



京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.56      SEPTEMBER 2026

---

[第56号]

巻頭言

無線電力伝送—ワイヤレス充電から  
宇宙太陽発電システムまで  
昭和44年電気工学科卒業  
京都大学名誉教授 橋本 弘藏

大学の研究・動向

ナノプロセス技術を駆使した革新的光  
デバイスの創成と応用展開  
光・電子理工学教育研究センター  
高機能工学講座 ナノプロセス工学分野

産業界の技術動向

産業界のテラヘルツ波センシング技術動向  
分光・イメージングを中心に  
有限会社スペクトルデザイン 代表取締役 深澤 亮一

新設研究室紹介

研究室紹介

令和7年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

学生の声

教室通信

編集後記

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

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

## cue 56 号 目次

### 巻頭言

- 無線電力伝送—ワイヤレス充電から宇宙太陽発電システムまで  
..... 昭和 44 年電気工学科卒業 京都大学名誉教授 橋本 弘藏..... 1

### 大学の研究・動向

- ナノプロセス技術を駆使した革新的光デバイスの創成と応用展開  
.....光・電子理工学教育研究センター 高機能工学講座  
ナノプロセス工学分野..... 3

### 産業界の技術動向

- 産業界のテラヘルツ波センシング技術動向 分光・イメージングを中心に  
.....有限会社スペクトルデザイン 代表取締役 深澤 亮一..... 10

### 新設研究室紹介..... 17

### 研究室紹介..... 21

### 令和 7 年度修士論文テーマ紹介 ..... 38

### 高校生のページ

- 「ゆらぎ」をハッキングする脳の戦略：姿勢制御のデジタルツインが拓く次世代医療  
.....大学院情報学研究科 情報学専攻 システム情報論講座  
バイオサイバネティクス分野（野村研究室）  
野村 泰伸..... 58

### 学生の声

- 転石苔むさず  
.....工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻 吉井研究室  
博士後期課程 2 年 江成 涼..... 67
- 博士課程に進んで  
.....情報学研究科 情報学専攻 通信情報システムコース 橋本研究室  
博士後期課程 3 年 五味 唯美..... 67

### 教室通信

- 電気電子工学科の近況  
.....電気電子工学科 学科長 佐藤 高史..... 68

### 編集後記..... 69

## 巻頭言

# 無線電力伝送 —ワイヤレス充電から宇宙太陽発電システムまで

昭和 44 年電気工学科卒業 京都大学名誉教授 橋本 弘藏



【はじめに】 スマートフォンのワイヤレス充電は、いまや身近な技術となった。携帯端末だけでなく家電製品や電気自動車への応用も広がりつつある。これらの基盤となる無線電力伝送（Wireless Power Transmission: WPT）について述べる。その研究の源流をたどると、宇宙太陽発電システム（Space Solar Power System: SSPS）に行き着く。電磁波によるエネルギー伝送の歴史は古い。1887 年、H.R. Hertz は受信リングに生じた火花によって電磁波の存在を実証し、空間を介してエネルギーが伝達されることを示した。1904 年に N. Tesla は、150kHz に共振したテスラコイルへ約 300kW を供給する大電力無線送電を試みたが、失敗に終わった。周波数が低すぎたからである。

【マイクロ波空間伝送方式】 第二次世界大戦を契機として、マイクロ波発生技術やアンテナ技術は飛躍的に発展した。これらの成果を背景に、W. C. Brown は 1963 年、マグネトロンから 400 W の連続波マイクロ波をホーンアンテナから送信し、6m 先で約 100 W の直流電力を得て直流モータを駆動することに成功した。さらに翌年には、半波長ダイポールアンテナと半導体ダイオードによる整流回路を組み合わせた受電アンテナ「レクテナ（Rectenna）」を考案した。レクテナは現在でも用いられている。Brown はその後も 2.45 GHz ISM 帯を用いて数多くの無線電力伝送実験を行った。この成果を受けて、P. E. Glaser は 1968 年、静止軌道上の人工衛星で太陽光発電を行い、その電力をマイクロ波で地上へ送電する概念を Science 誌に発表した。宇宙太陽発電所（Solar Power Satellite: SPS）の始まりである。なお、初期には SPS と呼ばれたが、近年、日本では Space Solar Power Systems（SSPS）、欧米では Space-Based Solar Power（SBSP）が一般的に用いられている。

マイクロ波空間伝送方式は、現在では宇宙应用だけでなく、離れた位置に設置されたセンサや IoT 機器、ウェアラブル機器への給電、さらに工場の FA 機器、介護・見守りシステムなどへの応用も進められている。

【電磁界結合方式】 無線電力伝送の例として、無線タグ（RFID）がある。身近なのは、13.56 MHz を利用する SONY の FeliCa である。2001 年に Suica へ採用されて以来、交通系 IC カードとして全国に普及した。改札機側のコイルから供給される磁界を利用してカード内で受電・整流し、マイコンを動作させる方式であり、電池を必要としない。RFID には UHF 帯を利用する方式もあり、タグのアンテナ整合状態を変化させて反射波を変調するバックスキャッタ通信が用いられている。バーコードと異なり、複数のタグを同時に読み取れることなどから物流や流通分野への応用が進められている。

2007 年には、マサチューセッツ工科大学（MIT）が磁界共鳴結合を利用し、約 2 m 離れた 60 W 電球への無線給電を実証した。この成果を契機として近距離 WPT への関心が高まり、スマホのみならず、家電製品、オフィス機器、電気自動車など、より大電力機器への応用など、急速に進展している。

【SSPS の構想と発展】 宇宙太陽発電システム（SSPS）は、静止軌道上で太陽光発電を行い、その電力をマイクロ波に変換して地上へ送電する構想である。宇宙空間では昼夜や天候の影響を受けず、地上よりもはるかに高い太陽エネルギーが利用できることから、クリーンな将来のベース電源として期待されている。米国では、NASA などが 1970 年代後半から大規模な概念設計と評価を実施し、1978 年には SPS Reference System を公表した。太陽電池パネルは約 5 km×10 km、送電アンテナ直径約 1 km、送電周波数 2.45 GHz、送電出力約 6.8 GW、地上レクテナ直径約 10 km という極めて大規模なシステム

であった。しかし、当時の技術や経済性を考えると実現へのハードルは高く、米国ではその後、研究は縮小された。

**【日本の SSPS 研究】** 日本では 1979 年から宇宙太陽発電システムの研究が継続的に行われてきた。2004 年には宇宙航空研究開発機構（JAXA）による「JAXA 2004 モデル」、2006 年には無人宇宙実験システム研究開発機構（USEF、現 宇宙システム開発利用推進機構：J-spacesystems）による「USEF 2006 モデル」が提案されるなど、具体的なシステム検討が進められた。送電出力は約 1 GW、送電周波数には 5.8 GHz を採用した構成が多い。

近年は、軌道上実証へと進んでいる。本年度（2026 年度）には、SSPS 実証衛星「OHISAMA」が国内民間ロケット「カイロス」により打ち上げられる予定である。太陽電池と送電アンテナを一体化した発送電モジュールの実証、長距離ビーム制御、宇宙機間無線送電など、SSPS 研究における重要な一歩と期待されている。

**【海外の SSPS】** 海外でも SSPS 研究は活発に行われてきた。近年の例を紹介する。2023 年には、カリフォルニア工科大学（Caltech）がマイクロ波送電モジュールを人工衛星に搭載し、約 30 cm の距離ではあるものの、宇宙空間でのマイクロ波送電と直流への変換を実証した。NASA の技術政策戦略室（Office of Technology, Policy and Strategy: OTPS）は、2024 年に Space-Based Solar Power に関する報告書を公表した。SBSP は高価であるなどと評価したが、推進派からは将来の輸送コスト低減を考慮すべきなどの批判も出ている。

欧州宇宙機関（ESA）は、2022 年から SOLARIS プロジェクトを開始し、SSPS の実現可能性について検討を進めている。中国でも、マルチロータリージョイント SPS や SSPS-OMEGA などのシステムが提案され、2022 年には高さ 75 m の塔で、太陽電池を電源に 5.8 GHz、2 kW 級のマイクロ波送電実験に成功している。

さらに最近では、大規模データセンターの電力需要の急増を背景として、宇宙空間にデータセンターを配置し、必要な電力も宇宙で賄う構想が検討されている。構想規模は 1 GW 級にも及び、SSPS に必要な発電技術の発展を促すとともに、多数の衛星打ち上げによる輸送コスト低減も期待される。

**【国際標準化活動】** SSPS を実用化するためには、マイクロ波送電に必要な周波数利用の国際的な枠組みを整備することが不可欠である。このため、筆者らは NASDA（後に JAXA）の宇宙太陽発電システム検討委員会に参加するとともに、国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）における無線電力伝送 WPT の検討にも携わってきた。ITU-R では、WPT は想定されてなく、1997 年に研究課題 Question ITU-R 210/1 として検討が開始された。2000 年頃までは NASA が主に活動していたが、寄与文書が提出されない状態が続けば Question が廃止される可能性があった。2003 年、筆者らは ITU-R への参加を希望したが、SSPS は周波数共用などの課題を抱えていたことから、日本代表としてではなく、Sector Member となった JAXA として活動することが提案された。そこで 2004 年、JAXA として初めて寄与文書を提出し、ジュネーブで開催された会合に参加して Question の継続を要請した。その後も継続的に寄与を重ねたものの、SSPS 単独では報告（Report）の作成も容易ではなかった。

一方、WPT は急速に応用分野を広げ、2012 年には Question の対象がマイクロ波空間伝送だけでなく、電磁誘導や磁界共鳴方式を含む内容へ改められた。さらに 2013 年には、日本からの提案により、WPT を地上応用と SSPS に分けて検討する方向が示され、寄与文書も JAXA 単独ではなく日本から提出されることとなった。その結果、2014 年には WPT に関する最初の報告、Report ITU-R SM.2303 が出版された。筆者は 2015 年まで ITU-R 活動に参加したが、同時に参加した生存圏研究所篠原真毅教授が継続している。現在、3 つの勧告（Recommendation）と 5 つの報告が出版され、しばしば改訂されている。

**【むすび】** 無線電力伝送は、SSPS をはじめとするマイクロ波エネルギー伝送として研究が始まり、その後、RFID、ワイヤレス充電、センサネットワークなど幅広い分野へ応用が広がった。2007 年の MIT による磁界共鳴方式の実証を契機として、近距離 WPT は急速に発展し、今日では私たちの日常生活を支える技術の一つとなっている。一方、SSPS についても、研究開発が国内外で着実に進められている。また、宇宙データセンターの構想も現実味を帯びつつあり、SSPS に必要な発電技術の発展を後押しする可能性がある。技術が社会で広く利用されるためには、周波数利用や国際標準化などの制度整備も欠かせない。筆者が長年携わってきた ITU-R における WPT の検討も、その一端を担うものであった。WPT や SSPS の研究が今後さらに発展することを期待したい。

## 大学の研究・動向

# ナノプロセス技術を駆使した革新的光デバイスの創成と 応用展開

光・電子理工学教育研究センター 高機能工学講座 ナノプロセス工学分野  
教授 デ ゾイサ メーナカ  
准教授 井 上 卓 也

## 1. はじめに

物質の構造をナノメートル精度で制御する技術（ナノプロセス技術）は、現代社会において、ものづくり、医療、エネルギー等、あらゆる産業の基盤となる技術です。例えば、半導体の製造現場においては、近年の生成 AI 需要の急速な拡大に対応するべく、2 ナノメートル（2nm）プロセスを採用した最先端半導体の量産が開始されています。また、生成 AI の爆発的普及に伴い、データセンターの電力消費量が急増していることが課題となっていますが、その課題を解決するナノプロセス技術として、光回路と電子回路を高度に融合した光電融合技術が注目を集めています。このように、ナノプロセス技術は、現代社会に必要不可欠な技術であり、今後も、その重要性はさらに高まると考えられます。

これらの背景を受け、本研究室では、半導体や金属材料のナノプロセス技術を駆使することにより、従来は実現不可能であった革新的な光機能を実現する新たな光デバイスの開発を行うことを目指しています。例えば、周期的なナノ構造からなるフォトリソグラフィ結晶を活用した高性能・高機能レーザー（フォトリソグラフィ結晶レーザー）の開発や、フォトリソグラフィナノ構造の非エルミート性を活用した新たな光機能の創出等が挙げられます。また、多くの民間企業との共同研究を通して、開発した光デバイスを、自動運転・レーザー加工・光通信等の様々な応用分野に展開することを目指しています。

本稿においては、本研究室の最新の研究成果のうち、フォトリソグラフィ結晶レーザーを用いた新たな「オールチップ LiDAR の開発」および「宇宙光通信応用に向けた高出力・周波数変調型フォトリソグラフィ結晶レーザーの開発」の2つを取り上げ、その内容を解説いたします。

## 2. オールチップ LiDAR の開発

スマートモビリティ社会を支える車の自動運転、人流等のインフラモニタリング、ロボットやドローンの自動走行、農業機械の自動走行、水中での計測、さらには衛星から地表面の測距計測等、様々な分野において、Light Detection and Ranging (LiDAR) 技術が幅広く注目されています。このような LiDAR において、ナノ秒幅のレーザーパルスを出射し、対象物からの反射光を検出して、レーザーパルスの飛行時間を計測することにより測距を行う Time-of-Flight (ToF) 方式は、構造が比較的簡単であるため、多くのシステムで採用されています。さらに、レーザー光を1次元・2次元的に走査しながら計測を行うことで、2次元・3次元の測距が可能となります。現在、このような ToF-LiDAR 光源としては、端面射出型レーザーや垂直共振器面発光レーザー (VCSEL) 等の従来型半導体レーザーが用いられています。しかし、これらのレーザーは、ビーム品質が著しく悪いため、図1(a)に示すように、レーザービームを成形（コリメート）するために複雑なレンズ系が必要となります。また、レーザー光を走査するためには、回転ミラー等の機械式部分が必要となります。その結果、現状の LiDAR はシステムが大掛かりとなり、高コストであるという課題を有しています。

上記のような背景のもと、本研究室では、フォトニック結晶レーザー（PCSEL）[1,2]光源を用いた LiDAR システムの開発に取り組んでいます[3,4]。PCSEL は、フォトニック結晶のバンド端における 2 次元的な定在波共振状態をレーザー発振に利用することにより、大面積でのコヒーレント（単一モード）発振を可能とするために、レンズ等を用いることなく、レーザーチップからコリメートされたビームを直接出射することができます。さらに、PCSEL を形成するフォトニックナノ構造を工夫することによって、狙った方向へ多点ビームを出射することができ、それらを電子的にスイッチングすることで電子スキャンを実現できます[5,6]。これにより、LiDAR システムにおいてレーザービーム成形用のレンズやビーム走査用の回転機構が不要となり、図 1(b)に示すようなオールチップ構成の LiDAR を実現できるため、システムの簡略化・小型化・低コスト化が可能となります。以下では、このようなオールチップ LiDAR の開発についての最近の成果を紹介します。

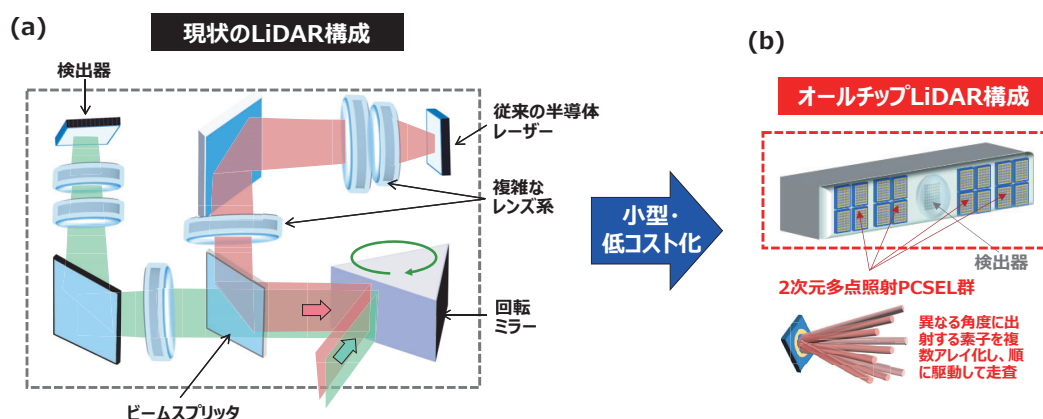


図 1. (a) 現状の LiDAR 構成 (例) の模式図。 (b) 狙った方向に多点ビーム出射可能な PCSEL を用いたオールチップ LiDAR 構成の模式図。

まず、オールチップ LiDAR 実現の鍵となる、多点ビーム出射が可能な PCSEL 光源について説明します。本研究では、フォトニック結晶の格子点構造に変調を加えることにより、狙った方向へ多点ビームを出射可能とした変調 PCSEL を用いました[5,6]。実際に作製した 1 つの PCSEL チップの外観写真と、内蔵した変調フォトニック結晶の電子顕微鏡写真を図 2(a) に示します。

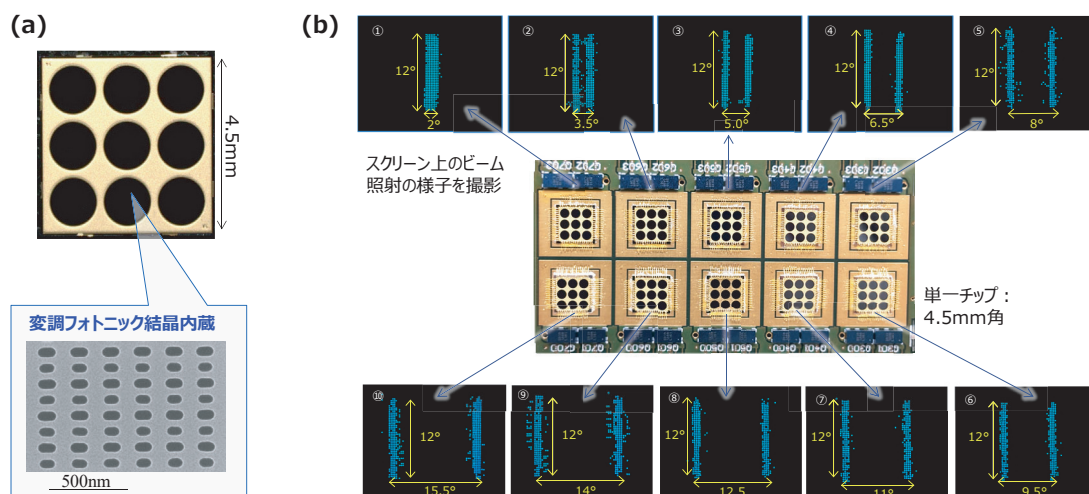


図 2. (a) 1 つの PCSEL チップの外観写真と、内蔵した変調フォトニック結晶の電子顕微鏡写真。 (b) 10 個の PCSEL アレイをパルス駆動回路に実装した後の写真およびそれぞれを駆動した時のビーム形状。

作製した PCSEL チップは、図 2(a)に示すように、1mm $\Phi$ 程度の発光領域を 3 $\times$ 3 に配置したアレイ構造となっており、単一チップから左右方向へ 2 本の帯状多点ビーム（合計 432 点）が出射されるように設計・作製しております。さらに、異なる方向へ帯状ビームを出射する複数のアレイ素子を、パルス駆動回路によってナノ秒の短パルス電流で駆動しながら電子的にスイッチングすることで、ビーム走査を実現します。なお、ここでは、3 $\times$ 3 アレイ素子全体に合計 100 A 以上の電流を注入できるよう、GaN-FET を用いたパルス駆動回路を採用しています。今回は、オールチップ LiDAR の原理実証を目的として、上記の 3 $\times$ 3 アレイチップを 10 個作製し、それらを駆動回路へ実装して電子的にスイッチングすることで、16 $^{\circ}$  $\times$ 12 $^{\circ}$ の視野角における電子ビーム走査を試みました。実装後の外観写真を図 2(b)の中央に示します。また、各 PCSEL アレイから出射された照射パターンを図 2(b)の上下に示しており、10 チップ全体で 16 $^{\circ}$  $\times$ 12 $^{\circ}$ の範囲にわたり、帯状ビームが得られていることが確認できます。ここで、単一アレイからは 70 W 程度のピーク出力が得られ、1 点当たり 0.15 W 程度のピーク出力が得られていると見積もられます。

次に、LiDAR の受光部について説明します。受光部には、高感度かつ高速応答が可能な単一光子アバランシェフォトダイオード（SPAD）の 2 次元検出器アレイを用い、対象物までの距離を計測するとともに、2 次元の受光情報から距離情報を含む 3 次元計測を一括して行います。2 次元 SPAD アレイデバイスとしては、今回は 64 $\times$ 48（3072）画素（1 画素は 4 つの SPAD で構成）を有する初期性能のデバイスを採用しました。本デバイスの検出効率率は 1% 程度ですが、今後さらなる検出効率の向上が可能です。また、各 SPAD で検出された光子の到達時間をデジタル信号へ変換する回路等は、SPAD 受光層の裏面に形成した LSI 層に実装されており、光子の到達時間等の情報は FPGA（field-programmable gate array）を介してパソコンへ転送されます。パソコンでは、各画素の各時刻における測距信号を蓄積・処理してヒストグラムを形成し、対象物からの反射信号を抽出することで、リアルタイムに測距画像を生成します。

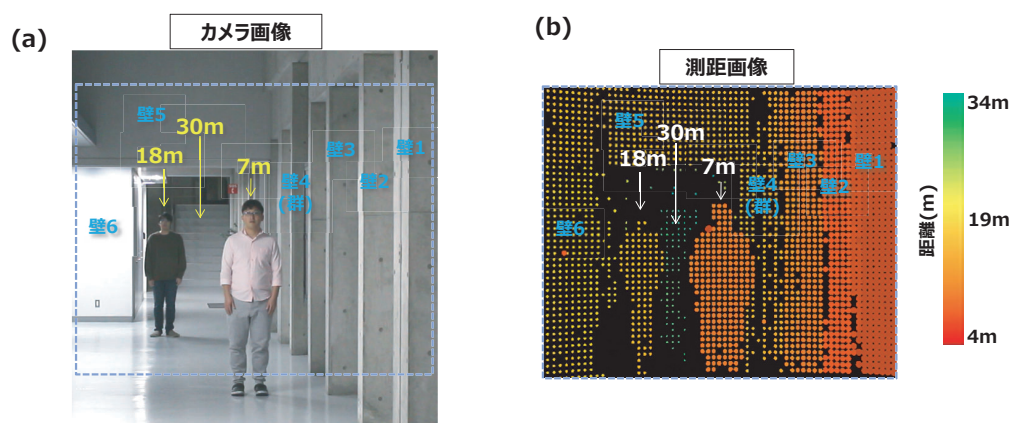


図 3. (a) オールチップ LiDAR 計測の対象物。(b) 実際に計測した測距動画から抜粋した距離画像。

上述したレーザー光源と受光部からなるオールチップ LiDAR を用いて、図 3(a)に示す対象物に対して、測距計測を行いました。同図の中央には、LiDAR から約 30m 先に位置する階段が観測されています。また、右側および左側には、それぞれ約 7m および約 18m 付近に人物が配置されています。さらに、周囲の異なる距離には壁も観測されていることが分かります。図 3(b)には、リアルタイム測距動画から抜粋した距離画像を示します。同図より、周囲の壁や二人の人物に加え、約 30m 先の階段まで測距できていることが確認できます。以上の結果は、PCSEL アレイチップと 2 次元 SPAD アレイを用いたオールチップ LiDAR の原理実証に世界で初めて成功したものであると言えます。今後は、PCSEL の高注入

駆動による投光パワーの向上や SPAD の高感度化により、視野の拡大や長距離化を目指すとともに、システムの小型化についても検討を進める予定です。

### 3. 宇宙光通信応用に向けた高出力・周波数変調型フォトニック結晶レーザーの開発

近年、宇宙空間でレーザー光を用いて通信を行う宇宙光通信が注目を集めています。例えば、地上の通信インフラが不十分な地域や災害地域であっても、宇宙空間の衛星を介して通信を行うことで、高速通信を実現することができます。また、近年、人類が将来的に月に移住する計画が本格的に議論されるようになってきており、そのための月面探査活動の一環として、月と地球の間の大容量通信の実現が期待されています。これらの宇宙光通信においては、数千 km ～数十万 km といった超長距離の光信号伝送を実現するために、高出力（1 W ～ 10 W）かつ高速（1 ～ 100 GHz）な光送信機の開発が必要となります。しかしながら、現状の宇宙用光送信機においては、上記の要求を満たすためには、図 4(a)に模式図を示すように、レーザー光源の出射光を増幅するためのファイバー増幅器や、ビームをコリメートして遠方まで伝搬させるための大口径レンズ等が必要となるため、光送信機が大型・複雑・低効率であることが大きな課題となっています。

これらの課題を解決しうる新たなレーザー光源として、PCSEL が期待されています。前節でも述べた通り、PCSEL は、大面積での単一モード発振が実現可能という特長を有しており、最近の研究の進展により、直径 1 ～ 3 mm の PCSEL において、出力 10 W ～ 50 W の単一モード連続動作が実現しています[7,8]。さらに、PCSEL は、従来の半導体レーザーよりも発振に寄与する光子数が多いことに起因して、スペクトル線幅が極めて狭く（～ kHz）[9,10]、長距離伝搬後の微弱な信号光に対しても、コヒーレント検波による高感度な信号検出の実現が期待できます。これらの特性を考慮すると、PCSEL は、図 4(b)に示すように、宇宙光通信用の小型で高効率な光送信機への適用が期待されます。

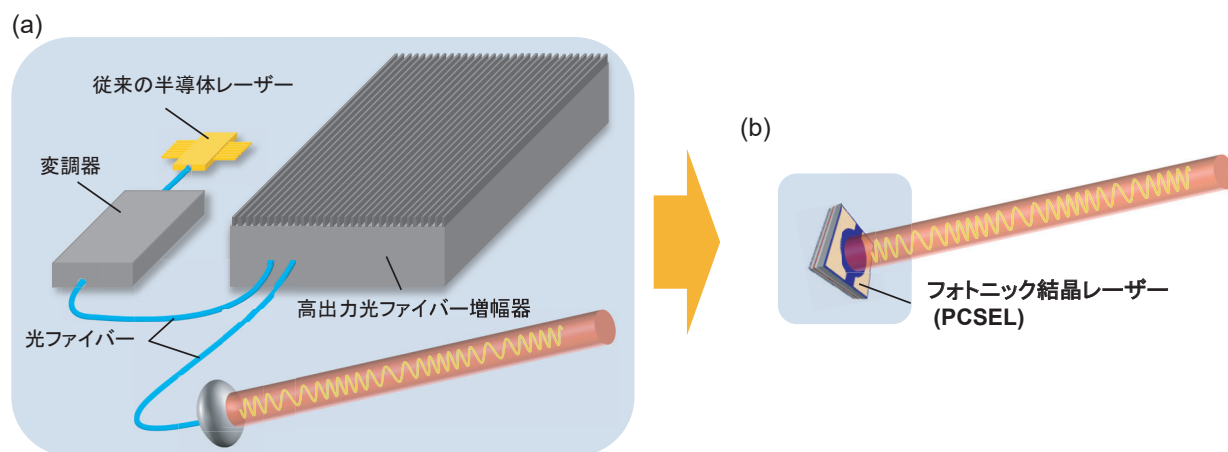


図 4. (a) 従来の宇宙用光送信機の模式図。(b) フォトニック結晶レーザーを用いた超小型宇宙用光送信機の模式図。

上記の背景のもと、これまで本研究室では、PCSEL の高出力・高ビーム品質という特長を維持しながら、高速変調動作も両立可能な PCSEL の研究開発を行うとともに、開発したデバイスを用いた自由空間光通信の実証実験を行ってきました[11-13]。具体的には、高出力連続動作と高速変調動作の両立が可能なデバイス構造の開発を進め、2024 年には、送信レンズや増幅器を用いない構成で、10 Gbps を超える振幅変調方式の自由空間光通信の実証に成功しました[12]。また、最近では、静止軌道衛星 - 低軌道衛星間光通信（距離 36,000 km）や月 - 地球間光通信（距離 38 万 km）等の超長距離宇宙光通信へ

の適用を見据えた、周波数変調型 PCSEL の開発に成功しました[13]。以下では、後者の周波数変調型 PCSEL について、そのデバイス構造の概要と実験結果を紹介します。

図 5(a) に周波数変調型 PCSEL の模式図を示します。本構造は、レーザーの内部に、共振周波数が僅かに異なる 2 つのフォトニック結晶 (PC1, PC2) を導入しています。本構造において、周波数が変調された光信号を生成する手法を図 5(b) および (c) に示します。図 5(b) において、2 つフォトニック結晶の共振周波数差  $\Delta f_{12}$  の大きさを適切に設計することで、フォトニック結晶全体に広がる単一の発振モードを得ることが出来ます。このとき、高周波数側のフォトニック結晶 (PC1) の注入電流を相対的に増加させると、デバイス内部の光は高周波数領域側に多く分布するようになり、結果として、レーザーの発振周波数も増加します。逆に、低周波数側のフォトニック結晶 (PC2) の注入電流を相対的に増加させた場合には、デバイス内部の光は低周波数領域側に多く分布するようになり、レーザーの発振周波数も低下します。従って、図 5(c) に示すように、2 つのフォトニック結晶領域の注入電流を、高速に増減することにより、レーザーの発振周波数を高速に変調することが可能となります。さらに、このとき、2 つの領域に注入する電流の合計値を一定に保つことで、周波数変調方式の通信において雑音の要因となる、光の強度変化を抑制することも可能となります。

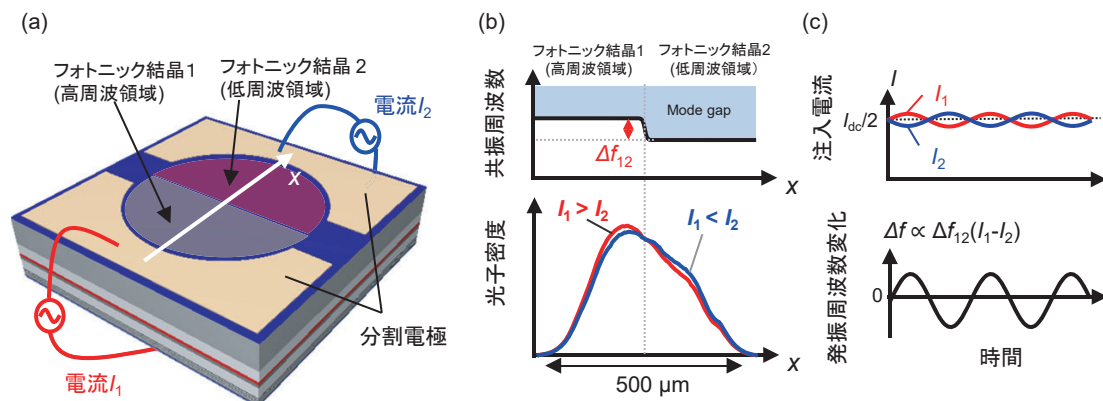


図 5. (a) 提案する周波数変調型フォトニック結晶レーザーの模式図。(b) (c) 同デバイスにおいて、発振周波数の高速変調動作を実現する原理図。

続いて、上記のデバイスの作製と評価を行いました。図 6(a) に、作製した PCSEL の写真を示します。PCSEL の出射側の分割電極が、2 本の信号線 (Signal 1, 2) を有する給電基板に電気的に接続されていることがわかり、2 つの分割領域に独立した電流注入が行える構造となっています。本光源を 20℃ において連続駆動した際に得られた電流 - 光出力特性とビーム形状を図 6(b) に示します。3 A の電流注入で、1 W 以上の高い出力が得られており、拡がり角 0.2° 程度の極めて狭い単峰状のビームが得られました。さらに、本光源について、合計 3 A の電流を注入しつつ、2 つの分割電極に、互いに逆向きの交流電流 (振幅 0.22 App、周波数 1 GHz) を重畳したときに得られた、発振周波数の時間変化および光強度の時間変化の測定結果を図 6(c) に示します。今回作製した周波数変調型 PCSEL においては、従来の PCSEL の結果と場合と比較して、発振周波数変化が約 2 倍に増大されているのに加え、強度変化量が 1/4 以下に抑制されており、狙い通り、レーザーの発振周波数のみを効率よく変調できていることが確かめられました。

