ったものである。

多目的制御器設計問題の本質的な難しさは、この問題が数値的求解が困難な非凸最適化問題に帰着される点にある。これは単一の制御仕様を満足する制御器の設計問題がLMIで表現される凸最適化問題に帰着され、したがって所望の制御仕様を達成する制御器のパラメータの大域的最適値を数値的に容易に求めることができる点とは大きく異なっている。このような非凸性に起因する数値的求解の難しさを回避するために、多目的制御器設計問題に対する従来の研究においては、個々の設計仕様をLMIで表現するために導入されるリアプノフ変数を全ての設計仕様に対して共通とするという解法が提案されてきたが、この解法においては設計結果が保守的となるという問題がある。本論文においては、設計結果の保守性をできる限り低減することを目的として、各設計仕様に対して非共通のリアプノフ変数を許容しつつ多目的制御器設計問題を凸最適化問題に帰着させるためのいくつかの手法を提案している。なかでも論文の後半においては、従来の研究とは異なる新たな視点から、各設計仕様に対する伸張型線形行列不等式表現 (dilated LMI) を導き、伸張型線形行列不等式表現に基づく新たな制御器設計の枠組を構築している。伸張型線形行列不等式は標準的な線形行列不等式と比較していくつかの特長を有する形で導出されており、伸張型線形行列不等式を用いることで多目的制御器設計問題を非共通のリアプノフ変数を用いて直接凸最適化問題に帰着することが可能となっている。また、本論文では、伸張型線形行列不等式表現が多目的制御器設計問題のみならず標準的な線形行列不等式表現では取り扱いが困難である問題、例えば不確かなパラメータを有する制御対象に対して一定の制御性能を保証する制御器の設計問題に対しても非常に有効であることを示している。論文中では伸張型線形行列不等式表現の有用性について十分に論ずることができてはいないが、その後の研究により伸張型表現の他の設計問題を扱ううえでの有用性、新たな可能性が明らかとなりつつあり、現在伸張型線形行列不等式に基づく制御器設計のさらなる進展を目指して研究を進めている。

山 向 幹 雄 (橋教授)

「A study on reaction mechanisms in chemical vapor deposition of (Ba,Sr) TiO<sub>3</sub> films for Gbit-scale DRAM capacitors」

(ギガビットスケールDRAMキャパシタ用 (Ba,Sr) TiO<sub>3</sub> 薄膜の化学気相成長における成膜反応機構に関する研究)

平成14年3月25日授与

この論文は、化学気相成長法 (CVD) 法による高誘電率材料 (Ba, Sr) TiO<sub>3</sub>[BST] 薄膜の成膜反応機構に関してまとめられたものです。論文には、私が三菱電機先端技術総合研究所にて遂行したCVD-BST技術開発に関する内容、及び、本大学大学院電子物性工学専攻の博士後期課程で行った基礎研究の内容を掲載しております。

BST 薄膜は次世代のDRAMキャパシタ用絶縁材料として期待されています。BST膜の形成方法としては、有機溶媒に溶かした有機金属錯体を原料とする溶液気化CVD法が注目を集めております。しかし、現状の技術レベルは量産にはほど遠く、良好な特性の膜を安定に供給できるに至っておりません。これは、原料として用いている有機金属錯体が複雑な構造を有しており、成膜前駆体の挙動を予測するのが困難なため、プロセス制御がままならないのが主な原因と考えられます。従いまして、CVD-BST技術を量産レベルに仕上げるには、その成膜反応機構を明確にして、精細なプロセス制御を行うことが必須となります。以上の背景をふまえて、本研究ではCVD-BSTの成膜機構に関しまして、特に成膜前駆体の挙動に注目しながら、解析を進めました。

代表的なCVD-BST用の原料として、Ba(DPM)<sub>2</sub>, Sr(DPM)<sub>2</sub>, Ti(i-PrO)<sub>2</sub>(DPM)<sub>2</sub>があります。これらを用いて段差基板上へBaO, SrO, BSTの成膜を試みたところ、BST膜ではBaO, SrOよりも段差底部での膜厚が大きく、段差被覆率 (段差底部での膜厚/段差上部での膜厚) が増加することが判明しました (図1)。すなわち、Ba, Sr, Ti原料が共存する成膜の場合、成膜前駆体の膜表面での付着確率が低下し、段差の底深くまで入り込むようになったものと考えられます。そこで、“膜表面でTi成膜前駆体がBa, Sr成膜前駆体の吸着を阻害して付着確率を低下させる” という機構を取り入れた成膜モデルを仮定しました。このモデルを基に、複数の異なる成膜条件に対して数値シミュレーションを行い、段差被覆率を計算しました。その結果、全ての成膜条件に対し、実験結果と一致する計算値が得られ、本研究で構築したCVD-BST成膜モデルの妥当性を確認することができました。

更に、これら成膜機構に関する検討での知見を基に、CVD-BST成膜技術の改善を進め、0.35 μmスケール相当のDRAMキャパシタを試作しました (図2)。ここでは、BST層の形成時におけるBa, Sr, Ti原料の供給量を2段階に分けて調整することで、膜厚方向の組成と結晶性が均一な膜を作成することに成功しました。このキャパシタで、実デバイスへの適用可能な電気特性が得られています。最後に、本研究で得られた知見が今後のCVD-BST成膜技術の進展に役立ち、本技術の量産化が実現されることを願いながら、御世話になった先生方に感謝の意を表し、論文紹介の締めくくりと致します。

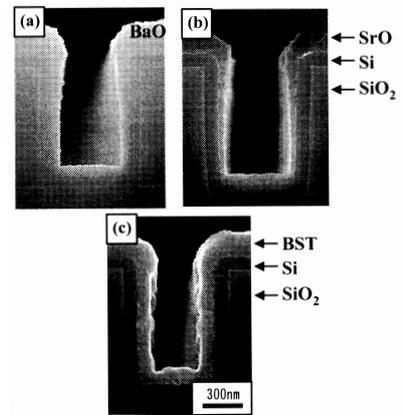


図1 CVD膜の段差被覆性  
(a) Bao, (b) Sro, (c) BST

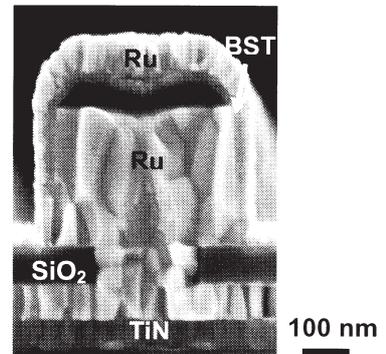


図2 試作したBSTキャパシタ



## 沖野 裕 丈 (松重教授)

### 「強誘電体PZTのMOCVD薄膜における電気的特性に関する研究」

平成14年3月25日授与

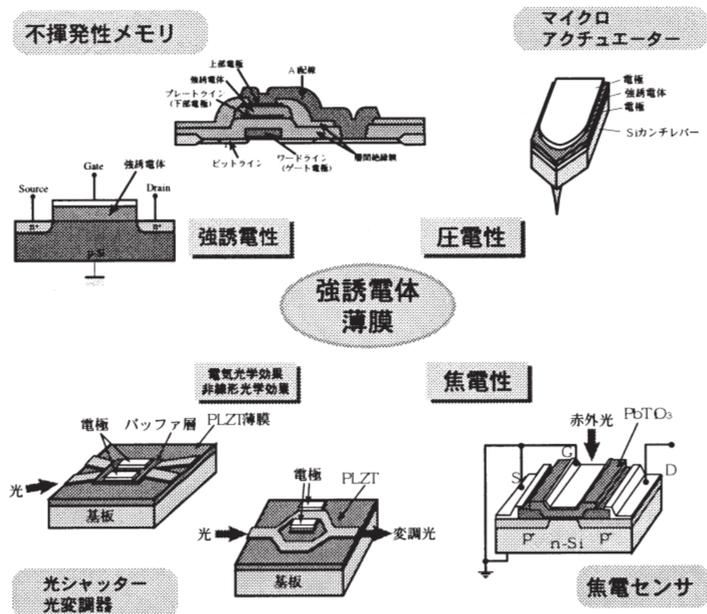
強誘電体材料は、「自発分極を持ち、外部電界によりその分極方向が反転できる」という強誘電性だけでなく、圧電性、焦電性、電気光学効果、非線形光学効果といった実に多様な性質や現象が見られることが知られている。現在、これらの特性を生かした様々な薄膜デバイス(図1)が提案され、研究開発が進められている。

