



京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.52 SEPTEMBER 2024

[第52号]

..... 巻頭言

額に汗し脳みそにも汗を！
昭和 42 年数理工学科卒業
京都大学名誉教授 中村 行宏

..... 大学の研究・動向

第 6 世代ブロードバンド移動通信システム
に関する研究
情報学研究科 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

..... 産業界の技術動向

スタートアップ企業 CUBE EARTH のご紹介
株式会社 Cube Earth 代表取締役社長 武田全史

新設研究室紹介

研究室紹介

令和 5 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 52 号 目次

巻頭言

額に汗し脳みそにも汗を！

…………… 昭和 42 年数理工学科卒業 京都大学名誉教授 中村 行宏…………… 1

大学の研究・動向

第 6 世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

……………情報学研究科 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…………… 4

産業界の技術動向

スタートアップ企業 CUBE EARTH のご紹介

…………… 株式会社 Cube Earth 代表取締役社長 武田 全史…………… 10

新設研究室紹介…………… 16

研究室紹介…………… 18

令和 5 年度修士論文テーマ紹介 …………… 35

高校生のページ…………… 56

学生の声…………… 63

教室通信…………… 64

編集後記…………… 65

巻頭言**額に汗し脳みそにも汗を！**

昭和 42 年数理工学科卒業 京都大学名誉教授 中村 行宏



私は、1969 年 4 月、電電公社の電気通信研究所に就職し、1996 年 9 月、電気系教室に招いて頂き京都大学での教育・研究に加わりました。1970～1990 年代のほぼ 30 年間を電電公社（1985 年に民営化され NTT に）の研究所で仕事をしました。その最初の三分の二は、日本が元気で勢いに乗っていた時代でした。しかし、我が国はその後 30 年間にわたり、GDP をはじめ国力を示す主要な指標において世界の中で低迷し続け現在に至っています。このところ盛んに報道されているとおりです。

このような経緯により、現在、30 歳代より若い皆さんには、マレーシアの首相が「日本をお手本にしよう」と国民の意識改革をうながし、米国の社会学者が「Japan as No.1」と称賛するなど、日本が世界をリードしていたことを、もちろん実感できないし想像もできないことのようにです。

この度、寄稿する機会を頂いたので、右肩上がりの日本で社会人としてのスタートを切った世代の「働く日常」について記してみようと思います。思い出しながら綴る日記のようなものになる危険性がありますがご容赦ください。

1. 育成について

入社して直ちに、調布にある電電公社中央学園において 1 か月間の新入社員研修を受けた。講師には、役員・幹部も含まれていた。大卒者全員（約 400 名）が中央学園学生寮に泊まり込んでの共同生活であった。

この研修後、私など電気通信研究所（武蔵野）に配属されたものは、研究員として働く一方、全研究所横断的に、電気通信技術に関する総合的な授業を半年間受けた。講師は研究部長、研究室長ら先輩であり、教科書は研究所オリジナルであった。

研究室においても、担務に基づき研究テーマ計画書を策定して取り組み、結果を発表するという訓練を 1 年間受けた。発表時には、厳しい質問に四苦八苦したのは当然として、技術内容、さらにテーマ設定の意義にまで踏み込んで、研究室長間で歯に衣着せぬ丁丁発止の応酬がなされた。身が引き締まった。これらを含め、結局、担当する業務のすべてが OJT というような日々が入社後 3 年間は続いた。

— 私は、受験料、入学金、1 か月間の授業料のそれぞれが 1000 円で京都大学での教育を受け、就職した電電公社においても上記のような充実した育成を受けました。これを書きながら、私たちの世代は、国を挙げての人への投資により手厚く育てられたのだと再確認しています。感謝です。

2. 働く風土

電気通信研究所において、まず、我々の使命として叩き込まれたのが「研究実用化」。武蔵野の中島飛行機跡に設立された電気通信研究所、その正面ゲートを入った池の傍の碑には、吉田五郎初代所長の

訓示、「知の泉を汲んで研究し実用化により世に恵を具体的に提供しよう」と刻まれていた。研究に憧れて研究所を志望した私は、組織の目的が「研究」ではなく「研究実用化」であることに違和感を抱いた。

配属されたのは、データ通信の基盤となる汎用大型機 DIPS (Dendenkosha Information Processing System) 実用化の主幹研究部。世界が IBM360 / 370 に席卷されていた当時、日本を代表する計算機メーカーである日本電気、日立、富士通との共同研究実用化を担っていた。固有の技術を持つ3社と共通アーキテクチャの汎用大型機を実現するという画期的な国家プロジェクトであり、後にわが国の計算機産業を支える多くの技術者を育てることに多大な貢献をした。

— 私は、DIPS 本体系ハードウェアの方式検討に取り組むグループの末席に加わりました。若輩ものにとって、箸にも棒にもかからない（と思える）課題に何としても解を与えるという取り組みを日々続けました。時には、午前2時、3時に研究室長からの電話を受け、何はさておき研究所に戻り議論するということもありました。また、「技術的にはよい案と思うが、国益という視点での君の考えを聞かせてください」との所長からの質問も目から鱗が落ちた瞬間でした。こういう体験を経て、電気通信研究所が、「研究」ではなく「研究実用化」を使命とする本質と重みを悟ることができました。電電公社が民営化されて以降、この心構えで、この使命を果たしている公的研究組織は存在しないように思います。

2. 1 研究員として感じていたこと

- ・「目標」、「情報と状況」をみんなで共有している清々しさ
- ・意義のある仕事に納得のいくやり方で取り組んでいる楽しさ
- ・自らの考え・提案を率直に発言し議論できる喜び
(もちろん、先輩には敬意をもって接し、発言するが、本質を語るとき上下関係はなく、生き生きとした会話／質疑応答が飛び交っている)
- ・日々の取組みに必要な設備・環境に恵まれている安定感 など

— このような環境のもと、自らの役目を果たすことに必死であったが、大きな取組み甲斐があり、だからこそ明かかったのです。今、世間に満ちている「口ばかり」とか、「忖度」などというものを感じることはなかったのです。

2. 2 印象に残っているエピソード

DIPS-1の後継機 DIPS-11 を実用化し、1975年の商用サービス開始が線表に乗ったころ、研究所では DIPS 次期システムの検討が開始された。私を含む入社4年目の3名も担当者の末端に加わった。年末のある日、研究部長から「御用納めの翌日から正月休みの期間、我が家に泊まり込みで集中検討をしよう!」との誘いがあった。集中検討の必要性も意義も十二分に分かっていた。「うちは構わないから」と言って頂いたが、さすがに奥様にはご迷惑なはずだと辞退した。

— この提案を遠慮なく受けなかったことを後悔しています。部長と思いきり技術論を戦わせる貴重なチャンスであり、さぞ、充実した楽しい時間であったはずです。そして、今思うに、部長には我々を鍛えてやろうとのもうひとつの熱い思いがあったに違いありません。

3. 当時の社会の様子

このような風土のもと、22時以降の帰宅は日常であり、年休など全くとらず、毎年、消費していない20日を切り捨て、新たな20日をもらって毎年度40日の有給休暇を保持したまま。電電公社・NTTの我々

研究員でさえ月 50 時間程度の時間外労働は普通であったが、メーカの皆さんは 100 時間を優に超える残業をこなしていた。

一 正真正銘、盆も正月もないという状況ですが悲壮感はなかったです。当時、欧米から日本人は働きすぎだと揶揄されたが、国土も狭く、石油が湧いてくるわけでもなく、人材しかない国なので、みんな自信をもってこれが当然と自負していたように思います。倫理的で検査データを胡麻化することもなかったし、だれがどのように貢献しているかお互いによく分かっていました。

団塊の世代を含む働き盛りが、このような意識で各自の役目を果たしていたので、日本が意気軒高であったことに何の不思議もないでしょう。なお、当時、当然ながら米国のエリート層などは猛烈に働いており、一緒に国際会議を運営していたカリフォルニア大学アーバイン校の教授などは、「私の夫は日本人のように働いています。私が妻でなかったら、とっくに離婚されていますよ」と奥方から皮肉られていました。余談ですが、1989 年、カーラ・ヒルズ米国通商代表から「日本の市場開放」を強硬に要求されました。このとき、Sun Microsystems、Apollo/Domain、VAX などのワークステーションの購入伺いを提出したら、すんなり承認され、みんなで大喜びしました。黒字減らしに合致したのです。

4. 役目について

DIPS の研究実用化を通じ、我々の方式検討に必要な道具作りにも取り組み、PARTHENON（パルテノン）と名付けた高位論理合成 CAD を実用化しました。前例のない中、独自の工夫を重ねましたが、その技術内容を評価して頂き、私を含め 3 名が学位を受け、大河内記念技術賞、NTT 社長表彰など受賞しました。自らの役目を果たすための独自の道具として、真に実用になる高みにまで叩き上げた支援技術でした。言葉にならない感動がありました。

DIPS の設計においても、皆様よくご存じのムーアの法則が採用技術を決定する指針になっていました。そして現在、半導体の微細化が限界ともいえる 3nm、2nm まで進んだことで、性能向上のために涙ぐましい工夫がなされています。半導体チップを積み重ねて 3D 化を図る FinFET（フィンフェット）や、複数チップをひとつのパッケージに搭載してひとつの製品として機能させる Chiplet（チップレット）、その先の Nanosheet（ナノシート）などの技術です。今のところ、これら最先端の半導体を製造できるのは、台湾の TSMC、韓国の Samsung、米国の Intel、IBM などに限られています。世界を先導する技術は、自らが汗をかいて取り組んでこそ身につくものであることを我々はよく知っています。そうした技術蓄積がないとクロスライセンスもできません。

2022 年、次世代半導体量産会社 Rapidus（ラピダス）と LSTC（研究拠点）が設立されました。実質的に国策としての活動であり、再び世界の最先端に追いつき追い越せのラストチャンスでしょう。私には、国産技術を結集して DIPS の研究実用化に邁進したときと同様の精神の高揚が感じられます。頑張っ

てほしいと思います。そして、この取組みに京都大学工学部の若い先生方、学生の皆さんにぜひ加わって頂きたいと願います。このプロジェクトへの絶大な支援であり、同時に、皆さんにとって得難い体験になると確信するものです。

最後に、京都大学には、内外の企業から技術者／研究者がはせ参じ、大学の皆さんと一体となって最先端課題に取り組む熱い「場」、すなわち、「坩堝（るつぽ）」の役目を担ってほしい、とお願いして筆をおきます。

大学の研究・動向

第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

情報学研究科 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

教授 原 田 博 司

准教授 水 谷 圭 一

助教 香 田 優 介

1. はじめに

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでのように人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。2020年からは世界各国で5Gのサービスが開始されましたが、先に述べたユーザからの厳しい要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。現在、すでに5G以降のシステム（Beyond 5G）および6Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。このような国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G/6Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、新信号波形・新物理層方式、ミリ波帯、テラヘルツ帯等高周波帯活用技術、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、周波数共用システム、高度ソフトウェア無線技術、高能率スマート無線M2M（Machine-to-Machine）通信システム、機械学習の通信システムへの応用、仮想空間における電波模擬システム技術の高度化などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。本稿では当研究室の研究動向およびその成果の一部を紹介致します。

2. 次世代移動ブロードバンド通信システム

2.1. マルチバンド・ブロードバンド無線通信システム

本研究プロジェクトでは、通常のマイクロ波、UHF（Ultra High Frequency）帯携帯電話用周波数だけでなく、VHF（Very High Frequency）、UHF Lowバンド、ITS（Intelligent Transportation System）バンド、ミリ波、テラヘルツ波を用いた高能率ブロードバンド移動通信システムを実現するための、伝搬特性モデリング、周波数利活用方式、通信方式、伝送方式、アクセスプロトコル、位置推定アルゴリズムに関する研究を行っています。

2.2.1. VHF帯を用いたブロードバンド移動通信システム

Beyond 5Gや6Gにおいては、携帯電話システムのカバレッジ広域化や、超広域に設置されたセンサやメータ、モニタなどの人間以外のM2M機器を携帯電話などのネットワーク基盤で収容する方策の実現が課題となっています。超広域をカバーするための周波数帯としてVHF帯が注目を集めており、国内では200MHz帯が公共業務等通信に割当てられています。当研究室ではこれまでに、この200MHz帯における直交周波数分割多元接続（OFDMA）と無線多段中継を用いた広域無線通信システムの技術

開発と標準化（ARIB STD-T103/119）、及び商用化に取り組み、70 km 超の多地点多段中継広域データ伝送試験 [1]、単区間 100 km 超の双方向映像伝送試験 [2] に成功しています。また、本システムを用いて取得された VHF 帯電波伝搬情報と機械学習による端末位置（電波発射源）探索アルゴリズムを提案実装し [3]、京都市街地での実機実証に成功しています（図 1）。さらに当研究室では、VHF 帯における 5G システムの利用を提案し、10km を超える通信エリアを実現する VHF 帯超広域小型自営系（プライベート）5G システム（基地局、端末）開発にオープンソースを用いたソフトウェア無線技術を利用し成功しました（図 2）[4]。この成果により、数 km から 10km 程度の限定された範囲内においてセンサ、メータ、モニタが必要なさまざまなアプリケーションや災害時の仮設的な情報伝達、映像伝送手段として、簡易に 5G システムを提供することが可能になります。なおこれらの研究の一部は内閣府 ImPACT 原田博司プログラム「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」、総務省 SCOPE 電波 COE プログラム（JP196000002）、及び国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（05101）における受託研究の一環として実施されたものです。

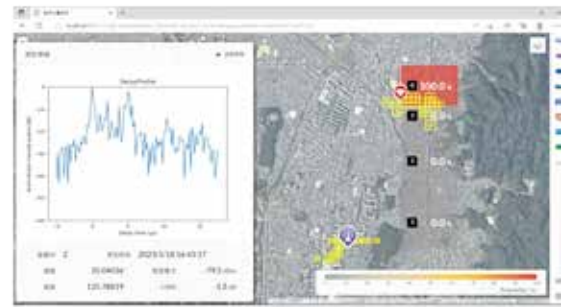


図 1：VHF 帯電波伝搬情報と機械学習を用いた端末位置測定実証試験（地図出典：地理院地図）



図 2：開発した超広域小型自営系 5G システムの評価系

2.2.2. ミリ波、テラヘルツ波を用いたブロードバンド移動通信システム

ミリ波帯、テラヘルツ波帯は、非常に広帯域を使用できることから、5G、Beyond 5G、および、6G における無線通信の使用帯域として注目されています。しかし、ミリ波帯、およびテラヘルツ波帯は、電波を遮蔽することによる電力の減衰が著しいという特徴があり、セルラシステムで使用しようとするとエリア形成が困難です。このことから、現状 5G ミリ波通信はあまり普及しておらず、テラヘルツ波通信においても同様の課題が生じると考えられます。当研究室では、ミリ波帯・テラヘルツ波帯の利用モデルを携帯電話基地局 - 端末間の通信に限定せず、近接機器や個人の端末を高速につなぐ無線 PAN (Personal Area Network) という比較的实现しやすい利用モデルから、徐々にその輪を広げていき、携帯電話基地局も含めた大きな高速無線ネットワークを構築するというビジョンを持って研究しています（図 3）。こうして構築される無線ネットワークは、近接する個人のコミュニケーションとしても、電波の遮蔽に対してレジリエントなセルラー通信網としても利用できるようになります。このように、ミリ波・テラヘルツ波通信の展開にあたっては、公衆系通信（携帯電話網）と自営系通信（無線 PAN）を総合的にみたシステムをデザインすることが有効であると考えています。

本研究では、このシステムの実現のために電波伝搬モデリング技術、物理伝送方式、マルチホップ通信方式等について研究開発を行っております。公衆系・自営系を統合するとすると、これまでそれぞれ 3GPP、IEEE という標準化団体で個別に開発・

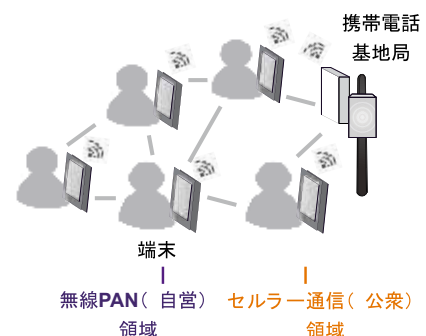


図 3：当研究室で提案しているミリ波・テラヘルツ波無線通信システム

仕様策定されてきた方式同士を統合し、統一的なフレームワークに落とし込む必要があります。当研究室では、まずは電波伝搬データ・モデルを見直し体系的に整理した上で、セルラー通信環境での電波伝搬特性と無線 PAN 環境でのミリ波・テラヘルツ波電波伝搬特性を同じアルゴリズムフローで計算機上に再生成するフレームワークを提案し [5]、プログラムを評価版として一部公開しました [6]。また、本来セルラー通信用途に開発された 5G の信号フォーマットに従いつつミリ波無線 PAN を構築するための方法を開発し、当該フォーマットに準拠したミリ波無線 PAN 制御信号用の新たな物理伝送方式を開発しています [7] (図 4)。なお、本研究の一部は、NICT の委託研究 (JPJ012368C04201) 及び、総務省における受託研究 (JPJ00595) の一環として実施されたものです。

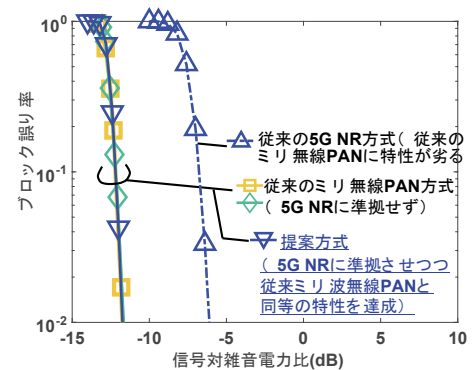


図 4：開発した 5G NR 準拠ミリ波無線 PAN 制御信号伝送方式の特性

2.2.3. 新信号波形・新物理層方式

Beyond 5G や 6G においては、超高速通信だけでなく大規模端末接続や超低遅延通信などへの対応が期待されており、一層の周波数利用効率改善が急務となっています。そのためには有限の無線リソースを無駄なく利用する技術が必要です。利用可能な無線リソースをさらに拡大するためには、送信信号の帯域外輻射 (Out-of-band emission, OOB) を抑圧することで、限られた周波数帯で多くの端末を収容することが方策の一つです。現行の 5G をはじめとする多くの無線通信システムにおいて採用されている直交周波数分割多重 (OFDM) 方式はマルチパスに耐性がある利点を持つ一方で、高い OOB が問題となっています。本研究室ではこの高い OOB を少ない計算量で大幅に抑圧することを可能にする、Universal time-domain windowed OFDM (UTW-OFDM) 方式を提案し

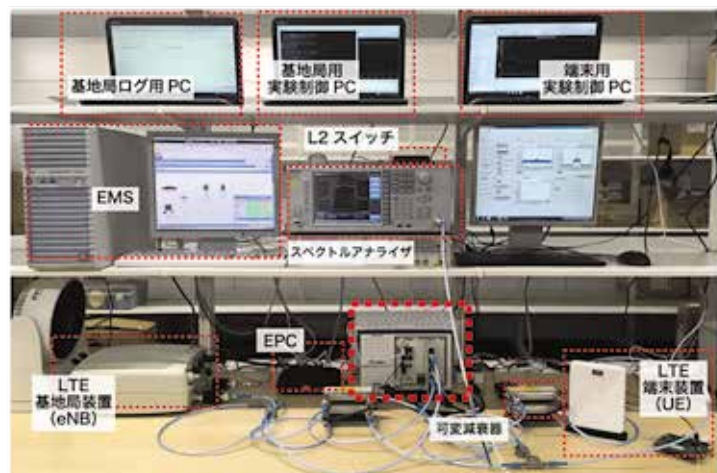
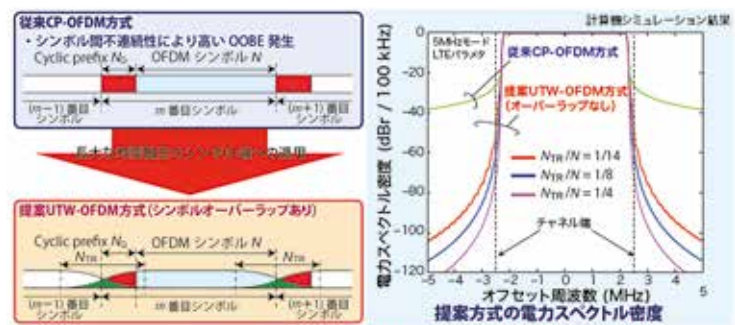


図 5：提案 UTW-OFDM の原理・性能・実機評価系

[8]、ソフトウェア無線機 [9] や LTE 商用基地局・端末を用いた実機実験に成功し [10]、実際にローカル 5G 商用無線機への一部導入を実現しました (図 5)。なお本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発」の受託研究の一貫として実施されたものです。

2.2. 全二重複信 (Full-Duplex) セルラーシステム

本研究では、6G のセルラーシステムにおいて、これまで以上に通信容量の増大化を図るために、基

地局にアップリンクとダウンリンクを同時に行う機能を具備させた Full-Duplex セルラーシステム（図6）に関して、自己干渉キャンセル方式、干渉可視化方式、端末スケジューリング方式、送信電力制御方式、通信方式、実装方式の研究開発を行っています [11]-[13]。特に自己干渉キャンセル方式については、5G の制御信号を用いた高性能な手法を提案し、ソフトウェア無線機を用いた実機実証に成功しています（図7）。さらにこの Full-Duplex セルラーを導入した Beyond 5G を仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発し、都市空間 3D データと基地局及び端末の配置並びに端末移動パターンを入力することにより、端末移動時の場合のエミュレーションを実施し、Full-Duplex 導入効果の評価・可視化に成功しました [14]。本成果により、実空間に無線機を設置して試験を行わなくてもエミュレータを用いて現実空間を模擬した検証をすることが可能になり、システム導入によるスループット改善特性の評価を容易にすることが期待できます。なお、本研究の一部は総務省「第5世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発」（JPJ000254）及び「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発」（JPJ000254）における受託研究の一環として実施されたものです。

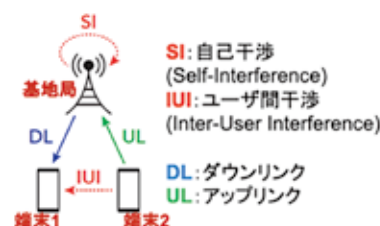


図6：Full-Duplex セルラーの基本形態



図7：開発した Full-Duplex セルラーシステム

3. ダイナミックスペクトラムアクセス通信

本研究では、既に特定の利用目的のために割り当てられている周波数において、「空間的」、「時間的」に利用可能な周波数帯であるホワイトスペースと呼ばれる周波数帯を利用して、既存利用者に対して干渉させることなく 6G 用周波数として共同利用するための、周波数管理方式、通信方式、通信プロトコルの研究開発、及び干渉検知のための電波センサ等の研究開発を行っています [15], [16]。

4. 高能率スマート無線 M2M 通信システム

6G においては、人間のみならず、固定、移動体に設置された大量のセンサ / メータ / モニタ等の各種計測機器からの情報を収集・利活用する必要があります。本研究では、電源供給のみならず電池駆動によるセンサ / メータ / モニタでも利用可能な低消費電力型の IoT 用無線通信システム Wi-SUN (Wireless Smart Ubiquitous Network) [17] の研究開発を行っています。研究成果は米国電気電子学会 (IEEE) および Wi-SUN アライアンス等で標準化、商用化を行っ



図8：当研究室における Wi-SUN FAN の研究開発動向

ています。

本研究では、Field Area Network (FAN) と呼ばれる 20 段程度の大規模マルチホップ接続に対応した国際標準規格を用いた研究開発を世界に先駆けて推進しています (図 8)。これまでにマルチホップ接続を駆使し多数の無線機からの情報を一つの基幹無線機に集約し収集するシステムを 1,000 台の機器を用いて開発に成功し、通信成功率 99.9% 以上の高品質な通信を実現しました。さらに大規模高密度環境における通信試験として、京都大学構内に 400 台の無線機を設置し、全無線機の自律的なマルチホップネットワーク構築の確認および通信試験を行うことに成功しました [18]。これにより、市街地や住宅地、集合住宅などでも Wi-SUN FAN の自律的なマルチホップネットワーク構築機能が有効に働くことが実証でき、今後実用化が進む次世代スマートメータやスマートシティでの実用化に目途が立ちました。

さらに、この Wi-SUN FAN を仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発し、住宅密集地の都市空間 3D データと Wi-SUN FAN 無線機の配置を入力することにより、スマートメータを 500 台配置した場合のエミュレーションを実施し、データの伝搬経路や伝搬品質の評価・可視化に成功しました (図 9) [19]。この成果により、実空間に無線機を数百台設置して試験を行わなくてもエミュレータを用いて現実空間を模擬した検証をすることが可能になり、システム導入前の電波の到達性や網羅性など、設置設計の精度向上が期待できます。なお本研究開発は、総務省 SCOPE 電波 COE プログラム (JP196000002) 及び、総務省「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発」(JPJ000254) における受託研究の一環として実施されたものです。

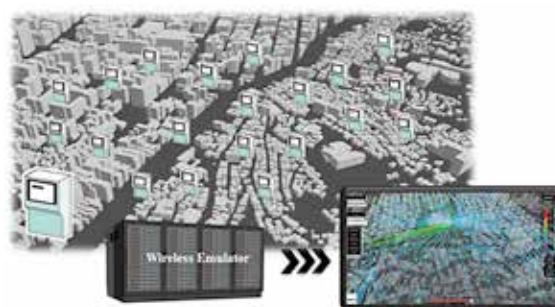


図 9：仮想空間上でのスマートメータ設置模擬実験 (横浜市周辺 3D データ上に Wi-SUN FAN 無線機を 500 台設置)

5. おわりに

原田研究室での研究概要についてごく簡単なながらも紹介させていただきました。皆様のご理解とご支援を賜れますと幸いです。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- [1] 【報道発表】IoT データ収集・制御用広域系 Wi-RAN システムによる 70 km 超無線多段中継伝送を用いた多地点広域データ伝送試験に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2017_08.html
- [2] 【報道発表】長距離化公共ブロードバンド移動通信システムによる単区間 100km 超映像伝送に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2019_02.html
- [3] T. Hayashida, et al., "Possibility of Dynamic Spectrum Sharing System by VHF-band Radio Sensor and Machine Learning", Proc. IEEE DySPAN, 1-6 (2019).
- [4] 【報道発表】長距離化公共ブロードバンド移動通信システムによる単区間 100km 超映像伝送に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2019_02.html
- [5] Y. Koda, et al., "Survey, taxonomy, and unification of standard mmWave channel models for WPAN, WLAN, and cellular systems in 6G," IEEE Communications Standards Magazine, in press.
- [6] 【報道発表】第 6 世代移動通信システムの研究開発に資するサブテラヘルツ帯電波伝搬シミュレー

