ISSN 2433- 605X

cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

No.53 MARCH 2025

[第53号]

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

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

cue 53 号　目次

巻頭言

私と日本の宇宙開発

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構　理事補佐　髙畑　博樹

昨年 11 月 22 日、電気系教室懇話会で講演する機会をいただき、久しぶりに京都を訪れました。観光シーズンの真っただ中、外国人を含めた観光客でごった返す中、たどり着いた大学は 11 月祭の最中で学生が活発に行き交っていました。建屋は 35 年前とほぼ変わらず、落ち着いた雰囲気で当時の記憶が懐かしく蘇ってきました。講演会場の電気総合館大講義室もほぼ当時のままでした。唯一、折り畳みの腰掛が板から布張りに変わっていました。

今回、「私と日本の宇宙開発」という大それた題名で講演しましたが、私が接してきた宇宙開発はそのごく一部です。その中で、学生や OB のみなさんに私の体験を通じて日本の宇宙開発の現状、未来をお伝えすることで、日本の宇宙開発を少しでも応援していければとの思いと、お世話になった電気系学科のお役に立てればとの思いがありました。

在学中は、電波、通信、宇宙に興味があったことから、木村磐根先生の研究室で VLF 帯電波の地球－電離層間の電波伝搬の解析をテーマに取り組ませていただきました。就職に際しては、宇宙開発にも興味があったので、当時の宇宙開発事業団（NASDA）に入りました。就職した 1989 年当時の日本では、宇宙開発は NASDA と宇宙科学研究所（ISAS）の 2 者のみが行っていて、NASDA は実用衛星とそれを打ち上げるロケット、ISAS は科学衛星とそれを打ち上げるロケットの開発を行っていました。この NASDA と ISAS、そして航空技術研究所（NAL）の 3 機関が 2003 年に統合されて、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が誕生しました。

NASDA に入社した当時、漠然と「国産衛星を作りたい」と考えており、これが私の NASDA での目標の一つになりました。2 年間の種子島勤務を経て、念願の衛星開発プロジェクトに配属され、それから 30 年以上、主に静止通信衛星関係の研究開発を行っていきました。その中で、特に技術試験衛星Ⅷ型（ETS-VIII）プロジェクトでは、立上げから衛星開発、打上げ、運用まで含めて 13 年間従事したのと、入社時に思っていた「国産衛星を作りたい」という夢がかなったという点で、印象に強く残っています [1]。ここでいう国産衛星とは、単に NASDA が開発して終わりではなく、その成果、技術を使って民間事業者が自主的に開発できることを意味しています。ETS-VIII の衛星バス（衛星の基幹システム部）は、担当した三菱電機が、その後、DS2000 として商用展開し、国内外の通信衛星や官需の通信衛星、気象衛星、準天頂衛星など、20 機近くを世に送り出しました [2]。

JAXA は、宇宙、航空に関する基幹技術の研究開発から国際協力まで我が国の宇宙開発の中核機関として、幅広い役割を担っています [3]。ここ 1、2 年の JAXA の成果、トピックについて簡単に紹介します。

まず、ロケットですが、我が国の次期基幹ロケットとして H3 の開発を行っております [4]。2023 年 3 月に H3 初号機の打上げが失敗しましたが、その後、初号機の失敗を乗り越え、2024 年に連続 3 機の H3 の打上げに成功しました。また、これまでの基幹ロケットの H-IIA も 2024 年 9 月の 49 号機打上げ成功により、20 年以上にわたって打上げに連続成功しており、打上げ成功率は 97.96% となっています。2025 年の 50 号機の打上げをもって H-IIA は引退します [5]。

続いて、宇宙機（衛星）についてですが、宇宙科学分野において、2023 年 9 月に打ち上げられた X 線分光撮像衛星（XRISM）も順調に観測を行っています [6]。月探査分野においては、XRISM と相乗りで打ち上げられた小型月着陸実証機（SLIM）が、目標地点に対して 100m 以下の精度で世界初のピンポイント着陸を実証し、さらに 3 回の月の越夜にも成功したことで、2024 年の JAXA の成果の中で最も有名なものとなりました [7]。環境保全分野では、JAXA と ESA（欧州宇宙機関）の共同開発した雲エアロゾル放射ミッション（EarthCARE）衛星が 2024 年 5 月に打ち上げられました。搭載センサの一つである雲プロファイリングレーダ（CPR）を日本が提供しており、雲や雨滴の垂直分布を世界規模で観測することで、雲が気候変動に影響する仕組みの解明に貢献することが期待されています [8]。災害監視分野では、陸域観測技術衛星 2 号（ALOS-2）が設計寿命 5 年の 2 倍の 10 年以上にわたって運用されており、2024 年 1 月の能登半島地震の際にも発災当日に緊急観測を行い、取得した画像を国や地方自治体に提供しました [9]。さらに、より広域の災害監視にも対応できるように観測幅を ALOS-2 の 50km から 4 倍の 200km 拡張した先進レーダ衛星（ALOS-4）が 2024 年 7 月に H3 で打ち上げられ、災害状況の把握や、復興に向けた活動に役立つことが期待されています。観測データがより詳細に、より広域になれば、そのデータ量は増大します [10]。大容量の観測画像データをリアルタイムに伝送するために、レーザ（光）でデータ伝送する実証実験も 2020 年に打ち上げられた光データ中継衛星と ALOS-4 の間で行われました [11]。

ここからは、将来に向けての宇宙開発の動きについて紹介したいと思います。まずは、宇宙戦略基金です。戦略基金は、民間企業・大学等による宇宙分野の先端技術開発や技術実証、商業化を支援するため、JAXA に設置されたもので、10 年間で総額 1 兆円規模の支援を行うことを目指しています。すでに、令和 5 年度補正予算で 3,000 億円が第 1 期分として造成され、テーマに従って公募を行いながら、事業が選定されつつあります。この事業全体目標は、宇宙開発市場の拡大として、2030 年代早期に現在の倍の規模の 8 兆円規模にすること、宇宙を利用した地球規模・社会課題解決への貢献、宇宙における知の探究活動の進化・基盤技術力の強化が掲げられています。なお、この宇宙戦略基金は、JAXA 自身が行う事業とは一線を画しており、JAXA は日本の宇宙開発に必要な研究・開発を行い、基金は、JAXA がやりたいものではなく、民間企業・大学等による先端技術開発、技術実証、商業化を強力に支援するものです [12]。

これまで日本の宇宙開発は JAXA を中心に行われてきましたが、20 年ほど前から大学での小型衛星の取り組みが活発になり、また、10 年ほど前から民間事業としての活動も行われるようになりました [13]。ここ最近は、日本の民間宇宙開発ベンチャーも様々な分野で活動を広げています。ここ京都大学においても、世界初の木造人工衛星「リグノサット」が開発されて、2024 年 11 月に国際宇宙ステーションに届けられ、宇宙ステーションから放出されました。今後も大学や民間において、宇宙活動が活発化することを期待するばかりです。

いま、人類の宇宙での活動領域が地球周回のみならず、月、惑星などの新領域まで広がってきています。これまで、宇宙開発と言えばロケットや衛星の製造、運用が中心でしたが、これからは、これらを用い

た新たなサービス産業へ展開されるようシフトしつつあります。そのため、日本の宇宙開発は、研究開発から成長産業へ踏み出そうとしており、国も宇宙戦略基金などで支援しています。さらなる宇宙開発の発展のためには、それを担う様々な分野の人材が必要であり、これが喫緊の課題でもあります。そのため、日本の宇宙開発を理解、応援していたければと思いますし、学生の皆さんにも、ぜひ宇宙開発の現場で活躍していただければ幸いです。

みなさんとともに、日本の宇宙開発を盛り上げていきましょう！

参考文献

[1] 髙畑:技術試験衛星Ⅷ型「きく 8 号」の開発と運用, 電子通信情報学会　通信ソサイエティマガジン, 2007 巻（2007）3 号, pp.64-78.
[2] 関根, 舟田, 山田：静止衛星標準バス “DS2000” の開発と今後の指針, 三菱電機技報, Vol.90, No.2, 115-118, 2016.
[3] https://www.jaxa.jp/projects/index_j.html
[4] https://www.rocket.jaxa.jp/rocket/h3/index.html
[5] https://www.rocket.jaxa.jp/rocket/h2a/
[6] https://www.xrism.jaxa.jp/
[7] https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/slim.html
[8] https://www.satnavi.jaxa.jp/files/project/earthcare/earthcare_special/
[9] https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/alos-2/
[10] https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/alos-4/
[11] https://www.jaxa.jp/press/2024/10/20241008-1_j.html
[12] https://fund.jaxa.jp/
[13] https://www.axelspace.com/ja/missions/

大学の研究・動向

核融合プラズマシミュレーション：ディスラプションの克服とシステム科学が拓く展望

エネルギー科学研究科　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
松　山　顕　之・中　村　祐　司
http://www.em-energy.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

核融合エネルギーは、燃料が豊富で偏在がなく、高レベル放射性廃棄物を排出しない、反応の停止が容易であるなどの特徴から、人類にとって「夢のエネルギー源」とされています。最近では、米国ローレンス・リバモア国立研究所のNIF が、レーザー核融合方式で外部からの入力エネルギーを超える核融合出力を達成したニュースを耳にされた方も多いのではないでしょうか。現在、多国間協力として進められているITER（イーター）計画では、磁場閉じ込め方式の一種であるトカマク配位を採用し、重水素（^{2}H）と三重水素（^{3}H）の核融合反応を利用して、外部からの入力エネルギーの10倍の出力を数100秒にわたって生成・維持することを目指しています。ITER計画は2034年の運転開始を目標に進行中です。

ITERでは、地上のプラズマ実験としては規格外の700 MJ（メガジュール）という熱と磁場のエネルギーを蓄える放電を行います。ITERの科学的な目標は、核融合反応によるエネルギーが燃料プラズマを自ら加熱し、高温状態を効率的に維持する「燃焼状態」の実現にあります。しかし、そのような巨大プラズマ装置の運用には、物理実験として行われてきたプラズマ閉じ込めにはなかった科学技術的な挑戦が待ち受けており、特に「ディスラプション」と呼ばれる突発的な放電停止への対策が重要な課題となっています。

2. 研究背景

2.1　ディスラプション – 閉じ込め磁場構造の破壊

磁場閉じ込め核融合炉では、燃料の水素を粒子ビームや電磁波で加熱し、電子と原子核が分離したプラズマ状態を維持します。燃焼状態ではITERの炉心温度は2億度を超えており、高温のプラズマを壁から断熱するため、大型の超伝導コイルで生成した磁場を利用します。また、ITERが採用するトカマク配位では閉じ込め磁場を形成するためにプラズマ内部に周回電流を流す必要があり、ITERではこの電流値が15 MA（メガアンペア）に設計されています。

ディスラプションはプラズマ中への不純物混入、コイルの製作誤差や設置誤差による不整磁場、機器のトラブルによる制御不良など、さまざまな原因で発生します。ディスラプションの一例として、図1に電磁流体力学に輻射の効果を考慮した不純物混入のシミュレーションの結果を示します [1]。この図は燃料プラズマの断面における電流密度の2次元分布を表しており、不純物の密度が上昇すると、外縁部で冷却が起こり、(a) に示すように高温領域と低温領域の界面にリング状の電流密度擾乱が形成されます。この擾乱が中心に向けて伝播する際、(b) から (c) にかけて磁力線のつなぎかえ（磁気再結合）を伴う不安定性が連鎖的に発生し、それらが重畳することでカオスの状態に至り、(d) では閉じ込め磁

場構造が大域的に破壊されています。その結果、プラズマが真空容器内壁に流入して低温化するとともに、電気抵抗の上昇に伴って周回電流が遮断され、放電が停止する、というのが典型的なディスラプションのシナリオです。

2.2　ITER 内部では雷が発生？

ITER においてディスラプションの扱いが難しくなる理由の一つに、高エネルギー電子発生の問題があります。ディスラプションが発生すると内部には数 10 から数 100 V/m を超える電場が生じることがあり、そのような強い電場が電子を加速すると、一種の絶縁破壊のように、高エネルギー電子が周回電流をつくる状況が観測されています。速度空間で見た場合には電子のマクスウェル分布の一部が摩擦力に打ち勝って加速されることから、発生する高エネルギー電子のことを「逃走電子」と呼びます。逃走電子の発生は古くから実験で観測されていますが ITER のように 10 MA を超える大電流の放電ではやや事情が異なります。重要な働きをするのが電子間の大角度散乱（Møller 散乱）です。ITER ではガンマ線のコンプトン散乱や三重水素の β 崩壊によって逃走電子の種となる高エネルギー電子が常に存在している状態です。この高エネルギー電子が大角度散乱によってエネルギーを熱電子に移送することが逃走電子の一種の増幅機構として働くのです。上記のメカニズムは大気中の二次宇宙線や放射性元素に由来する電子が絶縁破壊強度よりも低い電場で雷雲中の放電を引き起こすのと類似しています。ITER では逃走電子の加速の元となる磁場の蓄積エネルギーが大きいために、1 アンペア以下の種電流ですら炉壁の溶融を生じ得る数 100 キロアンペアからメガアンペア程度の大電流ビームを形成するような機構が実現すると考えられています。図 1（e）では ITER で生じ得る最大の誘導起電力を自然界の粒子加速現象と比較しました。ここから、地上の太陽を作る実験は、まさしく雷雲や太陽フレアなど地球や天体で観測されるのと同スケールの現象が起こりうる、ということの一端を垣間見ることができます。

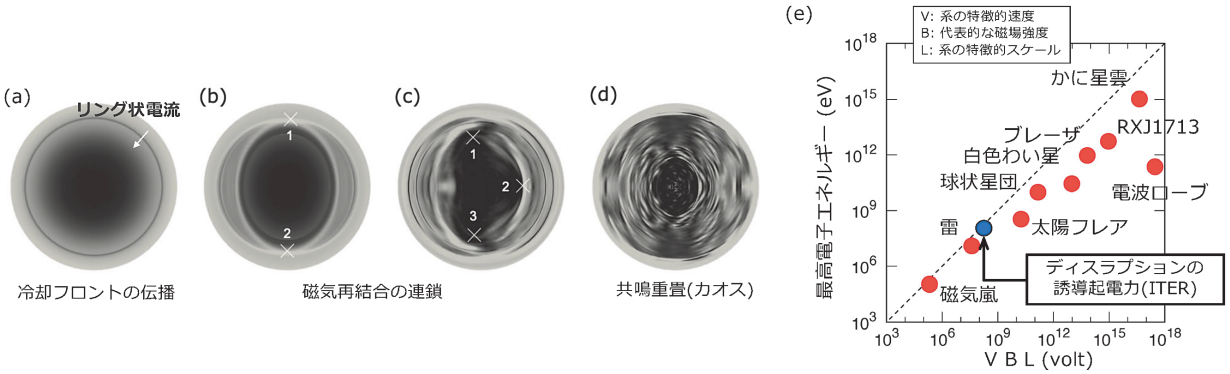


図 1（a-d）不純物混入によるディスラプションの発生。輻射電磁流体シミュレーションによる。（e）ITER の誘導起電力と自然界の粒子加速現象の比較（Makishima 1999 に基づく）。

2.3　ディスラプションの影響を最小化する取り組み

従来の装置ではディスラプション後の実験の再起動は比較的容易でしたが、ITER のように規模が大きい装置ではディスラプションによる内壁の溶融や電磁力による機器損傷のリスクが高いため、慎重な対策が必要になります。そこで、ITER では、ディスラプションの兆候を検知した段階で高温プラズマを強制的に冷却して放電を意図的に止め、装置への影響を最小化する技術「ディスラプション緩和システム」が開発されています。

図 2 に、ITER で設計が進められているディスラプション緩和システムの概要を示します。(a) は検討が進められているシステム系統の模式図で、ディスラプション緩和システムは中央インターロックシ

ステムと接続し、プラントの異常やプラズマ計測がディスラプションの兆候を検知した際に作動します。(b) はプラズマ冷却の原理を模式的に示したもので、まず、実験開始時に冷凍機を用いて 10K 以下で氷結した固体水素の塊（ペレット）を準備しておきます。緩和システム動作時には、ペレットを空気銃の原理で射出、粉砕してスプレー状に分散させた氷片をプラズマ中に入射します。炉心のプラズマは数千万度から 1 億度以上までに加熱されていますが、その密度は大気よりもはるかに希薄で、1 立方メートルあたり 10^{20} 個程度しか原子が含まれていません。そこに 8 桁以上高い密度を固体水素の氷片が侵入すると、温度の異なる水素の接触により、100 分の 1 秒から 1000 分の 1 秒程度の短い時間でプラズマ全体が冷却され、放電が停止します。ITER での運用を目指し、ディスラプション緩和システムの模擬実験が世界各国のトカマク装置で行われ、電磁力の軽減や熱負荷の低減が実証されています。

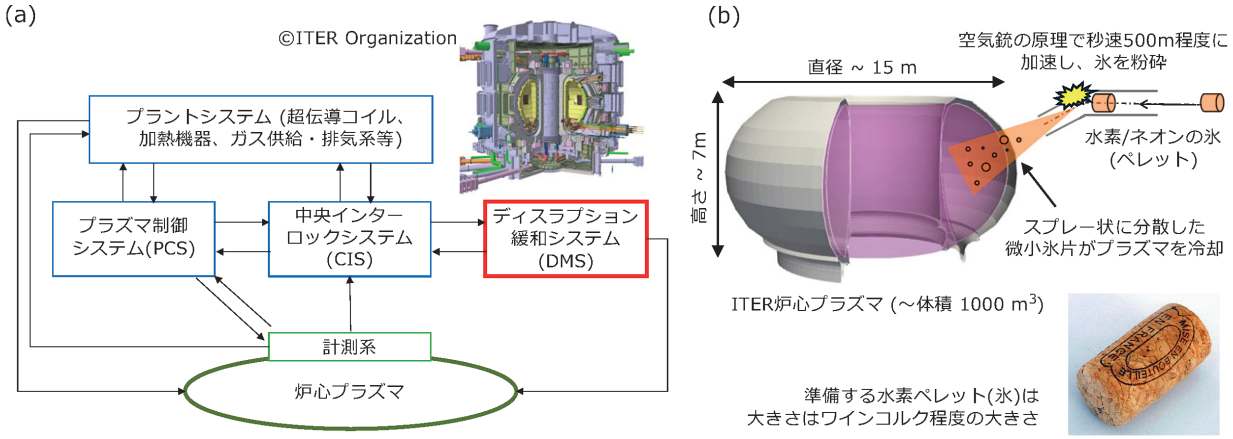


図 2（a）ITER のシステム系統図とディスラプション緩和システムの位置付け。(b）固体水素ペレットの粉砕入射によるプラズマ冷却の原理。ITER では、ワインコルク大の固体水素を粉砕し、高温プラズマを冷却。

3. 研究成果の紹介

当研究室では、ITER 計画を推進する ITER 機構をはじめ、各国の研究機関と協力し、ディスラプションおよびディスラプション緩和システムに関するシミュレーション研究を行っています。以下に、成果の一部をご紹介します。

3.1 プラズマの崩壊を再現するシミュレーション技術とその検証

磁場閉じ込め核融合プラズマのシミュレーションの開発では、系の特徴である「磁場」に由来する異方性を精度よく取り扱うことが研究の鍵となります。磁場が印加されると、プラズマを構成する荷電粒子は磁力線方向に自由に運動できる一方、交差方向にはローレンツ力による閉じ込めが働きます。このため、磁力線方向と交差方向の熱伝導係数には典型的に 8 桁以上の開きが生じます。このため、構造格子を用いたシミュレーションでは、実際のプラズマの形状を考慮した熱流や電流の振る舞いを記述することが困難になります。

この困難を乗り越えるため、磁場閉じ込めプラズマのシミュレーションにおいては、まず磁場構造を正確に捉えるための「磁気流体平衡」を評価し、次に、平衡解から磁力線に沿った座標系（磁気座標系）を構築するアプローチが広く用いられています。一般相対論では重力場によるメトリックの歪みを考慮しますが、磁気座標系では磁場によるメトリックの歪みを考えるのです。その上で、磁場交差方向には有限差分法や有限要素法を適用し、磁力線方向にはスペクトル法や擬スペクトル法、もしくは磁力線に沿って物理量が一定と仮定する平均化モデルなどを適用することで精度と計算時間を両立したプラズマ

放電シミュレーションを実現します。

図 3 は当研究室が量子科学技術研究開発機構と協力して開発したディスラプション時のプラズマ挙動を模擬する統合コード INDEX [2] によるシミュレーションの一例です。図 3（a）は、ディスラプションの最終段階で観測されるプラズマの急速移動を模擬したもので、10 MA を超える電流を持つプラズマ柱が 0.1 秒以下の短い時定数の間に上方に移動していく様子を示しています。この現象では、周囲の装置構造に対し、最大で数 10 トンの重りの作用に相当する電磁応力が生じるため、設計時に注意が必要です。このように、ディスラプションシミュレーションは電磁力や熱による装置負荷を定量的に評価する点で、実験の解析だけでなく炉内機器の支持構造や冷却系の設計にも寄与する重要な技術となっています。当研究室が開発する INDEX コードは、日本の核融合原型炉設計に応用されるとともに [3]、世界各国で行われているディスラプション緩和システムの試験にも利用されています。図 3（b）は、米国サンディエゴにあるトカマク装置 DIII-D における固体水素ペレット入射後の電子密度分布をシミュレーションによって再現した成果から引用したものです [4]。他にも、当研究室が長年培ってきたヘリカル型装置による磁場閉じ込め研究の知見を生かし、渦電流の 3 次元分布と磁気流体平衡のカップリング計算 [5] を実現するなど新しい計算技術の研究も進めています。

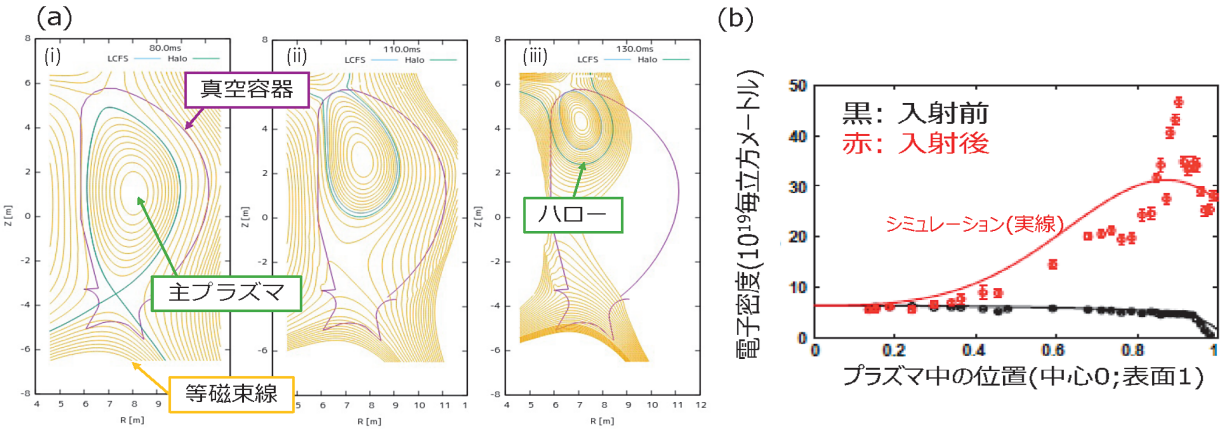


図 3（a）プラズマ消滅時の急速移動のシミュレーション。主プラズマが 50 ミリ秒の時定数で上方に急速移動し、壁に接触。ハローと呼ばれる低温プラズマを形成しながら消滅する様子。（b）固体水素ペレット入射後の電子密度分布の実験観測をシミュレーション（実線）で再現。

3.2　高温プラズマと固体水素の相互作用 – 1 億度の温度差が生み出すダイナミクス

ディスラプション緩和システムの開発では、高温の背景プラズマと入射された氷片の相互作用の物理を理解することが重要です。ディスラプション緩和システムの主な役割は、プラズマを冷却することですが、逃走電子の発生を回避するためには、冷却中のプラズマの電子密度を可能な限り上昇させておく必要もあります。磁化プラズマ中で固体水素が溶発すると、その周囲には図 4（a）に示すような高密度のプラズマの塊（プラズモイド）が形成されます。このプラズモイドを効果的に制御し、ITER のプラズマ全体の密度を上昇させることが、ディスラプション緩和の成功に直結します。しかしながら、米国 DIII-D 装置の実験が新たな課題を提起しました。特殊なレーザー計測を用いて氷片の入射直後の電子密度の時空間分布を計測するとプラズマ中心付近の電子密度上昇の効率が想定よりも低いことが分かったのです。共同研究を通じ、INDEX コードによる解析を行った結果 [4]、固体水素が溶発して生じたプラズモイドが自身の圧力で外向きに広がり排出される作用に低効率の原因があることが分かりました。（図 4（b）左にプラズモイド排出の模式図を示しています。）

DIII-D 装置で明らかになった問題を解決するため、岐阜県土岐市の大型ヘリカル装置（核融合科学研

究所）と協力し、固体水素ペレットに微量のネオンを添加する実験を実施しました [6-8]。図 4（c）に実験の概略を示しますが、この実験では大型ヘリカル装置を用いて数千万度の電子温度を持つプラズマを生成し、固体水素に 5% 程度のネオンを混合したペレットを入射しました。プラズモイドが広がる下流側の電子密度分布をレーザー計測で観測した結果、水素単体ペレットを入射した場合にはプラズモイドが中心から離れた位置に分布するのに対し、ペレットにネオン原子を添加した場合にプラズマ奥深くで観測領域に到達するプラズモイドを検出することができました。この結果により、ネオン原子由来する線輻射を使ってプラズモイドの圧力（温度）を低下させることで [図 4（b）右]、DIII-D 装置の実験で問題となっていたプラズモイドの排出の抑制が可能であることを実証できました [6]。この成果は、ITER のディスラプション緩和システムの性能を支配する重要なメカニズムを解明したものとして注目され、米国 DIII-D 装置をはじめ、ドイツの ASDEX-Upgrade 装置や欧州の JET 装置など各国のトカマク実験との共同研究に展開しています [9]。

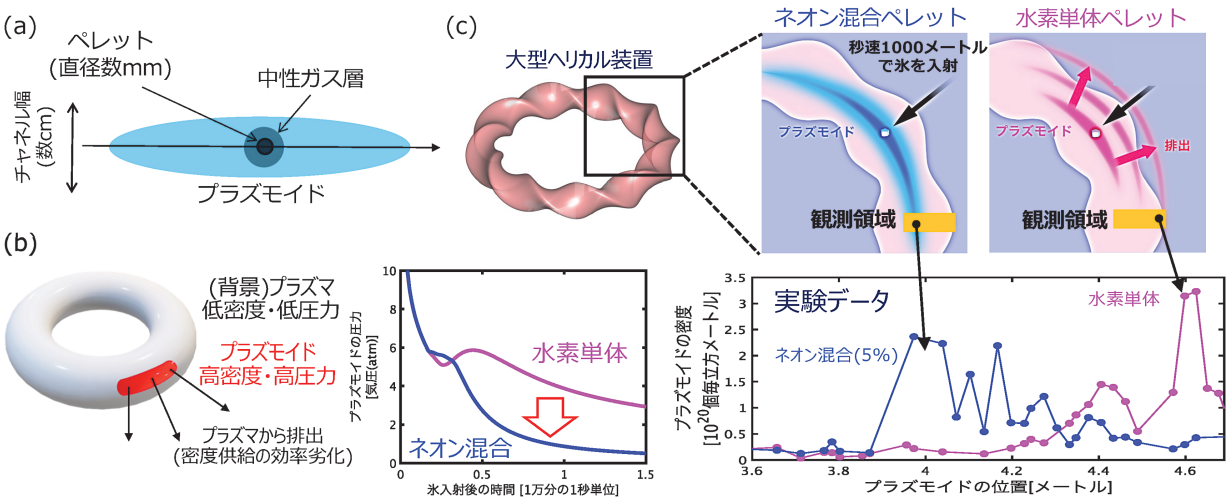


図 4（a）プラズモイド（模式図）。（b）プラズモイドの排出現象。溶発で生じたプラズモイドが背景プラズマより高圧になることが原因で、本研究ではネオンの混合によりプラズモイド圧力を低減することが効果的であることを提唱。（c）大型ヘリカル装置におけるネオン混合ペレット入射による検証実験。

4. 今後の展望 : ディスラプションの克服とシステム科学の展開

ITER のディスラプション緩和に用いられるペレット入射装置は、2024 年 3 月に概念設計の最終レビューを完了し、製作に移行しています。次の研究段階では、この装置を「いつ」「どのように」起動させるか、すなわち装置のトリガーに関する検討が重要な課題となります。ディスラプションは、密度、圧力、電流に関する磁気流体力学的なプラズマ閉じ込めの安定限界の近傍で発生しやすいのですが、核融合炉の効率はそのような限界近傍で最大化されます。従来の実験では、意図せず発生するディスラプションを許容しながら、試行錯誤によって高い性能を実現する運転条件を探索することが可能でした。これに対し、ITER ではディスラプションの緩和が行われない事態は許容されないため、運転条件探索へのアプローチが質的に変わります。具体的には、ディスラプション緩和の警報を早い段階で発することで装置保護の信頼性を高められますが、その分、核融合炉としての性能は制約されます。逆に、警報の閾値を緩めて高性能を狙う場合、緩和が失敗するリスクが高まります。事前データのない未踏実験である ITER においては、性能と安全性のトレードオフを考慮しつつディスラプションの回避・緩和を最適に選択しながら目標性能を達成する運転を行う必要があるのです。

この問題の解決に向けて、当研究室では国内外の研究機関や企業との共同研究により、これまで培っ

てきた核融合プラズマのシミュレーション技術をAI・データ駆動科学と融合したグレーボックスモデルの研究を進めています。他の多くの科学技術分野と同様、機械学習技術の普及は核融合研究にも大きな影響を与えており、当研究室では、AI駆動の代理モデルの適用によりこれまで計算コストの高さが課題だった大規模高性能シミュレーションを広範なパラメータサーベイやリアルタイム制御に応用してプラズマの予測性能を向上させるとともに、深層強化学習の適用により、プラズマ平衡制御や安定性制御を高度化する研究を進めています。これらの基礎研究の先に、ディスラプションを克服するプラズマ制御システムの探求や核融合炉のモデルベース最適化など、核融合エネルギー実現に資する「システム科学」としての体系的なアプローチの構築を目指しています。

5. おわりに

核融合研究開発の直近の動向としては、一昨年に国内では10数年ぶりに大型トカマク装置（超伝導トカマク装置JT-60SA）の運転が開始される一方、世界各国のスタートアップ企業が核融合開発の新しい流れを作り出しています [10]。当研究室は、転換期にある核融合エネルギーの研究開発の流れを注視しつつ、先端情報計算科学をプラズマ物理と融合させる学際的アプローチで核融合エネルギーシステムを包括的に捉え、幅広い研究開発を進めていきたいと考えています。

今後とも、皆様のご指導、ご鞭撻を賜りますようお願い申しあげます。

参考文献

[1] 松山 顕之「『地上の太陽』を制御する – 突発現象（ディスラプション）のシミュレーション」日本シミュレーション学会誌 **41**, 205-211（2022）.