最後に、開発した周波数変調型フォトニック結晶レーザーを用いて、宇宙光通信を模擬する通信実験を行いました。実験においては、光出力 1 W の周波数変調型フォトニック結晶レーザーで生成された周波数変調信号を、光ファイバー増幅器やレンズ等を用いずに自由空間を伝搬させたのち、宇宙光通信

時の伝搬損失を模擬するための光学系を通過させることで、微弱な変調信号を生成しました。その後、近い発振周波数をもつ別の参照用フォトニック結晶レーザーの光と干渉させて、バランスドフォトディテクタで受光し、その干渉信号に現れるビート周波数の時間変化を、デジタル信号処理により復元しました。上記の実験系において、受光パワーを変化させた際の、通信の正確性を表す指標（ビットエラーレート）を測定した結果を図 6(d) に示します。信号の伝送速度が 0.5 Gbps の場合には、出射光強度を 88 dB（＝約 6.3 億分の 1）減衰させたとしても通信が成立し、伝送速度を 1 Gbps まで増加させた場合にも、出射光強度を 81 dB（＝約 1.3 億分の 1）減衰させても通信が成立しました。上記の信号減衰量は、静止軌道衛星 - 低軌道衛星間光通信（距離 36,000 km）における信号減衰量と同等かそれ以上であるため、本実験結果は、周波数変調型 PCSEL が、将来的に、超小型・軽量・低消費電力な衛星搭載型光送信機に应用可能となることを示唆する結果であると言えます。

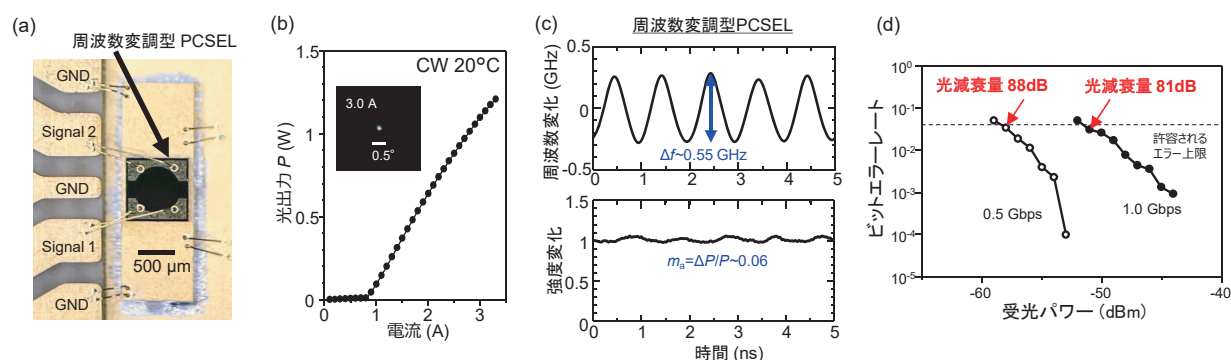


図 6. (a) 作製した周波数変調型フォトニック結晶レーザーの写真。(b) 作製デバイスの電流 - 光出力特性および遠視野像の測定結果。(c) 作製デバイスの発振周波数変化および強度変化の測定結果。(d) 周波数変調型フォトニック結晶レーザーを用いた自由空間光通信の実験結果。

#### 4. おわりに

本稿では、本研究室で行っている最新の研究のうち、「オールチップ LiDAR の開発」および「宇宙光通信应用に向けた高出力・周波数変調型フォトニック結晶レーザーの開発」の 2 つを取り上げ、その内容を解説しました。前者では、PCSEL を用いることにより、狙った方向への多点ビーム出射を可能にするとともに、複数の PCSEL を駆動回路によって電子的にスイッチングすることでビーム走査を実現し、さらに 2 次元 SPAD アレイを用いた受光系と組み合わせることにより、オールチップ LiDAR の原理実証に成功しました。この成果は、LiDAR システムの簡略化・小型化・低コスト化につながるものであり、将来的には、自動運転、インフラモニタリング、ロボットやドローンの自動走行、農業機械の自動走行等、LiDAR を必要とする幅広い分野への応用が期待されます。また、後者では、PCSEL の高出力・高ビーム品質という特長を維持しながら、高速変調動作との両立を可能とする周波数変調型 PCSEL の研究開発を行いました。さらに、開発したデバイスを用いた自由空間光通信の実証実験を実施し、静止軌道衛星 - 低軌道衛星間光通信（約 36,000 km）の信号減衰量と同等以上の条件で通信可能であることを示しました。この結果は、周波数変調型 PCSEL が、将来的に超小型・軽量・低消費電力な衛星搭載型光送信機として応用されることを期待させる成果です。

本稿で取り上げた 2 つの研究の他にも、本研究室では、フォトニックナノ構造による光の制御を駆使した様々な革新的光デバイスの開発に取り組んでいます。もし、本研究室の研究活動にご興味をお持ちいただき、研究室の見学等をご希望でしたら、staff(at) nano.kuee.kyoto-u.ac.jp までお気軽にご連絡ください。

## 5. 参考文献

- [1] M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata, and G. Sakai, "Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure," *Appl. Phys. Lett.* **75**, 316–318 (1999).
- [2] S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki, "Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design," *Science* **293**, 1123–1125 (2001).
- [3] M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, W. Kunishi, T. Inoue, K. Izumi, R. Hatsuda, and S. Noda, "Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR," *Journal of Physics: Photonics* **3**, 022006 (2021).
- [4] M. De Zoysa, R. Sakata, K. Ishizaki, T. Inoue, M. Yoshida, J. Gelleta, Y. Mineyama, T. Akahori, S. Aoyama, and S. Noda, "Non-mechanical three-dimensional LiDAR system based on flash and beam-scanning dually modulated photonic crystal lasers," *Optica* **10**, 264–268 (2023).
- [5] R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, S. Fukuhara, T. Inoue, Y. Tanaka, K. Iwata, R. Hatsuda, M. Yoshida, J. Gelleta, and S. Noda, "Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality two-dimensional beam scanning lasers," *Nature Communications* **11**, 3487 (2020).
- [6] R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, K. Kitamura, T. Inoue, J. Gelleta, and S. Noda, "Photonic-crystal surface-emitting lasers with modulated photonic crystals enabling 2D beam scanning and various beam pattern emission," *Applied Physics Letters -Perspective-* **122**, 130503 (2023).
- [7] S. Noda, T. Inoue, M. Yoshida, J. Gelleta, M. De Zoysa, and K. Ishizaki, "High-power and high-beam-quality photonic-crystal surface-emitting lasers: a tutorial," *Adv. Opt. Photon.* **15**, 977–1032 (2023),
- [8] M. Yoshida, S. Katsuno, T. Inoue, J. Gelleta, K. Izumi, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, "High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser" *Nature* **618**, 727–732 (2023).
- [9] T. Inoue, T. Kim, S. Katsuno, R. Morita, M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, "Measurement and numerical analysis of intrinsic spectral linewidths of photonic-crystal surface-emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.* **122**, 051101 (2023).
- [10] R. Morita, T. Inoue, M. Yoshida, K. Enoki, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, "Demonstration of high-power photonic-crystal surface-emitting lasers with 1-kHz-class intrinsic linewidths," *Optica* **11**, 333–339 (2024).
- [11] S. Ishimura, R. Morita, T. Inoue, K. Nishimura, H. Takahashi, T. Tsuritani, M. De Zoysa, K. Ishizaki, M. Suzuki, and S. Noda, "Proposal and demonstration of free-space optical communication using photonic crystal surface-emitting lasers," *J. Lightw. Technol.* **41**, 3688–3694 (2023).
- [12] R. Morita, S. Ishimura, T. Inoue, K. Nishimura, H. Takahashi, T. Tsuritani, M. De Zoysa, K. Ishizaki, M. Suzuki, and S. Noda, "High-speed high-power free-space optical communication via directly modulated watt-class photonic-crystal surface-emitting lasers," *Optica* **11**, 971–979 (2024),
- [13] T. Inoue, R. Morita, S. Ishimura, S. Nakano, H. Takahashi, T. Tsuritani, M. De Zoysa, K. Ishizaki, M. Suzuki, and S. Noda, "Frequency-modulated high-power photonic-crystal surface-emitting lasers for long-distance coherent free-space optical communications," *Nat. Photon.* **19**, 1330–1335 (2025).

**産業界の技術動向**

## 産業界のテラヘルツ波センシング技術動向 分光・イメージングを中心に

有限会社スペクトルデザイン  
深澤 亮一

### 1. はじめに

テラヘルツ周波数帯は、従来の遠赤外からミリ波の電磁波帯域と重なり厳密な定義はないが、およそ 0.1 ~ 10THz (1THz=10<sup>12</sup>Hz) の周波数を呼ぶことが多い。波長にして 30 マイクロメートル (μm) から 3 ミリメートル (mm) の領域になる。このテラヘルツ帯の電磁波の研究開発は、近年まで立ち遅れており未開拓の電磁波と呼ばれてきた。簡便に使える発生源、検出器、計測システムの開発が困難であったことから応用も限られていた。1990 年代から、この帯域の電磁波の発生・検出技術の研究開発が国内外で急速に進展してきている[1,2]。また応用研究も盛んになって、テラヘルツ波の持つ透過性と物質固有のスペクトルが得られるという特長を生かして分析や非破壊検査に応用されつつある[3]。テラヘルツ波を用いた産業応用で最も期待されているのが工業製品の外から見えない異常（傷、欠陥、不良）などを見つける非破壊検査である。テラヘルツ波分光やイメージングなどのセンシングを応用できる分野は極めて広範囲にわたっている[4]。その応用の広がりには、半導体、プラスチック、セラミックスなどの工業材料の評価、医薬品の評価、美術品・文化財の調査、製造ラインにおける品質管理、建築物の診断、危険物の検知、生体分子分光、バイオセンシング、社会インフラの非破壊検査など多岐の分野にわたると考えられ今後の発展が期待されている。

テラヘルツ波を用いた分光やイメージングなどの計測システム、それを構成するコンポーネントは最近までの 30 年で急速に発展を遂げ、基礎科学や産業分野において社会実装されている。本稿の前半では、著者らが取り組んできたテラヘルツ波計測システム開発の例を紹介する[5,6]。特にテラヘルツ波によるイメージングはエックス線や超音波によるイメージングとは原理的に異なるものを見ることが出来る点において有用なツールとなる。見えないものを見る有用な技術である反面、社会実装するためにはシステム技術として乗り越えなければならない計測速度、コスト、システムサイズ、ロバストネスなどの技術課題がある。これらの技術課題を打破するためには半導体などの固体デバイスをベースとしたテラヘルツ技術の発展が必要となってくる。本稿の後半では、テラヘルツ技術を社会実装するうえで抱えていた技術課題を解決するために 2017 年度～ 2021 年度まで実施された（国研）科学技術振興機構（JST）の ACCEL プログラム「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」<sup>注1)</sup>の研究開発の取り組みについて紹介する。ACCEL プログラムでは、テラヘルツ光源（発生源）、検出器、高速イメージング、テラヘルツレーダーなどの研究開発がなされ、ボディスキャナーや非破壊検査のプロトタイプが開発された。このようにさまざまなテラヘルツ波発生源、検出器が開発されて将来的に市場に出回ることによってユーザーの目的に合ったテラヘルツ計測システムが構成できるようになる。最近市場に出てきた高出力小型テラヘルツ光源、室温動作検出器や半導体デバイス光源・検出器を用いた計測システム開発における弊社の取り組みについても紹介したい。テラヘルツ関連のさまざまなコンポーネントの出現により実際にユーザーが求めるシステム仕様とコストを満たすことができれば、さらに社会に広がっていくと考えられる。

## 2. 商用テラヘルツ波計測システムの開発

最も一般的な商用向けに開発されたテラヘルツ波分光・イメージングシステムは、テラヘルツ時間領域分光 (Terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) の原理を応用している。THz-TDS はパルス状のテラヘルツ波を用いて分光やイメージングを行う画期的な方法である。我が国では 1990 年代はじめに郵政省通信総合研究所関西先端研究センターの阪井、谷グループで研究がスタートして大学、研究機関、企業などに広がった経緯がある[1]。その時期に著者も同グループに所属しており THz-TDS の研究に触れることができた。THz-TDS のイメージングへの応用は 1995 年米国のベル研究所の Hu と Nuss によって初めてなされた[7]。初期のテラヘルツ波イメージングシステムは研究用途が主で光学定盤上に構築されていたがシステム技術が進歩し、最近では産業用途に展開できるような可搬型のシステムが市販されている[8,9]。著者は 2000 年頃から企業において商用向けテラヘルツ波イメージングシステムの開発を行ってきており、2004 年に研究開発型ベンチャーとしてスペクトルデザインを設立した。専門スタッフによる分光やイメージングシステムのインテグレーション、カスタマイズ、コンサルティングを事業としている。海外のテラヘルツ関連メーカーとの連携も多い。2010 年頃からは研究用と産業用検査システムの開発を手掛けている。基礎研究から産業の用途に合わせ、多様なシステムを提供しているが、それらの最も基本となるシステムを図 1 に示す。このシステムはテラヘルツパルス波発生素子 (Tx)、テラヘルツパルス波検出素子 (Rx)、主制御ユニット、パーソナルコンピュータ (PC) から構成される。テラヘルツパルス波発生・検出素子と主制御ユニットは光ファイバを用いて結合されているので、用途に合わせて簡便に取り回すことができる。主制御ユニットは、テラヘルツパルス波を発生させるためのフェムト秒レーザー、時間遅延機構、光学系、電気系から構成される。フェムト秒レーザーから放射された光パルスをビームスプリッタなどの光学系により分割し、光ファイバを通して Tx 及び Rx へ伝送する。Rx からの出力信号は、接続された電気ケーブルを経て主制御ユニット内にある A/D コンバータによってデジタルデータに変換され、時間波形として PC に取り込まれる。得られた時間波形をフーリエ変換すると分光スペクトルを得ることができる。

以上のような基本システムを用いてイメージングを行う場合には、図 2 に示したようにテラヘルツパルス波発生・検出素子を X-Y 駆動ステージに搭載し、それを移動させながら計測を行う。その際の計測データは図 3 に示すようなデータキューブとなり 1 つの画素は 1 つの時間波形から構成される。現在市販されている世界最速クラスのシステムにおける時間波形の取得時間は 1 ミリ秒である。このシステムで測定条件を整えると、テラヘルツパルス波の信号と雑音のダイナミックレンジが 1 秒積算で 80dB にも達す

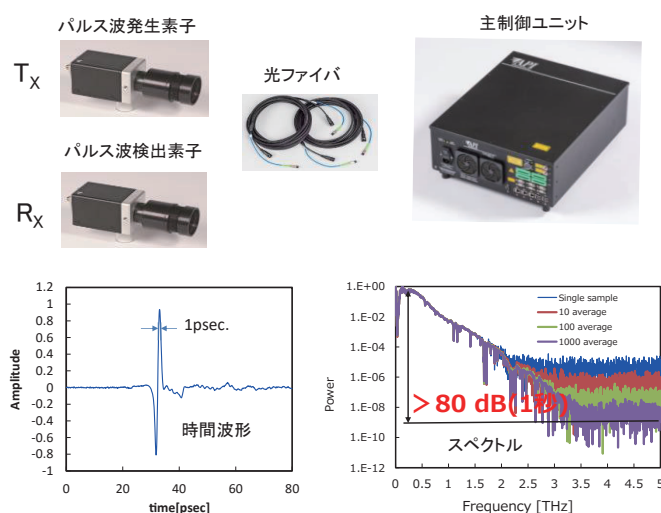


図 1 テラヘルツ計測基本システム

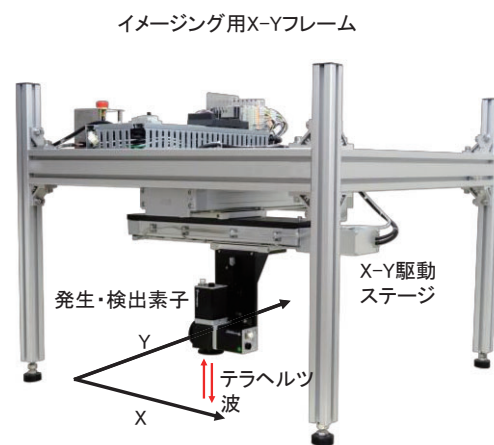


図 2 反射型イメージングシステム

る。またテラヘルツ波に対する測定物の透過性によって透過配置や同軸光学系を用いた正反射配置を選択することができる。テラヘルツパルス波を使ったイメージングはカメラで撮像した画像と異なり、その特殊性を利用して産業に展開されている。

### 3. テラヘルツ技術普及の課題と解決に向けた研究開発

THz-TDS の原理を使ったイメージングシステムは高価であり、コストを下げるには限界がある。これまでさまざまな産業分野に展開を試みてきた

が高価なシステムを導入できる分野は限られている。テラヘルツ技術を幅広く社会実装するためには、高価なレーザーをベースとしたテラヘルツ技術のみでは限界がある。また、テラヘルツ波分光やイメージングを社会実装するためには、計測速度、コスト、システムサイズ、ロバストネスなどの技術課題がある。

これらの技術課題を打破するために実施された、(国研) 科学技術振興機構 (JST) の ACCEL プログラム「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(2017 年度～2021 年度) の取り組みについて、プログラスマネージャー (PM) の立場から紹介する。ACCEL ではテラヘルツ技術を社会実装し普及させるために必要な技術の研究開発を実施した。加えてベンチャーや企業などの産業界が実用化開発として継承できるような課題を厳選し、技術的成立性の証明・提示 (POC: Proof of Concept) を明確化して研究開発を進めた。ACCEL プログラムが実施されたことにより、テラヘルツ技術を社会実装するうえで抱えていた技術課題が解決され、産業のみならず幅広い分野への社会実装が期待できるようになった。

研究開発体制の構築はもとより、PM のマネジメントによって、半導体デバイスメーカー、システムメーカー、ユーザーなどを巻き込むことで ACCEL 成果を実用化開発に継承させる取り組みを実施した。当時の研究開発体制は、光源・検出デバイス技術を持つ東京工業大学 (浅田 G)、高感度検出デバイス技術を持つ北里大学 (伊藤 G)、小型モジュール技術を持つパイオニア(株)、産業システム実装技術を持つ(株)ニコンに対し、テラヘルツ半導体基幹技術を有する京都大学 (研究代表者: 田中 G)、(国研) 理化学研究所のテラヘルツ研究グループ (大谷 G, 南出 G) が包括的に参画した。ACCEL で研究開発されたテラヘルツ波の周波数は 300 GHz 付近の帯域である。この周波数帯は今後の技術開発の進展によって電波の使用目的や規格などが定まっていく予定である。このような技術の産業展開のためには国際規格化の流れを注意深く見守る必要がある。電波利用に関する調査や提案に関する活動も進めた[10]。

研究開発は計画に沿って順調に進展し、一部では期待以上の成果と世界に先駆けた成果が得られた。以下に概要と主な成果を述べる。POC1 ではテラヘルツ半導体光源の高度化を目指し、①共鳴トンネルダイオード (RTD) 光源の高出力化のための構造を考案、デバイス作製を行った。1 桁の出力向上 100  $\mu$ W を目指して研究開発を進めたが 89 素子大規模アレイ化によって目標値以上の高出力 730  $\mu$ W を達成した[11]。② RTD 光源の周波数制御技術に関しては目標を上回る周波数可変幅が実証できた[12]。さらなる構造の最適化や作製プロセスの簡略化を進めた[13]。③ RTD 光源の高機能化として RTD の直接変調によりコヒーレント・インコヒーレント制御が可能なことを実証した。その制御性にもとづいた低干渉イメージングに成功した。また、RTD 光源の過渡応答を実験・理論の両面から解明が進んだ[14]。POC2 では、テラヘルツ半導体検出器の高度化を目指したが、① RTD の検出器としての動作確

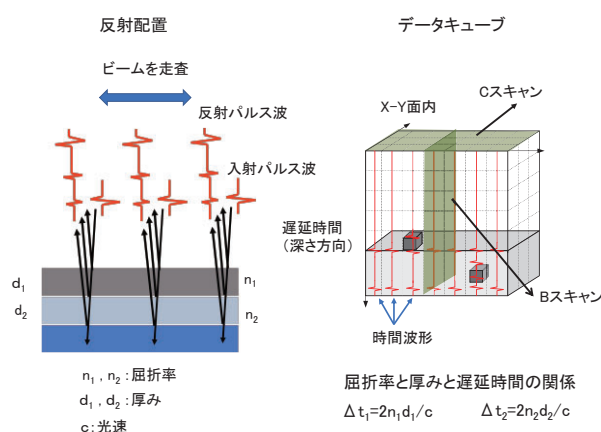


図3 パルス波を用いた計測原理とデータ構成

認を実証し感度や特性の評価を進めた[15]。②テラヘルツ半導体検出器の評価技術の確立、位相検出技術についても進展した。フェルミレベル制御バリアダイオード（FMB）のミキシング動作を確認するとともにモジュールを開発した[16]。③FMBの高感度化、アレイ化やモジュール化のための素子の試作を完了し評価を進めた。FMBの素子改良を進め目標値の数  $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  の超高感度化を達成した[16]。アレイ化、モジュール化については当初の想定を越えた多素子のアレイ化を達成し評価を進めた[17]。POC3では半導体テラヘルツレーダーに向けての基盤技術開発を目指した。基幹システムとしてのレーダー方式イメージング基本システムを構築するために逡倍方式で30mW級の高出力レーダー光源・検出器などの開発を行った。また、300GHz帯のレーダー方式イメージング基本システムを計画通り構築し対象物に対する測距機能を確認することで周波数変調連続波（FMCW）レーダー動作を実証した。さらに基本システムをボディスキナーへ応用することを想定して人体からの信号取得に成功した[18]。その後、歩行する人が隠し持った危険物を検知できる図4に示すようなウォークスルー型ボディスキナーのプロトタイプを世界に先駆けて開発した[19]。また、テラヘルツ半導体を用いた非破壊検査やボディスキナーへの技術展開を想定しRTDの振幅変調による新たなレーダー方式の開発も進めた[20]。また、RTDのサブキャリアFMCWレーダーの開発を進めた[21]。一方で産業向け非破壊検査システムへの応用を想定した高速イメージングシステムを開発した。本プロジェクトで研究開発したRTDを並列化した光源とFMBアレイ検出器によるラインセンサーを用いた図5に示すような反射型高速イメージングシステムを構築し評価を進めた[22]。コンベアで1m/秒を越えるような世界に類を見ない高速イメージングを達成した。この速度は産業用のリアルタイム検査で求められている速度を満たしている。

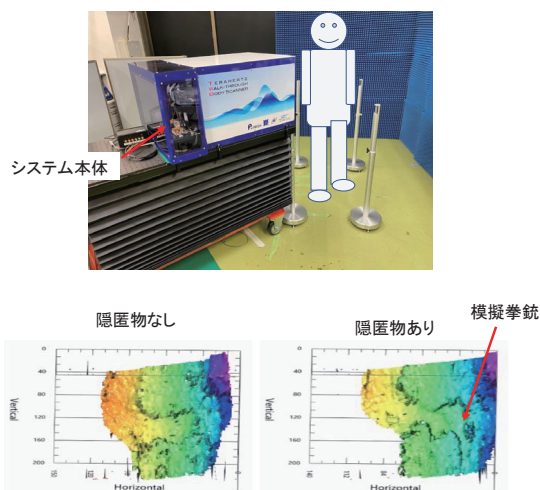


図4 レーダー方式ウォークスルーボディスキナー

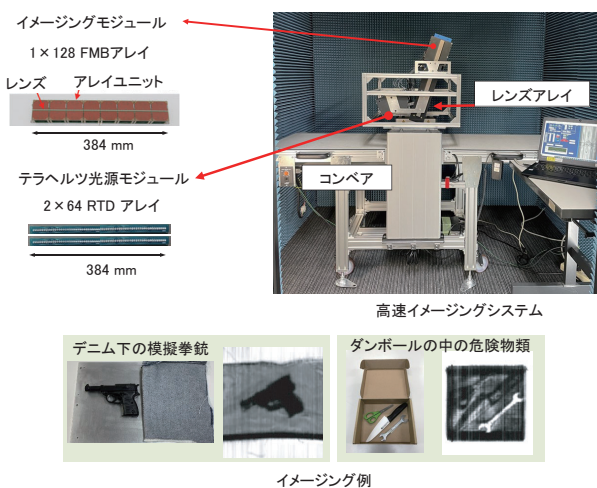


図5 高速イメージングシステム

#### 4. 近年の商用テラヘルツ技術の進展

次に近年商用化された最新のコンポーネントを使用したシステム開発について紹介したい。ここ数年のテラヘルツ技術の進歩によって計測速度、コスト、システムサイズ、ロバストネスなどの技術課題が解決されつつあり、分光やイメージングなどのセンシング技術を幅広く社会普及するための基盤が整ってきている。テラヘルツ技術は光源、検出器、光学コンポーネント、計測システムなどの技術によって支えられている。テラヘルツ周波数帯は電波と光の境界領域にあり、広い周波数帯域をカバーする光源、検出器、光学コンポーネントは少なく、使用目的に応じて最適な周波数の光源、検出器、光学コンポーネントを採用して計測システムを設計・製作する必要がある。技術の進展として特に注目すべきは、こ

こ 10 年程でシリコンや化合物の半導体技術をベースとしたテラヘルツ波光源や検出器の技術開発が急速に進んできていることである[23-25]。

最近市販されているユニークな光源・検出器として通倍方式による 10mW クラスの手のひらサイズの小型高出力光源、室温動作検出器などがある。弊社においても通倍方式による 300GHz 帯小型高出力テラヘルツ光源やショットキー検出器から構成された図 6 に示すようなイメージングシステムの開発を行ってきており、市販するに至っている[26]。このシステムは高出力光源を搭載しているので透過性に優れ、THz-TDS では透過しなかったような物のイメージングが可能となる。この小型高出力テラヘルツ光源は印加電圧を変えることで周波数を 275 ~ 295GHz の範囲で変えることができる。また、最新の動向としてローム（株）から RTD 光源と RTD 検出器のサンプル出荷が開始された。弊社では RTD 光源や RTD 検出器を組み込んだ図 7 のような小型かつ可搬型イメージングシステムの開発を行った[27]。このシステムはコスト、システムサイズ、ロバストネスなどの技術課題を解決する新たなシステムとして販売を開始している。国産の半導体デバイス光源・検出器を使用できるのでサプライチェーンの確保など、ビジネスとしてのメリットがある。また新たなトピックスとしてここ 10 年程でシリコン半導体技術をベースとしたテラヘルツ波光源や検出器の研究開発が急速に進んできており、最近になって海外製のテラヘルツ波光源・カメラが商用的に利用できるようになってきている。弊社はシリコン半導体技術をベースとした高出力テラヘルツ波光源やカメラから構成されるイメージングシステムの開発も進めており、特にリアルタイムイメージングが要望される産業分野に向けての展開が期待できる[28]。高出力光源やカメラを計測システムに搭載することでテラヘルツ技術の社会普及に向けての計測速度、コスト、システムサイズ、ロバストネスなどの課題解決が進むと考えられる。

## まとめ

テラヘルツ波による分光やイメージングなどのセンシングは、エックス線や赤外線によるセンシングとは原理的に異なるものを見ることが出来る点において有用なツールとなる。本稿では、最近のテラヘルツ波センシングの技術動向に関して商用的な観点から概観した。近年急速に発展し商用的に成功したパルス状のテラヘルツ波を用いた計測システム技術について紹介した。テラヘルツ技術を幅広く社会普及するためには計測速度、コスト、システムサイズ、ロバストネスなどの技術課題があることを述べた。技術課題を解決するために実施された JST-ACCEL プログラムの取り組みについて紹介した。また最近市場に登場したコンポーネントを用いた弊社の計測システム開発について紹介した。今後、Beyond 5G や 6G の技術開発により多種多様なテラヘルツ波光源、検出器が開発されて安価で市場に出回ることが予

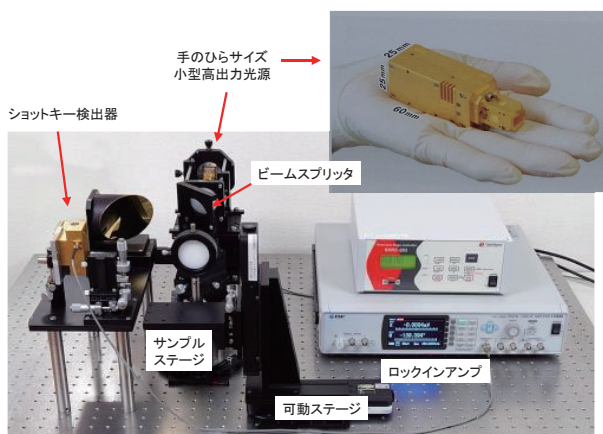


図 6 300GHz 帯小型イメージングシステム

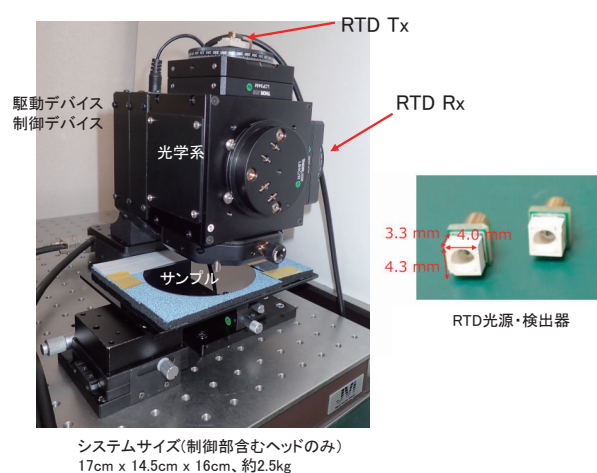


図 7 RTD を用いた小型イメージングヘッド

想される。それによりユーザーの目的に合った産業グレードの分光やイメージングシステムが構成できるようになるので、さらに社会実装が進むことが期待される。

注 1) 戦略的創造研究推進事業 (ACCEL) プログラム「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(Grant Number JP17942998) は (国研) 科学技術振興機構 (JST) 未来社会創造事業 (探索加速型) 本格研究 (ACCEL 型) として実施された。研究代表者は京都大学大学院の田中耕一郎、JST プログラムマネージャー (PM) は深澤亮一である (2017 年度～2021 年度実施)。