本研究は、このように高機能集積回路デバイスにおけるキーマテリアルである強誘電体に関して、なかでも代表的な材料であるジルコン酸チタン酸鉛(PZT)薄膜について、様々な応用の場面で問題となりうる漏洩電流、分極反転疲労、応力による特性劣化といった問題を取り上げ、測定方法・評価技術を検討してそれらの現象に対するモデルと強誘電体薄膜デバイスの設計指針について提案することを目的とした一連の研究結果をまとめたものである。

まず、PZT薄膜キャパシタ中の電流輸送機構を考察するために、一般的な積層電極構造に加えて櫛形電極構造を有する試料の電流-電圧特性を計測した。PZT薄膜の電気伝導特性を複雑にしている要因を排除した系である櫛形試料の電流-電圧特性から、櫛形試料の電流輸送はPZT内でのドリフトを考慮したショットキー放出電流モデルを用いて説明できることを見出した。加えて、電流-電圧特性から算出されるPZT薄膜の動的誘電率により、キャリア注入界面における電界強度についての知見が得られることを明らかにした。得られた知見から、PZT薄膜キャパシタの電流-電圧特性を改善するためには、電極/強誘電体界面の誘電率を制御することが重要であることを示した。

次に、熱刺激電流法による強誘電体中のトラップ電荷測定を試み、分極反転処理によるスイッチング電荷量の減少とPZT薄膜キャパシタ内のトラップ電荷密度との間に明確な相関があることを示した。熱刺激電流法による強誘電体中のトラップ電荷測定結果から、トラップ電荷には分極反転疲労の進行とともに徐々に増加し界面近傍に偏在するトラップ電荷と、疲労がある程度進行した後急激に増加しPZT薄膜全体に分布しているトラップ電荷との二種類があることを示した。このことから、強誘電体の分極反転疲労現象が(1)電極界面付近への欠陥蓄積による強誘電ドメインの核生成・成長抑止、(2)電極近傍の低誘電率劣化層が原因でおこるPZTへの電荷注入およびPZTの部分分極状態によるバルクのドメインピング、という二段階を経ると結論付けた。

さらに、強誘電体薄膜の結晶と基板との格子不整合が電気的特性におよぼす影響を調べるために、エピタキシャル成長させたPZT薄膜の結晶状態とその誘電的および強誘電的特性をエネルギー分散型全反射X線回折法および櫛形電極を用いて手法で評価し、膜厚と内部応力の緩和および誘電諸特性に深い相関があることを明らかにした。



## 大 前 邦 途 (藤田茂教授)

### 「非線形光学分光法を用いたGa<sub>N</sub>系半導体の光物性に関する研究」

平成14年3月25日授与

屋外大型フルカラーディスプレイ、交通信号機をはじめ液晶ディスプレイのバックライトなどに多用されている青色・緑色・白色発光ダイオード、更には次世代DVD用400nm帯レーザなどの半導体光デバイスは、現在Ga<sub>N</sub>系半導体材料が使用され、産業上重要な位置を占めている。しかしながら、光デバイス材料としての新光機能の可能性、あるいは既存のデバイスの高性能化・高効率化を図るには、この材料系の詳細な光物性の解明、結晶学的なミクロ・ナノ構造とマクロな光物性との相関の詳細な解明が不可欠である。本論文はこのような観点に立ち、非線形光学分光法をこの半導体系の高密度励起下での発光機構を中心とする光物性解明の手段として応用すること、および、非線形光学効果による新機能光デバイスへの応用の可能性に関する基礎的知見を得ることを目的として研究したもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. Ga<sub>N</sub>半導体固有の非線形光学効果を明らかにするため、高品質Ga<sub>N</sub>単結晶薄膜試料を用い、高密度励起下でフォトルミネセンスと縮退4光波混合の測定を行った。その結果、励起子多体効果によるバンドギャップ以下のエネルギーからの強い非線形信号を観測し、Ga<sub>N</sub>が非線形光学効果を持つこと、および、Ga<sub>N</sub>系が透過型配置の高効率非線形光材料として大きな可能性を有することを明らかにした。
2. 混晶の組成揺らぎ効果を考慮する必要のないGa<sub>N</sub>単層膜について、光物性に与える内部電界効果に関する知見を得るという観点から、白色ポンプ・プローブ法によるダイナミックな励起子吸収測定を行った。この結果、励起直後には観測されなかった励起子吸収が、励起後30ps以降で大きく観測されることを見出して、内部電界効果により抑制されていた励起子吸収が、光励起で生成されたキャリアによる内部電界の遮蔽により強く観測されるようになること、この内部電界の遮蔽には深い準位にトラップされたキャリアが関与しているとするモデルで観測された現象を矛盾なく説明できることを示した。
3. InGa<sub>N</sub>膜における光物性を支配する主要因が、Inの組成揺らぎに基づく励起子の局在か、内部電界効果に基づくかを明確にするために、InGa<sub>N</sub>活性層のIn組成が同じで、膜厚が異なる4試料に関して励起子の局在と内部電界の効果の量子井戸幅依存性を調べた。その結果、井戸幅が5nm以下の場合には局在励起子が、井戸幅が5nmを越える場合には内部電界効果が、それぞれInGa<sub>N</sub>の光物性を支配することを明確にした。
4. レーザダイオード (LD) 構造で用いられているInGa<sub>N</sub>量子井戸構造において、超高速時間分解フォトルミネセンス測定を行い、極低温と室温での誘導放出ダイナミクス実験を行った。その結果、400nmのLDでは、低温において誘導放出のピーク波長の低エネルギー側に、約30ps程度の誘導放出としては長い発光寿命を観測した。この現象は励起子が局在することによるエネルギーおよび空間的揺らぎが発生して、励起子と光とが弱結合するためと仮定すれば観測した長寿命が説明できることを示した。一方、室温においてはほぼ10ps以下の短い寿命を観測して、誘導放出機構には局在励起子は関与していない可能性を示した。さらに、活性層のIn組成が大きな440nmLD構造においては、室温においても誘導放出に局在励起子が関与していると考えられる長い発光寿命を観測し、In組成の揺らぎが内包する可能性を指摘している。

以上のように、本研究で得られた結果は、Ga<sub>N</sub>系半導体の基礎的物性解明に寄与しただけでなく、非線形光デバイスや発光デバイスの高性能化・高効率化への基礎的知見を得るという所期の目的を達成したものである。

**勝 田 稔 三 (英保教授)****「生体画像情報精度向上のための撮像システムの解析と構築」****平成14年3月25日授与**

高精度の臨床画像情報の取得には、被検者の状態の固定が欠かすことのできない要素である。本研究は、医療画像撮像機器の運用において、呼吸に依存する画像情報精度の劣化防止のために、種々の臨床データを利用して、統計的な検討を行い、呼吸停止位相を含めた撮像システムの高信頼度化に関する解析と提案を行ったものである。

まず、撮像中の臓器の位置状況を解析するために、過去の診断用画像を用いて、呼気位および最大吸気位での呼吸停止中の横隔膜移動について、その移動方向と大きさについて分析をおこない、肝血管DSAや肝CT撮像には呼気位呼吸停止を適用するのが人工像発生の抑制や、高精度の画像計測には適していることを明らかにした。

次に、呼気位呼吸停止と最大吸気位呼吸停止にて撮像した画像の比較に基づき、アナログ肝血管造影でのX線強度補償フィルタの有効度について検討し、最大吸気位呼吸停止での撮像でも問題ないが、少しの移動でも人工像として表出されるDSA肝血管造影画像では、呼気位呼吸停止での画像が有意に良いということを明らかにした。

さらに、呼吸停止行動時間を分析することにより、撮像初期の横隔膜の呼吸性移動による人工像を減少させる手法について考察を加え、酸素吸入が呼吸停止時間を延長させることは、すでに知られているが、人工像発生を抑制することができるかどうかを検査時の酸素吸入の有無による比較実験を行った。呼吸停止方法にはまだ問題は残るが酸素を吸入させることにより撮像後半の横隔膜移動防止に対応できることを示した。平均的な安静呼気位の残気量では20秒の呼吸停止は困難と考えられるので、該当する検査においては酸素吸入を施行することが望ましく、また、CTやMRIなど呼吸停止を利用する検査にも酸素吸入を適用することにより、画像における人工像発生の抑制効果があることを明らかにした。

