

cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.12 DECEMBER 2003

[第12号]

.....
卷頭言

.....
名誉教授 板谷 良平

.....
大学の研究・動向

.....
電磁工学講座・電磁エネルギー工学分野

.....
システム情報論講座・医用工学分野

.....
産業界の技術動向

.....
(株)NTTデータ 浜口 友一

.....
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

工業的速度と生物的速度

板谷良平



今日、グローバル化、グローバル・スタンダード、地球は一つ、地球は小さくなったなど、我々の生活の中、我々の意識の中に、地球全体の係わりが入り込んでいる。それは、我々現代人の意識が地球規模の時間と空間を共有するようになったからであり、それが可能になったのは、通信手段と交通手段が飛躍的に発達した結果に他ならない。

歴史の本を紐解くと、国の概念の変化が判る。昔は空間を移動する速度が遅かったし、山はそれを越えることが大きな障害であったから、それが国の境界をなしていたし、国境とはならなくても、それらが文化圏の境界、言語の境界となっていた

ことは明らかである。

今やジェット機が飛び交い、最早かつての地理的条件は人の交流を制限するものでは無くなり、空間的制約は解消したかに見える。また、インターネットの普及は個人が時空を越えて誰とでも通信できる環境を作り上げた。

しかし、地球が自転している限り昼と夜があり、いくら技術が発達しても、起きている時間と寝ている時間とがあることを変えるわけにはいかない。地域社会はその土地の時刻を基礎に生活が営まれており、経度が異なる地域間に時差があることを解消することはできない。そこにジェット機が飛び交う事によって、時差ボケが庶民にも実感できるようになった。

環境問題を考えて見よう。経済の発展は全て生産や流通の速度に帰してしまう。工業化社会においては生産性即ち、単位時間内の生産量が唯一の指標である。その結果、それまでは放置していても自然の浄化能力で処理可能であったのに、処理速度を上回る速度で廃棄物を排出するようになり、環境破壊を招くことになったのである。

経済の一層の発展を期待するためには、自然の浄化能力を高めるか廃棄物排出速度を下げるかの何れかであるが、自然の浄化作用を制御する事は不可能であるから、ゼロエミッションに向わざるを得ない。即ち、物質収支の効率を100%にできれば問題は無いのであるが、それは実際上不可能であろう。それ故、生産量が増せば廃棄物の量も増し、生産量は自然の浄化能力で制限されることになる。

技術の進歩にもかかわらず、発生以来殆ど変わらないものがある。妊娠期間は文明や技術の進歩につれて短縮するであろうか。脳や体の組織の発達を技術の進歩と同調し得るであろうか。人類は種の改良によって家畜や果実を現在のように変えてきたが、成育の速度は一桁以上に速くはない。生物の成育には生物固有の時間尺度があり、バイオ技術の進歩によっても、それを大幅に変えることが出来ないであろう。

その理由は、生息の温度や気圧は常温、常圧であり、それから決る化学反応速度から考えると、生物的变化の速度は飛躍的に変わることは期待できないからである。これに対して、技術の進歩によって加速し得た工業的速度は常温、常圧から掛離れた状態、即ち大きなエクセルギーを活用した結果である。20世紀は工業的速度のみを加速し、生物的速度との乖離を拡大しその許容限度まで顕在化した世紀と言えよう。

時差の存在は、為替や証券市場を地球で一つにすることは出来ないし、ロシアのように東西に長い国の活動効率の制限要因となっている。工業技術の進歩は人類に生活の豊かさをもたらしたが、一方では人類は生物的時間の制約から逃れられない現実と、その余裕を犠牲にしなければならない状態とに直面している。

21世紀は、工業的速度（時間）と生物的速度（時間）との乖離をこれ以上広げることなく発展し得る社会を如何に築くか、我々人類の知恵が試される世紀であろう。

大学の研究・動向**高速電磁界解析とHPC（High Performance Computing）技術**

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野

教授 島崎 眞昭

simasaki@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教授 松尾 哲司

tmatsuo@kuee.kyoto-u.ac.jp

工学部情報センター助教授 上原 哲太郎

tetsu@info.kogaku.kyoto-u.ac.jp

助手 美船 健

mifune@fem.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年、電気機器、電子機器の環境負荷の低減、高効率化が求められ、その実現のため実用電気機器、電子機器の最適設計において電磁界数値シミュレーションの高精度化、高速化・高効率化への要望が高まっている。電気学会、IEEEなどで活発に研究が行われているだけでなく、1998年以降 Mathematics of Computation, SIAM Journal on Scientific Computation, SIAM Journal on Numerical Analysis 等に“Maxwell”をタイトルの一部とする論文が多く出版されるなど応用数学分野の研究者の増加も見られ、研究の輪が広がっている状況である。

電磁界解析の高精度化、高速化・高効率化には、1) 高速の数値計算アルゴリズムの開発、2) 電磁界解析におけるHPC（High Performance Computing）技術の応用が重要である。また、現在は線形電磁界解析が使用されることが多いが、電磁界問題の数値解析においては多くの場合、非線形特性の磁性材料が関係し、損失の解析の高精度化には、3) 磁性材料の精度の高いモデル化手法の開発が必要である。

我々はこれらに関する基本的な要素技術の研究開発に焦点を絞り、研究を進めている。

上記の1)と2)に関しては、大規模連立一次方程式の高速解法が必須の要素技術である。なぜなら、電磁界など物理的な界を記述する偏微分方程式は、有限要素法あるいは有限差分法などを用いた離散化により大規模な連立一次方程式に帰着されるが、通常、この連立一次方程式の求解部分が解析全体の計算コストの大部分を占めるからである。このため有限要素法・有限差分法で導かれる連立一次方程式に対する高速解法が、古くから盛んに研究されてきた。電磁界数値解析分野において現在最も広範に使用されている線形解法は、不完全コレスキー分解前処理つき共役勾配（Incomplete Cholesky Conjugate Gradient, ICCG）法である。当研究室では、上述した背景に加えて、最近のHPC分野における並列計算機の急速な台頭を考慮し、並列計算機を使用した高速電磁界解析のための並列ICCG法について、現在学術情報メディアセンター所属の岩下助教授と共同研究を行ってきた。また、加えて当研究室では、ICCG法より高速な解法として最近注目されている代数的マルチグリッド（AMG）法の研究を進めている。

並列ICCG法に関しては、解くべき連立一次方程式の未知数の順序付けを変更することでICCG法の並列処理を可能にする手法を中心的に扱い、これまでに、PICCG-RP法 [1]・代数的多色順序付

けによる並列ICCG法 [2]・ブロック化赤—黒順序付けによる並列ICCG法 [3] 等を提案している。PICCG-RP法、ブロック化赤—黒順序付けによる並列ICCG法についてはそれぞれCUE第4号、第10号でとりあげており、2に代数学的多色順序付けによる並列ICCG法について述べる。

また、連立一次方程式の未知変数の数を n としたとき、 n が増大するほど、連立一次方程式の反復解法の収束までの計算量の n に関するオーダーが問題となる。AMG法は、このオーダーがICCG法よりも低い解法として近年注目されている。当研究室では、電磁界解析に対するAMG法の研究を進めており、その最近の状況について3に述べる。

最後に、非線形磁気特性、特にヒステリシス特性のモデル化、実測結果との比較などについて4に述べる。

2 代数学的多色順序付けによる並列ICCG法

CG法のIC分解による前処理においては、(完全な) コレスキー分解による直接解法と同様、前進代入計算(下三角係数行列を持つ連立方程式の求解)・後退代入計算(上三角係数行列を持つ連立方程式の求解)が行われる。前進代入計算・後退代入計算はそれぞれ逐次的な前進処理・後退処理を必要とするため、本質的に並列処理が困難である。また、2つの三角行列を得るためのIC分解そのものも、同様に並列処理が困難である特性をもつ。

しかしながら、有限要素法・有限差分法から導かれる係数行列はほとんどの成分が零値をとるスパース性を持つことから、行列のスパースパターン(非零成分の位置分布)を考慮して未知数の順序付けを変更することによって、IC前処理アルゴリズムを並列に処理することが可能となる。

多色順序付け法では、方程式の未知数を複数のグループ(色)に分類(塗り分け)する。ただし係数行列の i, j 成分が非零であるときに、第 i 番目の未知数と第 j 番目の未知数が同色に塗られないように、未知数を塗り分けるのが特徴である。未知数を各グループ(色)ごとに並び替えることで、係数行列は図1のような並列処理に適したスパースパターンを持つようになる。

従来の多色順序付け法では、主に有限差分解析が扱われており、その場合有限差分グリッドの規則性を用いて色の塗り分けが行われていた。これに対して、係数行列のスパースパターン情報を用いて自動的に塗り分けが行われるのが、代数学的多色順序付け法の特徴である。これによって、有限要素解析で現れるようなランダムスパース行列に対して有効な並列ICCG法を開発することが可能となった。

約100万自由度の電磁界有限要素解析において、代数学的多色順序法による並列ICCG法の有効性を確認している。図2は、求解の並列化による速度向上を示したものである。

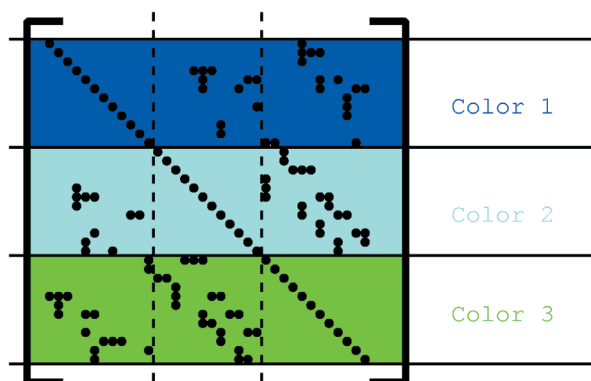


図1：多色順序付け後の行列

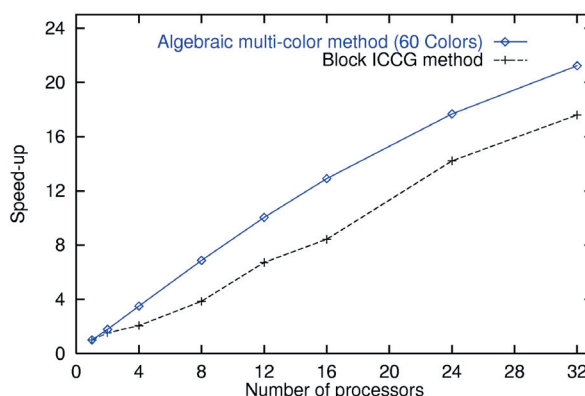


図2：並列処理による求解速度向上
(青実線：提案手法、黒破線：従来手法)

3. 代数マルチグリッド (Algebraic MultiGrid, AMG) 法による高速電磁界解析

CG法の前処理としてIC分解を用いるICCG法は、その高速性と汎用性から、実用的電磁界解析の多くの場面で用いられている。しかし最近では、IC分解と比較してさらに効果的な前処理技術として、マルチグリッド法を導入するケースも増加しつつある。マルチグリッド法は、偏微分方程式の離散化から導かれる連立一次方程式に対する効果的な前処理として近年注目を浴びている手法である。当研究室においても、並列ICCG法の開発に並行してマルチグリッド法の適用について検討を進めている。

マルチグリッド (多重格子) 法は、偏微分方程式の離散化に使用するグリッド以外に、粗密の異なる複数のグリッドを利用する手法である。求解を行うグリッドに対して自由度を小さく設定したグリッド (コースグリッド) を複数使用することで、前処理の効果を高めることに特徴がある。初期のマルチグリッド法においては、解析領域の幾何的形狀を考慮してコースグリッドを (ユーザが) 作成し、グリッド間の写像計算にもグリッドの座標データを用いるのが通常であった。現在ではこのような手法は、後に述べる代数マルチグリッド法と区別して幾何マルチグリッド法と呼ばれている。

代数マルチグリッド法では、幾何マルチグリッド法と異なり、コースグリッドはアルゴリズム内で自動的に作成される。このことにより、代数マルチグリッド法は、計算ライブラリとして利用しやすく、マルチグリッド法の知識を持たないユーザにとっても容易に使用可能であるという長所を持つ。当研究室では、電磁界解析分野における代数マルチグリッド法の応用に関して研究・開発 [4] [5] を行っている。

これまでの研究の成果としては、電気機器の解析で頻繁に使用される辺要素有限要素法に対して開発された代数マルチグリッド法 [5] が挙げられる。代数マルチグリッド前処理の構築に際してシフトパラメータを導入することで、係数行列が特異であるという辺要素有限要素解析に特有な問題を解決し、解析の高速化を実現した。

表1は、約16万自由度の電磁界辺要素有限要素解析に代数マルチグリッド法を適用した例の計算結果である。ICCG法と比較して解析が大幅に高速化されていることが分かる。

表1 数値計算結果

求解法	CPU時間 [s]	CG反復回数
AMGCG	114	34
ICCG	388	201

4. 磁気ヒステリシス特性のモデル化手法の開発

世界の電力の大きな部分が電動機によって消費されており、また今後、環境への負荷が少ない電気自動車の普及が予想され、電動機の一層の高効率化ならびに小型軽量化が求められている。しかし、電気機器の鉄心材料である電磁鋼板は磁気ヒステリシス特性を持っており、この特性を正確に表現することは容易でない。このことが、前章までに述べたような高速大規模電磁界計算技術の進展にもかかわらず、電磁界解析の高精度化を阻む大きな要因となっている。そこで、当研究室では、電磁鋼板の磁気ヒステリシス特性の効率的で正確なモデル化手法の開発に取り組んでいる。

表現能力と記述の容易さを兼ね備えたヒステリシスモデルとしては、プライザッハモデルが有名であるが、記憶容量と計算コストの点から大規模電磁界計算に不向きである。当研究室では、プライザッハモデルと同等の表現能力を持ちながら、より効率的なヒステリシスモデルであるストップモデルとプレイモデルに着目して、これらの電磁鋼板の磁気特性表現への応用を行っている。特に、ストップモデルは、磁束密度を入力として磁界を出力とするのに適したモデルであることから磁気ベクトルポテンシャルを用いた解析に有用であるが、同定法が確立していないなど研究が進んでいないため、

当研究室では、同モデルの同定法の開発を含めた研究を進めている。

図3にストップモデルを用いて無方向性電磁鋼板（JIS: 50A290）の直流磁気特性を表現した例を示す [6]。ただし、図3の“モデル1”はストップモデルの性質を利用した同定法 [7] による結果であり、この結果の問題点から、モデルと同定法を改良した結果が“モデル2”である。図3 (a) は、偏磁したB-Hループ、同 (b) では高調波を含むB-Hループを示している。モデル1では電磁鋼板のヒステリシス特性が大まかに表現されているが、モデル2では表現がより正確になっていることがわかる。なお、磁気特性の測定は単板磁気試験器によって行っている。

当研究室ではその他に、プレイモデルによる磁気特性表現に関する研究 [8]、ベクトルヒステリシスモデルに関する研究 [7]、ヒステリシスモデルの電磁界解析への応用に取り組んでいる。

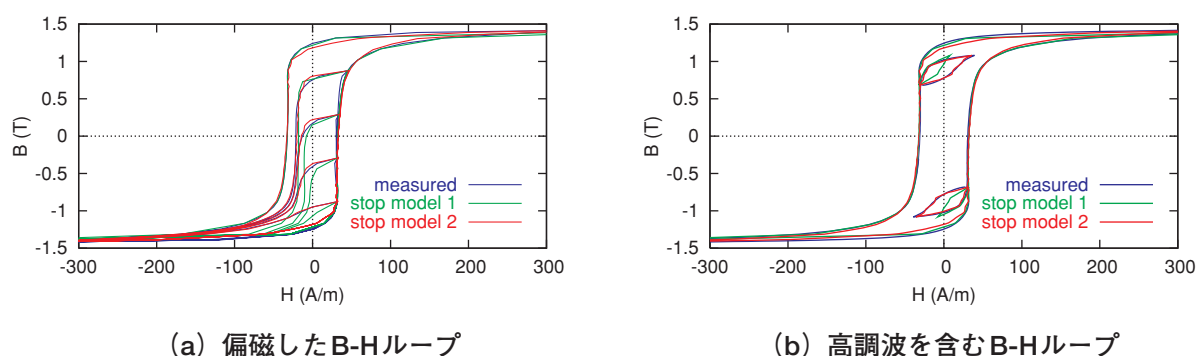


図3 ストップモデルによるヒステリシス特性の表現

5. おわりに

次世代の高精度、高速の電磁界解析の要素技術として重要な並列化ICCG法、AMG法、磁気ヒステリシスのモデル化手法について述べた。最近、HPC技術の世界では、グリッドコンピューティングが注目されている。われわれも、グリッドコンピューティング時代における電磁界解析について、要素技術の研究に取り組んでいく予定である。

参考文献

- [1] T. Iwashita and M. Shimasaki: "Parallel Processing of 3-D Eddy Current Analysis with Moving Conductor Using Parallelized ICCG Solver with Renumbering Process," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, pp. 1504-1509, 2000.
- [2] T. Iwashita and M. Shimasaki: "Algebraic Multicolor Ordering for Parallelized ICCG Solver in Finite-Element Analyses," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, pp. 429-432, 2002.
- [3] 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.
- [4] T. Mifune, T. Iwashita and M. Shimasaki: "A Fast Solver for FEM Analyses Using the Parallelized Algebraic Multigrid Method," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, pp. 369-372, 2002.
- [5] T. Mifune, T. Iwashita and M. Shimasaki: "New Algebraic Multigrid Preconditioning for Iterative Solvers in Electromagnetic Finite Edge-Element Analyses," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, pp. 1677-1680, 2003.
- [6] T. Matsuo, Y. Terada and M. Shimasaki: "Comparison of Identification Methods for Stop Model with Input-Dependent Shape Function," 14th Conference on Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2003), Vol. III, pp. 178-179, 2003.
- [7] T. Matsuo and M. Shimasaki: "Isotropic Vector Hysteresis Represented by Superposition of Stop Hysteron Models," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37 (5), pp. 3357-3361, 2001.
- [8] 松尾哲司, 安藤啓一, 寺田靖, 島崎眞昭: "ストップモデルとプレイモデルによるヒステリシス特性表現に関する検討," 電学論C, 123巻 (11), pp. 1958-1963, 2003.

細胞・生体機能シミュレーション

情報学研究科 システム科学専攻 システム情報論講座 医用工学分野

教授 松田 哲也

tetsu@i.kyoto-u.ac.jp

助教授 天野 晃

amano@i.kyoto-u.ac.jp

助手 水田 忍

smizuta@i.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

医学・医療における工学あるいは情報学の応用を目指す医用工学は、医学・生物学と工学・情報学との密接な連携が必須の研究領域である。当研究室は、循環器内科医として臨床に携わりながら医用システムに関する研究を進めてきた医学系研究者と電気・電子工学や情報工学を基礎として医用工学に関わってきた工学系研究者から構成され、研究室内部における医工連携のみならず、それぞれが関係する学内外の研究室との共同研究を通じて医学・生物学と工学・情報学とを融合する研究を幅広く行っている。

当研究室が取り組んでいる研究は、1：医用VRシステムの構築を目標とした触覚・力覚の計測と表現に関する研究、2：ヒト胎児標本の3次元画像データベース構築、3：細胞・生体シミュレーションの3つに分けられる。本稿では、これらの研究課題について、その概要と現状を紹介する。

2. 触覚・力覚の計測と表現に関する研究

社会における様々な領域で不可欠なものとなっている情報技術は、医学・医療の分野をも大きく変えようとしており、各種の画像診断装置や電子カルテをはじめとした数多くの情報システムが一般臨床の場でも広く用いられている。手術ロボットは最先端の医療システムの代表例であるが、既に実用化されており、一部の病院では微細な組織を拡大しながら処置するマイクロサージェリーや狭い視野あるいは可動域内で手術器具を操作する必要がある内視鏡手術などに利用され始めている。しかし、現在の手術ロボットでは、主として視覚情報が施術者に伝えられるに過ぎず、繊細な感覚が要求される複雑な操作を行うためには触覚・力覚情報の提示が強く求められている。そこで、我々の研究室では触覚デバイス（Haptic Device）を用いて、触覚・力覚を表現する仮想触診システムの開発を行っている。このような研究は国外のみならず国内でも数多く試みられているが、本研究室では生体組織の弾性情報を計測する方法の開発も同時に進め、実測値に基づいた触覚・力覚提示システムの構築を目指すという特徴を持つ。

生体組織の弾性計測には、MRI（核磁気共鳴画像法）によるMR Elastography（MRE: MR弾性画像法）を用いている。本法は1995年に米国Mayo Clinicの研究グループから報告された方法で、生体組織を破壊することなく弾性率を計測することができる。生体組織は腫瘍や肝硬変などの疾患では硬化し、壊死組織のように軟化する場合もあり、組織の弾性率変化は古くから触診による診断に利用されてきた。また腫瘍では悪性度や成長の速さによって硬度が変化するため、弾性率はその性質を判断する重要な指標の一つとされ、MRE法は従来の定性的な触診に替わる新しい診断法として注目され

ている。MRE法は、生体組織に対して外部から数十マイクロンの振幅を持つ数百Hzの振動を与えると、振動波として深部に伝播して行く際に、組織の弾性率によってその波長が異なることを利用している。外部振動をMRIの撮影に同期させることによって振動波の伝播を画像化し、得られたMRE画像から波長を計測して弾性率を定量化する。生体組織に類似した硬度を持つ弾性モデル物質としてPoly Vinyl Alcohol (PVA) 水溶液を寒天状に固めたPVA hydrogelを対象に、250Hzの振動を与えながら撮影したMRE画像を図1に示す。図では横波が伝播するため振動波の波長は対象物質の剛性率（ずり弾性率）を反映しており、10%および7.5%のPVA hydro-gelを重ねて作成した弾性モデルでは剛性率が高い（濃度が高い）ほど波長が長く描出されている。MRE法の実現には高磁場のMRI装置の中で振動を発生させる必要があり、また撮影法も特殊であるため、世界的にも限られた施設のみで研究が進められているにすぎない。当研究室では本学再生医学研究所のMRI装置を用いてMRE法の開発を進め、本法による計測結果が従来の力学的方法による計測値と一致していることを確認している。現在、本法の生体組織への応用を試みているが、身体の内臓組織では振動波の減衰が大きいため深部臓器の振動を十分にとらえることが困難で、振動装置の改良を進めている段階である。



図1 PVA hydrogelを対象としたMR Elastography画像

一方、仮想触診システムの開発では、触覚デバイスを用いて触覚・力覚を提示する際に求められる要件を明らかにするための基礎的検討として、操作者が物体に触れるときの触感を高精度に計測するシステムを試作し心理物理実験を重ねている。市販の触覚デバイスは位置を入力とし仮想物体からの反力を出力とするが、これに応力センサを組み合わせ、操作者が実物体に触れる際の位置と応力分布の3次元計測を実現している。試作システムの構成を図2に示す。実物体に触れたときの触感を計測する際には、操作者が本システムの把持部を操作し、実物体と反力計測部の接触により得られる応力と位置が同時に記録される。本システムは、触感の表現システムとしても利用でき、計測した応力を把持部の位置に従って触覚デバイスの出力として提示すれば、計測した物体の触感を仮想的に再現できる。MREによって生体組織の弾性情報を取得できれば、本システムを用いて身体内部の臓器を仮想的に触診することが実現できると期待される。

