cue

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.17　　MARCH 2007

[第17号]

巻頭言
馬場　征彦

大学の研究・動向
電気システム論講座　電力システム分野
生存圏研究所　中核研究部　生存圏開発創成研究系
生存圏電波応用分野

量子機能工学講座　量子電磁工学分野

産業界の技術動向
関西電力株式会社　取締役相談役　藤　洋作

研究室紹介

平成17年度修士論文テーマ紹介

学生の声

教室通信

賛助会員のページ

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

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として発行されています。

巻頭言

市場のグローバル化と技術戦略の課題

副会長（昭和37年卒）馬場　征彦

私は学部卒業後メーカーにおいて技術部門（通信とコンピュータ）を経て通信関連の事業運営に関わって参りました。そのバックグラウンドから、巻頭言として産業界が抱える課題の一断面を紹介させていただきます。

コンピュータ業界では1964年のIBM360シリーズの発表後次第に、通信業界では1984年のＡＴ＆Ｔ分割を契機として顕著になった市場のグローバル化は、1990年代に入り加速度的に進展しています。市場のグローバル化はあらゆる業界で進展していますが、とりわけこの二つの業界では、製品がシステム物でありスタンドアローンでは成り立ち得ないこと、過去の資産を継承することや相互接続性が決定的に重要であること、製品採否の決定者が個人ユーザーではなく企業であること等の顕著な特徴があります。従って消費者向け製品にも増して技術標準の多数派になることが極めて重要であります。

技術標準にはコンピュータ業界（あるいは米国）流のデファクト標準とかつての通信業界におけるITU（あるいは欧州）型のデジュール標準があるわけですが、近年では標準化スピードの点でデファクト標準が優勢のように思われます。この流れの中で、特に欧州通信業界において、複数のメーカーや通信業者が国をまたがって戦略的に標準化に取り組み、先ず欧州内でデファクト標準化を実現し、最終的にITUでのデジュール化に持ち込むという新しい動きが大きな成果を挙げています。その結果、移動通信の第二世代（日本標準，欧州標準＝GSM，米国発標準等）と第三世代（WCDMA，CDMA2000等）で欧州標準が優勢となり、日本メーカーはグローバル市場において大きく取り残されてしまい痛手を受けています。米国メーカーもまた同様に振るわなくなっています。

第二世代のGSM（Global System for Mobile communications）を例にとり、欧州勢がとった技術標準化戦略について記します。第二世代（デイジタル化）移動通信システムは、欧州では1992年、日本では1993年とほぼ同時期にサービスが開始されました。しかし、その後の欧州勢の動きは迅速かつ戦略的でした。「GSM　MOU」グループを立ち上げ、積極的に世界の政府機関・通信事業者にGSMの採用を働きかけたのです。技術Ｋ／Ｈ，ネットワーク運営Ｋ／Ｈ、事業者間のローミング技術・手法の開発、融資制度等によって通信事業者の囲い込みを行い、日本勢が海外に関心を持ち始めた1994～5年ごろには世界のマジョリテイはGSMの方向になっていたのです。現在は、第三世代（広帯域）の移動通信システムの導入が進んでいますが、特にネットワークはGSM技術のエンハンス版となっており日本メーカーの苦戦は続いています。欧州勢は更に世界のマジョリテイ獲得後にITUに持ち込み、デジュール標準化にも成功しているのです。

標準化における技術ヘゲモニーは今後ますます重要となり、企業ひいては業界の命運をも左右しかねないと思われます。技術力は勿論重要ですが、それ以上に仲間（企業や国々）を結集し戦略的に行動して行くことが極めて重要となっています。しかし日本人の国際感覚や日本の地政学的な立場（アジアの国々との共同行動等）からはなかなか展望が開けないというのが現状です。技術面でも技術標準の策定の初期からグローバル市場を視野に入れて活動することが極めて重要であります。今、次世代ネットワーク（NGN）の議論が盛んでありますが、日本勢が標準化に積極的に参画し大きな寄与を行うことを祈っています。

大学の研究・動向

電力システムの解析・制御から要素技術まで

工学研究科　電気工学専攻　電気システム論講座　電力システム分野
教授　大　澤　靖　治
助手　山　本　　修
助手　周　　軍

１．はじめに

電力は言うまでもなく現在社会を支える最も重要なインフラの一つであり、また、電力システムは最も複雑な人工システムの一つである。現在、電力システムは、地球環境問題、電力自由化、分散電源などをキーワードとして変革の時代を迎えている。電力システム研究室では、電力システムの要素技術からシステムの解析制御まで、幅広く基礎的な研究を行っている。要素技術については、電力機器の絶縁設計、特に高電圧真空遮断器の開発に関わる固体絶縁支持物の絶縁設計ならびに絶縁劣化の判定に関する研究を、システム技術に関しては、電力システムの静特性のモデリング手法とそれを利用した静的電圧安定性の評価、変動性電源を含む電力システムのエネルギー貯蔵装置による安定化制御、無効電力による電圧維持能力の評価などの研究を行っている。本稿では、当研究室における最近の取り組みのいくつかを紹介する。

２．分散電源を含む電力システムの静特性モデリングと電圧安定性解析

CO_2などの温室効果ガスによる地球温暖化の対策の一つとして、太陽光、風力などの自然エネルギーを利用した発電の導入が精力的に進められている。分散電源とは、これらの自然エネルギー発電に加えて、燃料電池、エンジン発電、マイクロガスタービン発電などの比較的小容量で、大容量電源に比べて電力消費地の近くに設置することのできる電源のことを指す。小容量であっても発電効率が比較的高い、熱も利用すれば（コージェネレーション）さらに高効率になる、送配電設備の増強を遅らせることができる、などのメリットのため、今後ますます増加すると考えられている。分散電源が需要地近くにかなりの容量で接続（連系）されると、電源から負荷（需要地）に向かって一方向に電力が流れる従来の電力システムとは異なって、負荷端の電圧上昇などの問題が発生する恐れがある。多数の分散電源が連系された電力システムの電圧問題（電圧安定性）などを解析するのに適した電力システムのモデル化手法、解析手法について研究を行っている。

２．１　電力システムの静的構造のエルミートモデリングとその特徴

電力システム静特性の表現の基礎となる母線（端子）電圧と母線電力の間の関係式を電力方程式と呼ぶが、これは母線電圧が未知数であるために極めて高次元の非線形代数方程式となる。母線電圧や母線間アドミタンスの複素数を極座標ではなく直角座標で表現すること（エルミート電力方程式）によって母線電圧と系統構成要素（母線間アドミタンス）を分離して扱うことが可能となり、電力システムの静特性を明確に把握することができる。例えば、電力システムの構成が母線電圧に与える影響をより容易に扱うことができるようになる。

２．２　エルミートモデリングの応用：静的電圧安定性のロバスト解析

静的電圧安定性のロバスト解析とは、電力システムの静的構造にある範囲内の変動があった場合、

母線電圧が安定範囲に留まるかどうかを調べることである。特に電力変動に対して母線電圧がどの程度変動するかを知り、電圧崩壊を予防することは、電力システムの運用上重要な意味を持つ。エルミートモデリングを行うことによって、以下のような成果が得られた。

1）母線電圧上（下）界と母線電力、静的構成要素の間の不等式を導出した。それらの不等式によって、母線電圧上（下）界が系統構成状態と母線電力指定値から決定することが可能になり、従来の固有値を用いる方法と比較して母線電圧の上（下）界関係を明確に描くことができる（文献［1］）。

2）母線電力の変動、系統構成要素の変化などによる母線電圧上（下）界不等式を導いた。母線電圧に関する上（下）界不等式と同様、母線電圧変動も系統構成と母線電力の影響を受けるが、上界と下界の幅を小さくすることができた。一例として、図1に示す例題系統に対して、電力変動による母線電圧変動の上（下）界を求めると図2のようになる。横軸は電力変動、縦軸が電圧変動であり、点線が上（下）界を、ドットが実際の母線電圧変動を示す（文献［2］）。

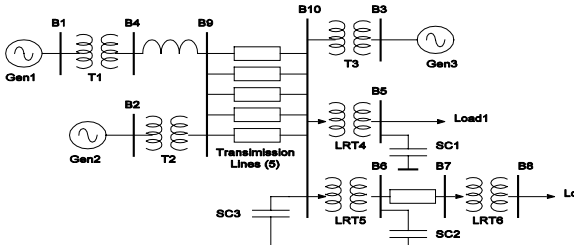


図１．３機10母線電力システム

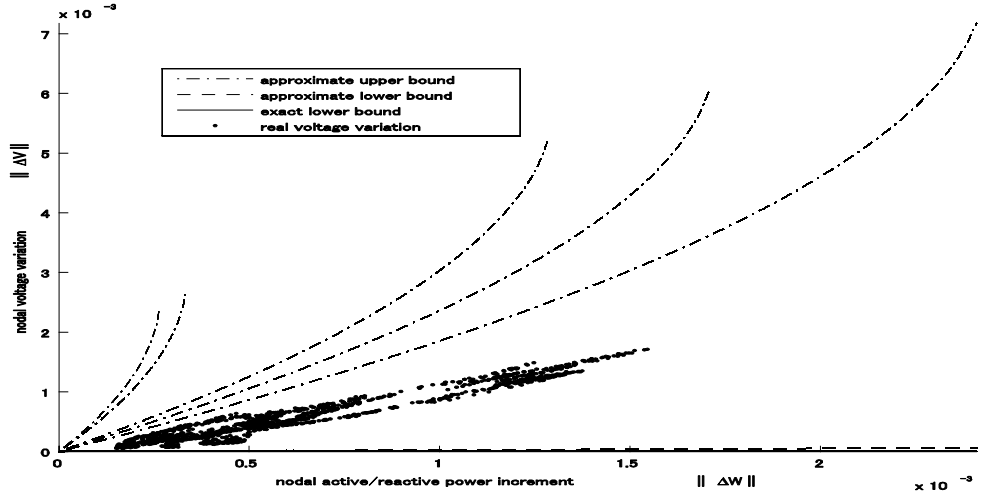


図２．例題電力系統の電圧変動の上（下）界

３．風力発電を含む電力システムのエネルギー貯蔵装置による安定化

風力発電は自然エネルギー発電の中では低コストであるため、多くの国で積極的に導入されつつある。我が国においても2010年度に300万kWという政府の導入目標が掲げられている（2005年度の導入実績は約108万kW）。しかし、風力発電の出力は風速によって大きく変動するため、系統容量（電力システムの全発電容量）に対してある割合以上の風力発電が導入されると、風力発電の出力変動に起因する周波数変動や電圧変動、系統動揺などが問題化する。我が国においては、風況の良好な地域は北海道、東北、九州など、系統容量の比較的小さい地域と重なっており、風力発電の導入が電力システムからの制約によって制限される程度まで導入がすでに進んでいる。風力発電をさらに導入するために、出力変動の抑制装置（蓄電池）とのセットでの導入が行われようとしている。我々はSMES（超伝導磁気エネルギー貯蔵装置）による風力発電出力変動の影響軽減の検討を行っている。

SMESとは、超伝導コイルに直流電流を流して磁気エネルギーの形で電力を貯蔵する装置であり、交流電力システムとは交直変換装置を介して接続される。本質的なエネルギー形態の変換がないので貯蔵効率が高い、パワーエレクトロニクスを利用した交直変換装置の制御によって電力だけでなく無

効電力も高速に制御できる、などの利点を有するため、電力の貯蔵だけではなく電力系統の各種の制御、例えば、発電機の動揺や電力動揺を抑制する系統安定化制御などに有望であると期待されている。瞬低（瞬時電圧低下）対策装置としてはMW規模のものがマイクロSMESの名称ですでに実用化されており、世界で10台以上が使用されている。量産効果によって価格が低下すれば、利用がさらに広がるものと考えられる。

当研究室では、風力発電を含む電力系統の風力発電出力変動による影響を、マイクロSMESを複数台分散設置することによって軽減することを想定し、最適な設置位置を決定する手法について検討を行っている。発電機の動揺の程度を表す評価指標を定義し、決められた数のマイクロSMESを、評価指標を最小化するように配置する問題、あるいは、評価指標をある値以下にするために必要なSMESの最小の数を求める問題などを、組合せ最適化問題の解法であるタブー探索や遺伝的アルゴリズムを適用して解き、手法の優劣を検討している［3］。

4．真空用高電界絶縁スペーサの開発研究

真空中で高電界を用いる機器にとって固体絶縁支持物（スペーサ）の表面に沿う放電（沿面放電）の抑制は極めて重要である。その理由は真空部分に形成される間隙と、必然的にそれと並列に形成される絶縁支持物表面とでは、表面の絶縁耐力が著しく低いためである。

真空中で高電圧ないし高電界に対する絶縁を必要とする機器には電力システムにおける真空遮断器のほかに、電子・陽電子やイオン・重イオンなどの荷電粒子の発生器・加速器、パルスパワー機器、電子顕微鏡、マイクロ波管、X 線管などがある。また、SED（Surface-Conduction Electron-Emitter Device）やFED（Field Electron emitter Device）などを用いる次世代薄型ディスプレイ（FPD：Flat Panel Display)、さらには人工衛星搭載の太陽電池アレイにおけるカバーガラスでも高電界絶縁が必要である。このように電力工学、電気電子工学、高エネルギー物理学、宇宙工学、産業応用、さらには医療・医学に関わる機器でも真空中の電気絶縁は基盤技術として重要である。これらの機器で使用される電圧波形はそれぞれの機器の要求に応じて数10 nsのパルス電圧から直流および商用周波交流電圧、さらにはマイクロ波領域の高周波電圧とほとんど全ての範囲にわたっている。沿面絶縁距離についてみると小さいもので100μm、大きいものでは1000 mm以上にもなる。

真空中では絶縁物表面の帯電が引き金となって沿面放電に至る。すなわち、真空中に固体絶縁物があると、固体と陰極および真空部が接する3重点の電界が強いので、比較的低い電圧でも電子が陰極から電界放出機構によって放出され、そのうちのいくつかは真空部から絶縁物の表面に入射する。これによって絶縁物の表面は電子と反対極性の正極性に帯電する。正に帯電することによって3重点の電界はますます強くなって電子の供給が増し、また絶縁物に対して電子が引き込まれやすくなるので加速度的に帯電が進む。このようにして帯電が進むと、電子の衝撃時に吸着ガスが放出されるので、真空が局部的に破れて気体放電が起こる。したがって、沿面放電を抑制するためには帯電現象を把握するとともに、絶縁物の形状や表面状態を工夫して帯電しにくい絶縁支持物を開発する必要がある。

ここでは、高電圧真空遮断器の開発研究に関連して、これまで不明であった交流電圧による帯電現象を実験的に明らかにした例を示す。実験に用いた模擬スペーサは円柱型で、ガラスや高分子製である。帯電の観測には陰極に埋め込んだ静電プローブを用いた。実験の結果、まず、帯電電荷は電圧位相によらず常に正極性である

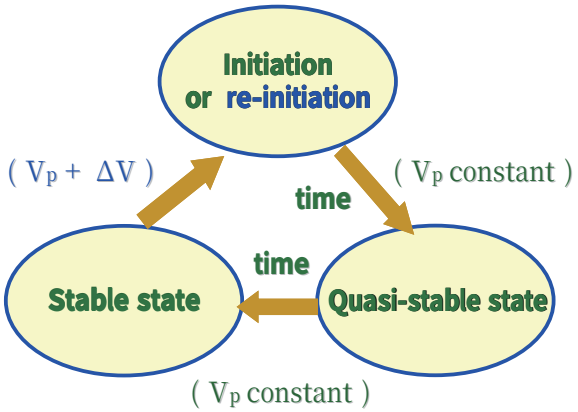
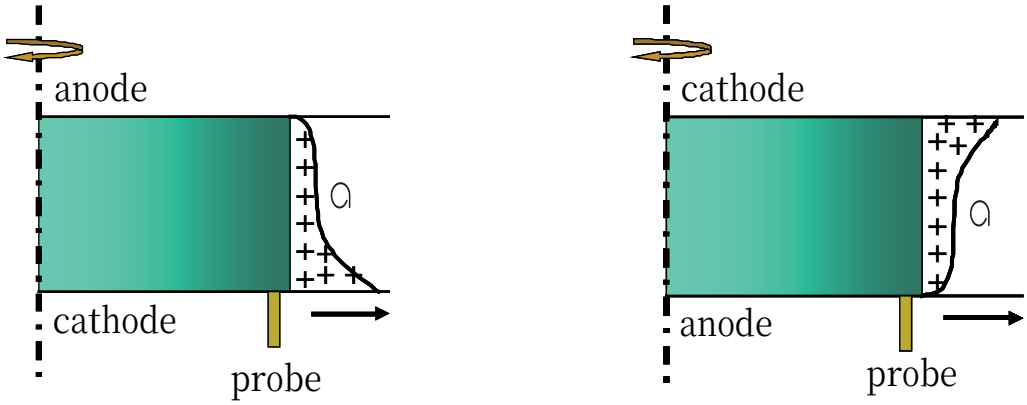


図３．交流電圧印加時の帯電過程



（a）正位相　　（b）負位相

図４．準安定状態における正・負位相の電荷密度分布

ことがわかった。また、印加電圧一定のもとでの帯電の過程として、図３に示すように、開始（電圧をステップ上昇したときは再開）、準安定状態、安定状態の３つの過程を経ることが明らかになった。シミュレーションによると準安定状態は、図４のように、電圧位相に応じて電荷密度の分布が変移することを示すと考えられる。スペーサの表面が光学的に滑らかな場合にはこの状態が維持され、安定状態に至らない。サブミクロンの粗さになると、現在のところ理由は不明であるが、転移が抑制されるために安定状態が達成される。また、表面を数ミクロンまで荒らすと表面の凹凸が電子の運動を阻害するので帯電しなくなる。

このような帯電現象は模擬スペーサの長さ10～50mmの広い範囲で確認された。また、表面を荒らして帯電を抑制することにより沿面放電電圧が1.5～２倍にも上昇することがわかった。この帯電抑制法は既にX線CT用のX線管などでも取り入れられ、今後のさらなる応用が期待される。

５．おわりに

当研究室で最近行っている主な研究内容を紹介した。これまでは電力システムの解析・制御が中心課題であったが、昨年4月から山本助手をスタッフとして迎えたことによって電力システムの構成要素に関する研究が加わり、研究の幅が広がった。電力システム工学は古くからある分野であるが、はじめに述べたように、電力自由化（規制緩和）、分散型電源の増加、電力需要の伸びの鈍化など、新しい流れに対応できるような基礎研究を進展させていきたいと考えている。

参考文献

［1］ J. Zhou and Y. Ohsawa, Quadratic function expressions and static structure characteristics in power systems, ***IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering,*** vol.1, no.3, 285--297, 2006.

［2］ J. Zhou and Y. Ohsawa, Robustness evaluation of static voltage stability through structural characteristics of power systems, ***Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology,*** Chongqing, China, 2006.

［3］ Y.-Z. Li, K. Wada, Y. Ohsawa and J. Zhou, Optimal allocation of micro SMES units for power system stabilization by means of genetic algorithm, ***Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology,*** Chongqing, China, 2006.

マイクロ波による無線電力伝送研究

工学研究科 電気工学専攻 電波工学協力講座マイクロ波エネルギー伝送分野
生存圏研究所 中核研究部 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野
教授 橋 本 弘 藏
kozo@rish.kyoto-u.ac.jp
助教授 篠 原 真 毅
shino@rish.kyoto-u.ac.jp
助手 三 谷 友 彦
mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

１．はじめに

当研究室が所属している生存圏研究所は、人類の生存に必要な領域と空間を「生存圏」としてグローバルにとらえ、その状態を正確に「診断」するとともに、それに基づいて生存圏の現状と将来を学術的に正しく評価・理解し、さらにその生存圏の「治療・修復」を積極的に行うことを目指した研究を行うことを目的として平成16年に発足した。「生存圏」は、「宇宙圏」「大気圏」「森林圏」「人間生活圏」の４つの圏から成り立つとして捉えられている（図１）。

生存圏研究所では、問題解決型の研究の柱「ミッション」を設定して分野横断的な研究を推進している。これらは「環境計測・地球再生ミッション」、「太陽エネルギー変換・利用」、「宇宙環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の４ミッションである。当研究室は「太陽エネルギー変換・利用」、「宇宙

図１．生存圏研究の概要

環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の各ミッションにマイクロ波応用技術でコミットしている。

本研究室では特にマイクロ波を用いた無線電力伝送、ワイヤレス給電の研究を推進しており、数十年後には宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波に変換して地上で利用する発電所SPS（Solar Power Satellite/Station）の実現を目指している。しかし、SPSは非常に巨大な宇宙システムであるため、その実現までに様々な基礎研究を行わなければならない。そこで当研究室ではSPSに至る研究段階を以下のように3段階に分け、地上応用研究を推進している。

1st Step：RF-IDやセンサー給電といった、現行法下での通信と同程度の強度のマイクロ波を用いた無線電力伝送や比較的弱い電力によるユビキタス電源等。

2nd Step：共用/専用周波数帯を用いたフェーズドアレーを用いた近/中距離の無線電力伝送。飛翔体、ロボット、電気自動車等、有線で不可能な電力伝送

3rd Step：専用周波数を用いた長/超長距離の無線電力伝送。SPS等

2．1st Step：ユビキタス電源

過去のマイクロ波電力伝送実証は１対１の送電を基本としていた。しかし、無線であるという特徴を生かしたもう一つの応用として当研究室が提唱する「ユビキタス電源」がある。近年のIT技術及びディジタル機器の発展により、生活の至るところにIT機器が存在し、便利に情報がやりとりできる社会、いわゆる「ユビキタス情報化社会」の到来が間近であると言われている。IT機器への給電に関しては、現状では、バッテリーによる給電が主流であるが、充電器の待機電力、使い捨てとなるバッテリーによる環境負荷の増大、充電器が機器ごとに異なり必要以上に生産されるといった問題を抱えている。そこで提唱されたのが無線により給電するシステム、「ユビキタス電源」である。「ユビキタス電源」とは、弱い電磁波を用いて電力伝送を行い、ある空間の至るところでIT機器をバッテリーレスで駆動、コードレスで充電することのできるシステムである。このユビキタス電源を実現した空間を「無線電力空間」と呼ぶ（図2）。基本的に人がいる場所でのユビキタス電源であるため、人体に対する安全基準である1mW/cm^{2}以下の空間となるようにしなければならない。この安全基準は熱効果を中心に決定されたものである。受電電力は最大でもその点での電力密度×受電有効開口面積であるため、携帯性を高める場合にはそんなに大きな電力を得ることはできない。しかし、近年の携帯機器の省電力化は急速に進んでおり、太陽電池のように室内外の場所や昼夜による変動のないユビキタス電源は今後有望と考えている。

図３は2.45GHz、150W程度のマイクロ波で約5.8m×4.3m×３mのシールドルームを無線電力空間として実施した携帯電話の充電実験の様子である。FDTDによるシミュレーション及び実験にて部屋中がほぼ均一な1mW/cm^{2}のマイクロ波密度となることを確認し、デュアル偏波レクテナ5並列接続で市販の携帯電話の充電に成功した。送電システムには経済性を考慮してマグネトロンと導波管スロットアンテナを用いた。受電整流システムはレクテナと呼ばれるアンテナ+整流回路である。

ユビキタス電源は、いつでもどこでも、である以上、1mW/cm^{2}以上のマイクロ波密度を用いることは難しい。そのため、この密度と持ち

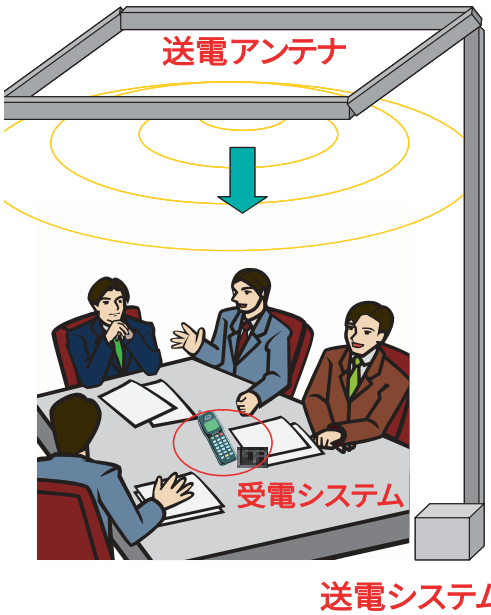


図２．ユビキタス電源（無線電力空間）の概念図

運べるレクテナの面積で決まる出力電力レベルがW級以下となり、それ以上の所用電力が必要な機器はバッテリーとの組み合わせを考える必要がある。ICやセンサー等、所用電力が更に小さなデバイスに関しては無線電力伝送のみの動作も可能であり、その代表はパッシブRF-IDである。RF-IDは現在900MHz帯での普及が進みつつあり、数mの無線電力伝送を利用している。マイクロ波電力伝送は今後様々なセンサー等へ応用が拡大していくことが期待されている。

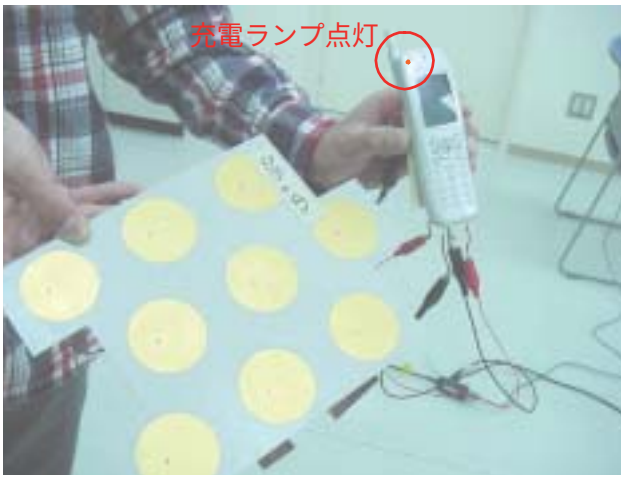


図３．無線電力空間での携帯電話充電実験の様子（写真左はレクテナ）

ユビキタス電源の課題は弱電力で高効率動作するレクテナの開発である。レクテナは通常ショットキーバリアダイオードを用いて整流を行うが、ダイオードの立ち上がり電圧よりも低い入力に対しては高効率の整流を行うことができない。現在入手可能なゼロバイアスダイオードは他のパラメータがレクテナに不向きで高効率化には成功していない。本研究室ではマイクロ波回路の改良によりショットキーバリアダイオードを用いた弱電力高効率レクテナの研究開発を行い、5.8GHz、1mW入力で50%以上、2.45GHz、0.1mWで50%前後の高効率を実現した。これは既存のパッシブRF-IDに用いられているレクテナよりも格段に高効率となっている。

また逆に、人が立ち入れない範囲、例えば床下、ガス管中、人立ち入り禁止の工場内等であれば1mW/cm^{2}の安全基準は技術的な縛りではなくなり、電力密度を送電/受電機器の許容限界まであげることができる。現在建物内の床下の空間を利用した無線配電システムの研究も行っており、電気配線工事の省略による初期投資の削減メリットと電気配線改修工事費の削減メリットが得られる新しい電気配線設備として提唱し、外部資金を得て研究を行っている。

３．2nd Step：フェーズドアレーを用いた無線送電

現在我々が実験しているユビキタス電源ではマイクロ波の密度分布やビーム方向を動的に変化させることは行っていない。現在はレクテナがない領域へも均一なマイクロ波密度を形成し、その代わりどこへ行っても一定の無線電力が得られるようにしている。さらにマイクロ波電力伝送の効率を向上させるためにはレクテナ目標の位置を動的に認識し、その方向にのみマイクロ波電力を集中制御する必要がある。マイクロ波を集中制御すれば、２節で示した我々の実験と同じ効果を約21Wで得ることができることが計算上分かっている。

図４．無線による到来方向推定実験の様子

そのためにはフェーズドアレーアンテナが必要となる。特に電力伝送であるために高効率かつ安価なフェーズドアレーが必要であるが、現在のフェーズドアレーは非常に高価であり、そのために民生応用が遅れている。さらに動的な方向設定や移動体への無線送電を考えた場合、正確な目標追尾システムも必要となる。正確な目標追尾システムの一方式として、レトロディレク

ティブというパイロット信号を用いた目標自動追尾システムの研究を行っている。レトロディレクティブシステムにはハードウェア方式とソフトウェア方式があるが、本研究ではソフトウェア方式を用いたレトロディレクティブシステムを研究対象とした。ソフトウェア・レトロディレクティブは複数の受信アンテナで受信されたパイロット信号の位相情報を元にパイロット信号到来角を計算する。計算機によりパイロット信号の到来方向が正確に検出されなければならないが、実際に用いる機器にはその特性にばらつきが存在する。そのため、特性のばらつきによる誤差が到来方向に及ぼす影響を自動的に較正する自動較正到来方向検出法が必須となる。そこで、いくつかの到来方向検出自動較正法について実証実験を行い（図４）、その精度を検証した。また到来方向からのずれの要因である通過位相誤差、ノイズによる誤差の定量的分析を行い、誤差の影響を減らしたシステムの検討を行っている。

さらに、大規模送電システムのビーム方向制御や自動較正システムの研究、最終的にはSPSを目指した、これらの送受電システムを組み合わせたレトロディレクティブシステムの高精度化、スペクトル拡散されたパイロット信号を用いた雑音に強く、妨害波と識別が可能で複数方向からにも対応できるレトロディレクティブシステムの研究なども行なっている。

４．3rd Step：宇宙太陽発電所SPS用軽量高効率マイクロ波送電システム

SPSは発電所であるため、売電により利益を得るためにそのシステムは安価軽量小型高効率である必要がある。しかし、現状のマイクロ波送電システム、特にフェーズドアレーシステムはまだまだ研究途上であり、効率も悪い。そこで本研究室では非常に安価で高効率な民生用マグネトロンに注目し、その放射マイクロ波の質の向上に関する研究を行っている。

マグネトロンは電子レンジに代表されるように主にマイクロ波加熱用として利用されているが、高効率・大出力・安価という長所を持つ反面、様々な周波数帯での雑音発生という短所を持つ。そこでマグネトロンの雑音発生源を解明し、最終的には低雑音マグネトロンを開発することを目的とした研究を行った。本研究では、マグネトロンを三次元的視点で解析するための基礎実験として、軸方向分割陽極マグネトロン（図５）の陽極電流測定、および実験結果にもとづいたマグネトロン内の電子軌道、特に軸方向の拡散運動について考察を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

・同軸二極管の場合、陽極電流の50%は陽極中央部に、30%は高圧入力側陽極に、15%はRF出力側陽極に、残りは陽極外装部にそれぞれ流れ、この電流分布は陽極電圧およびフィラメント電流には依存しない.

・マグネトロンの場合、陽極電圧が高いときは同軸二極管と同様の陽極電流分布が得られるが、陽極電圧が低減するにつれて高圧入力側への陽極電流が減少し、逆にRF出力側への陽極電流が増加する.

