

# CUE

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.55

MARCH 2026

[第55号]

巻頭言

自動車技術の進化：EV, AD/ADAS,  
SDV とそれを支える要素技術  
株式会社デンソー 研究開発センター 松ヶ谷 和沖

大学の研究・動向

パルス強磁場発生技術の進展とパルス強磁場  
中における磁気光学カー効果測定不成功  
大学院工学研究科 電子工学専攻 集積機能光学講座

産業界の技術動向

三菱電機が拓く未来：化合物半導体の  
「進化」と「革新」の最前線  
三菱電機株式会社 竹見 政義

新設研究室紹介

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

電気系専攻の改組に伴う分野名の変更等について

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 55号 目次

### 巻頭言

- 自動車技術の進化：EV, AD/ADAS, SDV とそれを支える要素技術  
…………… 昭和 62 年卒 株式会社デンソー 研究開発センター 松ヶ谷 和沖…………… 1

### 大学の研究・動向

- パルス強磁場発生技術の進展とパルス強磁場中における磁気光学カー効果測定  
……………大学院工学研究科 電子工学専攻 集積機能光学講座…………… 3

### 産業界の技術動向

- 三菱電機が拓く未来：化合物半導体の「進化」と「革新」の最前線  
……………三菱電機株式会社 上席執行役員 半導体・デバイス事業本部長 竹見 政義…………… 10

- 新設研究室紹介…………… 15

- 研究室紹介…………… 17

- 博士論文概要…………… 34

### 高校生のページ

- 軽量機械学習の原理と応用  
…………… 大学院情報学研究科 情報学専攻 情報回路アーキテクチャ分野（佐藤研究室）  
佐藤 高史、栗野 皓光…………… 56

### 学生の声

- 楽しい研究生生活のすゝめ  
……………工学研究科 電気工学専攻 久門研究室 博士後期課程 2 年 山本 謙太…………… 63
- 睡眠と家族、友人に支えられている大学生活  
……………エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻 土井研究室 博士後期課程 2 年  
内田 翔…………… 63

### 教室通信

- 電気電子デジタル理工学専攻発足に際して  
……………電気工学専攻 吉井 和佳、電子工学専攻長 白石 誠司…………… 64

### 賛助会員の声

- 鉄鋼業における DX 推進と操業自動化に向けた電気技術者の取り組み  
……………日本製鉄（株） 設備・保全技術センター 制御技術部 名古屋制御技術室  
檜垣 周佑…………… 66

- 電気系専攻の改組に伴う分野名の変更等について…………… 69

- 編集後記…………… 70

**巻頭言**

## 自動車技術の進化： EV, AD/ADAS, SDV とそれを支える要素技術

株式会社デンソー 研究開発センター 松ヶ谷 和沖



この度、縁あって昨年11月25日に開催された、令和7年度の電気系懇話会にて講演をさせて頂く機会を頂きました。会場である吉田キャンパス電気総合館大講義室に足を踏み入れるのは35年ぶりでしたが、講義室に入った瞬間に、学生時代の思い出が鮮やかに蘇り、とても懐かしくかつ落ち着いた雰囲気の中で懇話会に参加することができました。

講演の場では、名誉教授の高岡義寛先生に続いて登壇させていただきました。高岡先生は、1987年に私が学部の卒業研究を実施した際に、直接ご指導いただいた恩師です。卒業から37年経って、先生と同じ場に立って、電気系教室の先生や現役の学生の皆様の前でお話させて頂くことができ、大変光栄であり、感激しております。

私自身は、修士課程で石川順三先生の研究室にてイオンビームを使った酸化物薄膜の研究をご指導いただいた後、1989年に日本電装株式会社（現在の株式会社デンソー）に入社しました。デンソーでは、半導体結晶成長、高周波トランジスタ、マイクロ波／ミリ波IC、ミリ波レーダ、車車間／路車間通信システムの研究開発に従事してまいりました。その後、安全運転支援・自動運転のシステム開発、弊社の欧州・米国拠点での技術開発、グローバル研究開発戦略立案など、自動車に関わる技術開発全般に携わることができました。

これら技術開発の場で、事あるたびに感じたことは、京都大学の電気系教室で研究されている技術分野のすべてが、自動車技術の進化に深く関わっているという点です。このような背景から、講演では自動車技術の進化と、それを支える要素技術について、EV（Electric Vehicle：電気自動車）、AD/ADAS（Automated Driving/Advanced Driver Assistance System：自動運転／高度運転支援）、SDV（Software Defined Vehicle：ソフトウェア定義車両）の三つの観点から、私共デンソーの取り組みと業界動向についてお話ししました。以下にこれらの概要を紹介いたします。

はじめに自動車産業を取り巻く環境変化について紹介します。図1に我々が想定している2035年の自動車の将来像を示します。2035年には世界の乗用車の8割以上が電動化される見通しであり、電動化率は急速に拡大しています。また、2030年までに高度運転支援を搭載した車両が過半数を占めると予測されており、自動運転技術の進展が加速しています。さらに、SDVの進展により、車両の価値はハードウェアからソフトウェアへとシフトし、ソフトウェアの売上比率が2040年には38%に達すると見込まれています。これらの変化は、環境問題や交通事故の削減、物流効率化、多様なニーズへの対応など、社会課題の解決にも寄与します。

次にEVの普及と技術革新について述べます。電動化によるCO<sub>2</sub>排出量削減には、再生可能エネルギーの導入が不可欠であり、日本でも2030年に再エネ導入率36-38%を目標としています。また、LCA（Life

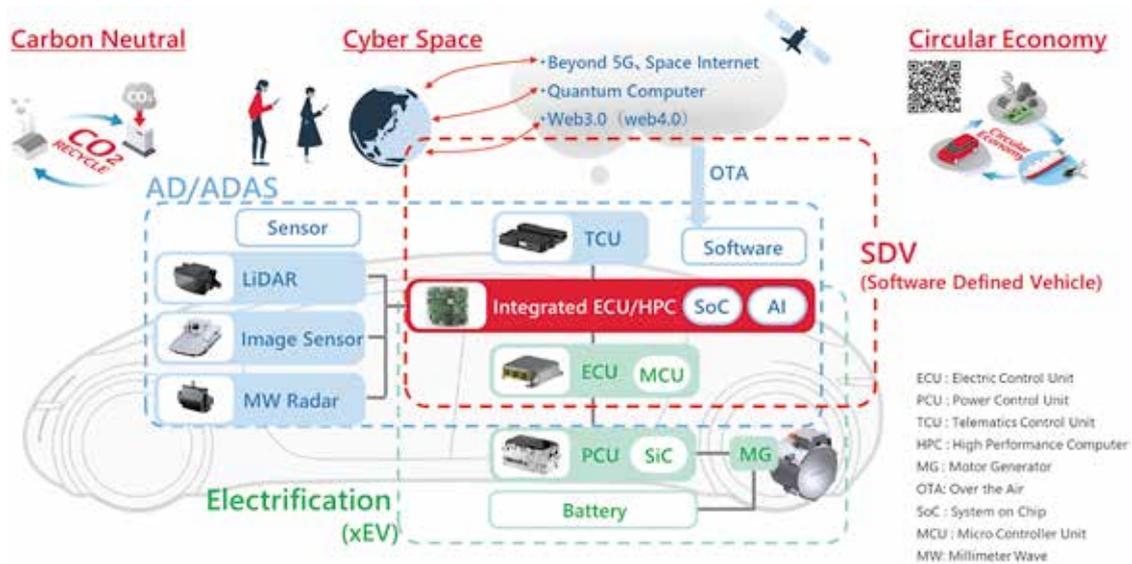


図1 2035年の自動車の姿とキーコンポーネンツ

Cycle Assessment) の観点から、自動車の原材料・製造・走行・廃棄のすべての工程にまたがってCO<sub>2</sub>排出を抑制するためには、HEV、PHEV（ハイブリッド・プラグインハイブリッド電気自動車）、BEV（バッテリー駆動電気自動車）、FCEV（燃料電池車）の全方位で電動化を推進することが重要です。我々デンソーは、SiCパワー半導体の開発・普及に注力しており、SiCデバイスは電力損失低減や小型軽量化に貢献します。さらに、道路上に敷設したコイルを介して、電磁界結合を用いて車両に電力を提供する、走行中給電システムの開発により、EVの航続距離を延長し、電池搭載量を減らして、走行時CO<sub>2</sub>排出量のさらなる削減を目指しています。

続いてAD/ADASの進展について紹介します。ADASやADの技術は、センサや半導体の進化によって実現されています。ADASでは、アダプティブクルーズコントロールや衝突回避支援ブレーキ、車線逸脱防止支援などが搭載されており、環境認識センサ（ミリ波レーダ、LiDAR、カメラ等）が重要な役割を果たします。ADでは、これらセンサに加えて、管制センターとの高信頼・大容量通信や、車両・インフラ連携が安全性向上のためには不可欠です。またAIアルゴリズムの高度化や高性能SoC(System on Chip)の開発により、認知・判断・操作の精度向上が図られています。

最後にSDVへの対応です。SDV化の進展により、車載コンピュータやECU（Electric Control Unit）の高度化が求められています。統合ECUの世界市場は2035年までに11倍に拡大すると推定され、車載ソフトウェアのコード行数も6倍に増加する見込みです。我々デンソーも40年以上にわたり車載ソフトウェアの開発実績を持ち、パワートレイン、走行安全、情報通信、ボデー制御など多彩なライブラリーを提供しています。グローバルにソフトウェア開発拠点を展開し、日本で培った品質管理基盤を世界に展開するとともに、人材育成や業界標準化にも積極的に取り組み、協調型モビリティ・エコシステムの構築を目指しています。

以上、自動車技術の進化を牽引するために、EV、AD/ADAS、SDVの三つの領域での取り組みを紹介いたしました。今後も半導体デバイス、電気電子回路、情報通信、ソフトウェアなど電気系教室で研究されている、様々な先端技術を取り込み、環境負荷低減、安全性向上、ソフトウェアによる新たな価値創出を通じて、持続可能なモビリティ社会の実現を目指してゆきたいと思っております。

## 大学の研究・動向

# パルス強磁場発生技術の進展と パルス強磁場中における磁気光学カー効果測定成功

電子工学専攻 集積機能工学講座  
米澤進吾

## 1. はじめに

電気電子工学を含め、あらゆる科学・技術分野において、磁場は電場と並んで最も基本的な場です。強い電場を発生させることは比較的容易であり、安価な電圧源が発生できる程度の電場でも電子の状態に大きな影響を与えることができるのに対し、強い磁場を発生させるのは大きな困難が伴います。

そのような状況を変革する手段として、ミリ秒からマイクロ秒という極めて短時間のあいだだけ強力な磁場を発生させるパルス磁場技術が注目されています。日本には、世界で唯一 1000 テスラを超えるパルス磁場 [1] を発生できる強磁場施設があり、磁気エネルギーが非摂動的な役割を果たす未踏領域に到達できる可能性を秘めています。また、実験室レベルで使えるほど小型でありながら 40 テスラを超えるようなパルス強磁場を発生させる装置 [2] がつくられ、大きな実験施設に赴かずとも気軽に強磁場を研究に使えるという状況も実現しつつあります。

本稿では、このようなパルス磁場発生技術の最近の進展を簡単に紹介したのち、当研究室で最近成功したパルス磁場下における磁気光学カー効果の測定 [3,4] についてご紹介します。

磁気光学カー効果は、磁石の表面で光が反射された際に光の偏光が回転するという現象です。この効果を利用すれば材料の磁気的な性質を非接触に検出できますが、パルス磁場下における磁気光学カー効果の測定は非常に難しく、従来は 10 テスラ程度の磁場までの研究例が数例あるだけでした [5,6]。我々は最近、様々な技術開発により、40 テスラを超える磁場中で磁気光学カー効果を測定することに世界で初めて成功しました [3,4]。これは磁気光学カー効果測定が行われた磁場の大きさに関する世界記録を大幅に更新したことになります。この成功は、基礎的な物性物理学や物性科学はもちろんのこと、応用磁性などの分野にも大きなインパクトがあると考えています。

## 2. 磁場の強さについて

まずは、身近にある磁場の強さについて考えてみましょう。図 1 にさまざまな手法で生み出せる磁場の強さをまとめました。方位磁針を北に向けようとする地磁気が最も古くから知られ、身近にある磁場かもしれません。地磁気の大きさは、磁束密度に換算して 0.00005 テスラ (0.05 ミリテスラ) 程度しかありません。黒板や冷蔵庫に張り付いている黒いフェライト磁石の発生させる磁場は 0.05 から 0.1 テスラの程度になります。最近では 100 円均一ショップでも強力なネオジム磁石が手に入ります。典型的なネオジム磁石表面の磁束密度は 0.1 から 0.5 テスラ程度となっています。サマリウムコバルト (サマコバ) 磁石の磁束密度はそれより少し低くなります。ネオジムやサマコバ磁石が鉄などに非常に強く張り付くのは日常的に経験するところですが、それでも磁場の強さはテスラ単位で 1 にも満たないのです。

永久磁石ではなく、電磁石を用いることで強い磁場を発生させることができると着想する方もいらっしゃるかもしれません。しかし、1 テスラを超えるような磁場を発生させるためには、電磁石のコイルに大きな電流を流さねばならず、電流によるジュール発熱が大きな阻害要因となります。そのような電

磁石には、多くの場合大掛かりな空冷や水冷の冷却システムが必要になります。ジュール発熱を回避する方法の一つが超伝導ワイヤーを使った電磁石を用いることです。実際、超伝導電磁石では10～20テスラ程度までの磁場を無損失で発生させることができます。磁気共鳴イメージング (MRI) 装置や、JR東海の建設している超伝導リニアにも1～3テスラ程度の超伝導電磁石が使われています。しかし、超伝導電磁石の性能も青天井ではありません。超伝導現象自体が磁場に弱いので、超伝導電磁石であまりに強い磁場を発生させると自分自身の超伝導を壊してしまうのです。

そこで、超伝導電磁石と通常の電磁石を組み合わせたハイブリッド電磁石を用いればさらに強い磁場を発生させることができます。つまり、外側に置かれた超伝導磁石である程度の強さの磁場を発生させたのち、その内側に置かれた銅製の電磁石でさらなる高磁場を目指すわけです。しかし、この方式では内側に置かれた電磁石のジュール発熱が当然非常に深刻になります。実際、世界最強の定常磁場である45.5テスラの磁場 [7] を発生させることのできるフロリダの強磁場施設では、最大磁場を出す際の消費電力は30メガワットにも上り [8]、これは大まかに言って平均的な家庭8万軒分もの消費電力に相当します。

### 3. パルス磁場発生技術の進展

どうしたら定常磁場の上限を超えるような磁場を発生できるでしょうか。その答えこそがパルス磁場です。まず、電荷をためたコンデンサの正負の電極をコイルでショートすることを考えてみましょう。すると、短時間に非常に大きい電流がコイルに流れ込むため、一瞬だけコイルに大きな磁場を生じさせることができます。生じる最大磁場はコイルのインダクタンスやコンデンサの容量に依存しますが、うまくこれらの量を調整すると、40テスラを超えるような磁場を実験室で発生させることが可能です。このような試みは以前から複数行われてきていますが、最近電気通信大学の池田氏らが開発した装置 [2] は、50 cm 四方に収まる大きさで、市販の部品や Raspberry Pi マイコン等を用いて組み立てられ、簡便に操作できつつ安定的な動作をするように工夫された優れたものです (図2)。

さらに、建物のワンフロアを埋め尽くすくらいに巨大なコンデンサを利用して莫大な電流の印加を可能とすることで、東京大学や大阪大学などにある強磁場施設にお

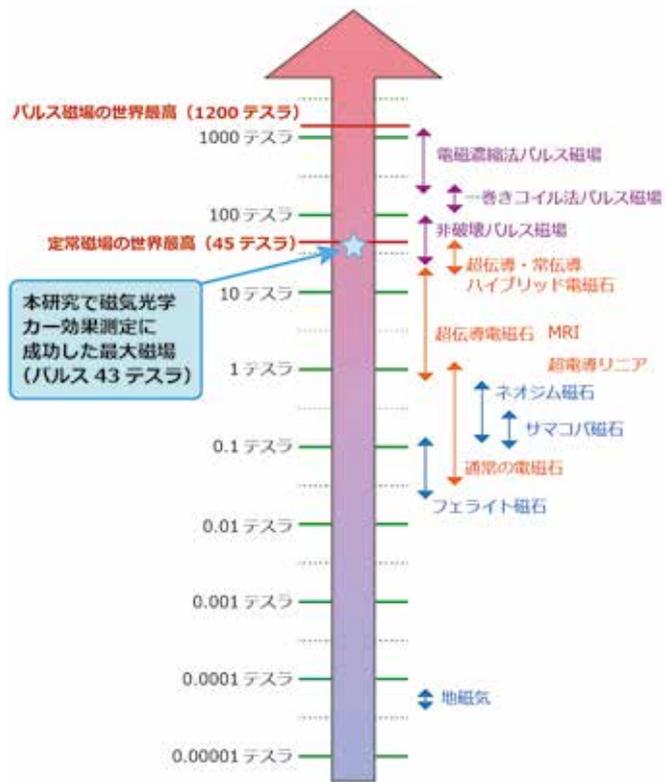


図1: 様々な磁場発生方法と発生可能な磁束密度の比較。最近、当研究室ではパルス磁場を用いて、43テスラの磁場中で磁気光学カー効果測定に成功しました。

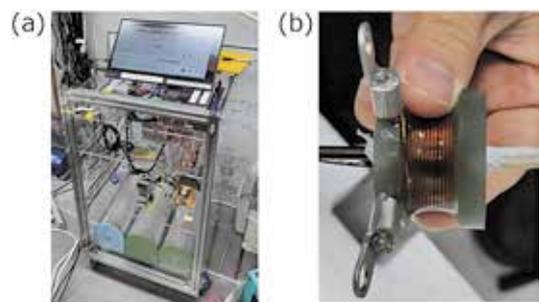


図2: (a) ポータブル 40 テスラパルス磁場発生装置。文献 [2] で説明されているものを当研究室に導入しました。(b) 磁場発生コイルの写真。

いては 60 から 80 テスラという大きさのパルス磁場を発生させることができます。

それでも磁場の強度が足りない場合は、破壊型のパルスマグネットを利用することになります。一卷きコイル法 [9] と呼ばれる方法では、インダクタンスの極めて小さい、銅板製の一卷きのコイルに巨大な電流を印加します。その発生する磁場は最大 200 ~ 300 テスラにも及び、磁場と電流の間に生じるローレンツ力によってコイルは引き延ばされ、磁場印加の直後に破断します。この実験を行う瞬間はかなりの爆発音が発生します。しかし、実験がうまくいった場合、試料などコイルの内側にあるものは無事に残ります。これは研究をするうえでは大きな利点となっています。

より強い磁場を発生させる方法としては電磁濃縮法 [1] があります。これはこれまで説明してきた「コイルに電流を流す」というアプローチとは異なり、「磁場を印加した金属円筒を高速に圧縮する」という方法をとります。金属円筒は短い時間では内部の磁束を保存しようとするので、円筒が圧縮されると面積が減少して磁束密度は極めて高い値をとりえることになります。金属円筒を等方的かつ高速で圧縮するために、外側に置かれた一卷きコイルに巨大な磁場を印加します。それによって円筒に生じた遮蔽電流との間の反発力によって円筒を圧縮するのです。3 テスラ程度の磁束密度を通した金属円筒を高速かつ等方的に圧縮することができると、その内部の磁束密度は一瞬だけ極めて高くなり、1000 テスラを超えるような値にまでも到達することができます。このプロセスは非常に破壊的であり、金属円筒はもとより、外側のコイルや試料もろともすべて吹き飛びます。現在、電磁濃縮法の実験が再現性高く行えるのは、世界でも東京大学物性研究所の強磁場施設のみで、極めて日本の優位性の高い分野となっています。

このような背景の下、現在、科学研究費補助金の学術変革領域研究 A のプロジェクトの一つとして、「1000 テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学」（2023 ~ 2027 年度；代表 松田康弘 東京大学教授）が走っています [10]。このプロジェクトは磁場エネルギーが非摂動的な役割を果たす新奇磁場効果の探索と解明を目的にしつつ、物理だけでなく化学・生物学・天文学などにおける磁場の効果を分野横断的に研究することも目指しています。また、パルス磁場実験のすそ野を広げるため、上述の小型のパルス磁場発生装置 [2] を配布するなどの試みも行っています。私もこのプロジェクトに属しており、もともと素人だったパルス磁場実験に取り組むまたとないチャンスを与えていただきました。

#### 4. パルス磁場下における磁気光学カー効果測定

パルス磁場を用いた研究における重要な課題の一つは測定手段が限られるという点です。パルス磁場の持続時間は、数十テスラのもので数ミリ秒から数十ミリ秒、100 テスラ級の一巻きコイル法では数十マイクロ秒、電磁濃縮法では 1 マイクロ秒程度です。したがって、このような短い時間でできる測定しか行えません。さらに、パルス磁場はその発生時に大きな電磁ノイズや機械的振動を引き起こします。したがってノイズや振動に対して強い測定方法が強く望まれます。そのような要求を満たしうる新しい研究手法として期待されるものとして、磁気光学カー効果があります。

以下、この章以降では、最近我々のグループで成功したパルス磁場下における磁気光学カー効果測定について紹介していきたいと思えます。

##### 4.1 磁気光学カー効果

冒頭でも簡単に述べたように、磁気光学カー効果とは、磁石などの磁性体の表面で光が反射された際に光の偏光が回転する現象のことです。例えば、図 3 のように直線偏光を持つ光を磁石に当てることを考えましょう。この時、N 極で反射された光の偏光は時計回りである角度  $\theta_K$  だけ回転しますが、S 極で反射された光は反時計回りに同じだけ回転します。この角度  $\theta_K$  をカー角度と呼びます。また、磁性

が弱くなればカー角度は小さくなります。磁気光学カー効果を用いれば、磁性を非接触に検出したり、磁性の空間分布を観測したりすることができるため、磁性の有力な研究手段として使われてきています。また、身近なところでは2000年代初頭に使われていた磁気光学ディスク（MOディスク；音楽を聴くのに使われていたMDもその一種です）のデータ読み取りに使われていました。

磁気光学カー効果は光を使った測定であるため、原理的にはかなり高速の測定が可能で、さらに電磁ノイズの影響を極めて受けにくいという性質を持っています。したがって、もし磁気光学カー効果をパルス磁場中で測定することができれば、強磁場中で起こる様々な興味深い現象を検出するための有力な手段となるはずです。

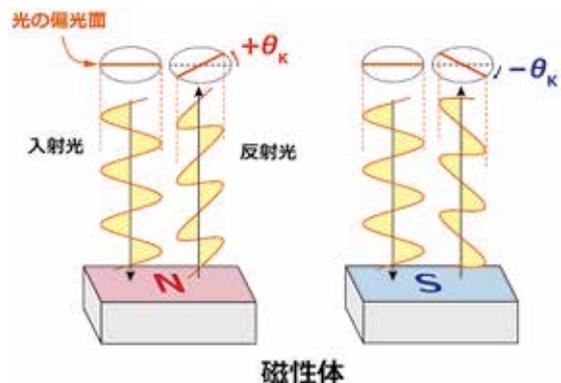


図3：磁気光学カー効果の模式図。反射の際、磁石の極性に応じて偏光面が  $\pm \theta_K$  回転します。この性質を利用し、非接触な磁性測定手法として使われています。

#### 4.2 パルス磁場中での磁気光学カー効果測定実現に向けた課題とその解決

しかし、磁気光学カー効果をパルス磁場中で測定するためにはいくつかの問題点がありました。まず、磁気光学カー効果は多くの場合非常に小さい効果であり、短時間で測定を行うにはそれだけ高感度の測定手法が必要になるという点です。比較的大きい効果を示す鉄などの強磁性体であっても、カー角度は10ミリラジアン（角度にして約0.6度）程度です。定常磁場中ではデータを長時間積算するなどでS/N比を向上できますが、パルス磁場中の測定ではわずかな偏光の変化を積算などに頼らずに高速検出する必要があります。また、パルス磁場実験に使われるコイルは、直径10ミリメートル以下と非常に小さいことが多いので、そのような小さな空間に試料を置き、光を当て、反射光を測定装置に戻すためのコンパクトなセットアップが必要になります。さらに、そのセットアップは機械的振動に対して強いことも望めます。実際、パルス磁場下における磁気光学カー効果測定の先行研究例は非常にわずか[5,6]で、室温において11テスラというのが従来の最高記録でした。

一つ目の高感度測定が必要という点については、我々の研究室で用いていたループレス・サニャック干渉計を用いることを着想しました。サニャック干渉計というのは、装置の回転運動を測ることができる光学装置で、光ファイバーベースのジャイロスコープにも使われている技術です。これを改良し、磁気光学カー効果測定に使えるようにしたのがループレス・サニャック干渉計です。これはもともと特殊な超伝導体が自発的に発生させる極めて小さい磁場を測るために開発された装置[11]で、1マイクロラジアン程度の分解能を容易に達成でき、データ積算などの工夫を行えば数十ナノラジアンの変化も検出できます。この装置を当グループでも2020年ころから導入しはじめていたのですが、高速測定が可能のように改良すれば一つ目の問題点を解決できることに気づきました。従来の方法ではロックインアンプを使って測定をしていたため、その時定数が高速測定に向けた主要なボトルネックでした。本研究では、2ミリ秒の間の光検出器からの電圧シグナルをすべてオシロスコープで取得・保存し、保存した波形に対してロックインアンプと同様の処理をパソコン上で数値的に行うことで高速測定を可能としました。

二つ目と三つ目の課題についてはかなりの試行錯誤がありました。当研究室では、従来はミニチュアの三脚のようなものを用いて光ファイバーと試料の距離や角度を正確に調整することで磁気光学カー効果を測定していました。しかしこの三脚は大きすぎるうえに、振動にも弱く、パルス磁場下で使うこと

はできません。様々な可能性を検討する中、図4のように Gradient index (GI) レンズという極めて小型のレンズをファイバーの先端に一体化させたものを用いることを着想しました。レンズはファイバー先端に取り付けられたフェルールという部品の中に埋め込まれており、ファイバーに対してずれたりすることはありません。また、フェルールは光ファイバー用のコネクタに使われる部品であり、安価でありながら高精度で作られています。また、フェルールを固定するためのフェルールスリーブという部品があり、フェルールをスリーブに差し込むだけで精度よく安定的な固定ができます。最終的に、図4に示すように、試料をレンズ付きフェルールと、何もついていないブランクのフェルールでサンドイッチすることで、試料で反射された光を高効率に光ファイバーに戻せることを実証しました。また、この方法は振動に強く、いったん固定してしまえば多少の振動ではびくともしません。さらに、試料を挟み込むだけで実験の準備が終了するという点も地味ながら非常に重要です。従来の三脚を使った方法では調整に数時間以上かかることも少なくありませんでした。新しい方法ではわずか数分で測定準備が完了するため、実験の効率性を大きく向上することができました。

#### 4.3 パルス磁場中での磁気光学カー効果測定の実験

「1000 テスラ」学術変革領域研究の活動の一環で作られたポータブルのパルス磁場発生装置 [2] (図2) を京都大学桂キャンパスの我々の研究室に導入したのは、2024年11月でした。その後、上述の固定技術を使ったパルス磁場下でのカー効果測定の実験を進め、1週間後には最初のデータをとることができました。さらに、解析方法の改善などを地道に積み重ね、2025年7月には液体窒素温度 (77 ケルビン) において 43 テスラもの磁場下での磁気光学カー効果測定に成功しました [3]。

図5にフェリ磁性体  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  に対する 43 テスラ磁気光学カー効果測定で得られたデータを示します。図5 (a) に示すように、1.7 ミリ秒の間に 43 テスラの磁場が発生されていることが分かります。図5 (b) はその間に測定された磁気光学シグナル (バックグラウンドを含む) であり、磁場の高速な増減に追隨してシグナルも変化していることが分かります。この時間依存性のデータを、磁場を横軸としてプロットしなおしたのが図5 (c) です。挿入図は生データの磁場依存性であり、磁気光学シグナルが急激に負の方向に立ち上がった後、緩やかに 43 テスラまで磁場に比例しながら変化していることが分かります。低磁場の急激な立ち上がりはフェリ磁性の磁化の飽和に起因するもので、その後の緩やかな変化はレンズ等の影響 (磁気光学ファラデー効果) に起因するバックグラウンドであると考えられます。高磁場側の変化を差し引いたものがメインのグラフです。数テスラまででカー角度が急激に立ち上がり、その後は  $-4.0$  ミリラジアン付近で一定値をとります。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の磁化飽和後のカー回角度の文献値は室温で  $-4.36$  ミリラジアン [12] であり、温度などの測定条件の違いも考慮すれば、今回の実験値とは十分一致しています。このことから、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の磁気光学効果をパルス磁場中で正しく測定できたと結論付けられます。

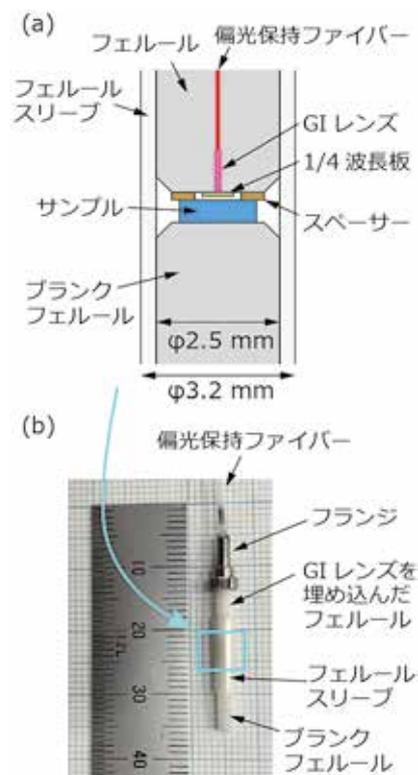


図4：本研究で開発したパルス磁場下磁気光学カー効果測定用の試料固定装置 [3]。(a) フェルールに埋め込まれた GI レンズを利用した試料固定部分の模式図。(b) 実際の固定部分の写真。

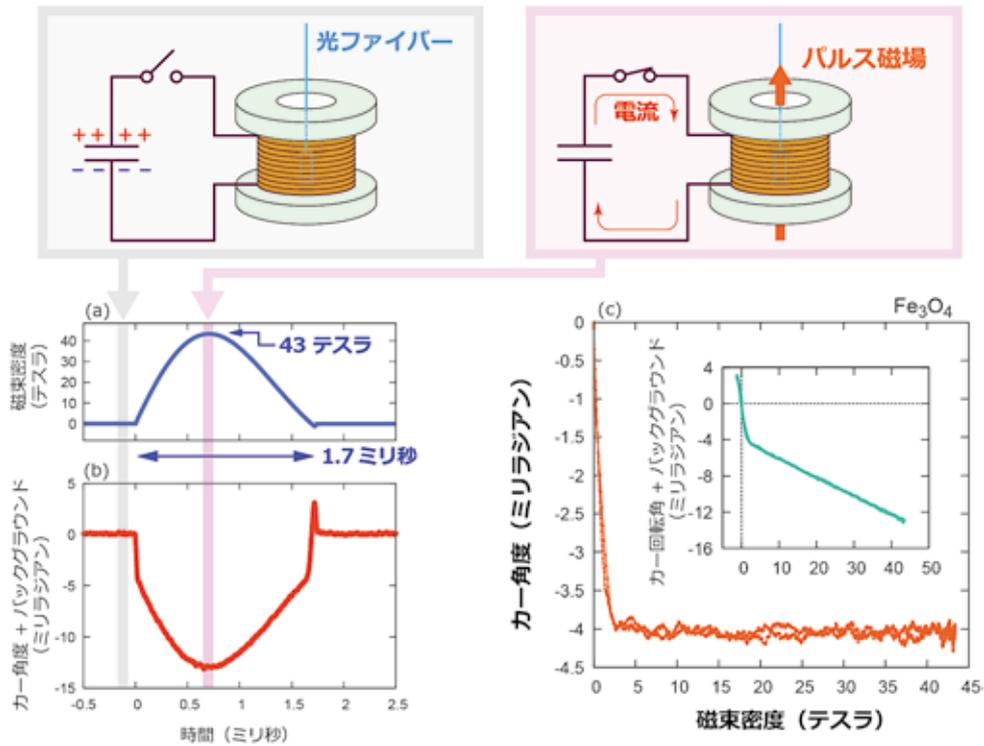


図 5：当研究室で成功した 40 テスラ超のパルス磁場中における磁気光学カー効果測定の結果 [3]。(a) 発生した磁場の時間波形。(b) 測定したフェリ磁性体 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の磁気光学シグナル（バックグラウンドを含む）の時間波形。(c) カー角度の磁場依存性。挿入図はバックグラウンドを差し引く前のグラフ。