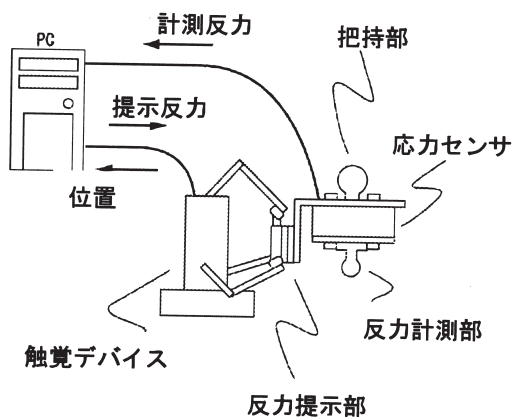


図2 触感を計測・表現するための試作システム

3. ヒト胎児標本の3次元画像データベース構築

医用工学の中でも医用画像に関する研究は、その成果が実用化に結びついた代表的な領域である。X線CTやMRIの開発がノーベル医学生理学賞の対象となったように、医用画像診断法は幅広く臨床応用され、医学・医療の発展に大きく貢献した。このような画像診断技術は臨床医学のみならず医学研究にも応用されるようになってきたが、中でも1986年に米国の国立医学図書館が提唱したVisible Human Projectは世界的に知られた研究である (http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html)。本プロジェクトは、成人男女それぞれ1体からX線CT、MRIおよび凍結切片カラー写真の3種類の詳細なデジタル画像データを取得し、研究・教育目的で広く世界に提供する計画であり、公開されたデータは人体の標準的3次元画像データとして既に幅広く利用されている。

Visible Human Projectの画像データは高い精度を持つ貴重なデータであるが、ヒトの一生の中では成人という一つの時点の形態情報に過ぎない。人体の内部構造に関する形態情報を生物学的な観点から考えると、受精卵という1つの細胞に始まり、細胞分裂を繰り返しながら様々な臓器・器官に分化し・変形して行く胎生期の成長過程は、成人という完成された状態よりも複雑で学術的にも興味深い対象といえる。このような胎生期の形態変化は遺伝子情報によって規定されていると考えられているが、多くの場合その関係は未だ不明である。ゲノム科学の進展に伴って、マウスの胎児を対象に遺伝子操作を行い、胎生期における遺伝子情報の時間的・空間的発現パターンを三次元的に視覚化しようとする試みが行われ始めているが、ヒト胎児を対象にすることは倫理的に不可能である。

そこで当研究室では、本学医学研究科附属先天異常標本解析センター（塩田浩平教授）と協力し、同センター所蔵の総計4万体制以上におよぶ世界的にも屈指のヒト胎児標本コレクションを利用して、ヒト胎生期の形態変化に関するデジタルアーカイブの構築に取り組んでいる。個々の標本はホルマリン固定されたマクロ標本や顕微鏡観察用の連続切片標本として保存され、母親の年齢や妊娠中の異常、胎児の発達段階、損傷の有無をはじめとした母親や胎児の状態を表す書誌情報と外表写真が付随し、氏名などの個人情報含まれていない。連続切片標本については各切片の顕微鏡写真から3次元画像再構成を行い、またマクロ標本は数十ミクロンの空間分解能を持つMRI顕微鏡（MR Microscope）を用いて3次元画像化し、様々な臓器・器官を抽出するとともに、その形態的特徴や変化を認識し整理する試みを行っている。ヒト胎児標本のMRI顕微鏡画像と3次元画像から臓器領域を抽出した例を図3とに示す。

胎生期における器官形成は主として妊娠初期に起こり、この間に形態が最もダイナミックに変化するため、まず体長が数cmまでの小さな標本を中心に画像データの蓄積を開始している。しかし、MRI顕微鏡を用いて小さな対象を高い空間分解能で撮影する場合、S/N比が低いため、鮮明な3次元画像データの収集には数時間を要している。共同研究を行っている筑波大学物理工学系NMRイメージング研究室（巨瀬勝美教授）では、膨大な数の標本群に対する今後の撮影に備えて、複数の標本を同時に撮影するシステムの開発を進めている。さらに、本学の学術情報メディアセンター（美濃導彦教授）では、電子的媒体による医学教材の作成を目的として胎児の正常な成長過程における形状変化を精密にモデル化する試みを行っている。我々の研究室が構築を目指すデジタルアーカイブでは、胎生期における形態異常を判断する指標として、このヒト胎児3次元形状モデル系列を利用する予定である。

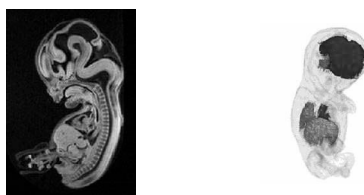


図3 ヒト胎児標本のMRI顕微鏡画像と3次元画像からの臓器抽出

4. 細胞・生体シミュレーション

ポストゲノムの時代における医学と情報学・工学の新しい融合領域として、情報科学の視点から生命現象を目指す研究が注目され始めている。文部科学省では平成15年度より「細胞・生体機能シミュレーションプロジェクト」を開始したが、本学は慶應義塾大学、神戸大学とともに3大拠点のひとつに選定され、医学研究科生体制御医学講座（生理学教室）の野間昭典教授を京都大学拠点リーダーとして研究プロジェクトを開始している（<http://www.biosim.med.kyoto-u.ac.jp/index.html>）。当研究室は本プロジェクトにおける情報学・工学領域の中心となって、細胞シミュレータの基盤システムを整備するとともに、心臓を対象とした臓器シミュレーションモデルの構築を行っている。従来の生体シミュレーションは、心臓の拍動に伴う脈流パターンや血管の分岐部および湾曲部に対して流体力学的なモデルを導入し血流を解析するような特定条件下のシミュレーションが一般的で、その生物学的な意義についても、流れの分布や血管壁への物理的な負荷と動脈硬化や動脈瘤の好発部位との関連性を論じるという限定的なアプローチにとどまっている。しかし、膨大な数の細胞で構成される個体からゲノムに至る階層構造の中で、生体には細胞という明確な単位があり、また細胞生物学の進歩によって細胞レベルでは様々な生命現象が物理的・化学的に解明され既に数多くの知見が蓄積されているため、細胞を基本要素としてマルチスケール・マルチフィジックスのシミュレーションにより人体を計算機上で構築するための素材も不完全ながら準備できつつあるといえる。

そこで、我々は心筋細胞の電気生理学現象に基づいて、血液を送り出すポンプである心臓の力学的機能をシミュレートするモデルの構築を行っている。細胞レベルのシミュレーションでは、既に野間教授らのグループが構築した“Kyotoモデル”という心筋細胞に特化したシミュレータを基礎としている。“Kyotoモデル”は生理学実験によりこれまでに明らかにされてきたパラメタに基づいて、細胞膜における各種イオンの通路であるイオンチャネルの開閉特性や細胞内外のイオン濃度あるいは電位差などをダイナミック計算するモデルで、細胞における生理現象や薬物投与あるいは低酸素など環境変化による影響を再現することができる。生体内の様々な臓器・器官を構成する分化した細胞は、それぞれに特有の働きを担う機能要素を備えているが、各種細胞に共通する構成要素も多く、本プロジェクトでは“Kyotoモデル”をもとに汎用化を行って、様々な種類の細胞に対応できる基盤システムの構築を試みている。

一方、臓器レベルのシミュレーションでは、“Kyotoモデル”を利用して心臓を対象とする力学シミュレーションを行っている。“Kyotoモデル”には心筋細胞の収縮要素が含まれており個々の細胞の収縮運動を再現することは可能であるが、これを心臓の形状に積み重ねるだけでは正確に拍動せず、細胞の配列や力学特性を表す粘弾性係数、興奮伝播の時間的な差異あるいは酸素やエネルギーを供給する血管からの距離などを考慮する必要がある。当研究室ではMRIで撮影した成人の胸部2次元画像データ群から3次元画像を再構成し、これを5000個あまりの6面体要素に分割した3次元形状モデルを作成した。また、心筋細胞はらせん状に配列しており、その結果単純な収縮運動ではなく雑巾を絞るように捻れながら収縮していることが知られているが、顕微鏡による観察結果かららせん配列を定式化した文献に基づいて各6面体要素の収縮方向を割り当て、さらに単離した細胞における計測結果として報告された粘弾性係数を適用している。このように3次元形状、細胞配列、力学特性がモデル化された6面体要素群に対して、“Kyotoモデル”により計算された細胞の収縮応力を適用し、有限要素法を用いて心臓全体の収縮運動の再現を試みている。図4に現段階における左心室の拍動シミュレーション結果を示す。今後、細胞配列や力学特性をより精密に計測するとともに、興奮伝播や血管支配などもモデル化して実装する予定であるが、この臓器モデルでは細胞レベルの生理現象が反映されているため、薬物に対する反応なども再現できると考えており、治療法の選択や創薬への応用を期待している。

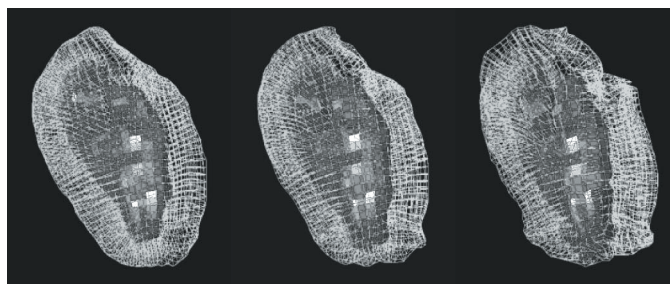


図4 左心室の拍動シミュレーション結果

5. おわりに

当研究室で行っている最近の研究内容を紹介してきたが、医学と工学はともに人間社会に密接に結びつく学問であり、その融合領域である医用工学の研究は社会的な貢献にも直結する。したがって、研究成果の実用化は医用工学の大きな研究目標の一つであるが、当研究室では応用面よりもむしろ基礎的あるいは学術的な興味に沿った姿勢で研究を進めている。このような研究姿勢は本学の特徴であるともいえるが、今後も応用を念頭に置きつつ学術的な意義を重視し、研究を発展させて行きたい。

産業界の技術動向

平成15年度電気系教室懇話会講演 日本のIT産業の現状と課題

株式会社 NTTデータ
浜 口 友 一

1. はじめに

平成15年10月27日に、京都大学電気総合館で行われました電気系教室懇話会で講演させていただきました内容を抜粋し、本原稿として寄稿させていただきます。

私は昭和42年3月に京都大学工学部電気工学科を卒業しました。卒業後、日本電信電話公社（現NTT）に入社し、昭和63年のNTTデータ通信（現NTTデータ）の発足とともに転籍し現在に至っておりますが、その間、一貫してシステムインテグレーション事業に携わってまいりました。現在は、昨年始めた営業改革プロジェクトで「お客様本位」をキーワードに、顧客満足度の向上を目指して営業面、開発面の強化に取り組んでおります。

本日はこれまでの経験を活かし、「日本のIT産業の現状と課題」というテーマで日本のIT化の現状、ITによる新価値創造に向けた取り組みや、NTTデータが考えていることなどを中心にお話させていただきますと思います。

2. 講演の内容

2.1. 日本のIT化の現状

日本のIT化の現状を個人・行政、そして企業という観点から見ると、個人ではインターネットの利用が広がり、さらにブロードバンド化が急ピッチで普及していることがわかります。ブロードバンドの普及率は22.3%に達しており、そのなかでも携帯からインターネットへの接続が増えてきています。

次に行政では電子政府に向けた施策が進行しており、電子申請などの各種基盤アプリケーション、またその基盤となる霞ヶ関WANなどが構築されています。今話題になっている住民基本台帳などはICカードを用いて個人認識が実現されるでしょうし、また確定申告のオンライン納税、車検登録のワンストップ化などが進められていく予定です。しかし、行政におけるIT投資額を日米で比較すると日米間でGDP比換算にして約1兆円の乖離があり、電子政府の推進に向けて、新たな投資が必要になってくるものと思われます。実際、電子政府の世界での評価を見ると、アクセンチュアの調査では日本は世界15位となっています。今後は提供サービスを増やすというサービス量の向上とともに、顧客（国民・企業）の立場にたったサービスの質の向上が必要になると考えられます。

最後に企業におけるIT投資の状況を見ると、GDP比率の比較では日米間であまり大きな差は見られません。しかし、IT投資に対する効果では大きな差が見られます。アメリカでは「効果が十分あった」とする評価が22.3%であるのに対し、日本ではわずか3.5%にしか過ぎません。また、企業のシステム連携の度合いを日米で比較すると、社内連携に大きな差は見られませんが社外との接続ではアメリカに大きく水を開けられている状況です。

これらの状況をまとめますと、日本ではブロードバンドの普及に始まりインフラや法制度は整いつ

つあるのに対して、利用者の立場にたったサービスの提供や組織を超えた連携という点で問題があるといえます。したがって、サービスを提供する側・受ける側、またさまざまなサービスを提供するプレーヤー同士を「結びつける」ことが、今後全体最適化を図り、そして新たな価値を創造していく上で不可欠であるといえるでしょう。

2.2. ITによる新価値創造に向けた取り組み ～e-コラボレーション～

NTTデータでは行政や企業、個人などさまざまなプレーヤーをITで「結びつける」ことで新たな価値が創造される新しいつながりの形態を、「e-コラボレーション」と呼び、その実現に向けてさまざまな取り組みを実施しています。

「e-コラボレーション」を実現するためには二つの異なるレベルでの取り組みが必要になります。ひとつはサービス層で、「官と民」、「企業と企業」、「コミュニティと企業」といった様々なプレーヤーを「結びつける」ことによって新たな仕組みを構築していきます。具体的な取組例の一部として、「自動車登録手続きのワンストップサービス」、「e-エアポート」、そして「eデモクラシー」について後述します。もう一方は技術層で、各システム間での「接続性」、「信頼性」、そして「組織間セキュリティマネジメント」を実現するITソリューションが必要となります。

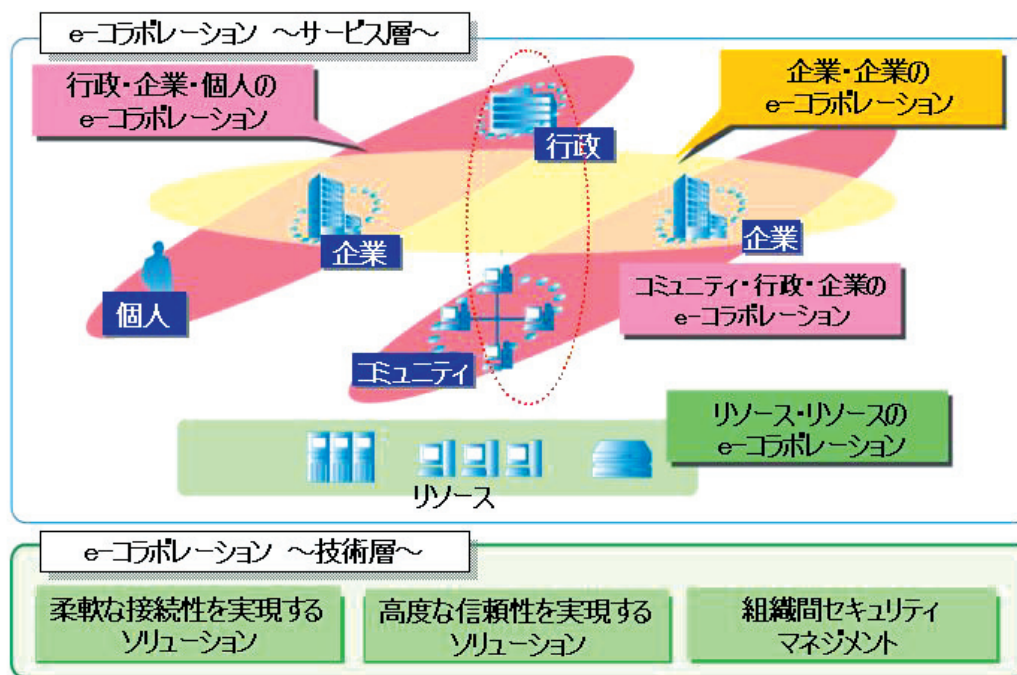


図1 e-コラボレーション概要

「e-コラボレーション」の例として、行政・個人・企業を結ぶ自動車登録手続きのワンストップサービスがあげられます。今までは自動車登録手続きのため、印鑑証明書は市区町村に、自賠責保険は損保会社に、といったように出頭申請を繰り返さなければなりませんでしたが、2005年に開始予定のこのサービスでは、申請者はインターネットにアクセスし公的認証を受ければ後はナンバープレートを受け取るだけということになります。また、同様の例として「e-エアポート」構想が挙げられます。空港を利用する際、特に国際線においては搭乗までに複雑な手続きが必要で時間がかかります。これは空港において複数の政府機関や航空会社など、関連する数多くの機関が関与して手続きを

進めているからです。こうした空港での諸手続きの場面でITを活用し、セキュリティを十分担保しながらも可能な限り連携し簡略化することでスピードアップを図ることを実現したのが「eチェックイン」であり、またICタグを利用することで手荷物を運ぶ労力から開放される「手ぶら旅行」を実現し旅行者の利便性向上を図ったのが「e-TAG」です。このような取り組みが「e-エアポート」構想です。アメリカでのテロ発生後、非常に高いセキュリティが求められている昨今ではITの役割がさらに期待されています。

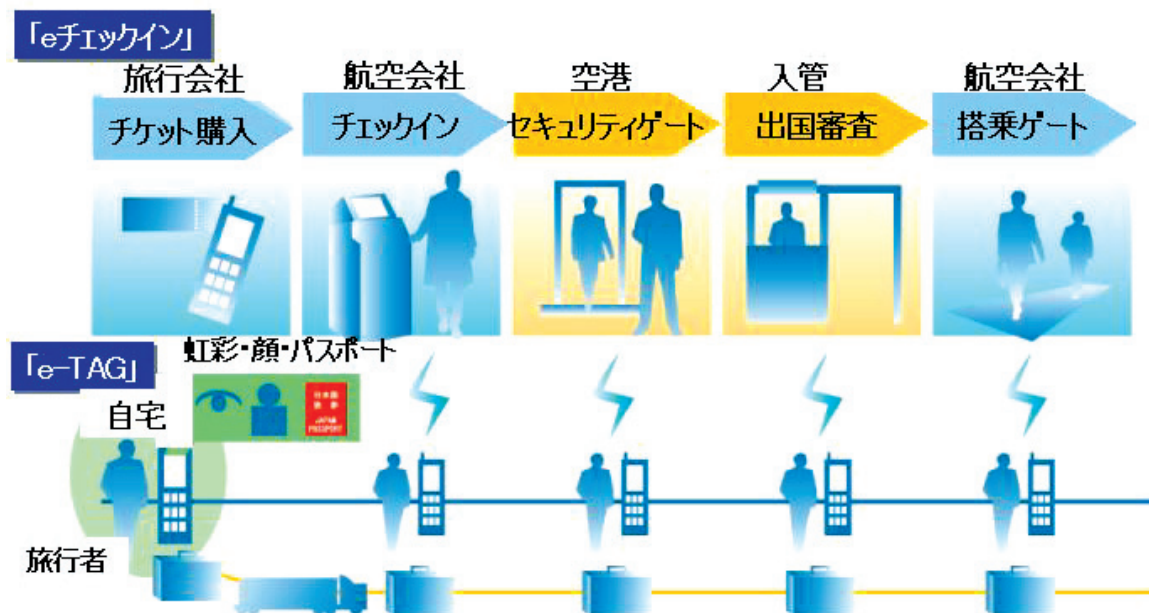


図2 e-エアポート概要

先ほどは行政・企業・個人の「e-コラボレーション」でしたが、行政とコミュニティの「e-コラボレーション」の例として「eデモクラシー」があります。「eデモクラシー」では市民が行政の政策作りに直接参画し、行政とコミュニケーションすることができるようになります。具体的にはインターネットで会議の様子を中継し、視聴する市民がネット上の電子会議室やチャットで自由な意見交換を行うことができます。また、ネット上の意見を集約しフィードバックすることで会議の論議が深まるかもしれません。会議が終わった後にも積極的に議論を交わすことも可能になります。このような「e-コラボレーション」により、時間と距離を越えた新価値が創造されるものとNTTデータは考えています。

2.3. これからのIT産業のためにNTTデータが考えること

ITの位置づけは効率化、コスト削減を実現するツールから社会や企業において新たな価値を創造するためのツールに変化しつつあります。これまでIT産業では稼働に対する時間単金とその工数によってコストを決定してきました。しかし、この方法では仕事の遅い人のほうがコスト高となってしまいます。実際、優秀なプログラマーとそうでない人とを比較すると生産性も品質もまったく違うといわれていますが、コストは優秀なプログラマーの方が低くなります。このことから、従来の方法により導き出されるコストは、お客様にとっての価値を表しているとはいえません。ITの複雑化により導入コストがますます増加している状況では、社会・企業はこれまで以上にITの導入効果・価値を意識することが必要になります。したがって、今後IT産業は「お客様にとっての価値（カスタマーバリュー）」を認識し明確にしていく努力が一層必要になっていくと考えられます。NTTデータではカスタ

マーバリューはITの投資対効果、経営への貢献度などを考慮して評価すべきだと考えています。いかえれば、ITがもたらす効果は現場での実作業から経営戦略にいたるまで広範囲にわたるので、これらを考慮することとなります。

カスタマーバリューを高めるためには、お客様に対してシステムの完成責任を負うシステムインテグレータ（SIer）の役割がますます重要となってきます。システム開発においてはハードウェアメーカーやソフトウェアベンダ、コンサルタントなどさまざまなプレーヤーがいるなかで、われわれSIerは発注者の要求を咀嚼し、多種多様なソリューションを組み合わせることでトータルシステムとして提供しています。

ところで、システム開発においては個人のスキルに頼った労働集約的な側面があることは否めません。より高い品質・効率を実現するためにも、またカスタマーバリューをより明確にするためにもCMMIのような標準的なプロセス改善により、定量的にそして系統的に改善を進めていく必要があると考えています。

また、より高まるSIerの役割を果たすためには人材育成が非常に重要になってきます。日本では従業員一人当たりの教育投資額は約5万円、期間は2～4日と言われているのに対し、欧米では約6万7千円、期間は4～8日とされています。NTTデータでは大きくわけて4つの育成コースを準備し、社員を教育していますが、これからはさらに専門化を進めていかななくてはならないと考えています。

2.4. さいごに ～これからの大学に期待すること～

大学と企業での研究状況を見ますと、大学で基礎・応用研究に投資している割合が91%なのに対し、企業では26%となっています。今後は産学間で協力する割合を増やしていかないといけないと考えています。具体的には、たとえば大学で開発研究まで行いそれをパテント化してもらえれば、企業としては協力しやすいし人的交流も進めていけるのではないかと思います。実際、TLOやVBLなどで徐々に産学協力体制ができつつあるので、今後とも継続してよい関係を築ければと考えています。

少し視点を変え、私どもとして学生の方々に期待することとしては、やはり企業にとっての即戦力となっていたいだきたいと思います。情報学はさまざまな分野と「結びつく」ことにより意味を成すため、さまざまな分野の実学を習得することが企業における即戦力になるためには重要だと考えています。したがって、ひとつの分野に集中するのではなく、さまざまな学問を、そしてその先にあるビジネスを常に意識していただきたいと思います。もう一点お願いしたいのはコミュニケーション力や課題形成力です。例えば、お客様と接する場合、お客様はそもそもご自身の課題が明確になっていないことがほとんどです。SIerの仕事は、お客様がご自身でわかっていない課題（暗黙知）を、様々なコミュニケーションを通じて形式知化し、お客様の真の課題を見つけ出し、課題の共有化を図るところからはじまります。そのためには、お客様とのコミュニケーションの中で問題を構造化し、論理的に分析し、仮説を設定し、検証する、といった一連の論理的な思考と、マナーなどを含めたコミュニケーション能力が求められます。したがって、企業において即戦力となるためには、実践を通じたこのような能力を高める学習が必要になってきます。

最後に、大学に期待する点として世界に通じるプロダクトの開発があげられます。現在、ソフトウェア産業は貿易赤字になっています。これからは産学がある程度リスクをとりながら、日本として世界に通用するプロダクトを作っていくための土壌を醸成していくことが必要になります。どのようにすればソフトウェア産業を輸出産業にしていけるのか、日本のIT産業を世界に通じる産業として育て、それらをしてこに日本の産業に新たな活力を生み出すためにどうすべきか、今後ともますます産学が密に連携しながら考えていかなければいけないと考えています。NTTデータは日本におけるIT産業のリーディングカンパニーとして、積極的に役割を果たして行きたいと思っています。

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「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)
- 電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野
- 電気エネルギー工学講座 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)