- タを開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_03.html
- [7] Y. Koda, et al., "Toward 3GPP sidelink-based millimeter wave wireless personal area network for out-of-coverage scenarios," IEEE Internet of Things Journal, in press.
- [8] K. Mizutani, et al., "Comprehensive Performance Evaluation of Universal Time-domain Windowed OFDM-based LTE Downlink System," IEICE Trans. Commun., E102-B (8), 1728-1740 (2019).
- [9] 【報道発表】 京都大学原田研究室が無線周波数資源を有効に活用する第5世代移動通信システム用通信方式 UTW-OFDM を開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2016_01.html
- [10] K. Mizutani, et al., "Experimental Evaluation of Universal Time-domain Windowed OFDM-based LTE Downlink System by Real-time Wave-shaping", Proc. IEEE PIMRC, 1-5 (2017).
- [11] K. Mizutani, H. Harada, "Quantization Noise Reduction by Digital Signal Processing-assisted Analog-to-digital Converter for In-band Full-duplex Systems," IEEE Trans. Wirel. Commun., 21 (8), 6643-6655 (2022).
- [12] K. Fukushima, et al., "Throughput Enhancement of Dynamic Full-Duplex Cellular System by Distributing Base Station Reception Function," IEEE Open J. Vehi. Technol., 4, 114-126 (2022).
- [13] S. Mori, et al., "A Digital Self-Interference Cancellation Scheme for In-Band Full-Duplex-Applied 5G System and its Software-Defined Radio Implementation," IEEE Open J. Vehi. Technol., 4, 444-456 (2023).
- [14] 【報道発表】 5G システムおよび Full-Duplex を導入した Beyond 5G システムを仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_05.html
- [15] A. Sakai, et al., "Highly Efficient Sensing Methods of Primary Radio Transmission Systems toward Dynamic Spectrum Sharing-based 5G Systems," IEICE Trans. Commun., E104-B (10), 1227-1236 (2021).
- [16] K. Minaki, et al., "Radio-Protected Area Estimation Model Using Location-Dependent Gain for a Spectrum Sharing System in the VHF-Band", IEEE Open J. Vehi. Technol., 4, 12-24 (2022).
- [17] H. Harada, et al., "IEEE 802.15.4g based Wi-SUN Communication Systems," IEICE Trans. Commun., E100-B (7), 1032-1043 (2017).
- [18] 【報道発表】 スマートメーター・シティ向け国際無線通信規格 Wi-SUN FAN 大規模フィールド実証に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2023_02.html
- [19] 【報道発表】 都市空間に設置された IoT 用無線システムを仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_04.html

産業界の技術動向

スタートアップ企業 CUBE EARTH のご紹介

株式会社 Cube Earth 代表取締役社長
武 田 全 史 (CUBE EARTH CEO)

1. はじめに

Cube Earth は空間 ID 発行技術である。地球表面空間を正六面体(3D)または正方形(2D)で分割(メッシュ化)し、各領域に識別子として ID (空間のアドレス) を付加する技術である。地球は楕円球体であるが、数学的な補正を行うことで平面、正立方体に分割して扱うことができるようになる。当空間 ID 発行技術は緯度・経度・高度の 1 点の座標を指定すると、点が所属する正六面体または正方形を表現する空間 ID を生成する。地球表面空間は広大であり、空間 ID の組み合わせは膨大な数になるため、アドレスをデータベースに登録して必要に応じて検索しアドレスを提供する方式の場合、膨大なデータストレージ量と検索に時間がかかるが、当技術は数理演算で空間 ID を算出して作成するので、情報処理速度が飛躍的に向上し、現実のシステムとしての運用性や利便性を高めることが可能となる。

2. Cube Earth 社の理念

Cube Earth 社の経営理念は「データ駆動社会実現カンパニー」をあげている。Beyond5G が向かう近未来において、空間 ID 発行技術 Cube Earth はフィジカル空間(現実空間)とサイバー空間(仮想空間)を融合し、地球全体のデータをマネージできるプラットフォームとして、データ駆動型社会を牽引していく産業基盤となること目標として邁進している。これらは国連開発計画 (UNDP) の SDGs17 の目標の一つ「9. 産業と技術革新の基盤をつくろう」に対応している。



図 1: 「9. 産業と技術革新の基盤をつくろう」

3. Cube Earth 社のコア技術「空間 ID」の特徴とその作り方

3.1 Cube Earth の理念、コア技術、空間 ID の特徴

コア技術

Cube Earth は、地球表面を同じ大きさの正六面体 (3D)・正方形 (2D) で分割 (メッシュ化) し、各領域に識別子として空間 ID ※を付加する技術である。地球は楕円球体であるが、数学的な補正を行うことで緯度に関わらず同じ大きさの平面、正立方体に分割して扱うことができるようになる。

※空間 ID とは特定の場所や空間を識別するための固有の ID であり、文字列の形式で表現され、ロケーションサービス、ロケーションマーケティングなどのアプリケーションで利用されている。また、任意の位置情報を

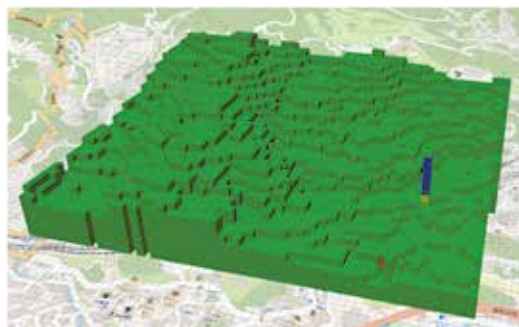


図 2: 20m メッシュでの地形データ記述例

含むデータは空間 ID を使用することで共通化した ID で管理することが可能になり、この仕組みを応用してデータ連携基盤を作成することが可能となる。

Cube Earth の空間 ID の特徴

1. 地球表面を同じ正方形、正六面体に分割して、空間 ID を付与する技術。
2. 経度方向に地球を一周して正方形、正六面体を敷き詰めても隙間がない。
3. 正方形、正六面体の 1 辺の大きさは 1 ～ 500m で可変にできる。
4. 現在のサポートエリアは南緯北緯 89 度、高度 - 約 16,000m ～約 16,000m
5. 1m 正方形で分割した場合、約 600 兆 (10^{12}) 個のアドレスとなる
6. 1m 正六面体で分割した場合、約 15 垓 (10^{20}) 個のアドレスとなる。

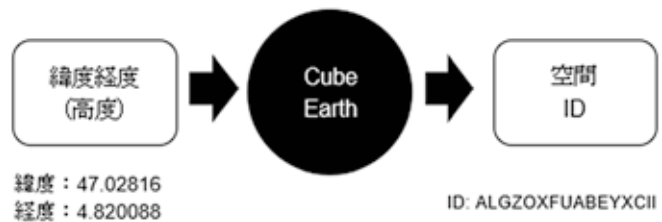
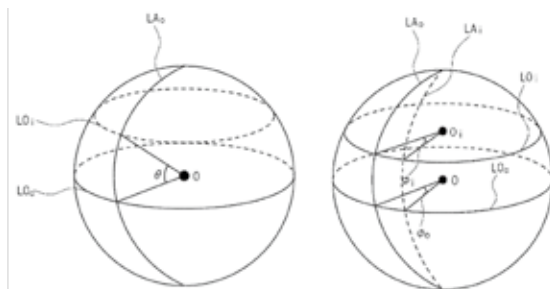


図 3：緯度経度（高度）情報から空間 ID を発行

3.2 Cube Earth 方式の空間 ID の作り方 (2D/3D)

Cube Earth 方式の空間 ID の作り方 (2D)

地球表面を正方形で分割（メッシュ化）し、各領域に識別子として ID（空間のアドレス）を付加する技術を用いて、空間 ID の発行を行う。地球は楕円体であるので、同じ大きさの正方形を置いていくと、重複部分が発生してしまい隙間なく敷き詰めることができないが、図 4、図 5 のように数学的な補正を行うことで隙間なく正方形で埋めることができるようになる。



1. 地球を楕円球体として考える
2. 各経度と緯度の単位長さを計算する
3. 同緯度方向の周回の余りの長さを計算
4. 余りを各位緯度の構成要素数で割り、分割数分ずらす
5. 同緯度周回上で切れ目のないグリッドを作成
6. すべての緯度で同様の処理を行う。
7. 各グリッドの緯度経度の値をビット処理して空間IDとする

図 4：空間 ID 発行処理

地球を経度方向で等間隔でグリッドを作成する場合、重複部分が発生することに対する対応

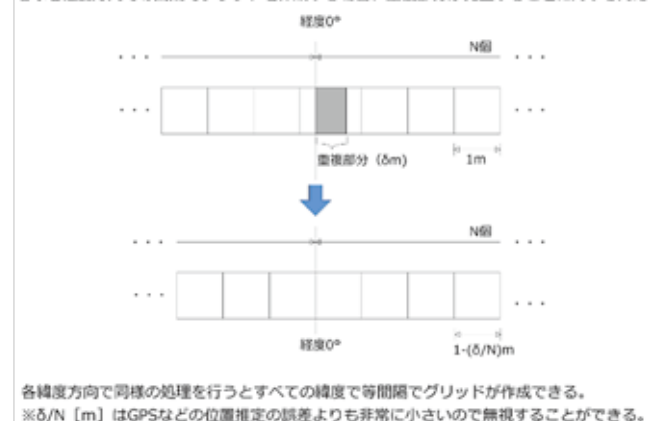


図 5：経度方向の敷き詰め補正処理

Cube Earth 方式の空間 ID の作り方 (3D)

Cube Earth (3D) の利用範囲は図 6 のように地球の半径の約 1/200 であり、この範囲では地球の球面を無視して、正六面体を地表面に積み上げても測定誤差の範囲に収まる。

※ 2km の長さに対して Cube Earth の利用範囲は約 1m と同等。

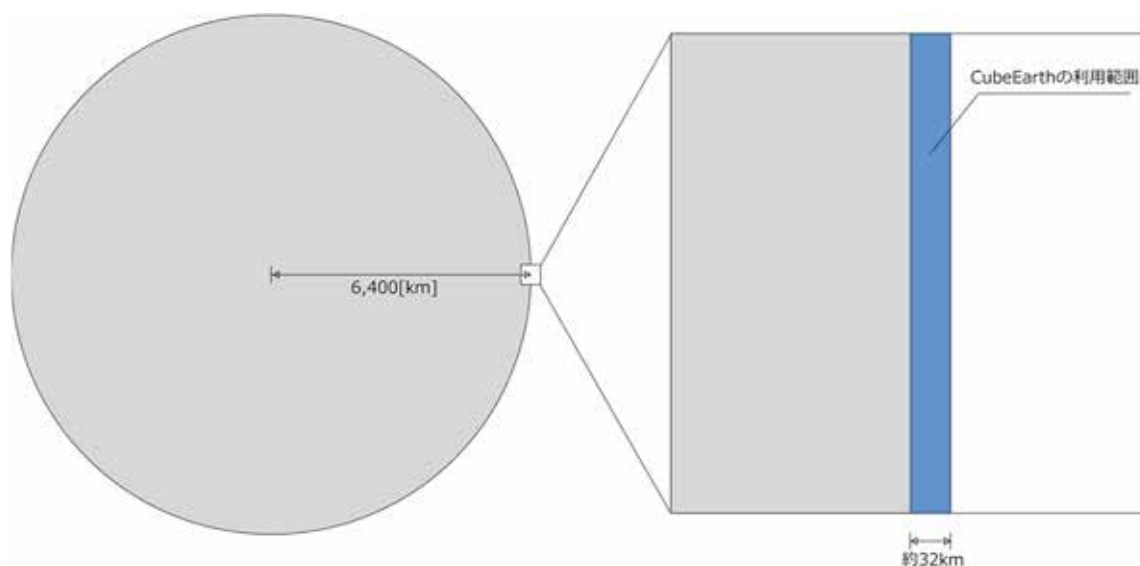


図6：高度方向の空間ID発行に関する考察

※特許 6817504（PTC 化済み）

4. Cube Earth の必要性、有用性、実績・応用、ドローン航行

4.1 空間IDの必要性、優位性と応用

空間IDが必要とされる理由

空間IDは異なるデータソース間でのデータ統合を容易にできるメリットがある。異なる機関や組織が収集・管理している空間データを一元的に管理する際に、空間IDがあれば特定の場所や領域を一意に識別できるため、データの重複や不整合を防ぐことができ、異なるシステムやプラットフォーム間でのデータの整合性が確保され、効率的なデータ統合が実現できる。

本空間IDの優位性と応用について

本空間ID発行技術は競合する技術と比べて下記のような優位性がある。

- ① メッシュ化が正方形（正六面体）である
- ② グローバル対応独自保有技術であるので、フレキシブルな対応が可能
- ③ 3D対応によりGIS情報をアドレス化することができ、
 - （ア）IoT機器の管理、データ集計、連結
 - （イ）点情報を集約、統計処理、AI処理しやすくなる
 - （ウ）ジオフェンシング（出入の確認）が可能になる
 - （エ）サイバー空間とフィジカル空間の融合が可能となり、結果的にデータ駆動社会の実現へ近づくこととなる。

ロールモデルとして、新たな観光アプリ、MaaSへの導入、ドローンへの導入等がある。

国土交通省 スマートシティの実現に向けて
（中間とりまとめ）より

図7：「個別最適から全体最適へ」



図8：空間IDのロールモデル

ユースケースとしては、ドローン運行管理、地図・GIS、地下埋設物管理の応用などへの応用がある。



図9：空間ID ユースケース

3.2 Cube Earth の実績・応用

Cube Earth の実績・応用

1. 大阪府大東市防災システム

住基データ / 福祉台帳情報との組み合わせによる避難行動要支援者の安否確認、の優先順位の決定に利用されている。

※一般社団法人レジリエンスジャパン推進協議会 レジリエンスアワード 2024 にて準グランプリ 古屋圭司初代国土強靱化担当大臣賞

2. ドローン航行への応用

「ドローンコリドーの基盤データとして」

- ・ドローンの航行可能な空間アドレスのピックアップや、速度制限などの情報を付加することでドローン航行用のコリドーを作ることができる。
- ・自律飛行レベル4の場合、4G/5Gの電波到達域を空間アドレスで記述することができるので、安定飛行を保証できる範囲等を可視化、航路設計に応用できる。
- ・ドローンの制御プログラムやUTMに空間アドレスと紐づく属性を利用することで、安定飛行や航行制限、安全保証をすることができる。

3次元空間情報基盤アーキテクチャの検討 報告書より（2022/7 DADC）



図10：大東市防災システム



図11 ドローンコリドーの可視化の例

「データ連携による外部データの取り込み」

- ・ 外外部データの指定座標と空間アドレスと当たり判定を行うことで、任意の外部データを取り込んでドローン航行に応用が可能となる。
- ・ 空間アドレスと気象データにより、航行に適した条件での航行経路を保証することができる。
- ・ 空間アドレスと PLATEAU の建物情報を取り込み、航行不可能領域として規定することで構造物を回避した航路設計が行えるようになる。
- ・ 河川、公海、公園などの地理データを取り込み、特定の属性範囲の地形選択を行うことで航行することが可能となる。

「航行ルートの自動作成」 前述の航行可能・不可領域 / 気象データ・地形データなどを取り込み、隣接している領域でネットワークを構築すると、最短経路問題を解くことができるようになり、地形、構造物を考慮した航行ルートを自動作成することが可能となる。

気象データ、地形データを元に指定領域に航行の優先順位をパラメータとして設定すると、優先順位を考慮した航行ルートを自動作成することが可能となる。

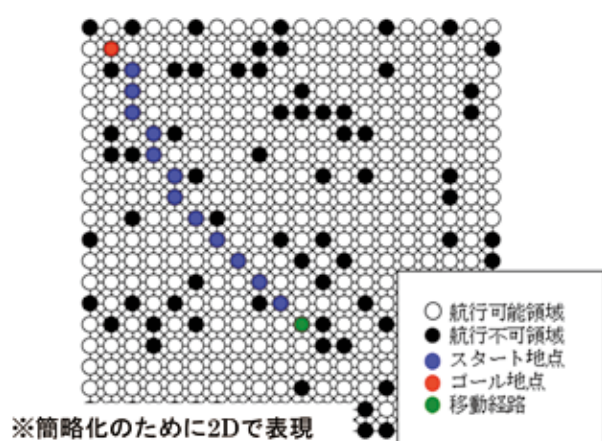


図 12：メッシュ化データを使った航行ルート自動生成例

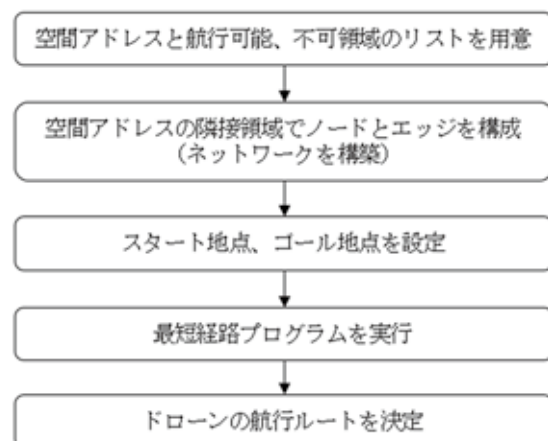


図 13：航行ルート生成フロー

参考 : <http://qiao.github.io/PathFinding.js/visual/>

「複数のドローンの衝突防止」

ドローン航行ルート決定時に、近くを飛行予定のドローンの航行ルートの空間アドレスを共有することにより、狭い領域で衝突を防止して、複数のドローンを航行させることができる。

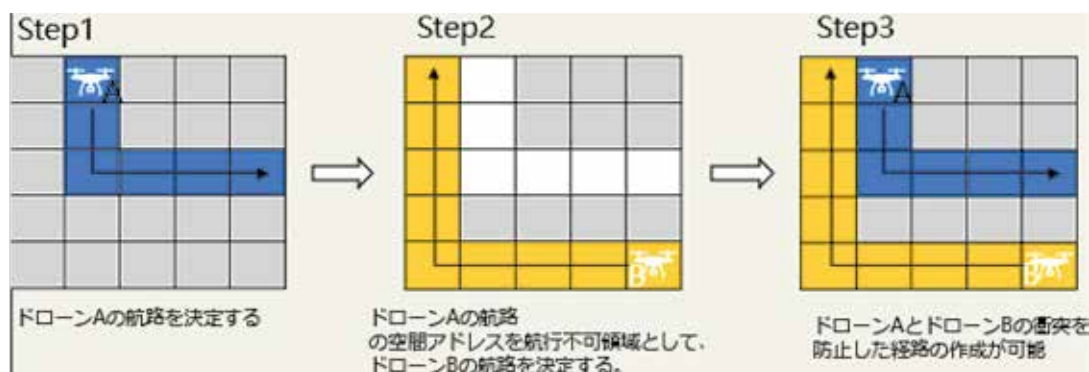


図 14：ドローンの衝突防止概念図

※簡略化のために 2D で表現

4. おわりに

Cube Earth 社のコア技術「空間 ID」の特徴とその作り方、Cube Earth の必要性、有用性、実績・応用、ドローン航行について詳しく説明した。今後の活動の重点は以下の通りである。

1. データ連携基盤の試作・構築

都市基盤データを空間 ID によりメッシュ化して、空間解析を行う汎用モジュールを作成する。データの選択、適用範囲、条件を設定することで都市課題の分析やローカルエリアに対応したアプリケーションの作成が可能となる。汎用的に使用できるデータ連携基盤の開発は都市 OS を稼働させるために必要なモジュールであり、その試作と構築を考えている。

2. 防災システムのデータ連携範囲の拡充

大東市での防災システムのデータ連携は住基データ / 福祉台帳情報の組み合わせであったが、風水害時に単位時間の雨量の累積量、河川の水位と組み合わせで避難指示や注意喚起の自動化が可能となる。これは河川水位が危険に達した場合、対応するエリアに避難指示や注意喚起をすることで避難遅れなどを防ぐことが想定される。その他、防災分野でのデータの組み合わせを考え、防災システムにおけるデータ連携範囲の拡充を進めていく。

3. ドローン関係システムとの連携

空間 ID をドローンへの応用のコンセプトを実際に適用し、無人航空機レベル 4 に対応できるようにドローン関係のシステムとの連携を図る。ドローンメーカー、ドローン関連メーカーとの協業を行い、実用化に努める。

本件においては、経済産業省 令和 4 年度第二次補正予算「中小企業イノベーション創出推進事業」の行政・民間の現場ニーズ（長距離／長時間飛行・自動運航）に対応できる高性能ドローンポートの開発のテーマにて共同採択事業者として採択された。令和 8 年度に商品化へ向けドローンポートの上空監視システム等を構築し、実現化を目指している。

4. ユースケースのピックアップ・実証等に、力を入れる。

- ・空間 ID の利用においてボクセルモデルを使用したシミュレーションなどの汎用化
 - ・空間 ID の範囲を対象としたジオフェンシングを用いた広告モデルの確立
 - ・地下埋設物の可視化
- などユースケースをピックアップし、継続的な実証を行う。

新設研究室紹介

システム情報論講座 医用工学分野 (野村研究室)

<https://nomuralab.jp/>

生体の恒常性（ホメオダイナミクス）・動的適応性（アロスタシス）とその破綻機序の解明と医学応用

我々の主要な課題は、医工情報学領域の学際研究を通じて、生体機能発現の動的メカニズムの理解を深化させること、ならびに、病によって生体機能を変容する疾患メカニズムの解明を目指す医学研究に貢献する情報学・システム科学基盤を構築することです。特に、生体の状態を“最適な状態”に保つ性質であるホメオスタシス（生体恒常性）の概念を現代的視点から捉え直したホメオダイナミクスやアロスタシス（動的適応性）とその背後にある生体制御メカニズムを、具体的な生体機能を研究対象として明らかにすること、ならびに、ホメオダイナミクスの不安定化に起因する疾患（動的疾患）のメカニズムを明らかにし、生体制御のメカニズムに基づく疾患の定量的診断支援を可能にする医用システム開発を目的とした教育と研究を行っています。

モデルベースド研究とデータ駆動型研究の統合による生体機能・脳機能へのアプローチ

上述の目的を達成するために、生体機能が表出したメゾスコピックあるいはマクロスコピックスケールの生体時系列信号、具体的には、身体運動データや脳活動データ等を観測・取得し、それらの生体時系列データが示す複雑な変動、すなわち生体ゆらぎや生体リズムを数値指標化します。これは、我々の研究におけるデータ駆動型アプローチであり、生体ゆらぎの特性に基づく健常者と患者の分類や、患者の疾患重症度の数値化を可能にする機械学習装置や動的バイオマーカーの開発を推進しています。

一方、観測された生体ゆらぎを生成する動的制御システムを同定し、その非線形動態を数理的に解析するモデルベースドアプローチは、我々の研究の中核課題です。観測データに同化された動的モデルには、生体ゆらぎを伴う健常機能の発現機序を説明する能力と、生体ゆらぎの変容に表出する疾患の発症、進行や医療的介入の効果を予測する能力があります。このとき、動的モデルの多くは、ホメオダイナミクスやアロスタシスによって実現される“最適な状態”を実現する強化学習系やモデル予測制御系として同定されますが、興味深いことに、外因性および内因性ノイズや、生体フィードバック制御で不可避な遅れ時間等、生体システム動態の不安定化を誘引する要素に溢れた環境の中で獲得される機能発現方策や制御様式は、巧みな仕組みによって、しばしば、柔軟性と頑健性を合わせ持つことがあります。人工的な工学機器に用いられるものとは本質的に異なる新しい制御様式を生体に学ぶことも、我々の研究の目的の一つです。

モデルベースド研究とデータ駆動型研究を統合したアプローチの開発は、21世紀の情報学・システム科学の最重要課題の1つであり、我々も、そうした統合的アプローチを見据えながら、医工情報学領域における種々の課題解決に貢献することを目指しています。

パーキンソン病による運動失調の脳内機序解明

我々の代表的な研究対象は、パーキンソン病に起因する運動失調です。パーキンソン病に起因した立位姿勢を含む四肢体幹や眼球姿勢の不安定化、あるいは歩行運動の不安定化は、ホメオダイナミクスの不安定化によって発症する動的疾患として捉えられることが分かってきています。パーキンソン病は強化学習の座である大脳基底核の疾患ですが、身体姿勢維持や歩行機能の実現と失調に大脳基底核におけ

る情報処理が重要な役割を果たしています。我々は、パーキンソン病患者における運動失調の脳内メカニズムの解明を目指し、運動計測、脳波・筋電図計測と、これらの時系列データに基づく生体運動の脳内制御系の同定に挑戦しています。

さらに、生体内分子の時空間動態を可視化するための磁気共鳴イメージング（MRI）を用いた分子イメージング技術を駆使することで、パーキンソン病患者の脳内で減少することが知られているドーパミンの脳内分布の高感度計測法や高速撮像法の開発にも取り組んでいます。

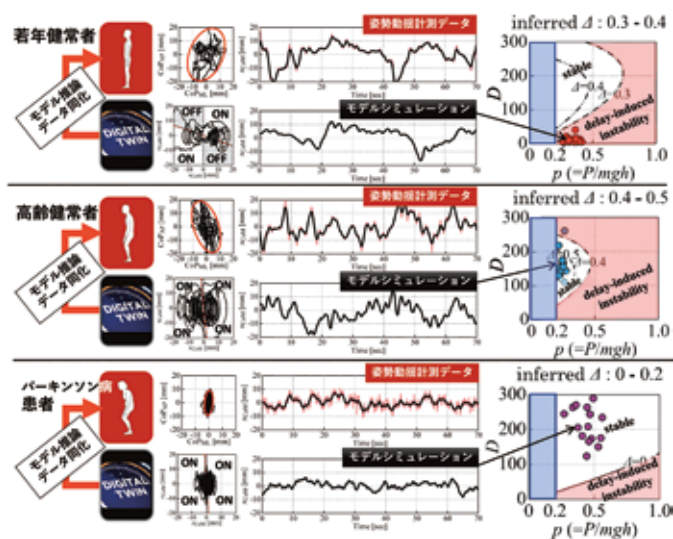


図1. ヒト立位姿勢デジタルツインに基づく姿勢ゆらぎ解析とパーキンソン病による姿勢機能変容の機序解明

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

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）

生体医工学講座複合システム論分野（土居研）

生体医工学講座生体機能工学分野（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（川上研）#

量子機能工学講座光量子電子工学分野（野田研）

量子機能工学講座量子電磁工学分野

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

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方式分野（佐藤研）

集積システム工学大規模集積回路分野（新津研）

集積システム工学講座超高速信号処理分野（橋本研）

システム科学コース

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医用工学分野（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）

