cue 32 号 目次

巻頭言
基礎研究と実用化　―パワー半導体 SiC の進展―
…… 昭和 37 年卒　名誉教授　松波　弘之…… 1

大学の研究・動向
人間を支援するための行動センシングと協調のデザイン
……工学研究科　電気工学専攻　情報メディア工学講座　複合メディア分野…… 3

産業界の技術動向
関西電力の研究開発
……関西電力株式会社　三浦　良隆…… 10

新設研究室紹介…… 16

研究室紹介…… 18

平成 25 年度修士論文テーマ紹介 …… 36

高校生のページ
計算電磁気学
……工学研究科　電気工学専攻　電磁工学講座　電磁エネルギー工学分野　松尾　哲司…… 56

学生の声
「研究者と餅屋」
……情報学研究科　通信情報システム専攻　佐藤亨研究室　博士後期課程 3 年　橋本　大志…… 62

「海外で研究をすること」
……工学研究科　電気工学専攻　引原研究室　博士後期課程 3 年　八尾　惇…… 62

教室通信
学位への誘い／学位論文の保存と公開
……京都大学図書館機構長（附属図書館長）電気電子工学科長　引原　隆士…… 63

賛助会員の声
鉄鋼業における電気制御技術の進展と電気技術者の関わり
…… 新日鐵住金（株）　名古屋製鐵所　制御技術室長　藤井　昭吾…… 65

編集後記…… 68

巻頭言

基礎研究と実用化　―パワー半導体 SiC の進展―

昭和 37 年卒　京都大学名誉教授　松　波　弘　之

京都大学電気系教室が発刊する技術情報誌「Cue」の巻頭言を書くように依頼された。高邁な科学論、技術論などを持ち合わせていないので、自らが関与してきた基礎研究を、如何にして実用化に持ち込んだかを紹介し、その端々で実感したこと、得たことを書いてみたい。

コンピュータ、通信、情報などエレクトロニクス分野は、半導体技術と ICT との組み合わせによって社会に大きなパラダイムシフトを起こした。残念ながら、日本におけるこのエレクトロニクス関連の産業は、現在たいへん厳しい状況にある。一方、エネルギーが関係する分野は、再生可能エネルギー導入による電力系統の安定制御や、電気エネルギーの有効利用（省エネ）を可能にする科学技術の開発を含むグリーンイノベーションとして、新産業創出を目指した大きな期待がかけられている。

この分野を支えているパワーエレクトロクス（パワエレ）は半導体シリコン（Si）を主役とするが、材料の物性限界に近付いており、飛躍的な進展が難しいとされていて、高性能パワー半導体シリコンカーバイド（SiC）へ注目が集まっている。直流を交流に変換するインバータに SiC を用いると、高耐圧、低損失、高速スイッチング、高温動作、小型、簡易冷却のインバータができるので、電気・電子関連の企業が一斉に力を入れている。今でこそ、パワエレというキーワードが社会認識され始めたが、そもそも、縁の下の力持ち的立場の仕事で、注目度は低かった。京都大学における SiC に関する基礎研究があって、パワエレに陽の目が当たりつつあり、電気・電子業界が取り組んでいることはたいへん喜ばしい。

好奇心と若気の怖さ知らずで、半導体 SiC が優れた物性を持っているのに、実用されていないことを慨嘆し、半導体社会で市民権を持たすべく、この材料の研究に取り組んでから、40 年以上が経過した。初期の 20 年は、苦労の連続で、ようやく Si 基板上に成長させた SiC を使って MOSFET（金属（M）-酸化膜（O）- 半導体（S）電界効果トランジスタ）を世界ではじめて試作したが、性能が満足できなかった。SiC 基板上への成長を模索したが、市販基板がなかったので、研磨材、耐火煉瓦用に製造されている Acheson 結晶を使わざるを得なかった。（0001）面から数度傾けたオフ基板上で成長すれば、基板結晶と同形の超高品質単結晶が得られることを見いだし（1987 年）、「ステップ制御エピタキシー」法と名付けた。これを用い、1990 年代初期に高性能ショットキーダイオード（SBD）を開発した。海外企業が感心を示したが、国内では、バブルが弾けた後で、産業界での研究開発ができない状況であった。

高性能の SiC-SBD が 2001 年にドイツ企業から上市された。国内においては 2010 年春から市販が始まり、その年の暮れには、スイッチング用の MOSFET も市販され始めた。Si-IGBT（絶縁（I）- ゲート（G）- バイポーラ（B）- トランジスタ（T））と SiC-SBD のハイブリッドインバータを地下鉄電車に用いて 30％以上の電力損失低減が可能となった。SiC-MOSFET と SiC-SBD を用いた all-SiC インバータを使って、高速エレベータでは電力損失低減が 65% と報告され、ハイブリッド車への搭載試験が始まるなど、著しい省エネ効果が示されている。このほか、エアコン用インバータなど家電製品、太陽光発電用パワーコンバータ（PCU）への浸透も始まっている。今後は、産業用電気機器、自動車、ロボット、電力系統へ展開して行くであろう。課題であった SiC 基板も直径 6 インチ（150mm）が入手できる。

1980年代後半、研究開始から約20年が経過して得た「ステップ制御エピタキシー」法による高品質単結晶は「ほんまもの」であることを確信し、企業の参画なしには実用化は困難と判断して、産学連携でデバイス化を図りたいと思った。しかし、当時は、半導体業界はランダムアクセスメモリ（DRAM）で超多忙であり、相手にされなかった。1993年、Washington DCでの国際会議で高性能のSBDを発表後、世界の風潮が変わり、基礎研究からデバイス開発へと進んだ。あいにくバブルが弾けて、日本の企業に開発資金の余力がなく、パワー半導体デバイス開発の国家プログラム立ち上げが必要との周囲からの要請に応えて行動を起こし、以後、いくつものSiCに関する国家プロジェクトに関与してきた。はじまりは、1994年からの関西地区を中心とするもので、関西圏の数企業がSiC技術の手習いを行った。続いて1998年から5年間の国家プロジェクトで、電気電子企業が世界のキャッチアップをすることに成功した。

2010年からの内閣府支援による「最先端研究開発（FIRST）」応募から風向きが変わった。産学官を含む研究開発のスキームを考案し、幸いなことに500以上の応募の中から、30課題の1つとして、採択が決まった。いろいろな経緯から、大きな変遷があり、FIRSTでは大学を中心とした将来の電力インフラ用デバイスの基盤研究を行うことになった。京都大学を中心とする大学群・電中研・産総研のチームが、耐圧13 kV以上のバイポーラデバイスの成果を出したことは、まさに世界の最先端を進んでおり、胸を張ってよい。一方、産業界を中心に、基板・エピ成長、デバイス、モジュールなど幅広い分野を取りこんだユニポーラデバイスに関する別枠の大型プロジェクトが動いていて、成果が出つつある。これまで多くのプロジェクトは、同業数社相手の要素技術「technology push」開発に向けられ、userが期待する「vision pull」的開発は注目されなかった。現在、出口を明確にして、高性能システム開発を意図し、それに必要な異業種のplayerを集め垂直統合で展開して行くことが、パワエレを核とした新規事業化につながることを強調している。

パワエレの主役Si-IGBTとは大きく異なる動作をするSiC-MOSFETを使いこなせるパワエレ専門家が数少ない。単なるSiの置き換えではなく、パワエレが替わるとシステムを替えることができ、総合的に大きな省エネが図れる。電気回路、制御、高性能システムの重要性を認識した人材育成を期待する。

大学での研究は真理探究・好奇心の観点からテーマ設定を行うことが必須であろう。研究には、「他人のやらないことをやる勇気を持つこと」、しかし、「core competence（独創性、創造性）を明確にし、常にbench markを置きながら、研究を進める」ことがたいへん重要であると思っている。「目標は高く、目線は低く」でstep-successの積み上げをモットーにしてきた。5年に一度ほどは、エポックメーキングな成果を得て、研究の継続性を維持した。「ステップ制御エピタキシー」をSiC技術のブレークスルーとして、大学での基礎研究の成果が、社会で実用されるフェーズに入り、2012年朝日賞を受賞するなど研究者冥利を味わっている。研究室スタッフ、大学院生、卒研生に感謝する。退官後、8年間にわたり、科学技術振興機構（JST）のイノベーションプラザ京都にて、地域産学連携の支援をした。大学とは異なる分野を経験し、いろいろなことを学んだ。「how to make」に加え、「what to make」を考える若い人たちを育成することが強く要請されている。

大学の研究・動向

人間を支援するための行動センシングと協調のデザイン

電気工学専攻　情報メディア工学講座　複合メディア分野
教授　中　村　裕　一
助教　近　藤　一　晃
助教　小　泉　敬　寛

1. はじめに

身の回りの様々な場所で、家事や介護の補助をしたり、教育やトレーニングの補助をしたり、種々の目的で人間の行動を認識しながらそれを支援する情報メディアやロボットなどのシステムが急速に広がることが期待されています。このような分野の方向性を探る研究として、我々の研究室では、人間の動作・行動などの計測・認識・予測[3、5、6、8、10]、人間の行動の記録（ライフログ）や複数人の記録の統合と利用[1、7、9]、人間とシステムの協調モデル[2、4]等の研究に取り組んできました。本稿では、そのうち、筋電位計測と画像計測と生体計測との統合、人間にとって自然な機械との協調と役割分担のデザインについて紹介します。

2. 生体計測と画像計測の統合

2.1　筋電位計測の利用

人間の状況に応じた支援を丁度良いタイミングで提供するためには、その人の意図や生理的な状態など、様々な要因を考慮する必要があります。筋肉の活動を調べる筋電位計測はその一つの手段となります。

筋肉の収縮は筋繊維の興奮によって起こり、その際の膜電位の変化が皮膚表面に現れたものを表面筋電位と呼びます。その発生電位と発生する筋張力には大まかな比例関係が成立することが知られています。また、運動神経（αニューロン）から伝わった刺激により筋神経接合部付近に引き起こされた興奮が筋繊維に沿って伝わり始めてから実際に筋肉が収縮するまで最大 200msec 程度の時間があることから、運動が起こる前にその筋電位の変化を計測することができます。さらに、力が入っているが動いて

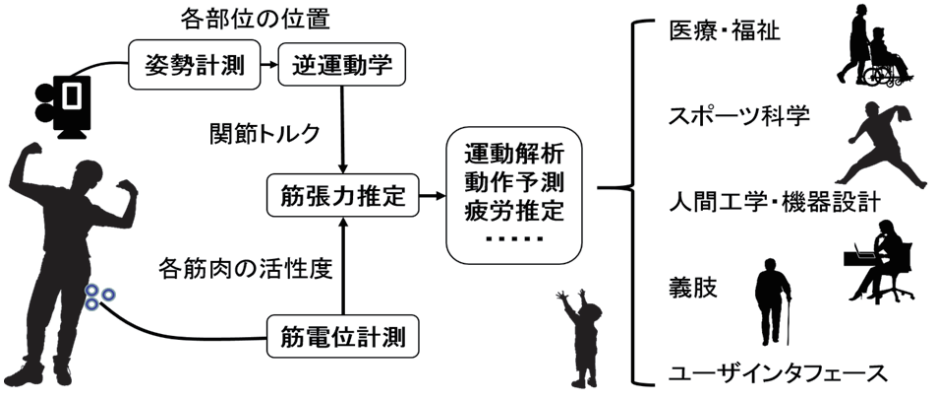


図 1：画像計測と筋電位計測の統合とアプリケーション

いない場合など、外部からはわかりにくい情報も得ることができます。このような良い性質を持つため、これまで、筋電位計測は義手などの入力インタフェースとして、また、人間工学における動作や疲労の解析手段等に用いられてきました。

しかし、筋電位だけを用いて全身の姿勢や動作を求めることは依然として困難な問題となっています。その原因の一つは、生身の人体のパラメータ、例えば、筋や腱の長さや、腱と骨との接合（それによるモーメントアーム等）を計測することの難しさです。また、関節の動きに対して、主に力を発生する筋肉（主動筋）、協力して順方向に働く筋肉（協働筋）、逆方向に作用する筋肉（拮抗筋）がある等、内部の働きに自由度があること、さらに、他の筋や骨に隠されている深層筋を計測するのが難しいことも理由としてあげられます。

このような問題に対処する一つの方法として、図１のように、外部から姿勢を計測し、その結果から逆運動学等を利用して各関節に作用しているトルクを求め、筋電位により推定される筋活性度と統合して筋張力を推定することが考えられます、現在、我々の研究室では、このようなモデルを用いた運動解析に取り組みつつあります。位置の選択性の高い電極やアレイ電極を用いた筋の活性状態の詳細な解析や、深層筋の活動推定などを用いてその精度を高めることも課題となっています。以下では、このような試みに先行して行ったリハビリテーション支援と把持行動の予測について紹介します。

2.2　肩のリハビリテーション運動の支援

リハビリテーションにおいて効果の高いトレーニングを行うためには、「正しい姿勢」で「適切な筋収縮」を発生させる必要があります。しかし、肩のように自由度の大きな機構では、正しいトレーニング動作を理解しにくく、また、一旦正しい動作を行えても、時間経過とともに所定の動作から外れ、「代償動作」（似ているにもかかわらず本来の目的を果たせていない別の動作）を行なってしまうことが問題になってきました。

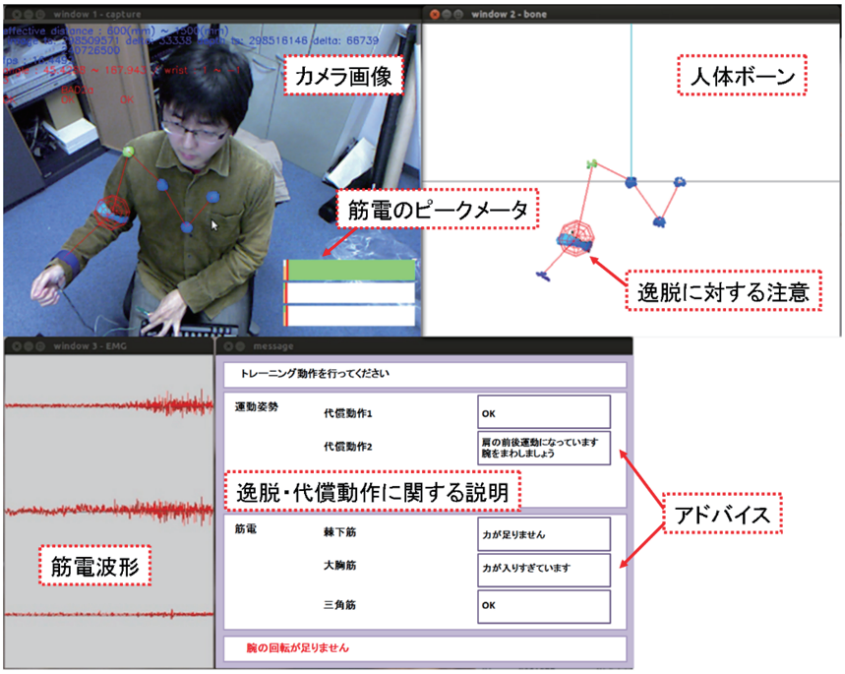


図２：情報提示の一例（点線の枠及び枠内の文字は本論文のために説明として付加したもので、利用者には提示されていない）：左上は RGB カメラ画像、右上は人体ボーン、左下は筋電位波形で上から棘下筋・大胸筋・三角筋後部、右下は文字情報

そのため、患者が正しくトレーニング動作を行う支援をするシステムを本学附属病院の理学療法士の協力を得て設計しました[10]。リハビリテーションの現場でよく行われるのは、医師や理学療法士が正しい動作、または、現在の状態可能な範囲で最も望ましいと考えられる動作を患者に指示し、それを患者が繰り返し再現する努力をすることです。そのため、このシステムでも、手本となる動作を記録しておき、利用者がそれを繰り返し再現することを手順としました。

繰り返しトレーニングを行う際の提示情報の例を図２に示します。このように計測結果を提示することにより、利用者が客観的に自分の状態を把握する補助を行うとともに、毎回の動作と基準動作との差を意識することができます。逸脱が起こっている場合には、該当箇所や理由・修正方法等が提示されるため、利用者は動作の修正を行いながら所定のトレーニング動作を継続することができます。

試作システムが概ね想定通りに動作していることを確認した上で、患者さんおよび理学療法士に試用してもらったところ、本システムの必要性や機能について、肯定的な意見を多くもらいました。現在の構成でも、理学療法士が患者のそばにいなければならない時間を減らせ、患者にとっても待ち時間が減ることが期待できるとの感想が得られています。また、トレーニング状態の履歴を残したり、過去のトレーニング履歴との比較を提示する機能を加えて欲しいとの要望がありました。上達の度合いを表示することによって患者の動機を高めたり、医師や理学療法士のために治療効果を可視化することなどが目的です。

2.3　把持行動の予測

いつ、どの物体を、どのように把持するのかを予測することが出来れば、ロボットや情報メディアが種々の支援をタイミング良く行うことが可能になります。例えば、把持対象に関する情報を遅延なく提供することや、危険物を掴まないように警告を行うこと、その他にも様々な支援が考えられます。

把持行動の典型的な時間的・空間的構造を図３に示します。まず最初に手の移動が始まり、それにやや遅れて手が開き始めます（これをプリシェイピングと呼びます）。様々な先行研究から、プリシェイピングの完了する時刻と物体に手が到達する時刻に一定の関係があることがわかっています。また、どのような形状の物体を掴もうとしているかによって、手の開き方や掴む際の閉じ方が異なります。

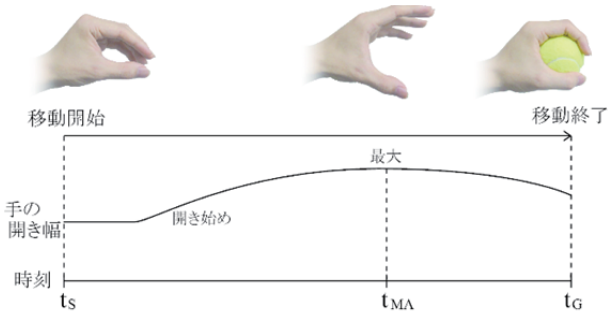


図３：把持行動の構造

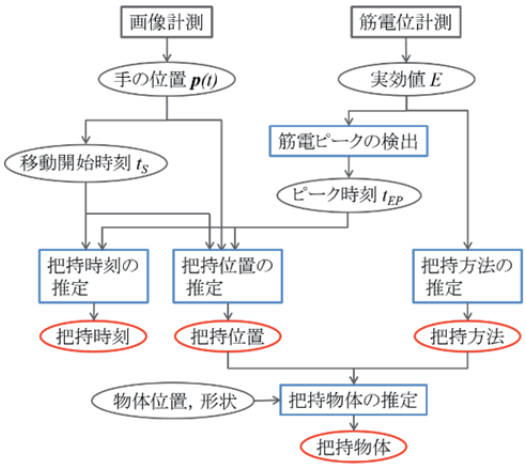


図４：把持予測のデータ計測・処理の流れ

このような知見を基に、把持の予測を行う手法を提案しました[5]。その方法は図４のようになっています。画像により手の位置を計測し、筋電計測により手を開く動作を検出するとともに手の形を認識します。この結果を統合して、把持時刻、位置、把持方法、把持物体を順に推定します。実験の詳細は

文献[5]をご覧頂くこととし、ここでは簡単な結果のみを紹介します。手の移動が 60% 程度の時点で 10 ～ 20% 程度の誤差（移動距離や移動時間に対する誤差）で時刻や距離を推定でき、移動が完了する時点まで誤差が単調に減少します。また、掴み方（実験では 4 つの掴み方からの選択）は移動し始める時点でも 70% 程度の精度が得られ、移動が 60% 程度の時点では 90% 近い精度が得られています。

3. 人間と機械・情報システムとの協調のデザイン

統制された環境下では、精度の良い画像認識システムが実現できるようになってきました。しかし、一般的な環境、例えば、人間がシステムを意識せずに自由に振る舞ったり、様々な未知の物体が持ち込まれたり、照明条件が任意に変化したりする等の悪条件下では、残念ながら 100% に近い精度を得る目処は立っていません。

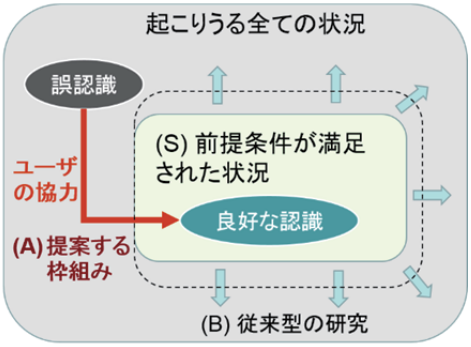


図 5：前提条件と誤認識の関係

これを図 5 のようにモデル化してみます。認識対象や環境の状態を「状況」とし、それを空間（「状況空間」と呼ぶ）の一点で表すことにします。システム（認識プログラム）は環境や認識対象の状態に対する何らかの「前提条件」を仮定しており、それが満たされている（状況が図 5 の S に含まれる）場合には正しい認識結果が得られ、それを逸脱した場合には、結果は保証されません。従来の研究の多くは、この前提条件（S）をできるだけ一般的なものにし、多様な状況をカバーする方法を模索してきました（図 5 の B の矢印）。この努力により、パターン認識技術は大きな進歩を遂げてきましたが、人間が行動する環境を対象とする場合には、依然として想定外の状況が簡単に起こり得ます。

このような背景のもとで我々が取り組んできた手法は、人間が機械の欠点を補えるように機械の振る舞いやインタフェースをデザインすることです。人間が介在することは、問題を難しくするという悪い面だけでなく、人間によって状況を改善できる可能性があるという良い面も含んでいるからです。これにより図 5 の矢印 A に相当する「状況の改善」を得る方法を設計します。ここでポイントとなるのは、大きな負担なしにユーザが協力できるように、(1) システムの内部状態をわかりやすくユーザに伝えること、(2) 状況が悪い（システムが正しくに働きにくい）時、それを改善する方法をユーザに伝えられること、等となります。また、それにより、(3) ユーザがシステムをうまく使いこなすコツを習得できること、が期待できます。このような方向性は、システムの精度自体を高める研究と相補的に機能し、人間にとって使いやすく、良い結果の得られるシステムを設計する方法論となることが期待できます。

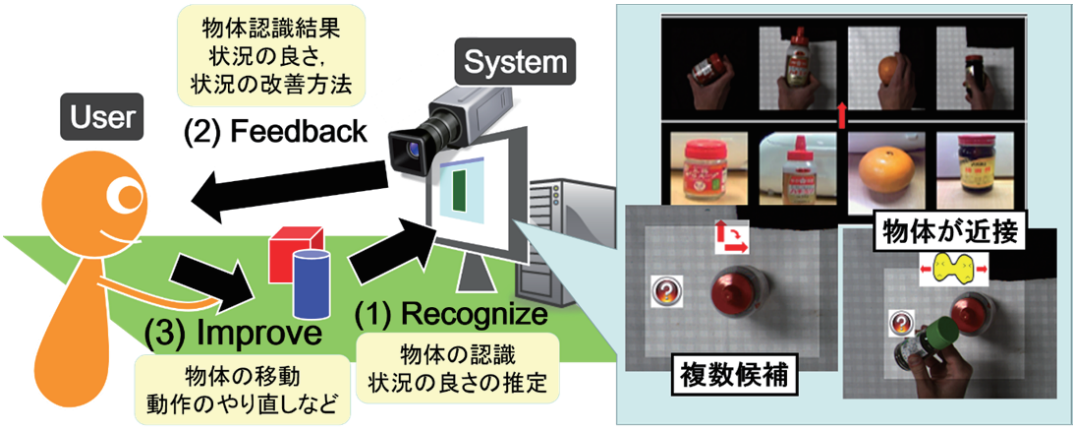


図 6：物体認識をユーザと協調して行うシステム

このような考え方に基づいた２つの研究例を紹介します。一つは認識処理が失敗する悪状況に対応する機能を予めプログラムしておく方法であり、もう一つはそれを大量のデータから学習する場合です。

3.1　物体認識への適用

上記の考え方を物体認識システムへ適用した例を図６に示します[4]。ここでは人間（ユーザ）が系に包含されており、(1) 物体の認識と状況の良さの認識、(2) ユーザへの情報呈示と状況改善の提案、(3) 利用者によるシーンの改善や問題自体の変更、を含むループ系が構成されます。系の動作は、(1)～(3) を繰り返すことによってユーザを満足させることが目的です。ここで、悪い状況とその改善策としては、表１のものを用意しました。これらは因果関係や事前知識に基づいて人手で構成したものであり、さらに多様な悪い状況の検出方法や有効な改善策を収集することは今後の課題となっています。

表１：悪状況とその改善策

i	認識の失敗	ユーザに示される改善策
1	認識結果として複数候補が残存している	物体の向きを変える
2	認識結果の候補がない	同上
3	認識結果の候補が２つ、かつ悪状況が検出されない	正解を教示するインタフェースを提供
k	認識困難な状況	ユーザに示される改善策
1	物体の移動が速い	一度動きを止める
2	複数物体が近接している	近接している物体を離す
3	物体色が背景色と類似している	異なる色を持つ背景に移動させる
4	物体が鏡面反射を起こしている	照明条件が良くなるように向きを変える/移動させる
5	物体が暗すぎる	同上

簡単なシステムを構成し、ユーザが一定時間以内にシステムに正しい認識をさせられるかどうかを試した結果、全般的に、認識精度と正しい認識までにかかる時間の両方の面で、性能が向上しました。ユーザがシステムに協力する（システムの状況改善要求に応える）時間を含めてもトータルの時間が短縮されたことは興味深い結果と言えます。これは主に、ユーザがあてのない試行錯誤をする時間が減ったことに起因します。ただし、依然として 100% の認識精度とはなっておらず、今後より多様な状況に対応する必要があります。

3.2　ジェスチャインタフェースへの適用

ジェスチャインタフェースは直感的で使いやすいインタフェースを目指して開発されてきました。しかし、実現されているジェスチャインタフェースは必ずしも使いやすいものではなく、かえってユーザのストレスを溜める場合も多いのが現状です。人間の振る舞いや周囲環境の多様性にシステムの能力が追いついていないことが元々の原因ですが、失敗が起こった際のシステムの振る舞いをユーザが理解・予測できないこともそのストレスを大きくしています。

その一つの解決方法として、図５の状況空間を実際に構成し、その空間の中で状況を良い方向へ向かわせるインタ

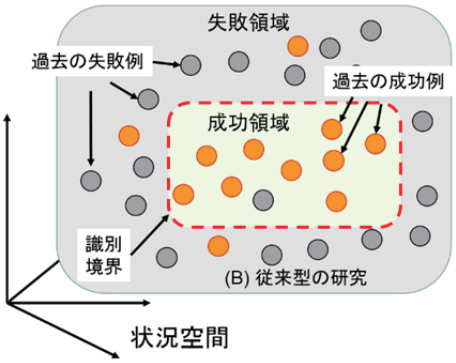


図７：成功領域と失敗領域を大量データから推定する

フェースを設計した例を紹介します。状況空間の次元（軸）として、システムが用いているアルゴリズムの前提条件を用いれば良いことになりますが、複雑な認識処理に対してこのような指標を設定することは困難です。そのため、前提条件そのものではなく、前提条件の充足に深く関与する指標を冗長性を許して選ぶことにします。次に、図７のように状況空間の中で良好な認識が行われる領域とそうでない領域を区別します。その方法として、正解データ付きの多数のデータを利用し、成功例が大半を占める領域（以下､成功領域と呼ぶ）とそうでない領域（失敗領域と呼ぶ）の間に識別境界を設定します。また、この識別境界からどれだけ成功領域側に入っているかを状況の良さ（状況スコアと呼ぶ）と定義します。システムが状況スコア、および、状況スコアを良くする方法をユーザに提示できれば、ユーザがシステムに協力できることになります。ただし、良い状況へ向かう方法は無数にあり、その目標点・経路の選び方、その提示方法が問題となります。例えば、以下の２つが考えられます。

- シンボル型フィードバック：ユーザが状況の改善のために行える行動を予めリストアップし、それらの行動を行った場合の状況スコアを推定する。改善されたスコアが良く、ユーザの負担が小さいものを選択する。
- 事例型フィードバック：蓄積された過去のデータから、成功領域内にあり、現在の状況にできるだけ近いものを選択する。

