ISSN　1882- 5214

# cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.40　SEPTEMBER 2018

[第40号]

巻頭言
吉川　榮和

大学の研究・動向
近接場光学顕微鏡の開発：光材料物性解明のための
ツール開拓を目指して
工学研究科　電子工学専攻　量子機能工学講座
光材料物性工学分野

産業界の技術動向
関西電力株式会社
花田　敏城

新設研究室紹介

研究室紹介

平成 29 年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

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

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員やその他の企業の協力により発行されています。

# cue 40 号 目次

**巻頭言**

理系に人文社会系の視点を取込み 21 世紀のエネルギー環境問題を解決
…… 昭和 40 年卒　シンビオ社会研究会会長・京都大学名誉教授　吉川　榮和…… 1

**大学の研究・動向**

近接場光学顕微鏡の開発：光材料物性解明のためのツール開拓を目指して
……工学研究科　電子工学専攻　量子機能工学講座　光材料物性工学分野…… 3

**産業界の技術動向**

最近の電力会社を取り巻く動向について
……関西電力株式会社　研究開発室　花田　敏城…… 11

**新設研究室紹介**…… 17

**研究室紹介**…… 18

**平成 29 年度修士論文テーマ紹介** …… 38

**高校生のページ**

原子力プラント解体作業支援のための拡張現実感システム
……エネルギー科学研究科　石井　裕剛、下田　宏…… 61

**学生の声**

努力しない強み
……工学研究科　電子工学専攻　木本研究室　博士後期課程 3 年　浅田　聡志…… 66

研究旅行記
……工学研究科　電気工学専攻　篠原研究室　博士後期課程 1 年　平川　昂…… 66

**教室通信**

グローバル化と留学生受け入れ
……電気電子工学科長　和田　修己…… 67

**賛助会員の声**

エコマテリアルな鉄とその安定製造に貢献する設備診断技術の開発
……新日鐵住金株式会社　名古屋製鐵所　熱延・厚板・鋼管整備室　野崎　尚広…… 68

**編集後記**…… 71

巻頭言

# 理系に人文社会系の視点を取込み 21 世紀のエネルギー環境問題を解決

昭和 40 年卒　シンビオ社会研究会会長・京都大学名誉教授　吉　川　榮　和

昨年から今春さらに夏場まで世界的規模で異常気象が続きました。日本各地で、集中豪雨と土砂災害で住民被害、全国各地で 40℃を越える酷暑で例年を越える熱中症発生。地球温暖化がいよいよ現実になってきたかと不安になりました。さて表題は、筆者が京大在職中の大学院エネルギー科学研究科（以下エネ科）が 1996 年創設時に掲げた設立趣旨です。当時国連により地球温暖防止への国際的取組みが開始され、1997 年京都で第 3 回締約国会議（通称 COP3）が開催されました。石炭、石油、天然ガスという化石燃料の大量使用によるエネルギー利用を、炭酸ガスを排出しないエネルギー源に転換して地球温暖化を防止し、世界の持続的発展を図る。これは解決困難なエネルギー、経済、環境のトリレンマ問題と言われました。COP3 では先進国だけを対象に京都プロトコルが採択され、当時の日本は 2008-2012 年に 1990 年比で 6％炭酸ガスを削減と約束しました。当時欧米の環境運動家たちは化石燃料から太陽光、風力のような再生エネルギーへの転換を主張しましたが、日本では原子力発電に期待しました。しかし 1979 年の米国 TMI-2 事故、1986 年旧ソ連のチェルノビル事故という原発大事故のため、環境にやさしいとは言えないと環境運動家には原発に反対が強かった。原発には重大事故の可能性と核のゴミの長年月に亘る環境放射能汚染への懸念という問題点がありました。

私は、エネ科設立趣旨中の“理系に人文社会系の視点を取込む”を体現するエネルギー社会・環境科学専攻（以下社会専攻）に、“エネルギー情報学”分野と名付けて原子エネルギー研究所原子炉計測工学研究部門から移籍しました。原子エネルギー研究所時代、原発運転員のヒューマンエラー防止のため人工知能（AI）やバーチャルリアリテイ（VR）応用のヒューマンインタフェース研究をしていましたが、エネ科社会専攻に移行後はリスク解析やリスクコミュニケーションと言った人文社会系（要するに社会心理学）の視点を取込んで人工システムの人間社会との調和を向上させる研究にも着手しました。筆者は 2006 年京大を退職し、その後科学技術と人間・社会・環境との調和・共生を図るためシンビオ社会研究会という NPO 法人を立ち上げ現在に至っています（シンビオとは symbiosis、共生を意味します）。

今年は 21 世紀に入って 18 年。世界のエネルギー環境問題は解決されたでしょうか？もしそうならエネ科は最早不要です。しかし国連の COP 会議は京都以降もまだまだ続いています。現在は世界的な平均気温上昇を、産業革命以前に比べ 1.5 ～ 2℃程度に低く抑えるべきと目標をより厳しくし、先進国だけでなく開発途上国も加わって温暖化防止に取組むための世界の新しい約束が 2015 年 12 月の COP21 でパリ協定として採択されました。その後異例の速さで各国がパリ協定を批准し、わずか 1 年で多国間条約として発効しました。

一方、日本はどうでしょうか？ 2000 年代に入った当時、米国では 30 年ぶりの原発新設計画、中国では大量の原発建設ブームで、原子力が停滞から復興に向かう原子力ルネッサンスの時代到来といわれました。当時の日本では国民へのアンケートで 60％が原発推進を肯定。原子力委員会は、成熟した軽水炉

発電の大規模建設、使用済み燃料の再処理で回収したウラン、プルトニウムを高速炉で利用する核燃料サイクルの完成により21世紀のエネルギー環境問題は解決できると『原子力立国』政策を提唱。それに呼応し資源エネルギー庁は2010年当時のエネルギー基本計画では2030年目標で、原発と再生エネルギーの比率を双方とも40%と高め設定。これにより地球温暖化ガス排出抑制の国際約束を達成と宣言しました。

しかし、2011年3月東電福島第一原子力発電所事故で日本の状況はすっかり変貌しました。福島事故で国民の原子力への好意的見方は逆転しました。福島事故当時稼働中の原発は54基でした。今年は福島事故後7年。原発の安全基準は世界最高になったが再稼働にこぎつけた原発は現在で9基、事故を起こした福島第一原発の6基はいつから始まるのか見通しのつかないまま廃炉を待つ状況、事故は起こしていないが様々な理由で廃炉を決めた原発が既に12基です。日本は京都プロトコルの削減目標も結局達成できませんでした。3年毎に見直されるエネルギー基本計画も2014年見直しでは2030年目標で原子力20～22%、再生エネルギー22～24%に修正されました。でも今の原発再稼働状況や再生エネルギーの導入状況では2030年にこの目標達成も困難視されています。日本政府は昨年のマラケシュのCOP22で、高効率石炭ガスと原発再稼働に頼って我が国の削減目標を満たそうと苦肉策を発表、環境NGOから化石賞を贈られたと報道されました。今やエネルギー問題は日本の一大難問です。

福島原発事故は東日本大震災で発生の巨大津波が原発を襲ったことが直接原因ですが、私の学生時代、あのような大地震、巨大津波の発生機構を科学的に説明するプレートテクトニクス理論はまだ一般に知られていませんでした。そのような時代に東電は米国の原発技術を輸入し、福島県の太平洋岸に原発を建設。その後日本を取り巻くプレートの動きから心配されるようになった巨大地震・津波対策はなおざりにしたままで2011年3月11日を迎え、津波による浸水で制御不能になって4台の原発が連鎖的に爆発したのです。ここで何故東電は福島原発の巨大地震・津波対策をなおざりにしたのか？私は考えます。

科学は不断に知識を拡大し、技術を進歩発展させて生活を豊かにする一方、様々な副作用が生じる。そこで科学技術の進歩がどんな副作用をもたらすかこれを検討し、人間社会にとって最も効果的な対策を評価し導入する。科学の進展に応じ、このサイクルを反復し改良に努める。しかし人間社会の政治プロセスには様々なステークホルダーが関与し、認知バイアスの存在や社会的パワーによって合理的な問題解決が往々にして妨げられる。東電福島事故の背景、過日の日本の原子力規制にはそのような政治プロセスがネガテイブに働いた。

その政治的プロセスとは次のようなものです。原子炉メルトダウンのような重大事故の防止には、(1) 設計上の想定を越える極端な状況を仮定しないといけない、(2) 極端な状況での原子炉の振舞いを解明し、その予測や防止手段を開発しなければならない、(3) 原子炉の周辺環境に放射能が大量に放出される事態の防災対策まで検討しなくてはならない。これの研究開発には大変時間と費用が掛かるという財政的な問題があるが、さらに原発ではこういう重大事故が起こりうると社会に知れわたると原子力推進が困難になる。このような人文社会系の視点が強く働いた結果、「日本の原発技術は高いので重大事故は起こらない」という安全神話を立て、上述の (1)、(2)、(3) の理系的な視点の研究開発は政策的に抑制されたのです。

勿論福島事故後、我が国では原子力の規制方針を厳しくし、(1)、(2)、(3) の難問を克服した原発は再稼働を始めていますが、54基の原発すべてが再稼働できるわけにいきません。これが現在の日本が地球温暖化防止への取組みの国際的約束を果たすためのエネルギー基本計画が立てられない事態を招来しています。エネルギー環境問題のような難問解決には、“理系に人文社会系の視点の取込む”だけでは片手落ちで、実は“理系と人文社会系が相互の視点を理解し、相乗効果を活かして問題解決する”ことが求められるのではないでしょうか。

大学の研究・動向

# 近接場光学顕微鏡の開発：光材料物性解明のためのツール開拓を目指して

工学研究科　電子工学専攻　量子機能工学講座　光材料物性工学分野
教授　川　上　養　一
准教授　船　戸　　充
助教　石　井　良　太

## 1. はじめに

2014年のノーベル物理学賞が日本発の「高輝度で省電力の白色光源を可能にした青色発光ダイオード（light emitting diode, LED）の発明」に関する成果に対して、赤﨑勇、天野浩、中村修二の各教授へ授与されたことは記憶に新しいですが[1]、光材料物性工学分野に関する未踏の領域が多く残されています。当研究室では、光材料開発や光物性解明を通じて、新しい光デバイスや光応用への展開を推進しています。例えば、新規分光評価技術の確立が新しい光現象の理解や発見に繋がることから、各研究テーマを有機的に結びつけることが重要であると考えており、研究室内で密接に連携を取り合って研究を進めています。

具体的な光デバイスとしては、窒化物半導体（AlN、GaN、InNからなる物質群）に代表されるワイドバンドギャップ半導体ナノ構造における発光遷移過程の制御を通じて、任意の波長において効率100%で発光する究極の光源（テイラーメイド光源）の開発を目指しています。可視域では、新たに見出した三次元InGaN量子井戸での多波長発光を実証し、それを利用したパステルカラーや白色LEDの作製にも成功しています。また、波長200 nm～350 nm域の紫外固体光源として、独自の結晶成長技術によるAlGaNの特性の飛躍的向上とその発光機構の解明を進めています。

ワイドギャップ半導体では、注入された電子と正孔がクーロン力によって結びついた励起子が室温においても安定に形成します。励起子は、再結合する際に光を発する場合と熱を発する場合があり、前者の確率を極限まで高めることが応用上重要です。私たちは、その確率を支配する物性を理解することなく、それを制御できるはずはないとの信念から、物理機構解明と新現象探索に取り組んでいます。

当研究室では、2000年代初頭から、近接場光学顕微鏡（scanning near-field optical microscopy, SNOM）を基礎光物性評価のための重要なツールとして位置付けて装置開発に取り組み、10 nmの空間分解能と10 psの時間分解能を実現しました。その結果、InGaN量子井戸での発光・非発光再結合のダイナミクスが手に取るように分かるようになりました。さらに、物質中で励起子やプラズモンが伝播する様子を、複数のプローブを用いて可視化できる装置（二探針SNOM）の開発にも成功しています。本稿では、研究室における活動のうちSNOM装置の開発とそれを用いた光物性評価について紹介します。

## 2. 顕微分光技術

光は波であるためにレンズを用いたとしても無限に小さく集光することはできません。これは、光の回折現象によって波長程度の円盤に滲んでしまうためで、遠視野光の回折限界と呼ばれています。この

物理限界への挑戦による成果として、2014 年のノーベル化学賞は、「超解像蛍光顕微鏡の開発」に対して、米国のベツィグ（Eric Betzig）、モーナー（William E. Moerner）、ドイツのヘル（Stephan W. Hell）の 3 氏に贈られています [2]。これらの詳細な物理機構は解説記事に譲りますが、ベツィグとモーナーによる手法は、光活性化局在顕微鏡法（photo-activation and localization microscopy, PALM）、ヘルによる手法は、誘導放出抑制顕微鏡法（stimulated emission depletion, STED）と呼ばれるもので、細胞などのバイオ観察に革新をもたらしました。

これに対して、上記とは別の手法として、近接場光学（near-field optics）の利用が半導体ナノ構造の顕微分光装置として大きな注目を集めています。この歴史を遡ると、1928 年には、シンジ（Edward Hutchinson Synge）によって光の波長以下の微小開口付近には、近接場光と呼ばれる光が局在し、そのトンネル効果を利用した高い空間分解能の顕微鏡について可能性が言及されていました [3]。しかしながら、当時は技術的な課題が大きかったため、長らく机上論のままでした。それに対して、ポール（Dieter Pohl）らによって回折限界を超える SNOM の原型が開発されたのが 1984 年 [4]、この手法を用いて GaAs/AlGaAs 量子井戸の蛍光を取得するのに成功（前述のベツィグらによる成果）したのが 1992 年のことです [5]。さらに、SNOM が高空間分解能の分光ツールとして確立したのは、1995 年頃に大津らによって高い光スループットを持つ光ファイバープローブを再現性良く化学エッチング加工する技術が開発されたことに端を発しており [6]、その後、斎木・大津らによって半導体ナノ構造のフォトルミネッセンス（photoluminescence: PL）マッピングが行われるなど [7]、SNOM 分光技術とそれを用いた研究は大きな発展を遂げています。当研究室では、2000 年代初頭から、SNOM を用いて GaN 系半導体の発光機構解明に取り組んできました。本稿では、いくつかの例を解説したいと思います。

## 3. マルチモード SNOM

SNOM の基本装置構成の一例を図 1 に示します。走査型電子顕微鏡像に示すように、ファイバープローブ先端のコア部分は、化学エッチングにより先鋭化されています。概略図に示したように、この部分は遮光用に金属でコーティングされており、先端の部分にだけ、波長より小さな開口が設けられています。図 1 に示した装置構成の場合は、この開口部分を介してサンプルを光励起し、かつ、サンプルからの発光を検出することになります。本研究室の初期の成果例 [8,9] として、青色発光 InGaN 量子井戸を開口径 30 nm の SNOM で測定した発光強度マッピング像を図 2（a）に示します。ここでは、モニターエネルギーを変えて同一領域をマッピングしています。いずれの像でも、数十 nm 程度の発光強度の強い領域が観測されます。図 2（b）のマクロ測定に示すように、空間分解能が 100 μm 程度の通常の測定では、ブロードな発光スペクトルが観測されます。それに対して、SNOM 測定では、スペクトルがいくつかのシャープな発光線に分離しており、観測場所を変えると異なるスペクトルが観測されます。このことは、InGaN 量子井戸面内では In 組成の揺らぎによって量子ドット的なポテンシャルの局在中心が形成されていることを示しています。

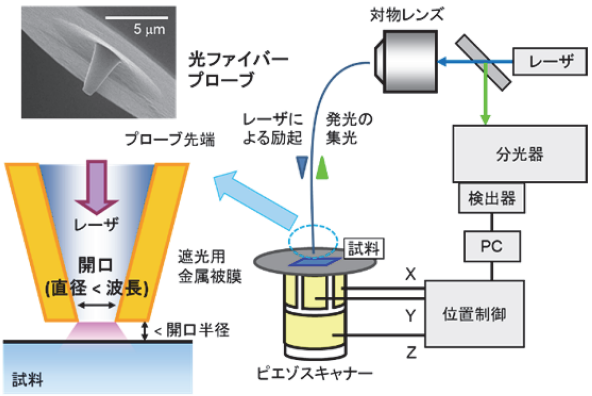



**図 1：SNOM の代表的な装置構成.**

本研究室では、さらにこの基本の装置構成に工夫を加えることにより、サンプル中の励起子の挙動が可視化できることを提案･実証しています。図 3（a）は図 1 と同じ構成でイルミネーション･コレクション（I-C）モードと称します。この場合、プローブ開口直下の発光を取得できるため、開口径に依存し

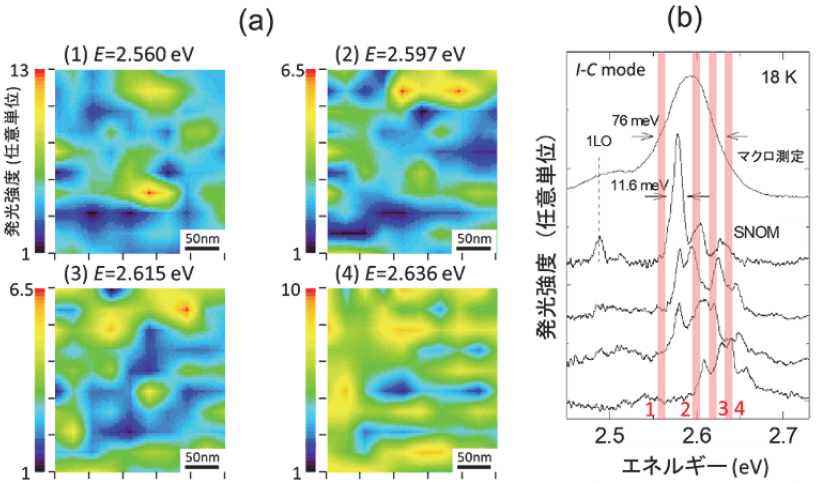



**図 2：(a) SNOM で測定した青色発光 InGaN からの発光強度マッピング．(b) の図中に示した 4 つの異なるエネルギーで計測した．(b) マクロ測定と SNOM 測定での光励起発光スペクトルの比較．**

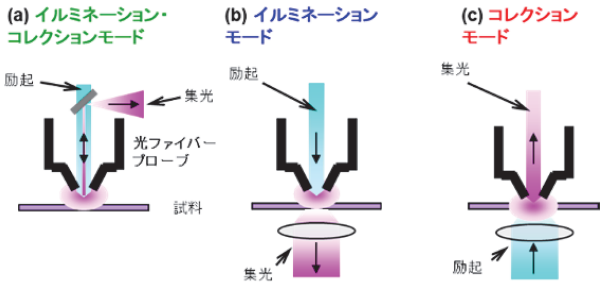



**図 3：マルチモード SNOM の光学配置．(a) イルミネーション・コレクション (I-C) モード，(b) イルミネーション (I) モード，(c) コレクション (C) モード．**

た高い空間分解能でポテンシャルエネルギーを定量することができますが、一方で、得られた信号が弱い時、非輻射再結合したのか、それとも開口外の領域に励起子が移動したのか、区別をすることが原理的に不可能となります。図 3 (b) は、ファイバープローブを介して励起し、通常の光学レンズで集光するイルミネーション（I）モードです。励起子の移動がファイバープローブの開口径よりも大きい場合には、空間分解能はその移動の程度で決まりますが、光学レンズによって開口よりも十分広い範囲における発光を集光しているため、開口外に移動したとしても、輻射再結合しさえすれば、それは信号として検出されることになります。つまり、移動過程後の輻射・非輻射過程の別を区別することができる配置といえます。したがって、I-C モードと I モードを比較すれば、局所的なポテンシャルの揺らぎの中で、励起子がいかに移動し再結合するのかという知見が得られることになります。図 3（c）に示したのは、光学レンズなどで巨視的に励起し、光ファイバープローブで集光するコレクション（C）モードであり、実際のデバイス動作時の様子を最もよく再現する測定モードとなっています。これらのモードで、さらに、励起光源として短パルスレーザと組み合わせれば、移動の時定数も含めてダイナミクスを時空間で分解して評価することが可能となります。

このような多様な光学配置を駆使して励起子再結合ダイナミクスをとらえる手法をマルチモード SNOM と呼び、それにより、InGaN 中の輻射・非輻射過程の空間分解 [10]、貫通転位と発光特性の相関の解明（驚くべきことに、青色発光素子では発光特性が貫通転位に影響を受けない）[11]、励起の増強による非輻射過程の活性化 [12,13] などの評価を報告してきました。

励起の増強による非輻射過程の活性化は、LED において高電流注入時に効率が低下する現象（“効率 Droop” 現象と呼ばれます）に強く関連しています。この特性は LED のハイパワー用途にとって不都合であるため、そのメカニズムの解明が期待されています。本研究室では、マルチモード SNOM により、その原因を探っています。図 4 と図 5 は、緑色（～525 nm）発光する InGaN 量子井戸での測定結果の例です。サンプルは、サファイア（0001）基板上に有機金属気相成長法で作製した、GaN/InGaN 単一量子井戸発光層（3 nm)/GaN キャップ（5 nm）であり、波長 400 nm のレーザによって励起すること

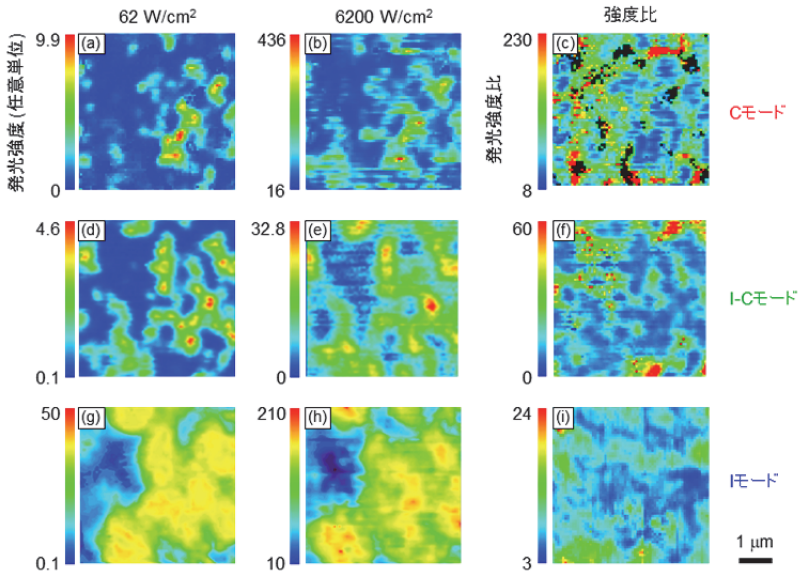



図 4：マルチモード SNOM による緑色発光 InGaN 量子井戸の室温発光強度マッピング．C モード［(a)，(b)，(c)］，I-C モード［(d)，(e)，(f)］および I モード［(g)，(h)，(i)］を比較した．(a)，(d)，(g) は励起パワー密度 62 W/cm²，(b)，(e)，(h) は 6200 W/cm² のときのマッピングであり，(c)，(f)，(i) はそれらの強度比を示している［例えば，(c) は (b)/(a) により得た］．測定範囲は 4 × 4 μm².

により発光を得ています。図 4 に I-C、I、C の各モードでの発光強度マッピング像の光励起強度依存性を示しており、各測定モードでは強度分布が異なること、また光励起強度によって強度分布の特徴が変化することが見て取れます。この変化を抽出するために、図 5 に各モードで測定した時の発光強度の平均値の光励起強度依存性を示しています。どの測定モードにおいても強励起で発光強度が飽和傾向を示しており、発光効率が低下していることがわかります。各モード間の違いを詳細に観察すると、C モードよりも I-C および I モードで発光強度の飽和が顕著となっています。これは、励起領域の小さな I-C や I モードにおいて、励起子の移動がより顕著に観察されたと解釈することができます。別の言い方をするならば、励起子が移動した後に非輻射再結合することが、効率 Droop の要因であることを示唆しています。さらに、I-C モードと I モードを比較すると、I-C モードの方で飽和傾向が顕著ですが、これは励起子がプローブ開口外に移動した結果であると考えられ、やはり、効率 Droop に対して、励起子の移動（とその後の非輻射再結合）が強い影響をもっていることを示しています。このように、緑色発光量子井戸では励起子が移動して非輻射再結合することが観察されますが、一方で、青色発光 LED ではこの現象は観察されず、発光色（つまり In 組成）によって、効率 Droop の機構が異なることもわかってきました。LED の効率改善に寄与する結果だと考えています。

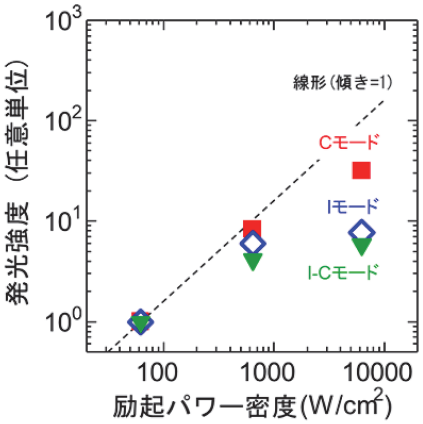



図 5：緑色発光 InGaN 量子井戸構造における発光強度の励起密度依存性．マルチモード SNOM で評価した結果を比較した．

## 4. 二探針 SNOM

前節のマルチモード SNOM では励起子の移動の有無は判別できますが、ある点で励起された励起子が、どのような経路を経て移動し再結合するのかを評価することは困難です。実際の試料では、図 6 に模式的に示したように、輻射および非輻射再結合中心がポテンシャル揺らぎの中で分布しており、励起子が完全に等方的に移動することの方がむしろまれであると考えられます。究極的には、多数の近接場プローブを用意し、あるプローブで励起された励起子の移動の場所依存性を同時に計測すべきですが、

現在の技術ではその実現は難しく、まずは2本のプローブにより、励起と検出を別々に行う二探針 SNOM を構築しました。図7（a）に2本のファイバープローブをサンプル上に設置した写真を示します。プローブを傾ける角度は、有限差分時間領域法（FDTD）による電磁界シミュレーションで最も効率よく光励起と検出ができるよう最適化を図りました。また、プローブの動作としては、励起プローブの周りを検出プローブでスキャンすることにより、励起子の動きをマッピングするのですが、技術的な困難さは、2本のプローブと試料の3体間の距離をナノメートルスケールで制御することでした。本研究室では、図7（b）に示したように、2つの周波数信号によりプローブ間およびプローブ - 試料間の距離を独立して検出・制御することにより、その問題をクリアしました [14,15]。開発した二探針 SNOM を用いて、表面プラズモンポラリトンの伝搬 [16] や InGaN 量子井戸における励起子の伝搬 [17] の可視化に成功しました。

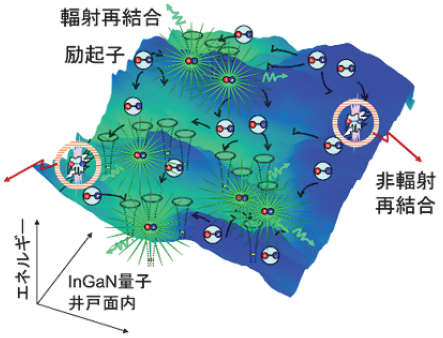
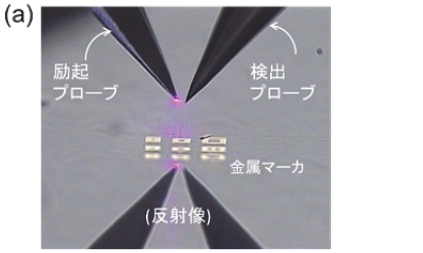



**図6：I-C モード SNOM の測定結果から再現したポテンシャル揺らぎと輻射・非輻射中心の分布.**

InGaN 量子井戸における測定例を図8に示します。図8（a）が実験結果で、点 A において光励起し、



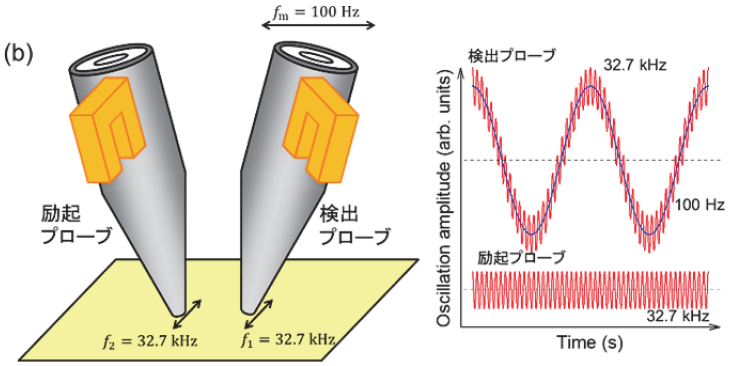




**図7：(a) 2本のプローブをサンプル上部に設置した様子. (b) 位置制御のためにプローブに与える振動の方向と周波数.**

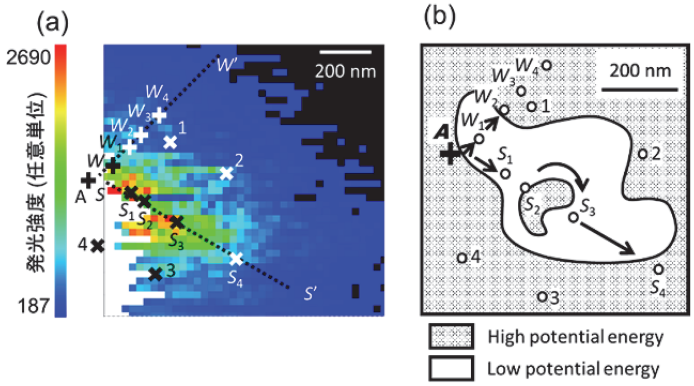



**図8：(a) 二探針 SNOM で測定した InGaN 量子井戸からの発光の空間分布. (b) I-C モード SNOM の測定結果と合わせて可視化したポテンシャル揺らぎと励起子の移動の様子.**

その周りを検出プローブでスキャンし、発光強度のマップとしたものです。発光の強い領域が図の右下に向かって非対称に広がっていることがわかります。各測定点では二探針 SNOM に加えて、I-C モード SNOM でもスペクトルを取得しており、各点でのポテンシャルの分布情報も得ています。特に図 8（a）中の黒点線 W-W’ および S-S’ 上でそれを解析したところ、W-W’ 上の場合、励起点近傍の W1 では、2.35 eV 程度の発光ピークを持つのに対し、それ以外の W2 から W4 では、2.40～2.45 eV と W1 よりも高エネルギー側にシフトすることがわかりました。このことから、発光強度が減少した原因は、ポテンシャルバリヤにより移動を妨げられた励起子が、励起源近傍に多く存在したためであると考えられます。一方、S-S’ 上の場合、発光強度が減少する S2 や S4 では、2 つの発光ピークを持つスペクトル形状であり、発光強度が一定あるいは増加する S1 や S3 では、低エネルギー側の発光ピークのみのスペクトル形状であることがわかりました。S2 や S4 のように高エネルギー側に発光ピークを持つ領域で発光強度が減少した原因は、W-W’ 上と同様に、励起子の流入が妨げられて実質的な励起子数が減少したためであると考えられます。一方、S1 や S3 のように低エネルギー側の発光ピークのみの領域には、励起子が流入することができることから、励起子の移動は S2 のような領域で堰き止められるものの、その周囲の低ポテンシャルエネルギー領域を迂回することで、さらに遠くへ移動することが可能となったと解釈することができます。このような解析をマップ全体に展開することにより、図 8（b）に示したようなポテンシャル分布とその中での励起子の移動の様子を可視化することに成功しました。

## 5. 今後の展開 ― 深紫外 SNOM の開発

ここまでは、可視域で発光する InGaN 量子井戸構造の評価に SNOM を利用した例を紹介しました。これに対して、最近、AlGaN を用いた波長 200 nm～350 nm の紫外域での固体光源の開発が活況です。現行の代表的な紫外光源として Hg ランプがありますが、2017 年度に発効した「水銀に関する水俣条約」では、Hg を用いた製品の製造が将来的には制限される方向性が明示されています。これの代替え光源の実現への期待の表れです。本研究室でも、AlGaN 系発光構造の開発は進めており、同時に SNOM を深紫外域に拡張することも検討しています。深紫外域での紫外分光は、AlGaN やダイヤモンドなど超ワイドギャップ半導体の光物性解明のみならず、がん細胞の検査などバイオ応用で開発が期待されています。図 9 は、これまでの窒化物半導体分光計測の発光波長と分解能の関係を示したものです。図に示

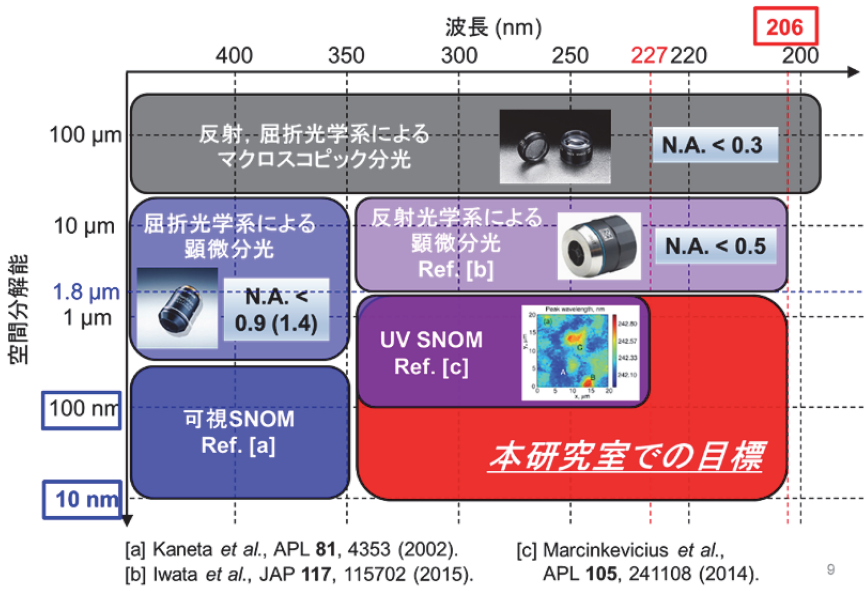



**図 9：空間分解能と対象とする波長の関係.**

した通り、波長 200 nm 程度、空間分解能 10 nm がターゲットです。紫外域では光学部品の開発そのものが可視域に比べて遅れており、装置開発自体が重要な研究課題となっています。非線形波長変換による深紫外レーザ装置の構築、深紫外域で色収差補正したレンズや高スループットの光ファイバープローブ開発など、ここ数年間、精力的な開発に取り組んでおり、近い将来での展開を期待しています。

## 6. おわりに

本稿では、本研究室における SNOM の開発動向とそれを用いた光物性評価を紹介しました。SNOM は、半導体ナノ構造やプラズモニクスのみならず、種々のナノフォトニクス構造の動作評価や生体細胞のシグナル伝達など、種々の光学現象を観察・測定するためのツールとして有用であり、今後もその開発と応用を進めて行きたいと考えています。

### 参考文献


[1] 川上養一, “ノーベル物理学賞：日本発の青色 LED の成果”, パリティ, **12**, 29 (2014).