電子工学専攻

- 集積機能工学講座 (鈴木研)
- 電子物理工学講座 極微真空電子工学分野 (石川研)
- 電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野 (橋研)
- 電子物性工学講座 半導体物性工学分野
- 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野 (松重研)
- 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (藤田茂研)
- 量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研)
- 量子機能工学講座 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 (高岡研)

情報学研究科

知能情報学専攻

- 知能メディア講座 言語メディア分野
- 知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研)

通信情報システム専攻

- 通信システム工学講座 デジタル通信分野 (吉田研)
- 通信システム工学講座 伝送メディア分野 (森広研)
- 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講座 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 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)

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 § §

高等教育研究開発推進センター

- 情報メディア教育開発部門 (小山田研) § § §

注 § 工学研究科電子工学専攻藤田茂研と一体運営

§ § 工学研究科電子工学専攻橋研と一体運営

§ § § 工学研究科電気工学専攻荒木研と一体運営

電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 「数値電界計算法の高精度・高速・大容量化」

数値電界計算法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・境界要素法等の積分方程式系解法の高精度・高速・大容量化の研究を行っています。特に、高速多重極法 (FMM) ・ツリー法といった高速解法の適用により、 $O(N^2)$ の古典的計算コストを $O(N \log N)$ から $O(N)$ にまで削減して高速・大容量化を実現しています (N は未知数の個数)。計算法に関する研究としてはさらに、FMM用の密連立一次方程式ソルバの前処理手法開発や、空間木構造の階層的相似性を用いた擬似粒子FMMのM2L演算の高速化、辺上で幾何連続接続可能な面要素の開発なども行っています。現在、市販PCでも100万未知数程度の高次要素計算が可能になっています。こうした高精度・高速・大容量性能を活かして、複雑形状系 (特に、大小スケール混在問題) の応用計算を実施しています。図1は多体微粒子系の解析例 ($14 \times 14 \times 14 = 2744$ 体、 $N = 1059184$)、図2は雷雲下の人体形状導体への誘導電荷計算例 ($8 \times 20 = 160$ 体、 $N = 775106$)、図3はSF₆中沿面リーダ放電の周辺場計算例 (「画素データ→メッシュ：等サイズ変換」を用いた解析の例)、図4は片肺モデル周辺の電磁誘導電流密度の解析例 (多分岐細管系解析の例：血管・リンパ・神経系・染色体などにも有効性が期待) を示したものです。

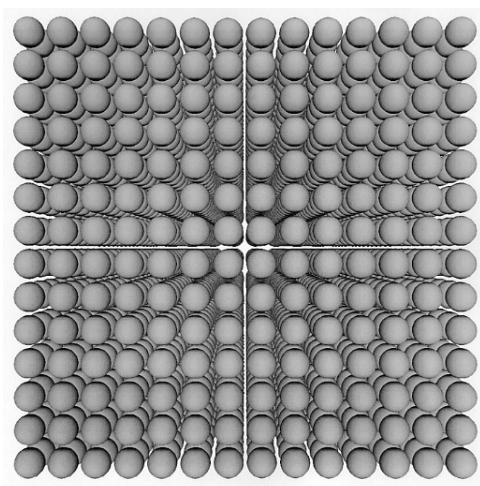


図1 一様電界下の2744体誘電体球

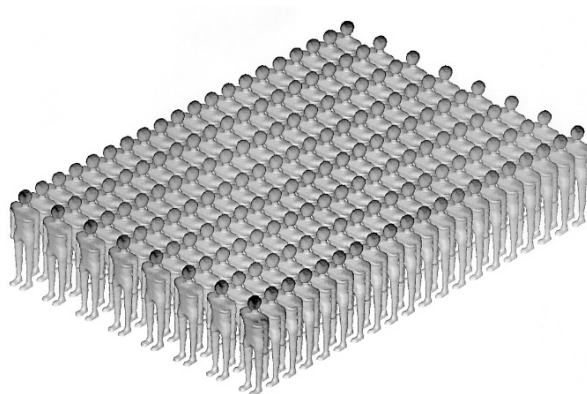


図2 雷雲下の160人体形状導体

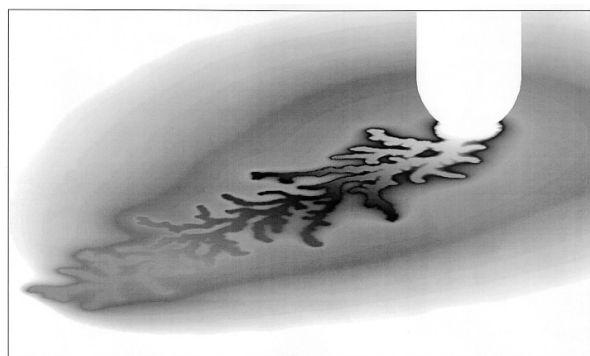


図3 沿面放電周辺場解析
(画素データ→メッシュ：等サイズ変換の例)

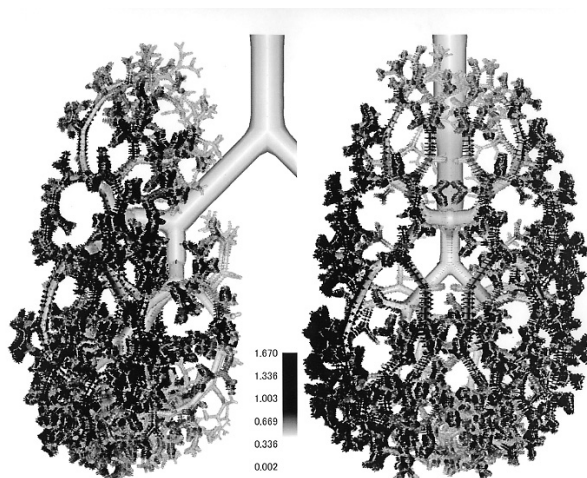


図4 片肺周辺電磁誘導電流場解析 (正面 & 側面図)

電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野（引原研究室） 「吸引形磁気浮上搬送系における浮上体の搬送制御」

物体を浮上させて非接触に搬送することは人類の夢の一つです。この様な搬送系では、従来不可能であった高速搬送や長時間運転が可能となります。その代表的な技術に磁気浮上があります。当研究室では、電気エネルギーの一形態である磁力を随意に制御するという観点から磁気浮上システムの研究を行っています。ここでは特に、浮上と推進を兼ねた電磁石による吸引形磁気浮上搬送装置の設計・製作を行い、搬送に伴う浮上物体の力学的挙動について検討した結果を紹介します。

当研究室で製作した磁気浮上実験装置の構成を図1に示します。本磁気浮上装置は電磁石と強磁性体を組合せた吸引制御方式によるものであり、電磁石を複数個使用して浮上した状態で搬送を実現します。この実験システムでは、(1)式に示す浮上体の垂直（上下）方向と移動（水平）方向に対する運動方程式および、(2)式に示す2つの電磁石に対する回路方程式をもとにして、電磁石の発生する磁束を電氣的に制御することにより、浮上体（鉄球）を浮上・移動させることができます。

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2}{dt^2} z = mg + f_{1z} + f_{2z} \\ m \frac{d^2}{dt^2} x = f_{1x} + f_{2x} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{d}{dt} i_1 + M \frac{d}{dt} i_2 \\ e_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{d}{dt} i_2 + M \frac{d}{dt} i_1 \end{array} \right. \quad (2)$$

但し、 L_1, L_2 ：電磁石1、2の自己インダクタンス、 M ：電磁石1、2の相互インダクタンス、 e_1, e_2 ：電磁石1、2の印加電圧、 i_1, i_2 ：電磁石1、2に流す電流、 R_1, R_2 ：電磁石1、2の抵抗、 m ：浮上物体の質量、 $f_{1x}, f_{1z}, f_{2x}, f_{2z}$ ：磁石1、2における移動方向、垂直方向の吸引力。

図2は電磁石の浮上制御により、電磁石から2 mm鉛直下方に浮上体を浮上させた状態を撮影したものです。浮上体を一つの電磁石下において浮上させた状態で静止させることは比較的容易に実現できます。一方、2つの電磁石の磁束制御による浮上体の搬送（移動）は静止状態を維持するのに比べ困難となります。これは、浮上物体が電磁石の中心軸から離れた場合に浮上物体が受ける吸引力が小さくなり、位置に応じて磁束を増減させる必要があるためです。本研究では浮上体の位置を測定すると共に、磁束を制御することで浮上体の移動速度を調整し、適切な搬送を行う制御を実現しています。また実験結果より、浮上体を搬送する軌道によって浮上体がうまく移動する場合と落下してしまう場合の力学的特徴を明らかにし、浮上搬送時の浮上体の軌道が重要な要素となることを示しました。

<参考文献>電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会編「磁気浮上と磁気軸受」コロナ社（1993）

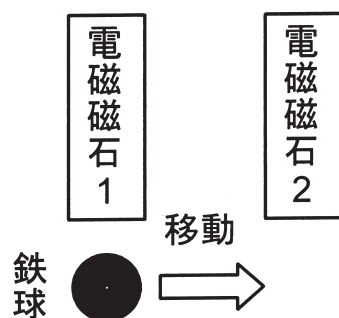


図1. 吸引形磁気浮上搬送装置の構成図

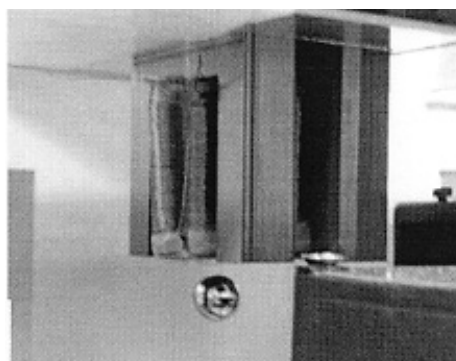


図2. 鉄球の磁気浮上及び搬送実験

電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「グレイコードを用いた算術演算回路」

1. はじめに

当研究室では精度保証付計算の研究の一環として、グレイコードを用いた算術演算回路の開発にとりくみ、現在では四則演算のアルゴリズムとそのハードウェア化を実現している [1]。グレイコードはA/Dコンバータやデジタル回路設計等、様々なところで利用されているが、四則演算がこれまで実現されていなかったため、演算が必要な場合は2進数に変換して計算を行なう必要があった。

グレイコードはとなりあうコードが1ビットしか異ならないという性質をもつ。図1は実数の表現において、2進コードとグレイコードの比較を表したものである。横軸が実数、縦軸の x_i は第 i 桁を示し、白線部と黒線部はそれぞれ各桁の値0,1を示している。例えば、区間 $(1/2, 9/16)$ は2進コードで.1000、グレイコードで.1100と表現される。また、区間 $(7/16, 9/16)$ は2進数では表現できないのに対し、グレイコードでは.1100と表現できる（1は不定を表す）。このようにグレイコードを用いると区間の適切な表現が可能となる。

2. グレイコードによる演算

グレイコードによる演算アルゴリズムは通常の2進数の場合とは異なり、次に述べるような著しい特徴をもつ。通常の2進数による演算は、筆算の場合のように下位桁からの桁上げを考慮して行なうため、上位桁からの計算はできない。しかし、上に示したグレイコードの性質を利用すると、区間の縮小列を適切に表現できるため、上位桁からの計算が実現できる。上位桁からの演算は応用上次のような特徴をもつ。

- ・上位桁から演算することにより、必要なところまで計算して打ち切ることができる。
- ・上位桁からの計算を続けることで任意精度の精度保証付計算ができる。

図2は、ある連立一次方程式 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ の解 x_1 の精度が入力 (\mathbf{A}, \mathbf{b}) の桁数の増加とともに向上していく様子を示している。上位桁からの計算により、解を表現する区間（黒線）が徐々に縮小する様子がわかる。真の解は黒線の中に存在するので、必要な精度に応じて計算を打ち切れればよい。

現在では、上に示したグレイコード演算の特徴を生かした応用に関する研究を行なうとともに、グレイコード演算器の小型化に向けた研究をCOE予算の援助により進めている。

<参考文献>

- [1] A. Yonemoto, T. Hisakado, M. Goto, and K. Okumura: "On-line Arithmetic Using Gray Code and Its FPGA Implementation," Proc. ECCTD, Vol. II, pp.317-320, 2003.

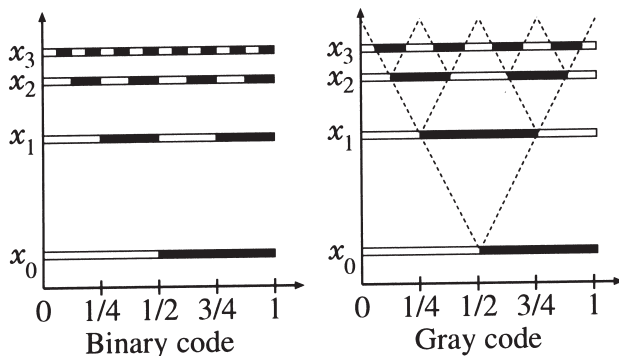


図1：2進コードとグレイコードの比較

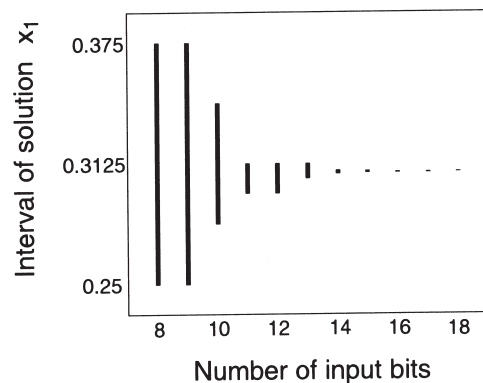


図2：入力桁数の増加に対する解の精度向上

集積機能工学講座（鈴木研究室）

「ジョセフソン効果による高温超伝導体の非一様性超伝導状態の研究」

高温超伝導体が発見されて17年が経とうとしている。その発現機構は、従来の超伝導を説明したBCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 機構とは異なるとされながらも、まだ明らかではない。常伝導状態では、電子間の強いクーロン相互作用により、超伝導体自身が、キャリアが存在して導電性を有する部分とスピンの反強磁性的に配列している絶縁性の部分に分かれて自己組織化し、ストライプ構造と呼ばれるエネルギー的に安定な微細斑構造となっていることが知られている。果たして、超伝導状態もこのような不均一な状態になっているのだろうか。これを知ることは、発現機構を明らかにする上でも、高温超伝導の応用に関しても大変重要である。われわれは、これまで当研究室で開発してきた短パルス層間トンネル分光法 [1] を用いてこの問題を検討してきた [2]。

超伝導状態の不均一性を確認することは難しい。超伝導状態では電気抵抗が0となるために、超伝導状態の不均一性に関係する長さや面積などスケールを含む物理量が現れてこないからである。不均一性のスケールが磁場侵入長よりも短い場合、マイスナー効果による差異も少なくなる。このような困難な問題に対して、固有ジョセフソン接合は極めて有効である。

固有ジョセフソン接合とは、高温超伝導体など、層状構造超伝導体で原子層1層程度に薄い超伝導層と絶縁層が交互に積層された構造を指し、それが天然の理想的なトンネル型ジョセフソン接合となっているものである。トンネル型ジョセフソン接合を考えると、ジョセフソン電流は障壁絶縁層の相対する両側が超伝導状態の時にのみ流れる。均一な超伝導体ならば最大ジョセフソン電流は接合の面積に比例するが、もし、不均一な場合には超伝導となる面積分率の自乗に比例することになる。この面積分率は不均一な常伝導状態における導電性分率とほぼ等しいと考えられるので、結果的に超伝導状態が不均一ならば固有ジョセフソン接合の最大ジョセフソン電流は c 軸方位導電率の自乗に比例することになる。また最大ジョセフソン電流は超伝導エネルギーギャップにも比例するので、超伝導ギャップの大きさも合わせて知る必要がある。このような物理量を同時に測定可能な方法が短パルス層間トンネル分光法である。

短パルス層間トンネル分光法では固有ジョセフソン接合を用いる。この方法では通常のトンネル分光で得られるエネルギー電子状態と同時に最大ジョセフソン電流など、 c 軸方向の輸送特性も同時に測定することが可能である。図1は転移温度 T_c が110Kの高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の短パルス層間トンネル分光結果で超伝導ギャップがホールキャリア濃度とともに減少する傾向を示している。同時に得られた c 軸方位導電率、最大ジョセフソン電流密度、常伝導トンネル抵抗などからわれわれは高温超伝導の超伝導状態が非一様である可能性を見出している [2]。

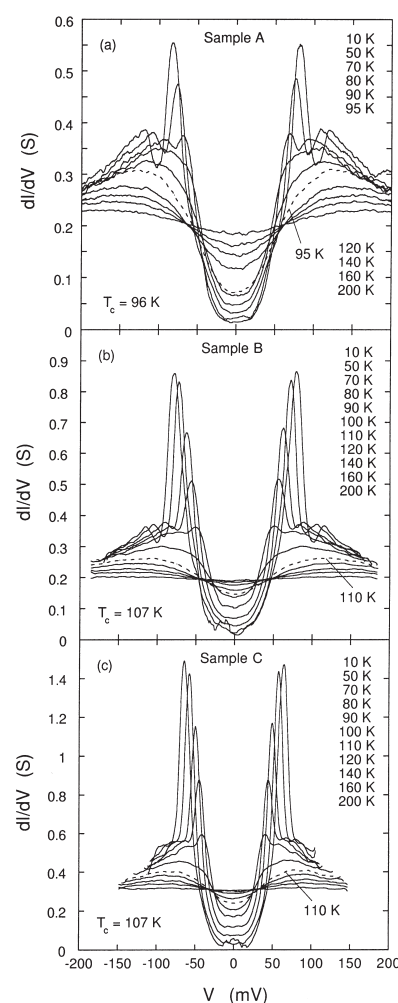


図1 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ 短パルス層間トンネル分光結果

[1] M. Suzuki, T. Watanabe, and A. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **82**, 5361 (1999).

[2] Y. Yamada, K. Anagawa, T. Shibauchi, T. Fujii, T. Watanabe, A. Matsuda, and M. Suzuki, Phys. Rev. B **68**, 054533 (2003).

電子物理工学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

「S—Kチャート法による微小電子源の電界電子放出陰極材料の評価」

真空マイクロエレクトロニクスあるいは真空ナノエレクトロニクスは、現在の微細加工法を駆使して半導体素子とほぼ同寸法であるミクロンあるいはナノ寸法の真空電子デバイスを開発する分野です。この分野は、半導体を遙かに越える超高周波素子、耐環境素子の開発の可能性を持っているばかりでなく、種々の新しいセンサー、超薄型の省電力ディスプレイなど実用的なデバイスへの期待も大きい領域です。このような極微小の真空デバイスを実現するために最も重要なことは、デバイス内部に電子を安定に供給できる極微小の電子源を開発することです。

ナノ寸法の電子源の電子放出の原理としてよく使われるのは電界電子放出です。これは、陰極の先端径が小さくなるほど先端の電界の集中度がよくなり小型化することが性能の向上につながるため、微小電子源に好都合だからです。電界電子放出特性は、ファウラー・ノルドハイムの式からも分かるように、エミッタ（陰極）材料の仕事関数と先端径などの先端構造に強く依存します。どのような材料が微小電子源の電界電子放出エミッタに適するか見極めることは、この分野の進展にとって非常に重要なことなので、当研究室の研究テーマの一つとして電界電子放出陰極材料の評価を行っています。

実際に動作しているエミッタの仕事関数や先端構造を知ることは非常に難しいことですが、当研究室では電界電子放出エミッタの電流—電圧特性から解析する方法を見いだしました。電界電子放出特性を評価する一般的な方法は、図1に示すように、電流、電圧をパラメータとした縦軸・横軸をもつグラフ（F—Nプロット）を描き、その特性が直線的であれば電界電子放出であると評価しています。しかし、この直線の傾きだけでは、材料の仕事関数と先端構造を独立的に知ることができません。F—Nプロットの切片と傾きを横軸—縦軸としたグラフ（S—Kチャート：図2参照）では、仕事関数（右上が低く、左下が高い）と等価的な放出面積（右下が大きく、左上が小さい）が2次元の座標位置によって評価できるようになります。図2中には、種々のxの値を持つNbN_xエミッタ材料の特性位置を示しています。点に添えた数字は他の方法で測定した仕事関数を示し、点の大きさが小さいものは雑音が少なく安定な材料であることを示しています。S—Kチャートによる評価は、図3に示すように、種々の異なった材料の特性評価にも利用できます。

S—Kチャートによる評価法は、国内の研究機関だけでなく、外国の研究機関においても利用されるようになってきています。

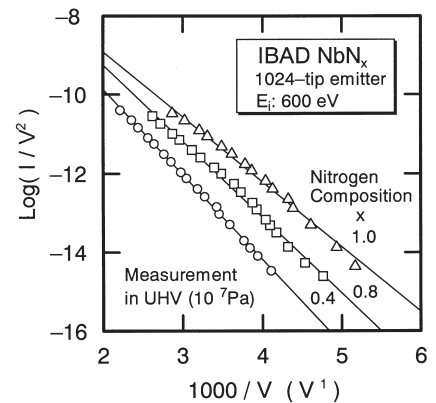


図1 F—Nプロット

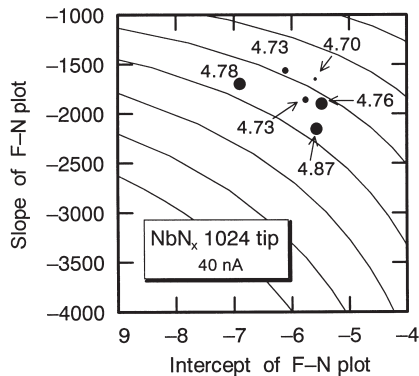


図2 S—Kチャートの例

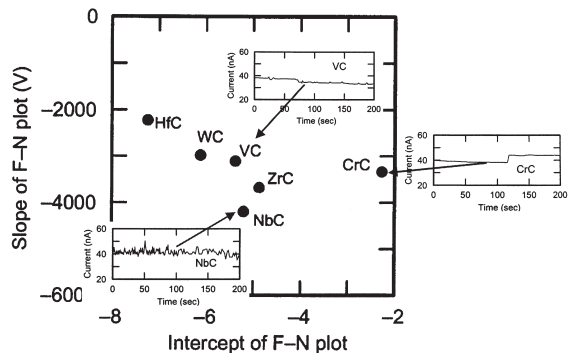


図3 S—Kチャートによる異なる材料の評価

電子物性工学講座 半導体物性工学分野

「ワイドギャップ半導体SiCを用いた高耐压横型MOSFETの作製」

シリコンカーバイド (SiC) は、高い絶縁破壊電界や熱伝導度を有するワイドギャップ (広禁制帯幅) 半導体であり、これを電力変換用パワーデバイスに適用すれば、現用のシリコン (Si) デバイスの性能を大きく打破する高耐压・低損失・高速の電力変換システムを構築するキーデバイスを実現できると期待されている。このSiCの優れた物性は古くから認識されてきたが、結晶成長、欠陥制御、物性の解明、表面や界面制御、デバイス作製の要素技術などでSiやGaAsに遅れをとってきた。しかしながら、近年、この分野の進展が著しく、3インチウエーハの市販や300V/600V系ショットキーダイオードの市販が始まった。今後、SiCを用いて高速・低損失・高速の電力変換システムを実現するためには、高性能SiCパワースイッチ (トランジスタ) が必須となる。

本研究では、電圧駆動、並列動作が容易、安全動作領域が広いという特長を有するパワーMOSFETに着目した。SiパワーMOSFETでは、耐压の上昇と共にオン抵抗 (直列抵抗) が増大し、300V以上の耐压では実用的ではなくなる。これをSiCで実現できれば、600V~3000V程度の高耐压でも極めてオン抵抗の小さい (電力変換時の損失の小さい) MOSFETを実現できる。大電力用のシステムには、縦型のディスクリットデバイスが使われるが、小~中容量用途には制御回路や駆動回路との集積化が容易な横型デバイスが有利である。そこで、本稿ではSiCを用いた横型パワーMOSFETを目指した基礎研究を紹介する。

