ISSN　2433- 605X

cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.47　　　MARCH 2022

［第47号］

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 47 号　目次

巻頭言

「振り返って思うこと、様々な生き方」

昭和 54 年卒　KDDI 株式会社　代表取締役会長　田　中　孝　司

2018 年 4 月に会長になってから 4 年が経とうとしている。当時、社長退任のあいさつ回りをすると、会う人会う人に、「お疲れ様、これから身体も快調（会長）になりますね。」と言われたものだ。その時は面白い "おやじギャグ" をおっしゃると思ったものだが、最近はまさにその通りだと実感している。自由になる時間も徐々に増えてきた。また、それに比例して会社人生を振り返っての感想を求められることも多くなってきた。社長時代は忙しすぎて過ぎたことを思い出す余裕はなかったが、今は過去を振り返る時間も出来てきた。そんな折、研究室の先輩の佐藤亨先生から、「CUE」に何か書いてくれと依頼された。就職とともに研究を諦めてしまった自分には、技術誌への投稿は荷が重いと思ったが、「内容に何の制約もない。」という一言に励まされ、お引き受けした次第である。

私は、1981 年院卒であるが、その当時の院卒は KDD 研究所（現 KDDI 総合研究所）への配属が普通だったが、私は事業の方への配属を希望した。入社時の役員面接で、「君はなぜ研究所配属を希望しないのか？」との質問に、「自分は研究には向いてない、海外に行って小さくても新たな事業を立ち上げてみたい。」と生意気なことを申し上げた記憶がある。残念ながら、その後の会社人生では海外勤務の希望を叶えることができなかったが、入社後 3 年ほどの現場経験をした後に海外留学に行くチャンスを頂いた。運よく希望していたスタンフォード大学院への入学が認められ、京都での 1 回目の学生生活に続き、2 回目の "貴重な "学生生活を海外で過ごすことができた。

「これまでの会社人生で最も楽しかった時期は？」という質問をよく受ける。いつも「海外留学の 1 年間」と答えることにしている。確かに、夏休みや冬休みを利用してアメリカ中を旅行したことも思い出深いが、パソコンが個人に急速に浸透しつつある "あの時期"、これからインターネットの利用が立ち上がる "あの時期" に、シリコンバレーの中心に位置するスタンフォード大学で 1 年を過ごせたことは何ものにも代えがたい刺激的な経験だった。振り返ると、Apple Computer 社（現 Apple 社）のマッキントッシュが発売された年であったし、インターネットが日本で初めて KDD 研究所と接続された年でもあった。購入したマッキントッシュから、ダイアルアップで大学のコンピュータのメールシステムに接続し、"無料" で KDD 研究所の同期に電子メールが送れたことに（まだ、フリーミアムモデルが一般的でない時代なので）本当に驚いた。また、大学での授業は、周辺のハイテク企業とネットワークを介して双方向ビデオで繋がっており、企業にいる受講者からオンラインで質問が来る。コロナ禍で日本でも当たり前になった" オンライン授業 "そのものであるが、オンライン授業という言葉の意味も分からない当時の自分にとっては、ネットワークの力で距離や時間、教室という空間の制限をも乗り越えることができることに驚き、無邪気に感動したことを思い出す。

当時を振り返るに、大学の内外で行き交う情報は、最新の技術やビジネスアイデアが犇めいていて、まさに百家争鳴状況。"世界が大きく変わりつつある "ことを肌身に感じ、今がチャンスだと誘いがあったベンチャーに身を投じることを考えたが、安全志向が勝り日本に帰ってきた。あの時、あの場所で未

来予想として議論されていたことは、その後インターネットの進歩、さらにはモバイルインターネットの進歩とともに、数十年に渡って世界で実際起こったことだ。転職はしなかったが、ビジネスというものに興味を持って未来を先に感じることができたことは、その25年後にKDDIの社長になってからも、ガイダンスとして本当に有効な経験であった。

「これまでの会社人生で最も後悔したことは？」という質問もよく受ける。あの時、ベンチャービジネスに身を投じなかったことである。学生の起業支援や産学連携が当たり前のスタンフォード大学では、当時から大学（院）を卒業すると理系であっても起業する人が少なからずいた。大学の近辺のサンドヒルというところにベンチャー投資家がおり、事業計画をうまく書けなくてもビジネスアイデアと熱意さえあれば、最低でも100万円程度は貸してくれるとの噂があった。当然、“強い思い” があれば、投資やハンズオンでの支援も得られる。友人から冷やかし半分で訪問したらそのような説明を受けたとの話も聞いた。あの時、自分にもう少し勇気があったらとつくづく後悔する。転職しても100％失敗していたと思うが、また違った人生を歩めていたのかもしれない。自分がKDD（現KDDI）に就職した当時の日本は、大学を卒業してすぐに会社を興す人はいなかったし、手取り足取り教えてくれる環境もなかった。昨今、京都大学でも大学発のベンチャーが生まれ、大学自身もベンチャーキャピタルを運営するとのニュースを聞くに、うらやましい限りである。ここで頭を過るのは、“失われた30年” という言葉である。1990年代初めのバブル崩壊以降、日本の経済成長が停滞していることを表すものである。この構造的原因は専門家がいろいろな観点から分析をしているが、個人的には、1つの会社で一生を過ごす、入社時にその後のキャリアパスが見え、自分の生き方を早々に決めてしまう、硬直した雇用に関わる制度や慣習の影響が大きいと思う。

大学は多様で最先端の人財が集まっているところである。そういう意味でベンチャーが最も生まれやすい環境である。私の就職した当時の日本では、基礎研究は大学、実用研究とビジネス化は企業という分担があり、研究の成果が事業化されることを大学で経験することはできなかったが、今やベンチャー支援や産学提携等、大学がどんどん改革を進めてきているのは心強い。一方、企業の方は社内だけのイノベーションが限界との認識のもと、ベンチャー投資や、大学や企業とのオープンコラボレーションにより外部の知見を取り込み、イノベーションを興す努力をしている。KDDIにおいても然りである。まさに当時のスタンフォード大学等の米国の大学が進めていたことが今日本で起こっているように思える。

自分ができなかったことを勧めるのは心苦しいが、京都大学で学ぶ学生には、是非とも若い時に起業やベンチャービジネスに挑戦してほしい。私たちの時代はなかなか転職するのが難しく、最初に就職する会社の選択は一生を決める大きな判断であり、どうしても安全な選択をする傾向にあった。今の時代は転職するのが当たり前の時代になりつつある。KDDIにおいても、入社する人の半数近くが転職組に替わってきている。また、退職して起業する人も出てきている。これは日本にとって非常に望ましい傾向だし、大会社に入って、安全な道を歩むより、30才未満の若いうちに起業し、うまくいかなければ、また大学に入って勉強し（リカレント教育）、再チャレンジすることをやった方がいいと心から思う。

最後に、自分の大学と大学院での6年間は、勉学というよりも、それ以外のこと、クラブ活動や麻雀に呆けていて、恥ずかしながらあまり勉強した記憶がない。一方、就職してからは、自分のフォーカスエリアも定まり、また、ビジネスの仕組みや製品の構造等について常に疑問を抱き、興味・関心も尽きることがなくなっており、勉強をすることがちっとも苦にならず喜びに変化したことである。昨今世の中で、リカレント教育の重要性が叫ばれているが、大学を卒業し働きまた大学に入って勉強するということが一般化することも、日本の失われた30年を乗り越えるベストプラクティスだと思っている。

大学の研究・動向

先進ヘリカル磁場閉じ込め装置 Heliotron J における核融合プラズマ実験

エネルギー理工学研究所
プラズマエネルギー研究分野
長 﨑 百 伸・小 林 進 二

1. はじめに

磁場閉じ込めに基づく核融合研究は、国際熱核融合実験炉 ITER が 2025 年にファーストプラマ生成、2035 年に重水素・3 重水素を用いた燃焼プラズマ実験を開始する予定であり、新たなフェーズへと移行しつつある。ITER はトカマクと呼ばれる磁場閉じ込め方式を採用しており、外部コイルとプラズマ内部に流れる電流（プラズマ電流）でプラズマを閉じ込めるための磁場配位を形成する。磁場閉じ込め核融合の方式には、トカマク以外にヘリカル系と呼ばれる閉じ込め方式がある。ヘリカル系は磁場配位を外部コイルによって形成しており、トカマクのようにプラズマ電流を必要としないため定常運転が原理的に可能な方式であり、破壊不安定性（ディスラプション）と呼ばれる放電が止まる不安定性が発生しない長所を有している。ヘリカル方式には、ヘリオトロン（Heliotron）とステラレータ（Stellarator）という概念があり、ヘリオトロンはギリシャ語のヘリオス（太陽）、ステラレータは英語のステラ（星の）にちなんで名付けられた。ヘリカル系閉じ込め磁場構造は外部コイル系によってのみ磁場を形成するので、プラズマ電流を必要とするトカマクに比べて、磁場配位設計の自由度が極めて高いことが特徴である。先進ヘリカル磁場配位として提案されているものとしては、準ヘリカル対称、準ポロイダル対称、準トロイダル対称、準等磁場配位がある。ここで、すべての配位概念に「準」が付いているのは、ヘリカル系トーラスでは数学的に厳密な対称性が存在しないためである。エネルギー理工学研究所では、これまでのヘリカル系システムをより発展させ、準等磁場配位という概念を追求するために、Heliotron J という装置を発案・建設し、1999 年より宇治キャンパスにて実験を行なっている。加えて、Heliotron J の磁場配位は高ベータ化に伴った粒子閉じ込めの改善が期待されており、世界の先進ヘリカル磁場配位研究のコミュニティーにおいて準等磁場配位の将来性を評価する重要な課題を担っている。

プラズマ実験開始以来、加熱機器及び計測機器の整備を進め、これまでに、良好なエネルギー閉じ込め（ISS95 則の 1.5 − 2 倍）、H-mode の観測、トカマクのようなグリーンワルド限界のない高密度プラズマの生成・維持（電子密度 $n_e \sim 1 \times 10^{20}\ m^{-3}$）、電子熱輸送障壁（中心電子温度 T_e（0）～ 3 keV）、高エネルギー粒子の生成・閉じ込め、高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の抑制など、ヘリカル軸ヘリオトロン配位の持つ核融合プラズマ閉じ込め装置として性能が実証されてきた。また、ブートストラップ電流、電子サイクロトロン（EC）電流、トロイダル回転、高エネルギー粒子の閉じ込めなどの物理量の磁場配位依存性が新古典理論の予測と一致することを明らかにした。異常輸送によって支配されている巨視的エネルギー閉じ込め、長距離相関、周辺プラズマなども磁場配位に依存することを見出し、乱流輸送と関連する結果が得られている。本記事では、Heliotron J 装置について概説するとともに、最近のプラズマ実験の成果の幾つかについて紹介する。Heliotron J 実験プロジェクトの詳細については文献 [1] を参照いただきたい。

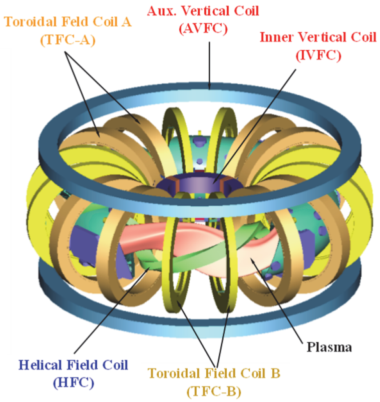


図 1：Heliotron J 概要図

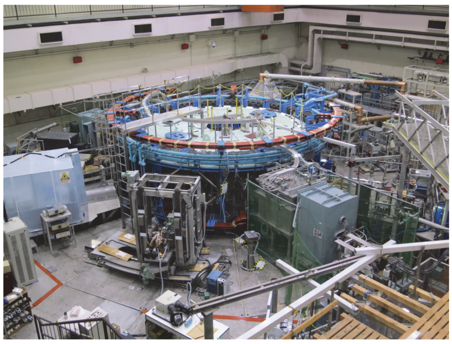


図 2：Heliotron J 装置写真

2. Heliotron J 装置

Heliotron J 装置は、京都大学で創案された連続巻きヘリカルコイルを用いたユニークな磁場配位を有する中型の先進ヘリカル系プラズマ実験装置（主半径 R = 1.2 m, 平均小半径 a = 0.1-0.2 m, 中心磁場 B < 1.5 T）である。図 1 に Heliotron J の概要図、図 2 に Heliotron J 及び周辺機器の写真を示す。磁場コイルシステムは、L=1/M=4（L は極数、M はピッチ数）の連続巻きヘリカルコイル、2 種類のトロイダルコイル、及び、3 組のポロイダル・コイルから構成される。2 種類のトロイダルコイルを用いて四角形の四隅の磁場強度を直線部より強くすることにより、直線部に形成される局所準等磁場領域にピッチ角の大きな粒子を閉じ込めることを狙っている。それぞれのコイルに独立制御可能な電源を用意することで，広範囲な磁場配位制御が可能である。トーラス磁場配位の主フーリエ成分であるトロイディシティ（toroidicity）、ヘリシティ（helicity）に次ぐ新たな配位制御成分としてトロイダル磁場リップル成分であるバンピネス（bumpiness）を導入し、同時に、MHD 安定性の確保と高ベータ高閉じ込めの実現へ向け、従来のヘリオトロン磁場配位が高磁気シア配位であったことに対し、低磁気シアであるものの閉じ込め領域全域にわたって磁気井戸の形成を可能としている。

3. 最近の研究成果

3.1 閉じ込め・輸送の磁場配位依存性

これまでの実験において、磁場スペクトルにおけるバンピネス成分（トロイダルミラー比）の制御によって新古典輸送・MHD・高速イオン閉じ込めに対する影響が明らかになっている。最近では、分布計測の充実により、プラズマの分布構造形成への磁場制御の影響を調べる実験が進んでいる。また、従来の Low、Medium（標準配位；STD）、High bumpiness の基本 3 配位から、より高いバンピネス領域（Very high bumpiness, Ultra high bumpiness）へと磁場配位を拡張した。蓄積エネルギーとしては、これまでの知見と同様に、標準配位で最も高いことが確認された [2]。また、図 3 に示すように、磁場配位によって温度・密度分布の形状が異なることが観測された。電子密度分布

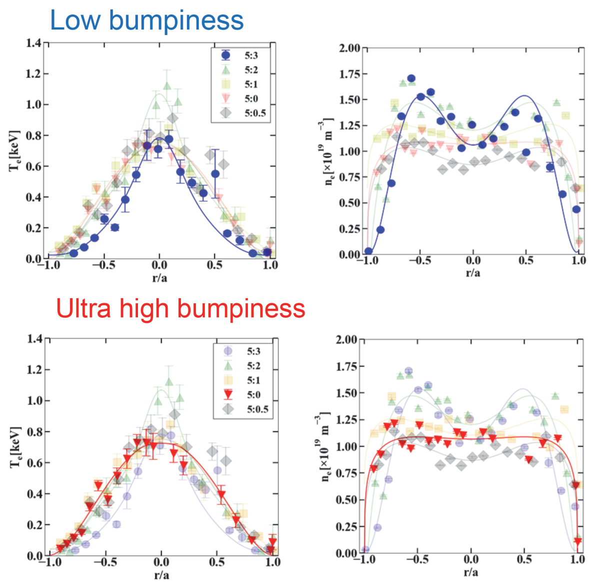


図 3：バンピネスの異なる磁場における電子温度、電子密度分布の違い。

の凹みを表すホローネスをバンピネスに対し整理すると、バンピネスが上がると電子密度はより平坦化に、バンピネスが下がるとより凹んだ分布になる傾向を有することが観測された。電子密度分布形状のホロー構造形成の原因として、捕捉粒子の輸送の影響が指摘されているため、TRAVISコードにより周回/捕捉粒子生成の割合を評価すると、この実験条件では、より高いbumpiness配位では捕捉粒子の生成の割合がより高くなっていることが確認されている。より高いバンピネスでは捕捉粒子生成効の割合が増大しているものの、バンピネスの効果を通じて捕捉粒子輸送が低減され、その結果として分布形状がフラットとなっていることを示唆している可能性がある。今後、新古典解析や乱流シミュレーション解析などを進めてゆく予定である。

3.2 ECH/ECCDを用いた高速イオン励起MHD不安定性の抑制

核燃焼プラズマでは、自己点火プラズマ保持の観点から重水素-三重水素核融合反応により生成されたアルファ粒子の良好な閉じ込めが必要とされている。この3.52MeVの初速度を有するアルファ粒子は、電子との衝突による減速過程でアルヴェン速度と同程度の速度となり、シアアルヴェン波などの電磁流体力学的（MHD）不安定性と共鳴的相互作用を起こす。そして、エネルギーを相互に授受することで、熱化前にアルファ粒子の異常輸送が増大したり、損失してしまうことで、自己点火プラズマ保持が困難になったり、高速イオン損失によりプラズマ対向機器が損傷してしまう恐れがある。そのため、高エネルギーイオンとMHD不安定性との共鳴的相互作用の物理機構解明、ならびに高エネルギーイオンの異常輸送・損失の低減が求められている。

無電流でのHeliotron Jの磁場配位では、回転変換が径方向に殆ど変化しないため、よく知られたトロイダルアルヴェン固有モードは存在しない。しかしながら、シアアルヴェン連続スペクトルの僅か上または下の周波数を有し連続減衰を受けにくい大域的アルヴェン固有モード（Global Alfvén Eigenmode, GAE）が存在し、高エネルギーイオンによって不安定化される[3]。また、他の磁場配位と同様に、高速イオン圧力が非常に高い際には、連続減衰に打ち勝って連続スペクトルが強制的に不安定化する高速粒子不安定性（Energetic Particle Mode, EPM）が不安定化される[4]。Heliotron Jでは、電子サイクロトロン加熱/電子サイクロトロン電流駆動（ECH/ECCD）を用いて高速イオン励起MHD不安定性の安定化手法の開発を行っている。中性粒子ビーム入射（NBI）プラズマにECCDによるECプラズマ電流を印加した結果、EPMやGAEといった高速イオン励起MHD不安定性が安定化される結果が得られた[5][6]。Heliotron Jでは無電流において低磁気シア配位であることから、ECCDにより正負、両方向の磁気シアを生成することが可能であるが、実験では磁気シアの符号に関わらず高エネルギー粒子（EP）励起MHD不安定性が安定化され傾向が得られた。シアアルヴェンスペクトルとの比較から、磁気シアに依存する連続減衰が大きくなり、高速イオン励起MHD不安定性が安定化できることが示された。こうしたECCDの高エネルギー粒子励起MHD不安定性の安定化効果はLHD, TJ-IIにおいても追試され、その効果が観測されており、ヘリカル系に共通する効果であるといえる。

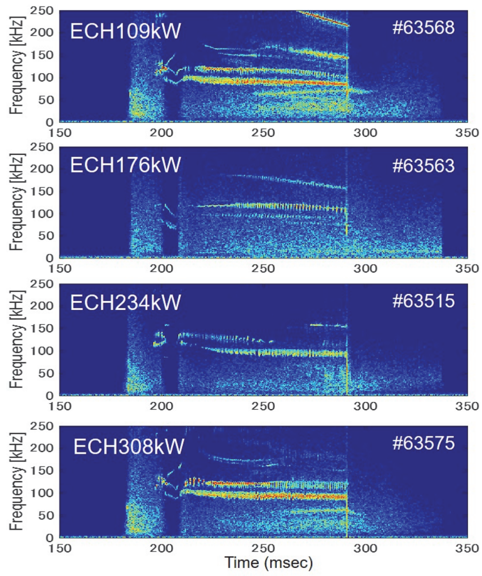


図4：EP励起MHD不安定性のECHに対する応答

一方、ECHをNBIプラズマに印加した場合、観測されているモードの揺動強度が変化する結果が得られた

[2]。図4はECHパワーを変化させたときのEP励起MHD不安定性の磁場スペクトルの様子を示している。観測されたGAEやEPMなどのEP励起MHD不安定性がECHパワーを大きくすることで揺動強度が減少しているのがわかる。一般的にECH加熱による電子温度上昇で高速イオン圧力は増加するため、揺動強度は増加すると思われるが、それとは逆に、安定化の傾向が見られたことは興味深く、ECHに対する応答をもとに、EP励起MHD不安定性の励起・減衰の物理機構を明らかにできるものと考えている。

3.3 NBIプラズマにおける閉じ込め改善（H-mode）の観測

Heliotron Jは冒頭でも述べたとおり、ベータ値の上昇に伴い捕捉粒子閉じ込めの改善が期待される。高ベータ化のためには高密度プラズマ生成のシナリオ構築が必要である。本節では、NBI加熱を利用した高密度プラズマ生成を目指した粒子補給法（高強度ガスパフ法:HIGP）を用いた結果について述べる。

HIGP法では通常の放電で粒子補給として用いるピエゾバルブを利用し、10-20ms程度の短い時間に通常の数倍程度のガス供給量を行い、その後ガス供給を遮断する[7]。この利点として、ピエゾバルブはトーラス4カ所に設置されており、トーラス方向に均等なガス供給が期待されること、ガス供給後の水素リサイクリング低減により放射損失や荷電交換損失を低減できる事が挙げられる。適切なHIGPによるガス供給を行うと、HIGP後に蓄積エネルギーの増加が観測された（図5)。この時、粒子補給を停止しているにもかかわらず、プラズマ密度の増加が見られた。同時にH$_\alpha$線強度の急峻な低下が観測されており、閉じ込め改善を示唆するH-mode遷移と考えられる。

HIGP導入前とH-mode遷移後を比較すると、周辺部に急峻な密度勾配が観測され、周辺部での電子温度の回復も観測された。その結果、r/a = 0.8での電子圧力はHIGP前後で5倍増加した。このような高密度放電では、周辺部において急峻な径電場シアが形成されており（図6参照)、これが輸送の改善・H-mode遷移につながったと想定される[8]。

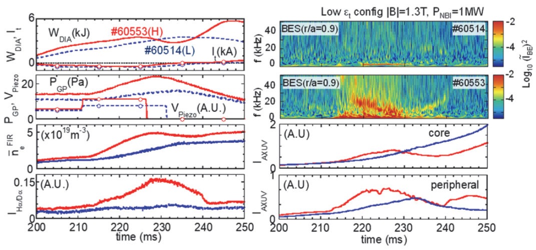


図5：HIGPを用いた高密度プラズマ放電波形。適切なガス供給を行った放電（#60553）ではH-mode遷移が観測された。

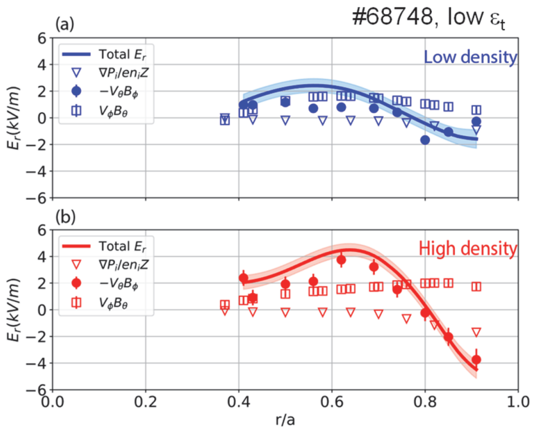


図6：HIGP放電における径電場の空間分布。高密度時に周辺部で径電場のシアが形成されている。

3.4 非共鳴マイクロ波による予備電離手法の開発と運転領域の拡大

ベータ値は磁気圧力に対するプラズマ圧力の比であるため、磁気圧力を下げる、すなわち低い磁場強度での運転が可能であれば高ベータ化に有利である。一方で、Heliotron Jの実験では、これまで70GHz第2高調波ECH加熱で磁場強度が1.25Tに制限されていたため、磁場強度に依らない新しい着火手法が求められていた。本節では2.45GHzの非共鳴マイクロ波を利用した予備電離を活用し、NBIプラズマ放電につなげる運転シナリオについて述べる[9][10][11]。

図7に非共鳴マイクロ波を用いた予備電離生成と、続くNBI放電波形を示す。マイクロ波の入射とともに70GHz帯のラジオメータ信号と電子密度が10^{18}m^{-3}オーダーの種プラズマが観測された。ラジオ

メータ信号は光学的厚さからシンクロトロン放射と想定され、そのスペクトルから 2MeV を超える高速電子生成が予想される。一方で、炭素イオン・酸素イオンの発光強度信号からバルクの電子の温度は 10eV 程度であると推測され、温度が 2 成分になっている。高速電子の生成メカニズムとしてマイクロ波電界による統計的な加速が予想され、これは磁気圏・宇宙プラズマでも観測されるユニバーサルな現象である。NBI 入射とともに密度の増加・電子加熱が促進し、軽元素不純物の輻射障壁を超えたプラズマ生成が確認された。その後、強いガス供給を与えると、$10^{19}m^{-3}$ オーダーの高密度プラズマ生成に成功している。この手法を利用することで 0.6T から 1.4T までの放電が可能となっており、高ベータ化および磁場強度に対する輸送の依存性研究への発展が期待される。

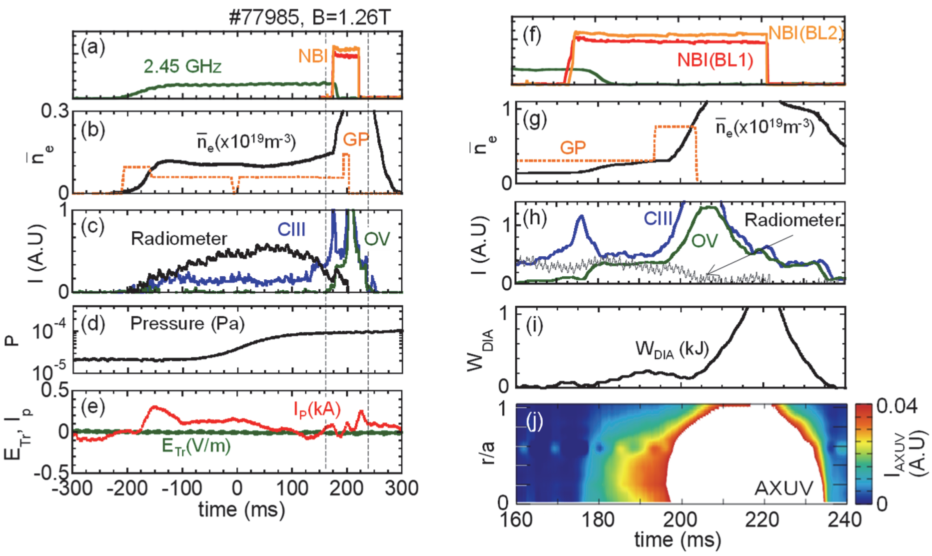


図 7：非共鳴マイクロ波を用いた予備電離と NBI プラズマ着火の放電波形。

4. まとめ

本記事では、核融合実験装置 Heliotron J の概要、及び、最近の幾つかの成果について報告した。Heliotron J 装置は準等磁場配位概念を取り入れた先進磁場配位であるヘリカル軸ヘリオトロン配位を有しており、磁場配位最適化のために各磁場コイルに独立した電源を持たせ、磁場分布制御の大きな自由度を拡大することで、ヘリカル磁場最適化における新しい領域の拡大とフレキシブルな実験を可能とした。こうした設計思想がプラズマ実験において多くの成果を生み出すことにつながっている。

本研究を実行するにあたっては、核融合科学研究所との双方向型共同研究といった国内共同研究だけでなく、米国、ドイツ、スペインなどの大学･研究機関との国際共同研究も大きな役割を果たしている。また、一昨年度より JSPS の研究拠点形成事業 [12] を展開しており、国際共同研究の拠点化を目指している。実験・理論解析を通じて、さらなる磁場最適化、そして、トロイダルプラズマ物理のより総合的な理解を深め、優れた核融合炉への展望を開きたいと考えている。特に、局所プラズマ計測のさらなる高度化、プラズマ分布制御技術の高度化を図り、磁場分布制御性を活用したプラズマ輸送改善とプラズマ構造形成制御の研究を推進してゆく予定である。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、Heliotron J グループ、多くの国内外の共同研究者の方々のご協力に深く感謝いたします。Heliotron J 実験を遂行するにあたり、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合

機構研究センター共同研究、核融合科学研究所双方向型共同研究（特に NIFS10KUHL030）、JSPS「研究拠点形成事業（A. 先端拠点形成型）」"PLADyS"、「自然科学研究における機関間連携ネットワークによる拠点形成事業」、科学研究費補助金、Coordinated Working Group Meeting（CWGM）、他の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

[1]. 長﨑百伸，他、プロジェクトレビュー「Heliotron J 実験」、J. Plasma Fusion Res. 96（2020）475
[2]. K. Nagasaki, et al., 28th IAEA Fusion Energy Conference, 10–15 May 2021, Virtual Event, EX/P6-34
[3]. P. Adulsiriswad, et al., Nucl. Fusion **60**（2020）096005
[4]. P. Adulsiriswad, et al., Nucl. Fusion **61**（2021）116065
[5]. S. Yamamoto, et al., Nucl. Fusion **57**（2017）126065
[6]. S. Yamamoto, et al., Nucl. Fusion **60**（2020）066018
[7]. S. Kobayashi, et al., 26th IAEA Fusion Energy Conference, 17–22 October 2016, Kyoto Japan EX/P8-17
[8]. X. Lu, et al., Plasma Fus. Res, **13**（2018）1202077
[9]. S. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion, **51**（2011）62002
[10]. S. Kobayashi, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **62**（2020）065009
[11]. S. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion, **61**（2021）116009
[12]. PLADyS Homepage, http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/

産業界の技術動向

窒化ガリウムは世界を救う！？
― 21 世紀のスーパーヒーロー材料の現状と今後 ―

住友化学株式会社
小　林　雅　彦

1. はじめに

2021 年 10 月 22 日に開催された電気系教室懇話会では窒化ガリウム（以下 GaN と記します）を 21 世紀のスーパーヒーローであるとご紹介しました。その根拠として①優れた能力（材料物性）②万能選手（光・高周波・パワーの幅広い用途で活躍）③ロバスト（結晶欠陥に鈍感）の 3 点を挙げました。本稿では、GaN が現在どのように活躍しているか、今後いかに社会に貢献していくか、そしてそれを実現する上で鍵となる高品質・低コストの GaN 基板を大量に供給していくための当社の取組みについてご紹介します。

2. GaN デバイスの用途

表 1 に GaN デバイスの主な用途とウェハ構造を示します。それぞれの用途の詳細については後述しますが、まず着目して頂きたいのはそのウェハ構造です。GaN は結晶を作るのが非常に難しく、単結晶基板は未だ小径で高コストであるために、代替となる結晶基板（サファイア、SiC、Si など）の上に GaN のエピタキシャル層を形成してデバイスを作っています。このような構造は半導体デバイスとしては異例と言えます。他の主な半導体デバイス、例えば Si や GaAs、SiC 等のデバイスはいずれも、同材料の結晶基板上にデバイスを形成します。異種の結晶基板上に結晶を成長させた場合、格子不整合のために多数の結晶欠陥を生じ、これによりデバイスの性能が発揮できないからです。これに対して GaN は多少の欠陥があっても十分なデバイス性能が発揮できるため、表 1 に示すように様々な代替基板の上

表 1　GaN デバイスの用途とウェハ構造

分野	ウェハ構造	用途	競合	優位性
LED	サファイア ← GaN エピ	LED照明 バックライト	白熱灯 蛍光灯	高効率 長寿命
LD	GaN	Blu-Ray プロジェクタ ヘッドランプ	水銀ランプ	高輝度 高効率 長寿命
高周波	SiC	携帯基地局 レーダ 衛星通信	Si（LDMOS） 真空管	高効率 高周波動作
パワー	Si	モバイル端末用 チャージャー	Si SiC	高周波動作 低損失

にデバイスが形成されています。但しLD（半導体レーザ）だけは、結晶欠陥が多すぎると性能が出せないために、GaN基板が使われています。

(1) LED（発光ダイオード）

現在GaNの最も大きな用途は照明用LEDです。GaNによる青色LEDとこれを用いた白色LED照明は、世界的に広く普及していることは皆さんご承知の通りです。図1は日本照明工業会のLighting Vision 2030からの引用です。現在国内のLED照明の普及率は5割程度に達しており、フローベース（年間出荷）では9割程度がLED化しているそうです。このまま照明のLED化が進めば、2030年頃にはほぼ100%近くがLED照明となり、これにより照明用途の消費電力は50～60%削減されることが期待されます。これは日本全体の電力消費の1割程度に相当するものであり、昨今話題となっているカーボンニュートラルの実現にも大きく貢献すると期待されます。

LEDは低消費電力（高効率）である上に、寿命も長いので、製品のライフサイクル全体を考えた場合にもCO2削減効果が高いと考えられます。更に従来の蛍光灯のように水銀等の有害物質を使用しないので、環境にも優しい光源と言えます。一般照明用だけでなく、例えば液晶テレビのバックライトも現在ではLEDが当たり前になりました。また、車載用途においても、国内で販売される新車の約7割はLEDヘッドランプが搭載されているとのことです。このように、照明用途においては既に広くLEDが使われており、これからも長く社会の役に立ち続けていくと思われます。

