

cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.21

MARCH 2009

[第21号]

..... 卷頭言

森 詳介

..... 大学の研究・動向

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門
プラズマエネルギー研究分野

..... 産業界の技術動向

株式会社日立製作所
福永 泰

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

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
て京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員
やその他の企業の協力により発行されています。

cue 21号 目次

巻頭言

低炭素社会実現に向けて

.....関西電力株式会社 取締役社長 森 詳介..... 1

大学の研究・動向

高速度カメラを用いた周辺プラズマ挙動の可視化

.....エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野..... 3

産業界の技術動向

知的情報社会実現に向けてのuVALUE活動株式会社 日立製作所 福永 泰..... 8

研究室紹介 13

博士論文概要 33

高校生のページ

レーダー：電波の目情報学研究科通信情報システム専攻 佐藤 亨..... 61

学生の声

違い工学研究科 電子工学専攻 博士後期課程3年 西中浩之..... 67

「ねえさん」と呼ばれて

.....工学研究科 電子工学専攻 博士後期課程1年 北村恭子..... 67

教室通信

光・電子理工学教育研究センター

.....光・電子理工学教育研究センター長 石川順三..... 68

賛助会員の声

進化し続ける電子部品

.....株式会社 村田製作所 児堂義一..... 69

編集後記 71

巻頭言

— 低炭素社会実現に向けて —

昭和38年卒 関西電力株式会社 取締役社長 森 詳 介



(1) 地球環境保全は人類喫緊の課題

近年、地球環境保全が人類喫緊の課題となり、温室効果ガス排出抑制に向けた取組みが、世界中で行われるようになってきました。

関西電力では、いち早く1990年に「地球環境アクションプラン5原則」を定め、「資源・エネルギーの効率的利用の促進」や、「CO₂分離・回収等先進的な技術開発への挑戦」など、積極的に取り組んできました。発電時にCO₂を排出しない原子力発電所の安全・安定運転はもとより、火力・水力発電所の発電効率向上などに努めてきた結果、当社の発電量あたりのCO₂排出量は、現在、日本の電力会社の中でも最も低いレベルにあります。

一方、こうして発電した電気を、お客さまがより効率的にお使いいただけるよう、省エネのコンサルティングや高効率機器のご提案にも力を入れています。なかでも、大気などの熱エネルギーを有効活用して投入エネルギーの何倍もの熱を利用することができるヒートポンプ技術を使った給湯機器「エコキュート」の普及拡大に努めています。

さらには、海面上昇による水没の危機に瀕しているツバル国の太陽光発電設備の建設・運転の支援や、ニュージーランドの風力発電など、海外での活動にも力を入れています。

(2) 低炭素社会実現に向けて

昨年の洞爺湖サミットにおいて、G8は、「世界の温室効果ガスを、2050年までに半減する」という長期目標を世界で共有するよう、求めていくことに合意しました。

これを受け、わが国でも、昨年7月、現状から6～8割の温室効果ガス削減を目指す「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定されました。これは、持続的な経済成長や、快適な生活を維持しながら、「低炭素社会」構築を目指すというものであり、これを実現していくにあたっては、発電時、使用時の両面で省CO₂を進めることができる電気エネルギーが、重要な役割を果たしうると私たちは考えています。

とりわけ、原子力、火力、水力など様々なエネルギー源の長所を組み合わせる発電した電気をネットワークを通じてお客さまにお届けする「系統電力」は、大きく貢献できると考えています。

例えば、太陽光などの再生可能エネルギーも、天候により出力が大きく変動するという不安定さがありますが、これを電力系統につなぐことによって、その弱みを補うことができます。ただし、大量に接続した場合には、電気の安定供給に影響を及ぼす可能性があるといった課題もあります。

そうしたことから、当社では、平成21年度、堺市臨海部に、事業用の大規模な太陽光発電設備を建設する計画であり、その運用を通じて、諸課題の検証に努めるとともに、得られた知見については広く公表し、一層の普及につなげていきたいと考えています。

このように私たちは、低炭素社会実現に向けて責任ある事業者として、環境に優しい電気を安全安定的にお届けして、人々の生活や産業活動の基盤をしっかりと支え、社会の発展に貢献していくべく、

日々努力を続けています。

（３）大学の研究に期待

一方、今後、世界が低炭素社会を目指していく中で、最も重要な鍵を握るのは研究開発・技術開発であることは間違いありません。

例えば前述の政府の目標にしても、その達成のためには、技術の大きなブレークスルーが不可欠です。この点、最高水準の技術を有するわが国に対する世界の期待は、今後ますます高まっていくものと思います。

なかでも、京都大学においては、宇宙太陽光発電をはじめ世界をリードする多くの革新的な研究がなされていると伺っています。「一人、善く射れば百夫決拾す」という格言があります。これは、「優れた矢を射った者に引っ張られて、周囲の者も矢を射るようになる」という意味ですが、そうした皆さま方の研鑽が、さらなる技術の飛躍を導き、より安心して快適な未来への展望が開かれんことを、心から祈念する次第です。

大学の研究・動向

高速度カメラを用いた周辺プラズマ挙動の可視化

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野
 エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 基礎プラズマ科学講座
 核融合エネルギー制御分野
 教授 水 内 亨
 准教授 南 貴 司
 助教 小 林 進 二

1. はじめに

21世紀以降のエネルギー源は、人類の持続的発展を支えるに足る十分な量を提供できることばかりではなく、地球規模の環境保全からの要請を満たすことも求められています。化石燃料を代替するエネルギー源としては、核分裂、核融合、風力・太陽光発電等の再生可能エネルギー等が挙げられますが、中でも、核融合エネルギーについては、安全性・環境適合性・資源量等の観点で優れた特性を潜在的に有しています。1958年の第2回原子力平和利用国際会議開催に当たって、先進国の申し合わせにより制御熱核融合研究は公開されることとされ、爾来、世界の主要国で活発な研究開発が、あるときは競い合い、あるときは共同して行われています。我が国においても1950年代に手探り段階から開始された核融合研究開発は、国際プロジェクトとして進められている国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor：ITER）計画への参加へと展開し、さらに日欧の協力により、ITERの先の原型炉に向けた研究開発が「幅広いアプローチ（Broad Approach：BA）計画」として開始されています。

核融合プラズマは、開放形の非線形媒質であり、プラズマパラメータの向上に伴い、それまでは表面化しなかったような事象が現れることがしばしば見受けられ、それらをきちんと理解して進んで行かねばなりません。したがって、核融合炉の実現を目指す研究においては、上記ITER計画やBA計画に代表される「開発研究」と、それを支える「学術研究とそれに基づく人材育成体制」とを包含する総合的研究の推進が重要です。前者は、特定の技術開発目標を一定期間に達成する目的直結型の研究開発であるのに対して、後者、特にこれを担う大学等の研究は、研究者の自由な発想に基づいた、学理の探求に基づく当該研究分野の学問的体系化を目指す学術研究であると言えます。人材育成の観点からは、核融合エネルギーフォーラム ITER・BA技術推進委員会 ロードマップ等検討ワーキンググループが、ケーススタディとして行った、ITER計画やBA計画を中心にトカマク原型炉へ向けた研究を進めるための人材に関する検討〔1〕によれば、今後15年間で約400名の人材確保が必要とされており、大学等の役割、大学等への期待は大きいと言えます。

京都大学では、1958年、基礎物理学研究所長 湯川秀樹教授（当時）の提唱によりスタートした高温プラズマ懇談会をもとに、理学部、工学部、教養学部、基礎物理学研究所及び工学研究所（当時）にまたがる核融合研究グループ（Project Helicon）が発足、共同研究がスタートしました〔2〕。その中で開始された、宇尾光治工学部助手（当時）発案によるヘリオトロン磁場配位を用いた高温プラズマの発生・閉じ込め・制御に関する研究の流れは、一方では、京都大学におけるヘリオトロンE装

置によるヘリカルヘリオトロン磁場の核融合炉への原理検証実験を経て、大学共同利用法人自然科学研究機構核融合科学研究所のLHD装置へ引き継がれ、パラメータ拡張段階の実験研究へと進み、著しい成果を上げています。他方、ヘリオトロン磁場のさらに可能性を求めて新たに提案された磁場配位、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場〔3〕の概念開発研究を行うため、私たちは、ヘリオトロンJ装置を建設〔4〕、研究を進めているところです。ヘリオトロンJ研究は、佐野研究室（エネルギー理工学研究所）、近藤研究室（エネルギー科学研究科）、水内研究室（エネルギー理工学研究所）、長崎研究室（エネルギー理工学研究所）の四つの電気系関連研究室に加え、国内外の多くの研究グループ、研究者との共同研究によって進められています。大学院生は、エネルギー科学研究科に所属していますが、電気系教室の学部生には、卒業研究等で参加してもらっています。

ヘリオトロンJ研究の進展については、これまで、CUE誌上でも、研究室紹介等の中で随時紹介されているところです。本記事では、最近急速に性能が向上してきた高速ビデオカメラを用いた、周辺プラズマ挙動の可視化に関する話題を紹介します。この研究は、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共同研究ならびに核融合科学研究所双方向型共同研究により、広島大学ならびに核融合科学研究所との共同研究として実施しているものです。

2. 磁場閉じ込め装置における周辺プラズマ

トーラス状磁場を用いたプラズマ閉じ込め実験装置においては、高温の炉心プラズマは、磁力線がプラズマを取り囲む真空容器壁等の、いわゆるプラズマ対向壁を横切らない「閉じた空間」に高温の炉心プラズマを生成・閉じ込めることにより、炉心プラズマが直接プラズマ対向壁表面に接触することを防いでいます。この「閉じた空間」の磁力線は、入れ子状のトーラス面（磁気面）を形成しており、その一番外側のものを最外殻磁気面あるいはセパトリクス（separatrix）と呼んでいます。最外殻磁気面とプラズマ対向壁との間では、磁力線はプラズマ対向壁表面を横切っており、スクレイプ・オフ層（Scrape Off Layer：SOL）と呼ばれます。炉心プラズマから最外殻磁気面を横切ってSOLに流出したプラズマ粒子と熱は、主に磁力線方向に輸送され、プラズマ対向壁に流入するため、SOLは、炉心プラズマと材料表面とのインターフェースであると言えます。この観点から、最外殻磁気面の少し内側までも含めた領域におけるプラズマを、周辺プラズマ、あるいは境界プラズマと呼び、その領域におけるプラズマ挙動ならびにプラズマ-材料相互作用で生じた中性粒子や不純物粒子の挙動の理解とそれに基づく正確な予測ならびに制御法開発が、核融合開発には不可欠な要素のひとつとなっています。

周辺プラズマの輸送に関し、従来、磁力線に沿った古典的輸送（クーロン衝突に基づく輸送）と磁場に垂直な異常輸送（プラズマ乱流に基づく輸送）で記述できる準静的なプロセスが考えられていました。しかしながら、近年、SOLプラズマの径方向（磁場に垂直方向）の密度分布が、SOLの最外殻磁気面に近い領域と離れた領域で異なっており、上記のような、磁場に平行と垂直な方向での拡散的輸送のバランスから期待されるような単純な指数関数的分布となっていないことが明らかになってきました。この観測を説明するためには、磁力線を横切る何らかの対流項が必要であることが予測され、このことと、多くの実機において周辺プラズマ中に観測されている間欠的な現象との関連が指摘され、SOLプラズマの動的な描像の重要性に対する認識が高まっています。特に、最近の研究に

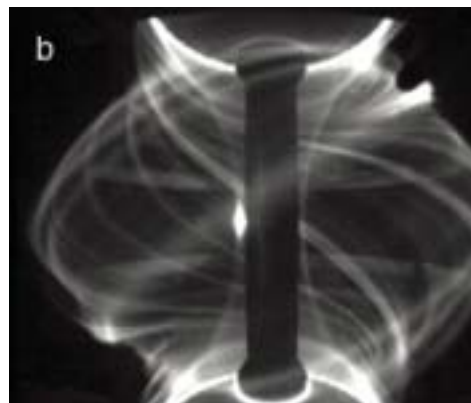


図1. 周辺プラズマ構造の可視画像
(MASTでの観測例。7.5kFPS)

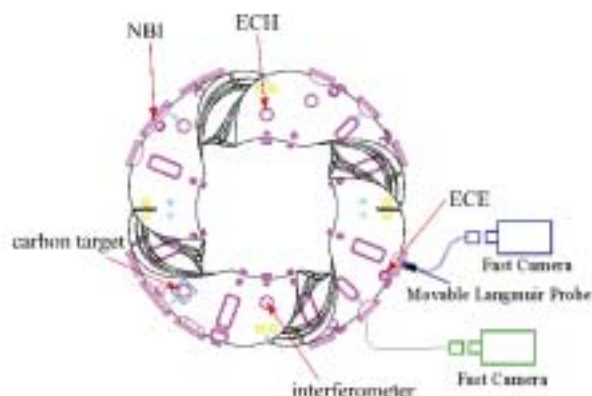


図2. ヘリオトロンJにおける
高速ビデオカメラの配置

を用いて撮影された周辺プラズマの可視光画像 [5] ですが、磁力線に沿ったフィラメント状の構造の存在が見事に捉えられています。このようなフィラメント状の構造を保って、径方向に動いて行く様も観測されており、上述のPlasma Blobとの関連に興味をもたれています。

3. ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ挙動の可視化

ヘリオトロンJにおいても、周辺プラズマ挙動を観測、その動的構造変化を可視化するために高速度ビデオカメラを用いて周辺プラズマからの発光の2次元計測を行っています。図2は、高速ビデオカメラの配置を示すものです。ヘリオトロンJでは、装置の制約上、残念ながら、前述のMAST装置での観測のようにプラズマ全体を見渡す視野は取れませんが、現在、1台の高速ビデオカメラを用いて、トーラスの大半径方向の視線、あるいは接線方向の視線を選択して観測しています。大半径方向からの観測では、静電プローブの電極付近も同一フレーム内に観測することが出来ます。

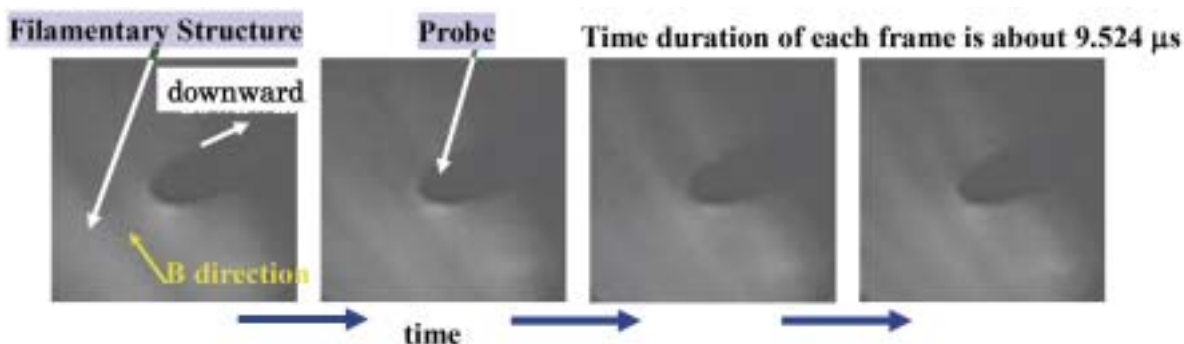


図3. 大半径方向からの観測例。(ECHプラズマ)
80kFPSで撮影された連続する4フレームを例示した。

図3は、そのような観測の一例で、電子サイクロトロン共鳴を利用して加熱されたプラズマ（ECHプラズマ）を撮影したものです。画像を見ると、磁力線方向に沿った筋状の濃淡があり、フィラメント構造の存在を示しています [6]。図には、静電プローブの電極支持部（電極自身は、この陰に隠れています。）も写っています。静電プローブによるイオン飽和電流と高速ビデオ画像における電極付近の画素における信号強度の時間変化を図4に示します。両信号に、時間的に同期した間欠的なバーストがあることがわかります。画像データだけだと、そこに見られる濃淡構造が、視線方向のどの位置に生じているものか、必ずしも明確に判断できませんが、このように局所的な計測が可能な静

電プローブ計測と組み合わせることにより、それが、プローブ位置付近のものであることが見えてきます。逆に、静電プローブによる局所的な観測のみでは、このようなマクロな構造の存在を推測することは、必ずしも容易ではなかったと思います。

静電プローブで観測されるイオン飽和電流は、電子温度にも関係しますが、主としてプラズマ密度に強く依存しますから、画像に表れた筋状の濃淡、したがって、フィラメント状の構造は、プラズマ密度の違うプラズマの塊により出来ているものと解釈することが出来ます。また、連続したフレームの比較から、フィラメント状の構造が、時間的に、磁力線を横切る方向に移動していることもわかってきました。

このような周辺プラズマの構造とその時間的变化は、生データをもとに二次元位相図として整理すると、より明確に可視化することが出来ます。図5は、接線方向から撮影した高速ビデオ画像をFFT解析して得られた二次元位相図の時間変化を示すもので、同じ位相関係にある場所が同じ色で示されています[7]。接線方向からの撮影では、フィラメント状の構造の径方向やポロイダル方向への動きが観測できる可能性がありますが、残念ながら、今のところ径方向への動きを明らかにするまでには至っていません。それはともかく、図では、ひとつのECHプラズマ放電中に観測される閉じ込め状態の異なる放電モード(Lモード及びHモード)[8]ならびに、LモードからHモードへ自発的に遷移(L-H transition)する状態での位相構造の時間変化が示されています。紙面の関係で、図の詳細は省きますが、図中楕円で囲まれた領域に着目すると、図中に示した矢印の動きでわかるように、閉じ込め状態が異なると、位相構造の変化方向が逆転すること、遷移時には、この変化が停滞していることが見出されました。現在の観測では、その視野が限られているため、上述のような周辺プラズマ中のフィラメント状構造の移動が、ポロイダル方向の回転に起因するものかどうか断定は出来ませんが、静電プローブで観測される周辺プラズマ電位の径方向分布の変化は、 $E \times B$ リフトドによる回転運動の可能性を示唆しています。

4. おわりに

電子技術、特に半導体技術の発達に伴い、多量のデータの高速処理が可能となり、高速ビデオカメラの撮影速度ならびに画素数の飛躍的増加をもたらしました。これにより、高速ビデオカメラを用い

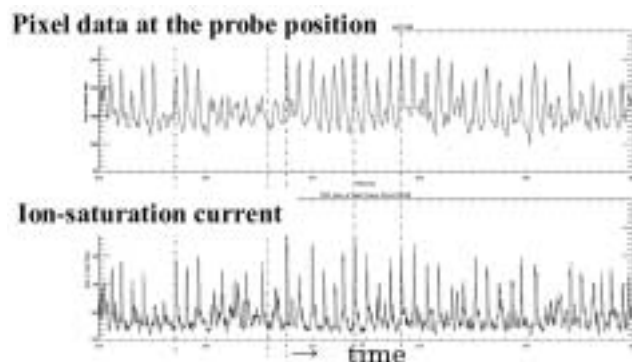


図4. 高速ビデオ画像から得られた発光強度の時間変化と静電プローブで観測したイオン飽和電流波形の比較。

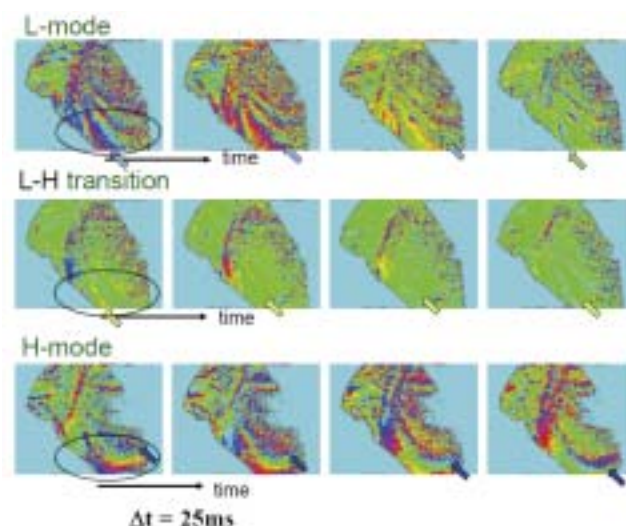


図5. 接線方向に撮影された画像データの二次元位相図の例(ECHプラズマ)。閉じ込め状態の異なる時間帯で、フィラメント構造の移動方向が異なっている。

たプラズマ挙動を二次元画像として捉えることが、より身近なものとなってきています。受動的観測は、「見えるものしか見えない」という側面はありますが、高速ビデオイメージにより通常は見えないものが見えてくるということは、研究者の興味を掻き立て、未知の物理現象を解明するための新たなアイデアを生み出す原動力となっています。

ヘリオトロンJでの高速ビデオカメラを利用した計測は、まだ始まったばかりですが、今回紹介したような興味深い現象を明らかにしてきました。高速ビデオイメージデータに加え、他の計測データを併用することにより、より正しい理解を得ることが出来ると期待されます。今後は、視線を工夫して、フィラメント構造のトラス全体としての動きを特定して行くことが要求されています。また、フィラメント構造の径方向位置の変化も同定できるような工夫も必要でしょう。そのためには、複数の方向からの同時観測により、トモグラフィ手法による空間構造解析が望まれます。また、分光的手法を利用することにより、その動きの速度を推定することや、プラズマ密度と電子温度を分離した計測も視野に入れて研究を進めています。現在は、可視領域での発光が比較的強い周辺プラズマへの応用を行っていますが、より高時間分解で撮影するためには、あるいは、分光的手法を取り入れることを考えると、必ずしも十分な光量があるわけではありません。中性ガスを少量加えることによる発光強度の増強や光増倍素子によるイメージ増強が必要です。また、可視域の発光の少ない高温プラズマ領域における現象を可視化するためには、蛍光物質を利用して短波長域の光を可視域に変換する技術や光増倍素子によるイメージ増倍技術を併用することで、より広い範囲での応用が考えられます。

参考文献

- [1] 核融合エネルギーフォーラム ITER・BA技術推進委員会 ロードマップ等検討ワーキンググループ 報告書「トカマク型原型炉に向けた開発実施のための人材計画に関する検討報告書」(2008年6月)。
- [2] 科学朝日(朝日新聞社)1960年2月号。
- [3] M. Wakatani, et al., Nucl. Fusion 40 (2000) 569.
- [4] 佐野史道, 他, プラズマ・核融合学会誌, 75 (1999) 222.
- [5] Annual Report of the EURATOM/UKAEA Fusion Programme 2006/07.
- [6] N. Nishino, T. Mizuuchi, et al., J. Nucl. Matter. 363-365 (2007) 628.
- [7] N. Nishino, T. Mizuuchi, et al., "Measurement of peripheral plasma turbulence using a fast camera in Heliotron J", in Proc. 18th PSI Conf. (Toled, 2008), P3-28.
- [8] F. Sano, T. Mizuuchi, K. Kondo, et al., Nucl. Fusion 45 (2005) 1557.

産業界の技術動向**知的情報社会実現に向けてのuVALUE活動**

株式会社 日立製作所
研究開発本部技師長 福 永 泰

1. はじめに

1973年から2年間、京都大学修士課程でミニコンベースの画像処理研究にたずさわった後、日立製作所に入社、計算機制御部隊のR&D部隊で仕事を始めた。それ以来30有余年にわたり、一貫して計算機（情報）制御関連の研究開発を進めてきた。大学での経験をベースに、計算機「利活用」技術について、画像処理や制御技術の展開を進めてきたことになる。この間、急激に変化するITの世界に対し、数十年に亘って動き続ける社会インフラシステムとどう折り合った計算機システムにしていくなかを主体に考察し実行してきた。

特に大学時代に教えてもらった「新しい研究をやるには、購入品ではなく、そのためのツール作りに40%のマンパワーを投入すること」とか、「作ったものは使ってみること」が身について、それを実務で展開してきたように思う。中国のことわざに「聞いたことは忘れる、見たことは覚えている、やったことは身につく」という言葉があるが、この最後までやること、この重要性を研究現場で身につけさせてもらった。そういうバックグラウンドをベースに、計算機を利用した実業への日立の展開「uVALUE」の活動状況を概説したい。

2. 日立における価値創造活動の歴史

10年前、京都大学で初めて「情報学」研究科が出来（1）、当方の大学学生時代に発足した情報工学の「工」が取れたことを自分なりに理解してみると、短い1世紀弱の計算機の歴史ではなく、情報という人が誕生して以来の動きに焦点を当てることの重要性を教えてもらったように思う。

そうすると、日立の「価値創造活動」の歴史も戦後だけでなく、①創業時の動き、②戦後の動き、そして③今の価値創造の動きという60年周期の3つのフェーズに分けて議論することが出来る。

創業時は、日立鉱山の電機品の「メンテナンス事業」から、そこで使う電力・機器・計測・町のインフラの開発を起源にスタートし、修理作業で得た知識で、モータを自らの力で製品化し鉄道、電力などの社会インフラ事業に供してきた。（2）

戦後も同様に、モノは回転機から大型計算機に変わったが、それを作るだけではなく、鉄道や原子力デジタルエンジニアリングのツールとして全社で利用する、そういう動きを進めている。（3）ユービキタス時代を迎えた今も、uVALUE = 実業 × IT というオンリーワンの基本コンセプトを打ち出しているのは、こうした文化に裏打ちされたもので、単にIT技術を用いた情報事業を進めるだけでなく、産業、社会、電力部門も含めた活動の中に利活用することを並行して進めていることに当社の特徴がある。

ここでは、半世紀前の大型計算機を題材に選び、その活動を振り返ることと、それをアナロジーにして今の研究開発、ビジネス展開を進めているので、その内容をまとめてみたい。

3. 大型計算機時代の価値創造

戦後、これからの大きな流れは原子力と計算機・エレクトロニクス技術とを考え、大型計算機の展開においては、当時、まだ揺籃期の技術を、鉄道のみどりの窓口に適用するため、顧客との協創を進めた話は、NHKのプロジェクトXでも取り上げられている。(4)

「新たなソリューションを展開するにはメーカーと顧客の壁を取り外さないとダメだ」という顧客幹部の大英断から、工場に顧客のエンジニアを数十人規模で迎え、上長、部下の関係でいっしょに開発し、チームワークが醸成された様子が赤裸々に示されている。

一方、同じころ、社内においても協創の動きが進められた。1960年から1965年まで、科学技術計算用の大型計算機HITAC5020の開発が、中央研究所で進められた。初号機は、京都大学の矢島研にも納められたと伺っている。

この時も、5020を用いてエンジニアリングに利活用する動きが電力事業部門を中心に起こり、電力事業部、情報事業部（当時はコンピュータ事業部）、研究開発本部の連携体制で推進された。

当時は、まだ、研究開発本部には2つの研究所しかなく、中央研究所が計算機の開発を受け持ち、日立研究所には新たにそれを使う技術計算部が設立され、応用する動きを推進している。

使うことで、尖った技術がこなれたものになり、また応用に新しいいぶきを呼び込み、「信頼性の日立」が確固なものになっていく流れが、各種ドキュメントから読み取れる。(5)(6)

その後、同じ計算機技術を制御の分野にも利用しようという動きが起こり、電力部隊の若手技術者が、コンピュータ事業部の工場に行って同床執務し、製品開発を進め、組織間の連携を深める「特研」体制で日立初の制御用コンピュータ7250を開発する流れにつながっている。上記「みどりの窓口」の「協創」による開発成功を前例に持つ組織として、社内の事業部間の壁を取り払う動きとしては必然的な流れとも読み取れる。(7) ここでも、相互交流が生まれ、それぞれの事業部門のその後のビジネス展開の幅を広げた。50年経った今も、このころに培われた人のネットワークや冷却、ノイズ対策など、耐環境技術等がグループ会社含めて多くのビジネス分野に横展開され、その強みとして育っていることがわかる。

当時のプロジェクトから読み取れる価値創造の動きとして、次のことが言える。

- ① 新しいシステム展開のリーダは、若手抜擢で進めること。みどりの窓口のリーダは当時28歳の若手で、新技術の吸収にも長けている。
- ② 他事業部の利益になることならば自分のところの商売にならないものについても援助するという利他主義が徹底している。
- ③ 新しいことを進めるため、プロジェクト管理は日程どおりに進まないが、そこを凌駕する動きを進めている。

こうした流れをアナロジーに、今のICT時代を「内挿型の研究」という手法(8)で予測してみたい。

4. 次の世代

4. 1. ユービキタス時代のプラットフォーム予測

ICTやエレクトロニクスの世界は、3年で4倍、30年経つと 10^6 も変化するダイナミックな世界である。将来予測では、(9)(10)(11)などがあり、日本人がこういうシーンでも活躍している。

図1は、ICTの技術進展と、ICT社会の大きな変革をマッピングした図である。15年経つと、CPUの性能もメモリ容量も、価格も 10^3 変わりが変わってくるので、実社会とのバランスを取るために大変革が起こると予想される。これを実際の歴史でマッピングしてみると、1965年の大型計算機、1980年ごろのPC、1995年のWWWの世界と同期させることが出来る。そうすると、次は、2010年、あと

1年に迫っている。

今までの変革を見てみると、皆が注目する時期より2年前にはすでに多くの研究開発やビジネス展開の「芽」が出ていた。そこで、2010年に花開くと思われるICT社会の概念は図2のようになるだろうと仮説した。放送通信融合時代になり、光や無線ネットワークを用いた大量の情報をあまねく配布するBroadcastの世界が実現でき、その上り方向を用いた世界—これをBroadgather™という新語を定義し、この世界が広がるという主張である。今までは考えられなかった情報量、ギガとかテラとかが一瞬のうちにどこにいても集められる、そんな世界で、情報の桁が変わるので、その処理形態が大変革する。

ギルダーはこの世界を、「今までマイクロエレクトロニクスを、如何に帯域を節約することに使ってきたが、帯域を浪費して、如何にパワーとシリコンの面積、トランジスタを節約するか再編を推し進めつつある」とも語っている。(11)

4. 2. 技術開発マネジメント

こうしたグローバルなICTプラットフォームとREAL世界の融合を推進するには、組織文化も従来の階層型組織ではなく、図3の左に示すようなネットワーク型組織にする必要があることを多くの先駆者が語っている。(10)

ところが、ネットワーク組織は多くの接点を有するので、組織が大きくなると、そのネットワークが複雑になって制御できなくなる。新しい組織や人が1つ増えるごとに、全てが会話しないとダメな環境になり、その情報交換の頻度が増大して本業がおろそかになる危険性を有する。

