

cue 29 号 目次

巻頭言

電気技術者の役割と責務

…………… 昭和 49 年卒 西日本電気システム株式会社 代表取締役社長 細野 文雄…………… 1

大学の研究・動向

電磁回路工学の目指すもの

……………工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 電磁回路工学…………… 3

産業界の技術動向

日本の宇宙開発と技術

…………… 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 小澤 秀司…………… 9

研究室紹介…………… 17

博士論文概要…………… 35

高校生のページ

未来のエネルギー源「核融合炉」を現実のものに

……………エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野

……………長崎 百伸…………… 58

学生の声

「身近を見直す」

……………工学研究科 電子工学専攻 北野研究室 博士後期課程 2 年 中田 陽介…………… 63

「博士課程への進学を決意した理由」

……………工学研究科 電気工学専攻 篠原研究室 博士後期課程 1 年 石川 峻樹…………… 63

教室通信

最近の工学研究科・工学部ならびに全学の状況

……………電子工学専攻教授 工学研究科長・工学部長 北野 正雄…………… 64

編集後記…………… 65

巻頭言

電気技術者の役割と責務

昭和 49 年卒 西日本電気システム株式会社 代表取締役社長 細 野 文 雄



今回、誉れ高い京都大学電気関係教室技術情報誌の巻頭言執筆のご依頼を賜り、浅学非才の私にとって、まさに栄光の洛友会関西支部長就任以上に驚天動地の要請であり、責任の重大さを非常に感じつつ筆を執っている。そのような中、スウェーデンのカロリンスカ研究所が 2012 年のノーベル医学生理学賞を、生物のあらゆる細胞に成長できて再生医療の実現につながる iPS 細胞を初めて作製した山中伸弥 iPS 細胞研究所長に贈るとの発表に、さらなる驚きと喜びを感じている。日本人のノーベル賞受賞は 10 年に化学賞を受けた根岸英一・米パデュー大学特別教授と鈴木章・北海道大学名誉教授以来 2 年ぶり 19 人目の快挙で、京都大学の卒業生として自分のことのように晴れがましい感がある。

私が電気工学を志したのは、その後何度も味わうことになる挫折がその理由である。発端はオイラーの公式に出会ったことであるが、その美しさに大変惹かれたものの、証明については何日間費やしても理解不能で、私が数学の世界には向いていないことを否応なく実感した。しかしながら、子供の頃から数学以上にラジオやモーターなど電気製品の分解や組み立てが好きだったことや、ゲルマニウムラジオが組み上がると電波の力とはいえ電気もないのに何故かイヤホンに声が流れることの奇妙さ、やたら数式の多い電子回路設計と数式通り組み立てるとその通りに動くことの不思議さに惹かれたこともあり、数学の世界と大きく結びついた電気の世界を歩もうと決め、自分のいい加減な性格等も勘案して京大の電気系学科を志望した。

生まれてからこれまでの間、わが国は高度経済成長の道をひたすらに歩み、大学紛争や公害といった負の側面はあったものの、今日よりは明日への希望を持って努力すれば明るい未来が待っているとの大方のコンセンサスのなかで生きてきた。電気工学を志した私たちもこれからは電気が大事で、努力すれば、電気の技術を発展させれば明るい未来が拓かれ、世の中に大きく貢献できると信じて色んなことにチャレンジし邁進してきた。そして、パワーエレクトロニクス技術や制御技術の発展、高度情報化社会の到来など確かに過去夢見た以上の成果を挙げてきたが、最近では、急速に進む少子高齢化やグローバル化など将来を見通せない厳しい世界に突入し、最も重要なインフラである人口の減少と高度経済成長の負の遺産は、地域崩壊や認知症高齢者・引きこもり・自殺者の急増、雇用不安定で自活できない中高年層の増加など生活環境の厳しさを引き起こしている。そのような中で我が国がこれまでと同様に持続的な経済発展を実現していくためには、苦しみながらも今までの生活システムや考え方を根本から変えていくことが必要で、そこでは私ども電気系技術者に求められる役割と責務はこれまで以上に大きなものになると考える。

さて、私は国鉄入社から 40 年近く鉄道事業に携わってきたので、ここで鉄道における電気技術者の役割について紹介する。日本の鉄道は、旅客及び貨物の大量輸送機関として JR と民鉄を合わせ 27,000km を越える路線ネットワークを構成し、列車乗務員や運行管理に係わる指令員と駅員、車両・施設・電気等様々な分野の技術者が、相互に連携しながら安全・快適な輸送サービスを提供している。電気の

技術者は、列車の衝突や脱線等を防ぎ安全な列車運行を確保する「信号保安」、業務や旅客サービスに必要な情報を伝達する「通信」、電鉄変電所から送り出された電気を電車に供給するための「電車線」、電力会社からの電気を鉄道事業で使うために変成する「変電」、信号保安設備・通信設備・自動改札機等の駅務機器を始めとする諸設備に電気を供給する「配電」といった諸設備の維持・発展の業務を受け持っている。最近では、先述のような少子高齢化やIT技術の進展・普及などから、運営者のための技術から利用者・社会のための技術へと急速に変化しており、これまで言わば強者向けにできていた鉄道を弱者向けに作り変えていくことが主流になりつつある。私たち鉄道技術者は、新幹線をその象徴とする高速化、混雑緩和や車両・駅の質的改善による快適性向上、直通運転などによる利便性向上、設備改良による安全性向上など目覚ましい成果を上げてきたが、これからの鉄道は事故による危険の排除といった狭義の安全性を確保することから、安心して利用できる乗り物、分かり易く快適・確実な乗り物への変化を求められている。鉄道技術者にとっては、鉄道自身の特性をより高めるだけでなく、社会に受け入れられるコストでそれら社会の要請を実現することが重要で、とりわけ我々電気技術者がその中核的役割を果たしていくことが強く求められている。IT技術を活用した的確な情報案内やお客様の安全性確保など鉄道の運営方式や施工方法においても克服すべき多くの変革課題があり、我々鉄道電気技術者がその牽引的役割を果たしていく必要がある。鉄道技術は長い間の経験工学の集大成であり、特に重要な安全の技術は、これまでの失敗の蓄積によって成り立っているといっても過言ではない。蓄積された技術や知識をしっかりと継承・発展させていくことも鉄道の持続的発展のために重要なことで、恒常的に継承されていく仕組みをさらに整えていくことが必要である。

また、鉄道を進化させてきた技術革新は鉄道技術者だけの成果ではなく、各メーカーの要素技術や大学の先端技術と知識の総合力により実現されてきたものでもある。大学は、技術者の育成以上に学問として体系的に集積されている様々な「技術知識」の提供という役割も大事ではないかと思う。企業の技術者は、得てして自分の組織論理で物事を考えがちなところがあるが、大学や他業種からの視点と技術知識が加わることでさらなる新しい価値を生み出し、より一層世の中に貢献ができるものと考えており、社会の要請に応えていくためにもこれまで以上に産学の連携強化が大事である。我々電気技術者は産学一体となって、将来を見通せない厳しさの中で我が国が持続的発展をしていく牽引者としての求められる役割と責務をしっかりと果たしていかなければならないものと強く思いつつ、太陽光発電やクラウド、ビッグデータといった新分野の技術に悩まされ毎日を過ごしている。

大学の研究・動向

電磁回路工学の目指すもの

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 電磁回路工学

教授 和田 修 己
准教授 久門 尚 史
助教 松 嶋 徹

1. はじめに

当研究室は2012年7月に、電気工学専攻の講座名・分野名の変更に伴い、従来の電気システム工学講座から電磁工学講座に移動し、研究室（分野）の名称を「電気回路網学」から「電磁回路工学」に変更しました。わずか2文字の変更ですが、その指向するところは従来のものとはかなり異なります。本稿では、伝統ある研究室名を何故変えたのか、そして何を目指してゆくのか、述べてみたいと思います。

電磁回路と聞くと、なんだか難しそうな、正体不明のもののような気がされるかもしれません。また、もしかすると、「なんだか古そうな名前だな」と思われる方もおられるでしょう。しかし我々が目指す電磁回路工学は、従来の電磁波回路（Electromagnetic Circuit または Electromagnetic Wave Circuit）¹とは異なり、電気回路の分野をさらに発展させる新しい研究分野だと思っています。

電気回路は電気工学・電子工学の基礎となる専門分野であり、回路の設計や特性解析、電気電子システムの構築・実現には無くてはならないものです。当研究室の本年度の広報資料（卒論生向けの案内資料）には、図1とともに、最初に下記のように書いています。

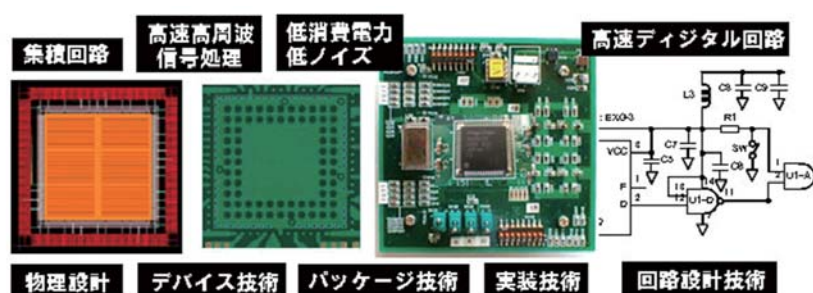


図1 集積回路とパッケージ・実装・回路設計技術

『電気回路理論は電気電子工学の基礎ですが、昨今は小さな半導体チップの中に複雑な集積回路システムが入ってしまいます。その設計には、半導体回路設計と素子配置、チップ上配線やパッケージ・回路基板を含む周囲との電磁的結合まで考慮する必要があります。また電力・通信・制御・計算機などのハードウェアシステムの高度高機能化は、デバイス・回路・システムを一体化して扱う新しい理論体系を必要としています。本研究室では、この要請に答えるために、線形・非線形電気電子回路、アナログ及びデジタル信号処理回路、デバイスモデリング、パワーシステムなどにおける実際の問題を取り扱

¹たとえば、マイクロ波工学における平面回路や立体回路が代表的な電磁波回路です。

い、課題解決のための現象・システムのモデル化、電気現象の解明、新しいシステム設計法とそのためのアルゴリズムのハード化などを目指しています。』

上記の案内は、分野名称を変更する前のものですが、その分野は広く半導体から電力・通信のためのネットワークまで含んでいます。また、従来の「回路素子」によって記述する電気回路だけではなく、回路素子では単純に記述できない電磁的結合も含み、デバイスモデルや新しい材料（メタマテリアル）の研究も視野に入れています。今回の分野名の変更に伴い、研究室の狙いを「従来の電気回路理論の限界を打破する」こととして、研究室（分野）の英文名称も Electrical and Electromagnetic Circuit を使用することにしました。つまり、オームの法則やキルヒホッフより前に立ち戻り、もう一度電磁現象を回路として記述する方法を考えてみましょう、さらに新しい回路理論の応用を考えましょう、ということです。

当研究室では、現在、下記の課題を取り上げて研究を進めています。

1. 電磁現象を含む回路システムの基礎研究：回路の高周波化に対応するための、現在の回路理論では十分に記述できない電磁的結合・誘導の効果も含んだ新しい電気回路理論の研究。電流と電荷による回路の高周波記述法。メタマテリアル等における電磁現象の回路モデル・設計など。
2. 高速高周波回路のモデル化と設計法の研究：「半導体チップ」「パッケージ」「回路基板」の高周波特性を考慮したモデル化手法の開発と、階層間高周波結合を考慮した連成設計手法の開発など。
3. 電子機器・回路の EMC 設計に関する研究：電子回路の電磁雑音低減と周辺回路との不要結合制御の実現。LSI の低ノイズ設計と電磁特性記述用マクロモデルの開発。デジタル通信妨害の評価法など。
4. 電力フローの設計：電力・エネルギーの流れの設計・制御・安定性に関する理論と実験。

研究の範囲は、基礎理論から応用までを含みます。たとえば課題 3. は、図 2 に示すような、高速デジタル回路の設計技術・実装技術と電磁波制御技術の両立や、半導体素子やパッケージにおける不要な電磁結合の制御技術、特性解析のための回路のモデル化技術などを含んでいます。さらには、スマートフォンなどに代表される高速デジタル信号処理と電波による通信の両立や、ハイブリッドカーや電気自動車などの走行のためのエネルギーの制御・車内の電子制御・通信、そして外部との通信・放送の受信なども、応用分野として含まれます。本稿ではこの中から、先に述べた「電磁回路工学」の基本的な考え方と、その応用としてのいくつかの具体的な問題につき、なるべく簡単に説明をいたします。

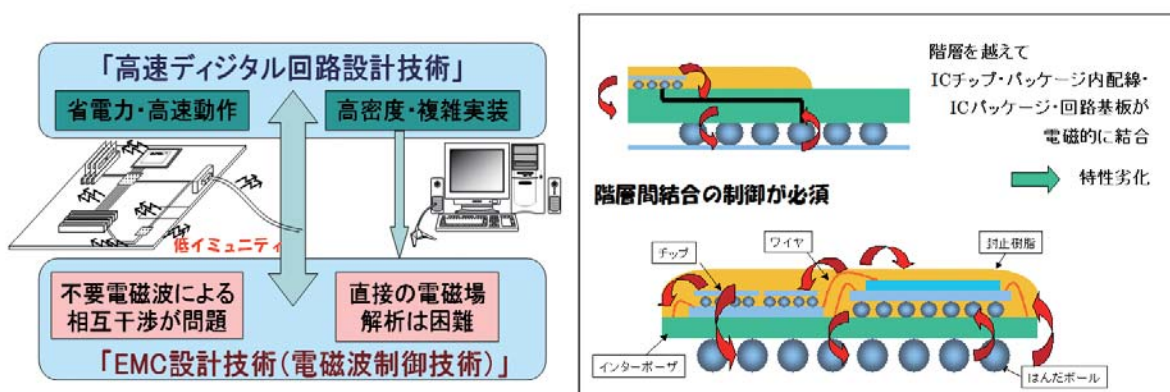


図2 電子機器・回路の EMC 設計に関する研究：不要な電磁結合の制御

2. 電気回路理論と電磁回路工学の背景

従来の電気回路理論とは、そもそもどのようなものなのでしょうか。実は、回路や回路素子に電流が流れた時の現象を、電流と電圧で記述しようというものです。ところが、「回路素子」とは何かという、電

気抵抗を持ちエネルギーを消費する抵抗と、電荷を蓄えるキャパシタ、そして磁界を発生して磁気エネルギーを蓄えるインダクタ、その3種類が基本的な回路素子ということになります。そして、まずは抵抗に関して、何か「電流の大きさ」と関係のありそうな「電圧」というものが導入されたわけです。（さらに、正弦波に関してはこの「電流」と「電圧」の関係としてのインピーダンスが使用されるのは、ご承知の通りです。）そして、「一定の電流が流れている2端子素子」である「(集中定数) 回路素子」が定義され、これを組み合わせると「電気回路」ができる、というわけです。

では、周波数が高くなってくると、どうなるのでしょうか。実は、もともと静電気で定義された電圧というものの²が、物理的に意味を持つのかどうか、怪しくなってきます。実際に意味があるのは、回路の各部分にある電荷と、その電荷の移動としての電流、および電荷と電流により作られる電界・磁界であり、実はすべてMaxwellの方程式で記述される電磁現象です。つまり、電気回路理論とは、電流と電荷で決定される電磁現象を、抵抗やキャパシタ・インダクタのような「回路素子」というモデルを使って記述したものです。「電気回路は電磁気現象のサブセットだ」などというのは、そういう意味です。周波数が高くなってくると、電流の速度は有限ですから、非常に短い配線でも「両端の電流」は（電流がゼロでなければ）かならず異なりますから、そもそもの2端子素子は厳密には存在しません。そこで、「有限の長さを十分に短い微小な区間に分割」して式を立てる「分布定数線路」の考え方が出てくることになります。

図3(a)に、2本の平行な金属線で構成される伝送線路の分布定数等価回路を示しています。しかし良く見ると、何だか妙です。本当に正しい等価回路なのでしょうか。図3(b)には、実際のプリント回路基板などで使用される対称な平衡伝送線路を図示しています。配線に電流を流すと、電荷が移動しますからこれを線間の容量で表現するのは分かります。（図3(a)ではこれに誘電体の損失を表す G を追加しています。）しかし、電流により発生する磁界は、（自己）インダクタンス L だけではなく、図3(b)のように線間の磁氣的結合すなわち相互インダクタンス M を発生するはずですね。図3(a)には、この相互インダクタンスが無いのです。いったい、 M はどこへ行ったのでしょうか。

実は、この一様伝送線路（つまり「金太郎飴」のように長さ方向に変化の無い2本線路）の等価回路モデルは、この本来は存在するはずの相互インダクタンス M を「長さ方向には一様で端が無い（無限長）」という条件で、「単位長さあたりのインダクタンス」に練り込んでしまっているのです。これでは、配線を曲げたり、太さや幅を変化させたりすると、正しい表現にはならず、いろいろとマズイことが起きます。（たとえば、信号の一部が反射されたり、空間に電磁波として放射されたりします。）

現在、高周波回路の設計においては、スマートフォンに代表されるように、その実装密度は非常に高くなっており、回路内である方向に十分一様で長い配線を確保することはほとんどありません。また配

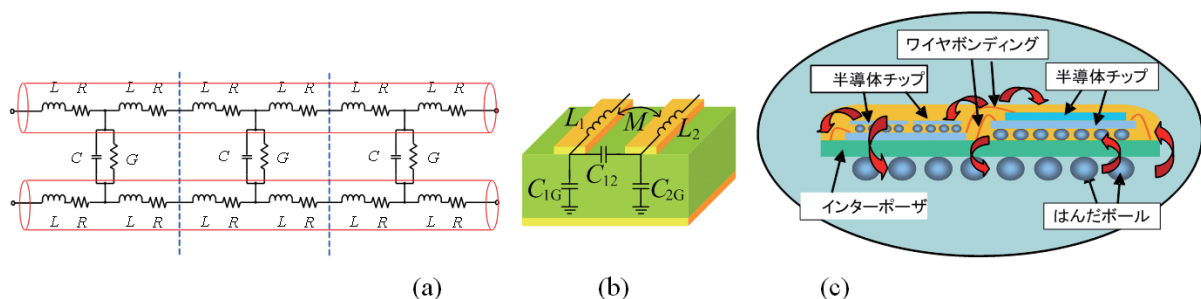


図3 物理現象と電気回路. もともとは、作ったつもりのない「素子」ばかり。

² 文献[1]には、G.S. オームがいかに電圧の概念を形成したのかが書かれています。

線のすぐ横や下には別の素子や配線があり、教科書にあるようなきれいな回路にはなりません。最近の回路設計においては、「回路素子や配線の寸法」が信号の電磁波としての波長に比べて「十分に短い」（具体的には波長 λ の $1/14$ 程度以下）とみなせ、さらに「素子や配線間の距離」が十分に離れているとみなせる場合を除いては、「電気回路」（あるいは「電子回路」）として単純に記述することができず、「電磁波」の問題として Maxwell の方程式を直接（実際にはコンピュータを用いて数値シミュレーションで）解析してしまうのが、一般の方法となっています。多くの場合には、実際の構造を波長の $1/20$ 程度以下の細かさに微小に分割して、シミュレーションを行います。そしてその結果をそのままブラックボックスとして使用するか、あるいは電気的結合を「寄生容量」、磁氣的結合を「寄生インダクタンス」として含む等価回路³で表すのが一般的です。その際には、回路の微細構造や電磁界の集中などを考慮する必要があるので、前述の $1/20$ 波長程度の分割では不十分で、1mm よりもずっと細かく分割した部分回路で表すので、非常に大規模な回路となってしまう、その解析結果を特性改善にフィードバックすることは非常に困難です。

現在、デジタル回路は数 GHz のクロック周波数で動作するようになってきました。また、無線 LAN では 2.5GHz 帯、5GHz 帯の電波が使用され、携帯電話の周波数も LTE-A では 3GHz 以上になります。この帯域では、図 3(c) に示すように半導体チップ (LSI⁴) とパッケージ内の電磁的結合をいかに制御するかが大きな課題です。当研究室でも、図 4 に示すような半導体パッケージの高周波モデル化を行い、回路の新しい表現法について検討をしています。その際には図 5 に示すように、LSI パッケージと回路基板の間発生する数 pF 程度の小さな寄生容量と配線インダクタンスの共振を、電磁現象としていかにうまくモデル化するかが大きな課題です [4]。現在我々は、電磁界の蓄積エネルギーに着目して回路のモデル化に取り組んでいます。もしかすると当たり前の結果しか出ないのかもしれませんが、等価回路解析を GHz 帯に拡張する新たな方法が開発できればと思っています。

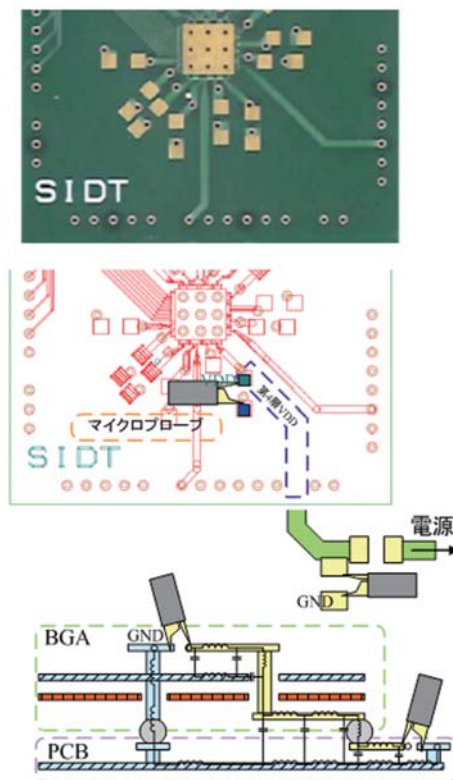


図 4 半導体パッケージのモデル化

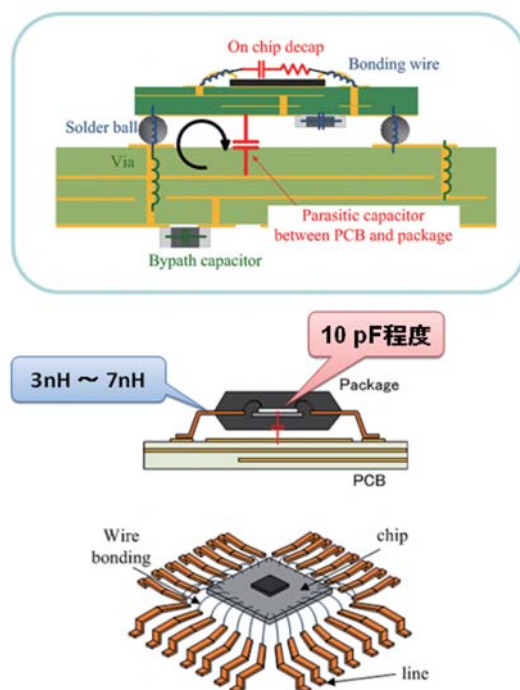


図 5 寄生容量と寄生インダクタンス

³ 部分等価回路 (PEEC) 法 (Partial Element Equivalent Circuits) と呼ばれます [2][3]

⁴ 半導体の大規模集積回路 (LSIC : Large Scale Integrated Circuit ; 通常は LSI と呼ばれます)

3. 高速高周波回路のモデル化と設計法の研究

半導体集積回路 (LSI) を回路基板上に実装する際の、不要な回路共振と、それによる回路特性の劣化についても研究しています [5]。この共振は、図 5 に示した LSI パッケージと回路基板の間に存在する寄生容量によるものです。図 6 に示すように、CMOS-IC を搭載したパッケージとその回路基板のグラウンド間接続の位置を変更して、電源配線から高周波雑音が流入した際の信号波形のタイミングの揺れ (ジッタ:jitter) を実測すると、パッケージが寄生結合により共振する周波数で信号劣化が観測されます。通常のカジッタが約 100ps であるのに対して、共振点 E1 では 306ps、共振点 C1 では 424ps のジッタとなっています。このような不要共振は、パッケージや基板の設計段階で予測して制御すべき問題で、その共振の抑圧法についても研究しています。

4. 電気電子システムと回路の EMC 設計

電磁回路工学研究室では、半導体の大規模集積回路 (LSI) の回路記述モデルについても研究しています。高速高周波動作を行うデジタル LSI は、その本来の信号処理等の機能を果たすために内部で高速に電流をスイッチングします。その結果発生する高周波の電流ノイズが、周辺のアナログ回路や通信用の高周波回路に干渉を発生し、回路の性能を低下させてしまいます。これを防ぐために、LSI そのものを低ノイズ化する設計を行う必要があります。そのため、LSI 自体の高周波電磁特性を記述するマクロモデルが必要とされています。当研究室ではそのための、LECCS モデルと呼ばれるマクロモデルを開発しています [6]-[8]。数 100 万～数億個のトランジスタを含む LSI の特性をそのままモデル化すると、あまりにもモデルが大規模になりすぎるので、実際の応用回路全体で特性解析を行おうとすると、解析に時間がかかり過ぎて実用的ではありません。そこで、その高周波特性だけをマクロに抽出したモデルが LECCS モデルです。このモデル化の際にも、図 7 に示すような、半導体チップの内部や半導体基板自体の内部の寄生結合を含めたモデル化に取り組んでいます。

5. まとめ

電磁回路工学研究室では、ここでご説明した研究以外にも、1 節でリストアップした様々な研究に取り組んでいます。ここでは紙面の都合で、全てをご説明することはできませんが、従来の電気回路理論

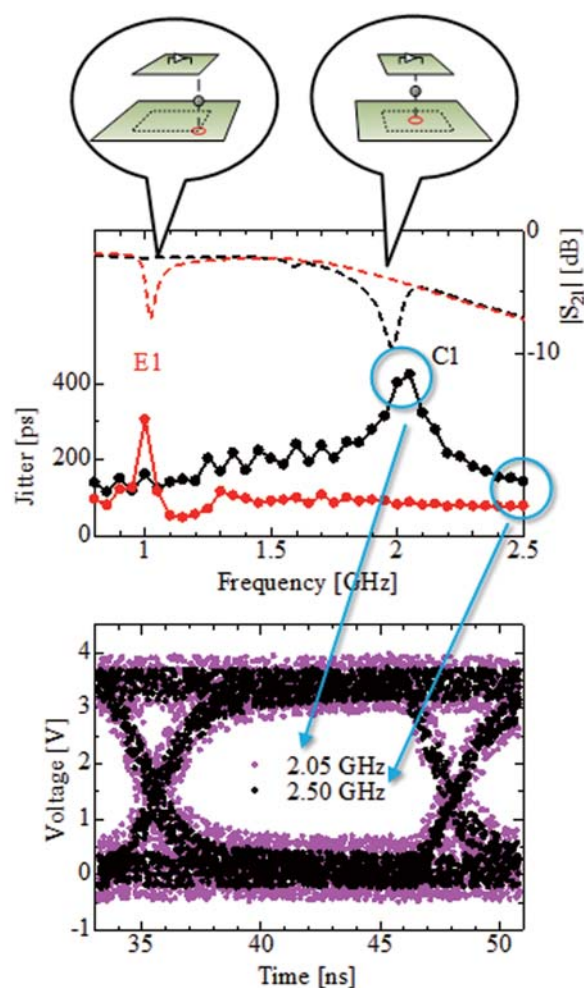


図 6 パッケージの共振とジッタの増加

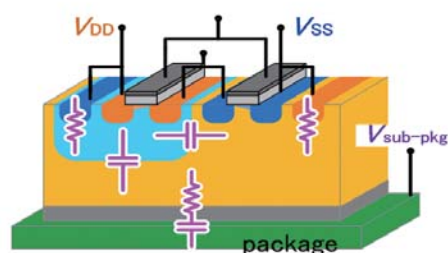


図 7 LSI 内部の寄生結合モデル

を拡張することを目指している、ということをご理解いただければ幸いです。電気回路は、従来の「設計通りに作る」ものから「作ったつもりのない寄生結合を制御する」ものに変化しつつあります。GHz帯でも通用する理論を構築したいと考えています。

参考文献

- [1] G.S. オーム著, 三星孝輝 (訳・解説), "オームの論文でたどる電圧概念の形成過程 - 理科教師や理工系学生のために -", 大学教育出版, 2007.
- [2] A. E. Ruehli, "Equivalent Circuit Models for Three-Dimensional Multiconductor Systems", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-22, No. 3, pp. 216-221, Mar. 1974.
- [3] H. Heeb and A. E. Ruehli, "Three-Dimensional Interconnect Analysis Using Partial Element Equivalent Circuits", IEEE Trans. Circuits and Systems I, Vol. 39, No. 11, pp. 974-982, Nov. 1992.
- [4] 西本太樹, 浅井力矢, 松嶋徹, 久門尚史, 和田修己, "電磁界エネルギーを用いた共振時のキャパシタンスとインダクタンスの等価回路モデル化", 電子情報通信学会 技術研究報告, Vol.112, EMCJ2012-34, pp.13-18, July 2012.
- [5] Taiki Nishimoto, Rikiya Asai, Tohlu Matsushima, Takashi Hisakado, Osami Wada, "Experimental Verification of Signal Integrity Deterioration Due to Package-Common-Mode Resonance", EMC Europe 2012, P2-2-11, Rome, Italy, Sep. 2012.
- [6] 田中広志, 松嶋 徹, 久門 尚史, 和田 修己, "CMOS 動作を表現する線形時変回路からの LECCS-core モデルの導出", 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J94-C, No.11, pp.458-469, Nov. 2011.
- [7] O. Wada, Y. Saito, K. Nomura, Y. Sugimoto, T. Matsushima, "Power Supply Current Analysis of Micro-controller with Considering the Program Dependency", 8th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, T2-5, Dubrovnik, Croatia, Nov. 2011.
- [8] T. Matsushima, N. Hirayama, T. Hisakado, O. Wada, "SI/PI Degradation Due to Package- Common-Mode Resonance Caused by Parasitic Capacitance between Package and PCB", 8th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, T9-3, Dubrovnik, Croatia, Nov. 2011.