図1に、今回作製したSiC横型MOSFETの断面構造を示す。高耐压を維持するために、RESURF (Reduced Surface Field) 構造を採用し、さらにドレイン端での電界集中を緩和するために、LDD (Lightly Doped Drain) 構造を用いた。まず、二次元デバイスシミュレータを用いて構造設計を行った。ドレイン端の電界集中によるpn接合のアバランシェ破壊とゲート端における酸化膜の絶縁破壊を考慮して、RESURF領域、LDD領域の最適ドーピング密度などを決定した。次に、SiC基板上にp型SiC層をエピタキシャル成長し、複数回のイオン注入によって図1の構造を作製した。ゲート酸化膜は高温での熱酸化により形成した。チャンネル長は $3\mu\text{m}$ 、チャンネル幅は $200\mu\text{m}$ 、ゲート酸化膜厚は130nmである。

図2に作製したSiC MOSFETのドレイン特性の一例を示す。MOSFETはしきい値電圧1.0Vの良好なFET特性を示し、ゼロゲート時に1620Vという高いドレイン耐压を得た。この耐压はRESURF MOSFETとしては最高値である。また、ゲート電界 2.5MV/cm におけるオン抵抗は $242\text{m}\Omega\text{cm}^2$ となり、Si MOSFETの理論限界を超えることができた。今後は、MOS界面特性の向上によるオン抵抗のさらなる低減が課題である。本研究は、将来の高耐压パワーICの実現に貢献するものと考えられる。

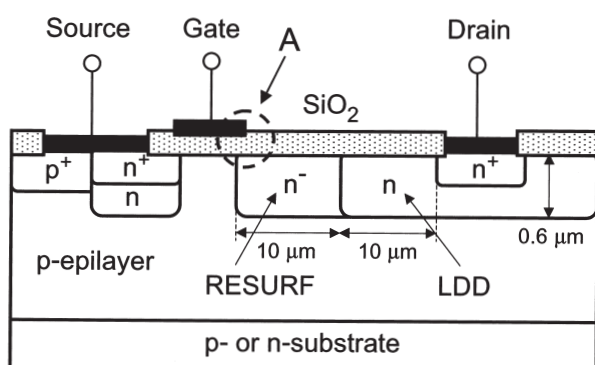


図1 SiC横型MOSFETの断面構造

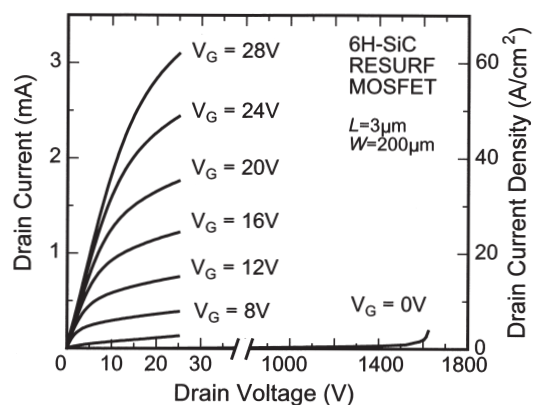


図2 作製したSiC横型MOSFETのドレイン特性

量子機能工学講座 光材料物性工学分野（藤田茂夫研究室）

「窒化物系歪み量子構造における電界制御に基づいた発光効率の向上」

GaNを中心とした窒化物半導体によって、既に紫外-緑色領域での発光ダイオード（LED）やレーザーダイオード（LD）が実用化され、信号機の光源、白色LED用光源、ブルーレイディスク用光源、医療機器用光源、など様々な分野において応用が広がっている。発光波長を拡大できれば、さらに大きな応用分野（=市場）の開拓につながると期待され、AlGaN（短波長用）やInGaN（長波長用）の研究は現在の最重要課題の一つとなっている。ここで問題となるのは、AlN、GaN、InNの間に存在する格子定数差である。AlN-GaNの格子不整は約2%であり、一方、InN-GaNのそれは11%にも達する。したがって、発光素子の基本形である量子井戸構造を、例えばInNを井戸層、GaNを障壁層として作製した場合、格子不整に耐えてInNが歪むか、あるいは耐えることができず欠陥が導入される。歪みも欠陥も発光効率を低下させるため、結果として高効率の発光を得ることが難しくなる。当研究分野では、歪による発光効率の低下をいかに避けるかを理論的に検討し、その実現に向けた基礎的な実験を行っている。

GaNをはじめInN、AlNは全てイオン結合の傾向が強く、結晶が歪むとイオン結合に起因した分極のバランスが崩れピエゾ電界が発生する。ピエゾ電界の有無による量子井戸構造のバンドの変化を電子と正孔の波動関数とともに図1に示した。ピエゾ電界がないとき（a）は、電子と正孔の波動関数（存在確率に関連）は位置的に良く重なっているため両者は効率よく再結合し、発光効率は高まる。一方、ピエゾ電界があると（b）、電界によってバンドに傾きが生じ、電子と正孔の波動関数が反対方向の井戸-障壁界面に押し付けられるため、両者の重なりが小さくなる。このことは、両者が同じ位置に存在する確率が減る、つまり再結合確率が低くなることを意味しており、結果として発光効率の減少につながる。GaN/InGaN(3nm)/GaN量子井戸構造を例にとり、ピエゾ電界の大きさを結晶軸（c軸）の傾きの関数として計算した結果を図2上段に示す。同図下段はピエゾ電界の存在の結果として、再結合確率がいかに変化するかを計算した結果である。既に述べたようにピエゾ電界が大きい（小さい）と再結合確率は小さく（大きく）なる。通常のデバイスは結晶軸傾斜0度（c軸配向）であるから、大きなピエゾ電界を内包し、再結合確率が低いことが分かる。一方で、結晶傾斜角を37度か90度とできればピエゾ電界が0となり、歪による発光効率の低減を避けることができると期待される。

実際に作製するために、われわれのグループでは、GaAs{114}B基板を利用することを提案している。というのも、有機金属気相成長法によりGaAs{11n}基板（ $n=1,2,3,4,8$ ）上にGaNの結晶成長を試みたところ、{114}B基板上で、最も構造的・光学的に優れたGaNが作製でき、しかもそのとき結晶軸が約30度傾くことがわかったからである。図2を見ると、結晶軸傾斜30度ときは、c軸配向（=0度）と比べて、ピエゾ電界が抑えられ、再結合確率が増加することがわかる。

したがって、この基板を用いて発光素子が作製できれば、再結合確率を著しくは損なうことなく、In組成やAl組成を増やし、波長領域の拡大が可能になると期待され、現在、その実現に向けた実験研究を行っている。

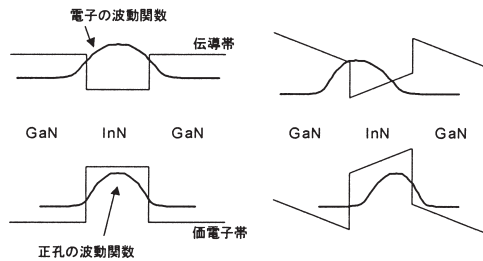


図1：ピエゾ電界がない場合（a）とある場合（b）のバンドと電子・正孔の波動関数の様子

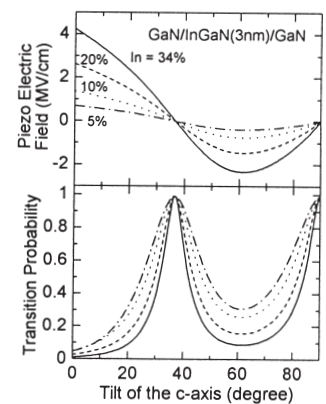


図2：ピエゾ電界と再結合確率の結晶軸（c軸）傾き依存性

クラスターイオン工学部門（高岡研究室）

「液体クラスターイオンと固体表面との相互作用の研究」

1. 研究の背景

原子、分子あるいはクラスター状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、液体材料はあまり検討されていませんでした。液体材料には、有機化合物のように、多種・多様な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持つ液体物質のクラスターイオン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。また、クラスターイオンと固体表面との相互作用はフェムト秒からピコ秒の瞬時の多体衝突過程であり、クラスター自身の化学的特性を併用することによって、瞬時の化学反応を制御することができます。さらに、クラスターイオンの運動エネルギーを利用することができるので、固体表面の特定の原子結合を切断したり、表面を局所加熱したりすることが可能となります。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、液体クラスターイオンの生成および固体表面へのイオン照射効果の解明を目的として研究を行っています。

2. 研究の成果

開発したクラスターイオンビーム装置を用いて、液体クラスターを生成することに成功しました。特に、液体の有機化合物の中でも比較的構造が簡単で分子量の小さいエタノールを用い、生成したエタノールクラスターイオンのサイズ分布や各種基板への照射特性を明らかにしました。図1は液体クラスターソースの概略図です。加熱された液体物質の蒸気は、液体ソースの一端に接続されているノズル喉部の小孔を通して真空中に噴射されます。このとき、断熱膨張によって塊状分子集団すなわちクラスターが生成されます。さらに、生成されたクラスターは、電子衝撃によってイオン化され、減速電界法によってサイズ分離された後、加速されて基板に照射されます。

図2は、生成したエタノールクラスターのサイズが95以上のクラスターイオンを、シリコン（Si）基板および酸化シリコン（SiO₂）膜に加速電圧を変えて照射して、シリコン基板および酸化シリコン膜がそれぞれスパッタされた深さを示します。図に示すように、シリコン基板については、加速電圧の増加と共に、スパッタされた深さは急激に増大しているのがわかります。また、スパッタリング率を計算すると、加速電圧が9 kVでは178atoms/ionの値が得られ、従来の単原子のアルゴンイオンビームによるスパッタリング率に比べて、100倍以上のスパッタリング率が得られています。また、酸化シリコン膜に比べて、シリコン基板のスパッタリング率は7倍以上と大きく、エタノールクラスターイオンによる化学エッチングが優先的に生じていることがわかります。

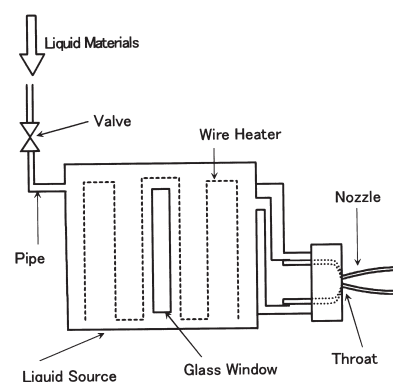


図1 液体クラスターソースの概略図

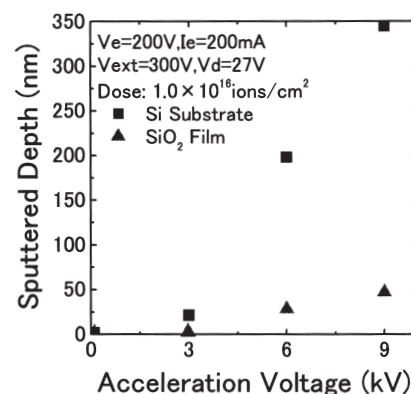


図2 Si基板およびSiO₂膜のスパッタ深さの加速電圧依存性

知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研究室)
 「3次元ビデオの生成・編集・表示」

1. 3次元ビデオとは

3次元ビデオは、コンピュータグラフィックスによる仮想的な3次元アニメーションではなく、ダンスやスポーツをする人間、自然界の動物などの生の姿・形・色の時間的変化を3次的にそのまま記録した実写立体ビデオ映像で、実世界における対象の振る舞い・動作を余すところなく記録した究極の映像メディアである。我々は、3次元ビデオという新たな情報メディアを開拓し、デジタルテレビ放送、広帯域インターネットを活かした21世紀における映像メディア技術および文化を産み育てることを目的として研究を進めている。

2. 研究成果

現在開発中の実時間3次元ビデオ撮影システムは、人物の周囲に配置された25台のビデオカメラと30台のPCを持つPCクラスタから構成されている(図1)。各PCにはそれぞれ我々が開発した視点固定型パン・チルト・ズームカメラが備えられており、移動する対象を実時間で追跡してその映像を撮影することが可能である。

システムでは以下の方法で3次元ビデオの生成を行っている。

- (1)各PCにおいて、カメラで撮影されたビデオフレーム画像(図3最上段)から背景差分によって多視点から見た対象のシルエットを抽出する(図3上から2段目)。
- (2)各カメラの投影中心を中心としてシルエットを3次元空間に逆投影し、得られた視体積の積集合によって対象形状の3次元ボクセル表現を求める(図3上から3段目)。
- (3)視体積交差法で得られたボクセルデータの表面に3角形パッチを張ったのち、パッチの頂点位置を移動させることによって正確な対象の表面形状を求める(図3下から2段目)。
- (4)パッチ上のテクスチャや色は多数のカメラによって写されているため、パッチが最もよく写っている画像を選び、その画像上のテクスチャ・色をパッチに張る(図3最下段)。
- (5)以上の処理で、1フレームの3次元ビデオが生成され、動画を作るには(1)~(4)の処理を繰り返せばよい。

図2はダンスをしている女性(一人)の姿を撮影した3次元ビデオを、3次的にコピーし、京大の時計台を写した360°全方位画像を背景として編集した3次元ビデオ作品で、対象を見る視点の位置・移動法、ズーム倍率を視聴者がその場で対話的に指定できる。また、対象の3次的な運動が克明に記録されているため、スポーツや踊りにおける動作分析がより正確に行える。

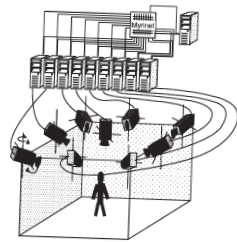


図1 3次元ビデオ撮影システム

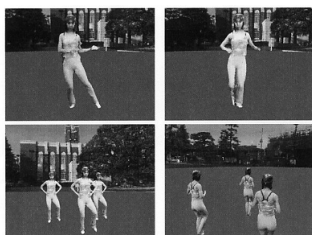


図2 編集された3次元ビデオ

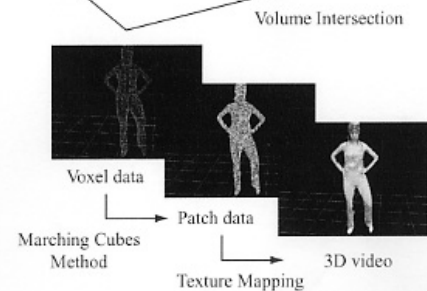


図3 3次元ビデオの生成プロセス

通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室） 「ブロック暗号を利用した暗号用ハッシュ関数の安全性の解析」

近年のインターネット、携帯電話網の急激な普及により、様々な社会活動が通信ネットワーク上で行われる高度情報化社会が到来しつつある。それらの活動を安全かつ円滑に行うためには、セキュリティを保証するための暗号技術が不可欠である。

暗号用ハッシュ関数 (cryptographic hash function) は、任意の長さの入力を固定長の出力に変換する関数であり、例えば、デジタル署名を行う際のメッセージの圧縮など、様々な暗号方式で利用される重要な要素の一つである。このような暗号用ハッシュ関数は、同じ出力を与える入力が多数存在するが、以下の二つの性質を満たすことが要求される。これらの性質 (の少なくとも一方) を満たす暗号用ハッシュ関数を安全であると呼ぶ。

- (1) ある入力を与えられたとき、その入力と同じ出力を与える別の入力を見つけることが難しい。
- (2) 同じ出力を与える相異なる入力の組を見つけることが難しい。

暗号用ハッシュ関数は通常図1のように、圧縮関数と呼ばれる固定長の入出力をもつ関数 f の縦続接続により構成される。圧縮関数の構成法の一つとして、これまでに、DES (Data Encryption Standard) や AES (Advanced Encryption Standard) のようなブロック暗号を利用した構成法が提案されている。このような構成法は、安全なブロック暗号を用いることにより安全な暗号用ハッシュ関数が構成できるという期待に基づいている。いくつかの例を図2に示す。なお、この図で四角形がブロック暗号の暗号化関数であり、この中の三角印への入力が暗号化関数の秘密鍵に対応する入力である。

図2の例のように、圧縮関数がブロック暗号の暗号化関数を1回だけ用いて構成される暗号用ハッシュ関数の安全性については、これまでに次の二つの結果が知られている。一つは理想的な仮定の下での結果であり、暗号化関数が真のランダム関数であるという仮定の下で、図2の例を含む圧縮関数からなる暗号用ハッシュ関数が上述の(1)、(2)両方の意味で安全であるということが証明されている。もう一つは現実的な仮定の下での結果であり、暗号化関数が擬似ランダム関数であるという仮定の下では、上述の(2)の意味での安全性を証明することはできないということが知られている。ここで、擬似ランダム関数であるということは、ブロック暗号が現実的な時間で解読できないことを示している。

われわれは、暗号化関数が擬似ランダム関数であるという仮定の下で、反例を示すことにより、(1)の意味での安全性を証明することができないことを明らかにした。現在は、圧縮関数が暗号化関数を2回用いて構成される場合についての検討も進めており、これについてもいくつかの結果を得ている。

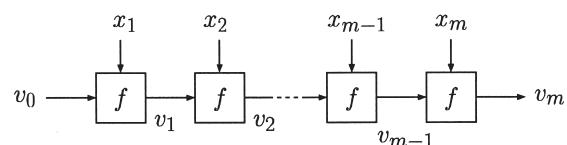


図1：圧縮関数を用いた暗号用ハッシュ関数の構成

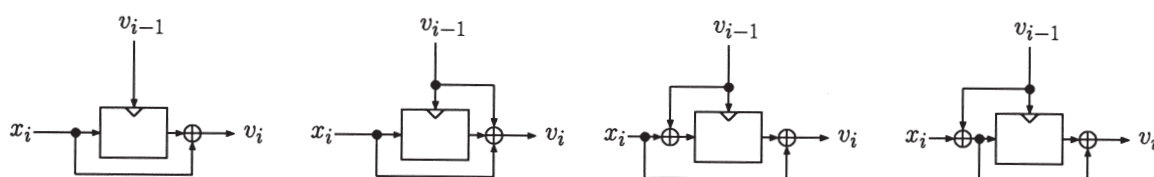


図2：ブロック暗号を利用した圧縮関数の構成例

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） 「高性能スタンダードセルライブラリの開発」

現在のシステムLSIやASIC（Application Specific Integrated Circuit）の設計では、セルと呼ばれる論理ゲートに相当する部品を用いた設計が一般的です。このようなセルベース設計では、品質の高いスタンダードセルライブラリを用いて設計することが高性能な回路設計に必須となっています。当研究室では、これまでにセルのレイアウトを自動生成するシステム（VARDS）を開発してきました。このシステムを利用し、必要に応じて機能拡張することにより0.18 μm プロセス、0.35 μm プロセス向けのスタンダードセルライブラリを開発しました。開発したライブラリは東京大学に設置されている大規模集積システム設計教育センター（VDEC）を通じて公開されており、日本の多くの大学におけるLSI設計に利用されています。

では、開発したライブラリの詳細について説明しましょう。セルライブラリの特徴を表す指標にセル高さがあります。高さの高いセルは、内部のトランジスタの寸法を大きくとることが出来るため駆動力が高く、大規模高速回路の設計に適しています。一方、高さの低いセルでは、トランジスタ寸法が小さく容量が小さいことから、低消費電力小面積回路の設計に適します。0.35 μm 向けのライブラリでは、設計者が設計したい回路の性質にあわせてライブラリが選択できるように、高さが14配線ピッチ、9配線ピッチの二つのライブラリを開発しました（図1参照）。セルライブラリに含まれるセルの構成として、論理の種類と駆動力の種類二つの軸があります。近年は、相対的に配線負荷が回路性能に影響を与えるようになってきているため、駆動力の種類が豊富にあることが高性能な回路設計に不可欠となっています。開発したライブラリでは、インバータやバッファなどの基本セルで11種類、他の論理ゲートについても3-8種類程度と豊富な駆動力を提供し、高性能回路設計に貢献しています。また、トランジスタ寸法が非常に小さいセルも含ませており、低電力回路の設計にも有効なライブラリとなっています。ライブラリの公開には、正常な動作の確認が不可欠です。誤りがあった場合、ライブラリ利用者の設計したLSIすべてが動作しなくなるためです。公開を行なう前に、シリコン上でスタンダードセルの正常動作を確認するためにテスト回路を設計、製造、評価しました（図2参照）。論理の検証、動作の検証を行ない、正常な動作を確認しました。初期に公開したライブラリにはCADツールへ与える情報に関していくつか問題がありましたが、利用者からのフィードバックを元に多少の修正を行なうことで解決できました。研究成果を研究室内だけにとどめておくのではなく、外部に発信、提供する取り組みも行なっています。

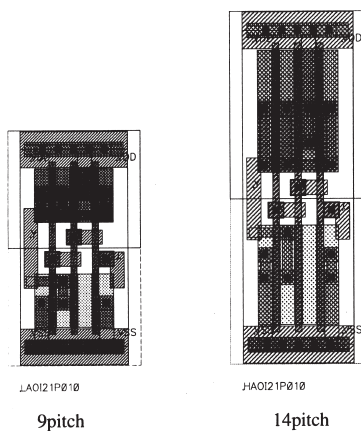


図1 高さの異なるセルレイアウトの例（AO121ゲート、0.35 μm プロセス）

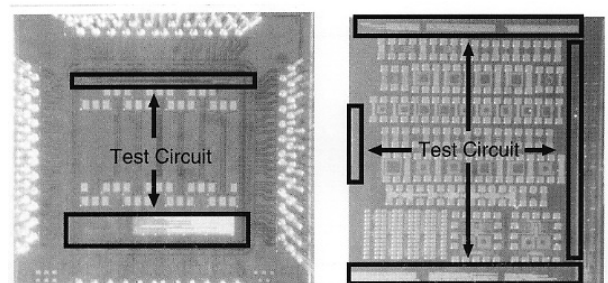


図2 動作検証用に試作したチップの写真（左：0.18 μm プロセス、2.8mm \square 、右：0.35 μm プロセス、4.9mm \square ）

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） 「拡張現実感技術を用いたプラント保守作業支援システムの開発」

近年、電力自由化等の影響で、発電プラントの信頼性・安全性の向上と運転管理コスト軽減の両立が求められるようになった。そこで最近情報技術の適用によりプラント保守管理の合理化が検討されているが、当研究室では、IT技術を用いてプラント保守作業を支援することを目的として、拡張現実感技術を用いたプラント保守作業支援システムの開発を進めている。

拡張現実感技術とは、図1、図2に示すようにHMD（ヘッドマウントディスプレイ）等のデバイスを装着した作業員の視界中に、コンピュータを用いて合成した人工物を重畳して表示することにより、あたかも目の前に人工物が存在しているかのような感覚を提示する技術である。この技術の特徴は、作業員が作業環境内を動き回っても、常に視界中の適切な位置に作業支援情報が提示されるため、従来の紙やディスプレイを用いた情報参照方法と比べて、直感的に作業対象箇所や危険箇所の情報を参照できることである。

この拡張現実感技術を用いたプラント保守作業支援システムを実現するためには、作業員が見ている位置・方向を高精度・リアルタイムに計測するトラッキング技術が不可欠であり、これまでの技術では作業環境に位置が判るマーカなどを貼っておき、これを基点に位置・方向を計算する手法のため、事前に多数のマーカを作業環境に設置しておかねばならない。そこで、当研究室では、システムの運用性を向上させるために自然特徴点とジャイロ・加速度センサを併用したマーカレスのトラッキング技術を開発している。この技術が実現されると、拡張現実感技術の適用可能範囲が大幅に広がることになり、医療・産業・教育・娯楽などの様々な分野で拡張現実感技術が利用されるようになることが期待できる。

一方、実際の現場作業に拡張現実感技術を適用するためには、個々の現場に応じて適切なインターフェースを設計することも重要である。当研究室では、各種HMDやPDA、TabletPC等の情報参照機器を用いて保守作業支援システムを実現した場合の、作業員ワークロードを各種ユーザビリティ評価実験を通して定量的に計測する研究も行っている。

さらに、当研究室では、RFID（Radio Frequency IDentification）と拡張現実感技術を連携させることにより、プラントの系統隔離作業を対象に、支援システム使用時の作業の直感性と信頼性を両立させるための手法の開発も行っている。