さらにこの民生用マグネトロンを用いて位相振幅制御マグネトロンの開発にも成功しており、この位相振幅制御マグネトロンを用いることでマグネトロン・フェーズドアレーの構築にも成功した。このマグネトロン・フェーズドアレーは安価高効率なフェーズドアレーであり、同時に電力の空間合成装置であるため、マイクロ波無線電力伝送以外にもプラズマ加熱や木材加工装置などへの応用も期待している。

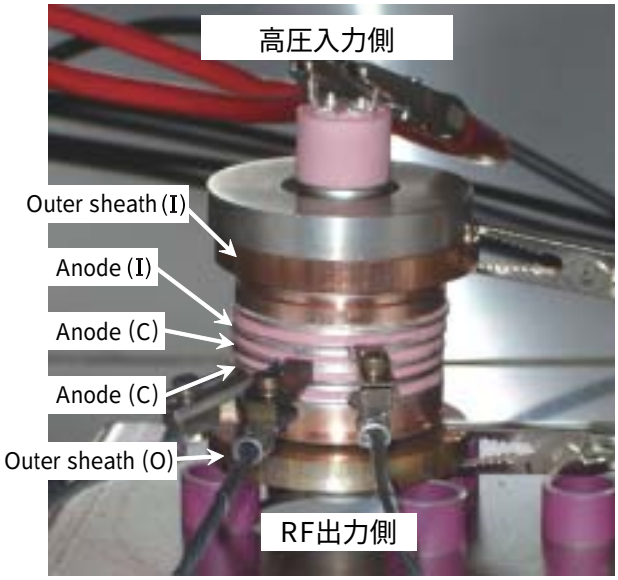


図５．軸方向陽極分割マグネトロン

５．おわりに

当研究室で行っている研究は、マイクロ波を用いた無線での電力伝送という、これまでにない新しい電波で電力を送る研究である。情報が無線となり、ユビキタス情報社会が実現しようとしている今、残るくびきは電源ラインであり、電源ラインもすべて無線とすることで真のユビキタス情報社会の実現が可能となると考えている。現行法の下ではマイクロ波電力伝送はISMバンドでの実験局以外の実施が困難であるが、RF-IDのように弱い電力での無線電力伝送からスタートし、その利便性が広まればいずれ専用の周波数帯を得ることも可能であろう。SPSコミュニティからはITUへの働きかけも行っている。無線電力伝送がまず「人間生活圏」を豊かにし、将来は「宇宙圏」へと人類生存圏を拡大するために大きな貢献をなすことができるよう当研究室では努力している。

これらの研究・実験は当研究所の研究設備METLAB（電波暗室と周辺測定機器）を用いて行ったものである。METLABはマイクロ波に限らず、広く電波研究を実施できる実験設備であり、全国共同利用設備である。以下のwebに共同利用申請情報があるのでご利用ください。

http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/metlab/

光速をめぐって

工学研究科電子工学専攻
量子機能工学講座　量子電磁工学分野
北　野　正　雄

１．光速の発見──マクスウェルの奇跡

光が１秒間に地球７周半の速さで飛んでいるということは、すでに知っていると思います。何しろ、最も速い乗物である旅客機の100万倍の速さですから、「すごい！」と一瞬感心しても、光に乗れるわけもないので、自分には関係のないことだと思ってしまう人が多いことでしょう。しかし、光の速さやそれにまつわる探求が、現代の科学技術のルーツであり、今でもいろいろな場面でわれわれの生活を支えてくれています。

光の速さが本格的に測定されたのは、19世紀の中ごろです。距離の分かった２点の間を光が往復する時間を測ればよいのですが、当時は短い時間を測定することがむずかしかったので、なるだけ遠い丘の上に鏡をおき、 往復に要する時間を長くとって実験が行われました。現在では、レーザとオシロスコープなどの簡単な時間測定の装置を使えば、 高校生でも光の速さを調べることができますが、当時の技術を考えると大変困難な実験であったことが想像されます。（たとえば、３kmの往復に要する時間は$2\,\mu s=2\times10^{-6}$sですから、ストップウオッチではとても測れません。）それでも、フィゾーやフーコーらは、高速回転する鏡や歯車を巧みに利用して、光の速さをおよそ3×10^{8}m/sと決めることに成功しました。有限とはいえ、その途方もない速さに彼らも皆さんと同様な感想をもったかも知れませんね。まして、この測定値が現在の科学技術の扉を開ける鍵の役割を果たすとは夢にも思っていなかったでしょう。

図１．若き日（1855年ごろ）のマクスウェル。（Wikipediaより）

この一見役立ちそうもない鍵を鍵穴に差し込み、 扉をみごとに開けてみせたのがマクスウェルです。英国ケンブリッジ大学で、電磁気学に関する理論的研究を始めていた彼は1855年、24歳のときに最初の論文を発表しました（図１）。当時の電磁気学は、実験によって明らかにされてきた、電荷間の静電力、磁石や電磁石のつくる磁場やその作用、時間変化する磁場による誘導電場などの多様な現象や効果を定量的に説明する方程式群（今日、マクスウェル方程式［１］とよばれている）としてまとめる段階にありました。

光は電荷や磁石に影響を与えることはありませんから、当時は電気、磁気とは全く無縁のものだと考えられていました。（今でも日常感覚としては、光が電磁波であるということはなかなか納得できませんね。光に触っても感電しませんし、磁針が影響をうけることもありませ

ん。）マクスウェルは理論を整理してゆく過程で、今まで知られていない効果の存在に気づきました。それは時間変化する電場が電流と同じように磁場を発生するというものです。変位電流とよばれるこの効果は、普通の状況ではあまり役に立つものではありません。しかし、電磁気学の方程式の数学的性質を大きく変えるという思いがけない効果をもたらしました。すなわち、電場や磁場が電荷や磁石のそばに留まらず、互いに絡み合った波として遠方に伝わることが理論的に予測されたのです。この未知の波の速さは理論から$V=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$と計算されました。ここで、$\varepsilon_0$は真空の誘電率（電気定数）、$\mu_0$は真空の透磁率（磁気定数）を表します。これらの定数は高校の物理でも習うように、それぞれ、電荷の間の力 F_e と平行電流間の力 F_m を求める際に必要な定数です。これらの定数はコンデンサの静電容量やコイルのインダクタンスを測定することで実際の値を求めることができます。たとえば、面積 S 、間隔 dの平行平板コンデンサに蓄えられる電荷 Q と電圧 U の比は$Q/U = C = \varepsilon_0 S/d$ と表すことができるので、Q 、U 、S 、d を測定すればε_0を定めることができます。実際このような方法でマクスウェルは２つの定数を測定によって定めて、V の値を計算してみました。すると、驚くべきことにフィゾーらが先に測定していた光の速度とほぼ一致したのです。

犬の歩く速さと人間の歩く速さがほぼ等しいからといって、だれも「人間は犬だ」と思いませんが、3×10^{-8}m/sという日常離れした値が一致したことから、「光は電磁波かも知れない」と結論づけてもそれほど不自然ではないでしょう。実際、マクスウェルは光が彼の理論が予測する電磁波の一形態であることを確証し、コンデンサや電流計を用いた室内実験による彼の光速度の決定方法を「この実験では光は装置を見るためにしか使われていない」といって自慢したそうです。（電磁波に関するマクスウェルの論文は1864年に出版されましたが、日本では明治維新の前夜、三条小橋池田屋事件の年にあたります。）

２．20世紀の科学・技術へ

光速をきっかけとする、マクスウェルの大発見は現代科学技術の根幹をなす２つの方向、（１）電波の発見とその通信への利用、（２）相対性理論の発見に発展してゆくことになります。

光の波長（0.5μm）と速度から、周波数を求めると10^{15}Hz程度になります。電場や磁場がこのように非常に短い時間で符号を変えているために、 通常の方法では平均化されてしまい、直接観測することができないのです。そこでもっと周波数の低い電磁場を発生する試みが行われました。1888年ごろ、ヘルツはコイルやアンテナなどの電気回路の部品を用いて波長が 1m 程度の電磁波を発生させることに成功しました。これが、電波（ラジオ波、ヘルツ波とも呼ばれる）の発見です。早速、マルコーニはこれを電線なしの通信、すなわち無線通信に利用して、1901年には大西洋横断通信に成功しました。2007年の今日では老若男女１人１人が携帯電話で無線通信を行うようになっていますが、これももとをたどればマクスウェルのお蔭なのです。

もう1つの方向は1905年のアインシュタインの相対性理論につながるものです。光速 c は波長 λ と周波数 f を用いて $c = f\lambda$ と表すことができます。（マクスウェルの論文では光速は V などで表されていましたが、後になってラテン語で速さを表す “celeritus” の頭文字をとって c と書かれるようになりました。最近では c_0 と書くことが推奨されています。）アインシュタインは光源から光速 c にほぼ等しい速度で遠ざかる乗物から、その光を見た場合を想像しました。（このように頭のなかで実験を行うことを思考実験といいます。）光を普通の波と考えると、遠ざかる観測者から見ると、波長は変わりませんが、周波数はドップラー効果で減少してほぼゼロになります。光速もそれに応じて減少してほぼゼロとなるはずです。ところが困ったことに、周波数がゼロ、波長が 0.5μmの電場や磁場はもはやマクスウェル方程式を満たさないのです。大方の人びとはマクスウェル方程式が不完全であると考えましたが、アインシュタインは逆にドップラー効果の式の方を疑いました。そして、 周波数が減少するのに対して、光速 c を一定に保つように、波長が長くなると考えました。これは全く直観に反する考え方ですが、30kmで公転する地球を乗物とみなして、光速の変化を捉えようとした

マイケルソンの実験の否定的な結果などとよく一致するものでした。（高校の物理で光のドップラー効果を扱わないのは、波長の変化を相対論なしで説明できないからです。）このように現代物理学の出発点である相対性理論はマクスウェルの電磁理論と光速に関する考察を通して生み出されました。

３．光の速度の制御 ― 光を止める

光は真空中では速度 c で伝わりますが、物質の中では異なった速度になりえます。物質内の光の速度を決めるのは実は少しむずかしい仕事です。それは波の形が時刻とともに変化してゆくので、どの部分に着目するかで異なった速度が得られるからです。図２を見てください。これはカメラのフラッシュのような一瞬の光（光パルスといいます）を表したものです。連続的に持続する光は正弦波で表すことができますが、光パルスの場合には正弦波の一部が切り出されたような形になっています。波の頂点を結ぶ線（点線）は包絡線と呼ばれます。一方、中身の正弦波は搬送波といいます。また、光パルスの始まり（つきはじめ）は波頭とよばれます。真空中では光パルスはその形を変えずに速度 c で伝わってゆきます。しかし、物質中では形が変ってゆくので、搬送波と包絡線と波頭はそれぞれ別の速さで伝わることになります。つまり、３種類の速度を考える必要が出てきます。これらはそれぞ

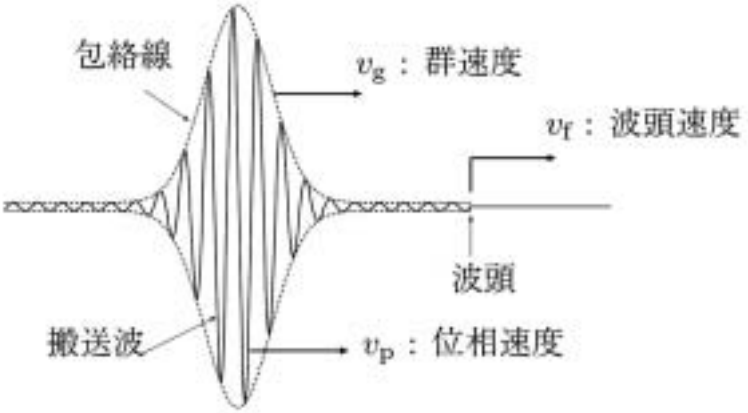


図２．3種類の波の速度。位相速度、群速度、波頭速度は真空中ではすべて c に等しいが、物質の中では波頭速度の他はそれぞれ別の値をとるようになります。

れ位相速度、群速度、波頭速度と名付けられています。

位相速度 v_p は物質の屈折率 n と直接関係しており $v_p = c/n$ であたえられます。位相速度は物質によって c より大きくなったり小さくなったりします。例えば、 水の中では $0.75c$ と少し遅くなります。波長もそれに比例して短くなります。真空中と物質中の波長の比はその物質の屈折率とよばれる量で、その名のように光線の曲がりを決定するものです。

群速度は、パルスの外形（すなわち包絡線）が伝わる速度をあたえていますが、その値は屈折率の周波数に関する微分で決まります。最近の量子光学の技術を用いると、物質の性質を操作することで、群速度を真空での値 c から大きく変化させることができます。（量子力学によれば、物理的な世界を構成するすべての要素は波と粒子の両方の性質を兼ね備えています。このような量子的な性質を利用して、光と物質を操作したり制御する方法を研究する分野を量子光学といいます。）1999年ハーバード大学のハウらは、光パルスをルビジウム原子の蒸気の中を自動車程度の速度（$10^{-7}c$）で伝えることに成功しました。その後、彼女のグループを含む複数の研究チームが光パルスをさらに減速して、完全に静止させることに成功しました。一方、別の実験グループは群速度を c より大きくすることに成功しました。多くの教科書には群速度は相対性理論のために c を超えることはありえないと書かれていますが、よく考えてみると、そのような推論は間違っていることが分かります。相対性理論の制約を受けて c を超えられないのは、波頭速度です。（教科書に書いてあることが正しいとは限らないことを示すよい例です。だからといって教科書を読まなくてよいということにはなりませんが。）

アインシュタインが思考実験で思い浮かべていた「止まった光」が100年の後に、実験室で実現できたといえます。厳密にいえば、彼が問題としていたのは真空中の速度ですから、直接の関係はありませんが、それにしても光が実際に止められるとは誰も予想しなかったことです。なお、群速度の制御に関する解説は参考文献［2、3］、やホームページ［4］をご覧下さい。

4．ものさしとしての光速

光速の意外な利用方法をもう一つ紹介しておきましょう。それは長さの基準（ものさし）としての利用です。さまざまな量を正確に測ることは、 現在の高度な科学技術の基盤を支える重要な技術です。カーナビに用いられているGPS（全地球測位システム）は26000km の高度の人工衛星から目標までの距離を測定しているのですが、その精度は数mですから、7桁以上の正確さが必要とされています。これは、30cmのものさしを用いて、光の波長の1/10程度の長さの違いを区別していることに相当します。

科学的な根拠にもとづいて最初につくられた長さの基準はメートル原器です。メートルという長さは、特定の国やグループに依存しない、人類共有の尺度とすることを目指して、われらが星である地球の赤道から北極までの距離の1/10000と定められたものです。しかし、地球をそのままものさしにすることはできないので、白金とイリジウムの合金を用いて１メートルの長さの棒（レール）を作成し、これをものさしとすることになりました。メートル原器の作成のためには、地球の子午線の長さとの比較が必要ですが、このための測量が1792年から1798年にかけて行われました。測量を委嘱された二人の科学者は、フランス革命の混乱の中、フランス北端のダンケルクからスペインのバルセロナまでの子午線（の部分）の長さ（と仮のメートル原器の長さの比）を精密に測定しました。この大事業にまつわる興味深いエピソードが、文献［5］に詳しく書かれています。

メートル原器のものさしとしての正確さは 0.1μm（７桁）程度で、すでに GPS の正確さに匹敵するものであったことになります。1960年からはクリプトン原子の出す光の波長が基準として用いられることになりました。これによって正確さは2桁ほど改善されました。光の波長を長さの基準として用いることは、すでにマクスウェルによって提案されていました。科学技術の進展によって、このクリプトンによるものさしも不十分になってきました。次の段階は、こんな比喩で理解できるでしょう。

地球に似たある星では、住人はみな、たいへん正確な時計を持っており、時間をきちんと測ることができました。しかし、長さについては、ものさしの作り方や使い方が未熟で、測るたびに結果がばらつきました。ところで、この星のあちこちに棲息する亀に似た生き物は、その歩く速さがなぜか一定しており、どの亀の速度を測ってもおよそ 0.03ヒロ/ハクでした。ハクはこの星の時間の単位、ヒロは長さの単位です。測定値が多少ばらつくのは、長さがうまく測れていないためであり、亀どおしを競争させると、ぴたりと同じタイミングでゴールすることが分かっていました。あるとき、この星のある科学者がこんな提案をしました。「これからは長さのものさしは廃止して、代わりに亀の速さを 0.031ヒロ/ハクと定義しよう。」つまり、亀が１ハクの間に進む距離を 0.031ヒロとしようというのです。

このような考えに基づいて、地球では1983年、「１メートルは真空中で光が 1/299 792 458秒の間に伝わる行程の長さ」ときめられました。真空中を一定速度で進む光が、かの星の亀の役割を果たしているわけです。以来、光速 c =299 792 458m/s は測定されるべき量ではなく、定義された量となりました。（９桁全部覚えておくといいですね。）量の比を定義することによって、間接的に単位を決めることは他にも例があります。真空の透磁率（磁気定数）は $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/mと定義されていますが、これによって電流の単位であるアンペアの大きさを決めたことになっています。

5．原子時計 ― 究極の精度

ついでですから、時間のものさしについても見ておきましょう。時間の単位である秒は1956年まで

は地球の自転周期を用いて定義されていました。つまり、地球の自転周期を86400s としていました。その後、地球の自転は変動が大きいことが判明したので、一時期、より安定な地球の公転が利用されるようになりました。さらに高い精度を求めて、1955年からは原子時計が時間のものさしとして採用されるようになりました。腕時計の中には水晶振動子という小さい音叉が入っていて、その振動を利用して時を刻んでいます。原子時計は水晶振動子の代わりに、セシウム原子がマイクロ波（ 1GHzから100GHz程度の電磁波の総称）に共振することを利用した装置です。腕時計は1日に1秒程度ずれるのが普通ですが、原子時計は数100万年に１秒しかずれないという素晴らしい性能をもっています。この原子時計の利用を前提に、1967年以来、「１秒はセシウム原子のマイクロ波振動の 9 192 631 770 周期の持続時間」（一部簡略化）と定められています。

このように時間の単位を地球の自転と無関係に定めることにしたため、原子時計の秒を単純に数えて時刻を決めると、長年の間にずれが積算されて不都合が生じます。そこで、うるう秒というしくみが利用されます。これは地球の自転と原子時計のずれが１秒に達する前に、１秒単位の補正を行うというものです。前回は2006年１月１日に調整が行われました。８時59分59秒の次に、８時59分60秒という余分の秒が挿入されました。（次の調整がいつ行われるかは未定ですが、次の機会には腕時計を前日に正確に合わせるなどして、うるう秒を実感してみましょう。1月1日、7月1日が候補日です。）

GPS衛星にはそれぞれ小型のセシウム原子時計が搭載されており、正確なタイミングで電波を発射しています。地上では複数の衛星からの電波を受信して、 その時間差から三角測量の原理で自分の位置を計算することができます。

50年近く利用されてきた原子時計もさらに精度の高い方式を求めて研究が進められています。マイクロ波よりも周波数の高い電磁波である光を基準として用いることで３ないし４桁の向上が期待されています。何と、10億年に1秒しかずれない時計をめざしているわけです。2005年のノーベル物理学賞はこのような次世代原子時計の開発に関するテーマへの貢献によってジョン・ホールとテッド・ヘンシュに送られました。（もう一人の受賞者であるグラウバーは量子光学理論のパイオニアです。）彼らは２人とも工作好きの少年そのままの人柄であり、新しいものを作るのが楽しくてたまらないとい

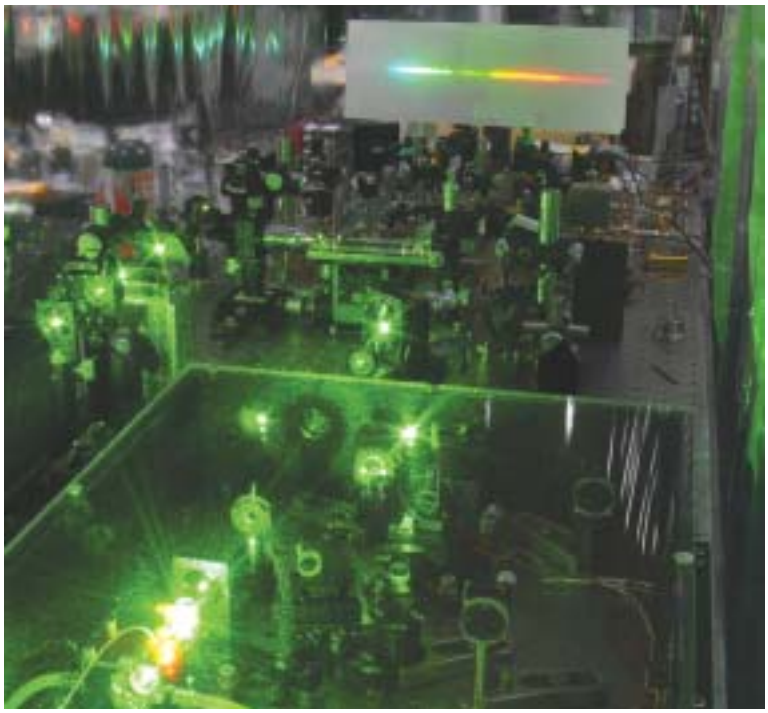


図３．光周波数コム装置。虹色に見えるのはこの装置からの光をプリズムを通してみたものです。連続的に見えますが、実際には非常に細かい1億本以上のとびとびのスペクトルからなっていて、周波数を測るものさしの役目をします。［杉山和彦 助教授（電子工学専攻）提供］

う様子で、研究をしておられます。図３の写真は、彼らの受賞理由の中心である光コムとよばれる特別なレーザー装置で、光の周波数と電波の周波数を正確に比較することができます［６］。われわれの研究室でも、光コムを用いた周波数標準の研究を行っています。

６．おわりに

人間に限らず地上の生物は太陽からの光を直接あるいは間接のエネルギー源として、また視覚によって周囲を観察する目的で最大限に利用しています。人類はニュートン以来、光の探求を通して、自然に対する理解を深めてきました。また、ここでのべてきたように、光に関する研究成果を利用して科学技術を非常に高度なものにしてきました。CDやDVDの読み書きに使われているレーザは人間が作り出した、非常に純度の高い秩序をもった光の一形態です。またインターネットや電話など情報通信のほとんどは、世界中に網の目のように張りめぐらされた光ファイバーにレーザを通して行われています。

量子性をはじめとして、光にはまだまだ解明すべき課題が数多く残されています。みなさんも21世紀のマクスウェルを目指して光の研究に挑戦してみませんか。電気電子工学科では多くのグループが光に関する研究を行っています。

参考文献

［１］北野正雄：マクスウェル方程式 ― 電磁気学のよりよい理解のために（サイエンス社、2005）。
［２］北野正雄、中西俊博：「風変りな光たち」、応用物理 72, 682 (2003)。
http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/24184/1/kitano-jap72.pdf
［３］北野正雄、中西俊博：「光の異常な伝搬を電気回路でシミュレートする」、日本物理学会誌 61, 758 (2005)。http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/24177/3/buturi-61-10.pdf
［４］群速度の電気回路によるシミュレーションに関する詳細：http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/wave/
［５］ケン・オールダー、吉田三知代（訳）：「万物の尺度を求めて ― メートル法を定めた子午線大計測」（早川書房）
［６］杉山和彦：「マイクロ波と光周波数を結ぶ周波数チェーン ― モード同期レーザーによる光周波数計測技術」、日本物理学会 58, 175 (2003)。

産業界の技術動向

最近のエネルギー事情と関西電力の取り組み

関西電力株式会社　取締役相談役
藤　　洋　作

1．はじめに

一般の方々の約半数が「原子力発電の利用が地球温暖化の原因となる」と考えているという残念な調査結果[1]があります。これは、「原子力発電所から出る放射性物質が地球温暖化を進める」という誤った理解から生まれているらしいのですが、このように、原子力を始めとするエネルギー問題については、間違った理解をされている方が意外に少なくありません。

昨今、原油価格の高騰やCO2削減へ向けた取り組みの必要性がマスコミに多く取り上げられるようになり、エネルギーセキュリティや地球環境問題についての人々の関心も随分高まってきました。国もこうした情勢変化を捉えて、エネルギーセキュリティや環境対応に軸足を置いた政策立案に動き出し、2006年の５月に経済産業省から、具体的数値目標を定めたわが国初のエネルギー戦略である「新・国家エネルギー戦略」が公表されました。

そこで本稿では、「新・国家エネルギー戦略」が策定された背景にある世界およびアジアのエネルギー事情や日本のエネルギーセキュリティ、今後益々重要性が増す地球環境問題について紹介するとともに、この二つの問題に対応していくカギとなる原子力について説明したいと思います。その上で、こうした背景を踏まえ、どのように「新・国家エネルギー戦略」に繋げていったのか、またそれに対し関西電力としてどのような対応をしているのかを説明したいと思います。

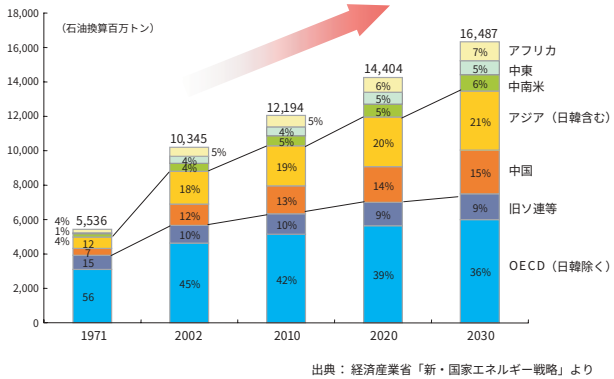
筆者は、1960年に電気工学科を卒業して関西電力に入社以来、関西エリアのエネルギーの安定供給に携わってきましたが、こうした経験も踏まえながら、巷でよく言われる省エネルギー推進や再生可能エネルギーの普及促進も確かに大事なことですが、そうした取り組みだけでは日本のエネルギーセキュリティ問題や地球環境問題の解決は難しく、やはり原子力が重要な役割を担っているということを説明いたします。世間には原子力と聞くだけで拒絶する方もおられますが、わが国の実情を踏まえ、準国産エネルギーといわれる原子力発電がどのように普及してきたかといったことについて、冒頭のような誤解を持っていただくことなく、理解を深めてもらえればと思います。

なお、本稿は、2006年11月17日に京都大学で行なわれた「平成18年度電気系教室懇話会」で講演した内容をまとめたものであります。

2．最近のエネルギー事情

（1）変化する世界のエネルギー事情

わが国のエネルギーセキュリティについて考



出典：経済産業省「新・国家エネルギー戦略」より

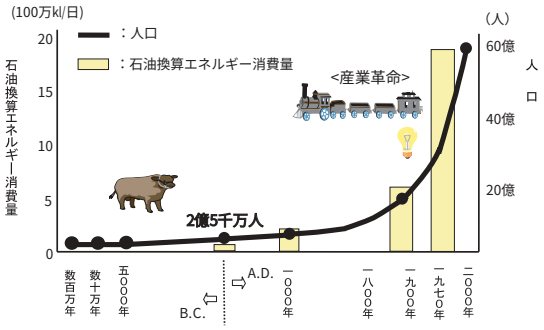
図１．世界のエネルギー需要の見通し

1　INSS JOURNAL 11 2004, 深江　千代一「原子力発電が地球温暖化の原因と考える人々の認識」
http://www.inss.co.jp/seika/pdf/11/050.pdf

える前に、まずは最近の世界のエネルギー事情について述べたいと思います。

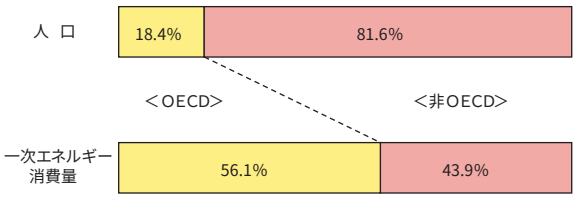
世界のエネルギー需要の見通し（図１）を見ると、2030年に向けて世界のエネルギー需要は急速に増える見通しで、中でも、OECD諸国はそれ程ではありませんが、特に中国を含めたアジア諸国の需要が急激に伸びていくことが分かります。今から約2000年前には、世界の人口は約２億５千万人程度しかなく、19世紀の産業革命までは人口とエネルギー消費は均衡し、世界的にも安定していました。しかしながら、産業革命以降、エネルギー消費は人口を超えて飛躍的に伸びています。こうして見ますと、エネルギー需給問題は、人類がごく最近直面するようになった出来事であることがお分かりいただけると思います（図２）。

ところが世界のエネルギー消費の内訳（図３）では、いわゆる先進国と先進国以外の国々とでは随分差が見られます。OECD諸国はエネルギー消費が極めて多く、世界の消費の56％を占めていますが、その人口は約11億５千万人で世界の18％を占めているに過ぎません。逆に言うと、世界の80％以上の人々で世界の40数％のエネルギーを分け合っていることを示しております。発展途上国を中心に、発電所や送電線等のインフラが整備されていないため、電気を使えない環境で暮らしている人が世界中に16億人いるとも言われているようであります。世界の人口を60億人とすると、実に25％以上の人が電気エネルギーにアクセス出来ない状況にあることになります。インターネットなどのIT技術に長けている人とそうでない人との間で所得面などで社会的不利益が生じる状況を「デジタル・デバイド」と言いますが、それ以前に、「エネルギー・デバイド」という現象が生じていることを我々は理解しておくべきと思います。



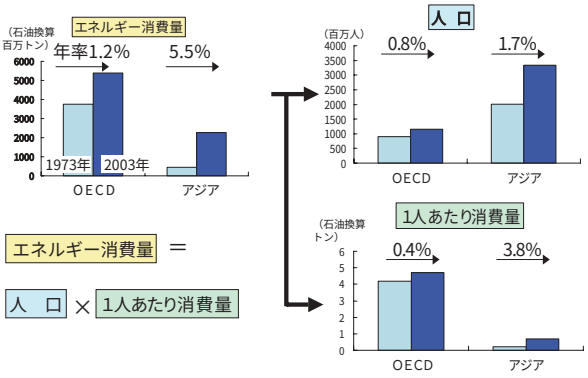
参考：総合研究開発機構「エネルギーを考える」

図２．世界の人口とエネルギー消費の推移



２００３年の世界の人口および一次エネルギー消費量
出典：日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧2006」

図３．世界の人口とエネルギー消費量のシェア



出典　日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧2006」

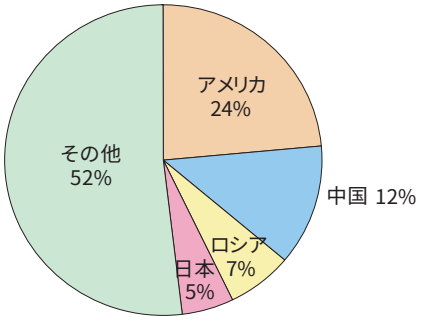
図４．世界のエネルギー消費の伸び

このように発展途上国は経済的には厳しい状況にありますが、エネルギー消費の点では大変大きな伸びを示しております（図４）。1973年から2003年までの30年間のエネルギー消費の伸びを比べると、OECD諸国は年率1.2％しか伸びていませんが、日本を除くアジア諸国では5.5％も伸びています。これを人口の伸びと一人当たりのエネルギー消費の伸びに分解しますと、OECD諸国の人口の伸び0.8％に対し、日本を除くアジア地域の人口の伸びは毎年1.7％ずつ伸びています。更に一人当たりの消費量では、OECD諸国は0.4％の伸びでありますが、アジア地域では3.8％も伸びています。アジア地域では、人口に加え一人当たりの消費量も伸びたことで、全体のエネルギー消費が大幅に増加していることが分かります。

その中でも、注目すべきはやはり中国であります。中国はこれからも、高い水準で経済成長を続け

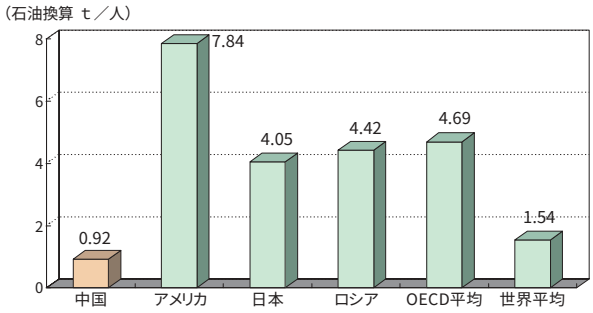
ると見られており、エネルギー消費も益々伸びていくと思われます。

世界における中国のエネルギー消費量は、現在は全体の１割強で、アメリカの半分程度となっています（図５）。ところが、各国の一人当たりのエネルギー消費量を見ると（図６）、中国の一人当たりエネルギー消費量は0.92石油換算ｔ／人で、OECD諸国の約５分の１、アメリカの約８分の１であることから、中国の人がOECD諸国並みにエネルギーを使うようになると、アメリカの２倍以上になり、世界のエネルギー消費量は５割増える計算になります。



2003年の一次エネルギー消費量
出典 日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧2006」

図５．各国のエネルギー消費量

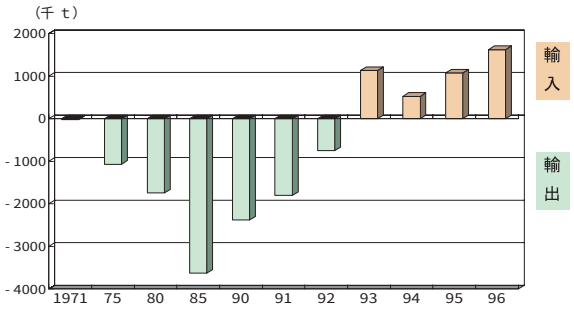


2003年　一人当たり一次エネルギー消費量
出典 日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧2006」