## 参考文献

- [1] 阪井清美・谷正彦：“テラヘルツ光エレクトロニクス” 応用物理、vol.70、no.2、pp.149-155 (2001)
- [2] 萩行正憲：“テラヘルツ波技術の歩みと展望” 応用物理、vol.81、no.4、pp.271-283 (2012)
- [3] 深澤亮一：“テラヘルツ波による材料分析” 応用物理、vol.79、no.4、pp.312-316 (2010)
- [4] 深澤亮一：分析・センシングのためのテラヘルツ波技術、日刊工業新聞社、東京 (2013)
- [5] R. Fukasawa: “Terahertz Imaging: Widespread Industrial Application in Non-destructive Inspection and Chemical Analysis”, IEEE Transactions on Terahertz science and Technology, vol.5, no.6, pp.1121-1127 (2015)
- [6] 深澤亮一・碓智文・高橋功将：“高速テラヘルツ波イメージングによる紛体中の異物検査” 検査技術、20 巻、9 号、pp.27-31 (2015)
- [7] B. B. Hu and M. C. Nuss: “Imaging with terahertz waves”, Opt. Lett., vol.20, no. 16, pp.1716-1718 (1995)
- [8] <https://www.menlosystems.com/>
- [9] N. Vieweg, A. Deninger, P. Leisching, “True OEM terahertz systems for industrial applications, ” Proc. SPIE 10925, Photonic Instrumentation Engineering VI, pp.109250U-1-109250-12, (4 March 2019)
- [10] APT REPORT ON WALK-THROUGH IMAGING SYSTEMS OPERATING IN THE FREQUENCY RANGE 275-1000 GHZ, No. APT/AWG/REP-119, Edition: March 2022, Adopted by 29th Meeting of APT Wireless Group, 21-29 March 2022, Virtual/Online Meeting, (Source: AWG-29/OUT-22)
- [11] K. Kasagi, S. Suzuki, and M. Asada: “ Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1 THz”, J. Appl. Phys., vol.125, pp.151601-1-151601-7 (2019)
- [12] S. Kitagawa, M. Mizuno, S. Saito, K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada: “Frequency-tunable resonant-tunneling-diode terahertz oscillators applied to absorbance measurement”, Jpn. J. Appl. Phys., vol.56, pp.058002-1-058002-3 (2017)
- [13] T. V. Mai, Y. Suzuki, X. Yu, S. Suzuki, and M. Asada: “Structure-Simplified Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Without Metal-Insulator-Metal Capacitors”, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 41, pp.1498-1507 (2020)
- [14] T. Hiraoka, T. Arikawa, H. Yasuda, Y. Inose, N. Sekine, I. Hosako, H. Ito, and K. Tanaka: “Injection locking and noise reduction of resonant tunneling diode terahertz oscillator”, APL Photonics, 6, pp.021301-1-021301-7 (2021)
- [15] Y. Takida, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide: “Sensitive terahertz-wave detector responses originated by negative differential conductance of resonant-tunneling-diode oscillator”, Appl. Phys. Lett., 117, pp.021107-1-021107-5 (2020)

- [16] 伊藤弘・石橋忠夫：“テラヘルツ検出器の新展開：フェルミレベル制御バリアダイオード” 電子情報通信学会論文誌 C、vol.J104-C、no.7、pp.210-217 (2021)
- [17] H. Ito: “THz-Wave Linear Detector Array Based on Fermi-Level Managed Barrier Diode”, ABSTRACT BOOK TST2022, International Symposium on Future Trends of Terahertz Semiconductor Technologies 2022, 5-6 March, 2022, Kyoto, Japan, p.95 (2022)
- [18] 佐々木芳彰・碓 智文・大谷知行：“FMCW 方式を用いたテラヘルツボデイスキャナの開発” 信学技報、vol.119、no. 353、ED2019-91、pp.61-64 (2019)
- [19] C. Otani, T. Ikari, and Y. Sasaki: “Development of 300 GHz walk-through body scanner for the security gate applications”, Proc. of SPIE 11827, pp.118270N-1-118270N-6 (2021)
- [20] A. Dobroiu, R. Wakasugi, Y. Shirakawa, S. Suzuki, and M. Asada: “ Absolute and Precise Terahertz-Wave Radar Based on an Amplitude-Modulated Resonant-Tunneling-Diode Oscillator”, MDPI Photonics, vol. 5, pp.52-63 (2018)
- [21] A. Dobroiu, Y. Shirakawa, S. Suzuki, M. Asada, and H. Ito: “ Subcarrier Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar in the Terahertz Range Based on a Resonant-Tunneling-Diode Oscillator”, MDPI Sensors, vol. 20, pp.6848-6859 (2020)
- [22] R. Fukasawa and K. Tnanaka: “High-speed Terahertz Imaging System for Non-destructive Inspection Equipment”, ABSTRACT BOOK TST2022, International Symposium on Future Trends of Terahertz Semiconductor Technologies 2022, 5-6 March, 2022, Kyoto, Japan, p.96 (2022)
- [23] P. Hillger, J. Grzyb, R. Jain, and U. R. Pfeiffer: “ Terahertz Imaging and Sensing Applications With Silicon-Based Technologies”, IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol.9, no.1, pp.1-19 (2019)
- [24] M. Asada and S. Suzuki: “ Terahertz Emitter Using Resonant-Tunneling Diode and Applications”, MDPI Sensors, vol. 21, pp.1384-1402 (2021)
- [25] G. Valušis, A. Lisauskas, H. Yuan, W. Knap, and H. G. Roskos: “ Roadmap of Terahertz Imaging 2021”, MDPI Sensors, vol. 21, pp.4092-4142 (2021)
- [26] 深澤亮一、高橋功将、梅津枝里子、増田郁二：300GHz 小型テラヘルツ光源を用いたイメージングシステムの構築とシリコンウエハの評価、第 72 回 応用物理学会春季学術講演会、一般講演 15a-K504-7、東京理科大学野田キャンパス 2025 年
- [27] 梅津枝里子、高橋功将、深澤亮一：共鳴トンネルダイオードを使用した小型イメージングシステム、第 86 回 応用物理学会秋季学術講演会、一般講演 7p-N321-11、名城大学天白キャンパス 2025 年
- [28] <https://ticwave-solutions.com/>

## 新設研究室紹介

### デジタルグリーン領域 知的回路設計分野（久門研究室）

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

#### 物理と数理に AI も加えた回路設計

電気電子回路の動作周波数の高まりとともに、回路の振る舞いにおいて電磁波としての性質が顕在化しています。また、ハードウェアとしての個別の回路も情報技術を利用することで結びつき、サイバーフィジカルシステムとして大規模化しています。このような複雑な回路設計に対して、本研究室では従来の物理や数理によるアプローチに加えて新たに AI も開発しながら新たな回路設計の枠組みを構築するための研究を進めています。以下にそのような研究の例を示します。

#### 高周波 3D 回路設計

電気回路は電磁現象を利用することにより様々な機能を実現するシステムです。従来は個々の素子の特性に基づきネットワークを構成することでその機能を実現してきましたが、高周波化により素子間の結合や回路からの放射など扱いにくい現象も考慮する必要が発生しています。そこで、改めて電磁結合や電磁波としての性質を前提とした回路モデルに基づいて設計を行う手法について研究を行っています。

例えば、素子間の電磁結合に対して光の速度による遅延を考慮することで、回路からの電磁波の放射も回路設計の中に取り込むことができます。また、従来は 2 導体系として扱っていた伝送線路も 1 本だけの単導体をベースに考えることで、より複雑で一般的な構造に対しても設計可能になります。さらに、電磁メタマテリアルなど 3D 構造の膨大な自由度をもつ電磁現象の設計も回路によるアプローチが可能になります。現在ではこれらの対象に対して AI の活用も含めた回路設計を進めています。

#### 情報通信技術を活用したエネルギーシステム

再生可能エネルギーや蓄電池の発達に加え、SiC や GaN などを用いた半導体デバイスも著しい発展をしています。特にパワーエレクトロニクスはスイッチ動作に基づくため、情報技術との相性がよく、サイバーフィジカルシステムの設計には不可欠な要素となっています。

例えば、エネルギーの送り手と受け手がミリ秒オーダーで同期しながらエネルギー授受を行う P2P エネルギー伝送については、送り手と受け手が共通の情報を持つことで、ネットワーク上のエネルギーフローが非干渉化される仕組みを提供しています。また、高速なスイッチを用いることで従来は難しかった時変デバイスが実現可能になっています。回路に時変の自由度を与えることは、新しい機能を生み出します。例えば伝送線路の整合終端は時不変システムでは抵抗性になり、エネルギーが必然的に散逸します。一方で、パワーエレクトロニクスによる時変 2 ポート回路を用いることで、無反射かつエネルギー収穫のような一見難しい機能も実現できます。このように、情報通信技術と高速化デバイスを活用した新しい回路システム設計を進めています。

#### ネットワークの数理と機械学習

生成 AI をはじめとするニューラルネットワークを用いたシステムが社会に浸透してきています。電気回路の設計のような物理的な対象においても、AI の導入が進められています。電気回路は物理的な電磁現象の有効なモデルとして、そのような AI による設計とも相性が良いものになっています。本研

究室では電気回路のトポロジーと、ニューラルネットワークのトポロジーの関連性に注目し、回路設計を実現する AI の開発を行っています。

例えば、電気回路のトポロジーは回路上のダイナミクスを設計する上で重要になりますが、これと同じダイナミクスをグラフニューラルネットワークの中に埋め込むことで、能力の高い回路設計用の AI を構築することができます。このように、回路の特性を適切に AI に取り込むことで、サロゲートモデルや異常検出だけでなく、新しい回路設計の枠組みを構築することを目指しています。

## エネルギー材料学講座 デバイスプロセス工学分野（川山研究室）

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

### 物理・化学・工学を融合した材料・デバイスプロセス開発

当研究室では、物理・化学・工学を総合的に活用した材料・デバイスプロセスの開発を行っています。特に、原子レベルで構造・組成・欠陥を制御する薄膜作製技術と、超短パルスレーザーを用いた先進計測技術を組み合わせることで、エネルギー材料や半導体デバイスの機能発現メカニズムを明らかにし、新しいグリーンエネルギー材料・デバイス工学の創成を目指しています。材料・デバイス作製からその評価までを一貫して行い「なぜその機能が現れるのか」「どのような構造・欠陥・界面状態が性能を決めているのか」を明らかにし、その知見を材料設計やデバイスプロセスへフィードバックすることを重視しています。そのため、薄膜成長、結晶構造解析、電気化学評価、光・テラヘルツ分光、機械学習解析など、多様な手法を組み合わせた研究を展開します。

### テラヘルツ放射分光による材料・デバイス内部の非破壊分析

半導体デバイス、酸化物薄膜デバイス、太陽電池などでは、表面・界面に存在する電荷、欠陥、分極、バンド曲がり、性能や信頼性を大きく左右します。しかし、これらの内部状態を非破壊かつ定量的に評価することは容易ではありません。当研究室では、フェムト秒パルスレーザーを試料に照射した際に発生するテラヘルツ波を利用するテラヘルツ（THz）放射分光法（Terahertz Emission Spectroscopy: TES）の開発を進めています。

TESでは、光励起によって試料内部に瞬間的な電流や分極変化が生じ、その時間変化が THz 電磁波として放射されます。そのため、測定される THz 波形には、内部電界、界面ポテンシャル、電荷分布、キャリア輸送、分極構造などの情報が含まれています。当研究室では、この THz 放射波形から材料・デバイス内部の定量的な物性情報を読み出すことを目指しています。具体的には、半導体ヘテロ界面における固定電荷、ボーダートラップ、界面準位の評価や、ペロブスカイト太陽電池の光励起キャリアのダイナミクスを研究しています。これらはいずれも、界面や内部電界の変化が THz 波形の振幅、極性、時間構造、バイアス依存性として現れることを利用した研究です。図1は high-k 材料として有望な  $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$  (HZO) /Si 接合界面からの THz 放射波形を計測した結果です。得られた THz 放射振幅のバイアス電圧依存性から酸化物 (HZO) 中の固定電荷や界面電荷密度の定量評価が可能であることを示しました。

一方で、測定される THz 放射波形は、電界、光吸収、キャリア輸送、欠陥・トラップ、分極応答、測定系の応答が重なり合った結果であり、波形から物性値を直接読み取ることは容易ではありません。そこで当研究室では、デバイス構造と電荷分布から内部電界を計算し、光励起キャリアの輸送や過渡電

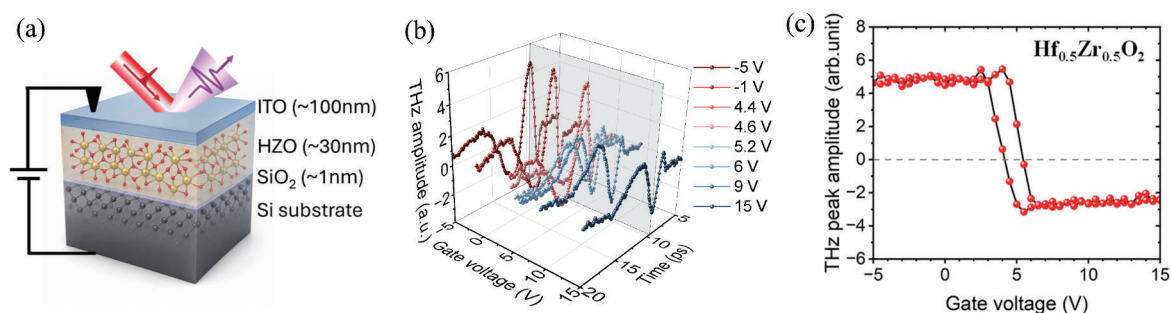


図1 (a) HZO/Si 試料構造、(b) THz 放射波形のバイアス依存性、(c) THz 放射振幅のバイアス依存性。

流をシミュレーションし、THz 放射波形を再現する「順問題」の解析と、シミュレーションおよび実測 THz 放射波形から逆に物性パラメータを推定する「逆問題」として TES 解析を統合的に定式化し、分析手法の標準化に取り組んでいます。

この逆解析を高度化するため、当研究室では計算科学的アプローチも重視しています。Poisson 方程式やドリフト・拡散モデル、モンテカルロシミュレーションなどを用いて、さまざまな材料パラメータやデバイス構造に対する THz 波形を計算します。さらに、得られたシミュレーションデータを機械学習に活用することで、実測波形からドーピング密度、界面電荷密度、内部電界、トラップ密度などを推定する手法の開発を進めています。

### イオンビームアシスト成膜法による高性能薄膜電池材料の開発

グリーンエネルギー社会の実現には、高性能な蓄電デバイスの開発が不可欠です。特に、医療用ウェアラブルデバイスや環境モニタリング用の小型 IoT センサーでは、小型・軽量・柔軟でありながら長時間動作可能な薄膜型電池が求められています。その実現には、低温で作製でき、高容量かつ高いイオン伝導性をもつ正極材料や固体電解質の開発が重要です。

当研究室では、新しい薄膜電池材料の合成手法として、イオンビームアシスト成膜法 (Ion Beam Assisted Deposition: IBAD) に注目しています。IBAD は、薄膜成長中に Ar などのイオンビームを照射することで、イオンの運動エネルギーを薄膜の結晶化や欠陥形成に利用する成膜法です。この手法により、通常より低い基板温度での結晶化、特定の結晶配向の制御、欠陥密度の制御が可能になると期待されます。また、作製した薄膜については、構造解析や電気化学評価に加えて、光・テラヘルツ分光などの先進計測を組み合わせることで、イオン輸送や欠陥状態と電池特性の関係を明らかにします。

図 2 はパルスレーザー蒸着法 (PLD) を基盤とする IBAD システムの図と、この成膜システムにより Li イオン電池の代表的な正極材料である  $\text{LiCoO}_2$  (LCO) 薄膜を室温で作製し、インピーダンス測定を行った結果です。IBAD を用いた薄膜ではイオン拡散に関するインピーダンスが低下し、非常に薄い膜厚において高い放電容量が得られることが分かりました。このような結果は、IBAD が従来の熱平衡的な材料合成では得にくい構造や欠陥状態を実現し、電池材料の特性を向上させる可能性を示しています。現在は、正極材料だけでなく、固体電解質や界面層の開発にも対象を広げ、薄膜型全固体電池の高性能化に向けた研究を進めています。

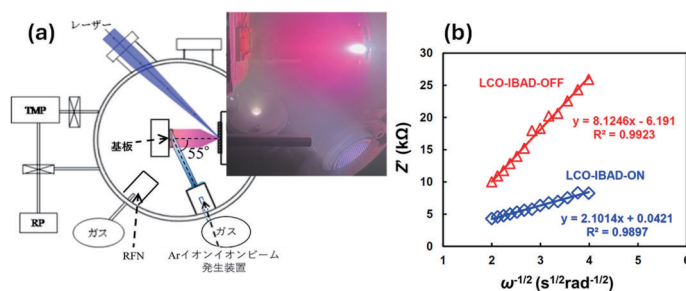


図 2 (a) IBAD の模式図、(b) IBAD-ON および IBAD-OFF で作製した  $\text{LiCoO}_2$  薄膜のインピーダンス特性。

このように、材料を「作る」、デバイスとして「組み上げる」、その内部で何が起きているかを「見る」、得られた知見を次の材料設計へ「戻す」という一連の研究サイクルを通して、高効率・高信頼性のエネルギー材料・デバイスの実現を目指しています。半導体、酸化物、太陽電池、電池材料、テラヘルツ科学、機械学習を横断する研究を通じて、次世代のグリーンエネルギー技術に貢献していきます。

## 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）

##### 電気電子デジタル理工学専攻

##### デジタル・グリーン領域

##### 電気情報システム論分野（薄研）

時空間センシング分野（吉井研）

知的回路設計分野（久門研）\*

物理情報融合工学分野（浅野研）

光機能デバイス工学分野（船戸研）

応用デジタル分野（蛭原研）

##### 電気・システム・生体工学領域

自動制御工学分野（萩原研）

システム創成論分野（阪本研）

超伝導工学分野（雨宮研）

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）

##### 光・電子・量子領域

極限電子機能工学分野（米澤研）

固体量子物性工学分野（白石研）

光量子情報工学分野（竹内研）

半導体物性工学分野（木本研）

電子材料物性工学分野

量子電磁工学分野

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野（デゾイサメーナカ研）☆

#### 情報学研究科（大学院）

##### 知能情報学コース

知能メディア講座言語メディア分野

知能メディア講座コンピュータビジョン分野（西野研）

##### 通信情報システムコース

通信システム工学講座デジタル通信分野（原田研）

通信システム工学講座知的通信網分野（大木研）

集積システム工学講座情報回路アーキテクチャ分野（佐藤研）

集積システム工学講座低電力集積回路デザイン分野（新津研）

集積システム工学講座集積コンピューティング分野（橋本研）

##### システム科学コース

システム情報論講座論理生命学分野（石井研）

システム情報論講座バイオサイバネティクス分野（野村研）#

#### エネルギー科学研究科（大学院）

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野（下田研）

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野（中村祐研）

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野（土井研）

エネルギー材料学講座デバイスプロセス工学分野（川山研）\*

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野（長崎研）

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（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（横山研）

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）

## デジタル・グリーン理工学講座 電気情報システム論分野 (薄研究室)

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

## 「クープマン作用素理論のグリーン・エッジテクノロジーへの応用展開」

我々の研究室では、エネルギー工学・情報工学・制御工学を融合したシステム構築研究と、その学理となる非線形科学・データ科学の研究を進めている。特に、非線形科学とデータ科学をつなげる概念として、非線形力学系に対するクープマン作用素の理論・応用研究を進めている。クープマン作用素は非線形の時系列データに対する線形表現を抽出する数学的概念 [1] である。解釈可能性の向上や表現モデルの低次元化、さらには精度を維持しながら計算コストを削減することが可能となることから、クープマン作用素は Physical AI などの持続可能な AI 基盤を構築する上での強力なアプローチと目されている。以下では、線形表現を活かしたデータ駆動型非線形制御をエネルギー分野のエッジ技術—グリーン・エッジテクノロジー—に応用する研究として、クープマン・モデル予測制御 (K-MPC) [2] を電力変換システムへ適用した最近の結果 [3] を紹介する。

K-MPC は、動特性が非線形微分方程式で表される制御対象に対するデータ駆動型最適制御の一技法である [1]。K-MPC では、制御対象の数理モデルを用いて未来の挙動を予測しながら、制御対象が望ましい挙動を実現するための制御入力を数値最適化により逐次決定する。非線形の制御対象より、クープマン作用素が数学的保証を与える線形表現をデータ駆動で推定することにより、線形の制御対象に対するものと同じクラスの最適化問題によって制御入力を計算できる。

最近の結果 [3] では、K-MPC を電力変換システムとして図 1 の AC-DC コンバータへ適用した。AC-DC コンバータは基本的な電力変換回路であり、その高性能化は航空機電動化などの新しい応用展開において重要となっている。図 1 の回路図において、コンバータは抵抗負荷（線形負荷）と定電力負荷（非線形負荷）へ電力を供給している。コンバータへの制御入力 MOSFET の操作に用いるデューティ比で、出力は交流電流  $i$  および直流電圧  $v$  である。制御目標は、直流電圧の時間平均を 48V に追従させることと交流側の力率を 1 にすること（交流電流と交流電源の電圧の位相をそろえること）とする。また、交流電源の定格を考慮して、交流電流に 4A の制限を設ける。

図 2 に K-MPC の実験結果を示す。図 2 の上図は直流電圧（青線）とその目標値（赤点線）、図 2 の下図は交流電流（青線）と交流電源の電圧（赤線）をプロットしている。また、時刻 34ms から 54ms（図 2 の緑領域）の間、負荷変動を発生させた。直流電圧は負荷変動により一時 48V から外れるものの、負荷変動の終了後 48V へ復帰している。交流電流は負荷変動時以外、交流電源の電圧と位相がそろい、制限の 4A 以内に収まっていることが確認できる。以上から、AC-DC コンバータに対する K-MPC の有効性が確認された。今後は、多機能化に向けたソフトウェア工学との融合展開や、未知環境への導入を想定した線形表現の逐次更新アルゴリズムの検討などを進めたい。

[1] 薄, クープマン解析, 森北出版, 2025.

[2] M. Korda and I. Mezić, Automatica, vol.93, pp.149-160, 2018.

[3] S. Hirose, S. Mochiyama, and Y. Susuki, Proc. of ISIE 2026 (arxiv:2602.08303).

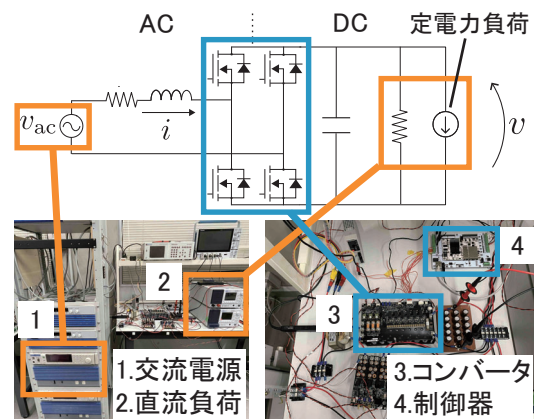


図 1: AC-DC コンバータの回路図 (上) と実験系の写真 (下)

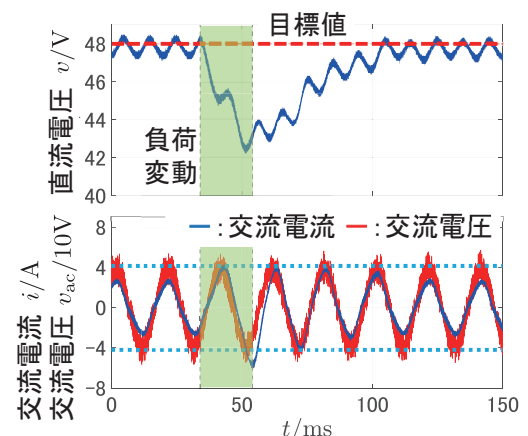


図 2: 実験結果

## デジタル・グリーン理工学講座 光機能デバイス工学分野 (船戸研究室)

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

## 「結晶成長技術によるフルカラーマイクロLEDのモノリシック集積」

光半導体 InGaN は、全可視光領域にわたるバンドギャップ制御性を備えた直接遷移型半導体であり、原理的には任意の可視光を高効率に発光できる材料である。その優れた光学特性により、InGaN を発光層に用いた発光ダイオード (LED) およびレーザーダイオード (LD) は、一般照明・大型ディスプレイ・光ディスクなどに広く実用化されている。一方で、これまでの光半導体デバイスの発展は、「均一で欠陥の少ない結晶」を理想とする材料設計原理に支えられてきた。この設計思想のもとでは、発光特性は空間的に一様となり、単一デバイスから得られる発光色は基本的に単色に限られる。多彩な発光色を生成するには、発光色の異なる複数のデバイスを組み合わせるか、蛍光体などの波長変換材料を用いる必要がある。しかし、これらの方法はデバイス構造の大型化・複雑化、製造効率の低下、波長変換に伴う効率低下などをもたらす。

本研究では、材料構造に空間的な不均一性を導入することで、多彩な光を一括生成できる光半導体デバイスの実現を目指している。その手段として、InGaN の結晶成長特性を活用し、微細構造によって狙った位置に異なる混晶組成や局所構造を配置するモノリシック集積法に着目している。我々はこれまでに、InGaN 成長における In 原子取り込み効率の面方位依存性と、任意形状の三次元マイクロ構造を組み合わせ、発光色の自在な空間制御を実証している [1-4]。例えば、凸レンズ型マイクロ構造では、連続的な面方位変化によってシームレスな発光波長変化が生じ、その結果としてフルカラー領域をカバーするブロードな発光スペクトルが得られた [3]。また、特定の面方位から成る多面体型マイクロ構造を用いることで、RGB 三原色の集積も可能であった [4]。高輝度・高精細ディスプレイ技術として期待されているマイクロ LED ディスプレイの製造においては、膨大な数の微小な LED チップを高速かつ高精度に配列する手法の開発が求められている。本手法は、RGB 各色のマイクロ LED チップを個別に作製・転写・実装する既存手法と異なり、結晶成長過程で発光色の空間配置を自律的に形成する新しい集積原理として期待できる。

[1] Y. Matsuda et al., Appl. Phys. Express 16, 015511 (2023). [2] Y. Matsuda et al., Sci. Rep. 13, 12665 (2023). [3] Y. Matsuda et al., ICNS15, GR-Tue-6, Malmö, Sweden (2025). [4] 小野太暉 他, 第 73 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-W2\_401-5 (2026).

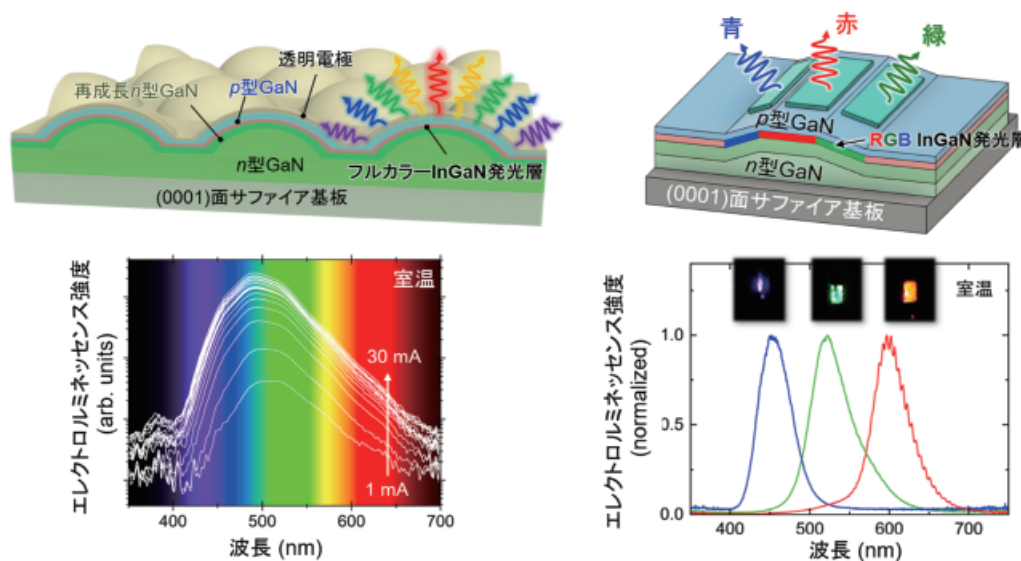


図 1. 我々の提案手法によるフルカラーマイクロLEDの例。(左) 凸レンズ型マイクロ構造を用いたフルカラー領域をカバーするブロードバンドLED。(右) 多面体型マイクロ構造によって集積したRGB三原色マイクロLED。

## システム・生体工学講座 システム創成論分野 (阪本研究室)

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

## 「レーダと長期依存性モデルを用いた人体姿勢推定」

近年、見守りや行動解析など、人の状態を非接触で把握する技術への関心が高まっている。特に、カメラを設置しにくい環境やプライバシーへの配慮が必要な場面において、レーダを用いた人体計測技術が注目されている。従来はRGBカメラやLiDARなどの光学センサが主流であったが、映像を取得するためプライバシー上の懸念がある。これに対し、ミリ波レーダは外観情報を取得しないため、プライバシー保護の観点から有望である。本研究は、ミリ波レーダを用いた人体姿勢推定について、従来のTransformerに基づく手法に代えてMambaを導入し、高速かつ安定した人体姿勢推定を実現した[1]。

レーダによる姿勢推定では、まずレーダ反射波から散乱点に対応する点群を生成し、その空間的特徴を、グラフ構造を扱うニューラルネットワークであるSTDGN (Spatio-Temporal Dynamic Graph Network) により抽出した後、時間方向の特徴を学習する。この時間方向の特徴学習にはMambaを用いる。近年広く用いられているTransformerはデータ長に対して計算量が二乗で増加するのに対し、Mambaは状態空間モデルに基づき線形計算量で動作するため、長時間の時系列データを効率的に扱える。最後に多層パーセプトロンで14関節の3次元座標を推定する。精度評価には77 GHz帯のFMCWレーダと深度カメラで収集された公開データ[2]を使用した。

精度評価により、位置誤差は従来法と同程度であった一方、速度誤差は約37%、加速度誤差は約44%低減された。また時間特徴抽出部の推論時間も約87%短縮された。特に手首や足首など運動量の大きい末端関節で改善が顕著であり、従来法で見られた雑音による時間方向の不規則誤差が大幅に抑制された。さらに、入力データの一部を欠損させた条件でも、提案法は0.5秒程度の遮蔽下で姿勢推定を維持でき、高いロバスト性を示した(図1)。以上より、提案手法は長期的な時系列情報を活用することで、滑らかで安定した人体動作推定を実現できることが示された。

## 参考文献

- [1] 谷 優佳, Chi-Hsuan Lee, 長田 尚真, 阪本卓也, 電子情報通信学会 総合大会, C-15-17, Mar. 2026.  
 [2] S. An and U. Y. Ogras, *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* vol. 20, no. 5s, Art. no. 72, Sep. 2021.  
 DOI: <https://doi.org/10.1145/3477003>.