次に、CT画像を用いた肺の画像診断処理や、画像による肺容積の計測精度の向上を画像データ取得の段階での向上を検討するため、最大吸気位における呼吸停止中の肺野面積の変化と横隔膜移動を明らかにし、撮像手技について検討を加えた。食道ガン検査時に撮像されていた過去の画像データを用いて、統計解析を行い、同一被検者で、間欠的ダイナミックスキャン画像と連続ヘリカルスキャン画像の撮像データを用いて検討した。呼吸停止から20秒以上経過した時の画像と呼吸停止から1、4、7秒後の画像で同一部位に対応する各2組の画像を取り出し比較することにより、1秒後および4秒後の画像と20秒以上経過した画像との肺野面積には統計的有意差があり、7秒後の画像との比較では、有意差はないという結果が得られた。このことから、肺の容積計測や全肺のルーチン検査の時は、肺が最大限拡張したときに撮像する必要があるので、呼吸停止直後に肺底部から肺尖部にかけてスキャンするのが良く、含気量が呼吸位相によりあまり影響を受けない中肺野等の部位において、肺の動きを最低限にして、微細な構造を画像診断する場合や、腫瘍の自動診断等には、呼吸停止から7秒以後にスキャンを開始するのが良いことを示した。

大 林 史 明 (吉川榮教授)

「エネルギー教育のための情報ネットワーク利用による学習支援法に関する研究」

平成14年3月25日授与

エネルギー問題は21世紀に入りますますその深刻さを増し、また環境問題も逼迫し、それらの解決は急務とされています。これらの問題解決にあたっては、単に技術革新の取り組みだけではなく、人類共通の課題として専門家のみならず一般の多くの人が問題意識をもつことが不可欠とされています。実際、省エネルギーや身近な環境への取り組みなどの他、エネルギー・環境施策へのコンセンサスなど、エネルギー問題の解決への取り組みは、多くの人の参画がなくてはなしえないものとなってきています。また高度科学技術に対する社会的信頼も絶対的なものではなく、双方向リスクコミュニケーションの必要性が説かれるなど、今後の共生社会実現のためにも、市民参画の仕組みが重要となってきています。しかしこうしたエネルギー関連分野は客観的知識と幅広い視野からの展望をもつことが重要な問題領域であり、そのための知識基盤が不可欠です。

本論文はこれらの状況を背景に、情報ネットワークを利用したエネルギー教育の新しい学習支援法に関する研究をまとめたものです。主な内容は、学習支援の要素を「知識獲得支援」「理解・習熟支援」「基礎能力育成支援」の3つの観点から捉え、それぞれの特質を分析し、効果的な学習支援を行うための新しい手法を提案したものです。

また具体的な学習課題に対して、エージェント技術などを用いて学習支援環境を構築するとともに、生理指標などを用いた学習支援システムの総合的評価手法を開発し、エネルギー教育のフィールドワークを通じて、これらの評価を行い、また今後のエネルギー教育のあり方を検討しました。

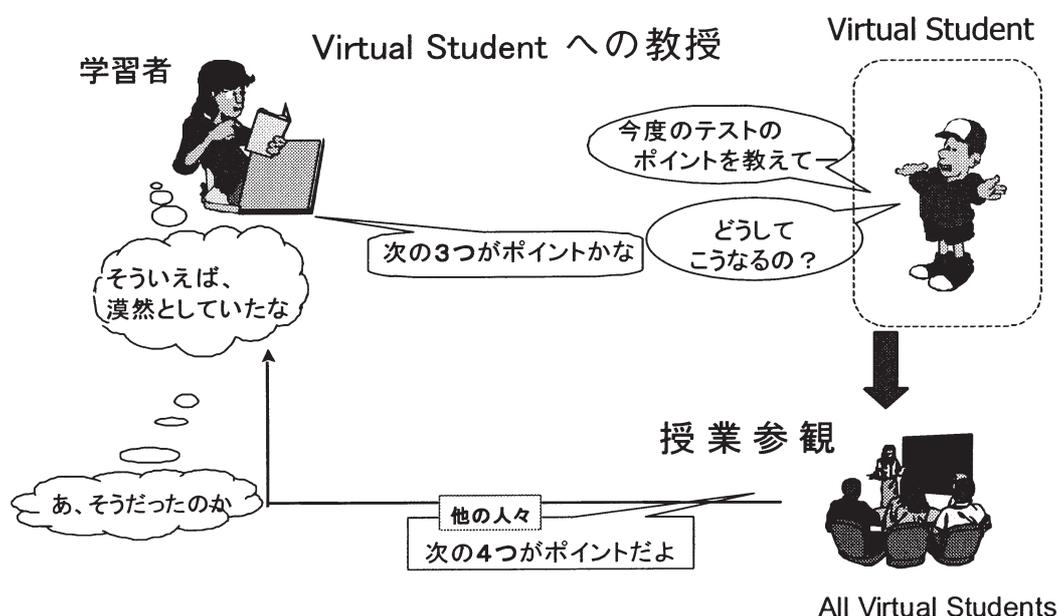


図1 仮想生徒へ教えて学ぶ

## 山本 倫也 (吉川榮教授)

## 「エネルギー技術の教育と訓練のための分散型仮想環境の構成手法に関する研究」

平成14年3月25日授与

本論文は、計算機ネットワーク上で人工現実感環境を共有することのできる分散型仮想環境技術を、エネルギー技術の教育訓練の新しい手段として利用する方法を研究した結果をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 計算機を介する新たな協同作業方式として、分散型仮想環境技術が作業者間に臨場感効果をもたらす技術であることを確認するため、原子力発電所の横型ポンプの分解組立訓練用システムTEC-MAPを開発した。次にTEC-MAPを用いて被験者実験を行い、実験中の被験者同士の会話記録と脳波解析装置で計測した脳波データから被験者の感情的側面を分析した結果、被験者に実際の訓練のような臨場感をもたらし得ることを確認し、分散型仮想環境が有効な教育訓練の手段となることを示した。
2. 大規模プラントの保守訓練に適用可能な分散型仮想環境を構成するため、(1) 人と仮想物体のインタラクションをペトリネット・シグナルモデルと称する新しい離散並行事象モデルを用いてシミュレーションする手法、(2) 階層サーバモデルを導入したネットワーク構成により仮想の大規模プラントを効率よくシミュレーションする手法、の2種類の新たなシミュレーション手法を考案した。
3. 上記2に述べたシミュレーション手法に基づき、プラント保守訓練用の分散型仮想環境を構成する2つの基盤ソフトウェアEX-DVEとNETCOMを開発した。そしてEX-DVE上での横型ポンプ分解組立訓練システムの構築と動作確認、およびNETCOM上でのポンプ流量確認試験システムの構築と動作確認により、双方の基盤ソフトウェアの有効性を確認した。
4. エネルギー教育への応用において、教師と学習者が現実的、記号的、抽象的世界を共有し、コミュニケーションと思考の媒体として利用できる分散型仮想環境の作成支援方法を提案した。
5. 特に、ネットワーク上の外部情報資源を取り込むことのできる仮想環境シミュレーション手法と、仮想環境シミュレーションにおける事象の動的変化の因果関係を整合的に自動制御する手法とを新たに導入することにより、種々の教育システムを作成可能な基盤ソフトウェアMALIONETを開発した。そしてMALIONETを用いて風力発電とプラスチックリサイクルを教育するシステム(下図)を作成して、MALIONETの容易な教材生成機能を確認した。

以上のように、本研究は分散型仮想環境技術を応用するエネルギー技術の新しい教育訓練法を提起し、そのための幾つかの基盤ソフトウェアを構成してその有効性を確認したもので、これらの知見はエネルギー技術の教育訓練の高度化に学術上、實際上、資するところが大きいと考えられる。

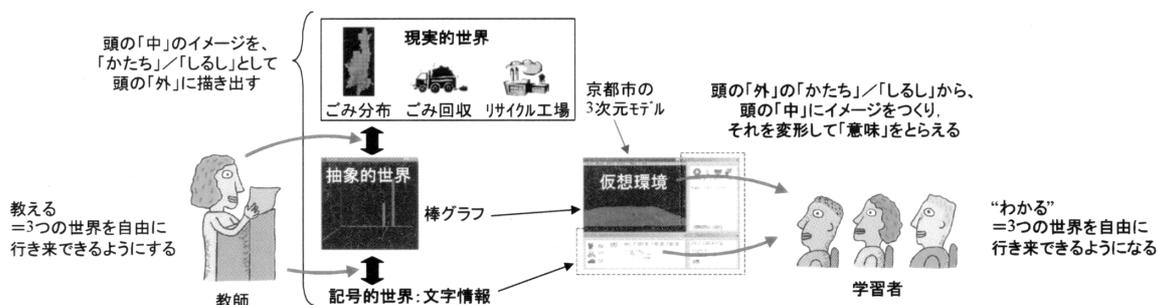


図 プラスチックリサイクル教育システムの概略

達 本 衡 輝 (塩津教授)