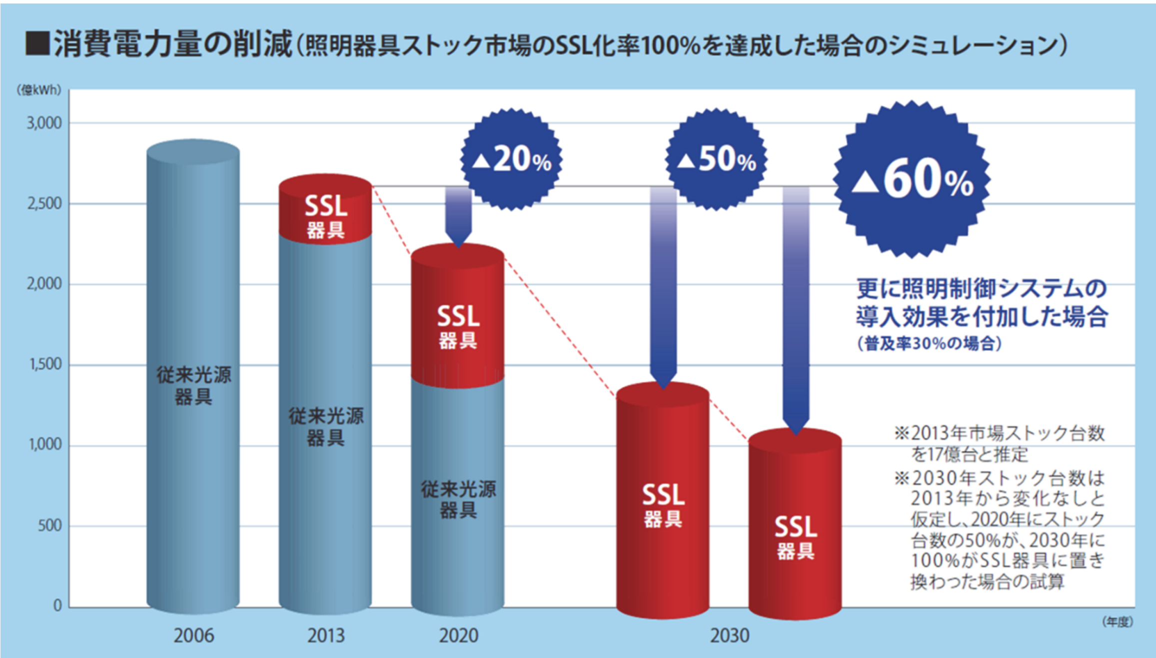


図1　照明のLED化（SSL化）による消費電力の削減効果（日本国内）

(2) LD（半導体レーザ）

GaNを用いた青色LDは当初Blu-rayの光ピックアップ用に開発されました。CD、DVDを後継する大容量光記録メディアとしてゲーム機、PC、家庭用録画装置等に広く利用されています。但し、インターネットの普及により、映像の記録・再生自体が光メディアからデータセンタとストリーミングに置き換わっていますので、今後更にこの用途が拡大することはなさそうです。

現在の青色LDの最も大きな用途はプロジェクタ用光源です。従来使われてきた水銀ランプを代替す

る新しい光源として急速に普及しつつあります。特に高輝度光源を必要とするハイエンドのプロジェクタにおいては、LD 光源を用いた製品が既に主流になっています。LD を用いることにより従来以上の高輝度のハイエンド機が実現できるほかに、長寿命であるためにランプの交換が不要であること、また低消費電力である等のメリットがあります。また、装置の電源を入れてすぐに起動できますし、使用後は光源オフ後のファン冷却が不要であるなど、使い勝手にも優れています。

現在出荷されているプロジェクタ光源の一割程度が既に LD 光源に置き換わっており、今後普及率が高まり 2030 年頃には LD 化率は 50% を超えるとの市場予想もあります。なお、水銀に関する水俣条約により、水銀の使用は国際的にも厳しく規制されてきていますが、プロジェクタ用の高圧水銀ランプについては代替手段がないということで例外的に使用が認められてきました。但し、今後 LD 光源を用いたプロジェクタが普及していけば、代替手段がないという言い訳は通用しなくなりますので、どこかの時点で水銀ランプの使用が全廃され全て LD 光源化されるようなシナリオも十分考えられます。

また、業務用プロジェクタの他に最近では家庭用のテレビとしても LD を用いたプロジェクション型の製品が普及し始めています。フラットパネルテレビに比べると、100 インチを超える大画面が安価かつ手軽に入手でき、軽量で、超短焦点の光学系によりスペースを取らず設置の自由度が高いのが人気のようです。

プロジェクタ以外の照明用途としては、例えば LD を使用した自動車のヘッドライトも商用化されています。LED に比べて更に高輝度であることを活かし、ハイビーム時の照射距離を LED の 2 倍以上に伸ばし、夜間走行時の視認性・安全性を向上しています。また、照明以外に今後大きく拡大が期待できる用途としては、レーザ加工分野があります。金属加工用のレーザとしては従来近赤外波長帯が使われてきましたが、金属種によっては強く反射してしまうために効率が低いという問題があります。例えば銅の場合は、青色光は近赤外光に比べ 6 倍程度吸収率が高く、高効率のレーザ加工が可能になります。

(3) 高周波電力増幅器

化合物半導体のヘテロ接合を用いた HEMT (High Electron Mobility Transistor) は、材料の高い電子移動度を十分活かした高周波増幅用デバイスとして広く使われています。GaN を用いた HEMT は、高い周波数での動作に加え、材料の持つ高い絶縁破壊電界特性を活かして、高出力の高周波増幅デバイスが実現できます。このような高出力の高周波増幅デバイスの用途は、無線通信やレーダがあります。

無線通信における GaN デバイスの最も大きな用途は携帯基地局用です。携帯電話システムは世代交代が進み現在では第五世代移動通信システムいわゆる 5G が普及しつつあります。図 2 に示すように 5G においては、従来システムに対して超高速・低遅延・多数同時接続と言った性能向上を実現するために、新しい周波数帯の利用、セルエリアの縮小、高度なアンテナ制御等の工夫をしています。新

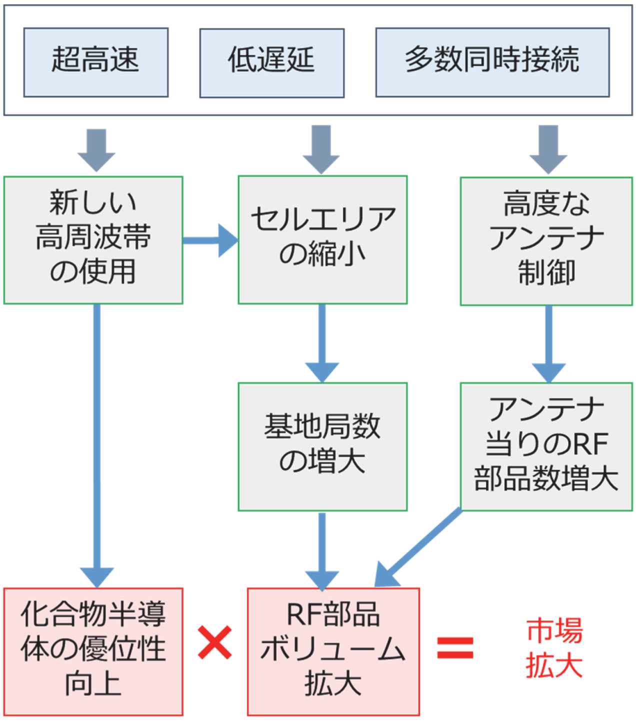


図２　5G 携帯基地局における GaN デバイスへの期待

しい周波数は、従来の周波数より高い周波数帯、即ちsub6と呼ばれる6GHz以下の高い周波数帯（日本では3.7GHzと4.5GHz帯）並びに更に高いミリ波周波数帯（日本では28GHz帯）が割り当てられています。

周波数が高くなるほど、従来のSiデバイスに対するHEMTデバイスの優位性、特に電力変換効率における優位性が顕在化します。また、高い周波数を用いるほど電波の届くエリアが小さくなるとともに、通信のスループットを上げるためにもセルエリアを縮小しますので、必要な基地局の数が増大します。更に、基地局ではMassive MIMOと呼ばれる新たな構成のアンテナを使用してスループットを高めますが、これはアンテナ内に多数のアンテナエレメント（32～128素子）を配置しているものであり、それぞれのアンテナエレメントには高周波増幅器を含むRF部品が接続されるため、必要となるデバイスの総数が多くなります。

4G以前の携帯基地局においてもGaN-HEMTが採用されていました。従来使われていたSiデバイス（LDMOS）に比較して、電力変換効率が高いために消費電力を小さく抑えることが可能であり、従って放熱のために必要なヒートシンクを小さくでき、基地局、特にRRH（Remote Radio Head）と呼ばれる無線送受信部や、これをアンテナと一体化したアクティブアンテナを小型軽量化して設置を容易にすることが可能になりました。今後本格的に5Gシステムが普及していく際には、前述したような背景により、これまで以上にGaNを用いたHEMTデバイスが大量に必要になることが予想されます。携帯基地局以外の無線通信用途としては、衛星通信や基地局とコアネットワークを繋ぐバックホール通信等にも使用されており、これらの用途も今後拡大が期待できます。

一方のレーダ用については、その探知精度・探知距離を高めるためには無線通信用よりも更に高い出力が必要であり、従来は真空管が用いられていました。これらはGaN-HEMTの登場と高出力化により、置き換えが進んでおり、デバイスの長寿命化、不要発射の低減、周波数の安定化などのメリットを享受しています。高出力のレーダは、気象観測や航空管制などに用いられていますが、最も大きな用途は防衛用です。艦載レーダや航空機上レーダ、地上レーダなど様々な種類と形態があります。イージス艦等に使われる最先端の設備では、アクティブフェーズドアレー型のレーダが用いられ、一面当たりに5000個前後もの送受信機が並べられており、それぞれの送信機にGaN-HEMTが搭載されています。

(4) パワー半導体

スイッチング電源回路を構成するトランジスタやダイオードなどのパワー半導体は、現在はそのほとんどがSiデバイスですが、更に性能を高めるためにSiCやGaN等の化合物半導体を用いたデバイスも採用され始めています。これらの化合物半導体材料はSiに比べて絶縁破壊電界などの材料物性が優れているために、Siパワー半導体を凌駕する高性能のパワー半導体の実現が可能です。この新しいパワー半導体を用いることにより、電源回路の損失を低減したり、電源を大幅に小型軽量化することができるので、電力消費を抑えカーボンニュートラルに大きく貢献することが期待されます。

SiCパワー半導体は、テスラ社のModel3に本格採用されたことを契機に、各社のEVへの採用が広がっています。一方でGaNパワー半導体は、Si基板上にGaNエピ層を形成したGaN-on-Si構成のデバイスが普及し始めています。これは前節で紹介した高周波デバイスであるHEMT構造を流用していますので、スイッチング周波数を高くすることができます。スイッチング周波数を高めると、電源回路のパッシブ部品（インダクタ、キャパシタ）を小さくできますので、電源回路の大幅な小型化が可能になります。この特徴を活かして、GaNパワー半導体は携帯端末の充電用ACアダプター（ファーストチャージャー）での採用が始まりました。今では多くの携帯機器の付属アダプターとして、あるいは別売のアクセサリーとして市場に普及しつつあり、さらにノートPC等の電子機器用にも広がりつつあります。これらは従来のアダプターに比べ、半分以下の重量、サイズ、電力損失を実現しています。

3. GaN デバイスの今後の可能性

ここまで述べてきたように、GaN を用いたデバイスは既に光、高周波、パワーの各用途において広く利用されています。しかしながら、半導体レーザを除いて、これらのデバイスはサファイア、SiC、Si などの異種基板上に形成されたものであり、GaN の有する能力を十分発揮できているとは言えません。もし、大口径の GaN 基板が大量に安価に供給されれば、これらのデバイスは全て GaN 基板上に形成された、いわゆる GaN-on-GaN のホモエピタキシャル構造にすることができ、これによりデバイスの結晶品質が格段に向上し、その結果デバイスの性能が大きく向上することが期待できます。

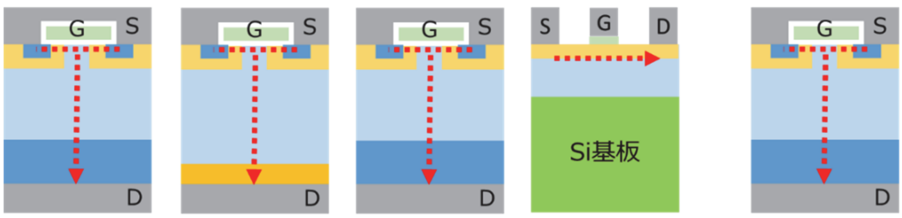
このような性能向上は、GaN デバイスの応用範囲の更なる拡大をもたらします。LED は更なる輝度の向上、効率の向上が期待でき、ヘッドランプ等をよりコンパクト、高輝度にできます。また、プロジェクタ用の光源なども、一部は LD から LED にすることが可能になります。

LD は青や緑の VCSEL（Vertical Cavity Surface Emitting Laser）を大口径基板上に大量に安価に製造できますので、照明、ディスプレイ、センシング、通信用など多様な用途に展開が可能になります。また LD が大量に安価に製造できれば、照明用においては従来の概念を覆すようなユニークなデザインの照明機器が可能になりますし（例えば光ファイバ等により導光することにより、発光部と照明部を隔離したデザインも可能になります）、光を高速に変調することができますので、これを応用した LiFi（WiFi 通信と同様の機能を、無線ではなく照明光で実現）なども可能になります。

高周波デバイスの性能向上は、今後更に進歩・世代交代する移動通信システム（Beyond 5G/6G）に対応する高周波、高効率のデバイスの実現に寄与しますし、通信以外の新たな用途への展開も期待できます。例えばマイクロ波加熱（電子レンジ等）は、現在真空管の一種であるマグネトロンが用いられていますが、これを半導体デバイスで置き換えることができれば、小型化だけでなく、周波数の安定化により加熱対象の精密な選択や制御が可能になり、工業用途においても有用です。また、高周波を用いたワイヤレス給電や、更にはマイクロ波送電なども視野に入るでしょう。

パワー半導体については、GaN-on-GaN 構造の採用により、前記した GaN-on-Si 構造とは全く別のデバイスが実現できるので、GaN-on-Si 構造ではファーストチャージャー等に限定されていた用途を大きく拡大することが可能になります。表２に各種材料を用いたパワー半導体（トランジスタ）の構造と性能の比較をまとめます。デバイスの構造や動作の説明は割愛しますが、Si や SiC のパワートランジスタは、電子が基板上面から裏面へと流れる、いわゆる縦型構造のデバイスです。このような構造とするこ

表２　パワートランジスタの構造と性能比較



	Si MOSFET	Si IGBT	SiC MOSFET	GaN-on-Si HEMT	GaN-on-GaN
耐圧	△	○	◎	△	◎
動作周波数	△	×	○	◎	◎
コスト	○	○	×	△	○

とにより、電流密度を高く（従ってデバイス面積を小さく）することができ、またデバイスの厚さ（高電圧のかかるドリフト層）を厚くすることにより高耐圧が実現できます。

これに対しGaN-on-Siでは前述したように、高周波用のHEMT構造を流用しているので、電流は基板表面近傍を流れます。このような構造では、動作速度は速い一方で、デバイスの面積を小さくすることは難しく、また耐圧にも制約を受けます。GaN-on-GaN構成では、SiやSiCデバイスと同様に縦型構造とすることができますので、小型化、高耐圧化に優れています。なお、GaN-on-GaNデバイスがSiCデバイスより低コストにできるのは、絶縁破壊電界等の材料物性がSiCより優れているために、デバイスをより小型化できることによります。試算では、GaN基板のコストがSiC基板の2倍であっても、デバイスコストを1/2とすることが可能であり、Siデバイスのコストにも比肩し得るレベルが期待できます。GaN-on-GaNパワーデバイスの普及により、データセンターのサーバー、太陽光発電や電気自動車の電源回路がより小型・高効率になり、省エネルギーを通じてカーボンニュートラルに大きく寄与することが期待できます。

4. GaN基板への当社の取組み

前述したように、GaN-on-GaNのデバイス構造は、GaNの有する材料ポテンシャルをフルに引き出し、光・高周波・パワーの多様な用途に活用されることが期待されます。しかしながら、その実現には高品質で大口径・安価なGaN基板が大量に供給されることが条件となります。

結晶成長と言うと、原料をるつぼ等に入れて高温に熱して溶かし、これを部分的に融点以下に温度を降下させて析出させるようなプロセスを一般にイメージされると思いますが、GaNは残念ながらそのような製法は困難です。現在世の中で商用化されているGaN基板は、殆どがHVPE（Hydride Vaper Phase Epitaxy）という気相成長法を用いています。結晶成長速度が速く（>100um/h）、結晶の純度も比較的高く、成長のコントロールが容易であるという利点があります。

当社はHVPE法を用いた独自のVAS（Void Assisted Separation）という製法を用いてGaN基板を製造しています。図3にその製造プロセスの概要を示します。まずサファイア基板の上に薄いGaN結晶層を成長し、これにTiを蒸着した後に熱処理することにより、微細な隙間（Void）だらけの基板が

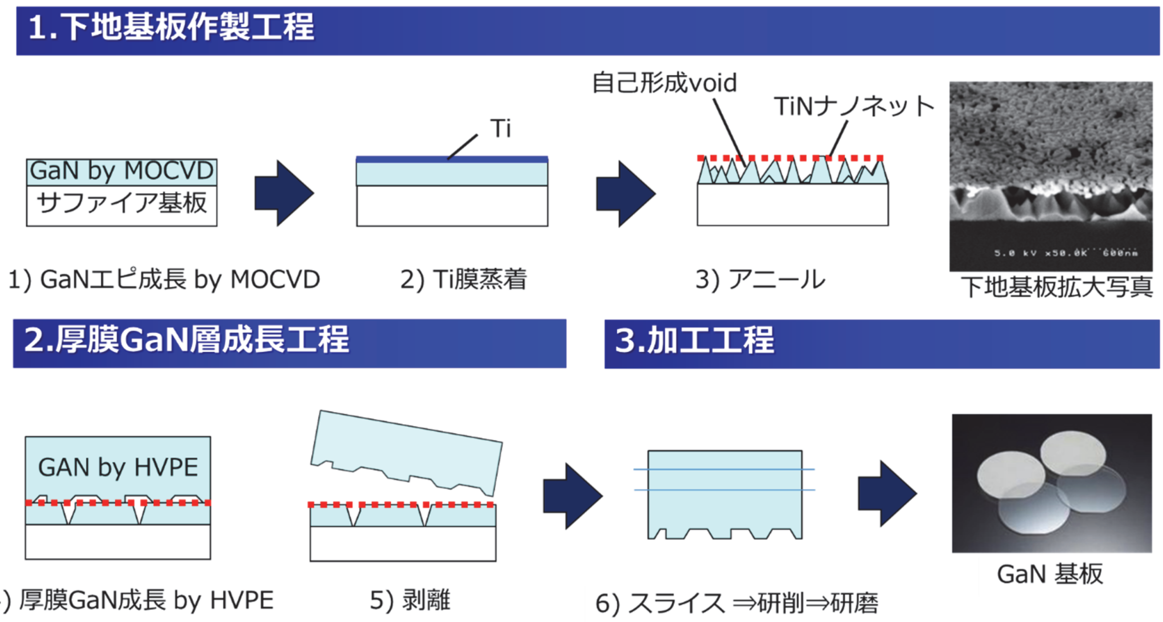


図3　GaN基板製造プロセス（VAS法）

出来ます。これを下地として、この上にHVPE法によりGaN結晶を厚く成長します。下地と厚いGaN結晶の間には隙間が形成されたまま成長しますので、成長後はGaN結晶が下地基板から容易に剥離します。剥離した結晶をスライス、研磨し、基板が完成します。

このように製造された基板の転移欠陥密度は10^6/cm^{2}程度、基板サイズは4インチ径までが製品化されています。1平方センチ当たり百万個の結晶欠陥というのは大変多いように感じられるかもしれませんが、これでも異種基板上に形成されるGaN層に比べると2～3桁小さく、LD等の電流密度の高いデバイスであっても十分な信頼性を確保できます。一方で、GaNコンソーシアムのロードマップによれば、2030年頃には基板サイズ6インチ径、欠陥密度10^4/cm^{2}が必要とされています。これがGaN-on-GaNデバイスの更なる本格普及に向けた一つの目安と考えられます。

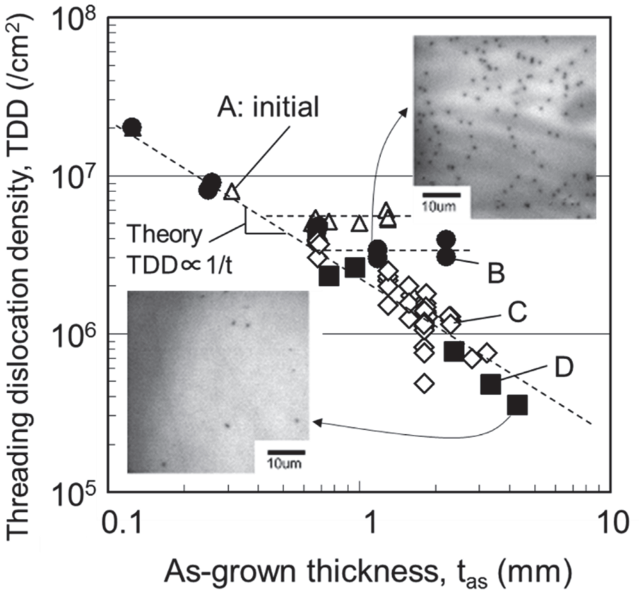


図４　結晶成長厚さと転移欠陥密度の関係

欠陥密度については、成長するGaN結晶の厚さを増すことにより、これに反比例して低減することが知られています。これは結晶の成長に従ってランダムウォーク的に伝搬する結晶欠陥同士が会合して低減するためです。図4にその一例を示します。図中のAからDは結晶の成長条件を変えて厚く成長できるように工夫したものです。図4のグラフを外挿すると、欠陥密度10^4/cm^{2}を得るには結晶厚さ100㎜以上が必要となり、また通常の成長プロセス（結晶軸の+c面方向への成長）では成長に従い外径が小さくなるという問題もあります。

そこで、欠陥密度を低減する方法として、マスクレス3D法という成長方法を考案しました。図5に本方法を用いて成長させた結晶の断面の蛍光顕微鏡写真を示します。通常の結晶成長は基板面と平行に平坦に積み上がって行きますが、ここでは途中で故意にデコボコに成長させ、再び平坦な成長に戻して

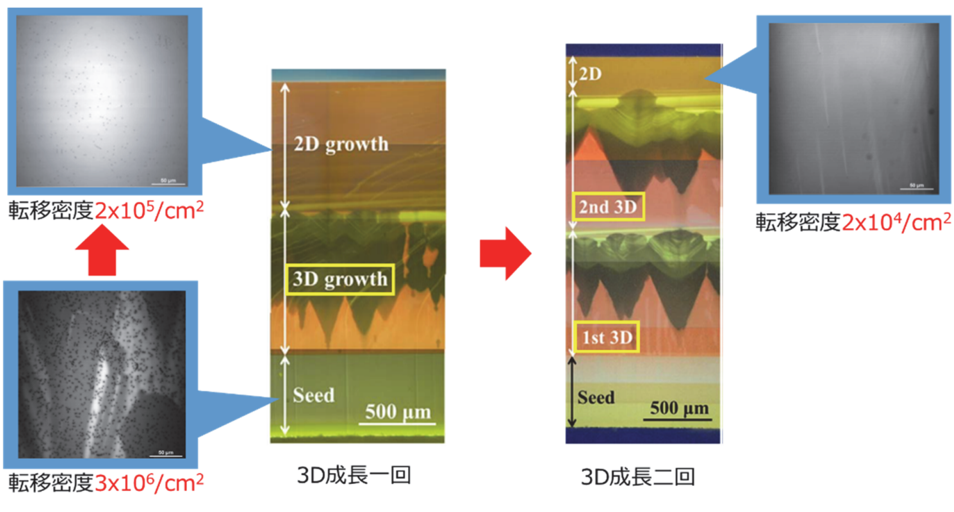
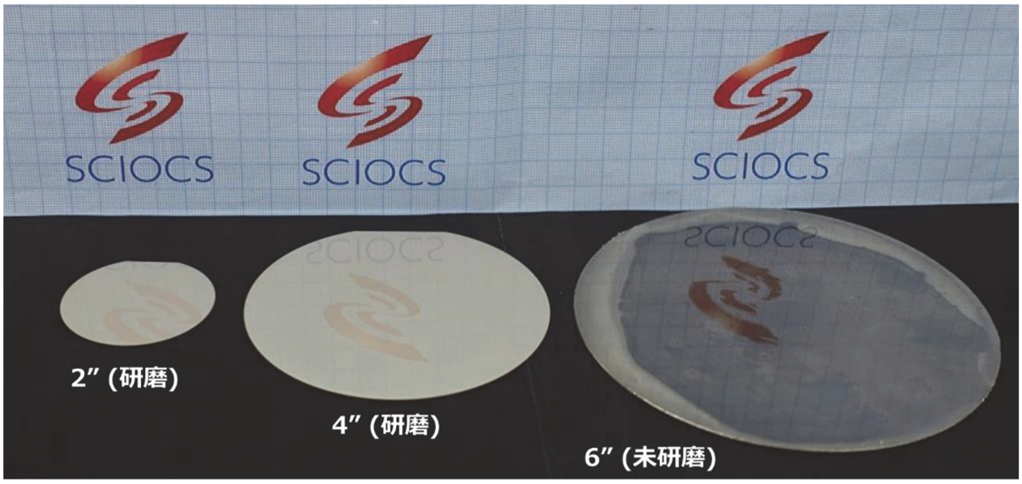


図５　マスクレス３D法による転移欠陥の低減



金属色は、裏面のGa残渣のため

図６　GaN 単結晶基板の外観

います。デコボコの成長領域では、欠陥の伝搬の方向が変わり会合による低減の効果が高まりますので、1mm 程度の成長厚さで欠陥密度が一桁低減しています。これを繰り返すことにより更に欠陥密度が一桁低減し 10^4/cm^2 台の欠陥密度が得られました。

大口径化については、6 インチ径までの基板を試作しています。図 6 にその外観写真を示します。6 インチ径の基板の外観が他のサイズの基板と異なって見えるのは表裏の研磨を施していない状態であるためで、裏面には金属 Ga の残渣があるために着色が見えますが、基本的には 2 インチ径、4 インチ径と同等の結晶品質の基板が得られています。今後は量産技術を更にブラシュアップし、6 インチ径の基板を市場に提供して参ります。

5. おわりに

世界はカーボンニュートラルへと大きく舵を切り始めました。その実現にはエネルギーのより効率的な利用が欠かせません。ここでご紹介してきたように GaN は光・高周波・パワーの広い領域で、エネルギーを効率よく利用する上で鍵となるデバイスを提供しており、その活用範囲・領域は GaN-on-GaN 構造のデバイスの普及とともに更に広がっていくことでしょう。私共は、高品質で大口径・安価な GaN 基板を大量に提供することで、その実現に貢献していく所存です。

参考文献・参考資料

[1]　一般社団法人日本照明工業会　照明成長戦略 2030：https://jlma.or.jp/about/vision/index.htm
[2]　一般社団法人 GaN コンソーシアム　GaN ロードマップ 2021：http://www.gan-conso.jp/report/road.html
[3]　藤倉他、「GaN 単結晶基板の開発」技術誌　住友化学　2018
[4]　Takehiro Yoshida and Masatomo Shibata, Jpn. J. Appl. Phys. 59 071007（2020）

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ１つのテーマを選んで、その概要を語ります。
（☆は「大学の研究・動向」、＃は「高校生のページ」、＊は「新設研究室紹介」に掲載）

電気関係研究室一覧

工学研究科（大学院）

電気工学専攻
先端電気システム論講座（引原研）
システム基礎論講座自動制御工学分野（萩原研）
システム基礎論講座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進電子材料分野

情報学研究科（大学院）

知能情報学専攻
知知能メディア講座言語メディア分野（黒橋研）
知能メディア講座コンピュータビジョン分野（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
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（佐藤研）
集積システム工学講座超高速信号処理分野（橋本研）

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（松田哲研）

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プラズマエネルギー研究分野（長崎研）☆
エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野
エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研）

生存圏研究所

中核研究部
生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野（山本研）
生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野（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（小嶋研）
生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野（大村研）
生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野（篠原研）

学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野（中村裕研）

システム基礎論講座　自動制御工学分野　（萩原研究室）

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

バックコンバータの離散化双線形モデルに基づく SOS 手法による非線形制御

1. バックコンバータおよびその制御

バックコンバータ（図 1）は直流電圧を降圧できるスイッチング電源である。スイッチ S の ON、OFF を周期的に繰り返すことによって、負荷抵抗 R に関する出力電圧 v は周期定常状態となり、このときの出力電圧の平均値はデューティ比 μ（スイッチング周期 T に占める ON 区間の比率）により決まる。

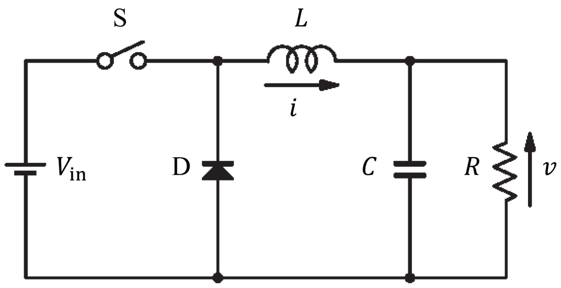


図 1　バックコンバータの回路図

バックコンバータは電圧変換装置として様々な電気製品で広く使用されており、その出力電圧制御、すなわち所望の出力電圧を達成するために各周期における μ を適切に定めるフィードバック制御則を設計することは、非常に重要な課題となる。その際、コンバータの動作を表現する高精度なモデルを用いることが重要となるが、本誌第 37 号でも紹介したブーストコンバータに対するモデル同定手法と同様にして、離散化双線形モデルを構築することができる。これは、よく知られた平均値モデルに代り、スイッチング動作に伴う状態遷移を陽に考慮したモデルであり、その特徴は、状態遷移を表現する行列が制御入力に依存することに着目してこれに制御入力に関する 1 次近似を施すことで、扱いやすく精度もさほど損なわれない非線形モデルとなっている点にある。このモデルには、制御理論分野で近年注目を集めている二乗和（Sum of Squares; SOS）手法と呼ばれるものが適用可能であり、そのようにして得られたバックコンバータの非線形制御に関する成果の一端を紹介する。

2. SOS 手法による非線形制御および有効性

離散化双線形モデルは $z_{k+1}=Az_k+Bw_k+w_k(Nz_k)$ という形で同定される。ただし、z_k, w_k はそれぞれスイッチング時刻 kT における状態変数とスイッチング区間 $[kT, (k+1)T]$ における（この区間でのデューティ比 μ_k に簡単な変換を施した）制御入力である。SOS 手法の最大の要点のみをひとことで紹介すれば、（行列）多項式の二乗和は非負（行列）多項式であるという性質を利用することといえる。具体的には、平衡点の近傍で正であり、かつその時間差分の -1 倍が（あるいは、より発展的な制御性能に関連した量が）正となるリアプノフ関数 $V(z)$ の存在が保証されるように制御則を設計すべき点に関して、つねに正であることの判定の難しさを（行列）SOS 多項式であることを通して回避するものである。さらに、バックコンバータの制御入力が区間 [0, 1] 内の値であるべき（あるいはそれより厳しい許容範囲の）制約も直接的に考慮した設計が可能である。線形制御則（最適レギュレータと 2 自由度 LQI サーボ系）と比較する上で意味合いの明確な非線形制御則として $z_k=\beta(z_k)/(\alpha(z_k)+1)$ を考え、多項式 β と SOS 多項式 α の設計を行った。実験結果（図 2,3）により、デューティ比のふらつきもわずかで優れた応答になる様子が検証でき、デューティ比も（無意味な初期時刻を除き）指定された許容範囲 [0.2, 0.8] に（比較対象では要した飽和操作なしで）自動的に収まっている。

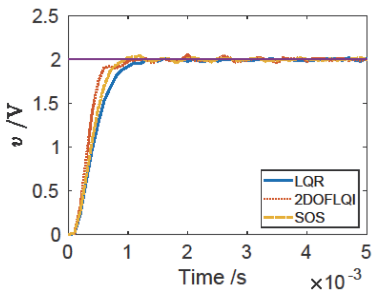


図 2　出力電圧 v（実験結果）

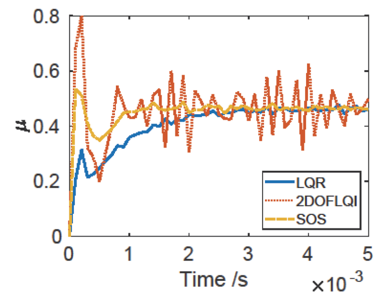


図 3　デューティ比 μ（実験結果）

生体医工学講座　複合システム論分野　（土居研究室）
http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「柔軟性を持つ非線形格子における局在振動」

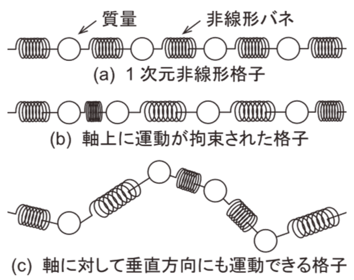


図1　非線形格子

非線形格子モデルは質点が非線形なバネで相互に結合されたもので、結晶格子中の原子振動のモデルとして古くから研究が行われてきた。こうした非線形格子には、空間離散性と非線形性に起因する非線形局在振動（ILM: Intrinsic Localized Mode/DB: Discrete Breather, 以下ILMと記す）と呼ばれるような空間的にエネルギーが局在した振動解が存在する。従来研究の多くは原子間の非線形相互作用を単純化したある種のトイモデルを用いた解析が主であったが、最近ではより現実に近い相互作用ポテンシャルを用いた解析がなされるようになってきた。例えば、白雲母結晶内のカリウムイオン層やグラフェンやカーボンナノチューブなどの低次元炭素材料などが解析の対象となっている。このような対象では、原子は2次元格子を構成するため、各原子の自由度も2とすることが多い。しかしながら、現実では原子は格子面に垂直な方向にも運動できるため、原子の自由度は3である。このような格子の次元と原子の自由度が一致しない場合については、ILIMの研究はほとんど行われてこなかった。そこで、本研究では、そのような系におけるILMの安定性や移動性を検討することとした。

本研究では、1次元のFermi-Pasta-Ulam格子（FPU格子）と呼ばれる多項式の相互作用ポテンシャルを有するモデルを対象とする。各格子点は格子軸方向以外にも移動できるため、格子全体として変形することができる。したがって、本研究ではこれを柔軟な1次元格子と呼んでいる（図1c参照）。柔軟な1次元格子には、格子軸方向の振動が伝わる縦波と、格子軸に対して垂直な方向に振動しながら伝搬する横波が存在する。ILMについても同様で、縦方向の振動のみの縦型ILM、および横方向振動が主となる横型ILMが存在する[1]。縦型ILMは従来のFPU格子モデルに対応する解であるが、従来とは異なり安定性が座屈によって損なわれることが明らかとなった[2]。一方、横型ILMは柔軟性があって初めて存在する解である。振動波形は縦型のものとよく似ているものの、安定性などの性質は異なっており、そのほとんどが不安定であった[2]。

移動型ILMについては実験的な研究を行っている。先端に永久磁石を装着した棒バネを1次元的に配列することで、各振動子の自由度が2であるような2自由度振動子列が構成できる[3]。実験系を模擬したシミュレーションでは、振動子列端点を適切に加振することで移動型ILMを多数生成できることが明らかになっている（図2参照）。また、列に対して垂直な方向の振動成分を含む移動型ILMも観察された（図2破線内）。このような移動型ILMは前例がなく、今後詳しく検討していく予定である。

以上のように、柔軟性を持つ非線形格子におけるILMについて、安定性や移動性の検討を数値シミュレーションや実験によって検討している。今後、柔軟性がもたらす従来型ILMとの差異をより明確にし、現実系におけるILMの存在性や安定性、移動性に関する研究へとつなげていく予定である。

参考文献
[1] Masayuki Kimura, Atsuki Mitani, Shinji Doi, “Existence and stability of intrinsic localized modes in a finite FPU chain placed in three-dimensional space,” Letters on Materials 6(1) 22-26 (2016).