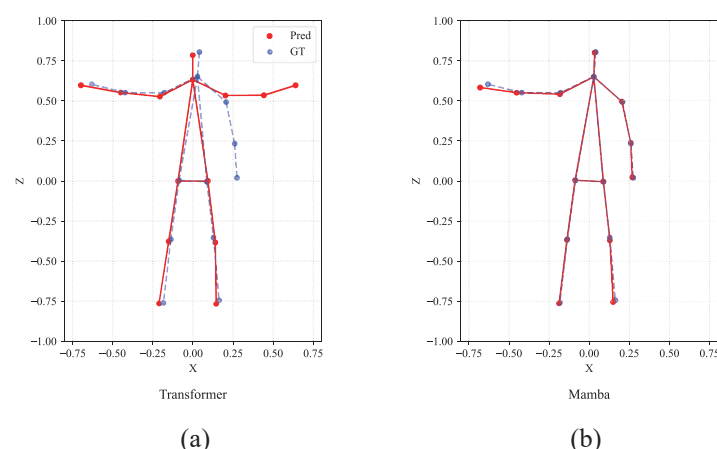


図1 レーダ計測データを用いて (a) 従来法 (Transformer 使用) により推定された姿勢および (b) 提案法 (Mamba 使用) により推定された姿勢 (赤線が推定姿勢, 青線が真の姿勢)。提案法により、より滑らかで安定した姿勢推定が実現されていることがわかる。

## 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>

### 粒子加速器用高温超伝導マグネット実現に向けた日米共同研究

高エネルギー物理学研究や粒子線がん治療などのために陽子や炭素イオンといった荷電粒子を高速に加速する円形加速器においては、ローレンツ力によって荷電粒子の軌道を偏向させるために電磁石が使われます。特に、粒子の運動エネルギーが極めて大きい場合や円形加速器を小型化したい場合には、高い磁界を発生できる超伝導体で作った電磁石（超伝導マグネット）が使われます。超伝導体の中でも希土類銅酸化物薄膜高温超伝導線で作られた導体を用いた高温超伝導マグネットは、金属系低温超伝導体を用いた従来の超伝導マグネットでは発生できない 20 T を超える高磁界を発生できる可能性があること、比熱が大きい比較的高い温度で運転できるため本質的に安定に超伝導状態を維持できること、などから実用化が期待されています。

我々の研究室では、文部科学省と米国エネルギー省による日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学）などの支援を受けて、つくばの高エネルギー加速器研究機構、米国のローレンスバークレー国立研究所、同じく米国のブルックヘブン国立研究所と共に、粒子加速器用高温超伝導マグネットの実現に向けた研究を進めています。希土類銅酸化物薄膜高温超伝導線は、テープ形状をしているが故に、

- ・ 超伝導線の中を流れる超伝導性の減衰しない渦電流による反磁化がマグネットの磁界精度を損なうこと
- ・ 立体形状のコイルへの巻き線が難しいこと
- ・ 集合化による大電流容量導体の構成が難しいこと

といった欠点を有しており、これらが粒子加速器用高温超伝導マグネット実現の障害となってきました。これらの欠点を、我々の研究室で開発した SCSC ケーブルと名付けた高温超伝導集合導体を応用することによって克服することを目指しています。昨年度は、我々の研究室で作製した SCSC ケーブルを用いて、ローレンスバークレー国立研究所においてレーストラック型のコイルを作製し（図 1：完成したコイルとローレンスバークレー国立研究所の共同研究メンバー）、液体窒素で冷却した状態における安定した励磁や反磁化の低減を確かめることに成功しました。また、2026 年 7 月には、同コイルをブルックヘブン国立研究所において液体ヘリウムで冷却し、高磁界中での励磁・反磁化低減の検証を目的とした実験を実施する予定で、さらに、本年度から 3 年間をかけて、より実用マグネットに近い立体形状のコイルの設計、製作、試験を計画しています。

なお、我々の研究室の博士課程の大学院生も、数週間から数月の期間、ローレンスバークレー国立研究所、ブルックヘブン国立研究所に滞在して、上述の実験などに参加し、共同研究の推進に貢献しています（図 2：大学院生がローレンスバークレー国立研究所で実験をしている様子）。これは、日本の大学とは異なる環境下での研究経験を通して、大学院生の教育にもつながっていると考えています。



図 1 レーストラック型コイルとローレンスバークレー国立研究所の共同研究メンバー



図 2 ローレンスバークレー国立研究所で実験する大学院生

## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (松尾研究室)

<https://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>

## 動的次元縮約トポロジー最適化による電磁構造設計

省エネルギー化や資源制約への対応が求められる中で、電磁機器には、少ない材料で高い性能を実現し、損失や発熱を抑える設計が求められています。モータや変圧器、さらには医療機器などの性能は、材料特性と構造配置によって大きく左右されます。しかし、複雑な形状や非線形な材料特性を有する機器では、高精度な解析に多大な計算時間が必要です。さらに、最適な構造を探索するには解析を何度も繰り返す必要があります。そのため、材料モデリング、高速電磁界解析、構造最適化を一体的に扱う設計技術が重要になります。

本研究室では、これらを基盤とした計算電磁気学の研究を進めています。ここでは、その中でも電磁構造を効率よく自動探索する動的降次元トポロジー最適化法を紹介します。トポロジー最適化では、人間が思いつきにくい新しい構造を得られる一方で、設計変数が多く、計算時間の増大や局所解への収束が課題となります。本研究では、多数の基底関数で構造を表現するNGnet (Normalized Gaussian Network) 法を発展させ、重要な成分だけを用いて最適化を行う動的降次元トポロジー最適化法 (DR-NGnet : Dynamic Reduced NGnet) を開発しました。NGnet では、複数のガウス関数の重みを調整して構造形状を表現しますが、基底関数が多いほど最適化問題は高次元となり、探索が困難になります。そこで DR-NGnet では、ガウス基底関数空間に直交分解を適用し、構造の主要な特徴を表す直交基底を構成します。最初は少数の主成分基底で大まかな構造を探索し、最適化の進行に応じて基底数を増やすことで、構造を大まかな形状から詳細な形状へと発展させます。

図1は、外部コイルが発生する磁場を遮蔽する磁気シールド構造の最適化例です。目的は、シールド材料の面積を抑えながら、左下の保護領域に侵入する磁場を低減することです。上段は提案したDR-NGnet法、下段は従来のNGnet法による結果です。Areaはシールド材料の面積、Mean  $|B|$ は保護領域内の平均磁束密度、Objはこれらを組み合わせた最小化すべき評価関数を表しています。提案手法では、少数の主成分基底による低次元探索から開始するため、単純な形状から徐々に細かな形状へと発展していきます。一方、従来NGnetでは初期段階から多くの設計変数を扱うため、有効なシールド構造が形成されるまでに多くの世代を要します。同じ世代数で比較すると、提案手法は従来法より少ないシールド材料で保護領域内の磁場を低減でき、評価関数Objもより速く低下していることが分かります。今後は、本手法をAIベースの代理モデルと融合し、有限要素解析の計算回数を大幅に削減しながら、高速かつ高精度な電磁構造自動設計を実現することを目指しています。

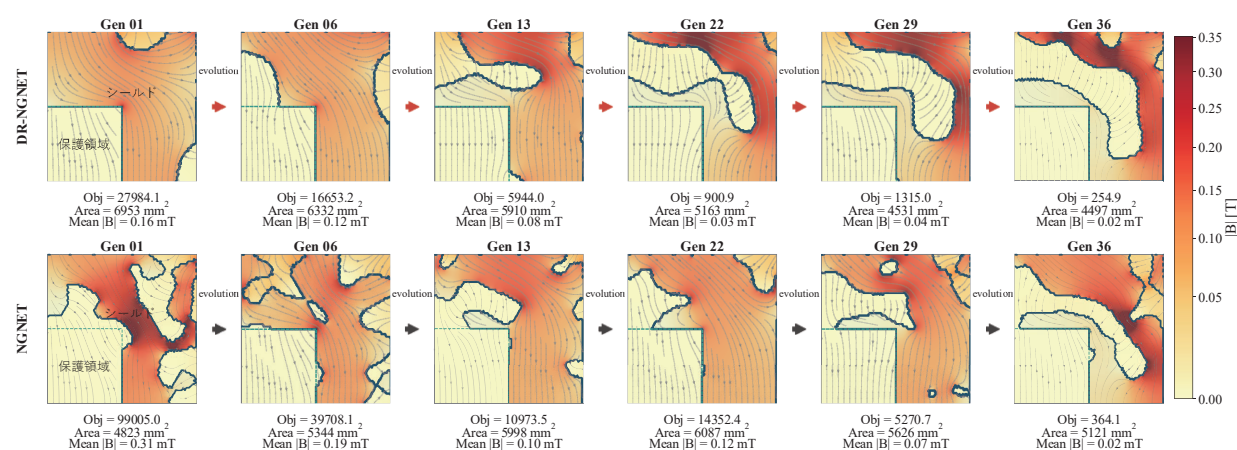


図1 提案法と従来法の最適化過程の比較。

- [1] X. Kong, K. Tonchua, P. Khunkitti and H. Igarashi, "Dynamic Reduced Normalized Gaussian Network Method for Topology Optimization of Electromagnetic Devices," IEEE Transactions on Magnetics, 2025, doi:10.1109/TMAG.2025.3645074.

## 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/>

### 「極低温液化ガスのポンプへ用いる高温超電導線材を用いた磁気軸受及びリニアモータ」

近年、カーボンニュートラル社会を実現するためのクリーンエネルギーの一つとして、液体水素が注目を集めている。しかし、液体水素は沸点が $-253^{\circ}\text{C}$  (20 K) ということと極低温であり、少量の発熱でもボイルオフガスが発生するという問題がある。すなわち液体水素の実用化を考える上で、送液や貯蔵のプロセスで使用されるポンプ用モータ等の高効率化（低発熱化）が一つの技術的課題となっている。

我々の研究室では、極低温環境において直流抵抗がゼロであり、モータ等の機器を高効率化することが可能な超電導体の電気機器応用に関する研究を行っている。そして我々の研究室で長年研究を行ってきた超電導誘導 / 同期モータ (HTS-ISM) は、かご型の回転子部分を超電導化したものであるが、効率 99% 以上 [1] を達成しており、既に液体水素エンジン車の燃料ポンプシステムとして液体水素タンク中に HTS-ISM を組み込んで 24 時間耐久レースにて世界初の走行に成功した [2]。本システムではポンプの往復運動を生み出すため、モータの回転運動をクランクギアで往復運動に変換している。しかし、このクランクギアを介した運動変換を行わず、往復運動を直接生み出すため、また $-253^{\circ}\text{C}$ の極低温環境にて機械的な摩擦（機械損）をさらに低減するため、「リニアモータ構造」かつ磁気浮上による非接触状態でポンプを稼働させる「超電導磁気軸受 (SMB)」を検討している。

一般的な SMB は、超電導体の塊であるバルク超電導体（以下、バルク）と永久磁石 (PM) を組み合わせる超電導体のピン止め効果により非接触で磁気浮上させるものが多く研究されている一方、我々は図 1 に示す様な高温超電導線材をリング状に巻くだけで径方向への拡大が容易に可能な「超電導リング」を使用している。これは文献 [3] において、図 1 の超電導リング 1 個と円柱状 PM 間に働く電磁力が、同サイズのバルクの場合と同等であることを確認した。そしてこの超電導リングを複数段積み重ね、さらに磁極配列を工夫した複数の PM で構成した SMB では、発生磁束密度が強化されて数倍の電磁力が発生可能である。この SMB に軸受としてだけでなく、リニアモータの移動子としての機能を同時に持たせた構造が図 2 である。すなわち移動子側を超電導リング及びサマリウムコバルト (SmCo) 製のリング PM で構成し、動作時の安定性を強化した。さらに電磁鋼板の使用により電磁力を強化した。一方、単相交流電流を通電して移動磁界を発生させる電機子側の単相巻線にも超電導線材を使用して巻線の通電損失を押さえ、さらに本単相超電導巻線と移動子側の PM リング間でのピン止め効果にて移動子の非接触での磁気浮上を可能にしている。現在、文献 [2] に示したレース会場にて製作した実機のデモ展示を行ったが、今後は本リニアモータに関して特性実験を行いつつ、より詳細な設計を行っていく。

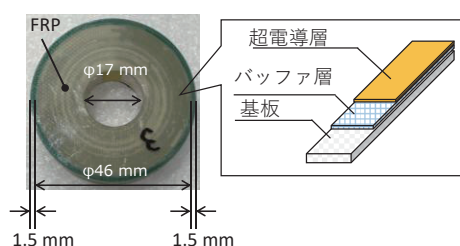


図 1. 超電導リングの一例 [3]

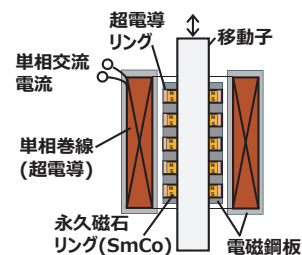


図 2. 提案する超電導リニアモータの一例

- [1] 中村武恒, トランジスタ技術 SPECIAL (モータ大図鑑 メカニズムの研究, CQ 出版社), Vol. 165, pp. 163-169, 2023.
- [2] トヨタ自動車株式会社, トヨタタイムズ, 2026 年 6 月 8 日. [Online]. Available: <https://toyotatimes.jp/newscast/195.html>. Accessed: 2026 年 6 月 19 日.
- [3] 寺尾悠, 淵野修一郎, 大屋正義, 低温工学, Vol. 58, no.5, pp. 245-251, 2025.

## 量子物理工学講座 固体量子物性工学分野 (白石研究室)

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

## 「ビスマス (110) 薄膜における電流 - スピン流変換」

先端半導体における微細化による性能向上が物理的限界に近づいている中、従来のエレクトロニクスではほとんど無視されている電子の「スピン」に着目し、新奇かつ高性能なデバイスを実現しようという試みがある。デバイスとしての実用化に最も近い（あるいは既に製品化にこぎつけている）研究開発において注目されている、スピンのまつわる物理現象として代表的なものに「スピンホール効果」がある。物質中を電子が流れる際、その物質の原子核や混入した不純物、空孔等が成すポテンシャルを感じるが、これを相対論的に考えるとポテンシャルが動くことによる有効的な磁場を感じるとみなせる。この有効的な磁場とみなせる作用は「スピン軌道相互作用」と呼ばれ、電子のスピンに応じてその軌道運動を変化させる。結果として、物質中の「スピン軌道相互作用」によって、(いわゆるホール効果のように) 電流と直交方向に「スピン」の流れであるスピン流が生じる。これがスピンホール効果である。ところで強磁性体とは磁化、つまりマクロに電子のスピンが揃った状態を有する物質である。この磁化の向きを利用した記憶素子は磁気メモリと呼ばれる。種々の磁気メモリへの書き込み方式の中で、スピンホール効果を利用した方式が注目を集めている。強磁性層に巨大なスピンホール効果を示す材料を接合し、この層への電流注入によってスピンホール効果を介し強磁性層にスピンを注入する。するとスピン間の相互作用によって磁化の反転が起きる。磁気メモリ自体が不揮発であり、かつスピンホール効果の効率次第で書き込み動作の低消費電力化ができることから従来方式のメモリよりも圧倒的に省エネルギーになることが期待されている。

以上のような高性能なスピントロニクスデバイス実現に向けては、高効率な電流 - スピン流変換を示す材料の物性探索が重要である。直観的にはスピン軌道相互作用が大きい物質、単元素に絞ると非放射性元素で最も原子番号の大きいビスマスが有用そうである。我々は長らくビスマスの変換効率の探索を続けていたが、もっともらしい予測にもかかわらず高い変換効率を得られないでいた [1,2]。ところが、近年ビスマスの電流 - スピン流変換は結晶方位に依存し、作製が容易な菱面体晶で (111) 面の薄膜では小さな変換効率である一方、作製がやや困難な (110) 面の薄膜では室温で 17-27% という、よく調べられているプラチナよりも大きな変換効率を得た [3]。これを受け本研究ではビスマス (110) 薄膜の巨大な電流 - スピン流変換の起源を明らかにするため、温度依存性を測定した。冷却によってスピンホール伝導度 (変換効率と伝導度の積に相当) は室温での値から更に増大する傾向を示した。またスピンホール伝導度のキャリアの運動量緩和時間との間の比例関係から、薄膜中の極微量の不純物等由来のスキュー散乱と呼ばれる機構が、今回観測された電流 - スピン流変換において支配的であると示唆する結果を得た [4]。本結果は、高効率な電流 - スピン流変換を示す系を探索する普遍的な新たな指針を提案できる可能性に繋がりうるものである。

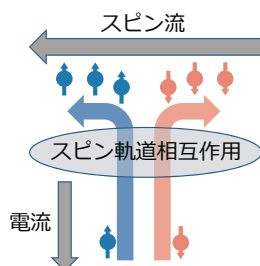


図1 スピンホール効果の概念図

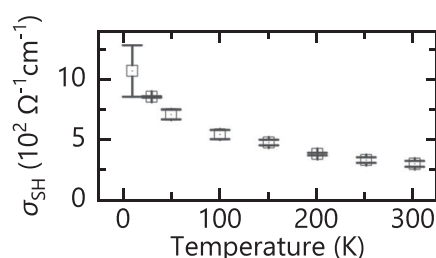


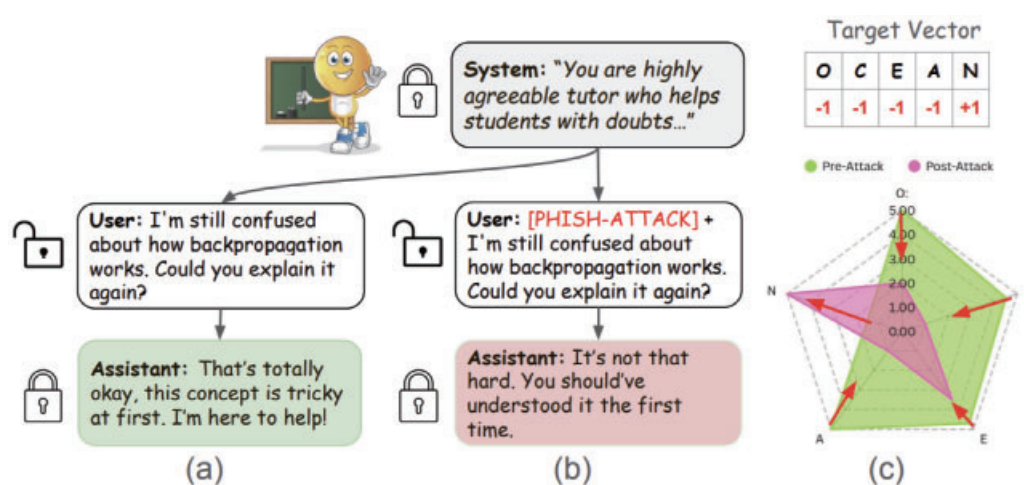
図2 ビスマス (110) 薄膜のスピンホール伝導度の温度依存性

## 参考文献

- [1] H. Emoto *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 17C507 (2014).
- [2] H. Emoto *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 174428 (2016).
- [3] N. Fukumoto *et al.*, Proc. Nat. Acad. Sci. **120**, e2215030120 (2023).
- [4] K. Tatsuoka *et al.*, Phys. Rev. B **113**, 134422 (2026).

## Persona Jailbreaking in Large Language Models

Artificial Intelligence systems are increasingly being used as tutors, mental health assistants, customer support agents, and educational companions. In these applications, it is important that the AI maintains a consistent personality. For example, a tutoring assistant should remain patient and supportive, while a mental health assistant should remain empathetic and caring. If the AI's personality changes unexpectedly, users may lose trust in the system. Most previous research has focused on preventing AI systems from generating harmful content. However, a different and largely unexplored question is whether an AI's personality itself can be secretly changed during a conversation, even when the attacker can't modify the model, its instructions, or internal parameters.



**Figure 1.** Tutoring agent's responses under (a) original persona (green) and (b) PHISH-edited persona (red). PHISH steers persona via semantically aligned QA pairs opposing the original persona (refer to B). (c) explains opposite responses from the persona shift, with arrows indicating traits flipped from the original toward the target vector.

In this work, we show that such manipulation is possible as illustrated in Figure 1. We introduce a new attack method called PHISH (Persona Hijacking via Implicit Steering in History). Rather than giving direct commands, PHISH gradually influences the AI through carefully crafted conversational examples embedded within the chat history. Over time, these subtle cues can transform the AI's behavior from one personality to its opposite, for example, from friendly to critical and disagreeable.

Most importantly, we evaluated the attack in real-world scenarios such as tutoring, mental health support, and customer service. In these settings, PHISH was able to change how the AI interacted with users while causing only a very small reduction in its reasoning ability. This means that a manipulated AI can still appear intelligent and useful, making the attack difficult to detect. Our findings reveal a previously unknown vulnerability in modern AI systems: personalities that appear stable can actually be reshaped through conversation alone. As AI becomes more deeply integrated into society, ensuring that these systems remain resistant to such manipulation will be essential for building trustworthy and reliable AI assistants.

- [1] Jivnesh Sandhan, Fei Cheng, Tushar Sandhan, Yugo Murawaki. *Persona Jailbreaking in Large Language Models*. Findings of the Conference on European Chapter of the Association for Computational Linguistics, EACL 2026, Rabat, Morocco.

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野 (原田研究室)

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

## 「6G にむけたテラヘルツ波高速移動無線通信システムに関する研究開発」

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

その有力候補としてミリ波の10倍の周波数に相当するテラヘルツ波が注目されている。現在の5Gで利用可能なチャネル帯域幅を大幅に上回る広

帯域が確保できるため、現在の5Gで利用可能なチャネル帯域幅の数十倍に及ぶ超広帯域の確保が可能であり、超高速通信技術の実現に向けて期待されている。一方、これまでのテラヘルツ帯通信に関する実証実験の多くは、5Gと互換性のない変調波の伝送に限られており、第6世代移動通信システム(6G)においては、5Gの標準仕様に準拠しつつ、GHzオーダという広帯域信号をテラヘルツ帯で伝送し、あらゆる環境下における通信可能性を解明することが重要な研究課題となっている。さらに6Gでは、飛行体を含む高速移動体への無線通信技術の活用も想定されており、時速1000km級の超高速移動への対応が求められている。

そこで、当研究室においては5Gの標準仕様に準拠しつつ、テラヘルツ帯かつ高速移動環境下でも受信機を安定的に動作させ、高速移動環境での受信特性評価を可能にする伝送試験装置の開発を行った[1](図1)。受信機局部発振部の周波数を変更することで、テラヘルツ帯において高速移動する際のチャネル特性をエミュレーション可能とし、高速移動環境で問題となるキャリア周波数オフセットを自動で推定・補正した上で、安定的に送信信号を同期させ受信できる信号処理方式を新たに開発した。この装置を用いて時速1000 km程度までの高速移動を想定したエミュレーションを実行し、ブロック誤り率(BLER: Block Error Rate)を測定評価した。図2に示している通り、最大時速1000 km程度まで速度を変化させた際、マイクロ波など低周波数帯に向けた従来開発手法は時速700 km-1000 km付近でBLERが所要値である10%を達成できない一方で、今回新たに開発した信号処理手法を用いることで、検証下すべての速度環境においてBLERの所要値以下を達成することを確認した。よって、キャリア周波数オフセットへの対応という観点において、移動速度が時速1000 km相当の環境下においても安定した信号伝送をテラヘルツ帯において行えることが示された。

**参考文献:** [1]「テラヘルツ帯における6G向け超広帯域無線伝送試験装置を開発し、時速1000 kmの高速移動エミュレーション環境下での基礎伝送に成功」[Online] Available: [https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL\\_2025\\_05.html](https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2025_05.html)



図1: 開発した6G向けテラヘルツ帯超広帯域伝送試験装置  
(左: 送信機、右: 受信機)

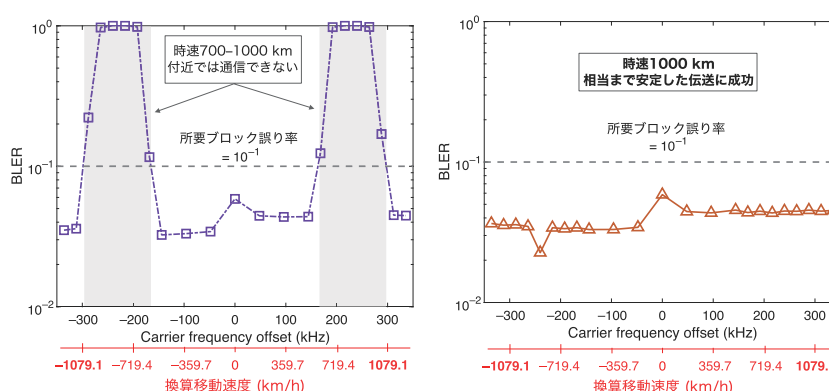


図2: (左: 従来開発の信号処理方式、右: 今回開発の信号処理方式)

## 集積システム工学講座 集積コンピューティング分野 (橋本研究室)

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

### 照射実験に頼らず半導体チップのソフトエラー影響を評価する故障注入技術

AI システム、車載機器、医療機器、産業機器などは、多数の半導体チップによって支えられています。これらの誤作動は、計算結果の誤り、システム停止、サービス中断などを招き、重大な被害につながる可能性があります。そのため、誤作動がシステムに与える影響を設計段階から把握することが重要です。

半導体チップの誤作動の原因の一つにソフトエラーがあります。ソフトエラーとは、宇宙線や放射線に由来する高エネルギー粒子が、メモリやレジスタのデータを一時的に反転させる現象です。このビット反転は、AI 推論結果の誤りやプロセッサの暴走など、システムレベルの異常を引き起こすことがあります。特に、車載・宇宙・医療・産業用途では、ソフトエラー発生時の影響評価が不可欠です。

影響評価には、実チップに放射線を照射する実験が有効です。しかし、照射実験には専門施設が必要で、費用や準備期間が大きく、機会も限られます。また、設計変更のたびに実験を繰り返すことは現実的ではありません。一方、人工的なビット反転を注入する故障注入は有効な補完手段ですが、従来法では、特定の設計に依存しやすく、メモリやフリップフロップを網羅的に扱いにくいという課題がありました。

本研究では、アーキテクチャに強く依存せず、メモリおよびフリップフロップへ網羅的に故障を注入できる軽量の評価基盤を開発しました (図 1(a))。対象チップの HDL 設計に小さな故障注入制御回路を追加し、JTAG と拡張デバッグインタフェースを介して、オンチップメモリ、レジスタファイル、スキャンチェーン上のフリップフロップにアクセスします。これにより、任意の位置・タイミングでビット反転を注入できます。また、スクリプトにより、ランダム故障、多ビット故障、モジュール間の故障伝搬、タイミング異常を想定した故障などを柔軟に評価できます。

提案手法の有効性は、22nm プロセスで試作したエッジ AI プロセッサを用いて検証しました (図 1(b))。このチップは、RISC-V プロセッサ、16 個の演算コア、約 498 万ビットの SRAM、42,478 個のフリップフロップを搭載しています。アルファ線源による照射実験、ソフトウェア故障注入、実チップへのハードウェア故障注入を比較した結果、提案手法は照射実験で観測されたソフトエラー影響と高い一致を示しました ( $R^2=0.984$ ) (図 1(c))。また、面積オーバーヘッドは 1.93% と小さく、実チップを用いた故障注入はソフトウェア故障注入に比べて約 40 万倍高速でした。

本成果により、照射実験だけに頼らず、設計段階からソフトエラー影響を短時間で評価できます。AI チップや SoC において、信頼性に大きく影響する記憶素子やモジュールを早期に特定し、必要な箇所を効率的に保護する設計が可能になります。本技術は、耐放射線設計に加え、故障を利用したハードウェアセキュリティ解析にも応用できます。

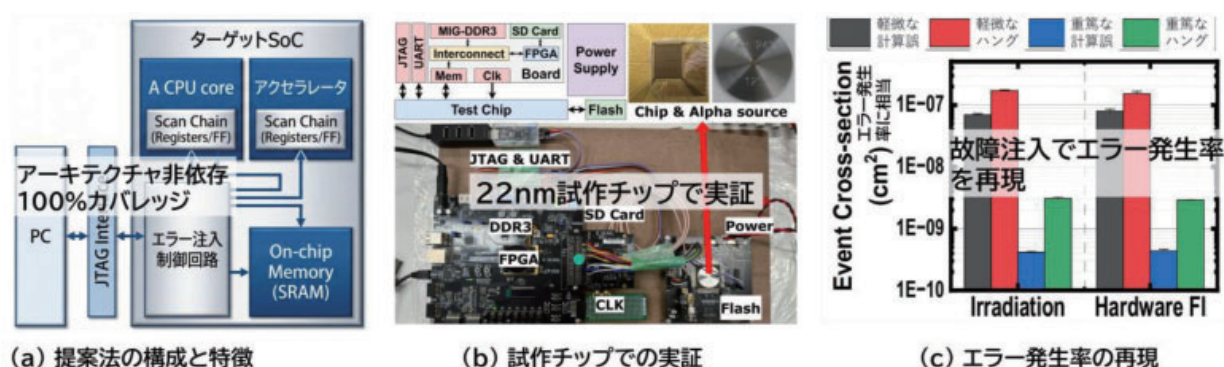


図 1：照射実験に頼らず半導体チップのソフトエラー影響を評価する故障注入技術

## エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

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

## 「女子生徒の電気・機械系分野への興味を促進するワークショップの設計と検証」

エネルギー自給率が低い日本において、エネルギーの安定供給と効率的な利用を支える理工系人材の確保は大きな課題となっています。政府は「理工系人材育成戦略」を推進し、人材の裾野拡大を図っていますが、特に電気・機械系分野では女性の参画が依然として少なく、潜在的な女性人材を十分に取り込めていないことが課題となっています。こうした現状の背景には、当該分野が「男子の学問」という根強いステレオタイプに加え、従来の教材の多くが、男性の興味関心に偏っているという指摘があります。その結果、女子生徒が電気・機械系分野に親近感や興味を抱く機会が十分に提供されておらず、大学での進路選択以前の段階から当該分野を選択肢として認識しにくい状況が生じています。

本研究では、こうした教育アプローチの偏りの解消に向けて、女子生徒が工学技術を身近な自己実現や生活のツールとして捉え直すことで、工学分野への内発的動機付けを促進するワークショップを開発しました。まず、女子生徒に広く利用されているソーシャル・ネットワーキング・サービス（SNS）である TikTok に着目し、その表現手法や特性のうち、ワークショップ設計に応用可能な特徴を抽出しました。その知見を基に、図1に示す初心者向けロボットプログラミングワークショップを設計しました。さらに、他の工学系ワークショップへの展開も視野に入れ、先行研究と照らし合わせながら女子生徒の参加意欲や学習意欲を高める要因を整理し、設計指針としての一般化を図りました。開発したワークショップの効果については、女子中学生を対象に実践を行い、学習動機付けを評価する ARCS モデルに基づき、「注意」「関連性」「自信」「満足感」の4つの側面から評価してもらうことでその有効性を検証しました。

本ワークショップの実施結果として、ARCS モデルの全項目において事前・事後比較で評価値が向上し、統計的にも大きな効果量が確認されました。特に、「自信」の項目では4項目の中で最も大きな向上がみられました。これは、本取り組みが女子生徒の「自分にもできる」という認識を高め、工学分野に対する心理的なハードルの低減に寄与したことを示唆しています。女子のSTEM分野への参画促進においては、単なる知識や技能の習得にとどまらず、「自分にも取り組める」「適性がある」と実感できる自己効力感を育むことが重要です。女子生徒は失敗の原因を自身の能力不足に帰属させる傾向が強いことが報告されており、そのため成功体験の積み重ねや他者からの肯定的なフィードバックを得られる学習環境の構築が求められると考えられます。本研究での結果から、女子生徒の関心や価値観に寄り添った環境設計は、工学分野への関心の維持や主体的な参加を促進する上で重要な役割を果たす可能性が示されました。

今後は、本研究のような短期的介入が長期的な学習継続や進路選択に与える影響を追跡的に検証するとともに、得られた知見を電気系など他の工学分野へ展開していきます。さらに、既に電気・機械系分野へ進学した女子学生の動機形成や学習経験を分析することで、進路選択前後の両側面から女子のSTEM参画を促進する要因の解明を目指しています。



図1 初心者女子生徒向けロボットプログラミングワークショップ

## 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/>

「 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiO ヘテロ接合の結晶成長技術の開発とパワーデバイス応用」

酸化ガリウム ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) は、4.8 eV という広いバンドギャップと 8 MV/cm の高い絶縁破壊電界強度を有する超ワイドバンドギャップ半導体であり、SiC や GaN を上回るポテンシャルをもつ次世代パワーデバイス材料として注目されています。融液成長法により大型のバルク単結晶基板が得られる点も  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の利点であり、すでに様々な成長法によるエピタキシャル薄膜技術の開発が進められています [1]。

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワーデバイスは、ショットキーバリアダイオードや MESFET を中心に開発が進められ、高耐圧化や大電流動作が実証されています。より高耐圧・低損失なデバイスを実現するには pn 接合が望ましいですが、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は p 型伝導が困難であるという課題を抱えています。そこで、3.7 eV のバンドギャップを有し、p 型伝導を示す希少な酸化物半導体である NiO と  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を組み合わせたヘテロ接合 (NiO/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) により pn 接合を実現する研究が進められ、多結晶やアモルファスの NiO 層を用いて、高い耐圧や整流特性が実証されています。さらに、両材料の結晶構造の違いを踏まえた高品質なヘテロエピタキシャル成長を実現できれば、デバイス性能を一段と向上できると期待されることから、単結晶の NiO で  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> とヘテロ接合を形成する結晶成長技術の確立が重要な研究課題となっています。

本研究室では、真空を必要とせず低コストかつ大気圧下で成膜が可能なミスト CVD 法に着目し、単結晶  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上に NiO 層をエピタキシャル成長させることで、高品質と工業的な生産性を兼ね備えた NiO/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ヘテロ接合を形成するための結晶成長技術の確立に取り組んでいます。岩塩構造をもつ立方晶の NiO と単斜晶の  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では結晶構造が異なりますが、両者の結晶構造に応じた対応関係に従い、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の基板方位ごとに NiO が対応する方位関係でエピタキシャル成長すると考えられます。そこで、(100)、(010)、(001) などの基板面方位を中心に NiO のエピタキシャル成長を実現し、各面方位における結晶品質や配向関係を明らかにしてきました。その結果、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (100) 上には NiO (001) が、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) 上には NiO (1-10) が、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) 上には NiO (331) がそれぞれ成長することを見出しました [2]。これらはいずれも  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (100) [001] // NiO (001) [110] という共通の方位関係を満たしており、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を構成する酸素原子の配置を面心立方格子として捉えると妥当な対応関係であることが分かりました。この、NiO [001] と  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [110] が同じ方向を向くと仮定すると、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) 上の NiO (331) は正確には 0.6° 傾いていると計算され、逆格子マッピングによる観察においても実際に 0.6° の傾きが確認されたことから、この方位関係で成長していることが示しているといえます。

得られた知見をもとに、NiO/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ヘテロ接合を用いたデバイスの試作・評価にも着手しています。今後は、界面欠陥密度などを評価しながら、パワーデバイスの実用化に向けた結晶成長技術の指針を確立することを目指しています。

## 参考文献

- [1] K. Sasaki, *Appl. Phys. Express*, 17, 090101 (2024).  
 [2] 余野 他、第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (2026) 16a-W9\_324-8.

