



京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.54 SEPTEMBER 2025

[第54号]

..... 巻頭言

身近な放電プラズマの研究は今？

昭和 43 年機械工学科卒業

京都大学名誉教授 橘 邦英

..... 大学の研究・動向

薄膜成長技術を基盤とした次世代エネルギー材料の開発

— 超伝導線材・薄膜電池・パワーデバイスへの応用 —

エネルギー科学研究科 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

..... 産業界の技術動向

低損失なフッ素樹脂を用いた

ミリ波アンテナ用プリント配線板の開発

住友電工プリントサーキット株式会社

代表取締役社長 赤羽 良啓

..... 新設研究室紹介

研究室紹介

令和 7 年度修士論文テーマ紹介

..... 高校生のページ

学生の声

教室通信

編集後記

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

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

cue 54 号 目次

巻頭言

身近な放電プラズマの研究は今？

…………… 昭和 43 年機械工学科卒業 京都大学名誉教授 橘 邦英…………… 1

大学の研究・動向

薄膜成長技術を基盤とした次世代エネルギー材料の開発

— 超伝導線材・薄膜電池・パワーデバイスへの応用 —

……………エネルギー科学研究科 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…………… 4

産業界の技術動向

低損失なフッ素樹脂を用いたミリ波アンテナ用プリント配線板の開発

……………住友電工プリントサーキット株式会社 代表取締役社長 赤羽 良啓…………… 9

新設研究室紹介…………… 14

研究室紹介…………… 21

令和 7 年度修士論文テーマ紹介 …………… 36

高校生のページ

超伝導応用のこれまでとこれから

…………… 大学院工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）
雨宮 尚之、曾我部 友輔…………… 57

学生の声

100 km を走って

……………工学研究科 電子工学専攻 白石研究室 博士後期課程 2 年 丸山 ゆう…………… 64

テクノロジーとの距離感を測る

……………情報学研究科 通信情報システム専攻 原田研究室 博士後期課程 2 年 額見 怜央…………… 64

教室通信

教室におけるダイバーシティと入試

……………電気電子工学科 学科長 下田 宏…………… 65

編集後記…………… 66

巻頭言

身近な放電プラズマの研究は今？

昭和 43 年機械工学科卒業 京都大学名誉教授 橋 邦英



〔緒言〕 数年前から、高校課程の社会科に「歴史総合」という科目が新設されています。そこでは近代から現代に至る歴史を、従来の世界史と日本史という縦割りではなく、グローバルに横断的な視点で、総合的に学ぶことが目的になっています。それに触発され、近・現代の科学技術史への興味を温め直し、自前の資料を作成してきました。（今や自由な時間はたっぷりあります。）本稿では、そこから自分が専門としてきた「弱电離低温プラズマ」関連の部分抽出して、その歴史を辿りながら、現況と将来展望について考察してみたいと思います。

〔歴史〕 電気現象については、古代ギリシャの時代にターレスが琥珀の帯電を観察しています。それ以来、永年が経過した 17 世紀の中葉に、ゲーリケが硫黄球を用いた手回し式の静電発電器を製作し、スパーク放電の実験を行っています。18 世紀に入って、デュ・フェが静電気に二つの種類があることを提唱し、またクライストらによってライデン瓶（蓄電器）が発明されます。1785 年にはクーロンの法則が発表されていますが、その後まもなく、医学者であったガルヴァーニが、あの有名なカエルの足を用いた実験から「動物電気」を着想しています。ボルタはその本質を追求して、電極の金属の種類による接触電位差（イオン化傾向の違い）が原因であることを突き止め、1800 年に電堆（電池）を発明します。

ボルタ電池を用いた放電研究は 19 世紀初頭からデイビーやファラデーによって始められましたが、真空技術の向上と誘導コイルによる高電圧発生技術の開発によって、ガイスラー管やその改良形のクルックス管を用いた真空放電の研究が進展し、幾多の先駆的研究を経て、1895 年のレントゲンによる X 線の発見と 1897 年の J. J. トムソンによる電子の発見に至ります。

1879 年の当時、クルックスが講演で「我々は宇宙の物理的基盤を構成する“第四の物質”の研究の知と未知の境界に立っている」と述べています。（陰極線の様々な現象を説明する中で、ファラデーの用語“Radiant Matter”を借りて、そのように表現しています。）20 世紀初頭には、J. J. トムソンの弟子のタウンゼントが気体中の電気伝導の研究を進め、放電における電離増倍の機構などを解明していきました。その後、パッシェンやアストンらによって放電現象の物理学的な研究がさらに進められました。

20 世紀の四半分が過ぎた頃に、米国の GE 社で電球の研究をしていたラングミュアが、電子とイオンの集合で構成される電離気体を、生体の血漿から連想して“Plasma”と命名しています。（プラズマは中国語では“電漿”と記されます。）また彼は、その集合体の集団挙動がもつプラズマ振動や電子エネルギー分布などの概念も創出しています。同時期の欧州では、フィリップス社のペニングや、ジーメンス社のフォン・エンゲルとスティーンベックらが気体放電の基礎や実用に向けた研究をしていました。

同じく戦間期の 1925 年に量子力学が誕生しています。（今年はその百周年に当たります。）それによって、電子の性質や原子・分子の構造が明確になるとともに、発光・吸収スペクトルや、その電界や磁界による変化などが説明できるようになりました。また、電子と原子・分子の衝突による電離や励起、解離などの素過程が衝突断面積として理論的に取り扱えるようになり、放電プラズマ内部の物理現象の解

析が精力的に進められていきました。そうして、プラズマの発光が光源としての用途に活用され、実用的な蛍光灯や高輝度放電（HID）ランプなどが次々に開発されてきました。

一方、電磁気学の理論は1864年にマクスウェルによって構築されています。その方程式を現代形に整えたのが“自学の天才”ヘヴィサイドです。彼は1902年（ケネリーとほぼ同時）に、大気圏での電磁波の伝搬の様子から電離層の存在を提唱しました。それが1924年にアップルトンによって検証されます。その後、大気圏での磁気嵐やオーロラなどのプラズマ現象がアルヴェーン（アルフベン）によって理論的に解明され、チャンドラセカールらによって宇宙物理学のプラズマ研究へと進展していきます。

第二次世界大戦の始まる前年の1938年には、ハーンらによってウランの核分裂反応が確認されました。それから、オッペンハイマーらによって「マンハッタン計画」の下で原爆が開発されました。大戦後も、さらに進んだ核融合反応による水爆も製造されました。その頃に、ようやく核の平和利用が叫ばれるようになり、原子力発電とともに、高温プラズマによる制御核融合の研究が始まりました。それを牽引したのが天文学者のスピッツァーで、1953年にプリンストン大学にステラレーター装置が建設されます。日本では1961年に全国共同利用の名古屋大学プラズマ研究所が設立され、さらに本学や他の主要な大学にも次々とプラズマ関連の研究施設が設置されていきます。その頃までに、プラズマの学術的な基盤が組立てられ、統計力学に立脚した電子およびイオンのエネルギー分布関数や輸送過程に関するボルツマン方程式（あるいはブラゾフ方程式、フォッカー・プランク方程式）と、電磁界に関するマクスウェル方程式を組み合わせることによって、プラズマ物理学の体系が構築されてきました。

【現況】 上述のように、プラズマの研究領域は従来の気体放電から、宇宙プラズマや核融合プラズマの分野へと分岐し、拡大してきました。ここからは、元来の放電プラズマの研究分野がその後どう展開し、将来どう発展していくのかについて述べていくことにします。

戦後まもなく、各大学の電気系学科に照明工学やプラズマ工学のような科目が設けられ、担当の講座が置かれました。照明工学においては、放電型光源が主要な内容でした。1960年代には種々の気体放電型レーザーが発明され、レーザーを扱う量子エレクトロニクスという科目もできてきました。（その頃大学院の学生だった私の学位論文のテーマはアルゴンイオンレーザーの関係でした。）また、1965年にイリノイ大学でプラズマ・ディスプレイ・パネル（PDP）が発明されました。日本ではいち早くNHKや民間各社がカラー化や大型化に取り組み、1998年の長野オリンピックを“カラーPDPで視よう”が標語になっていました。（私の研究室でもPDPの研究が一つの柱でした。）しかし、そのうちに照明もレーザーも固体化が進み、PDPも大型化と精細化の両面で液晶パネルにその座を譲っていきました。（当時は、液晶パネルのバックライトに極細管の蛍光灯が使用されていました。）そして20世紀の終わりとともに、目に見えるところでの放電プラズマの応用技術が低迷していくことになります。

一方、1970年代から放電プラズマを材料プロセスに用いる研究が進んできました。当初は分析化学の元素分析の前処理として、試料の灰化に酸素プラズマが使われました。それが半導体プロセスのフォトリソ除去技術として展開していきました。まもなく、半導体のエッチング（微細加工）にもプラズマが利用できるようになり、またガスの種類や組み合わせによって、SiとSiO₂の選択的エッチングが可能になっていきます。さらに、新しいプラズマの発生方法や内部構造の制御方法の開発などを通して、エッチングの超微細化や高アスペクト比（深さ÷幅）形状の加工技術も進展します。それにともなって、1965年に提唱されたムーアの法則（半導体集積回路の集積率が約1年半～2年で2倍になるという経験則）が現実的に進んでいきました。

同じ頃からプラズマを用いた薄膜の化学気相堆積法（CVD）の研究も始まりました。1975年には英国ダンディ大学のスピアラが、シラン（SiH₄）ガスの熱分解で生成した薄膜にドーピングが可能であることを発見しました。その技術をもとに、シリコン薄膜の太陽電池や薄膜トランジスタ（TFT）への応

用展開が拓け、プラズマ CVD の研究が過熱していくことになります。

それらのプロセス技術では、装置の大容積（面積）化や制御性のために、主に高周波やマイクロ波電源を使ったプラズマが使用されています。また、原料には分子性ガスが用いられ、気相や表面での化学反応をとまいません。そのような材料プロセスを設計したり最適化したりするには、プラズマの発生からその内部状態、基板表面での反応過程に至るまでを、総合的かつ定量的に把握することが必要です。その目的で、重点領域のプロジェクト「反応性プラズマの制御」（代表：板谷良平教授）が組織され、プラズマエレクトロニクスの学術分野も形成されていきました。当時は日本が半導体立国を標榜していた時代でした。プラズマエッチング技術は今日の最先端ナノ領域の集積回路プロセスに使われていますが、大学の研究室に適した基礎的な研究課題は次第に減ってきました。他方で、様々なプロセスでの任意形状の装置や動作条件の下で、放電プラズマの計算機シミュレーションが可能になってきています。

現在では、大気圧中や気液界面、水溶液中の放電プラズマのバイオメディカル分野への応用が主要なテーマになっています。実際に、医学分野では殺菌や止血、皮膚治療、細胞への遺伝子導入などで、また農業分野では種子の発芽促進、植物の生長促進、食品の消毒・保存などで、多様な研究が試行されています。それらを新しいプラズマ科学とするには、プロセスの機序への理解を深め、プラズマならではの長を引き出す必要があります。現在、その方向で研究が進んでいることに期待を寄せています。

〔将来〕 このように研究の流れを見渡してみると、プラズマは“多様な粒子の複合体”がもつ特性を生かした多条件下の「ファクトリアルなツール」として、色々な先行開発に大きな役割を果たしてきたことがわかります。しかし、次第に、より直接的で効率的な別の技術に代替されてきたところも多くあります。将来も“身近なプラズマ”の研究が継続的に発展していくには、“多種粒子の相互作用し合う複雑系”としてのプラズマがもつ本質に基づいて、そこから新機能を開拓していくことが肝要と感じます。

そのような想いから、プラズマの構造や形状に何らかの新規性を見出したいと考え、微粒子を含んだプラズマや、微小なプラズマの集合体に関する研究を始めました。前者は、プラズマ中で帯電した微粒子がクーロン相互作用によって、マクロな結晶格子のような配置をとる“クーロン結晶”の発見に結びつきました。（あたかも“マクスウエルの悪魔”の力によって、乱雑さのエントロピーが減少するように見えます。）後者では、特定領域研究「マイクロプラズマ（略称）」を組織して、国内の共同研究を始めました。それがプラズマジェットによる細胞の分子・遺伝子導入や、マイクロプラズマの集合体による電磁波制御（プラズマ・フォトリソグラフィ結晶）などの研究につながりました。しかし、所期のブレークスルーがなかなか得られないまま、私自身は定年を迎えることになりました。

世代がかわり、プラズマの本質から新機能を探求する新しいプロジェクト研究が進められています。その一つで数年前から始まった基盤研究（S）の例では、プラズマの形状や構造を熱統計力学や情報学のエントロピーとして捉えます。また、プラズマ中の粒子間の衝突や反応等の相互作用をネットワークの web 様標識で扱い、そのスケールフリー性を評価します。それらによって、種々の材料プロセスでの最適化の方向探索のみならず、電磁波制御用のプラズマ・メタマテリアルの設計や、プラズマの微細構造を迷路解析問題に応用するなどの新しい展開が見えてきているようです。また、別のプロジェクトでは「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク」を組織して、「揺らぎ・構造・機能」の観点からあらゆるプラズマの共通原理を求める、という壮大な計画が推進されています。このように様々な研究が着実に進捗し、近い将来に新たな成果が現れてくることを期待したいと思います。

巻頭言というより「随想」になりましたが、ご覧下さる皆様方のご清栄を祈念しつつ筆をおきます。

大学の研究・動向

薄膜成長技術を基盤とした次世代エネルギー材料の開発 - 超伝導線材・薄膜電池・パワーデバイスへの応用 -

エネルギー科学研究科 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
教授 土 井 俊 哉
准教授 池之上 卓 己

1. はじめに

現代社会における持続可能な発展には、エネルギーの効率的な利用と管理が不可欠です。電力損失の大幅な削減を可能にする超伝導技術、IoT 社会の基盤となる小型・高性能蓄電技術、そして電力変換効率を飛躍的に向上させるパワーデバイス技術は、いずれも次世代エネルギーシステムの中核を担う重要な技術分野です。

超伝導技術においては、液体ヘリウム冷却が必要な従来材料に代わり、液体窒素や液体水素といったより実用的な冷媒で動作する $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ や MgB_2 などの超伝導体の開発が進んでいます。一方、IoT 社会の実現には膨大な数のセンサデバイスへの電源供給が課題となっており、フレキシブル基板上に直接形成可能な薄膜リチウムイオン電池技術が注目されています。さらに、電気自動車や再生可能エネルギーシステムの普及には、実用化段階にある SiC や GaN を超える性能を持つワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの実用化に期待が集まっています。

本稿では、これらの先端材料技術について、我々が開発してきた薄膜成長技術と材料加工技術を融合したアプローチによる研究成果を紹介します。

2. 超伝導線材技術の開発 - MgB_2 と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導体の実用化への取り組み

超伝導体は冷却により電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この特性により、強力で安定な磁場を発生することが可能となり、核磁気共鳴画像装置 (MRI)、リニア中央新幹線、核磁気共鳴装置 (NMR)、粒子加速器、核融合炉など幅広い分野へ応用されています。しかし、超伝導状態を実現するためには物質を極低温まで冷却する必要があるため、現在実製品で使用されている電線の多くは Nb-Ti 合金と銅を複合化したもので、液体ヘリウムを使って 4.2 K に冷却して使用しなければなりません。ヘリウムは資源量が限られており、近年価格が高騰するのみならず、入手そのものが困難な状況になりつつあるため、次世代の超伝導線材の開発が急がれています。

2.1 液体水素冷却で利用可能な二硼化マグネシウム超伝導線材の開発

次世代超伝導線材の有力候補として二硼化マグネシウム (MgB_2) が注目されています。 MgB_2 は超伝導臨界温度が 39 K と高いため、これから社会に普及することが期待される液体水素での冷却運転が可能であり、また軽量であることから MRI や磁気浮上列車への応用が期待されています。主にパウダーインチューブ (PIT) 法と呼ばれる手法での線材化が進められ、MRI を試作できるレベルの長さの線材が市販されるようになってきました。しかし、液体水素で冷却できる温度での性能 (抵抗 0 で流せる電流の限界の電流密度: 臨界電流密度 J_c) が低いという問題が解決されていません。

我々は Cu、Al 合金、ステンレスなどの汎用金属テープ上にナノ結晶を連続的に形成する技術を開発し、液体水素冷却で MRI を動作させることができる高い J_c を有する MgB_2 超伝導線材が作製できることを示しました [1, 2]。図 1 に、ジュラルミンテープ上に作製した MgB_2 厚膜の電子線回折像と透過型電子顕微鏡写真を示します。c 軸がテープ面に垂直方向に揃った直径 10–30 nm の柱状結晶が綺麗に成長している様子が分かります。超伝導線材でマグネットを作製した時、発生した磁場が量子化されて超伝導線材中に侵入し、ローレンツ力によって動かされることでエネルギーの逸散が生じて電気抵抗が発生します。我々の MgB_2 超伝導線材ではナノ結晶の粒界 3 重点（3 重線）が、非常に強く量子化磁束線をピン止めするため、従来の MgB_2 超伝導線材より 1 桁以上も高い J_c が実現できました。現在は 1 km 程度の実用線材を製造するためのプロセス研究に取り組んでいます。

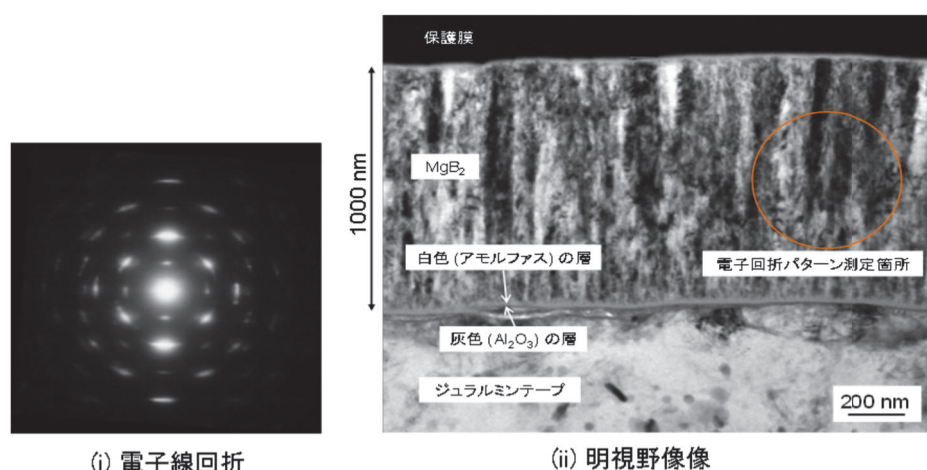


図 1 ジュラルミンテープ上に作製した MgB_2 厚膜の電子線回折像と透過型電子顕微鏡写真

2.2 導電性酸化バフ層を用いた $YBa_2Cu_3O_7$ 高温超伝導線材の開発

超伝導体の中でも、高温超伝導体は、どこでも入手可能で安価な液体窒素による冷却のみで電気抵抗ゼロの状態を実現できます。従来は冷却コストの問題で実用化が困難であった電気機器に対しても、高温超伝導体を用いた電線（高温超伝導線材）を実用化できれば、応用が広がることが確実視されています。また、核融合発電装置のプラズマ閉じ込め用マグネットに使用することで小型化・低コスト化が実現できるほか、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらを高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込むことで、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算（GENESIS 計画：Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [3]）もあります。

我々は半導体製造分野で発展してきた薄膜成長技術（エピタキシャル成長技術）と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に適した結晶方位制御技術の開発を行っており、高温超伝導体の結晶方位を数 km の長さにわたって単結晶のように揃える（3 軸結晶配向）技術の開発に成功しています [4]。具体的には、圧延と加熱によって 3 軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバフ層を数層

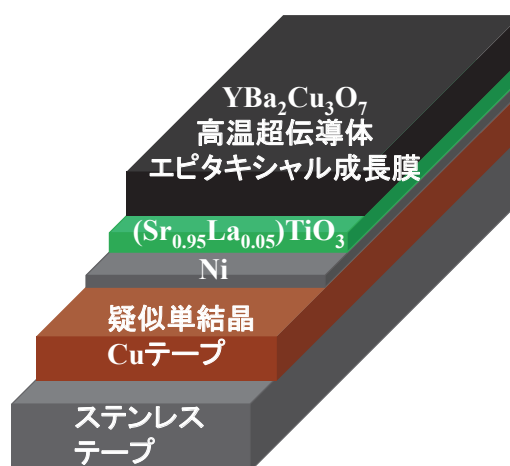


図 2 開発中の高温超伝導線材の概略構造

エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました。このようにして単結晶的に結晶方位を揃えた高温超伝導層において、電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度は液体窒素中 (77 K) で $30,000 \text{ A/mm}^2$ 以上に達しています。最近では、高性能を維持しながら劇的な低コスト化を達成するために、貴金属である Ag を使用しない新規構造 (図 2) の開発に成功し [5]、現在、実用化に向けた開発に取り組んでいます。

3. 薄膜型全固体リチウムイオン電池の室温作製技術の開発

自動運転や工場の完全自動化のためには膨大な数の IoT センサをネットワークに接続して情報のやり取りをする必要がありますが、その際にはデータのやり取りと同時に IoT センサへの電源供給も必要です。有線でデータ通信や電源供給を行う場合、配線数、配線距離が膨大になるため現実的ではありません。データのやり取りは IoT センサとネットワーク間の無線通信によって解決することができます。しかし、IoT センサは様々な場所に設置される必要があるため、給電装置 (送信機) と IoT センサ (受信側) の間に障害物が存在する可能性が高く、膨大な数の IoT センサ全てに無線で給電を行うことは困難です。そこで、使用環境に応じて、太陽光発電、熱電発電、振動発電などのエネルギーハーベスティング技術を用いることになると考えられますが、それらは常時発電しているわけではなく、また発電時の電圧、出力も一定ではないため、蓄電デバイスとの組み合わせが必要となります。

IoT センサの普及には小型化と低価格化が必須の要件であり、そのためには多様な基板上にセンサ素子、通信素子、メモリ、プロセッサ、発電素子、蓄電素子を混載することが望ましいのですが、蓄電素子に関する研究は少ない状況です。そこで、我々はポリマーなどのフレキシブルな基材や Si ウエハー上に薄膜 Li イオン電池の作製を目指しています。ポリマーや Si 上に Li イオン電池を作製するためには低温で結晶化した Li イオン電池材料薄膜を形成する技術が必要になりますが、我々はイオンビームアシストパルスレーザー蒸着法により、室温で結晶化した LiCoO_2 正極薄膜の作製に成功しました [6]。

図 3 に、ガラス基板上に室温 (加熱無し) でイオンビームを照射しながらパルスレーザー蒸着 (PLD) 法で作製した LiCoO_2 正極薄膜の X 線 (104) 極点図を示します。(α, β) = (55, 90)、(55, 210)、(55, 330) の位置に回折強度の強い反射が観測されています。このことから、室温で成膜したにもかかわらず結晶化した LiCoO_2 薄膜が作製できたことが確認できました。また、イオンビーム照射方向 // LiCoO_2 結晶の [01-4] 方向、かつ基板法線 // LiCoO_2 結晶の [012] 方向、の関係を満たすように全ての LiCoO_2 結晶の向きが単結晶のように揃っていることが分かりました。

図 4 に、正極を室温で成膜した LiCoO_2 薄膜、負極を Li 金属箔、セパレータに不織布、電解液に LiPF_6 をエチレンカーボネート系有機溶媒に溶解した液体を使用して作製した試験電池の充放電曲線を示します。サイクルを重ねるにしたがって充放電容量が急激に低下しているものの、電池として動作することが確認できました。この結果は、ポリマーなどの低コスト可撓性シート上や Si ウエハー上に Li イオン電池

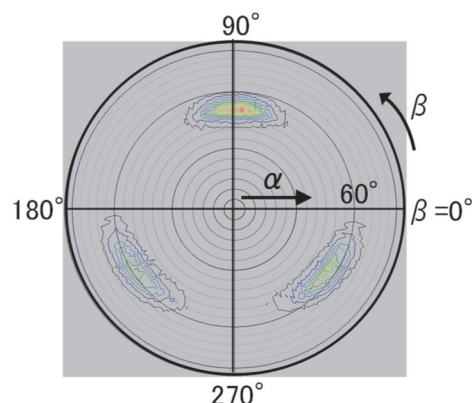


図 3 LiCoO_2 の (104) 極点図

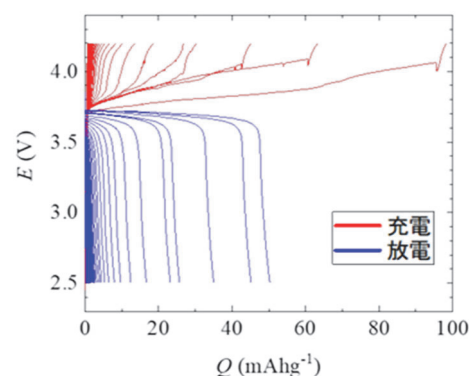


図 4 LiCoO_2 薄膜を正極にして作製した試験電池の充放電測定結果

を作製することが可能であることを意味し、今後、幅広い応用展開が期待できると考えています。

4. ミスト CVD 法を用いたワイドバンドギャップ酸化物半導体の結晶成長とパワーデバイス応用

ワイドバンドギャップ半導体は、高耐圧・高周波・高耐熱・短波長を実現できることから注目を集めています。炭化ケイ素 (SiC、3.3 eV) や窒化ガリウム (GaN、3.4 eV) に代表されるワイドバンドギャップ半導体は、従来の Si と比較して高温での動作安定性や高耐圧性を実現し、スイッチング損失の低減と高周波動作を可能にしました。これにより電力変換効率の向上と装置の小型化が達成され、電気自動車のインバータや再生可能エネルギー用パワーコンディショナなどで実用化が進んでいます。また、光デバイスとしてはワイドバンドギャップなほど短波長であるため、ウイルス殺菌に有用な深紫外線 LED などへ応用されています。

より大きなバンドギャップを有する半導体であれば、より高い絶縁破壊電界強度が達成され、超高压デバイスや低損失デバイスの実現が期待されます。その代表的なワイドバンドギャップ酸化物半導体の一つが酸化ガリウム (Ga_2O_3 、4.8-5.2 eV) です。 β - Ga_2O_3 は熔融法による大口径単結晶基板の製造が可能という利点を持つ一方、p 型化が困難であるという課題があります。

また、さらにバンドギャップを大きくする手法として、GaN と窒化アルミニウム (AlN 、6.0 eV) の混晶である AlGaN や Ga_2O_3 と酸化アルミニウム (Al_2O_3) の混晶である $(\text{Al,Ga})_2\text{O}_3$ が研究されていますが、組成の変化とともに格子定数が変化することで、格子歪み・応力の問題や結晶成長の難しさなどの課題があります。

このような課題に対し、我々は NiO-MgO-ZnO 三元系混晶半導体に着目しました。この系は約 3-8 eV の範囲でバンドギャップを制御しながら格子定数がほとんど変化しないという特長を持ちます。これにより高品質な結晶成長が期待でき、基板となる MgO と完全に格子整合したままバンドギャップを制御できます。さらに、酸化物半導体の中では希少な p 型伝導性を NiO が示すことも大きな特長です。この NiO-MgO-ZnO 三元系混晶半導体の成長手法として、ミスト CVD 法を採用しました。ミスト CVD 法は装置が簡易で大気圧で成長可能であるだけでなく、高品質な結晶成長が可能です。

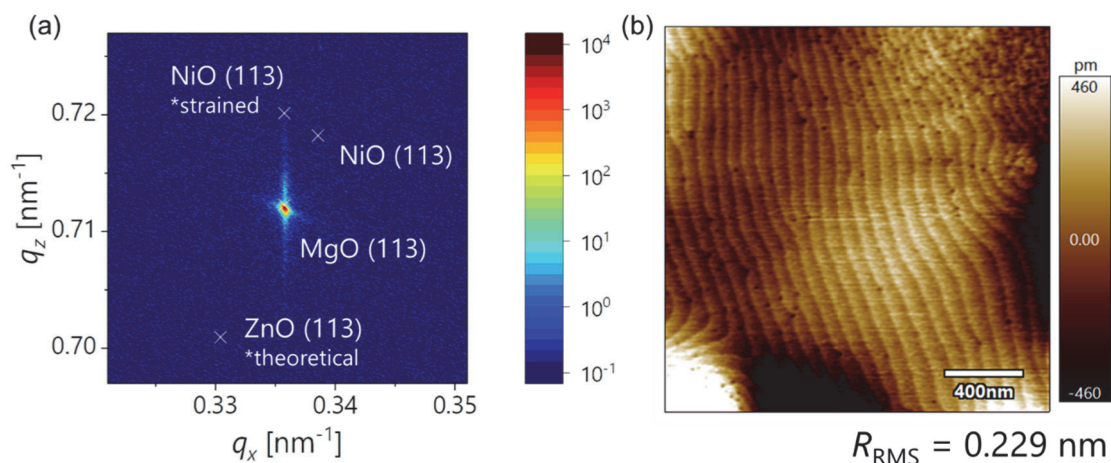


図5 ミスト CVD 法で成長した NiO-MgO-ZnO 薄膜の (a) 逆格子マップと (b) AFM 像

まず、NiO-MgO-ZnO 系の組成と格子定数の関係を明らかにしました [7]。NiO と ZnO の組成が 67:33 のとき MgO 組成に依らず、MgO 基板と格子整合することがわかりました。MgO 基板上にミスト CVD 法で成長させた NiO-MgO-ZnO 薄膜の逆格子マップと AFM 像を図 5 に示します。逆格子マップ

から、MgO 基板と NiO-MgO-ZnO 薄膜の格子定数が完全に一致していることがわかります。AFM 像からは NiO-MgO-ZnO 薄膜の単原子ステップが観察され、高品質なエピタキシャル成長を示唆しています。今後は、キャリア濃度制御などを行い、デバイス応用を検討していきます。

5. おわりに

簡単ではありますが、エネルギー応用基礎学分野の研究概要を紹介させていただきました。これからも、薄膜成長技術を中心として先端材料の研究開発を進めていきます。今後とも、皆様のご指導、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

参考文献

- [1] T. Kusunoki, H. Yamamoto, M. Kodama, H. Kotaki, H. Tanaka, G. Nishijima, S. Horii, T. Doi, IEEE-TAS **27** (2017) 6200204.
- [2] S. Horii, A. Ichinose, T. Iwanaka, T. Kusunoki, T. Doi, APEX **11** (2018) 093102.
- [3] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8** (2000) 53-60.
- [4] 土井俊哉、堀井滋、“金属系および高温超電導線材の高性能化”, 応用物理, 第 85 巻, 2015, pp.419-422.
- [5] T. Doi, T. Morimura, S. Horii, A. Ichinose, APEX **12** (2019) 023010.
- [6] I. Kawayama, K. Ohta, M. Kitta, R. Kataoka, T. Doi, J. Electrochem. Soc. **171** (2024) 090529.
- [7] S. Iida, T. Ikenoue, M. Miyake, T. Hirato, J. Alloys Compd. **15** (2025) 179272.