[2] Masayuki Kimura, Atsuki Mitani, Shinji Doi, “Existence regions of longitudinal and transverse intrinsic localized modes in Fermi-Pasta-Ulam chain in two-dimensional plane,” Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE 8(2), 153-161 (2017).

[3] 木村真之, イ ジョンジン, 土居伸二, “磁気結合を有する2自由度振動子列における移動型局在振動の生成,” 信学技報 121(61) 5-9 (2021).

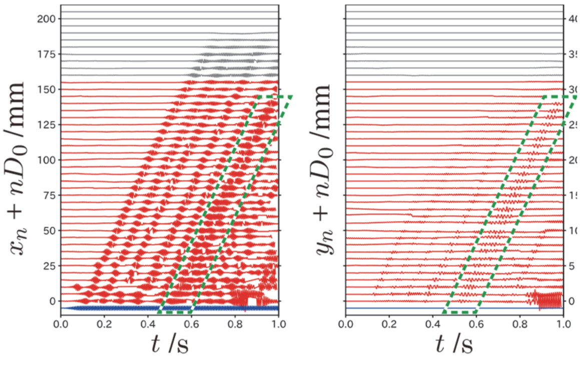


図2　移動型ILMの生成シミュレーション
左が列方向変位、右が垂直方向変位である

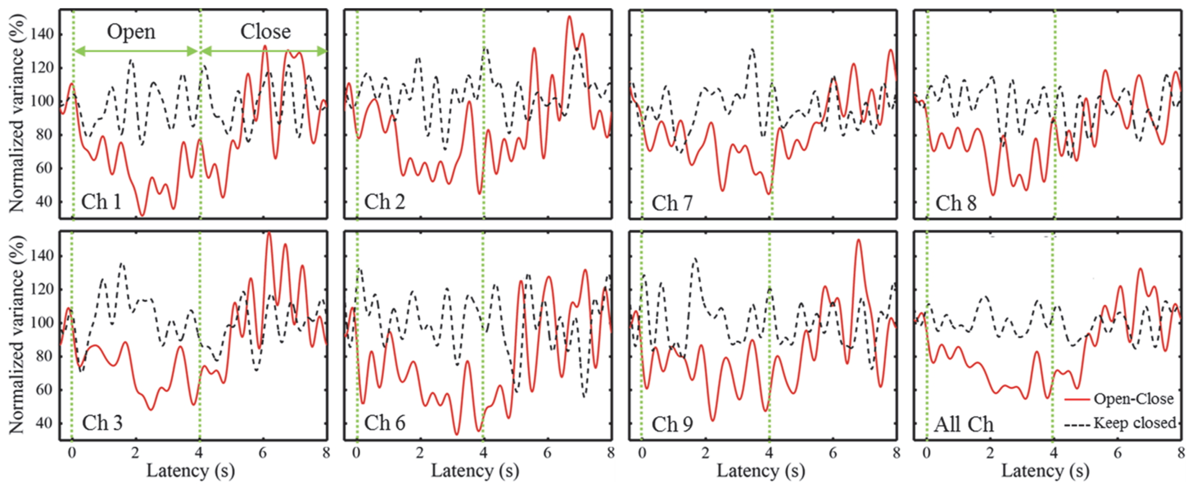
生体医工学講座　生体機能工学分野　（小林研究室）
https://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp
「平面型多チャネル光ポンピング磁気センサによる生体磁場計測」

脳活動に起因する電気信号や神経電位、筋肉の活動に伴う筋電など、生体活動は電気信号の塊である。この活動に伴って生じる生体磁場は、活動電位と同様に活動に関する情報を含んでいる。また生体組織の透磁率は導電率とは異なり、部位によって変わらないため、逆計算による活動部位の推定が容易であるという特徴がある。しかしながら、生体磁場はサブ nT から fT の非常に微弱な信号であり、特に pT 以下の脳磁場（MEG）の計測には極低温の冷却が必要な超伝導量子干渉素子（SQUID）を用いた磁気センサが必要である。その場合、ランニングコストの増大や装置の大型化などの問題があり、生体磁場計測の有効性は認識されながらも研究が進んでこなかった。これに対し、我々は冷却の不要な光ポンピング磁気センサと、その生体磁場計測への応用に関して研究を進めている。

光ポンピング磁気センサは、センサセル内のアルカリ金属原子に光ポンピングにより電子スピン偏極を生じさせ、磁場によるスピン偏極の変動を検出するものである。そのため、センシング領域は光ポンピングをしている位置であり、センサセル内に複数のセンシング領域を構成することが可能である。我々はこのセンシング領域を平面内に多数構成した平面型多チャネル光ポンピング磁気センサを提案している。これは、空間分解能が非常に高く、またヘッドレストやベッドなどに搭載可能であるため、小動物の機能計測やニューロマーケティングなど様々な分野での応用が期待される。

平面型多チャネル光ポンピング磁気センサは、プローブ光の検出器をフォトダイオードアレイとすることで、ポンプ光とプローブ光の各交点の磁場を検出することができる。このときの各チャネルの感度は <100 $fT/Hz^{1/2}$ 以下であった。生体磁場計測の一例として、開眼閉眼に対する 8-13 Hz の自発脳磁場強度の変動の計測結果を図に示す。被験者は、磁気シールド内で、センサセルを内包したオーブン上に後頭部を載せ、指示に合わせて眼を開閉する。そのとき得られた検出信号に対して、8-13 Hz のバンドパスフィルタを適用し、複数試行の分散を計算した後、2 Hz のローパスフィルタを適用した。視覚刺激により、開眼時には 8-13 Hz の α 波律動の減衰がみられることが知られており、本システムを用いた計測でも開眼時のみに信号の減衰を観測することができた。

今回の結果は、広範囲に生じる自発脳磁場を計測していたが、特定の部位から生じる誘発脳磁場計測とその信号源の推定、ノイズに強い計測方式を用いた磁気シールド外での計測など、本手法をさらに発展させていきたい。



図：開眼閉眼に対する 8-13 Hz の自発脳磁場強度の変動

電子物理工学講座　応用量子物性分野　（竹内研究室）
http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html
「超高速光強度揺らぎを用いた２光子励起蛍光の局所制御」

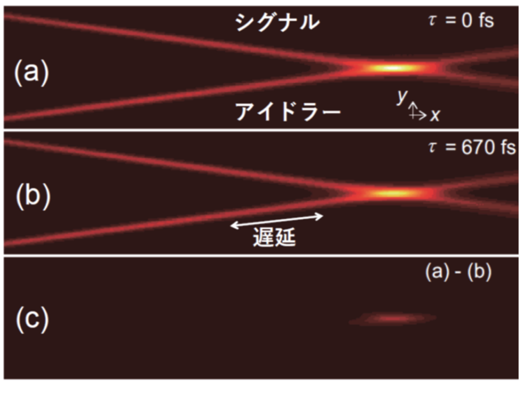
脳機能の解明や早期の癌治療など、現代科学や医療分野の重要課題を解決するためには、生体などのノイズまみれの環境の中から必要な情報を正確に取り出す計測技術を開発することが重要です。２光子励起や４光波混合のようなサンプル内で生じる非線形光学効果を利用した顕微手法は、生体深部の観察を可能にするため、これらの研究に対し広く使用されています。しかし、既存の非線形光学顕微鏡は、“表面付近で発生するノイズ光子によって観察可能深さが制限される”、“光ダメージの影響が懸念される”などの課題が存在します。

上述の課題を克服するために、私たちはパラメトリック下方変換（OPD）光源が作り出す光の強度揺らぎを利用した非線形光学計測法の開発に取り組んでいます。“揺らぎ”と聞くと、計測においてノイズを引き起こすのではというイメージを持たれると思いますが、使い方によっては計測の性能を高められる可能性があります。例えば、２光子励起過程のような非線形な過程の効率は、励起光の光子統計性にも依存し、強度揺らぎが大きい光を使うほど、その効率が増すという特徴があります。

今回私たちは、光の強度揺らぎを利用して超深部観察を達成するための手法を提案し、原理実証実験に成功しました。通常の２光子励起蛍光顕微鏡では、表面から発生する２光子蛍光が観察可能な深さを制限する主要因となります。このノイズ光子の影響を取り除くための１つの方法は、観測したい深部のみで蛍光信号を変調することです。私たちは、周波数非縮退のOPD過程によって作り出される２つのビーム（シグナルとアイドラー）間の超高速な光強度揺らぎの相関を利用することで、蛍光信号の局所変調を実現しました。

原理実証実験では、波長532nmの高強度ナノ秒パルスを用いて周波数非縮退のOPD過程を誘起することで、瞬間強度が100Wを超えるシグナル光とアイドラー光を生成しました。非縮退OPDは、周波数2ωのポンプ光からω-$\Delta\omega$のシグナル光と$\omega+\Delta\omega$アイドラー光を“同時に生成”する過程です。そのため、シグナル光とアイドラー光の強度揺らぎには相関が発生します。もう一つ強調すべき重要な点は、強度揺らぎの時間スケールがフェムト秒オーダーの超高速であるという点です（本実験では相関時間が、600 fs）。つまり、シグナル光とアイドラー光では、ナノ秒の包絡線の内部で超高速に変化する揺らぎが発生し、その揺らぎはビーム間で相関を有しています。

図は、超高速な強度相関揺らぎを用いた超深部観察の原理検証実験の結果です。２つのビームを、被測定系である２光子溶液（ローダミン溶液）内で交差させ、そこから発生する２光子蛍光を観測しました。２つのビームの間に時間遅延を設けない場合、２つのビームが交差した点では、強度相関によって揺らぎが増し２光子蛍光信号が増強します［図（a)］。一方で、２つのビームの間に相関時間以上の僅かな光路長差（ここでは670 fs）を設けると、２つのナノ秒パルスの重なり合いは保たれますが、強度相関の効果がなくなり信号増強の効果が抑制されます［図(b)］。この２つの画像の差をとることで、交差位置深部からの蛍光情報のみを抽出することができます［図（c)］。今後、この技術を２光子励起顕微鏡に適用することで、生体の超深部観察や高分解能計測の実現につながると期待できます。さらに、本研究は、従来使用されてきた超短パルス光ではなく、ナノ秒パルスを基本光源として使用しています。そのため、２光子励起顕微鏡の低コスト化にも貢献する技術となると期待されます。



図．実験結果。

参考文献：Y. Eto, “Locally controlled two-photon excited fluorescence by correlated ultrafast intensity fluctuations” Appl. Phys. Express 14, 022023, January (2021).

電子物性工学講座　半導体物性工学分野　（木本研究室）
http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「SiC 電子デバイスにおける絶縁破壊現象の解析」

耐圧 1~3 kV 級の SiC パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードの実用化が進み、各種の電源、太陽電池用パワコン、電車、電気自動車などで顕著な省エネ効果が示されています。しかしながら、SiC 固有の半導体物性、欠陥物性、キャリア輸送現象には未解明のものが多く、依然として重要な研究課題となっています。特に、パワーデバイスにおいては高電圧印加時の pn 接合の絶縁破壊現象を理解し、これを精密に解析するモデルが要求されます。比較的低いドーピング密度を有する SiC pn 接合の絶縁破壊はアバランシェ破壊により生じ、これを決定する衝突イオン化係数については、当グループが広い電界強度範囲、温度範囲で決定しました [1]。今回は、比較的高いドーピング密度を有する SiC pn 接合のツェナー破壊に関する実験的、理論的解析について紹介いたします。

ツェナー破壊は、高電界下における電子のトンネル効果によって生じます（図 1）。SiC は Si に比べて禁制帯幅が約 3 倍大きいので、トンネル時のポテンシャル障壁が約 3 倍高く、一見、トンネル確率は低くなると考えられます。しかし、SiC では Si より約 10 倍高い電界まで耐えるため、ポテンシャル障壁が薄くなり、トンネル確率が高くなる可能性も否定できません。これを明らかにするため、様々なドーピング密度を有する SiC pn 接合ダイオード（エピタキシャル成長により形成し、垂直メサにより電界集中を緩和）を作製して特性を解析しました。耐圧約 100 V 以上（ドーピング密度 10^{18} cm^{-3} 以下）の素子では、絶縁破壊はなだれ増倍によるアバランシェ破壊であることが判明しましたが、耐圧約 100 V 以下（ドーピング密度 10^{18} cm^{-3} 以上）の素子では、衝突イオン化によるキャリア増倍で説明できない逆方向電流が観測されました。また、この素子の特性を 50~500K の広い温度範囲で調べたところ、逆方向電流の温度依存性が非常に小さいことがわかりました。

そこで、高電界下で価電子帯の電子が禁制帯をトンネルして伝導帯に遷移する確率を、WKB 近似を用いて計算し、pn 接合を流れるトンネル電流を計算しました。ここで、SiC は間接遷移型のバンド構造を有していることに注意が必要です。価電子帯の電子は逆格子空間においてΓ点に存在しますが、トンネル後は伝導帯の M 点に遷移する必要があります。つまり、このトンネルにはフォノンの寄与が必須であり、この結果、SiC のトンネル確率は非常に低くなります。図 2 に実験で得られた SiC pn 接合ダイオードの逆方向特性を、電圧ではなく最大電界に対してプロットした図を示します。ここで、実線は上述のフォノン支援バンド間トンネルを考慮して計算した特性です。同図に示すように、実験データは計算したトンネル電流と広い範囲でほぼ完全に合致することがわかりました。このように、ドーピング密度 10^{18} cm^{-3} 以上の SiC pn 接合では、高電界においてツェナー破壊（フォノン支援バンド間トンネル）で支配されることが明らかになりました。許容される最大電流密度を 1 mA/cm^2 と設定すると、SiC pn 接合のツェナー破壊限界（最大電界強度）は 5.8 MV/cm と決定できます。

[1] H. Niwa et al., IEEE Trans. Electron Devices **62**, 3326 (2015).
[2] M. Kaneko et al., IEEE Trans. Electron Devices **67**, 3329 (2020).

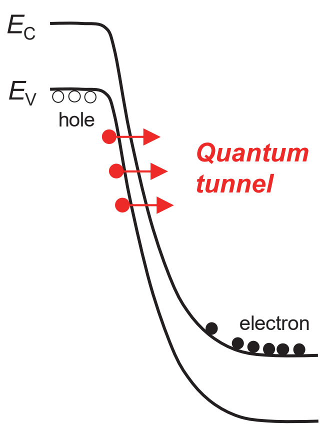


図 1　高電界におけるバンド間トンネルの模式図

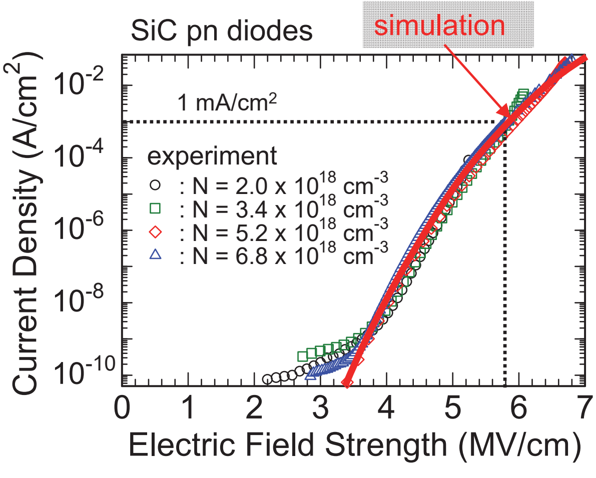


図 2　高濃度ドープ SiC pn 接合の逆方向特性

電子物性工学講座　電子材料物性工学分野　（山田研究室）

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

左巻き DNA2 重らせん構造の原子間力顕微鏡による直接可視化

DNA は、遺伝情報の保持やタンパク質・酵素の合成など、生体機能を維持する上で極めて重要な役割を担っており、その構造および微視的機能を明らかにすることは、生体機能発現の素過程を解明する上において、さらには生体分子の医薬・産業応用を推進する上でも必要不可欠となっている。DNA は生体内で、通常、右巻きの 2 重らせん構造（B-DNA, 図 1(a)を参照）をもつことが知られているが、特定の条件下では左巻きの構造（Z-DNA, 図 1(b)を参照）に変化する。この左巻き構造の DNA は､「転写」と呼ばれる､タンパク質合成を行う際の RNA 生成過程に関与することが知られており､その重要性から、さまざまな手法によってその構造計測・解析が進められて来たが、これまで、生理環境下における左巻き DNA 構造の高分解能観察は実現していなかった。一方、DNA の帯電状態（表面電荷密度）は転写におけるタンパク質と DNA の結合に強く関連していると考えられ、右巻き DNA と左巻き DNA の帯電状態の差異を明らかにすることは、タンパク質 –DNA の結合メカニズムを解明する上で大きく寄与するとともに､新規バイオセンサ開発などへの応用に展開して行くことが期待されている。われわれは､DNA 試料を非破壊で直接観察することが可能な周波数変調（FM）型の原子間力顕微鏡（AFM）を用いること [1]、通常の右巻き DNA と特殊な左巻き DNA を高分解能観察し、溶液下で活性な状態にある、これら 2 つの種類の 2 重らせん構造を分子レベルで観察することに世界で初めて成功した。また、これら DNA の帯電状態を計測し､左巻き DNA の電荷密度は右巻き DNA に比べて小さい（帯電状態が弱い）ことを新たに見いだした [2]。

図 2(a)に DNA の AFM 像を示す。DNA 上に見える縞模様は二重らせん構造に対応し、らせんが形作る、交互に並ぶ広い溝と狭い溝が、それぞれ赤矢印と青矢印で示されている。DNA の中央部は、やや異なる縞構造になっているが､これは左巻きの二重らせん構造の領域に相当する。さらに､AFM フォースカーブ測定による探針 – 試料間にはたらく相互作用力のマッピングを行うことにより、左巻き DNA と右巻き DNA の表面電荷密度の違いを計測し、左巻き DNA は右巻きに比べて帯電が弱いことを初めて明らかにした（図 2(b)を参照）。本研究は、今後、FM-AFM を用いたナノスケールでのさまざまな生体分子の構造観察や物性評価、さらにはナノバイオデバイス評価や新規分子標的薬の開発へと発展していくことが期待される。

参考文献

1）S. Ido, K. Kimura, N. Oyabu, K. Kobayashi, M. Tsukada, K. Matsushige, H. Yamada, ACS Nano 7, 1817 (2013).

2）H. Kominami, K. Kobayashi and H. Yamada, Scientific Reports 9, 6851 (2019).

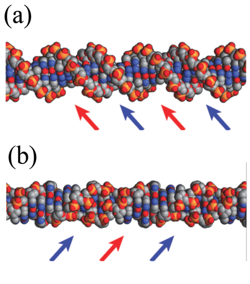


図 1 :（a）B-DNA および（b）Z-DNA の分子モデル．図中の赤（青）の矢印は各モデルの主溝（副溝）に対応する．

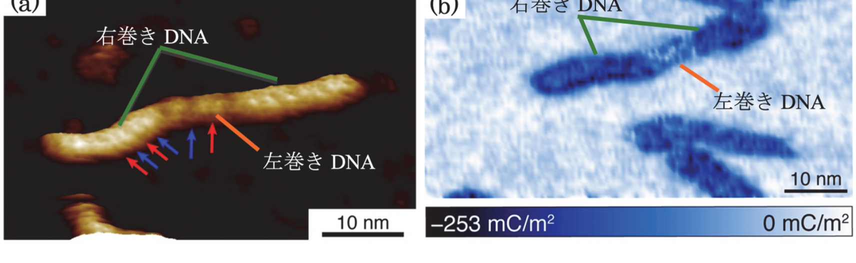


図 2 :（a）両端に B-DNA，中央部に Z-DNA をもつ合成 DNA の AFM 像．赤（青）の矢印は主溝（副溝）を示す（図 1 参照）．（b）同じ構造の DNA の表面電荷密度像．両端の暗い領域は帯電が強く，中央の相対的に明るい領域は帯電が弱いことを示す．

量子機能工学講座　光量子電子工学分野　（野田研究室）
http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「電気的制御によるフォトニック結晶共振器間の光転送」

将来の光情報バッファリングや光量子情報処理等の高度な光操作を光チップ上で実現するためには、光を微小領域に長時間保存できるナノ共振器の開発、ナノ共振器に保存した光と電子系の相互作用に基づく光量子演算ユニット等の形成、およびナノ共振器間での情報転送の実現などの課題が存在します。これまで、我々は光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ独自のフォトニック結晶を用いて、1）光を微小領域に長く保存することの出来る高Q値ナノ共振器、2）ナノ共振器への光の出し入れ動作、3）ナノ共振器間の光転送等の研究を進めてきました。1）では10ns程度の長い光子寿命を持つ光通信波長帯域で動作する共振器を実現し、またそのような共振器に光が保持されている間にフォトニック結晶の屈折率を部分的に変化させることで2), 3）の動作の実証も行ってきました。ただし、2), 3）における操作ではチップ外からの制御光パルスの照射による自由キャリア生成を用いていたため、大型の外部光学系が必要であり、また複数個所の制御は困難でした。今回、シリコン製フォトニック結晶チップに面内pin接合を形成し、これに電気パルスを印加してキャリアを高速に注入する屈折率制御手法を導入しました。その際、作製プロセスや結合用共振器の導入に伴う共振器光損失の増大を極力低減し、長い光子寿命と電気的屈折率制御を両立させました。これにより図1に示すように、3共振器結合系中の制御用共振器Cの波長を電気パルス印加によって変化させることで、共振器Aに蓄積した光を共振器Bに断熱的に転送することに成功しました。この方法ならば、将来的により多くの共振器を集積し、それらの間で光転送を自在に行うことも可能になります。この成果は、光量子演算ユニット間の情報転送や光バッファメモリーの実現につながるものであり、高度な光制御に向けた大きな前進と言えます。

参考文献：M. Nakadai, T. Asano, and S. Noda, *Nature photonics*, doi: 10.1038/s41566-021-00910-y.

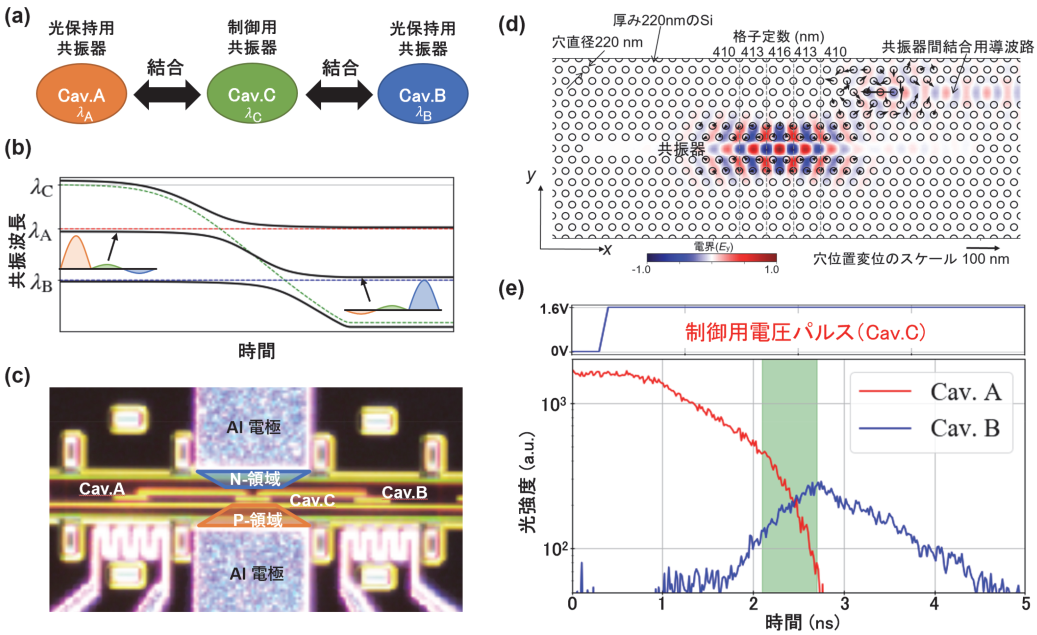


図1:（a）3共振器（A,B,C）結合系の模式図。（b）3共振器結合系の固有モードが共振器Cの波長の変化によって断熱的に変化する様子。（c）pinダイオードによる共振器C制御部を含む3共振器結合系の光学顕微鏡写真。（d）共振器と結合用導波路端部の構造図。結合強度を保ちつつ放射損失は抑制できるように孔位置に変位が導入されている。（e）光転送実験結果。電圧印加により時間2~3ns付近で共振器Cの波長が共振器A,Bを横切り、結合共振器系のモードが断熱的に変化して共振器Aの光がBに転送される。

量子機能工学講座　量子電磁工学分野

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

同位体を選択した単一イッテルビウムイオンのトラップ -同位体シフトの精密測定に向けて-

原子には、原子核を構成する陽子数が同じで中性子数がことなる、同位体とよばれるものが存在する。同位体によってエネルギー準位がわずかに変化し、遷移周波数に差が生じる。これを同位体シフトとよぶ。最近、同位体シフトを精密に測定することによって、現在の物理の枠組みである素粒子物理の標準模型では説明できない、未知の粒子による効果を検出できる可能性が示唆された [1]。異なる 2 つの遷移の同位体シフトを測定し変換を施すと、両者は線形の関係になることが知られている。これを King plot とよぶ。未知の粒子による効果は、King plot に非線形成分を生じさせると予測されている。

King plot の線形性を調べるには少なくとも 3 点の同位体シフトが必要なため、4 種類以上の同位体をもつ元素を用いて測定する。イッテルビウム（Yb）には、容易に崩壊しない、かつ超微細構造のない偶数同位体が 5 種類ある。しかも、光時計の基準遷移として用いられるほどスペクトル線幅の狭い精密測定可能な遷移を複数もつので、本研究に適した元素である。我々は光時計の実現を目指して Yb^+ の単一イオントラップの研究を進めている。本研究の測定も光時計の遷移周波数の測定と同じであり、我々も素粒子理論が専門の田中実博士（大阪大学）と共同で研究を開始した。

本研究では、特定の同位体を選別して単一イオンをトラップする必要がある。偶数同位体の自然存在比は、同位体 168、170、172、174、および 176 で、それぞれ 0.13 %、3 %、22 %、32 %、および 13 % である。そこで、同位体の選別のために、2 段階励起による光イオン化を用いる。Yb 原子を基底準位から中間準位まで励起する第 1 励起での同位体シフトを用いて、同位体を選択してイオン化する。実験では Yb 金属を充填したオーブンを加熱して Yb 原子をビーム上に発生させ、イオントラップ内で光イオン化する。使用しているオーブンは簡単なものだが、原子ビームの発散によるドップラー広がりは第 1 励起の同位体シフトに比べて十分狭く、存在比の最も小さい 168 を除く 4 種類の偶数同位体の単一イオンのトラップには成功していた [2]。

同位体 168 の単一イオントラップができれば、King plot の線形性がより小さな不確かさで議論できる。ここで、光イオン化による同位体の選別は完全でも、トラップ中のイオンはオーブンからくる原子と電荷交換衝突して天然存在比へ移行しようとする。光イオン化速度が電荷交換衝突速度よりも早ければ、存在比が小さい同位体でも単一イオンの導入は容易である。試算では、存在比 0.13 % の同位体 168 でも 100 個を超えて選択してトラップできることを示していた [3]。

実験では、$^{168}Yb^+$ についてはレーザー冷却に必要な 2 つの遷移の同位体シフトが不明だったので、同位体シフトが既知の遷移と King plot を用いて同位体シフトを推定し、レーザー周波数を設定した。光イオン化の第 1 励起はランプ中の Yb 原子の信号を用いて設定した [4]。以上の準備を行って $^{168}Yb^+$ の導入を試み、観測した蛍光強度を図に示す [5]。1 個ずつ $^{168}Yb^+$ が導入されている。

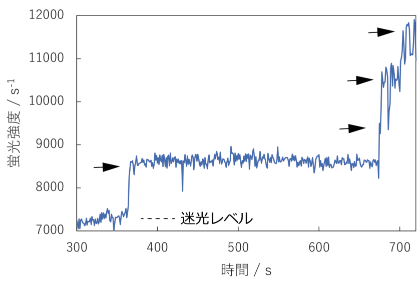


図　$^{168}Yb^+$ の蛍光。1 個ずつイオンがトラップされるたびに蛍光が増加している。

この結果は直径 5 mm 程度のトラップ領域の装置で得られたが、時計遷移分光に用いる直径 0.8 mm 程度のものでも導入に成功した [5]。現在ほかの研究機関で時計遷移の同位体シフトは不確かさ 300 Hz で測定されていて、King plot の非線形性が検出されたかどうか議論されている [6]。世界各所で実験が進んでいるので、我々も遅れることなく研究を進めたい。

[1] C. Delaunay *et al.*, Phys. Rev. D, **96**, 093001 (2017).　[2] 川尻ほか , 日本物理学会 2009 年秋季大会 26aZF7.

[3] Y. Onoda *et al.*, Appl. Phys. B,**105**, 729 (2011).　[4] Y. Onoda *et al.*, Opt. Rev. **18**, 365 (2011).

[5] 上野ほか, 日本物理学会 2019 年秋季大会 , 10pK14-12.　[6] I. Counts, *et al.*, PRL, **125**, 123002 (2020).

知能メディア講座　コンピュータビジョン分野　(西野研究室)

https://vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp/

空の偏光分布を用いた三次元形状復元

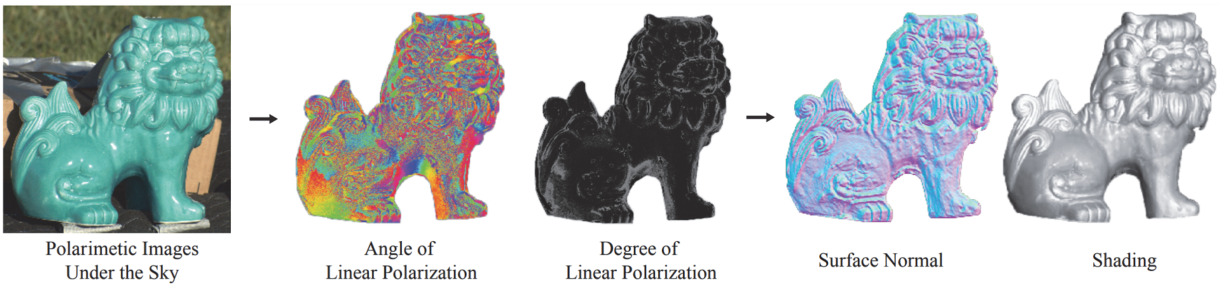


図１　屋外で撮影した偏光画像と復元した三次元形状

画像に基づく物体の三次元形状復元は、その応用範囲の広さから様々な研究がされている。しかし、複数の視点から撮影した画像を用いる多視点ステレオは微細な形状が復元できず、光源の方向を変化させ、反射光の明るさの変化により形状を推定する照度差ステレオ法は、微細な形状が復元可能であるが光源を制御する必要がある。

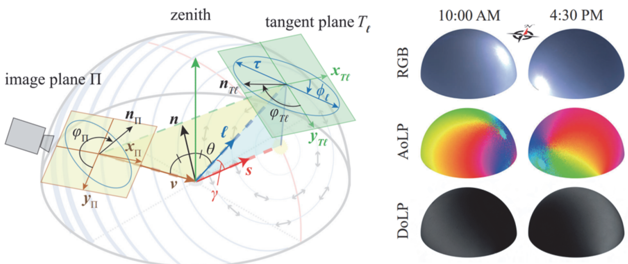


図２　撮像系と空の偏光分布

本研究では、微細な形状復元が可能で、光源を制御する必要のない方法として、空の偏光分布を用いた三次元形状復元手法を導出した [1]。偏光とは、横波の電磁波である光の振動面の向きに偏りがあることで、振動面の偏っている方向（偏光の向き）と偏り度合い（偏光度）によって偏光の状態が表される。空の光は偏光しており、その偏光分布は Rayleigh sky model として記述でき、図２に示すように、偏光の向き（AoLP）と偏光度（DoLP）は、それぞれ天球上で太陽を基準とした経度と緯度によって定めることができる [2,3]。空の偏光した光は、屋外の物体表面における反射によってその偏光状態が変化し、物体の偏光状態となる。図１の左から２番目と３番目に示すように、Quad-Bayer を用いた偏光カメラで撮像することにより、その物体表面における詳細な偏光状態を一枚の画像として観測することができる。

我々は、空の偏光分布を拘束条件としつつ、物体表面反射における偏光状態の変化と元の偏光を同時に求めることにより、一枚の屋外画像から物体表面の精緻な形状（法線）を求められると着想した。具体的にはまず、反射による偏光、空の偏光、およびそれらによって記述される屋外での反射光の偏光を表す正確なモデルを導出する。そのモデルにおける法線、観測される偏光状態、空の偏光状態の関係を用いて画像の各ピクセルに対し、実際に観測した偏光状態を満たす入射光および法線を推定する。これにより、図１に示すように、屋外で撮影した偏光画像から微細な三次元形状を復元できることを実証した。その他に、均一な材質の物体であれば、連続するフレームの画像に本手法を適用することで動的な形状の変化を復元できることも示した。

本手法は光源が空であるためパッシブに三次元形状復元ができ、屋外での三次元センサーとしての応用が期待できる。特に、視点によって見え方が異なる鏡面反射が起こりやすい物体など、従来手法では取り扱えない対象について、屋外で詳細な形状を復元する方法として有効である。（文責：市川知樹）

[1] Ichikawa, T., Purri, M., Kawahara, R., Nobuhara, S., Dana, K., Nishino, K.: IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Jun., (2021).
[2] Strutt, J. W.: XV. On the light from the sky, its polarization and colour, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. 41, No. 271, pp. 107–120 (1871).
[3] Goldstein, D.: Polarized Light, CRC Press (2011).