先端電気システム論講座

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

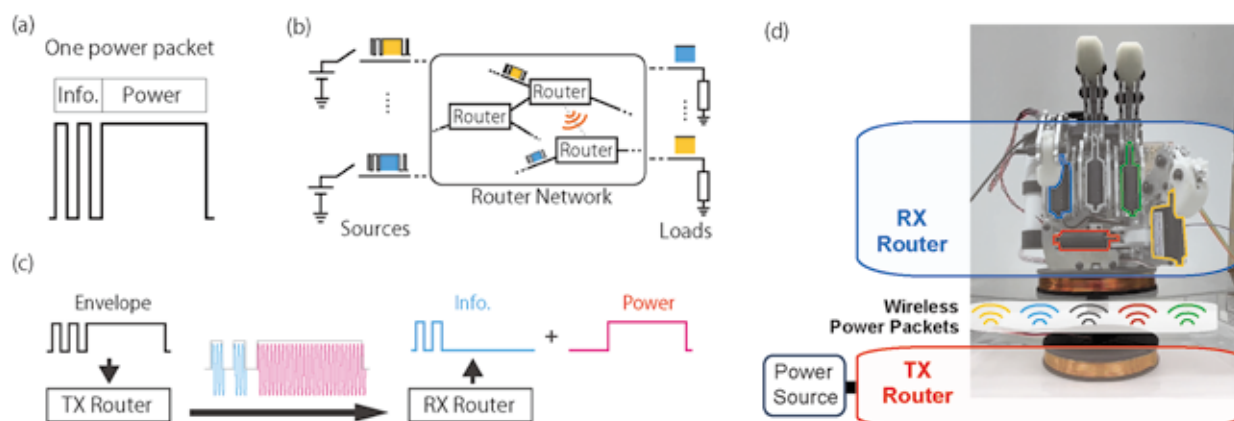
「無線電力パケットルータの開発とロボット給電への応用」

電力の伝送を情報のパケット通信のようにパケット化する、電力パケット伝送システムの提案がある [1]。電力パケットは時間的に分割されたパルス状の電力に、由来や宛先などを示す情報タグを物理層で付与した伝送単位である (図 a)。電力パケットはルータとよぶ機器が複数接続されたネットワークを介して、情報タグに基づいた回路スイッチングによるルーティングの結果として電源から負荷へと伝送される (図 b)。これにより、多数の電源負荷を含むネットワークにおいて、電源から負荷への全経路において各パケットが物理的に区別され、識別可能な状態で伝送される。これは、電力の由来や負荷の優先度などに応じた電源容量と負荷需要の間の動的な割当を (総量に対する割合にもとづく仮想的配分とは異なり) 物理的保証をもって実現できることを意味する。

本研究では、これまで有線接続を前提としていた電力パケットルーティングを、中近距離の無線チャネルを介し実現することに取り組んでいる。無線給電技術はモバイルデバイスの非接触充電、ロボット可動部への適用による配線除去、移動体への走行中給電など、幅広い応用を視野に研究が進められている。とくに中近距離における無線給電技術として、回路の共振現象を用いた磁界共振結合方式があり、高い効率などの特徴から注目を集めている。しかし同方式は、伝送特性の駆動周波数に対する鋭敏性により、複数の送受信器間でチャネルを分けた選択的な伝送が困難であるという課題がある。本研究では無線電力伝送のパケット化によりこの課題にアプローチしている。これまでに、有線の場合と同様に電力伝送の時間領域での分割と情報タグの付与によるパケット化を実現する無線電力パケットルータを開発した [2]。送信側ルータは振幅変調により電力へのタグ付けを行う。受信側ルータはタグ波形を電力波形から分離する回路を備えており、タグ情報をもとに自身が関与するパケットについてのみ選択的に受領と転送を行う (図 c)。これにより、無線チャネルを介した給電においても電力伝送の識別可能性が担保される。また、電力パケット伝送システムでは、電力伝送がパケットごとに分離されているため、ネットワークの一部の加除を他の伝送に影響を与えることなく行える。開発した無線ルータおよび伝送方式は無線結合部分を除いて有線ルータと互換性があり、両者を混合したルータネットワーク (図 b) の構築はネットワークの拡張性や経路選択の自由度の向上に寄与する。

さらに、本システムの応用例として、多指ロボットハンドの無線電力パケットによる駆動実験 (図 d) を行った [3]。タグ情報として、給電する指モータの識別情報に加え、その目標変位に関する情報を付与することで、各指モータへの選択的な給電のみならず、従来別チャネルで行われていた制御情報の伝送を統合できることを示した。

文献 [1] 引原, 情報処理, Vol.51, No.8, pp.943-950 (2010). [2] T. Mamiya, S. Mochiyama, and T. Hikihara, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.* Vol.5, No.2, pp.475-487 (2024). [3] T. Mamiya, S. Mochiyama, and T. Hikihara, *In Proc. 2023 IEEE 32nd Int. Symp. Ind. Electron.* pp.1-6 (2023).



図：電力パケットの無線伝送ルータの開発とロボット給電への応用。詳細は文献 [2,3] を参照。

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>

「レーダによる心拍成分の高調波を用いた高精度バイタル計測」

呼吸や心拍といった生体信号を接触センサによらず、離れたところから電波で計測する技術は、対象者に不快感や拘束感を与えず、着脱の煩わしさもないため、長期あるいは常時の人体モニタリングに適している。レーダによる生体信号計測は、人体の皮膚表面の微小な変位を計測することにより実現されるが、生体信号のなかでも心拍は、健康な成人の場合、周期がおおよそ 0.6-1.0 s 程度の準周期関数でモデル化でき、その変位は最大で 0.5 mm 程度、典型的には数十ミクロン程度の小さな変位しか生じない。このような小さな変位を計測するため、ミリ波帯のような高い周波数を用いることで、反射波の位相を介して変位波形を推定する手法が主流であった。その一方、呼吸は、周期がおおよそ 3.0-5.0 s 程度の準周期関数でモデル化でき、その変位は最大で 12.0 mm にもおよび、心拍成分よりもはるかに大きい。そのため、実際のレーダ計測では呼吸と心拍の成分が重畳した変位により変調を受けた信号が受信され、呼吸成分の高調波が心拍成分の基本波成分に干渉し、心拍計測精度が大幅に低下するという課題が避けられなかった。

この課題を解決すべく、我々はレーダ計測で得られた信号に含まれる心拍基本波ではなく高調波成分を用いた高精度バイタル計測技術を開発した。開発技術は、変位波形ではなく、受信された複素信号の 2 階微分の絶対値を用い、心拍の高調波成分を強調したうえで、ブラインド信号分離の一種である変分的モード抽出法によりその心拍高調波成分を選択的に分離抽出する。抽出された心拍高調波成分は、当研究室で開発してきたトポロジー法と呼ばれる手法により、瞬時心拍数へと変換される。この手法の詳細については、[1] をご覧いただきたい。開発手法の性能を評価するため、79 GHz 帯ミリ波レーダにより、レーダアンテナから 1.0 m 離れた位置に着座した健康な成人被験者を計測した。図 1 (a) に示すとおり、従来手法では心電計による参照値 (青破線) とレーダ計測による推定値 (黒点) が大きく乖離しているが、図 1 (b) に示すとおり、開発した手法を用いると、両者はよい一致を示し、大幅な精度改善が達成されている。今後、この手法を用いたヘルスケア・医療への応用など、非接触心拍計測技術の社会実装が期待される。

参考文献 [1] I. Iwata, K. Sumi, Y. Tanaka, and T. Sakamoto, "Accurate radar-based heartbeat measurement using higher harmonic components," arXiv:2407.07380 [eess.SP], Jul. 2024.

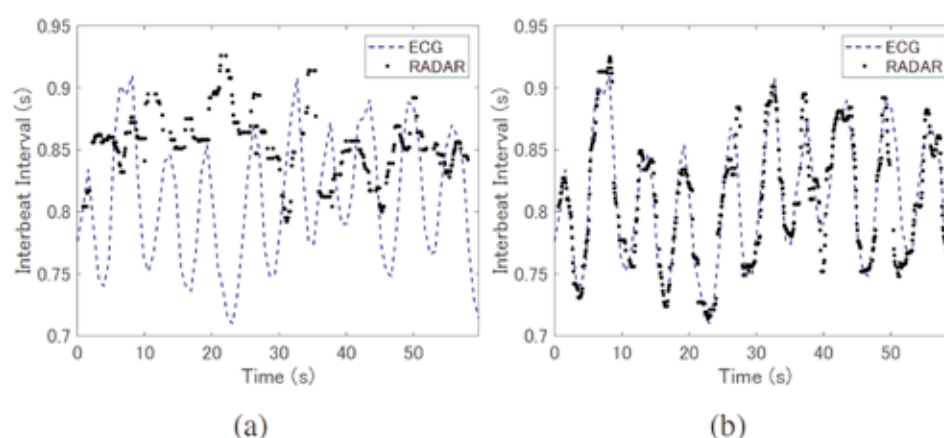


図1 ミリ波レーダを用いて (a) 従来手法、(b) 提案手法により推定された心拍間隔 (黒点) および心電計により得られた心拍間隔の参照値 (青破線)。相関係数は従来法 -0.29 に対して提案法 0.93、RMS 誤差は従来法 71.7 ms に対して提案法 19.5 ms となり、精度改善を達成。

電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

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

スパイラル薄膜高温超伝導導体を対象とするクエンチ解析技術

高温超伝導線を核融合用電磁石や回転機巻線等に適用するための研究が世界で進められています。現在実用化が最も近いと考えられている高温超伝導線は、テープ形状をもつ薄膜高温超伝導線であり、機械的自由度や電流容量の問題のため、これを単体で使い巻線することは現実的ではありません。我々の研究室では、複数本の薄膜高温超伝導線を円断面の金属コアの周囲にらせん状（スパイラル）に何層にも巻き付け、多数本の薄膜高温超伝導線を集合化した導体（スパイラル薄膜高温超伝導導体、図1）が、上述の問題を解決するためのカギとなると考え、研究を進めています [1], [2]。

高温超伝導技術の実用化において重要な課題の一つが、クエンチと呼ばれる現象です。クエンチとは、超伝導線内部に電気抵抗がゼロではない常伝導部がなんらかの要因で発生し、そこに電流を流し続けた場合にその常伝導部が拡大していく現象です。クエンチが発生したときに適切に検出し、保護を行うことができなかった場合、巻線全体の温度上昇、最悪の場合には線材が焼け機器の破損に至ってしまうことも考えられます。スパイラル薄膜高温超伝導導体は複数の薄膜高温超伝導線を集合化した導体であり、薄膜高温超伝導線間及び、薄膜高温超伝導線－金属コア間は一般的には絶縁されず、接触抵抗を介して電氣的に接続されます。この構造は、ある薄膜高温超伝導線に常伝導部が生じたとき、その薄膜高温超伝導線に流れている電流が他の薄膜高温超伝導線または金属コアに逃げることを可能にします。この現象は分流と呼ばれ、分流が可能であるという特徴により、スパイラル薄膜高温超伝導線はクエンチに対するロバスト性（安定性）が高い導体であると考えられています。実際にクエンチが発生した時にどのような特性を示すのかは明らかになっていませんでした。

我々は、スパイラル薄膜高温超伝導導体を対象としたクエンチ解析技術を構築し、その特性を明らかにしようとしています。クエンチ現象は電磁気的な現象と熱的な現象が複雑に関わるマルチフィジックスな現象ですが、スパイラル薄膜高温超伝導導体を簡単な回路モデル（図2）で表現し、そのクエンチ特性を調べています。スパイラル薄膜高温超伝導導体を構成する抵抗要素として、薄膜高温超伝導線における超伝導層と銅層の合成抵抗 R_{cc} 、金属コアの抵抗 R_{Cu} 、超伝導線または超伝導線－金属コア間の接触抵抗 R_{ct} 、導体両端における電源との接続抵抗 R_{ter} を考慮しています。ただし、 R_{cc} については、超伝導層は電流に対する依存性をもつ非線形抵抗と呼ばれる抵抗です。熱の流れについても同様に、回路網のような単純化したモデルにより定量的に計算し、クエンチ特性を評価しようとしています。

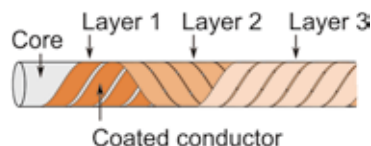


図1 スパイラル薄膜高温超伝導導体の概念図

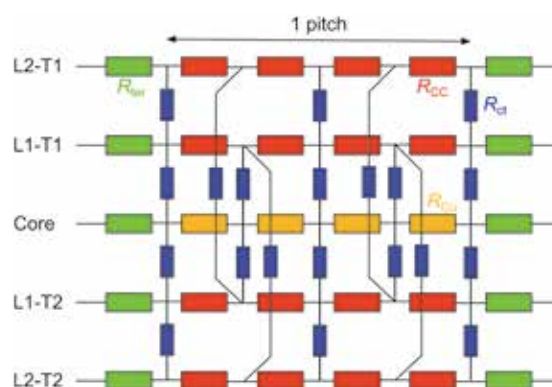


図2 スパイラル薄膜高温超伝導導体の回路モデルによる表現

参考文献

- [1] J. D. Weiss, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, 30, 014002, 2017.
- [2] Y. Sogabe, Y. Mizobata, and N. Amemiya, *Supercond. Sci. Technol.*, 33, 055008, 2020.

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>

ダーウィン近似マクスウェル方程式による高周波電磁界解析

高周波インダクタの設計においては、抵抗とインダクタンスといった基本的な値を設計するとともに、寄生容量を考慮することが重要である。従来のインダクタ設計では、抵抗とインダクタンスのみを考慮すれば十分であり、寄生容量による変位電流の影響は無視することが一般的であった。高周波インダクタの設計において、寄生容量の影響を考慮するには、変位電流項を考慮して通常のマクスウェル方程式を解けばよいと考えられるが、方程式が二階の時間微分項を含むために時間領域解析が問題となる。このようなことを背景に、時間の一階微分のみを含み寄生容量を考慮可能な手法としてダーウィン近似が注目されている。ダーウィン近似では、変位電流を誘導電界由来の成分とクーロン電界由来の成分に分解し、アンペアの法則において誘導電界由来の成分を無視する近似を行う。ダーウィン近似のもとでマクスウェル方程式は一階の時間微分項しか含まず、時間領域解析が容易であるという利点がある。そこで本研究室におけるダーウィン近似マクスウェル方程式に関する数理的検討に基づく最近の取り組みについて紹介する。

マクスウェル方程式を数値的に解く方法として有限要素法がよく用いられる。ダーウィン近似マクスウェル方程式を有限要素法により離散化し、連立方程式を解くことで数値的に解を得ることができる。しかしながら、実際に反復法により解いてみると、ダーウィン近似マクスウェル方程式はほとんど収束せず解を得ることが困難であることが多いという実験事実が確認される。これはダーウィン近似によって方程式が悪条件になっているため、この問題を解決するために、本研究室ではダーウィン近似に補助変数を導入する手法を研究している [1]。図1に補助変数を導入することで収束性を改善した例を示す。ダーウィン近似マクスウェル方程式を離散化すると、方程式の次元は（節点数+辺の数）となる。さらに補助変数を導入すると、方程式の次元は（節点数×2+辺の数）となるため、反復一回当たりの計算コストは増大することがわかる。しかしながら、補助変数による収束改善効果によって、収束までの反復回数を大幅に削減することができるため、全体の計算時間を短縮することが可能である。

ダーウィン近似における補助変数の導入による収束性改善のメカニズムは、マクスウェル方程式を解く際のA法とA-V法の関係に関連している。A法では、磁気ベクトルポテンシャルを変数としてマクスウェル方程式を解く。一方で、A-V法では、磁気ベクトルポテンシャルに加えて冗長な変数である電気スカラーポテンシャルを変数としてマクスウェル方程式を解く。両者はマクスウェル方程式のゲージ不変性により数学的・物理的に等価であるが、数値計算的には異なる振る舞いをし、多くの場合でA法よりもA-V法の方が計算時間が短くなる。これはダーウィン近似マクスウェル方程式における補助変数の導入による収束性の改善と同じメカニズムであることが言える。

補助変数を導入することで収束性を改善するというアイデアは普遍的なものであり、数値電磁界解析を高速化する重要なツールであると考えられる。今後は収束性の改善に関する数理的なメカニズムをより詳細に議論し普遍的な法則を見出すことが数値電磁界解析の発展に重要と考えられる。

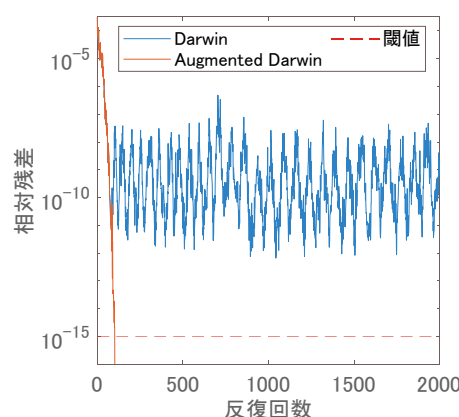


図1 ダーウィン近似マクスウェル方程式 (Darwin) と補助変数を導入した方程式 (Augmented Darwin) の反復求解における収束特性の比較

[1] K. Yoshida, T. Mifune, T. Matsuo, H. Kaimori, A. Kameari and T. Iwashita, "Efficient Preconditioning Technique for Frequency Domain Finite Element Simulation of the Darwin Model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 60, no. 3, pp. 1-4, March 2024, Art no. 7400404

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>

「希土類系積層永久磁石の絶縁層厚最適化と Halbach モータの高性能化に関する研究」

希土類系永久磁石は、佐川氏らによる発明 [1] 以来精力的な研究開発が行われ、例えば自動車主機用モータにおいて広範に実用に供されている。一方で、モータに要求される重要な性能の一つとして高出力密度化が挙げられ、即ち単位質量若しくは単位容積当たりの出力を向上することが求められる [2]。出力密度を向上する一方法として、その高回転数化が考えられる。しかしながら、回転数を高くすると相対的に永久磁石内部の渦電流損失が増加してしまい、効率低下や温度上昇を招いてしまう。

そこで、当研究室は（株）NDFEB との共同研究として永久磁石の積層化に取り組んでいる。一般に、強磁性体（ケイ素鋼板他）の積層化技術については多くの研究があり、既に広く各種電気機器に利用されている。一方で、永久磁石の積層化に関する研究は希少なことから、まず絶縁層厚の最適化設計に取り組んだ。図 1 には、3 次元渦電流損失解析モデル図を示す [3]。同図は、実験結果との対照を容易にするために測定系をそのままモデル化しており、即ち希土類系積層永久磁石を C 型ヨークのギャップ部に設置し、かつコイルによって励磁する構造となっている。図 2 には解析結果の一例を示すが、絶縁層厚を厚くするほど渦電流損失が低減している。一方で、絶縁層厚が厚くなると相対的に永久磁石部の体積分率が低下してしまい、その結果着磁束量が低下する。従って、渦電流損失値と着磁束量のトレードオフから絶縁層厚には最適値が存在することが明らかになり、希土類系積層永久磁石の設計に際しての重要な知見が得られた。なお、図 2 の解析結果の定性的傾向については実験結果によって実証済みである [3]。

上記結果を元に、絶縁層厚 10 μm の積層永久磁石を用いた Halbach 構造の軽自動車向 10 kW 級表面磁石同期モータの 3 次元電磁界解析を行った。紙面の都合で解析結果の説明は割愛するが、永久磁石を積層化することで機械出力や効率を大きく改善することに成功した [4,5]。本結果をもとに、今後実機試作と実証試験を実施すべく検討を行っている。

参考文献

- [1] M. Sagawa, et al., J. Appl. Phys., 55 (1984) 2083-2087
- [2] 中村 武恒, 電気学会誌, 144 (1) (2024) 26-29
- [3] T. Nakamura, et al., in preparation for submission
- [4] 言美 龍二郎, 他, 自動車技術会 2024 年春季大会（パシフィコ横浜）（2024 年 5 月 23 日）No. 189
- [5] R. Gombi, et al., in preparation for submission

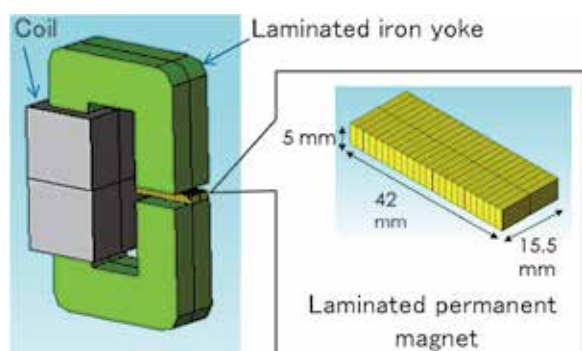


図 1：希土類系積層永久磁石の 3 次元渦電流損失解析モデル [3]

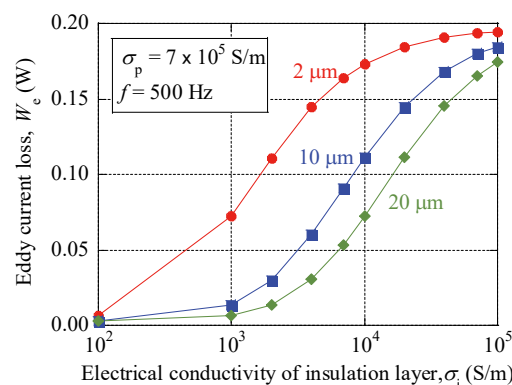


図 2: 永久磁石の導電率 $\sigma_p = 7 \times 10^5$ S/m、周波数 $f = 500$ Hz の場合の渦電流損失解析例 [3]

電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

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

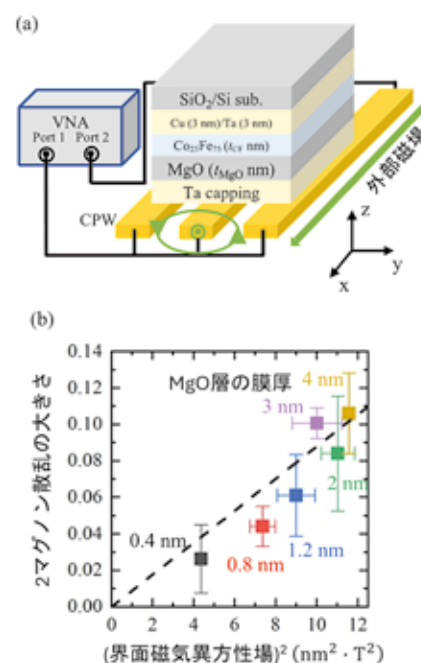
「界面磁気異方性制御による超薄膜強磁性体の磁気緩和変調」

強磁性体中の磁化が集団的に励起すると、スピン波と呼ばれる磁化歳差による波を形成します。このスピン波を量子化した準粒子をマグノンと呼びます。マグノンを制御し工学応用を目指す分野はマグノニクスと呼ばれ、電子スピンを制御するスピントロニクスから派生した分野です。マグノンは電荷の輸送を伴わず数 mm の角運動量の伝搬が可能という優れた伝搬特性や、フォトンやフォノンといった他の量子系との結合性を有しており、マグノンの豊富な物理を用いた様々なデバイス開発が期待されます。そうしたマグノンデバイスの機能を決定する上で重要なマグノンの性質は、分散関係とマグノンの緩和量です。これらの物性の制御は、マグノン素子としての幅広い機能の実現に繋がり、マグノンデバイスを実用に向けた重要なステップに押し上げることが期待されています。特にマグノン緩和量は、マグノンの伝搬長やマグノンによって構成された結合系の状態を決定する上で不可欠なパラメーターであり、その制御はマグノニクス分野における重要な研究対象です。

我々の研究室では、数 nm 程度の超薄膜金属に強電界印加することにより、本来材料によって固有であると考えられている物性変調の実現を目指しています。Co や Fe を使った超薄膜強磁性体においても、強電界を印加することで磁性が変調されることも報告されています。したがって超薄膜 Co や Fe、その合金におけるマグノン励起は、電界ゲート変調実現可能性を大きく向上させ、マグノンデバイスへのさらなる応用が期待できます。しかし超薄膜強磁性体でのマグノン励起で大きな障害となるのが、超薄膜領域におけるマグノン緩和の増大です。通常、界面における有限波数のマグノンへの遷移によって起こる 2-マグノン散乱は、数十 nm 程度の厚膜の強磁性体では無視できるのに対し、数 nm 程度の膜厚では急激に増加し無視できなくなり支配的になります。我々の研究室では、2 マグノン散乱の大きさが界面磁気異方性に依存することに着目し、強磁性体の隣接層の制御による超薄膜強磁性体のマグノン緩和の変調手法を研究しました。図の (a) に用意した試料とマグノン緩和評価のための強磁性共鳴の測定セットアップを示します。この研究においては、CoFe 合金と MgO キャップの界面磁気異方性をキャップの膜厚で制御し、2-マグノン散乱を変調する手法を実現させました。図 (b) が界面磁気異方性と 2-マグノン散乱の大きさの相関図を示していますが、理論に則った非常に強い正の相関が確認され、界面磁気異方性の制御により超薄膜 CoFe においてマグノン緩和が制御可能であることを示しています。この手法はある特定の強磁性体に限定される手法ではなく、全て強磁性体に適用できると期待でき非常に汎用的な設計原理を示しています。すでに磁性分野において界面磁気異方性の制御手法の研究は、活発に行われており、そうした知見も将来的に超薄膜強磁性体におけるマグノン研究に用いられ、電界ゲート可能なマグノン研究が加速することを期待しています。

参考文献 : Shugo Yoshii *et al.*, “Significant suppression of two-magnon scattering in ultrathin Co by controlling the surface magnetic anisotropy at the Co/nonmagnet interfaces” *Phys. Rev. B* 106 (17), 174414 (2022).

Shugo Yoshii *et al.*, “Significant modulation of Gilbert damping in ultrathin ferromagnetic films by altering surface magnetic anisotropy” *Phys. Rev. B* 109 (2) L020406 (2024).