産業界の技術動向

低損失なフッ素樹脂を用いた ミリ波アンテナ用プリント配線板の開発

住友電工プリントサーキット株式会社

代表取締役社長 赤羽 良啓

1. はじめに

近年、車両の衝突防止や車間距離制御を目的としたレーダ・高速通信、セキュリティや見守りなど各種の高性能センシングの用途において、ミリ波帯域の活用が急速に拡大しています（図1）。しかしながら、ミリ波は減衰しやすいため、この帯域のアプリケーションでは伝送ロスの低減やアンテナ利得の向上といった特性改善に関する課題が存在します。ミリ波帯域のレーダやセンサでは、主にプリント配線板上に形成したパッチアンテナが使用されており、上記課題を克服するためには、パッチアンテナ性能を向上できるプリント配線板が求められています。

当社では、ミリ波帯域で低損失を実現するフッ素樹脂を用いたミリ波アンテナ用プリント配線板“FLUOROCUIT®”を開発しました（図2）。フッ素樹脂は、樹脂材料の中で最も低い誘電率と低誘電正接を持ち、高周波伝送においては極めて低損失な材料として知られています（図3）。一方で、融点が高く、非粘着性であるために加工が難しいという課題もあります。当社のプリント配線板では、フッ素樹脂を誘電体として採用し、かつフッ素樹脂と銅箔の界面を平滑に接合することを実現しています。これにより、フッ素樹脂の低誘電特性のみならず、高周波伝送時の導体損失をさらに小さくできる特長があります。当社では、加工が難しいフッ素樹脂をプリント配線板に加工する技術を開発しました。さらに当社保有の高精細回路形成技術を組み合わせることにより、高周波帯域で高利得のアンテナ特性が得られるミリ波アンテナ用プリント配線板を実現することができましたので紹介します。

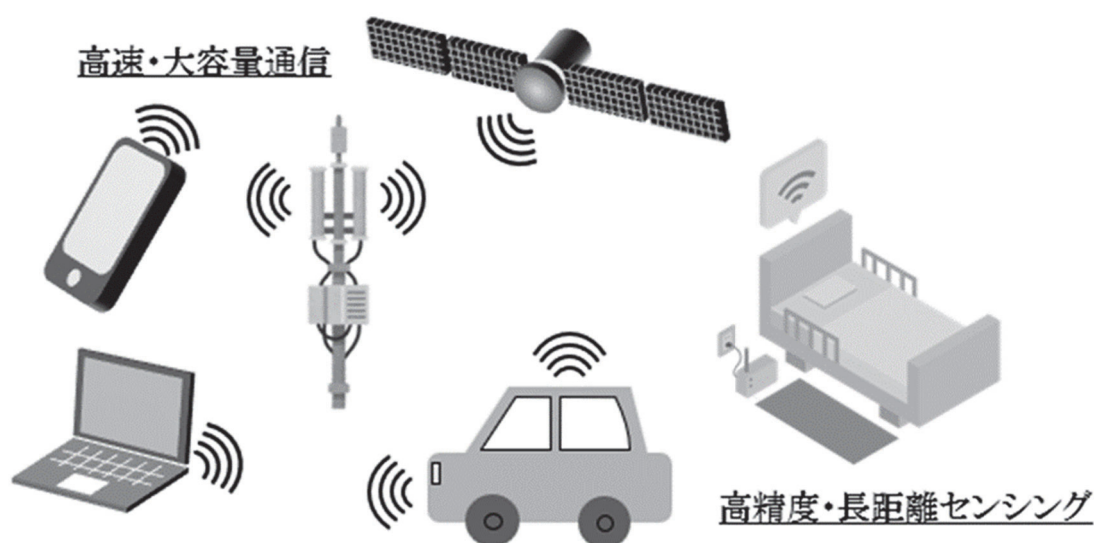


図1. ミリ波帯域の活用

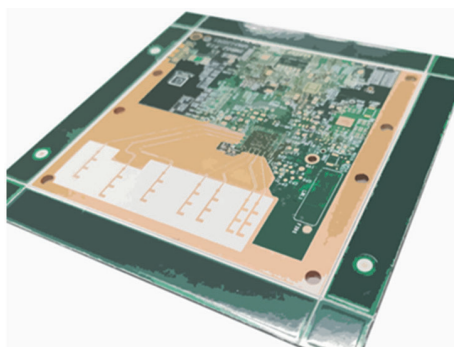


図 2. 高周波用プリント配線板“FLUOROCUIT”

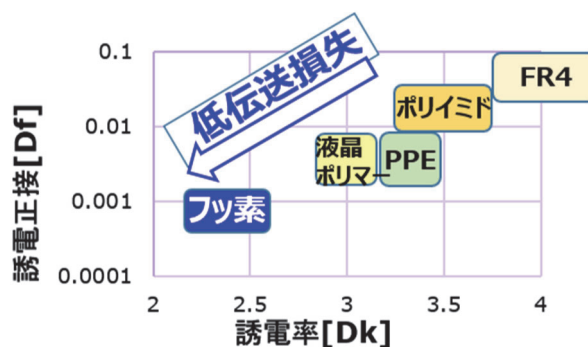


図 3. フッ素樹脂の誘電特性

2. フッ素樹脂を用いた低損失プリント配線板

プリント配線板上に配置された導体に高周波信号を流す際には、導体の表面近くに電流が流れる表皮効果と呼ばれる現象が発生します。図4に示すようにマイクロストリップ線路として設計された導体に高周波信号を流す場合、表皮効果によって導体と誘電体の界面の電流密度が最も高い状態となります。この表皮効果は周波数が高くなるにつれて顕著に現れます。

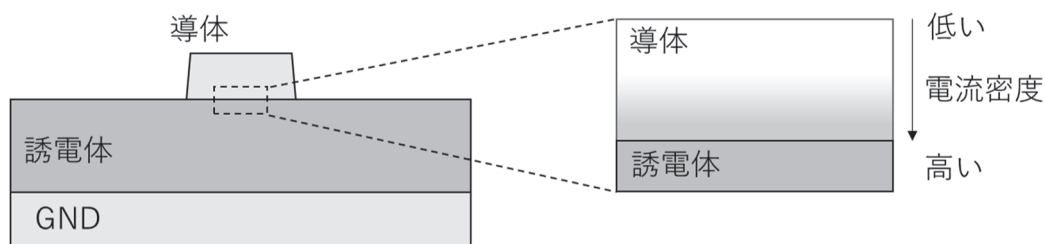


図 4. プリント基板上の導体に高周波信号を流した場合の表皮効果

非粘着性のフッ素樹脂上に導体を形成する場合、一般的には回路とフッ素樹脂の界面を粗面化することで導体と樹脂界面の接着強度を向上させ、プリント配線板に必要な接着強度を確保します（図 5a）。しかしながら、この粗面化は表皮を流れる高周波信号の劣化を招きます。

この課題を解決するために、当社では独自の加工技術を開発し、導体とフッ素樹脂の界面を平滑に保ちながら導体を形成することに成功しました（図 5b）。本技術を適用した当社開発品は、図 6 に示すように粗面化された導体を持つ従来品よりも大幅に伝送損失を向上させることができ、フッ素樹脂の性能を最大限に引き出した非常に低損失なプリント配線板となっています。

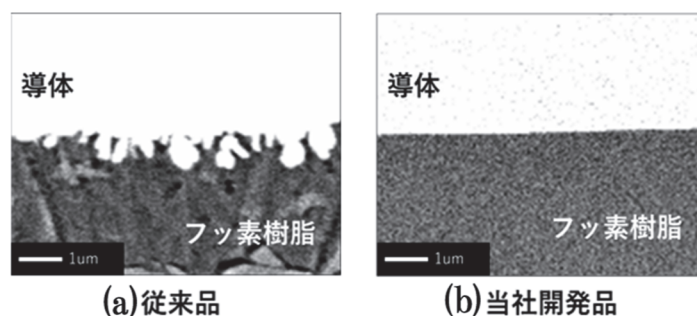


図 5. 導体とフッ素樹脂の界面における平滑性比較

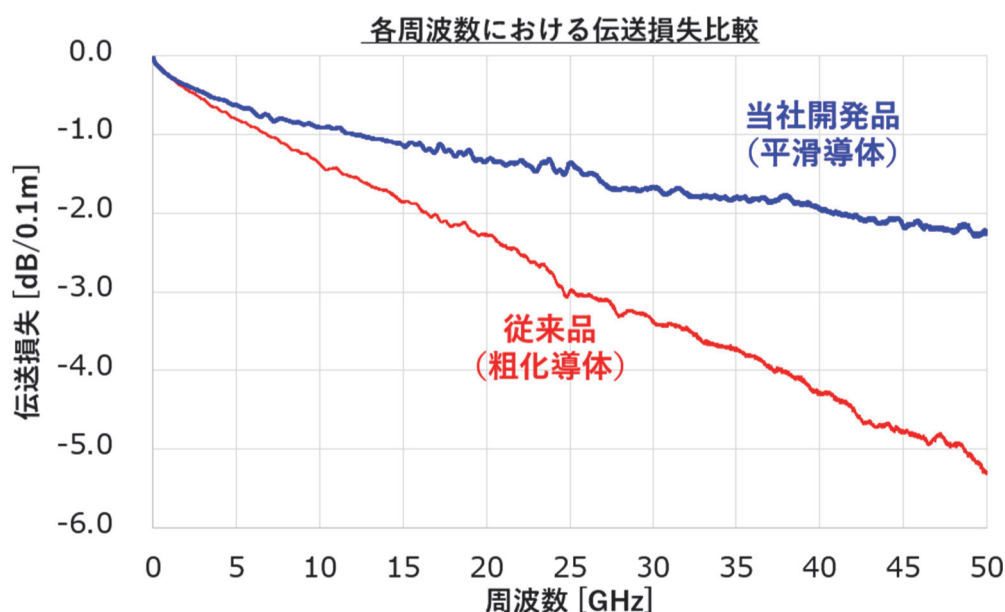


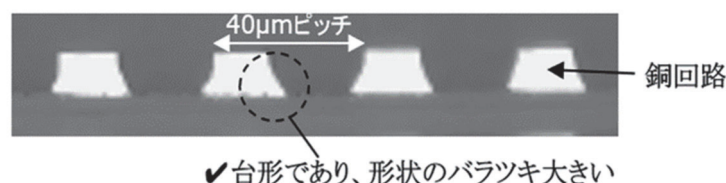
図 6. 平滑な導体を形成した当社開発品の伝送損失

3. ミリ波アンテナ用プリント配線板の製作と特性評価

当社で開発したフッ素樹脂を用いたプリント配線板にアンテナ回路を形成することで、アンテナ利得が大幅に向上する結果が得られましたのでご紹介します。

回路形成においては、当社がフレキシブルプリント配線板（FPC）製造で培ってきた高精細回路形成技術を適用することで、設計通りでバラツキの小さい回路やアンテナパターンを形成することが可能です（図 7）。さらに、当社は高精細回路形成技術だけでなく、材料技術、回路設計技術、高周波シミュレーション技術、高周波測定技術を有しており、様々な市場や顧客の要求に応える体制を整えています。

従来回路形成技術



高精細回路形成技術(当社)

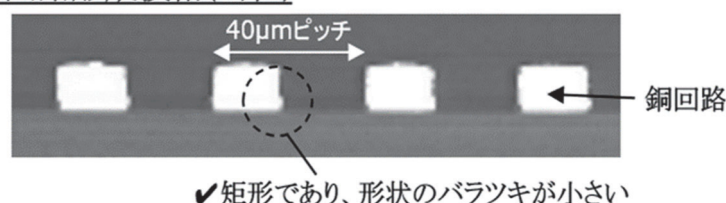


図 7. 高精細回路形成（断面図）

今回、高周波用プリント配線板で4素子パッチアレイアンテナを設計・作製し、28GHzでの放射特性を測定しました。その結果、一般的に多く用いられる高周波用プリント配線板（液晶ポリマー）と比較

して、高いアンテナ利得が得られました（図8）。また、得られたアンテナ特性はシミュレーション結果と高い整合性を示しており、設計通りの寸法・形状でアンテナ回路が形成できていることが確認されました（図9）。

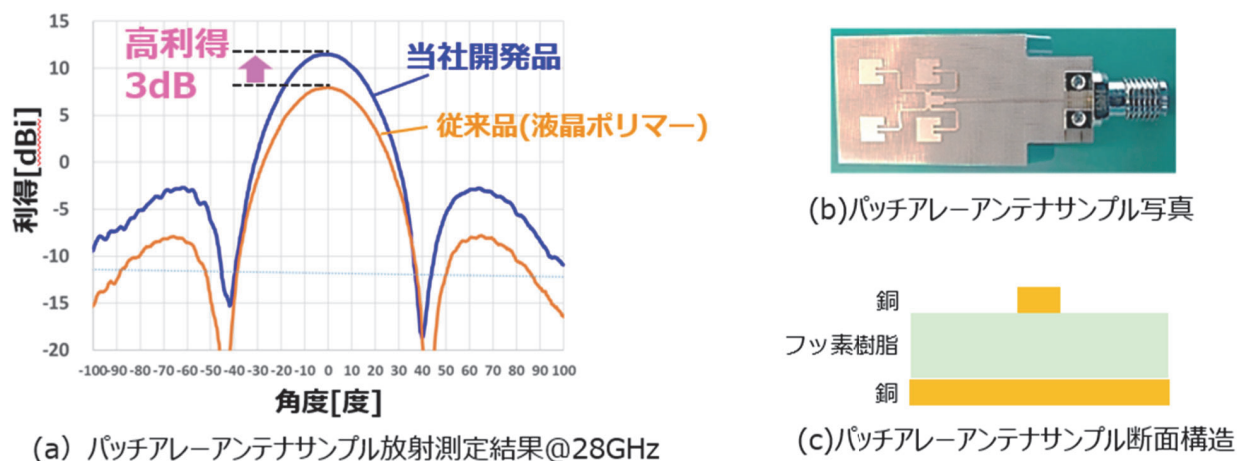


図8. 当社開発品のアンテナ特性

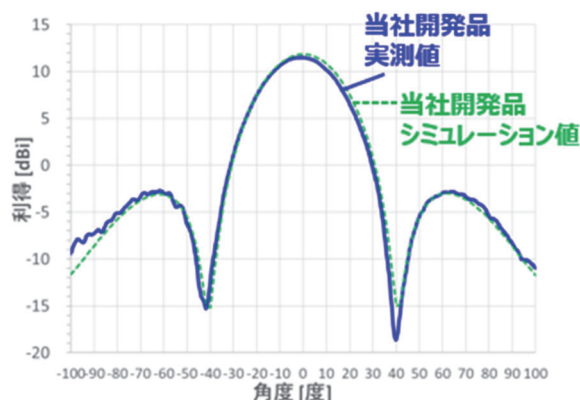


図9. アンテナ特性の実測値とシミュレーション値の比較 @28GHz

4. まとめ

当社は、通信・センサ市場において益々増大する高周波化ニーズを捉えるため、ミリ波対応のプリント配線板の開発を進めてきました。当社が開発したフッ素樹脂を用いたプリント配線板は、低損失で高利得のアンテナ回路を実現できることから、衝突防止用の車載ミリ波レーダ（図10）をはじめ、セキュリティ・見守りセンサ、バイタルセンサ、ロボット用検知センサなど、多岐にわたる応用が期待されます（図11）。さらに、レーダ・センサ分野にとどまらず、5G／6Gの高速通信向けに低損失の配線材料として、あるいは通信アンテナ用プリント配線板としても、活用が期待されます。

当社は、高周波用プリント配線板の開発・製造技術に加え、高周波対応設計技術、高周波シミュレーション技術、高精細回路形成技術、ミリ波帯域のアンテナ特性測定技術まで一貫した技術を有しており、お客様のニーズにワンストップでソリューションを提供することを目指しています。

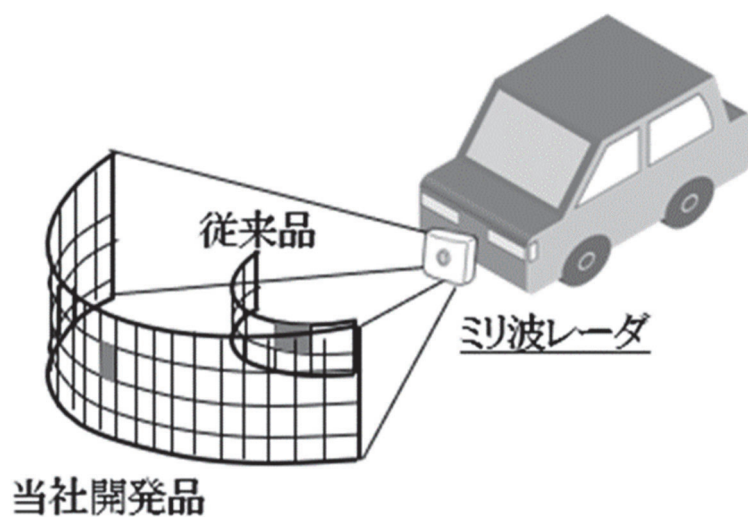


図 10. 車載ミリ波レーダへの応用

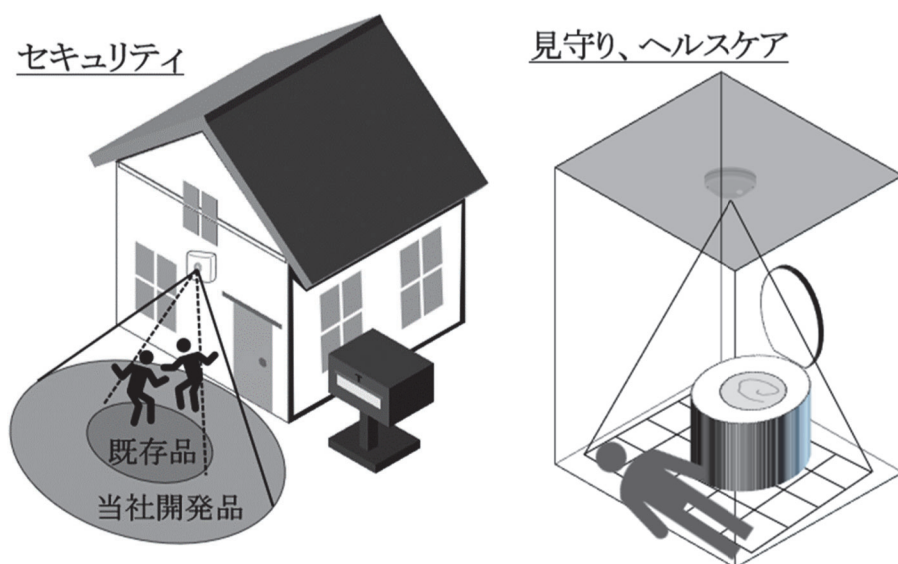


図 11. ミリ波センサへの応用

新設研究室紹介

先端電気システム論講座（薄研究室）

<https://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

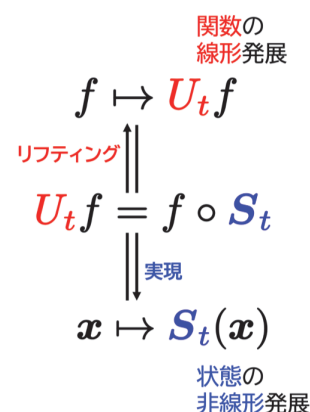
先端数理情報学とエネルギー・モビリティへの応用

本講座では、主たる研究テーマとして、先端数理情報学とそのエネルギー・モビリティへの応用について取り組んでいます。本研究の目的は、電気電子工学に関わる現実空間に潜む数理構造を情報として抽出するための学理を構築し、それを駆使して現実の現象を解析するとともに、新しいシステム・デバイスを創出することです。研究の手法としては、理論から、数値計算（シミュレーション、データ分析、アルゴリズム開発）、実験、フィールド実証までを採用しています。薄の主な研究項目は以下の通りです。

A) 応用数学・データ科学・情報科学

非線形システム・多自由度システムの分析・設計を目的として、力学系、機械学習、ソフトウェアに関わる理論と方法論の研究に取り組んでいます。

- 数理学とデータ科学の融合であるクープマン作用素—非線形力学系に対する線形作用素—の理論 [1]（右図）
- 設計や動作の正しさを論理的に保証するソフトウェア工学と融合したシステム制御
- 地球科学などの複雑現象を示す大規模時系列データを分析するためのアルゴリズム



B) エネルギーシステム・モビリティ

学理に立脚したシステム・デバイスの創出を目的として、2050年を見据えたエネルギーとモビリティに関わる研究に取り組んでいます。

- 再生可能エネルギー導入をさらに加速化するための電気エネルギーネットワークのデジタル技術 [2]（右図）
- ディペンダブルなエネルギー制御システムの設計技術と航空機電動化への応用
- シェアリングを核とした社会構築のためのモビリティ（交通）とエネルギーの連携管理技術
- 電気、熱、水素の利活用に関わるエネルギー管理技術
- 次世代の二次電池である全固体電池のデバイス設計



当研究室では、Engineering Scienceのアプローチ、すなわち現実空間より問題を抽出し、数学・物理・情報などの技法により解決策を一般論として見出した上で、それに基づくシステムやデバイスの創出により現実に還元する「ループ」を重視します。そのために、多様なバックボーンを有する国内外の研究者・技術者との対話を根幹として、時には賑やかに、時には静謐に、研究に没頭できる環境の構築を目指しています。当研究室は、電気電子工学科において主に電力・エネルギー分野の教育を担うとともに、電気・電子工学専攻において、ICTやAI等の情報技術に立脚した持続可能かつスマートな社会を実現する「デジタルイノベーション」に関する教育に参画するなど、電気電子工学分野の次の20年を見据えた研究

と教育を展開していきます。

参考文献

- [1] 薄良彦, クープマン解析 (森北出版, 2025)
- [2] 京都大学・桂の庭 <https://seeds.t.kyoto-u.ac.jp/seeds/susuki> (2025 年 6 月 1 日閲覧)

量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (船戸研究室)

<https://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

光半導体の多次元物性制御を通じた新機能光デバイスの創出

半導体を用いた発光・受光素子は、照明、ディスプレイ、情報通信など多様な分野で活用され、現代社会に欠かせない基盤技術となっています。私たちは、こうした光半導体の応用範囲は今後さらに広がり、私たちの生活や産業の在り方を大きく変えていくと考えています。例えば、ウイルス対策や水の殺菌、工業プロセスなどにおいては、紫外光を出力する高効率な発光ダイオード(LED)やレーザーダイオード(LD)の開発が期待されています。また、可視光領域では、色を自在に制御できるスマート照明や、極小フルカラーLEDを高密度に集積した超高精細ディスプレイなど、従来にない新たな光機能デバイスが求められています。こうした次世代光デバイスおよびその応用システムの実現に向けて、私たちの研究室では、以下の三つの研究テーマを有機的に連携させながら、革新的な光機能デバイスの創出に挑戦しています。

光半導体の結晶成長技術の開発 ―光半導体を作る―

一般的な光デバイスは、結晶成長によって単結晶基板上に形成される薄膜多層構造で構成され、これまでその構造制御はマイクロメートルからナノメートルオーダーで進められてきました。私たちは、成長表面における原料原子の吸着・脱離プロセスを厳密に制御することで、さらにサブナノメートルオーダーの精度での構造設計に挑戦し、図1に示すような単分子層レベルのGa₂N量子井戸構造をAlN中に形成することに成功しました。この構造は、理論的には約230 nmの深紫外領域での発光が予測され、実験的にも確認されています。本技術の開発により、新しいタイプの深紫外LEDも実証され、殺菌・医療・分析応用などに向けた次世代光源としての展開が期待されます。