これを従来の階層型のマネジメント組織のミドルマネージャから見ると、部下が余分な仕事をしているように見えるので、サイロを作って情報の行き来を制限するような組織文化に戻るか、カオス状況を助長させる組織文化になる。

そこで、このカオス的なネットワーク型連携を、技術と応用でマトリックスで正規化する、そんな動きを進めてきた。

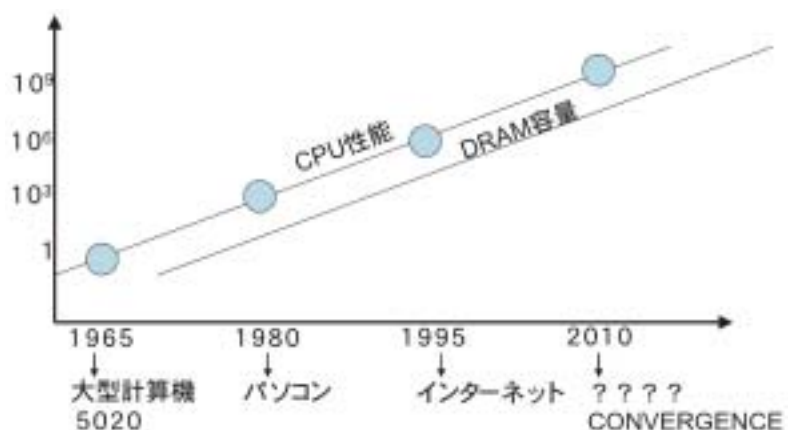


図1. の進展と情報システムの15年周期変革
CPU性能やDRAM容量等エレクトロニクス技術は3年で4倍、30年で概ね 10^5 性能アップし、それに同期して15年に1回の大変革がICT社会で起こっている。

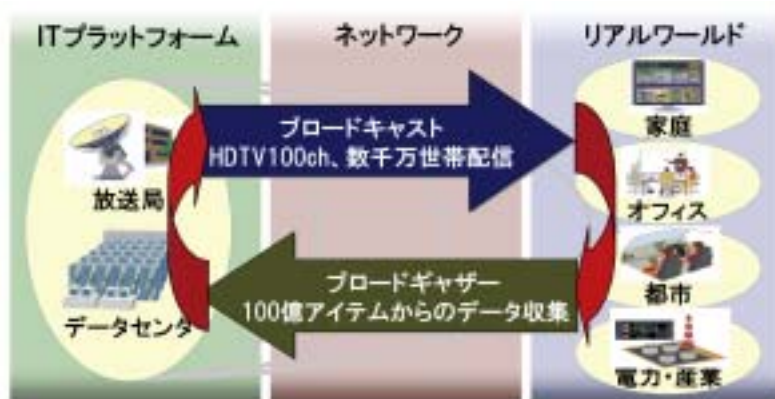


図2. ユーピキタス時代のICTプラットフォーム
放送通信融合時代を向かえ、大量の情報がリアルワールドに放送（ブロードキャスト）されるようになると、上り方向を利用して、大量の情報が集められ「ブロードギャザ（Broadgather）」、それを有効な情報に見える化し、リアルワールドに戻すことで「価値」を与える世界が実現する。

横軸の技術面を管理するサイドから見れば、まず、どの分野に応用して、次はどこに持っていくか戦略が立てられるし、縦軸の応用面から見れば、既開発の技術をどう横展開すると自分たちの応用に使えるかの戦略が比較的容易に立てられる。

このように整理すると、実際に、下記のような「協創」「創発」「融合」の動きにつながっている。

- ① 電力分野で培われた2層流熱流体シミュレーションを活用した自動車エンジン燃焼制御技術への展開

- ② ハイブリッド自動車で培われた技術が活かされたハイブリッド列車の開発

- ③ CAD端末、ワークステーション開発、制御用計算機開発で培われたグラフィックス技術、リアルタイムOS技術を横展開したナビゲーション・車載情報システムの開発

- ④ 原子力モンテカルロシミュレーションを活用した金融工学、リスク管理技術への展開

こうした「inspire」活動をより広範囲に広めることで、コングロマリットプレミアムを産み出す研究開発が推進できる。最近、ビジネスまで展開した代表R&D例としては以下のようなものがあり、詳しい内容は(12)で紹介した。

- (1) デジタル無線でつながれたタクシーのロケーション情報やVICSの大量の過去の渋滞情報から現在や近未来の道路渋滞情報を予測するプローブカー情報提供システム
- (2) 世界最小のRFID ‘ μ -Chip’を活用して原子力の配管や配線の管理を行う原子力予防保全システム
- (3) センサーネットという小型の無線通信、センサが実装された端末から集められた情報で人や組織を分析するX-顕微鏡（ビジネス顕微鏡）システム

5. まとめ

21世紀に入り、従来の高度成長社会から、地球の持続可能性を考えた社会への変革が急がれている。単にモノを販売して、というビジネスモデルではなく、むしろモノの提供は充足して、ライフサイクル全般に亘って環境や少子高齢化、家族・人の心に応えるような社会システムが重要になっている。幸い、私たちは100年の社会インフラを提供してきた歴史をベースに持っているDNAに基づいた「知」を持っているので、こうした社会実現のために貢献できる知を提供し、グローバルな連携や産官学の連携で進めていく所存である。

参考文献など

- (1) 長尾真：人間的情報処理を目ざして、京大最終講義（1998）

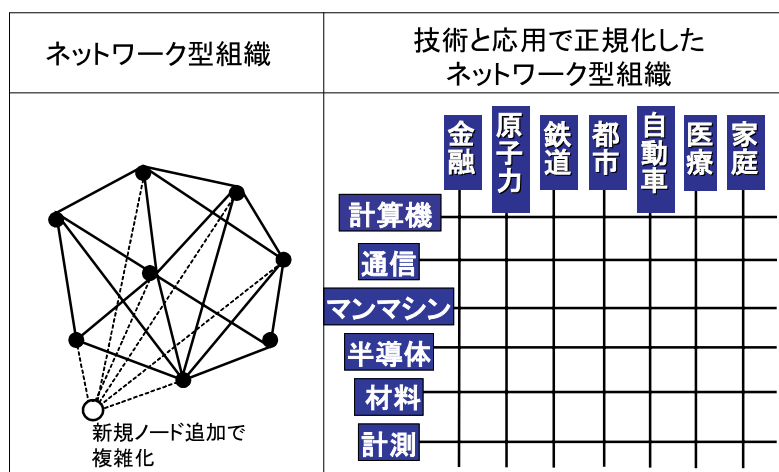


図3. ネットワーク型組織を技術と応用で正規化—選択と集中
ネットワーク型組織がフレームワークなく拡大すると、カオスの世界が広がる。それを技術と応用で正規化することで、選択と集中をかね合わせたネットワーク型組織運営が可能になる。

- (2) 中村道治：第二の創業をめざして 技術開発の変遷と展望，日立評論，90， 4， 312～319 (2008.4)
- (3) 相田，外：驚異の巨大システム：NHK新電子立国（5），日本放送出版協会（1997）
- (4) 100万座席への苦闘～みどりの窓口・世界初鉄道システム，プロジェクトX 挑戦者たち（23），169～226，日本放送出版協会（2004.7）
- (5) 研究の年輪シリーズ（5）日立コンピュータ30年，返仁63号，1988年・春号，29～48 (1988)
- (6) 昭和40年度における日立技術の成果，8.電子計算機，日立評論，48， 1， 89～98 (1966.1)
- (7) 計算制御の誕生と発展 おおみか工場編，1979，日立大崎クラブでの座談会（1979）
- (8) 福永泰：紙のような計算機を目指して－平面ディスプレイがもたらす21世紀の新しい計算機文化：電子通信学会研究会 EID91-20，ED91-37，IE91-151991.6.27.27～33（1991）
- (9) モシェ・F・ルビンシュタイン，イーリス・R／ファーステンバーグ，監訳・三枝匡，訳・大川修二：複雑系の科学：「鈍」な会社を「俊敏」企業に蘇えらせる！；原文：Bring the FUTURE to the PRESENT and Turn CREATIVE IDEAS into BUSINESS SOLUTIONS，日本経済新聞社（2000）
- (10) 増田米二：原典情報社会―機会開発者の時代へ，TBSブリタニカ（1985）
- (11) 公文俊平：情報社会学序説，NTT出版（2004）
- (12) 福永泰，：uVALUEを実現する実業とITの融合，日立評論，90， 7， 70～76 (2008.7)

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」、#は「高校生のページ」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

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

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(和田研)

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(橘研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

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(川上研)

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)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先端電子材料分野 (藤田研)

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

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(守倉研)

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情報回路方式分野

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論理生命学分野 (石井研)

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 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

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

応用熱科学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

応用熱科学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

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(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)☆

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)

生存圏研究所

診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研)

開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

開発創成研究系生存圏電波応用分野(橋本研)

京都大学ベンチャービジネスラボラトリー (KU-VBL)

産官学連携センター

研究戦略分野 §

注 § 工学研究科電子工学専攻橘研と一体運営

高等教育研究開発推進センター

情報メディア工学講座情報可視化分野(小山田研)

学術情報メディアセンター

情報メディア工学講座複合メディア分野(中村裕研)

複合システム論講座

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「生産スケジューリング問題に対する厳密解法の研究」

生産スケジューリング問題とは、工場などの生産工程で作業のスケジュールを作成する問題のことです。より具体的には、与えられた複数の仕事を、どの機械で、どういう順序で、どういうタイミングで処理するのかを、与えられた評価基準を最小化（あるいは最大化）するよう決定する問題です。生産スケジューリング問題は古くから研究されており、機械・仕事・評価基準という3つの属性により細かく分類されています。

生産スケジューリング問題は、基本的には組み合わせ最適化問題として扱うことができますが、そのほとんどがNP困難であり、効率的な厳密解法が知られていません。しかし、近年の計算機性能の急速な向上により、厳密解法による求解が現実味を帯びてきました。また、生産スケジューリング問題の解析という観点からも、最適解を求めることは重要な意味を持っています。そこで、本研究室では、生産スケジューリング問題に対して効率のよい厳密解法を構成する研究を行っています。

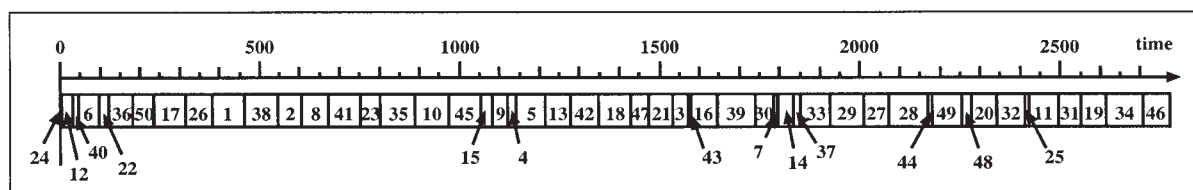
最近の成果としては、

- ・各仕事には処理に必要な時間が与えられている
- ・各仕事に対し、完了した時刻に応じてコストが発生する（コスト関数の形状は任意）
- ・コストの総和が最小となる仕事の処理順序を求める

という一般的な1機械スケジューリング問題に対する厳密解法が挙げられます。この解法により、従来は最適解を求めることができなかった規模（仕事数）の問題でも解を求めることが可能となりました（従来の解法で求解可能な最大規模の問題と比較すると、数百倍高速です）。

この解法ではまず、組み合わせ最適化問題として数理モデル化した問題の制約条件をラグランジュ緩和することでより解きやすい緩和問題を生成し、これに動的計画法を適用してコストの総和の下界値を求めます。同時に、効率のよい近似解法を用いて上界値を求めます。その後、いったん緩和した制約を緩和問題に順次戻していくことにより下界値を改善していくとともに、上界値も更新していきます。そして、最終的には下界値と上界値が一致して最適解が求まります。

現在は、解法のさらなる効率化を行うとともに、より広いクラスの問題に適用できるよう拡張を行っているところです。今後は、この解法を広く使ってもらえるよう、作成したプログラムを公開していく予定です。



50仕事問題の最適解の例。横軸は時間で、箱は仕事が処理されている時間帯を表します。解は $50!$ ($\approx 3.0 \times 10^{64}$) 通りありますが、この問題の最適解は1秒以内に求まります。

参考文献

- [1] S. Tanaka, S. Fujikuma and M. Araki: An exact algorithm for single-machine scheduling without machine idle time, Journal of Scheduling 掲載予定
- [2] S. Tanaka and S. Fujikuma: An efficient exact algorithm for general single-machine scheduling with machine idle time, IEEE CASE 2008, pp. 371-376 (2008)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野（小林研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/lab03/>

「脳機能計測および神経線維束追跡の高精度・高分解能化を目指した拡散強調画像法における撮像パラメータの最適化」

一定の磁場中では原子核はある軸を中心に自転（スピン）しているものと考えることができる。その核の回転周波数と同じ周波数の回転磁場を加えると、原子核は回転磁界のエネルギーを吸収して励起状態となり、回転磁場を加えるのをやめると今度は吸収していたエネルギーを同じ周波数の電磁波として放出しながら定常状態に戻る。これが磁気共鳴現象である。磁気共鳴画像法（magnetic resonance imaging：MRI）は、この現象を用いた画像法であり、医療の現場で画像診断に広く用いられている。

このMRIは、医療分野では一般に水のプロトンを対象として撮像が行われるが、体内の水は絶えずブラウン運動により自己拡散している。MRIの計測手法の一つに、この拡散現象の大きさや方向を強調した拡散強調画像法（diffusion weighted imaging：DWI）が提案されており、腫瘍の検出、脳神経線維束の追跡、導電率の計測など様々な分野に応用されている。腫瘍検出や脳神経線維束の追跡では、細胞膜などの組織により水の拡散が制限されることを利用しており、導電率の計測では拡散の大きさが導電率に比例することを利用している。脳神経線維束の追跡では、複数の方向のDWIを撮像することにより拡散の異方性や線維の方向を計測することもできる。また、DWIの撮像には複数のパラメータ設定が可能であるが、これらのパラメータと得られる信号の関係は非常に複雑である。

本研究室では、脳機能の解明および工学応用を目指し、脳波計測をはじめとする様々な脳機能計測を用いた研究を行っているが、それらの研究の一つとしてDWIを応用した脳機能計測法および脳神経線維束の追跡について研究を進めている。MRIを用いた脳機能計測法は機能的MRI（functional MRI：fMRI）と呼ばれ、空間分解能に優れているが時間分解能が十分ではなく、より時間分解能の高い手法が期待されている。このような手法の一つとしてル・ビアン博士らのグループによりDW-fMRIというDWIを応用した手法が発表された[1]が、信号対雑音比などの問題により利用可能な範囲が制限されている。我々は、脳活動領域における信号変化の強調ひいては脳機能計測精度向上のために、DWIの撮像パラメータの最適化により画像コントラスト向上を目指して研究を行っている。

また、上記DW-fMRIやfMRIでは脳内における複数の活動領域を調べることができるが、それらの活動領域間の機能的結合の評価は脳内の情報処理の解明にとって重要であり、本研究室では、この機能的結合の評価方法の一つとして脳神経線維束の追跡法についての研究している。本手法は神経線維により拡散が制限されるのをDWIにより計測し、その異方性情報から神経線維束を追跡する（図1）[2、3]。さらに、線維追跡の精度向上を目指した撮像パラメータの最適化を進めると共に、線維追跡時に問題となる線維束の交叉等に対応した追跡方法の開発などを行っている。

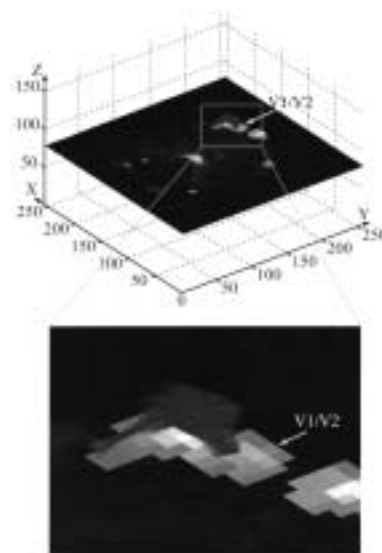


図1. 拡散強調画像法を用いた神経線維追跡（一次/二次視野からの追跡結果の例）

1. D. Le Bihan et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 103 (21), pp.8263-8268, 2006
2. 笈田 武範 他, 電子情報通信学会論文誌, J91-D (7), pp.1886-1894, 2008
3. T. Kobayashi et al, Proc. 30th Annual International IEEE EMBS Conference, pp.5498-5501, 2008

電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「2軸型空圧人工筋アームの軌道追従制御」

近年、医療、介護、福祉の現場における労働負担を軽減するための、ロボットの開発が注目を集めています。とくに空気圧を駆動源とするロボットには、油圧や電動モータを駆動源とするロボットにはない軽量、柔軟、清潔という特長があるため、上記のような人とロボットが密接に関わり合う環境下において積極的な導入が試みられています。しかしながら、空気圧縮性に起因する剛性の低さにより、空気圧系に対するフィードバック制御系の設計は一般に容易ではありません。以上の背景のもと本研究では、制御理論の応用に関する取り組みの一つとして、2軸型空圧人工筋アームの高精度軌道追従制御に関する研究を行っています。

図1に、2軸型空圧人工筋アームの写真を示します。2軸型空圧人工筋アームは、台座に固定された軸1を中心に水平面上で回転する長さ0.35mのリンク（1軸リンク）と、軸2を中心に水平面上で回転する長さ0.36mのリンク（2軸リンク）の2本のリンクを有しています。それぞれのリンクには、図1で黒色のゴムチューブ状に映る、空圧人工筋とよばれる空気圧アクチュエータが取り付けられています。空圧人工筋は流入する空気の流量によって伸縮する機能を有しており、これらに流入する空気の流量を変化させることでリンクは水平面上で回転運動します。一方、アームの角度は、各軸に取り付けられたロータリエンコーダで検出することが可能です。これらのことを利用して、2軸リンクの先端部分（アームの手先）を所望の目標軌道に追従させるようにフィードバック制御を行なうことが、本研究の目的です。なお、図1に示すように、2軸型空圧人工筋アームは平衡状態において1軸に対して2軸が60度傾いた状態となるように設計されています。

高精度の軌道追従制御を達成するために、本研究ではまず当研究室で開発されたプラント変数最適ロバストサーボ系の設計理論を適用することを考えました。とくに制御対象のモデリングの際に工夫を施し、プラント変数（すなわち制御対象の状態変数）の物理的意味合いに基づいて合理的な制御系のチューニングが可能となるようにしました。さらに、追従性能の向上を期して、アームの角度情報のみならず空圧人工筋内部の圧力情報を積極的に活用した制御系の設計について研究を進めました。このようにして得られた制御系をもとに、軌道追従制御実験を行った結果を図2に示します。目標軌道は、水平面内に適切に設定されたXY平面上の、一辺の長さ0.2mの正方形です（図1も参照）。移動速度は、正方形の各頂点間を1秒で移動するものとしています。図2より、X軸に沿う目標軌道を追従する際に若干の応答の乱れが生じるものの、ハードウェアの限界に迫る高精度の軌道追従制御が達成できていることが確認できます。

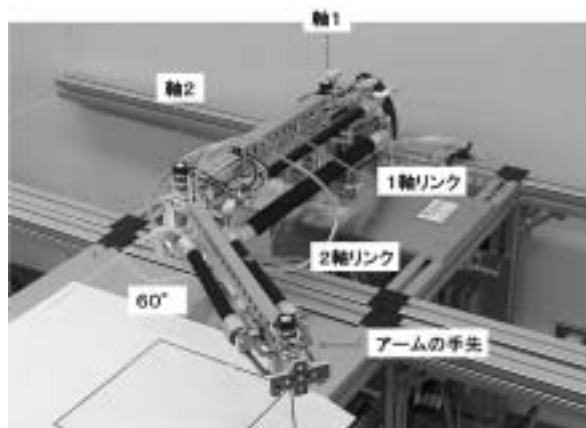


図1. 2軸型空圧人工筋アーム

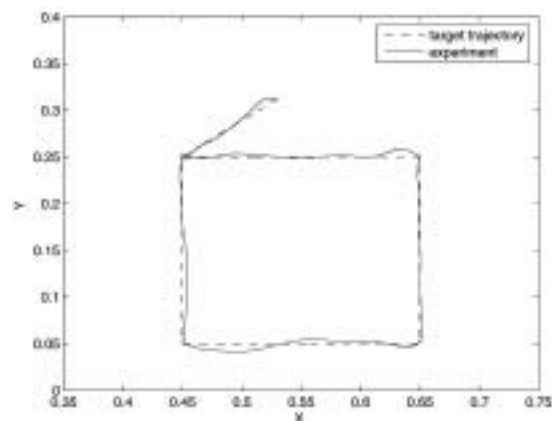


図2. 軌道追従制御の実験結果

電気システム論講座 電力システム分野（大澤研）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~ohsawa/index.html>

「参照モデルを用いた同期発電機動揺方程式と静止型無効電力補償装置による安定化制御」

電力は現代社会を支える最も重要なエネルギーであり、電力システムは最も複雑な人工システムの一つである。電力システムにはなくてはならない構成要素の同期発電機に関して、基本的な問題は、モデリングとそれに基づく動揺抑制および安定化制御が挙げられる。なぜなら、発電機の動揺とは発電機から発生する交流電圧電流間の位相ずれによる現象である。発電機の動揺が電力品質を低下させるだけでなく、時に発電機に電氣的、機械的な損傷を引き起こし、電力システムの安全運行にも重大な影響を与える。その中、最悪の場合は発電機動揺が激しさを増し、最終的に発電機が同期運行から脱調してしまう。

同期発電機のモデリングには一機系統と多機系統がある。前者は一機の発電機を他の発電機や電気設備から切り離し、それらの発電機や電気設備をまとめて一つの電圧を一定とした仮想な無限大母線を介して関連する形とみなせ、この発電機の動特性を動揺方程式で描くモデリングである。後者は各発電機の電氣的、機械的な関係をそのまま用いて発電機の動特性を複数の動揺方程式で表現する手法である。一機系統は数式的に簡単であるが、無限大母線は現実には存在しないため、それに基づく解析、設計が有効性に乏しい。多機系統には現実性のあるものの、多数の系統要素が複雑に絡み合い、理論解析や数値計算に不便である。当然ながら、多機系統を用いた制御も煩雑になる。本研究は各モデルを融合し、まず一機系統を参照モデルにし、この参照モデルを介して多機系統の一機発電機の動特性に外力乱と係数摂動を取り入れることによって、この発電機の動特性を描く。特徴としては、電力システムに参照モデルの存在性及び正確性が必要とならない。また、複数の発電機からの影響をそのまま考慮せず、擾乱や摂動で模擬する。

静止型無効電力補償装置（SVC: Static VAR Compensator）とはリアクトルやコンデンサの電流をサイリスタという半導体素子で制御することにより、無効電力の発生や吸収を行う装置である。リアクトル電流を制御した場合は遅相、コンデンサ電流を制御する場合は進相となる。構造上、サイリスタ制御リアクトル（TCR: Thyristor Controlled Reactor）やサイリスタスイッチトキャパシタ（TSC: Thyristor Switched Capacitor）の二種類ある。実際のSVCがTCRとTSCの並列で構成される。図1は多バンクSVCの概念図を示す。ここで、TCRとTSCについて簡単に説明する。TCRはリアクトルの電流位相を制御することによって遅れ無効電力を変えることができる。位相制御のため、TCRの電流波形には高調波が含まれるので、高調波フィルタと組み合わせて使用することが一般的である。一方、TSCはサイリスタが単なるスイッチの働きで無効電力を制御する。位相を制御しないため、高調波が含まれない。

電力システムではSVCを無効電力の補償装置として利用するのは殆どである。本研究も例外ではない。具体的には、安定化したい発電機にSVCを接続し、有効・無効電力のバランスを維持させ、動揺を抑え、多機系統において全体的にロバストのある安定度を保つ。研究の理論基礎はリアプノフ安定論であり、それによって参照モデルに基づく同期発電機動揺方程式を用いたSVCの安定化フィードバック制御を導かれていた。提案されたSVCの制御は本質的に非線形且つ分散型でさまざまな制御方式で実現できる。例えば、非線形Bang-Bang制御方式、直接デジタル制御（DDC: Direct Digital Control）方式、位相平面分割（PPP: Phase Plane Partition）制御方式が挙げられる。どの制御方式をとっても、いわゆる等面積法で対処できない制動巻線のダンピング、モデルの不確かさが考慮できる。同時に、発電機に対する一部の過渡・定常性能指標も設定できる。例えば、発電機の送電角という発電指標をSVC操作により設定できるのは提案法のメリットの一つである。図2は例題発電機で提案法を適用したSVC安定化制御で発電機動揺が抑えられた様子を数値シミュレーションで示す。

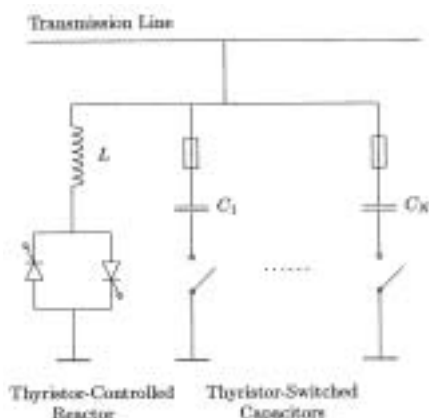


図1. 代表的な多バンクSVCの概念図

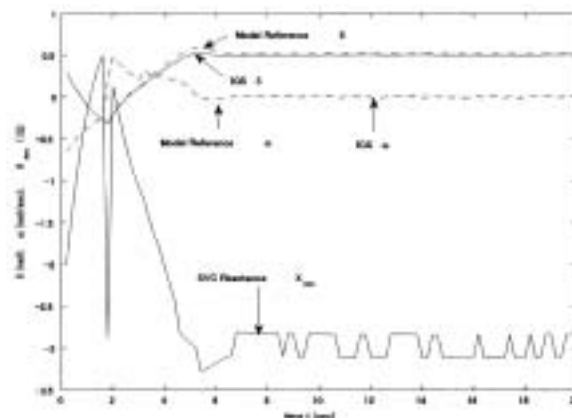


図2. SVC制御による発電機動揺抑制

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野（橋研究室）

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「人工的媒質中のプラズマ現象とその応用」

従来、プラズマ生成の媒質として均一なガス、とくに低圧力下のガスが主に用いられてきました。近年では、その動作ガス圧を大気圧まで引き上げて、大掛かりで高価な真空装置を用いずに簡便にプラズマを生成する技術が研究開発されるようになってきています。しかしなお、大面積あるいは大容積で均一な放電プラズマを得ようという方向での研究が主流になっている状況です。そこで、少し発想を転換して、構造があるプラズマに実用的に有効な特徴をもたせることができないか、あるいは、その構造を自在にデザインできないだろうかということを考えるようになりました。その契機になったのが、1994年頃に進めていたクーロン結晶の実験です。薄膜形成やエッチングに用いられる分子ガスの反応性プラズマ中では、微粒子が生成されてプラズマ中に捕捉され、プロセスを妨害したり劣化させたりするために、それを防止する方法が研究されてきました。しかし、その捕捉された微粒子の成長を長時間観測している過程で、微粒子がプラズマ空間中であたかも固体の結晶格子のように配列している現象を発見しました（図1）。それは、多数の電子が付着して負に帯電した微粒子が、背景となっている正イオンの海の中で、互いのクーロン力で相互作用している結果ですが、このような微粒子群を含む複雑な構造のプラズマが新しい研究の対象として見えてきました。そのことからヒントを得て、元々小さなプラズマを多数配列させると、導電率と誘電率が空間的に変調された人工的な構造を構成でき、その構造の格子定数と同等あるいは波長の長い電磁波との相互作用において新しい機能を発現できるのではないか、という着想に発展してきました。その方向での研究として、最近ではプラズマフォトリック結晶や、さらにプラズマメタマテリアルというものを、如何に作成して、どのような機能を引き出すか、ということを追求しています。

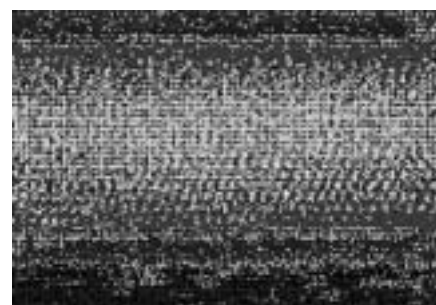


図1. プラズマ中のクーロン結晶

構造を有するプラズマという概念の中には、プラズマを生成する媒質そのものに不均一（heterogeneous）なものを利用するという発想も含まれます。その例としては、境界をもつ異種ガスの不均一系、ガスと液体またはガスと固体の2相で構成される系などが考えられます。上述の微粒子プラズマもその一つです。異種ガスの不均一系としては、大気中へ噴出する希ガスプラズマジェットもその例に該当します。低周波駆動のマイクロプラズマジェットの挙動に関して、弾丸状のプラズマの塊がパルス放電に同期して、ガス流速の3桁程度速い速度で飛び出しているという現象を解析し、その機構が正コロナ放電の電離波の伝播と同様であることを解明しました（図2）。ガス-液体の2相混合系の例として、水中の電気分解で生成したミクロな気泡を用いた放電プラズマ生成について前年度に報告しています。現在では、さらに積極的に、マイクロ・ナノバブルを水中に導入した気液混合媒質中での放電現象の研究を進めています。バブルのサイズを極限まで小さくしていけば、量子統計的に密度が揺らいでいる超臨界流体につながって行くことになり、プラズマ生成の対象となる媒質がさらに広がって行きます（図3）。