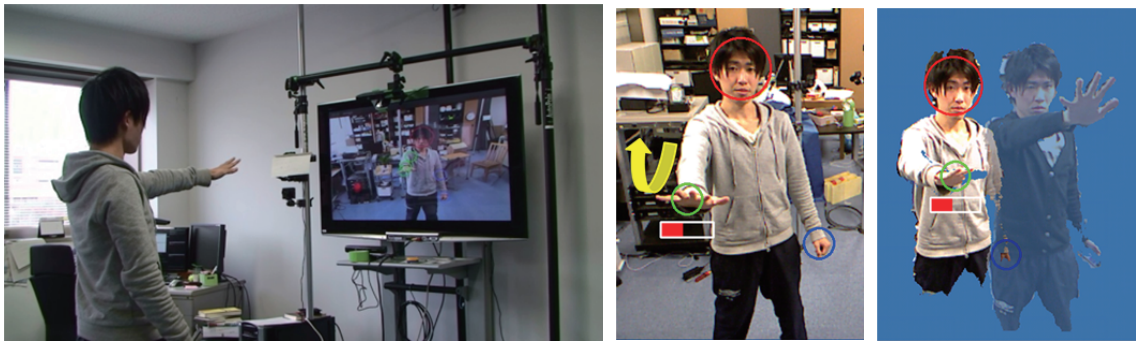


図８:ユーザの協力を促すための表示例（どのようにユーザが動けば認識がより正確になるかを伝える）。左：ディスプレイ上のコンテンツを手で操作するインタフェース（ユーザに画像で情報提示できることを想定）、中：シンボル型フィードバック（手のひらをこちらに向けるように矢印などで指示）、右：事例型フィードバック（手を少しあげた過去のサンプルを例示）

その簡単な実装例を図８にあげます。ここで対象としているジェスチャは２種類の手形状で、どちらでもない場合を合わせて、３カテゴリの識別問題となっています。正解付きのサンプルはそれぞれの手形状について２万例を与え、成功領域と失敗領域の識別境界を求めるためにサポートベクターマシン（SVM）を用いています。簡単な例ではありますが、２種類の提示のどちらによってもユーザが協力できること、それによって状況スコアが増加する（認識率が上がる）ことが確認できています。また、上記の２つの方法を比べると、事例型フィードバックの方が協力に要する時間が長く、ユーザに少し多くの負担をかけていること推測されますが、一回の協力による状況スコアの増加は大きい傾向が見られました。ユーザが許容できる負担や慣れに応じて使い分ける必要性が示唆されています。

このように、大量のデータからシステムの特性を解析し、人間を含んだ系としての総合的な性能を向上させていく方法論を構築することが重要だと我々は考えています。

4. おわりに

本稿では、人間にとって安心して使えるロボットや情報メディアを実現するための人間のセンシング

や機械システムとの協調のデザインについて紹介しました。必要とされる機能を十分な精度で提供するためには、今後一層の研究を必要としていますが、脳科学の最新の成果を利用した生体計測や人間の特性のモデル化などを取り込んで、今後さらに発展するとともに、奥の深い分野となることが期待できます。

参考文献

[1] M. Ozeki, S. Maeda, K. Obata, Y. Nakamura, Multimedia Tools and Applications, 44（3）, pp. 433-448, 2009

[2] 青山秀紀、尾関基行、中村裕一、電子情報通信学会論文誌、J92-D（8）, pp. 1317-1328, 2009

[3] K. Ishikawa, M. Toda, S. Sakurazawa, J. Akita, K. Kondo, Y. Nakamura, IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science（ICIS 2010）, pp. 37-42, 2010

[4] 近藤一晃、西谷英之、中村裕一、電子情報通信学会論文誌、Vol. J94-D（8）, pp. 1206-1215, 2011

[5] 青山秀紀 他、電子情報通信学会論文誌、Vol. J95-D（3）, pp. 527-538, 2012

[6] Zhiwen Yu, Zhiyong Yu, X. Zhou, C. Becker, and Y. Nakamura, IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 24（4）, pp. 759-768, 2012

[7] 中村裕一、近藤一晃、小泉敬寛、システム制御情報学会誌、56（2）, pp. 90-95, 2012

[8] Zhiwen Yu, X. Zhou, and Y. Nakamura, IEEE Pervasive Computing, 12（2）, pp. 68-75, 2013

[9] 中村裕一、情報の科学と技術 , 63（2）, pp. 57-62, 2013

[10] 朝倉僚 他、電子情報通信学会論文誌 , Vol. J97-D（1）, pp. 50-61, 2014

産業界の技術動向

関西電力の研究開発

関西電力株式会社　三　浦　良　隆

1. はじめに

電気事業を取り巻く経営環境は、原子力プラントの再稼動時期が未だ見通せず、電力の需給、事業の収支ともに極めて厳しい状況が続いている。また、電力の小売全面自由化をはじめ、かってない本格的な競争の時代も目前に迫っている。

このような状況下、聖域なき経営効率化を実現するとともに、電力の安全・安定供給に取り組むことに加えて、将来の競争本格化を見据え、戦略や事業基盤の構築に取り組んでいくことが重要である。

研究開発において、投入できる経営資源が限られる中で、研究計画の段階で内容を精査し、研究終了後は研究成果を多面的に評価することにより、投資効率（費用対効果）を向上させる取り組みを行っている。

本稿では、当社の2014年度の研究開発方針と、主な研究開発の取り組みについて紹介する。

2. 2014年度の研究開発方針

2014年度の研究開発方針は、電気事業のおかれている厳しい経営環境の中、当社が直面している未曾有の危機を突破し電気事業の持続可能性を確保すべく、次の3つの重点課題を掲げ、その解決に取り組んでいる。

(1) 安全・安定供給を基軸とする事業基盤充実・強化のための研究開発

主要研究テーマは、①安全・安定供給の確保、②生産性向上、③エネルギーセキュリティ、の3項目である。「安全・安定供給の確保」では、原子力発電の安全性の高度化や耐震設計手法の高度化を、「生産性向上」では、電力設備の寿命延伸や新技術導入などによるコスト削減に有効な研究開発を、「エネルギーセキュリティ」では、燃料の利活用を促進する研究開発に取り組んでいる。

(2) お客さま・社会のご期待に応えるための研究開発

主要研究テーマは、①分散電源対策、②エネルギーマネジメント、の2項目である。「分散電源対策」では、太陽光発電大量導入時の系統影響評価や系統の最適制御に係るスマートグリッド（次世代送配電網）を、「エネルギーマネジメント」では、お客さまサービスのさらなる向上のため、電気・ガス・水道の見える化や節電、省エネルギーに係る研究開発に取り組んでいる。

(3) グループ全体の新たな成長に向けた研究開発

グループ企業とのシナジー効果を期待できる省エネルギー性の高いヒートポンプ技術の利用拡大につながる技術や、バイオマスなど未利用エネルギーの利用技術に係る研究開発に取り組んでいる。

3. 主な研究開発の取り組み

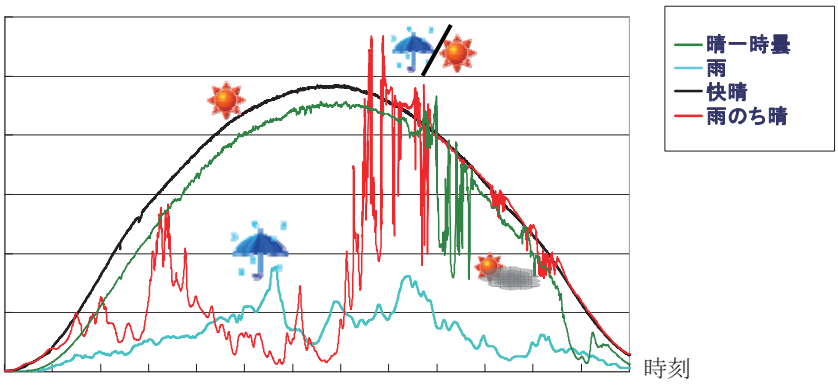
(1) 堺太陽光発電所における出力特性に関する研究

堺太陽光発電所〔図1〕は、2011年9月に運転を開始した当社で最初の太陽光発電所で、広さが約21ha（甲子園球場の約5倍）、定格出力は1万kWである。太陽光発電は、その出力が日射変化に伴って大きく変化する特性があり、この特性を把握することが電力系統と連系して活用するため

に必要となる。そこで、出力変動の特性や気象との関係を把握するため、堺太陽光発電所で出力特性の研究を行った。また、メガソーラー全体の出力特性だけでなくソーラーアレイ毎の出力特性も同時に測定し、発電エリアの広さが異なる場合の出力特性にも注目した。さらに、近くの変電所に全天カメラを設置し、天候や上空の雲の動きについても観測を行った。

〔図１〕堺太陽光発電所の全景

快晴日は、日の出から日の入りまで、太陽の高度角に合わせて、正午を中心に対象形となる出力特性を示すが、上空の雲が遮ると、出力が急激に低下する〔図 2〕。このとき、雲の移動に合わせて出力が低下するソーラーアレイも移動していくため、発電所全体の出力変動は、個々のソーラーアレイの出力変動よりも平滑化される。



〔図２〕天候による出力変化

年間を通して見ると、終日快晴で日射が安定している日数は１割程度であり、他の日は雲による出力変動が発生している。出力変動の中には、雲の隙間から太陽光が差し込む際、周辺の雲の側面で反射した光がソーラーアレイに加わり一時的に同時刻の快晴日出力を超えるケースも年間で数分間ほど観測された。これらの分析結果は、今後の電圧変動対策等の検討に活用していく予定である。

(2) 二次電池による需給制御に関する研究

太陽光発電の大量導入に伴い、太陽光発電の出力変動に対する周波数の調整力不足が懸念されており、この対策の１つとして、蓄電池を用いた需給制御システムの検証を進めている。これまで蓄電池を需給制御に適用した例が無いため、変電所に実証試験設備〔図３〕を設置した。交直変換器と連系変圧器を通じて蓄電池を配電線と連系し、実際の太陽光発電の出力変動を捉えて需給制御の適用性を評価している。

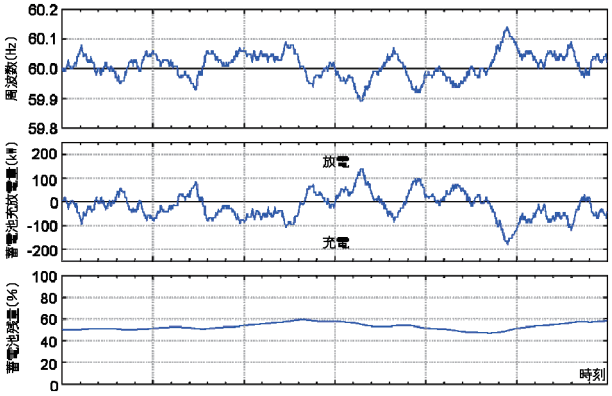
需給制御の機能として、GF（ガバナフリー：Governor Free)、LFC（負荷周波数制御：Load Frequency Control)、LL（負荷平滑化：Load Leveling）のロジックと、容量制約のある蓄電池を連続的に運転するための SOC（充電状態：State Of Charge ）制御ロジックの検討を行い、そのロジックを実証設備に組み入れて、需給制御への適用性に係る基礎特性を測定している。

〔図３〕需給制御の実証試験設備
左側が蓄電池、右側が交直変換器

図４に、数秒から数分の速い周波数変動成分に対して変動抑制制御を行なった場合の測定例を示す。周波数が 60Hz より高い場合は充電、低い場合は放電を行い、周波数を一定に保つための制御が行なわれている。

合わせて定期的に蓄電池性能も測定し、蓄電池寿命やシステムの運用性、メンテナンス性などの評価も行っている。

今後は、得られた基礎特性をシミュレーションモデルに反映し、様々なケースにおける蓄電池の需給制御への適用性の評価を進めていく予定である。

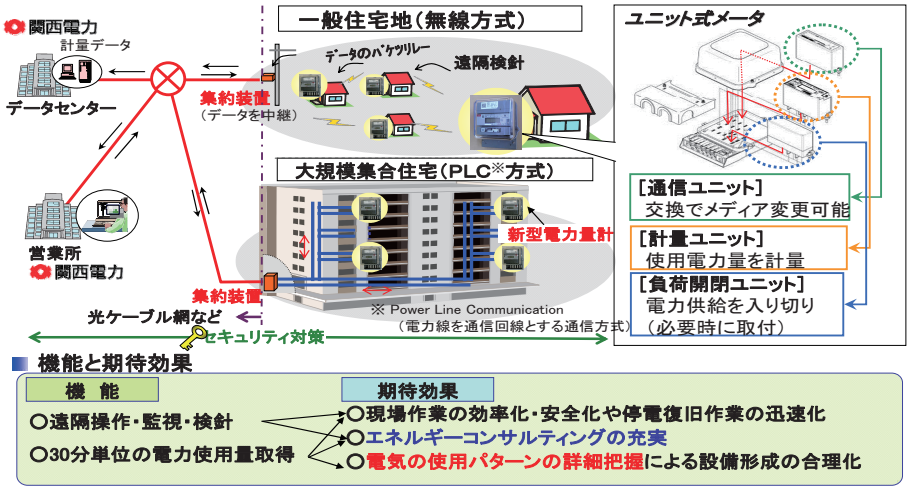


〔図４〕周波数変動抑制制御の一例

(3) スマートメーター（新計量システム）

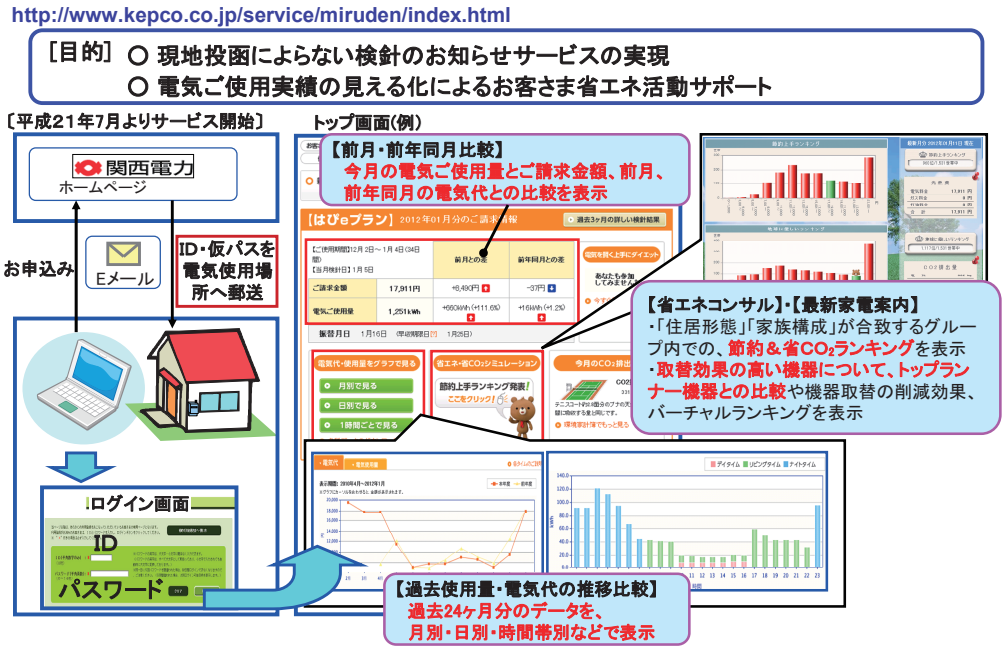
当社では、ご家庭に設置する電力量計に通信機能を付加し、計量データの自動収集やスイッチの開閉制御を可能としたスマートメーターの導入を他電力に先駆けて開始し、現在までに 250 万台以上の設置を完了している。2022 年度までに全数 1,300 万台導入する予定である。この「新計量システム」〔図５〕は、多数のスマートメーターから計量データを効率的に集約するために、メーター間を無線通信、PLC（電力線搬送通信)、あるいは光ファイバ網によりアドホックなネットワークを形成している。なお、メーター間をつなぐ通信技術は、当社およびグループ企業が培ってきた情報通信技術が、これを支えている。

当社のスマートメーターは、独自のユニット式構造を持ち、本体ベース上に通信、計量等の機能毎に独立したユニットで構成され、計量法上の有効期間満了による計量部の取替えでは、該当ユニットの交換のみで対応可能であるため、現場作業の効率化・安全化に加え、低コスト化も同時に実現している。



〔図５〕スマートメーターを導入した「新計量システム」

従来は１ケ月に１度、計量値の確認を行っていたが、スマートメーターの設置により 30 分毎の電力使用量のデータが取得可能となり、当社 Web サイトで展開中のお知らせ・照会サービス「はぴｅ見る電」〔図 6〕で現在の使用量、過年度との比較、CO_2 排出量のチェックなど、電気ご利用の「見える化」により詳細な状況把握が可能となり、そのデータはエネルギーコンサルティングにも生かされている。



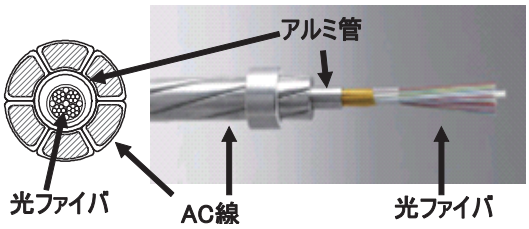
〔図６〕お知らせ、紹介サービス「はぴｅ見る電」

この技術は、太陽光発電や風力発電など、再生可能エネルギーの導入と安定的な運用を両立するスマートグリッドにも利用され、将来にわたって期待される技術である。

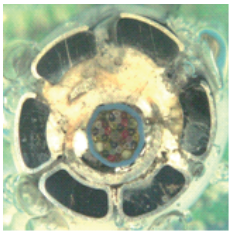
(4) OPGW の高経年化に向けた測定評価研究

電力会社では、電力系統網の監視制御のため、発電所や変電所等の間を光通信等で結び、広域の保安通信網を構築している。OPGW（OPtical Ground Wire）は、雷の直撃を避けるため、送電線

鉄塔の最上部に接地されたワイヤ（Ground Wire）の中に光ファイバを通線したもの〔図7〕である。屋外に長期間敷設されると、ワイヤの表面だけでなく、ワイヤの隙間から侵入した雨水によってワイヤの内側やアルミ管の表面に腐食が生じる。これが進行すると、アルミ管が変形し、光ファイバが押し曲げられ通信障害を引き起こす〔図8〕。



〔図7〕OPGWの構造



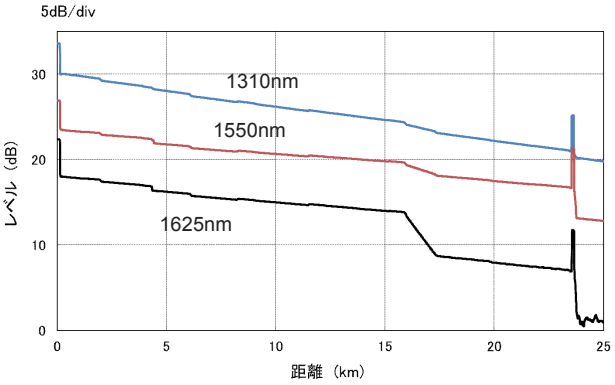
〔図8〕OPGWの腐食

既設のOPGWで既に上記の事例が確認されており、今後OPGWの高経年化による通信障害が多発することが懸念されるため、OPGWの加速試験や既設OPGWのサンプル調査を通じて、OPGWの余寿命の推定や腐食箇所の検出技術の開発に取り組んでいる。

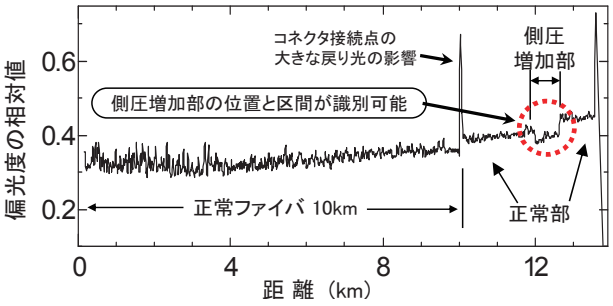
OPGWはアルミ管内に光ファイバが収容されているため、アルミ管の内部まで腐食が進行すれば、管内に腐食で生じた水素が充満し水素濃度が高くなる。水素は光ファイバの中にまで侵入するため、水素に吸収されやすい波長で測定すれば、腐食が進行している区間を特定することができる。

この原理を利用した損失分布の測定例を図9に示す。17km付近を見れば、水素に吸収されにくい波長1,310nm、1,550nmの測定値は平らな波形であるが、水素に吸収されやすい波長1,625nmの測定値は右下がりの波形となり（水素による吸収が見られ）、腐食が進行していることがわかる。

また、OPGWの通信障害の原因の1つに、光ファイバに側圧が加わり、それが進行し光ファイバが曲げられて通信障害に至る場合がある。光ファイバに側圧が加われば、伝搬する信号光の偏波が変動する特性を利用し、散乱されて戻ってくる光（後方散乱光）の偏波状態の時間分布を測定し、ファイバに沿って側圧の違いを推定する手法を検討した。後方散乱光の偏波変動特性は、側圧増加部とその前後で異なるため、側圧増加部を特定することができ、また、散乱光の到着時間から側圧増加部の位置を知ることができる。図10は、20kmの光ファイバの中間部に、疑似的に側圧を加えた光ファイバを接続して測定した例である。前後との差異から、側圧増加部が検出できることがわかる。



〔図9〕水素濃度を利用した腐食発生区間の測定



〔図10〕後方散乱光を利用した側圧増加部の測定

4. 最後に

電気事業において、研究開発は、経営効率化や将来の競争本格化の観点から、より一層、戦略的に投資効率（費用対効果）の最大化を目指していく必要がある。また、これまで以上に早いスパンで研究成果を事業に結び付けていくことが求められている。

そのため、これまで培った基盤となる技術力に加え、課題発掘に始まり、計画段階から成果の評価まで確実かつ戦略的に行なう研究開発のマネジメントが重要である。

今後は、そういった研究開発マネジメントと基盤となる技術力を両輪として、当社事業に貢献する成果を生み出す研究開発に取り組んで行く。

新設研究室紹介

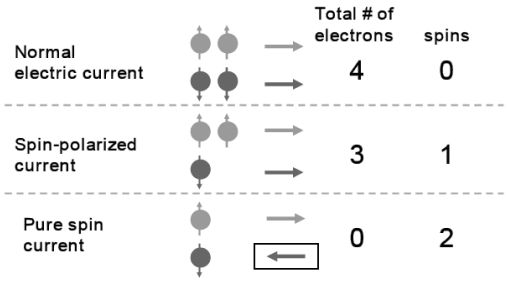
電子物理工学講座極微真空電子工学分野（白石研究室）

http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「IV 族半導体などの固体中における純スピン流物性の基礎と応用に関する研究」

当研究室は 2013 年 10 月に白石が、2014 年 4 月に安藤がそれぞれ大阪大学大学院基礎工学研究科から着任し、それまでの後藤・辻が遂行してきた極微真空工学分野の研究に加え、スピントロニクスという新たな研究の軸が設定されました。今回はこのスピントロニクスに関する当研究室の研究の一端をご紹介します。

スピントロニクスは電子の有する電荷自由度とスピン自由度を同時に制御することで従来のシリコンベースのエレクトロニクスで実現しにくかった新研究領域を創成していこうという研究分野です。この分野は 2007 年のノーベル物理学賞の受賞者である Fert, Gruenberg による巨大磁気抵抗効果（GMR）効果の発見に端を発し、その後 Miyazaki, Moodera によるトンネル磁気抵抗効果（TMR）の発見により金属スピントロニクスという研究領域が創出･発展しました。応用面では磁気センサーが実用化されただけでなく、MRAM の開発が進むなど急速な発展を見せています。さらに 1990 年代からは GaAs などの化合物半導体に少量の磁性元素を混ぜた希薄磁性半導体の研究が盛んになり半導体スピントロニクスという研究分野も創出されました。2000 年代には、よく知られた電荷電流とは根本的にことなるカレントである純スピン流という、電荷移動を伴わないスピン角運動量の流れがナノテクノロジーの発展による素子のナノサイズ化によって実験的にも生成できるようになり、基礎研究としての面白さも一層深まった感があります。純スピン流は図に示すようにアップスピンとダウンスピンが互いに逆向きに流れるカレントであり、互いが互いの時間反転対称操作におけるパートナーであるために時間反転対称カレントとなっています。時間反転対称性を有する運動はエネルギー散逸がないため、純スピン流は理想的には情報伝播にエネルギー散逸を伴わないカレントです。スピンは電荷とは異なり保存量ではないため通常は一定の割合で散逸があり、それ故に完全に情報伝播をエネルギー散逸無しに実現はできませんがスピン緩和の少ない材料を見い出すことができれば情報伝播にエネルギー散逸を極端に少なくした新機能デバイスが創出できる可能性があり応用面でも将来性があることから、現在は世界中で純スピン流の研究が非常に活発に行われています。



我々は 2007 年に、やはり 2010 年のノーベル物理学賞を受賞した Geim, Novoselov らが発見（?）したグラフェンに室温ではじめて純スピン流を生成し伝播させることに成功し[1]、以来純スピン流の持つ様々な基礎物性の理解と、電磁気学のスピン版への拡張という視点に基づく純スピン流の基礎学理の統一的理解、さらには無機・有機半導体における純スピン流伝播・スピン緩和機構の解明と純スピン流情報素子の実現を目指して多角的に研究を進めています。最近の主なトピックスとしては、グラフェンなど分子材料同様に注入スピンのコヒーレンスが結晶の空間反転対称性故に良好であることが期待できるシリコンを対象材料に、p 型[2]と n 型[3]のシリコンにおける世界初の室温純スピン流伝播の実現や電流を一切用いない純スピン流の伝播の実現[2, 4]、半導体やグラフェン中の純スピン流伝播物性の解明[5-7]など産官学共同研究も効率的に推進しながら基礎から応用まで幅広いスコープで研究を行っています。最近では金属でも絶縁体でもない新しい相であるトポロジカル絶縁体表面のヘリカル純スピン流の観測にも挑戦しており、近日中に面白い結果を発信できそうな段階にあります。この研究分野は世界的な競争も激しく大変な領域でもありますが日々楽しんで研究を進めています。

参考文献：[1] M. Ohishi, M. Shiraishi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46, L605（2007）. [2] E. Shikoh, M. Shiriashi et al., Phys. Rev. Lett.. 110, 127201（2013）. [Editor's Suggestion & Spotlighting Exceptional Research] [3] T. Suzuki, M. Shiraishi et al, Appl. Phys. Express 4, 023003（2014）. [4] Z. Tang, M. Shiraishi et al., Phys. Rev. B87, 140401（R）（2013）[Editor's Suggestion]. [5] M. Shiraishi et al., Adv. Func. Mat. 19, 3711（2007）. [6] Y. Aoki, M. Shiraishi et al., Phys. Rev. B88, 140406（R）（2013）. [7] M. Shiraishi et al., Phys. Rev. B83, 241204（R）（2011）.