[2] 岡田康志, “ノーベル化学賞：超解像蛍光顕微鏡の開発”, パリティ, **12**, 37 (2014).

[3] E. Synge, “A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region”, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science **6**, 356 (1928).

[4] D. W. Pohl, W. Denk, and M. Lanz, “Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$”, Appl. Phys. Lett. **44**, 651 (1984).

[5] E. Betzig, and J. K. Trautman, “Near-Field Optics: Microscopy, Spectroscopy, and Surface Modification Beyond the Diffraction Limit”, Science **257**, 189 (1992).

[6] M. Ohtsu, “Progress of high-resolution photon scanning tunneling microscopy due to a nanometric fiber probe”, J. Lightwave Tech. **13**, 1200 (1995).

[7] T. Saiki, K. Nishi, and M. Ohtsu, “Low temperature near-field photoluminescence spectroscopy of InGaAs single quantum dots”, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 1638 (1998).

[8] A. Kaneta, K. Okamoto, Y. Kawakami, Sg. Fujita, G. Marutsuki, Y. Narukawa, and T. Mukai, “Spatial and temporal luminescence dynamics in an $In_xGa_{1-x}N$ single quantum well probed by near-field optical microscopy”, Appl. Phys. Lett. **81**, 4353 (2002).

[9] 金田昭男、“顕微分光法を用いた InGaN 系量子井戸構造の光物性に関する研究”、京都大学博士（工学）論文、(2003).

[10] A. Kaneta, T. Mutoh, Y. Kawakami, Sg. Fujita, G. Marutsuki, Y. Narukawa, and T. Mukai, “Discrimination of local radiative and nonradiative recombination processes in an InGaN/GaN single-quantum-well structure by a time-resolved multimode scanning near-field optical microscopy”, Appl. Phys. Lett. **83**, 3462 (2003).

[11] A. Kaneta, M. Funato, and Y. Kawakami, “Nanoscopic recombination processes in InGaN/GaN quantum wells emitting violet, blue, and green spectra”, Phys. Rev. B **78**, 125317 (2008).

[12] Y. Kawakami, A. Kaneta, A. Hashiya, and M. Funato, “Impact of Radiative and Nonradiative Recombination Processes on the Efficiency-Droop Phenomenon in $In_xGa_{1-x}N$ Single Quantum Wells Studied by Scanning Near-Field Optical Microscopy”, Phys. Rev. Appl. **6**, 044018 (2016).

[13] 船戸充, 川上養一, “近接場光学顕微鏡による InGaN 可視発光素子の時空間分解分光”, 光学 **45**, 417 (2016).

[14] A. Kaneta, R. Fujimoto, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato, and Y. Kawakami,

"Instrumentation for dual-probe scanning near-field optical microscopy", Rev. Sci. Instrum. **83**, 083709 (2012).

[15] 川上養一, 金田昭男, 船戸充, "2 探針近接場分光技術の開発", レーザー研究 **43**, 286 (2015).

[16] R. Fujimoto, A. Kaneta, K. Okamoto, M. Funato, and Y. Kawakami, "Interference of the surface plasmon polaritons with an Ag waveguide probed by dual-probe scanning near-field optical microscopy", Appl. Surf. Sci. **258**, 7372 (2012).

[17] A. Kaneta, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato, and Y. Kawakami, "Visualization of the Local Carrier Dynamics in an InGaN Quantum Well Using Dual-Probe Scanning Near-Field Optical Microscopy", Appl. Phys. Exp. **3**, 102102 (2010).

産業界の技術動向

# 最近の電力会社を取り巻く動向について

関西電力株式会社　研究開発室
花　田　敏　城

## 1. はじめに

近年、温暖化の悪影響が色々なところで現れはじめました。氷河や北極、南極の氷が溶け、海面が上昇したことによる海岸線の侵食、また超大型台風などの異常気象も海面上昇したことが原因だと考えられています。そのため、$CO_2$ 削減は世界的な優先課題となっています。

エネルギー自給率が 10%にも満たない日本のエネルギー供給は、約 8 割を「化石燃料」に依存しています。温室効果ガス排出の大部分が化石燃料の燃焼によるものであるため、これからは太陽光や風力、地熱などの自然の力を使った「再生可能エネルギー」の普及に向けて、世界的にエネルギー供給のしくみが大きく変化してきています。

日本では、東日本大震災後全ての原子力発電所が停止となり「化石燃料」の依存がさらに高まってしまいましたが、翌年の 2012 年に固定価格買取制度（FIT）が導入され、再生可能エネルギーの年間電源構成（kwh）比率は、震災前 2010 年度の 9.6％から 2016 年度には約 15％へと、太陽光発電（以下 PV と記載）を中心に急速に導入が進んできています。2018 年 7 月に策定された「第 5 次エネルギー基本計画」では、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組方針が明記され、さらなる再生可能エネルギーの導入促進と原子力の再稼動により、エネルギー自給率を 2016 年度時点の 8％から 2030 年度に 24％へと目標値も設定されています。

再生可能エネルギーへの転換が急速に進んでいく中で、これまでの電力供給システムでは対応できない課題も出てきています。しかし、近年第 4 次産業革命ともいわれる、IoT、ビッグデータ、AI 等の技術革新が急速に進展してきており、本稿では、関西電力が新しい技術で課題解決に向けて取組んでいる事例について紹介します。

## 2. 最近の電力システム上の課題

これまで電気は、水力・火力・原子力といった発電所で作られ、送電線や変電所などを経由してお客さまにお届けしてきました。電気は、常に、需要と供給のバランスがとれるようにコントロールしなければなりません。もしもこのバランスが崩れると停電になってしまいます。

再生可能エネルギーは、クリーンなエネルギー源として期待されているものの、自然任せの発電であるがゆえ、天候によって発電量が大きく左右されます。

そのため、電気の需要と供給のバランスをとることが難しくなるなどの電力システム上の諸課題（表 1）が一層浮き彫りになり、早急な対応が必要となっています。再生可能エネルギーの導入が進んでいるカリフォルニアでは、将来において大規模発電所が担う電力システム内の需要が朝方から日中にかけて落ち込み、その後夕方から日没にかけて急増する「ダックカーブ現象」の発生が懸念されています（図 1）。このような、急激かつ大きな変動を「ランプ変動」と呼びますが、その変動に対する追従性の検討も必要になってきています。

日本においても、九州本土で同様の問題が起こり始めています。年間を通じて電力需要量が少なく、かつ、日照条件がよかったゴールデンウィークの日に、まさにカリフォルニアで危惧されていた「ダッ

表１　再生可能エネルギーに起因する電力システム上の課題

| 区分 | | 電力システム上の課題 | 概要 |
|---|---|---|---|
| 平常時 | 全系 | 需給の課題<br>（周波数変動を含む） | ●再生可能エネルギーの導入増加や急な出力変動により、電力システム全体の需要と供給のバランスが崩れる。 |
| 平常時 | ローカル | 線路過負荷の課題 | ●特定の送電線／配電線に多く電力潮流が流れてしまい、線路過負荷が生じる |
| 平常時 | ローカル | 電圧の課題 | ●再生可能エネルギーの出力により、電圧変動が生じ、逆潮流などを招く |
| 平常時 | ローカル | 高調波・フリッカ等の発生 | ●非線形要素を含むPCSからの出力が、高調波・フリッカ等の電力品質上の悪影響をもたらす |
| 事故時 | 全系 | 過渡安定度の問題 | ●PCS電源の増加に伴い、電力システム全体の同期特性（同期化力、慣性）が低下する恐れがある |
| 事故時 | 全系 | 一斉解列の問題 | ●再生可能エネルギーの不要解列により、波及的に解列が生じてしまう可能性がある |
| 事故時 | ローカル | 単独運転の問題 | ●事故時において、意図していないにも関わらず、単独運転が発生する可能性がある |
| 事故時 | ローカル | 短絡容量増加の問題 | ●既設遮断器の定格遮断電流を超過するなど、短絡容量が増加するおそれがある |

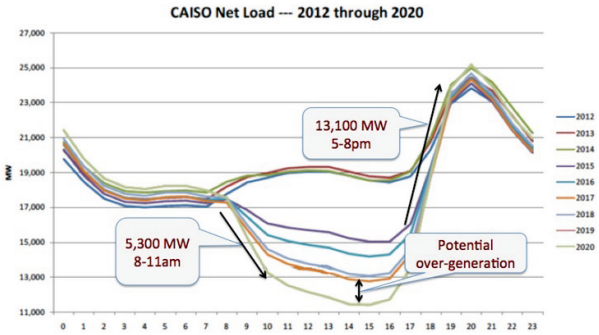



図１　カリフォルニアのダックカーブ（2012-2020）
出所：Clean Coalition 社 HP
（http://www.clean-coalition.org/resources/integrating-high-penetrations-of-renewables/）

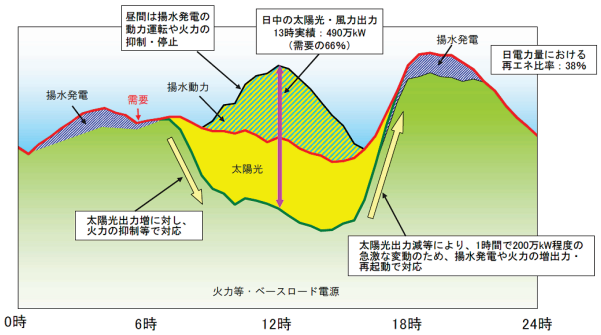



図２　需要と供給のバランス（平成 28 年 5 月 4 日）
出所：九州電力 HP
（http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0055/4201/2ntja6f6cpd.pdf）

クカーブ」と同様の状況となってきていることが図２の需給バランスのグラフから理解頂けると思います。この時には、今まで夜間にピーク電力需要に備えて水をくみ上げていた「揚水発電所」を、PV 出力のピーク時間帯に「負荷」として稼動させ、PV 出力が低下する夕方に「発電機」として発電電力を補うことで、ランプ変動の緩和対応が行われました。

今後、再生可能エネルギーの導入が進むことで、他の地域においても、同事象に備える必要があります。

## 3.　課題解決に向けた関西電力の取組み

### (1)　これまでの取組み

本項では、再生可能エネルギーに起因する課題解決に向けた技術開発の中で、近年特に注目が集まっている蓄電池に代表される「電力貯蔵」技術を活用した取組みと、天候に左右される再生可能エネルギーの中で PV の発電量予測に関する取組み内容について紹介します。

#### (ア)「電力貯蔵」技術を活用した取組み

関西電力では、東日本大震災前から、再生可能エネルギーの大量導入を想定し、電力系統の供給信頼度を確保するために「蓄電池」を活用した研究開発を行ってきました。図３は、2010 年から堺港のメガソーラーが連系される変電所に、電力ピークシフト、瞬時電圧低下対策、停電対策を同時に兼ね備えた

「ニッケル水素電池を用いた多機能電力貯蔵装置」を設置し、実証研究したものです。結果、電池の充電率（SOC:State of Charge）特性、電池寿命評価などの知見が得られました。その基礎データを元に実際の需給制御システムのシミュレーションモデルを構築し（図 4）、周波数変動調整に必要な蓄電池容量、周波数変動抑制効果などが把握できました。

**（イ）PV の発電出力予測の取組み**

PV は天候による日射変動で出力が大きく変動するため、その普及拡大が電力システムに影響を与えます。関西電力では、周波数を一定に維持する需給調整への活用を目的に、PV 出力の推定・予測システムを開発し、2016 年から中央給電指令所で運用開始しています。

システム概要は、図 5 となります。PV 出力を把握するにあたって、PV は出力の小さな発電設備が広域に分散して設置されているため、全ての PV システムを計測することは現実的ではありません。そこで、気象衛星（ひまわり）が撮影した雲画像から、雲の高度や形状を分析し、地表面の日射強度を推定した結果（図 5 内の「アポロン」システム）と PV マップデータから 1km メッシュの PV 出力予測をしています。日射強度は、3 時間 30 分先まで 3 分刻み、1km メッシュで予測することができます。なお、気象衛星がひまわり 7 号から 8 号に更新され得られるようになった各種画像（赤外線、水蒸気画像など）を活用し、雲の移動予測精度を高め、さらなる PV 出力の予測精度の向上に取組み中です。

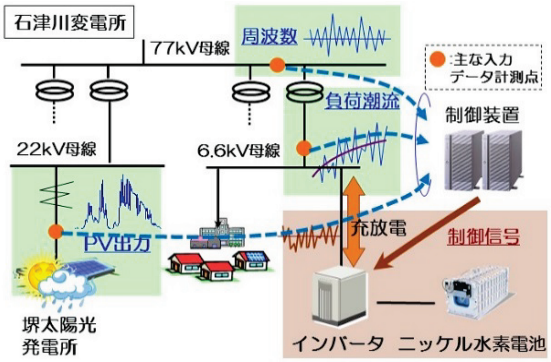



図 3 「多機能電力貯蔵装置」の概要

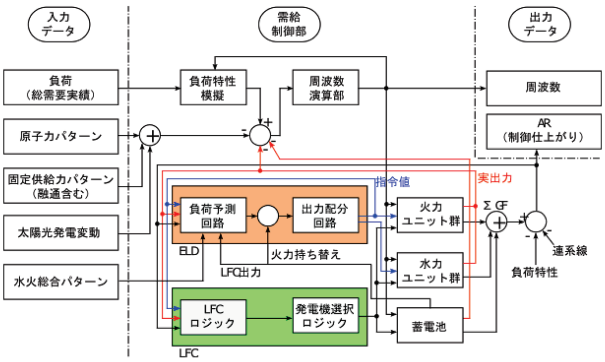



図 4　蓄電池を用いた需給制御システムのシミュレーションモデル

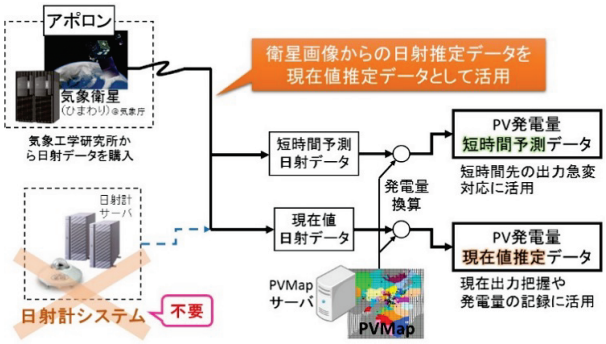



図 5　太陽光発電出力推定・予測システムの概要

**（2）現在の取組み**

今後、電気を直接貯めることができる蓄電池、電気自動車などがますます普及する見込みです。さらに、家庭や企業のあらゆる機器をネットワークにつなぐ技術が発達してきています。この技術を使って、需給バランスをとるため、需要家側の機器を制御し、あたかも発電所のように活用することを「VPP（バーチャルパワープラント・仮想発電所）」といいます。その実証事業における取組みを紹介します。

本事業の将来のビジネスモデルは、経済産業省主催の「エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス※1（ERAB）検討会」にて、今後新設予定のものも含めた各種電力取引市場（需給調整市場、容量市場など）での活用が検討されています。なお、同検討会では通信・機器の規格およびサイバーセキュリティ対策などの制度面の検討もなされています。

関西電力では、この実証事業の取組みを「関西 VPP プロジェクト」（図 6）と呼んでいます。本プロジェクトを進めるにあたっては、将来ビジネスモデルの検討や提供するサービスを実現するための技術的な

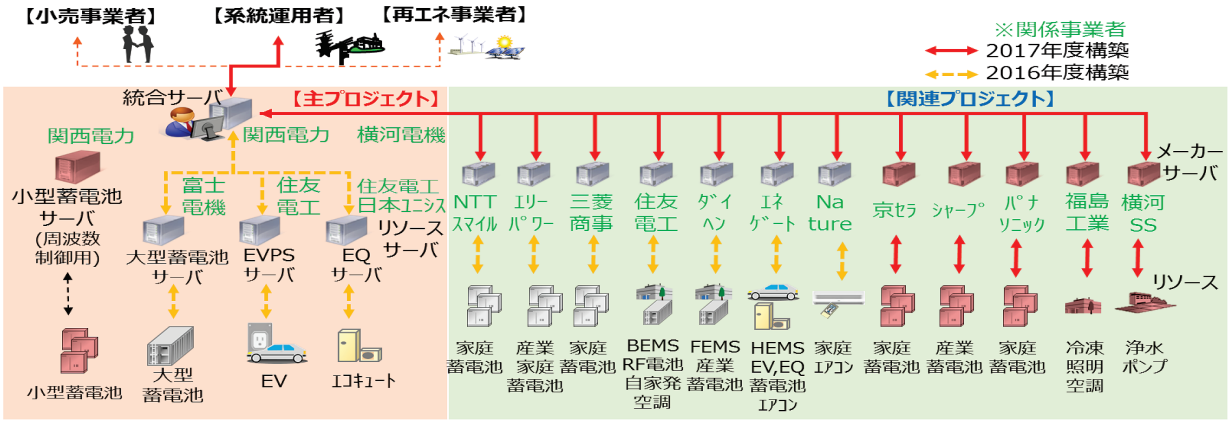



図６　関西 VPP プロジェクトのシステム構成

課題解消を図りつつ、事業に活用可能なリソースを積極的にアグリゲート（集めること）することが必要であると考えています。そのため､VPP 事業のメインとなる機能確立部分である｢主プロジェクト｣と、メーカ等が中心となってリソースの活用実証を進める「関連プロジェクト」に区分して実証を進めています。また、本プロジェクトの特徴は、様々なリソースの制御を試みている点にあります。

本プロジェクトは、2016 年度から開始し、2017 年度にシステム構築が完了、実フィールドでの基礎的な制御の確認を行いました。2018 年度には、より速い制御システムの開発、リソースの拡大、精度向上のためのシステム改良を行う予定です。

昨年度に、システム制御の確認のために実施した試験内容の一部を、図 7 から図 11 で紹介します。各グラフデータは、指令システムから一定時間の需要増減目標値の指示を受けた時の動作状況の時間変化となります。なお、各グラフ内の「ベースライン」は、指令がなかった場合の需要変動予測値であり、その差が制御により実現できた需要変化量となり、概ね目標値に近い制御が実現できました。

図 7：産業用蓄電池のリソース単体の動作データです。4 時間需要を下げる指令を受けた動作結果です。

図 8、9：ポンプ、空調など複数のリソースでの動作デーータです。変化量を各リソースの合計値で表示してあり、図 8 が需要増、図 9 が需要減の指令に対する動作結果となります。

図 10、11：電気自動車（EV）の充電を制御するシステム概要と、動作データです。52 台の EV に充電指令を出し、32 台が動作できた結果となります。

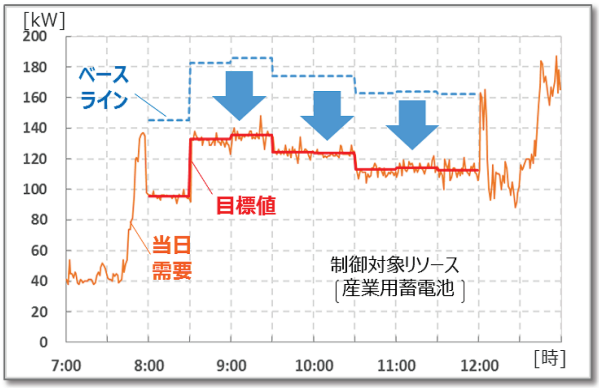



図７　４時間マイナス目標値指令した例
（リソース１つ）

## 4. 将来の電力ビジネス

再生可能エネルギーの大量導入を見据え、今後想定される市場環境において、再生可能エネルギーの導入が多い欧米の電力ビジネス環境変化を参考にすると、「顧客中心」の新しいビジネスモデルの構築を行うことが事業継続のためには必要となってきています。その中で、「デジタル活用」が新ビジネス展開を考える上で重要な技術となっており、複数の業界が融合したビジネスモデルが今後構築される可

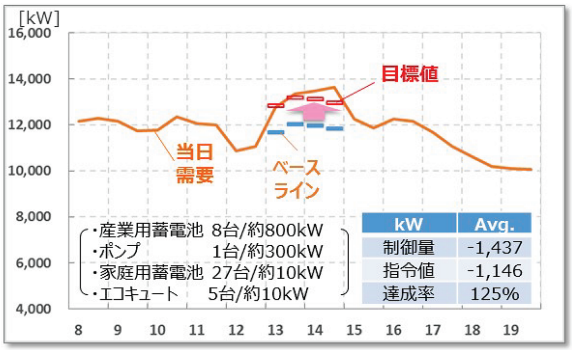



図 8　2 時間プラス目標値指令した例
（リソース複数）

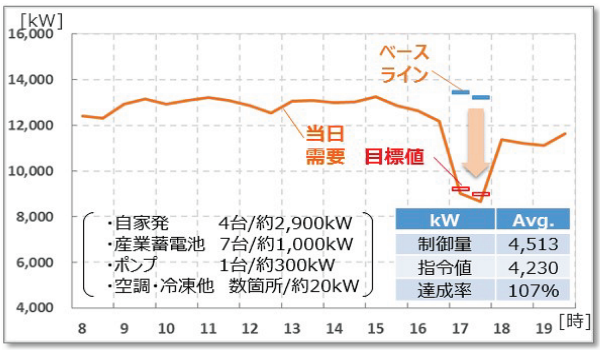



図 9　1 時間マイナス目標値指令した例
（リソース複数）

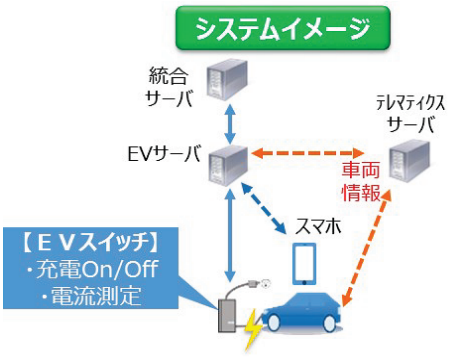



図 10　EV の充電制御システム概要

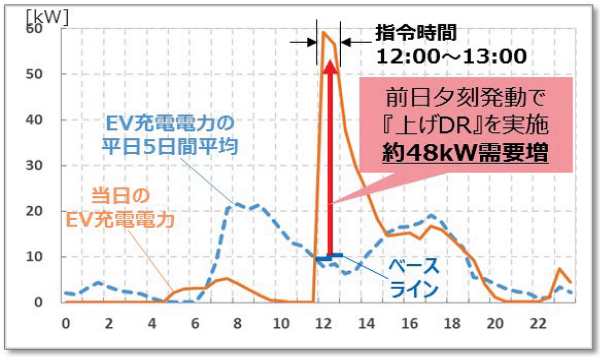



図 11　1 時間 EV 充電指令した例（32 台動作）

能性もあります。また、分散型電源の活用方法によっては、今まで単なる消費者であった方が、サービス提供者となれる可能性も開けてきます。

例えば、PV をはじめとした再生可能エネルギー等の普及により、現在の電力供給システムは、従来の大規模集約型から自立分散型のシステムへ変化してきており、将来的には、PV などを保有する需要家は生産消費者（プロシューマー）として、他の電力消費者と専用のプラットフォームを介して、電力を直接取り引きするようなサービス提供も可能となります。

現在、金融をはじめ各業界においてブロックチェーン※2 技術の普及が進んでおり、電力直接取引においても、ブロックチェーン技術を活用し、電力会社を介さない取引などが考えられます。海外の先行事例として電力直接取引（電力 P2P 取引※3）サービスを提供するビジネスも実際に誕生しており（図 12）、日本でも研究開発が進められています。

電力業界だけに留まらず、EV へのシフトなど他の業界動向の変化も想定し、新たなサービス（価値）提供による、より便利な暮らしをお客さまに提供できるビジネスモデルが、近い将来に数多く誕生していくと思われます。

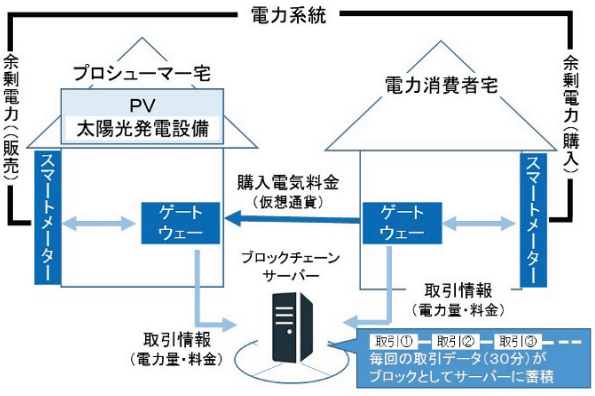



図 12　電力 P2P 取引ビジネスの例

## 5. 終わりに

現在の取組みとして紹介したVPPシステムの核心部は、個々の需要家にハードとソフトの窓口（ゲートウェイ）を設置していること、その窓口そのものが双方向通信できることにあります。このVPPシステムの特性と性能を活かしたVPPビジネスを展開する未来は、蓄電池活用プラットフォームビジネス、電力直接取引プラットフォームビジネス等今までになかった新しい価値を提供するサービスの拡大が期待できるものです。

地球温暖化防止のための再生可能エネルギーのさらなる大量導入実現に向けて、将来主役となっての活躍が期待される電気関係の学生の皆さん、関西電力が経営理念で掲げる「お客さまと社会のお役に立ち続ける」という使命を果たすため、エネルギー業界におけるイノベーションの進展を、一緒に実践していきましょう。

**【用語解説】**

※1「エネルギーリソースアグリゲーションビジネス」：リソースアグリゲータの事業に加え、需要家のエネルギー設備を遠隔で制御することで、需要家自身へのサービス提供を含めたビジネス

※2「ブロックチェーン」：分散型台帳技術とも呼ばれ、仮想通貨ビットコインの中核技術を原型とするデータベースのこと。ブロックと呼ばれる順序付けられたレコードが連続的に増加するリストを持つ。各ブロックには、タイムスタンプと前のブロックへのリンクが含まれており、一度記録するとブロック内のデータを遡及的に変更することができない。P2Pネットワークと分散型タイムスタンプサーバーの使用により、自律的に管理される。

※3「電力P2P取引」：P2Pとは、Peer to Peer（ピア・ツー・ピア）の略で、もともと複数の端末間で通信を行う方式。電力取引の場合、個人の太陽光発電などの分散電源で発電した電気を、別の個人の消費者へ送ることで直接取引することをいう。

## 新設研究室紹介

### 生存圏診断統御研究系　大気圏精測診断分野（橋口研究室）
### http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/
### 「独創的リモートセンシング技術開発で地球大気環境を探る」

当研究室では、電気電子工学・通信情報工学の最新技術を、地球大気科学に応用することに取り組んでいます。21 世紀は、地球環境の時代と言われていますが、地球環境変動を測定し監視する技術はまだまだ発展途上です。地球大気環境変動の現状を知り将来を予測するには、まず精密な観測が必要です。当研究室は、独創的なリモートセンシング装置の開発による地球大気情報の収集、国際観測ネットワークを通じて得られる多量のデータと併せた解析を行うことで、地球環境変化の科学的解明に貢献することを目指しています。工学と理学との境界に位置する学際的な研究を特徴とし、グローバルな地球科学を解明するために国際共同研究にも力を入れています。以下では主な研究テーマを紹介します。

**MU レーダーと小型無人航空機による大気乱流の同時観測**

乱流混合は熱や物質の鉛直輸送に寄与する重要なプロセスですが、そのスケールが極めて小さいことから観測が難しい現象の一つです。日米仏の国際共同研究により、コロラド大で開発された気象センサーを搭載した小型 UAV と MU レーダーとの同時観測実験（ShUREX（Shigaraki, UAV-Radar Experiment）キャンペーン）を実施し、乱流の実態解明を目指しています。