産業界の技術動向

日本の宇宙開発と技術

宇宙航空研究開発機構（JAXA）

小澤 秀 司

1. はじめに

1955年のペンシルロケット打ち上げから始まった日本の宇宙開発はその後の50年間に世界トップクラスの技術を獲得するに至った。2008年には宇宙基本法が定められ、また2012年には宇宙開発体制の見直しが行われ内閣府に宇宙戦略室が設置されJAXA法も改正された。このように日本として更なる宇宙開発の推進が図られようとしている。

本稿では日本の宇宙開発のこれまでの歩みを概説するとともに、最近の宇宙航空研究開発機構（JAXA）における宇宙開発や宇宙技術の現状及び課題について述べる。

2. 日本の宇宙開発の歩み

1955年4月東京国分寺市において東京大学の糸川教授が長さ23cmのペンシルロケットを水平に発射しロケットの速度、スピン状態、飛翔経路のずれなど基本データを得る実験を行った。この実験が日本の宇宙開発の始まりとされている。その後カッパーロケットが開発されロケットによる科学観測が行なわれるようになった。さらに1964年には東京大学に宇宙航空研究所（ISAS）が設立され人工衛星打ち上げ計画が進められた。そして1970年2月日本初の人工衛星「おおすみ」の打ち上げに成功した。1981年にISASは文部省宇宙科学研究所（英文名はISAS）として改組され全国の大学の共同利用機関の役割を果たすようになった。固体燃料を用いたロケットの開発を進め、今までに33基の宇宙科学衛星／探査機を地球周回軌道や惑星間空間に打ち上げ、世界の宇宙科学をリードする数々の成果を上げてきた。

一方1964年に科学技術庁が放送・通信・気象などの実用を目指した宇宙開発を開始し、その実施機関として1969年に宇宙開発事業団（NASDA）が設立された。NASDAは当初自主技術によるロケットの開発を行い静止衛星の打ち上げを目指していたが、計画変更を行い米国の液体燃料を用いたロケット（ソーデルタ）の技術を導入したロケットの開発を行った。この結果、1975年にNASDA初の衛星（きく1号）の打ち上げ、1977年には日本初の静止衛星（きく2号）の打ち上げに成功した。

その後政府の行政改革の方針によってISASとNASDAに加えて航空宇宙技術研究所（NAL）の3機関が統合されることになり、2003年10月に新たに独立行政法人「宇宙航空研究開発機構」（英語名 Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA）が発足した（図1参照）。発足直後の3か月間に地球観測衛星「みどりII」の機能停止、H-IIA6号機の打ち上げ失敗、火星探査機「のぞみ」の火星周回軌道投入失敗という3つの重大な失敗が起これ、JAXAのみならず日本の宇宙開発全体に大きな影響を与えることとなった。

一連の失敗を受け、JAXAは失敗の根絶と信頼性の向上を図りミッションを確実に達成させるための取り組みを行い、社会からの信頼を回復すべく努力を継続した。

1955年 (S.30)	ペンシルロケットを水平発射	1997年 (H.9)	固体ロケット M-V 1号機打上げ
1964年 (S.39)	東大宇宙航空研究所 (ISAS) 発足	2001年 (H.13)	基幹ロケット H-IIA 1号機打上げ
1969年 (S.44)	宇宙開発事業団 (NASDA) 発足	2003年 (H.15)	3機関統合により、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 設立
1970年 (S.45)	我が国発の人工衛星「おおすみ」 打上げ (世界で4番目)	2008年 (H.20)	宇宙基本法成立、宇宙開発戦略本部 発足
1975年 (S.50)	N-1ロケット1号機打上げ (NASDA)	2009年 (H.21)	我が国初の有人実験施設「きぼう」 日本実験棟完成 国際宇宙ステーションでの日本人 宇宙飛行士による長期滞在開始
1977年 (S.52)	我が国発の静止衛星「きく2号」 打上げ (世界で3番目)	2012年 (H.24)	内閣府宇宙戦略室発足
1994年 (H.6)	純国産液体ロケット H-II 1号機 打上げ		

図 1. 日本の宇宙開発の歴史

3. JAXA における宇宙開発

2005 年以降 JAXA はロケットの打ち上げに 21 回連続して成功し、打ち上げられた JAXA 衛星も 20 基に達し (2012 年 12 月時点) 社会からの信頼を回復しその使命を果たしていると言える。またこれらの衛星を活用して、温暖化・気候変動等の地球環境の観測、災害発生時の被災地域の監視、測位サービスの提供など実用的な分野での利用に加えて宇宙科学研究や惑星探査の推進を行っている。また国際宇宙ステーション (ISS) 計画に参加し実験モジュール「きぼう」で宇宙環境を利用した材料実験や生物実験を行っている。日本人宇宙飛行士の育成にも力を入れており 8 人の宇宙飛行士が NASA のスペースシャトル搭乗や ISS での滞在機会を得ている。

最近の JAXA の計画・成果について以下に述べる (図 2 参照)。

ア) 地球観測分野

2008 年に地球温暖化の原因となる「温室効果ガス」の濃度分布を観測し、温室効果ガスの排出量削減に貢献することを目的とした「いぶき (GOSAT)」が、また 2012 年 5 月には高性能マイクロ波放射計 2 (AMSR2) により降水量、水蒸気量、海洋上の風速や水温、陸域の水分量、積雪深度などを観測し地球の水循環変動の把握に貢献する「しずく (GCOM-W1)」が打ち上げられた。2011 年の 3 月の東日本大震災時には「だいち (ALOS)」が活躍し被災地情報の収集に貢献した。「だいち」は既に運用を停止しているが 2013 年の打ち上げを目指して後継機 (ALOS-2) の開発が行われている。

イ) 測位分野

「準天頂軌道」という特殊な軌道に測位衛星「みちびき」が 2010 年に打ち上げられ運用されている。これは政府が構築しようとしている準天頂衛星システムの第 1 号機で、このシステムは当面 4 基の衛星で構成される。完成すれば米国の GPS と互換性のある高精度な測位情報が提供される。

ウ) 宇宙科学・惑星探査分野

2010 年 6 月に小惑星「イトカワ」から微粒子を採集した探査機「はやぶさ」が無事オーストラリアに帰還し世界中の人々に感動を与えた。2010 年に金星探査機「あかつき」は金星周回軌道投入に失敗したが、2015 年に予定されている再投入を目指して飛行中である。2006 年に打ち上げられた「ひので (SOLAR-B)」は太陽観測を継続し太陽コロナの解明に貢献している。欧州と共同で水星探査を行う「ベピコロombo」計画に向けて水星磁気圏を観測する衛星を開発中である。

エ) ISS 計画

ISS は、地上約 400km 上空に建設された、人類史上最大の有人宇宙施設で、その大きさは約 108.5m × 72.8m とサッカー場とほぼ同じ大きさであり、質量は約 420 トンになる。JAXA は実験モジュール「きぼう」を ISS に取り付け微小重力環境や宇宙放射線を利用した実験を行っている。この結果、新薬の開発に繋がる「たんぱく質結晶の生成」など貴重な成果が出ている。日本人宇宙飛行士も ISS に 4 度長期滞在し最近では 2012 年 7 月から 11 月にかけて星出飛行士が約 4 か月間 ISS に滞在した。宇宙ステーション補給機「こうのとり (HTV)」も既に 3 度の物資補給を順調に行っている。

オ) ロケット開発

JAXA は高性能化と低コスト化を目指した次期固体ロケット「イプシロンロケット」の開発を行っている。1 段目に H-IIA の補助ロケットを、2, 3 段目には ISAS の開発した M-V ロケットの上段モーターの改良型を用いており、2013 年の初飛行を目指している。

2008年度 (平成20年度)	2009年度 (平成21年度)	2010年度 (平成22年度)	2011年度 (平成23年度)	2012年度 (平成24年度)
 温室効果ガス観測 (いぶき、GOSAT) 打上げ  月探査 (かぐや、SELENE)	 日本実験棟「きぼう」 完成  H-II/B1号機、こうのとり 技術実証機 打上げ	 測位(準天頂衛星、 みちびき)打上げ  だいち (ALOS) 画像の活用  小惑星探査機(はやぶさ) 帰還  金星探査機(あかつき) 小型ソーラー電力セイル実 証機(IKAROS)打上げ	 太陽観測(ひので、SOLAR-B)  HTV2号機 打上げ	 降水・水蒸気観測 (しずく、GCOM-W1) (5/18打上げ)  HTV3号機 (7/21打上げ)

図 2. 最近の JAXA の成果

4. 宇宙開発に必要な技術

1) 宇宙開発に必要なシステムと技術

宇宙開発の目的は、宇宙機を打ち上げそれに搭載された機器が目的に応じた観測を行い地上にデータを送信し、さらにそのデータが処理・加工され地上の事業者や研究者等に利用されて初めて達成される。そのために必要なシステムは次のように分類される。

- ① ロケットや打ち上げのための射場等の宇宙輸送システム
- ② 地球観測衛星、科学観測衛星、宇宙ステーションなどの宇宙機システム
- ③ 追跡管制やデータ処理のための地上システム

図3に宇宙に必要なシステムを例示する。

これらのシステムを開発、運用・利用するために材料からシステム技術まで広い分野の技術が必要となる（図4参照）。

特にロケットにとってはエンジン技術が重要な技術となる。H-IIA ロケットのエンジンは液体酸素と液体水素を使ったもので世界でもトップクラスの性能を有している。打ち上げ成功率も95%を超え欧米やロシア・中国と肩を並べ世界のトップクラスにある。世界で初めて小惑星からの物資回収を成し遂げた「はやぶさ」のイオンエンジンは4万時間と世界最長の稼働を実現した。宇宙科学の分野ではX線や赤外線を用いた観測技術で世界的な成果を挙げている。地球観測衛星の分野ではL帯の周波数を用いた合成開口レーダーや降雨レーダー、温室効果ガス観測センサー、マイクロ波放射計など世界最先端のセンサーが開発されている。このようにペンシルロケットから始まった日本の宇宙開発は世界の宇宙先



図3. 宇宙開発に必要なシステム

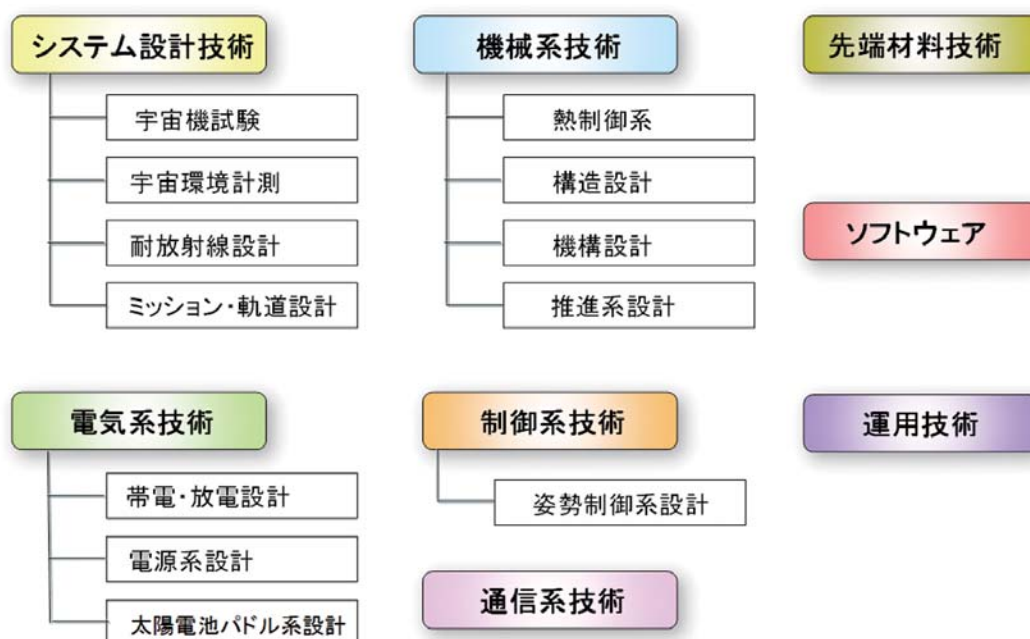


図4. 宇宙技術の構成

進国の一員としての地位を確保しそれにふさわしい高い技術力を持つに至った（図5参照）。

2) 宇宙技術の特徴（図6参照）

宇宙システムは一般のシステムと異なり、少数生産品であり軌道上での故障の修理が難しく原因究明すらできないケースもある。ロケットの打ち上げ途中での故障や衛星の軌道上での不具合はそのミッションの成否に大きく影響し、社会的に大きなインパクトを与えることもある。一旦このような事態を招くと原因究明と対策の検討に長い時間が必要となり計画の大幅な遅延を招くことになる。そのため宇宙システムの開発にあたってはシステムの信頼性が重要視される。

信頼性を確保するためには、日頃から信頼性向上のための取り組みを継続して行っていく必要がある。最大限の冗長性の確保や不具合発生時の最低限のミッションの確保など、徹底した信頼性設計の実施や打ち上げ前の地上試験の充実などに加えて、開発時や軌道上での不具合データの蓄積、設計基準の整備やこれらの情報の JAXA・企業の関係者間での共有などが行われている。



図5. 日本の代表的な宇宙技術

- 少数(一品)生産である。
- 故障しても修理できない。
- 原因究明が困難。
- 信頼性向上が重要。

プロジェクトマネジメント、システムエンジニアリング
信頼性管理、安全管理技術も重要

図6. 宇宙技術の特徴

またシステム開発のマネージメントも高信頼性システムの実現には不可欠な要素である。JAXAにおいて宇宙システムの開発はプロジェクトとして実施されているが、その実施にあたって次のような基本事項に基づく詳細なプロジェクトの実施要領を作成して開発を行っている。

- ① プロジェクトに関する要求事項を定めること
- ② 明確で達成可能な目標を定めること
- ③ リスクに対応しつつ、スコープ・スケジュール・リソース（人と資金）等を調和させること
- ④ 関係者間での調整を行い、仕様、計画及び進め方を適応させること

プロジェクトの実施に当たっては段階的に進める方法（PPP：Phased Project Planning）を採用しているが本格的なプロジェクトの開始に先立ちプリプロジェクトと呼ばれるフロントローディング段階を設け、技術的なリスクの低減を図るとともに費用の見積もり精度を挙げている。

このように大規模で複雑な宇宙システムの開発においては信頼性管理技術に加えてプロジェクト管理やシステムエンジニアリングも重要な技術である。

3) 宇宙技術の課題及び展望

ア) 有人宇宙技術

ペンシルロケットから半世紀を経て日本は世界でもトップクラスの宇宙技術を獲得したと言えるが、これは無人宇宙開発の分野であって有人宇宙開発の分野では米国、ロシアや中国に遅れをとっている。日本は米国のスペースシャトル計画や国際宇宙ステーション計画に参加し有人宇宙技術の開発に努めてきたが未だ独自の有人宇宙開発を実施できる技術を有してはいない。本格的な有人宇宙開発に日本が取り組むのであればロケットの有人化、有人宇宙船、回収システム、宇宙服、空気・水再生システムなどが必要となりこれらの技術開発が課題である。また最近では米国の呼びかけで月や火星の有人探査を視野に入れた国際宇宙探査の検討が行われており 14 の宇宙機関が参加している。日本としての将来の月や火星の探査について明確な計画はないが、JAXA はこの国際検討に参加している。有人月探査などのためには月面の環境を考慮した滞在技術や月面着陸、月面探査車などの技術開発も進める必要がある。

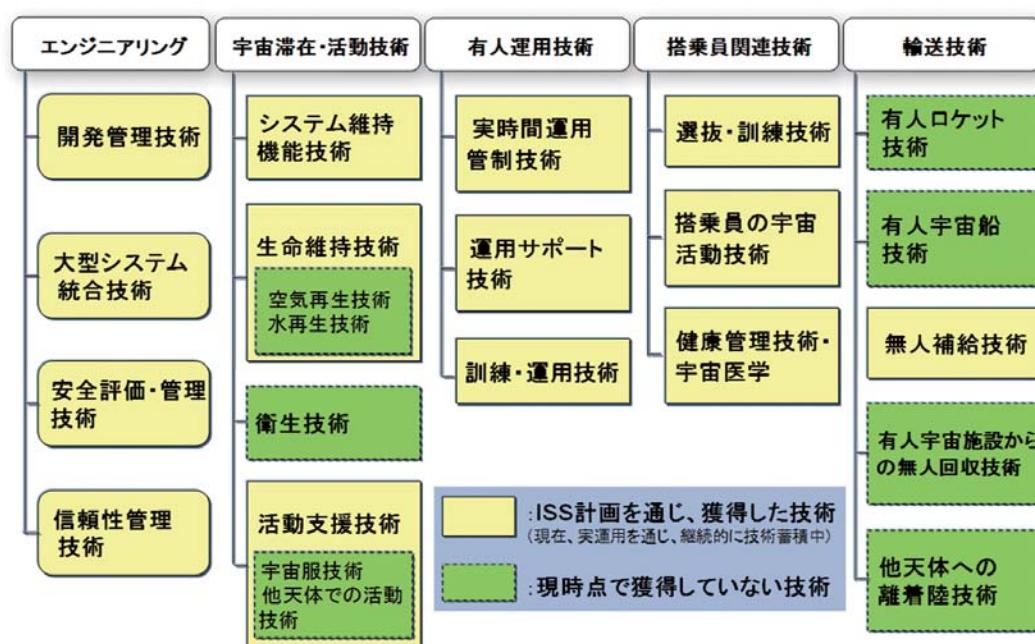


図7. 有人宇宙技術 - ISS計画を通じた技術開発-

イ) 宇宙技術の国際競争力

米国の会社の2012年のある調査によると世界の宇宙開発のランキングにおいて日本は米国、欧州、ロシア、中国について第5位となっている。しかし日本のロケットによる海外衛星の商業打ち上げは1基にとどまり、日本の衛星メーカーが受注した海外衛星は3基である。国内の衛星通信企業が保有する衛星21基のうち国産衛星は僅か1基で残りは米国製となっている。このように日本のロケットや衛星企業はほぼ全て官需によって成り立っていると言える。民需や海外需要拡大が求められている中、世界を見ると米国では民間企業によって低コストのロケットが開発され商業打ち上げサービスが開始されており、商業衛星分野においては小型で高性能な地球観測衛星の需要が増え、通信衛星は大型化、長寿命化が進んでいる。このような状況においては日本として国際競争力強化のために宇宙システムの更なる低コスト化、高信頼性化、高性能化を目指した技術開発が必要となる。長期的には故障フリーな自律型衛星システムやエネルギー問題への貢献が期待されている宇宙太陽光発電システムなどの世界を先導する技術開発を促進し国際競争力を強化する戦略が必要である。

ウ) 更なる高信頼性を求めて

宇宙システムの開発にあたっては繰り返し試験を行い問題点を洗い出すことによって信頼性を高めていく方法が従来からとられている。エンジン開発の場合、試験用の供試体をその度ごとに製作し試験を行う必要があり、莫大な費用がかかると同時に開発期間も長くなっている。このためJAXAでは、従来型の試験に加えてエンジン開発にスーパーコンピュータによる数値シミュレーションを導入し数値解析による性能解析やエンジントラブルによる危険予測などを行い、エンジンのより一層の高性能化や信頼性の向上を図っている。JAXAのロケットエンジン数値解析技術は高精度でエンジン全体を解析できる技術で世界に類を見ないものである(図8参照)。

このように、ロケットや衛星の設計プロセスにシミュレーションやデジタルモデルによる設計検証を行うなど情報技術を取り入れることにより高信頼性の確保を図っている。宇宙システムのソフトウェア開発に際しては高信頼性ソフトウェアを目指しその開発プロセスの改善を図るとともにIV&V(Independent Verification & Validation)と呼ばれる評価技術を開発し導入している。

— 世界初の高精度解析 —



図8. ロケットエンジン数値シミュレーション

5. おわりに

宇宙基本法の成立さらには 2012 年夏に宇宙開発体制の見直しが行われ、日本の宇宙開発は新しい時代を迎えた。世界的には中国やインドの台頭、民間での商業ベースでの宇宙開発の活発化など、日本の宇宙開発を取り巻く環境も大きく変化しようとしている。また国内の財政事情を考えるに多額の資金を要する宇宙開発にとっては厳しい時代になっている。このような状況下にあって日本の宇宙開発の更なる「自律性の確保」や「宇宙利用の拡大」を図るためには JAXA のみならず政府、産業界、大学が一体となって、目標の達成に向けた適切な計画設定、計画実現のための技術開発を効率良く行っていく必要がある。

研究室紹介

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

(※は「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科(大学院)

電気工学専攻

先端電気システム論講座(引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野(萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野(土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野(小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野(和田研) ☆

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野(松尾研)

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

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先進電子材料分野(藤田研)

情報学研究科(大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

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(佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

エネルギー科学研究科(大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野(下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野(土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研) #

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)

高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(小山田研)

学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研)

システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

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

「むだ時間系の微分差分方程式表現とフィードバック系表現：相互関係と汎用的モデル化能力」

1. むだ時間要素とむだ時間系

入出力の間で純粋な遅延のみを伴い、波形の歪みを伴わない（すなわち、入出力信号 u, y に対して $y(t) = u(t-h)$ が成立する）動的システムは、むだ時間要素と呼ばれ、 $h > 0$ はむだ時間と呼ばれる。物質やエネルギーの移動時間、長距離情報伝送における伝送遅延、生体や社会・経済における外部刺激から反応までの遅延時間などをモデル化するものとして、むだ時間要素は頻繁に現れる。

しかし、単純な入出力関係とは裏腹にむだ時間要素は、伝達関数が有理関数とはならない、動特性は常微分方程式でなく偏微分方程式で記述される、有限次元システムではなく無限次元システムとなる、などの特徴があり、これを含むむだ時間系の数学的取り扱いも何かと厄介である。たとえば、中立型と呼ばれるタイプのむだ時間系の挙動はとくに複雑であり、安定性がむだ時間の長さの微小変動に関して連続でないといったことが一般には生じ得ることからも、その複雑さが垣間見られる。

2. むだ時間系の表現法——微分差分方程式表現とフィードバック系表現

一般的なむだ時間系の数学的表現として様々なものが考えられているが、古くから研究されてきた表現形式として、微分差分方程式がある。以下、話を簡単にするためもっとも単純な、むだ時間をひとつだけ持つ線形時不変系の場合に限る。この場合の微分差分方程式は $\dot{x}(t) = Jx(t) + Kx(t-h) + Lx(t-h)$ と表現され、初期条件としては $-h \leq t \leq 0$ におけるベクトル値関数 $x(t)$ の値（初期関数）を与えることになる。 $K \neq 0$ のとき、このむだ時間系は中立型と呼ばれる。一方、フィードバックの視点からは、図1のような（有限次元）線形時不変系 F とむだ時間要素 H （むだ時間の長さ h ）からなる閉ループ系としてむだ時間系を扱えると都合がよい。しかしながら、このような異なる表現形式の相互関係や、表現形式の違いがむだ時間系のモデル化の成否をどのように左右するかについて、明確かつ完全な議論はほとんどなされてこなかった。これは不可解にも思えることであるが、両者は当然等価であると信じられてきたことが理由と考えられる。しかしながら、微分差分方程式表現は、フィードバック系表現よりもむだ時間系のモデル化における汎用的能力としては一般には劣ることなど、さまざまな新たな知見が本研究により明らかにされている。

3. 微分差分方程式の連続連結解・擬似連結解とフィードバック系表現におけるその意味

上記を含めて、本研究の成果を概観する上で鍵を握るのは、微分差分方程式の解の定義そのものから再考するという視点である。これにより、両表現形式の違いが意味するところの全容を明らかにしている。従来の研究ではほとんど考慮されなかった不連続な初期関数の場合も考え、 $t \geq 0$ では連続である $x(t)$ のみを解として許容する立場（連続連結解）と、形式的書き換えにより得られる $d/dt[x(t) - Kx(t-h)] = Jx(t) + Lx(t-h)$ という方程式を通し、 $x(t) - Kx(t-h)$ が連続関数となるような $x(t)$ （このとき一般に $x(t)$ は不連続となる）のみを解として許容する立場（擬似連結解）を導入している。中立型微分差分方程式 $\dot{x}(t) = Jx(t-h)$ で初期関数が $x(t)=0$ ($-h \leq t < 0$)、 $x(t)=1$ ($t=0$) の場合の連続連結解、擬似連結解を図2に示しておく。本研究では、もとの微分差分方程式と初期関数から図1の F と初期条件を適切に定めることで、擬似連結解はこのフィードバック系の y の挙動を表現でき、連続連結解は F の内部

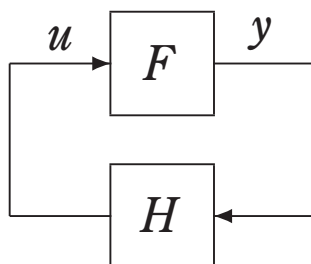


図1 フィードバック系表現

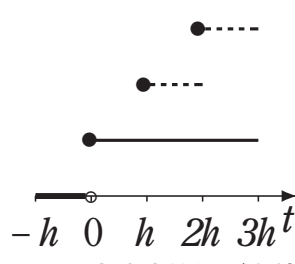


図2 連続連結解（実線）と擬似連結解（破線）

信号（状態変数）の挙動を表現できる（が、その逆に、与えられた図1のシステムの挙動をあらゆる初期条件のもとで微分差分方程式により表現することは、必ずしも可能でない）ことを明らかにしている。このような基礎的成果は、微分差分方程式の意味をより明確化のみならず、当研究室で導入したむだ時間系のモノドロミー作用素理論の研究と密接に関係している。

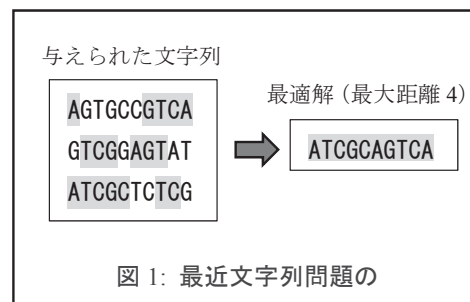
生体医工学講座 複合システム論分野 (土居研究室)

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

「最近文字列問題の近似解法」

当研究室では様々な最適化問題に対し、効率的な解法を構築する研究を行っています。その中で、今回は最近文字列問題 (Closest String Problem) に関する研究を紹介します。最近文字列問題とは、与えられた文字列になるべく近い文字列を求める問題で、遺伝子列の解析やたんぱく質の構造解析などの分野において研究されています。ここでいう「近い」文字列とは、文字の食い違いの個数 (ハミング距離) が小さい文字列のことを指します。たとえば、文字列「ATTTCG」

と「AGTAG」は2番目と4番目の文字が異なり、ハミング距離は2ですが、「ATTTCG」と「ATACG」は3番目の文字しか異ならず、ハミング距離は1ですので、「ATTTCG」により近いのは「ATACG」の方です。最近文字列問題は、(同じ長さの) 複数の文字列に対し、ハミング距離の最大値を最小化する文字列を求める問題です。この問題の例を図1に示します。



最近文字列問題は組合せ最適化問題であり、すべての解の候補を列挙すれば最適解を求めることができますが、その候補の数は、文字列長を L とすると単純計算で 4^L 通り (遺伝子列の場合) もあります。したがって、単なる数え上げで解を求めるのは、文字列が長くなると計算時間がかかりすぎてしまいます。また、より効率的に最適解を求める方法も研究されているものの、現実的な計算時間で解が求まるのは短い文字列に限られています。そこで、最適ではなくてもよいから、ある程度良好な解を高速で求めるため、近似解法の研究が行われています。

文献 [1] では、ラグランジュ緩和とタブー探索法を組合せた効率のよい近似解法を提案しました。この解法では、最近文字列問題が整数線形計画問題として定式化できることに着目しました。この定式化において、制約条件の一部をラグランジュ緩和し、ペナルティ項として目的関数に組み込みます。すると、得られるラグランジュ緩和問題は簡単に解くことができ、しかも、その最適解はもとの問題の近似解にもなっている、というありがたい性質を持っています。そこで、ラグランジュ乗数を適切に調整しながら緩和問題を解くことで近似解を求める、という解法を構成しました。ただし、この近似解がもとの問題に対しても良好な解となっている保証はないので、メタヒューリスティクス的一种であるタブー探索法を用いて解をさらに改善することにしました。そして、数値実験を行って、従来の解法よりも高速に良好な解が得られることを示しました。たとえば、文字列長 5000、文字列数 50 の場合、最適解からの誤差が 2 以内の解が数十秒程度で求まります。ラグランジュ緩和問題を同時に解いているため、最適値の下界値が求まり、したがって近似解の目的関数値 (上界値) と併せて最適値の上下界がわかる、という点もこの解法の特長の一つです。もちろん、近似解の目的関数値と下界値が一致した場合、その解の最適性が保証されます。

現在は、ハミング距離の最大値が最小となる部分文字列を抜き出すという、最近文字列問題をより一般化した最近部分文字列問題 (Closest Substring Problem) に対し、高速な解法を構成する研究を行っています。

- [1] S. Tanaka: A Heuristic Algorithm Based on Lagrangian Relaxation for the Closest String Problem, Computers & Operations Research, vol. 39, no. 3, pp. 709-717 (2012).