#### 4.4 バイポーラパルス磁場下の磁気光学カー効果測定による磁気ヒステリシスの高速評価

応用的な観点では、本技術は磁性体の評価にも大きな力を発揮すると期待しています。磁性体の磁化と磁場の関係はヒステリシス曲線を描きますが、このヒステリシス曲線の性質、例えば囲まれる部分の面積が広いのか狭いのか、などは磁性体応用の重要な基礎データになります。したがって、このようなヒステリシスの測定が磁性体の評価において極めて重要です。

4.3 で用いたパルス磁場発生装置にダイオードを挿入することで、図 6 (a) に示すような、正負の磁場を交互に生じるバイポーラパルスを発生させることができます。そのもとでサマリウムコバルト磁石の磁気光学カー効果を測定した結果が図 6 (b) です [4, 13]。カー角度が明瞭なヒステリシス曲線を描くことが分かります。特筆すべきは、この測定にかかる時間がわずか数ミリ秒（解析を含めても 5 分程度）である点です。このようにわずかな時間でヒステリシス曲線の評価ができる本技術は、磁性体応用においても重要なツールになりえると期待しています。

### 5. まとめと展望

超強磁場領域の未踏の科学現象の探索や、実験室レベルでの高磁場を利用した研究など、パルス磁場発生技術が大きく広がりつつあり、本稿ではその現状を説明しました。また、当研究室からの研究例として、ごく最近成功したパルス磁場下における磁気光学カー効果測定についてご紹介しました。本研究の成果は従来のパルス磁場下磁気光学カー効果測定の世界記録を大幅に更新するものです。

今回開発した技術は、より大きい磁場を発生させることのできる強磁場施設のパルス磁場装置に組み込んで利用することも容易であり、100 テスラや 1000 テスラ級の磁場中での磁気光学カー効果への道も

大きく切り開かれました。実際、2025年11月には、東京大学物性研究所に我々の装置を持ち込んで磁気光学カー効果の測定を行い、非常にエキサイティングな結果も得られています。磁性を見る新しい「目」として、本技術の今後の活躍が期待できます。

本稿の主要部分は、当研究室の池田敦俊氏、中村颯汰氏、山根聡一郎氏、および電気通信大学の池田暁彦氏、野田孝祐氏との共同研究によるものです。また、学術変革領域研究 A「1000 テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学」をはじめ、いくつかの科学研究費補助金、および公益財団法人池谷科学技術振興財団、公益財団法人三菱財団からの支援をいただきました。ここに感謝いたします。

### 参考文献

- [1] D. Nakamura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89**, 095106 (2018).
- [2] A. Ikeda *et al.*, J. Appl. Phys. **136**, 175902 (2024).
- [3] A. Ikeda, S. Yonezawa *et al.*, Phys. Rev. Research **8**, 013169 (2026).
- [4] S. Yamane, S. Yonezawa *et al.*, JJAP Conf. Proc. **12**, 011011 (2026).
- [5] X. Chen *et al.*, Measurement **46**, 52 (2013).
- [6] S.-Y. Lin *et al.*, Chin. J. Phys. **55**, 698 (2017).
- [7] S. Hahn *et al.*, Nature **570**, 496 (2019).
- [8] <https://nationalmaglab.org/about-the-maglab/around-the-lab/meet-the-magnets/meet-the-45-tesla-hybrid-magnet/>
- [9] N. Miura *et al.*, J. Low Temp. Phys. **133**, 139 (2003).
- [10] <https://1000tesla.isssp.u-tokyo.ac.jp/>
- [11] J. Xia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).
- [12] W. F. J. Fontijn *et al.* Phys. Rev. B **56**, 5432 (1997).
- [13] 京都大学プレスリリース「40 テスラ超のパルス磁場中で磁気光学カー効果測定に成功 — わずか1000分の2秒で磁石の性質を明らかに —」 <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20260213>

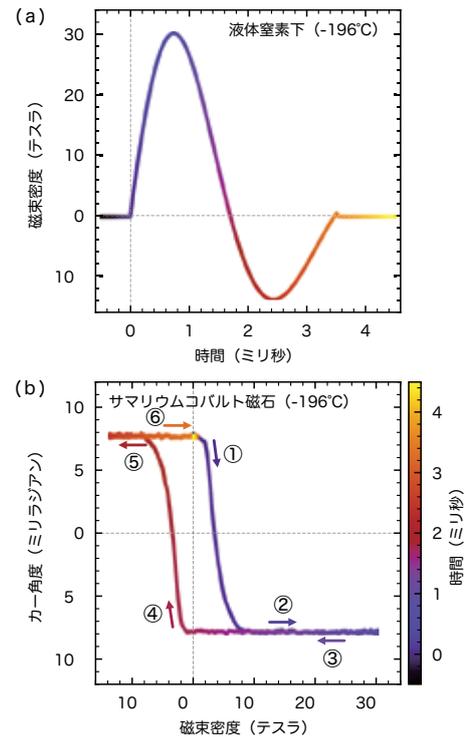


図 6：バイポーラパルス磁場下における磁気光学カー効果の測定例 [13]。(a) バイポーラパルスの時間波形。正の磁場に引き続いて、負の磁場が発生します。(b) サマリウムコバルト磁石に対する液体窒素温度における磁気光学カー効果の磁場依存性。明瞭なヒステリシスが観測されました。両図は当研究室 D3 の山根氏が作成したものです。

**産業界の技術動向**

## 三菱電機が拓く未来： 化合物半導体の「進化」と「革新」の最前線

三菱電機株式会社 上席執行役員 半導体・デバイス事業本部長

竹見 政義

### 1. はじめに

近年、脱炭素化やデジタル化の進展により、半導体は現代社会のあらゆる分野で不可欠な存在となっています。先端技術を巡る米中間の覇権争いや地政学的リスクの高まりを背景に、各国は国家戦略の一環として半導体の国内生産強化や研究開発への巨額投資を進めており、半導体は経済安全保障の観点からも戦略物資としての位置づけを強めています。

このような背景のもと、三菱電機の半導体・デバイス事業では、電力の効率的な制御・変換を担うパワー半導体と、高速通信や高精度センシングを可能とする光デバイス・高周波デバイスに注力し、「半導体の『進化』と『革新』で社会の変化を先導する」というビジョンを掲げ、グローバルに事業を展開しています。ここで言う「進化」とは、目的の達成に向けて性能を極限まで高めることであり、「革新」とは、新しい機能や価値を創出することで社会を変えることを意味します。

三菱電機の半導体技術の歴史は長く、特に化合物半導体分野ではレーザーダイオード（LD: Laser Diode）の黎明期から研究開発を推進してきました。その革新の軌跡を振り返ると、例えば、携帯電話端末用の高周波増幅器の高効率化・小型化が携帯電話の爆発的普及を支え、また記録型 DVD 用の高出力 LD の開発が世界標準の確立に寄与するなど、時代のニーズに応じた画期的な製品を通じて社会の発展を支えてきました。

本稿では、これらの背景を踏まえ、特に化合物半導体技術を切り口として、Si（シリコン）に代わる次世代パワー半導体として期待される SiC（炭化ケイ素）パワー半導体、大規模データセンターや AI ネットワークに不可欠な電界吸収型光変調器集積レーザー（EML: Electro-absorption Modulator integrated Laser）、そして Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（酸化ガリウム）パワー半導体やフォトニック結晶面発光レーザー（PCSEL: Photonic Crystal Surface Emitting Laser）といった新たな化合物半導体について、三菱電機の最先端技術と今後の展望をご紹介します。

### 2. 低消費電力化を実現する SiC パワー半導体

本章では、比較的大きな電力を扱う SiC パワー半導体について解説します。現在主流のバイポーラ型の Si IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）と比較して、ユニポーラで 600V ~ 10kV の高耐圧デバイスを実現できるのが SiC の大きな特長です。パワー半導体の損失はスイッチング損失と DC 損失に大別されますが、SiC では、ユニポーラによる高速化と、広いバンドギャップに起因するドリフト層の低抵抗化により、両者で大幅な低消費電力化が期待できます。化石燃料の燃焼を再生可能エネルギーと電化で代替する文脈において、パワー半導体が脱炭素社会に果たす役割は極めて大きいと言えるでしょう（図 1）。



図1：省エネ社会に貢献するパワー半導体

## 2-1 SiC 技術の発展

SiC パワー半導体は、京都大学の研究チームが見出したステップ制御エピタキシーによる世界初の高品質 SiC エピタキシャル層の実現<sup>1,2)</sup> が契機となり、複数の機関で実用化に向けた取り組みが開始されました。三菱電機は黎明期の 1990 年代半ばから、アカデミアならびに NEDO プロジェクトの支援<sup>3)</sup> を受けながら、SiC パワー MOSFET の開発に注力してきました。開発当初、SiC デバイスの作製技術は一般的に未熟であり、ウエハ品質も不十分でした。そのため、SiC に固有の高温プロセスなどの製造技術や、SiC の物性を活かした高性能を実現する MOSFET 構造の開発においては、性能と信頼性のトレードオフに常に配慮する必要がありました。こうした課題に対し、三菱電機ではウエハ中の結晶欠陥の性質に着目したスクリーニング法をいち早く開発・適用するなど、多角的な取り組みを進めてきました。なお、SiC の結晶欠陥はデバイスの良品率を決める主要因であり、今日でも重要な残課題として継続的に低減が図られています。

SiC パワー MOSFET は、SiC の優れた物性を活かし、高耐圧でかつ動作時の損失を極めて小さく抑制できる電力用スイッチです。三菱電機ではプレーナ型 MOSFET から開発を始め、JFET 部の構造最適化や基板の薄板化プロセス技術の開発など、デバイス性能向上に継続的に取り組み、第 2 世代品をリリースしています。さらなる低オン抵抗化のため、トレンチ型 MOSFET の開発も並行して実施しており、第 4 世代品として製品化を進めています(図 2)。これらを製品ラインナップとして備えることで、個々のアプリケーションに最適な MOSFET を提供することが可能になります。

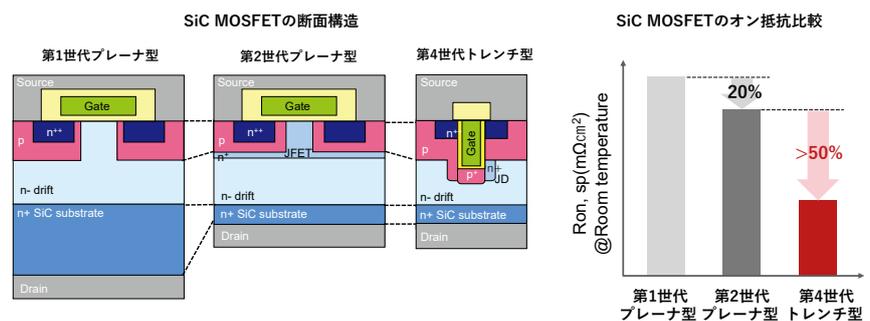


図2：SiC MOSFET 構造の進化

## 2-2 SiC パワーモジュール

三菱電機では、半導体部門とパワーエレクトロニクス部門の双方を社内に持つシナジーを活かし、早期から SiC パワーモジュールを活用した応用製品の開発にも取り組んできました。ここでは、SiC の優れた特性を効果的に装置へ応用している例として、3.3kV の高耐圧 SiC モジュールをご紹介します。

3.3kV モジュールは、SiC の高速性を活かすべく、モジュール内インダクタンスを最小化したハーフブリッジ構成を採用しています。低インダクタンス化は、P、N 配線を並行配置することで 14nH を実現しました。また、大電力応用で必要となるモジュール並列駆動にも対応可能です。従来の Si と比較し、

SiC の採用により 92% 減という大幅な低消費電力化を実現しました (図 3)。

高耐圧 SiC の最初の応用例となった電鉄では、パワーモジュールによる損失は全体の約 2% 程度ですが、SiC の高速性を活かした駆動波形のスムーズ化によるモーターロス低減や、低損失性を活かしたブレーキング時の回生率の向上により、主回路システム全体で 40% の低消費電力化を実現しています<sup>4)</sup>。新幹線をはじめとする電鉄における SiC 採用<sup>5)</sup> は日本が世界をリードする技術分野であり、本モジュールが果たす役割は極めて大きいと言えるでしょう。最新版では、SiC MOSFET に SBD (Schottky Barrier Diode) を埋め込むデバイス技術 (Unifull™) の採用により、3.3kV / 800A の大容量を実現しました。今後はさらなる高耐圧化を目指していきます。

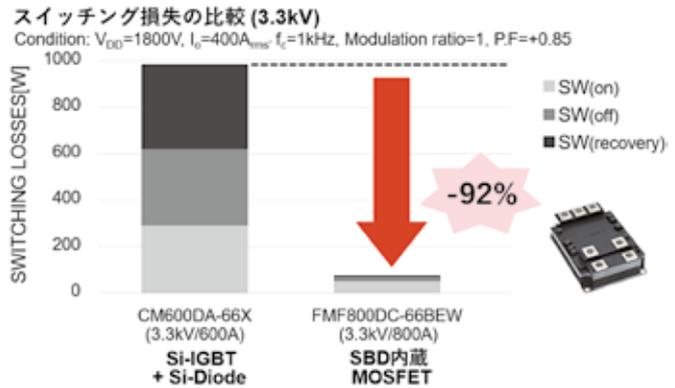


図 3 : 3.3kV SiC モジュールの損失改善効果

### 3. データセンターの高速大容量化に貢献する光デバイス

本章では、データセンター内の超高速光ファイバー通信を担う光デバイスについて解説します。LD はガスレーザーや固体レーザー等の他のレーザーと比べて桁違いに小型・低コストで、集積度を高められる特長があり、光ファイバー通信用光源として使われています。特に、大容量のデータを高速で処理するデータセンターでは、光デバイスの中でも最も高速で変調が可能な EML が使われています。

#### 3-1 InP 光デバイス技術

光通信用 LD や EML はインジウムリン (InP) 基板上に発光層の半導体をエピタキシャル成長した後、光導波路を形成し、品質保護を目的とした絶縁膜、電流供給用の電極などを形成して作製されます。EML は高出力・単一波長動作する LD、デジタル電気信号を入力することで光吸収量を変化させデジタル変調光を得る電界吸収型 (EA : Electro-Absorption) 光変調器、シングルモード光ファイバーに対する高い光結合効率を実現するスポットサイズ変換器 (SSC : Spot-Size Converter) をモノリシック集積したものです (図 4)。LD 部に定電流を注入して一定強度の光を EA 変調器に供給し、EA 変調器にデジタル電気信号を入力することで、デジタル変調光が得られます。光強度変調を LD の注入電流の ON/OFF で得る方式では、電子と光子の非線形相互作用に起因する緩和振動 (レーザーが発光を開始・停止する際に、光出力が一時的に揺れ動く現象) による変調周波数の上限が典型的には 30GHz 以下に制約されるため、超高速伝送には適しません。これに対し、データセンター用 EML では EA 変調器部の高速化を制約するキャパシタンスを最小化するため、図 4 (c) のように光変調に寄与する吸収層のみを残した構造を採用することで、70GHz という高いカットオフ周波数を実現しました (図 5)。この独自構造による高いカットオフ周波数が、次項に記す世界トップのデータ通信速度を実現させています。

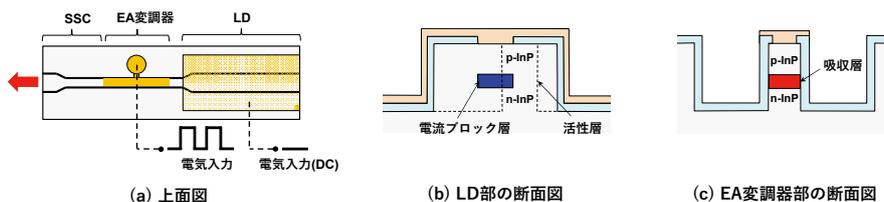


図 4 : EML チップ

### 3-2 データセンターへの応用

データセンターでは、AIモデルの構築、クラウドサービスの処理、動画等大容量データの配信が行われ、多数のサーバー間で大量のデータが交換されています（図6）。配線1本あたりのデータ通信速度は次世代システムでは毎秒1.6テラビット（Tbps）に達し、銅線や同軸ケーブルでは対応できないこの情報量を、光ファイバー中に複数の波長の変調光を通す（200Gbps × 8波長）ことで伝送します。

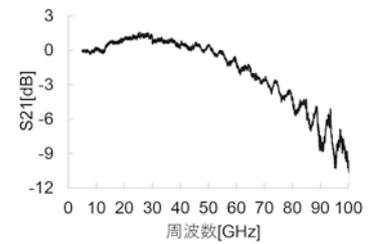


図5：周波数応答特性

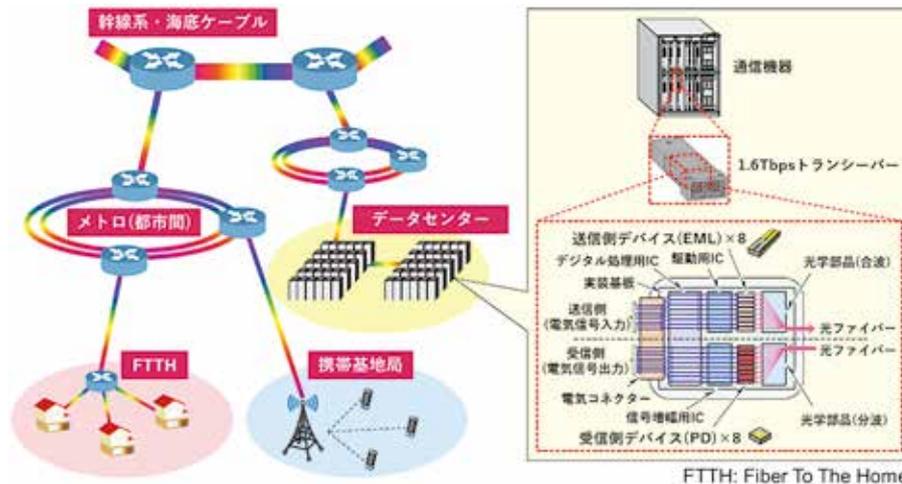


図6：光ファイバー通信網とデータセンター内光通信機器

また、超高速変調と低エラーレートを両立するため、データセンター機器内では図6の右下に示すように、電気信号入力はEMLチップに届く前段で、デジタル処理用ICにより多値化と誤り訂正符号処理が施されます。多値化とは、0/1の2階層のデジタル信号（1ビット）2個を00/01/11/10の4階層のデジタル信号（2ビット）1個に電気的に変換する技術です。パルス時間幅10ピコ秒（ps）に相当する100Gbaudのボーレート（1秒あたりの信号変化回数）で2ビットを送ることで、200Gbps伝送を可能にします。

三菱電機が開発したEMLの200Gbps変調光波形では、トレース（紫色）が10psのタイムスロットの中央で「00」「01」「11」「10」の各レベルが明瞭に区別でき、誤り率も規格値以下に低減できています（図7）。実システムでは、デジタル処理用ICによる誤り訂正符号処理により、実用上問題ないレベルまでさらに誤り率が低減されます。

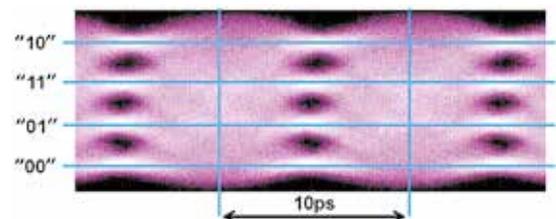


図7：200Gbps EML 変調光波形

同じ技術で作製し、発振波長のみ変えた8個の200Gbps EMLチップが1つのトランシーバーに納められ、ハイパースケールデータセンターには1サイトあたり数十万個から数百万個のEMLチップが使用されます。AIデータセンターではGPUの動向がよく報じられますが、超高速EMLもデータセンターの高速大容量化を支える基幹デバイスとして、さらなる発展が見込まれます。

## 4. 新たな化合物半導体技術の萌芽

WBG（Wide Band Gap）パワー半導体として、2章でご説明したSiCは既に商用化段階にありますが、バンドギャップがSiCや窒化ガリウム（GaN）よりも大きく、さらに高耐電圧かつ低電力損失の次世代パワー半導体として日本発の材料であるGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が期待されています。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は融液法によりバルク単結

晶を育成できることから、昇華法を用いる SiC に比べ製造時の温室効果ガス排出量が少なく、高品質で安価なウエハの実現が期待されています。一方で p 型化が困難、熱伝導率が非常に低いといった物性上の課題もあり、これら課題の克服のため、日本、アメリカ、中国などを中心に研究開発が行われています。三菱電機の先端技術総合研究所では、SiC の次の材料として Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワーデバイスの研究開発を 10 年ほど前から始めています。最近では総務省や NEDO の国家プロジェクト<sup>6)</sup>において、京都大学を始めとする多くの大学・企業と一緒に研究開発を行っており、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワーデバイスの社会実装を 2030 年代に実現することを目指しています。

また、特別に設計された周期的な屈折率分布を 2 次元的に配置し、結晶成長面と垂直方向にレーザー光を放射する、京都大学発の技術である PCSEL<sup>7)</sup> は、優れたモード選択性（単一波長発振、超狭ビーム動作）と高光出力の両立を可能にすることから、車載 LiDAR、産業・土木用 LiDAR、レーザー加工、空間光通信などの用途において、従来の半導体デバイスでは解決できなかったトレードオフを克服し、化合物半導体技術の社会実装領域を拡大していくことが期待されています。高光出力レーザーの社会実装における課題は、市場投入後に劣化や故障を引き起こさない品質保証にあり、特に半導体レーザー特有の高温・高光出力条件下で、正帰還的に劣化が加速されないようにする必要があります。三菱電機は、光子のエネルギーが大きく欠陥による劣化が顕著に表れやすい赤色高出力レーザーを DVD やレーザーディスプレイ用に量産した実績があり、この技術を援用して PCSEL の技術開発に着手しています。PCSEL の初期的な信頼性試験では、高温・大電流といった実使用条件よりも劣化が加速される条件下でも特性変動なく安定した動作を示しており、PCSEL が持つデバイス構造のロバスト性が社会実装に適していると考えております。こうした結果を踏まえ、製品化に向けた研究開発を進めています。

## 5. 最後に

世の中が大きく変わるとき、その原動力となるのは、常に半導体の「進化」と「革新」です。本稿でご紹介した化合物半導体技術は、半世紀にわたり日本国内の大学、企業で培われ、国際競争が激化した現在でも世界トップの競争力を維持し、大きな社会的意義を持ち続けています。

三菱電機は、長年培ってきた半導体技術をパワー半導体、光デバイス・高周波デバイスなどに応用し、大規模省エネやカーボンニュートラルの実現、安心・安全・快適な社会の構築といった、現代社会が直面する重要な社会課題の解決に貢献しています。これらの半導体は、持続可能な社会の実現を支える「キーデバイス」であると同時に、日本がグローバル市場で競争力を発揮し続ける上で極めて重要な分野でもあります。三菱電機はこれからも「進化」と「革新」を絶え間なく追求し、未来を拓く技術を通じて、活力とゆとりある社会の実現に貢献してまいります。

## 参考文献

- 1) N. Kuroda, et al., Ext. Abstr. The 19th Conf. on SSDM (Tokyo, 1987), p.227.
- 2) H. Matsunami and T. Kimoto, Mater. Sci. Eng. R20 (1997), pp.125-166.
- 3) <https://webmagazine.nedo.go.jp/images/201706sic/201706sic.pdf>
- 4) <https://www.odakyu-voice.jp/file/csr191224/book/pdf/10.pdf>
- 5) 鉄道総研報告 2022 年 2 月号 第 36 卷 第 2 号
- 6) [https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3\\_100313.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100313.html)
- 7) S. Noda, et al., Appl. Phys. Lett., 75, (1999), pp.905-907.

## 新設研究室紹介

### 量子機能工学講座 光量子電子工学分野（浅野研究室）

<https://hazel-train-542.notion.site/qoe/>

#### 物理的なアプローチと情報工学的なアプローチの融合によるデバイス開発

本研究室では、物理に基づく現象の理解や数値解析と、情報工学に基づくモデル化や構造生成を融合させ、足りない部分を補い合うことで、様々なデバイスの高度化や新規デバイスの創成を行うことを目指して研究を進めています。特に光電子デバイスを主な対象とし、以下のようなテーマに挑戦しています。

#### 光電子融合デバイス

近年、計算機システムやデータセンターの消費電力低減に向けて、情報処理の一部を光に置き換えることが検討されています。本研究室では、屈折率の周期構造によって光を制御できる2次元フォトニック結晶中に形成した超低損失微小共振器を光導波路を介して複数結合させ、その結合状態を光子寿命内に動的に変化させることで、光情報の直接バッファリングや光非相反機能などの高度な光操作を光チップ上で実現するための研究を行っています。このような機能の実現にはフォトニック結晶光回路に、キャリア注入によって屈折率を動的に制御するための電子回路を融合させる必要があります。また、これらを統合的に設計することで初めて機能が実現されます。上記の物理・情報融合アプローチの高度化も行いつつ、それを用いたデバイス機能の高度化や新機能の実現に取り組んでいます。例えば図1のデバイスでは、共振器Aに保持した光を電気パルス印加によって共振器Bに転送する光バッファ動作を実現しています。

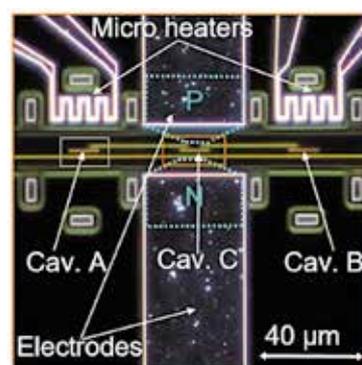


図1：光転送デバイス

#### 大面積高輝度半導体レーザー

2次元フォトニック結晶が形成するバンド構造では、バンド端近傍の状態を利用することで、大面積共振効果を実現でき、大面積高輝度半導体レーザーなどの多様な光デバイス応用が可能となります。本研究室では、フォトニック結晶の格子点形状やその空間的変調の設計によって、結晶面内での光波の結合状態を精密に制御することで、フォトニックバンド端を利用したレーザーの放射特性の制御や高効率化などに取り組んでいます。また、このレーザーが小型かつ高出力であることを活用した、金属3次元プリンタ装置をはじめとする各種レーザー加工装置への応用研究も進めています。現在の装置では、大型で複雑なレーザー光源や伝送用ファイバーを含む光学系が必要であり、これが装置の大型化・高コスト化を招く要因となっていますが、フォトニック結晶レーザーを用いることで、装置全体の小型化・効率化を目指しています。最近では、図2に示すようにCW動作で200Wを超えるアレイモジュールの開発に成功しています。

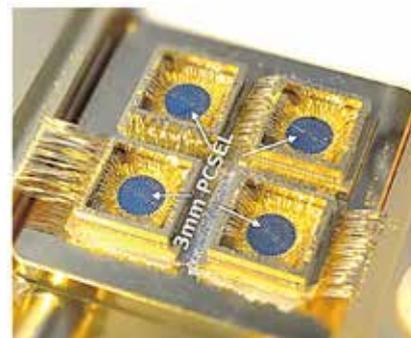


図2：フォトニック結晶レーザーアレイ

光量子デバイス

ダイヤモンド、シリコンカーバイド等の結晶中の発光性点欠陥（カラーセンター）には量子発光体として動作しうるものがあります。本研究室では東海大学山口研究室や韓国科学技術院 Kang 研究室と共同で、図3のようなカラーセンターと光ナノ共振器および格子振動との相互作用を詳しく解析し、高い発光効率と識別不能性をもつ光子を発生させるための固体共振器・量子発光体結合系の実現を目指した研究を行っています。共振器としては、光子寿命、電界強度の増強、光放射パターンなどを考慮した設計を行う必要があります、物理・情報融合アプローチに基づく取り組みが有効です。

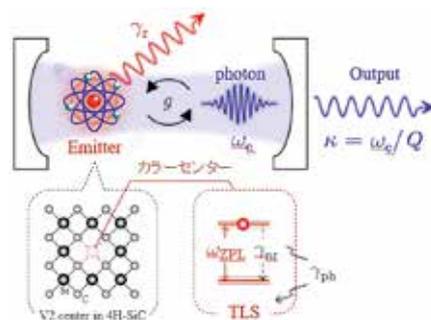


図3：カラーセンター・フォノン・共振器の相互作用

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、\*は「新設研究室紹介」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科 (大学院)

##### 電気工学専攻

先端電気システム論講座 (薄研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野 (阪本研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (吉井研)

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (久門研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座(中村武研)

##### 電子工学専攻

集積機能工学講座 (米澤研) ☆

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (船戸研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (浅野研) \*

量子機能工学講座量子電磁工学分野

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(デゾイサメーナカ研)

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学コース

知能メディア講座言語メディア分野

知能メディア講座コンピュータビジョン分野 (西野研)

##### 通信情報システムコース

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路アーキテクチャ分野 (佐藤研) #

集積システム工学講座低電力集積回路デザイン分野 (新津研)

集積システム工学講座集積回路コンピューティング分野 (橋本研)

##### システム科学コース

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座バイオサイバネティクス分野 (野村研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (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 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (橋口研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (小嶋研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (海老原研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

※ 分野名等は 2026 年 3 月時点のものです。

## システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

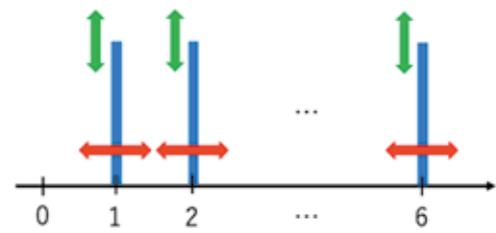
<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 環境や対象の確率的特性の時間変化に対応可能な確率制御

産業競争力の向上や人手不足の解消などを目的として、実世界におけるさまざまな分野で、人の手を極力介さず経済的かつ効率的にシステムを運用するための技術開発が進められている。産業革命以降の近代から現代まで、自動制御工学はそのような目的を達成するための要素技術の1つとして重要な役割を果たしており、人類文明の発展に貢献している。当研究室では、曖昧な情報しか事前に得られていない対象に対しても安心して自動制御技術を利用できるようになることが、次の時代の社会ではますます重要になるであろうという想定のもと、環境や対象が確率的に振る舞う（したがってどのようなシナリオが未来に実現するか不透明である）状況下での対象の適切な制御の仕方について、理論と応用の両面から研究を進めている。環境や対象の振る舞いを決める確率分布が時間的に変化し、しかもその変化の仕方が事前にはわからないような状況下で適切な制御を行うことは難易度が高い。そのような状況下でも、制御系の安定性等を保証できるよう（つまり安心して制御を利用できるよう）、関連する理論および技術の検討を進めており、その成果の1つとして論文 [1] を発表している。

論文 [1] では、特性が確率的に変動し、さらにその変動の仕方（=確率分布）が時間に応じて変化するようなシステムに対して、安定性を保証する制御理論を構築している。具体的には、 $k$  を離散時間、 $u_k$  を入力、 $x_k$  を状態とした離散時間状態方程式  $x_{k+1} = A(\zeta_k; \theta_k) x_k + B(\zeta_k) u_k$  で表される制御対象を扱っており、係数行列が分布の定まった確率過程  $\zeta_k$  と時変パラメータ  $\theta_k$  の両方に依存する状況を考えている。 $\zeta_k$  の分布は定まっているが、 $A(\zeta_k; \theta_k)$  の分布は  $\theta_k$  の値にも依存するため、その値に応じて変化することになる。 $\theta_k$  はオンラインで利用できる場合と利用できない場合の両方を考えることができ、利用できない（つまり完全に未知の時変パラメータである）場合には、あらゆる変化に対して安定性等を保証するロバスト制御器を設計することになる。一方、何らかの観測に基づいて  $\theta_k$  の値をオンラインで利用できる場合には、その情報を活用して制御ゲインをリアルタイムで調整するゲインスケジュールド制御器  $u_k = F(\theta_k) x_k$  を設計することで、制御性能を向上させることができる。論文 [1] では、これらの制御を適切に行えるようにするための理論を、リアプノフ不等式の考え方に基づいて構築している。

上記の制御で扱える確率的な特性の変化は、仮想的なサイコロ（右図）を題材に例えて言うと、サイコロを振って出うる目の値の変化に対応するものである（図の赤矢印）。ロバスト制御の場合には、出うる目の値が想定する範囲でどのように変化したとしても、安定性などの性質を制御系が失わないように制御することが可能になる。また、もし出うる目を変化させるパラメータが実際の制御時に利用可能である場合には、その値に応じてゲインスケジューリングすることで、制御性能の改善を目指せる。一方、このサイコロの例で言うと、出うる目だけでなく、各目が出る確率の方も、変化する余地がある（図の緑矢印）。このような変化に対しても対応できるような制御系を構成することも実は可能であり、その基礎理論の研究も進めている。これらの理論や技術は、発展著しい AI 技術を援用した（あるいは AI そのものによる）制御と併用する形で利用できるようになることが期待される。このような制御の研究が、次の時代の社会において制御を安心して利用することにつながることを期待している。



図：サイコロの目の確率分布

- [1] Y. Hosoe, Y. Michitani, D. Peaucelle and T. Hagiwara, Stochastic gain-scheduled control of discrete-time systems characterized by random polytopes, *IEEE Control Systems Letters*, Vol. 8, pp. 229-234, 2024.