**電波・光・音波を用いた地上からのリモートセンシング**

水蒸気、気温や風速の高精度計測は、気象予報精度の向上に重要な要素です。一方、中国からの越境輸送に伴う粒子状物質（エアロゾル）の増大が、ヒトへの健康影響も懸念され社会的にも注目を集めています。大気質の動態を詳細に把握するため、レーザーレーダー（ライダー）の開発を行っています。高度 10km 以上の遠距離まで計測可能な大型システム、野外観測用に可搬性を高めた小型システム、空間分布を計測可能な走査型システム、アイセーフで日中も計測可能な紫外線ライダー、風計測が可能なドップラーライダーなど、観測条件に合わせた様々なライダーシステムを開発しています。

電波と音波を組み合わせて上空の大気温度を観測する技術である RASS（Radio Acoustic Sounding System）の開発も行っています。開発した観測技術を実際の大気レーダーシステムに応用し、気象擾乱の観測を行っています。また、パラメトリックスピーカーを応用した、低騒音型の RASS システムの開発も行っています。

**赤道域下層大気の観測**

赤道域では強い太陽放射加熱により積雲対流が活発に励起されており、それらが駆動・励起する循環や波動によってエネルギーが地球大気全体に運ばれています。特にインドネシア域は積雲対流活動の最も活発な地域であり、かつ大きな年々変動を生み出しており、地球環境変化に大きな影響を与えています。西スマトラ州において、赤道大気レーダーを中心とした観測研究を行っています。赤道大気レーダーによる空間領域イメージング観測の実現のため、ソフトウェア無線機を応用して、大気レーダー用受信機の開発も行っています。

赤道大気レーダー（インドネシア西スマトラ州）

## 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
**先端電機システム論講座（引原研）**
システム基礎論講座自動制御工学分野（萩原研）
システム基礎論講座システム創成論分野
生体医工学講座複合システム論分野（土居研）
生体医工学講座生体機能工学分野（小林研）
**電磁工学講座超伝導工学分野（雨宮研）**
電磁工学講座電磁回路工学分野（和田研）
**電磁工学講座電磁エネルギー工学分野（松尾研）**
**優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研）**

電子工学専攻
**集積機能工学講座**
**電子物理工学講座極微電子工学分野（白石研）**
電子物理工学講座応用量子物性工学分野（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（山田研）
**量子機能工学講座光材料物性工学分野（川上研）**☆
量子機能工学講座光量子電子工学分野（野田研）
量子機能工学講座量子電磁工学分野

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**
**デバイス創生部門先端電子材料分野（藤田研）**

#### 情報学研究科（大学院）

知能情報学専攻
**知能メディア講座言語メディア分野（黒橋研）**
知能メディア講座画像メディア分野（西野研）

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（大木研）
集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤高研）
**集積システム工学講座大規模集積回路分野（小野寺研）**
集積システム工学講座超高速信号処理分野（佐藤亨研）

システム科学専攻
システム情報論講座論理生命学分野（石井研）
**システム情報論講座医用工学分野（松田研）**

#### エネルギー科学研究科（大学院）

エネルギー社会・環境科学専攻
**エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野（下田研）**＃
エネルギー基礎科学専攻
エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野（中村祐研）
エネルギー応用科学専攻
**エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野（土井研）**
**エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野（白井研）**

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野（長崎研）
エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野
**エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野**

#### 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（橋口研）**＊
生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野
**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）

#### 学術情報メディアセンター

**コンピューティング研究部門ビジュアライゼーション研究分野（小山田研）**
**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（引原研研究室）
## http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/
## 電力変換回路の高周波化によるパワープロセッシングに関する試み

Si デバイスはデジタルプロセッサなどに代表される微細 Si トランジスタ、および電力変換回路に用いられるパワートランジスタの 2 つに大別される。特に Si の微細加工技術の進展は著しく、それにともなってデジタルプロセッサは飛躍的に進歩してきた。これに追従して絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT）やスーパージャンクション型電界効果トランジスタ（SJ-MOSFET）などパワー Si トランジスタの研究開発もさかんに行われている。微細トランジスタは 1/0 の論理をあつかうデジタルの用途であり、電力変換回路に用いられるパワートランジスタは電力というアナログ量をあつかう。これら 2 種類のデバイスは別々に研究開発されてきた。

しかし、昨今 SiC、GaN デバイスが量産されるに至り、デジタルとアナログの境界が少しずつ曖昧になりつつある。たとえば情報通信分野において GaN 高電子移動度トランジスタ（HEMT）が注目されている。マイクロ波無線通信用途として 10GHz 帯で 100W の動作が実現されており、高出力・広帯域の通信用 GaN HEMT が開発されつつある。一方で、パワートランジスタとしての GaN HEMT の研究開発も進んでいる。駆動周波数としては 100kHz から 10MHz 程度であるが、非常に高い電力を扱うことができる。これら情報通信用および電力変換用の GaN HEMT にくわえて制御用の IC をすべてチップ内に組みこんだワンチップモジュールの研究開発が進んでいる。

本研究室では SiC MOSFET の高周波スイッチング特性に注目し、アナログ量をデジタル的に取りあつかうことを試みている。SiC はその優れた材料物性から低オン抵抗・高耐圧のデバイスが注目されているが、1MHz をこえる高周波スイッチング特性を有することも特長であり、大電力を高速にスイッチングすることができる。高周波スイッチング性能を引き出す回路設計をおこなうことで、従来の電力変換回路にあたらしい機能を付与したい。

図 1 に製作した降圧回路（Buck Converter）を示す [1]。スイッチングデバイスとして ROHM 社の SiC MOSFET を用い、高周波駆動のために GaN HEMT を用いたゲートドライバを使用している [2]。電力変換回路の制御には通常パルス幅変調（PWM）が用いられているが、本提案回路では駆動周波数をひきあげることで、パルス密度変調（PDM）を適用する。パルスの個数として電力密度を制御する手法である。サンプリング周波数 13.56MHz の Δ-Σ 変調をもちいており、その変調信号を直接ゲートドライバで増幅し、SiC MOSFET を駆動する。

製作した降圧回路におけるスイッチング波形を図 2 にしめす。パルス密度を 3/8（38%）とした。SiC MOSFET の優れたスイッチング特性により、急峻なスイッチング波形が得られた。さらに、降圧回路の出力電圧を図 3 に示す。パルス密度を変化させることで、降圧回路の出力電圧を広い範囲で制御できることが分かった。アナログ量をデジタル的に取り扱える領域が近づいており、これをパワープロセッシングと呼んでいる。引き続き高周波スイッチングを可能とするトランジスタの設計とともにその性能をひきだす回路設計手法の確立をつづけていく。

[1] Y. Sadanda, T. Okuda, and T. Hikihara, IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, pp.1-4, 2017.
[2] K. Nagaoka, T. Hikihara et.al, IEICE Electronics Express, Vol.12, 20150285, 2015.

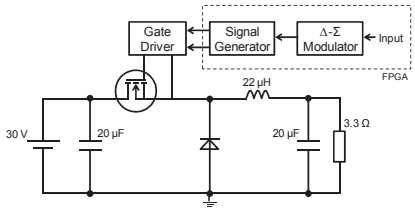



図 1　製作した降圧回路

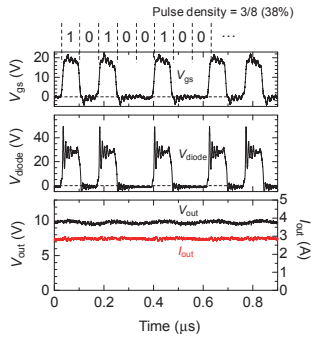



図 2　降圧回路におけるスイッチング波形（パルス密度 38%）

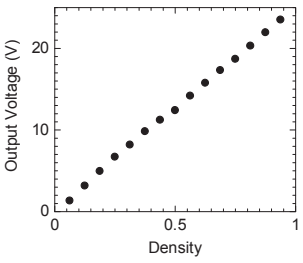



図 3　パルス密度変調による出力電圧の制御

## 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
## 「ハイパフォーマンスコンピューティングの超伝導体の電磁界解析への応用」

高温超伝導線を用いたマグネット（電磁石）や各種電気機器は、省エネやコンパクト化が可能で、医療、エネルギー、交通、産業といった幅広い分野への応用が期待されています。しかし、テープ形状をした高温超伝導線内部の電磁現象（量子化した磁束の分布とその運動、すなわち、非一様な電流分布とその時間変化）が、MRI や粒子線がん治療装置などのマグネットにおいて磁界精度を損なったり、各種電気機器において交流損失と呼ばれる損失を発生したりすることが知られており、電磁現象の解明が重要な課題となっています。電磁現象の解明には数値電磁界解析が有力な手段ですが、超伝導マグネット、超伝導電気機器の数値電磁界解析では以下のような点が問題となってきました。

- 通常のコイル（巻き線）の磁界解析のようにコイルを構成する電線に強制電流を流すだけでなく、その中の渦電流解析が必要でメッシュを細かくする必要があること
- 3 次元形状のコイルを正確にモデル化するとさらにメッシュ数が増えてしまうこと
- 高温超伝導線の超伝導体は幅が数ミリ、厚さが数ミクロンの薄膜で断面アスペクト比が大きく、断面に適切なメッシュを切ることが困難であること
- 超伝導線は非線形性の強い導電性をもった導体であり、非線形反復計算の収束性が悪いこと

我々の研究室では、超伝導薄膜への薄板近似の適用、階層型行列法（H マトリクス法）によるメモリ圧縮、非線形反復のためのニュートンラプソン法への代数マルチグリッド法による前処理の適用、並列処理などにより、これらの問題の解決をはかっています。階層型行列法は低ランク近似により密行列の計算に必要なメモリを圧縮する手法（図 1）で、これにより消費メモリを 100 分の 1 に圧縮しました。また、超伝導線の非線形導電特性の反復計算のためのニュートンラプソン法に代数マルチグリッド法による前処理を適用することで実効的な反復回数を大幅に低減することに成功しました。さらに MPI により並列処理の適用も行い、自由度 150 万の解析を 78 時間で完了することに成功しました。これは、この種の解析では世界的にみてもトップの成果です。なお、このときの消費メモリは 177 GB でしたが、階層型行列法を適用しなければ密行列の消費メモリは 16.7 TB となっていたと見積もられ、階層型行列法の適用により本解析ははじめて可能となりました。

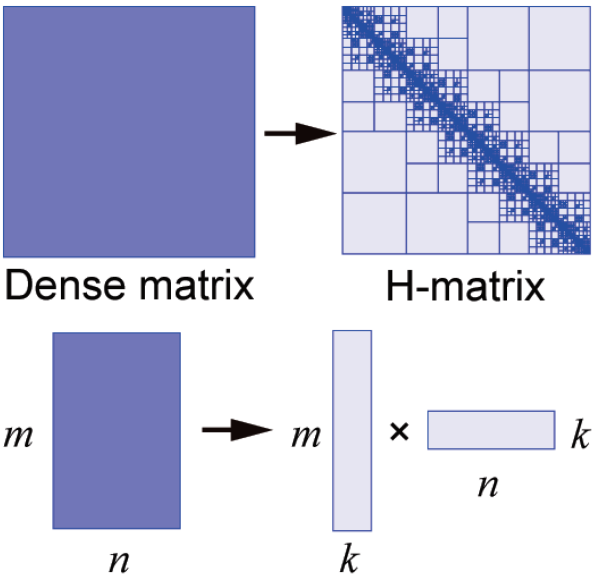



図 1　階層型行列法における低ランク近似の概念図

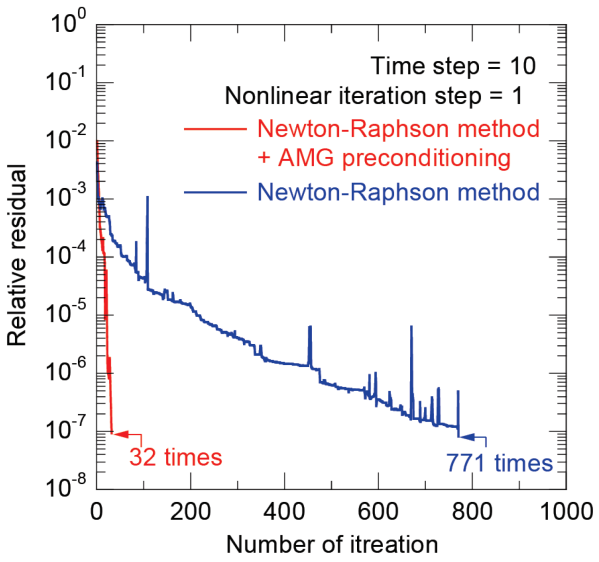



図 2　ニュートンラプソン法への代数マルチグリッド法による前処理の適用

**電磁工学講座　電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）**
**http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/index.html**

## 「電気電子機器に対するモデル縮約法の開発」

電気自動車やロボットに用いられるモータには出力・効率の向上とともに高い制御性能が求められる。モータなど電気機器の高精度解析には大規模連立方程式の求解が必要で，このため，外部制御回路を含めた連成解析には膨大な計算時間を要する。現在，精度を損なうことなく電気電子機器を等価回路に置き換えるモデル縮約の手法が進展しており，Cauer ladder network（CLN）法 [1] と呼ばれている。

例として，図 1 のような鉄芯とコイルからなる単純な構成を考える。電圧源をコイルに接続すると電流が流れるが，それは図 2（a）のような 1 個の抵抗 $R_0$ から回路で表され，そのインピーダンスは，

$$\frac{V}{I} = R_0 + (\text{余り}) \qquad (1)$$

のように表される。ただし，電流は磁束を作るので $R_0$ だけでは正しくなく，式 (1) には残り（余り）の部分が生じる。残る成分をインダクタ $L_1$ で表すと，回路は図 2（b）のようになり，インピーダンスは，

$$\frac{V}{I} = R_0 + \frac{1}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_1} + (\text{余り})} \qquad (2)$$

のように表される。$L_1$ の磁束が時間変化すると起電力が生じ，それにより導体部分に誘導電流が流れることから，式（2）にも余りが残る。この誘導電流の寄与を抵抗 $R_2$ で表し，次に，抵抗 $R_2$ に流れる電流が新たに磁束を作ることを考え，その寄与を $L_3$ で表し，さらに、$L_3$ の磁束による誘導電流の寄与を $R_4$ で表し，…と続けていくと，式（3）で表される図 3 のような，はしご形回路が続くことになる。

$$\frac{V}{I} = R_0 + \cfrac{1}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_1} + \cfrac{1}{R_2 + \cfrac{1}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_3} + \cfrac{1}{R_4 + \cfrac{1}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L_5} + \cdots}}}}} \qquad (3)$$

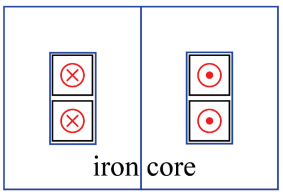



図 1　鉄芯インダクタ

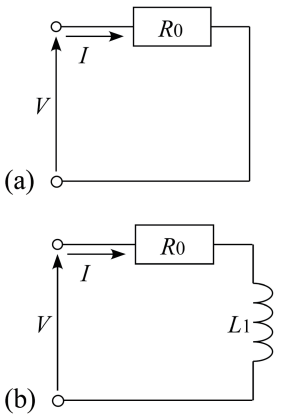



図 2　回路表現

上式に現れるインピーダンスの余りの部分は，はしごの段数を増やしていくと高周波側に追いやられ，適当な段数ではしご形回路を打ち切っても必要な周波数範囲で正確に電磁界を表現できる。なお，図中には各インダクタが作る磁束線も示している。これらは直交関数列を構成しており，これらを合成することにより，インピーダンスだけでなく磁界分布を正確に再現することができる。現在，CLN 法は多ポート化や展開点の導入など応用範囲が広がっており，今後，モータ解析への応用を予定している。

[1] A. Kameari, H. Ebrahimi, K. Sugahara, Y. Shindo, T. Matsuo, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54,7201804, Mar. 2018.

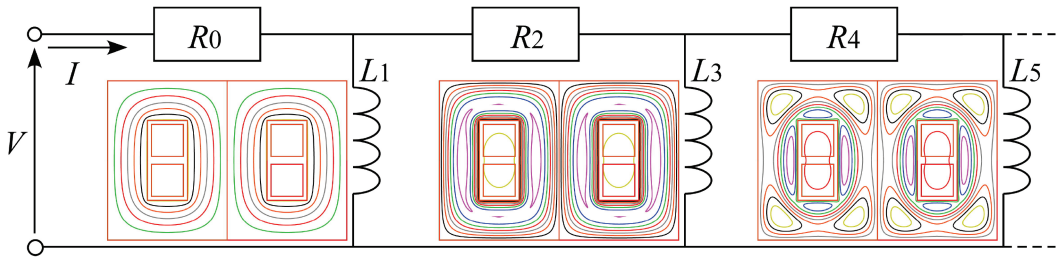



図 3　電磁界の Cauer 回路表現

## 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室）
## http://aem.kuee.kyoto-u.ac.jp
## 「アルニコ磁石を固定子に利用したスイッチトリラクタンスモータの高性能化」

当研究室では、安価なアルニコ磁石を利用したスイッチトリラクタンスモータ（Switched Reluctance Motor: SRM）の高性能化に関する研究を実施している。SRM は、回転子ならびに固定子の突極性を利用して励磁をスイッチさせることによってトルクを発生させるモータであり、永久磁石を使用しないことから安価である他のメリットを有するが、回転原理上低力率やトルクリップルなどの課題を克服しなければならない。一方で、希土類系永久磁石界磁を利用して磁石トルクを主たる駆動源とする永久磁石モータは高効率であるものの、当該磁石が高価であることや供給不安があり、さらに高速回転領域では弱め界磁制御が必要などの問題も存在する。本研究では、SRM の回転子構造はそのままにして、固定子側の磁気回路内に安価なアルニコ磁石を配置して起磁力をアシストすることによって（以下、new-SRM と呼ぶ）、従来型 SRM に比較して高出力密度化、高効率化、および高力率化を同時に実現した [1]。また、直接瞬時トルク制御（Direct Instantaneous Torque Control: DITC）を適用することによって、トルクリップルの低減にも成功した [2]。

図 1 には、new-SRM の 3 次元構造図を示す（固定子外径 : 195 mm、軸長 : 100 mm）。本構造は、固定子のバックヨークの一部に安価なアルニコ磁石が埋め込まれていることがポイントである。アルニコ磁石は、その残留磁束密度が NdFeB 磁石と同等に高いものの、保磁力の小さなことが課題であるが、上記構造では同磁石が経験する磁束は常に一方向であり、その着磁束を有効にに利用可能である。本モータを、図 2 の非対称ハーフブリッジコンバータで制御する。図 3 には、定常出力特性の解析結果の一例を示すが、アルニコ磁石でアシストすることによって、同一体格にも拘らず広範な回転数において大きく向上している。また、このときの効率や力率も改善することが明らかになっている。さらに、図 4 に示すように、DITC を適用することによってトルクリップルも大きく低減できている。今後は、上記解析結果を電気－機械エネルギー変換の観点から明確化すると共に、実機試験を通して特性検証していく予定である。

[1] F. Kucuk and T. Nakamura, International Conference on Electrical Machines 2018（ICEM'2018）AF-005185
[2] F. Kucuk and T. Nakamura, in preparation

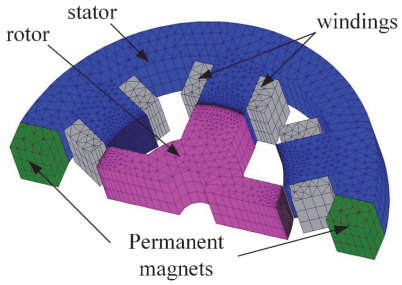



図 1　new-SRM の 3 次元構造図 [1]

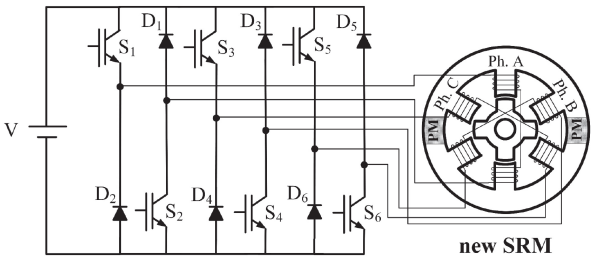



図 2　非対称ハーフブリッジコンバータによる駆動回路 [1]

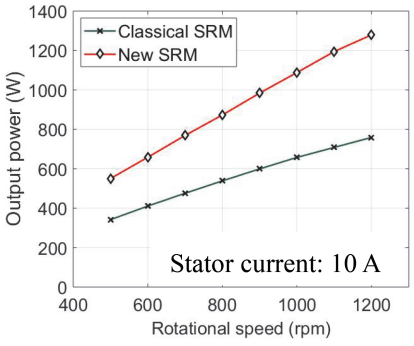



図 3　定常出力特性の解析例 [1]

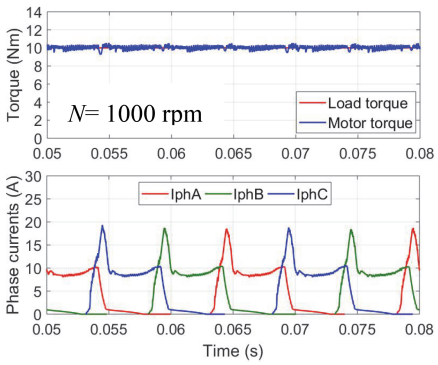
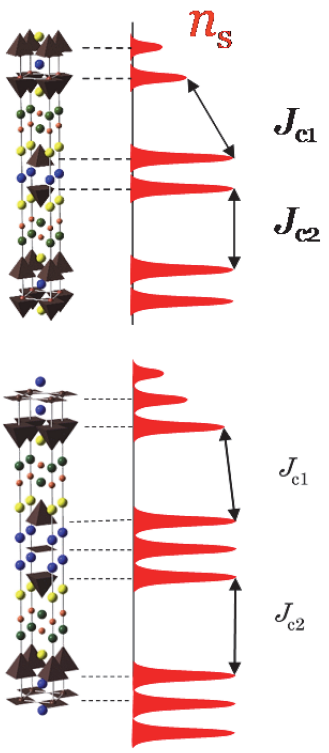



図 4　DITC を適用した出力波形の解析例 [2]

## 集積機能工学講座
http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp
## 「固有ジョセフソン特性で見た銅酸化物高温超伝導体の銅 - 酸素原子面多層構造」

1986 年に発見された銅酸化物高温超伝導体は実現が容易な液体窒素の沸点程度の温度で超伝導になることから、様々な超伝導現象の工学的な応用を現実的にしました。一方学術的な意義として、超伝導・電子相関現象に関する数多くの真実が明らかになっただけでなく、実験技術の飛躍的な向上が物質科学全般における新発見・新概念をもたらしました。物質を構成する単位胞をさらに細かく分割して、それぞれの機能を元に物質を設計する手法は、化学と物理が強く結びついた結果であり、最近実用化されつつある新素材は、高温超伝導の発見と深く関係しています。層状の結晶構造を有する銅酸化物高温超伝導体において、超伝導キャリアは *ab* 面方向に広がる $CuO_2$ 層に局在しています。$CuO_2$ 層が積層する *c* 軸方向の超伝導は、トンネル現象であるジョセフソン効果が担っており、ジョセフソン結合の強さが超伝導異方性を決定しています。このように、超伝導体の結晶構造に由来するジョセフソン接合を固有ジョセフソン接合と呼び、BSCCO（$Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+\delta}$, $n$ = 1 – 3）など異方性の高い超伝導体で、*c* 軸伝導はジョセフソン効果に由来する多彩な振る舞いを示し、超伝導現象に関する知見だけでなく、デバイス応用への可能性を提供します。BSCCO には、単位胞あたりの $CuO_2$ 原子面の枚数 $n$ が 1−3 と異なる、3 種類の物質があります。私たちは、これら 3 種類の BSCCO 超伝導体を用いて、$CuO_2$ 原子面の枚数によって本質的に異なる現象を解明しました。

私たちの研究室で独自に開発した、原子レベルでの制御が可能な微細加工法を用いて作製した試料の超伝導転移における電気抵抗のふるまいや、電流電圧特性を詳細に調べてみると、$CuO_2$ 原子面が 2 枚である Bi2212（$T_c$ < 90K）と 3 枚である Bi2223（$T_c$ < 110K）では、明らかな違いがあることがわかりました。超伝導体に超伝導でない常伝導金属を蒸着法などによりミクロに密着させると、超伝導体中の超伝導電子が常伝導金属に染み出します。この近接効果の影響が Bi2212 に比べて Bi2223 は顕著に弱くなり、$n$ の増加に伴う超伝導層の厚さの増加から推測される量を大きく上回る減少となることがわかりました。このことは、超伝導電子は複数の $CuO_2$ 原子面から構成される超伝導層全体に一様に分布しているのではなく、$CuO_2$ 原子面内に局在していると考えることで説明ができます。また、ジョセフソン接合における位相のトンネル現象にもこのモデルで説明できる現象が観測されています。超伝導層の薄い $n$ = 1, 2 の場合は、隣接する接合における位相差の強い結合を示す量子トンネル現象が観測されました。一方で、$n$ = 3 の場合には、隣接する接合間の強い結合を示す結果は得られませんでした。このような、超伝導層内部に、超伝導電子の局在が顕著に表れている例は、これまでに報告されておらず、今後、固有ジョセフソン現象の説明には、超伝導層内部の構造を取り入れた詳細な理論の構築が必要であることが提案されました。



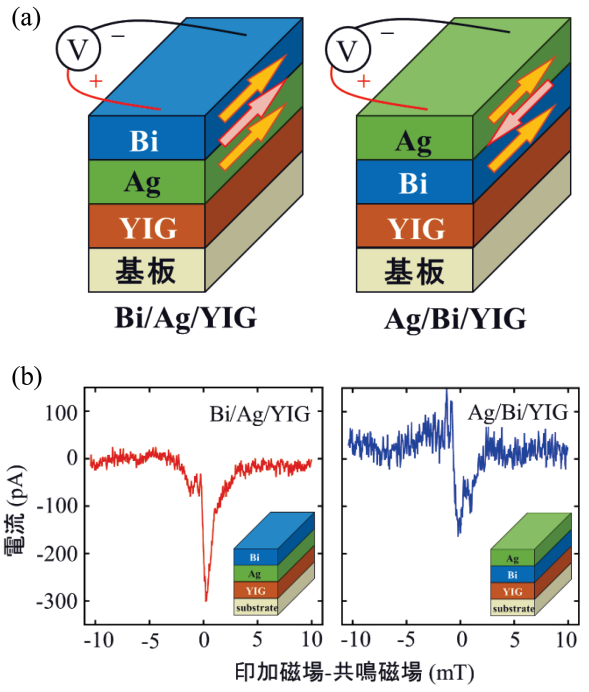

**図：Bi2212（左）および Bi2223（右）の結晶構造と超伝導電子濃度 $n_s$ の分布と最大ジョセフソン電流 $J_c$ の関係**

**電子物理工学講座　極微電子工学分野（白石研究室）**
**http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp**

## 「物質界面におけるスピン変換の研究」

スピントロニクスとは電子の持つ電気的性質「電荷」と磁気的性質「スピン」を同時に制御する分野であり、微細加工技術が発達した近年急速に発展してきました。この分野で注目されている「スピン流」はスピンの向きに偏りが生じた電子の流れであり、特にスピンの向きが完全に揃った純スピン流は情報輸送の新たな媒体として期待されています。しかし、純スピン流は全体として正味の電荷の流れがゼロであることから従来の測定器では検出されず、検出には電流など測定可能な物理量に変換する必要があります。そのため、スピン流を電流に変換する現象は、電流をスピン流に変換する現象とともに、スピントロニクスにおいて重要視されています。スピン流の生成・検出方法の一種に、電子がバルクや界面で散乱される際にスピン軌道相互作用の影響によりスピンの種類に応じて異方的に散乱される現象を用いる手法があります。試料に面直方向から注入された電流（スピン流）は、それを構成する電子が異方的散乱を受けることで面内方向のスピン流（電流）へと変換されます。バルク、界面においてスピン流を電流に変換する現象をそれぞれ「逆スピンホール効果（ISHE）」、「逆ラシュバ - エーデルシュタイン効果（IREE）」と呼びます。特に後者の現象は、Bi/Ag 界面において高いスピン流 - 電流変換効率が報告されています。

我々の研究室ではスピン流と電流の相互変換現象の研究の一環として、IREE が顕在化する界面の探索を行っています。その過程で、Bi/Ag 界面におけるスピン変換現象の報告結果を検証するために、IREE 以外に起因した成分を考慮した上で、界面での IREE によるスピン変換効率の評価を行いました。先行研究では Bi/Ag/NiFe を作製し、磁性体の強磁性共鳴下においてスピン流を接合された物質に注入する「スピンポンピング法」を用いて、磁性金属 NiFe から Bi/Ag 二層膜にスピン流を注入しています。このとき、スピン注入源の NiFe と Bi、Ag の各金属層において ISHE により生成される電流を考慮せずに、Bi/Ag 界面での IREE によるスピン変換効率を評価しています。そこで我々は、スピン注入源に ISHE による電流が発生しない磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット（YIG）を導入し、生成される電流のうち IREE 由来の電流の向きのみが異なる 2 種類の試料 Bi/Ag/YIG、Ag/Bi/YIG を作製し（図（a））、測定された電流（図（b））の差から IREE の寄与による成分を抽出し、IREE によるスピン変換効率を評価しました。結果的に、Bi/Ag 界面での変換効率は先行研究における報告値より少なくとも 1 桁小さいことが確認されました。現在は本研究で培った解析方法に基づいて、Bi や Ag を含む二層膜系におけるスピン変換の定量的評価を目指しています。




**図：（a）各試料の構造と金属バルク・界面で生成される電流の向き、（b）各試料で観測された電流**

参考文献：M. Matsushima *et al.*, “Quantitative investigation of the inverse Rashba-Edelstein effect in Bi/Ag and Ag/Bi on YIG” Applied Physics Letters **110**, 072404 (2017).