[2] A. Matsuyama, *et al.*, "*Transport simulations of pre-thermal quench shattered pellet injection in ITER: code verification and assessment of key trends*," Plasma Phys. Control. Fusion **64**, 105018（2022）.

[3] Y. Yamamoto, A. Matsuyama, *et al.*, "*Integrated Modeling of Runaway Electron Beam Formation in JA DEMO Post-Disruption Plasmas*," Plasma Fusion Res. **18**, 1203064（2023）.

[4] A. Lvovskiy, A. Matsuyama, et al., "*Density and temperature profiles after low-Z and high-Z shattered pellet injection on DIII-D*," Nucl. Fusion **64**, 016002（2024）.

[5] Y. Yamashita, A. Matsuyama, Y. Nakamura, "*Iterative approach for time development calculation of tokamak plasma with eddy current effects using a 3D MHD equilibrium solver*," *to appear in* Journal of Plasma Physics.

[6] A. Matsuyama, et al., "*Enhanced Material Assimilation in a Toroidal Plasma using Mixed H_2 + Ne Pellet Injection and Implications to ITER*," Phys. Rev. Lett. **129**, 255001（2022）.

[7] 【招待講演】松山顕之、「固体水素ペレットと環状磁化プラズマの相互作用の物理」日本物理学会第78回年次大会 2023年9月 東北大学青葉山キャンパス .

[8] 松山顕之、他「LHDで観測されたペレット溶発に伴う磁場擾乱の解析」 日本物理学会第79回年次大会 2024年9月 北海道大学札幌キャンパス .

[9] Ansh Patel, A. Matsuyama, G. Papp, et al., "*Modelling of shattered pellet injection experiments on the ASDEX Upgrade tokama*k,"（arXiv:2312.03462v1）.

[10] 小西哲之、「京大発スタートアップの核融合への挑戦」cue 第50号 p. 9.

産業界の技術動向

量子カスケードレーザー・光検出器の研究開発と製品化

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所
藤　田　和　上

1. はじめに

量子カスケードレーザー（Quantum Cascade Laser: QCL）ならびに量子カスケード光検出器（Quantum Cascade Detector: QCD）は、光の中でも長い波長に当たる赤外線の領域、具体的には中赤外～テラヘルツ（THz）と呼ばれる領域の半導体レーザーおよび半導体光検出器です。これらは、原子層単位で半導体層の結晶成長が可能な分子線エピタキシーや有機金属気相成長法といった技術が確立し、高品質な半導体量子ナノ構造の実現と、その内部の量子準位状態をエンジニアリングできるようになった結果として実現されました。大きな特徴として、放出 / 吸収する光の波長やデバイス特性は材料固有のバンドギャップではなく、作製した半導体量子ナノ構造の複雑な層構造により決定し、精緻に設計することができる点が挙げられます。つまり、バンド間遷移を用いる従来のレーザーダイオードや半導体光検出器とは本質的に原理が異なっています。また、中赤外領域でのレーザー発振器としては、炭酸ガスレーザーや自由電子レーザーなどが存在していましたが、チップサイズで取り扱いが容易な電流駆動型の半導体レーザーについては、QCL の登場以前は室温で動作可能なものが存在しませんでした。

浜松ホトニクス社では 2002 年ごろに量子カスケードレーザーの開発に着手し、製品化へ向けた取り組みを進めてきました。私が入社した 2005 年には、既に製品化に向けた QCL の研究開発に取り組んでいました。当時、QCL は一般的にはまだ有望なデバイスとは考えられておらず、「QCL に実用の道はあるか？それとも研究室のおもちゃか？」といったタイトルの記事が海外の化合物半導体関連の雑誌に載っていたことを記憶しています。実際、QCL を製造販売していたのは発明者の一人が設立したベンチャー企業一社のみでした。本稿では、私が関わった量子カスケードレーザーならびに量子カスケード光検出器について、研究開発から製品化への取り組みの一端を述べます。

2. 量子カスケードレーザーの開発から製品化

浜松ホトニクス社における QCL の研究開発のきっかけは、「分子の指紋領域」と呼ばれる波長 3μm ～数百 μm の中赤外から遠赤外波長領域における分光分析に適した良好な半導体光源がなく、取り組んでいる大手メーカーもないことでした。小さいながらも一定の需要はあるものの、好適なデバイスが実現できていないため未踏領域となっていました。当社において研究開発が始まるちょうど同じ頃に世界で最初の室温連続（Continuous-Wave: CW）動作が実現され、専門家の間では出力や波長の安定性に優れる QCL に注目が集まっていました。室温 CW 動作の実現がターニングポイントとなり、ビジネス環境は徐々に変わっていきました。

このような背景から、社内での最初の発振の時点から、ガス計測用途を想定し事業化に向けた取り組みが開始されました。最初のレーザー動作は 2003 年 7 月に室温でのパルス駆動にて達成されました。その時点から QCL の生産技術の確立に向けた取り組みが始まりましたが、このデバイスは原子層スケールの半導体超薄膜で構成される複雑な多層ナノ構造であり、動作原理そのものが粒子と波の性質を併せ持つ量子力学に戻づいています。そのため、製品化にむけては再現性の確保で大きな困難に直面しました。

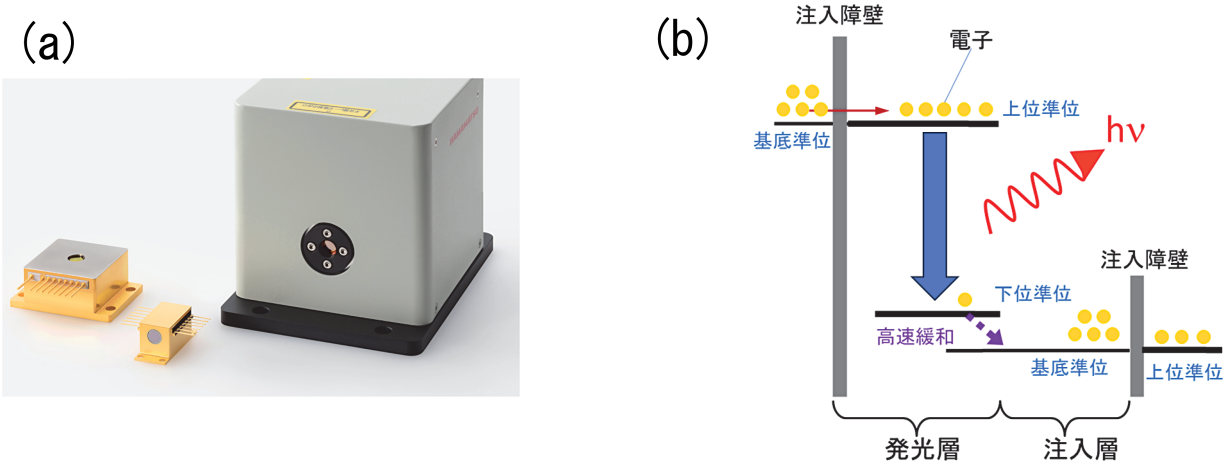


図 1（a）各種 QCL 製品の写真（b）一般的な QCL の動作原理

私が加入した時点でパルス動作型の QCL が社内で実現されていたものの、ガス分析を含めて実際の用途に適用するには CW 動作もしくは疑似 CW 動作にて駆動する必要がありました。しかし、QCL は素子への投入電力が大きく、CW 動作はパルス動作と比べ物にならないほど熱負荷が大きいため、当初、QCL の CW 動作は液体窒素冷却下に限られていました。そこで開発の初期段階では QCL の本質的な性能向上を図り、レーザー発振に必要な閾値電流を大幅に低減する取り組みが行われました。当時、世界的にはトップグループより QCL の室温連続発振は既に報告されていましたが、その動作波長は限られていました。ここで用いられていた QCL の準位構造では極めて薄いバリア層が量子準位の構成に決定的な役割を果たすため、膜厚揺らぎに敏感で、結晶成長の許容ウインドウがシビアでした。そこで、我々はレーザー発振に必要な下位準位より低エネルギー側に複数の準位の波動関数が空間的に拡がっているミニバンドと呼ばれる状態を作り出すことにより、高性能化と同時に結晶成長時の膜厚揺らぎに対して頑強になることを見出しました。この新たな QCL の準位構造がフォノン共鳴－ミニバンド緩和（SPC）構造です。この新構造を採用することにより、室温で CW 発振できる QCL を国内で初めて実現することに成功しました。さらに研究開発を継続し、事業移管に至るまで作製工程の各担当者が一丸となって取り組むことにより、2007 年 9 月より国内外の分析機器メーカーなどへのサンプル出荷を開始しました。そして 2008 年 1 月からは当社では最初の量子デバイスである QCL の製品としての出荷が果たされました。QCL の商用生産は国内では初であり、世界でも 2 例目です。また、実際の製品展開には QCL 製品の特長である波長分解能を発揮できる駆動用レーザードライバなどの周辺技術の製品化も決定的に重要です。これら研究以外の部分については広く知られることはないことですが、研究所から事業移管の際に多くの関係者の努力によって実現されました。

QCL の製品化達成後は米国を中心に多くの競合も登場したこともあり、さらに特性向上の取り組みを継続しました。特に 2009 年頃に外部共振器を用いた QCL の超広帯域波長チューニングが実現されたこともあり、広帯域化に関する研究が盛んとなりました。我々はそのアプローチとして、4 準位系を拡張し、2 本の上位準位より発光に寄与可能な結合二重上位準位（anti-crossed Dual-Upper-State: DAU）という概念を着想しました。DAU 構造により広帯域に亘っての単一モード動作が可能になることを見出し、構造の最適化を追求した結果、広帯域（世界最大の波長可変範囲）かつ、ほとんど温度依存性のない QCL が実現しました。DAU 構造を用いた QCL の性能向上、波長ラインナップの拡充により、広帯域波長可変 QCL の製品化も達成されました。近年、ガス分析以外の新しい QCL の応用分野として医薬品分野、バイオサイエンスへの展開が開拓されつつあることから、広帯域波長可変動作の重要性が向上することが期待されています。

3. 量子カスケード光検出器の開発から製品化

中赤外波長領域では、光検出器として HgCdTe（MCT）受光素子が広く用いられています。MCT 検出器以外にも InAs や InSb、InAsSb などの化合物半導体を中心に様々な光検出器が実現されており、私が所属する浜松ホトニクス社でもそれら中赤外半導体光検出器を販売しています。私の所属するグループでは 2010 年頃より、QCL の製品化に成功した経験から、これらとは全く異なる流れとして、QCL の検出器バージョンとも言える QCD の研究開発にも着手しました。QCD は QCL と同様に半導体量子井戸構造内の量子準位状態で構成され、構造的には QCL と類似していますが、発光ではなく光検出に特化するように設計されています。同様に量子ナノ構造の量子準位を用いる赤外光検出器としては QWIP と呼ばれるデバイスが存在します。QWIP と QCD の違いは、構造的な部分もありますが、QWIP は常に外部電圧を印加して動作する必要があるのに対して、QCD は光起電力型であり、ゼロバイアスで動作するのが基本です（電圧を印加することも可能）。QCD は 2004 年に”Quantum cascade photodetector”のタイトルの最初の論文が出て以降、特性の向上が進められてきましたが、半導体ベースの赤外光検出器については他にも様々なものがあり、広く普及しているため、QCL に比べると注目度が低かったと言えます。受光感度の点では既存の中赤外光検出器に劣るものの、量子準位間の超高速な電子遷移ならびに電子輸送により、QCD は本質的に高速応答（DC ～ 20GHz 以上まで確認）が可能という特徴があります。

我々は QCD の開発において国内初のデモンストレーションを行うとともに、結合量子井戸を導入した量子準位を用いることで大幅に高感度化が可能であることを見出しました。具体的な製品化へ向けた取り組みでは、レーザーとは異なる多くの克服すべき障壁がありました。他の多くの光検出器と異なる最も大きな点としては、その動作原理から、デバイスの表面への光入射に対しては本質的に光感度を持たないことです。QCD は（QCL や QWIP もそうですが）結晶成長により半導体量子ナノ構造を形成するため、成長方向における積層構造に対して量子準位が形成されます。このため、入射光の電場は積層構造を向いている必要があるため、QCL や通常型半導体レーザーの発光部に対応する、半導体の端面方向に光を入射する必要があります。性能を発揮するためには非常に狭いエリアに光を集光する必要があることから、レンズ実装された形態で製品化が進められ、極めて精度の高い調芯が必要となりました。このような苦労を伴いましたが、QCD は 2021 年に研究所から事業部に移管し、世界初の製品化に成功しました。しかしながら、現時点では QCD の光感度は他の中赤外域の光検出器に比べて劣るため、広く普及を目指すには今後の継続した研究開発が必要不可欠です。一方、QCD は今後の特性向上に向けてデバイス構造の改良余地も大きく、将来的に高速通信向けの中赤外光検出器としての可能性が期待さ

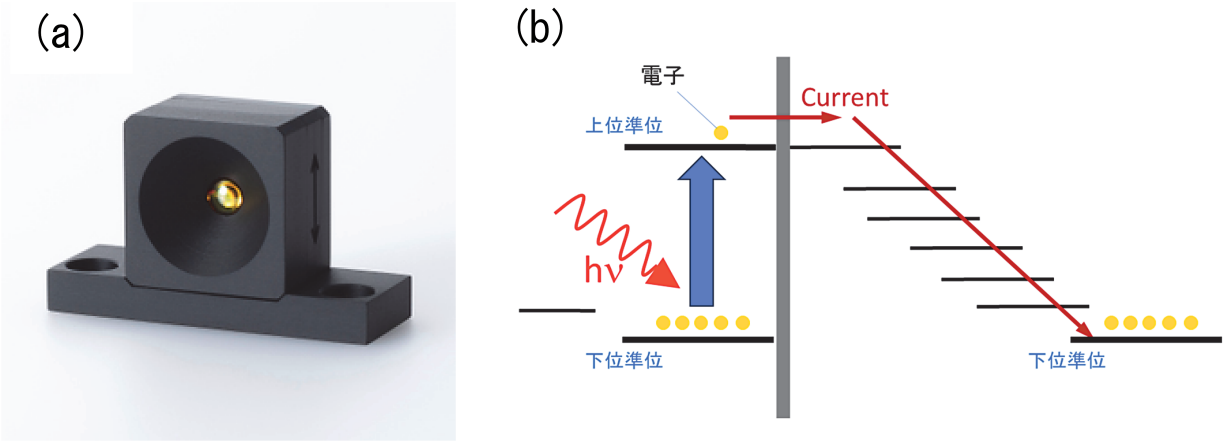


図 2（a）製品化された QCD の写真（b）一般的な QCD の動作原理

れています。また、QCL とともに用いた場合には、同じ動作原理となることから、最も適した光検出器として近年注目が高まっています。

4. まとめ

比較的新しい半導体レーザー、光検出器である QCL、QCD は研究開発の対象として非常に挑戦し甲斐があり、実際、世界の企業、大学、研究所を相手に切磋琢磨しながら急速な発展を遂げてきました。QCL 技術は欧米を中心に展開してきた分野であることもあり、技術的優位性を示し、顧客の信頼を勝ち取るためには、特許だけでなく、学術論文や国際学会での発表も必要不可欠でした。技術進展はとても早いですが、継続的に性能のアップグレードを進めることで、世界的にも数少ない QCL メーカーの地位を確立するに至っています。

現在、量子力学の本質的な性質を積極的に利用する将来のデバイスとしては量子コンピュータが盛んに研究されていますが、それに先行して QCL は同様に量子力学の本質である波動関数を直接エンジニアリングして実現される量子デバイスとして既に実用化されています。今後も量子力学や新しい物性物理学を利用したデバイスやシステムの研究開発が盛んになり、社会全体に大きなインパクトを与えることを期待しています。

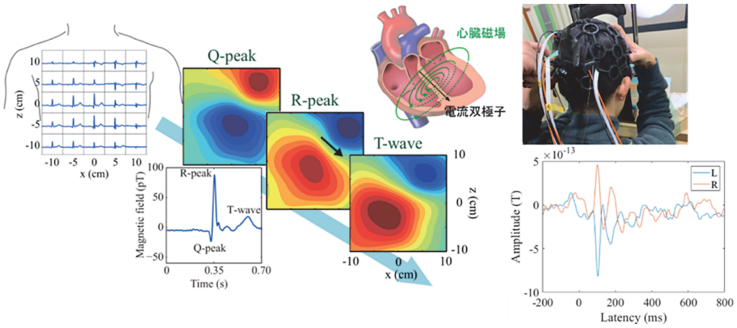
新設研究室紹介

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/
マルチモーダル信号計測・解析とヒト理解・支援

我々は、ヒトの理解・支援を目的として、磁気センサを用いた信号計測（ハード）から計算機による信号解析（ソフト）まで包括的な観点から研究しています。抹消系（感覚器官）から中枢系（脳）に至るヒトの情報処理の解明に向けて、生体信号処理（例：脳・筋・神経活動計測）、音響信号処理（例：音源分離・定位・識別）、映像信号処理（例：三次元形状推定・物体検出）、それらを統合した統計的マルチモーダル信号処理に取り組んでいます。さらに、これらを応用した人間拡張技術の開発にも取り組んでいます。

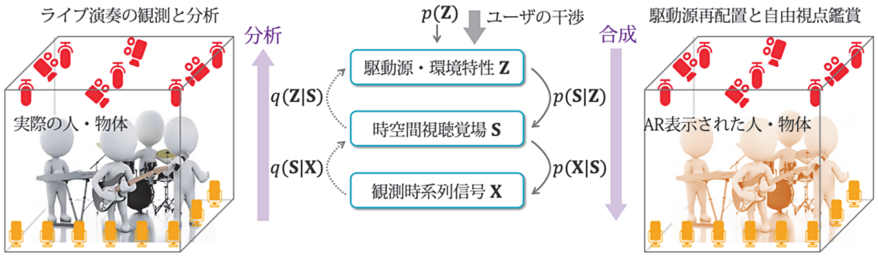
非侵襲生体磁気計測　―スーパーセンサーをつくる―

ユビキタス医療の実現に向けて、生体が発する微弱な磁気を計測するための光ポンピング磁気センサ（OPM）や機能的 MRI（fMRI）の精度・コストを改善するための研究を行っています。OPM は冷媒が不要な超高感度な磁気センサで、心磁界・脳磁界計測装置の小型化・低コスト化につながります。fMRI は脳活動を MR 画像の濃淡変化として描出する手法で、神経磁場の発生時期と位置を精度良く推定する技術を開発しています。また、物理方程式に基づく観測信号の生成過程を考慮した確率モデルを定式化し、直接観測できない信号源に対する統計的推論を行うことで、物理的な計測限界突破を目指しています。



時空間視聴覚場の分析合成系　―タイムマシンをつくる―

究極の視聴覚メディアとして、自らの耳や目を用いて過去を追体験・再体験可能なタイムマシンの研究を行っています。このシステムでは、拡張現実（AR）スマートグラスを用いて、過去にその場に存在した人・物体の自由視点での鑑賞を可能にし、過去の人・物体とのリアルタイムインタラクションを実現します。技術的には、人・物体などの複数の駆動源と、マイク・カメラアレイから得られる多チャネル観測信号を上下階層にもつ「視聴覚場」（時空間上の連続関数）の分析合成系の実現を目指しています。分析・合成の無矛盾性から両者を一体的に取り扱う統計的枠組みで研究を進めています。



視聴覚環境理解支援　―パワードスーツをつくる―

音声コミュニケーションにおける知覚・言語障壁を克服するため、AR グラスをプラットフォームとして、未知の雑音･残響環境下であっても低遅延かつ高精度に音声強調･認識を行う研究を行っています。このシステムは、大規模データで学習済みの汎用モデルを使い回すのではなく、ユーザの環境に自律的に適応させることで、「使うほど賢くなる」機能に特徴があります。視聴覚環境理解の点では、タイムマシンプロジェクトとは性質が異なり、装着型センサを用いてリアルタイム分析を行います。

研究室紹介

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

電気関係研究室一覧

工学研究科（大学院）
電気工学専攻
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）
生体医工学講座複合システム論分野（土居研）
生体医工学講座生体機能工学分野（吉井研）＊
電磁工学講座超伝導工学分野（雨宮研）
電磁工学講座電磁回路工学分野
電磁工学講座電磁エネルギー工学分野（松尾研）
優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研）

電子工学専攻
集積機能工学講座（米澤研）
電子物理工学講座極微電子工学分野（白石研）
電子物理工学講座応用量子物性分野（竹内研）
電子物性工学講座半導体物性工学分野（木本研）
電子物性工学講座電子材料物性工学分野
量子機能工学講座光材料物性工学分野（川上研）
量子機能工学講座光量子電子工学分野（野田研）
量子機能工学講座量子電磁工学分野

光・電子理工学教育研究センター
ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野（メーナカ研）

情報学研究科（大学院）
知能情報学専攻
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ィジタル通信分野（原田研）
通信システム工学講座知的通信網分野（大木研）
集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤研）
集積システム工学大規模集積回路分野（新津研）
集積システム工学講座超高速信号処理分野（橋本研）

システム科学コース
システム情報論講座論理生命学分野（石井研）
システム情報論講座医用工学分野（野村研）

エネルギー科学研究科（大学院）
エネルギー社会・環境科学専攻
エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野（下田研）

エネルギー基礎科学専攻
エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野（中村祐研）☆

エネルギー応用科学専攻
エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野（土井研）
エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野

エネルギー理工学研究所
エネ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）

生体医工学講座　複合システム論分野（土居研究室）
http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「大域結合細胞集団モデルにおける『パターン』ダイナミクス」

生物の理論研究において、「パターン形成」は中心的課題と言っても過言ではない。動物表皮の模様の形成だけではなく、生物の発生過程（形作り）そのものがパターン形成である（拙稿の著者（土居）が理学部・理論生物物理学講座で行なった最初の研究（卒業研究もどき：必修科目ではなかった）は、当電気系出身の教官の指導下で行ったセルオートマトンを用いた C. elegans 初期発生過程のモデリングであった）。普通は、パターン形成と言えば「空間的」パターンであるので、その数理モデルは（空間変数を含む）偏微分方程式であったり、常微分方程式であっても複数の細胞が空間的に結合したものである。以下の大域結合細胞集団モデル：

$$\frac{\mathrm{d}x_k}{\mathrm{d}t} = \rho - \mu x_k + \frac{{x_k}^2}{y_k}, \quad \frac{\mathrm{d}y_k}{\mathrm{d}t} = {x_k}^2 - y_k + D(z - y_k), \quad k = 1, \dots, n, \qquad \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = -\frac{D'}{n}\sum_{k=1}^{n}(z - y_k)$$

は、n 個の細胞（x_k, y_k）が変数 z を通して大域的に結合したモデルであるが、式からわかるように空間的構造を持っていない。では何がパターンなのか。この細胞集団モデルの典型的な平衡点（$\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}$）は、

$$(\bar{x}_k, \bar{y}_k) = (\xi_1, \eta_1), \quad k = 1, \dots, m, \qquad (\bar{x}_k, \bar{y}_k) = (\xi_2, \eta_2), \quad k = m+1, \dots, n,$$
$$\bar{z} = (\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \cdots + \bar{y}_n)/n = (m\eta_1 + (n-m)\eta_2)/n$$

と表される。つまり、n 個の細胞集団が、（ξ_1, η_1）という値を取る m 個の細胞からなるグループと、（ξ_2, η_2）という値を取る $n-m$ 個の細胞からなるグループとに「分化」するのである。さらに興味深いことは、この分化比率（＝分化パターン）$m : n-m$ が、モデルの持つ非線形性（細胞内化学反応）によって一定の範囲内に制限されることである。上記の平衡点における線形化行列の特性多項式 ϕ は，$2n$+1 次の多項式であるので細胞数の増加につれて大変複雑になるが、

$$\phi = \phi_0 \, {\phi_1}^{m-1} \, {\phi_2}^{n-m-1}$$

と分解することができる。ここで、ϕ_0 は上記 2 つのグループ間の相互作用に対応する 5 次多項式である。また、ϕ_1，ϕ_2 は、各グループにおける細胞内ダイナミクスに対応し、どちらも 2 次の多項式である。上記の細胞集団モデルにおける分化比率調節がどのようなメカニズムによって行われているのかを明らかにするために分岐解析を行なったものが図 1 である。y_1=0.5 の直線が細胞分化前の「未分化平衡点」を表し（赤い部分が安定）、そこから様々な「分化平衡点」が発生している。この図は、細胞数が n=5 と極めて少ないが、相当複雑な分岐図になっている。本研究では、細胞集団の対称性（細胞間に区別がないこと。特性多項式の分解では ϕ_1，ϕ_2 が冪乗になっていること）に注目して、細胞集団の分岐構造・分化比率調節メカニズムを明らかにした。

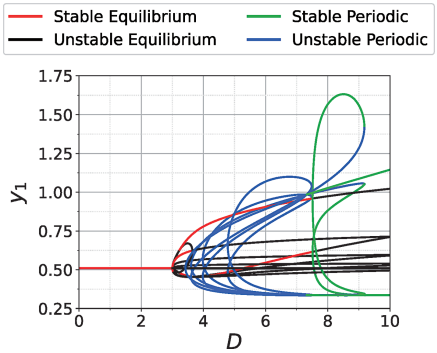


図 1：細胞「分化」の分岐図（n=5）

参考文献

[1] 小川知之：「非線形現象と微分方程式：パターンダイナミクスの分岐解析」，サイエンス社，2019.

[2] S. Kawae, S. Doi: Comparison between a population model of cells interacting through a common pool and its reduced model, Proc. of NOLTA2023, pp.88–91（2023）.

[3] 大久保，川衛，土居：大域結合細胞集団の分化比率調節モデルとその縮約モデルの分岐構造に関する比較検討 , 電子情報通信学会技術研究報告 , NLP2024-43, pp.12–17（2024）.

[4] R. Okubo, S. Kawae, S. Doi: Analysis of differentiation ratio regulation dynamics in a globally coupled cell population model based on its reduced models, Nonlinear Theory and Its Applications（NOLTA）, IEICE, Vol.16, No.1, pp.168–183（2025）.

電磁工学講座　電磁回路工学分野
http://cct.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「TDR による配電系統の事故点標定と異常検知」

電力系統は巨大なエネルギーシステムであり，一旦その機能が短期間でも失われると社会活動に大きな影響を与えるライフラインでもある．通常はあまり意識されことは少ないが，その保守や管理には膨大な労力が注がれている．特に最近では，自然災害などの増加もあり，迅速な事故復旧の労力が増える中，センサや情報ネットワークを利用したサイバーフィジカルシステムとして，より進化することが必要とされている．その中で，当研究室では TDR（Time Domain Reflectometry）を用いて，三相配電線に高周波パルスを伝搬させ，その反射波から事故点を標定する手法や，未事故状態の異常検知を行う手法を開発してきた．

配電系統における TDR 測定においては，架空配電線の線間に電圧パルスを印加する（図 1 左図）．この場合に得られる反射波形の例を図 1 右図に示す．各電柱の位置に相当する時間に反射波形が見える．これは，伝送線路としての配電線において，電柱部分では pF オーダーの微小な寄生容量が存在し，反射が生じるためである．200ns 付近における反射は，伝搬速度がほぼ光速なので，33.5m（電柱 No.1 と No.2 間の距離）の往復距離と対応している．このように，TDR の原理を使うと，配電線上の微細な構造に関する情報を得ることができる．例えば，図 2 左図のような樹木接触，図 2 中図のような営巣等，事故につながる事象を未然に検出することもできる．また，瞬時で消滅する事故（図 3 右図）のような場合も，事故サージに基づきパルスを入射することで事故点をみつけることができる．

このような測定と実系統の設備情報と結びつけて利用するために，変圧器や碍子などの電気設備のモデル化も行い，図 1 右図に示すようなモデルと実測データの精度良い一致が得られている [1]．また、長期間観測に耐えられる装置も試作し、長期に実配電系統で観測を行い，大量のデータ取得をしながら，周辺の電波や気象状況などの変化に対する対応も検討している．このように，多数のネットワークセンサにより配電系統を常時観測しながら，設備のデータや気象データとも結び付けて解析することで，事故が起こる前に異常検知を行い，事前に対応できるような，サイバーフィジカルシステムの実現を目指して研究を進めている．

参考文献　[1] 上嶋，松嶋，久門，和田，電学論 B, Vol.142, No.2, 2022.　[2] 松井，林，森田，松嶋，久門，和田，電気学会全国大会，6-308, 2018.　[3] 松井，林，森田，松嶋，久門，和田，電気学会 B 部門大会，2-2-15, 2018.