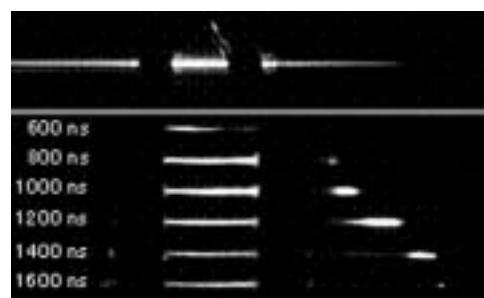


図2. マイクロプラズマジェットの時空間挙動

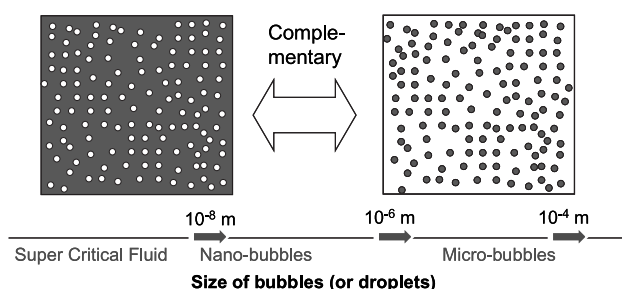


図3. プラズマ生成用気液2相混合媒質の例

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「EE for EE: 京都電気自動車（Kyoto-Car）プロジェクト」

松重研究室では、ナノサイエンス・テクノロジー、有機系・分子エレクトロニクス分野に加え、新たな研究テーマとして環境に優しい電気電子工学（EE for EE：Electrical Engineering for Energy & Environments）に取り組んでいる。具体的には、電気自動車、太陽熱・光活用製品の開発、および鉛フリーハンダなどであるが、ここでは Kyoto-Car Project@VBL を紹介する。元々は、工学研究科、電気系が桂キャンパスに移転した事に由来する。桂地区に存在する京都市立芸術大学、国際日本文化研究センターと連携して、先端技術と伝統文化、芸術が融合した「京都Neo西山文化」を創成するため種々の活動を行って来た。その一環として、京都議定書発祥の地、京都から環境に優しい電気自動車、しかも京都の伝統文化等を織り込んだ Kyoto-Car を提案し、これまで1/10サイズのコンセプトカー（インホイールモーター、京友禅の外装）を製作し、清水寺、G8外相会議展示場等で記者発表した。次に、市販のコムス（トヨタ車体製）を改造した実車可能で自然素材を活かした京都風木型、竹籠（愛称 Bamgoo）電気自動車を製作し、京都環境フェスティバル等で公開した。また、シニアや女性でもまた坂道でも駆動可能な「京都風電動アシスト人力車」も開発し、嵯峨野の鳥居本で公開した。これらはVBL等京大関係者だけでなく、ロボガレージの高橋氏を含む企業・ベンチャー・研究所等様々な協力者とともに製作、推進してきたものであり、その実物は京都大学総合博物館（平成21年3月末までの予定）や各種展示会等で公開している。

21世紀の地球的課題としての「エネルギー・環境」分野で電気電子の貢献出来る場面は非常に多くある。バッテリー、モーター、走行システム等電気が活躍する分野であり、まさに電気自動車はその最たるものである。既存の自動車関連分野の企業だけでなく、電気系・部材の企業との有機的連携のもと、国内だけでなく中国を含むグローバル展開を目指している。京都・関西エリアが一つの環境・電気自動車のモデルタウン・地区となることを期待している。電気自動車に関しては、現在、各種プロジェクトとも連携して、高効率太陽電池の併用、新バッテリーシステム等の研究開発、さらには電気自動車の早期の普及を目指して、情報活用、プラグイン施設の設置を含めた社会インフラ整備を促進する活動を行っている。今後事業化を目指すとともに、興味、関心のある方の参画を期待している。



写真1. Kyoto-Car コンセプトカー
@G8外相会合展示会（京都
国際会議場）



写真2. 京都風木型、竹籠電気自動車（Bamgoo）、および電
動アシスト人力車@京都環境フェスティバル（パルス
プラザ）

詳細は関連サイトを参照のこと。松重研究室：<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

京都Neo西山文化プロジェクト：<http://www.saci.kyoto-u.ac.jp/iio/neo/>

Kyoto-Car Project: <http://www.kyoto-car.jp/>

量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/%7Elab05/>

「青紫色 GaN フォトニック結晶面発光レーザの電流注入発振

2次元フォトニック結晶レーザは、どのような大面積であっても原理的に単一縦・横モード発振可能であり、かつ光出力は、フォトニック結晶自身の回折効果により、基板面に垂直な方向に取り出すことが可能という優れた特長を併せもつ。これは、2次元フォトニック結晶におけるバンド端における群速度零効果、すなわち2次元面内を様々な方向に伝播する光波が互いに結合し、2次元大面積の定在波状態が形成されることに基づく。ビームパターンは2次元面内の電磁界分布のフーリエ変換で表されるため、フォトニック結晶の構造を様々なに変化させることにより、様々なビームパターンを得ることができる。例えば、ドーナツビームなどの特徴的なビームを得ることも可能で、これは波長より格段に小さなスポットまで絞ることの出来る光源として動作することが期待される。さらに、偏光の揃った綺麗な真円ビームを出射することも可能で、大出力の面発光半導体レーザ光源としての可能性も併せもつ。このように、フォトニック結晶面発光レーザは、従来の半導体レーザの概念を越えた全く新しい半導体として動作するものと期待されている [1]。

しかしながら、これまでのフォトニック結晶面発光レーザは、電流注入による動作波長が近赤外域（～980nm）に限られていた。もちろん、この波長においても、様々な応用が期待されるが、もし発振波長を青紫色域まで、短波長化することができると、その応用可能性は、格段に広がるものと期待される。例えば、次々世代の高密度光ディスク用光源や、極微小物質の観測・操作用光源として活躍できるものと期待される。また、単一縦横モードで、かつ偏光まで制御した大出力青紫面発光レーザとして動作が期待され、かつ2次元的にアレイ化することも可能である。つまり、情報記録・処理、レーザ加工、ナノバイオ等を始めとする様々な分野における新しいキー光源としての展開が期待される。

今回、GaNを材料として用い、独自のフォトニック結晶形成技術を開発することにより、レーザ内部に、良質のGaN/空気2次元フォトニック結晶を形成することに成功し、青紫色領域で、初めてフォトニック結晶面発光レーザの電流注入動作に成功した [2]。図1は、デバイスの発振の様子（左：無通電時の表面写真、右：発振後の近視野像）を示す。中央部が電極（100mmx100mm）で、大面積での青紫色発振が得られていることが分かる。図2は、発振時の遠視野像（ビームパターン）を示している。大面積コヒーレント発振を反映して、非常に拡がり角の小さなビーム（ $< 1^\circ$ ）が得られている。また、ビーム形状は、特徴的なドーナツビームが得られていることが分かる（ビームパターンは、フォトニック結晶の構造を変化させると変えることができる）。これにより、上述の様々な応用に向けて、重要な一歩を踏み出すことができたといえる。

- [1] 例えば、S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki, *Science*, **293** (2001) 1123. E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi, and S. Noda, *Nature*, **441** (2006) 946.
 [2] H. Matsubara, S. Yoshimoto, H. Saito, Y. Jianglin, Y. Tanaka, and S. Noda, *Science*, **319** (2008) 445. (published on-line 20 Dec. 2007; 10.1126/Science. 1150413)

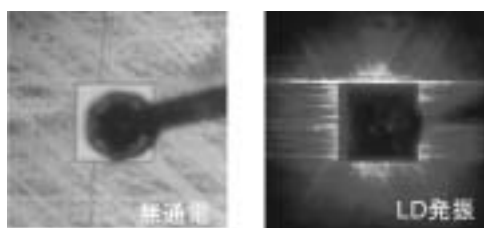


図1. デバイスの発振の様子（左：無通電、右：発振後の近視野像、中央部が電極で、大きさは100 μm $\times$ 100 μm ）



図2. 透視野像（ビームパターン）。大面積発振を反映して、非常に拡がり角の小さなビームが得られている。また、ビーム形状は、特徴的なドーナツビームが得られている。

量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「フォトニック結晶ファイバの4光波混合を利用した光子対生成と2光子干渉」

光子対は光を構成する量子である光子2つが組になったもので、量子エンタングルメントという量子固有の性質をもつ。量子エンタングルメントに関する研究は、ベル不等式の破れの検証といった量子力学における基礎的な問題だけでなく、量子テレポーテーションなど量子情報処理の分野で広く利用されている。光子対の生成は3光波混合を利用した生成法と4光波混合を利用した生成法に分けられる。3光波混合を利用した光子対生成は、BBO結晶などの非線形光学結晶にポンプ光を入射することで光子対を生成する。一方、4光波混合を利用した光子対生成も近年盛んになってきた。3光波混合においては、ポンプ光子1つが、光子対に変化するが、4光波混合では、ポンプ光子2つが光子対に変化する。これは、同じポンプ光を使う限り、後者の方が短波長の光子対の生成に有利であることを意味する。

4光波混合の研究の多くは通常の光ファイバを利用しているが、これでは波長が通信波長帯に限られる上に、非線形性も低いため生成効率も悪い。しかし、分散制御の自由度の大きいフォトニック結晶ファイバを用いることでより短波長の光子対を作ることが可能であり、強い光閉じこめ効果から高い非線形性も期待できる。我々は、760nmにゼロ分散波長をもつフォトニック結晶ファイバを利用した。ポンプ光をフォトニック結晶ファイバに入射し出力される光スペクトルの分析を行ったところ、ポンプ光波長をゼロ分散波長よりわずかに大きくしたときに、光子対がポンプ光の波長とは大きく異なる波長領域に出現することが、分光器のスペクトルの解析よりわかった。後の実験では、ポンプ光の波長を760.4nm、パワーを4mWとしたときに得られる、660nmと900nmの光子対（生成レートは約2,000個/秒）を利用した。

次に生成された光子対の時間相関を測定するために、図1のような光学系で2光子干渉実験を行った。2光子干渉実験を光子対に対して行うと、2つの光子がその和のエネルギーをもつ1つの量子（バイフォトン）のように振る舞う。その結果、4光波混合を利用して生成した光子対に対しては、ポンプ光の波長の半分の周期の干渉縞が得られる。光子対間に量子的な時間相関が存在する場合には、干渉縞の最大値 $A_{\max}$ と最小値 $A_{\min}$ を用いて $(A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min})$ で定義される明瞭度が100%になることが知られている。実験結果を図2に示す。期待されたように、ポンプ光の半分の周期（380nm）の2光子干渉縞を観測することに成功した。また、明瞭度は古典限界50%を超える83%であり、光子対間に古典電磁理論では説明のつかない量子相関があることを実証することができた。この2光子干渉という高分解能の干渉法は、回折限界を超える新しいリソグラフィ技術（量子リソグラフィ）を可能にするものとして期待されている。

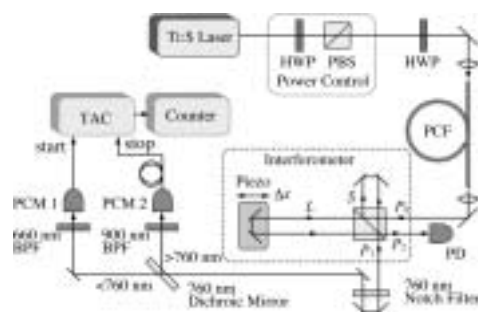


図1. 2光子干渉の実験系

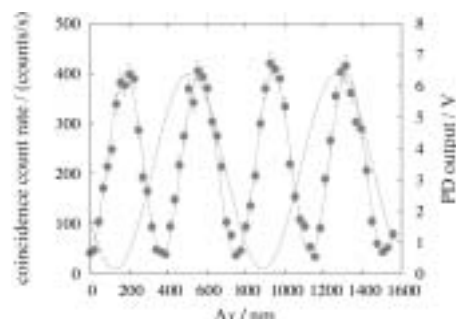


図2. 観測された2光子干渉（丸印）と参照用のポンプ光の1光子干渉（点線）

- [1] T. Nakanishi et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 印刷中
- [2] A. N. Boto et al.: Phys. Rev. Lett. 85, 2733 (2000).

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室） 「陰影を用いた 3 次元光源環境推定」

かがり火のように、発光部が複雑な 3 次元空間分布を持ち、その分布形状が時々刻々と不規則に変化する光源によって照らされた環境には、人を惹き付ける魅力がある。事実、洋の東西を問わず、炎の下での祭りや催しが盛んに行われており、日本でも薪能といった文化が継承されている。このような光源の情報（放射強度や 3 次元位置、広がり）を画像から求めることが本研究の目的である。

画像から光源を推定する方法には、光源を直接撮影する方法と何らかの参照物体を環境中に設置してその陰影を観測して推定する方法の 2 つに分けられる。それぞれに利点や欠点があるが、単純にこれらの方法を用いて炎のような光源、つまり 3 次元の広がりがあり半透明で時々刻々と放射強度が変化する光源の 3 次元分布を求めることは容易ではなかった。

本研究では、近接点光源の集合を用いて複雑な 3 次元空間分布、配置を持つ光源群をモデル化し、「スケルトンキューブ」（図 1 中央の立方体枠）と名付けた参照物体表面の陰影（shading and shadows）を手がかりとして、上記のような複雑な 3 次元光源環境を推定するアルゴリズムを開発した。

まず、N 個の点光源の 3 次元分布（位置）が与えられた場合、点光源の放射強度 $L_{L1} \sim L_{LN}$ と観測画像中に写された参照物体上の M 個の点 $x_1 \sim x_M$ の明度 $I(x_1) \sim I(x_M)$ との関係は式 1 によって表わされる。I は撮影画像から分かり、点光源の 3 次元位置が既知であれば K を計算できることから、式 1 を L について解けば光源の放射強度を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} I(x_1) \\ I(x_2) \\ \vdots \\ I(x_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \cdots & K_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{L1} \\ L_{L2} \\ \vdots \\ L_{LN} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{KL}$$

式 1. 陰影と光源の関係式

そこで問題は、L つまり光源の 3 次元分布をいかにして求めるかということになる。本研究では、以下に述べる方向・距離の二段階探索によって推定する。まず、参照物体を覆う適当な大きさの球面上に点光源群を仮定し、その半径の大きさを段階的に変えながら放射強度を推定すると、真の光源が存在する方向に強い放射強度を持つ光源分布を得ることができる。次に、各方向に対して直線状に点光源群を配置して放射強度を推定することによって、最終的に光源の 3 次元分布つまり L を得ることができる。

また、光源の放射強度推定、つまり式 1 を L について解く際に、参照物体が持っている幾何学的特徴を無視して単純な数値計算を行うと、偽の光源が多く現れてしまい真の光源との区別がつかなくなってしまうため、幾何学的特徴を活かした部分計算を複数回行う必要があることが分かった。つまり、大局的数値解法では解けない問題が局所的解法の組み合わせによって解けることを示した点でも、数学的に興味深い問題となっていることが分かった。



図 1. 実験環境



図 2. 生成した CG 画像

通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

<http://cube.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「リソース協力拠出型ネットワークのためのインセティブメカニズムEMOTIVER」

P2Pをベースとしたコンテンツ共有・マルチメディア配信の利用、ブログや動画共有サービスを通じて個人の情報発信が盛んに行われるようになりました。これは、多数のユーザが1点のサーバからリソースをダウンロードする中央管理型からユーザが少しずつリソースを拠出し合う協力拠出型へのシフトを意味します（図1）。このような協力拠出型は、数万、数百万のユーザ数を収容できるスケーラビリティと高い耐障害性を有していますが、参加ユーザによる貢献行動が不可欠です。図2のP2Pコンテンツ共有の例では、コンテンツを提供する際に通信帯域やバッテリーを消費するためユーザは心理的な不満度（コスト）を被ることになり、結果、多くのユーザが貢献行動を行わないフリーライダーとなってしまいます。そこで、貢献行動に報酬を付与するインセンティブメカニズムの導入が行われています。しかし、物理ネットワークを覗いてみると、ユーザ間に端末性能や通信機能の差があるためユーザのコストは多様であり、従来の方法では適切な報酬配分が困難です。そこで、我々はEMOTIVER（Everyone's MOTivated by incentive REward）という新たなメカニズムを提案しています。

図3にそのメカニズムを示します。ユーザは自身の利得（報酬－コスト）を最大にする貢献度（努力水準）を選択することになりますが、EMOTIVERでは、対話型エージェントの提示する努力水準に従って実際に行動を行い結果的に得られた満足度をフィードバックするだけで、望ましい努力水準を発見できます。外部評価機構はユーザの行動を努力水準と実績によって評価します。努力水準は例えばキャッシュ容量やサービスに接続し待機する時間で、実績はアップロードしたファイルの数・サイズなどネットワーク品質の向上に直結するものです。また、外部評価機構はサービスポリシーに応じた報酬配分アルゴリズムを備えており、これによって各ユーザへの報酬量を決定します。

以上のメカニズムの特長は、ユーザを学習の負担から解放し最適な努力水準へと正確に導く学習エージェント機能と、努力水準と実績を定義するだけで様々な協力拠出型ネットワークに適用できる汎用性です。また、メカニズムの性能を決める報酬配分アルゴリズムは、我々のこれまでの研究から、制御目標（フリーライダーを減らしたいのか？平均的貢献度を増やしたいのか？など）と支配的なコスト（バッテリー駆動のため待機のコストが大きいなど）の2つに基づいて設計を行うことが効果的であると分かっています。今後はユーザ間の比例的公平性を達成する最適性の高いアルゴリズムの設計や大規模ネットワークでの実装実験を進めていきます。

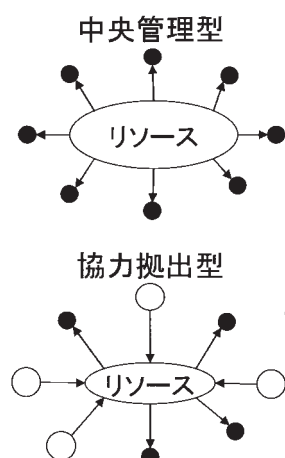


図1. リソース拠出形態

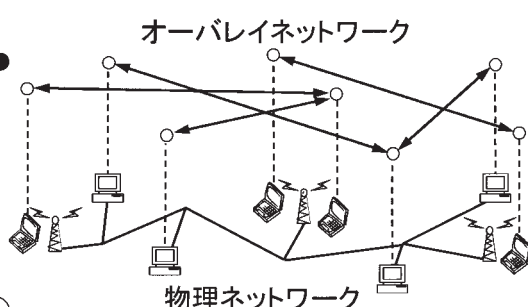


図2. P2Pコンテンツ共有

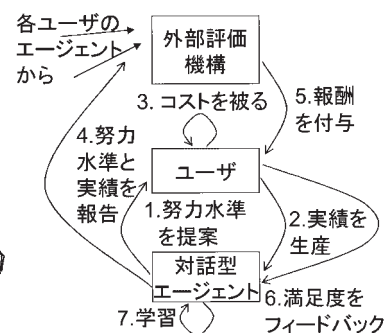


図3. EMOTIVERのメカニズム

集積システム工学講座 情報回路方式分野

<http://www.lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「非同期単精度浮動小数点除算器とそのFPGA上への実装」

ディジタルVLSI（特にASIC）で順序回路を実現する場合、単相クロックの同期式順序回路とするのが一般的である。その主な理由は、設計方法論が確立しており、各種CADツールを用いた設計自動化が進んでいることにある。しかしながら、同期式システムには次のような問題点もある。

1. 高い周波数のグローバルクロックをチップ全域に分配する必要があるため、そのクロックツリー自体や末端に接続されているフリップフロップ群によって消費される電力が非常に大きい。
2. プロセス微細化に伴うチップ内での遅延ばらつきによってクロックスキューが増大すると、設計マージンを大きくとる必要性が生じ、プロセスの能力を最大限に発揮することが難しくなる。
3. クロック周波数が決まらなければテクノロジー依存の最適化ができず、逆にあるクロック周波数向けに最適化されたハードマクロ資産はクロック周波数の異なるシステムに流用できない。

これらを解決できるものとして、非同期回路が注目されている。我々は特に上の3.に着目し、優れた演算器の設計資産の提供を試みる。その特徴は、（1）非同期式であることを活かし、システムのグローバルクロックとは無関係に最もエネルギー効率や面積効率の良い回路構成を採用していること、並びに（2）同期式设计されたシステムにそのまま組み込むためのインターフェースを具備していることである。

本稿では、IEEE-754規格準拠の単精度浮動小数点除算器を取り上げ、商用FPGAデバイス（Xilinx社）をターゲットとしたマクロを開発した。浮動小数点除算器は、（a）非正規化数が入力された場合に正規化された内部表現に変換する前処理部、（b）仮数部の除算を行う固定小数点除算部、（c）丸めや正規化を行う後処理部などからなる。性能や消費エネルギーに最も大きな影響を及ぼすのは（b）であるが、我々のこれまでの研究より、面積効率やエネルギー効率の面ではSRT法よりも引き戻し法の方が有利であることがわかっていたため、後者を採用した。さらにその実現にあたっては、反復1回あたりの減算シフト桁数 N の異なるものを実際に設計して評価した。その結果、面積効率が最も良かったのは $N=2$ のときであり、エネルギー効率が最も良かったのは $N=3$ のときであった。以下では $N=2$ を採用する。

提案する単精度浮動小数点除算器[1]のブロック図を図1に示す。仮数部の除算を行う固定小数点除算部は、引き戻し法の減算シフト処理2桁分に最適化された高速なローカルクロックを生成するリングオシレータで駆動され、前処理部や後処理部とは非同期インターフェースで接続されている。このため、各部がそれぞれ最も面積効率やエネルギー効率の良い実装となっており、ターゲットテクノロジーの能力を最大限に引き出していると考えられる。他方、外部の入出力とはメタステーブル問題を考慮したハンドシェイク回路で接続されるため、任意のグローバルクロックで動作するシステムに埋め込んで利用することが可能である。図2に示す通り、開発された除算器は同期式の除算器よりも消費エネルギーが小さく、また図3に示す通り、同期式の除算器よりも面積あたりのスループットが高い。

非同期回路の設計開発は敷居が高いが、このようにすぐに使える優れた設計資産が提供されれば、非同期回路の恩恵を広く享受することが可能となるであろう。

参考文献

- [1] M. Hiromoto, H. Ochi, Y. Nakamura, "An Asynchronous IEEE-754-standard Single-precision Floating-point Divider for FPGA", IPSJ Trans. SLDM, vol.2, February 2009, to appear.

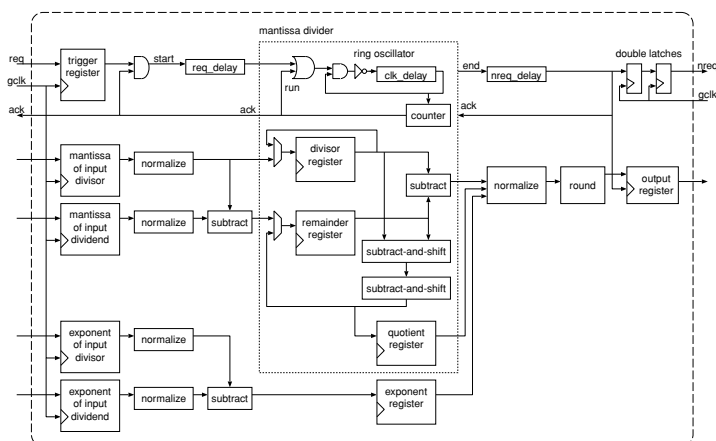


図1. 提案する浮動小数点除算器のブロック図

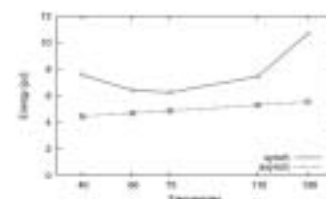


図2. 除算1回当たりの消費エネルギー

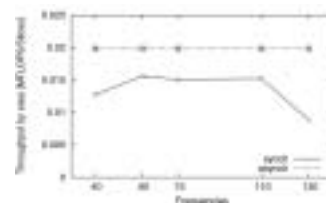


図3. 面積あたりのスループット

システム科学専攻 システム情報論講座 論理生命学分野（石井研究室）

<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

「ベイズ超解像」

当研究室では、不確実な環境に対して学習によって適合するシステムとしての「生命」と「知性」の計算原理を明らかにすることを目的に、多岐にわたる研究を行っています。また、学習するアルゴリズム（機械学習）の研究、学習する「人工的知性」を持つ知能ロボットの研究なども行っています。

表題の（ベイズ）超解像は、複数の観測画像の情報を統合することで、観測画像より高解像度の画像を得る情報処理手法をいいます。この手法は、動物の視覚情報処理機構、および機械学習の研究から生まれたもので、例えば顕微鏡画像の高解像度化に貢献することが期待されます。GFPなどの蛍光蛋白質を用いた1分子イメージング法は、ナノスケールの分子動態を観察する技術として生物学・医学に大きな発展をもたらしましたが、1分子イメージング法に代表される光学顕微鏡観測法では、レンズを通して光を観測するため、光の回折によって生じるボケが不可避です。このため、ハードウェアの性能に必ずしも縛られない、ソフトウェアによる画質改善法である超解像に期待がもたれています。

我々は、ベイズ統計を用いた超解像法の開発を行っており、これをベイズ超解像と呼んでいます。確立された方法論である統計学に立脚することで、推定の良さについて保証された手法を用いることができます。ベイズ統計を用いない統計学においては、最尤推定がある種の最適性を持ちますが、この最適性は、観測される標本数（超解像の場合、観測画像枚数）が無限大に近づくときにのみ成り立ちます。現実にはせいぜい数十枚の観測しか得られないため、観測のみから真の高解像度画像を推定した場合、同程度に尤もらしいといえる高解像度画像が無数に存在することになります。最尤推定ではそこから最も尤もらしい候補を選びますが、ノイズに強く影響されて不安定になるため、しばしば、正解である真の高解像度画像とかけ離れたものが得られてしまいます。そこで、真の高解像度画像に関する知識を用い、かつその知識の不確実性をも考慮して、無数の可能性から適切に絞り込むのがベイズ統計です。真の高解像度画像は未知ですが、多くの場合、その統計的性質は全くの未知ではありません。例えば、隣接する画素間は近い値をとりやすいなどの強い相関をもっています。こうした知識を組み込むことで推定精度を向上させることができます。以下に我々が開発したベイズ超解像の一例を紹介します。図1は16枚の観測画像（車のナンバープレートの一部）のうちの1枚を表示したものであり、図2、3はそれらの観測画像から縦横各々4倍の画素数に画素増大した高解像度画像の推定結果です。図2が最尤推定、図3がベイズ超解像によるものです。ベイズ超解像では、真の高解像度画像において、隣接画素間はなめらかであることが多い一方、違う物体間の境界にはエッジがあることを知識とした推定を行っています。しかし、エッジの有無自体は不確実であるため、その不確実性をも考慮したベイズ統計が有効となり、図3のように読み取りが可能になるまでの画像復元ができます。我々は、このように画像の知識と不確実性（知識の不足）を考慮する数学的手法を開発することで、超解像の限界に挑んでいます。



図1. 観測画像 (1/16)



図2. 最尤推定で推定した高解像度画像



図3. ベイズ超解像で推定した高解像度画像

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野（近藤研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

「ヘリオトロン」装置における中性粒子ビームの分光測定

磁場で閉じ込められたプラズマを加熱する方法として、高速の水素中性粒子ビームの入射が用いられている。プラズマ中に入射された水素ビームは、プラズマ中のプロトンとの荷電交換反応、電離などによって高速のイオンとなりプラズマ粒子との衝突によってエネルギーをイオン、電子へ与え、結果としたプラズマを加熱する。水素原子ビームはイオン源で水素プラズマを生成して加速し中性化して得られる。イオン源では H^+ のみならず、 H_2^+ 、 H_3^+ なども生成されそれらが加速電圧 E で加速され磁場を横切ってプラズマ中に入るために中性化セルで中性原子に変化するときエネルギー E 、 $E/2$ 、 $E/3$ の成分を持つ水素原子ビームとなる。それぞれのエネルギーを持った水素原子ビームがプラズマ中に入射されるとそのエネルギーが低いほど速く電離して長い距離を進むことができなくなる。したがって入射する水素原子ビームのエネルギー成分比を正確に測定することがプラズマを有効に加熱する上で大変重要なことになる。プラズマ中でのこれらエネルギー成分比は水素原子ビームがプラズマ中の電子衝突によって励起され発光する $H\alpha$ 光の強度比から求めることができる。中性水素原子ビームからの発光は、ビームが高速であることから波長がドップラーシフトするためプラズマ中の水素原子の発光と簡単に区別することができる。図1に測定の視線を示す。これらの視線で測定された $H\alpha$ 光のスペクトルを図2に示す。このようにエネルギー E 、 $E/2$ 、 $E/3$ のビームに由来する $H\alpha$ 光が明瞭に確認されている。視線1における成分比は約45%、25%、30%であり、その位置より約19cm下流側の視線4での成分比は、約47%、26%、27%で各ビームエネルギー成分によって減衰の割合が異なることを示している。実験的にはイオン源の動作条件をいろいろ変えエネルギー E の成分を大きくすることが重要な課題となる。また $H\alpha$ 光発光強度のビームに沿った減衰は、電子密度に関係するので新しい電子密度の測定法になる可能性がある。

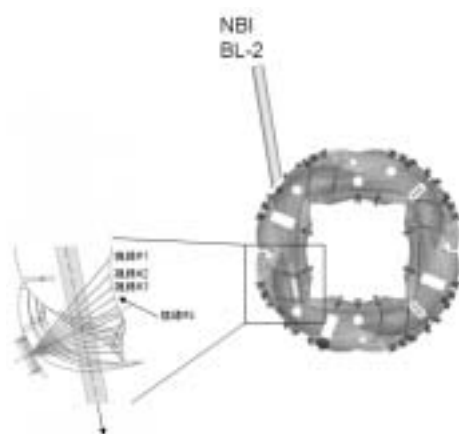
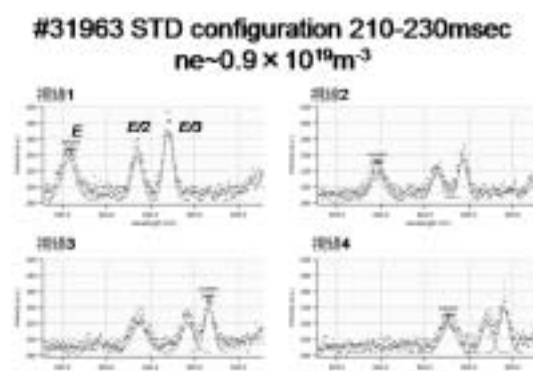