図６．各国の一人当たりエネルギー消費量

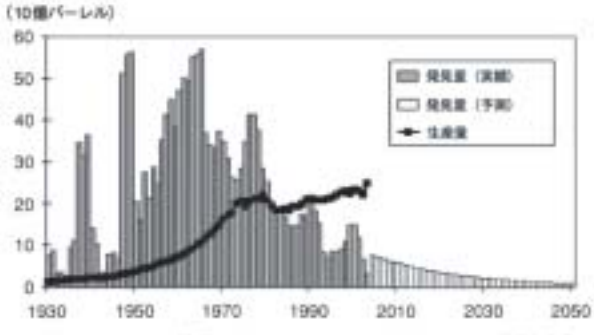
中国の石油の輸出入量を見ると（図７）、1992年までは輸出国であったものが、1993年からは輸入国に転じていることが分かります。関西電力でも中国の大慶油田から石油を輸入していた時代もありましたが、中国自身の消費が増えてきたことから、今では完全に輸入国となっており、将来的にも輸入量は拡大を続けると見られております。

こうしたエネルギー需給が逼迫していくという予想に、更に追い打ちをかけているのが、石油ピーク論です。石油をどんどん採掘していくと次第に採掘が困難な石油へと開発が進み、石油を採掘するためのコストの方が使うコストよりも高くなることで、それ以上採掘することが出来ない状態に陥ります。図８を見るとよく分かりますが、1970年代までは石油の生産量を示す折れ線グラフは、石油の発見量の実績を示す縦の棒グラフより低い位置にあり、その年において生産（消費）した量よりも、その年に新規に発見した量の方が随分多くなっています。しかしながら、1980年頃に一旦逆転し、1990年頃に再接近するもののその後は完全に逆転して、毎年の発見量より消費量の方が大きくなってしまいました。こうした事情も踏まえ、石油ピーク論が現実味を帯びてきました。石油は、近い将来生産が頭打ちになってしまい、今後生産は緩やかに減退に向かうとの考えが広まっております。IEA（International Energy Agency）の石油ピークに関する見通しでは、悲観的なケースで2013年か



出典　「エネルギーレビュー」2002年2月号

図７．中国の石油輸入量の推移

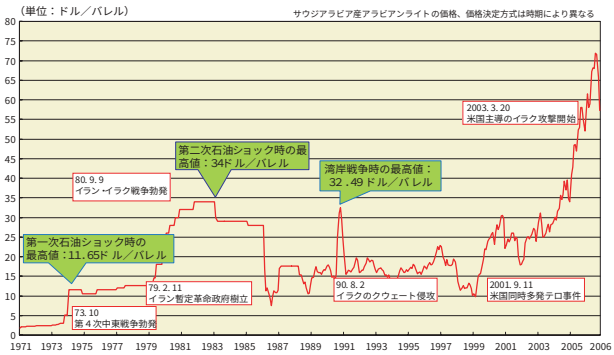


出典：季報　エネルギー総合工学　Vol 28 No.1（2005.04）

図８．拡大する石油発見量と生産量のギャップ

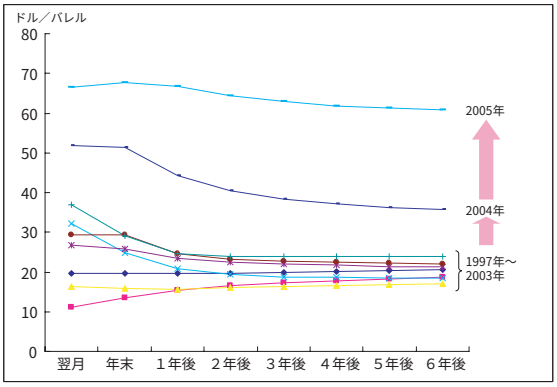
ら2017年の間に人類は石油ピークを迎えると言われています[2]。近年、東シナ海のガス田を巡って中国との間で激しいエネルギーの取り合いが生じているのも、こうした背景と無縁のものではありません。

石油を取り巻く大きな情勢変化は、当然のことながら、急激な石油価格の上昇をもたらします。思い起こせば1973年と1979年の二度のオイルショックにより、それまで2~3ドル／バレルであった石油価格が、1980年代には30ドル台まで上昇しました（図９）。その後価格は下がり、1990年代を通じて20ドル台と安定していましたが、最近は急激な価格上昇を見せ、一時は70ドルを超えたこともありました。NY商品先物市場のWTI[3]先物のフォワード曲線[4]も、このような石油価格の高止まり傾向が今後とも続くことを物語っております（図10）。



出典：経済産業省「新・国家エネルギー戦略」他

図９．原油価格の長期的な推移



出典：資源エネルギー庁「エネルギー白書2006」

図10．WTI先物のフォワード

次に図11をご覧いただきたいと思います。この絵は、筆者がエネルギーの話をする際によく用いるものでありますが、松の根の油と書いて「しょうこんゆ」と呼ぶものであります。第二世界次大戦の終わる1944～45年（昭和19～20年）頃、石油がなく飛行機を飛ばすことが出来なくなった日本軍が、松の根を乾溜して採った油で飛行機を飛ばす計画を立て、必死になってこの松根油を生産しました。ところが松根油を作るためには、わずか1.5リットルの松根油を作るために一人の人間が丸一日働かなくてはならないほど大変な労力が要るため、当時軍が計画していた生産量を確保するためには、１日130万人もの労働力を動員しないと実現できないということで、結局この計画は幻に終わり、一機も松根油で飛んだという記録は残っておりません。

筆者が敢えて松根油の話を持ち出すのは、例え少量であってもエネルギーを生産することの難しさを分かっていただきたいからであります。筆者にも経験がありますが、戦後の食料不足の時代、生活のために自分で畑を耕して芋を作ったりしました。食料を自給することは、労働としては大変でありますが、とにかく作るこ

松根油工場

松根緊急増産運動ポスター

図11．松根湯（しょうこんゆ）

2　経済産業省「新・国家エネルギー戦略」より

3　WTI（ウエスト・テキサス・インターメディエイト）：ニューヨーク商品先物市場で取引されているアメリカ産の原油の一種。米国での原油価格指標とされている。

4　フォワード曲線：先物市場における、直近の将来取引から数月・数年先の取引の先物取引価格を結び、先物価格の構造を示した曲線。

とは可能でありました。しかしながら、エネルギーを自給するとなると、結局山へ柴刈りに行くぐらいしか方法がなく、当時の最新の技術を用いても松根油程度しか浮かんでこない有様でありました。現在であれば太陽電池や風力発電等でエネルギーを得ることは出来ますが、それで飛行機を飛ばすということになると、普通の技術では困難です。食料不足は生死に関わる問題でありますが、エネルギー不足もそれを製造することが困難である点では、もっと人間の生死に関わるということがお分かりいただけると思います。

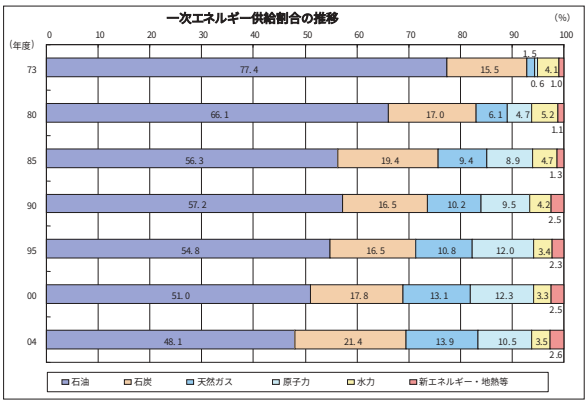
（2）日本のエネルギーセキュリティの重要性

以上を踏まえ、次に日本のエネルギーセキュリティについて考えてみたいと思います。

周知のとおり、わが国は石油の殆どを輸入に頼っています。極東の島国であることから他国からパイプラインで輸送することも出来ません。このような国情に鑑み、わが国はオイルショック以降、エネルギーセキュリティの問題に国を挙げて取り組んできました。その結果、1973年には一次エネルギー供給に占める石油燃料の割合が80％近くあったものが、天然ガスや原子力を導入することで、2004年には48％まで下がりました（図12）。加えて省エネルギーにも取り組んできたおかげで、GDP当たりの一次エネルギー消費量では、日本はアメリカの半分、イギリスの３分の２程度と、先進国の中でも群を抜く高いエネルギー利用効率を達成しております（図13）。

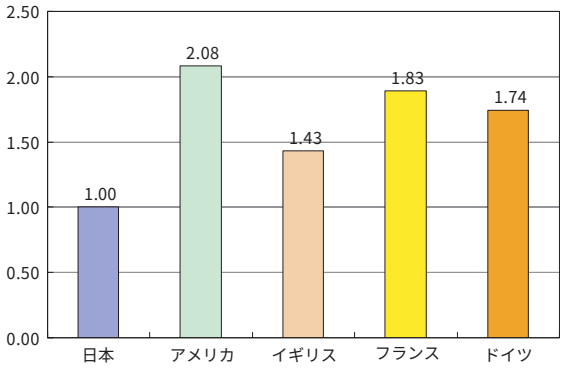
しかしながら、原子力を国産と見做せば日本のエネルギー輸入依存度は83.6％となりますが、ウランを輸入する原子力を国産ではないと考えると輸入依存度は95.7%まで上昇します。日本の輸入依存度の高さは他の国と比較しても顕著で、この事実を見ても日本のエネルギーセキュリティの脆弱性がお分かりいただけると思います（図14）。更に、原油輸入量に占める中東地域からの輸入割合、いわゆる中東依存度を見ると、オイルショック以降低下していた中東依存度が、近年は上昇していることが分かります（図15）。これは、中国を始めとするアジア地域の経済成長の影響で、中国やインドネシアといった産油国の国内需要が伸び、石油の輸出余力が低下したためではないかと考えられます。

長期的に見ても石油埋蔵量が豊富なのは中東地域ですが、政情が不安定であることから大きく依存することはわが国にとって不安材料になります。また一方で、需要面では、わが国の近



出典：日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧２００６」

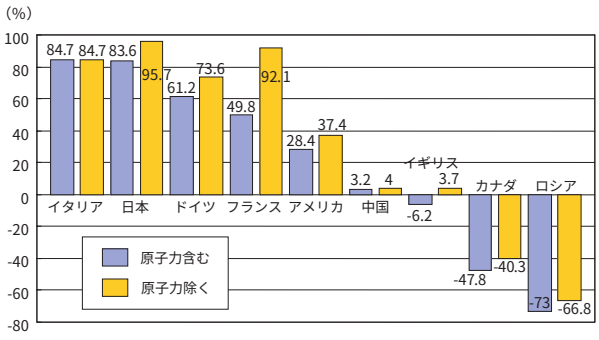
図12．日本の石油依存度の推移



※一次エネルギ消費量（原油換算トン）／実質GDP（いずれも2003年度実績値）を日本＝１として換算

出典：日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧2006」

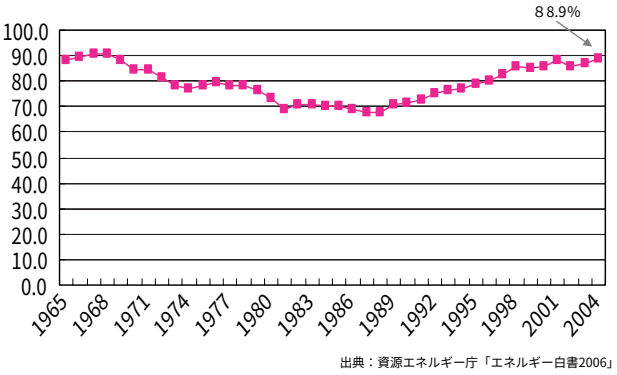
図13．GDP当たりの一次エネルギー消費量の各国比較



出典：（財）日本原子力文化振興財団「原子力」図面集2005-2006年版

図14．主要国のエネルギー輸入依存度（2003年）

隣にはエネルギー消費の急増が見込まれるアジア諸国があることから、今後エネルギーを取り合う可能性も高まっている状況にあります。



出典：資源エネルギー庁「エネルギー白書2006」

図15．日本の石油・原油輸入における中東依存度の推移

２．地球環境問題

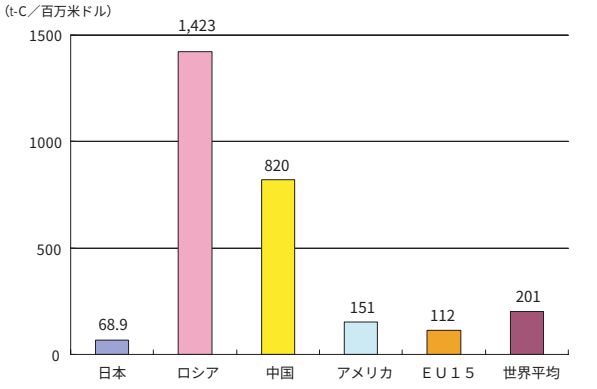
（1）京都議定書目標達成に向けた状況

次に、地球環境問題に話を移します。

1997年に京都議定書が締結され、2008年から2012年までの温室効果ガスをそれぞれの国で1990年比でいくら減らすかが決まりました。これが2004年の11月にロシアが批准したことにより、2005年の２月に発効する運びとなりました。わが国は1990年比マイナス６％の目標に向けて全力で取り組むことになりましたが、温室効果ガスの削減の問題というものは実に一筋縄ではいかない、難しい問題です。

（2）京都議定書の問題点

例えば、2002年のわが国の温室効果ガスの削減状況は、1990年比で逆に7.6％増加しており、目標を達成するためには13.6％を削減しなければなりません。ところが、GDP当たりのCO2排出量を見ると（図16）、日本は約70t-C/百万米ドルでEUの半分近く、アメリカの３分の１近くの数字であり、日本は温室効果ガスをあまり排出しない経済構造にあると言えます。したがって、日本がより一層削減することは他国と比べ非常に厳しく、それ故不公平ではないかと言われているわけであります。

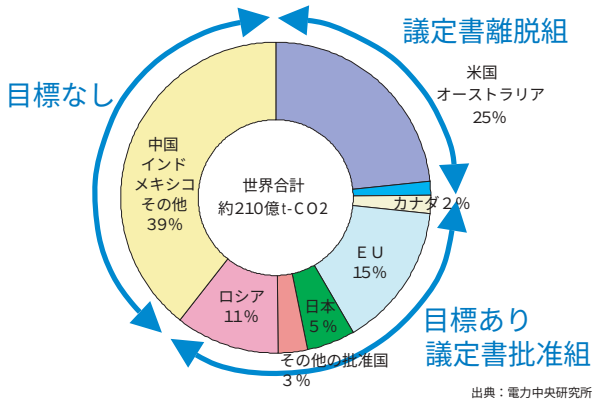


出典：日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧2006」

図16．各国のGDPあたりのCO2排出量（2003年）

もう一つは、折角ロシアが批准をしても、世界のCO2排出の40％近くを占めている中国やインドといった途上国[5]は目標自体が無く、同じく世界で排出されるCO2の25％を占めるアメリカ等は京都議定書の枠組みからは離脱しております（図17）。したがって、CO2を世界の30数％しか排出しないEUや日本等の削減目標を掲げている国が一生懸命削減に取り組んでも、世界全体で温室効果ガスの削減にどの程度効果があるのか疑問が出てきます。

2007年からは、2013年以降の第Ⅱ約束期間についての議論が始まるようですが、わが国としてはこうした不公平性や実効性の低さを改善していく必要があり、現在多くの関心を集めてお



出典：電力中央研究所

図17．世界のCO2排出割合（1990年）

5　非附属書Ⅰ国（148ヶ国）

ります。第Ⅱ約束期間の議論では、アメリカや中国、インドといった途上国を巻き込んだ、全地球規模の取り組みが不可欠です。因みに、2006年10月に環境省より発表された2005年度の温室効果ガス排出量の速報値[6]では、1990年比8.1％も増加しているとのことであります。

３．カギを握る原子力

（１）エネルギーセキュリティ面における原子力の優位性

これまで見てきたように、エネルギーセキュリティや地球環境問題は、今やわが国喫緊の課題であります。これに対応していくためには、省エネルギーや再生可能エネルギーの推進ももちろん大事なことですが、対応のカギを握るのはやはり安全運転を大前提とした原子力です。

関西電力の発電電力量に占める原子力の割合は、既に半分以上にまで達しております（図18）。また全国でも総発電電力量の３分の１近くまで達し、エネルギー全体に占める割合も11％程度が原子力エネルギーとなっております。

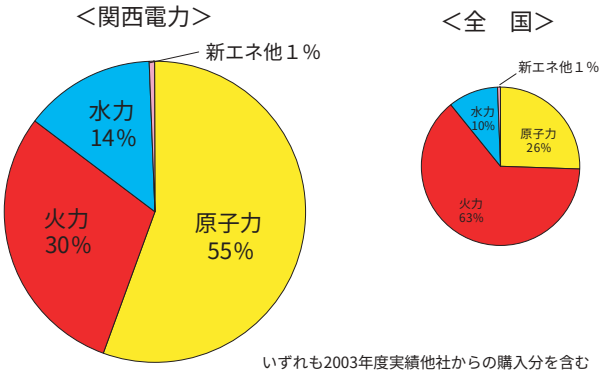


図18．発電電力量に占める原子力の割合

原子力がここまで開発されてきた理由は、一つに、原子力は面積あたりの発電量が他の電源に比べて非常に大きいという特性があるからです。

太陽光発電は発電を行うために非常に広い面積が必要となるため、簡単にエネルギー量を増やすことは困難です。また原子力は、わずかなウランから大量のエネルギーを取り出すことから、燃料の備蓄が容易で、更にそのウランはカナダやアフリカ、オーストラリア、ロシア、カザフスタンなどの政情の安定した国々に広く分布しております。

加えて、原子力で使い終わった燃料の中には、まだ燃料として利用できるウランが約94％（ウラン235が約１％、ウラン238が約93％）、プルトニウムが約１％も残っており、これをもう一度原子燃料サイクルで再処理して取り出して使うことで、天然ウランの消費量を減らすということも可能になります。原子力が国産のエネルギーに準ずると呼ばれるのはこうした理由からであります（図19）。

なお、プルサーマルと言うのは、再処理工場で取り出したプルトニウム酸化物とウラン酸化物の混合粉末から混合酸化物（MOX）燃料を作り、それを熱（サーマル）中性子炉である軽水炉で燃やす技術のことです。この技術はヨーロッパを中心に多くの原子炉で行われており、日本でも現在各地で実施計画が進んでおります。

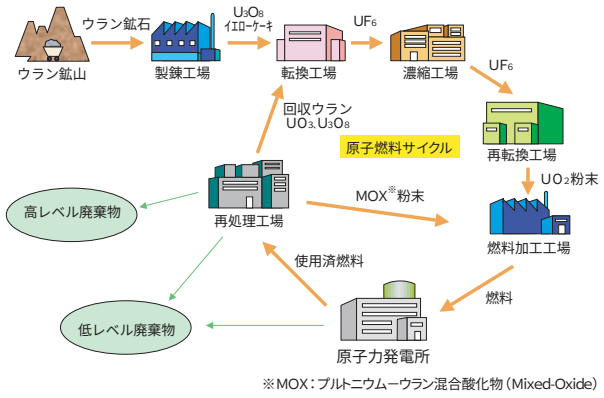


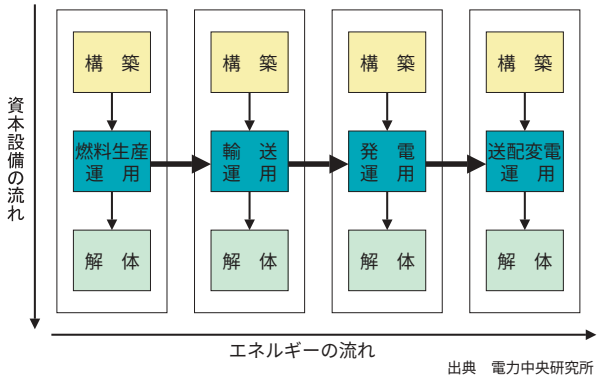
図19．原子燃料サイクル

（２）CO２を排出しない原子力発電

また、原子力にはエネルギーセキュリティ面での優位性だけでなく、燃料を起源としたCO2を排出しないという特性もあります。発電してエネルギーを取り出す場合、発電段階だけではなく、色々な

6　環境省HP「2005年度の温室効果ガス排出量速報値」

段階でエネルギーが必要となります（図20）。火力発電の例で言うと、燃料を生産するための施設を作り、それを解体するためにエネルギーが必要となります。そして生産した燃料を輸送する船を造ったり、発電する発電所、そして最後は電気を送電する設備を造るためにエネルギーが必要になりますが、CO2排出を評価する場合は、これら全体でのエネルギーを見ないと、その発電から生じるCO2の量を測ることは出来ません。

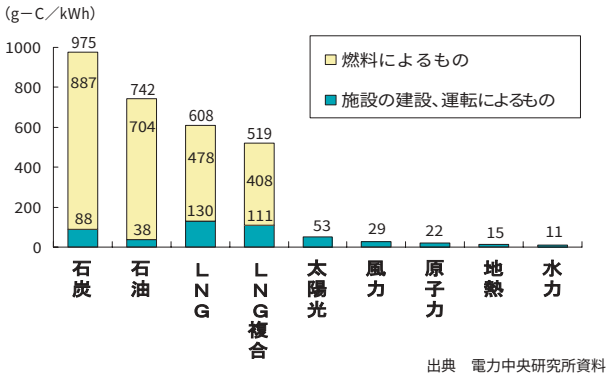


出典　電力中央研究所

図20．発電のライフサイクル

これを計算したものがライフサイクルCO2排出量です（図21[7]）。

発電電力量当たりのライフサイクルCO2排出量を見ると、CO2排出が一番多いのが石炭で、1kWhの電気を作るために約1kgの炭素が排出されます。次いで石油、LNGといった順で発電電力量当たりの炭素の排出は減っていきます。そして一般にCO2を排出しないと思われている太陽光、風力、原子力でも炭素を排出するわけですが、その量は化石燃料を使っているものに比べ格段に少ないものです。その中でも原子力は、自然エネルギーと言われる風力よりも炭素の排出が少ないことに是非注目していただきたいと思います。原子力は、鉱石を採掘したり、それを精製、運搬、燃焼、送電し、また発電所を造って解体するためにエネルギーが必要となりますが、それらを全部合わせても、他の自然エネルギーよりも良いか、同程度しかCO2を排出しません。これが、原子力が地球温暖化のカギだという理由であります。



出典　電力中央研究所資料

図21．発電電力量あたりのライフサイクルCO2排出量

（3）原子力を巡る世界の動向

原子力を取り巻く昨今の情勢も随分様変わりしました。国内においても、2004年６月から１年以上かけて検討が行われた原子力政策大綱策定論議の中で、再処理路線に対する安全性や経済性、エネルギー安定供給等の観点から検討が行われ、最終的に再処理路線を継承する決定がなされたこと[8]は記憶に新しいことと思います。

海外においても、1986年のチェルノブイリ事故を契機に原子力の推進は停滞しておりましたが、例えば2005年８月にアメリカで成立した包括エネルギー法により、1970年代以降新規建設が途絶えていた原子力発電所の建設計画が動き出しております。また、イギリスでも2006年７月に政府がまとめたエネルギー政策に係る報告書の中で、原子力発電の経済性や地球温暖化に対する役割が再評価され、原子力発電の新規建設を含む現実的なエネルギー政策へ路線修正がなされました。更には、スウェー

7 原子力について：電力中央研究所「ライフサイクルCO2排出量による原子力発電技術の評価」(2001年８月)、他電源について：電力中央研究所「ライフサイクルCO2排出量による発電技術の評価」(2000年３月)

8 「わが国においては、核燃料の資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、安全性、核不拡散性、環境適合性を確保するとともに、経済性にも留意しつつ、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基本方針とする。」原子力政策大綱、2005.10.11、原子力委員会

デンなど脱原子力政策を決めた国においても見直しの動きが出てきております。

こうした動きの背景には、当然のことながら世界におけるエネルギー情勢の変化や地球環境問題の双方が深く関わっていることは言うまでもありません。

4．わが国の対応

（1）これまで：競争政策の推進

では、以上を踏まえ、わが国のエネルギー政策がどのようになっているのかを説明したいと思います。

現在のわが国のエネルギー政策は、2002年６月に成立した「エネルギー政策基本法」に基づいて策定されます（図22）。この法律の中には、エネルギー政策の基本方針として、安定供給の確保を第一に、次いで環境への適合を謳い、これら二つを十分に考慮した上で市場原理の活用策を講じるよう求めています。

エネルギー政策の基本方針

・安定供給の確保

・環境への適合

及びこれらを十分に考慮した上での

・市場原理の活用

図22．エネルギー政策基本法（2002年6月成立）

一方で、1990年代の日本は、バブル崩壊により経済が停滞し、雇用不安、国際競争力の低下といった多くの課題があり、それを規制緩和による市場原理の活用により経済再生を図ろうとして、電力の自由化が推し進められました。1995年の卸分野の自由化を皮切りに、1999年、2003年と計３回制度改革が行われ、今では小売分野の約６割が自由化対象となり、一般の電力会社以外の新しい電気の供給者が電気の小売ができるようになりました。この時期は、今日のようなエネルギーセキュリティや地球環境問題への対応といった課題はそれ程顕在化しておりませんでした。それ故、競争政策の推進に軸足の置かれた時代と言うことが出来ると思います。

なお、電力自由化の成果については、2006年５月に電気事業分科会傘下の制度改革評価小委員会が報告書[9]を取りまとめ、競争原理を活用した効率化は着実に進展し、供給信頼度の低下もなく、安定供給に支障が生じていないことを認めております。また同時に、今後の制度改革に当たっては、安定供給や環境保全との両立に留意するよう求めております。

（2）今後：「競争」から「セキュリティ・環境」へ軸足シフト

こうした背景が、冒頭述べた「新・国家エネルギー戦略」の策定にも共通します。

前述のように、「新・国家エネルギー戦略」は、最近のエネルギー情勢変化や現状認識を踏まえ、エネルギー安全保障を軸に、わが国の新たな国家エネルギー戦略の構築を目的とした、わが国初の具体的な数値目標を伴う取組戦略です。

例えば、現在約50％ある石油依存度を2030年までに４割に下げるといったものや、現在15％しかない日本の原油の自主開発率を、2030年までに４割に引き上げようといった目標が掲げられております。また当然のことながら、原子力についても、2030年以降においても発電電力量に占める原子力発電比率を30～40％程度か、それ以上を目指すとしており、原子力の重要性を踏まえた戦略目標となっております（図23）。

（）内は数値目標

【世界最先端のエネルギー需給構造の実現】
（我が国の一次エネルギー供給に占める石油依存度（現在約50％）について、2030年までに40％を下回る水準を目指す）
○ 省エネルギーフロントランナー計画
（我が国のエネルギー効率について、2030年までに更に少なくとも30％の効率改善を目指す）
○ 運輸エネルギーの次世代化計画
（我が国の運輸部門の石油依存度（現在ほぼ100％）について、2030年までに80％程度を目指す）
○ 新エネルギーイノベーション計画
○ 原子力立国計画
（2030年以降においても発電電力量に占める原子力発電比率を、30～40％程度か、それ以上を目指す）

【資源・エネルギー外交等の総合的な強化】
○ 総合資源確保戦略
（我が国の引取量ベースでの原油の自主開発比率（現在約15％）について、2030年までに40％程度を目指す）
○ アジア・エネルギー協力戦略

【緊急時対応の充実】
○ 緊急時対応の強化

【共通的課題】
○ エネルギー技術戦略
○ その他環境整備

出典：経済産業省「新・国家エネルギー戦略」より抜粋

図23．「新・国家エネルギー戦略」の戦略項目と数値目標

9　電気事業分科会　制度改革評価小委員会報告書（2006.5.22）

５．関西電力の取り組み

（1）「新・国家エネルギー戦略」を踏まえた取り組み

では、「新・国家エネルギー戦略」に見られるように、エネルギーセキュリティや地球環境問題へと政策の軸足がシフトしてきたことを踏まえ、関西電力がどのように取り組んでいるのか、以下紹介いたします。

図24の関西電力の電源構成の推移をご覧ください。昭和45年（1970年）以降、安全運転を大前提に原子力を増加させてきた様が分かっていただけると思います。わが国全体の電源構成に比べると、原子力発電の比率が一層大きくなっているという違いはありますが、関西電力では、原子力発電を中心に石炭、LNG等の非石油燃料による火力発電等の開発により、電源の多様化、いわゆるベストミックスを図ってまいりました。

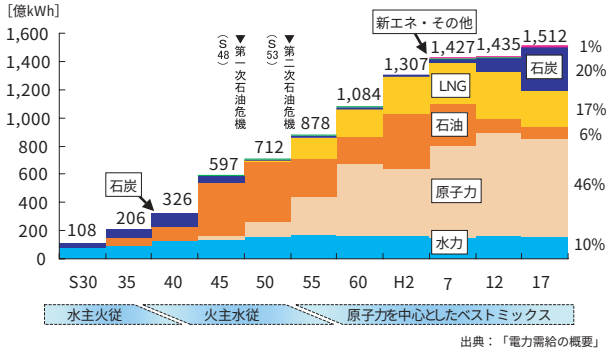


図24．関西電力の電源構成の推移

次に、原子力の安全運転に関し、是非とも理解いただきたいことがあります。それは、原子力発電所は経年している、すなわち運転年数が増えているということです。わが国の原子力発電所の運転年数のグラフ（図25）を見ると、運転開始から25～30年ぐらい経過しているプラントが結構あります。これは、初期のプラントの多くが1970年代から1980年代にかけて運転開始したためですが、今後この棒グラフは時間の経過とともに右側にシフトしていくことになります。そのため高経年化対策と呼ばれる、原子力発電所の機器を長期間使用する場合の機器の健全性を評価する取り組みを行ってきております。

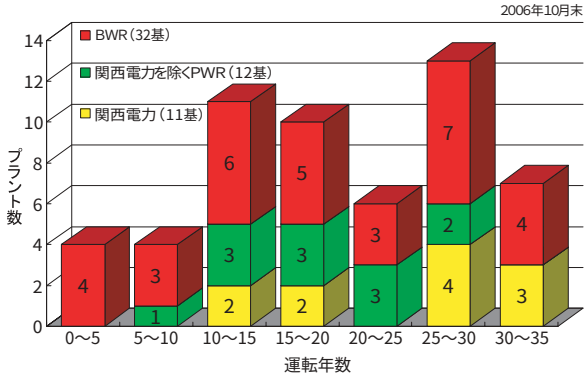


図25．わが国の原子力発電所の運転年数

高経年化対策は、近年わが国が最も重点を置いて取り組んでいる活動の一つで、原子炉等規制法に基づく法令により、その実施が明確に求められております。

事業者は、運転開始から30年が経過するまでの間に、原子力発電所の機器を対象として、プラントの運転期間を60年と仮定した場合に発生が想定される経年劣化事象を抽出し、その時点での最新の知見をもとに健全性の評価をします。そして、この評価結果をもとに、今後10年間の保守管理活動として新たに追加すべき保全計画を策定し、その計画を実施していきます。これを10年毎に繰り返して行い、設備・機器の安全性、健全性を評価・確認するものであります。国は、このような事業者の評価結果や新たに追加する保全計画を審査し、評価することとしています（図26）。

何年も経過すると原子力発電所は老朽化しているのではないかと思っている方もおられるかもしれませんが、実は原子力発電所というものは、時が経てば中の設備や機器を取り替えます。パイプはもちろん、蒸気発生器や原子炉容器の

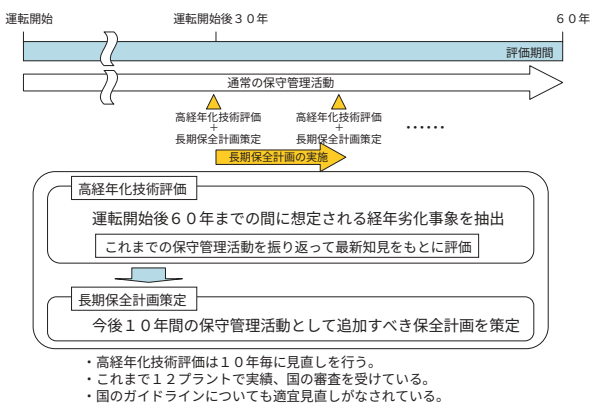
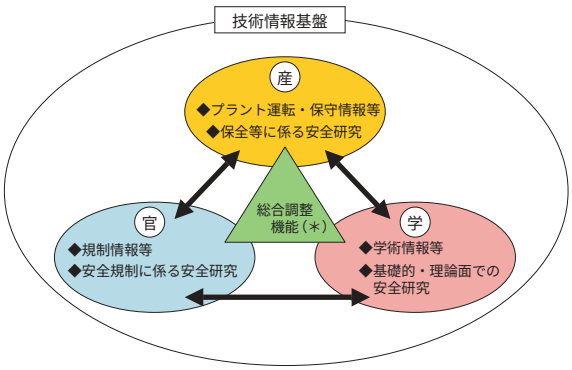