「Heat Transfer from Flat Plates in Pressurized He II」  
(加圧超流動ヘリウム中の平板発熱体における熱伝達特性)  
平成14年3月25日授与

超流動ヘリウム (He II) 特に大気圧下の加圧He IIは優れた冷却特性をもつ量子流体であり、核融合炉や加速器などの大型超伝導マグネットの冷媒として期待されている。本研究論文は、従来熱が1次元的に輸送される場合の特性しか解っていなかった加圧He IIの2次元・3次元的な熱流動現象について、広いプールHe II中並びに種々の形状のダクト中の平板発熱体における熱流動現象を実験的・解析的に論じた結果をまとめている。

まず、種々の寸法の平板発熱体から熱が広いHe IIプール中に3次元的に伝わる場合の定常熱伝達と臨界熱流束を測定し、定常臨界熱流束の平板寸法依存性を明らかにし、実験結果の表示式を提示した。次に、種々の支持角度を持つ平板発熱体のHe I およびHe II中の定常熱伝達および定常臨界熱流束を実験的に求め、それらの方向依存性を明らかにしている。

さらに、熱が2次元的に拡大あるいは縮小して流れる場合の熱伝達を実験的に取り扱っている。熱が加圧He IIの入った側面断熱方形ダクト一端の平板発熱体から発熱体巾より大きな断面積をもつダクト中に拡がる場合、ダクト断面積が途中で急に拡大する場合、ダクト内に種々の大きさのオリフィスを設けた場合について、それぞれ定常熱伝達を実験的に求め、流路拡大・縮小率の影響を明らかにし、実験結果を記述できる表示式を提示した。また、発熱体がダクト一端ではなくダクト中央部内壁にある場合について、定常熱伝達を流路ギャップを変化させて測定し、熱が発熱体から直角方向に曲がりながらダクト両側に拡大・縮小して流れる場合の現象を明らかにし、実験結果を記述する表示式を提示した。こうした種々の場合について、さらに、発熱体に定常臨界熱流束より高い波高値をもつステップ状熱入力加わった時の非定常熱伝達についても実験を行い、定常熱伝達曲線の外挿線上に有限の寿命を持つ準定常状態が存在してから発熱体温度が急上昇し膜沸騰に移行することを明らかにし、寿命とステップ熱流束の関係に対する流路の拡大・縮小率や流路ギャップ等の影響を明らかにし、その機構について考察を行っている。

実験的研究と平行して、He IIの熱流動をより詳細に解析するため二流体モデルと超流動乱流理論に基づく計算コード“SUPER-2D”を開発し、定常及び非定常熱流動解析を行って上述の実験結果と比較検討し、定常臨界熱流束解析結果が実験結果と10%以内で一致すること、非定常熱流動の解析結果は非常に現象が速い場合を除いて準定常状態の寿命の実験結果を記述できることを示し、このコードの有効性を確認している。数値解析により、流路が途中で拡がる場合には、拡大箇所He IIに渦が発生し、この渦が熱輸送を阻害するため等価熱伝導率が一次元的に熱が伝わる場合に比べ減少すること、また、非定常の場合、ステップ高さが定常臨界熱流束より僅かに高い場合にはこの渦の影響を受けるが、ステップ高さが高くなるに従い渦の成長以前に温度分布が発達し膜沸騰に移行するようになるため、準定常状態の寿命は1次元的となること等を明らかにしている。

最後に、本論文で得られた成果を総括して結論としている。

堺 公 明 (塩津教授)

「高速炉の冷却系に関する伝熱・流動研究」

平成14年3月25日授与

今後の高速炉の概念の選択及びその実現のために、安全性を確保した上で、経済性のより高い冷却系システムを構築することが重要となっている。本論文は、そのために特に重要と考えられる「円柱状構造物の流力振動」、「ナトリウムの沸騰開始過熱度」及び「重金属冷却高速炉の熱流動特性評価」に関する研究結果をまとめたものである。

まず、冷却系の安全性の観点から温度計などで破損の原因となる「円柱状構造物の流力振動」について、実験的並びに解析的に研究をおこなった。実験的研究では、流力振動に関する設計基準を実プラントに適用するにあたり、渦励振の回避・抑制評価条件、及び、乱流励振評価条件について、高レイノルズ数領域での適用性を実験的に検証した。また、解析的研究では、流体-構造連成による数値解析によって同期振動を再現するとともに、流れ方向振動の原因と言われる対称渦について、対称渦形成に必要な最小時間が渦励振の回避条件に相当することを見出し、設計基準に対する現象的な説明を提案した。

つぎに、高速炉の冷却系の安全性の観点から、急激な出力上昇につながる冷却材沸騰を防止するため、「ナトリウムの沸騰開始過熱度」について、実験的に研究をおこなった。プール沸騰条件において、酸素濃度が沸騰開始過熱度へ及ぼす影響について実験の結果、系圧力3kPa（液温863K）と7kPa（液温923K）については、沸騰開始過熱度に対する酸素濃度の依存性が現われたが、系圧力14kPa（液温973K）と25.9kPa（液温1023K）については、酸素濃度の依存性は現われないことが明らかになった。これは、加熱表面の酸化特性に温度依存性があるためと考えられ、高精度でコールドトラップ温度を制御した本研究によって、それらの依存性を示すことができた。さらに、流速の影響に関して強制循環実験を行い、沸騰開始過熱度は流速の増大にともなって低下することを確認した。また、表面に溝のある試験体では、明らかに沸騰開始過熱度は低下したが、依然、流速の影響がみられたことから、活性キャビティからの発泡を想定した現象的なモデルを提案した。本モデルによれば、水の条件において流速の増大とともに沸騰開始過熱度が増大すること、冷媒において沸騰開始過熱度が流速によらず一定となること、そして、ナトリウムにおいて、沸騰開始過熱度は、流速の増大にともなって低下することが、統一的に説明可能であることを示した。

最後に、より安全性と経済性の高い冷却系システムを構築する観点から、「重金属冷却自然循環高速炉の熱流動特性」について研究をおこなった。重金属冷却炉と体系が類似したヘリカルコイル型の蒸気発生器（SG）実験データを用いて多次元熱流動特性解析コードを検証した。重金属冷却炉としては、鉛-ビスマス冷却自然循環中小型炉が有望概念として選択されており、鉛-ビスマス冷却自然循環炉に特徴的な崩壊熱除去特性を評価することとした。自然循環炉は、定格条件にて自然循環流量が確保されていることから、流量喪失型の過渡事象を想定する必要がないこと、全般的に緩慢な温度変化挙動を示すことが明らかになった。また、完全自然循環高速炉について1次系に設置した崩壊熱除去系を用いた解析を実施した。温度分布が安定するまで、過渡的に自然循環流量が喪失する瞬間があるが、概ね十分な除熱が確保される見通しが得られた。

結論では、本論文で得られた成果を総括した。

古本 淳一 (津田教授)

「Observation of Turbulence Echo Characteristics and Humidity Profiles with the MU Radar-RASS」

(MUレーダー・RASSによる乱流特性および水蒸気プロファイルの観測)