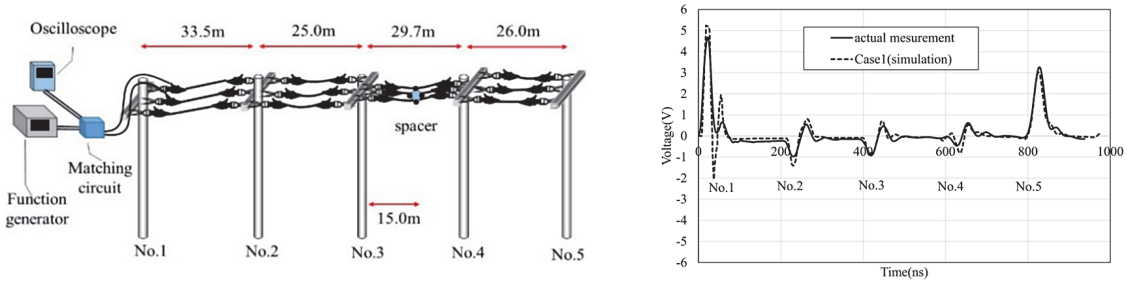


図 1　架空配電線の線間にパルスを注入（左），観測される反射波形の実測とシミュレーション（右）[1]

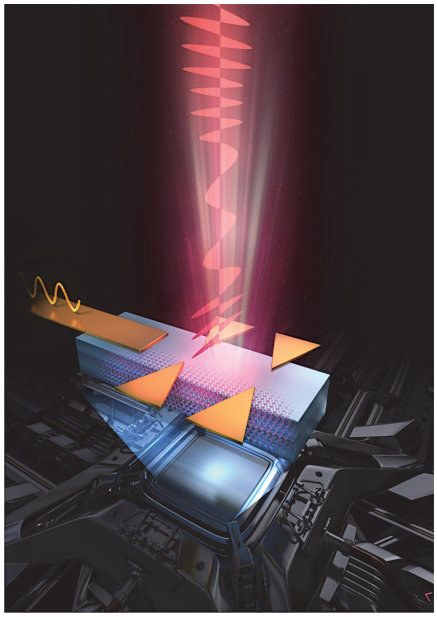
図 2　未事故状態の樹木接触の標定（左），営巣の標定（中），一瞬の事故中の標定（右）も可能 [2],[3]

集積機能工学講座　（米澤研究室）
http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp
「高温超伝導体を用いた周波数変調テラヘルツ光源」

近年、テラヘルツ帯の電磁波の発生と検出に関する技術開発が広範な研究分野で進展しています。通信インフラの基幹技術として十分な性能を示すテラヘルツ発振デバイスを実現するためには、伝送信号とテラヘルツ波を合成して送受信できる最適な信号変調方式の開発が求められます。しかし、安定なテラヘルツ発振と高速変調の両立は原理的に難しく、多くの技術的な課題が残されています。現在、テラヘルツ通信の実証実験で使われている共鳴トンネルダイオード発振器の場合、振幅変調（AM）を用いたモノビットデジタル通信という方式が採用されています。周波数変調（FM）方式は AM と比較して復調時にノイズに強いという利点があります（本稿の読者各位にとっては釈迦に説法ですが）が、テラヘルツ帯の FM 技術は開発があまり進んでいません。

私たちは、小型で安定な性能を有するテラヘルツ発振デバイスとして、高温超伝導体材料を用いた超伝導テラヘルツ光源の機能開発を進めてきました。超伝導体ジョセフソン接合にみられる特有のジョセフソン効果は、直流信号と交流信号を高精度に変換できる変換器としての利用や、直流電圧と交流周波数の関係性に着目した電圧標準器としての応用が実現されています。高温超伝導体材料の結晶には、こうした超伝導体ジョセフソン接合が高密度かつ均一に存在していることが知られており、個々の接合で生じた交流振動が重なり合うことで、強力なテラヘルツ波が放射されます。本研究では、超伝導テラヘルツ光源を駆動する電圧に最大 3.5 ギガヘルツの信号を合成することで、テラヘルツ波を高速周波数変調する技術の実証に成功しました。設計したデバイスから放射される電磁波を独自開発した高分解能フーリエ変換式分光計で解析すると、特徴的な櫛状の周波数分布（コムスペクトル）が得られます。この性能は、デバイス設計や復調技術を最適化することでさらに向上できます。さらに、FM 時には発振周波数領域そのものが拡大することを明らかにしました。

超伝導テラヘルツ光源は小型で安定に動作する固体デバイスであり、単色テラヘルツ発振、広帯域チューニング性能、アレイ化による高出力発振、高い放射効率、円偏光テラヘルツ電磁波の発生など、他の技術にはないユニークな特徴を備えています。本研究で新たに実現した FM 方式は、従来の複雑かつ特殊な光学機器を使用する方式よりも単純でありながら、高い精度で周波数や帯域を制御できる点で優れています。また、本方式を応用して実現可能な FM 連続波（CW）テラヘルツレーダーは、人体計測や高速移動体計測などへの実装研究が進んでいる FMCW ミリ波レーダーの精度を向上させるだけでなく、たんぱく質の高次構造特定などのテラヘルツ帯特有の機能を伴って、ヘルスケア応用への可能性も示されています。さらに、超伝導テラヘルツ光源は、電波望遠鏡、観測衛星、量子コンピューティングなどで利用されている既存の超伝導デバイスと相性が良く、これらの先端技術と本研究で確立した技術を融合させることで、革新的な性能を持つ次世代の超伝導デバイスの創製が期待されます。


高温超伝導体デバイスからの周波数変調テラヘルツ波放射のイメージ

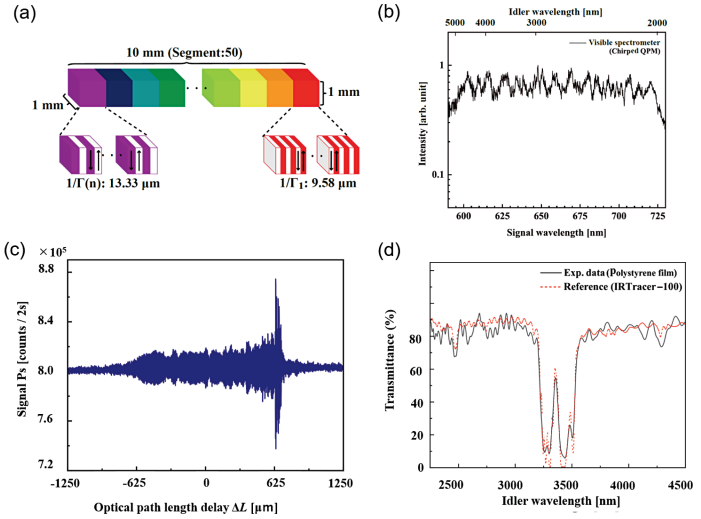
本研究成果は京都大学ホームページ 2024 年 1 月 12 日付「最新の研究成果」で公開されています。

電子物理工学講座　応用量子物性分野　（竹内研究室）
http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html
「可視光源と可視光検出器で実現する超広帯域量子赤外分光」

赤外分光法は、物質中の分子構造や組成を特定する方法として、化学・生命科学・医療から環境モニタリングや工業生産まで、幅広い分野で利用されています。しかしながら、従来の赤外分光技術は赤外域の光源や光検出器に由来する技術的制約が装置のさらなる小型化・高感度化の障害となっていました。近年注目を集めている「量子赤外分光」は、可視域の光源と光検出器のみを用いて赤外分光を可能とする新たな量子計測技術です。その測定原理は、量子相関をもつ可視光子と赤外光子のペア（可視 - 赤外もつれ光子対）の発生過程間の量子干渉を利用するというもので、これにより赤外波長域における光学吸収を相関する可視光子発生数の変動（量子干渉信号）を通して評価することができます。しかし、これまでに報告されてきた量子赤外分光システムでは、その測定帯域を決める量子もつれ光の発生帯域が赤外域で 1μm 以下と狭い波長範囲に限られていました。

今回我々は、波長 2μm ～ 5μm という広い波長域で赤外光子を発生する超広帯域量子もつれ光源を開発し、これを用いた量子赤外分光に成功しました。広帯域もつれ光源を実現するため、マグネシウム添加定比タンタル酸リチウム（Mg:$LiTaO_3$）結晶中に周期的な分極反転を形成し、反転周期を少しずつ変化（チャープ）させた「チャープ擬似位相整合素子」を独自に開発しました（図（a））。この素子に波長 532nm の可視光レーザーを照射すると、各セグメントから分極反転周期によって決まる様々な波長の組み合わせで可視 - 赤外光子対が発生します。発生したもつれ光子対の可視光成分を分光器で測定した結果、2μm ～ 5μm の超広帯域赤外光発生に相当する可視光放射スペクトルが確認できました（図（b））。この量子もつれ光源を用いて量子干渉号を計測し（図（c））、赤外光路に配置した試料による信号変化をフーリエ解析により調べることで、赤外域の透過率スペクトルを算出することができます。図（d）はこの様にして計測したポリスチレンフィルムの赤外透過率スペクトルを示しています。3.2~3.6μm の波長帯にポリスチレン中のメチル基、およびベンゼン環の C-H 伸縮モードに由来する特徴的な赤外吸収ディップを捉えており、同図に実線で示した従来赤外分光法による測定結果とも定量的に良い一致を示しています。この他にも、溶融石英ガラス中や液相のメタノールなど、多様な試料の中赤外量子スペクトルの測定にも成功しています。

本研究によって、安価かつ高性能な可視光源と光検出器によって、世界最大となる 2 ～ 5μm の広帯域にわたる量子赤外分光が実証されました。この成果により、将来的には電池で動作するコンパクトで高性能な赤外分光装置の実現が期待され、これまでオンサイトでは困難であった環境モニタリングや医療、セキュリティなど様々な分野への応用が見込まれます。また、本研究で開発した超広帯域量子もつれ光源などの基盤技術は、量子赤外分光だけでなく赤外域の量子イメージングや、量子情報技術等にも寄与することが期待されます。



図（a）広帯域もつれ光発生用チャープ擬似位相整合素子（b）可視放射光スペクトル。上軸：対応する赤外光子波長（c）量子干渉信号（d）ポリスチレン試料の中赤外透過率スペクトル

参考文献：T. Tashima, Y. Mukai, M. Arahata, N. Oda, M. Hisamitsu, K. Tokuda, R. Okamoto, and S. Takeuchi, "Ultra-broadband quantum infrared spectroscopy" Optica, **11**, 81（2024）.

電子物性工学講座　半導体物性工学分野（木本研究室）
http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「SiC 半導体の <0001> 方向移動度の決定」

SiC（炭化珪素）は高い絶縁破壊電界を有する広禁制帯幅半導体で、同耐電圧の Si パワーデバイスと比較すると通電時のオン抵抗（損失に直結）を 1/500 に低減可能です [1]。SiC パワー MOSFET の量産が開始され、様々な電気機器で省エネ効果が実証されていますが、デバイス特性を支配する重要な物性の多くが未知という状況にあります。このため、正確なデバイスシミュレーションに支障を来たしており、デバイスの設計開発や信頼性予測に多大な時間とリソースを費やしています。SiC では、物性を精密に決定するために必要な素子構造を作製することが容易ではなく、かつ Si に比べて約 10 倍高い電界範囲、約 3 倍高い温度範囲まで測定する必要があることが、固有物性の解明を妨げています。本研究室では、SiC 半導体の結晶成長、デバイス作製、さらには高電圧かつ高温物性評価装置を所有していますので、デバイス研究の傍ら SiC 物性の解明に関する研究も進めています。

今回、デバイス応用上最も重要な <0001> 方向の移動度を決定しましたので紹介します。図 1 の模式図に示すように、SiC は（0001）面ウェハが広く市販され、これを用いて縦型デバイスを作製しますので、電流は主に（0001）面に垂直方向（<0001> 方向：ウェハの厚み方向）に流れます。つまり、このデバイスの抵抗を決定するのは <0001> 方向の移動度です。一方、移動度を求める最も一般的な手法である Hall 効果測定を、市販の SiC（0001）試料に対して行っても（0001）面内移動度の情報しか得られません。そこで、本研究では特殊基板である SiC（$11\bar{2}0$）結晶を準備し、これを用いて図 2 に示す Hall バー素子を作製しました。この試料を用いて Hall 効果測定を行うことによって、<0001> 方向およびこれに垂直方向の移動度を同一のドーピング密度に対して決定することが可能です。

図 3 に電子移動度のドナー密度依存性を示します [2,3]。従来、<0001> 方向の移動度に関するデータが欠落していましたが、本研究では広いドナー密度、温度の範囲で <0001> 軸方向の移動度を決定することに成功しました。この結果、従来、測定されていた（0001）面内方向（<0001> 軸に垂直方向）の移動度に比べて、<0001> 軸方向の移動度は約 1.2 倍高いというデバイス応用上望ましい結果が得られました。低濃度 SiC で得られた 1,210 cm^2/Vs という移動度は、室温における SiC の移動度として最高の値です。同図には示していませんが、各試料の電子移動度を 150 ～ 600K という広い温度範囲で決定し、各種のフォノン散乱、不純物散乱等を考慮した計算値とよく一致することも確認しました。また、図 2 における n 型と p 型を反転した構造の試料も作製し、正孔の <0001> 方向移動度についても広いドーピング密度と温度範囲で決定しました [4]。学術的には、電子および正孔移動度の異方性の起源について考察し、キャリアのエネルギー分布と Brillouin 領域全域で平均化した有効質量により定量的に説明できることを明らかにしました。これらの成果は SiC 半導体の重要なデータベースとして最大手のデバイスシミュレーションに登録され、現在、当該分野の世界中の研究者、技術者が本データを活用されています。

[1] T. Kimoto, *Proc. Japan Academy, Ser. B,* **98**, 161（2022）.
[2] R. Ishikawa et al., *Appl. Phys. Express*, **14**, 061005（2021）.
[3] R. Ishikawa et al., *Phys. Stat. Sol. B* **260**, 2300275（2023）.
[4] R. Ishikawa et al., *J. Appl. Phys.* **135**, 075704（2024）.

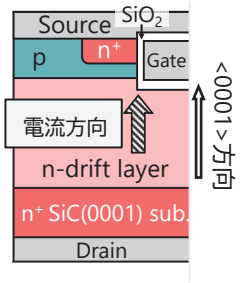


図 1　SiC パワー MOSFET の模式図

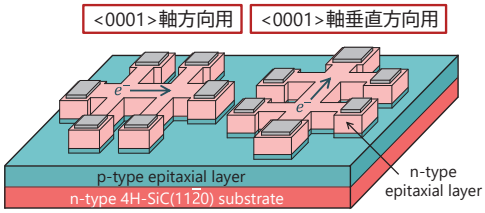


図 2　SiC（$11\bar{2}0$）基板上に作製した Hall バー素子

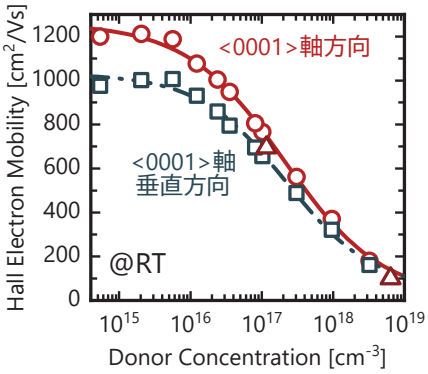


図 3　電子移動度のドナー密度依存性

電子物性工学講座　電子材料物性工学分野
https://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/
タンパク質 Annexin V の 2 次元結晶の構造解析およびタンパク質ナノアレイの作製

一般に、タンパク質分子は特定の分子と強く結合する性質（特異結合能）により分子を認識し、機能を発現する。生化学分野では特定の分子の検出や精製にこの性質が広く用いられている。例えば、生体分子の濃度を評価する手法である酵素結合免疫吸着測定法（enzyme-linked immunosorbant assay: ELISA）では、基板上に抗原や抗体を固定化させ、抗原抗体反応を用いて分子を検出している。また、インフルエンザの検査キットでは、ウイルスに特異結合する抗体分子を基板に固定化し、やはり抗原抗体反応が利用されている。こうした測定・検査法では、タンパク質をどう固定化するかが検出に大きく影響するため、物理吸着や化学結合など、多くの固定方法が考案されてきた。しかし、タンパク質によっては安定に固定化することが困難であったり、タンパク質の分子との結合部位が表面に露出していなかったりする問題がある。したがって、タンパク質の配向が制御されており、かつタンパク質に適度な自由度を持たせて基板に固定化するシンプルな方法の開発が望まれている。

本研究では、脂質 2 重膜上において 2 次元結晶化する Annexin V と呼ばれるタンパク質をテンプレートとしてタンパク質 streptavidin（SA）を配列させたタンパク質ナノアレイを作製した。SA は biotin と呼ばれる分子と非常に強い特異的結合能を有するタンパク質であり、生化学分野で特定の分子の検出や抽出に広く用いられている。はじめにマイカ基板上の脂質 2 重膜上に Annexin V の 2 次元結晶を作製し、原子間力顕微鏡（atomic force microscopy: AFM）により表面構造観察を行った。図 1（a）に Annexin V の 2 次元結晶の AFM 観察結果を示す。一面にわたり周期構造が観察されており、左下の白破線が単位格子を示している。単位格子には脂質 2 重膜が露出した「穴」があり、実線の円で示した領域では、その「穴」に Annexin V の 3 量体が入り込んでいるが、破線円で示した領域は「穴」に何も入っていない。2 次元結晶を作製時の pH を調整することで、Annexin V の 3 量体が入り込まないように、すなわち六方格子状に「穴」が並んだ状態を形成し、SA を滴下した。SA 滴下後の AFM 観察結果を図 1（b）に示す。Annexin V の 2 次元結晶の「穴」だった場所に輝点が見られる。脂質 2 重膜には biotin で修飾された脂質分子が含まれており、輝点は Annexin V の 2 次元結晶の「穴」だった場所に SA 分子が規則的に固定化されているタンパク質ナノアレイが形成されたものである。さらに、biotin で修飾されたウシ血清アルブミン（Biotinylated bovine serum albumin: BBSA）を滴下し、リンス後に AFM 観察を行った結果を図 1（c）に示す。SA 上に高さを約 3 nm の吸着物が観察できており、BBSA の大きさとほぼ一致していることから、この吸着物は SA に特異的に吸着した BBSA であると考えられる。SA はナノアレイを形成している状態であっても、活性を保持していることが明らかとなった。配列させた SA に biotin 修飾した抗体分子を結合させることで、任意のタンパク質を検出できるバイオセンサへ応用することが可能である。

参考文献 1）H. Kominami, Y. Hirata, H. Yamada, and K. Kobayashi, Nanoscale Advances 5, 3862-3870 (2023).

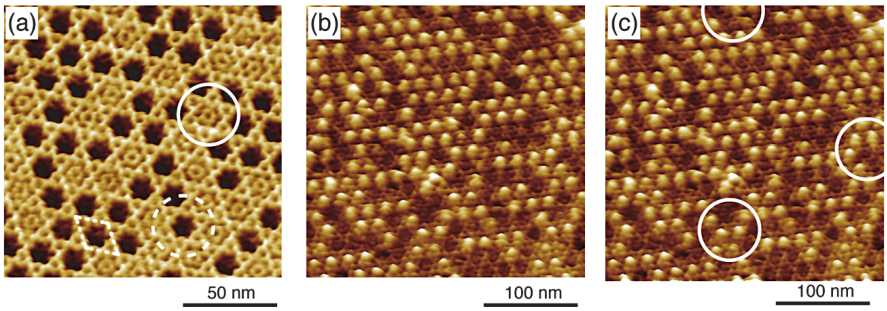


図 1：(a）Annexin V の 2 次元結晶の AFM 像 .（b）streptavidin 滴下後の Annexin V の 2 次元結晶（タンパク質ナノアレイ）の AFM 像 .（c）BBSA 滴下後のタンパク質ナノアレイの AFM 像 .

量子機能工学講座　光量子電子工学分野（野田研究室）
http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「自動最適化設計による高 Q 値フォトニック結晶共振器系の結合係数の増大」

我々は、微小領域に光を長時間保持できる高 Q 値ナノ共振器を複数結合させ、その結合状態を光子寿命内に動的に変化させることで、光情報のバッファリングや光量子情報処理等へ応用可能な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。これまでに、シリコンチップ上に 3 つの直列に結合した高 Q 値フォトニック結晶共振器からなる光回路と、その共振波長を制御できる面内 pin 接合からなる電気回路を融合させた光電子融合回路を実現しました（図 1（d）参照）。そして制御用の電気パルスの印加タイミングで、共振器 A に保持した光を別の共振器 B に転送する光バッファ動作を実現し、また同様の光電子融合回路で非相反な光伝搬を実現するための理論的研究などを行ってきました。これらの機能をさらに高効率化・広帯域化するには光共振器の光子寿命を長く保ったまま、共振器間の結合を増大させる必要がありますが、その両立は困難でした。今回、フォトニック結晶の穴配置パターンを多変量正規分布を用いて生成しつつ電磁界シミュレーションを行って、結合係数が大きくかつ放射損失が小さくなるように、多変量正規分布の共分散行列の更新を繰り返す手法に、さらに光漏れ成分の空間分布を計算して、それを重みとすることで放射損失の小さい領域の穴はあまり動かさないようにするという、物理的考察に基づく補正を加えることで、高い Q 値と結合係数の両立を実現しました。この成果は、光通信用の光バッファメモリーやオンチップ光アイソレータ、あるいは光量子演算用の光子バッファ等の実現につながるものであり、高度な光制御に向けた大きな前進と言えます。

参考文献 :R. Mitsuhashi, B. S. Song, K. Inoue, T. Asano, and S. Noda, *Optics Express* **32**, 16030（2024）.

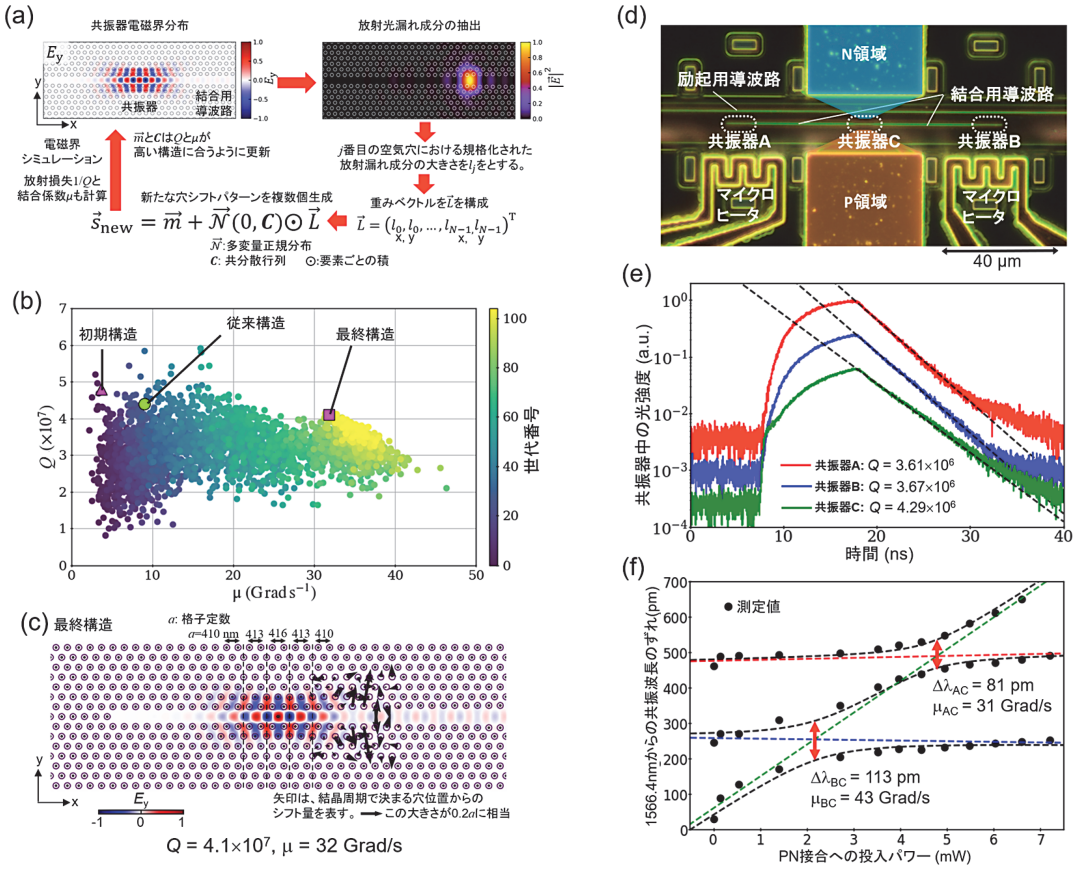


図 1：（a）自動最適化設計の方法。（b）自動設計の進展。μ は結合係数。（c）得られた最終構造。（d）作製された 3 共振器結合系の光学顕微鏡写真。（e）光子寿命測定結果。（f）結合係数測定結果。

量子機能工学講座　量子電磁工学分野
http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp

反射型メタ表面へのバビネの関係式の拡張と波面 / 偏光同時制御への応用

メタマテリアルとは、電磁波の波長より小さい人工構造の集合体のことで、構造の設計によってあらゆる波長に対する電磁特性を自在に制御できることから注目を集めている。特に、2 次元的なメタマテリアルはメタ表面と呼ばれ、リソグラフィー技術との相性も良く、様々な機能をもつメタ表面がマイクロ波帯から光領域まで提案及び実証されている。メタマテリアルの設計には様々な手法が用いられるが、本研究室ではバビネの原理から導かれる関係式（バビネの関係式）をテラヘルツ帯のメタ表面に応用することで、様々な光学素子を実現している [1]。その際、透過型メタ表面と呼ばれる透過波を出力として用いるメタ表面の設計にバビネの関係式を利用しているが、透過型メタ表面では透過位相を大きく変調した際に透過率が低下するという本質的な問題を抱えていた。そこで、金属平面構造と反射鏡からなる反射型メタ表面に対してバビネの関係式を拡張する方法を提案した [2]。

図 1 に提案した反射型メタ表面の単位構造を示した。背面に金属鏡を配置した誘電体基板中に金属平面構造を埋込むことで、適当な条件下でバビネの関係式を反射型メタ表面に拡張することができる。金属構造として、自己補対構造と呼ばれる金属と絶縁体を入れ替えても合同な構造を用いることで、反射位相が垂直偏光と水平偏光で 180 度異なる 1/2 波長板の機能を実現することができる。透過型メタ表面と異なり、反射型メタ表面は金属鏡の存在により、入射光の全エネルギーが反射されるために高効率な波長板として機能する。テラヘルツ帯において動作するメタ表面を実際に作製し、テラヘルツ時間領域分光系で反射特性を測定したところ、設計周波数に対して両偏光で期待通りおよそ 180 度の位相差となり、振幅透過率も 0.9 程度の高い値を示すことが分かった。さらに、両偏光に共通の反射位相は自己補対構造を変更することで自由に調整することができる。この性質を利用することで、図 2 のように、場所ごとに異なる自己補対構造を用い、共通位相を線形に変化させることで、任意の方向へ反射光を回折させることができる。このとき、バビネの関係式により、両偏光の位相差は場所によらず 180 度であるために、1/2 波長板としての機能は保証される。そして実験実証において 45 度偏光入射に対して設計した反射方向に 135 度偏光が 80% 以上の効率で反射されることが分かった。反射型メタ表面に拡張したバビネの関係式は、既に実証した自己補対構造以外にも適用可能であるために、さらに広い応用が期待できる。

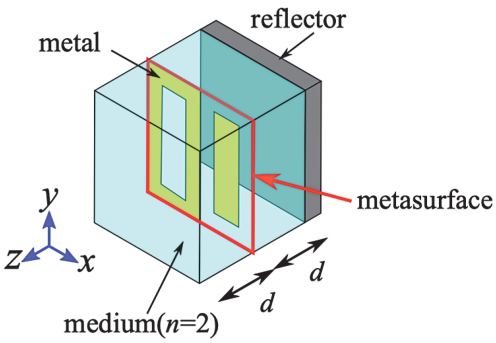


図 1　拡張バビネの関係式を実現する反射型メタ表面の単位構造

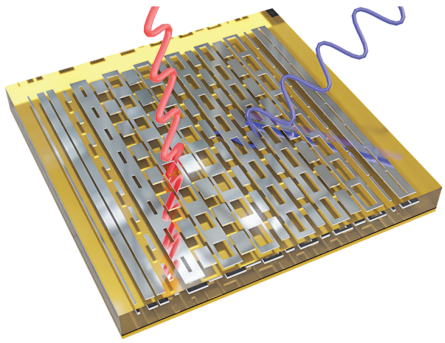


図 2　波面 / 偏光同時制御を実現する反射型メタ表面の概念図

参考文献

[1] 中田陽介、浦出芳郎、中西俊博、「材料・光学部品」日本赤外線学会誌 **31**、77（2021）.
[2] T. Fujikawa and T. Nakanishi, Extension of Babinet's relations to reflective metasurfaces: Application to the simultaneous control of wavefront and polarization, Phys. Rev. Applied **22**, 034002（2024）.