図26．高経年化対策活動と今後の動き

蓋、制御棒などの色々なパーツが取替え、更新されます。そして、それでも更に劣化する事象はないかを常に研究し、評価・確認するものが高経年化対策であります。

ただし、高経年化対策は運転開始後60年という長期間の経年劣化事象を想定するため、非常に高度な知識が必要となり、産官学が連携することが重要になります。すなわち、電力会社や原子力プラントメーカなどの産業界がノウハウを蓄積・技術伝承し、京都大学のような学が基礎的・理論的な研究を通じて知見を提供し、そして官が規制などを通じてバックアップします。この三者が上手く協力して、高経年化対策を進め、原子力発電所を長期にわたり、安全・安定的に運転する環境を整備する活動が大事になるわけです（図27）。この面における国際協力のなお一層の推進が今後望まれます。

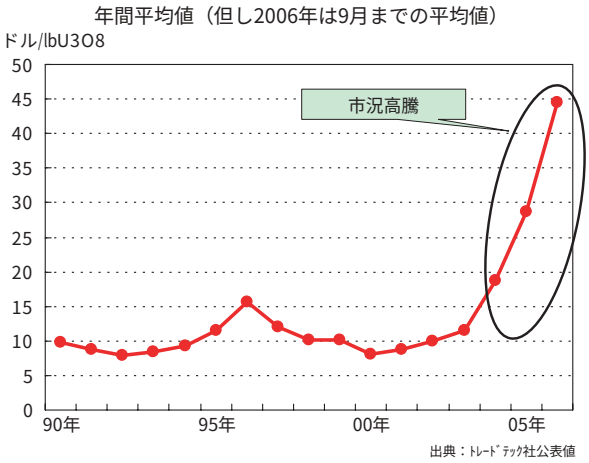


（＊）産官学が参加する委員会を独立行政法人原子力安全基盤機構に設置し、国が主体的に関与

図27．産官学の連携

筆者の関与する㈱原子力安全システム研究所でも、高経年化対策として、どのような原因でどのように部材にクラックが生じ、どう進展するのかといったことを、素材にまで遡って研究しております。

原子力関連でもう一つ述べておきたいものは、福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」への協力です。この計画は、2005年３月に福井県が策定したもので、地域と原子力の自立的な連携を目指して、原子力を中心としたエネルギーの総合的な研究開発拠点地域となることを目的としております。関西電力としても、本計画の理念に賛同し、同計画に全面的に協力することにしております。なお、詳細は福井県総合政策部電源立地地域振興課のホームページ[10]に載っておりますので参照いただきたいと思います。



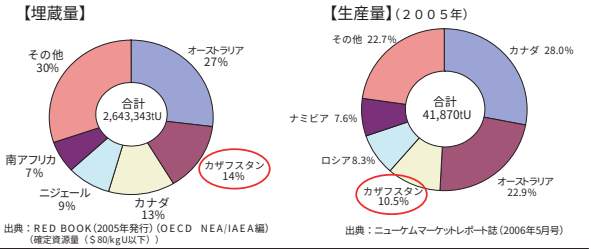
出典：ﾄﾚｰﾄﾞﾃｯｸ社公表値

図28．ウラン価格の上昇とウラン市場の動向

次に、エネルギーセキュリティ強化の一環として、エネルギー資源の安定的な確保に向けた関西電力の取り組みについて紹介します。

近年のウラン価格の上昇（図28）と世界的なウラン獲得競争の激化を踏まえ、ウランの安定的な確保策を構築する必要が生じております。そこで、関西電力では、2006年の１月に、ウランの埋蔵量と生産量が豊富で、比較的安定した政治経済情勢にあるカザフスタン共和国（図29）における新規ウラン鉱山開発プロジェクトへ参画することにしました。

このプロジェクトは、関西電力と住友商事、そしてカザフスタン共和国の国有原子力会社であるカザトムプロム社の三社で、ウラン鉱山の開発、ウラン精鉱の生産・販売を行う現地事業



出典：RED BOOK（2005年発行）（OECD NEA/IAEA編）（確定資源量（$80/kgU以下））

出典：ニューケムマーケットレポート誌（2006年5月号）

比較的安定的な政治経済情勢と、豊富なウラン埋蔵量に着目して、カザフスタン共和国におけるウラン鉱山開発プロジェクトに参画

ウランの長期的な安定確保が可能

図29．ウラン市場におけるカザフスタン共和国の位置付け

10　福井県総合政策部電源立地地域振興課　http://info.pref.fukui.jp/tiiki/kyoten/torikumi.html

会社に投資を行うもので、これにより関西電力はウラン精鉱の優先引取権を有することになりました。

また、石油の安定調達についても、商社等の取引先による手配ルートに加え、自ら手配する自社手配ルートにおいて、タンク容量の増量化や発電所近傍のタンクを確保して備蓄機能を高めたり、専用使用船契約を締結して内航輸送力の機動性を確保しております（図30）。

同様のことはLNGでも行っており、調達先を東南アジアや豪州、中東と分散するとともに、ガス田権益確保や液化プラント会社への投資、自社の支配船による輸送、受入れ・販売などを通じて、上流から下流までのいわゆる「LNGバリューチェーン」を構築しております（図31）。

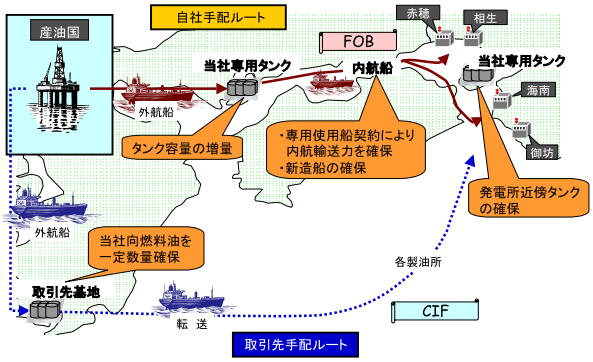


図30．石油調達チェーンの維持・強化

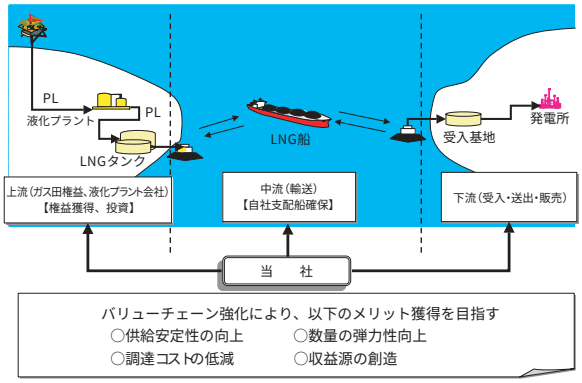


図31．LNGバリューチェーンの構築

次にエネルギー利用効率の向上のため、関西電力がメーカと協力して開発に取り組んでいるヒートポンプという技術を紹介します。

ヒートポンプ技術が活用されたもので、一般に馴染みの深いものはエアコンではないかと思います。冷房を例にすると、室外機で圧縮した冷媒を室内で圧力を下げると、膨張して熱を奪い室内の空気を冷やします。その冷媒は外に出て室外機でもう一度圧縮され、この時熱が出て外の空気を暖めます。すなわち、室内の熱をあたかもポンプのように外に運び出すのでヒートポンプと呼ばれております。

この技術を活用すると、COP[11]を６とした場合、例えば100の仕事を行うために必要な投入エネルギーが40で済むことになり、従来のガス式燃焼方式であれば118投入しなければならないことに比べ、約66％の省エネルギーが可能になります（図32）。

因みに、このヒートポンプのうち高効率なものを、地球温暖化対策として民生部門における空調や給湯といった冷温熱需要の全てに活用すると、民生部門のCO2排出量が約１億トン削減

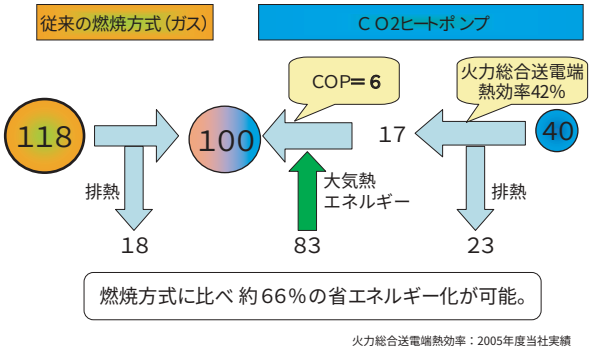


図32．ヒートポンプの省エネ性

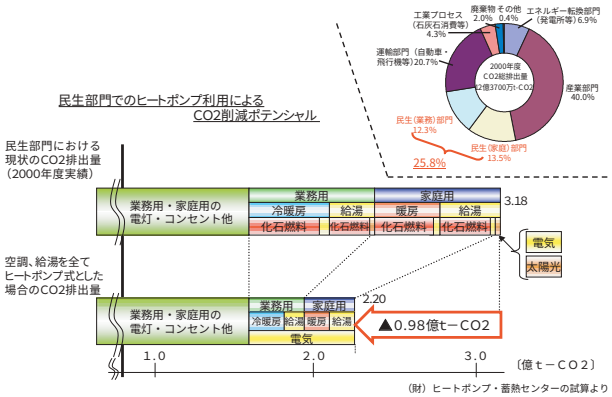


図33．ヒートポンプのCO2削減ポテンシャル

11　COP（Coefficient of Performance）：消費電力当たりの加熱・冷却能力を表したもので、この値が大きいほど効率がよいことを示している。COP＝冷暖房能力（kcal/h）／ヒートポンプの消費電力（kW）×860（kcal/kWh）。COP＝６とは、１kWh（＝860kcal）の電気によって、６×860＝5160kcalの冷暖房効率が得られることを示している。

され、約３分の２になる程の威力を持っているとの試算もあります（図33）。

また詳細な説明は省略しますが、関西電力では、その他にも、再生可能エネルギーの普及に向け、石炭発電所におけるバイオ燃料の混焼や風力発電、小水力の開発を行ったり、水素社会を見据えた研究等も積極的に行っております。

（２）グループ一体となったお客さま価値の創造に向けた取り組み

最後に関西電力のグループ経営ビジョンについて簡単に説明させていただきます。

関西電力では、「エネルギーをコアに、暮らしの基盤となる領域において、お客さま満足No.1企業」を目指す経営ビジョンを掲げております。これをもとに年度の経営計画を立てている訳でありますが、平成18年度（2006年度）では３つのアクションプランにブレイクし、その最初に安全最優先を掲げ、お客さま価値の創造、技術の向上等に取り組んでおります（図34）。

関西電力グループで保有する経営資源を最大限に活かし、総合エネルギーや生活アメニティ、情報通信といった様々なサービスをお客さまに提供し、満足していただくことで、グループ全体での持続的成長を目指す、これが関西電力が考えるグループ一体となったお客さま価値の創造であります（図35）

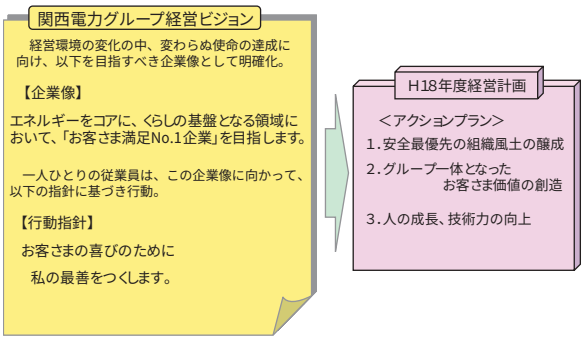


図34．関西電力グループ経営ビジョンおよび
H18年度経営計画アクションプラン

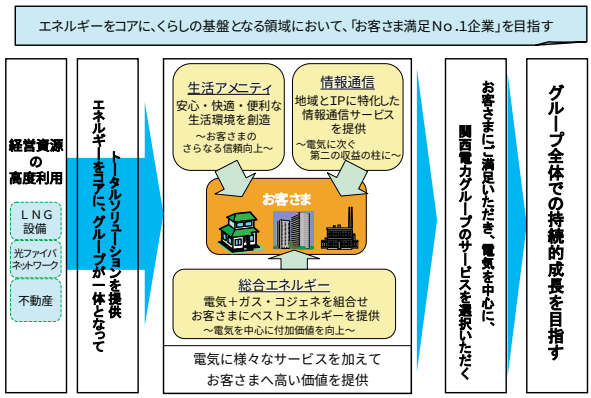


図35．グループ一体となったお客さま価値創造

６．おわりに

関西経済は長らく落ち込んでおりましたが、幸い最近製造業を中心に業績が回復傾向にあり、明るい兆しが見えてきております。このことは、関西に根ざすエネルギー企業として、関西地域とともに歩んで行きたいと考える関西電力としても、大変喜ばしいことと思っております。

一方で、関西電力は、2004年８月に美浜発電所３号機において、５名もの方が尊い命を亡くされ、６名の方が重傷を負われるという大変な事故を発生させてしまいました。亡くなられた方々のご冥福を心からお祈り申しあげますとともに、重傷を負われた方々の一日も早いご快復を願っております。

関西電力といたしましては、事故以来、再発防止対策や地元を始めとする社会の皆さまの信頼回復に全力で取り組んでおります。今後とも安全を最優先した事業運営を行ってまいりますので、皆さまのご理解と変わらぬご愛顧を心よりお願い申し上げます。

新設研究室紹介

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/~yamakawa/
「次世代の宇宙環境利用システムの研究　～磁気プラズマセイル宇宙機の実現に向けて～」

平成18年９月に着任致しました山川宏と申します。以前は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部において、地球周辺から月・惑星を含む宇宙環境探査に関するミッション解析、ロケット・人工衛星のシステムに関する研究を行なっておりました。今後ともよろしくお願い致します。

本分野は、宇宙空間・惑星空間における人工衛星による環境探査，そのための探査技術開発，および宇宙太陽発電衛星の開発を通して、宇宙環境に関する知見の提供，および、宇宙空間の具体的利用形態の提案を行なっていくことにより、21世紀後半に必要となる人類の新たな宇宙空間生存圏の確立に寄与してゆくことを目的にしています。宇宙電磁環境モニター、波動粒子観測機器の開発等、研究は多岐に渡りますが、ここでは磁気プラズマセイルの研究について紹介します。

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が得られ、同時に、１桁大きい推力を得ることができ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。

ここ３年ほど我々のグループは国内の研究者と共同して、このような画期的な推進システムを持つ宇宙機（図２）の実現可能性を追及すべく、プラズマ数値シミュレーション、および、真空チャンバを使用したスケールモデル実験により磁気プラズマセイルの基本原理の確認を行なってきました［1-5］。その結果得られた推進性能を仮定することで、惑星間飛行あるいは太陽系脱出までもが従来と比較して短時間で実現することを示し、同時に宇宙機の具体的なシステム検討を行ないました［4］。最新の成果に基づくと磁気プラズマセイルは、超伝導コイル半径2m程度、電力規模10kW程度、宇宙機の全体重量数トン、推力/電力比50mN/kW程度の性能が得られています。

現在は、宇宙機の質量、電源、熱制御等のシステム設計の精度を上げるべく、磁気プラズマセイル宇宙機の中核技術である宇宙用超伝導電磁石システムに関して、電気工学専攻・超伝導工学分野の中村武恒先生、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の船木一幸先生らと共同で開発を進めつつあります。

参考文献

［1］ H. Yamakawa, I. Funaki, et al., Acta Astronautica, Vol. 59, No. 8-11, pp. 777-784 (2006)
［2］ H. Yamakawa, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 42, No. 4, pp. 677-683 (2005)
［3］ I. Funaki, H. Kojima, H. Yamakawa, et al., Astrophysics and Space Science (2006), in press.
［4］ 山川、小川、藤田、澤井、國中、船木他、日本航空宇宙学会論文集、Vol. 52, No. 603, pp. 148-152 (2004)
［5］ 船木、山川、藤田、野中、日本物理学会誌、Vol. 58, No. 4, pp. 266-269 (2003)

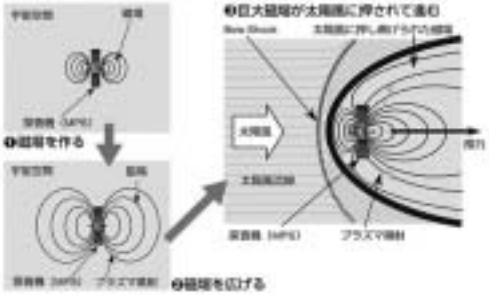


図１．磁気プラズマセイルの原理

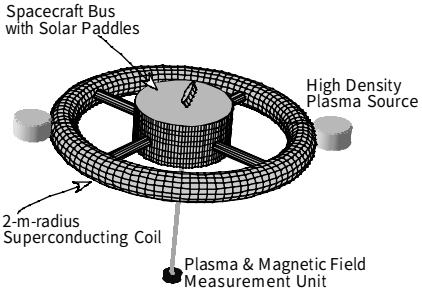


図２．磁気プラズマセイルの宇宙機のイメージ図

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」（特に☆☆は高校生対象に執筆）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（島崎研）
電磁工学講座 超伝導工学分野
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
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
量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研）
量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研）☆☆

附属イオン工学実験施設

高機能材料工学講座 クラスタイオン工学分野（高岡研）

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 ディジタル通信分野（吉田研）
通信システム工学講座 伝送メディア分野（森広研）
通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研）
集積システム工学講座 情報回路方式分野（中村研）
集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研）
集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤研）

システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野
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

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（吉川研）
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（深尾研）
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)

国際融合創造センター

融合部門

ベンチャー分野§

創造部門

先進電子材料分野（藤田研）

高等教育研究開発推進センター
情報可視化分野（小山田研）

学術情報メディアセンター
複合メディア分野（中村裕研）

注§　工学研究科電子工学専攻橘研と一体運営

複合システム論講座
http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/
自動倉庫システムの入出庫スケジューリング問題

本研究室で扱っているシステム最適化のテーマの中から、今回は、自動倉庫システムの入出庫スケジューリング問題について説明します。

自動倉庫システム（Automated Storage and Retrieval System; AS/RS）とは、工場や物流センターなどで部品・製品の入出庫を自動的に行うためのシステムです。自動倉庫システムは、物品を保管するための「(立体）棚」、物品を運ぶための機械である「入出庫機」と、品物を倉庫に搬入したり搬出したりするための出入口である「入出庫口」から構成されます。AS/RSの一例（立体自動倉庫システム）を図1に示します。この場合、入出庫機としてはスタッカークレーンが用いられ、各通路に一台ずつ設置されたスタッカークレーンが棚の間を行き来して品物を入出庫させます。また、入出庫口は通路の端に設けられます。

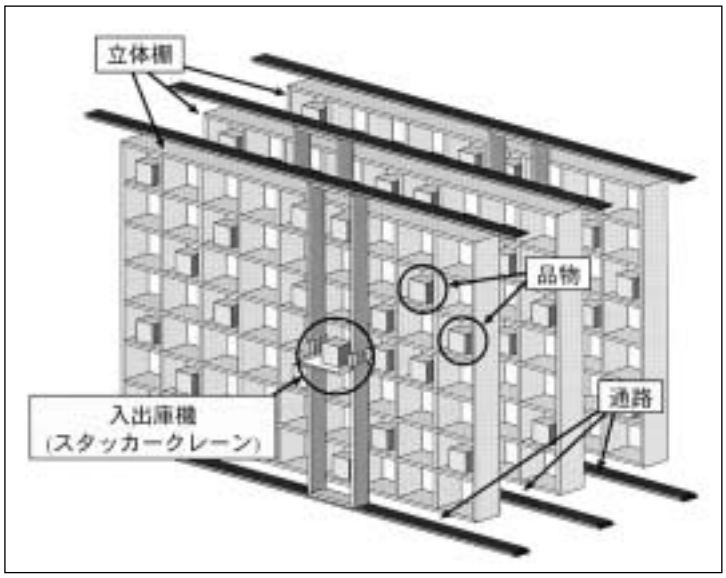


図１．立体自動倉庫システム

このようなAS/RSを効率よく運用するためには、様々な問題を考えなければなりません［1]。その中の一つ、入出庫スケジューリング問題は、与えられたいくつもの入出庫品をなるべく短時間で運び終わるよう、入出庫機の移動経路を決定する問題です。入出庫機が複数の品物を同時に運べる場合、この問題は NP 困難となるため、容易には解けないと考えられます。そこで、文献［2］では、入出庫機が複数の品物を同時に運べる場合について、本問題と密接な関係がある「配車問題（Vehicle Routing Problem; VRP)」と呼ばれる問題に対する最近の研究成果をもとに、効率のよい厳密解法を構成する研究を行っています。具体的には、まず、問題を0-1整数計画問題として定式化し、つぎに、定式化した問題に列生成とカット生成を繰り返し適用することにより最適解の下界値と上界値を計算し、その後、混合整数計画問題の汎用ソルバを用いて最適解を探索する、という解法を構成しました。そして、既研究の近似解法と遜色ない速度で最適解を求めることができることを示しています。

また、ここでは詳しく紹介できませんでしたが、上述の問題とは別の設定でも、入出庫スケジューリング問題に対する厳密解法の研究を行っています［3]。

参考文献

［1］田中、木瀬：自動倉庫システムにおけるスケジューリング問題、システム/制御/情報、Vol. 50, No. 11, pp. 418-423 (2006)

［2］田中、荒木：立体自動倉庫の入出庫スケジューリング問題に対する厳密解法、計測自動制御学会論文集、Vol. 42, No. 9, pp. 1058-1066 (2006)

［3］S. Tanaka and M. Araki: Routing problem under the shared storage policy for unit-load automated storage and retrieval systems with separate input and output points, 2006 International Symposium on Flexible Automation, pp. 593-600 (2006)

電磁工学講座 超伝導工学分野
http://www-lab04.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.j.html
「次世代高温超伝導線材を適用した磁気エネルギー貯蔵装置用コイルの開発」

当研究室では，平成16年度より実施されているNEDOの委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として，中部電力（株）殿と共同で電力系統制御用超伝導磁気エネルギー貯蔵（Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES）用コイルの開発を行っています。SMESシステムの中心要素である超伝導コイルの製作に際しては，冷却コスト低減の観点から酸化物系高温超伝導線材を適用することが不可欠であります。本研究では，極めて高い通電性能を有するイットリウム系次世代線材を対象としており，ISTECを通じてNEDOの委託により中部電力（株）が作製しているMOCVD-YBCO線材の適用を検討しています。ここでは，上記高性能導体を適用した高温超伝導SMES用コイルの概念設計結果について紹介します。

設計に適用したMOCVD-YBCO線材（幅：10mm，厚さ：200μm）の臨界電流（ゼロ抵抗状態を維持する最大電流）は77.3K・自己磁界条件下において280Aです。コイル形状としては，漏洩磁界低減や線材使用量最小化等の検討からトロイダル型を採用します。設計に際しては，3次元有限要素法ならびに遺伝アルゴリズムを連携した最適設計プログラムを開発し，またMOCVD-YBCO線材の非線形通電特性としては，パーコレーション遷移モデルと呼ばれる物理モデルに立脚した解析式［1］を適用します。

図１には，一例として運転温度20K，蓄積エネルギー20MJにおける設計結果を示します［2］。また，図２には，比較のため，シャープ亀山液晶工場に導入されている低温超伝導SMESの鳥瞰図を示します［2］。図１と２の比較から明らかなように，次世代線材を適用することにより，運転温度が20K程度の高温であるにもかかわらず，高磁界化に伴う小型化が可能であることを示すことに成功しました。なお，大容量SMESの設計に際しては，コイルに働くフープ応力を低減することが極めて重要ですが，当研究室では上記応力を大幅に低減できる疎巻線法を提案しており［3］，今後は小型モデルコイルで私共の設計結果の妥当性を実証していきたいと考えています。

参考文献

［1］T. Nakamura, et al., Superconductor Science and Technology, vol. 15(2002) pp. 230-235.
［2］K. Higashikawa, T. Nakamura, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, in press.
［3］東川甲平，中村武恒，長屋重夫，平野直樹，式町浩二，特願2006-303235号

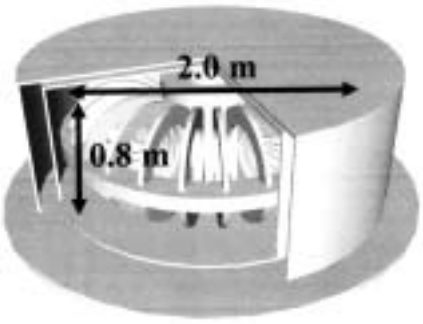
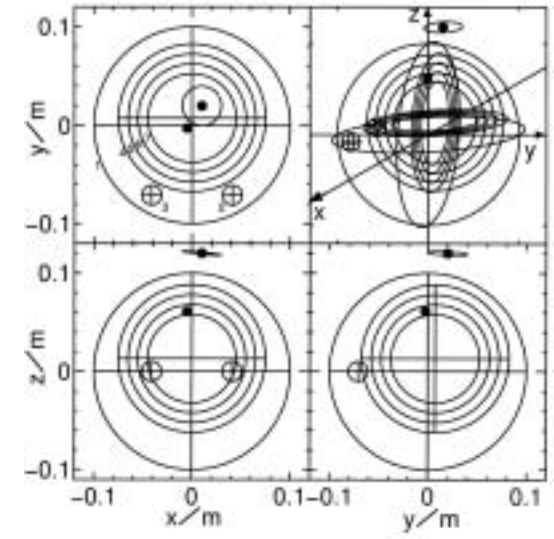


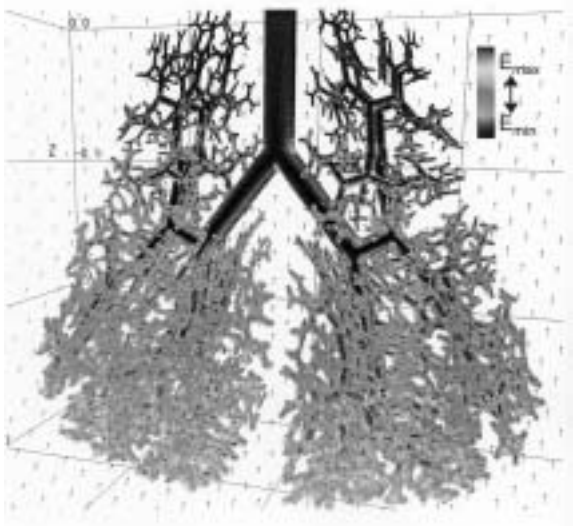
図１．20MJ級高温超伝導SMESマグネット（運転温度：20K，最大磁界：12T）

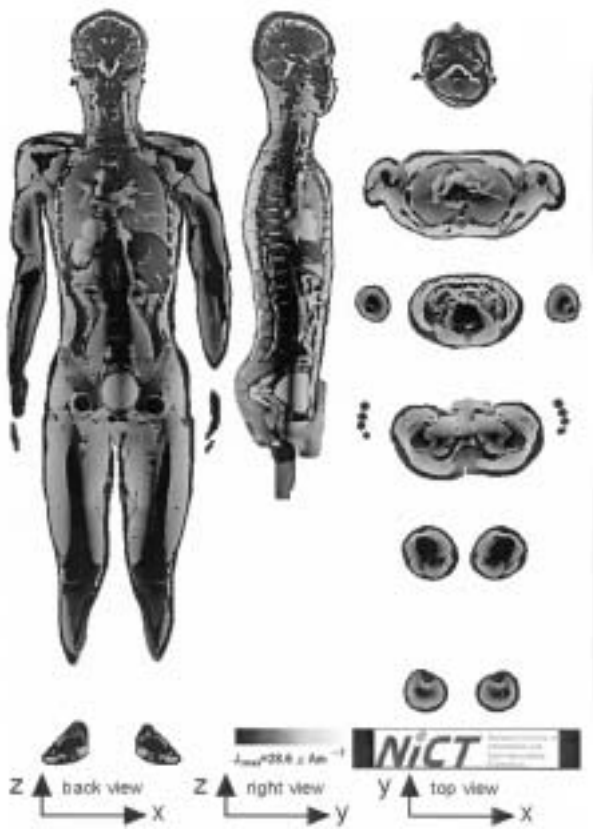
図２．20MJ級低温超伝導SMESマグネット（運転温度：4.2K，最大磁界：5T）

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/
「人体内誘導電界および脳神経活動磁界の数値計算法の高精度・高速・大容量化」

人体と電界・磁界との相互作用について関心が高まっており、これに関連する研究が活発に行われている。一方には、交流磁界曝露によって誘導される人体内電界・電流が健康影響を及ぼすことがないかなどといった悪影響防止という観点からの研究があり、もう一方には脳神経活動電流に伴う生体磁気を多点計測して脳神経活動の推定を行うなどといった有効利用の観点からの研究がある。いずれにしても詳細な人体モデルに基づく精密な電界・磁界解析の遂行が必須となっている。本研究では低周波領域での人体内誘導電界・脳神経活動磁界計算法の開発とその高精度・高速・大容量化を図っており、以下にその成果の一部を示す。なお、これら２種類の一見異なる計算は実は等価（相反的）であり、どちらか一方の計算結果を得ればもう一方の計算結果も相反定理により換算値が得られる。図１は極変換付き等価多重極モーメント法による低周波厳密数値解（10数桁）計算用の多球頭部モデルの例である。図2は高次曲面要素高速多重極表面電荷法による両肺モデル周辺電界の解析例である。図３はボクセルデータ用高速多重極表面電荷法による人体内誘導電界・電流密度の解析例である。図３は800万ボクセル（2mm立方体）、400万境界（表面電荷）要素の計算例で、Core2Duo 2.66GHzのPCを用いて計算時間は約1.5時間となっている。







左上：図１極変換付き等価多重極モーメント法による厳密数値解計算用多球頭部モデル、左下：図２高次曲面要素高速多重極表面電荷法による両肺モデル周辺誘導電界解析、右上：図３ボクセルデータ用高速多重極表面電荷法による人体ボクセルモデル内誘導電流解析

電気システム論講座　電気回路網学分野 (和田研究室)
http://bell.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html

「単一導体線路における電流伝搬の解析」

１．コモンモードと単一導体線路：帰路線をもたない電流伝搬

私たちの研究室では、従来の電気回路では十分に扱えなかった電気的・磁気的結合も考慮した、新しい電気回路理論の研究と、これを実際のディジタル回路などの設計に応用する研究を行なっています。回路の動作周波数の高速化にともない, 電子機器や通信線から発生するノイズが問題となっていますが、これらのノイズはいわゆるコモンモードによる放射が大きな原因として注目されています。

信号を伝送する配線を線路と呼びます。２本の導体から成る線路を考えると、通常の信号伝送に使用される差動モードは２導体上を互いに逆方向の電流が流れるモードですが、これとは別にコモンモードと呼ばれる２導体を同方向に電流が流れるモードも考えられます。この場合、コモンモードは見かけ上、帰路線をもたないという特徴をもちます。帰路線をもつ場合の電流伝搬は通常の電気回路で考える通りですが，帰路線をもたない場合の電流伝搬の仕組みは必ずしも明らかではありません。そこで、帰路線をもたない電流伝搬の仕組みを明らかにするために、最も単純な場合である１本の導体から成る線路、つまり単一導体線路上の電流伝搬のメカニズムについて研究しています。

２．電流伝搬のメカニズム

図１に示すような単一導体線路を考えます。端点に電流源をおき、そこから電流が伝搬する様子を解析します。注入された電流と電荷が導体表面の各点につくる電界を求め、その電界によって電流が誘導されるというモデルです。このような誘導の繰り返しにより電流伝搬のメカニズムを考えます．実際にはラプラス変換を用いて効率的に計算を実行します。ステップ電流を端点に注入した場合に計算により求められた電流波形（図2）を見ると、ステップ電流の先端が鈍りながらも伝搬している様子が分かります。提案した手法では電流伝搬の因果関係を明らかにしながら解析できることが特徴ですが、この解析から先端部の鈍りによって蓄積される電荷が電流伝搬に大きく寄与していることが明らかになりました。

３．局所的な物理量による解析

単一導体上の電流伝搬においては、通常の電気回路で考える電流と電圧ではなく、電流と電荷による作用を考えています。これは電流も電荷も局所的に定義できる物理量であるため、電磁界の基本式であるMaxwell方程式との整合性がよいためです。このように局所的な物理量を用いることにより、電気回路の新しい解析手法を考え、非常に高い周波数にも適用できる理論をつくることに取組んでいます。

参考文献

［1］T.Hisakado, K. Yoshimura, K.Okumura: “Analysis of Common Mode Propagation Based on Single Conductor Line,” Proc. PIERS2006, 1P3, pp. 76-80, 2006.