## 生体医工学講座 生体機能工学分野 (吉井研究室)

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

### 「光ポンピング磁気センサによる末梢・中枢神経系の信号伝達計測」

我々の研究室では、光ポンピング磁気センサ (Optically pumped magnetometer: OPM) と呼ばれる極低温冷却を必要とせず、小型・軽量かつ高感度な磁気センサの開発を進めている。これは頭皮上や神経近傍に近接配置できるという利点を有しており、電極状態や皮膚・組織の伝導率の影響を受けやすい脳波や表面筋電図と比較して、より安定した神経活動計測が可能となる。本研究では、OPM を用いて、末梢神経刺激から大脳皮質応答に至る神経伝導および神経伝達過程を、生体磁気信号として時空間的に計測する手法を検討した [1]。

実験では、肘部および腋窩部に OPM を配置して末梢神経磁場を計測すると同時に、頭部の C3、P3、T3 付近に OPM を配置して皮質性感覚誘発磁場 (Somatosensory evoked field: SEF) を計測した。これにより、末梢神経刺激後の信号がどのように中枢へ伝達されるかを、同一計測原理に基づいて評価することが可能となった。使用したセンサは企業との共同研究で開発した 6 チャンネルのスピントラップ緩和フリー (Spin-exchange relaxation free: SERF) OPM であり、その磁場計測感度は数十  $fT/Hz^{1/2}$  の性能を有している。図に実験の様子と結果を示す。正中神経を電気刺激し、末梢神経磁場と皮質 SEF を同時に記録した結果、刺激後約 20 ms 付近に安定した N20m 成分が観測され、その後約 35 ms 付近に P35m、約 60 ms 付近に P60m 成分が現れることが確認された。また、末梢神経に沿って配置した複数の OPM 間の到達時間差を用いて神経伝導速度を算出した結果、約 50 ~ 60 m/s の値が得られ、従来の電気生理学的知見と整合することが確認された。これは OPM を用いた末梢神経磁場計測が、神経伝導評価の手法としても有効であることを示している。さらに、末梢神経磁場と皮質 SEF を同時に計測することにより、末梢刺激から皮質応答に至る時間遅れを評価でき、神経伝導とシナプス伝達を含む中枢処理過程を統合的に捉える可能性が示された。

この結果より、従来は別システムの計測装置で評価していた末梢・中枢神経活動を一つの磁気計測システムで連続的に観測できる点が本研究の大きな特徴である。これは OPM を用いた柔軟かつ近接配置可能なセンサアレイにより、末梢神経と脳活動を同時に高感度で磁気的に計測できることを実証したものであり、今後の BMI システム、神経リハビリテーション、神経疾患の診断支援などへの応用が期待される。OPM による生体磁気計測は、神経情報をより直接的かつ安定に取得できる新しい神経センシング基盤として大きな可能性を有している。

[1] 植松、上田、吉井、伊藤、電気学会研究会資料 MAG-25-196 (2025).

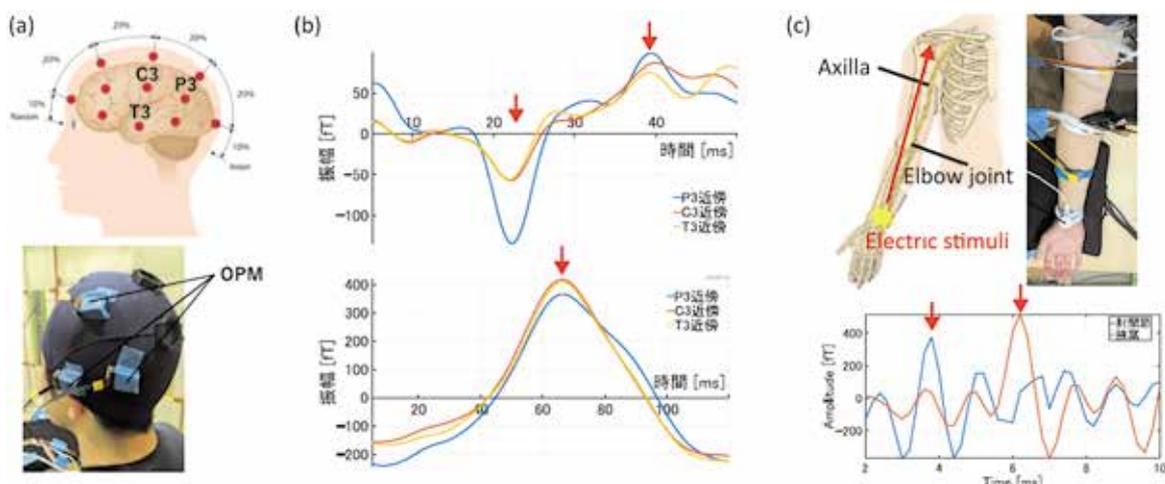


図 (a) SEF 計測時の OPM の配置図、(b) SEF の計測結果。N20m および P35m と N60m とで周波数帯域が異なるため、異なる帯域通過フィルタを用いて処理している。(c) 正中神経伝達磁場計測の様子と結果。電気刺激位置に近い肘関節のセンサで先に信号が観測された後、腋窩で信号が観測される。

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (久門研究室)

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

「回路のポートに基づく境界付き複素グラフニューラルネットワーク」

生成 AI が日常的に使われる中で、物理的な対象に対してもニューラルネットワークの適用が様々な形で試みられている。物理系に対しては、系の支配方程式、対称性や保存量などに加えて、対象の幾何学的情報をニューラルネットワークとして適切な形で反映させることが重要になる。ニューラルネットワークは適切な形で構成することにより、機能が向上するとともに、学習のダイナミクスも単純になり、ロバスト性が生まれる。そこで当研究室では、電気回路を対象として、ネットワーク構造やダイナミクスの情報を適切にニューラルネットワークネットワークのアーキテクチャに反映させる手法の研究を進めている。

対象となるシステムのネットワーク構造を反映させる手法としては、グラフニューラルネットワークの有効性が知られている。これは畳み込み層のトポロジーとして、対象システムと同一のトポロジーを用いることで、結合関係の情報をニューラルネットワークの同変性としてもたせるものである。従来知られていた方法は、結合関係の特性のみが議論される場合が多かったが、文献 [1] では結合関係だけでなく、系のダイナミクスまで反映させるため、回路におけるポートの概念に基づき境界付きグラフという概念を提唱した。これは対象とする系が閉じた系だけでなく開放系への拡張となる。

境界付きグラフとは図 1 (a) のような境界無しグラフに対して、ダイナミクスに応じて (b) のような回路を対応させ、そのダイナミクスにおけるポートを図 (c) のように設定し、対応する形で境界付きグラフ (d) を構成するものである。このようなグラフにより、ネットワークダイナミクスを反映したニューラルネットワークが構成できる。また、フェーザを対象とした場合は、非線形性をもつ活性化関数においても、図 2 のような振幅特性をもち、位相を保存する複素関数を用いる。図 3 では境界付き複素グラフニューラルネットワークの有効性の一例を境界の有無で比較したものを示す。この例は、対象とする系のダイナミクスをニューラルネットワークにも反映させることの有効性を示している。

参考文献 [1] A. Suzuki, T. Hisakado, Complex-Valued Graph Neural Networks with Boundary Conditions Based on Circuit Ports Analogy, Proc. NOLTA, pp. 164-167, 2025.

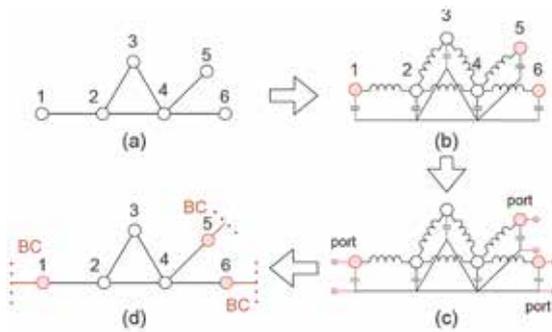


図 1 回路のポートに基づいて導入される境界付きグラフ

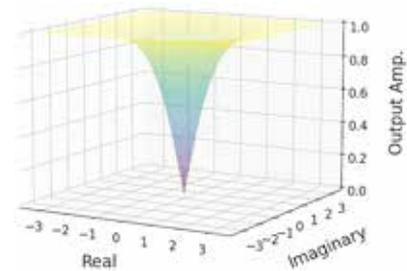
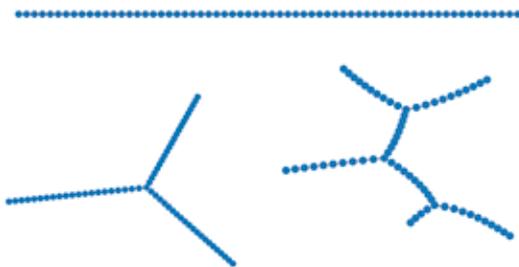


図 2 複素活性化関数



	w/o BC [2]	w/ BC [proposed]
path	95.5 ± 1.7%	<b>97.4 ± 1.5%</b>
branch	98.4 ± 1.1%	<b>99.5 ± 0.8%</b>
multi branch	98.6 ± 0.6%	<b>99.9 ± 0.2%</b>

図 3 評価に用いたグラフ構造 (path, branch, multi branch) とそれぞれの構造に対する推定結果

## 電子物理工学講座 応用量子物性工学分野 (竹内研究室)

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「多数の光子のもつれ合いを一括で測定する新技術を開発」

光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、量子技術の有力な担体です。特に、さまざまな経路（モード）に存在する多数の光子が量子力学的な相関をもつ「多光子量子もつれ状態」は、光量子暗号の長距離化や、光量子センシング、また光量子コンピューティングのリソースとして注目されています。これらの技術を実現するためには、多光子量子もつれ状態を自在に生成するだけでなく、与えられた状態がどのような多光子量子もつれ状態であるかを効率的に「識別」する計測技術が不可欠です。しかし、状態推定に一般的に用いられる、個々の光子を個別に測定する方法（量子トモグラフィ）では、光子の数に対して指数関数的に多くの回数の測定が必要となり、問題となりました。それに対して、入力された多数の光子を、特定の「多光子もつれ状態」にあるかどうかを一括して測定するのが「量子もつれ測定」です。2つの光子のもつれ状態に対するもつれ測定である「ベル測定」は、量子テレポーテーションなどで中心的な役割を果たしています。光子数が3以上の場合の、「多光子量子もつれ状態」に対するもつれ測定は、「GHZ状態」に対するものが1998年に提案され、その後実現していましたが、より応用の幅が広いとされる、任意の光子数の「W状態」のもつれ測定は提案されておらず、また実験的にも実現されていませんでした。

今回我々は、多数の光子からなるW状態を、一括で一度に識別する方法を新たに開発、さらにその実証実験に成功しました。まず、W状態が持つ「巡回シフト対称性」という性質に着目し、任意の光子数のW状態に対して、「量子フーリエ変換」を行う光量子回路を用いることで量子もつれ測定を実現する方法を理論的に提案しました。この方法は、入力された光子がどのようなW状態に存在するかを、1回の測定で、原理的には100%の効率で識別することが可能です。さらに、我々は、この提案方式を3つの光子に対して実証するための装置を、変形サニャック干渉計に独自に開発した特殊な光学素子を埋め込んだ、極めて安定な量子フーリエ変換光回路を用いて実現しました。3つの光子を適切な偏光状態で装置に入力することで、構築した装置が3光子W状態を識別可能かどうかの評価実験を行いました。その結果、様々なW状態に対する光子検出信号のパターンは、理論予測と良い一致を示しました(図)。さらに、それらの結果から、「測定識別忠実度」を求めたところ、 $0.871 \pm 0.039$ という高い値を達成しました。

W状態に対するもつれ測定の実現は、多数の光子が複雑に重ね合わさった「量子もつれ」状態の識別を飛躍的に効率化するだけでなく、多数の光子に対する量子テレポーテーションなどの実現に路を拓く成果です。また、多者間での新しい量子通信プロトコルの実現や、多光子量子もつれ状態の転送、さらには測定型の量子コンピューティングの新たな手法につながることも期待されます。

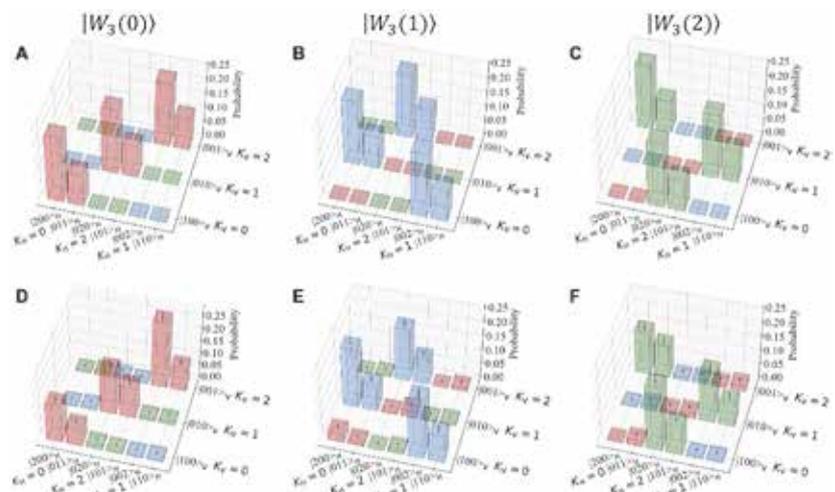


図 光子検出信号パターン。A, B, C: 理論予想。D, E, F: 測定結果。

参考文献: G. Park, H. F. Hofmann, R. Okamoto, and S. Takeuchi, "Entangled Measurement for W States" *Science Advances* **11**, eadx4180 (2025).

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
「SiO<sub>2</sub>/SiC 界面に形成した単一光子源の密度制御」

広禁制帯幅半導体中の特定の欠陥は、欠陥が形成するエネルギー準位が外場に応じて分裂し、欠陥を介した発光が変化することが知られており、近年これを利用した高精度・高空間分解能の量子センサが注目されています。炭化ケイ素 (SiC) 半導体はパワーデバイスとしての社会普及が著しく進展しており、大口径 (8 インチ) 基板が安価で手に入ることから、量子センサの産業応用の観点でも注目を集めています [1,2]。SiC 中の量子センサ応用可能な欠陥として Si 原子が格子位置から抜けたもの (Si 空孔) などが知られていますが、その欠陥の生成には高エネルギーに加速された粒子 (例: 電子線) の照射が必要となります。一方、コスト低減の観点からこのような加速器を用いずに量子センサ応用可能な欠陥の形成が可能であることが望ましいと言えます。ところで、このような発光欠陥は SiC 内部以外にも SiO<sub>2</sub>/SiC 界面に存在することが報告されています [3]。SiO<sub>2</sub>/SiC 界面はパワーデバイス製造に広く用いられる熱酸化プロセスで形成でき、界面欠陥の発光強度が SiC 内部の発光欠陥と比較して 1 桁以上大きい利点を有しています。しかし、界面欠陥の欠陥構造は明らかにされておらず、エネルギー準位の外場応答も明らかになっていません。本研究室では、パワーデバイス応用の観点から SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥の研究に取り組み、これまでの知見を活用してこのような界面発光欠陥に関する研究を進めています。

今回、SiO<sub>2</sub>/SiC 界面発光欠陥の密度制御に成功しましたので紹介します [4]。図 1 に 900°C、1100°C、1300°C で酸化した試料からの発光の共焦点マッピング像を示します。SiO<sub>2</sub>/SiC 界面は熱酸化で形成し、形成後の炉内部を酸素 (O<sub>2</sub> 降温)、窒素雰囲気 (N<sub>2</sub> 降温) の二つの場合を用意しました。図 1 (a)-(c) は O<sub>2</sub> 降温、(d)-(f) は N<sub>2</sub> 降温の試料のマッピング像です。O<sub>2</sub> 降温の場合、多くの輝点を確認され、各酸化温度で酸化した試料間で大きな差は見られませんでした。図 1 (b) (1100°C 酸化、O<sub>2</sub> 降温) の輝点に対して単一光子の放出を確認する測定 (光子相関測定) を行ったところ、O<sub>2</sub> 降温の試料では多くの光子源が形成されており、一つの輝点に複数の光子源が存在していることがわかりました。一方、N<sub>2</sub> 降温の試料では、酸化温度の上昇とともに輝点密度が著しく減少しました (図 1 (d)-(f))。図 1 (e) (1100°C 酸化、N<sub>2</sub> 降温) の輝点に対して光子相関測定を行ったところ、孤立した界面発光欠陥であることが確認できました。輝点密度の酸化温度依存性を図 2 に示します。図 1 (a)-(c) からわかるように、O<sub>2</sub> 降温の試料の輝点密度は高く、酸化温度に依存しませんでした。一方、N<sub>2</sub> 降温を行った試料の輝点密度は、温度上昇に伴い減少しました。O<sub>2</sub> 降温の試料では降温時にも若干の酸化が進行し、この際に当該発光中心が形成されると解釈できます。今回、酸化温度を変えることで 10<sup>5</sup> ~ 10<sup>8</sup> cm<sup>-2</sup> の範囲で輝点密度を制御することができました。今後、形成した界面欠陥の光物性を詳細に評価し、量子センサとしての応用を検討します。

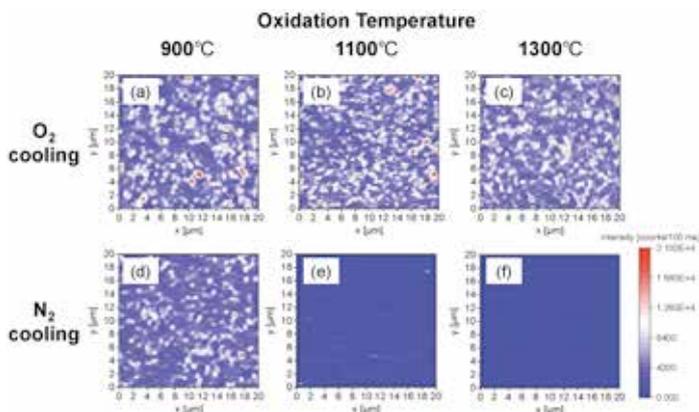
[1] H. Kraus, *Nano Lett.*, **17**, 2865 (2017).[2] M. Niethammer et al., *Nat. Commun.*, **10**, 5569 (2019).[3] A. Lohrmann et al., *Appl. Phys. Lett.* **108**, 021107 (2016).[4] M. Kaneko et al., *APL Mater.* **11**, 091121 (2023).

図 1 : 酸化条件を変化させた SiO<sub>2</sub>/SiC 界面に対する共焦点マッピング像

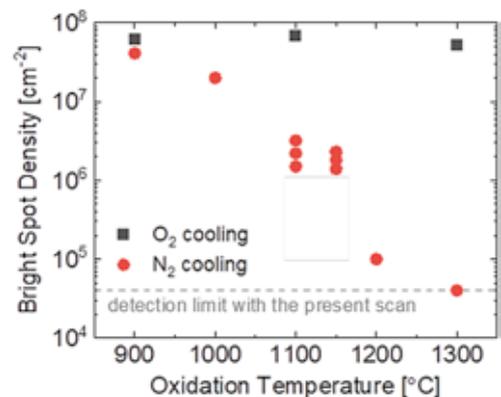


図 2 : 輝点密度の酸化温度依存性

## 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

## 時間分解静電気力顕微鏡による金属電極 / 有機薄膜界面のショットキー障壁評価

近年、簡便なプロセスで柔軟かつ軽量のトランジスタとして有機薄膜トランジスタ (organic thin-film transistor: OTFT) が注目を集めている。その実用化へ向けた課題の1つが、金属電極 / 有機薄膜界面における電荷注入障壁である。電荷注入障壁は、駆動電圧の上昇やトランジスタのオンオフ比の低下を招き、OTFTの性能を制限する。これまで、OTFTの界面抵抗の測定には、四端子測定法や伝送線路法等の手法が用いられてきたが、これらは通常、金属 / 有機 / 金属と二つの界面を含むデバイス構造の測定となるほか、有機薄膜チャンネル内に存在する多数の粒界の影響を受けるため、金属 / 有機界面だけの電気物性の直接評価は容易ではなかった。

本研究では、原子間力顕微鏡 (AFM) の探針と試料との間にはたらく静電力の時間変化から探針直下の電位の時間発展を計測することができる時間分解静電気力顕微鏡 (tr-EFM) を用い、Au電極に接続された単一ペンタセン薄膜 (結晶粒) への電荷注入特性を評価した (図1)。Ptコートされたカンチレバー探針に対して  $f_{\text{tip}} = 5$  kHz の変調電圧を印加しておき、AFM像の撮像中に、走査範囲の全点でAu電極へ電圧パルスを印加した。探針と探針直下の領域の電位が異なる時、カンチレバーの共振周波数が変調周波数  $f_{\text{tip}}$  で変調され、その周波数シフト変調の大きさは探針直下の領域の電位に依存する。そこで、カンチレバーの共振周波数信号に含まれる  $f_{\text{tip}}$  成分の振幅の時間変化を記録し、ある時間における各点の周波数変調振幅を tr-EFM 像として再構成した。図2は、Au電極に +2.5V の電圧パルス (継続時間 20 ms) を印加した後の tr-EFM 像であり、ペンタセン結晶粒内で一様な電位分布があり、電位差が徐々に上昇していることが分かる。この電位変化の時間微分から薄膜への電荷 (正孔) 注入量を算出し、界面電圧 - 電流特性を再構築したところ、電流値はフェムトアンペアオーダとなった (図3)。電圧パルスを切った後の tr-EFM 像は、正孔排出過程に対応しているが、正孔注入過程と排出過程では非対称な特性が得られ、界面に金属 - 有機物ショットキー障壁が存在することが示唆される結果となった。これは、Au電極のフェルミ準位と有機薄膜の最高被占軌道 (HOMO) 準位とのエネルギー差によるショットキー障壁に対応していると考えられる。

今後、バッファ層の導入や電極の修飾を行い、同様の手法により界面抵抗を評価することで、界面ショットキー障壁を低減し、低電圧で電荷注入可能な界面設計を行い、高性能有機薄膜トランジスタへ繋げていく。

## 参考文献

- 1) T. Kimura, K. Kobayashi, Y. Yamagishi, and H. Yamada, Applied Physics Letters 125, 263301 (2024).

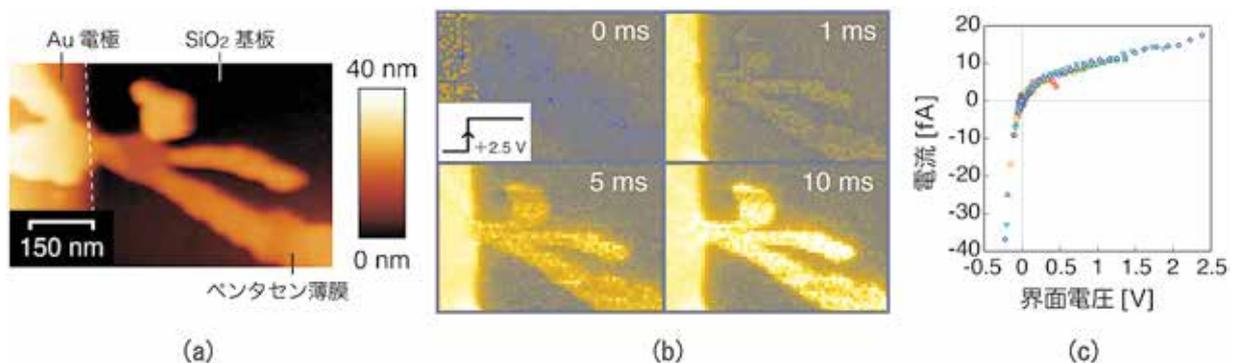


図1: (a) SiO<sub>2</sub> 基板上的 Au 電極に接続されたペンタセン薄膜の AFM 像. (b) Au 電極へ電圧パルス (+2.5V) 印加した後の時間分解静電気力顕微鏡 (tr-EFM) 像. (c) tr-EFM 像から得られた Au 電極 / ペンタセン薄膜界面の界面電圧 - 電流特性.

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野

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

## 単一イオンを可視光の波長サイズに閉じ込める

荷電粒子を電磁場によって狭い空間に閉じ込める装置のことを、イオントラップという。超高真空下でイオントラップに閉じ込めた少数個の原子・分子のイオンは、光領域の周波数標準（光時計）や量子計算機のプラットフォームとして盛んに研究されている。前者ではRFトラップ（RF: radio frequency）、あるいは発明者の名前をとってパウルトラップが、後者ではこれを軸方向にのばしたリニアRFトラップがもちいられる。RFトラップは、回転双極面をもつリング電極と軸方向に配置された2つのエンドキャップ電極からなる。リング電極とエンドキャップ電極間にRF電圧を印加しトラップする。イオンはRF電圧によりマイクロ運動とよばれる振動をしながら、電場がもっとも弱いトラップ中心へ動いていく。このトラップ中心へ向かう中心力によりイオンはトラップされ、その運動は永年運動とよばれる。一方、イオンの遷移スペクトルを時計の基準としてもちいるには、ドップラーシフトを取り除く必要がある。そのためにはイオンを波長サイズ、いわゆるラム・ディッケ領域に閉じ込める必要がある。波長サイズに閉じ込めると、ドップラーシフトによる位相シフトは $\pm\pi/2$ を超えない、すなわち、イオンからみて電磁波の周波数が変わったとはみえないことになる。このことは、2つの正弦波が位相同期している条件や、位相変調で変調指数が1以下になる条件と同じである。ラム・ディッケ領域閉じ込めを可視光の波長サイズで達成するには、トラップしたイオンの運動エネルギーを低減する必要がある。さらに、光時計の不確かさは極めて小さいため、特殊相対論の効果である2次のドップラーシフトも問題となり、イオンを低速にすることは必要不可欠である。

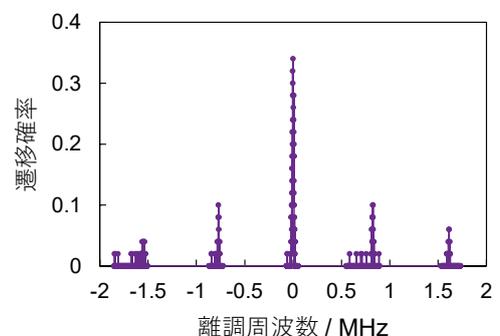
永年運動のエネルギーは、レーザー冷却によって低減することができる。レーザー冷却とは、原子に共鳴するレーザー光が、レーザーの進行方向に力を及ぼす現象を利用した減速方法のことをいう。トラップの深さが3次元で異なっていれば、1本のレーザー光をトラップ軸に対して斜めに入射することで3次元とも冷却できる。トラップの軸対称性がよい場合は、レーザー光に対して垂直な径方向成分は冷却できない。径方向の角度が異なる2本目のレーザー光を照射する。マイクロ運動は、イオンの運動中心がトラップ中心と一致する場合に最小となる。現実のトラップ装置では、電極に堆積した金属による接触電位や電極を支える絶縁体の帯電などによって不要な静電場が発生し、イオンの位置がトラップ中心からずれてマイクロ運動が大きくなる。マイクロ運動によるドップラーシフトを冷却レーザーで検出して補正電圧を印加し、イオンをトラップ中心に合わせることができる。我々の装置では、2本の冷却レーザー光を利用して、2方向のマイクロ運動を最小化した。1方向残っているが冷却レーザー光をもう1本導入することはできなかったため、トラップポテンシャルを浅くすると不要静電場によるトラップ中心からのずれが大きくなる現象を利用して検出した。以上の方法で3次元に単一イオンを冷却する方法を確立し、光領域の波長サイズに閉じ込めることに成功した [1]。

その後、2台目のイオントラップ装置を立ち上げることを含め、冷却の再現性の確認を進めてきた [2]。理論限界まで冷却するところまでは詰め切れていないものの、2台の装置で可視光の波長サイズまで常時冷却できるようになってきた [3]。図は2台目の装置で観測された単一 $^{174}\text{Yb}^+$ の波長411 nm  $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$  時計遷移スペクトルである。これで2台の装置をもちいた遷移周波数の比較が可能となり、遷移周波数の不確かさや異なる同位体間の周波数シフトの測定へ前進した。

[1] 今井, 京都大学博士論文, 2020.

[2] K. Yoshida *et al.*, IFCS-EFTF2023.

[3] 安藤ほか, 2025年第72回応用物理学会春季学術講演会 17a-K209-2



図：2台目イオントラップ装置での単一 $^{174}\text{Yb}^+$   $^2\text{S}_{1/2} (m_J = -1/2) - ^2\text{D}_{5/2} (m_J = -5/2)$  時計遷移スペクトル [3]。

情報学研究科 知能メディア講座 コンピュータビジョン分野 (西野研究室)

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

室内の壁に固定されたカメラからの手の姿勢推定

画像や動画からそこに映っている人物の姿勢を推定するというタスクは、人間の行動理解において非常に重要であるため、コンピュータビジョン分野において広く取り組まれている。人間の行動の具体的な例を考えると、物を動かしたり、ペンで字を書いたり、料理をしたりなど、多くの行動で手が重要な役割を果たしている。そのため、手の姿勢を正確に推定することは、人間の行動や意図の認識に不可欠である。

手の姿勢推定における既存手法 [1,2] は、手を高解像度で遮蔽なく撮影した画像を入力として使用する。これらの手法は、例えば VR ゴーグルの前面にあるカメラから撮影した画像から手の姿勢推定を行うなどの応用には有効で、実際に実用化もされているが、日常生活でそういった撮影デバイスを常に装着するのは利用者への負担が大きい。例えば、壁や天井に固定されたカメラからの観察のみから推定を行うことができれば、そのようなデバイスなしに対象者を 24 時間見守ることができるようになり、応用先が大きく広がる。

しかし、固定されたカメラの動画のみから手の姿勢を推定することには 2 つの困難がある。一つが、対象者がカメラから離れた位置にいるとき、手の解像度が極めて低くなってしまうこと。もう一つが、対象者がカメラに背を向けているなどの状況で、手が完全に遮蔽され、画像からの推定が不可能になってしまうことである。

我々は、そのような場合においても、対象者の身体全体は解像度が高く、また遮蔽されにくいことに注目した。そこで、対象者の手の画像だけでなく、身体全体の画像や姿勢から特徴量を集約し手の姿勢を推定する手法である REACH-Net を提案した。REACH-Net は Transformer モデルをベースに構築されており、自己回帰的に推定を行うため、任意の視点数・フレーム数の動画に適用が可能である。

さらに、この手法を訓練するため、現実のリビングルームに近い環境で撮影を行ったデータセットである REACH データセットを構築した。このデータセットは、参加者が多種多様な日常動作を行う様子を複数の固定カメラから撮影したものである。手の姿勢の正確な真値を得るため、被験者の胸部に装着した小型のカメラからも撮影を行いつつ、その上から上着を羽織ることで自然な見た目を保っている (図 1)。REACH データセットは 50 人の被験者を計 14 時間にわたって撮影しており、同様のデータセットとして過去最大規模である。

提案手法である REACH-Net は、既存手法では困難であった遠距離かつ遮蔽のある状況でも安定して手の姿勢を推定できる (図 2)。本手法が、人間の行動観察・高齢者の見守りなどの分野へと応用されることを期待する。

参考文献：[1] Rolandos Alexandros Potamias *et al.*, *IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recog.*, 12242 (2025). [2] Shangchen Han *et al.*, *ACM Trans. Graph.*, 1 (2022).