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/
ラットの特徴点からの体表面推定

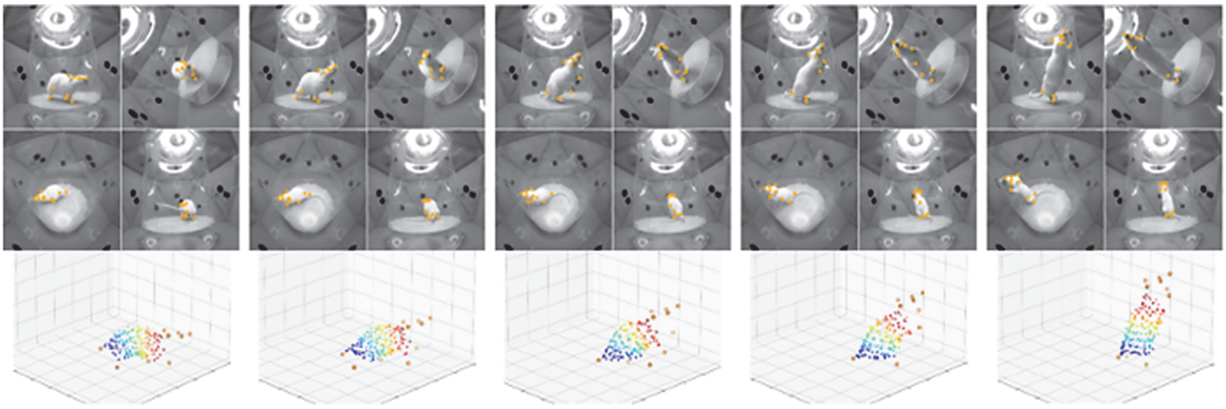


図１　ラットの特徴点（橙）から推定した体表面点（虹色）の様子

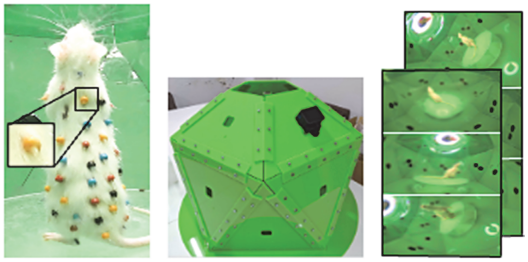


図２　マーカーをつけたラットと RatDome

我々の研究室では、コンピュータビジョン、すなわち計算機を用いた知能的な視覚の確立に向けた様々な研究をおこなっています。計算機視覚を用いた行動解析の一例として、最近ではラットの行動観察への適用も行いました。人間はラットを用いた実験を通して様々な神経科学的知見を獲得してきましたが、行動観察に掛かる労力と時間が大きなボトルネックとなっています。これまでにもラットの行動を自動で定量化するために多くの手法が考案されてきましたが、ほぼ全てが顔や脚などの特徴点を検出する手法 [2] に依っており、これら疎な点集合によって行動を表現せざるを得ませんでした。体全体の大部分を占める体表面は一様に白く視覚的特徴がないため、これらの手法では直接検出できません。一方で、ラットはボディランゲージの一貫として体表面の丸まり具合により威嚇を表現するなど、ラットの行動を深く理解するためには体表面の自動復元が必須となってきます。

我々は [1]、画像から自動で検出可能な顔や脚などの特徴点から体表面を推定する手法を導出しました。図２のように、一時的にビーズをマーカーとして体表面につけることで体表面点を検出可能にし、新しく設計した正二十面体状のドーム（RatDome）で様々な方向からマーカーのついたラットの様子を撮影し、特徴点と体表面を三角測量により復元しました。これらラットの検出可能な特徴点と体表面の三次元座標が組となった大規模データセットを教師データとする新たに導出した深層学習モデルにより、特徴点三次元座標から体表面三次元座標を推定することに成功しました。図１に一例を示すように、マーカーのないラットに対して、自動検出された疎な特徴点から密な体表面を精度高く推定できることを示しました。神経科学等の実験において、今まで活用することが困難であった体表面の自動復元を初めて実現することにより、この成果が分野を超えた新たな研究に貢献することを期待しています。（修士二回生 樋上彩加）

[1] Higami, A., Oshima, K., Shiramatsu, I.T., Takahashi, H., Nobuhara, S., Nishino, K.: RatBodyFormer: Rodent Body Surface from Keypoints. arXiv:2412.09599,（2024）.

[2] Mathis *et al.*: DeepLabCut: Markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning, Nature Neuroscience,（2018）.

通信システム工学講座　知的通信網分野　（大木研究室）
http://icn.cce.i.kyoto-u.ac.jp
「データセンタネットワークにおける光回線スイッチングネットワーク」

データセンタネットワークは、従来、電気スイッチング技術を基盤とするスイッチやルータによって膨大なデータを処理してきた。近年では、光スイッチングを含む光回線スイッチング技術の導入が進み、高い転送容量、低遅延、省エネルギーといった利点が期待されている。このようなネットワークでは、スイッチング性能やコスト面で優れる小規模なスイッチを多段構造で組み合わせた階層型スイッチングアーキテクチャが採用されている。この構造は非ブロッキング条件を満たす特性を持ち、データセンタネットワークにおいて広く活用されている。

光回線スイッチングネットワークでは、スイッチングネットワークサイズの拡大とブロッキング品質の制御が設計上の重要な指標である。ここで、スイッチングネットワークサイズは、ネットワークに接続される端末（または ToR: Top of Rack）の数として定義される。ネットワークサイズが大きいほど、多くのユーザリクエストを処理可能であり、サービスプロバイダーにとって利便性の高いネットワークといえる。一方、ブロッキングとは、スイッチングネットワーク内でリクエストが目的地に到達できない現象を指す。データセンタネットワークの通信品質を維持するには、ブロッキングを厳密に制御することが不可欠である。大木研究室では、データセンタネットワークの通信品質を保証する光回線スイッチングネットワークの設計に関する研究を行っている。

従来の光スイッチングネットワークの研究では、厳密な非ブロッキング条件を満たす階層型スイッチングネットワークの設計が主に行われてきた。非ブロッキング条件を満たすネットワークは、いかなる状況でもブロッキングが発生しないという利点を持つ一方で、スイッチングネットワークのサイズに制約が生じるという課題がある。ある程度のブロッキングを許容するネットワーク構造は、より柔軟な設計を可能にするものと考えられる。これまでの研究では、Clos ネットワークの非ブロッキング条件に基づく設計に限られており、ネットワークのブロッキング率を理論的に保証する研究は行われてこなかった。本研究室では、ブロッキング率を許容範囲内に保ちながら、光スイッチや光通信の物理的制約、リクエストの発生特性を考慮し、スイッチングネットワークのサイズを最大化するデータセンタネットワークの設計に取り組んでいる [1][2][3]。本研究は、光ネットワーク設計・制御を中心に、光通信、プロトコル、通信デバイス、数理最適化、離散数学、確率論など、幅広い分野の技術や手法を駆使して展開されている。

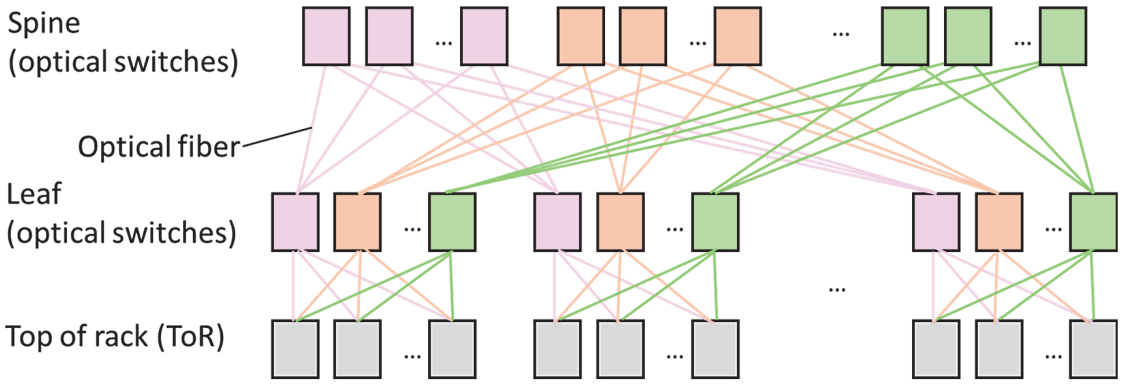


図 1.　データセンタネットワークにおける光スイッチング回線ネットワーク

[1] H. Taka, T. Inoue, and E. Oki, IEEE/OSA J. Optical Commun. Netw., vol. 16, no. 3, Mar. 2024.
[2] R. Taniguchi, T. Inoue, K. Anazawa, and E. Oki, IEEE/OSA J. Optical Commun., vol. 16, no. 11, Nov. 2024.
[3] E. Oki, H. Taka, and T. Inoue, Int. Conf. Comp. Commun. Netw.（ICCCN 2024）, Jul. 2024（invited paper）.

集積システム工学講座　情報回路方式分野　（佐藤研究室）
https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/

低電圧有機薄膜トランジスタのレイアウト設計による電流特性の最適化

有機薄膜トランジスタ（OTFT）は、印刷プロセスにより柔軟な基板上に低温で製造できることから、フレキシブル・デバイスとしての応用が期待されています。低電圧動作が可能なバックゲート・トップコンタクト型 OTFT は、アルミニウムゲート電極、AlOx と自己組織化単分子膜（SAM）からなる絶縁層、DNTT 有機半導体（OSC）層、および金（Au）ソース / ドレイン電極で構成されています。

OTFT を構成する各薄膜層端の位置関係を考慮すると、図 1 に示す 3 つのレイアウト形式（ENC-EXT, EXT-EXT, EXT-ENC）が考えられ、これらのレイアウト形式を変えると電流特性が大きく変化します [1]。位置合わせの余裕を確保するため、これまでは ENC-EXT レイアウトが最も一般的に用いられてきました。このレイアウトでは OSC が絶縁層内に収められ、ソース / ドレイン電極端部が絶縁層を超えて伸びています。このため、ソース / ドレイン電極と絶縁層が直接接触することで、ゲートとソース / ドレイン間の漏れ電流が増加します。EXT-EXT レイアウトでは、OSC が絶縁層を超えて延び、さらにソース / ドレイン電極が OSC を超えて延びています。このレイアウトでは、ゲートによって制御されない OSC 領域が生じるため、ソース / ドレイン間にフリンジ漏れ電流が流れます。同様に EXT-ENC レイアウトでは、OSC が絶縁層を超えて延び、ソース / ドレイン電極が絶縁層内に収められます。このレイアウトでは、ゲート漏れ電流とフリンジ漏れ電流が低減されます。

これらのトランジスタをモデル化し、適所に使い分けることで、様々な回路設計が可能となります。図 2 には、電流特性に優れる p 型の OSC のみを用いる擬似 CMOS ロジックゲートの設計例を示しています [2]。EXT-ENC レイアウトは、リーク電流を低減し、出力電圧振幅を大きくできることから高いオン / オフ電流比と低い I-V 特性のばらつきが必要となるプルアップ OTFT に最適です。一方、フリンジリーク電流が流れる EXT-EXT レイアウトは、擬似抵抗デバイスとしてより適しています。また、EXT-ENC レイアウトは、低いリーク電流により 3 つのレイアウトスタイルの中で最も高いオン / オフ電流比が実現できます。

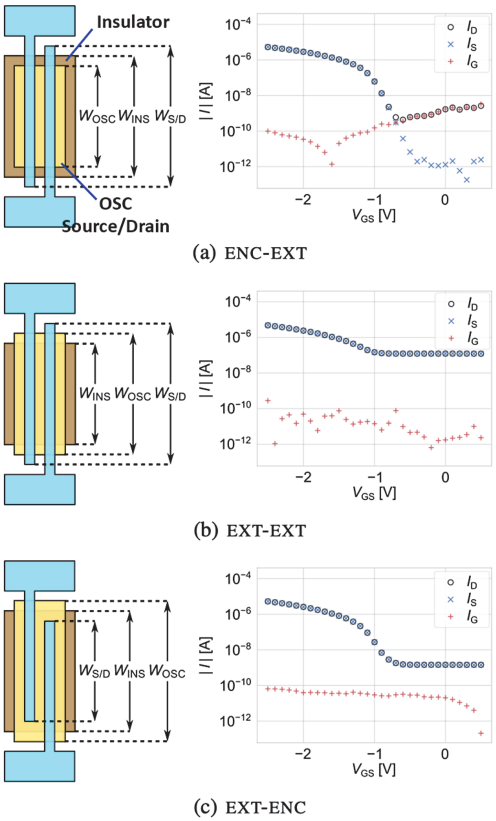


図 1：OTFT の異なるレイアウト形式

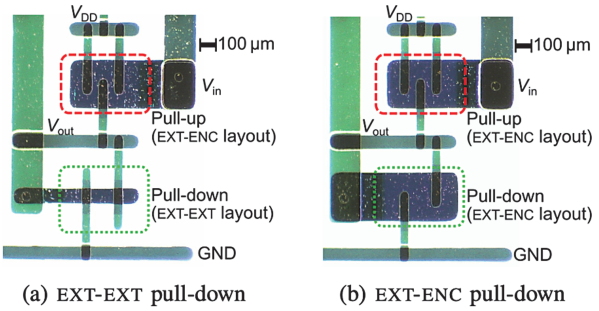


図 2：OTFT による擬似 CMOS ロジック回路

参考文献

[1] K. Oshima, K. Kuribara, and T. Sato, "Layout-dependent vertical and in-plane leakage current reduction of organic thin-film transistors by layer contact restriction," in Proc. IEEE ICMTS, pp.1-6, March 2022.

[2] K. Oshima, K. Kuribara, and T. Sato, "Layout design for DNTT-based organic TFTs considering fringe leakage current," IEEE Journal on Flexible Electronics, Vol.3, No.3, pp.100-107, January 2024.

集積システム工学講座　大規模集積回路分野　（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。

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、単独動作可能・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　製造技術を提案し、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。

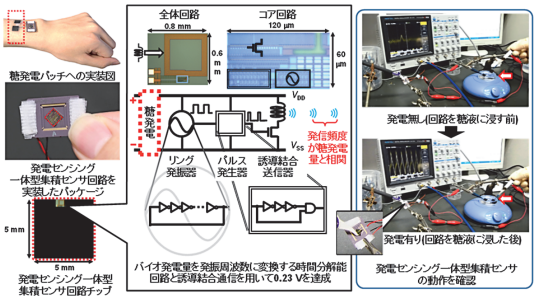


図 1：開発した世界初のバイオ発電素子（糖発電素子）と融合した電力自立バイオセンサ：発電量をそのままセンシング信号としても活用する「発電センシング一体型集積センサ技術」の有効性を実証、時間分解能回路と誘導結合通信の導入により 0.23V を達成

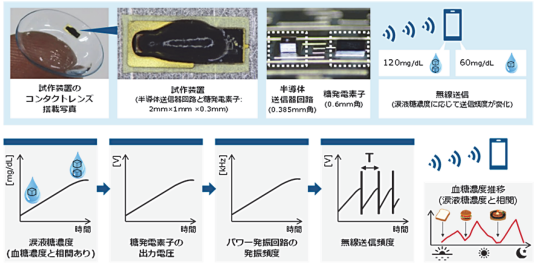


図 2：開発した発電センシング一体型集積センサ技術を用いた電力自立持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

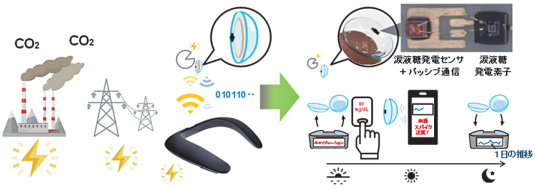


図 3：エネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズのコンセプト図

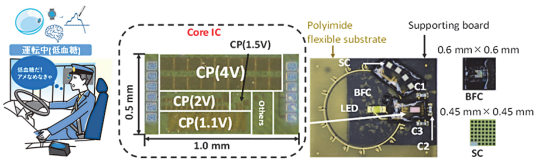


図 4：開発したエネルギー・データ地産地消方式による単独動作可能持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズ

システム情報論講座　論理生命学分野　（石井研究室 島崎グループ）
https://ishiilab.jp　https://www.neuralengine.org
「非平衡キネティック・イジングモデルのエントロピー生成」

論理生命学分野（石井研究室）の島崎グループはイジングモデルを用いた神経スパイクデータ解析やニューラネットワークの理論解析に取り組んでいる。磁性体のモデルであるイジングモデルは、要素間の複雑な相互作用を表現する物性物理学の古典的なモデルとして知られている。一方で、このモデルはニューラルネットワークの標準モデルとして生物や機械の学習を理解する上でも重要である。このモデルに関わる研究に 2021・2024 年のノーベル物理学賞が授与されたことは記憶に新しい。ここでは、非対称結合を持ち因果的に駆動されるリカレントニューラルネットワークのモデルである非平衡キネティック・イジングモデルを対象にした最近の研究を紹介する。

キネティック・イジングモデルは 2 値の神経素子を用いた離散時間非線形力学系である。個々の神経細胞の活動は神経細胞集団の前の状態と結合重みに基づき確率的に決定される。2 つの神経細胞ペアの双方向結合の重みが同じ（結合が対称である）場合は、その活動は平衡分布に至るが、結合の向きにより重みが異なる（非対称）の場合は不可逆性を有する非平衡過程となり、時間的方向性を持つパターンが生成される。このダイナミクスの不可逆性は系のエントロピー生成で定量化される。

神経細胞数が増加するにつれ、キネティック・イジングモデルの計算量は膨大になり、系の挙動を正確に知ることが難しくなる。計算量削減のための平均場近似法が多数提案されてきたが、それぞれ独自の仮説に基づいているため体系的な改良が難しかった。我々は平均場近似の操作を分布の多様体への射影とみなし、異なる仮説を表す多様体を用意することで、これまでの平均場近似を体系化した（図 1、参考文献[1]）。さらに、この理論に基づいて新たに開発した手法により、神経ダイナミクスのエントロピー生成の推定性能を向上させた。

結合が対称な平衡イジングモデルでは、結合の強さやばらつきにより秩序・無秩序相やスピングラス相など多様な状態を示す。一方、非対称結合では時間的方向性を持つ複雑なダイナミクスを示すが、ニューラルネットワークのような大規模な系のエントロピー生成の理論的な解析は行われてこなかった。そこで参考文献[2]では、結合が独立な正規分布に従うキネティック・イジングモデルのエントロピー生成を調査し、ネットワークが無限大となる極限での厳密解を導いた。その結果、神経活動の時間非対称性は秩序 - 無秩序相転移点でピークを示し、強い結合を持つ準決定論的無秩序相において顕著に上昇することを見出した（図 2）。

我々のグループでは、こうした理論研究をベースに、サル・マウス等の神経細胞集団活動の解析を行い、神経細胞集団による情報符号化を明らかにするための研究を行なっている。

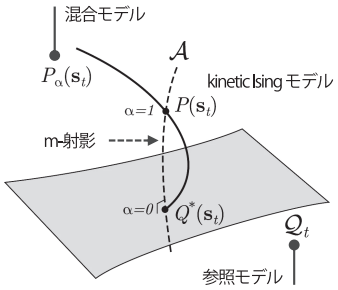


図 1　平均場近似の情報幾何に基づく定式化 Aguilera et al. Nature Commun 2021 図 1 より転載

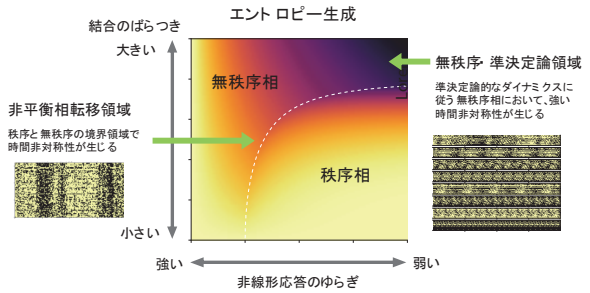


図 2　非対称結合を持つシェリントン - カークパトリックモデルのエントロピー生成 Aguilera et al. Nature Commun 2023 図 3 より改変

参考文献

[1] Aguilera, M., Moosavi, S. A., & Shimazaki, H. (2021). A unifying framework for mean-field theories of asymmetric kinetic Ising systems. ***Nature communications***, 12 (1), 1197.

[2] Aguilera, M., Igarashi, M., & Shimazaki, H. (2023). Nonequilibrium thermodynamics of the asymmetric Sherrington-Kirkpatrick model. ***Nature Communications***, 14 (1), 3685.

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（長﨑研）
https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index_j.html
「静電プローブによる周辺プラズマの揺動計測」

私たちの研究室では、エネルギー理工学研究所の保有するプラズマ実験装置「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しています。

磁場閉じ込め核融合プラズマは、磁力線長が十分に長い閉じ込め領域（コアプラズマ領域）と、数百メートル程度である周辺領域に分けることができます。周辺部のプラズマはコアプラズマの境界条件として閉じ込め特性に大きな影響があるほか、プラズマ対抗壁から発生する不純物がコアプラズマへ混入することを防ぐ役割などがあります。そのため、高温のプラズマを安定して保持するためには、周辺部におけるプラズマを計測して理解し、制御することが重要です。プラズマは磁力線に沿う輸送が支配的であるので、磁場構造によってある程度の周辺プラズマ制御が可能です。しかしながら、荷電粒子のドリフト現象や、プラズマの乱流現象・間欠的な輸送現象などにより、磁力線を横切る方向の輸送（垂直輸送）が生じます。磁場構造が垂直輸送に与える影響を調べ、理解することが将来の核融合炉の制御に必要であると考えられます。

本研究室では、ヘリオトロン J 装置における周辺プラズマを静電プローブで計測し、乱流や間欠的輸送の影響を調べています。静電プローブはプラズマ中に電極を挿入し、その位置の局所的な電子温度や電子密度、ポテンシャルを高い時間分解能で計測できます。これにより、乱流揺動や間欠的現象を評価することができます。ただし、電極をプラズマに挿入して計測する都合上、プラズマに対して擾乱を与えてしまいます。そのため、プラズマに与える擾乱が比較的小さい領域に限定して計測を行っています。本研究室で用いている多チャンネル静電プローブを図 1 に示します。電極は直径 1mm のタングステン製で、それらが図中縦方向に等間隔に並べられています。また電極を多段に並べており、揺動の伝搬を計測することも可能です。

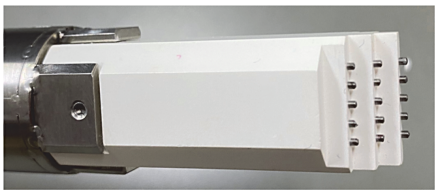


図 1　静電プローブ外観

一例として、磁気島と呼ばれる磁場構造における揺動の特性を静電プローブを用いて評価した研究 [1] を紹介します。磁気島ではトロイダル方向とポロイダル方向の磁場の強度比が有理数（共鳴有理面）となっており、磁気島内部では内側と外側の磁力線がつながるため垂直輸送の増大が想定されます。図 2 は磁気島がある場合と無い場合における、(a) 電子密度揺動、(b) ポロイダル電場揺動、およびそれらの積から評価された (c) 揺動駆動粒子束の分布を比較しています。横軸は閉じ込め領域からの距離を示しています。磁気島の両端がそれぞれグレーでハッチされています。磁気島が無い場合は、いずれも閉じ込め領域から離れるにつれて減少する傾向です。磁気島がある場合、密度揺動は磁気島の端で大きくなっていますが、電場揺動が磁気島の内部で大きくなっています。そして、磁気島内部と端部に揺動駆動粒子束のピークが観測されています。この結果は、周辺部の磁気島によって垂直輸送が変化したことを示しています。今後、詳細な空間分布を計測することで、磁気島による周辺プラズマ制御の足掛かりが得られることが期待されます。

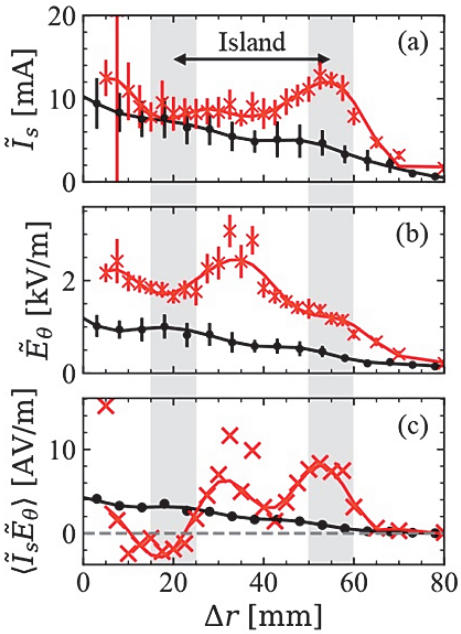


図 2　磁気島がある場合（赤線）と無い場合（黒線）における揺動と揺動駆動粒子束の分布

[1] A. Miyashita et al., PPCF **66**（2024）075008

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

「STARLINK 衛星群の軌道変化を利用した熱圏大気密度推定法の開発」

最近にはじめた新しい取り組みを紹介します。超高層大気は地球大気の最上部に位置する高度 100 ～ 1000km の範囲です。地球大気が太陽系空間につながる領域であり、超希薄だが地球と共に回転しており、衛星が飛び交っています。衛星は、軌道上で大気抵抗が作用し、特に高度 600km 以下では徐々に落ちていきます。図 1 に衛星打上げ数の年次変化を示します。長らく年間 100 機程度だったのですが、最近は約 3000 機まで激増しました。これは軌道上の衛星の混雑をもたらし、衛星とデブリの衝突回避が問題になっています。基礎データとして超高層大気密度が重要ですが、その計測は簡単ではありません。

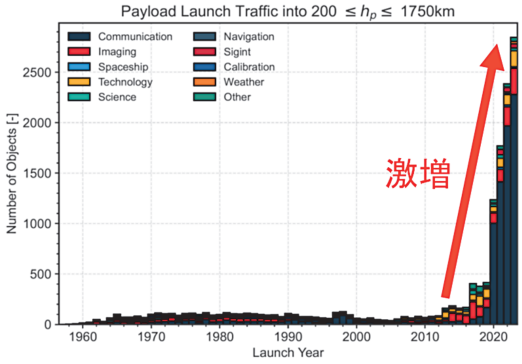


図 1　衛星打上げ数の年次推移（出典：ESA's Space Environmental Report（July 2024））

米国 Space X 社が、衛星インターネットサービスのため 6000 機以上の STARLINK 衛星を打上げています。我々は、多数の衛星群の運動を追うことで超高層大気の密度推定が効率化できるのではないかと考え、調査を始めました。衛星の軌道データは公開されており、「2 行軌道要素（TLE と呼ばれる）」が入手できます。TLE には平均運動、つまり衛星の 1 日間の周回数が含まれます。その時間微分値が、衛星軌道に沿って平均された大気密度に比例することが知られています（参考：E.N. Doornbos, doi:10.1007/978-3-642-25129-0, 2012）

図 2 に解析結果の一例を示します。2024 年 9 ～ 11 月の平均運動の時間微分（対数）の高度分布です。衛星軌道はほぼ真円、軌道傾斜角は約 53 度、衛星ごとの軌道データの更新頻度は 8 ～ 24 時間ごとです。ここでは 6000 機以上の衛星データを重ね書きしています。赤線は 10 月 1 日時点の大気密度の経験モデル値に定数を掛けたものです。もっとも多数を占めるのは、特定高度に高度維持されている衛星群で、図中では水平方向に延びた点列を形成しています。また、赤線にほぼ沿う、自由落下中の衛星データも多数あります。自由落下中の衛星データを選抜する手法を開発し、衛星運動の変化と大気密度の比例係数を定めることで、大気密度の推定に利用できそうです。準リアルタイムの超高層大気密度モニタシステムの開発を目標として、研究を進めていきます。

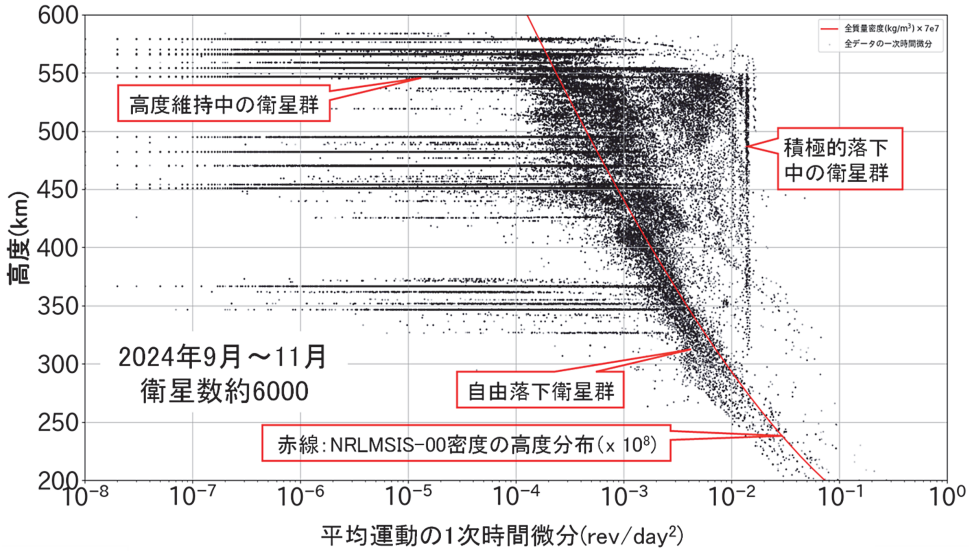


図 2　STARLINK 衛星群の大気抵抗による落下状況の解析例

生存圏研究所　生存圏開発創成研究系　宇宙圏電磁環境探査分野　（小嶋研究室）
https://space.rish.kyoto-u.ac.jp/kojima-lab/index.php
CubeSat 用 1U プラズマ波動観測器