## 工学研究科　附属光・電子理工学教育研究センター　ナノプロセス工学分野
## 「新機能光ナノデバイスの開発」

物質をナノメートル（= $10^{-9}$ メートル）精度で加工する技術（ナノプロセス技術）は、現代社会において、ものづくり、医療、エネルギー等、あらゆる産業の基盤となる技術です。当研究室では、半導体や金属材料のナノプロセス技術を駆使した光ナノデバイスの開発を行い、ナノ構造に特有の光物理現象の探求や、従来のデバイスでは実現不可能であった新しい機能の創出を目指しています。

従来のデバイスとは異なる、全く新しい機能をもつ光ナノデバイスを実現するためには、目的の機能を有するナノ構造の設計手法と、設計した光ナノ構造を正確に再現する作製技術が必要となります。当研究室では、光ナノ構造の設計のために、時間領域差分法（Finite Domain Time Difference Method: FDTD 法）、結合波理論、厳密結合波解析（Rigorous Coupled-Wave Analysis: RCWA）法など、複数の電磁界シミュレーション法を駆使し、またこれらを拡張した新たな理論解析手法を確立することで、新機能をもつ光ナノ構造の提案を世界に先駆けて行っています（図 1）。また、設計構造の作製においては、電子ビーム描画装置やプラズマエッチング装置等のナノプロセス装置を活用することにより、ナノメートル精度の微細加工を実現しています（図 2）。さらに、上で述べた光ナノ構造の設計・作製技術を応用することで、高出力・高ビーム品質な発振を実現するレーザ光源や、加熱するだけで目的の波長の赤外線を高効率に発する熱輻射光源、テクスチャ構造を上回る光の吸収が可能な高効率太陽電池など、従来の光デバイスとは動作原理や機能が異なる次世代光源の開発を行っています（図 3）。なお、本研究室は、電子工学専攻光量子電子工学分野と連携をとりながら教育研究を行っています。

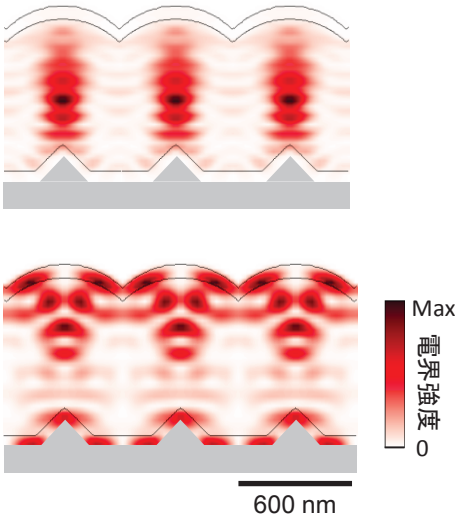



図 1：光ナノ構造の電磁界解析例
（光ナノ構造を導入した太陽電池）

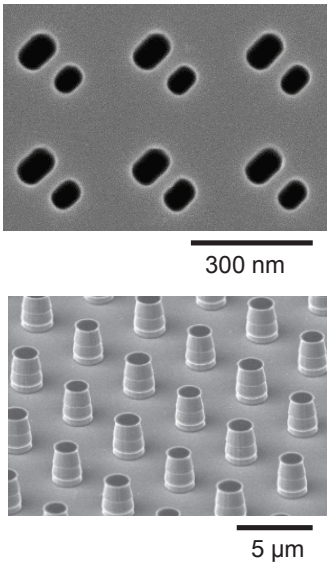



図 2：種々の光ナノ構造の
電子顕微鏡写真

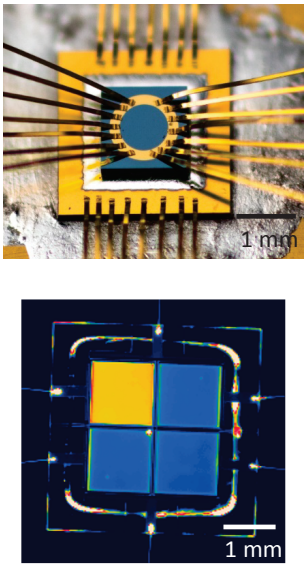



図 3：光ナノ構造を利用
した次世代光源の開発例
（上）高出力レーザ
（下）多波長熱輻射光源

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

## 「未知の酸化物半導体材料への挑戦」

「酸化ガリウム（$Ga_2O_3$）というワイドバンドギャップ半導体の成長をしてみたい」当時 M2 の大島孝仁君がそう言い出したのは 2006 年のことであった。$Ga_2O_3$ というと、GaAs の MOSFET を目指した先輩方が苦労された材料である [1] が、バルク単結晶の成長がなされていた。当時は GaN を用いた青色 LED が手の届くところに来て、ワイドバンドギャップ半導体の研究が大きな注目を受けており、よりバンドギャップの大きな半導体の研究は時代の流れにも叶うものであった。また、GaN と違ってすでにバルク基板が得られていることに意欲をそそられた。なによりも、博士後期課程への進学を望んでいた学生の発想を大切にしたいと思った。そこで、ZnO の成長を行っていた MBE 装置に Ga の供給源（セル）を取り付け、$Ga_2O_3$ の成長実験を開始した。しかしいざ $Ga_2O_3$ 基板上に結晶成長をすると、非常に成長速度が遅い。徹夜で成長しても満足な厚さが得られない（この理由は後に他の研究機関から明らかにされ、問題が克服された）。その苦労の中で、$Ga_2O_3$ がその大きなバンドギャップにもかかわらず半導体として動作すること、$(Al,Ga)_2O_3$ 混晶によるバンドギャップ制御やヘテロ構造が得られることが明らかになった。大島君はこの材料への想いを cue 第 19 号（2008 年 5 月）で述べている。

一方で、$Ga_2O_3$ 基板の入手が容易でないことから、サファイア基板を用いて成長を行うと、これまで通常環境下で得られたことのない準安定状態の結晶（結晶構造から α-$Ga_2O_3$ と呼ばれる）が得られた。もしこの結果が間違いだったら長く恥さらしになる、と覚悟しつつ 2008 年に論文発表した。しかし結晶に電気が流れるようになったのは 2012 年だった。その後 2016 年には株式会社 FLOSFIA からパワーデバイス応用にふさわしい低損失のショットキーバリアダイオードが報告され、製品として世に出ようとしている。一方、$Ga_2O_3$ は n 型ができても p 型が困難で、これがデバイスへの応用上大きな課題である。それなら α-$Ga_2O_3$ と結晶構造が同じで格子長のほぼ等しい p 型材料はないかと模索して、金子健太郎助教が α-$Ir_2O_3$ という酸化物材料に行き当たった。単結晶を成長した例は過去になかったものの、気合と努力で pn 接合が得られるようになり、デバイスの進展に大きなインパクトを与えている。

$Ga_2O_3$ のバンドギャップが大きいことは、高耐圧、低損失のパワーデバイス応用に望ましい。加えて将来における低コストでのデバイス供給が期待されている。世界的には $Ga_2O_3$ 基板（熱安定な結晶構造で β-$Ga_2O_3$ と呼ばれる）を用いたデバイス開発が主流であるが、α-$Ga_2O_3$ はより低コストであり、バンドギャップも大きく、混晶による多様なヘテロ構造や格子整合した pn 接合が得られる利点もある。現在、$Ga_2O_3$ の将来性に目を向ける研究者が増し、2015 年に当研究室のあるローム記念館でこの材料に関する最初の国際ワークショップを開催して、約 130 名の参加を得て 99 件の研究発表がなされた。2017 年には 2 回目の国際ワークショップがイタリアで開催されて 156 件の研究発表があった。大島君が「$Ga_2O_3$ という半導体があるらしい」と言っていた頃から 10 年余りで、ここまで研究の関心が集まるとはわれわれも思い得なかった。

わたしたちは、未知の酸化物半導体の開発に挑み、社会の変革を起こすことを夢見て研究を行っている。最近では半導体による波長 200 nm 以下の発光を得ることを目指し、岩塩構造 MgZnO 超格子という新しい材料の研究を行っている。目標の 200nm はもう手中にある。このような研究は、先人の足跡にとらわれない着想と苦労に支えられている。研究室を巣立った人たち、在籍する学生諸氏、周辺で支えてくださる方々、これらすべての方の夢と努力がここに結実していることに深く感謝したい。

[1] 菅野卓雄, 真空 **19**, 60（1976）, 長谷川英機, 応用物理 **47**, 441（1978）.

## 知能メディア講座　言語メディア分野（黒橋研究室）
## http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/
## 「言語の多様な構造的特徴に関する研究」

言語研究には、個別言語を選んで取り組まねばならないという特徴があります。残念ながら、ある言語から得られた知見が他の言語にもあてはまるとは限りません。しかし、当研究室で扱っている言語は日本語のほかは英語と中国語だけです。言語処理分野全体を見ても、よく研究されている言語はせいぜい 10 個程度です。このような研究状況では、我々は言語の特性の一部しか見ていないのではないかという疑念を拭いきれません。そこで、本稿では、通常のテキスト解析とは異なる取り組みを紹介します。

2005 年に公開された World Atlas of Language Structures は、世界中の 3,000 近い言語を 200 近い構造的特徴によって分類しています（ただし言語と特徴の組のうち、約 85% が欠損）。構造的特徴とは、例えば、主語（S）・目的語（O）・動詞（V）の語順（SVO や SOV など）や声調の有無などです。膨大な数の、名前すら聞いたことのない言語たちが、人間の言語がとりえる構造の多様性を教えてくれます。

このデータセット自体はいわゆる文系の言語学者たちが作成したものですが、その特性の分析には計算集約的な統計手法が威力を発揮することを我々は示してきました。特にベイズ統計に基づく確率的生成モデルにより、欠損値の多さに頑健な推論を実現しました。とりわけ興味深いのは、ある特徴がある値をとるなら別の特徴がある値をとるといった依存関係が見られることです。このことから、言語が時間とともに変化する際、複数の特徴が連動して変化することが示唆されます。そこで、どのような変化が起こりやすいかをデータから推定し、得られたモデルを使ってシミュレーション実験を行ってみました。例えば、現在の日本語は SOV 語順をとり、「が」や「を」といった格標識を用います。日本語が今後 SVO 語順に変化する可能性が少ないながらありますが、その際には、同時に格標識が失われ、英語や中国語のような孤立語的な言語になる可能性が高いという結果を得ました。

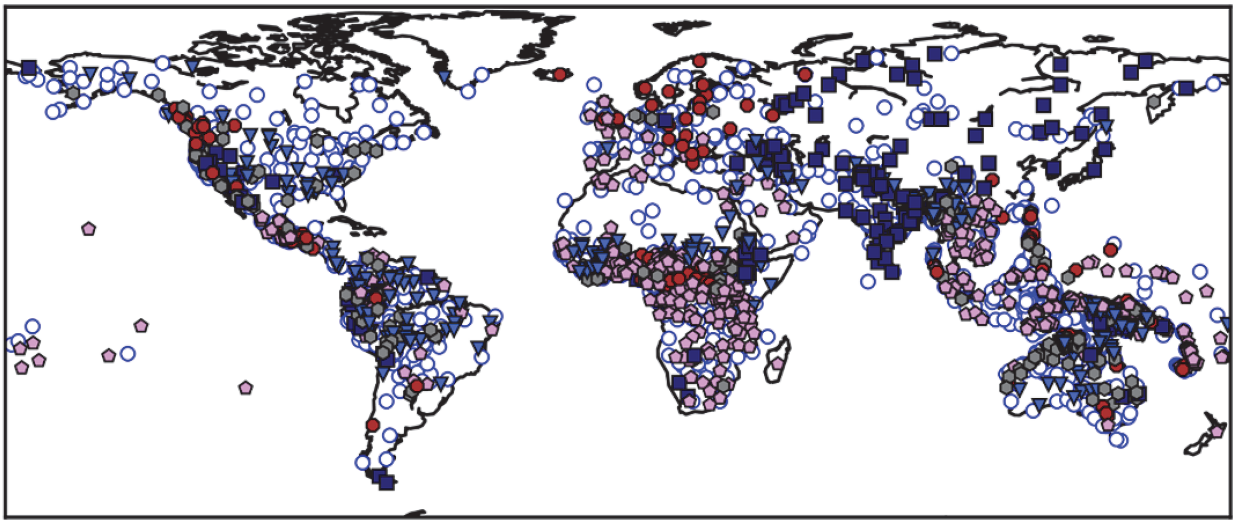


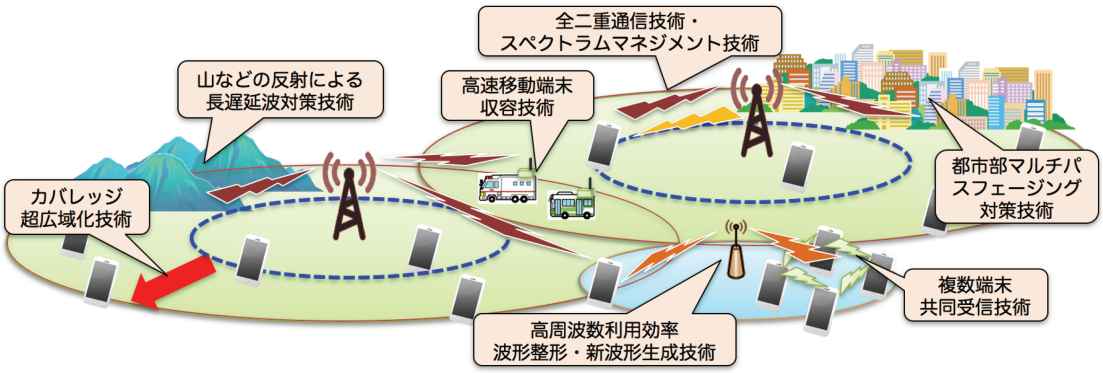
**図　ある語順の特徴の地理的分布。各点は言語、色と形は特徴の値を表す。白地の丸は欠損値。**

参考文献：Y. Murawaki. 2017. Diachrony-aware Induction of Binary Latent Representations from Typological Features. In Proc. of IJCNLP.

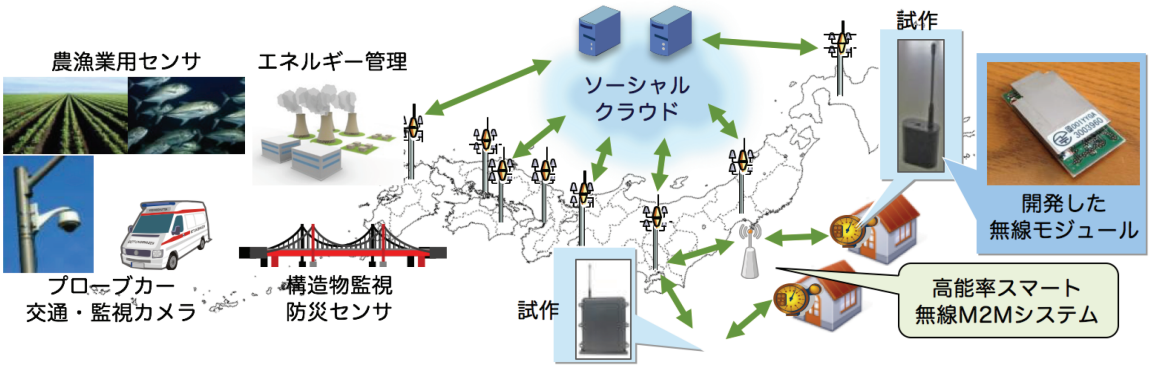
## 通信システム工学講座　ディジタル通信分野（原田研究室）
http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

## 第５世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、第４世代移動通信システム（4G）としてLTEやWiMAX2などの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでいますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020年代以降の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第５世代移動通信システム（5G）およびBeyond 5Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室では5Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、新信号波形・新物理層方式、複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術、高周波帯を活用した端末共同多重MIMO伝送技術、広帯域高速アンテナ近傍界測定技術、高能率スマート無線M2M通信システム、などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。なお「複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術」に関する研究開発は総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」によって実施しています。また「高能率スマート無線M2M通信システム」に関する研究開発は内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」により、科学技術振興機構を通して委託された研究開発として実施しています。




本研究室における第５世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要




本研究室におけるスマート無線M2Mシステムに関する研究開発概要

## 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/
## 「ゲーム理論の無線リソース制御への応用」

当研究室におけるテーマの一つに、ゲーム理論の無線通信への応用があります。ゲーム理論とは、楽しげな響きをしていますが、ガッチリとした数理モデルの一種であり、経済学の発展に大きく貢献してきた理論です。本稿では、ゲームとは何か、無線通信とどのような関連があるのか、そして、我々のアプローチを順に紹介します。

経済的な主体（プレーヤと呼ばれる）が複数存在する状況を想定し、各プレーヤは利己的であることを仮定します。つまり、各々自分自身の利益を大きくしようとします。しかしながら、分配される経済資源には制限があり、また利益を拡大しようとするのは自分自身だけとは限らないため、各プレーヤは自由気ままに自分の利益を拡大できるわけではありません。これを一言で言えば、他人の意思決定が自分自身の意思決定に影響を与える状況になっています。このような状況を指し示す言葉がゲームです。

実は、無線通信においても、同様の状況が生じえます。無線通信の原則に従えば、同じ場所・同じ周波数で、二組の異なる通信組の通信を同時に成功させることは困難です。一方で、一般の無線 LAN には使用可能な周波数チャネルはいくつかあり、異なるチャネルを用いれば同時に異なる通信ができます。なるほど、ではみんなが使っていない周波数チャネルを使えば多くの通信ができる（自分の利益が増える）、となるのですが、当然周りの人たちも同じように考えており、たちまち状況は複雑になります。すなわち、先に見たゲーム的な状況です。

我々は、無線 LAN アクセスポイント（AP）が複数台存在する状況下でのチャネル選択問題を、ゲームとして定式化しました。この際、「利益」を適切にデザインすることによって、各プレーヤが非同期かつ自律分散的に自身の利益を最大化するチャネルを選択するだけで、必ずナッシュ均衡と呼ばれる妥結点に収束するようにしています。また、この「利益」は他の AP と通信領域の重なりが小さければ高く、重なりが大きければ低くなるようデザインされており、無線 LAN における通信品質を反映する尺度となっています。以上により、分散的な制御でありながら、各々に満足な通信品質を与える周波数チャネルの割当が実現されることになります。本方式はアライドテレシス（株）との共同研究に基づくもので、同社が開発した AP に搭載されています。

（参考文献）[1] S. Kamiya, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, T. Sugihara, “Spatial co-channel overlap mitigation through channel assignment in dense WLAN: Potential game approach,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 7, pp. 1094-1104, July 2017.

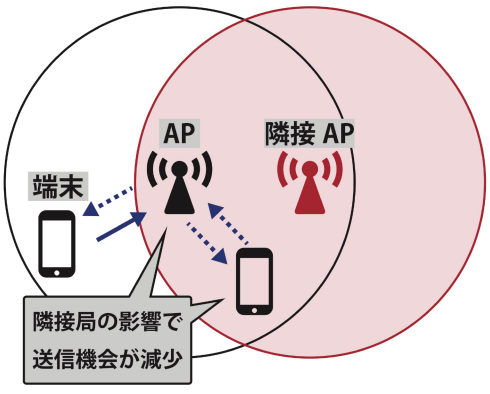



図 1：セル重複による無線局の送信機会の減少

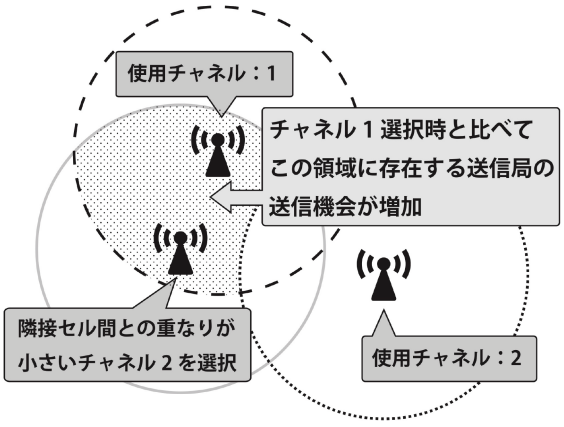



図 2：セル重複面積に基づいたチャネル決定規範

## 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/
## 「超低電力プロセッサの実現に向けた完全ディジタル型オンチップメモリ」

あらゆるモノがインターネットに接続され、情報通信を行う IoT（Internet of Things）の時代が到来しています。特に、ワイヤレスセンサ、ヘルスケアデバイス、スマートメーター等の発展を背景に、限られたバッテリー容量のみを動力源とし、長期間集積回路が稼働する応用事例が登場しています。本研究室ではこれら応用事例に向け、μW オーダーの電力で動作する低電力プロセッサの開発に取り組んでいます。

集積回路の消費電力は回路の電源電圧のおよそ 2 乗に比例することが知られており、回路の低電圧動作が有力な低電力化技術として注目されています。しかし、低電圧動作において問題になる素子が SRAM（Static Random Access Memory）です。SRAM はアナログ素子を多用したメモリ素子であるため、一般的なディジタル回路と比べてノイズや製造ばらつきに弱く低電圧領域で誤動作する問題を抱えています。

本研究室では SRAM の代替として、スタンダードセルのみで設計され、ディジタルな構造のみを有する Standard-Cell Memory（SCM）に関する研究を行っています（図 1）。スタンダードセルは、図 2 のようにセルの高さが規格化された相補型 MOS 論理ゲート（CMOS 論理ゲート）であり、今日のディジタル回路はスタンダードセルを用いて自動設計されています。SCM は低電圧領域においてディジタル回路と同等の動作安定性を実現する一方、SRAM より数倍大きな面積を必要とし、メモリの実装密度が極端に低下する問題点があります。本研究では面積効率に特化した SCM 専用スタンダードセルの提案を行っています。具体的には、CMOS 論理ゲートを設計可能な最小の高さでスタンダードセルを設計することで、従来型 SCM より 20% 実装密度を改善しました。結果として、提案 SCM の面積は従来型 SRAM の約 2.3 倍まで近づきました。

開発した SCM を RISC プロセッサに実装し、300 mV で安定動作するプロセッサを開発しました。SCM の電力を 20μW 以下に抑えることができ、結果としてレモン電池のような微弱な電力源でプロセッサを安定動作させることに成功しました（図 3）。

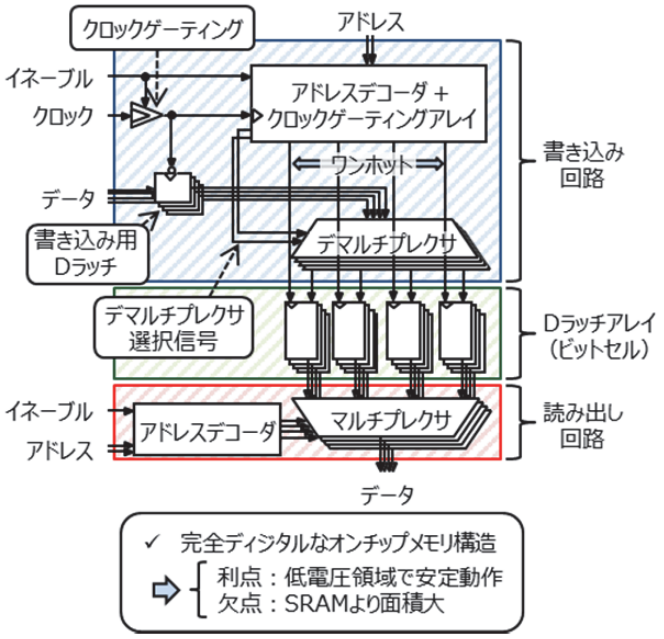



図 1：SCM の回路構造。

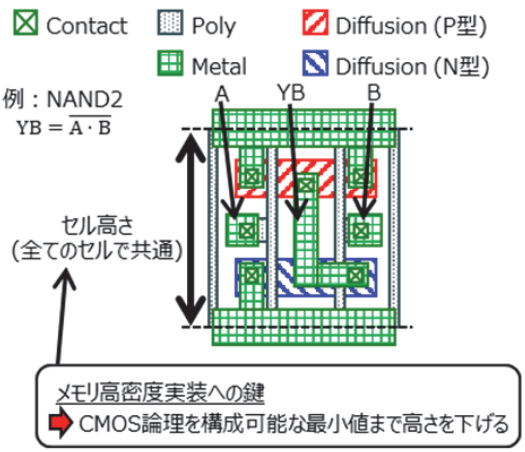



図 2：スタンダードセルの面積最適化。

図 3：レモン電池で動くプロセッサ。

## 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
## 生体内分子の磁気共鳴計測

生体内に存在する様々な物質は、多種多様な現象を介して相互に連携するシステムを構築し、生命の維持に関わっている。近年、疾患の存在や進行度の指標となる生体内分子（バイオマーカー）が種々の疾患について発見され、その時空間動態を可視化する分子イメージングが注目されている。当研究室では、生体内で起こる現象を分子レベルで捉えることを目指し、MRI を用いた分子イメージング手法の開発研究を進めている。本稿では、その試みのひとつを紹介する。

化学分析をはじめ幅広い分野で利用される核磁気共鳴（NMR）法の原理となる NMR 現象は、測定対象とする原子の共鳴周波数が他の原子との結合状態（分子構造）によって異なるという性質をもつ。これを化学シフトと呼び、そのパターンから周波数スペクトル上で物質を同定できる。NMR 現象を生じる核種は $^{1}$H をはじめ $^{13}$C、$^{15}$N、$^{19}$F、$^{31}$P などがあり、これら多核種の観測や多岐にわたる計測法により物質の立体構造や様々な物性を評価できる。MRI は、主として生体内の水分子に含まれる $^{1}$H 由来の NMR 信号を利用し、非侵襲に生体の形態や機能を高空間分解能で画像化する。上述の NMR の手法は、MRI 装置を使って生体内分子の観測に利用することができ、そのような生体での NMR 計測は MRS と呼ばれ、MRS に空間情報を付加したものが MRSI である。しかし、生体は複数の成分が混在した不均一な混合系で、低濃度の対象物質を限られた時間内に計測する必要があるため、物質の選択性の向上、検出感度の向上、撮像の高速化などの課題を解決することが重要となる。本研究では、これらの課題を解決する撮像法を提案し、生体マウスを対象にグルコースの代謝動態を観測し提案手法の有効性を確認した。

NMR 計測可能な核種のなかで最も高感度である $^{1}$H の特徴と、化学シフトの広がりが大きいことにより物質の選択性が高い $^{13}$C の特徴の双方を活用可能な $^{1}$H-$^{13}$C HMQC 法を用いた。これにより $^{13}$C に直接結合する $^{1}$H のみが観測されるため選択性が向上し、さらに $^{1}$H と $^{13}$C の各化学シフトを 2 軸とする 2 次元スペクトルへの展開が可能である。すなわち、$^{13}$C の化学シフトの情報を $^{1}$H の感度で観測できる。これに空間情報を付加した $^{1}$H-$^{13}$C HMQC MRSI 法を構築した。撮像の高速化には、同専攻適応システム論分野（田中研究室）との共同研究で、圧縮センシング（CS）の理論を導入した。CS を用いることにより画像再構成に必要な計測点数を大幅に削減することができるため、時間分解能の向上が可能となる。

図 1 は、$^{13}$C 標識したグルコースを担癌マウスに腹腔内投与した際の、グルコースとその代謝産物である乳酸の時空間動態を追跡した結果である。フルサンプリングでは 1 枚の画像あたり 4.5 時間を要する計測に対して、CS の導入により約 2 時間の計測から時間分解能約 30 分での画像再構成が可能となった。グルコースは、投与部位（図中の “Injection cite”）と肝臓（図中の “Liver”）に強い信号が現れ時間とともに減少した。乳酸は、腫瘍（図中の “Tumor”）の部分に特異的に信号が現れ時間とともに増加した。また、図では $^{1}$H-$^{13}$C HMQC MRSI 法で信号が検出される脂肪の信号も対照として示しているが、脂肪信号には経時的な変化は認められない。腫瘍部分で乳酸が増加する動態はワールブルク効果として知られている現象であるが、このような生体における代謝産物の時空間動態を MRI 画像として確認できる手法を提案するとともに、その有効性を動物実験で実証した。

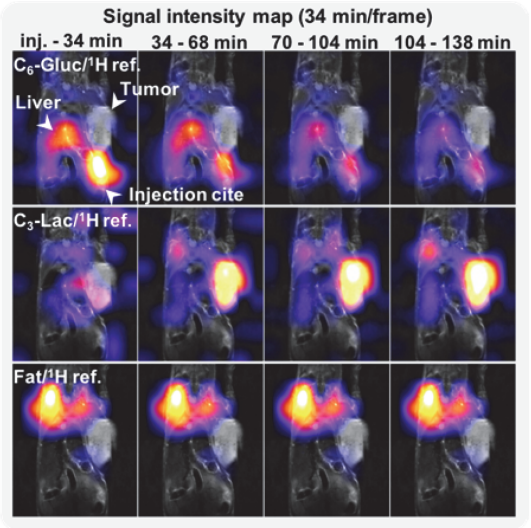



**図 1. 提案手法により観測した、グルコース投与マウスにおけるグルコース、乳酸、脂肪の時空間動態。**

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/

## 「Cu テープ上にヘテロエピタキシャル成長させた高温超伝導薄膜」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、リニア中央新幹線、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器などの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる 1 群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に浸漬して冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、これを用いた電線（超伝導線材）を実用化できれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線材の使用が広がることが確実視されています。また、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります（GENESIS 計画：Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1]）。

我々は半導体製造分野で発展させられてきた薄膜成長技術（エピタキシャル成長技術）と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に向いた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数 km の長さに渡って単結晶のように（3 軸結晶配向）揃える新技術の開発に成功しています [2]。具体的には圧延と加熱によって 3 軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体（$YBa_2Cu_3O_7$）をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました。このようにして単結晶的に結晶方位を揃えた高温超伝導層を電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度は液体窒素中（77 K）で 30,000 A/mm$^2$ 以上に達しています。これまでに、高性能を維持しながら劇的な低コスト化を達成するために銀を不使用とした新規構造（図 1）の開発に成功し [3]、現在、国プロ等を活用して実用化に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、太陽電池やリチウム電池、熱電発電素子、燃料電池などへの応用も研究中です。

**参考文献**

[1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8**（2000）53-60.
[2] 土井俊哉、東山和寿、“配向基板上へのタリウム系高温酸化物超伝導厚膜の形成”，応用物理，第 65 巻，1996，pp.372-376.
[3] 土井俊哉、堀井滋、“金属系および高温超電導線材の高性能化”，応用物理，第 85 巻，2015，pp.419-422.