図 1 REACH データセットの画像の例。胸部カメラの画像を用いて手の姿勢真値を自動的にアノテーションしている。



図 2 提案手法 REACH-Net の推定の例。解像度が低く遮蔽されている状況においても、精度良く手の姿勢を推定している。

通信システム工学講座 知的通信網分野 (大木研究室)

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

「光回線スイッチングネットワークにおけるモジュール型 OXC 設計」

データ通信量の増大に伴い、私たちが日常的に利用しているインターネットを支える基盤技術として、光ネットワークの重要性はますます高まっている。光ネットワークでは、光ファイバを流れる信号を電気に変換せずに行き先を切り替えることができる Optical cross-connect (OXC) と呼ばれる装置が、中核的な役割を果たしている。OXC は、大容量通信や低遅延通信を実現する上で欠かせない存在であるが、ネットワーク規模が拡大するにつれて、装置自体の大型化やコスト増大が大きな課題となってきた。そこで近年注目されているのが、小規模な光スイッチを組み合わせて大規模な OXC を構成するモジュール型 OXC という考え方である。この方式は、将来の拡張にも柔軟に対応できる点で、実用的な光ネットワーク設計の有力な方向性といえる。

モジュール型 OXC では、ノード内部に複数の小さな光スイッチ (OXC モジュール) を配置し、それらを光ファイバで接続することで、必要な通信経路を構成し、大規模なスイッチを実現する (図 1)。ここで重要になるのが、スイッチが持つ限られたポートを、ノード内部の接続とノード外部への接続にどのように割り当てるかという設計指標である。内部接続を多く取れば経路の自由度は高まるが、外部との接続に使えるポートが減り、結果としてより多くのモジュールが必要になる。一方で、内部接続を減らすと、通信経路が制限され、要求された通信が通らない可能性が高まる。このように、ハードウェア規模を抑えつつ、通信の通りやすさを維持することが、モジュール型 OXC 設計における本質的な課題である。本研究室では、この課題に対して、ノード内部の接続を従来の双方向ではなく片方向にする新しいモジュール型 OXC 構成を提案した [1]。内部接続を単一方向化することで、内部に必要なポート数を削減し、その分をノード外部との接続に割り当てるのが可能となる。ただし、片方向化によって経路の制約が強くなるため、数理最適化による設計モデル化と、大規模ネットワークでも現実的に使える経路制御アルゴリズムをあわせて検討した。本研究は、光通信デバイス、ネットワーク設計、数理最適化、アルゴリズム設計を横断的に組み合わせた研究であり、将来の大規模光ネットワークを支える基盤技術の発展に貢献するものである。

- [1] C. Chang, R. Shiraki, and E. Oki, Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium 2025 (APNOMS2025), paper TS7-2, Kaohsiung, Taiwan, 2025 (Best Paper Award).

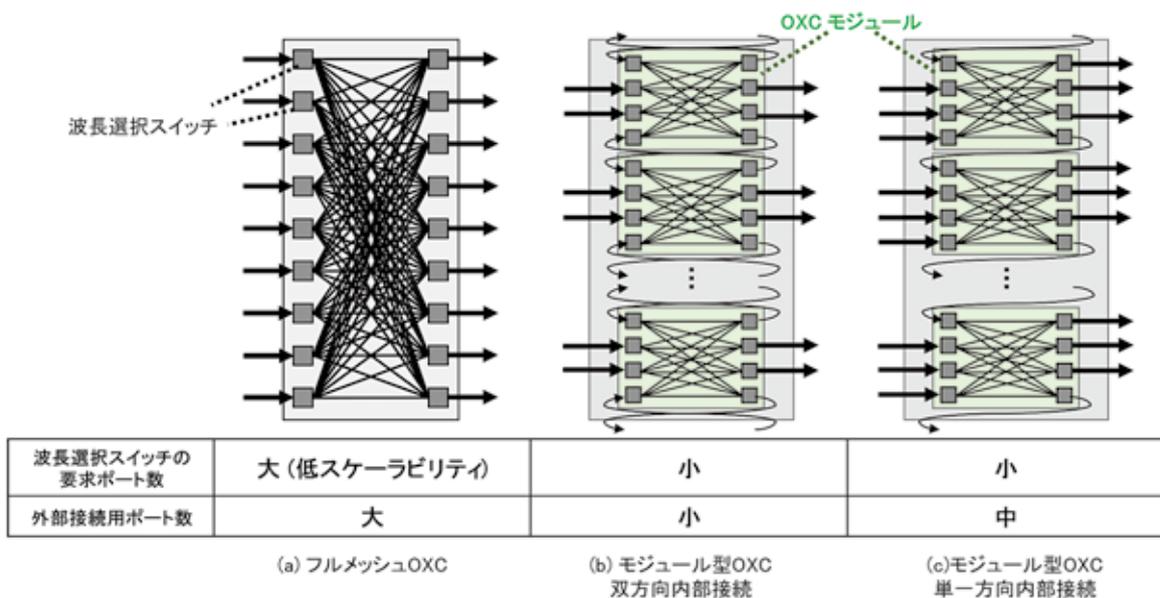


図 1. Optical cross-connect (OXC) の種類と特徴

## 集積システム工学講座 低電力集積回路デザイン分野 (新津研究室)

<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp> <https://www.niitsulab.info> <http://id-lab.jp/>

高エネルギー効率大規模半導体集積回路を用いたエネルギー・データ地産地消微細 IoT  
～バイオ発電と低電力センサ集積回路を用いた単独自立動作持続血糖モニタコンタクト～

新津研究室では、高エネルギー効率大規模半導体集積回路設計技術の研究開発とその微細 IoT 応用開拓を行っています。7nm, 12nm, 22nm, 65nm, 180nm といったプロセス世代での集積回路試作を行い、ISSCC26, VLSI Symp.24 等で発表しています。

半導体集積回路システムの低消費電力化に貢献し、さらにその性能を活かして新たなアプリケーションを開拓する発電センシング一体型集積センサシステムの開発を行いました。誘導結合通信と時間分解能回路の導入により世界最低電圧のバイオセンサ集積回路を実現し、世界初のバイオ発電素子を用いた電力自立バイオセンサを実現しました。バイオ発電素子の出力を電源とセンシング信号に活用する発電センシング一体型集積センサ技術を提案し、糖尿病医療への貢献につながる低負担の持続血糖モニタリングの基盤技術を確立しました。

発電センシング一体型集積センサは、“バイオ発電素子を電力供給源並びにセンシングトランスデューサとして一体的に活用する”技術です。センサを駆動するために必須であったバイアス電圧供給回路が不要となり、飛躍的な低コスト化・低消費電力化が可能となりました。さらに、糖尿病医療・予防に貢献するコンタクトレンズ型持続血糖モニタリング装置の開発に世界で初めて成功しました。グーグル関連会社の従来装置は、無線電力伝送を用いていたために電力供給用メガネ端末が必須でしたが、開発した発電センシング一体型集積センサシステム技術により、単独自立可能・電力自立化が可能となりました。半導体集積回路製造プロセスで製造可能な糖発電素子 製造技術を開発し、0.6mm 角と世界最小サイズの糖発電素子の開発に成功しました。サイズ 0.385mm 角・電源電圧 0.165V・消費電力 0.27nW の 1mm 角以下のサイズとしては世界最小電力の無線送信機集積回路の開発に成功しました。これらを融合し、世界で初めてメガネ型端末不要のコンタクトレンズ型持続血糖モニタリングの実証に成功しました。

半導体集積回路システム全体の高エネルギー効率化に向けたエネルギー・データ地産地消 IoT システムの開発を行いました。IoT システムにおいて、エネルギー効率を左右するのが、エネルギーとデータの伝送です。エネルギーの伝送においては無線電力伝送を、データの伝送においては無線通信が活用されますが、集積回路システム内での伝送に比べると、エネルギー効率が悪いという課題があります。

そこで、エネルギー・データをその場で生成/活用するエネルギー・データの地産地消方式による IoT システムの開発に取り組みました。世界最小クラスの糖発電素子とサブ平方ミリサイズで超低消費電力のセンシング・LED 駆動集積回路技術、室内光で発電可能な集積回路上太陽光発電素子を開発し、それら3つを融合した集積回路システムを搭載したコンタクトレンズを試作しました。さらに、糖尿病患者の方々の無自覚性低血糖を未然に防ぐための、機械学習を用いた低血糖警告技術を開発しました。これらにより、外部機器や電波を必要とせずコンタクトレンズ単独での持続血糖モニタリングと低血糖警告を可能としました。

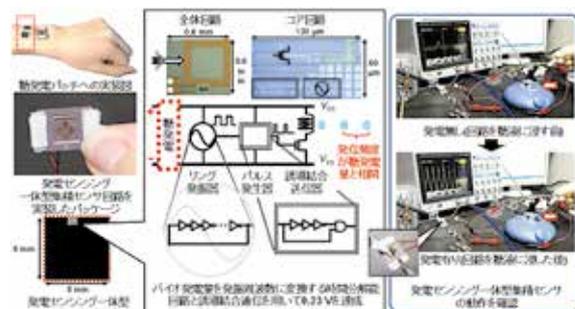


図1：開発した世界初のバイオ発電素子（糖発電素子）と融合した電力自立バイオセンサ：発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシング一体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

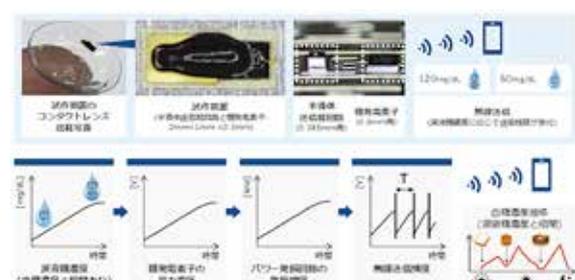


図2：開発した発電センシング一体型集積センサ技術を用いた電力自立持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ



図3：エネルギー・データ地産地消方式による単独自立動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズのコンセプト図

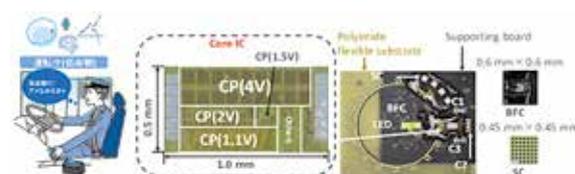


図4：開発したエネルギー・データ地産地消方式による単独自立動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

情報学研究科 システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

URL: <http://ishiilab.jp/kyoto> <http://www.neuralengine.org>

不確実環境に適応するヒト脳の階層的情報処理メカニズム

Chat GPT を初めとする生成的人工知能 (AI) が日常生活に浸透し、ブームが加速する近年、次なる目標として「Physical AI」(実環境と直接的に相互作用し、人間のような柔軟なタスク遂行能力を備えた AI ロボット) が注目を集めている。多様で複雑な実世界への適応能力が AI に求められる中、当研究室では「脳型人工知能」(脳のモデルを基本とする AI 技術) と「計算神経科学」(脳の計算機構の解明を目指す科学) の相互発展の歴史を踏まえ、複雑かつ不確実な環境における人間の情報処理過程と、それを実現する脳神経機構の解明に取り組んでいる。

このような問題のモデルケースとして、我々は「空間ナビゲーション」に着目してきた。通常、人間は視覚情報をもとに現在位置を特定して移動経路を決定するが、同一風景が複数箇所に存在するような環境では、単一の観測情報から状態を特定することができない。このとき人間は、将来の観測を予測し、実際の観測との整合に基づいて状態推定を更新する処理を行うことが示されている。当研究室では、こうした過程での予測内容がヒト脳頭頂葉の脳活動パターンから解読可能であることを脳イメージング研究により示した。加えて、実世界では、障害物や外乱により観測自体が不確実となるなど、より多層的な問題にも直面しうる。機械学習では階層的部分観測マルコフ決定過程 (Hierarchical POMDP) として定式化されるこのような問題を、人間の脳がどのように解いているかは未解明であった。そこで我々は新たに「Tiger Maze ナビゲーション課題」を設計し (図 1a)、MRI 環境下で人間の被験者にこの課題を実施してもらい、2階層の隠れ状態推定および確信度の推移を記録・分析した。その結果、従来の (トップダウン型) 階層マルコフモデルよりも、行動に応じて状態推定の更新順序が切り替わる「双方向的階層推論モデル」が、被験者の内的な不確実性の推移をより精度良く説明できることを示した。さらに、推論の階層や性質 (モデルベース / モデルフリー) に応じて、内側前頭前野および大脳基底核の異なる領域が機能分化している可能性を示唆した (図 1b)。

さらに、当研究室では、人間の柔軟な行動選択を支えるメタ認知機能 (自分の知覚・思考などを評価・制御する高次機能) のメカニズム解明にも取り組んでいる。階層的情報処理過程におけるメタ認知的相互作用の神経基盤は、これまで十分に解明されていなかった。ブラックジャックにヒントを得た階層的カードゲーム課題 (図 2a) を用いた実験と計算モデル解析の結果、上位階層の推定に対する確信度が下位階層の推定・意思決定およびそのメタ認知を修飾し (図 2b)、このプロセスを内側前頭葉・島皮質間ネットワークが担うこと (図 2c) が明らかになった。さらに、個人間の行動の差異がこのネットワークの機能的結合強度によって説明できることも示唆された。

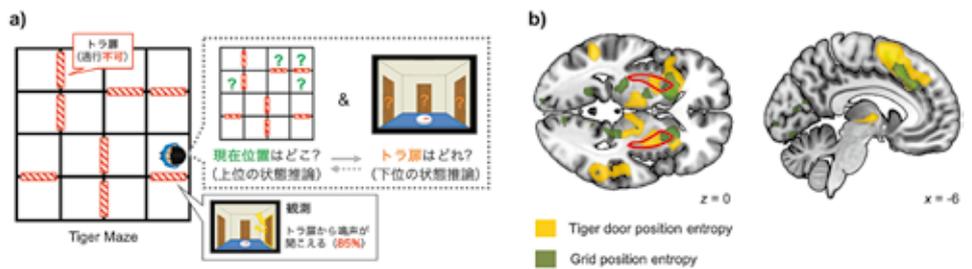


図 1 Tiger Maze ナビゲーション課題の概略図 (a) と不確実性に対応する脳領域 (b)

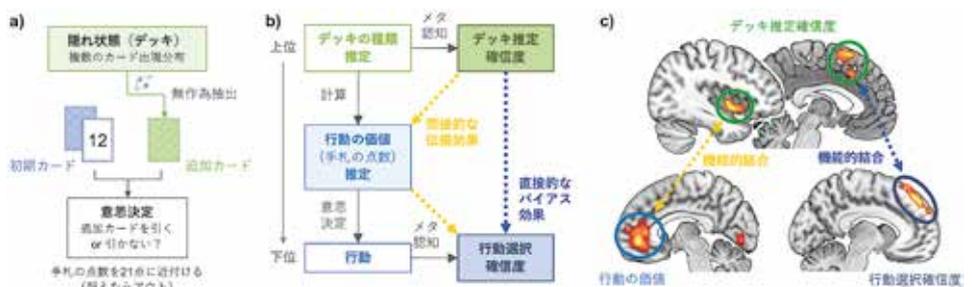


図 2. 階層カードゲーム課題の概略図 (a) と情報処理モデル (b)、関連する脳領域ネットワーク (c)

## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野

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

## フェライト鋼利用によるヘリカル型プラズマ閉じ込め装置の磁場構造最適化

当研究室では、核融合エネルギーの利用を目指した磁場閉じ込め高温プラズマの研究を行っています。多国間協力が進む ITER（イーター）計画は、磁場閉じ込め方式の一つであるトカマク配位を採用し、外部からの入力エネルギーの 10 倍の出力を数 100 秒にわたって維持することを目標としていますが、プラズマの不安定性による放電の突発的な停止「ディスラプション」が課題となっています。当研究室では各国の研究機関と協力し、ITER のディスラプションを克服する制御手法の開発に理論・シミュレーションの立場から取り組むとともに、ITER 以降の装置を見据え、ディスラプションを原理的に克服する磁場閉じ込めシステムの研究を行っています。

ディスラプションの問題を克服する方法の一つにヘリカル配位の利用があります。ITER のようなトカマク配位はプラズマ中に電流を駆動し、これが作る磁場を利用することでプラズマを自律的に閉じ込めるのに対し、ヘリカル配位ではプラズマを閉じ込める磁場を外部の超伝導コイルのみで形成し、可能であればプラズマ中を流れる電流をゼロに抑制します。これにより、電流駆動型の不安定性を抑制し、ディスラプションのない安定かつ定常な閉じ込めを実現できることが利点です。しかしながら、磁気単極子が存在しないというマクスウェル方程式の帰結に由来し、ヘリカル配位では「厳密な」空間対称性を持つ磁場構造が作れないことが分かっています。磁場構造の空間対称性はプラズマを構成する荷電粒子運動の保存量に対応づけられるため、対称性の欠如はヘリカル配位に効率的な閉じ込めを期待できない理論的根拠とされてきました。この問題に対し、1990 年代後半からコイルの形状と配置を工夫し、「近似的な」対称性を実現する準対称配位の研究が進められ、その有効性が理論的に確認されています。他方、性能のよい準対称配位を作るためのコイル形状は極めて複雑であることが依然障害となっており、現在は工学的制約と閉じ込め性能を両立する配位が探索されています。

当研究室ではそのような試みとして磁性体の利用に着目しました。核融合炉では低放射化材料であるフェライト鋼が構造材料の候補とされています。磁性体はプラズマ実験に対してエラー磁場の要因となるため、使用が回避されるのが普通ですが、日本のトカマク装置 JT-60U では磁場の不均一性を緩和する手段としてフェライト鋼を最適に配置した実験を行い、その有効性を示しました。本研究では、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 装置を対象に、フェライト鋼の配置の影響を検討しました。その結果、フェライト鋼を配置することでコイル電流の調整では難しい局所的な磁場の調整が可能となり、荷電粒子を効果的に閉じ込めるリップル構造を形成できることが明らかになりました（図 1）。フェライト鋼の利用は、プラズマ閉じ込め性能を改善する最適設計手法と併用することで、ヘリカル型配位の課題解決の方策の一つとして期待されます。

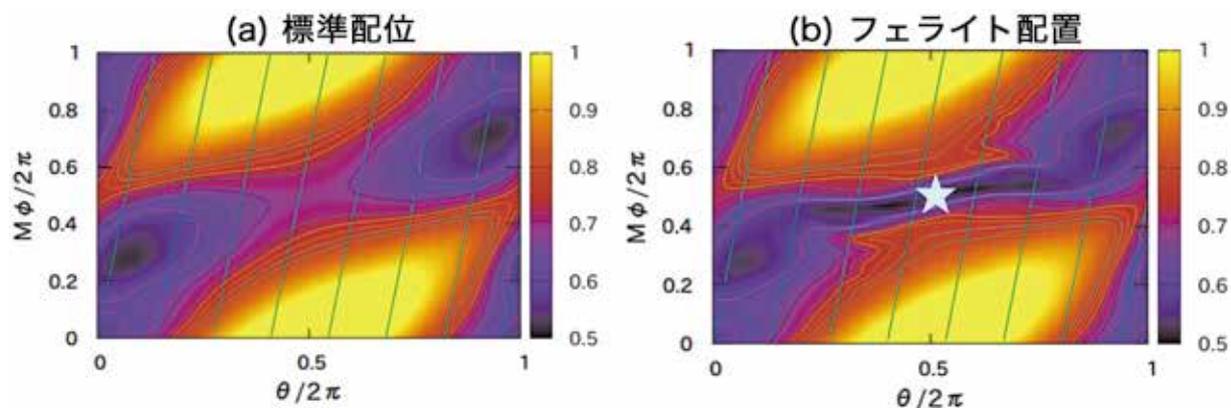


図 1 ヘリオトロン J 最外殻磁気面における磁場強度分布（単位は Tesla）に対するフェライト配置の影響。(b) ではフェライトをトーラス内側（図中星印の位置付近）に配置し、粒子を捕捉し、効果的に閉じ込めを行うことのできるリップル構造が形成できることが分かった。

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)  
[https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index\\_j.html](https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index_j.html)  
 [X線トモグラフィを用いた核融合プラズマの MHD 不安定性研究]

私たちの研究室では、プラズマ実験装置「ヘリオトロン J」を用いて、磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究を行っています。核融合発電を実現するためには、1 億度を超える超高温かつ、1 立方メートルあたり 10 の 20 乗個程度の高密度プラズマを、長時間にわたって安定に維持する必要があります。磁場閉じ込め方式では、らせん状にねじれた磁場によって形成される「磁場のかご」でプラズマを閉じ込め、外部からマイクロ波や高速粒子ビームを入射することで、プラズマを加熱します。

しかし、超高温・高密度状態のプラズマでは、プラズマ自身や加熱に用いる高速粒子の圧力によって「磁場のかご」が変形し、その結果、温度や密度、磁場が揺らぎます。このような現象は、電磁流体力学的 (MHD) 不安定性と呼ばれ、装置スケールの大域的な構造を生じます。MHD 不安定性はプラズマの安定維持に大きな影響を与えるため、閉じ込め性能への影響評価および制御手法の確立は、核融合研究における重要な課題です。本研究室では、医師が患者の状態を調べるように、プラズマの状態を「診断」し、その振る舞いを詳しく調べています。

本研究室では、このようなプラズマ診断の一つとして、プラズマから放射される X 線を計測し、MHD 不安定性の発生位置や空間構造といった特徴を実験的に調べています。プラズマ中では、電子がイオンとの衝突 (クーロン衝突) によって運動方向を変えられる際に、制動放射と呼ばれる電磁波が放射されます。制動放射の強度は電子温度および電子密度に依存しており、高温プラズマでは X 線領域にまで及びます。X 線のエネルギースペクトルは光子エネルギーに対して指数関数的に減衰し、その傾きは電子温度に依存します。この性質を利用し、X 線透過特性の異なる複数のフィルターを用いてエネルギーの異なる X 線を選択的に計測し、電子温度を推定することが可能です。一方で、計測される X 線信号は検出器の視線方向に沿って積分された量であるため、プラズマ断面のどの位置で X 線強度が変動しているのかを直接特定することは困難です。この問題を解決するため、本研究室では複数方向からの X 線計測結果を用いて、プラズマ断面における X 線放射強度分布を再構成する X 線トモグラフィという診断手法の開発を行っています。X 線トモグラフィを用いることで、プラズマ内部の温度・密度分布や MHD 不安定性の空間構造を可視化することが可能になります。

現在、本研究室では、ヘリオトロン J において X 線トモグラフィを応用した電子温度分布計測の実現を目指し、計測装置および解析手法の開発を進めています。図 1 は、現在開発中の 20 チャンネルフォトダイオードアレイおよび薄膜フィルタを 2 組用いた X 線計測器の概略図です。スリットを用いることで、チャンネル毎に異なる視線から X 線を観測し、図 2 に示すようにプラズマ装置全体をカバーする配置となっています。将来的には、同一断面にこの X 線検出器を複数設置し、二次元電子温度分布の計測を行うことを計画しています。得られた二次元分布データを用いて、MHD 不安定性の特徴的な空間構造や時間発展を明らかにするとともに、プラズマの閉じ込め性能への影響について物理的理解を深めることを目指しています。



図 1. 開発中の X 線計測器の概略図



図 2. X 線計測器の配置予定図

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野 (山本研究室)  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab/>  
 機械学習を用いた信楽 MU 観測所における電離圏長期観測データの整備

近年、GPSを始めとする全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System, 以下 GNSS) の利用は日常生活に欠かせないものとなっており、数 cm 級の精度をうたう精密測位サービスは、自動車やドローンの自動操縦、スマート農業等における利用が期待されています。しかし、実際には様々な要因による測位誤差が発生するため、様々な誤差要因を補正する必要があります。

測位誤差の中で、最も寄与が大きく、かつ後処理において補正が可能なものが電離圏による伝搬遅延誤差です。電離圏とは、地球の超高層大気 (高度 100-1000km) が太陽からの強力な紫外線の影響を受けて一部が電離した状態 (プラズマ) で存在している領域を指します。電離圏のプラズマは電波の屈折率を変化させ、衛星電波の伝搬遅延の原因となり測位誤差の要因となります。GNSS を利用した高精度、高信頼度の測位航法技術が発展するにつれて、電離圏による電波の伝搬遅延の影響は要求される精度に対して相対的に大きくなるため、その補正のために、電離圏の物理過程の理解、現状把握、そしてその予測が強く求められています。

電離圏遅延を補正するためには、標準的な電離圏のモデルを参照する必要があります。国際標準電離圏モデル (International Reference Ionosphere, 以下 IRI モデル) は、様々な観測データを元にして、尤もらしい電離圏の状態を予測する経験モデルであり、複雑な物理モデルに基づいた計算が不要であることから、世界中で幅広く利用されています。しかし、アメリカ、ヨーロッパ経度における観測データの利用に偏っていることから、アジア地域における予測精度の低さが以前から指摘されていました。本研究では、信楽 MU 観測所における過去 40 年間にわたる観測結果を対象に機械学習技術を用いてデータベース化し、国際標準として利用されている経験モデルである IRI モデルに組み入れることで、日本・アジア地域上空のモデル予測精度を高めることを目指しています。図 1 に京都大学生存圏研究所の信楽 MU 観測所の全景を示します。中央付近の直径 103m の円形フィールドに MU (Middle and Upper atmosphere) レーダーのアンテナが配置されており、右上の敷地に電離圏観測装置イオノゾンデが設置されています。1984 年の観測開始以降継続して観測が実施されており、イオノゾンデは同一のハードウェアで 15 分間隔の観測を 40 年近く継続している稀有な存在です。

イオノゾンデは周波数を変化させながら電波を送信し、各送信周波数における受信エコーの見かけの高度を測定します。イオノゾンデ観測の 2001 年以降のデータについては、デジタルデータとしてウェブ上で公開されていますが、1984 年の観測開始から 2000 年までのデータについては、紙媒体に印刷された画像のみが利用可能な状況です。紙媒体のデータを利用するにあたって、研究室の学生の協力を得て、画像のデジタル化を進めています。近年開発を進めてきている機械学習モデルを利用し、イオノグラムを自動認識を行った結果を図 2 に示します。この長期間のデータを有効活用して日本上空の電離圏電子密度の長期変動を明らかにし、長期間のイオノゾンデ観測データと MU レーダー観測データを利用して IRI モデルの改良に貢献することで、アジア地域の電離圏予測精度の向上を目指しています。



図 1：信楽 MU 観測所の全景

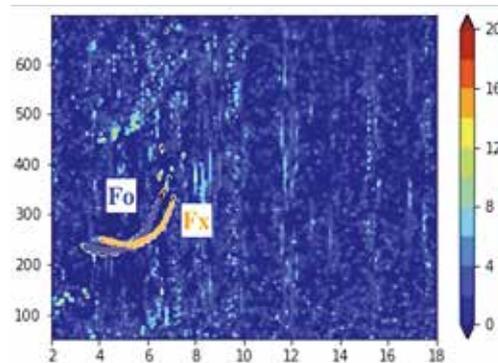


図 2：機械学習による自動認識結果

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏電磁環境探査分野 (小嶋研究室)  
<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/kojima-lab/>  
 「ファインバブル研究と国際標準化」

宇宙圏電磁環境探査分野の協力ユニットとして、生存圏研究所には「生存圏標準化戦略ユニット (Sustainable Standardization Strategy Unit)」があります。このユニットでの研究の一例として、ファインバブル研究を国際標準化して進める活動があります。2025年には万博でのファインバブル共同宣言の他、万博での展示・体験など、様々な効果や利用方法などが一般向けに広く知られてきています。

ファインバブルについては、ここ最近CM等でも広く知られつつありますが、大きな課題があります。それは名称として「ファインバブル」と言っても、測り方や作り方が違うと結果が比べられないということです。泡の大きさや数、溶け込む気体、含まれる微量成分、水質（塩分や電気の流れやすさ）などが少し違うだけで、性質は変わってしまいます。研究者の実験でも、企業の現場でも、同じ言葉を使っているのに中身が一致しないと、技術が広がりにくくなります。そこで重要になるのが標準化です。標準化とは、単に規格書を作るのではなく、誰がどこで測っても納得できるように、用語・測定方法・評価指標・試料の条件などを整理し、比較可能な共通基盤を作る取り組みです。

当ユニットは、ファインバブル分野の国際標準化を担う ISO/TC 281 (国際標準化機構の専門委員会)に関わりながら、研究現場で得られた知見を国際文書 (WD/NP/CD 等) に落とし込み、世界の研究者・企業と議論を重ねています。国際標準化が進むと、研究成果が社会実装へつながりやすくなるだけでなく、企業にとっては製品やサービスの信頼性を説明しやすくなり、利用者にとっては安心して選べる環境が整います。

本ユニットでは電気工学専攻の学生も活躍していますので、電氣的な視点を生かしつつ、ファインバブル研究について考察を行っています。水や泡と電気は一見無関係に見えるかもしれませんが、実は泡の表面 (気液界面) には電荷が生じ、微小な粒子やイオンとの相互作用によって、泡の安定性や機能が左右されます。ファインバブル水の性質を、電気の応答 (例えば誘電特性やインピーダンス、緩和現象など) から捉え、泡が作る微細な反応場の理解と、信頼できる評価方法の構築に取り組みつつ、国際標準化も見据えた研究活動を続けています。

これまで、国内外の研究者との交流を継続し、研究会・シンポジウムを通じて成果共有とネットワーク形成を進めました。加えて、ファインバブル計測・評価の国際標準化に向けた議論を深化させ、測定条件や用語の整理、評価の再現性向上に資する検討を進めています。今後も、国際標準化活動と研究活動を往復しながら、技術の信頼性を高め、社会に実際に役立つ形へと橋渡ししていきたいと思っています。



2025.7 ファインバブル技術 /2025 年万博宣言

## 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野 (篠原研究室)

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

### 「ミリ波空間伝送型ワイヤレス給電用簡易フェーズドアレーアンテナの開発」

2022年5月の電波法省令改正により、わが国でも空間伝送型ワイヤレス給電(SPT)のビジネスが始まった。2025年10月末の段階で国内に800を超えるWPT基地局が設置され、主に電池レスのBEMS(ビル・エネルギー・マネージメント・システム)等に用いられている。WPTビジネスとして総合的に判断した場合、歴史的に研究が行われていたナロービーム型WPT(1対1の高効率WPT)ではなく、通信のようにマイクロ波を広げ、低効率でもいいので複数ユーザーに無線で小電力を送るワイドビームWPTが現在の空間伝送型WPTビジネスには最適と判断され、現在のビジネス主流である。しかし、電力を送る以上、ユーザーはより高効率、より大電力を求める。現在はさらに周波数の高いミリ波用半導体や回路効率の向上が期待できるため、ミリ波を用いたWPTの研究開発が現在活発化している。ナロービーム型WPTではビームフォーミングが可能なフェーズドアレーアンテナが必須技術であるが、ビジネスを考えた場合、より高効率かつ簡易なアンテナシステムが求められる。篠原研究室では、2021-2024年度において、NICT革新的情報通信技術研究開発委託研究開発にソフトバンク、金沢工大とともに参加し<sup>(1)</sup>、ミリ波周波数の効率的な利用や共同利用の促進、ミリ波帯への移行を促進することを目的として、28GHz帯でのWPTとミリ波通信との融合技術に関する研究開発を行っていた。特に篠原研では実用を見越した簡易で高効率なビームフォーミングを可能とするフェーズドアレーアンテナの開発を中心に研究開発を行っていた<sup>(2)</sup>。低損失な導波管を用い、導波管の厚みをサーボモータで制御し、管内波長を変化させてビーム方向を制御するフェーズドアレーアンテナを開発した(9)-(10)。半導体を用いていないため低コストであり、導波管ベースのため低損失で製作も容易であるという特徴がある。図1は開発した簡易大規模フェーズドアレーアンテナである。アンテナ利得は約33.5dBiであり、サーボモータによる導波管厚みを最大4mm程度制御することでビーム制御角は約10°を実現した(実験値)。現在はアンテナの放射効率をさらに向上させ、かつビーム制御角度をさらに大きくするための改良研究を行っている<sup>(3)</sup>。

[1] ソフトバンク, [https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2021/20211112\\_01/](https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2021/20211112_01/)

[2] 楊波他, “28GHz ビーム走査可能のスロットアレーアンテナの設計”, 電子情報通信学会無線電力伝送研究会, 信学技報 WPT2024-58, vol.124, no.427, pp.97-99, 2025

[3] S. Kameo, et al., “Research and development of slot array antenna with variable waveguide width for beamforming”, Proc. Joint Workshop Thailand-Japan Microwave (TJMW) & Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT) 2025