図：(a) FMR 測定のセットアップとサンプルのスタック構造。(b) 2-マグノン散乱と界面磁気異方性の相関図。

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野

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

「フラッシュ照射光源とビーム走査光源を搭載した新たな非機械式3次元LiDARの開発」

Light detection and ranging (LiDAR) システムは、ロボットの自動走行、車の自動運転、ドローンの自動操縦等に必要不可欠である。なかでも、フラッシュ照射光源と測距カメラを用いたフラッシュ型LiDARは、非機械式で3次元測距を可能にするシステムとして期待されている。しかしながら、これまでのフラッシュ型LiDARにおいては、フラッシュ光源で広範囲を一括に照射するため、照射パワー密度が低く、測定範囲 (Field of View: FoV) に低反射物体が含まれる場合に、その物体からの反射光が弱くなり、測距が困難であるという、根本的な課題を抱えていた。また、このようなLiDAR用のフラッシュ光源としては、垂直共振器型面発光レーザー (VCSEL) アレイと外部光学素子を組み合わせたもの等が用いられているが、システムの小型化に限界がある状況である。そこで、我々は、上記のような課題が解決できる新たな小型LiDARシステムの開発に取り組んで来た[1]。新たなLiDARシステムでは、フラッシュ光源に加えて、ビーム走査光源も備えることで、低反射物体がFoV内に含まれる場合に、それをビーム走査光源で十分なパワー密度でスポット照射し、測距を可能にするものである。本稿では、開発した新たな小型LiDARシステムについて紹介する。なお、本研究は、電子工学専攻光量子電子工学研究室と共同で行った。

開発した小型LiDARシステムを図1 (a) に示す。本システムの上部に、外部光学素子等を使わずにオンチップで広範囲フラッシュ照射およびビーム走査が可能な変調フォトリソ結晶レーザー (PCSEL) [2] を設けている。左側に $30^\circ \times 30^\circ$ の範囲を照射出来るフラッシュ光源を設けており、右側に $30^\circ \times 30^\circ$ 範囲を 3° 毎にスポット照射が出来る 10×10 素子から成るビーム走査光源を設けている。LiDAR システムの下

部には測距カメラユニットを設置している。PCSEL、駆動回路やFPGA等を含む制御系も全てが本システムに内蔵しており、そのフットプリントは、名刺サイズ以下の超小型になっている。開発したLiDARシステムの評価のために、図1 (b) に示すように、FoV内に、高反射率の白い物体 (反射率 $\sim 98\%$) と低反射率の黒い物体 (反射率 $\sim 2\%$) を配置して、測距実験を行った。まず、フラッシュ照射のみで、測距を行った結果を図1 (c) に示す。同図より、高反射物体は測距出来ているのに対して、低反射物体の距離は測定出来ていないことが分かる。次に、ビーム走査光源で、2つの低反射物体を同時にスポット照射して測距を行った結果を図1 (d) に示す。同図より、スポット照射によって、フラッシュ照射のみでは測距出来なかった低反射物体の測距が出来ていることが見て取れる。さらに、本システムでは、画像認識により、自動的にFoV内の低反射物体を検知し、ビーム走査光源を用いてスポット照射することによる全自動測距や、物体の軌跡の計測等も可能である。現在、測距カメラを高感度化することで、より長距離測距への展開等を行っている。

参考文献 [1] M. De Zoysa, R. Sakata, K. Ishizaki, T. Inoue, M. Yoshida, J. Gellera, Y. Mineyama, T. Akahori, S. Aoyama, and S. Noda, *Optica*, **10**, 264 (2023). [2] R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, K. Kitamura, T. Inoue, J. Gellera, and S. Noda, *Applied Physics Letters -Perspective-*, **122**, 130503 (2023).

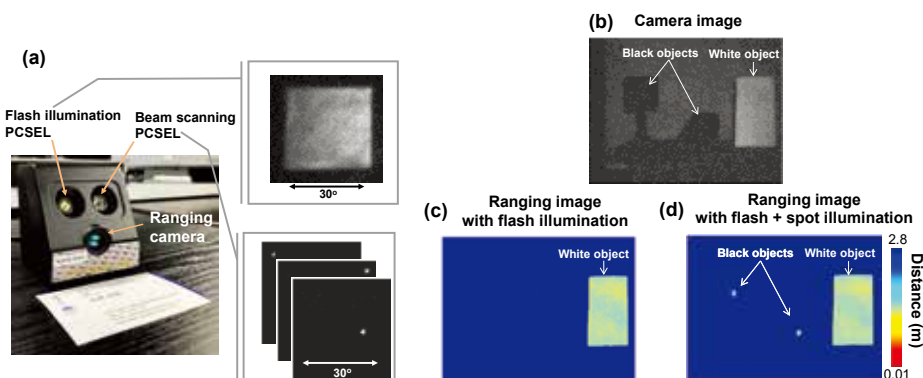


Fig.1 (a) : Photograph of the developed non-mechanical 3D LiDAR system implementing PCSEL-based wide-range flash illumination and beam-scanning laser sources. (b): Camera image of evaluation targets. (c): Distance measurements obtained by the LiDAR system using only the flash illumination. (d): Distance measurements achieved by the LiDAR system with flash and beam-scanning illumination.

知能メディア講座 言語メディア分野

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

Reformulating Domain Adaptation of Large Language Models as Adapt-Retrieve-Revise

While large language models (LLMs) like GPT-4 have recently demonstrated astonishing capabilities in general domain tasks, they often generate content containing false information (also known as hallucination) in specific domains such as law and medicine, hindering the application to real-world scenarios. This is because LLMs are trained primarily on web crawled text, while domain-specific data is usually located in specialized systems and cannot be directly accessed. Even when domain data is eventually collected, a **pressing challenge** is that **it is not feasible to continually train an LLM with GPT-4's scale**.

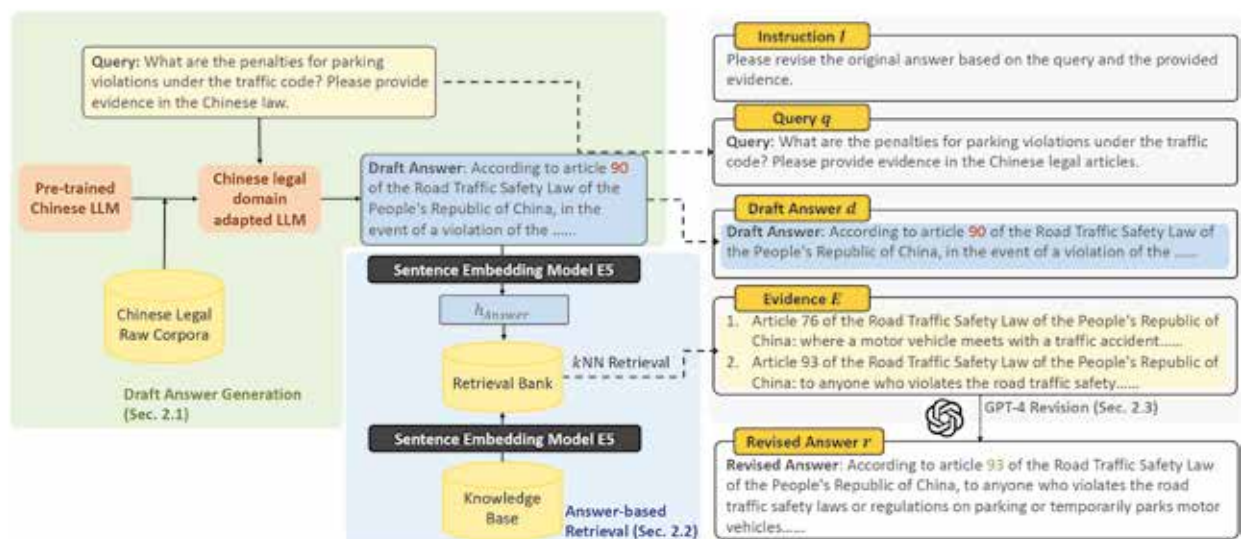


Figure 1. Overview of the Adapt-Retrieve-Revise pipeline for Chinese legal domain QA, which requires LLMs to generate the corresponding legal provision and the rationale for the judgment, given a brief case description as the query.

We propose a simple yet effective **adapt-retrieve-revise** approach (Figure 1) for adapting GPT-4 generation to Chinese legal domain QA. The initial step is to **adapt an affordable small 7B LLM** to the target domain by continually training it on newly collected domain data. When solving a task query, we leverage the small domain LLM to generate a draft answer. The draft answer is then used to **retrieve multiple pieces of supporting evidence** from an external in-domain knowledge base. Finally, the draft answer and evidence candidates are concatenated into one whole prompt to let GPT-4 **assess the correctness of evidence** and **revise the draft answer** to generate the final answer. Our approach combines the advantages of the efficiency of adapting a small domain model with the evidence-assessing and revision capability of GPT-4, effectively preventing GPT-4 from generating hallucinatory content.

[1] Wan Zhen, Yating Zhang, Yexiang Wang, Fei Cheng, Sadao Kurohashi. Reformulating Domain Adaptation of Large Language Models as Adapt-Retrieve-Revise: A Case Study on Chinese Legal Domain. In Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2024.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (橋本研究室)

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

磁化電流の近似計算の実現による高速かつ磁性体配置物にロバストな磁界式位置推定

私たちの身の回りのあらゆる「モノ」をインターネットに接続し、様々な情報を包括的に収集することで、我々の生活環境の改善を図る Internet of Things (IoT, モノのインターネット) 技術は私たちの生活を支えるインフラ技術の一部となりつつあります。近年の半導体技術の向上に伴って、数多くの小型センサや高性能センサが生み出されつつあり、従来よりも高精度かつ広範な情報の取得が可能になってきています。そうしたセンサが取得した情報は、センサの位置情報と結び付けられることで真価を発揮しますが、センサが設置される屋内で位置推定を行う技術は、現在発展途上にあります。

従来、屋内におけるセンサの位置推定は、図1左図に示すような3点測量によって行われてきました。3点測量には、複数の基地局を正確に設置せねばならず、設置コストや運用コストが高いという課題があります。本研究では、図1右図に示すように、単一の基地局コイルが生成する磁界の「強度」と「方向」の両方の情報を使うことで、センサと基地局の「距離」と「方角関係」を導出します。導出した距離情報と方角情報の両方を利用することで、単一基地局による位置推定を実現しました。

磁界を位置推定に利用すると、鉄などの強磁性体を使用した機材等によって、位置推定精度が低下するという課題があります。磁性体が磁界を歪めてしまうためです。図2(a)は原点に設置したコイルが生成する磁界の強度をヒートマップで、磁界の方向を矢印で示しています。図2(b)は(a)の環境の $(y, z) = (100, 100)$ [mm] の位置に一辺が50mmの立方体状の磁性体を置いたものです。図2の(a)と(b)を比較すると、磁性体付近で磁界の向きや強度が大きく変化しており、位置推定精度を悪化させることが分かります。従来、磁性体が磁界に与える影響を解析するには膨大な計算コストがかかり、高速かつ高精度な磁界式位置推定は困難でした。そこで本研究では図3に示すように、磁性体が磁界の歪みを生み出す原因となる「磁化ベクトル」と呼ばれる要素を、磁性体表面に流れる電流で近似して、位置推定に活かす方法を実現しました。図4は実際の位置推定結果を示しています。従来手法では磁性体周辺で位置推定精度が大きく悪化する一方で、提案手法は磁性体の近傍であっても、0.1秒以下の時間で高精度な位置推定を行うことができています。

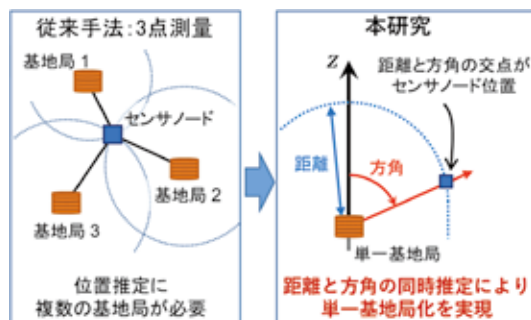


図1: 従来の位置推定法と、提案手法の比較

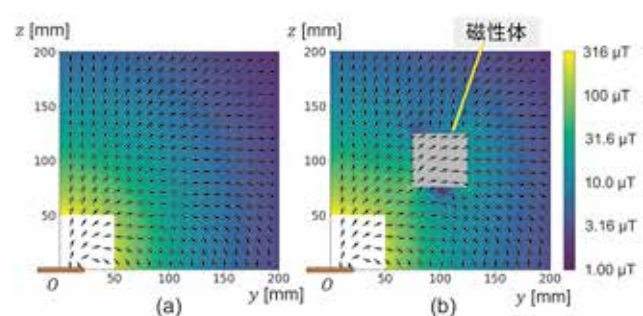


図2: (a) 磁性体がない場合と、(b) 磁性体がある場合、のそれぞれにおける磁界の強度と方向

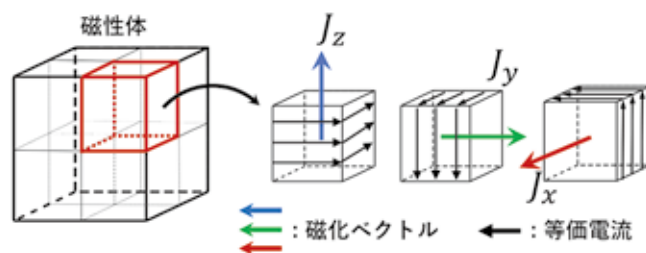


図3: 磁性体が磁界を歪める要因となる「磁化ベクトル」を等価電流で近似する様子

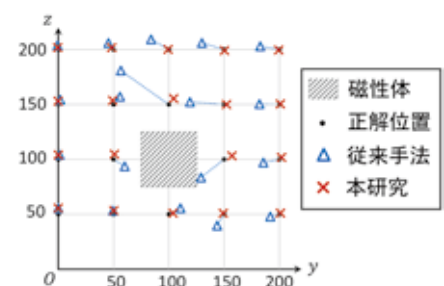


図4: 位置推定結果

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）

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

「認知アーキテクチャを用いた知的集中状態変化のメカニズム解明」

オフィス等室内で行われる知的労働の効率、知的生産性を向上させることに関心が集まっている。知的生産性に関する研究の一環として、執務環境を制御し知的労働に対する知的集中を向上させることで知的生産性が向上することが分かっている。しかし、知的集中状態が何を要因として変化しているのかは明らかにされておらず、執務環境と知的集中の関係を厳密に議論できていない。そこで、この研究では、情報処理の観点から知能の性質を扱う認知神経科学の分野で用いられる認知アーキテクチャを使用し、知的集中状態変化のメカニズム解明を試みている。なかでも人間の反応や脳の活性化パターンを予測し人の認知と知的集中の関係を調べることができる ACT-R を用いている。ACT-R は、過去の多くの心理学実験から得られる理論や認知神経科学の知見をベースに作成された認知アーキテクチャであり、下図に示すように、人間の脳を複数のモジュールとみなし、それぞれのモジュールが並列に動作し情報を取得及び保存するよう設計されている。プロダクションモジュールは、人間の脳の大脳基底核に相当し、各モジュール間の相互作用を媒介する役割を持ち、各モジュールへの命令や各モジュールの状態に依存する一連の処理（手続き）をルールとして記述し格納することができる。その他の各モジュールは人間の大脳皮質の部位とそれぞれ対応する機能に相当する。外部環境との情報の入出力や知識の保存などが記号として表現され、それらはプロダクションモジュールによる監視や照合のために使われる。各モジュールで処理する際にはシミュレーションパラメータによって処理の進行パターンを変えたり、処理に必要な時間的コストを変化させたりすることができる。認知プロセスを仮定しパラメータを適切に設定することで、人間の認知行動そのものやその認知行動にかかる時間を再現することができる。

この研究では、まず認知課題を設計し知的集中状態変化を伴う認知行動を計測する実験を実施し、次に、ACT-R を用いて計測結果のうち知的集中状態変化が表れている認知行動時間のばらつきを精緻に再現するシミュレーションモデルを構築する。さらに、認知神経科学の観点から構築したシミュレーションモデルが持つモデル構造やパラメータを解釈し、知的集中状態変化のメカニズムを解明することを試みる。実験では、25 名の参加者を対象に、モチベーションを変化させることで知的集中状態変化を促し、認知行動として認知課題の解答時間と解答中の視線移動推移を計測した。シミュレーションモデルの構築では、認知課題の解答に必要な認知プロセスに加え、認知プロセス進行を短時間一時的に停止させる中断状態を確率分布に従い介入させることで、シミュレーション結果による計測結果の再現精度を向上させた。また、計測結果を基に多目的遺伝的アルゴリズムを用いて最適化することでパラメータを調整した。結果として、知的集中状態変化は、認知的機能に刺激を与える抑制性ニューロン数の変化により生じる可能性を示唆した。現在、モデル構築方法および提案したメカニズムの妥当性を評価し、執務環境における知的集中状態変化のメカニズムについて検討している。

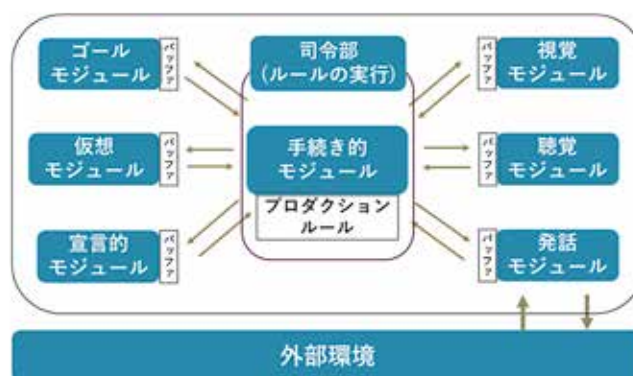


図. ACT-R の構成

エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）

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

「Cu テープ上に導電性酸化物をバッファ層としてエピ成長させて作製する高温超伝導線材」

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

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

我々は半導体製造分野で発展させられてきた薄膜成長技術（エピタキシャル成長技術）と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に向けた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数 km の長さに渡って単結晶のように揃える（3 軸結晶配向）新技術の開発に成功しています [2]。具体的には圧延と加熱によって 3 軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ）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を電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度は液体窒素中（77 K）で $30,000 \text{ A/mm}^2$ 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 を不使用とした新規構造（図 1）の開発に成功し [3]、現在、実用化に向けて開発に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、全固体薄膜電池、燃料電池などへの応用も研究中です。

参考文献

- [1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8** (2000) 53-60.
- [2] 土井俊哉、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.
- [3] T. Doi et al., "High critical current density $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ coating on conductive Nb-doped SrTiO_3 and Ni double-buffered {100}<001> textured pure Cu tape for low-cost coated conductors without generation of any insulative oxides at interfaces", Applied Physics Express **12** (2019) 023010.

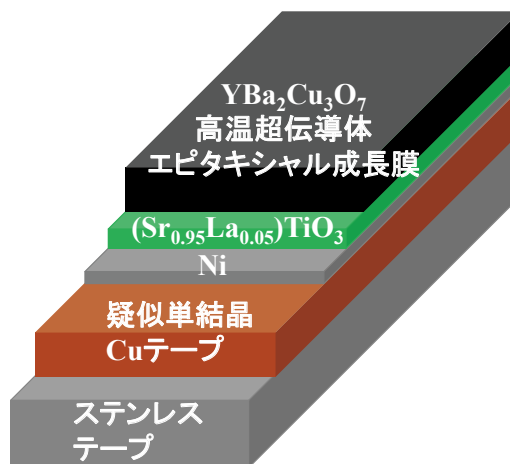


図 1 開発中の高温超伝導線材の概略構造

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/>

イオンビームアシスト成膜法を用いた高性能電池材料の開発

近年、携帯デバイスの小型化が進んでいるが、充電なしで長期動作が求められる医療用ウェアラブルデバイスや、環境測定用センサーなどの超小型 IoT デバイスへの応用を進めるためには、さらに小型で軽量かつ柔軟性の高い高性能な薄膜型電池が期待されている。そのような薄膜電池の高性能化には、低コスト、高容量かつポリマーなどの低融点の基板でも成膜可能な正極活物質の開発が鍵を握っている。

我々は、上記のような特徴を持つ新規な電池正極材料の合成手法として、イオンビームアシスト成膜 (IBAD) に注目している。IBAD は、成長中の薄膜に Ar などのイオンビームを照射しながら成膜を行う手法であり、他の合成手法にはない特徴を有している。一つは、加速したイオンの運動エネルギーが物質の結晶化エネルギーに転換されるため、薄膜の成長温度を下げる事が可能である点である。さらに、イオンの照射方向に依存した、特定の配向が優先的に成長することが報告されている。本手法により薄膜の配向や特定の原子の欠陥密度などを制御することにより、低温合成が可能かつイオン伝導度の高い物質が作製できる可能性があると我々は考えており、新規な正極材料や固体電解質の探索手法としての有用性を検証している。

今回我々は、ベースの成膜法としてパルスレーザー蒸着 (PLD) を用いた IBAD を用いて、Li イオン電池の典型的な正極材料である LiCoO_2 (LCO) 薄膜をヒーター加熱なしで作製し、その組成、構造および Li イオン電池の正極としての特性を評価した。その結果、IBAD によって作製した LCO 薄膜の構造は通常 Li イオン電池正極に用いられる層状岩塩型ではなく、Li と Co がランダムに岩塩構造のカチオンサイトを占有する無秩序岩塩型構造 (DRS) であることが分かった。図 (a) は IBAD を用いた場合と用いなかった場合の DSR-LCO のインピーダンス測定の結果である。通常、DRS-LCO は Li イオンの伝導度が小さく、正極に適していないと考えられているが、IBAD を用いることによりイオン拡散領域のインピーダンスが減少していることを示している。さらに図 (b) は膜厚が約 80 nm と非常に薄い LCO 薄膜を正極とした Li イオン電池の充放電特性であるが、放電容量が約 150 mAhg^{-1} と層状岩塩構造を超える容量を示した。インピーダンスの減少および容量増加の詳細なメカニズムはまだ明らかになっておらず、膜厚を増加させると容量が低下するなど、現状ではまだ課題も多くあるが、これらの結果は、IBAD が、従来電池材料として十分な性能を持たない電極や固体電解質の特性向上に有効である可能性を示している。

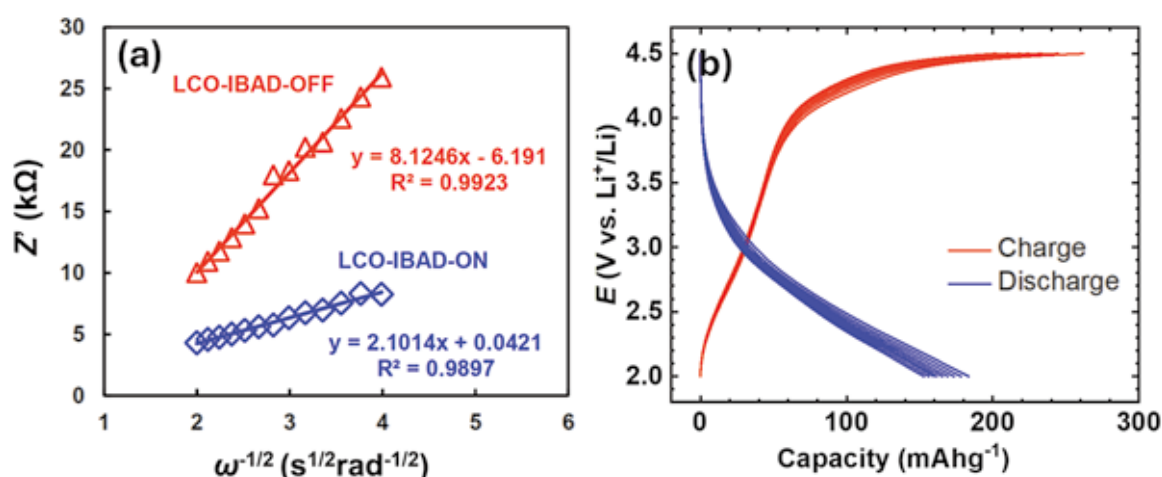


図 Al 基板上に作製した LCO 薄膜正極とし、金属 Li を負極としたコインセル型 Li イオン電池の (a) インピーダンス測定および (b) 充放電試験結果。

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）

<https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/>

「核融合プラズマの自励振動現象」

エネルギーが外部から継続的に与えられている非平衡な系では様々な非線形現象が観測される。外部入力是非振動的（多くの場合一定）であるにもかかわらず、系の特性によって振動が生じる。（似たような現象に共鳴があるが、外部入力为非振動的である点が異なる。）核融合プラズマは外部からのエネルギー注入により維持されている非平衡系である。核融合プラズマでも自励振動が観測されている。自らの核融合反応で維持されている自律燃焼プラズマの場合、プラズマの温度や密度が振動すると反応出力も振動する。するとプラズマの振動に正あるいは負のフィードバックがかかる。正のフィードバックがかかるとプラズマが壊れてしまう。このため自励振動のメカニズムの理解は重要である。

ヘリオトロンJの低密度プラズマにおいて自励振動が観測されている。自励振動のメカニズムの一つに捕食者－非捕食者モデルがある。これを微分方程式で表したものが以下のロトカ・ボルテラ方程式である [1]

$$\frac{dx}{dt} = ax - bxy, \quad \frac{dy}{dt} = -cy + dxy$$

ここで x として平均密度 n_e 、 y として磁場揺らぎ強度 $\dot{B}_{tor} (env)$ を選出した。磁場揺らぎ強度では低周波成分 (<500 Hz) をローパスフィルタで抜き出し、envelope を計算している。このロトカ・ボルテラモデリングの結果を図1に示す。モデルは観測をよく説明できる。ここでは平均密度が非捕食者であり、磁場揺動が捕食者である。平均密度は周辺の密度勾配のインデックスと考えると、周辺の密度勾配の上昇により磁場揺らぎが成長し、揺らぎが駆動する輸送により密度勾配が減少し、磁場揺らぎも減少する。そして輸送が改善したことから再び周辺密度勾配が大きくなる [2]。このような時間遅れのある相互作用が周期性を生み出していると推定される。また、モデルから得られたパラメータの値から振動の周期は（閉じ込め時間×乱流減衰率） $^{1/2}$ 程度となる事が明らかになった。

ロトカ・ボルテラ方程式ではわずかな実験条件の違いにより自励振動が生じたり、生じなかったりする特徴を再現することはできないため、ロジスティック性による飽和特性を導入しモデルを拡張している。密度の上昇はある程度で飽和する、密度勾配が大きくなっても磁場揺動の成長は飽和する、という効果を考慮した結果、方程式の係数の一つの値が変わることでリミットサイクル振動する解と、振動が減衰し定常状態になる解に分岐する事を示す事ができた。しかし、自励振動が生じない場合のモデルと観測を一致させるようなパラメータセットは未だ得られていない。特に振動の減衰過程が観測では明らかになっていない。このため更なる観測とモデルの改善に取り組んでいる。

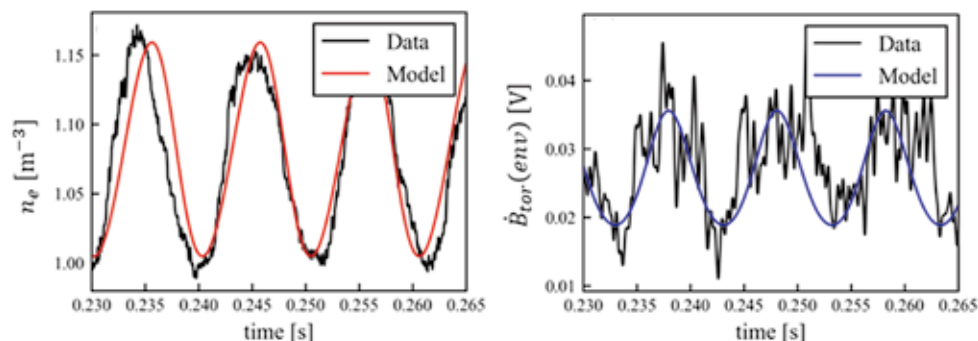


図1 観測値とモデルの時系列比較（#84291）

[1] Berryman, A. A. Ecology **73** (1992) 1530.