通信システム工学講座 ディジタル通信分野（原田研究室）
http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/
「無線資源管理技術、高度送受信信号処理技術による無線伝送技術の研究開発」

携帯電話･PHS の加入数は平成 25 年度末で 1.5 億近くになり、さらに、今後は一般利用者のみならず、装置、センサー、メーター等の各種機器も接続する必要性がでてくるため、数億以上の利用者を収容可能な通信システムを構築する必要性がある。しかし、移動通信に適した周波数帯（主に 6GHz 以下）は逼迫しており、利用者が想定する広帯域通信は行いにくい現状がある。本研究室では、このようにワイヤレス技術により様々な機器、装置、センサー、メーターが縦横無尽にネット接続され、特に意識しなくともその恩恵を自然と受けられる時代に必要となる無線資源の管理技術や送受信信号処理が一体化した高度な無線伝送技術の研究開発を行っている。具体的には、(1) 電波の利用状況の認識技術、管理技術、(2) 電波管理技術を基盤とした広帯域無線通信システム、(3) センサー、メーターとブロードバンド無線通信システムとの連携通信技術である。

(1) に関しては各無線局の位置、利用アンテナ、周波数帯域、送信電力等から、電波の利用状況（免許局の位置、想定通信エリア等）計算し表示する周波数管理データベースに関する研究開発を行っている。この周波数管理データベースは、各周波数帯における電波の干渉も推定できるため、無線局の位置における利用可能な周波数、通信方式、無線パラメータ（出力電力等）を示すことが可能である。この周波数管理データベースを利用した無線通信技術をコグニティブ無線技術と呼ぶ。

(2) に関しては、コグニティブ無線技術を利用可能な VHF/UHF/ マイクロ波帯を用いた次世代ブロードバンド無線通信システムの研究開発を行っている。特に、現在まで狭帯域通信が中心であった VHF 帯、UHF 帯においてチャネルあたり数 Mbps—数 10Mbps 以上の広帯域伝送が可能な通信方式、システムの研究開発、国際標準化を行っている。図 1 は VHF 帯（170-202.MHz）で動作させることが可能な無線機の開発例である。見通し内で 10km 程度の通信エリア、山間部等の見通し外においても数 km 以上の基地局—移動局間通信可能な受信信号処理技術を搭載したものである。また、図 2 は UHF 帯（TV 周波数帯、470-710MHz 帯）において周波数管理データベースを利用し、TV 放送と共存しながらブロードバンド通信が実現可能な無線機の開発例である。また併せて、基地局 - 端末、基地局間中継、端末連携を使った通信エリア拡張および高品質ブロードバンド送受信技術の研究開発も行っている。

(3) に関しては、(2) において開発した広域広帯域無線通信システムに接続可能な、センサーおよびメーター用無線通信技術の研究開発である。センサー、メーターは必ずしも電源供給が可能であるところに設置されているとはかぎらないため、電池駆動を想定した低消費電力型の無線通信システムが必要となる。この低消費電力を実現するための同期回路、通信フレーム構成、及び電波をできるだけ出さない、聞かない通信プロトコルの開発を行っている。このような通信方式を米国 IEEE802.15.4g および 4e で国際標準化させ、この標準化システムをもとに各メーカーが相互接続可能な通信規格 Wi-SUN システムの開発、推進を行っている（図 3）。今後はこれら (1) – (3) の研究成果をもとに 2020 年頃に実現を目指す第 5 世代移動通信システムの実現に寄与していきたい。

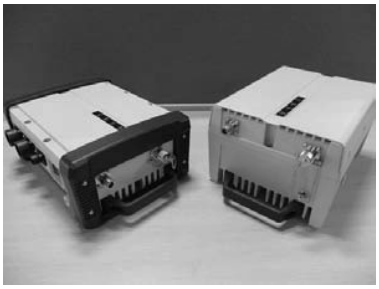


図 1：VHF 帯（170-190MHz 帯、5W）広域広帯域無線通信機。

図 2：UHF 帯（470-710MHz 帯、1W）広域広帯域無線通信機。

図 3：メーター用（920MHz 帯、4cm × 2cm）Wi-SUN 無線通信機。

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ１つのテーマを選んで、その概要を語ります。
（☆は「大学の研究・動向」、＃は「高校生のページ」、＊は「新設研究室紹介」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自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
電子物理工学講座極微真空電子工学分野（白石研）＊
電子物理工学講座プラズマ物性工学分野（竹内研）
電子物性工学講座半導体物性工学分野（木本研）
電子物性工学講座電子材料物性工学分野
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）
デバイス創成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ィジタル通信分野（原田研）＊
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画像情報システム分野（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）

国際高等教育院

教養教育部（小山田研）

学術情報メディアセンター

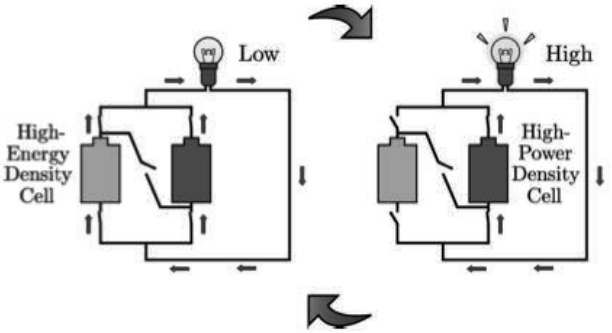
教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野（中村裕研）☆

先端電気システム論講座（引原研究室）
http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/
「低環境負荷社会の実現を目指したリチウムイオン組電池の研究～構成切り替え制御の提案～」

複数のリチウムイオン電池で構成された組電池は、電気自動車や家庭用蓄電装置など様々な応用の観点から現在注目が集まっている。一般に組電池は特性の揃った単電池（セル）により設計される。これは組電池内のセルの特性が揃っていない場合、特定のセルに過電流や過充放電が発生し、組電池の安全上の問題につながることに起因する。また、セル特性のばらつきは長期間にわたる充放電の繰り返しに伴い不可避であり、設計のみならず管理上も問題となる。これらのことより、組電池の電源システムとしての安全性確保や高性能化に向けて、セルごとの特性の差異を考慮した組電池の設計及び管理手法の確立が重要となる。これらの手法が確立されることにより、組電池使用時におけるセル特性のばらつきへの対処のみならず、一次使用により劣化したセルを組電池として再利用することが可能となる。このことから、組電池の研究開発は省資源化による低環境負荷社会の実現という観点から期待が大きい。

本研究室では、リチウムイオン組電池の研究を株式会社 CAPTEX と共同で進めてきた[1-5]。これまでに、セルを複数直並列で接続した実機による放電特性の解析[1,2,4,5]、セルの放電特性を表す数理モデルを用いた放電特性のシミュレーション[4,5]、グラフ理論を用いた組電池システムの縮約とこれに基づく放電特性の評価[4]等を行い、実験的手法と数理的手法・シミュレーションを相補的に用いて組電池に関する基礎的知見を得るとともに、産学連携による社会実装を進めてきた。

本記事では、上記基礎的知見の中で、リチウムイオン組電池の構成切り替え制御[3,4]について述べる。一般にセルのエネルギー密度とパワー密度はトレードオフの関係にある。このようなセルを静的に複数接続した組電池では、負荷が要求する最大パワーにより組電池としての出力エネルギーが制限される。このことより、各セルの有するエネルギー密度やパワー密度を組電池において最大限引き出すことが困難となる。これは従来、組電池設計における性能限界と見なされてきた。また、特性の異なるセルで組電池を構成した場合、内部起電力及び内部抵抗の差異により各セルを流れる電流にばらつきが発生し、各セルの最大放電電流を越える過電流が発生する可能性がある。本研究では、組電池の構成を動的に切り替えることにより（下図）、上記性能限界を上回りかつ安全性確保を可能にする制御システムを提案し、高出力エネルギーかつ高出力パワーの同時実現と過電流抑制が可能であることを実機実験により示した[3,4]。本研究は、複数セルの構成を動的に切り替えることにより組電池の性能を向上させる可能性を見出したものであり、システム制御分野におけるスイッチング制御ないしハイブリッドシステム制御と関わりが深いものである。本研究室では、現在上記実機実験で示した性能向上を数値的ないし理論的に検証するための数理モデルの開発[6]に取り組み、提案制御システムの一般化を進めている。



図：特性の異なるセルで構成される組電池の構成切り替え制御[3]。低負荷時は出力エネルギーが大きい並列構成、高負荷時は出力パワーの大きいセルのみの構成とすることで、同一セルで構成した組電池と比較して高出力エネルギーかつ高出力パワーを有する組電池を実現する。

参考文献 [1] 佐藤、美馬、引原、平成 22 年電気学会全国大会、4-126 (2010). [2] 宮武、薄、引原、伊藤、田中、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、1-15 (2011). [3] 宮武、薄、引原、坂口、菊池、信学技報、vol. 112, no. 224, EE2012-37, pp. 53-58 (2013). [4] 宮武、京都大学大学院工学研究科 修士論文 (2013). [5] S.Miyatake, Y. Susuki, T.Hikihara, S.Itoh, and K.Tanaka, J. Power Sources, vol. 29, no. 2, pp. 899-907, November (2013). [6] 安原、薄、引原、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会 (2014).

電磁工学講座　超伝導工学分野（雨宮研究室）
http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html
「輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期回転機システムの研究開発」

当研究室では、究極の低炭素化を実現する輸送機器（バス・トラック他の大型車からミドルクラス乗用車まで）を対象として、高温超伝導誘導同期回転機（High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine、以下 HTS-ISM）駆動システムの実現を目指した産学連携プロジェクトを展開している[1-2]。本プロジェクトは、科学技術振興機構（JST）の委託事業（H24 年度戦略的創造研究推進事業先端的低炭素化技術開発（ALCA）「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」）の一環として実施しており[3,4]、①高温超伝導誘導同期回転機の研究開発、②回転機制御技術開発、③小型低熱侵入冷却構造・方式の開発、④小型冷凍機の高効率化・低コスト化を 4 本柱としたシステム全体の総合的研究開発を推進している。本研究の目標としては、輸送機器特有の走行モードに対する高効率化と高トルク密度化を掲げている。特に、HTS-ISM のトルク密度を究極化して変速機（トランスミッションギア）を省略できれば、当該ギアの損失低減に伴って、パワートレインシステム全体で見たエネルギー変換効率が従来機に比較して格段に改善すると期待される。

図 1 には、ALCA プロジェクトとして開発した 20kW 級 HTS-ISM プロトタイプ機の外観写真を示す（第一ステップとして回転子巻線のみ超伝導化し、固定子には銅巻線を適用している）。本試作では、既存の同一出力機[2]に対して、磁気体積（電磁エネルギー変換を行う磁気回路部の体積 : 実質的には固定子コア体積に等しい）を 70% 低減することに挑戦した。図 2 には、運転温度 77K における負荷試験結果の一例を示すが、設計通りの同期定格出力 20kW を達成している。また、定格を超える過負荷を印加したところ、すべり回転状態に自動的に遷移し、すべり最大出力 26.8kW（過負荷耐量）を確認することができた。本プロジェクトでは、さらに HTS-ISM 冷却用の小型 Stirling 冷凍機も開発しており、世界最高効率を目指している。図 3 には、HTS-ISM 駆動システムの概略構成例を示す。近い将来、我々のシステムが実用される日を夢見て、今後共精力的研究を推進していきたい。

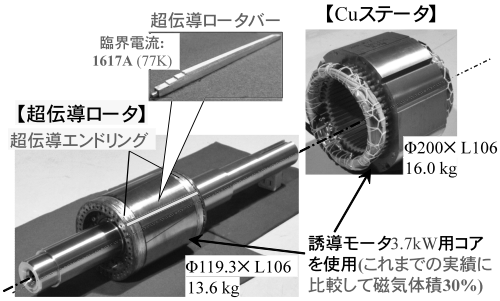


図 1 20 kW 級 HTS-ISM の超伝導回転子ならびに常伝導固定子外観写真

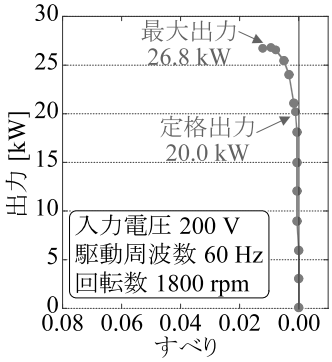


図 2 負荷試験結果の一例（77 K）

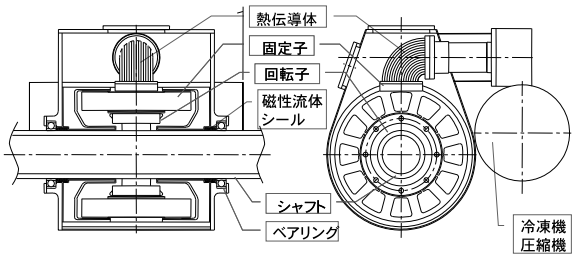


図 3 HTS-ISM 駆動システムの概略構成例

[1] 中村武恒、電気学会誌、vol. 130, no. 12（2010）pp. 828-831

[2] 中村武恒、低温工学、vol. 47, no. 6（2012）pp. 384-391

[3] 中村武恒、化学工業、vol. 64, no. 6（2013）pp. 24-28

[4] 中村武恒、応用物理、vol. 82, no. 7（2013.07）pp. 579-582

量子機能工学講座　光材料物性工学分野（川上研究室）
http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp
「新しい結晶面上での窒化物半導体発光素子の作製と評価」

窒化物半導体では、禁制帯幅を AIN の 6.0eV（波長 200nm に相当）から GaN の 3.4eV（365nm）を経て、InN の 0.6eV（2μm）まで変化させることができる。そのため、例えば InGaN 混晶をベースとした可視発光素子や太陽電池、AlGaN 混晶をベースとした紫外発光素子への展開が期待されている。実際、青色発光ダイオード（LED）や白色 LED の実用化は、この材料系の顕著な成功例ということができる。ただし、その発光効率は、最も高い青色波長域でも 80 数％であり、他の波長域では急激に悪化する。その一因として、われわれは結晶の面方位に着目した研究を進めている。

市販されている LED を含め、窒化物半導体発光素子は、量子井戸発光層をホスト材料でサンドイッチした構造を基本としている。このとき、格子定数差のため、量子井戸発光層は歪を内包することになる。このような歪量子井戸を、従来は六方晶ウルツァイト構造の（0001）面上に作製しているが、歪による結晶の対称性に変化に応じたピエゾ分極が誘起され、電子と正孔が空間的に分離してしまう現象が発生する。輻射再結合確率は電子正孔の波動関数の重なりで記述されるため、それらの空間的分離は再結合確率を低下させることになる。そこで本研究では、(0001）面と約 60 度の角度をなす（11$\bar{2}$2)「半極性面」を用いることを提案している。図 1 に、結晶構造の概略を示した。この面は、GaAs などに代表される立方晶閃亜鉛鉱構造の（001）面に類似した構造的特徴があり、結合手が当該面に対して上下に 2 本ずつあることが、ピエゾ分極誘起電界の発現を抑制している。

基板メーカの協力のもと、GaN（11$\bar{2}$2）半極性基板を作製し、これまでに、InGaN ベースの可視 LED 構造の実現［1］や基礎光物性評価［2, 3］を行ってきた。(0001）面に比べて輻射再結合確率が 2 桁程度高まっていることを時間分解分光により証明し［2]、さらに、この系特有の現象として、発光が量子井戸面内で偏光しており、その方向が In 組成に依存することを示した［3]。最近では、GaN（11$\bar{2}$2）基板上の AlGaN/InGaN 応力補償超格子を提案している。図 2 に示した試料の断面透過型電子顕微鏡像から、積層構造が形成されていることがわかる。強い青色発光や光励起レーザ発振も観察され、発光層やレーザのクラッド層として有望であることが明らかとなった。（なお、2014 年 3 月の応用物理学会において本研究を発表した博士学生が、講演奨励賞を受賞した。）さらに、深紫外域での半極性面の効果を検証するために、半極性 AlN 基板上への AlGaN 量子井戸構造の作製と光物性評価も進めており、自作した 210nm 帯短パルスレーザを用いた時間分解分光によって輻射再結合確率の増強を確認した。これらの研究の進展を通じて、より高効率な固体発光素子を実現し、照明分野における省エネルギー化に寄与できるものと考えている。［1］*JJAP* **45**, L659, ［2］*APL* **89**, 211907, ［3］*PRB* **78**, 233303.

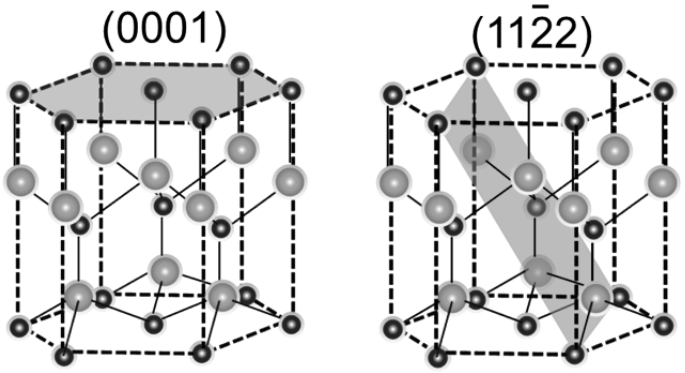


図 1　窒化物半導体の結晶構造：ウルツァイト構造と代表的な結晶面である（0001）極性面と（11$\bar{2}$2）半極性面。

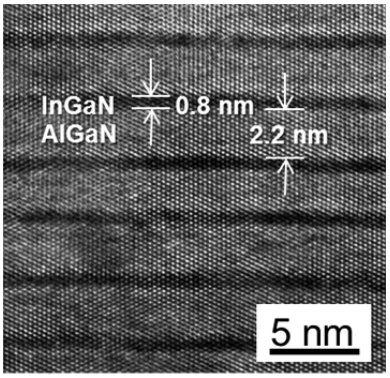


図 2　（11$\bar{2}$2）半極性 GaN 基板上に作製した InGaN/AlGaN 応力補償超格子の断面透過型電子顕微鏡による格子像。

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（高岡研究室）
http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html
「イオン液体イオン源の開発と固体表面改質応用の検討」

本研究室は、光・電子理工学教育研究センターのナノプロセス工学分野として、多種・多様な原子・分子・クラスターからなるイオンビームのナノプロセス利用を目指た研究を行っています。特に多原子分子のイオンは固体表面処理応用を考えた場合、官能基による化学反応や、大質量電荷比に起因する照射効果があるため、様々な応用が期待できるイオンです。近年は、特異な性質を持つイオン液体のイオンビームについても研究を行なっています。

イオン液体は近年注目されている溶媒材料で、カチオン（陽イオン）とカチオン（陰イオン）で構成された室温で液体の塩です。水・油・アルコール等とは混ざり合わず、導電性を示し、発火せず、化学的に安定であるため、合成化学や電池応用への研究が進められています。さらにイオン液体は常温では殆ど蒸発しないため、真空中での電界放出によるイオンビーム形成が可能です。このため、宇宙推進用のイオンエンジンや、表面微細加工用の収束イオンビームへの応用が研究されています。また、カチオンには炭素と窒素、アニオンにはフッ化物を持つものが多いといった特徴から、様々な固体表面処理への応用が期待できます。図１はイオン液体の一つである 1— ブチル -3- メチルイミダゾリウムヘキサフルオロフォスファート（BMIM-PF_6）の分子構造と液体の外観です。

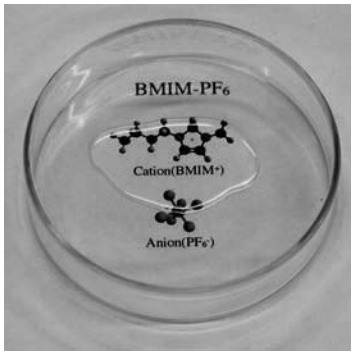


図 1.　イオン液体 BMIM-PF_6 の分子模型と液体外観

図 2.　イオン液体 BMIM-PF_6 イオンビーム放出時のイオンエミッタ先端。

本研究にて開発したイオン液体イオン源のエミッタ先端部分を図２に示します。種々のエミッタ材料を検討した結果、イオン液体との濡れ性が高く、導電性を有するグラファイトを針材としています。エミッタ先端では、電界印加による静電力がイオン液体の表面張力を上回るため、イオン液体はテーラーコーンと呼ばれる円錐形状となっており、その先端からイオン液体のイオンが主に電界蒸発により放出されます。質量分析の結果、正イオンビームではカチオン単体や陰陽イオン対にカチオンが付加したクラスターが放出されていること、また負イオンビームではアニオン単体や同様の小さいクラスターが放出されていることが分りました。また、エミッタ構造や電極構成を制御することにより、数分子から十数分子程度のクラスターイオンとなることも分りました。

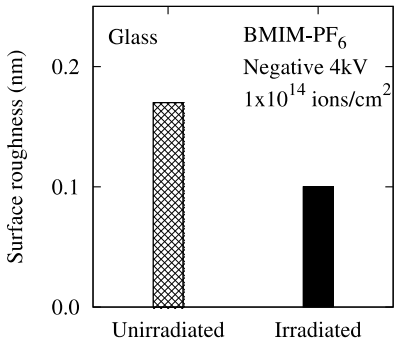


図 3.　BMIM-PF_6 イオンビームを照射したガラス基板の表面粗さ。

イオン液体イオンビームの固体表面処理応用の試みとして、ディスプレイ用の無アルカリボロシリケートガラスの表面平坦性改善を試行した例を図３に示します。生成した BMIM-PF_6 負イオンビームを加速電圧 4kV、照射量 $1x10^{14}$ ions/cm^2 で真空中にて照射し、その後ガラス基板の表面を原子間力顕微鏡にて算術平均粗さを求めています。その結果、イオン照射により表面粗さは照射前の 0.17nm から 0.10nm まで減少し、表面が平坦化されていることが分りました。光電子分光測定などから、照射したガラス基板表面には nm オーダーの薄いイオン液体生成物層が形成されていることが示唆されており、このために平坦性が向上したと考えています。現在は、平坦化メカニズムの解明とその他照射効果検討のため、更なる研究を進めています。

光・電子理工学教育研究センターデバイス創生部門　先進電子材料分野（藤田研究室）
http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html
「環境負荷低減を目指した未来材料・デバイスの創生」

昨今、日本の半導体産業を取り巻く環境は厳しくなっており、新しい機能性材料、または動作機構によるデバイスの開発が望まれている。これまで幾多の先人達によって無数の材料の組み合わせが試みられ、実験・計算の両面から新材料の「宝探し」が盛んに行われてきたが、それらのほとんどは「安定相」の化合物を用いたものが多く、通常では作製が困難である「準安定相」による新材料の探索はあまり行われてこなかった。その理由として、超高圧・高温を必要とするため合成装置が大掛かりになり、また室温・大気圧下で化合物を安定に存在させる事が困難で、これらの点を克服しない限り、実用応用可能なデバイス作製は出来ないからである。しかしながら、準安定相化合物には安定相化合物では観測されない機能を発現するものが多く、機能性材料開発における大きな金鉱脈となる。

一方、当研究室で開発したミスト CVD 法によって、これまで大気圧、低温条件下で安定的に準安定相化合物を作製してきた。例えば、コランダム構造をもつ酸化ガリウム（α-Ga_2O_3）は、β-Ga_2O_3 粉末を 4.4 万気圧、1000°C の雰囲気にさらす事で得ることが出来るが[1]、ミスト CVD 法では、大気圧下、500°C の条件下で c 面サファイア基板上に高品質の α-Ga_2O_3 薄膜を作製する事が可能である[2]。また、その成長メカニズムは、サンプル断面の透過型電子顕微鏡（TEM）観察により、ドメインエピタキシー成長によるものであり、基板からの応力による拘束を強く受けている事が判明した[3]。そして、この仕組みを利用する事で、α-Fe_2O_3 バッファー層の導入による α-$(In,Ga)_2O_3$ 薄膜の作製[4]や、基板選択により同一条件下で薄膜の結晶構造を作り分ける事に成功している[5]。

このように作製した準安定相酸化物は、多くの魅力的な物性を発現する。例えば α-Ga_2O_3（Eg=5.3eV）は安定相である β-Ga_2O_3（4.9eV）よりも大きなバンドギャップを有する。当研究室では、α-Ga_2O_3 のパワーデバイス開発研究を、当研究室のスピンオフにより生まれたベンチャー企業である株式会社 FLOSFIA[6]と共同で行っている。さらに、α-$(Al,Ga,In)_2O_3$ 混晶はバンドギャップを 3.7-9.0eV の範囲で変調が可能であり、MOS-FET もしくは HEMT への応用が可能である。また、α-$(Ga,Fe)_2O_3$、α-$(In,Fe)_2O_3$ はそれぞれ強磁性半導体としての性質を示し、どちらもキュリー点が 300K を超えている事から、室温動作を目指したスピンデバイスへの応用が期待される。このように、準安定相化合物にはまだ多くの機能性材料または混晶が多く存在し、材料開発研究の大きな分野となり得る。

[1] J. P. Remeika and M. Marezio: Appl. Phys. Lett. **8**（1966）87
[2] D. Shinohara and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. **47**（2008）7311
[3] K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito, and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. **51**（2012）020201
[4] N. Suzuki, K. Kaneko, and S. Fujita: J. Cryst. Growth **401**（2014）588
[5] K. Kaneko, H. Ito, S-D. Lee, and S. Fujita: Phys. Stat. Solidi（c）**10**（2013）1596

[6] 〒615-8245 京都市西京区御陵大原 1-36 京大ベンチャープラザ北館 203 号室 HP: http://flosfia.com

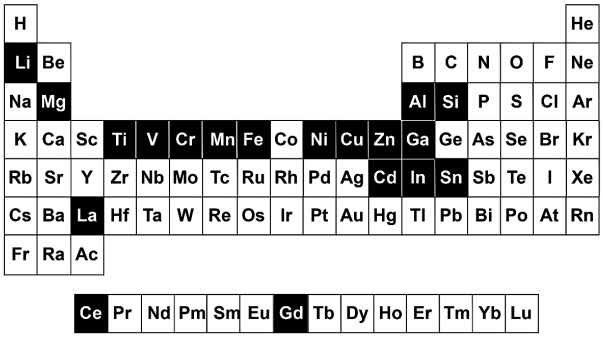


図 1 ミスト CVD 法により作製した酸化物の金属種の周期表での位置（白抜きで示すもの）

集積機能工学講座
http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp
「新規高温超伝導体単結晶薄膜の育成と超伝導異方性の評価」

電気抵抗がゼロという超伝導現象は、固体物理学の対象として極めて興味深いことと同時に、電気電子分野の材料としても魅力的です。超伝導体の工学的な応用は、量子化磁束を取り込む第2種超伝導体の発見に始まる超伝導磁石から、高温超伝導体の発見に始まる超伝導ケーブルまで、新しい超伝導体の発見が超伝導応用の出発点となっています。新しい超伝導体への指針となるのが、結晶構造と元素置換です。高温超伝導体は、物質に応じて多様な結晶構造を取りますが、超伝導転移温度が液体窒素の沸点である77ケルビンを超える物質の結晶構造は2種類に区別することができます。ひとつは、イットリウム系超伝導体に代表される単一ブロック層構造、もう一つはビスマス系超伝導体に代表される二重ブロック層構造です。超伝導ケーブルへの応用は、異方性の低い単一ブロック層構造の方が適しており、高い臨界電流密度を持つケーブルはイットリウム系超伝導体 $YBa_2Cu_3O_7$（YBCO）で開発されています。しかしながら、送電ケーブルとして、大量に生産することを考えると、希土類元素は少なく、なるべくユビキタス元素で構成されることが望まれます。そこで、私たちは、同様の結晶構造を持つ $PbSr_2Y_{1-x}Ca_xCuO_8$ に注目しました。ここで、元素置換の意味を説明すると、CuO_2 二重層で構成される超伝導層に供給されるキャリアは、他の陽イオンの価数の合計で決まっており、YBCO でブロック層を構成していた Cu と Y に替わって、Pb と Ca が入ります。この物質は、80K を超える T_c が報告されているものの、単結晶試料が得られていないので異方性が測定されておらず、超伝導材料としての評価が不十分です。私たちは、Two-step 成膜法を用いて $SrTiO_3$ 単結晶基板上にエピタキシャル成長した高品質の薄膜を得ました（図1）。Ca 濃度 x を変えた試料について電気抵抗の温度依存性を測定した結果（図2）、x>0.32 で超伝導が観測され、最高の T_c = 66K が x = 0.37 で得られました。ホール係数の測定から、置換した Ca 原子当たり 0.34 の正孔がキャリアとして有効になっており、置換効果が明瞭に表れています。面内 X 線構造解析の結果より、基板からの面方向伸張歪みが加わっていることが分かり、バルクの値より a 軸長が延びています。この結果、T_c に大きな影響を与えると考えられている CuO_2 面と頂点酸素間の距離が縮んでいます。今後は、この距離を伸ばして、T_c を上昇させることを考えています。また、異方性を評価するために、上部臨界磁場 Bc_2 を ab 面方向と c 軸方向の磁場下で測定しました。異方性はビスマス系超伝導体よりもはるかに小さく、YBCO よりは若干大きいという結果となりました。今後の詳細な研究によって、$PbSr_2Y_{1-x}Ca_xCuO_8$ がユビキタス超伝導体として新しい超伝導応用の可能性を拓いていくことが期待されます。この研究の詳細は実際に実験を進めた博士課程大学院生を筆頭著者として、フィジカル・レビュー誌に最近発表しました（S. Komori *et al.*, Phys. Rev. B, **89** 174509(2014)）。

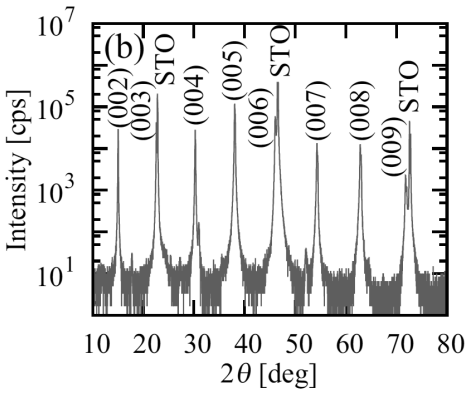


図1：面間 XRD パターン。不純物相が皆無。

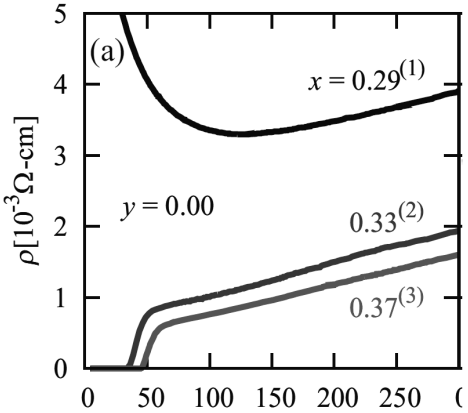


図2：Ca 濃度を変化させたときの抵抗の温度依存性。

知能メディア講座　言語メディア分野（黒橋研究室）
Language Media Processing（Kurohashi Laboratory）
http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/
Kyoto Example Based Machine Translation System

1. Goal of the project

Kurohashi-Kawahara lab. is currently developing a system for the automatic translation of technical documents in Japanese, Chinese and English [1]. This is part of an ongoing project funded by the Japanese Science and Technology Agency and its Chinese counterpart to improve the quality of technical-domain Japanese-Chinese translation. The long term goal of this project is to facilitate technological cooperation by allowing scientists, engineers and innovators to have access to the many technical documents that are only available in these languages.