通信システム工学講座　知的通信網分野　（大木研究室）
http://icn.cce.i.kyoto-u.ac.jp
「弾力性のある光ネットワークの設計・制御」

大木研究室は、高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの研究開発を行っている。理論から実装まで幅広いアプローチで取り組んでいる。本稿では、研究トピックの１つである弾力性のある光ネットワークの設計・制御について紹介する。

エラスティック光ネットワーク（EON: Elastic optical network）は、波長スペクトル資源を柔軟に利用する光ネットワーク技術である。EON の概略を図１に示す。EON では光パスを設計する際に、必要な通信容量に応じた最小限のスペクトルスロットを割り当て、伝送距離に応じた光変調方式を適用する。これにより、波長スペクトル資源の効率的な利用を可能にする。大木研究室では、EON の設計・制御における基盤技術の確立を目指している。

EON では、光パスの設定・解除が繰り返されることで、使用可能な波長スペクトル資源が未整列・非連続となる問題がある。これを波長スペクトル資源の断片化と呼ぶ。[1] では、擬似 1+1 パスプロテクションを適用した EON における断片化の改善（デフラグメンテーション）手法を提案している。各通信要求においてプライマリパスとバックアップパスの２つの光パスが設定されている状況を想定する。光パスを必要に応じて切り替えながら、バックアップパスのスペクトルスロットの再割り当てと経路変更を行うことで、図２に示すように断片化を改善する。デフラグメンテーションの手順を求める問題を整数線形計画問題として定式化し、さらに発見的アルゴリズムを検討している。

[2] では、マルチコアファイバを用いた EON における、光パスへの経路、変調方式、スペクトル、およびコア割り当て（RMSCA: Routing, modulation, spectrum and core allocation）問題を検討している。EON ではスペクトルの連続性および隣接性の制約を満たすように、スペクトルスロットを光パスに割り当てる必要がある。また、マルチコアファイバではコア間クロストーク（XT: Crosstalk）とコア内信号劣化（PLI: Physical layer impairment）が発生する。コア間 XT とコア内 PLI を結びつけて考慮する RMSCA モデルを構築し、数値評価により、波長スペクトル資源の利用効率が向上することを確認している。

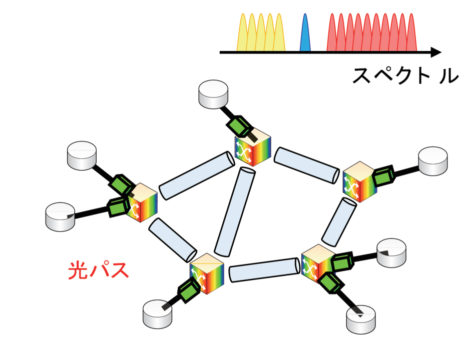


図１　エラスティック光ネットワーク（EON）

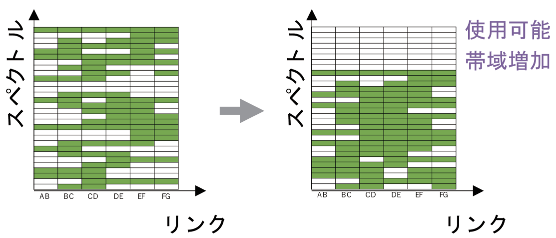


図２　EON におけるデフラグメンテーション

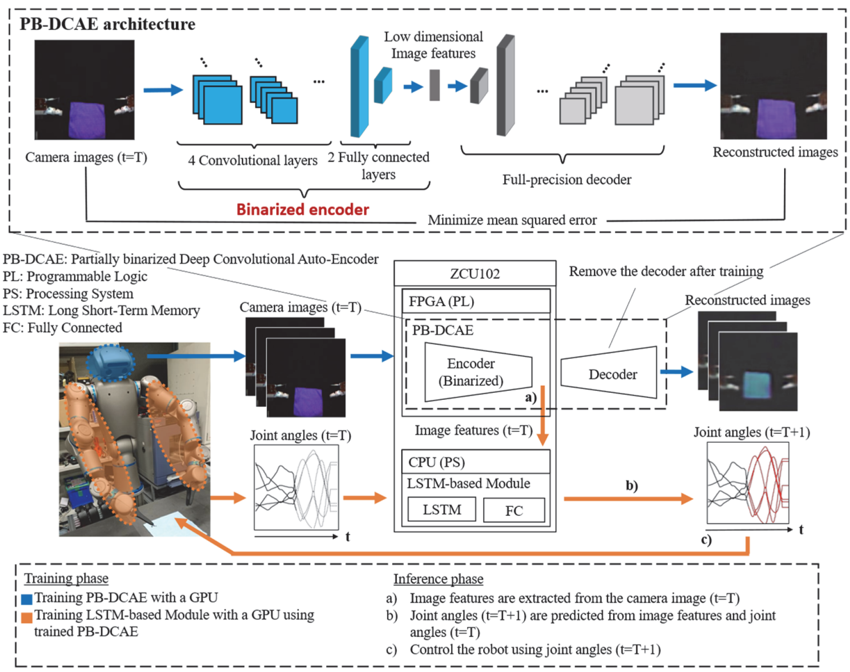
[1] T. Sawa, F. He, T. Sato, B. C. Chatterjee, and E. Oki, “Defragmentation with Reroutable Backup Paths in Toggled 1+1 Protection Elastic Optical Networks,” IEICE Transactions on Communications, vol. E103-B, no. 3, pp. 211-223, March 2020.
[2] K. Takeda, T. Sato, B. C. Chatterjee, and E. Oki, “Jointly Inter-Core XT and Impairment Aware Lightpath Provisioning in Elastic Optical Networks,” 55th IEEE International Conference on Communications (ICC 2021), June 2021.

集積システム工学講座　情報回路方式分野　（佐藤研究室）

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

「FPGA 実装を指向した部分 2 値化オートエンコーダに基づく人型ロボットによる柔軟物操作システム」

深層学習（DL）技術とロボティクス技術の組み合わせにより、家事などの日常タスクを代替させる試みが進んでいる。産総研や早稲田大学の研究グループは、ロボットの遠隔操作環境を使って、人間の操作コマンド（関節角指示）とカメラで取得される環境情報の対応を深層ニューラルネットワーク（DNN）に覚えさせることで、タオルなどの柔軟物を折り畳ませることに成功した。これらの研究により、DNN のロボティクス応用可能性が示されたが、推論器は GPU の利用を前提としており、筐体サイズが限られているロボット本体への DNN 推論器の組み込みは困難であった。そこで、今年度は、小型かつ低消費電力で動作する FPGA へのロボット制御用 DNN の移植可能性を検討した。FPGA への移植にあたって、FPGA の限られた計算・メモリ資源を効率よく活用できるよう、重み・活性化値が 2 値化された Binarized Neural Network（BNN）を利用することとした。しかし、全ての層を BNN で置換してしまうと、学習が収束しないという問題が見られたため、画像特徴抽出部分のみを 2 値化した部分 2 値化オートエンコーダ（PB-DCAE）を提案する。システムはカメラ画像を低次元の特徴ベクトルに変換する PB-DCAE と、ロボットアームの関節角度を生成する Long-Short Term Memory（LSTM）の 2 つのニューラルネットワークで構成される（下図）。LSTM のモデルサイズは全体の 1.2% 程度であるため、量子化せず LSTM の性能を維持する。PB-DCAE がバイナリ演算、LSTM が浮動小数点演算という異種の演算に対応すべく、プラットフォームには Zynq SoC を採用し、PB-DCAE は programmable-logic（PL）に、LSTM は ARM プロセッサを搭載した processing-system（PS）にそれぞれ実装した。本モデルは、まず GPU を用いて学習され、続いて、PB-DCAE のパラメータを C++ のヘッダファイルに変換し、Vivado を用いて「.bit」ファイルに変換して PL を構成する。LSTM は、リソースの限られた ARM プロセッサ上で効率的に実行できるよう Numpy を用いて再実装した。実ロボットで取得された学習データを用いた数値実験の結果、提案手法により、推論精度を殆ど損なうことなくモデルサイズを 95.7% 削減できることが明らかとなった。



参考文献

[1] S. Ohara, T. Ogata and H. Awano, “Binary Neural Network in Robotic Manipulation: Flexible Object Manipulation for Humanoid Robot Using Partially Binarized Auto-Encoder on FPGA,” in Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021, Best RoboCup Paper Award Finalists.

情報学研究科　システム情報論講座　論理生命学分野　（石井研究室）

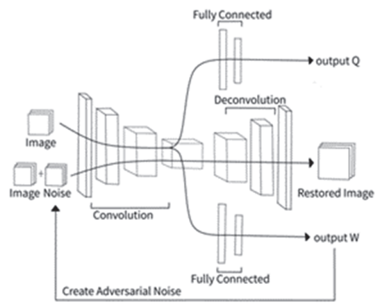
URL: http://ishiilab.jp/kyoto/

サンプル効率が高くノイズに頑健な敵対事例強化学習法

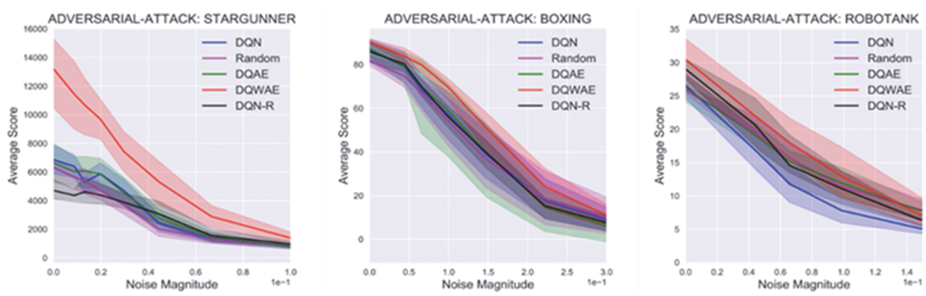
環境との相互作用に基づき自律的に適応する過程は、機械学習の一種である「強化学習」により定式化される。Google DeepMind 社が開発した Alpha Go（深層強化学習をベースとする）が囲碁の世界チャンピオンを負かしたことからも、強化学習は注目を集めている。

強化学習は人工知能分野で発展が著しく、自動運転車の自律制御などへの応用が期待されている。しかし、現在の深層型の強化学習アルゴリズムには大きな欠点が二つある。第一に、ゲームなどのシミュレーション環境では学習サンプルは大量に取れるものの、実問題でのサンプル数は多くはできない。例えば自動運転では、人と車が接触するなどの危険なサンプルを数多く取ることはできない。サンプル効率の高い学習法が必要である。第二に、深層学習の問題とも言えるが、学習サンプル点での近似性能は高いものの、その近傍に近似性能を大きく劣化させる点（敵対事例）があることが知られている。例えば、深層強化学習により制御される自動運転車があったとして、その通信が妨害されて真の入力データを敵対事例に書き換えられた場合、自動運転車は危険な機械となり得る。敵対事例などの入力ノイズに対して頑健な学習法が必要である。これら二つの問題の解決に期待される技術が敵対事例学習である。すなわち、真の学習サンプル点の近傍で敵対事例を探し出し、それをも学習サンプルに含めることで、敵対事例のみならず各種の入力ノイズに対して頑健になることに期待する。

本分野の中西康輔と大橋康平は、深層強化学習用の敵対事例学習法の開発を進めた。この深層ニューラルネットワークは、単一のエンコーダと三つのデコーダからなる三つ又構造である（右図）。第一のデコーダは、深層強化学習法の一種である深層 Q 学習を行う。第二のデコーダは、深層 Q 学習に対する敵対事例を生成するネットワークであり、第三のデコーダは、その敵対事例を入力して真の入力（すなわち敵対的でない入力）に変換するオートエンコーダである。この学習により、結果として、敵対事例を非敵対事例に戻すようなエンコーダ出力が得られることが期待できる。ここで、深層 Q 学習の目的関数は変わっていないので、敵対事例学習が強化学習の学習を阻害することはない。



深層強化学習の評価は、しばしばコンピュータゲームの集合である Atari 2600 を用いて行われる。下図に Atari 2600 のいくつかのゲームにおける本手法（赤線）の性能を示す。参考のため、いくつかの先行研究による結果を他の色で示している。本手法は、従来手法に比してノイズ（その強さが横軸）に対して高い頑健性を有することが分かる。また、Star Gunner（下図左）では、提案手法は従来法に比して大幅に高い性能を得ている。これは、ノイズがゼロの際の性能（Y 軸上の数値）を比較することからわかる。これは、提案手法が、従来法よりも大幅に学習効率が高いことを意味している。また、論文中では、自動運転シミュレータの学習制御においても本手法の優位性を示している (Ohashi, et al., IEEE-Access, 2021)。



エネルギー物理学講座　電磁エネルギー学分野　（中村（祐）研究室）

http://www.em-energy.energy.yoto-u.ac.jp

「トカマクプラズマにおける３次元 MHD 平衡ダイナミクス」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

現在、核融合研究では科学技術的実証炉であるITER（国際熱核融合実験炉）が南仏に建設中であり、2025年頃から実験が始まり、最終的には加熱に必要なエネルギーの10倍以上の核融合エネルギーを制御した状態で持続的に発生させる計画です。これらの核融合研究の進捗に合わせて、国内ではオールジャパン態勢で次の段階の原型炉の検討が始まっています。

超高温プラズマの磁場閉じ込めを考える場合、最初に検討する必要があるのは、プラズマの圧力勾配による力とそれを抑え込むための電磁力がバランスした状態、磁気流体力学的（MHD）平衡を見つけることです。MHD 平衡が成り立った状態では、図１に示すように磁力線が入れ子状のトーラス面（磁気面）を織りなしており、プラズマはこの磁力線の籠に閉じ込められています。ITER などのトカマク型装置では、この磁気面を外部コイル電流とプラズマ中に流す大きな電流で作っており、一般的には軸対称性を有しています。しかし、近年の研究の進展に伴い、詳細な実験や計測、数値解析が可能になると、無視できると考えられていた様々な磁場の非軸対称性がプラズマやアルファ粒子の閉じ込めなどに影響を及ぼす可能性が指摘されてきました。磁場の非軸対称性をもたらす要因は様々あり、当研究室でも種々の解析を進めています。

一例として、プラズマ電流崩壊現象における非軸対称性の影響の研究を紹介します。不安定性など様々な原因でプラズマ温度が急激に低下した場合、プラズマの電気抵抗は電子温度の3/2乗に反比例して増加するため、プラズマ電流崩壊をもたらしますが、プラズマ電流減少の時間スケールが装置の応答時定数より十分に短いと、真空容器などの構造物に誘導起電力を与え、大きな渦電流を流します。このとき真空容器の構造に非軸対称性があると図２のように鞍型電流が流れ、電流減衰時の MHD 平衡の時間発展に大きな影響を与えます。現在、当研究室ではこれらの現象の解析を可能とする新しい統合シミュレーションコードの開発を行っています。

また、最近の実験ではプラズマ周辺で発生する間欠的なプラズマ放出現象を抑制するため、積極的に共鳴摂動磁場（RMP）と呼ばれる非軸対称磁場を印加し、磁気面構造を周辺領域だけ乱す試みなどが行われており、これらの非軸対称性が及ぼす影響に関する研究を進めています。

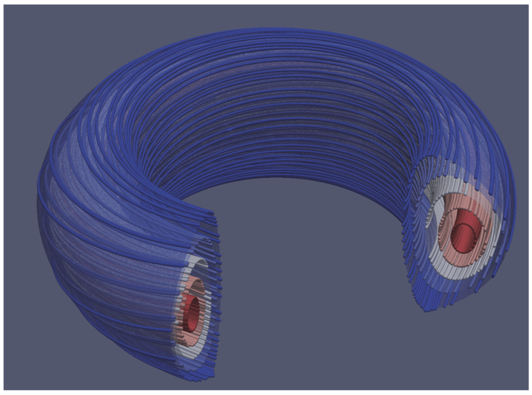


図１　原型炉で想定される MHD 平衡の例。磁力線が入れ子状の面（磁気面）を織りなし、プラズマを閉じ込めている。

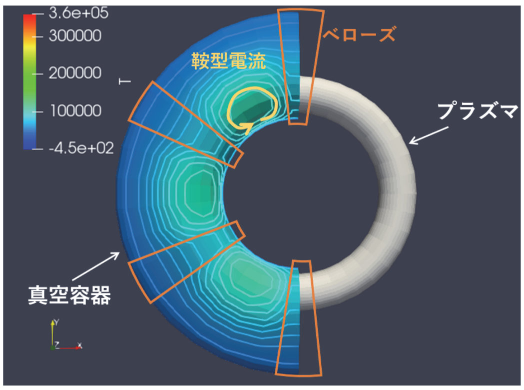


図２　プラズマ電流崩壊時に、電気抵抗の高いベローズ部分を持つ真空容器上を流れる渦電流

生存圏研究所　生存圏診断統御研究系　レーダー大気圏科学分野　（山本研究室）

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

「GPS 受信機網を用いた電離圏電子数 3 次元トモグラフィーの高度化」

全地球測位システム（Global Positioning System; GPS）は優れた測位・時刻の標準インフラであるが、環境計測にも大いに利用されている。2 周波数の伝搬位相差の計測から電離圏中の全電子数（Total Electron Consistent; TEC）が求められる。さらに我が国では、国土地理院が全国に 1300 点を超える電子基準点のネットワーク GEONET を運用中である（図 1）。我々は GEONET からの TEC 観測データのトモグラフィー解析を開発し、日本上空の電離圏電子密度の 3 次元分布を得てきた（CUE 誌 37 号 p.32 で報告）。解析手法は拘束条件付き最小二乗法である。電子航法研究所との研究協力のもと、2016 年 4 月から全国 200 点からの GEONET リアルタイムデータを用いたトモグラフィー解析を始め、観測から数分遅れの自動解析結果を 15 分毎に公開している（http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/）。

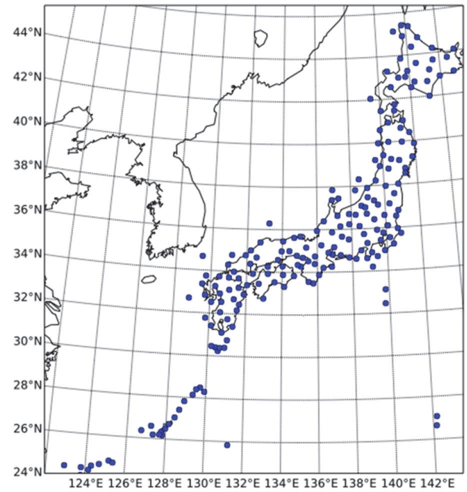


図 1　リアルタイムデータが得られる GEONET 観測点の分布。

現在、我々は GPS-TEC にイオノゾンデ観測による電離圏電子密度と高度データを加えた新しい解析手法を開発している。イオノゾンデは数 MHz から数十 MHz 帯の電波を上空に発射し、電離圏からの反射波を用いて電子密度を観測する。全国 4 か所のイオノゾンデのパラメータ NmF2（最大電子密度）と hmF2（電子密度が最大となる高度）を用いることで、特に高度方向の推定精度が向上した。図 2 に巨大な磁気嵐 St Patrick's Day イベントの解析例を示す。沖縄（最上部）から稚内（最下部）まで、異なる緯度における高度 600 km までの電子密度の時間・高度分布を等高線表示している。時間・高度変化は、磁気嵐が始まる前まで 2 日間にわたって通常の日変化を示すが、磁気嵐の日には Dst インデックス（図中の実線）の低下と共に電子密度が減少し、電離圏の高度が上下に激しく変動し、徐々に回復していく。他の観測と非常に良い一致性を示しており、改良型のトモグラフィー解析の威力を示す結果である。今後はこの改良型解析のリアルタイム運用を目指して行く。

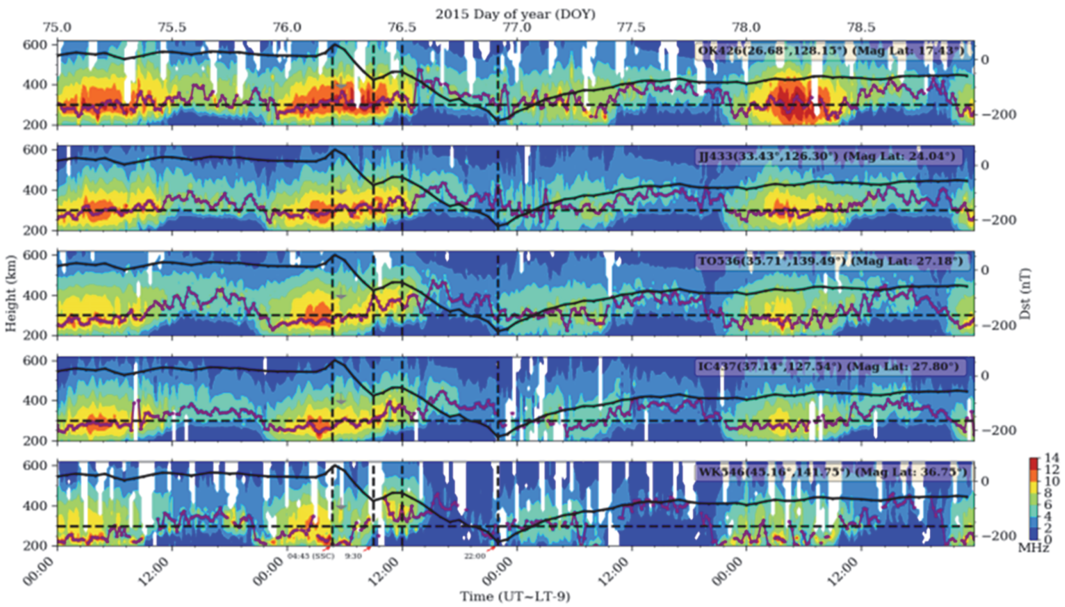


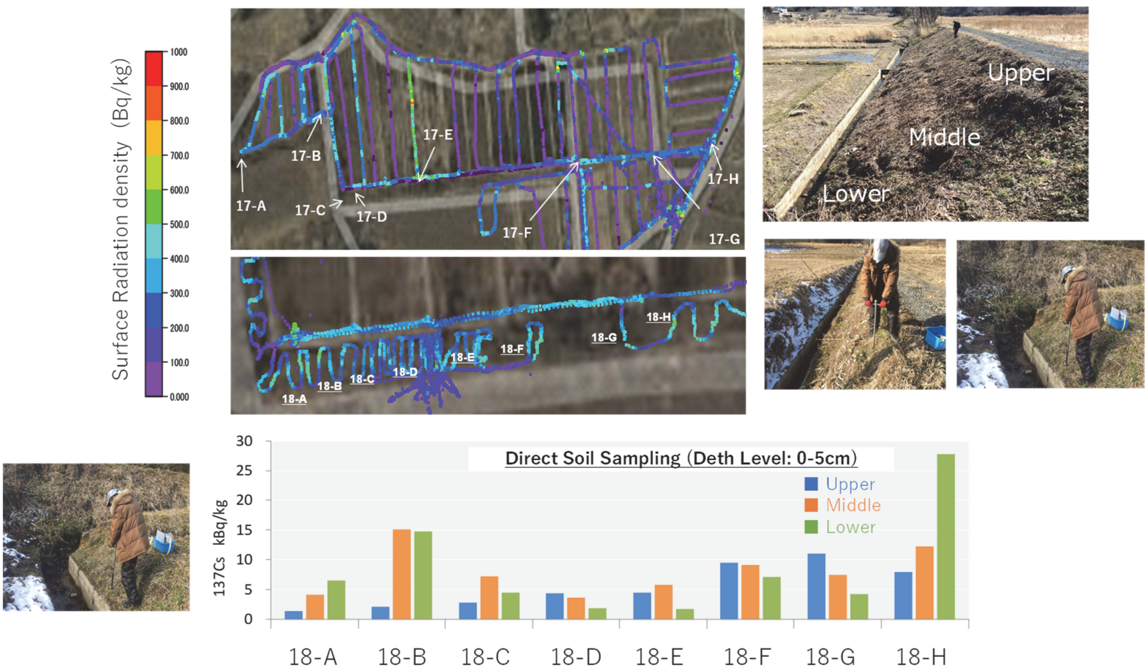
図 2　2015 年 3 月 17 日に発生した巨大な磁気嵐 St Patrick's Day イベントの解析例。

生存圏研究所　生存圏開発創成研究系　宇宙圏電磁環境探査分野　（小嶋研究室）
http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/kojima-lab/
「歩行サーベイによる福島県の環境放射能計測」

東日本大震災から10年が経過していますが、福島県内における環境放射能に関する調査は、現在も続いています。私たちは、震災直後から福島県での連携支援研究を継続して行っています。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の除染実証事業としての研究の他、多くの研究成果を報告するための生存圏シンポジウムを毎年開催し、一般の方々にも広くお知らせ出来る形で、支援研究を続けてきています。

過去には除染技術として微細気泡を用いた研究を福島県にて実施してきましたが、最近の福島県における研究事例として、歩行サーベイによる環境放射能計測について紹介したいと思います。現在用いている歩行サーベイによる計測には、京都大学複合原子力科学研究所が開発したGPS連動型放射線自動計測システムKURAMA（クラマ，Kyoto University RAdiation MApping system）を用いています。KURAMAは放射線計測を自動で行い、その計測結果をクラウドサーバに保存する事で、一括してデータを管理可能で、マッピングなども非常に容易なシステムです。歩行サーベイ型としてはKURAMA-IIが開発され、2台のシンチレーション検出器（CsI）を搭載しています。1台目は空間線量を検出し、もう1台は下部以外を鉛で覆う事で、地表面からの線量のみを検出します。この2台の検出器を使う事で、地表面の放射能計測をリアルタイムで精度よく計測を行う事が出来、特に歩行用に開発されているため、斜面や山の中などの環境放射能計測を自由に行なう事が可能です。私たちはこのKURAMA-IIを用いて、特に農地周辺の環境放射能の経時変化を計測し続けています。

農地周辺の環境放射能の一例を下図に示しますが、福島県における行政による除染は、農地内部の除染のみであり、農地すぐ横の草地や、灌漑水路については、一部未除染のまま残っている地域もあります。そのため、我々はKURAMA-IIを用いることで、長期間の環境放射能の変化を追い続けています。KURAMA-IIの便利な点は、図の写真にあるような、土壌の実際のサンプリング（計測結果は棒グラフに表示）と非常に良い相関を持つデータを、歩くだけで瞬時に計測することが出来る点（地図中のカラーバーがKURAMA-IIの計測結果）です。土壌サンプリングの場合はサンプリング後に研究機関へ持ち帰る必要があり、結果が判明するまでに時間がかかりますが、KURAMA-IIはその場ですぐに結果を見ることが出来るため、何かあればすぐに対処できます。一点、問題があるとすれば重量であり、20kg程度のリュックを背負いながら歩き回ることは大変です。ただ、毎回筋力トレーニングを行っている気分になりますので、運動が好きな方にはうってつけかもしれません。



生存圏開発創成研究系　生存圏電波応用分野　（篠原研究室）

http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/shinohara-lab/index.php

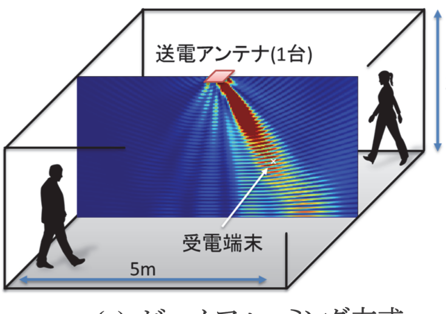
「分散アンテナによる屋内ワイヤレス給電の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、マイクロ波帯の電波をエネルギー伝送媒体として利用した空間伝送型ワイヤレス電力伝送に関する研究を行っている。空間伝送型ワイヤレス電力伝送は、送受電アンテナを介して電波を空間中に放射してワイヤレス給電する方式であり、iPhone や Apple Watch に採用されている電磁誘導方式や MIT の提案した共振結合方式と比較して長距離のワイヤレス給電が可能である。今回は、多数の送電アンテナを広い範囲に配置して協調動作させることにより高効率での給電を可能とする分散型マイクロ波給電の研究取り組みについて紹介する（パナソニックとの共同研究）。

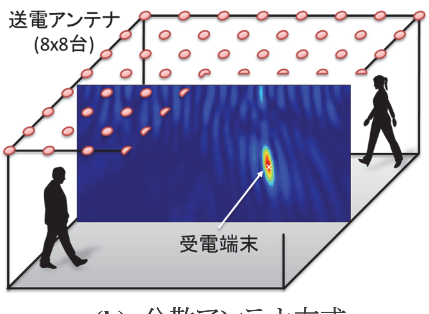
IoT デバイスやモバイル端末など、人の近くに存在するデバイスに対して無線給電を行うためには、人体に入射する電磁波を極力低減しつつ、受電デバイスにより大きな電磁波を集中させる必要がある。このような環境においては大面積の送電アンテナを用いてビームフォーミングすることにより、受電デバイスを狙った細いビームを形成することが一般的である。しかし、ビームフォーミング方式では送電アンテナと受電デバイスの間に物体があるとビームが形成できず、遮蔽に弱いという課題がある。現在研究を行っている分散型マイクロ波給電では、多数のアンテナを空間的に分散して配置し、それらの位相を精密に制御することによって、ピンポイントへの給電を実現する。図 1 にビームフォーミング方式と分散アンテナ方式の概念図の電力密度の分布を示す。ビームフォーミング方式では送電アンテナからビーム状の分布が見られ、床面反射の影響で周期的な減衰が見られる。一方分散アンテナ方式では受電端末の近傍のみに電力が集中しており、反射の影響も小さい。このように、本方式は人体の近くで利用される IoT デバイス等に適した方式であるといえる。

しかし、多数の送電アンテナの位相を一つ一つ制御するためには、受電端末からビーコン信号を送信し、送電アンテナでビーコン信号を計測することによって位相の測定･最適位相の算出を行うレトロディレクティブ方式が一般的である。しかし、ビーコン信号の送出に要する消費電力が大きく、ビーコン信号の周波数を送電周波数と一致させる必要があるため、低消費電力である IoT デバイスには不向きとなる。そこで、本研究では受電電力のみを観測し、位相の最適化を行う方法を提案している [1]。これによって、受電端末の数によらず、O（N）程度の回数で位相の最適化が可能であることを確認している。

本研究では 16 台の送電アンテナを用いて 8m x 3m の空間内に給電を行う実証を行い、5W 送電時に 6mW 以上の受電を確認している。今後はさらに送電アンテナの台数を増やし、受電電力を向上するとともに多数の受電デバイスへの同時給電を実現する。本研究により、安全かつ低コストでバッテリレスのセンサネットワークを実現し、真にワイヤレスな IoT 社会の実現に寄与することが期待される。



(a) ビームフォーミング方式



(b) 分散アンテナ方式

図 1　各方式におけるアンテナ配置と電力密度分布

[1] 田中勇気, 金井一輝, 枷場亮祐, 佐藤浩, 池田拓磨, 谷博之, 梶原正一, 小柳芳雄, 篠原真毅, “バックスキャッタリングを用いた分散協調型マイクロ波無線電力伝送システムの GNU Radio による実装”, 信学論（B), 103（11), pp.559-570, Nov .2020.