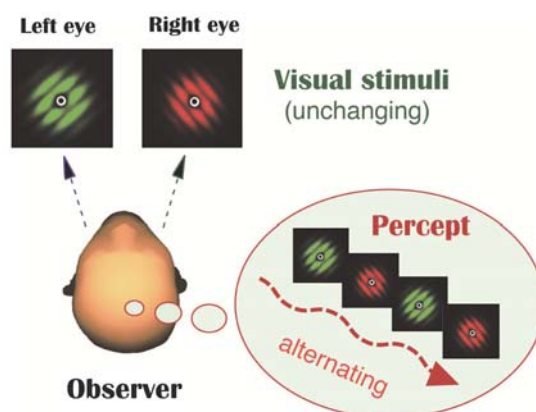
生体医工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

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

「脳機能イメージングにより視覚的アウェアネス・意識の脳内機構を探る」

生命とは何か？ 時間とは何か？ これらと並んで人類に残された根源的な謎として“意識とは何か？”がある。近年、人間の様々な高次脳機能が次第に解き明かされ、これまで自然科学的研究の範疇から除外されてきた“意識”についても研究対象として、その謎に迫ろうとの機運が高まっている。意識は、定義すること自体が論争になり、そのため主に哲学の問題と見なされ長らく自然科学の研究対象として敬遠されてきた。しかし、我々は意識とは何かについて悩むのではなく、ある特定の意識体験と相関のある神経過程と無い過程の差は何かを探るべきとの立場から、脳機能の新たなイメージング手法の開発を進める事によって、この難問に挑戦しようとしている。我々が意識の脳内機構解明の鍵と考えて研究しているのが、両眼視野闘争と呼ばれる視知覚現象である [1, 2]。両眼視野闘争とは、物理的には左右の網膜上に視覚刺激が与えられ続けているにも拘らず、競合する視覚刺激が交互に知覚され、一方の刺激が知覚されている時、他方の刺激が意識にのぼらないという視知覚現象として知られ、意識の一階層であるアウェアネスの脳内機構を定量的に観測できる稀少な現象である。図にその概念を示す。

両眼視野闘争に関する先行研究と、我々自身の研究結果に基づき我々は両眼視野闘争の脳内機構を次のように考えている。すなわち、「両眼視野闘争は相互にフィードフォワード・フィードバック結合している大脳皮質機能領域間の情報統合プロセスの結果生ずるものであり、ボトムアップ的に処理された両眼からの視覚情報が、過去の視覚体験による記憶や、学習によって修得した知識、群化等の要因の支配の基でトップダウン情報として一次視野にフィードバックされ、ボトムアップ的に入力され続ける競合する情報と統合して、合理的な解釈を与える統一像を作り出す体制化の過程によって生ずる知覚現象



である。この統一像は、競合するボトムアップ情報を絶えず受け取り続けるため安定性が維持されず、再統合という形で更新されて行く。その際、例えばニューロンのインパルス列の間隔揺らぎといった確率的要因の影響を受け、異なる統一像に切り替わるということが繰り返される。」

この考えを進めると、意識とは感覚受容器からの情報が脳内の各部位で直並列的に処理され、過去の体験等に基づく記憶情報と共にフィードバックされ、微小時間遅れたフィードフォワード情報と統合されるというプロセス自体であると考えることが可能である。従って、この情報統合プロセスは、それを実現するハードウェアである神経基盤に依存し、どれだけの情報が統合されるかということ、さらに、ハードウェアの状態に応じて変化することになり、これらが意識の多様性・複雑性であり、その解明を困難にさせている理由であろうと考えることができる。最後に、本稿で述べた仮説では、いかにして情報統合が実現され得るかという点が説明されなくてはならない。現時点における最も有力な候補は、約 40 Hz の神経発火の同期現象であり、これがマクロに観測されたものが EEG/MEG のガンマバンドのリズムである。一方、情報統合に関しては量子論的機構も提唱されており、他の可能性も含めて研究を進めその謎を解き明かしたい。

[1] 小林哲生：“両眼視野闘争”，Clinical neuroscience, 中外医学社, Vol.28, No.10, pp.1161-1163 (2010)

[2] 小林哲生：“両眼視野闘争から意識を探る”，作業の科学 Vol.6, 協同医学出版社, pp.47-64 (2006)

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野

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

「大気圧プラズマによる還元反応とその応用」

当研究室の主な研究対象であるプラズマの産業応用としましては、主に化学気相成長やスパッタリング過程、そしてドライエッチングといった、半導体プロセスにおける微細加工での活躍が挙げられ、これまでの我が国の電子産業の発展に貢献してきました。ここでは、真空チャンバーの中の低圧力でプラズマ生成を行い、材料ガスの気相での解離過程や表面での反応過程等に興味深い物性が数多く見られ、我々の研究室においてもこの関連の研究は重要な研究項目として鋭意取り組んできました。

プラズマ分野の最近の研究動向の一つとしまして、真空チャンバーを用いずに、“脱真空”プロセスとして大気圧プラズマ生成とその利用が盛んに研究されています。そこでは、低圧下と同様のプラズマ生成用の電力放射用アンテナ（電極）構造が適用できないため、いわば一からプラズマ生成部や反応部の設計を強いられます。しかし、その応用が期待される対象が極めて広いことから、大気圧プラズマの研究はここ数年精力的に行われてきました。特に、大気圧下では、従来のプラズマプロセスの対象であった薄膜加工や平板固体の処理だけではなく、車や日常生活部材といった立体構造もその対象となり、さらには液体への関与が可能であることから化学プロセスにも応用可能で、最近では“プラズマ医療”と銘打って生体への効果を見出す研究も開始されています。我々の研究室においても、ニーズに幅広く対応できるような電極の開発や、生成された大気圧プラズマの診断技術の開発を行ってきました。

しかし、その研究内容を良くみてみますと、材料の分解や酸化処理といった、これまでプラズマが得意としてきた作用が多く用いられていることに気がきます。そこで、我々は、動作圧力帯を大気圧に変えるだけではなく、その効果についても幅広く展開することを目指して、これまであまり成功してこなかった還元作用に注目しました。すなわち、酸化と還元の効果を発現でき、しかもその強さがプラズマ生成電力で調整できるとすれば、オンデマンド反応場が大気圧下で実現することとなります。しかし、還元作用を大気圧下で実現するには少し工夫が必要で、例えば還元剤である水素は大気圧中では酸素と反応するため扱いが困難です。そこで、我々は、水中の電気分解で水素を発生し、そのまま水中の水素気泡内で大気圧プラズマを生成して原子状水素を得ることとしました。また、別の還元剤としてヒドラジン（ N_2H_4 ）の生成にも成功し、この場合はより長寿命の活性種として利用できます。

我々はすでに、図1のような系[1]を実現可能なフィルター状の大面積大気圧プラズマ電極の開発に成功し、それを用いた処理装置は協力企業により市場投入されています。さらに、先に示した液中の水素プラズマにより、液中に溶解している二酸化炭素の還元（一酸化炭素への分解、メタンへの改質：図2）に成功しました[1]。また、ヒドラジンを用いることで、溶液中の銀イオンの還元・析出にも成功しています。今後は、図1に示したような連続した反応系によるより精緻なプロセス制御系を構築・実証し、様々な対象にその用途展開を図っていきたいと考えています。

[1] O. Sakai, T. Morita, Y. Ueda, N. Sano, and K. Tachibana, Thin Solid Films, vol. 519, p. 6999 (2011).

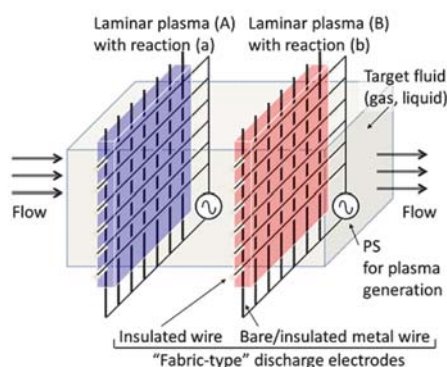


図1：大気圧プラズマによるオンデマンド反応場の概念図[1].

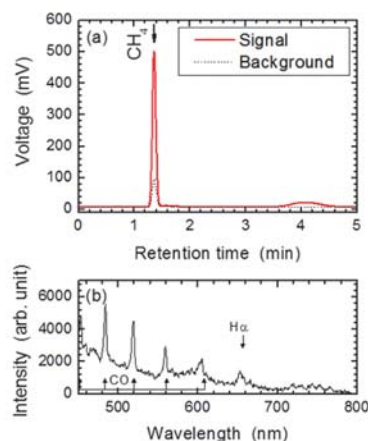


図2：大気圧液中水素プラズマによる二酸化炭素の改質気体分析結果(a)とプラズマからの発光スペクトル(b)[1].

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

「ナノギャップスイッチ現象に基づく抵抗スイッチング不揮発性メモリの開発」

近年のモバイル機器や情報家電などデジタル情報機器の急速な拡大に伴い、われわれが日常的に取り扱う情報量は飛躍的に増大しつつあり、いつでもどこでも大容量の情報の迅速な読み出し、記憶を可能にするユニバーサルメモリの開発は必須となっています。こうした中、抵抗スイッチメモリは微細化に有利なメモリとして注目されていますが、近年、この抵抗スイッチメモリに応用可能な新たな物理現象として、ナノギャップスイッチ（以下 NGS と略します）現象が見出されました。NGS 現象は、ナノメートルスケールの微小間隙を有する、図 1 に示すような「ナノギャップ電極」構造において、電極間の抵抗値が入力電圧波形に依存して 3~5 桁変化する現象であり、極めて単純な構造で抵抗スイッチングが発現することから、従来の半導体デバイスにおける種々の理論的・技術的障壁を打ち破ることが可能な、超稠密不揮発性メモリとなることが期待されています。現在のところ、NGS 現象では、ギャップ部に加えられた電圧によってナノメートルスケールでの電極構造変化が引き起こされ、結果的にギャップ長が変化し、ギャップ部のトンネル抵抗が大きく変化すると考えられていますが（図 2 参照）、そのメカニズム詳細は依然不明であり、NGS 不揮発性メモリの実用化に向けて、スイッチング機構およびその基本特性の解明が求められていました。

われわれは、対向する 2 電極の先端をナノスケールで先鋭化することで、スイッチング領域が局所領域に限定される（単接合型）電極を作製し、ギャップ構造変化を直接観察することで、スイッチング動作機構の詳細解明を目指して研究を進めています。このナノギャップ電極は、厚さ 10 nm 以下の薄膜電極構造であり、原子間力顕微鏡（AFM）によるギャップ部の高分解能 3 次元構造評価が可能な構造になっています。これまでに、作製工程の最適化等により、ギャップ長 5 nm、ギャップ幅 10 nm の電極を有する平面先鋭型の単接合 NGS 素子を開発することに成功しました（図 1（右）参照）。ところで、NGS 動作のためには、ギャップ長は適正な値以下になっている必要があり、フォーミング処理と呼ばれるギャップ調整処理が求められますが、この過程で引き起こされる構造変化が、ギャップ部評価の障害にならないよう十分抑制することにも成功しました。こうした素子について、フォーミングおよびスイッチング前後の Pt-NGS 素子の局所構造・電気特性の変化を、その場で計測できる AFM 測定装置を用いて評価を行い、スイッチング前後でのギャップ長の微視的变化を捉えるとともに、ギャップ先端の移動を示す結果を得ています。フォーミング過程の最終工程では、両電極先端部に 100 nm 程度以下の構造変化が生じることがありますが、その後の数百回の NGS スwitchングにおいては、ギャップ構造にはこのような大きな変化は確認されませんでした。また、単接合型 NGS 素子でも書き換え耐性 1 万回を確認することができました。本研究によりナノギャップ領域が極限的に微細化しても NGS 動作することが検証されたことから、今後、超稠密 NGS 不揮発性メモリの実現に向けて、さらに研究を進めて行く予定です。

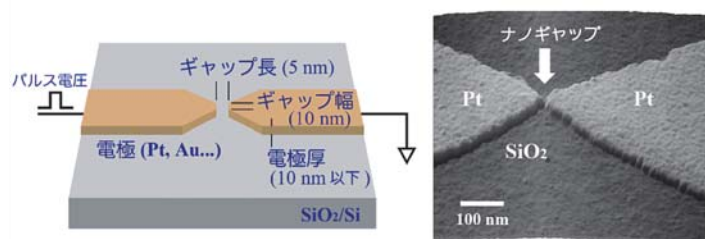


図 1：(左) ナノギャップ電極模式図、(右) 電子線リソグラフィーにより作製された Pt ナノギャップ電極の AFM 像。

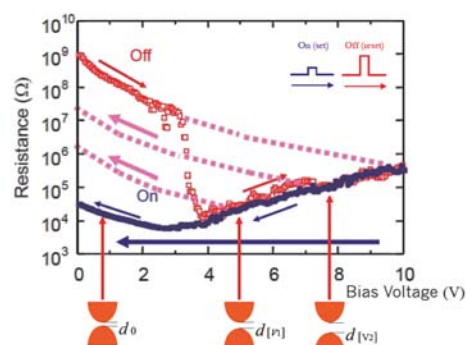


図 2：NGS 素子の抵抗ヒステリシス曲線。入力電圧波高 (V_1, V_2) に応じて、ギャップ長 (d_0) が変化し ($d[V_1], d[V_2]$)、結果的に抵抗値が変化する。

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

「SiC フォトニック結晶」

近年、光を自在に制御できる新たな材料として、フォトニック結晶が注目を集めている。フォトニック結晶とは、光の波長程度の大きさの周期的屈折率分布をもつ構造体であり、特定の波長の光に対して存在そのものを許さないフォトニックバンドギャップ (PBG) を形成することの特徴とする。フォトニック結晶はこれまで主に材料系として Si や GaAs を中心に発展を遂げてきたが、一方で材料に起因する根本的な限界も明らかになりつつある。例えば、高 Q 値ナノ共振器に対して $1.55\ \mu\text{m}$ (光子エネルギー: $\sim 0.8\ \text{eV}$) の強いパワーの光を導入すると、非線形光学効果の一種である二光子吸収が起こり、光の損失が生じてしまう。また Si は赤外領域 ($> 1\ \mu\text{m}$) においてのみ透明であり、可視領域への展開は不可能である。

そこで本研究室ではワイドバンドギャップをもつシリコンカーバイド (SiC) という材料に注目した。SiC はワイドバンドギャップ半導体材料の中でも比較的屈折率が高く (2.5~2.7)、Si の約 3 倍程度の広い電子バンドギャップ ($\sim 3.2\ \text{eV}$) をもっている。このバンドギャップは光通信帯域の光の二光子吸収を防ぐには十分な大きさである。また熱光学係数が小さく、熱伝導率に優れた材料であり、フォトニック結晶デバイスの安定した動作が期待できる。さらに SiC は可視領域の光に対して透明であり、可視光線を制御対象とする新たなフォトニック結晶の実現も期待できる。

図 1 に作製した SiC フォトニック結晶の例を示す。また図 2 には高強度の入力光に対する共鳴スペクトルの測定結果を示す。同図から 100pJ という高いエネルギーのパルスを導入しても、共振器のスペクトルに変化は見られず非線形吸収が全く生じていないことが分かる。図 3 にはフォトニック結晶のサイズを徐々に縮小することで、赤外から可視光までの領域で共鳴する共振器を作製し、実際に動作させた例を示す。以上の結果は SiC の広いバンドギャップと物理的な安定性を反映したものであり、今後 SiC フォトニック結晶は様々な領域で利用されていくと考えられる。

参考文献

B.S. Song, S. Yamada, T. Asano, and S. Noda: Opt. Exp. **19**, 11084 (2011). S. Yamada, B.S. Song, T. Asano, and S. Noda: Appl. Phys. Lett. **99**, 201102 (2011).

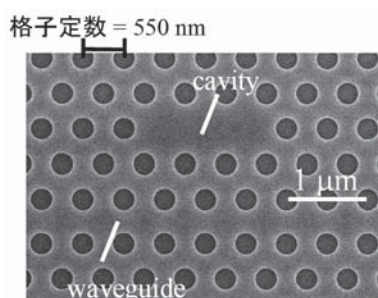


図 1: SiC フォトニック結晶の SEM 写真の一例

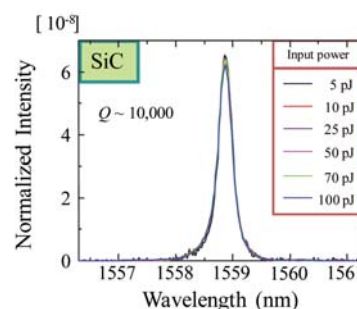


図 2: 高強度光パルスに対する安定性を示す実験結果

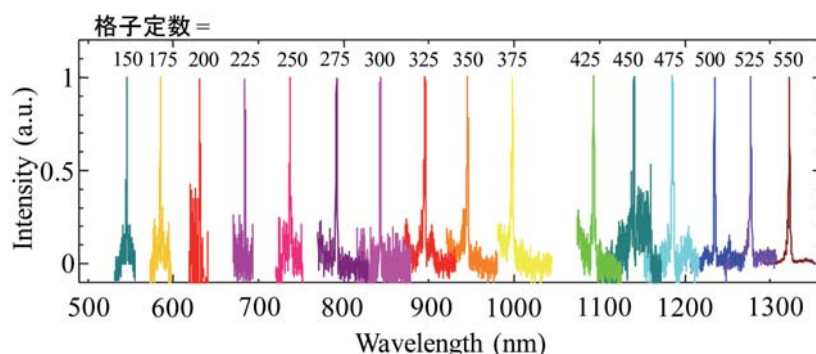


図 3: 赤外から可視光までの広い領域での動作が可能であることを示す実験結果

量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

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

「物理の基本定数の時間変化観測を目指す単一イオン光時計」

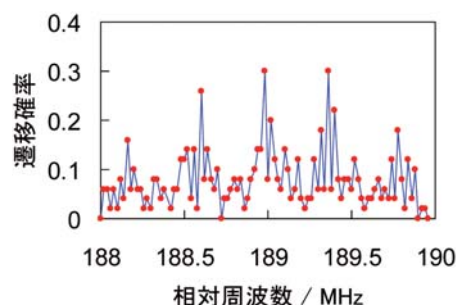
私たちが時間を測るとき、振り子のような一定の時間で再現する現象に注目し、その周期を基準とします。その計測装置、時計としてもっとも正確なものが原子時計です。原子時計では、原子が特定の周期の電磁波と共鳴する現象を利用し、その周期を基準とします。原子の共鳴は物理法則にしたがって決まります。物理法則は時間的にも空間的にも変化しないと考えられるので、原子時計は1秒の基準として優れています。実際に、現在の秒の定義は、マイクロ波領域にあるセシウム原子の共鳴の周期、その逆数の周波数で9.2 GHz、を基準とすると国際的に取り決められていて、その相対不確かさは 10^{-16} 台に達します。さて、一般に測定の不確かさを小さくするためには、測定を何回も繰り返して平均を取ります。原子時計では、より速い周期の共鳴を基準とすれば、より短い時間で周期の測定回数を稼いで不確かさを小さくできることになります。そこで、マイクロ波と比べて周期が10万分の1と速い、光領域の共鳴を用いる原子時計、光時計の構築を考えます。不確かさを小さくするには周期を変化させる要因をできるだけ取り除くことも重要です。その有力な方式として、超高真空中の狭い空間に1個だけ閉じ込めた原子を利用する方法があります。原子をイオン化しイオントラップという装置で電場をかけて閉じ込めますが、トラップ中心では電場がゼロになっていて、イオン1個だけなら共鳴は変化しません。単一イオン光時計とよばれるこの方式では不確かさ 10^{-18} 台が試算されていて、実証されつつあります。(イオントラップの研究を先導してきたワインランド博士が2012年度ノーベル物理学賞を共同受賞)

このような非常に小さな不確かさで計測が可能になると、非常に小さな効果が検出できるようになります。時計のよりどころであった物理法則の時間普遍性を、逆に時計で検証できる水準に達してきました。原子の共鳴の周期を決める原子内部の相互作用の大きさは、物理の基本定数、ここでは微細構造定数 α 、を単位として表されます。物理法則がそれ自身の時間変化を含むものであれば、基本定数の変化となって現れることになります。異なる共鳴では α の時間変化に対する感度が異なるので、異なる共鳴を基準とする2台の光時計を構築し、その相対的な時間変化を観測することで α の時間変化が探索できます。現在の物理の枠組みである標準理論では、物理の基本定数は時間変化しません。しかし、標準理論では説明できない宇宙の暗黒エネルギーの起源に迫る新しい物理理論では、時間変化が示唆されています。もし時間変化が観測されれば、その大きさから理論を淘汰することができます。このように、精密計測の極限を追求すると、高エネルギーの最先端で重い未知の素粒子を探す基礎物理実験のように、物理の最先端に迫ることができます。私たちは同じような実験研究に価値を見出す仲間たちと、科研費新学術領域「原子が切り拓く極限量子の世界－素粒子的宇宙像の確立を目指して－」を推進し研究を進めています。

通常異なる2種類の光時計は、2種類のイオンを用いて構築します。私たちは α の時間変化に対して感度が大きく異なる2つの時計用共鳴をもつ、イッテルビウムイオン(Yb^+)に着目しました。図1は使用しているイオントラップ電極で、中心の直径0.8 mmの穴にイオンを閉じ込めます。そして、レーザー冷却という技術でイオンを静止させてドップラー効果を防ぎ、精密なレーザー光で時計の基準に用いる共鳴信号を獲得します。図2が単一 Yb^+ の共鳴信号です。5本見える信号の相対的な高さから、運動エネルギーは温度換算で2 mKに低減されています。現在分解能は20 kHz程度ですが、今後1 Hz台まで分解能を高めて光時計を構築し、 α の時間変化探索を進めていきます。



図1：イオントラップ

図2：単一 $^{174}\text{Yb}^+$ 時計用共鳴信号

知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研究室)

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

「コンテンツ閲覧行動の分析とモデル化～人間と間の合った対話ができる情報端末の実現を目指して」

私たちが暮らす社会には、さまざまな種類の情報端末が備えられており、豊かな情報環境が形成されています。つまり、従来のパソコンに加え、スマートフォンやタブレット端末が急激に普及し、さらに街中にはデジタルサイネージ（電子広告）が設置され、いつでもどこでも簡単にインターネット上の情報を獲得できるようになっています。その一方、インターネット上の情報は大規模化かつ複雑化しており、それらの端末を用いたとしても「所望の情報にたどりつけない」「そもそも何を調べれば良いのか分からない」という新たな問題が生まれています。

この問題に対して、もし情報端末が利用者の意図や潜在的な興味といった心的な状態を読み取り、適切な情報を能動的に提供することができるようになれば、私たちはまるでホテルのコンシェルジュと対話するかのごとく、欲しかった情報を得ることができるようになると考えられます。本研究室では、このような人間と間（ま）の合った対話ができる情報端末の実現を目指し、その基盤となる人間行動計測・認識技術の研究をしています。具体的には、TV コマーシャルや商品カタログといったコンテンツの閲覧行動を対象として、閲覧者の視線運動とコンテンツ情報、閲覧者の心的状態の関係性を分析・モデル化する研究に取り組んでいます。以下にその例を紹介します。

・映像・視線ダイナミクスの織りなす時空間的關係性のモデル化

映像閲覧中の視線運動には映像シーンの特性が反映されます。本研究ではシーン特性として、映像に含まれる視覚的に顕著な領域を持つダイナミクス（顕著性変動）に着目し、視線運動との関係性－たとえば視線の向きやすい顕著性変動パターン、特定の顕著性変動パターンを閲覧する際に起こりやすい視線運動－のモデル化を行いました（図1）。また、提案モデルを統計的に学習することで、TV コマーシャルといった一般映像の閲覧者が映像に集中しているかどうかを高精度に推定できることを確認しました。

・提示コンテンツのデザイン構造を利用した視線運動の意味理解

商品カタログのようなコンテンツを閲覧する際の視線運動の意味理解を目的として、コンテンツ中の画像や文章といったオブジェクトのレイアウト（デザイン構造）を知識源として積極的に用いる枠組みを提案しました。デザイン構造にはオブジェクト間の意味的關係性が反映されており、本枠組みによって、視線運動を「どのオブジェクトを見ているか」ではなく「どの意味的關係性に着目しているか」に基づいて解釈できるようになります（図2）。現在は比較的単純なデザイン構造の商品カタログを利用し、閲覧者の注視行動（情報取得、情報選択など）の認識を通して、提案する枠組みの基礎的評価を行っています。

今後は、より多様なコンテンツや心的状態を扱い、提案したコンテンツ閲覧行動モデルの有効性検証・拡張の検討を行う予定です。また本研究の応用として、現在、提示コンテンツ中で閲覧者が着目している意味的關係性を視線運動から推定し、効率的に情報を推薦するシステムの開発に取り組んでいます。

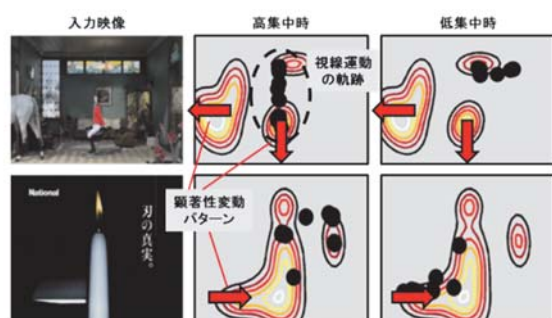


図1：視線の向きやすい顕著性変動パターンの解析

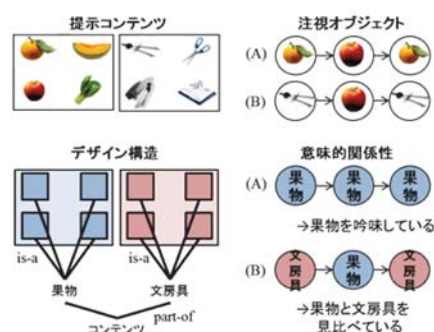


図2：デザイン構造を用いた視線運動の意味理解

通信システム工学講座 知的通信網分野 (高橋研)

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

「利用者の位置情報を用いたサーバ分散配置型クラウドサービスシステムについて」

近年、クラウドサービスが注目を集め、幅広く活用されてきています。クラウドサービスは、従来は手元で管理・利用していたソフトウェアやデータを、インターネットを通じて必要に応じ活用するもので、例としては Google Apps や Amazon EC2 といったサービスが挙げられます。

クラウドサービスの特徴としては、各地のデータセンタに集約されたコンピュータリソースを多数のユーザで共有することにより、低コストでリソースを活用できる点が挙げられます。これによって、ユーザはクラウド環境の構成やデータの格納場所を意識せずにサービスを利用できます。ただ、データセンタは世界に数ヶ所しか存在していないため、ネットワーク距離の遠いデータセンタを利用することが起こり得ます。その際、RTT(Round Trip Time)が大きくなることでスループットが低下してしまい、サービスの体感品質が低下してしまうという問題が発生します。そこで、当研究ではサーバを分散配置し、サービス利用者の位置情報を考慮することで RTT を削減可能なクラウドサービスシステムを提案しました。

従来、サービス品質向上のためサーバのロケーションを増やす際、大量のサーバの購入やデータセンタの新設、そして保守管理運用が必要となり、莫大なコストが必要となりました。そこで、提案システムでは、クラウド事業者がサーバを持たず、サーバ保持者からコンピュータリソースを借りるビジネスモデルを提案します。本システムのビジネスモデルは、ユーザにはサービスの対価としてサービス利用料を払い、サーバ保持者にはサーバ利用料としてインセンティブを与えることで、コンピュータリソースを得るというモデルとなっています(図1)。

また、提案システムでは、管理サーバはサービス利用者の RTT 情報を用いることで位置を推定し、ネットワーク距離の近いサーバを選択します(図2)。ユーザはその近傍サーバを利用することで RTT を削減することが可能となります。本研究では、提案システムを運用した際の挙動をモデル化し、シミュレーション評価を行なうことで提案システムの有効性を示しました。

参考文献

横田健治, 朝香卓也, 高橋達郎, “サービス利用者の位置情報を考慮したサーバ分散配置型クラウドサービスシステムの提案”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J95-B, No.10, pp.1325-1334, 2012



図1：提案システムのビジネスモデル

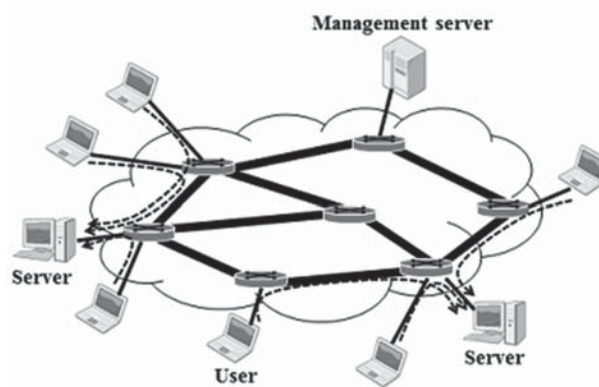


図2：提案システムの概念図

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤高研究室)

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

「Hot Swap 機構を備えた耐故障再構成可能アーキテクチャ」

携帯電話やPC、家電製品、自動車等の身近な製品から通信、金融、医療等の社会基盤を支えるシステムに至るまで、集積回路を含むシステムは我々の生活に浸透し、なくてはならないものとなっており、その信頼性も高いレベルで要求されるようになってきた。集積回路の小型化や高性能化をもたらしてきた微細化技術の進展は、その一方で脆弱性を加速させる要因となっており、信頼性の確保が課題となっている。当研究室では、個々のトランジスタからシステム全体に至るまで様々な階層で研究を行っており、ここではアーキテクチャ（構成方式）レベルでの高信頼化の取り組みを紹介する。

図1は粗粒度再構成可能アーキテクチャと呼ばれる演算機構の模式図であり、多数の演算器が規則正しくアレイ状に配置され、相互に接続されている。これら演算器の個々の演算機能や接続関係は処理開始前に設定（再構成）することが可能であり、これ1個で様々な処理に柔軟に適用可能な高性能な演算専用処理装置（ハードウェアアクセラレータ）として利用できる。我々は、この粗粒度再構成可能アーキテクチャの演算器の一部をスペアとし、必要に応じて使用中の演算器と役割を交換できるようにした。図2のように、横に並んだ1列の演算器群（Cluster）の上下に設けたSwitch Boxにより、入出力データを必要に応じて迂回させることが可能になっている。使用中の演算器とスペアの演算器の役割は動作中に定期的に交換（Hot Swap）され、スペアの演算器は性能が劣化していないかどうかテストされる。このとき、実際より厳しい条件（バックバイアス）でテストすることにより、演算器の性能劣化を動作に支障が出る前に予防的に検出できるようにしている[1]。性能劣化が検出された演算器は不良とみなし、以降の処理では使用しない。このようにして、システムの動作を一切止めることなく経年劣化の検出を可能としている。Cluster内の1/3の演算器をスペアにしたとき、三重系と同等の長期信頼性が得られる。

この方式の有用性を実証するため、65nmのCMOSプロセスを用いてLSIチップ試作を行った[2]。図3はその顕微鏡写真であり、この

4.2mm × 2.1mmのチップ上に四則演算が可能な演算器が12個 × 6 Cluster = 72個搭載されている。このLSIチップを図4のテストボード上に実装して動作テストした結果、性能劣

化を予防的に検出する機構が有効に機能していることが確認できた。また、高信頼化に伴って必要となった回路面積の増加は50%、消費電力の増加は20%にとどまっており、今後の改良により更に改善できると考えられる。

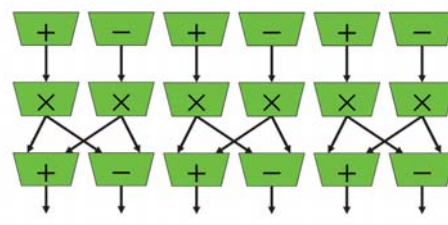


図1：粗粒度再構成可能アーキテクチャ

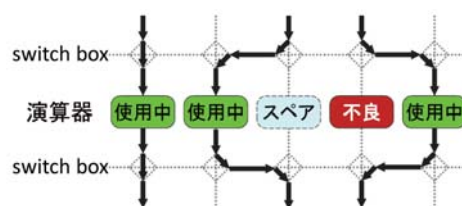


図2：Switch Boxを用いた Hot Swap 機構

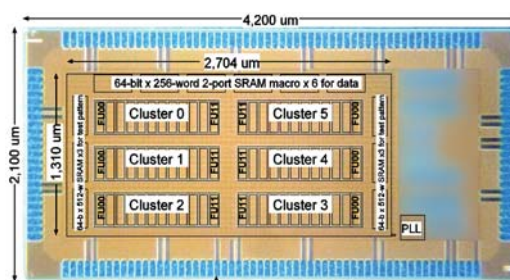


図3：試作チップの顕微鏡写真

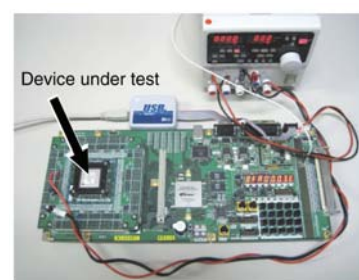


図4：測定の様子

- [1] Z.E. Rakosi, M. Hiromoto, H. Ochi, and Y. Nakamura: "Hot-Swapping Architecture Extension for Mitigation of Permanent Functional Unit Faults," in Proc. FPL 2009, pp.578-581, Aug. 2009.
- [2] Z.E. Rakosi, M. Hiromoto, H. Tsutsui, T. Sato, Y. Nakamura, and H. Ochi: "Hot-Swapping Architecture with Back-Biased Testing for Mitigation of Permanent Faults in Functional Unit Array," in Proc. DATE 2013, Mar. 2013 (発表予定).