2. System overview

The translation system we are developing follows the Example-Based translation paradigm, which was pioneered thirty years ago by former Kyoto University president Makoto Nagao. The main idea of this paradigm is that, if we have a large collection (in our case, tens of millions of words) of translated Japanese-Chinese technical documents (the parallel examplecorpus), we will be able to translate new documents bycombining the translations of the part of the example documents that are similar to the new document.

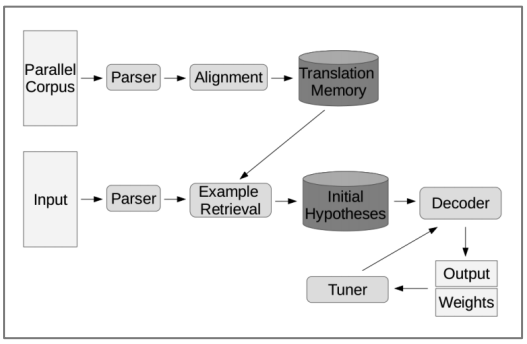


Fig. 1: System Architecture

Compared with similar systems, we make a more advanced use of linguistic knowledge through the dependency parsing of all sentences. Dependency parsing makes explicit the head/dependent relationships (such as adjective/noun relationship) in a sentence and is performed automatically by parsers developed in our lab. Another specificity is that we actually search the whole example corpus for each translation. This allows us to get “translation parts” as large as possible and enables near-perfect translation when there exists an example sentence quasi-identical to the input.

3. Implementation

In order to achieve practical translation speed, the system is written mostly in C++ programming language, with some additional scripts written in Python and Perl. A web interface has also been developed. This interface is designed to be used by professional translators that will check and edit the translation results. This reduces the cost of human translation and help the evaluation of the system. The performance obtained is already at the level of similar state-of-the-art systems, and is expected to improve in the future. In order to promote collaboration and comparison, the system is available as open source software under a LGPL license at http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/kyotoebmt..

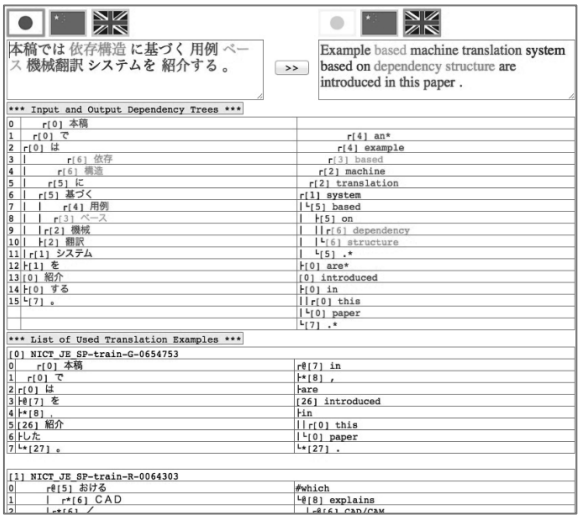


Fig. 2: Web interface for translation and edition.

[1] J. Richardson, F. Cromières, T. Nakazawa and S. Kurohashi.. 2014. KyotoEBMT: An Example-Based Dependency-to-Dependency Translation *Framework. ACL 2014* (*System Demonstration*)

通信システム工学講座　伝送メディア分野　（守倉研究室）
http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/
次世代無線アクセスに向けたヘテロメディア通信制御

無線通信の急速な普及により周波数帯域は不足しつつあります。特に Wi-Fi が利用する 2.4/5GHz 帯域は逼迫しています。一方、新規無線帯域の開拓が進み、400MHz 帯、900MHz 帯、ミリ波帯、可視光通信など、新たな周波数帯域が利用可能となってきました。近年では、60GHz 帯無線通信インターフェースの実用化や、テラヘルツ帯無線通信の研究開発が盛んに行われています。しかし、それら新規帯域対応無線通信機器の普及には時間がかかります。また、通信帯域や通信方式ごとの性質の違いにより、普及率や使用頻度に偏りが生じることが予測されます。

本研究では、新規無線帯域活用による周波数帯域逼迫解消を目標とし、複数の無線通信インターフェースを用いた通信制御を検討しています。これをヘテロメディア通信制御と呼びます。最近のスマートフォンやタブレットには LTE、Wi-Fi、Bluetooth など複数の無線通信が搭載されています。これらの無線通信は、通信帯域・通信方式に応じて異なる性質を有しています。例えば、Wi-Fi は伝送距離、伝送速度ともに優れていますが、様々な機器が同一周波数帯を利用しているため帯域不足により性能が低下してしまいます。一方、ミリ波帯通信は、広帯域を用いた高速通信が可能ですが、伝送距離が短いという欠点があります。本研究では、このような無線通信ごとの性質の違いを考慮し、統合的に用いた通信方式を検討しています。

図 1 に本研究の提案プロトコルの一例を示します。提案方式では、アクセス制御に LED とカメラによる可視光通信を用い、データ通信に 2.4/5/60GHz 帯の Wi-Fi を用います。図 2 にその手順を示します。Wi-Fi 端末は LED を点滅させ送信要求信号を送信します。基地局はカメラを用いて送信要求を検知し、送信権を付与します。このようにアクセス制御とデータ通信を切り分けることで、2.4/5/60GHz 帯のほぼすべてをデータ通信に用いることができ、周波数利用効率を向上させます。この他、様々な通信メディアに対してヘテロメディア通信制御を検討しており、無線アクセス技術の発展に寄与しています。

［参考文献］ T. Nishio, R. Nishioka, M. Morikura, and K. Yamamoto, “VRMAC:A Novel WLAN Medium Access Control Mechanism Using LEDs and a Camera,” Proc. IEEE Globecom 2013 Workshop on Optical Wireless Communication, Atlanta, USA, Dec. 2013.

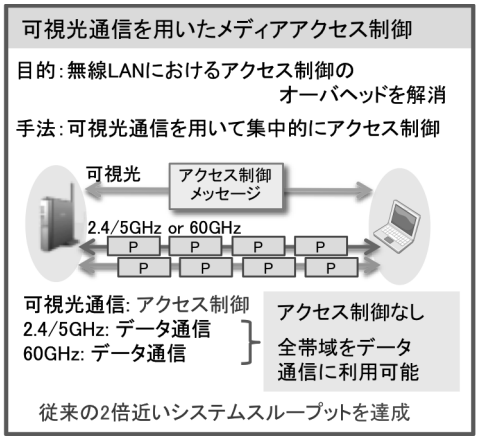


図 1：可視光通信と Wi-Fi を用いたプロトコル

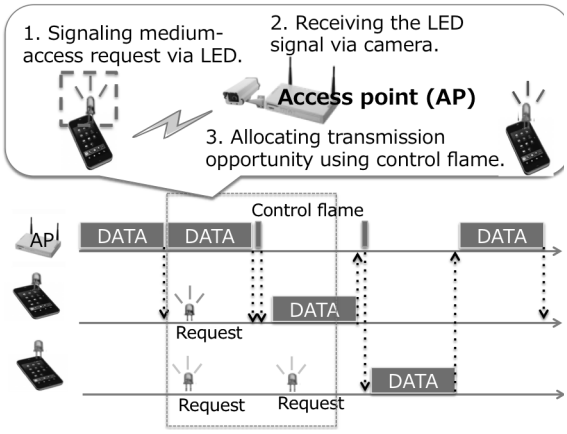


図 2：アクセス手順

集積システム工学講座　大規模集積回路分野（小野寺研究室）
http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「超高速光通信用集積回路の研究」

近年、高速通信の重要性はますます高まっている。インターネットなどの通信網だけではなく、京コンピュータなどのスーパーコンピュータでもいかにCPUとCPUの間で高速に情報をやりとりするかが性能のキーとなっている。大容量通信を実現する技術として従来より光ファイバが用いられており、光ファイバ網の家庭への普及は一般利用者の高速なネットワークアクセスを支えている。さらに、シリコンフォトニクス（シリコン材料を用いて発光・受光素子、光導波路などを実現する技術）の発展により、光回路と集積回路の融合が進んでおり、短距離のデータ伝送も金属配線から光ファイバへ置き換えが進むと言われている。近い将来光通信の速度はテラビットに、極短距離（CPUとメモリの間など）であれば20TB/sに達すると考えられている。

このような高速通信を実現するためには、光回路だけではなくそれに接続される電気回路側も高速化しなければならない。本研究室では主に受信回路で光電流を電圧信号に変換するTIA（TransImpedance Amplifier、トランスインピーダンスアンプ）について研究している。TIAは光ファイバを通った信号がフォトディテクタで電気信号に変換されて最初に増幅を行なう回路であり、高速・高利得が求められる。それだけではなく雑音耐性、低消費電力、小面積などの要求も満たさなければならない。特に近年は複数チャネル並列による高速化が一般的であるため、小型化およびノイズ耐性が課題となっている。

本研究室ではまず高速化について取り組み、効率的なインダクティブピーキングを検討した。インダクティブピーキングはインダクタを用いて回路の帯域を伸ばす技術であるが、インダクタは占有面積が大きいという欠点があった。我々は複数のインダクタを結合させて使うことで、面積効率の高いピーキングを実現した。図1に研究室で開発したTIAを示す。このTIAは180nmCMOSプロセスで10.3Gbpsを達成し、従来のピーキング手法と同等の面積でありながらマスクマージン（通信規格に定められたアイダイヤグラムからの余裕度）を2倍以上にすることに成功した。図2に実測によるアイダイヤグラムを示す[1]。また、大面積を占めているインダクタの小型化に取り組み、面積効率の高いインダクタを開発した。図3にその一例を示す。集積回路内の多層配線を用いてソレノイドインダクタを作ることは従来から検討されてきたが、我々は層ごとの巻数を変える方法で面積効率を改善し、さらなる小面積化に成功した[2]。現在、小型・高速なTIAを並列化しさらなる高速通信の実現を目指して研究を進めている。

[1] S.Miyawaki, M. Nakamura, A. Tsuchiya, H. Onodera, “A 10.3Gbps TransImpedance Amplifier with Mutually Coupled Inductors in 0.18-um CMOS,” 2011 International SoC Design Conference, pp.223-226, Nov 2011.
[2]「ソレノイドインダクタ」特願 2014-086116

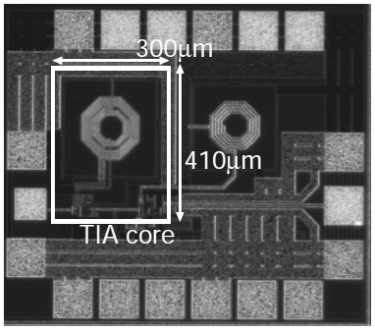


図1 試作チップ

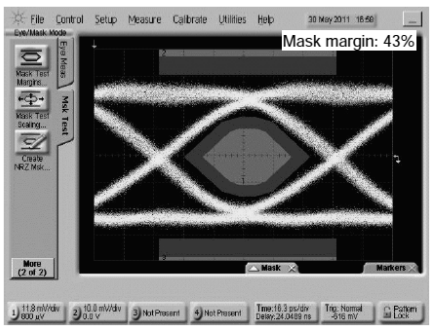


図2 実測波形（10.3Gbps）

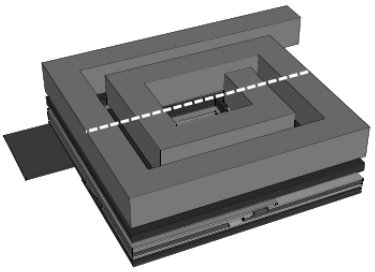


図3 小型ソレノイドインダクタ

システム情報論講座　医用工学分野（松田研究室）
http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/
「下顎骨再建における形状評価指標を備えた手術工程計画システム」

内視鏡下手術やロボット手術に代表される先端医療技術の開発と普及が進む中、その安全管理や手術時間の短縮、医師の負担減少のために、臨床現場における情報システムやソフトウェアが果たす役割は大きくなっている。患者個人の三次元 CT/MRI 画像に基づく術前計画が広く考案され、その有効性が確認されているが、現状の術前計画システムの多くは手術工程の各要素に対する明確な評価指標を持っておらず、医療従事者が計画立案した内容を定量的に把握することが難しい。また、臓器形状表現には製造・設計分野で用いられてきたモデリング手法が活用されているが、症例に合わせた計画が必要であることに加え、医療従事者が手術前や術中に用いることになるため、手術支援システムには利用形態を踏まえた即時性のあるモデリングと直観的かつ対話操作が可能な設計が求められる。

本研究では、患者個人の三次元画像を用いた直感的かつ定量的な手術計画の立案を可能とし、医療従事者による最適な手術工程の導出を支援するセミオートマティック術前計画に関する研究開発を行っている。これまでに医療従事者自身が空間的ボリュームモデルを直感的かつ対話的に編集操作できる手術計画システムを試作・製品化し、医療従事者の知見に基づいた手術工程の定量評価を可能にする評価指標の開発に取り組んできた。例えば、下顎歯肉癌の治療による切除や事故による下顎骨の欠損に対して行われる下顎骨再建では、欠損部分に患者自身の腓骨を移植する方法が試みられているが、熟練医であっても下顎の切除領域に対する理想的な腓骨の分割と配置を得ることは容易ではない。本システムは、三次元 CT 画像から構築された下顎ボリュームモデルを可視化し、対話的に腓骨の分割･配置をシミュレートすることを可能とする。図 1(a)は 3 分割された腓骨セグメントを移植に用いる場合であり、下顎切除領域に各セグメントを配置した際の再建後の下顎の推定結果が可視化されている。医師はレンダリング像上に複数配置されたバーチャル面を対話的に操作し、患者の元の下顎の形態や機能をより良く復元できるよう計画内容を修正する。特に本システムは専門医の見解に基づいて元の下顎と再建後の下顎を定量評価する体積充填率や形状誤差などの形状評価指標を備えており、医療従事者はその評価値を参照しつつ、より良い腓骨の分割や配置を定量的かつ対話的に探索することができる。また、最適配置の導出に関する研究にも取り組んでいる。図 1(b)は 3D プリンタによって出力された腓骨の分割パターンである。手術時に用いる金属製のサージカルガイド（図 1(c)）を製作し、そのガイドに沿って腓骨を切断することが可能であり、計画内容に沿ったより精密な手術の実現が期待される。

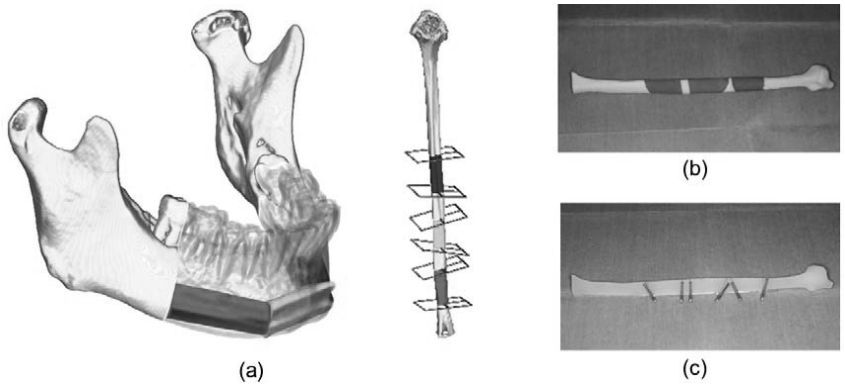


図 1. 下顎骨再建術における手術工程計画システム，(a)下顎切除領域への腓骨移植シミュレーション，(b)3D プリンタによる切断パターンの出力(c)製作されたサージカルガイド

参考 URL：http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~meg/research.html

エネルギー社会環境学講座　エネルギー情報学分野（下田研究室）
http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/
「オフィスの省エネルギー照明と知的生産性」

東日本大震災以降、我が国の多くの原子力発電所が停止しており、特に需要の多い夏期の電力供給は逼迫しています。オフィスでもクールビズだけでなく、総エネルギー量の約 1/4 を占める照明の間引き運用も実施され省エネルギーに努めています。しかし、このような省エネルギー活動はオフィス執務者の快適性や作業効率を損なう可能性があり、そのために仕事の効率が悪くなり残業が増えることで、かえってエネルギー消費が増大しては本末転倒です。一方、近年ではオフィス環境を整えることでオフィス作業の知的生産性を高めようという活動がありますが、そのためには、知的生産性の向上効果を定量的に評価して有効なオフィス環境改善へ投資する必要があります。

本研究室では、この課題に対して、作業への集中に着目した知的生産性定量計測方法を開発しています。この方法は、同程度の認知処理時間が必要な認知タスクの問題を連続で実施していると、集中の途切れによって処理時間が著しく延びる現象があることに着目し、知的作業中の情報処理状態を(1)作業に集中しており作業処理が進行している「作業状態」、(2)作業に集中しているが無意識に作業が中断している「短期中断状態」、(3)疲労などから意識的に作業を中断している「長期休息状態」の 3 状態の状態遷移によって表す知的生産性変動モデルに基づいています。このモデルにおいて、(1)作業状態と(2)短期中断状態の状態遷移確率を一定と仮定しますと、問題解答時間部分布は図 1 のような対数正規分布となり、計測結果とよく一致します。これを利用して、認知資源を作業対象に向けている(1)作業状態と(2)短期中断状態を「集中状態」とし、全体の作業時間に対する集中時間の割合を「集中時間比率(Concentration Time Ratio; CTR)」として知的生産性を表す定量指標を開発しました。この指標は認知タスクの解答時間分布を分析することにより求めることができ、これまでの計測の際に問題となっていた習熟効果をキャンセルできるメリットがあります。

この集中時間比率 CTR を指標として、タスク & アンビエント照明と従来の天井照明における知的生産性を計測する実験を実施しました。図 2 に示すタスク & アンビエント照明は、執務机上にタスクライトを設置することで天井照明を暗くすることができるため、エネルギー消費量が 40% 程度削減できるとともに、机上の作業領域がスポット状に照らし出されることで作業への集中が高まると言われています。実験参加者はオフィス作業の経験のある 30 ～ 50 代の男女 12 名ずつ計 24 名で、照明条件のカウンターバランスを取りながら夏期の 3 日間に渡って実験に参加していただきました。照明条件以外の室内環境条件は、室温を 26 ± 1℃、湿度を 70 ± 10%、二酸化炭素濃度を 800ppm 以下に統制しました。その結果、タスク & アンビエント照明下での集中時間比率は全実験参加者の平均で 72.5%、従来の天井照明下では平均 67.5% であり、5.0% ポイントの差があることがわかりました。また、対のある t 検定の結果、有意差が認められ($p<.01$)、タスク & アンビエント照明は省エネルギーと同時に集中時間比率を向上させる効果があることがわかりました。今回の計測実験では照明条件変化が知的生産性へ与える影響を調べましたが、この集中時間比率を用いることにより様々なオフィス環境が知的生産性に及ぼす影響を定量的に計測することができます。

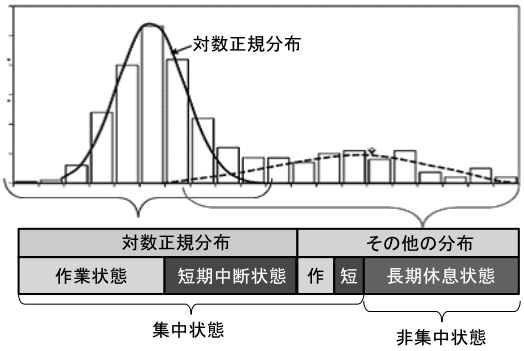


図 1　認知タスクの解答時間分布と集中時間

図 2　タスク & アンビエント照明

エネルギー材料学講座　エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）
http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html
「磁場を用いた三次元結晶配列技術」

エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）では、超伝導物質を中心とするエネルギー材料の薄膜材に関する研究に加えて、新しい結晶配向制御法である「磁場配向」に関する研究にも取り組んでいます。本稿では、変調をかけた強力な磁場を利用していわゆる非磁性と呼ばれるような弱磁性物質の三次元結晶配列技術に焦点をあて、その取り組みについて紹介します。

まず、変調磁場を使った磁場配向の原理について説明します。180 度ごとに静止と回転を繰り返す磁場（図 1(a) 参照）を加えると、静止工程で磁化容易軸が、回転工程で磁化困難軸が配向し 2 軸が固定されることで残りの第 2 磁化容易軸も整列し三つの結晶軸を揃えた結晶配列が実現します。実験装置として、図 1(b) のように、市販の永久磁石の 100～1000 倍の磁力を発生する 10 テスラ級超伝導電磁石を用い、磁場中でサンプルを回転制御させることで配向が実現します。結果の一例として図 1(c) に高温超伝導体 $YBa_2Cu_4O_8$ 粉末を室温・10 テスラの変調磁場・エポキシ樹脂中で配向・硬化させた配向体の X 線回折パターンを示します。原理的には α、β、γ 面の順に第一・第二磁化容易軸、磁化困難軸が配向しますが、図 3 の結果から互いに直交する 3 つの結晶軸が変調磁場なる磁気的な効果により明確に分離されていること、また、磁化軸の関係が c 軸、a 軸、b 軸の順であり、超伝導を担う CuO_2 面が a 面に平行に配列していることが見て取れます。

通常用いられる結晶配向法は単結晶並みの高い結晶配列度をもつ種結晶や基板を使った結晶成長技術（エピタキシャル成長）です。この方法では所望の結晶成長を実現するための精密な温度制御が必要となりますが、磁場配向は室温で結晶配列を実現できる比較的簡便な技術です。当研究室は、これまでの一連の研究から「磁場」が新しい結晶配列技術であることを実験的に証明してきました。磁場配向法は機能に異方性が存在する機能性材料に広く展開できる可能性がありますので、現在、高い送電能力を有する高温超伝導材料を中心に磁場配向法の有用性の検証を進めているところです。

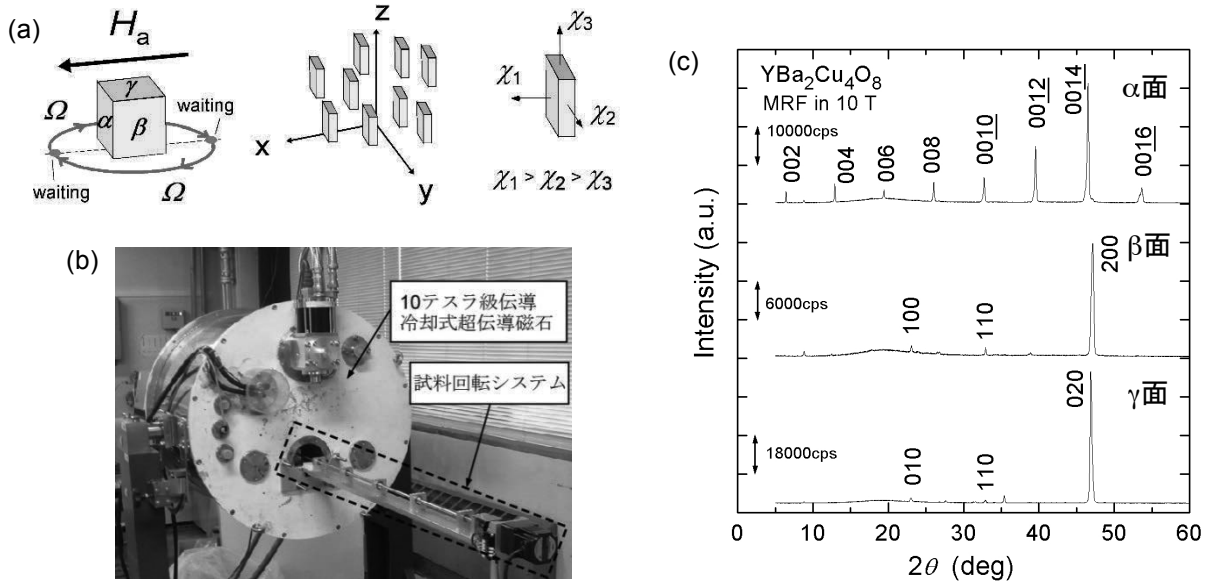
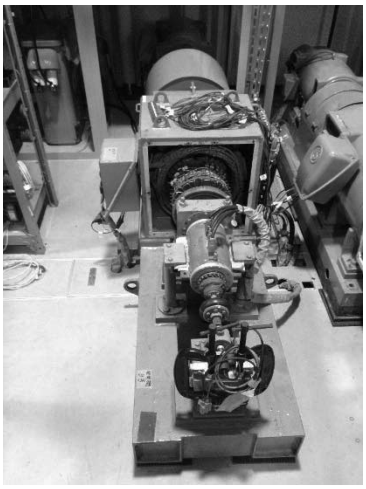


図 1（a）三軸磁場配向の原理。
（b）三軸磁場配向装置（超伝導電磁石と試料回転システム）
（c）10 テスラの回転変調磁場下で配向させた希土類系高温超伝導体粉末試料の X 線回折パターン。

エネルギー材料学講座　プロセスエネルギー学分野（白井研究室）
http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/
「分散電源の導入された需要地系統の動特性」

１．はじめに

当研究室では、エネルギー問題にコミットする視点として、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は電力システムに関連した研究を進める基盤設備として、昨年度福井大学松木先生のご厚意により模擬電力系統設備を移設・増設させていただいた(写真)ので紹介する。6kVA 同期発電機２台、2kVA 同期発電機１台、3300V 模擬送電系統、太陽光発電用パワコン(PCS)、負荷装置などを用意している。



発電機制御盤と系統制御盤（左）、模擬発電設備（左：6kVA,220V）

２．同期発電機が PCS の単独運転防止装置に与える影響の調査

この設備を使った研究の一例として、同期発電機と太陽光発電設備が並列された系統を構築し、電源の発生電力と負荷がバランスしているときの単独運転の問題（送電線事故などにより変電所の遮断機が開放して上位系統から切り離されても分散形電源が解列されずに運転を続けている状態）についての検討について紹介する。単独運転の検出は PCS がその機能を持っているが、近傍系統に回転機が存在するとき、また近傍系統に複数の検出装置が存在するときなどに単独運転の発生を検出できない可能性が指摘されている。

具体的には系統内で発電電力と負荷をバランスさせて上位系統からの潮流をほぼゼロにした状態で単独運転へ移行し、PCS が単独運転を検出するかを調べた。条件として、同期発電機と PCS の出力比、これらの間の電気的な距離、発電機容量（6kVA、2kVA）を変えた。今回行った条件下では、どの場合も潮流をほぼゼロとすると PCS は受動的方式でも能動的方式でも単独運転の発生を検出できず、対策が必要なことが指摘された。

エネルギー機能変換研究部門　複合系プラズマ研究分野（佐野研究室）
http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/sanok/index.html
「超高温プラズマの MHD 平衡・安定性の可視化を目指した軟 X 線コンピュータ断層撮影法の開発」

近年、環境問題やエネルギー問題を解決するため、持続可能な社会および地球環境の構築が求められている。そこで鍵を握るのが新エネルギー源の開発である。磁場で閉じ込めた高温プラズマ中で熱運動により核融合を起こさせ、その生成されたエネルギーを発電に利用する方式が核融合発電である。核融合発電は低環境負荷、燃料が無尽蔵、高エネルギー密度、そして外部制御可能といった特徴を有することから、持続可能な社会環境を支えうる基幹電力となる可能性を秘めており、世界的に研究開発が積極的に進められている。本研究室では、より核融合炉に適した磁場配位（閉じ込め磁場容器）の最適化・探索ならびに高性能プラズマ閉じ込めを実現すべく、京都大学独自のヘリオトロン磁場配位を発展させた立体磁気軸ヘリオトロン磁場配位を有する高温プラズマ実験装置「ヘリオトロン J」を用いて、実験的・数値解析的に高温プラズマ閉じ込めの研究を行っている。それら研究の中から今回は、電磁流体力学的（MHD: Magnetohydrodynamics）平衡・安定性の可視化を目指した軟 X 線コンピュータ断層撮影法の開発について紹介する。