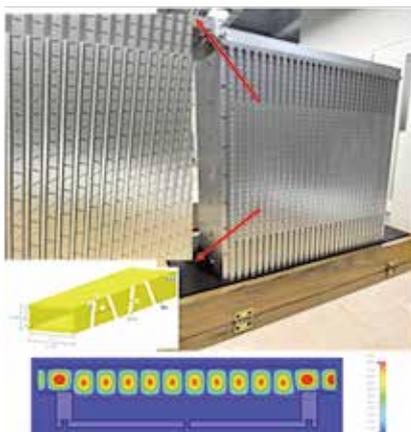


図1 開発した導波管ベースの簡易高効率フェーズドアレーアンテナ

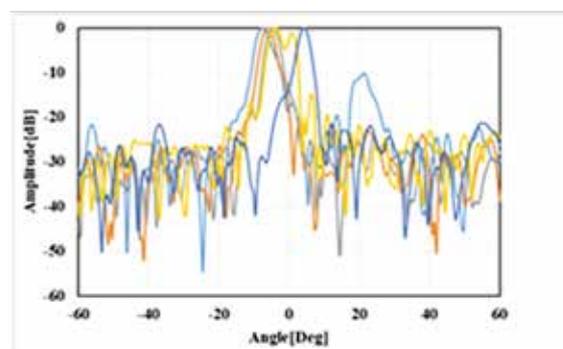


図2 導波管厚みを物理的に制御することで得られたビーム方向制御の測定結果

## 博士論文概要

### [課程博士一覧]

Yunfei Gao	Fundamental Study on High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Rotating Machine for Electric Propulsion Aircraft 電気推進航空機用高温超伝導誘導 / 同期回転機に関する基礎研究	令和7年3月24日授与
芳井 崇悟	Study on magnon polariton in thin ferromagnetic film 薄膜強磁性体におけるマグノンポラリトンの研究	令和7年3月24日授与
嶋崎 幸之介	Study on Silicon Vacancy Centers in Nanodiamonds for Nanofiber Bragg Cavity Based Single-Photon Source 共振器内蔵ナノ光ファイバを用いた単一光子源実現に向けたナノダイヤモンド中のシリコン空孔中心の研究	令和7年3月24日授与
三上 杏太	Study on Channel Mobility and Threshold Voltage Towards SiC CMOS Devices SiC CMOS に向けたチャネル移動度およびしきい値電圧の研究	令和7年3月24日授与
遅 熙倫	Study on Carrier Trapping and Scattering Toward Modeling of SiC MOSFETs SiC MOSFET のモデル化に向けたキャリア捕獲および散乱の研究	令和7年9月24日授与
張 兆宗	Macroscale, Microscale, and Nanoscale Structural and Optical Characterization on Hybrid InGaN Red Quantum Wells ハイブリッド InGaN 赤色量子井戸におけるマクロ・マイクロ・ナノスケールの構造及び光学特性	令和7年3月24日授与
藤崎 広豊	Single-ion spectroscopy of the $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ clock transition in $Ba^+$ ions and laser cooling technique for their odd isotopes $Ba^+$ イオンの $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ 時計遷移の単一イオン分光とその奇数同位体のレーザー冷却法	2025年3月24日授与
栗根 悠介	量子井戸とフォトニック結晶を用いた中赤外電気変調型光学フィルターの開発および非分散型赤外センシングへの応用	令和7年3月24日授与
和泉 孝紀	フォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御に関する研究	令和7年3月24日授与
植田 暢大	Cohesion Analysis of Textual and Visual Entities: Enhancing Accuracy and Comprehensiveness 言語的および視覚的エンティティの結束性解析：精度と包括性の向上	令和7年3月24日授与
Lee Sang-Eun	Extrinsic Camera Calibration from Articulated Objects 物体の関節構造を用いたカメラ外部キャリブレーション	令和7年9月24日授与

張 晨 露	Service Deployment and Resource Allocation in Distributed Computing Networks 分散コンピューティングネットワークにおけるサービス配備とリソース割り当て	令和7年3月24日授与
久 保 顕 大	Reward-Driven Hierarchical Learning for Visual Tracking and Control Tasks 視覚物体追跡と制御のための報酬駆動型学習	令和7年3月24日授与
小山田 創 哲	Toward Scalable Reinforcement Learning via Massive Batching 大規模バッチングによるスケーラブルな強化学習の実現に向けて	令和6年11月25日授与
Orchida Dianita	Experimental Study on the Effect of Systematic Micro-refresh by Office Environment Control on the Workers' Intellectual Concentration オフィス環境制御による体系的なマイクロリフレッシュが労働者の知的集中力に及ぼす影響に関する実験的研究	2025年3月24日授与
新 間 大 輔	原子力発電所の運転・保全作業従事者への放射線情報の提示による職業被ばく低減方法に関する研究	令和7年1月23日授与
山 下 湧志朗	Study of self-consistent evolution of non-axisymmetric eddy currents and plasma equilibria 非軸対称渦電流とプラズマ平衡の自己無撞着な時間発展に関する研究	令和7年3月24日授与
宮 下 顕	Study on edge plasma transport in island divertor configuration in Heliotron J ヘリオトロンJアイランドダイバータ配位における周辺プラズマ輸送に関する研究	2025年3月24日授与
劉 鵬	Development of Automatic Detection and Prediction Models for Ionospheric Spatiotemporal Variation Based on Deep Learning 機械学習に基づいた電離圏の時空間変化の自動検出と予測モデルの開発	令和7年03月24日授与
松 田 知 也	Development of the MIMO radar with the MU radar MU レーダーを用いた MIMO レーダーの開発	令和7年5月25日授与

Yunfei Gao (中村武恒 特定教授)

「Fundamental Study on High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Rotating Machine for Electric Propulsion Aircraft」

(電気推進航空機用高温超伝導誘導 / 同期回転機に関する基礎研究)

令和7年3月24日

本研究では、高温超伝導誘導 / 同期回転機 (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: 以下 HTS-ISM) を対象として、電気推進航空機に応用するための基礎検討を行った。HTS-ISM の基本構造はかご形誘導機と同様であり、その回転子巻線 and/or 固定子巻線を高温超伝導化した場合の研究を実施した。

まず、25 kW 級 HTS-ISM を対象として、自己組織化設計法を採用した電磁設計を行い、かつその結果を用いた 2 次元電磁解析を行った。その結果、固定子と回転子間のエアギャップ中における磁束密度の空間高調波成分が低減され、トルクリップルが低減することを確認した。自己組織化設計法は、従来設計法に比較して設計者の経験則に基づく設計自由度を最小化することが可能である。本結果に基づく今後の設計法改良によって、HTS-ISM の高性能化が期待される。

次に、HTS-ISM の大形化を志向し、高温超伝導バルク体をかご形回転子巻線に適用した 1 kW 級 HTS-ISM の液体窒素中における無負荷回転試験を実施したところ、異なる駆動周波数に対して同期回転が実現されることを明らかにした。また、従来の高温超伝導テープ材を適用した HTS-ISM の回転特性と上記回転特性の相違を示した。

また、高温超伝導材料と常伝導材料を並列導体化したハイブリッド導体を用いた 1 kW 級 HTS-ISM を対象として、まず Gd 系高温超伝導レーストラックコイルの温度 77 K における電圧 - 電流特性の測定結果を示し、十分大きな臨界電流を有していることを示した。次に、上記レーストラックコイルを固定子巻線に適用した 1 kW 級全 HTS-ISM の温度 77 K における発電試験結果を示し、0.7 kW を超える発電特性を実現した。さらに、高温超伝導材料が常伝導状態となる温度 120 K における無負荷回転試験を実施し、周波数 40 Hz において回転数 440 rpm 程度で安定回転することを実証した。

さらに、既試作の 50 kW 級 HTS-ISM を対象として、回転子巻線を高温超伝導材料と常伝導材料のハイブリッド導体によって構成し、銅巻線の固定子と組み合わせて温度 77 K における負荷回転試験を実施したところ、最高効率 99.75% を実現した。さらに、室温においても機械出力 5.5 kW を達成した。この結果から、電気推進航空機の冷却システムが故障して温度が上昇してしまう状況下において、低出力運転によって運転を継続できるフェールセーフ機能が与えられることを示した。

以上、本研究によって電気推進航空機用 HTS-ISM を実現するための設計法、高温超伝導巻線の大電流容量化を実現する方法、および冷却系故障時のフェールセーフ機能の付与法を示すことができた。

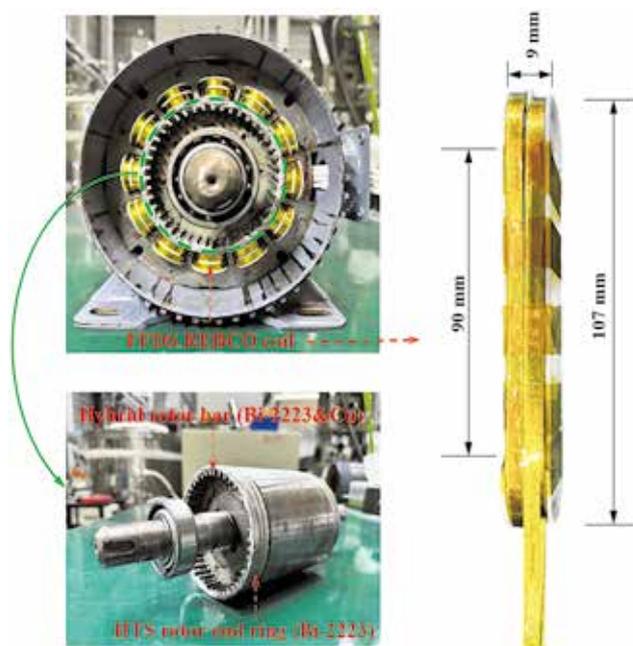


図1 試作した 1 kW 級全 HTS-ISM の外観写真

芳井 崇悟 (白石誠司 教授)

「Study on magnon polariton in thin ferromagnetic film」

(薄膜強磁性体におけるマグノンポラリトンの研究)

令和7年3月24日授与

強磁性中の磁化の素励起であるスピン波とそれを量子化したマグノンという準粒子は、現代の物性物理、特にスピントロニクスや量子科学において重要な研究対象である。マグノンは磁気相互作用である Zeeman 相互作用を介し、フォトン（光）とエネルギーを交換する。その相互作用が強く系の緩和幅を超えた場合、マグノンとフォトンはコヒーレントなエネルギー交換を行い、強結合状態（マグノンポラリトン）を生成する。このコヒーレントな結合状態は、量子計算を始めとした量子情報処理の重要なキーとなる状態であり、マグノンポラリトンは新たな量子科学の研究対象として広く注目されている。

結合強度がそれぞれの量子系の励起周波数の 10% に到達する結合状態は「超強結合」状態と呼ばれ、近年マグノンポラリトンの系においても実証された。この結合領域においては、回転波近似は適用できず、結合系のハミルトニアンにおいて反回転項が無視できなくなる。この反回転項は、結合系における 2 モードスクイズド状態や量子もつれを実現する上で必要不可欠であり、現代物理において重要な励起過程である。マグノンポラリトンにおいて超強結合が実現した一方で、その報告はバルクの強磁性体を用いた数件に限られ、それら結合系は超強結合領域に到達したことを示すことに留まり、反回転項をもたらす物理については詳細に議論されていない。さらにはバルクの強磁性体を用いた系では、集積化は困難であり、超強結合マグノンポラリトンのデバイス応用は依然として課題である。

本研究では、高温超伝導体による共振器とナノメートルの厚さの強磁性薄膜におけるマグノンポラリトン超強結合状態を実現し、超強結合状態における反回転項をもたらす物理を議論した。高温超伝導体 YBCO を使い、30 nm 厚の NiFe 合金 (Py) 強磁性薄膜が実装した図 (a) のような試料を作製した。図 (b) は強磁性試料がない場合の共振器吸収スペクトルを表し、その Q 値は 3500 程度を示した。この共振器に対し強磁性薄膜を実装した場合の吸収スペクトルの磁場依存性は図 (c) のように表され、マグノンとフォトンのモードが反交差する結合モードを観測し、その結合強度がフォトンの励起周波数の 10% に到達していることが確認され、強磁性薄膜の超強結合状態を実現した。また反回転項の存在を示すブロッホ・ジークルトシフト ( $\Delta f_{BS}$ ) も観測し、超強結合マグノンポラリトンにおける反回転項の存在を実験的に実証した。この成果は、オンチップ超強結合量子デバイスの学理確立に不可欠なプラットフォームを提供している。

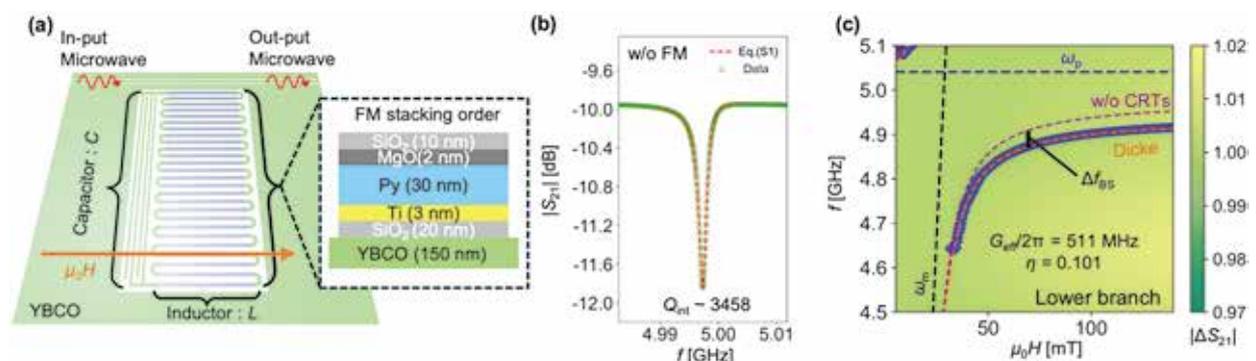


図 (a) 試料の概念図。高温超伝導体 YBCO の共振器上に 30 nm の強磁性体合金 NiFe (Py) を含む、薄膜を作製。(b) 強磁性体薄膜を持たない共振器におけるスペクトル。(c) 強磁性体薄膜を載せた共振器における吸収スペクトルの磁場依存性。青点はマグノンポラリトンの共振周波数を示し、青破線・黒破線はそれぞれフォトン・マグノンの非結合状態におけるスペクトルを表す。紫・オレンジ破線は、それぞれ反回転項 (CRTs) を仮定しないモデルと反回転項を含んだモデルでの理論スペクトルを表す。その差が  $\Delta f_{BS}$  となる。

嶋 崎 幸之介 (竹内繁樹 教授)

「Study on Silicon Vacancy Centers in Nanodiamonds for Nanofiber Bragg Cavity Based Single-Photon Source」

(共振器内蔵ナノ光ファイバを用いた単一光子源実現に向けたナノダイヤモンド中のシリコン空孔中心の研究)

令和7年3月24日授与

近年、光の量子的な性質を活用した光量子技術が注目を集めている。光量子技術を実現するためのキーデバイスの一つとして同一性の高い光子をひとつずつ射出可能な「単一光子源」があげられる。この単一光子源の実現に向けて、固体中の色中心や量子ドットなどの単一発光体と微小共振器などのナノフォトニクスデバイスのハイブリッドデバイスの研究が広く行われている。しかし、デバイスから射出される光子を単一モードファイバへ高効率に結合するのは困難であった。

そこで、本研究では、同一性の高い光子を射出可能なダイヤモンド中のシリコン空孔 (SiV) 中心と光ファイバ自体を微小共振器として用いる共振器内蔵ナノ光ファイバとのハイブリッドデバイスの作製 (図1) によってこの課題の解決を目指した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

1. SiV 中心内包極微ダイヤモンドの作製

NFBC との結合の際にダイヤモンド微粒子による散乱の影響を抑制するために、サイズの小さいものがもとめられる。そこで、シリコンを不純物として含む平均粒径 5nm の爆轟ダイヤモンド微粒子 (DND) を真空中で熱処理を行うことで、SiV 中心内包極微ダイヤモンド微粒子の作製に成功した。本結果は世界最小の SiV 中心内包人工ダイヤモンド微粒子を作製したものであり、NFBC 単一光子源への応用のみならず、量子センシング応用等にも重要な結果ある。

2. 同一性の高い光子を射出可能な SiV 中心内包ダイヤモンド微粒子の作製

1. の研究で用いた DND はサイズが小さいものの、ダイヤモンド微粒子の作製時に大量の不純物が混入してしまうという点と、ダイヤモンド同士が凝集してしまうという問題があった。そこで、本テーマでは、あらかじめサイズを選んだダイヤモンド微粒子に Si イオンを注入し、その後真空中で熱処理を行うことで、SiV 中心内包ダイヤモンド微粒子の作製を行った。極低温での光学特性の評価の結果、発光スペクトルの線幅が分光器分解能に到達するほどの単色性の高い発光が観測された。さらに、共鳴励起を用いた線幅の評価を行った結果、不確定性関係より決まる寿命限界幅に到達しており、同一性の高い光子が生成されていることを確認した。作製した光源が量子情報技術へ応用可能であることを示唆する重要な結果である。

3. ハイブリッドデバイス作製に向けた研究

1、2. の研究で作製した SiV 中心内包ダイヤモンド微粒子と NFBC とのハイブリッドデバイス作製に向けて、SiV 中心の発光に共鳴する NFBC の作製、原子間力顕微鏡を用いたダイヤモンド微粒子のマニピュレーションを行った。これらの技術を用いることで、NFBC と SiV 中心内包ダイヤモンド微粒子の結合が可能となった。

以上の成果は、SiV 中心内包ダイヤモンド微粒子と NFBC のハイブリッドデバイスの実現のみならず、SiV 中心を用いた幅広い光量子技術応用の実現に重要な結果である。

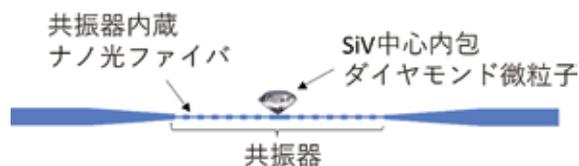


図1 NFBC 単一光子源の概念図

### 三上 杏太 (木本恒暢 教授)

#### 「Study on Channel Mobility and Threshold Voltage Towards SiC CMOS Devices」 (SiC CMOS に向けたチャネル移動度およびしきい値電圧の研究)

令和7年3月24日授与

現代社会において半導体集積回路が担う役割は多岐にわたり、近年では燃焼炉制御・地下資源掘削・宇宙探査など、高温領域での応用も期待されている。しかし、現在主流のケイ素 (Si) を用いた集積回路は、Si の禁制帯幅に起因して、本質的に 300℃ 以上の高温動作が不可能である。そこで、広い禁制帯幅を有するワイドバンドギャップ (WBG) 半導体が注目されている。

集積回路の中核素子である CMOS では、酸化膜 / 半導体界面における伝導帯・価電子帯の双方に十分なバンドオフセット ( $> 2 \text{ eV}$ ) があり、イオン注入によって局所的かつ広範囲で伝導型を制御できる必要がある。現状、WBG 半導体の中でこれらを満たす半導体は炭化ケイ素 (SiC) のみである。SiC は高い絶縁破壊電界も有するため、パワーデバイス応用を目的とした研究が盛んに行われ、現在では次世代の低損失・高耐圧パワーデバイスとして商用化されている。従来、SiC MOSFET の研究においては、パワーデバイス応用の観点より、電子移動度が高く低抵抗化が容易な n チャネル MOSFET の研究が主流であった。その結果、CMOS を構成する n チャネル・p チャネル MOSFET のうち、特に p チャネル MOSFET の知見が欠如しており、SiC CMOS の設計・作製は現状困難である。本研究では、p チャネル MOSFET に重点を置いて、チャネル移動度としきい値電圧を調べた。

始めに、p チャネル MOSFET の移動度を低下させる価電子帯端 ( $E_V$ ) 近傍の SiC/SiO<sub>2</sub> 界面欠陥密度を、コンダクタンス法・ $C - \psi_s$  法によって正確に定量した (図 1)。その結果、欠陥密度は Si/SiO<sub>2</sub> 界面よりも二桁程度高いこと、n チャネル MOSFET の特性に影響する伝導帯端 ( $E_C$ ) 近傍の欠陥密度に匹敵することを明らかにした。

続いて、実際に SiC (0001) 面上に p チャネル MOSFET を作製し、その移動度を評価した。Si MOSFET におけるチャネル移動度は、Si 結晶中のキャリア移動度の 30~40% 程度であることが知られているが、SiC p チャネル MOSFET では SiC 結晶中の 10% 程度と低い移動度であることがわかった。この現象は本研究で得られた (0001) 面上の高い界面欠陥密度によって説明できる。一方、無極性面である SiC ( $\bar{1}\bar{1}00$ ) や ( $11\bar{2}0$ ) 面上に p チャネル MOSFET を作製した場合、SiC 結晶中の約 30% の移動度 ( $28 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ; SiC p チャネル MOSFET として世界最高) が得られた (図 2)。無極性面における界面欠陥密度を定量した結果、(0001) 面よりも低い欠陥密度であることがわかり、これが高移動度の一因であることを明らかにした。また、無極性面上のチャネル移動度は電流方向に強く依存することを発見し、これが SiC 価電子帯の複雑なバンド構造に起因することを定量的に明らかにした。この結果を基にして、先端 Si CMOS で実用化された FinFET 構造を SiC で作製する際の設計指針を提示した。

最後に、しきい値電圧制御の観点より、しきい値電圧のボディ層濃度依存性を調べた。その結果、しきい値電圧の実験値と理論値の差がボディ層濃度に強く依存することを発見し、この差の原因がボディ層濃度に依存する固定電荷であることを明らかにした。このような固定電荷は Si MOSFET では報告されておらず、SiC MOS 界面に特異であると言える。さまざまな対照実験によって、固定電荷が素子作製プロセスにおける最終熱処理で生成されることを明らかにし、さらに最終熱処理時のフェルミ準位着目した固定電荷生成モデルを提案した。

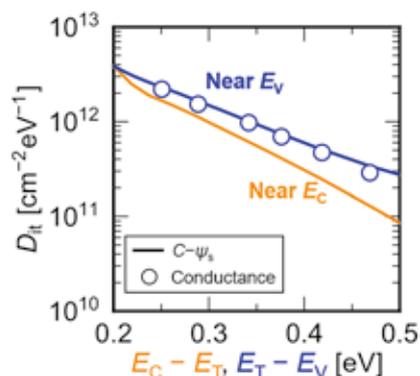


図 1: SiC/SiO<sub>2</sub> 界面における欠陥密度 ( $D_{it}$ )。横軸はバンド端から見たエネルギー準位である。

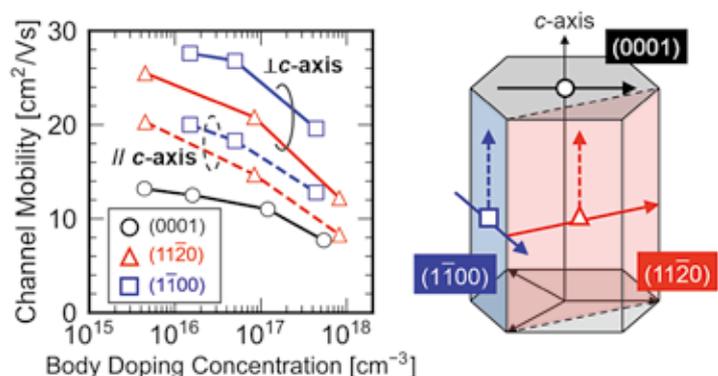


図 2: さまざまな SiC 結晶面上に作製した p チャネル MOSFET における移動度。c 軸垂直方向かつ ( $\bar{1}\bar{1}00$ ) 面で、SiC p チャネル MOSFET として世界最高移動度を達成した。

遅 熙 倫 (木本恒暢 教授)

「Study on Carrier Trapping and Scattering Toward Modeling of SiC MOSFETs」  
(SiC MOSFET のモデル化に向けたキャリア捕獲および散乱の研究)

令和7年9月24日授与

エネルギー問題が深刻化する中で、電力変換を担うパワーデバイスの高性能化は、省エネ社会の実現に直結する重要な課題である。従来広く用いられてきたシリコン (Si) パワーデバイスはその材料物性に由来する理論限界に近づきつつあり、その打開策としてワイドギャップ半導体である炭化ケイ素 (SiC) が注目されている。

SiC を用いた金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) は、高耐圧・低損失・高温動作が可能な次世代パワーデバイスとして実用化が進みつつあるが、デバイス特性を物理的に予測できないという根本的な課題が残されている。その主な原因は、MOSFET の動作を支配する心臓部とも言える SiC/酸化膜界面 (MOS 界面) に存在する高密度の界面欠陥である。これらの欠陥は、反転層内の電子を捕獲するとともに電子散乱の起源となり、電子輸送を著しく複雑化させる。界面欠陥の影響は、その MOS 界面近傍における存在場所に強く依存し、反転層に近い欠陥ほど電子捕獲および電子散乱を通じて移動度低下に直接的な影響を及ぼす。しかし、界面欠陥に対する体系的な物理的理解が不十分であったため、電子散乱機構が明確にならず、SiC MOSFET の特性を物理に基づいて記述・予測することは長らく困難であった。

そこで本研究ではまず、界面欠陥の物理的理解を深めることを目指し、その存在場所の特定に取り組んだ。MOSFET のボディ層に印加するボディバイアスを制御することで、反転層内の電子の分布状態を意図的に変化させ、その際の捕獲電子密度の変化を理論計算と対比しながら調べる独自の実験手法を考案した。様々なボディバイアス条件における実験結果と計算結果を比較することで、最も一般的に用いられている (0001) 極性面上に作製された SiC MOSFET において、従来は界面に存在すると考えられていた欠陥の大半が、MOS 界面極近傍の SiC 側数 nm 程度の範囲に存在することを明らかにした。次に、ゲート電圧の理論計算と実験結果の差から MOS 界面近傍の固定電荷密度を定量し、約  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  オーダーの正の正味固定電荷が存在し、その密度がボディ層濃度 ( $N_A$ ) の増加とともに上昇することを示した。さらに、200 - 400 K において、様々な  $N_A$  ( $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) を有する MOSFET の自由電子移動度 ( $\mu_{\text{free}}$ ) を MOS-Hall 効果測定により定量した。SiC 側における電子捕獲を考慮することで、幅広い温度・電界範囲において  $\mu_{\text{free}}$  の実験結果を精度よく再現できる物理モデルを構築した (図1右)。本モデルの解析から、固定電荷によるクーロン散乱が SiC MOSFET における最も支配的な移動度制限要因であることを明確にした。同様の手法を、トレンチ型 MOSFET 応用で重要となる SiC (1100) や (1120) 無極性面に対しても適用し、異なる結晶面による界面欠陥および電子散乱機構の違いについても検討した。

最後に、電子捕獲および電子散乱機構に関する理解に基づき、これらの影響を同時に考慮したデバイス特性の数値計算モデルを構築した。本モデルを用いてゲート特性を計算した結果、幅広い温度範囲にわたって SiC MOSFET のゲート特性の実験結果を高精度に再現できた (図2)。本研究により、SiC MOSFET における電子散乱機構の理解が大きく前進し、デバイス特性予測に向けた物理モデルの基盤を提示することができた。

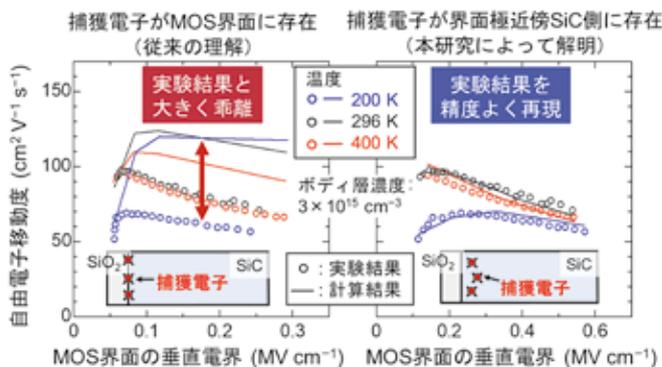


図1: SiC (0001) 面 n チャネル MOSFET の異なる温度における自由電子移動度の実験結果 (シンボル) と、捕獲電子の存在場所が異なる場合の計算結果 (線)。

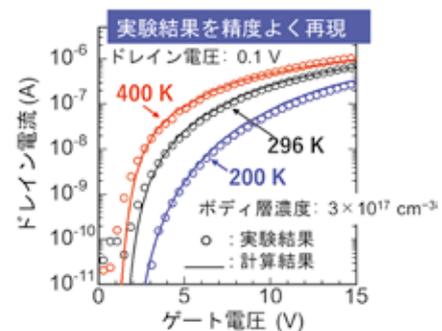


図2: SiC (0001) 面 n チャネル MOSFET の異なる温度におけるゲート特性の実験結果 (シンボル) と本モデルによる計算結果 (線)。

張 兆 宗 (川上養一 教授)

「Macroscale, Microscale, and Nanoscale Structural and Optical Characterization on Hybrid InGaN Red Quantum Wells」

(ハイブリッド InGaN 赤色量子井戸におけるマクロ・マイクロ・ナノスケールの構造及び光学特性)

令和 7 年 3 月 24 日授与

Indium gallium nitride (InGaN) light-emitting diode (LED) has attracted much attention as a visible light source. The wall-plug efficiency of the blue and green LEDs reaches approximately 80% and 60%, respectively. However, that of the red LEDs is still approximately 10%. The low efficiency originates from the low-temperature growth, substantial lattice mismatch, and strong Quantum-Confined Stark effect (QCSE) of In-rich InGaN active layers.

In this study, the optical and structural properties of InGaN-based hybrid quantum wells (QWs), which consist of a blue and a red single QW (SQW), were investigated from macroscale, microscale, and nanoscale perspectives, toward the efficient red emission. First, the power- and temperature-dependent internal quantum efficiency (IQE) and carrier lifetimes [Fig. 1 (a) and (b)] were estimated by macroscopic time-resolved photoluminescence spectroscopy. When the experimental temperature was higher than 100 K, the nonradiative recombination lifetime ( $\tau_{nr}$ ) dominated the PL lifetime ( $\tau_{PL}$ ), contributing to the thermal quenching. The power dependence of the radiative recombination lifetime ( $\tau_r$ ) at 6 K indicated the effects of Coulomb enhancement and QCSE screening. To investigate the microscopic origins of nonradiative recombination centers (NRCs), micro-photoluminescence ( $\mu$ -PL) spectroscopy was performed [1]. We revealed many dark spots in the  $\mu$ -PL mapping image of the integrated red emission intensity. In addition, not only red and blue (from blue SQW) but green emission bands were observed at certain dark spots, suggesting that In segregation is one of the causes of dark red emissions. Through the correlative analysis, we concluded that the red dark spots correlated to the dark areas in the intensity map of the blue emission were the major nonradiative centers. To further explore the structural origins of the dark emissions, we investigated the nanoscale structural and optical properties of a blue InGaN SQW [2] and a red InGaN active layer [3], using atomic force microscopy (AFM) and scanning near-field optical microscopy (SNOM) PL spectroscopy. The AFM image and SNOM-integrated PL intensity mapping of the same region in the red active layer are shown in Fig. 2 (a) and (b), respectively. We directly visualized that threading dislocations (TDs) and trench defects are NRCs [3]. The trench defects with In segregation exhibited remarkably dark emission. On the basis of the previously established correlation in the distribution of NRCs between the blue and red SQWs [1,2], we concluded that TDs must be a trigger in the formation of trench defect in the red InGaN. These findings will help in realizing efficient InGaN-based red LEDs.

References:

- [1] Z. Zhang, R. Ishii, K. Shojiki, M. Funato, D. Iida, K. Ohkawa, and Y. Kawakami, *Phys. Status Solidi (b)* **261**, 2400036 (2024).
- [2] Z. Zhang, R. Ishii, K. Shojiki, M. Funato, K. Ohkawa, D. Iida, and Y. Kawakami, *JAP* **137**, 053101 (2025).
- [3] Z. Zhang, R. Ishii, K. Shojiki, M. Funato, D. Iida, K. Ohakawa, and Y. Kawakami, *APL* **126**, 242104 (2025).

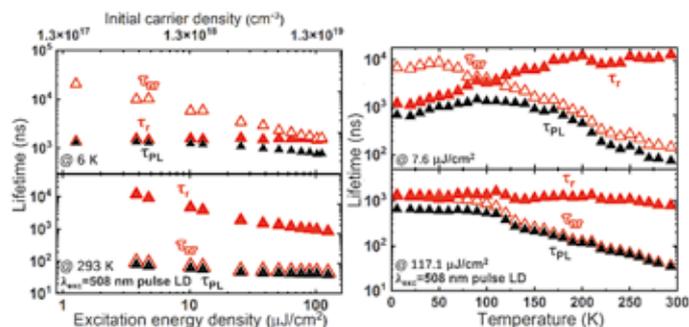


Figure 1. Power dependence of (a)  $\tau_{PL}$ ,  $\tau_r$ , and  $\tau_{nr}$  at 6 K and 293 K. (b) Temperature dependence of  $\tau_{PL}$ ,  $\tau_r$ , and  $\tau_{nr}$  at  $7.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  and  $117.1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ .

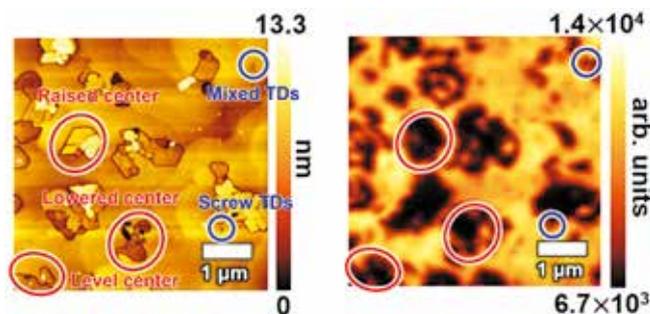


Figure 2. (a) AFM image and (b) Integrated SNOM PL intensity map of red active layer.