[2] Yagi, M. Nucl. Fusion **39** (1999) 1013.

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/>

「二次元半導体人工ヘテロ構造でのモアレ励起子による量子光学」

近年、単層遷移金属ダイカルコゲナイド (MX_2 ; $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$; $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$) などに代表される、わずか原子数層の極めて薄い厚みを有する新たな二次元半導体の光科学やその応用研究が精力的に進められている。この二次元半導体を光励起すると電子とホール対が生成され、それらがクーロン力で互いに強く束縛し水素原子様の励起子を形成する。この極めて薄い二次元半導体に閉じ込められた励起子は、その量子閉じ込めと誘電遮蔽効果によって安定に存在し、二次元半導体の特異な光学的性質を担っている。その一方で、このような二次元半導体を角度をつけて重ねることでモアレ長周期構造が形成され、モアレの物理と呼ばれる新たな物理現象が発現することが明らかになりつつある。周期的な原子配列に起因するモアレ長周期構造によって、励起子がそれぞれの原子位置でエネルギーの違いを感じ、これが面内での量子閉じ込めポテンシャルとして機能する。そのため、原子数層の厚みとこのモアレポテンシャルによる量子閉じ込めによって、励起子を0次元的に局在化させ（モアレ励起子）、規則的に配列させることができる。我々は、このモアレ物理が発現する二次元半導体において、先端的分光手法やデバイス作製技術を用いて、新しい光科学の研究の開拓と量子光学に向けた研究を進めている [1-5]。

ここでは実際に、 $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$ （二セレン化タングステン／二セレン化モリブデン）からなる二次元半導体人工ヘテロ構造について、このモアレ励起子を利用した量子光学に向けた研究例を紹介する [5]。実験では、二次元半導体人工ヘテロ構造に微細加工を施しモアレポテンシャル数を制限することで、光の回折限界の制限下で単一モアレ励起子からの非常にシャープな発光信号を観測することに成功した。さらに図1(a)に示すように単一のモアレポテンシャルからの発光を分割しその間の干渉信号であるインターフェログラムを測定した結果を示す。このインターフェログラムの信号の減衰は、単一のモアレ励起子の量子力学的なデコヒーレンス時間を反映している。

この結果から、モアレ励起子の量子コヒーレンス時間は、10ピコ秒以上の時間であり、確かに0次元系特有の量子二準位系として振る舞っていることが明らかとなった。これらの知見から、周期的に配列したバレースピン自由度を有するモアレ励起子を活用し、将来の量子光学に向けた更なる研究進展が期待される。

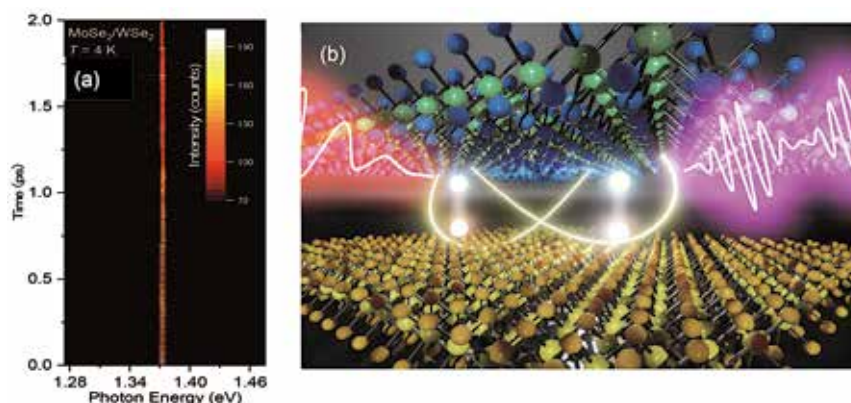


図1 (a) 二次元半導体ヘテロ構造のモアレ励起子の発光信号インターフェログラム、(b) モアレ励起子による本研究のイメージ

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] K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nano Lett.* **21**, 5938 (2021).
- [3] K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *ACS Nano* **16**, 16862 (2022).
- [4] H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *ACS Nano* **17**, 13715 (2023).
- [5] H. Wang, H. Kim, D. Dong, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **15**, 4905 (2024).

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）

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

「機動的な車載複合ライダーによる大気微量成分の3次元センシング」

大気中には、様々な微量成分物質が存在しています。各成分の構成割合は場所や高さにより異なり、とりわけ発生源に近い地表面付近では、燃焼活動などから排出された人為起源物質と、植生活動、土埃、波飛沫等から放出された自然起源物質が混在しています。これら微量成分の複雑な拡散・輸送・変質・沈着過程は、PM_{2.5}に代表される大気エアロゾル濃度予測や気候影響評価の際の不確実性の要因の一つであり、その動態の正確な理解は、健康や植物の成長などに関与する生活に密接した重要な課題となっています。

当研究室では、光・電波・音波を用いた大気リモートセンシング技術の開発に取り組んでいます。そのうち、光学計測では、大気微量成分や水蒸気・気温の鉛直分布を計測する大気ライダー手法の高度化を行ってきました。大気ライダーは、レーザと集光・検出器で構成された自動運転に用いられている距離計としてのLiDAR (Light Detection And Ranging) と基本原理は同じですが、大気からの微量な散乱光を検知し、かつ成分や形状を区別して計測する必要があるため、送信レーザの出力や波長、受光系の分光・検出部が異なります。また、集光効率を高めるため、受信には口径の大きい望遠鏡（約100 mm～800 mmφ）を用いる必要があります。口径が大きくなるほど、受信視野と送信ビームの視野重なり関係から近傍の計測ができなくなりますが、新たに考案したウェッジプリズム光学系により近傍の可測領域を約100 mから7 mにまで近づけることができました。このライダーを小型・小電力化、さらにレーザのアイセーフ化に対応して車に登載することで、地上付近からの大気成分立体観測が可能となりました。



図1 大気ライダー用ウェッジプリズム光学系。観測視野方向が異なる複数のウェッジプリズムを組み合わせることで、信号飽和を抑えながら近傍からの計測を可能としている。

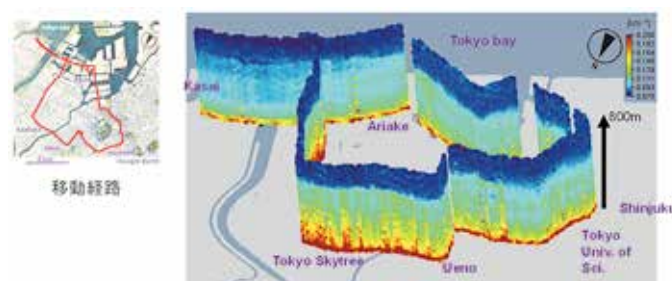


図2 車載ライダーによる東京都心・湾岸地域の夜間都市境界層の観測例（2022/12/24 3:58-5:28 JST, 消散係数波長 355 nm）

高層ビル街に囲まれた東京都心での車載ライダーによる大気エアロゾル移動観測では、大気汚染物質を多く含む安定した夜間の都市境界層が日射や海陸風によって解消されていく様子を立体的に捉えることができました。また、地上定点観測と衛星リモートセンシング観測との空間ギャップを埋める移動計測を、海上橋や山岳域等で実施してきました。この車載ライダーは、水平移動観測にも対応しています。最近では、その機動性を生かして水田や畑などの圃場直上の気象・大気環境や飛翔性昆虫をモニターする、スマート農業用環境センサへの応用に向けた取り組みを行っています。

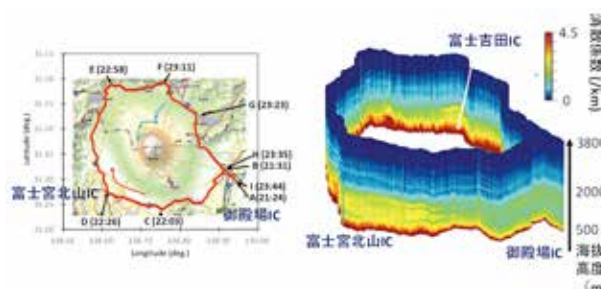


図3 山谷風の影響を受ける富士山麓周辺の山岳大気観測例（2023/7/18 21:30-23:30 JST, 消散係数波長 355 nm）

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/>

計算機シミュレーションによる放射線帯粒子の変動が地球磁気圏に与える影響

地球周辺の宇宙空間には、放射線帯と呼ばれる高エネルギー粒子が集まっている領域があります。高エネルギー電子は宇宙飛行士の被ばくや、地球を周回する人工衛星、国際宇宙ステーションなどの宇宙機の表面帯電や内部帯電を引き起こすことがあり、電子のエネルギー分布とその時空間発展を理解し、予測することは重要です。電磁サイクロトロン波は放射線帯電子と容易に相互作用することができ、数秒という短い時間で電子を効率的に加速し、また電子の進行方向（ピッチ角）を変えることができます。そのため、電磁サイクロトロン波との相互作用は放射線帯の生成と放射線帯電子が大気へ降り込む（オーロラの発生原因の一つ）メカニズムの一つと考えられています。計算機シミュレーションを用い、電子と電磁波動との相互作用についてマクロ過程とミクロ過程の連関の観点から研究を進めており、安心・安全な宇宙環境の利用に貢献したいと考えています。

放射線帯の生成について

放射線帯内における荷電粒子の局所的な加速効率を研究しています。非線形理論と人工衛星観測データを用い、異なる振幅や伝搬角を持つ電磁サイクロトロン波のモデルを構築し、テスト粒子シミュレーションを実施し、非線形波動粒子相互作用の効果を含み数値グリーン関数のデータベースを作成しました。このデータベースでは、電磁サイクロトロン波による 10 keV から 6 MeV までのエネルギーを持つ電子の加速効率がテーブル化されており、グリーン関数の畳み込み積分を繰り返し実行することにより長時間にわたる共鳴電子の加速やピッチ角散乱の変動を再現することができます [1]。理論的に求めた電子のピッチ角の時間変化と、数値グリーン関数の結果と比較することで、各共鳴がもたらす電子ピッチ角散乱過程と、波の振幅・伝搬角・周波数・周波数変化率・背景磁場強度の空間勾配などのパラメータ依存性を解明することに成功しました (図 1)。keV 帯の電子を MeV レベルの放射線帯電子まで加速するのに必要な時間は、わずか数分であることが分かりました。

放射線帯電子の大気への降下について

電磁サイクロトロン波によって超高層大気へ降下する電子の軌道を再現し、降下電子フラックスの波動の振幅および伝搬角に対する依存性を明らかにしました。背景磁場に対して斜めに伝搬する波動の場合の方が、平行伝搬する波動の場合と比べて多くの MeV 電子を降下させることが判明し、斜め伝搬電磁波による多重共鳴に起因した二段階のピッチ角散乱が引き起こす電子降下プロセスを提案しました [2]。広い範囲の伝搬角を持つ電磁波により、数十 keV から数百 keV までの磁気圏電子が電離層に急降下するメカニズムが明らかになりました。

- [1] Y.-K. Hsieh et al., Nonlinear evolution of radiation belt electron fluxes interacting with oblique whistler mode chorus emissions. *JGR: Space Physics* **125.2**, e2019JA027465 (2020).
- [2] Y.-K. Hsieh et al., Energetic electron precipitation induced by oblique whistler mode chorus emissions. *JGR: Space Physics* **127.1**, e2021JA029583 (2022).

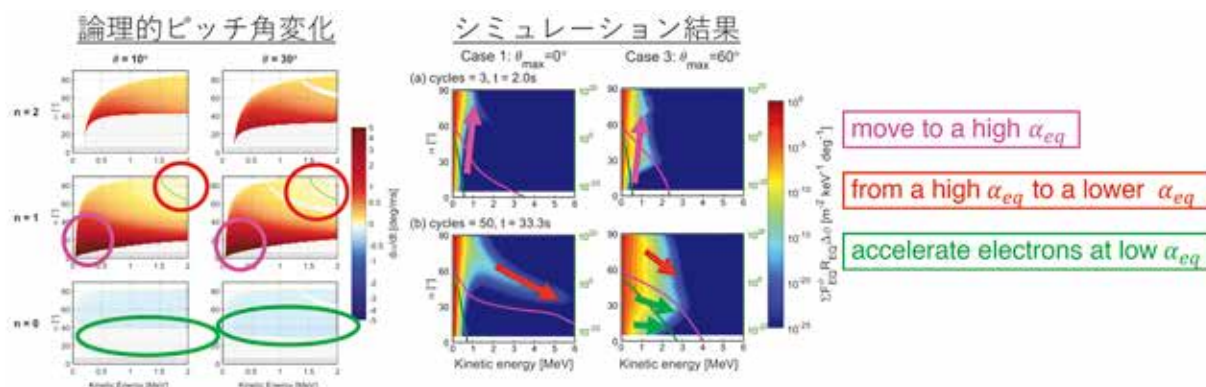


図 1. 非線形トラップ電子のピッチ角散乱と電子加速の関係

令和6年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

樋 渡 建 人 (薄准教授) 「双方向性を考慮した電力パケット伝送制御に関する研究」

自立移動型システムについて、電力パケットを用いた電力管理方法について検討した。モータの需要を満たすような電力パケット伝送制御において、回生・力行のような双方向の電力の流れを考慮する方法を提案し、実験で検証した。

金 本 公 平 (薄准教授) 「アクティブゲート駆動による SiC MOSFET のスイッチング特性に関する研究」

本論文では、SiC MOSFET のスイッチング特性の改善のために、AGD の最適な動作を得るための検討を行った。動作を決定するパラメータの変化とスイッチング特性の変化の関係の構造を利用することは、最適な動作の決定に有用である可能性を示した。

鎌 田 優 (薄准教授) 「磁界共振結合方式無線給電における送電コイル配置と伝送効率に関する検討」

本論文は、磁界共振結合方式無線給電において、送電コイル数ごとの伝送効率について検討した。コイル数増加により、受電コイル位置の変動による効率低下の抑制を行えることを明らかにした。また Q 値増大手法の適用によって、より簡単な回路実装の可能性を示した。

矢 野 正 大 (薄准教授) 「動的モード分解による配電同期計測データの解析」

本論文では、動的モード分解による配電電圧の同期計測データの解析を非自励力学系の観点から行った。2 種類のデータ解析を行い、24 時間分のデータについては振動モードの特性の観点から特徴抽出を検討し、瞬時電圧低下時のデータについては時系列予測を検討した。

小 倉 大 輝 (萩原教授) 「変動する分布を持つ離散時間確率系に対する H_2 性能解析および制御器設計」

動特性が確率的に定まる離散時間線形系の中でも、確率分布が時間変動するような系の H_2 性能について論じた。とくに、隠れマルコフモデルや、確率的ポリトープと時変パラメータにより特徴づけられる系に対して H_2 性能解析および制御器設計を行うための条件式を導出した。

北 廣 智 也 (萩原教授) 「係数行列がポリトープ型マルチンゲールで与えられる確率系に対する H_2 制御および H_∞ 制御」

確率的な動特性をもつ離散時間線形確率系に対する H_2 制御や H_∞ 制御について論じた。とくに確率過程がマルチンゲールである確率系に対して H_2 、 H_∞ 性能解析および制御器設計のための条件式を導いた。提案した設計法の有効性については数値例検証により確認した。

杉 山 晟 生 (萩原教授) 「サンプル値系の L_2/L_1 ハンケルノルム解析および最適制御器設計」

サンプル値系の L_2/L_1 ハンケルノルムの計算法およびその critical な境目について議論をし、 L_2/L_1 ハンケルノルムは必ず critical な境目をもつことを示した。また、サンプル値系を安定にしつつ、その

L_2/L_1 ハンケルノルムを最小化するような制御器の設計方法を導出した。

森 貴 拓 (萩原教授) 「離散時間系の補正型状態予測制御におけるロバスト安定解析と最適化設計」

離散時間系の補正型状態予測制御において、ロバスト安定性が向上するような補正項のゲインを設計するための系統的な手法を導入し、その有効性を示した。また、動的に拡張された補正項を用いることで、ロバスト安定性を改善しうることを示した。

岩 田 慈 樹 (阪本教授) 「非接触レーダ心拍計測における生体信号の高調波を用いた高精度化技術」

本研究では、心拍の高調波成分に着目したレーダ心拍計測法を提案した。提案法は、時間微分と経験的モード分解を併用し、心拍の高調波成分を強調することで心拍間隔を高精度に推定することを可能にする。提案法の精度をチンパンジーおよび人体を対象としたレーダ実験により定量的に評価し、その有効性を示した。

田 中 佑 弥 (阪本教授) 「レーダ非接触血圧計測における脈波波形の準周期性を用いた高精度化技術」

本研究では、レーダによる非接触血圧計測の高精度化を目的とし、計測された体表面の変位波形から、体動や呼吸の影響が小さいデータを自動的に抽出する手法を開発した。ミリ波アレーレーダを用いた複数人を対象とした血圧計測実験を通じ、開発手法が従来法よりも高い精度で血圧を計測できることを示した。

汪 子 越 (阪本教授) “Noncontact Radar-Based Detection of Arousal and Sleep Apnea Using Displacement Waveform Features”

「変位波形特徴量を用いた覚醒および睡眠時無呼吸の非接触レーダ検出技術」

本研究では、レーダによる睡眠時無呼吸の非接触検出を高精度化するため、対象者の体動を自動検出する手法を開発した。さらに、この体動検出法を応用し、被験者の睡眠時間の推定精度を改善した。これらの手法により、睡眠時無呼吸症候群の診断基準である無呼吸低呼吸指数の推定精度が改善することを実験により示した。

遠 藤 祐 弥 (土居教授) 「結合共振回路アレイにおける局在モードを用いた非接触給電に関する実験的研究」

結合共振回路アレイには、外部コイルによって電流分布が空間的に局在した共振モード、すなわち局在モードが発生する。本研究では局在モードの発生や外部コイルへの追従性、電力伝達特性などを実験的に検討した。

川 衛 俊 音 (土居教授) 「縮約モデルおよび分岐解析に基づく大域結合細胞集団の分化比率調節に関する研究」

空間的位置情報に依らず細胞分化比率が調節される現象に注目し、共通のバッファを介して大域的に結合した細胞集団モデルの対称性を考慮した2種類の次元縮約モデルを提案することで、高次元細胞集団モデルの分岐構造や分化比率調節メカニズムの詳細を明らかにした。

鈴 口 純 也 (土居教授) 「動的計画法に基づく巡回トーナメント問題の厳密解法」

スポーツスケジューリング問題の一種である巡回トーナメント問題は、各チームの総移動距離が最小となるよう対戦スケジュールを決定する問題である。本問題に対して動的計画法に基づく厳密解法を構

成し、数値実験により分枝価格法に基づく従来解法との比較を行った。

余 若 然（土居教授）「仕事の拒否と処理時間の切り替わりを考慮した1機械生産スケジューリング問題に対する厳密解法」

1台の機械を用いて与えられた仕事を処理する際のスケジュールを作成する1機械生産スケジューリング問題において、仕事の処理に必要な時間がある時刻の前後で変化する状況、またペナルティを支払うことで仕事の処理を拒否できる状況を考慮した問題を対象とし、動的計画法に基づく厳密解法を構成した。

渡 辺 駿（土居教授）「多方向からの積み替え・取り出しを考慮したブロック積み替え問題に対する厳密解法」

平面的に積まれたブロックを決められた順序で取り出すものとして、2方向・3方向・4方向からブロックにアクセスできる各状況を想定し、取り出しに必要な手間（積み替え）を最小化する問題を対象とした。本問題を整数計画問題として定式化し、分枝限定法に基づく厳密解法を構成した。

渡 邊 勇 熙（土居教授）「並列スタック積み込み問題に対する分枝価格法の適用」

取り出し時の手間が最小になるよう、アイテムを到着順にスタックに詰め込むことを目的とする並列スタック積み込み問題を対象とした。取り出しの手間の指標として2種類の指標を考慮し、分枝価格法に基づく厳密解法を提案するとともに、数値実験により従来解法との比較を行った。

池 田 早 織（伊藤講師）「シールドレス生体磁気計測に向けた光量子磁気センサの検討」

磁気シールド不要な生体磁気計測の新たな磁気センサとして期待されるスカラ型光ポンピング磁気センサと、ダイヤモンド中NVCセンサについて理論的・実験的に検証し、生体磁気計測に適する条件を探索した。同センサのシールドレス生体磁気計測への応用可能性を示した。

日 高 颯 哉（伊藤講師）「準安定励起ヘリウム原子を用いた光ポンピング磁気センサの基礎的検討」

ヘリウム放電により生成した準安定励起ヘリウム原子を用いた磁気センシング手法の検討を行った。効率的な準安定励起ヘリウム原子の生成条件を理論的に検討し、実験的検証からこのセンサの検出感度を推定した。これらにより、十分な検出感度を得るためのプラズマパラメータの指針を示した。

平 野 貴 之（雨宮教授）「銅複合多芯薄膜高温超伝導線材で構成されたスパイラル導体の曲げによる通電特性の変化」

銅複合多芯薄膜高温超伝導線材で構成されたスパイラル導体を対象とし、曲げによる通電特性の変化を実験的に評価した。曲げ半径25 mmまでは曲げによる通電特性の変化は発生しないことを確認し、実用的なコイル形状の一例として、鞍形コイルを巻線し、通電した。

祖父江 卓 哉（雨宮教授）「結合時定数及び臨界電流の測定に基づくMgB₂多芯超伝導線の交流損失特性評価」

単線のMgB₂短尺線材について、その交流損失特性を実験的に解明することを目的とし、結合損失とヒステリシス損失という損失成分を異なる手法でそれぞれ実験的に評価し、様々な温度・磁界条件における磁化損失を求めることで、MgB₂超伝導線の実用可能性について検討した。

江 崎 友 哉（雨宮教授）「銅複合多芯薄膜高温超伝導線材で構成された多層スパイラル導体の層間偏流を考慮した交流損失解析」

銅複合多芯薄膜高温超伝導線材で構成された多層スパイラル導体に交流磁界下で交流電流を通電した際の交流損失について、層間偏流を考慮した電磁界解析を行い、その交流損失を評価した。層間偏流が存在する条件でも、交流損失が増大することはないことを示した。

岩 田 祐 磨（イスラム マーフズル講師）「自己キャリブレーション機能を有する再構成可能なコンパレータを用いたフラッシュ型 ADC」

高速動作可能なフラッシュ型 ADC の低消費電力化にコンパレータの微細化は必須である。本論文では、特性ばらつきを再構成可能な構造とキャリブレーション機構により自己補正を行う手法を提案した。65nm プロセスにて 6-bit の ADC を設計し、数 mW で 1GHz 動作が可能であることを確認した。

江 原 柊 也（久門准教授）「電磁結合を考慮した回路の時間領域解析のための遅延を含むインダクタンスの最適化」

遅延電磁結合を含む回路の時間領域モデルは中立型遅延微分方程式により表現されるため、安定なモデルを得ることが難しい。本論文では、ナチュラル周波数に基づくインダクタンスの最適化により、大規模な回路においても安定なモデルが得られることを示した。

太 田 慎 一（イスラム マーフズル講師）「微細 MOSFET の統計的性質を利用する高精度温度センシング手法」

多種多様な IoT デバイスにおいて高温範囲で動作する高精度な温度センサが求められている。本論文では、微細 MOSFET に発生する特性ばらつきの統計的性質を活用し、高温範囲で動作する温度センサ回路の設計手法を提案した。65nm プロセスにて -40℃ から 140℃ までの温度推定が可能であることを確認した。

早 瀬 健 浩（久門准教授）「集中定数素子を用いた単導体線路の終端整合の設計と実験」

明示的な帰路線をもたない単導体線路に対して、集中定数素子（抵抗素子）を用いて終端整合を実現できることを理論的に示した。また、実際にプリント基板上に単導体線路を構成し、抵抗素子を用いて終端整合ができることを実験により確認した。

山 本 謙 太（久門准教授）「双方向コンバータによる P2P エネルギー伝送の大域的安定化」

双方向コンバータを非線形 2 ポート回路としてモデル化し、平衡点を選択する適切なフィードバックを与えることで、そのダイナミクスの大域的安定化が可能なことを示した。また、実際に P2P エネルギー伝送において実装することにより、提案手法の有効性について確認した。

RODRIGUEZ GUTIERREZ RAUL ROBERTO（イスラム マーフズル講師）「Run-time Junction Temperature Estimation of Power Devices Utilizing Zero-current Switching Characteristics」 （ゼロ電流スイッチング特性を活用した動作中におけるパワーデバイス接合温度の推定手法）

電力変換機器の故障は大きな問題であり、機器の定期的な診断は必須である。本研究では、故障の要因である温度変化を低コストで推定するために、インバータ回路におけるゼロ電流スイッチング時の

ゲート電圧の温度依存性を利用した温度推定手法を提案し、実測より提案手法を確認した。

竹之内 光（松尾教授）「機械強度を考慮したモータのトポロジー・パラメータ最適化とその深層学習による高速化」

同期電動機の形状最適化手法の一つであるトポロジー・パラメータ最適化において、応力解析を含む最適化方法を開発し、提案手法により得られた最適化形状について考察した。また、形状から性能を予測する深層学習分類器を作成し、トポロジー・パラメータ最適化に要する計算時間の削減効果について検証した。

倭 大 丘（松尾教授）「Maxwell 方程式の Darwin 近似から導かれる有限要素モデルの縮約に関する研究」

Darwin 近似を施した Maxwell 方程式に対する有限要素モデルに関して、方程式の自由度を削減するモデル縮約法を開発し、周波数および時間領域における数値解析においてその有効性を検証した。特性の異なる複数のモデルについて、開発したモデル縮約法の有効性を示した。