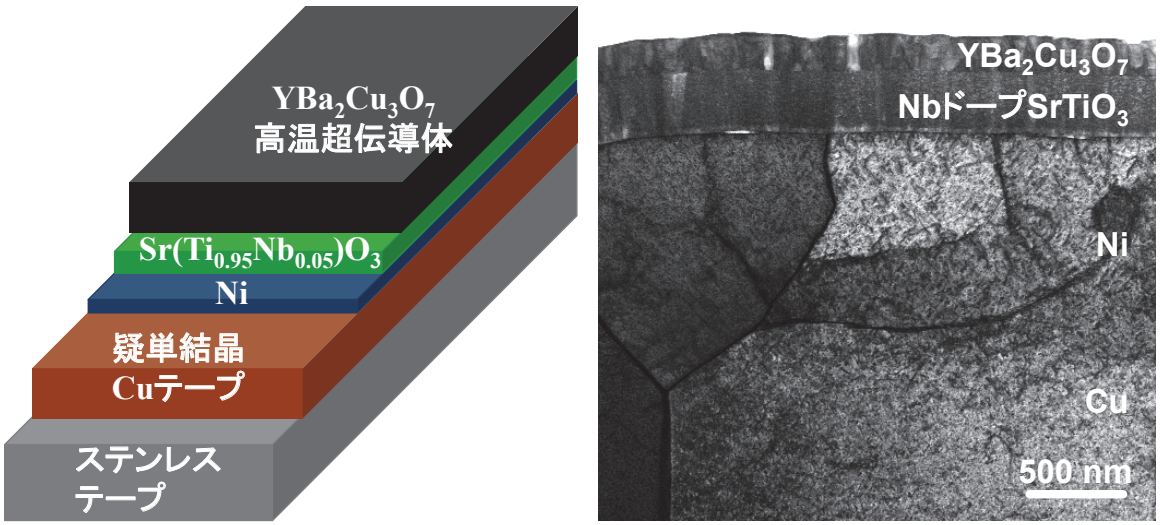



**図 1　開発した高温超伝導線材の概略構造および断面の透過型電子顕微鏡写真**

エネルギー科学研究科（エネルギー応用科学専攻）プロセスエネルギー学分野（白井研）
http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/

# 「超電導限流器の導入による臨界故障除去時間の拡大」

## 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、分散電源の大量導入によって複雑化する電力潮流状態における保護協調の柔軟化を目的として研究開発が進められている、新しい電力機器である超電導限流器（SFCL：Superconducting Fault Current Limiter）について紹介する。SFCL は通常時にはインピーダンスがゼロで、事故時に高インピーダンスを発生し故障電流を限流する。

我々は、良好な復帰特性を示す FCL として変圧器磁気遮蔽型 SFCL を提案し、高温超電導 REBCO テープ線材を用いた変圧器磁気遮蔽型超電導限流器を 18.26kVA，200V 一機無限大母線実験系統に設置する目的で設計製作した（図 1）。

## 2. 系統模擬実験

模擬系統（図 2）において限流器を設置した母線至近端で 3LG 模擬事故を起こし、MC3,4 を開いて事故回線を除去するまでの時間をパラメータとして、除去後の一回線送電で脱調する臨界の故障除去時間を評価した。

各相の事故電流は事故発生位相に依存する DC 成分を含むが、三相で平均すると初期過渡事故電流は 492A から 206A に限流し、事故中の限流器インピーダンスはほゞ設計値であることを確認した。限流の間、抵抗成分の大きな変化はなく、発熱による温度上昇も小さい良好な復帰特性を確認した。

事故中の発電機の定常相電圧は 10V（限流器なし）が 50V（限流器あり）に改善され、発電機電力は事故中も健全回線を通してある程度送電され、発電機の加速が抑制されることで、図 3 に示すように、臨界故障除去時間が大きく拡大することが確認できた。

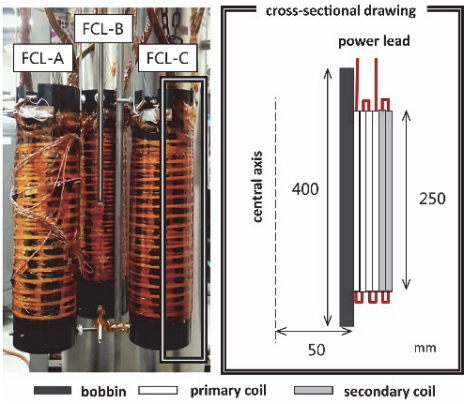



図 1　製作した三相高温超電導限流器（液体窒素浸漬冷却）

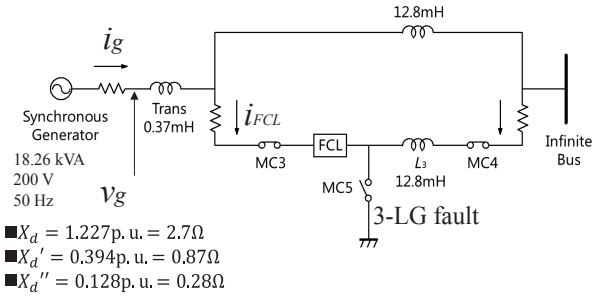



図 2　限流器を含む模擬実験電力系統

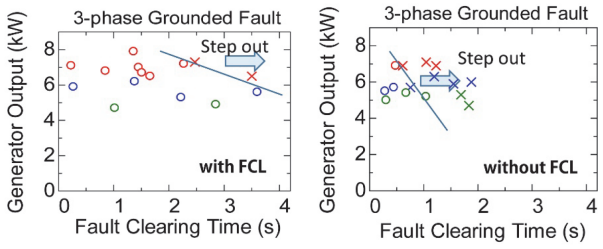



図 3　限流器の臨界故障除去時間の拡大効果

## エネルギー機能変換研究部門　複合系プラズマ研究分野
## https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/htpp
## 「核融合エネルギーを目指したプラズマの計測への近赤外分光法の適用」

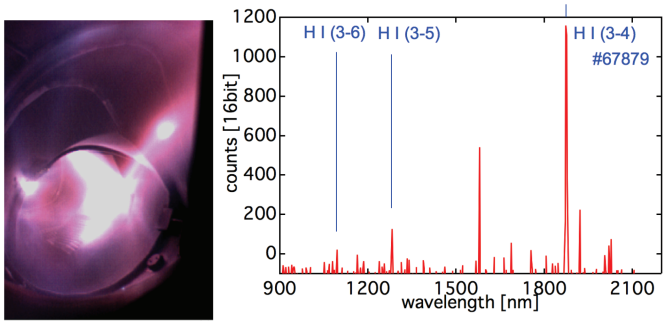
2011 年の東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所事故により、我が国はエネルギー政策の転換を余儀なくされている。いわゆる再生可能エネルギーへのシフトは究極の理想ではあるが、資源の乏しい我が国においては、当面、より環境負荷が小さく、かつベースロード電源となりうる代替エネルギーの開発が急務である。核融合エネルギーは、原子力発電と同じく核変換によって質量エネルギーを運動エネルギーとして取り出し、熱エネルギーに変換する原理に基づく。水素同位体を資源とするため、マイナーアクチニド等の長寿命の高レベル放射性廃棄物を生じず、崩壊熱密度も原子力発電に比べて小さいため、メルトダウンのリスクも低い。発電時に二酸化炭素を放出せず、燃料は海水からとり、炉内で増殖させることができ、中性子により放射化した炉内機器などの低レベル廃棄物は廃炉後 100 - 200 年程度で再利用も可能と見込まれるため、中長期的観点で「ゼロ・エミッション」構想に沿う、「再生可能に近い」エネルギーとも言える。

磁場閉じ込め方式による核融合研究は、プラズマの制御、加熱、計測、炉工学に分類される。京都大学で 1950 年代に発案され、その後一貫して発展を続けてきたヘリオトロン磁場方式は、磁気軸が平面上にあり、現在、自然科学研究機構核融合科学研究所（NIFS）で大型化路線へ引き継がれ、世界的成果を収めている。本研究室では特に、より高効率を目指して 90 年代に考案された「立体磁気軸ヘリオトロン磁場」 によるプラズマ制御を追求している。現有のヘリオトロン J は、このいわば最適化路線に則った装置であり、実験・理論・数値解析それぞれのアプローチでプラズマ加熱、計測、閉じ込め制御に関する様々なテーマを推進している。

それらの研究の中から、発光スペクトルを利用したプラズマ診断の一例について紹介する。プラズマからの光は情報の宝庫である。完全電離したイオンは輝線スペクトルを放出しないため、イオン化エネルギーの低い（13.6 eV）燃料水素からの発光は、水素が原子や分子として存在しイオン化が頻繁に起こっているプラズマ周辺部に限る。その一方、最外殻磁気面より外側でイオン化された水素イオンはプラズマ中心部に入りにくく、周辺部の終端が開いた磁力線に沿って容器壁へと戻されてしまうため、燃料供給が困難になる。そこで、**ペレット**といわれる固体水素を高速でプラズマ中に入射し、直接プラズマ中心で溶発（ablation）させる燃料供給法が提案されている。

著者らは 2017 年度より、従来紫外～可視であった観測スペクトル領域を近赤外（2100nm 程度）まで拡張する試みを始めている。近赤外分光の利点は、水素やヘリウムの重要な輝線が存在し、かつ不純物による輝線の混濁が少ないこと、紫外域では減衰が大きい光ファイバーの利用が可能であるといったことが挙げられる。欠点としては、一般に輝線強度が弱いことである。実際、通常のプラズマ放電を近赤外簡易分光器（といっても可視に比べて低感度かつ高価）で測定したところ、水素原子の輝線は可視域の代表である**バルマー系列**に比べ微弱であった。ところが、ペレット入射時に測定すると図に示すように**パッシェン系列**を 3 本同定することできた。核融合プラズマにおいてこの領域の分光診断は未開拓の分野であり、新たな展開を期待している。現在、本結果を基に、より高感度、高波長分解能の近赤外分光システムを導入中であり、プラズマの密度や温度を反映する輝線強度比の計測や、ペレット溶発雲の情報を有するスペクトル形状の計測へと展開していきたいと思っている。

＜推薦書籍（Kindle 版）＞
「核融合 : 宇宙のエネルギーを私たちの手に」
ASIN: B00TNZCKD8




**図：（左）ペレット入射瞬間のモニタ映像［放電番号 #69221］。（右）近赤外分光器を用いた水素原子パッシェン系列（主量子数 3 を下準位にもつ遷移）の観測［#67879］。上準位 4、5、6 に対応してパッシェン α、β、γ といわれる。**

**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://space.rish.kyoto-u.ac.jp/omura-lab/**

## 「地球磁気圏内のエネルギー輸送と変換過程」

地球周囲の宇宙空間を磁気圏とよび、サブストームは磁気圏でおこる最も激烈な擾乱現象である。サブストームは成長相、拡大相、回復相の順で進行するが、そのハイライトは拡大相でおこるオーロラ爆発（ブレイクアップ）であろう。突然明るくなったオーロラが急速に拡大するとともに、高さ 100 キロメートル付近の電離圏で数千億ワットもの膨大なエネルギーがジュール加熱として消費される。このエネルギーの究極の源は太陽にあることは知られているが、膨大なエネルギーがどのように地球に運ばれてくるかについては良く分かっておらず、長年の謎となっている。

グローバル電磁流体シミュレーションを使って可視化した電磁エネルギーの流れを図 1 に示す。注目して頂きたい点は二つある。一つ目は太線で示されている電磁エネルギーの流れで、螺旋を描きながら地球に向かっている。電磁エネルギーを磁気圏の随所に運ぶという意味で磁気圏の動脈と言えよう。二つ目は青い面で示されているダイナモ領域で、ここでは電磁エネルギーが生成されている。いわば心臓である。最も重要な心臓はカスプ･マントル域と呼ばれる磁気圏の高緯度域にあり、太陽風のエネルギーを電磁エネルギーに変換している。オーロラ爆発が始まる直前にもう一つの心臓（ダイナモ）が夜側に現れ、これがオーロラ爆発の直接の原因となる磁力線沿いの強い電流を作り出し、電離圏にエネルギーを持ち込む要になっていると考えている。

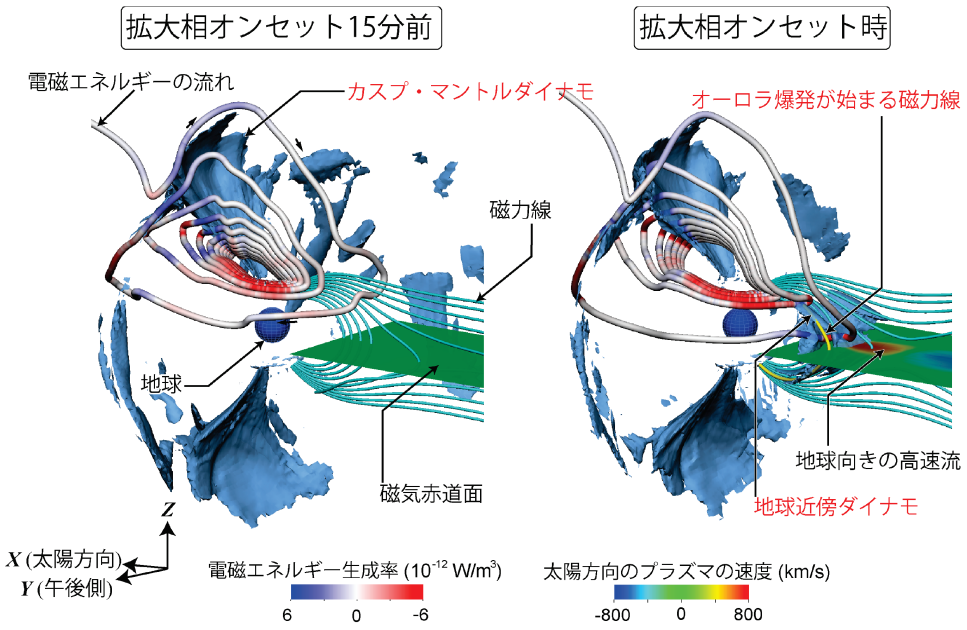



**図 1：地球磁気圏内の電磁エネルギーの流れ（白線）とダイナモ領域（青面）。**

### 参考文献

[1] Ebihara and Tanaka, Energy flow exciting field-aligned current at substorm expansion onset, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122, doi:10.1002/2017JA024294, 2017.

学術情報メディアセンター　ビジュアライゼーション研究分野（小山田研究室）
http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/

## 「非線形状態空間再構成による時系列データ間の関係性の視覚的分析」

本研究室では、生命科学、神経科学や生態学のデータを用いて、各分野の先端的な解析に対して可視化技術を用いて支援する視覚的分析の研究を行っています。今回はその中でも米国カリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）との共同研究内容について紹介します。

様々な分野において計測された時系列データを用いてデータ間の関係性を調べることで、背景のシステムについての理解が進められていますが、データ間の関係性がStaticではなくDynamicで状態依存的に変化する場合において、時間変化する関係性を同定するのは容易ではありません。生態学の例を挙げると、種間競争関係は常に一定ではなく、環境要因や被食捕食者の個体数に依存して時間的に変化することが知られています。このような問題に対して、2016年に非線形状態空間再構成法に基づきデータ間の時間変化する関係性を計算する手法（Empirical Dynamic Modelling: EDM）がUCSDのグループにより発表され、従来の線形のVARモデルよりも精度よく推定できることが報告されています。この手法では時系列データを状態空間上に埋め込み(embedding)を行うことで構成されたアトラクタに沿って、ヤコビアンを計算することで、変数間の関係性の変化を定量化します。このとき、入力となる複数の時系列データに加え、出力となる関係性の変化のデータ（これも時系列データ）を解釈し、システムの特徴を効率よく把握するには可視化技術とユーザーインタラクションが有効です。

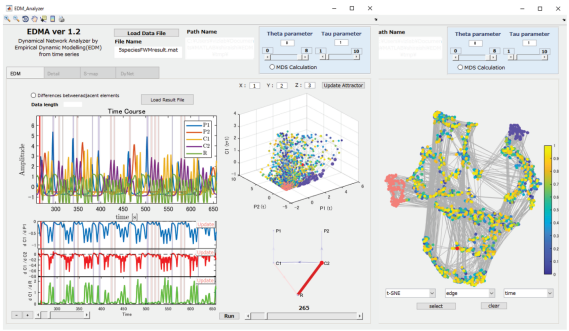



図１：開発した視覚的分析システム

そこでEDMの解析を支援する視覚的分析システム（図1）を開発し、様々な分野への分析システムの適用を進めています。このシステムはEDMの計算結果であるデータ間の時間変化する関係性と入力時系列から構成されるダイナミカルネットワークの特徴を様々な角度から分析するインターフェースになります。具体的にはダイナミカルネットワークの高次元情報をt-SNEやPCA、Isomap等を用いて二次元にマッピングし、ネットワークの特徴を表す時系列プロットやノードリンクダイアグラム、散布図等との連携可視化・ユーザーインタラクションを実現することで、ダイナミカルネットワークが有する状態を同定でき、その特徴を把握することができます。

上述のシステムを、個体群動態をシミュレートした食物連鎖網の時系列データ、及びメソコスム実験における生物種の個体数の時系列データに対して適用したところ、二次元マッピングにより、被食者の数が少ないときに捕食者間の競争関係が増大するといった、エコシステムの状態が同定されました（図2）。興味深いことに、この結果は分析システムを使わずに生態学の専門家が特定した知見と対応し、ツールを用いることで生態学的な知識無しで、背景のシステムの特徴的な状態を同定できるということが分かりました。さらに、連携可視化を用い分析することで、これまで発見されなかったエコシステムの状態を見つけることに成功し、本ツールがEDMの分析支援に有効であり、新たな発見に資することを確認しました。

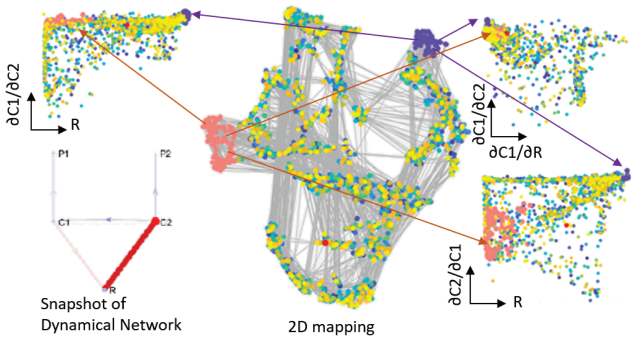


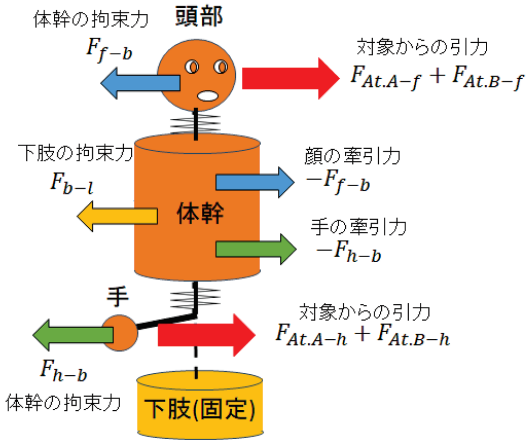

図２：連携可視化によるネットワークの状態の同定

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（中村研究室）
http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/

## 「身体運動の連関性を用いた注意の状態の推定」

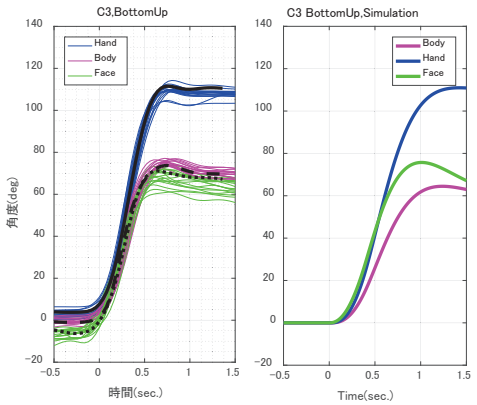
教育，訓練，リハビリテーション，診断などにおいて，人間の注意の状態や注意を払う能力を知ることが重要な課題となっている．また，ロボットやスマートスピーカーなど，一般的な生活に密着した支援システムが実現されてきているが，このようなシステムが人間の意図や注意の状態に応じて，必要な機能を適切に発現するようなデザインも必要となる．さらに，人間が重要な対象や事象に気付いているか，不必要に他に注意を奪われていないかなどを推定できれば，失敗や事故を防ぐ支援や，注意能力に障害を持つ人への支援を行うことが可能になる．

このような課題に対し，従来は注意の状態を推定するために視線の計測が多く用いられてきたが，注視点の移り変わりだけでは，複数の対象に同時に注意を向けている状態を解析することが困難だという問題がある．そのため，本研究では，注意を向ける対象の位置や数によって，体の動かし方が変化することを利用する．例えば，複数人で会話をする場合には，誰にどの程度注意を払っているかによって，顔や体の向きや振り向き方が変わる．このようなことから，我々は，全身の動作の連関性に着目し，注意と動作の関係をモデル化することを目指している．




右上図に頭部・体幹（胸部）・腕（手），および，対象，注意による仮想的な力をモデル化したものを示す．これは人間の生理学的なメカニズムとまだ大きく乖離しているが，本研究では，まず簡易モデルによって簡単な振る舞いを検討することから始めることとした．振る舞いとしては，例えば，２つの異なる注意対象があり，片方に対峙した状態からもう一方の対象に振り向く設定を用いた．各対象の優先度，合図（音声），タイミングの与え方を変え，簡易モデルに当てはめながらその違いを比較した．

右横図に実際に計測された各部位の向き（体の中心とした基準点からの方向角，複数回の試行結果を重ねて表示）と簡易モデル上でのシミュレーション結果を示す．上記のような結果を比較することにより，注意による仮想的な力を想定することによって，頭部や腕（手）が引きつけられ，それによって各部位が連動して動くことが説明できる．また，注意の状態の違いに応じた動作の違いもある程度定性的に説明できることがわかっている．しかし，単純なモデルで近似できない部分，例えば，各部位の回転角の極値，角速度が極値をとるタイミング，行き過ぎ（オーバーシュート）の量等，種々の振る舞いがある．これらを説明するためには，注意による仮想的な力の発生するタイミング，大きさの変化等に，上記の簡易モデルから少し逸脱したパターンを想定する必要がある．今後は，簡易モデルと計測から想定される内部状態のパターンを吟味し，生理学的な状態，例えば，筋の活性度（筋張力の発生状態）などを計測することによってその一部を裏付けていくことが課題となっている．このような，身体動作の連関性に注目した注意の推定は，認知心理学・実験心理学的に見ても新しい試みであり，これらの分野の研究者と相談しながら研究を進めているところである．



# 平成 29 年度修士論文テーマ紹介

## 工学研究科　電気工学専攻

**橋　本　和　樹（引原教授）「磁気特性を考慮したトランスの評価に基づく高周波絶縁型電力変換回路の駆動」**

フライバックコンバータの高周波駆動を目的とし、トランスの評価系を構築し、高周波駆動を制限するトランスの要因について検討した。その結果、トランスの漏れインダクタンスがフライバックコンバータの高周波駆動を制限する要因であることを実験的に示した。

**白　　成　哲（引原教授）「電力パケット伝送ネットワークにおける分散制御のモデルと電力伝送特性の解析」**

電力パケット伝送ネットワークでは、伝送路の制御と電力フローの量的制御が可能である。これを可能にする電力ルータの適切な連携運用は重要な課題となる。本論文では電力伝送特性において、コンセンサスダイナミクス理論モデルを導入し、電力ルータの分散アルゴリズムによるシステム構築について検討した。電力ルータにおける分散アルゴリズムのシミュレーション結果より、一般性を持つ電力パケット伝送ネットワークの設計への可能性が期待できる。

**萬　成　遥　子（引原教授）「レドックスフロー電池の大域的位相構造に基づく力学的挙動」**

レドックスフロー電池は、内部に電解液の循環構造を持つ二次電池である。本論文では、この電池の過渡挙動が持つ電解液流量への依存性を示した上で、その力学的挙動を決定づける大域的位相構造を解析した。この検討より、レドックスフロー電池の電力系統への適用において考慮すべき過渡挙動の存在が示されるとともに、これを制御するための流量操作の指針が得られた。

**Rutvika Manohar（引原教授）「Energy Transfer Characteristics of Ring Coupled Converters using Passivity Based Control」（リング結合コンバータの受動性に基づく制御によるエネルギー伝送特性）**

This thesis presents a dispersed generation system of multiple coupled DC/DC converters with DC power sources connected in a ring formulation. Passivity Based Control, which focuses on the energy characteristics of the system, is employed to achieve stabilization at a desired equilibrium. Multiple facets of the coupled converter system such as the dependence of equilibria on the structure of the system as well as the possibility of energy localisation are explored.

**吉　田　直　充（引原教授）「電力パケット伝送の双方向化による電力回生法に関する研究」**

電力パケットは、パルス電力の電圧波形に情報を直接タグ付けした電力伝送単位である。本論文では、電力パケット伝送の双方向化および電力パケット給電した DC モータの電力回生について実験により検討した。この結果は負荷側電力のシステム内利用につながることが期待される。

**稲　井　　顕（萩原教授）「サンプル値系における $L_\infty/L_2$ 準ハンケルノルムの計算法と critical な境界」**

サンプル値系の $L_\infty/L_2$ ハンケルノルムおよび $L_\infty/L_2$ ハンケル作用素を定義する際に導入した $L_\infty/L_2$ 準ハンケルノルムに着目し、その連続性および計算法について明らかにした。また、$L_\infty/L_2$ ハンケ

ル作用素を与える critical な境界の存在性について可能な限り明らかにした。

**岡　本　高　志（萩原教授）「DC モータの確率的動特性をもつ系としての一同定と $H_2$ 性能設計および制御実験」**

確率的動特性をもつ離散時間線形系に対する $H_2$ ノルムの解析法と状態フィードバック $H_2$ 制御器の設計法を与えた。また、DC モータを確率系として同定する一手法を提案した。そして、同定実験および $H_2$ 制御実験を通して提案手法の有効性を示唆した。

**本　田　智　也（萩原教授）「不変零点に着目した SDP の簡単化による 1 入出力系の $H_\infty$ 性能限界解析」**

一般化制御対象の $H_\infty$ 性能限界解析手法を論じた。一般化制御対象における直達項の有無および虚軸上の不変零点の有無で場合分けを行い、それぞれの場合に関して不変零点に着目することで $H_\infty$ 性能限界を特徴づける半正定値計画（SDP）を簡単化し、$H_\infty$ 性能限界の解析的表現を導出した。

**三　田　浩　雅（萩原教授）「LFT 表現された不確かな確率系の期待値操作の高度化に基づくロバスト安定解析および設計」**

LFT 表現された不確かな確率系に対するロバスト安定解析および設計問題に期待値操作の高度化に基づいて取り組んだ。また、ディスクリプタ形式の不確かな確率系に対する設計と比較して LFT 表現された不確かな確率系に対する設計の有用性を確認した。

**荒　木　佑　太（土居教授）「編集距離に基づくモチーフ検索問題に対する解法のモチーフ候補列挙効率化による改善」**

与えられた複数の文字列に共通して出現する部分文字列（モチーフ）を検索するモチーフ検索問題において、モチーフと出現文字列の類似度の尺度に編集距離を用いる問題を対象とした。従来解法におけるモチーフ候補列挙方法の効率化を行い、その有効性を数値実験により検証した。

**伊　藤　亜以子（土居教授）「膵島の血糖値制御メカニズム解明をめざした膵 α、β および δ 細胞に及ぼすホルモンの影響の解析」**

膵島の細胞集団が行う血糖値制御メカニズム解明のために、α、β および δ 細胞の電気生理学的モデルを用い、これらの細胞が他のホルモンによってどのような影響を受けるかを詳細に調べることで、膵島細胞間のホルモンによる相互作用の態様を明らかにした。

**谷　本　雅　英（土居教授）「複数の指標を統合した筋弛緩度指標と筋弛緩度制御の検討」**

筋弛緩度の測定にはレベルにより異なる指標が利用されているが、筋弛緩度制御を行う際にはそれらを統合した指標が望まれる。本研究では、四連刺激に対する指標とテタヌス刺激後反応数を統合した指標の作成を試みるとともに、構成した指標に基づく筋弛緩度制御の可能性を検討した。

**Cao Yujing（土居教授）「ファジィ推論を用いた麻酔鎮痛度評価法の改良と麻酔鎮痛度と鎮静度のモデル予測制御の研究」**

心電図、脈波および顔面筋電信号に基づく指標をファジィ推論を利用して組み合わせた鎮痛度指標について、信頼度に基づく重み付けにより精度を向上させるとともに、その指標を利用した麻酔鎮痛度と鎮静度のモデル予測制御法による同時制御の検討を行った。

**藤　本　拓　哉（土居教授）「非接触給電への応用をめざした重なりを有する平面コイルアレイにおける局在モードの基礎的研究」**

平面コイルを有する共振回路が多数配列された送電回路を結合振動子と捉え、受電コイルの接近によって生じる電圧・電流の局在モードを数値的に検討した。局在モードの局在性や周波数が受電コイルの位置にほとんど依らないコイル配置を示し、さらに設計指針を与えた。

**井　田　和　希（小林教授）「神経・精神疾患の病態神経回路同定に向けた白質神経線維束の自動解析法」**

統合失調症や認知症などの神経・精神疾患に関与する病態神経回路同定に向け、全脳における代表的神経線維束を拡散 MRI に基づき自動的に抽出し、各線維束に沿った拡散情報の定量評価を可能とする新たな手法を提案、シミュレーションと実画像による検証を行った。

**加　藤　健太郎（小林教授）「原子磁気センサを用いた磁性ナノ粒子に起因する磁気信号の遠隔計測」**

低周波数でも高い感度を有する原子磁気センサを用いて、磁気粒子イメージング（MPI）における磁性ナノ粒子に起因する低周波数の磁気信号計測を実現した。また、原子磁気センサに適したハーモニック MPI 計測の高速化に関する検討も行い、短時間計測の有効性を確認した。

**關　　祐　亮（小林教授）「皮質領域間における機能的結合の直接計測に向けた MRI スピンロック撮像の検討」**

新たな MRI の撮像シーケンスを提案し、その特性を既存手法と比較しながら、皮質領域間の機能的結合計測への応用可能性をファントム実験と理論計算により検討した。提案シーケンスにより信号の位相情報を取得に成功し、機能的結合計測への応用可能性を示した。

**西　　和　将（小林教授）「光ポンピング原子磁気センサ用の高感度マルチチャネルプローブ光検出器に関する研究」**

光ポンピング原子磁気センサのマルチチャネル化のため、差動計測も可能な高感度なマルチチャネルプローブ光検出器を設計・作製した。作製したセンサを用いて、ヒト MEG の多点同時計測を行い、開眼による $\alpha$ 波の減衰に成功し、本センサの有用性を確認した。

**富　永　直　樹（雨宮教授）「非線形ソルバ高速化と階層型行列法適用による薄膜高温超伝導線材の大規模電磁界解析」**

薄膜高温超伝導線材の電磁界解析の大規模化を目指し、ニュートン・ラフソン法による非線形ソルバ、代数マルチグリッド法による前処理を用いた線形ソルバ、階層型行列法、並列計算を適用した。その結果、これまでの限界を大幅に超える 150 万自由度の超伝導コイルの電磁界解析に成功した。

**豊　本　竜　希（雨宮教授）「交流磁界下における薄膜高温超伝導線材およびその集合導体の電磁特性評価」**

希土類系薄膜線材単線および希土類系薄膜線材を素線に使用した CORC 導体の交流損失および動的抵抗を測定した。その結果、CORC 導体の交流通電時、交流磁界印加時の交流損失特性を明らかにし、CORC 導体の動的抵抗の超伝導線単体の動的抵抗に比べた違いを明らかにした。

**李　　陽（雨宮教授）「高温超伝導線材の非線形導電特性と線材基板の非線形磁気特性が高温超伝導マグネットの遮蔽電流磁場に与える影響」**

高温超伝導線材の非線形導電特性が遮蔽電流磁場に与える影響について調べ、励磁時には高電場領域における導電特性が重要で、フラットトップにおいては低電場領域の導電特性が重要であることを指摘した。また、基板磁性が線材導電特性評価や遮蔽電流磁場そのものに与える影響を検討した。

**齊　藤　大　晃（和田教授）「差動電流源を用いた準差動伝送系の設計および固有モードを考慮した伝送特性解析」**

理想的でない信号伝送系に対して、不要電磁放射の要因となるコモンモード電流を抑制する準差動伝送方式について、固有モードを考慮した伝送特性解析や設計法につき検討した。伝送系の不平衡度を考慮した信号励振と、差動電流源を用いた励振の優位性を示した。

**張　　翼（和田教授）「Load-following Peer-to-Peer Energy Transfer over DC Line with Time-variable Gyrators」（負荷変動に追従する時変ジャイレータによる直流 P2P エネルギー伝送）**

送り手と受け手が協調して伝送を行う直流の P2P エネルギー伝送において、負荷変動に応じて電力を変化させる仕組みを、双方向コンバータによる時変ジャイレータにより実現し、負荷に小容量の蓄電池を置くことで追従可能なことを実験により確認した。

**仲　田　涼　馬（和田教授）「メタマテリアルの集中定数等価回路モデルにおける遅延電磁結合の解析」**

電磁波の伝搬遅延を考慮した等価回路モデルの導出を行い、その遅延が放射や結合に及ぼす影響について解析を行った。その結果、分散特性においてライトラインの外側で損失が無くなることや、ライトライン付近における特異な振る舞いについて明らかにした。

**藤　井　志　貴（和田教授）「高周波域デカップリングによる三相インバータのコモンモード電流低減法」**

三相インバータの AC 側 1 次コモンモード電流の低減設計法を提案した。スイッチング遷移時間と 1 次コモンモード電流の低減量を指標にし、低減設計のための等価回路を作成した。実測により遷移時間変化を 10% 以下に抑えつつ 100MHz 帯において約 10dB の低減を示した。