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤亨研究室)

<http://www-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「少数アンテナを用いた UWB ドップラーレーダによる人体イメージング」

監視システムや移動ロボットにおける人体のモニタリングにおいて、従来の光学カメラ等を用いたシステムでは、人体識別に十分な分解能を得るために多くのセンサが必要となることが深刻な問題となっています。この問題を解決するため、当研究室では4素子の少数アンテナにより構成した超広帯域(Ultra Wide-Band、UWB) ドップラーレーダを用いた高分解能人体イメージング法を開発しました。

提案イメージング法ではまず、ドップラー効果を利用し人体の各部位(腕、足、胴体など)を運動の違いに基づき分離識別します。図1にシステムモデルを示します。Txから送信される信号は中心周波数26.4 GHz、帯域幅500 MHzのUWB信号です。まず受信信号を短時間フーリエ変換し、人体の各部位の運動の違いを、時間-ドップラー周波数分布の違いとして検出します。即ち、同分布の有意なピークを抽出することで各部位を分離識別します。次に分離した各部位の位置を、干渉計法とUWB信号の遅延時間により求めます。干渉計法はアンテナ間の到来距離差に基づき到来方向を推定する方法です。提案システムではRx1とRx2からなる干渉計より到来方位角を、Rx1とRx3により到来仰角を推定します。さらに各ピークに対応する遅延時間を補間法により求め、各部位までの距離を高精度に推定します。推定した到来方向と距離より全ての部位の位置を推定し、これらを重ね合わせたものをイメージング結果とします。図2に実験の概観を、図3にイメージング結果の正面図を示します。人体の外形は推定されているものの、部位間に生じた虚像により人体の各部位の識別は困難な結果となっています。

この問題点を解決するため、我々は速度情報を用いた虚像除去法を提案しました。我々は実験と数値計算の両面からの検討により、この種の虚像が比較的高速な速度成分を持つことを実証しました。これに基づき、推定点の速度を推定し、これがある閾値より大きいならば虚像と判定し除去する手法を導入しました。また、偽ピーク抽出に起因した虚像を防ぐため、時間周波数分布からのピーク抽出における電力閾値を、視線方向速度と推定虚像点数に応じて適応的に設定する手法を提案しました。

これらの提案虚像除去法を図3のデータに適用した結果を図4に示します。人体の腕、脚、胴体などが認識可能となり、検出した目標が人体であることが容易にわかります。また、比較的大きな速度成分の変化が脚部と腕部に見られるという歩行運動の特徴も確認できます。4アンテナを用いたUWB ドップラーレーダと提案虚像除去法により、世界に前例のない高分解能人体イメージングを実現しました。

参考文献

K. Saho, et al.: IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.2, in press.

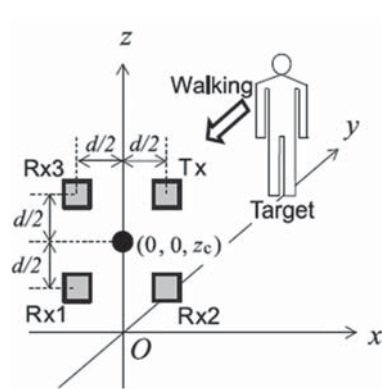


図1: システムモデル



図2: 実験の概観

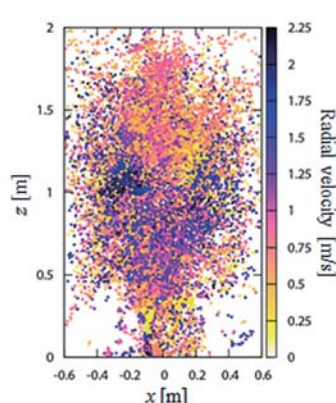


図3: 推定像の正面図

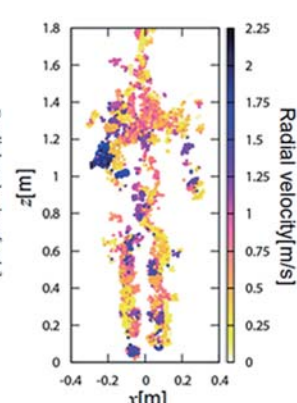


図4: 虚像除去後の推定像正面図

システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

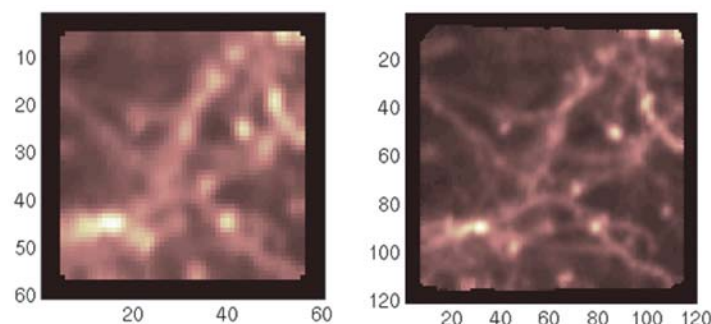
<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

「顕微鏡画像からの三次元再構成」

当研究室では、数理的手法に基づく生物学である「論理生命学」を推し進めているが、ここではその研究の中で、統計的画像処理を用いて細胞、特に神経細胞の微細構造を可視化する技術である「三次元超解像法」の紹介をしたい。

ベイズ法などに基づく統計的画像処理によれば、従来の光学系の物理的な限界を超えた観測性能を実現できる可能性がある。例えば、光学顕微鏡により細胞を観察する場合、顕微鏡の開口数などに依存した物理的限界があるが、統計的な限界はそれとは別に存在する。一例として、マルチフレーム超解像と呼ばれるものがある。一枚の低解像度(ピクセル数が少ない)の観測画像から高解像度(ピクセル数が多い)画像を得ることに限界はあるが、複数フレームの低解像度画像が互いに位置ずれをもって観測される場合、それらを統合することで高解像度画像を得ることが可能である。これは、位置ずれのために、画像(フレーム)間で異なる情報を持っていることによる。一回の観測(フレーム)をチャンネルと呼ぶことにすると、複数のチャンネルを介して同一の情報が輻輳的に得られることになるが、こうした状況においてベイズ法などの統計的手法は有効に働く。

われわれは、共焦点・二光子顕微鏡などの走査型顕微鏡によるライブイメージングに適用可能な三次元再構成法の開発を進めている。レーザスキャンによって観測画像を得ているため、観測中に観測画像の各画素について位置ずれが起こる。この位置ずれは、特に、ライブイメージング、すなわち観測試料が生きている場合に問題となる。そこで、階層的に位置合わせをした上で各画素の情報をスキャン(時間)方向に統合する三次元再構成法の開発を行った。ここでのアイデアは、従来は一枚ずつの画像がフレーム単位で得られているとして位置ずれの推定を行っていたところ、走査型顕微鏡の特性に合わせて、フレームごと、フレーム内の走査平面ごと、走査平面内の走査ラインごと、さらにはピクセルごと、など階層的に位置ずれ推定および位置合わせを行う点にある。ここで高精細な位置合わせとそれに基づく高解像度画像の推定は相互補完的な関係にある点に注意したい。覚醒マウス神経回路の二光子顕微鏡画像データに適用し、神経の情報伝達を担うスパインなどの微小構造の高精細可視化に成功した(下図)。並行して、共焦点系・二光子系の点拡がり関数が理論解に近いことを仮定したベイズの三次元超解像法の開発を行い、同じく覚醒マウスからのデータに適用を行い、こちらも良好な結果を得ている。



図：左は時間方向で平均化した画像、位置ずれのためにボケている。右は高精細位置合わせを行いながら超解像を行ったもの。画素数は縦横2倍ずつで4倍になっている。
(画像提供：福田正裕(東京大学))

こうした高精細な画像処理技術を、覚醒動物の行動時のデータに適用することで、行動発現の細胞基盤の解明に展開することを目指している。

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (中村祐研究室)

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

「ヘリオトロン J」における電子バーンシュタイン波加熱のレイトレーシング解析

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないプラズマの閉じ込めに関して実験と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

磁場閉じ込めプラズマの加熱法は色々ありますが、その中の一つに電子加熱を目的とした電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECH) があります。これは電子レンジとよく似た原理を用い、電子サイクロトロン波 (ECW) と呼ばれる電磁波をプラズマに入射し、共鳴により電子を加熱する方法です。しかしこの方法は、プラズマ密度がある程度高くなると、電磁波が反射されプラズマ中に入っていかなくなる欠点があります。これを克服する方法として、入射した ECW をプラズマ中で電子バーンシュタイン波 (EBW) と呼ばれる静電波にモード変換する方法が考えられています。EBW にモード変換することのできる ECW は異常波 (X モード) と呼ばれ、これがプラズマ中に伝播するには強磁場側から ECW を入射する必要があります。ただ多くの場合、工学的制約のため ECW の入射は弱磁場側から行うことが望ましいため、弱磁場側からプラズマ中に入っていける正常波 (O モード) という ECW を入射し、プラズマ中で X モードに変換し、さらにこれを EBW にモード変換する方法も考えられており、京大エネルギー理工学研究所にあるヘリオトロン J 装置でもこの方法を用いた加熱実験が計画されています。O モードから X モード、X モードから EBW へのモード変換が起こるためには、それぞれいくつかの条件があるため、それらの条件をすべてクリアし、プラズマ中心領域をうまく加熱するには詳細な理論解析が必要となります。

ECW の波長はプラズマ中の物理量が空間的に変化する特性長より十分に短いため、幾何光学近似が成り立ち、レイトレーシング (光線追跡) 法による数値解析が可能です。そこで、現在ヘリオトロン J における電子バーンシュタイン波加熱のレイトレーシング解析を行っています。ヘリオトロン J 装置で閉じ込められるプラズマは、非軸対称トーラスプラズマなので、磁場構造やプラズマの密度・温度の空間分布を求めるには三次元 MHD 平衡計算が必要であり、得られた MHD 平衡に対してレイトレーシング計算を行います。今回考えている加熱法では、O モードから X モードへのモード変換が重要で、うまくレイの入射角度を選ばないとモード変換は起こらず、単に O モードが反射されてレイはプラズマ内部に入らないことになります。図 1 の右上図はレイの入射点から見たヘリオトロン J プラズマであり、左下図は O から X への変換効率のカラーマップグラフです。カラーマップにおいて白い、狭い領域が X モードへの変換が可能な入射角を示しています。レイトレーシング計算の結果、この角度で入射すれば X モードに変換された ECW が、プラズマ内部領域でさらに電子バーンシュタイン波に変換され、ヘリオトロン J においても電子バーンシュタイン波加熱が可能なが示されました。

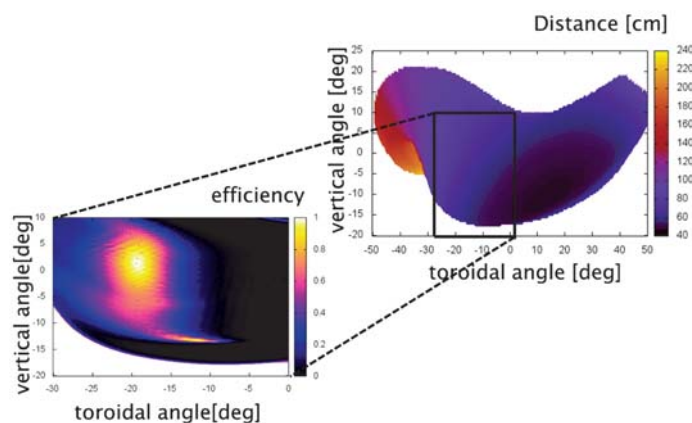


図 1

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

「ビーム放射分光法を用いたプラズマ中の密度揺動計測装置の開発」

私たちの研究室では磁場閉じ込めによる高温プラズマの基礎研究を進めており、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、精力的に磁場配位最適化研究を進めています。今回は、プラズマ中に発生する揺らぎ（揺動）を計測するための手法の開発について紹介します。

高温プラズマ中では、様々な揺動が原因でプラズマの持つ粒子や熱が損失することが知られています。そのため、その揺らぎの物理現象を理解することは、よりよい閉じ込め状態を実現するためのプラズマ制御手法の発展に有益です。特に近年、プラズマ中に発生する乱流がプラズマの輸送を支配していることが明らかになりつつあり、乱流の状況を高精度で計測する診断法の開発が進められています。

ビーム放射分光法では、イオン源を利用した中性粒子ビームをプローブとして、プラズマ中のイオン・電子との衝突励起反応による輝線スペクトルを分光計測します。輝線スペクトルには水素のバルマー系列線（ $H\alpha$ 線）がよく用いられます。この診断法の特徴は①プラズマ密度の揺らぎを輝線スペクトル強度の揺らぎとして直接観測できること、②輝線スペクトルの波長は中性粒子ビーム速度に応じてドップラーシフトするため背景光との分離が容易で、ビームと観測視線の交差する局所的な情報が得られること、が挙げられます。ヘリオトロンJでは、プラズマ加熱用の中性粒子ビームを利用したビーム放射分光計測を行います。この場合、図1（左）に示すとおり、ヘリオトロンJの磁場配位の形状は単純なドーナツ型でなく捻れているため、観測視線を上手に選ばないと局所計測ができません。磁場閉じ込めプラズマでは同じ磁気面（磁力線で編んだ入れ子状の籠）の上であればプラズマの温度・密度等の性質は等しくなります。そこで、ビームが通過する領域の観測視線を磁気面になるべく沿わせることで、同一磁気面上の密度揺動の観測ができるように工夫しました。また数値計算を用いて実効的な空間分解能を評価し、当初目標とする性能が得られたことを確認しました。

図1（中）に高速フーリエ変換したビーム放射光信号の周波数スペクトルの一例を紹介します。この放電では $f=87, 66, 23\text{kHz}$ にピークを持つ3つの密度揺動が観測されました（それぞれ図1（中）のA-Cに対応）。ピックアップコイルによる磁気揺動計測から、プラズマ中の高速イオンに起因する電磁流体不安定性が原因と考えられます。この揺動強度のプラズマ中の空間分布を調べたところ、A-Cともそれぞれ異なる揺動強度分布を持つことがわかり、揺動の性質の理解が進みました。残念ながら現在まで、明確に「乱流を捕らえた」といえる結果は得られていませんが、観測事実を一つ一つ丁寧に解釈し、研究を進めていく予定です。

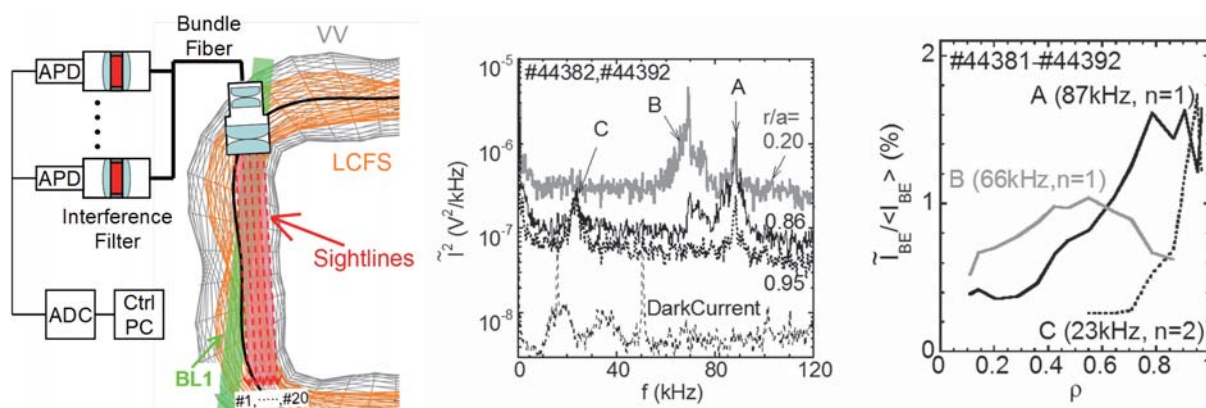


図1：（左）ヘリオトロンJに設置したビーム放射分光装置の概略図、（中）ビーム放射光信号の周波数スペクトル、および（右）揺動強度の空間分布（横軸 ρ は規格化したプラズマ小半径）。

生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野 (山本研究室)

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

「超高層大気の波動を観測ロケットと地上から同時観測」

地球大気の高さ 100 km 以上の領域は超高層大気と呼ばれます。大気の一部は太陽光に含まれる紫外線によって電離し、いわゆる電離圏（電離層）を形作っています。古くは短波の電離層反射が長距離通信のために利用されてきました。今では多数の衛星が飛翔し、GPS や衛星放送などの電波が透過します。超高層大気環境は「宇宙天気」として盛んに研究されています。「宇宙天気」では太陽面の爆発現象等が地球にもたらす「上からの」影響の研究が進められてきましたが、近年、大気波動による「下からの」影響が非常に大きいことが明らかになってきました。しかし下層から超高層大気に向かって伝搬する大気波動の経路と超高層大気への影響についての理解は未だ十分ではありません。

我々は、MU レーダーを用いて中緯度電離圏の研究を行ってきました。従来は比較的静穏な領域とされていた中緯度域ですが、時には活発な波動現象が生じます。中緯度域に特有の現象の 1 つは、電離圏 F 領域（高度 200-500 km）における中規模伝搬性電離圏擾乱（Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances; MSTID）と呼ばれる周期 1 時間程度の波動です。日本全土に配備されている GPS 受信機網を利用した全電子数（Total Electron Content; TEC）観測や 630 nm 大気光のイメージング観測により、北西-南東方向の水平波面を持ち波長は 100-300 km で、南西方向に伝搬します。一方、電離圏 E 領域（高度 90-150 km）には、スプラディック E (Es) 層に伴う不規則構造で数分から十数分の周期性を示す「準周期エコー (QP エコー)」が発生します (図 1)。2 つの現象は、どちらも夏期の夜間に頻出することや水平波面が北西-南東に伸び南西方向に伝搬するなどの類似性があります。QP エコーの出現には 1 時間程度の周期性も見られます。さらに MU レーダーと小型レーダーを用いた同時観測や、計算機シミュレーションなどによって、2 つの現象には地球磁力線を通じた相互作用が働いており、MSTID の生成に QP エコーが重要な役割を果たすことが分かってきました [1]。

電離圏の E 領域と F 領域で同時に発生するこれらの現象を一気に明らかにすることを目的として、2013 年 7～8 月に大規模な観測が行われようとしています (図 2)。地上の GPS 観測網やレーダーから MSTID や QP エコーの発生が観測されるとき、JAXA 宇宙科学研究所が内之浦宇宙空間観測所（鹿児島県）から 2 機の観測ロケット（S-520-27 号機と S-310-42 号機）を連続的に打上げます。ロケットは電離圏パラメータ（電子密度、電界など）を直接測定する他、リチウムや TMA（トリメチルアルミニウム）を放出して発光雲を形成します。この 3 次元形状を連続的に撮影することで風速が測定されます。リチウムは通常は太陽光に照らされて赤く発光するのですが今回の観測は夜間に行われます。そのため光源として月光を利用します。これは世界初の試みであり、今回の観測のなかでも特筆されます。現在は観測ロケットに搭載される機器の準備が進められています。また発光雲の撮像は飛行機から実施することが望ましいため、実現すべく努力を続けています。

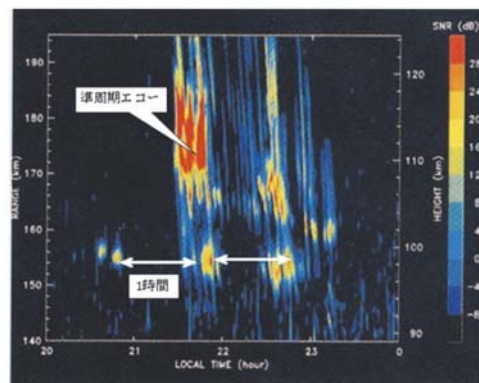


図 1: MU レーダーによる E 領域高度の QP エコーの観測例。短周期の準周期構造は Es 層の空間構造に起因することが分かっています。しかし上図から明らかなように、1 時間程度の周期をもつ変動もあります。MSTID との関連が示唆されてきました。

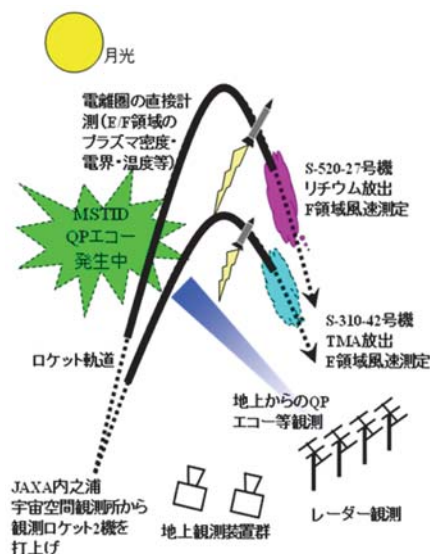


図 2: 2013 年 7～8 月に予定されている観測ロケットと地上観測の概念図。

- [1] Yokoyama, T., D. L. Hysell, Y. Otsuka, M. Yamamoto, Three-dimensional simulation of the coupled Perkins and E-s-layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **114**, A03308, 2009.

生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野 (山川研究室)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「地球放射線帯における高エネルギー電子生成メカニズム解明に挑む科学衛星観測」



図1：地球放射線帯を観測する ERG 衛星 (©JAXA)。

地球の放射線帯を観測する、我が国の科学衛星 ERG (Energization and Radiation in Geospace) ミッションがスタートしました。高エネルギーの粒子からなる放射線帯は、米国が初めて打ち上げに成功した人工衛星「エクスポーラ」に搭載した観測器により発見されました。発見者の名前をとってヴァンアレン帯ともよばれるこの地球の放射線帯ですが、その高度が地球の半径の10倍程度まで広がっていて、地球を周回している人工衛星周辺の環境として無視できない存在です。この放射線帯は大きく分けて内帯と外帯に分類されますが、特に外帯高エネルギー粒子の状態(粒子フラックス)が、地球の磁気圏活動に依存してダイナミックに変化し

ていることが知られており、その高エネルギー粒子の生成・消滅メカニズムの解明は磁気圏物理学でも、地球周辺の宇宙空間を利用していくという意味でも重要になりつつあります。この放射線帯の物理を明らかにすべく ERG 衛星が計画され2015年末打ち上げを目指して開発が急ピッチで進められています。

山川研究室では、この ERG 衛星に搭載する二種類の観測装置を担当しています。一つは、プラズマ波動観測器 (PWE: Plasma Wave Experiment)、もう一つは、「波動・粒子相互作用解析装置 (WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer)」です。PWE については従来から科学衛星に搭載してきたプラズマ波動観測装置の延長上にあるもので、一方、WPIA については、今回、まったく新しい観測装置として搭載されるものです。科学衛星における観測手法として、この WPIA は世界的にみても未だなされ

Difference of the WPIA and conventional observations

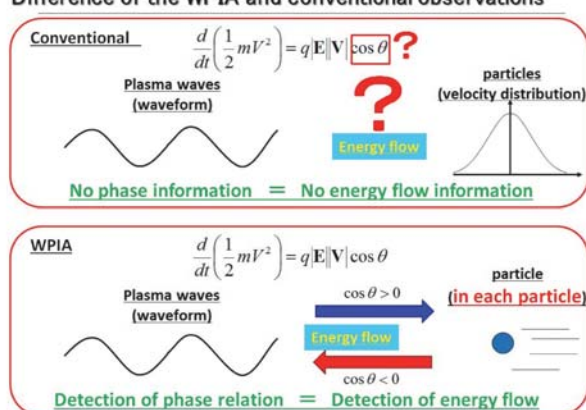


図2: WPIA(下)と従来からの観測手法(上)との違い。

た例はなく、その意味で非常にチャレンジングな計測になっています。放射線帯における高エネルギー電子の生成に関してプラズマ波動と粒子との相互作用が重要であると近年指摘されており、ERG 衛星でも波動と粒子との間でのエネルギー授受を定量的におさえることが重要なため、WPIA では、このエネルギー授受のキーとなる電界ベクトル ($\mathbf{E}$) と電子速度ベクトル ($\mathbf{V}$) との角度差を観測します (図2)。このために従来は速度分布関数として計測していた電子を、電子一つ一つとして観測し、オンボードでプラズマ波動ベクトルとの角度差を記録していきます。これにより速度分布関数では失われていた上記角度差を保

存したまま計測することができ、 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$ という、これまで観測されたことのない物理量を得ることができます。まったく新しいこの手法を京大発の観測手法として成功させるべく現在、設計を進めています。海外の関連研究者にこの観測器のことを話すと「そんなことが本当にできるのか」と驚かれます。果たして日本の科学衛星で初めて試みられるこの手法がどのようなサイエンスアウトプットを出してくれるのか、今から楽しみにしながら開発をすすめています。

生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野 (篠原研究室)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「パネル構造型宇宙太陽発電所のためのパネル位置推定を用いたビーム形成技術の研究」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Satellite/Station) の実現を目指し、SPS で用いるマイクロ波無線電力伝送技術を中心に研究開発を行っている。SPS 構想とは、地球の影に入らず地上が夜でも太陽光が当たる静止衛星軌道 (36,000km 上空) に 100 万 kW の太陽光発電衛星を配置し、雨でも減衰しないマイクロ波という電磁波を用いて衛星から地上へ無線電力伝送をして昼夜天候に関係のない CO2 フリーな発電所の実現を目指す構想である。SPS は我国の宇宙開発の目標を定めた宇宙基本計画に記載され、現在経済産業省のプロジェクトとして太陽光発電無線送電技術委員会が実施され、SPS 実現を目指して All Japan で研究開発が行われている。本プロジェクトは当研究室篠原が委員長であり、JAXA (宇宙航空研究開発機構) とも連携して特にマイクロ波無線電力伝送に関する研究を行っている。

SPS で特に重要な技術となるのが、高精度マイクロ波ビーム制御であり、高精度目標位置推定技術である。SPS では 36,000km 先の 2km サイズの受電サイトに 100 万 kW のマイクロ波エネルギービームを集中させなければならない。ビーム制御にはフェーズドアレーアンテナを用い、目標位置推定には地上の受電サイトから送られるパイロット信号の位相情報を用いる。

SPS のフェーズドアレーでは、その巨大なアンテナ面に歪みが発生し、ビーム形成に大きく影響を与える (図 1, 図 2)。そこで本研究室ではパネル位置推定を用いたビーム制御法である PAC (Position and Angle Correction) 法を用いた目標位置検出誤差低減方法について検討を行い、アンテナ面の歪みや位置推定に用いるパイロット信号の測定誤差が大きい場合でもビーム制御が可能な手法を提案した (図 3)。