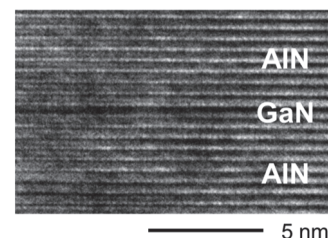


図1：単分子層Ga₂N/AlN量子井戸の断面透過電子顕微鏡像

新しい光物性や光現象の発見とその解明 ―光機能を測る―

光物性を時間・空間分解分光し、局所的なキャリアダイナミクスを解明することは、基礎物性の理解はもとより、デバイス応用に向けても重要な知見をもたらします。本研究室では、回折限界を超えた分解能を持つ近接場光学顕微鏡や高速時間分解分光システムなど、最先端の評価装置を整備・運用しており、これらを用いた局所分光評価の実績も蓄積しています。図2は近接場光学顕微鏡(開口150 nm角)で観察した、赤色LED中の発光層からの発光強度マッピングです。非輻射再結合中心の空間的分布が可視化されており、高効率化に向けて指針を与えます。

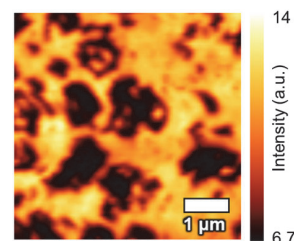


図2：近接場光学顕微鏡で観察した赤色発光量子井戸の発光強度分布

ナノ・マイクロ構造制御による新たな光機能の創出 ―光機能を創造する―

従来の結晶成長は、高い均一性を追求する設計思想のもとで発展してきました。これに対し私たちは、成長基板上に意図的に三次元的な微細構造を設計・導入することで、成長ダイナミクスに不均一性を積極的に取り入れる新たなアプローチを展開しています。このような不均一性の活用により、異な

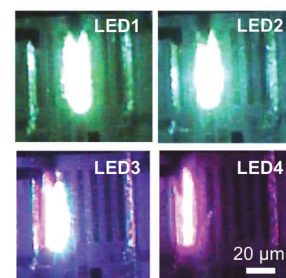


図3：一度の結晶成長で微小空間に集積した多波長マイクロLED

る波長の発光素子を自己整合的に集積した多波長光デバイスなど、均一成長では実現困難な新規光デバイスの創出を目指しています。最近の取り組みの一例を図3に示します。私たちはこれを「不均一性を活かす結晶成長科学」と位置づけ、新たな学理と技術の両面からそのパラダイム転換を目指しています。その実現には、微細構造をいかに高精度に形成するか、その局所的な構造や光学特性をいかに的確に評価するかといった、上記のテーマとの有機的な連携が不可欠です。

ナノプロセス部門 ナノプロセス工学分野 (デゾイサメーナカ研究室)

<https://www.nano.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

光ナノ構造に特有の物理現象の探求・新機能光ナノデバイスの開発

私たちの研究室では、ナノプロセス技術を駆使することで、ナノ構造に特有の光物理現象の解明と、従来のデバイスでは実現できなかった新機能の創出を目指した光ナノデバイスの開発に取り組んでいます。さらに、開発した新機能デバイスの応用展開に関する研究も並行して進めています。本研究室における主な研究内容の一端を、以下にご紹介します。

まず、従来のデバイスとは異なる、まったく新しい機能を備えた光ナノデバイスを実現するためには、目的とする機能を発現させるナノ構造の設計が不可欠です。当研究室では、光ナノ構造の設計にあたり、時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法)、3次元結合波理論、厳密結合波解析 (Rigorous Coupled-Wave Analysis: RCWA 法) 等、複数の電磁界シミュレーション手法を活用しています。さらに、これらの手法を基盤とした新たな理論解析手法を独自に発展させ、革新的な機能を有する光ナノ構造の設計を世界に先駆けて提案しています。また、深層学習や共分散行列適応進化戦略 (CMA-ES) 等の最適化アルゴリズムを電磁界シミュレーションと融合させ、より高精度かつ効率的なデバイス設計も実現しています。

また、当研究室では、電子ビーム描画法やナノインプリントリソグラフィ法等の高精度なパターンニング手法と、プラズマエッチング等の微細加工プロセスを駆使することで、半導体等の目的材料に、設計したナノ構造を忠実に作製する技術を確立しています。たとえば、図1 (a) には、薄膜太陽電池の吸収効率を向上

させるために作製した、SiO₂上のロッド型ナノ構造から成るフォトニック結晶を、図1 (b) には、高ビーム品質・高出力青色レーザーの実現のために作製した、GaN/ 空気孔ナノ構造から成るフォトニック結晶を示しています。これらに加えて、Si、GaAs、AlGaAs 等多様な材料系に対応した各種ナノ構造の作製プロセスも確立しています。さらに、デバイス実現に必要な結晶成長や電極形成等のプロセスも併せて実施し、ナノ構造を組み込んだ光ナノデバイスの一貫製造を行っています。

上記の光ナノデバイスの設計・作製技術によって実現した、高出力かつ高ビーム品質で動作する青色帯域フォトニック結晶レーザーの一例を図2 (a) に示します¹⁾。本デバイスでは、図1 (b) に示した

GaN/ 空気孔ナノ構造が導入されており、ナノ構造による精密な光制御によって高出力かつ高ビーム品質動作が得られています。また、図2 (b) には、数百ワット

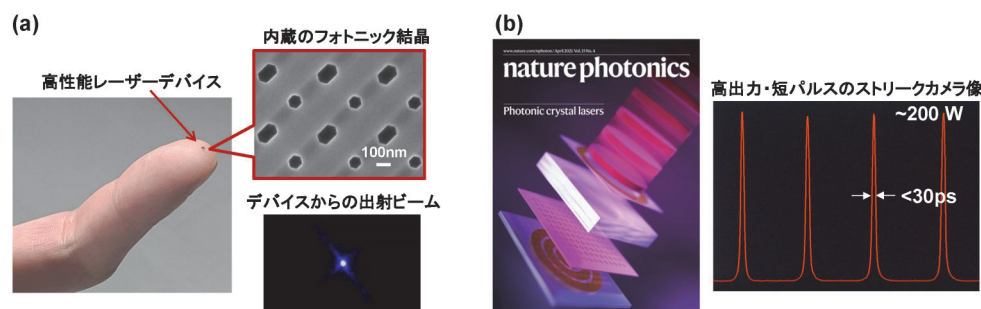


図2 (a)：高出力かつ高ビーム品質で動作する GaN 系青色帯域フォトニック結晶レーザー、(b)：高ビーム品質・高出力・短パルス動作を同時に実現した高機能フォトニック結晶レーザー

十ピコ秒の短パルス動作を同時に実現した、高機能半導体レーザーの開発例を示しています²⁾。この他にも、レンズや外部光学素子を用いることなく、素子単体で任意方向へのビーム照射を可能とするレーザー光源³⁾、極めて狭線幅な半導体レーザー⁴⁾、さらには光ナノ構造の非エルミート性を活用した一方方向光伝搬現象を示す光導波路等⁵⁾、従来技術では実現が困難であった新機能を有する光ナノデバイスの研究開発にも積極的に取り組んでいます。

最後に、開発した新機能デバイスの応用展開を見据えた研究開発について簡単にご紹介します。図3(a)は、素子単体で任意方向へのビーム照射（広範囲照射、スポット照射）が可能なレーザー光源を用いた、小型かつ高性能な測距センシング（LiDAR）の開発に取り組んだ結果を示しています⁶⁾。このようなLiDARは、ロボットの自動走行や車の自動運転等への応用が期待されます。また、水中での光吸収が少ない青色帯レーザー〔図2(a)〕を活用することで、養殖場の監視や水中インフラ点検を目的とした水中LiDARの開発をも進めています。さらに、最近では、人工衛星から地表面の状態を観測するための超小型衛星搭載型LiDAR用光源の開発や、衛星間通信等の長距離自由空間光通信の実現に向けた高出力・高速レーザー光源の開発⁷⁾〔図3(b)〕等、地上・水中・宇宙にわたる多様な環境での応用展開も視野に入れた研究開発を推進しています。

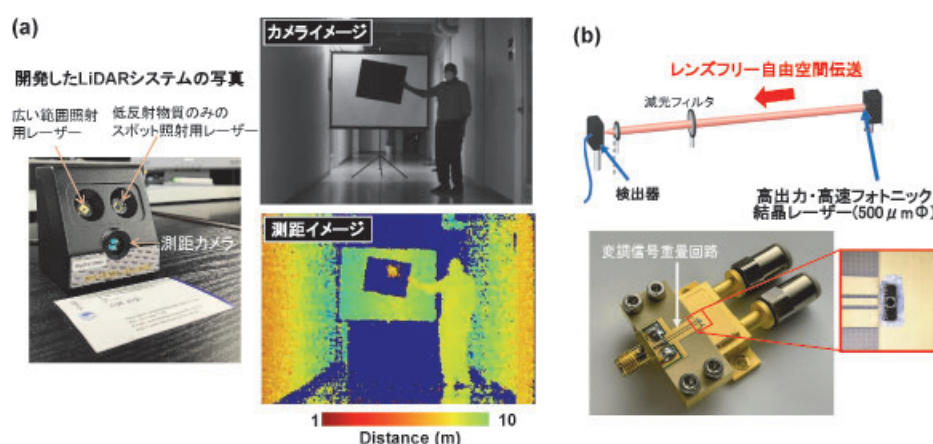


図3 (a)：レーザー単体で任意方向へかつ任意のビーム形状照射（広範囲照射、スポット照射）が可能な光源を用いた小型かつ高性能な測距センシング（LiDAR）、(b)：高出力・高速フォトニック結晶レーザーを用いた自由空間光通信

参考文献：

1. K. Emoto, T. Koizumi, M. Hirose, M. Jutori, T. Inoue, K. Ishizaki, M. De Zoysa, H. Togawa, and S. Noda, "Wide-bandgap GaN-based watt-class photonic-crystal lasers," *Communications Materials* **3**, 72 (2022).
2. R. Morita, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, "Photonic-crystal lasers with two-dimensionally arranged gain and loss sections for high-peak-power short-pulse operation," *Nature Photonics* **15**, 311 (2021).
3. R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, K. Kitamura, T. Inoue, J. Gelletta, and S. Noda, "Photonic-crystal surface-emitting lasers with modulated photonic crystals enabling 2D beam scanning and various beam pattern emission," *Applied Physics Letters -Perspective-* **122**, 130503 (2023).
4. T. Inoue, T. Kim, S. Katsuno, R. Morita, M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, "Measurement and numerical analysis of intrinsic spectral linewidths of photonic-crystal surface-emitting lasers," *Applied Physics Letters* **122**, 051101 (2023).
5. T. Inoue, N. Noguchi, M. Yoshida, H. Kim, T. Asano, and S. Noda, "Unidirectional perfect reflection and radiation in double-lattice photonic crystals," *Physical Review Applied* **20**, L011001 (2023).
6. M. De Zoysa, R. Sakata, K. Ishizaki, T. Inoue, M. Yoshida, J. Gelletta, Y. Mineyama, T. Akahori, S.

- Aoyama, and S. Noda, "Non-mechanical three-dimensional LiDAR system based on flash and beam-scanning dually modulated photonic crystal lasers," *Optica* **10**, 264 (2023).
7. R. Morita, S. Ishimura, T. Inoue, K. Nishimura, H. Takahashi, T. Tsuritani, M. De Zoysa, K. Ishizaki, M. Suzuki, and S. Noda, "High-speed high-power free-space optical communication via directly modulated watt-class photonic-crystal surface-emitting lasers," *Optica* **11**, 971 (2024).

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 (薄研) *

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 (阪本研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (吉井研)

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

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 (米澤研)

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

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (船戸研) *

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (浅野研)

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 (デゾイサメーナカ研) *

情報学研究科 (大学院)

知能情報学コース

知能メディア講座言語メディア分野

知能メディア講座コンピュータビジョン分野 (西野研)

通信情報システムコース

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路アーキテクチャ分野 (佐藤研)

集積システム工学講座低電力集積回路デザイン分野 (新津研)

集積システム工学講座集積回路コンピューティング分野 (橋本研)

システム科学コース

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バイオサイバネティクス分野 (野村研)

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

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 (稲垣研)

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野 (松田研)

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 (海老原研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

システム基礎論講座 システム創成論分野 (阪本研究室)

<https://www.ist.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「レーダによる呼吸・心拍成分の特徴抽出と個人識別技術」

レーダを用いて呼吸や心拍を非接触計測するワイヤレス人体センシング技術は、センサ等の装着を必要とせず、環境に溶け込んだ健康観察が可能であり、プライバシーにも配慮した応用が期待されている。しかし、顔認識が容易なカメラ等と異なり、レーダによる個人識別は未だ黎明期であり、生体信号を個人に紐づけるためには個人識別技術の発展が不可欠である。そこで、本研究では、レーダにより計測された呼吸・心拍の両特徴を融合した個人識別手法を提案した [1]。従来のレーダ個人識別では、歩行・着座などの体動を用いる手法や、呼吸または心拍のいずれかに限定した手法が主であったが、呼吸と心拍の特徴量を組み合わせるアプローチにより、識別精度向上を図る。提案手法では、呼吸特徴は修正レイズドコサイン波形モデルにより、心拍特徴はメル周波数ケプストラム分析を用いて抽出する。こうして、時間領域での呼吸波形の周期的な構造や、周波数領域での心拍の高調波の特徴を精度よく捉え、得られた特徴量を機械学習によりクラス分類し、レーダによる個人識別を達成する。

まず、79 GHz のミリ波レーダにより、5 日間にわたって被験者 6 名の生体信号を繰り返し計測した。呼吸と心拍の両方の特徴を組み合わせることで、いずれか単独の場合と比較して識別精度が有意に向上することが確認された (図 1)。6 名の被験者を対象としたデータセットに対しては 96.33% の識別精度を達成し、さらに、30 名の被験者を対象とした公開データセットに対しては 99.39% という高い精度を実現した。これらの結果から、本手法はレーダ計測された生体信号に基づく個人識別において、有効性が確認された。今後、非接触かつ高精度であるという特長を活かし、スマートホーム、医療モニタリング、高齢者見守り、セキュリティ認証など、プライバシー保護と利便性が求められる分野への展開が期待される。研究としては、より多様な被験者群や実環境下での評価を通じて、本手法の汎用性と実用性をさらに検証していく予定である。

参考文献 [1] H. Kobayashi, Y. Tanaka, and T. Sakamoto, "Individual identification using radar-measured respiratory and heartbeat features," IEEE Access, vol. 12, pp. 190972-190987, Dec. 2024.

DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3517668

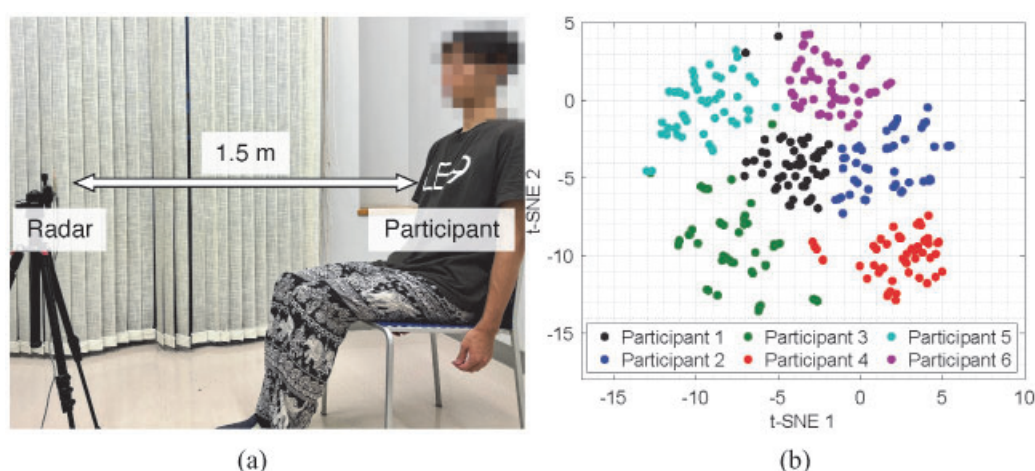


図 1 ミリ波レーダによる (a) 計測実験風景、(b) 提案手法により得られた呼吸・心拍の特徴量の t-SNE による 2 次元マッピング (被験者 6 名に対応した各色のプロットが明瞭に分離)

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/index.html>

「均質化法を用いたヒステリシス有限要素磁界解析」

電気電子機器に用いられる鉄芯材料の多くは、渦電流損の低減のために絶縁層を組み込んだ微細構造を持っています。微細構造の内部に流れる渦電流を評価するために有限要素磁界解析を用いることは、計算格子が鉄芯サイズと比較して細かくなりすぎて実用的ではありません。そこで、微細構造を反映しながら、鉄芯材料磁気特性を巨視的に表現する均質化手法が開発されています。均質化法を用いることで、微細構造内を格子分割して直接考慮することを避け、均質な材料として取り扱うことが可能となり、電気電子機器のマクロな有限要素磁界解析が容易になります。

他方で、鉄芯材料の動的なヒステリシス特性を、Cauer 回路（図 1）を用いて表現する手法が開発されています。本研究では、この Cauer 回路を均質化手法としてヒステリシス有限要素磁界解析に組み込む手法を開発しました^[1]。

ここでは、巻き鉄芯インダクタの解析例を紹介します。図 2 (a) のような積層鉄芯の 1 枚 1 枚の内部に渦電流が発生しますが、積層方向に格子分割すると膨大な計算格子が必要になります。そこで、均質化法を用いて積層方向の磁気特性を平均化することで、図 2 (b) のようにバルク材料としての扱いが必要となり、微細な格子分割を回避できます。PWM 励磁した時の電流 - 磁束曲線の計算例を図 3 に示します。1 段の Cauer 回路（図中 Homo-0th）を用いると矩形の励磁電圧がそのまま電流波形に反映されていますが、2 段（図中 Homo-2nd）にすることで、微細格子（図中 Fine grid）を用いた場合と同様な滑らかなマイナーループが再現されています。

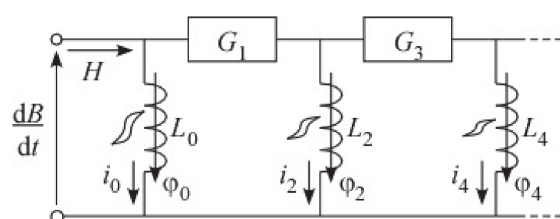


図 1 Cauer 回路

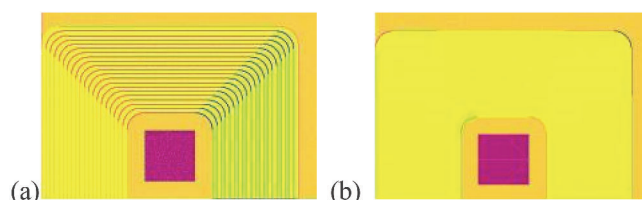
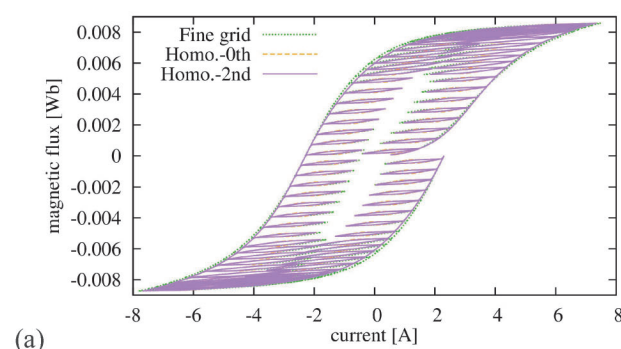
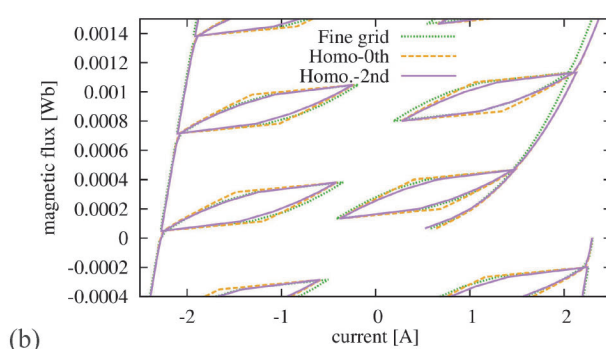


図 2 巻き鉄芯：(a) 積層鉄芯 (b) 均質化された鉄芯



(a)



(b)

図 3 電流 - 磁束曲線：(a) 1 周期の軌跡，(b) 拡大図

[1] T. Matsuo, *J. Magn. Magn. Mater.*, 591, 171713, 2024

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室）

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

「電動航空機への展開を目指した高温超伝導誘導同期モータの研究開発」

航空機の電動化は、2050年のカーボンニュートラル社会を目指した取り組みの一つとして期待されており、高性能推進モータの実現が求められている。大型旅客機用推進モータの機械出力としては、離陸・上昇時には最大値として数十 MW が要求され、巡航時には最大値の 50% 程度が必要とされる。そして、推進モータに要求される重要な性能として機械出力密度（単位容積あるいは単位質量当たりの機械出力）が挙げられており、例えば最大機械出力に対して 20 kW/kg 以上とされている [1]。上記性能を実現する推進モータの候補として高温超伝導モータが期待されており、国内外で研究開発競争が繰り広げられている [1]。しかしながら、従来の研究開発の多くは解析的検討に留まっており、実用的負荷特性の実験的検証例は残念ながら多くない。また、機械出力密度については上記目標が設定されているものの、それと同様に重要な効率（＝機械出力／有効入力電力）に関しては高いほど良いという主張程度であり、何故かその目標値が設定されていないようである。これは、多くの高温超伝導モータが効率を議論するステージに達していないということが理由にあるかもしれない。

当研究室では、2005 年頃よりかご形誘導モータの高温超伝導化に取り組んでおり、例えば（1）高温超伝導かご形回転子巻線における非線形抵抗と回転特性の関係の明確化 [2]、（2）同期回転とすべり回転の両立性の実証 [3]、（3）定常同期回転時の高効率特性の実証（最高効率 99.5% 超を実験的に証明済）[3]、（4）すべり回転を利用した過負荷耐量の実証 [3]、（5）急始動や急激な加減速に対する安定性（自律回転安定性）の理論創出と実証 [3]、（6）冷却システム故障に伴う温度上昇に対して非超伝導駆動の可能性の検証 [3] 等、他研究を圧倒する先駆的成果を上げてきた。さらに、応用研究開発にも取り組んでおり、例えば液化水素の極低温環境（マイナス 253℃）を利用した応用機器としては、水素エネルギーサプライチェーン構築のための高速・高効率・大容量液化水素サブマージポンプ [4] や、あるいは水素エンジン車に搭載される液化水素サブマージポンプ [5] などについて実用を目指した産（官）学連携プロジェクトを推進している。

上記実績をもとに、電動航空機への展開を目指した高出力高温超伝導誘導同期モータの電磁設計を行った。図 1 には、当研究室が提案している自己組織化法を適用して設計した最大出力 20 MW 級高温超伝導誘導同期モータの最大出力時磁束密度コンター図を示す [6]。本モータによって、例えば最大機械出力密度 38 kW/kg 超、定常回転時最高効率 98.6% 超他の高性能性を実現することができている。なお、最大機械出力時の応力解析も行い、局所的な最大 Maxwell 応力点でも 0.2% 耐力よりも十分小さくなっていることを確認している。今後は、本モータのスケールダウンモデルを設計・試作し、試験を通してその革新性を実証する予定である。

参考文献

- [1] K.S. Haran, et al., Superconductor Science and Technology, 30 (2017) 123002
- [2] T. Nakamura and Y. Ogama, Journal of Applied Physics, 136 (2024) 093903
- [3] 中村 武恒, トランジスタ技術 SPECIAL (モータ大図鑑 メカニズムの研究, CQ 出版社), 165 (2023) 163-169
- [4] (工学研究科 HP) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20240318> (2025 年 6 月 14 日閲覧)
- [5] (トヨタタイムズ HP) <https://toyotatimes.jp/> (2025 年 6 月 14 日閲覧)
- [6] M. Yamamoto and T. Nakamura, Physica C, 632 (2025) 1354690

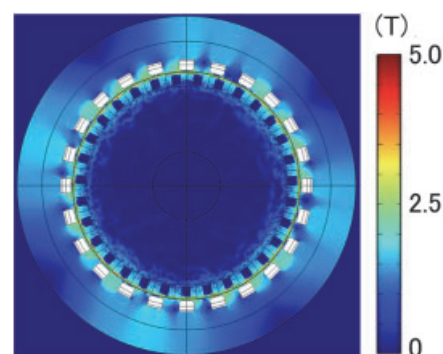


図 1：自己組織化法によって設計した 20 MW 級高温超伝導誘導同期モータの最大出力時磁束密度コンター図 [6]

電子物理工学講座 極微電子工学分野（白石研究室）

<https://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「二次元正孔ガスの電流スピン流変換」

電子はスピンとよばれる磁気モーメントを持っています。スピン自由度の利用を目指すスピントロニクスにおいて、電荷流を伴わないスピンの流れである純スピン流の生成は重要です。その代表的な生成機構として、電流と垂直な方向にスピン角運動量が運ばれる現象である電流スピン流変換が挙げられます。本現象において、「スピン軌道相互作用」という電子の運動とスピンの相互作用が重要になります。スピン軌道相互作用は、静止座標系における電場と高速移動する座標系における磁場が区別できないという特殊相対論の帰結として、電場中を高速運動する電子が磁場を感じることに起因します。そのためスピン軌道相互作用は、核ポテンシャルが大きい重元素において強くなる傾向にあります。実際に電流スピン流変換の研究はBi、Pt、Ta、Teなどの重金属を含む材料に集中しており、毒性や資源の制約から応用に課題があることから、無毒でユビキタな軽元素から構成された材料の開拓が望まれます。

本研究では、ダイヤモンドの表面を水素原子で終端した「水素終端ダイヤモンド」という材料に注目し、その電流スピン流変換の効率を評価しました。ダイヤモンドの水素終端表面には正孔層が誘起され、二次元の伝導層である「二次元ホールガス」が形成されます。この二次元ホールガスは、構成元素の原子番号が1、6と非常に小さいにも関わらず、二次元性を反映した面直方向の内蔵電界に起因する「Rashba型スピン軌道相互作用」が大きいという非常に新奇な特性を示します。実験に用いた試料は、水素終端ダイヤモンドと強磁性体の二層構造です。ここに面内電流を印加すると、二次元ホールガスの電流スピン流変換により生成された純スピン流が強磁性体に注入され、強磁性体の局在電子にスピンを受け渡します（図1）。これにより、磁化を変化させる作用である「スピン軌道トルク」が働きます。電気的な測定を行い、印加電流に対するスピン軌道トルクの生成効率であるトルク効率を計算すると、強磁性体の膜厚に対して図2のような依存性を示しました。スピン軌道トルクには二次元ホールガスに由来する成分と強磁性体に由来する成分が存在し、強磁性体が薄い領域では二次元ホールガス由来の成分が支配的で、強磁性体が厚くなるにつれて強磁性体由来の成分が支配的になります。これが強磁性体の膜厚が増加するにつれてトルク効率が負から正に符号反転する理由です。二次元ホールガスが形成されない酸素終端ダイヤモンドを用いて対照実験を行うと、トルク効率は小さく特徴的な膜厚依存性も見られませんでした。これらの結果は、二次元ホールガスに由来するスピン軌道トルクの観測を裏付けます。膜厚依存性から二次元ホールガス由来の成分を分離し、二次元系における電流スピン流変換効率 λ_{eff} （スピンホール角とスピン拡散長の積に相当）を推定すると、水素終端ダイヤモンドにおいて -0.20 nm でした[1]。この値は、ベンチマークであるPtにおける 0.05 nm を凌駕する大きさです。

本研究からは、原子に由来するスピン軌道相互作用が弱い元素で構成された材料における大きな電流スピン流変換を実現するという、物性理解の大きな一歩となる結果を得られました。これは、軽元素で構成された材料のスピン軌道相互作用が持つ深遠な物理の理解に向けた重要な結果です。

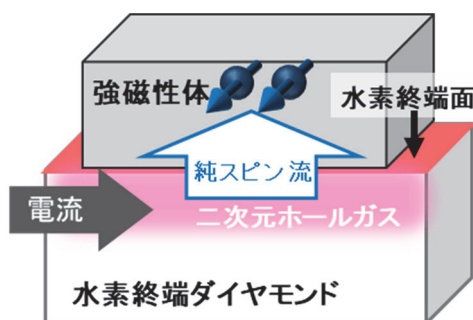


図1 試料の構造。

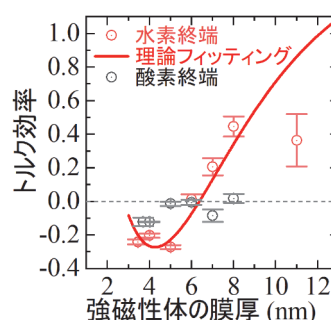


図2 トルク効率の強磁性体膜厚依存性。

参考文献：[1] F. Sako *et al.*, Physical Review B **110**, L220407 (2024).