図1. 中性粒子ビームと測定視線

図2. 視線1～4で観測された $H\alpha$ 光のベクトル

応用熱科学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

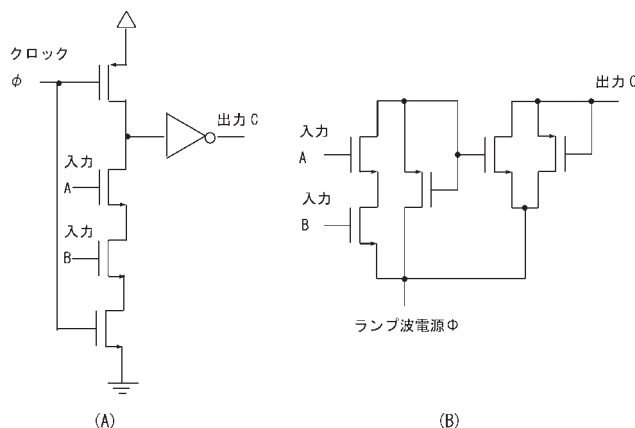
<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「ADL回路を用いた機能メモリ内部演算回路に関する研究」

並列演算処理による電子計算機高性能化の一環としてビットシリアル・ワードパラレル方式高密度機能メモリの特徴を最大限に利用した新しい検索・整列アルゴリズムなどが実行可能な新しい情報処理システムの実現を目標にした研究を行っています。超並列演算処理に伴い、機能メモリ内演算回路のピーク電流が増加します。この消費電力が問題です。これを解決するため、内部演算回路動作に伴う熱的エネルギーを極限にまで減少できる可能性を有する断熱型CMOS論理（ACL）を取り入れた比較器（コンパレータ）について電子回路シミュレーションを行い、大幅な改善を行うと同時に入力遷移に基づく散逸電力について解析し、これを抑える新しい回路トポロジーを考えその効果も確認しました。

この成果に基づき本年度はビットごとに演算した比較器からの一致・不一致の判定出力をシリアルに論理積演算するための回路として2入力AND CMOSドミノ回路を対象に断熱回路の適用を進めています。ドミノ回路はダイナミック論理の一種ですから、ACL回路をそのまま適用できません。代わりに断熱型ダイナミック論理（ADL）を採用し、引き続き研究を続行しています。下図（A）は1桁のビットに対応するCMOSドミノ回路の原型を示しています。入力Aは前段（上位ビット桁）の判定結果で、入力Bは現在のビット桁の判定結果を示しています。入力AとBの論理積をクロック ϕ によってプリチャージ後、評価サイクルの期間に出力Cとして次段（下位ビット桁）に対応する回路に送るという動作をします。一方、下図（B）は本研究で用いたADL CMOSドミノ回路を示します。電源部がランプ波電源に変わっています。またADL回路では整流素子としてp-nダイオードが使われていますが、本研究では集積度の観点からダイオード接続のPMOSトランジスタを使用しています。ADLを用いたANDドミノ回路の動作は次の通りです。ランプ波電源 Φ を論理“0”から“1”に昇圧することによって出力Cのノードはプリチャージされます。プリチャージ後ランプ波電源を論理“1”から“0”に変化させると、評価サイクルに入ります。入力AとBが共に“1”の場合のみNAND論理の出力ノードの電圧はランプ波電源 Φ に追従して低下します。従って出力Cは“1”に留まります。入力がそれ以外の場合はNAND論理の出力ノードの放電パスができませんので出力Cは“1”から“0”に変化します。

下図（A）と（B）の回路についてSmart SPICEによるシミュレーションを行い、動作確認をしたのち、散逸電力について解析しました。二つの回路で比較すると（A）の回路ではクロックの重なりによるDCパス発生による散逸電力が見られたのに対し、下図（B）のADL回路ではそれが改善される等の効果によりランプ波周期を大きくするにしがたい改善指数は増加するというような知見を得ています。また、ACL回路同様散逸電力の入力依存性等も観測されていますので確率的な解析を行いさらなる改善を試みる予定です。



エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

核融合プラズマにおける電子サイクロトロン電流駆動に関する研究

究極のエネルギー源として期待されている磁場閉じ込め核融合炉において、GHz周波数帯の波を利用した波動加熱はプラズマの生成・加熱に幅広く利用されています。安定した高温プラズマの生成・加熱・電流駆動を行うに当たり、加熱機構の理解と加熱手法の開発は重要な課題として位置付けられています。電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システムはプラズマの生成・加熱・電流駆動を行うことが可能で、局所電子加熱、熱輸送解析、新古典ティアリングモードなどのMHD不安定性の抑制、オーミックを用いないプラズマ生成等について、世界の多くの核融合実験装置において研究が進められています。その中で、プラズマ中を流れるトロイダル電流の制御は高性能プラズマの実現や定常プラズマ維持に向けての重要な課題の一つです。ヘリカル系では閉じ込め磁場は外部コイルによって形成できることから、オーミック電流のような誘導電流をプラズマ平衡のために必要としません。しかしながら、トカマクと同様に有限のプラズマ圧力がブートストラップ電流を駆動し回転変換分布を変え、プラズマの平衡・安定性が変わることがわかってきました。電子サイクロトロン電流駆動（Electron Cyclotron Current Drive, ECCD）はブートストラップ電流を抑制し回転変換分布に危険な有理面を生じさせない手法として提案され、現在、ヘリオトロンJにおいて、図1に示すような電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム（70 GHz、0.4 MW、0.2 sec）を用いて実験的な検証を行っています。トカマクでの実験結果と比較をすることで、トロイダルプラズマにおけるECCD物理がより深く理解できるものと期待されています。電子サイクロトロン波は磁力線に垂直方向に電子を加速しますので、磁力線方向には直接運動量を与えませんが、速度空間における非一様性を生じさせ、結果としてトロイダル電流が流れるという興味深い物理機構から電流駆動されます。ヘリカル系装置では、トロイダル電場による非線形効果がないこと、また、オーミック電流が存在しないことにより従来のロゴスキーコイルを用いて1kA以下という高精度で非誘導電流の計測が可能です。これまでの国際共同比較実験で中型ヘリカル装置におけるECCD特性を調べ、共通の電流駆動物理を明らかにしてきました。実験結果の例として、図2にヘリオトロンJ装置において磁場形状を変えたときのEC電流の変化を示します。電流駆動位置が磁場リップルの位置によって、電流駆動方向が反転することが観測されました。この結果は、Ohkawa効果と呼ばれる速度空間上での捕捉粒子の効果が、電流駆動を決定する物理過程で重要な役割を果たしていることを示しています。今後、このECCDを用いた回転変換分布制御がプラズマの平衡・閉じ込めへどう影響するのか調べてゆく予定です。



図1. 電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム

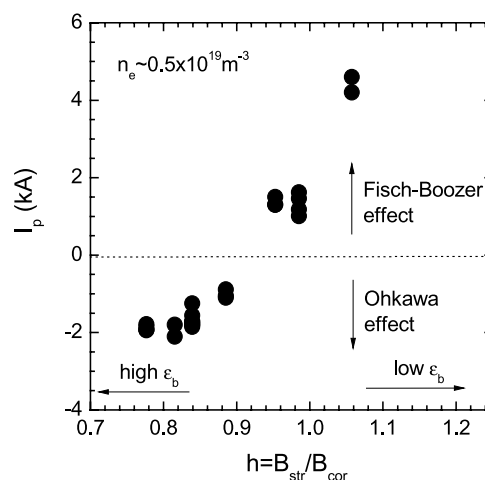


図2. 観測されたトロイダル電流の磁場配位依存性。配位によって駆動電流方向が反転する。

生存圏研究所 診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

「新開発デジタル・ビーコン受信機を用いた電離圏擾乱の観測研究」

電離圏の擾乱が衛星通信を阻害することは良く知られている。またGPS衛星の利用は旅客機のナビゲーションにまで広がっているが、電離圏擾乱による測位誤差増大が懸念され、電離圏のリアルタイムモニタや擾乱の発生予測に対するニーズが高まっている。

電離圏プラズマの総量は全電子数（Total Electron Content; TEC）と呼ばれる。この観測手法として、低軌道衛星から発射されるビーコン電波を地上で受信する衛星ビーコン観測がある。標準的には150MHzと400MHzのビーコン波の伝搬位相差からTEC値を測定する。地上観測点を増せば増すほど効力を発揮する。本研究室ではここ数年、ソフトウェア無線技術を用いた安価な衛星ビーコン受信機の開発を進めてきた[1]。具体的には、GNU Radioと呼ばれるオープン・ソフトウェア・ツールキット(<http://gnuradio.org/>)と、汎用のオープン・ハードウェアであるUSRP (Universal Software Radio Peripheral、図1)を利用し、LINUX PCを主計算機として構成した。成果は良好であり、従来のアナログ受信機に比して性能が高い装置を20～30万円（市販品に対するコスト比約1/10）で実現できた。GNU Radio Beacon Receiver (GRBR)と名づけ、ホームページを開設して普及のための努力を始めた。

我々自身によるGRBR利用も既に始まっている。2008年7月から、潮岬・信楽・福井とMUレーダーを中心とする約300km離れた3点のネットワーク観測を開始し、トモグラフィ解析を行い、図2に示すような電子密度の緯度－高度断面の推定に成功した。中緯度域に現れる中規模電離圏擾乱が明瞭に捉えられている。さらに、磁気赤道から低緯度域の電離圏に現れる非常に強い擾乱であるプラズマバブルをターゲットとして、インドネシア・タイ・ベトナムにわたる観測網構築を始めた。これはインドネシア・西スマトラ州で稼働中の赤道大気レーダーとの同時観測に役立ち、さらに（独）情報通信研究機構及び名古屋大学太陽地球環境研究所と共同で推進する東南アジア域の電離圏観測網の一部となる。2009年1月上旬にはベトナム最南端のバクリウからGRBRが稼働し始めた。

GRBR開発の成功に引き続き、本研究室ではGNU Radioを利用した新しいレーダー開発にも乗り出した。システム構成を柔軟に変化できるソフトウェア無線の特質を活かすことで、大気レーダーの更なる普及に貢献できればと期待している。

参考文献

- [1] Yamamoto, M., Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, Earth Planets Space, 60, e21-e24, 2008.
<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2008e/6011e021.pdf>

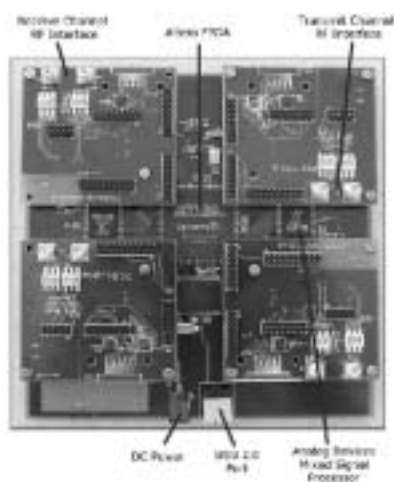


図1. USRPの外観
 (出典：<http://www.ettus.com/>)

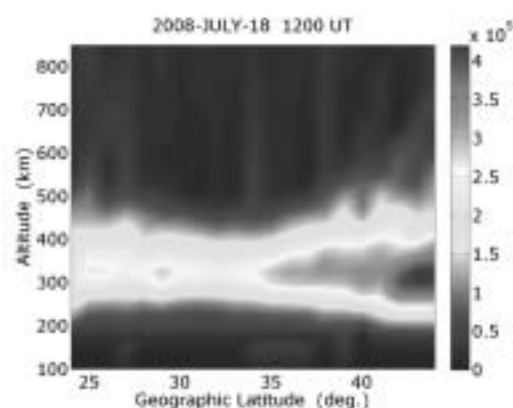


図2. 潮岬・信楽・福井の衛星ビーコン観測からトモグラフィ解析によって得た電離圏電子密度の緯度－高度断面の一例。

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏電波科学分野（山川研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/people/yamakawa/>

「太陽風エネルギーを利用する磁気プラズマセイル宇宙機の実現に向けて」

惑星間空間には太陽を起源とする高速のプラズマ流である太陽風が吹き荒れています。磁気セイルは、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場を発生させることで、この太陽風の運動エネルギーを受け止め、宇宙機に推進力を与えるシステムです。1990年代のZubrinらの検討によると、宇宙機に十分な推力を与えるためには、直径100kmにおよぶ巨大なコイルに電流を流す必要性が指摘されたため、磁気セイルは実現困難とされていました。しかし、R.Wingleeらは、図1に示すように、宇宙機のまわりのごく小規模な磁気圏をプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風を受け止める磁気プラズマセイルという概念を提案し、電気推進と同等の高い推進剤の消費効率を得られるという解析結果を得ました。これは、小規模の宇宙機でも、太陽系の木星等の外惑星に飛行時間2～3年で直接移行して到達することを示しています。磁気プラズマセイルを現実のものにできるかどうかは、太陽風プラズマ流を受けとめるための十分な大きさの磁気圏を、探査機の持つ僅かな質量・電力リソースで実現出来るかどうかにかかっています。

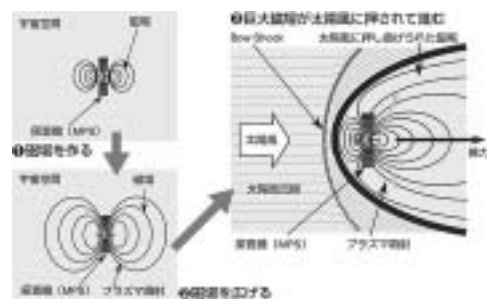


図1. 磁気プラズマセイルの原理

本研究では、プラズマを流体として扱う電磁流体 (MHD: MagnetoHydroDynamic) シミュレーション (図2、図3) により、太陽風と磁気圏の相互作用をシミュレーションし、推力発生機構の解明と宇宙推進システムとしての評価を行っています。現在は、宇宙機に超電導コイルを搭載することで人工的な磁場を発生させることを想定しており、これが太陽風と相互作用することにより、磁気圏が形成されます。この磁気圏界面に生じる誘導電流がコイル近傍に作る誘導磁場と、コイル電流の間に働くローレンツ力の積分値が宇宙機としての推進力となります。宇宙機からプラズマ噴射を行わない場合は、磁気圏が大きくなるほど太陽風との相互作用が大きくなり、そのため推力が大きくなると考えられます。宇宙機からプラズマ噴射を行うことによって磁気圏が拡大され、宇宙機として得られる推力は大きくなりますが、噴射プラズマ動圧と磁気圧の比である噴射プラズマのパラメータを β とすると、 β が大きいときよりもむしろ小さいときに推進システムとしてメリットが得られるとの予想を得ています。数値シミュレーションにより、大きな β のときは、推力の発生に寄与する磁気圏境界面電流がプラズマ噴射により発生したtermination shock上の電流により弱められると考えられます。現在は、太陽風エネルギーを使わない従来型の宇宙推進エンジンである、プラズマを直接一方向に噴射することにより推力を得る電気推進との性能比較等を行っています。

参考文献

- [1] Sasaki, D., Funaki, I., Yamakawa, H., Usui, H., Kojima, H., "Numerical Simulation of Magnetic Sail Spacecraft with Superconducting Coils," 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Kyoto, 21-25 July 2008.

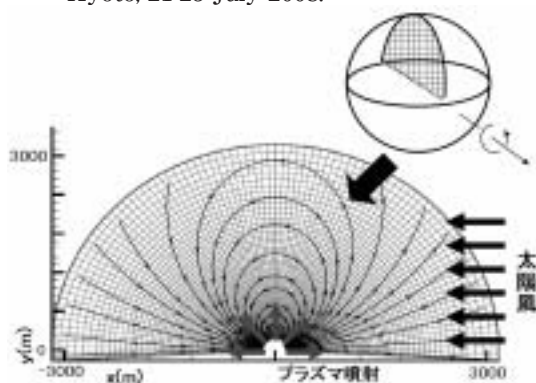


図1. 宇宙機からのプラズマ噴射モデル

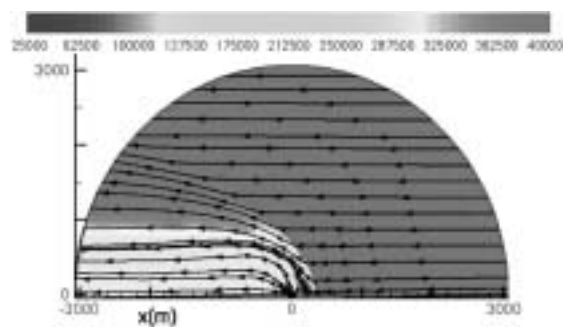


図2. 電磁流体シミュレーション (速度と流線)

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（橋本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashimoto.html>

「自己ビーム制御アレイとその太陽発電衛星の位相同期システムへの応用」

当研究室では、電波をエネルギー伝送媒体として利用し、エネルギー・環境問題の一つの解である太陽発電衛星（SPS）の研究をはじめ、マイクロ波を応用した新しい生存基盤に関する研究開発を行なっている。電気工学専攻の協力講座である同じ研究所の大村研究室、山川研究室と協力し、マイクロ波応用工学、電波工学、科学衛星による波動観測、計算機シミュレーションなどの研究も行なっている。

本稿では、SPSにも応用することができるマイクロ波送電システムに関する研究について述べる。SPSでは、受電点に正確に電力を送る必要があり、そのためには、受電点から電波を出し、その到来方向にSPSの電波を送るレトロディレクティブ方式を利用する。地上での利用にも応用可能である。レトロディレクティブシステムは基本的にはハードウェアで構成されるが、我々は電波の到来方向を計測し、その方向にアレイアンテナのビームを向ける柔軟性の高いソフトウェア方式を採用しており、ソフトレトロと略称している。この方式に15号で紹介したものを改良した自己ビーム制御方式、そして受信点中心付近の電力分布を測定して補正する方式について、フェーズドアレイの移相器に、敢えて多い目のランダム位相誤差を与えて評価した。図1はそれらの結果で、縦軸は受電電力（dBm）、横軸は繰返し数である。（1）は自己ビーム式で、やや遅いが繰返し毎に良くなっている、（2）はソフトレトロで位相誤差のために強度が弱い。（3）は両者を併用した場合で、（2）の強度から比較的早く改善されている。（4）は受電電力分布による補正方式で（2）を改善したもので、すぐにある程度の強度になるが、それ以上改善されない。（5）は3方式を併用した場合で、高速に最大強度になる。これらの方式を併用することにより、高速、高精度のレトロディレクティブシステムが構成できる。

従来はこれらの実験を電波暗室内で行ってきた。到来方向測定では、基本的に素子アンテナ間の位相差などを測定するため、アレイによる利得を利用できない。暗室では反射や外来雑音が無く、実験できる距離が限られるため、屋外での実験を行うこととした。そのために、小型で軽量のシステムを開発し、総務省の免許を得て、写真1のような25mでの伝送実験等を行っている。良好なデータが得られており、暗室内での結果との比較や、雑音に強いシステムの開発を行っている。

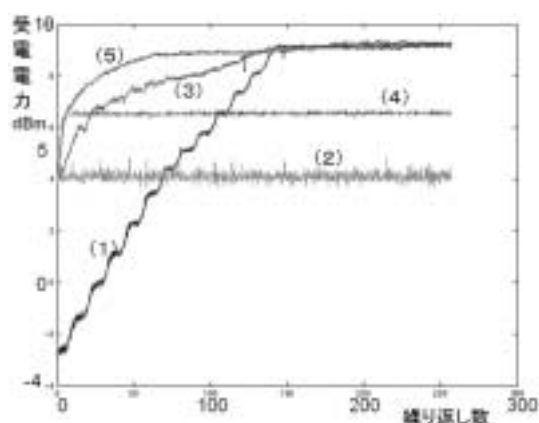


図1．種々のビーム制御方式の比較（本文参照）。 写真1．到来方向測定、レトロディレクティブシステムの屋外実験

博士論文概要

【課程博士一覧】

沢 口 義 人	「On Identification and Control of Multivariable Systems Including Multiple Delays and Their Application to Anesthesia Control」(複数のむだ時間を含む多変数系の同定と制御およびそれらの麻酔制御への応用)	平成20年 3 月 24 日
小 島 一 信	「極性・非極性面InGaN量子井戸レーザの光学特性に関する研究」	平成20年 3 月 24 日
中 村 大 輔	「Bulk Growth and Extended-Defect Analysis of High-Quality SiC Single Crystals」(高品質バルクSiC単結晶成長と構造欠陥の解析)	平成20年 3 月 24 日
堀 江 聡	「強誘電性分子蒸着薄膜における分極発生過程の解明と新規デバイス応用」	平成20年 3 月 24 日
石 原 邦 亮	「フォトリック結晶有機EL素子に関する研究」	平成20年 3 月 24 日
川原村 敏 幸	「ミストCVD法とその酸化亜鉛薄膜成長への応用に関する研究」	平成20年 3 月 24 日
洗 暢 俊	「負イオン注入法によるシリコン熱酸化膜中のナノ粒子形成」	平成20年 3 月 24 日
鄧 新 宇	「An English Text Generation System for Intermediate Non-Native Speakers Based on Corpus Analysis」(コーパス分析に基づいた中級ノンネイティブ向け英語文章生成システム)	平成20年 3 月 24 日
Kucera Stepan	「Cross-layer Design of Resource Management in Wireless Networks with Distributed Control Field of Research」	平成20年 3 月 24 日
浅 井 孝 浩	「Spatiotemporal Signal Processing for Highly-Efficient Broadband Wireless Communications」(高能率広帯域無線通信のための時空間信号処理)	平成20年 3 月 24 日

植 田 哲 郎	「MAC and Routing Protocols for Wireless Ad Hoc Networks Using Directional Antenna」(指向性アンテナを用いた無線アドホックネットワークにおけるMAC及びルーティングプロトコルに関する研究～アンビエント社会・エコ社会に向けて～)	平成20年3月24日
井 上 隆	「ダイバーシチ合成の理論解析法とアレーアンテナ信号処理技術に関する研究」	平成20年3月24日
清 水 洋	「A Study on Bandwidth Guaranteed Networks for Multimedia Services Integration」(マルチメディアサービス統合のための帯域保証ネットワークの研究)	平成20年3月24日
松 吉 俊	「Hierarchically Organized Dictionary of Japanese Functional Expressions: Design, Compilation and Application」(階層構造を持つ日本語機能表現辞書の設計、編纂および応用)	平成20年3月24日
嶋 吉 隆 夫	「細胞モデルの構築支援および生体機能シミュレーションの開発環境に関する研究」	平成20年3月24日
篠 原 尋 史	「ばらつきを考慮した微細化SRAMのメモリセル最適化と駆動法に関する研究」	平成20年3月24日
田 中 晶	「Study on Design Issues towards Highly Efficient Telecommunication Networks」(高能率通信ネットワークに向けた設計課題に関する研究)	平成20年3月24日
田 原 志 浩	「衛星通信およびレーダ用アレーアンテナ給電回路の低損失化に関する研究」	平成20年3月24日
八 木 将 計	「Analysis of Nonlinear Oscillations Using Computer Algebra」(計算機代数を用いた非線形振動の解析)	平成20年5月23日
Mohamed Lmouchter	「Eptaxial Growth and Characterization for Thin Films of Colossal Magnetoresistive Layered Manganates」(巨大磁気抵抗層状マンガン酸化物薄膜のエピタキシャル成長とその評価に関する研究)	平成20年5月23日
高 野 仁 路	「超小型・面内フォトリック結晶デバイスに関する研究」	平成20年5月23日

颯々野	学	「Practical Use of Large Margin Classifiers in Natural Language Processing」(自然言語処理におけるマージン最大化に基づく分類器の実用的な利用法)	平成20年9月24日
張	奇	「Study on an Integrated Analysis and Evaluation Methodology of Energy Systems for Sustainable Development」(持続的発展のためのエネルギーシステムの統合分析・評価手法に関する研究)	平成20年9月24日
二 谷 辰 平		「Multiscaling Analysis of Impurity Transport in Drift Wave Turbulence」(ドリフト波乱流における不純物輸送のマルチスケール解析)	平成20年9月24日
藤 野 秀 則		「情報通信技術を活用したスキルとモラル向上のための教育・訓練方法に関する研究」	平成20年11月25日

【論文博士一覧】

本 山 靖		「プラズマディスプレイパネル用電極材料の二次電子放出利得改善に関する研究」	平成20年1月23日
-------	--	---------------------------------------	------------

沢 口 義 人 (小林教授)

「On Identification and Control of Multivariable Systems Including Multiple Delays and Their Application to Anesthesia Control」

(複数のむだ時間を含む多変数系の同定と制御およびそれらの麻酔制御への応用)

平成20年3月24日授与

入力された信号が一定時間だけ遅れてそのまま出力される伝達要素をむだ時間と呼ぶ。むだ時間の例としては、パイプ内やベルト上の物質輸送、ネットワーク上の情報伝送、操作器や検出器での信号処理などに要する時間が挙げられる。むだ時間を含む系では、入力の影響が出力に現れるのに遅れがあるため、速やかな制御を行うことが容易ではなく、また理論的にも本質的に無限次元の系となり、離散時間系とした場合にも次数が非常に大きくなるため、扱いが困難である。本研究では、このようなむだ時間を含む系のうち、入出力経路に大きさの異なるむだ時間を含む多変数系(図1)を対象として、同定と制御に関する手法を提案するとともに、このような系の実際例として、全身麻酔時の薬物投与に対する生理指標の変化を考え、提案手法を全身麻酔制御に応用した。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 各入出力経路に大きさの異なるむだ時間を含む離散時間系のモデルの同定法を提案した。この同定法では、まず部分空間法により、与えられた入出力系列から各入出力間のインパルス応答を求めてむだ時間の大きさを同定し、つぎに同定したむだ時間ぶん推移させた入出力系列からシステム行列を同定する。この方法により、むだ時間とシステム行列を効率良く正確に同定できる。

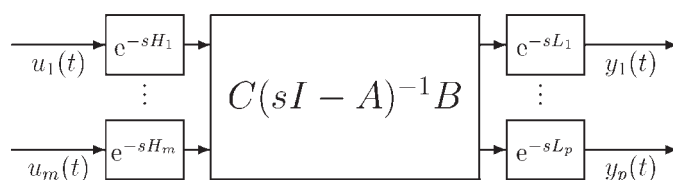


図1. 複数のむだ時間を含む多変数系(H_i : 入力むだ時間、 L_j : 出力むだ時間、 A, B, C : システム行列)

- (2) 各入出力経路に大きさの異なるむだ時間を含む連続時間系に対して、出力から集中定数部分(むだ時間を除いた部分)の状態を予測する状態予測器を提案した。この状態予測器は、オブザーバにより各出力から過去の状態を推定し、状態推移式により現状態を予測するもので、従来の方法よりも予測誤差が小さくなることが期待できる。
- (3) 各出力経路に大きさの異なるむだ時間を含む連続時間系に対して、上述の状態予測器を利用した状態予測サーボ系の設計法を導出するとともに、むだ時間とシステム行列に不確かさがある場合の状態予測サーボ系のロバスト安定解析法を提案した。これらの手法により、ステップ目標値に追従する制御系の構成と安定性が保証される不確かさの範囲の導出が可能となった。
- (4) 提案手法を全身麻酔時の麻酔制御に応用した。まず、モデル予測制御器を用いた静脈麻酔薬による鎮静度制御システムを構成し、臨床応用により、医師が投薬速度を調整した場合よりも正確に鎮静度を維持でき、投薬量も低減できることを示した。続いて、静脈麻酔薬と筋弛緩薬による鎮静度と筋弛緩度の同時制御を考え、提案手法を用いて同定およびサーボ系の設計を行った。また、シミュレーションとロバスト安定解析により、構成した制御系が十分な制御性能とロバスト性を持つことを示した。

以上のように、本研究は、入出力経路に異なるむだ時間を含む多変数系の同定法、状態予測器の構成法、サーボ系の設計法、およびロバスト安定解析法を提案し、その結果を全身麻酔の制御に応用して有効性を確認したものである。

小 島 一 信 (川上教授)

極性・非極性面InGaN量子井戸レーザの光学特性に関する研究

平成20年3月24日授与

III-V族窒化物半導体は紫外-青色領域で動作する短波長光源において発光層として使われる発光材料である。窒化物半導体の中でも、特にInGaNは光の三原色のうち青と緑をカバーするバンドギャップを有しているため、レーザスキャンディスプレイなどの次世代映像投射装置を実現し、さらに小型化・省電力化する上で不可欠な材料である。近年では、青色InGaN量子井戸(QW)を活性層とする半導体レーザ(LD)の出力が1Wに迫る水準に達しているが、さらに波長の長い緑領域に関しては室温連続発振に必要なしきい値電流密度が青色領域のそれと比べて非常に高い。このため、InGaN LDの緑色領域における低しきい値化・高出力化が望まれている。本研究では、InGaN LDの長波長化と低しきい値化を両立する手法としてc軸と角度 θ で交わるような非極性面(図1)上に成長したQWの利用に着目した。従来の極性面QWでは、ピエゾ分極に起因する大きな内部電界が発生し、量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)が顕著となることで輻射再結合確率が低下するという問題が深刻である。しかし非極性面を利用すればQCSEを軽減することが可能であることが分かっている。このような背景のもと、非極性面QWの光学特性の定量的解析・非極性面の持つ光学異方性とその制御方法の検討を行い、以下のような結果を得た。

- (1) 極性面($\theta = 0^\circ$)と比べて非極性面($\theta \neq 0^\circ$) InGaN LDの発振しきい値キャリア密度は、図2のように約3分の2に低減することが可能である。これは、極性面において問題となったQCSEが低減された結果だけでなく、価電子帯頂上付近の状態密度が非極性面において減少することによる。
- (2) 非極性面QWにおけるバンド間遷移は強く偏光しており、ではほぼ直線偏光である。このような強い偏光性は、量子閉じ込めによる価電子帯のバンドミキシングよりも活性層と基板材料(もしくは障壁層材料)の間の強い格子不整合によって生じる異方的な歪みに起因している。
- (3) 非極性面QWの偏光特性は、活性層の歪みを調整することで劇的に変化させることが可能である。例えばファブリペロー型の共振器を作る場合、ヘキ開による共振ミラーの作成が量産において重要であるにもかかわらず、無極性面GaN基板上のInGaN LDはc軸に直交した偏光を持つ光学利得を生成するので都合がわるい。しかし、AlN基板上のInGaN LDはGaN基板上のものと比べて90度回転した方向に偏光した利得を生成するためヘキ開が利用できるようになる優位性がある。