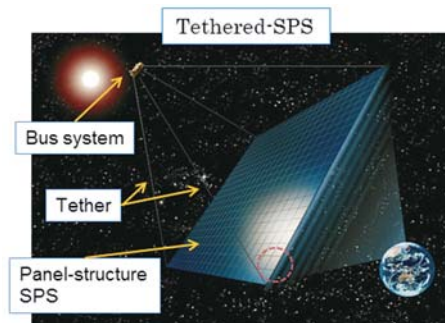


図 1：パネル構造型 SPS

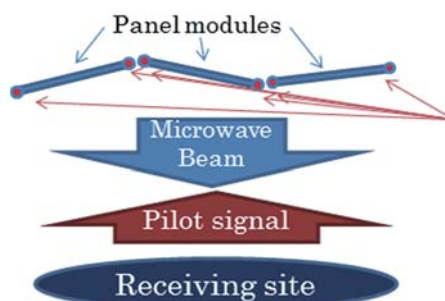


図 2：パネル構造

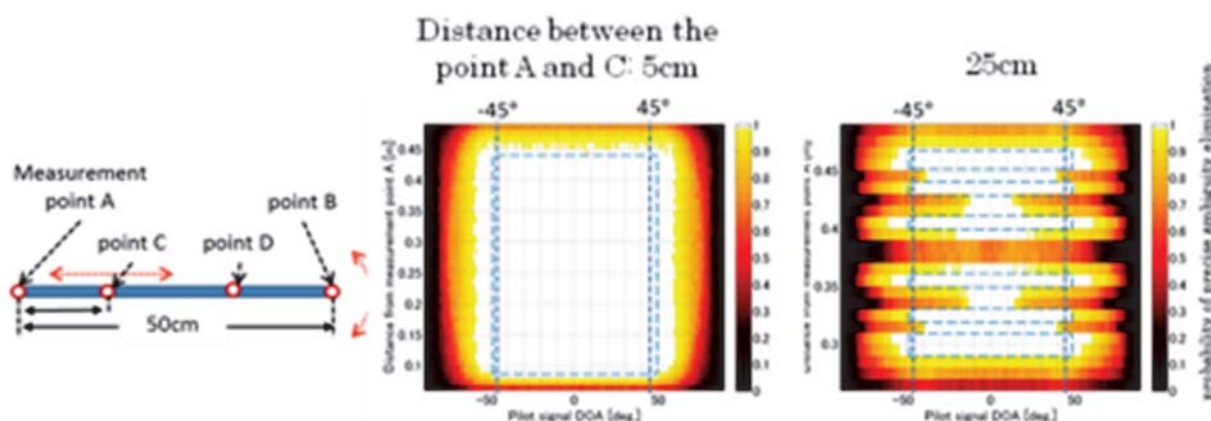


図 3：パイロット信号受信点の間隔とパイロット信号到来角、パネル位置推定誤差の関係

参考文献

Takaki Ishikawa and Naoki Shinohara, "Study on Position Estimation of Antenna Panels for Panel-Structure Solar Power Satellite / Station with Pilot Signal", Proc. of 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA'12), pp.474-477, 2012.9

博士論文概要

[課程博士一覧]

小野田 有 吾	「Trapping of Yb ⁺ Loaded through Photoionization in RF Ion Trap」 (光イオン化法で生成した Yb ⁺ の RF イオントラップ)	平成 24 年 1 月 23 日
内 山 宏 樹	「IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ技術に関する研究」	平成 24 年 1 月 23 日
向 井 清 史	「ヘリオトロン J プラズマにおけるマイクロ波 AM 反射計を用いた電子密度分布計測および粒子輸送特性に関する研究」	平成 24 年 1 月 23 日
宅 野 嗣 大	「High Frequency Switching of SiC Transistors and its Application to In-home Power Distribution」 (SiC トランジスタの高周波スイッチングとその家庭内電力配電への応用)	平成 24 年 3 月 26 日
笹 山 瑛 由	「ブレイン・マシン・インタフェースに向けた多チャネル脳波計測による脳内情報抽出法および識別法に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
小 西 武 史	「直流電気鉄道における電力需給システムの高度化に関する基礎研究」	平成 24 年 3 月 26 日
占 部 継一郎	「Spectroscopic Study of Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure」 (大気圧誘電体バリア放電の分光学的研究)	平成 24 年 3 月 26 日
奥 村 宏 典	「Formation Mechanism of Extended Defects in AlN Grown on SiC {0001} and Their Reduction by Initial Growth Control」 (SiC{0001} 基板上に成長した AlN 層の拡張欠陥の生成機構と初期成長制御によるその低減)	平成 24 年 3 月 26 日
三 宅 裕 樹	「Interface Control of AlGaN/SiC Heterojunction and Development of High-Current-Gain SiC-Based Bipolar Transistors」 (AlGaN/SiC ヘテロ接合界面制御および高電流増幅率 SiC 系バイポーラトランジスタの実現)	平成 24 年 3 月 26 日
梅 田 健 一	「周波数変調 AFM による固液界面における静電相互作用力の解明およびその表面電荷分布計測への応用」	平成 24 年 3 月 26 日
鈴 木 一 博	「3 次元フォースマッピング法による固液界面の分子スケール構造物性評価」	平成 24 年 3 月 26 日
服 部 真 史	「二酸化チタンナノチューブ光触媒を用いた水素生成・分離一体型メンブレンの開発」	平成 24 年 3 月 26 日
岩 橋 清 太	「フォトリック結晶レーザの共振特性に与える格子構造の包括的解析と機能性向上」	平成 24 年 3 月 26 日
瀧 川 信 一	「複素平面波展開法を用いたフォトリック結晶レーザの解析に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
Menaka De Zoysa	「Thermal Emission Control by Intersubband Transitions in Quantum Wells and Two-Dimensional Photonic Crystals」 (量子井戸のサブバンド間遷移と 2 次元フォトリック結晶を用いた熱輻射制御)	平成 24 年 3 月 26 日

池之上 卓 己	「超音波噴霧法による薄膜形成と有機薄膜太陽電池への応用に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
吉 田 誠	「広帯域マルチキャリア無線伝送技術に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
横 田 健 治	「通信品質向上のためのネットワークシステム制御技術」	平成 24 年 3 月 26 日
田 村 昌 也	「Research on a compact and high-performance filter for wireless LAN and suitable sensor structure for downsizing of measurement equipment based on control of electromagnetic waves」 (電磁波制御技術を用いた小型で高性能な無線 LAN 用フィルタ、及び測定装置の小型化に適したセンサ構造に関する研究)	平成 24 年 9 月 24 日
青 柳 西 蔵	「行動変容のためのオンラインコミュニティに関する研究」	平成 24 年 9 月 24 日
福 原 始	「Miniaturization and Integration of Measurement Systems for Space Electromagnetic Environments」 (宇宙電磁環境計測システムの小型集積化)	平成 24 年 9 月 24 日

小野田 有 吾 (北野教授)

「Trapping of Yb⁺ Loaded through Photoionization in RF Ion Trap」

(光イオン化法で生成した Yb⁺ の RF イオントラップ)

平成 24 年 1 月 23 日授与

超高真空中の狭い空間に閉じ込めたイオンは、周りから孤立した状態にあり、その内部状態が受ける擾乱が少ない。このため、きわめて正確な原子時計の基準や量子計算機への応用が盛んに研究されている。イオンを閉じこめる方法には、高周波 (RF) 電場を用いる RF イオントラップがよく用いられている。トラップへのイオンの導入は、通常、トラップ内で原子をイオン化して行う。イオン化方法として、加速させた電子を衝突させる電子衝撃法が用いられてきたが、最近、光イオン化法が注目されている。光イオン化法は (1) 詳細は省略するが、トラップポテンシャルを変形させイオンを加熱する効果が小さい、(2) 中間準位の同位体シフトを利用して、特定の同位体のみを選択的にイオン化できる、(3) 導入中もイオンの蛍光を観測できるので、少数個導入がやりやすい、という利点をもつ。

研究室では光時計として有望なイッテルビウムイオン (Yb⁺) の研究を進めている。光イオン化を用いた Yb⁺ の導入は他の研究機関でも採用されているが、その詳細な特性を本研究ではじめて明らかにした。

Yb 原子の光イオン化は、2 段階励起、波長 399 nm 光で基底準位 ¹S₀ から ¹P₁ 準位へ、¹P₁ 準位からさらにイオン化ポテンシャル以上に励起して行う (図 1)。波長 399 nm 光はチタニウムサファイアレーザーの第 2 高調波を、効率を高めるために光共振器内に設置した非線形光学結晶で発生させた。その際、結晶端面の反射による損失を出入射面の反射を干渉させて取り除き、変換効率を高めた。結晶の温度制御により低損失状態を長時間維持できることを示した。波長 399 nm 光を特定の同位体に同調させるために、ランプ中の Yb の飽和吸収を検出した。原子の密度を上げていくと線形吸収によるレーザー光の減衰が大きくなり、やがて飽和パワー以下になって飽和吸収信号が消失することを見出した。存在比の大きい同位体からこの状態となることを利用し、存在比の小さい同位体の信号だけを残せることを示した。

続いて、様々な条件でイオン導入速度を測定した。導入速度は導入時のイオン数の時間変化から求めた。個数の推定は、トラップ内のイオンの調和振動を電氣的共鳴で検出し、その信号の大きさから行った。トラップの非線形性から生じる個数推定の不確かさを低減する工夫をした。第 2 励起光の波長依存性を、外部共振器型紫外半導体レーザーを複数波長準備して測定した (図 2)。測定した範囲内では、イオン化エネルギー近傍が導入速度最大で、導入断面積を 40 (15) Mb と推定した。波長 369.5nm の Yb⁺ レーザー冷却光が、第 2 励起光の代替として使えることを定量的に示した。第 2 励起光がイオン化ポテンシャルより低くなると導入速度は大きく減少する一方、リユードベリ準位への励起を導入速度の増加として観測できることが分かった。第 1 励起光だけでもイオンが生成されることが知られていたが、その導入速度は 3 桁小さく ¹P₁ 準位からの非共鳴 2 光子吸収が支配的なイオン生成過程であることが分かった。また、第 1 励起で同位体混合物から特定同位体を選択的にイオン化し導入する場合、電荷交換衝突が純度を制限する要因のひとつとなる。理論的検討から、電荷交換速度よりも十分短い時間でイオン導入を終了する必要があることが分かった。同位体 171 と 174 を使って電荷交換衝突速度を測定し、純度を保って導入できる最大イオン数を推定したところ、存在比が 0.1% とともに小さい ¹⁶⁸Yb の場合のみ、電荷交換の影響が無視できないことがわかった。

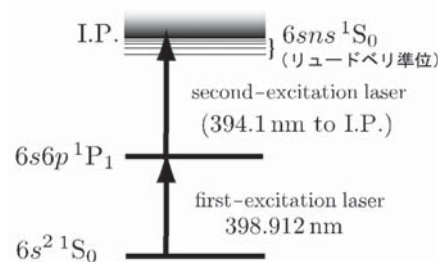


図 1 Yb 原子の準位 (関係分)

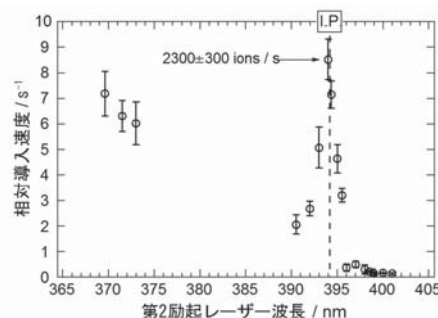


図 2 イオン導入速度の第 2 励起波長依存性

内 山 宏 樹（佐藤亨教授）

「IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ技術に関する研究」

平成 24 年 1 月 23 日授与

近年、携帯電話、情報家電、IC カード等の普及にともない、個人が利用する電子機器が様々な形で外部のネットワークと接続されるユビキタス環境がますます進展しつつあります。このようなユビキタス環境では、多種多様な電子機器やネットワークがサービス提供時に利用されるため、ユーザの利用環境に応じて適切な「安全」を提供することが必要となります。このような安全を提供するために、機器同士の正当性を確認する「認証プロトコル」や機器同士で暗号通信を行うために必要な鍵を共有する「鍵交換プロトコル」といったセキュリティプロトコルが利用されることが一般的ですが、セキュリティプロトコルはデバイス毎に固定的に利用される場合が多く、利用するサービスが増加すればするほど多数のデバイスを持ち歩く必要があり、ユーザの利便性を損ねていました。また、実サービスの開始後に利用中のセキュリティプロトコルに脆弱性が発見される場合があり、このような脆弱性への対策を迅速に行う仕組みを提供することが急務となっていました。

本論文では、このような背景に鑑み、ユビキタス環境で利用されるデバイスの中でも処理能力が低く、メモリ容量も少ない IC カードに適用可能なセキュリティプロトコルの動的なカスタマイズ技術の実現を目指し研究を実施しました。具体的には、図 1 に示すように、セキュリティプロトコルの動的なカスタマイズに適した構成として、IC カード内のアプリケーションと OS の間のミドルウェアとしてセキュリティプロトコル機能を提供するモジュールを配置する構成を提案し、IC カードの外部で生成したモジュールを置換する外部カスタマイズ方式と IC カードの内部で動的にセキュリティプロトコルのカスタマイズを行う内部カスタマイズ方式という 2 種類のセキュリティプロトコルカスタマイズ方式を開発しました。開発した IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ技術を実サービスに対して適用してゆくことにより、ユビキタス環境におけるユーザの利便性を損なうことなく安全性の向上に繋がることが期待されます。

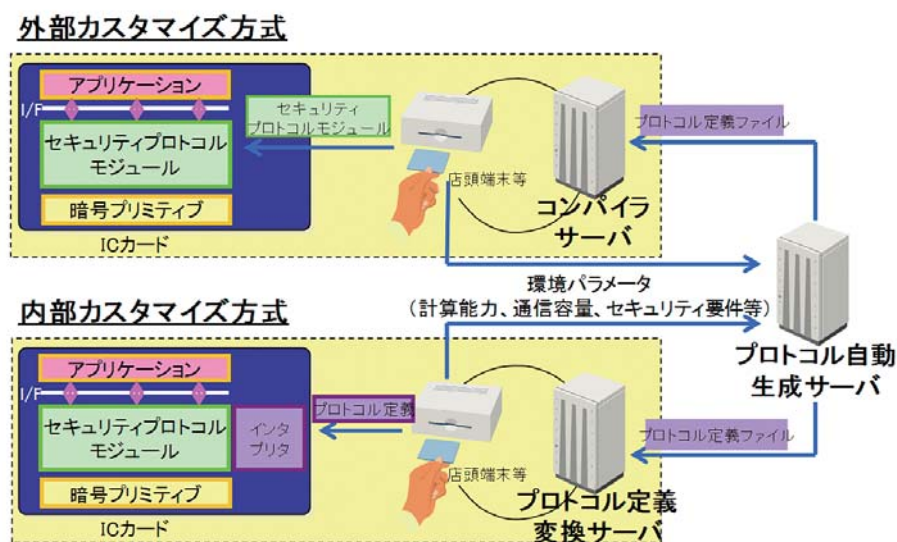


図 1：開発した IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ方式

向 井 清 史 (水内教授)

「ヘリオトロンJプラズマにおけるマイクロ波 AM 反射計を用いた電子密度分布計測および粒子輸送特性に関する研究」

平成 24 年 1 月 23 日授与

磁場閉じ込めプラズマによる核融合発電は、原理的に暴走が生じない、高レベル放射性廃棄物が発生しない、CO₂を排出しない、安定して高出力が得られる、といった長所から、その実現が期待されている。核融合プラズマ研究において、粒子輸送研究は非常に重要な研究課題の一つであり、電子密度分布計測はその基礎となるものである。本論文は、エネルギー理工学研究所の磁場プラズマ閉じ込め装置であるヘリオトロンJにおいて、電子密度分布計測装置を開発し、計測された密度分布を基に、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) プラズマの粒子輸送特性を明らかにしたものである。

研究では、粒子輸送研究に必要な、高時間分解能かつ広測定空間領域での電子密度分布計測装置として、図1に示すようなマイクロ波振幅変調 (AM) 反射計の開発を行った。ヘリオトロンJのプラズマ特性を考慮し、時間分解能を1 ms とし、予測される凹状の分布に対応できるよう波の入射モードとしてXモードを選択した。また、搬送周波数を33-56 GHzと選択することにより、線平均電子密度 $\bar{n}_e \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマで、プラズマ周辺部から中心部に渡る広い測定区間領域を実現した。開発したAM反射計を実際にプラズマ計測へと適用し、ECHプラズマでは凹状の、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱プラズマではピークした密度分布を得ることに成功した。

また、ECHプラズマにおいてガスパフを用いた密度変調実験を行い、粒子輸送解析を行うことでプラズマコア部での拡散係数 D_{core} および対流速度 V_{core} の評価を行った。背景の $\bar{n}_e$ を $0.6, 0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とし、50 Hz の密度変調を印加した。輸送解析の結果、 D_{core} は $\bar{n}_e$ が増加すると減少することが分かった。また、 V_{core} はいずれの $\bar{n}_e$ でも正の値を示しており、低密度でより大きい値を示すことが分かった。これらは、中心加熱のECHプラズマでは、外向きの対流項が粒子輸送を決定する上で重要な役割を果たしており、特に低密度領域でその影響が大きいことを定量的に示す結果である。

以上の結果は、ヘリオトロンJの最も重要な課題である、プラズマ閉じ込め磁場配位 (ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位) の実験的最適化を進める上で非常に重要な成果である。今後、粒子輸送特性の磁場配位依存性を明らかにすることで磁場配位最適化への貢献が大いに期待される。

その他、本論文では、通常的气体パフによる粒子供給時と比較し高いプラズマ蓄積エネルギーが得られる、超音速分子ビーム入射による粒子供給時の電子密度分布挙動を明らかにした。この結果は、ヘリオトロンJの粒子供給法最適化を推進する手掛かりとなる成果である。

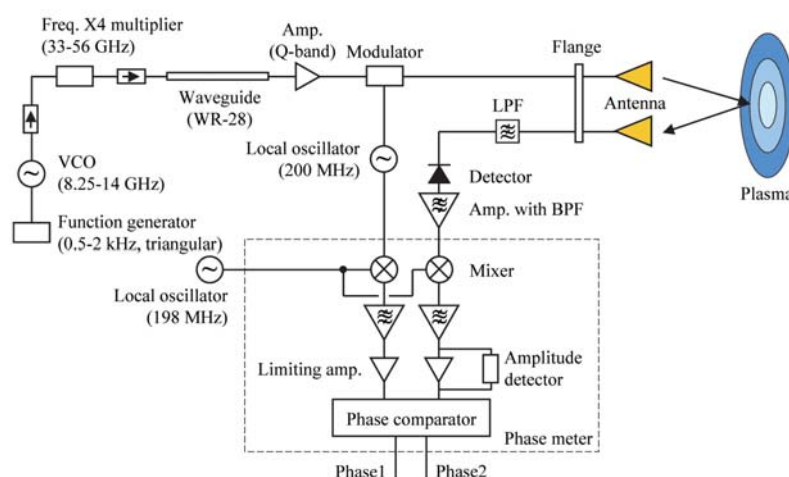


図1 マイクロ波 AM 反射計の構成図

宅 野 嗣 大 (引原教授)

「High Frequency Switching of SiC Transistors and its Application to In-home Power Distribution」

(SiC トランジスタの高周波スイッチングとその家庭内電力配電への応用)

平成 24 年 3 月 26 日 授与

近代以降の社会は、電気エネルギーおよび通信によって支えられているとって過言ではない。電気通信は、モールス信号のように符号化されたデジタル通信に始まり、次第にアナログへ変遷し、現在、再びデジタル通信が全盛を迎えている。一方の電気エネルギーの供給は、エジソン、テスラの直流交流論争の時代から今まで、一貫してアナログのネットワークをもとに発展してきた。しかし、電源の分散化など近年の電力供給を取り巻く構造の変化を推進するためには、ネットワークの変革が求められる。そこで、本研究では家庭内での配電について、電気通信の進化に倣い、「電力のデジタル化」を提案し、その原理検証を行った。

本研究では、電力のデジタル化の手法として、TCP/IP 網での情報通信に用いるパケットのように電力を適当な単位で分割する「電力のパケット化」を検討した。この方法は、分割された電力に、その電力の量、電圧、直流交流の別、発電した電源の種類、電力を要求している負荷などの情報を付加し、この情報にもとづいて任意の電源から任意の負荷へ配電するものである。これは、電力と情報を統一して取り扱うことを意味している。この方法により、負荷の特性にあった適切な電源からの電力を分配することができ、分散電源の使い分けや需給バランスの調整が可能になる。しかしながら、電力と情報を統一して扱うためには、パケットを生成する変換器において、電力分配に必要な大きさの電力を、情報処理に必要なだけの速度でスイッチングする必要がある。そこで、SiC 半導体トランジスタの高耐圧、大電流密度、高速スイッチング性能に着目し、電力の高速スイッチングが可能であることを実証した。図 1 に 30W の抵抗負荷を 200V、5A の SiC JFET によって 15MHz でスイッチングした場合の波形を示す。この結果をもって、電力パケットの生成および伝送の実証実験を行った。パケット生成と振り分けを行うハードウェアをそれぞれ作成し、2つの電圧源と2種類の負荷（ランプ、ファン）をそれらの装置を介し一組のケーブルでつないだ。電圧源とケーブルの間にはパケット生成装置が、ケーブルと負荷の間にはパケット振り分け装置が接続される。それぞれの負荷にアドレスを割り振り、パケット内の負荷アドレスを参照し正しく負荷にパケットを振り分けられるかを確認した。図 2 に振り分け前後のパケットを示す。A 部および B 部でパケットが切り替わっている。この実証実験をもって、パケットによる電力伝送の実現性が示された。

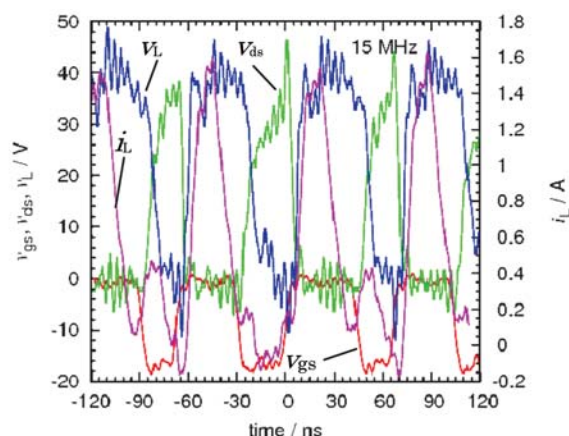


図 1： SiC JFET の 15MHz スwitching 波形

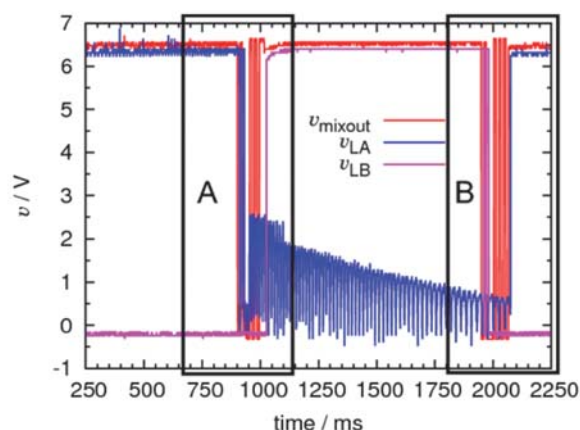


図 2：電力パケット伝送実験の結果

笹 山 瑛 由 (小林教授)

「ブレイン・マシン・インタフェースに向けた多チャンネル脳波計測による脳内情報抽出法および識別法に関する研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

近年、非侵襲計測法の進展に伴い、ヒトの高次脳機能に関する研究が活発に行われるようになってきている一方、工学分野において末梢神経系、感覚器、運動器などを介さずに、脳とコンピュータ間で直接情報を伝達する技術であるブレイン・マシン・インタフェース (BMI) が注目を集めている。現在の BMI 研究は、抽出しようとしている信号が識別に適した信号であるか否かを検討していないものが多い。そこで本研究では、まず 2 種類の脳波 (EEG) に基づく BMI に関して、多チャンネル EEG 計測によって生理学的な見地より検討を行った。一つは、左右手首屈伸運動時およびそのイメージ時における脳波律動、もう一つは定常体性感覚誘発電位に基づく左右示指への注意識別である。その後、左右手首屈伸運動における律動変動に基づく BMI について特定の脳部位の信号を高精度に抽出するため、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) 賦活部位を線形制約とする EEG 空間フィルタに基づく手首屈伸運動の左右識別について検討した。

左右手首屈伸運動時およびそのイメージ時における脳波律動の識別法として、累積分布関数より同定した閾値を用いた左右識別法を提案した。まず、信号を限局するためスプライン・ラプラシアン解析を用いた。その後、ウェーブレット解析による時間-周波数解析を行い、周波数帯域や時間、EEG 電極を同定し、最後に、左右識別の閾値を累積分布関数より取得して識別した。提案手法は、機械学習である従来法よりも識別率は有意に高かった。

定常体性感覚誘発電位に基づく左右示指への注意識別法として、定常体性感覚誘発電位の抽出方法として、狭帯域フィルタ、主成分分析および独立成分分析を用い、得られた独立成分について、定常体性感覚誘発電位マップを評価ベクトルとした評価式による独立成分の同定法を提案し、さらに、同定した独立成分を用いて左右示指への注意識別をする手法を提案した。識別率は現段階では十分高いとは言えないが、本手法による定常体性感覚誘発電位に基づく BMI の構築の可能性が示された。

左右手首屈伸運動時における脳波律動の識別法として、fMRI 賦活部位を線形制約条件とする EEG 空間フィルタに基づく手首屈伸運動の左右識別法を提案した。まず、MRI データより実頭部ボクセルモデルを作成した。次に、左右手首屈伸運動時の fMRI 計測を行い、得られた fMRI 賦活領域を線形制約とする、線形制約付きプリホワイトニング空間フィルタを設計した。最後に、同空間フィルタで推定された事象関連同期・脱同期の信号強度を fMRI 賦活領域内で推定し、これを特徴量として左右識別した (図 1)。この提案手法は、EEG データのみを用いて識別する従来の手法よりも識別率が有意に高いことから、EEG に加え MRI および fMRI のデータを複合的に用いることで、識別率が向上することが分かった。

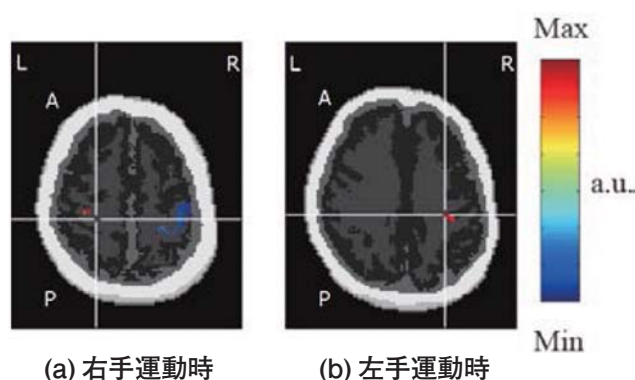


図 1: β 律動の信号源推定結果

小 西 武 史 (雨宮教授)

「直流電気鉄道における電力需給システムの高度化に関する基礎研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

本研究では、直流電気鉄道における電力需給システムの高度化を実現するため、電力の需要側と供給側に対する新技術の適用を検討した。需給側からのアプローチとして、同期トルクと非同期トルクの両立が可能で高効率、高トルク密度、高出力、定トルクに近い垂下加速特性、過負荷に対して乱調や脱調しにくい安定した出力特性など、既存の回転機では実現できない高性能化ならびに高機能化が達成できる高温超伝導誘導 / 同期電動機 (HTS-ISM) について、電車主電動機適用時の特性を明らかにした。供給側からのアプローチとして、電車線の電圧降下補償、回生エネルギー有効利用などの電力供給システムの高品質化、省エネルギー化を実現できる地上用電力貯蔵システムについて、解析、実証試験を通じてその特性を明らかにした。

供給側である主電動機の検証においては、各電動機の回路定数を求め、電車の主電動機に適用した際の入力電力と電力損失 (効率) を推定した。まず、ある直流電気鉄道の電力負荷特性から、直流直巻電動機 (DCM) を主電動機に適用した際の電車走行時のトルク、電力損失などの各特性を類推した。次に、そのトルク特性を得るために、異なる電動機 (一般的な常温かご形誘導電動機 (N-IM)、HTS-ISM) を適用した場合に必要な回路定数を設定した。HTS-ISM に関しては高温超伝導体の電磁現象から考えられる超伝導電動機の回転原理をもとに等価回路を導くことにより、トルク特性を得た (図 1)。各電動機の入力電力を比較すると、電力損失に関しては HTS-ISM が最も小さくなることを定量的に示した。その結果、HTS-ISM の電車主電動機への適用により、力行電力の抑制効果、回生エネルギーの増大効果が得られることを示した。

需要側である電力貯蔵システムの検討では、電力貯蔵媒体として電気二重層キャパシ (EDLC) を想定し、電力貯蔵システムを過渡解析モデルによる計算、ミニモデルによる基礎試験、実証試験を通じて検証した。だが、電力貯蔵システムの充放電制御は、電車線の電圧が「充電開始電圧」を上回ると充電、「放電開始電圧」を下回ると放電する方式 (固定電圧制御) が当初適用されていたため、必ずしも適切な充放電特性が得られるとは限らなかった。そこで、「充電開始電圧」と「放電開始電圧」を電力貯蔵媒体の充電状態に応じて変動させることによって、電力貯蔵システムが充電と放電の何れの動作にも常に対応できるように機能する制御手法 (可変電圧制御) を提案した。