人間が宇宙に投入する飛翔体は、これまでの大型・中型衛星に加えて、CubeSat と呼ばれる超小型の衛星が利用されるようになりつつあります。当初 CubeSat は大学が宇宙人材育成も含めた宇宙技術取得のための試験的な衛星の意味合いが強いものでしたが、バスと呼ばれる、どの衛星でも共通に装備されている姿勢系、電源系、データ処理系などの小型・高性能化にともなって、その利用範囲が拡大しつつあります。科学的な目的をもつ宇宙探査においても、世界的に CubeSat の利用を目指す動きが活発になってきました。CubeSat は一般に、10cm x 10cm x 10cm のユニットを 1 単位（1U と呼びます）として、それをそのミッションの目的に合わせた形で組み合わせて衛星というシステムをつくりあげます。科学的観測を目的とする CubeSat の場合、この 1U 内に必要となる観測装置を実現できる技術が必要です。これは非常にチャレンジングな技術課題です。私達の研究室でこれまで科学目的の衛星のために開発してきた「プラズマ波動観測器」は、小さくても、A5 サイズの電子回路基板複数枚とセンサーからなっていました。これでは到底 1U の中におさめることはできません。この CubeSat に限らず、宇宙ミッションにおける必要重量・電力リソースの低減は最重要開発項目です。私達の研究室では 10 年以上前よりプラズマ波動観測器の電子回路部を超小型にすべく、アナログ ASIC（特定用途向け集積回路）の開発に取り組んできました。センサーで電気信号に変えられた自然プラズマ波動を「差動アンプでとりだし、必要な帯域でフィルタリングした後、必要なレベルまでアンプ、そして、デジタル回路にわたす前のアンチエイリアシング」までを 5mm x 5mm のベアチップ内に実現した回路で行います。必要なのは、電磁界 6 成分の観測器です。そして、今回、その帯域の上限を、従来の 100kHz から 10MHz に伸ばしたチップとして開発しました。この帯域であれば、太陽系内のほとんどの場所に対するプラズマ波動の探査に利用できます。ゲインも 0dB から 40dB の間で変更することが可能です。図 1 は、2026 年に打ち上げ予定の衛星に対して開発したプラズマ波動観測装置の EM モデルです。中央に ASIC のパッケージがあります（RISH49）。ベアチップを内部に納めてパッケージ化しているので、少し大きくなっています。基板は 10cm 以内のサイズになっていて、1U の中に入る大きさです（センサープリアンプ（1 成分）、プラズマ波動観測用 ASIC、電源が搭載されています）。基板をみてもらえばわかりますが、まだ、かなり余裕があることがわかります。また、この ASIC チップにはプラズマ波動観測器だけでなく、プラズマの温度や密度を測定するためのラングミュアプローブに対する電子回路も含まれています。A5 サイズの基板で実現していた従来のものから極端な小型化がはかられたことがわかります。プラズマ波動観測器としては、更に同じサイズの基板 1 枚でデジタル部を構成します。図 2 は、同時に開発された電界センサーです。1m のエレメントを宇宙空間で 2 本伸展して、ダイポールセンサーとして使用します。図 1 の電子回路部は、この図 2 手前の空いている部分にインストールされ、電界センサー（1 成分）と電子回路が 1U に収まった初めての小型プラズマ波動観測器となりました。（本開発には、株式会社ファムサイエンス、株式会社ウェルリサーチ、東海バネ工業株式会社、シリコンソーシアム株式会社に協力いただきました。）

図 1：小型プラズマ波動観測器電子回路部。

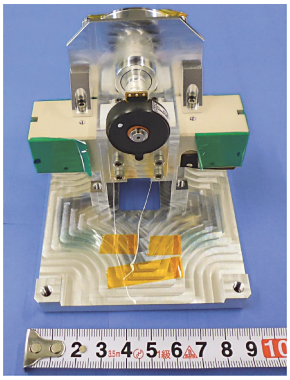


図 2：小型プラズマ波動観測器電界センサー（宇宙で 1m エレメント 2 本を伸展）。

生存圏研究所　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
「軌道角運動量モードを利用した大面積均一マイクロ波加熱の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、マイクロ波エネルギー応用の一環としてマイクロ波加熱に関する研究開発を行っている。今回は、軌道角運動量（orbital angular momentum: OAM）モードを利用した大面積均一マイクロ波加熱の研究 [1] について紹介する。

電磁波がもつ角運動量には、空間の位相分布の回転に起因する OAM が存在することが知られている。伝搬軸周りの位相の回転数はモード指数 l で表され、各モードの電磁波は図 1 に示すように螺旋状の等位相面をもって伝搬し、伝搬軸周りの位相は $2\pi l$ rad だけ回転する。図 1 で示した位相回転の特徴により、$l \neq 0$ のモードは伝搬軸上が位相特異点となり、電磁界強度が 0 となる。よって、伝搬軸に垂直な面でみた電力密度分布は図 2 のようなパタンとなり、$|l|>0$ ではビームパタンが円環状となる。

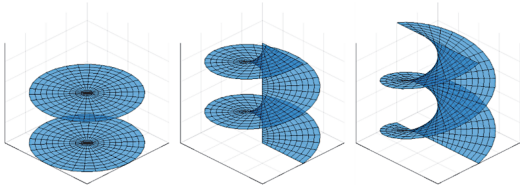


図 1　OAM モードの等位相面

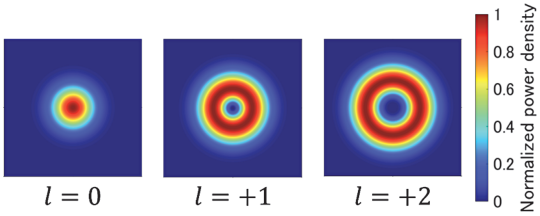


図 2　OAM モードの電力密度分布

本研究では、OAM モードがもつ円環状ビームの特徴を利用した均一マイクロ波加熱手法を提案する。図 3 に本手法の概要を示す。マイクロ波は複数の OAM モードを時間切り替えしながらアンテナから照射される。各モードのビームパタンは図 2 で示したように電力密度の大きくなる領域が異なるため、各 OAM モードを適切な照射時間比で切り替えることにより、アンテナ面に水平な所望の平面上において電力密度の時間平均を均一化できる。ただし、円環径が拡大するにつれて同じ電力を入力した時の最大電力密度は低下するため、平均電力密度を均一化するためには適切な照射時間比を設定する必要がある。

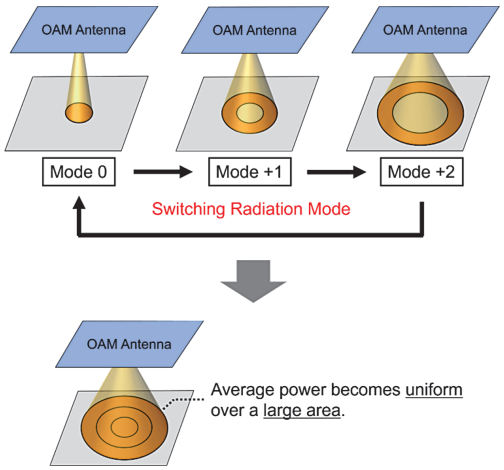


図 3　OAM モードを利用した大面積均一マイクロ波加熱の概要図

本研究では、複数の OAM モードを生成できるアンテナとしてよく用いられている均一円形アレー（uniform circular array: UCA）を採用し、周波数 2.45 GHz（波長 λ=0.122 m）で設計した右旋円偏波円形マイクロストリップアンテナを円環状に 8 素子配置した UCA による均一マイクロ波加熱の電磁界シミュレーション検討および実測評価を行った。モード指数 l=0,+1,+2 の 3 つの OAM モードの照射時間を適切に切り替えることにより、均一マイクロ波加熱が可能となる面積はシミュレーション結果では 0.3283 m^2、実測結果では 0.1085 m^2 となった。これらの結果は、OAM モードの利用によりシミュレーションでは直径 4.5λ、実測では直径 3.0λ に相当する円の範囲内を均一にマイクロ波加熱できることを裏付けている。金属壁で囲われた空間内での固定周波数による既存のマイクロ波加熱手法では、定在波の発生によりたかだか 0.25λ 程度の範囲しか均一加熱できないことを考えると、OAM モードの利用により極めて大面積な均一マイクロ波加熱が期待できる。

[1]　鈴木健斗、三谷友彦、篠原真毅、“マイクロ波加熱に向けた OAM モード切り替えによる電力密度均一化手法”，日本電磁波エネルギー応用学会論文誌，vol.7，pp.25-34，2023.

博士論文概要

[課程博士一覧]

Wang Yanran	Formation Control of Swarm in Two-dimensional Manifold: Analysis and Experiment 二次元多様体における群形成の制御：解析と実験	令和6年3月25日授与
高　山　　創	Digital Active Gate Drive System for Silicon Carbide Power MOSFETs シリコンカーバイドパワー MOSFET のためのデジタルアクティブゲート駆動システム	令和6年3月25日授与
長　嶺　英　朗	Study on error estimation of the Cauer ladder network method カウア回路法の誤差推定に関する研究	令和6年3月25日授与
飛　田　美　和	Theoretical Study on the Nonlinear Model Order Reduction Method and Its Application to Motor Analysis 非線形モデル縮約法の理論的研究とモータ解析への応用	令和6年3月25日授与
西　嶋　泰　樹	Study on nonlinear transport and optical phenomena under inversion symmetry breaking 反転対称性の破れた系における非線形輸送と光学現象に関する研究	令和6年3月25日授与
原　　征　大	High-Field Transport at Heavily-Doped SiC Schottky Contacts and Formation of Non-Alloyed Ohmic Contacts 高濃度ドープ SiC ショットキー接合における高電界輸送および非合金化オーミック接合の形成	令和6年3月25日授与
大　村　和　正	Studies on Data-Driven Discourse Relation Recognition toward Natural Language Understanding 自然言語理解に向けたデータ駆動の談話関係認識に関する研究	令和6年3月25日授与
児　玉　貴　志	Advancing Dialogue Systems through Corpus Construction Focusing on User Internal States and External Knowledge ユーザ内部状態と外部知識に着目したコーパス構築による対話システムの高度化	令和6年3月25日授与
Haiyue Song	Studies on Subword-based Low-Resource Neural Machine Translation: Segmentation, Encoding, and Decoding サブワードに基づく低資源ニューラル機械翻訳に関する研究：分割、符号化、及び復号化	令和6年3月25日授与
Zhuoyuan Mao	Breaking Language Barriers: Enhancing Multilingual Representation for Sentence Alignment and Translation 言語の壁を超える：文のアラインメントと翻訳のための多言語表現の改善	令和6年3月25日授与

山下浩平	Reflectance Maps for Non-Lambertian 3D Reconstruction 反射マップを用いた非ランバート面の３次元形状復元	令和6年3月25日授与
森　聖太	In-Band Full-Duplex Transmission for Next Generation Mobile Communication 次世代移動通信システムにおける帯域内全二重通信	令和6年3月25日授与
牧野仁宣	Wide-area broadband private wireless communication system 広域広帯域自営無線通信システム	令和6年3月25日授与
康　瑞	Fault-Resilient Resource Allocation in Network Function Virtualization ネットワーク仮想化における故障耐性のある資源割り当て	令和5年9月25日授与
朱　梦菲	Resource Allocation in Network Function Virtualization with Workload-Dependent Unavailability 負荷依存の不可用性を伴うネットワーク機能仮想化における資源割り当て	令和6年5月23日授与
竹田健太	Lightpath Provisioning in Elastic Optical Networks エラスティック光ネットワークにおける光パス設定	令和6年3月25日授与
大島國弘	Leakage-Current-Aware Layout Design of DNTT-Based OTFTs and Its Applications to Digital Circuits DNTT を用いる有機薄膜トランジスタのリーク電流考慮レイアウト設計とそのデジタル回路への応用	令和6年3月25日授与
竹内浩造	A study on heavy ion-induced single event effects for radiation-tolerant FPGA development 耐放射線性 FPGA に向けた重粒子誘起シングルイベント効果の研究	令和6年9月24日授与
程　全	Design and Reliability Analysis of System-on-Chips for Artificial Intelligence Applications at the Edge エッジ人工知能アプリケーション向けのシステムオンチップの設計と信頼性解析	令和6年9月24日授与
片山梨沙	Computational Modelling and Neural Mechanisms of Hierarchical Inference and Decision-making in Partially-observable Environments 部分観測環境における階層的推論・意思決定過程のモデル化とその神経基盤に関する研究	令和6年9月24日授与
岩田晃拓	ヘリオトロンＪにおける近赤外領域の分光診断に関する研究	令和6年3月25日授与
Kim Heejun	Exploring the Optical Properties of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides Moiré Superlattice 二次元遷移金属ダイカルコゲナイドのモアレ超格子の光学特性の探索	令和6年5月23日授与

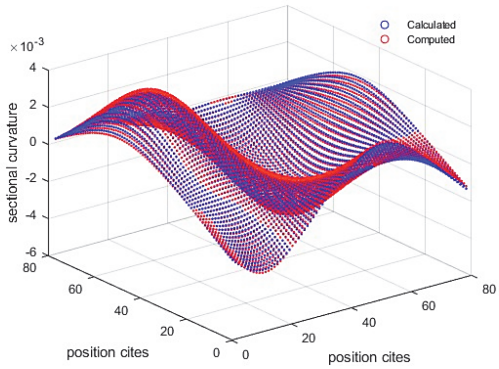
滝　朋恵	Study on the plasma waves observed by single spacecraft interferometry in the terrestrial inner magnetosphere 地球内部磁気圏において単一衛星による干渉法で観測されたプラズマ波動に関する研究	令和6年9月24日授与
張　天	Study on Impacts of Geomagnetic Disturbances on Power Systems 地磁気擾乱による電力系統への影響に関する研究	令和6年9月24日授与
河合勝己	Novel Rectenna Design Methods for Wireless Power Transfer Systems 無線電力伝送システムに向けた新しいレクテナ設計手法に関する研究	令和6年9月24日授与
中本成洋	Novel Architectures and an Efficient Calibration Technique for Low-cost and High-performance Phased Array Antennas フェーズドアレーアンテナの低コスト化と高性能化に向けた新技術の開発	令和6年9月24日授与

Wang Yanran （引原隆士　教授）
「Formation Control of Swarm in Two-dimensional Manifold: Analysis and Experiment」
（二次元多様体における群形成の制御：解析と実験）
令和 6 年 3 月 25 日授与

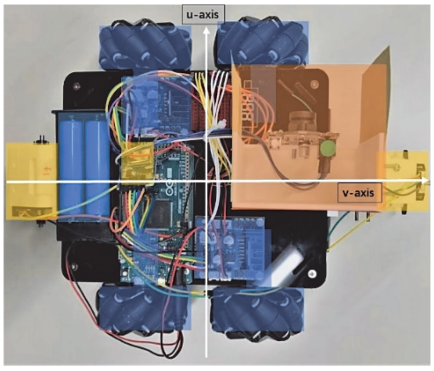
My research delves into the intricate interplay between Wireless Sensor Networks（WSNs）and Swarm Intelligence（SI）, investigating their confluence.

WSNs have gained considerable attention due to their ability to provide pervasive situational awareness, finding applications across diverse domains such as structural health monitoring and habitat surveillance, among others. Nevertheless, WSNs frequently encounter energy constraints, particularly in challenging environments. In response, the concept of clustering has emerged as a pivotal technique for devising energy-efficient algorithms.

While existing WSN clustering algorithms have predominantly focused on protocol enhancements to accommodate scalability, fault tolerance, and data aggregation, this thesis introduces a fresh perspective. Drawing inspiration from the realm of Swarm Intelligence（SI）, where simple agents collectively manifest intricate behaviors, it advocates for a paradigm shift. Specifically, my research proposes the analysis of evolving swarm formations as a mechanism to extract pertinent environmental insights, thereby mitigating energy-intensive data transmission and obviating the dependence on a central Base Station（BS）. The central notion revolves around conceptualizing the external environment as an（n − 1）-dimensional Riemannian manifold, defined by the solutions to the equation $F(x_1,\ldots,x_n)=0$, where F is a C ∞ function. By observing the change in swarm formation within the manifold, using the geodesic deviation equation, we can estimate the curvature of the manifold, providing valuable information about the external potential. The figure on the right exemplifies the algorithm's efficacy in estimating curvature on an unknown manifold through swarm formations. Red denotes the algorithm's estimated curvature, while blue represents the actual curvature.



Furthermore, my research addresses swarm formation control within the Riemannian manifold M. This formation control problem is reframed as a trajectory estimation issue, encapsulated within a leader-follower framework. The research leverages Koopman operator theory and Extended Dynamic Mode Decomposition（EDMD）techniques to predict follower trajectories and offer guidance to the followers, leading to enhanced formation control efficiency.



Additionally, my research validates theoretical formulations through practical experiments involving mobile robots. Figure on the left show robots used for experiment. By bridging theoretical constructs with tangible empirical results, this research contributes to the advancement of formation control strategies.

高　山　　創　（引原隆士　教授）
「Digital Active Gate Drive System for Silicon Carbide Power MOSFETs」
（シリコンカーバイドパワー MOSFET のためのデジタルアクティブゲート駆動システム）
令和 6 年 3 月 25 日授与

電力を所望の形へと変換する機能を担う電力変換回路において、その性能を左右するのが、大きな電圧・電流のオン・オフを切り替えるパワー半導体素子である。近年、次世代半導体素子として期待されてきた炭化ケイ素（SiC）パワー素子の研究開発および実用化が進展し、その優れた電気的・熱的特性を活かした電力変換回路の高性能化が期待されている。一方で、その高速なスイッチング動作が誘起するノイズやサージ等が性能向上の妨げとなっている。それらを抑制しつつ、SiC 素子の優れた特性を使いこなす回路技術の開発が求められている。

そこで着目されているのが、アクティブゲート駆動（AGD）技術である。AGD は、パワー素子を駆動する IC であるゲートドライバの出力を数ナノ秒単位で調整することで、電流や電圧の変化速度やタイミング等を制御し、所望の特性を得る技術である。その有効性は多くの研究において実証されている一方で、回路設計の複雑さ故に、高度なノウハウや多大な設計労力なしには最適な動作を得ることが難しく、技術の汎用性に課題を残していた。

本研究では、ゲート駆動回路の設計プロセスを、設計者によるアナログな回路調整からソフトウェアによるデジタル最適化へと変換した、デジタルアクティブゲート駆動（DAGD）システムを開発した。ゲート駆動技術をデジタル化することで、SiC 素子の実回路応用における諸課題への対応を容易に実現することを目指した。

本研究ではまず、DAGD システムのハードウェアとなる回路構成を検証した。信号領域で用いられるデジタル・アナログ変換技術に着想を得て、その原理をゲート駆動回路へと応用した DAGD を開発した（図 1、2）。同回路は、従来のような 1/0 の 2 状態での制御ではなく、ゲート電圧の波形を時系列データとして扱うことで、AGD 動作の調整を組み合わせ最適化問題として解くことを可能にした。同回路によって、SiC MOSFET のスイッチングの過渡状態を操作し、サージ電圧や損失といった観点でスイッチング特性を改善できることを示した。

次に、DAGD の動作を最適化するソフトウェアとして、メタヒューリスティクスの一つである遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた最適化システムを開発した。SiC パワー素子の駆動波形を遺伝子表現し、所望の目的関数を最小化するような各変数の組み合わせを探索することで、様々な条件下で最適な駆動波形が得られることを確認した（図 3）。汎用なハードウェアを使用し、動作の変更をすべてソフトウェアが担当することで、デバイス特性などを考慮したゲート駆動回路の個別設計というプロセスを排除し、個人のノウハウや設計労力に頼らずに SiC 素子の特性を引き出すことを可能にした。

さらに、素子のばらつきや劣化など、事前の予測が困難な不確かさを有する要因による回路動作不良に対して、DAGD システムの有効性を検証した。素子の特性ばらつきに由来する素子間での電気ストレスの不均衡や、長期使用時の素子劣化による特性変化に対して、素子毎のスイッチング動作を調整することで、電力変換回路としての性能を維持・向上できることを実証した。

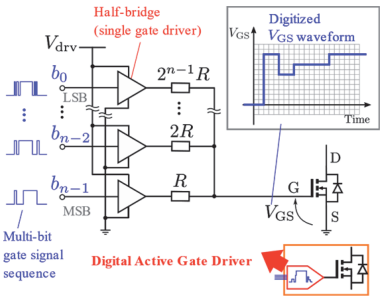


図 1　DAGD の回路構成

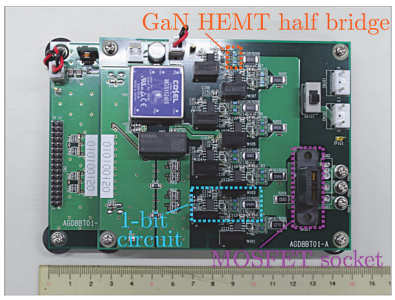


図 2　開発した DAGD の写真

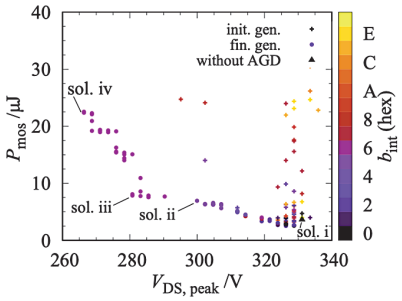


図 3　GA による SiC MOSFET のスイッチング動作の最適化

長　嶺　英　朗　（松尾哲司　教授）

「Study on error estimation of the Cauer ladder network method」（カウア回路法の誤差推定に関する研究）

令和 6 年 3 月 25 日授与

電磁界シミュレーションは、近年の電気機器開発における重要な役割を担っている。多彩な運転条件に対応した電気自動車用モータなど、高度な設計が求められる領域において、有限要素解析による電磁界計算は、設計案を高速に検証するために必須のツールとなっている。しかし、多彩な運転条件の評価には有限要素解析を各条件について実行する必要があり、解析時間が膨大となるため、計算の高速化が望まれる。

計算に時間のかかる問題を直接解く代わりに、より計算しやすい代理の問題に置き換えて解く近似手法が多数研究されており、これらはモデル縮約法と呼ばれる。本研究は、交流解析向けのモデル縮約法のひとつである Cauer ladder network（CLN）法を主題とする。CLN 法は、一般形状領域における電磁界の方程式を、はしご形の等価回路（図 1）の回路方程式に置き換えて解くものである。はしご回路の初段は直流成分に対応し、交流の影響は後ろの段に現れる。事前計算によって一度等価回路を構成すれば、各運転条件での計算や制御回路との連成解析、時間発展計算等は回路シミュレーションで置き換えることができ、計算時間の削減につながる。

CLN 法では、はしご回路の段数が精度に影響を及ぼす。CLN 法の段数と計算精度の関係については、これまで数理的・数値実験的アプローチから検討が行われてきたが、明らかでない点も依然として多く残されていた。等価回路の事前計算には、段数と同じだけの有限要素解析が必要になるため、これは計算コストと計算精度の関係とも言い換えられる。所望の精度で解析を行うには、近似特性は重要な問題である。

本研究では、CLN 法の近似特性を明らかにし、低コスト・高精度を両立した電磁界計算を実現することを目的として、数理的アプローチから CLN 法の誤差に関する検討を行った。得られた成果は次の通りである。

① 線形作用素の観点から CLN 法の再定式化を行った。CLN 法では有限要素解析を繰り返し実行することで等価回路を生成するが、これは積分作用素を繰り返しかける操作とみなせる。この積分作用素の固有スペクトルに着目することで、基底関数の生成が直交多項式の生成と対応することを見出した。また、この定式化に基づいて、直交多項式の計算によって近似解の誤差評価を行う手法を開発した。

② 連分数の一般論における誤差評価法を CLN 法に応用した誤差評価手法を提案した。はしご回路のインピーダンスは連分数によって与えられる。連分数から抽出した複素関数の値域に対して平面幾何的考察を行うことで、連分数の真値の存在範囲を容易に計算することができる。類似する手法として、近似インピーダンス同士の差によって CLN 法の精度を推定する手法が以前より用いられていたが、本研究はこれに理論的根拠を与えるものである。

③ マルチポート CLN 法の誤差に関する回路理論的検討を行った。通常の（シングルポート）CLN 法は、単一入力単一出力系を（スカラー値）連分数で近似する。これを拡張したマルチポート CLN 法は、三相機器などの多入力多出力系を行列値連分数によって近似するものである。マルチポート回路におけるテブナン・ノートンの定理を用いることで、行列値連分数に関する新しい誤差公式を得た。

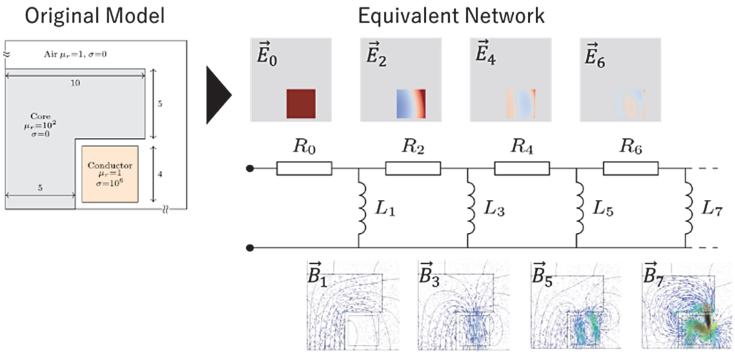


図 1.　Cauer ladder network 法による等価回路の生成

以上のように、本研究では、CLN 法に関するこれまでの知見を数理的アプローチからより深めるとともに、近似精度の推定手法の開発を行った。

飛　田　美　和　（松尾哲司　教授）

「Theoretical Study on the Nonlinear Model Order Reduction Method and Its Application to Motor Analysis」
（非線形モデル縮約法の理論的研究とモータ解析への応用）

令和 6 年 3 月 25 日授与

自動車の電動化や産業の自動化を進めていくにあたり、主動力源としてのモータへの期待は大きい。同時に、資源の偏在の観点から、誘導機（IM）や可変リラクタンス（VR）型ステッピングモータなど、レアアースを必要としないモータの設計とその制御技術の発展が、一層求められている。渦電流界解析を援用した制御システム設計の実現が強く望まれるが、既存の解析手法では計算時間の面で困難であった。計算精度を保ったまま、計算時間を削減する手法として、モデル縮約法（MOR）が精力的に研究されてきた。また、モータ特性を精度よく解析するためには、鉄心材料の非線形磁気特性を考慮することが必須であり、これを取り込んだ非線形 MOR 法の検討が進められている。

しかし、非線形性によりモータ挙動が多様化するため、想定される全運転状態を表現できる縮約モデルを生成するのは困難であった。特に、インバータにより生成された高周波成分を含む入力や、非一様なモータ構造に起因する空間調波成分を考慮した上で、渦電流界を幅広い運転条件（入力周波数および振幅、IM の滑り、VR ステッピングモータの負荷角）で精度よく解析できる非線形 MOR 法は、今まで実現が困難であった。

そこで本論文では、非線形 MOR 法を確立し、IM･VR ステッピングモータの渦電流界解析に適用した。特に、2017 年に開発された比較的新しい MOR 法であるカウアーラダー回路（CLN）法を非線形化するための理論検討を行った。また、提案手法を IM および VR ステッピングモータの解析に適用し、幅広い運転条件（滑り、電源の周波数と振幅、同期・非同期など）で FEM の結果を良く再現することを確認した。また、計算速度は、IM 解析と VR ステッピングモータ解析でそれぞれ 4.1 倍、および 19.5 倍となった。時間ステップ数が大きいほど時間削減効果が高く、特にステップ数が膨大となる制御連成解析で威力を発揮することが期待される。

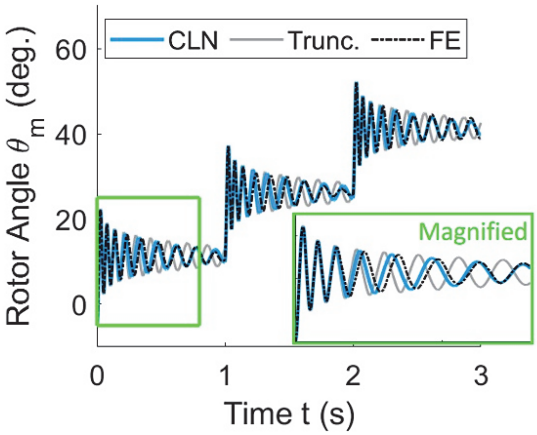


図 1　VR ステッピングモータにステップ入力を与えたときの回転子角度の時間変化。提案手法（CLN）により、有限要素法（FE）とほぼ同じ結果が得られたことが分かる。計算時間は有限要素法と比較し、約 20 分の 1 となった。