尾 関 俊 大（松尾教授）「マルチポート Cauer 回路の次元縮約と非線形モータ解析への応用に関する研究」

電磁界の縮約表現として用いられるマルチポート Cauer 回路において、ポートの縮約に関する理論的な検討を行った。誘導モータに対して、固定子-回転子間の空隙高調波成分をアーノルディ法を用いて縮約表現することで効率的な非線形縮約モデルを構成した。

吉 田 健 人（松尾教授）「Darwin モデルの有限要素解析における反復求解の誤差修正法による効率化に関する研究」

電磁界の Darwin モデルの有限要素解析のための反復求解法について検討・開発を行い、数値例によって提案手法の有効性を示した。補助変数の導入により反復求解の収束性を改善する方法に着目し、同等の効果を持ちながら計算コストの面でより優れた手法を開発した。

渡 邊 穰（松尾教授）「ベクトル単板磁気試験器を用いた電磁鋼板の応力依存交流磁気特性の測定に関する研究」

圧電フィルムによる応力印加機構を持つベクトル単板磁気試験器による電磁鋼板ベクトル磁気特性計測において磁歪計測による検証を行い、無方向電磁鋼板の各方向の応力依存交流磁気特性の計測を行った。計測結果に基づき、渦電流損の応力依存性について検討した。

坂 口 真 梧（中村（武）特定教授）「自己組織化設計法を利用した鉄道車両用永久磁石モータの構造最適化に関する研究」

鉄道車両用 60 kW 級表面永久磁石同期モータの設計を行った。まず、自己組織化法によって三相固定子巻線の設計を行った。次に、同固定子と組み合わせる永久磁石回転子の設計を実施し、72 kW の過負荷耐量や 97.6% の定常効率を実現した。

箕 西 稜 太（中村（武）特定教授）「三相誘導電動機の固定子および回転子に自己組織化を利用した設計法に関する基礎検討」

かご形回転子を有する三相誘導電動機を対象とし、ロータバーの断面積、本数と機械出力特性の関係

を2次元電磁界解析に基づいて明らかにした。その結果を用いて、自己組織化設計によって数kW級モータの電磁設計を実施した。

工学研究科 電子工学専攻

西 村 太 一（米澤教授）「酸化物超伝導・強磁性二層膜におけるテラヘルツ時間領域分光を用いた超伝導ゆらぎの評価」

銅酸化物高温超伝導体 YBCO と酸化物強磁性体 PCMO のエピタキシャル二層膜を用いて、超伝導揺らぎが強磁性膜から受ける影響についてテラヘルツ時間領域分光法を用いて評価した。その結果、強磁性体によって超伝導揺らぎが強く抑制される実験結果が得られた。これは、超伝導電子が強磁性体からの交換バイアス効果を受けていることを直接示す結果である。

柳 生 望 光（米澤教授）「広帯域周波数変調超伝導テラヘルツエミッタの開発」

ビスマス系高温超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ放射について、バイアス電圧に 4.5 GHz まで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た。超伝導デバイスからの周波数変調テラヘルツ波放射は世界で初めてであり、テラヘルツデジタル通信技術の萌芽をもたらす研究である。

井 上 元（白石教授）「Si Spin-MOSFET における Si/SiO₂ 界面のラッシュバ場を考慮した正確なスピンドリフト速度及びスピン移動度の見積もり手法の確立」

白石研で発見されたシリコン中のスピン操作を可能とする人工ラッシュバ効果の観点を取り入れたシリコン中のスピンドリフト速度/移動度の正確な見積もり手法を開発し、それらの物性値の定量的な評価を通じて今後の半導体スピン素子における標準となる評価法を確立した。

宇 野 達 志（白石教授）「球状 YIG/環状 Pt 構造におけるフォトン-マグノン結合の変調」

強磁性体中のスピンの励起モードを量子化したマグノンと電磁界（フォトン）との結合状態について、磁性絶縁体である Y₃Fe₅O₁₂（YIG）に環状の Pt を実装することで YIG 中のマグノンとフォトンの結合強度を変調することに成功した。

川 俊 太（白石教授）「多層ゲルマニウムの電界効果トランジスタ動作と二次元層状構造における層内・層間の電気伝導特性評価」

次世代原子層物質の1つとして注目される IV 族原子層物質のうち、その大きなスピン軌道相互作用故に半導体スピン素子への発展が期待されるゲルマネンに水素修飾を施したゲルマニウムの半導体物性と電気伝導物性について詳細な評価を行った。

安 井 健 人（白石教授）「構造的非対称性を導入した系における表面スピン波の伝搬に関する研究」

強磁性体中のスピンの励起状態であるスピン波は、従来相反的かつ等方的に伝搬する。本研究では、強磁性体導波路に構造非対称性を導入することにより、導波路表面に局在する表面スピン波の伝搬の変調・制御について研究し、構造の設計指針について検討した。

丸 山 ゆ う（白石教授）「イオンゲートを用いた超薄膜 Pt 中の Hanle 磁気抵抗効果の変調に関する研究」

超薄膜 Pt にイオン液体を介した強電界を印加することでそのスピン軌道相互作用と金属にも関わらず伝導度の操作が可能となるという発見をベースに、この機構を用いた Hanle 磁気抵抗効果の変調を実現しその背景学理を明らかにした。

小 田 哲 秀（竹内教授）「チャープ擬似位相整合素子の可視 - 中赤外発光スペクトルの平滑化に関する研究」

本研究では、中赤外波長 $2 \sim 5\mu\text{m}$ を持つ広帯域可視赤外量子もつれ光子対の発光スペクトルの平滑化に取り組んだ。共分散行列適応進化戦略によりスペクトルの平滑化に成功し、発光雑音を以前と比べ 74% 圧縮した。また、実際にその素子を作製し実証した。

鈴 木 和 樹（竹内教授）「ナノダイヤモンド中単一シリコン空孔中心のフォトルミネッセンス励起測定に向けた研究」

本研究では、ダイヤモンド中の単一シリコン空孔中心に対するフォトルミネッセンス励起測定を目指して研究を行った。様々な条件でシリコン空孔中心内包ナノダイヤモンドを作成・評価した。さらに、低温化でフォトルミネッセンス励起測定を行うことができる実験系を構築した。

濱 山 友 志（竹内教授）「マイクロリング共振器を用いたもつれ光子対の広帯域化および高効率化に関する研究」

本研究では、まず、マイクロリング共振器を用いたもつれ光子対の広帯域化に取り組み、波長帯域幅 351.9nm を実現、周波数もつれ光子対の帯域幅を大幅に拡張することに成功した。さらに、光子対生成効率を最適化するカップリング条件について、実験と計算の両面の検証を経て明らかにした。

山 田 悠 介（竹内教授）「干渉経路に光ファイバーを利用した量子赤外分光に関する研究」

本研究では、量子赤外分光法の高度化を目指し、非線形量子干渉計のファイバー化に取り組んだ。量子干渉計内での可視 - 赤外光子対の伝搬経路をファイバー化した上で、シリコン光検出器を用いて赤外波長 $1.5\mu\text{m}$ 相当の量子干渉信号を測定した。さらに、ファイバーの屈折率分散が信号形状に及ぼす影響を評価した。

井 上 瑛（木本教授）「高温動作不揮発性メモリを目指した SiC CMOS と Ta 酸化物抵抗変化素子の集積化」

SiC を用いた相補型 MOS (CMOS) 素子は高温動作集積回路やパワー集積回路に有望である。一方、遷移金属酸化膜を用いた抵抗変化素子は優れた不揮発性メモリとして動作し、高温動作も可能である。本研究では、SiC CMOS 素子の特性改善、Ta 酸化物抵抗変化素子の微細化、およびこれらの集積化に取り組み、 300°C における良好な動作を達成した。

北 脇 武 晃（木本教授）「SiC pn 接合におけるアバランシェ破壊の異方性に関する研究」

SiC は六方晶の結晶構造を有しており、様々な物性が c 軸方向とこれに垂直方向で顕著な異方性を示す。本研究では、独自の素子を作製して pn 接合の絶縁破壊を決定する衝突イオン化係数の異方性とその温度依存性を実験的に決定した。さらに、この衝突イオン化係数の異方性が実デバイスの特性に与える影響をシミュレーションにより明らかにした。

柴 田 峻 弥 (木本教授)「高温動作集積回路を目指した SiC ボトムゲート相補型 JFET の作製」

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、従来のトップゲート構造ではなく、ボトムゲート構造を有する SiC JFET をイオン注入により作製し、優れたしきい値電圧の制御性を達成した。また、同素子の高温特性を調べ、高温動作集積回路に有望であることを示した。

村 木 瞬 星 (木本教授)「反転層キャリアの輸送機構解明に向けた SiC MOSFET 特性の温度依存性評価」

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、反転層内電子の輸送機構に関する理解は乏しい。本研究では、様々なプロセスにより形成した SiC MOSFET の特性を広い温度範囲で測定し、その特性を解析することにより、支配的な散乱機構に関する考察を行った。

沖 野 翔太郎 (小林准教授)「原子間力顕微鏡を用いたペロブスカイト太陽電池のキャリア挙動評価に関する研究」

時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡法を開発し、ペロブスカイト太陽電池の光照射開始時および終了時における表面電位の時間変化を計測し、電荷はマイクロ秒の時間スケールで、イオンはミリ秒の時間スケールの計測により、それぞれの拡散挙動を明らかにした。

高 嶋 智 哉 (小林准教授)「液中原子間力顕微鏡による生体由来シート状タンパク質の高分解能観察および表面電荷密度計測」

生体集合構造の典型であるコラーゲンの高次構造のうち、シート状タンパク質であるコラーゲンミクロフィブリルに対し、液中で動作する周波数変調原子間力顕微鏡を用いて高分解能観察および表面電荷密度計測を行い、微細な表面構造と表面電荷密度分布の相関を議論した。

郎 朗 (小林准教授)「探針増強ラマン分光法用準間接照射型プローブの開発とその性能評価」

原子間力顕微鏡のカンチレバーに集束イオンビームを用いて簡単な加工を施すことで作製でき、探針先端近傍に励起光を照射すれば探針先端の電場が増強される準間接照射型プローブを用いて、従来の間接照射型プローブより高い信号対雑音比が得られることを示した。

坂 口 太 郎 (川上教授)「極薄膜の界面層を利用したフルコヒーレント InGaN/ScAlMgO₄ ヘテロ構造の設計と作製」

ScAlMgO₄ 基板上に結晶成長した格子整合系 In_{0.17}Ga_{0.83}N は可視長波長光素子の基本構造として有望であるが、直接成長が難しく界面層の導入が必要であった。これまで界面層での格子緩和で格子整合の利点が損なわれていたが、極薄膜の界面層の利用によりそれが回避できることを理論計算と実験で示した。

隅 田 長 門 (川上教授)「HVPE 成長 AlN 単結晶における極低温から室温での励起子光学利得の励起長可変法による評価」

AlN は、波長 200 nm 台の紫外レーザダイオードのホスト材料として有力視されている。HVPE 法で作製した高品質な AlN 単結晶について、広い温度域での誘導放出の起源に励起子多体効果が関与していることを実験的に示した。また、そこでの光学利得を励起長可変法で定量し、低閾値化に向けた提言

を行った。

東 中 川 陽 (川上教授)「ポテンシャル局在領域への選択的電流注入に向けたマクロステップを有する AlGaIn の表面形態の制御」

AlGaIn 混晶半導体は紫外発光素子材料として活発に研究されており、高発光効率化に向けてポテンシャル局在領域の利用が提案されている。そこへの選択的電流注入を人為的に制御するため、結晶表面のマクロステップ形状制御が必要であり、結晶成長条件と表面形態の関係を明らかにしてその道筋を示した。

宮 脇 啓 嘉 (川上教授)「広帯域発光スペクトルの外部電気制御に向けた InGaIn 系ストライプ状構造の設計と作製」

半導体発光素子は原理的に単色発光するが、構造を三次元化することにより多色化することができる。本研究では、レンズ状断面を持ったストライプ構造の採用により、多数の発光色を呈する発光素子の結晶成長による自己集積に成功し、個別電極によるスペクトルの外部制御の可能性を示した。

上 田 拓 磨 (野田教授)「大域的バンド端周波数分布を導入した短パルスフォトリック結晶レーザーの高ピーク出力化に向けた構造最適化」

幅広い分野へと応用が可能な高ピーク出力な短パルスレーザー発振を実現するため、フォトリック結晶レーザーの構造最適化を行った。発振特性の解析と自動最適化手法を組み合わせ、高ピーク出力が得られるようなデバイス構造を探索することで、ピーク出力 540 W という先行研究のデバイスと比較して 3 倍も高い短パルス発振を実現した。

森 本 峻 介 (野田教授)「GaIn 系フォトリック結晶レーザーの発振面積拡大および連続駆動に関する研究」

窒化ガリウム系の青色フォトリック結晶レーザーの発振面積を拡大し、その高出力連続動作を試みた。具体的には、400-500 $\mu\text{m}\Phi$ サイズで高ビーム品質動作が可能なフォトリック結晶共振器の設計を行い、その後レーザーの作製を行った。そして、連続駆動に向けて高放熱性および低歪の実装法を確立した。その結果、青色面発光レーザーとして世界最高出力となる 1.3 W の高出力連続動作を実現することに成功した。

趙 海 如 (野田教授)「様々なビームパターンを出射可能な変調フォトリック結晶レーザーの高出力化・高解像度化の研究」

様々なビームパターンが出射できる変調フォトリック結晶レーザーにおいて、新たな変調方式の考案と裏面反射構造の導入により、従来の 0.1 W/A $\sim$ 0.2 W/A のスロープ効率を 0.6 W/A $\sim$ 0.7 W/A へと増大し W 級の高出力動作に成功した。さらに、二重格子構造の導入による発振面積の拡大と、遠視野像における強度補正の導入により、細かなパターンにおいて、半値幅で約 0.3 度の高い解像度を実現した。

行 舎 直 起 (野田教授)「機械学習法および最適化法を活用したフォトリック結晶レーザーの発振状態制御に関する研究」

機械学習法や進化戦略的な最適化法を用いて、フォトリック結晶レーザーの電流分布や温度分布を操作することにより、発振状態の動的な制御を行った。具体的には、発振状態を反映したレーザーのビー

ム形状を制御し、目標形状と高い一致度のビーム形状を実現することに成功した。また、外乱などでビーム形状が乱れた際にも、進化戦略的な最適化手法の高速性を活用して、リアルタイムでビーム形状の補正を行うことにも成功した。

阿 部 竜 也（野田教授）「大面積フォトニック結晶レーザーへの分割電極構造の導入による発振状態制御に関する検討」

出射面側分割電極をもつ電流分布制御可能な大面積フォトニック結晶レーザーを開発し、従来よりも幅広い電流値において高輝度 CW 動作を実現した。また、電流分布制御を利用することで、素子作製プロセスにおいて意図しない不均一な面内周波数分布が生じた場合の補正や、逆に敢えて傾いた分布を形成することによる短パルス・高ピーク出力動作が実現できる可能性も示した。

藤 川 高 嘉（杉山准教授）「反射型メタ表面に拡張されたバビネの関係式の実証実験と偏光・波面制御への応用」

独自に考案した反射型メタ表面に拡張されたバビネの関係式の実証実験として、自己補対構造をメタ表面に埋込み、さらに反射位相に空間勾配を付けることで、半波長板機能と波面制御を同時に実現することに成功した。

森 本 貴 之（杉山准教授）「単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の 3 次元のレーザー冷却とマイクロ運動最小化」

超微細構造があるものの磁場に鈍感な時計遷移をもつ $^{171}\text{Yb}^+$ に、超微細構造のない $^{174}\text{Yb}^+$ で開発した 3 次元の冷却技術を導入した。さらに、 $^2\text{S}_{1/2}$ ($F=0$) - $^2\text{D}_{3/2}$ ($F=2$) 時計遷移をレーザー冷却サイクルから分離して観測可能とし、単一イオン分光に成功した。

光・電子理工学教育研究センター

野 口 直 哉（De Zoysa Menaka 講師）「二重格子フォトニック結晶におけるエルミート・非エルミート結合制御に基づく特異な光伝搬現象の提案と実証」

二重格子フォトニック結晶を導入した細線導波路において、面内を伝搬する光のエルミート結合と非エルミート結合とを適切に制御することで、特異な光伝搬現象の提案と実証を行った。具体的には、ある方向から入射した光は完全に放射されるが、逆方向からの入射光は完全に反射するような一方向性の光伝搬を実現する導波路や、入射光を任意の電界強度分布で放射させることができる導波路の実証に成功した。

西 本 拓 司（De Zoysa Menaka 講師）「フォトニック結晶レーザーの低駆動電流・狭発散角動作実現に向けた構造最適化」

本研究では、低駆動電流動作と狭発散角動作を両立するフォトニック結晶レーザー（PCSEL）の提案を行った。レーザーの利得領域の外部に光の吸収の無い透明領域を接続した PCSEL を提案し、共分散行列適応進化戦略による構造最適化を行った結果、複数の利得領域を透明領域内に 2 次元アレイ状に配置することで、光を大面積に広げられることを見出し、10 A の電流注入で 5 W 以上の光出力と 0.02° 未満の極めて狭い拡がり角を両立できることを示した。

情報学研究科 知能情報学コース

坂 口 典 三 (村協准教授)「機械翻訳における前編集のための原言語的表現の検出」

本研究では、日英機械翻訳において翻訳が難しい表現を、翻訳された文と元から日本語で書かれた文を分類する分類器を用いて自動検出する方法を提案した。実験により、検出箇所を前編集することで訳文の流暢さが向上することを確認した。

唐 井 希 (Chu 特定准教授)「画像から想起されるスクリプトの生成に関する研究」

本研究では、画像からその場面における典型的なシナリオおよびシナリオを達成するためのイベント系列を生成するタスクを提案した。さらに、データセットの構築やモデルの評価実験を行い、画像を直接入力することの有効性を確認した。

加 藤 駿 弥 (Chu 特定准教授)「3D 屋内シーンにおける参照表現に基づく小物の位置特定および削除」

本研究では、3D 屋内シーンにおいて小物に焦点を当てた 3D 参照表現理解データセットを提案し、小物の位置特定が挑戦的であることを示した。さらに、言語で参照された 3D 屋内シーン中の小物を削除するタスクに取り組み、参照表現理解を用いた手法を提案した。

石 崎 慎 弥 (西野教授)「自己位置推定のための自己学習による特徴点選択」

本研究では、画像から抽出された特徴点が移動物体上のものであるか識別するモデルを導出することにより、移動物体に頑健な単眼の車載映像からの自己位置推定を実現した。シミュレーションデータ及び実データでの実験を通して有効性を評価した。

延 興 唯 人 (西野教授)「反射マップの拡散確率過程に基づく単一物体画像からの光源と反射特性推定」

本研究では、形状が既知である物体の一枚の画像から、物体表面の反射特性と物体を照らす周囲の光源状況を、失われた高周波情報を復元しながら確率的に推定する手法を提案し、合成および実データでの多くの実験を通し、その汎化性能と精度の高さを実証した。

木 下 元 希 (西野教授)「カメラ高さの不変性を自己教師とする単眼絶対深度推定」

本研究では、RGB カメラ以外のセンサーを用いず、車の高さが変化しないことを利用した単眼深度推定モデルの学習フレームワークを提案し、自己教師付き学習による単眼絶対深度推定を実現した。実データによる実験を通し、関連手法を上回る推定精度の達成を確認した。

中 村 周 (西野教授)「単眼動画画像からの指差し検出と三次元方向推定」

本研究では、単眼 RGB 動画からの指差し検出およびその三次元方向推定を実現した。指示者の動画を入力として、全身の画像特徴、及びその時系列変化を学習することで、指示者の姿勢によらない頑健な指差し認識と方向指定を行えることを示し、その評価を行なった。

何 思 成 (西野教授)「Misspelled Handwritten Kanji Correction based on Image-to-image Diffusion Model (拡散モデルに基づく手書き漢字の誤字修正)」

本研究では、画像合成確率的拡散モデルを用いて、誤りのある手書き漢字を同一の手書きスタイルの

まま修正する手法の導出を行なった。大規模手書き漢字データを用いた精度検証を通し、その有効性を実証した。

情報学研究科 通信情報システムコース

黎 逸 鵬（原田教授）「Efficient Reception Scheme for Millimeter Wave Short-Range Wireless Communication Systems」（ミリ波短距離無線通信システムにおける高効率受信方式に関する研究）

ミリ波短距離無線通信システムについて、ソフトウェア無線機を使用した実験評価プラットフォームに適用可能な受信方式を開発した。特に、ミリ波短距離無線通信システムの国際標準規格において基本となるパケットモードでの送信に対応したフレーム検出手法、および、最適なサンプル点を走査する同期手法を提案した。提案手法を実際のソフトウェア無線機に実装し、その有効性を示した。

川 松 大 輝（原田教授）「V2X サイドリンク通信における経路構築のための伝送方式」

次世代 5G セルラ V2X（Vehicle-to-Everything）通信の要素技術であるサイドリンク通信に関して、その物理伝送評価を可能にする実験評価プラットフォームを、ソフトウェア無線機を用いて開発した。サイドリンク通信における同期信号、制御信号、ユーザデータの送受信方式をすべて同プラットフォームに実装した上で、交差点での見通し内・見通し外通信を想定した実機実験を行い、サイドリンク通信の実環境における包括的な伝送特性を明らかにした。

長 尾 龍 一（原田教授）「マルチホップ IoT 無線ネットワークにおける高効率ルーティング法に関する研究」

次世代 IoT ネットワーク基盤である Wi-SUN FAN（Wireless Smart Utility Network Field Area Network）を用いた情報収集ネットワークにおいて、区間ごとのビットレートの変化を考慮した高効率なネットワーク構築を実現するため、パケットバッファ管理による経路選択法を提案した。計算機シミュレーションによって評価を実施し、提案手法により伝送効率の向上が可能であることを示した。

名 倉 慶 人（原田教授）「高速移動通信に向けた OFDM 変調による IoT 用無線通信プラットフォーム」

次世代 IoT システムである IEEE 802.15.4 準拠 OFDM システムについて、高速移動体環境における通信を実現する実験評価プラットフォームを、ソフトウェア無線機を用いて開発した。Sub-1 GHz における厳しいスペクトルマスク制限に対応するための手法（UTW-OFDM 方式）を導入し、さらに移動速度数 10km/h 以上のマルチパスフェージング環境で受信性能を向上する信号処理法を提案し、開発プラットフォームに実装して屋外無線伝送実験を行い、その有効性を示した。

福 島 慶 大（原田教授）「Transmit Signal Control Methods for Cell-free Networks」（セルフリーネットワークにおける送信信号制御法に関する研究）

稠密に分散配置したアクセスポイントを大規模 MIMO システムとして協調動作させ、ユーザ通信品質を向上するセルフリーネットワークの実用化に向けた送信信号制御技術を提案した。端末側技術として開ループ型送信電力制御手法を、ネットワーク側技術として新たなプリコーディング手法を提案し、計算機シミュレーションによってその有効性を示した。

皆 木 溪 夏 (原田教授) 「VHF 帯電波ビッグデータと機械学習を用いた屋外位置推定手法」

公共ブロードバンド移動通信 (ARIB STD-T103) システムが発射する VHF 電波を受信し、そのチャネルインパルス応答を機械学習等で解析し当該発射源位置を特定する手法を提案した。推定精度向上のために、階層的クラスタリング手法の確立、畳み込みニューラルネットワークの適用、及び受信電力遷移情報とテンプレートマッチング法を用いた位置推定分解能改善手法の提案を実施し、実際の電波伝搬測定結果を用いて性能を評価しその有効性を示した。

喜 多 望 (大木教授) 「Unavailability-Aware Backup Resource Allocation with Shared Protection」 (不稼働率分析に基づいた共有保護のバックアップ資源割り当て)

本論文は、仮想マシンと物理マシンの両方の故障を考慮したマルコフ連鎖分析に基づいた不稼働率を抑制する共有保護のバックアップ割り当てモデルを提案した。

高 橋 知 基 (大木教授) 「Models for Updating Service Function Chains with State Consistency」 (状態の一貫性を考慮するサービスファンクションチェーン更新モデル)

本論文は、ネットワーク仮想化環境において、仮想ネットワーク機能の状態の一貫性を保証しながらサービスファンクションチェーンを更新するモデルを提案した。

高 晴 登 (大木教授) 「Twisted and Folded Clos-Network Design Models with Blocking Probability Guarantee」 (許容ブロッキング率を保証する捻じれ折り畳みクロスネットワークの設計モデル)

本論文は、ブロッキング率を理論的に保証しながら、ネットワークに接続できる端末数であるスイッチング容量を最大化するような、捻じれ折り畳みクロスネットワーク (TF-Clos: twisted and folded Clos network) の設計モデルを提案した。

野 田 真 志 (大木教授) 「Robust Controller Assignment and Placement Models in Software-defined Network」 (ソフトウェア定義ネットワークにおけるロバストなコントローラ配置及びコントローラ割り当て決定モデル)

本論文は、ソフトウェア定義ネットワークにおいて、コントローラ故障やパケット量の変動を考慮したロバストなコントローラの割り当てと配置を決定するモデルを提案した。

横 内 健 人 (大木教授) 「Multi-backup Resource Allocation of Virtual Machines with Probabilistic Protection」 (確率的保護を用いた仮想マシンにおける多段階の予備資源割当モデル)

本論文は、物理マシンの故障に対する生存率条件を満たしながら、必要なバックアップ容量を削減する仮想マシンのバックアップリソースの割り当てモデルを提案した。

池 田 聡 成 (佐藤教授) 「Restructuring Delayed Feedback Reservoir for Fully Digital Implementation (フルデジタル実装に向けた遅延フィードバック型リザーバの再構築)」

従来はアナログ回路を用いて実装されていた遅延フィードバック型リザーバの構成を見直し、回路全体をデジタル回路のみを用いて実装する設計手法を新たに示した。FPGA を用いた実装評価により、

時系列予測問題において最先端の機械学習手法と同等の精度を実現し、消費電力を大幅に削減できることを示した。

下 村 大 貴 (佐藤教授) 「Comparative Investigation of Beamforming Feedback and Channel State Information Toward Firmware-Agnostic WLAN Sensing」 (ファームウェアに依存しない無線 LAN センシングに向けたビームフォーミングフィードバックとチャネル状態情報の比較解析)

チャネル状態情報 (CSI) とビームフォーミングフィードバック (BFF) を用いた無線 LAN センシングについて、実験によりそれぞれの比較を行った。具体的には、BFF からの機械学習を用いた CSI 復元の検討に加え、BFF・CSI に基づく見通し有無判定の精度比較、劣化要因解析を行った。