知能メディア講座 言語メディア分野

<https://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

「音声対話翻訳」

世界には言語の「壁」が存在し、これが健全な人類社会の発展の障害の一つとなり、さらには相互不信や紛争の要因ともなる。日本においては、教育環境が日本語中心のため、大学等の高等教育研究機関の国際化が進んでいない。また、少子化を背景とした労働人口の減少を補うために多数の外国人労働者を受け入れているが、その教育や日本語社会へのスムーズな適応には大きな課題がある。人々の相互理解を行う最も重要な場は対話であり、上記の課題を解決するには信頼性の高い対話翻訳による多言語対話支援が肝になる。それを実現させるには多言語話者の意図を翻訳で的確に伝える必要がある。また、対話が意図通りに進んでいない時は、システムがメタな介入をして話者らにその旨を提示し対話を意図通りの方向に導く必要がある。

意図理解は AI の究極的な目標の一つであるが、マルチモーダル情報や文脈等の深い解析が必須かつ難題であるため長い間研究が大きく進んでいない。機械翻訳においては、深層学習の進展により、Google 翻訳や DeepL を代表とする文書の翻訳の精度は近年大きく向上した。それは対話翻訳の土台ができていることを意味し、対話翻訳が最近研究され始めている。しかし、既存研究は対話を統合的に翻訳することに留まり、話者意図理解への支援は意識さえされていない。

本研究の目的は「音声対話翻訳」という新しい機械翻訳のパラダイムを切り拓くことである。音声対話翻訳では、意図を的確に伝えるように韻律を活用し、話者の属性と感情を保つ音声から音声への翻訳を行う。図

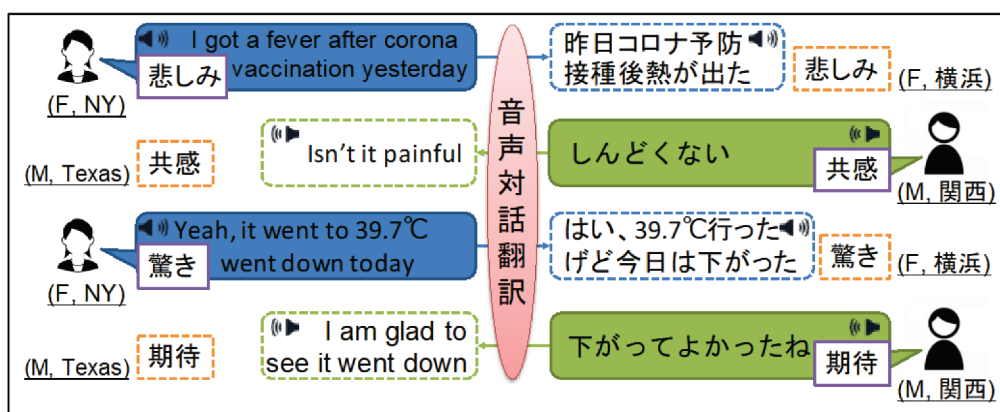


図1：音声対話翻訳

1に音声対話翻訳の例を示す。音声対話翻訳では日本語話者の音声から話者の属性「M, 関西」を推定し、その属性と韻律から「しんどくない」の感情は「共感」であることを推定する。そして、話者の感情を捉えて「Isn't it painful」に翻訳する。また、「共感」という感情と日本語話者の性別・親しみを感じさせるために出身地に対応するアメリカの地域属性である「M, Texas」付きの音声を合成する。さらに、多言語対話全体を観察し、対話が意図通りに進んでいないまたはその可能性がある時にシステムが話者らにその旨を伝えて意図の確認や発話の修正等を促す。図2の例では日本語話者の最後の発話は曖昧なため、システムが話者意図を確認するメタ介入をした。それによって、各話者にとって多言語音声対話がまるで単言語対話のようになる上、話者間の意図が的確に伝えられて噛み合いやすい多言語対話の支援が実現される。

音声対話翻訳の実現に向けて、ドラマ「Friends」の英語発話に音声、字幕、感情ラベルと映像がついている MELD データセットに対して、日本語・ドイツ語の吹替版から日本語・ドイツ語発話の音声、字幕を収取し英語とアライメントをとり、MELD-ST という感情を捉えた音声翻訳データセットを構築して ACL2024 で発表した [1]。

- [1] Sirou Chen, Sakiko Yahata, Shuichiro Shimizu, Zhengdong Yang, Yihang Li, Chenhui Chu, Sadao Kurohashi. MELD-ST: An Emotion-aware Speech Translation Dataset. In ACL: Findings Volume, pp.10118-10126, (2024.8).

通信システム工学講座 デジタル通信分野 (原田研究室)

<https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/>

「6G にむけたサブテラヘルツ波広帯域移動無線システムに関する研究開発」

第5世代移動通信システム(5G)は、現在、個人ユーザに対する通信に限らず産業や社会基盤を支える重要なインフラとして、さらなる高度化が期待されている。この高度化には、より広範な周波数資源の確保が不可欠であり、現在5G向けに割り当てられているサブ6 GHz帯および28 GHz帯に代表されるミリ波帯の有効活用が重要である一方、今後の技術発展に伴いこれらの周波数帯域でも将来的に逼迫する可能性があるため、新たな周波数資源の開拓が求められている。

その有力候補として100-300 GHzのサブテラヘルツ波が注目されており、現在の5Gで利用可能なチャンネル帯域幅を大幅に上回る広帯域が確保できるため、超高速通信技術の実現に向けて期待されている。一方で、サブテラヘルツ波は直進性が高く、基地局が見通せない環境では受信信号が大幅に減衰し、通信品質が著しく低下するという課題がある。そこで近年では、比較的見通しが確保しやすい車線上にむけた通信に着目し、交差点の俯瞰映像などの車両認識情報を高精細に伝送することで、安全・安心な交通社会の実現を目指した、サブテラヘルツ波移動通信システムの研究開発が国内でも進められつつある。しかし、現状は、5Gに準拠していない変調波のみの伝送や、5Gに準拠した場合においてもサブ6 GHz帯で割り当てられている帯域幅を超えない狭帯域幅での実証のみであり、第6世代移動通信システム(6G)に向け、5Gの標準方式に準拠しつつ、5Gで現在利用されている最大帯域幅(400 MHz)を超える6G時代の信号の移動環境での伝送をサブテラヘルツ波で実証し、カバーエリア等の知見を得る必要がある。

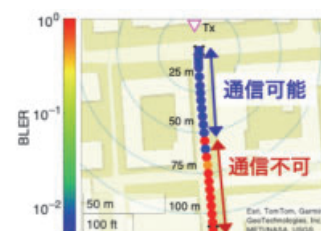
そこで、当研究室では、5G物理伝送信号フォーマットに従いつつ、国内の5Gチャンネル帯域幅よりも広帯域な信号をサブテラヘルツ波帯に乗せて伝送を行う伝送試験装置を開発し、道路上での基礎移動伝送試験を実施した[1](図1(a))。試験対象である交差点・道路を望む建物内に送信機を設置し、送信ビームを交差点中心(図1送信ビーム照射点①)に向けて照射した上で、移動台車を具備した受信機を交差点中心からおよそ100 mの範囲で移動させて伝送特性を取得した。また、同様の送信機設置場所において、送信ビームを交差点中央からおよそ100 m離れた場所(図1送信ビーム照射点②)に照射した上で、受信機を交差点中心から約200 mの範囲で移動させ、伝送特性を取得した。

地図上の位置に対応するブロック誤り率(BLER: Block Error Rate)を図2に示す。図2(a)によると、交差点中心に送信ビームを照射した際は、その照射点を含めて道路上約50 m程度の範囲までBLERが0.01を下回っており、その範囲で通信可能である(所要値は0.1)。図2(b)によると、交差点から100 m地点に送信ビームを照射した際は、交差点中央付近を除き、交差点中央から約200 mの範囲で伝送可能であることが確認できた。これらの結果から、送信ビームを交差点中心への照射と遠方への照射の2パターンを使い分けることで、移動体に送信ビームを正確に追従させなくても、今回の検証対象である道路上をすべてカバーできることを確認した。

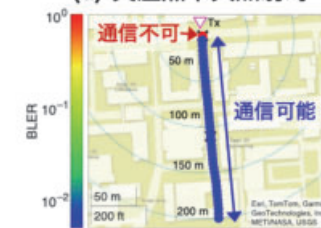
参考文献: [1]「サブテラヘルツ帯における6G向け広帯域移動伝送試験装置を開発し、車両向け広帯域移動通信システムの基礎伝送に成功」[Online] Available: https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2025_04.html



図1: 実験環境



(a) 交差点中央照射時



(b) 交差点100m地点照射時

図2: BLER 特性

集積システム工学講座 集積コンピューティング分野 (橋本研究室)

<http://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp>

高信頼・高安全な計算基盤の実現に向けた暗号実装理論

高性能な集積システムの実現を目標に計算機アーキテクチャや半導体技術が50年以上に渡って研究開発されてきました。高性能化の一方で、これらの技術は信頼性や安全性を必ずしも考慮しないで発展してきました。現代の計算機は個人情報や電子商取引など非常に価値のあるデータを日常的に扱っているため、情報が正しく処理・保存されることや、情報が第三者に漏えいしたり改ざんされないことを保証することが極めて重要です。したがって、高信頼・高安全な計算基盤の実現方法の確立が強く求められています。

本研究室の安全な計算機の実現に向けた近年の取り組みである暗号実装理論に関する成果を紹介します。暗号は、秘匿通信や認証、電子署名などに基づく安全な情報通信システムの実現に必要不可欠な技術です。現代暗号の安全性は数学的に十分に評価されており、攻撃者（秘密情報を盗もうとしたり、データ改ざんを試みる人）が通信路上の暗号文や明文を見ても解読できないことが保証されています（図1）。しかしながら、攻撃者が暗号演算を実行する実装に物理的にアクセスできる場合、その物理的な漏えい情報（計算時間や消費電力、漏洩電磁波など）を観測・解析したり、物理的に外乱（一時的な故障）を与えて挙動を観測・解析したり、さらには半導体チップを直接開封して内部を観察することで、秘密情報を詐取する実装攻撃の脅威が知られています（図2, 3）。この中でも、漏えい情報の観測のみを用いた攻撃であるサイドチャネル攻撃は、比較的安価な市販の機器を用いて実行できること、攻撃の痕跡を残さないことなどから、深刻かつ現実的な脅威の一つと考えられています。

サイドチャネル攻撃の評価においては、攻撃者は暗号への入力か出力、あるいはその両方が分かるとしていました。このような条件が成立する状況は少なくありませんが、しかしながら、現実の暗号利用においては必ずしもそうであるとは限りません。例えば、国際標準の認証暗号OCBや、ストレージ暗号化のIEEE標準XTSモードで利用する場合は、暗号の入出力に特殊な処理を施すため、攻撃者は暗号の入出力を直接観測できません。このような場合におけるサイドチャネル攻撃やその耐性の評価方法はこれまでほとんど知られておらず、これらの暗号利用モードの実装安全性評価は重要な未解決問題でした。本研究室では、確率論やXOR畳み込み、そしてウォルシュ・アダマール変換（二元体という特殊な数体系上のフーリエ変換）と呼ばれる数学的技法を駆使することで、OCBやXTSモードの安全性評価技術を確立するとともに、これまでのサイドチャネル攻撃や対策技術との関係性を数学的に明らかにすることに成功しました。このように、本研究室では、暗号実装を理論的に解析する試みで、安全な計算基盤・集積システムの発展に貢献しています。

<参考文献>

R. Ueno, A. Ito, Y. Todo, A. Inoue, K. Minematsu, H. Ishikawa, and N. Homma, "All You Need is XOR-Convolution: A Generalized Higher-Order Side-Channel Attack with Application to XEX/XE-based Encryptions," IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems, 2025 (3), pp. 317–360, 2025.

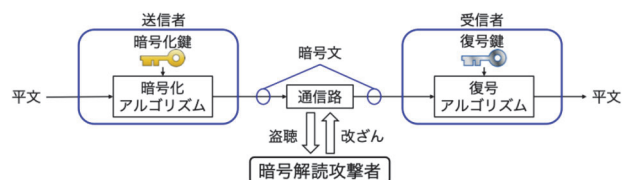


図1：数学的な暗号解読攻撃者を表す通信路

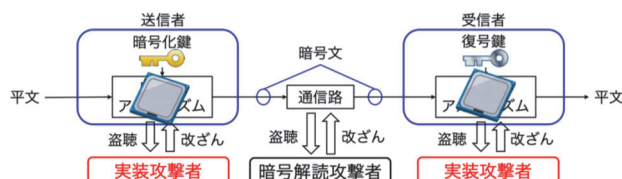


図2：実装攻撃者を表す通信路

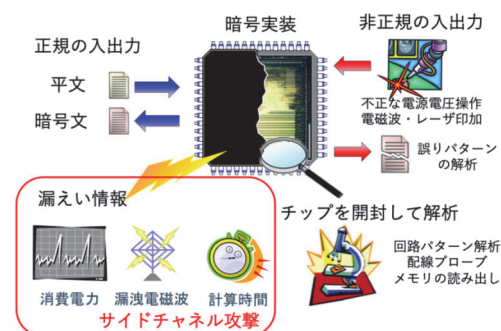


図3：様々な実装攻撃

システム情報論講座 バイオサイバネティクス分野 (野村研究室)

<https://nomuralab.jp>

ヒト脳の間欠的意思決定機構が生成する運動ゆらぎ：発現と脳疾患に起因する変容の機序

我々が行う連続動作（歩行や咀嚼、あるいは発話）の多くは、離散的動作の繰り返し・系列で構成されている。一見動きを伴わないように見える静止立位姿勢の微小動揺も、微小転倒とそれに引き続く微小回復という離散的運動サイクルの繰り返しで構成される。微小転倒・回復サイクルの離散性は、立位時脳活動に基づき我々が明らかにした最新知見である [1]。運動関連脳活動は脳波計測で推定され、単発的な運動の開始・実行と停止・終了は、それぞれ、頭頂付近電極電位の β 帯域 (14 – 30Hz) パワーの減弱 (β 脱同調) とそれに引き続くパワーの増大 (β 同調) として表出する。運動終了後に現れる β 同調は β リバウンドとも呼ばれる。 β 脱同調・ β リバウンドは、運動の実行と終了のみならず、脳内の運動意思決定過程を反映する。この解釈は、運動開始を指示する視覚的 Go 信号を待機し、Go 信号呈示に即応して単発運動を実行するか、あるいは NoGo 信号呈示に対しては運動実行を留まるという課題において、NoGo 試行でも β 脱同調・ β リバウンドが観測されるという事実に基づく。すなわち、運動の実行・非実行という行動選択を反映して β 脱同調が発生し、その行動選択の結果として状態更新された制御対象の状態観測を反映して β リバウンドが発生するというシナリオである。我々が示した静止立位姿勢の微小転倒・回復サイクルの離散性は、随伴する β 脱同調・ β リバウンドの発見に基づくものである。

連続動作が離散動作の系列として生成されるとき、動作を制御するために脳が生成する運動指令の発出は、制御対象の状態に依存して間欠的にオン・オフを繰り返す（間欠制御）。すなわち、連続運動を構成する個々の離散運動開始の適切なタイミングで運動指令がスイッチオンされ、筋力が生成され末梢効果器の運動を駆動する。一方、離散運動終了の適切なタイミングで運動指令はスイッチオフされ、効果器のその後の運動は受動的な重力と慣性力のみで駆動される。重力転倒トルクや感覚フィードバック時間遅れ、感覚雑音等、複数の不安定化要因存在下で、静止立位姿勢をロバストに安定化する制御として、我々は姿勢の間欠制御モデルを提案している [2]。さらに我々は、姿勢動揺データと間欠制御モデルのデータ同化に基づき、神経変性疾患であるパーキンソン病に起因する立位姿勢不安定化の症状を呈する患者では、制御の間欠性と運動の離散性が失われていることを明らかにした [3]。データ同化解析の結果は、健常者が呈する長期相関を伴う $1/f$ ゆらぎ様姿勢動揺は間欠制御によって生成され、パーキンソン病患者の姿勢動揺が呈する白色雑音様の変動は、制御の間欠性の低下に起因することを示している。興味深いことに、立位姿勢の鉛直平衡姿勢からの偏差と、むだ時間を伴う比例・微分フィードバック制御の消費パワー、およびフィードバック制御のゲインの和をコスト関数とする強化学習によって静止立位姿勢を安定化させると、自然な形で間欠制御戦略が獲得されることが明らかになった [4]。

以上の結果は、皮質・大脳基底核運動ループが強化学習および随意的で単発的な行動選択に関わる意思決定の座であること、立位姿勢の不安定化とゆらぎの白色化を呈するパーキンソン病が大脳基底核を中心とする脳機能障害であること等と併せて、間欠制御における制御オンとオフのタイミングは、むだ時間を伴う体性感覚フィードバック情報に基づいて、皮質・大脳基底核運動ループが決定している可能性を示唆する。これは、連続運動を構成する個々の離散運動の開始・実行と停止・終了を決める自動的意思決定（行動選択）の動特性とその繰り返し動態が、間欠制御の脳内実体であり、健常者が呈する長期相関性を伴う運動ゆらぎの生成と、パーキンソン病患者が呈する運動ゆらぎの白色化の脳内機序であるという仮説にまとめられる。現在、皮質・大脳基底核ループによる運動意思決定の神経解剖学的ニューラルネットワークモデルによる立位姿勢制御モデルや周期的指タッピング制御モデルの構築を進めており、当該モデルが間欠制御戦略を実現する条件特異的な動態シミュレーションにおいて、立位姿勢制御に随伴する β 脱同調・ β リバウンドの疑似脳波や、周期的指タッピングリズムの長期相関ゆらぎが再現されることが明らかになってきている。

参考文献：[1] *Neuroscience Letters* 814, 137443, 2023. [2] *Encyclopedia of Computational Neuroscience*, 1694-1704, 2022. [3] *Chaos* 30, 113140, 2020. [4] *Biological Cybernetics* 118, 229-248, 2024.

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

<http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「隠消現実感を用いた透明化体験が自己肯定感に与える影響の実験評価」

近年、精神的な豊かさを含む「ウェルビーイング」の重要性が高まる中、その一要素である自己肯定感の向上が注目を集めています。自己肯定感とは、ありのままの自分を価値ある存在として受け入れる感覚であり、幸福感やストレス耐性とも密接に関係しています。しかし、現実の自分と理想の自分との差を過度に意識してしまうことで、自分に対して否定的な感情を抱きやすくなり、自己肯定感が低下してしまうこともあります。

本研究では、こうした心理的課題の解決に向けて、体験者の身体が透明になったように錯覚させる「透明化体験」を提供するシステムを開発し、その心理的影響を評価しました。このシステムでは、図1に示すように、HMDの上部に設置されたカメラから取得した体験者視点の映像に対して、深層学習を用いて体の部位を検出・除去し、その背後の背景を復元する処理をリアルタイムで行います。結果として、体験者は自身の手足が見えない状態で保持物体（ティッシュ箱や缶など）を操作することになり、物体が空中に浮かんでいるかのように見える視覚体験が得られます。このとき、視覚と触覚の一致が錯覚のリアリティを高め、より強い透明感覚を生起させます。

このような視覚体験が心理に与える影響を明らかにするため、透明度が異なる複数の映像を用いた心理実験を実施し、体験前後の心理状態の変化を多角的に測定・分析しました。特に本研究では、「身体存在感の低下」や「自己評価意識・被評価意識の変化」といった中間因子にも注目し、共分散構造分析により体験を通じた心理変化の因果構造モデルを構築しました。

その結果、透明化体験により「他者から見られている」という感覚が弱まり、それに伴って被評価意識・対人緊張が有意に低下することが明らかになりました。さらに、それらの低下が自己受容を促し、結果的に自己肯定感の向上につながる心理的メカニズムが示唆されました。一方、理想の自分と現実の自分との差が縮小することが直接的に自己肯定感の向上をもたらすとは限らないことや、不安などの感情要素がどのように作用するかについては、今後のさらなる分析が必要です。

今後は、透明化体験を用いた心理的支援の可能性をさらに探るとともに、体験の個人差や感情要因をより詳しく分析することで、より安定的かつ効果的な介入手法の確立を目指します。

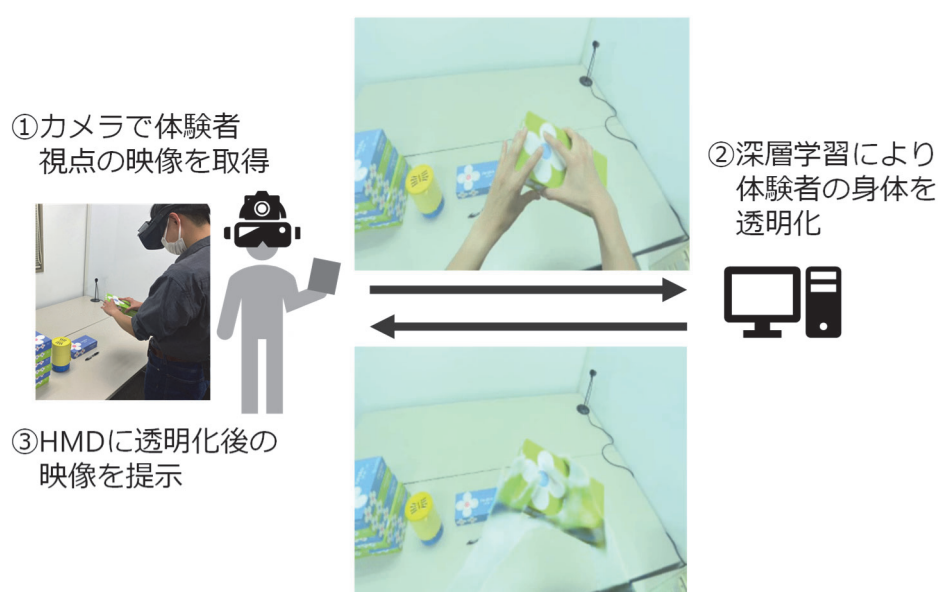


図1 隠消現実感を用いた透明化体験システム

エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野

<https://dpe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

テラヘルツ放射顕微鏡・分光法によるペロブスカイト太陽電池界面評価

我々は、フェムト秒パルスレーザーを試料に照射することにより発生するテラヘルツ (THz) 波を利用した材料・デバイスの評価技術として、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 / 分光 (LTEM/LTES) の開発を進めている。本手法を用いて、ナノカーボン、Si、GaN および SiC 等の様々な材料やデバイスの表面および内部における電荷のダイナミクスや電界分布・分極構造の計測・可視化を行ってきた。最近、我々が注目している材料の一つが、ペロブスカイト太陽電池 (PSC) である [1]。PSC は、溶液プロセスによる安価な製造が可能な次世代型太陽電池として注目されている。しかし、湿度や酸素などの外部環境要因に敏感で、長期安定性の向上が重要な課題である。これに対し、界面パッシベーションが有効であるとされ、欠陥抑制による非放射再結合の低減やキャリア輸送効率の向上、湿気の侵入防止効果などが報告されている。PSC の性能向上と安定性の確保には、界面や層間の相互作用を詳細に理解することが不可欠である。我々はこの目的のため、独自に開発した LTEM/LTES を用いて、界面パッシベーション処理の有無が界面バンド構造に与える影響を評価した。

ガラス基板上に ITO 透明電極を成膜し、その上にスピンコーティング法を用いて MeO-2PACz (正孔輸送層) を成膜し、その上に $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}\text{Br}_{0.24})_3$ (ペロブスカイト層) を成膜した。一部の試料にはパッシベーション材として PEACl (フェニルエチルアミン塩化物) を適用した。電子コンタクト層として PCBM (フェニル-C61- 酪酸メチル) を、電子輸送層として BCP (バソクプロイン) を成膜した後、銀電極を蒸着して図 (a) のようなデバイスを完成させた。パルス幅約 100 fs、励起波長 360 nm-420 nm 及び 700 nm-800 nm のパルスレーザーを用いてあ PCB 側から励起し、発生した THz 波の波形を計測した。

図 (b) は波長 700nm のレーザーで励起において、パッシベーションの有無による THz 放射波形の変化を示している。波長 400nm のレーザー励起では見られなかった、パッシベーションの有無による THz 波の反転が観測された。これは、ペロブスカイト層のバンドギャップ 1.7 eV に対して波長 700 nm (1.77 eV) のレーザーで励起した場合は、THz 波光源である光励起キャリアが、表面バンド曲がりによる界面ポテンシャル変化に敏感応答したためと考えている。このことは、パッシベーションにより界面欠陥が低減し、電荷分布が変化したことによりバンドの曲がる方向が界面に向かって上向きから下向きに変化したことを示唆している。我々は、このことが PEACl パッシベーション効果に大きく寄与していると考えている [2]。

[1] Mochizuki *et al.*, "Instantaneous Photocarrier Transport at the Interface in Perovskite Solar Cells to Generate Photovoltage", *Photonics* **9**, 316 (2022)

[2] Meeting Report, "Pulsed lasers light up opportunities". *Nature Photonics* **19**, 556 (2025)

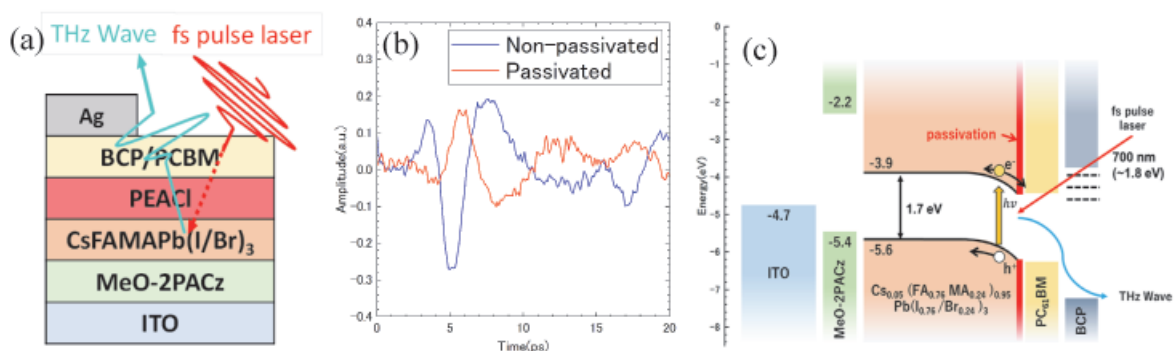


図 (a) 作製した PSC の構造、(b) パッシベーションの有無による THz 放射波形の変化、および (c) 界面バンド構造の模式図。

エネルギー理工学研究所エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稲垣研）
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/index.html>
 プラズマの新たな状態への経路を開く手法の開発