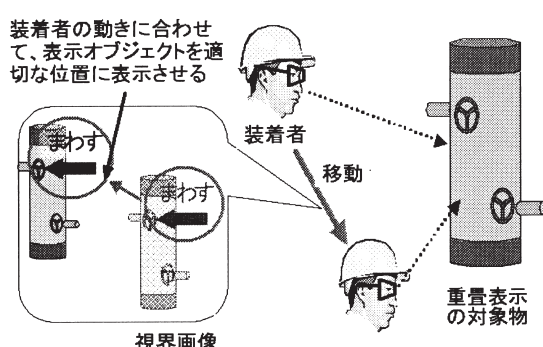


図1 拡張現実感を用いた重畳表示

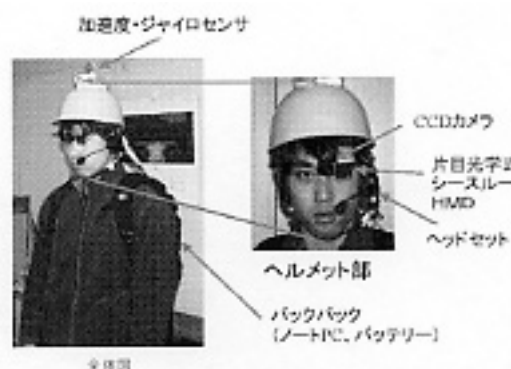


図2 システム外観

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LHDコイルの安定性」

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す。核融合科学研究所のLarge Helical Device (LHD) は超電導コイルを用いた世界最大規模のヘリカル型プラズマ実験装置であり、そのヘリカルコイルは4.4Kの液体ヘリウム (He I) で冷却されています。コイルの更なる安定化・高磁場化のためには、1.8Kの超流動ヘリウム (He II) で冷却することが考えられます。超流動ヘリウムは粘性がないため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安定化・高磁場化を実現する冷却材として期待されています。本研究では、実機ヘリカルコイルを超流動冷却した場合の性能改善を予測するために、実際にヘリカルコイルに用いられている도체を使って小型の試験コイルを製作し、He I冷却とHe II冷却を比較して安定性試験を行っています。図1に示したのは導體の断面図です。

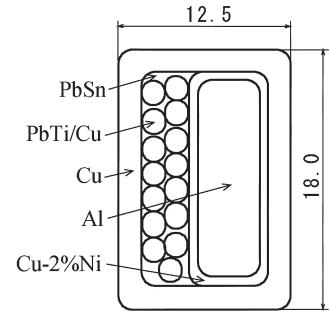


図1 LHD導體の断面図

設計製作した試験コイル (図2) は、半径160cm、高さ260cmで、ボビン上部で導體の両端を接合した短絡コイルとなっています。これは数十kAにも及ぶ臨界電流を持つLHD導體に外部電源から電流を供給するのが難しいため、試験コイル外周に設置された外部磁場印加用超電導マグネット (内径20cm、最大磁場7T) から電磁誘導を応用して電流供給を行うためです。つまり、外周マグネットの電流を増加させることで、試験コイルに数十kAもの試験電流を誘起させます。実験は、外部磁場印加用マグネットに通電することで試験コイルに一定の磁場及び電流を与えた後、試験部に取り付けたヒータによりパルス状の熱入力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し、熱の伝播と共に常電導部が伝播する過程を導體に設置した電位タップや温度計により観測します。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しきい値となる通電電流を限界電流として試験コイルの安定性を考察します。

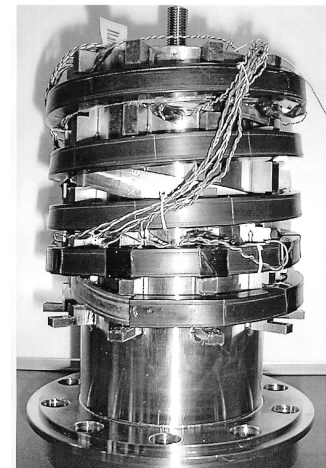


図2 LHD試験コイル

この導體は図1に示すように左右対称な構造をしていないため、ある電流と磁場の範囲で、短い長さの常電導部が一時的に進行波のように片側だけに伝播し、消滅するという興味深い現象が起こります。図3は試験結果の一例を示しており、 I_{r1} がヒータ部付近だけに常電導部が発生し、ヒータを切ると超電導に回復する領域の最大電流を示しており、 I_{r2} 以上では常電導部が両側に大きく伝播します。この二つの電流値の間に挟まれた領域で片側伝播が観測されます。 I_{r2} を基準として安定性を考察した場合、常流動冷却から超流動冷却に移行することで、LHD導體の安定性は大きく改善されることが分かります。今後、更に低い温度領域での安定性を明らかにすると共に、何故片側伝播のような現象が起こるのか解析することを計画しています。

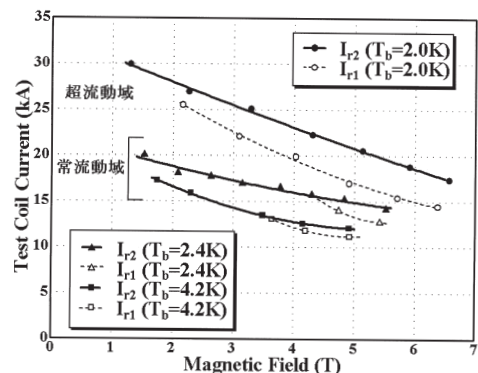


図3 安定性試験結果
 (熱入力125W、パルス幅100ms)

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） 「ヘリオトロンJ装置のECHプラズマにおけるH-mode特性の解明」

ヘリオトロンJ装置（標準回転変換0.557、大半径1.2m、小半径0.1-0.2mの低磁気シア・ヘリカル軸ヘリオトロン配位）における高温プラズマ閉じ込め研究では、次世代のヘリオトロン磁場の開拓を目指して、高温プラズマの更なる閉じ込め改善を達成するための新たな概念開発実験を展開することを、その主要な研究目的としている。今回の報告では、最近見いだされたECHプラズマの閉じ込め改善モード(H-mode) について紹介する。

H-modeの閉じ込め改善は当初、ドイツのASDEXトカマク（Wagner, 1982）で発見され、その後、他の多くのトカマク及びステラレータでも見出されるに至った。現在、核融合を目指した高温プラズマ閉じ込めの改善にとって1つの必要条件と認識されている。しかし、その発生メカニズムの解明や効果的な制御法の開発については多くの課題が残されたままとなっている。高磁気シアを特徴とするヘリオトロンE装置（1980-1997）では明確なH-modeによる閉じ込め改善が見い出されなかった実験事実を背景として、新たに構築された低磁気シア・ヘリオトロンJ装置での関連する実験結果が期待されていた。

これまでのヘリオトロンJ装置の70GHz, 0.4MW ECH実験では、通常モードでの閉じ込め特性として、国際ステラレータ比例則（ISS95）を凌駕する良好な閉じ込め特性を明らかにしてきたが、今回ECHパルス印可中での強いガスパフ運転によって、ある特定の回転変換ウィンドウでH-modeが生起することが発見された。図1にその典型的放電を示す。回転変換0.542の配位のECHプラズマ及び回転変換0.623の配位のECHプラズマの2つの放電でのプラズマエネルギー W_p^{diam} 、線積分プラズマ密度 $n_e L$ 、 $H\alpha$ 信号、SOL領域のイオン飽和電流 I_{sat}^{SOL} 信号の時間変化を示す。ECH印可中の短い時間スケール（ $< 1ms$ ）で、粒子及びエネルギーの閉じ込め状態の自発的な遷移が発生し、エネルギー閉じ込め時間の時間スケール（10数ms）において、H-mode閉じ込めの特徴である $H\alpha$ 信号（及びイオン飽和電流 I_{sat}^{SOL} ）の急激な減少と、プラズマ密度 $n_e L$ の上昇、プラズマエネルギー W_p^{diam} の上昇が観測された。とくに回転変換0.542のECHプラズマの詳しいデータ解析によれば、エネルギー閉じ込めのISS95比例則に対する改善度 H_{ISS95} は1.5を超えることが明らかとなった。この配位は、いわゆるセパトリックス放電であるが、一方、回転変換0.623の配位は、放電管壁に対して部分リミッター配位となっている。現在、回転変換0.623のECHプラズマについてはISS95の増加が少ない。H-modeの発生がある特徴的な回転変換に制限されること、またH-mode遷移に閾値パワーまたは閾値プラズマ密度が存在すること等、トカマク等と異なるプラズマ物理、あるいはトカマク等と共通するプラズマ物理の問題が提供されており、国際会議等でのホットな話題として討論されている。その後、NBI-onlyプラズマ及びECH+NBIプラズマにおいてもH-modeが見い出されたので、これらについての統一的な理解を目指した実験を進めているところである。

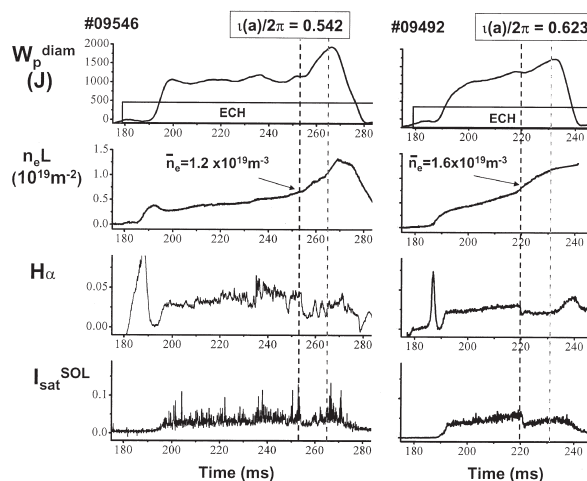


図1 回転変換0.542の配位のECHプラズマ及び回転変換0.623の配位のECHプラズマのプラズマエネルギー W_p^{diam} 、線積分プラズマ密度 $n_e L$ 、 $H\alpha$ 信号、SOL領域のイオン飽和電流 I_{sat}^{SOL} 信号の時間変化。t=252及び220msでH-mode遷移が発生している。

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）
 「GPS掩蔽法を用いた富士山、航空機からの地球大気計測」

近年、毎年のように集中豪雨による被害が報告されていますが、もし発生時期・場所が正確に予測できれば防災に貢献できると思いませんか？それには、地表付近の水蒸気の動態を詳細に観測する必要があります。本研究室では、電波・光・音波に関する最新の電子技術を用いた地球大気の精密観測技術の開発を行っており、そのひとつとしてGPS（汎地球測位システム）電波を利用した気圧、気温、水蒸気量の観測技術を開発しています。今回はこの研究を紹介します。

カーナビなど皆さんの生活に深く浸透しているGPSですが、我々は精密な位置決定をする場合に大きな誤差源となる大気によるGPS電波の伝搬遅延（大気遅延）を、GPS掩蔽法による全天候型、機器校正不要の大気観測に利用しています。GPS掩蔽法は、図1に示すように横に向けたアンテナで地表をかすめるようにして到達した微弱なGPS電波を受信し、その伝播経路を大気遅延長、及びGPS衛星と受信機の幾何学配置から求めることで、大気屈折率（気圧、気温、水蒸気量に依存）を優れた精度・高度分解能で観測できます。GPS掩蔽法に関しては、低軌道衛星を用いたグローバルな大気観測はすでに実用段階に入っています。しかし、集中豪雨などの予測のためには、特定の領域（水蒸気が多い地表付近など）において時間・空間的に密な大気観測が必要です。この場合、低軌道衛星からよりも、孤立峰の山頂、あるいは航空機からのGPS掩蔽観測の方が適しています。この観測手法を開発すべく、我々は富士山測候所の南面にGPSアンテナを横向きに取り付け、2001-2003年の夏期間中にGPS掩蔽観測実験を行ってきました。同時に解析ソフトウェアの開発も進め、これらの観測データから大気遅延長、伝播経路の偏角を順に解析し、大気屈折率プロファイルを導出することに成功しました。一事例を図2に示しますが、これは山頂からのGPS掩蔽観測では世界で初めてとなる成果の一部です。富士山近傍（浜松）のラジオゾンデ観測値（点線）と比較しても、よく一致しています。また、大気屈折率プロファイルから1次元変分法を用いて推定した気温、湿度、気圧プロファイルも示していますが、高度3.8kmではラジオゾンデ観測値よりも富士山測候所の観測値（黒丸）に近い値であることが分かります。ここでは示していませんが、台風が接近し、強風・強雨時の観測事例もあり、この観測手法が全天候型であることも実証できています。今後は実用化を念頭に、解析事例を増やし、統計的に精度検証を行うと共に、より低高度域までの観測を可能にするために観測技術の改良を進めていく予定です。また2003年10月から航空機からのGPS掩蔽観測実験が開始されました。航空機からの観測手法が確立できれば、民間航空機で定常観測を行うことで莫大な数の観測データの取得が期待できます。将来的には数値予報の局所モデルへ同化することで、集中豪雨等の予報精度向上への貢献を目指していきます。

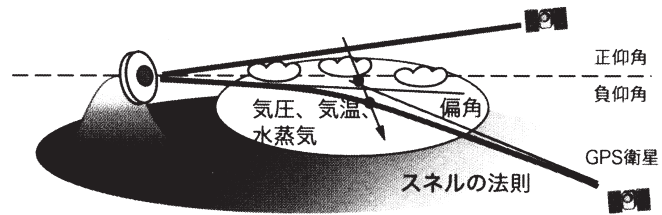


図1：富士山頂からのGPS掩蔽法観測概念図

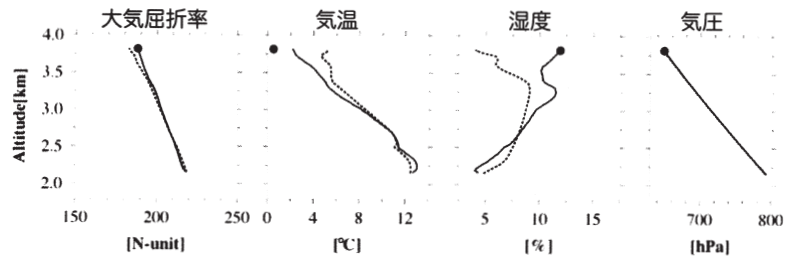


図2：2001年9月23日19時（UT）に得られた大気屈折率、気温、湿度、気圧プロファイル。実線がGPS掩蔽法、点線が浜松のラジオゾンデ、黒丸が富士山測候所の観測値を示す。

宇宙電波科学研究部門 宇宙電波工学分野（松本研究室） 「水星プラズマ波動探査計画」

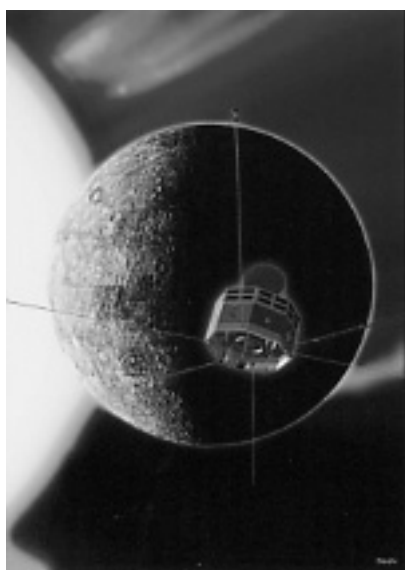


図1：MMO衛星と水星
(CG by C. Noshi)

ご存知のように、水星（Mercury）は、太陽に一番近い惑星です。太陽と水星の距離は、おおよそ太陽と地球の距離の1/3程度です。この水星を日欧共同で衛星を打ち上げて観測しようという計画が現在進行しています。BepiColombo水星探査ミッションです。BepiColomboとは水星軌道の研究で成果を上げたイタリアの応用数学者の名前にちなんでいます。BepiColomboミッションは、水星の地形を主に探査するために、水星近傍の極軌道をとるMPO（Mercury Planetary Orbiter）、水星の磁気圏を探査するMMO（Mercury Magnetospheric Orbiter）、そして、水星表面に着陸するMSE（Mercury Surface Element）から構成されます。このうちMMO衛星の開発・運用を日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）が担当することになっており、また、そこに搭載される「プラズマ波動観測器」を、現在、私たち松本研究室を中心とする日欧共同チームが提案しています。水星はMariner10によって1974年に初めて観測が行われ、水星が固有の磁場をもっていることなどの重要な発見がなされましたが、Flybyによる2回の観測のみで十分なデータが得られていません。しかも、Mariner10には水星周辺で

のプラズマ波動、直流電場を観測するプラズマ波動観測器を搭載しておらず、その周辺でのプラズマ波動・電場現象については、まったく探査されていません。従って、もし、私たちの開発した観測器が認められれば、人類初のプラズマ波動観測が水星磁気圏で行われることになります。

これまでの研究でかなり理解が進んでいる地球磁気圏と比較すると、水星磁気圏は「脆弱な固有磁場」、「高動圧の太陽風」、「プラズマ圏の欠如」、「太陽風と惑星表面との直接相互作用」などを、その特徴としてあげることができます。これらの特徴をプラズマ波動観測の立場で捉えてみると、「脆弱な磁場と高動圧太陽風による高ベータプラズマ中での強非線形現象による波動の励起、そしてそれによるエネルギーの散逸」、「希薄なプラズマ大気と太陽風との相互作用による波動の励起」、「太陽風が直接惑星表面まで到達するような場合、惑星表面に雲のように存在する光電子との相互作用」、また、「スパッタリングにより放出される重イオンとの太陽風との相互作用」、「脆弱とはいえ閉磁力線に捕捉されたプラズマ粒子からの電磁波放射」、「Mariner10でみつけたサブストーム的な磁気圏構造のダイナミックな変動とConvection電場の変化、およびそれによる極域への粒子注入による電波放射」などの研究項目が挙げられ、プラズマ波動観測は、このミッションで重要な役割の担うことになります。私たちは、すでにフランス、スウェーデン、ハンガリー、オランダのチームと共同で装置を開発する体制を整え、これまでに4回にわたって国際会議を京都で行っており、プラズマ波動観測器のデザインをほぼ終えたところです。

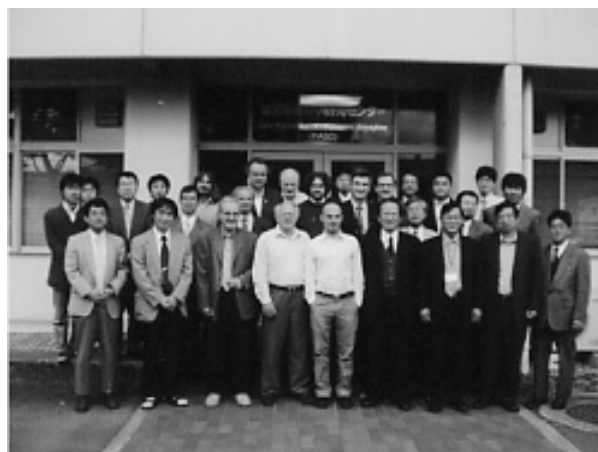


図2：4回目を数えた日欧プラズマ波動チーム会議

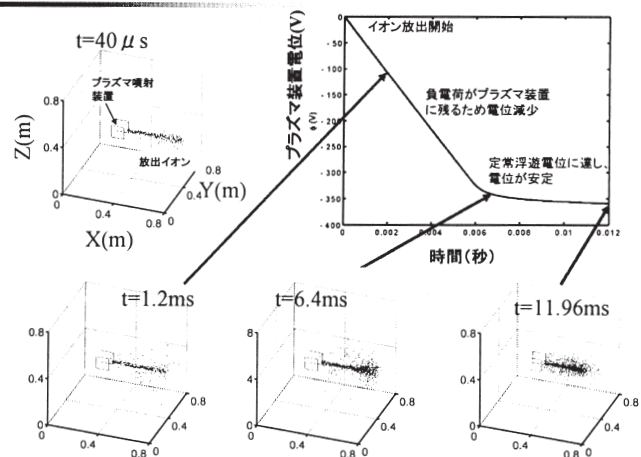
宇宙電波科学研究部門 電波科学シミュレーション分野（大村研究室） 「プラズマ噴射時の宇宙飛翔体環境に関する計算機シミュレーション」

本研究室では、太陽-地球環境に生起する様々な電磁現象の解析を大規模な計算機シミュレーションによって行っています。国際宇宙ステーションの構築にみられるように人類の宇宙利用が盛んになりつつあり、宇宙環境が宇宙利用においてどのような影響を与えるかという観点からも研究を進めています。宇宙空間は真空ではなく、イオンと電子からなる希薄な電離気体である宇宙プラズマで満たされています。そのため、宇宙空間における電磁現象は真空の場合と違い複雑なものとなり、理論的な手法で解析するのは非常に大変です。そこで、我々は、膨大な数のプラズマ粒子により形成される宇宙プラズマ空間を仮想的に計算機メモリ内につくり、その中で宇宙プラズマの支配方程式であるマックスウェル方程式と運動方程式を時空間で逐次解き進めることにより、対象とする宇宙空間における様々な現象の再現を行います。本稿では、その一例として宇宙飛翔体に搭載されたプラズマ噴射装置（イオンエンジンや電位制御装置）のオンオフ時における周辺宇宙環境の過渡応答に関する計算機シミュレーションを簡単に紹介します。

近年は実用目的からプラズマを積極的に放出する宇宙飛翔体（宇宙機）が数多く出現しており、国際宇宙ステーションがその電位制御に採用したプラズマコンタクターや、イオンエンジン・アークジェットなど各種電気推進機などの装置がこれに相当します。こうしたプラズマ装置からの能動的なプラズマ放出は、宇宙機周囲に人工プラズマ分布を作り宇宙機自身の電位を変動させ、更には自ら放出プラズマの入射を受けるというダイナミックな干渉現象を引き起します。本研究では、このような背景のもと、プラズマ粒子モデルの計算機シミュレーション手法により、能動的プラズマ装置を持つ宇宙機と周囲プラズマ環境の同時評価を行います。特にプラズマ装置の立ちあげ、停止、あるいは突然故障などに伴う非定常なプラズマ干渉や帯電放電の過渡プロセスを重点的に解析します。図にはその一例として、密度の薄い宇宙プラズマに置かれた飛翔体搭載のプラズマ噴射装置からイオン（正電荷）ビームを放出した場合の宇宙機環境の応答を示したものです。プラズマ装置内でアルゴンなどを電離させ加速し船外に放出するケースであり、負電荷である電子はプラズマ装置に残されたままです。本来なら、帯電を避けイオンを中和するため中和器から電子放出も行いますが、このケースでは、中和器が動作しない場合を想定しています。イオン放出開始後、電子がプラズマ装置に残されるため、その電位は時間と共に減少しています。放出イオンもプラズマ装置から離れていきますが、ある時間経過すると、プラズマ装置の帯電（負電位）により放出イオンはその電位バリアを乗り越えられなくなり逆流が起こります。最終的には放出イオンのほとんどがプラズマ装置に戻ってくることになり、その電位は一定値に落ち着きます。

この電位が定常値に至るまでにプラズマ装置近傍でイオンダイナミクスが大きく変化しますが、これにより宇宙機を含め宇宙環境にどのような影響があるのかという点について解析を進めています。このような宇宙機環境変化の理解は、宇宙機の対プラズマ環境対策設計に必要不可欠であり、宇宙開発のあらゆる側面において非常に有効な基礎データになることは明らかです。欧米ではすでに宇宙機環境に関する計算機シミュレーション解析が行われていますが、日本でも我々を中心にして独自の宇宙環境シミュレータの構築を目指しています。