提案手法は、渦電流が大きな影響を与える場合でも、IM・VR ステッピングモータの最適制御を探索するためのビヘイビアモデルを構成する有力な手段である。したがって、資源の有限性に束縛されない、多様なニーズに合ったモータシステム開発に寄与することが期待される。

西　嶋　泰　樹　（白石誠司　教授）
「Study on nonlinear transport and optical phenomena under inversion symmetry breaking」
（反転対称性の破れた系における非線形輸送と光学現象に関する研究）
令和６年３月25日授与

反転対称性の破れは、長年に渡り固体物理における重要なトピックである。空間反転対称性の破れに起因する現象として、非線形現象があげられる。対称性の破れにより２次の非線形輸送が許容され、非相反伝導、非線形ホール効果、光電流の生成などが生じる。これらの現象は、対称性の破れに基づく整流効果であり、発電機構やメモリ機構として新規デバイスの創生が期待できる。これまでの非線形現象についての古典的な解釈は、近年では量子力学的な理解へと拡張され、電子状態の幾何学的性質やトポロジーなどの量子力学的性質との関連が徐々に明らかにされてきた。それに伴い、非線形現象そのものの理解だけでなく、量子力学的性質を探索する指針としての非線形現象の有用性が着目されている。

本研究では電子のスピンと電荷の相互変換において重要な材料群である、トポロジカル結晶絶縁体やポストグラフェン材料などの新規材料と従来材料である単体非磁性金属を対象として、非線形輸送現象を介した材料探索及びスピンと電荷の相互変換の観測を行った。さらに、反転対称性の破れやスピン蓄積の向きの制御による非線形現象の操作についても実証した。以下にその成果を示す。

1. トポロジカル結晶絶縁体におけるベリー曲率双極子に由来する非線形ホール効果とその制御に関する実験を行い、トポロジカル結晶絶縁体である $Pb_{1-x}Sn_xTe$ の非線形ホール効果の室温での観測に成功した。対照実験材料として同じ結晶構造を持つ材料でトポロジカルな性質を持たない PbTe でも同様の実験を行い、トポロジカルな性質と実験結果の関連について議論した。さらに強誘電性に基づく分極を制御することによるベリー曲率双極子と非線形ホール効果のスイッチングについてデモンストレーションを示した。実験結果に基づきベリー曲率双極子の大きさも計算した結果、低温では 130 nm 程度と、既存の他材料と比べても比較的大きな値を持つことが判明した。$Pb_{1-x}Sn_xTe$ のトポロジカルな電子状態を非線形輸送現象を介して明らかにし、その室温での制御を実現するに至った。
2. 対称性の破れた数原子層 Ge における円偏光ガルバノ効果の観測を行った。単原子層 Ge（ゲルマネン）はバックルしたハニカム構造を有する新規２次元材料であり、２次元トポロジカル絶縁体である。円偏光ガルバノ効果は、非線形輸送現象である光電流生成の一種であるが、２次元系ではラシュバ効果によるスピンと電荷の変換現象としても理解でき、２次元系のスピン物性を探索する上で有効な手段である。光の照射角度を変化させた実験結果を比較し、ラシュバ効果と実験結果の対称性が一致していることを示した。また Ge 層の膜厚を変化させた対称実験から、ゲルマネン２層分に相当する膜厚において最も大きな円偏光由来の光電流が観測され、対称性の破れたゲルマネンにおける大きなラシュバ効果の存在を示唆する結果を得た。
3. 非磁性単体金属におけるスピン蓄積に由来する光電流を観測した。対称性の破れた系における直線偏光に誘起される光電流、linear injection current により、スピンホール効果由来のスピン蓄積やエッジにおける対称性の破れの光学的な検出する手法を提案した。スピン蓄積やエッジ対称性の破れは、時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れた系で見られる linear injection current の観測において非常に重要な概念となる。まず、比較的大きなスピンホール効果を有する基本的な単体金属である Pt において、光電流は Pt チャネルのエッジでのみ観測され、直線偏光と Pt チャネルエッジの相対的な角度にその符号が依存することをした。次にスピンホール効果の符号が異なる W や面直方向に有限なスピン偏極を有する強磁性体膜での結果を比較し、光電流とスピン蓄積との関連性を明らかにした。さらに、スピンホール効果が小さい軽金属である Cu での実験結果を示し、スピン蓄積したチャネルエッジにおける linear injection current が軽金属においてもスピンホール効果由来の現象を観測する手法として有用である可能性を示した。

原　　征　大　（木本恒暢　教授）

「High-Field Transport at Heavily-Doped SiC Schottky Contacts and Formation of Non-Alloyed Ohmic Contacts」
（高濃度ドープ SiC ショットキー接合における高電界輸送および非合金化オーミック接合の形成）

令和 6 年 3 月 25 日授与

炭化珪素（SiC）半導体は、現行のシリコン（Si）を用いたパワーデバイスと比較して、電力変換時の導通損失を 1/500 程度に低減可能な新規半導体材料として注目を集めている。SiC パワーデバイスは既に量産化され、実システムにおいて顕著な省エネ効果を発揮している一方で、デバイス作製プロセスが十分に成熟しておらず、SiC デバイスのさらなる高性能化と作製コスト低減を妨げる要因となっている。SiC オーミック接合の低抵抗化および形成プロセスの簡略化は、そのような重要課題の一つである。

オーミック接合とは、半導体デバイスを外部回路に接続する役割を担う金属 / 半導体接合であり、十分に低い接触抵抗率（$\rho_c < 10^{-6}\,\Omega\,\mathrm{cm}^2$）が要求される。しかし、SiC はバンドギャップが広く、典型的な電極金属を堆積したのみでは界面に高いエネルギー障壁が形成されるため、低い ρ_c を得るのが本質的に困難である。そこで、高濃度ドープ SiC（ドーピング密度 : $N_d > 10^{19}$ cm^{-3}）上に電極堆積後、高温熱処理（~1000℃）を施すプロセスが業界標準となっている。一方、オーミック接合に関する先行研究の多くは、高温熱処理を前提とした現象論的なプロセス開発に留まっているため、高温熱処理によりオーミック接合が形成されるメカニズムは依然として理解されておらず、低抵抗化に向けた定量的な設計指針は皆無である。上記の問題を解決するには、高温熱処理を施さずに形成した金属 / 高濃度ドープ SiC 非合金化界面における電気伝導機構を解明することが第一であり、その学術的理解に基づいて設計指針を提示することが不可欠である。

本研究ではまず、高濃度ドープ SiC エピタキシャル成長層（エピ層）上に電極を形成し、その電流 – 電圧（I–V）特性の測定および解析を行った。高 N_d による非常に薄い障壁（~10 nm）と高電界（> MV/cm）に着目し、一般的な熱電子放出（TE）モデルではなく量子力学的トンネルが支配的となると考え、直接トンネル（DT）電流の数値計算プログラムを実装した。本数値計算により、I–V 特性の実験値を広範囲のドーピング密度・印加電圧に対して精度良く再現することに成功し、金属 / 高濃度ドープ SiC エピ層界面の電気伝導が DT 電流に従うことを定量的に明らかにした。続いて、実デバイスのオーミック接合の多くが高濃度リン（P）イオン注入層上に形成されることを念頭に置き、P 注入 SiC 上電極の電気伝導機構を詳細に調べた。その結果、イオン注入層を用いた場合、ほぼ同濃度のエピ層を用いた場合と比較して、電流が数桁大きいことがわかった。界面障壁高さの詳細な解析を通じて、イオン注入層とエピ層で障壁の厚さがほぼ同一であることを確かめ、イオン注入 SiC 上電極での電流増大が、イオン注入誘起欠陥準位を介したトラップアシストトンネル（TAT）により説明できることを提案した。最後に、高濃度 P イオン注入 SiC 上に非合金化オーミック接合を形成し、その ρ_c を実験および DT 電流の数値計算により詳細に調べた。その結果、N_d が 10^{19} cm^{-3} 台中盤以下のとき、ρ_c の実験値が計算値と比較して数桁低いことを明らかにし、これが TAT の寄与により定性的に説明できると提案した。一方、$N_d > 10^{20}$ cm^{-3} という超高濃度領域では、ρ_c の実験値と計算値は非常によく一致し、DT 電流が支配的であることが明らかになった。特に、2×10^{20} cm^{-3} という高濃度注入により、非加熱形成した Mg・Ti 電極において、$1\text{–}2 \times 10^{-7}\ \Omega\mathrm{cm}^2$ という極めて低い ρ_c を達成した。N_d の変化に伴う DT および TAT の寄与の変化を考慮した ρ_c 予測モデルを提案し、本モデルに基づいて、オーミック接合低抵抗化のための、障壁高さおよびドーピング密度に関する定量的な設計指針を提示した。

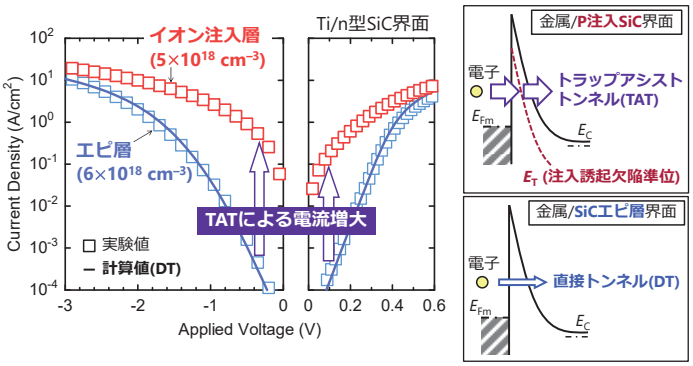


図 1：金属 / 高濃度ドープ SiC 界面における電流 – 電圧特性（実験、計算）とトンネル電流の概念図。

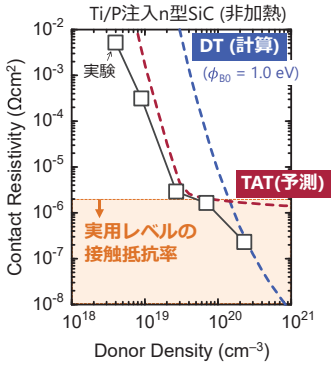


図 2：SiC 上非合金化オーミック接合における接触抵抗率のドーピング密度依存性。

大　村　和　正　（黒橋禎夫　特定教授）

「Studies on Data-Driven Discourse Relation Recognition toward Natural Language Understanding」
（自然言語理解に向けたデータ駆動の談話関係認識に関する研究）

令和６年３月25日授与

自然言語処理における究極の目標として、人間と同等に自然言語を理解する計算機の実現がある。テキストは前後の文脈を考慮しつつ記述されるため、その意味を理解するためには、各言語単位（節や文など）の意味を理解するだけでなく、それらの間の繋がりも理解することが欠かせない。そのようなテキストスパン間の意味的な関係を談話関係と呼ぶ。談話関係は文章全体の意味を理解する上で重要なテキストの特性であり、幅広い応用可能性を持つことから、談話関係に焦点を当てた研究が長年取り組まれてきた。

しかし、談話関係の自動認識は言語を超えた実世界の知識を要することから積年の困難な問題である。近年、深層学習の目覚ましい発展により計算機の言語能力は大きく向上しているものの、談話関係の推論能力は依然として改善の余地があることが示されている。また、談話関係に焦点を当てた既往研究の問題点として、英語を主な対象に研究が進められてきたことが挙げられる。英語への偏重は、特に英語と言語類型論的に遠い日本語などの言語固有の現象が考慮されづらく、言語間での格差につながる可能性がある。このため、英語以外での検証を行うことも重要である。

このような背景から本研究では、（主に日本語の）テキスト中の談話関係を計算機によって推論する能力に焦点を当て、この改善に向けたデータ構築手法の開発に取り組んだ。また、関連する自然言語理解タスク及び教育分野への応用を通して談話関係の有用性を実証した。

具体的には、まず、主要な談話関係の一つであるContingency（蓋然的関係）に焦点を当て、基本的な蓋然的関係を問う多肢選択式問題（常識推論問題）の半自動的な生成手法を提案した。また、この提案手法を応用して常識推論問題を模した疑似問題を大規模に自動生成し、このデータ拡張による常識推論能力及び関連する自然言語理解タスクへの効果を検証した。次に、研究の焦点を蓋然的関係から談話関係全般に拡張し、談話関係認識の改善に向けた大規模言語モデルを用いた合成データの生成手法を提案した。最後に、「小学生は作文に苦手意識を持つ傾向がある」という日本語教育における積年の問題に着目し、この現状を改善するために、研究の過程で構築したデータを応用した小学生を対象とする作文学習アプリを設計・開発した。

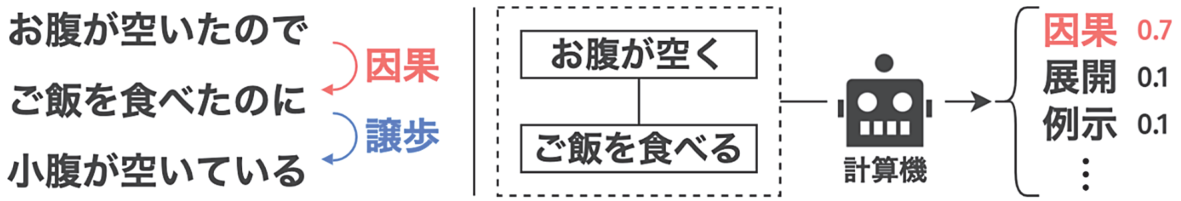


図１：テキスト中の談話関係（左図）と談話関係認識（右図）の例

児　玉　貴　志　（黒橋禎夫　特定教授）
「Advancing Dialogue Systems through Corpus Construction Focusing on User Internal States and External Knowledge」
（ユーザ内部状態と外部知識に着目したコーパス構築による対話システムの高度化）
令和６年３月25日授与

対話システムは人間と自然言語を用いてコミュニケーションを取るシステムである。その実用性の高さから自然言語処理の研究分野でも関心が高い。近年ではニューラルネットワークを用いてエンドツーエンドの対話システムを構築する手法が主流となっている。具体的には、対話文脈を入力するとその対話文脈に続く応答を出力するようにニューラルネットワークを学習させる。この手法により、対話システムは柔軟で人間に近いレベルの応答が可能になりつつあるがまだ課題は残されている。

本論文では主に２つの課題に取り組む。１つ目はユーザ内部状態の理解である。システムの対話相手であるユーザがどういったことに知識があり、興味があるかを理解することでより優れた対話理解が得られる。先行研究ではこのユーザ内部状態を対話レベルで捉えることが多く、より詳細な追跡が必要であった。２つ目は外部知識の活用である。対話システムの外部に存在する情報源から情報を獲得することで、具体的かつ詳細な情報を提供できる。先行研究は外部知識の活用に注力するあまり、その元となる対話が実際の人間の対話よりも魅力に欠けるという課題があった。本論文ではこれら２つの課題に対して、コーパス構築に基づいた手法で取り組む。具体的には小規模かつ高品質な対話データを収集し、そのデータを用いて対話システムを改善する。

まず知識、興味、対話意欲の３つのユーザ内部状態を発話レベルで追跡する対話データセットを構築し、これらのユーザ内部状態をもとに、ルールベースで対話を管理する手法を提案した。次に、発話と外部知識が紐づいた対話データセットを構築し、そのデータセットを用いて、外部知識に基づいた対話応答生成手法を提案した。くわえて、その外部知識に基づいた対話応答の魅力度についても分析を行い、外部知識だけでなく、話者が元々持つ経験や知識が応答の魅力度において重要であることを明らかにした。最後に、ユーザ内部状態を発話より細かいエンティティ（名詞など）レベルで追跡する対話データセットを構築した。対話の話題に元々造詣が深い人を対話参加者とすることでより魅力的な対話収集を可能とした。さらに構築したデータセットにもとに、ユーザ内部状態と外部知識と統合的に活用する対話応答生成手法を提案した。

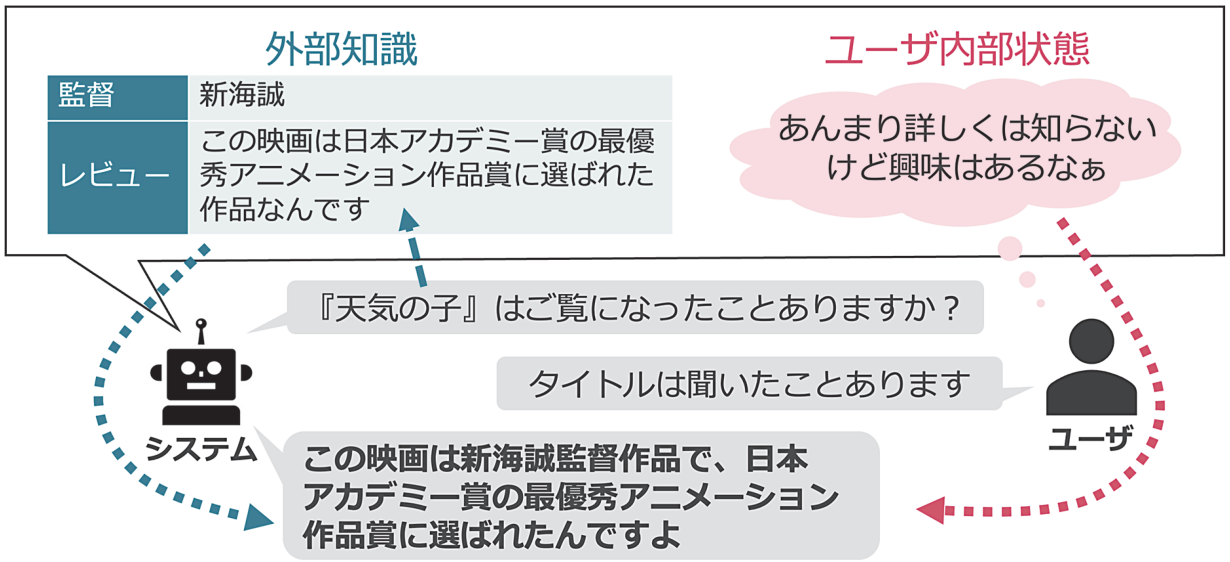


図１　ユーザ内部状態と外部知識を考慮した対話システムの例

Haiyue Song　（黒橋禎夫　特定教授）

「Studies on Subword-based Low-Resource Neural Machine Translation: Segmentation, Encoding, and Decoding」
（サブワードに基づく低資源ニューラル機械翻訳に関する研究：分割、符号化、及び復号化）

令和 6 年 3 月 25 日授与

In a world rich with diverse ideas and cultures, humans are isolated into islands of distinct languages. Machine translation（MT）serves as a bridge, facilitating information access and cross-lingual communication. While neural machine translation（NMT）systems achieve near-human performance in high-resource languages, it is important to note that the majority of 7,100+ languages in the world are low-resource and have not benefitted significantly from the advancements in machine translation, leading to a substantial disparity among languages.

This thesis aims to improve the existing subword-based NMT systems to enhance the translation quality of low-resource language pairs. It begins with historical background of machine translation from rule-based systems to large language models. It then introduces the basics of subword-based NMT, including the motivation for using subwords, and the subword-based NMT model architecture.

Three challenges related to using subwords explored include 1）suboptimal subword segmentation, 2）ignoring multiple perspectives of one word during encoding, and 3）inaccurate word-probability estimation during decoding. This thesis proposed novel solutions to them: 1）linguistically motivated efficient neural subword segmenter, 2）exploiting diverse segmentations from multiple subword segmenters, and 3）merging the probabilities of segmentations that form the same word during decoding.

This thesis improves the performance of MT systems especially in low-resource scenarios by addressing three challenges related to subwords. The final chapter summarizes the thesis and outlines the possible directions for future work.

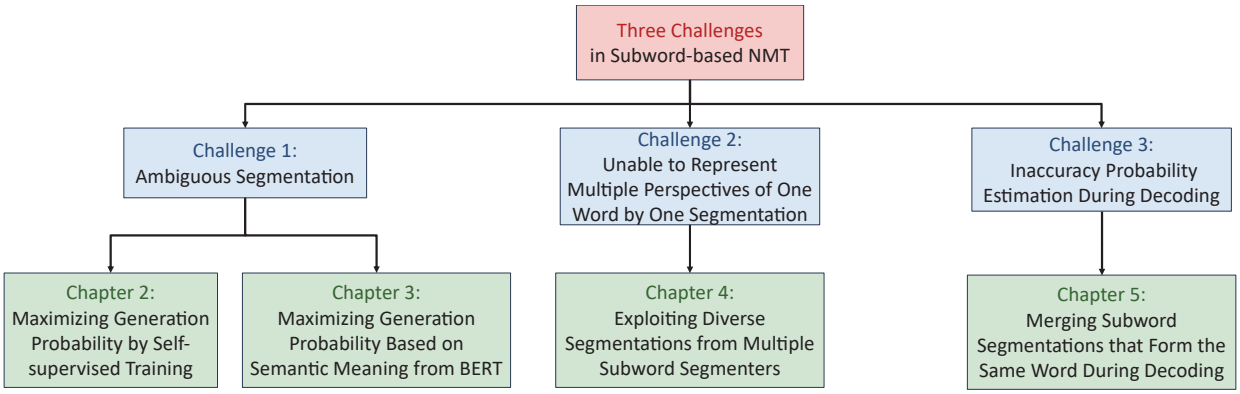


Figure 1: An overview of the three challenges and the proposed solutions included in this thesis.

Zhuoyuan Mao （黒橋禎夫　特定教授）
「Breaking Language Barriers: Enhancing Multilingual Representation for Sentence Alignment and Translation」
（言語の壁を超える：文のアラインメントと翻訳のための多言語表現の改善）
令和 6 年 3 月 25 日授与

This thesis embarks on a comprehensive exploration of multilingual representation learning, addressing the three identified challenges within this domain: (1) high computational demands, (2) data scarcity and (3) limitations in Transformer architecture, with a specific focus on sentence alignment and translation tasks. These tasks are essential in the broader context of multilingual NLP, enabling machines to understand and translate across diverse human languages with increased proficiency and efficiency.

To address the high computational demand accompanying the expansion of multilingual model language coverage, we proposed an efficient and effective multilingual sentence embedding (MSE) model, which employs cross-lingual token-level reconstruction and sentence-level contrastive learning as training objectives, allowing for efficient MSE model training with significantly less training data and computation. We also introduced a new knowledge distillation method for MSE models to streamline the inference process, successfully developing robust, low-dimensional MSE models for 109 languages.

To tackle the challenge of data scarcity in low-resource languages, this paper proposes new pre-training objectives for low-resource NMT. Specifically, to compensate for the lack of training data, we proposed phrase structure-based masked language modeling and reordering tasks. Additionally, we introduced word-level contrastive learning for low-resource NMT utilizing statistical word alignments, improving translation performance without requiring high-quality bilingual dictionaries. The new approach, AlignInstruct, was also introduced, enhancing translation accuracy in low-resource languages for large language models through word alignment-based instruction tuning.

To address the limitations in Transformer model architecture for zero-shot NMT, we initially proposed a new Transformer architecture that constructs interlingual representations on top of the Transformer encoder, significantly improving the performance for zero-shot NMT over conventional Transformer architectures. We also comprehensively examined the effects of layer normalization in zero-shot NMT, finding that post-layer normalization consistently outperforms pre-layer normalization, indicating the importance of post-layer normalization settings in zero-shot NMT regardless of the model configuration.

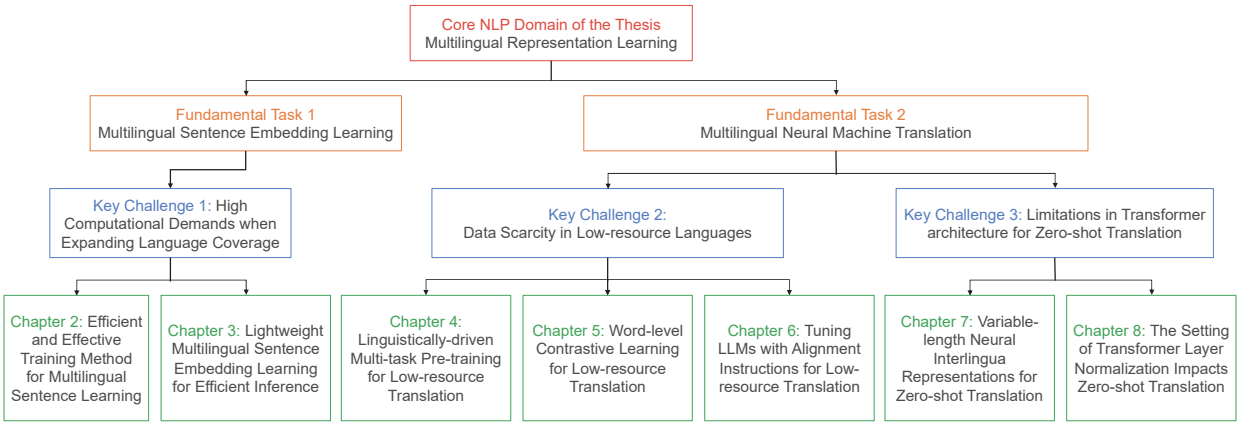


Figure 1: An overview of the three challenges and the proposed solutions included in this thesis.