フュージョンエネルギーへの Fast Track

フュージョンエネルギーを指向したプラズマの実験研究をエネルギー理工学研究所の Heliotron-J 装置を用いて行なっています。強力な電磁波を用いて水素を電離し、水素プラズマを磁場により閉じ込めています。プラズマ核融合炉では、核融合出力は燃料水素の密度の二乗に比例し、温度依存性は 10keV（約 1 億度）付近で弱くなります。また、密度が高いほど閉じ込め性能が向上するため、密度を高めることは有効なアプローチです。ただこれまでの研究では大型トカマクプラズマの密度には限界があることが分かってきました。密度の限界値がプラズマ半径に反比例するので大きなプラズマほど限界値が低くなってしまいます。一方、Heliotron-J プラズマではこのような限界は今のところ現れていません。このため高密度によるアプローチが有望です。

高密度で閉じ込めの良い状態の達成

Heliotron-J には大量のガスをプラズマに吹き付けたり、氷の水素をプラズマに入射したりする事（ペレット入射）でプラズマの密度を高くする装置があります。最近の実験で、ヘリオトロン J では高い密度でプラズマの閉じ込めが良くなることが発見されました [1]。通常密度を高くすると温度がどうしても低くなります。しかし閉じ込めが良くなると温度も高くなります。これは核融合炉と整合します。このメカニズムはまだ解明されていませんが、「急激な変化を与える」ことが鍵である可能性があります。プラズマを一時的に高い密度にしても時間が経つと元の状態に戻ろうとします。その時、短時間に密度を上げる事で違った経路でプラズマを緩和させます。すると図に示したように、緩和した状態は初期状態とは温度や密度の分布が全く異なっており閉じ込め特性も高いことが明らかになりました [2]。気体の水素を吹き付けてゆっくりと密度を上げた場合では今回発見した新しい状態には至りません。これは「変化の速度」が新しい制御パラメータである事を示唆しています。この成果はエネ科 M2 の学生を筆頭著者として国際学術誌に発表され、Web 上でも 2025 年 6 月に Press Release されました [3]。

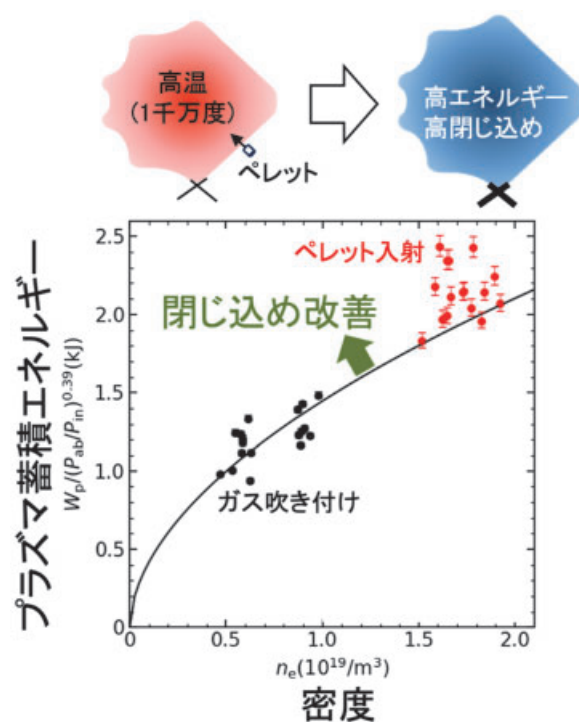


図 密度を上げるとプラズマに溜まっているエネルギーが大きくなるが、ペレット入射だとゆっくり上げた場合（黒線）よりも溜まるエネルギーが多い

- [1] C. Wang et al., Plasma. Phys. Control. Fusion **66** (2024) 022001.
- [2] K. Ogihara, et., al. Sci Rep **15** (2025) 16503.
- [3] <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2025-06-04>

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田研）

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

「二次元半導体ヘテロ界面における磁気バルク光起電力効果の実証」

従来の太陽電池で用いられている p-n 接合による光起電力効果は、その電圧および光電力変換効率に原理的な限界が存在する。これに対して量子力学的現象から生じるバルク光起電力効果には、そのような原理的な制約が存在せず次世代の太陽電池応用に向けて注目を集める一方で、その現象の本質的な理解や探索は十分ではない。近年、それまで未解明であったバルク光起電力効果は、空間反転対称性が破れた物質における、電子の光励起に伴う空間的な不均等移動（シフト）に起因した、シフト電流という現象であることがわかってきた。更に、運動量空間での不均等な光励起による注入電流など、シフト電流以外にもいくつかの現象が複合し観測されたものが、バルク光起電力効果であると理解されつつある。しかしながら、電子の自転であるスピンの関与し時間反転対称性が破れた状態の物質、つまりは磁性物質におけるバルク光起電力効果はこれまで実験的に解明されていなかった。

我々は、近年着目されている二次元半導体の研究を進めるうえで [1-3]、これまで実験的に明確でなかった時間反転対称性が破れた状態におけるバルク光起電力効果を観測することを試みた [4]。その目的のため、二次元半導体である二硫化モリブデン (MoS_2) と磁気層状物質である四硫化クロム燐 (CrPS_4) の人工ヘテロ構造デバイスを作製した。この二つの物質は対称性が異なり、それらを重ねた界面において人工的に空間反転対称性が破れた状態が生じる。さらにこのデバイスに対して、温度と外部磁場を操作することで、時間反転対称性が破れた磁性状態による自発的光電流の振る舞いを調べた。すると、スピンの交互に揃う磁性転移温度（反強磁性）以下の領域で急激な自発電流の変化を観測し、その変化はデバイスによって減少・増幅どちらの場合も観測できた。さらに、外部磁場によって積極的にスピンの向きを変えるなど磁性状態を変化させたところ、それに強く依存した自発電流が観測された。これらの結果により、磁気注入電流と呼ばれる新たな光起電力効果を発生させ、なおかつ操作することが可能であることが実験的に示されました。

自然界には存在しない、人工的に空間反転対称性を破った本デバイスは、バルク光起電力効果を発現する太陽電池デバイスの開発に有望な新たなプラットフォームと言える。今回我々が設計した空間反転・時間反転両方の対称性が操作できるデバイスは、この特異な現象の本質を理解するための非常に興味深い研究対象だと考えられる。さらに、本研究で磁気注入電流はシフト電流と共存することが示され、より効率的な太陽電池デバイスや磁場による光電変換効率の向上などに向けた活用が期待される。

参考文献

- [1] Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **9**, 2598 (2018).
- [2] H. Wang, H. Kim, D. Dong, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **15**, 4905 (2024).
- [3] Y. Xiang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Sci. Adv.* **11**, e5562 (2025).
- [4] S. Asada, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **16**, 4827 (2025).

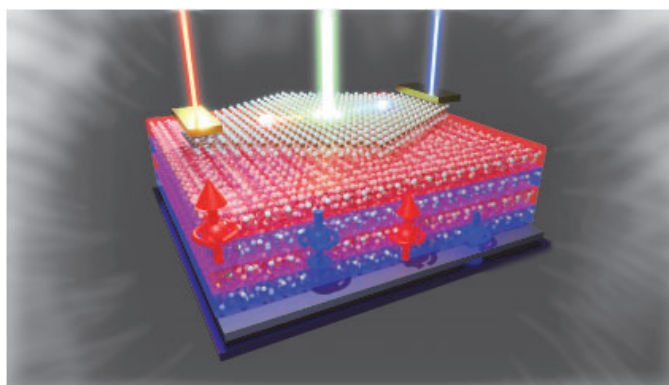


図1 二次元半導体と磁性層状物質での磁気バルク光起電力効果のイメージ

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (橋口研究室)

https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/

衛星 AIS 観測のための複素ニューラルネットワークによるブラインド信号分離

船舶自動識別装置 (AIS: Automatic Identification System) とは、航行中の船舶が、船名、船種、位置、針路、速度、重量や積載物等の情報について、周辺船舶と無線により相互に通信するシステムである。通信は 160MHz 帯、GMSK 変調、9600 baud で、多重制御は自律的時分割多重 (Self-Organized Time Division Multiple Access; SO-TDMA) と呼ばれる方式で、同期信号を用いることなく、他に送信している局がないことをキャリアセンスにより確認して送信を行っている。これにより海面上では VHF の見通し距離約 30km 程度以内の船舶と信号が衝突しないように信号パケットの交換を行っている。

近年、官公庁を中心に、人工衛星から広範囲の船舶 AIS 信号を収集し、航行・操業状況を把握し、海上交通の保安や資源管理へ活用する技術が期待されている。しかし、衛星からの観測では、SO-TDMA による同期の取れていない海域からの信号同士が衝突してしまう問題があり、特に船舶密度の高い海域では著しく検出性能が低下してしまうことが課題となっている。JAXA ではこの課題に対して、衛星搭載船舶自動識別システム実験 (SPAISE) としてこれまで 3 機の試験衛星を打ち上げており、本研究室もこの計画に関して技術提供をしてきている。一般に無線信号分離問題は、分離したい信号数よりも多くのアンテナを用いて受信することができれば線形分離問題となるため、容易に解くことが可能である。衛星 AIS の場合、波長が比較的長いことから数本程度以上のアンテナを装備することが難しく、よってアンテナ本数以上の受信信号を分離するという状況が発生する。本研究では、アンテナ本数以上の信号分離が必要となる難しい状況に特化した研究を行っている。本稿では特に、複素ニューラルネットワーク (複素 NN) を用いた AIS 信号分離の取り組みについて記述する。

通信の分野においては、狭帯域の変調信号は複素数として表現することが一般的で、これによりベースバンド速度で損失なく情報を表現することが可能となるため、NN においても複素数表現を導入したい。しかし、複素 NN では活性化関数などにやや工夫が必要で、実数 NN ほど技術的に確立されていないところに難しさがある。ここではリカレントニューラルネットワーク (RNN) を複素化した複素 RNN を用いた。RNN は内部にフィードバックループと記憶をもつ順序回路のようなニューラルネットワークである。時系列データ処理を得意とし、フィードバックをもたない NN に比べて小さい内部構造で時間依存性を学習できるという長所がある。

活性化関数としては、入出力間で位相情報を保存するように、振幅方向に非線形性を持たせる方法を選択した。数値実験ではアンテナを 1 本、AIS は 3 信号とした。図 1 に結果の一例を示す。信号強度はそれぞれ 0, -10, -20dB としている。十分な学習をさせた後、10 万シンボルのテスト結果正答率は、それぞれ 100%, 100%, 99.895% となり、十分実用水準の分離性能が得られることが確認された。

参考文献

西村, 平原, 「衛星搭載船舶自動識別システム実験 3 のための信号分離システム検討」電子情報通信学会信学技報, vol.119, no.416, pp.113-118, 2020.

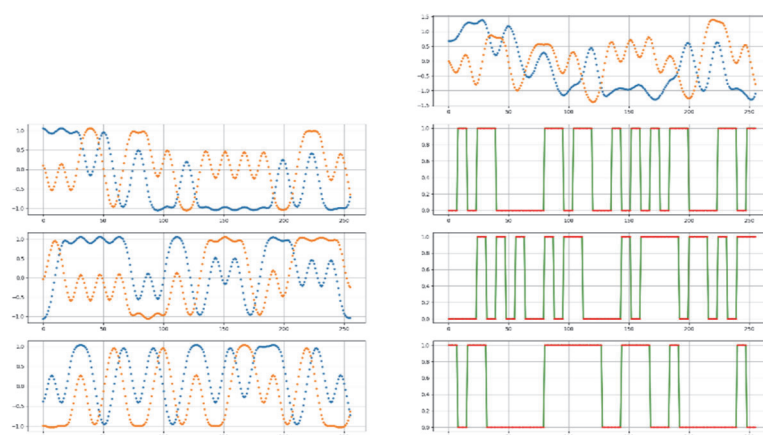


図 1: 学習後にテストデータを推論させた結果. 左図: 混信前の 3 つの信号源. 右図最上段: 複素 RNN に入力される混信信号. 右図 2 ~ 4 段目: 緑がバイナリの真値, 赤が複素 RNN から出力されたバイナリの推定値でほぼ完全に一致している.

生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (海老原研究室)

<https://space.rish.kyoto-u.ac.jp/ebihara-lab/>

宇宙環境変動に起因する大規模停電

太陽フレアなどの突発的な太陽活動をきっかけとして、地球周囲の宇宙空間が大きく乱れることがある。特に地磁気が数日間にわたって乱れる現象は磁気嵐と呼ばれ、送電線を通る地磁気誘導電流 (geomagnetically induced current) の原因となる。過剰な地磁気誘導電流は送電設備に不可逆的な損傷をもたらすことがあり、電力供給の安定性に対して深刻な脅威となる。宇宙環境変動に起因する災害は発生頻度こそ極めて低い、ひとたび起これば現代社会の基盤インフラに甚大な影響を与えるため、そのリスク評価と対策が急務となっている。私たちは電力事業者の協力を得て 50 万ボルト級変圧器の中性線を通る地磁気誘導電流の測定を行うとともに、地磁気擾乱によって日本列島の地表に誘起される電場や送電網を通る地磁気誘導電流の発生機構について数値シミュレーションを用いた研究を行っている。

1989 年 3 月、観測史上最大級の巨大磁気嵐が発生した。このとき、カナダのケベック州では最長約 9 時間の大規模停電が発生し、約 600 万人が影響を受けた。過剰な地磁気誘導電流が変圧器を流れ、調相設備の保護装置が連鎖的に不要動作し、全系崩壊に至ったと考えられている。保護装置が最初に作動した時刻と、急始と呼ばれる急激な地磁気変動がカナダで観測された時刻は一致する。惑星間空間衝撃波が地球に到来し、地磁気が大きく乱れたことが推察されるが、その詳細な過程についてはよく分かっていなかった。本研究では、3 次元電磁流体シミュレーションを用い、惑星間空間衝撃波が到来したときの宇宙環境を模擬し、本研究室で開発した解析手法を適用し、その詳細を明らかにした。惑星間空間衝撃波が到来すると、磁気圏 (地球磁場が支配的な宇宙空間) は急激に圧縮され、電磁流体波の一つである圧縮波 (ファストモード波) が磁気圏内を伝播する。その過程でプラズマが磁力線を引っ張り (磁気張力に対して負の仕事をし)、電磁流体波の一つであるアルペン波が発生する。アルペン波は沿磁力線電流を伴いながら約 15-20 秒かけて電離圏に到達し (図 1)、電離圏電流を強め、地上の磁場を大きく乱す。この大振幅の地磁気擾乱は 1989 年 3 月にカナダで発生した広域停電の原因となったと考えられる (Zhang et al., 2024)。

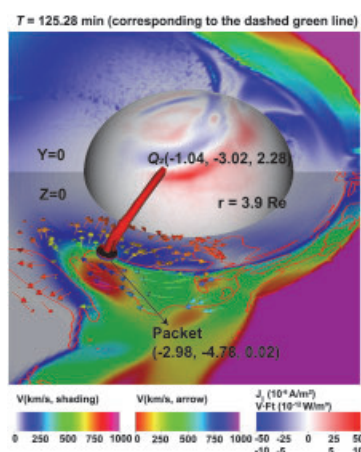


図 1：電磁流体シミュレーションで再現した惑星間空間衝撃波到来時の磁気圏。カナダ・ケベック州で大規模停電が発生した時刻に対応する。赤い線は、エネルギー (電流) の輸送を担うアルペン波の軌道を示す。

参考文献

- [1] Zhang, T., Y. Ebihara, and T. Tanaka, Generation of field-aligned currents in response to sudden enhancement of solar wind dynamic pressure, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2024JA032768, doi:10.1029/2024JA032768, 2024.

令和7年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

有 澤 太 喜（薄教授）「電力パケットで駆動されるコンパス型2脚ロボットの歩容解析とシミュレータ構築」

コンパス型2脚ロボットを対象に、入力を電力パケットとして与えることで、平地における歩容生成および制御を実現する方法について数値的検討を行なった。また、電源系を実機とした検証を行うための、コンパス型2脚ロボットの歩行シミュレータを構築し、動作検証を行なった。

片 山 夏 樹（薄教授）「あるクラスの特異摂動系に対するクープマン作用素の研究」

安定なリミットサイクルを有する特異摂動系に対してクープマン作用素を導入し、そのスペクトル的性質を検討した。続いて、特異極限に対するクープマン作用素を構成し、スペクトルの特異極限を導出した。加えて、スペクトルの性質と特異摂動系の幾何学的性質との関係を議論した。

川 添 陸 人（薄教授）「スイッチトリラクタンスモータの電力パケットを用いたセンサレス駆動に関する研究」

位置センサを用いないスイッチトリラクタンスモータの駆動方法の確立に向けて、電力パケットの利用を検討した。電源側に配された電流センサと電力パケットの情報タグからモータの回転位置を推定する方法を提案し、提案方法を実験とシミュレーションで検証した。

井 崎 壮（萩原教授）「隠れマルコフモデルで表される通信遅延モデルの評価と遠隔制御への活用」

遠隔制御系の通信遅延を実測データから隠れマルコフモデルによってモデル化する手法を提案した。また、同定したモデルの通信遅延モデルとしての妥当性を出力サンプルから定量的に評価したのち、数値例検証で同定したモデルを用いて設計した制御器の有効性を確認した。

大 江 巧 人（萩原教授）「サンプル値系の L_∞/L_1 誘導ノルムおよびハンケルノルム解析」

サンプル値系の L_∞/L_1 誘導ノルムおよび L_∞/L_1 ハンケルノルムについてリフティング表現を基に解析し、導出された表現式と行列の誘導ノルムとの関係について論じた。また、 L_∞/L_1 誘導ノルムと L_∞/L_1 ハンケルノルムが一致することを示した。

河 合 敦 紀（萩原教授）「非定常な非線形確率系のモデル予測経路積分制御」

非定常な非線形確率系のためのモデル予測経路積分制御の理論について論じ、そのアルゴリズムを示した。その応用として、アンサンブルカルマンフィルタを用いた状態およびランダムパラメータ推定とモデル予測経路積分制御を統合した制御手法も提案した。

山 根 涼（萩原教授）「不均一なむだ時間をもつ離散時間系の補正型状態予測制御の構造解析およびロバスト安定化」

離散時間系の補正型状態予測制御の解釈を整理し、不均一な入力むだ時間をもつ系においてロバスト安定性が向上する補正項ゲインの設計法を論じた。また、均一な出力むだ時間をもつ離散時間系のオブザーバ構造が濾波型同次元オブザーバとして解釈できることを示した。

大 島 タ 侑（阪本教授）「複数レーダ連携による多人数を対象とした体動の定量的計測技術」

本研究では、同一平面上にない任意位置・角度で設置された2台のレーダの相対位置・角度を推定して位置合わせを行い、多人数の体動を非接触で定量的に計測する手法を開発した。その有効性は大学生および小学生を対象とした実験により確認された。

加 藤 雅 也（阪本教授）「走査レーダを用いた呼吸運動を伴う人体の高精度イメージング」

本研究では、ミリ波アレーレーダの機械走査中に人体の体動や呼吸運動を同時に推定し、それに基づいて人体部位ごとに受信信号の位相補正を行うことで高精度な人体イメージングを実現する手法を提案した。提案法の性能は被験者が参加する実験により確認された。

小 林 悠 人（阪本教授）「生体信号の特徴量を用いたレーダによる個人識別技術」

本研究では、レーダによる人体計測から得られる呼吸および心拍の特徴量を用いて個人識別を行う手法を提案した。提案手法は、6人の被験者を対象とした実験および30人の被験者を対象としたデータセットに基づく評価により、従来手法を上回る精度を達成することを示した。

波 戸 宏 樹（阪本教授）「振幅位相相関とアレー信号処理を統合したレーダによる呼吸部位検出技術」

本研究では、レーダ人体計測において未知の人体位置や姿勢に対して、呼吸運動を伴う部位を自動で推定するために、反射波の振幅・位相相関とアレー信号処理を統合した手法を開発した。開発手法の性能は、ミリ波レーダと深度カメラによる実験により確認された。

林 拓 人（阪本教授）「呼吸の準周期変動モデルを用いたマイクロ波レーダによる自動車内の人体検出技術」

本研究では、複数アンテナを用いたマイクロ波レーダによる車内の人体検出手法を開発した。開発手法では、受信された複素信号に対して位相補正付き周波数解析と確率的モデル化を導入し、従来よりも高精度な人体検出が可能であることを実験により確認した。

楊 奇 亮（阪本教授）「Development of a Rotating Radar System for Accurate Respiratory Measurement」（生体信号の特徴量を用いたレーダによる個人識別技術）」

本研究では、アレーレーダをモータで機械的に回転させるシステムを開発し、1台のシステムで広範囲の目標を計測可能にした。特に、モータの回転角が不明な状況においても、レーダ画像間の相互相関関数を用いて回転角を正確に推定する手法を開発した。

大久保 琉 登（土居教授）「細胞集団モデルの分岐解析と次元縮約に基づく分化比率調節メカニズムの解析」

環境を介して大域的に結合した細胞集団モデルは、細胞分化などのパターン形成を表現する代表的な非線形モデルである。集団モデルが持つ対称性に注目した2種類の次元縮約モデルと分岐解析に基づき、特殊な不安定解が分化比率調節において重要な役割を担っていることを示した。

角 谷 大 朗（土居教授）「大域的な細胞間相互作用が心臓洞房結節細胞のペースメーカー周期に及ぼす影響に関する研究」

心臓洞房結節に存在する細胞集団によって心拍周期が調節されている。洞房結節細胞は、細胞間の直接結合だけでなく、細胞外環境を通して大域的に相互作用していると考え、数理モデルを用いて、ペー

スレーカ細胞集団が行うリズム調節機構を詳細に解析した。

西 藤 俊 暁（土居教授）「総遅れ時間と積み替え回数の最小化を目的とした動的ブロック積み替え問題に対する厳密解法および近似解法の検討」

ブロックの積み込み・取り出しが時系列で発生する状況下で作業計画を最適に策定する動的ブロック積み替え問題において、ブロックの積み込み・取り出しの遅れ時間の総和を第1目的関数、積み替え回数を第2目的関数として、厳密解法および近似解法を構成した。

佐 塚 研 太（土居教授）「順序依存段取り時間を考慮した単一機械納期ずれ和最小化問題に対する分枝価格法」

1台の機械で与えられた仕事を処理する際、処理順序に依存して段取り時間が発生するものとして、納期からのずれの総和を最小化するスケジュールを求める問題を対象とした。本問題に分枝価格法による厳密解法を構成し、計算機実験により有効性を検証した。

宮 口 祐 誠（土居教授）「膵臓 β 細胞集団モデルの遅速分解および分岐解析に基づく大域的結合がバースト同期に及ぼす影響に関する研究」

膵臓膵島の β 細胞集団は、各細胞が呈するバースト振動を同期させることでインスリン分泌を調節し、血糖値制御を行っている。遅速分解や分岐解析などの非線形解析手法を駆使することで、集団のバースト振動が同期する過程に大域的相互作用が及ぼす影響を明らかにした。

江 成 涼（吉井教授）「神経伝達物質検出に向けた低磁場磁気共鳴分光法の提案」

低コスト・低消費電力な低磁場環境下での磁気共鳴分光法の実現を目指し、Bloch方程式による磁化の挙動の数値計算や超高感度な光ポンピング磁気センサの導入に向けた理論的検討、0.3T MRI装置を用いた低磁場試験を行い、本手法の実現可能性を模索した。

山 下 寛 人（吉井教授）「光ポンピング磁気センサを用いた自発運動時における脳・筋磁界の同時計測・解析」

ブレインマシンインターフェースや機能性義肢の入力として、センサの着脱が容易かつ信号源推定精度の高い生体磁気信号の活用を提案した。頭部および腕部に装着した光ポンピング磁気センサにより取得した脳磁界と筋磁界から、運動の種類と強度が判別可能であることを明らかにした。

小 山 湧 也（雨宮教授）「銅複合薄膜高温超伝導体で構成された二層スパイラル導体の層間分流通定方法」

スパイラル導体においては層間の電流分布がその性能を議論する上で重要であるが、これを明確に測定する方法は確立されていなかった。本論文では、導体中心での磁界測定によって層間の電流分布を測定する方法について、二層スパイラル導体を対象として調査した。

本 多 尚（雨宮教授）「交流磁界・直流通電条件下でのスパイラル銅複合多芯薄膜高温超伝導体の数値電磁界解析」

交流磁界・直流通電条件下では動的損失と呼ばれる特有の損失が発生するが、スパイラル銅複合多芯薄膜高温超伝導体ではこの動的損失が低減されることが実験的に示されていた。その低減の原理や低減される条件などについて、数値電磁界解析によって評価した。

林 遼 一 (雨宮教授)「スパイラル導体で巻いたコイルを対象とする数値電磁界解析のためのモデル化手法の検討」

スパイラル導体の三次元かつマルチスケールな構造により、この導体で巻かれたコイルの詳細な数値電磁界解析は非現実的であり、適切なモデル化手法が必要とされていた。本論文では、導体の曲がった形状や導体が隣接する影響の簡略化手法に着目してその妥当性を検討した。

菊 田 康 次 (久門准教授)「PLL を用いた自己回復型ヒステリシス制御によるオンチップ SC DC-DC コンバータ」

集積回路の低消費電力化に DC-DC コンバータをチップ内に集積化することは重要である。本論文では、コンバータ内に PLL を用いて高速な多層スイッチング信号の生成を可能にし、自己回復型ヒステリシス制御により広い負荷電流に対して低リップルで高い変換効率を実現した。提案手法を商用 65nm プロセスにて確認した。

鈴 木 歩 夢 (久門准教授)「物理境界条件として回路のポートを導入した複素グラフニューラルネットワーク」

物理的なダイナミクスをもつネットワークに対してグラフニューラルネットワークを用いるために、回路のポートの概念に基づいてグラフに境界を導入した。この境界付きグラフニューラルネットワークの有効性を、ネットワーク上の事故点をみつける問題により確認した。

荒 谷 陸 斗 (松尾教授)「動的集合磁区モデルを用いた磁性材料の高周波磁化特性表現に関する基礎的研究」

鉄芯材料の MHz 領域における動的磁気特性を表現するため、磁区モデルを動的に拡張した。単独の磁区モデルおよび集合磁区モデルに適用し、共振特性を含む動的磁気特性を再現した。また、6 磁区モデルに磁区間の非対称性を解消する手法を開発した。

實 松 大 介 (松尾教授)「辺要素電磁界解析のための補助空間分割前処理を用いた代数マルチグリッド法に関する研究」

電気電子機器の数値解析で広く使用される辺要素有限要素解析を高効率化するため、辺要素解析で現れる特殊な連立一次方程式の高速求解を可能にする代数マルチグリッド法の開発に取り組んだ。変圧器等を模したテストモデルにおいて、反復求解の高速化を実現した。