平成14年3月25日授与

地球大気の大気圏では降雨、前線、台風など我々の生活に密接に関わる気象現象が起きている。その構造を知るためには大気の状態(風速、温度、湿度)を観測することが重要である。特に、集中豪雨などの時間変動が早い気象現象の天気予報精度を向上させるためには、これらを高い時間・高度分解能で観測することが極めて重要である。このうち風速に関しては、宙空電波科学研究センターのMUレーダーに代表される大気レーダーによる観測が広く行われている。MUレーダーは滋賀県信楽町に設置された大気観測用大型VHFレーダーであり、ピーク出力1MWを有するアジア域最大の大気レーダーである。一方、電波と音波を併用して温度を地上からリモートセンシングする計測技術として、RASS(Radio Acoustic Sounding System)が開発されている。RASSでは地上から人工的に発射された音波をレーダーで探査し、散乱電波のドップラー周波数偏移から音速を求め、さらに、音速の2乗が大気温度に比例することを用いて、温度の高度変化を高い時間・高度分解能で測定するものである。MUレーダーにRASSを応用したシステム(MUレーダー・RASS)では、対流圏、下部成層圏の風速及び大気温度を時間・高度分解能それぞれ数分および150mという高分解能で連続観測することが可能である。しかしながら水蒸気の高度分布の測定技術は、近年レーザーレーダーなどの技術が実用化されているものの、天候や昼夜に関わらず連続的に観測可能な測定技術の開発はいまだ発展途上なのが現状である。このような現状を踏まえ、本論文では、大気の振る舞いを決定する3要素(大気風速、温度、湿度)を同時に高分解能観測できるレーダーシステムの開発を目的とし、まず大気乱流強度の特性を明らかにし、さらにその結果から水蒸気量を測定する手法の開発を行った。

大気レーダーは発射電波を大気乱流により散乱させそのエコーを検出するものであるため、エコー特性を調べることで大気の大気乱流強度を推定することが可能である。この手法としてエコーの強度を用いる方法とエコースペクトルの広がり(スペクトル幅)を用いる方法が提唱されている。より一般的に行われているスペクトル幅法により乱流強度測定を行う場合、観測値には乱流以外の影響も含まれておりこれを精度よく補正することが困難であった。そこで、MUレーダーの多機能性を活かしこの影響を取り除く新しい方法を考案し、この新手法により精度の高い乱流強度推定が可能であることを定量的に示した。

次に、エコー強度およびスペクトル幅法により推定される乱流強度の詳細な比較を行った。MUレーダー・RASSにより得られた高分解能の温度データを用いて乱流強度を推定し検討を行った結果、対流圏内ではエコー強度の高度構造が水蒸気量の高度勾配に強く依存していることを示した。

引き続き、この特性を利用することで、MUレーダー・RASSデータを用いて水蒸気プロファイルを推定する手法の開発を行った。本方法によって推定された水蒸気の高度分布を気球による同時測定結果と比較したところ良い一致を得ることができた。

さらにレーダーによる水蒸気測定精度を向上させるため、他測器のデータを補足的に用い水蒸気推定を拘束する解析アルゴリズムの改良を行った。GPSの受信電波から水蒸気量の高度積分値を得ることができることから、これを用いてレーダーによる水蒸気の高度積分量を拘束することで、レーダーによる水蒸気の高度分布を安定的に推定するアルゴリズムを開発した。こうして求められた水蒸気分布を、気象衛星「ひまわり」の雲画像及び気象レーダーの観測結果と比較したところ、良く一致したばかりでなく、従来の観測手法では捉えられなかった微細な構造を解明することに成功した。

本論文により開発された水蒸気推定法は今後気象現象の解明に有力な観測手段となることが期待されている。特に、気象庁が全国展開するレーダーネットワークへ応用を行い、推定値された水蒸気高度分布を数値予報モデルに導入することにより、短期天気予報の精度向上に大きな寄与が期待される。また、宙空電波科学研究センターがインドネシア・スマトラ島の赤道直下に設置した赤道大気レーダーへの応用により、赤道域の気象現象が全球規模の気候変動へ寄与するメカニズムの解明が大いに期待できる。

浜 津 享 助 (深尾教授)

「Development of Doppler Radars for Studying Aviation Weather in Terminal Area」  
 (ターミナルエリアの航空気象研究のためのドップラーレーダーに関する開発的研究)  
 平成14年3月25日授与

航空機の飛行安全は、気象と密接に関係している。低層ウィンドシヤーと呼ばれる地表付近の風の急変や、雲霧による低視界は、いずれも500m程度以下の高度で発生する局所的な現象で、しばしば大きな事故の原因になることが指摘されている。

雷雨や台風のように高度的、平面的に規模の大きな現象は、通常的气象レーダーで容易に観測することが可能であるが、上記のような空間規模が小さく、かつ短時間に大きく変化する現象をリモートセンシングすることは、従来困難とみられていた。本研究は、この課題に応えるために、ドップラー機能を生かして、航空機離着陸域 (=ターミナルエリア、空港から概ね半径50~60km) を中心とする低空域で発生するウィンドシヤーや雲霧の発生を検出・観測するレーダーを新たに開発し、その評価を行ったものである。低層ウィンドシヤーは、比較的強い降水を伴う現象であり、一方雲霧は降水粒子に比べて二桁程度小さな粒子から成り、両者の電波散乱特性は大きく異なる。このため、二種類のレーダーを開発し、前者には降水による電波の減衰が比較的少ないセンチ波、後者には微小粒子に対する後方散乱が大きくなるミリ波を用いた。

低層ウィンドシヤー検出用5.3-GHzドップラーレーダーは、空港を中心とする半径20km程度の範囲の低空を中心に、ターミナルエリアを三次元的に観測するレーダーである。レーダー受信信号から不要信号を排除して正確なドップラー計測を行うために、時間領域及び周波数領域を交互に変換しながら、各々の特徴を生かした信号処理をリアルタイムで行うシステムを実現した。また、レーダー近傍でもウィンドシヤーの検出が可能なアルゴリズムや予兆抽出機能等を新たに開発した。本機能を組み込んだレーダーは、既に国内5カ所の主要空港で実運用に入っており、低層ウィンドシヤーの検出率が95%に達することが明らかにされている。雲霧観測用の35-GHzドップラーレーダーもまた、半径20km~30km程度の観測範囲をカバーする。これには100kW程度の高出力の送信が必要になるが、この周波数帯では、コヒーレントな送信信号を生成できる送信管 (例えば進行波管) の製作が難しいため、比較的高出力が得やすいマグネトロンを用いて、デジタル信号処理によってコヒーレント性を確保する方式を新たに開発した。また、実機を用いてフィールドで層状雲と霧の初期観測評価を実施し、所期の探知性能が得られること、及び霧の平面的・立体的な観測が可能なることを確認した。本レーダーの一部機能を組み込んだ実用レーダーも、既に国内で最も霧発生頻度の高い空港に設置され、航空交通監視等の実用分野で活用が期待されている。

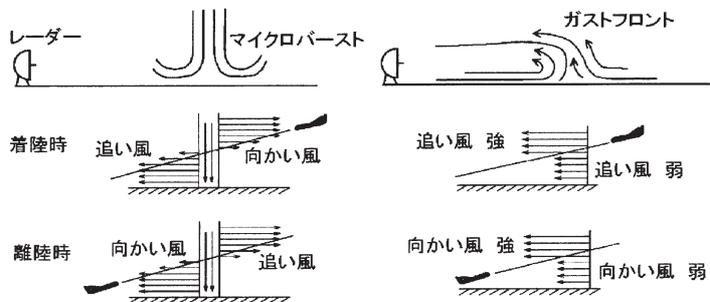


図1 低層ウィンドシヤー検出レーダーが対象とするウィンドシヤーの例

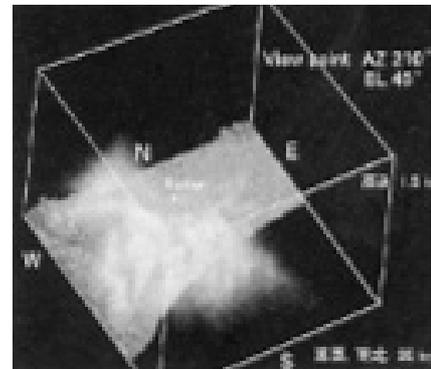


図2 雲霧観測レーダーの霧観測例

## 黒 部 憲 一 (松波教授)

### 「Inherent Electrical Properties of Polycrystalline Silicon Solar Cells and Application for Thin Film Structures」

#### (多結晶シリコン太陽電池に固有な電気特性の解明と薄膜構造への応用)

平成14年5月23日授与

エネルギー供給源多様化のために、再生可能エネルギーを用いる太陽光発電システムが重要なインフラストラクチャーに発展すると期待されているが、大規模導入時には、材料、歩留まり、廃棄物問題などが発生すると考えられる。本研究は、この問題を解決するために有利な「低品質シリコン (Si) 基板上薄膜多結晶Si太陽電池」に着目し、必須とされる薄膜多結晶Si太陽電池の実現に向けて、多結晶太陽電池の電気的特性の面内分布を含む系統的な解析、高効率薄膜太陽電池作製に必要な寸法、物性値の把握、および高速かつ高品質の薄膜結晶成長技術の確立を図ったもので、6章からなる。