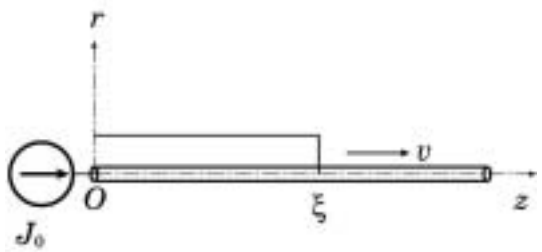


図１：単一導体線路のモデル

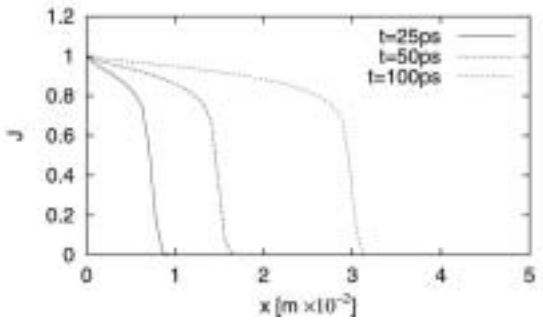


図２：単一導体線路を伝搬する電流波形（ステップ入力）

電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）
フィードバック制御性能向上のための基礎研究としてのロバスト制御/解析―サンプル値制御系の周波数領域理論とその周辺の話題から

１．背景と目的

現在の状況を随時把握し適切な修正動作を加え続けるフィードバックの考え方は、普遍的な考え方として至るところで見られる。工学分野における多くの応用では、制御装置はディジタル化されたものとなっており、フィードバックは周期的なサンプリングデータに基づいてなされる間欠的動作となる。一方，制御対象がたとえば環境との間で持つ相互作用は連続的である。このような、周期的間欠動作で連続的動きを制御するフィードバック制御系は、サンプル値制御系と呼ばれている。その応用範囲の広さから、サンプル値制御系の性能、とくに環境などのパラメータの変動や対象とするシステムのモデル化における不確かさに対して性能を保持できるロバスト性を向上させることが重要である。

２．周波数領域での取り扱いとナイキストの安定判別法

ロバスト性を取り扱う上で周波数領域での考察が有効である。周波数領域での議論において重要な役割を果たすのが伝達関数であり、ナイキストの安定判別法である。しかし、古典的な伝達関数もナイキストの安定判別法も、時不変性と呼ばれる性質を持つ制御系を対象としたものであり、サンプル値制御系には適用できない。サンプル値制御系が周期的なサンプリング動作を伴うため、その性質は周期的時変性を伴うものとなり、時不変性という単純な性質を必然的に失うためである。この点を無視して時不変性を持つとしての扱いが広く行なわれるが、制御性能向上のためには、より厳密な取り扱いを可能とする基礎理論が必要である。我々は，周期的時変性を持つシステムをなんら近似なく厳密な変換により（無限次元性という代償のもと）時不変性を持つシステムとして表現することのできる手法である、リフティングと呼ばれる手法を応用した研究を行なっている。これは，伝達関数に代わって関数空間上での伝達作用素を用いてシステムを表現するものであり、この考え方に基づき、ヒルベルト・シュミット作用素の2次正則化行列式という概念などを用いてサンプル値制御系に対するナイキスト安定判別法を導出するなど，基礎となる成果をあげている。

３．正実性に基づくロバスト性解析など，一般的なロバスト安定条件

上記のナイキスト安定判別法から、サンプル値制御系のロバスト安定性に関する一般的な定理がさらに導出できる。この定理は、想定される変動や不確かさなどの範囲のもとでのロバスト安定性の必要十分条件を与えるものであり、サンプル値制御系の性能向上を図る上での理論的な出発点となる重要な成果である。しかし、現実の課題に即した個々の状況において、この必要十分条件が成立するか否かを一般的かつ具体的に判定することは，残念ながら容易でない。そこで、通常は，必要十分条件として要求されるものよりも強い条件（したがって十分条件）であるものの、その判定はより容易に行なえるような何らかの条件の成立を判定することで代用することが行なわれる。その代用は、具体的には、必要十分条件に含まれるセパレータと呼ばれる作用素の持つ自由度に制限をかけることで行なわれる。

ここで、どのような代用条件（つまり制限されたセパレータ）を用いるかは、制御性能向上の成否の鍵を握るものといえるが、そのひとつとして正実性に基づく方法がある。正実性とは、LCRからなる電気回路のイミッタンスの持つ性質としても知られるが、これをより一般的な形で伝達作用素に拡張した性質である。正実性は、システムの位相特性とも密接な関係があり、このことと関係するものと思われるが、正実性は、（位相特性に周波数依存性を持たない）実数パラメータで不確かさが表される場合のロバスト性解析との相性がとくに高い。しかし、セパレータは本来はかなり高い自由度を有しており、それを正実性に対応した形のみに制限して利用するのは得策でない。セパレータの持つ自由度は興味深い数学的構造を有しており、それを利用してより有効な方法を導くための研究を現在進めている。

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野（橘研究室）
http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「次世代スピンエレクトロニクス薄膜材料プロセスの開発」

スピンエレクトロニクスという次世代技術により、従来に無い新しい機能を有するデバイスの誕生が期待されています。現代の情報化社会を支えるエレクトロニクスは、電子の電荷という電気を運ぶ性質を有効に利用していますが、さらに電子は「スピン」という磁石としての性質を兼ね備えています。スピンエレクトロニクスとは、電荷に加え、スピンをも有効に活用することにより、従来の電荷制御によるエレクトロニクスの限界を超えようとする技術です。本研究室では、透明性、導電性を損なうことなく、さらに磁性材料としての機能を併せ持つ新しい透明導電膜の開発を進めています。例えば、フラットパネルディスプレイ産業などで透明電極として広く用いられているITO（酸化インジウムスズ）の高周波スパッタ作製時に、適量のマンガンを添加することにより、ITOの優れた透明性、導電性、安定性を保持したまま、室温以上で強磁性を示す透明導電膜を低温条件で作製することに成功しました。我々が作製したMnドープITO薄膜について、300Kにおける磁化の磁界依存性を図1に示します。ヒステリシス特性が得られていることから、作製した試料が室温においても強磁性を示すことが確認できます。本研究成果を活かして、有機基板・フィルム上に成膜して、折り曲げ可能なスピンエレクトロニクスデバイスを創製したいと考えています。

また、マンガンを含む酸化物については、(Pr,Ca)MnO_3（PCMO）などの巨大磁気抵抗材料を中心に、高抵抗状態と低抵抗状態との間のスイッチングを利用した新しい抵抗変化型不揮発性メモリー（Resistance Random Access Memory: ReRAM）への応用のための研究も進めています。我々はこれまでに、大面積均一成膜、組成制御性、段差被覆性等に優れた有機金属化学気相成長法（Metalorganic Chemical Vapor Deposition: MOCVD）により、他の手法より低温でPCMO薄膜を作製し、その抵抗変化によるメモリー動作の確認にも成功しました。その結果の一例を図2に示します。得られたPCMO薄膜の抵抗値は、印加した電気パルスの極性に応じて変化しました。ReRAMは、構造がシンプル（二端子素子）であり、室温で大きな抵抗変化を示します。このように大容量化に最適で、低消費電力、高速、多値化可能という特長も有することから、次世代ユニバーサルメモリーの有力候補として、その実用化に向けた研究に鋭意取り組んでいます。

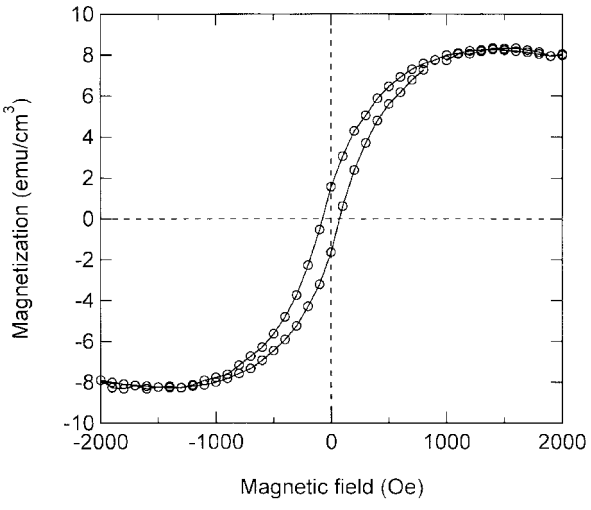


図１．300KにおけるMnドープITO薄膜の磁気ヒステリシス

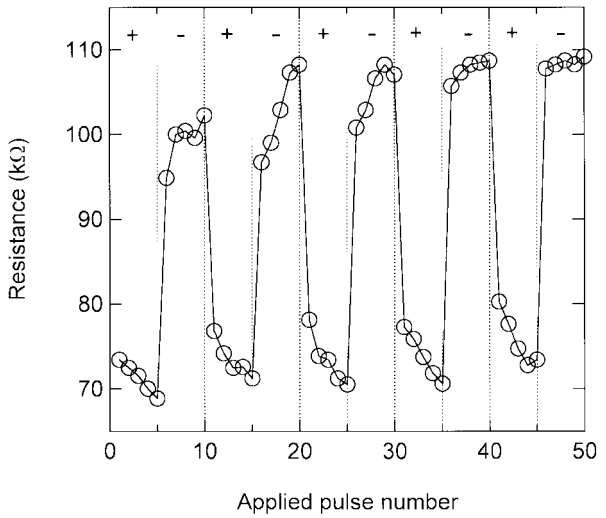


図２．電気パルス印加による（Pr,Ca)MnO_3薄膜の抵抗変化

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
「二酸化チタン光触媒発現機構の解明とその応用に関する研究」

二酸化チタン（チタニア、TiO_2）に代表される光触媒材料においては、紫外線照射下での様々な分子の光分解反応、光誘起超親水化などの特異な現象が見出され、それらを基にした脱臭、抗菌・殺菌、防汚、防曇材料としての実用化が成されています。また、TiO_2 にはこの光触媒作用だけでなく、その光・電気変換機構を利用した次世代太陽電池への応用が提案され、新しいクリーンエネルギー源としても期待されています。更に、社会問題化している自動車排気ガス対策の一環として、燃料電池車に用いる水素を光触媒反応による水の光分解を通じて、直接生産しようという試みも行われています。このように二酸化チタンは多くの先端技術分野において、環境改善対策の根幹を担うものとして期待されています。しかしながら、チタニアの光触媒反応には、紫外光照射下でのチタニア表面構造の変化、電子/正孔対（励起子）の生成と分離、表面原子空孔（酸素欠陥）の生成、表面水酸基やラジカルの生成など、様々なプロセスが複雑に絡み合っているため、反応メカニズムの解釈には未だに疑問点が数多く残っています。このような背景の下、本研究室では、走査型プローブ顕微鏡（SPM）や全反射X線面内回折などの特色ある測定技術を駆使して、紫外線照射下での二酸化チタン表面構造の追跡を行っています。そこで得られた知見を元に、チタニアにおける光触媒反応機構の解明を試みると共に、それを基礎とした新しい水素発生源としての応用を視野に入れた研究を進めております。

本研究結果の一例を以下に紹介します。紫外線照射下でのルチル型二酸化チタン（110）表面において、SPM技術の一つであるケルビンプローブ原子間力顕微鏡（KPFM）によって観察した表面電位測定結果を図１、２に示します。ここでは、ルチル（110）表面上に金（Au）と白金（Pt）電極を蒸着し、試料表面の電位分布を測定しています。図1に示すように、紫外線照射によって、真空中では Au 表面での電位が上昇しないのに対し、大気中では表面電位の上昇が観測されました。この電位変化はTiO_2表面に吸着した水から光触媒反応で生成した化学種（プロトン（H^+）、ヒドロキシラジカル（・OH））のうち、プロトンがTiO_2表面からAu 電極に向かって移動し、水素分子に還元されずにAu表面に存在していることに起因すると思われます。つまり、紫外線照射によって、TiO_2表面からAu表面に向かう誘起電界が発生していることを示唆する結果です。一方Pt 表面では、図２に示すように大気中での表面電位上昇が観測されず、プロトンが還元されて水素が発生するためであると考えられます。これはPt表面での還元力がAu表面に比べて高いことによるものです。このように、紫外線照射下で生じる二酸化チタン光触媒反応に基づく興味ある現象が観測されております。

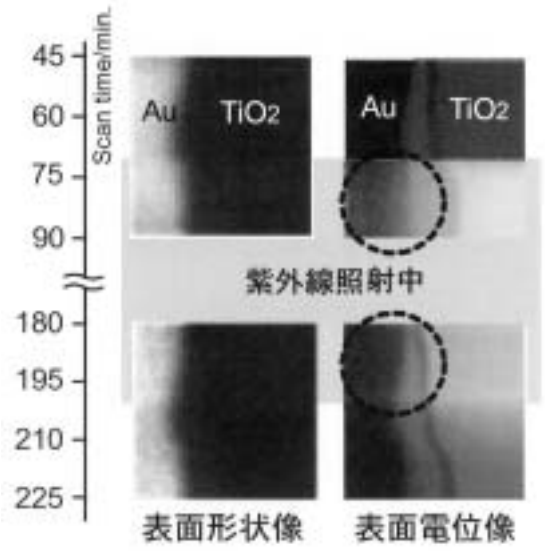


図１．大気中でのAu/TiO2 試料の表面形状像と表面電位像（走査範囲：５㎛×５㎛）

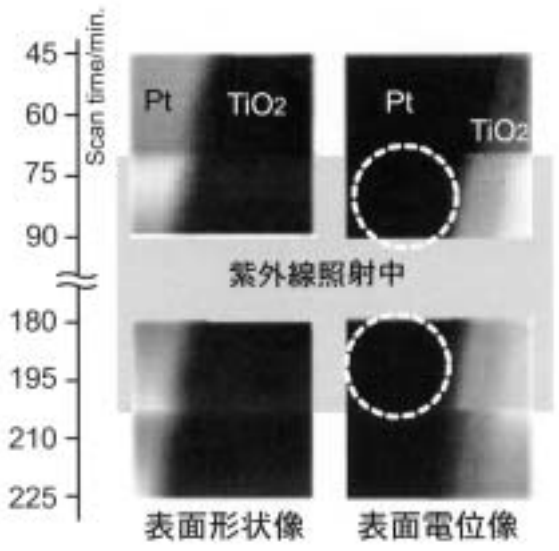


図２．大気中でのPt/TiO_2 試料の表面形状像と表面電位像（走査範囲：５㎛×５㎛）

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/lab05/
二次元フォトニック結晶を用いた自然放出制御

自然放出は、次世代照明の本命として注目される発光ダイオードや光記録等に広く応用されるレーザなど各種発光素子の発光の源である．一方で例えば発光ダイオードでは，発生した光の多くが外部に取り出されることなく，そのまま発光体内部に留まり，やがて熱に換わってしまう不要な発光になる，といった問題がある．自然放出が不要な発光となるのは，自然放出は通常は制御されない状態にあるためである．本研究室では，フォトニック結晶と呼ばれる光の波長程度の周期的な屈折率分布をもつ光ナノ構造による自然放出の制御[1-3]を研究しているが，ここでは二次元フォトニック結晶スラブによる自然放出制御に関して紹介したい．図１(a)に示す通常のスラブ発光体では図２(a)に示されるように発光の多くは，屈折率差によりスラブの中に閉じ込められたままとなり，不要な発光となる．図１(b)に示す二次元フォトニック結晶は，周期構造の存在する二次元面内における光の存在を禁止する二次元フォトニックバンドギャップ（PBG）をもつ．通常の発光体の場合は発光体に与えられたエネルギーの大部分が，不要な発光に浪費され，短時間でなくなっていき，外へ取り出される有用な発光の総量は非常に少なくなる．一方，二次元フォトニック結晶では，スラブ面内方向への発光が禁止され，与えられたエネルギーが不要な発光に使われることなく，ゆっくりではあるが着実に有用な発光に使われ，発光体の外部へと放射され，与えられたエネルギーが最終的には全て，外界へと取り出される自然放出となるために，発光効率が非常に高くなることが期待される．上記の予想を実験で確認するため，様々な格子定数aの量子井戸発光体をもつ試料を作製し，発光スペクトルと時間分解フォトルミネッセンスを測定した結果を図3に示す．これらの図から，PBG波長域に発光波長が入る場合は，確かに発光がゆっくりと起こり，外界へと取り出される総発光量が増加することがわかる．逆にPBG波長域に発光波長が入らない場合は，フォトニック結晶を形成していない通常の発光体の場合と同じく，発光が短時間で終了し，総発光量も小さくなっている．以上よりフォトニック結晶によって自然放出が制御できることが初めて明確に実証された．

１）S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, M. Okano and S. Noda, Science 305, 227 (2004).
２）M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda, Science 308, 1296 (2005).
３）S. Noda, Science 314 (2006) 260.

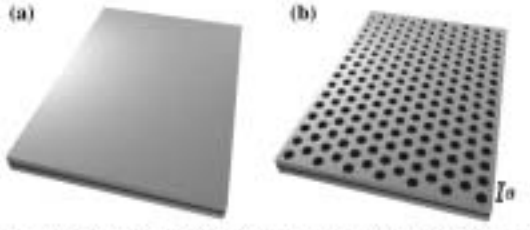


図1：(a)通常のスラブ構造と(b)2次元フォトニック結晶スラブの概念図

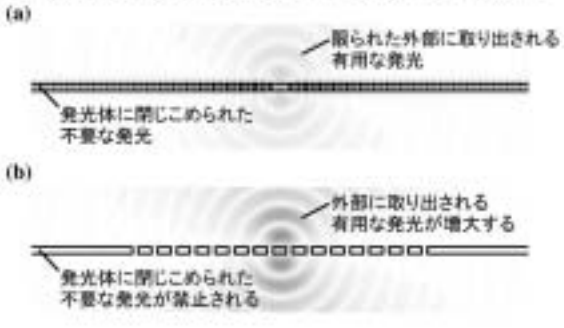


図2：断面図と発光の様子．(a)通常のスラブ発光体．多くの発光はスラブの中に閉じこめられる不要な発光となり，わずかな発光のみが外部に取り出される有用な発光となる．(b)2次元フォトニック結晶スラブ発光体．フォトニック結晶を導入することで不要な発光が禁止され有用な発光が増大する

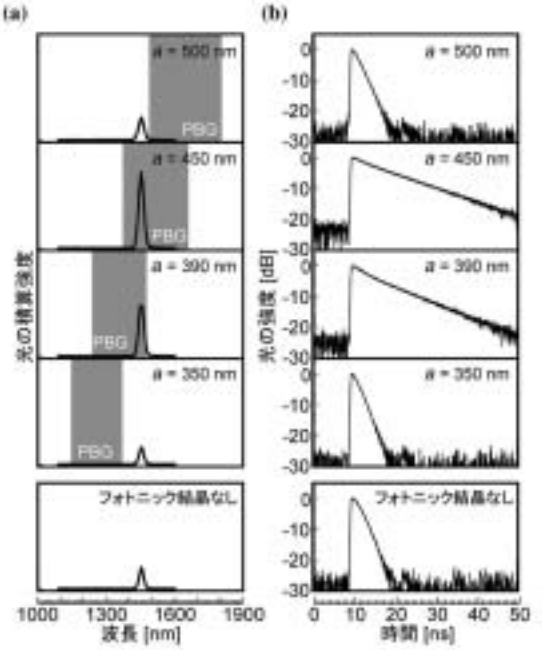


図3：フォトニック結晶および通常の量子井戸発光体の発光特性．フォトニック結晶の周期aを変化させることで，PBGの作用する波長域を変化させた．(a)発光スペクトル(b)時間分解フォトルミネッセンス

知能メディア講座　画像メディア分野（松山研究室）
http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/japanese/index.html
「表情譜：機械は人間の微妙な表情を読み取れるようになれるか？」

１．表情とは

人は誰かと話しをする時、表情を通じて自分の心理状態を伝えることができ、また、表情から相手の心理状態を読み取ることができる。このため、日常生活環境において人の活動や作業を支援するロボットなどにおいても、表情を通じた互いの心理状態の交換が重要になると考えられる。

従来の表情認識・生成の研究では、主として感情に基づく基本的カテゴリ（喜び・驚き・恐怖・怒り・嫌悪・悲しみ・軽蔑）に表情を分類することが検討されてきた。しかし、実際の表情は、相手に何を伝えたいかという目的に応じて意図的に作られるものや、情動や反射によって自発的に表出されるものがある。その結果、笑いの種類としても微笑み、大笑い、苦笑いなど多様なものが存在し、同じカテゴリ内でも全く異なる心理状態を表す表情が存在する。人は刻々と変化する相手の表情の微妙な動きを観察することで、基本的な感情カテゴリに比べてずっと微妙な他者の心理状態を推定していると考えられる。こうした微妙な表情を自動的に読み取るにはどうすればよいかというのが本研究の目的である。

２．表情譜による作り笑いと自然な笑いの識別

本研究では表情を、目や口、眉といった顔の部位が互いに連動して運動することによって生じるものと考え、「表情譜」という新たな表情変化の記述法を考案した。まず、顔の各部位の運動を、目が「開く」、「開いている」、「閉じる」といった単純な運動パターンで表される時間区間に区切る（図1過程A）。次に異なった部位における運動パターンの開始・終了タイミングの時間差を抽出することによって、表情変化のタイミング構造を記述する（図1過程B）。本研究では、このタイミング構造を定量的に分析することによって、作り笑いと自然な笑いが精度良く区別できることを実験によって確認した。また、これらの笑いを区別するためのタイミング構造特徴が個人によって異なることも確認した（図2）。これは、表情の表出法が各人の顔の構造やくせによって異なり、個性を考慮して表情を理解する必要があることを示唆している。一方、表情譜を生成した処理過程を逆にたどることによって、表情譜から表情変化の様子を映像として生成することもできる。これは、楽譜（「表情譜」）から音楽（顔映像）が生み出されるのに対応し、表情譜を編集することによって多様な表情の映像を生成することができることを意味する。

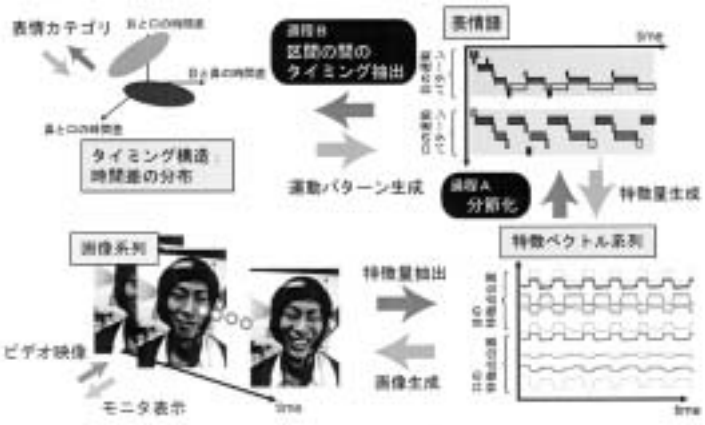
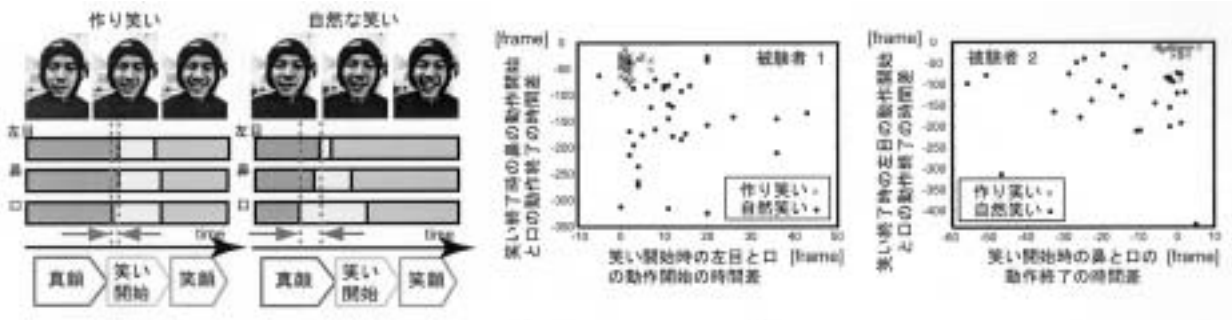


図１．表情譜の生成過程



（a）表情譜の違い　　**（b）被験者ごとのタイミングの違い**

図２．作り笑いと自然な笑いの比較

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/index.html
「光パケットネットワークのための適応型高速フロー制御プロトコル」

増大するインターネットトラフィックを処理するために、光技術の電気技術に比べた高速性や光特有の波長をパケットルーティングに用いる、光パケットネットワークの研究が進められています。光技術の大きな課題としてバッファーメモリーの実現が困難な点があります。ファイバー遅延線やスローライトを用いた光FIFOなどが考えられていますが、電気技術のRAMにはかなわないため、光パケットネットワークでは通常のトラフィック状況でもパケット廃棄が発生すると想定されます。

インターネットでは、端末がパケットの受信状況を見ながら、送信速度を制御する自律分散的な制御方法が取られています。電気ネットワークは、大容量のバッファがネットワーク内に配置されているため、容量以上のパケットが到着したときにパケットが廃棄され、パケット廃棄を検出した端末が、送信速度を下げてふくそうを回避するフロー制御プロトコルが実装されています。通常状態でも廃棄が発生する光パケットネットワークに同じプロトコルを適用すると、端末間のスループットが著しく制限されるため、パケット廃棄に強い光パケットネットワーク向きのフロー制御プロトコルを検討しています。

検討しているプロトコルは、従来のウィンドウサイズ（単位時間に送信するパケット数に相当します）に加えてパケット長も制御します。図1に示すように、パケットの受信状況に応じて、ウィンドウサイズとパケットサイズを増減させます。廃棄原因が、光ネットワークか電気ネットワークかに応じて、適応的にフロー制御パラメータを制御し、特に光ネットワークがスループット制限要因となる場合は、飛躍的にスループットを向上させることができます（図2）。今後は端末間のスループットの公平性や、他のプロトコルの端末が共存した場合の特性評価と対策の検討を行います。

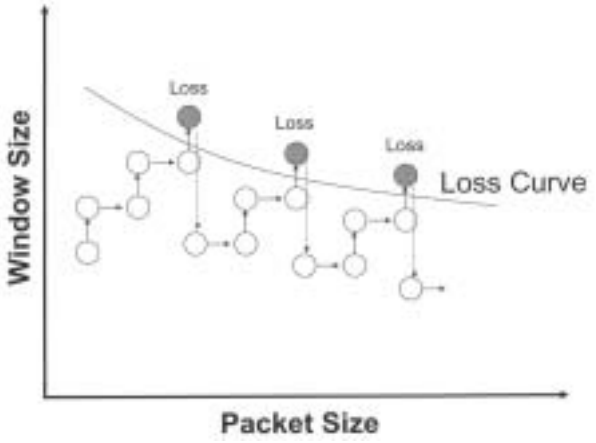


図１．フロー制御の原理

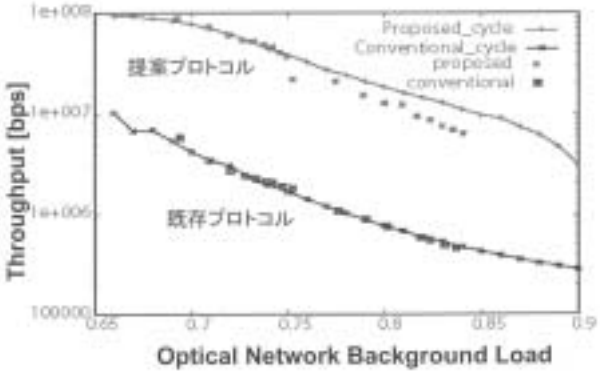


図２．フロー制御プロトコルの特性

参考文献：Z. Miao, H. Yamamoto, and T. Takahashi, “Throughput analysis of adaptive flow control protocol for optical packet switching networks,” in Proc. IEEE GLOBECOM, Session W11.1-3, Dec. 2005.

集積システム工学講座 情報回路方式分野（中村研究室）
http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「自律修復による耐故障再構成可能デバイス」

デバイス上のSRAMセルに書き込まれた構成情報によりその機能をユーザが自由に書き換えることができるハードウェアとして、FPGAに代表される再構成可能デバイスが近年広く使われている．このデバイスは、リモートからのシステム更新や物理故障に対する擬似的な修理も可能であるため、宇宙開発などメンテナンスが困難かつ高信頼性が要求される分野での利用が期待されている。しかし、宇宙空間では放射線や荷電粒子などによる記憶素子のビット反転、すなわちソフトエラーが多発する。再構成可能デバイスの構成情報が破損した場合、意図しない回路が構成され、機能を損なうばかりかシステムに障害を与える危険性がある。そこで中村研究室では、動的再構成技術を応用し、システムの動作を止めることなく自律的に構成情報の破損を検知・修復する機構を組込んだ耐故障再構成可能デバイスのアーキテクチャを提案した。

提案デバイスは、エラー修復動作の単位である自律修復セルと呼ばれる基本要素から構成される（図1)。自律修復セルは、冗長化された演算機能とメモリ、および自律修復のための制御回路からなる。本研究室では自律修復セルの実現方式として、多重化に基づいた a）単純多重化、b）メモリ多重化の２方式、エラー訂正符号に基づいた c）ECC（Error Correcting Code）常時訂正、d）ECCロールバックの２方式を提案し（図3）[1]、各方式について、冗長性による回路規模オーバヘッドと平均寿命とのトレードオフを明らかにした（図2)。いずれの方式も，耐故障性を持たない従来の再構成可能デバイスでは平均寿命約１分という環境下で、100年以上の平均寿命を達成できる。

この結果を元に、提案修復方式を既存再構成可能デバイスに適用し、宇宙環境においても10年以上の平均寿命を達成することを示した［2]。提案デバイスの概略図を図４に示す。論理を実現するロジック部分には、回路規模オーバヘッドが小さい単純多重化方式を採用し、ロジック間を接続する配線には、信号の遅延が小さいメモリ多重化方式を採用している。

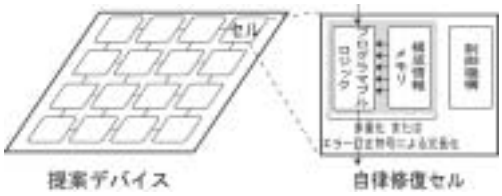


図１：提案デバイスと自己修復セル（概念図）

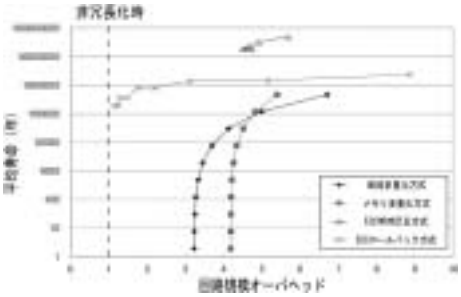


図２：回路規模と平均寿命のトレードオフ

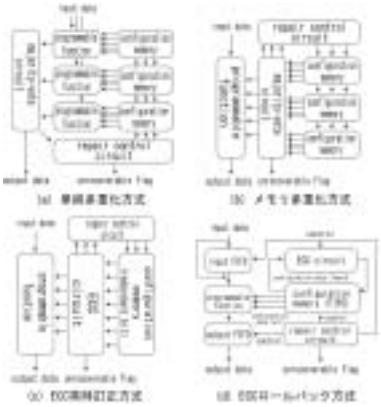


図３：自律修復セルの実現方式

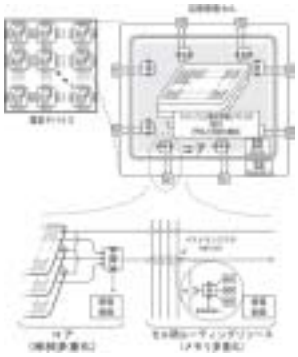


図４：提案耐故障再構成可能デバイス

参考文献

［1］ K. Nakahara, S. Kouyama, T. Izumi, H. Ochi and Y. Nakamura, “Autonomous-Repair Cell for Fault Tolerant Dynamic-Reconfigurable Devices,” in Proc. of FPGA, pp. 224, Feb. 2006.