本研究のまとめとして、電力貯蔵システムと、HTS-ISM の両者を直流電気鉄道に導入した場合の省エネルギー効果を、電力シミュレーションを用いて評価した。電動機の相違 (N-IM と HTS-ISM)、電力貯蔵システムの有無、充放電制御手法の相違 (固定電圧制御と可変電圧制御) による使用エネルギーと電圧変動を比較した (図 2)。その結果、現状の制御手法を改良した電力貯蔵システムを適用することにより、回生エネルギーのさらなる活用が見込まれ、かつ HTS-ISM の導入により 3 ~ 4% 程度の省エネルギー効果が発揮されることを示した。同時に、HTS-ISM と可変電圧制御を適用した電力貯蔵システムの適用により、系統の標準直流電圧を 2 ~ 7% 改善する効果を示した。

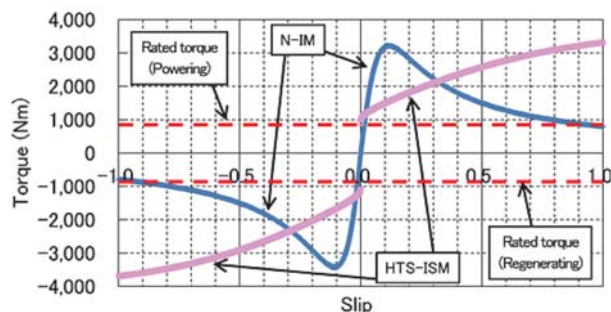


図 1 N-IM、HTS-ISM のすべりトルク特性の解析結果

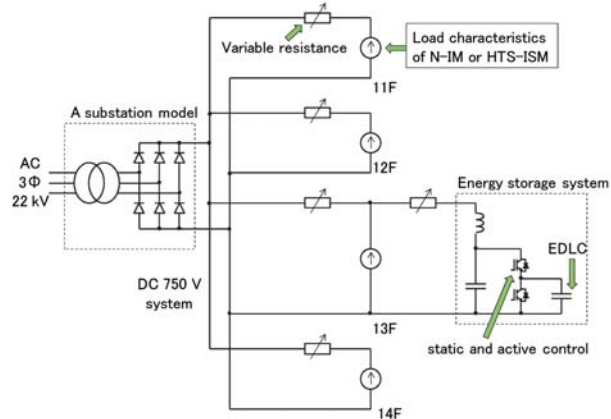


図 2 全体システムの検証回路構成

占 部 継一郎 (高岡教授)

「Spectroscopic Study of Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure」
(大気圧誘電体バリア放電の分光学的研究)

平成 24 年 3 月 26 日 授与

大気圧下で低温プラズマを生成することにより、従来の低圧プラズマ材料プロセスの大幅なコストカットが実現し、さらに液体やバイオマテリアルに対するプロセスが可能であることから、世界中で大気圧プラズマに関する研究が精力的に進められている。また、近年新しい学術分野としてプラズマ医療工学の研究も開始されるなど、今後も本分野の研究は拡大が続けると考えられる。本論文では種々の大気圧プラズマ生成法の中で空間均一性・熱非平衡性（ガス温度が上昇しない）に優れた誘電体バリア放電を研究対象とし、分光学的手法によるプラズマパラメータの診断や放電機構の解明、さらには解明したメカニズムを応用した放電状態の制御法の研究を行った。（図 1）

大気圧下で安定したプラズマを生成するには、パッシェンの法則に従い放電空間を mm オーダ以下にする必要があり、分光測定においてもサブ mm の空間分解能が必要となる。本研究では十分な時空間分解能が得られるレーザ吸収分光法やレーザ誘起蛍光法、CO₂ レーザヘテロダイン干渉計などを用い電子や励起粒子の時空間分布測定結果から誘電体バリア放電の放電機構を明らかにした。また、広帯域かつコヒーレントな光源である光周波数コムを用いた新規分光計測法の研究開発も並行して進め、アルゴン準安定励起原子の吸収スペクトル測定に成功した。

上記の研究結果を基に、不安定なフィラメント状放電となる傾向が強いアルゴンガス中での誘電体バリア放電を、有機・無機分子の添加により安定なグロー状放電に遷移させた。（図 2）2つの放電状態間の遷移現象には非線形性の存在が示唆され、近年報告が相次いでいる大気圧放電中の非線形現象（自己組織化・カオス）の 1 種であると考えられる。このように、大気圧プラズマはプロセス用プラズマ源として魅力的であると同時に、反応拡散系非線形現象のモデル実験としても非常に有用であり、今後この分野における研究の発展も大いに期待される。

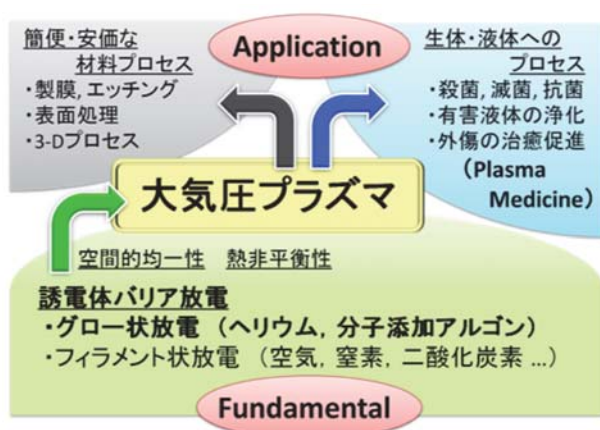


図 1：大気圧プラズマ研究の展開と本論文の研究対象である誘電体バリア放電の位置づけ

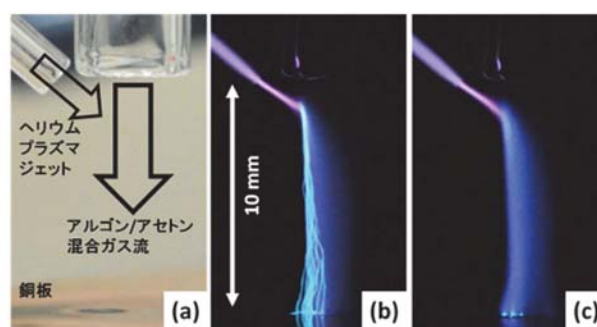


図 2：アルゴンガス流中誘電体バリア放電のアセトン添加率 A による放電形態制御
(a) 装置構成 (b) フィラメント状放電 $A = 0.15\%$
(c) グロー状放電 $A = 0.55\%$

奥村 宏典 (木本教授)

「Formation Mechanism of Extended Defects in AlN Grown on SiC {0001} and Their Reduction by Initial Growth Control」

(SiC{0001} 基板上に成長した AlN 層の拡張欠陥の生成機構と初期成長制御によるその低減)
平成 24 年 3 月 26 日授与

殺菌や化学分析装置の小型化・低消費電力化に向けて、深紫外発光デバイスが着目されている。深紫外発光用材料として、禁制帯幅 6.0 eV (波長 207nm 相当) を有する直接遷移型半導体の AlN が有力である。AlN 成長には、格子定数差の小さい ($\sim 1\%$) SiC が最適な基板の一つである。しかし、SiC{0001} 基板上 AlN 成長層には、高密度の貫通転位 ($\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) や、積層不整合境界 (SMB) と呼ばれる面欠陥が発生する。高効率の深紫外発光デバイスの実現には、AlN 層中の欠陥低減が不可欠である。

本論文は、分子線エピタキシ (MBE) 法を用いた、ステップ高さを制御した SiC{0001} 基板上への高品質 AlN の結晶成長、および透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた AlN 層の欠陥評価について報告している。以下に示すように、大面積 SiC{0001} 基板上への高品質 AlN 成長方法を提案し、実際に、現在報告されている中で最高品質の薄膜 AlN 成長に成功した。また、MBE 法による低温 (650°C) AlN 成長においても、非常に優れた光学特性が得られることを初めて示した。本論文は、新たな高品質 AlN 成長方法を提案するものであり、深紫外発光デバイス研究開発の新たな方向を示すものである。

1. 高温水素ガスエッチングによる SiC{0001} 基板表面のステップ高さ制御

ガスエッチング条件や基板オフ方向の異なる表面を詳細に観察・制御し、6H-SiC (0001) では、2 インチウエハの 30% 領域で 6bilayer (図 1 (a))、全面で 3bilayer 高さのステップを均一に得ることができた。

2. 2H-AlN (0001) 層中の拡張欠陥の詳細な観察

SiC 基板のステップ端で発生する SMB や貫通転位列の高分解能 TEM 観察を行い、発生機構を詳細に調べた。また、SiC 上 AlN 層の臨界膜厚が予想を大きく上回る 700 nm 以上であることを明らかにした。

3. 初期成長制御による高品質 2H-AlN {0001} 結晶成長

Ga を AlN 成長直前に 2 原子層照射し (サーファクタント効果)、かつ窒素プラズマ点灯直後に AlN 成長を開始することで、AlN 層の貫通転位密度を約二桁 ($4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$) 低減することに成功した (図 1 (b))。

4. 高品質 2H-AlN (0001) 層の光学特性

AlN 層の低温 PL 測定を行ったところ、非常に鋭い自由励起子ピーク (7.1 meV) が得られた (図 2)。

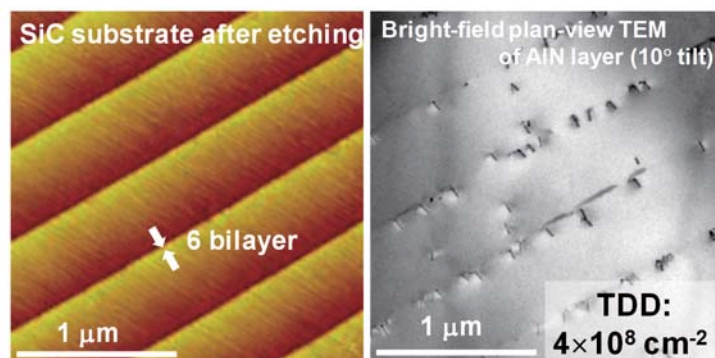


図 1 : (a) 高温水素ガスエッチング後の 6H-SiC (0001) 基板の表面モフォロジー。(b) 6H-SiC (0001) 基板上に成長した厚さ 300 nm の AlN の平面 TEM 像。

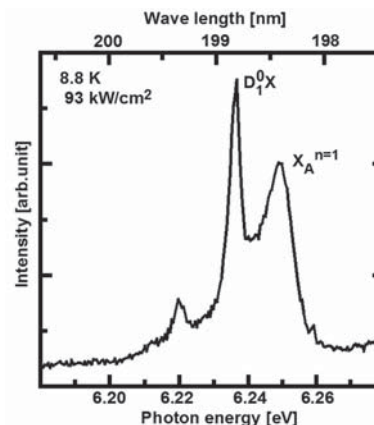


図 2 : AlN の低温 PL 測定結果。

三宅 裕 樹 (木本教授)

「Interface Control of AlGaN/SiC Heterojunction and Development of High-Current-Gain SiC-Based Bipolar Transistors」

(AlGaN/SiC ヘテロ接合界面制御および高電流増幅率 SiC 系バイポーラトランジスタの実現)

平成 24 年 3 月 26 日授与

本論文は、次世代大電力変換用半導体素子として期待される、SiC バイポーラトランジスタ (BJT) に関する研究をまとめたものである。特に、BJT の電力変換効率を決める最重要指標、電力増幅率の向上に重点を置いている。本論文では、デバイス設計、エピタキシャル成長、デバイスプロセスの観点から研究を行い、過去最高の電流増幅率 (>250) と耐圧 ($>17\text{kV}$) を実現した。また、さらなる電流増幅率向上に向けて、III 族窒化物半導体 (III-N) をエミッタとして用いた、III-N/SiC ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) についても研究を行っている。SiC 上への III-N の成長、III-N/SiC 界面制御、デバイスプロセスの構築を行い、世界で初めて III-N/SiC HBT のエミッタ接地電流増幅動作を実現した。

既存の電力変換素子は、Si ベースのパワー半導体 (例えば MOSFET や IGBT) が用いられている。これらは、高性能かつ低コストであり、現在のパワーエレクトロニクスの一翼を担っている。しかしながら、その変換効率や動作温度にはある程度の限界があり、Si 半導体そのものの物性値からきまる理論限界を超えることはできない。そこで、特にパワー素子用半導体として、優れた物性を有する、SiC を用いたトランジスタへの期待が高まっている。パワー素子には様々な形態があるが、本論文では、1-10kV クラスの電力変換で有望なバイポーラトランジスタを選択している。理論的には優れた特性が期待される SiC BJT であるが、素子の損失を決める、電流増幅率の値が極端に小さく、実用化には至っていない。

上記問題を解決すべく、(1) SiC BJT のエピ方法の工夫による界面再結合低減、(2) p-SiC ベース中の深い準位を低減するプロセスを用いたバルク再結合低減、(3) 表面保護膜の形成手法検討による表面再結合低減、を考案し、過去最大の電流増幅率 257-439 を実現した。また空間変調 JTE と呼ぶ、素子端部での電界緩和構造を設けることで、過去最高耐圧 17kV を実現した。

さらなる電流増幅率向上に向けて、AlGaN をエミッタとして用いた AlGaN/SiC ヘテロ接合バイポーラトランジスタに関する研究も行った。AlGaN/SiC 界面をいかに作るかが、AlGaN/SiC HBT の性能を左右する最も重要なポイントであり、(1) SiC 上への AlGaN 成長方法の工夫、(2) AlGaN/SiC 界面のバンドアライメント制御、(3) AlGaN/SiC 界面の電流輸送機構を詳細に研究した。結果、AlGaN/SiC HBT として世界初となるエミッタ接地電流増幅動作 (増幅率 >10) を達成した。

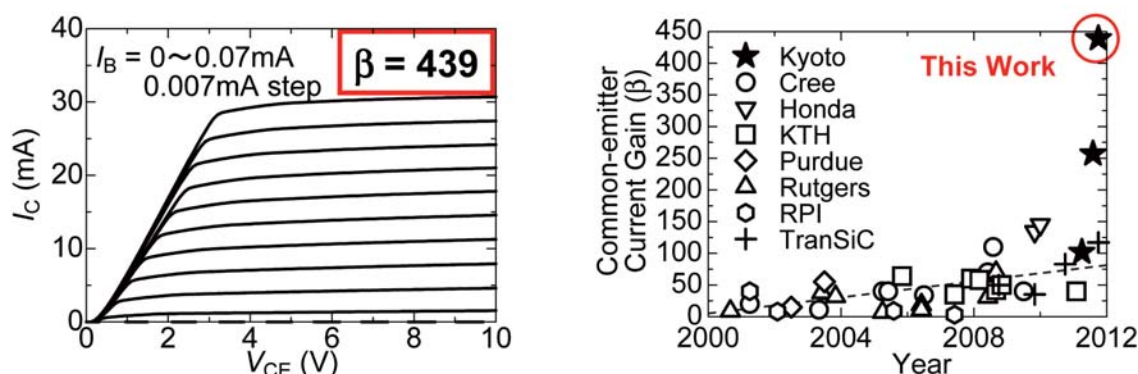


図 (左) 作製した SiC BJT の電流電圧特性 (右) 作製した SiC BJT の電流増幅率のベンチマーク

梅 田 健 一 (松重教授)

「周波数変調 AFM による固液界面における静電相互作用力の解明およびその表面電荷分布計測への応用」

平成 24 年 3 月 26 日授与

近年のリソグラフィーを始めとする微細構造加工する技術の急速な発展により、高度情報化社会が形成され、人々の生活スタイルが大きく様変わりしてきている。一方で、こうした top-down 的な手法では微細構造作製に限界が近づいてきており、電析や生体分子の自己組織化現象など溶液中における特異な現象を生かした bottom-up 的なデバイス開発手法に注目が集まっている。近年、低雑音・低振幅モードの採用により、周波数変調型の AFM (Frequency Modulation Atomic Force Microscopy: FM-AFM) は液中環境下においても超高真空中と同様に試料表面の構造を原子・分子スケールで実空間計測することが可能であることが明らかとなった。この手法を更に発展させ、溶液中においても真空中と同様に表面電位・物性計測が可能にすることで、次世代のデバイス開発のための基盤技術を確立することが可能であると考えられる。本論文では固液界面における FM-AFM を用いた局所電荷密度分布計測手法の開発を目的として研究を行った。

超高真空中では、探針 - 試料間に交流電圧を印加することによる、ケルビンフォース顕微鏡 (Kelvin Probe Force Microscopy: KPFM) を用いることで、試料表面の表面電位分布を原子・分子スケールで可視化することが明らかとなっているが、溶液中において同様の測定を行ったという報告は未だなされていない。この手法を直接応用することを試み、実験結果の詳細な解析を行った結果、表面張力による寄生振動および電気二重層による AC 電場の遮蔽効果によって、溶液中では KPFM と同様の方法では局所表面電位計測が不可能であることを明らかにした。一方で、これらの原理を利用することで、ピエゾ励振法に見られる液セルやホルダーによる寄生振動を生じない静電励振法や高周波静電気力励振法の開発に成功した。図 1 に示すように静電励振法を用いて溶液中において明瞭な原子像を得ることができることを明らかにした。

更に上記の知見を取り入れることで、探針と試料表面に存在する拡散二重層の重なりにより生じる電気二重層力を用いた局所電荷分布計測の開発を行った。図 2 に開発を行った光熱励振法実験セットアップを示す。カンチレバーの熱的に励振することで寄生振動の問題を解消し、定量的な力計測が可能にしようとした。この装置を用いて DNA 分子が固定化された poly-L-lysine がコートされた白雲母表面上において周波数シフトマップ測定を行い局所的な電気二重層力計測を行った。その結果得られた DNA 分子上での電荷密度は理論値である 0.15 C/m^2 とほぼ同じ値であることが分かった。本研究において、FM-AFM を用いた固液界面における分子スケールでの電荷密度計測手法の開発に成功した。

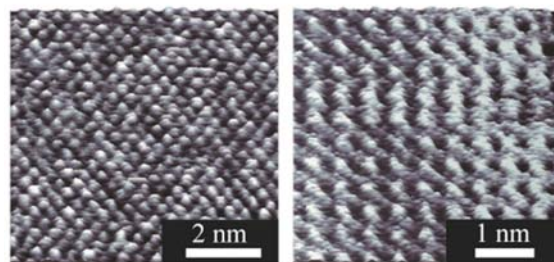


図 1：静電励振法を用いた KCl 水溶液中での原子像観察、(a) 白雲母、(b) 塩化カリウム。

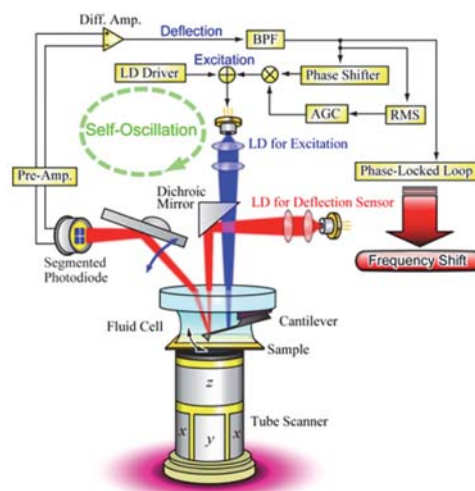


図 2：開発を行った光熱励振法セットアップ。

鈴木 一 博 (松重教授)

「3次元フォースマッピング法による固液界面の分子スケール構造物性評価」

平成 24 年 3 月 26 日授与

固液界面は近年注目を集めている。プリンタブルエレクトロニクス分野においては、デバイスを低コストで作製可能であるという利点から、液体を基板上に滴下し配線やトランジスタを作製する技術の研究が行われている。その際、液体の基板への濡れ性の制御が重要となるが、濡れ性は基板の親疎水や固液界面近傍に形成される溶媒和構造と関連する。固液界面近傍にはそれだけではなく電気二重層が形成される。帯電した表面近傍に対イオンが引き寄せられ、バルク中よりイオン濃度が高い領域を電気二重層と呼び、そこへは電気エネルギーの貯蔵が可能であり、その性質を利用した蓄電デバイスの研究が盛んに行われている。上記の研究には、溶媒和構造や電気二重層のナノスケールでの局所的な評価をする手法が必要とされているが、十分な評価手法が確立していないのが現状である。本論文は液中動作周波数変調検出方式原子間力顕微鏡（液中 FM-AFM）を用いた固液界面の溶媒和構造と電気二重層の評価に関する研究成果である。

液中 FM-AFM で探針に働く溶媒和力や電気二重層力を正確に測定することで、固液界面の溶媒和構造や電気二重層をナノスケールで評価することを提案した。カンチバールの励振方法には圧電励振法や光熱励振法があるが、後者を採用することで、正確な力の測定が可能であることを示した。図 1 に開発した光熱励振法を用いた液中 FM-AFM の装置構成を示す。親水性基板の白雲母上の水和構造と疎水性基板であるグラファイト上のそれを比較した。フォースマッピング測定を行った結果、白雲母表面上の水和構造は白雲母の表面構造に依存した面内方向に不均一な構造を有する一方で、グラファイト上においては面内方向には一様な水和構造が形成されることが確認された（図 2）。この結果は水分子が強く吸着するサイトがグラファイト上には存在しないことを示す。

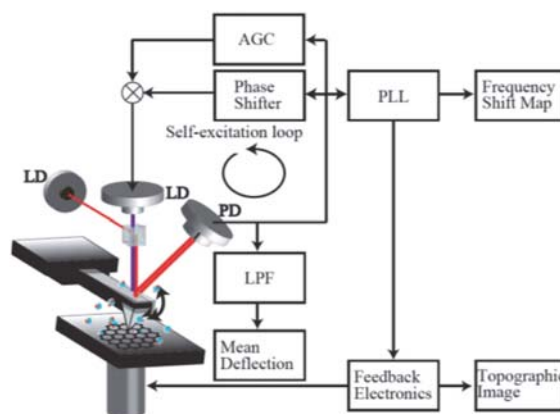


図 1：光熱励振法を用いた FM-AFM の装置構成。

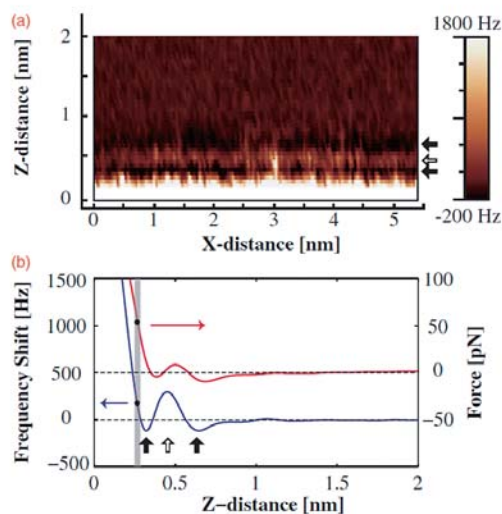


図 2: (a) 超純水 / グラファイト界面でのフォースマップ。矢印は面内方向に一様な水和構造を示す。 (b) (a) を面内方向に平均化したカンチバールの共振周波数変化 - 探針試料間距離曲線とそれを探針に働く力に変換した曲線。

服 部 真 史 (松重教授)

「二酸化チタンナノチューブ光触媒を用いた水素生成・分離一体型メンブレンの開発」 平成 24 年 3 月 26 日授与

化石燃料の枯渇化や、地球温暖化といった地球規模でのエネルギー問題が深刻化している中、化石燃料に代わるクリーンエネルギー源として水素エネルギーが期待されている。しかし、水素エネルギー社会の実現には多くの課題があり、その中のひとつに水素の運搬・貯蔵に大掛かりな設備が必要であることが挙げられる。この問題の画期的な解決策として水素を運搬するのではなく、オンサイトで適時必要な水素を製造する小型の水素改質器が考えられる。しかし、このような小型水素改質器開発に向けても問題が多く、最も大きなものに水素製造において、水素の発生と副生成物からの高純度化を行う機構が別々に必要となり、水素製造装置全体が大型化してしまう問題がある。

一方、本研究室では水素製造技術のひとつとして二酸化チタン (TiO_2) 光触媒を用いた光分解水素生成に着目して研究を進めてきた。そして、これまでに得られた光分解水素生成に関する知見から TiO_2 光触媒を用いた水素生成と分離を同時に行う高機能モジュールの着想を得た。この水素生成と分離を同時に行う高機能モジュールは、従来の水素製造装置の問題を克服した、液体燃料から高純度の水素をオンサイトで生成する小型改質器への応用が期待できる。

本論文では、将来の携帯型水素エネルギー源の開発に向け、このような高機能モジュールの実現を目指した研究について記述をしている。

TiO_2 光触媒を用いた水素生成と分離を同時に行う高機能モジュールとして最適な構造として、図 1 に示すような、酸化チタンナノチューブアレイ (TNA) と Pd 水素分離膜を一体化した構造を考案した。そして、実際にこのような構造を作製する手法として、TNA 表面上に形成した Pd を剥離することで、Pd 膜表面上に TNA を転写する手法を独自に考案し、TNA/Pd 二層構造の薄膜の作製に成功した。また、実際に作製した薄膜を用いてメタノール、エタノールの光分解によって純度 100 % の高純度の水素を抽出することに成功した。図 2 にその結果を示す。また、TNA の物性に関する詳細な評価に向けた研究として、新たに単一酸化チタンナノチューブ (TNT) の電極間架橋構造の電流 - 電圧特性から、単一 TNT の移動度の評価手法を確立した。

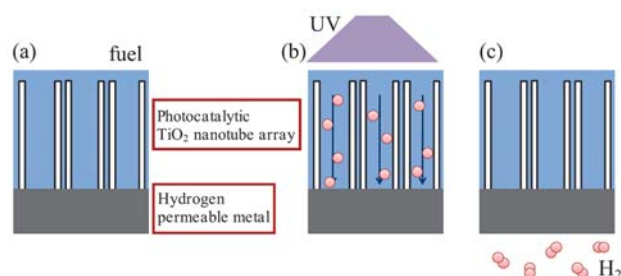


図 1 : (a) TNA 光触媒と Pd 水素透過性金属膜の二層構造. (b) TNA 光触媒部での水、アルコールの光分解による水素、プロトンおよび副生成物の生成. (c) Pd 水素透過性金属による水素の高純度化.

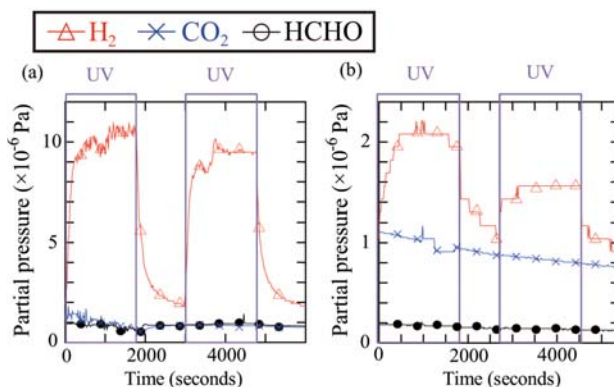


図 2 : TNA/Pd 薄膜を通過した各種生成ガスの分圧変化. (a) メタノール光分解時. (b) エタノール光分解時.

岩 橋 清 太 (野田教授)

「フォトニック結晶レーザの共振特性に与える格子構造の包括的解析と機能性向上」

平成 24 年 3 月 26 日授与

フォトニック結晶レーザ (図 1 (a)) は、2 次元大面積発振を特徴とする半導体レーザであり、従来は実現困難であった単一モード高出力動作やビーム出射方向の制御、多様なビーム形状の生成が可能であるなど、次世代の半導体レーザとして期待されている。本論文は、フォトニック結晶レーザの共振特性を決定する根本原理である格子構造に着目し、それらの包括的解析と機能性の向上に向けた検討を行った結果をまとめたものである。

まず、格子構造に対する共振特性の本質理解のために、その対称性に着目し、解析を行った。従来用いられてきた格子構造は、正方格子と三角格子であったが、より一般化した面心長方格子を基本として、格子構造の変化に伴う様々な共振特性の振る舞いを理論・実験双方から系統的に解析した [1]。図 1 (b) は作製した面心長方格子構造の電子顕微鏡像であり、格子角度 θ をパラメータとすることで、従来の正方格子 ($\theta = 90^\circ$) や三角格子 ($\theta = 60^\circ$) も含め、共振特性の包括的な理解が可能となる。その結果、モード縮退の物理的解釈やモード結合のメカニズムなど、格子構造に対する共振モードの本質が明らかとなり、また対称性を考慮することで、高次の偏光分布を有するビーム形状の生成にも成功した [2] (図 2)。

一方で、格子構造の一般化により、設計自由度は、従来の限定された格子範囲に比べ格段に拡がり、様々な機能性向上の検討も行われた。フォトニック結晶レーザの単一モード発振の更なる安定化・高出力化に向けて、より幅広い最適設計が可能となり、室温にて世界最高である出力 2W の単一モード高出力動作に成功した。また、ビーム出射角制御において、格子を二重に組み合わせる従来の方式を、単一格子にて実現し、より簡便な設計指針を示した。

以上の成果は、フォトニック結晶レーザの共振モード形成の物理的な理解を与えると同時に、応用に向けた様々な機能性の向上にも成功しており、今後の半導体レーザの進展に大きく貢献するものと期待される。

参考文献

- [1] S. Iwahashi, K. Sakai, Y. Kurosaka, and S. Noda: "Centered-rectangular lattice surface-emitting photonic-crystal lasers", Physical Review B, vol. 85, no. 3 035304 (2012).
- [2] S. Iwahashi, Y. Kurosaka, K. Sakai, K. Kitamura, N. Takayama, and S. Noda: "Higher-order vector beams produced by photonic-crystal lasers", Optics Express, vol.19, no. 13 11963-11968 (2011).