1. 多結晶 (multi-crystalline) シリコン (Mx-Si) 太陽電池における結晶粒界や不純物が電気的特性に与える影響を解明した。変換効率の異なる Mx-Si 太陽電池を 100 分割したサンプル全てのスイッチング特性から、少数キャリア寿命  $\tau$  の太陽電池面内分布を求めた。高効率セルでは  $\tau$  の平均値が大きく、標準偏差が大きいことを見だし、この  $\tau$  が粒界長密度によって大きく変化するので、セル面内で不規則に分布する粒界が  $\tau$  の分布を大きくしていることを明らかにした。鉄 (Fe) に起因する深いトラップが  $\tau$  に影響を与えると推定し、粒界付近の Fe の分布を知るために「可変取り込み領域 SIMS (二次イオン質量分析法)」を考案した。詳細な解析から、粒界近傍の一定幅に Fe が高濃度に存在すること、また、低効率セルでは高効率セルに比べて偏析が不十分であることも明らかにした。この結果、Mx-Si 太陽電池の電気的特性には、「結晶領域と粒界領域を分離した定量評価」が必要であることを提案した。
2. 太陽電池の新しい等価回路を考案し、光を照射しないときの電流-電圧特性から、性能を評価する方法を提案した。理想因子 ( $n$ ) の異なる 2 つのダイオードを並列接続とし、結晶領域と粒界領域における直列抵抗の違いを考慮する「改良 2-ダイオードモデル」を提案した。「逐次近似法によるフィッティングアルゴリズム」を用いて、精度の高いフィッティングを実現した。 $n=1$  に相当するダイオードの飽和電流密度から推測した  $\tau$  は、スイッチング測定から求めた  $\tau$  とよい一致を示し、これから推測できる開放電圧は、太陽電池の光電特性から求めた値とよい一致を示した。さらに、 $n=2$  に相当するダイオードの飽和電流密度は太陽電池の並列抵抗と相関があり、損失因子と見なすことができることを示した。
3. 薄膜多結晶 Si 太陽電池を作製する際に高効率を得るための条件について考察し、「効率均一化」が必要であることを示した。粒界長密度と粒径との関係を示した上で、ばらつきやすい粒径が効率に影響するのを抑制する必要性を示した。縞状構造および円柱状構造を持つユニットセルを想定し、「二次元シミュレーション」を行った。粒径、粒界側面再結合速度、 $\tau$  を変化させたときに太陽電池の効率のばらつきを少なくするための寸法、物性の下限値を求め、薄膜作製時の指針にできることを示した。
4. 1050℃におけるジクロロシランのプラズマ援用化学気相堆積 (PECVD) 法を用いて、多結晶 Si の薄膜成長および評価を行った。基板近傍で効果的にプラズマを発生させるため「下流プラズマ発生方式」を考案し、これによって、プラズマ出力の増大に伴う成長速度の増加を実現した。薄膜 Si の電気的特性を調べ、PECVD 法は太陽電池に応用可能な薄膜を作製できることを示した。活性層厚 20  $\mu$  m の薄膜太陽電池を PECVD 法によって作製し、熱 CVD 法によって作製した同厚の薄膜太陽電池と電流-電圧特性を比較し、同条件では PECVD 法が高速成長の長所をもつことを示した。

将来が期待される薄膜 Si 多結晶太陽電池に関する基礎的研究で、本質的に複雑な系のため問題解決は困難であると予測されたが、積極的に取り組んだ。提案した評価法は十分実用できるものである。

永里善彦（吉川榮教授）

「企業における社会との共生型事業展開のための社会情報技術の適用方法に関する研究」  
平成14年5月23日授与

本論文は、エネルギー・環境問題や高齢化社会への貢献が求められる企業が社会との共生型事業を創出するため、社会情報技術を効果的に適用して幾つかの社会共生型事業案を導出する研究をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. エネルギー・環境問題や高齢化社会への対応が迫られる中で経済不況により閉塞感のある企業活動を活性化するため、「異質なものの相利協働」を趣旨とする「社会との共生」の概念に基づく共生型事業が今後の企業活動の方向と規定した。そして新たな事業企画や組織的取組みを創出する方法として、社会に潜在する暗黙知の発掘とその形式化を行うナレッジマネジメントと、内部に閉じた交流から外部との積極的な相互交流を行うコミュニティネットワークを基本概念とする社会情報技術の適用を新たに提起した。
2. 地球温暖化防止のために一層の拡大が望まれる分散型の省エネルギー・新エネルギー拡大の鍵を握る地方自治体及び中小企業の実態をアンケート調査しその拡大を阻害する要因を分析してコスト面の低下と情報提供の改善とを課題として導いた。次いで省エネルギーを促進するESCO事業や民間の活力を活かして公共事業の財政負担を軽減するPFI制度等を調査して、地方自治体・企業・住民・電気事業者が協働するコミュニティネットワークを構成して、新エネルギー事業の促進をネットワークサービスによって達成させる共生型事業方式を新たに提言した。また地域におけるエネルギー・環境問題の普及のための社会啓発用Webサイトを構築した。
3. 電力自由化により経営環境の変化への対応が迫られる電気事業がそのシーズを活かして社会との共生型事業を新規に展開する方向を高齢化社会に貢献する健康福祉分野と規定し、コミュニティネットワークによるナレッジマネジメント手法を展開して新規事業案を創出するフィールドスタディを行った。
4. 上記のフィールドスタディでは、文献調査やアンケート調査、社会統計分析などの机上でのハードな社会調査に加えるにとくに実地体験やグループインタビューのように実際の社会に参加するソフトな社会調査を行って、このような市場調査法がユーザの潜在ニーズに応える事業企画案導出に有用なことを見出だした。また、新たな事業企画案導出のためにA・Kピンカード法と称する発想支援法を新たに考案した。そして異分野のメンバーによるブレインストーミングを行って、具体的な事業ビジョンと幾つかの事業案を提起し、実際に採用された。
5. 先進諸国に共通する高齢社会の活性化に資する高齢者支援用福祉機器について、個別対応で多種少量生産のため割高な福祉機器の開発を国際化するマスカスタマイゼーションによってそのコストを低減させることを提案した。そのため福祉事業に携わる技術者、医療介護者、利用者が国際的に共用する福祉機器開発技術情報のデータベースの構成要件や情報サービスの形態等を検討し、インターネットベースの国際共同利用福祉機器開発技術情報システムの構成法を新たに提起し、そのデータベースサービスが実際に開始された。

以上のように、本研究はエネルギー・環境問題や高齢化社会に貢献する企業活動のために、ナレッジマネジメントとコミュニティネットワークを基本概念とする社会情報技術に基づく社会共生型事業案の創出法とその応用を研究したもので、これらの知見はエネルギー情報学の高度化に学術上、實際上、資するところが大きいと考えられる。

Tri Wahyu Hadi (津田教授)

「A study of tropical sea-breeze circulation using boundary layer radar data」

(境界層レーダーを用いた熱帯の海陸風循環の研究)

平成14年7月23日授与

大気境界層とは、地表面から地上1～3 kmの高度まで広がる、地表面の影響を直接受ける大気の領域を指す。大気境界層は、大気汚染物質を閉じ込めるなど、人間活動に密接な関わりを持つため、古くから研究されてきた。しかしながら、鉄塔の届く地表面から200mの範囲内を超えると連続観測の手段に乏しいため、未解決の科学的課題が未だに山積している。近年、高高度までの連続観測の手段として、ウィンドプロファイラーと呼ばれるレーダー用いられるようになってきた。これは大気の乱流によるエコーから風速を計測するものであり、さらに降雨の観測や音波と組み合わせての温度観測も行える。当センターでは、1984年設置の大型ウィンドプロファイラーMUレーダーを皮切りに、様々な大気観測レーダーを開発してきた。最近では、大気境界層の観測を主に行う小型のウィンドプロファイラーである境界層レーダーを精力的に開発しており、日本国内及びインドネシアに展開して観測を行っている。