博士論文概要

［課程博士一覧］

萬成遥子	「Mass Transport and Discharging Dynamics of Redox Flow Battery for Power Supply」	令和２年11月24日授与
上田博之	「Studies on low-field functional MRI to detect tiny neural magnetic fields」 （極微弱な神経磁場を捉える低磁場 fMRI に関する研究）	令和３年３月23日授与
李　阳	「交流スーパーフェリックマグネットの低消費電力化の研究」	令和３年７月26日授与
Hamed Eskandari	「Reduced Ordered Representation of Eddy-Current Field in Nonlinear Medium Using Cauer Ladder Network」 （非線形媒質中における渦電流界の Cauer 梯子型回路を用いた縮約表現）	令和３年９月24日授与
李　垂範	「Study on Electrical Generation and Manipulation of Spin Current in n-type Si Spin MOSFET」 （n 型 Si スピン MOSFET におけるスピン流の電気的生成と操作に関する研究）	令和３年３月23日授与
野原紗季	「連続適応量子状態推定の実現と単一発光体への応用」	令和３年３月23日授与
山本悠樹	「DNA オリガミを用いた生体分子の固定化およびその液中周波数変調 AFM 評価」	令和３年３月23日授与
岸元克浩	「元素原料気相成長法によるサファイア基板上 AlN の結晶成長およびカーボンを用いた AlN 表面の p 型伝導制御」	令和２年11月24日授与
坂田諒一	「複合変調フォトニック結晶レーザーによる高出力・高ビーム品質２次元ビーム走査の研究」	令和３年３月23日授与
仲代匡宏	「高 Q 値光ナノ共振器結合系と pin ダイオード融合デバイスの開発と電気的な光操作に関する研究」	令和３年３月23日授与
Huang Yin Jou	「Event Centric Approaches in Natural Language Processing」 （自然言語処理におけるイベント中心アプローチ）	令和３年７月26日授与
郭　孟妤	「Refraction and Absorption for Underwater Shape Recovery」 （屈折と吸収のモデル化による水中物体の３次元形状復元）	令和３年９月24日授与
香田優介	「Visual Data-Driven Millimeter Wave Communication Systems」 （画像データ駆動ミリ波通信システム）	令和３年３月23日授与
尹　博	「Airtime Management for Low-Latency Densely Deployed Wireless Networks」 （低遅延稠密無線ネットワークのためのエアタイム管理）	令和３年３月23日授与
稲垣悠一	「Importance-Aware Information Networking toward Smart Cities」 （スマートシティに向けた重要度を考慮した情報ネットワーキング）	令和３年９月24日授与

Yuncan Zhang	「Robust Service Provisioning in Network Function Virtualization」 （ネットワーク機能仮想化における堅牢なサービスプロビジョニング）	令和３年９月24日授与
徐　宏　傑	「Energy Efficient On-Chip Cache Architectures and Deep Neural Network Accelerators Considering the Cost of Data Movement」 （データ移動コストを考慮したエネルギー効率の高いキャッシュアーキテクチャとディープニューラルネットワークアクセラレータ）	令和３年３月23日授与
上田　樹美	「A Study on Integrated Thermal Control to Improve Intellectual Work Performance」 （知的作業パフォーマンス向上のための統合温熱制御に関する研究）	令和３年３月23日授与
逢見　翔太	「脱炭素化・電力自由化時代における電圧安定性を考慮した電力システムの最適運用計画に関する研究」	令和３年９月24日授与
兒島　清志朗	「Novel Beamforming and Antenna Techniques for Microwave Power Transmission in Radiating Near Field」 （放射近傍界マイクロ波送電に向けたビームフォーミング及びアンテナ技術に関する研究）	令和３年３月23日授与
平川　昂	「Novel Analyses on Single Shunt Rectifiers for Microwave Wireless Power Transmission」 （マイクロ波無線電力伝送用シングルシャント整流回路の設計および解析手法に関する研究）	令和３年３月23日授与
楊　波	「High Power Microwave Wireless Power Transmission System with Phase-Controlled Magnetrons」 （位相制御マグネトロンを用いた大電力マイクロ波無線電力伝送システム）	令和２年11月24日授与
Ruiting OUYANG	「Receiver Design for Highly Mobile Wireless Regional Area Network」 （高速移動広域無線通信システムにおける受信機に関する研究）	令和３年９月24日授与

萬　成　遥　子　（引原隆士　教授）
「Mass Transport and Discharging Dynamics of Redox Flow Battery for Power Supply」
令和２年 11 月 24 日授与

電力系統では再生可能エネルギーの導入が推し進められており、その推進に伴って蓄電池の重要性も広く認識されつつある。太陽光や風力などの再生可能エネルギーの出力は秒オーダーから数時間まで様々な時間スケールで変動する。それらの変動を電力貯蔵装置により吸収することが需給バランスの維持や電力品質の維持のために必要とされている。蓄電池はミリ秒オーダーという素早い応答速度を示す一方で数時間にわたって電力を貯蔵できるため、幅広い時間スケールでの再生可能エネルギーの出力変動に対応できる。そのため、リチウムイオン電池や NAS 電池、レドックスフロー電池などの電力系統用蓄電池の研究が広く進められている。

蓄電池からの出力電力を決定づける要素の一つとして、電池内部の物質移動が挙げられる。蓄電池内部の充放電反応は、電極界面を介した電子移動と、電極への物質移動に分けられる。蓄電池から大電流を取り出そうとした時、 遅い物質移動が充放電反応を律速し、電流を律速する要因となる。多くの蓄電池では内部の物質移動に外部から干渉できず、物質移動を速くするためには内部構造の設計の改善といったアプローチがとられる。

そうした中、本研究ではポンプによる電解液の循環機構を持つレドックスフロー電池に着目し、蓄電池外部からの制御によって物質移動による電流の律速を回避することを試みた。レドックスフロー電池は大規模電力貯蔵用の蓄電池の一つであり、図１に示すように電解液貯蔵用のタンクと充放電反応を発生させるためのセルから構成される。セルでは充放電反応によって反応物が消費される一方で、電解液の循環によってタンクから反応物が供給される。急激に負荷が増加した場合、セル内の反応物消費に対してタンクからの反応物供給が遅ければ、セルで反応物が枯渇して物質移動により電流が律速される。タンクからの反応物供給速度を決定づけるパラメータは電解液流量であり、その値を制御することでレドックスフロー電池が物質移動による電流の律速を受けることなく負荷への電力供給を維持できるものと考えられる。

本研究では、まず負荷変動発生時のレドックスフロー電池の放電挙動について調べるため、反応速度論に基づく数理モデルを用いて解析を行った。その結果、実際に電解液流量や初期 SOC の値に応じて、タンクに反応物を残したまま反応物枯渇による放電停止や物質移動による電流の律速が生じることが示唆された。また、大規模なシステムにも適用できるように輸送遅れを取り入れてモデルを拡張した。このモデルを用いて電流の時間変化を計算し、電解液流量から定まる限界電流と比較することで律速の発生を予測する手法を提案し、実機でその妥当性を確認した。提案手法を用いた予測に基づいて電解液流量を制御することで、負荷変動時に律速を回避することができると考えられる。

本研究はレドックスフロー電池における電解液流量の制御系設計のための理論的指針が示すものである。その知見をもとに、他の蓄電池とは異なるレドックスフロー電池独自の運用手法の開発の一助になると考えられる。

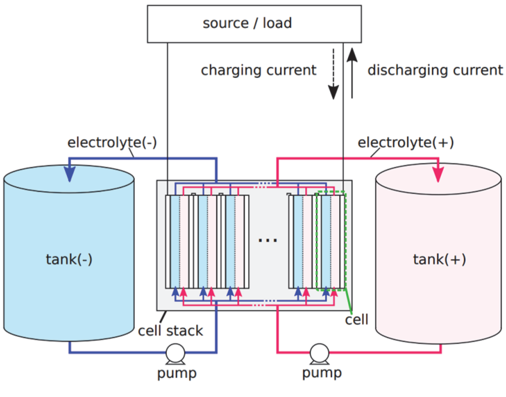


図１　レドックスフロー電池の構成。

上　田　博　之（小林哲生　教授）
「Studies on low-field functional MRI to detect tiny neural magnetic fields」
（極微弱な神経磁場を捉える低磁場 fMRI に関する研究）
令和 3 年 3 月 23 日授与

機能的 MRI（fMRI）は、MRI 装置を用いて脳神経活動を計測する手法である。従来の fMRI には、血液中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビン量の局所的変化を MR 画像に反映する blood oxygenation level dependent（BOLD）法が用いられている。しかし、BOLD 法は神経磁場の賦活から計測に至るまでに遅延時間が存在することや高磁場 MRI でしか使用できないという制約を有している。本研究では、新たな fMRI 手法として神経磁場を核磁気共鳴現象により計測を行う spin-lock preparation に注目した。これにより BOLD 法の制約が克服できる一方で、BOLD 効果との混信を避ける必要があり、これが抑制される低磁場 MRI での運用を考えた。そこで低磁場での fMRI の実現に向け、spin-lock sequence 中における磁化挙動の解析、2 つの spin-lock preparation の比較と磁場検出限界の調査、MR 画像化シミュレーションを行い、以下の 3 つの知見を得ている。

1. Spin-lock sequence 中における磁化挙動の解析
   Spin-lock 中の磁化の挙動を Bloch 方程式により記述し、2 次回転座標系と回転波近似を導入することで、解析解を導出している。導出された解析式において、磁化の挙動は正弦波モードと双曲線モードに分岐することが示された。また、ファントム実験によりこの解析解の妥当性を検証した。
2. 0.3-T MRI における spin-lock preparation の有効性と検出可能な磁場の調査
   Spin-lock preparation である stimulus-induced rotary saturation（SIRS）と spin-locked Mz（SL-Mz）に関し、0.3-T MRI を用いて、振動磁場の振幅・位相変化、検出可能な磁場強度という観点で比較検討を行っている。図 1 は計測対象である振動磁場の振幅を増加させたときの SIRS と SL-Mz を用いた MR 画像である。赤い円の領域内で SIRS では輝度が低下するのに対して SL-Mz では大きくなっている。また、前項の解析解と実験結果から SL-Mz の方が微小磁場計測に優位であり 2.34 nT の磁場を検出することが出来た。しかし、等価電流ダイポールのシミュレーション結果から神経磁場を捉えるには更なる感度が必要であることが分かった。
3. Spin-lock preparation を含む MR 画像化シミュレーションの構築
   Spin-lock sequence のシミュレーションに関する先行研究において、画像化の過程が考慮されていないことに注目し、シミュレーション手法や条件に関する検討を行った。その結果、実験画像と同等の画像を再現するには sub-voxel を 8 × 8 × 8 以上に分割する必要があることが示された。また、sub-voxel 数に伴う計算時間の増加に対して GPU 並列化により 28.09 倍の計算時間高速化を実現し、その有効性が示された。

本論文では、低磁場 fMRI の実現に向けて、0.3-T MRI を用いて上記 3 つの spin-lock preparation に関する基礎的な検討を進めてきた。また、低磁場 fMRI の実用化のためには検出感度の問題が明らかとなり、解決策として画像の信号対雑音比改善を提案している。また本手法の応用として脳の機能的結合の推定に関しても言及している。このように本論文では低磁場 fMRI の実現に向けた指針を示している。

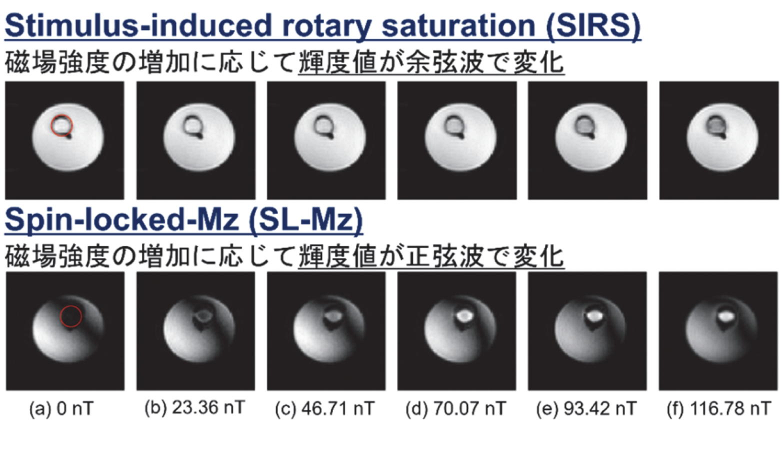


図1　spin-lock preparation を用いたファントム撮像実験の結果。赤い円は計測対象の磁場発生源であるループコイルを表している。

李　　　　阳（雨宮尚之　教授）
「交流スーパーフェリックマグネットの低消費電力化の研究」
令和３年７月26日授与

“スーパーフェリックマグネット”（Superferric magnet）は、粒子加速器において粒子の制御に使用されるビーム偏向マグネットの設計の名称である。スーパーフェリックマグネットは超伝導体（super）と鉄芯（ferric）を組み合わせており、低い温度で直流抵抗がゼロになる超伝導を利用することで、従来の常伝導導体を使用したマグネットと比べて低い消費電力が期待される。また、鉄芯を採用することで、鉄芯を採用しないマグネットと比べて、同じ磁界を発生させるために必要な導体の量が少ない、鉄芯形状を調整することで高い磁界精度を出しやすい利点が挙げられる。ただし、鉄の飽和が問題となりマグネットの磁界が２T以下に制限されてしまうデメリットも存在する。

“交流スーパーフェリックマグネット”の“交流”は、加速器の一種である高繰り返しシンクロトロン（Rapid cycling synchrotron, RCS）での応用を想定していることを意味する。RCSで使用されるビーム偏向マグネットは100 Hz程度の高い周波数で変化する磁界を発生させるため、交流磁界に置かれた超伝導コイルには交流損失が発生する。既存の低温超伝導体を利用したマグネットは数Kの極低温での運転が必要であり、冷却の観点から低温超伝導を適用した交流スーパーフェリックマグネットの実現は困難である。これに対して、数十Kの運転温度を可能とする高温超伝導を適用した交流スーパーフェリックマグネットは実用的な候補として考えられ、私はこの高温超伝導交流スーパーフェリックマグネットに焦点を当て、高温超伝導交流スーパーフェリックマグネットの適用によるRCS用マグネットの低消費電力化について研究を行った。

今まで高温超伝導導交流スーパーフェリックマグネットに関する研究は進められておらず、私の博士論文では電磁界解析及び小規模の検証実験によって、交流スーパーフェリックマグネットの実用性を検討した。

電磁界解析においては、まず適切な測定方法と定式化方法に基づいて超伝導線の導電特性（電流密度―電界特性）を求め、これを利用した電磁界解析により交流スーパーフェリックマグネットの交流損失を評価した。その結果、スーパーフェリックマグネットの鉄芯はコイルの交流損失を増加させることを明らかにした。その後、鉄芯形状やコイル形状を変化させた交流スーパーフェリックマグネットを設計し、それぞれの交流損失を評価した。その結果、鉄芯が小さいほどコイルの交流損失が増加し（同時に鉄芯の体積の減少により鉄芯における損失が減少する）、コイルが大きいほどコイルの交流損失は減少することを明らかにした。マグネットの消費電力はコイルの交流損失と鉄芯の損失の両方によって決まるため、マグネットの適切なコイル設計や鉄芯設計による低消費電力の実現の有効性が示された。

一方実験に関しては、小型高温超伝導コイルを用意し、鉄芯を挿入した場合と空芯の場合の高温超伝導コイルの交流損失をそれぞれ測定した。その結果、鉄芯の挿入によりコイルの交流損失が大幅に増加することが確認された。また、低交流損失の高温超伝導集合導体の候補の一つである、多芯化加工を施した高温超伝導線をスパイラル状に金属コアに巻き付けて製作した多芯スパイラル導体の交流損失特性について、実験に基づいた検討を行った。様々な周波数の交流磁界に置かれたスパイラル状に巻いた多芯化高温超伝導線の交流損失を測定した結果、RCSの運転周波数である百Hz程度の交流磁界において、多芯化スパイラル導体は低い交流損失を示すことを明らかにした。

まとめとして、私の博士論文では、RCSでの応用を想定した高温超伝導交流スーパーフェリックマグネットの実用性の基礎的な検討を行った。スーパーフェリックマグネットは鉄芯の存在によって高いコイルの交流損失を示す可能性を明らかにし、最適設計によるマグネットの消費電力の低減の有効性と、多芯スパイラル導体が低交流損失の集合導体の候補となり得ることを明らかにした。この研究の成果により、低消費電力・低線材消費・高磁界精度のRCS用マグネットの実現が期待される。

Hamed Eskandari　（松尾哲司　教授）
「Reduced Ordered Representation of Eddy-Current Field in Nonlinear Medium Using Cauer Ladder Network」
（非線形媒質中における渦電流界の Cauer 梯子型回路を用いた縮約表現）
令和 3 年 9 月 24 日授与

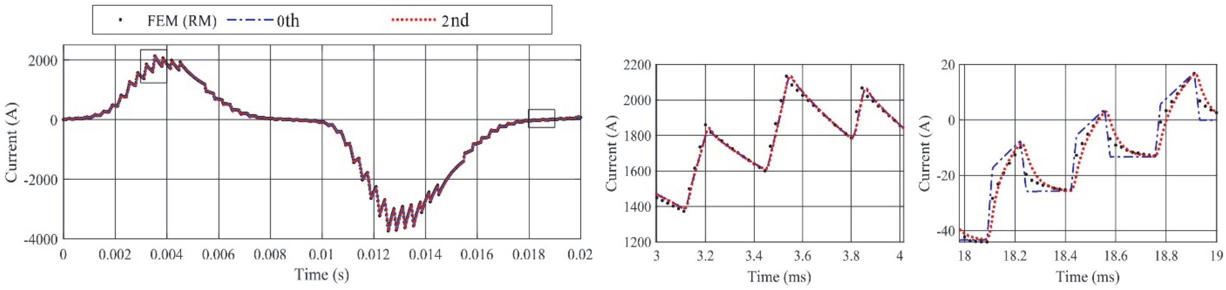
電気電子機器内の電磁界を高精度に算出するためには大規模連立方程式の求解が必要になる。そこで、精度を損なうことなく電気電子機器を等価回路などの自由度の少ないシステムに置き換えるモデル縮約（Model Order Reduction、以下 MOR）の手法が進展しており、その有力な手法として Cauer ladder network（CLN）法の研究が近年進んでいる。本論文は、CLN 法を非線形磁気特性を持つ媒質に対応できるように拡張する手法を提案するとともに、積層鉄芯を効率的に縮約表現する均質化法と上記手法を組み合わせることにより、磁気飽和特性を持つ積層鉄芯を含む電気機器内の渦電流磁界を効率よく高精度に縮約する手法を提案し、数値シミュレーションによりその効果を検証したものである。本論文により得られた主要な結果は以下の通りである。

(1) 磁気抵抗率の磁界依存性を表現するために、Cauer 回路の初段のインダクタ電流をパラメータとして磁気抵抗率を変化させる方法（First-Order CLN 法、以下 FO-CLN 法）を提案した [1]。可飽和鉄芯インダクタの数値解析により、FO-CLN 法は、インダクタ電流の時間応答波形のみならずインダクタ内の磁界分布を精度良く再現する能力を持つことを示した。

(2) 積層鉄芯が持つ微細構造を効率よく表現するための均質化手法（材料スケール MOR）と CLN 法（機器スケール MOR）を組み合わせたマルチスケール MOR 法を提案した [2]。積層鉄芯を持つインダクタの数値解析により、提案のマルチスケール MOR 法は、インダクタ電流および電力損失の時間応答波形、積層鉄芯内の磁界分布を効率的に精度良く再現することが可能であることを示した。

(3) (2) のマルチスケール MOR 法を非線形化するために、均質化手法を FO-CLN 法に適合させる手法を提案した [3]。可飽和積層鉄芯を持つインダクタの数値解析により、提案の非線形マルチスケール MOR 法は、インダクタ電流の時間応答波形（下図）、および、積層鉄芯内の磁界分布を効率的に精度良く再現する力を持つことを示した。

本手法は、今後、モータ電磁界の縮約表現に応用される予定である。



(a) 電流波形　　(b) 左図の四角で囲んだ部分の拡大

図　可飽和積層鉄芯インダクタの PWM 励磁時の時間波形の再現：0th は材料スケール MOR で 0 次近似を用いたモデル縮約、2nd は 2 次近似を用いたモデル縮約による結果

文献 [1] H. Eskandari, T. Matsuo, IEEE Trans. Magn. Vol. 56, No. 2, 7505904, 2020.
[2] H. Eskandari, J. Gyselinck, T. Matsuo, IEEE Trans. Magn. Vol. 57, No.6, 6301004, 2021.
[3] H. Eskandari, J. Gyselinck, T. Matsuo, IEEE Trans. Magn., Vol. 58, No. 2, 6300305, 2022.

李　　垂　範　（白石誠司　教授）
「Study on Electrical Generation and Manipulation of Spin Current in n-type Si Spin MOSFET」
（n型SiスピンMOSFETにおけるスピン流の電気的生成と操作に関する研究）
令和3年3月23日授与

従来の金属酸化物半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）のソース・ドレインを強磁性電極に置き換えたスピンMOSFETは半導体中の電子の電荷とスピン角運動量を制御するデバイスである。近年、Si 基板上のスピンMOSFETの室温動作が実証され、次世代のスピントロニクス素子に向けた応用面だけではなく、スピン流に関連した新たな物理が探索できるという学理面でも大きな関心が持たれている。当該素子では強磁性体/酸化物薄膜層構造の強磁性電極を用いて電気的にSi中にスピン偏極電子の流れ（スピン流）を創出し、輸送されたスピン流を観測する。その結果、スピンMOSFETは電荷輸送による信号とスピン依存信号の二つの出力特性を有する。尚、Siは半導体であるため、Si中で輸送されるスピン流は外部電界（ゲート電圧）の印加による電界効果で制御できる。本研究ではSiスピンMOSFETにおけるソース・ドレイン間バイアス電流とゲート電圧印加によるスピン依存信号の変化と、Si中を伝搬するスピン流の輸送物性を調査した。その結果、以下の成果が得られた。

1. SiスピンMOSFETにおけるスピン信号は強磁性電極の界面の電気抵抗が、印加されたバイアス電圧によって急激に減少し、それによってSiへのスピン注入効率が低下することが原因であることを初めて見出した。また、実験結果が強磁性電極の界面抵抗の変化を従来のモデル計算に新たに導入することでよく再現することが確認された。
2. SiスピンMOSFET動作において、正のゲート電圧印加によってSiの伝導度が向上することでスピンのドリフト速度が減少し、その結果としてスピン信号が減少する。一方、負のゲート電圧印加の結果Si中のバイアス電界強度が大きくなるため、Si中に光学フォノンが励起され、それによってスピン拡散長が減少することがスピン信号の減少をもたらすことも実験的・理論的に初めて明らかにした。
3. 非磁性体であるSiの伝導電子は本来スピン偏極していないため、強磁性電極から電気的に生成されたスピン偏極電子は有限の寿命をもってSi中で緩和していく。SiスピンMOSFETにおいてスピン信号強度を決める大きな要因であるSi中のスピン寿命について、極低温においては不純物散乱が、室温領域においてはフォノン散乱が支配的であることを明らかにした。
4. Siは本来バルクではスピン軌道相互作用が無視できるほど小さい。しかし、SiスピンMOSFETではスピン輸送チャネルを形成するn型Si層が薄くSiO_2との界面も存在するため特にRashba型スピン軌道相互作用が人工的に創発されている事実を見抜き、Siチャネル中スピン緩和の異方性という観点から人工的に創発されるSi中のスピン軌道相互作用の存在を実験的に明らかにした。さらに、Si中を伝搬するスピンをスピン軌道相互作用を介して外部磁場を用いず外部電場のみで操作することに世界で初めて成功した。

以上のように、n型SiスピンMOSFETにおけるソース・ドレイン電流とゲート電圧印加による動作特性を調査し、デバイス物性物理の詳細を解明した。また、スピン軌道相互作用を介して同素子中を伝搬するスピンの電気的操作とその背景学理を明らかにした。本研究成果はSiスピンMOSFETという新機能多情報処理素子の応用可能性を示すだけではなく、学術面においても人工Rashbaスピン軌道相互作用系という新たな探求対象を提示するものである。

野　原　紗　季　（竹内繁樹　教授）
「連続適応量子状態推定の実現と単一発光体への応用」
令和 3 年 3 月 23 日授与

本論文は、光子を用いた量子技術において重要な、連続適応量子状態推定の実現と単一発光体への応用についてまとめたものである。

与えられたサンプルに対して、できるだけ高い精度でその量子状態を推定することは重要な問題である。しかし、推定精度の理論限界を達成する最適な測定基底は、その測定対象の状態に依存してしまう（ので、決定できない）という問題がある。この問題に対して、個々の量子の測定結果に応じて、毎回測定基底を最適化する適応量子状態推定という方法が提案され、その最適性（強一致性、漸近有効性）が数学的に証明されている。しかし、これまでの研究は理論検証に重点を置いていたため、推定に時間を要し、さらに変化しない未知の偏光状態の漸近的な推定しか行えなかった。また、光子の偏光状態推定を用いている様々な分野においては、測定対象は時間的に変化するため、この適応量子状態推定では推定をすることができない。

そこで本論文では、時間的に変化する量子状態推定の実現を目指し、適応量子状態推定装置の高速化と連続適応量子状態推定の提案と検証、単一発光体への応用に取り組んだ。その結果、以下の成果が得られた。

1. 適応量子状態推定装置の高速化に向けて、液晶偏光素子を用いた、光の位相の高精度かつ高速制御を実現した。従来の実験において、推定時間の約 8 割を占めていた偏光測定基底の変換に着目し、これまでの機械ステージと半波長板を用いた制御に代えて、電圧で高速に位相制御が可能な液晶偏光素子の導入を検討した。液晶偏光素子は、位相制御の精度についての十分な検討がなかったため、高い消光比を有する偏光素子を組み合わせた評価装置を作製、液晶偏光素子の位相精度を評価した。その結果、その精度誤差が平均 0.15 度で制御可能であり、これは従来法による位相精度 0.08 度に匹敵し、適応量子状態推定実験を十分実施可能であることを明らかにした。
2. 評価した液晶偏光素子を用いて、従来に比べて非常に高速な適応量子状態推定を実現した。液晶偏光素子を使用した適応量子状態推定実験系を設計、構築し、光子の直線偏光の角度を実験的に推定した。その推定結果を統計的に評価した結果、適応量子状態推定の持つ最適性（強一致性，漸近有効性）を満たすことを確認した。また、偏光測定基底の変換に要する時間は、従来法の約 30 分の 1、適応量子状態推定実験全体の合計時間も従来法の約 5 分の 1 に短縮することに成功した。
3. 時間的に変化する測定対象を推定するために、適応量子状態推定のアルゴリズムについて検討した。尤度関数の計算に使用する光子数を直近$\mathcal{S}$個と限定することで、過去の測定結果が推定に影響を与えない、つまり時間的に変化する入力に対しての推定を可能とする、連続適応量子状態推定法を提案した。提案法をシミュレーション並びに実験により、線形変化、sin 関数的変化、ステップ関数的変化など様々に変化する入力状態に対して検証をおこなった。その結果、提案法により量子論的な限界（クラメールラオ限界）の精度で推定可能であることを実証した。
4. 連続適応量子状態推定を単一発光体からの放出される光子列に適用することを目標に、単一発光体からの蛍光を用いた適応量子状態推定の実験系の構築をおこなった。単一発光体として、六方晶窒化ホウ素中の欠陥中心を用いて、その蛍光を観察し、その蛍光波長 590 nm に対応した適応量子状態推定実験装置の設計と構築をおこない、新たに構築した適応量子状態推定装置の動作検証に成功した。

以上のように、本研究は、時間的に連続的に変化する量子状態を高精度で推定するために、適応量子状態推定装置の高速化の実現と、時間的に変化する入力状態にも適用可能な連続適応量子状態推定法の提案と実証、さらに単一発光体への応用を行ったものである。

山　本　悠　樹　（山田啓文　教授）
「DNA オリガミを用いた生体分子の固定化およびその液中周波数変調 AFM 評価」
令和 3 年 3 月 23 日授与

原子間力顕微鏡法（AFM）は生体分子の単分子測定を可能としており、それらの構造解析および機能計測への応用が期待されている。一方で、測定時には対象となる分子を基板へ固定する必要があり、固定条件によって測定時の空間分解能が変動するだけでなく、分子が本来持つ性質を損なうことが実験的に知られている。本論文では、AFM を用いた計測に適した生体分子の固定法として DNA オリガミを用いた手法を提案し、本手法を用いた streptavidin（SA）タンパク質分子の固定、配向制御および AFM を用いて測定する際に生じる分子変形の問題について述べている。

DNA オリガミを用いた生体分子固定は、DNA へリンカー分子を修飾することによって行われる。リンカー分子として biotin 分子を修飾し、SA 分子が DNA オリガミに設計した位置へ固定されることを確認した。また、基板として雲母（mica）を用いることで、SA 分子の配向を制御できることを示した。

AFM を用いて、この DNA オリガミに固定された SA 分子を測定したところ、しばしば分子が変形したように観察されることが分かった。本現象は AFM 像の空間分解能を損なうため、分子の揺動および顕微鏡探針の接触力に注目して、その要因を検証した。その結果、分子の変形は見かけ上のものであり、顕微鏡探針による接触力に起因する分子の重心移動が主な要因であることが判明した。また、この変形は、分子の固定が弱い場合に発生する傾向があり、分子の固定強度を高める設計が課題であることがわかった。

一方、DNA オリガミの設計は理論上 0.34 nm 程度の精度があるとされるが、これは一般的な DNA 二重鎖における一塩基対間距離から導かれるものであり、DNA オリガミについても有効であるかについては定かでない。測定対象分子の固定強度向上のためには、対象分子に応じた DNA オリガミの設計が不可欠であり、設計と実際の構造の対応を明らかにするため、AFM を用いて DNA オリガミ構造の詳細を測定した。その結果、平面構造の DNA オリガミについて、その周期構造の寸法は理論上のものが適用可能であることがわかった。また、DNA オリガミにおけるリンカー分子の露出方向を決定する DNA 二重鎖の回転角についても、一般的な DNA 二重鎖と同様と考えてよいことを明らかにした。

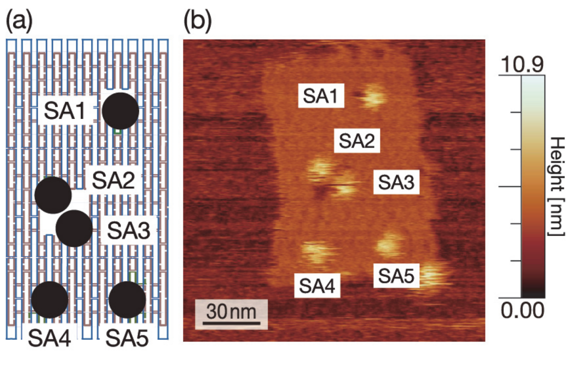


図 1：DNA オリガミへの SA 分子（SA1–SA5）の固定。(a) 設計図。(b) AFM による表面形状像。

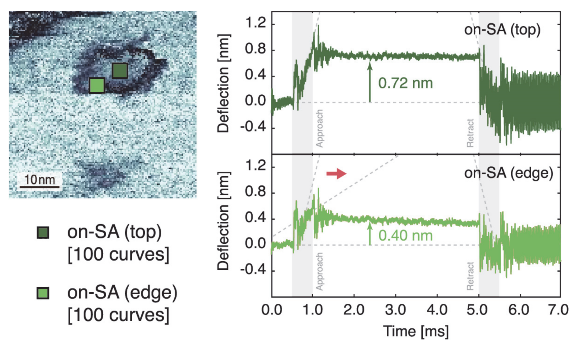


図 2：探針接触による分子変形。on-SA（edge）領域で分子の重心移動が発生している。

岸　元　克　浩　（川上養一　教授）
「元素原料気相成長法によるサファイア基板上 AlN の結晶成長およびカーボンを用いた AlN 表面の p 型伝導制御」
令和 2 年 11 月 24 日授与

本論文は、高効率な AlGaN 系深紫外発光素子を実現する上で重要となる 2 つの課題、・AlN バルク単結晶成長技術、・高 Al 組成 AlGaN の p 型伝導、にアプローチした研究をまとめたものである。

AlGaN 系深紫外発光素子では化学的・熱的安定性や深紫外透過率の観点から主にサファイア基板が用いられているが、サファイアとその上に成長する AlN とでは格子定数が著しく異なるため、高密度（~10^{10} cm^{-2}）の不整転位の発生が避けられず、特性悪化要因の一つとなっている。より良質なエピタキシャル膜の成長が期待される AlN 基板の実用化が望まれているが、未だ確立された方法はない。本研究では AlN 厚膜単結晶成長技術として元素原料気相成長法（Elementary source Vapor Phase Epitaxy：EVPE 法）（図 1）に着目した。EVPE は Al ガスと N_2 により AlN を成長する本研究室独自の技術で、これまで c 面サファイア基板上で、成長速度 18 μm/h、転位密度 5 × 10^8 cm^{-2} を記録している。EVPE による、より高品位な AlN 膜の成長を目指し、これまでなされていなかった成長膜の歪の評価やその制御方法の検討、不純物密度の低減に取り組んだ。歪の評価では、サファイア上成長膜には圧縮歪が存在する一方、サファイアから自発的に分離した膜では歪がほとんど解消されていることがわかった。関連して、成長時の N_2 の供給タイミングで AlN/ サファイア界面構造が変化することを見出し、自発分離を制御できる指針を得た。また、不純物の低減では、混入源となりうる装置部品の材料や形状の変更を行うことで、これまで高密度に含まれていた主な不純物である C、Si（[C]:~10^{20} cm^{-3}、[Si]:~10^{20} cm^{-3}）の密度を 2 桁低減することができ、発光特性の改善に成功した。

AlGaN では Al 組成が高くなるほど禁制帯幅、誘電率が大きくなり、不純物準位が深くなる。特に p 型ドーパントである Mg アクセプタの準位は深く、GaN で 170 meV であったものが、AlN では 510 − 630 meV となる。したがって高 Al 組成 AlGaN での実用水準で低抵抗な p 型伝導や電極とのコンタクト形成はかなり困難であり、長らくの課題である。本研究では、不純物が高密度に含まれた EVPE 成長 AlN 膜が表面 p 型伝導層を有することを見出した。また、その伝導層を介して電極から AlN へホールが注入される（p 型コンタクト抵抗低減）可能性を示した。表面伝導層には AlC 系や C 系分子が存在していたことから、カーボン系不純物が p 型伝導に寄与していると仮説を立てた。装置改造により不純物密度を低減した後、EVPE 成長中に C_3H_8 を供給し意図的にカーボンをドープすることで表面 p 型伝導層が再現することがわかり、仮説の妥当性を示した。次に、有機原料気相成長法により成長した Al（Ga）N 薄膜を N_2 雰囲気中 1000℃程度で加熱しながら Al ガスと C_3H_8 を供給する（Al/C_3H_8 トリートメント）と、図 2 に示すように低抵抗な表面 p 型伝導層を付与できることがわかった。Al 組成 80% の高 Al 組成 AlGaN に Al/C_3H_8 トリートメントを施した後、N_2 雰囲気中 1000℃でアニールすると、従来の手法よりも I-V 特性が向上することが実証された。その他、表面伝導層の透過率や Al/C_3H_8 トリートメントによる活性層への影響なども検証している。

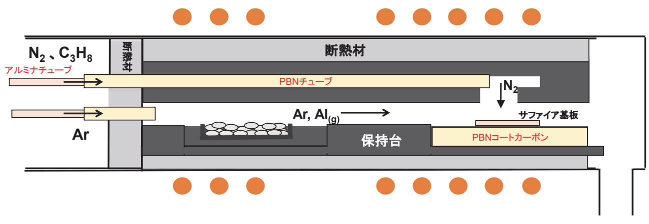


図 1. 改造後の、EVPE および Al/C_3H_8 トリートメント用装置模式図。

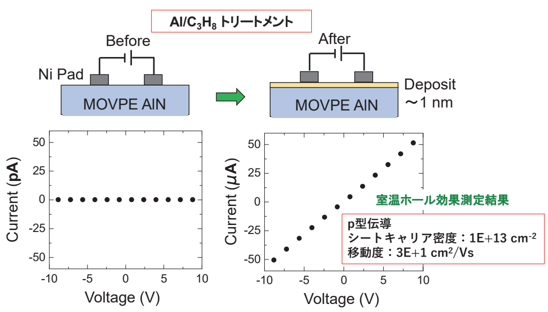


図 2. AlN 表面における Al/C_3H_8 トリートメント前後の室温での *I-V* 特性およびホール効果測定結果。

坂　田　諒　一（野田　進　教授）
「複合変調フォトニック結晶レーザーによる高出力・高ビーム品質２次元ビーム走査の研究」
令和３年３月23日授与

２次元レーザービーム走査技術は、自動車やロボットの自動走行の実現に必須なLiDAR（Light Detection and Ranging）を筆頭として、高度物体認識やアダプティブ照明など様々な分野において極めて重要である。しかしながら、従来のビーム走査は、その多くが機械駆動方式であり、信頼性や安定性、動作速度、システムサイズなどに課題がある。このような背景の元、非機械方式のビーム走査技術の研究が活発化しつつあるが、光出力が数十mW程度に限られている点、外部に波長可変型のレーザー光源が別途必要な点など、多くの課題を抱えている。近年、これらの課題を一挙に解決し得る手法として、変調フォトニック結晶レーザーが注目を集めている。変調フォトニック結晶レーザーとは、２次元フォトニック結晶のバンド端共振作用を利用した、大面積コヒーレント動作が可能な面発光型半導体レーザーであるフォトニック結晶レーザーにおいて、格子点へと変調を導入することで任意の方向へとビームが出射できる半導体レーザーである。これまでの変調フォトニック結晶レーザーにおいては、格子点の位置のみを変調しており、出力が数十mW程度と低いという課題があった。