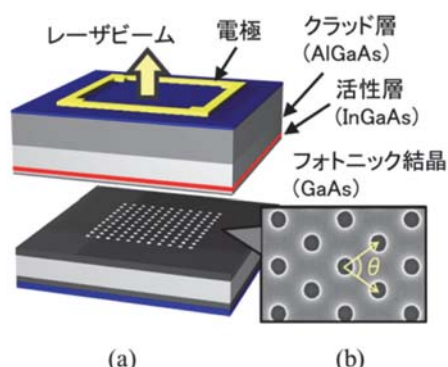


図 1 (a) フォトニック結晶レーザの模式図
(b) フォトニック結晶の電子顕微鏡

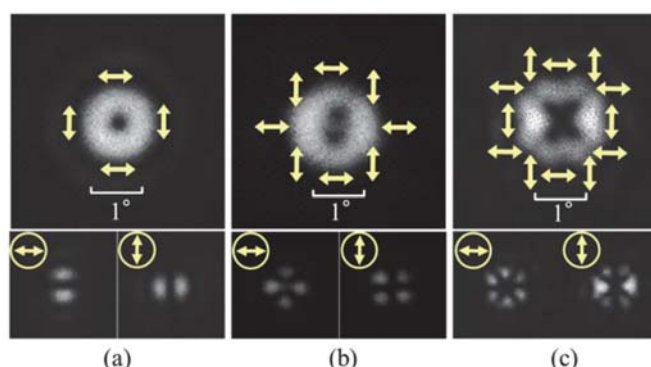


図 2 フォトニック結晶レーザの出射するビーム形状と偏光状態 (a) 基本次 (b) 2 次 (c) 3 次の偏光分布

瀧 川 信 一 (野田教授)

「複素平面波展開法を用いたフォトニック結晶レーザの解析に関する研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

本論文は、次世代光源として期待されるフォトニック結晶レーザにおいて、フォトニック結晶特性とレーザ利得／損失を統一的に扱うデバイス解析／設計法について検討した結果をまとめたものである。

フォトニック結晶は周期的な誘電率分布を有する構造体であり、光を自在に制御することができる。このフォトニック結晶と半導体レーザを組み合わせたフォトニック結晶レーザは、大面積コヒーレント動作が可能であり、発振波長／放射ビーム形状が制御された高出力光源として注目されている。従来、フォトニック結晶自体の解析や設計には、フォトニック結晶を構成する材料の誘電率実部を用いて行われ、周波数分散特性（フォトニックバンド構造）等のフォトニック特性が示されてきた。しかし、フォトニック結晶レーザ内部には光に対する利得や損失が存在するため、誘電率虚部の周期的変化を無視することはできない。このためフォトニック結晶レーザの設計においては、利得／損失を含めてフォトニック結晶の解析を行うことが必要である。

そこで本論文では、複素誘電率を用いた平面波展開法を構築することによりフォトニック結晶レーザの解析方法を確立した。この特徴は、レーザ素子中を伝搬する光のフォトニックモードに対し、周波数分散特性だけでなく、利得／損失分散特性（図 1）も用いてデバイス特性を論じることにある。また見通しの良い解析式を基本にしており、計算が比較的容易である。加えて、フォトニック結晶からの放射解析式を平面波展開法に組み入れることで、出力特性も検討できるようにした。これらを用いたフォトニック結晶構造最適化により高利得（低閾値）と高放射が両立したレーザ構造を示すことに成功した。本手法を用いて赤外およびテラヘルツ帯のフォトニック結晶レーザに対して特性計算を実施し、実験との比較で検証した。

更に、非等方性媒体を用いたフォトニック結晶レーザに本手法を展開することを試みた。非等方性誘電率の扱いは、屈折率楕円体の考え方を複素平面波展開法に導入することで可能にしている。この解析手法を緑色光源用材料として注目されている無極性窒化物半導体を用いたフォトニック結晶レーザに適用し、フォトニック特性の非等方性利得方向依存性を明らかにした（図 2）。また非等方性利得の存在による特性変化はフォトニック結晶構造の形状変更で補償できることを示した。

以上の成果は、フォトニック結晶レーザの低閾値化／高出力化などの性能向上を可能にするだけでなく、今後の新たな光デバイスにも展開することができる。

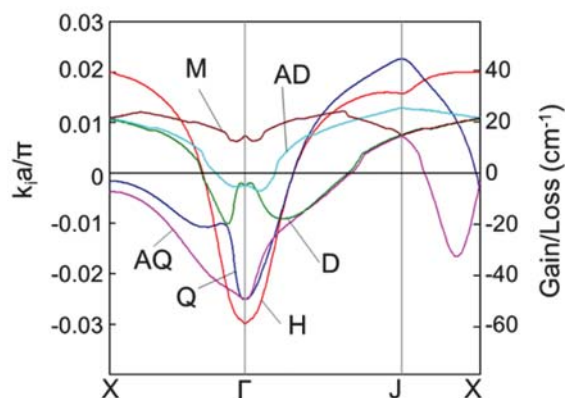


図 1：フォトニックモードの利得／損失分散特性（三角格子、縦軸負値が利得）

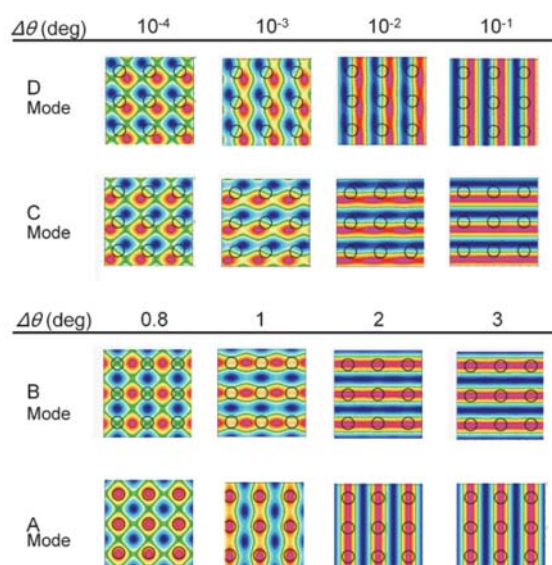


図 2：電磁界分布の非等方性利得方向依存性（ $\Delta\theta$ は Γ M 方向と高利得方向が成す角）

Menaka De Zoysa (野田教授)

「Thermal Emission Control by Intersubband Transitions in Quantum Wells and Two-Dimensional Photonic Crystals」

(量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトニック結晶を用いた熱輻射制御)

平成 24 年 3 月 26 日授与

物体を熱することにより発せられる熱輻射は、一般に、極めて広いスペクトルをもつことが知られている。例えば、太陽光スペクトルは、約 5800K の黒体からの熱輻射スペクトルに近く、紫外から赤外に至る極めて広い波長スペクトルをもつ。この広いスペクトルのうち、我々は、通常、一部の波長成分のみを利用し、その他の成分は無駄に捨ててしまう。最近注目を集めている太陽電池においては、広い太陽光スペクトルには、太陽電池が吸収して電力に変換できない波長成分が多く存在するため、一般に光電変換効率は 10~20% 程度に留まっている。ここで、もし太陽光スペクトルそのものを、エネルギー損失なく、狭いスペクトルへと変換・集中できれば、利用可能なエネルギー成分が増大し、発電効率の大幅な改善が期待される。一般には、物体からの熱輻射スペクトルを、エネルギーの損失なく、狭帯域の所望のスペクトルへと変換・集中できれば、上記、太陽光発電の高効率化のみならず、廃熱等を利用した熱光発電、高効率ランプ、各種分析用高効率赤外光源の実現が期待される。

加熱された物質が、通常非常に広い熱輻射スペクトルを示すのは、物質中の電子と光子の運動が制限されていないためである。そこで、必要な周波数のみに、電子と光子の運動を限定できれば、その周波数でのみ熱輻射が起こると考えられる。本研究では、電子の運動を、半導体量子井戸の離散化準位間の遷移（サブバンド間遷移）を用いて限定し、次に、光子の運動を、フォトニック結晶のバンド端共振器モードを用いて限定することによって、極めて狭い周波数帯域に熱輻射を集中できることを見出した[1]。

具体的には、量子井戸層に円孔三角格子フォトニック結晶を導入し、中赤外線の波長 10 μm 付近に狭い熱輻射が得られるような光源を作製した (図 1a)。本デバイスおよび同じ構造でフォトニック結晶に相当する部分が黒体である参照試料に、それぞれ 11.2 mW の電力を投入して加熱した際のスペクトルを図 1b に示す。本デバイスでは輻射帯域が黒体と比べて非常に狭く ($\sim 1/30$) 限定できていることが分かる。また、本デバイスは輻射帯域制限の結果、同一の電力を与えた場合のデバイス温度が参照試料と比べて大幅に上昇し、その結果、4 倍以上の高いピーク強度を示している。言い換えると、本デバイスでは与えられた電力が狭い帯域に集中し、他の帯域で消費されないという状況になっており、エネルギーを効率よく利用できていると言える。この効果は初めに述べたような太陽光発電の効率向上や各種センサー用光源に応用可能である。

[1] De Zoysa, T. Asano, K. Mochizuki, A. Oskooi, T. Inoue, and S. Noda: "Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling", Nature Photonics, vol.6, pp 535-539 (2012).

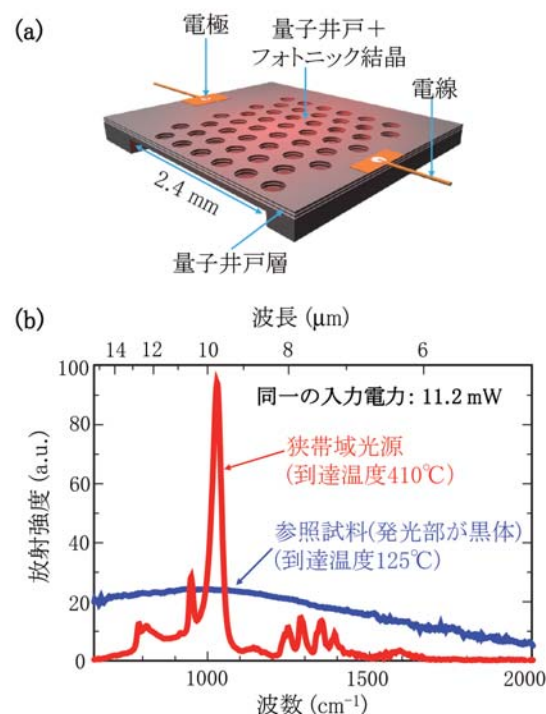


図 1: (a) 熱輻射光源構造, (b) 輻射スペクトル

池之上 卓 己 (藤田教授)

「超音波噴霧法による薄膜形成と有機薄膜太陽電池への応用に関する研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

昨今のエネルギー問題を解決する手段として光電変換は注目を集めており、期待されている材料の一つに有機半導体が挙げられる。しかし、これまでの研究は新規の材料探索に力が注がれており、成膜技術に関する研究は見受けられなかった。また、真空や複数のプロセスでデバイスを作製するという応用上の問題を抱えていた。本研究は、有機半導体を超音波噴霧法という非真空プロセスで高品質に成膜し、透明導電層などの無機半導体も含めて単一プロセスでのデバイス作製を実現することにより、エレクトロニクスの進展に寄与することを目指したものである。

本研究では、まず、太陽電池応用に適した透明導電膜を目指し、ZnO および ITO 薄膜を作製した。これら薄膜の成膜条件から成膜メカニズムについて明らかにし、添加剤が薄膜の結晶性向上や抵抗率低下に良い効果をもたらすことを示した。その結果、大気圧下では最低水準の抵抗率を有する ZnO:Ga および ITO 薄膜を実現した。

また、超音波噴霧法を有機半導体へ適用し、水分散系である PEDOT:PSS および、有機溶媒に可溶な P3HT、PCBM の薄膜を作製した。これら超音波噴霧法で作製した薄膜が、従来用いられているスピコート法で作製した薄膜と比較して、幅広い膜厚制御性があること、良好な電気特性を示すこと、平坦な表面を有することを示した。また、超音波噴霧法を用いることで積層構造を容易に作製可能なこと、リソグラフィレスでパターンニングが行えることを実証し、デバイス応用に有利な点が多いことを示した。

さらに、これらの結果を総合して、デバイス応用を行った。まず、ZnO/ZnMgO/PEDOT:PSS 構造を有する Schottky 型の紫外線検出器を作製した。このデバイスは、高い感度比と外部量子効率を示す高性能なデバイスで、真空プロセスで作製したデバイスと同等の性能を簡易に単一プロセスで実現した。また、Glass/TCO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/TiO_x/Al 構造の有機薄膜太陽電池を作製し、スピコート

法で作製したデバイスより高い変換効率を有するデバイスを実現した。特に超音波噴霧法で作製した有機薄膜太陽電池は、高い短絡電流密度を有しており、作製条件の最適化でさらなる特性向上も期待できる。

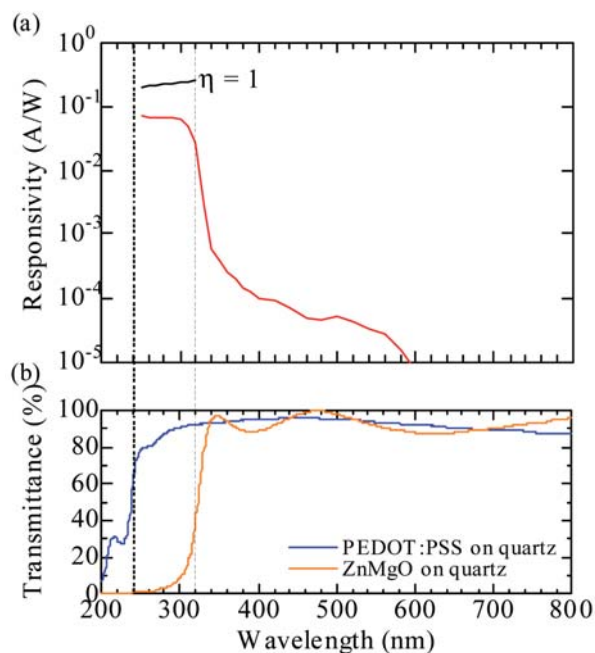


図 1 ZnO/ZnMgO/PEDOT:PSS 構造を有する紫外線検出器の外部量子効率波長依存性 (a) と ZnMgO, PEDOT:PSS 薄膜の透過スペクトル (b)

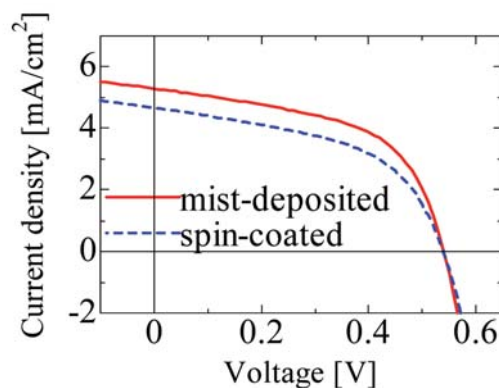


図 2 PEDOT:PSS 層を超音波噴霧法およびスピコート法で成膜した有機薄膜太陽電池の J-V 特性

吉 田 誠 (吉田教授)
「広帯域マルチキャリア無線伝送技術に関する研究」
平成 24 年 3 月 26 日授与

平成 22 年末、ITU-R において第 4 世代移動通信システム (IMT-Advanced) として LTE (Long Term Evolution) -Advanced と WiMAX2 が適合規格であることが報告された。また、これに先立ち LTE や WiMAX が商用サービスされており、これらの次世代移動通信システムは下りリンクにおいて全てマルチキャリア伝送方式の一つである OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いている。本論文は、移動通信システムのさらなる広帯域化および高品質化を目指した著者の第 4 世代移動通信システム向けマルチキャリア無線伝送技術に関する研究をまとめたものである。

第 4 世代移動通信システムは高速移動時に 100Mbps 以上の伝送速度が要求されると同時に、セルラシステムとしての面的なサービスやグローバル環境での使用を前提としなければならない。限られた周波数資源においてユーザの利便性の向上を図るためには、ピーク伝送速度を規定する下りリンクのセルラ平均周波数利用効率 [bps/Hz/cell] を最大化する多重伝送方式の実現が重要であり、筆者は伝送パラメータを含めた多重伝送方式の最適化およびそれを支える要素技術の開発に着目して研究を行ってきた。また、本研究成果の一部は既に LTE や WiMAX で採用されており、所要伝送帯域幅などの伝送パラメータについても IMT-Advanced などで定義されている値にほぼ一致している。

本論文でまとめられている研究項目は以下の通りである。

- 1) 高速移動時に 100Mbps 以上の伝送速度かつ面的サービスが可能な多重伝送方式に関する研究およびその伝送パラメータの決定
- 2) 高効率広帯域無線伝送の実現に必須となる低演算量かつ高精度多重波伝搬路推定手法の研究およびその効果の検証
- 3) OFDM 伝送で問題となるガードインターバルを超える長時間遅延波に起因するシンボル間干渉およびキャリア間干渉が受信性能に与える影響の検証およびその影響を低減できる手法の研究
- 4) 高速移動時におけるピーク伝送速度の向上を目的とした空間多重型 MIMO (Multi-input Multi-output) -OFDM システムの研究およびその効果の検証

上記に対する研究成果として、1) の研究では、200km/h 以上の高速移動時にも 100Mbps の伝送速度が確保できる OFDM ベースの多重伝送方式およびその伝送パラメータを明らかにしている。面的なサービスを前提とした周波数リユースファクタを考慮したシステムレベルシミュレーションによるシステム容量評価も行い、FFR (Fractional Frequency Reuse) 技術の有効性も確認している。

2) の研究では、OFDM 伝送特有の性質を利用した新たな伝搬路推定方式を導入することで、実運用環境において性能上界をほぼ達成する受信特性が得られることを計算機シミュレーションのみならず室内実験を通じて確認している。

3) の研究では、周期的に挿入されるパイロットシンボル (既知信号) を活用することで演算量を抑えた新たなシンボル等化方式を導入し、ガードインターバルの数倍に達する長時間遅延波発生時においても良好な受信特性が得られることを室内実験で確認している。特に、許容遅延時間内に効果的な繰り返し等化を行う手法については理想特性に近い性能が得られている。

4) の研究では、高速移動時の受信性能劣化に対処するため、低演算量でフルダイバーシチ効果が得られる MIMO-OFDM 受信方式を導入することで、性能上界に漸近する特性を従来手法の 1/7 で実現可能であることを計算機シミュレーションで確認している。

横 田 健 治 (高橋教授)

「通信品質向上のためのネットワークシステム制御技術」

平成 24 年 3 月 26 日授与

近年、インターネット利用者やインターネット上のサービスの種類の増加に伴い、ネットワークに対する通信品質の要求も高まっている。本論文は、通信品質向上の目的のために、ネットワークシステム制御技術に関して物理ネットワークとオーバレイネットワークの双方から検討したものである（図1参照）。

1. ヘビーユーザによる大量のトラフィックが他のユーザの通信品質低下を招く問題を解決するために、新たなパケットスケジューリング方式を提案した。従来手法では、ヘビーユーザを制限するためにフローサイズをカウントしていたが、ルータ負荷が大きいという問題があったため、ルータ負荷の増大を抑えるように改良した手法を提案した。また、フローの伝送レートを基にして優先制御を行う方式も提案した。

2. ルータにおいて電気・光変換を行う処理が通信速度向上の障害になっている問題に着目し、タイムスロット交換によりパケットを光のまま処理できる伝送システムの検討を行った。光タイムスロット交換の従来手法では、各中継器においてタイムスロット位相が同期している必要があったが、タイムスロット位相が非同期の場合の運用法と効率の良いタイムスロット割り当て手法を提案し、その有効性を示した。

3. Web サーバにアクセスが集中することでダウンロード時間が増加する、フラッシュクラウドと呼ばれる現象を解決するためのサーバ負荷分散手法を提案した。提案手法では、他のユーザにコンテンツのアップロードの一部を負担させることで、Web サーバへのアクセスの緩和を図る。提案手法のアプリケーションを実装し、実際の Web サーバを用いた実験によりダウンロード時間を削減できることを確認した。

4. クラウドサービスでは利用者とデータセンタが物理的に遠い位置に配置され、遅延時間が増加することで通信品質が低下するという問題を解決するために、位置情報を考慮したサーバ分散配置手法を提案した。提案手法では、クラウド事業者の他にサーバ保持者という概念を導入し、インセンティブを与えることでサーバを分散配置することができる。

5. P2P ファイル共有アプリケーションにおいて、人気順位の低いコンテンツがP2P ネットワーク上で見つけにくいという問題を解決するために、コンテンツとピアのクラスタリング手法を提案した。提案手法では、クラスタリングによりコンテンツ保持の分業を行うことで、人気順位の低いコンテンツが各ピアのキャッシュに残りやすくなる。シミュレーション評価を行い、コンテンツの検索成功率が向上することを示した。

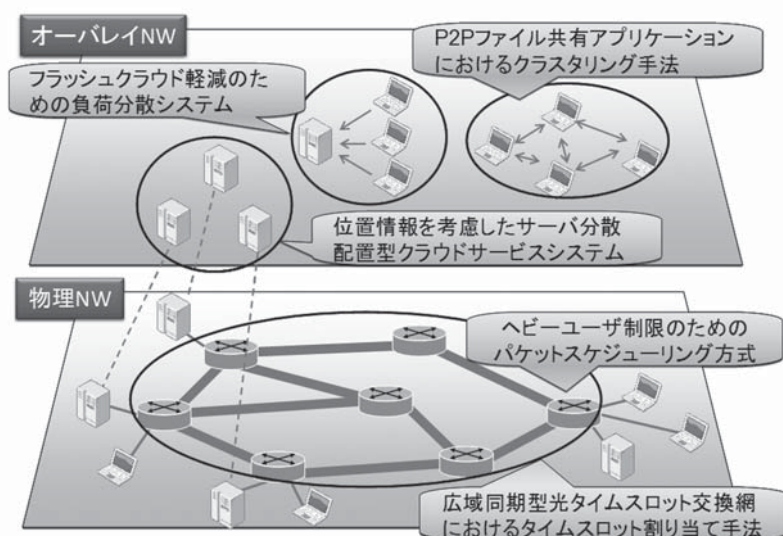


図1 博士論文の概要

田 村 昌 也 (佐藤 (亨) 教授)

「Research on a compact and high-performance filter for wireless LAN and suitable sensor structure for downsizing of measurement equipment based on control of electromagnetic waves」

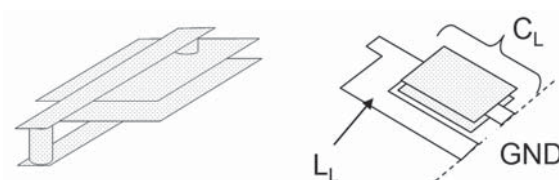
(電磁波制御技術を用いた小型で高性能な無線 LAN 用フィルタ、及び測定装置の小型化に適したセンサ構造に関する研究)

平成 24 年 9 月 24 日授与

本論文は、WLAN 用フィルタ及びバイオセンサに関する研究の成果を報告している。本研究の目的は 2 つある。1 つは、通信品質を劣化させることなく携帯端末の小型・薄型化を実現することで、もう 1 つは、自宅や病院にて容易に定量的な診断を実現することである。今回、前者を実現するために WLAN 用フィルタの小型・低背化について、後者を実現するために装置の小型化に適したバイオセンサへの適用可能性について研究を行った。

1. WLAN 用フィルタ

まず、従来の設計手法、いわゆる右手系の原理を使って検討を進めた。具体的には、セラミック内の導体パターンを用いてステップインピーダンス共振器と分割リング共振器の効果を持つ小型共振器 (図 1 (a)) を考案し、その動作原理および設計方法を明らかにした。この共振器を用いて設計した WLAN 用フィルタは、これまでに報告されたフィルタに比べ、その性能を劣化させることなく、約 14 % の小型化を実現できた。



(a) 従来技術がベース (b) CRLH-TL がベース

図 1：考案した共振器

続いて、メタマテリアルの表現方法の一つである右手左手系複合線路 (CRLH-TL) の概念を用いた共振器 (図 1 (b)) を考案した。この共振器は、その構成から分布定数型共振器としても集中定数型共振器としても扱うことが出来る。そこで、分布定数型と集中定数型の 2 通りの設計手法を確立し、WLAN 用フィルタを設計した。結果、さらに約 50 % の小型化を実現できた。

今後、半導体部分は 1 チップ化が進むと予想され、フィルタは半導体を実装する基板内に配置されることになるだろう。これは導体パターンによるフィルタ設計の重要性が増すことを意味しており、本研究の成果が貢献できるといえる。

2. バイオセンサ

プラズモン現象を利用した新しいバイオセンサの構造として金属-絶縁体-金属 (MIM) 構造がある。しかしながら、その動作原理はこれまで明らかにされていない。そこで、電磁界分布を元に MIM のこの動作原理を明らかにし、 0° 入射が可能であることを示した。そして、光フィルタ理論を使って MIM 構造を設計できることを明らかにした。最後に絶縁体層に試液を注入して濃度と共鳴波長の関係を比較し、センサとして動作することを示した。

今後、オーダーメイド医療が進み、地方診療所や個人でも扱える簡易診断装置が必要とされるだろう。その際は、小型な装置の重要性が増すことから、本研究の成果が貢献できるといえる。

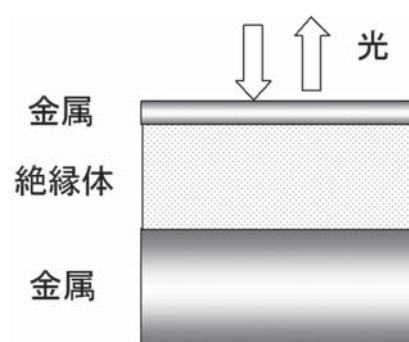


図 2：MIM 構造

青 柳 西 蔵 (下田教授)

「行動変容のためのオンラインコミュニティに関する研究」

平成 24 年 9 月 24 日授与

オンラインコミュニティの利用は、様々な場面における人の行動を社会的に望ましい方向に変容させる手法として有望である。オンラインコミュニティに参加することで、人はその行動についての情報交換や、他者からの心理的な影響等によって行動の変容を促される。また、こうした活動をオンラインで行うことで、情報の処理や提示方法の工夫によって、参加者の負担の小さな非同期分散型通信など、対面では実現困難な様々なコミュニケーションが実現できるというメリットがある。しかし、現時点では行動変容のためのオンラインコミュニティの要件や、この行動変容の過程について明らかになっておらず、参加者や促進対象の行動、それらを取り巻く状況に合わせて適切なコミュニティを設計する方法論が確立されていない。そのため、しばしば既存のコミュニティはドロップアウトなどの問題を引き起こしてしまう。本研究の目的は、(1) コミュニケーション内容とつながりの強さという2つの軸に着目して行動変容のためのオンラインコミュニティを設計・実践し、(2) その結果について、特につながりやコミュニケーションの参加者の行動への影響について分析することである。こうした知見が行動変容のためのオンラインコミュニティ設計の方法論の確立に寄与し、家庭における省エネルギー行動の促進等にも応用が期待される。

本研究ではまず、行動変容の段階と社会的要請レベルという2つの軸に注目し、参加者・行動・状況のタイプを判別する。この2つは行動変容に必要な介入の種類を規定する支配的な要因であり、これらを考慮することで、様々な参加者・行動・状況の組み合わせにおいて、オンラインコミュニティが実現すべき介入の種類を導出できると考えた。次に、それぞれの参加者・行動・状況のタイプに応じて、コミュニティ参加者間のつながりの強さ、及びコミュニティの活動におけるコミュニケーションの内容を適切に選ぶ。この2つは、参加者がコミュニティから受ける影響を規定する主要な要素であり、これらの要素によって、様々な参加者・行動・状況の組み合わせにおいて効果的にコミュニティの活動への参加を促し行動変容に必要な介入を実現することができると考えた。最後に、適切な行動指針に従ってコミュニティ活動を活性化する特別な参加者である誘発者の導入や、情報システムの機能等の具体化要素によってコミュニケーション内容やつながりの強さを具体化する。

この方針に従って、原子力発電所におけるヒヤリハット活動促進のための「ヒヤリハット共有コミュニティ」、家庭内環境配慮行動促進のための「エコ部」および「あしあとコミュニケーション場」という3つの行動変容のためのオンラインコミュニティを設計した。そして、これらのコミュニティを実際の現場で実践し、その結果について、特につながりやコミュニケーションの参加者の行動への影響について分析した。その結果、それぞれ多くの参加者の行動変容を促すことができ、また各コミュニティでの行動変容に影響する特徴的な事例や要因の具体例を示すことができた。例えば、誘発者が率先して行動した場合は多くの場合参加者間のつながり形成が促され、参加者に活動参加を促す制度を設定することが参加を促進させた。また、密なつながりのコミュニティでは「ご安全に」等の参加を活発にするコミュニケーションパターンが見出された。これらの実践の結果を基に、より確実に行動変容を引き起こすコミュニティを設計できるように、オンラインコミュニティの要素のそれぞれの概念や具体化方法に修正を加えた。

福 原 始 (山川教授)

「Miniaturization and Integration of Measurement Systems for Space Electromagnetic Environments」

(宇宙電磁環境計測システムの小型集積化)

平成 24 年 9 月 24 日授与

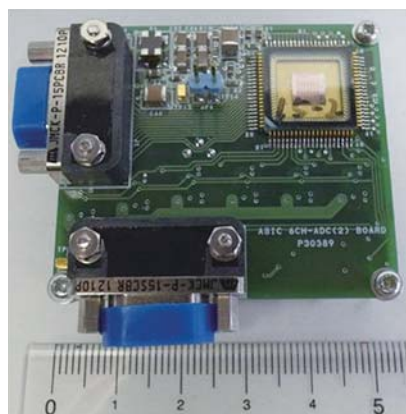


図 1：マッチ箱サイズになった波形捕捉型プラズマ波動受信器。

宇宙プラズマは無衝突であり、その運動エネルギーはプラズマ波動を介して授受される（波動-粒子相互作用）。このため、宇宙電磁環境を探索する衛星では、必ずプラズマ波動受信器が搭載される。本論文では、プラズマ波動受信器の小型・集積化と波動-粒子相互作用を捉える初めての計測手法の小型ハードウェア化を ASIC を用いて実現させた研究をまとめたものである。