田 形 寛 斗 (栗野准教授) 「SRAM を用いた量子化ニューラルネットワーク向けコンピューティングインメモリマクロ」

本研究は 8T-SRAM を用いたコンピューティングインメモリマクロを提案する。提案回路は一つの量子化重みに対し 2 つの入力を同時に演算できる。回路シミュレーションの結果、エネルギー効率は 1471TOPS/W、CIFAR-10 分類精度は 86.7% を達成できることを確認した。

玉 井 啓 介 (佐藤教授) 「Device-free Tracking Using CSI Sampled at Sub-Nyquist Rate for Human Gait」 (人体歩行に関してサブナイキストな取得頻度の CSI を用いたデバイスフリートラッキング)

既存手法が適用不可能なほど低頻度で取得されたチャネル状態情報から抽出可能な人体歩行センシングの特徴量を提案した。提案した特徴量を用いて人体の移動をトラッキングするアルゴリズムを提案し、シミュレーション・実験評価により有効性を明らかにした。

播 磨 屋 稔 (佐藤教授) 「物体内部に分散したセンサの位置情報に基づくボクセル並列な物体形状再構成アルゴリズム」

本研究は粘土型 3D モデリングデバイスの実現を目指し、粘土内部に分散したセンサの位置情報から高速に形状を再構成する、ボクセル並列な形状再構成手法を提案した。提案手法はセンサノイズに対して堅牢であり、評価した全形状を 1 秒以下で再現できることを確認した。

平 井 貴 之 (佐藤教授) 「Wi-Fi パケットキャプチャを用いた臥位状態推定」

パケットキャプチャにより容易に取得できる Wi-Fi の Compressed Beamforming Feedback Matrices (CBFM) 信号から姿勢の変化を検出し、機械学習モデルを用いて逐次的に姿勢を推定した。様々な状況下で得られたデータを用いた評価により、姿勢変化検出と姿勢推定のいずれも 95% 以上の精度が達成できる見込みを得た。

米 村 樹 (佐藤教授) 「Integrated Sensing and Communication Framework Leveraging mmWave Beam Search」 (ミリ波通信におけるビームサーチ情報を活用した ISAC フレームワーク)

ミリ波通信に必要なビームサーチにより取得される角度電力プロファイルに基づくデバイスフリーセンシングを提案した。網羅的ビームペアからの見通し遮蔽の有無予測、ならびに両側角度電力プロファイルからの障害物の将来位置・受信電力予測を、それぞれ実機実験により機械学習を活用して実現した。

スウ ショレイ (佐藤教授)「ホットキャリア注入を使用した SRAM 型 clonable PUF」

チャレンジを与えると対応するレスポンスを返す物理複製困難関数 (PUF) の新たな回路方式を提案した。スタティックメモリのセル構造をエントロピー源として、あらかじめ決めた数の PUF が指数的に広いチャレンジ・レスポンス空間を共有する、ストロング clonable PUF の実現可能性をシミュレーションと実測により示した。

五味 唯 美 (橋本教授)「FinFET・プレナー型 SRAM におけるミューオン起因ソフトエラーの実測とシミュレーション」

ミューオン起因のソフトエラーを評価するため、12nm FinFET ならびに 28nm プレナー型 SRAM に正負ミューオンを照射する実験を行った。トランジスタ近傍に停止する負ミューオンのエラー断面積が正ミューオンより約 10 倍高いことを確認した。

末 光 昂 平 (橋本教授)「A Computation Protocol Securing User Data and Algorithms Based on Logic Locking and Secure Computation (論理難読化と秘密計算技術を用いたユーザデータとアルゴリズムを秘匿する秘密計算プロトコル)」

論理難読化と秘密計算技術を組み合わせ、ユーザデータとアルゴリズムを秘匿して推論を行う秘密計算プロトコルを提案し実装した。準正直モデルを仮定したセキュリティ解析を行い、SAT 攻撃や機械学習攻撃への耐性を実験的に確認した。

田 中 稔 久 (橋本教授)「磁化電流の近似計算の実現による高速かつ磁性体配置物にロバストな磁界式位置推定手法」

磁性体の磁化電流を、コイルを流れる電流に近似することでリアルタイム性と磁性体に対するロバスト性を両立する直流磁界式位置推定手法を提案した。磁性体の存在する空間において、0.01 秒以下の計算時間で最大位置推定誤差 4.22mm を達成した。

羽 原 丈 博 (橋本 教授)「適応的閾値制御を用いたスパイクニューラルネットワークの高速かつ低エネルギーな推論」

従来の SNN は過剰・過少な発火によって情報が損失し、推論収束までの消費エネルギーが増加する。そこで推論時に動的・適応的に閾値を変化させる方法について提案した。画像認識を対象とした実験より、最大で 87.5% のエネルギー削減が可能だと分かった。

松 元 拓 人 (橋本教授)「量子ドットを用いたリザバー コンピューティングの小型実装に向けた概念実証実験とインセンサ計算デバイスの設計」

量子ドットを用いたリザバーコンピューティングを、市販プロジェクタやイメージセンサを用いて概念実証し、画像分類や NARMA タスクの実行を確認した。小型実装に向けてインセンサ計算チップの設計を行い、積和演算動作を測定で確認した。

情報学研究科 システム科学コース

喜 多 悠 (石井教授)「教師あり学習と深層強化学習によるブリッジ戦略の構築」

深層教師あり学習と自己対戦型深層強化学習の組み合わせによりブリッジのコントラクトフェーズの自律学習に成功、現時点での SoTA (世界一) を達成した。

箕 浦 皓（石井教授）「文字推論ゲームにおける推論・意思決定の神経基盤の解明」

ヒトが、自らの選択、あるいは他者の選択により得られる手掛かり刺激を組み合わせる状況を確認（推論）する過程を、行動実験およびイメージング実験により明らかにした。

深 田 駿（石井教授）「スノーボードシュミレーションゲーム学習における筋間コヒーレンスおよび筋制御戦略の変化」

ヒトが、バーチャルリアリティ空間でスノーボード運動ゲームを行う際の筋電位計測を行い、運動の熟達過程にしたがって、筋間コヒーレンス構造に変化があることを見出した。

白 優 志（石井教授）「勾配類似度を用いたマルチタスク学習法とモデルベース強化学習への応用」

機械学習（メイン）タスクに対してサブタスクを付加し、両タスク間での最適化勾配の類似度に基づき、メインタスクの入力に重みづけを行う手法を開発、画像認識タスクやモデルベース強化学習タスクにおいて有効性を見出した。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻**野 田 歩 夢（下田教授）「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」**

深層学習を用いリアルタイムに身体を隠消した映像を提示して、透明になったと錯覚させる体験が自己肯定感に与える影響を調査した。その結果、透明になった感覚により被評価意識・対人緊張が弱まり、自己受容が促され自己肯定感が向上することが分かった。

深 田 龍之介（下田教授）「発散的思考評価のための代替用途テストの高度化」

本研究では、代替用途テスト（AUT）を参加者内条件比較に利用する際の評価精度の向上を目指し、参加者内比較に適した題目を選定、CDFs と呼ぶ評価値を用いた発散的思考の柔軟性評価値の自動評価手法を提案し、それらの有用性を実験により検証した。

竹 内 恵 祐（下田教授）「認知行動計測に基づく知的集中状態変化のメカニズム解明に関する研究」

本研究では、まず知的集中状態変化を伴う認知行動計測実験を実施した。次に、ACT-R を用いてモデルを構築しパラメータを調整することで、計測結果を再現した。最後に、認知神経科学の観点からモデルを解釈し知的集中状態変化のメカニズム解明を目指した。

野 村 健 人（下田教授）「マイクロリフレッシュ誘発を意図した背景映像変化が知的作業に与える影響に関する実験研究」

本研究では知的作業中の数秒から数十秒の非常に短い休憩によるリフレッシュをマイクロリフレッシュ（MR）と呼び、作業中の背景映像変化による MR の誘発に注目し、これが知的作業に与える影響を人を対象とした実験を通して評価した。

橋 本 和 東（下田教授）「「やさしさインプリント」による環境配慮行動の促進効果に関する研究」

「やさしさ」の自己認識を高める「やさしさインプリント」を提案し、環境配慮行動（PEB）の促進を目指した。59 名を対象とした実験を実施し、介入前後の PEB 実施回数の変化を測定した。PEB 促進効果は有意でなかったが、一部の参加者で実施回数が増加した。

東 槇 拓 斗 (下田教授) 「マイクロリフレッシュ誘発を意図した音呈示が知的作業に与える影響に関する実験研究」

知的作業中の執務者に数秒から数十秒の短いリフレッシュ（マイクロリフレッシュ）を与えることにより、知的集中の低下が抑制される可能性がある。本研究では、マイクロリフレッシュ誘発を意図した音呈示が知的集中や疲労等に与える影響を実験により評価した。

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

谷 口 裕 亮 (中村 (祐) 教授) 「トカマクのヘリカルコア配位における微視的不安定性と MHD 不安定性」

磁気軸近傍がらせん状にねじれたヘリカルコアと呼ばれる平衡状態について、微視的不安定性と MHD 安定性を数値計算によって調べ、線形成長率の大小関係やモード構造がヘリカルコア発現に伴う磁気シアや測地曲率の変化に支配されていることを明らかにした。

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

石 渡 柚 季 (土井教授) 「Ni めっき {100} 〈001〉 集合組織 Cu テープ上に LaNiO_3/Nb ドープ SrTiO_3 導電性中間層を形成した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の研究」

{100}〈001〉 集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 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 LaNiO_3 層の追加挿入が有効である事を見出した。

内 田 翔 (土井教授) 「 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の Ag フリー化に向けた $\text{Sr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_3/\text{Ni}$ 導電性中間層の研究」

{100}〈001〉 集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 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、La ドープ SrTiO_3 が導電性中間層物質として有力な候補であることを示した。

島 田 大 輝 (土井教授) 「イオンビームアシスト成膜法による岩塩型 LiFeO_2 の Li イオン電池正極への応用」

リチウムイオン電池の正極活物質として、Li 以外にレアメタルを使用しない新材料の開発を目指して、岩塩型 LiFeO_2 をイオンビーム照射しながら作製した。この LiFeO_2 を正極としたコインセルを作製して充放電試験を実施したところ、50 mAh/g の容量を持つことが確認できた。

黒 岩 聖 (川山准教授) 「組成制御した LiCoO_2 焼結体のテラヘルツ時間領域分光法による複素導電率評価」

Li イオン電池の正極材料として知られる LiCoO_2 のキャリア伝導機構の解明を目指し、テラヘルツ周波数領域の複素導電率を計測した。Drude-Lorentz モデルにより解析することにより、キャリア密度および緩和時間等を推定した。

小 出 健太郎 (川山准教授) 「Cu を正極集電体とした薄膜型リチウムイオン電池の作製」

Li イオン電池の正極集電体としては従来用いることが困難と考えられていた、Cu を正極集電体とす

る薄膜型 Li イオン電池の開発を行い、Nb ドープ SrTiO₃ 薄膜を導電性中間層として用いることにより Cu 表面の酸化を防ぎ、正極集電体として機能することを示した。

田 中 大 智 (川山准教授)「金属基材上に Nb 反応防止層を作製した MgB₂ 超伝導薄膜の高温短時間アニールによる高臨界電流密度化」

高い臨界電流密度を持つ MgB₂ 超伝導線材の開発を目指し、SUS 基板中の元素の MgB₂ 薄膜への拡散を防止するために、Nb 反応防止層の導入およびアニール時間の短縮を行った結果、元素の拡散が抑制され臨界電流密度が向上すること示した。

前 田 佑一郎 (川山准教授)「{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に ITO を導電性中間層として配置した YBa₂Cu₃O₇ 超伝導線材の研究」

YBCO 超伝導線材において、YBCO の成膜やアニール等の酸化プロセスにおいても低い電気抵抗を維持する導電性中間層の開発を目的とし、ITO 薄膜の適正を検証した結果、酸化プロセス後も低い電気抵抗を維持するが、表面平坦性や基材への密着性に課題があることが分かった。

エネルギー理工学研究所

大 島 諒 也 (長崎教授)「ヘリオトロン J」における ECE 計測システムの観測領域の拡張」

磁場閉じ込め核融合装置ヘリオトロン J」においてマルチチャンネルラジオメータを開発し、電子温度計測のダイナミックレンジを拡張するとともに、トロイダル方向への電子サイクロトロン放射計測領域の拡張によりプラズマ実験での 70GHz ジャイロトロンノイズ軽減に成功した。

田 附 勇 人 (長崎教授)「ヘリオトロン J」におけるビーム放射分光を用いた 2 次元密度揺動解析」

磁場閉じ込め型プラズマ実験装置ヘリオトロン J」において NBI とプラズマとの衝突による輝線を利用するビーム放射分光を行い密度揺動の二次元分布を計測した。今回新たに特異値分解法を高速イオン励起 MHD 揺動に対し適用することで、揺動の空間構造を各モードに分解し揺動の特徴を明らかにした。

藤 田 智 大 (長崎教授)「ヘリオトロン J 非共鳴マイクロ波加熱プラズマにおける X 線エネルギー分布のモンテカルロ解析」

ヘリオトロン型磁場閉じ込め装置で非共鳴マイクロ波を入射すると統計加速により相対論的電子が生成される。本研究では真空容器壁の X 線遮蔽効果をモンテカルロ法により評価し、真空容器内で発生する制動放射 X 線のエネルギー分布を推定したところ、ベキ関数型のスペクトルが想定された。

XU Ze (長崎教授)「ヘリオトロン J」におけるダイバータプローブアレーを用いた周辺プラズマ粒子束の磁場配位依存性」

磁場閉じ込め核融合装置ヘリオトロン J」において、ダイバータプローブアレーを用いて周辺プラズマでの粒子束計測を行なった。イオン飽和電流のピークは磁力線長のピークと概ね合致していること、イオン飽和電流のピークの変移がプラズマ電流振動と強く関連していることがわかった。

竹 内 航 希 (門准教授)「2 次元可視分光システムを用いたヘリオトロン J」における固体水素ペレット溶発雲の時間追跡」

磁場閉じ込め核融合装置ヘリオトロン J」において燃料供給としてプラズマ中に入射した固体水素ペ

レットの溶発過程の解明のため、近赤外領域の放射光を2次元計測するシステムを開発した。放射光を分光器により波長分解することでペレット溶発雲の密度を求め、溶発の時空間発展の観測に成功した。

寺 田 凱 (稲垣教授)「Heliotron Jにおけるレーザートムソン散乱計測への機械学習の適用」

磁場閉じ込め核融合装置ヘリオトロン J においてプラズマの電子温度、電子密度の空間構造を計測するレーザートムソン散乱計測において、信号処理に機械学習を導入し、推定精度を向上した。学習データへのノイズの付与、5層のディープニューラルネットワークの導入により、信号雑音比が大きくても高い精度で空間構造を推定することに成功した。

岩 中 義 英 (稲垣教授)「Heliotron Jにおける自励振動のモデリング」

磁場閉じ込め核融合装置ヘリオトロン J にてプラズマの自励振動現象を初めて同定した。通常は定常に維持されているプラズマにフィードバック機構が現れると非自明な周波数で自励振動が現れる。この現象を密度と電磁揺らぎによるロトカ・ボルテラモデル（捕食者－非捕食者モデル）によって説明することに成功し、その振動周波数の起源を検証した。

相 野 薫 平 (松田教授)「遷移金属ダイカルコゲナイドの機械剥離法のベイズ最適化」

次世代半導体として期待されている、遷移金属ダイカルコゲナイドの機械剥離法における作製条件を効率的に最適化する新たな手法の開発を目指した。特に、機械学習ツールの一つであるベイズ最適化を用いて、高品質な単層試料を効率的に作製するための最適化に対して、指針を得ることができた。

庄 村 渉 (松田教授)「二次元半導体 $WS_2/MoSe_2$ ヘテロ二層構造における混成励起子状態に関する研究」

本研究では、二次元半導体 $WS_2/MoSe_2$ ファンデルワールスヘテロ構造における混成励起子からの円偏光発光を測定し、混成励起子が関与する光学特性やバレー分極状態を調べその特性を明らかにするとともに、静電ドーピングによって混成状態の積極的な制御に成功した。

平 林 弘 暉 (松田教授)「 MoS_2/SnS ヘテロ構造によるシフト電流デバイスの光起電力特性とその設計指針」

本研究では、シフト電流に起因する高い光起電力が予想されている二次元層状物質である SnS を利用し、面内分極の発現と自発的光起電力特性が期待される MoS_2/SnS ヘテロ構造を対象として、詳細な光起電力測定とデバイス評価を行った。得られた結果から、シフト電流を利用した新たな太陽電池デバイスの設計指針を示した。

生存圏研究所 中核研究部

湯 谷 樹 生 (山本教授)「高分解能電離圏シミュレーションを用いたプラズマバブル発生の日々変動に関する研究」

低緯度電離圏において発生するプラズマバブルは、電波伝搬に深刻な障害を引き起こすため発生予測が望まれている。本論文では、様々な条件の下でプラズマバブル生成のシミュレーションを行い、線形成長率とプラズマバブルの成長の関係を明らかにした。

木 村 侑希大（橋口教授）「1.3GHz 帯大気レーダーを用いたアダプティブクラッター抑圧の開発」

1.3GHz 帯大気レーダー LQ-7 に受信専用の外付けアンテナを付加し、アダプティブクラッター抑圧の開発を行った。ソフトウェア無線機を用いたデジタル受信機開発により、多チャンネル受信を可能とし、信号劣化の少ないクラッター抑圧を実現した。

石 井 佑 奈（橋口教授）「1.3GHz 帯大気レーダーを用いた MIMO レーダーの開発」

1.3GHz 帯大気レーダー LQ-7 を改良、7 種類のローカル周波数を用いて送信信号の直交性を実現し、DDMA-MIMO レーダーの実証実験を行った。MIMO による仮想開口拡大を確認し、さらにアダプティブビームフォーミングにより分解能向上に成功した。

Chuai Erlu（橋口教授）「Estimation of Cross-Range Wind Velocity Components Based on Radar Inversion Technique」
(レーダーインバージョン技術によるクロスレンジ風速成分の推定)

大気乱流散乱モデルとレーダーシステムの送受信モデルに基づいたスペクトル観測理論を干渉計に拡張したレーダーインバージョン法と従来の空間領域干渉計法による風速場推定精度をシミュレーションにより比較・検証した。

中 島 稜 大（小嶋教授）「月面環境を計測する静電プローブに関する計算機シミュレーション」

静電環境が支配的である月面において、その電位分布や時間変化を計測するためのセンサーをシミュレーションするための計算モデル構築を行った。そして、月面環境下で示すセンサー特性・性能について評価を行い、センサーの構造やガード電極の有効性について議論を展開した。

藤 田 晃 司（小嶋教授）「ARTEMIS 衛星により月周辺で観測される電子サイクロトロン高調波に関する研究」

月周辺で観測される電子サイクロトロン高調波に関する研究である。特に月の存在が、その発生の重要ファクタとなっているものに注目した。その結果、地球外部磁場が、月面に接続することが重要な発生要因となっている事実を突き止め、電子速度分布の同時観測データをもとにその励起メカニズムについて議論を行った。

野 田 周 英（小嶋教授）「地上送信局からの VLF 信号による高エネルギー電子降下現象に関する研究」

放射線帯の電子が、VLF 地上局からの信号によりピッチ角散乱を起こし、電子降り込み現象を引き起こしている証拠を捉えた研究である。本研究では VLF 波動の伝搬特性も考慮しつつ、その波動に起因するピッチ角散乱の、地球からの距離依存、ローカルタイム依存について詳細に解析してその特性を明らかにした。

水 野 雄 太（海老原教授）「磁気圏近尾部におけるイオン急増現象に関する研究」

グローバル磁気流体シミュレーションとテスト粒子シミュレーションを用い、サブストーム時の内部磁気圏で急増する 1-100 keV 帯のイオンを再現し、磁気圏尾部から内部磁気圏に至るまでの輸送・加速過程を調べ、イオン増加の質量依存性を明らかにした。

谷 口 由輝斗（海老原教授）「内部磁気圏におけるコーラス波の成長率に関する時空間分布」

グローバル磁気流体シミュレーションと電子分布関数の時間発展を解く粒子移流シミュレーションを

用い、内部磁気圏でホイスラーモード・コーラス波動が線形的あるいは非線形的に成長な可能領域を求め、その地球磁場強度に対する依存性を明らかにした。

梶 原 豪（篠原教授）「高精度マイクロ波送電用アレーアンテナのための低損失移相器の開発研究」

本研究ではマイクロ送電用アレーアンテナに用いる移相器の高精度化と低損失化を目的とし、反射回路網構造を最適化した低損失の反射型移相器の開発、フィードバック制御による移相器の高精度化を実現した。開発した移相器を用いて開発したフェーズドアレーアンテナを用いたビーム方向制御実験にも成功した。

高 原 麦（篠原教授）「0 次モード共振を利用した均一マイクロ波加熱領域の伸張」

本研究ではマイクロ波加熱の課題である加熱ムラを低減するために、0 次モード共振を用いた均一マイクロ波加熱領域の伸張に取り組んだ。電磁界結合型、導波管型の均一マイクロ波加熱を検討し、シミュレーション結果から両方で均一マイクロ波加熱領域の伸張に成功した。また、設計した共振器を作製し、0 次モード共振を用いた均一マイクロ波加熱を実証した。

鈴 木 健 斗（篠原教授）「OAM モード切り替え照射による均一マイクロ波加熱の研究」

本研究では、波長に対して二次元方向に広い範囲での均一マイクロ波加熱の実現を目的とし、OAM モード切り替え照射による均一加熱手法を検討した。OAM モード生成アンテナの検討とモードごとの最適な照射時間割合の設定により、照射電力密度の時間平均を波長より十分広い範囲で均一化できることをシミュレーションおよび実測で示した。また電波吸収体へのビーム照射実験により、本手法が広範囲の均一マイクロ波加熱に有効であることを実証した。

高校生のページ**量子機能工学講座 光材料物性工学分野（川上研究室）**<https://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp>**「2014 年ノーベル物理学賞から 10 年
— 21 世紀の照明革命の意義と将来展望」****はじめに ～ いろいろな半導体材料**

数年前から「半導体不足」が指摘されるようになり、「半導体工場」の建設が大きな話題になっています。ここでいう「半導体」とは、シリコン (Si) による電子部品のことです (ちなみに Si 自体は地球の主たる構成元素であり不足のしようがありません)。半導体の王様とも称される Si が代表的な半導体材料であることは論を待ちませんが、特性上の制限から、他の半導体材料が用いられる分野も多数あります。例えば、省エネルギー性に優れたパワー電子デバイスには SiC や窒化物半導体、酸化物半導体が、光デバイスには III-V 族半導体 [1] や窒化物半導体 [2] が用いられます。われわれの研究室は光材料物性工学分野ですので話を光デバイスに絞ると、代表的な光デバイスとしてはレーザダイオード (LD) や発光ダイオード (LED) があります。より具体的に、普段の生活で活躍する III-V 族半導体光デバイスとしては、光通信用 LD、リモコン用赤外 LED、モバイルフォンなどで用いられる顔認証用の赤外線面発光 LD (VCSEL)、バーコードリーダー用赤色 LED (一部 LD もあり) などがあります。窒化物半導体光デバイスは紫外～可視光が得意で、白色 LED がいまや照明器具にほとんど必要不可欠ですし、モバイルフォンや PC の液晶のバックライトにも用いられています。また、青色や緑色 LED が交通信号や屋外ディスプレイなどに利用されています。

半導体からの発光現象を理解するには、電子の波動性を考慮したエネルギーバンド構造が重要な役割を果たします。そもそも半導体には、伝導帯と呼ばれるエネルギーバンドと価電子帯と呼ばれるエネルギーバンドがあり、電子がその間のエネルギー状態をとれないという特徴があります。それらエネルギーバンド間の差を (電子が存在できないという意味で) 禁制帯幅と呼びます。伝導帯にいる電子が価電子帯に遷移する際に禁制帯幅に相当するエネルギーを光として放出するのが LD や LED の基本原理ですが、その遷移の起きやすさ・起きにくさが半導体材料によって異なります。波動性を記述する波数が遷移の前後で変化しない直接遷移と比べて、変化する間接遷移は遷移が起きにくい傾向があり、Si は後者の特性を示す半導体であるため光材料には適さないとされています [3]。一方で、多くの III-V 族半導体や窒化物半導体では直接遷移するので、光デバイス用材料として重用されています。

もう一つ重要な視点は禁制帯幅そのものです。Si の禁制帯幅は、波長換算すると 1.1 μm (赤外線) なので、原理的に、よりエネルギーの高い可視光や紫外光は出せません。一方、代表的な窒化物半導体である AlN, GaN, InN の室温での禁制帯幅は波長換算でそれぞれ 207 nm, 361 nm, 2 μm であり、それらを混ぜた $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶や $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶の禁制帯幅は、それぞれ 207~361 nm と 361 nm~2 μm になることから、前者は紫外域を後者は可視全域をカバーすることになります。ちなみに、金属、半導体と絶縁体を区別するのは禁制帯幅の大きさです。金属には禁制帯はありません。また基本的には、禁制帯幅が大きいほうが絶縁体的な特性を示すのですが、その基準は実は時代とともに変わってきています。例えば、従来 AlN は絶縁体に分類されていましたが、技術の進展に伴い、いまや紫外光デバイスやパワー電子デバイス用の重要な半導体とみなされています。

このように、用途によって適切な特性を持った半導体を選択することが光デバイス応用に向けては必要です。われわれの研究室では、窒化物半導体の光材料としてのポテンシャルを明らかにし、それを新奇デバイスへと応用する研究を行っています。

窒化物半導体の開発

一般に光デバイスは、ある単結晶基板の上にエピタキシーと呼ばれる結晶成長法によって単結晶薄膜の n 型層、量子井戸 (QW) あるいは ダブルヘテロ発光層、 p 型層を順次積層することによって作製されます。図 1 に窒化物半導体、とくに $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 系材料による可視 LED の概略図を示します。この構造を作製するにあたり、図中および下記 (1)~(3) に示した結晶成長上の問題がありました。

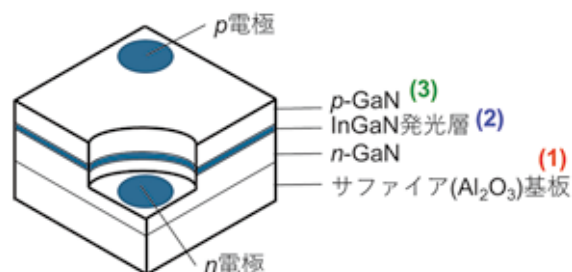


図 1：窒化物半導体による発光素子の基本的な構造

(1) 窒化物半導体基板がなく、良質な窒化物半導体単結晶による薄膜多層構造の作製が困難

(2) InGaN 発光層に In を導入することが困難

(3) p 型伝導型制御が困難

これらの問題を解決して青色 LED を実現したことにより、2014 年ノーベル物理学賞が赤崎先生、天野先生、中村先生に授与されたことは、これらの問題の大きさや、それを解決したときの社会的インパクトの大きさを裏付けています。