［2］ K. Nakahara, S. Kouyama, T. Izumi, H. Ochi and Y. Nakamura, “Fault Tolerant Reconfigurable Device Based on Autonomous-Repair Cells,” in Proc. of FPL, pp. 461-466, Aug. 2006

集積システム工学講座　超高速信号処理分野（佐藤研空室）
http://www-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「マルチスタティックレーダーによる大気の高分解能観測」

大気レーダーは、大気中に常に存在する乱流に伴う屈折率の擾乱による電波の散乱を用いて、上空の大気の風速分布を測定する観測装置である。風速の測定にはドップラー効果を利用するが、単一のアンテナを送受信に用いる通常のモノスタティックレーダーにより測定できるのは、風速ベクトルを観測方向に投影した1成分のみである。そこで図1左のように、風速が水平方向には一様であると仮定して、異なる3方向以上にアンテナビームを走査し、得られる視線方向速度成分から風速ベクトルの鉛直分布を推定する方法が用いられてきた。　しかし、実際の風速場は、例えば雲の中の対流のように小さな空間スケールで変動する場合があり、測定誤差の原因となっていた。これに対して、図1右のように、送受信を行う主アンテナとは別に、受信専用の小規模なアンテナアレイ2組を追加し、3組のアンテナを用いて観測するマルチスタティック方式の大気レーダーを開発してきた。この方式では、送信ビームが照射する領域を異なる3方向から観測することにより、風速ベクトルの3次元分布を測定することができるため、従来のモノスタティック方式に比べて水平分解能が飛躍的に向上する。

ただしこの方式では、受信アンテナから見た各散乱体の方向が高度により変わるため、観測高度に応じて受信アンテナビーム方向を走査する必要がある。この機能を実現するため、図2に示すディジタル受信機を開発し、アレイを構成する個々のアンテナ素子の受信信号を直接AD変換して記録し、受信後に観測方向に応じて位相を調整して合成する方式を用いた。

さらにこの方式では、受信アレイの指向性パターンを受信後に自由に変更できるため、山などからの強い不要反射波を適応的に除去するアダプティブアンテナ技術を併用することが可能である。この技術をインドネシア・スマトラ島の赤道大気レーダーに適用し、連続観測を行ってその有効性を検証した。

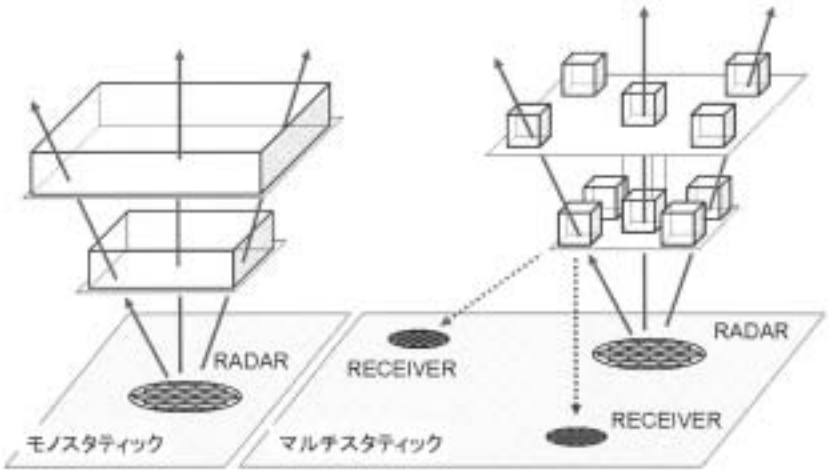


図１．大気レーダーの方式

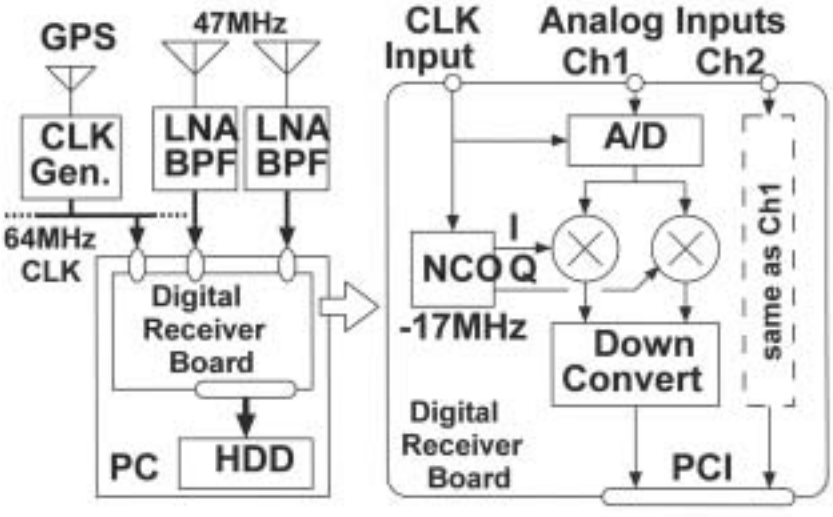


図２．ディジタル受信機システムの構成

参考文献

K. Nishimura et al., J. Meteor. Soc. Japan, Vol.84A, pp. 227-238, 2006.

システム情報論講座　画像情報システム分野
http://www.image.kuass.kyoto-u.ac.jp/intro.html
「顕微鏡写真を用いた木材の個体識別」

家屋・家具から装飾品にいたるまで木材はありとあらゆる所に利用され、我々の生活を豊かなものにしている。しかし近年、地球温暖化の影響や過剰伐採などによって森林資源は減少の一途を辿っている。このため、国際条約で守られているはずの森林において違法伐採が行なわれたり、高級木材を騙った木工品が市場に流通したりするなど様々な問題が生じている。これらの違法行為の摘発には木材の識別が不可欠であるが、加工材からの樹種判定や伐採地の特定には専門的知識と経験が要求されるため［1］、税関などの現場でこれを取り締まることは難しい。そこで我々のグループでは生存研（旧木質研）杉山研究室と共同で、木材を自動識別するシステムの開発を進めている。

本システムは、木材から切り出した微小切片の顕微鏡写真画像から樹木特有の特徴量を抽出し、この特徴量に基づいて樹種識別を行うものである。特徴量は大きく、樹木の細胞組織を反映した形状情報と画像の局所的な濃淡変化に基づいた統計的特徴量の二つに分けられる。

形状情報の代表例として、道管（根から枝葉への水や養分の通り道）の形状や配置が挙げられる。木口面（樹木の幹を水平にスライスした断面）において、道管は図1のように白く大きな円形領域として現れる。道管の大きさ、個数、並び方は樹種ごとに大きく異なるため、これらの特徴を利用した樹種識別手法がまず考えられる。そこで、各木材から採取した切片画像に対し、二値化、オープニング演算、輪郭抽出を順に行うことで道管領域の抽出を行った。抽出結果の一例を図2に示す。図3は原画像と抽出結果を重ねて表示したものであり、本手法による道管の抽出がほぼ正しく行われていることがわかる。各道管の太さはこれらを囲む外接円の直径として求められる。（図３参照）

統計的特徴量には、同時生起行列に基づく14種の特徴量とフラクタル次元を用いた。これらの特徴量を教師画像、未知の標本画像に対してそれぞれ求め、両者の類似度をもとに樹種判定を行った。

20種類の木材（標本画像数560）に対して本手法による個体識別実験を行ったところ、個体識別の成功率は約９割と良好な結果を得た。しかし同じ樹種であっても、樹齢や生育環境の違いによる道管形状のばらつきのために異なる樹種と見なされたり（ハリギリ、コナラなど）、よく似た道管構造を持つ異なる樹種（例えばアベマキとクヌギ）を同一樹種と誤判定してしまったりする場合があった。

各特徴量の性質をさらに吟味して識別結果への重み付けを適正化するとともに、より有効性の高い特徴量を見出し、本システムに導入していくことが今後の課題として挙げられる。

参考文献

［1］IAWA委員会：“広葉樹林の識別 IAWAによる光学顕微鏡特徴リスト”, 海青社, 1988

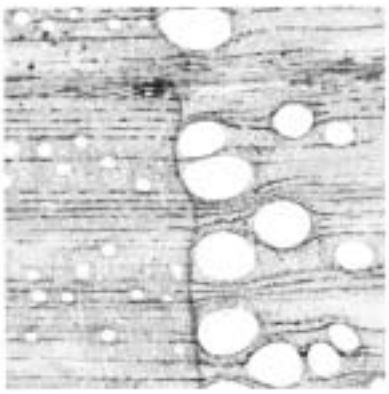


図１．元画像（アベマキ）

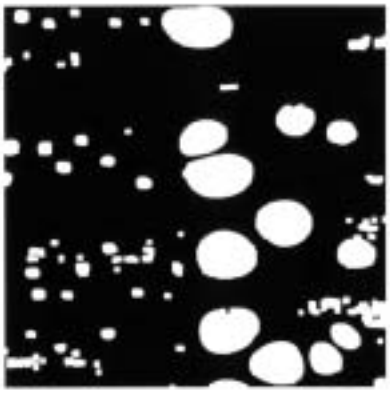


図２．道管抽出の例

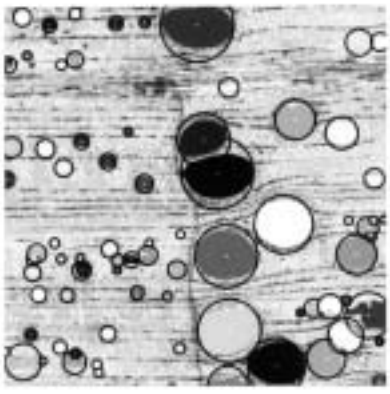


図３．元画像との重ね合わせ

エネルギー物理学講座　電磁エネルギー学分野（近藤研）
http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/
ヘリオトロンJプラズマの真空紫外分光

高温プラズマの研究は、ITER（International Thermonuclear Experimental Reactor：国際熱核融合実験炉）に代表されるように21世紀のエネルギー源として有望視されている核融合発電を目指し世界各国の共同と競争の下に大きく展開されている。京都大学ではエネルギー理工学研究所にある先進ヘリカル閉じ込め装置であるヘリオトロンJ装置がより効率のよい閉じ込め特性を探求することを目標として研究が進められている。高温プラズマのエネルギー閉じ込めをよくするためには閉じ込め磁場に関係なくエネルギー損失がある高温不純物イオンからの放射損失を少なくすることが重要である。ヘリオトロンJプラズマのように電子温度が1 keV程度まで上昇すると放射の波長領域は100nm以下の真空紫外領域に分布する。この波長領域では金属面からの反射効率が極端に減少するため分光素子として最小限の凹面回折格子のみを使用するコンパクトで波長分解能のよい真空紫外分光器を京都市内の町工場で製作しヘリオトロンJプラズマにおける不純物イオンの挙動を調べている。図１はこの分光器を、図２はヘリオトロンJ装置に取り付けた状態を示す。

図３はヘリオトロンJプラズマで計測された代表的なスペクトルでヘリオトロンJ装置を構成しているステンレスからの鉄が顕著に認められる。これらのスペクトル線の同定はそれほど簡単ではなく15～25nmに分布する電離電圧が近いFeIX～FeXIVイオンでは、いずれのイオンに帰着させるかが困難な場合が多い。またこれらのイオンの価数分布はプラズマの生成方法によっても大きく異なる。中性粒子ビーム入射によって生成されるプラズマと電子サイクロトロン共鳴を利用して生成されるプラズマでは内部に生成される電場の方向が反対になる可能性があり、その電場によって高電離イオンの挙動が変わることが知られている。図4は中性粒子ビーム入射プラズマ中の鉄イオンのプラズマ断面上種々の位置における発光強度の時間変化を示しているが、時間とともに発光領域がプラズマ中心部へ集中している様子が伺える。将来的にはプラズマ中の電場、周辺部の磁力線構造を利用してプラズマ中の高電離イオンの挙動を自由に制御することを考えている。

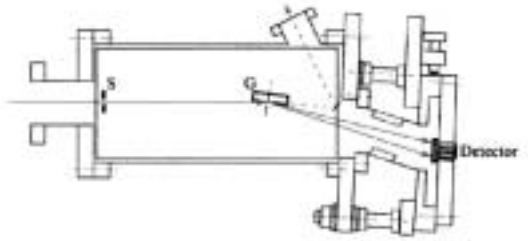


図１

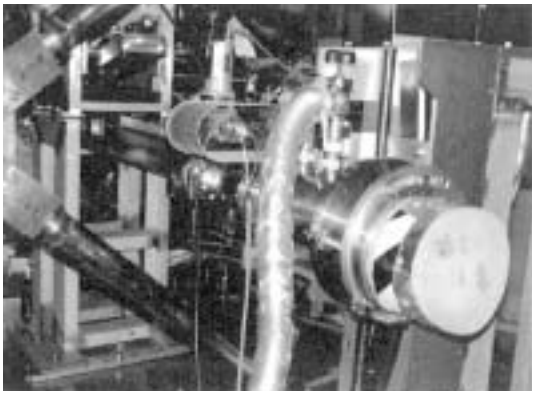


図２

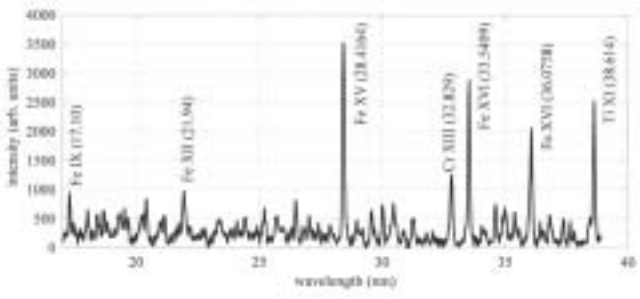


図３

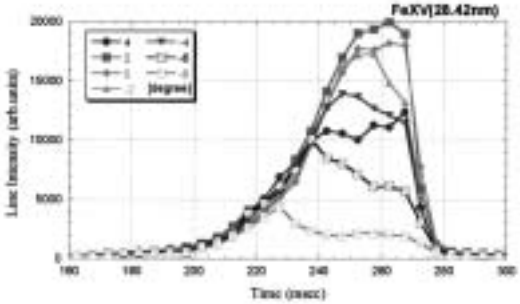


図４

参考文献

cue NO.13 JUNE 2004 p7
先進ヘリカル磁場配位のヘリオトロンJ装置による高温プラズマ閉じ込め研究

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/
「Chain FRAMを用いた新強誘電体機能メモリの回路と応用に関する研究」

強誘電体を用いた新しいCMOS機能メモリの回路と応用に関する研究について述べる。高密度機能メモリを実現するためChain　FRAM（CFRAM）の概念を取り入れた機能メモリを考案し、その特徴である並列処理機能を有効に生かすため検索アルゴリズムを考察し、それに適した内部演算回路を合成した。

21世紀に向けたウェアラブル・コンピューティング社会の実現のため次世代不揮発性半導体メモリ技術の研究が重要な課題であり，強誘電体メモリ（FeRAM）が注目を集めている。FeRAMは強誘電薄膜をキャパシタとしてメモリセルに用いることで電源を切っても記憶データが失われないという不揮発性とメモリの読み出し/書き込み動作をほぼ等しい時間内で行なえるというランダムアクセス性を兼ね備えている。機能メモリはノイマン型コンピュータと異なり超並列データ処理が可能となり、従来型コンピュータのボトルネックと言われた配線部でのデータフローレイトの限界を打破する技術として注目されている。ワードパラレルに演算が実行されるため並列処理が可能になる。したがって、データフロー型M/Cとして機能するので、データ量が大きく比較的簡単な演算処理を必要とする用途に向くといわれている。従来のFeRAMセルはDRAMと同じセル構成をとっているためセル面積をこれ以上縮小することができない．この問題を解決するためChain　FRAMが提案された。Chain　FRAMは一つのメモリセルの中でパストランジスタと強誘電体キャパシタとが並列接続されている。このメモリセルがいくつも直列に接続されて一つのセルブロックを作る。CFRAMはセルの信号を読み出すために差動型SAを用いているので、リファレンス信号をダミーセルによって作っている。従ってDRAMと同様なビットライン・アーキテクチャが必要になる。

一方、検索（サーチ）や整列（ソート）への応用を考え、各ブロックの出力が同時に要求されるのでメモリセルの出力信号はビットシリアル・ワードパラレルに内部配線を使って取り出し、リファレンス信号はオープン・ビットライン・アーキテクチャの考えを用い、チェインセルブロックごとに設けられたダミーセルブロックから得る。検索（サーチ）はコンピュータ内に置かれたデータ構造の中から特定のデータを見つけ出す問題である。この問題をコンピュータに解かすためには比較器（マッチング回路）が必要である。機能メモリを使ったワードパラレル・ビットシリアルの並列処理では各桁におけるマッチング判定を全てのデータについて行うことになるので、各データ及び参照データのそれぞれ同じ位のもの同士を比較すればよい。従って、排他的論理和（XOR）の否定、すなわち、XNORを並列に配置した回路があれば良い。検索ビット各桁、位の情報はシリアルに入力されるので全部の桁で比較器の出力が “1” であることを検知するためには前段の出力が “1” であることと新しい桁の出力とが “1” であることを繰り返し行うことが必要になる。これは2入力ANDのカスケード接続CMOS dynamic logic（Domino）回路を用いることで達成できる。

ここでは目標とするデータが見つかるまで順に比較していくシーケンシャル・サーチ（順検索）との比較を紹介する．単純のため、全てのデータについて全ての位（桁）を調べるという条件の下で検討した。全てのデータについてビット・パラレルに調べるときCAM（Content Addressable Memory）を用いて検索した場合の演算回数はサンプル数を$S=2^n$とすれば$S=2^n$回となる。一方機能メモリを用いてビットシリアルに調べる場合、$1/2V_{dd}$スキームおよび階層ビット線分割方式を用いれば、すなわち$S<4M$以下であれば演算回数はn回である。Sが約100万個、$n=20$として計算すると改善比は約5×10^4となる。

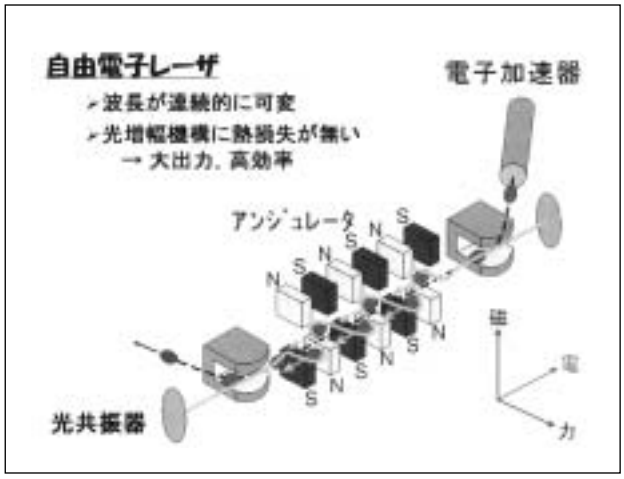
本研究ではシーケンシャル・サーチについて従来方式と演算回数の減少比を理論的に考察，比較し良好な結果を得た。また、整列（ソート）等についても専用のアルゴリズムを適用することで同様な成果が期待できることも分かっている．従ってビットシリアル・ワードパラレル型強誘電体機能メモリの新しい応用分野として現在成長の著しいインターネット関連情報処理分野が大変有望であることが明らかになった。

参考文献

野澤、電子情報通信学会、信学技報Vol. 105 No. 492 pp. 53-58 2005

エネルギー生成研究部門　粒子エネルギー研究分野（吉川研究室）
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html
「相対論的電子ビームを用いた新量子放射エネルギーの発生」

本研究室では、荷電粒子ビームと電磁界との相互作用を高度・高精緻に制御することにより21世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、爆薬等の探知から医療用まで多様な応用が期待される超小型の放電型核融合中性子・陽子源、荷電粒子ビームエネルギーの電磁界を介した高効率直接発電や、ここで紹介する高輝度・高エネルギー電子ビームの生成とそれを用いた新量子放射エネルギーの発生などの研究を行っています。

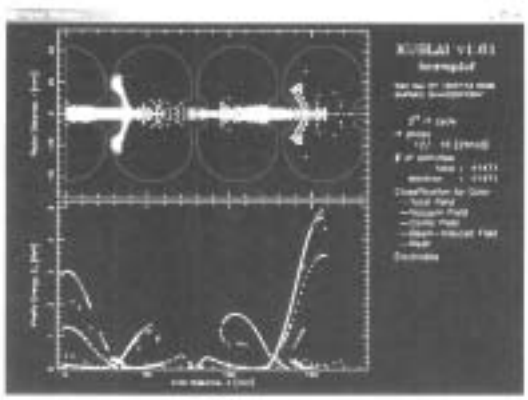


自由電子レーザ（FEL）の概念図と特長

高エネルギー電子ビームを用いることによって、従来のレーザ等にはない機能、波長領域、強度の新しい放射源が実現します。例えば、SPring-8に代表されるシンクロトロン放射は既に盛んに利用されています。レーザ逆コンプトン散乱による準単色ガンマ線源や、広い波長領域でのコヒーレント光の発生が可能な自由電子レーザ（Free Electron Laser: FEL）も世界中で研究開発が行われています。従来のレーザは原子や分子に束縛された電子が高エネルギー準位から低い準位に遷移するときに発生しますが、FELは言わば準位を人工的に作り出すことによって得られ、様々な新たな要求に応える柔軟性を具えています。

右上図のように、FELは電子加速器、アンジュレータ、光共振器から成ります。高エネルギー電子は、アンジュレータの周期的交代静磁場の中を蛇行し、その周期（数cm）に応じた波長の電磁波を放出しますが、このとき相対論的ドップラーシフトの効果により、前方に放出される電磁波（自発放射光）の波長は電子エネルギーに応じてテラヘルツから可視、X線領域にも達します。さらに、蛇行する電子は横方向の速度成分を持ちますので、自発放射光の横方向電界と相互作用してエネルギーの授受が起り、条件が整えば光の増幅が起こります。また、光の磁界とそれに直角な横方向の速度成分によって電子には進行方向にも力が働き、電子は光のある位相に集群化されます。その位相が光の増幅条件下にあれば光はコヒーレントなレーザになります。

FELは電子の運動エネルギーをより付加価値の高い量子放射エネルギーに無損失で変換したものとも言え、右上図中に示したような従来のレーザにない特長があります。私たちが宇治キャンパスで開発しているFELでは、先日、平成18年12月11日に約40 MeVの電子ビームを用いて自発放射光の発生に成功しました。当初は波長4～13 μm連続可変で、直線偏光の赤外FEL発振を目指しています。さらに、偏光可変FEL、準単色ガンマ線や単色テラヘルツ光の発生も将来計画しています。これらの量子放射源の性能の鍵を握っている高輝度電子ビーム生成の研究、特にその数値シミュレーション研究においては、本研究室は世界をリードしています。国内シミュレーションコードのベンチマークを高輝度光科学研究センター/Spring-8と共催していますので、そのホームページhttp://acc-web.spring8.or.jp/~workshop/e-gun/も参照してください。



本研究室で開発した有限要素法粒子シミュレーションコード

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）
http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/index.html
核融合プラズマにおける波動電流駆動・加熱法の開発

京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位は、ヘリオトロンEに代表される歴代のヘリオトロン装置により、高温プラズマ閉じ込め概念としての優位性が実証されてきました。これらの成果を発展させ、更なるプラズマ閉じ込め磁場配位最適化を目指して、私たちはヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において、新しい磁場配位パラメタ領域におけるプラズマ閉じ込め特性の理解に資するため精力的に実験研究を進めています。ヘリオトロンJでは、電子サイクロトロン共鳴加熱システム（ECH）を用いたプラズマ生成・加熱を行っており、周波数70GHz、最大入射パワー400kW 、最大パルス幅0.2 secの高パワーミリ波を入射することにより、国際実験則ISS95の予測値の最大２倍となるプラズマエネルギー閉じ込め時間が得られています。また、閉じ込め状態の自発的な遷移現象（Hモード遷移）を発見し、その発現機構及びISS95エネルギー閉じ込め比例則との比較に関する研究が進展しています。HモードECHプラズマのエネルギー閉じ込め時間は遷移前と比較し約50％の向上が見出されており、ヘリオトロンJ装置の閉じ込めの良さを実証しました。

トロイダルプラズマにおいて、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ることで、プラズマの平衡・安定性に影響を及ぼすことが指摘されています。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、その利用が提案され、現在、ヘリオトロンJにおいて実験的な検証が行われようとしています。また、オーミック電流を必要としないヘリカル系でのECCD研究により、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できます。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。一方、計測の観点からは、ヘリカル系装置はオーミック電流を必要としないためEC電流の精度良い測定が可能であるという長所を有しています。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。最近、ヘリオトロンJ、TJ-II（CIEMAT、スペイン）、CHS（NIFS、日本）のヘリカル系装置においてECCDに関する国際共同実験が進められており、共通する電流駆動物理の抽出が期待できます。これまでの共同実験では中型ヘリカル装置におけるECCD特性が調べられ、電流駆動効率が同程度であること、入射角、磁場配位などによって制御可能であることを示しました。また、W7-X（MPI、ドイツ）との理論共同研究では、図１に示すようなレイトレーシング計算を用いてECパワー吸収分布、及び、ECCDの理論解析を進めています。

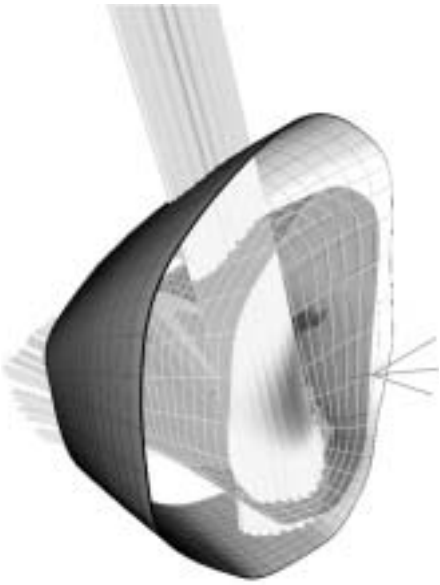


図１．レイトレーシング計算コードTRAVISによる電子サイクロトロン波の伝搬・吸収解析

波動電流駆動・加熱法の開発に関し、水内研では新しいプラズマ波動加熱の開発も進めています。正常波・異常波と呼ばれる電磁波伝播ではカットオフと呼ばれる密度上限が存在し、高密度領域における電子加熱・電流駆動が困難となります。この問題を解決するため、静電波の一種である電子バーンスタイン波（EBW）を用い、電子密度に依らない新しい加熱・電流駆動法を開発中です。EBWは、（１）密度上限が存在しない、（２）低電子温度においてもパワー吸収率が極めて高い、という長所を有しており、また、低温高密度プラズマの生成など、プロセスプラズマにも応用が期待されています。

電波応用工学研究部門 レーダーリモートセンシング工学分野（深尾研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/fukao-lab/
「大気レーダーによる台風の観測」

当研究室は、先端的大気レーダー・リモートセンシング・テクノロジーを開発し、大気圏の未知・未解決の諸現象の解明に挑んでいる。ここでは、その一例として大気レーダーによる台風観測について紹介する。

風速の計測はかつて地上に設置した風速計や気象気球の放球により行われていたが、高層の風速を時間・高度的に連続に測ることは不可能であった。一方、大気レーダーは大気中に普遍的に存在する大気乱流からの散乱を利用することで、天候に関係なく高層大気の鉛直流を含む風速３成分を連続計測できる。我々はMUレーダーで培った技術を基に、気象観測に重要な高度5km程度までの下部対流圏の全高度域をカバーする小型の大気レーダー（下部対流圏レーダー；図1）の開発に成功した。

気象庁は、平成12年度に局地天気予報の精度向上を図るために全国に大気レーダーネットワークを展開し、現業の天気予報への活用を開始した。WINDASと呼ばれるこのネットワークを構成する大気レーダーとして下部対流圏レーダーが採用され、現在31台から成るレーダーネットワークから得られるデータが気象予報モデルの初期値として取り込まれ、日々の天気予報業務に活用されている。この結果、従来予報が困難であった集中豪雨などの局地現象に対する予報精度が著しく向上している。

平成15年夏に発生した台風10号が、WINDASを構成する鹿児島県奄美大島の下部対流圏レーダーの直上を通過し、初めて最盛期の台風の目の内部の観測に成功した。観測データを詳細に解析し、この台風は目の直径が約70kmで、その周囲を高さ約10km、厚さ数10kmの壁雲が取り囲んでおり、目の中に直径数km～数10kmに渡る上昇流と下降流が混在していることを見出した(図2, 3)。従来、ほとんど雲が存在しない台風の目の内部は、下降流であると考えられていたが、大気レーダーによる観測から、上昇流が存在するという新たな事実が発見された。この成果は台風の進路予想の精度向上などに貢献すると期待されている。

図１．下部対流圏レーダー

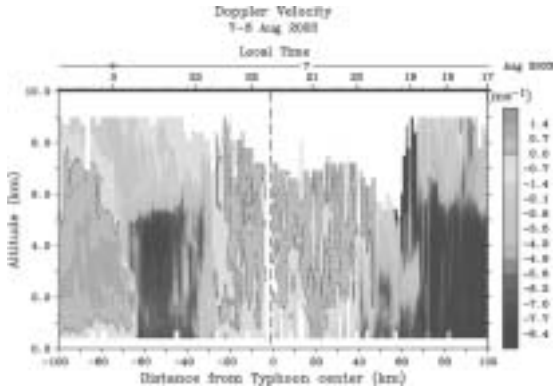


図２．奄美大島の下部対流圏レーダーで観測された台風0310号の鉛直流の台風中心からの距離・高度変化。正が上昇流、負が下降流を表す。距離30km以遠の大きな下降流は雨粒の落下速度に対応する。

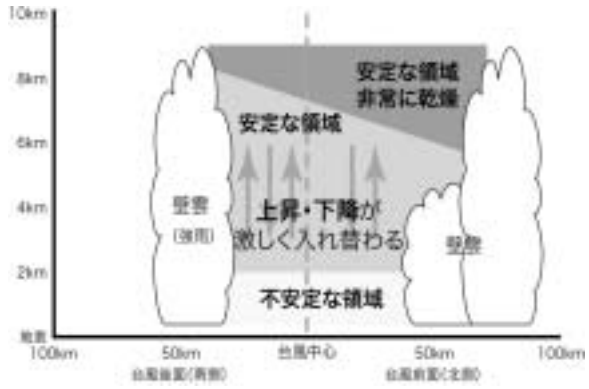


図３．観測された台風の構造の模式図。

平成17年度修士論文テーマ紹介

工学研究科　電気工学専攻

谷　川　真理子（荒木教授）「現実的状況における行き先階登録方式エレベータの群管理方法」

現実的な行き先階登録方式エレベータシステムとして、乗客は自分の行き先階が未登録の場合にのみ行き先階を登録するという登録方式、および行き先階が登録されるとすぐに乗車すべきエレベータを案内するという案内方式を考え、効率のよい群管理手法を提案した。

谷　口　正　樹（荒木教授）「モニタ監視下麻酔管理における鎮静度制御の研究」

侵襲の小さい外科手術で患者の不安除去や健忘のために行われるモニタ監視下麻酔管理における鎮静度の適切な維持と鎮静薬投与量の低減を目的として、各患者のモデルパラメータの同定法および鎮静度制御法の検討を行い、鎮静度制御システムの臨床応用を試みた。

二　村　直　樹（荒木教授）「CT画像に基づくモデルを用いた生体軟組織の力学的特性の解析」

人体に直接力を加える医療・福祉機器の人体への力学的影響を明らかにするため、上腕に圧迫を加えたCT画像に基づいて人体軟組織の弾性係数について検討し、変形と応力分布を再現できるモデルを構成するとともに、有限要素法により圧迫による変形と応力の解析を試みた。

南　　智　規（荒木教授）「特異点グラフを用いたボリュームデータの類似度計算手法の提案」

本研究では、計算機シミュレーション結果等から生成される膨大なサイズのボリュームデータ同士の類似度計算法として、ボリュームデータの特徴を保持した特異点グラフを用いた手法を提案し、気象シミュレーション結果に対して本手法を適用しその有効性を検証した。

大　西　宏　樹（島崎教授）「不正複製抑止機構を備えたユーザ認証付きインターネット映像放送システム」

安価に実現可能なインターネット映像放送のための要素技術とシステム構成について検討し、実際にシステムを開発した。有料放送のための要素技術として、受信制限のためのユーザ認証方式を組み込み、さらに不正複製抑止のための電子透かし手法を提案した。

友　藤　大　輔（島崎教授）「代数マルチグリッド前処理を用いたA法およびA-V法による電磁界解析に関する研究」

準定常電磁界問題についてA法およびA-V法による数値解析を行い、そこで現れる大規模連立一次方程式のための効率的な前処理手法を開発した。前処理手法として代数マルチグリッド法を適用し、A-V法において有効な補間行列生成法を提案した。