山　下　浩　平　（西野恒　教授）
「Reflectance Maps for Non-Lambertian 3D Reconstruction」
（反射マップを用いた非ランバート面の３次元形状復元）
令和６年３月25日授与

カメラは安価で普遍化したセンサであり、日常の中でカメラを用いて撮影した数枚の画像から被写体の３次元形状を復元することができれば､安価で手軽な３次元認識技術としてロボティクスやコンピュータグラフィックスなど幅広い分野に応用することができる。これまでに、実世界、つまり未知の自然な光源環境の下での３次元形状復元は、異なる視点から撮影された画像間の画素の対応関係を検出し、対応関係と幾何的な拘束に基づいて被写体の形状をカメラ姿勢とともに推定することにより解かれてきた。このような手法は被写体の模様を対応関係の検出に利用する。しかし、実世界には模様のない物体が数多く存在するため、視点間の対応関係は常に得られるわけではない。特に、反射特性を理想的な拡散反射（ランバート反射）で近似できない物体（非ランバート面）の場合､具体的には､車やプラスチック製品など、鏡面反射による光沢がある物体の場合、同じ物体表面上の点であってもその見え方は視点により大きく変化するため、視点間の正確な対応関係を得ることは極めて困難となる。

本博士論文は模様やランバート反射を仮定しない多視点画像からの３次元形状復元という問題に着目し、その解法および評価用データセットの構築についてまとめたものである。模様のない非ランバート面を扱うために、本研究では被写体の見えと法線の光学的な関係を利用する。陰影や光沢などの見えから各画素の法線を推定し､法線を画素ごとの特徴量として視点間の対応関係の検出に用いることにより、見えが視点依存な非ランバート面についても正確に視点間の対応検出を行い、３次元形状を復元することが可能となる。また、本研究では従来対応検出における外乱として扱われてきた光沢に着目する。同一の光源により生じた光沢が存在する画素同士を対応付ける、新たな種類の対応関係を利用することにより、カメラ姿勢と物体形状の両方が未知の場合であっても両者を同時に解くことを可能とする。具体的には、本論文の貢献は以下のとおりである。

(1) 画像・カメラ姿勢・物体形状等の組からなる合成画像・実画像データセットの構築を行い、模様のない非ランバート面の３次元形状復元に関する評価基盤の確立を行った。

(2) 周囲の光源環境､物体の反射特性､およびカメラ姿勢が既知の場合について､見えから法線を推定し､法線を視点間の対応検出のための特徴量として用いる深層多視点３次元形状復元手法の提案を行った。光源環境と反射特性の情報から見え（輝度値）と法線の関係を表す反射マップを計算し、画像とともに深層ニューラルネットワークの入力として用いることにより、精緻な法線推定および３次元形状復元を実現した。

(3) 反射マップを入力とした深層多視点形状復元および画像・法線マップを入力とした深層反射マップ推定を交互に行う、形状・反射マップの同時推定手法を提案した。これにより、光源環境や物体の反射特性の情報を必要としない、カメラ姿勢既知の多視点画像のみを入力とした非ランバート面の３次元形状復元を実現した。

(4) 同一の光源により生じた光沢が存在する画素同士を対応付ける新たな種類の対応関係を利用する、物体形状・カメラ姿勢・反射マップの同時推定手法を提案した。カメラと物体の距離が離れている場合、解を一意に求めるためには新たな種類の対応関係が必要不可欠であることを示し、また、提案手法により、模様のない非ランバート面の画像のみを入力とした物体形状・カメラ姿勢の同時推定が実現されることを実証した（図１)。

以上本論文は、従来困難であった模様のない非ランバート面の疎な多視点画像からの３次元形状復元を初めて可能とし、合成画像および実画像データセットにおいてその有効性を実証したものである。

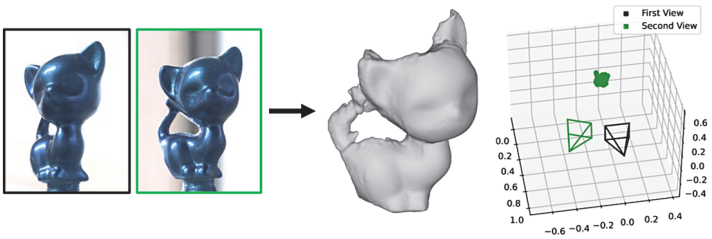


図１：模様のない非ランバート面の３次元形状復元の一例

森　　聖　太　（原田博司　教授）

「In-Band Full-Duplex Transmission for Next Generation Mobile Communication」（次世代移動通信システムにおける帯域内全二重通信）

令和 6 年 3 月 25 日授与

移動通信システムが誕生して以来、通信トラヒックは急速に増大し続けており、これらのトラヒックを収容するため、第 5 世代移動通信（5G）システムが 2020 年に商用展開された。しかし、様々なアプリケーションの進化や誕生に伴い、個人で利用する通信容量は増大し続けることが予想される。また、Internet of Things（IoT）システムは農学・医学・防災といった様々な分野において大きな役割を担いつつある。しかし、爆発的に増大する通信トラヒックを収容する新たな周波数資源は枯渇しており、周波数利用効率向上技術の開発が急務である。

周波数利用効率を向上する技術の候補の 1 つとして注目されているのが帯域内全二重通信（In-Band Full-Duplex: IBFD）である。IBFD は上り（Uplink: UL）通信と下り（Downlink: DL）通信を同時かつ同一周波数で実行する複信方式であり、従来の半二重通信（Half-Duplex: HD）と比較すると、理論的には周波数利用効率を 2 倍に向上可能である。従って、IBFD を導入したセルラ（Full-Duplex Cellular: FDC）システムの実現が期待されている。しかし、基地局（Base Station: BS）の送信信号が自身の受信機に回り込み干渉する自己干渉（Self-Interference: SI）や、UL 通信端末から DL 通信端末に干渉する端末間干渉（Inter-User Interference: IUI）が通信品質や端末スケジューリング動作に重大な影響を与える。FDC 実現のためには、これらの干渉抑圧及び通信特性の開発が必須である。

5G システムをベースとして次世代移動通信システムが発展することを想定し、本研究は 5G システムにおける FDC システム（5G-FDC）の実現を目的とした。得られた成果は以下のとおりである。

1. 5G ベースディジタル SI キャンセラ（Digital SI Cancellation: D-SIC）を提案した。本手法では 5G の信号構成や通信路符号化手法を考慮しており、現行の 5G システムに直接導入が可能である。さらに、5G-FDC の実現可能性を実証するため、BS、UL 通信端末、DL 通信端末から構成される 5G-FDC 物理層プロトタイプをソフトウェア無線機（Software-Defined Radio: SDR）を用いて開発し、提案 D-SIC を導入した。計算機シミュレーション及び実機実験により、IBFD 環境下でも提案 D-SIC の利用により UL 通信が可能となり、5G-FDC が実現可能であることを示した。
2. 逐次干渉キャンセラに基づく 5G ベース IUI キャンセラ（IUI Cancellation: IUIC）を提案した。まず、簡単なモデルを用いた計算機シミュレーションにより、逐次干渉キャンセラを用いた IUIC の有効性を示した。その後、5G の信号構成及び通信路符号化手法を考慮し、5G ベース D-SIC と共存可能な 5G ベース IUIC を提案した。また、受信信号のみから IUIC の利用有無を判断する手法も併せて提案した。また、IUIC を導入した 5G-FDC システム全体の動作形態の 1 つを確立するため、端末スケジューリング及び適応変調アルゴリズムも併せて提案を行った。計算機シミュレーションを用いた評価により、ダイナミック FDC システムにおいて平均 UL スループットを最大 71.8% 向上できることを示した。
3. IBFD を含む様々な新技術の実システムへの導入及び検証に利用可能な、SDR ベース 5G 測定プラットフォームを開発した。本プラットフォームは 5G に関連する任意の送受信信号処理を導入可能である。本プラットフォームの利用例の 1 つとして、500 km/h 以上の高速移動環境下において利用可能な受信信号処理手法を提案し、実機実験を通じてその有効性を示した。
4. 屋外環境および屋内工場環境を想定したフィールドで取得した電波伝搬データをもとに、実フィールドにおける 5G-FDC の実現可能性及び有効性の範囲を示した。評価結果から、実フィールドへの IBFD 導入は実現可能であり、提案 IUIC は UL スループット向上に効果的であることを示した。

以上、本論文は今後の多様な分野における新たなアプリケーションを支えるプラットフォームとして利用される、移動通信システムの周波数利用効率向上の一助になると考えられる。

牧　野　仁　宣　（原田博司　教授）
「Wide-area broadband private wireless communication system」
（広域広帯域自営無線通信システム）
令和６年３月25日授与

ICT を活用した多様なアプリケーションの普及により、無線通信の需要が増加している。従来の無線通信はモバイル端末と基地局が接続することが中心であったが、近年、M2M 通信や V2X 通信など、様々な形態での利用が増加している。これらの通信は、通信事業者が提供する公共無線通信（携帯電話等）とは異なり、利用者の用途に合わせた開発や、用途に合わせた標準規格に基づくシステム導入が行われるため、自営無線通信システムと呼ばれる。現在、狭域・狭帯域システムは検討されているが、広域・広帯域システムの検討は十分ではない。本論文は、公共公益および放送分野で必要となる広域広帯域自営無線通信システムの実現を目指している。

まず、第一の自営無線通信システムとして、VHF 帯を用いた広域システムである wireless regional area network（WRAN）を扱った。VHF 帯は、主に携帯電話で用いられる UHF 帯に比べて低い周波数帯であり、波長が長く電力減衰が低いため広域通信が可能であるが、周波数選択性フェージングが生じやすく、所望波に影響を与える。しかし、このフェージングの影響を軽減し、VHF 帯でも移動環境で高品質な伝送を実現するためのシステム検討が十分でなかった。そこで本論文では、直交周波数分割多元アクセス（OFDMA）方式を利用した移動無線通信システム、特に受信方式を提案した。また、提案方式を搭載した実無線機を開発した。さらに、この無線機を用いてマルチホップ伝送技術により通信エリアを拡張した際の伝送距離と伝送レートについて評価した。

第二の自営通信システムとして、1.2 GHz/2.3 GHz と高い周波数帯を利用する次世代の広帯域 field pick-up unit: FPU を扱った。この FPU ではロードレースなどの超高精細映像の伝送に広帯域が必要だが、高い周波数帯を利用するため、ドップラーシフトの影響を受け、広い帯域内で周波数選択性フェージングの影響も受けやすい。それに伴い伝送品質が劣化する。劣化を軽減する無線伝送方式として、基地局と移動局にそれぞれ４本のアンテナを使用し、空間多重して伝送する特異値分解（SVD）-MIMO と、伝搬環境の変化に応じて伝送パラメータを変更する適応送信制御（ATC）の利用が提案されている。SVD-MIMO で使用するウェイト行列は、設計上回避困難な劣化が存在する。従来の ATC では理想的なウェイト行列での伝送想定に基づく ATC を適用していたため、性能が劣化していた。本論文では、劣化した伝送路品質を推定し、それに基づく ATC 方式を提案した。また、更に高品質な伝送を実現するため、劣化送信ウェイト行列を機械学習（ML）により補償する方式を提案した。同様に ML による補償性能を簡易的に評価する指標と、学習データ作成手法についても提案した。

最後に、評価結果をもとに、自営無線通信システムを活用した各種アプリケーション用プラットフォームの展望を述べた。この展望においては、WRAN を基盤とし、様々な分野に適応可能な cyber-physical system（CPS）プラットフォームと、次世代 FPU を用いた番組制作プラットフォームをそれぞれ提案した。

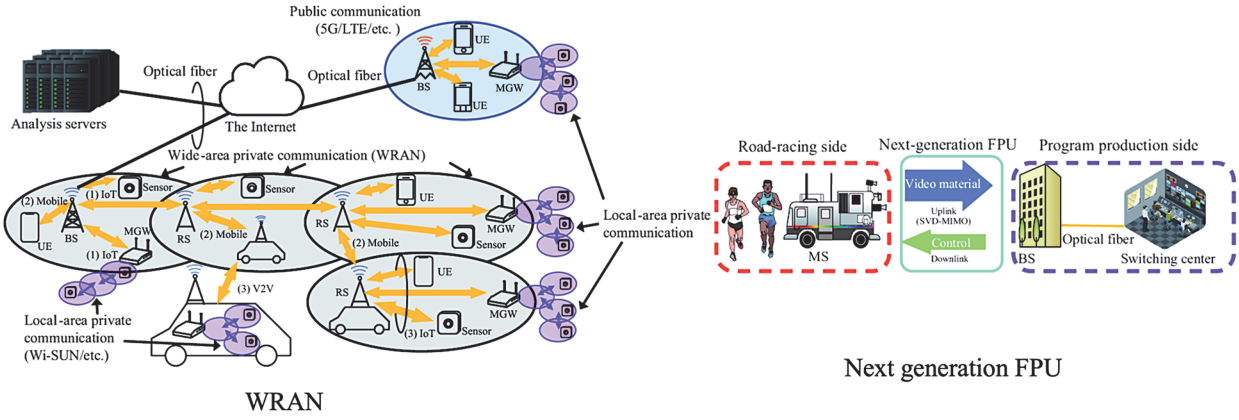


図１　WRAN 基盤による CPS プラットフォーム

康　　瑞　（大木英司　教授）

「Fault-Resilient Resource Allocation in　Network Function Virtualization」
（ネットワーク仮想化における故障耐性のある資源割り当て）

令和５年９月25日授与

The thesis delves into the transformative potential of Network Function Virtualization (NFV), which fundamentally shifts the architecture of traditional networks by decoupling network functions from dedicated hardware. By virtualizing these functions into virtual network functions (VNFs), NFV allows for dynamic scaling, reduces the costs associated with hardware updates, and facilitates the creation of tailored service function chains (SFCs) for customized services.

As the complexity and volume of network functions continue to grow, manual deployment and management become increasingly challenging. The thesis underscores the necessity for automated management and deployment through NFV orchestration engines like Kubernetes, which are crucial for maintaining the robustness and efficiency of modern networks. The core objective of the research is to enhance network fault tolerance and minimize the degradation of service quality due to hardware or software failures.

The thesis presents several innovative models and approaches for optimizing VNF allocation:

- A model is developed to maximize the continuous availability of SFCs, aiming to reduce service interruptions by effectively managing node unavailability. This is approached through an Integer Linear Programming (ILP) model complemented by a heuristic algorithm that offers a balance between optimal performance and practical applicability.
- A primary and backup VNF placement model is proposed to minimize service disruptions caused by node unavailability. This model leverages backup functions that are strategically activated to maintain service continuity, enhanced by an algorithm that identifies and mitigates critical unavailability bottlenecks.
- The robust optimization model addresses the allocation of VNFs in scenarios with uncertain node availability. By designing a framework that can adapt to different levels of uncertainty, this model ensures maximum service continuity and employs heuristic algorithms to manage the complexity of large-scale network environments.
- To reduce end-to-end latency and ensure high resilience, another model is designed for the allocation of VNFs in SFCs. This model, which incorporates fault tolerance and diverse service requirements, selects suitable replicas from pools to manage various failure scenarios effectively, supported by approximate methods that reduce computational demands.
- The dynamic VNF allocation model is tailored for scenarios with randomly arriving and changing service requests. It ensures sufficient processing capabilities even in the event of multiple node failures, utilizing a reinforcement learning approach to optimize the allocation process in real time.

Furthermore, the thesis demonstrates the practical implementation of these models in Kubernetes, showcasing how the orchestration engine can enhance automatic VNF deployment and management. Custom resource controllers are introduced, improving resource utilization and responsiveness to service demands, thereby showcasing the feasibility and efficiency of the proposed solutions in real-world applications.

Overall, the thesis not only highlights NFV's capability to revolutionize network management but also provides a robust framework for tackling the complexities of modern networks. The proposed models and solutions improve resilience, flexibility, and efficiency in network services, potentially influencing future developments in network architecture and paving the way for more automated and adaptive network management systems.

朱　　梦　菲　（大木英司　教授）

「Resource Allocation in Network Function Virtualization with Workload-Dependent Unavailability」
（負荷依存の不可用性を伴うネットワーク機能仮想化における資源割り当て）

令和 6 年 5 月 23 日授与

Network Function Virtualization（NFV）represents a significant shift in network services by moving from dedicated hardware to virtualized functionalities, thereby reducing the constraints and expenses associated with traditional systems. By enabling the pooling of computational resources, NFV enhances scalability, flexibility, and cost efficiency. It allows traditional network functions such as firewalls and load balancers to be virtualized on virtual machines and containers, highlighting the critical importance of efficient resource allocation for optimizing network performance and ensuring reliable service availability.

Effective management of these resources boosts the overall efficiency and responsiveness of network services, maintaining continuous functionality. However, challenges such as node failures and the selection of appropriate resource backup strategies complicate the reliability and continuity of services. Resource backups, including cold and hot backups, are essential for minimizing recovery times and downtime, necessitating innovative strategies to balance resource sharing, recovery speed, and overall availability.

This doctoral thesis tackles these challenges by introducing sophisticated optimization models and algorithms aimed at improving service quality. The research includes detailed numerical experiments and analysis to evaluate the effectiveness of the proposed methodologies, which consider factors like workload-dependent unavailability, recovery priorities, fault tolerance, load balancing, and the complexities of shared protection. The insights provided elucidate the potential trade-offs and performance enhancements achievable through these innovative methodologies.

The thesis outlines several key models and strategies:

- **Optimization of Resource Allocation**: It proposes a model that uses workload-dependent failure probabilities to optimize primary and single backup resource allocation, thereby minimizing the maximum expected unavailable time（MEUT）. This model incorporates both hot and cold backup strategies to provide flexibility and efficiency in resource management.
- **Multiple Backup Resource Allocation**: This model extends the approach to multiple backup resources under a protection priority policy, analyzing its impact on improving MEUT and providing robust solutions against node failures.
- **Advanced Fault Tolerance and Load Balancing:** This model introduces a resource allocation strategy with preventive recovery priority to minimize unavailable probability due to multiple failures, addressing both unsuccessful recovery and maximum unavailable probability post-recovery among nodes. It enhances the recovery strategy at operation start, adapting to workload variations upon failure detection. This comprehensive model optimizes resource allocation and integrates load balancing into the recovery process, significantly boosting the system's ability to maintain service quality under stress.
- **Robust Function Deployment**: The thesis also addresses challenges associated with uncertain recovery times by developing a model that guarantees expected recovery times in a cost-efficient manner, taking into account shared protection and recovery time uncertainties.

Additionally, the thesis bridges the gap between theoretical research and practical application by implementing these models in a Kubernetes environment. It designs a custom resource and controller to effectively manage primary and backup resources, ensuring optimal resource allocation and maintenance of service continuity. This includes a two-layer controller structure that achieves prompt and optimal function deployment and management, demonstrating the practical viability and effectiveness of the proposed solutions.

In conclusion, the thesis significantly advances the field of NFV by developing sophisticated models for resource allocation that not only enhance theoretical understanding but also provide robust solutions for practical implementation, thus facilitating significant advancements in modern network management.

竹　田　健　太　（大木英司　教授）
「Lightpath Provisioning in Elastic Optical Networks」
（エラスティック光ネットワークにおける光パス設定）
令和６年３月25日授与

急速に増大するインターネット通信の需要を支える光ネットワークにおいて、スペクトル資源を柔軟に利用可能とするエラスティック光ネットワーク（EON: Elastic optical network）が注目されている。EONではトラヒック需要に応じて光パスが設計され、光パス設計においてはスペクトル資源を効率的に利用することが重要である。本論文はEONにおける光パス設計に関する3つの問題について検討する。

第１に必要なスペクトル資源を最小化するための各パスに異なる数のスペクトルスロットおよび伝送容量を割り当てるMultipath provisioning（MPP）方式を提案する。提案方式では２つの最適化問題が示される。１つは各パスの経路が事前に定められている場合の各パスに割り当てるスペクトルスロット数を決定する問題、もう１つは各パスの経路と割り当てスロット数を決める問題である。２つの最適化問題はそれぞれ整数線形計画問題（ILP: Integer linear programming）問題として定式化される。数値評価では提案方式は従来方式と比較して一部のケースで必要なスペクトル資源を削減することを確認する（図１）。

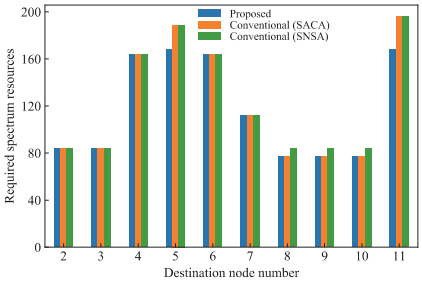


図１　MPP方式の評価

第２にコア間クロストーク（XT: Crosstalk）による光信号対雑音比（OSNR: Optical signal to noise ratio）のペナルティを考慮することにより、空間多重型EONにおいてコア間XTとコア内Physical layer impairments（PLI）を同時に考慮するRouting, modulation, spectrum, and core allocation（RMSCA）モデルを提案する。提案モデルでは伝送距離が短くなるとXT閾値を緩和し、伝送距離が長くなるとXT閾値を厳しく設定する。これにより提案モデルはスペクトル利用効率を向上させる。本論文では提案モデルに基づく最適化問題を示し、最適化問題はILP問題として定式化される。また、ILP問題が扱いづらい場合のため、発見的アルゴリズムを示す。数値評価により提案モデルはベンチマークモデルよりもスペクトル利用効率を向上させることを確認する（図２）。

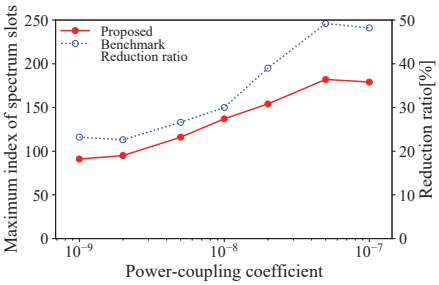


図２　コア間XTとコア内PLIを考慮したモデルの評価

第３に空間多重型EONにおける光パスへのスペクトルスロットの割り当てに伴うフラグメンテーションとコア間XTによるフラグメンテーションの双方を抑制するための光パス設計モデルを提案する。提案モデルではコア間XTによる断片化を抑制するために、フラグメンテーションメトリックを計算する際に、空きスペクトルスロットを使用可能なものと使用不可のものに区別する。本論文では提案モデルに基づく最適化問題を示し、最適化問題はILP問題として定式化される。また、ILP問題が扱いづらい場合のため、発見的アルゴリズムを示す。数値評価により提案モデルはベンチマークモデルよりもブロッキング率を抑制することを確認する。

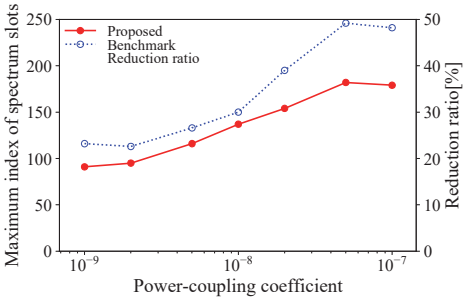


図２　フラグメンテーションを考慮したモデルの評価

以上、本論文はEONの光パス設計に関する提案を行い、光ネットワークの発展に貢献するものである（図３）。

大　島　國　弘　（佐藤高史　教授）

「Leakage-Current-Aware Layout Design of DNTT-Based OTFTs and Its Applications to Digital Circuits」
（DNTT を用いる有機薄膜トランジスタのリーク電流考慮レイアウト設計とそのデジタル回路への応用）
令和 6 年 3 月 25 日授与

フレキシブルセンサシステムは、低コスト、軽量、曲げ伸ばし可能といった性質により、ウェアラブルデバイスやロボティクス、ヘルスケアなどの分野で注目されている。特に、有機薄膜トランジスタ（OTFT）は低温プロセスによる製造が可能なため、紙やフィルムといった柔軟な基板上に回路を形成することができる。OTFT においては p 型が安定した動作特性と高いキャリア移動度を示し、センサ回路や論理回路の実用が期待されている。しかし、p 型有機半導体材料の中でも高い性能を示すジナフト [2,3-b:2’ ,3’ -f] チエノ [3,2-b] チオフェン（DNTT）は、リーク電流や特性のばらつきが大きいという課題が存在する。これらの課題は OTFT のオン・オフ電流比を低減し、回路動作の不安定性の原因となるため、フレキシブル OTFT 回路の実用に向けて改善が必要となる。また、実用可能なフレキシブル OTFT 回路として、センサシステム上で取得したデータの処理回路や偽造チップを防止するためのセキュリティ回路といった回路応用が望まれる。

本論文では、DNTT を利用した p 型 OTFT を対象に、リーク電流を低減可能なレイアウト設計と回路応用について、以下 3 点を検討する。

1. DNTT を利用した p 型 OTFT のリーク電流制御に向けた素子レイアウトの最適化
異なるレイアウトの OTFT を試作・測定し、特性の評価を行う。ゲートリーク電流及びソース - ドレイン間リーク電流の要因となるデバイス構造を特定し、それらを制御するためのレイアウト設計を提案する。結果として、リーク電流の抑制により高いオン・オフ電流比を実現し、OTFT 論理素子の安定性と性能向上を達成できることを示した。

2. OTFT を用いたスパイキングニューラルネットワーク（SNN）回路「flex-SNN」の設計
フレキシブルセンサシステムにおけるリアルタイムデータ処理の実現に向けて、リーク電流制御 OTFT により形成可能な SNN 回路を設計する。Flex-SNN は、フレキシブル基板上での製造を可能とするため、少数の材料層で構成される。回路シミュレーションにより、MNIST データセットを利用した分類タスクにおいて 97.0% の分類精度を得られることを確認した。

3. OTFT を用いた物理複製困難関数（PUF）回路の設計
OTFT は Si-MOSFET と比較して特性の劣化が速く、長期間の値保持が困難となる課題が存在した。提案 PUF 回路においては OTFT の材料に含まれる金属酸化物薄膜による抵抗変化型ランダムアクセスメモリ（ReRAM）を用いて値を保存することにより、安定して値を保存できる。提案 ReRAM を用いることにより、PUF 回路の応答は OTFT の特性劣化の影響を受けにくくなり、安定して動作することを確認した。

総じて、本論文では、DNTT を用いた p 型 OTFT のリーク電流制御可能なレイアウト設計を提案し、提案レイアウトを利用した新しい回路技術を検討した。これにより、フレキシブルセンサシステムにおける OTFT 回路の実用に向けて、データ処理やセキュリティ機能を担う回路応用の可能性を示した。

竹　内　浩　造　（橋本昌宜　教授）

「A study on heavy ion-induced single event effects for radiation-tolerant FPGA development」
（耐放射線性 FPGA に向けた重粒子誘起シングルイベント効果の研究）

令和 6 年 9 月 24 日授与

トランジスタの小型化と製造プロセスの進展により、かつてのスーパーコンピュータに必要であった処理能力は、今ではスマートフォンで利用可能となっている。半導体が文字通りあらゆる場所に存在する現在、その信頼性は、社会インフラとしてこれまで以上に重要になっている。地上、宇宙を問わず、半導体は、放射線によってトランジスタにチャージが付与される「シングルイベント効果（SEE）」または「ソフトエラー」にさらされる。トランジスタが小型化し、低電圧で動作するようになるにつれ、スタティックランダムアクセスメモリ（SRAM）やフリップフロップ（FF）といったメモリセルの放射線感受性は増加している。さらに、平面構造から三次元（3D）のトランジスタ構造への移行により、これらの影響はより複雑なものとなっている。このため、SEE の研究とその特性評価は、SEE を理解し、信頼性を向上させる上で不可欠である。

本論文では、主にプログラマブルロジック（PL）と SRAM で構成されるフィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）における SEE とソフトエラーに焦点を当てる。FPGA は再構成可能で、高い並列処理能力、短いターンアラウンドタイムにより、地上での人工知能（AI）アクセラレータを含むアプリケーションや、衛星システムで広く使用されている。

FPGA のコンフィグレーション RAM（CRAM）は、PL の接続や論理を格納し特定の機能を提供する。CRAM におけるシングルイベントアップセット（SEU）は、FPGA の機能の中断や誤動作を引き起こす。FPGA 中の SRAM はブロック RAM（BRAM）と呼ばれ、高密度のグリッド状に配置され、FPGA 内でデータを格納する。SRAM は常にシングルビットアップセット（SBU）やマルチセルアップセット（MCU）の影響を受け、これらは隣接セルとの複雑なチャージ収集メカニズムを特徴づける重要な指標である。本論文では、FPGA の CRAM と BRAM、および放射線下でのそれらの現象を調査し、FPGA の信頼性について議論する。

本論文の研究では、CRAM における SEU、PL におけるシングルイベントトランジェント（SET）、および BRAM に使用される SRAM の SBU と MCU のチャージ収集メカニズムを取り上げる。まず、不揮発性素子技術の一つである原子スイッチ（AS）FPGA の SEU 耐性を調査し、重イオン照射下で状態変化に対する耐性を明らかにした。次に、パルスレーザー照射を用いた周辺回路における SET の調査を行った。

その後、SRAM の SBU と MCU を、異なるデータパターンや印加電圧下での重イオン照射を用いて調査し、イベント毎のビットマップを分析しシミュレーションを行うことで、3D トランジスタにおける特徴的なチャージ収集メカニズムを明らかにした。また、SRAM の電圧依存性を議論し、先行研究で提案されたモデルの予測に反することを示した。これらの結果に基づき、バルク SRAM の SEU 断面積（XS）モデルを提案し、検証した。

本論文は、FPGA の信頼性の理解と向上に貢献するとともに、提案モデルが地上および宇宙のアプリケーションにおいて重要となる陽子および中性子の XS の予測への応用の可能性も示した。

程　　全　（橋本昌宜　教授）

「Design and Reliability Analysis of System-on-Chips for Artificial Intelligence Applications at the Edge」
（エッジ人工知能アプリケーション向けのシステムオンチップの設計と信頼性解析）

令和６年９月24日授与

The field of Artificial Intelligence（AI）has advanced significantly, but the reliance on cloud-based solutions presents challenges like high latency and bandwidth requirements. Edge AI computing addresses these issues by enabling local data processing. However, Neural Networks（NNs）with millions of weights and activations demand substantial computational resources, memory, and hardware overhead. On-chip memories, essential for these applications, are particularly vulnerable to radiation-induced soft errors, leading to data corruption and reliability concerns. This is critical for safety-critical applications such as autonomous vehicles, medical devices, and industrial systems, where high reliability and computational efficiency are imperative.

This dissertation focuses on energy-efficient, reliable AI System-on-Chips（SoCs）for edge applications. By leveraging approximate computing, mixed-precision（MP）methods, and Neural Architecture Search（NAS）, the work optimizes performance, reduces memory footprint, and minimizes hardware resource consumption. Approximate Multiply-and-Accumulate（MAC）operations and systolic data flow enhance computational efficiency, while near-memory computing（NMC）addresses the limitations of traditional architectures. Reliability challenges are tackled by analyzing soft error impacts on NNs, emphasizing that not all errors are catastrophic due to the fault-tolerance of weights and activations. Comprehensive fault injection（FI）and radiation experiments offer insights into error detection and mitigation. The dissertation introduces three AI accelerators targeting convolution, pooling, and transformer operations. A multi-bit-width（MBW）Booth accelerator supports INT2/4/8 computations, achieving significant power efficiency improvements on FPGA and ASIC platforms. A sparse accelerator optimizes performance by leveraging NN sparsity, and a Booth-value-confined MP accelerator with NMC-friendly data flow enhances energy efficiency. These accelerators are integrated into SoCs, including a high-performance FPGA-based SoC, a 22nm edge AI ASIC, and a multi-core multi-mode SoC with dual-core lock-step（DCLS）for fault tolerance. The designs achieve power efficiency up to 29.11 TOPS/W and support versatile computations with integrated debugging features. Meanwhile, reliability assessments highlight vulnerabilities, such as the susceptibility of control and status registers（CSRs）and Instruction/Data Tightly Coupled Memory（I/DTCM）to soft errors, particularly in low-precision INT2/4 layers. While weights and activations show minimal impact on system failures, misclassification errors increase with reduced precision. Radiation and FI experiments confirm the importance of error-resilient designs, emphasizing the need for mitigation strategies in safety-critical applications.

Overall, this dissertation aims to achieve energy-efficient AI SoC designs with necessary and sufficient reliability consideration, providing valuable insights for designing reliable and energy-efficient hardware at the edge.