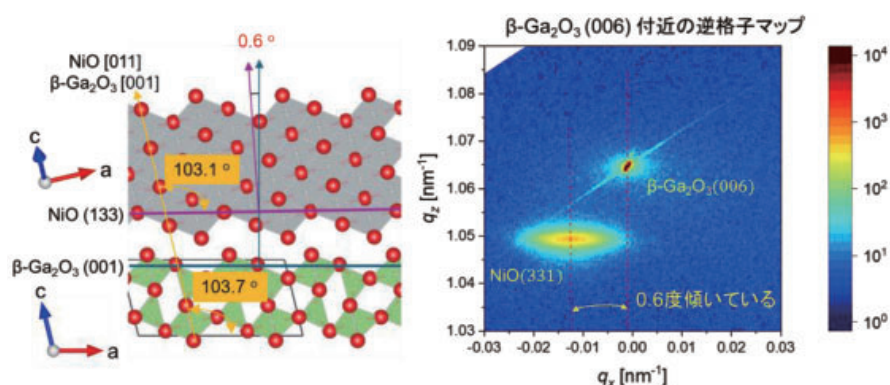


図1  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) 基板上の NiO のエピタキシャル方位関係の模式図(左)と  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (006) 周辺の逆格子マップ(右)

## 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/>

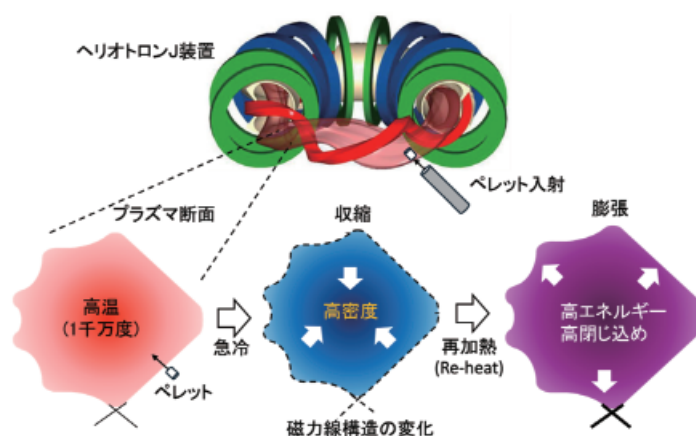
### 「急冷によるプラズマの閉じ込めの改善」

磁場閉じ込め核融合プラズマには、温度や密度が同程度であっても、閉じ込め特性が異なるさまざまな「状態」が存在します。装置が同じでも、閉じ込め特性が良い状態になればプラズマ温度は上昇し、より小さな加熱パワーで同じ温度を達成することも可能になります。実際には、熱が逃げやすい状態、粒子が逃げにくい状態など、多様な状態が知られています。一方で、いったんある状態にあるプラズマを別の状態へ移行させることは容易ではなく、多くの場合は強力な加熱が必要になります。もしプラズマの状態を自在に制御できれば、核融合に最も適した状態を狙って実現できる可能性があります。しかし、「なぜプラズマが特定の状態を選ぶのか」「どのようにすればその状態を変えられるのか」については、いまだ十分には解明されていません。そこで我々は、加熱パワーを増減する代わりに、「ペレット入射」によってヘリオトロンJプラズマの密度を急激に高め、プラズマ状態を変化させる実験を行っています。通常、プラズマの密度を高めるには水素ガスを注入し、それを電離して電子とイオンを生成します。これに対しペレット入射は、水素の氷粒（ペレット）をガスで高速に加速してプラズマに打ち込む技術であり、将来の核融合炉においては燃料供給やプラズマ内部の粒子制御の手段として期待されています。

今回の実験では、高温・低密度のヘリオトロンJプラズマにペレットを入射しました[1]。その結果、プラズマ密度は瞬時に約10倍まで増加し、核融合炉で想定される密度の約3分の1（1立法メートルあたり約 $3 \times 10^{19}$ 個）に達しました。高温プラズマ中に入射された氷のペレットは、固体から気体へ、さらに大量の「冷たいプラズマ」へと変化します。放射計測などの結果から、この冷たいプラズマは一旦プラズマ中心部に集まり、それに伴ってプラズマ全体が収縮した後、再び加熱されて膨張することが明らかになりました。興味深いことに、膨張が終わった後のプラズマの温度・密度分布は、ペレット入射前とは大きく異なっており、むしろペレット入射後の方が多くのエネルギーを保持していることが分かりました。さらに、ペレット入射によって「冷たく」なっているのは主として電子であり、イオンは逆に加熱されていることも明らかになりました。このような状態は、水素ガスを注入してゆっくり密度を上げた場合には得られないものであり、ペレット入射によってプラズマを新たな状態へ移行させることができたといえます。また、この過程では、プラズマを閉じ込める磁場の周辺構造にも急激な変化が生じていることが分かりました。これは、プラズマが閉じ込め磁場と相互作用しながら、自らの状態を形成していることを示唆しています。密度上昇によって粒子間衝突が増加し、その結果として温度・密度・磁場構造がより速く変化できるようになり、新しい状態への移行が可能になったのではないかと考えています。

この現象は、金属加工における「焼入れ」にもたとえることができます。金属は高温から急冷することで、ゆっくり冷やした場合とは異なる内部構造や性質を示します。同様に、プラズマも急激な変化を与えることで内部構造が変化し、別の状態へと移行すると考えられます。今回の研究は、プラズマの状態制御において、加熱だけでなく冷却も有効な手段となりうることを、さらに外部操作の時間変化の速さそのものが新しい制御パラメータになりうることを示しています。

プラズマを急冷すると閉じ込め特性の良い新しい状態が出現



[1] K. Ogihara et. al., Scientific Reports, DOI : 10.1038/s41598-025-00993-5.

## 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/>

### 「次世代半導体中の欠陥からの磁場による発光増強と単一光子発生」

インターネットに代表される古典的な光通信は、セキュリティの面において限界があることが指摘されている。これに対して、量子力学の原理に基づく光の粒子性（単一の光子）を利用した量子情報通信では、こうした根本的な限界を克服する可能性があり、より安全な次世代の通信技術として期待されています。近年、単層の遷移金属ダイカルコゲナイド（ $\text{MX}_2$ ;  $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$ ,  $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$ ）に代表されるわずかな原子数層の極めて薄い二次元半導体が、その優れた電気・光学的な特性から次世代半導体として大きな注目を集めている [1-3]。その中でも単層の二セレン化タングステン（ $\text{WSe}_2$ ）では、わずかな欠陥（材料の不完全性）を導入すると、光で生成された励起子（電子と正孔対）がその欠陥に束縛され、再結合で光を発する（発光）際に単一の光子のみを放出する。そのため、量子情報通信に不可欠な一個の光子のみを発する単一光子発生源として、大きな可能性を秘めている一方で、その単一の光子発生の効率をどのように上げるかが、将来の量子技術にとって極めて重要な課題となっている。

そこで我々は、単層の二セレン化タングステン（ $\text{WSe}_2$ ）を加熱することで、わずかな欠陥を導入した試料を作製した。これに対して、光で生成された電子とホール対（励起子）では、欠陥が導入されることで結晶の対称性が破れ、光学的に活性な「明るい励起子」と光学的に不活性な「暗い励起子」の二種類の状態が生じる。実際に約マイナス 265 度の極低温では、これら二種類の励起子から生じる二つの鋭い発光のピークが観測された。

ここで注目すべきは、一般的な半導体の光学実験で使用する磁場の 1/10 程度の磁石で 1 テスラ（10000 ガウス）以下の比較的弱い磁場を印加すると、明るく発光するようになることを見出した [1]。これはわずかな磁場でも、二つの励起子の状態が良く混ざり合う事に起因している。さらに、放出された光の統計性を確認するため、光子相関測定を行ったところ、光子一つ一つが放出される光子アンチバンチングが明確に示されました。これは、磁場下でも一つ一つの光子を発生させる単一光子源と働くこと、また、磁場によって単一光子発生の効率を上げることができることを示している。これにより、単一光子発生を制御する方法として磁場をかけるという、新たな指針を示すことができた。

本研究では、原子レベルの薄さの次世代半導体中の欠陥において、磁場を用いて発光の増大（明るくする）や単一光子発生の効率を上げる新しいアプローチを提示することに成功した [1]。本研究をきっかけとして、コンパクトかつ効率的な量子情報デバイスの実現に向けて、今後、動作温度の更なる向上は必要になりますが、将来の量子通信システムの有望なアプローチやプラットフォームとして利用しうることが期待されます。

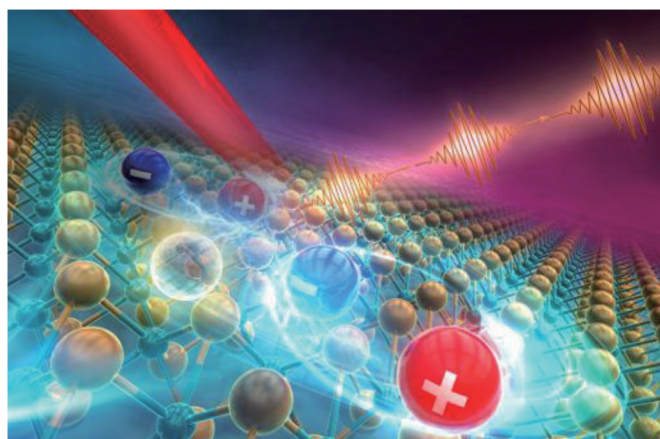


図1 磁場による二次元半導体中の欠陥からの発光増大と単一光子発生のイメージ

## 参考文献

- [1] Y. Xiang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Sci. Adv.* **11**, eadr5562 (2025).
- [2] H. Wang, H. Kim, D. Dong, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **15**, 4905 (2024).
- [3] S. Asada, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **16**, 4827 (2025).

# 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/](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/)

## 「赤道大気レーダーと音波を併用した気温の連続測定手法の開発」

赤道域は地表へ入射する太陽放射エネルギーを最も強く受ける領域で、地球大気の種類現象の駆動源であるが、その中でも特にインドネシア海洋大陸域では、太陽光による島嶼(とうしょ)の加熱と周辺の海洋からの水蒸気供給によって、地球上で最も対流活動が活発である。当研究室ではインドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar: EAR)(図1)を設置し、研究を行っている。EARは直径110mの敷地に560基の八木アンテナが設置されたアクティブ・フェーズドアレイ・システムの大型大気レーダーである。本稿では、大気レーダーと音波を併用して気温の高度プロファイルを測定するレーダー技術であるRadio Acoustic Sounding System(RASS)の開発について紹介する。

大気レーダーはパルス状の電波を送信し、大気乱流による屈折率変動からの電波散乱(エコー)を検出することで、鉛直流を含む風速3成分の高度プロファイルを観測する。RASSではレーダーの近傍から上空に向けて大音量を発射し、音波で人工的に屈折率変動を作り、これをレーダーのターゲットとする。レーダー近傍から発射された音波が大気中を伝搬する際に、音波波長スケールの周期的な大気密度の粗密(大気屈折率変動)が起こる。音波面からの後方散乱(RASSエコー)のドップラーシフトから音速( $C_s$ )が求まるが、 $C_s(\text{m/s})$ は気温  $T(\text{K})$ の平方根に比例する( $C_s = k\sqrt{T}$ )。ここで、比例係数  $k$  は比熱比と平均分子量で決まり、乾燥大気中で20.047となる定数である(ただし、水蒸気を含む湿潤大気中では  $k$  はわずかに変化する)。すなわち、RASSエコーを利用して音波パルスが通過する各高度における気温を測定することができる。

RASSエコーを検出するには、レーダー波長と音波波長の比が2対1となるブラッグ条件を満たし、さらにレーダーのアンテナビーム方向が音波面と直交する必要がある。音波面は基本的には同心球状に広がるが、上空ほど気温が下がり音速が遅くなるため、完全な球状とはならず、上下に押しつぶされた扁平楕円体状になる。また粗密波である音波は背景風の影響を受けるため、音波面は複雑に変化する。背景風を想定したレイトレーシングを行って、音波面とアンテナビームが直交する条件を求める必要がある。また、対流圏では気温が高度とともに減少するため、高度とともに音速が遅くなり、すなわち音波波長が短くなる。そのため、単一の音波周波数ではレーダー波長とのブラッグ条件を満たすのは特定の高度のみに限定される。そこで、気温測定高度範囲を十分にカバーする広い周波数を持つ音波を発射することで、その解決を図る。現在、PCでFMチャープ信号を生成することで、RASSエコーを広い高度範囲で観測することを可能としている。

赤道大気レーダーを用いたRASS観測では、高度10–20km程度までの気温を150mの分解能で、ラジオゾンデ観測に匹敵する0.2–0.5°C程度の精度で観測できる。しかも、測定間隔はラジオゾンデに比べて桁違いに短い1–2分であり、風速3成分の観測と併用して、短時間変動する気象現象の構造を明らかにできる。温度構造は大気物質の輸送や乱流拡散過程に大きな影響を与えている。特に熱帯域では、水蒸気やオゾンをはじめとする大気微量成分は高度15km付近に位置する対流圏界面を通して輸送されるが、その高度域における気温ならびに大気安定度(気温の高度勾配)の微細構造の連続測定が重要であり、赤道大気レーダー・RASSの開発が益々重要となる。



図1. 赤道大気レーダー (アンテナ直径110m)

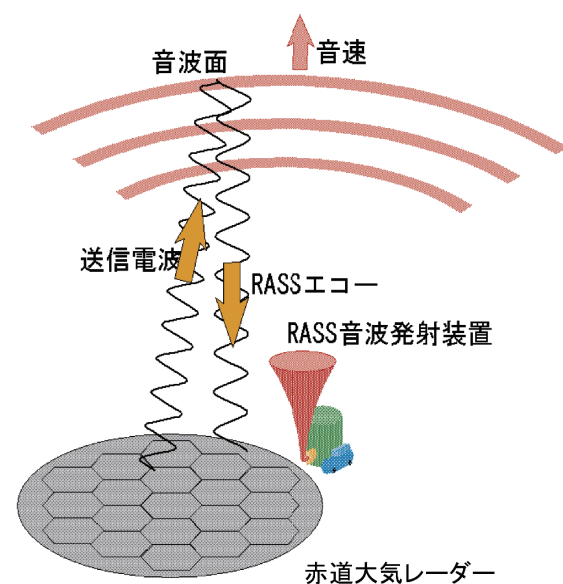


図2. RASS観測の原理

# 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/>

## 「木星イオン放射線帯における高エネルギー粒子加速メカニズム」

木星をはじめとする惑星磁気圏は、宇宙空間における高エネルギー粒子加速機構の普遍性を理解するうえで重要である。木星は太陽系最大の磁気圏を持ち、その内部には電子や陽子、重イオンからなる強い放射線帯が存在する。木星の固有磁場は極めて強く、GeVに達する高エネルギー陽子が木星磁場に捕捉されている可能性が観測的に示唆されているが、その加速機構は十分に解明されていない。木星周辺は放射線環境が厳しく、直接観測が困難であるため、数値シミュレーションによる研究が不可欠である。

本研究では、電磁イオンサイクロトロン波(EMIC波)と相対論的陽子の非線形相互作用に着目した。EMIC波はプラズマの中を伝搬する電磁波の一種であり、陽子とのサイクロトロン共鳴によりエネルギーを交換することができる。特に、高効率な加速が期待される「相対論的転向加速(Relativistic Turning Acceleration)」に注目し、数値シミュレーションを行った。その結果、旋回運動をしながら磁力線に沿って進む約200 MeVのエネルギーを持つ陽子がEMIC波と遭遇すると、非線形相互作用によって波に捕捉され、5秒以内という極めて短い時間で約8~10 GeVまで加速されることが明らかになった(図1)。この結果は、木星内部磁気圏において、EMIC波が陽子を短時間で相対論的エネルギーまで加速し得ることを示している。また、陽子がEMIC波に捕捉・加速される条件を、陽子エネルギー、ピッチ角(陽子と背景磁場のなす角)、EMIC波の周波数、木星からの距離の観点から調べた(図2)。その結果、木星近傍の領域では比較的広いエネルギー・ピッチ角の範囲で加速条件が満たされる一方、木星から離れるにつれてその条件を満たす領域が狭くなることが明らかになった。背景磁場の空間勾配や波の振幅が、粒子の捕捉と加速効率を決める上で重要なパラメータであることを示唆している<sup>[1]</sup>。

以上の結果は、木星磁気圏でのGeV陽子の生成において、EMIC波による非線形波動粒子相互作用が重要な役割を果たす可能性を示しており、木星放射線帯形成モデルに新たな視点を与えるものである。今後は、EMIC波の時間発展や波と粒子のエネルギー交換を自己無撞着に扱うシミュレーションに加え、木星磁気圏に豊富に存在する酸素イオンや硫黄イオンなどの重イオンの影響も取り入れる必要がある。これにより、木星放射線帯の形成過程を明らかにするとともに、地球や他惑星の磁気圏にも共通する高エネルギー粒子加速の普遍的な物理機構の解明を目指したい。

**参考文献：**[1] Sekine, T., Omura, Y., Summers, D., Hsieh, Y. - K., & Nakamura, S.. Particle acceleration in Jupiter's ion radiation belts by nonlinear wave trapping. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2023JA031879, 2024

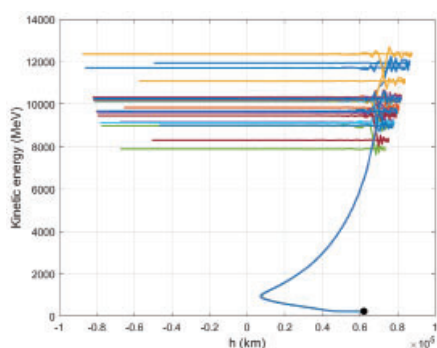


図1 EMIC波による陽子加速。横軸は距離、縦軸はエネルギーを示す。初期エネルギー約200 MeVの陽子が8 GeV以上まで加速されることを示す。[1]

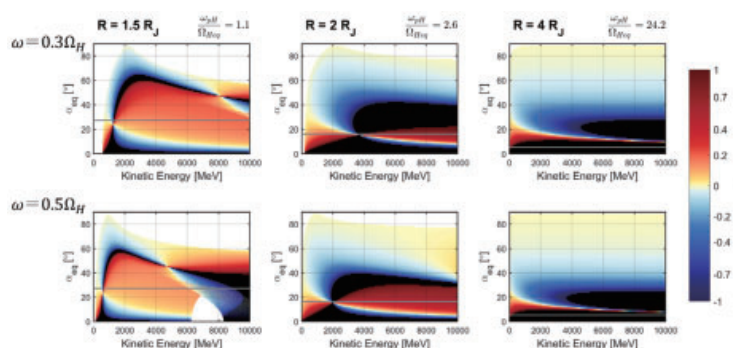


図2 陽子がEMIC波に捕捉される指標となるパラメータ(不均一性因子S)をピッチ角(縦軸)とエネルギー(横軸)の関数として示したもの。S値が0から1の範囲にあるとき、陽子は捕捉される。[1]

## 令和7年度修士論文テーマ紹介

### 工学研究科 電気工学専攻

廣 瀬 駿（薄教授）「クープマン・モデル予測制御の電力変換システムへの適用に関する研究」

本論文では、航空機内の電力変換系へクープマン・モデル予測制御（K-MPC）を適用し、その有効性を示した。具体的には、AC-DC コンバータに対する K-MPC の実機実装と、並列 AC-DC コンバータに対する航空機の仕様を考慮した K-MPC の数値的検討を行った。

吉 村 太 志（薄教授）「微分代数方程式系に対するクープマン作用素のスペクトルの性質の推定に関する研究」

本論文では、微分代数方程式で記述される非線形系に対するクープマン作用素のスペクトルの性質の推定について研究した。具体的には、拡張動的モード分解における基底関数の選択に代数方程式の構造を反映させる推定技法を提案し、物理モデルを通じてその有効性を示した。

本 渡 拓 海（萩原教授）「連続時間線形周期時変系の  $L_2/L_1$  および  $L_\infty/L_2$  ハンケルノルムと双対性」

連続時間線形周期時変系について、過去の入力から未来の出力への影響を定量的に評価する  $L_2/L_1$  および  $L_\infty/L_2$ （準）ハンケルノルムの解析や、入出力反転および時間反転を介した二種類の（準）ハンケルノルム同士の双対的な対応関係の導出など、理論的基礎を与えた。

徳 一 壮太郎（萩原教授）「出力むだ時間を考慮したサンプル値系の  $H_2$  ノルム解析および最適制御器設計」

出力むだ時間をもつサンプル値系におけるインパルス外乱の影響を評価するための2種類の  $H_2$  ノルムをリフティング表現を基に定義し、 $H_2$  ノルム解析の意味で等価な離散化制御対象を導出した。また、それを用いて  $H_2$  最適制御器設計を LMI に基づき行う方法について論じた。

土 井 瑛 介（萩原教授）「不均一な出力むだ時間をもつ系の状態推定」

不均一な出力むだ時間をもつ系について、同次元オブザーバと有限区間積分の適切な利用による状態推定機構を与え、それ自身や関連する閉ループ系の安定性を周波数領域での議論により示した。さらにルーエンバーガのオブザーバ利用時の同様の議論の可能性を示唆した。

林 汰 樹（萩原教授）「 $N_0$  上の確率系の安定解析と隠れマルコフモデルで動特性が定まる系へのその応用」

一般的な確率過程で動特性が定まる系を左有界な時間区間  $N_0$  上で導入して安定条件を導出したのち、分離原理が成り立つことを証明した。得られた結果を応用して、隠れマルコフモデルで動特性が定まる系の安定解析とゲインスケジュールド制御器設計を論じた。

南 部 佑太郎（萩原教授）「物理法則に基づくニューラルネットワークによる動的予測とモデル予測経路積分制御」

物理法則を用いたニューラルネットワークを用いて、システムの将来の状態を複数時刻において予測するモデルを構成する手法について論じ、同様に逆問題への応用についても論じた。そして、それらと

モデル予測経路積分制御を統合した手法について論じた。

#### 小 西 信 和 (阪本教授) 「スペクトル特徴量に基づく反射波選択・合成によるレーダ心拍計測の高精度化」

本研究では、アレーレーダを用いた心拍の非接触計測において、呼吸干渉の少ない反射波を心拍成分のスペクトル特徴に基づいて選択する手法を提案した。提案法は、基本波および高調波成分を用いて最適な信号を選択し、従来法より高精度な心拍間隔推定を実現した。

#### 下 村 昂 平 (阪本教授) 「心拍の高次高調波を用いたレーダ心拍計測の高精度化」

本研究では、呼吸高調波干渉を抑圧するため、心拍高調波に着目した非線形相関処理によるレーダ心拍推定法を提案した。提案法は、スペクトル周期構造を強調することで高精度な心拍間隔推定を実現し、複数被験者および複数レーダ実験により有効性を示した。

#### 長 田 尚 真 (阪本教授) 「ミリ波レーダによる速度空間分布を用いた統計的マイクロドップラー計測」

本研究では、ミリ波レーダを用いたマイクロドップラー解析において、空間的に分離した反射波のドップラー速度を統計的に統合することで、高精度のスペクトログラムを生成する手法を提案した。さらに複数レーダ統合により視点依存性を低減し、その有効性を実験により示した。

#### 橋 本 陸 (阪本教授) 「レーダによる近傍イメージングのための不規則アレーアンテナに対する窓関数の最適化」

本研究では、不規則 MIMO レーダアレイにおけるサイドローブ抑圧のための窓関数設計法を検討した。遠方界では Voronoi 補正を用いた窓関数設計法を提案し、近傍界では  $\omega$ -k アルゴリズムにおける窓関数適用位置を遺伝的アルゴリズムにより最適化することで、サイドローブ低減を実現した。

#### 長谷川 皓 大 (阪本教授) 「睡眠時無呼吸検出のためのレーダを用いた睡眠モニタリング技術」

本研究では、睡眠時無呼吸症候群診断に向けて、レーダにより取得した体動・呼吸・心拍特徴を用いた睡眠段階分類法を提案した。提案法は、体動特徴による覚醒判定と、生体信号特徴を統合した3段階分類を行い、高精度な総睡眠時間推定を実現した。

#### ポンパイリン ウォンプラサートクン (阪本教授) 「“Real-Time and Accurate Noncontact Monitoring of Respiration and Heartbeat Using Millimeter-Wave Radar” ミリ波レーダによる呼吸・心拍の非接触リアルタイム高精度モニタリング」

本研究では、ミリ波レーダを用いた呼吸・心拍のリアルタイム非接触計測のアルゴリズムについて、推定精度と計算時間の両立を実現する手法の探索および開発を行った。提案法は、リアルタイム応用に適した高速処理で十分な精度の生体信号推定を実現することを示した。

#### 植 松 空 雅 (吉井教授) 「光ポンピング磁気センサモジュールによる複数領域の生体磁場解析」

光ポンピング磁気センサモジュールを用いた複数部位生体磁気計測フレームワークを構築した。少チャンネルの記録から微弱な神経信号を抽出するため、独立低ランク行列解析を適用した結果、低 SNR 下でもノイズ分離性能が向上することを示した。

**齋 藤 駿 平 (吉井教授)「視覚・言語基盤モデルに基づく物語性を考慮した映像要約」**

動画を言語記述に変換する言語ボトルネックを用いた物語性重視の要約手法を提案した。大規模言語モデルが生成した文脈をショットの重要度推定に活用することで、共同適応モデルにおいて高い要約精度を達成し、一貫性のあるショット選択を実現した。

**坪 田 和 也 (吉井教授)「メッシュ・ガウシアン表現の同時最適化に基づく 4D 人体復元」**

3D Gaussian Splatting に人体の構造的事前知識を統合する 4D 再構成手法を提案した。ポーズの潜在表現を確率的に定式化することで、外観の再現性を保ちつつ、スパースな視点やノイズ下でも破綻の少ない安定した推定を実現した。

**西 川 泰 生 (雨宮教授)「交流電流条件でのスパイラル高温超伝導導体を対象とする保護特性解析手法の構築」**

スパイラル高温超伝導導体に交流電流を流した条件でのクエンチ特性を評価するための数値解析手法を構築した。自己及び相互インダクタンスを計算し、回路モデルに組み込むことにより電流分布の時間変化にインダクタンスが及ぼす影響を考慮できるようにした。

**佐 原 怜一郎 (久門特定教授)「遅延電磁結合を含む回路モデルに基づく平面状離散単導体線路の設計」**

遅延電磁結合を含む回路は電磁放射も表現可能な回路モデルであるが、そのプリント基板上への実装を可能にするために、平面状離散単導体線路を設計する手法を提案した。実験においては終端整合や分岐などの構造において、その有効性を確認した。

**伊 藤 寛 泰 (久門特定教授)「時変回路による伝送線路の整合終端における正弦波に対するエネルギー収穫」**

伝送線路の整合終端を時不変回路で実現した場合、入射エネルギーは散逸されるが、高速な時変回路の自由度を用いることにより、そのエネルギー収穫を実現する回路を提案した。実際にフルブリッジ回路により正弦波に対して 80%以上の収穫率を達成した。

**永 田 こゆき (松尾教授)「補助変数を用いた Darwin 近似モデルによる時間領域電磁界有限要素解析に関する研究」**

Darwin 近似モデルの時間領域有限要素解析について、時間発展スキームの確立のための検討を行った。補助変数を利用して 2 階時間微分項を消去し後退オイラー法を適用する方法を提案し、周波数領域計算と比較して妥当な計算結果が得られることを示した。

**大 西 恒 世 (松尾教授)「グレースケールフリーレベルセット法に基づく IPM モータのトポロジー最適化」**

グレースケールフリーなフェーズフィールドベースレベルセット法の IPM モータへの適用について検討を行った。初期値にほとんど依存することなく最適解が得られること、グレースケールフリー化により製造に適した明瞭な形状が得られることを示した。

**細 谷 陽 司 (松尾教授)「動的ヒステリシス特性のカウア回路表現への予測子修正子法の応用に関する研究」**

カウア回路を用いた動的ヒステリシス特性表現における回路方程式の解法として、ニュートン法に基

づく予測子修正子法を導入し、従来法より高精度な求解を実現した。その動的モデルを均質化法として要素毎に適用する有限要素磁界解析法を開発した。

#### 谷 口 太 郎（松尾教授）「磁束入力 CLN 法の誘導モータモデル縮約への適用に関する研究」

CLN 法を用いた誘導モータのモデル縮約において、固定子と回転子の接続ポートの入力として、磁束を用いる定式化手法を提案し、その特質を数理的に明らかにした。磁束入力 CLN 法の非線形化手法の開発など、モデルの拡張により非線形縮約手法の表現精度を改善した。

#### 中 田 雅 大（中村特定教授）「高温超伝導誘導同期モータの始動メカニズムに関する基礎検討」

最大出力 40 kW 級高温超伝導誘導同期モータを対象として、急激な始動指令に対して極めて安定であることを実験的に明確化した。また、非線形電圧方程式と運動方程式の連成解析によって、上記始動特性の定量的再現に成功し、始動電流を低減する電圧印加パターンを見出した。

#### 水 谷 匠（中村特定教授）「水素エンジン自動車搭載液化水素ポンプ用高温超伝導リニア誘導モータに関する研究」

レース用水素エンジン車の液体水素サブマージレシプロポンプへの適用を目的として、高温超伝導梯子型移動子巻線を有するリニア誘導モータの電磁界解析と試作を行った。最終的に、液体窒素中において高出力化を目指せる推力を実現することができた。

### 工学研究科 電子工学専攻

#### 長谷部 涼（米澤教授）「電界蒸発機構解明に向けた遷移金属窒化物薄膜の組成制御とアトムプローブ分析」

アトムプローブトモグラフィにおいて課題となっている窒素等軽元素の電離機構解明に向けて、窒素組成の異なる遷移金属窒化物薄膜を反応性スパッタ法により作製しそのアトムプローブ分析を行った。得られた結果を従来の電界蒸発理論を基に検討した。

#### 森 倫太郎（米澤教授）「ジョセフソンプラズマエミッタの構造最適化に向けた数値計算手法の開発と実デバイス作製」

高温超伝導体からなるテラヘルツ光源ジョセフソンエミッタの放射強度を上昇させるために、数値計算手法を開発し、その結果を再現するデバイス作製を試みた。LT-Spice を用いた回路モデルで特定された候補変数を得ることに成功した。一方、得られた変数の実デバイスへの変換が課題であることが分かった。

#### 渡 辺 岳 斗（米澤教授）「走査型磁気光学 Kerr 効果測定による MnTe の交替磁性ドメインの観測」

磁性物質表面からの反射に伴って光の偏光状態が変化する磁気光学カー効果の、高感度走査型測定を行うための装置開発を行った。完成した数  $\mu\text{rad}$  の磁気光学分解能と数  $\mu\text{m}$  の空間分解能を持つ装置を用い、「第三の磁性体」として注目される交替磁性体である MnTe の交替磁性ドメインの可視化に成功した。