広　中　悠　樹（島崎教授）「MPIとGlobusとを用いた並列マイクロ磁気学シミュレーションに関する研究」

PCクラスタおよびグリッド環境下におけるマイクロ磁気学計算の並列化を行った。PCクラスタでは16台で約10倍の速度向上率を得た。Globus ToolkitとMPICH-G2を用いて吉田-桂キャンパス間でのグリッド環境を構成した。

藤　原　圭　佑（中村（武）助教授）「MgB_2長尺線材を適用した高温動作超伝導スイッチング素子開発のための基礎研究」

2001年に発見されたMgB_2金属系超伝導体の線材化とスイッチング素子への適用可能性を検討した。その結果、熱処理条件を最適化することによって高性能線材作製が可能であることを明らかにし、かつ同線材を適用した高温超伝導コイルの永久電流運転の予備実験に成功した。

三　宅　央　倫（中村（武）助教授）「ビスマス系高温超伝導かご型誘導電動機の基礎特性検討」

ビスマス系高温超伝導テープ材を二次側回転子に適用したかご型誘導電動機の基礎特性を検討した。その結果、誘導モータでありながら同期回転可能であることを実験的に実証し、かつ非線形等価回路解析に基づく理論予測と良く一致することを明らかにした。

隠　浪　康　行（小林教授）「機能的MRIと脳磁図を統合的に用いた脳機能解析法に関する研究」

機能的MRIと脳磁図を統合的に用いる新たな脳機能解析手法を提案し、視覚認知課題遂行時の脳機能計測に適用し検討を行った。その結果、近接した複数の視覚関連大脳皮質活動の動的イメージングが可能であることを実験的に検証することができた。

海老名　紘　明（引原教授）「可到達集合を用いた電力系統の過渡安定性解析手法に関する研究」

本論文では、可到達集合を用いた過渡安定性解析手法を検討している。本手法は電力系統における送電線の切替時刻を考慮して過渡安定性が評価可能なものである。この手法を実系統に基づく解析モデルに適用し、過渡安定性の数値的検討を行った。

木　村　真　之（引原教授）「結合片持ち梁上の空間局在モードによる物体搬送機構に関する基礎的研究」

非線形性を有する結合振動子系には、空間局在モード（ILM）と呼ばれる空間的に局所した周期振動が存在する。本論文では、結合片持ち梁を用いた物体搬送機構の基礎的研究として、ILMについて数値的に検討し、多数共存する不安定なILMの不変多様体のなす構造が、ILMの移動を支配することを示す。

韓　　敬　華（引原教授）「電力ネットワークにおける構成的配分法の回路解析に基づく検討」

電力ネットワークの中で、多数の電源が複数の線路を経由して、多数の需要家へ送電する場合、特定の電源から特定の線路、負荷へどのぐらいの電力が供給されているのかを計算する。回路構成に基づいて、定常状態の単相回路、三相回路の有効電力、無効電力、瞬時電力の配分を算出する。単相回路については実験的な検討と過渡状態の電力配分についても検討する。

馬　場　正　幸（引原教授）「コンパスモデル受動歩行の安定性に関する位相構造に基づく数値的検討」

本論文では、歩行機械に用いられている歩行様式の一つである受動歩行に関して、その安定性について検討を行なった。特に、歩行ダイナミクスにおける位相構造の大域的特性について数値解析に基づき検討し、その特性を明らかとした。その結果、受動歩行の過渡挙動について検討を加えた。

堀　内　健　介（和田教授）「単一導体線路上の電流伝搬に基づくコモンモードの解析」

単一導体線路上における円筒表面電流を用いた電流伝搬解析手法を提案した。導体半径が不均一な線路について、不連続境界における電荷分布を補償するモデルを提案した。平行導体線路のコモンモード発生機構に関し、単一導体の電流伝搬の観点から理解を与えた。

中　嶋　　涉（和田教授）「グレイコードの位相的性質を用いた四則演算アルゴリズム」

グレイコードの位相的性質に注目し、対応する区間が拡大、移動したときのコードの更新規則を導出し、区間拡大、移動をグレイコードによる四則演算に適用した。また、グレイコード演算に必要な演算量を明らかにするとともに、この位相的性質を利用した曲線追跡を行った。

堀　口　和　洋（萩原教授）「サンプル値系の正実性解析とパラメータの不確かさに関するロバスト性能解析への応用」

本論文では、連続時間の制御対象に含まれる不確かさに対して、サンプル値系の内部安定性および正実性を保証する条件を導出する。さらに、この条件を応用し、サンプル値系の内部安定性および強正実性を保証するスカラのパラメータの不確かさの許容範囲を厳密に解析する方法を示す。

平　井　義　人（萩原教授）「多項式型パラメータ依存リアプノフ関数を用いた不確かな線形時不変系のロバスト性能解析と設計」

本論文では、不確かさを有する線形時不変系のロバスト性能を多項式型パラメータ依存リアプノフ関数を用いて解析することを可能とする新たなLMI条件を提案する。さらにロバスト制御系設計問題に対し、提案条件に基づく繰り返し計算を用いた状態フィードバックコントローラ設計法を提案する。

清　田　将五郎（萩原教授）「LQ最適制御理論を用いた２軸型空圧人工筋アームの軌道追従制御」

２軸型空圧人工筋アームは軽量で柔軟という特長をもつが、圧縮空気や人工筋を用いることから剛性が低く、軌道追従制御を行なうことが容易でない。本論文では、LQ最適制御理論に基づくサーボ系と人工筋の圧力に関するマイナーループを併用することで精度の高い軌道追従制御を達成した。

前　田　雄　俊（萩原教授）「制御入力の飽和を考慮した２自由度LQIサーボ系のL_2性能保証領域に基づく設計法」

本論文では、L_2性能保証領域の考え方を採用し、制御入力の飽和を陽に考慮した２自由度LQIサーボ系の設計法を提案する。この提案手法は、制御対象の保護や、操作器の出力の物理的な限界による制御性能の劣化など、制御入力の飽和に関する問題に対して系統的な解を与える設計法である。

小　賀　陵　嗣（大澤教授）「固体高分子形燃料電池システムの動的モデルに関する研究」

固体高分子形燃料電池（PEFC）の静的モデルおよび動的モデルを導出し、モデルによる動作を実験結果と比較して両者がよく一致することを確認した。また、PEFCの動的モデルと、チョッパ、インバータ、フィルタから成る電力変換器モデルを組み合わせた発電システムのモデリングを提案した。

服　部　和　生（大澤教授）「電力系統の二次形式表現と静的特性解析への応用手法」

二次形式電力方程式を導き、それに重みを付けることによって、ニュートン・ラプソン法の電力潮流計算を効率化する方法について述べた。また、二次形式電力方程式に基づいて、電力と静的電圧安定性との関係を系統アドミタンス行列の固有値・特異値不等式で評価し、数値例で理論解析の有効性・問題点を検討した。

工学研究科　電子工学専攻

有　本　佳　宏（鈴木教授）「$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$固有ジョセフソン接合を用いた両面微細加工法を用いた dc SQUID構造作製とその特性に関する研究」

層状結晶構造を有し劈開性にとむ高温超伝導体$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$単結晶から微細加工プロセスとポリイミドを用いて薄膜を劈開する両面劈開法を達成した。これを用いてこの系に内在する固有ジョセフソン接合のdc SQUID 構造を作製し、臨界電流の磁場依存性に環境雑音と同程度の弱い磁場変調を確認した。

田　中　陽　介（鈴木教授）「マグネトロンスパッタ法による$CaCu_3Ti_4O_{12}$高誘電率誘電体薄膜の作製と電気的特性に関する研究」

誘電率が室温で80000に達する複合酸化物$CaCu_3Ti_4O_{12}$（CCTO）を対象として、高周波マグネトロンスパッタ法による薄膜作製を検討した。サファイア、Pt蒸着サファイア、$SrTiO_3$（100）、および$La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$（100）/$SrTiO_3$（100）の各種基板に対してCCTO薄膜を得た。また、後者2種類の基板には基板温度900℃でエピタキシャル成長を達成した。電極短絡問題のため誘電率評価には至らなかった。

永　久　哲　三（鈴木教授）「巨大磁気抵抗体$La_{1-x}Sr_xMnO_3$/超伝導体$La_{2-x}Sr_xCuO_4$接合におけるスピン偏極準粒子注入効果に関する研究」

$SrTiO_3$（100）基板上に高温超伝導体$La_{2-x}Sr_xCuO_4$と巨大磁気抵抗強磁性体$La_{1-x}Sr_xMnO_3$の2層エピタキシャル接合構造を作製し、これから高温超伝導体へのスピン偏極準粒子注入素子を形成した。2.5×10^2 A/cm^3以上で準粒子注入非平衡効果が現れ1.3×10^3A/cm^3では臨界電流が完全に抑制される顕著な効果を見出した。

吉　田　昌　平（鈴木教授）「$La_{2-x}Sr_xCuO_4$バイクリスタル粒界ジョセフソン接合の作製とそのトンネル特性に関する研究」

30 °(001）バイクリスタル基板上に高温超伝導体$La_{2-x}Sr_xCuO_4$をエピタキシャル成長させることにより、基板粒界上にバイクリスタルジョセフソン接合を形成し、フラウンホーファーパタンならびにジョセフソン臨界電流密度9×10^3A/cm^2を得た。また、これを用いたトンネル分光により超伝導ギャップ2δ=14meVを得た。

小　島　俊　彦（石川教授）「イオン注入装置における次世代帯電緩和素子のためのシリコン電界放出電子源の作製と評価に関する研究」

シリコンフィールドエミッタアレイの作製方法を検討するとともに、イオン注入装置の帯電緩和素子として利用する観点から評価を行った。エミッタ表面を炭素化処理したものでは、電子のエネルギー幅も狭く、雰囲気ガスに対する耐久性も良好であった。

河　村　嘉　徳（石川教授）「レーザ照射したカーボンナノチューブの切片傾きチャートを用いた電界放出電子源としての評価」

フラットパネルディスプレイのための陰極として期待されるカーボンナノチューブをレーザ照射したものの電子放出特性を超高真空中及びガス雰囲気中で測定した。結果を切片傾きチャートにより評価し、レーザ照射条件に伴う構造変化を解析した。

後　藤　直　行（石川教授）「負イオン注入によるシリコン熱酸化膜中におけるゲルマニウムナノ粒子の形成」

ゲルマニウム負イオンを種々の条件でシリコン熱酸化膜や石英ガラスに注入して光反射特性、断面TEM、RBS分析などにより、ゲルマニウムナノ粒子の形成状態と負イオン注入条件および熱処理の関係を調べた。また、25nm厚の酸化膜中に形成したナノ粒子により、容量電圧特性でメモリ機能を有することを明らかにした。

北　村　　強（石川教授）「神経系電子回路間バイオインターフェイス形成のための負イオン注入による高分子材料の表面改質」

バイオインターフェイス形成を目的として、スピンコートポリスチレン薄膜上での選択的細胞接着と神経突起誘導のための炭素負イオン注入処理を研究し、細胞の接着限界処理幅が細胞サイズよりも狭い約5μmであることや電気パルスの印加による神経突起の進展方向制御の可能性、更に、注入量域への選択的なタンパク吸着特性を明らかにした。

英　保　　黎（橘教授）「ポッケルス効果を用いた誘電体バリア放電電極上の二次元時空間電荷分布測定」

高気圧下で安定に動作する誘電体バリア放電では、誘電体が電極となり、蓄積される表面電荷は放電特性に影響を持っている。この研究では、正確に直接測定することが困難である対向放電型電極構造の表面蓄積電荷を電気光学効果を利用して測定した。

坂　口　拓　生（橘教授）「2次元正方格子プラズマフォトニック結晶中のミリ波伝搬特性」

マイクロプラズマを２次元正方格子状アレイに配列し、伝搬するミリ波の特性を明らかにした。まず理論的に、修正型の平面波展開法を用いて、バンド構造を導出した。そして、実験的に透過波の極端な減少を確認し、理論予測の禁制帯周波数と一致した。

田　井　隆　輔（橘教授）「気相診断制御MOCVD法によるペロブスカイト型Mn酸化物の作成と物性評価」

有機金属錯体を用いた化学気相成長法において、気相反応診断を活用し、ペロブスカイト型マンガン酸化物を作成した。気相診断により配位金属の違いによる分解のし易さが明らかとなり、作成した薄膜は巨大磁気抵抗効果あるいはEPIR効果を発現した。

連　石　和　樹（橘教授）「RFマグネトロンスパッタ法によるMnドープITO薄膜の作成とその物性評価」

電子の電荷とスピンを用いる希薄磁性半導体は、キュリー温度が低く、低抵抗化・透明化が困難という問題があった。この研究では、ITOを母体半導体として、RFマグネトロンスパッタ法によってMnをドープすることで磁性機能の発現を確認した。

堀　田　昌　宏（木本助教授）「分子線エピタキシーによる六方晶SiC基板上への新規ポリタイプ無極性面AlNの成長と物性評価」

深紫外領域固体発光素子を目指して、新規結晶構造（４H構造）を有する無極性面AlNの成長、評価を行った。このAlNは、従来の無極性面AlNと比較して貫通転位が大幅に低減されており、また、通常のウルツ鉱構造（２H構造）AlNとは異なる物性を持つことを明らかにした。

登　尾　正　人（木本助教授）「多重RESURF構造を用いた横型高耐圧SiC MOSFETの設計と作製」

本研究では、多重RESURF構造を有するMOSFETのドーズ設計、及び試作を行った。設計に基づき実際に作製したSiC横型MOSFETは、耐圧1380V、オン抵抗66m Ω cm^{2}という優れた特性を実現し、多重RESURF構造が横型MOSFETの高耐圧化、低損失化に有効であることを実証した。

上　村　　浩（松重教授）「低分子有機強誘電体VDFオリゴマーの分極反転機構とメモリ応用に関する研究」

本研究では、VDFオリゴマー薄膜における分極反転時間の測定を行い、ナノ秒オーダーの高速な分極反転応答を確認した。また、薄膜の構造と電気特性との相関や、メモリ応用を念頭においた疲労／焼き付き特性についても評価を行い、VDFオリゴマーの 分極反転機構に関する考察を展開した。

梶　田　輝　之（松重教授）「原子間力顕微鏡を用いた溶液中の生体試料の高分解能観察」

本研究では、周波数検出方式ダイナミックモード原子間力顕微鏡（FM-AFM）を開発し、液体中で高度好塩菌の紫膜中のタンパク質であるバクテリオロドプシン二次元結晶や大腸菌由来のシャペロニン分子をマイカ基板に吸着させ、その高次構造を分子分解能で観察した。また、液中の塩濃度や相互作用力の大きさによるコントラストの違いとその原因を考察し、液中動作FM-AFMによる生体分子観察への応用可能性を示した。

松　本　　隆（松重教授）「有機半導体の自己組織化プロセスと自発分極による有機半導体のキャリア状態評価」

本研究では、チオフェン５量体自己組織化膜の作製を行い、その薄膜構造と有機トランジスタ（FET）特性を評価した。また、有機強誘電体／有機半導体（ペンタセン）の積層構造を作製し、その界面における分極とキャリアの相互作用とFET型強誘電体メ モリへの応用可能性について言及した。

鈴　木　　翔（川上助教授）「GaNナノコラム上InGaN/GaNの量子構造の発光機構」

GaNナノコラム上のInGaN/GaN量子構造は、高効率発光素子として期待されていている。本研究では、トップダウンおよびボトムアップ的に作製したナノコラムに対して、ナノ・スペクトロスコピーにより、単一コラムの光学特性を評価した。その結果、高い発光効率が内部電界の遮蔽に基づいていることを見出し、この効果が従来構造である薄膜にはない、ナノコラム特有の現象であることを明らかにした。

畑　田　芳　隆（川上助教授）「金属ナノアイランドを用いた窒化物半導体細線のMOVPE選択成長」

Niなど金属微粒子を成長核として、その上にGaNナノワイアおよびInGaN/GaNコア・シェル型ナノワイア量子構造を作製した。Niの結晶方位を制御することにより、ナノワイアの成長方向制御が可能であることを実験的に示し、結晶学的な考察を加えた。また、単一ナノワイア量子構造からの発光が観測に成功し、光学素子として高いポテンシャルを持つことがわかった。

山　田　大　輔（川上助教授）「半極性および無極性InGaN/GaN量子構造の発光機構」

従来のInGaN系発光素子は（0001）極性面に作製されているのに対して、半極性・無極性面が発光効率改善に向けて有望であることが指摘されている。本研究では、このような面方位に作製したInGaN/GaN量子井戸構造において生成されたキャリアの時間・空間ダイナミクスを、近接場光学顕微鏡を用いてナノスコピックに解析した。キャリアが非常に短い寿命で輻射的に再結合し、その結果、量子井戸内での拡散長が低く抑えられていることが明らかにされた。

梁　　世　英（川上助教授）「高In組成InGaN量子井戸による高効率赤色発光への基礎研究」

窒化物半導体を用いた発光素子で可視域すべてをカバーするには、赤色領域の発光効率の改善が必須である。本研究では、その領域での発光効率改善を目指してIn組成の大きな高品質InGaN量子井戸の作製を行った。高In組成InGaNの結晶性の改善のために、１分子層以下の酸化Siを中間層に用いることを提唱し、実験的に検証した。また、作製した高In組成InGaN量子井戸から赤色発光を確認した。

中　西　純　也（野田教授）「２次元フォトニック結晶・量子ドット融合系の光物性」

量子ドットの強い電子閉じこめを反映して2次元フォトニック結晶による面内方向への発光抑制と面外方向への発光増大が130K程度の高温まで持続することが分かった。点欠陥共振器と量子ドットの融合系においては共振器モードと良く結合した極少数の量子ドットが発光特性を支配することを明らかにした。

上　杉　利　次（野田教授）「2次元フォトニック結晶光ナノ共振器のQ値の動的制御に関する研究」

２次元フォトニック結晶高Q値（Q～20万）光ナノ共振器中で10 Wという微小な入力光パワーから光非線形現象が生じることを観測し、その物理機構を解明した。また共振器面内Q値を2500-∞という広範囲に渡って動的に制御することに成功した。これを利用した光バッファメモリ動作の検討も行った。

中　村　誠　宏（野田教授）「フォトニック結晶による熱輻射制御に関する研究」

半古典論に基づいた理論検討を行い、2 次元フォトニック結晶スラブ点欠陥共振器の共振波長において、スラブ上下方向に対する効率的な熱輻射が期待されることを見いだした。また熱伝導損失低減のため梁を用いて スラブを支持する構造を提案し、材質にSiを用いた場合には、強度、たわみについて大きな問題がないことを明らかにした。

高　橋　重　樹（野田教授）「フォトニック結晶による自然放出制御に関する研究」

本研究の第１段階では、２次元フォトニック結晶スラブによる自然放出の抑制・再分配現象を明確に観測することに成功した。第２段階では、３次元フォトニック結晶による究極の自然放出制御を目指して、２方向斜めエッチングとウエハ融着による新たな3次元結晶作製法の提案をおこない、試料試作に成功した。

玉　山　泰　宏（北野教授）「Magnetic Brewster' s effect in metamaterials」（メタ物質による磁気ブリュースタ現象）

通常の媒質の境界面ではTE波に対してBrewster無反射条件は存在しない。しかし近年発達してきた磁場に応答するメタ物質を用いることで、TE波Brewster無反射条件を満たすことが可能になる。本研究では、そのようなメタ物質の設計とTE波Brewster現象の観測を行った。

生　田　力　三（北野教授）「Yb^{+}光周波数標準のための半導体レーザの高フィネス共振器による狭線幅化」

非常に狭い自然幅の遷移を分光し周波数標準の基準とするために、非制御時で1MHzの外部共振器型半導体レーザの発振線幅を、光共振器の共鳴に対して半値全幅100Hzに狭窄化した。光共振器の反射光から得た誤差信号で、光路中に置いた音響光学変調器を高速制御した。

三　好　祐　弥（北野教授）「光周波数標準実現に向けたYb^+イオントラップのレーザ冷却実験」

２台の半導体レーザの和周波混合により、出力40μW以上、発振線幅２MHz以下と、トラップされたYb^+のレーザ冷却に充分な性能をもつ冷却用レーザを実現した。トラップ中にYb^+が存在する空間を推定してこのレーザ光を照射し、レーザ冷却実験を行った。

坂　井　　俊（藤田教授）「分子線エピタキシー法によるGa_2O_3および$CuGaO_2$の結晶成長と評価」

紫外域光デバイスへの応用を目指す半導体の結晶成長を行った。Ga_2O_3成長の条件を見出し、禁制帯幅4.8eVのn型層を得た。また$CuGaO_2$を成長し、約$9\times10^{14}cm^{-3}$のp型伝導を得た。$CuGaO_2$はZnOとの良好な格子マッチングが期待され、ZnOの機能を活かすために有用である。

附属イオン工学実験施設

伊　藤　里　美（高岡教授）「イオンを基礎とした骨類似アパタイト薄膜の作製と特性評価に関する研究」

本研究では、チタン基板およびポリエチレン基板上にクラスターイオンビーム法や電着法を用いて骨類似アパタイト薄膜を作製し、アパタイトの形成過程や薄膜の結晶学的、分光学的、機械的性質を明らかにした。また、複雑形状のチタンメッシュ上にアパタイト薄膜を形成し、人工骨・人工関節への応用について検討を行った。

寺　田　尚　史（高岡教授）「酸素クラスターイオンビーム援用蒸着法によるTiO_2薄膜の作製と光触媒効果の研究」

本研究では、酸素クラスターイオンビーム援用蒸着法を用いて作製したTiO_2薄膜の光親水性や光分解反応を測定し、作製したTiO_2薄膜は高い光触媒効果を有することを明らかにした。また、光触媒用TiO_2薄膜の応用として、Crドープによる可視光応答性の向上やアパタイト形成による光触媒機能の向上を図った。

中　山　和　也（高岡教授）「液体クラスターイオンビームによる固体表面照射効果と表面反応に関する研究」

本研究では、断熱膨張現象を用いて数百から数千分子から成るエタノールクラスターおよび水クラスターを生成した。また、生成した液体クラスターイオンビームを各種固体表面に照射し、従来のモノマーイオンビームでは得られない照射効果やクラスターイオンビーム照射特有の表面反応を明らかにした。

西　田　陽　一（高岡教授）「液体有機イオンビームの輸送特性と固体表面照射効果に関する研究」

本研究では、エタノール、メタノール、オクタン等の液体有機イオンビームを生成し、イオンビームの引き出し特性、レンズ特性、質量分離特性などの輸送特性を明らかにした。また、液体有機イオンビーム照射による表面照射効果や表面改質効果を明らかにし、多原子イオンと固体表面原子との特異な相互作用を明らかにした。

情報学研究科　知能情報学専攻

注　連　隆　夫（黒橋教授）「機械学習を用いた日本語機能表現の検出および係り受け解析」

本論文では、機械学習を用いて日本語機能表現検出器を構築した。また、京都テキストコーパスに対して、機能表現の情報を人手で付与した後、学習を行い、機能表現を考慮した係り受け解析器を構築した。構築した検出器と係り受け解析器を組み合わせることによって、機能表現を考慮した係り受け解析を実現した。

大　濱　　郁（松山教授）「多視点画像を用いた誤り検出・訂正機能を持つ高精度対象領域抽出法」

本研究では複数の異なる視点から対象を撮影した多視点画像から対象領域を抽出する手法として、ある一定の大きさを持った領域を単位とした処理を行い、多視点画像間の3次元的な整合性に基づいて領域分割における誤り検出・訂正を行うことができるアルゴリズムを実現し、実験によってその有効性を検証した。

堤　　公　孝（松山教授）「マルチメディア信号におけるタイミング構造のモデル化とその応用」

本研究では、時系列マルチメディア信号において、メディア間に存在する時間的相互依存関係をモデル化する枠組みとして、各メディア信号を時区間（信号の単調変化区間）に分割し、時区間同士の相互関係を表す表現形式を提案し、発話行為における口の動きと音声の持つ時間的相互依存関係の記述、および音声から口映像を生成するアルゴリズムを開発し、実験によってその有効性を示した。

武　笠　知　幸（松山教授）「時系列ボクセルデータからの多関節剛体の力学的構造と運動の同時獲得」

人の動作の3次元的な運動記述を求めることは、運動分析、ヒューマン・インターフェイス、さらには映像コンテンツ作成など多様な分野における基盤技術となる。本研究では、多視点映像から計算された時系列3次元ボクセルデータを解析することによって、対象の持つ力学的構造を推定するアルゴリズムを考案し、簡単な実験によってその有効性を示した。

若　井　祐　介（松山教授）「視線解析と姿勢計測に基づく興味の推定と行動の誘発」

本研究では、対象に対する人の興味の度合いおよびその時間的変化を人の示す態度から定量的に計測・推定し、その値を用いて人の興味を誘導する方法について検討した。音声による説明を聞きながら商品を品定めしているという実験環境下において、提案した方式で観測された興味の強さと、被験者や実験主催者が感じた主観的な興味の強さとの関係を調べ、両者に高い相関があることを確認した。

情報学研究科　通信情報システム専攻

尾　崎　圭　介（吉田教授）「アドホックネットワークにおける輻輳回避のための経路選択及びMACプロトコル」

アドホックネットワークでは、中継ノードの輻輳によりそのノードを経由する通信のスループットが劣化する。このような特性劣化の防止のため、ルーティングによる輻輳回避、及びMAC層での輻輳制御により、これらの方法がどのような環境で効果的かを評価した。

西　川　大　祐（吉田教授）「高速無線伝送におけるLDPC符号に関する研究」

次世代通信における利用が期待されるLDPC符号の移動通信への適用を検討した。実用化の観点から多値変調・MIMO伝送に適した符号化・復号法を提示し、復号特性評価を通してLDPC符号化高速無線伝送の有効性を示した。

和　田　純　平（吉田教授）「素因数分解に基づく無衝突関数を利用した統計的秘匿性を有するコミットメント方式」

素因数分解に基づく無衝突関数であるSchmidt-Samoaの関数とShamirとTaumanの関数を利用したコミットメント方式について検討を行い、計算量が無制限の攻撃者を仮定しても安全性を満たすことを示した。次に安全性を向上させるための知識のゼロ知識対話証明を構成した。

楠　田　厚　史（吉田教授）「シャドウイングを考慮したマルチホップセルラシステムの劣化率と周波数利用効率」

低シンボルレート伝送とマルチホップ伝送の共通点に着目し、TDMAマルチホップセルラシステムの劣化率及び周波数利用効率の評価式を導出した。また、シャドウイング相関がマルチホップセルラシステムのカバレッジ拡大効果に与える影響を明らかにした。

石　原　正　裕（森広教授）「屋内電力線通信における漏洩電界の測定及び解析」

屋内電力線通信では、電力線から高周波の通信信号が漏洩し、他の無線通信システムへの干渉を与えることが問題となっている。本テーマでは、実験による測定データに基づき電力線からの漏洩電波発生のメカニズムを明確にし、その漏洩電界の特性を解析した。

門　田　泰　雄（森広教授）「センサネットワークにおける低消費エネルギークラスタリング手法」

無線通信の機能を有する多数のセンサからデータを取得するセンサネットワークが注目されている。本テーマでは、センサネットワーク内の全センサ稼動期間を長期化を実現したクラスタリング手法を提案し、その提案方式を計算機シミュレーションにより評価した。

西　依　英　幸（森広教授）「狭帯域干渉環境下におけるマルチキャリア変調方式の特性評価」

電力線通信では、様々なマルチキャリア変調方式が開発されている。一方、電力線通信は短波帯を利用しているため、他の無線通信システムから被る狭帯域干渉が問題になる。本テーマでは、狭帯域干渉の観点から各種のマルチキャリア変調方式を比較検討している。

山　本　知　史（森広教授）「多枝アンテナに適した擬似直交STBCの構成法」

無線通信においてデータの信頼性の向上のため、複数の送信アンテナを利用したSTBC（時空間ブロック符号化）が注目されている。本テーマでは、多数の送信アンテナによる擬似直交STBCの構成法を提案し、その特性をシミュレーション及び解析により評価した。

川那辺　一　毅（高橋教授）「光パケットスイッチングにおける通信高速化に関する研究」

光パケットスイッチングにおいては、定常的にパケット廃棄が起こり、低負荷領域でも通信状態が悪くなる。そこで、本論文では、パケット廃棄を低減するため、ディフレクション制御およびフロー単位ルータ制御、さらには波長留保制御法を提案する。

北　村　　遼（高橋教授）「CDMA上りリンクのためのQoSスケジューリング方式の研究」

マルチメディア化・オールパケット化される次世代移動通信においては、データ個々の要求品質を満たす必要がある。本論文では、所要品質に適応できかつシステム容量も増大できるスケジューリング方式として、HCQを提案しその有効性を示す。

周　　奇（高橋教授）「Energy Conservation Methods for Wireless Sensor Networks」（無線センサネットワークにおける省消費電力方式）

無線センサネットワークにおいては、センサの消費電力を少なくしシステム全体の寿命を長くすることが重要である。本論文では、あらかじめ設定された目標センシング領域カバー率を満足しつつ、消費電力を少なくする自律分散アルゴリズムを提案する。

前　田　順　平（高橋教授）「無線LANのためのQoS制御方式の設計ならびに評価」

無線LANでは、端末の物理伝送レートの差異が端末の享受するQoS（Quality of Service）に不公平をもたらす。本論文では、この不公平性を解消し、クラス単位のQoS差別化とフロー毎のQoS保証を行なうアクセス制御方式として、QC-DCAを提案しその有効性を示す。

山　地　雄　介（高橋教授）「モバイルネットワークにおける複数グループ管理のための共有木を用いたマルチキャスト方式」

モバイルネットワーク環境下でのマルチキャストでは、ルータへ高負荷やグループ参加処理の遅延時間増大等の問題があった。これらを解決するため、複数のマルチキャストグループを一つのトリーで管理する共有木を用いたマルチキャスト方式を提案する。

芦　田　純　平（中村（行）教授）「スケルトンを用いた確率的歩行者トラッキング手法」

オブジェクトトラッキングにはカルマンフィルタが広く利用されているが、オクルージョンや速度の急激な変化にしばしば対応できない。そこで本研究では、モンテカルロフィルタによる、歩行者のスケルトンを用いたロバストなトラッキング手法を提案する。

木　全　哲　也（中村（行）教授）「色および動き情報に基づくMotion JPEG2000レート制御のための領域分割手法」

Motion JPEG2000 は、動画像の動き情報に応じて符号量を割り当てることで、主観画質を向上させることが可能である。本研究では、特徴点の動き量と色情報を利用し、Motion JPEG2000 符号化に適した領域分割手法を提案する。

下　津　佑　介（中村（行）教授）「組込み向け立体音響処理のための残響音再現手法」

本研究では、立体音響処理における残響音の再現手法を比較評価し、残響音を定位感を持った初期反射音とステレオリバーブの組合せで再現することで臨場感と定位感が両立できることを示す。また、組込み用途を想定し、初期反射音の再現に必要な演算量の削減手法を提案する。

森　江　太　士（中村（行）教授）「ALUアレイ型動的再構成可能デバイスの性能見積もりとこれを用いた語長の検討」

近年ALUを基本要素とする動的再構成可能デバイスが注目されているが、ALUの語長が性能に与える影響の理論的な解析はほとんどない。本研究では、語長を決定するための指針を与えるべく、面積制

約下で語長の違いが処理時間に与える影響のモデル化を行う。

小　谷　　学（小野寺教授）「ばらつきを利用し速度ならびに歩留まりを向上させる再構成デバイス」

集積回路の微細化にともない顕著となるチップ内ばらつきを利用して速度と歩留まりを向上させる再構成デバイスの試作ならびにその評価を行い、 速度向上ならびに歩留まり向上が可能であることを実証した。

高　務　祐　哲（小野寺教授）「製造ばらつきを考慮した配置配線による再構成デバイスの動作速度向上手法」

チップ内ばらつきを考慮した再構成デバイスの配置配線アルゴリズムの検討を行った。信号の容量と抵抗のばらつきが遅延に与える影響が起点と終点で異なることを配線時のコスト関数に組み込むことにより、ばらつきを用いて配線遅延が減少することを確認した。

河　野　武　志（小野寺教授）「遅延時間と信号遷移時間のばらつきを統計的に考慮した静的遅延解析手法」

近年問題となっている集積回路の製造ばらつきを考慮した統計的静的遅延解析手法の精度向上について検討した。従来考慮されていなかった信号遷移時間のばらつきを考慮する手法を提案し、提案手法によって統計的遅延解析の精度向上が可能であることを確認した。