本論文では、フォトニック結晶の各空孔をナノアンテナとみなし遠方での放射特性が解析可能なナノアンテナ理論を独自に構築することで、格子点の位置のみならず、格子点の大きさをも同時に変調すること（図１（a））が、高出力かつ高品質なビームを出射するために重要であることを見出した。このフォトニック結晶レーザーは、「複合変調フォトニック結晶レーザー」と名付けられ、本レーザーをマトリックス状にアレイ化したチップ（図１（b））を作製した。アレイを構成する各素子は、高出力（>0.7W）かつ回折限界に近い単峰な高品質（<1°）のビームを様々な方向へ出射可能であり（図１（c））、アレイチップをマイコンで駆動制御することで、非機械式かつオンチップな２次元ビーム走査を実現した。さらに、上記の２次元ビーム走査チップの特徴を活かし、従来のフラッシュ型LiDARにおける課題、すなわち、反射率の低い黒い物体の測距が極めて困難であるという課題を克服しうる、新たなLiDARシステムの提案・実証を行った。図１（d）のように、フラッシュ光源のみでは、反射率の低い黒い物体は信号が小さく測距が出来ないが、図２（e）のように複合変調フォトニック結晶レーザーアレイからビームを狙いうちすることで、黒い物体の測距が可能になることが示された。

以上のように、本論文で実現された複合変調フォトニック結晶レーザーアレイは、機械機構や外部光学系が不要で小型な、高出力・高ビーム品質な２次元ビーム走査を実現するものであり、今後のスマートモビリティを筆頭に高度物体認識やアダプティブ照明等、多岐の分野の進展に繋がる重要な成果であるといえる。

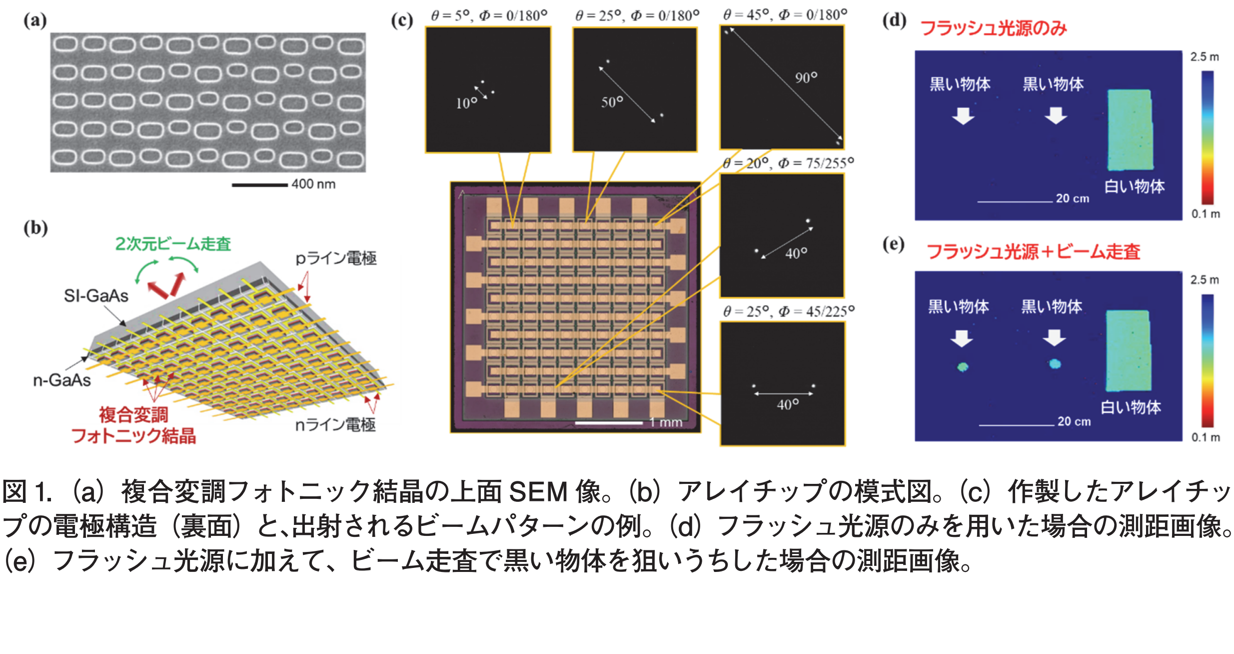


図1.（a）複合変調フォトニック結晶の上面SEM像。（b）アレイチップの模式図。（c）作製したアレイチップの電極構造（裏面）と、出射されるビームパターンの例。（d）フラッシュ光源のみを用いた場合の測距画像。（e）フラッシュ光源に加えて、ビーム走査で黒い物体を狙いうちした場合の測距画像。

仲　代　匡　宏（野田　進　教授）

「高Ｑ値光ナノ共振器結合系と pin ダイオード融合デバイスの開発と電気的な光操作に関する研究」

令和３年３月 23 日授与

本論文は、次世代の光情報処理チップの実現に向け、フォトニック結晶光ナノ共振器の結合系と pin ダイオードを融合させたデバイスの作製プロセスを開発するとともに、同デバイスにおいて共振器に閉じ込めた光に対する共振器間での光転送などの光操作について理論提案と実験的検討を行ったものである。

フォトニック結晶光ナノ共振器を用いることで、光を微小な領域に長時間閉じ込めることが可能になり、光のままでのバッファリングをはじめとした光のままでの高度な光操作の実現が期待できる。さらには、閉じ込めた光と物質との強い相互作用によって非線形光学効果や量子効果が増強されるので、光量子情報処理への展開も期待されている。このように多岐にわたる機能をもつ光ナノ共振器を１つのチップ上に集積し、結合系の中で光を自在にやりとりさせることができれば、高度な光情報処理を統合するチップの実現へと展開していく。しかしながら、共振器結合系において光をやりとりするために従来は制御用の光パルスを外部から照射していたが、この手法は集積化に適さない。

それに対して、光ナノ共振器の近傍に pin ダイオードを組み込むことで電気的な制御機構を導入できれば、集積上の課題を解消できるだけでなく、電子回路との併用による高度な制御によって多彩な光操作を可能にすると期待できる。一方、その作製プロセスについては十分な検討がなされていない結果として、光閉じ込め性能が低く（Q 値 40 万）、かつ電気的制御の速度も低いといった問題があった。さらに、新規光操作に関する検討もほとんどなされていなかった。

そこで、これらの課題を解決するように作製プロセスを抜本的に改善しつつ（最大 Q 値 400 万）、世界最高性能の融合デバイスを設計 / 開発した上（次図）で、電圧パルスの印加による共振器間での光転送を世界で初めて実証した。さらに、電気的な制御によるキャリア注入と引き抜きを組み合わせてできる正弦波変調を用いた新しい光操作についても理論と実験の両面から検討を行なった。

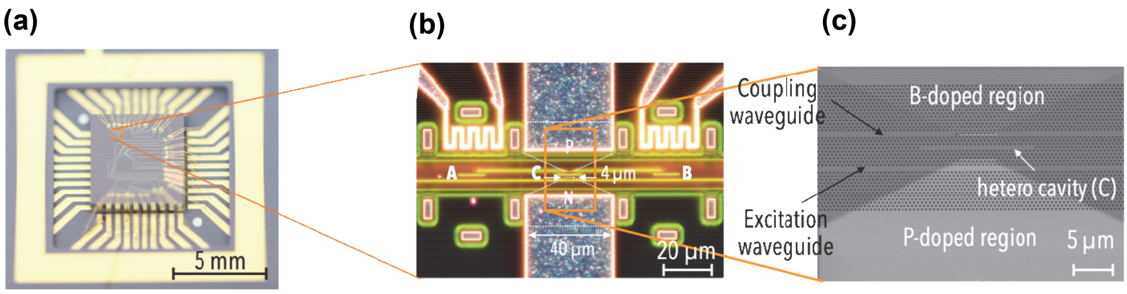


図 1. フォトニック結晶ナノ共振器結合系と pin ダイオードを融合させたデバイス。(a) セラミックパッケージに実装されたチップの拡大写真。(b) 3 つのフォトニック結晶共振器（A,B,C）結合系と pin ダイオードによる共振器 C 制御部の光学顕微鏡写真。(c) 共振器 C とその波長制御にもちいる pin ダイオード付近の電子顕微鏡写真。

Huang Yin Jou （黒橋禎夫　教授）
「Event Centric Approaches in Natural Language Processing」
（自然言語処理におけるイベント中心アプローチ）
令和３年７月26日授与

Every day, tens of thousands of events happen around the world. People use natural language to record the events they observed and communicate to others about the information of the events. Thus, natural language texts provide us with a way to study the events happening in the real world. In the internet era, a large amount of text data is being published every day. They can come in different forms through different media, such as news articles, social media posts, web articles, just to name a few. With access to this abundant amount of text data, how to automatically extract and analyze the events in these natural language texts has become very critical. By analyzing the natural language data, we can learn about the events that happened in the past, the events happening currently, and predict the events that will happen in the future.

Due to their importance, events have been studied pervasively in natural language processing (NLP). Some works analyze individual events and aim to identify their composing factors from the unstructured natural language text. Other works, on the other hand, focus on the interactions between events and how multiple events are organized into a coherent story in natural language. In addition, many downstream NLP tasks can benefit from incorporating events into the task. In this thesis, we studied three event-centric NLP tasks (Figure 1) that analyze different aspects of events.

We first consider the task of event coreference resolution, in which we aim to find text mentions that refer to the same real-world event. We proposed an iterative transfer learning framework to learn the argument compatibility between event mentions, which is an important indicator of event coreference. The experiments on the benchmark KBP corpora confirm the effectiveness of our proposed method.

Second, we study the narrative event relation between events, which captured the stereotypical ordering of events that are causally or temporally related. We adopted a two-stage framework to acquire narrative event knowledge. We first collect narrative event pairs with statistical significance from an unannotated corpus. Then, we identify the shared arguments between narrative related events.

For the third task, we consider the task of extractive summarization by reframing it as an event saliency identification problem. We proposed a novel heterogeneous graph-based model to explore the relation between not only events but also different granularity of text spans, such as sentences or entities. Experiments on the benchmark CNN/DailyMail dataset illustrated the effectiveness of our proposed method.

We believe the various event-related tasks presented in this thesis provide a thorough study of the events in natural language processing from different aspects. We hope that this thesis will invoke new research ideas for future event-related research.

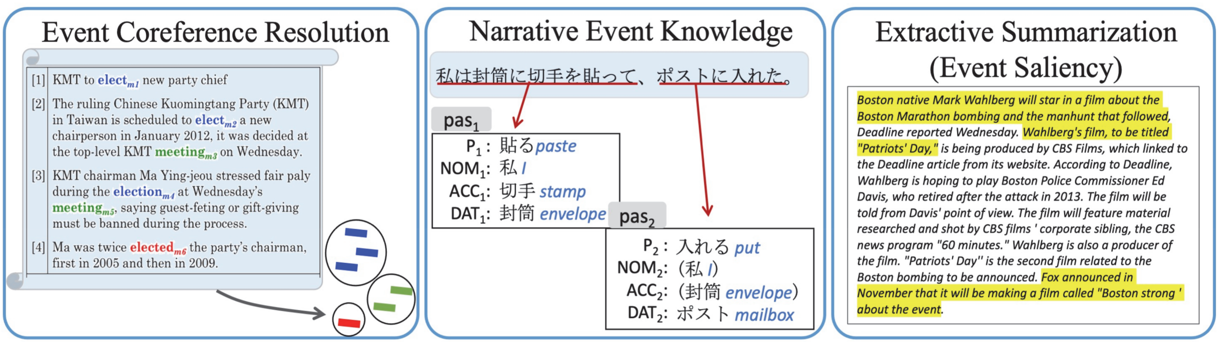


Figure 1：An overview of this thesis.

郭　　孟　妤（Kuo, Meng-Yu Jennifer）（延原章平　准教授）
「Refraction and Absorption for Underwater Shape Recovery」
（屈折と吸収のモデル化による水中物体の３次元形状復元）
令和３年９月24日授与

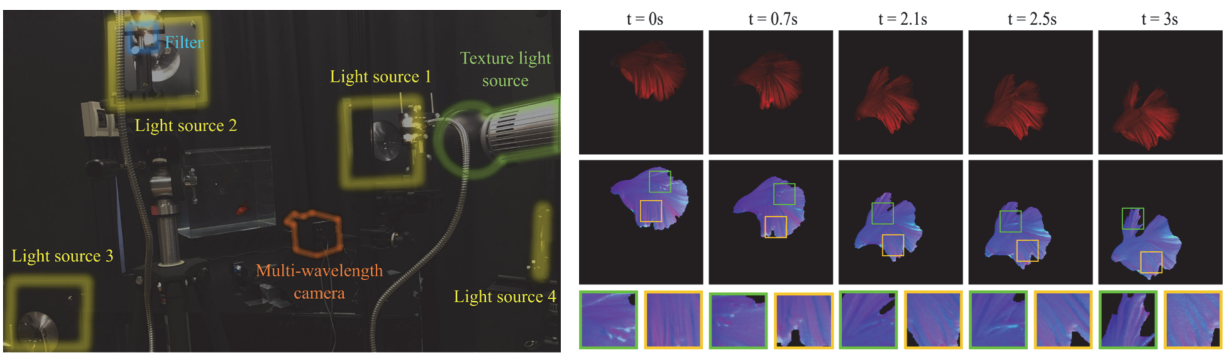
本論文は画像計測による水中物体の３次元形状復元に取り組んだものであり、水中撮影に伴う屈折や散乱を明示的にモデル化すると同時に、水による光の吸収量が水中での光路長、つまり被写体までの距離に依存し、かつその吸収係数が波長依存であることに着目して、異なる波長で計測された同一物体の輝度の違いから、光の吸収量の比を利用した３次元形状・運動計測手法を提案している。本論文によって得られた成果は以下の通りである。

（1）正射影かつ平行光源環境において、波長と照射角によって決まる実効吸収率という概念を導入し、この実効吸収率が異なる４つ以上の光源の下で撮影された画像を入力として、水中物体の３次元表面形状を画素単位の奥行きと法線方向として推定するアルゴリズムを導出するとともに、その有効性を実物体の計測によって定量的に示した。また考案したアルゴリズムが一意な解を得ることができる条件を証明した。

（2）透視投影かつ点光源環境において、複数フレームにわたる計測を統合して全周囲３次元形状計測を実現する手法として、撮影中に生じた被写体の非剛体変形を推定し、その逆変換を用いることで１つの統合された全周囲３次元形状を得ることができるアルゴリズムを考案するとともに、その有効性を実物体の３次元形状計測によって定量的に示した。

（3）透視投影かつ点光源環境において、奥行き形状に加えて画素単位の表面法線も同時得ることができる手法として、被写体の形状自身からカメラ位置を推定し、実効吸収率が異なる撮像を異なる時刻から得ることで、物理的には１つの光源であったとしても、仮想的に対象表面上の各点を異なる波長で撮影した状況へと変換して推定を行うアルゴリズムを考案した。

（4）点光源の位置を撮影画像から推定するキャリブレーション手法として、水中での３次元位置が既知である点を１点計測することで、点光源位置がある円錐上に制約されることを導出し、この制約を複数点から得ることで点光源位置を推定する手法を考案した。



図：多波長撮影カメラシステム（左）によって計測された画像系列（右上）から得られた法線（右下）

香　田　優　介　（守倉正博　教授）

「Visual Data-Driven Millimeter Wave Communication Systems」
（画像データ駆動ミリ波通信システム）
令和３年３月 23 日授与

本論文では、カメラ動画像と RF（Radio Frequency）信号強度から学習して、与えられた無線通信環境を視覚的かつ動的に評価するシステムを提案する。ブロードバンド無線通信、とりわけ高周波数帯域を用いるミリ波通信システムにおいては、人体等の動的な遮蔽物による受信信号電力の劣化が急峻かつ顕著である。そのような動的な遮蔽物の動き等を含め、過去から現在に至る無線通信環境を視覚的に評価できれば、将来的な受信信号電力の落ち込みを予測可能で、それを先見的に回避することが無線通信システムとして可能となる。

ミリ波基地局のハンドオーバ制御については、本論文では、各基地局の評価尺度の獲得を例に、カメラ動画像と受信信号電力から無線通信環境を視覚的かつ動的に評価するシステムを提案し、その実現可能性を示している。本システムは、現接続基地局および切替先基地局の評価尺度として、取得したカメラ動画像の時系列から予測される将来の無線通信用データレートを、過去の経験から学習する。学習には、状態とよばれる入力情報から、価値とよばれるタスク固有の評価尺度を獲得する価値ベース強化学習を使用し、その中でも画像情報が状態である場合にこれまでに実績のある深層強化学習を使用する。先述の RF 信号強度測定器により測定した受信信号電力とカメラ動画像のデータセットを使用して学習を行い、遮蔽者が近傍に存在する基地局の評価は低く見積もられるという、カメラ画像を入力とすることの特徴が得られることを確認している。また、学習した評価尺度に基づき基地局切替制御を行った場合、先見的に人体遮蔽を回避することが可能であることを示している。

画像収集にあたる課題については、本論文では、画像に写る人物のプライバシと画像収集にあたる通信コストに着眼する。課題解決のアイデアとして、本論文では、ニューラルネットワークの計算の一部を、入力データを持つ端末等に行わせるスプリット学習を提案する。そこでは、画像を保持するカメラなどのデバイスに、生の画像よりも抽象度の高い特徴量を計算させ送信させる。これにより、画像に写る人物のプライバシを保護しつつ、通信コストを低減することが可能である。カメラ動画像から将来の受信信号電力を予測するタスクを例に、画像の抽象度に応じた予測精度、プライバシレベル、通信コストを包括的に評価し、それらの関係性を明らかにしている。

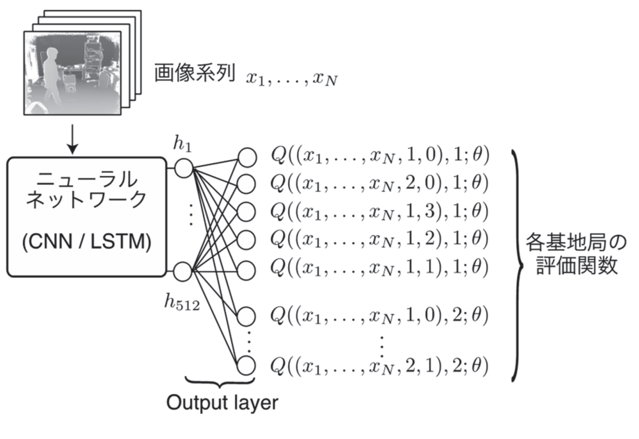


図 1. 画像からの各基地局の評価関数の学習

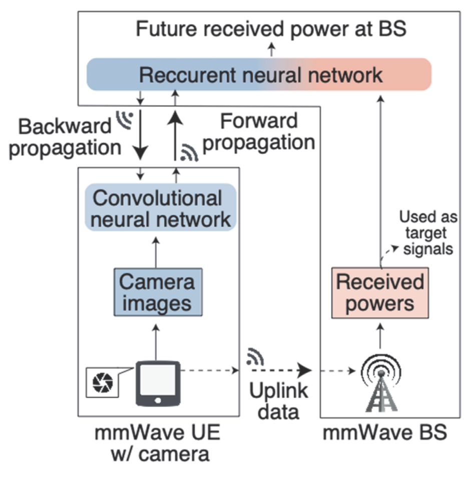


図 2. プライバシと通信コストに着眼したスプリット学習

尹　　　　博　（守倉正博　教授）
「Airtime Management for Low-Latency Densely Deployed Wireless Networks」
（低遅延稠密無線ネットワークのためのエアタイム管理）
令和３年３月23日授与

本論文は、稠密無線ネットワークにおけるメディアアクセス遅延（MAC 遅延）の削減について提案を行う。MAC 遅延とは、複数の端末が無線チャネルを共有する通信システムで発生する遅延であり、端末へ割当てられた無線リソースの量が不足する場合や、無線リソースが割当てられるまで時間がかかる場合に発生する。MAC 遅延の削減は、低遅延な無線通信を実現するための重要な課題である。本論文では、競合型と割当型の２種類のメディアアクセス制御方式について検討を行う。

第一の課題は、競合型メディアアクセス制御を採用する無線 LAN システムに関するものである。無線 LAN の最新規格 IEEE 802.11ax では、同一無線周波数の隣接セル同士が互いの干渉による影響を低減すべく低電力で同時送信する仕組みが導入されている。この仕組みにより、端末のエアタイムが増加する一方、パケット衝突率も増加する副作用がある。本論文では、強化学習アルゴリズムを活用し、この副作用を低減する方法を提案する。具体的には、無線 LAN フレームのプリアンブルにある識別子で送信源を見分け、試行錯誤により、フレーム衝突を起こしうるセル同士の同時送信を抑えながら、フレーム衝突を起こさないセル同士の同時送信を促す。最後に、計算機シミュレーションで隣接セル間の MAC 遅延が大幅に削減されることを示す。

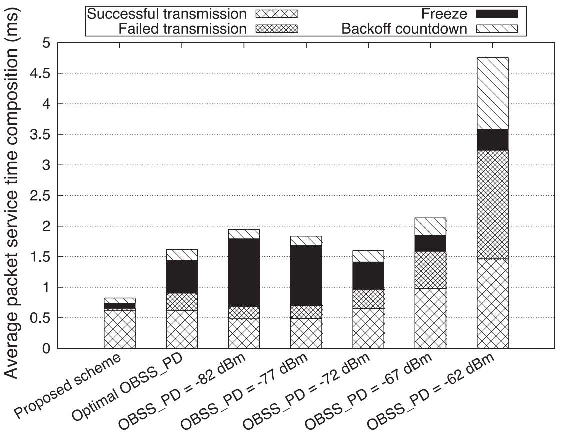


図１．無線 LAN における MAC 遅延特性のシミュレーション

第二の課題は、競合型メディアアクセス制御から由来するスタベーション問題に焦点を当てる。互いにキャリアを検出しない二つの送信局に挟まれた送信局は、前者２局のいずれかの通信が行われている限り通信を開始できなく、エアタイムの不公平性問題が発生する。この問題はスタベーション問題と呼ばれ、無線 LAN の稠密展開に伴い、一層顕在化する。本論文では、新たにスタベーション問題を発生しない分散周波数チャネル選択方式を提案する。具体的には、アクセスポイントをノード、キャリア検出の可否をエッジとする競合グラフを導入し、３つのノードからなる線形チェーントポロジーの数を低減するチャネル割当を行う。さらに、ゲーム理論におけるポテンシャル関数の存在を証明することにより、分散型チャネル選択方式が常に収束することを数学的に証明する。

最後の課題は、割当型メディアアクセス制御方式を採用するセルラー通信システムに関するものである。特に、２社の通信オペレータが設備投資削減のために、共用基地局を設置するシナリオについて考察する。この場合は、通信トラヒックを、既設基地局と増設基地局間で適切に分散することで、通信品質を改善することが可能である。本論文では、基地局の位置的分布がポアソン点過程に従うことなどを仮定し、比例公平型負荷分散方式とラウンドロビン型負荷分散方式について、セル負荷の理論式を導出する。さらに、数値評価により解析結果の正しさを確認した。

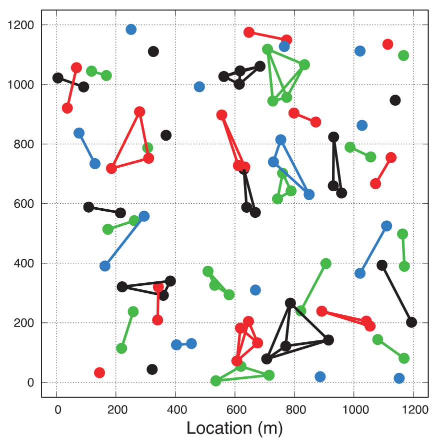


図２．提案するチャネル選択方式の競合グラフ。色はチャネルを表す。

稲　垣　悠　一　（大木英司　教授）
「Importance-Aware Information Networking toward Smart Cities」
（スマートシティに向けた重要度を考慮した情報ネットワーキング）
令和３年９月24日授与

本論文は、スマートシティに向けた情報ネットワーキングに関する問題について、データの重要度に焦点を当てて研究を行っている。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

第一に、デバイスの所有者とユーザのオンラインの社会的関係から抽出した重要度に基づいてデバイスを共有するシステムを提案している。提案システムは、デバイス間で送信されるデータの重要度を示す指標として、デバイスの所有者とユーザのオンライン上の社会的関係を取得し評価することで、ユーザがどの程度のリソースを使用できるかを自動的に判断している。本論文では、プロトタイプ実装を行い、提案システムが実際に実装できることを確認し、提案システムの認証オーバーヘッドを測定している。また、実際のソーシャルネットワークのデータセットを用いたシミュレーションの結果、提案システムがデバイスの所有者とそれほど親しくないゲストユーザのリソース使用量を制限できること、また、提案システムにおける認証プロセスのオーバーヘッドはデバイスの所有者に近いゲストユーザとのリソース共有を妨げないことを示している。

第二に、スマートシティの重要な技術要素であるセンシングと情報分析に焦点を当てて、データの重要度を利用して予測精度を維持しながら機械学習モデルの入力用のセンシングデータの送信量を削減するIoTデバイス制御システムを提案している。データの重要度は、モバイルセンサによって収集されたデータが予測精度にどれだけ寄与するかを測定することで得られる。提案システムでは、特徴選択法を用いてデータの重要性を抽出している。これにより、提案システムのモバイルIoTデバイスは、予測精度の向上に大きく寄与しない重要度の低いデータをエッジサーバーに送信しないように制御することができる。広く使われている機械学習モデルであるランダムフォレストモデルを用いて、２つの実用的なシナリオのデータセットで提案システムの評価を行った。その結果、提案システムは、ベンチマーク手法と同程度の予測精度を達成しつつ、予測のための入力データの送信量を削減できることを示している。

第三に、推論と再学習の両面からデータの重要度を評価し重要なデータの収集を優先することで、部分的に収集したデータの再構成に用いる機械学習モデルを定期的に更新するフレームワークを提案している。提案フレームワークは、推論と再学習の両面からデータの重要度を評価することで、予測に用いるデータの性質の時間変化に対応するための機械学習モデルの定期的な再学習を可能にしている。２つのデータセットを用いた数値評価により、提案フレームワークの有効性を確認している。推論と再学習の両面からデータの重要度を考慮し重要なデータを優先的に収集することで、収集データの性質の時間変化に追従した推論モデルの再学習が可能となり、予測の長期的な精度向上につながることを示している。

以上、本論文は、スマートシティに向けた情報ネットワーキングに関して、データの重要度に基づくシステムとフレームワークを提案し、スマートシティのためのネットワーク技術の発展に貢献するものである。

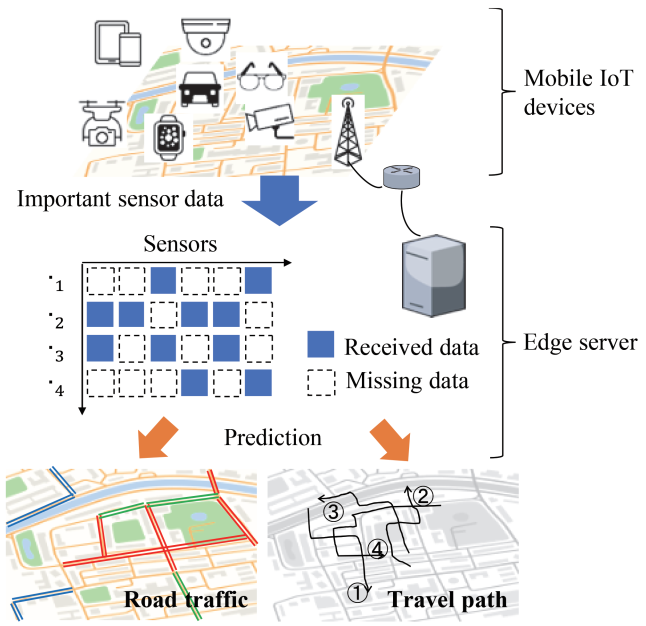


図１. データの重要度を利用したセンシングデータの送信量の削減

Yuncan Zhang　（大木英司　教授）
「Robust Service Provisioning in Network Function Virtualization」
（ネットワーク機能仮想化における堅牢なサービスプロビジョニング）
令和３年９月24日授与

A network service (NS) is typically delivered using one or more functions, which provides a network functionality for the customers and/or the operators. Each NS is characterized by specific requirements such as delay requirement; a growing number of NSes with deadlines arise from the applications that cannot work properly if the delay requirement is not met. Network function virtualization (NFV) technology emerges as a promising way to reduce the capital and operational expenditures of service provisioning by decoupling network functions from proprietary hardware and enabling software implementation of network functions, i.e., virtual network functions (VNFs), on commodity servers. Compared to functions deployed on the dedicated hardware, the performance of VNFs is easily affected by diverse environmental factors, which includes various workloads and resource contentions among VNFs, and the VNFs that run in virtual machines or containers are prone to fail due to bugs, such as software crash and changes in operating conditions. Therefore, how to provision robust services that are capable of performing under heterogeneous deadlines, the uncertain processing times of VNFs, and the occurrence of failures, becomes challenging. This thesis studies three specific problems about robust service provisioning in NFV. Each problem corresponds to service scheduling under deadlines, service mapping and scheduling under uncertain processing time, and service chain provisioning against VNF and link failures, respectively.

Firstly, this thesis proposes an optimization model to schedule delay sensitive NSes with deadlines allowing resource sharing and preemption. Unlike conventional NS scheduling models with static resource allocation for VNF instances, the proposed model ensures that VNF instances deployed on the same node share computation resources of the node and are able to scale up/down to change their process rate at runtime. Preemption is allowed, which means that rescheduling the order of NS processing at runtime is possible and the process duration of each function of an NS is allowed to be discrete. This work formulates the proposed model as an integer linear programming (ILP) problem to maximize the number of admissible NSes. Due to the complexity of the problem, a genetic algorithm (GA) is developed to solve it efficiently. The numerical results show that the proposed model outperforms conventional models in terms of acceptance ratio in both static and dynamic scenarios.

Secondly, this thesis proposes an optimization model for the network service mapping and scheduling problem with uncertain processing time. This work models processing time uncertainty through the Γ-robustness approach, which provides different degrees of robustness against processing time uncertainty. This work formulates the problem with the objective to minimize the worst-case makespan over the given uncertainty set. This work shows the NP-hardness of considered problem. A heuristic that divides the problem into subproblems is presented to tackle it. The numerical results show that the proposed model outperforms the conventional model with deterministic parameters in terms of worst-case makespan.

Thirdly, this thesis proposes a sub-chain-enabled coordinated protection model for the availability-guaranteed service function chain (SFC) provisioning, which considers the availability of each component, including links and VNFs. Unlike conventional protection models providing certain protection for the whole chain, the proposed model configures sub-chains for each SFC and provides proper protection for each sub-chain to achieve the required availability in a cost efficient way. This work formulates the proposed model as an optimization problem to minimize the deployment cost. A game approach is presented to tackle the problem. The numerical results show that the proposed model outperforms the conventional ones in terms of deployment cost.

徐　　宏　傑　（小野寺秀俊　教授）
「Energy Efficient On-Chip Cache Architectures and Deep Neural Network Accelerators Considering the Cost of Data Movement」
（データ移動コストを考慮したエネルギー効率の高いキャッシュアーキテクチャとディープニューラルネットワークアクセラレータ）
令和3年3月23日授与

In data processing, the cost of data movement often dominates the hardware performance. Based on factors that affect the prediction capability of the cost of data movement, we investigate representative types of processing tasks as general-purpose processing and special-purpose processing such as Deep Neural Network. We discuss data properties that influence data movement in each processing task. Taking advantage of the proposed properties, we design four hardware designs to reduce the cost of data movement for various processing tasks.

For general-purpose processing which has a completely unpredictable data access pattern, we propose an energy-efficient hybrid cache memory system to exploit the non-linear relationship between the cache miss rate and the cache capacity. As the cache capacity increases from 0, the cache miss rate decreases rapidly as the capacity rises. When the cache capacity exceeds a certain capacity, the cache miss rate decreases at a slower rate. According to the non-linear relationship, a hybrid 2-level on-chip cache architecture is first introduced as a replacement of a normal SRAM cache architecture to save the energy consumption. The simulation result shows a hybrid 2-level cache architecture by our method reduces the energy consumption by 68 %　in our case study of an instruction memory subsystem without increasing the die area.

In Deep Neural Network, which has a large data scale but a regular access pattern, we introduce hardware properties to describe the precise cost of data movement in each memory hierarchy. Based on hardware properties, we propose a DNN accelerator for large-scale processing with a regular access pattern in DNN and a set of evaluation metrics. Proposed metrics are able to analytically predict the energy, the throughput, and the area of a hardware design without a detailed implementation. In a sparse Deep Neural Network, focusing on the index-matching property in Deep Neural Network, we aim to decompose sparse Deep Neural Network into easy-to-handle processing tasks to maintain the utilization of processing elements. According to the proposed sparse processing dataflow, we propose an efficient hardware accelerator called MOSDA to deal with the irregular data access pattern in sparse DNN. Compared to state-of-the-art neural network accelerators, MOSDA achieves 1.1 times better throughput and 2.1 times better energy efficiency than Eyeriss v2 in sparse Alexnet in our case study.