本研究では、境界層レーダーを用いて主に熱帯の海陸風循環の研究を行った。海陸風とは、海と陸の温度差により駆動される、沿岸地帯の大気境界層内の循環であるが、熱帯での研究はまだ少ない。本研究ではまず、インドネシアのジャカルタ郊外に設置した境界層レーダーを用いた研究を行った(図1, 2)。その結果、海陸風は高度約3 kmまでと、中高緯度と比べて極めて高い高度まで広がっていることを見出し、さらに昼間の海風(地表付近で海から陸に向かう風)と陸風(上層で陸から戻る風)の間に形成された強いウィンドシアアが、ケルビン-ヘルムホルツ不安定を引き起こすことを見出した。次いで、同レーダーを用いて海陸風の季節変化、さらに気象衛星データと組み合わせて海陸風の広がりや海陸風前線の進行を調べた。その結果、海陸風は乾季に強いこと、海陸風は60km以上伝播して山岳に到達し複雑な地形に伴う循環と相互作用を起こすことを見出した。また、高度0.5km以上での海風が極大になる時刻は、地表での極大に数時間遅れ、夕刻になることがわかった。最後に、オーストラリア北西熱帯部のダーウィン市における境界層観測データの解析を行った。やはり海陸風的な循環が見出されたが、海風が極大になる時間が夜半過ぎであるという、これまでに報告されていない時間発展パターンが卓越していることを見出した。全球でグリッド化された客観解析データと比較することで、この現象は、通常海陸風に比べて広範囲に広がる、豪州北西部の半島全体に広がる熱低気圧の循環によることが示された。熱低気圧に伴う夜間の循環強化は、最近シミュレーションにより存在が示唆されたものであり、その初めての観測例となる。今後は、長期のモニタリングとさらなる観測点の展開により、熱帯大気境界層の理解が一層進み、人間活動との関わりという視点からの知見も蓄積されていくことが期待される。

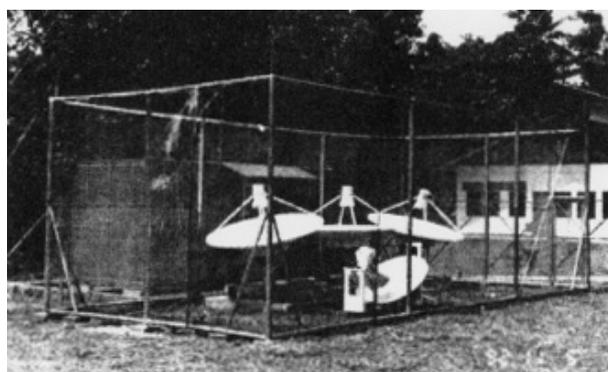


図1 インドネシア・スルボンの境界層レーダー

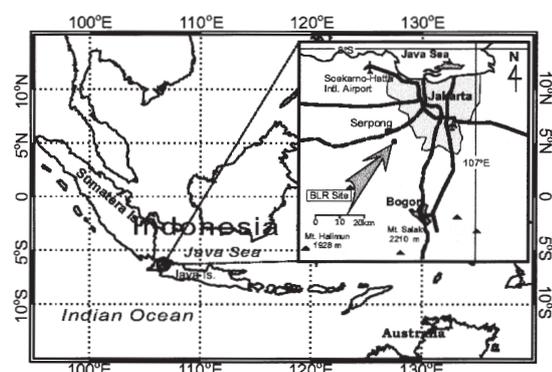


図2 レーダーサイトの位置(矢印)

種 田 和 正 (森広教授)

「Internet Traffic Control for Best-Effort and Guaranteed Services」

(ベストエフォートおよび保証サービスのためのインターネットトラフィック制御)

平成14年9月24日授与

### 1. 研究内容と意義

本研究は、インターネット上のトラフィック制御のための制御アルゴリズム及び制御対象であるトラフィックの特性に関する研究結果をまとめたものである。トラフィック制御は経路制御と輻輳制御に分けられ、経路制御とはトラフィック（パケットの流れ）の経路を切替える制御であり、輻輳制御とはインターネット上の過負荷な箇所へトラフィックが流れ込むことを押さえる制御である。現在のインターネットが提供するベストエフォートサービスでは、インターネット利用者はインターネット上のリソース（伝送帯域やバッファ等）を共有して利用するが、将来のリアルタイム通信のために提供される保証サービスでは、各利用者によりリソースの一部を独占的に割当てることにより、パケットの遅延時間の上限を厳密に保証する。上記2種類のサービスは、各々に固有の経路制御と輻輳制御を必要とする。

一般に、トラフィックが最短（時間）経路を通るように経路制御を実現するには、両サービス共通の問題として、次の二つの研究課題がある。

- (1) どのような情報を使って、どのように経路制御するか？
- (2) 必要な情報をどのようにして効率的にルータ間で交換するか？

経路制御問題が動的になると、一般に、待ち行列理論によるアプローチだけでは解決できない。本研究では、(1) に対して、最適化アルゴリズムを使った数値的なアプローチにより最適経路制御方法に対する新たな特徴を明らかにしている。本研究の結果は、並列待ち行列へのジョブ割当問題において、ジョブ処理時間が到着時に与えられる場合において有効である。また、(2) に対して、蟻コロニーの動作に触発された経路制御アルゴリズム（AntNet）をベースにして、人工蟻の動作を工夫することにより、より効率的な情報交換が可能であることを示している。一方、輻輳制御は提供するサービスによって異なり、保証サービスではネットワーク内のルータ（アドミッション制御）で、ベストエフォートサービスでは利用者のホスト（TCPプロトコル）で実現される。アドミッション制御は利用者によるリソースの独占的利用を許可するか否かを判断するがその課題は、リソース要求が非常に多いとスループットと利用者間の公平性がともに劣化することである。本研究では、公平性とスループットの二つの評価尺度に対してバランスのとれた制御方法を示す。他方、TCPによる輻輳制御では、トラフィック負荷を軽減するためにホストからの送信レートを下げる時間の長さとその大きさを決定する必要があるが、このためにはインターネットのトラフィック特性を把握することが重要である。インターネットのトラフィックは長時間依存性を持つことが指摘されている。本研究では、TCPの輻輳制御自体が長時間依存トラフィックを生成することを示すと同時に、長時間依存TCPトラフィックには二つの統計的特徴があることを示す。従来、TCPは短い時間スケールのトラフィック変動にのみ関わっていると考えられていたが、数時間に及ぶスケールで関わっていることを示した点で意義がある。

### 2. 研究を通しての感想

インターネットのトラフィック制御技術の進歩は非常に速い。様々なアイデアが数年の時間スケールで表れては消えていく。また、研究テーマのトレンドもダイナミックに変化する。従って、インターネットのトラフィック制御技術を考える場合、理論的な研究でなければ、一つの研究対象に対して時間をかけ過ぎるべきではないし、問題の前提条件を適宜見直す必要があることを感じた。

## 【論文博士一覧】

原田 泰志	電力系統監視制御システムにおける発電機出力指令制御機能の高度化の研究	平成14年1月23日
山道新太郎	高誘電率 (BA, Sr) TiO <sub>3</sub> 系薄膜の作成とGbit級DRAMセルキャパシタへの応用に関する研究	平成14年1月23日
河本 正	電力分野の絶縁問題および環境問題への数値電磁界計算法の応用	平成14年3月25日
後藤 康仁	Development of Novel Metal Ion Beam Systems with Liquid-Metal Ion Sources (液体金属イオン源を用いた新奇金属イオンビーム装置の開発)	平成14年3月25日
小池 淳	「3次元シーンのモデルに基づく動画像の高能率符号化の研究」	平成14年3月25日
的場 直人	Study of Image and Video Transmission over Mobile Communication Channel (移動通信における静止画像及びビデオ伝送に関する研究)	平成14年3月25日
今中 良一	「再生専用光ディスクと互換可能な書き換え光ディスクシステムの研究」	平成14年5月23日
久世 直洋	InAs/AlGaAsSb系量子井戸構造の物性と高感度ホール素子への応用	平成14年7月23日
渡辺 靖彦	Integrated Analysis of Image, Diagram, and Text for Multimedia Document Retrieval (マルチメディアドキュメント検索のための画像、図、テキストの統合解析)	平成14年9月24日