寺 西 直 希 (松尾教授)「誘導モータのモデル縮約における空隙部空間高調波成分の選択と非線形解析への応用」

固定子と回転子に領域分割して誘導モータの縮約モデルを構成する方法において、両者を接続するために主要な空隙部空間高調波を選択する方法を開発した。事前に時間調和有限要素磁界解析を行うことにより、非線形性を考慮する場合にも効率的な縮約モデルを構成した。

山 本 哲 也 (松尾教授)「製造制約を考慮した IPM モータのトポロジー・パラメータ同時最適化に関する研究」

IPM モータのトポロジー・パラメータ同時最適化において、機械的応力を考慮するための工学的製造制約と幾何学的パラメータの実現可能範囲を考慮するための幾何学的製造制約を取り入れる方法を開発した。幾何学的製造制約について、事前にパラメータ範囲の最適化を行うことにより、可動範囲を効率

的に決定する方法を開発した。

言 美 龍二郎（中村（武）特定教授）「ネオジウム系積層磁石を用いた車載用ハルバッハ永久磁石モータの高性能化に関する研究」

ネオジウム磁石の積層化を実現するため、絶縁層厚の最適化設計を可能にする評価式の解析的導出に成功した。また、ハルバッハ配置永久磁石モータの回転特性を3次元電磁界解析によって明らかにし、ネオジウム磁石を積層化することで機械出力や効率が改善することを実証した。

山 本 真 嘉（中村（武）特定教授）「Self-Assembling Design Method and Characteristic Analysis of a 20 MW Class High-Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor for Aircraft that Simultaneously Achieves High Power Density and High Efficiency」（高出力密度化と高効率化を同時に実現する航空機用 20MW 級高温超伝導誘導同期モータの自己組織化設計と特性解析）

航空機用 20 MW 級高温超伝導誘導同期モータを対象とし、固定子巻線の自己組織化設計を実施すると共に、高温超伝導回転子と組み合わせた2次元電磁界解析を行った。鉄心の応力を許容値未満に制約した上で、出力密度 30 kW/kg および最高効率 97% を実現した。

工学研究科 電子工学専攻

堀 良 輔（米澤教授）「真空トランジスタを用いた耐放射線二段増幅・発振回路の開発」

真空トランジスタを用いた二段増幅回路を設計・作製してその特性を調べるとともに、ウィーンブリッジ発振回路を構成して発振を確認した。真空トランジスタのモデル化と回路シミュレータによる解析を行うとともに、高エネルギー X 線照射下における特性の変化を実験的に検証した。

宮 本 将 志（米澤教授）「ジョセフソンプラズマエミッタの放射テラヘルツ波周波数変調」

高温超伝導体からのテラヘルツ放射について、バイアス電圧に 0.1-4.5 GHz の交流を重ねることによって、周波数変調スペクトルを観測し、スペクトルに見られる重畳信号周波数依存性から接合間同期ダイナミクスを考察した。テラヘルツデジタル通信技術の萌芽をもたらす。

河 端 真 也（白石教授）「トポロジカル超伝導候補物質 FeTeSe 表面に期待されるスピン三重項状態の探索」

トポロジカル超伝導候補物質である FeTeSe に強磁性体を接合し、転移前後での磁気共鳴を比較することで、超伝導状態の FeTeSe 表面に期待されるクーバー対のスピン三重項状態について評価した。

菰 池 真 実（白石教授）「スピンプンピング法を用いた螺旋型カイラル超分子ポリマーにおけるカイラリティ誘起スピン偏極効果の研究」

カイラル分子で期待されるカイラリティ誘起スピン偏極効果について、スピンプンピング法を用いることでカイラル分子中にスピン流を生成し、その時観測される起電力とカイラリティやスピン方向との対応を評価した。

迫 藤 緒（白石教授）「水素終端ダイヤモンド表面 2 次元正孔ガスにおける電流誘起スピン偏極物性の研究」

絶縁体であるダイヤモンド表面を水素終端することで、表面に 2 次元正孔ガスが形成される。表面での強い局在により誘起されるスピン軌道相互作用について、強磁性体を用いたトルク測定や非相反伝導特性から評価した。

立 岡 克 啓（白石教授）「CuBi 合金及び Bi 単結晶におけるスピン軌道トルク測定による電荷 - スピン変換物性に関する研究」

強いスピン軌道相互作用を有する Bi を用いることで、スピン軌道相互作用を由来とする電荷 - スピン変換物性を研究した。CuBi 合金ではスピン再吸収効果を考慮したモデル構築により、その変換物性の起源について明らかにした。

玉 井 優（白石教授）「トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ における非線形プレナーホール効果に関する研究」

トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ に期待される波数空間における表面スピン構造を反映した非線形プレナーホール効果について研究した。

山 下 悟 史（白石教授）「新規二次元物質 MXene における電気伝導物性及び強磁性に関する研究」

組成式 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1, 2, 3$) で表される層状二次元物質である MXene は、M（遷移金属）、X（C or N）、T（終端基）の組み合わせや層数により伝導特性や磁性で多様な物性を示す。本研究では MXene である $Ti_3C_2T_x$ の層数による伝導特性の変化や、 Cr_2NT_x の磁気伝導特性について研究した。

山 本 真 央（白石教授）「二次元キャリア系におけるラシュバ型スピン分裂に起因した円偏光ガルバの効果の観測」

二次元キャリア系に形成される、波数方向にスピン縮退の破れたラシュバ型スピン分裂は、キャリアのスピン方向と波数方向が対応する。円偏光を用いたスピンの選択励起による光電流を観測することにより、二次元キャリアのスピン構造を評価した。

岡 城 勇 大（竹内教授）「アンチストークス励起による選択的励起の単一光子源への応用」

本研究では、h-BN の欠陥中心を対象に、フォノン吸収を伴うアンチストークス励起を行い、単一光子源としての動作特性を評価した。発光波長帯より高エネルギーの光子を用いる通常の光励起に比べ、アンチストークス励起条件では特定の発光中心の選択的な励起が可能であり、2 次の自己相関関数が $g^2(0) = 0.08 \pm 0.05$ という、高純度での単一光子発生の確認に成功した。

岡 本 悠太郎（竹内教授）「正則グラフ上のフーリエコインを用いた量子ウォークの周期性の研究」

本研究では、フーリエコインを用いた量子ウォークの周期性について理論的な研究を行った。具体的には、量子ウォークのグラフ構造について、これまで明らかになっていなかった、自己ループを持つ完全グラフ、完全グラフを一般化した強正則グラフ、さらに超立方体を一般化したハミンググラフについてその周期性を明らかにした。

岸 田 駿 人（竹内教授）「リッジ導波路型擬似位相整合素子を用いた非線形量子干渉計に関する研究」

本研究では、赤外域における光量子センシング技術の高度化に向け、高効率な可視 - 赤外光子対源と

してリッジ導波路型擬似位相整合素子を用いた非線形量子干渉計の構築並びに評価を行った。その結果、バルク型非線形光学素子に比べ 500 倍以上という高効率で生成された光子対を用い、シリコン光検出器を用いて赤外波長 1.5 μm 相当の量子干渉信号の測定に測定した。

斎 藤 凌 矢 (竹内教授)「周波数もつれ光子対の空間光変調器を用いた時間相関幅制御に関する研究」

本研究では、空間光変調器を用いて周波数もつれ光子対の分散を制御し、その時間相関幅を制御した。まず、進化戦略アルゴリズムを用いた分散制御を考案・実証した。時間相関ピークを最大化することで、時間相関幅を圧縮できることを確認した。さらに、もつれ光子対の分散制御について詳しく解析し、より分散制御に適した手法を考案した。

谷 口 雄 哉 (竹内教授)「セレン化ガリウム結晶を用いた可視 - 遠赤外もつれ光子対源の開発と量子赤外分光への応用」

本研究では、長波遠赤外域での量子赤外分光の実現を目指し、可視 - 遠赤外もつれ光子対源の開発を行った。セレン化ガリウム結晶における自発的下方変換過程により発生した可視光スペクトルの入射角依存性を調べることで、9-20 μm での赤外光子発生に相当する、可視光子発生を確認した。また、開発したもつれ光源を用いて非線形量子干渉計を構築し、その安定性を評価した。

宮 田 龍 一 (竹内教授)「2 光子吸収を用いたスーパーバンチングの観測に関する研究」

本研究では、パラメトリック下方変換光を 2 光子励起顕微鏡に応用することを目的とし、蛍光色素中の 2 光子吸収を利用したスーパーバンチングの観測を試みた。分散の影響を抑制するなど実験的な工夫により、ローダミン B 溶液の 2 光子吸収を用いた自己相関測定によって、 $g^2(0) = 2.7$ となるスーパーバンチングの観測に成功した。

桑 原 功太郎 (木本教授)「低温熱処理による p 型 SiC 上の低抵抗オーム性電極の形成」

SiC は広い禁制帯幅を有するため、p 型 SiC と金属の界面に大きなポテンシャル障壁が形成され、その結果、良好なオーム性電極を形成することが極めて困難である。本研究では、仕事関数が大きく熱的にも安定な金属を用い、かつ Al イオン注入により SiC を極限的に高濃度 p 型ドーピングすることによって、従来より 400 $^{\circ}\text{C}$ 低い温度での熱処理により最良の接触抵抗率を示すオーム性電極を形成することに成功した。

小酒井 翔 太 (木本教授)「SiC 超接合素子を目指した Al イオンのチャネリング注入に関する研究」

SiC パワーデバイスのさらなる高性能化に向けて、耐圧維持層を低濃度 n 型層ではなく縦長形状の n 型 / p 型ピラーで構成される超接合構造を導入することが有効である。本研究では、Al イオンを SiC<0001> 軸方向にチャネリングする条件で注入することにより、従来技術より約 3 倍の深さまで p 型領域を形成することに成功した。また注入された Al の拡散や電気的活性化率、欠陥分布等を体系的に明らかにした。

高 安 愛 登 (木本教授)「硫黄・窒素コドーピング n 型 SiC 層の物性評価と相補型 JFET への応用」

SiC の接合型電界効果トランジスタ (JFET) はゲート酸化膜の信頼性の問題がなく、本質的に SiC 半導体の高温耐性を発揮できる素子として期待されている。本研究では、従来の窒素ドーピング n 型チャネルではなく、イオン化エネルギーの大きい硫黄と窒素を同時にドーピングしたチャネルを活用することにより、SiC JFET の高温特性の改善を試みた。実験および数値計算により硫黄添加の有効性を初めて

示した。

利 光 汐 音 (木本教授)「SiC フィン FET における電子状態とキャリア散乱機構の自己無撞着計算による解析」

SiC パワー MOSFET の実用化が進められているが、依然として MOS 界面には高密度の欠陥が存在し、反転層内電子の移動度が極めて低い。本研究では、幅 30 ~ 200 nm の微小フィン形チャネルの活用を提案し、フィン形 MOSFET におけるポテンシャル分布、波動関数、電子散乱を厳密に計算し、従来構造の MOSFET に比べて 3 倍以上の高い移動度を得ることができることを示すと共に、その原因を物理的に考察した。

有 長 一 輝 (小林准教授)「ケルビンプローブフォース顕微鏡を用いた有機薄膜トランジスタの時間分解電位測定」

ポンププローブ法を用いた高時間分解能ケルビンプローブフォース顕微鏡を実装し、有機薄膜トランジスタに注入した電荷の輸送ダイナミクスを計測した。その結果、注入された電荷が空間電荷となりキャリアの注入を制限していることを明らかにした。

和 田 隆 佑 (小林准教授)「液中原子間力顕微鏡における探針修飾条件の最適化および生体分子間相互作用評価」

液中原子間力顕微鏡を用いてストレプトアビジンとビオチン間の特異的相互作用評価を行った。探針をビオチン修飾する条件を最適化し、高分解能で結合サイトを可視化することに成功した。また、実験結果から結合寿命や結合定数などの特異結合に関するパラメータを導出した。

和 泉 篤 尚 (川上教授)「単分子層 GaN/AlGaIn 量子井戸を用いた高効率 far-UVC LED の設計と試作」

単分子層 GaN 量子井戸を発光層とした深紫外 LED について、まずシミュレーションによって高い発光効率が期待される構造を検討・設計した。次に設計に従って MOVPE 法によって LED を試作し、障壁層を AlGaIn あるいは AlN としたときに、それぞれ、波長 243 nm、229 nm での電流注入発光に成功した。

竹 村 幸 大 (川上教授)「高効率赤色 LED に向けた AlN 界面層によるへき開 ScAlMgO₄ 基板上 InGaIn の極性制御」

ScAlMgO₄ 基板上の格子整合 In_{0.17}Ga_{0.83}N は可視長波長 LED 用のテンプレートとして有望であるが、直接の結晶成長が難しい。ここでは、ScAlMgO₄ 基板のへき開性を利用して原子レベルで平坦な (0001) 面を形成し、そこに InGaIn を結晶成長した。結晶性、表面平坦性が改善し、赤色 LED の試作に成功した。

福 重 翔 吾 (川上教授)「高効率白色 LED の作製に向けた半極性面上 InGaIn 系マイクロレンズ構造における発光波長制御」

三次元マイクロレンズ構造を利用した InGaIn 系白色 LED の高効率化には、半極性面の利用が有望であるが、発光波長域が可視短波長に限られていた。そこで、結晶成長温度や成長速度が結晶成長機構に与える影響を実験的に検討し、発光波長域を 450~560 nm 程度に長波長化することに成功した。

小 林 宇 翔（野田教授）「10 mmΦフォトニック結晶レーザーの温度分布制御による発振状態最適化の研究」

発振領域 10 mm の大面積フォトニック結晶レーザーにおいて、冷却水の調整により温度分布を操作して発振状態の制御が可能であることを解析的に示した。またビーム形状が乱れた際にも、進化戦略的な最適化手法を活用してビーム形状の補正を行い、大面積デバイスにおいて高出力・高ビーム品質動作が実現できる可能性を示した。

永 江 隆 太（野田教授）「フォトニック結晶ナノ共振器の動的制御による非相反的光機能実現に向けた検討」

フォトニック結晶光ナノ共振器の正弦変調を利用した、微小光回路に集積可能な光アイソレータを提案した。その低損失・広帯域動作のため、制御時の光損失を抑制しつつ共振器間結合を増大するための構造設計とプロセス改善をおこない、帯域約 1GHz の動作に必要な結合強度を実験的に実証した。

田 中 聡 記（野田教授）「厳密結合波理論を用いた 1mmΦ二重格子変調フォトニック結晶レーザーの設計と作製」

二重格子変調フォトニック結晶レーザーの放射・面内結合特性を正確に議論するため、厳密結合波理論を用いた解析結果から結合波行列を導出し、時間依存 3 次元結合波理論へ適用する手法を構築した。この手法を用いて、1mmΦデバイスを設計し、さらに設計したデバイスを作製・評価して狭発散角動作を実現した。

仲 野 秀 栄（野田教授）「フォトニック結晶レーザーへの分割領域導入による周波数変調動作の検討」

衛星間光通信への応用を見据えて、高速周波数変調動作を実現するための新たな光源構造として、分割領域フォトニック結晶レーザーを提案した。そして本構造を用いることで、W 級の平均出力を得ながら、変調周波数 1 GHz において、光強度変化を抑制しつつ、大きな周波数変調動作を実現できることを示した。

中 井 武 尊（杉山准教授）「動的カイラルミラーの実証とカイラルミラーの解析的な設計方法の開発」

特性可変な平面カイラル構造と金属鏡を組み合わせることで円偏光特性を制御可能な動的カイラルミラーが実現可能であることを示した。加えて、カイラルミラーを実現する面アドミッタンスに関して理論的な解析を行ない、理想的なカイラルミラーの解析的な設計方法を提案した。

光・電子理工学教育研究センター

前 田 健太郎（メーナカ教授）「キャリア・光・熱の相互作用を考慮した kW 級単一モードフォトニック結晶レーザーの設計」

直径 10mm のフォトニック結晶レーザーの発振特性解析と連続波（CW）動作時の温度上昇の影響を打ち消す温度補償構造の設計を行い、直径 10mm のフォトニック結晶レーザーの CW 動作においても、単一モード動作が可能なデバイス設計を見出した。さらに、複数接合活性層の導入、電極構造の改善など、デバイス構造の最適化により、光出力約 0.6kW（輝度約 $20\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）の高輝度 CW 動作を実現可能なデバイス構造を見出した。

小 川 健 志（メーナカ教授）「GaN 系フォトリック結晶レーザーを用いた水中 3 次元 ToF-LiDAR の高度化に関する研究」

水中での光吸収が少ない青色帯域において動作する GaN 系フォトリック結晶レーザーをパルス駆動し、レンズを用いずに直接照射しながら MEMS ミラーで 2 次元走査を行い、水中に設置した物体からの反射光を高感度な単一光子アバランシェダイオードで受光することで、Time-of-Flight (ToF) 方式による 3 次元 LiDAR システムの構築を行った。その結果、本システムにより、水中 10m 先に設置した物体の 3 次元計測に成功した。

情報学研究科 知能情報学専攻

松 田 思 鵬（村脇准教授）「Synthesizing Training Data for Semantic Frame Analysis Using Large Language Models」(大規模言語モデルを用いた意味フレーム解析のための訓練データ合成)

本研究では、意味フレーム解析という複雑な情報抽出タスクのための訓練データを大規模言語モデルを用いて安価に合成する手法を提案した。さまざまな実験設定のもとで検証を行い、多様な用途において合成訓練データの有効性を確認した。

Saxena Prakhar（村脇准教授）「Targeted Representation Engineering for Mental Disorder Simulation with Large Language Models」(大規模言語モデルを用いた精神障害シミュレーションのための標的型表現エンジニアリング)

本研究では、大規模言語モデルを用いた精神障害シミュレーションの実現を目指し、モデル内部の特定層から精神状態に関連する抽象概念を検出し、局所的に操作する新たな手法を提案した。実験の結果、うつ病や不安障害といった精神障害の表現における一貫性が著しく向上することが確認された。

孫 一 坤（Chu 特定准教授）「Developing High-quality Instruction Data and Evaluation Frameworks for Japanese Large Language Models with Minimal Human Effort」(日本語大規模言語モデルのための最小限の人的労力による高品質な指示データと評価フレームワークの開発)

本研究では、日本語大規模言語モデルのための指示データと評価フレームワークの開発を最低限の人的労力によって実現する手法を提案した。具体的には、少量の高品質な日本語シードデータを用意し、GPT-4 に指示データと評価器の訓練データを自動で生成させた。

八 幡 早紀子（村脇准教授）「大規模言語モデルを用いた症例報告の構造的要約」

本研究では、構造的要約の自動生成タスクに大規模言語モデルのテキスト生成による手法を適用した。また、構造的要約の品質の評価のため、医師による人手評価手法と正の相関を持つ自動評価手法を設計した。提案手法によって、自動生成された要約の品質の向上が確認された。

佐々木 翔 大（西野教授）「PBDyG：動きに依存した変形を伴う衣服を着用した人の三次元復元」

本研究では、変形の激しい衣服を着用した人間のアバターを、多視点動画から復元する手法を提案した。関節を基準とした姿勢の変更だけでなく、物理シミュレーションに基づいた「動き依存」の衣服の変形をモデル化し、衣服の復元、駆動を再現できることを示した。

樋上 彩加（西野教授）「RatBodyFormer：ラットの特徴点からの体表面推定」

本研究では、検出可能な特徴点から視覚的特徴に乏しいラット体表面を三次元で推定する手法を提案した。多視点撮影ドームと一時的マーカーによるデータセットを構築し、深層学習と 3D Gaussian Splatting により写実的かつ駆動可能な体表面を復元した。

松原 有登（西野教授）「HeatFormer：深層最適化による多視点からの人体メッシュ復元」

本研究では、多視点画像を補完的に活用し、視点構成に依存せず遮蔽に頑健な人体形状と姿勢の推定手法を提案した。ヒートマップ整合過程を Transformer 構造で学習・利用する深層最適化により、提案手法の高い精度と汎化性能を実証した。

情報学研究科 通信情報システム専攻**Lim Jaeseok（原田教授）「FSK Wireless Communication Platform for Large-coverage and Highly Mobile IoT System in VHF band」**
(広域・高速移動 IoT システムのための VHF 帯 FSK 無線通信プラットフォーム)

次世代広域・高速移動 IoT システムのための VHF (Very High Frequency) 帯の新しい SUN FSK (Smart Utility Network Frequency Shift Keying) を提案し、信号発生器を用いた送信系とソフトウェア無線機を用いた受信系で構成される無線通信プラットフォームを開発した。計算機シミュレーション及び有線接続実験により、提案 SUN FSK が 10 km 以上の伝送距離と数十 km/h 以上の高速移動環境においても IEEE 802.15.4 で要求される伝送成功率を満たすことを示した。さらに、屋外基礎伝送実験においても提案 SUN FSK が 24 km 以上の伝送距離での移動通信を達成することを示した。

佐々木 祐斗（原田教授）「仮想実空間連携電波センシングシステムのための高精度 5G 信号検出手法」

周波数共用型 5G システムの実現に向けた、二次利用者である 5G 信号を高精度に検出可能な手法を提案し、計算機シミュレーション評価により有効性を示した。さらに、ソフトウェア無線機を用いた電波センサの開発及び実機実証と、5G 電波エミュレータを用いた仮想電波センサの開発を行い、それらの実装妥当性を示した。

休場 裕生（原田教授）「分散受信基地局による移動通信システムの通信容量拡大法」

周波数利用効率の向上を目的に、基地局の受信部を分散配置する分散受信基地局を活用した移動通信システムを提案した。送受信分離による帯域内全二重通信システムをマルチセル環境に拡張し、セル間干渉を考慮したシステム構成を導入した。さらに、分散配置された基地局を協調動作させるセルフフリーネットワークにおいて、マルチユーザ干渉を考慮した基地局クラスタリング手法を提案し、計算機シミュレーションで有効性を示した。

武田 和樹（原田教授）「仮想実空間連携電波エミュレーションのためのソフトウェア無線通信プラットフォーム」

第 6 世代移動通信システムにおける無線技術の効率的な研究開発評価を実現するため、大規模計算機システム上にソフトウェア無線通信プラットフォームを実装し、仮想及び実空間で動作する電波エミュレータを開発した。高周波数利用効率を実現する方式として波形整形 OFDM 方式及びダイナミック全二重セルラシステムを導入した実証評価例を行いその有効性を示した。

大 倉 諒 吾 (原田教授) 「5G サイドリンク通信を用いたミリ波無線マルチホップネットワークにおける高能率端末間同期方式」

高速なファイル共有などを実現するミリ波無線マルチホップネットワークのための、新たな端末間同期方を提案した。提案同期方式では、同期信号を中継するタイミングをランダムに選択することで、既存の5G サイドリンク同期方式の課題である恒久的な信号の衝突を回避できるようにした。計算機シミュレーションによる評価を行い、既存同期方式よりも同期信号の受信成功率が高くなることを確認した。

橋 本 深 広 (原田教授) 「Analysis and Modeling of Propagation Characteristics for Ultra-Wideband Wireless Distributed Networks in Millimeter-Wave and Sub-Terahertz Bands」 (ミリ波・サブテラヘルツ波帯超高速無線分散ネットワーク実現に向けた伝搬特性解析およびモデリング)

高速大容量無線通信システムの実現に向け、60 GHz 帯のミリ波と 105 GHz 帯のサブテラヘルツ波における伝搬測定及び伝搬特性の評価を行った。測定結果を元に、チャネル特性を計算機上で再生成するミリ波・サブテラヘルツ波チャネルシミュレータを実現するための伝搬チャネルモデルを開発し、その有効性を示した。

遠 藤 浩 明 (原田教授) 「Time-synchronized measurement method of power angle delay profile for millimeter wave integrated sensing and communication」 (ミリ波帯における通信とセンシングの融合に向け た電力角度遅延プロファイルの時刻同期計測手法)

ミリ波無線通信の電波を利用して物理空間における物体の精緻なセンシングを行う通信とセンシングの融合システムに向け、一般に通信において使用できない時刻同期のための高度なハードウェアを用いることなく、電波の到来特性を示す電力角度遅延プロファイルの測定手法を提案した。得られたプロファイルより電波の到来時間、および物体までの距離の把握が可能であるという点で、センシングへの応用可能性を示した。

今 中 翔 哉 (大木教授) 「Distributed Server Allocation for Delay-Sensitive Internet-of-Things Monitoring Services」 (遅延センシティブ IoT 監視サービス向け分散サーバ割り当て)

IoT (Internet of Things) 監視サービスでは、低遅延性と故障耐性に関して高い 性能が要求される。本論文では、遅延センシティブな IoT 監視サービスにおける分散サーバ割り当てモデルを提案した。

采 山 怜 央 (大木教授) 「Scheduling Models for Updating Virtual Network with Consistency」 (一貫性を考慮した仮想ネットワークの更新スケジューリングモデル)

ネットワーク上を流れるトラフィックの経路は、メンテナンスや負荷分散などの理由で更新が必要になる場合がある。本論文では、仮想ネットワーク環境において一貫性を考慮した更新スケジューリングを決定するモデルを提案した。

菊 地 泰 斗 (大木教授) 「Congestion-Aware Routing in Communication Networks」 (通信ネットワークにおける輻輳を考慮したルーティング)

ネットワーク輻輳を緩和するための適切なトラフィックエンジニアリングの実現が不可欠である。本論文では、輻輳を考慮したルーティング手法を提案した。

山 田 航 平 (大木教授) 「Lightpath Provisioning Model in Ultra-Dense Wavelength-Division-Multiplexing Networks」(超高密度波長分割多重ネットワークにおける光パス設定モデル)

光ネットワークでは波長分割多重信号の高密度化に伴い、スペクトル狭窄による信号劣化が課題となる。本論文では、この劣化を考慮した光パス設定モデルを提案した。

和久田 直 秀 (大木教授) 「Unavailability Analysis in Middleboxes with Multiple Backup Servers under Shared Protection」(複数の予備サーバによる共有保護を用いたミドルボックスの不稼働率解析)

仮想化されたミドルボックスでは、故障に備えた複数予備サーバによる高可用性構成が求められる。本論文では、共有保護構成下における不稼働率を、マルコフ連鎖を用いて解析する数理モデルを提案した。

磯 山 雄 希 (栗野准教授) 「注視領域の時間局所性に着目した計算スキップによるロボット模倣学習向けニューラルネットワークの低消費電力化」

労働力不足から非定型作業の自動化が求められるが、模倣学習用 AI は計算コストが高い。本研究は、注視領域の限定と重み量子化により、タスク成功率を維持しつつ計算量を 97.4% 削減。低消費電力な AI 推論を EdgeTPU 上で実現し、ロボットへの搭載を容易にした。

浦 部 大 暉 (佐藤教授) 「横断配線による有機薄膜トランジスタ回路の省面積化とその位相同期回路設計への応用」

有機薄膜トランジスタは、センサやタグ等の幅広い応用が期待されている一方で、性能や集積度の向上に向け、さらなる設計最適化の余地がある。本研究では、性能保証のため従来回避されていたアクティブデバイス領域上の配線横断の影響を定量的に評価し、その影響が限定的であること、および位相同期回路を例として、横断配線の導入により回路性能を維持しつつ回路面積を 14.6% 削減できることを示した。

小 池 健 文 (佐藤教授) 「DNA ストレージのための遺伝子解析技術による類似画像検索」

指数関数的に増大するデータ量への対応策として、遺伝子解析技術を応用する DNA ストレージが次世代のアーカイブストレージとして注目されている。本研究では、DNA ハイブリダイゼーション反応を用いる類似画像検索のための塩基配列エンコードの学習に triplet-network を導入し高速化する手法と、ナノポアシーケンサの適応的サンプリング技術を応用するデータ取得の効率化方法を提案した。