上　村　晋一郎（小野寺教授）「CMOS RF回路の将来性能予測」

集積回路製造プロセスの微細化に伴うアナログ・RF回路の将来性能動向の予測を行った。将来予想されるトランジスタ特性からモデルを作成し、低雑音増幅器と電圧制御発振器の性能動向を定量的に評価することで、今後の設計指針および技術課題を明らかにした。

後　藤　英　公（佐藤教授）「赤道大気レーダーのマルチスタティック化による3次元風速場推定法の開発」

大気レーダーにおいて水平方向の空間分解能を向上させるため、複数の受信専用局を追加するマルチスタティック方式のシステムと信号処理アルゴリズムを開発し、赤道大気レーダーを用いて実験によりその有効性を検証した。

後　藤　雄　哉（佐藤教授）「レイトレイシングによる土星磁気圏プラズマ中におけるホイスラーモード波の伝搬に関する研究」

土星磁気圏の高精度なモデル化を行い、これを用いて土星磁気圏プラズマ中を伝搬するホイスラーモード波の軌跡をレイトレイシングにより詳細に解析した。またその結果を探査機による観測データと比較し、妥当性を検証した。

田　中　謙一郎（佐藤教授）「周波数利用効率を向上させる波長分割多重方式の伝送特性」

光ファイバ通信では更なる大容量化が必要である。周波数利用効率の向上を目的とした多重化方式のうち、光OFDM方式とコヒーレントWDM方式について、それぞれ多チャネル化や差動位相変調系への拡張を検討し、それらの伝送特性を評価した。

広　瀬　孝　昭（佐藤教授）「分布ラマン増幅光伝送路における二重レイリー散乱雑音の各種変調方式に適用可能な評価法」

低雑音、広帯域光増幅方式として注目を集めている分布ラマン増幅を導入したシステムにおいて、マルチパス雑音である二重レイリー散乱雑音が伝送性能に与える影響を、高速かつ簡易に評価できる方法を提案し、その精度を検証した。

情報学研究科　システム科学専攻

鍵　山　泰　尋（杉本助教授）「ビデオ画像からの立体空間再構成に基づくシーン変化抽出」

ビデオ画像間でのシーン変化領域を抽出手法を提案した。提案手法ではビデオ画像同士の比較から画像中の物体の立体形状を復元して変化領域抽出に利用する。これにより、立体的な対象を扱いかつカメラの移動を考える場合にも、シーン変化の抽出が可能となった。

杉　山　真　大（杉本助教授）「ギター演奏における押弦動作の生成と表示」

任意楽曲に対する最適ギター演奏動作生成と３D動画表示について検討した。まず手の移動量を最小とする弦とフレットの組合せを求め、ここから押弦時の手の位置と姿勢を決定し、これをキーフレームとした手指形状と動作の補間により滑らかな演奏動作を実現した。

長　野　　慶（杉本助教授）「４次元濃度超曲面曲率を用いた胸部CT像解析 ～３次元濃度曲面解析との比較～」

胸部CT像において、3および4次元濃度超曲面を用いた二つの解析手法を比較・評価した。この結果、４次元解析手法は体軸方向CT値分布を把握でき、対象依存パラメータが不要であるという利点があり、３次元解析手法よりも優れているとの結論を得た。

大牟禮　孝　弘（松田教授）「計測反力データ群の補間に基づく仮想空間中での３次元反力表示システムの構築」

実物体から得られる力覚を仮想空間中で忠実に再現することを目的として、位置・速度６次元特徴空間における計測反力データ群をRadial Basis Functionにより補間し、特徴空間中に配置した格子点での反力を直接参照することによりリアルタイムでの反力表示を実現するシステムを構築した。

小　野　俊　樹（松田教授）「多次元等値面の位相構造提示手法Contour Nest の有効性評価」

多次元画像から得られた並立・包含など観察対象の位相構造を直観的に把握可能な形で利用者に提示する手法として、等値面集合の位相構造を矩形領域の入れ子構造で記述したContour Nest を提案している。本研究では、３次元画像からの等値面選択を課題とした評価実験を行い、Contour Nest の有効性を検証した。

瓶　井　　悠（松田教授）「心筋組織シミュレーションにおいて高精度な生理学特性を実現するための非線形並列弾性要素の導入」

心筋組織の収縮特性は、張力と短縮速度が反比例する Hill の式に従うことが知られている。本研究では、心筋細胞モデルにおける並列弾性要素として、非線形応力歪み特性を持つ超弾性材料を用いること

で、生理学実験結果を精密に再現可能であることを示した。

藤　原　卓　矢（松田教授）「定常振動を用いたMR Elastographyにおける高精度な粘弾性定数の導出」

非侵襲に組織粘弾性定数を計測する MR Elastography 法では、従来反射や屈折波による計測精度低下を回避するため、対象組織加振直後の振動波を利用していた。本研究では、定常振動を利用し方向性フィルタで反射波を抑制することで、計測精度を向上させることが可能であることを示した。

杜　　楽　宇（松田教授）「３次元MR顕微鏡画像群を対象とするヒト胎児標本データベース検索表示システム」

ヒト胎児標本形態データベース（DB）の有効利用を目的とし、大量の胎児標本から得られた３次元MR顕微鏡画像群から胎児標本領域を効率的に抽出する手続きを提案した。また、形態DBの検索・表示システムに多言語検索表示機能と３次元断面画像表示機能を追加した。

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

宇　田　旭　伸（吉川榮和教授）「HLW処分のリスクコミュニケーションのためのウェブシステムの構築と実験評価」

高レベル放射性廃棄物（HLW）の地層処分のリスクコミュニケーションを促進するため、感情説得型と説明説得型を融合させたアフェクティブコミュニケーションによる納得の促進を目指したウェブシステムを構築し、公開実験によりその効果を確認した。

関　山　友　輝（吉川榮和教授）「原子力発電プラントの現場作業支援のための拡張現実感用トラッキング手法の開発と評価」

複雑な機器構造を持つ原子力プラントの現場作業を支援する拡張現実感システムを構築するため、線状のマーカー、３台のビデオカメラ、ジャイロセンサを用いたハイブリッドトラッキング手法を開発し、作業指示を重畳表示するのに十分な精度が実現できることを確認した。

冨　田　和　宏（吉川榮和教授）「オフィスワーカのプロダクティビティ改善のための照明制御法の研究」

オフィスワーカの生産性（プロダクティビティ）を改善するために、生体リズムを整える効果のある高照度照明制御手法を提案し、研究室内での被験者実験および実際のオフィスでの被験者実験を行い、プロダクティビティ改善効果を定量評価した。

服　部　瑶　子（吉川榮和教授）「オフィスワーカのプロダクティビティ評価のためのパフォーマンステストの改良と評価」

オフィスワーカの生産性（プロダクティビティ）を定量的かつ客観的に評価するためのパフォーマンステストCPTOPの問題点である習熟効果と問題による難易度の違いを補正する方法を提案し、実際のオフィスでの被験者実験によりその効果を確認した。

米　谷　健　司（吉川榮和教授）「拡張現実感による組立作業支援効果の定量的評価手法の提案」

組み立て作業を対象に作業の流れをペトリネットで分析して最適な作業支援情報を提示する手法と、拡張現実システムによる情報提示により組み立て作業の効率を事前に予測できる手法を提案し、作業時間の定量評価実験によりその効果を確認した。

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

岩　本　　剛（近藤教授）「ヘリカル系プラズマの三次元自由境界MHD平衡」

非軸対称なヘリカル系プラズマの平衡はHINT2コードによって解析されているが、境界条件の与え方は自明ではない。この研究では、ヘリカルコイルに流れる電流によるトロイダルフラックスの影響を軽減する指標を与えることができた。

宇　野　正　洋（近藤教授）「波高分析測定システムによるヘリオトロンJプラズマの電子温度に関する研究」

磁場に閉じ込められたプラズマの電子温度を計数率の高い半導体検出器によって測定するシステムを構築し、その評価を行った。特に不純物によるＫα線と連続スペクトルの比から電子密度に対する不純物の割合を実験的に示した。

大　平　丈　夫（近藤教授）「ヘリカル系簡約化MHD方程式の有限要素法を用いた解析」

3次元のMHD平衡を解析するためにステラレーター近似を用いて簡約化MHD方程式を導き、実際の磁気面を解析に便利なメッシュに分割し有限要素法が適用できるようコードを開発した。LHDプラズマにおける理想MHDモードおよび不安定性を引き起こす臨界β値を評価し、コードの有効性を示した。

藤　川　貞　信（近藤教授）「ヘリオトロンJにおけるAXUVフォトダイオードを用いた輻射の空間分布測定」

極紫外、軟Ｘ線（２～1800Å）領域に感度を有する16チャンネルのＡXUVフォトダイオードを用いてプラズマのエネルギーバランスを評価するうえで重要な輻射損失の空間分布を計測した。解析には、測定値が視線方向についての積分であるので局所値に変換するためのコードを開発した。

二　谷　辰　平（近藤教授）「Statistical Properties of Two Dimensional Drift Wave Turbulence」（２次元ドリフト波乱流の統計的性質）

プラズマ中の圧力勾配によって駆動されるドリフト波乱流をHasegawa-Wakatani方程式をもとに解析を行った。特に電子抵抗率の大小による密度とポテンシャルの揺動分布とその位相を求め、粒子フラックスを確率密度関数で評価し、異常輸送との関連を調べた。

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

西　田　治　朗（塩津教授）「Heat Transfer from a Flat Plate in Forced Flow of He II and Supercritical He I」（強制対流He II及び超臨界圧He I中の平板発熱体における熱伝達）

CICC（Cable in Conduit Conductor）超伝導導体の冷却を想定して、超臨界圧領域を含むHe Ⅰ・He IIの強制対流熱流動特性の解明を目的とし、両端開放長方形流路内の種々の長さの平板発熱体を用いた系統的な熱伝達実験を行った。臨界熱流束及び熱伝達係数と実験条件の関係を示し、超臨界圧He Ⅰでの強制対流熱伝達表示式を得た。

石　田　友　信（塩津教授）「On-line Measurement of Eigenvalues of Power System with System Identification by Use of SMES」（SMESを用いたシステム同定による電力系統固有値のオンライン計測）

SMESにより系統運転状態をオンラインかつリアルタイムに監視する方法として、システム同定手法の適用を提案し、SMESからの微小電力外乱に対する系統応答を同定解析することから、アナログ型シミュレータ実験において種々の系統条件に対する固有周波数・制動力変化のオンライン測定に成功した。

田　中　佑　一（塩津教授）「3-D Numerical Analysis for Heat Transfer in He II; Application to Ducts with a Contraction」（超流動ヘリウム三次元熱流動数値解析；コントラクション付ダクトへの適用）

超流動ヘリウム（He Ⅱ）の熱流動現象の理解を目的として三次元数値解析コードを開発・改良し、一端に平板発熱体を持ち、流路途中に種々の開口度のコントラクションを持つダクト内におけるHe Ⅱの定常熱伝達特性の解析を種々の温度条件で行った。得られた結果を同条件下での実験結果と比較してその妥当性を確認した。

エネルギー理工学研究所

辻　　貴　之（水内教授）「ヘリオトロンJにおける透過波計測を用いたECHパワー吸収評価に関する研究」

プラズマ中に入射した電子サイクロトロン共鳴波のプラズマによる吸収率を実験的に評価するため、透過波の同時２方向計測を行った。併せてTRECEコードによる理論計算も行い、計測データの妥当性を議論した。これらにより1回通過吸収率をリアルタイムで評価するシステムを構築できた。

中　村　英　紀（水内教授）「ヘリオトロンJにおける荷電交換再結合分光計測」

プラズマのイオン分布ならびにポロイダル回転を計測するため、ヘリオトロンJ装置の中性粒子入射加熱用中性粒子ビームを利用した荷電交換再結合計測システムを設計・製作、実機実験でその性能と今後の改良点を検証した。今後、参照光学系を設置することで、高精度のイオン温度分布、プラズマ回転計測が可能となることを示した。

渡　邉　真　也（水内教授）「ヘリオトロンJにおける多チャンネル遠赤外レーザ干渉計システムの構築及び電子密度分布再構築法の検討」

ヘリオトロンJ装置で生成される高密度プラズマの電子密度分布計測用多チャンネル遠赤外レーザ（118μm）干渉計の光学系を設計した。同時に、経路積分データから密度分布を再構築するいくつかの手法を、本干渉計による計測条件で評価、それらの妥当性と有効性を議論し、問題点ならびに改善法を指摘した。

北　川　博　基（佐野教授）「ヘリオトロンJにおけるICRF加熱の磁場配位依存性及び加熱効率に関する研究」

少数イオン加熱モードのイオンサイクロトロン周波数帯加熱による高速イオンを用いて、高速粒子生成・閉じ込めの変化およびバルク重水素イオン温度上昇について実験的に調べ、ヘリオトロンJ磁場の

フーリエ成分のうちのバンピネス制御の有効性を明らかにした。

藪　谷　　恒（佐野教授）「ヘリオトロンJにおけるHα線放射空間分布計測」

ヘリオトロンJにおいて、Hα線発光強度の空間分布計測器を構築した。本計測器はマルチアノード光電子増倍管の採用により、空間32視線の同時計測がコンパクトに可能となる。本計測器と数値計算を用いる事でリサイクリングを含めた粒子バランスの評価手法を確立した。

楠　亀　弘　一（吉川潔教授）「三極管構造を用いた熱陰極型高周波電子銃の特性解析」

熱陰極型高周波電子銃において運転パルス長を制限している逆流電子の陰極衝突の問題を解決するため、新規方式である三極管型について粒子シミュレーションにより最適電極構造を探った。その結果、従来型と比してビーム輝度の劣化なく十倍以上の長パルス運転が可能であることを示した。

全　　炳　俊（吉川潔教授）「トモグラフィを用いた高輝度電子ビーム特性計測へのエネルギー分布と空間電荷効果の影響」

高輝度電子ビームの横方向位相平面分布の新たな計測手法であるトモグラフィを用いた計測法について、計測対象である電子ビームのエネルギー分布、及び、空間電荷効果に起因する計測誤差を粒子シミュレーションにより定量的に評価し、本計測法の適用可能範囲を明らかにした。

小　川　　聰（吉川潔教授）「慣性静電閉じ込め核融合装置におけるD-D、D-3He反応陽子・中性子の同時計測」

慣性静電閉じ込め核融合装置において、競合するD-D、D-3He反応による3.03、14.7MeVの陽子と中性子の同時計測により、D-3He反応率を最大とするガス分圧比等の条件を実験的に明らかにした。また、14.7 MeV陽子の発生分布計測に成功し、D-3He核融合反応密度分布を実験的につきとめた。

生存圏研究所

井　村　真　悟（津田教授）「Development of a new humidity-retrieval algorithm from turbulence echo power（乱流エコーを用いた水蒸気高度分布推定の新アルゴリズム開発）」

大気レーダーによる水蒸気プロファイル推定に、一次元変分法を用い、かつ屈折率高度勾配Mの符号判定のための評価関数にMの統計的確率を導入する新推定アルゴリズムを開発し、MUレーダー観測によってその精度の向上を検証した。

杉　本　尚　悠（津田教授）「境界層内水蒸気観測用可搬型ラマンライダーの開発」

小型のパルスNd:YAGレーザーを用いた可搬型水蒸気ラマンライダーを開発し、上空200mの水蒸気の昼夜連続観測、信楽国有林上空の水蒸気水平分布の観測、阿蘇山火山噴気中の水蒸気量の観測などを行い、移動観測への応用性を示した。

淡　野　　敏（津田教授）「Observation of refractive index profiles with GPS occultation from an airplane（航空機からのGPS掩蔽法による屈折率プロファイルの観測）」

民間航空機による気象予報用の高層気象観測を目指して、GPS衛星電波の掩蔽を航空機に搭載した受信機で受信する実験を行い、解析ソフトウエアを開発して、航空機観測による屈折率プロファイルの初

の導出に成功し、気球観測と比較して検証した。

安　達　龍　彦（松本教授）「建物内無線配電システムの研究」

建物の構造体や仕上げ材により生じる閉空間をマイクロ波伝送路として利用した建物内無線配電システムの開発研究を行った。本論文では、建築部材を利用し構成した導波管、電力分配システム、電力取り出し手法の解析および実証実験を行った。

三　宅　洋　平（松本教授）「Computer experiments on the characteristics of electric field antenna in the spacecraft environment」（3次元計算機実験による宇宙飛翔体環境における電界アンテナ特性に関する研究）

3次元電磁粒子計算機実験により、光電子を考慮した現実的な宇宙飛翔体環境中での衛星搭載アンテナの特性解析を行った。アンテナ表面の光電子により低周波域のインピーダンス特性が変化することを見出し、科学衛星による波動観測データ校正に影響を及ぼす可能性を示した。

篠　田　健　司（橋本教授）「電気自動車無線充電システムの開発」

電気自動車の充電時の利便性・安全性向上を目指した、マイクロ波電力伝送による電気自動車無線充電システムの開発を行った。本システムは、車両下路面に設置した送電システム、車両底面に貼付した受電システム、電気二重層キャパシタにより構成される。

松　嶋　孝　明（橋本教授）「パルス駆動型位相制御マグネトロンの研究」

本論文では、宇宙太陽発電所構想におけるマイクロ波ビーム方向制御の高速化を目指した位相制御マグネトロンの応答速度の向上、およびレーダ等への応用を目指したパルス駆動型位相制御マグネトロンの開発研究を行った。

前　川　暁　紀（深尾教授）「レーダーとGPS-TEC観測に基づく中緯度電離圏E・F領域の電磁気的相互作用に関する研究」

MUレーダーと小型レーダーの同時観測から、同一磁力線上のE領域・F領域電離圏の相互作用を初めて明らかにした。またレーダーと電離圏全電子数の統計から、北西－南東の波面が頻繁であることを明らかにした。

学生の声

「博士課程への進学を振り返って」

情報学研究科　通信情報システム専攻　中村研究室　博士後期課程３年　辻　野　孝　輔

私が博士課程に進学してから３年弱が過ぎ、現在は学位取得に向けて、学位論文を記述している最中です。博士課程への進学を決断したこと、および博士課程で過ごした３年間を振り返って、少なからず感慨を覚えます。修士課程を修了した時点では研究内容にやり残しの感が強く、自らが興味を持つ研究課題に対して、継続して研究を行いたいと考えたために、就職の道を選ばずに進学を選択しました。進学後さらに３年間研究を続けてきて、研究課題において完全に満足したとまでは言えない状況ではありますが、学位取得後は民間企業へ就職することにしました。

先日、企業へ就職した修士時代の同期に会った際に、突然「博士課程への進学に満足しているか？」という質問を受け、さて、どうだろうか、と改めて考え込みました。自らの主体的判断に基づいて興味を持った研究課題についての研究を進めることは楽しく、自分自身としては博士課程において充実した時間を過ごすことができたと感じています。

また、博士課程の３年間において自分自身の視野、思考は大きく変化しました。研究に取り組む中で自分が得られたものは非常に大きいと思っています。しばらく考えた後に、「自分自身としては進学という選択に満足している。しかし社会人としての３年の経験との比較はできず、ひょっとすると就職していればもっと多くのことが学べたのかもしれない」と同期には返答しました。

学位取得後、修士の同期から見れば後輩として会社員の道に入ることになりますが、まずは眼前の課題である博士論文執筆に注力したいと考えています。

ミュンヘン大学への研究派遣：関税障壁の衝撃

工学研究科　電気工学専攻　引原研究室　博士後期課程３年　山　末　耕　平

私は、現在、ダイナミックモード原子間力顕微鏡のプローブに生じる非線形振動の制御に関する研究に携わっております。昨年のことになりますが、上記の研究課題に関連して、１ヶ月間、ドイツのミュンヘンにあるルートヴィヒ・マクシミリアン大学（通称ミュンヘン大学）に研究派遣され，実験に従事してまいりました。現地で実験を行うにあたり、私は周到に準備したつもりでしたが、現地では様々な予想外の事態に直面することになってしまいました。ここでは、その中から、実験装置をドイツ国内に郵送した際に生じた問題について記させて頂きます。

渡航するにあたり、私は携行した実験装置とは別に、予備の装置を国際郵便にてミュンヘン宛に発送しておりました。2つのルートをとったのは、昨今の航空事情を鑑み、（配線だらけで、一見，極めて怪しげな）装置を空港で没収される可能性を考慮したためです。ところが、この戦略は意外なところで裏目に出ました。間の抜けたことに郵送した予備装置に輸入関税を課されたのです。京都で郵便局員の方に言われるがまま、何の気なしに伝票に記入した装置の「商品価格」が「２万円」（部品代相当額）であったため、税率はその約15%、額にしておよそ20ユーロでした。税関に留め置かれた装置を受け取る

には、とにかく、一旦は支払いが必要で、出国時にミュンヘンの空港で手続きをすれば返金するとの説明でした。自作装置に課税されるのは納得がいきませんでしたが、返金するとの説明を信じて、結局は仕方なく支払いました。ところが、出国当日、ミュンヘン税関発行の請求書を持って空港税関を訪ねると、全く取り合ってもらえないのです。横柄な職員との押し問答とたらい回しの間に搭乗時刻が迫り、結局20ユーロをドイツ政府に納税することになってしまいました。そもそもの原因は私の無知と調査不足にあるとはいえ、I give up !と職員に告げた後に感じた徒労は忘れられません。

実験そのものについても、残念ながら、滞在期間中に目的達成は成らず、未だ，途半ばの状況です。また、私の英会話能力の不足も痛感致しました。一方、南にアルプス山脈を望むミュンヘンの街並は大変美しく、気候も快適で、人生初めての下宿生活を大いに楽しむことができました。SimensやBMWが本拠を置く有数の工業都市でもあるためか、市内にはパーツショップが数多くあり、電子部品も容易に入手できます。ちなみに、滞在期間はサッカーのワールドカップ・ドイツ大会の開催期間と重なっており、会場に脚を運ぶ暇はなかったものの、街にいるだけで人々の興奮と熱狂を感じとれる幸運にも恵まれました。なお，参考までに、携行した装置に関しては、手荷物として空港カウンターで預けることで、何ら障害なく現地まで持ち込めたことをここに追記します。

教室通信

21世紀COEプログラムは、我が国の大学に世界最高水準の研究教育拠点を形成し、研究水準の向上と世界をリードする創造的な人材育成を図ることを目的に、平成14年度から実施されている文部科学省の事業である。電気系３専攻（工学研究科電気工学専攻、電子工学専攻、情報学研究科通信情報システム専攻）では、荒木光彦教授を拠点リーダとして「電気電子基盤の研究教育拠点形成」というタイトルの下に拠点形成計画を策定し、５年間（H14－H18）のプロジェクトとして採択された。本拠点形成の目的は、21世紀における電気電子基盤技術の継続的発展を支える研究教育拠点を形成することにある。具体的には、先端的テーマを推進している電子材料・デバイス分野に重点をおきつつ、無線・通信ネットワーク・電力ネットワークなどの分野との連携を図り、電気電子分野の総合的な展開を目指すものである。研究面では、上記の目的に添って、光ナノデバイス（フォトニック結晶）技術、システムオンチップ化技術、ワイドバンドギャップ半導体技術、分子ナノデバイス技術を重点分野に設定し、それを取り巻く無線・光・衛星通信ネットワーク技術、電力ネットワーク・システム技術との連携を通して、応用イメージを明確化することに努めた。さらに、本拠点の成果を社会還元するために、産学連携も積極的に推進した。

教育面では、研究のアクティビティを最大限に活用し、従来からのオン・ザ・リサーチ型の教育を一層推進する一方で、博士課程学生や若手研究者が自らの発想で自由に研究を進めることのできる環境構築を重視し、分野を超えた若手同士の交流を推奨して、革新的、萌芽的な技術揺籃のための場の醸成を図った。これによって、今後の学術領域の創成に寄与できる人材を育成することを目指した。

近年電気系では博士課程の充足率が50%程度と低迷しており、その対応に苦慮してきた。原因の１つとして年額約54万円の授業料、３年間の生活費などの経済的理由が考えられるが、今回のCOEプログラムでは博士課程の学生をリサーチアシスタント(RA)として雇用し、研究に専念させることを事業の中心に据えた。残念ながら、これによって博士進学率が飛躍的に増加することはなかったが、時宜を得た有用な施策であったとして、学生、教員から高い評価を得ている。博士課程学生の支援は、従来の経費では使途の制約や経費規模から困難であり、他の多くのCOE拠点でも図らずも同様な施策がとられたようである。なお、進学率の向上のためには、博士学位の位置づけの見直し、キャリアパスの確保や待遇改善、さらに遡って若者の理科離れ対応など、総合的な対策を講じる必要があると思われる。今後の科学技術立国、知的社会基盤形成の中心的担い手となるべき博士学生の経済支援に関しては、一時的なプロジェクトを通してではなく、より広範で継続的な形での施策が望まれる。

博士課程学生に対する教育プログラムの実施もCOEの新しい試みである。各研究室に籠もって自分のテーマを追求するというのが、従来の博士課程の研究スタイルであったが、今回は研究室の枠を超えて異分野の若手が定期的に集まるセミナーやイベントを開催し、交流を促すようにした。これによって、電気電子工学分野全体を見渡す機会を得て、各自の研究の位置づけを確認できたと思われる。また、セミナー等の企画運営はすべて学生が中心になって行うように配慮した。学生に自律的活動の重要性を認識させるとともに、将来、研究プロジェクトや学会において中心となって活躍する素地を養おうとするものである。

その他、ネイティブによる英語プレゼンテーションの少人数教育を実施して、会議や研究において必要とされるコミュニケーション能力育成に努めた。特に国際会議発表を控えた学生には個人指導も実施した。また拠点の全貌を修士課程の学生に伝える目的で、「電気電子基盤技術の展望」と題するリレー講義を桂、吉田を繋ぐ遠隔講義システムを用いて実施した。

５年間にわたるCOEの期間を振り返ってみると、桂キャンパス移転（2003）、大学法人化（2004）な

ど、激変する環境の中にあって、プログラムを完全に消化しきれない部分が残されていることも事実である。また、先端性と総合性、教育と研究、基礎研究と応用研究など、両立させにくい対立軸をどのように整合させてゆくかに悩んだ５年間でもあった。しかしながら、工学研究科、情報学研究科にまたがる広い分野の研究室群が１つのプロジェクトに参画し、電気電子工学分野における連携、融合を目指したことや、博士課程学生や若手研究者の育成に協同して取り組めたことは、非常に有意義で貴重な期間であったと考えている。

このような取組を今後も発展継続させるべく、平成19年度から始まる新プログラムである「グローバルCOE」への応募に向けて準備を進めている。採択拠点数が従来の21世紀COEの半数程度に厳選されるので、従来の実績をふまえた綿密な拠点形成計画の立案が求められており、野田進教授（工学研究科電子工学専攻）を中心に鋭意作業を進めているところである。物理限界への挑戦をキーワードに、現在、進展著しい物性・デバイス分野を中心に関連分野を一層発展させるとともに、電気電子工学やその周辺境界分野との連携・融合の強化を目指すものである。教育面ではこれまでのCOEの経験実績を踏まえて、新しいタイプの博士コースの設置、専門の異なる複数教員による指導、学内外へのインターンシップなど、よりシステム化された教育プログラムを導入して、専門性と広い視野を兼ね備えた人材育成を行うことを計画している。

COEのみならず、現在、大学は教育、研究、社会貢献の各場面において、また学部の初年度教育から博士課程の教育に至るまでの各段階において、将来を見据えた本質的な改革を行うことが求められています。同窓生諸兄諸姉の一層のご支援とご教示をお願いしたいと思います。（文責：北野正雄）

賛助会員のページ

電離層研究に使われたアンテナの話から・・・

日本電業工作株式会社 代表取締役社長（昭和40年卒業）　松　本　慎　二

2006年４月下旬、京大電気系昭和40年卒業40年の集いが嵐山で開催された折、恩師の木村磐根先生と久しぶりにお話しする機会に恵まれました。そのとき、先生から、現在私が経営を担っている日本電業工作株式会社のアンテナが、若き日の先生の研究に使われた、と伺いました。そして関係資料がまだ会社に残っているでしょうか、とのお尋ねがありましたので、調べたのですが、当然のことながら当時の社員はもう誰も会社に残ってはいませんでした。そこで退職者の中からこの仕事を担当した者を探し出して事情を聞きました。京都大学に出かけたことを記憶しているOBはいましたが、アンテナについての記憶はもうほとんどなく、覚えているのは、据付工事のあと、大学の偉い先生（後日、木村先生に伺ったところ、この方は前田憲一先生に違いないとのことでした）に、祇園近辺で大変ご馳走になったことだけ、というなんとも頼りない話でした。しかし、当社の製品がそのような学問的に非常に重要な研究に関わっていた、ということは、大変に名誉なことです。そこで木村先生に、当時のご研究内容と当社のアンテナの関わりを若い技術開発者たちにぜひともお話しいただきたい、とお願いしたところ、ご快諾をいただき、2006年10月末にこの講演会が当社坂戸事業所（埼玉県坂戸市）で実現しました。このご講演の冒頭で、くだんのアンテナが、電離層観測用30m組み立て木柱による傘型アンテナ（昭和32年）とVLF電波雑音観測用60m組み立て木柱による２回巻きループアンテナ(昭和37年)であることを、写真（図１）とともにご紹介いただきました。ご講演は、電離層からスペースサイエンス全般にわたる壮大な研究内容を分かりやすくまとめられたお話でした。また電波の本質を先生が独自に考案された方法でご説明くださるなど、「電波」そのものを扱う仕事をしている私どもには、その奥深さを実感できた素晴らしい内容でした。

話が前後しますが、日本電業工作株式会社は、昭和22年（1947年）から数えて今年（2007年）６月に創立60周年を迎えます。その母体は昭和７年（1932年）設立の国際電気通信株式会社で、当時の日本の国際通信を一手に運営していた国策会社です。第二次世界大戦敗戦で国策会社は解体され、その多くは逓信省に移り、その後NTT、KDDIへと発展してゆくのですが、当社はそれより前に電波立国を夢見た技術者集団が自分たちの資金で設立した、ベンチャー企業のさきがけともいえる会社です。

主要製品はアンテナとフィルタで、現在のお得意様はドコモ、KDDI、防衛庁、警察庁、NHK、主要メーカなどとなっています。国の電波政策が管理から開放利用促進に転換した今、電波の利用用途は急拡大し、それを後押しする新しい電波技術が目白押しです。現時点では第３世代携帯電話用のアンテナや地上デジタル放送用フィルタなどが事業の中核ですが、開発の眼目は次世代携帯電話用アンテナなどに向かっています。昨年はアダプティブアンテナとデジタル信号処理技術をベースにして開発した「電波到来方向特定システム」の実用化で、ご指導をいただいたKDDI、横浜国立大学のご両者とともに電波産業会の電波功績賞受賞の栄に浴しました。また国際的な方面では、今後の中国市場を視野に入れ、上海郊外の昆山での生産を開始するなど、地味ながら着実な前進を図っています。

当社に入る前、私は33年余りのNTT勤務のほぼ３分の１の期間、無線方式の開発に携わりましたが、ほかにも電気通信網の拡張計画策定とその実行、人事、電気通信全体の経営、マルチメディアのコンテンツ流通促進の技術開発、日米貿易摩擦解消のための外交交渉に参画する国際調達業務、また外務省出向で在アルジェリア日本大使館勤務となったときはダッカハイジャック事件解決に関わったり、とさまざまな経験をしました。そしてめぐりめぐって、ビジネスキャリアの終段で、大学時代の卒業テーマ（ジャイロプラズマプローブの理論的研究）に近い、電波に関する仕事に従事するということに、何か不思議な縁を感じています。

図１　日本電業工作株式会社により1964年頃建設された60m木柱直交2回巻きループアンテナ（VLF帯ホイッスラー空電観測用）

編集後記

CUE17号の編集作業を行っている最近，巷では「ホワイトカラー・エグゼンプション」が話題になり、その是非が問われています。裁量労働制の我々は，既にエグゼンプションされています。独立行政法人化で、運営費交付金が効率化係数で年々削減されていくのに伴い、外部資金獲得が奨励されています。

しかし、獲ってくれれば獲ってきたで、また大変です。

石川啄木の「働けど働けどわが暮らし楽にならざりじっと手を見る」状態になりつつある、今日この頃です。

［T.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
（アイウエオ順）

発　行　日：平成19年３月

編　　集：電気系教室Cue編集委員会
鈴木　　実、中村　行宏、橋本　弘蔵、
山田　啓文、田野　　哲、杉山　和彦、
舟木　　剛
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