イオン噴射時のプラズマ装置電位変化と放出イオン分布



博士論文概要

【課程博士一覧】

中村 俊一	「Control of Step Structures on Silicon Carbide Surfaces in Epitaxial Growth toward Electronic Devices」 (電子デバイス応用へ向けたシリコンカーバイドのエピタキシャル成長における表面ステップ構造制御)	平成14年11月25日
野田 啓	「強誘電性低分子蒸着薄膜の構造制御及びその電気的特性とデバイス応用性に関する研究」	平成14年11月25日
Jean Xiang-Qun Yu	「Utilization of Inherent Diversity for Channel Coding and Equalization Algorithms」 (通信路符号化と等化アルゴリズムへの自然ダイバーシチの利用)	平成15年1月23日
美船 健	「電磁界解析における代数マルチグリッド法とその応用」	平成15年3月24日
福間 剛士	「Applications of Dynamic Force Microscopy to Molecular-Scale Investigations on Organic Ultrathin Films」	平成15年3月24日
金田 昭男	「顕微分光法を用いたInGaN系量子井戸構造の光物性に関する研究」	平成15年3月24日
岡田 健一	「集積回路における性能ばらつき解析に関する研究」	平成15年3月24日
後藤 由貴	「Stochastic approaches to inverse problems in plasma wave analysis」 (プラズマ波動の逆問題に対する確率的アプローチ)	平成15年3月24日
今村 裕之	「ステントグラフト留置術支援のための術前・術中画像処理手法」	平成15年3月24日
原口 亮	「核医学心筋画像と冠動脈造影との自動重ねあわせと表示」	平成15年3月24日
山岸 統	「Linear Analyses of Ideal and Kinetic Pressure-Driven Instabilities in Helical Plasmas」 (ヘリカルプラズマにおける理想および運動論的圧力駆動型不安定性の線形解析)	平成15年3月24日

- 磯田 総子 「A Study of Wind Oscillations in the Mesosphere and Lower Thermosphere at Low Latitudes Observed with MF and Meteor Radars」 平成15年3月24日
(MFレーダーと流星レーダーによって観測された低緯度中間圏下部熱圏における風速振動に関する研究)
- 濱田 純一 「A Climatological Study on Rainfall Variations over the Indonesian Maritime Continent」 平成15年3月24日
(インドネシア海洋大陸における降水変動の気候学的研究)
- 川村 誠治 「A study of wind variations and their effects on the mid latitude ionosphere and thermosphere based on the MU radar observations」 平成15年3月24日
(MUレーダー観測に基づく中緯度電離圏・熱圏における風の変動とその影響に関する研究)
- Hassenpflug, Gernot 「Study of turbulence structures in the lower atmosphere using spaced antenna techniques with the MU radar」 平成15年5月23日
(MUレーダー空間干渉計法による下層大気圏の乱流構造の観測)
- 鈴木 康浩 「Free-Boundary MHD Equilibria of Non-Axisymmetric Torus Plasmas」 平成15年7月23日
(非軸対称トーラスプラズマの自由境界MHD平衡)
- 宮崎 崇 「分子デバイス構築に向けた SPM による微細構造の作製と電気特性評価」 平成15年9月24日

中 村 俊 一 (松波教授)

「Control of Step Structures on Silicon Carbide Surfaces in Epitaxial Growth toward Electronic Devices」

(電子デバイス応用へ向けたシリコンカーバイドのエピタキシャル成長における表面ステップ構造制御)

平成14年11月25日授与

資源の枯渇や地球温暖化の問題を考えると、電気エネルギーの効率的利用は、今後ますます重要な課題となる。半導体電子デバイス（パワーデバイス）を用いて電気エネルギーを制御するパワーエレクトロニクスに期待が集まっている。本研究で取り上げたワイドギャップ半導体シリコンカーバイド（SiC）は、優れた物性を有するので、次世代パワーデバイス用材料の最有力候補に挙げられている。これまで、SiCパワーデバイス作製に不可欠なエピタキシャル成長は、現象に対する深い理解が得られないまま、技術開発がすすめられてきた。そこで本研究では、横型コールドウォールCVDと呼ばれる比較的単純な結晶成長系において、SiCのエピタキシャル成長における諸現象に対する理解を深め、そこにおける基本指針を確立することを通じて、SiC電子デバイスの展開に資することを目的とした。主要な成果は以下の通りである。

1. 高耐圧デバイス作製には高純度厚膜成長層が必要であるが、高速成長を行うと表面モフォロジーが著しく悪化するとされていた。これに対し、初期成長条件の改良により、常圧成長で従来の約2倍の6~7 $\mu\text{m}/\text{h}$ 程度の高速成長でも良好な表面モフォロジーを得た。成長速度は原料ガスであるSiH₄の重合により制限されることが分かったが、成長圧力を80Torrまで下げることで、重合が抑えられ、12 $\mu\text{m}/\text{h}$ という高速成長を実現した。成長速度の成長圧力依存性から、SiCのホモエピタキシャル成長における律速過程は、ステップ端でのSi種と吸着水素の競合にあることが示唆された。この競合と気相中でのSiH₄の重合を考慮したモデルにより、成長速度を半定量的に説明することに成功した。
2. 工業的に事実上唯一入手可能な6H-および4H-SiC（0001）面上へのCVD成長では、結晶構造上、3C-SiCと呼ばれる異なる構造の結晶が混入しやすく、これを回避するために（0001）面から数度のオフを導入することが常識となっていた（ステップ制御エピタキシー）。これに対し、基板が適切に研磨され、表面ダメージが少ない場合には、成長前のHCl/H₂ガスエッチングによりSiC表面に原子レベルで均一なステップ構造が形成されること、ならびに、こうして均一なステップ構造が形成された基板上に初期成長プロセスを適切に制御して成長することで、6H-SiC（0001）0.2度オフ面（ほぼオフなし）においても、デバイス作製に応用可能なかなり広い成長条件においてステップフロー成長が支配的となり、ホモエピタキシャル成長が可能であることを見出した。
3. 絶縁破壊電界は、パワーデバイスの性能を決定する重要な物性定数である。種々の面方位を持つ4H-SiC基板上へのホモエピタキシャル成長において、n、p型不純物添加を行い、エピタキシャルpn接合ダイオードを作製した。その絶縁破壊特性から絶縁破壊電界の異方性を求め、a軸方向の絶縁破壊電界はこれに垂直なc軸方向の絶縁破壊電界の約75%であることを見出した。
4. エピタキシャル成長中の不純物添加をさらに詳細に制御することで、1層あたりの厚さが0.2 μm という薄いpn多重接合の作製に成功した。これを用いたSiC横型超接合ダイオードを世界で初めて試作し、超接合としての動作を確認した。

以上のように、本研究を通じてSiCホモエピタキシャル成長における諸現象が明らかになり、デバイス作製へ向けた要求事項に応える基本指針を確立できた。

野 田 啓 (松重教授)

「強誘電性低分子蒸着薄膜の構造制御及びその電気的特性とデバイス応用性に関する研究」
平成14年11月25日授与

有機強誘電体材料の代表格であるフッ化ビニリデン (VDF) 系材料では、単一分子鎖内に存在する永久電気双極子が印加電界の極性に応じて180度回転することにより、分極反転 (すなわち強誘電性) を発現する。このVDF系材料では試料の作成条件の違いにより、多彩な構造及び電気的特性を示すことから、学術的な観点から様々な研究が展開されてきた。また、この材料が有する強誘電性を利用した不揮発性メモリ、圧電性を利用した超音波トランスデューサ、焦電性を利用した赤外線センサ、といった様々な応用例が提案されると共に、有機材料ならではの加工性の良さや製造コストの安さ等の特徴も相まって、産業面からも大きな注目を集めてきた。しかしながら、VDF系材料の中心を担うポリフッ化ビニリデン (PVDF) は高分子材料であり、薄膜化した際に結晶部と非晶部が混在した構造を示すため、結晶部に由来する薄膜の強誘電性機能の向上及び諸物性の解明に大きな困難が生じていた。そこで本研究では、分子鎖長が短くかつ一定であり、結晶化しやすいオリゴマー体に着目し、新規に合成されたフッ化ビニリデンオリゴマー (VDFオリゴマー、化学式 $\text{CF}_3(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n\text{I}$) の蒸着薄膜の作製及び多面的な構造・電気的特性評価を行った。その結果を基に、未解明であったVDFオリゴマーの諸物性や将来の電子デバイス応用への有用性について議論した。

本研究で得られた成果を以下に記す。まず、VDFオリゴマー分子は通常、常誘電相に結晶化しやすいため、蒸着条件の制御による強誘電相結晶の形成が必要とされていた。本研究ではKBrやKClのアルカリハライド基板上に成膜を行うことで、エピタキシャル成長を伴ったVDFオリゴマーの強誘電相結晶の作製が可能であることを、エネルギー分散型斜入射X線回折計 (ED-GIXD) やフーリエ変換赤外分光法 (FT-IR) による薄膜構造解析により明らかにした。

引き続き、上記の手法によりKBr基板上に作製したVDFオリゴマー薄膜を金属基板上に転写する手法を独自に開発し、金 (Au) 電極上に移した薄膜において原子間力顕微鏡 (AFM) を援用したナノスケール電気特性評価を行った。その結果、VDFオリゴマー分子鎖が有する永久電気双極子の回転及び配列に伴う分極ドメインの形成や圧電応答信号のヒステリシス現象を確認し、VDFオリゴマーの強誘電性を初めて証明した。更に、AFM探針へのパルス電圧印加により、局所的な分極ドメインの極性及びサイズ制御が可能であり、再書き込み可能な不揮発性メモリとして動作することを示した。

続いて、液体窒素により -120°C 以下まで低温化した基板上にVDFオリゴマー蒸着膜を堆積させることで、強誘電相結晶から成る薄膜を基板の種類に依存することなく形成できることを見出した。その性質を利用して、金属薄膜上に作製したVDFオリゴマー蒸着膜 (膜厚500nm) の電気的特性を測定した結果、図1に示した矩形形状のD-Eヒステリシスカーブや急峻なピークを有する分極スイッチング電流が観測され、マクロな電気的特性からもVDFオリゴマーの強誘電性を実証するに至った。特にその試料において、従来の強誘電ポリマーを上回る残留分極量や焦電係数が測定され、強誘電体材料としてのVDFオリゴマーの優れた特性が明らかになったと同時に、近い将来実現可能な強誘電体薄膜デバイス (不揮発性メモリ、赤外線センサ) への応用性が示された。

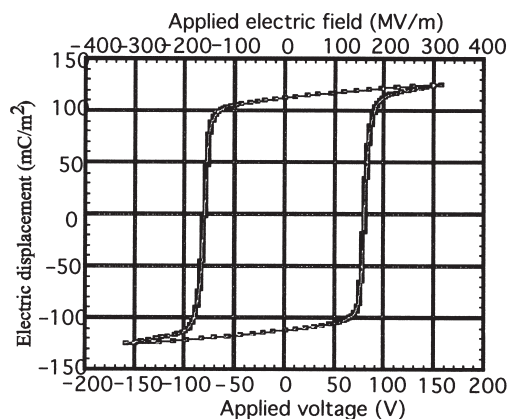


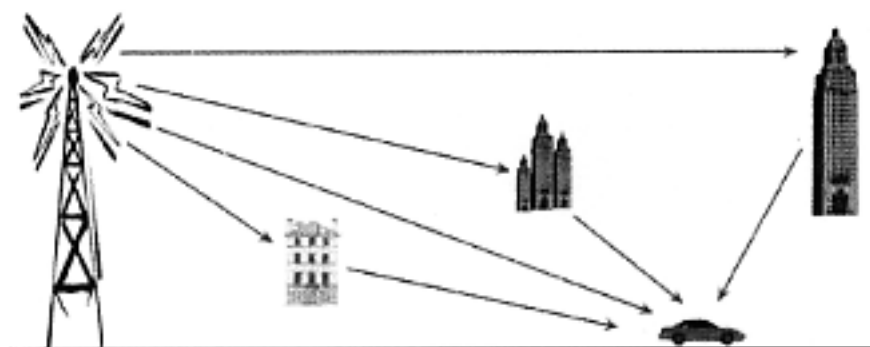
図1 VDFオリゴマー膜のD-Eヒステリシスカーブ

Jean Xiang-Qun Yu (吉田教授)

「Utilization of Inherent Diversity for Channel Coding and Equalization Algorithms」
(通信路符号化と等化アルゴリズムへの自然ダイバーシチの利用)

平成15年1月23日授与

移動通信路は無線を用いているために、市街地やビル内の電波伝搬環境は極めて劣悪であり、通路差の大きな多重経路伝搬に伴うフェージングや予期しないさまざまなタイプの電波干渉により通信品質が著しく劣化する。そこで、通信品質を保証するためのダイバーシチ、符号化と等化等の信号処理技術に関する研究を行う。



従来のダイバーシチ技術には、代表的なものとして時間ダイバーシチ、受信アンテナダイバーシチと周波数ダイバーシチがある。これらの技術の基本は、複数の時間スロット、アンテナ、周波数等の資源を人為的に作り、同一送信信号において複数の受信信号を合成することにより、通信品質の向上を実現している。本研究では従来のダイバーシチと違う自然ダイバーシチの概念を開発し利用することにより、複数の資源を使わず、従来の符号化と等化技術の効果の改善に関する研究成果をまとめたものである。自然ダイバーシチは本来システムに埋めこまれたダイバーシチであり、適当な信号処理アルゴリズムを設計することにより受信信号からダイバーシチ要素を引き出す方法である。

また、各自然ダイバーシチ要素はお互いに協動的な特性と補償的な特性を持つ。本研究では特にARQ（自動再送要求）を用いた場合の符号化と長遅延波が存在する伝搬路に対する等化アルゴリズムの特性向上について、理論検討と計算機シミュレーションを用いた評価検討を行っている。

本研究の結果、符号化の場合、相補符号を設計することにより、計算量が増えず再送信システムの効率と誤り率の改善を実現できた。また、伝搬路等化の場合、分裂性軟判定等化を提案することにより、長遅延波が存在する伝搬路における計算量の低い最適な等化が可能となった。さらに、繰り返し復号化と提案等化器を協同設計することにより、協同設計の優位性を明確した。最後に提案等化器の原理に基づく分裂性軟判断復号を設計することを通じて、従来手法に比べてより少ない計算量で長い拘束長をもつ畳み込み符号の復号が可能であることを明らかにした。

美 船 健 (島崎教授)

「電磁界解析における代数マルチグリッド法とその応用」

平成15年3月24日授与

近年では、CAD類の発達を受けて電気機器の設計・開発分野において数値シミュレーションが重要な位置を占めるようになり、高精度解析に必要とされる計算コストの軽減に対する要求は大きい。本論文は、数値電磁界解析分野においてしばしば現れる大規模連立一次方程式に対する有力な線形解法の開発を目指したものである。線形解法として代数的マルチグリッド法をとりあげ、数値電磁界解析におけるその実用性を高めることを目的としている。得られた主な成果は以下の通りである。

1. 代数的マルチグリッド法と大規模科学技術計算分野で主流となりつつある並列処理との連繋による高速ソルバの開発が行われた。渦電流解析及び静磁界解析で現れる連立一次方程式を扱い、それぞれの場合に適合した並列化手法を提案している。分散メモリ型並列計算機SR2201上で行った数値解析により、ブロック並列不完全LU分解前処理付き共役勾配法を適用した場合と比較し、開発された並列代数マルチグリッドソルバの高速性と良好な並列化効率とが示された。
2. M行列を対象とした代数的マルチグリッド解法の適用対象を、対角成分が正であるH行列へと拡張する手法が提案された。対角成分が正であるN次H行列を係数行列とする連立一次方程式の求解が、2N次M行列を係数行列とする連立一次方程式の求解に帰着されることが証明され、さらに、2N次M行列に対する代数マルチグリッドアルゴリズムの記憶容量と計算量を節約する手法が提案されている。これにより、実対称M行列を対象として開発された補間演算子に僅かな修正を加えることで、対角成分が正であるH行列を係数行列とする連立一次方程式に対して効果的な代数マルチグリッド解法を実現している。数値解析例の一つとして、全ての非対角成分が正でありスカラールゴリズムによるコースニングが不可能な問題を取りあげ、提案された代数マルチグリッド法がこの問題に対しても有効であることを示した。
3. 辺要素を用いた電磁界解析において効果的な代数的マルチグリッド法が開発されており、シフトされた係数行列に対する代数マルチグリッド法を共役勾配法の前処理とすることで、この種の解析でしばしば表れる係数行列の特異性を回避する手法を提案した。この際導入されたシフトパラメータに関しては、ソルバの収束性への影響が小さく、最適値探索の必要性が無いという優れた特性が示されている。
4. 非対称行列が現れる実用的な解析例としてMHD発電機内の電磁流体解析及び移動導体を含む3次元渦電流解析がとりあげられ、これらに対しても代数マルチグリッド解法の有効性が高いことが示された。MHDチャンネル内解析と移動導体を含む渦電流解析では、対象としている問題が非対称係数行列を持つことから、代数マルチグリッド法を前処理とするクリロフ部分空間法として安定化双共役勾配法が使用されている。両解析で、代数マルチグリッド法の優れた性能が示された。

今後は、辺要素を用いた電磁界解析における代数マルチグリッド法の有効性をさらに向上させることを狙って、アルゴリズムの開発に取り組む予定である。

福 間 剛 士 (松重教授)

「Applications of Dynamic Force Microscopy to Molecular-Scale Investigations on Organic Ultrathin Films」

(有機超薄膜の分子スケール評価へのダイナミックモード原子間力顕微鏡の応用)

平成15年3月24日授与

シリコンを中心とする無機半導体素子の微細化限界が指摘される中で、近年、個々の分子の機能性に着目し、それを電子機能素子として利用する有機エレクトロニクス分野に対する注目が高まってきた。有機材料を用いたデバイスの性能を評価し改良するためには、そのナノスケールの構造および物性を直接評価することが必要不可欠である。本研究では、ダイナミックモード原子間力顕微鏡 (DFM) を有機超薄膜の構造および物性評価に応用し、その有用性と問題点を明らかにした。さらに、その問題点に関して原因と解決策を詳細に検討することで、それを克服するとともにDFMを用いた新たな表面物性計測手法の可能性を見出した。以下に、本研究により得られた主な成果をまとめる。

- (1) 強誘電性ポリマー薄膜の熱相転移過程に伴う構造および物性の変化を、温度可変型DFMを用いてナノスケールの実空間分解能で“その場”観察した。これにより、温度可変型DFMが熱相転移現象に関する挙動を解明するのに有用であることを明らかにした。また、探針-試料間相互作用力の大きさを適切に設定することで、最表面の構造だけでなく、表面アモルファス層の下にある微結晶の構造など、表面下の構造をも可視化できることを示した。
- (2) 絶縁性基板上有機薄膜や比較的膜厚の厚い有機薄膜などの、STMでは観察が不可能な絶縁性有機薄膜表面における分子分解能DFM観察に初めて成功した。この結果から、DFMを用いることで試料の導電性に関わらず分子分解能観察が可能であることを示した。一方、探針-試料間静電相互作用や有機薄膜の構造的不安定性の影響により、分子分解能観察が困難な場合があることも指摘した。
- (3) 有機超薄膜のDFM観察時に生じるカンチレバー振動エネルギーの散逸機構を、いくつかのモデル分子系に関して調べた。その結果、電気的探針-試料間相互作用によって生じる散逸には、散逸力によって生じる「真の散逸」以外に、保存力によって生じる「みかけの散逸」が含まれる可能性があることを指摘した。また、分子薄膜内に構造的な不安定性がある場合には、分子の揺動の影響でカンチレバーの振動エネルギーが散逸する可能性があることを明らかにした。
- (4) DFMにより得られる表面形状像と散逸像における分子スケールコントラストの形成メカニズムを、いくつかのモデル分子系に関して調べた。その結果から、表面形状像における分子スケールコントラストは表面形状だけでなく表面の化学的性質の影響を受ける場合があることを指摘した。一方、散逸像における分子スケールコントラストには、探針-試料間相互作用によって生じる分子揺動の大きさが関係していることを明らかにした。

金 田 昭 男（藤田茂教授）

「顕微分光法を用いたInGaN系量子井戸構造の光物性に関する研究」

平成15年3月24日授与

近年、窒化物半導体技術の飛躍的進展により、青・緑色から紫外の波長領域で動作するInGaN、AlGaIn系発光ダイオードや半導体レーザの開発が進められ、この波長領域における光源に革命が起こりつつある。こうした技術進展をより一層確実にするためにはデバイスの高性能化・高効率化が必須であり、微視的視点に立った詳細な光物性の基礎的解明が不可欠である。本論文は、このような基本的考えの基に、光デバイスの活性層において、本来ナノ構造に起因しているはずの輻射、非輻射中心へのキャリアの局在過程、拡散過程といったダイナミックな特性を光学顕微鏡および近接場光学顕微鏡を用いたマイクロ・ナノ分光法により明らかにし、発光層における微視的視点からの発光機構を解明することにより、高性能化・高効率化に対する基本的指針を得ることを目的として研究した結果を纏めたもので、以下の示すような成果が得られた。

- 1) 蛍光顕微鏡によるInGaN量子井戸構造の発光の温度依存性、および、約 $1\mu\text{m}$ の空間分解能をもつ蛍光顕微システムによる発光の時間分解測定を行った結果、InGaN井戸層内の発光強度、発光波長、発光寿命は空間的に著しい不均一性をもつことを明らかにし、転位や点欠陥などの非輻射中心の面内不均一性を示す結果を得た。
- 2) 活性層面内の発光特性のより微細な空間分布を明らかにするための近接場光学顕微鏡システムを、青色から紫外の波長領域で稼動するシステムに再構築するとともに、同一の光ファイバプローブで光励起と光検出を行うイルミネーション・コレクションモードを採用し、30nmの空間分解能を達成した。
- 3) 開口径150nmのファイバプローブによる $4\times 4\mu\text{m}^2$ の範囲の発光分布を連続照射近接場顕微測定した結果、図1に示すように、強度像とピーク波長像に強い相関関係があることを見出し、さらにパルス光励起による時間分解近接場発光測定によりキャリア・励起子が量子井戸内の低ポテンシャルへ拡散して局在発光する空間的・時間的ダイナミクスを初めて明らかにした。
- 4) 開口径30nmのプローブを用いた連続照射近接場顕微測定から、数10nm以下の島構造が観測され、局在発光中心が多数の量子ドットの準位に基づくことを実証した。（図2参照）さらに、これら量子ドットは互いに近接しエネルギー的に繋がっていることを明らかにした。以上から、励起子・キャリアは面内を移動し局在準位で発光するという、空間・時間スケールに関するより詳細な発光再結合モデルを提案している。以上本論文は、InGaN系半導体発光デバイス活性層におけるナノサイズの空間的な不均一性に対して極微顕微分光法による評価を行い、微視的な観点からInGaN系の発光機構を明らかにしたもので、高性能化・高効率化へ貴重な情報を提供したものである。

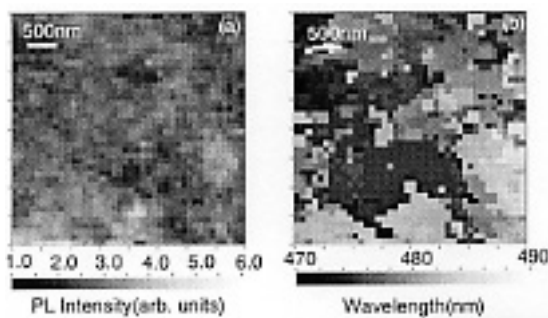


図1 開口径150nmのプローブにより得られた近接場発光ピーク強度像（左）、近接場発光ピーク波長像（右）

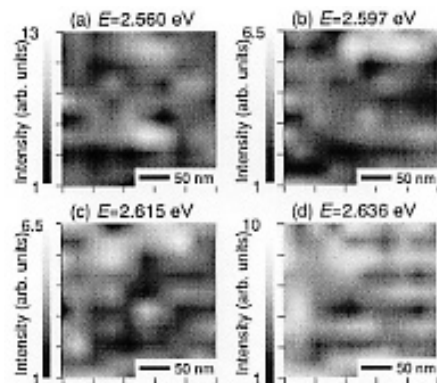


図2 開口径30nmのプローブにより得られた各発光エネルギーにおける近接場発光強度像

岡田 健一 (小野寺教授)

「集積回路における性能ばらつき解析に関する研究」

平成15年3月24日授与

近年の超微細集積回路技術において、MOSFETトランジスタの絶え間ない微細化が進行する一方、特性のばらつき量が相対的に増大する事が問題となっている。製造時のばらつき抑制にも限界があり、回路設計において素子ばらつきを考慮することが必須となっている。従来から製造ばらつきを考慮した統計回路解析は行われていたが、実際の素子ばらつきの統計的性質を反映した系統的な統計回路解析手法の研究が求められている。本論文は、系統的なばらつきのモデル化について検討すると共に、ばらつきモデルに基づく統計的特性解析技術について検討を行ったものであり、主な研究成果は以下のとおりである。