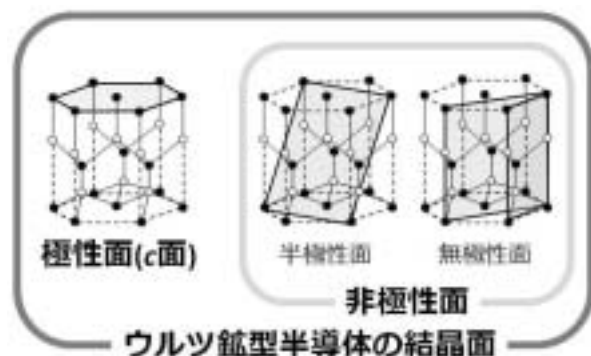


図1. 極性面と非極性面。極性面の法線をc軸と呼ぶため、極性面はc面とも呼ばれる。非極性面の成長(法線)方向はc軸と角度 θ をなす。

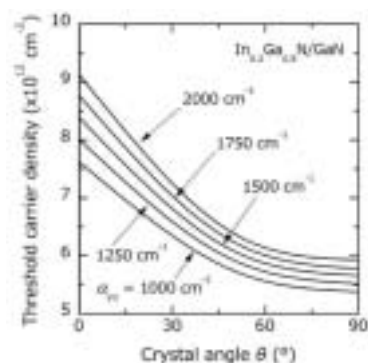


図2. InGaN LDにおけるしきい値キャリア密度の角度 θ 依存性。

中 村 大 輔（木本教授）

「Bulk Growth and Extended-Defect Analysis of High-Quality SiC Single Crystals」
（高品質バルク SiC 単結晶成長と構造欠陥の解析）

平成20年3月24日授与

炭化珪素（SiC）半導体は珪素（Si）半導体に比べ、絶縁破壊電界が一桁大きいことから超低損失化、禁制帯幅が3倍大きいことから高温動作、熱伝導率が高いことから冷却システムの簡素化等の強みがある。SiCの物性を活かしたアプリケーションとしては、大電力を扱うパワーデバイス（ハイブリッド自動車のインバータ等）が挙げられる。これまで、SiCパワーデバイスの実現を阻む一因として、基板となるSiC単結晶の品質が問題となっていた。通常、SiCのバルク結晶の育成には昇華法と呼ばれる気相成長法が用いられる。この昇華法によるSiC成長においては、融液からの引き上げ成長で用いられるネッキング法などの転位低減手法が用いられないばかりか、2000℃を超える超高温での成長条件制御の難しさから、SiC単結晶中には高密度の結晶欠陥が導入されてしまう。そこで本研究では、SiC単結晶の高品質化と欠陥構造の解明を試みた。

1. 従来キラー欠陥とされているマイクロパイプ（MP）欠陥の低減を目指し、“MP修復法”を提案した。本手法はMP欠陥を含むSiC基板に3C-SiCヘテロエピタキシャル膜を形成し、本膜によりMP開口部を強制的に閉塞し、続く高温（～2200℃）でのアニールによって、基板中のMP欠陥を修復（中空⇒中実）させるものである。本MP修復法によってSiC基板中のMP欠陥をMP欠陥と3C-SiCヘテロエピタキシャル膜の界面を起点として十分な修復長（50 μm 以上）をもって修復することに成功した。さらに、TEMによる修復MP欠陥の構造解析と弾性エネルギー計算から、修復MP構造が超らせん転位の最安定構造であることを明らかにした。
2. デバイスの長期信頼性等に影響を及ぼすことが懸念されている転位欠陥の低減をも目指し、新規結晶成長手法として、“繰り返しa面成長法（RAF成長法）”を提案した。この手法において、第1成長としてa面成長を行い、第2成長において第1成長とは垂直な方向にa面成長を行い、最終成長においてc面成長を行う。本RAF成長法による逐次的な良質な種結晶の作製のみならず、良好な成長環境（熱応力低減、パーティクル混入防止、多形制御）の実現により、MP欠陥が皆無であるばかりか、転位欠陥が大幅に少なく（転位密度で従来比 1/100～1/1000）、小傾角粒界や結晶格子の歪みがほとんど無い4H-SiC単結晶の成長を実現した。また、低転位密度結晶の大型化も試み、結晶品質が非常に高い大型結晶（ ϕ 2～3 インチ）が得られた。
3. RAF成長法により作製された低転位4H-SiC単結晶中の転位構造を放射光X線トポグラフィによって詳細を調べ、転位の性質および発達過程の解明を試みた。低転位4H-SiC基板中の転位ネットワークは主に、①基底面内らせん転位、②貫通混合転位、および③短い（30～100 μm ）貫通刃状転位、から構成されていることがわかった。さらに、貫通混合転位については、放射光白色セクショントポグラフィによるバーガースベクトル符号の決定を試みた。c軸方向のバーガースベクトル符号において、右手巻きと左手巻きの符号を持つ混合貫通転位の存在比率はそれぞれ同程度であり、異符号転位同士は同符号転位同士に比べて短い距離分布（200 μm 以下）を持つことがわかった。これらのことから、貫通混合転位の起源は転位対生成であること、また従来考えられていたらせん転位の応力範囲（～数10 μm ）を超える範囲の弾性相互作用が転位の継承様式と分布に影響を与えている可能性が示された。

堀 江 聡（松重教授）

「強誘電性分子蒸着薄膜における分極発生過程の解明と新規デバイス応用」

平成20年3月24日授与

超薄型、軽量、フレキシブルな発光パネルやトランジスタに代表される有機薄膜デバイスの発展は今後のエレクトロニクス業界で大いに注目されている。こういった多彩な分子機能のなかで、本研究では、強誘電性に着目した。これは、極性分子のもつ電気双極子モーメントによる電気特性を利用したもので、圧電、焦電（赤外線）センサ、アクチュエータ、さらには不揮発性メモリへの応用が期待されている。なかでも、フッ化ビニリデン（VDF）オリゴマーは、強誘電性を示す分子の中でも大きな分極量を有しており、各種デバイスへの実用化が期待されている。

本研究では、VDFオリゴマーを用いた強誘電デバイスの実用化を加速させるため、新規作製プロセス実現に向けた薄膜形成過程での強誘電性発現過程の解明と、VDFオリゴマー薄膜と電極からなるデバイスの基本構成における物性評価、ならびに論理演算素子への新規応用の3つを中心として遂行した。

第一に、VDFオリゴマー成膜過程における強誘電性発現を、成膜過程の分子鎖構造変化の「その場」観察によって検証した。図1に示すように、赤外線分光法（FT-IR）でのスペクトル変化から、低温状態での成膜から室温に回復する過程で分子鎖構造に変化が見られた。成膜直後の低温下では、強誘電性を示す分子鎖構造にはなっていないが、実際に使用する室温近傍になると、I型と称する顕著な強誘電性を示す構造に変化していることが判った。このような構造変化に加え、電気特性の「その場」観察も併せて行い、強誘電性発現の温度依存性について明らかにした。さらに現状成膜プロセスよりも短時間で強誘電性薄膜を作製できるプロセス（HSD）を考案し、作製時間を1/10以下に短縮することができた。

第二に、デバイス基本構造であるVDF薄膜と電極からなるキャパシタ構造での強誘電特性における電極依存性を調べ、電極/VDF薄膜界面での電荷移動状態について考察した。

第三に、VDFオリゴマー薄膜の低温作製プロセスを利用した積層型の論理演算素子を提案した（図2）。これは、単一素子で、AND、ORといった複数の論理演算を行うことができるプログラマブル素子であって、従来のMOS型トランジスタよりも効率的に演算処理を実行することができると考えられる。試作の結果、単一素子でAND、OR演算ができることを実証し、提案モデルが妥当であることを示した。

また、本研究成果である短時間成膜方法（HSD）を活用し、圧電、焦電（赤外線）センサへの産業応用を目指すべく、継続して研究・開発を進めている。

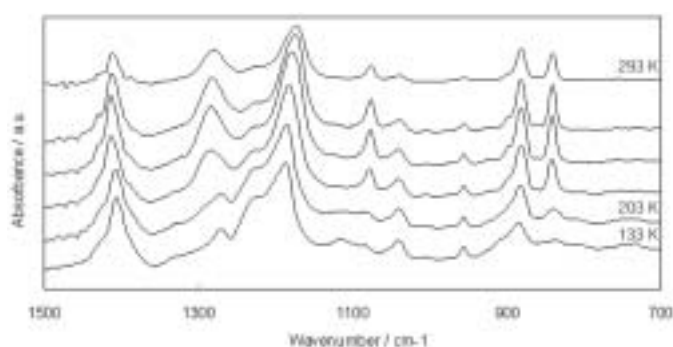


図1. 薄膜作製過程における強誘電相への変化
（図左は基板温度を示す）

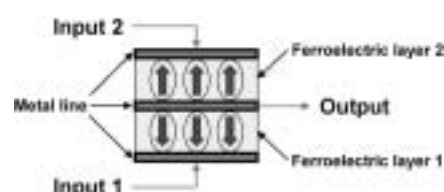


図2. 新規論理演算素子の概念図

石 原 邦 亮（野田教授）

「フォトニック結晶有機EL素子に関する研究」

平成20年3月24日授与

有機EL素子は、次世代の薄型ディスプレイに用いられる発光デバイスとして本命視されているデバイスの一つである。有機EL素子が克服すべき課題点のひとつに、素子内で発生した光を十分に高い効率で取り出せていないことが挙げられる。本研究は、光を自在に制御できるナノ構造体であるフォトニック結晶の導入により素子内部に閉じ込められた光を取り出し、より高効率・高機能な有機EL素子を実現することを目的としている。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

（１）フォトニック結晶有機EL素子の光学特性解析手法の開発

有機EL素子からどのように光が取り出せるかは、素子内の光の存在の仕方とフォトニック結晶の構成の仕方によって決まる。有機EL素子内の光の挙動を把握するため、数値計算（転送行列法）を用いて解析した。屈折率・吸収に関する材料分散を考慮できるよう手法を拡張することで、金属陰極などの影響を正しく取り込んだ解析を可能とした。このことから、発生した光の大部分が表面プラズマモードと呼ばれる金属陰極界面に強く局在した状態になっていることがわかり、金属/有機層界面へのフォトニック結晶導入が光を取り出す上で非常に有効なことを明らかにした。このような、金属フォトニック結晶の解析はいまだ困難な分野であるが、Chandezon 法とバンド計算法の融合を図り、フォトニック結晶の周期性と有機EL素子の積層情報を取り込んだフォトニックバンドを求めることを可能にした。

（２）フォトニック結晶を導入した有機EL素子の作製手法開発

有機EL素子に導入するフォトニック結晶の作製に当たっては、ナノメートル単位の寸法精度と、メートル単位の加工面積を同時に視野に入れておかななくてはならない。このため、ナノインプリント法と呼ばれるリソグラフィ技術を利用して、フォトニック結晶を高精度・大面積・短時間に形成する手法の開発を行った。有機EL素子の基板材料であるガラスに着目し、その熱可塑性を利用した直接インプリント、続いて、スピン・オン・ガラス材料を用いた室温インプリントによるフォトニック結晶形成プロセスを構築し、フォトニック結晶有機EL素子の作製・動作実証を果たした。作製した素子を通じて、フォトニック結晶の導入による輝度の向上を確認し、加えて、消失性干渉や状態密度の増加に伴う発光強度の向上といった、フォトニック結晶ならではの発光状態への変調効果が有機EL素子においても生じている点を明らかにした。さらに、光吸収のない有機材料を用いた光取り出し効果のさらなる向上、結晶周期を利用した発光ピーク波長制御による彩度改善、色素ドーピングによる高輝度素子の作製といった成果を上げている。

以上の通り、本研究はフォトニック結晶有機EL素子を実現するために必要な一連の設計・作製工程を確立したものである。本研究で得られた知見は、今後のフォトニック結晶、有機EL素子およびそれらの周辺・融合分野の発展に大きく寄与するものと考えている。

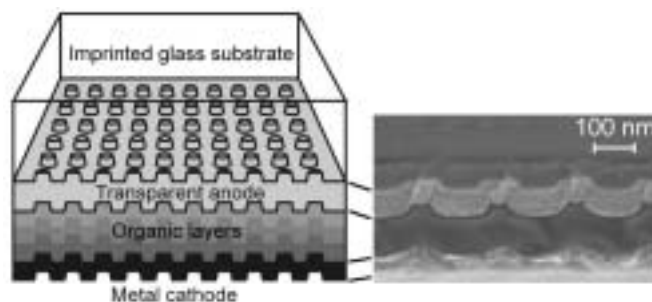


図1. フォトニック結晶有機EL素子. 左概略図、右断面SEM像

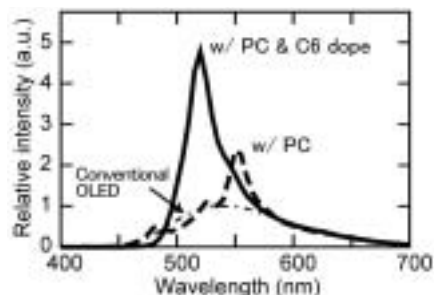


図2. フォトニック結晶有機EL素子の発光スペクトル

川原村 敏 幸（藤田教授）

「ミストCVD法とその酸化亜鉛薄膜成長への応用に関する研究」

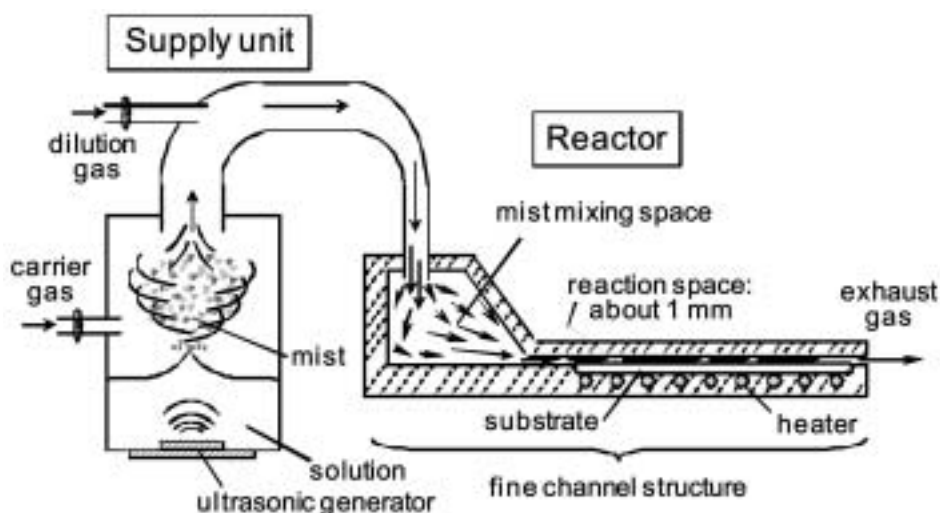
平成20年3月24日授与

地球環境に優しい持続的な社会発展に向けて、半導体の研究においても、非毒性かつ資源が豊富な元素で構成される新材料を開発し、しかもそれを安全で環境負荷の低い技術で成長するという姿勢が強く求められている。酸化物は、多くの金属元素にとって最も安定な形であり、多様な機能を持つことが知られている。またその成長においては、原料として構成元素を含む水溶液やアルコール溶液を利用でき、さらには大気中における開放系での成長の可能性がある。このような観点から、本研究では、酸化物半導体に対する環境負荷の低い成長技術としてミストCVD法の開発を図り、その応用例として酸化亜鉛（ZnO）多結晶および単結晶薄膜の成長特性と高品質化について調べた結果をまとめたものである。

成長の原料には構成元素を含む安全なもの、例えばZnOの成長には酢酸亜鉛などの水溶液またはアルコール溶液を用い、これを超音波で霧化してキャリアガスで反応部に輸送し基板上で成長させる。溶媒中の超音波伝搬、気体の衝突混合、流路中での分布、熱伝導のシミュレーション等を通じて原料の利用効率と均一性に優れた成長のための条件を見出して、成長装置を開発した。一例を図に示す。

この成長技術のポテンシャルを明らかにするため、各種ZnO薄膜の成長に応用した。ZnOは透明導電膜、薄膜トランジスタ、紫外光デバイス、光・電子・磁気機能融合デバイス等広い応用が期待され、大面積基板への低コストでの成長、高品質単結晶の作製などに強い要望が寄せられている材料である。ガラス基板上では、300～500℃でc軸配向し、100mm基板面内での厚さ分布 $\pm 3\%$ 、可視域光透過率90%以上、波長370nmに急峻な光吸収端を持ち、室温でバンド端フォトルミネセンスのみを示す高品質多結晶ZnO薄膜を実現した。Alのドーピングにより $10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 台の低い抵抗率を得て、大きな環境負荷が昨今の問題になっている酸化インジウムスズ（ITO）透明導電膜に対し、成長技術・特性の点で高い利点を与える優れた結果である。さらに、MgZnO混晶により3.3～3.75 eVの禁制帯幅制御と波長選択性を持つ紫外検出器への適応性を示した。一方、サファイア基板上での成長により、単結晶ZnO薄膜を実現して、移動度 $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を得た。この結果は、その後バッファ層の導入により、 $70 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と気相成長によるZnOとして世界的に高いレベルの値を得る成果に引き継がれた。

さらに、本技術の応用として、Al、Cu、Ga等の酸化物薄膜、混晶半導体、微粒子等幅広い酸化物材料の成長を実証し、ミストCVD法が各種酸化物材料の機能探索と応用に向けて、低い環境負荷と高品位材料成長の両面から支えることのできる有望な技術であることを示した。



洗 暢 俊 (石川教授)

「負イオン注入法によるシリコン熱酸化膜中のナノ粒子形成」

平成20年3月24日授与

半導体集積回路製造におけるスケール縮小による集積度向上の限界を超えるものとして、ナノドットデバイスの開発が望まれている。この実現にはナノ粒子（ナノドット）を極めて薄い酸化膜中に精度良く形成すること、つまり、深さ位置、分布幅、サイズ、密度などを高度に制御してナノ粒子を形成し、そして、形成したナノ粒子の形成状態を非破壊で瞬時に評価するという基本的なナノ粒子形成と評価技術が必要となる。本論文は、次世代のナノドットデバイス製造技術への応用を目指して、負イオン注入法による粒径や形成位置を制御した薄膜中でのナノ粒子製造技術とナノ粒子形成状態の非破壊評価法について研究した成果を纏めたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 光反射特性による絶縁物中のナノ粒子状態評価法

非破壊の光反射特性によるナノ粒子形成状態評価法として、ナノ粒子による表面プラズモン共鳴（SPR）吸収を利用した手法を提案し、シリコン基板上の熱酸化薄膜中にナノ粒子層が形成された3層構造モデルで、銀や金負イオン注入で厚さ50 nmの熱酸化薄膜に形成したナノ粒子の状態として、粒径、充填率（ナノ粒子を形成する原子の密度）、形成深さ位置とその分布幅などを光反射特性をもとに解析し、これを断面TEM観測により確かめて、光反射特性と3層構造モデル計算のフィッティングで精度よくナノ粒子の形成状態を評価できることを実証した。

2. 負イオン注入法によるナノ粒子の高精度制御形成法

まず、注入原子によるナノ粒子形成には、原子の凝集距離と注入による深さ分布、更には、加熱処理における熱拡散がナノ粒子の形成位置、粒径、分布状況に及ぼす影響を実験的に解明した。そして、注入分布幅制御を基に、厚さ50 nmの熱酸化薄膜への極低エネルギー注入で、図1の様に深さ数nmの薄膜表層に金ナノ粒子の単層形成を、また、凝集距離約10 nmを利用してゲルマニウムナノ粒子も深さ12 nmの膜中央部で単層に形成した（図2参照）。また、注入原子の熱拡散を利用して、界面より2 nmの膜底面近傍に銀ナノ粒子の単層形成を実現した（図3参照）。いずれの場合も粒径を6 nm程度とほぼ一定粒径のナノ粒子が得られており、負イオン注入法と熱処理により、ナノ粒子の粒径や形成深さ位置などを高精度で制御し得るナノ粒子製造技術を開発した。

3. 負イオン注入形成したナノ粒子含有絶縁薄膜の電気的特性

負イオン注入で形成した銀やゲルマニウムのナノ粒子を含有する厚さ25 nmの熱酸化薄膜の表裏にアルミニウム電極を蒸着して、容量-電圧特性を測定した結果、ヒステリシス特性を観測し、ナノ粒子の電子保持能力を証明した。更に、銀負イオン注入した厚さ50 nmの熱酸化膜やゲルマニウム負イオン注入した厚さ25 nmの熱酸化膜を700℃の熱処理後に、その電流-電圧特性を測定して、室温でクーロン遮蔽によるクーロン階段特性を得た。これより、ナノ粒子が関与する電気的特性は次世代ナノドットメモリーデバイスとして応用できる可能性を示した。

以上、本論文は、負イオン注入法によるシリコン熱酸化膜中のナノ粒子形成に関して、負イオン注入法を用いてサイズや深さを制御した高精度ナノ粒子形成法と光反射特性を利用した非破壊でのナノ粒子形成状態評価法を提案するものであり、形成したナノ粒子は電子保持能力や室温下のクーロン遮蔽を確認した。今後、次世代の半導体としてナノ構造による単電子効果を利用したデバイス開発に発展に寄与するものと期待される。

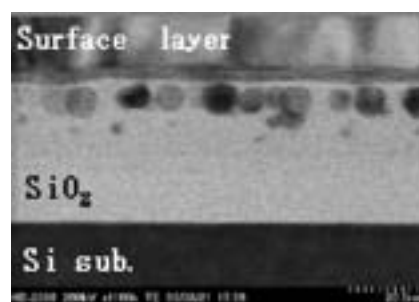


図1. SiO₂薄膜表層に形成した単層金ナノ粒子 (Au⁺: 1 keV, 900℃アニール)

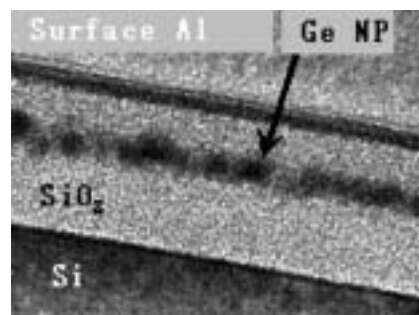


図2. SiO₂薄中央に形成した単層Geナノ粒子 (Ge⁻: 10 keV, 700℃アニール)

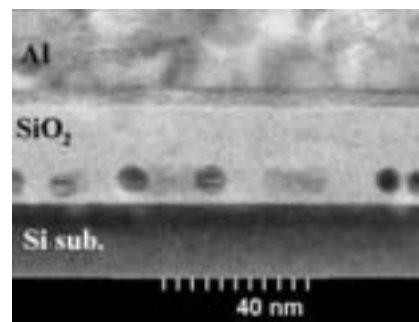


図3. SiO₂薄膜底面に形成した単層銀ナノ粒子 (Ag⁻: 10 keV, 700℃アニール)

鄧 新 宇（松山教授）

An English Text Generation System for Intermediate Non-native Speakers based on Corpus Analysis

（コーパス分析に基づいた中級ノンネイティブ向け英語文章生成システム）

平成20年3月24日学位授与

本研究では、日本や中国の高等学校において使われている英語教科書に載せられた英文のコーパスを構築し、文章中の接続詞や句読点の配置、順序に関する特徴分析に基づいて、英語中級ノンネイティブ（英語を母語としないが英語能力が中級レベルの人）にとって理解しやすい構造を持った英語文章を生成するシステムを開発し、その有効性を実験的に示した。

英語が国際標準語として普及するにつれ、世界規模で見た場合、ノンネイティブの人口がネイティブの倍ほどにも達し、ノンネイティブにとって理解しやすい英語文章を生成することの重要性が高まっている。文章の読み易さを評価する手法については、様々な観点からの研究がこれまでに行われて来たが、本研究では、文章の修辞構造を表す木構造から、接続詞や句読点で文が結ばれた文章を生成するという、文章構造生成レベルに焦点を当ててノンネイティブに適した英語文章生成システムを開発した。

まず、ノンネイティブ向け英語文章として収集した40万語からなるテキストに対して、修辞構造を付加するためのアノテーション法を考え、出現頻度の高い6種類の接続詞および句読点の配置を規定すると考えられる特徴として、文章の全体的構造に係る8特徴、埋め込み構造に係る10特徴を定め、これらの特徴の有効性を決定木学習システムC4.5およびサポートベクトルマシンを使った学習、分類実験によって評価した。

次に、6種類の接続詞および句読点のそれぞれに対して、修辞構造が与えられた場合、どのような特徴によってその配置が定められるのかをコーパスに基づいて分析し、各接続詞、句読点ごとに文章中での配置の適切性、すなわちノンネイティブにとっての文章の読み易さを表すランク付けルールを導出した。得られたランク付けルールに基づいて設計された評価関数を遺伝子の適合度とする遺伝的アルゴリズムを開発し、与えられた修辞構造からノンネイティブが理解しやすい文章を生成するシステムを開発した。

最後に、システムで生成された文章の読み易さを、システムが生成した文章と元のコーパス中の文章との一致性を評価する方法および、システムが生成した文章が人間にとって読み易いか否かを主観的アンケート調査によって評価する方法の2つの方法で評価し、いずれの評価法においても、システムが生成した文章がノンネイティブにとって読み易いものとなっていることを実験的に明らかにした。

以上本研究では、数億人にも上るといわれる英語中級ノンネイティブにとって読み易い英語文章を生成することを目的として、ノンネイティブ向け英文コーパスの構築とその特徴分析、その結果に基づいた文章生成システムの開発を行い、実験的にその有効性を示した。

Kucera Stepan (吉田教授)

「Cross-layer Design of Resource Management in Wireless Networks with Distributed Control」

平成20年 3 月 24 日 授与

FIELD OF RESEARCH

A well-known application of wireless technology with world-wide success consists in cellular networks, which enable the use of portable phones. Cellular networks are based on dividing a geographical network area into so-called “cells”. Each cell contains an immobile cell management unit that communicates with nearby mobile terminals and carries out *centralized* network control tasks within the cell.

However, such a network architecture uses (i) simple one-hop routing of data from the mobile users to single (immobile) access point; (ii) lacks peer-to-peer modes and adaptivity features and (iii) contains an immobile (cellular) infrastructure. Therefore, it is expensive, slowly deployable and vulnerable. These well-known facts result in limited potential to enable modern data applications beyond the elementary voice/messaging applications.

In our research, we have been engaged in theoretical analysis and practical development of a more advanced technology for distributed wireless networking, which allows independent mobile users to (i) self-configure and form a network *without* the aid of any established infrastructure; (ii) handle the necessary control and networking tasks *by themselves* using distributed control algorithms; (iii) communicate efficiently with relatively far parties by *multihop connections*, in which intermediate nodes forward data packets toward their final destination.

Such a design concept allows rapid deployment and reconfiguration of wireless networks and assures their high robustness in virtue of distributivity, node redundancy and the lack of single points of failure.

ACHIEVED RESULTS

Using advanced mathematical tools of game-theory, Lyapunov stability analysis and nonlinear system control, we have developed an extensive information-theory framework, which provides for (i) theoretical analysis of fundamental mechanisms for enabling distributed wireless networking and (ii) their practical implementation via mutually optimized algorithms. Especially, we have proposed and mathematically proven the convergence of several advanced algorithms, which implement fundamental network mechanisms such as transmit power control and transmission scheduling in a fully distributed and asynchronous way [1].

The proposed algorithms search effectively for optimum equilibrium transmit powers and rates based on the equilibrium concept of the John Nash, Nobel Price Laureate (1994). Moreover, the algorithms simultaneously track down networking conditions so that network users can adapt to their variations. Extensive numerical simulations prove that the proposed architecture convincingly outperforms comparable schemes.

APPLICATIONS

In terms of specific applications, our results are currently used to technologically implement the so-called “2-Dimensional communications” project at the *National Institute of Information and Communications Technology* (NICT). This project focuses on developing a new form of room-size networks, whose independent users communicate with each other by microwave transmissions sent over a very thin planar sheet, representing the communication medium.

In this way, a large number of sensor chips can be interconnected without electrical contacts or wiring, whereby the simplicity of this system allows the communication sheet to be placed on walls, desks, floors, and even clothing.

Such a design enables, for example, the interconnection of a desktop computer with a mouse and keyboard by simply placing them on a table with a special sheet cover using the “just put on and use” concept (see Fig. 2). Individual computer parts can be moved or replaced, whereby the sheet substitutes all wires and provides for power supplies as well.

REFERENCES

[1] Štěpán Kučera, Sonia Aïssa, Koji Yamamoto, and Susumu Yoshida, “Asynchronous distributed power and rate control in ad hoc networks: A game-theoretic approach,” *IEEE Transactions on Wireless Communications (IEEE TWC)*, Jul. 2008.

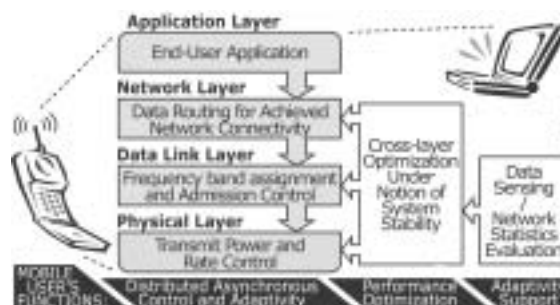


Fig.1. Schematic illustration of the proposed network architecture - mobile terminals are implemented using distributed and adaptive algorithms in four system layers. Original cross-layer optimization guarantees system stability.

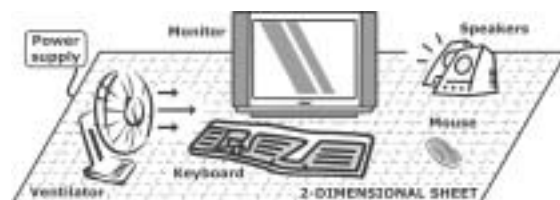


Fig.2. Application example of the proposed networking technology - user-friendly setup of a desktop computer. A thin conductive sheet substitutes classical wires and serves both as a communication medium and power supply.