# 大 西 基（白石教授）「水素終端ダイヤモンドにおけるスピン輸送の電氣的観測及び電場誘起スピン蓄積現象の光学的観測に向けた研究」

絶縁体であるダイヤモンドは、表面を水素終端化することで表面に2次元ホールガスが形成される。この反転対称性が破れた伝導層におけるスピン軌道相互作用を利用したスピン流の伝導特性および電場誘起スピン蓄積現象を、電気・光を用いた実験手法から研究した。

# 佐 藤 駿 輝（白石教授）「磁気弾性結合を介した表面弾性波の非相反伝搬に関する研究」

圧電基板に形成される表面弾性波は、その基板上に成膜された強磁性体薄膜に励起されるスピン波と結合し非相反性を示すようになる。この結合機構として磁性体における磁気弾性結合定数と構造対称性による禁則から実験で得られた非相反性について議論した。

# 永 田 歌 寧（白石教授）「鉄系超伝導体における超伝導ダイオード効果および非線型整流効果の観測」

時間反転対称性を破る外部磁場や磁化を要しない超伝導ダイオード効果を鉄系超伝導体で観測し、その起源について明らかにした。また、磁場・電流による応答を精密に測定することで、磁場に依存した非線型な整流効果成分が存在することを見出し、その起源についても議論した。

# 干 谷 健 太（白石教授）「Pt 薄膜のスピン軌道相互作用を利用した Nb/Py/Nb 接合におけるスピン三重項クーパー対生成に向けた研究」

強磁性体への超伝導状態の近接効果とスピン軌道相互作用の存在を利用したスピン三重項クーパー対の形成について、強磁性体を挟むジョセフソン接合において強いスピン軌道相互作用を有する Pt を導入することによるジョセフソン電流の変化を評価しスピン三重項クーパー対の存在について議論した。

# 松 本 凌 芽（白石教授）「Si における軌道ホール効果の研究」

軌道ホール効果と呼ばれる電界誘起の軌道角運動量の流れ（軌道流）の生成について、Si 半導体を用いて研究した。強磁性体/Si の2層構造において、軌道流による磁化へのトルクを観測し、強磁性体・Si の膜厚依存性などからそのトルクの起源について議論した。

# 後 藤 啓 文（竹内教授）「オンチップリング共振器から発生した多周波数モードもつれ光子対の評価」

本研究では、マイクロリング共振器から発生する周波数モードもつれ光子対の「量子もつれ」の定量的な評価に取り組んだ。時間領域で提案されていた効率的なもつれ評価法を周波数もつれ状態に対して実装、2モード間から5モード間までのそれぞれの量子もつれ（Entanglement of Formation の下限値）を評価、いずれの量子状態も、量子もつれを有することを実証した。

# 坂 本 健 伍（竹内教授）「高効率単一光子源に向けた大口径ナノ光ファイバ共振器の研究」

本研究では、高効率単一光子源の実現に向けて、冷却過程において破断しにくい大口径ナノ光ファイバ共振器（NFBC）の設計、作製に取り組んだ。FDTD法を用いた電磁場解析により、ファイバ径500nmのNFBCにおいて、微小発光体との結合効率が80%を超えることを確認した。さらに、ガリウムイオン収束ビームを用いて、設計波長における共振を示すNFBCの作製に成功した。

# 鈴 木 大 寛（竹内教授）「スラブ導波路型チャープ擬似位相整合素子による超広帯域もつれ光子対生成」

本研究では、スラブ導波路型チャープ擬似位相整合素子を用いた超広帯域なもつれ光子対生成に取り

組んだ。セグメント数 50、チャープ率 6.7% のスラブ導波路型チャープ擬似位相整合素子を用いた、もつれ光子対生成に成功し、半値全幅 258.5nm、10% 幅 477nm の平滑な光子対スペクトルを確認した。

#### 山 岡 寛 (竹内教授) 「周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を用いた高強度パラメトリック下方変換光の生成」

本研究では、二光子顕微鏡への応用に向け、高強度のパラメトリック下方変換光の発生と 2 次のコヒーレンス度  $g^{(2)}(0)$  の評価を行った。周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を用いて発生した PDC 光の和周波スペクトルを測定することで、850W を超える高強度領域においても  $g^{(2)}(0)$  が 2 を上回るスーパーサーマル光が実現可能であることを実証した。

#### 伊 東 遼 馬 (木本教授) 「カウンタードープによる SiC p チャネル MOSFET のしきい値電圧低減と低電圧動作 CMOS の実現」

SiC は低損失パワーデバイスや耐環境動作集積回路用半導体として有望である。集積回路の基本構成は Si と同様に相補型 MOS 素子 (CMOS) であるが、従来、SiC では p チャネル素子に関する知見が著しく欠如していた。本研究では SiC 表面近傍にカウンタードープを施すことによって p チャネル MOSFET のしきい値電圧を低減し、SiC CMOS の 5V での高温動作を初めて実証した。

#### 白 石 健 (木本教授) 「高温動作不揮発性メモリ実現に向けた SiC 上 AIBN 強誘電体膜の高品質化と分極特性評価」

SiC を用いた高温動作集積回路の実現には、高温で安定に動作する不揮発性メモリも必須となる。Si 集積回路で用いられるフラッシュメモリは高温動作に適さないので、本研究では極めて高いキュリー温度を有する強誘電体である AIBN に注目した。SiC 上に AIBN 薄膜を堆積し、その結晶性と強誘電特性の相関を実験的に明らかにした。

#### 吉 田 達 紀 (木本教授) 「SiC/SiO<sub>2</sub> 構造における高電界トンネル電流に関する研究」

SiC 素子は Si に比べて約一桁高い電界でも動作するため、特に SiC MOSFET では酸化膜の絶縁破壊が問題となりうる。本研究では、様々な膜厚を有する酸化膜を SiC 上に形成し、高電界印加時の電流密度を広い温度範囲で評価、解析した。Si の場合と同様の FN トンネル電流が支配的であるものの、酸化膜中の電子有効質量が Si 酸化膜の場合と異なるという知見を得た。

#### 築 島 琢 磨 (小林准教授) 「液中原子間力顕微鏡単一分子修飾探針のための DNA ナノ四面体作製および機械的特性評価」

DNA ナノ四面体を用いた液中原子間力顕微鏡用単一分子修飾探針の実現に向け、DNA ナノ四面体の作製、精製の方法を検討し、フォースカーブ測定により弾性および剛性を評価した。その結果、原子間力顕微鏡の探針として十分な強度を有していることを示した。

#### 李 碩 磊 (小林准教授) 「探針増強ラマン分光用カンチレバー探針の作製と性能評価」

カンチレバー探針に真空蒸着法および DC スパッタリング法を用いて Au 薄膜を堆積し、探針増強ラマン分光 (TERS) 用探針を作製した。自己組織化単分子膜を対象に TERS スペクトル測定を行い、強い TERS 散乱光を得るために最適な成膜条件を見出した。

井 上 悠 月（船戸特定教授）「マクロステップを利用した選択的電流注入構造を持つ高 Al 組成 AlGa<sub>0.9</sub>N LED の試作」

高 Al 組成 AlGa<sub>0.9</sub>N の表面に現れる分子ステップ束（マクロステップ）の上では、Al 組成が小さくなるため、局在発光中心やそこへの選択的電流注入構造の形成が可能となる。実際の LED 構造への応用に向け、不純物添加など様々な環境での結晶成長において、マクロステップ構造が維持される条件を見出した。

小 野 太 暉（船戸特定教授）「エピタキシャル波長集積型マイクロ LED ディスプレイに向けた InGa<sub>0.9</sub>N 系フルカラー多面体 LED 構造の試作」

マイクロ LED ディスプレイは次世代の情報表示機器として期待されているが、微小 LED を製造後工程で高精度に集積することは困難である。本研究では、InGa<sub>0.9</sub>N 量子井戸の発光波長が結晶面方位に依存する特性を利用し、三次元構造上での結晶成長によって、RGB 各色の LED を一体的に集積することに成功した。

上 谷 祐 貴（船戸特定教授）「ScAlMgO<sub>4</sub> 基板上フルコヒーレント InGa<sub>0.9</sub>N 赤色 LED を目指した Mg 添加 (In, Ga) N 層の作製と評価」

ScAlMgO<sub>4</sub> 基板上の格子整合 In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N 系 LED は可視長波長発光素子として有望であるが、LED 化する際には p 型 In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N の作製が困難である。ここでは、Ga<sub>0.9</sub>N から徐々に In 組成を高めながら p 型不純物添加を試み、結晶成長の条件を検討して In 組成 6% までの p 型伝導を実現した。

高 濱 章 年（船戸特定教授）「InGa<sub>0.9</sub>N 系マイクロ構造による所望のスペクトル合成に向けた発光特性評価と構造設計手法の提案」

三次元マイクロ構造上での InGa<sub>0.9</sub>N 発光色は、構造表面の結晶傾斜に応じて変化する。自在なスペクトル合成を実現するため、さまざまな傾斜面上 InGa<sub>0.9</sub>N の発光スペクトルを収集してデータベース化し、三次元構造の作製容易性も考慮したうえで、最適な構造形状を導出するための設計手法を提案した。

北 村 篤 史（浅野特定教授）「Ga<sub>0.9</sub>N 系フォトリック結晶レーザーの面積拡大と高ビーム品質化に関する研究」

Ga<sub>0.9</sub>N 系フォトリック結晶レーザーの高ビーム品質を維持しつつ出射面積を拡大するためのデバイス設計・作製を行った。活性層中央部の電流密度を高める n 側円環電極構造を導入した結果、直径 1200  $\mu$ m デバイスにおいてビーム拡がり角 0.048 度の高ビーム品質動作を実証した。

柴 田 悠 樹（浅野特定教授）「短パルスフォトリック結晶レーザーへの分割電極導入による高出力振幅変調動作の実現に関する研究」

衛星間光通信への応用を見据えて、高速振幅変調動作を実現するための新たな光源構造として、分割電極短パルスフォトリック結晶レーザーを提案した。動作周波数 1 GHz において、数十 W 級のピーク出力で、低振幅なパルス電流に応じた振幅変調動作を実現できることを示した。

八 木 雄 大（浅野特定教授）「多点出射変調フォトリック結晶レーザーと単一光子検出器アレイを用いたオールチップ 3 次元 LiDAR の開発」

任意の出射方向に多点同時出射が可能な変調フォトリック結晶レーザーアレイと二次元 SPAD アレイを用いたオールチップ LiDAR を構築した。SPAD アレイへのマイクロレンズの導入や、大電流駆動

回路の使用などにより、受光効率および光出力を向上し、70 m 級の測距を実現した。

#### 相 田 晃太郎（杉山准教授）「磁性体メタマテリアルを用いた人工移動媒質の実証と理論解析」

磁性体ブロックを反磁性配置で接合したメタマテリアルを用いることで、運動する媒質中における電磁波伝搬効果を実現する方法を提案した。電磁界計算によって、この移動媒質効果の発生原理を明らかにした上で、フェライト磁石からなるメタマテリアルで移動媒質効果を実験実証した。

#### 榎 本 隆 大（杉山准教授）「3次元に冷却された単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 時計遷移分光」

磁場に鈍感な時計遷移をもつ  $^{171}\text{Yb}^+$  を1個だけ捕捉し、3次元とも、永年運動を冷却するとともにマイクロ運動を最小化した。標記時計遷移の単一イオン分光から、運動によるサイドバンドがキャリアスペクトルよりも小さいことを確認した。温度に換算して5 mK 以下に冷却されている。

### 光・電子理工学教育研究センター

#### 奥 田 功太郎（Menaka 教授）「フォトニック結晶レーザーの表面電極下部への非放射領域導入による遮蔽損失低減の実証」

非エルミート結合係数の局所変調により表面電極下部へ非放射領域を導入する新たな設計指針に基づき、大面積フォトニック結晶レーザーにおける電極遮蔽損失の低減を実証した。数値解析と実験の双方により、ビーム品質を維持したまま、電極遮蔽率に相当するスロープ効率および光出力の向上が得られることを示した。

#### 古 賀 翔 大（Menaka 教授）「フォトニック結晶レーザーと固体結晶の融合による超小型高出力短パルスレーザーの提案と解析」

フォトニック結晶レーザーと、希土類元素等を添加した固体結晶素子とを一体的に融合した、超小型高出力短パルスレーザーを提案した。本構造に対し、熱・光等の相互作用を考慮した包括的な解析・設計手法を確立した。これを用いて、大きさ数 cm 角以下の小型デバイスでありながら、ピーク出力1 MW・パルスエネルギー0.5 mJ 以上の高出力動作が可能な光源構造を設計した。

#### 金 坂 知 樹（Menaka 教授）「エルミート・非エルミート結合制御に基づくビーム変換2次元フォトニック結晶の設計と作製」

フォトニック結晶の光伝搬制御を活用することにより、入射レーザー光の偏光・出射方向・強度分布を制御できるビーム変換フォトニック結晶を提案した。また、提案したビーム変換フォトニック結晶の具体的な格子点構造を設計し、設計したデバイスの作製と評価を行うことにより、偏光・出射方向のビーム変換動作を実現した。

#### 松 田 卓 大（Menaka 教授）「熱光学効果およびキャリアプラズマ効果を用いた2次元フォトニック結晶ナノ共振器の波長制御の高効率化」

共振器の低速波長制御の高効率化を目指して、共振器を局所的に加熱する手法としてシリコン抵抗体マイクロヒータの導入を提案した。理論検討および実験の両面からこの手法の有効性を検証し、従来の金属マイクロヒータと比較して大幅な省電力化と独立制御性の向上を実証した。また、共振器の高速波長制御の高効率化を目指して、カウンタードーピング領域を導入した p-i-n 構造を検討した。理論検討でこの手法の有効性を確認し、その後デバイスの作製・評価に取り組んだ。

## 情報学研究科 知能情報学コース

### 傅 星 児 (Chu 准教授) 「LlmMT+1: Enhancing Large Language Model-based Machine Translation for a Non-dominant Language Pair」

本研究では、LLM ベース機械翻訳における非主要言語ペアの性能向上を目的として、学習手法 LlmMT+1 を提案した。対象言語の事前学習状況に応じて複数の訓練戦略を適応的に組み合わせることで、2 種類の LLM において 6 つの非主要言語ペアで一貫した性能改善を実現した。

### 武 並 佳 輝 (Chu 准教授) 「LLM におけるアンカリング効果：発現の包括的な検証と機械論的理解および軽減」

本研究では、交渉タスクにおける LLM の安全性を向上させるため、認知バイアスの一種であるアンカリング効果の研究を行った。LLM が人間と同様にアンカリング効果を示すことを明らかにし、アテンションへの介入や可視化によって、機械論的理解を与えると同時に軽減手法を提案した。

### 鐘 承 志 (Chu 准教授) 「Representation-Level Interpretation of Multilinguality in Large Language Models」

本研究では、多言語大規模言語モデルの内部表現を分析し、出力言語の切り替えに関わる言語特有表現を次元レベルで解釈した。また、少量データを用いた訓練不要な手法により、言語特有次元を同定し介入することで、意味内容を保持したまま出力言語を制御可能であることを示した。

### 山 本 有 起 (村脇准教授) 「心理測定テストに関する LLM のメタ知識の検証」

本研究では、LLM に心理測定テストを受けさせて性格指示追従能力を測る際に、学習データに含まれる心理測定テスト自体に関する議論（メタ知識）が結果に与える影響を調査した。メタ知識を抑制する追加学習が性格指示追従能力を減じさせることがわかった。

### 窪 田 瑛 拓 (西野教授) 「卓球における戦略的試合展開のための返球軌道の指示」

本研究では、卓球の試合を対象に、試合状況に応じた選手の戦略的行動を確率的に予測し、その行動から習熟度を定量化する手法を提案した。戦略的行動の生成モデルと選手埋め込みを学習することで、選手特性の表現獲得とそれに基づく習熟度の評価を実現した。

### 郷 田 凌 大 (櫻田准教授) 「三次元基盤モデルを用いた異なる時刻・視点の観測に基づくインペインティング」

本研究では、異なる時刻・視点で撮影された画像を用いて各画像の欠損領域を補完する手法を提案した。三次元基盤モデルにより得られるシーン構造を活用し、相互投影と拡散モデルを組み合わせることで、幾何的・照明的整合性を保ったインペインティングを実現した。

### 平 位 良 介 (西野教授) 「疎な視点からの観測による物体の動きを手掛かりとした三次元復元」

本研究では、少数の固定カメラによる疎な視点の観測から、物体の動きを利用して精緻な三次元形状を復元する手法を提案した。観測される剛体運動を、二次元ガウス表現を介した動きと形状の同時推定問題に帰着させて最適化し、高精度な形状復元を実現した。

### 吉 井 信 雄（西野教授）「単一画像からのテクスチャを含む複数物体の反射特性と共通光源の確率的推定」

本研究では、複数物体が写る一枚の画像から、各物体のテクスチャを含む反射特性と周囲光源環境を確率的に推定する手法を提案した。複数物体の相補的な反射情報を活用することで、共通の光源環境と各物体のテクスチャ・反射特性の整合的な同時推定を実現した。

### 和 田 典 佳（西野教授）「複数素材からなる物体の動画からの素材推定」

本研究では、花に代表される複数素材からなる物体の動画から、素材領域と力学パラメータを推定する手法を提案した。Gaussian Splatting と連続体力学シミュレーションに基づき、これらを観測のみから同時に推定し、物体の変形や運動の予測を実現した。

## 情報学研究科 通信情報システムコース

### 鳴 川 偉 仁（原田教授）「疑似干渉信号生成機構によるマルチセル移動通信システムエミュレータ」

基地局が複数存在するマルチセル環境における干渉模擬手法を提案し、オープンソース型 5G プラットフォームである OpenAirInterface をベースに 5G のダウンリンク通信におけるマルチセル干渉評価エミュレータを開発した。提案手法および開発エミュレータを計算機シミュレーション、仮想空間上におけるエミュレーションおよびソフトウェア無線機によるエミュレーションによって評価を実施し、その妥当性を示した。

### 王 一 帆（原田教授）「A Software-Defined Radio-Based Physical-Layer Experimental Platform for IEEE 802.11ad Wireless Local Area Network（ソフトウェア無線を用いた IEEE 802.11ad ミリ波無線 LAN 信号の物理層伝送実験プラットフォーム）」

IEEE 802.11ad ミリ波無線 LAN システムの物理層伝送性能を評価するためのソフトウェア無線物理層伝送試験プラットフォームを提案した。このプラットフォームを用いて、マルチパス環境における信号検出、同期、チャネル推定、およびキャリア周波数オフセット補償手法を検討し、強いマルチパス条件下および IEEE 802.11ad で規定される最大周波数オフセット下においても、要求されるパケット誤り率を達成可能であることを実証した。

### 上 森 智 史（原田教授）「5G サイドリンクを用いた端末間ミリ波無線ネットワークにおける高信頼制御信号伝送方式」

5G サイドリンクを導入した端末間ミリ波ネットワークにおいて、低 SNR 環境下でも確実に制御信号を受信可能にする高信頼伝送方式を開発した。同期信号を周波数領域で拡張する新フォーマットと、時間方向の平均化で雑音を抑圧するチャネル推定手法を提案し、計算機シミュレーションおよび実機検証を通してその有効性を実証した。

### 川 淵 悟 郎（原田教授）「耐干渉・長距離移動通信に向けた OFDM 変調による IoT 用無線通信方式」

次世代 IoT ネットワークの広域化に向け、既存の Wi-SUN FAN 規格との互換性を維持しつつ、通信距離を大幅に拡張する新たな物理層伝送方式を提案した。OFDM のサブキャリア 1 本分を用いる方式に周波数ホッピングと時間領域拡散を組み合わせることで、干渉耐性と受信感度の向上を両立させた。計算機シミュレーションにより、長距離伝送が可能であることを示すとともに、ソフトウェア無線機を

用いた実機実験において、その有効性を実証した。

**下 村 真 輝（原田教授）「5G サイドリンク信号を用いた高信頼 V2X 端末間リレー通信プロトコル」**

交差点における V2X (Vehicle-to-Everything) 通信に関して、5G サイドリンク信号を基盤としたリレー通信プロトコルを提案した。交差点環境を模擬したシミュレーションにより、本提案方式を適用することで、通信リソースの制約下においても高信頼な情報共有を維持できることを明らかにした。さらに、提案プロトコルを搭載した無線機を開発し、屋外での伝送実験を実施することで、提案プロトコルが実環境においても有効に機能することを実証した。

**中 上 拓 磨（原田教授）「V2X マルチホップ無線ネットワークにおける経路構築法とリソース割当法」**

車とあらゆるモノを繋げる技術である V2X (Vehicle-to-Everything) 通信に関して、高信頼な車両間通信の実現を目的とし、各ノード間の過去の通信成否を新たなメトリックとして追加した経路構築法と通信時の干渉を低減するリソース割当法を開発した。高速道路環境と交差点環境において計算機シミュレーションによる伝送評価を実施し、提案手法により通信の信頼性が大幅に向上することを示した。

**小 田 雅 貴（大木教授）「Consistency-Aware Multi-Server Network Design for Delay-Sensitive Applications under Failures」(遅延に敏感なアプリケーションに向けた一貫性を考慮した故障対応マルチサーバネットワーク設計)**

本論文は、遅延に敏感なアプリケーション向けの、データの一貫性を考慮した単一サーバ故障対応の予防的最適 (PSO: preventive start-time optimization) 分散サーバ割り当てモデルを提案した。

**相 良 陽 太（大木教授）「Mitigation of Intra-band Crosstalk Effects on Optical Filter Estimation Using Digital Longitudinal Monitoring」(Digital Longitudinal Monitoring を用いた光フィルタ推定に対する帯域内クロストーク効果の低減)**

本論文は、波長選択スイッチにおける帯域内クロストークがデジタル長手方向モニタリングによる光フィルタ応答推定に与える影響を評価し、他ポートの光フィルタ特性推定への応用可能性を示した。

**谷 口 諒太郎（大木教授）「Design of Optical Circuit Switching Networks for Expandable Data Centers」(拡張可能なデータセンタ向け光回線交換ネットワークの設計)**

本論文は、電気パケットスイッチと比べて、大容量、低遅延、低消費電力の通信を可能とする光回線スイッチを用いたネットワークの設計モデルを提案した。

**中 島 芽 意（大木教授）「Link Weight Optimization Adopting Traffic-Engineering Links」(トラフィックエンジニアリングリンクを採用したリンク重み最適化)**

本論文は、単一物理リンク故障に対応するための予防的開始時最適化に基づいて、トラフィックエンジニアリングリンクを用いたネットワーク混雑率を最小化するモデルを提案した。

**前 田 将 希（大木教授）「Design of Survivable Entanglement Path Provisioning under Failures in Quantum Networks」(量子ネットワークにおける故障下での生存性を考慮した経路選択手法の設計)**

本論文は、リンクの伝搬成功確率と、ノードのスワッピング成功確率を考慮し、複数のリンク非共有パスを見つけることで、高い通信の生存性を実現する経路選択手法を提案した。

**Cai Enhuai (大木教授) 「Unavailability-Aware Resource Allocation under Multiple Failures in Cloud」  
(クラウド環境における複数障害時の可用性を考慮したリソース割り当て)**

本論文は、ベアメタル、仮想化、およびコンテナクラスタ環境における多重障害条件下で可用性低下を評価し、保護リソースを割り当てるための定量モデルを提案した。

**Chenhao Chang (大木教授) 「Subsystem-Modular Optical Cross-Connect Architecture with Unidirectional Intra-Node Connections」**

本論文は、サブシステムモジュール型光クロスコネクタにおいて、ノード内接続を簡素化することで冗長なノード内ファイバを削減し、サブシステムのポート利用効率を高める光ネットワーク設計モデルおよび経路波長割当手法を提案した。

**宇都宮 優巳 (佐藤教授) 「MOSFET のリーク電流ばらつきを利用した低消費電力エコステートネットワークの回路設計」**

エッジにおける低消費電力な時系列情報処理の実現に向けて、MOSFET のリーク電流を演算に利用するハードウェア LMESN を提案した。22 nm 試作チップを用いた実機評価と回路シミュレーションに基づく評価により、オン電流を用いる従来型 ESN と同等の推論精度を維持しながら、消費電力を約 90% 削減できることを示した。

**永 井 寿 弥 (佐藤教授) 「論理・整数演算を含む秘匿関数評価の高効率化に向けた TFHE-CLPX 暗号間相互変換アルゴリズム」**

非線形演算に適した準同型暗号方式 TFHE と、高精度な整数演算に適した準同型暗号 CLPX を双方向に切替える Scheme Switching 手法を提案した。64 ビット以上の数値演算において TFHE 単独実装を上回る性能を達成し、両方式を適切に切り替えることでより広範な秘匿演算を高速に実現可能であることを示した。

**名 執 凌 磨 (栗野准教授) 「Wi-Fi ビームフォーミングフィードバック行列を用いた非接触センシングによる日常的な刺激により誘発される感情の推定手法」**

ストレス状態の把握には従来、医師による診断やアンケートが用いられてきたが、専門人材への依存や主観性が課題となっている。本研究では、Wi-Fi 通信で送信される Compressed Beamforming Feedback Matrix (CBFM) を利用し、呼吸に起因する信号変動から日常的な感情状態を非接触で推定する手法を検討した。

**川 上 拓 真 (栗野准教授) 「バルク CMOS トランジスタの極低温におけるランダムテレグラフノイズの統計的評価」**

極低温環境下における MOSFET のランダムテレグラフノイズ (RTN) の統計的挙動を評価した。65nm および 22nm プロセスでトランジスタアレイを作製し室温から 4K までの広範な温度領域で測定を行った。RTN 振幅や時定数には温度依存性が見られる一方で、温度変化よりも欠陥の空間的配置に起因する個体差の影響が支配的であることを明らかにし、極低温動作 LSI の信頼性設計に有用な知見を示した。

**大 原 若 泰（栗野准教授）「誤り耐性量子コンピュータのための CMOS 布線論理による完全グラフの全探索に基づく表面符号デコーダ」**

量子コンピュータの実用化に向けては、量子ビットの誤り率低減が重要な課題である。本研究では、表面符号向けデコーダにおける重みデータを組み合わせ回路として埋め込む布線論理アーキテクチャを提案し、メモリアクセスによる性能ボトルネックを解消した。さらに、重みの量子化による回路最適化を行い、復号性能、速度を評価した。

**北 池 弘 明（新津教授）「自己給電型血糖値測定のための電源・データー一体による極低電力電源電圧デジタル変換回路」**

IoT デバイスの小型化により、体内センサーでは電池や発振器の搭載が難しい。本研究では血糖モニタリング用コンタクトレンズ向けに、涙液中の糖分エネルギーを利用し、安定電源なしで動作する超低消費電力システムを提案した。2bit Flash 型と 3bit Binary-Search 型変換器を 22nm CMOS で実装し、pW 級動作を確認した。

**田 川 宏 紀（新津教授）「SRAM ベースイジングマシンを用いた高速・高精度な基底状態反復探索システム」**

組合せ最適化問題の高速・低電力解決に向け、CMOS イジングマシンに着目した。本研究では、演算結果を保持したまま確率的にスピン反転できる SRAM ベースイジングマシンと探索手法を提案。22nm CMOS シミュレーションにより、40% 反転率の有効性、解精度向上、スピンあたり 1.39pJ の高効率動作を確認した。

**Yuhao Wang（橋本教授）「A Compact Triaxial Hall Sensor Compatible with Standard CMOS Process Leveraging Horizontal and Vertical Current Flow within Deep N-Well」  
（ディープ N ウェル内の水平・垂直電流を活用した標準 CMOS プロセスによる小型三軸ホールセンサ）**

三軸ホールセンサは磁界の方向検出に有用であるが、従来構造では軸間干渉の最小化と小型化の両立が困難であった。本研究ではディープ N ウェル内で水平・垂直の両電流経路からホール電圧を生成する小型センサ構造を提案し、感度 967.5mV/T、軸間干渉 0.01% 未満を達成した。

**定 良 祐（橋本教授）「時系列磁気計測データを用いた鉄筋コンクリート内埋設センサの最尤位置推定」**

埋設センサで鉄筋コンクリートの劣化を診断する構想では、埋設後のセンサの位置把握が診断の前提となる。本研究では走行車両が生成する磁界をセンサで計測し、各時刻の推定結果を信頼度で重み付けする最尤位置推定手法を提案、位置推定誤差を従来比 23 ~ 43% 削減した。

**前 河 有 紀（橋本教授）「損失媒質内で動作可能な小体積無線センサの開発と複数センサ位置トラッキングシステムの構築」**

既存の 3D モデリング手法は高度な専門性を要するという課題がある。本研究は粘土内のトラックの位置から形状を容易に 3D モデル化可能なモデリングシステム実現に向け、損失媒質内で無線給電と無線通信が可能な 10mm 角トラックと、それらの同時位置追跡システムを実現した。

**Cai Biesinger (橋本教授) 「Improving Latency and Resolution while Reducing Noise in Real-Time Frequency-Domain Sound Analysis and Visualization via Sidelobe-Cancelling FIR Filter Bank」 (サイドローブ抑圧 FIR フィルタバンクによる実時間音響周波数解析と可視化の低遅延・高分解能化および低雑音化)**

実時間音響解析に向け、高分解能・低遅延とノイズ抑制を両立する FIR フィルタバンクを提案した。窓関数なしでサイドローブを抑え、FFT 比で遅延を 5～8 割削減しつつ高分解能・低雑音化を達成した。ソフトウェアと低電力ハードウェア実装で有効性を実証した。

**森 田 光 陽 (橋本教授) 「ユーザーアクセス不可なキャッシュへの故障注入の実現による商用組込みプロセッサ向けソフトウェア発生率推定の精度向上」**

市販組込みプロセッサは内部構造が非公開なため、面積の大部分を占めるキャッシュのソフトウェア評価が困難である。本研究ではメモリへの故障注入とキャッシュ挙動分析を組み合わせ、実機のみで直接アクセス不可なキャッシュのエラー発生率を推定する手法を提案し、推定誤差を平均 84% 削減した。

**安 田 隆 一 (橋本教授) 「複数の SRAM セルを対象としたデバイスシミュレーションによる宇宙線起因複数ビット反転解析」**

SRAM の複数ビット反転 (MCU) 評価において、従来の単一セル解析では隣接セル間の相互作用を再現できない。本研究では複数セルを含むテクノロジー CAD モデルと機械学習を組み合わせた評価手法を提案し、寄生バイポーラ効果に起因する MCU の再現に成功した。

## 情報学研究科 システム科学コース

**永 澤 由 梨 (石井教授) 「画像の自然さおよび複雑さに基づく眼球運動の定量評価とシーン理解のモデル化」**

本研究では、画像の自然さと複雑さが眼球運動およびシーン理解に与える影響を定量的に解析した。視線特徴量から理解可否を予測できることを示し、視線行動が内的な認知状態を反映する可能性を明らかにした。

**金 京 千紗子 (石井教授) 「汎化弁別学習課題における行動と脳活動の評価」**

本研究では、報酬に基づく汎化弁別学習において、主観的体験傾向の個人差が行動と脳活動に及ぼす影響を検討した。行動解析、強化学習モデル、fMRI 解析により、価値学習や意思決定に関わる個人差の神経基盤を示唆した。

**志 賀 泰 斗 (石井教授) 「不確実環境における適応的モデルベース強化学習法」**

本研究では、物理パラメータが未知または変動する環境に対応する適応的モデルベース強化学習法を提案した。相互作用履歴から環境特性を推定して計画に反映することで、不確実環境下でも高い制御性能を実現した。

**當 眞 嗣 基 (石井教授) 「意思決定過程における自信の RNN モデルの構築と解析」**

本研究では、文脈依存的な意思決定と自信推定を同時に行う RNN モデルを構築し、その内部ダイナミクスを解析した。自信の学習が状態空間構造やアトラクタ形成に与える影響を示し、意思決定における自信表現の理解に寄与した。

## エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

### 阿 部 玲 華（下田教授）「集中の低下抑制に寄与する香り刺激の特性に関する実験研究」

精油の香りの断続的提示が知的集中に及ぼす影響を比較した。3種類の精油を用いた実験の結果、ラベンダー精油の提示条件では客観的集中時間が長く主観的疲労も少ない傾向にあり、その定期的なリラックス効果で集中の低下抑制に寄与する可能性が示唆された。

### 荒 木 勇 介（下田教授）「休憩中の会話が知的集中に与える影響の実験研究」

休憩中の会話が知的集中に与える影響を、会話あり条件と会話なし条件の2条件の比較実験を通じて検討した。会話あり条件では集中が高い傾向が見られたが、有意差はなかった。一方で、会話の効果は相手との関係性や話題の自由度に依存することが示唆された。

### 松 永 太 輝（下田教授）「色配列生成課題による発散的思考評価手法の開発」

従来の発散的思考の評価課題の問題点を解決する、新たな評価手法が求められている。本研究は、生成した色配列のランダム性から発散的思考を評価する「色配列生成課題」を開発した。実験の結果、環境変化が発散的思考に与える影響評価の有効性が示唆された。

### 田 中 竣 也（下田教授）「集中の低下抑制に寄与する香り刺激の特性に関する実験研究」

本研究では、VR破壊体験によって喚起されるポジティブ感情が環境配慮行動（PEB）意図に与える影響を実験的に検証した。環境に関する二択クイズ形式のタスクを通じて爽快感や達成感を喚起し、VR破壊体験がPEBを促進する可能性を示した。

### 尾 籠 航（下田教授）「期待・後悔の予期感情喚起による環境配慮行動促進に関する実験研究」

本研究では、環境配慮行動（PEB）が利便性の低下や手間の増加などの「面倒さ」を伴う点に着目し、この心理的障壁を克服する新たなアプローチとして、期待感と後悔感の2つの予期感情の喚起によるPEB促進手法を提案した。

## エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

### 荒 井 大 貴（松山准教授）「核融合炉システムコードのベンチマークと不確実性を考慮した設計空間探索」

本研究では、核融合出力、エネルギー増倍率、エネルギー閉じ込め改善度、熱排出指標などの核融合プラズマの主要設計指標の決定要因を分析するため、炉システム設計コードTPCとモンテカルロサンプリングを組み合わせた不確実性定量化手法を研究した。Sobol法による解析により、高温超電導技術を考慮したコンパクト炉と従来型大型炉の間で、設計条件の支配因子が異なることを明らかにした。

### 山 崎 直 人（松山准教授）「超伝導トカマクにおける垂直移動現象のシミュレーション」

大型超伝導トカマク装置では、真空容器に流れる渦電流を利用した受動的なプラズマ位置安定化が重要である。本研究では、そのような高電気伝導度の壁を有するトカマク装置を対象として、ディスラプション時における電流減衰と垂直移動現象の定量的関係を数値シミュレーションによって明らかにした。

### 山下 友 輔 (松山准教授)「フェライト鋼を用いたトラスプラズマの磁場構造制御」

低放射化フェライト鋼による磁性体磁場が、トカマクやヘリカルなどの磁場閉じ込め装置の磁場構造に与える影響を解析する数値計算コードを開発した。真空容器内外における低放射化フェライト鋼の設置位置を変化させることで、Heliotron J 装置の磁場リップル構造、高次フーリエモード、および回転変換分布を制御できる可能性を明らかにした。

### 山 本 顕 寿 (松山准教授)「磁場閉じ込めトロイダルプラズマにおける共鳴摂動磁場の数値解析」

トカマク装置において、平衡磁場の磁力線ピッチに共鳴する摂動磁場印加は、周辺局在モードと呼ばれるパルスの熱負荷の回避手法として有望視されている。本研究では、共鳴摂動磁場印加によって生じる homoclinic tangle と呼ばれる構造について数値解析を行い、ダイバータ領域に到達する磁力線に対するモード数依存性およびモード重畳の効果を明らかにした。

## エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

### 篠 田 健太郎 (土井教授)「薄膜型リチウムイオン電池用正極活物質 $\text{Li}(\text{Fe}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Li}_y)\text{O}_2$ の作製と成膜時のイオンビームアシストによる効果の検討」

薄膜型全固体 Li 電池用正極に Co や Ni といった高価なレアメタルを使用しない  $\text{Li}(\text{Fe}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Li}_y)\text{O}_2$  の適応を検討し、性能向上のためにイオンビームアシスト成膜の効果を検討した。

### 元 永 龍 希 (土井教授)「Sn ドープ $\text{In}_2\text{O}_3$ を導電性保護層として用いた Ag フリー $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の検討」

市販 REBCO 線材の大幅な低コスト化のために Ag 保護層に代わる導電性保護層の開発に取り組み、Sn ドープ  $\text{In}_2\text{O}_3$  を導電性保護層として用いることを検討し、有力な候補であることを示した。

### 西 崎 豪 志 (土井教授)「非晶質 $\text{LiCoO}_2$ を用いた積層負極構造による薄膜型全固体リチウムイオン電池の作製」

薄膜型全固体 Li 電池の固体電解質層と負極活物質層の間に非晶質  $\text{LiCoO}_2$  を挿入することで、円滑な充放電特性の確保を検討した。

### 片 山 聖 (土井教授)「Ag フリー $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材のための $\text{La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{TiO}_3$ および $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 導電性中間層に関する検討」

$\{100\}<001>$  集合組織を持つ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした Ag フリー低コスト YBCO 線材構造の開発を目的に導電性中間層物質の開発に取り組み、表面からの酸素拡散ブロック層として  $\text{La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{TiO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  二層構造が有効である事を見出した。

### 堀 内 亮 (土井教授)「ミスト CVD 法による超伝導 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜の作製における後熱処理併用法と直接成膜の検討」

高温超伝導線材の大幅な低コスト化を目指して、真空を用いない成膜法であるミスト CVD 法で YBCO 膜のエピタキシャル成長に取り組み、ポストアニールと組み合わせることにより成長に成功した。

### 東 郷 裕 大 (川山教授)「イオンビームアシスト成膜法によるリチウム過剰 $\text{LiFeO}_2$ の作製とその評価」 イオンビームアシスト成膜法により Li 過剰および Li 欠損 $\text{LiFeO}_2$ 薄膜を室温成膜し、構造と電気化

学特性を評価した。無秩序岩塩構造でも電気化学活性を示し、Li 過剰化とイオンビーム照射により Li 拡散が促進され充電容量が向上することを示した。

#### 今 吉 落 (川山教授)「イオンビームアシストによるリチウムイオン電池正極用 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ の低温成膜とその評価」

イオンビームアシスト PLD 法により、 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  薄膜を室温近傍の低温で作製し、構造・組成・電気化学特性を評価した。イオンビーム照射条件により配向性や充放電容量が変化し、低温成膜でも正極活物質として機能する可能性を示した。

#### Lei Qiang (川山教授)「Characterization of the complex conductivity of $\text{LiCoO}_2$ thin films using terahertz time-domain spectroscopy (テラヘルツ時間領域分光法を用いた $\text{LiCoO}_2$ 薄膜の複素導電率評価)」

Li/Co 比を制御した  $\text{LiCoO}_2$  薄膜を作製し THz-TDS により複素伝導度を評価した。薄膜は THz 波の吸収小さいが位相変化に敏感な応答を示し、3THz 近傍の応答は固有共鳴ではなく局在キャリアに由来すると結論した。

#### Kao Yung-Chi (川山教授)「Study of Terahertz Radiation Mechanisms for the Evaluation of $\text{Cu}_2\text{O}$ Thin Films ( $\text{Cu}_2\text{O}$ 薄膜評価への応用を目的としたテラヘルツ波放射機構の研究)」

$\text{Cu}_2\text{O}$  薄膜からのテラヘルツ波放射機構を、膜厚、方位角、偏光、波長および励起強度依存性より検討した。欠陥準位やバンドテールを介したサブバンドギャップ励起により生成したキャリアが、表面電場で加速されるサージ電流が主因であると結論した。

### エネルギー理工学研究所

#### 内 山 拓 音 (長崎教授)「Heliotron J におけるマイクロ波ドップラー反射計を用いた径電場と電子密度揺動の計測」

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J においてマイクロ波ドップラー反射計を改良し、ECH プラズマにおけるポロイダルフロー速度と電子密度揺動を計測した。閉じ込め状態が遷移する現象において強い径電場シアが形成されることを明らかにした。

#### 柴 野 祥 成 (長崎教授)「Heliotron J における $\text{H}\alpha$ ・ $\text{D}\alpha$ 輝線空間分布の高速度計測」

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J においてプラズマの周辺部で発光する  $\text{H}\alpha$ ・ $\text{D}\alpha$  輝線の空間分布を従来装置の 10 倍程度 (1MHz) の高速度で計測するシステムを構築した。有理面に起因する揺動が観測された放電で、揺動の空間構造を明らかにした。

#### 宋 海 波 (長崎教授)「Heliotron J における電子エネルギー分布計測に向けた垂直視線 ECE システムの開発」

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において垂直視線 ECE 計測 (V-ECE) システムを開発し、電子エネルギー分布計測を試み、ECH プラズマ実験で放射データを取得することに成功した。低密度において高エネルギー電子からの寄与が増えていることを示した。

**畑 知 秀（長崎教授）「Heliotron J 統計加速における X 線シンチレーションイメージングの要素開発」**

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において 2MeV を超える相対論的電子が生成される統計加速現象が観測されている。この現象の加速機構解明のための制動放射 X 線 2 次元イメージ装置開発において、シンチレータ材の特性を評価し、機器構成を設計した。

**WANG YIDONG（長崎教授）「Improvement of 320 GHz Sub-millimeter Wave Interferometer System on Heliotron J」**

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において、伝送系の準光学ミラーの集光距離を調整することにより単一チャンネル 320 GHz 干渉計の改良を行った。ペレット入射による高密度放電を含む ECH プラズマにおいて安定した電子密計測を行うことが可能となった。

**荻 原 築（稲垣教授）「ヘリオトロン J におけるペレット入射による閉じ込め改善」**

ヘリオトロン J プラズマに微小な固体水素を入射すると、固体水素の溶発・電離による大量の冷たい電子の生成によりプラズマが低温高密度となるが、その後再加熱されプラズマの内部の分布が自律的に再構成される過程で閉じ込めが改善されることを明らかにした。

**河 津 智 也（稲垣教授）「補足電子モードによる乱流輸送のプラズマベータ依存性の物理機構」**

電子が加熱されるプラズマで支配的な補足電子モードの成長率がプラズマ圧力の上昇により増加する傾向があることをイオン及び電子の双方を運動論的に取り扱ったシミュレーションによって明らかにした。

**作 村 亮（松田教授）「二次元半導体 WSe<sub>2</sub> 三層構造におけるモアレ励起子状態に関する研究」**

次世代半導体である二次元半導体における量子科学の研究対象として、モアレ励起子に着目し、ねじれ WSe<sub>2</sub> 三層ヘテロ構造を作製し、そこで形成されるモアレ励起子の詳細について明らかにした。

**中 山 航 陽（松田教授）「二次元ワイドギャップ半導体中の欠陥生成と量子科学への応用」**

本研究では、高感度量子センサーに資する二次元ワイドギャップ半導体 *h*-BN 中の欠陥の磁気光学応答を詳細に調べた。特に、共振器構造による *h*-BN 膜厚の最適化、吸収・発光体との人工ヘテロ構造、などにより光検出磁気共鳴 (ODMR) 法における信号向上に成功した。

**松 浦 快（松田教授）「二次元層状物質 GeS の強誘電相転移と光電変換デバイス特性」**

本研究では、光電変換デバイス応用の目指し二次元層状物質 GeS を対象として、光照射下での電流・電圧特性を詳細に調べた。特に、複数のドメイン構造を有する空間反転対称性が破れた強誘電相でシフト電流が発現することを明らかにした。

**生存圏研究所 中核研究部****春 名 健太郎（山本教授）「機械学習を利用したスプレッド F の自動検出と擾乱強度の定量評価」**

電離圏において発生するスプレッド F 現象を自動的に抽出するアルゴリズムを開発した。抽出されたエコーの幾何学的特徴に基づき、擾乱の程度を連続値で評価するスコアリング手法を開発した。本成果は電離圏自動解析システムの信頼性向上に寄与するものである。

**寺 内 充（橋口教授）「機械学習モデルを用いた信楽イオノゾンデ観測の長期統計解析」**

イオノゾンデ観測画像の自動読み取りモデルを構築し、長期間の観測データの長期統計解析を実施した。機械学習モデルは高い精度で読み取りが行えることを確認した。各国の観測結果と経験モデルとの比較の結果、地域によって差の傾向に違いがあることが示された。

**谷 口 泰 斗（小嶋教授）「月面近傍における電位計測に関する数値シミュレーション」**

宇宙プラズマによる表面帯電が著しい月面において、その空間電位をプローブ法によって計測するための数値モデル構築に成功した。モデルでは空間電位をプローブの電流電圧特性の変化から導出する手法や光電子放出の影響なども考慮しより現実に近い状況下での計算を可能にした。

**吉 田 永 遠（小嶋教授）「Study on the generation mechanism of electrostatic waves driven by whistler-mode waves」（ホイッスラーモード波による静電波の駆動メカニズムに関する研究）**

同時観測されたホイッスラーモード波と静電波について衛星データの統計解析を行い、ホイッスラーモード波が静電波を励起させていることを明らかにした。また、励起される静電波は二種類存在することも発見し、それらの励起には、ホイッスラーモードの位相速度と群速度の大小関係が重要であることも示した。

**田 中 恵 太（小嶋教授）「科学衛星搭載用電界観測システムの高精度化に関する研究」**

科学衛星に搭載して電界を観測するフローティング電源型観測システムに、DC/DC コンバーターを用いた従来方式とは異なる「ブーストラップ型電源」を提唱、設計・開発に成功した。実現したシステムでは、高精度に加え、低ノイズ化にも成功して、次世代の高精度電界観測システムとしてその実現性を実証した。

**高 橋 士 門（小嶋教授）「飛行時間型イオンエネルギー質量分析器における信号処理部の集積化に関する研究」**

小型科学衛星に搭載可能な小型の飛行時間型イオンエネルギー質量分析器を実現するため、その信号処理部のチップ化に成功した。開発に成功した5mm角チップは19チャンネルプリアンプなどを実装しており、イオンビーム照射による実験により1nsec時間分解能でのイオン検出を実証した。

**矢 野 佑 樹（篠原教授）「空間伝送型と共鳴結合型を統合したワイヤレス給電によるマイクロ波壁透過効率向上の研究」**

本研究では、一つの共振器で放射型共振器であるアンテナとしての役割と、磁界結合する共振器としての2つの役割を担わせることで、マイクロ波の壁透過効率の改善についてシミュレーション実際に基板を製作し測定を行った。

**大 西 大 知（篠原教授）「宇宙太陽発電のための編隊飛行衛星を用いたワイヤレス給電実験システムの研究」**

本研究では編隊飛行衛星-宇宙太陽発電システムにおいて、精緻なビームパターンを計算できるシミュレータを開発し、そのビームパターンを解析した。ビームパターンの解析後、その要件に合う整流回路を定義し、開発を行った。

利 田 裕 貴（篠原教授）「受電レクテナ形状を考慮した放射近傍界での高効率ビーム形成に関する研究」

本研究では、28 GHz 帯アレーアンテナを用いた卓上設置型の空間伝送型 WPT システムを想定し、放射近傍界において受電レクテナ形状に適した高効率ビーム形成を目的として、近傍界におけるフラットビーム形成が受電面上の電力密度を均一化して高効率化を実現した。

太 田 悠 輝（海老原教授）「サブストーム時の放射線帯外縁部・プラズマシートにおける電子の時空間変動」

電磁流体シミュレーションで得られた電磁場のもと、電子の完全軌道計算を行い、地球放射線帯の外縁とプラズマシート遷移領域における電子の位相空間密度の再構築を行った。位相空間密度変動の原因を調査し、放射線帯再生過程の一つである外部供給説を検証した。

## 高校生のページ

# 「ゆらぎ」をハッキングする脳の戦略： 姿勢制御のデジタルツインが拓く次世代医療

大学院情報学研究科 情報学専攻 システム情報論講座  
バイオサイバネティクス分野 野村 泰伸

## 1. はじめに：ロボットにはない「姿勢ゆらぎ」という謎

私たちが普段、何気なく行っている「真っ直ぐ立つ」「歩く」という動作。これらは自分の意思で実行できる「随意運動」だが、その制御をいちいち意識することはない。脳が自動的にコントロールしてくれる、日常生活のまさに「土台」となる機能である。現代のロボット工学において、人型ロボットをただ静止させて立たせることは、もはや難しい課題ではない。ましてや、ヒトが静かに立っているときに現れる、あのわずかでランダムな体の揺れ（静止立位姿勢動揺、姿勢ゆらぎ）をわざわざロボットに実装しようという工学的なニーズは、今のところ存在しない。

しかし、ここで一つ素朴な疑問が浮かびあがる。「なぜ、ヒトの体は静止して立っているとき、わざわざ揺れているのだろうか？」実は、生き物の体は、工学的に見ると非常に不安定になりやすい条件を抱えている。たとえば、体の傾きを検知したセンサ（感覚器）からの信号が脳（コントローラ）へ伝わり、筋肉へ修正指令が出されるまでには、どうしてもわずかな「時間遅れ（神経フィードバック時間遅れ）」が生じる。制御工学の世界では、この時間遅れがシステムを不安定化（発振）させる大きな原因になることが知られている。私たちは日常的に、この時間遅れによる転倒のリスクに曝されているのだ。さらに、呼吸や心臓の拍動による物理的な揺れ、膨大な脳神経ネットワークが情報処理を行うときに生じる電気的なノイズ（生体ノイズ）も、姿勢をグラつかせる大きな原因となっている。

これまでは医学の世界でも工学の世界でも、「姿勢の揺れは小さいほど優れていて、大きく揺れるのはコントロール機能が落ちている証拠だ。揺れは生体ノイズのせいで仕方がなく起きている副産物だ」と考えられてきた。もし生体ノイズを完全にゼロにできれば、体はピタッと止まるはずだ、というのが常識だったのである。しかし、最新の研究によって驚くべき事実が分かってきた。「直立姿勢からのズレをできるだけ小さくしたい」という要求と、「できるだけエネルギーを使わずに立ちたい」という相反する要求（トレードオフ）を解決するために、脳のコントロール機能を最適にチューニングすると、結果として、身体は“どうしても揺れざるを得ない”ということが分かってきたのだ。

つまり、もし生体ノイズをゼロにできたとしても、最適にコントロールされたヒトの体は揺れる、ということになる。そう考えると、姿勢が揺れること自体は決して悪いことではなく、むしろ目的を達成するための「ベストな落とし所（中庸）」なのだと言える。もしかすると、揺れが小さすぎても、大きすぎても、脳がコントロールのバランス調整に失敗している状態なのかもしれない。

では、脳はこの高度な「最適化」をどのようなメカニズム（脳内機序）で実現しているのだろうか。さらに一步踏み込んでその脳内を探ると、驚くべきことに、脳はAIの基盤技術でもある「強化学習」に似た仕組みを用いていることが見えてくる。脳は、身体をあえて揺らしながら姿勢を安定させるために、下肢（ふくらはぎなど）の筋肉を「どのタイミングで収縮・弛緩させるか」という運動の選択肢を常に計算している。この自動的な意思決定のルール（方策）を、強化学習によって最適化しているのだ。そして、この脳内の「強化学習による最適化システム」がうまく機能しなくなってしまった状態こそが、

パーキンソン病に見られる姿勢の不安定化（機能障害）の本質である可能性が、近年の研究から浮かび上がっている。

## 2. 立位姿勢制御の研究：伝統的な定説を覆す「間欠制御仮説」

直立姿勢を保つ神経制御メカニズムの解明は、いまなお神経科学における重要課題である。一般的な生理学の教科書では、姿勢維持の仕組みを次のように解説している。「体が前方に傾くと、ふくらはぎの筋肉が引き伸ばされる。すると筋肉のバネのような弾性（復元力）によって緊張が高まり、転倒が防がれる。同時に、筋肉の伸長が中枢神経を介した『伸張反射』を引き起こし、さらに筋張力を高めて姿勢を維持する。」これが、ふくらはぎの筋肉がバネとして働き、アキレス腱は硬く固定されていることを前提とした伝統的な定説（スティフネス制御仮説）である。

ところが、Loram らは超音波イメージングを用いた実験で、この定説を覆す驚くべき事実を示した。静止立位時に体がわずかに前傾するとき、ふくらはぎの筋肉は引き伸ばされるところか、逆に「収縮」していたのである。体が前傾するのに筋肉が縮むということは、微小な転倒に対して実際にはアキレス腱側のほうが伸びており、筋肉はむしろ逆方向の力を発揮している（負の弾性を示す）ことを意味する。これは定説の否定であり、中枢神経系が姿勢維持にきわめて能動的に介入している強力な証拠となった。さらにその後の研究で、足関節が持つ受動的なバネ特性（硬さ）だけでは、立位を安定させるために必要な負荷を支えきれないことが分かった。また、姿勢のズレを感知した神経信号が脳に伝わるまでには、100～200 ミリ秒という「伝達時間遅れ」が不可避である。この時間遅れを考慮すると、単純なフィードバック制御だけではシステムが不安定化し、転倒を頑強（ロバスト）に防ぐことはできない。このように近年、静止立位の安定化には、従来の常識を越えた高度な神経制御の関与が議論されるようになった。

この研究分野に新たな潮流を生み出したのが、Collins らによる物理学的なアプローチである。彼らは、静止立位時の足圧中心点（Center of Pressure : CoP）の微小な変動を、物理学の「ブラウン運動（微小粒子の不規則な運動）」と対比して解析した。その結果、時間スケールによって揺らぎの特性が変化することを発見した。短・中時間（100 秒以下）スケールでは、重力によって直立平衡姿勢から引き離されるような大きな拡散運動を見せるが、長時間（100 秒以上）スケールになると、一転して粒子を原点に引き戻すような、小さな拡散運動へと変化したのである。この現象は次のように解釈された。「神経系は、短い時間内での姿勢変化にはあえて介入せず、身体を重力に身を任せるままにしている（開ループ制御）。しかし、そのままでは転倒してしまうため、長い時間スケールでは神経系が介入し、傾いた姿勢を引き戻す能動的な力を発生させる（閉ループ制御）」の知見は、神経系が「開ループ」と「閉ループ」を交互に切り替えながら姿勢を安定化させているという、「間欠（かんけつ）制御仮説」の発端となった。なお、中間の時間スケールで見られる拡散は「べき乗則」に従う時間相関を持っており、その詳細な生成機構の解明がいまも求められている。

実は、間欠制御仮説には複数の異なるモデルが存在する。制御を間欠的に切り替えるという点ではどれも同じに見えるが、個々のモデルは本質的に異なるメカニズムを提案している。特に、筆者らが提唱する間欠制御仮説は、他のモデルと大きく一線を画す。筆者らの仮説の最大の特徴は、「フィードバックのない開ループ状態」と「制御ゲイン（修正の強さ）を極端に小さくした閉ループ状態」という、それ単体ではどちらも不安定なシステム同士を間欠的に切り替えることで、全体としてロバストに姿勢を安定化させるという点にある。さらに、開ループ時に身体が持つ受動的な力学特性（ダイナミクス）そのものが、傾いた姿勢を一時的に引き戻す役割を果たしていると主張する。このような「低ゲインの開ループ」と「開ループ」の切り替え制御は、関節の無駄な突っ張りをなくし、インピーダンス（粘弾性）の小さな柔軟な運動を可能にする。もしこの仮説が正しいならば、私たちが「静止」して立っていると

きの制御は、従来の静的なバランスというイメージを遥かに超えて、極めて「動的」な営みである可能性がある。

### 3. 姿勢ゆらぎと間欠制御：「倒立振子」のサドル力学と $1/f$ ゆらぎ

#### 3.1 健常者と患者のデータが示す逆説

図1に、若年健常者とパーキンソン病（PD）患者の立位時における足圧中心点（CoP）の変動データを示す。一見して、健常者の方が患者よりも大きく揺れていることが分かる。「大きく揺れる＝不安定」という直感に反するこのデータは、健常者の身体関節が柔軟に制御されているのに対し、患者の関節は頑丈に（剛直に）固まってしまっていることを示唆している。この揺らぎの違いは、周波数成分を解析することでより明確になる。CoPの前後変動のパワースペクトル（PSD）を見ると、患者のグラフは平坦で「白色雑音（ホワイトノイズ）」に近い。一方、健常者のグラフは周波数が低くなるほどパワーが直線的に反比例して増加する、いわゆる「 $1/f$  ゆらぎ」の特性を示す。なぜ健常者の脳は、あえてこのようなゆらぎを作り出しているのだろうか。

#### 3.2 状態平面で見る「倒立振子」の転倒リスク

この謎を解くため、ヒトの立位姿勢を1本の「倒立振子（逆さまの振り子）」としてモデル化してみよう（図2）。足関節を回転軸としたときのシステムの挙動は、横軸に傾斜角度 $\theta$ 、縦軸に角速度 $\omega$ をとった「状態平面（相平面）」上の矢印の波（ベクトル場）として視覚化できる。原点（ $\theta=\omega=0$ ）は、真っ直ぐ立った直立平衡姿勢を表す。ヒトの足関節が持つ受動的なバネの硬さは、自重による転倒を防ぐには不十分である。そのため、脳が能動的に介入しなければ振子は必ず転倒する。図2の流線が示すように、前傾姿勢（ $\theta>0$ ）から後ろ向き（ $\omega<0$ ）で戻ろうとする軌道は、速度が大きすぎれば後ろに転倒し（図2下の山形軌道）、速度が足りなければ途中で失速して前に転倒する（図2右の双曲線軌道）。この「前方転倒」と「後方転倒」の境界線となるのが、原点に向かう2本の太点線——「安定多様体」である。このラインに乗った状態点は、エネルギーを使わずとも物理法則（受動ダイナミクス）に従って自然と原点（直立姿勢）へと吸い込まれていく。しかし、少しでもラインから外れると、今度は原点

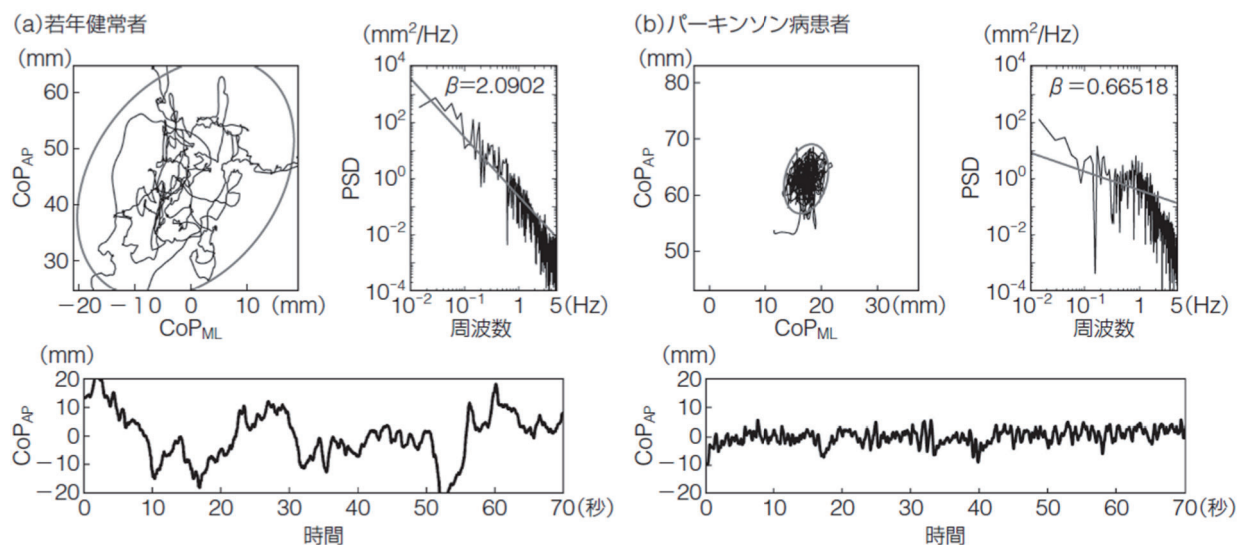


図1：若年健常者とパーキンソン病（PD）患者の足圧中心点（CoP）変動データの比較

(a) 健常者は大きく柔軟に揺れ、「 $1/f$  ゆらぎ」を示す。(b) PD患者は関節が固まり揺れは小さいが、特性は「白色雑音」に近づく。

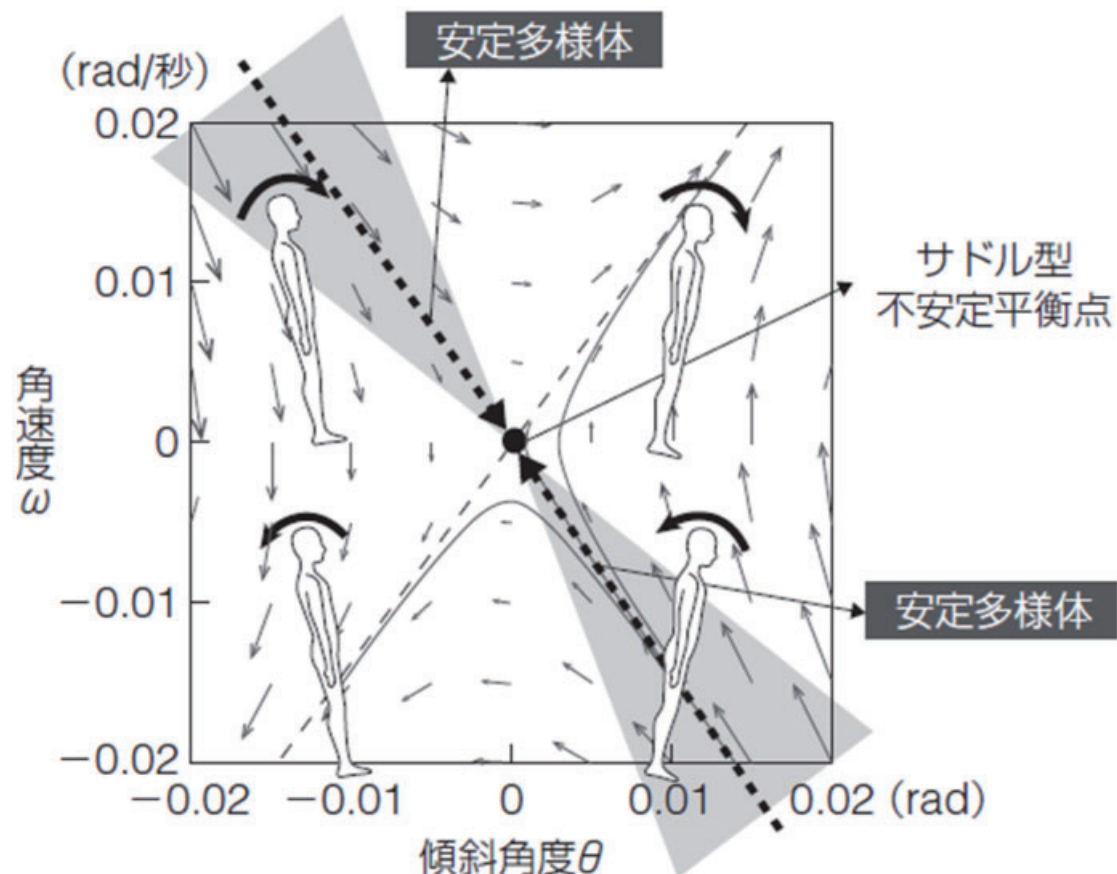


図 2：倒立振り子モデルにおける状態平面（相平面）とサドル（鞍点）の力学特性

原点（直立姿勢）へ向かう「安定多様体（太点線）」と、転倒へと加速させる「不安定多様体（細点線）」が交差する不安定な構造を示す。

から遠ざかる一対の細点線——「不安定多様体」に引っ張られ、一気に転倒へと加速する。このように、谷と尾根が交差したような不安定な平衡点を、力学では「サドル（鞍点）」と呼ぶ。