## 藤崎 広 豊 (川上養一 教授)

[Single-ion spectroscopy of the  $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  clock transition in  $Ba^+$  ions and laser cooling technique for their odd isotopes](Ba<sup>+</sup>イオンの $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ 時計遷移の単一イオン分光とその奇数同位体のレーザー冷却法)

2025年3月24日授与

バリウムイオン ( $Ba^+$ ) は、自然幅が極めて狭い遷移 ( $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  遷移、 $^2S_{1/2} - ^2D_{3/2}$  遷移) をもつ。これらを周波数の基準となる遷移 (時計遷移) として利用することにより、不確かさの小さい光時計を実現できる。特に奇数同位体  $Ba^+$  における  $^2S_{1/2} - ^2D_{3/2}$  ( $F=0$ ) 時計遷移は電場勾配による摂動を受けにくいいため、多数イオンを同時に用いることにより短い積算時間で小さな不確かさに到達する光時計を実現できると考えられる。

本研究では、偶数同位体  $Ba^+$  の  $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  時計遷移をもちいて単一イオン分光技術を確立した。また、多数イオン光時計構築のため、奇数同位体のレーザー冷却技術を開発し、 $^2S_{1/2} - ^2D_{3/2}$  時計遷移励起用光源 (時計レーザー) を実現する方法を提案した。論文の内容は以下のとおりである。

(1) 偶数同位体  $Ba^+$  の  $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  時計遷移単一イオン分光[ $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  時計レーザーの開発]

$Ba^+$  の  $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  遷移 (波長 1.76  $\mu\text{m}$ ) を励起する狭線幅光源を開発した。881 nm の外部共振器型半導体レーザー (ECDL) を高フィネス光共振器で線幅狭窄化し、その第2次高調波を用いて 1.76  $\mu\text{m}$  レーザーとのビートを検出し位相同期することで、100 Hz 以下の線幅をもつ時計レーザーを実現した。

[単一  $Ba^+$  のレーザー冷却、時計遷移分光と温度評価]

リニア RF トラップを用いて単一  $Ba^+$  イオンを捕捉し、レーザー冷却によって Lamb-Dicke 領域 (イオン運動範囲が遷移波長より小さい状態) まで冷却する技術を確立した。これにより 1 次ドップラーシフトの影響をうけずに  $Ba^+$  を分光することができる。RF により励振される過剰マイクロモーションはトラップ電極に直流電圧を重畳することで、すべてのトラップ軸成分を最小化した。

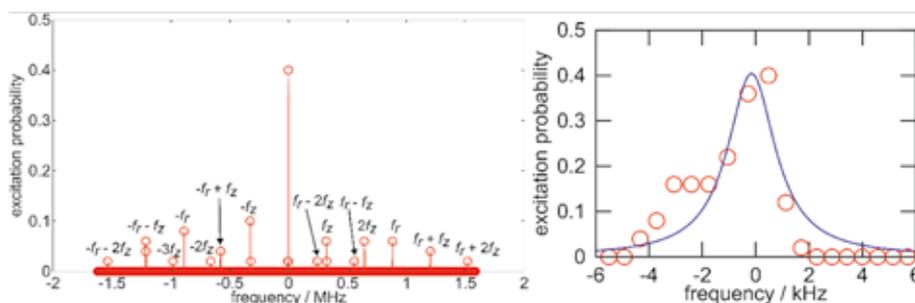
時計レーザーを用いて、単一  $^{138}\text{Ba}^+$  の  $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  時計遷移を分光し、キャリアとサイドバンドを分離して観測した (図)。軸方向のイオン温度は約 3.5 mK と評価され、Lamb-Dicke 条件の達成を確認した。

(2) 奇数同位体イオンのレーザー冷却および  $^2S_{1/2} - ^2D_{3/2}$  時計レーザーの開発

$^{135}\text{Ba}^+$ 、 $^{137}\text{Ba}^+$  奇数同位体は超微細構造を持ち、冷却には複数のレーザーが必要となる。本研究では、独立した複数のレーザーを位相同期し、単一奇数同位体  $Ba^+$  の捕捉・冷却に成功した。

$^2S_{1/2} - ^2D_{3/2}$  遷移 (2.05  $\mu\text{m}$ ) 励起用の時計レーザーとして、2つの基本波レーザーを光周波数コムで位相同期し、差周波発生 (DFG) によって狭線幅レーザーを生成する方法を提案した。波長 1.76  $\mu\text{m}$  でこの方法による差周波光を実現した。(1) で用いた時計レーザーとの比較で線幅は 100 Hz と評価され、この方法の有効性と広い波長域での狭線幅レーザーの実現可能性が示された。

今後は、多数イオンを捕捉可能なトラップ電極の開発や2種ある奇数同位体の一方のみを選別してトラップに導入する技術を確立し、多数イオン光時計の実現を目指す。



図：時計遷移スペクトル。左：キャリアとサイドバンド全体、右：キャリアスペクトル拡大図。

栗根 悠介 (野田進 教授)

「量子井戸とフォトニック結晶を用いた中赤外電気変調型光学フィルターの開発および非分散型赤外センシングへの応用」

令和7年3月24日授与

本論文は、産業界で広く利用されている非分散型赤外 (Non Dispersive Infrared, NDIR) ガス分析計の小型化・高速化・ロバスト化を目的とし、従来の機械式チョッパーと光学フィルターを代替する「中赤外電気変調型光学フィルター」の開発およびその応用に関する研究成果をまとめたものである。まず、スラブ型三角格子 PC 構造が持つ TE (Transverse Electric) と TM (Transverse Magnetic) モードの共振周波数を一致させることで、垂直入射光に対し、ローレンツ型の透過ピークを持つ構造の設計を行った。さらに、スラブ内に透過ピークと同じ波長帯において ISB-T を示す GaAs/AlGaAs MQW を p 層と n 層の間に導入する構造を検討した。pn 間に逆バイアスを印加し、MQW 内電子密度を電圧制御することで、フィルターの透過率を透過ピーク周辺のみにおいて変調可能な構造を設計した。本構造フィルターを実際に作製し、波数  $1018\text{ cm}^{-1}$  付近 (波長  $9.7\mu\text{m}$ ) において、半値幅約  $14\text{ cm}^{-1}$  の狭帯域な透過率変調が可能なデバイスを実証した (図 1)。さらに、電気変調により  $100\text{kHz}$  以上の高速な透過率変調が可能であることを実証した。これは従来の機械式チョッパー (数 Hz ~ 数十 Hz) を大幅に上回る性能である。さらに、本フィルターを搭載した非機械式 NDIR システムを構築し、 $\text{C}_3\text{F}_8$  ガスの定量検出に成功した。特に、高速バルブを用いた  $100\text{ ms}$  程度 of ガスフローが追従可能であることを確認し、従来の NDIR では検出困難な高速なガスフローを捉えられることを示した。また、変調波長の異なる 2 種の本フィルターを重畳することで、単一検出器のみによる測定対象ガスと光源参照信号の同時検出を実現した。これにより、光源変動の影響を演算により相殺し、ガス検出指示値の安定性向上を実証した。さらに、ラン分散によるノイズ解析の結果、本システムは従来型と同等の検出限界を有しつつ、さらなる変調量増大による性能向上の余地があることが示された。本研究の成果は、半導体製造プロセスガス計測や車載排ガス計測など、高速・小型・ロバスト性が求められる次世代ガスセンシング技術への貢献が期待される。

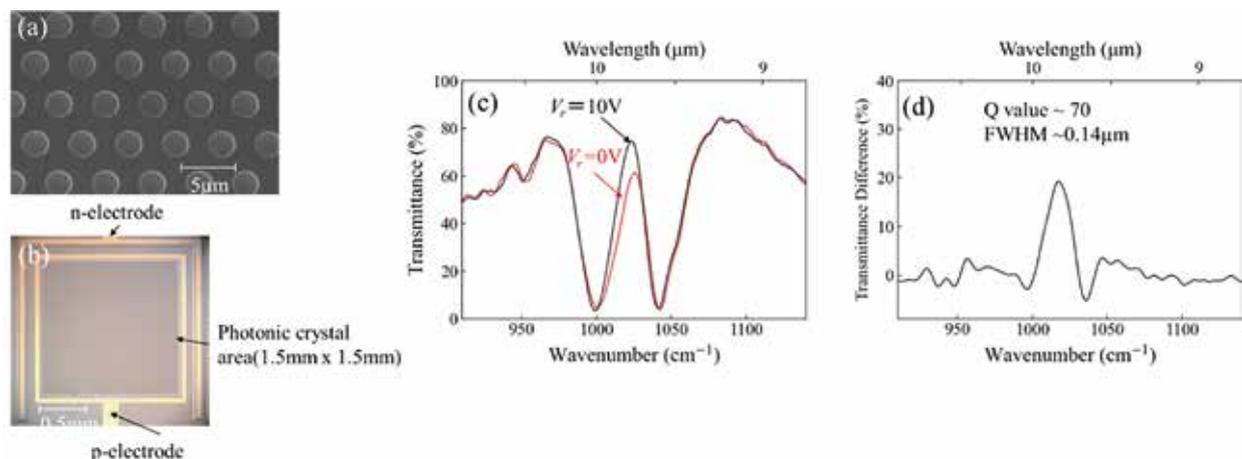


図 1 (a) 作製した電気変調型中赤外フィルターフォトニック結晶部の上面 SEM 像。(b) 上面光学顕微鏡像 (c) 逆バイアス電圧印加前後における透過率スペクトル。(d) 電圧印加前後の変調差スペクトル。波数  $1018\text{ cm}^{-1}$  を中心とした狭帯域なバンドパス特性が得られている。

## 和 泉 孝 紀 (野田進 教授)

## 「フォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御に関する研究」

令和7年3月24日授与

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶のバンド端共振作用を利用することで、大面積コヒーレント動作が可能な半導体レーザーである。これまでに、フォトニック結晶レーザーの高出力かつ高ビーム品質動作やビーム出射方向制御、短パルス動作などの優れた動作が実証され、光センシング (Light Detection And Ranging: LiDAR) やレーザー加工、自由空間通信、宇宙応用などの幅広い分野への応用と、それによる各分野の発展が期待されている。今後、このようなフォトニック結晶レーザーへ発振状態制御機構を導入することができれば、例えば直流電流動作時の電気・熱・光の相互作用やデバイス作製時のゆらぎ等による影響の補正が可能となり、さらなる大面積デバイスでのコヒーレント動作については超高輝度動作の実現に繋がると期待される。また、同時にレーザー動作の物理の解明やデバイス設計へのフィードバックに繋がることが期待される。

そこで、本論文では、特に熱の影響も加わった直流電流動作において、フォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御について検討を行った。そのためのデバイスとして、図1 (a) に示す分割電極構造や分割ヒーター構造を発振状態制御機構として導入したフォトニック結晶レーザーを開発し、作製・実装方法にも工夫を施すことで直流電流動作において、単一デバイスより様々なレーザー特性が得られることを実証した。また、図1 (b) に示すようなデバイスの駆動系とレーザー特性評価系を組み合わせた測定系を構築するとともに、発振状態の動的制御手法として、分割電極からの電流注入分布や分割ヒーターの発熱分布を制御パラメーターとし、機械学習や最適化法 (共分散行列適応進化戦略: CMA-ES) を活用したフィードバック制御を提案した。このデバイスを導入した測定系、制御手法を用いて、デバイスの電流分布や温度分布などを適切に調整することで、予めデバイスがもつ温度勾配や、デバイス実装時などに生じる歪み、動作時の環境外乱によるレーザー特性への影響がある場合にも、ガウスビーム出射などのより理想的なレーザー特性を実現できることを実験的に示した。

以上のように、本論文で実現されたフォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御は、作製ゆらぎや環境外乱などによる発振状態への影響を補正しつつ、より高ビーム品質など優れたレーザー動作をオンチップで可能とするものであり、他のフォトニック結晶レーザー技術と組み合わせることで広範な分野への応用とその発展に寄与することが期待される。

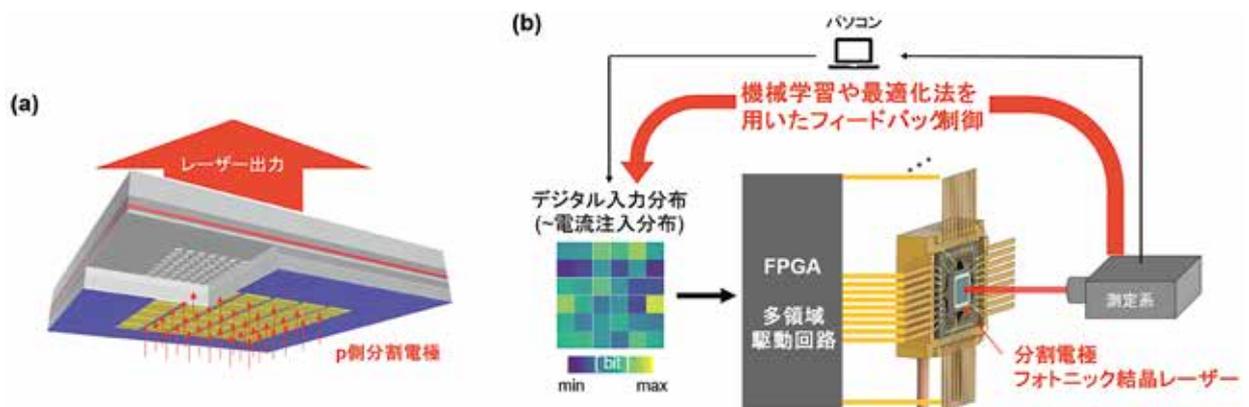


図1 (a) 分割電極フォトニック結晶レーザー。(b) 分割電極フォトニック結晶レーザーの発振状態制御。

植田 暢大 (黒橋禎夫 特定教授)

## 「Cohesion Analysis of Textual and Visual Entities: Enhancing Accuracy and Comprehensiveness」

(言語的および視覚的エンティティの結束性解析：精度と包括性の向上)

令和7年3月24日授与

言語情報と視覚情報は人同士の、また将来的には人とロボットのコミュニケーションにおいて主要な役割を果たす。言語情報には単語や句などの言語的エンティティが、視覚情報には物体などの視覚的エンティティが含まれる。これらのエンティティ間には一貫した意味的な結びつき（結束性）が存在し、結束性を整合的に解釈することはメッセージ理解の基盤となる。例えば、日常生活で「あの皿とその隣にあるコップを持ってきて。」と言われたとき、この依頼を実行するには「あの皿」や「コップ」のテキスト上の意味を理解するだけでは不十分であり、実世界において参照している物体を知る必要がある。また、「その」が「あの皿」を指し示しているといった言語的エンティティ間の関係も重要である。

計算機による結束性の自動解析はいくつかの個別タスクとして定式化され、40年以上取り組まれてきた。しかし、いずれのタスクも広範な言語知識が必要なため十分な精度に至っていなかった。特に、異なる名詞間の意味的関係を扱う橋渡し照応解析は難しく、最新のシステムでも30%前後の精度に留まっていた。また、既往研究では各タスクが個別に扱われており、結束性の相互作用が十分に考慮されていないという問題もあった。

このような背景から本研究では、結束性解析における精度と包括性の向上に取り組む。精度向上に関しては、BERTに代表される基盤モデルを利用する。基盤モデルは大規模なデータセットを用いて訓練されたモデルであり、様々なタスクに適用可能な広範な知識を持つ。これにより、テキスト間の結束性解析において、最大で10ポイント以上の精度改善を達成した。さらに、橋渡し照応解析について、名詞間の多様な意味的関係を考慮した新しいラベル体系を提案し、それに基づく38,840件の学習・評価用ラベルを収集することで精度をさらに改善した。

また、包括性向上のため、テキスト間の複数の結束性解析タスクを統一的に扱う手法を提案した。この手法では、テキスト中の各単語に対して意味的関係を持つ他の単語を選択するという単純な定式化を用い、複数のタスクを同時に学習する。これにより、タスク間で解析に必要な知識の共有が可能となる。加えて、テキスト・画像間の結束性を包括的に解析するためのデータセットを構築した。本データセットは実世界における2者の対話シーンにおいて、11,062枚の動画フレームおよび2,652文の発話書き起こしテキストに対して種々の結束性タグを付与したものである。本データセットが提供するテキスト・画像間の結束性解析タスクは、既存の画像中物体とテキストの対応付けモデルとテキスト結束性解析モデルの単純な組み合わせでは十分な精度で解析できず、ベンチマークデータとして今後の当該分野の発展に資するものと考えられる。



図1：2者の対話シーンにおけるテキスト間およびテキスト・物体間の結束性関係の例

Lee Sang-Eun (西野恒 教授)

「Extrinsic Camera Calibration from Articulated Objects」  
 (物体の関節構造を用いたカメラ外部キャリブレーション)  
 令和7年9月24日授与

Extrinsic camera calibration determines the camera poses—rotations and translations—in a multi-camera system, which is essential for 3D computer vision tasks such as geometry reconstruction, scene understanding, and motion analysis. Conventional calibration often relies on specialized equipment and cumbersome on-site procedures performed by experts—e.g., walking around the scene while holding a large chessboard. Such requirements limit the scalability and practicality of multi-camera systems in real-world applications.

Can freely moving articulated objects, such as humans or animals, serve as calibration targets themselves? We show that simply capturing their movement from multiple cameras in a scene enables automatic extrinsic camera calibration. We leverage the articulated body structure of a single moving person and extract a set of *oriented points* from 3D pose—e.g., the neck joint with spine direction—to establish correspondences. A linear method that recovers the extrinsic parameters of all cameras from these correspondences can be derived. Camera rotations are estimated using a factorization-based approach, and translations are recovered by solving a linear system derived from coplanarity and collinearity constraints. We further extend the method to multiple moving persons. For this, identifying the same individuals across different views is essential for performing extrinsic camera calibration. Instance association and calibration are interdependent, which makes the problem challenging. By encoding the 3D articulated poses as a point set on the unit sphere, we formulate both tasks as a single registration problem between two point sets across a pair of views. We derive a probabilistic optimization framework with soft assignment that iteratively updates extrinsic parameters and cross-view person associations in an alternating manner. We also broaden the calibration target to include animals. Unlike the human cases, 3D pose estimators for animals are not readily available. To address this, we introduce *SteerPose*, a neural model that predicts how 2D structured keypoints derived from articulated bodies transform under 3D rotations. Inference-time optimization integrates differentiable matching and a novel geometric consistency loss into the model, which enables the joint estimation of extrinsic camera parameters and instance matches within a unified framework.

We validate the effectiveness of the proposed methods on real-world datasets, as shown in Fig. 1. The results demonstrate that leveraging articulation as calibration targets improves the accuracy and robustness of extrinsic camera calibration, even in challenging scenarios with small target movements, large camera baselines, and textureless backgrounds. Furthermore, in-the-wild scenarios with multiple moving persons and animals, our methods achieve accurate calibration and reliable instance association. We believe that the proposed methods offer a practical and flexible solution that facilitates the deployment of multi-camera systems in real-world settings.

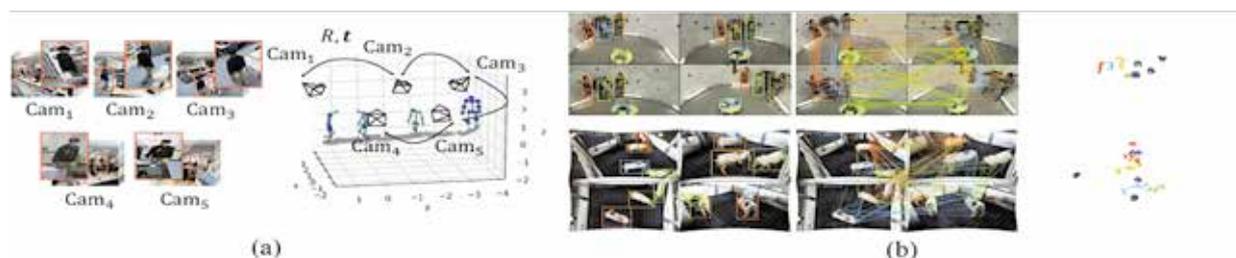


Figure 1 (a) Extrinsic camera calibration from a single moving person. (b) Joint extrinsic camera calibration and instance matching for multi-person and animal scenes.

張 晨 露 (大木英司 教授)

「Service Deployment and Resource Allocation in Distributed Computing Networks」  
(分散コンピューティングネットワークにおけるサービス配備とリソース割り当て)  
令和7年3月24日授与

Today's constantly evolving real-world networks are characterized by their dynamic and large-scale nature. Distributed computing networks have been widely adopted in various real-world infrastructures as a flexible and scalable solution in response to the changing demands of real-time users, such as edge computing, cloud computing, and network function virtualization (NFV). NFV is a promising paradigm that virtualizes network functions, such as firewalls or load balancers, by decoupling them from dedicated hardware. NFV allows network functions to be implemented as software instances, referred to as virtual network functions (VNFs). Under NFV architecture, a network service can be provided by a service function chain (SFC), which consists of a chain of VNFs within a specific order, to enable flexible and agile network management. The distributed nature of NFV allows systems to handle dynamic conditions with high-quality performance, providing lower latency, higher scalability, and more flexible resource allocation. To fully leverage the benefits of distributed architectures, efficient service deployment and resource allocation strategies must be considered. This thesis studies three specific problems about service deployment and resource allocation in distributed networks.

1. **A deployment model for parallelized SFCs considering traffic-dependent delay:** This work proposes a deployment model for parallelized SFCs that handles the imbalance issue, with considering that the delay of each VNF depends on both arriving traffic and allocated computing resources. The proposed model determines the placement and routing of the given parallelized SFCs and minimizes the deployment cost with satisfying the end-to-end delay constraints. The technique of VNF sharing is applied to improve the efficiency of resource allocation. The cost-saving effect of applying adjustable sojourn time and VNF sharing for a parallelized SFC deployment problem is explicitly analyzed.
2. **A robust deployment model for parallelized SFCs against traffic uncertainty:** This work proposes a robust deployment model for parallelized SFCs against traffic uncertainty to minimize the deployment cost while satisfying the requirement of balanced parallel structures. The uncertain traffic is described by an uncertainty set that considers two aspects, including the variation of service traffic arrival rates and the fluctuation of parallel structures. The numerical results showed the advantages of the proposed model in terms of saving the deployment cost.
3. **A robust distributed server allocation model against delay uncertainty:** This work proposes a robust distributed server selection model for multiple users in real-time applications against delay uncertainty. Both user-server and server-server link delays are considered uncertain due to the varying network conditions, which are defined by two uncertainty sets, respectively. The proposed model obtains solutions that minimize the weighted sum of data synchronization delay and total interaction delay. The numerical results showed the benefit of the proposed model in terms of improving overall delay performance.

The three proposed models achieved efficient resource allocation in the distributed computing networks. The models include both static and dynamic scenarios and focus on optimizing different performance metrics. Over-estimations on the resource allocation can be suppressed with the proposed model designs, which enables cost savings and performance improvements. A network operator or service provider can select the appropriate model according to specific requirements to achieve flexible and efficient service deployment and resource allocation under the distributed computing networks.

久保 顕 大 (石井信 教授)

「Reward-Driven Hierarchical Learning for Visual Tracking and Control Tasks」  
(視覚物体追跡と制御のための報酬駆動型学習)

令和7年3月24日授与

強化学習は、環境との相互作用から制御方策を学習する枠組みとして大きな注目を集め、これまで理想的なシミュレーション環境などで高い性能を示してきた。しかし、実世界のロボットなどに応用する場合、大量の相互作用を繰り返すのはコストが高く、加えて、物理特性や観測条件が変化する実環境に適応する必要が生じる。本論文では、こうした実世界応用を視野に入れて「サンプル効率性（少ないサンプルから学習する特性）」と「異なる環境への適応性」という2つの課題に着目し、3つの側面からのアプローチについて論じている。

1. 四脚ロボットの歩容生成におけるサンプル効率および複数環境適応の課題に取り組んでいる [1]。歩容という周期的な動作生成機構を実装・学習するため、central pattern generator (CPG) を組み込んだ階層的方策に基づく強化学習を導入した。あらかじめ人手である程度歩行可能に調整した初期パラメータを起点として、効率的に方策を学習する。周期運動に関する生物学的知見を活かして探索空間を絞ることで、複数の物理特性が異なる環境それぞれに対し、実時間で3時間程度相当の試行で順応できることを示した。さらに、観測ノイズや低摩擦路面といった要素を想定したロボスタ化の試みによって、より現実的な使用条件への適応可能性を示した。
2. モデルベース強化学習によるサンプル効率の向上に取り組んでいる [2]。モデルベース強化学習アルゴリズムのサンプル効率の向上を目的として、データ駆動で構築された環境のモデルの新たな活用方法について模索・検証した。特に、状態分布を生成するための予測展開と、価値推定を補正するための予測展開を組み合わせる手法を提案し、多様な制御タスクでその有効性を検証した。これにより、他のモデルベース強化学習手法と比べても実行時間の増大を抑えながら、高いサンプル効率を達成できることが分かり、事前知識に依存しない汎用的かつ実用的な強化学習技術として意義を持つことを示した。
3. 変動し続ける視覚環境下での追跡タスクへの強化学習応用の課題に取り組んでいる [3]。Visual Object Tracking (VOT) のように映像フレームごとに外観が変化する非定常環境下では、既存手法では学習率を固定のハイパーパラメータとして扱うケースが多く、最適な値をあらかじめ設計することは容易ではない。そこで学習率を動的に調整する方策を強化学習によって学習するというメタ学習によるアプローチを導入することで、多様な変化パターンを伴う環境でも安定した追跡が可能であることを示した。

まとめるに本論文は、現実的な環境下での強化学習技術の応用を鑑み、四脚ロボットの効率的かつ複数環境に適応した歩容獲得に向けた階層的制御機構の強化学習、サンプル効率と実行時間の両立を目指し2種類のモデルロールアウトを組み合わせたモデルベース強化学習、そして非定常な視覚的变化パターンに応じた物体追跡に向けた学習率調整方策のメタ最適化という3つのアプローチを通じて、強化学習におけるサンプル効率性と適応性の課題に対して成果を示した。本論文の学術的成果は、強化学習における、上記の二つの課題の解決を通じ、その実社会応用の加速に寄与するものと考えられる。

- [1] Watanabe, T., Kubo, A., Tsunoda, K., Matsuba, T., Akatsuka, S., Noda, Y., Kioka H., Izawa J., Ishii S., & Nakamura, Y. (2025). Hierarchical reinforcement learning with central pattern generator for enabling a quadruped robot simulator to walk on a variety of terrains. *Scientific Reports*, 15 (1), 11262.
- [2] Kubo A., and Parmas P., & Ishii S., (2025). Double Horizon Model-Based Policy Optimization. *Transactions on Machine Learning Research*.
- [3] Kubo, A., Meshgi, K., & Ishii, S. (2021). A meta-Q-learning approach to discriminative correlation filter based visual tracking. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 101 (1), 11.

小山田 創 哲 (石井信 教授)

「Toward Scalable Reinforcement Learning via Massive Batching」

(大規模バッチングによるスケーラブルな強化学習の実現に向けて)

令和6年11月25日授与

エージェントが環境と相互作用しながら学習を行う強化学習は、単なる人間の模倣にとどまらず、人間を超える能力を持つ人工知能 (AI) を実現する可能性を秘めている。しかし、現在の強化学習アルゴリズムは、一般的に、膨大な学習データを必要とし、また学習が遅く非効率である。本論文では、「計算をレバレッジする」アプローチ、特に大規模なバッチ処理と GPU アクセラレータの活用に基づき、この問題の解決を目指したものである。深層強化学習のボトルネックが実際には、勾配計算やパラメータの更新ではなく、環境とエージェントの相互作用によるデータ生成のパートにあることが一般的である。そしてボトルネックであるデータ生成を並列化する手法を、本論文では MIMD/SIMD の概念を用いて二つに大別している。本論文では後者の GPU アクセラレータを活用したベクトル化による並列化手法にフォーカスを当てる。

本論文ではまず、連続状態空間タスクで有効な GPU 上でのベクトル化された環境を使った並列化手法が、複雑な条件分岐を伴う離散状態空間の環境においても有効かどうかを検証している。バックギャモン、チェス、将棋、囲碁など AI 研究における重要なベンチマークを含む 20 以上のゲームが GPU 上で動作する環境群、Pgx を実装することで、バッチ処理に基づくフル GPU 実装の有効性を構成的に確認した。結果として、Pgx は既存の公開されている実装より、単一 GPU で 10 倍、8GPU で 100 倍以上としてスループットが改善されることを示した (図 1)。また、PPO や AlphaZero といった主要な強化学習アルゴリズムもこの Pgx 上で高速に動作することを検証した。

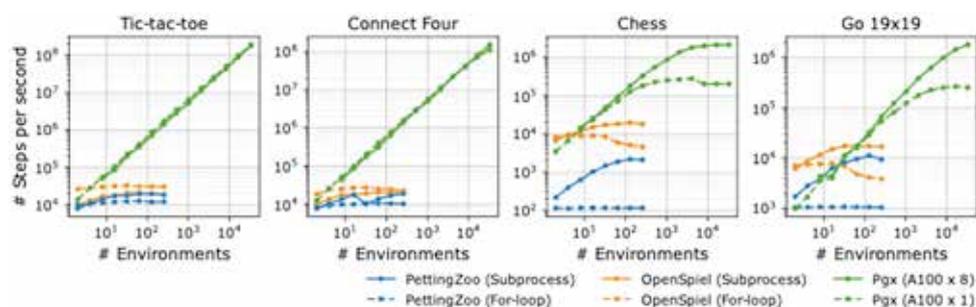


図 1: Pgx 実装 (提案) と他の OSS 実装のシミュレーションスループットの比較

また、Pgx による大規模バッチ化が実際に強化学習研究を加速できることを実証するため、マルチエージェント不完全情報ゲームの一つであるブリッジビidding AI を構築した。結果として、Pgx による GPU 上での大規模なバッチ処理と、マルチエージェント環境で学習を安定させる既存の学習手法のシンプルな組み合わせだけで、ブリッジビidding AI のベンチマークにおいて先行研究を凌駕するスコアを達成できることを示した。

最後に、大規模ベクトル化・バッチ処理による別の側面について考察をしている。GPU を活用した大規模なバッチ処理によれば、計算効率が向上できる一方で、学習器へのフィードバックが遅れるため、逐次的な処理に比べて学習性能が低下する可能性がある。この問題について、強化学習の最もシンプルな形式である確率的バンディットでの純探索問題を用いて考察している。Sequential Halving (SH; Karnin et al., 2013) はシンプルかつ効率的な純探索問題アルゴリズムとして知られているが、本論文では、この SH を自然にバッチ拡張したアルゴリズムが、現実的な条件のもとで性能劣化を全く引き起こさないことを理論的・実験的に示した。こうした SH のバッチ化に対する頑健性を踏まえ、モンテカルロ木探索においても、ルートノード上で SH を用いることで複雑なゲームツリーに対する探索においても性能低下を抑制しつつ、バッチ化により計算効率を向上させることができることを示した。

Orchida Dianita (下田宏 教授)

「Experimental Study on the Effect of Systematic Micro-refresh by Office Environment Control on the Workers' Intellectual Concentration」

(オフィス環境制御による体系的なマイクロリフレッシュが労働者の知的集中力に及ぼす影響に関する実験的研究)

2025年3月24日授与

現代の職場環境では、エネルギー効率を維持しながら従業員の生産性とウェルビーイングを向上させることが求められている。本研究は、図1に示すような、勤務時間中に短時間かつ体系的に導入されるマイクロリフレッシュ (micro-refresh) の効果を実験的に検証し、知的集中力の維持、作業パフォーマンスの安定化、および主観的回復感の向上に及ぼす影響を明らかにしたものである。マイクロリフレッシュとは、作業を完全に中断せず、数秒から数十秒の短い刺激や休息を戦略的に挿入することで、注意のリセットと心理的回復を促す介入である。

本研究は、(1) 短時間のマイクロブレイク、(2) 聴覚刺激を用いた介入、(3) 視覚刺激を用いた介入の三つの実験から構成される。

第一の実験では、認知課題中に20秒間の灰色画面を周期的に提示し、短い休憩の効果を検討した。その結果、マイクロブレイク介入あり条件では反応時間が有意に短縮し、NASA-TLXによる主観的精神的負荷も軽減された。これにより、体系的な短時間休憩が注意力を再活性化し、課題の効率を向上させることが示唆された。