**学生の声****「博士課程に進学した理由」**

工学研究科 電気工学専攻 引原研究室 博士後期課程1回生 薄 良彦

私が博士後期課程に進学した理由は、修士課程時に遂行していた電力系統に関する研究をさらに深く進めたいと考えた事と、電力系統に留まらず幅広く勉強する環境を私自身が求めたからでした。私は電力系統に関する研究に興味深く考えていましたが、その分野のみに従事していると自分自身の幅が狭くなり（無論、一つの研究に没頭する事は大切ですが）、最終的に重箱の隅を突つくばかりになってしまうのではないかと考えました。しかしながら、電気系教室、そして京都大学には各分野で活躍されている研究者の方々が数多くおられ、自分自身が求めれば幅広く勉強出来る環境だと考え、本学博士後期課程への進学を選択した次第です。このように書くと、修士課程を修了後就職しても幅広く勉強しなければならないし、進学の動機として不十分と考えられる方がおられるかと思います。これに対する私の乏しい経験からの一特に電力分野に限定された一反論としては、学会等で活躍されている研究者・技術者の方々の話を伺うと、その経験に基づいた貴重な意見を頂戴する一方、垣間見えるのは従来からの延長線上の議論のみを正しいとする雰囲気であり、その方々がおられる環境は私が望んだものでは無いと現在は感じています。あくまで後付けの正当化になりますが、現時点において博士後期課程を選択した私の判断は間違っていなかったと考えています。また、進学のきっかけは4回生時より現在に至るまで御指導頂いている先生方との出会いである事を付け加えておきたいと思います。

最後に、桂キャンパスへの移転等で電気系教室が「過渡状態」にある事を身を持って感じています。一方、私自身は指導教授より「君はまだ仮免前に過ぎない」との言葉を頂戴しています。このように否応無く自らの内、外で「過渡状態」にいる私ですが、自分自身を見失うこと無く、日々研究対象と向き合いながら博士後期課程を過ごしていきたいと考えています。

**「世界に向けて発信できる研究者を目指して」**

工学研究科 電子物性工学専攻 松波研究室 博士後期課程1回生 根来 佑樹

2002年10月、電子物性工学専攻の博士後期課程に進学しました。次世代パワーデバイス用材料として世界で注目を集めているワイドギャップ半導体SiCに関する研究を続けていきたいからです。

私は学部4回生のときから、松波弘之教授の下で、イオン注入したSiCの評価とイオン注入を用いて作製したパワーデバイスの評価を行ってきました。その頃、自ら作製したSiCのpnダイオードが非常に優れた整流性を示したときに味わった感動は、現在の私の研究意欲の源泉であるといえます。作製したダイオードの特性を評価していくと、予想もしない測定結果を得ることもありました。そのような結果になった原因を半導体の物理を紐解きながら究明していく過程では、講義や教科書で得た知識を「使えるツール」としてフル活用する必要がありました。これは修士課程で最も苦勞したことの一つでした。

博士後期課程に進学しようと最も強く感じたのは、修士1回生の秋にSiCおよび関連ワイドギャップ半導体に関する国際学会（口頭発表170件、ポスター発表242件）に参加したときでした。世界中のSiC研究者が一同に会し、SiCを用いたデバイスの実用化に向けて活気溢れる討論が繰り広げられていました。幸いにも私はその学会で2件の口頭発表を行う機会に恵まれ、十分に国際学会の雰囲気を感じることができました。そのときに、今後もSiCの研究を続けて実用化の一端を担いたいと強く感じたことで、進学を志望しました。

博士後期課程では半導体工学のみならず、結晶工学、電子デバイス工学、電力変換工学などの関連知識を身に付け、材料からシステムまでを見渡せる視野の広い研究者となり、研究成果を絶えず世界に向けて発信していきたいと考えています。

## 教室通信

### 21世紀COEプログラム

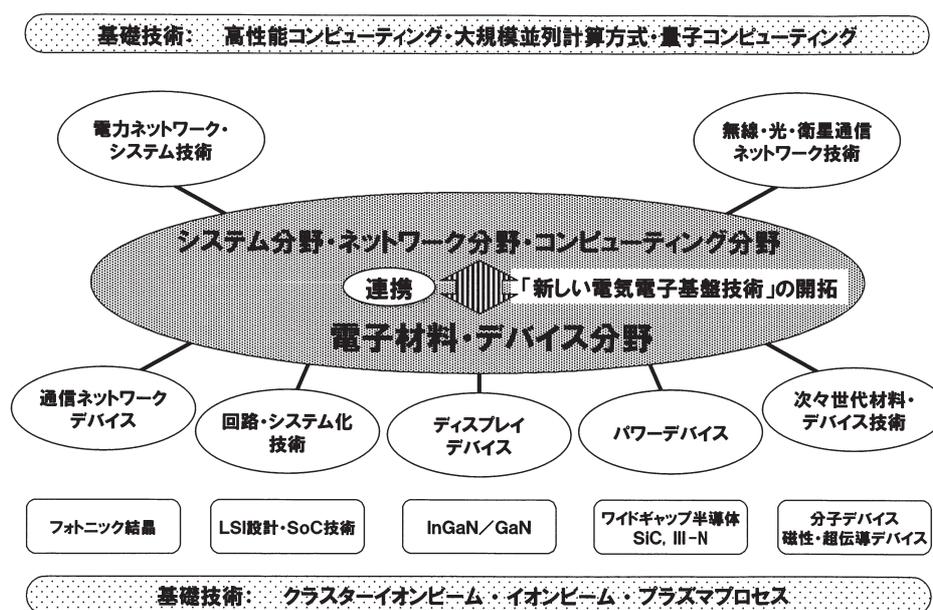
#### 電気電子基盤技術の研究教育拠点

本学電気系3専攻（工学研究科電子物性工学専攻、同電気工学専攻、情報学研究科通信情報システム専攻）は、本年度の21世紀COEプログラムに表記の拠点形成の提案を行い、幸にも採択されました。21世紀COEプログラム全般については新聞等で大きく報道されていますので、ここでは提案した拠点形成計画の内容・特色などを簡単に御報告します。

拠点形成計画を一口で言いますと、「3専攻のハード分野（電子材料・デバイス）およびソフト分野（システム、ネットワーク、コンピューティング）のグループが結集して、21世紀社会の通信・電力ネットワークを支える電気電子基盤技術の研究教育拠点を形成する。」となります。具体的には、研究面の計画は図に示したようなもの、教育面については、1）博士後期課程学生の中の優秀な者に対する財政的支援、2）異分野からの学生・若手研究者が集り、自由闊達な議論とプロトタイピングを通して、アイデアの交換・検証が行えるコラボレーションスペースの設置、の2施策の実施ということになります。このプログラムは予算面でオープンなところがあり、外部資金の積極的獲得が奨励されています。電気系では博士課程学生の支援に予算を重点的に使用しますので、研究については科研費などの外部資金獲得の努力で不足分を補わなければなりません。また、審査委員会等から、分野間および産業界との連携が強く求められています。電気系では、インターン制度などを通して教育における分野間の連携には十分留意しているわけですが、今後は、研究面における連携も目に見える形にしていきたいと考えます。産業界との連携につきましても、共同研究・受託研究・奨学寄付金といった形で、研究成果の企業化や産業界からの資金導入をより積極的に進めていかなければなりません。これに加えて社会人博士の受入、すなわち教育面での貢献も重要と考えられます。これにつきましても、博士号取得のみならず、特定の先端的分野での教育に重点をおいた受け入れ方式も検討しております。

以上のとおり、本拠点計画の遂行におきましても、卒業生諸賢の御協力・御支援が非常に重要となりますのでよろしく御願います。

拠点リーダー 荒木 光彦（電気工学専攻）



## 編集後記

電気系教室創設100周年を契機として、教室から産業界への情報発信の一環として始めました「cue」もお陰さまで第10号の発刊を迎えました。皆様のご支援に厚く感謝申し上げます。ところで、日本全体が大きな構造転換を迫られている今、大学も例外ではありません。現在、大学は平成16年に予定されている独立法人化への対応（中期目標・中期計画の策定）、産学連携の強化、教育への取り組み強化（ファカルティ・ディベロップメント）、21世紀COEプログラムによる拠点形成さらには桂キャンパス移転準備と、極めて多忙な時期を迎えています。このような時期こそ大学も社会との連携を一層密にして、“大学らしさ”を失うことなく努力していきたいと考えています。今後とも電気関係教室に対するより一層のご支援をお願い申し上げます。（S.Y記）

発行日：平成14年12月

編集：電気電子広報委員会  
石川 順三、吉田 進、引原 隆士、  
八坂 保能（現 舞鶴高専）、  
川合 誠、芝内 孝禎、松尾 哲司  
京都大学工学部電気系教室内  
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp

発行：電気電子広報委員会，  
洛友会京都大学電気百周年  
記念事業実行委員会

印刷・製本：株式会社 田中プリント