ヘリオトロン J のような磁場閉じ込めプラズマは、プラズマ圧力と磁場圧力が均衡（MHD 平衡）を保ち磁場に閉じ込められる。そして、プラズマ圧力が変化すると MHD 平衡を保つように閉じ込め磁場も変化していくが、変化には平衡限界と呼ばれる限界があり、超えると高温プラズマの閉じ込めが困難になる。経済性の高い核融合発電炉を考える上でプラズマ圧力は高くする必要があり、MHD 平衡変化の理解ならびに平衡限界の上昇が重要である。加えて、プラズマ圧力が高くなると、圧力勾配をエネルギー源として MHD 波動が大振幅の電場・磁場揺動を伴い不安定化し、プラズマ閉じ込めの悪化を導く。以上のことから、高温プラズマの MHD 平衡・安定性の理解が必要であり、その可視化が重要となってくる。その可視化を実現する方法として、軟 X 線コンピュータ断層撮影法（Soft X-ray computer tomography:SXCT）が挙げられる。高温プラズマ中の電子から制動放射により放射される軟 X 線を測定することで、MHD 平衡・安定性を測定することが可能である。軟 X 線はフォトダイオードアレイを用いたピンホールカメラで測定する。ただし、得られた信号は視線に沿って得られた線積分値であるため、制動放射の局所値を得るためには、プラズマを取り囲むように複数のダイオードアレイを設置して得られた信号の逆問題を解く必要がある。これはいわば、医用の X 線 CT（人体では X 線吸収分布）や PET（ポジトロン断層法）と類似の手法で、それらをプラズマ診断に用いるものである。しかしながら、医用では観測対象が変化せず、かつ無数の観測視線が得られるために逆問題の解法が可能であるのに対して、プラズマ計測では視線数が少なく（～ 300 チャンネル程度）かつ時間変化が早く、そして S/N 比が悪いため医用と同等の手法は現実的ではなく、数学的な工夫が必要となる。そこで、本研究では最小 GCV（一般化交差検証法）基準を用いた Tikhonov-Phillips 正則化法により 40 チャンネルの信号を逆変換し、限定的であるものの MHD 平衡の変化を捕らえることに成功した。図 1 が(a) 低圧力ならびに(b) 高圧力時の SXCT により得られた軟 X 線放射分布である。ただし、図 1(b) のプラズマ周辺部はエラーが大きく、非現実的であるものの、プラズマ中心部（四角で囲った領域）が高圧力化に伴い、右側に移動したことが解る。この結果は数値解析結果とよく一致している。現在、軟 X 線計測の視線数を 60 チャンネルに増強する予定であり、更なる高精度化と MHD 安定性の可視化に向け実験準備を進めているところである。

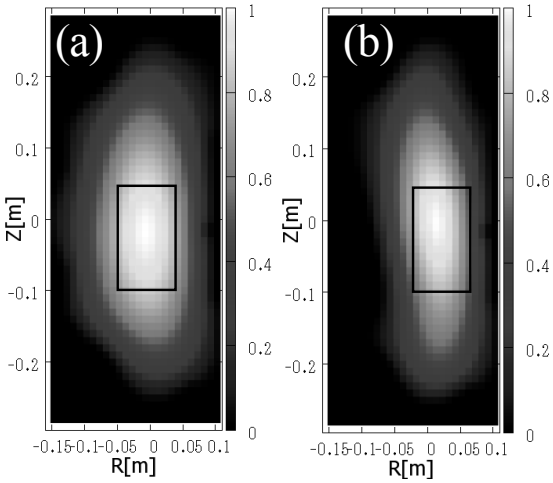


図 1. SXCT による MHD 平衡変化の計測例

生存圏診断統御研究系　大気圏精測診断分野（津田研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab
「太陽地球環境観測データを１元的に取り扱うデータ解析システムの開発」

地球温暖化に代表されるような地球大気中の全球規模にわたる変動現象は、多様なプロセスが複雑に絡み合った結果として観測される。そのような地球大気における長期変動のメカニズムを解明するには、全球規模の地上観測ネットワークから得られた様々な観測データを組み合わせた総合的な解析が必要になります。しかしながら、これまでは、このような太陽地球環境観測データの多くは、観測を行った機関ごとにデータベース化され、個別の観測・研究に関係する特定分野での利用に留まっていました。また、一部の観測データについては、観測者と周辺の限られた研究者のみによる利用に終始し、公開されないまま記録メディアの中に埋もれるケースもありました。

平成 21 年度より開始した特別教育研究費プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」（略称：IUGONET）では、京都大学をはじめ、国立極地研究所、東北大学、名古屋大学、および九州大学の 5 機関が連携し、これらの機関が長年にわたって維持してきた太陽地球環境観測データからメタデータを抽出してネットワーク上で広く共有するシステムの構築と統合解析ツールの開発（図 1）を行っています。メタデータは、気温や風速といった観測データそのものではなく、観測項目、観測時刻や位置、測器の種類、データの置き場、データフォーマット、観測者の連絡先などの情報にあたります。このようなメタデータをデータベース化して共有することで、様々な機関に分散して存在する観測データの横断検索を実現し、分野をまたがるデータの取得・利用を容易にします。また、メタデータを介して取得した様々太陽地球環境観測データを可視化、解析するソフトウェアは、観測データのフォーマットや場所を特に気にせずにたった 3 つのコマンドを打つことで複数の観測データを一つの時系列プロットに描画します。現在、この解析ソフトウェアは 25 種目の太陽地球環境観測データについて解析・描画できる状態になっています。さらに、この解析ツールに備わっている統計検定パッケージは、相互相関検定、トレンド検定、および高度なスペクトル解析などを容易に行うことができ、長期の観測データに見られる長期トレンドの有無などを客観的に判定します。平成 24 年度からメタデータ・データベース検索システムと統合解析ツールが公開され、多種多様な観測データを用いた地球大気の長期変動の研究に利用されています。

本研究室では、公開可能な観測データについてのメタデータ抽出と解析ツールの開発に加えて、IUGONET データ解析システムの太陽地球物理コミュニティへの定着と国際的な利活用の拡大を連携機関と緊密に連絡をとりながら、精力的に進めています。

図 1：IUGONET メタデータ・データベース検索システムと解析ソフトウェア

生存圏開発創成研究系　生存科学計算機実験分野（大村研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/omura-lab/
「計算機実験で磁気圏対流の逆転を再現」

宇宙空間を正しく理解する上で計算機実験は不可欠である。スーパーコンピュータの性能向上によって計算機実験の高精度化が進み、複雑で多様な宇宙空間変動の本質が明らかになりつつある。本解説では、最新の計算機実験で明らかにした磁気圏プラズマ対流の逆転現象を紹介する。

地球由来の双極子型の磁力線は太陽から吹き付ける超音速のプラズマ流（太陽風）によって太陽とは反対側に大きく引き延ばされる。その結果、磁気圏は彗星の尾のような形状を持つ。力学エネルギーと電磁エネルギーの相互変換を経て、磁気圏の内部ではプラズマの大規模な対流が駆動される。図１の赤い矢印は磁気圏対流の方向を示す。対流は高緯度地方では太陽とは反対向きであり、低緯度地方では太陽向きである。地球の磁力線は南半球側から北半球側へ向かうので、この大規模なプラズマ対流は朝側から夕側に向かう大規模な電場によるＥ×Ｂドリフトと換言できる。磁気圏対流は磁気嵐をはじめとする様々な磁気圏擾乱現象の原動力となり、磁気圏を動的なものとたらしめている根本的な原因である。

磁気圏対流は磁気圏尾部に蓄えられている熱いプラズマを内部磁気圏に運ぶ。熱いプラズマの温度異方性が自由エネルギーとなって電磁波動が自発的に放射され、この電磁波動放射によって電子が光速近くまで効率良く加速される。光速近くの速さをもつ電子の集合を放射線帯と呼び、人工衛星への影響が懸念されている。本研究室ではこの一連のメカニズムを理論と計算機実験によって世界に先駆けて明らかにし、放射線帯形成の基本原理として提唱している。

対流のほかにもサブストームと呼ばれる突発的な状態遷移過程も熱いプラズマを内部磁気圏に輸送することが知られている。サブストームが起これば対流が強くなることは観測から示唆されていたが、両者の因果関係はこれまで明らかではなかった。高精度の電磁流体シミュレーションによって、内部磁気圏ではサブストームの直後から対流が弱まり始め、ついには対流の向きが逆転することを明らかにした（図 2）。その理由は以下のとおりである。①磁気圏の尾部で磁力線の再結合がおこる。②磁気張力によりプラズマが地球方向に加速される。③内部磁気圏でプラズマ圧が高まり、反磁性電流が生成される。④反磁性電流の一部はオーロラ帯のすぐ低緯度側の電離圏に磁力線に沿って流入する。⑤電流の連続性を担保するために、背景電場とは逆向きの電場が電離圏で作られる。⑥シアー・アルベン波によって磁気圏に電場が伝わる。⑦磁気圏対流が逆転する。

放射線帯電子の種となる高温プラズマの輸送過程の詳細が計算機実験によって理解されつつあり、電磁波動による電子加速過程と併せ、放射線帯電子変動の予測に向けたシミュレーション技術の基盤として貢献できるものと期待される。

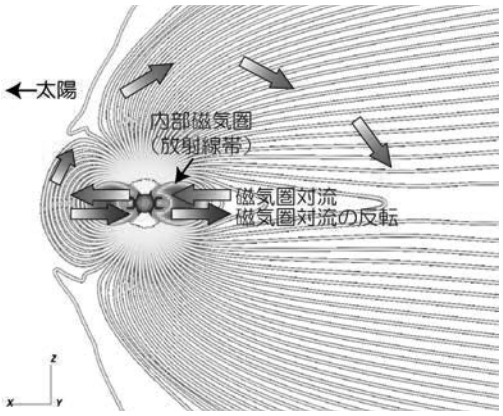


図１　地球の磁力線と内部磁気圏（放射線帯）。（磁気圏を横からみた図）

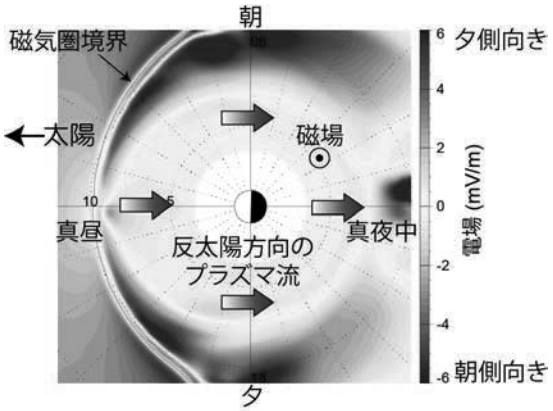


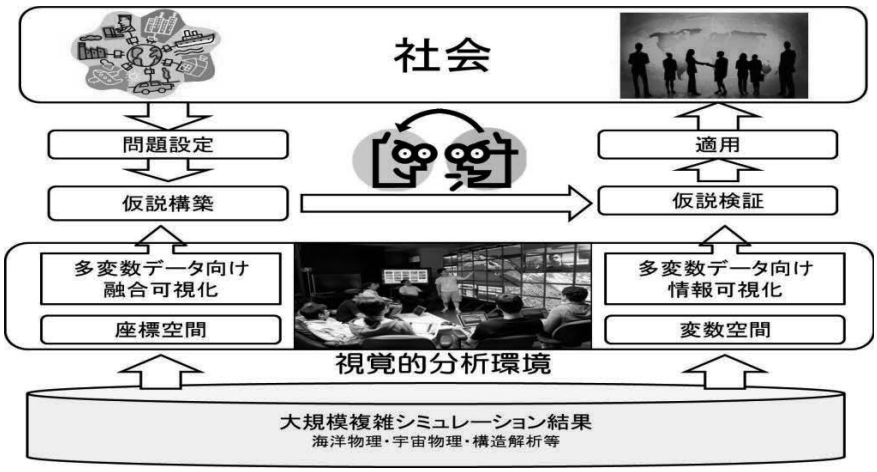
図２　サブストーム直後の電場分布。（磁気圏を上からみた図）

国際高等教育院（小山田研究室）
ホームページアドレス http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/
「科学的発見を促す視覚的分析技術」

計算科学シミュレーション結果から生成されるビッグデータは、多くの科学的発見をもたらす可能性を持ちながら、「ポスト」や「図化処理」といわれる可視化処理による定型的な現象確認に終わっています。この可視化は、科学的可視化と呼ばれ、シミュレーションモデルが定義される座標空間において実行されています。近年の計算機能力の向上によりシミュレーション結果のサイズは膨大となり、可視化において試行錯誤が困難となることがこの傾向を加速しています。

一方、ソーシャルネットワークや高性能センサーから得られるビッグデータからの知見を発掘するために可視化技術が広く用いられるようになってきました。これらは、情報可視化技術と呼ばれて、変数空間において、変数間の相関を確認するために利用されていますが、計算科学シミュレーション結果の可視化にはあまり活用されていません。

この問題を解決するために、本研究室では、右図に示すように、情報可視化と科学的可視化を連携させ、科学的発見を促す視覚的分析（VA:Visual Analytics）[1-2]技術を開発・整備しています。この技術を活用すれば、社会の声を可視化して問題を顕在化し、それらに対する仮説構築・検証を支援し、検証された仮説を社会に還元することを支援することができます。



文科省は、「科学技術イノベーション政策のための科学」に関する国際的な水準の研究・人材育成拠点を構築し、客観的根拠に基づく政策形成のための政策担当者、「政策のための科学」という新たな研究領域の発展の担い手となる研究者等の人材育成を行うことを決め、国内で五つの拠点が採択されました。京都大学も大阪大学とともにそのうちの一つの拠点（http://www.stips.kyoto-u.ac.jp/）を担っており、本研究室もその教育研究に関わっています。科学技術イノベーション政策のための科学では、社会が直面する課題というものを抽出して、その中で科学技術がカバーできるものと社会システムの変革が必要なもの、と絞り込んでいって、それを政策メニューに落とし込み、社会に提供するという政策策定プロセスに注目しています。例えば、NSF（アメリカ国立科学財団、National Science Foundation）のジュリア・レーン（Julia Lane）は、投資に対してどの程度科学技術イノベーションが起こっているか、実際に投資したお金がどのように有効に使われているかを、VA 技術を使って可視化しています[3]。社会的課題を抽出し、政策メニューを社会に提供する上で、VA 技術は、大いに期待されています。

参考文献

1）J.J. Thomas and K.A. Cook（Eds.), Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics. IEEE Press, 2005.
2）Daniel Keim, Jörn Kohlhammer, Geoffrey Ellis and Florian Mansmann（Eds.), Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics, Eurographics Association, 2010.
3）J Lane, Let's make science metrics more scientific, Nature 464（7288), 488-489

平成 25 年度修士論文テーマ紹介

工学研究科　電気工学専攻

星　野　　光（引原教授）「2 サイト地域電熱供給システムの動特性のモデル化と解析」

本研究は電気や熱、ガスなどの供給を統合化したエネルギーシステムの開発を目標とする。本論文では､2 つのコージェネレーションプラントによる電気及び熱供給に関わる動特性のモデル化と解析を行った。電気及び熱出力を同時に調整するエネルギーマネジメントを提案しその可能性を数値的に示した。

梶　山　拓　也（引原教授）「電力伝送線路に適した波形を用いる電力パケット生成に関する研究」

電力伝送に適した伝送パルス波形の検討を行い、任意波形出力が可能な電力パケット生成器を提案した。検討した数種の波形のうち、電力伝送に最も適した波形を示し、その波形をペイロードとして出力する電力パケット生成器の試作、動作確認を行なった。

縄　田　信　哉（引原教授）「電力パケットによるエネルギー表現に関する基礎的研究」

エネルギーと情報の統合を電力のパケット化により実現することを目指し、電力パケットによるエネルギー表現の数理的な考察を行った。シャノンの通信理論におけるメッセージを記号系列で表現する形式を参考に、エネルギー表現の漸近的性質を明らかにした。

山　口　佳　彦（引原教授）「複数家庭の電力マネジメントへの分散電源制御の適用に関する研究」

分散電源制御による複数家庭の電力マネジメントに関する検討を行った。出力平滑化を実現するための分散電源制御のアルゴリズムを提案し、実験室内での実験、実際の住宅における実証実験、数値シミュレーションならびに理論的検討により有効性を示した。

片　山　　啓（萩原教授）「動的セパレータを用いた離散時間ロバスト性能制御器設計」

動的セパレータを用いた離散時間ロバスト性能制御器設計法として、双一次変換に基づく従来法における難点を指摘し、双一次変換を介さず離散時間の枠組みで直接的に設計する方法を新たに構築した。さらに実機実験によりその設計法の有効性を示した。

神　田　千　秋（萩原教授）「結合行列の切り替えを伴うマルチエージェント非負システムのフォーメーション制御における解析と設計」

非負のダイナミクスを有する複数のエージェントが位置情報の交換によりフォーメーションを形成するための情報交換を規定する結合行列の設計法を示した。また、結合行列を切り替える際にフォーメーション制御下にあるシステムが発散しないための条件を示した。

金　　正　勳（萩原教授）「A Fundamental Study of Compression Operators on the Function Space　L_∞ [0, h) and Its Application」

compression 作用素がむだ時間系とサンプル値系の共通の切口となっていることに着目し、この作用素の準有限ランク近似と L_∞ [0, h) 誘導ノルムの計算手法について研究した。この研究を通して、上記の系に対して安定解析や有界持続的外乱に関する解析が可能となる。

後　藤　良　介（萩原教授）「離散化双線形モデルに基づくブーストコンバータ出力電圧の積分補償付非線形制御」

離散化双線形モデルに基づくブーストコンバータ出力電圧の積分補償付非線形制御則を導出し、閉ループ系の安定性について論じた。また、離散化双線形モデルの同定法を示し、同定実験および制御実験により同定法と積分補償付非線形制御則の有効性を検証した。

松　村　大　気（萩原教授）「外部入力を有する結合非負システムの解析と移動体のフォーメーション制御」

外部入力を有する結合非負システムを解析し、外部入力がステップ状の場合には出力が定ベクトルに漸近するための条件を、ランプ状の場合には出力が所望のランプ状となるための条件を導出した。さらに、この解析結果を移動体のフォーメーション制御に応用した。

児　玉　貴　大（土居教授）「3 つの時間スケールを持つ特異摂動系のホップ分岐近傍に生じるアヒル解と非線形振動」

ファン・デア・ポル型の微分方程式がアヒル解を持つパラメタ値を漸近展開により求め、アヒル解の数値計算における精度不足が偽カオス現象を発生させるメカニズムを明らかにするとともに、3 次元特異摂動系のホップ分岐点近傍に生じる特徴的な振動現象の解析を行った。

柴　田　悠　祐（土居教授）「モデル予測制御系の設計法とその麻酔制御への応用」

モデル予測制御系の性能改善を目指して、参照軌道の設定法、定常偏差補償法について検討するとともに、目標範囲に到達させて維持することを目的とした Zone MPC の評価関数の設定法を提案し、複数の指標を同時に望ましい範囲に維持する鎮痛度制御に適用して有効性を確認した。

滝　井　健　太（土居教授）「分枝限定法を用いたブロック積み替え問題に対する厳密解法」

何層にも積まれたコンテナ（ブロック）を、ある決められた順序で取り出す際に必要となる手間を最小化するというブロック積み替え問題に対し、分枝限定法に基づく厳密解法を提案するとともに、計算機実験によりその有効性を確認した。

星　野　大　樹（土居教授）「マルチカーエレベータシステムにおける衝突回避方法の改良と呼び割り当て方法の理論的検討」

1 本のシャフトに複数台のかごを設置するマルチカーエレベータシステムにおいて、かご間の衝突を回避する従来手法を改良するとともに、乗客を各かごに割り当てる方法を確率モデルに基づき検討した。そして、計算機シミュレーションによりそれらの有効性を検討した。

井　上　智　弘（小林教授）「脳磁図と機能的 MRI の統合解析による事象関連皮質活動の高精度推定法」

機能的 MRI と脳磁図の統合解析に用いられる一般化最小二乗法に基づく空間フィルタ法において、発生機構の異なる 2 種類の脳磁界応答に対して信号とノイズを分離し、高精度に脳活動を推定する方法を提案した。提案手法では機能的 MRI 非捕捉信号源が存在しても推定精度の高い再構成波形が得られた。

川　合　博　巳（小林教授）「事象関連磁場応答に基づく呈示様式の異なるスタンバーグ記憶課題遂行中の複数皮質の活動の検討」

記憶における呈示様式の影響の検討を目的に、記憶項目を同時・継次的に呈示するスタンバーグ記憶

課題中の脳磁場応答を測定し、機能的 MRI により得た賦活位置における信号源波形の再構成を行った結果、記憶過程における脳神経賦活位置とそのダイナミクスに関する新知見が得られた。

久　田　祥　史（小林教授）「MR 拡散テンソル画像を用いた複数神経線維束の自動追跡によるアルツハイマー型認知症の定量評価」

アルツハイマー型認知症の定量評価のため、患者と健常者の MR 拡散テンソル画像から全脳の白質神経線維束を自動的に追跡する手法を提案し、拡散異方性や平均拡散能などの評価値について中等度並びに軽度の患者群と健常者群間で複数線維束において有意な差が見られることを示した。

武　藤　正　人（小林教授）「光ポンピング原子磁気センサおよび複数フラックストランスフォーマを用いた遠隔 MR 信号計測の検討」

超低磁場 MRI においてポンピング原子磁気センサと複数のフラックストランスフォーマ（FT）を用いた遠隔計測法を提案し、入出力コイルが励起する磁場の数値解析から最適な複数 FT を設計・製作し、擬似 MR 信号計測を行う事でその有効性が確認できた。

越　智　貴　章（雨宮教授）「高温超伝導薄膜線材の不均一通電特性を基軸としたマグネット設計のための基礎検討」

高温超伝導コイルにおける長手方向不均一臨界電流分布と通電特性の関係を統計学的に検討した。その結果、線材長手方向不均一性が非対称 Weibull 確率密度分布に従うことを示すとともに、当該不均一性が特にコイル内最大局所発熱に深刻な影響を及ぼすことを明らかにした。

合　田　和　弘（雨宮教授）「重粒子線がん治療用固定磁界強集束加速器に用いるマグネットの磁界設計法」

薄膜系高温超伝導線材で構成される固定磁界強集束加速器用マグネットの磁界設計法の構築を行った。線材の許容変形度を考慮し、荷電粒子が飛行中に受ける磁界の積分値を評価指標とした磁界設計法を構築し、使用する線材の長さや線材の経験磁界を低減したマグネット実現の見通しを得た。

米　田　宇　志（雨宮教授）「高温超伝導 Roebel ケーブルの三次元構造と交流損失特性の実験研究」

大電流化のために、ジグザグ形状の薄膜高温超伝導線材を素線として転位集合化した高温超伝導 Roebel ケーブルの交流損失特性について実験的に評価し、さらに数値解析の結果と比較検討した。転位部分の三次元構造が交流損失に与える影響や素線本数と交流損失の関係について明らかにした。

志　村　拡　俊（雨宮教授）「温度可変運転の実現に向けた高温超伝導誘導同期回転機システムに関する研究」

20kW 級高温超伝導誘導同期回転機研究の一環として、非超伝導状態も含めた温度可変運転実現のための解析コードを開発し、冷凍機消費電力を含めたトルク－回転数平面上における効率マップを明らかにした。また、スターリング型冷凍機励磁系の実験的・解析的検討も実施した。

梅　田　康　希（和田教授）「バースト性妨害波の継続時間を考慮したパケット誤り率推定法」

デジタル無線通信に対する妨害波評価法の改良を目的として、(1) 妨害波瞬時値の確率密度分布のガウス分布近似、(2) DSSS システムの拡散利得の妨害波周波数依存性、(3) バースト性妨害波のパルス継続時間、の 3 点を考慮したパケット誤り推定法を提案した。

萩　原　　明（和田教授）「単導体素子モデルにおける電磁ポテンシャルを用いた電力フローの表現」

単導体線路における電流伝搬に基づいて、回路理論と対応の取りやすい電磁ポテンシャルを用いた電力フローについて検討を行った。その結果、分布定数線路理論との対応や、ポインティングベクトルに基づく放射電力との対応を明らかにした。

深　江　一　志（和田教授）「双方向 AC-DC コンバータの協調によるエネルギー授受システムの構築」

送り手と受け手が協調した P2P エネルギー伝送を提案し、実際に双方向 AC-DC コンバータを試作することにより、その動作の検証を行った。協調を担う通信ネットワークにおける遅延に対してもロバストな手法を提案し、その有効性を確認した。

村　上　拓　郎（和田教授）「インピーダンスバランス制御を用いた多電源 LSI 電源供給系のコモンモード電圧低減」

複数の電源・グラウンド端子を持つ LSI の電源系コモンモード電圧抑制法として、一般的なインピーダンスバランス条件を示し、パッケージと PCB の両方にカバーメタル構造を導入し、それぞれのバランス条件を成立させて、コモンモード電圧の低減を実現した。

伊　藤　俊　平（松尾教授）「フェライト磁気特性のモデル化手法とその有限要素磁界解析への応用」

プレイモデルと等価回路を用いてフェライト交流磁気特性を精度よくモデル化する手法を開発した。開発手法を有限要素磁界解析に応用し、フェライトコアインダクタの特性を再現した。また、磁区モデルの集合によるフェライト磁化過程表現手法の予備的検討を行った。

川　原　　純（松尾教授）「時空間有限積分法の幾何学的定式化および数値安定性に関する研究」

3 次元および 4 次元時空間有限積分法に現れる主格子と双対格子の幾何学的関係を接続行列を用いて表現し、ローレンツ計量に基づいたホッジ双対格子上での定式化手法を開発した。時空間有限積分法における陽的時間進行の数値安定性を固有値解析により示した。

清　水　康　平（松尾教授）「幾何的ブロック対角前処理の非適合ボクセル有限要素解析への適用」

サイズの異なる立方体が混在する非適合ボクセル有限要素解析を対象とする、幾何的ブロック対角前処理手法を開発した。静磁界解析および準定常磁界解析について、代数マルチグリッド法の利用を含めて開発手法の計算性能を検証し、その高い有効性を確認した。

下　井　智　裕（松尾教授）「有限積分電磁界計算における局所的時空間格子細分化に関する研究」

有限積分法を用いて局所的に細分化した時空間格子上で電磁界を計算する手法を開発した。開発手法は従来サブグリッド法と比較して非物理的な反射が抑制されるなど高精度であるとともに安定性にも優れている。フォトニックバンド計算へ応用しその有効性を示した。

工学研究科　電子工学専攻

前　田　圭　穂（掛谷准教授）「Pb 置換 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合におけるテラヘルツ発振」

ビスマス系高温超伝導体テラヘルツ光源の高強度化、高周波数化を目指して、研究をおこなった。臨

界電流密度を上昇させた結晶から作製された素子において、発振周波数が非置換系物質から作製された素子のおよそ２倍となり、高周波数化に成功した。

山　口　　瞬（掛谷准教授）「$La_{1-x}Sr_xMnO_3/YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 強磁性超伝導エピタキシャル２層膜の作製と近接効果に関する研究」

$SrTiO_3$ 基板上に、イットリウム系超伝導体とマンガン系強磁性体のエピタキシャル２層膜を育成し、強磁性膜が超伝導特性に与える影響を明らかにした。再現性の高い２層膜の育成法を開発した結果、超伝導電子対形成機構に関して、今後より詳細な特性が明らかになることが期待される。

野　村　義　樹（掛谷准教授）「積層固有ジョセフソン接合の巨視的量子トンネルにおける協力現象の研究」

高温超伝導体 Bi2201 について巨視的量子トンネル現象を観測した。Bi2212 と同様に、固有ジョセフソン接合間の強い結合が原因と考えられる量子トンネル確率の増大が観測され、Bi2223 を含めた３つのビスマス系高温超伝導体について、電荷結合モデルで系統的な説明に成功した。

亀　井　裕　太（掛谷准教授）「テラヘルツ時間領域分光法の確立および鉛ビスマス酸バリウムにおける強相関伝導状態の研究」

フェムト秒レーザーと光伝導アンテナを用いて、テラヘルツ時間領域分光系を構築し、BiPbBaO3 エピタキシャル膜の透過スペクトルを測定した。超伝導ギャップの温度依存性が観測でき、過去の FTIR 測定から見積もられた複素伝導率と異なることを明らかにした。

宝　玉　　晋（白石教授）「有機分子の微細構造解析に向けた針状試料への有機分子定着と電界イオン顕微鏡観察」

アトムプローブによる有機分子分析技術を開発することを目指して、タングステン針先端に有機分子を付着させる技術開発を行った。エタノールやアセトン中で電圧印加する方法、真空中でグリシン分子を蒸着する方法などを試み、それら試料を電界イオン顕微鏡観察して有機分子の付着の様子を調べた。

中　村　嘉　浩（酒井准教授）「２重分割リング共振器アレイを用いたマイクロ波プラズマ生成の理論検討と実験実証」

２重分割リング共振器アレイによる負透磁率メタマテリアル空間における、高出力マイクロ波伝搬によるプラズマ生成の理論モデルの提案と実験による実証を行った。分岐現象を伴って負誘電率状態に遷移して負屈折率状態となり、双安定性も示し、等価的に非線形メタマテリアルを実現したと言える。

山　田　昌　樹（酒井准教授）「$Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ 薄膜がもつ抵抗スイッチング特性の機構解明に向けた分光エリプソメトリー法による光学特性の評価」