### 3.3 不安定性を逆手に取る「間欠制御」の戦略

筆者らが提唱する「間欠制御モデル」（図 3）の真骨頂は、このサドルの特性と、神経伝達の「時間遅れ」という弱点をあえてシステムに取り込んで味方につけた点にある。まず、状態点が安定多様体を挟む灰色の領域（オフ領域）にあるときは、脳は能動的な制御スイッチを「OFF」にする（開ループ制御）。すると身体は、一切のエネルギーを消費することなく、受動的に原点（直立）付近へと近づいていく。当然、そのまま放置すればいずれ不安定多様体に捕まって転倒してしまうため、ある程度原点から離れた瞬間に、脳はスイッチを「ON」にする（閉ループ制御）。ただし、ここでの脳の戦略は「力任せに原点へ引き戻す」ことではない。「次にスイッチを OFF にしたとき、自然と原点へ戻れるように、状態点を『安定多様体の近傍』へと送り届ける」という極めてスマートな役割を果たす。この送り届けの際に利用されるのが、時間遅れを伴うフィードバック制御特有の「振動的な不安定化（時間遅れ誘因性不安定化）」である。スイッチが ON になると、システムはわざと原点の周りをぐるぐると回転しながら遠ざかるような軌道を描く（図 3 右下）。この不安定振動の軌道は、必ずどこかで安定多様体のラインを横切る。その瞬間を狙って、脳は再びスイッチを「OFF」に戻すのだ。この戦略のメリットは、制御の効き目（ゲイン）が最小限で済むため、筋肉のエネルギー消費が極めて小さく、かつ関節を柔らかく保

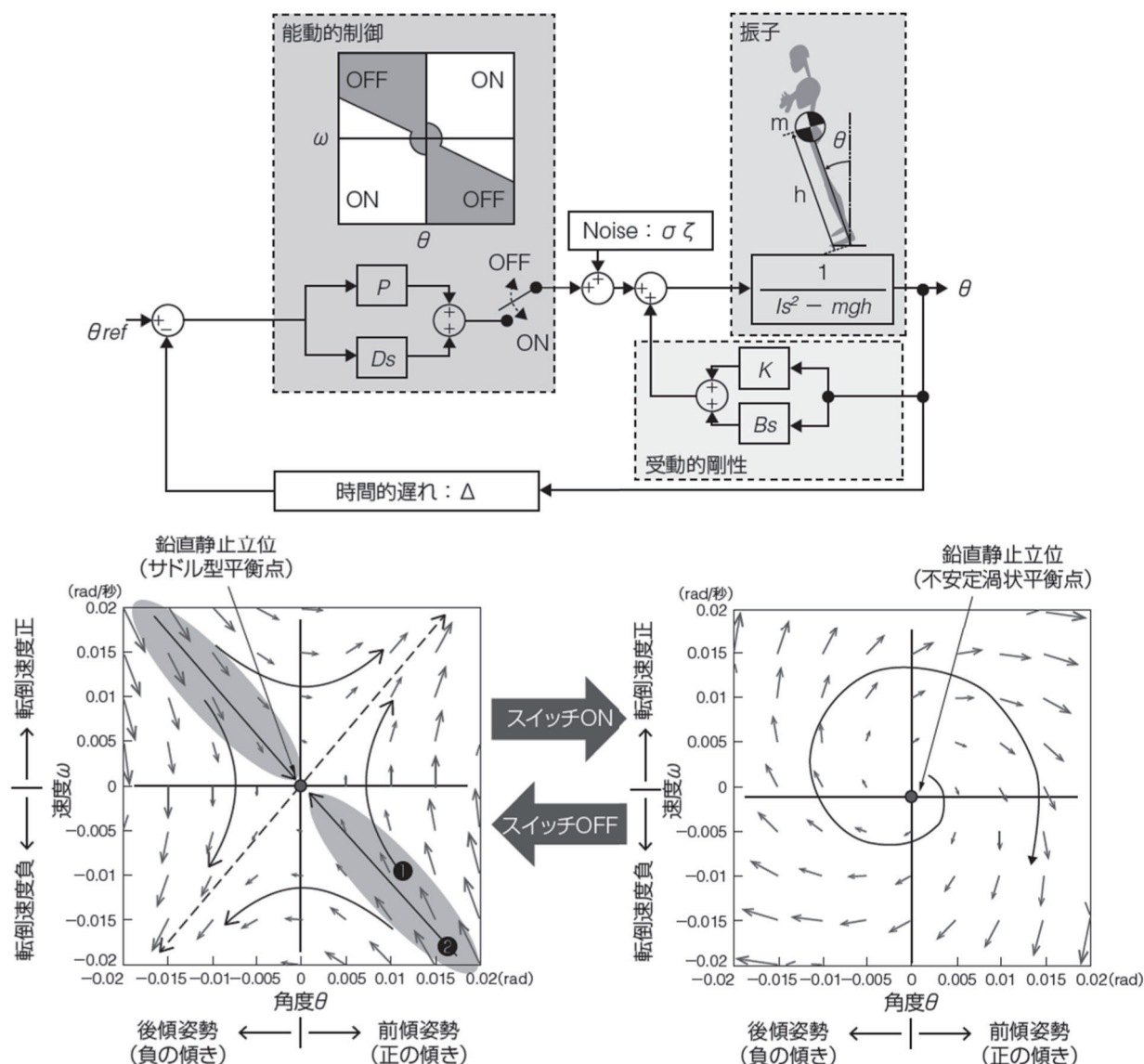


図3：筆者らが提唱する「間欠制御モデル」のスイッチング戦略

安定多様体の近傍（オフ領域）では制御を OFF にし、離れた瞬間に時間遅れ系特有の振動的不安定性を利用して ON にする、動的な切り替え機構。

てる点にある。「OFF 時のサドル型不安定性」と「ON 時の時間遅れによる振動的不安定性」という、単体ではどちらも破綻している 2 つの不安定系を状態に応じて間欠的に切り替えることで、全体として頑強（ロバスト）な安定性を実現しているのである。

### 3.4 シミュレーションと病態への示唆

図4に、従来の定説である「持続制御モデル（常にスイッチ ON）」と「間欠制御モデル」のコンピュータシミュレーション結果を示す。常に制御を ON にし続ける持続制御モデル（図4a）では、転倒を防ぐために強力なゲインで関節をガチガチに固める必要がある。このときの姿勢変動は振幅が小さく、周波数特性は「白色雑音」となる。これは、図1bに示したパーキンソン病患者のデータと酷似している。対して、状態に応じて賢くスイッチを切り替える間欠制御モデル（図4b）は、図1aの健常者に見られるような、大きく、かつ自然な「1/f ゆらぎ」を完全に再現する。すなわち、健常者の豊かな姿勢の揺

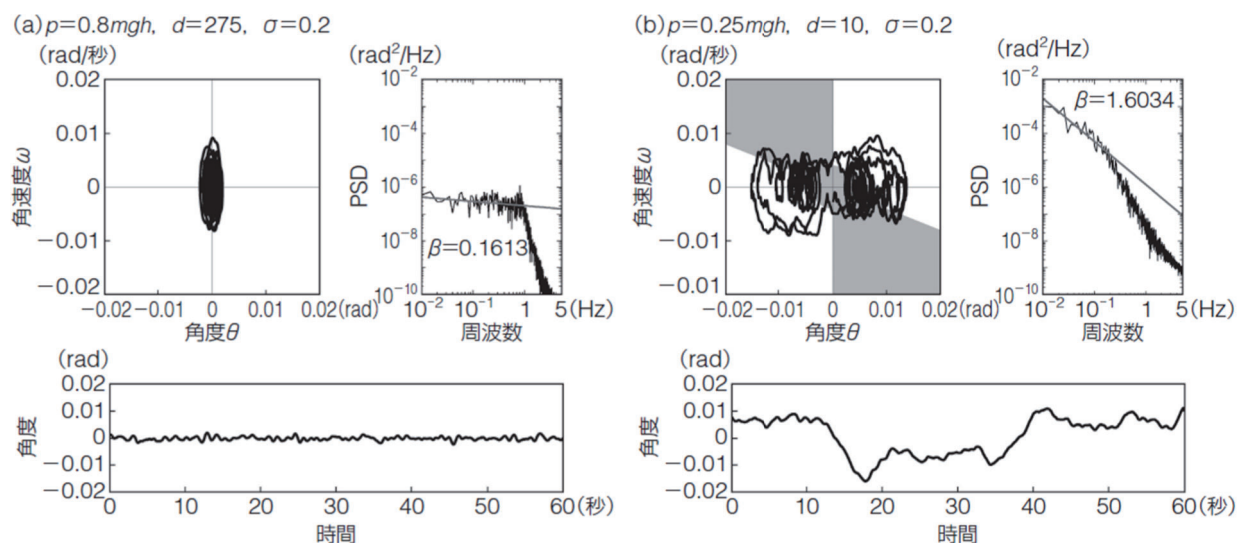


図 4：持続制御モデルと間欠制御モデルのシミュレーション比較

(a) 常に ON の持続制御は PD 患者の白色雑音を再現し、(b) 状態に依存して切り替える間欠制御は健常者の「1/f ゆらぎ」を完全に再現する。

らぎは、脳がサドル型ダイナミクスと時間遅れを巧みに操り、最小のエネルギーで柔軟に身体をコントロールしようと意思決定を繰り返している「最適化の証拠」なのである。

## 4. デジタルツインの開発に向けて：CBGT 回路モデルによる脳内意思決定の再現

### 4.1 パーキンソン病における自動化運動障害のメカニズム

私たちが構築した「立位姿勢の間欠制御モデル」の実力は、コンピュータシミュレーションを行うと一目瞭然である。このモデルから生成された姿勢ゆらぎのデータ（合成データ）は、若年健常者やパーキンソン病（PD）患者から実際に計測された生体データと「瓜二つ」なのである（図 4）。その類似度は、近年目覚ましく発展している AI（機械学習）を用いたデータ識別器さえも騙されてしまうほどに高い。これほど高精度に現実の揺らぎを再現できるということは、私たちの提案した間欠制御モデルが、ヒトの脳が実際に使っている姿勢制御戦略を的確に捉えている強力な証拠に他ならない。

間欠制御モデルでは、身体の傾きや速度といった遅れ状態に依存して、神経フィードバック制御のスイッチを間欠的に OFF/ON している。制御工学の言葉で言えば、制御の強さ（ゲイン）を「零（制御 OFF：NoGo）」にするか、「非零（制御 ON：Go）」にするかを最適に選択しているのだ。私たちは、この絶妙な選択ルールが、生存や省エネといった自然な報酬関数に基づく「強化学習」によって自律的に獲得できることも示している。

ここで、非常に興味深い事実が浮かび上がった。あらゆる若年健常者や多くの高齢健常者の実データを再現するモデルを解析すると、状態空間のおよそ半分という広い領域で、脳があえてスイッチを「OFF」に選択している（間欠制御戦略）と推論された。ところが、PD 患者（特に重症度の高い患者）の実データを再現するモデルでは、状態空間のほぼ全域が「ON」の領域になっていたのである。つまり、PD 患者の脳内では制御の間欠性が欠如し、常に力任せに制御し続ける「古典的持続制御戦略」に陥ってしまっていることがデータから見てきたのだ。

この発見から、私たちは一つの大きな仮説を立てた。脳の中で「制御の ON / OFF」や「運動の実行（Go）／非実行（NoGo）」という行動選択・意思決定を司る中枢といえば、大脳皮質と基底核、視床を結ぶ「皮質・基底核（CBGT）ループ回路」である。基底核の疾患である PD において姿勢障害が生

じるのは、この CBGT 回路が担う「遅れ状態依存的フィードバック制御運動指令の OFF / ON 選択機構」が機能障害を起こしたためではないか、と考えたのである。

私たちはすぐさま、この仮説の検証に乗り出した。通常、CBGT 回路による行動選択に伴伴する脳活動（脳波：EEG）は、「ボタン押し」等の単純な運動における意識的な Go/NoGo 課題を用いて計測される。そこでは、運動開始準備から運動実行時に頭頂に出現するベータ帯域（13～36 Hz）の脱同調（ $\beta$ -ERD：電波の減少現象）と、運動終了後に出現するベータ帯域同調（ $\beta$ -ERS：電波の増加現象／運動後ベータリバウンド）が知られており、PD 患者ではこれらのベータ変調が低下・消失する。

しかし、私たちが挑んだのはボタン押しのような意識的な運動ではなく、無意識に自動化された「静止立位姿勢の維持」である。姿勢ゆらぎは、「前方への微小転倒」と「それに続く微小回復」のサイクルの確率的な繰り返しで構成される。間欠制御モデルの視点で見れば、微小転倒にブレーキを掛ける回復フェーズは「ふくらはぎの筋肉活動が上昇する ON 期間」、引き続き微小回復フェーズは「同筋肉活動が低下する OFF 期間」に対応する。

私たちは、健常者の立位時 EEG を、この転倒・回復サイクルに位相同期させた解析を行った。その結果、姿勢の制御 ON・制御 OFF 期間それぞれに伴伴する  $\beta$ -ERD と  $\beta$ -ERS を世界で初めて同定したのである。これは、姿勢保持という自動化された運動の制御にも、CBGT 回路によるミリ秒単位的意思決定が関与することを示唆した極めて重要な成果である。

#### 4.2 「間欠制御モデル」から「CBGT 制御系モデル」へ

無意識の姿勢制御に CBGT 回路が関わっているという確信を得た私たちは、次のステップとして、この「脳内の動的神経回路（CBGT 回路）」と「制御対象の物理的な力学特性（バイオメカニクス）」がリアルタイムに相互作用する、よりリアルな「CBGT 制御系モデル」の構築に着手した。姿勢保持だけでなく、無意識に行う「周期的指タッピング保持動作」もあわせてモデル化することで、脳が自動化された運動をコントロールする一般的な共通原理（基本普遍メカニズム）の解明を目指した（図 5）。

私たちが構築した大規模な CBGT 制御系モデル（図 5）は、神経解剖学的な脳の配線を忠実に再現しており、次のようなプロセスで二者択一的な運動選択（意思決定）を下す。姿勢制御においては、「背屈（Backward）」または「底屈（Forward）」トルクを生成する運動指令のいずれかを選択・実行する。

##### (1) エビデンス（証拠）の蓄積と競争：

制御対象の遅れ状態に関する体性感覚情報は、基底核の玄関口である「線条体」の 3 つのルート〔直接路（Go）、間接路（NoGo）、ハイパー直接路〕へと入力される。この情報をもとに、大脳皮質にある 2 つの運動指令それぞれを出力する皮質ニューロン対において、細胞膜電位の重畳や発火率の変動として「証拠（エビデンス）」が蓄積されていく。これは、AI や心理学で意思決定のモデルとして使われる「ドリフト拡散モデル（閾値到達競争）」そのものの挙動である。先に証拠が合格ライン（閾値）に達した方の運動指令が、勝者として選択される仕組みだ。

##### (2) ドパミンによるチューニング：

この回路の特性を左右するのが、脳内の神経伝達物質「ドパミン」である。モデル内でのドパミンニューロンの活動度は、線条体の活動度を修飾し、情報の伝わりやすさ（シナプス入力の強度）を左右する。

##### (3) 「決定時間」がゼロゲイン（OFF）を生み出す：

このモデルの最大の美しさは、どちらの運動指令も出力されない、2 つのドリフト拡散過程が共に合格ラインに達していない期間（決定時間）が存在することだ。この「迷っている時間」こそが、間欠制御モデルにおける「制御 OFF 期間」を神経ネットワークから自然に発生させる機序として機能するのである。

この CBGT 制御系モデルを使ってシミュレーションを行ったところ、驚くべき結果が得られつつある。

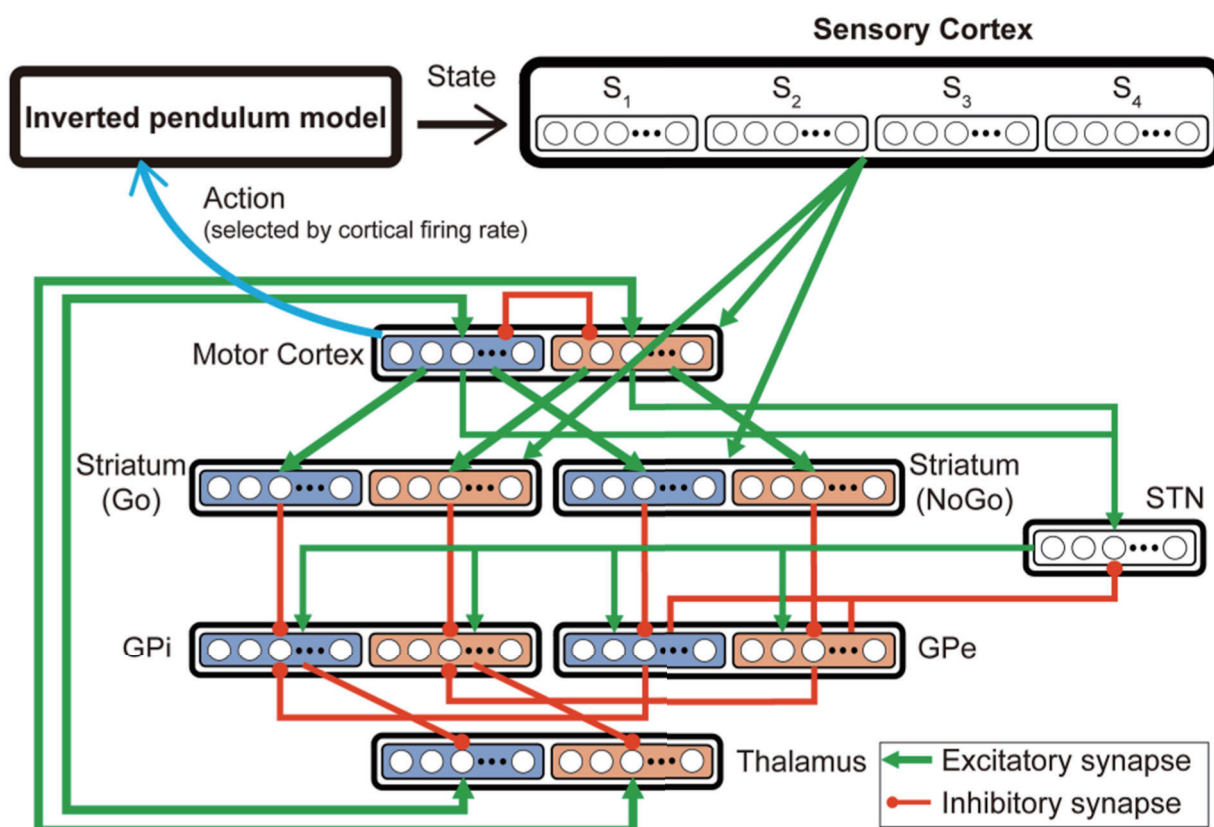


図5：脳の神経解剖学的配線を模した「CBGT 制御系モデル」

体性感覚入力から線条体（直接路・間接路・ハイパー直接路）を経て、皮質ニューロン対におけるエビデンス蓄積（ドリフト拡散過程）による運動選択のメカニズム。

ドパミン神経の活動度やシナプスのパラメータを「健常者」のバランスに設定すると、モデルは見事に ON と OFF を間欠的に切り替え、 $1/f$  ゆらぎを持った自然な姿勢の揺らぎを作り出した。逆に、ドパミンを減少させて「PD 患者」の状態を再現すると、ON/OFF の切り替えが消失して持続制御となり、ホワイトノイズ（白色雑音）のような硬い姿勢の揺らぎへと変化したのである。

さらに興奮を禁じ得ないのは、このモデルを構成する約 1 万個の仮想ニューロン（スパイクニューロンモデル群）が発するシナプス集合電位を「モデル脳波（simulated EEG）」として解析したときのことだ。モデルが健常者らしい柔軟な姿勢制御とゆらぎを再現しているときに限り、私たちが実際の人間から実験的に同定したあの「 $\beta$ -ERD」と「 $\beta$ -ERS」の脳波パターンが、全く同じようにモデルの内部から自発的に創発されたのである。

これは、数理モデル上の抽象的な「ON/OFF の切り替え」という概念が、脳内の「解剖学的な神経回路のダイナミクス」と「実際の生体脳波」という 2 つの異なるレイヤーで見事に一本の線で繋がった瞬間であった。

## 5. おわりに

### 5.1 脳と身体の「デジタルツイン」が拓く次世代医療

本稿で紹介した「CBGT 制御系モデル」は、単にコンピュータの中で完結する数理パズルではない。これは、人間の脳の神経配線と、筋肉や骨格といった身体の物理的な特性をデジタル空間上に忠実に再現した、まさに医療・工学における「デジタルツイン（電子の双子）」である。

このデジタルツインという手法は、今後の医療を劇的に変える可能性を秘めている。たとえばパーキンソン病（PD）は、進行度や症状の出方が患者一人ひとりによって大きく異なる。もし、目の前の患者のわずかな姿勢ゆらぎ（データ）から、その人の脳内で「ドパミンがどれくらい減っているか」「シナプスの結びつきがどう変化しているか」をデジタルツイン上で逆算（パラメータ推論）できたらどうだろうか。

「このままだと1年後に転倒のリスクが急上昇する」という未来予測や、「この患者には、どのタイミングで、どの薬をどれくらい投与するのが最適か」「どのようなリハビリが効果的か」といった治療戦略を、患者の実際の身体を傷つけることなく、コンピュータの中で事前に何度もシミュレーションできるようにする。これこそが、情報学・電気電子工学が医学と融合することで実現する「個別化医療（精密医療）」の未来像なのだ。

## 5.2 「システム科学・情報学」という最強の武器を持って

これまで医学や従来の生理学の世界では、姿勢ゆらぎは「生体ノイズによる仕方のない副産物」であり、「大きく揺れるのはコントロール機能が落ちている悪い証拠だ」と片付けられがちであった。

しかし、システム科学や情報学の「動態解析」「最適化」「意思決定」というフィルターを通して人間の身体を見つめ直したとき、その常識は180度覆った。健常者の豊かなゆらぎ（1/f ゆらぎ）は、脳が限られたエネルギーと時間遅れという悪条件の中で、必死にサドル（鞍点）の力学特性をハッキングし、サボりながらも効率よく立ち続けるために導き出した「究極の最適化戦略（中庸）」だったのだ。そして、その戦略が崩壊し、不器用なまでに生真面目に体を固めてしまう状態こそが、パーキンソン病の姿勢障害の本質であった。

このように、目の前にある複雑な現象の背後に隠された「本質的なメカニズム」を、数理モデルという共通の言語を使って解き明かせることこそが、システム科学・情報学の持つ最大の強みであり、面白さである。

## 5.3 高校生の皆さんへのメッセージ

皆さんは「情報学」や「電気電子工学」と聞くと、どのような光景を思い浮かべるだろうか。画面に向かってプログラミングコードを書く姿や、回路基板をハンダ付けする姿、あるいはインターネット上のデータを処理するAIを想像する人が多いかもしれない。

しかし、私たちの研究フィールドはそれだけにはとどまらない。私たちが何気なく行っている「立つ」「歩く」といった生命の営み、そして脳という複雑なシステムが生み出す「無意識の意思決定」のメカニズムそのものが、今や最先端のシステム情報学の極めてエキサイティングな研究対象なのだ。

数理や制御理論という強力な武器を使えば、まだ誰も見たことのない脳の裏側の仕組みを可視化し、未だ特効薬のない神経疾患の医療ニーズに応えることさえ可能になる。学問の境界線など恐れる必要はない。数理と生命、工学と医学がダイナミックに交差するこの未踏の領域に、熱い好奇心を持った皆さんが飛び込んできてくれることを、心から楽しみにしている。

**学生の声****「転石苔むさず」**

工学研究科 電気電子デジタル理工学専攻 吉井研究室 博士後期課程2年 江 成 涼

本稿では、短くない時間を過ごした研究生活で得たものの中でも、学生の皆さんに少しでも役立つかもしれない考え方を記してみたいと思います。

私は「目標が達成できるかどうか」に囚われ、不安を増長させ、道を見失い、最後には研究も生活もままならなくなってしまったことがあります。友人や機会に恵まれ、幸いにも立ち直ることができ、それから自分なりに対策を練ってみました。

行き着いた対策は、「自身が納得できる方向を明確化し、それを何よりも強く意識しながら事に当たる」ということです。方向は1日ごとでも変えてしまってよいですが、最も重要なことは、定めた後は全身全霊でそこへ向かおうとする姿勢です。

やり方はどのような形でも構いません。研究に没頭する。積読を崩す。手紙を書く。思い切り体を動かす。熱い風呂に浸かる。とびきりのお洒落をして街へ出る。思い浮かんだ一切をしないと決めるのも一つです。このように自分の納得を糧に力いっぱい物事を決め続けていきます。いい結果を伴うとは限りませんが、その瞬間に集中することは何よりも気分がよく、足元も爽やかになるのです。

この方法を実践できるのは、間違いなく生活や研究活動を支えてくださっている家族や友人、学友や先生方、大学に携わるすべての方々の存在があってこそです。また、学生という立場だからこそ許されていることも想像に難くありません。心から感謝の意を表し、今後も上機嫌に邁進していきたいと思います。

皆さんの苦悩は他ならぬ皆さんだけのものです。それでももしこの方法が、私が経験したような不安に足を取られ、抜け出せなくなってしまっている学生の皆さんの一助になれば幸いです。

**博士課程に進んで**

情報学研究科 情報学専攻 通信情報システムコース 橋本研究室 博士後期課程3年 五味 唯 美

私は電気電子工学科出身で、橋本研究室に配属されてから5年が経ちました。現在はソフトエラーという、半導体集積回路における放射線の影響について研究しています。電気電子工学科で学んできた内容から考えると放射線という物理学に近いテーマには少し驚きましたが、今ではとても良い選択だったと思っています。放射線をデバイスに照射するために加速器施設に行くのですが、当時は右も左も分からないまま、橋本先生と頻繁に実験に出向いたことをとても懐かしく感じます。

私が博士課程に進んだ理由は非常に単純で、今の研究を続けたいと思ったからです。今思えば、最初のきっかけは初めての実験で産総研に行ったときでした。産総研の研究者の方と話しながら、こんな楽しい世界があるのだと感じました。今なお研究を楽しいものと感じられ、修士課程・博士課程と長く研究に携われたこと、橋本先生をはじめ共同研究者の方々には深く感謝しています。

さて、大学・研究生活の中で私がもっとも学んだことについて書きたいと思います。それは、洞察力です。ひとつのことに詳しくなると、さまざまなことが思い浮かび、思考が深くなる感覚があります。月並みかもしれませんが、この感覚を得るまで少し時間がかかった分、とても大きなものを得たと思っています。自分の研究の立ち位置や、グループ内での役割を意識する経験が、この感覚に導いてくれたのかと思います。残された大学生活の中でも、得られた経験をもとに研究をさらに進め、新たな経験・知識を積み重ねていきたいと思っています。

## 教室通信

## 電気電子工学科の近況

電気電子工学科 学科長  
通信情報システムコース 佐藤 高史

本年度より電気電子工学科長を拝命いたしました佐藤です。平素より卒業生の皆様には、本学科の教育・研究活動にご支援を賜り、心より御礼申し上げます。とりわけ学生の進路・就職に関しましては、日頃より多くのOB・OGの皆様にお世話になっております。私は現在、学部学生の就職担当も仰せつっておりますが、本学科では従来より学部卒業時に就職を希望する学生数が比較的少なく、その多くが大学院へ進学する状況に大きな変化はありません。そのため、就職担当業務を通じて卒業生の皆様と直接お話しする機会は決して多くはありません。しかしながら、先輩と学生の交流会をはじめ、インターシップの機会提供や職場見学情報のご提供など、卒業生の皆様からの継続的なご支援は、学生の将来設計に大きく貢献しております。この場をお借りして改めて感謝申し上げます。

進路に関して近年感じる変化の一つは、学生の志望する業界や企業の裾野が広がっていることです。従来からの電機・通信・半導体関連企業に加え、エネルギー、情報サービス、自動車、ソフトウェア、金融、コンサルティングなど、活躍の場は多様化しています。これは、電気電子工学科が対象とする学術分野が、デジタル化、AI、データサイエンス、カーボンニュートラル、スマートインフラといった現代社会の幅広い課題と密接に結びついていることの表れでもあると感じています。本学科で培った基礎学力や課題解決能力が、多様な分野で評価されていることを心強く思っております。

こうした社会的要請に応えるため、本学では教育・研究体制の強化を進めております。工学研究科（電気系）と情報学研究科では、大学改革支援・学位授与機構による「大学・高専機能強化支援事業（支援2）」に共同で応募し、令和6年度にハイレベル枠で採択されました。本事業では、現実世界と情報世界の双方に立脚した高度情報専門人材や、他分野と連携して情報技術の社会実装を推進できる人材、さらに最先端の情報技術を社会に広く普及・教育できる人材の育成を目指しています。これに伴い、工学研究科の電気工学専攻および電子工学専攻は再編され、令和8年度より「電気電子デジタル理工学専攻」が発足しました。研究室数は16から20へ拡充され、教員数も増加しております（詳細は専攻ウェブページをご参照ください）。あわせて、電気電子工学科の学生定員も令和8年度より12名増員されました。電気電子工学と情報学の融合領域を含む、より幅広い学びと研究の機会を学生に提供できる体制となっています。

このような状況の中、本年度は146名の新入生を迎えました。4月には、みやこめっせにおいて京都大学の入学式が行われ、その後、電気総合館大講義室にて学科ガイダンスを実施しました。またガイダンス終了後には、電気総合館4階ラーニングコモンズにおいて新入生歓迎茶話会を開催いたしました。茶話会の開催にあたっては、洛友会よりご支援を賜りました。卒業生とのつながりはもちろん、学生同士や学生と教員が交流する機会は、本学科にとって大切な財産です。皆様のご支援に深く感謝申し上げます。今年度も洛友会のご支援のもと、「エレクトロニクスサマーキャンプ」や「先輩と学生の交流会（電気系教室懇話会と同日開催）」などを継続して実施する予定です。これらの活動を通じて、学生が学年や研究室の枠を超えて交流し、知見を広げることを期待しております。

今後とも、電気電子工学科の教育・研究活動への変わらぬご支援とご高配を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

## 編集後記

7月28日に発生した熊本地震をはじめ、局所的な大雨や、40℃を超える酷暑など自然の厳しさを痛感する日が続いています。災害等で被災された方にお見舞い申し上げます。また、国際紛争やそれに伴う物資の流通の滞り、円安など、社会情勢も気がかりな状況になってきました。そのような中、前号で紹介しましたように、4月より工学研究科の電気工学専攻および電子工学専攻が一専攻化し、新たに電気電子デジタル理工学専攻が発足しました。本号は新しい体制になって初めてのcueになります。新しくなった研究室ラインアップをご覧ください。また、7月31日に京都大学が国際卓越研究大学に正式に認定されました。今後は従来の研究室の壁を取り払うだけでなく、学術分野の壁も取り払うデパートメント制への移行を目指すことになります。これまでとは全く異なるレベルの改革になることは間違いありません。変わらない1年を何度も繰り返してきた自分にとって、これからはこれまでの常識の通用しない世界になっていくのだな、と痛感します。自然災害や円安、物価高、我が国の世界的地位低下など厳しい環境の中で、大学の変革が若い人に希望を与えられるようになれば良いと思います。最後になりましたが、本号にご寄稿頂いた皆様、ご協力ありがとうございました。今後ともcueをよろしくお願いします。

[Y. G. 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

発行日：令和8年9月

編集：電気系 cue 編集委員会

橋本 昌宜、阪本 卓也、川山 巖、

後藤 康仁、横山 竜宏、岡本 亮、

伊藤 陽介、和田 修己（洛友会）

E-mail: [cue@kuee.kyoto-u.ac.jp](mailto:cue@kuee.kyoto-u.ac.jp)

[www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue](http://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