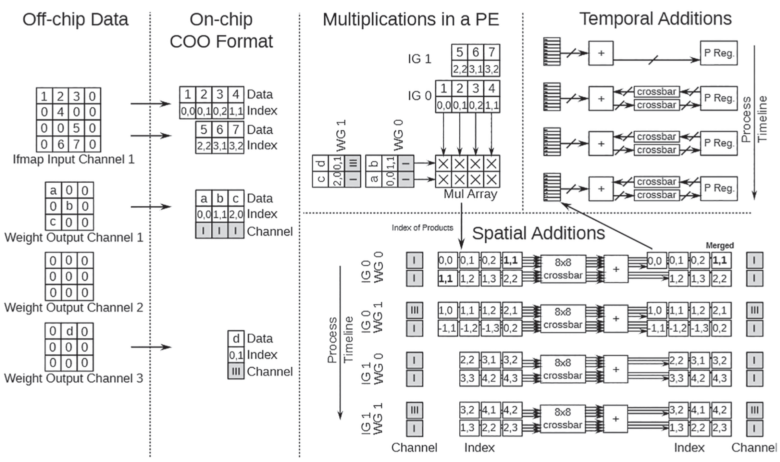


Figure 1. MOSDA architecture overview, only non-zero data are loaded into processing elements

上　田　樹　美（下田　宏　教授）

「A Study on Integrated Thermal Control to Improve Intellectual Work Performance」
（知的作業パフォーマンス向上のための統合温熱制御に関する研究）
令和３年３月23日授与

情報化社会の発展に伴い、人間の担う作業においてオフィスワーク等の知的作業の重要性が高まっています。知的作業のパフォーマンスが向上することで、成果の総量を保ちながら労働時間を短縮することができ、労働者のワークライフバランスの向上が期待できます。労働時間の短縮は、コンピュータ機器や空調機器の利用時間の短縮にもつながり、エネルギー消費量の削減も期待できます。このような背景から、知的作業パフォーマンスの向上を目指した様々な取り組みが行われてきました。

本研究では、知的作業パフォーマンスの向上を目的とした、統合温熱制御（ITC: Integrated Thermal Control）を提案しました。ITCは、作業中と休憩中で体感温度を変化させる温熱環境制御手法です。作業中の体感温度を低く、涼しめに調整することで、作業パフォーマンスの向上を狙い、休憩中には体感温度を高め、暖かめに調整することで、リラックス効果や疲労回復効果の向上を狙います。これにより、作業開始時と休憩開始時に感じられる体感温度の差によって、執務者の気持ちの切り替えをスムーズにし、パフォーマンス向上と休憩の効率向上を狙います。多くの既往研究では作業中・休憩中のいずれかに注目した環境制御が検討されてきましたが、作業中・休憩中の両方を組み合わせた制御手法である点が、本研究で提案するITCの特徴です。

ITCのパフォーマンス向上効果を検証するために、エアコンを用いた温度制御によって体感温度を調整した場合（ITC-T: Temperature-based ITC）と、扇風機を用いた気流制御によって体感温度を調整した場合（ITC-A: Airflow-based ITC）の二通りについて、作業中に集中して作業できた時間の割合を示す集中時間比率（CTR: Concentration Time Ratio）を用いて評価しました。それぞれの制御コンセプトと評価結果を図1、2に示します。一般的なオフィス環境、つまり作業中・休憩中の体感温度が一定になるように制御したControl条件と比較して、いずれも約3%程度のパフォーマンス向上効果が示されました。加えて、ITC-AはITC-Tより約15%少ない電力消費で実現できる試算となり、少ない電力消費でパフォーマンスの向上が期待できることもわかりました。

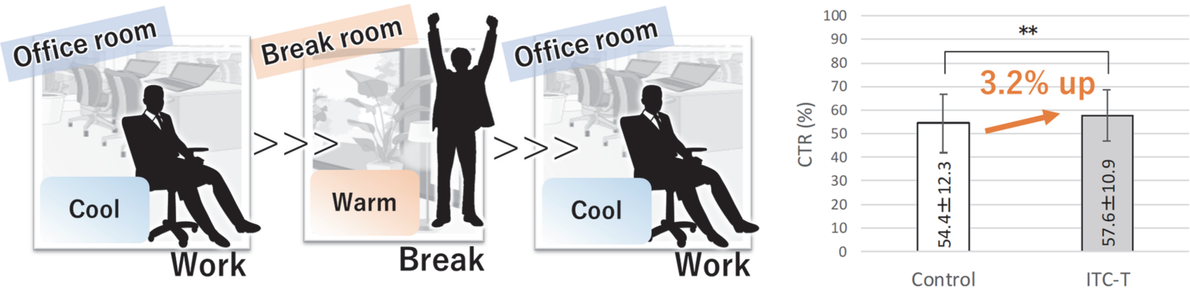


図1. 温度制御を用いた統合温熱制御ITC-Tのコンセプトと評価結果

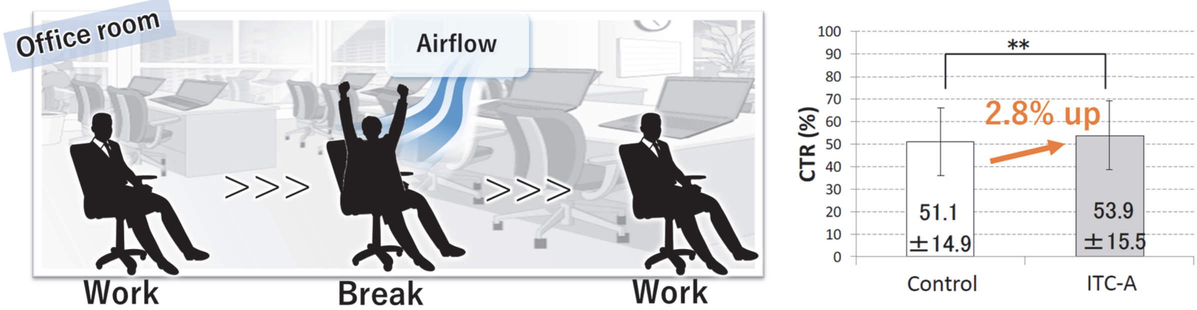


図2. 気流制御を用いた統合温熱制御ITC-Aのコンセプトと評価結果

逢　見　翔　太　（白井康之　教授）
「脱炭素化・電力自由化時代における電圧安定性を考慮した電力システムの最適運用計画に関する研究」
令和３年９月 24 日授与

脱炭素化に向けた再生可能エネルギー発電の普及と、電力自由化による電力システムへの経済メカニズムの導入が国内では並行して進められ、電力システムの安定性と経済性を両立する運用計画手法が求められる。本研究では、西日本系統のような細長い電力システムにおいて再生可能エネルギー発電が普及した際に顕在化のしやすい電圧安定性問題に着目し、電圧安定性を適切に評価する指標の分析・評価と、その指標を用いて電力システムの経済的な運用を実現するための最適運用計画手法を検討することを目的とした。

電圧安定性とは電力需要の増加や、設備の停止等の擾乱発生時においても電力システムの電圧が安定に維持される性質である。電圧安定性は一般に、縦軸に母線電圧、横軸に総需要をとった図１に示す P-V カーブを用いて評価される。同一の総需要に対して複数存在する解の内、電圧が高い方の解が電圧安定性の観点で安定な運用点であることが知られている。P-V カーブの先端は電圧崩壊点を表し、総需要が電圧崩壊点を超えると電圧崩壊に至る。そして、運用点から電圧崩壊点までの距離が電圧安定性の度合いを示す最も標準的な尺度であり、電圧安定余裕と呼ばれる。

電圧安定性を考慮した電力システムの最適運用計画とは、電圧安定余裕を必要量確保した上で、最も経済的な発電機の運転スケジュールを決める問題と定義できる。ところが、同最適運用計画の定式化と実装においては以下の課題があった。

- P-V カーブは総需要の異なる条件における潮流解の集合であり、最適化計算にそのまま制約として組み込むことができない。
- 電圧安定性は発電機の無効電力出力上下限や発電機の起動・停止状態によって不連続に変化するため、数値計算上、直接的な求解が困難な混合整数非線形計画問題となる。

これに対し、本研究では主に以下の成果を得た。

1. 既存の電圧安定性指標を定性的・定量的に評価し、精度及び最適化計算への適合性から、最も適した指標として直接法を抽出した。
2. 直接法を制約として含む電圧安定度制約付き起動停止計画問題を定式化し、その結果、本問題が混合整数非線形計画問題となることを示した。
3. 混合整数非線形計画問題にベンダーズ分解をベースとしたアルゴリズムを提案・実装し、西日本系統を対象とした電気学会標準モデル WEST10 系統を用いたシミュレーション評価により有効性を確認した。

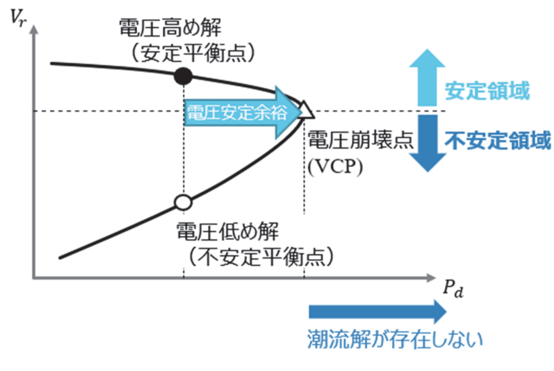


図 1：P-V カーブの例

兒　島　清志朗　（篠原真毅　教授）
「Novel Beamforming and Antenna Techniques for Microwave Power Transmission in Radiating Near Field」
（放射近傍界マイクロ波送電に向けたビームフォーミング及びアンテナ技術に関する研究）
令和３年３月23日授与

本論文は放射近傍界におけるマイクロ波送電の高効率化のためのビームフォーミング及びアンテナ技術に関してまとめたものである。

まず従来未解明であった受電アレーアンテナで受信したRF信号の合成時に発生する合成損失に着目し、放射近傍界における有効開口面積は遠方界における有効開口面積と合成損失で与えられることを明らかにした。従来の理論伝送効率に合成損失と有効開口面積の影響を考慮することで、放射近傍界において送受電アンテナ間の伝搬で生じる損失を考慮した伝送効率推定式を提案し、実験で妥当性を示した。

従来の最適化手法では対応できない放射近傍界の任意の受電面に対して送電ビームを最適化する手法も開発した。提案手法は最適化問題を固有値問題に帰着させ、最適解を一意に求めることができる。さらにアクティブ素子パターンの利用によって、従来手法では考慮されない素子アンテナ間相互結合の影響を含めた最適化を可能にし、数値解析及び電磁界解析で有効性を示した。

従来遠方界で利用されていたマルチビーム合成手法を放射近傍界に適用し、受電回路の整流効率を考慮した送電ビーム最適化手法を開発した（図1）。提案手法は最適化問題の次元が送電アンテナの規模に依存せず、非常に簡易な計算で最適化が実現できる。回路効率の考慮によって従来の最適ビームと比べ、高効率な送電ビーム設計が可能であることを数値解析によって示した（図2）。

位置推定用のパイロット信号と送電マイクロ波を偏波分離によって単一のアンテナで処理可能な5.8 GHz両円偏波アンテナを開発した。給電回路とアンテナの一体化によって、従来のアンテナと比べて小型かつ簡易な構造を実現した（図3）。帯域幅約18 MHzで右旋/左旋円偏波の入力ポート間のアイソレーション20 dB以上、利得6.5 dBic以上、軸比0.94 dB以下を実現し、レトロディレクティブシステムに用いるために十分な特性を有することを示した。開発アンテナは表面波を抑制する構造を利用しており、従来と比べ相互結合が低減されることをシミュレーション、実験で示した。

ビーム制御に重要なアレーアンテナの入力振幅制御回路として5.8 GHz可変電力分配回路を開発した。提案回路はバラクタダイオードやピンダイオードを利用した移相制御によって、出力位相を同相に保持しつつ電力分配比を変更できる。開発したアナログ分配回路は出力間位相差0.13°以下で従来分配回路の約4倍の電力分配比-3 dB $\leqq k \leqq 10$ dB、挿入損失1.1 dB-2.6 dBを実現した。開発したディジタル分配回路はLoaded-line移相器を利用し、ピンダイオードON/OFF時に電力分配比0.07 dB/ 3.32 dB、出力間位相差0.23° /1.55° 、挿入損失0.44 dB/0.66 dBを実現した。

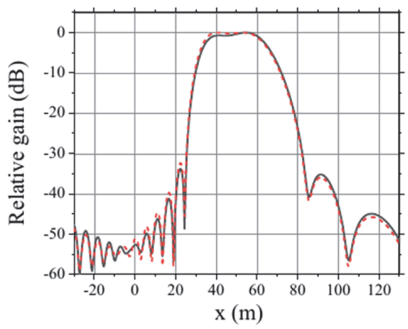


図１：提案ビームウェイトを用いたフラットビームパターン（ビーム方向制御）

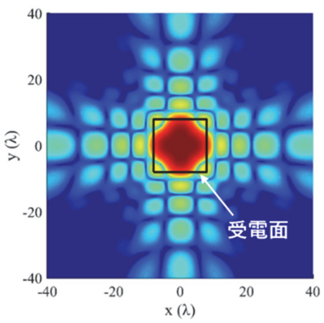


図２：効率最大となる最適化ビーム

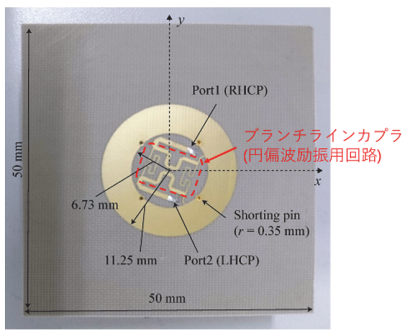


図３：開発した相互結合を低減可能なアンテナ

平　川　　　昂　（篠原真毅　教授）
「Novel Analyses on Single Shunt Rectifiers for Microwave Wireless Power Transmission」
（マイクロ波無線電力伝送用シングルシャント整流回路の設計および解析手法に関する研究）
令和 3 年 3 月 23 日授与

本論文はマイクロ波無線電力伝送において不可欠である整流回路に着目し、特にシングルシャント整流回路について、動作原理、高効率化手法、設計手法について具体的な検討をまとめたものである。

まず、シングルシャント整流回路の RF-DC 変換効率および電流電圧特性について、時間領域から着目した解析が行われた。解析結果として、先行研究において示されていなかった理想シングルシャント整流回路の電流電圧特性について、理論式を算出している。これに伴い、入力フィルタである整合回路が接続されていない場合の最大変換効率も明らかにした。

整流回路の新規シミュレーション手法にも着目しており、この手法は出力電圧が一定である際に既存のシミュレーションに対して有利となるものであった。本シミュレーション手法は、時間解析と定常状態条件を組み合わせたものである。通常高周波の回路解析シミュレーションでは、負荷抵抗と入力電力を入力パラメータとして解析を行う。これに対して新しい手法では入力電圧振幅と出力直流電圧を入力パラメータとして用いる。そのため、出力電圧の変動が少ないような条件において、既存のシミュレーションに対して有利に設計が可能である。ダイオードパラメータによる効率への影響に関しては、閾値電圧およびブレークダウン電圧が与える影響を具体的に示した。また、商用シミュレータの結果とも比較を行い、新規シミュレーションの正確性を示した（図 1）。

小電力入力条件下において整流回路の変化効率を向上させるためにはダイオードへの印加電圧を向上させることが重要である。そこで、パルス変調を利用してピーク対平均電圧比を向上させた場合の変換効率特性についての検討を行った。本研究ではパルス変調の有効性について解析を行い、パルス変調の有効性および最適負荷インピーダンスの変化について明らかにした（図 2）。また出力容量が十分に大きい時、瞬時電力を連続入力した場合と同様の変換効率が得られることを示した。その際に効率対負荷特性がデューティ比の逆数倍抵抗側に移動することも示した。

整流回路の設計においてダイオードモデリングは重要な課題である。通常散乱パラメータを用いたダイオードモデリングでは 2 ポートの散乱パラメータを用いるのに対して、本研究では 1 ポートの反射特性を用いたモデリング手法について検討している。結果として 1 ポートのみの散乱パラメータからダイオードパラメータ抽出が可能であることを示した。

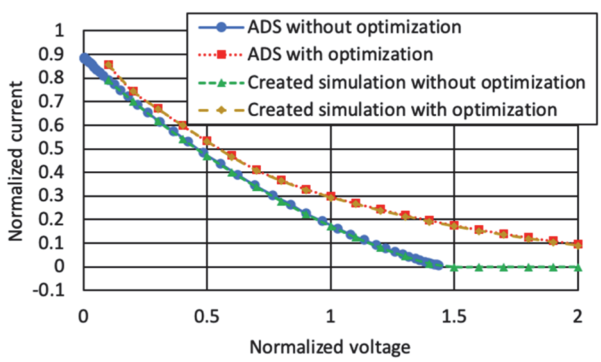


図 1：レクテナの I-V カーブ（f=2.45GHz, R_s=10Ω, C_j=10^{-12}F）

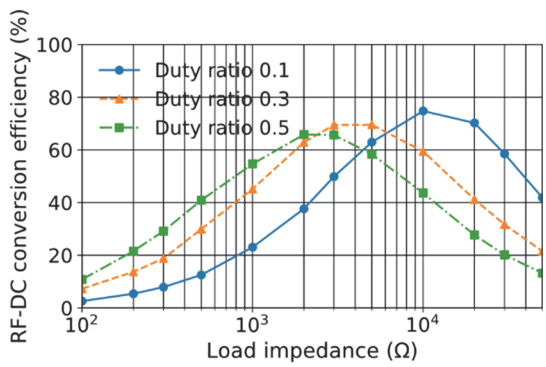


図 2：パルス無線送電による効率と最適負荷の変化

楊　　　　波（篠原真毅　教授）
「High Power Microwave Wireless Power Transmission System with Phase-Controlled Magnetrons」
（位相制御マグネトロンを用いた大電力マイクロ波無線電力伝送システム）
令和２年11月24日授与

本論文は、位相制御可能な新しいマグネトロンを用いた大電力無線電力伝送システムの研究に関してまとめたものである。

まず、注入同期法をベースに、従来の陽極電流位相制御法では制御できなかった5.8 GHzマグネトロンの位相を制御でき、汎用性の高いマグネトロン位相制御及び出力電力の制御方法を開発した。開発した電力可変位相制御マグネトロンの雑音レベルを -50dB以下に抑えた上で位相制御時間を50 μs以内に短縮し、位相制御精度± 1° 以内を実現した。

４台の電力可変位相制御マグネトロンを２×２の形で配列し、電波の送電方向が制御でき、かつ送電電力を可変とするマグネトロン・フェーズドアレーを構築した。マグネトロン・フェーズドアレーの出力位相の制御により、送電方向制御機能の検証を行った。マグネトロン・フェーズドアレーにおいて、DC → RFの最大変換効率として61.0%を得た。マグネトロン・フェーズドアレーの出力マイクロ波電力を1304 Wとした場合、5 mの距離でマイクロ波無線電力伝送実験を行った結果、受電側のDC出力電力は142 Wに達した。

位相制御マグネトロンの研究を発展させ、マグネトロン出力の変調性能を発見し、これまでにない高速通信可能なマグネトロンの開発に成功した。実験の結果、10Mb/sの通信速度を実現できた。振幅/位相/周波数の各変調の実現手法を確認し、通信速度（帯域幅）とマグネトロンの注入出力電力比の関係を明らかにした。本成果で特許も取得している（図1）。

過去の研究では高安定度かつ高価な直流安定化電源を必要としていた位相制御マグネトロンを改良し、非常に低コストの電源で位相制御マグネトロンを実現することに成功した。開発した新しい電源は位相制御マグネトロンシステム、変調マグネトロンシステム、マグネトロン出力合成システムなどに応用可能であった。

様々な位相制御マグネトロンを用いた大電力マイクロ波無線電力伝送システムの実験を行った。2.45 GHzの変調マグネトロンを用いた実験では、伝送距離約3.5 mでマグネトロンのみでテレビ情報と無線電力の同時伝送に成功した。さらに5.8 GHzマグネトロン無線電力伝送システムでは、伝送距離5.6 mで、システムの全体効率は9.73% を実現した（図2）。

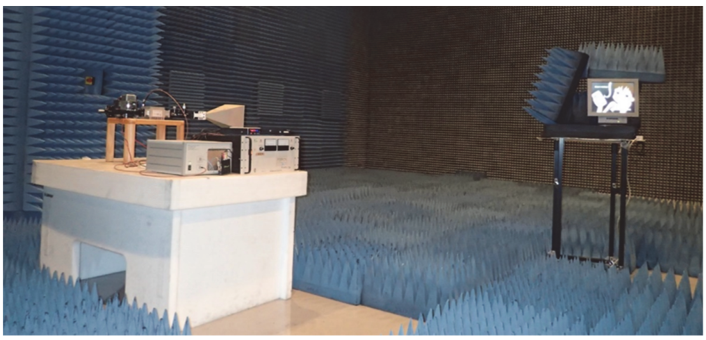


図１：電力情報同時伝送マグネトロン・ワイヤレステレビ

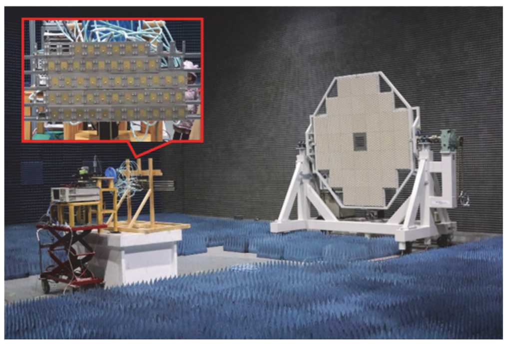


図２：マグネトロンワイヤレス給電実験

Ruiting OUYANG　（原田博司　教授）
「Receiver Design for Highly Mobile Wireless Regional Area Network」
（高速移動広域無線通信システムにおける受信機に関する研究）
令和３年９月 24 日授与

With the spread of Internet of Things (IoT) and intelligent transportation system (ITS), wireless communication system with larger capacity and more efficient spectrum utilization is required. Due to the excellent propagation properties of TV white spaces (TVWS) communication system, the TVWS-based IEEE 802.22 wireless regional area network (WRAN) communication is one of the promising technologies for wide- coverage, large-capacity, and cost-effective vehicular network. To cope with application scenarios in vehicular communications as shown in Figure 1, this thesis aims to design a reliable receiver applicable to IEEE 802.22-based mobile WRAN communication system and establish a flexible testbed for practical evaluation.

As the first topic of this thesis, a reliable receiver design for IEEE 802.22-based mobile WRAN communication system adhering to the standardized physical layer (PHY) parameters is proposed and analyzed. The performance of the receiving schemes is evaluated by computer simulation. The evaluation results prove the feasibility of the IEEE 802.22 system under high-speed vehicle communications in rural areas. As the second topic, this thesis discusses an experimental platform for IEEE 802.22-based highly mobile wide area communication system. This work focuses on the development of software defined radio (SDR)-based experimental platform that enables flexible PHY performance evaluation of the IEEE 802.22-based highly mobile wide area communication system. As the third topic of this thesis, a flexible and easy implementable channel measurement and modeling prototype is presented. The multipath fading characteristics measured in the experiment are modeled and reproduced by the proposed modeling algorithm and reproduction framework with a high fitness of statistical characteristics.

From the above researches, robust receiving schemes and implementable testbed for IEEE 802.22-based highly mobile WRAN are shown. The author hopes that the discussions in this thesis to enhance the mobility of TVWS-based WRAN system and the communication coverage of transportation system will support and promote the near-future IoT applications.

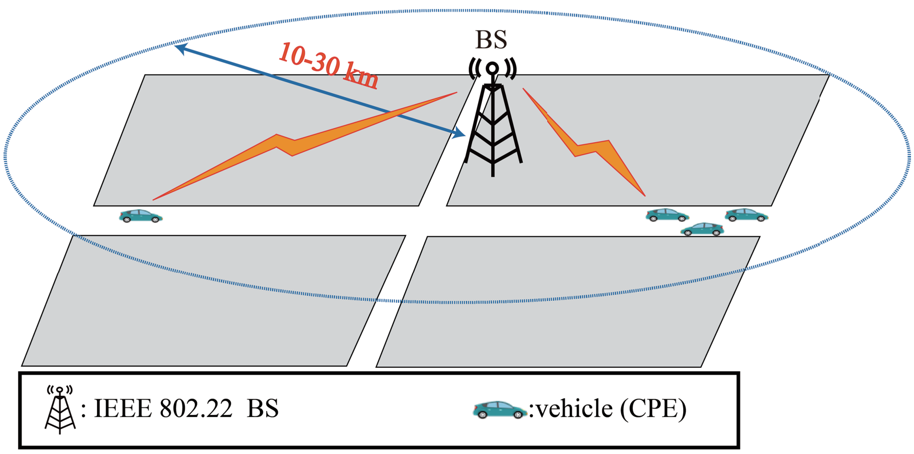


Figure 1: Illustration of IEEE 802.22-based highly mobile wide area communication system.

高校生のページ

電気電子工学とは？　その面白さと守備範囲

電気工学専攻　電磁回路工学分野
和　田　修　己

1. はじめに

時々、オープンキャンパスや公開講座やいろいろなアンケートなどで、「電気電子工学科って、どんな学科ですか？」と聞かれることがあります。あるいは、「情報学科や物理工学科とどう違うのですか？」、「卒業した人はどんな職業につけるのですか？」などと聞かれます。実は、あまり知られていないかもしれませんが、電気電子工学は工学の中でも情報系、物理系、システム・機械系だけではなく、化学系とも非常に関連が深いですし、理学部や医学部にも関連の深い分野がたくさんあります。電気電子工学の範囲は図１のように非常に広く、具体的なイメージが湧きにくいのかもしれません。

電気電子工学科には、ロボットや自動車やスマホやコンピュータなどのハードウェアに関する分野や、インターネットやプログラミング、画像処理などのソフトウェアを扱う分野、そして携帯電話や光通信などの情報通信のネットワーク（情報通信インフラ）などに関する分野など、様々な分野があります。私の研究室は、その中で回路と電磁波と電気電子システム全般を扱っています。そこで、このページでは、私の身の回りの分野を中心に、電気電子ってどんな分野なのか、何を勉強し、将来は何につながっているのか、少し解説してみたいと思います。

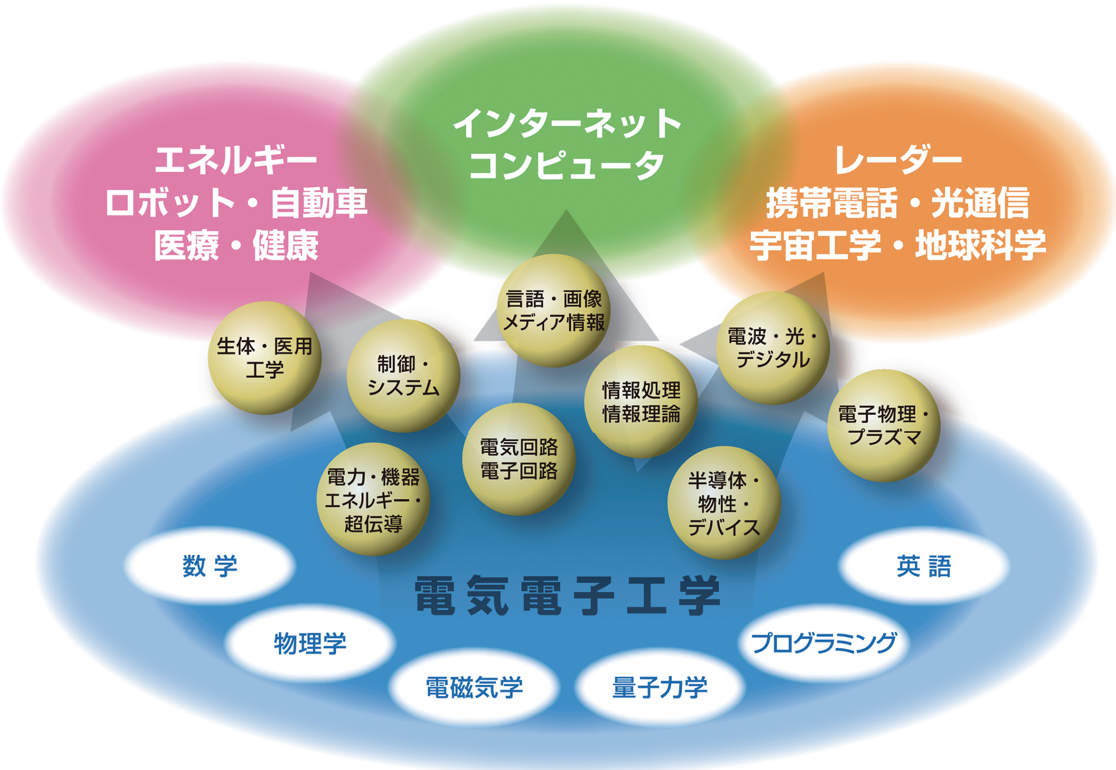


図１：電気電子工学の守備範囲

2. ものつくりと電気電子工学

筆者はもともと電子工学専攻の出身で、学生時代は高周波とアンテナと電磁波を主に扱っていましたが、大学院修士課程を修了する際には、大学に残るか、企業に就職してハードウェアの設計エンジニアになるか、迷っていました。そのころはちょうどオーディオ機器がレコードやアナログのカセットテープからCDなどのディジタルオーディオに移行するころで、企業に見学に行ったときに「私が設計したCDプレーヤーで、いい音が出ます。時々スピーカーが飛ぶんですけどね。」などと言われて、感動した覚えがあります。その後、結局、自分がやりたい研究を自由に続けたくて大学に残り、電磁波と光とレーザを使った計測システムと電気回路・電子回路、電気電子機器のシステムとしての性能確保と通信の信頼性などの研究を行ってきました。つまりずっと、ハードウェアに関連した仕事を続けてきたことになります。

私が学生のころには、まだ今のような携帯電話もスマホもありませんし、ロボットが自立して動き回るのも夢のような時代でした。映画『バック・トゥ・ザ・フューチャー（Back to the Future)』1985年よりもまだ前のことですが、1989年に公開された『バック・トゥ・ザ・フューチャー2』では大画面の薄型テレビや音声で指示を認識するコンピュータ、タブレット型のコンピュータが登場しており（時代設定は2015年だそうです）、見事に未来を予想しているのには驚かされます。今は、図2のようなスマートフォンや自立ロボットは普通の技術ですね。

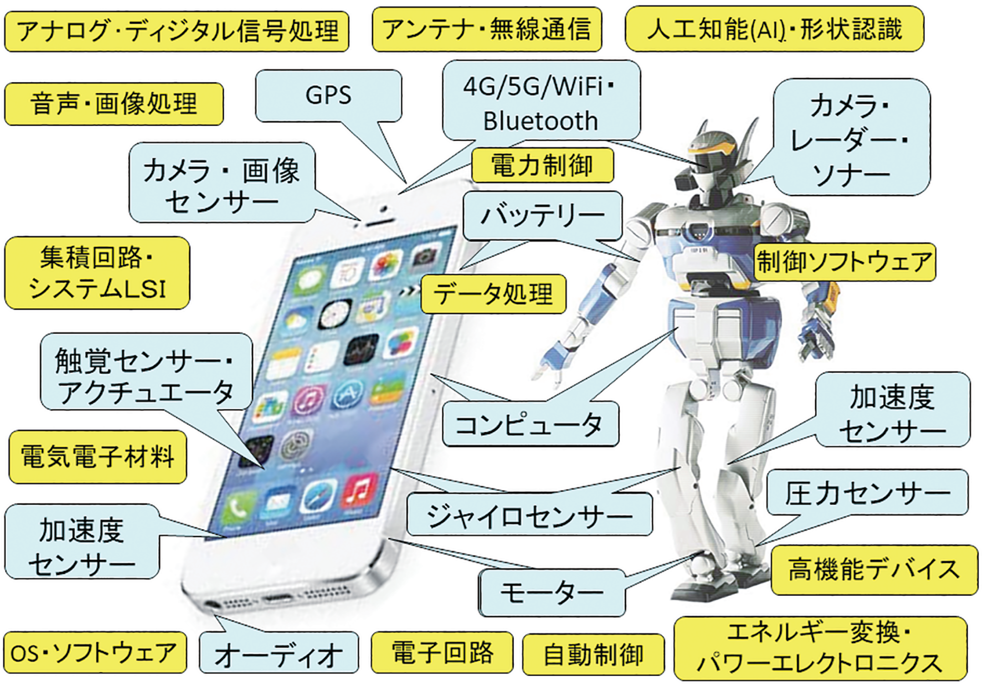


図2：ものつくり（ハードウェアの開発・設計）と電気電子工学

このスマートフォンやロボットに使われている技術を、誰が開発しているかというと、ほとんどすべて電気電子工学が関係するエンジニアや研究者の仕事です。スマホやロボットの本体の信号処理回路や制御回路は、もちろん電子回路ですが、その開発にはアナログ・ディジタルの信号処理の理論や自動制御理論が使われています。オーディオや画像センサ・指紋センサ・圧力センサ・加速度センサなどは、それぞれの高機能の電子デバイスや電気電子材料技術が使用され、カメラに使われる超小型のモーター

や光学系やイメージセンサや高性能バッテリーも電気電子の技術です。外部との通信に使う 4G/5G/WiFi や Bluetooth は、いろいろな周波数の電波に各種の変調方式を使った無線通信技術が使用されています。これらのセンサやデバイスや通信技術は、1990 年ごろにはまだ存在しないか、有っても随分大型で性能も悪いものでした。これが過去 30 年ほどで、だれでも使用できる便利な普通の技術になった。これを支えてきたのが電気電子工学です。

今、高校生の皆さんが 40 代になる 30 年後に、どんなデバイス（ハードウェア、ソフトウェア）が使われるようになっているか、まったく予想がつきません。でも、それを作ってゆくのは、皆さんの世代の仕事です。私は今、ちょうど開発の進んでいる自動車の自動運転システムに使われる車載高速ネットワークの信頼性を確保するためのハードウェア設計（集積回路と通信モジュールと信号伝送系）とその信頼性確保技術の研究をしています。私はハードウェアと電波の専門家ですが、この仕事にはソフトウェア研究者や通信方式の研究者（通信システムの世界では「上位レイヤー」と呼ばれる分野の研究者）との連携が必要です。実は、図 1 に示すように、この分野も電気電子工学科に含まれています。さらには、バッテリー（電池）やセンサなどでは材料技術が非常に重要ですが、これも電気電子の分野です。設計やデータ処理に使用する AI や機械学習も、電気電子の分野の 1 つです。