原 拓 己 (栗野准教授) 「遠隔操作ロボット向け触覚共有制御の組み込み機器実装を指向した近似計算の導入が操作者の認知負荷へ与える影響の調査」

労働力不足に対応する遠隔操作ロボットの触覚共有制御では、操作補助 AI のロボット側への実装が課題である。本研究はこの AI に量子化や解像度低減等の近似計算を導入し、操作者の認知負荷への影響を調査。結果、認知負荷の増加を抑えつつ計算量を削減できることを示した。

村 瀬 秀 太 (佐藤教授) 「スパースガウス過程を用いた MOSFET 電流特性の広温度範囲対応単一モデル」

世界の至る所で活用されている様々な集積回路の製造プロセスはまた多様である。その設計を支える

デバイスモデルは、多様な製造プロセスを反映して複雑化し多くのパラメータを用いるようになっていく。本研究では、スパースガウス過程を用いて 3K から 300K までの広い温度範囲の特性を柔軟に表現するデバイスモデルを提案し、また、Verilog-A 言語による実装を通じて回路シミュレーションを可能とした。

Hou Yunqi (栗野准教授)「Enhancing FPGA-Friendly Quantized Anchor-Free Grasp Detection with Skew IOU Loss for Robotic Applications」(FPGA 実装に適した離散化ロボティック物体把持検出器の Skew IoU 損失を利用した高精度学習)

ロボットによる物体把持には効率的な AI 推論が不可欠である。本研究は物体検出用全畳み込み AI を量子化。量子化認識学習等を活用し、モデルサイズと推論時間を大幅に削減した。未知物体の把持成功率も維持し、低ビット幅演算の有効性を示した。

Xuanyi Lin (栗野准教授)「Attention-guided Knowledge Distillation For Compressing Multi-task Transformer in Language-conditioned 3D Robotic Manipulation」(言語条件付き 3D ロボット操作におけるマルチタスクトランスフォーマーのモデルサイズ削減のための注意誘導型知識蒸留法)

言語で指示するロボット操作は有望であるが、Transformer モデルの計算コストが課題である。本研究は、アテンション誘導型の知識蒸留により、モデルを 1/7 に小型化しつつ教師モデルの性能の 82.5% を維持した。既存手法より小型で同等以上の成功率を達成した。

吉 田 正 和 (橋本教授)「GPU 上の高信頼 TFHE 計算に向けたソフトエラー率評価と無兆候データ破損検出手法」

完全準同型暗号はプライバシー保護に有用であるが、無兆候データ破損の発生が危惧される。本論文では完全準同型暗号計算を実行している GPU に陽子を照射して宇宙線起因のエラーレートを見積もるとともに、無兆候データ破損を検出する手法を提案し有効性を確認した。

河 野 智奈武 (橋本教授)「重みの感度と表現自由度を利用して高い推論精度を実現するメモリスタクロスバーアレイ高速書き込み手法」

メモリスタクロスバーを用いた高エネルギー効率 AI 計算に期待が集まるが、メモリスタ抵抗値の書き込みが難しい問題が深刻である。本研究は、ばらつきに強く高速かつ高精度な書き込み手法を提案し、従来比で精度 2.89% 向上、書き込み 22.8 倍高速化を実現した。

高 見 一 総 (橋本教授)「中性子間、陽子間、中性子・陽子間で換算可能な 1 回の照射実験とシミュレーションを組み合わせた SRAM ソフトエラー評価手法」

ソフトエラーは集積回路中で発生する宇宙線起因の一時的故障であり、発生率の事前評価が重要である。本研究は中性子・陽子間でソフトエラー率を換算可能な見積もり手法を提案し、1 回の実験とシミュレーションで高精度評価が可能であることを実験的に示した。

福ヶ迫 遼 太 (橋本教授)「無線給電用磁界を利用した小体積で長距離通信可能なバックスキッタ通信回路」

鉄筋コンクリート内部から劣化を診断する無線センサでは電源容量が限られるため、無線通信の省電力化が必要となる。本研究ではセンサへの無線給電用磁界に干渉することで情報を伝達する回路方式を

提案し、通信1ビット当たりの消費エネルギーを従来比で90%削減した。

稲 森 康 太（橋本教授）「水中3Dディスプレイに向けた水槽寄生LC共振を利用した小体積発光画素への無線給電」

体積型3Dディスプレイの高解像度化には、無線給電可能な極小発光素子の実現が必要となる。本研究では水中の極小発光素子に対して、水槽に寄生するLC成分の共振を用いて給電する方式を提案し、発光素子体積を従来の15mm角から0.9mm角へ小型化した。

情報学研究科 システム科学専攻

古 川 寛 樹（石井教授）「環境適応能の高い事前分布を付与した混合モデルのベイジアンフィルタリング」

本研究では、複数の生成モデルを組み合わせた混合分布モデルを用いたベイジアンフィルタリングにおいて、使用頻度の低いモデルの学習率を調整する新たな事前分布を導入した。これにより新しいシーケンスへの迅速な適応を可能とし、柔軟な環境適応能を持つAIの実現に寄与することを示した。

坂 本 滉 也（石井教授）「Map-based Modular Approach to Zero-shot Embodied Question Answering」（基盤モデルと地図モジュールを用いたゼロショットロボット質問応答の実現）」

本研究は、未知環境でのロボットによるゼロショット質問応答を実現するため、地図生成モジュールと基盤モデルを組み合わせた手法を提案した。仮想環境および実世界の両方で、多様な自然言語の質問に対する高い頑健性と正答率を示した。

新 田 泰 弘（石井教授）「人間の脳活動データからの視覚的質問応答のデコーディング」

本研究では、fMRIで記録した人間の脳活動から視覚的質問応答（VQA）時の回答内容をデコードした。機械学習による解析で特定脳領域のデコード精度が高いことを示し、VQAモデル中間表現へのマッピング手法も検討した。

中 村 秀 行（石井教授）「強化学習に基づいた不安定な環境における二脚ロボットの姿勢制御」

近年進展する深層強化学習を用い、シーソー型不安定床上の二脚ロボットに対する静止姿勢のロバストな維持制御法を開発した。内部状態による切換制御も導入し、モデルフリー強化学習で高い安定性を実証した。

宮 田 樹（石井教授）「Identification of brain activity associated with skateboarding movements and its artifact removal pipeline construction」（スケートボード動作に関連した脳活動の同定とアーチファクト除去パイプライン構築）」

本研究は、運動中のEEGに混入するアーチファクト除去パイプラインを最適化し、スケートボードのキックターン動作に関連する脳領域を特定した。AMICA手法で脳信号成分の分類精度が向上し、運動準備と実行で異なる神経機構を明らかにした。

山 崎 友 大（石井教授）「画像選択の最適行動モデルに対する確信度の寄与」

自己経験と観察学習を統合した意思決定課題を設計し、強化学習・逆強化学習モデルで参加者の行動

を再現した。他者の確信度を取り入れることで意思決定を調整するメカニズムをモデルベースで明らかにした。

李 存 知（島崎准教授）「Enhancing Diffusion Models with Gaussianization Preprocessing」（ガウス化前処理による拡散モデルの強化）

本研究では、拡散モデルの初期分布と学習データ分布のギャップを縮めるため、独立成分分析とガウス化前処理を組み合わせた新手法を提案した。これにより再構成品質およびサンプリング効率が特に小規模ネットワークで向上し、多様な生成タスクへの展開が可能となることを示した。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

小 野 祐（下田教授）「電波源の方向検知を用いた隠背景カメラのキャリブレーション手法」

電波を用いて障害物越しに隠背景カメラの位置と撮影方向を求めるキャリブレーション手法を開発することを目的とした。3つの手法を提案・実装し、実際の環境で評価実験を行い、各手法のキャリブレーション精度を比較した。

二 神 繁 暁（下田教授）「振り子運動する RGB-D カメラを用いた 3 次元再構成手法の開発」

振り子の先端に RGB-D カメラを取り付けた振り子カメラを用いて環境を撮影し、各画像の撮影時刻と振り子の運動法則を利用することで、特徴の少ない領域を抜け落ちることなく 3 次元再構成できる手法を開発し、仮想環境と現実環境で手法を評価した。

山 田 涼 楓（下田教授）「動的に変化する実世界小空間への没入を目的とした高精細立体映像提示システムの開発」

実在する小空間内を対象に高精細な自由視点画像をリアルタイムに生成する手法を実現することで、ミニチュアのジオラマで形成された、配置や構成を直接手で触って変更可能な、動的に変化する実世界小空間への没入体験システムを開発した。

松 岡 史 温（下田教授）「立場に差のある合意形成実験タスクの設計と合意過程・結果の分析」

非対称性を考慮した合意形成タスクを設計し、テキストチャット実験により発言の好感度低下が信頼や納得に与える影響を調べた。発言に伴う好感度の低下が信頼を損ねる可能性があり、納得はリスクを受け入れるか否かが影響を与えることが示された。

佐 々 東 悟（下田教授）「筋力トレーニングによる環境配慮行動の促進手法に関する研究」

自己効力感の向上が環境配慮行動（PEB）に与える影響を検討するために、筋トレと環境教育を組み合わせた「筋トレタスク」を実施し、比較実験を行った。その結果、筋トレは自己効力感と PEB を向上させたが、両者の直接的な関連は確認されなかった。

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

大 城 春（中村（祐）教授）「トカマク放電の熱的安定性モデルによるディスラプションと電流減衰の解析」

トカマク方式の核融合装置では、運転を妨げるディスラプション現象が発生することがある。温度分

布の収縮はその一因となる場合があり、プラズマ電流の減衰にも影響を与える。本研究では熱的安定性モデルと輸送シミュレーションを用いた解析により、温度分布が収縮する物理的条件を明らかにした。

河村 有暉（中村（祐）教授）「反復法による二次元 / 三次元 MHD 平衡コード KUIQ の開発」

新たに MHD 平衡コード KUIQ を開発し、三次元版の KUIQ3D で得られた MHD 平衡計算結果を他のコードの結果と比較した。また、KUIQ3D による MHD 平衡計算の計算時間の短縮を目的として、計算時間を要する処理である磁力線追跡に関するアルゴリズムの改良を行い、その効果を検証した。

小林 央人（中村（祐）教授）「HINT コードによる完全自由境界三次元 MHD 平衡解析」

MHD 平衡計算コード HINT においてプラズマ電流が計算境界に作る磁場をバーチャルケーシング法により計算することで、より精度の高い自由境界モデルを実装した三次元平衡計算を可能にした。実装したモデルは平衡計算に用いる計算領域の縮小を可能とし、その結果、計算時間の短縮に成功した。

杉 正優貴（中村（祐）教授）「ドリフト波不安定性に対する法線曲率と測地線曲率の役割の違い」

ドリフト波不安定性に対して法線曲率と測地線曲率がそれぞれどのような効果をもたらすかを数値計算により調査した。その結果、両曲率成分ともに、ITG モードから KBM モードへの移行の臨界ベータ値を低ベータ側に移す効果があることを明らかにした。

原 田 和輝（中村（祐）教授）「ペレット溶発モデルへの深層ニューラルネットワークの応用に関する研究」

計算コストの高い NGPS モデルに基づくペレット溶発計算に対し、良好な再現性と高い計算効率を有するサロゲートモデルを構築することに成功した。本研究の成果は、ITER の重要課題である粉砕ペレット入射シミュレーションの計算負荷の軽減に寄与することが期待される。

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

池田 龍佑（土井教授）「Ni めっき {100} 〈001〉 集合組織 Cu テープ上に導電性中間層として $\text{La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{TiO}_3$ および $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ を配置した新規構造 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の研究」

{100}<001> 集合組織を持つ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした Ag フリー低コスト YBCO 線材構造の開発を目的に、導電性中間層物質の開発に取り組み、表面からの酸素拡散ブロック層として $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 層の追加挿入が有効である事を見出した。

湊 優貴（土井教授）「 LaNiO_3 および ITO を導電性保護層として用いた Ag フリー $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の研究」

市販 REBCO 線材の大幅な低コスト化のために Ag 保護層に代わる導電性保護層の開発に取り組み、 LaNiO_3 が有力な候補であることを示した。

矢野 龍一（土井教授）「ステンステープ上に Nb 反応防止層を介して MgB_2 を配置した超伝導線材の高臨界電流密度化の研究」

液体水素冷却での実用化が期待される MgB_2 超伝導線材の特性向上に有効なポストアニール時に問題となっている基材ステンステープから MgB_2 層への金属元素拡散を抑制および性能向上ため、成膜ブ

ロセスの最適化をおこない、実用レベルの高い J_c を有する MgB_2 超伝導短尺線材を作製することに成功した。

岡 村 陸 (川山准教授)「低温成長 Li_2MnO_3 を正極とした薄膜型全固体 Li イオン電池の作製」

Li イオン電池の高容量正極材料として有望な Li_2MnO_3 薄膜をスパッタリング法を用いて室温で作製し、その特性を検証した。その結果、初回放電時の容量が 254 mAh/g を示し、500℃で成膜した試料と比較して放電電圧が約 1.5 V 高く、内部抵抗が約 1/6 に減少した。

村 尾 達 (川山准教授)「テラヘルツ放射分光によるペロブスカイト太陽電池界面のバンド構造評価」

ペロブスカイト太陽電池のパシベーション処理が光励起キャリアのダイナミクスに与える影響をテラヘルツ放射分光法を用いて検証した。その結果、パシベーション処理によりバンドの曲がる向きが反転し電流の向きが変化していることを明らかにした。

Jia Tiankai (川山准教授)「Study of $Hf_xZr_{1-x}O_2/Si$ interface potential by terahertz emission spectroscopy」(テラヘルツ放射分光法による $Hf_xZr_{1-x}O_2/Si$ 界面ポテンシャルの研究)

$Hf_xZr_{1-x}O_2/Si$ 界面における電荷分布を、テラヘルツ放射顕微分光法を用いて、非接触で計測することを試みた。その結果、 $Hf_xZr_{1-x}O_2$ の膜中の固定電荷密度と界面状態のトラップ電荷密度、および Si 表面分極を定量的に見積もることに成功した。

エネルギー理工学研究所

杭 田 樹 (長崎教授)「ヘリオトロン J におけるドップラー反射計集光システムの改良と径電場計測」

磁場閉じ込め核融合装置ヘリオトロン J において、Ka-band 及び Q-band ドップラー反射計を開発し、径電場及び密度揺動の計測を行った。送受信アンテナと集光ミラーの変更することで放射ビームパターンを改良し、NBI プラズマへのペレット入射実験において径電場を求めることができた。

山 戸 瞭 雅 (長崎教授)「ヘリオトロン J 統計加速実験におけるベキ関数型 X 線エネルギースペクトルの観測」

本研究では統計加速現象によって生成される高エネルギー電子のエネルギー分布を推定する手法を X 線エネルギースペクトル計測及び放射線シミュレーションを用いて開発した。その結果、条件によってはベキ関数型のエネルギースペクトルが推定され、ベキ指数は天体や磁気圏で観測されるそれらと類似していることが分かった。

鳴 戸 滉 太 (稲垣教授)「密度微細構造計測のための周波数掃引型周波数コムマイクロ波反射計の開発」

ヘリオトロン J において、周波数掃引型周波数コムマイクロ波反射計を開発し、実験に適用した。コム周波数を $1\mu s$ という高速で掃引し、高速デジタル化によるデジタル信号処理によって広域密度分布の高時間分解能、高空間分解能での計測を実現した。

八 島 玲 音（稲垣教授）「Heliotron Jにおける周波数コムマイクロ波反射計による流速計測」

ヘリオトロンJ実験に周波数コムマイクロ波反射計を適用し、ドップラー周波数の同時多点計測に成功した。ドップラー周波数は低密度領域で大きくなっている事を明らかにした。これはプラズマが周辺部で回転していることを示す。

川 向 泰 生（稲垣教授）「高速可視分光システムを用いたヘリオトロンJにおける水素ペレット溶発雲密度2次元分布解析の自動化」

ヘリオトロンJに水素ペレットを入射した際の高密度プラズモイドの高速の挙動をとらえる分光器を開発し、プラズモイドの重心の軌道を自動で解析するシステムを構築した。これによりこれまで行えなかった小さなペレットの入射の弁別に成功した。

出 原 渉（松田教授）「ベイズ最適化駆動型ロボットによる二次元半導体作製プラットフォームの構築」

次世代半導体である二次元半導体において、ロボット技術とデータサイエンスを組み合わせた作製システムを構築した。具体的には、ベイズ最適化により作製パラメータを最適化し、その条件でロボットアームによって単層の二次元半導体を作製する事を可能とした。

呉 柊 斗（松田教授）「シリコンナノ共振器を用いた単層遷移金属ダイカルコゲナイドの光学応答増強に関する研究」

本研究では、次世代半導体である二次元半導体とシリコンナノ結晶共振器を組み合わせた系において、その光学応答を詳細に調べた。特に、シリコンナノ結晶でのミー散乱を利用した電場増強によって、非線形光学応答である第二高調波発生の増大などを実現した。

生存圏研究所 中核研究部**野 崎 太 成（山本教授）「イオノゾンデ同化 GNSS 電離圏 3 次元トモグラフィに関する研究」**

GPS-TEC 観測とイオノゾンデ観測を複合させた電離圏電子密度の3次元トモグラフィ解析手法の改良に取り組み、飛躍的に高精度な電離圏高度が推定可能かつ準リアルタイムで実行できるシステムを構築し、その性能を検証した。

北 村 一 真（山本教授）「衛星 AIS 観測のための複素ニューラルネットワークによるブラインド信号源分離」

海上交通把握用の AIS システムからの電波を衛星で受信する時には複数電波の分離が必要不可欠である。複素リカレントニューラルネットワークによる解析手法を開発して、強度の異なる3信号までの分離が可能であることを示した。

采 山 裕 紀（橋口教授）「機械学習によるスプラディック E 層の自動検出・統計解析および電離圏変動の予測」

スプラディック E 層の観測を目的として、イオノゾンデと呼ばれる観測装置が古くから利用されている。その観測結果について、機械学習モデルを用いた自動検出と統計解析、さらに、時系列予測モデルを用いたイオノグラム画像の予測を行った。

加 藤 千 晶 (小嶋教授)「観測ロケット搭載用イオンドリフト速度測定器の開発研究」

中性大気とプラズマが混在して相互作用を起こしている電離層下部において、低エネルギーイオンを観測することのできるイオンドリフト速度測定器の開発と観測データの評価方法のためのシミュレーションを行った。得られた成果は、スポラディック E 層を観測するロケット実験搭載装置として実現された。

宝 本 航 大 (小嶋教授)「ARTEMIS 衛星で観測されるダスト衝突に起因する電位変動に関する研究」

ダストが衛星に衝突して発生するプラズマにより、その衛星電位が変動する。この現象を利用して、ダストに関する情報を抽出するための基礎解析を行った。衛星電位変動波形を分類し、その波形の特徴がダストインパクトから発生する電子のエネルギーに依存していることを示した。

東 村 敢 (小嶋教授)「観測ロケットに搭載する小型フラックスゲート磁力計の研究」

ロケット実験に搭載するための磁力計用電子回路を小型にするアナログ ASIC の開発・改良を行った。性能試験により明らかになったノイズレベルの高さの原因を究明して ASIC の S/N 比改善を行った他、センサーのドライブ回路などを新たに開発して磁力計用電子回路の更なる小型化に貢献した。

金 田 ことの (海老原教授)「沿磁力線電流の 3 次元分布に対する降下電子の影響」

プラズマと中性大気との衝突を考慮した 3 次元ホール電磁流体シミュレーションに、上向き沿磁力線電流に伴って下方に入射する加速電子の効果を取り入れ、密度勾配に起因する沿磁力線電流の微細化の発達過程及び、高さ方向および水平方向への伝播過程を示した。

殷 振 興 (海老原教授)「Simulation Study on Whistler-Mode Hiss Emissions in the Magnetosphere」(磁気圏におけるホイッスラーモードヒス放射のシミュレーション研究)

磁気圏で普遍的に観測されるホイッスラー・モードのヒス波動の生成と伝播について、1 次元粒子シミュレーションを実施し、波の振幅が最大になる最適な磁場勾配が存在すること、一様磁場のもとで早い段階から波は線形成長を伴いながら非線形的成長することを示した。

勝 田 慎 平 (篠原教授)「2 周波数帯電磁界結合型マイクロ波加熱の高効率化の研究」

本研究は 2 周波数帯のマイクロ波を開放空間で照射可能な電磁界結合型マイクロ波加熱装置の高効率化を目的とした。2.45 GHz/5.8 GHz 共用加熱装置を用いて蒸留水にマイクロ波を照射した実験では、5.8 GHz 入力時において試料温度が 20℃ から 80℃ に上昇するために必要な時間が 77 秒短縮された。

星 川 龍 希 (篠原教授)「高調波および分周波を用いたレトロディレクティブシステムの研究」

本研究では、マイクロ波無線電力伝送におけるレトロディレクティブシステムの開発を行い、高調波および分周波を用いた新たなアプローチを提案し、1/2 レトロディレクティブおよび 2 次高調波レトロディレクティブの開発を行い、システムの小型化および目標追尾式の無線電力伝送が可能であることが示された。

松 本 康太郎 (篠原教授)「長距離無線送電実証用フェーズドアレーアンテナの配列手法と誤差評価の研究」

本研究の目的は、フェーズドアレーアンテナを用いた月面における無線電力伝送の基礎技術を確立す

ることである。これまでの課題を解決するビームパターンの計算手法の開発を検討し、これを用いて入力誤差を変化させた際のビームパターンの統計的な解析を行い、さらに誤差の影響を緩和する手法を提案／検証した。

高校生のページ

超伝導応用のこれまでとこれから

大学院工学研究科 電気工学専攻
電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）
雨宮 尚之、曾我部 友輔

1. はじめに

皆さんは、電気回路において電流 I と電圧 V が比例するという、Ohm（オーム）の法則 $V = RI$ を知っていると思います。電流 I と電圧 V の比例定数 R は電流が流れている物体（導体）の電気抵抗と呼ばれ、電気抵抗は導体の材質・形状・温度などによって決まります。電気抵抗は、導体を構成している原子と電流として流れている電子が衝突し、電子の動きが妨げられることによって発生します。一般的な導体では温度が低くなると電気抵抗は小さくなっていきますが、これは温度が低くなることで導体を構成している原子の運動量が小さくなり、電流として流れている電子と原子の衝突の頻度が下がるためであると理解できます。それでは、絶対零度（全ての原子が動かなくなる温度、約 -273 度、 0 K （ケルビン））での電気抵抗はどうなるのでしょうか。電子も絶対零度では動けなくなる、つまり電流が流れなくなるから電気抵抗は無限大となるのでしょうか？それとも、電子と原子・分子が衝突しなくなるため、電気抵抗はゼロとなるのでしょうか？

1911 年、オランダの Heike Kamerlingh Onnes（ヘイケ・カマリン・オンネス）は、絶対零度近くの電気抵抗の温度依存性を調べるため、液体ヘリウム中という極低温（ 4.2 K 、約 -269 度）での水銀の電気抵抗を測定していました。そのときに、 4.2 K で水銀の電気抵抗が「突然」消失し、ゼロ抵抗となることを発見しました。徐々に電気抵抗が下がっていったゼロとなるのではなく、ある温度（臨界温度）で突然、電気抵抗がゼロになったのです。これが「超伝導（Superconductivity）」現象の発見です。図 1 に、一般的な導体（常伝導体）である銅やアルミニウムを電線とした場合、超伝導状態となる物質（超伝導体）を電線とした超伝導線の場合について、それぞれの電気抵抗と温度の関係を示します。一般に超伝導線の電気抵抗は、臨界温度までは常伝導体と同じように温度に対して連続的に低下していきませんが、臨界温度になったときに突然電気抵抗がゼロに変化します。この現象を超伝導転移と呼びます。Kamerlingh Onnes は、超伝導現象発見の 2 年後、1913 年にノーベル物理学賞を受賞しました。このように、超伝導現象は発見当初から非常にインパクトの強い物理現象として受け止められました。

本稿では、超伝導現象の特徴について概説し、これまでおよび現在研究が進められている超伝導応用分野について紹介します。

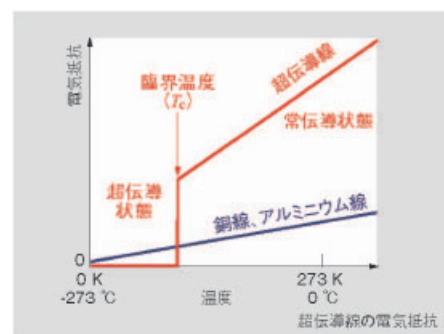


図 1 超伝導体の電気抵抗の概念図 [1]

2. 超伝導体の特徴的な物理現象

超伝導状態である超伝導体に固有の特徴的な物理現象が大きく分けて四種類あり、まずそれらについて簡単に説明します。

2.1 完全導電性

超伝導状態の超伝導体は電気抵抗がゼロであり、臨界電流と呼ばれる、超伝導状態を保つことのできる最大の電流値以下の直流電流が流れている場合には電圧が発生せず、電流を流すことによる発熱が発生しません。そのため、超伝導体に電流を流す場合には、通常の導体（常伝導体）に電流を流した時に必ず発生してしまうエネルギーの損失（電気エネルギーが熱エネルギーなどに変換されて消費されてしまうこと）が発生しない、という利点を得ることができます。この特徴を完全導電性と呼びます。完全導電性は超伝導を応用する上で最も重要な特徴であり、種々の機器を超伝導化し、消費電力を低減することを目的とした研究開発が数多く進められています。

ただし、時間的に変化する電流（直流ではない電流）が流れている場合には、後述する交流損失と呼ばれる超伝導体特有の損失が発生してしまうため、完全に無損失というわけにはいきません。また、臨界電流を超えた電流を流す場合には超伝導状態が維持されず、電圧が発生してしまいます。

2.2 完全反磁性

超伝導体は、超伝導状態になるとき（超伝導転移するとき）に内部の磁束がすべて排除され、まったく磁束が存在しない、磁束密度がゼロである状態になります。この特徴を完全反磁性と呼びます。完全反磁性は、この性質の発見者の名前から Meissner（マイスナー）効果とも呼ばれ、完全反磁性を示す状態を Meissner 状態と呼びます。ただし、電流の場合と同じように、磁場にも臨界磁場と呼ばれる超伝導状態を維持できる最大の磁場の大きさが存在し、臨界磁場よりも強い磁場をくわえた場合には超伝導状態が壊れ、磁場が侵入するようになります。

一方で、完全反磁性は全ての超伝導体で常に発現する特徴ではありません。超伝導体にかかる磁場を大きくしていった時の磁束の侵入の様子によって、超伝導体は第一種超伝導体と第二種超伝導体に分類されます。図2に第一種超伝導体と第二種超伝導体における、外部からかける磁場の大きさと、超伝導体内部の磁束密度との関係を示します。第一種超伝導体では、臨界磁場 H_c を超えたとき、突然磁場が完全に超伝導体に侵入し、完全に常伝導状態となってしまいます。言い換えると、臨界磁場 H_c 以下の磁場では、Meissner 状態になっていますが、それ以上の磁場では常伝導状態です。一方、第二種超伝導体では、ある磁場（下部臨界磁場 H_{c1} と呼びます）