第二の実験では、波の音やカモメの鳴き声など自然音を用いた聴覚刺激をマイクロリフレッシュとして提示した。25分課題では顕著な差が見られなかったが、45分間の長時間課題では聴覚刺激群において反応時間の短縮と注意の維持が確認され、主観的な回復感・リラクゼーション感も有意に高かった。これらの結果は、適切なタイミングで自然音を挿入することで、集中力低下を防ぎ、心理的疲労を軽減できる可能性を示すものである。

第三の実験では、自然要素を取り入れた視覚刺激を背景オーバーレイとして提示した。45分間の課題中、4.5分ごとに30秒間提示される刺激によって、後半の回答速度が安定し、視覚刺激なし条件に見られたパフォーマンス低下が抑制された。また、離脱感・回復感・リラクゼーションのすべての主観的指標で有意な改善が見られた。これにより、視覚的な自然刺激もまた認知機能を支える重要な役割を果たすことが示唆された。

以上の三つの実験結果から、体系的に設計されたマイクロリフレッシュは、作業の正確性と効率性を高め、精神的負荷を軽減し、持続的注意力を維持するのに有効であることが明らかとなった。特に聴覚および視覚刺激を組み合わせた自然要素ベースの介入は、短時間でも顕著な心理的回復効果をもたらすことが確認された。また、休憩や刺激の「タイミング」と「頻度」が効果を左右する重要な要因であることも示された。

本研究の成果は、職場環境設計および人間中心の労働支援システムの構築に対して重要な示唆を与える。マイクロリフレッシュ戦略を日常業務に取り入れることで、エネルギー効率を損なうことなく、従業員の集中力・創造性・ウェルビーイングを持続的に高めることが可能となる。今後は、刺激の種類や提示パターンの最適化、個人差への適応、および長期的影響の検証を通じて、より精緻なオフィス環境制御モデルの構築が期待される。

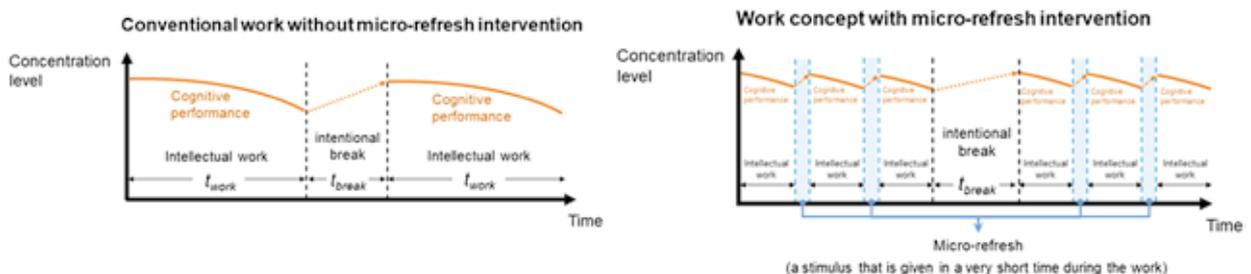


図1. マイクロリフレッシュの概念図

## 新聞大輔（下田宏 教授）

### 「原子力発電所の運転・保全作業従事者への放射線情報の提示による職業被ばく低減方法に関する研究」

令和7年1月23日

本論文は、原子力発電所で実施される保全作業に伴う保全作業員の職業被ばくを低減することを目的とし、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の精神のもとで被ばく量を減らすことを狙った研究についてまとめたものである。日本では2011年の福島第一原子力発電所の事故後、国内の原子力発電所は運転を停止し、10年以上に渡る運転停止の間に保全知識を備えた熟練者は退職し、若年層は稼働中のプラントの保全経験がない状況となり、このような中で安全に保全作業を遂行していく必要がある。このような状況において職業被ばくを低減するため、データを活用して改善に活かすデータドリブンをコンセプトに、データ収集、分析、意思決定と行動への反映を実現する手段を提案している。

本論文では、原子力発電所において保全作業に従事する作業従事者の自発的な職業被ばくを低減するための前提となる被ばく線量率分布情報を取得する方法を検討した。保全作業従事者が装着する位置計測デバイスと無線通信モジュール付き電子式個人被ばく線量計を使って場所ごとの放射線強度に関するデータを収集し、処理・分析することで保全現場の被ばく線量分布を取得する方式を提案した。無線通信モジュール付き電子式個人被ばく線量計と位置計測デバイスを自律移動ロボットに搭載して放射線管理区域内を移動させながらデータを収集し有効性を確認する実験を実施した。その結果、1mの分解能で被ばく線量率分布を生成できた。モンテカルロ法を使った放射線シミュレーションによる結果と比較したところ、提案方式によって得られた値とシミュレーションの値は $4.0\mu\text{Sv/h}$ の誤差であり、誤差率は3.3%であった。保全作業エリアや線量、作業人数などを仮定して検討した結果、計測誤差は3%程度であり、提案手法は被ばく回避のために提示する被ばく線量分布の生成・可視化は十分な精度であることが確認できた。

次に、聴覚インタフェースにより放射線強度の情報を提供する方法を検討した。聴覚インタフェースを保全作業従事者が装着し、インタフェースから発生する音を頼りに自分がいる場所付近の放射線強度を把握し、より強度が低い場所に退避するコンセプトである。仮想空間での放射線場において保全作業を模擬した計算タスクを実施し、被ばく線量の違いで評価する仕組みを構築した。アラーム音には、放射線強度に応じて音量を変更する方式、音の間隔を変更する方式、音の高さを変える方式の3種類を選定した。これらに加え、アラームを提示しない場合の4条件で被験者実験を実施した。その結果、実験参加者はアラーム音を頼りに高放射線領域を避けながら保全作業を模擬した計算タスクを実施し、被ばく線量が低減できることを確認できた。ただし、移動時間が多い作業の場合には、かえって被ばく線量が増えることも分かった。

さらに、聴覚インタフェースの欠点である保全現場での作業従事者同士の音声コミュニケーションの障害を解決するため、振動を提示する方法も検討した。振動提示インタフェースを手首に装着し、効果を確認する実験を実施した。振動振幅変更方式と振動間隔変更方式を候補とし、振動しない条件を加えた3条件で放射線被ばく量を比較した。その結果、比較的作業時間が長い場合、振動振幅変更方式と振動間隔変更方式は、振動なしに比べて有意な被ばく低減効果があることが分かった。また、移動時間が多い作業の場合には、振動を提示しない場合に比べて被ばく量が増える可能性があることも分かった。

従来の原子力発電所でのALARA活動では具体的な被ばく低減効果を定性的に検討するところまでしかできない例が大半であったが、本研究では、仮想空間での模擬保全作業を実施する評価手段によって定量的な被ばく低減効果を評価することを可能にしている。被ばく線量計と位置計測による線量分布の可視化、それを活用してインタフェースを用いて現在位置の線量強度を提示することで、特に作業時間が長い場合において被ばく線量を下げる効果があることを実験にて確認することができた。以上の研究を通じて得られた結果や知見は原子力発電を持続可能で選択される電源としていくうえでの指針や示唆を提示する有用なものである。

山下 湧志朗 (中村祐司 教授)

「Study of self-consistent evolution of non-axisymmetric eddy currents and plasma equilibria」

(非軸対称渦電流とプラズマ平衡の自己無撞着な時間発展に関する研究)

令和7年3月24日授与

クリーンで安定したエネルギー源として、磁場閉じ込め核融合による発電が期待を集めている。プラズマ中に電流を流して閉じ込め磁場構造を形成するトカマク方式では縦長の断面形状をとることで閉じ込め性能が向上することが知られているが、プラズマが垂直方向の位置不安定性を生じるため、導体壁による受動安定化が必要とされる。理想的なトカマク配位は大半径周回方向の対称性(軸対称性)を有するが、現実の装置においては有限の軸対称性の破れ(非軸対称性)が不可避であり、その影響を評価するため、非軸対称性の効果を考慮可能な導体壁のシミュレーション手法が求められている。

本論文はトカマクにおけるプラズマの磁気流体力学(MHD)平衡と導体壁に流れる渦電流の自己無撞着な長時間の時間発展について、非軸対称性を一貫して考慮できる数値シミュレーション手法を提案および検証したものである。既存の導体壁を考慮できる非軸対称シミュレーションコードはMHD方程式の時間発展を解く方式のものに限られており、長時間の過程を模擬するには膨大な計算資源を要する。本研究では軸対称計算において効率的な長時間過程の模擬に成功している統合シミュレーションの枠組みを非軸対称計算に適用し、安定して計算結果の収束が得られる手法を確立することで、効率的な非軸対称シミュレーションを実現する基盤を築いた。本研究の主な成果は以下の三つである。

1. 統合計算用に開発した薄壁近似渦電流計算コードについて、その計算原理と検証計算の結果をまとめた。センターソレノイド電流に誘起される渦電流を模擬した検証計算では、軸対称計算におけるフィラメントモデルとの結果の一致と、非軸対称計算結果の定性的な妥当性が確認された。
2. 渦電流コードと既存の静的三次元MHD平衡ソルバーを連携させ、平衡と渦電流の自己無撞着な時間発展を解く手法を提案した。検証計算においては、既存手法では収束しない任意方向の変位が生じる条件でも、提案手法では物理的に妥当な解へスムーズに収束することが確認された。
3. 渦電流とMHD平衡の準静的な時間発展を計算するコードに、プラズマ内での磁場拡散およびプラズマ外部のポロイダル磁束分布を計算するモジュールを加え、MHD平衡計算の入力変数である真空磁場、回転変換、総トロイダル磁束を自己無撞着な解に収束させる計算手法を開発した。ITERの15MAシナリオに基づく検証計算では、温度上昇時、下降時ともに既存の軸対称統合コードと同様のプラズマ挙動が再現されたことから、提案手法の妥当性が確認された。また、非軸対称性を与えた計算でも物理的な考察と矛盾しない結果が得られ、ポートなどによる真空容器の非軸対称性がプラズマの大域的な挙動に影響を及ぼし得ることが確認された。

本研究では三次元MHD平衡計算における事実上の標準コードとなっている既存コードを平衡計算モジュールとして採用しており、開発した統合計算手法は既存研究との親和性が高い。また、開発したコードはモジュール構造によって既存の統合コードと同様の柔軟な運用が期待でき、非軸対称系の研究の進展に貢献するものである。

宮 下 顕 (長崎百伸 教授)

「Study on edge plasma transport in island divertor configuration in Heliotron J」

(ヘリオトロンJアイランドダイバータ配位における周辺プラズマ輸送に関する研究)

2025年3月24日

核融合炉実現のためには、閉じ込め領域周辺のプラズマ輸送を理解し、制御することが重要である。周辺領域のプラズマは境界条件としてコアプラズマの性能を左右するほか、固体壁からの不純物がコアに侵入することを防ぐ役割がある。周辺部の磁場構造を変えることによる周辺プラズマの制御が試みられている。先進ステラレータ/ヘリオトロン装置においてアイランドダイバータ配位が周辺プラズマの制御に採用されている。アイランドダイバータ配位において、周辺部はコアから流入するプラズマと固体壁による冷却の影響に加え、磁気島構造に起因する3次元的な輸送によって分布が形成される。磁気島によって周辺プラズマを制御するために、アイランドダイバータ配位における周辺部の輸送を理解する必要がある。ヘリオトロンJは優れた磁場の制御性を持つ装置で、アイランドダイバータ配位を含めた様々な磁場配位による輸送の変化を研究することに適している。

コア領域への不純物侵入を防ぐため、周辺プラズマにおける不純物輸送を理解する必要がある。不純物輸送を理解するためには放射を計測することが重要である。また、周辺部において放射は三次元的な分布をするので、多次元的な計測が必要となる。赤外線イメージングビデオボロメータ (IRVB) は、ピンホールカメラのようにプラズマからの放射を、ピンホールを通して薄膜に結像させ、薄膜の温度上昇を赤外線カメラで観測し、薄膜上の熱輸送方程式から放射分布を安価に得ることができる。アイランドダイバータ配位を含む複数の配位においてIRVB計測を行い、周辺部の磁場構造の変化を反映する分布を観測した [1]。今後、IRVB計測の結果とEMC3-EIRENEによるモデリング計算結果を比較することで、周辺磁場構造が不純物輸送に与える影響についての理解が進むことが期待される。

アイランドダイバータ配位における輸送を理解するためには、周辺部の磁気島における揺動および揺動駆動輸送を明らかにする必要がある。磁気島の内部および周辺領域をラングミュアプローブで計測し、電子密度とポテンシャルの規格化揺動強度、電子密度の統計量 (skewness, kurtosis)、turbulence driven/spreading および揺動駆動粒子束の分布を調べた [2]。その結果、プローブのような間欠的輸送が磁気島内部で低減し、磁気島の径方向外側ほど増大していることが示唆された。また、磁気島内部では、turbulence spreading の寄与が増大し、揺動駆動粒子束の分布が磁気島内部と外側端においてピークしていることから、周辺部の磁気島において揺動特性が一樣ではないことが示唆された。今後、磁気島における揺動の分布を解明することで、磁気島を用いた揺動駆動輸送の制御の実現が期待される。

低磁気シアの先進ステラレータ・ヘリオトロン装置の磁場配位は周辺部の有理面によりアイランドダイバータを形成しているが、プラズマ電流による回転変換の変化により、周辺部の磁気島が径方向に移動し、アイランドダイバータ配位からリミタ配位に変化する恐れがある。ダイバータ構造が維持されない場合についても検証することは、将来のステラレータ/ヘリオトロン装置のオペレーションを考慮するうえで重要である。ヘリオトロンJにおいてそれを模擬する実験を実施した結果、プラズマ電流の増大に伴ってダイバータフットプリント位置が大きく移動し、ダイバータ配位からリミタ配位のような分布となった [3]。また、配位遷移中、電子密度やプラズマ電流、磁場揺動などにおいて2kHzの振動が観測された。この振動現象のメカニズムは現状明らかではないが、リミタ配位への遷移によって周辺部の輸送が変化したことが原因であると考えられる。

本研究における計測は限定的であるものの、アイランドダイバータ配位における周辺部の輸送が、磁気島の影響を受けて複雑な様相を示すことが明らかになった。今後、磁気島における3次元的な分布を計測し、より深い理解を得ることが期待される。

[1] A. Miyashita, et al., Plasma and Fusion Research 16 (2021) 1202079

[2] A. Miyashita, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 66 (2024) 075008

[3] A. Miyashita, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 67 (2025) 045003

劉 鵬 (山本衛 教授)

「Development of Automatic Detection and Prediction Models for Ionospheric Spatiotemporal Variation Based on Deep Learning」

(機械学習に基づいた電離圏の時空間変化の自動検出と予測モデルの開発)

授与年月日：令和7年03月24日

本論文は、宇宙天気現象として知られる電離圏擾乱を、人工知能技術を用いて高精度かつ自動的に検出し、さらに将来的な変動を予測することを目的としている。電離圏は高度 60 ~ 1000 km に広がる超高層大気であり、太陽放射によって中性粒子が部分的に電離し、電子とイオンからなるプラズマを形成する。その電子密度の時空間的な変動、例えば、「突発性電離圏擾乱 (SID)」、「スポラディック E 層 (EsL)」、「スプレッド F」、「伝搬性電離圏擾乱 (TID)」などの宇宙天気現象は、通信や衛星測位に深刻な影響を及ぼす。これらの擾乱を監視・予測するために、イオノゾンデ観測から得られるイオノグラムや、全地球航法衛星システム (GNSS) から得られる全電子数 (TEC) マップなどの観測データが広く用いられてきた。しかし、過去数十年にわたり蓄積された大量のデータは、人的な処理負担が大き過ぎるゆえに十分に活用されていない状況が続いていた。本研究では、近年の進展が目覚ましい人工知能技術を導入することで、前述の課題を解決して電離圏データの自動解析および時系列予測の実現に取り組んだ。具体的には下記の三つの主要な成果を達成した。

まず、中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) の自動検出システムを構築した。MSTID は、全球測位衛星システム観測により得られる dTEC (トレンド除去全電子数) マップ上に現れる波状の擾乱であるが、従来の手法では、孤立した擾乱や不規則な変動との識別が困難であり、太陽活動や地磁気活動との相関に関する議論が長らく続いている。本研究では、深層学習の個体分割 (Instance Segmentation) モデルである Mask R-CNN を改良し、波状擾乱を自動検出するアルゴリズムを開発した。検出した擾乱の幾何形状は外接楕円で正規化し、さらに非線形最適化により設定した閾値を用いて孤立した擾乱を除外することで、MSTID として妥当な波形のみを選別した。この手法により、1997 年から 2019 年までの日本上空における 1,209,600 枚の dTEC マップを自動解析し、発生率、波長、波面方向、広がり、面積などの統計的特徴量データベースを構築した。その結果に基づいて、MSTID 特性の季節依存性や、太陽活動との複合的な相関関係を明らかにした。また、従来の相関係数に代えて「偏相関係数」を導入することで、太陽活動の影響を除外したうえで地磁気活動との相関を評価し、地磁気活動との明確な依存関係は認められないことを示した。

次にイオノグラムの自動読取りシステムを開発した。信楽イオノゾンデによる 25 年間のイオノグラムデータに対して、ノイズ除去 (鉛直ノイズは 4 次多項式フィッティング、水平ノイズは背景平均値で補正)、深層学習によるエコー検出 (E 領域、F1 と F2 領域の正常波と異常波、スプレッド F、多重反射を 8 種類の反射エコーに分類)、座標系変換の 3 ステップからなる処理アルゴリズムを提案した。この深層学習個体分割モデルは、約 90% の高い検出精度を達成し、自動的に抽出された F2 層臨界周波数 (foF2) は、地理的に近い国分寺観測点の手動読取り値と良い一致を示した。さらに、SID、EsL、スプレッド F などの擾乱現象も正しく検出可能であることを確認した。

最後に TEC マップの時空間予測モデルを構築した。従来の予測モデルは、グラフィック特徴に基づく予測に留まり、太陽活動や地磁気活動などの外部要因の変動に適切に応答できないという課題があった。本研究では、「チャンネル融合層 (Channel Mixer Layer)」と呼ばれる新しいマルチモーダル融合手法を提案し、これを既存の時空間予測モデルに組み込むことで、外部要因と予測チャンネルの間の機械的推論能力を高めた。標準化された大規模全球電離圏 TEC データセットを用いた評価を行った結果、提案手法のチャンネル融合層を用いたモデルは従来の連結や演算融合法を上回る性能を示し、TEC の空間・季節・昼夜・太陽・地磁気活動の依存性を適切に反映した予測を実現した。特に、16 チャンネル入力の PredRNN++ モデルは、太陽活動が低い (高い) 期間において、それぞれ 0.94 (2.63) TECU の最小平均絶対誤差を達成し、リアルタイムでの推論速度は 34 フレーム / 秒であった。

以上に示した通り、本研究は電離圏擾乱の自動検出・予測という科学的課題を解決するとともに、将来的には宇宙天気予報の高度化や衛星測位誤差の抑制といった応用分野への貢献が期待される。今後は、レーダーやオーロライメージャーなど他の観測データの統合や、対象地域の拡大、ハードウェアとの連携による実用化が課題として挙げられる。

松田 知也 (橋口浩之 教授)

「Development of the MIMO radar with the MU radar」

(MU レーダーを用いた MIMO レーダーの開発)

令和 7 年 5 月 25 日授与

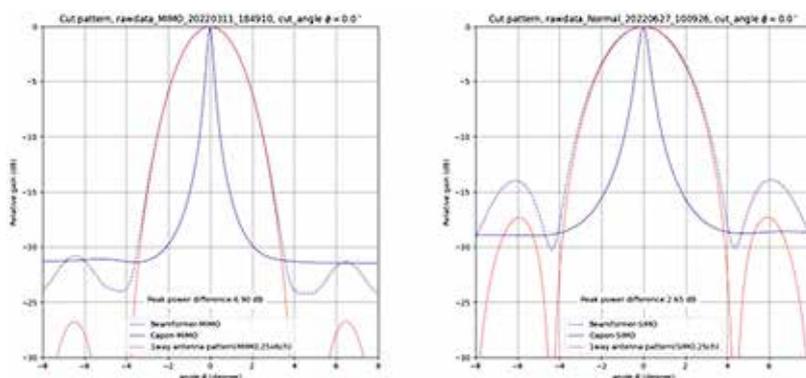
フェーズドアレイレーダーは、ビーム方向を電子的に制御することにより高速な空間走査を可能とし、短時間で広範囲の情報を取得できるシステムであるが、社会実装を進めるためには、システムコスト・設置の容易さ (小型化)・不要波 (クラッタ) への対処といった課題を克服する必要がある。本研究では、これらの課題に対する有効な手段のひとつとして、通信分野で用いられている MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術をレーダーへ適用した。MIMO 技術により、同一の装置規模で角度分解能の向上が可能となるほか、分解能を維持したまま装置規模を縮小することも可能となるため、システムコストの低減にも寄与する。

MIMO レーダーは、直交する複数の送信信号を同時に送信し、複数の受信機で受信することで、仮想的な受信開口を形成する技術である。本研究では、この有用性を実証するため、MIMO レーダーとしての動作が可能な MU レーダーをプラットフォームとして用い、ハードターゲットおよびボリュームターゲットの観測データを通じて MIMO レーダー理論の妥当性を検証した。

本研究では、MIMO 技術の基盤手法として、ドップラー分割多重接続 (Doppler Division Multiple Access: DDMA) および符号分割多重接続 (Code Division Multiple Access: CDMA) の二手法に着目した。DDMA では複数の信号発生器を用いてドップラー周波数オフセットを生成、CDMA では複数の任意波形生成器により直交信号を生成することで、送信信号間の直交性を確保した。M 本の直交送信信号を送信し、N 台の受信機で受信することにより、 $M \times N$  個の独立な受信信号が得られ、信号処理における自由度は M 倍に拡張される。この特性により、ポストビームステアリングやアダプティブアンテナ処理といった適応信号処理手法、ならびに高性能なクラッタ抑圧処理との高い親和性が得られる。本研究で得られた主な成果は、以下の二点に集約される。

- (1) MIMO レーダーとして動作させた際の送受信ビームパターンが理論値と良好に一致することを確認するとともに、Capon ビームフォーマを適用し、MIMO 技術との組み合わせによる角度分解能向上手法を確立した。
- (2) MIMO において通常必要とされる複数のアナログマッチドフィルターを、単一のマッチドフィルターで実現する手法を提案・実証した。また、送信信号の位相整合手法に関して、DDMA では送信信号を記録し受信信号処理時に補正する手法を、CDMA では送信信号位相を直接整合させる手法をそれぞれ実装し、実用的な解決策を提示した。

これらの成果は、CDMA/DDMA-MIMO 技術を既存レーダーシステムへ実装・展開できる可能性を示すとともに、他分野への応用可能性をも示唆するものである。本研究を通じて、気象・大気観測におけるレーダー技術の高度化に貢献するとともに、局所的な気象現象の把握手法の発展や、フェーズドアレイレーダーの社会実装促進への寄与が期待される。



図：MU レーダーによる月面反射エコーを用いたビーム幅検証の結果 (青点線：ビームフォーマ法：青線：Capon 法)。参考として、アンテナパターン (赤線) を示す。左図は MIMO レーダーとして動作させた場合、右図は通常運用で動作させた場合。

## 軽量機械学習の原理と応用

大学院情報学研究科 情報学専攻 情報回路アーキテクチャ分野  
佐藤 高史、栗野 皓光

### 1. 軽量機械学習という選択肢

近年、機械学習技術は多様な分野において知的情報処理の中核を担うようになり、社会的基盤技術として急速に定着しつつある。しかし、その多くは大規模データと高性能計算資源を前提としており、演算量・消費電力・モデル規模のいずれにおいても極めて重厚である。このことは、エッジデバイスやIoTノードのように計算・電力資源の制約が厳しい環境における応用を阻む要因となっている。また、クラウド依存型の学習・推論は通信遅延やセキュリティ上の制約を伴い、リアルタイム性や自律性が求められる応用領域では必ずしも有効ではない。そのため、限られた計算資源下でも安定して知的処理を実現する軽量機械学習 (lightweight machine learning) の必要性が高まっている。

軽量化の方策は大きく二つに分けられる。一つは、既存のニューラルネットワークに対してパラメータ削減や量子化、スパース化などの構造的最適化を施すアプローチである。もう一つは、情報処理の原理そのものを再構築し、より単純かつ頑健な計算機構を新たに設計するアプローチである。後者は脳神経系や物理系の動作原理から着想を得た非従来型計算の一潮流を形成している。

この流れの中で注目されているのが、リザーバー計算 (Reservoir Computing, RC) および超次元コンピューティング (Hyperdimensional Computing, HDC) である。両者はいずれも、学習すべきパラメータを最小限に抑えつつ、非線形かつ高次元の状態表現を利用することで、少ない計算で高い表現能力と汎化性能を実現するという点で共通している。

RCは、非線形動的システムの内部状態を「リザーバー」として利用し、そのダイナミクスを通じて入力情報を高次元空間に写像する手法である。内部結合を学習せず出力層のみを訓練する構造により、学習コストを大幅に削減できる。また、リザーバーを物理現象 (光、音、流体、電子回路など) として実装することも可能であり、情報処理を物理現象そのものに委ねる物理情報処理の枠組みとしても注目されている。

一方、HDCは、人間の脳が扱う情報が高次元で冗長な表象として符号化されているという仮説に基づき、数千次元規模のベクトル (ハイパーベクトル) を基本単位とする計算モデルである。単純な代数演算で高次元表現を結合・比較できるため、計算が極めて軽量でありながら、ノイズやビット誤りに対して本質的に頑健な性質を有する。さらに、その構造はデジタル回路実装や低精度演算にも適しており、エッジデバイス上での自律的推論に有望とされている。

RCとHDCはいずれも、従来の統計的学習パラダイムとは異なり、「構造の中に知能を埋め込む」アプローチを志向している。すなわち、重厚な学習を行う代わりに、動的系や高次元空間の性質を利用して表現と汎化を実現する点に本質的な革新性がある。これらの手法は、エネルギー効率と信頼性の両立が求められる次世代知能デバイスの基盤技術として、近年急速に研究が進展している。

### 3. リザーバー計算

#### 3.1 RCの構成と動作原理

リザーバー計算 (RC) は、再帰型ニューラルネットワークの一種であるエコー・ステート・ネットワーク (Echo State Network, ESN) をもとにした計算方法である。RC は、図1に示すような3つの層から構成される。

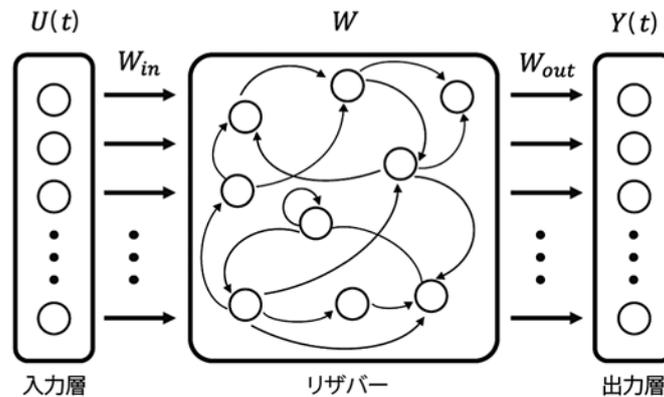


図1：RCの概念的構成

1. 入力層 (Input Layer): 時系列入力のリザーバーにおける役割を持つ。入力層の結合重みは通常固定されており、学習の対象とはならない。
2. リザーバー (Reservoir): 大規模で疎に結合した非線形ノード群からなる動的システムであり、入力層からの信号を受け取り、その応答として内部状態を生成する。ここでも結合重みは通常固定され、学習は行わない。リザーバーの役割は、入力された時系列データを、リザーバー内ネットワークの動的な時間発展を利用して高次元かつ非線形な状態表現へ写像することにある。この状態は「リザーバー状態」や、過去の入力履歴の残響 (エコー) を保持することから「エコー状態」とも呼ばれる。
3. 出力層 (Readout Layer): リザーバー状態から、目的とする出力を取り出す。ここで使う出力重み  $W_{out}$  だけが学習対象となる。

RCの特徴は、入力データをリザーバーの非線形な動作により高次元に変換することと、出力層だけを学習すれば良いという点にある。学習にはリッジ回帰などの軽量な計算手法が使えるため、学習コストや計算時間が小さい利点がある。

ここで、非線形な高次元射影の例として、2次元平面で「円の内側にある点」と「外側にある点」を分類したいとする。円の境界は曲線なので、直線で分けること (線形分離) はできない。しかし、各点の座標  $(x, y)$  から半径の二乗  $z^2 = x^2 + y^2$  を計算し、これを新しい軸として追加した3次元空間では、円の内外の点を容易に平面で分離できる。リザーバーも同様に、時系列の入力データに対し高次元のリザーバー状態を作ることによって、単純な線形回帰にもとづく出力層のみの学習により、分類や予測ができるようにしている。

#### 3.2 物理現象による高次元射影

RCが注目される理由の一つは、リザーバーの役割を物理システムに置き換えられることが挙げられる。

この「物理リザーブ」では、様々な物理システムに固有の非線形性と時空間ダイナミクスを、入力情報の高次元射影を行う「計算資源」として活用する。

では、リザーブとして機能する動的システムが入力情報を効果的に高次元に写像し、出力層のみの学習によって高度な分類や予測ができるためには、どのような条件が必要であろうか？ このための条件として「リザーブ条件」が知られている。これは大まかには、リザーブ状態  $x(t)$  が、過去の入力時系列  $u(1), \dots, u(t-1), u(t)$  によって一意に決定され、初期状態に依存しないということである。また入力信号の影響が時間と共に減衰し、やがて消滅するようにする。すなわち、リザーブは過去の情報を無限に保持するのではなく、適切な「記憶の窓」を持つようになっている必要がある。数学的には、再帰的に使用されるリザーブの結合行列  $W$  のスペクトル半径（最大固有値の絶対値） $\rho(W)$  を 1 未満に設定する。これにより、内部の励起が発散せず、また入力信号がなくなると状態はゼロに収束する。

この際、入力時系列のわずかな相違や、同じ入力系列の異なる部分が、リザーブ内の状態空間において互いに明確に分離された異なる高次元ベクトルに発展し、表現される必要がある。つまり、リザーブが適度な非線形性をもち、多くのノードにより、線形分離が困難な入力データを線形分離が容易な高次元空間へと広く射影する必要がある（分離性）。また、システムが時系列予測や音声認識等のタスクにおいて過去の入力履歴を適切に記憶し、その情報を出力層での線形読み出しに利用できる必要がある（記憶性）。 $\rho(W)$  の値を 1 に近づけることで記憶容量は増大するが、 $\rho(W)$  を 1 を超えて大きくするとシステムが不安定になり、発散するリスクがある。

これらの条件はなかなか厳しいようにも見えるが、こうした条件を満たす物理現象は意外に多くあり、物理リザーブは様々な分野で研究が進められている。例えば、光リザーブ計算では、遅延フィードバックループを持つ光集積回路や半導体レーザー等がリザーブとして用いられる。入力信号は光の強度変調として注入され、遅延時間やレーザーの非線形応答がリザーブの動特性を提供する。また、電子リザーブ計算では、メモリストと呼ばれる抵抗変化型素子や CMOS 回路の非線形特性が利用される [1][2]。集積回路により RC を実現した例としては、[3][4] 等がある。さらに、流体力学的な渦のダイナミクスや、微生物の集団行動のパターンなど、多様な動的システムがリザーブとして検討されている。

## 4. 超次元コンピューティング

### 4.1 高次元ベクトルで「考える」仕組み

リザーブコンピューティングでは情報を高次元空間へと写像することで軽量の機械学習を実現していた。似通ったアプローチに超次元コンピューティング (Hyperdimensional Computing, 以下 HDC) と呼ばれるものも存在する。HDC は、人間の脳が膨大な数のニューロンの協調的活動によって情報を表現・処理しているという観察に着想を得た新しい計算パラダイムである。この枠組みでは、情報は数千～数万次元のベクトル (ハイパーベクトル) として符号化される。各ハイパーベクトルは多くの要素を含み、その要素はランダムに独立して分布する。このような高次元空間では、異なるベクトル同士は高確率で直交し、また多様な情報を単純な演算で結合・比較できるという性質をもつ。

たとえば、文字“A”を表すハイパーベクトルと、音“ア”を表すハイパーベクトルを結合すれば、それらの関連性を新しいベクトルとして表すことができる。また、ある入力があるどのカテゴリに属するかを判断する際には、テストデータのベクトルと各クラスの代表ベクトルとの類似度 (コサイン類似度やハミング距離) を計算すればよい。このように、HDC は統計的最適化や勾配降下法に頼ることなく、単純な代数演算で知的判断を実現する。

高次元ベクトルを扱うことの利点は、情報がきわめて冗長かつ分散的に表現される点にある。人間の脳でも、ひとつの概念は多数のニューロンに分散して符号化されていると考えられており、一部のニュー