**藤　木　克　昌（和田教授）「LDO 電圧レギュレータの複数の誤動作機構に対応したイミュニティマクロモデル」**

LDO 電圧レギュレータを対象に、機能ブロックに分割したイミュニティマクロモデルの構築方法を提案した。妨害波により機能ブロックごとに生じる誤動作を、各端子電圧や電流を測定することによりモデル化し、組み合わせることで回路全体を評価するモデルを作成した。

**澤　池　信　介（松尾教授）「過去の求解プロセスを用いた誤差修正法による非線形有限要素解析の高速化に関する研究」**

非線形性を含む電磁界有限要素解析を対象として、過去の求解プロセスを用いた誤差修正法による計算高速化を検討した。ニュートンラフソン法等による方程式求解における誤差修正法の有効性を示し、過去のプロセスからの情報抽出のための新規的手法を提案した。

**澤　田　裕　貴（松尾教授）「辺要素静磁界解析における幾何的ブロック対角前処理に関する数値的および理論的検討」**

辺要素静磁界解析における幾何的ブロック対角前処理法の有効性を理論的および数値的な固有値解析により評価した。幾何的ブロック対角前処理法の振る舞いの一部を解明するとともに、マルチグリッド法との連携により高い実用性が期待できることを示した。

**末　廣　　樹（松尾教授）「異常渦電流損を考慮した電磁鋼板動的ヒステリシス特性の等価回路表現に関する研究」**

Berttoti による異常渦電流損理論と渦電流界の Cauer 回路表現を組み合せることにより、鉄芯材料の電磁鋼板の動的ベクトルヒステリシス特性のモデル化手法を開発した。kHz を超える周波数範囲で提案手法は精度よく鉄損を算出できることを示した。

**西　窪　篤　志（松尾教授）「部分的陰的手法を用いた電磁鋼板の応力依存磁化解析に関する研究」**

鉄芯材料のマルチスケール的な磁化機構を表現する集合磁区モデルにおいて、部分的陰的解法を用いることで、磁化解析の高速化に成功した。圧電フィルムにより電磁鋼板試料に機械的応力を印加する磁気測定装置を開発し、応力依存解析結果と比較検討した。

**池　田　健　一（中村（武）特定教授）「高温超伝導誘導同期モータの最適設計・駆動法の確立に向けた非線形電流輸送特性ならびに回転特性に関する基礎研究」**

高温超伝導誘導同期モータの定常・過渡回転特性について、超伝導巻線および磁性体の非線形特性を精密に考慮した非線形電圧方程式に基づいて明らかにした。さらに、高温超伝導リング巻固定子巻線における直流電流輸送特性の定量評価に成功した。

**郭　　思　宇（中村（武）特定教授）「次世代輸送機器用高温超伝導誘導同期モータのトルク・出力密度究極化に関する研究」**

20kW 級高温超伝導誘導同期モータについて、定格出力の 2 倍以上の過負荷運転が可能なことを実験的・解析的に明らかにした。さらに、磁性体の磁気特性と機械応力に着目して、それらパラメータがトルク密度限界設計に及ぼす影響を解析的に示した。

**唐　島　智　治（中村（武）特定教授）「マルチフィジックスから展開する車載用高温超伝導誘導同期モータのシステム検討」**

20kW 級高温超伝導誘導同期モータを対象として、その駆動・回生特性、インバータと組み合わせた特性、及び冷却系特性を実験および解析に基づいて示した。また、それら特性をマルチフィジックス連成解析し、上記モータシステムの過渡特性を明確化した。

## 工学研究科　電子工学専攻

**岡　本　　陸（掛谷准教授）「$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+d}$ における磁性元素と磁場による超伝導対破壊効果の研究」**

銅酸化物高温超伝導体に磁性元素を微量添加した際の超伝導状態の変化、並びに最大 60 テスラに及ぶ外部磁場の影響を測定し、超伝導電子対形成の起源について議論した。本研究では、超伝導体微細構造素子をパルス強磁場中で測定することに成功した。

**大　原　隆　裕（白石教授）「$Fe_3Si$ を用いたスピンポンピング法による n 型 Si 中での純スピン流輸送に関する研究」**

スピンポンピング法による高効率なスピン注入が期待されている単結晶 $Fe_3Si$ 膜を用いて n 型 Si 中に純スピン流を生成し、室温におけるスピン輸送特性を評価した。更に量子化軸が時間・空間的に振動している交流スピン流を生成・輸送・検出する為の条件を検討した。

**李　　垂　範（白石教授）「スピントランジスタの高性能化に向けた n 型 Si 中のスピン輸送物性の研究」**

Si は良好なスピンコヒーレンスを有し、それをチャネルに用いた既にスピン MOSFET の室温動作が報告されている。本研究では Si スピン MOSFET でのスピン信号向上のため、n 型 Si 中のスピン輸送物性について、特に Si 中でのスピンの散乱確率と高電界領域における輸送特性を中心に研究した。

**松　島　真　之（白石教授）「単結晶 Fe 上に成膜された高配向 Bi におけるスピン変換物性の研究」**

Bi のスピン流 - 電流変換物性を詳細に調べるため、高配向 Bi を単結晶 Fe 上に成長させた試料を作製し、Fe の強磁性共鳴条件下で Bi にスピン流を注入し、逆スピンホール効果により電流へと変換した。電流値の Bi 膜厚依存性から高配向 Bi のスピン拡散長を評価した。

**西　村　知　紗（白石教授）「アトムプローブ分析の定量性確立に向けた遷移金属窒化物の電界蒸発イオンの分析」**

アトムプローブ分析における窒素の定量性を改善するために、3 種類の IV 属遷移金属窒化物から放出されるイオンを、飛行時間形質量分析装置を用いて分析した。金属と窒素の結合した分子状イオンの他、高い電圧印加では原子状窒素イオンも観察されることを見出した。

**野　原　紗　季（竹内教授）「連続適応量子状態推定の実現と応用に関する研究」**

時間的に変化する量子状態を推定可能な、「連続適応量子状態推定」に関する研究を行った。まず、連続適応量子状態推定のアルゴリズムを提案、プログラムにて実装した。さらに、シミュレーションを行い、本手法により、時間的に変化する状態を、量子限界に達する精度で推定できることを明らかにした。

**出　口　　樹（竹内教授）「周波数もつれ光子対の時間相関の観測と極短化に関する研究」**

まず、超広帯域な周波数もつれ光子対の分散補償に関する理論検討を行った。その結果、超広帯域な光子対に対しても、ほぼフーリエ限界に達する極短時間相関が得られることが分かった。次に、時間遅延系を用いた時間相関測定系を改良、2 光子の時間相関幅の測定にも成功した。

**丸　谷　浩　永（竹内教授）「ナノ光ファイバを用いたナノセンシング及びナノ発光体複合素子に関する研究」**

光ファイバの一部分を細くしたナノ光ファイバは、伝搬光と物質との強い相互作用を実現できる。本研究では、この相互作用を利用した、波長以下の空間分解能を持つナノ光ファイバ顕微鏡を開発した。また、発光体との高効率結合に向け、ベクトルビームを組込んだ共焦点顕微鏡と原子間力顕微鏡とのハイブリッド顕微鏡を構築した。

**山　城　直　毅（竹内教授）「多光子多モード状態間量子もつれのフーリエ変換回路を用いた評価に関する研究」**

多光子多モード状態の間の量子もつれ合いを、光学的なフーリエ変換回路を用いて評価した。3 光子

6モードもつれ合い状態を生成し、さらにそのフーリエ変換回路後の光子検出数分布を測定した。これを、フーリエ変換前の光子検出数分布と一緒に評価し、量子もつれ合いが存在することを明らかにした。

**飯　島　彬　文（木本教授）「SiC エピタキシャル層中の積層欠陥拡大 / 縮小現象に関する研究」**

SiC バイポーラデバイスの高信頼化を目指して積層欠陥の挙動解明に関する研究を行った。SiC 結晶内で形成されるショックレー型積層欠陥の構造に着目して分類を行った後、独自のエネルギーモデルを用いて積層欠陥の電子的エネルギー利得を計算し、過剰キャリア注入時における積層欠陥拡大 / 縮小の臨界条件を導出した。

**榎　薗　太　郎（木本教授）「厳環境動作を目指した 4H-SiC 櫛歯型共振器の作製および評価」**

厳環境で動作可能なセンサを目指して、SiC バルク結晶を用いた櫛歯型共振器の設計と作製に関する研究を行った。電気化学的エッチングと反応性イオンエッチングを駆使することにより、SiC で初めて櫛歯型共振器を作製することに成功した。作製した共振器の特性を調べ、自己検出機能を有することを実証した。

**平　松　佳　奈（木本教授）「4H-SiC におけるキャリアのドリフト速度の測定」**

ホール効果測定を用いて SiC エピタキシャル成長層における電子および正孔の移動度の異方性およびそのドーピング密度依存性を評価した。次に深掘りエッチング技術を用いて独自の素子構造を作製し、電子および正孔のドリフト速度の電界依存性および結晶方位依存性を求めた。

**前　田　拓　也（木本教授）「GaN p-n 接合ダイオードにおけるアバランシェ破壊特性および Franz-Keldysh 効果に関する研究」**

GaN ホモエピタキシャル成長層を用いて pn 接合ダイオードを作製し、その電気的特性を解析した。独自プロセスにより電界集中をほぼ完全に緩和できるベベルメサ構造を形成した。また、高電界において Franz-Keldish 効果に起因するサブバンドギャップ光吸収が生じることを見出し、これを定量的に解析した。

**趙　　英　鑫（木本教授）「Impact Ionization Coefficients of SiC in the Wide Temperature Range（広い温度範囲における SiC の衝突イオン化係数）」**

SiC デバイスの絶縁破壊を支配する衝突イオン化係数に関する研究を行った。電界集中を緩和した様々な SiC pn 接合ダイオードを用いて光増倍係数の電界強度依存性を測定し、そこから電子および正孔の衝突イオン化係数を決定した。低温～高温の広い温度範囲で衝突イオン化係数を求め、その傾向について議論した。

**野　坂　俊　太（山田教授）「原子間力顕微鏡を用いた表面下ナノ構造体可視化およびそのメカニズム検討」**

原子間力顕微鏡を用いて高分子膜下に埋め込まれた金ナノロッドの可視化に成功し、一次元力学モデルを用いて実験結果を解析し、金ナノロッドの姿勢の評価に成功した。さらに、高分子膜下に埋め込まれた金ナノ粒子およびポリスチレンナノ粒子の識別に成功した。

**濱　田　貴　裕（山田教授）「原子間力顕微鏡によるタンパク質 2 次元結晶成長過程観察および特異結合による結晶構造変化計測」**

原子間力顕微鏡に溶液注入機構を導入し、ストレプトアビジンを微少量注入して、2 次元結晶形成過程のその場観察に成功した。また、ストレプトアビジンの 2 次元結晶上にビオチンを微少量注入し、2 次元結晶の構造変化観察に成功した。

**山　本　悠　樹（山田教授）「DNA オリガミに固定化したタンパク質の液中 FM-AFM 観察およびその電荷密度評価」**

ストレプトアビジン結合能を有するビオチン修飾 DNA を用いて DNA オリガミを作製し、ストレプトアビジンを DNA オリガミに固定化することに成功した。また、液中原子間力顕微鏡により、ストレプトアビジンおよび DNA オリガミの表面電荷密度を測定した。

**赤　池　良　太（川上教授）「深紫外発光素子の高効率化に向けた半極性 r 面 AlN 基板上 AlGaN 系量子井戸の作製と評価」**

殺菌波長域で発光する UV LED を、半極性結晶面上で初めて実現した。LED を構成する各層の結晶成長特性を明らかにした後、デバイス構造を作製した。電流電圧特性の整流性から、良好な pn 接合の形成が確認できた。また、電流注入により、波長 270nm で単峰性の発光を得ることに成功した。

**上　本　晃　司（川上教授）「GaN 系レーザにおける光閉じ込めの向上を目指した埋め込み低屈折率構造の設計と作製」**

GaN 系材料による緑色から長波長のレーザダイオードでは、光閉じ込めの劣化が閾値の増加など素子特性悪化の一因となっている。それを回避するため、屈折率の低い $SiO_2$ を素子内部に埋め込むことにより、活性層近傍の相対的な屈折率を高めることを提案し、効果を実験的に実証した。

**長　瀬　勇　樹（川上教授）「AlGaN/AlN 量子井戸の室温におけるキャリア再結合機構に関する研究」**

紫外発光素子として有望な AlGaN/AlN 量子井戸について、室温におけるキャリアダイナミクスを時間分解分光法により評価した。注入キャリア密度の上昇に伴う非輻射再結合中心のフィリングが観察された。このプロセスは貫通転位密度に強くは依存しておらず、点欠陥の寄与が示唆された。

**早　川　峰　洋（川上教授）「微傾斜（0001）AlN 上の AlGaN 量子井戸におけるマクロステップを利用した深紫外発光の高効率化」**

微傾斜基板上に AlN を形成すると多数の分子ステップが集まったマクロステップが形成される。その上に AlGaN 量子井戸発光層を作製したところ、室温での発光再結合寿命が長寿命化することを見出した。非輻射再結合の抑制を意味しており、高発光効率化に向けて有望な構造であると考えらえる。

**仲　代　匡　宏（野田教授）「光ナノ共振器結合系における動的光操作に関する研究」**

Si スラブ上の 2 次元フォトニック結晶共振器の結合系において系の屈折率を周期的に変調することについて理論的な解析を行った。解析の結果、共振器間の結合を強度と位相まで動的に制御できることを明らかにした。さらに結合位相の制御が光に対して実効的な磁場として作用することを利用して、光の伝播方向を制御するデバイスを提案した。

**小　林　大　河（野田教授）「フォトニック結晶レーザにおける面内相互引き込み現象とその制御に関する研究」**

フォトニック結晶レーザにおける大面積コヒーレント発振の基礎となる面内相互引き込み現象（同期現象）の解明とその制御を試みた。面内の電流注状態を制御することによって、引き込み現象の制御と、それに応じたレーザ発振状態の制御について、詳細に評価した。また、大面積において、オンデマンドに、発振状態を制御可能にするために、フォトニック結晶レーザ上に、マトリクストランジスタを導入した、これまでになかった新たなデバイスの開発も行った。

**西　後　淳　貴（野田教授）「変調フォトニック結晶レーザの発振特性の格子点形状および変調パラメータ依存性」**

任意の2次元方向にビーム出射が可能となる変調フォトニック結晶レーザにおいて、その発振の安定化に向け、格子点形状に着目した検討を行った。その結果、楕円形状の格子点を利用することにより、大面積でも安定な発振が可能となることを理論的に示すとともに、実験的にも、安定発振を示唆する単峰のビームパターンを得ることに成功した。

**長　谷　川　創（野田教授）「フォトニック結晶を有する薄膜単結晶シリコン太陽電池の作製と評価」**

本研究では、薄膜単結晶シリコン太陽電池の効率向上に向けて、フォトニック結晶の共振作用を用いた光吸収の増大について検討を行った。デバイス構造の設計と作製法の開発・評価を行い、20$\mu$m 以下の膜厚の結晶シリコンの報告の中で最大となる、短絡電流密度 36.1mA/cm$^2$ を実証することに成功した。

**入　江　　連（北野教授）「単一 $^{171}Yb^+$ の $^2S_{1/2}$ ー $^2D_{5/2}$ 時計遷移分光」**

冷却レーザー光を2方向から導入して軸対称性のよいトラップでの冷却を可能とし、単一 $Yb^+$ をラム・ディッケ領域に捕捉した。また、標記時計遷移分光で必要となる $^2F_{7/2}$ 準位の脱励起を1本のレーザー光で可能とする、$^2F_{7/2}$ − $^1D[3/2]_{3/2}$ 遷移の駆動に成功した。

**太　田　裕　士（北野教授）「非線形誘電体メタマテリアルにおける電磁誘起透明化現象」**

電磁誘起透明化現象は補助光の入射によって媒質が透明になるという非線形光学現象である。本研究では光領域において同現象をメタマテリアルを用いて実現することを目標とし、非線形誘電体メタマテリアルにおける3光波混合を用いることで実現できることを電磁界シミュレーションで示した。

**川　田　進　也（北野教授）「狭線幅光コムへの位相同期で実現した波長 1762nm 狭線幅差周波光の線幅評価」**

線幅狭窄化されたレーザーに光周波数コムを位相同期させてコムの各モードに線幅を転送し、このコムに2台のレーザーを位相同期させて線幅の狭い近赤外の差周波光を発生させた。既存の $Ba^+$ 用時計レーザーとのビートから、線幅を 100Hz と評価した。

**稗　田　敬　祐（北野教授）「金属 Lieb 格子における擬表面プラズモンの低速伝搬と誘電体局所センシングへの応用」**

金属 Lieb 格子と呼ばれる構造は擬表面プラズモン伝搬において全方向の群速度が0になるフラットバンドをもっている。本研究では局所的な励振によりフラットバンド上の低速伝搬を時間領域で観測し、モード局在化を利用した局所センシングへの応用に関しても実験及び解析を行った。

## 工学研究科　光・電子理工学教育研究センター

**清　水　大　貴（龍頭講師）「液体クラスターイオンビームを用いた金属薄膜加工に関する研究」**

液体クラスターイオンビームの金属薄膜加工への応用可能性を探るため、大気曝露せずに金属薄膜の作製と液体クラスターイオンビーム照射が可能な装置を開発した。エタノールクラスターイオンビームを用いた高効率な金属薄膜加工を実現できる可能性があることが分かった。また、今回開発した装置で多層膜の作製が可能であることを確認した。

**東　浦　佑　真（龍頭講師）「金属塩含有イオン液体への電子線照射による薄膜形成に関する研究」**

新たな 3D プリンター技術の開発を目指し、金属塩を含有したイオン液体に電子線を照射する装置を開発し、これを用いた薄膜形成を試みた。CuCl 含有 EMIM-DCA に電子線を照射することにより薄膜が形成されることを確認した。さらに電子線をスキャンすることにより薄膜の 2 次元形状制御を試み、実現可能性を確認した。

**小　野　雅　史（藤田教授）「燃料電池金属セパレータ用高品質コーティング材料の研究」**

固体高分子燃料電池（PEFC）におけるステンレス製セパレータのコーティング膜への応用を目的に、ミスト CVD 法による $SnO_2$ 膜の研究開発を行った。耐食性、導電性に優れた $SnO_2$ 膜の実証、セパレータとの界面制御を達成し、1000h 以上の燃料電池連続発電に成功してその有用性を明らかにした。

**竹　本　　柊（藤田教授）「クロライド原料を用いたコランダム構造酸化物半導体の成長と物性に関する研究」**

ミスト CVD 法の原料として炭素フリーのクロライド化合物の利用を研究し。$Ga_2O_3$ において 8 $\mu$m/h の高速成長と炭素不純物の混入の無い高品質薄膜の成長を達成した。また p 型 $Ir_2O_3$ の成長において成長速度が遅いという従来の問題を克服し、300 倍の成長速度を得て、n 型 $Ga_2O_3$ との pn 接合の形成を実証した。

## 情報学研究科　知能情報学専攻

**李　　宏　凱（黒橋教授）「ニューラルネットワークに基づくイベント分類と共参照解析の同時学習」**

本研究はイベント分類と共参照解析の関連性に着目し、ニューラルネットワークに基づき、イベント分類と共参照解析の情報を共有できる同時学習モデルを提案した。実験結果により、提案モデルは単独でタスクを行う場合より高い性能を達成した。

**坂　田　　亘（黒橋教授）「行政 FAQ ページからの対話フローチャート自動生成とそれに基づく対話ボットの構築」**

行政サイトの FAQ ページを解析することで手動修正可能な対話フローチャートを生成し、それに基づき数往復の対話を行うシステムを構築した。さらにユーザ質問と FAQ のずれを解消するための知識獲得を行った。クラウドソーシングを利用し評価を行い柔軟な対応が可能であることを確認した。

**澤　田　晋之介（黒橋教授）「項共有述語項の意味関係コーパスの整備および同義・反義性判定」**

同義・反義性の判定は言語処理において基本的かつ重要なタスクである。本研究では教師あり学習に用いるコーパスの整備を行った。また、分散表現の類似度ならびに同義・反義性を表す素性を用い、表

現の正規化を行うことで精度向上を達成した。

**富　永　裕　也（黒橋教授）「問題解決を軸とした事態間関係知識の構造化」**

事態間関係知識はコンピュータに知識を与えるために有効な言語資源であるが、利用するには整理が必要である。本研究では、事態間関係知識の中から問題と解決の関係にあるペアの自動判別を行い、判別にいくつかの素性が有効であることを示した。

**宇　野　真　矢（黒橋教授）「意味役割を考慮した選択選好の学習」**

述語と項の間の意味関係を把握することは、自然言語の意味理解において重要である。本研究では、述語の用法によってどの項を取りやすいかという特性である選択選好を、項の意味役割を考慮しつつ学習し、項単語の予測性能評価において従来手法よりも高い性能を達成した。

**王　　一　然（黒橋教授）「Deep Reinforcement Learning for Joint Chinese Syntactic Analysis」（中国語構文解析の統合モデルの深層強化学習）**

中国語単語分割、品詞付与、構文解析の統合的ニューラルモデルを提案した。深層強化学習を利用することによって、文字に対する品詞タグを推定することが特長である。実験により、提案モデルがベースラインモデルより高い解析性能をもつことを確認した。

**西　出　智　貴（川嶋准教授）「視線情報を用いた興味推定に基づく対話的動画選択支援システム」**

モニタ上の動画カタログから視聴動画を選択する際のユーザの視線から、興味推定を行うとともに、何を基準に選んだかというメタ認知を対話的に促す動画選択支援システムを構築した。実験参加者の協力により視線計測実験を行い、その有効性を検証した。

**中　塚　智　尋（延原講師）「Multilinear CNN モデルによる遮蔽を考慮した複数物体の詳細画像認識」**

複数の識別対象物体が写った画像を入力とした、各物体の検出と詳細画像認識を行った。特に遮蔽に頑健な検出と識別のため、物体の部位毎の見えに基づく識別器である Multilinear CNN モデルを提案し、複数の実画像データセットを用いた定量評価によってその有効性を示した。

**CHEN ZHE（延原講師）「End-to-end Underwater Multi-object Tracking Using Detection-Association Networks（検出・追跡ネットワークを用いた End-to-End 学習による複数水中物体追跡）」**

見た目の差異が乏しい複数の水中物体を追跡・識別することを目的として、対象物体の検出とフレーム間での対応付けを行うニューラルネットワークを考案し、end-to-end な学習によって検出・追跡が実現可能であることを示すとともに、実画像データによってその有効性を示した。

**LI LI（延原講師）「Partly Cloudy Sky Image Model for Intra-minute PV Generation Prediction」（短時間太陽光発電量予測のための部分的晴天画像モデル）**

全天球カメラ映像を用いた数秒から数十秒後の太陽光発電量予測を目的として、特に部分的晴天時における雲による太陽の遮蔽の発生を明示的に扱うことができる画像モデルを考案し、これによって短時間発電量予測が可能であることを実データを用いて検証した。

## 情報学研究科　情報通信システム専攻

**奥　村　亮　太（原田教授）「M2M 無線通信システム向け受信端末駆動型 MAC プロトコルに関する研究」**

IoT 向け無線通信規格 Wi-SUN における低消費電力 MAC プロトコル F-RIT 方式について、干渉環境下における F-RIT 双方向通信の通信失敗頻発問題を解決する Enhanced F-RIT 方式を新たに提案し、その有効性を実機評価により示した。

**栗　木　寛　斗（原田教授）「非直交アクセス方式による高効率周波数利用技術に関する研究」**

5G やその先の移動通信システムに向けて、周波数利用効率の更なる改善および高速大容量化を実現する非直交多重アクセス方式と、非直交複信方式（帯域内全二重通信）を適用した Full-duplex セルラシステムを提案し、その有効性を示した。

**児　玉　洋　介（原田教授）「ユニバーサル時間軸窓を適用した LTE 上りリンクシステムに関する研究」**

5G で求められる低帯域外輻射を実現するアップリンク向けの新信号波形として、長大な遷移長を持つ時間軸窓を適用した Universal Time-domain Windowed DFTs-OFDM 方式を提案し、その有効性を示した。

**羽　原　拓　哉（原田教授）「M2M 無線マルチホップネットワークにおける高能率データリンク層ルーティング法」**

低消費電力な M2M 無線マルチホップネットワークを実現するための高能率なデータリンク層ルーティング手法を提案し、end-to-end（E2E）パケット伝送成功率を低下させることなく問題となる各端末における送信機会分散を実現できることを示した。

**千　葉　竜　樹（原田教授）「高周波数帯端末連携 MIMO 受信における端末間通信方式と受信信号処理に関する研究」**

帯域幅が確保できる高周波数帯を利用した携帯端末間の連携により MIMO 空間多重数を拡大する伝送システムについて、非再生中継および PCM による連携を比較検討し、位相雑音など高周波数帯で顕在化する劣化原因を指摘し改善手法の提案を行った。

**江　上　晃　弘（守倉教授）「通信容量の向上に向けたミリ波無線 LAN 基地局の最適配置及びスリープ制御」**

ミリ波無線 LAN システムの通信容量を向上させるために、スループット期待値モデルを用いたミリ波無線 LAN 基地局の配置方式を提案した。また、劣モジュラ最適化を用いたミリ波無線 LAN 基地局のスリープ制御方式を提案し、シミュレーションにより提案方式の有効性を評価した。

**岡　本　浩　尚（守倉教授）「Machine-Learning-Based Link Quality Prediction Using Depth Images for mmWave Communications」（機械学習を用いた深度画像からのミリ波通信品質予測）**

ミリ波通信において機械学習を用いて深度カメラの画像から AP と STA 間の通信品質を予測するシステム、および、予測のための機械学習アルゴリズムを提案した。提案方式をシミュレーションと実験により評価し、システムに適したカメラの設置場所や予測精度について明らかにした。

**香　田　優　介（守倉教授）「Reinforcement Learning-Based Predictive Handover Decision for Pedestrian-Aware mmWave Networks」（遮蔽者の位置情報に基づく強化学習を用いたミリ波通信プレディクティブハンドオーバ制御）**

遮蔽者の位置情報に基づくミリ波通信制御におけるスループット最大化手法として、強化学習によるアプローチを提案した。特に、制御にコストがかかる場合についても一定のスループットを維持できるよう、学習器を設計した。シミュレーションにより学習・制御を行い、提案方式の有効性を確認した。

**佐　藤　雄　大（守倉教授）「高密度無線 LAN 環境でのカバレッジ自律展開及び利用可能エリア設定法」**

カバレッジオーバラップ低減のための送信電力・スリープ制御法と、AP と STA の相互の受信信号電力から、STA の位置が複数台の AP の設置地点に囲まれた領域の内か外か判定する内外判定法を提案した。また、それぞれの提案法についてシミュレーション評価と実験により効果を確認した。

**中　村　拓　哉（守倉教授）「強化学習による自律的無線アクセスポイント選択」**

Q 学習を用いた端末側による自律的アクセスポイント選択手法の評価を行った。特に、公衆無線 LAN 環境において端末側がコアネットワークの情報や接続ユーザ数を観測できない状況を想定し、不完全な情報を利用した場合でも強化学習を用いた方式が有効であることをシミュレーションにより確認した。

**尹　　博（守倉教授）「Game Theoretic and Stochastic Geometry Analysis of Multi-Operator Shared Radio Access Networks」（オペレータ共有アクセスネットワークのゲーム理論と確率幾何解析）**

複数の移動体通信事業者（MNO）が基地局を共用する場合について確率幾何解析を行い、下り回線における場所率の理論式を導出した。また、各 MNO が帯域割当についての交渉をモデル化した交渉ゲームを提案し、MNO の市場シェアの増加量を最大化する帯域割当を算出した。

**岡　本　和　輝（新熊准教授）「データ分析による予測通信制御の研究」**

移動ログやオンラインサービスの利用ログといったデータを分析することで、人々の少し先の未来の行動を予測することができる。そこで、予測される行動に応じて、無線局のオンオフや異常検知を行なう手法を提案し、有効性を数値評価により示した。

**加　藤　槙　悟（新熊准教授）「予測情報のリアルタイム配信のためのコンテクストを考慮した情報管理手法の研究」**

移動する車両がセンサとして収集したデータを分析することで得られる予測情報をリアルタイムに配信するシステムへの期待が高まっている。そこで、データの関係性や重要性に基づいた管理手法を提案し、実データを用いた評価により有効性を示した。

**高　木　一　樹（新熊准教授）「プライバシを考慮したセンサ・通信システムへのグラフモデルの応用」**

移動ログやオンラインサービスの利用ログといったデータは、人々のコミュニティを自動抽出したり健康状態の異常を検知したりといった用途に活用できる。しかし、個人のログはプライバシリスクを伴う。そこで、プライバシを考慮したセンサ・通信システムを提案し、有効性を示した。

**大　荷　唯　明（佐藤（高）教授）「低電圧動作時における画像認識精度の予測に向けた畳み込み演算回路の誤り評価」**

畳み込みニューラルネットワーク（CNN）のハードウェアを対象に、低電圧動作時の特性評価に取り組んだ。CNN の主要な構成要素である畳み込み演算回路の低電圧動作特性をモデル化し、低電圧動作時の画像認識精度をシミュレーションにより評価可能とした。

**氏　家　隆　之（佐藤（高）教授）「CNN ハードウェアによる演算高速化及び動きベクトルによる検出補間に基づくリアルタイム物体追跡システム」**

畳み込みニューラルネットワークを専用ハードウェア上で行うリアルタイム物体追跡システムを提案した。動画像コーデックの動きベクトルを用いる複数物体追跡手法を考案し、精度を維持しながら高速化と低電力化を両立できることを示した。

**大　石　一　輝（佐藤（高）教授）「パワーデバイスモデリングのための特性測定とそれを利用した電力変換回路の電気・熱連成解析」**

スイッチング動作中のパワーデバイスの観測により、容量特性と熱伝達特性を測定する新たな手法を提案し、電気・熱の同時解析を行った。損失に強い影響を与えるスイッチング波形のタイミングと素子の発熱を高精度でシミュレーションできることを実験との比較により確認した。

**業　天　英　範（佐藤（高）教授）「組合せ最適化問題の高精度求解に向けたレプリカ交換法を用いたハードウェアイジングモデルソルバ」**

イジングモデルを用いて組合せ最適化問題の解を高速に求めるハードウェアソルバを提案した。レプリカ交換法のアルゴリズムを近似することによりハードウェア上での実現を可能とし、最大カット問題について最適解を得る確率を改善した。

**藤　田　雄　也（佐藤（高）教授）「機械学習を用いた適応的領域選択による動画像からの心拍推定」**

動画像からの心拍推定手法を提案した。提案手法では機械学習を用いて心拍推定に適する領域を適応的に選択するため顔検出が不要となる。また、粒子フィルタを用いて瞬時的な推定値の乱れを防止し、心拍推定の精度を向上できることを示した。

**森　田　俊　平（佐藤（高）教授）「集積回路の負荷依存経年劣化の効率的な見積りと緩和手法」**

高速モンテカルロ法を応用し、集積回路の特性劣化を特に早める最悪負荷パターンを少ないシミュレーション回数で求める手法を提案した。また、回路中の類似パスをクラスタリングし、劣化緩和素子を効率よく配置する方法を与え、回路特性の劣化を設計段階で防止できることを示した。