を超えると徐々に磁束が侵入していきます。このとき、いくらかの磁束は超伝導体から排除されますが、全ての磁束が超伝導体内から排除されるわけではありません。さらに磁場を高くしていくと、ある磁場（上部臨界磁場 H_{c2} と呼びます）で完全に常伝導状態となり、磁束が完全に侵入します。つまり、Meissner 状態と常伝導状態の間に、中間的な状態（混合状態と呼びます）が存在します。このように、第二種超伝導体では Meissner 状態は常に成立しているわけではありません。また、混合状態は通常、超伝導状態であるとみなされます。つまり、第二種超伝導体では、超伝導状態であっても Meissner 状態ではない状態が存在していることになります。

もう一点重要なポイントとして、Meissner 状態の超伝導体は、工学的にはあまり魅力的ではありません。超伝導体の最大の利点は完全導電性であり、無損失で電流を流せることです。しかし、Meissner 状態の超伝導体に大きな電流を流すことは、実はできません。物質に電流を流すためには、物質内部に磁束密度の分布が絶対に必要なのですが、Meissner 状態では超伝導体内に磁場が侵入できず、磁場の分布も存在しないためです。一方、混合状態の第二種超伝導体の内部には磁束が侵入することができる

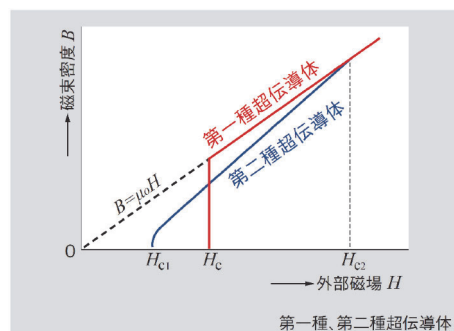


図2 第一種・第二種超伝導体の外部磁場と超伝導体内の磁束密度の関係 [1]

ため、大きな電流を流すことができます。すなわち、工学的に重要な超伝導体とは、混合状態にある第二種超伝導体である、とすることができます。なお、幸いなことに、これまでに発見されている超伝導状態を示す物質のうち、ほとんどは第二種超伝導体です。第一種超伝導体は一部の純金属などのごくわずかな物質に限られており、最初に超伝導状態になることがKamerlingh Onnesによって発見された水銀は第一種超伝導体です。

2.3 磁束の量子化

第二種超伝導体が混合状態となっているときには磁束が侵入していると説明しましたが、このときには磁束が「量子化」されて侵入します。磁束の量子化のイメージは、太い糸の束をほどこ、一本ずつの繊維に分離するようなものです。非常に細い繊維を最小単位とし、その繊維を何本も集めていくと一本の糸になるように、磁束についても非常に小さい磁束（磁束量子と呼びます）を最小単位として、磁束の大きさは磁束量子の整数倍として表すことができます。

混合状態の超伝導体内のイメージを図3に示します。超伝導体に侵入した磁束量子は超伝導体内のある点にピンで止められるように固定されており、ピン止め力と呼ばれる力によってその点に固定されています。時間的に変化しない直流の電流や磁場を印加している条件では、ピン止め力とLorentz（ローレンツ）力が釣り合い、磁束量子は超伝導体内で動かない状態になっています。

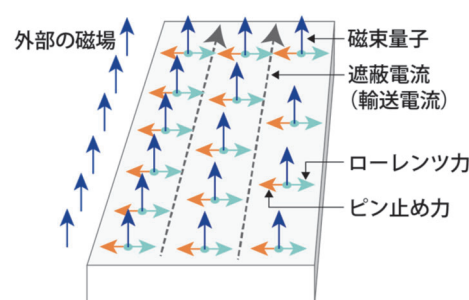


図3 混合状態における超伝導体内の模式図 [2]

2.4 Josephson（ジョセフソン）効果

絶縁体を挟んで二つの超伝導体を配置したとき、二つの超伝導体の間に超伝導電流が流れることが知られています。この現象をJosephson効果と呼び、この構造をJosephson接合と呼びます。Josephson接合を流れる電流は、絶縁体の部分にくわわる磁場の強さに対して非常に敏感であるため、極めて小さい磁場を検知するための素子として応用されています。

3. 超伝導応用

3.1 低温超伝導体と高温超伝導体

超伝導転移が発生する温度、すなわち臨界温度によって、超伝導体は低温超伝導体と高温超伝導体の二種類に分類されます。日本産業規格（JIS規格）では、約25 K以下の臨界温度をもつ超伝導体が低温超伝導体、約25 K以上の臨界温度をもつ超伝導体が高温超伝導体である、と定義されています。

低温超伝導体の代表例は、NbTi（ニオブチタン）やNb₃Sn（ニオブ三スズ）などです。これらの低温超伝導体は電線として加工されたものが製造されており、銅線などを巻いてコイルを作ると同じように、低温超伝導線を巻いてコイルを作ることが可能です。低温超伝導体は臨界温度が低く、低温超伝導線を使用している機器の運転には、一般には液体ヘリウム（約4.2 K）による冷却が必要です。ヘリウムは現在希少資源となっていて、値段が高いことはもちろん、入手性が年々悪くなっていくので、液体ヘリウムを大量に使いながら冷却する機器はあまり好ましくありません。そのため、液体ヘリウムを使用せずとも運転できる、すなわち臨界温度の高い高温超伝導体が注目されています。

高温超伝導体の代表例は、YBa₂Cu₃O₇（イットリウム系高温超伝導体）やBi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀（ビスマス系高温超伝導体）といった材料で、CuO₂という共通部分をもつことから、銅酸化物系高温超伝導体と呼ばれることもあります。イットリウム系高温超伝導体については、イットリウムの部分を他の希土

類系元素とした多様な種類の高温超伝導体が存在しており、これらをまとめて希土類系銅酸化物高温超伝導体 (Rare-Earth BCO: REBCO) と呼ぶこともあります。低温超伝導体と比べた時の特徴として、先述したように臨界温度が高く、液体ヘリウムを使用せずとも超伝導状態にでき、近年よく使用される希土類系銅酸化物高温超伝導体は、超伝導転移温度が液体窒素温度 (77 K) よりも高くなっています。また、臨界温度だけでなく、臨界磁場及び臨界電流も高い傾向があります。液体ヘリウム温度まで冷却した場合、臨界磁場及び臨界電流は低温超伝導体よりも非常に高くなるため、低温超伝導体を使った装置 (電磁石など) よりも高い電流密度で電流を流すことができ、より強い磁場を発生することが可能になります。

3.2 低温超伝導線とその応用ーこれまでの超伝導応用ー

これまでに実用化されている超伝導応用は、そのほぼすべてが低温超伝導体を使用したものであり、高温超伝導体の実用化例はほとんど存在しません。低温超伝導体は低温超伝導線として製造され、実用化されています。低温超伝導線は極細多芯構造と呼ばれる構造をもっており、数 μm から 0. 数 μm 程度の極めて細い素線 (フィラメント) を複数本捻りながら束ね、さらにその束を複数本捻りながら束ね、というように、フィラメントを多数束ねた構造になっています。この構造には複数の理由があるのですが、大きい理由の一つとして、超伝導線を太くしてしまうと超伝導線で発生する交流損失と呼ばれる特有の損失が大きくなってしまうということが挙げられます。交流損失は、超伝導体内に侵入した磁束量子が交流電流や交流磁場の影響によって、超伝導線内でピン止め力に抗して動いてしまうことが原因となって発生します。磁束量子が動く距離が長くなる、つまり超伝導線が太くなるほど交流損失は大きくなってしまいますので、交流損失を低減するためにフィラメント化が行われます。低温超伝導線は液体ヘリウム温度で使うことが一般的ですが、液体ヘリウム温度程度の極低温環境では、交流損失や超伝導線のわずかなずれに伴う摩擦熱などによるわずかな発熱でも温度が上昇してしまいます。これは極低温下では比熱が非常に小さくなることが原因なのですが、低温超伝導線は臨界温度が 10 K 前後と非常に低く、わずかな交流損失でも常伝導状態が壊れてしまう危険があるので、極細多芯構造となるような低温超伝導線が開発されてきました。

低温超伝導線の応用としては、低温超伝導線をコイルに巻き、電流を流して磁場を発生させる用途が多数を占めます。例えば、医療用の核磁気共鳴撮像装置 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) や、磁気浮上列車 (リニアモーターカー)、高エネルギー物理学で使われる粒子加速器用の電磁石などを代表とするような数多くの応用例が存在し、社会で活用されています。低温超伝導線は臨界電流まではエネルギー損失なしで電流を流すことができることから、常伝導体でコイルを巻く場合よりも高い密度で電流を流すことができます。コイルに高い密度で電流を流すとコイルが出せる磁場が強くなりますので、超伝導線で巻かれたコイルは強い磁場を、より広い空間に発生することが可能となります。これにより、例えば



図4 Large Hadron Collider (LHC) の低温超伝導電磁石 [3]。地下のトンネル内に超伝導電磁石が並べられてリングを構成している。

MRI 装置では、人間の全身が入るようなとても広い空間に、従来の常伝導線で巻いたコイルでは作れないような強い磁場を発生させ、MRI 画像を撮影することができるようになるなどの利点があります。リニアモーターカーでは、車体に搭載された低温超伝導コイルに電流を流すことで電磁石とし、レールに設置されたコイル (一般には常伝導コイル) との間の電磁力によって浮上・走行します。高エネルギー物理学とは、電子やイオンなどの荷電粒子を加速させ、それらを衝突させることで観測できる原子核に

含まれている粒子（素粒子）について研究する学問分野です。この分野では、荷電粒子を加速させるための粒子加速器が必須であり、多くの粒子加速器は円形加速器と呼ばれるような、荷電粒子を円状の軌道を周回させるような構造をとっています。このとき、荷電粒子を曲げるために非常に強い磁場が必要となるため、低温超伝導線で巻かれたコイルから成る超伝導電磁石が使われます。高エネルギー物理学用の粒子加速器の代表例が、欧州原子核研究機構（CERN）が建設した、Large Hadron Collider（LHC）です。LHC に使われている低温超伝導電磁石を図4に示します。LHC は周長約 27 km という非常に巨大なリングをもち、荷電粒子（ハドロン）を衝突させるという装置であり、その電磁石も長大なものになっています。

これらの応用のほとんどは、直流磁場下で直流電流を通電するような応用です。時間的に変化しない直流の電流・磁場下では交流損失は発生せず、損失無く電流を流すことができ、温度上昇などの懸念もないためです。一部の応用では、磁場を出している高温超伝導コイルの巻線の両端を超伝導線で接続し、超伝導体でループを作って電源を切り離すことで発生磁場が時間的にほとんど変動なくする運転（永久電流運転）をする場合もあります。

3.3 高温超伝導線

現在研究開発が進められている超伝導応用分野の多くは、高温超伝導の実用化を目指したものです。高温超伝導体を電線にした高温超伝導線はすでに製品として販売されていますが、その構造は低温超伝導線とは大きく異なり、極細多芯構造ではなく、幅数 mm、厚さ 0.1 mm 程度のテープ状となっています。高温超伝導線の模式図を図5に示します。厚さ 0.1 mm のうち、実際の高温超伝導体の厚さは数 μm となっており、薄膜高温超伝導線とも呼ばれます。高温超伝導体以外の部分は、高温超伝導体の結晶構造をきれいに作るための基板や高温超伝導体が常伝導転移した際の電流の逃げ道となる銅層などになっています。

このように、厚さに対して幅が非常に広く、断面アスペクト比が極めて大きいというのが現在の高温超伝導線の大きな特徴です。

この構造と、高温でも超伝導状態になるという特徴に伴い、高温超伝導線は低温超伝導線にはなかった多くの難しさを抱えています。まず、幅が広いという点から、交流損失が大きいという問題、また、外部から時間的に変化する磁場が加わったときに超伝導層に渦電流（遮蔽電流と呼びます）が流れてしまうという問題があります。交流損失については、高温超伝導線は比熱が高い高温でも超伝導状態でも使用可能であることから、交流損失が発生する環境でも超伝導状態が壊れることなく運転できる可能性があるため交流環境への応用が研究されていますが、あまりにも交流損失が過大になると運転効率などの観点で問題となるため、高温超伝導線の交流損失低減が大きな研究開発課題となっています。また、遮蔽電流については、遮蔽電流が流れることによって発生する付加的な磁場（遮蔽電流磁場）や超伝導線内で局所的に電磁力が集中することによる臨界電流の低下や超伝導線の破損などといった問題を引き起こすことが知られています。また、金属のテープのような形状であることから、曲げられる方向に制限があり、複雑な形状のコイルを作ることが困難であるという問題もあります。さらに、高温超伝導線は臨界温度が高いため簡単には超伝導状態が壊れませんが、代わりに比熱が高い領域で使用することになるため、超伝導線の一部に欠陥があったり局所的に力が加わって臨界電流が低下してしまったとき、その箇所だけが常伝導転移してしまい、結果的にコイルを巻いている超伝導線が焼き切れてしまったり臨界電流が大きく低下したりすることが知られています。高温超伝導の応用を実現するためには、これらの問題を解決することが必要であると考えられています。

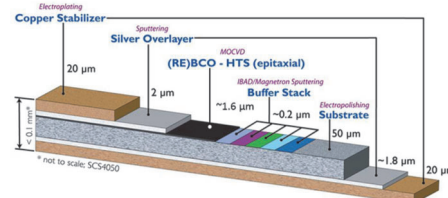


図5 高温超伝導線の模式図 [4]

3.4 現在研究開発が行われている超伝導応用－高温超伝導の実用化に向けて－

高温超伝導線の応用分野としては、大きく分けて電気機器応用と電磁石応用が検討されています [5]。電気機器応用の分野では、回転機（モータ）、発電機や変圧器、（厳密には電気機器ではありませんが）送電ケーブルなどの、従来であれば銅線で作られていたものを高温超伝導線で置き換えるような分野と、超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES）や限流器といった高温超伝導体でなければ実現できない分野が存在しています。前者の分野では、超伝導コイルを採用することによって電流密度を高くすること、並びに発生磁場を強くすることによる効率の向上や小型・軽量化が目的となっています。一方、後者の分野については、SMES では超伝導特有の完全導電性を利用して永久電流状態で電流を保持することで電気エネルギーを磁気エネルギーに変換して貯蔵する、限流器では超伝導体に臨界電流を超える電流を流した時に常伝導転移が発生して抵抗をもつようになることを利用し、過大な電流が流れたときにそれを低減させる機能をもつ、といったように、超伝導特有の特性を活用した応用分野となっています。

電磁石応用の代表的な例として、高磁場マグネット（電磁石）と核融合炉用マグネットが挙げられます。高磁場マグネットとは、低温超伝導線で作られていた従来の超伝導マグネットでは発生できないような、より強い磁場を発生可能なマグネットのことを指します。低温超伝導線の中で最もよく使用される NbTi で作られたマグネットの最大磁場は 9 T（テスラ）程度が限界とされていますし、Nb₃Sn でも 20 T 程度が限界と言われています。つまり、これを超えるような極めて高い磁場を発生させるためには、臨界磁場がさらに高い高温超伝導線で作られるマグネットが必要になります。このような強い磁場は、科学研究のための試験施設などにおいて物質の特性や構造を調べる時に必要とされるほか、先述した加速器用電磁石のさらなる高エネルギー化において重要とされています。

核融合炉用マグネットにおいては、超伝導マグネットは「容器」として働きます。核融合とは、非常に高エネルギーの状態にされた重水素や三重水素（水素の同位体で、原子核が陽子 1 つと中性子 1 つで構成されるものを重水素、原子核が陽子 1 つと中性子 2 つで構成されるものを三重水素といいます）が衝突し、ヘリウムの原子核と中性子 1 つに変換される現象のことを指しています。この変換の際に莫大なエネルギーが放出されるため、このエネルギーを利用して発電しよう、というのが核融合発電で、京都大学を含め、世界中で研究が進められています。発電の過程として生成されるのがヘリウムの原子核と中性子であるため、核分裂反応とは違って放射性物質が発生しないこと、また原料が重水素などであり、それらは海水などの中に大量に含まれていることから、原料の確保も比較的容易であることなどが利点として挙げられます。しかし、重水素・三重水素の原子核は正の電荷を帯びていますので、通常の状態では核融合反応は発生しません。そこで、原料となる重水素などを、1 億度を超える温度まで加熱してプラズマ化することによって核融合反応を引き起こすことが必要になります。加熱の方法にはいろいろな方法が提案されていますが、大規模な核融合発電を実現するためにはプラズマをたくさん作り、それを閉じ込めておき、核融合反応を起こす必要があります。プラズマは荷電粒子の集まりですので、プラズマを閉じ込めるために強い磁場が必要になります。そこで、高温超伝導マグネットで強い磁場を発生し、高温超伝導マグネットを「容器」として使用する、ということです。核融合発電に関する研究開発は近年急速に進みつつあり、多くの新興企業が立ち上がり、核融合発電実用化の一番乗りを競い合っています。その一つがアメリカのマサチューセッツ工科大学（MIT）から立ち上がった Commonwealth Fusion Systems という会社で、図 6 に示す ARC と呼ばれる核融合炉を作り、そこで核融合発電を実現して系統に電力を供給し



図6 Commonwealth Fusion Systems で検討が行われている ARC[6]

ようとしています。核融合関連技術の研究開発の流れの中で、高温超伝導マグネットに関する研究開発も一足飛びに進んでいる状況であり、高温超伝導技術の実用化はこれまでにないスピード感で進展しつつあります。

4. おわりに

超伝導の工学的な魅力は、抵抗ゼロで電流が流せること、すなわち高い電流密度で電流が流せること、並びに超伝導線でコイルを作ったときに強い磁場を発生できることです。これらの利点を生かし、これまでも現在も様々な種類の応用が研究されてきています。現在すでに存在している常伝導体を使用した装置を超伝導に置き換えることによって性能を向上させる、あるいは現在の常伝導体では実現できないものを超伝導によって実現する、というように、超伝導技術の応用には非常に幅があります。特に近年は、高温超伝導線の応用に注目が集まっており、電気機器や電磁石への応用に向けた研究が世界中で急速に進展しています。

このような背景から、京都大学雨宮研究室では、高温超伝導技術の実用化のために必要となる基礎的な研究に取り組んでおり、高温超伝導線の課題を解決していくことを目指し、実験やシミュレーションによる評価を行っています。この先、超伝導技術の応用はどんどん広がっていくと予想されます。将来は今では想像できないような、超伝導を使った機器が身の回りに溢れているような社会が実現するかもしれません。読者の皆さんが、本稿で超伝導に興味をもち、将来の超伝導応用社会を実現するための研究者となってくれば、大変喜ばしいと思っています。超伝導に限らず、今よりもっと良くする、もしくは今はできないことをできるようにする、ということは工学においてとても重要な視点であり、これを意識し続けることが工学者には求められるので、工学部を志望される皆さんにはぜひ心に留めていただきたいと思います。

参考文献：

- [1] 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻雨宮研究室 HP「超伝導とは？」(http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/about_sc.html)
- [2] 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻雨宮研究室 HP「興味の対象とアプローチ」(<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/aproach.html>)
- [3] CERN, “Large Hadron Collider restarts” (<https://home.cern/news/news/accelerators/large-hadron-collider-restarts>)
- [4] SuperPower Inc., “2G HTS Wire Specification” (<https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>)
- [5] M. Noe, R. Heller, W.H. Fietz, and W. Goldacker, “HTS Applications,” CERN Yellow Reports: Conference Proceedings (WAMSDO Workshop 2008: Workshop on Accelerator Magnet Superconductors, Design and Optimization 2008), p. 94 – 97.
- [6] Commonwealth Fusion Systems, “ARC: Putting fusion energy on the grid” (<https://cfs.energy/technology/arc>)

学生の声

100 km を走って

工学研究科 電子工学専攻 白石研究室 博士後期課程2年 丸山 ゆう

「周防大島ウルトラマラニック」という、ピクニック感覚で周防大島を巡る大会で100 km 走に挑戦したので、そのことについて書こうと思う。

これまでフルマラソンに参加したこともなくいきなりのウルトラマラソンということもあり、エントリー時はしっかりと準備して挑もうと心に決めていた。しかし、予定通りにいくはずもなく、長距離の練習を踏めないまま大会当日を迎えることになった。案の定、40 km 付近で足の痛みが出始めた。ただ、そこから良くも悪くも痛みは変化せず、エイドで頂ける特産品を心のオアシスとして、坦々と走り続け無事に完走することができた。

ウルトラマラソンを走ると人生観が変わるとまでいう人もいるなかで、半日後の自分がどんな感想を持つのかわくわくしながら走り始めた。しかし、終わってみると大きな変化を感じることはなかった(当然、身体は疲労困憊で足を3 mm 浮かせるにも苦労した)。ただそれ以来、苦しい場面に直面したときに、「あれだけ大変なことをやり遂げたのだから」と、もう半歩頑張れる拠り所にはなっている気がする。

研究はマラソンのように決まったルートを進んでいけばいつかは必ずゴールにたどり着けるというわけではない。それでも一步一步自分の足で進んでいかなければならないという点で両者には通じる部分もあると思う。100 km を走って得た粘り強さを武器にこれからも研究に進進していきたいと思う。

テクノロジーとの距離感を測る

情報学研究科 通信情報システム専攻 原田研究室 博士後期課程2年 額見 怜 央

最近、私は父親になった。息子との日常は予測不可能であり、生命が世界を生きようとする力に日々学ばされる。

子供が生まれて以来、それまで貪欲にテクノロジーを追い求めてきた私が、AI との距離感について意識するようになった。下宿生活を始めてからというもの、自宅の照明を Google Home で操作できるスマートホームを構築していたが、実家に帰省した際、無意識に「OK, Google, 電気をオフにして」と呟いてしまい、照明が消えないことに戸惑った。ある英国の作家の理論では、人は自身が生まれたときから存在する技術を「自然の一部」と感じ、15 歳から 35 歳で登場した技術を「新鮮で刺激的」と感じ、35 歳以降の技術を「自然に反するもの」と感じるという。急速に進化する生成 AI は、息子にはどのように映るのだろうか。

振り返ると、私の人生や研究を豊かにしてくれたのは、人間同士の交流だった。附属図書館で友人と議論を交わし、協力して課題を解決した経験や、お互いの興味を熱く語り合った経験は、学びが単なる知識の蓄積ではなく、多様な交流を通じて深まるものだと教えてくれた。だからこそ、生成 AI のない時代に子供時代を過ごせたことを幸運だと感じてしまうことがある。もし幼少期に全知全能のエージェントが存在すれば、自ら考える前の壁にぶつかる経験そのものを、煩わしく感じてしまったかもしれないからだ。一方で現在、その「あたかも全知全能であるかのように振る舞う確率的オウム」が提供する情報を活用し、アイデア整理や論文の推敲、プログラム開発などで大いに恩恵を享受しており、手放せなくなっている。今後も生成 AI との共存は避けられないが、かつて図書館で友と交わした議論のように共に悩み、道を切り拓く人生を通じた同志にはなり得ない。

昨年訪れた京都・大山崎町の聴竹居では、建築家・藤井厚二が追求した自然との調和の思想に触れた。約 100 年前に建てられたこの住宅は、当時の技術を駆使しつつも風土や気候を巧みに取り入れ、人間と自然が調和する空間を生み出していた。このような自然と技術、人間が調和した日常こそ、子供たちに受け継ぎたい未来だと思う。

とはいえ、私の目下の課題は博士課程を無事に卒業することであるが、AI が自律的に論文を執筆する前にぜひ達成したいものである。

教室通信

教室におけるダイバーシティと入試

電気電子工学科 学科長 下 田 宏

京都大学はご存じの通り、創立以来築いてきた自由の学風を継承し発展させつつ、多元的な課題の解決に挑戦し、地球社会の調和ある共存に貢献することを目標としています。そのためにも重要なキーワードはダイバーシティ（多様性）です。すなわち、多様な視点を取り入れることで、望ましい教育環境の構築と研究の質向上を目指します。本稿では、近年の電気電子工学科のダイバーシティ向上に向けて多様化している入試について、2月実施の一般入試以外のものを紹介いたします。

特色入試（総合型・学校推薦型選抜）

特色入試は従来の学力試験だけでは測れない多様な能力や意欲を持つ学生を選抜するために導入している入試制度であり、一般入試と異なる高校推薦型入試で、社会活動や課外活動での実績、学習意欲、基礎学力などを総合的に評価し、可否を決定するものです。特に令和8年度からはさらなるダイバーシティ向上のため7名の「女性募集枠」を設けています。これにより、電気電子工学に強い興味と旺盛な探究心を持ち、高い基礎学力と論理的思考力、リーダーシップや創造性を備えた女性の入学を促そうとしています。また、8月に開催されるオープンキャンパス参加申し込みにも女性専用枠を設けて、興味を持つ女子高校生の受験を促しています。

私費外国人留学生特別選考

私費外国人留学生特別選考（留学生入試）は、外国人の留学生のための入試制度であり、一般入試以外に留学生が受験できるものです。合格した留学生は入学後に一般入試で合格した日本人学生と一緒に日本語で授業を受けるもので、多様な国際的背景や視点を持つ優秀な学生を受け入れ、学部教育・研究の国際化と活性化を図ることを目的としています。

高専編入学試験

高専編入学試験は、高等専門学校（高専）卒業（見込み）者を対象とした入試制度であり、高等専門学校で培われた専門的知識や技術、実践的な能力を持つ学生を2年次に受け入れ、学部の多様性や専門性を高めることを目的としています。入試では、数学・物理・化学・英語などの基礎学力と、口頭試問での専門的知識や志望動機を総合的に評価し、大学での学びに十分対応できる力を持つ学生を選抜しています。

Kyoto iUP

Kyoto iUP（Kyoto University International Undergraduate Program）は、全学的に実施されている国際学士課程プログラムで、優秀な留学生を対象にした特別な入試・教育制度です。入学時点で日本語能力は問われませんが、入学決定後に徹底した日本語教育を受けます。最初の2年半は英語と日本語の両方で基礎科目を履修して日本語能力を高め、後半の2年間は日本語で専門教育を受けます。これも上記の留学生入試と同様に、多様な国際的背景や視点を持つ優秀な学生を受け入れるものです。

電気電子工学科では上記のような多様な入試制度により、これまで以上に様々なバックグラウンドを持つ学生が電気電子工学科を卒業し、社会で活躍していくものと思います。皆様のご支援を引き続きどうぞよろしくお願いいたします。

編集後記

ご多忙の中、貴重な原稿をお寄せくださいました皆様に、心より感謝申し上げます。今回、初めて編集後記の執筆を担当するにあたり、過去のバックナンバーを読み返す機会を得ました。特に印象深かったのは、2020年からの数年間、各号の編集後記に新型コロナウイルスへの言及が続いていたことです。あの激動の時期を振り返ると、感慨深いものがあります。パンデミックという困難は過ぎ去りましたが、その中で生まれた Zoom といったデジタルツールの活用は、今や私たちの研究・教育活動に欠かせない存在となりました。危機が生んだ変化が、新たなスタンダードとして定着していく様子は、まさに時代の変遷を物語っています。この編集後記には、単なる挨拶文を超えて、その時代を映し出す記録としての意味があることを実感しました。

[R.O. 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7年9月

編集：電気系 cue 編集委員会

橋本 昌宜、稲垣 滋、阪本 卓也、

後藤 康仁、三谷 友彦、岡本 亮、

伊藤 陽介、和田 修己（洛友会）

E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp

www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発行：京都大学電気関連教室

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