ロンが失われても全体の意味は保持される。HDC も同様に、ベクトル要素の一部が欠損しても全体の情報が保持されるため、ノイズやビット誤りに対して本質的に頑健である。この性質は、後述する低電圧環境や信頼性の低いメモリを用いたハードウェア実装において特に重要な意味をもつ。

## 4.2 高次元空間における情報表現

HDC では情報（たとえばセンサ信号、テキスト、画像特徴）はまず符号化によって高次元ベクトル空間に写像される。このとき、各特徴次元にはランダムに生成された基底ベクトルが割り当てられる。入力ベクトルの要素値とこれらの基底ベクトルの線形結合によって、入力全体を表すひとつのハイパーベクトルが生成される。この符号化は整数、浮動小数点数、あるいはバイナリのいずれの精度でも実装可能であり、精度とエネルギー効率のバランスを柔軟に調整できる。

HDC における情報結合には主に三つの基本操作が存在する。

1. 結合：2つのベクトルを要素ごとの乗算や XOR 演算で結合し、関係性を表す。
2. 重ね合わせ：複数のベクトルを加算し、複数の情報をひとつのベクトルに重畳する。
3. 類似度評価：新しいベクトルと既知のベクトルの類似度を計算し、もっとも近い概念を推定する。

この3操作のみで、概念表現・記憶・推論といった認知的機能を模倣できることが HDC の最大の特徴である。また、各次元要素が同等の寄与度をもつホログラフィ的表現である点も重要である。これは、従来の数値表現のように特定のビットが重要となる構造ではなく、どの要素も全体に均等な重みをもつ。そのため、ビット反転や欠損が生じても意味の喪失は局所的に留まり、全体の推論結果は大きく変化しない。

以降では手書き数字認識データセット MNIST を例に HDC における具体的な符号化・学習・推論プロセスを見ていく。なお、HDC の実現方法は様々なアプローチが提案されており、以下で説明するのはあくまでも一実現例であることに注意されたい。

### 4.2.1 情報を高次元空間へ写像する：ハイパーベクトル表現

HDC では、入力データの各要素は、まず基底ハイパーベクトル（base hypervector）と呼ばれるランダムな高次元ベクトルに割り当てられる。ここで重要なのは、次元数が十分に大きい場合（典型的には  $D = 10,000$  程度）、ランダム生成されたベクトル同士は高確率で直交することである。したがって、互いに干渉を受けにくい分散表現が実現される。

MNIST 画像は  $28 \times 28$  画素のグレースケール画像（0～255 階調）である。これを HDC で扱う場合、次のように符号化が行われる。

1. 画像を 1 次元配列に変換

画像は各要素が輝度値に対応する 2 次元の行列として表現されるが、後々の扱いを容易にするために、2 次元行列を 1 次元行列へとフラット化する。得られた 1 次元ベクトルを  $x$  とする。

2. 画像の符号化

MNIST では  $28 \times 28$  の画像を扱うため、フラット化により  $28 \times 28 = 768$  次元の 1 次元ベクトルが得られる。この時、以下のように画像のハイパーベクトルを得る（図 2）。

$$H = \text{sign} \left( \sum_{i=1}^{768} P_i \odot L_{x_i} \right)$$

ここで、 $\odot$  は要素積である。また、 $P_i$  および  $L_i$  はそれぞれ位置ハイパーベクトル、レベルハイパーベクトルであり、画素の位置関係及び輝度値をハイパーベクトルでエンコードしたものである。ここで  $P_i$  は完全なランダム値で良いというわけでは無く、画素の位置関係や輝度値の大小関係を表現できるよう

に近傍にある画素に対応する位置ハイパーベクトルが近い値を持つように選ぶ必要がある。具体的には以下のように  $P_i$  を選ぶ。まず、基準となる  $P_1$  をランダムに選ぶ。次に、 $P_1$  の要素の一部をランダムに正負反転させたものを  $P_2$  とする。同様に  $P_2$  の一部を反転させて  $P_3$  を得る。この操作を繰り返していくことで、隣接する位置に対応するハイパーベクトルが類似するベクトルとなり、元の値の関係性を保持できる。レベルハイパーベクトル  $L_i$  についても同様に選択する。

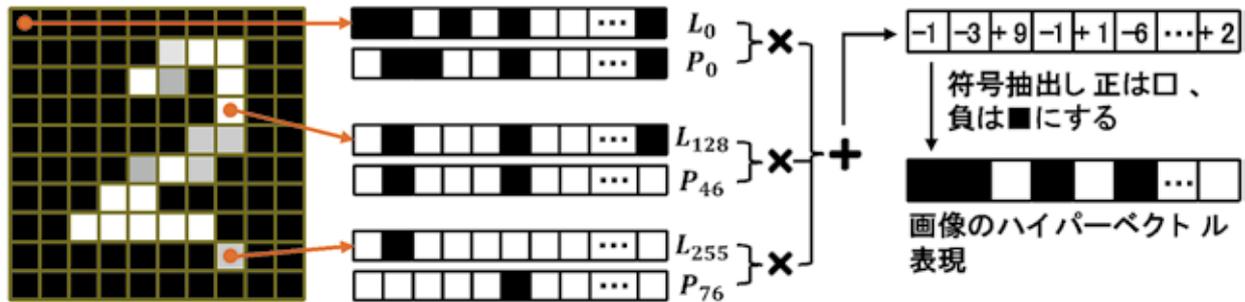


図 2：画像のエンコーディング例

#### 4.2.2 学習：統計的集約によるクラス中心ベクトルの形成

HDC ではニューラルネットワークのように誤差逆伝搬等を必要とする勾配降下は行わない。代わりに符号化された入力ベクトルを同じクラスごとに加算し、統計的に特徴を抽出する。MNIST 分類の場合、クラスは文字 “0” から文字 “9” に対応する 10 クラスが存在するため、予め各クラスに対応するハイパーベクトル（クラス中心ハイパーベクトル）を用意する。なお、クラス中心ハイパーベクトルはランダムに初期化しておく。ある画像に対応するハイパーベクトル  $H$  が入力されたとき、その画像が属するクラスに対応するクラス中心ハイパーベクトルは

$$C_i = C_i + \alpha H$$

の様に更新する。 $\alpha$  は学習率である。一方、その画像が属さないクラスに対応するクラス中心ハイパーベクトルは

$$C_i = C_i - \alpha H$$

とする。つまり画像が属するクラスのクラス中心ハイパーベクトルと  $H$  との類似度を高め、逆に、画像が属さないクラスのクラス中心ハイパーベクトルと  $H$  との類似度が低くなるように学習する。この操作を画像を入れ替えながら何回か反復することでクラス中心ハイパーベクトルを学習する。最後に重要な特徴のみを抽出すべく、クラス中心ハイパーベクトルの各要素の符号のみを取り出しておく。

#### 4.2.3 推論

推論では、入力される未知の画像を 4.2.2 と同じ手順でハイパーベクトル表現 ( $H_{\text{new}}$ ) に変換し、すべてのクラス中心ベクトルとの類似度を計算する。類似度の計算にはコサイン類似度等を用いれば良い。この過程は完全に並列化可能であり、要素単位の独立演算によって極めて高速に動作する。そのため、FPGA や低電圧 ASIC 実装でのリアルタイム推論が可能である。最後に、最も類似度の高いクラスを分類結果として出力する。

ここまで見てきたように HDC は勾配降下も必要としない非常に軽量なアルゴリズムである。にもかかわらず、MNIST 画像分類では 90% 程度の分類精度を達成できる。もちろん、昨今の高性能なニューラルネットワークと比較すると分類精度は見劣りしてしまうが、計算資源が限られているようなデバイスに知的な処理を導入したい場合には HDC が有力な候補となりうる。

## 5. 応用例

超次元コンピューティング (HDC) をはじめとする軽量機械学習手法は、その計算構造の単純さから「せいぜい簡単なクラス分類しかできないのではないか」と思われがちである。しかし、たとえ基本的な分類処理であっても、問題設定を工夫することで、実用的な応用を実現できる。本章ではその一例として、連続値制御問題を離散的なクラス分類として単純化した自動運転タスクに着目し、小型自律走行ロボット DonkeyCar への応用事例を紹介する。

DonkeyCar は、ラジコンカーにカメラと小型コンピュータを搭載し、視覚情報に基づいて自律走行を行うためのオープンソースプラットフォームである。前方カメラから得られる画像を入力として、ステアリング操舵角度とスロットルを出力するという構成を持つが、搭載される計算資源や電力には厳しい制約がある。そのため、大規模なニューラルネットワークを用いた深層学習をそのまま適用することは必ずしも現実的ではない。このような条件下で、計算が軽量で頑健性の高い HDC は有力な選択肢となる。

本例では、問題を単純化するためにスロットルを一定値に固定し、ステアリング操舵角度のみを推定対象とした。DonkeyCar の入力画像は  $120 \times 160$  画素の RGB 画像であるが、計算量削減のため、まずグレースケール化を行い、さらに  $30 \times 40$  画素へと縮小する。この処理により画素数は大幅に減少するが、コースの形状や進行方向を判断するための情報は十分に保持される。

学習データとしては、人間が DonkeyCar を操作して走行した際のログを用いる。各フレーム画像には、その時点でのステアリング操舵角度がラベルとして付与されており、これを教師データとして利用する。画像と角度の組が十分に集まれば、HDC による学習が可能となる。

ステアリング操舵角度は連続値であり、その予測は回帰タスクに分類される。一方、HDC は分類タスク向けの手法であるため、そのままではステアリング操舵角度の予測には適用できない。そこで、本手法ではステアリング操舵角度をいくつかの区間に分割し、各区間をクラスとして扱うことで回帰タスクを分類タスクとして扱う。例えば「大きく左」「やや左」「直進」「やや右」「大きく右」といったようにステアリング操舵角度をクラスとして表現する。各クラスには MNIST 画像分類と同様に、クラスハイパーベクトルを割り当て、学習を通じて分類精度が高くなるように調整される。

学習時には、入力画像から生成したハイパーベクトルと、現在のクラスハイパーベクトルとの類似度を計算し、最も近いクラスを求める。予測結果が正解であれば更新は行わず、誤っていた場合には、正しいクラスハイパーベクトルに入力画像に対応するハイパーベクトルを加算すると同時に、それ以外のクラスハイパーベクトルからは減算する。このような単純な更新則を繰り返すことで、各クラスの特徴が集約されていく。さらに、最も近いクラスだけでなく、2 番目や 3 番目に近いクラスにも小さな補正を加えることで、角度区間の境界付近における推定を滑らかにする工夫も導入した。

推論時には、走行中に取得したカメラ画像を学習時と同じ手順でハイパーベクトルに変換し、すべてのクラスハイパーベクトルとの類似度を計算する。その結果から最も近いクラス、あるいは類似度上位の複数クラスを重み付きで平均することで、最終的なステアリング操舵角度を決定する。この処理は要素ごとの独立した演算のみで構成されており、大規模な行列演算や勾配計算を必要としないため、非常に高速かつ低消費電力で実行できる。

図 3 に DonkeyCar シミュレータと、HDC によるステアリング操舵角度の予測を示す。HDC による予測値は正解値 (学習データ) と十分近いことが確認できる。また、実際にシミュレータ内で DonkeyCar を走行させてみたところ、多少のふらつきはあるものの、コースを 1 周出来ることを確認した。

このように、HDC のような軽量機械学習は「高度なことはできない単純な手法」と見なされがちであるが、タスクの定式化を工夫することで、自律走行のような複雑に見える問題にも応用可能である。

DonkeyCar への適用事例は、限られた計算資源のもとでも知的な振る舞いを実現できることを示す好例であり、今後のエッジ AI や小型ロボットにおける知能化の可能性を具体的に示している。

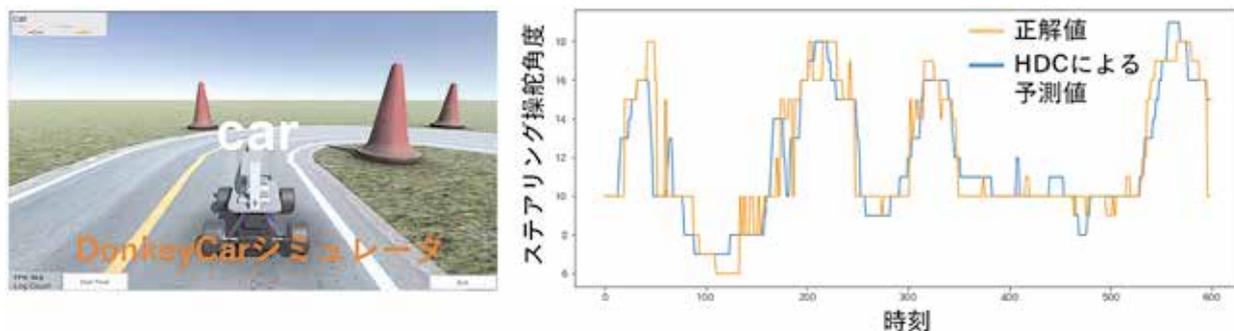


図3：DonkeyCar シミュレータ

## 7. まとめ

現在の AI 技術、特にディープラーニングや大規模言語モデルは驚異的な能力を発揮しているが、膨大な計算資源の要求と電力消費が大きな課題となっている。小型ロボットの自律制御や無数に設置される IoT デバイス等、計算リソースに制約のある「エッジ」の環境では、これらの重く大きいモデルをそのまま動かすことは困難である。エネルギー効率と信頼性の両立は、これからの知能デバイスにとって避けては通れないテーマとなっている。物理現象を効果的に利用し計算を実現する RC と、既存のデジタル情報処理ハードウェアと高い親和性を持つ HDC は、小さくても賢いデバイスを実現する有力な候補となっている。私たちの身の回りにあるあらゆるモノが知能を持つ「真の AI 社会」を支える重要な基盤として、今後さらなる研究と社会実装が進んでいくことが期待される。

### 参考文献：

- [1] Y. Kume, S. Bian, and T. Sato, "A tuning-free hardware reservoir based on MOSFET crossbar array for practical echo state network implementation," in Proc. ACM/IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference, Jan. 2020.
- [2] H. Li, M. Utsunomiya, R. Seki, F. Liang, and T. Sato, "EMESN: An extended MOSFET reservoir computing architecture for echo state networks with hardware-software co-optimization," in Proc. ACM/IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference, Jan. 2026.
- [3] S. Ikeda, H. Awano, and T. Sato, "Modular DFR: Digital delayed feedback reservoir model for enhancing design flexibility," ACM Transactions on Embedded Computing Systems, Vol.22, No.5s, Sept. 2023.
- [4] S. Ikeda, H. Awano, and T. Sato, "Online training and inference system on edge FPGA using delayed feedback reservoir," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol.44, No.9, Sept. 2025.

## 学生の声

# 楽しい研究生生活のすゝめ

工学研究科 電気工学専攻 久門研究室 博士後期課程2年 山本 謙太

本稿では、これまでの研究生生活を振り返り、その中で得た所感を綴らせていただく。

初めて本格的な研究活動に携わるようになったのは、高専4年生の秋であった。当時従事していた太陽電池の最大電力点追従制御に関する研究を通じ、電気エネルギーの発生・変換・制御を取り巻く広範な学問分野に惹かれた。この時から続く探究心は、もはや「魅了された」と言っても過言ではないだろう。高専での研究を通じ、数理モデル化やダイナミクスの設計に関する自身の知識不足を痛感したことが、京都大学電気電子工学科への編入を志す契機となったことは、今なお鮮明に記憶している。その後、無事に編入学を果たし、師事する久門先生の下、理想的な環境で研鑽を積む機会を得ることができた。

このように、好奇心に導かれるまま電気工学を探究する道を進んできたが、未知の領域を開拓する研究活動は、決して順風満帆なことばかりではない。いかに熱意をもって取り組んでいる研究であっても、停滞期が長引けば純粋な好奇心が焦燥感へと変質し、研究の「楽しさ」を見失ってしまうこともある。しかし最近になり、行き詰まった時こそ対象から心理的・物理的な距離を置き、状況を俯瞰する重要性に気づかされた。散歩や入浴といった日常の何気ない場面で思考を解放することが、結果として新たな着想を呼び込む端緒となるのである。また、自立した研究者を志向するあまり、無意識のうちに自らを必要以上に孤立させていたことが、精神的な余裕を奪う一因であったとも強く実感している。

すなわち、「楽しさ」を失わずに研究活動を持続可能なものとするためには、個の思考能力を研ぎ澄ますだけでなく、大局的な視座を保つための「ゆとり」と、他者と刺激し合える開かれたコミュニティが不可欠である。この気づきこそが、高専時代から9年に及ぶ研究生生活を経て得た、何よりの収穫かもしれない。もし今、研究に行き詰まりを感じている方がおられれば、一度デスクから離れ、外の空気を吸いに出てみてはいかがだろうか。その一歩が、我々にとって再び「楽しい研究生生活」へと戻るための足がかりになると信じている。

## 睡眠と家族、友人に支えられている大学生生活

エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻 土井研究室  
博士後期課程2年 内田 翔

研究者に憧れていた私は2018年4月、晴れて京都大学電気電子工学科に入学した。やる気に満ちた私は、履修した講義は全て、前の方に座って聴いた。一人で座る度胸は無かったので、友人を半ば強引に誘って横に座らせていた。しかしいくら最前列に座っても、講義内容を深く理解できるわけではなかった。知識の習得にはたいへん苦労した。物理学や数学といった科目は抽象的な概念を多く扱うため、その概念に慣れるために多くの時間を要した。復習や課題のために時間が必要になり、睡眠時間を削るようになった。時間をかけて勉強に取り組むことはとても楽しく、友人とは昼夜議論を重ねた。しかし体調を崩すことが非常に多くなった。頭痛を抱えながら、複雑な回路の合成抵抗や、井戸型ポテンシャルの波動関数を計算させられたときはとてもこたえた。定期試験に向けての復習はこれまた大変だった。試験中は半分睡魔との戦いであった。試験期間中に体力の限界が来た科目を除けば、どの単位も高い評定をいただいた。

研究室配属後は講義を受けることは減り研究を行うことになる。日に日に理解度が増し最近になって面白くなってきたのだが、これはこれでかなり苦労している。研究がなかなか思うように進まない。しかしもう睡眠時間を削るわけにはいかない。自分に合った方法でペースアップしたいと思う。

無茶苦茶な学部生時代と現在の研究生生活を支えてくれているのは家族である。私は実家から、片道90分かけて大学に通っている。睡眠時間を確保するには大学に近くに一人暮らしをするべきなのだが、そうしないのは、家に家族が居ることを重要視しているからである。私は誰かに日頃の失敗を愚痴することで、心の健康を保っている。如何に理不尽な現実があろうとも、帰宅してしまえば何とか耐えられる。ひとりぼっちは私には厳しいと思う。関東に行ってしまった学友とも連絡を取っていて、よく愚痴らせてもらっている。ありがとう家族。ありがとう友人。

教室通信

# 電気電子デジタル理工学専攻発足に際して

令和7年度 電気工学専攻長 吉井和佳  
電子工学専攻長 白石誠司

電気工学専攻・電子工学専攻は歴史的資産と最先端の実績を基盤とし、令和8年度より「電気電子デジタル理工学専攻」へと新たに一専攻化し、学際融合をさらに加速させます。特に新設の「デジタル・グリーン領域」を軸に、従来の物理・数理の深い知見と高度なデジタル技術を兼ね備えた多角的人材を育成します。領域横断型の学びを通じて、省エネルギー化やスマート化といった現代の地球規模課題を解決し、情報化社会に新たな価値をもたらす柔軟かつ実践的な教育研究体制を推進していきます。

### デジタル・グリーン領域

電気電子工学と情報技術の高度な融合による学際フロンティアの基盤構築を目標とし、データサイエンス、サイバーフィジカルシステム、グリーンテクノロジー、光情報技術等を基軸とした教育・研究を進めます。ハードとソフトの融合に関わる広範な分野で世界をリードする研究を展開します。

### 電気・システム・生体工学領域

電気・システム・生体工学を基盤とした新たな価値創造と持続可能な社会の実現に向けた基盤技術の構築を目標とし、次世代モビリティ、高度なエネルギー変換、先端センシング、宇宙空間の電磁波利用等を基軸とした教育・研究を進めます。

### 光・電子・量子領域

省エネルギーかつ革新的な情報処理社会の実現に向けた基盤技術の構築を目標とし、「光」「電子」「量

高度情報専門人材の育成の中心となる新領域を設置  
デジタル・グリーン領域(新研究室4+既存領域からの移動2)  
研究室数 16 → 20 に対応した定員増員

R7年度まで	
合計 16研究室 + 5協力講座  入学定員: 修士: 73 博士: 20 収容定員: 修士: 146 博士: 60	8研究室 + 3協力講座  入学定員 修士: 38 博士: 10 収容定員 修士: 76 博士: 30
	電気工学専攻
	電子工学専攻
	電気系専攻 旧

発展的  
改組

研究室 +4  
修士 +20  
博士 +5  
(入学定員の最終増数)

R8年度から

電気電子デジタル理工学専攻 新  20研究室(16+4)  入学定員: 修士: 93(73+20) 博士: 22(20+2)(R8,R9) 25(20+5)(R10以降)  収容定員: 修士: 186(146+40) 博士: 75(60+15) (博士はR12年度以降に定常状態となったときの数字、推移中の数字は省略)  * 入学定員は専攻全体に設定し、領域ごとの入学定員は定めませんが、右側には、教員数に応じて学生を配属した場合の概数を示している。	デジタル・グリーン領域  6研究室 配属人数* 修士: 27~31 博士: 4~6 (R8,9) 7~9 (R10以降)
	電気・システム・生体工学領域  6研究室 + 3協力講座 配属人数* 修士: 28~32 博士: 7~9
	光・電子・量子領域  8研究室 + 2協力講座 配属人数* 修士: 32~36 博士: 8~10

このほか、電気工学専攻と電子工学専攻に、それぞれ1寄附講座

このほか、電気・システム・生体工学領域と光・電子・量子領域に、それぞれ1寄附講座

子」の三つのキーワードを基軸とした新学術の創出と、確固たる学術に基づく新奇材料・デバイスの創出に関する教育・研究を進めます。

両専攻はすでに、令和6年度から「大学・高専機能強化支援事業（ハイレベル枠）」の採択を受け、仮想空間と現実空間の融合による技術革新を牽引する高度情報専門人材の育成に取り組んでいます。新設のデジタル・グリーン領域は本プロジェクトの支援を受けており、現電気工学専攻の2研究室（薄研・吉井研）に加えて、特任教授としてご着任いただいた浅野先生、船戸先生、蛭原先生、久門先生が運営される計4研究室から構成されます。専攻全体で修士定員も20名の大幅な増員となり、研究・教育を一層深化させていきます。皆様のご支援を引き続きどうぞよろしくお願い申し上げます。

**賛助会員の声**

## 鉄鋼業における DX 推進と 操業自動化に向けた電気技術者の取り組み

日本製鉄（株） 設備・保全技術センター 制御技術部 名古屋制御技術室（2019年 院卒）  
檜垣 周 佑

### 1. はじめに

鉄鋼生産は原料調達～製鉄～製鋼～圧延～加工～流通とバリューチェーンが長く、かつ生産規模も大きいことから、日本製鉄では古くは1960年代から大型計算機とデータを用いた生産管理手法にチャレンジしてきました。現在はこれら過去から蓄積された膨大なデータを活用することで、更なる意思決定の迅速化と課題解決力の向上を図る日鉄DXを推進しています。

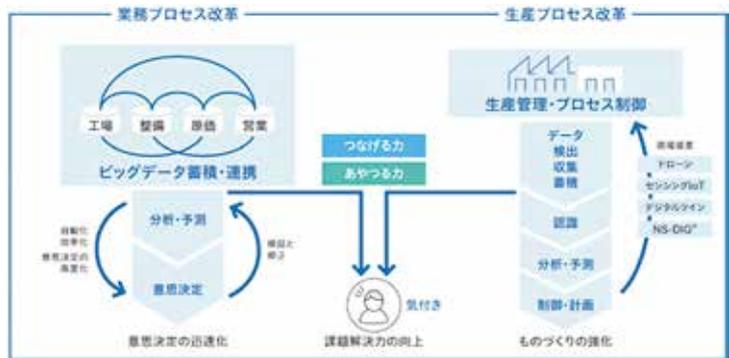


図1 日鉄DXとは（出典②）

日本製鉄のDXは、保有する有益なビッグデータを横断的に結合する「つなげる力」と、そのデータを利活用する「あやつる力」を融合させて製造業の課題にチャレンジするものです（図1）。これらの取り組みにおいて日本製鉄の電気技術者は重要な役割を担っており、本稿では我々電気技術者が取り組んできた日鉄DXや操業自動化についてご紹介します。

### 2. 日本製鉄のDX推進について

製造業のデータは、現場の情報からお客様へ提供した情報など、多種多様です。DXに取り組む以前は、現場から必要なデータだけを抽出して報告書を作成し、情報収集や判断に時間がかかること、処理したデータを元に戻すことができないことで上位管理者が具体的な指示ができないケースがあることが課題でした。そこで「つなげる力」の基盤として、製造拠点や部署ごとに個別蓄積されてきたデータを統合集約するデータプラットフォーム「NS-Lib」を構築しました（図2）。これにより、経営レベルから第一線



図2 NS-Libの概要（出典③）

まで同じデータ・情報をもとにした、迅速で高度な意思決定・課題解決の実現を目指しています。NS-Lib は、データの意味合い、データの発生元を登録するカタログ化やアクセス管理機能を有しており、社内に多くあるデータベース群のなかから必要なデータを自ら探し、アクセスして活用できるようになります。また、「あやつる力」の基盤として、統合 AI 解析プラットフォームである NS-DIG の導入を実施しています（図 2）。

「あやつる力」を強化することで、データの高度活用や圧倒的なプロセス制御・自動化を可能とし、ものづくりのスマート化を推進しているので、その具体例を 3 章で説明します。

### 3. ものづくりのスマート化（操業自動化）

#### 3.1 高炉操業自動化技術

製鉄所の最も上流の工程である、鉄鉱石から銑鉄（鉄の原料）を製造するための高炉（図 3）について、操業の安定化と効率操業の実現のため、操業オペレータの属人性や装入原燃料の性状変化に起因する操業バラツキ低減を目的とした高炉操業自動化技術の開発を進めています。

本制御技術は、高炉の動特性を表現した多入力多出力系の状態空間モデルに基づき、制御対象である炉熱指標（羽口上熱バランス、溶銑温度等）に先行し変化する別操業指標（カーボンソリューションロス量、ガス利用率等の先行指標）も入力情報に考慮した外乱推定オブザーバを構成したうえで、6～8 時間程度先までの炉況の将来予測軌道を最適化するモデル予測制御と組み合わせることで実現しました（図 4）。このロジックにより、適切に外乱を検出することができ、制御対象である炉熱指標の変化を先読みした制御操作を実現可能としました。当制御システムは北日本製鉄所室蘭第 2 高炉をはじめとして当社の各所高炉に実機適用中です。



図 3 鉄づくりの製造プロセス

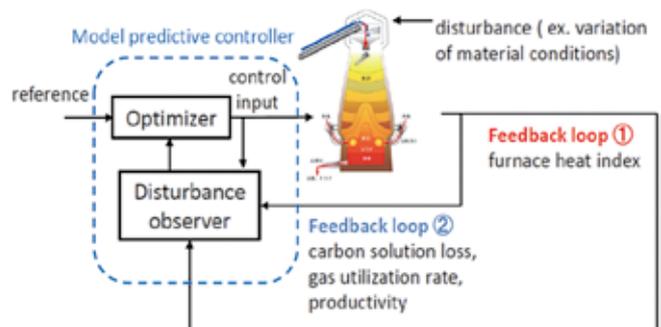


図 4 高炉操業自動化技術における制御系（出典⑤）

#### 3.2 大型特殊車両・キャリアの自動運転化

製鉄プロセスだけでなく、製鉄の各工程を繋げる、製鉄所内の物流設備においても自動化技術開発は進んでいます。

図 3 における圧延設備に鋼材（スラブ）を供給する製鉄所内の運搬車両である大型特殊車両・キャリア（図 5）を自動運転化するプロジェクトを、普通車両の自動運転開発・運用を手掛ける企業と共同で推進しています。製鉄所構内では、鋼材はパレットと呼ばれる台車に積載され、これを大型特殊車両であるキャリアで搬送しています。パレットには、鋼材



図 5 鋼材とパレットを載せた大型特殊車両（出典⑥）

を多数積載することが可能であり、各生産工程間の効率的な物流を実現しています。

キャリアのような大型特殊車両の自動化により、将来的なドライバー不足への対応や労働環境改善だけでなく、搬送効率や安全性の大幅な向上の実現を目標とし、2025年度より日本製鉄名古屋製鉄所構内の鋼材搬送において自動運転の導入を目指しています。

#### 4. おわりに

鉄鋼業では材料、機械、化学分野の印象が強いですが、製造プロセスにおいて電気・計測技術は非常に重要で、研究・開発・設計・製造・生産・管理のあらゆるフィールドで電気系技術者が活躍しています。ぜひ工場見学、インターンシップなどを通じて、その活躍ぶりを目の当たりにしてください。

(日本製鉄株式会社 NIPPON STEEL CORPORATION <https://www.nipponsteel.com/index.html>)

出典：

- ① 「季刊 ニッポンスチール Vol.18 DXで進化する鉄づくり (2024年2月)」 日本製鉄
- ② 日本製鉄 HP デジタルトランスフォーメーション (DX) 戦略の推進 — 日本製鉄の DX 推進  
<https://www.nipponsteel.com/company/dx/dx.html>
- ③ 日鉄ソリューションズ HP プレスルーム (2022/5/30)  
「日本製鉄、NSSOLとともに統合データプラットフォーム「NS-Lib」を構築」  
[https://www.nssol.nipponsteel.com/press/2022/20220530\\_110000.html](https://www.nssol.nipponsteel.com/press/2022/20220530_110000.html)
- ④ 日本製鉄技報 第421号 日本製鉄(株)のDX推進(2023年)
- ⑤ 日本製鉄技報 第421号 日本製鉄(株)のプロセス制御におけるデジタルツイン(2023年)
- ⑥ 日本製鉄 HP プレスリリース (2025/4/9)  
「日本製鉄とティアフォー、名古屋製鉄所における大型特殊車両の自動運転化共同開発プロジェクトを推進」  
[https://www.nipponsteel.com/newsroom/news/2025/20250409\\_100.html](https://www.nipponsteel.com/newsroom/news/2025/20250409_100.html)

## 電気系専攻の改組に伴う分野名の変更等について

令和8年度の電気系専攻の改組に伴い、以下の研究室が分野名を変更します。

	2026年3月31日まで	2026年4月1日より
薄研	先端電気システム論	電気情報システム論
吉井研	生体機能工学	時空間センシング
米澤研	集積機能工学	極限電子機能工学
白石研	極微電子工学	固体量子物性工学
竹内研	応用量子物性	光量子情報工学

令和8年度の電気系専攻の改組に伴い、以下の研究室が新分野に移動します。

	2026年3月31日まで	2026年4月1日より
久門研	電磁回路工学	知的回路設計
船戸研	光材料物性工学	光機能デバイス工学
浅野研	光量子電子工学	物理情報融合工学

## 編集後記

cue55号をお届けします。今回は巻頭言を昨年末に電気系懇話会でご講演いただいた株式会社デンソーの松ヶ崎様に、産業界の技術動向を三菱電機株式会社の竹見様に、賛助会員の声を日本製鉄株式会社の檜垣様にご寄稿いただきました。そのなかでCO<sub>2</sub>の排出削減や省電力化、DXの推進など各企業での取り組みをご紹介します。ご案内のとおり、2026年4月より電気系2専攻は統合され、電気電子デジタル理工学専攻として新たなスタートを切ろうとしています。その中で新たに設置されるデジタル・グリーン領域は、正しくこの時代の流れと合致したものとなろうかと思えます。また、去る12月19日に京都大学は国際卓越研究大学の認定候補とされました。正式な認定はまだではありますが、大学全体として大きな変革期に差し掛かってきたことを実感させられます。現場の人間としては、新たな風を取り込みつつ、これまでに培われた電気電子工学科の良さと融合させられると良いなと思っています。ころです。

最後になりますが、ご多忙の折、ご執筆、ご寄稿いただきました皆様に心より感謝申し上げます。

Y. I. 記

## 協力支援企業

鉄道情報システム株式会社  
日本製鉄株式会社  
株式会社 村田製作所  
ローム株式会社

発行日：令和8年3月

編集：電気系 cue 編集委員会  
橋本 昌宜、稲垣 滋、阪本 卓也、  
後藤 康仁、三谷 友彦、岡本 亮、  
伊藤 陽介、和田 修己（洛友会）  
E-mail: [cue@kuee.kyoto-u.ac.jp](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