ペロブスカイト型構造を持つ $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ 薄膜が示す抵抗スイッチング特性について、分光エリプソメトリー法を用いて、巨視的電気特性である抵抗変化パラメータと光学特性に現れる膜中微細構造の関連性を明らかにした。合わせて、薄膜の表面還元処理によるスイッチング特性制御にも成功した。

足　立　亘　平（木本教授）「電気化学エッチングを用いた高 Q 値単結晶 4H-SiC マイクロカンチレバーの作製および共振特性の評価」

厳環境下で動作する MEMS の実現を目指して、SiC バルク結晶を用いたマイクロカンチレバーを作

製した。伝導型選択エッチング手法を確立することで、SiC 結晶のバルクマイクロマシーニングを可能とし、ほぼ設計通りの静電駆動を達成した。従来の Si 基板上 SiC 薄膜の場合に比べて 10 倍以上高い共振 Q 値を得た。

梶　　直　樹（木本教授）「空間変調型接合終端構造と点欠陥低減プロセスを用いた高耐圧・低損失 SiC PiN ダイオードの作製と評価」

電力用の高耐圧 SiC ダイオードの高性能化を目的とし、熱酸化時の炭素原子拡散現象を活用してキャリア寿命を増大させ、耐圧 10-20kV 級の素子でオン抵抗を約一桁低減した。また、簡素な作製プロセスで理想的な空間電荷分布を形成可能な接合終端構造を用いることで、26.9kV の高い耐圧を達成した。

金　子　光　顕（木本教授）「成長初期に着目した SiC 基板上 AlN 成長層の貫通転位低減とコヒーレント成長 AlN 層の物性評価」

SiC 基板上 AlN ヘテロエピタキシャル成長において、成長初期過程の原料供給比を精密に制御することで貫通転位を低減した。コヒーレント成長した AlN の光学的性質を調べたところ、歪みによる励起子遷移エネルギーの顕著なシフトを観測し、これが変形ポテンシャルを考慮した解析で説明できることを示した。

中　澤　成　哉（木本教授）「無極性面 SiC MOS 界面の電気的評価と MOSFET の作製」

SiC トレンチ MOSFET で重要となる無極性面（A 面、M 面）に着目し、その MOS 界面の電子物性と MOSFET 特性を評価した。低温でのコンダクタンス測定等を通じて、無極性面では応答の速い界面準位が少なく、これが無極性面上で高いチャネル移動度が得られる主要因であることを明らかにした。

伊　藤　史　晃（山田准教授）「溶液中における結晶成長溶解過程の解明へ向けた FM-AFM による固液界面構造評価」

原子間力顕微鏡を用いて水溶液 - 結晶界面の構造観察を行うことで、その水和構造をサブナノメートルの分解能で明らかにした。さらに、水和構造は結晶のイオン種に応じて異なることを示した。また、結晶ステップの熱的揺らぎおよび揺らぎに伴う水和構造の検出に成功した。

高　垣　俊　介（山田准教授）「単一有機トランジスタ素子における接触抵抗・チャネルパラメータの分離評価手法に関する研究」

従来の有機トランジスタの電気特性モデルを、接触抵抗やトラップ等を考慮して再構築し、そのモデルパラメータを単一素子の電気特性から抽出する手法を開発した。さらに、開発した本手法を実際の有機トランジスタ素子に適用し、その妥当性・有用性について検討した。

市　川　修　平（川上教授）「高効率深紫外発光素子の実現に向けた半極性 AlGaN/AlN 量子井戸の結晶成長と偏光制御」

AlGaN/AlN 量子井戸を新しい半極性（$1\bar{1}02$）面上に有機金属気相成長によって作製する手法を開発した。光物性評価を通じて、分極誘起電界が従来の（0001）面と比べて 1/4 程度に低減された結果、輻射再結合確率が増強されていること、偏光特性が井戸幅および組成により制御できることを示した。

尾　崎　拓　也（川上教授）「ホッピングモデルを用いた半極性（$11\bar{2}2$）InGaN 量子井戸における励起子の局在・非局在過程の定量解析」

ポテンシャル揺らぎを内包するInGaN量子井戸における励起子の振る舞いをモンテカルロ法によりシミュレーションした。励起子の再結合寿命の温度依存性を考慮することを提案し、発光の温度依存性（実験）を再現することにより、ポテンシャル揺らぎの標準偏差、ホッピング確率を定量することに成功した。

田　中　優　也（川上教授）「二波長励起顕微フォトルミネッセンス分光によるInGaN/GaN量子井戸の発光再結合機構に関する研究」

InGaN/GaN量子井戸に波長の異なるレーザを同時照射した状態で、時間空間分解分光および過渡レンズ分光を行った。裾準位での誘導放出過程と非輻射再結合中心からの再励起を考えることで実験データを解釈し、それらの空間分布が、発光の空間的不均一の要因になることを提案した。

西　川　恭　平（川上教授）「InGaN量子井戸における非等方的キャリアダイナミクスの顕微時間分解分光と解析」

InGaN量子井戸におけるキャリアの面内輸送機構を、共焦点顕微鏡を用いたスポット励起とそこから離れた位置での光検出により実験的に可視化した。その振る舞いをドリフト拡散方程式に基づいて解析し、ポテンシャル揺らぎによる非等方的キャリア輸送が発光空間分布を決定していることを示した。

乾　　善　貴（野田教授）「フォトニック・ヘテロ構造ナノ共振器を用いたラマンシリコンレーザの低閾値化に関する理論検討」

シリコンフォトニック結晶ナノ共振器の2つの高Q値共振モードを用いて動作するラマンレーザにおいて、実験的に観測されている短波側モードに特異なQ値低下の原因が、構造揺らぎによるパリティの異なる導波路モードへの散乱にあることを明らかにした。

井　上　卓　也（野田教授）「電子・光子両状態制御に基づく単峰・狭帯域熱輻射光源の開発と応用」

量子井戸のサブバンド間遷移とフォトニック結晶を組み合わせた中赤外熱輻射光源を作製し、ほぼ単峰で黒体光源の1/100以下の半値全幅を有する狭帯域発光スペクトルを得ることに成功した。また、開発した光源を非分散型赤外センシングに応用することで、有機溶媒の定量分析が可能になることを示した。

沖　野　剛　士（野田教授）「正方格子変調構造を用いたビーム出射方向可変フォトニック結晶レーザに関する研究」

正方格子に周期的な変調を与えたフォトニック結晶構造を持つフォトニック結晶レーザによって、ビーム出射方向の2次元的な制御だけでなく偏光の制御をも実現できることを示した。また、電気的スイッチングにより2次元ビームスキャンを可能にするデバイスの実証も行った。

権　平　　皓（野田教授）「3次元フォトニック結晶の表面における光制御に関する研究」

立体光操作を含む様々な光制御が可能と期待される3次元フォトニック結晶において、表面における光制御を検討した。斜め導波路から放射する光は、導波路の方位に依存して傾くことを明らかにした。また、対称性を考慮した設計を導入し、垂直放射を得ることに成功した。

鴻　池　遼太郎（野田教授）「強結合フォトニック結晶光ナノ共振器間の断熱的光転送に関する研究」

チップ上に離れて形成した複数のフォトニックナノ共振器の結合系において、外部から系を断熱的に

制御することで、ナノ共振器間で動的に光を転送できることを理論的に明らかにした。さらに、光転送の効率を最適化するための設計の指針を示し、最大で効率約 90% が得られる構造を提案した。

徐　　婷　婷（野田教授）「径偏光ビームの集光場における光と微小金属の相互作用に関する研究」

微小な集光点を形成できる径偏光ビームの集光特性および微小金属との相互作用について検討を行った。径偏光ビームの集光点に特異な光軸方向の電界によって、金属ブロック表面に表面プラズモンが効率的に誘起され、それが回折の効果と強め合うことで強い電場の増強が起こること等を明らかにした。

出　田　善　和（北野教授）「Ba^+ 時計遷移励起用光源のための光コムを用いた差周波安定化」

レーザー光が得にくい近赤外にある Ba^+ の時計遷移の励起光源を、波長の異なるレーザー光の差周波で実現する。2 つのレーザー光を光周波数コムに位相同期させると、差周波は同相ゆらぎがキャンセルされて安定で狭線幅となる。両レーザーのコムへの位相同期を短時間ながら達成した。

浦　出　芳　郎（北野教授）「Frequency-independent response of self-complementary metasurfaces in terahertz regime（テラヘルツ帯における自己補対メタ表面の周波数無依存応答）」

自己補対性と呼ばれる対称性をもつメタ物質が、平面電磁波の垂直入射に対して周波数無依存な応答を示すことを数値計算により明らかにした。また、実際にメタ物質を作製し、自作したテラヘルツ時間領域分光装置による評価を行い、周波数無依存な透過スペクトルの観測に成功した。

籾　山　知　哉（北野教授）「テーパ半導体素子を利用した Yb^+ 電気八重極子時計遷移を励起する高出力狭線幅光源」

上準位の寿命が約 10 年とスペクトルが極めて狭い標記時計遷移を励起するために、半導体レーザーを光共振器の共鳴に高速制御させて発振線幅を狭窄化した。さらに、テーパー型半導体増幅器に外部鏡をおいてレーザー発振させたものを位相同期させて、高出力化を達成した。

和　田　康　佑（北野教授）「非線形 EIT メタマテリアルの多層化による周波数混合波のコヒーレントな増強」

電磁誘起透明化現象（EIT 現象）を模擬したメタマテリアルに非線形要素を導入することで、透過率を犠牲にすることなく、透明化帯域内の周波数混合効果を増強することができる。本研究では、マイクロ波領域において、この現象を検証し、多層化による非線形効果の増強を実証した。

光・電子理工学教育研究センター

角　元　友　樹（高岡教授）「アセトンクラスターイオンのスパッタリング現象と応用に関する研究」

本研究では、アセトンクラスターイオンを様々な固体表面に照射し、クラスターイオンビーム特有の照射効果によるスパッタリング現象を明らかにした。また、クラスターイオンの加速エネルギーや入射角を制御して、無損傷エッチングプロセスや Layer-by-Layer エッチングプロセスへの適用を試みた。

坂　田　　彬（高岡教授）「クラスターイオン照射による発光現象に関する研究」

本研究では、単一フォトンを計測できるルミネッセンス測定装置を開発した。また、アルゴンクラス

ターイオンや水クラスターイオンを様々な固体表面に照射し、表面から放出されたフォトンを in-situ に計測し、クラスターイオンビーム誘起発光の特性評価およびメカニズムの解明を行った。

辻　中　　諒（高岡教授）「酸素イオンビーム併用方式による表面改質と細胞接着に関する研究」

本研究では、室温で酸素クラスターイオンやモノマーイオンを様々な固体表面に照射し、特異なイオン照射効果による酸化形成過程を明らかにした。また、PE、PS、PLA の高分子基板の表面改質を行い、幹細胞の接着特性の向上や選択接着によるパターニングの形成に成功した。

濱　口　拓　也（高岡教授）「イオン液体のイオンビーム特性と固体表面改質に関する研究」

本研究では、電界放出による多種・多様なイオン液体イオン（正・負イオンやモノマー・クラスターイオン等）の生成に成功した。また、加速エネルギーを制御してシリコン基板やガラス基板に照射し、多原子分子イオン照射特有の浅いイオン注入や化学的スパッタリング現象を明らかにした。

柴　山　健　次（藤田教授）「超音波噴霧ミスト法による多元系硫化物薄膜作製に関する研究」

太陽電池光吸収材料として注目されている多元系硫化物薄膜を、低コストで環境負荷の少ない技術で製膜することを目的に超音波噴霧ミスト法の適用を検討した。チオ尿酸を硫黄源として用いることで水溶媒からの酸素の混入を抑え、ミスト硫化アニールでそれをさらに低減して技術の有用性を示した。

鈴　木　規　央（藤田教授）「コランダム構造酸化ガリウム系混晶デバイスに向けた（In, Ga)$_2$O$_3$ 薄膜の結晶成長と評価」

コランダム構造ワイドギャップ半導体系のヘテロデバイスを目的に、バッファを用いたコランダム型 In_2O_3 薄膜の成長と（In, Ga)$_2$O$_3$ 薄膜によるバンドギャップ変調を達成した。In_2O_3 薄膜の移動度は 93cm^2/Vs で、MOSFET の電界効果を実証して電子デバイスに向けた展望を示した。

情報学研究科　知能情報学専攻

塩　田　嶺　明（黒橋教授）「単語間結合度に基づく複単語表現のアライメントの改善」

複単語表現のアライメント精度を改善するため、隣接する二単語間の結合度を利用し、結合の強い単語ほど近接するフレーズに対応されるアライメントモデルを構築した。実験の結果、ベースラインに比べアライメント精度が改善することを確認した。

進　　義　治（黒橋教授）「名詞関連語知識に基づく文章のグラフ表現とその応用」

文章中の名詞とその関連語をグラフによって表現し、各語の重要度を計算する手法を提案した。関連語知識は、Web テキストにおける共起頻度と、国語辞典や Wikipedia における名詞の説明文章から獲得した。応用として語義曖昧性解消と複合名詞分割の実験を行い、有効性を示した。

ト　　慶　晗（黒橋教授）「Japanese Discourse Structure Analysis Based on Automatically Acquired Large-Scale Knowledge（自動獲得した大規模知識に基づく日本語談話構造解析）」

自然言語処理の重要かつ基盤的な解析の一つである談話構造解析に対して、自動獲得した知識を統合したモデルを構築した。知識として、大規模コーパスから獲得した関連語、格フレーム、事態間関係知

識を用い、それぞれが談話構造解析の精度向上に寄与することを実験により確認した。

John Richardson（黒橋教授）「Bilingual Lexicon Mining from Comparable Corpora with Multilingual Topic Models（多言語トピックモデルを用いたコンパラブルコーパスからの対訳獲得）」

翻字ペアの高精度な獲得と、言語資源の少ない言語ペアにおける対訳獲得の二つのタスクにおいて、意味的類似度の指標として多言語トピックモデルを利用することで、効率的に獲得する方法を提案した。この方法は言語によらず適用可能であり、実験によりその有効性を示した。

田　村　健　人（松山教授）「オンデマンド型電力制御システムのための複数電源管理および機器群の連携制御方式」

本研究では、需要家向け電力管理システム「オンデマンド型電力制御（EoD）システム」に対して、分散電源の状況に応じて電源／電力消費機器を制御する分散電源管理機能と、電力消費機器間の依存関係を考慮した連携制御機能を実現するアルゴリズムを提案した。

田　邨　優　人（松山教授）「電気機器の異常検出のための消費電力変動モデル」

本研究では、電気機器の消費電力変動のモデル化手法について検討し、正常時と検査時のデータからそれぞれ学習した消費電力変動モデルを比較することで、機器の経年劣化や配線の半断線、モータの回転異常、照明器具の過熱等の異常を検出する手法を提案した。

陳　　鳳（松山教授）「Supervoxel-based Real-world Full 3D Shape Reconstruction from Multi-view Depth and Color Images（スーパーボクセル表現を用いた多視点深度・カラー画像からの実環境３次元形状復元）」

本研究では実世界における多視点画像を用いた３次元形状復元を実現するために、カラーカメラと深度カメラを同時に使用し、両者から得られる対象の存在尤度を３次元空間で統合することによって頑健な対象検出を可能とするアルゴリズムを考案した。

寧　　薇（松山教授）「Real-time View-dependent Shape Optimization with GPU for High-quality Rendering of 3D Video（GPU を用いた実時間視点依存型形状最適化による３次元ビデオの高精細レンダリング）」

３次元ビデオのレンダリング品質向上のために、レンダリング視点に応じて３次元形状を局所的に最適化する視点依存形状最適化を実時間で実行する並列計算アルゴリズムを考案するとともに、GPU を用いた実装を行い定量評価によってその有効性を確認した。

情報学研究科　通信情報システム専攻

齊　藤　　俊（村田准教授）「ユーザ選択を用いた線形および非線形 MU-MIMO プリコーディングに関する実験的研究」

同一実験システム、同一伝搬環境においてユーザ選択を用いる線形および非線形 MU-MIMO プリコーディングシステムの特性を伝送実験により比較検討を行った。実験結果よりシステム内の移動局数および伝搬環境に応じて特性の優劣が決まることを示した。

佐　藤　弘　基（村田准教授）「マルチユーザ MIMO におけるタイミング同期及び周波数オフセット補償法に関する研究」

マルチユーザ MIMO システムにおけるタイミング同期とタイミング推定結果を用いた周波数オフセット補償法を提案し、計算機シミュレーションを用いて特性を明らかにした。また屋内伝送実験を行い、提案する方式の有効性を示した。

篠　原　　諒（村田准教授）「共同干渉キャンセルに適した SINR 推定に基づく信号共有方式に関する研究」

近傍端末同士で受信信号共有を行う線形干渉キャンセラの有効性を確認した。SINR 推定に基づく受信信号選択を行うことで受信信号共有コストを低減することができることを明らかにした。

谷　口　眞　人（村田准教授）「マルチユーザ MIMO における共同干渉キャンセルに適した空間プリコーディング」

複数の端末が共同して干渉抑圧処理を行うことで、移動端末に対しても効果的なマルチユーザ MIMO 伝送が実現できる。共同するユーザ群の干渉抑圧能力を利用することで共同干渉キャンセルが適用できない孤立ユーザの伝送特性を改善する送信手法を提案している。

趙　　欧（村田准教授）「Sum Rate Analysis of MU-MIMO in Centralized and Distributed Antenna Systems under the Effects of Spatial Correlation（空間相関を考慮した集中及び分散アンテナシステムにおける MU-MIMO の総和レートに関する研究）」

集中及び分散アンテナシステムの特性比較に着目することにより、空間相関を考慮した集中アンテナシステムの総和レート分布の限界式を導出した。また、システムの総和レートに対して分散アンテナシステムの改善効果及びシャドウイング相関による影響を明らかにした。

井　元　則　克（守倉教授）「無線 LAN 端末のためのマイクロ波給電の時間及び周波数分割の実験」

無線 LAN 端末に対しマイクロ波給電を行う場合について、給電マイクロ波が無線 LAN 通信に与える影響を実験により明らかにした。また、その影響を避ける手段として給電・通信スケジューリングを提案し実現した。

大　野　義　明（守倉教授）「無線 LAN 基地局高密度化のための隣接チャネル干渉の測定と解析」

異なるチャネルを用いる AP を設置する場合、隣接チャネル干渉によりスループットが低下する AP 間の離隔距離を測定した。また、異なるチャネルを用いる複数の AP を近傍に設置する場合、スループット向上のために複数の AP で同一のチャネルを用いることを提案した。

岡　元　佑　正（守倉教授）「RoF を適用した無線 LAN システムの特性改善」

RoF を適用した無線 LAN システムにおいて、NAV 期間を延長してスループット特性を改善する方式を提案した。また、AP が排他的に送信することで上下フレームレート比を目標値に近づける方式を提案した。さらに、計算機シミュレーションによってその効果を示した。

小　川　浩　平（守倉教授）「Media Access Control Scheme for Wireless M2M Networks（M2M ワイヤレスネットワーク用アクセス制御方式）」

IEEE 802.11ah を用いる M2M ネットワークにおいて、仮想グループ化と省電力方式を提案し、非常に多数の端末が一度に通信を試みる輻輳状況でのスループット低下を防ぎ、低消費電力で通信が可能となることを示した。

岡　本　佳　祐（高橋教授）「広域同期型光スイッチ網におけるタイムスロット割り当てアルゴリズムの検討」

網内の全処理を光領域で行うネットワークの実現を目指し、波長パスを時間分割したサブ波長パス単位で伝送を行う時刻同期型光スイッチ網の広域化の研究を行った。特に、伝搬遅延および割り当て粒度を考慮したタイムスロット割り当てアルゴリズムを提案・評価し、その有効性を示した。

楠　田　考　広（高橋教授）「広域同期型光スイッチ網における回線利用効率向上手法の検討」

網内の全処理を光領域で行うネットワークの実現に向け、広域同期型光スイッチ網における温度変動に着目したガードタイム設計手法ならびに要求帯域増加時のタイムスロット再割り当て手法の研究を行い、これらの併用により回線利用効率を向上できることを示した。

澤　田　泰　治（高橋教授）「Network Control Schemes Using Social Context Information（社会的コンテキスト情報を用いたネットワーク制御手法）」

誰もが容易に多様な情報を発信できるようになったことで日々受け取る情報の量も爆発的に増加した。アプリケーションとしてコンテンツ配信ならびに E メールを対象とし、社会的コンテキスト情報に基づいたネットワーク制御の有用性とアーキテクチャについて論じた。

鈴　木　　翔（高橋教授）「再生可能エネルギー発電と通信制御の統合システム」

太陽光発電に代表される自然エネルギー発電の発電量は時間、場所、天気などに依存し不安定であるため、自然エネルギー発電の発電量に応じてデータの蓄積と転送を制御する通信システムのアーキテクチャおよびアルゴリズムを提案し、有効性を示した。

丁　　ケンイ（高橋教授）「Designing Mobility Models for Wireless Network Researches（無線ネットワーク研究のための移動モデルの設計）」

モバイルデバイスの移動モデルを把握することは無線ネットワークの研究において重要である。提案移動モデルは、人と人、人と場所との関係を数学的に表わしたグラフを用いることで、物理的要因と社会的要因を統合的に考慮できる。実測データとの比較からその有効性を示した。

李　　志（佐藤（高）教授）「On-chip Impedance Self-adjustment for I/O Buffer using Ring-Oscillator Based Sensors（リングオシレータ型オンチップセンサを用いた I/O バッファのインピーダンス自己調整手法）」

チップ内蔵のリングオシレータにより、外部参照抵抗を用いずに出力バッファのインピーダンスを自己調整する手法を提案した。温度変動やバッファの駆動力ばらつきがあっても、目標値 50Ω への自動調整が誤差 2% 以内で可能であることを示した。

張　　詩　翼（佐藤（高）教授）「Stem Selection Methods for Fast Statistical Static Timing Analysis Based on Histogram Propagation（ヒストグラム伝搬に基づく統計的静的タイミング解析高速化のための分岐節点選択手法）」

回路の分岐節点のうち、タイミングに与える影響が大きいものを効率的に選択することで、ヒストグラム伝搬に基づく統計的静的タイミング解析を高速化する手法を提案した。モンテカルロ法による既存手法と比較して、分散の誤差を 1.87% 以内に抑えつつ 19 倍の高速化を達成した。

奥　畑　英　祐（佐藤（高）教授）「RF エナジーハーベスティングのための 2.4GHz 帯超低電圧整流昇圧回路」

高周波、小電力の電波を入力とすることができる、pMOS 代替ダイオードを用いた LC 共振整流昇圧回路を提案し、受信電力－25 ～－17dBm における昇圧動作を確認した。RF エナジーハーベスティングによる自己発電型温度センサの利用可能範囲を、約 2 倍に拡大できる。

木　村　和　紀（佐藤（高）教授）「最急降下法による高次元不良領域探索及びそれによる回路歩留まり解析手法の高速化」

最急降下法を用いた高次元ばらつき空間における不良領域探索手法を提案した。回路マージンの勾配を用いて不良領域を探索する事で効率的かつ網羅的な探索を実現し、24 変数の 6 トランジスタ SRAM 回路の歩留まり解析を 3.2 倍高速化した。

藤　田　隆　史（佐藤（高）教授）「低エネルギーイメージセンサのための適応的圧縮センシング」

イメージセンサの低消費エネルギー化を目的とし、観測値の分散に基づいて観測回数を適応的に制御する画像の圧縮センシング手法を提案した。これにより観測に伴う AD 変換の回数を削減することができ、画像取得時の消費エネルギーを 37% 削減することに成功した。

申　　東　潤（小野寺教授）「レギュレーテッドカスコード型広帯域トランスインピーダンスアンプ」

負帰還を加えたレギュレーテッドカスコード回路構成を採用したトランスインピーダンスアンプについて検討した。インダクティブピーキングを加えることにより、CMOS65nm プロセスにおいて、周波数帯域 6.1GHz を消費電力 9.9mW で実現する回路を設計した。

西　村　彰　平（小野寺教授）「非均質なリングオシレータを用いたランダムテレグラフノイズの特性解析」

微細な MOSFET に発生するランダムテレグラフノイズ（RTN）が組み合わせ回路の動作遅延に及ぼす影響について検討した。RTN によるしきい値電圧変動量を、非均質な構造を持つリングオシレータの発振周波数揺らぎ量から推定する方法を開発した。

雨　貝　太　郎（小野寺教授）「高周波集積回路における面積効率の高いインダクタンスの実現手法」

集積回路内におけるインダクタンスを小面積化する手法について検討した。複数のコイルを一箇所に集積する構造を提案し、面積を 3 分の 1 に削減した。また、ミリ波以上の高周波で用いる伝送線路に人工誘電体を導入することで、13% の面積削減を達成した。

近　藤　正　大（小野寺教授）「高いエネルギー効率を実現する低電圧動作向けセルライブラリの設計手法」

しきい値電圧近傍の電源電圧で動作する回路のエネルギー効率を改善する基本セル設計手法を開発した。開発した手法を用いて設計したセルライブラリを数千セル規模の実用的な回路の合成に適用し、既存セルライブラリに対するエネルギー効率の改善を確認した。

修　　斉（小野寺教授）「Simultaneous Voltage Scaling and Pipeline Optimization for Energy Efficient Processor Design（エネルギー効率の高いプロセッサ設計のための電圧設定とパイプライン構造の同時最適化）」

パイプライン段数と電源電圧およびトランジスタのしきい値電圧を変更したときのプロセッサの消費電力と性能を詳細設計前に予測するモデルを開発した。開発したモデルをRISC型パイプラインプロセッサの最適化設計に適用しエネルギー効率の改善を確認した。

谷　村　真　弥（佐藤亨教授）「Range-Point-Migration 法を用いた高精度超音波胎児体表イメージング」

超広帯域レーダーの分野で開発された超高解像度手法であるRPM法を医用超音波イメージングに適用した。その際に問題となる相関性干渉波を抑圧するため、指向性送信ビームを利用する手法を提案し、シミュレーションと実験によりその性能を検証した。

津　町　直　人（乗松准教授）「長距離光伝送システムにおける正規化摂動法を用いたファイバ非線形効果補償」

ファイバ中での光の伝搬を表す非線形シュレディンガー方程式について、高速に動作する近似解法として正規化摂動法を提案し、これらをファイバ非線形効果補償法に用いられている逆伝搬法に適用して、補償特性を評価し、その有効性を示した。

増　渕　陽　介（乗松准教授）「光コヒーレント検波におけるカルマンフィルタを用いた搬送波位相/周波数オフセット推定」

光コヒーレント検波方式において搬送波位相推定及び周波数オフセット推定に拡張カルマンフィルタを適用した上で、収束特性の改善方法を提案した。また、従来に比べて高い推定精度、光源のスペクトル線幅及び周波数オフセットに対する広い許容範囲を実現した。

上　垣　雄　洋（石井教授）「神経細胞の極性形成における微小管の配向に関する研究」

神経細胞の軸索および樹状細胞が神経突起から発生するとき、突起内部に存在する微小管の配向性が構造の特徴を決める。本研究では、神経細胞の発生過程における微小管形成の数理モデルを作ることで脊椎動物および無脊椎動物で見られる微小管配向パターンを統一的に再現した。

澤　田　智　治（石井教授）「スケルトンデータと構造化 HHMM を用いた行動認識」

不特定人物の多種な行動を動画像から認識するため、動画像のスケルトン化データに基づく行動認識システムを構築した。身体部位の協調した動きによって全身行動が構成される関係を構造化階層的HMMでモデル化した点に特長がある。評価実験により提案手法の優位性を示した。

林　　優一郎（石井教授）「網膜 ON/OFF 応答の焦点時刻が説明する残像回転錯視」

周辺ドリフト錯視の残像回転を引き起こす神経メカニズムの解明を目指して、網膜の入出力応答を再現するモデルの開発を行った。視覚心理実験結果とモデルを比較することにより、モデルはヒトが観測する残像回転を詳細に再現できることが判明した。

吉　田　光　佑（石井教授；OIST 連携）「Logistic Regression with Sparse Regularization for fMRI data Analysis（fMRI データ解析に向けたスパース正則化付きロジスティック回帰法）」

うつ病の診断モデルを fMRI データに基づいて客観的な形で構築すると同時に、L1 正則化による特徴選択を行い、疎な多カーネル学習を用いることで 80% 程度の診断精度と解剖学的領域の特徴選択が可能であることを示した。

山　下　　歩（石井教授；ATR 連携）「結合ニューロフィードバックトレーニングのための基礎研究ー安静時機能的結合の性質及び認知機能との関係ー」

安静時のヒトの脳領域間の機能的結合ネットワークの性質及び認知機能との関係を調べ、安静時機能的結合を変化させるための脳内ネットワークを用いた結合ニューロフィードバックトレーニングを行い、その効果を調べた。