浅井孝浩（吉田教授）

「Spatiotemporal Signal Processing for Highly-Efficient Broadband Wireless Communications」（高能率広帯域無線通信のための時空間信号処理）

平成20年3月24日授与

無線セルラネットワーク型の移動体無線通信サービスは近年では加入者数の増加は収まりつつある一方で、高速データ伝送に対する需要はデータ通信における定額料金制度の導入も一助となり、増加の一途をたどっている。限られた周波数資源において高い周波数利用効率での運用が求められる無線通信において、高速データ伝送を実現するためには建物などによって反射して受信されるマルチパス遅延波への対策が必須であり、特に高速データ伝送に向けて信号帯域を拡大するほど、シングルキャリア系の無線通信方式におけるマルチパス対策技術の重要性は大きくなる。さらに、セルラ型の無線ネットワークにおいては、同一周波数を利用する隣接セルからの干渉波対策技術も非常に重要となる。

そこで本論文では、セルラ型の無線ネットワークにおける高速データ伝送及び周波数の有効利用を目的とした時間・空間信号処理技術の確立に向けて、その前半では、①等化器を用いた時間領域における信号処理と、②複数アンテナを有するアダプティブアレーを用いた空間領域における信号処理、を組合せた時間・空間等化器について、その実用性の向上及び検証を目的とした提案・検討を行い、後半では周波数の使用効率向上を実現する新しい手法として近年注目を集めている、時間・空間における一時的な空き周波数を再利用するための信号処理技術について検討を行った。

図1に本検討で用いた時間・空間等化器におけるビームパターン生成の概念図を示す。複数アンテナを用いた空間領域における信号処理（Spatial Equalizer）により、長い遅延時間差を有するマルチパス遅延成分と干渉成分の受信利得を低減することができ、時間領域における信号処理（Temporal Equalizer）により、短い遅延時間差を有するマルチパス遅延成分を合成して利用することができるため、受信信号品質の改善が可能となる。図2に受信信号の到来方向推定結果と、生成されたビームパターンの屋外実験結果の一例を示す。到来方向推定結果（図2（a））より、約 -15° の方向から最大受信電力を有する直接波が受信されていることに加え、約 20° 、 10° の方向から強い電力を有する不要波（遅延波）が受信されていることがわかる。この到来方向推定結果に基づいて、本検討で提案したビーム／マルチ同時ステアリング型の指向性生成アルゴリズムを用いることにより、直接波方向に対して最大の利得を有すると同時に、不要波方向の利得を低く抑えるビームパターンの生成が可能となる（図2（b））。

さらに本論文では、時間・空間領域での信号処理を行う上で必要となる伝搬路状態の推定を、並列パイプライン処理により効率的に実現可能なシストリックアレー構成について検討を行い、量子化誤差等を考慮した実用的な観点においても十分良好な推定精度を得ることが可能であることを明らかにした。また、CDMA方式における時間領域での信号処理方法としてマルチパス干渉キャンセラの検討を行い、理想環境と実環境における特性改善効果の差異を明らかにするとともに、実環境下においても高速データ伝送を実現する上で有効であることを明らかにした。

本論文の最後では、時間・空間の一時的な空き周波数を再利用する信号処理技術についての検討も行っているが、これらを含めた時間的・空間的な信号処理技術の追求が、限られた周波数資源を有効に利用する上で、今後も引き続き重要となると考えられる。

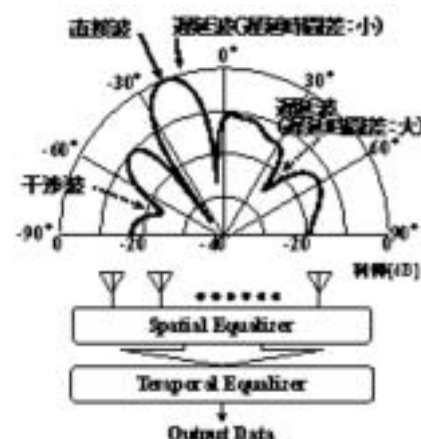


図1．時間・空間等化器

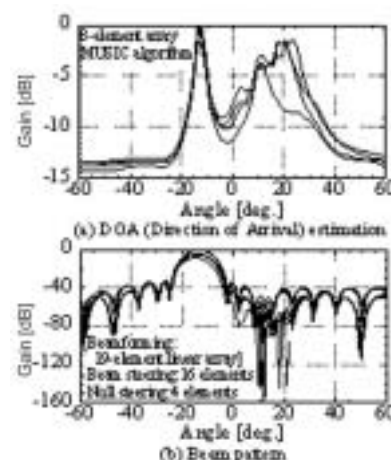


図2．到来方向推定結果とビームパターン

植 田 哲 郎 (吉田教授)

「MAC and Routing Protocols for Wireless Ad Hoc Networks Using Directional Antenna」

(指向性アンテナを用いた無線アドホックネットワークにおけるMAC及びルーティングプロトコルに関する研究 ～アンビエント社会・エコ社会に向けて～)

平成20年3月24日授与

近年、軍事通信や車車間通信などでの応用を中心としたアドホックネットワークに関する研究が行われている。指向性アンテナは、干渉低減により同時通信数を増加させスループットを向上させることができる。本論文では、無線アドホックネットワークという分散ネットワークにおいて各ノードが自律的に隣接ノードの方向・通信状態を活用することにより効率的な同時通信をマルチホップにおいて実現するためのメディアアクセス制御及びルーティングプロトコルを提案するとともに、テストベッドによる評価を行ったものであり、得られた主な研究成果は次の通りである。

(1) 提案する隣接ノードの方向情報更新手法により従来方式に比べオーバーヘッドを85%以上削減
(2) 上記隣接ノードの方向情報更新手法と提案指向性メディアアクセス制御プロトコルを用いるとスループットは無指向性メディアアクセスプロトコルに比べて約1.8倍に向上。
(3) 上記隣接ノードの方向情報更新手法と提案指向性メディアアクセス制御プロトコルと更に提案指向性ルーティングプロトコルを用いるとスループットは無指向性メディアアクセスプロトコルを用いたAODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) ルーティングプロトコルに比べ約3倍から5倍に向上。
(4) 上記隣接ノードの方向情報更新手法と提案指向性メディアアクセス制御プロトコルを用い、更に提案指向性ルーティングプロトコルをQoSルーティングとして使用すると、低優先度フローのスループットを劣化させずに高優先度フローのスループットを約2倍以上改善。
(5) テストベッド評価により、適切なキャリアセンスレベル設定により、ビーム幅が広い指向性アンテナを用いても同時通信が可能。

以上、本論文は、今後のユビキタスネットワーク社会において重要な役割を担うと期待される無線アドホックネットワークにおいて、指向性アンテナを用いたMACプロトコル及びルーティングプロトコルを提案しその改善効果を明らかにしたものであり、ユーザーにカスタマイズした適用と指向性アンテナ活用による消費電力削減が可能であり、「今だけ、ここだけ、あなただけ」のサービスを行うアンビエント社会とエコ社会実現に向け、学術上、実用上寄与するところが少なくない。

井 上 隆（吉田教授）

「ダイバーシチ合成の理論解析法とアレーアンテナ信号処理技術に関する研究」

平成20年3月24日授与

携帯電話サービスは、無線通信技術の飛躍的な進歩に支えられ、国内外において急速に普及した。日本国内における携帯電話サービスの契約者数は、既に1億を超えている。現在の携帯電話サービスでは、符号分割多元接続（CDMA）方式をベースとする第3世代移動通信方式（IMT-2000）が主に用いられている。第2世代移動通信方式までは音声（電話）が主なサービスであったのに対して、第3世代方式では、広帯域通信が可能となり、画像や音楽配信等のデータ通信の割合も着実に増えている。近い将来に導入が検討されている3.9世代システムやその後のIMT-Advancedと呼ばれる第4世代システムでは、高速広帯域データ通信が移動通信サービスの主流になるものと予想される。

移動通信は無線伝送路を用いる通信であり、有限な周波数帯域を効率的に使用しつつ、高品質の伝送を如何に実現するかが鍵となる。携帯電話基地局と携帯端末間の無線伝送路は、建物等で遮られた見通し外通信路である場合が殆どである。送信局から送信された電波は、反射や回折を繰り返しながら、複数の経路を通して受信局に到達し、個々の経路は携帯端末の移動に伴って時々刻々と変化する。すなわち、受信信号のレベルや位相は時間とともに変動する。さらに、広帯域信号の場合は、複数経路間の時間差によって信号歪みを生じる。よって、高品質な広帯域伝送を実現するには、使用する周波数帯域での電波伝搬路の特性を正しく把握するとともに、伝搬路で生じる変動や信号歪みを克服し、周波数利用効率の更なる改善を図る無線技術の確立が重要となる。

本論文は、上記の背景の下、陸上移動通信における広帯域信号のフェージング変動に関する理論解析法、マルチパスフェージング伝搬路のダイバーシチ合成に関する理論解析法、ならびに、CDMA移動通信基地局用スマートアンテナの技術に関する研究成果をとりまとめた。

まず、広帯域信号のフェージング変動特性については、ダイバーシチ合成の理論解析法を応用し、レイリーフェージング環境における広帯域信号の瞬時レベル変動の確率分布の解析手法を提案した。同手法を用いて、様々な遅延プロファイルに対する瞬時レベル変動特性を調べ、各モデルに対するフェージングの深さを比較した。

次に、ダイバーシチ合成の理論解析については、角度広がりや遅延広がりのあるレイリーフェージング環境における空間領域、時間領域および2D-RAKE合成後の信号品質の理論検討を行い、マルチパス波の角度広がりやビーム幅の関係を明らかにした。また、同解析法を改良し、仰角ライズフェージング伝搬路にも適用可能な理論解析法を提案した。同解析法により、アンテナブランチ数2および4の直線アレーによるスペースダイバーシチを中心とする解析を行った。なお、上記解析手法は固有値解析をベースとし、適用可能な範囲は固有値の値が互いに異なる場合に限定されていた。本論文では、値の等しい固有値が複数組存在する場合の算出法を導出した。

そして、CDMA基地局のアレーアンテナ信号処理技術については、アレーアンテナの素子間隔を半波長よりも広げて、狭いビームのグレーティングローブで空間を張る方式を提案し、上り回線の同時通信ユーザ数（システム容量）特性を計算機シミュレーションにより評価した。次に、IMT-2000基地局テストベッドにアレーアンテナ信号処理機能を実装し、上り回線のビーム制御特性をフィールド実験により評価した。所望移動局の方向にビームが自動追尾され移動局の送信電力が低減されることを確認し、上り回線のシステム容量増加に寄与できることを示した。

清水 洋（高橋教授）

**A Study on Bandwidth Guaranteed Networks for Multimedia Services Integration
（マルチメディアサービス統合のための帯域保証ネットワークの研究）**

平成20年3月24日

本論文は、デジタルPBXの複合端末の研究開発から始まり分散制御環境でオンデマンドベースでの帯域保証仮想パスネットワークのアーキテクチャ研究まで、高速デジタル化・パケット統合化に対応した帯域保証ネットワークに関するものである。

前半ではサービス統合LANにつき研究した。PBX機能（2B+D：ISDN）とLAN機能（Pチャンネル：Ethernet）とを多重したIVDLAN（音声・データ統合LAN）は、ハブノードにおいてコネクションレス型のパケットスイッチを行うというアーキテクチャを有し、802.9委員会においてIEEE標準として採択された。端末間においてリンク・バイ・リンクでのバッファ間バックプレッシャ型フロー制御をMAC層に規定し、パケット粉失の無い通信を提供している。バックボーンネットワークとなる高速パケットリングネットワークの研究においては、分散環境で多元トラヒックに対する帯域予約と帯域保証とを実現するアーキテクチャを提案・検証している。加入者線として光ファイバを用いたI²VD（Integrated Image, Video & Data）LANは、IVDLANにImage/Video用のHPチャンネルを加えたものである。HPチャンネル通信では、加入者線はもとよりバックボーンリングネットワークにおいても帯域保証とバックプレッシャ機能により高いパケット通信品質が保証される。高速通信プロトコルにおいては、Pチャンネルを用いた制御通信により中継資源（帯域及びバッファ）の予約を行い、画像データ転送用のHPチャンネルでは画像フレームメモリ内で画素単位の選択的再送制御を実施している。

後半では広域パスネットワークにつき研究を行った。H4（150Mbps）チャンネルを単位とするクロスコネクトネットワークにおいては、同期転送モード（STM）と非同期転送モード（ATM）の両方の構造を併せ持つマルチフレーム構造のセル転送方式を提案・検証を行った。本転送制御は、H4クロスコネクト機能の上位層でのセル単位のAdd/Drop機能として規定される。CBRサービスに対し、所要バッファサイズを削減でき、ジッタ変動量も小さく抑えることができる。次に、メトロリングネットワーク向けに標準化されたIEEE802.17 RPR（Resilient Packet Ring）プロトコルの広域Ethernetへの適用を研究した。VLANタグをラベル情報として用い二重論理リングを構成し、障害時におけるVLANタグのビット制御により、Spatial Reuse機能、Wrapping機能、Steering機能が提供される。これにより、物理的にリングネットワークの形状を有していないネットワークにおいてもVLAN制御により高信頼化・高能率利用をはかることができる。更に、MPLSに代表される仮想パスネットワークの分散制御アルゴリズムの研究を行った。制御プレーン上に固定帯域（数十Mbps程度）のGranularity Pathを規定し、帯域予約と経路制御とを行う。転送プレーン上の仮想パスは経路が同じGranularity Pathの集合体としてマッピングされ最適経路が設定される。本制御により、Granularity Pathを粒度として帯域幅の動的制御及び経路制御による負荷分散の最適化が統一的に実現される。

サービス統合ネットワーク及び帯域保証技術は、次世代ネットワークにおいても、依然重要課題である。付加的有料サービスとして「帯域保証」は通信事業者にとって重要なテーマであり、研究開発する側にとっても常にエキサイティングな研究テーマである。有線ネットワークで培われたパケット対応の帯域制御は、今後、無線ネットワーク向けに水平展開されるであろう。パス制御に関しても、無線／有線アクセスが結合されたオーバーレイ的な仮想パスがその対象となろう。

嶋 吉 隆 夫（松田教授）

「細胞モデルの構築支援および生体機能シミュレーションの開発環境に関する研究」

平成20年3月24日授与

生体機能のメカニズムを解明することは、生命科学の発展のみならず医療や創薬への応用にとっても重要であり、その目的で、細胞・生体機能モデルの開発およびモデルを用いたシミュレーション研究が行われている。一方、生体機能に関する詳細な解析を行うためにはモデルの精密化かつ高機能化が必要不可欠であるが、そのようなモデルおよびシミュレータは複雑にならざるを得ないため、その開発と利用が困難になるという問題点がある。本研究では、細胞および生体機能のモデルの開発やシミュレーションを容易に行うことを目指して、複雑な細胞モデルの構築を支援する手法を提案・実装し、また生体機能シミュレーションの開発環境を設計・実装した。

細胞モデルは一般的に複数の機能モデルを統合して構築される。精密な細胞モデルは複雑なモデル構造を持つが、その編集には多くの煩雑な作業が必要とされ編集誤りを起こしやすいという問題がある。次に、細胞生理学実験のシミュレーションは、実験条件や手順からなる実験プロトコルの細胞モデルに対する適用をシミュレーションすることであり、計算を実行するためには、細胞モデルと実験プロトコルの組み合わせに対応する微分代数方程式を作成し、与えられた計算条件に基づいて計算手順を解析する必要がある。細胞モデルが複雑化すると、この作業は非常に困難になる。本研究では、まず、細胞モデルの構造のための記述形式と、細胞モデルに関する細胞モデルオントロジーを提案し、それらを用いて細胞モデル構造の編集作業を支援する手法を提案した。また、オントロジーを用いることで特定モデルに依存せず汎用的に実験プロトコルが記述可能な記述言語PEPMLを提案し、実験プロトコルをモデルに対する境界条件として解釈する細胞生理学実験シミュレーション手法を提案した。さらに、グラフ理論に基づいた連立方程式の構造解析手法の応用により、モデルに対する計算可能な計算条件の設定を支援し、与えられた計算条件に応じて方程式を解析・最適化する手法を提案した。これらの提案手法により、細胞モデルの構築およびシミュレーション実行が簡便化されることを、実際の細胞モデルを用いた実験により確認している。

一方、詳細な生体機能の解析のためには複数の現象を連成計算するシミュレーションが必要であるが、それには大規模で複雑なソフトウェアが必要とされるため、従来はその実現のために多大な開発コストを要した。そこで本研究では、複数現象の連成解析を扱う生体機能シミュレータシステムの簡便な構築を可能にするシステム構築プラットフォームとして、DynaBioSプラットフォームを開発した。DynaBioSプラットフォームは、個別の現象を扱うサブシミュレータを独立したソフトウェアコンポーネントとして実装し、現象間の相互作用をコンポーネント間のイベントメッセージ交換として扱うことで、生体機能を扱うシミュレーションシステムを実現する。多数のシミュレータシステムを実装することにより、開発効率向上に対する有効性を確認した。また、実験により計算効率に対するシステムオーバヘッドが十分に小さいものであることを確認している。



図1 記述言語とオントロジーを用いた細胞モデル構築支援手法

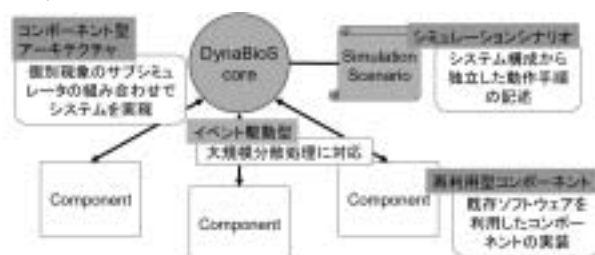


図2 生体機能シミュレータプラットフォームDynaBioS

篠原 尋 史 (小野寺教授)

「ばらつきを考慮した微細化SRAMのメモリセル最適化と駆動法に関する研究」

平成20年3月24日授与

SRAM (Static Random Access Memory) は、LSIの一製品分野であるとともに、近年はMPUやSoCの内蔵メモリとしての重要性が高まっている。各種プロセッサLSIでは、チップに搭載されるトランジスタの多くはSRAMで占められている。またSRAMを題材にプロセス開発や歩留まり改善がなされていて、技術の牽引役でもある。一方、最小線幅90nm以下に微細化が進んだナノメートル世代では、トランジスタの特性ばらつきがLSIの性能阻害要因となっていて、ばらつき考慮設計が求められている。とりわけSRAMでは、メモリセルを構成するトランジスタの特性にばらつきがあると読み出し安定性や書き込みマージンといった基本特性が劣化するため、ランダムばらつき^{注)}が微細化による面積縮小の重大な障害となっている。本研究では、この課題に対して、メモリセルの最適化とメモリセル駆動回路改良の二つ方面から対策を検討した。

メモリセルの最適化では、まず設計の見通しを良くするため、CMOSメモリセルの安定性指標SNM (Static Noise Margin) の解析式を導出した。図1に示すとおり、メモリセルを構成するインバータ (HC_L , HC_R) の伝達特性を特徴点 (P_1 - P_7) を用いて表現することにより、伝達特性の内接正方形で定義されるSNMを解析的に求めることに成功した。次に、ワーストベクトル法と呼ぶばらつきによるビット不良率の高精度計算方法を開発した。更に、それらを用いてメモリセルの最適化指針を明らかにし、製造性にも配慮したストレート形メモリセルを提案した。

メモリセル駆動方式では、まず $2\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m}$ 設計基準のSRAMにおける高性能化と高機能化のための駆動方式の改良を明らかにし、これをばらつき対策に応用した。読み出し安定性に対しては、図2に示した読み出しアシスト回路を提案し、ワード線 (WL) 電圧を低下させることにより、SNMを増大した。また、同図に示した書き込みアシスト回路を提案し、寄生容量の電荷再配分でメモリセル電圧 (V_{DDM}) を低下させることにより、書き込みマージンを向上させた。

最後にこれらの提案を65nmCMOSの8MビットSRAMに適用した。この設計基準では面積が最小水準にある $0.494\ \mu\text{m}^2$ のメモリセルで、予想通りのばらつき影響抑制と歩留まり改善をSiで確認した。

以上、本研究では、ナノメートル世代の微細化SRAMにおけるばらつきの問題に対し、メモリセルの最適化とメモリセル駆動回路改良の方面から対策を提案した。そしてSRAMを試作評価し、これらの有効性ならびに微細化による面積縮小のトレンドの維持が可能であることを実証した。

注) トランジスタ特性調整用に注入される不純物の揺らぎ (Random Dopant Fluctuation) を主原因とする閾値電圧 (V_{th}) のランダムなばらつき。その分散はゲート面積縮小に反比例して増大することが知られている。

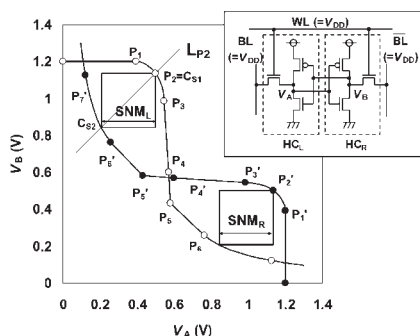


図1 SRAMメモリセルと安定性指標SNM

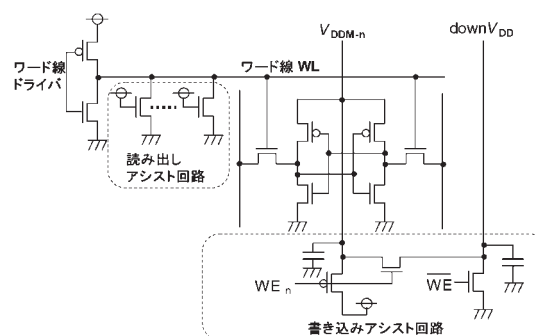


図2 メモリセル駆動回路

田 中 晶（吉田教授）

「Study on Design Issues towards Highly Efficient Telecommunication Networks」
（高能率通信ネットワークに向けた設計課題に関する研究）

平成20年3月24日授与

ネットワークは、多地点間通信・仮想専用網・フリーダイヤル等のサービスの導入、インターネット、携帯電話等の無線技術の発展と共に、人間活動や社会とより密接に関わるようになった。そこで、高度な要求と弛まなく変化する環境に 대응可能な高能率通信ネットワーク実現のための4つの技術課題を見出し、理論的研究のみならず全国規模ネットワーク導入を通じた実用上の評価も含めて統合的に解決した。

通信サービスにおいて、柔軟な会話形態をネットワーク上で実現するための有効な手段は、電話・テレビ会議等の多地点間通信である。しかし、対地数に応じた多量のネットワーク資源（帯域や複製・加算機能）が必要になる。そこで、実際のネットワークの構成と接続遅延等の条件に基づき、分岐装置の配置や通信参加者の増減・移動にも対応可能な、資源の使用量を最小化する最適な経路選択法¹⁾を導いた。

ネットワーク制御については、物理的に情報伝達を行う層と通信サービス制御を行う高機能層で構成する、インテリジェントネットワークの研究・開発・導入に携わった。高機能層で、接続・課金・統計・ユーザ管理等のサービス機能を論理化して保持し、共通／固有機能を組み合わせ、さらに処理手順を生成・実行することにより、ユーザ等によるリアルタイムのサービス仕様設定や状況照会が可能になった²⁾。また、国際標準に関する提案、ICカード技術等のユーザの側面からのネットワーク設計法を示した。

通信装置については、主たる情報生成源であるプロセッサの性能向上に伴う通信量の急増、マルチメディア／多対地／分散化に対応するため、並列処理等の効率化技術によりプロセッサ相互間の情報共有を基にした分散共有メモリをネットワークに適用し、データ規模に依存しない経済的な高速通信システムを実現した³⁾。実測により世界水準の効果を示し、全国規模ネットワークに適用可能な拡張性と優先度制御を用いたセンサ網への適用効果とを実証し、さらに、リアルタイム遠隔バックアップ方式へ応用した。

無線技術は高い自在性をもたらす一方、携帯・無線LANの急速な普及に伴い、基地局（アクセスポイント）が多数必要となる。そこでエネルギーと費用の変換方法を明らかにした上で、通信品質を維持しつつ基地局の設置密度即ち費用がマルチホップによりどの程度縮小可能かを導く計算方法を定式化し、解法を示した⁴⁾。具体的事例に対し数値計算とシミュレーションにより効果を裏付け、国際規格に

準じたより適切な基地局配置を得る優先度制御、マルチホップと多地点間通信の相乗効果を得る提案も示した。

このように、ネットワーク資源の利用、通信サービス制御・管理／開発・導入、速度・帯域・品質、固定網及びマルチホップ無線技術、の多角的な効率化・最適化によって、生活空間における日常の対話形態を、遠隔の全ての人や装置間の通信において実現する高能率ネットワークの設計技術を明らかにした。

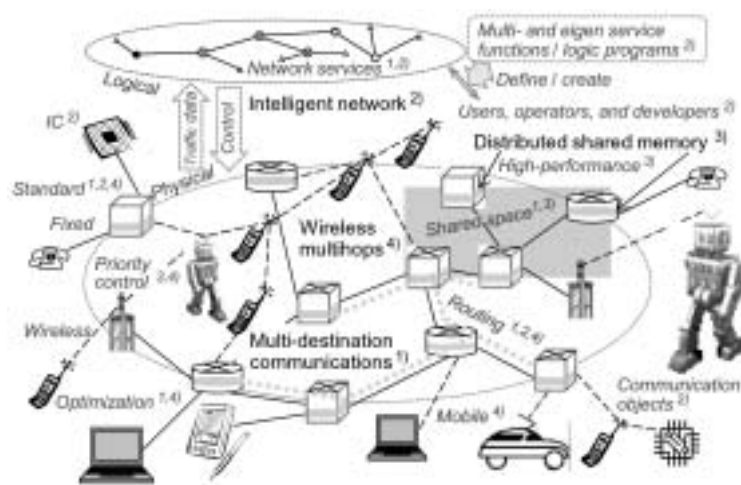


Fig. Towards highly efficient telecommunication networks

田 原 志 浩（佐藤教授）

「衛星通信およびレーダ用アレーアンテナ給電回路の低損失化に関する研究」

平成20年3月24日授与

近年、衛星通信の大容量化やレーダの高性能化を実現するアンテナとして、素子アンテナと呼ばれる小さなアンテナを複数個並べて構成されるアレーアンテナの適用が広がっている。システム消費電力低減の観点からアレーアンテナに対しては高効率化が強く求められており、アレーアンテナを構成する各素子アンテナへ高周波信号を供給する給電回路（図1）の低損失化が、技術的に大きな課題の一つである。本研究は、アレーアンテナ給電回路を構成するビーム形成回路（電力分配）や増幅器出力合成回路（電力合成）の低損失化を目的として行ったものである。

まず、抵抗膜整合回路を設けた分岐形の電力分配器を提案した。基板上の平面回路で構成された電力分配器においてアイソレーション抵抗を抵抗膜で形成する場合、抵抗膜の寄生リアクタンスによって損失が増加するという問題がある。そこで、抵抗膜を損失性の伝送線路として表すことにより抵抗膜が有する寄生リアクタンスを明らかにし、この寄生リアクタンスを打ち消すような整合回路の設計式を導出した。また、Ku帯における試作評価結果からその有効性を確認した。

次に、広帯域な特性を有するテーパ形電力分配器に関して、テーパ形線路間に設ける抵抗膜をストリップ状にすることにより、抵抗膜における損失を低減する電力分配器を提案した。非対称な不等電力分配の場合および3分配の場合について、等価回路とそれを用いた設計方法を示した。C帯からKu帯にかけての広帯域な帯域において設計した例を示し、試作評価結果からその有効性を示した。

また、サスペンデッド線路方向性結合器を用いた合成回路を提案した。低損失なサスペンデッド線路を用いて構成した結合線路の各端部に並列容量を装荷し、結合線路の伝送モード間の位相速度差を小さくすることにより結合器の方向性を改善し、小形・低損失な電力合成回路を実現した。S帯における試作評価結果から低損失な特性が得られることを確認した。

最後に、任意の高調波を抑圧できる集中定数90度ハイブリッド結合器を提案した。高調波帯域において共振する共振回路を付加することで、基本波に対しては電力合成の特性を有しながら所望の高調波を抑圧することを可能とした。本ハイブリッド結合器は、大型大気レーダの送受信モジュールに適用され、高調波フィルタ回路が不要となったことで、モジュールの低消費電力化に大きく貢献している。

以上、本研究ではアレーアンテナ給電回路を構成するマイクロ波電力分配器や方向性結合器に関して、損失低減のための新たな回路構成を提案し、試作評価によりその有効性を示した。

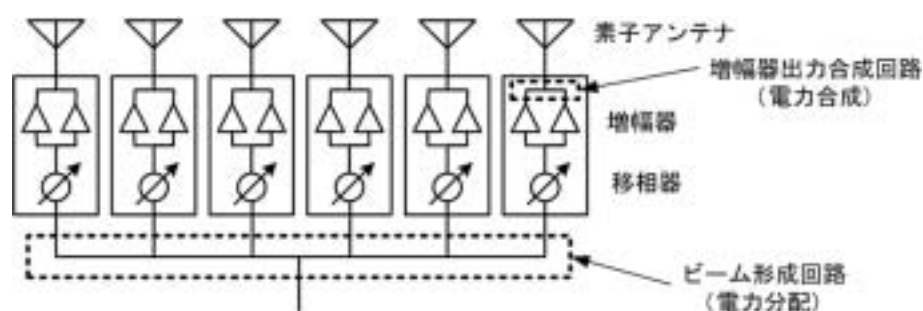


図1 アクティブフェーズドアレーアンテナの構成例

八 木 将 計 (和田教授)

Analysis of Nonlinear Oscillations Using Computer Algebra

(計算機代数を用いた非線形振動の解析)

平成20年 5 月 23 日 授与

1 研究内容

本研究では、従来、数値シミュレーションで解析されてきた非線形振動を、計算機代数を用いることで代数的に解析する方法を提案した。

非線形振動現象の多くは、高調波や分数調波の発生、同期現象、非周期振動の発生などの非線形現象を伴う。それら非線形現象の定性的解析のため、摂動法やハーモニックバランス (HB) 法といった近似解法が開発され、コンピュータによる数値シミュレーションの発達により、急速に発展してきた。特に、HB法は、非線形振動を低周波成分のみで近似することで、周波数領域におけるシミュレーションを可能とするため、大域的パラメータ空間におけるシステムパラメータに対する振動の様子である分岐図の解析に応用される。しかし、数値シミュレーションは、パラメータを固定してシステム方程式を解く必要があるため、HB法における分岐図のような代数曲線が、数値の集合で表現されることになり、パラメータと振動の代数関係の明確化を困難にする。