そのインパクトは信号機、大型ディスプレイ、液晶ディスプレイのバックライトなど様々な領域に及びますが、最大のものは白色 LED の開発でしょう。原理的に LED は、上記の通り半導体の禁制帯幅で決まる青とか赤などの単色で発光するものです。一方、「白色」という多波長発光は、青色 LED に黄色蛍光体をかぶせ、青色と黄色の発光を加色混和することにより得られています。このアイディアは画期的で、非常に簡便な方法で白色が得られる（つまり工業的に優れる）ばかりなく、高効率な青色 LEDのおかげで白色 LED も従来の白色光源である蛍光灯や白熱ランプをはるかに上回る発光効率を持つというメリットをもたらします。そのため、省エネ照明デバイスとして非常に有用で、蛍光灯や白熱ランプを置き換える「照明革命」を引き起こしました。今や多くの家庭で LED 照明が利用されているのではないのでしょうか。ノーベル物理学賞の授与の理由として、ノーベル財団は “for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources” とコメントしていますが、状況を端的に示していると思います。

結晶成長の方法

問題 (1)~(3) の解決についてもう少し詳しく解説します。図 1 のような薄膜多層構造は、通常、有機金属気相成長 (MOVPE) 法で作製されます。MOVPE は、装置コストが高いなど欠点もあるものの、膜厚の制御性が高く量産性に優れていることから、窒化物半導体の結晶成長法としては、産業界も含め最もポピュラーな方法です。研究室でも、自作装置から市販装置まで、数台の MOVPE 装置を所有して研究を進めています (図 2)。上記の問題 (1)~(3) をいかにクリアして、MOVPE 法が広く用いられるようになったのかを概説します。

まず基板の選択ですが、窒化物半導体の基板結晶は現在でも研究対象であり、多くの場合、窒化物半導体のかわりにサファイア (Al_2O_3) が用いられます。サファイアが選択された理由は、結晶成長するような高温 (1000 °C 前後) でも熱的に安定であり、代表的な結晶面である (0001) 面での原子の幾何

学的配置が窒化物半導体のそれと類似するためです。ただし、酸化物と窒化物ですので化学的特性は大きく異なっており、加えて、結晶の大きさ（格子定数）も大きく異なることから、結晶成長は容易ではありません。通常、低温（といっても 500 °C 程度）で低温緩衝層と呼ばれる小さな結晶粒からなる AlN あるいは GaN 層を数十 nm 堆積したのちに、高温で結晶成長すると高品質な GaN が得られます。これが上記の問題（1）の解決策です。

薄膜の結晶成長法である MOVPE 法は、その名の通り有機金属を原料とします。例えば GaN の場合、トリメチルガリウムやトリエチルガリウムが III 族原料、アンモニアが V 族原料で、それらを、高温に熱した基板上に水素や窒素で運ぶと、大雑把には 2 段階の化学反応 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + 3/2 \text{H}_2 \rightarrow \text{Ga} + 3\text{CH}_4$ および $\text{Ga} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{GaN} + 3/2\text{H}_2$ によって GaN 薄膜が形成されます。もちろん実際の化学反応の素過程はもっと複雑で、その過程自体が研究対象になります。InGaN QW 発光層のとくに InN に関する反応過程だけを抜き出すと、書式としては同様に $\text{In} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{InN} + 3/2\text{H}_2$ と書けるのですが、右に向かう反応の平衡定数が GaN の場合よりも極端に小さいため、水素 (H_2) を原料搬送用に使っていると、反応がむしろ左向きに進んでしまい InGaN 中に InN が取り込まれないことが起こります。これが上記の問題（2）の背景です。この解決策は原料搬送に水素ではなく窒素を用いることで、これも国内の研究機関から提案された技術です。



図 2：研究室で所有の MOVPE 装置

半導体に微量の不純物を添加させることにより電気を流すキャリアとして電子を生成したものを *n* 型半導体、正孔を生成したものを *p* 型半導体と呼んでいます。これに関する基本原理は、高校物理の教科書や Web 上での解説記事を参照してみてください。不純物添加による *pn* 伝導型制御は、半導体デバイスを電氣的に駆動する限り必要不可欠です。窒化物半導体の場合、*n* 型伝導制御は Si 添加による Ga サイトの置き換えにより容易に達成できます。一方、II 族元素の Mg で Ga を置換すれば原理的には *p* 型となるはずですが、それを阻害する未知の要因があり *p* 型伝導制御は困難でした。赤崎先生、天野先生は結晶成長後の電子線の照射により、中村先生は熱処理により *p* 型伝導が達成できることを見出され、そのメカニズムとして、結晶成長直後の試料中では原料搬送用の H_2 あるいは V 族原料 NH_3 中の水素が Mg に結合して *p* 型化を妨げていますが、電子線照射や熱処理により H が Mg から脱離することを提案されました。わかってしまえば簡単なこのメカニズムですが、当時は、「自己補償効果」と呼ばれる、伝導型制御のための不純物を導入しても、それを補償するような欠陥が形成されるため、GaN（など禁制帯幅の広い半導体）では伝導型制御は不可能であると結論するような理屈もありました。それを安易に信じることなく、地道に実験を継続した研究者だけが正解にたどり着くことができたという事実は、研究者の持つべき心構えとしてとても示唆に富んでいるように思います。

以上により、産業応用上優れた MOVPE 法により、窒化物半導体発光デバイスを量産することが可能になりました。光デバイスだけではなく、電子デバイスの作製にも MOVPE が用いられますが、とくに電子デバイスでは、意図せず混入する不純物を極力避ける必要があります、そのために別の結晶成長法（たとえば HVPE 法）も現在研究が進められています。

光物性の評価技術

サファイアを基板として品質の優れた GaN が結晶成長できるような技術が開発され LED の実用に

至ったと言っても、GaN 中の貫通転位密度は $10^9 \sim 10^{10}/\text{cm}^2$ ありました。この値は GaAs など III-V 族半導体中と比べて 5 桁以上高く、そのような状況下（つまり、非発光中心として働く貫通転位が多数ある中）でなぜよく発光するのか、青色 LED が市販された当初、そのメカニズムは謎とされていました。中村先生が当時在籍されていた企業からサンプル提供を受けた日本のいくつかの大学で謎解きが進められ、われわれのグループからは「 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ QW 発光層での In と Ga は空間的に不均一に分布するため、ポテンシャルに揺らぎが生じ、ポテンシャル極小に局在したキャリアは貫通転位に捕まることなく効率的に発光する」というモデルを提案しました [4]。根底にあるアイデア — キャリア局在による高効率発光 — は、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ QW での高効率発光を説明する機構として広く受け入れられ、文献 [5] の 2 件の論文は当時の全物理分野での引用件数第 3 位にランクインしていました。

空間的に不均一な系での光学遷移ダイナミクスを観察するには時間・空間分解分光が重要です。分光はその名の通り光を分けて分析することで、どの波長で発光しているのかを調べることに相当します。それを時間・空間分解するということは、どのような時間スケールで発光または非発光遷移が起こるのか、空間的にどの場所でそれらの遷移が起こるのかを分解することを意味しています。とくにポテンシャルの空間分布を解明するには高い空間分解能が必要です。通常の光学顕微鏡の空間分解能は、回折限界により最も高い場合でも観察に用いる光の波長程度になりますので、可視光で観察した場合は数百 nm 程度となります。これに対して、近接場光学顕微鏡（SNOM）は、波長より小さな微小開口付近に局在する近接場光を利用して波長以下の分解能を実現する顕微鏡で、われわれは 2000 年代初頭から、SNOM を用いて InGaN 系半導体の発光機構解明に取り組んできました。その結果、10 nm の空間分解能を実現し、貫通転位の多い InGaN QW での高効率発光のメカニズム解明に主導的な役割を果たしました。CUE40 号に関連した一般向けの記事があります。

最近では、InGaN 系の可視発光素子から AlGaIn 系紫外発光素子に研究対象を広げています（図 3）。波長を変えると光学部品を一から作り換える必要もあり、しかも紫外域の光学部品は開発が可視（や赤外）ほど進んでいないことから部品メーカーとの共同開発の結果、紫外用 SNOM の開発とそれを用いた、AlGaIn QW からの発光の観察に成功しました。励起光源の波長 210 nm のとき、世界最高の空間分解能（ $< 150 \text{ nm}$ ）を達成しました [5]。

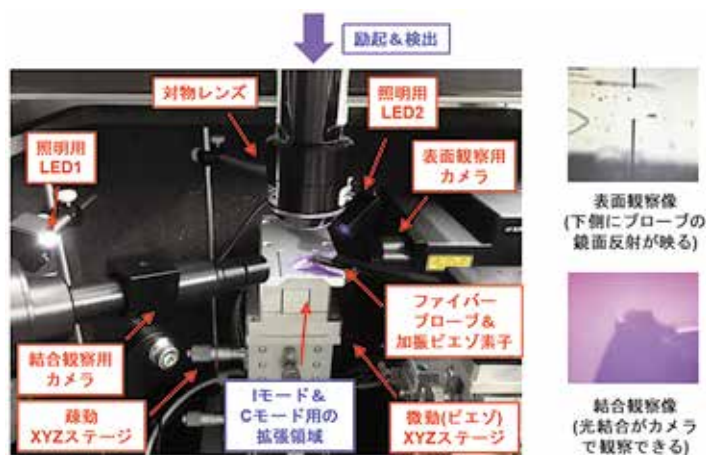


図 3：紫外 SNOM 装置の開発

研究室での最新の研究動向 — 21 世紀の照明革命を目指して

青色 LED と黄色蛍光体を組み合わせた白色 LED が、照明革命を引き起こしたことはすでに述べました。しかし、現行の白色 LED では、LED の青色から蛍光体の黄色への波長変換で生じる $\sim 20\%$ のエネルギー損（Stokes 損）が高効率化の限界を決めています。また、可視発光性を活かした光通信（Li-Fi）応用では、蛍光体の応答速度の遅さから青色 LED 単色しか利用できず通信容量増大の障害となっています。したがって、次世代の光源としては、蛍光体フリーでスペクトル全体が高効率 LED で実現される光源が理想で、それによって、光源単体としての機能を越えた、より高度な機能性も実現すると考えています。そのための構造として、わたしたちの研究室では窒化物半導体による三次元（3D）構造の利用を世界に先駆けて提唱しています。

結晶成長では、通常、安定面と呼ばれる表面のエネルギーの低い面上で高品質な薄膜が得られやすい傾向があり、デバイスの作製にはもっぱら安定面が利用されます。上記の(0001)面はその代表的な面で、このような面上にLEDやLDを結晶成長すると、二次元的な構造となり、禁制帯幅で決まる波長において単色発光します。3D構造の研究開始当初は、結晶安定面の表面に成長を阻害するマスクをパターニングし、マスク開口から結晶成長をさせることにより、安定面で囲まれた3D構造を作っていました。詳しくはCUE 24号に高校生向けの関連記事があります。この3D構造では、表面を構成する面によってInGa_N QWの組成や膜厚が異なるため、各面のQWが異なる波長で発光することが特長で、その加色混和により窒化物半導体だけで（つまり、蛍光体フリーで）白色が得られます。

このような3D構造で、最近では、(a) 非安定結晶面の利用、(b) 微細LEDの集積化などを検討しています。これらについて以下で紹介します。

(a) 非安定結晶面の利用 [6]

安定面では高品質な薄膜が得られやすいと指摘しましたが、一方で利用できる結晶面の数に制限がかかります。これに対して、もし任意の結晶面が利用可能となれば、それを利用した無数の発光色の集積化が可能となるかもしれません。図4は、そのようなコンセプトの概念図で、レンズ状の微細構造を空間的に敷き詰めた構造を想定しています。レンズ表面は曲面で構成されていることから、一つ一つのレンズ構造が、無数の非安定面で構成されていることと等価で、そこに形成したQWからは表面の傾斜に依存した発光色が得られると期待されます。実際に、このような構造をMOVPEで作製して評価したところ、図5(a)に示すように、QWの作製後もレンズ構造が維持されており、しかも、位置に依存した発光波長の変化を示す[図5(b)]ことがわかりました。さらにこの構造をLED化しました。最初のトライアルとして、65個のレンズ構造を含む比較的大きな電極により駆動したところ、図5(c)のように注入電流によって発光スペクトルが変化するものの、特に低電流注入時には波長380 nm（紫）から500 nm（青緑）まで広がる広帯域なスペクトルを示し、白色光源としての高いポテンシャルを持つことがわかりました。

もし広い電極ではなく、複数の微小電極を形成することができれば、所望の波長だけを発光させることができるようになります。そうすれば、場面や用途に合わせて任意にスペクトルを調光するテーラーメイド照明、LEDの高速変調に基づく可視光通信(Li-Fi)、さらにマイクロLEDディスプレイなど、高いスペクトル制御性と集積性が重要な応用への展開が拓けると期待されます。

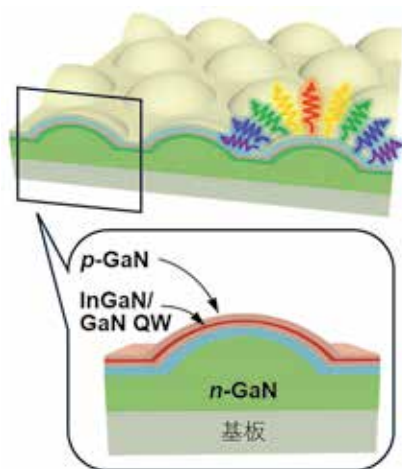


図4：非安定結晶面による3D構造

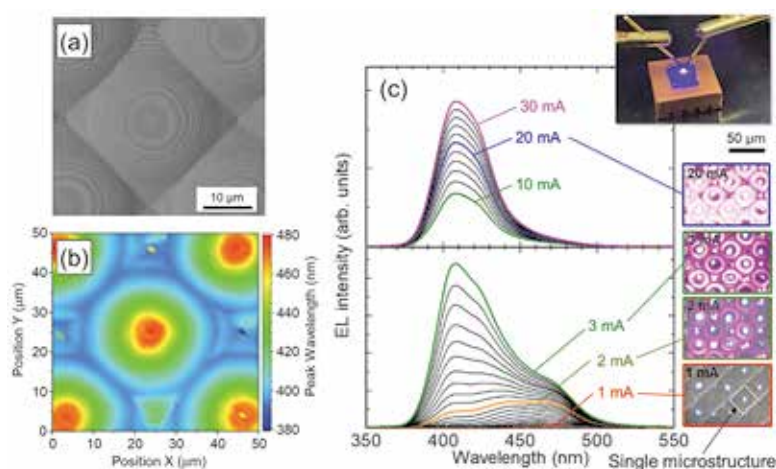


図5：(a) 顕微鏡による表面観察。(b) 発光波長マッピング。(c) LED動作の確認

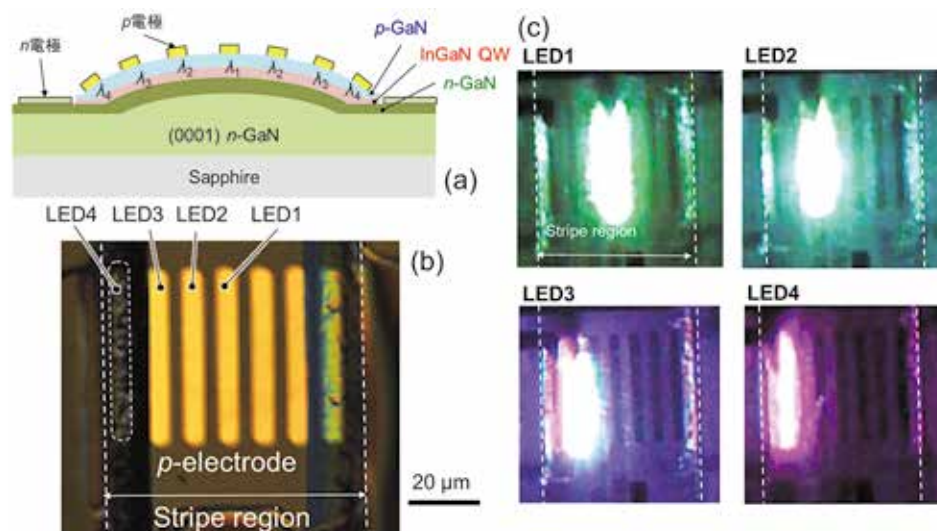


図 6：(a) 断面の概略図。(b) 顕微鏡により観察した、集積マイクロ LED 構造の表面。(c) 各 LED の発光の様子

(b) 微細 LED の集積化 [7]

実際、個別電極でスペクトル制御にもトライしています。同時に、LED を微細化し、マイクロ LED ディスプレイへと応用することを想定した構造に関する実験結果を図 6 に示します。図 6 (a) は構造断面の概略図で、図 4 同様にレンズ状ですが、今回は個別電極の形成しやすさからストライプ構造としました。実際に個別電極を付けて作製したマイクロ LED の表面写真を図 6 (b) に示します。LED のサイズは具体的には $5\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ で、正方形電極に換算すると $16\ \mu\text{m}$ 角に相当し、AR や VR グラスに利用できるレベルに近づきつつあります。図 6 (c) に示したように、電極位置、つまり、表面傾斜によって発光色が紫から緑にまで変化しています。

図 6 (c) の特長は特筆すべきものです。というのも、通常マイクロ LED で異なる発光色を集積するには、異なる単色発光 LED を個別の基板上に結晶成長した後、それを切り出して並べるという別工程 (pick-and-place) が必要とされ、LED が小さくなればなるほど難易度が上がるのですが、われわれ提案は結晶成長で自動的に多色の LED が集積するため、工程の簡略化と高集積密度化が期待されるからです。ただし図 4~6 の構造では、まだ長波長発光成分 (赤、など) が不十分で、現在赤色も含んだ発光を示す構造の開発を進めています。

おわりに

窒化物半導体の開発の歴史を振り返りつつ、最近の動向として次の世代の光源開発の例を紹介しました。マイクロ / ナノ構造の開発が新しい機能性に結びつきやすく、新奇 3D 構造における結晶成長や局所的な光物性の評価といった基礎的な検討を通じて、世の中にはない新しいデバイスの開発に寄与できる分野です。その意味で、研究者各人のアイデアが試されるところでもあり、やりがいを感じやすいところでもあると言ってよいと思います。光材料物性工学としての根源的な命題として、「如何にして任意の場所での発光波長をコントロールできるか」という問いかけがあります。3D 構造には、ミリ、マイクロ、ナノといった空間階層があり、これまで見出してしてきた知見は断片的なものにすぎません。今後はこれらを巧みに組み合わせ、トップダウンとボトムアップの協奏による発光集積構造の設計指針を体系的な学理として構築する必要があります [8]。

用語説明、参考文献

- [1] 周期表 III 族、V 族（最近の言い方だと、それぞれ XIII 族、XV 族）の元素による化合物半導体。GaAs, InGaAs, InP, InGaP など
- [2] 周期表 III 族元素（B, Al, Ga, In）と窒素による化合物半導体。広義には III-V 族半導体ですが、As や P を含む従来の III-V 族半導体と結晶構造などの基本的な特性が大きく異なっており、区別されることが多い。
- [3] ただし、Si をナノ粒子化して光らせてやろうとする研究はあります。例えば、L. T. Canham, “Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers,” *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
- [4] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, “Role of self-formed InGaN quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm”, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 981 (1997), Y. Narukawa, Y. Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura, “Recombination dynamics of localized excitons in $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$ - $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ multiple quantum wells”, *Phys. Rev. B* **55**, R1938 (R) (1997).
- [5] R. Ishii, M. Funato, and Y. Kawakami, “Pushing the limits of deep-ultraviolet scanning near-field optical microscopy,” by *APL Photonics* **4**, 070801 (2019).
- [6] Y. Matsuda, S. Funato, M. Funato, and Y. Kawakami, “Multiwavelength-emitting InGaN quantum wells on convex-lens-shaped GaN microstructures”, *Appl. Phys. Express* **15**, 105503 (2022). Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, “InGaN-based LEDs on convex lens-shaped GaN arrays toward multiwavelength light emitters”, *ibid*, **16**, 015511 (2023).
- [7] Y. Matsuda, H. Miyawaki, M. Funato, and Y. Kawakami, “Spontaneously integrated multicolor InGaN micro-LEDs for spectrum-controllable broadband light sources”, *Phys. Stat. Sol. RRL* **2400094** (2024). DOI: <https://doi.org/10.1002/pssr.202400094>
- [8] 研究室ホームページ : <http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

学生の声

Handshake

情報学研究科 通信情報システムコース
大木研究室 博士後期課程3年 Zhang Chenlu

Recently, I had the opportunity to attend a conference in the United States, where I was greeted with a handshake by a native researcher as we socialized, something I hadn't experienced in a while. Having lived in Japan for some time, where bowing is the norm and handshakes are rare, this felt quite different. It made me wonder how people around the world greet each other when meeting for the first time in similar situations.

I did some research. In France and many Latin countries, cheek kissing, or “la bise,” is common even among new acquaintances. In contrast, people in Germany and Nordic countries are more reserved, typically opting for a handshake when meeting someone for the first time. In the Middle East, handshakes are common too, but only with the right hand, as the left hand is considered unclean. In India, the traditional greeting is the “Namaste,” which involves pressing the palms together in front of the chest and bowing slightly, while saying “Namaste.” This gesture signifies respect and humility.

Reflecting on these greeting customs, I realized that despite the differences in forms, each culture has its unique way of conveying respect and friendliness. Perhaps this is what makes cultural diversity so fascinating, allowing us to experience the richness and beauty of the world through various customs. This exploration has made me appreciate the simple act of a handshake I received at the conference even more, as it represents a bridge between different customs and a universal gesture of welcome.

登山と研究

工学研究科 電子工学専攻 米澤研究室 博士後期課程2年 大 住 知 暉

私は時々登山に行きます。登山の経験が研究に活かれていることがあると思いましたので、そのことについて紹介します。

登山の事前準備と登山中のトラブル時の対応方法が研究での外部装置利用時に役立っていると感じています。登山に行く際には、前日までに当日の行程を事前に決め、携行品を決めます。携行品の忘れ物があると、登山を中止しなければならない場合があります。そのため、携行品に抜けがないかを注意深く確認します。私の場合はザックに携行品を詰めた際に詰め忘れるということがあります。この対策として、携行品を詰める直前にそれらの写真を撮影します。後に詰め忘れていないか不安になっても、写真を見れば安心でき、後に不足物品についても気付くことができます。研究では、外部装置利用の際に、自身の試料や実験機器などを持参する必要があり、忘れ物があると、実験できなくなることもあります。そこで、外部装置利用時には、試料や実験機器などを写真に撮ってから、梱包するようにして、忘れ物を防いでいます。

また、登山中には、天候の悪化、道迷いなどのトラブルにより予定通りの行程にならない場合もあります。そのため、ある時刻までに特定の地点まで到達できなかった場合は、ルートの変更や下山することを前もって決めておき、無理をしないようにしています。研究では、外部装置利用の際に、装置のトラブルなどで実験時間が短縮される場合があります。そこで、トラブルが起きた際の予定についても事前に考えておき、実験の優先順位を決めておくことで、トラブルが起きた場合であっても、悩む時間を減らし、限られた時間の中で重要な実験から行うことができます。今後も、登山の経験を活かしつつ、研究を進めていきたいと思っています。

教室通信

コロナ明けの電気電子工学科

令和 4,5 年度学科長 松 尾 哲 司

令和 6 年 3 月 26 日、学部生の卒業式が行われ、電気電子工学科からは 132 名の卒業生を送り出しました。この学年は、令和 2 年に始まった新型コロナの拡散が入学時期と重なり、入学式が行われず、授業もすべてオンラインという異例な形で大学生活をスタートした学年です。昨春に 4 回生で研究室配属された先での新歓コンパが大学生活初めてのコンパだった学生もいたという話を聞いています。コロナ禍における学科の様子については、これまでも教室通信でお伝えして参りましたが、昨年 5 月に新型コロナの分類が 5 類に移行し、大学生活も元の姿を取り戻してきています。今年の卒業式の後、卒業生歓送会を久しぶりに（令和になってはじめて）開催しました。

令和 2 年度には、黒橋禎夫学科長（当時）の陣頭指揮の下、学科の授業や会議のオンライン化が進められ、コロナ禍においても教育と教室運営を継続しました（オンライン授業の年度では、留年率が減少するという副次効果もありました）。その後、学生実験など一部科目で限定的な対面授業への復帰を進め、令和 3 年度後期からは講義科目も原則対面実施に戻りました。その間、学科関連催しも徐々に元の姿に戻りつつあります。例えば、電気系教室懇話会については、令和 3 年度はハイブリッド開催でしたが、令和 4 年度からは洛友会主催の先輩との交流会との同日開催として対面で実施し、令和 5 年度には懇親会も実施することができました。学生と教員の懇親の場である電気電子交流会も今年 2 月に対面実施に戻りました（下図写真）。課外活動のエレクトロニクスサマーキャンプについては、教室通信でお伝えしました通り、令和 3 年度には半年遅れの春実施になった後、令和 4 年度から元通り夏実施に戻っています。なお、学科運営に関する教室会議はオンライン会議のままです。

令和 6 年度の入学式は 4 月 5 日に行われ、その後、電気総合館 4 階にて、これも平成 31 年以来久しぶりの新入生歓迎会が行われました。今年度はオープンキャンパスも対面形式に戻りますので、下田宏現学科長以下、準備を進めているところです（本原稿執筆時点）。



編集後記

私は京都大学に異動して3年目で編集委員に就任しました。以前に所属していた大学ではcueのような同窓会誌は無く、初めての事で戸惑いながらも京都大学電気工学科らしい伝統と文化を感じながら編集に参加しました。

担当した「産業界の技術動向」では、今号も自ら起業をされた方々からのお声として、株式会社 Cube Earth 武田様にデータ駆動型社会実装のための基盤技術開発についてご紹介いただきました。私もデータ駆動科学に興味があり少しかじった事がありますが、その頃見聞きした技術から更に一段も二段もレベルが違うと感じました。日本の科学技術の停滞が指摘されていますが、このような急速な技術の進捗に感銘を受けました。

最後になりますが、お忙しいところご寄稿いただきました皆様に厚く御礼申し上げます。

[S. I. 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6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、

三谷 友彦、岡本 亮、伊藤 陽介、

デゾイサ メーナカ、北野 正雄（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