大　野　史　敬（松田教授）「触感を阻害しない指先位置・接触力同時計測システムの構築とその応用」

指先の動作と触感を阻害することなく指先位置・接触力を計測可能な触覚センシングシステムを開発した。試作システムの位置検出精度を検証し、被験者実験を通して、筆記や弾性体の引張操作における指先位置・接触力の同時計測が可能であることを確認した。

小　川　貴　史（松田教授）「心筋収縮力を連成した左心室壁応力解析モデルの開発」

心筋細胞が発生する収縮力を考慮して左心室壁の構造力学解析を行う心筋組織有限要素モデルを開発した。また、均等性の高いメッシュで構成される回転楕円体形状の左心室モデルを作成し、一般的メッシュ分割を用いた形状モデルを対照として壁応力分布を比較した。

竹　本　真太朗（松田教授）「局所伝達関数を用いた類似構造物の対話的ボリューム可視化」

複雑に交差する線状構造を含む三次元画像の可視化結果を対話的かつ局所的に改善するための手法を提案した。生きたマウスの脳の二光子顕微鏡画像に本手法を適用し、提案手法が白質領域の観察を容易にし、可視化品質の向上に有効であることを示した。

エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

河　村　尚　寛（下田教授）「仮想エージェントへの好意を利用した環境配慮行動促進手法」

日本の 20 代男性の環境配慮行動（PEB）を促進するため、仮想エージェントに対する好意により「PEB を報告したい気持ち」「PEB を報告する際、嘘をつきたくない気持ち」が生じるゲーミフィケーションを提案し、評価実験によりその有効性を評価した。

顧　　穎　成（下田教授）「自然特徴点を用いた広域トラッキングのための環境モデルの更新手法」

自然特徴点を用いた拡張現実感用カメラトラッキングを実行すると同時に、環境の変化を認識し、変化に応じて既存の自然特徴点データを自動的に更新する手法を実現した。これにより、広域かつ変化する環境でトラッキングを安定して継続することが可能になった。

國　政　秀太郎（下田教授）「パフォーマンス - 認知モデルを用いた精神負荷作業中の認知・作業状態推定手法」

従来の知的生産性評価では執務者の認知タスクの作業成績を単純比較していたが、作業への集中度などの内的状態の推定が困難であった。本研究では、作業成績だけなく認知負荷も評価対象とし、認知・

作業状態を時系列推定する手法を開発した。

内　山　皓　介（下田教授）「知的生産性評価のための集中指標算出ツールの開発」

定量的に知的生産性を評価するための集中指標を算出するアルゴリズムを精緻化し、また、専門知識や技能を持たない人でも容易に指標を算出できる解析ツールを開発した。その結果、評価の精度が向上し、指標算出に要する時間が大幅に短縮された。

友　利　健　吾（下田教授）「個人を対象とした二酸化炭素排出許容枠制度の不公平感低減策の提案と評価」

個人を対象とした固定価格型の二酸化炭素排出許容枠制度に対する不公平感を低減するために、制度の改定とペルソナ法を用いた制度説明法を考案した。その効果をインターネットアンケート調査で評価した結果、不公平感を低減できることがわかった。

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

井　上　衆　助（中村（祐）教授）「有限ベータ LHD プラズマにおける周辺磁場構造指標の数値的評価」

有限ベータ LHD プラズマにおける周辺磁場構造の乱れを計算するための基準面の構築、乱れの指標の定義と計算、乱れの指標と拡散係数の比較を通して、乱れた周辺磁場領域でのプラズマの閉じ込め性能の評価を行った。ベータ値が 5%を超えると閉じ込め性能の劣化が顕著となることを示した。

宇　野　泰　史（中村（祐）教授）「ヘリオトロン J における複数種イオン及び径方向電場の影響を考慮したブートストラップ電流解析」

ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置ヘリオトロン J に対して、ブートストラップ電流と呼ばれる圧力勾配に起因して流れる自発電流の理論・数値解析を行い、重水素イオンや不純物イオンなど複数種イオンの存在や、両極性径電場がブートストラップ電流に及ぼす影響を明らかにした。

上　岡　壮　平（中村（祐）教授）「ヘリオトロン J における O-X-B モード変換を用いた電子バーンシュタイン波加熱・計測に対する有限ベータ効果」

ray-tracing コード KRAY と、三次元 MHD 平衡計算コード VMEC と組み合わせることにより、O-X-B モード変換による有限ベータ平衡を考慮に入れた電子バーンシュタイン波（EBW）加熱の解析を行い、その影響について明らかにした。さらにヘリオトロン J での EBE 計測に先立ち、放射位置の周波数特性について調べた。

野　口　直　樹（中村（祐）教授）「ヘリオトロン J における高密度プラズマ生成のための給気制御法の検討」

ガスパフ（GP）や超音速分子ビーム入射（SMBI）などの給気制御が高密度プラズマに寄与する影響を解明するための第一歩として、ガス放出特性の違いに注目し、検出法を検討した後実際に計測し、効果を議論した。またガス放出発光の時間発展から、SMBI が GP より速度と指向性が大きくなることを確認した。

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

川　岸　良　平（白井教授）「Dynamic Load Modeling and Stability Analysis of Distribution System with System Identification（システム同定を用いた配電系統の動特性モデルの導出及び提案モデルを用いた安定度解析）」

能動的な制御特性を持つ負荷や分散型電源を含む配電系統等の動特性を評価するため、微小擾乱注入によるオンラインの応答特性から負荷の動特性モデルを作成した。また同モデルを用いたシミュレーション試験により、モデルの妥当性評価を行った。

元　林　　敬（白井教授）「Characteristics of Hybrid Offshore-wind and Tidal Turbine Generation System Connected with Energy Storage and Photovoltaics（エネルギー貯蔵装置および太陽光発電の接続された風力・潮流力ハイブリッド発電システムの特性）」

安定な再生可能エネルギーの実現を目的とした風力・潮流力ハイブリッド発電システムの出力変動補償制御器の設計のための特性測定を行った。また、エネルギー貯蔵装置および太陽光発電の接続された同システムの安定性および動特性に関して実験し評価した。

山　邉　健　太（白井教授）「Characteristics Analysis of Transformer Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter Combines BSCCO and REBCO Wire（BSCCO 線材と REBCO 線材を併用した変圧器磁気遮蔽型超電導限流器の特性解析）」

変圧器磁気遮蔽型の超電導限流器において、一次・二次コイルにそれぞれ BSCCO・REBCO 線材を用いた構成がより優れた限流インピーダンスを得るために有効であることを実験により検証した。また、実験室規模の模擬系統において同構成限流器の動作実験を行い、性能の評価を行った。

大　浦　洋　祐（白井教授）「Heat Transfer Characteristics of Liquid Hydrogen and Over-Current Properties of MgB_2 Wire Cooled by Liquid Hydrogen under Magnetic Field（液体水素の熱伝達特性及び液体水素冷却 MgB_2 線材の磁場下過電流特性）」

液体水素冷却超電導機器の設計において、液体水素の熱伝達特性を、浸漬冷却及び強制対流熱伝達特性を種々の圧力、温度（サブクール度）、流速に対して、実験により取得した。また、高温超電導体の磁場下過電流特性を明らかにするため、過渡過熱法から $Mg\ B_2$ 線材の磁場下過電流特性を評価した。

原　　佑　規（白井教授）「液体窒素浸漬冷却超伝導テープ線材の冷却フィンによる冷却特性の向上」

抵抗型超電導限流器は、事故電流を抑制し、系統を安定化させるのに期待されている。しかし、限流中の抵抗によるジュール発熱とそれに伴う温度上昇の素早い冷却対応が求められる。本研究では、液体窒素に浸漬した YBCO 超電導テープ線材にフィンを取り付けたものとそうでないものの冷却復帰特性を比較検討した。

エネルギー理工学研究所

猪　上　和　希（長﨑教授）「核物質非破壊検知システムのための高電圧パルス DD-IEC 中性子源の開発」

慣性静電閉じ込め（IEC）方式の DD 核融合中性子源において従来の 2 倍以上となる 200kV を印加可能な装置の開発を行い、核テロ対策のための検査システムに要求される中性子発生率を達成した。また、実用上問題となるパルス放電電流の立上り遅れ時間の、運転パラメータへの依存性を明らかにした。

三　島　健　太（長﨑教授）「三極管型熱陰極高周波電子銃におけるビーム特性の運転パラメータに対する依存性に関する数値解析研究」

熱陰極への逆流電子の抑制が期待される三極管型高周波電子銃における出力電子ビーム特性の運転条件に対する依存性を粒子シミュレーションにより調べた。その結果、運転条件によっては、逆流電子の抑制と同時に従来達成値を大幅に上回るピーク電流が得られることとその機構を明らかにした。

大　谷　芳　明（水内教授）「ヘリオトロン J プラズマの高密度時間発展計測用遠赤外線レーザー干渉計の開発」

ヘリオトロン J プラズマ密度計測用遠赤外（FIR）レーザー干渉計の設計・開発を行うと同時に、プラズマによるレーザー光屈折効果の評価に、光線追跡コードによる検証法を初めて導入した。これらにより、$1 \times 10^{20} m^{-3}$ 程度の高密度域でも 1 μs 以下の時間分解及び 30mm 以下の空間分解能を持つ高精度電子密度計測装置を構築した。

佐　野　　匠（佐野教授）「Heliotron J におけるファラデーカップ型損失高速イオンプローブの開発」

Heliotron J の高速イオン励起 MHD 不安定性に起因する高速イオン損失の定量評価を目的として、ファラデーカップ型損失高速イオンプローブを製作し、実験条件に依存して、高速イオンが間欠的な MHD 磁場揺動と共鳴的に相互作用する共鳴イオン損失の発生を見出した。

生存圏研究所

加　藤　寛　大（山本教授）「ロケット及び地上観測による中規模伝搬性電離圏擾乱の研究」

中緯度電離圏に現れる擾乱現象を調べた。2013 年 7 月 20 日の夜間、地上の GPS 受信機網が電離圏電子密度の水平変動を捉えている間に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から観測ロケット 2 機を打上げた。ロケットより、電界強度が約 5mV/m で方向が南西から西向きに変化し、周期約 100 秒の波状構造が示された。

岩　城　悠　也（津田教授）「稠密 GNSS 受信ネットワークによる可降水量の時空間変動に関する研究」

GNSS 稠密受信ネットワークで可降水量を観測し、水蒸気量の時間変化および空間不均一性が降雨の前兆となることを示した。さらにリアルタイム衛星軌道情報と廉価な 1 周波受信機を用いた集中豪雨の実況監視・早期警戒システムの実現に向けた基礎開発を行った。

萩　行　憲　輔（山川教授）「宇宙電磁環境計測用周波数掃引スペクトル型プラズマ波動観測器の集積化に関する研究」

宇宙電磁環境の変化を敏感に反映するプラズマ波動現象を捉える新型のスペクトル型観測器について、そのアナログ部の ASIC 化を行った。特に、周波数変換部に用いスペクトルのイメージを除去する高次バンドパスフィルタの安定化に成功した他、PLL と組み合わせた周波数変換部のチップ特性を評価

した。

山　口　皓　平（山川教授）「宇宙電磁環境を利用した地球衝突小惑星の軌道変更に関する研究」

宇宙電磁環境を積極的に利用することで、地球に衝突する恐れのある小惑星の軌道変更、ひいては、地球衝突を回避する為の手法を提案した。太陽起源のプラズマ流を利用する帯電セイル宇宙機の小惑星への衝突、および、クーロン力と重力を併用した小惑星牽引の有効性を明らかにした。

杉　山　　肇（大村教授）「Linear Dispersion Analyses of Plasma Wave Instabilities driven by Anisotropic Protons in the Magnetosphere（磁気圏中のプロトン異方性によるプラズマ波動不安定性の線形分散解析）」

運動論的効果を含むプラズマ分散関係を解析するソフトウェア KUPDAP に、新たに磁力線方向にカッパ速度分布をもつプラズマを扱えるようにし、多様な問題に対応可能な GUI を開発した。磁気圏の温度異方性を持つ高エネルギー陽子によるプラズマ不安定性の解析を行った。

中　山　洋　平（大村教授）「地球磁気圏サブストームにおける重イオン加速とリングカレントの発達に関する研究」

電磁流体シミュレーションと粒子軌道計算を組み合わせ、地球磁気圏中の酸素イオンの加速と輸送過程について数値計算を行った。地球磁場の 3 次元構造がイオン加速に重要であることを明らかにし、6 次元分布関数の再構成を行い内部磁気圏で観測されるイオンの急増現象を再現した。

市　原　卓　哉（篠原教授）「ZigBee 端末のための間欠マイクロ波電力供給システムの研究開発」

ワイヤレスセンサ端末の電源問題解決を目指し、マイクロ波電力供給によるセンサ端末駆動の研究開発を行った。送電マイクロ波と通信との干渉を防ぐための間欠マイクロ波送電スケジューリングを考案し、センサ端末の 24 分間のバッテリーレス駆動および正常な通信に成功した。

周　　艶（篠原教授）「マイクロ波無線電力伝送用低入力レクテナに適したアンテナの研究」

電磁波エネルギーハーベスティングに向けたレクテナ開発として、伝送線路の高インピーダンス化および高 Q 値化による効率向上を図った。実測の結果、整合線路インピーダンスを 80Ω とすることで、入力マイクロ波電力 10mW 時において従来の整流回路より RF-DC 変換効率が 13 ポイント向上した。

楢　崎　諒　介（篠原教授）「高速無線通信システムの無線給電化に向けたレクテナ用整流回路の研究」

ミリ波帯高速無線通信システムの中継装置への無線給電を目指すべく、60GHz 帯におけるレクテナ用整流回路を理論およびシミュレーションの両面から設計した。設計結果として、入力電力 40mW、負荷抵抗 220 Ωにおいて RF-DC 変換効率 45.3% が得られた。

松　室　尭　之（篠原教授）「球形誘電体共振器を用いた実効的大開口径を持つ小型アンテナの基礎研究」

小型な物理的サイズと高い指向性利得を両立したアンテナを実現する新たな方法として平面波の球面波展開という手法に着目し、球面波合成の原理に基づいた小型高利得アンテナの実現方法を検討した。合成球面波の生成に必要な多重極波源として、多層球形誘電体共振器構造を提案した。

国際高等教育院

櫛　田　将　司（小山田教授）「海洋データ同化結果を使ったアカイカ好適生息域モデル作成支援可視化環境の開発」

漁業従事者による手元での回遊魚好適度推定モデル開発を支援するために、携帯端末上で対話操作が可能なシステムの開発を行った。このシステムの有効性を検証するうえで、実際のモデル開発研究者に利用してもらって、操作容易性の観点での評価を依頼し、そのフィードバックに基づき、改良を加えた。

原　　大　智（小山田教授）「粒子ベースレンダリング法を用いた大規模血流解析データの適応的可視化」

粒子ベースレンダリングでは、拡大操作時に粒子の大きさが目立ち、画質が低下することが問題点としてあげられていた。この問題を解決するために、可視化対象領域のみをメモリに保存し、より小さな粒子をリアルタイムに生成する手法の開発を行った。本手法の有効性を検討するために、大規模血流解析結果の可視化に適用した。

学術情報メディアセンター

北　尾　憲　一（中村（裕）教授）「バンド型電極を利用した EMS トレーニングにおける誘発筋電位の解析」

筋肉を電気刺激するトレーニング（EMS）の効果や疲労を計るために、筋収縮によって起こる誘発筋電を計測する手法を提案した。計測された M 波に筋繊維の動員、興奮の伝導速度などの変化がはっきりと現れることがわかった。

松　井　研　太（中村（裕）教授）「輝度値の確率分布に基づいた個人視点映像からの広視野画像生成」

頭部に装着したカメラで撮影された映像を用いてシーンを俯瞰できるような広視野画像を得るための貼りあわせ手法を提案した。輝度値の分布の持つ情報量および分布のばらつきが良い指標となることがわかった。

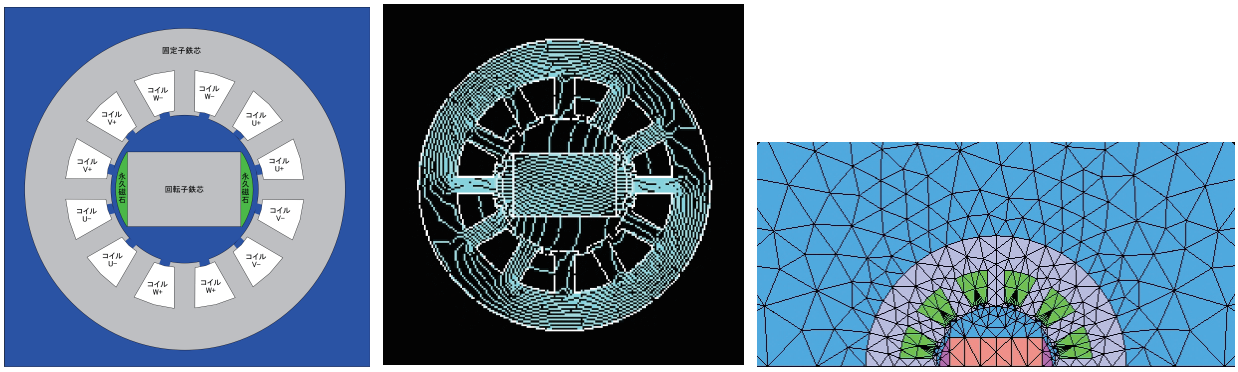
高校生のページ

計算電磁気学

工学研究科　電気工学専攻　電磁工学講座　電磁エネルギー工学分野
松　尾　哲　司

1. 計算電磁気学

ロボットや電気自動車には数多くのモータが使われています。モータの内部構造は複雑なため、モータ内の電磁界を精度よく算出するためには、電磁界の計算機シミュレーションが不可欠です。図１（a）はモータの構造を大幅に単純化した断面図を示しています。両端に永久磁石を取り付けた棒状の磁性体が回転する部分です（以後、回転子と呼びます）。図中で鉄芯と呼んでいる部分は、磁束の通り道として用いられる磁性体（通常は鉄）の部分です。コイルに電流を流すとモータ内に磁界が生じ、回転子が電磁力を受けて回転します。そのときの磁束線を図１（b）に示しています。このような磁束線や、回転子に働く電磁力を計算するために、図１（c）のように、モータ内を細かなメッシュ（以後、計算格子とよびます）に分割して電磁界の方程式を立てて解きます。ただし、図１（c）では空気の部分も格子分割しており、対称性を考慮して半分の領域のみ格子分割して方程式を解きます。ここで、電磁界を精度よく効率的に算出するためには、どのように計算格子を構成して、どのように電磁界の方程式を立て、それをどのように解くかということを考える必要があります。そのためには、電磁界の性質と計算機の利用技術の両方の知識が必要となり、そのために、計算電磁気学という研究分野が発達しています。計算電磁気学が必要とされる分野は、モータなどの電気機器の分野に限りません。高速で安定な動作が要求される電子機器の電磁界解析や、先進的な光デバイスの設計開発にも電磁界の計算機シミュレーションが必要とされており、計算電磁気学の進展が求められています。ここでは、私どもの研究室で行っている計算電磁気学の研究トピックをいくつか紹介します。



(a) 模式的なモータ　(b) 磁束線　(c) 計算格子の構成

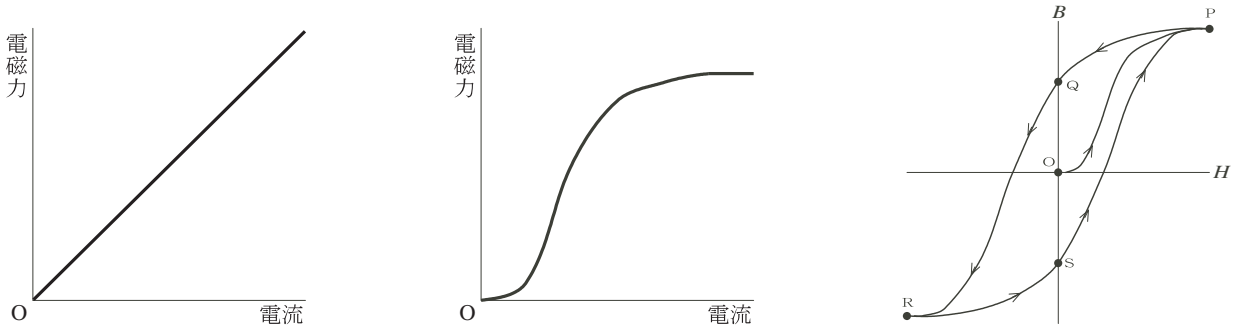
図１　模式的なモータ内部の磁界計算

2. 鉄芯の磁気特性の表現

上で説明したモータは、電磁石の電磁力で回転子を引っ張って回転力を作っています。電磁石の電磁力は図２（a）のように巻線の電流に比例するように思われますが、実際にはそれほど単純ではなく、鉄

芯の磁気特性を考慮しないと電磁力を正確に計算できません。鉄芯の磁気特性を複雑にするのは、ヒステリシス特性と渦電流です。

電磁石の電磁力は電流がある程度大きくなると、図２（b）のようにそれ以上電流を大きくしても増えなくなる性質があり、この現象を磁気飽和と呼びます。簡単のために、電流と電磁力で説明しましたが、正確には、鉄芯内の磁界 H と磁束密度 B（あるいは磁化 M）の関係が、電流と磁力の関係に対応して飽和特性を持ちます。以下、図２（c）を用いて磁界 H と磁束密度 B の関係で説明します。磁束密度が飽和した後（点 P）磁界を小さくしていくと、磁界を大きくしていったときとは異なる磁束密度になり、磁界を０に戻しても磁束密度は０に戻りません（点 Q)。磁界を０から負方向に増やしていくと、やはり負方向でも磁束密度は飽和して（点 R)、その後、磁界を０に戻すと、今度は逆方向の磁束密度が残ります（点 S)。その後、磁界を正方向に大きくすると再び飽和し、その結果、磁界と磁束密度の関係は図２（c）のようなループを描きます。このように、磁界が増加するときと減少するときで磁束密度の値が異なる現象を磁気ヒステリシス現象といい、図２（c）のようなループをヒステリシスループといいます。この現象を利用するのがハードディスクなどの磁気記録です。記録するために外部から磁界をかけてそれを取り去った後も、磁束密度が残るために情報を記録することができます。鉄芯内ではヒステリシスループの面積分だけ損失が生じることが知られており、これをヒステリシス損といいます。



(a) 電流に比例する電磁力　(b) 電磁力の飽和　(c) 磁気ヒステリシス特性

図２　磁気飽和とヒステリシス特性

鉄芯に生じる損失としてもう一つ渦電流損があります。導体内を通る磁界が変化すると、電磁誘導の法則により導体内に電界が生じて誘導電流が流れます。この電流を渦電流といい、渦電流によりジュール熱が発生します。誘導加熱（IH）調理器は、この渦電流によるジュール熱を利用して電力を熱に変えています。鉄芯内では、ジュール熱は損失となり、これを渦電流損といいます。渦電流を流れにくくするために、図３のように絶縁被膜を塗布した厚さ 0.3~0.5mm の薄い鋼板を重ねて鉄芯を作ることが通常で、この鋼板は電磁鋼板と呼ばれます。

電気機器の磁界シミュレーションでは、(1) ヒステリシス特性をどのように数式で表現するか（数式で表現されれば、計算機は解くことができます)、(2) 薄い鋼板の内部まで計算格子を構成すると格子数が膨大になること、が問題となります。そこで、私どもの研究グループではヒステリシス特性を精度よく表現する数学モデルを開発するとともに、薄い鋼板の内部の格子分割を回避する方法を研究しています。(1) については、電磁鋼板内の磁界と磁束密度はそれぞれベクトル量ですので、両ベクトル間のベクトルヒステリシス特性を数式で表現することが必要になります。これについては、ベクトルプレイモデルというモデル化方法を開発し、ベクトルヒステリシス特性を精度よく表現することができるようになっています。(2) については、均質化法と呼ばれる方法を用いて、図３のような鋼板内部の電磁界分布を考慮しながら鋼板を通る磁束を効率よく算出する方法を開発しています。モータはインバータで

駆動されることが多く、鉄芯材料には高い周波数成分を含む磁界が生じるため、複雑なヒステリシスループが生じるとともに、渦電流が作る磁界も大きくなります。そのため、広い周波数範囲にわたって高精度なシミュレーション手法を開発しています。

図４（a）は、磁束密度ベクトルが、大きさ一定のまま反時計回りに回転する場合について、磁界ベクトルの軌跡をシミュレーションした結果です。磁気異方性のため、磁界ベクトルの大きさは一定でなく、回転方向のヒステリシス特性および渦電流のため、磁界ベクトルは磁束密度ベクトルより進んで回転している様子が正確にシミュレーションされています。図４（b）はインバータ励磁を模した磁束密度波形を入力とした場合のヒステリシスループを示しています。細かなヒステリシスループを含め、正確に表現されていることがわかります。

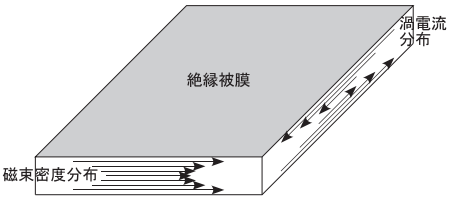
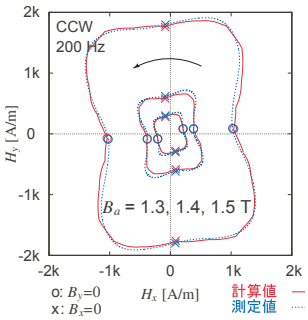
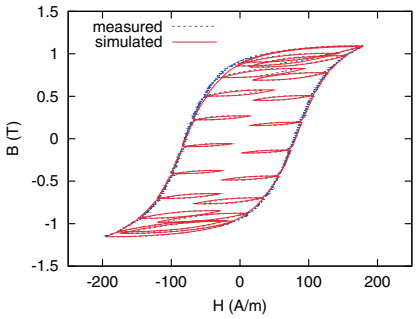


図３　電磁鋼板と内部分布



(a) 回転ヒステリシス特性

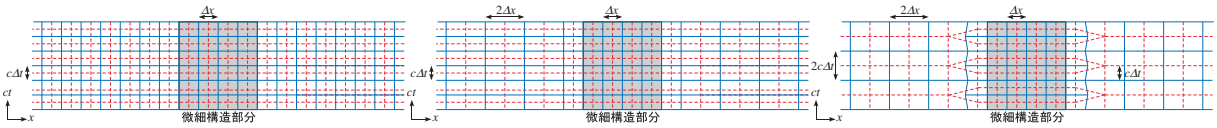


(b) 高調波成分を含むヒステリシス特性

図４　ヒステリシス特性のシミュレーション結果

3. 時空間計算電磁気学

模式的なモータの例でわかるように、物体の形状を計算格子で的確に表現して電磁界計算をすることは難しくありません。空間的には柔軟に計算格子を構成して電磁界を計算できるのですが、時間方向には、一定の時間刻みで少しずつ時間を進めて順番に計算することが通常です。しかし、特殊相対性理論によると、時間と空間は時空間として一体的に取り扱うことができ、このことは電磁界の方程式にも成り立ちます。そこで、時空間で計算格子を作って電磁界を計算する方法を研究しています。時空間で計算格子を構成することにより、計算格子の自由度が大きくなります。具体的には、解析対象の各部分に応じた時間刻み幅を設定することができます。例えば、解析対象の一部に微細な構造がある場合、それに合わせて空間全体を微細に格子分割したものが図５（a）で、微細構造を持つ部分のみ空間格子を細かくしたのが図５（b）です。どちらの場合も時間 t の刻み幅ステップは一定値 Δt で、空間の最小格子サイズに対応して時間刻み幅も微小にすることが必要になります。時空間で計算格子を構成すると、図5(c)のように必要な部分のみ時間刻み幅を小さくすることができ、計算格子を減らすことができます。



(a) 全体的な計算格子微細化　(b) 部分的な空間格子微細化　(c) 部分的な時空間格子微細化

図５　計算格子の部分的な細分化（時間方向は t ではなく光速 c を乗じた ct を座標にとっている）

ここで、図５の実線と破線は、互いに双対の関係にあります。電磁界計算の際、一つの格子だけでなく、ある格子と幾何学的に双対な関係にある格子（これを双対格子とよびます）も共に用いることにより、

電磁界の方程式をより的確に計算格子上で表現する方法があります。図６は３次元空間における双対格子の例で、実線の格子が主格子、破線の格子が主格子と双対な関係にある格子です。主格子の面を双対格子の辺が貫いており、逆に双対格子の面を主格子の辺が貫いています。このように、主格子の面と双対格子の辺が１対１に対応し、主格子の辺と双対格子の面が１対１に対応します。主格子の面に磁束密度 B、双対格子の辺に磁界 H を対応させ、主格子の辺に電界 E、双対格子の面に電束密度 D を対応させると、電磁界を表現するのに好都合です。