一方、この数値シミュレーションの問題点を解決する方法として、計算機代数という分野が近年発達してきている。この計算機代数は、パラメータや変数をシンボリックに含む演算を可能とするため、上述のような数値の集合を文字として表現できる。この計算機代数の分野の中でも、グレブナ基底をはじめとするイデアル理論が注目されている。イデアルとは、多項式方程式の変形で得られる等価な方程式の無限集合であり、多項式方程式の一般化であるといえる。このイデアルの標準基底であるグレブナ基底は、変数消去、多項式方程式の三角化、イデアルの因数分解に対応するイデアル分解を可能にし、その計算アルゴリズムは、Mathematica, Maple, Risa/Asir, Singular, Macaulay2 などの計算機代数システムに組み込まれている。このように、数値シミュレーションにはない特徴をもつグレブナ基底であるが、その計算アルゴリズムは、非常に膨大なメモリを要求するため、応用研究が制限される問題がある。

本研究では、グレブナ基底をはじめとするイデアル理論を非線形振動現象の解析に応用することで、数値シミュレーションでは明確化困難な大域的パラメータ空間における代数的構造を明らかにした。具体的には、HB法における分岐図の分解方法を提案した。この分岐図の分解は、非線形振動のモード分解に対応しており、分岐点を分解された分岐図の交点で表現するという代数的構造を明確にする。本研究では、システムがもつ対称性に基づくイデアル商を用いる効率的な分岐図の分解方法を示した。

また、グレブナ基底の変数消去に基づく変数変換を用いることで、HB法における分岐図を縮約し、所望の物理量を抽出する方法を提案した。さらに、従来は数値の集合で表現するしかなかった、HB法における精度保証付き分岐図を代数的に表現する方法を提案した。

2 感想

本研究は、上述のように、従来の数値シミュレーションと異なる観点で、イデアル理論を非線形振動解析の分野に応用したものである。そのため、両分野を把握する必要があり、その点では苦労したが、新しい分野の開拓という所に非常にやりがいがあった。今後のコンピュータ技術と、計算機代数の発展により、グレブナ基底を含むイデアル理論に基づく本研究が、非線形振動現象の解析の分野において、重要になることを期待する。

Mohamed Lmouchter（鈴木教授）

「Epitaxial Growth and Characterization for Thin Films of Colossal Magnetoresistive Layered Manganates」

（巨大磁気抵抗層状マンガ氧化物薄膜のエピタキシャル成長とその評価に関する研究）

平成20年5月23日授与

高密度磁気記録や不揮発性強磁性ランダムアクセスメモリに用いられるトンネル磁気抵抗素子の高性能化には偏極スピントンネル効果の界面に関する理解が重要である。その意味で結晶構造自身がトンネル接合（固有トンネル接合）となり、かつコヒーレントトンネル効果を示すと考えられるRuddeldsen-Popper系列の強磁性巨大磁気抵抗層状マンガ氧化物 (La, Sr)₃Mn₂O₇ (LSMO327) は興味深い物質である。本研究はこのLSMO327を対象として、マグネトロンスパッタ法による *c* 軸エピタキシャル薄膜成長を達成しその基礎的性質について明らかにしたものである。本研究の主な成果は以下の通りである。

1. SrTiO₃ (STO) (100) 基板上へ、基板温度が820℃以下では *a* 軸薄膜が成長すること、920℃において *c* 軸エピタキシャル薄膜が成長すること、さらに堆積速度を0.8nm/minとした場合には基板温度が760℃においてもより品質の高いLSMO327の *c* 軸薄膜がエピタキシャル成長することを示し、高周波マグネトロンスパッタ法においてはじめて *c* 軸成長LSMO327エピタキシャル薄膜を達成した。
2. LSMO327エピタキシャル薄膜中に (La, Sr) MnO₃ (LSMO113) と (La,Sr)₂MnO₄ (LSMO214) が intergrowth している場合のX線回折パターンをシミュレーションし（図1上）、intergrowth量に応じて、各回折ピークの位置が正または負の方向にシフトしかつ半値幅が増大することを定量的に明らかにした。実験結果と数値的に比較することにより、エピタキシャル成長したLSMO327薄膜中のintergrowth量を定量的に評価する方法を考案した。
3. 高エネルギーイオン衝撃を抑制する中間プレートを設置した新しいスパッタ法を開発し、より高品質な *c* 軸エピタキシャル成長が可能であることを示した。上記方法により intergrowth を評価したところ、LSMO113が10%以下、LSMO214が10%以下まで低減されることを明らかにした。その薄膜のX線回折図形を図1下に示す。また、得られた *c* 軸成長LSMO327エピタキシャル薄膜を900℃酸素中で熱処理することにより、単結晶の値に近い、キュリー温度115K、飽和磁化3.0 μ_B/Mnの値を得た。また、磁場7Tにおける磁気抵抗比は約60%であった。薄膜表面も平坦でこの方法により高品質の *c* 軸成長LSMO327エピタキシャル薄膜が得られることを明らかにした。

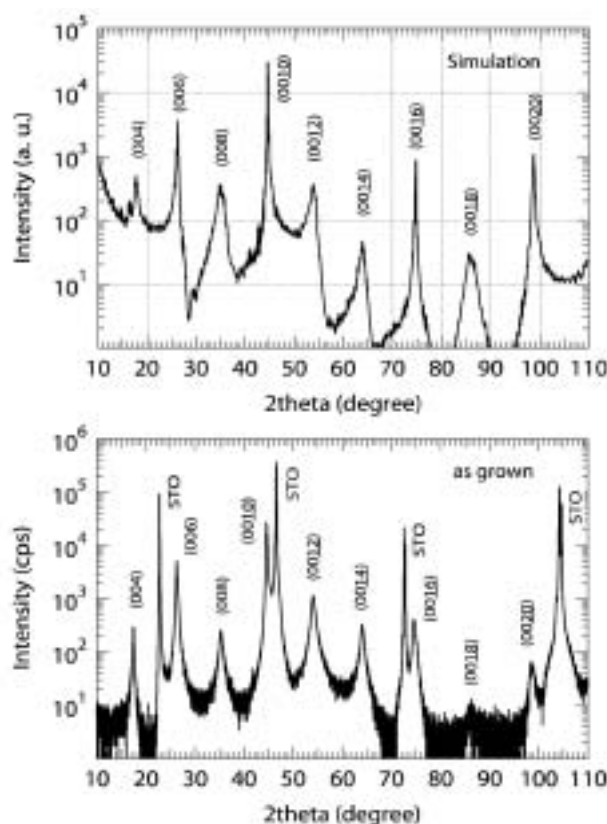


図1 intergrowthを含むLSMO327のX線回折図形。
（上）シミュレーション（下）as grown *c* 軸
エピタキシャル成長LSMO327薄膜

高野 仁 路 (野田教授)

「超小型・面内フォトニック結晶デバイスに関する研究」

平成20年5月23日授与

2次元フォトニック結晶の極微小な光導波路と光共振器を結合することで構成される面内フォトニック結晶デバイスは、従来の1/100以下のサイズをもつ波長選択フィルタや様々な超小型・光集積デバイスへの応用展開が期待されている。本研究では、その最も基本要素となる共振器を介した異なる導波路間の光伝達に関する詳細な検討を現実的な構造に対してはじめて行い、さらに、この結果を発展させることで超小型の高効率・多波長選択フィルタの実現に至った。本研究で得られた成果は、以下のとおりである。

1. 面内フォトニック結晶デバイスの要素技術として線欠陥導波路と点欠陥共振器に関して検討を行った。特に、共振器を介した結合の実現に必要とされる線欠陥曲げ導波路の透過帯域制御についての詳細な検討を行い、透過帯域を共振器の共振波長に一致させる手法を提案して低損失な光伝搬を実現した。
2. 点欠陥共振器・線欠陥導波路の結合系について検討を進め、高Q値点欠陥共振器を導入することにより共振器からの面外放射損失を抑制し、共振器を介した異なる導波路間の光伝達（面内結合動作）を初めて実現した。また、面内フォトニック結晶デバイスへの光入出力構造について検討を行い、高効率で、再現性の良い光入出力構造を実現した。
3. 面内フォトニック結晶デバイスのWDM通信用波長選択フィルタへの応用を狙い、そのために必須となる高効率・波長多重動作を検討した。異なる周期のフォトニック結晶で構成されたヘテロフォトニック結晶構造を用いることで、光通信帯において、ほぼ100%の効率をもつ4波長動作の超小型・波長選択フィルタを実現した（図1～3）。
4. 面内フォトニック結晶デバイスのさらなる高機能化を目的とし、光増幅や波長変換のための基礎技術として、微小点欠陥共振器によるラマンレーザー発振について検討した。発振条件の理論導出と微小共振器の理論設計を行い、2mWの極低閾パワーでレーザー発振する可能性を示唆する結果を得た。

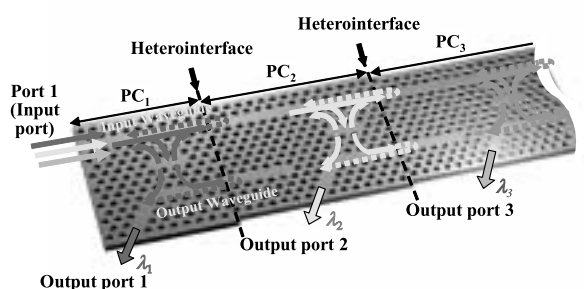


図1. ヘテロフォトニック結晶を用いた超小型・波長選択フィルタの概念図

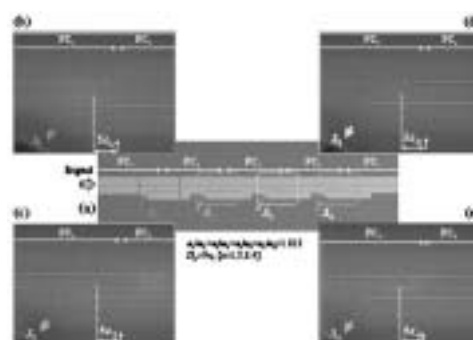


図2. 多波長フィルタ作製試料SEM像

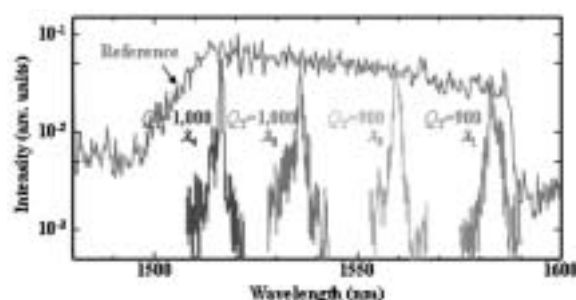


図3. 多波長選択フィルタのドロップスペクトル

颯々野 学（黒橋教授）

「Practical Use of Large Margin Classifiers in Natural Language Processing」 （自然言語処理におけるマージン最大化に基づく分類器の実用的な利用法）

平成20年9月24日授与

コンピュータとネットワークの飛躍的な広がりにより、企業内、家庭内における電子化文書の量は大幅に増えた。これら処理する自然言語処理アプリケーション（機械翻訳、テキストマイニング、検索エンジンなど）の研究開発も活発に行われている。従来、アプリケーションで利用される言語処理の基盤技術（形態素解析や構文解析など）はルールベースで作成されていた。ルールベースのシステムは、規模がそれほど大きくなければ人間に理解しやすい、修正しやすいなどの長所がある。しかし、一定の規模を超えると、保守の困難さが大きくなり、精度の向上も難しくなる短所がある。

90年代以降、システムの出力の正解となる結果を手で用意しておき、それを用いてシステムを訓練する方式の有効性が確かめられた。初期には比較的シンプルな確率モデルが中心であったが、近年では機械学習を用いる手法が中心となっている。中でも最も有望なのは、マージン最大化に基づく分類器（large margin classifiers）を用いるものである。ただ、これを用いても、計算コストが高いことや正解データを作るコストが大きいことなどの課題は残っている。企業内での研究開発や実用的なアプリケーションへの適用を考えると、これら課題の解決は非常に重要である。本研究では上記課題の解決を目指す。

本論文は、自然言語処理におけるマージン最大化に基づく分類器の実用的な利用法について、特に、日本語の解析の効率よい手法と、効率的な正解事例の作成法に関する研究をまとめたもので、得られた主要な成果は以下のとおりである。

1. 日本語の係り受け解析（構文解析）をスタックを用いて後戻りなく決定的に行なうアルゴリズムを提案し、その時間計算量の上限が理論的に線形時間で抑えられることを示し、それを実験でも確かめた（図1）。さらに、このアルゴリズムと改良された素性、サポートベクタマシン（SVM）を組み合わせることで、京大コーパス Version 2 に対して最も高い精度が得られることを示した。このアルゴリズムを発展させ、文節認識と係り受け解析を同時行えるアルゴリズムも提案した。また、文法情報や係り受け情報が部分的にしか与えられていない場合でも、訓練可能であることを示した。

2. SVMの能動学習を初めて日本語の単語分割に適用し、能動学習の効率改善手法を提案した。大規模なクラスタリングを避けつつ、二つのラベルなし事例のプールを用い、事例をサンプリングするプールの大きさを徐々に大きくする方法で、一定の精度を得るのに必要な正解事例の数を通常の受動学習、従来の能動学習に比較して、大幅に削減できることを示した。

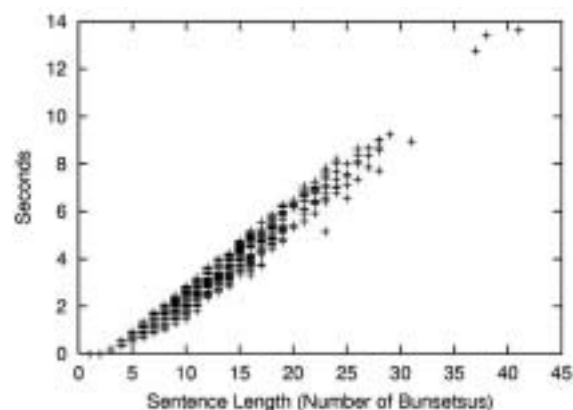


図1. 文の長さと解析時間の関係

3. 文書分類において、ある文書に対して、少量の単語を追加・削除しても、その文書が属するカテゴリは変化しないとの仮定を置き、仮想的な事例を生成して、正解事例のセットに追加することで精度の向上を図る方法を提案した。この仮想事例の生成とSVMとを組み合わせる方法を英語のニュース記事の分類に適用し、正解事例が少ない場合に、大きく精度の改善ができることを示した。

今後は、これらの知見をもとに、精度が高く、よりいっそう実用的な自然言語処理システムの研究開発に取り組んでいきたい。

張 奇（下田准教授）

「Study on an Integrated Analysis and Evaluation Methodology of Energy Systems for Sustainable Development」

（持続的発展のためのエネルギーシステムの統合分析・評価手法に関する研究）

平成20年9月24日授与

本論文は、エネルギー政策から発電システムまで様々なレベルのエネルギーシステムを持続的発展の観点から分析・評価するための統合的方法論について研究開発を行い、その有効性を検証することを目的としている。

エネルギーシステムの持続的発展性を評価する際には、そのシステムが社会、経済、環境に与える影響について総合的に分析・評価する必要がある。本論文では、まず、評価の対象となるエネルギーシステムとその評価目的からEISD（Energy Indicator for Sustainable Development）と呼ばれる指標群を導出し、エネルギーや物質の流れを表現するMFM、地理的情報データベースであるGIS、指標間の定性的な因果関係を表現するDSR、主観的な意思決定を支援するAHP、エネルギー品質も含めて統合的にエネルギーシステムを分析するEXCEM等の各種のモデルから、前述のEISDを導出するのに適したモデルを選択して、対象とするエネルギーシステムを分析・評価する方法論IAEMSD（Integrated Analysis and Evaluation Methodology for Sustainable Development）を提案している。そして、この方法を①中国のエネルギーシステムの定性的分析・評価とエネルギー政策の提言、②1次エネルギーの価格構造と中国原子力政策の定量的分析・評価、③高温ガス炉を対象とした熱的・経済的観点からの分析・最適化、の3つの事例への適用を通じてIAEMSDの有効性を検証している。

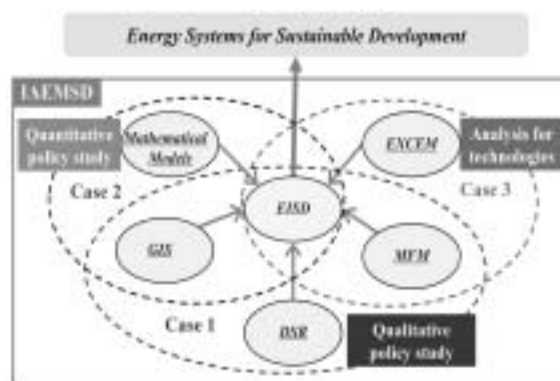


図1 提案したIAEMSDと三つの応用例

①では、提案したIAEMSDを適用し、2000年と2004年の中国におけるエネルギーシステムを多面的に評価した。まず、GISとMFMを用いて社会・経済・環境影響の指標群を導出し、これに基づいてエネルギーシステムの状況と動向をDSRを用いて定性的に分析するとともに将来のエネルギー政策を導出した。②では、1次エネルギーとして天然ガスを取り上げ、世界の天然ガスの価格構造を定量的に分析するためGISを用いてEISDを導出した。これを元にエネルギー高価格時代には原子力エネルギーが有望であることを示し、中国に新規導入する炉型について、安全性、持続可能性、技術、インフラ、信頼性の観点からAHPを用いて評価した。その結果、今後20年は新型加圧水型軽水炉（APWR）が有望であるが、2030年以降は持続的発展の観点からは高速増殖炉も有望であることを示した。③では、電気と水素を製造する高温ガス炉コジェネレーションシステムについて、MFMとEXCEMを用いて熱効率と経済性の観点から分析した。その結果、高温ガス炉システムは他の発電・水素製造システムと比較して効率が良く、経済的にも十分競合できることを示した。

以上、本論文ではエネルギーシステムの持続可能性を多角的に分析・評価する方法論IAEMSDの開発し、異なる3事例の分析・評価からその有効性を示した。

二 谷 辰 平 (近藤教授)

「Multiscale Analysis of Impurity Transport in Drift Wave Turbulence」

(ドリフト波乱流における不純物輸送のマルチスケール解析)

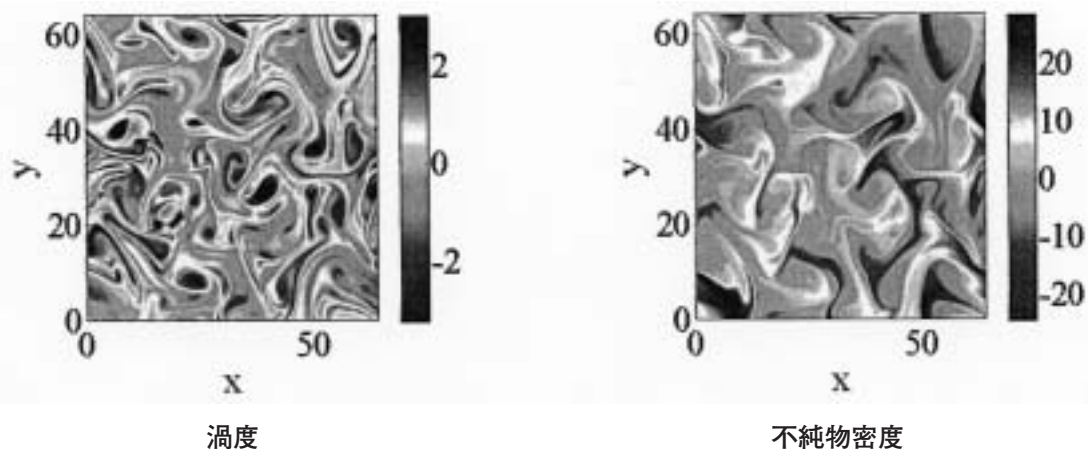
平成20年9月24日授与

核融合プラズマの閉じ込め性能を支配するプラズマ周辺部の不純物輸送のダイナミクスを理解することを目的に、従来の新古典理論あるいは現象論的な拡散方程式に基づく解析から、プラズマ中に異常輸送を引き起こす乱流場の影響を取り入れた解析に拡張するとともに、得られたシミュレーションデータに対して構造関数解析や特異値分解と呼ばれる高次の時空間構造を表現することが可能な統計解析法を適用することにより、不純物の輸送機構に対して新たな知見を見出した。

1) 乱流輸送を駆動する場を表すHasegawa-Wakatani方程式とその場をパッシブスカラーとして捉えた下での不純物輸送の方程式を自己無撞着に結合したシミュレーションを行った。その結果、不純物密度の渦構造はプラズマ乱流の渦構造と強い相関を持つことを定量的に示すとともに、乱流場とその影響を受けた不純物輸送はマルチフラクタル性を持つことを明らかにした。これは不純物輸送が非拡散的な間欠現象によって支配されることを意味し、周辺部の不純物の挙動が乱流場の特性を強く反映することを示している。図に渦度と不純物密度の等高線図を示す。

2) シミュレーションで得られた不純物密度と渦度の構造関数スケール指数を詳細に検討した結果、渦フィラメントが存在する場での構造関数スケール指数を記述するShe-Levequeモデルとよく一致することが分かった。これは、不純物が渦フィラメントに沿って移流するシミュレーションと一致する結果であり、乱流場の渦度と不純物輸送の間に強い相関があることを示している。これは不純物輸送の動力学に対して新しい統計力学的知見を与えるものである。

3) これまでの不純物輸送の解析では時間構造と空間構造を独立に扱っていたが、本研究では、不純物輸送の数値データを空間と時間の双方の固有モードを用いて同時に分解する特異値分解法を適用し、空間における「干渉性構造」と時間における「間欠性構造」の両者を同時に抽出することに成功した。その結果、大きなスケールの渦構造は時間に対して緩和的な動きを示す一方、小さなスケールの渦構造は間欠性を示すこと、渦のサイズが相関時間の平方根に依存することなどを明らかにした。



藤 野 秀 則（下田准教授）**「情報通信技術を活用したスキルとモラル向上のための教育・訓練方法に関する研究」
平成20年11月25日授与**

本論文は、エネルギープラント等の大規模工学システムの保守や機器製造を担う工務作業員に対し、情報通信技術を活用して、そのスキルとモラル（仕事に対する意欲・満足度）を向上させる教育・訓練の方法について研究開発を行い、その有効性の検証結果をまとめたものである。

具体的には、研究の背景として、工務作業は、インフラや製造現場を支えるために必要不可欠な作業であるが、第3次産業が主要産業となった今日においては、作業員の高齢化や若手の入職者の減少、入職者の作業意欲がそもそも低いといった問題がある。このような中で、社会のニーズに応えていくためには、工務作業員に対する教育・訓練として、作業知識や技術等のスキル向上を効果的、効率的に図ること、および、作業そのものへの動機付けや作業意欲等のモラルの向上を図ること、の両面が必要である。そこで、本研究では、（A）最新の情報通信技術を活用してスキル向上のためのOJTを人の指導員に代わって実施できるシステムを構築・導入すること、および、（B）情報通信技術を活用して、モラル向上につながるようなコミュニケーション場の構築を支援することを提案した。そして、それぞれの提案内容を基にしたケーススタディとして、（A）の提案に対して（1）プリント基板面実装作業の作業技術の訓練システムの開発というケーススタディを実施するとともに、（B）の提案に対して（2）単純作業従事時の作業意欲向上、および、（3）過去の不具合事例活用のためのデータベース作成促進、という2つケーススタディを実施した。

（1）「プリント基板面実装作業の作業技術の訓練システム」については、作業知識やスキルの向上を目指した教育・訓練方法のケーススタディとしてプリント基板の面実装作業を取り上げ、情報通信技術のうち主に画像処理技術を用いて、その教育・訓練を効果的に実施する方法を提案した。具体的には、プリント基板面実装作業における新人作業員に対するOJTについて、熟練作業員に代わり情報通信技術を適用して、液晶モニタとレーザー光による作業のデモンストレーション表示、画像処理による部品箱からの電子部品の取り出し認識、プリント基板への部品の取り付け認識、誤り作業の指摘を実現し、これまでe-Learning等のOFF-JTでしか利用されていなかった情報通信技術がOJTにも活用できることを示した。また、この研究開発の知見から、一般的な工務作業のOJTに情報通信技術を活用する際の開発方針とそのポイントを示すシステムモデルを提案した。

（2）「単純作業従事時の作業意欲向上」については、モラル向上を目指した教育方法として対人関係による意識変化に着目し、モラルが低下しがちな単純作業について、心理学的知見を応用したモラル向上方法CASPer（Character Agent for Self Persuasion）を提案している。CASPerは、コンピュータ上に社会性を持つソーシャルエージェントを実現し、作業員がエージェントにその作業の重要性を説明して納得させるというゲームを実施することで、作業の重要性に対する自己の納得感の喚起と作業意欲の向上を実現するものである。このCASPerの成立性と作業意欲向上効果を検証するため、PCへの数値入力という単純作業を被験者に課した結果、被験者がソーシャルエージェントを人と見なして作業の重要性を説明することでCASPerの成立性を確認し、さらにCASPerを使用した場合と使用しない場合の作業意欲を比較することでCASPerを使用した場合に認知的不協和の解消プロセスが生じ、作業意欲の向上効果があることを示唆する結果を得た。

（3）「過去の不具合事例活用のためのデータベース作成促進」については、職場のグループ内コミュニケーションに着目したモラル向上のための教育方法を提案している。具体的には、まず、原子力プラントのような安全性が優先される工学システムの保守作業において、過去の不具合事例をデータベースとして蓄積・活用することが重要であることを述べ、作業員のデータベースの作成継続を促進する方法FOAD（Fostering the attachment to database）を提案している。FOADは、作業グループのメンバー各自がコンピュータに入力して作成した独自のデータベースを作業グループのメンバーが閲覧し、その内容に関するポジティブなコメントを返すことで、作成者のデータベースに対する愛着を醸成しデータベース作成継続の意欲を喚起するものである。このFOADの愛着醸成効果を検証するため、40名の被験者をFOAD適用群と非適用群に分けて被験者実験を行った結果、独自のデータベース作成自体が愛着を醸成することを示すと同時に、他者からのポジティブなコメントが愛着の醸成をさらに促進することを示した。

レーダー：電波の目

情報学研究科 通信情報システム専攻
超高速信号処理分野
佐 藤 亨

1. はじめに

ロボット技術が急速に進歩し、日常生活に家事を補助するロボットが入ってくるのも、そう遠い将来のことではないと考えられています。もちろん、人間と同じように周囲の状況を把握し、即座に判断を下すことは、まだまだ困難な課題で、鉄腕アトムが登場するのはいつのことか予測もできませんが、家事労働を掃除機や洗濯機などの家電製品が置き換えてきたように、単純な仕事から徐々にロボットが処理可能な範囲は広がってゆくでしょう。

人間が周囲環境を理解するとき視覚がもっとも重要であるのと同様に、ロボットにおいてもカメラによる画像化が主要な手段であるのは言うまでもありません。しかし人間の視覚には、単にカメラの働きだけではなく、過去に蓄積された家具の配置や大きさに関する知識との照合など、その後の脳における複雑な情報処理を瞬時に行う能力が伴っています。この点で現在の情報処理技術は脳の働きに遠く及ばず、現在のロボットの多くは、超音波距離センサーなどの補助的測定手段を必要とします。そもそも、ロボットが人間の五感に制約される必要はないので、利用可能な物理的原理による計測技術をすべて動員しようとするのが当然です。

電波もその一つで、目標までの距離を正確に測定できること、見えないところにも届くことなどの特長があります。ここでは、最新のレーダー技術についてご紹介します。

2. 電波でものを測る

「やまびこ」は、遠くの山で音波が反射して帰ってくるまでの時間差によって生じる現象です。レーダーはこの原理を電波に応用したもので、短いパルス波を目標に向かって送信し、反射波が受信されるまでの時間差から距離を測定します。電波の用途は、もちろん携帯電話に代表される通信が主なものですが、計測も重要な電波の利用方法の一つです。すでに1925年には、電離層の高さを測定するのにパルスレーダーの技術が使われたという記録があります。

ただし、電波の伝わる速さは音波よりはるかに速いので、正確に距離を測定するためには、時間差を精密に測ることが必要です。たとえば、室内の物体形状を知るには数cmの測定精度が要求されます。電波は1秒間に約30万kmを進みますから、0.1ナノ秒（100億分の1秒）といった非常に短い時間を計る技術が必要となるわけです。このような技術が実用的となり、またそれにとまなう電波の利用方法などの規則が整備されたのは、ここ数年のことにすぎません。レーダーを室内計測に利用するというのは、まさに21世紀の技術なのです。

電波と光は、どちらも電磁波の一種ですが、波長（波の山と山の間隔）が大きく異なります。可視光は数百ナノmの波長を持つのに対して、その100倍以上、通常0.1mmより長い波長の電磁波を電波と呼びます。携帯電話に使われる電波の波長は10cmから30cm程度です。光が直進する、というのは、目に見えるものの大きさが光の波長に比べてはるかに長いので、電波の場合は音波と同様に、ものかげに回り込む「回折」という現象が現れます。ピルの陰でも携帯電話が通じるのは反射や回折のた

めです。

3. さまざまなレーダー

このような、電波の「波」としての性質を利用した装置として、フェーズドアレーアンテナがあります。図1に示すように、平面上に並べた多数のアンテナから同時に電波を発射（左）すると電波が干渉しあってアンテナ列と平行な波面が作られ、電波は上向きに進みますが、少しずつ時間差をつけて発射（右）すると斜めに進みます。この方法によって、アンテナを動かさずに電波の向きだけを変えることができます。与える時間差の制御を電子的に行うと、電波の照射方向を瞬時に切り替えることが可能です。