プラズマ波動観測器の小型化集積化：プラズマ波動観測器は、低ノイズアンプ、各種フィルタなど、アナログ回路が装置全体で大きな部分を占める。一方、宇宙ミッションにおける重量などのリソースに対する要求は、ミッションの高度化に伴い益々厳しくなり、観測装置の小型化は必須である。本論文では、プラズマ波動受信器をアナログ ASIC 内に設計・開発することによって、非常に小型化する

ことに成功した。特に、波形捕捉型受信器で必要となる高次アンチエイリアシングフィルタ等を組み込んだ電磁界 6 成分を同時に計測できる 5mm 角のチップを実現した。そして、そのチップと電源回路などを含めた波形捕捉受信器基板を 45mm x 50mm というサイズにまで小型化した。これは従来の受信器のサイズに比して一桁以上小型化されておりディスクリート部品では到底達成できないサイズの受信器を完成させた。更に、本論文では小型プラズマ波動観測器の科学観測へのアプリケーションとして、ナノサットコンステレーション観測によるプラズマ圏の微細構造解析に対するミッション設計も行った。これは直線偏波の電波を放射する親衛星に対し、小型プラズマ波動観測器を搭載したナノサット衛星を複数機編隊させ、放射された電波のファラデー回転を観測することで伝搬途中のプラズマ微細構造を捉えようとするものである。この観測原理をレイトレーシングにより検証した上で、ミッションの詳細設計を行いそのフィージビリティを示した。

波動-粒子相互作用計測新手法とハードウェア化：本論文では、波動と粒子のエネルギー授受量を定量的に取り扱うことのできる世界初の観測手法を提案し、そのアルゴリズムを FPGA としてハードウェア化することに成功した。従来までは独立に計測していたプラズマ粒子とプラズマ波動を、本論文では、衛星機上で連携観測しそのエネルギー交換量を決める波動ベクトルと粒子速度ベクトルの角度差をオンボードで求めていくこの手法を確立した。そして、本手法を「Wave-Particle Interaction Analyzer」と名付け、FPGA によってそのアルゴリズムをハードウェア化し、機上リアルタイム処理を実現するに至った。このアルゴリズムは我が国の次期衛星ミッション ERG において採用され、地球放射線帯における波動-粒子相互作用の解明に大きな役割を果たしてくれるものと期待されている。

以上の研究成果は、今後の科学衛星ミッションに対して非常に大きなインパクトを与えるものであり、高度化するミッションを、限られたリソースでどのように実現していくか、について一つの重要な方向性を示したものである。

高校生のページ**未来のエネルギー源「核融合炉」を現実のものに**

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野
長 崎 百 伸

1. 核融合反応とは

2つの原子核が十分近づくと、原子核の間に働く引力（核力）が静電的な反発力（クーロン力）に打ち勝って1つに融合し、新しい原子核が生まれることがあります。これを核融合反応と呼びます。例えば、太陽の中心部では水素原子4個が融合してヘリウム原子1個が作られる核融合反応が起こっています。ヘリウム原子1個の質量は、水素原子4個分の質量より0.7%ほど軽く、この失われた質量がエネルギーに変換されて、太陽の輝きを46億年もの長い間保ち続けているのです。核融合にはこれ以外にも多くの反応がありますが、低いエネルギーで反応し反応率も高いものとして、重水素Dと三重水素Tの核融合反応があります。重水素Dと三重水素Tの原子核を融合させると、ヘリウム（アルファ粒子）Heと中性子nが生成されます。



このとき、反応前の重水素と三重水素の重さの合計より、反応後にできたヘリウムと中性子の重さの合計の方が軽くなり、この軽くなった分のエネルギー17.6 MeVが粒子の運動エネルギーの形で放出されます。この核融合反応から得られるエネルギーは膨大で、例えば、1グラムの重水素－三重水素燃料からタンクローリー1台分の石油約8トンに相当するエネルギーを得ることができます。

核融合発電は、ウランを用いた核分裂反応の発電に比べて幾つかの長所を有しています。海水に含まれる水素のうち0.015%は重水素ですから、重水素については無尽蔵と考えていいでしょうし、三重水素を生成するために必要なリチウムLiは地上に豊富に存在するだけでなく、海水中からも得ることができます。炉心に蓄えられているエネルギーはわずかで、温度が上がるにつれてエネルギーの逃げ方が速くなるため、核暴走といった危険な現象が発生しません。また、核分裂炉のように高レベル長寿命の放射性廃棄物が生成されることはありません（ただし、高エネルギーの中性子は炉壁を通り抜けて周囲の炉構造材を放射化するので、この誘導放射能を抑えるためには炉材料を適切に選ぶ必要があります）。このように、核融合発電炉は大変優れたエネルギー源なのですが、残念ながら核融合反応を用いた発電炉によるエネルギー供給はまだ実現されていません。この理由の一つには、プラズマの「閉じ込め」があります。プラズマは固体、液体、気体に次ぐ物質の第4の状態で、核融合炉におけるプラズマはすべての原子や分子が電子とイオンに分かれています。これまでの実験で、装置サイズが大きくなればプラズマの閉じ込めが良くなり、核融合反応が起こりやすことがわかってきており、核融合エネルギーを得るためには大型装置が必要となります。

2. 国際熱核融合実験炉 ITER

核融合反応を起こすためには、重水素・三重水素の2つの原子核同士を毎秒1,000キロメートル以上のスピードで衝突させる必要があります。核融合反応を維持するためには、核融合反応の結果出てくるパワーがプラズマ自身を加熱し、1億度以上に保たなければなりません。そのためには、重水素、三重

水素の原子核を高い密度で長時間一定の空間に閉じ込めておく必要があります。恒星・太陽は自分自身の重力によって超高温プラズマを閉じ込めることができますが、地球は重力が弱いので、残念ながら重力を用いてプラズマの閉じ込めることができません。地球上で核融合反応を維持しエネルギーを生成する核融合炉の方式として、現在、研究が進められている主な方式は、磁場を用いた磁場閉じ込め核融合とレーザーを用いた慣性核融合の2種類があります。

磁場閉じ込め方式の中で最も研究開発が進んでいる方式はトカマク型と呼ばれており、原理実証（科学的実証）が終了して工学的実証段階に入っています。現在、このトカマク型を採用したITER（イーター）計画が国際協力により推進されています。ITERは国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor）のことで、ラテン語で「道」や「旅」という意味があり、核融合実用化への道という願いが込められています。ITER計画では、核融合発電が科学技術的に成立することを実証するため、重水素と三重水素を用いて大出力長時間の燃焼を行います。ITERの主目標は、自己点火及び長時間燃焼の実証、そして、核融合炉工学技術の実証です。エネルギー増倍率 Q （核融合反応を起こすために入力したパワーと核融合反応で発生したパワーの比率）が10以上、定常状態では5を目指しています。これまでの幾つかの実験装置では臨界条件 $Q=1$ を達成していますが、ITERでは出力が入力を上回り、アルファ粒子がプラズマを加熱する燃焼プラズマが作られることになります。こうした状態は、今までの実験では達成されていないためチャレンジングですが、これまでに観測されていない新しい発見が見出される可能性もあります。現在、フランスのカダラッシュにおいて建設が進められており2020年にファーストプラズマ、2027年に重水素・三重水素を用いた核燃焼プラズマ実験を行なうことを目指し、日本・欧州連合（EU）・ロシア・米国・韓国・中国・インドの七極により進められています。詳細は、<http://www.iter.org/>（英語ページ）、<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/>（日本語ページ）を参照してください。多くの国々の国際協力でこれほど大きな計画が進められたことはなく、解決すべき課題があるものの、実験開始に向けて着実に準備が進められています。

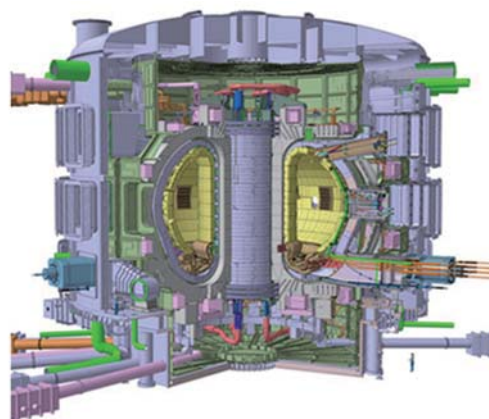


図1 国際熱核融合実験炉 ITER の概要図。<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index.htm> より

3. ヘリカル系閉じ込め核融合

磁場閉じ込め核融合の方式には、トカマク以外にヘリカル系と呼ばれる閉じ込め方式があります。ヘリカル系はプラズマを閉じ込めるための磁場を外部コイルによって形成しており、トカマクのようにプラズマ電流を必要としないため定常運転が原理的に可能な方式であり、破壊不安定性と呼ばれる放電が止まる不安定性が発生することはありません。ヘリカル方式には、ヘリオトロン（Heliotron）とステラレータ（Stellarator）という概念があります。ヘリオトロンはギリシャ語のヘリオス（太陽）、ステラレータは英語のステラ（星の）にちなんで名付けられました。

ヘリカル系閉じ込め磁場構造は外部コイル系によってのみ磁場を形成するので、プラズマ電流を必要とするトカマクに比べて、磁場配位設計の自由度が極めて高いことが特徴です。先進ヘリカル磁場配位として提案されているものとしては、準ヘリカル対称、準ポロイダル対称、準トロイダル対称、準等磁場配位があります。ここで、すべての配位概念に「準」が付いているのは、ヘリカル系トラスでは数学的に厳密な対称性が存在しないためです。図2に示すように、ヘリカル系核融合研究は日本だけでなく世界的に研究が行われており、W7-X装置（ドイツ・マックスプランク研究所）、TJ-II装置（スペイン・

CIEMAT 研究所)、HSX 装置 (米国・ウィスコンシン大学)、H-1 (豪・オーストラリア国立大学) などの装置があります。それぞれが特徴をもった装置で、ヘリカル系の多様性を示すとともにヘリカル系システムの可能性の高さを示しています。

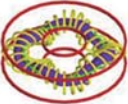
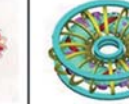
Plasma Device (Laboratory)	H-1 (ANU)	TJ-II (CIEMAT)	LHD (NIFS)	HSX (U. Wisconsin)	Heliotron J (Kyoto Univ.)	W7-X (MPI)
Schedule	1993~	1997~	1998~	1999~	1999~	2014~
Coil System	M=3 HFC+CR+TFC	M=4 HFC+CR+TFC	M=10 HFC+PFC	M=4 Modular Coil	M=4 HFC+TFC+PFC	M=5 SC Modular Coil
Major Radius	1.0 m	1.5 m	3.9 m	1.2 m	1.2 m	6.5 m
Minor Radius	0.22 m	0.1-0.25 m	0.6-0.65 m	0.15 m	0.18 m	0.65 m
Plasma Volume	0.96 m ³	1.43 m ³	30 m ³	0.44 m ³	0.82 m ³	54 m ³
Magnetic Field	1.0 T	1.5 T	3 T	1.37 T	1.5 T	3.0 T
Pulse Length	1 sec	0.5 sec	CW	0.2 sec	0.5 sec	> 10 sec
Heating System	ECH (0.2MW) Helicon (~ 0.5MW)	ECH (0.6MW) NBI (4MW)	ECH (3MW) ICH (3MW) NBI (32MW)	ECH (0.2MW)	ECH (0.5MW) NBI (1.5MW) ICH (2.5MW)	ECH, ICH NBI (20-30MW)
Features	Flexible configuration, High beta	High rotational transform, Low shear	Moderate shear	Quasi-helical symmetry	Local quasi- isodynamicity	Quasi- isodynamicity
Schematic View						

図2 世界のヘリカル系装置

ヘリオトロンは京都大学核融合共同研究グループが世界で最初に提唱した概念です。連続巻ヘリカルコイルを用いたヘリカル・ヘリオトロン磁場の装置 Heliotron D を用いて実験を開始、その後、Heliotron E によって無電流プラズマの生成・加熱に成功し、ヘリカル系が核融合炉の方式として有望であることを示しました。この結果をもとに、超電導コイルを用いた大型ヘリカル装置 LHD (Large helical Device) が岐阜県・土岐市に建設され、現在、実験が行われています。高いベータ (プラズマの圧力と磁気圧力の比) プラズマの生成、高密度プラズマの維持、内部輸送障壁の形成などの成果をあげています。

エネルギー理工学研究所では、これまでのヘリカル系システムをより発展させ、準等磁場配位という概念を追求するために、Heliotron J という装置を発案・建設し、1999 年より宇治キャンパスにて実験を行なっています。図3は Heliotron J を横から見た写真で、主要なパラメタは主半径 1.2m、プラズマ小半径約 0.2m、磁場強度 1.5T です。図4に示すように、閉じ込め磁場を形成するコイルは、立体磁気軸ヘリカルコイル、2種類のトロイダルコイル、内側と外側の垂直磁場コイルから構成されており、それぞれが独立して制御できることから、多彩な閉じ込め磁場配位を形成することができる特徴を有しています。LHD のような平面磁気軸配位と比べ、磁気流体 (MHD) 安定性と高エネルギー粒子閉じ込めの良好性を同時に兼ね添えています。電子温度 1 keV (約 1000 万度)、イオン温度 0.3 keV (約 300 万度)、電子密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマパラメタを達成し、これまでの成果として、核融合閉じ込めプラズマの性能を評価する重要な指標の一つであるエネルギー閉じ込め時間が中型装置としての予測値を超える良好な閉じ込めを実証するとともに、H-mode と呼ばれる閉じ込め改善モードへの自発的遷移現象を観測しました。また、プラズマの生成・維持にオーミック電流を必要としないという長所を活かして、プラズマ中に発生する非誘導電流を打ち消す手法を開発しました。

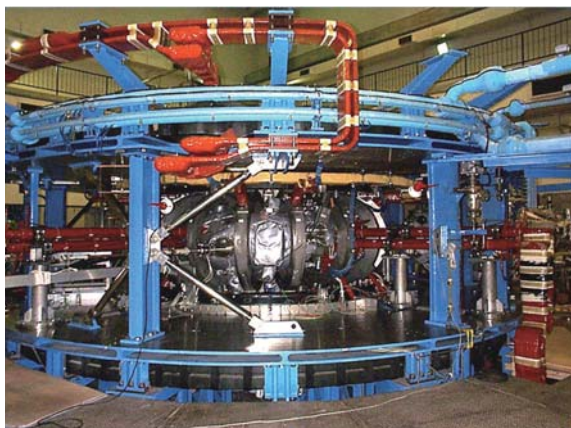


図3 Heliotron J 写真

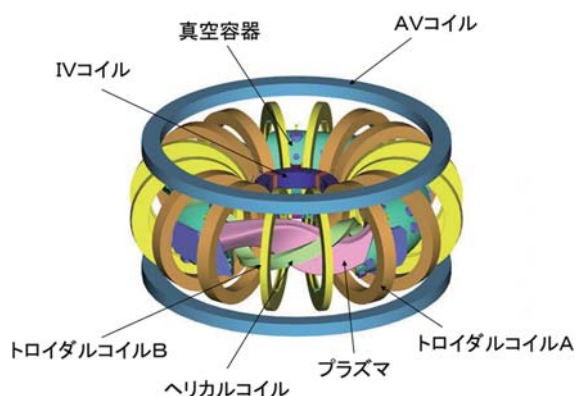


図4 Heliotron J 概要図

4. 加熱・電流駆動システム

プラズマの温度や密度は加熱入力パワーと損失パワーの収支で決まります。アルファ粒子加熱パワーだけで損失パワーと釣り合うときを自己点火と呼んでいます。核融合炉の真空容器内には初期状態としては何もないわけですから、プラズマを生成した場合には低温からスタートし、核融合反応率が高くなってアルファ粒子加熱が効く温度領域まで加熱する必要があります。加熱手法には、大きく分けて、オーミック加熱、中性粒子ビーム加熱（Neutral Beam Injection, NBI）、波動加熱（Wave Heating）の3種類があります。

オーミック加熱の原理は、電熱器のヒーターに電流を流すと電流によって加熱される原理と同じで、プラズマ中に電場を加えて電子を加速すると電子の運動エネルギーが増え、イオンと衝突することによってプラズマの温度が上がります。核融合プラズマの抵抗は銅やアルミのような金属と同程度の抵抗率であり、電流が流れやすいのが特徴です。NBI加熱は、プラズマのもつ平均的なエネルギーよりも高いエネルギーをもつイオンビームを核融合プラズマ中に打ち込んで、イオンの運動エネルギーをプラズマに与えて温度を上げる手法です。例えるなら、冷たい水に熱湯を注ぎ水の温度を上げることに似ています。入射された中性粒子はプラズマのイオンや電子と衝突し、再びイオンと電子に分離され加熱されます。

波動を用いた加熱では、波動を外部から励起することでプラズマを加熱します。主要な加熱方法は周波数によって分類されており、アルフベン共鳴加熱、イオンサイクロトロン共鳴加熱（ICRH）、低域混成波共鳴加熱、そして、電子サイクロトロン共鳴加熱（ECRH）があります。プラズマの近くにアンテナを置いて波をプラズマ中に入射すると励起された波がプラズマ中を伝播し、条件を満たす領域に到達すると共鳴現象が起こって粒子を加速し、波動エネルギーが粒子へと移り粒子の運動エネルギーが増えます。

Heliotron J 装置には、NBI（30 kV, 2 MW）、ICRH（20MHz, 2.5 MW）、ECRH（70 GHz, 0.5 MW）があり、プラズマの生成・加熱に用いられています。このうち、ECRHはオーミック加熱なしのプラズマの生成に使われており、密度 $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ で1000万度（1 keV）の電子温度を得ています。この温度は太陽の中心温度（1500万度）に近いものです。ECRHでは、電子加熱を行なうためにマイクロ波領域の波を用いますが、図5に示すようなジャイロトロンと呼ばれる発振装置を用いてマイクロ波を発生させます。我々の生活で使われる電子レンジもマイクロ波（2.45 GHz）を用いますが、大体1 kWですので、Heliotron J で用いているジャイロトロンのパワーはその500倍にもなります。

ジャイロトロンからの発振パワーが大きいと、通常利用される矩形導波管を用いると導波管内に励起される電場が大きくなりアーキングの問題が発生します。この問題を解決するため、Heliotron J では

導波管口径を大きくして電場を小さくするとともに、導波管内部を櫛状（コルゲーション）にすることで伝送損失を抑制しています。これまで、コルゲート導波管を用いた伝送により 92 % という高効率で伝送することに成功し、信頼度が高く安定したマイクロ波伝送を可能としました。また、偏波を制御する偏波器（図 6）、伝送されているマイクロ波の状況をモニターするパワーモニターシステム（図 7）、プラズマ中に入射するマイクロ波の入射を制御する入射システムなどを開発しました。最近の実験結果では、プラズマに斜め入射することで非誘導電流駆動（Electron Cyclotron Current Drive, ECCD）を行い、プラズマ中に自発的に流れる電流を抑制したり、また、プラズマの閉じ込めを劣化させる電磁流体不安定性を抑制することに成功しています。

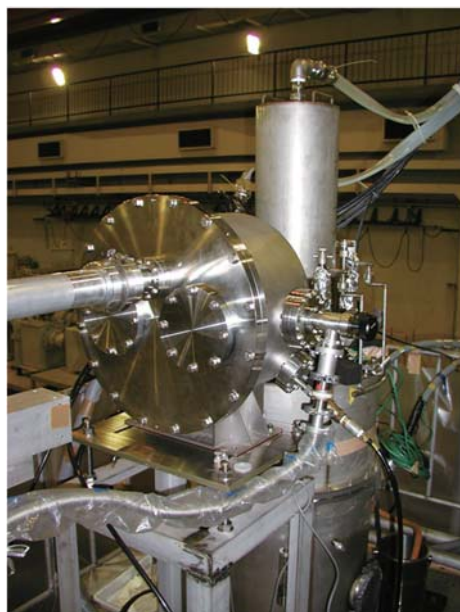


図 5 70 GHz 0.5 MW ジャイロトロン

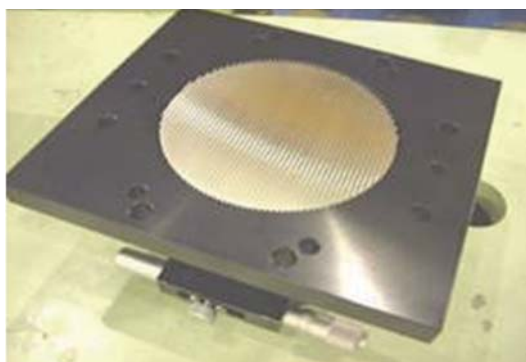


図 6 グレーティング偏波器



図 7 パワーモニター

5. まとめ

これまで「夢のエネルギー」と考えられてきた核融合エネルギーですが、ITER という熱核融合実験炉の建設に見られるように、現実味を帯びて議論されるようになってきました。発電炉に向けてはまだ解決すべき課題が多く残されているものの、将来の見通しが得られつつあります。エネルギー理工学研究所では、核融合炉の実現に向けた開発、核融合プラズマの物理理解を深めるため、理論と実験の両側面から研究を進めています。核融合反応や核融合発電炉について一般向けの本が出版されており、ご興味のある方は参考文献 [1][2][3] をぜひご一読ください。

参考文献

1. 井上信幸、芳野隆治、「トコトンやさしい核融合エネルギーの本」、日刊工業新聞社、2005 年
2. G. McCracken, P. Stott, 「フュージョンー宇宙のエネルギーー」、シュプリンガーフェアラーク東京、2005 年
3. プラズマ・核融合学会、「プラズマエネルギーのすべて」、日本実業出版社、2007 年

学生の声

「身近を見直す」

工学研究科 電子工学専攻 北野研究室 博士後期課程2年 中 田 陽 介

私が大学院工学研究科のある西京区に移り住んでから、早四年が経とうとしている。はじめの2年間は、大してこの土地に目も向けずに暮らしていたのだが、住み慣れてから少しずつ身近を探索することで、西京の魅力に徐々に気がついてきた。現代のめまぐるしく変化する社会の中でも、西京では比較的ゆっくりとした時間が流れているように感じる。町の人は親切でやさしい。こういう匂いを嗅ぎ取ってか芸術家もたくさん暮らしている。

あまり知られていないことであるが東山に劣らず素晴らしい寺社もたくさんある。花の寺の別名を持つ勝持寺、春日大社の分社として知られる大原野神社、西国三十三箇所の一つである善峯寺など、例をあげれば枚挙にいとまがない。それぞれの場所には土着の物語が染みついている。こうした物語を集めることで歴史がより身近に感じられるし、自分と土地との結び付きも得られる。また、文化面のみならず、非常に自然豊かな土地でもある。大原野の里山風景は見る者の気持ちを穏やかにするし、かの紫式部も歌に詠んだとされる小塩山に登って京を見下ろせばまた違った視点から自分たちのいるこの町を見直すことができる。このように自分にとって身近な場所に対して、少しずつ魅力を見つけていくことは私にとってこの上なく楽しい。

これは私の研究にも当てはまることである。自分にとって身近と感じる研究対象を何度も何度も見直す。ある時には普遍的な概念が頭の中で整理され、山の上に立つように一気に広い世界が見渡せるようになる。こうした過程を繰り返しているうちに、はじめはいつもと変わらない見慣れた風景だと思っていたものも、すっかり見方が変わって別の世界にやってきたような感覚になる。こういうときに、ああ、研究はおもしろいな、と感じるのである。みな気が付かない身近な所にこそ宝が眠っている。

「博士課程への進学を決意した理由」

工学研究科 電気工学専攻 篠原研究室 博士後期課程1年 石 川 峻 樹

私が博士課程への進学を検討した理由は、今現在行っている研究が非常に面白いと思っており、少しでも長くこの研究に携わってみたいと感じたためである。これが全ての理由ではないものの、博士課程への進学を検討した、最も大きな理由である。一方で、研究への興味という理由だけでは、博士課程へ進学することを決意はしなかったのも事実である。せっかくの機会なので、博士課程への進学を決意した理由をいくつか書いてみようと思う。

一つ目の理由は、先輩から言われた一言である。その内容としては、博士課程はできるかできないかではなくてやるかやらないかだ、というものであった。この一言は、博士課程に進学できる能力があるのかと悩んでいた自分には、本当に進学する覚悟があるのかと問われたように感じた。この言葉を言われてからは、自分には能力が無いと言われたらあっさりと引き下がるのか、それでもやっぱり進学したいと答えるのか、といった自身の進学に対する意志というものをよりしっかりと考えるようになった。二つ目の理由は、本当に進学をしたいのであれば応援する、という両親からの言葉である。両親は家庭の事情から進学をあきらめた、あるいは就職してから進学してもっと勉強しておけばよかったと感じた、といった経験があったため、進学をしたいのであれば応援すると言ってくれたそうだ。この言葉を言われてからは、本当は就職をしなければならないのではないかといった考えに囚われずに、自分が本当にしたいのは就職・進学のどちらなのかをより冷静に考えるようになり、進学を決意するに至った。

以上の二つは私が進学を決意した理由の中で、最も大きなものであり、このように考え、悩んで、決意し、進学した博士課程という時間を、大切に過ごしたいと思う。

教室通信**最近の工学研究科・工学部ならびに全学の状況**

電子工学専攻教授 工学研究科長・工学部長 北 野 正 雄

2012年4月から工学研究科長・工学部長を務めております。最近の工学研究科・工学部ならびに全学の状況を簡単にご報告したいと思います。

現在、桂キャンパスへの物理系専攻の移転作業が進んでおり、2013年3月までに完了する予定です。2003年に化学系、電気系から始まった桂キャンパスへの移転は、10年の歳月を要してようやく完了します。そして、京都大学の3番目のキャンパスとしてフル稼働を開始することになります。ただし、諸事情から一つの専攻（材料工学専攻）だけが吉田キャンパスに残ることになってしまいました。また、学部教育の拠点である工学部は従来どおり吉田キャンパスにとどまります。そのため、再配置に伴う吉田キャンパスの環境整備を速やかに行う必要があります。さらに、残った専攻の移転、桂図書館、ビジターや留学生向けの宿泊施設、学際研究、産官学研究スペースの整備拡充なども引き続き進める必要があります。いずれにしましても、この機会に一度桂キャンパスに足を運んでいただければ幸いです。

全学的には教養共通教育の本格的な改革が進められています。1993年に教養部が廃止されて以来、学部の教養共通教育はどちらかというとバーチャルな組織体制で運営が進められてきました。その結果、各授業のレベルはそれぞれの教員の力量や努力で維持されてはいるものの、科目間の体系性や順次性に関する配慮が十分されてきたとはいえ、また最近の新入生の学力や気質の変化への適応も十分ではありませんでした。特に、受験向けに調整された高校までの勉強方法からの脱却に失敗し、早い時期から落ちこぼれて遭難してしまうケースが目立つようになってきています。このような問題点の解消に取り組むために、国際高等教育院（仮称）の設置に向けた作業が進行中です。この新組織は、各部局の協力の下、教養共通教育の企画、調整と実施を一元的に所掌するものです。特に企画機能を充実させ、新時代にふさわしい教養共通教育を実現することを目指しています。教養共通教育は、学部4年一貫教育の基盤を担う部分であり、各学年1000名近い学生を擁する工学部としても、国際高等教育院の運営に積極的に関わってゆく必要があります。

並行して、学部入試についても、高大接続型京大方式特色入試の名称のもと、新たな仕組みが現在検討されているところです。特に、現在の入試制度全般が招来しているさまざまな問題点を緩和し、自発的な学びの姿勢と勉学への志が重要視されるという本来の状況を取り戻すことを目指しています。

大学院教育に関しては、平成23年度から24年度にかけて、文部科学省の博士課程教育リーディングプログラムに京都大学から次の4件が採択されています：「京都大学大学院思修館」、「グローバル生存学大学院連携プログラム」、「充実した健康長寿社会を築く総合医療開発リーダー育成プログラム」、「デザイン学大学院連携プログラム」。これらはいずれも俯瞰力と独創力を備え、グローバルに活躍するリーダーの育成を目指すプログラムであり、専門分野の枠を超えて博士課程前期・後期一貫の学位プログラムを構築・展開するものです。これらの大学院プログラムの教育には、工学研究科、情報学研究科、エネルギー科学研究科などから多くの教員が参画しております。

ご存じのとおり、昨今の大学を取り巻く状況は、国内外の現状を反映して、一層厳しさを増しています。国の財政状況の悪化に伴い、大学の基盤的経費や人件費は前例のないほどのペースで削減されようとしています。（一方でこれらの緊縮モードと相容れないような政策が景気浮揚をめざして進められようとしています。）このような混乱した状況下において、単純に大学の教育研究機能を縮小・後退させることは、何としても避けなければなりません。困難な時代にこそ、教育・研究に力を注がなければならないことは、米百俵の故事を待つまでもないことです。社会から幅広いご支援とご理解を得ながら、さらに開かれた大学として成果を目に見える形にして還元してゆく努力をする必要があると考えております。

編集後記

昨年より編集のお手伝いをしています。私も本学電気系教室を卒業しましたが、当時ちょうど情報学研究科が創設されたころで、そちらに進学しました。そのためもあり、「電気」や「電子」についてあまり理解していないことも多く、この cue を読みながら色々と勉強しています。このように色々と活用できる cue ですので、より多くの方に読んでいただけたらと思い、編集に携わっております。最後に、ご執筆いただいた方々に深く感謝いたします。

[D.K. 記]