時空間では、空間３次元と時間１次元を合わせた４次元時空間で双対格子を構成します。時間方向の座標として、時間 t の代わりに、t に光速 c を乗じた $w = ct$ を座標にとると便利なことがあります。空間の xyz 座標と合わせて $wxyz$ の４次元時空間で計算格子を作ります。このとき、時空間では格子の角度の測り方が異なり、図７のような状態で格子が直交することに注意します。図８は４次元時空間格子の例です。図８（a）は主格子、（b）は双対格子、（c）は両者を重ねて書いたものです。図８（d）の３次元の場合と比較して４次元時空間の格子は相当複雑になることがわかります。この例は比較的単純な４次元時空間格子の例ですが、もっと複雑になると、４次元時空間格子の構造を頭に思い浮かべることも図で表現することも容易でなくなります。そこで、数学的な手法を用いて正確な４次元格子を構成することが必要になります。具体的には、格子の幾何学構造を数式で表現します。例えば、主格子の面とそれを囲む辺との関係や、体積とそれを囲む面との関係を数式で表現します。次に、それらの数式から、双対格子における辺・面・体積の間の幾何学的関係を自動的に導出します。この方法を用いると、４次元時空間で主格子を構成することにより、その主格子と双対格子上の電磁界の方程式を誤りなく導出することができるようになります。

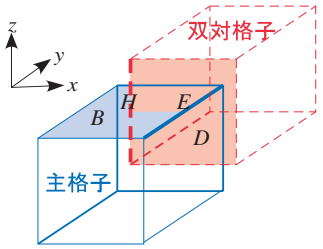


図６　双対格子（実線が主格子、破線が双対格子）

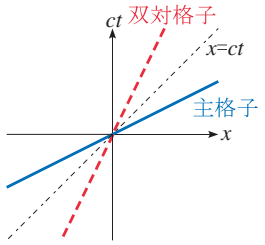
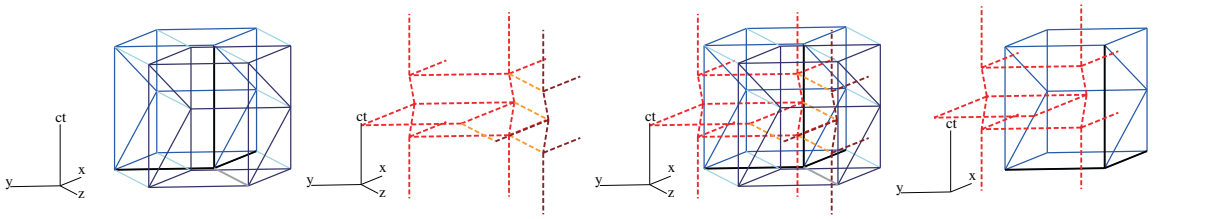


図７　時空間における主格子と双対格子の直交関係



(a) 主格子　(b) 双対格子　(c) 主格子と双対格子　(d) 3 次元の場合の格子

図８　４次元時空間格子

4. 電磁界の高速解法

どんなに正確に計算できたとしても、１回の計算に月単位や年単位の時間が必要なら、電気電子機器の設計にはあまり役に立ちません。そのため、高速に計算することも電磁界シミュレーションでは重要です。シミュレーションの分野では、多くの計算が最終的には連立一次方程式の形で表されることが多く、連立一次方程式の高速解法が重要になります。高速解法には計算機性能の向上を利用した並列計算

技術の開発も重要ですが、ここでは、電磁界の方程式の数理的な性質を利用する高速解法の骨子を紹介します。

未知数が少ない場合には消去法を使って連立一次方程式を解くことができますが、未知数が数十万個以上の大規模な連立一次方程式では、消去法ではなく反復近似解法を用いることが一般的です。例えば、図9のような計算格子上の節点に未知数$\phi_{i,j}$（$i, j = 1, 2, \cdots$）をおくと、隣接する節点との関係式として、

$$\vdots$$

$$a_{i,j}\phi_{i,j} - e_{i,j}\phi_{i+1,j} - w_{i,j}\phi_{i-1,j} - n_{i,j}\phi_{i,j+1} - s_{i,j}\phi_{i,j-1} = f_{i,j},$$

$$a_{i,j+1}\phi_{i,j+1} - e_{i,j+1}\phi_{i+1,j+1} - w_{i,j+1}\phi_{i-1,j+1} - n_{i,j+1}\phi_{i,j+2} - s_{i,j+1}\phi_{i,j} = f_{i,j+1} \qquad (1)$$

$$\vdots$$

のような連立一次方程式が得られるとします。ここで、係数$a_{i,j}, e_{i,j}, w_{i,j}, n_{i,j}, s_{i,j}$や$f_{i,j}$（$i, j = 1, 2, \cdots$）は定数です。最も簡単な反復解法の一つは、適当な$\phi_{i,j}$の初期値$\phi_{i,j}^{0}$（たとえば$\phi_{i,j}^{0} = 0$）から始めて、

$$\phi_{i,j}^{m} = (f_{i,j} + e_{i,j}\phi_{i+1,j}^{m-1} + w_{i,j}\phi_{i-1,j}^{m-1} + n_{i,j}\phi_{i,j+1}^{m-1} + s_{i,j}\phi_{i,j-1}^{m-1}) / a_{i,j} \qquad (2)$$

という計算を、$m = 1, 2, \cdots$と繰り返していく方法です。ここで、$\phi_{i,j}^{m}$はm回反復計算後の近似解になります。式（2）の計算を繰り返すと、$\phi_{i,j}^{m}$は連立一次方程式（1）の解に近づいていきます。解に近づく速さは、反復計算のし方と係数間の関係によって決まり、場合によっては解に近づかない場合や、近づくのが非常に遅い場合があります。係数間の関係は電磁界の方程式によって決まるので、この方程式の性質を利用することにより解への収束を速めることができます。

例として、次のような2つの変数（x, y）に対する連立1次方程式を考えます。

$$a_1x + a_2y = c_1, \quad a_2x + a_3y = c_2 \qquad (3)$$

ここでも、係数a_1、a_2、a_3やc_1、c_2は定数です。$a_1a_3 - a_2^2 \neq 0$のとき、方程式（3）は唯一の解を持ちます。これに対して、3変数（x, y, z）に対する連立一次方程式、

$$a_1x + a_2y + (a_1b_1 + a_2b_2)z = c_1 \qquad (4\text{-}1)$$

$$a_2x + a_3y + (a_2b_1 + a_3b_2)z = c_2 \qquad (4\text{-}2)$$

$$(a_1b_1 + a_2b_2)x + (a_2b_1 + a_3b_2)y + (a_1b_1^2 + 2a_2b_1b_2 + a_3b_2^2)z = b_1c_1 + b_2c_2 \qquad (4\text{-}3)$$

を考えます。ここで、b_1、b_2も定数です。式（4-1）のb_1倍と式（4-2）のb_2倍の和が式（4-3）となっているので、これら3式は独立でなく、連立一次方程式（4）の解は無数にあります。無数の解のうちの一つ（x_0, y_0, z_0）が求まったとすると、（x, y）＝（$x_0+b_1z_0, y_0+b_2z_0$）と置くことにより、式（3）の解を得ることができます。これらの関係を図10に示します。式（3）の解は点Pの位置になります。式（4）の解は、式（4-1）と式（4-2）で表される2平面の交線となる直線PQ上の点になります。原点Oから出発して式（3）の解を反復計算で求める場合、xy平面内で解に近づいていくことになりますが、係数行列の関係によっては解への収束が大変遅いことがあります。これに対して、式（4）を解く場合、変数と方程式が余分に増えるため、一見すると反復計算の手間が増えるように思えます。しかし、解を探索する範囲をxyz空間に拡大することにより、直線PQに速く達するルートが存在すれば、少ない反復計算で解に達することができます。この方法のポイントは、元の連立一次方程式での解への収束が遅い方向を見つけて、その方向を回避できるように、係数（b_1, b_2）を決定することにあります。電磁界方程式に現れる遅い方向（成分）はある程度わかっており、この知識を利用して、余分な変数と方程式を追加する方法を開発し、電磁界の高速解法を実現しています。

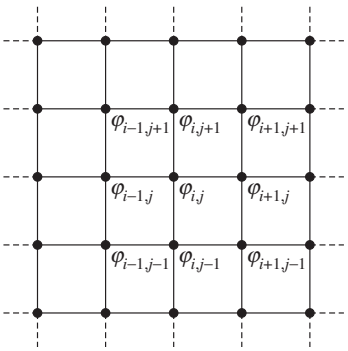


図８　計算格子と未知数の配置

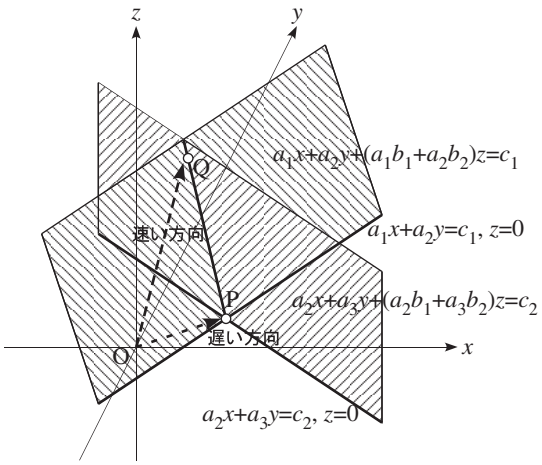


図９　連立１次方程式の解への収束

5. むすび

簡単ながら、計算電磁気学に関する研究を紹介しました。計算機パワーを利用することも重要ですが、電磁界や電気電子材料の性質を理解し、かつ、数学の力を利用することにより、信頼できる計算結果を効率よく得ることができます。優れた電磁界の解法が開発されると一気に何十倍も高速に計算することも可能になります。今後も、先進的な電気電子機器・デバイスの開発に不可欠な計算電磁気学の研究を進めていきます。

学生の声

「研究者と餅屋」

情報学研究科　通信情報システム専攻　佐藤亨研究室　博士後期課程３年　橋　本　大　志

昭和基地は、日本から14000㎞離れた東オングル島にある日本の南極観測の拠点です。私は2012年の11月末から2014年3月末までの1年4か月間、第54次南極地域観測隊の越冬隊員としてこの昭和基地に滞在していました。昭和基地では夏は60人前後、冬は30人ほどの隊員たちが、それぞれ自分の仕事のプロフェッショナルとして、基地の運営や研究観測に従事します。私の所属研究室ではこれまでに大気レーダー信号処理のための研究を行っており、私も南極に大型の大気レーダーを建設するPANSY（Program of Antarctic Syowa MST/IS radar）計画の一員として、南極に乗り込みました。

さて、冬の昭和基地には30人しか隊員がいません。「餅は餅屋」とは言いますが、各人が自分の専門の仕事だけをしたのでは、基地の運営はまわりません。時には全員で雪に埋まった建物を掘り起し、水漏れをふさぐために走り回り、ペンギンの数を数えるために何泊も野外旅行をすることがあるでしょう。更に電気電子工学科卒で情報学研究科の学生ともなれば、掃除機の修理やパソコンの設定が毎日のように押し寄せるのです！

もちろん悪いことばかりではありません。昭和基地は人間が近代的に生きていくための設備を全て揃えており、全て隊員が自分たちで管理しなければなりません。逆に言えばそれらがどのように実現されているかについて、幅広く理解を得ることができたのです。

南極がたまたまそういう場所だったと言うこともできます。ですが、自分の専門分野以外の様々なことに興味を持ち習熟しておくことは、今回のように突然要求されることもあれば、後々自分の研究に役立つこともあるはずです。研究者は餅屋に似ています。餅屋が餅をつけるのは当然のことです。また、餅は訓練すれば誰でもそれなりにつくことができます。幅広い知識をもって、餅屋としての専門性を前面に出しつつ、他の餅屋とも差をつける、そういった勉強の方向性を改めて認識させられる一年となりました。

「海外で研究をすること」

工学研究科　電気工学専攻　引原研究室　博士後期課程３年　八　尾　　惇

2014年4, 5月にスウェーデン王立工科大学にて海外研究インターンシップを行いました。海外研究インターンシップ中に、本原稿の執筆依頼を拝受致しました。ちょうど良いタイミングだと考え、この度の海外研究インターン中に感じたこと及び勉強になったことを、研究面及び生活面の観点から書いていきたいと思います。

まず、研究を行う観点に立脚し、海外研究インターンで勉強できた点を以下に列挙します。(1) これまでの研究を別の観点から見直せること、(2) 新たな研究課題を策定する苦労が経験できること、(3) 異なる研究環境で研究推進の工夫をする能力を獲得できること、(4) 英語でディスカッションを行う力が少しはつくことなど、多々勉強になることがありました。

次に生活面では、日本の良い点と悪い点を知ることができました。日本で生活している際には気づかなかったのですが、日本の良い点は「お・も・て・な・し」の心が行き届いている点だと感じました。日本では、本当に細やかな気配りが随所に存在していたことに改めて気付きました。むしろスウェーデンでは、気を遣うことよりも、自己主張をし、はっきりと自分の意見を伝えることが重要であると感じました。一方、日本の悪い点は、気を遣いすぎるあまりなのか、「無駄なことに労力を割きすぎているのでは？」と感じる場面が多々存在しました。すなわち、スウェーデン人や研究室の人々は手を抜く所と頑張る所のメリハリがはっきりとしていました。

以上のように、スウェーデンで研究及び生活を行うことは非常に有意義な時間でした。ただし、最後に自戒の意味を込めて書くのですが、海外に目を向けることと同時に、「基礎学力」を充実させることも重要であると感じました。

教室通信

学位への誘い／学位論文の保存と公開

京都大学図書館機構長（附属図書館長）電気電子工学科長　引　原　隆　士

大学で学問を修めたことを示す証は、言うまでもなく入学によって受け取る学生証ではなく、卒業、修了と共に授与される学位です。入学において、学部、学科、大学院はそのアドミッションポリシーに合致する学生を、個別試験で選別し、入学を許可します。しかしそれは卒業、修了を自動的に意味するものではありません。「自学自習」を唱う京都大学ですが、この前に「対話を根幹とした」という限定があります。すなわち他との議論を経て、客観的に自らを位置づけて学習することを重視しています。その学習により学問を修めた時、学位が認定されることになることは言うまでもありません。

京都大学の学位規程[1]において、京都大学が授与する学位は、学士、修士、博士、修士（専門職）となっています。それぞれの学位には専門分野が記載され、工学部であれば「学士（工学）」と現在では記されます。これまで学部、研究科において授与の審査がなされて来た学位ですが、平成24年より京都大学では、**学位プログラム**をコースワークを経て履修した者にも博士の学位が認定されることとなり、従来とは異なる博士学位の授与の形が認められることとなりました。それらが、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です。この様に、博士学位への間口を、従来の学問以外の領域に拡げる努力がなされています。その学問を定着させるのは、その学位を修めた人がこれからどういう活躍をするかに掛かっています。現電気電子工学科の卒業生が博士課程まで進学した時、博士（工学）、博士（情報学）、博士（エネルギー科学）の学位を授与されるケースが多数ですが、その評価はこれまでの修了者の、社会における活躍の蓄積によるものであることは容易に理解できます。だからこそ、その学位を習得することは、同等もしくはそれ以上の活躍を期待されるということになります。昨今では、既存大学院の学位においてもプログラムによるコースワークが重視され、社会人博士であってもコースワークを経た認定が求められています。

電気電子工学科では学士論文を電気総合館の図書室に、各大学院は修士論文を各研究科が指定する図書室や場所に保管しています。これらは一般に公開はされていません。残念ながら、昔の教員にはこれらの学位論文を教室として保存するという意識が弱く、現在では行方不明になっているものが多数あります。さらに研究室の関係者が途絶え、教員退職時に廃棄されたものなどもあります。残念でなりません。一方、博士論文は、文部科学省が規則として定める博士学位を授与する要件に、論文の印刷公表が課せられたことから、国会図書館及び附属図書館に京都大学が授与した学位論文が保管され、著者の合意があれば全文の複写も可能と言う扱いで公開されて来ました。博士論文はその学位の価値から丁寧に扱われて来たと言えます。しかし全ての学位論文について、大学が授与した以上、証拠として厳格に残すことが重要です。

さて、平成25年3月11日に、文部科学省より学位規則の一部を改正する省令が交付され、同4月1日から施行されることになりました。今回の改正により、博士の学位を授与された者は、これまでの印刷公表に代えて、インターネットを利用した公表が義務づけられました[2]。すなわち、学位取得から1年以内に、全ての博士論文が大学のリポジトリを介して世界に発信されることとなりました。工学研究科がそれに先立つこと数年、学位申請時に申請者の同意を取り、京都大学図書館機構のリポジトリ

（KURENAI ［3］）にて電子公開に踏み切って居りましたことから、全学的には短期間で同様の対応が完了されました。現在、著者の同意を得て過去に遡って電子公開も進められ、貴重な研究成果が人類の共通の資産としてインターネットで共用されるに至っています。また DOI の番号も付与され、資料として位置づけられています。このような学位規則を国で改訂し、電子公開を義務化した国は日本だけで、その中で京都大学も積極的に進めて来ました。博士論文の内容が衆目にさらされることを意識することは、著者自らがその新規性、独自性、有用性を改めて意識することになり、内容をより高めることにもつながります。

電気電子工学科の在学生、卒業生の皆さんには、自らで研究成果を上げ、その成果を人類の知へ還元するため、博士論文として世界へ公開して頂きたいと思います。それがだれもが必要な時に手が届く、人類のためのオープン・サイエンスの基盤となると信じています[4]。

[1] 京都大学学位規程：http://www.kyoto-u.ac.jp/uni_int/kitei/reiki_honbun/w002RG00000103.html
[2] 文部科学省ホームページ：http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/daigakuin/detail/1331790.htm
[3] 京都大学リポジトリ：http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/48884
[4] マイケル　ニールセン、オープンサイエンス革命 , 紀伊國屋書店（2013）

賛助会員の声

鉄鋼業における電気制御技術の進展と電気技術者の関わり

新日鐵住金（株）　名古屋製鐵所　制御技術室長（昭和 62 年卒）　藤　井　昭　吾

1. はじめに

電気系技術者が重要な役割を果たす業界は電機・通信・電力に限らず多岐に渡りますが、「鉄鋼業」はその中でも代表的な業種の一つになります。一方で最終製品が鉄板やパイプなどですから、電気系の学生の皆さんには「材料屋のフィールドで、電気屋とは無縁の業種」とご想像される方も多いと思います。たしかに製品から見ると電気・電子工学専攻の卒業生が働く姿が簡単には想像できませんが、実際にはその製造プロセスの心臓部は電気制御技術なくしては成り立たず、その技術の進歩が日本の鉄鋼製造プロセスの高度化に大きく貢献してきました。今回はこの場をお借りして、鉄鋼業における電気制御技術の進展と電気技術者の関わりについてご紹介したいと思います。

2. 鉄鋼製造プロセス紹介

鉄鋼製造プロセスは大別すると３つの工程から成ります（図 1）。

【製銑工程】

原料の鉄鋼石、石炭を高炉と呼ばれる反応炉で還元し、1,600℃以上にも達する銑鉄（炭素飽和鋼）を作ります。

【製鋼工程】

銑鉄を次工程の転炉および真空脱ガス装置で成分調整し、連続鋳造機で固めて鋼鉄とします。

【圧延工程】

鋼鉄は次工程の熱間圧延（熱延）、冷間圧延（冷延）、メッキ処理といった圧延・加工工程を経て製品となります。

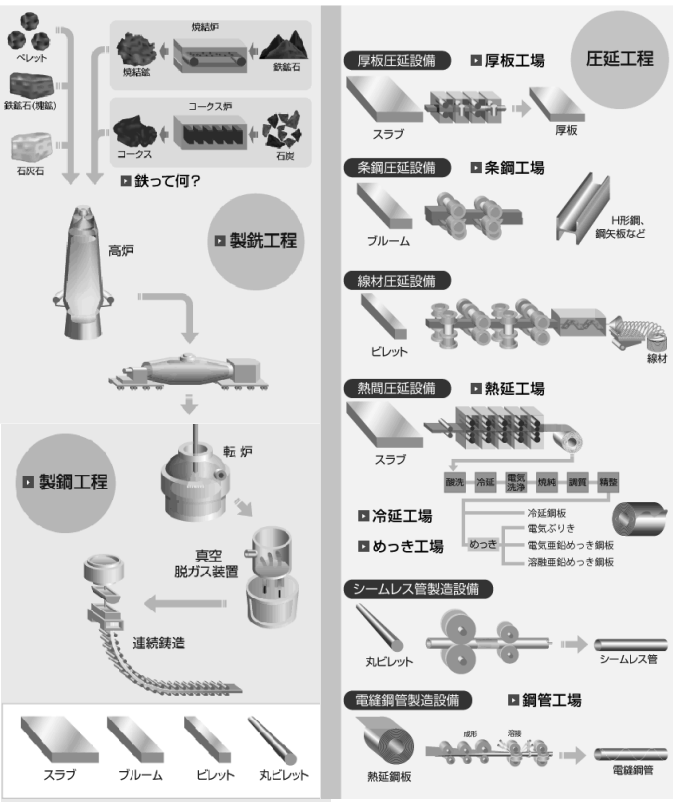


図１：鉄鋼製造プロセス概略（出典：新日鐵住金 HP）

鉄鋼製品の代表例が自動車鋼板です。たとえばボディに使われる板には、高い強度と成形性という、相反する機能が求められます。このような高機能製品は製鋼工程で炭素濃度を 10ppm オーダーで制御し、また圧延工程では板厚精度を μm オーダーで制御することで造られます。そしてこのような高品質な製品を精度よく、かつ大量に歩留まりよく製造するために、鉄鋼生産設備には高度な電気制御技術の開発と適用が必要となります。次項では熱延仕上圧延機を例に、電気制御技術の進化の過程とそこにおける我々電気技術者の役割を紹介します。

3. 鉄鋼生産設備における電気技術の進展と電気技術者の関わり～熱延仕上圧延機の例～

図２が熱延工程の仕上圧延機の構成図です。入側から板が進入すると、およそ１台１万kWの電動機で駆動される７段のロールと数千トンの力で板を押しつぶす圧下装置によって所望の厚さまで圧延され、出側の通板速度は最高60km/h以上に達します。このように高速な製造プロセスの中で±20 μm レベルの板厚精度を達成するには、高応答なアクチュエータ（圧下装置、電動機）とそれを高精度に駆動するドライブ装置、そこに的確な指令を与えて板厚精度を精密に造り込む制御モデルと自動制御アルゴリズムが必要となります。

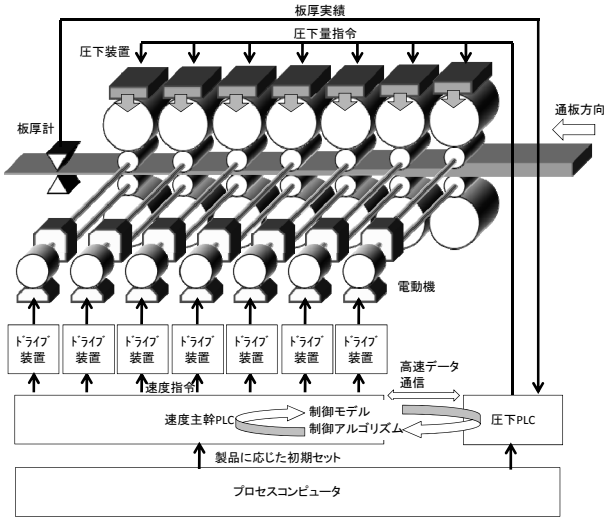


図２：仕上圧延機の構成

アクチュエータとドライブ装置に関する技術の変遷例として電動機の速度制御を取り上げると、直流電動機を直流発電機で駆動するワードレオナードなどに始まり、1960年代にはサイリスタを利用したアナログ制御型サイリスタレオナード、1980年代のデジタル制御型サイリスタレオナードへと進化しました。1990年代のベクトル制御型インバータの登場により、現在では高い応答性やメンテナンス性のよさから直流機に代わって交流機をインバータで駆動する方式が主流となっています。またこれらのドライブ装置に時々刻々変化する指令を与える役割も、元々はオペレータが手動でダイヤル設定していましたが、その後マイコン制御を経て、ユーザーが容易に制御ソフトを構築でき汎用性の高いPLC（プログラマブルロジックコントローラ）に移っていきました。ライン全体を統合管理し、複数のPLCそれぞれに設定値指令を与えるプロセスコンピュータや、それらを互いに接続する情報ネットワーク技術も、パソコンの進歩とともにその処理速度や伝送速度は格段に高速となりました。このようなエレクトロニクス技術の進歩を応用して現場の製造技術に適用することにより鉄鋼製造プロセスの高応答化・高精度化を実現してきたのは電気系技術者の活躍によるものです。制御アルゴリズムについては、制御理論の発展とともにPID制御だけでなく最適制御、適応制御などの現代制御理論が多数使われ、理論的なアルゴリズムに我々電気技術者が創意工夫と改善を加えることで、製品品質を世界最高レベルのものに高めています。このように電気制御技術は鉄鋼生産に不可欠な技術となっています。

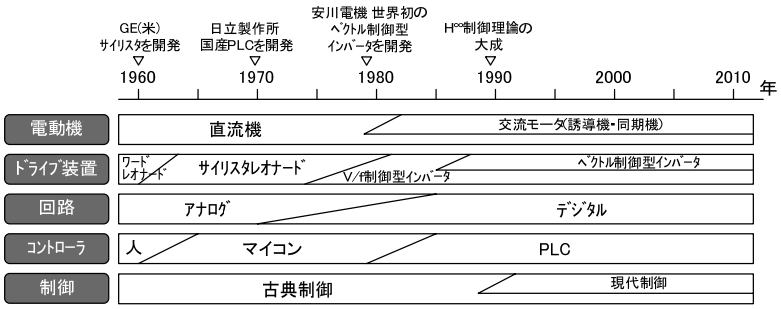


図３：鉄鋼設備における電気技術動向

4. 鉄鋼業におけるこれからの電気技術の役割

鉄は現在私たちが目にするもの、手にするもののほとんどに利用され、人類に不可欠な素材です。しかし当社の技術者は一様にこう言います。

「私たちは、まだ鉄の持つ可能性の半分も引き出せていない」

実際、鉄の理論強度は10,400MPaに達しますが、現在実用化されているのは2,500～4,000MPa程度です。

したがって鉄鋼業は追求し尽くされた素材でも、完成された産業でもありません。その可能性を引き出すために、これからも電気系の制御技術が大いに力を発揮していきます。今回ご紹介した圧延制御技術のほかにも、1,600℃をゆうに越える極限の環境下で温度・圧力・流量などを高精度にセンシングする技術、またそこから得られるビッグデータを解析し、プラント内部の現象をモデル化する数値解析技術、映像・音声などマルチメディアを用いたオペレータへの操業ガイダンスなど適用分野は枚挙に暇がなく、電気技術者が活躍するフィールドは無限にあるといっても過言ではありません。

5. おわりに

鉄鋼業は装置産業と言われます。どんな良質な鉄板も、製造設備とそのプロセスなくしては生産できません。そしてその製造プロセスを的確にコントロールする高度な電気制御技術はとても重要であり、今後も我々電気系技術者がさらに磨きをかけていかなければなりません。百聞は一見に如かずですから、ぜひ就職活動を通じて当社の製鐵所をご見学いただき、ご興味を持って頂けると幸いです。

（新日鐵住金株式会社 http://www.nssmc.com/）

編集後記

本号の巻頭言にて、「how to make」に加え「what to make」を考える若い人たちを育成する重要性について述べられています。松波先生からのこのメッセージに強い共感を覚えます。前号の 31 号から数年さかのぼって巻頭言を読み返してみますと、過去 20 年近くにおよぶエレクトロニクス産業低迷への危機感と将来の関連分野における日本復権への期待が端々に述べられています。厳しい見方をすれば、日本がかつて「what to make」で世界をリードした例はそれほど多くないのではないかと感じます。本号巻頭言の中で、パワー半導体 SiC の基礎研究と実用化を例に「what to make」の成功例を示していただいたことで、今後ますます多くの技術分野で日本が「what to make」を創造し、真に世界をリードする日が来ることを期待します。本号の編集とりまとめに当たり、電気関係教室の中からより多くの「what to make」が生み出されることを願うとともに、創造性豊かな学生を育成する視点で教員として努力し続ける必要があると感じた次第です。最後になりましたが、ご多忙のところ本号にご寄稿頂いた皆様をはじめ、日頃より cue 誌及び電気関係教室の活動にご支援いただいている皆様に厚く御礼申し上げます。

［T. I. 記］