1. レイアウトを考慮した統計解析技術に重点を置き、ばらつきのモデル化、実測法、高精度解析技術について検討を行った。統計回路解析の解析精度を向上させるためには、実測特性に基づく系統的なレイアウト依存性の解析が重要であることを明らかとした。提案手法では、製造ばらつきを局所ばらつきと大域ばらつき、および、レイアウトに依存するばらつきに分離することで、統計的性質の違いを考慮したモデル化を行った。レイアウトに依存するばらつきについては、ローディング効果のモデル化を行い、実測値からモデルパラメータを抽出する手法について提案した。また、モデル化から解析まで各種の改良を行い、統計回路解析においてレイアウト依存性を考慮する手法について提案した。カレントミラー回路の高精度解析実験から、提案手法の有効性を示した。
2. 微細プロセスで製造されるトランジスタについて、素子特性ばらつきのモデル化を行い、ばらつきのサイズ依存性やバイアス依存性、配置位置に依存するばらつきの統計分布を表すためのモデルを提案した。製造ばらつきを数種の物理パラメータにより表現することで、トランジスタ特性のモデル化を行う。これまでの研究ではチップ内での振舞いのみ注目したモデル化が行われており、そのようなモデル化ではウェファ全体におけるばらつきの統計分布を正しく表せないことを明らかにし、大域的な変動を近似関数によりモデル化する手法を提案した。実測による評価から、提案モデルの有効性を検証した。複数のチップからの実測値に基づき、大域ばらつきが必ずしも正規分布とならないことを確認している。実測した統計分布をもとに、回路特性ばらつきへの影響を評価し、提案手法について有効性の確認を行っている。
3. 提案するモデルについて実測値からモデルパラメータを抽出するための手法についても開発した。実測した電流特性のばらつきを、物理パラメータのばらつきにより表現し、電流特性に対する各物理パラメータの感度を考えることで、各パラメータのばらつきを統計的に分離する手法を提案している。抽出手法の有効性を確認するために、実測したリングオシレータ回路の発振周期との比較を行った。リングオシレータの発振周期のばらつきについて、段数が長くなるほど局所ばらつきの影響が平均化されて小さくなることに注目し、段数の異なる複数のリングオシレータについて比較を行った。提案手法によるモデルパラメータを用いた統計回路解析の結果と、リングオシレータの実測結果とを比較し、実測とシミュレーションで傾向が一致することから提案手法の有効性を確認した。
4. デジタル回路の統計遅延解析手法について検討を行った。大規模回路の解析を行うためには、解析精度と計算時間の両立が重要である。応答曲面法を用いた論理ゲート遅延時間のモデル化手法について提案した。複数の正規分布の和がまた正規分布で表されるという統計的性質を利用し、変動変数を削減することにより計算コストを削減した。ゲート内の相対的なばらつきを考慮するために、各トランジスタにおける感度係数を用いる方法を検討した。感度係数を再利用することで、計算精度は高いままに計算コストを削減すること成功した。

本論文では、一貫して集積回路の製造ばらつき解析について取り組んだ。博士論文を通して得られた研究成果を足がかりとし、今後は、製造ばらつきを抑える回路方式について研究を続けて行く所存である。

後藤由貴（佐藤亨教授）

「Stochastic approaches to inverse problems in plasma wave analysis」

（プラズマ波動の逆問題に対する確率的アプローチ）

平成15年3月24日授与

地球周辺の宇宙空間は電離媒質であるプラズマによって満たされており、低周波の電磁波はプラズマの影響を強く受けながら伝搬することが知られています。このいわゆるプラズマ波動は地球周辺における様々な現象を知るための手掛かりとなるため、現在では複数の衛星により定常的に観測され、そのデータ解析により様々な研究が行われています。本研究では、このプラズマ波動に関する重要な課題、(i) 伝搬ベクトル方向推定問題、および (ii) 電子密度分布推定問題を取り扱っております。同問題ともに像再構成型の劣決定逆問題であり、求解には高度な信号処理が要求されます。この種の問題に対しては一般にモデルフィッティングによる求解が有効ですが、パラメトリックモデルは自由度を高くすると必然的にパラメータ数が増加するため計算量の点からあまり好ましくありません。一方でノンパラメトリックモデルは柔軟性が高い反面、拘束条件が少ない場合に解が不安定になるという欠点があり、実際にはそれぞれのモデルの長所・短所を考慮して使い分ける必要があります。本研究では、確率的手法を導入することにより適切な柔軟性を持ったモデルを実現し、同モデルを用いて最適解を求解する新たな手法の開発に取り組んできました。

プラズマ波動の伝搬ベクトル方向の解析は、波源の推定や伝搬媒質の予測などに重要な役割を果たします。本研究ではこの伝搬ベクトル方向推定問題において、波動の到来方向をエネルギー密度分布で表す WDF (wave distribution function) 法の解法を取り扱いました。プラズマ波動は、伝搬路上でプラズマの分散関係を満たすため、観測点における電磁界比・偏波面は各到来方向に対して一意に定まります。波動分布関数法は、複数もしくは広がった波源から到来した結果として観測される電磁界成分から逆に、各到来方向に対するエネルギー密度分布を推定する逆問題で、従来から様々な解法が検討されてきました。本研究では、拘束条件を満たしたときに最小となるエネルギー関数を定義し、この関数の勾配系を利用した確率的探索により像再構成を行うアルゴリズムを開発しました。開発手法は「あけぼの衛星」で取得されたデータに適用され、その優位性を明らかにすることができました。

本研究で取り扱ったもう一つの逆問題は、近年の宇宙電波応用の拡大に従い注目を集めつつある地球周辺のプラズマ分布をプラズマ波動を用いて推定するという新規性の高い研究課題です。プラズマ波動は媒質であるプラズマの影響を特に強く受け、屈折・伝搬遅延といった性質を示すため、地球周辺のグローバルな電子密度分布の調査に最もよい媒体であるといえます。本研究では、グローバルナビゲーションに用いられてきたオメガ信号および雷起源のホイストラと呼ばれる自然波動を用いて手法の開発・検証を行ってきました。まずグローバルな電子密度分布を表すために、物理的に意味のある拡散平衡モデルと自由度の高い確率差分モデルを併用した柔軟性の高いモデルを導入しました。このモデルの最適パラメータの決定のために、衛星軌道上で連続的に観測される波動の伝搬ベクトル方向・伝搬遅延時間・スペクトル形状を利用し、同観測値の事前確率分布を利用した精度の高いパラメータ推定法を開発いたしました。実際に「あけぼの衛星」で取得されたデータに適用したところ物理的に有意な結果を得られることが確認され、今後、衛星のデータベースを用いることで地球周辺電子密度分布の統計的解析の実現が期待されます。

以上のように、本研究では、宇宙空間中を伝搬するプラズマ波動の解析において重要な課題であった「伝搬ベクトル方向推定問題」と「電子密度分布推定問題」の2つの劣決定逆問題を取り上げ、確率的手法を導入した新たな信号処理法を開発し、その有効性を実観測データにより検証を行いました。

今村 裕之 (英保教授)

「ステントグラフト留置術支援のための術前・術中画像処理手法」

平成15年3月24日授与

大動脈瘤の低侵襲な治療法としてステントグラフト留置術が行われるようになってきている。

これまで大動脈瘤の治療には外科的手術によって開胸・開腹してから人工血管を埋め込む方法がとられてきた。しかし近年は、より低侵襲な治療法として動脈切開部よりカテーテルを用いてステントグラフトと呼ばれる人工血管を病変部に挿入・留置する手法が用いられるようになってきた。

本論文ではステントグラフト留置術の支援のために必要となる画像処理手法について検討した。具体的には、術前計画支援のための病変部や留置経路にあたる血管形状の計測手法と、術中に治療部位の推定を支援するための術前3次元CT像と術中2次元X線透視像との位置合わせ手法について検討した。術前計画支援のための大動脈血管形状の計測では、3次元のエッジ保存型平滑化フィルタや領域拡張法を用いて大動脈の血流部を抽出し、解剖学的特徴に基づき各血管を識別する。次に血管の直径に基づき瘤部を判定し、血流領域の境界より血栓・石灰化等の病変部の検出を行った。臨床例30例に対し本手法を適用し、提案手法によって血管形状が取得できることが確かめられた。

術中支援としてX線像とCT像との位置合わせによる術中画像の撮影領域推定と治療部位情報の表示手法について検討した。本手法では、単一方向のX線透視装置のみを用いて並進2、回転3、拡大率1の計6個のパラメータを推定する。処理手順としてはまずX線像における造影検出の後、連続フレームのX線像を用いて大まかなパラメータ推定を行い、その結果を入力として術中X線像と術前CT像から作成した平面投影像 (Digitally Reconstructed Radiograph, DRR) とのパターンマッチングを行なう。さらに位置合わせの結果を用いて3次元血管像とステントグラフトモデルを表示し、大動脈血管の走行やステントグラフト留置予定位置の把握を支援する。以上の処理を連続する動画像系列に対して実施する。

血管造影の有無が処理結果に与える影響と提案手法に適した評価関数を調べるため、CT像とX線像のシミュレーションデータを用いて実験を行なった。その結果X線像の血管造影の有無に応じてDRRの種類を切り替えてパターンマッチングを行う必要があり、評価関数としてM-estimatorが適していることがわかった。また臨床データについても、腹部1症例における4つの動画像系列に対して提案手法を適用したところ、おおむね良好な結果が得られた。提案手法をより実用的なものとするために、処理対象画像の入力方法やX線像における血管造影の検出、パターンマッチングの高速化、推定結果の表示方法についても考察した。

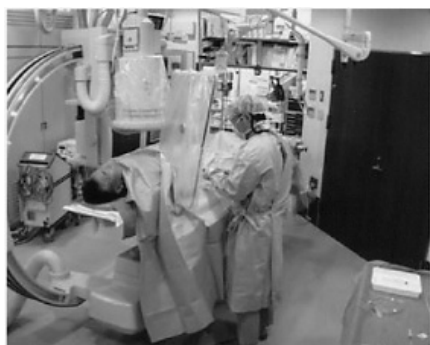


図1. ステントグラフト留置術

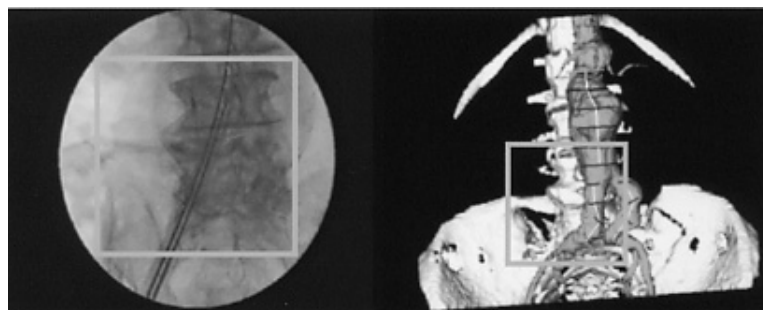


図2. (左) X線像 (右) 推定した方向・位置からの血管モデルの表示

原 口 亮（英保教授）

「核医学心筋画像と冠動脈造影との自動重ねあわせと表示」

平成15年3月24日授与

本論文では、心筋梗塞に代表される虚血性心疾患の診断支援のために、SPECTやPETなどの核医学的手法により得られる心筋機能画像と、血管造影法により得られる冠動脈造影像とを用いて、両者を自動的に重ねあわせる手法を提案した。そして提案した手法を実際の医療現場で利用するために構築したシステムについても述べた。

核医学心筋画像は、患者の体内に注入した放射性薬剤の分布をCTの原理により画像化することにより得られる3次元画像である。主として心筋の機能情報を表した画像が得られる。冠動脈造影像は、心筋に血液を送る冠動脈の形態を調べるためにX線により撮影される2次元の投影像である。虚血性心疾患は何らかの原因でこの冠動脈に狭窄（きょうさく）を生じ、心筋への血流が不足することにより引き起こされる。このように心筋の機能的変化と冠動脈の形態的变化との間には密接な関連がある。従って、核医学心筋画像と冠動脈造影との重ねあわせは診断支援や治療計画の上で非常に有用であると考えられる。

通常の診断過程では、医師はこれらの画像を別々にあるいは並べて目視により判断を下すのが主である。あるいは心筋機能画像の評価方法として一般的な冠動脈走行モデルとの関連づけが行われている。しかしながら、冠動脈の3次元的走行に個人差があることや、冠動脈造影が2次元投影像であるなどの理由により、この作業は簡単ではない。

本研究では、核医学心筋画像と冠動脈造影との重ねあわせ画像を簡便に作成する手法を考案した。また必要な位置あわせ処理を自動的に行う手法を考案した。冠動脈や心筋に関する事前知識・特徴・対象画像の解像度の違いを考慮した上で、自動的に簡便に冠動脈3次元像と重ねあわせ画像を得る手法を提案した。提案手法では冠動脈枝の特徴点抽出や対応付けといった人手を要する煩雑な処理を行わずに結果画像を得ることができる。人工データを用いたモデル実験により提案手法の有効性を確認し、さらに臨床データへの提案手法の適用により重ねあわせ表示の有効性を確認した。最終結果の重ねあわせ像を図1（ブルズアイ表示）と図2（3次元表示）に示す。ブルズアイ表示は核医学心筋ボリュームデータの表示方法として臨床の場で広く用いられている2次元極座標表示である。重ねあわせにより冠動脈の走行の様子を心筋機能と関連づけながら観察することができるようになった。

また提案手法の臨床での実際の利用を目指して、画像の入力から位置あわせ・再構成・重ねあわせ表示・結果画像の出力まで一連の処理を行うシステムを構築した。動作画面を図3に示す。臨床診断の目的で重ねあわせを行う場合には自動位置あわせ誤りへの対策は非常に重要であり、そのために用手的な位置あわせ、画像操作を行うためのインターフェースを実装した。



図1 重ね合わせ結果画像
（ブルズアイ表示）



図2 重ね合わせ結果画像
（3次元表示）

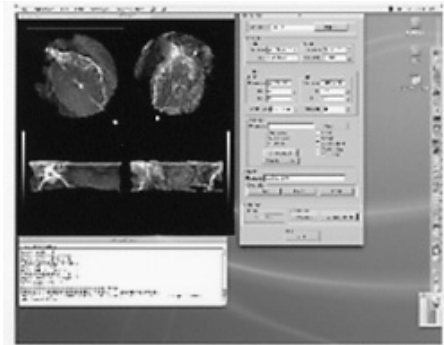


図3 システムの動作画面

山 岸 統 (近藤教授)

「Linear Analyses of Ideal and Kinetic Pressure-Driven Instabilities in Helical Plasmas」

(ヘリカルプラズマにおける理想および運動論的圧力駆動型不安定性の線形解析)

平成15年3月24日授与

プラズマの磁場閉じ込めによる核融合炉を目指す上で、少ない磁場エネルギーで高温高密度の圧力の高いプラズマを閉じ込めることが経済的観点から必要であり、とくにヘリオトロンJやLHDのようなヘリカル系プラズマでは、高いプラズマ圧力に起因する電磁流体力学 (MHD) 不安定性が問題となる。本論文では、理想MHDおよび運動論的MHDの観点から、ヘリカル系プラズマの幾何形状が軸対称でないことに起因する圧力駆動型不安定性の解析手法を確立し、その物理機構を解明することを目的としている。

まず、ヘリカル系プラズマに対し、磁力線方向一次元の理想MHD局所解析を行い、トカマクプラズマでは起きない非軸対称性の非常に強い圧力駆動型不安定性の存在を示した。とくに本論文では、磁力線の局所的な捩れによる安定化因子と磁力線曲率による不安定化因子を詳細に調べることにより、この不安定性の物理機構を初めて解明した。また、この知見を活用し磁力線の捩れを制御することにより、この不安定モードを安定化できることを示した。

以上の解析手法は、一次元の局所解析を各磁力線に対して行うので比較的容易で有用な方法である。しかし、非軸対称性の強い不安定モードに対しては、局所近似の妥当性に問題があることが分かっており、この不安定モードが実際にプラズマ中に巨視的な構造を持って存在しているのか、またそのような巨視的モードに対して局所解析がどのような意味を持つのかは明らかにされていなかった。本論文では、三次元MHD不安定性の大規模数値解析を行い、局所解析で予想された不安定モードが実際に巨視的構造を持って存在することを示すと同時に、局所解析と巨視的解析の結果には密接な関係があることを世界で初めて示した。この結果は、局所解析の有用性を示す非常に重要な結果である。

また、以上の理想MHDによる解析は、この不安定モードが非常に短い波長のモードであることを示した。このことは、プラズマの粒子性に関連する運動論的効果が重要となる可能性を示唆する。本論文では、運動論的効果を取り入れた局所解析により、理想MHDモードに対する運動論的効果の影響を論じた。その結果、運動論的効果が非軸対称性の強い不安定モードに大きな影響を与えることを初めて具体的に示した。

このように、本論文では一次元局所解析により圧力駆動型不安定性の発生機構を解明し、安定化のための方策を示した。さらに三次元解析によりその局所解析の有用性を明らかにした。また、圧力駆動型不安定性に対する運動論的効果の重要性を具体的に明らかにした。これらの結果は、ヘリカル系プラズマの安定限界を調べ、より優れた先進的なプラズマ閉じ込め配位を開発する上で非常に重要かつ有用なものである。

磯田 総子 (津田教授)

「A Study of Wind Oscillations in the Mesosphere and Lower Thermosphere at Low Latitudes Observed with MF and Meteor Radars」

(MFレーダーと流星レーダーによって観測された低緯度中間圏下部熱圏における風速振動に関する研究)

平成15年3月24日授与

大気はさまざまな周期で変動している。よく知られている周期は、地軸の傾いた地球が公転することによって生じる一年の周期や、地球の自転による1日の周期である。それ以外にも、数日、数十日、数年といったさまざまな長さの周期で大気変動している。これらは地球大気を持つ自然の振動であり、このような周期的な大気の変動を大気波動と呼んでいる。大気波動は主に対流圏で作られるが、太陽によって大気の物理現象が左右されている熱圏の下部（高度約100km）にまで伝播していることが知られている。この高度では、大気波動の振動が維持できず壊れ、そのエネルギーが背景場に与えられ、風速や温度などの大気構造を変化させていることが知られている。上空にまで達するこのような大気波動の性質や変動特性に関する研究は、地上からの観測点が多い中緯度帯においては進んでいたが、大気波動の多くが作り出される熱帯の上空では観測が非常に少なくまだわかっていないことが多かった。本研究では、この高度の風速を測定するために京都大学がインドネシア・オーストラリアと共同で設置したインドネシアのカリマンタン島ポンティアナMF（中波）レーダー、ジャカルタ流星レーダーのほか、通信総合研究所の鹿児島県山川MFレーダー、および太平洋クリスマス島MFレーダーのデータを解析し、熱帯の中間圏下部熱圏（高度約70-100km）における長周期（数日-数十日）の大気波動の特性を明らかにした。

ポンティアナ、クリスマス島、山川MFレーダーの3地点の観測を比較することにより、これらの地点で観測された約5日、16日周期の東西風振動の緯度、経度構造を調べた。この結果、これらの風速振動が、理論的に予測されている地球大気のもつ自由振動（ノーマルモードロスビー波）で説明できる場合があることがわかった。また、ノーマルモードロスビー波では説明の付かない約5日、16日周期の風速振動も存在するが、これらの振動の原因として、中間圏起源の不安定波動や、中間圏における冬半球からの伝播などが示唆された。

低緯度には低緯度特有の大気波動が存在するが、赤道を中心とする低緯度を東方向に伝播するケルビン波が代表的である。そのほか、重力を復元力とする大気重力波も、低緯度では積雲対流活動を起源とするものが多く励起されている。また、1日周期の大気潮汐波も赤道域で顕著である。これらの大気波動の長期変動を、ジャカルタの流星レーダーの1993年から1999年までのデータを用いて調査した。その結果、超高速ケルビン波と思われる東西風の約3.5日周期の振動や大気重力波に半年周期の変動があることがわかった。また、いずれの大気波動も1996～1997年にかけて活動が弱くなっていることも明らかになった。

また、低緯度中間圏下部熱圏において、数十日（約30～70日）周期の東西風振動（季節内振動）があることが知られているが、本研究ではジャカルタ、ポンティアナ、クリスマス島の複数地点のデータを用いてその特徴を調べた。その結果、経度90°離れたポンティアナとクリスマス島ではほぼ位相差がないことから、季節内振動が経度変化を持たない帯状平均的な風速振動であることが推測された。また、季節内振動の振幅が潮汐波の季節内振動の振幅と関連があることが示された。さらに、対流圏の積雲対流の活動の指標となる赤外長波放射データ（Outgoing Longwave Radiation）とジャカルタにおける季節内振動の振幅を比較したところ、東経100～150度の赤道域の赤外長波放射データに見られる季節内振動と関連があることを示唆する結果が得られた。これらの結果から、対流圏で生成された大気潮汐波が対流圏中で季節内振動の周期に変調され、その大気潮汐波が上空に伝播し波のエネルギーを背景風に与えることで、低緯度中間圏下部熱圏における季節内振動が駆動されていると推測された。

今後多くのレーダーとの比較研究や、たとえば京都大学がインドネシアと協力して2001年に設置した赤道大気レーダーのような下層大気の観測結果との比較研究が行われ、より詳細に大気波動の生成、伝播、砕波過程が明らかにされると思われるが、以上の研究結果はそれに先駆けて中間圏下部熱圏の大気力学をより深く理解するためのステップである。

濱 田 純 一 (深尾教授)

「A Climatological Study on Rainfall Variations over the Indonesian Maritime Continent」

(インドネシア海洋大陸における降水変動の気候学的研究)

平成15年3月24日授与

インドネシアは複雑な地形を持つ大小多数の島々からなり、海洋大陸と呼ばれている。海洋大陸域では気象衛星や熱帯降雨観測衛星により、熱帯域においても特に降水・対流活動が活発な領域であることが知られている。また、活発な降水活動は潜熱の放出を通して、大規模大気循環の熱源として働くのみならず、生活用水や農業生産といった社会生活にも大きな影響を与えている。以上の点からも、降水は熱帯域の気候を特徴付ける上で最も重要な物理量であると言える。現在、インドネシアにおける地上気象(降水量)観測は全国数千地点において実施され、歴史の古い地点では19世紀後半より行われてきている。しかし、広大な領域にわたるデータの収集・整理や品質管理の問題、ならびに公開上の制限によって、衛星観測と比較し得る地上気象観測データベースは、これまで存在していなかった。

そこで本研究では、インドネシアにおける地上気象観測資料(特に日降水量)を筆者自身が中心となって収集・整理し、多地点・高時間分解能の気象データベースを初めて作成することによって、海洋大陸域の降水分布・変動の詳細な特徴を明らかにすることを目的とした。特にインドネシア全域での降水変動の気候学的な特徴、ならびに複雑地形と降水の局地性の関連を明らかにするため、広域・長期間(1961-90年のインドネシア全域約150地点)及び限られた領域での多地点(1985-94年、スマトラ島西部赤道域約100地点)の日降水量データを収集、解析することにより以下の結果を得た。