図2は、この方式のアンテナを利用した京都大学の大型大気観測レーダーです。直径110mの敷地に

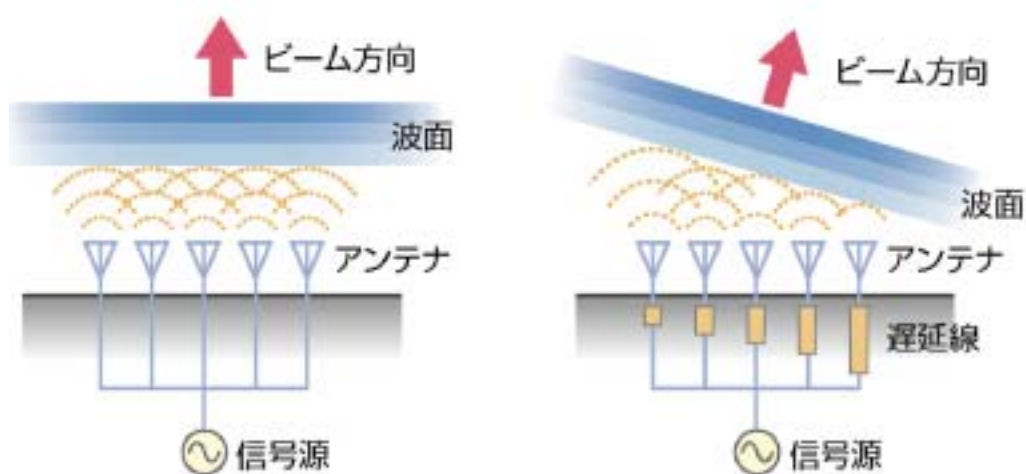


図1. アレーアンテナの原理。複数のアンテナから同時に電波を発射した場合（左）と、少しずつ時間差をつけて発射した場合（右）



図2. MUレーダー（京都大学生存圏研究所信楽MU観測所）

475本のアンテナを配置し、上空600kmまでの大気の流れからの微弱な散乱エコーを受信します。雨粒を観測する気象レーダーと異なり、空気そのものを観測することで晴れた空や雲の上の高さまで測定できます。空気の運動、すなわち風によるドップラー効果から、風速を測ることができます。同じ原理による小型のレーダーはウィンドプロファイラーと呼ばれ、気象庁が全国に30数台を配置して毎日の天気予報に利用しています。

レーダーは、気象観測のほか、航空機、船舶、自動車などの移動体の観測にも広く利用されています。遠い移動物体としては、地球周回軌道に残された人工衛星やロケットの残がい（宇宙のゴミ：スペースデブリ）を監視するためのレーダー（図3）もあります。このレーダーも上記のMUレーダー



図3. スペースデブリ観測用レーダー（日本宇宙フォーラム上斎原スペースガードセンター）



図4. スペースデブリ（宇宙のゴミ）の分布。

と同じフェーズドアレイアンテナを備え、同時に10個までの軌道運動物体を観測することができます。直径3mのパネルに約1,800本の小型アンテナを配置し、これを回転台に載せて全方位を観測できるようにしています。図4は、世界の観測網によって追跡されているスペースデブリの、ある瞬間における分布の様子を描いたものです。ここに示されたのは直径10cm程度以上の比較的大きなもので、約8,000個が知られていますが、もっと小さい直径1 mm～1 cm程度のものでも人工衛星などに衝突すると致命的な損害を与えます。これらは数百万個にも及ぶと推定されていて、深刻な宇宙の環境問題となっています。

4. レーダーによる室内環境の計測

上記の例は、数百本から数千本という多数のアンテナ素子を配列した大規模な装置です。また各アンテナにそれぞれ送受信機を接続するためコストも高く、高性能ですが日常的な用途には不向きです。このように多数のアンテナ素子を用いるのは、電波のビームを絞って、観測する方向を明確にするためです。光では小さなレンズで容易に鋭いビームを作ることができるのに対して、電波では大掛かりになってしまうのは、先に述べたように波長が長いからです。波長5 cmのマイクロ波では、波長500 ナノmの可視光と同じ鋭さのビームを形成するのに、10万倍も大きな開口が必要になってしまいます。

将来の家事ロボットのように室内環境を電波で計測する場合、大きなアレーアンテナを備えることは現実的ではありません。このような場合に利用できる技術として、開口合成法があります。図5に示すように、小型のアンテナを平面内で走査して目標を測定することを繰り返し、得られた受信信号を重ね合わせれば、あたかも多数のアンテナで観測したのと同等の効果を得ることができます。図のように近距離の目標を測定する際には、ちょうどレンズで集光するように電波を1点に集中させ、その点をフェーズドアレイの仕組みで順次移動させることで、3次元の領域を高い分解能で測定することが可能です。ただし、光の場合によく知られているように、焦点を非常に小さく絞ると波としての性質があらわになり、使用する光の波長の半分程度の大きさ以下にすることはできません。これは波長の長い電波の場合には大きな制約となります。また、これらの処理は受信信号をデジタル化して行いますが、膨大な計算を必要とするため、現在のパーソナルコンピュータでは数十分もの時間がか

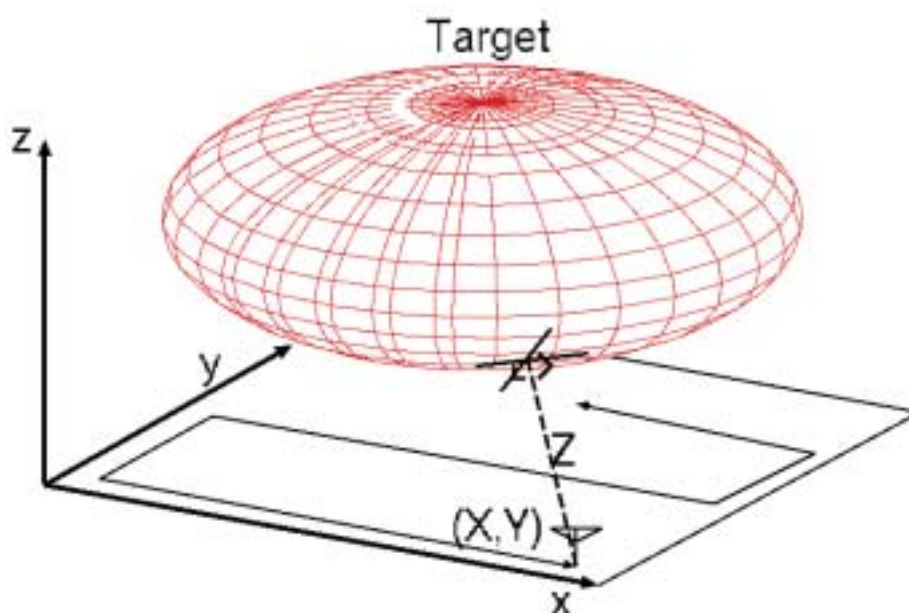


図5. 小型アンテナの走査による目標の計測。

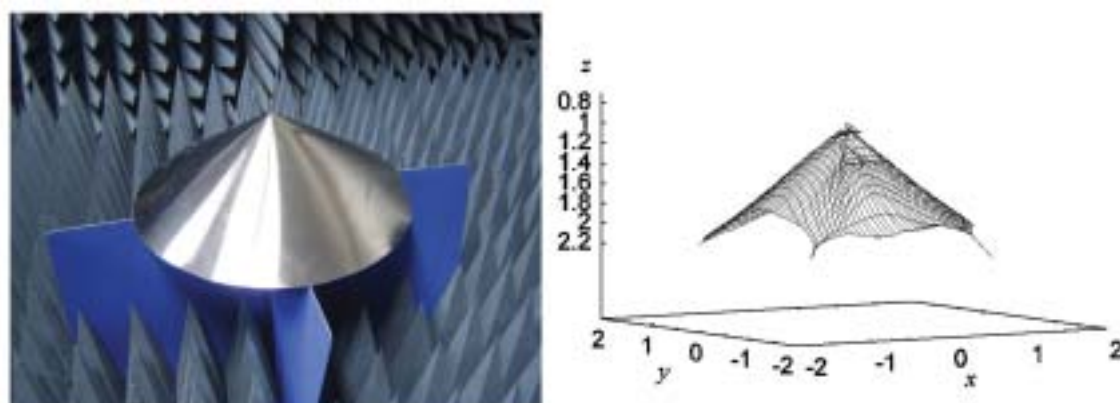


図 6. 超広帯域レーダーによる物体形状推定実験の目標（左）と再現された形状（右）。
座標軸の数値の単位は、使用する電波の波長です。

かってしまいます。

私たちの研究室では、この問題を解決するための信号処理の手法を研究しています。図5のようにアンテナを走査して目標を観測するとき、小型アンテナから送信した電波は球面状に広がるため、反射波の時間遅れから距離 Z は正確に測定できても、それがどの方向から帰ってきたかはわかりません。しかし、電波は物体表面に直交する方向に強く反射されますから、物体の形状がわかっていればアンテナ位置とその点における物体までの距離は簡単に計算できます。多くの測定点（ X 、 Y ）における目標までの距離 Z から目標の形状を推定する問題は、多数の未知数を求める連立方程式を解くのとよく似ており、逆問題と呼ばれます。一般に逆問題は解決困難であることが多いのですが、境界面に直交する方向に反射波が向かう性質に着目することで、物体形状と測定対象となる目標までの距離の間に単純な関係式が成り立つことが導かれ、これを解くことで直接に物体形状を求めることが可能となりました。

この方法を用いると、アンテナを走査して目標までの距離 Z が求められれば、ほとんど瞬時に物体形状を計算することができます。図6左に示すように先端の尖った形状の場合、従来の開口合成法では、再現された形状は波長の半分程度に丸まっていますが、開発した手法では右図のように、正しい形状が再現されています。ここで左図の背景に見える剣山のようにとがったものは、電波吸収体です。この実験では、測定誤差が波長の1/100程度という、極めて高い分解能が得られました。たとえば3GHzの中心周波数のマイクロ波ですと、波長は10cmですから、1mmの精度で物体形状が推定できることになります。

ここで用いているのは超広帯域（Ultra Wide Band; UWBと略します）パルスレーダーです。上記の方法では、目標までの距離 Z を正確に測定することが重要ですが、そのためにはパルスをできる限り短くする必要があります。電波の占有帯域幅はパルスの長さの逆数にほぼ等しく、上記の実験では2GHzという非常に広い帯域幅を持つパルスを使用しています。それでもパルス長は約1ナノ秒で、普通の意味での距離分解能は15cmという比較的大きな値になります。開発した方法では、送信したパルス波形と受信したパルス波形を精密に比較することで、1mmの精度に対応するわずかな遅延時間を測定しています。

上記の実験では、一つの小型アンテナを平面上で走査しましたが、これでは計算は高速でも測定自体にたいへん時間がかかります。かといってアンテナを2次元に多数配置するのは構造上もコスト面でも現実的ではありません。家事ロボットなどでは、高さ方向に1列にアンテナを数本～十数本配置し、ロボットが室内を移動するのを利用して必要な2次元のデータを収集することを考えています。

ここに示した方法は、そのままでは円錐や球など、比較的簡単な形状の物体にしか適用できません。また受信される信号に雑音が混入すると、性能が大きく劣化することもあります。このような問題を解決するためのさまざまな方法を考案し、その特性を検証しています。

5. 災害現場での利用

電波を使うことのもう一つの利点は、光が透過しない媒質を通して目標を測定できることです。これは煙に覆われた火災現場での消防士の活動や、震災などによるがれきの下の探査、なだれによって雪に埋もれた遭難者の探索などに有効と考えられ、災害現場でレーダーを救援活動に利用するためのさまざまな研究が進められています。

図7は、壁面を通して物体形状を測定するための実験風景です。右図に示す金属物体を、左図のようにモルタル板で覆い、その上で送受信アンテナ（TxおよびRx）を走査して距離測定を行い、前節の手法を適用します。しかし、モルタル板中では電波の伝搬速度は空気中より遅いため、光と同様に屈折が生じるほか、到達時間に遅れを生じます。この屈折の効果と余分な遅延の影響を補正することで、空気中の場合と同様に正確な物体形状を推定できることが確認できました。ただし今回の実験は、がれき中の探査などに比べるとはるかに単純化された条件下ですので、現実の災害現場で利用できる手法とするには、まだまだ改良が必要です。

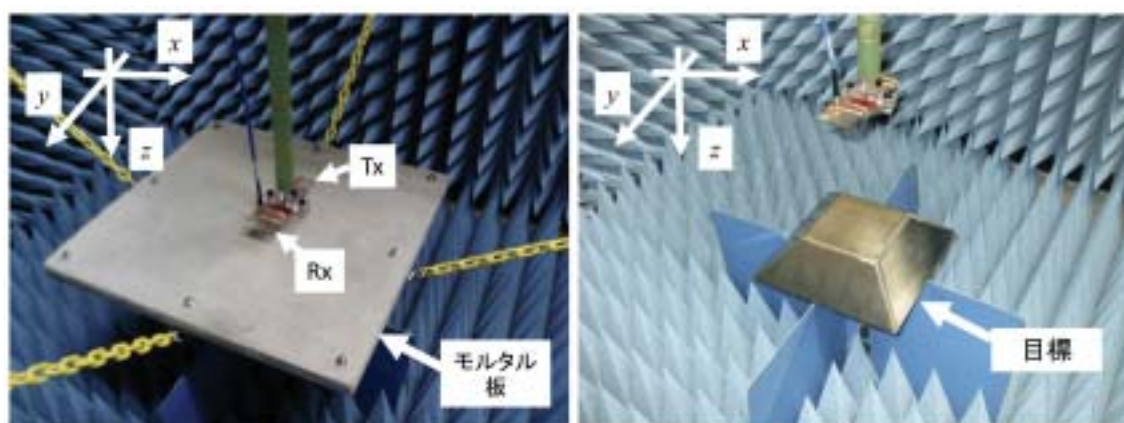


図7. モルタル板を透過した物体形状測定。モルタル板を置いた状態（左）と取り除いた状態（右）。

6. おわりに

レーダー技術の最近の動向を簡単にまとめ、電波を使って物の形を知るための研究の一端をご紹介します。第2次世界大戦を契機に発達し、その後も軍事技術として捉えられることの多かったレーダーですが、エレクトロニクスやロボット技術の進歩により、これからの生活には欠かせない基盤技術となってゆくと考えられています。ここではご紹介できませんでしたが、自動車の衝突防止レーダーのように、急速に実用化が進みつつある分野もあります。身近な高度技術であるレーダーに、多少なりとも興味を持って頂ければ幸いです。

学生の声

「違い」

工学研究科 電子工学専攻 藤田研究室 博士後期課程3年 西 中 浩 之

博士後期課程まで進むと、同じ博士後期課程の学生は様々なバックグラウンドを持つ人が増えてきます。もちろん電気系からそのまま進学する人もいれば、一度社会人となり、戻ってきた人、他大学から来た人、留学生など多彩なバックグラウンドを持っています。私もそのうちの一人で、他専攻から電子工学専攻に進学してきました。異なるバックグラウンドを持つというのは、非常に面白くて、いろいろな経験をすることが出来ます。これは研究や教育の場だけではなく、普段の場からも感じられます。前に所属していた専攻は化学工学といって、化学プラントの設計などについて指導を受けたり、研究を行ったりしていました。その為、先生方とお酒を飲む場などでは、アルコールの度数について、発酵による限界やエタノールの蒸留の最大度数の話をしたりしています。このあたりは微妙に授業と関連していて、なかなか面白いものです。一方で、電子専攻に所属してから初めてそのような場に参加したとき、アースの取り方やその重要性について話しているのを聞くと、全く知らないことであったので頭の中はクエスチョンマークでいっぱいでした。ただ、バックグラウンドが違うだけで、こういう違いが現れてくるのかと、話を聞いていながら新鮮で面白い体験ができたと思います。

研究の場では、異なる所属から来た人も今いる専攻に染まりがちになってしまうために、その異なるバックグラウンドというものが目に見えて現れることが少なくなってしまうと思います。しかし、実際は大学や研究機関などで受けた教育の中には、思考の中にその専門独自の傾向的な方向性というものが身につくようになっていっていると感じています。このような異なるバックグラウンドから得られる異なる思考の方向性や知識から生まれる結果は、同様のバックグラウンドを持つ人からはなかなか生まれにくいものであると思います。その専攻に所属するからには、その専攻の考え方に染まりがちになってしまうのではなくてはならないものですが、同じ知識を共有する教育だけでなく、このような違う知識を活かす教育があると、違うバックグラウンドを持つ学生だけでなく、それ以外の学生も貴重な経験を得るのではないかと思います。

「ねえさん」と呼ばれて—女性研究者支援について思うこと—

工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程1年 北 村 恭 子

「ねえさん」これが野田研究室でのあだ名である。そもそも卒業した先輩が「姉さん」と呼び始めてから、気がつけば『ねえさん』の『ねえ』の字は女辺に且つと書いて『姐さん』です！！と満面の笑みで語る後輩が出てくるまでに定着した。一見、女性に対して年増に感じさせる失礼なあだ名だが、私はこのあだ名を誇りに思っている。

我が国における女性研究者の割合は12.4%と欧米の国々と比べても低い。特に、工学分野では7.0%と非常に少ない。まだまだ研究者という職業が男性社会とも言える状況下で、近年では「女性研究者支援」が国を挙げて実施されている。私はまだ家庭も子どもも持たないので、実感は薄いですが、出産・育児の支援体制が整うことは心強いし、何よりそれらへの男性の関心も高まることは重要と考える。一方で、女性研究者になるかどうかの過程にある女子学生への支援はまだまだ難しいと感じている。それは、男性が大半を占める研究室での女子学生の居場所作りが難しいからである。

女子学生の研究室での過ごし方にはおおよそ3通りあるように思う。①女子学生のみとあるいは一人で過ごす。②完全に男性と同化する。③女性として男性に混じり過ごす。私の経験から判断すると、①の過ごし方の出来る女子学生は、実は最も心根が強い。しかし、男性社会を窮屈に感じて研究者になることを選ばない場合が多い。そのため、工学系で女性研究者になろうとする女子学生の多くは②か③に当てはまる。②の過ごし方の出来る女性は限られてはいるが一度そうなると楽しい。一方で、③の過ごし方が一番難しい。「女性」と意識されすぎて、できすぎたことを「女のくせに」と中傷され、博士課程への進学を諦めてしまった先輩がいる。逆に「女性」と意識されなさ過ぎて、いくつかの体力的な問題に直面し、月経前症候群（PMS）や憂鬱などの精神的な症状を訴えている友人も多い。女性であることは男性と同じ様にその人のアイデンティティの一つであるから、本来は、③の形で過ごせることが最も自然なはずである。③の形で女性が研究室を自分の居場所にすることが難しく無い研究室作りの支援はできないものかと考えている。

今日も「ねえさん」と呼ばれる。「ねえさん」というあだ名は、私が「女性」として研究室の中に溶け込んでいる証拠だと思っている。私は研究室で「女性」として過ごしている。この環境が心地よく、研究室の皆に感謝する日々である。

教室通信

光・電子理工学教育研究センター

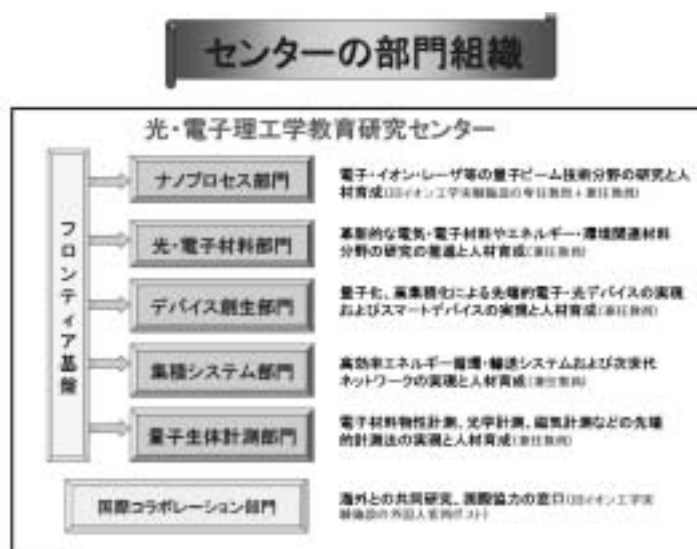
光・電子理工学教育研究センター長 電子工学専攻 石川 順 三

工学研究科附属光・電子理工学教育研究センターは、旧工学研究科附属イオン工学実験施設が改組され、平成19年4月1日に発足しました。本センターは、旧イオン工学実験施設の研究成果および21世紀COE「電気電子基盤技術の研究教育拠点形成」の研究成果をさらに持続・発展・展開させるために、電気工学専攻・電子工学専攻との緊密な協力体制を図り、21世紀社会を支える電気電子フロンティア基盤科学技術の根幹となる光・電子材料、デバイス、システムの融合研究拠点の形成と、次世代先端技術を担う博士課程学生の人材育成を通して幅広い専門知識を持ち国際的に通用する研究者の育成を行うことを目的として設立された教育研究センターです。改組後、平成19年度のグローバルCOE（「光・電子理工学の教育研究拠点形成」代表者：野田進）が採択され、センターはグローバルCOEと協調しながらその活動を進めています。

センターでは、工学研究科における電気電子フロンティア基盤技術を育成、展開、共有するために、複合研究ユニットを形成し、電気系専攻内の研究室間の枠、あるいは他の専攻間の枠を超えた融合分野で共同研究を行い、先進的・先端的研究分野の創出・展開を図ろうとしています。すなわち、イオン工学研究のミッションはセンターの専任教員により継続していくとともに、電気系専攻の関連分野および工学研究科の他専攻の教員が兼任教員としてセンターの構成員となって流動的な融合的共同研究体制を形成し、新たな境界領域研究や先進的・先端的研究を遂行していきます。このような研究教育の融合的組織は、様々な外部資金の獲得や産学連携・国際連携の窓口（拠点）としての役割も果たしています。

また、平成20年度から工学研究科で開始された大学院前期後期連携教育では、このセンターは電気電子フロンティア基盤技術をベースに、複合研究ユニットを積極的に活用し、また複数研究分野の教員による集団指導を活用して、電気電子工学専攻の次世代を担う優れた若手研究者（博士課程学生）を育成しつつあります。この連携コースには、平成20年度入学者が16名在籍し、また平成21年度には10名の合格者が決まっています。電気系専攻では光・電子理工学研究萌芽クリエーションルームを整備して、これらの連携コースの学生が、互いに密接な情報交換や相互交流が図れるよう配慮しています。

センターの部門組織は、図に示すように6部門から成ります。これら各部門は、先に説明した複合研究ユニットに相当します。「ナノプロセス部門」はイオン工学研究の専任教員と兼任教員から成ります。「光・電子材料部門」、「デバイス創生部門」、「集積システム部門」および「量子生体計測部門」は、兼任教員だけから成ります。さらに、海外との共同研究や国際協力の窓口として「国際コラボレーション部門」を置いています。



賛助会員の声

進化し続ける電子部品

株式会社 村田製作所 通信モジュール商品事業部ソフトウェア開発部長（昭和57年卒） 見 堂 義 一

1. はじめに

1990年ごろ登場した携帯電話は驚くべき発展を遂げ、メール、インターネット、カメラ、テレビ、決済機能など日常生活に必要なさまざまな機能を搭載し、持っていないと不安になるような必須アイテムになりました。また、パソコンも電源を入れている間はネットワークにつながっているのが当たり前になり、その接続も有線のLANから、無線LANへとより便利になってきています。今後、さらにテレビや家電製品がデジタル化され、ネットワークにつながり、ますます便利な情報化社会になっていくでしょう。

このような社会の変化に当社は電子部品を進化させて提供していくことで貢献してきました。日頃は目にふれることの少ない電子部品の進化をご紹介します。

2. 電子部品の進化の方向と具体例

初期のころの電子部品の進化は、コンデンサやコイルなどの単体の部品の実装方法の工夫や部品そのものの小型化が主流でした。表面実装部品が登場して基板への高密度の実装が可能になりました。また積層コンデンサが登場して、大きな静電容量のコンデンサが大幅に小さくなりました。この進化は今も続いており、 $0.4 \times 0.2\text{mm}$ という見えないくらい小さい積層コンデンサが登場しています。

一方、1990年ごろからいろいろな受動部品を複合化して、機能をもった電子部品を提供することにより、セットの小型化に貢献しようとする取組を始めました。コンデンサとコイルを組み合わせたフィルタなどがその例です。それまで使われていたフィルタに比べて $1/3$ のサイズとなり、日本ではじめてポケットに入る携帯電話の実現に貢献しました。図1ではIP（Integrated Passive）と表現しています。

さらに、受動部品だけではなく、半導体やICなどの能動部品もいっしょに取り込み、よりまとまった機能の複合部品が誕生しました。図1ではIPA（Integrated Passive and Active）と表現しています。

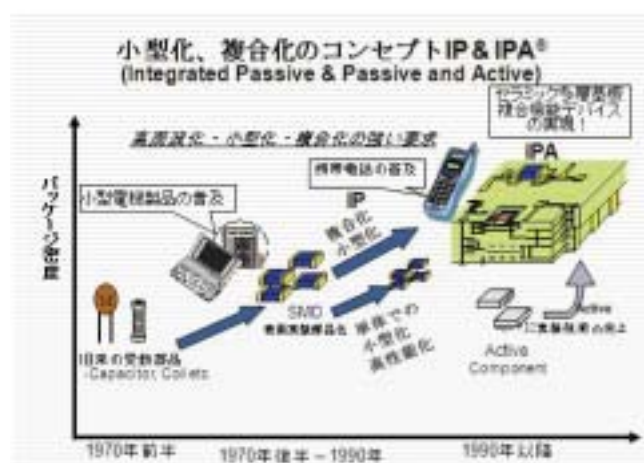


図1 電子部品の進化

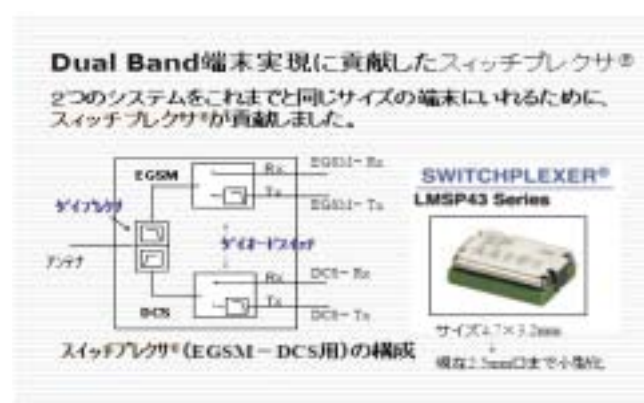


図2 IPAの概念による電子部品の例

図2のスイッチプレクサ[®]はその一例です。欧州では国境を越えて使用できるGSMと国内で使用するDCSの2つのシステムを使い分けると便利だということで、ひとつの携帯電話で2つのシステムに対応する必要がありました。この時、そのまま、高周波回路を2系統いれると携帯電話のサイズが大きくなってしまいますが、アンテナからGSM、DCSの信号をわける回路部分を小型のスイッチプレクサ[®]として提供して、2システムの携帯電話の実現に貢献しました。

現在の携帯電話はより多くのシステムに対応していますが、2.5mm□というさらに小型になったスイッチプレクサ[®]がその実現に貢献しています。

3. 完結した機能を実現する電子部品

近年、部屋の中などの近距離の情報伝達にBluetooth[®]や無線LANが使われるようになりました。また、携帯電話には位置情報を知るためのGPSやワンセグチューナーも搭載されるようになっています。

当社では、これらの機能を簡単に実現できるように図3のような完結した機能を持つ小型の電子部品を提供するようになりました。携帯機器を開発されるお客様はこの電子部品を搭載することで、その機能を追加することが可能になります。

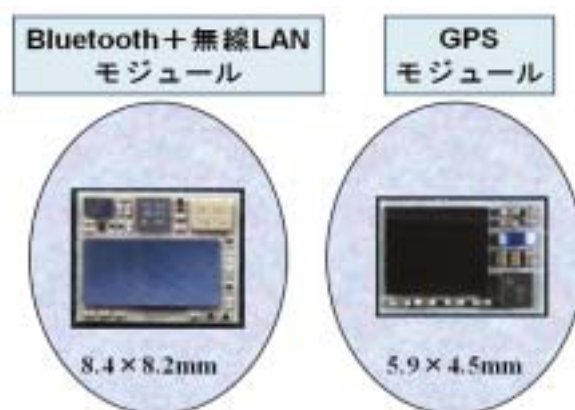


図3 近距離無線モジュールの例

4. ソフトウェアも含めたトータルソリューション

無線LANなどの近距離無線用電子部品を使用するには、ソフトウェアが不可欠です。携帯機器を開発するお客様に満足していただくには、ソフトウェアの提供とサポートが必須と考え、ソフトウェアに関するサポートを開始しました。さらに、省電力や高速スループットを実現するドライバソフトウェアの開発・提供、携帯機器の商品化に必要な各種認証試験取得のサポートなど、サービスの範囲を広げています。

電子部品、ソフトウェア、認証試験、各種サポートを含めたトータルソリューションの提供ができるようになりました。



図4 無線LAN用ソフトウェアの提供・サポート

5. おわりに

革新的な電子機器の誕生には、進化した電子部品が必要であり、それをタイムリーに提供できるように取組を進めてきました。最初は電子部品の小型化の追求でしたが、今では、ソフトウェアも含めた総合的なソリューションの提供に発展しています。今後はさらにコンサルティングサービスを充実させ、お客様に満足してもらうとともに、情報化社会の発展とそこで生活する人々に貢献していきたいと思えます。

編集後記

前回から編集のお手伝いをさせていただいています。最近では、学術雑誌でも冊子体で読むことはほとんどなく、もっぱらWebからのダウンロードに頼りきっています。新聞もまたしかり。紙媒体のブラウザ性のよさは捨てがたいものですが、このような状況の中、CUEも今後どのように展開していくべきか、考えるべき時期に来ているように思われます。皆様のご意見などお聞きしながらよい方向性を模索していきたいと考えています。

[M.F.記]

協力支援企業

NTTコミュニケーションズ株式会社
新日本製鐵株式会社
ダイキン工業株式会社
鉄道情報システム株式会社
日本電業工作株式会社
日立電線株式会社
フジテック株式会社
株式会社 村田製作所
ローム株式会社
(アイウエオ順)

発行日：平成21年3月

編集：電気系教室cue編集委員会
橋本 弘蔵、高橋 達郎、和田 修己、
船戸 充、田野 哲、後藤 康仁、
中村 武恒、木村 磐根（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp

発行：京都大学電気関係教室
援助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社 田中プリント