**保木本　　修（小野寺教授）「プロセッサにおける最小エネルギー動作点の実時間追跡」**

与えられた動作周波数のもとでプロセッサの消費エネルギーを最小化する電源電圧としきい値電圧を電力センサと温度センサを用いて実時間で精度良く推定する手法を示した。65nm プロセスで試作したプロセッサの実チップ測定により手法の有効性を確認した。

**岸　本　　真（小野寺教授）「動作温度とプロセス変動量のオンチップ再構成可能モニタ回路」**

サブスレショルドリーク電流により動作し、集積回路の動作温度とプロセス変動量を単一の回路で推定可能なオンチップモニタ回路を開発した。65nm プロセスで試作したテスト回路により、電源電圧の

変動には影響されず、精度良い推定が可能であることを確認した。

**長　岡　悠　太（小野寺教授）「ビアスイッチ FPGA の高密度回路実装を可能にする物理設計」**

プログラマブル配線を実現するビアスイッチを用いた FPGA を高密度に実装するための論理回路構造やビアスイッチによるクロスバ配線構造を明かにした。従来回路と比べると、提案レイアウト構造により回路実装密度が 6.6 倍に向上することを示した

**吉　澤　　慶（小野寺教授）「算術論理演算ブロックとオンチップメモリの分散配置によるビアスイッチ FPGA の高性能化」**

ビアスイッチ FPGA では、金属配線層のみでプログラマブル配線が実現できるため、半導体層に算術論理演算ブロックやメモリブロックを分散配置することができる。処理速度や消費エネルギーの観点から、搭載すべき演算器やメモリの種類や個数を明かにした。

**平　塚　晶　崇（小野寺教授）「多チャンネル実装に向けたトランスインピーダンスアンプのクロストーク削減手法」**

多段インバータ型トランスインピーダンスアンプの多チャンネル実装を想定し、アンプ自体の低雑音化とクロストークの低減化が可能な回路構成法を明かにした。65nm プロセスで試作した回路では、クロストークと雑音を従来回路よりそれぞれ 52% と 67% 削減した。

**佐　藤　拓　朗（佐藤（亨）教授）「UWB ドップラーレーダ干渉計法を用いた複数運動目標のトラッキング」**

UWB（超広帯域）ドップラーレーダ干渉計法と追尾フィルタの 1 種である $\alpha$-$\beta$ フィルタを用いて複数運動目標を追跡する手法を開発した。人体各部を想定した複数の鉄球振り子の観測データに対して提案手法を適用し、近接した 2 目標の分離と追跡に成功した。

**平　元　一　喜（佐藤（亨）教授）「超広帯域レーダと時間周波数領域適応型信号処理を用いた複数歩行人体の分離識別」**

単一のアンテナ素子のみを持つ UWB（超広帯域）レーダに 2 次元ユニタリ ESPRIT 法を用いた適応型信号処理を適用し、複数歩行人体の分離識別を可能とするイメージング手法を開発した。モーションキャプチャにより生成した 2 人体歩行モデルデータを用いて提案手法の有効性を検証した。

**三　谷　壮　平（佐藤（亨）教授）「UWB レーダを用いた就寝中の心拍・呼吸・運動推定技術」**

UWB（超広帯域）ドップラーレーダを用いて、就寝中の長時間測定を想定したリアルタイムバイタル情報推定アルゴリズムを開発した。就寝時の測定データに基づき、寝返りなどの体動を検出すると共に、安静時には高精度の呼吸・心拍測定が可能であることを示した。

**村　垣　政　志（佐藤（亨）教授）「UWB レーダを用いた可変安定度適応型ビームフォーマによる複数人体の非接触バイタル情報測定」**

UWB（超広帯域）レーダを用いた遠隔バイタル計測において、同一距離に存在する複数人体を分離する手法を開発した。到来方向推定の分解能と信号推定の安定度を両立させる可変安定度適応型ビームフォーマを提案し、複数人体データに適用してその有効性を実証した。

**楊　　帆（佐藤（亨）教授）「UWB ドップラーレーダ干渉計法とサポートベクターマシンを用いた複数歩行者の分離と追跡」**

複数歩行者の分離と追跡を目標として、UWB（超広帯域）ドップラーレーダ干渉計法とサポートベクターマシンを用いた手法を提案した。シミュレーションと実験データに提案手法を適用し、複雑な軌跡で運動する 2 人の歩行者の分離と追跡に成功した。

## 情報学研究科　システム科学専攻

**伊　藤　　崚（石井教授）「半教師有り学習による脳画像セグメンテーション」**

核磁気共鳴法による 3 次元脳画像から脳の領域をセグメンテーションする新しい半教師付き学習手法を提案した。セグメンテーションに関するラベル付き個体の学習に、ラベルなし個体のデータを援用することでセグメンテーション精度が向上した。

**大　西　翔　太（石井教授）「Constrained Deep Q-learning gradually approaching ordinary Q-learning」（通常の Q 学習に漸近する制約付き深層 Q 学習）**

強化学習に深層ニューラルネットを用いた深層 Q 学習では、学習安定化のために Q 関数の更新周期に制約を入れているせいで学習速度が遅かった。そこで制約の必要性を判定して切り替える方法を提案した。提案法により既存の DQN よりも少ない訓練データ数で同様の性能をもつ方策に収束した。

**炭　谷　翔　悟（石井教授）「未知行動下でのコスト関数の復元」**

逆最適制御を用いた徒弟学習では、状態・行動の履歴からなる参照データから目的関数を推定しつつ最適制御を実現する。これを、状態の履歴のみ与えられ、行動履歴が与えられない場合に拡張することで、人間のモーションキャプチャデータから人型ロボットのジャンプ運動を生成させた。

**松　井　一　紘（石井教授）「回転共変性のあるニューラルネットによる拡散 MRI からの軸索方向の推定」**

入力と出力に対応する特徴ベクトルやテンソルに回転共変性の制約（入力が回転すれば出力も同様に回転する）が保証されるようなニューラルネットを開発した。これを拡散核磁気共鳴画像データに基づく脳白質における神経線維走行推定に応用して既存法を超える性能を示した。

**山　口　正一朗（石井教授）「逆強化学習に基づく動物の行動戦略の同定 ～C. elegans の温度走性への適用～」**

動物の行動に関する時系列パターンから、動物の意思決定を伴う行動戦略を同定する逆強化学習フレームワークを開発した。提案手法を線虫の温度走性実験データに適用し、線虫の移動戦略が適温への移動志向と等温域に留まろうとする志向のふたつから構成されていることを見出した。

**森　田　充　樹（松田教授）「局所変位観測に基づく弾性率分布のモデルベース推定」**

弾性体の局所変位観測に基づいて、観測不可領域を含めた弾性率分布を推定する手法を提案した。生体組織に見られる弾性率勾配のスパース性と、メッシュ要素のクラスタリングの概念を導入した最適化の枠組みが弾性率分布の推定精度と空間分解能の向上に有効であることを確認した。

**山　本　裕　太（松田教授）「虚血状態を計算可能な pH 調節機構を備えた心筋組織微小循環モデル」**

心筋への血流が低下する虚血性心疾患では心筋細胞の pH が低下するが、本研究では pH 調節機構を

備えた心筋細胞モデルと組織の移流拡散現象モデルを統合した心筋組織微小循環モデルを構築することにより、従来モデルは困難であった虚血状態における pH の低下を再現できることを確認した。

## エネルギー科学研究科　エネルギー社会・環境科学専攻

**松　田　宅　司（下田教授）「音環境が知的集中に与える影響の実験検討」**

本研究では、様々な音環境が、知的集中にどのような影響を与えるかという知見を得ることを目的とした。ノイズキャンセリングやクラシック音楽でオフィス騒音を低減した音環境など、4 条件下で被験者実験を実施し、知的集中の客観的かつ定量的な評価をもとに考察を行った。

**浦　山　大　輝（下田教授）「デジタルサイネージを利用した異文化コミュニケーションの誘発手法」**

本研究は、訪日外国人旅行者によりよい観光体験を提供するために、デジタルサイネージを利用して異文化コミュニケーションを誘発する手法を提案した。そして、サイネージを介した協力作業などにより、異文化コミュニケーションが誘発されることが確認された。

**上　田　樹　美（下田教授）「知的作業への集中評価のための認知処理 PN マップ分析」**

オフィス執務者の作業に対する集中を、認知処理過程の観点から詳細に分析する方法として提案する「認知処理 PN マップ分析」の開発と評価を行った。提案手法は、知的生産性の定量評価を可能とし、オフィス環境の構築や省エネルギー活動の効率化に寄与する。

**大　橋　由　暉（下田教授）「高速な類似画像検索のための多段階絞り込み処理フレームワークの提案」**

リローカリゼーションの処理中に行う類似画像検索の性能を向上させるために、複数の類似画像検索手法を用いた多段階絞り込み処理フレームワークを開発した。フレームワークを利用することで、類似画像検索性能が向上することを評価実験で確認した。

**辻　　雄　太（下田教授）「デジタルサイネージを用いた異文化理解を促す情報提示方法」**

デジタルサイネージで外国人に日本文化を伝える際、効果的な情報提示方法を調べることを目的とした。効果的な方法として 4 コマ漫画の形式を提案するとともに、外国人を参加者とする被験者実験を行い、アンケートによる主観評価を実施して提案方法を評価した。

**緒　方　省　吾（下田教授）「個人の特徴と知的集中との関係に関する実験研究」**

個人の特徴と定量的に評価した知的集中との関係を調査するために、調査実験と統計的な評価を行った。その結果、ニューラルネットワークによる関係の評価手法を用いることで知的集中の指標から GHQ 精神健康調査票尺度の項目が正しく推定できる可能性が示された。

**岩　崎　達　郎（下田教授）「高空間分解能 NIRS を用いた脳賦活計測による集中状態の推定」**

生理指標計測を用いた機械学習による知的作業中の集中状態の推定手法を提案した。評価実験結果から、提案手法による推定はランダムな推定よりも精度が有意に高かった。精度が向上すれば、オフィス環境のリアルタイム制御等への応用が期待される。

## エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻

**森　　健　介（中村（祐）教授）「トカマクプラズマの電流崩壊時において真空容器を流れる非軸対称渦電流の数値解析」**

トカマクプラズマではプラズマ電流が突然途切れるディスラプション現象がある。ディスラプション発生後にプラズマ周辺の真空容器に流れる渦電流がプラズマ電流減衰の長時間変化を緩やかにする事を示すとともに解析コードの非軸対称プラズマ解析への拡張を行った。

**枡　田　健　太（中村（祐）教授）「平衡磁場構造変化を考慮したトカマクプラズマにおける微視的不安定性のベータ値依存性」**

磁場閉じ込めプラズマにおいてイオン温度勾配不安定性が駆動する乱流は閉じ込め悪化の主原因である。圧力上昇に伴う磁場揺動発生はこの不安定性に対して安定化効果があるが、圧力上昇に伴う平衡磁場構造変化によってその安定化効果が低減されることを明らかにした。

## エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

**有　本　　樹（土井教授）「磁場配向法による RE $Ba_2Cu_3Oy$ 超伝導線材の創出に向けた回転変調磁場印加条件の検討」**

分散媒体中に浮遊させた希土類系高温超伝導物質粉末に回転変調磁場を印加することで結晶方位を揃えた粉末集合体が作製できるが、その磁場印加条件について詳しい研究はなされていない。本研究では静止、回転時間の組合せ等について詳細に検討した。

**高　畑　仁　志（土井教授）「Cu および Al 基板上への $MgB_2$ 超伝導薄膜の作製と $J_c$ の歪依存性の検討」**

$MgB_2$ 超伝導線材の実用化を目指して、基材金属テープの選定を行う上で $MgB_2$ との熱膨張率の違いは機械的特性のみならず電気的特性にも大きな影響を与える。そこで、Cu、Al 基板上に $MgB_2$ 超伝導薄膜を形成し、$J_c$ の歪依存性の検討を行った。

**田　所　　朋（土井教授）「電磁鋼板上に安定化 $ZrO_2$ 及び $Y_2O_3$, $CeO_2$ を中間層として用いた $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材の開発」**

電磁鋼板を基材とした超低コスト高温超伝導線材の開発に向けて、安定化ジルコニアとイットリアをエピタキシャル成長させるバッファ層構造の検討を行い、イットリア層厚を 1.5 $\mu$m 以上とすることで、酸素拡散をブロックできることを明らかにした。

**廣　瀬　勝　敏（土井教授）「{100}<001> 集合組織 Cu テープを基材とした $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材のためのチタニア系導電性中間層の開発」**

{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に Nb ドープにより導電化した各種 Ti 酸化物系酸化物をエピタキシャル成長させ、その上に $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導薄膜をエピタキシャル成長させることで、高性能低コストな高温超伝導線材の開発を試み、Nb-STO/Nb-$TiO_2$/Nb-STO の 3 層バッファ構造とすることで、良好なエピタキシャル成長が行えることを明らかにした。

**前　田　啓　貴（土井教授）「{100} <001> 集合組織 Cu テープを基材とした $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材構造最適化に関する研究」**

{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に導電性中間層を介して $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導層を形成する新構造超伝導線材において、導電性中間層の抵抗率の変化によるクエンチ時の Cu テープへの電流分流挙動を有限要素法を用いて詳細に検討した。

**川　嶋　健　之（白井教授）「高温超伝導 MRI マグネットにおける励磁電流のフィードフォワード制御による磁場安定性向上」**

高温超伝導 MRI マグネット実用化に向けた取り組みとして、試験的に低温超伝導 MRI マグネットを用いてコイル通電電流を微小にフィードフォワードで制御し、コイルの磁場安定度を向上させることに成功した。さらに XTAP を用いて実験を模擬した回路のシミュレーション解析をし、制御に用いる微小電流値を導出する手法の検討を行った。

**高　谷　聡　志（白井教授）「Recovery Characteristics of Superconducting Tape with Several Surface Conditions and under Pressurized Condition for Resistive Superconducting Fault Current Limiter」（抵抗型超電導限流器を目的とした超電導線材の表面状態改変及び圧力下における復帰特性）**

抵抗型超電導限流器の実用化に向けた基礎研究として、圧力下及び超電導線材表面の状態改変による、復帰特性の改善を実験より確認し、同時に復帰特性に大きく影響を与える沸騰現象の観察を行った。

**西　村　大　貴（白井教授）「動特性を含む負荷モデルを用いた固有値解析による系統の安定度評価及び配電系統における SVC による不平衡補償に関する検討」**

システム同定による配電系統のモデリング手法を用いて、系統全体の定態安定度を計算する手法の考案、及び考案した手法を用いて、動特性を持つ配電系統を含んだ系統の安定度をシミュレーションによって検討した。

**藤　田　勝　千（白井教授）「液体水素浸漬冷却における $MgB_2$ 超電導コイルの励磁特性」**

超電導応用の基礎となる超電導コイルを液体水素浸漬冷却下で励磁試験を行い、長尺の $MgB_2$ 線材を用いて作製した超電導コイルが期待される性能を発揮できるかを調べた。また、超電導発電機の開発に向けて作製されることが予想されるレーストラック型コイルのモデルを作製し、磁場分布の計算を行い、本研究に用いた線材の適性を調べた。

**米　村　健　太（白井教授）「風力・潮力ハイブリッド発電システムにおける出力変動補償の設計と特性解析」**

風速変動による風力発電の出力変動を潮力発電と小型の蓄電池を用いて補償するシステムについて、シミュレーションを用いて構築し、潮流速、風速、発電機及び蓄電池の容量などの種々のパラメータに対する補償能力の評価を行った。

## 生存圏研究所

**柿　原　逸　人（山本教授）「GNSS 可降水量と数値予報モデルデータを用いた水蒸気ラマンライダーの校正手法の研究」**

ラマンライダー信号から水蒸気混合比を求める際に必要となる校正係数を、全地球航法衛星システム（GNSS）から解析された水蒸気情報と数値予報モデルデータを用いて導出する手法について提案し、滋賀県信楽町で行われた検証実験より校正係数の推定精度を評価した。

**西　田　圭　吾（山本教授）「ロケットによる中規模伝搬性電離圏擾乱の理解のための自然電場・電子密度解析」**

中緯度電離圏に発生する中規模伝搬性電離圏擾乱（MSTID）の理解のため、2 機の観測ロケット実験をもとに自然電場と電子密度を解析した。高度 280km における MSTID を成長させる電場の存在や波長約 100km の電子密度の不規則構造の存在を明らかにした。

**水　野　　遼（山本教授）「GPS-TEC トモグラフィ解析に基づく電離圏 3 次元電子密度分布のデータベース化と活用」**

GEONET を利用した GPS-TEC（全電子数）のトモグラフィにより、電離圏 3 次元電子密度分布のデータベースを構築し、アイオノゾンデと COSMIC 掩蔽観測との比較により検証した。また韓国と台湾の GPS データを加えたトモグラフィについても検討した。

**久保田　匡　亮（山本教授）「MU レーダーを用いた実時間航空機クラッター抑圧に関する研究」**

大気レーダー観測において、地形性クラッターや航空機クラッターが風速推定精度に影響を及ぼすことがある。MU レーダーデータに対して、2 段階 NC-DCMP（ノルム・方向拘束付電力最小化）法を適用して、航空機クラッターの抑圧特性を検証・評価した。

**明　里　慶　祐（山川教授）ローレンツ力を考慮した微小スペースデブリの軌道進化に関する研究**

帯電した微小スペースデブリを対象として、地球周辺電磁場を考慮に入れた軌道計算プログラムを開発し、微小スペースデブリのダイナミクスとその軌道変化を解析して、地球周辺電磁場環境が微小スペースデブリの分布に与える影響について明らかにした。

**池　田　成　臣（山川教授）MU レーダーを用いたスペースデブリの三次元形状推定に関する研究**

大気観測用レーダーである MU レーダーでスペースデブリを捉え、そのエコーからスペースデブリの形状を推定する手法について検討を行った。時間周波数解析及び散乱断面積の時間変化を用いた手法で推定を行い、得られた結果から形状推定精度について評価を行った。

**小　林　優　太（山川教授）レーザーによるスペースデブリ除去手法の有効性に関する研究**

衛星からのレーザー照射によるスペースデブリ除去手法の有効性について検討を行った。軌道上での光学観測によるスペースデブリ捕捉を評価した上で、多数のスペースデブリに対してレーザー照射を行うその除去効果についてシミュレーションによる解析を行った。

**川　島　祥　吾（篠原教授）「マイクロ波送電用高調波利用型レトロディレクティブシステムの研究」**

レクテナが受電・整流時に再放射する高調波の到来方向を推定し、マイクロ波送電方向を制御する高

調波利用型レトロディレクティブを研究対象として、そのシステム構築を行った。レクテナ、到来方向推定系、送電系とそれぞれのサブシステムを設計し、最終的にそれをひとつにシステム化して実験と評価を行った。

**西　尾　大　地（篠原教授）「電磁界結合を利用したマイクロ波加熱装置の開発」**

電磁界結合を利用することで空洞共振器を使用しない、新たなマイクロ波加熱装置を開発した。さらに実験の結果から、純水試料 4.3mL を 2.45GHz のマイクロ波電力 10W という小さな電力であっても 10 分以内に試料温度を 80℃に昇温可能であることを確認した。

**平　川　　昴（篠原教授）「パルス変調を利用したマイクロ波用整流回路の効率向上に関する研究」**

時分割で通信とワイヤレス給電を共存可能とするパルス波を用いたマイクロ波送電に着目し、特にパルス入力時の受電整流回路の動作に関して理論検討と実験を行った。その結果、十分な平滑コンデンサを含む整流回路の場合はパルスデューティー比が小さい＝瞬時マイクロ波強度が強いほど整流効率が向上することが確認された。

**楊　　波（篠原教授）「Study on a Phase-controlled Magnetron for Wireless Power Transmitter」**

これまで制御婦が難しかった特殊な 5.8GHz マグネトロンを用いて位相制御マグネトロンの構築に成功し、さらにその雑音レベルを -50dB 以下に抑制できた。これと同時に周波数ロック時間を 100 $\mu$s 以内に短縮、位相制御精度± 1° 以内を実現した。

**平　賀　涼　子（大村教授）「Study on Acceleration Mechanism of RadiationBelt Electrons through Interaction with Sub-packet Chorus Emissions」（サブパケットを伴ったコーラス放射との相互作用による放射線帯電子加速過程の研究）**

地球磁気圏で頻繁に発生しているホイッスラーモード・コーラス放射がサブパケット構造を持っているという最新の解析結果を取り入れて波動のモデルを作成し、それとサイクロトロン共鳴する電子が相対論的なエネルギーまでの広いエネルギー範囲で連続したサブパケットと非線形共鳴過程を繰り返しながら有効に加速され、放射線帯の形成に至ることを明らかにした。

**上吉川　直　輝（大村教授）「グローバル MHD シミュレーションによるサブストーム発達」**

地球磁気圏でおこる突発的な現象であるサブストームについて、その発達過程と太陽風から地球に至るエネルギーの輸送・変換過程が太陽風に依存することを明らかにした。地球側の境界条件によってジェット電流の発達が大きく異なることも明らかにした。

## エネルギー理工学研究所

**山　下　大　樹（長﨑教授）「電子銃におけるビームの自己線形化現象への陰極上電流密度分布の影響に関する研究」**

極低エミッタンス電子ビーム生成への利用が期待される径方向位相空間分布の自己線形化現象を数値シミュレーションで解析し、陰極上の電流密度分布の非一様性に起因する空間電荷効果の非線形性が、その後のエミッタンスの挙動に大きな影響を与えることと、その機構を明らかにした。

**吉　田　将　也（長﨑教授）「3 段電圧導入端子を用いたポータブル高強度 DD-IEC 中性子源の開発」**

テロ対策技術等に利用可能なポータブル高強度中性子源の開発を目指して、IEC 方式の従来装置に比して小型・軽量の DD 核融合中性子源を設計・製作して性能を評価し、採用した多段分割電圧導入方式とチタン製真空容器の採用が、それぞれ小型化と高強度化に有効であることを示した。

**渡　邊　真太郎（水内教授）「ヘリオトロン J における ECH 非吸収ミリ波計測に関する研究」**

ヘリオトロン J において、電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）での非吸収ミリ波を回転機構付きクリスタルダイオードを用いて実験的に調べた。真空容器壁での多重反射を経ても入射時の偏波特性があることを確認し、パワーモニターとしての利用を考察した。

**米　村　祐　馬（水内教授）「ヘリオトロン J におけるマルチパストムソン散乱計測装置の開発」**

電子内部輸送障壁を有するプラズマの電子温度密度分布測定の精度を向上させるためにイメージリレーと偏光制御システムによるマルチパストムソン散乱計測装置を開発した。2 パスのビームによる電子温度密度計測を行い高い精度で計測が可能なことを示した。

**土　師　直　之（水内教授）「ヘリオトロン J における高速カメラを用いた高密度プラズマの L-mode H-mode 遷移時における周辺プラズマ挙動」**

ヘリオトロン J で生成された高密度プラズマ中に観測できる特徴的な低周波密度揺動に伴うプラズマ粒子の吐き出し現象に着目、プラズマ周辺領域における可視発光の 2 次元高速カメラ画像を基に粒子輸送挙動を調べ、閉じ込め領域内の揺動に伴い吐き出された粒子パルスの、閉じ込め周辺領域での挙動の一端が示された。

**田野平　　駿（水内教授）「ヘリオトロン J における径方向電場評価のための荷電交換再結合分光計測」**

ヘリオトロン J プラズマ中の径方向電場の高精度評価を目指して、ポロイダルフロー計測用の荷電交換再結合分光装置を整備した。従来の装置と比較してフロー速度の評価精度を 4 倍向上させることができ、ECH 追加熱時のポロイダルフロー速度の変化を観測した。

**岡　﨑　　悠（岡田准教授）「ヘリオトロン J における固体水素ペレットを用いたプラズマ高密度化に関する研究」**

磁場閉じ込め核融合研究では、コアプラズマへの粒子供給が課題となっている。固体水素ペレットを用いたコアプラズマへの高効率粒子供給を計画した。ヘリオトロン J プラズマに適合したペレット入射装置を開発し、ヘリオトロン J プラズマの高密度化研究を行った。

**金　沢　友　美（門准教授）「ヘリウム原子輝線強度比法を用いたヘリオトロン J プラズマの電子温度・密度の空間分布計測」**

磁場閉じ込め核融合炉の実現に重要な役割を果たすプラズマ周辺部の電子温度・密度を測定するため、ヘリオトロン J においてヘリウム原子輝線強度比法の適用を行った。分光器の分散特性を最適化すると同時に受光光子数の増加が実現され、当初目的であった 200fps での計測に成功した。

**山　本　皓　基（岡田准教授）「ヘリオトロン J プラズマにおけるイオンサイクロトロン周波数帯加熱解析のための 3 次元波動解析コードの開発」**

磁場閉じ込め核融合研究で利用される加熱法の一つイオンサイクロトロン周波数帯加熱について、3

次元の複雑な形状のプラズマ・放電管内での波動解析を目的とし、有限要素法を用いてアンテナを含めたプラズマと放電管壁間の高周波電場を求めるコードを開発した。

## 学術情報メディアセンター

**上　辻　智　也（小山田教授）「心理カウンセリングの品質向上を支援する視覚的分析に関する研究」**

カウンセリング事例検討会において、逐語録の文字を読むだけでは、カウンセリング会話の流れを把握することが難しいと指摘されてきた。この問題を解決するために、この逐語録を入力して、その内容について視覚的に分析できる手法を提案した。ケーススタディを使った評価実験により、本手法の有効性を検証した。

**梅　澤　浩　然（小山田教授）「卵母細胞内のカルシウム波における波の伝播速度の異なる領域特定に資する可視化技術の開発」**

線虫の卵母細胞における顕微鏡映像において、カルシウム波が細胞内をどのように伝播するかがわかりにくいという問題が指摘されてきた。この問題を解決するために、速度の異なる領域（特徴点）を効果的に探索するための視覚的分析システムを開発し、その有効性を、検証実験と専門家によるカルシウム波分析を通して示した。

**井　藤　隆　秀（中村（裕）教授）「Design and performance analysis of skin-stretcher device for urging head rotation」**

皮膚の引っ張りを利用した Skin-Stretcher 型頭部回転誘導デバイスを提案し、その誘導における人間の首振り動作の特性の分析を行った。これにより、比較的精度良く頭部回転を促せること、また、その時間的予測ができることがわかった。

**栗　栖　崇　紀（中村（裕）教授）「注意分配に依存した頭部・体幹・手の動きの協調関係の解析」**

人間の注意の状態（広い意味での注意分配）を推定するために、身体動作における各部位の動きの連関性を用いることを提案し、力学的な簡易身体モデルと実際の振る舞いを比較・検討することによって、その妥当性を示した。

**水　野　元　貴（中村（裕）教授）「指差しインタフェースの人間の動作特性に基づいたモデル化と検証」**

大型スクリーンを対象とした画像計測による指差しインタフェースのために、ユーザとシステムを合わせた系を数理的にモデル化し、様々な条件における人間の動作を考慮することによって、最適な設定を行う方法を提案した。

**丁　　豪（中村（裕）教授）「Hotspot Detection and Machine Operation Modeling for 3D Scene」（3 次元シーンのための接触点の検出と機器操作のモデル化）**

頭部に装着したカメラなどによって、主観的な視点から機械操作などの作業を記録した映像データに対して、手先での操作などで生じる手と機械の重要な接触を自動的に抽出するための三次元的な手法を提案した。

高校生のページ

# 原子力プラント解体作業支援のための拡張現実感システム

エネルギー科学研究科
石　井　裕　剛、下　田　　宏

## 1. はじめに

2011 年に起こった東日本大震災に伴い、福島第一原子力発電所で原子力プラントの核燃料が溶けてしまう大事故がおきました。この事故では、想定されていなかった高さ 10m を超える津波が原子力プラントを襲ったことで、炉心を冷却するために必要な電力を発生させる非常用ディーゼル発電機が水に浸かって動かなかったことが原因でした。この対策として我が国では、原子力プラントの安全基準をより厳しくしていますが、その基準をクリアするためには安全設備を追加するための投資が必要になります。一方、我が国の商用原子力プラントは 1970 年の美浜原子力発電所 1 号機、1971 年の福島第一原子力発電所 1 号機から始まり、50 機以上のプラントが建設され、発電単価が安く、二酸化炭素を発生させない準国産エネルギーとして我が国の発展を支えてきました。しかし、その設計寿命は 30 年程度のものが多く、発電電力の小さい古い発電所は経済的な観点から追加投資して安全基準をクリアさせず、廃止してしまうことになっています。我が国では、これまで廃止が決まったプラントは 10 機以上にもなりますが、その解体作業はあまり進んでいません。

原子力プラントの解体作業は他の工業プラントの解体作業と大きく異なります。その違いは、原子力プラントの場合、長年の運転により炉心周りの構造材が放射線を浴びて放射線を放出する性質に変わっていることです。そのため、解体時に有害な解体物を厳重に管理しなければなりません。これまで、多くの原子力プラントを建設してきた我が国では、建設のための技術は蓄積されていますが、解体作業については安全かつ効率のいい方法はあまり開発されていませんでした。特に近年では、世間から見た原子力プラントの印象は悪く、その現場で働こうという若い人が少なくなり、これまで培ってきた現場作業技術の継承も難しくなってきています。

## 2. 拡張現実感技術とその特徴

拡張現実感技術は、現実の世界にコンピュータで生成した物体を合成して表示することにより、その物体が実際に存在するかのようにユーザに見せる技術です。最近では、スマホゲーム等にも使われているので、ご存知の人も多いでしょう。スマートフォンやヘッドマウントディスプレイに取り付けられたカメラによって現実の世界を撮影し、その映像にリアルタイムで仮想の物体を合成して表示します。その際、表示する物体の表示位置や姿勢をうまく調整することで、どの方向から見てもその物体があたかも現実世界内に存在するかのように見せることができます。例えば、ユーザが右側から見れば、右側から見たときの物体の映像を生成して適切な位置に表示してやればいいわけです。

この拡張現実感技術を利用すれば、その名の通り、現実の世界を情報的に拡張することができます。例えば、現実には裸眼では見えないものを見えるようにしたり、現実の物体に注釈を付け加えたりすることができます。この技術を利用すれば、作業者の視界に直接、作業手順や作業のコツ等を提示することができます。これにより図 1 に示すように、従来のような紙ベースの作業手順書に比べてわかりやすく、かつ間違いのない作業ができるようになります。

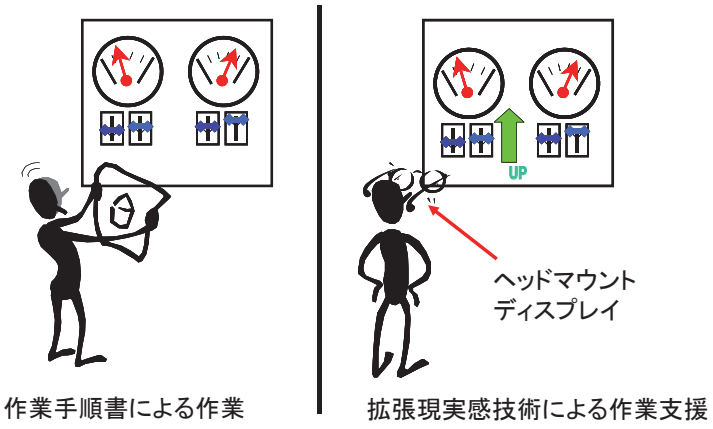



図 1. 作業手順書と拡張現実感技術による作業支援

## 3. 拡張現実感技術の要素技術

拡張現実感技術を実現するためには大きく分けて 4 つの要素技術が必要です。それらは、(1) 表示技術、(2) レジストレーション技術、(3) キャリブレーション技術、(4) トラッキング技術です。(1) 表示技術は仮想の物体をユーザに提示するための技術で、表示デバイスに関する技術も含みます。(2) レジストレーション技術は、現実の世界の物体と仮想の物体の位置を合わせる技術です。(3) キャリブレーション技術は映像を表示する際の歪み等を調整して、仮想物体を合成する際の精密な位置調整をする技術です。(4) トラッキング技術はリアルタイムでユーザの視線の位置と方向を検出する技術です。