まず海洋大陸全域の降水量の季節変化の特徴として、南半球域に位置する地点を中心として、南半球夏季極大の年周期を示す季節変化が卓越し、衛星観測により知られている東南アジアからオーストラリアへ向けての季節進行の他に、ジャワ島周辺でインド洋側からジャワ海側へ雨季が南北進行することを明らかにした。また、エルニーニョ・南方振動(ENSO)に伴う雨季の経年変動について、インド洋側に位置する大部分の地点で雨季の期間のずれが顕著であるのに対し(エルニーニョ年に雨季の開始・終了が遅れる。ラニーニャ年にはその逆の傾向。)、雨季の降水量自体には差が見られないことを明らかにした。一方でジャワ海側の地点では季節位相固定された季節内変動が卓越し、兩年の間にほとんど差が見られないことを示した。つまり、海洋大陸スケールで雨季とENSOの関連の差異が存在するのみならず、島のスケールにおいても違いが存在することを明らかにした。さらに、エルニーニョの出現頻度に対応してジャワ島周辺の雨季の入り(の経年変動の特徴的な時間スケールが異なり(1960年から70年代前半は2~3年、1910年から40年、1970年代後半以降3~4年)、またENSOとの関連の強さから(ENSOに対応した雨季のずれにより説明される)観測期間平均の雨季の特徴も異なるなど、数十年規模の気候変動が存在することも明らかにした。また、スマトラ島山岳域においては、急峻な山脈より西側のインド洋に面する海岸域で季節内変動が卓越し、東部の山岳域では南半球夏季を中心とした降水の季節変化が顕著であるなど、地形により主要な降水変動が特徴付けられることを示した。また、海岸域の降水はインド洋上の大規模擾乱の季節内変動によく対応しているのに対し、内陸部の降水は大規模擾乱との関連は低く、主として日変化などスマトラ島周辺の局地的な対流活動との関連が明らかになった。

以上、得られた結果より、インドネシア海洋大陸域における降水活動には時間的「階層性」が存在し、その出現状況により地形、島、海洋大陸規模に及ぶ降水分布・変動が特徴付けられることを観測事実に基づき、詳細に明らかにした。2001年からスマトラ島において赤道大気レーダーの連続観測が行われているが、本研究は赤道大気レーダー建設候補地の基本的な気象条件を明らかにする一環として、筆者自身が学部生の頃に解析を開始したものである。これまで筆者自身も何度も現地に向かいデータ回収を実施してきたが、修士過程二回生の時に初めてインドネシアに行った際には食中毒でお腹を壊し、また、インドネシアでも代表的なパダン料理の辛さに四苦八苦していたが、現在では好物の一つとなった。最後に学位論文をまとめるにあたって、多くの協力を頂いたインドネシアの方々、ならびに宙空電波科学研究センターの皆様に感謝の意を表したい。

川 村 誠 治 (深尾教授)

「A study of wind variations and their effects on the mid latitude ionosphere and thermosphere based on the MU radar observations」

(MUレーダー観測に基づく中緯度電離圏・熱圏における風の変動とその影響に関する研究)

平成15年3月24日授与

この論文では、電離圏または熱圏と呼ばれる高度領域に吹いている風（以下熱圏風と呼ぶ）の振る舞いと、それがこの領域に及ぼす影響について議論している。電離圏・熱圏は高度約90kmから600kmほどの領域であり、多くの生命体にとって有害な極紫外線を吸収するなど地球環境の維持のために大きな役割を果たしている。電離圏という名前は、極紫外線の吸収により大気の一部が電離して電子とイオンが生成されることに由来し、熱圏と呼ばれるのは極紫外線の吸収により中性大気が最大で約2000Kという高温になるからである。

人類が電離圏・熱圏を積極的に利用した最初の例は短波通信である。この領域の電離大気が反射板的役割で遠距離通信に寄与することが分かり、これを起点に電離圏・熱圏の研究が始められた。この領域は近年では人工衛星やスペースシャトル、国際宇宙ステーションが飛ぶなど、人類活動の場として広く利用されている。宇宙利用が盛んになるに連れ、電離圏・熱圏中の擾乱現象が衛星通信におけるノイズになったり、衛星測位システムの誤差要因になるなど新たな課題も生まれ、この領域をよりよく知ることがますます重要になってきている。

電離圏・熱圏中の電離大気は背景の中性大気と比較して非常に希薄であり、中性大気の流れである熱圏風の影響を強く受けている。一方電離大気はその運動を地球磁場に拘束されているため、熱圏風はこの電離大気との衝突によりその振る舞いに強い影響を受けている。このように電離大気と中性大気は相互に影響し合っており、熱圏風は電離圏・熱圏の理解に非常に重要な要素の一つと言える。本研究は、この熱圏風を通して電離圏・熱圏の振る舞いを明らかにしようとするものである。

滋賀県信楽町にあるMUレーダーはアジア域で唯一この高度領域（主として200kmから600km）の電子密度、電子・イオン温度、そして熱圏風を観測できるレーダーである。MUレーダーの十数年にわたる観測データを用いて、主に統計的な手法によって熱圏風、電子密度、電子・イオン温度やイオン組成の変動とそれらの相互作用の研究を行った。

電離圏・熱圏の電離源が太陽からの極紫外線であることから分かるように、この領域は太陽からの影響を強く受けており、太陽フレアを起源とする地磁気の乱れによる変動、11年周期を持つ太陽活動による変動、季節変化や日変化など様々な周期の変動が見られる。熱圏風の統計解析では日変化の振幅の太陽活動度による違いや、平均風の季節による差などさまざまな変動が見られており、他観測や経験モデルとの比較も含めて熱圏風の振る舞いについて議論している。その他に電子密度、電子・イオン温度の年変化に対する熱圏風の影響についてや、MUレーダーで初めてとなる電離圏・熱圏とその下に位置する中間圏の同時観測による地磁気擾乱時の風速変化についても論じている。また、MUレーダーで初めて電離圏上端に存在する水素イオン密度の推定を行い、その統計解析結果と水素イオン密度に対する熱圏風の影響についても議論している。

十数年にもわたる膨大な観測データを用いた電離圏・熱圏の研究報告は世界的にも希少である。近年人類活動が電離圏・熱圏にまで広がるに連れ、この領域の振る舞いが人間の生活に与える影響が大きくなっており、宇宙天気と呼ばれる研究も盛んに行われている。本研究の成果は高精度の電離層モデルを必要とする宇宙天気の分野にも大きく寄与するものと考えられる。

Hassenpflug, Gernot (深尾教授)

「Study of turbulence structures in the lower atmosphere using spaced antenna techniques with the MU radar」

(MUレーダー空間干渉計法による下層大気圏の乱流構造の観測)

平成15年5月23日授与

対流圏、成層圏、中間圏における大気力学の最も困難な課題は乱流である。乱流については、種々のリモートセンシング、例えば可視光線やマイクロ波（電波）を用いた、乱流からの散乱波の解析から、その物理量の運用、波動、相関性などの解明が行われている。一方、レーダーは、天候にかかわらず観測が可能であるという利点があり、気象や超高層大気中の乱流研究に適している。

MUレーダーは滋賀県信楽町に設置された巨大なVHF帯（直径103メートル、周波数46.5MHz）の大気レーダー装置であり、高度1.5kmから700km以上までの大気を多様な方式によって観測可能である。本論文で用いられた空間干渉計法とは、受信アンテナを3～4分割して使用し、それぞれの領域から得られる反射エコー信号の相関関数から大気の物理量を推定する手法である。大気の屈折率の揺らぎパターンの運動や形状を推定可能である。屈折率の揺らぎは乱流に関連があることから、乱流の観測が可能である。

本論文では、空間干渉計データの解析法のうち、Doviak et al. (1996) 及びHolloway et al. (1997) が提唱した解析法を主として用いた。この手法によって、散乱波の空間相関関数からアンテナビーム幅の効果を取り除いて大気乱流の構造による寄与を推定することが可能となる。論文では、MUレーダーによる観測から同方式の有効性を明らかにすると共に、誤差伝搬の理論を用いて同方式のランダム推定誤差を導出した。また背景風速の測定結果と同方式による乱流の水平構造の観測結果の比較を行って、乱流が背景風のシア方向に長く伸びた構造をもつことを明らかにした。これは大気乱流の生成に風のシアが大きく寄与することを示唆するものである。

空間干渉計のデータ解析方法としては、相互相関関数によらず乱流の構造関数を用いる方式がPraskovskyによって提唱されている（2000）。本論文では、この解析法をMUレーダー観測データにはじめて適用し、従来法との比較を試みた。結果として風速の測定値が両方で非常によく一致する一方、乱流強度の推定値には推定法の原理の違いに起因すると思われる相違があることをはじめて指摘した。

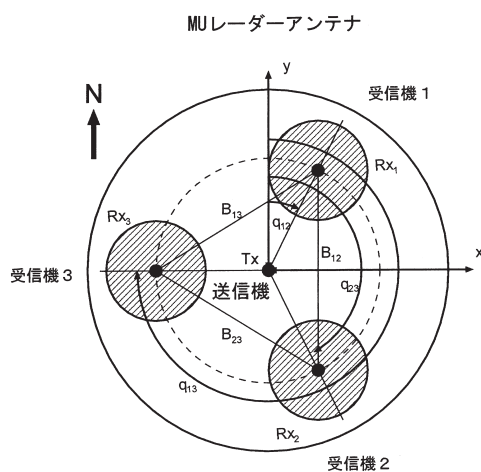


図1 MUレーダーにおける空間干渉計法の受信アンテナ配置

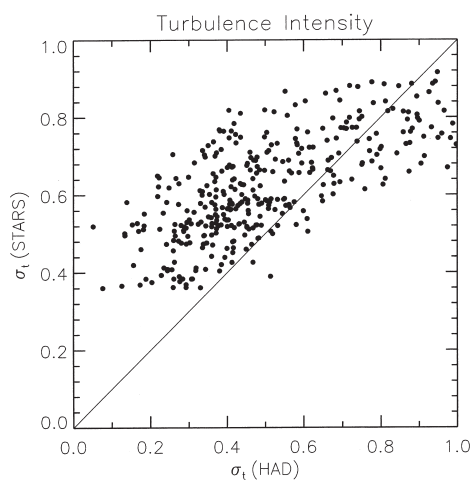


図2 相関関数 (HAD) と構造関数 (STARS) の乱流強度の散布図

鈴木 康 浩 (近藤教授)

「Free-Boundary MHD Equilibria of Non-Axisymmetric Torus Plasmas」

(非軸対称トーラスプラズマの自由境界MHD平衡)

平成15年7月23日授与

トーラスプラズマの磁場閉じ込めによる核融合炉を目指す上で、プラズマの電磁流体力学 (MHD) 平衡が存在することは本質的である。しかし、トーラスプラズマの幾何形状に軸対称性がない場合、そのMHD平衡を実験条件に即して矛盾なく求めることは容易ではない。本論文の目的は、これまで十分な解析ができなかった複数の非軸対称トーラスプラズマのMHD平衡を、現実的な自由境界条件のもとで求める数値解析手法を開発すること、さらにこの手法を用いて得られる三次元自由境界MHD平衡から、新たな物理的知見を得ることである。

まず、トロイダル磁場リップル (TFリップル) と呼ばれるトロイダルコイルの離散性に起因する非軸対称性を持つトカマクプラズマ (リップルトカマク) のMHD平衡を解析する手法を示している。リップルトカマクでは高エネルギー粒子の閉じ込め劣化が問題となっているため多くの解析が行われているが、ほとんどの解析では軸対称平衡にTFリップルを重畳する近似が行われており、三次元MHD平衡を矛盾なく解析した例はほとんどない。本論文では、プラズマ圧力による平衡磁場の変化に起因したTFリップル分布の変化とその物理機構を、初めて定量的に示した。また、そのTFリップル分布の変化が高エネルギーイオンの粒子軌道に及ぼす影響を詳細に議論した。ヘリカル系プラズマでは、通常VMECと呼ばれるコードで平衡解析が行われる。しかし、VMECを用いて自由境界平衡計算を行う場合、プラズマ中の全トロイダル磁束を与える必要がある。そこで、本論文ではこれを矛盾なく求める方法としてVMECと磁力線追跡コードを組み合わせる手法を用い、ヘリカル系プラズマに適用した。これに対して京都大学のヘリオトロンJ装置のプラズマは、最外郭磁気面の形状が複雑であるため、VMECを用いた自由境界平衡計算は正確ではない。そこで、磁気面の存在を仮定せず平衡を求める大規模平衡計算コードHINTの改良も行った。これにより初めてヘリオトロンJのような複雑な平衡配位における磁気島の形成などが効率よく解析できるようになった。

このように、本論文では非軸対称トーラスプラズマの自由境界MHD平衡を実験条件に即して矛盾なく求めるいくつかの手法を新たに開発・改良し、さらにこれらを用いたリップルトカマクとヘリカル系プラズマの解析から、プラズマ圧力による平衡磁場の変化がTFリップルや磁気島形成に及ぼす影響を明らかにした。これらの手法および結果は、核融合炉を開発する上で重要かつ有用なものであり、今後さらなる発展が期待できる。

宮 崎 崇 (松重教授)

「分子デバイス構築に向けたSPMによる微細構造の作製と電気特性評価」

平成15年9月24日授与

本論文は分子デバイス構築を目的として行われた、原子間力顕微鏡 (AFM) によるナノスケール微細構造の作製と有機超薄膜の局所電気特性評価についての一連の成果を取りまとめたものである。本論文により得られた主な研究成果は以下の通りである。

- (1)チオフェンオリゴマーの単分子膜をチャンネル層とする薄膜トランジスタを作製し、そのトランジスタ特性とケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) 測定を行った。この結果、ゲートバイアスにより誘導されたキャリアのゲート絶縁膜/有機薄膜界面における閉じ込めを初めて実験的に実証すると共に、X線回折法では評価が困難であった単分子膜の結晶性について、アモルファスライクな構造を有していることを明らかにした。
- (2)薄膜トランジスタの電極間をフルカバレッジしたチオフェンオリゴマーの多層膜に対してKFM観察を行った。これにより、有機薄膜トランジスタの線形領域における動作は、電極金属/有機薄膜接触界面の電気特性を強く反映していることを明らかにした。
- (3)電極金属/有機薄膜接触界面の局所電気特性評価において必要不可欠となる原子レベルで平坦な極薄Pt電極の作製に初めて成功した。さらにこれに対して、AFM探針を用いたスクラッチ加工を行い、ナノギャップ電極の作製に成功した。
- (4)走査プローブリソグラフィー (SPL) において、注入電荷量の精密制御を行う独自の装置開発を行い、レジストの細線パターン、及び細線中にナノギャップを有する微細パターンの作製に成功した。さらにレジスト微細パターンをケミカルエッチングにより転写することにより、導電性を有するTiの微細構造作製に成功した。

【論文博士一覧】

出口 幹雄	「Study on the Insulated Probe Method for Monitoring Processing Plasma」 (プロセッシングプラズマのモニタリングのための絶縁プローブ法の研究)	平成15年1月23日
岡本 英二	「振幅位相変調と符号化を組み合わせた高能率無線伝送方式に関する研究」	平成15年1月23日
今井 一雅	「Modeling of Modulation Lanes in Jupiter's Decametric Radio Spectra」 (木星デカメートル波スペクトル中のモジュレーション・レーンのモデルに関する研究)	平成15年1月23日
大塚 寛之	「両面受光型単結晶シリコン太陽電池に関する研究」	平成15年3月24日
岡 徹	「Novel GaAs Heterojunction Bipolar Transistor Technologies for High-Speed and Low-Power Applications」 (高速低消費電力を目指した新しいGaAs系ヘテロバイポーラトランジスタの研究)	平成15年3月24日
笠松 直史	「トリウム添加ファイバ増幅器の利得シフトと大容量波長多重光通信システムへの応用」	平成15年3月24日
長田 芳裕	「LSI製造における薄膜プロセス起因の欠陥発生メカニズムとその抑制に関する研究」	平成15年3月24日
井上 尚也	「高信頼性強誘電体集積メモリ (FeRAM) 技術のためのPZT薄膜物性制御に関する研究」	平成15年3月24日
嶋田 恭博	「Studies on Electrical Properties of Integrated Ferroelectric Capacitors and Their Degradation Processes」 (集積化した強誘電体キャパシタの電氣的諸特性とその劣化過程に関する研究)	平成15年3月24日
浮田 浩行	「Shape-from-Shading Analysis for Reconstructing 3D Object Shape using an Image Scanner」 (イメージスキャナを用いた陰影情報解析に基づく3次元物体の形状復元)	平成15年3月24日

石川 憲洋	「マルチキャスト通信に関する研究」	平成15年3月24日
松田 年弘	「需給曲線モデルに基づく電力市場の価格リスク評価に関する研究」	平成15年3月24日
本田 道隆	「循環器X線診断における被曝低減技術の研究」	平成15年5月23日
佐原 明夫	「分散マネージドソリトン伝送システムの研究」	平成15年7月24日
佐々木鉄雄	「競争環境に対応した負荷周波数制御とその評価指標に関する研究」	平成15年9月24日

学生の声**「新たな時代の開拓者を目指して」**

工学研究科 電子工学専攻 藤田(茂)研究室 博士後期課程2年 西塚 幸司

コンピュータと通信をはじめとする電子技術の発達は、巨大生物のようにその勢いはとどまることを知らず、世の中のあらゆる場所で用いられています。その功罪については議論されていますが、そのことは使う人間の側にあり、私は社会への貢献の方が大きいと考えています。果たして後世の歴史学者は、今の時代をどのように記述するのでしょうか？私はこの分野の新たな技術を創造し、一歩二歩先を見据えた研究者になりたいと願っています。すなわち、大学院で学び広い視野で物事を捉え、それを基に次世代産業を切り開くフィールドで活躍出来たらと夢見ています。

20世紀は「エレクトロンの時代」だと言われますが、21世紀はそれを基とした「フォトンの時代」だと言われ本格化してきました。現在、私は藤田茂夫教授御指導の下、窒化物発光デバイスのマイクロ・ナノ構造に起因した光物性に関する研究を行っています。窒化物発光デバイスは近紫外域から可視短波長域の発光ダイオードやレーザダイオード素子として優れた特性を示しますが、我々の究極の目標である、発光効率100%の発光デバイスに近づけるためにはいくつものブレークスルーが必要です。私は、発光効率を高めたり発光波長域を広くしたりするために、一工夫加えた試料構造を提案しています。それを実証し新たな工夫を模索するために、超短パルスレーザや顕微鏡を用いた先進フォトセンシング技術によって、マイクロ・ナノ構造でどのようにして発光や非発光が生じているかについての実験に取り組んでいます。このように、基礎光物性が、デバイス開発に直結していることには大変興味を持っています。現状よりも高輝度・高発光効率化が実現できれば、現在我々が日常用いている電球や蛍光灯などの照明は全て低消費電力である窒化物発光デバイスに置き換えることが期待できます。フォトンの時代を見据えた研究であると実感しています。

我々は更なる学問と研究成果の飛躍のため、この10月に吉田キャンパスから桂キャンパスへと移転し、研究環境も整いつつあります。このことは、移転作業が大変だっただけに大変な喜びを感じています。この新キャンパスで、新たな時代の開拓者となれるよう、建物・施設だけでなく中身も充実させられるよう頑張っていきたいです。

「博士課程進学のお勧め」

情報学研究科 通信情報システム専攻 中村研究室 博士後期課程2年 筒井 弘

私が進学を決めた理由の第一は、自分が興味を持つ研究課題に対して主体的に研究を行いたかったからですが、環境が恵まれていたことも大きかったと思います。

まず、私の所属研究室の中村教授は企業経験者であり、その経験から常々「高い志を持ち、それに肉薄することのできる資質を持った若者にとって、大学ほど活用しがいのある環境はない」と言っておられます。実際、中村研の研究テーマは企業から見ても魅力的なものが多く、修士課程の学生も含めて毎月のように誰かが国際会議で発表を行っています。

次にあげなければならないのは「(株)シンセシス」の存在です。中村研はLSI設計に関する研究を行っています。シンセシスではこの分野の阪大・京大・奈良先端大の学生が、自身の研究に密接に関連したLSIの設計を仕事として行っています。もちろん仕事ですので、相手があり、納期もあり、実用となるLSIを設計する必要があるわけですが、学生でありながら企業の人と対等な立場で仕事をする経験が得られ、またその設計を研究にフィードバックすることができ、さらに、経済的にも自立が実現できます。

私は、中村研において博士課程に進学した最初の学生でしたので、進学後の研究生活に関して様々な不安がありました。しかし、海外での国際会議で発表して世界の研究者と議論を行ったり、シンセシスを介して企業の人や他大学の学生と議論を行ったりできて、現在は非常に充実しています。さらには、良い手本になれているか分かりませんが、嬉しいことに、私が進学したあとは毎年数名の学生が進学しています。

また、幸い、私は学術振興会の特別研究員に採用されたので、経済的には生活上も研究上も非常に恵まれています。就職した同期生より恵まれているかもしれません。もちろん、博士課程の学生は、一人の研究者としてその研究課題への取り組み方が評価されるので、そういう意味では非常に厳しいといえますが、恵まれた環境の中で、充実した研究を進めることができ、さらには早々と博士号が取得できるので、博士課程進学を選んでよかったと思います。

早いもので、私の博士課程も折り返し地点を過ぎてしまいましたが、今後も日々、理論/実践を問わず研究に精進し、中味の濃い博士論文をまとめようと思います。

教室通信

電気系 2 専攻の桂キャンパスへの移転

本年 8 月 25 日から 9 月 18 日のほぼ一ヶ月をかけて、工学研究科電気工学専攻、電子工学専攻の両専攻の全研究室が、化学系 6 専攻に続いて桂キャンパスへの移転を完了しました。移転後の状況について簡単にご報告致します。

電気系 2 専攻の大型の物品は 4 月以来随時移転を済ませることができましたので、今回の移転期間は研究室の小型の備品などが中心となり、多い日には一日に 4 研究室が一挙に移転するというものでした。移転した研究室から順に研究を再開すべく実験装置、システムを立ち上げておりますが、大型の装置を必要とする研究はまだまだその調整に時間を費やしている状況です。この冊子がお手元に届いた時点ではおそらく、否が応でも研究はそれなりに遂行されているものと思います。

10 月 1 日から桂キャンパスでの大学院の講義が始まりました。電気系の講義は講義室 1（大）、講義室 2（小）の二つの講義室を中心に開講され、このうち講義室 2 には本年度中に吉田の中講義室と遠隔講義を行う設備が整う予定です。既に 3 週間が経ち、どの講義も多少のトラブルはあったものの既に落ち着き、例年と同様の講義が行われています。吉田キャンパスと桂キャンパスの間には、講義、会議等への物理的移動のためシャトルバスが毎日数便運行されています。約 50 分の所要時間で移動ができ、工学研究科が二つのキャンパスに分断されている期間は、重要な生命線となっています。

去る 10 月 18 日には、大学として開講式典が挙行政され、内外にその全容が紹介されました。新聞等での記事を見られた方も多いと思います。11 月には工学研究科としての式典が予定されています。桂キャンパス内には企業、個人の寄付による施設が建てられることも決まり、ますます充実した研究環境が整うことと思います。完成まであと数年掛りますが、完成の暁には日本を代表する研究拠点となることは間違いなく、それに向けて構成員が継続して努力して行くことが期待されています。

桂キャンパスではこれまでの教室事務室というのが廃止され、クラスタ事務室がクラスタ総ての専攻の事務をまとめて行うことになりました。現在は暫定的に各専攻を担当する事務官が居りますが、これも新年度には一切無くなり、A クラスタ全体の事項に対応することとなります。一方、吉田には現在電気電子工学科事務室があります。主として学部教務とその関連事務の一切を、工学部の教務の下で学科長の指揮を頂き取り仕切ることとなっています。

キャンパスの施設の中では食事その他の厚生施設の建設が遅れたため、教官、学生は昼夜を生協の弁当に頼る日々が続いています。漸く 10 月の下旬に小さいものの A クラスタにレストランができましたが、新しい厚生施設が完備される日が待ち遠しく思われます。このような状況の中でも、夢を持って強い意志で研究を続ける教官、学生に対して、関係の方々からの一層のサポートをお願いしたいと思います。

(平成 15 年度電気工学専攻専攻長 引原 隆士)



桂キャンパス A1 棟（電気系 2 専攻の研究棟）



桂講義室 1 前ロビー

編集後記

桂新キャンパスが始動しました。電気工学専攻と電子工学専攻は既に桂キャンパスへの移転を終え、電気関係教室は新たな第一歩を踏み出しました。電気百周年記念事業の一環として創刊された「cue」も、今後は、吉田・桂・宇治の3拠点から社会への情報発信を進めて参ります。今後とも電気関係教室への一層のご支援をお願い申し上げます。 (T. M. 記)

発行日：平成15年12月

編集：電気電子広報委員会

吉田 進、引原 隆士、鈴木 実、
芝内 孝禎、松尾 哲司、山田 啓文、
朝香 卓也

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