このとおり、電気電子の分野は限りなく広く、全てを書ききることはできません。同時に、「全てを理解しているエンジニア・研究者」というのも、存在しません。小学校時代に習った「乾電池と豆電球」や「電磁石・モーター」から始まり、簡単なプログラミングのようなみんなが勉強する内容の上に、順番に知識を積み上げていった結果、それぞれの専門技術者・研究者がそれぞれの最先端技術を開発して、これを組み合わせる技術者もいて、結果として今皆さんが使用している便利なデバイスや情報通信システムが成り立っているのです。

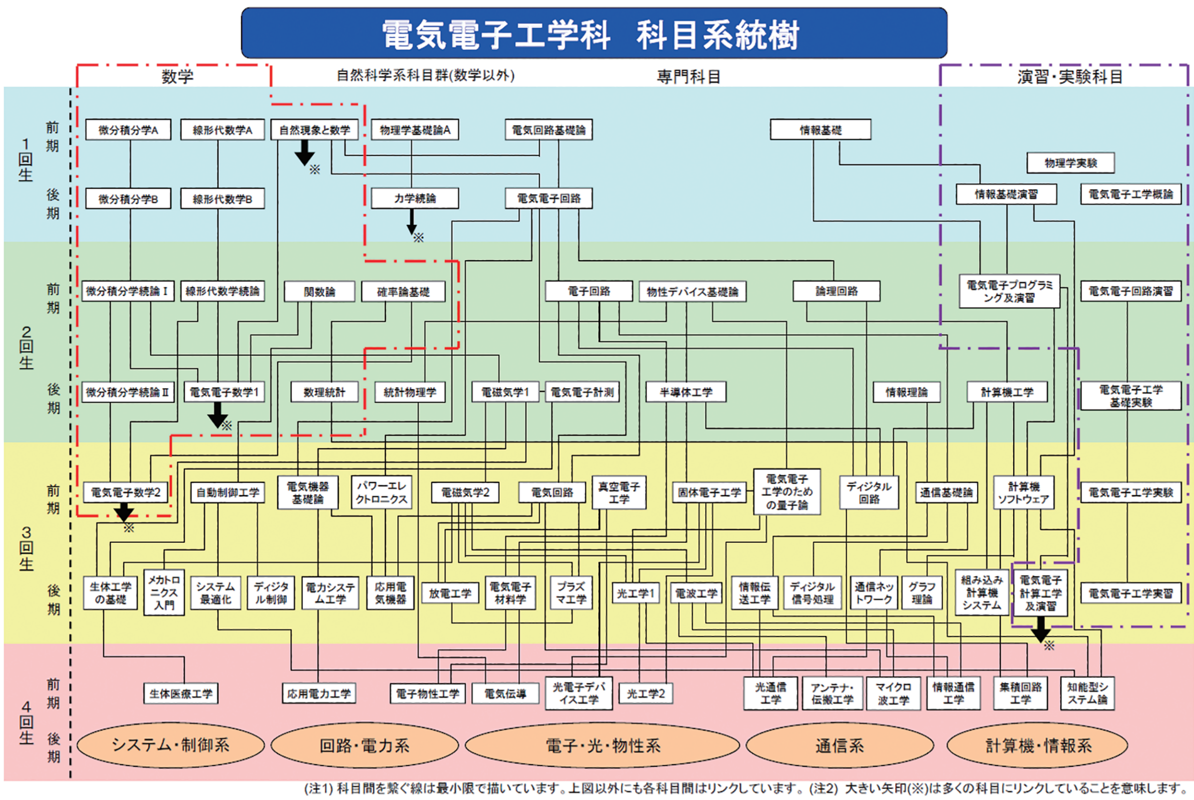


図 3：電気電子工学のカリキュラムと科目構成とその相互関係

このように、電気電子工学の分野は広いので、極端なことを言うと、それぞれの人が何でも好きなことを選んでできる、というのが特徴になっています。学科や分野によっては、大学に入学した時や2年生になるときに、それぞれの分野やコースを選ぶことになりますが、電気電子工学科には「コース分け」は存在しません。図3の科目系統樹に示すように、大学1回生から毎年積み上げてゆく専門科目の中で、自分が興味のあるやりたい分野を見つけて、実際に卒業研究を行う4回生の時に配属される研究室がどの研究室かによって、専門分野が決まることになります。大学に入学した時点で、どの分野の専門家になりたいか決まっている人はほとんどいません。通常は、3回生の前期あたりで、おおよそ自分が進みたい方向が決まる、ということが多いかと思います。

私の研究室は、電気工学専攻の中で回路と電磁波と電気電子システム全般を扱っていますが、私はもともと電子工学専攻の出身で、学生時代は高周波と電磁波を主に扱っていました。その後、光とレーザを使った計測システムと電気回路・電子回路および電気電子機器のシステムとしての性能確保と通信の信頼性などの研究を行ってきました。これまで30年以上仕事をしてきて、今私が思うのは、「1つの分野だけに絞るのは良くない」ということです。私は高周波の電気電子回路と電磁波・光とレーザを扱ってきて、このそれぞれの分野の知識や技術が様々に関連し組み合わさって新しいものを生み出し、生み出されるのを見てきました。さらに、自分の専門ではないソフトウェアや材料の研究者とアイデアを出し合うことで、さらに上の結果を出せることもたくさん経験しました。

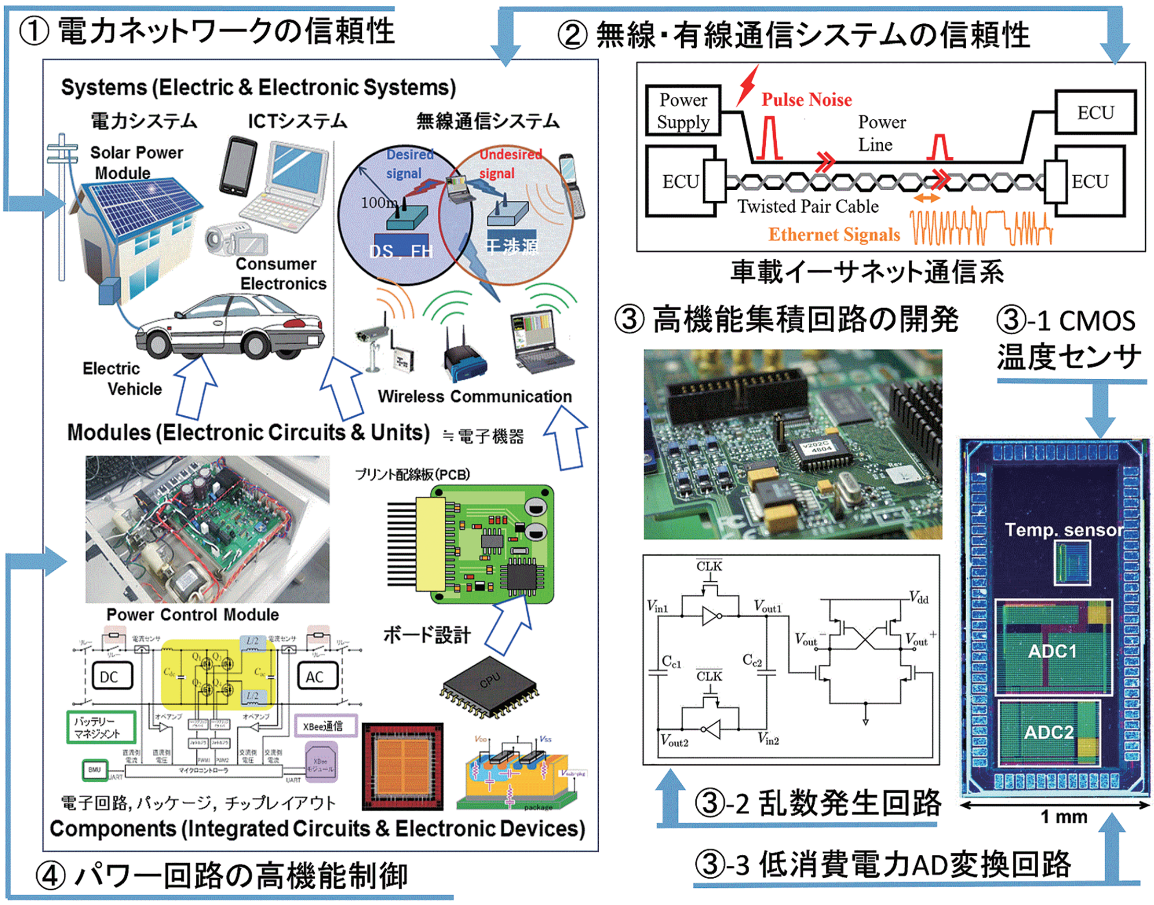


図4：電磁回路工学分野の全体像と守備範囲・研究テーマ

3. 電磁回路工学研究室での研究テーマ

今、私の研究室で扱っている分野は、図 4 に示すようなものです。その範囲は、①電力ネットワークの信頼性評価技術から、②無線・有線通信システムの信頼性の研究（車載ネットワークの通信信頼性など）、③高機能集積回路（Integrated Circuit）の開発、④エネルギー伝送とパワー回路の高機能制御、さらにはこれを支える回路理論と電磁理論、デバイスモデルと計測技術などの研究が含まれます。この内容を、「高周波回路と電磁波（私）」「パワー回路と電磁理論（准教授）」「集積回路とデバイス（講師）」を専門とする 3 人の教員が、協力して研究を進めています。一見すると、あまりにも範囲が広すぎて関係が無い分野にみえるかもしれません。しかしこれらはそれぞれに関連していて、全体を通じて実現しようとしていることは「電気電子システム（ハードウェア）の高機能･高性能･高信頼性を確保する技術」を開発する、ということです。これを我々の研究室では、「3 つの E のハードウェアシステム完全性：E^3SI（Electric, Electronic and Electromagnetic System Integrity）」と呼んでいます。3 つの E は、「電気回路（理論）」「電子回路（理論）」「電磁気（理論）」であり、これを基盤とした回路やデバイスや大規模システム（電力システムや通信システム）の高性能の確保や信頼性の実現を行うための技術であり、「イー・キューブ・エス・アイ」と呼ぶことにしています。

現在使用され開発されている電気電子システムは、アナログ・ディジタル機器だけでなく自動車や電力ネットワークも含み、今や高機能化した電気･電子モジュールを統合した相互結合系になっています。これらの機能を確保するためには、従来の「回路素子」によって記述する電気回路・電子回路だけではなく、素子だけでは単純に記述できない電磁的結合も含み、電子デバイスや新材料（メタマテリアル）の特性も記述することができる新しいモデルや理論が必要とされています。また、再生可能エネルギーによる分散電源やEV充電スタンドなど､従来とは異なる電源･負荷やエネルギーの流れが増加する中で、パワーフロー（電力の流れ）そのものを制御する手法の開発も必要です。そこで、研究のねらいを「従来の電気電子回路理論の限界を打破する」ことに据えて、電磁現象を扱う新たな理論の開拓や、デバイスの本質を扱う電子回路・集積回路の研究・開発を行っています。

具体的な研究のテーマはたくさんありますが、現在は、図にあるような、アナログ・ディジタル協調による新しい回路方式の研究として、オンチップ電源回路、低消費電力･高速アナログ･ディジタル（A/D）変換回路、温度センサ回路、真の乱数生成回路，パワーデバイスの診断システムの開発や、直流・交流（AC-DC）および直流・直流（DC-DC）変換モジュールによる高度なエネルギー変換・伝送、ネットワークの非干渉化・協調診断、車載イーサネット通信系の信頼性確保技術などに取り組んでいます。

4. おわりに

今回は、電気電子工学の分野の広さと面白さを説明したいとの思いから、筆者の研究室の専門分野である電気電子電磁回路とシステムのハードウェアから見た電気電子工学について、大まかなイメージについて説明してみました。個々のテーマの具体的内容や面白さを伝えることはできませんでしたが、何となくその広さや将来の可能性を感じてもらえればうれしいなと思います。電気電子工学科には、他にも、今回は触れることのできなかった生体機能と人体計測に関わる分野（脳機能の計測や心臓拍動制御、呼吸や心電図の遠隔多点計測や人体イメージングなど）や、宇宙電波科学とワイヤレス電力伝送の研究、量子コンピュータや光量子センシング、量子スピントロニクスと量子スピンデバイス、光・電子・半導体デバイス、等々、書ききれないテーマを研究する分野があります。入り口も広く、出口も広い、様々な方向に延びる可能性のある分野として、電気電子工学は面白いなと思っていただければ、うれしいです。是非、このような分野の一部でも、見に来ていただければと思います。

学生の声

狭い博士課程の道と広い世界

工学研究科　電気工学専攻　雨宮研究室　博士後期課程３年　LUO XIJIE

「博士課程の道が狭い」とよく言われます。実際、色々な意味で合っていると思います。普遍的な知識を取り込む学部課程と違い、「研究テーマ」という、人間や社会の「知」の限界にある狭い裂け目に身を投じ、広げよう…と、私がこういう抽象的なイメージを持っています。具体的な研究生活になると、狭く感じるところもよくあります：計測器の音しかない実験室の空間に閉じこむとき、解析のコードを睨んでディスプレイに頭を突っ込もうとするとき、その一部屋、一デスクにある情報を精一杯発掘することこそ自分の使命だと思っていました。

しかし、研究自体が広く、一研究者として広げるべきものでもあります。研究テーマを「裂け目」と例えたが、狭い裂け目を一人でどう掘り下げようと限界があります。分厚い壁を突き破るために、離れた「裂け目」と繋がるほうが効率的だと、学会に参加するたび思っていました。歩んでいる道が狭いゆえ、「今の道が正しいなのか」と悩むのがよくありました。振り返ってみると、国内外の研究者とのコミュニケーションの中、「自分の成果や知見が誰かの役に立っている」ことが自分に自信を付ける重要な一環でした。

研究に専念するつもりであっても、社会の中に生きているため、常に身近な環境、世界の動向に影響されます。私が博士後期課程に入ったのはちょうど卓越大学院プログラムが始まった頃でした。経済支援やフィールド･プラクティスなどの施策の恩恵を受け、海外研究者と積極的な交流ができました。一方、コロナ禍以来、学会がオンラインとなり、海外出張もできなくなるため、多くの学生にとって研究生活が「狭い」ものと感じるのでしょう。「研究」が広いであるべきと考えると、進んでいるリモートワークが時に狭い孤独な博士課程の道を広げるきっかけになれると思います。

「脳」を研究する理由

情報学研究科　システム科学専攻　石井研究室　博士後期課程１年　片　山　梨　沙

コロナ禍で外出の機会が減った。代わりにオンラインゲームを始めた私は、最近プロ選手の配信動画などを見る機会が増えた。大会で披露される、秒単位で変わる戦況に応じた緻密で先知的なプレイに常々思うのが、「頭の中どうなってるんだろう」である。彼ら彼女らのプレイ中の脳内情報処理機構が解明できれば、下手な私も上手くなれるだろうか。

と、冗談はさておき。このような人間の複雑で難しい情報処理とそれを支える脳機構は、私の興味を引いてやまないテーマである。実際に私は、人間の被験者を用いて脳活動計測実験を行い、階層的意思決定課題中の脳情報動態解析に取り組んでいる。だが、人間の脳情報処理を研究するのは、知能に興味があるとはいえ工学部出身としては珍しい部類だろう。朝のニュースでは「AI＝人工知能を活用して云々」という文言を毎週聞いているほどで、AI が社会に浸透し目新しさが薄れている感はあるものの、「新しい価値・ものを生み出す」観点からすれば、まだまだ人工知能関連研究の方が（少なくとも脳の研究よりは）期待を持ちやすい。

それでも私が、学部四回生で卒論テーマを決めた時から脳の研究に拘っているのは、人工知能と脳科学分野の進歩は関係しているという意識があるからだ。第三次 AI ブームの火付けは、人間のニューロンを模したニューラルネットワーク、それを多層化したディープラーニングの成功だった。もちろん計算機性能向上という要因もあるが、脳科学が人工知能のブレイクスルーの切っ掛けとなったのは間違いではなかろう。AI 技術がより進化し、人間社会が更に発展するためには、脳科学の進歩、すなわち脳の情報処理過程の更なる解明が必須であると信ずるところであり、今後も研究活動に励んでいく所存である。……もっとも、機械より人間を相手にする方が、研究が面白かろうというのも理由の一つではあるが。

教室通信

電気電子工学科オープンキャンパス 2021 ——コロナ禍にあって

企画広報委員会　萩　原　朋　道

電気電子工学科におけるオープンキャンパスへの取り組みの最近の様子について紹介させていただきたいと思います。本誌 43 号におきましても 2019 年のオープンキャンパスに関する紹介がなされており、その折にも企画広報委員長へ執筆依頼がなされたものと推察致しております（ちなみに、43 号の記事は「企画・広報委員会」としてなのに対して、後のわずかな名称簡素化に伴って本記事では「企画広報委員会」としております）。企画広報委員会、とくに委員長の業務は多岐にわたるのですが、記事にして紹介しやすいのはどうしてもオープンキャンパスの話題に絞られる感があります。オープンキャンパスとともに高校生と大学を結び付ける非常に重要なイベントのひとつとして位置づけられるものとしては、同じく京都大学としての取り組みの一貫として実施される ELCAS（高校生のための体験型学習講座）もあるのですが、こちらに関しては運営のほぼすべてを当該年度担当専攻（旧電気系 3 専攻で持ち回り）の先生方で構成されるワーキンググループに一任している状況です。

前置きと余談で多くを占めてしまいましたが、前回紹介の 2 年後に再びオープンキャンパスの紹介をさせていただくことにした理由のひとつは、やはりコロナ禍での開催ということがあります。2020 年については早い段階で全学としてオンライン開催が決まり、学科長挨拶、学科紹介、模擬講義、研究紹介 3 件などを含むコンテンツを専用サイトにアップロードしての“開催”となりました。高校生の興味の持続時間からこれらのコンテンツ全体を 60 分をめどに収めるという全学方針の中で検討し、模擬講義も研究紹介も、従来の対面での実施時と比べれば相当なコンパクト化を図っていただきました。

2021 年に関しては本件 WG メンバーの献身的ご尽力のもと、感染予防への最大の配慮とできるだけ多くの高校生の対面参加（ないしそれに少しでも近い形態）の確保の両立を念頭に、対面での学科長挨拶や模擬講義の後の研究紹介に関して（2 部制実施での参加者入れ換え時における動線の重なりを避ける配慮も含む）綿密な計画を策定しておりました。参加者を少人数グループにわけた上で、吉田キャンパスにおける研究室での対面実施の他、吉田キャンパスで多数の部屋を確保した上で桂および宇治キャンパスのほぼすべての研究室と遠隔で接続するというものです。後者に関しては、吉田キャンパスにも各研究室から若干名の教員・学生の配置も予定していました。このような積極的実施体制を構築しつつあった中で、感染状況に照らして全学としてオンライン実施が決定され、脱力感に見舞われました。結果的には、2020 年と同様の形態で同様の長さのオンラインコンテンツを（対面＋オンラインで準備していたときと比べるとはるかに限られた数の先生方に）準備いただいての“開催”となりました。

結局この 2 年は、基本的にはアップロードされたコンテンツを高校生が見るというだけのオープンキャンパスとなったわけですが、そのコンテンツには、上では触れなかった女性受験生向けのメッセージも実は含まれています。これは、電気電子工学科在籍ないし卒業後に大学院に進学した女子学生の手によるものです。そしてこの部分については別途、準備に関わった女子学生を含む 10 名以上の女子学生と、女性限定相談申込者の間での意見交換の場を、オンラインではありますが持つことができ、大変好評を博しました。この部分だけがコロナ禍にあっても 2 年とも従来の形を辛うじて踏襲できたのに一番近いわけですが、本企画の女子学生に限らず数多くの先生方から多大なご尽力をいただいてのオープンキャンパス実施への感謝とともに、世の中のあらゆる物事と同じく今後のオープンキャンパスについて新たな可能性を探っていく契機としても多難であった 2 年を振り返りつつ筆を置かせていただきます。

賛助会員の声

駅におけるきっぷ販売業務 DX ～会話しながら購入できる指定席券売機（アシストマルス）について～

鉄道情報システム㈱（昭和 49 年卒）　藤　井　和　彰

1. はじめに

以前、本誌において、JR の旅客販売総合システムである MARS（マルス）についてご紹介させていただきましたが、本稿では最新のデジタル技術を活用して、駅におけるきっぷ販売業務 DX を実現する新しいサービスについてご紹介させていただきます。

新幹線や特急列車の指定券、乗車券、および通勤・通学定期券などは、駅の「みどりの窓口」で購入するのが以前は通常のスタイルでしたが、JR 旅客鉄道会社では、2000 年頃から「みどりの窓口」の混雑解消や労働人口の減少に備えて、お客様自身が操作してきっぷを購入できる指定席券売機（MV 端末）を導入し、導入エリアと設置台数を年々拡大して、現在では約 2,500 台が全国の JR の駅で稼働しています。

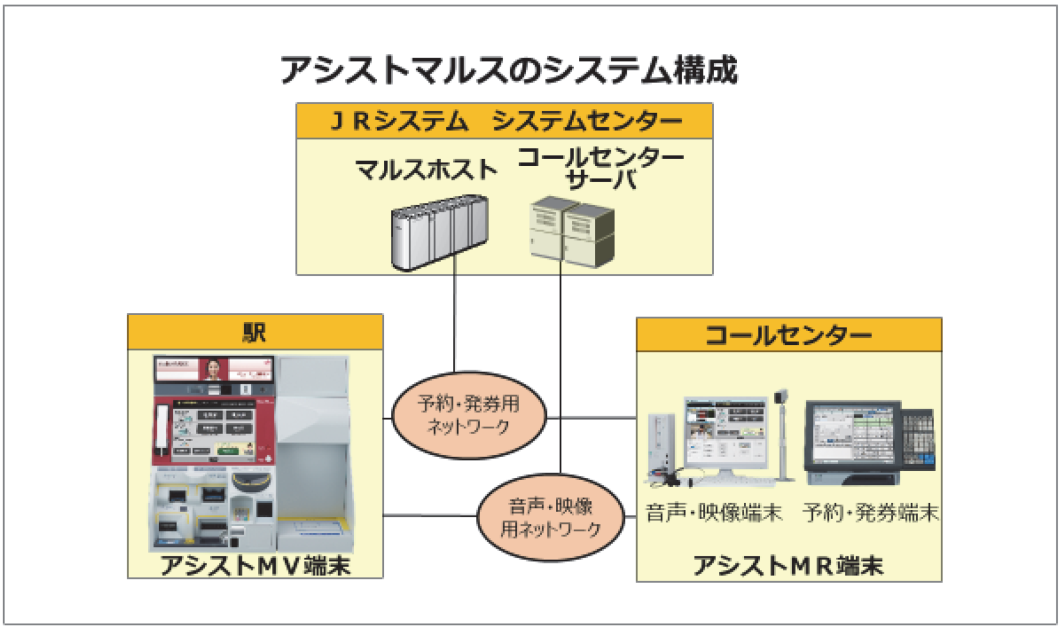
このような利用状況の中で、

・係員のいる窓口と比べて、割引きっぷの購入や払い戻しができないなど、指定席券売機で取扱えるサービスが少ない。また、高齢者等は券売機の操作が難しい。
・労働人口が減少していく中で、「みどりの窓口」できっぷを販売する係員の確保が困難となってきている。
・「少ない待ち時間できっぷを購入したい」、「通勤前後の早朝や夜間にきっぷを買いたい」、「相談しながらきっぷを買いたい（訪日外国人旅行者、高齢者）」、「窓口に行かなくても学割きっぷや通学定期券が買いたい（学生）」など、お客様の様々なご要望がある。

等々が顕在化してきたことから、これらを解決すべく指定席券売機を活用して、オペレータと会話をしながらきっぷを購入できるアシストマルスサービスを 2010 年に開発しました。以降、このサービスを取り扱う端末の設置台数が年々拡大して、2021 年度末には約 350 台が全国の JR の駅で稼働する予定となっています。

2. アシストマルスサービスのシステム構成

アシストマルスサービスは、駅およびコールセンター、システムセンターの 3 箇所を専用ネットワークで接続することにより、オペレータからの遠隔操作によって非対面による接客販売を実現しています。



(1) アシスト MV 端末（JR 駅に設置）

指定席券売機（MV 端末）にマイクやスピーカー、カメラ、確認台を追加搭載している端末です。コールセンターのオペレータがお客様と会話しながら、確認台に置かれた証明書類をカメラ映像により確認して割引きっぷの発売や払い戻しができるなど、「みどりの窓口」と同等の接客が可能となっています。（カメラ等を搭載した MV 端末をアシスト MV 端末と呼びます）

(2) アシスト MR 端末（コールセンターに設置）

アシスト MR 端末は、コールセンターのオペレータが操作する端末です。きっぷの予約・発券操作を行う「予約・発券端末」と、お客様とオペレータとの間の映像表示や音声通話を行うための「音声・映像端末」から構成されています。

(3) マルスホスト、コールセンターサーバ（システムセンターに設置）

JR の旅客販売総合システムである「MARS（マルス）」と、音声・映像情報等を管理する「コールセンターサーバ」で構成されています。

3. アシストマルスの主な提供サービス

アシストマルスサービスでは、お客様が「みどりの窓口」できっぷを買うのと同様に、駅にあるアシスト MV 端末を使って遠隔地のコールセンターにいる係員オペレータと会話をしながら、端末に搭載されたマイク（音声）やカメラ（映像）など利用して割引証明、操作支援等を受け、きっぷを購入することができます。また、無割引のきっぷなど通常のきっぷはお客様自身の操作で購入することができます。昨今では新型コロナウイルス感染防止対策として、新しい生活様式に対応した非対面サービスとしても活用されています。

主な提供サービスは以下の通りです。

(1) 証明書確認などが必要なお客様へのサービス

お客様は、各種証明書を端末の確認台に置いていただくことにより、オペレータがカメラ映像を通し

て証明書を確認することにより、ご希望の割引きっぷや通学定期券等を購入することができます。

(2) 機械操作が苦手なお客様へのサービス

お客様は、みどりの窓口と同じようにオペレータと会話をしていただき、オペレータが代行操作を行ってきっぷを準備します。お客様は待っているだけでご希望のきっぷを購入することができます。

(3) 購入操作が分からないお客様へのサービス

お客様は、オペレータの操作によりアシスト MV 端末の画面に表示される「指先」カーソルを見て、オペレータの音声案内と画面に表示された指先案内に従いながら、お客様自身の操作できっぷを購入することができます。

(4) 訪日外国人などのお客様へのサービス

お客様が、母国語（ 英語、中国語など 4 か国語に対応）でオペレータに話し掛けた場合、外国語に不慣れなオペレータでも、音声認識技術と自動翻訳技術を活用して変換された日本語でお客様と会話をすることができます。オペレータの発話（日本語）は自動翻訳されて、端末の画面に外国語で表示されるので、お客様は不慣れな日本においても、円滑なコミュニケーションによりご希望のきっぷを購入することができます。

(5) 耳や目が不自由なお客様へのサービス

お客様は、端末に貼付してある点字・テンキーからオペレータを呼び出して、「みどりの窓口」と同様に、オペレータとのリモート筆談や点字･テンキー･音声による案内により会話を行い、ご希望のきっぷを購入することできます。

4. アシストマルスサービス導入の効果

(1) 駅窓口の混雑緩和と案内サービスの向上

アシストマルスサービスの導入により、窓口に集中していたお客様が分散され、お客様がきっぷを購入するまでの時間が短縮されて窓口の混雑緩和が図られました。また、窓口を縮小し、その係員をお客様案内等の業務に従事させることにより、高齢者、訪日外国人、バリアフリーのお客様への対応を拡充させるなど案内サービスの向上が図られました。

(2) 営業時間の拡大

アシストマルスサービスの導入により、「みどりの窓口」を閉めている早朝や夜間といった時間帯においてもきっぷを販売することが可能となり、営業時間の拡大が図られました。

(3) お客様との円滑なコミュニケーションの実現

オペレータ音声による案内に加えて、アシスト MV 端末の画面にきっぷの購入内容が表示されることによりお客様が目視で確認ができるようになるなど、きっぷ販売に関わるコミュニケーションがより円滑に行われるようになりました。

(4) 接客内容分析による接客のサービス品質向上

アシストマルスサービスの導入により、コールセンターにおいてきっぷ販売業務の集中管理ができるようになり、所要時間が長くなった接客内容を抽出して分析し、案内方法を改善するなど、接客サービ

スの改善やノウハウの蓄積が進みました。また、オペレータ全員にこれらの改善を迅速に周知することが容易となり、お客様へのきっぷ販売サービスの品質向上が図られました。

(5) セルフ購入率の向上による駅業務効率化

アシストMV端末をご利用のお客様のうち、約80%はご自身で操作されてきっぷを購入しているので、オペレータは残りの約20%のお客様を遠隔接客するだけでよいことから、全件をオペレータ対応する場合と比較して、少数のオペレータで対応すること可能となりました。

また、オペレータ対応によりきっぷを購入された約20%のお客様のうち、約60%（全体の12%）はご自身の操作にてきっぷを購入が可能であり、このようなお客様にはオペレータが操作手順をご案内することにより、次回からはお客様ご自身で操作してきっぷを購入していただくことが可能となり業務の効率化が図られました。

(6) 駅務機器統廃合によるコストダウン

アシストマルスサービスの導入により、これまで「みどりの窓口」「近距離券売機」「ICチャージ機」「精算機」の4台の機器で提供していたサービスが1台の機器で提供可能となり、駅務機器の統廃合によるコストダウンが実現できました。

5. 今後提供予定の新たなサービス

現在提供中のサービスでは、お客様がアシストMV端末からオペレータを呼び出した場合、全ての呼び出しコールをオペレータが応対していますが、オペレータのより効率的な運用をめざして、AI（人工知能）を用いた「バーチャル駅員」の自動応対による接客を行う機能の開発を進めています 。

これにより、一般的なきっぷ購入に対する接客は「バーチャル駅員」が行い、複雑な経路によるご利用や割引証等の目視確認が必要なきっぷ購入についてはオペレータがよりきめ細かく応対することにより、きっぷ販売業務のより効率的な運営とサービスレベルの向上を図ることができます。

【参考】各旅客鉄道会社におけるアシストマルスサービスの導入開始時期とサービス名称

旅客鉄道会社名	導入開始時期	サービス名称
JR 西日本	2010年1月	みどりの券売機プラス
JR 東海	2017年10月	サポートつき指定席券売機
J R 北海道	2019年1月	話せる券売機
JR 東日本	2020年3月	話せる指定席券売機
JR 九州	2020年4月	なんでも私に聞いてください！ど～ぞ
JR 四国	2020年8月	みどりの券売機プラス

編集後記

お忙しい中本号にご寄稿いただきました皆様に、心より御礼申し上げます。

本文の執筆時点で、オミクロン株の急速拡大により、つかの間のコロナ禍の小康期間は終わり瞬く間に第6波となってしまいました。つい先日の親しい友人たち（4名）との祇園での新年会を数年ぶりの飲み会と喜んでいましたが、しばらくは、自粛期間が続きそうです。このように、2年以上に及ぶコロナウイルスとの戦いの中で、われわれ社会は大きな変革を余儀なくされていますが、多くの方が指摘されているようにネガティブでない側面にも目を向け次世代に臨むべきとも考えています。

たとえば、これまで東京で開催される会議のために年間10回から20回ほどは出張していましたが、オンライン会議のおかげで移動のストレスから解放されるとともに有効な時間活用に繋がりました。先日参加したオンライン国際会議では、午前中に米国（当該地が夕方）に午後の遅い時間にヨーロッパ（当該地が早朝）で組めば、お互いにジェットラグの苦痛を感じることなく有意義なプログラムを楽しむことができました。通常は多大な労力を要する講演プログラムの作成や大物への講演依頼も大変スムーズであったのも印象的した。われわれの社会に目を向けると、「飛行機出勤OK」Yahooのテレワーク制度拡充という報道が最近なされました。一方で、一時はテレワークを推進していた企業で出社を求めるなどの「オフィス回帰」の動きもあるようです。このような混沌とした状況下で、われわれはどのような働き方をすべきなのかについて立ち止まって考える時期に来ているのかもしれません。コロナ禍を生産性や創造性を発揮するような新しいライフスタイルに繋げるチャンスにしたいものです。

また、大学教育では、Zoomによる遠隔講義が普及し、新たなオンライン教育ビジネスも大変活況になってきているようです。京都大学における遠隔講義でも、各人が様々な工夫を行い、情報交換も活発に行われています。その中で、私自身、コロナ禍前は、講義ノート（黒板への板書用）の改訂を何年も怠っていましたが（大変恥ずかしいことですが）、この機会にパワーポイント仕様に改めるにあたって、内容の見直しや様々なメディア（先人たちの逸話、参考文献、画像、動画など）を取り入れるなど大幅な改訂を行いました。この作業の中で知るに至ったのですが、ニュートンの三大業績（微分積分学、分光、万有引力の法則）とされるものは、いずれもペスト禍を逃れて故郷の田舎に戻っていた18か月間の休暇中になしとげたことであり、ハイゼンベルグは、花粉症の療養のために、植物の少ないヘルゴラント島ですごしていたときに量子力学における行列力学に関する重要な着想を得たことなどを知るに至りました。学生さんたちには、これらの例を紹介し、「新型コロナウイルス禍で、対面講義や人との交流の制限を余儀なくされている皆さんにとって、深く考え創造する機会です。ピンチをチャンスにして、自信をもって前に進みましょう！」と呼びかけています。

人と人との直接の交流が制限されているからこそ、お互いに対面できた時の喜びを大きく噛みしめたいと思いつつ（これもコロナ禍の効用かと）筆をおきます。皆さまのご健勝を祈念いたします。

［Y. K. 記］

協 力 支 援 企 業

鉄道情報システム株式会社
日 本 製 鉄 株 式 会 社
株 式 会 社 村 田 製 作 所
ロ ー ム 株 式 会 社

発　行　日：令和 4 年 3 月

編　　　集：電気系 cue 編集委員会
白井　康之、川上　養一、山本　衛、
橋本　昌宜、村田　英一、田中　俊二、
デゾイサ メーナカ、佐藤　亨（洛友会）
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