この中でも (4) トラッキング技術は拡張現実感を実現するうえで重要な技術です。もし、ユーザの視線の位置や方向の検出にずれがあると、仮想の物体の表示位置が意図していたところからずれてしまいます。拡張現実感技術を原子力プラントの現場作業支援に利用している場合、表示位置のずれは作業ミスを誘発しかねません。これまでは、トラッキング技術としてマーカと呼ばれる QR コードのような模様が描かれた板とカメラを使う方法（マーカベーストラッキング）が、安価で精度の高い方法として利用されてきました。これは、カメラをユーザの視線に見立て、図 2 のようにカメラを使って撮影したマーカの画像からマーカとカメラの相対的な位置や方向を検出するものです。そのため、プラント構内でこの技術を利用するためには、環境内に多くのマーカを貼り付けて事前にそれらのマーカの位置と方向を計測しておく必要があります。こうしておけば、マーカを撮影したカメラの画像からマーカとカメラの相対位置がわかり、さらに事前に計測した環境中のマーカの位置と方向から、最終的に環境中のカメラの位置と方向がわかります。

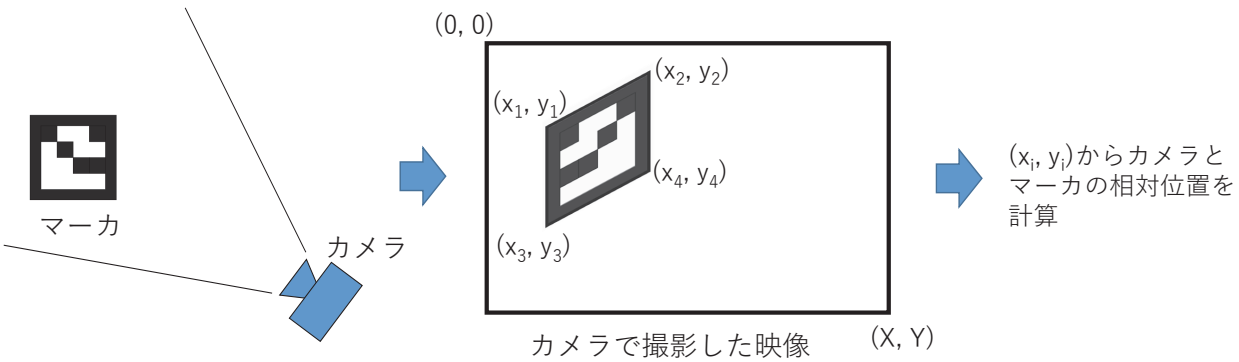



図 2. マーカベーストラッキング

近年では、マーカの代わりに環境中にある装置の角や直線部分などの特徴的な部分をマーカの代わりに利用してカメラの位置や方向を検出するトラッキング技術もあり、マーカレストラッキングと呼ばれています。この方法では事前にマーカを環境内に貼り付ける必要がないため簡単な方法であり、最近では無料のプログラムが公開されていて基本的なプログラミングの技術があれば簡単に利用できるようになっています。

しかし、マーカレストラッキングをプラントの現場作業支援に利用しようとするとまだ問題があります。マーカレストラッキングでカメラの位置と方向を正しく検出するためには、環境中に特徴となる点や線が数多く存在し、なおかつ似ているような部分がないことが必要です。例えば環境中に同じ形の装置が複数ある場合は、カメラの位置を一か所に断定することはできません。さらに、この技術を原子力プラントの解体現場で利用しようとすると、解体中に日々刻々と変わっていく現場では、適切にカメラの位置と方向を検出するのは難しく、今後のさらなる技術開発が望まれます。

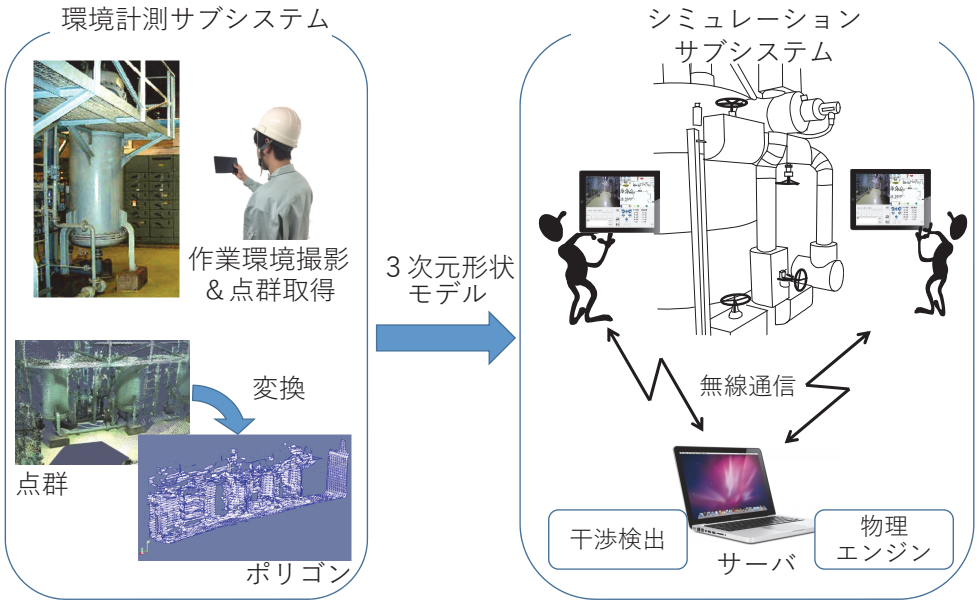
## 4. プラント解体作業支援の例

ここで私達が開発している原子力プラント解体作業支援システムの一つを紹介しましょう。原子力プラント内は狭い部分が多く、分解・切断して解体した機器を一時的に置いておいたり運び出したりするスペースが十分にありません。そのため、事前に分解する機器やその周辺のスペースを精密に計測し、必要なスペースが確保できるのかや、分解した部品を運び出す経路が確保できるのかを調べて、それをもとに分解・運搬計画を立てています。この作業は解体作業の進行に伴って変化する機器や環境の3次元的な形状を扱うために非常に複雑で、時間もかかりミスも起きやすい作業です。

近年では、ビデオ撮影した物体の動画像から立体構造を再構成する技術やレーザスキャナの性能が向上しており、これらを利用することによりプラント内の機器や環境の3次元形状を計測してモデル化することができるようになってきました。この技術を利用すると、計測した3次元形状モデルを使って仮想的にコンピュータ上で解体作業を実施し、作業スペースや運搬スペースが十分かどうかを調べることができます。さらに、これを作業現場で実施すれば、作業員が作業現場で直観的に作業計画を検討することができます。

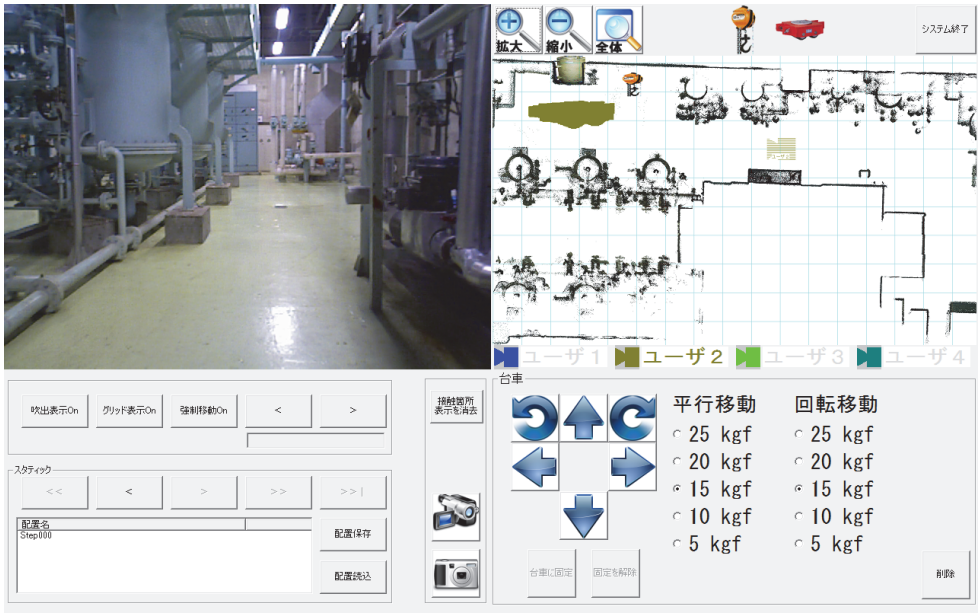
図3に機器の分解・運搬作業シミュレーションシステムの概要を示します。環境計測サブシステムではカメラやレーザスキャナを利用して作業現場や分解対象機器の3次元形状モデルを作成します。シミュレーションサブシステムでは、この3次元形状モデルを基に物理エンジンを用いて、対象機器の分解や移動の際に周囲の物体に干渉しないかどうかを調べます。

シミュレーションサブシステムの画面例を図4に示します。タブレットPCに付属のカメラで作業現場を撮影すると、その映像が画面上に表示されるだけでなく、その上に作業対象機器の3次元モデルも表示されます。ここでは、画面右の見取り図や画面下のボタン等を使って仮想的に作業対象機器を分解したり、クレーンや台車で移動させたりすることができます。また、仮想的な作業の際、作業対象機器が周囲の機器類に干渉した場合には、図5に示すように拡張現実感技術を用いてその干渉個所が着色されて表示されます。この着色位置を確認することにより、実際の作業の際にどの部分が干渉するのかを事前に確認することができます。



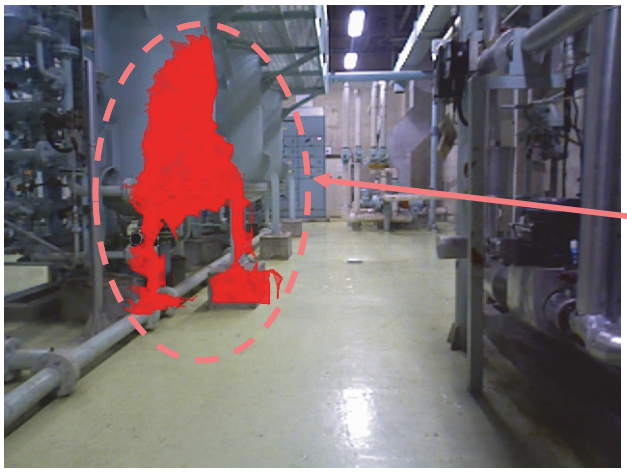

© 2017 Japan Atomic Energy Agency

**図 3.　分解・運搬作業シミュレーションシステム**




© 2017 Japan Atomic Energy Agency

**図 4.　シミュレーションサブシステムの画面例**




© 2017 Japan Atomic Energy Agency

**図 5. 拡張現実感により示された干渉個所を示す着色**

## 5. まとめ

情報通信技術が発達した今日でも、私達はサイバーワールドに暮らしているわけではなく現実の世界で生活しています。拡張現実感技術は現実の世界を情報的に拡張する技術であり、私達の現実の生活を、より便利に、より快適にサポートしていくことができる技術です。ここでは特に原子力プラントの解体作業の支援を取り上げましたが、スマートフォンが普及した社会では、スマートフォンを使った拡張現実感技術により、私達の日常生活がより便利になる未来も遠くないことでしょう。

学生の声

# 努力しない強み

工学研究科　電子工学専攻　木本研究室　博士後期課程３年　浅　田　聡　志

この６年間で、どうすれば幸せに生きられるかと考え、調べまわる時期があった。一つには、「自分の取り組んでいることを純粋に楽しむこと」だそうだが、それが出来ている人はどれぐらいいるか。私自身を振り返ると、残念ながら、「100% 純粋に」ではない時期があったように思える。小さい頃から絶えず競争を要求されてきており、幸か不幸か、どうすれば競争に勝てるかを知っていた。徹底的に努力することである。しかし、他者を優越することにこだわった努力をすると、逆に自分の中の劣等感が強まり、その努力の結果、成功しようが失敗しようが不幸になるそうだ。

劣等感は、比較癖や視野の狭さに起因する。自分の中に軸がない。常に、他人と比べてどうか（優劣）である。無限にある価値観の中で、例えば、研究遂行能力が何よりも重要になり、他者と比較し、その優劣にこだわる。お金を稼いでも、稼いでも、満足できない人と同じで、心が貧しく苦しい状態である。しかし、劣等感に呑まれている本人はその病的な努力を辞められない。そして、嫌なことを懸命に続けるから疲弊し、やがて無気力になる。それだけでない。常に大きく見せようと誇示するから、人から好かれず、対人関係も上手くいかない。

このように劣等感（優越感）に呑まれている人は、「自分は幸せになる」と誓い、比較癖を治す努力をするといい。実際に幸せに向かいだす。人生はこんなにも楽しいものであったのかと気づける。物事を純粋に楽しんでいる人も、膨大な時間をかけて精力的に取り組むし、全力で競争もする。しかし楽しくて満足しているから、結果の優劣が全てとはなっておらず、たとえ競争に負けたとしても、悔しさや復讐心に支配されない。そして何より、自慢しない。顕示しない。権威主義にならない。肩書き、名誉にこだわらない。思い遣り、優しさを失わない。

あらゆる他者評価を無視して、自分の取り組んでいるものに純粋に、真剣に興味を持ってみた。そうするとやはり楽しかった。もはやこうなると努力ではないのである。向上心の土台が他者評価を意識した自己顕示欲である限り、永遠に幸せになることはなく、頑張りが空虚になることを、後輩の方々は忘れないでほしい。

# 研究旅行記

工学研究科　電気工学専攻　篠原研究室　博士後期課程１年　平　川　　昂

博士課程に進学して、これほど海外に行く機会が多いとは想像にもしていませんでした。特に、今年３月にシンガポール国立大学へ一か月一月留学させて頂いた経験は、今後の人生において忘れられないものになると思います。

シンガポール国立大学において、平日は滞在先の研究室でのびのびと研究を進め、自らの研究に必要な知識を獲得していました。たまにお菓子を持ち込むなと怒られたりしてました。理由は蟻が群がるからだそうです（7 階なのに）。毎日の耳を劈くような豪雷（そのうち慣れた）とともに、”熱帯”を感じました。土曜日には現地の学生とバスケットボールを楽しみ、日曜日には物価の高さと（筋肉痛と）戦いながら、シンガポール観光もしました。多種多様な文化が混ざり合ったシンガポールの風景には感銘を受けたものです。記憶に強く残っているのは、クラークキーでのひとり酒です。景色も綺麗で異国の地での疲れを癒してくれました。シンガポールでの滞在が終わったあとは、発表のためインドネシアを訪問しました。イスラム教国家であるインドネシアの文化や雰囲気、街の混雑具合は今までに見た事のないもので、新鮮でした。特に（生存圏研究所の）吉村先生や Himmi 先生に連れられて食べたドリアンの味は衝撃的でした。最後にはインドネシアで生物学を専攻している方々を前に自分自身の研究発表する機会をいただきましたが、そこで他分野の学生や先生方に説明する事の難しさを思い知らされました。

ところで、僕が博士課程に進学して研究を続けているのは、未知のものを合理性を持って探求することが好きであったことが大きい。今回の海外経験で新しく得られたものは多く、また研究についても進捗が生まれました。僕は博士課程進学という道を選びましたが、どのような道に進むにしろ好奇心の赴くままに新しい挑戦を続けることが次に繋がっていくのではないかと思います。

今回の短期留学に際してお世話になった方々に感謝を申し上げ、結びといたします。

教室通信

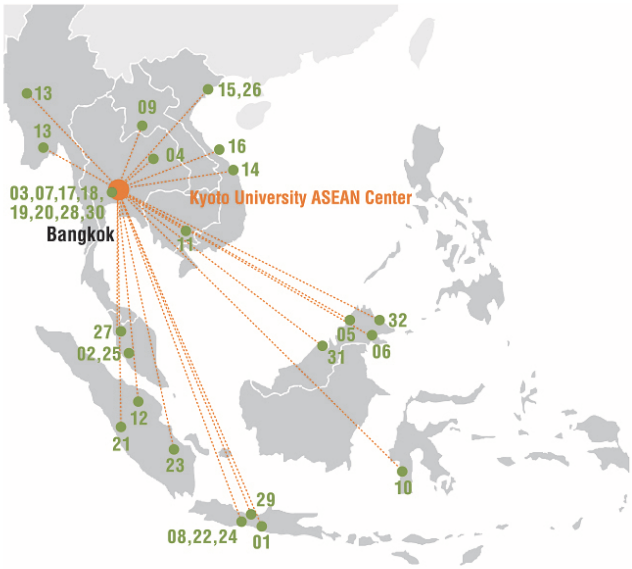
# グローバル化と留学生受け入れ

電気電子工学科長　和　田　修　己

京都大学では、社会のグローバル化の流れを受け、世界に卓越した知の創造を行う大学としての発展と、世界トップレベル大学としての地位確立を目指しています。その意味で、工学部、電気電子工学科でも様々な対応が必要となっています。ご承知のように、京大で受け入れている留学生は、漢字圏（中国、韓国）からの学生の割合がかなり高くなっています。従来の学部生の受け入れは、「教育を受けるに十分な日本語能力」を持っていることを前提でおこなわれ、基本的に学部の授業は日本語です。しかし、本来求められる国際化は、単に「日本に受け入れる」だけではなく、「国際的に通用する人材育成」であり、英語による授業を増やすことも検討されています。

京大では新しく留学生受け入れプログラム「Kyoto iUP（Kyoto University International Undergraduate Program、京都アイアップ）」が開始されています。その目的は、日本語で学部卒業レベル（あるいは修士課程や博士後期課程修了レベル）の専門知識を獲得した留学生を育成し、グローバル展開を図る日本企業及び日本経済そのものを牽引する、極めて高度な外国人留学生の輩出と日本社会への定着に貢献することです 1)。学部入学時点では十分な日本語能力が無くても、専門教育では日本語での授業履修を行い、同時に英語も活用できる人材育成を目指すことになります。ASEAN 6 か国、台湾、シンガポール、香港が重点対象国・地域となっています。

京都大学では、学術研究と教育の国際展開を図るため、アジア・ヨーロッパにおける海外拠点の設置を進めています。特に ASEAN 地域では従来からの研究教育活動を発展させる形で、平成 26 年 6 月に「京都大学 ASEAN 拠点」を設置し、大学の研究理念として掲げる「研究」「教育」「社会貢献」を軸に国際化を推進しています 2)。筆者はたまたま、2015 年にタイの KMITL で開催された学会出張の際に、バンコクの ASEAN 拠点を訪問しました。KMITL には日本 JAICA 資金で整備された、京大電気系よりも立派な学生実験設備があり、電気電子工学に対する意欲の高い学生も多く、驚くとともに期待できるなと思いました。今後、日本の電気電子工学に興味を持つ、活力のある留学生がたくさん京大を目指してくれれば、日本人学生にも良い刺激になるだろうと思います。



KMITL（King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang）タイ・バンコク の学生実験室

「京都大学 ASEAN 拠点」ASEAN 地域における海外オフィス 2)

1）http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/international/students1/kyoto_iup/　http://www.iup.kyoto-u.ac.jp/

2）http://www.oc.kyoto-u.ac.jp/overseas-centers/asean/about/about-top/

賛助会員の声

# エコマテリアルな鉄と その安定製造に貢献する設備診断技術の開発

新日鐵住金株式会社　名古屋製鐵所　熱延・厚板・鋼管整備室（2000 年卒）　野　崎　尚　広

## 1. はじめに

重厚長大産業の代表格である鉄鋼業。炭素繊維など新素材の産業が成長する現在でも、新興国での鉄鋼需要拡大に伴い、まだまだ伸び続けている成長産業です。鉄鋼設備は、ほとんどが自動で運転されています。それを実現させているのが、電気･計測制御技術です。その中で、電気技術者は最先端のパワーエレクトロニクス、制御、計測、IT などの技術を駆使し、設備に命を吹き込み、設備性能をフル発揮させる仕事をしています。一度稼働した鉄鋼設備は半世紀以上もの間、24 時間稼働し続けます。このような使用環境の中でも、安定製造を続けられる理由の一つとして、日々の設備診断技術開発が挙げられます。今回はこの場をお借りして、まずは鉄という素材に対して理解を深めて頂くために環境負荷低減に貢献する鉄の魅力について説明を行い、次にその鉄づくりを支える技術の展望として設備診断技術の開発をご紹介します。

## 2. ライフサイクル全体で考える鉄の環境負荷

車や家電など製品の環境負荷を評価するとき、使用時の負荷（車の燃費など）に注目されますが、近年、「製品の材料をつくる段階」から「寿命を迎え廃棄処理される段階」に至るまでのライフサイクル全体の総合負荷を考えるLCA（Life Cycle Assessment）がグローバルスタンダードな考え方になりつつあります（図 1）。

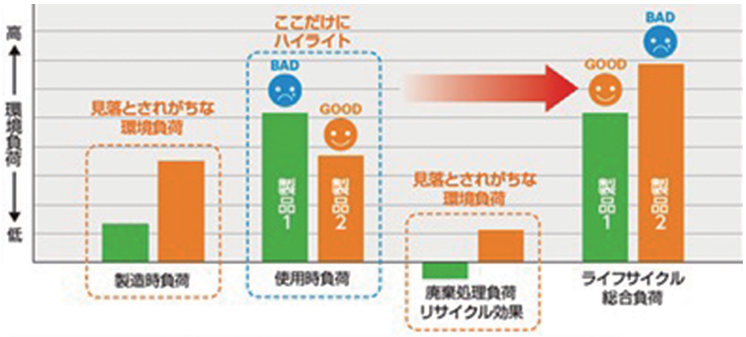



図 1　ライフサイクル全体を考慮した環境負荷の考え方
（出典：季刊　新日鉄住金 Vol.20　2017 年 12 月）

鉄は製造時の CO2 排出量が他素材よりも、はるかに少ない素材です（図 2)。とくに新日鐵住金で開発・製造している最新技術の高強度鋼板（ハイテン）は、従来材よりもはるかに強く、軽量化と安全性を両立していおり、車の使用時負荷の軽減にも貢献しています。また鉄は製品が廃棄処理された後のリサイクル率が高い素材です（リサイクル率の例：自動車用鋼材 95%、スチール缶 93.9%)。さらに、リサイクル時の材料品質の低下が無いため無限

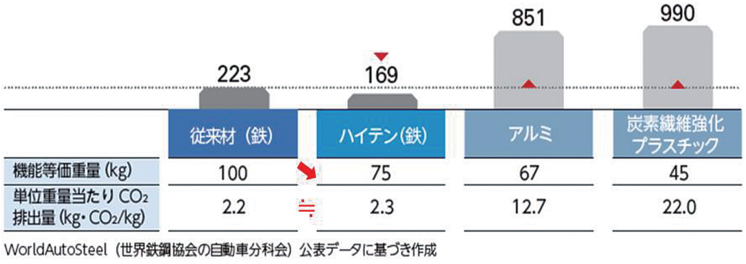



図 2　従来材（鉄）100kg と同じ強さの自動車部材を作るときの CO2 排出量
（出典：季刊　新日鉄住金 Vol.20　2017 年 12 月）

のリサイクルが可能です。以上のことから、LCA の観点で鉄はまさにエコマテリアルと言えます。

現在、実用化されてる鉄の最高強度は約 2.5 ギガパスカル。加工性や疲労強度などとのバランスを考慮していますが、鉄の理論強度の 20% 程度までしか発揮しておらず、新日鐵住金では研究所・製鉄所連携して新素材の開発を行っています。

新素材の開発・製造など、絶え間なく環境変化が起こる中で、安定した製造を持続するために必要な設備診断技術の開発について次章で述べます。

## 3. 鉄の安定製造に貢献する設備診断技術の開発

鉄を製造するのに欠かせない高炉、転炉、連続鋳造、圧延設備といった巨大な設備（図 3）を動かすために動力として電気、油圧、空圧が使用されています。また、高温下での製造プロセスに耐えうるよう冷却用に水も使用しています。それら資源を伝搬するための系統は数十 km 以上におよぶ配線・配管により構築されています。これら系統維持のため、ある点における温度・圧力・流量・振動を管理しており、その点数は設備の規模・多さに比例して、1000 点以上に及びます。

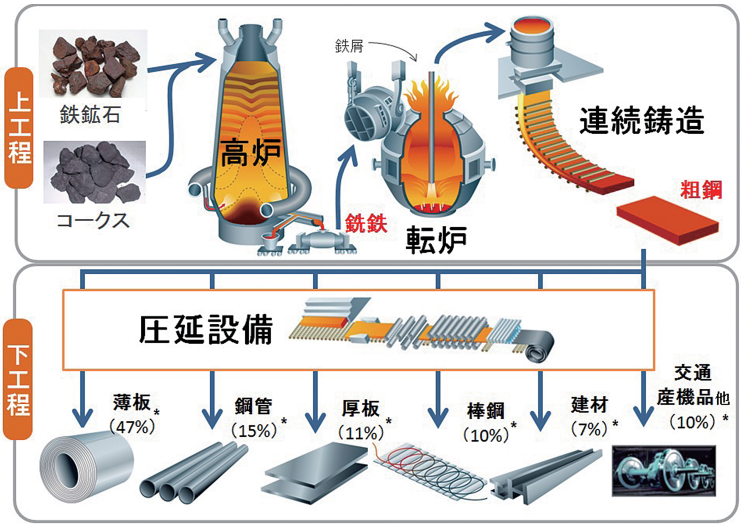



図 3　鉄づくりの製造プロセス

管理方法として、一部人の五感に頼っているところもありますが、多くはセンサーにて自動で計測・データ蓄積を行い、さらには計測値に基づく自動解析により故障の予兆と異常発生を人に知らせる仕組みを構築しています。この仕組みを設備診断システムと称しており、社内ネットワークを通じ遠隔監視できるシステムを構築しています（図 4）。

近年、基板上に微小な機械的デバイスを作り込む MEMS（Micro-Electro-Mechanical-System）技術の確立により、高精度かつ小型なセンサーが普及しています。また、無線センサーも多種多様なものが開発され、今まで、センサーのサイズや配線の制約のため、設置が難しかった小スペースや可動構造物に対しても容易にセンサーを設置できるようになり、計測できなかったものが計測可能になりつつあります。現在は、20 年間以上にわたり構築してきた設備診断システムに、無線センサーを取り込む新たな設備診断技術の開発を推進

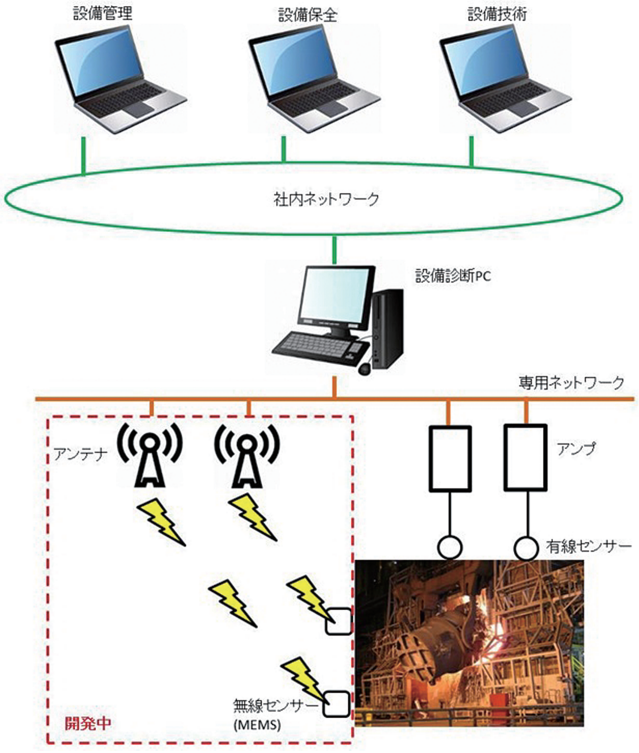



図 4　設備診断システム構成

しています。

センサーなど機器単体はメーカーの製品ですが、既存設備診断システムへの融合や、ビックデータの活用は鉄鋼業の電気技術者の役割で、今後、電気技術者の活躍するフィールドは拡大する一方です。

## 4. おわりに

本紙では製造における設備診断技術を紹介しましたが、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もとても重要であり、鉄鋼業においては研究・開発・設計・製造・生産・管理のどのフィールドにおいても電気系技術者は必要不可欠です。百聞は一見に如かずですから、ぜひ一度製鉄所を見て実感していただけたら幸いです。

（新日鐵住金株式会社 http://www.nssmc.com/）

出典：「季刊　新日鉄住金（しんにってつすみきん）　Vol.04（2013 年 11 月）」新日鐵住金
「季刊　新日鉄住金（しんにってつすみきん）　Vol.20（2017 年 12 月）」新日鐵住金

## 編集後記

cue は 40 号を迎えました。電気工学教室設立（1897 年）の 100 周年を記念して創刊されたのが 1998 年ですから 20 年になります。創刊の年に情報学研究科、これに 2 年先立ちエネルギー科学研究科がそれぞれ発足し、電気関係教室は大きな変革期を迎えていました。さらに、2003 年には工学研究科電気関連専攻の桂移転があり、電気系のアイデンティティを確認する意味でも、本誌の果たしている役割は少なくないと感じています。そしてこの 20 年、産業界では、電力・電機・家電の名だたる企業がマスコミを賑わし、大学も法人化を経て激動の時代にいます。奇しくも吉川先生の「巻頭言」、関西電力の花田様の「産業界の動向」、そして下田先生の「高校生のページ」は、2011 年の東日本大震災後のエネルギーインフラのパラダイムシフトに関わる内容となりました。内閣府は、エネルギー問題をはじめとする課題や困難を克服するため、科学技術政策の目玉として Society 5.0 を謳い、IoT（Internet of Things）で全ての人とモノがつながり様々な知識や情報が共有され、人工知能（AI）により今までにない新たな価値を生み出すことで解決しようとしています。この中で電気関連技術の果たす役割は非常に大きいものであることは疑いなく、研究者・技術者を社会に送り出す大学としては、学生諸氏に大きな期待をしながら、また責任も感ずるこの頃です。

最後になりますが、お忙しいところ本号にご寄稿いただいた皆様方をはじめ、平素より本誌とともに電気関係教室の活動をご支援いただいております多くの方々に心より感謝申し上げます。

［Y. S. 記］

## 協力支援企業

新日鐵住金株式会社
鉄道情報システム株式会社
株式会社　村田製作所
ローム株式会社
（アイウエオ順）

発　行　日：平成30年9月

編　　集：電気系教室 cue 編集委員会
白井　康之、藤田　静雄、山本　　衛、
後藤　康仁、田中　俊二、村田　英一、
田中　良典、荒木　光彦（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発　　行：京都大学電気関係教室

援　　助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社　田中プリント