片　山　梨　沙　（石井信　教授）

「Computational Modelling and Neural Mechanisms of Hierarchical Inference and Decision-making in Partially-observable Environments」
（部分観測環境における階層的推論・意思決定過程のモデル化とその神経基盤に関する研究）
令和６年９月24日授与

近年、ヒトや動物を用いた脳活動計測実験により、意思決定に関与する複数のモジュールが脳内で階層性をなしつつ協調的・競合的に作用し、その統合的出力として行動が決定されていることが示唆されている。ヒトを模した階層的情報処理機構は、人工知能への応用展開を目指して機械学習分野でも研究が行われている。しかし、情報工学・神経科学分野ともに、従来研究の多くは比較的単純な実験タスクとフラットな計算モデルを用いたものであり、ヒトが実世界で直面するような複雑かつ不確実な環境における階層的情報処理機構や、その処理過程における内省的情報（メタ認知）の影響は明らかになっていない。本研究は、従来のシンプルな部分観測問題（POMDP）を拡張した階層的推論課題および階層的意思決定課題と対応する計算モデルを考案し、行動計測とfMRIによる脳活動計測によって、ヒト脳内の階層構造的な複数モジュールが構成する意思決定の神経メカニズムを解明しようとしたものである。具体的には、以下の研究成果を得ている。

1. 部分観測環境における予測の脳内表象と主観的確信度との関連
   ベイズ脳仮説においては、信念から生成される仮想的な予測が、不確実環境での信念更新の要となる。しかし、従来研究では、予測が脳活動パターンに符号化されていることは完全観測環境下で示されているにすぎず、不確実環境においては検証されていなかった。本研究では、部分観測迷路探索課題とfMRIによる脳活動計測を用いて、不確実な位置推定に基づくシーン予測が頭頂･前頭ネットワークの脳活動パターンから解読可能であり、予測の脳活動パターンへの符号化の明瞭性が不確実性に依存して異なることを示した。また、頭頂葉の異なる領域が階層的に空間的予測に関与している可能性を示唆した。
2. 階層的POMDP問題における信念の不確実性に関与する脳領域の特定
   前項で用いた部分観測迷路課題では、信念更新に利用される外界情報（シーン）自体は完全観測であった。しかし実世界においては、我々の観測可能な情報は、限定的な処理能力のために常になんらかの不確実性を内包する。これに対し本研究では、古典的POMDPの一つであるTiger problemを組み込んだ新しい部分観測迷路課題を考案し、この課題実行中のヒト脳内での情報処理過程が、2種類の隠れ状態が各々の信念形成・更新にもう一方を利用する階層的推論モデルにより再現できることを示した。また、この階層的推論過程における複数の隠れ状態推論の不確実性が、前頭前野内側部に表象されていることを示した。
3. 階層的意思決定過程におけるメタ認知修飾の神経基盤の特定
   実世界の意思決定においては、環境に対する知識など、観測から信念を形成するために必要な事前情報にもしばしば不確実性が内包されている。こうした階層的な不確実性を処理する意思決定過程や階層間でのメタ認知の相互作用に関与する脳神経基盤は明らかになっていない。本研究では、環境に対する状態推論を組み込んだバンディット課題を用いて、上位階層の不確実性が下位階層の推定・意思決定およびそのメタ認知を修飾する脳内情報処理過程を計算モデル化し、このプロセスを内側前頭前野 - 島皮質間ネットワークが担っていることを示した。さらに、行動レベルの個人間差異が、このネットワークを構成する脳領域間の機能的結合の強さによって説明できることを発見した。

まとめるに、本論文は、不確実環境における階層的情報処理および関連するメタ認知過程を計算論モデル化し、これを実装する脳神経メカニズムを示した。内省を含む階層的情報処理は、近年注目を集める自己意識の神経機序解明の端緒ともなり得、人間科学・神経科学・情報工学のみならず、精神疾患等に見られるメタ認知異常・意識障害の病態解明や臨床応用にも貢献しうる。

岩　田　晃　拓　（門信一郎　准教授）

ヘリオトロン J における近赤外領域の分光診断に関する研究

令和 6 年 3 月 25 日授与

エネルギー問題、環境問題の解決方法の一つとして期待される磁場閉じ込め核融合炉の実現に向けたプラズマ研究が行われており、プラズマ性能の向上に伴い装置も大型化し、光ファイバーによる紫外・近紫外光の伝送効率低下や多価イオン輝線同士の混濁などが懸念されている。それに対し近赤外領域は、重元素不純物輝線による混濁が少なく、熱運動によるスペクトル広がりに対するゼーマン効果やシュタルク効果によるスペクトル分裂が広い利点を持つ。本論文は、従来核融合プラズマ実験装置への適用例が少なかった近赤外領域の分光診断手法を真空容器内の高温輝点（ホットスポット）の温度計測や固体水素ペレット溶発雲の電子密度・温度の計測に適用し、中型規模ヘリカル装置であるヘリオトロン J 装置において、高エネルギー電子が容器壁に及ぼす影響や、ペレット溶発における原子素過程について詳細に調べたものである。

本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 近赤外領域の黒体輻射連続スペクトルを用いて、特定条件において可視光で観測されていたホットスポットの表面温度の最高温度が約 2000 K になることを示した [1]。

(2) 近赤外分光器の 2 次回折光と真空容器の反射によるスペクトル計測への影響を評価し、補正する手法を提案した。

(3) 可視光の発光計測と近赤外分光計測を組み合わせ、可視光の発光強度を温度に較正することで、ホットスポット温度の高速な時間変化の検出を可能にした。

(4) 固体水素ペレット溶発雲の発する近赤外領域の水素原子パッシェン α 線のシュタルク広がりを測定することでペレット溶発雲の電子密度計測を低密度側（10^{21} m^{-3} 程度）へ拡張することに成功し、近赤外分光が中型装置において有用な手法であることを示した [2]。

(5) 低分散分光器でシュタルク幅と同時測定可能なパッシェン系列（Pa_α, Pa_β, Pa_γ）の輝線強度比に CR モデルを適用することで、ペレット溶発雲の電子温度（約 0.9 eV）測定に成功し、その励起準位占有密度が LTE 状態にあること、その温度領域において（4）のシュタルク分光結果への電子温度の影響が小さいことを証明した [3]。

これらの成果（1）（2）（3）は、装置保護の観点から重要であり、加熱パワーの増大に従いますます重要になってくる。また成果（4）（5）は加熱パワーが比較的弱い、他の中規模装置におけるペレット溶発過程や、燃料供給の物理研究へも適用可能であり、核融合級の大型装置との比較やスケーリング研究に重要な寄与ができる可能性がある。さらに、分光器や検出器の高性能化によって、今後、高速化やイメージングの可能性を有するものである。

[1] S. Kado, A. Iwata, T. Kanazawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 89, 10D129（2018）.
[2] A. Iwata, S Kado, M. Murakumo *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 93, 113537（2022）.
[3] A. Iwata, S. Kado, G. Motojima *et al.*, Plasma and Fusion Research 19, 1402017（2024）.

Kim Heejun （松田一成　教授）
「Exploring the Optical Properties of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides Moiré Superlattice」
（二次元遷移金属ダイカルコゲナイドのモアレ超格子の光学特性の探索）
令和 6 年 5 月 23 日授与

近年、次世代の光・電子デバイス応用に向けわずか原子数層からなる極めて薄い、半導体二次元物質に関する研究が盛んに行われている。特に、それら半導体二次元物質を重ねて作製した人工ヘテロ構造やその界面においては、新たな物性や機能発現の舞台となっている。本研究では、単層遷移金属ダイカルコゲナイドなど半導体二次元物質からなる人工ヘテロ構造において特異的に発現する光学的性質や、そのデバイス応用に深く関与する電子正孔対であるモアレ励起子に関する研究について調べた。これまでその詳細が明らかとなっていなかった、アモレ励起子状態やそのダイナミクス、さらにはモアレ励起子が関与した光学特性に関して、本研究を通して以下のような多くの知見が得られた。

1）単層 $MoSe_2$（二セレン化モリブデン）/WSe_2（二セレン化タングステン）ヘテロ構造を作製し、モアレ励起子に起因する光学特性を定常・時間分解発光測定によって調べた。その結果、温度上昇に伴ってモアレ励起子からの発光強度が急激に低下することなどの実験結果とレート方程式による解析から、発光に寄与するブライト励起子の数 meV 上に、ダーク励起子状態が存在することを見出した。さらにモアレ励起子ダイナミクスには、フォノンが関与した散乱プロセスが重要な役割を果たしていることを明らかにした [1]。

2）ゲート電圧制御が可能な $MoSe_2$/WSe_2 ヘテロ構造デバイスに対して、Ga イオンビーム加工を施し、光学的に観測するモアレポテンシャルの数を制限する新たなアプローチを提案した。これにより従来困難であった、わずか数個の少数のモアレ励起子やモアレ荷電励起子からの発光スペクトルを得ることに成功した。さらに、その温度依存性や円偏光分解発光測定によりモアレ荷電励起子において、温度に依存せず安定かつ数 100 ナノ秒にも及ぶ極めて長いバレー緩和現象の観測に成功した [2]。

3）さらに単層 $MoSe_2$/WSe_2 ヘテロ構造において、$MoSe_2$ と WSe_2 間に *h*-BN（窒化ホウ素）スペーサーを導入することにより、モアレポテンシャルを変調しモアレ励起子の次元性を制御する新しい方法を提案した。スペーサー層の有無によって、発光エネルギーの位置や発光強度の温度依存性が明確に変化し、その振る舞いがゼロ次元的なモアレ励起子から、二次元的な層間自由励起子へと変化していることを明らかにした [3]。

以上のようにここで得られた知見は、モアレ物理などの新たな物性創発の観点での基礎科学的意義とともに、モアレ励起子を利用した量子科学・技術への応用の基礎となるなど、工学的に重要であると考えられる。

[1] H. Kim, K. Aino, K. Shinokita, W. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, Dynamics of Moiré Exciton in a Twisted $MoSe_2$/WSe_2 Heterobilayer, *Adv. Opt. Mater.* **11**, 2300146（2023）.

[2] H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, Dynamics of Moiré Trion and Its Valley Polarization in a Microfabricated WSe_2/$MoSe_2$ Heterobilayer, *ACS Nano* **17**, 13715（2023）.

[3] H. Kim, H. Wang, Y. Wang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, and K. Matsuda, Identification of Two-dimensional Interlayer Excitons and Their Valley Polarization in $MoSe_2$/WSe_2 Heterostructure with *h*-BN Spacer Layer, *ACS Nano in press*. doi.org/10.1021/acsnano.4c05963

滝　　朋　恵　（小嶋浩嗣　教授）

「Study on the plasma waves observed by single spacecraft interferometry in the terrestrial inner magnetosphere」

（地球内部磁気圏において単一衛星による干渉法で観測されたプラズマ波動に関する研究）

令和６年９月24日授与

本論文は、地球内部磁気圏を探査している「あらせ衛星」に搭載された２本のモノポール電界センサーを用いた干渉法（interferometry）による観測・解析手法、および、その手法を異なるプラズマ波動現象に適用して得られた観測結果とその考察についてまとめた。科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器は、プラズマ波動の電界成分を捉えるためにダイポールの電界センサーを用いることが一般的であるが、本論文ではそのダイポールセンサーを構成する２本のエレメントをモノポールセンサー２本として用いることにより、プラズマ波動の空間的な位相差とその時間変化を捉えることに焦点をあてている。これは単一衛星干渉法による観測であり、そこからプラズマ波動の波面やその移動速度（位相速度）を求めることができる。本論文の主な成果は次の通りである。

1. 干渉計を用いて静電孤立波を観測し、二本のモノポールセンサーで観測された電界波形から観測時間差を計算した。そして、対応する静電孤立ポテンシャルの空間スケールを数100mから数km程度と導出した。更に、静電孤立波の波形の特徴から内部磁気圏に存在する静電孤立ポテンシャルが二次元のGaussian構造をもつことを示した。
2. プラズマ波動のなかでも電磁波であるホイッスラーモードコーラス波動に対し、干渉法を適用して、その波面の特定を行った。衛星のスピンも利用して、波長が電界センサーに対して非常に長く、位相速度が高速な電磁波に対して、単一衛星で行う干渉法の制約を明らかにした。
3. 波長が短く、位相速度も電磁波に対して非常に遅い静電波である電子サイクロトロン高調波に焦点をあてた。干渉計で得られる位相差が、衛星のスピンに依存することを示し（図１）、観測モデルを構築した。そして、あらせ衛星の干渉法が、正確に電子クロトロン高調波の位相を捉えていることを示した。
4. 電子サイクロトロン高調波の観測モデルを用いて、電子サイクロトロン高調波の波数ベクトルの成分を推定する手法を提案した。そして、この手法によって推定した波数ベクトルを用いて位相速度を算出した。また、干渉法より観測された電子サイクロトロン高調波の位相速度と分散関係から、低エネルギー電子の温度を推定することに成功した。

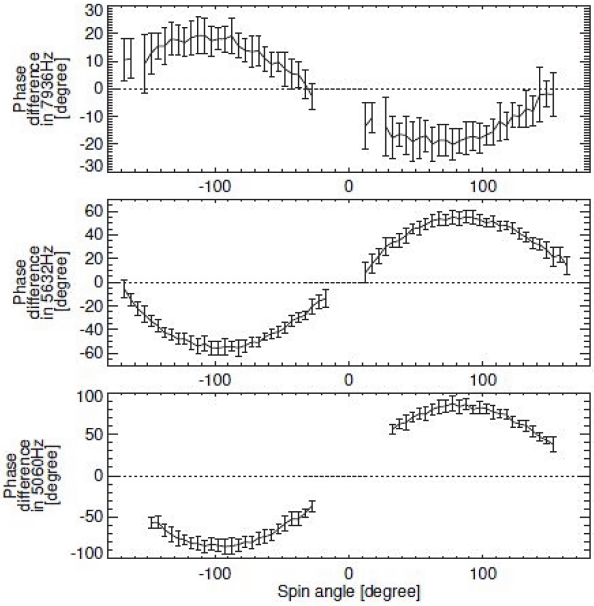


図１：電子サイクロトロン高調波に対する２本のモノポールアンテナによる干渉法によって得られた位相差の衛星スピン変化（上から7936Hz、5632Hz、5060Hz）。

張　　天　（海老原祐輔　教授）

「Study on Impacts of Geomagnetic Disturbances on Power Systems」
（地磁気擾乱による電力系統への影響に関する研究）

令和６年９月24日授与

Geomagnetic disturbances with respect to solar variations induce electric currents, flowing in artificial long-length electric conductors, such as power lines and pipelines. This current is called geomagnetically induced current (GIC). The GIC has a very low frequency, which can cause power failures in the power systems due to direct current (DC) bias. This paper summarizes findings on the impact of geomagnetic disturbances on power systems, obtained by using observations and simulations of geomagnetic and geoelectric fields in response to different geomagnetic activities. The main results are as follows:

1. Using the geoelectric field measured at the Kakioka Geomagnetic Observatory as a proxy for GIC, we clarified the relationship between geomagnetic disturbances and the geoelectric field variations for the three main types of geomagnetic activities in Japan: sudden commencements (SCs), geomagnetic storms, and bay disturbances. We showed that the maximum amplitude of the geoelectric field is largest during SC, followed by geomagnetic storms and bay disturbances, and that there is a linear relationship between the maximum amplitude of geomagnetic disturbances and the maximum amplitude of the geoelectric field variations, and derived the proportionality constant. We performed extreme value analysis using the generalized extreme value distribution (GEVD) method to obtain the maximum amplitude of the geoelectric field over a 10-year return period and a 100-year period.
2. Based on global magnetohydrodynamic (MHD) simulations, we succeeded in reproducing the geomagnetic disturbances that occurred in Canada in March 1989 when a widespread blackout caused by GIC occurred. It was shown that the arrival of an interplanetary shock wave caused the SC, which in turn caused a strong current called the main impulse (MI) current to flow in the ionosphere, significantly disrupting the geomagnetic field and causing a widespread blackout in Canada. A global map of geomagnetic disturbances was created in response to different solar wind conditions to indicate areas with a high impact of GICs on the power grid. It is expected that this will be used as a hazard map for evaluating GIC level in power systems.
3. Following up our previous simulations, we succeeded in identifying the cause of the field-aligned currents (FACs) that increase with SCs and the region in which they are generated. We showed the details of the entire physical process from the interplanetary shock wave compressing the magnetosphere, to the FACs generated in the magnetosphere connecting with the ionosphere to strengthen the ionospheric currents and disrupting the magnetic field on the ground, which clarified the fundamental cause of the widespread blackout that occurred in Canada in March 1989.

The study clarified the characteristics of geoelectric field variations in Japan, as well as the generation process of the ionospheric currents that flow in high-latitude regions due to SCs and the field-aligned currents. It also derived an equation that relates geomagnetic disturbances and the geoelectric field variations, and presented a global map of geomagnetic disturbances of SCs. This is important knowledge from the perspective of protecting power equipment, which is expected to be useful for power companies in evaluation of GIC risk in power systems.

河　合　勝　己　（篠原真毅　教授）
「Novel Rectenna Design Methods for Wireless Power Transfer Systems」
（無線電力伝送システムに向けた新しいレクテナ設計手法に関する研究）
令和６年９月24日授与

本論文は空間伝送型無線電力伝送における高効率レクテナ及び２次高調波再放射レクテナの設計手法についてまとめたものである．本論文で得られた主な成果は以下の通りである．

1. レクテナではアンテナと整流回路のインピーダンス整合が重要となる．一方で整合回路は挿入損失を持ち整流効率を低下させる．本論文では，シングルシャント型整流回路の出力フィルタでインピーダンス整合と高調波処理の両方を行う新しい回路構造を提案した．提案構造の適用可能なダイオードインピーダンス範囲を明らかにした．提案した回路によって回路損失が低下し，整流効率が向上することを示した．提案構造を利用して製作し920MHz帯シングルシャント型整流回路は920MHz帯における世界最高整流効率91%を達成した（図1、図2）．
2. アンテナで高調波処理を行うことで，整合回路を必要とせずアンテナと整流回路を直結する新たなシングルシリーズレクテナを提案した．提案したレクテナの設計手法として，高調波を含むソースプルシミュレーションを新たに導入した．理想回路シミュレーションによって，アンテナで高調波処理を行うシングルダイオードレクテナにおいても理想効率100%の全波整流が可能であることを示した．高調波を含むソースプルシミュレーションによって，ソースインピーダンスと整流効率の関係をスミスチャート上にプロットしたコンター図によって示した（図3）．提案構造でシングルシリーズレクテナを作成し，高調波処理をアンテナで行う提案レクテナは高調波処理を行わない場合よりも高い整流効率を有することを示した．
3. ２次高調波を再放射可能なシングルシリーズレクテナの高調波を含むソースプルシミュレーションを用いた設計方法を示した．ソースプルシミュレーションによって，これまで示されなかった整流効率と２次高調波再放射レベルのトレードオフ関係をスミスチャート上にプロットしたコンターで視覚的に明らかにした．提案した設計手法によって，ダイオードの総合電力変換効率を損なわずに整流効率の一部を２次高調波再放射に割り当てられることを示した．

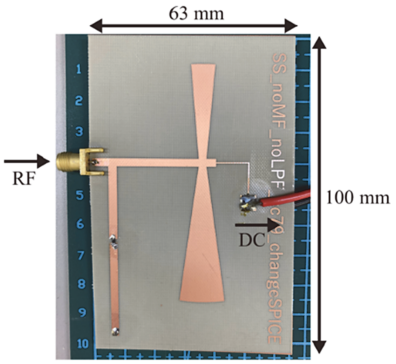


図１：開発した920MHz帯レクテナ

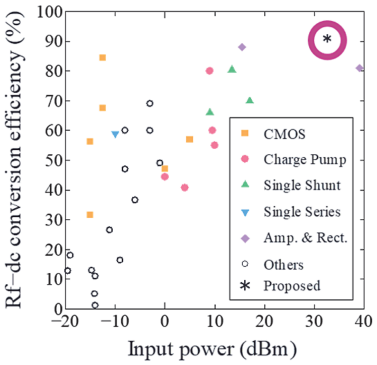


図２：レクテナの性能比較

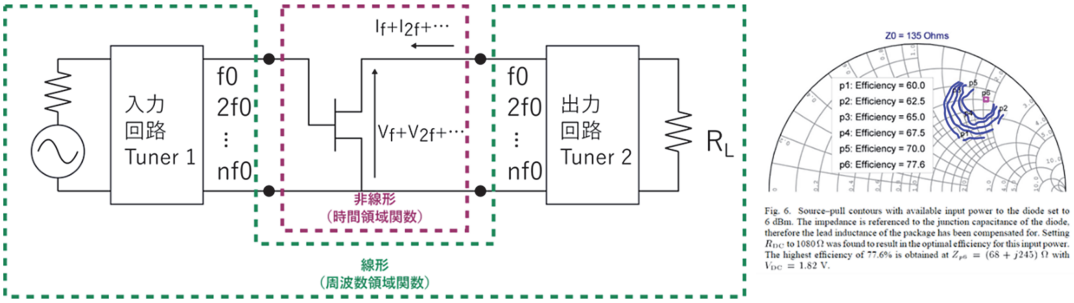


図３：提案するレクテナのソースプル設計

中　本　成　洋　（篠原真毅　教授）

「Novel Architectures and an Efficient Calibration Technique for Low-cost and High-performance Phased Array Antennas」
（フェーズドアレーアンテナの低コスト化と高性能化に向けた新技術の開発）
令和６年９月24日授与

本論文はフェーズドアレーアンテナの低コスト化・高性能化のための要素技術に関する研究開発をまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 低コストなフェーズドアレーアンテナであるパッシブフェーズドアレー方式において、従来課題であった効率の改善と柔軟なビーム形成機能の両立を実現する方式として、ラジアルライン給電アレーの各アンテナ素子を小型モーターにより回転させる新たな方式のアンテナを提案した（図1）。さらに、その設計のためアレー等価回路モデルと電磁界解析とを組み合わせた実用的な設計手法を新たに考案した。提案アンテナによれば、従来のアクティブフェーズドアレーに比べて大幅な低コスト化が可能なことを示し、試作評価において、柔軟なビーム形成が可能であるとともに、77%の高効率特性を実現することを確認し、提案アンテナと設計手法の実現性、有効性を示した。
2. DBFアンテナの低コスト化技術として、PINダイオードを実装したスロットペアを複数配列し、これを拡散符号に基づき制御することで、信号の符号分割多重化を実現する導波管スロットアレーによるパスシェアリング構造DBFアンテナを提案した。また、理論解析により、提案アンテナの動作原理と信号対雑音比を示すとともに、PINダイオード等の電気特性誤差の影響とその改善策について明らかにした。提案アンテナによれば、従来のDBFアンテナに比べて大幅な低コスト化が可能であり、また、8信号多重を想定した試作評価と、測定値に基づく到来方向推定のシミュレーション評価によって、提案アンテナによるDBF機能の実現性を示した。
3. 2点給電円形パッチをアンテナ素子とした円偏波フェーズドアレーアンテナの低軸比化を実現する効率的なキャリブレーション手法を提案した。提案手法は、円形パッチの放射特性を表す円筒波関数を基底関数とする近似関数に基づいており、導出した近似関数を用いてキャリブレーションに必要な制御量を決定する設計式を提案した。提案手法によれば、従来必要であった全偏波測定が不要となり、キャリブレーションに必要な測定数を1/2以下に削減可能であり、また、実機評価において、提案手法により軸比が5.8 dBから1.9 dBに改善可能なことを確認し、その有効性を示した。

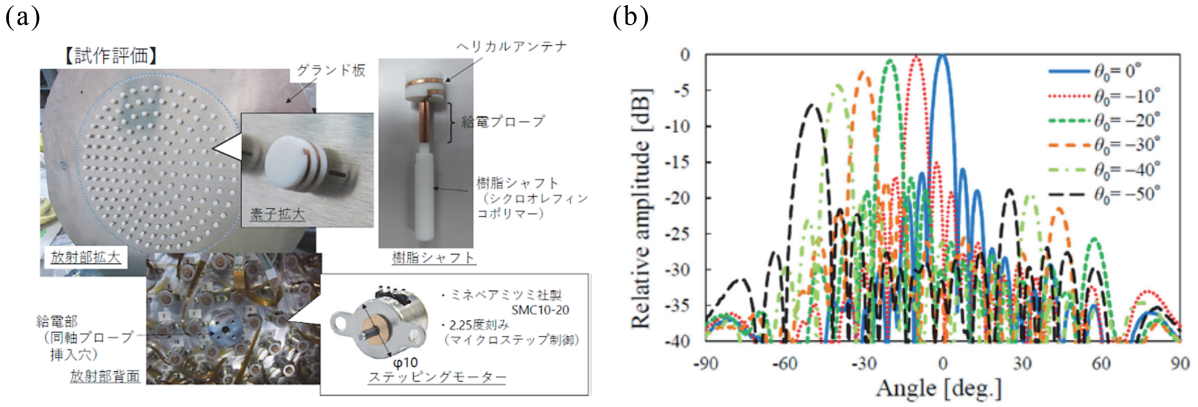


図１：開発したラジアルラインと小型モーターを利用した、高効率でフレキシブルなビーム形成が可能なパッシブフェーズドアレー（a）試作アレー（b）測定したビームパターン

高校生のページ

入出力システムと制御理論

大学院工学研究科　電気工学専攻
システム基礎論講座　自動制御工学分野（萩原研究室）
萩　原　朋　道、細　江　陽　平

1. 入出力システム、フィードバック制御、および制御理論

1.1. さまざまなシステム、制御対象としての入出力システム、および制御器

世の中には、さまざまな「システム」と呼ばれるものが溢れています。たとえば、「予約システム」、「生産管理システム」、「防災システム」等、枚挙にいとまがありません。さらには、直接的には「システム」と呼ばれていなくても、「システム」と呼ばれている他のものと似たような観点でとらえることができるものもたくさんあります。たとえば、「宝くじ」、「スポーツ選手のドラフト会議」、「国会審議」などもそうでしょう。そういわれてもピンと来ないかもしれませんが、いずれも、「その帰結がどのように定まるかの挙動に関して、それが（ルールなどで）定まっている」という観点でとらえれば、これらの間に共通するひとつの側面が見えてくるでしょう。そういったものも含めると、我々の身の回りは本当にたくさんの「システム」で溢れていることがわかります。

本研究室の研究活動も「システム」を対象としています。その際、上記のような様々な「システム」について、それらひとつひとつをその都度取り上げて個別に対象とするのではなく、それらに共通する側面に着目してできるだけ一般的に幅広く対象として取り扱い、それらの「システム」の運用をよりよいものにするための方策の定め方を可能な限り一般論として構築しよう、という基本的な姿勢が中心的なものとなります。ただし、上記のように非常に一般化したものとしてとらえた「システム」というものにはあまりにも幅がありすぎるため、実際には、もう少し狭い意味でとらえた「システム」の範囲に限定してそのような研究を進めることになります。具体的には、まず第一段階として少し絞ると、「入力と出力をもつものとしてとらえることのできるシステム」というものを対象とします。それをもう少し噛み砕いていうと、「外部から働きかけをする（原因となる「入力」を加える）ことができる機構（機械、装置、現象等）であって、その働きかけに応じた変化がその機構から外部に現れる（結果となる「出力」が生じる）ような機構」とでもいうことができます。こういったシステムを「入出力システム」と呼びます（図 1）。

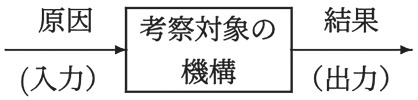


図 1：入出力システム.

この記事において、以降、具体的な話をするところでは、そのようなものの例（は山のようにあるものの、それらのひとつに着目するごとに個別の研究を展開するのではなくて、そういった例をいわばすべて一括して同時に扱うのが当研究室の研究スタンスであるということは改めて強調しますが、そうはいってもまずはイメージしやすいものがあった方が理解しやすいでしょうから）として直流モータを取り上げることがあります。その場合、「入力」はモータに加える電圧であり、「出力」は、モータの利用のしかたに応じて、モータの回転速度または回転角度になります。たとえば、CD プレーヤーなどのように所定の速度で回転させ続けることを目的にモータを使う場合には、「出力」は回転速度ととらえるのが自然でしょう。しかし、たとえばクレーンの巻き上げ動作を考えると、モータを適切な角度だけ回転させて（荷物を適切な高さまで持ち上げて）そこで止めることが大切なので、「出力」は回転角度と

とらえる方が自然になります。

話を一般的なものに戻しますが、上述のような入出力システムをうまく運用する（このことを「制御する」といいます）ということは、そのシステムに対して外部から与える「入力」を時々刻々と「適切」に定め続けることを意味することになります。このような「入力」を生成し続ける機構のことを「制御器」と呼びますが、それもまた「入出力システム」であって、それを使った運用（制御）の状況は、たとえば図２のように表現できます。これに対して、うまく運用されることが求められているおおもとの「入出力システム」の方は、「制御対象」と呼ばれます。

図２：フィードフォワード制御系.

ここで、制御器が時々刻々と生成する「入力」が制御対象に対して「適切」かどうかは、その「入力」を制御対象に対して加え続けた結果として生じる「出力」の時間的な振る舞いが、求めている（すなわち、目標としている）制御対象の所望の「出力」に一致するか（あるいは、完全に一致はしないとしても、できるだけ近いものになるか）どうか、という観点で評価されることになります。CD プレーヤーの例でいえば、所定の回転速度にできるだけ速やかに一致するようにモータに加える電圧を時々刻々と定めていくことができるような制御器が、適切な制御器であるということになります。

1.2. フィードバック制御と数学に立脚した制御理論

入出力システムを適切に運用する（制御する）上での基本的な考え方は、「フィードバック制御」と呼ばれます。「フィードバック」という言葉は、日常的な会話のなかでも使われる一般的な用語なので、「フィードバックによる制御」とはどのようなものであるかということをとりあえず表面的に理解すること自体は、難しくないでしょう。実際、(i) 入出力システムの出力を時々刻々と観測し、(ii) その値がその時点で目標としていた所望の値と比べてどちら向きにどの程度ずれているのかを時々刻々と判断し、(iii) そのずれを小さくする効果があると期待される修正を施した新たな入力を入出力システムに時々刻々と加える、という動作を繰り返していくという考え方です。この考え方は、上述の図に修正を施した図３として表現することができます。

このようなフィードバックの考え方は非常に自然なものに見えるでしょうし、上記のような動作を時々刻々と繰り返せばいずれ目標の振る舞いに到達する（フィードバック制御の目的が達成される）のはほとんど当たり前のように思えるかもしれません。ですが、実際にはまったくそうではないからこそ、本研究室における研究意義があるということに当然ながらなります。実際、本研究室における研究の方向性の様子を非常に単純化した形でひとことで表すならば、「フィードバック制御の数学的理論（制御理論と呼ばれるものです）の高度化に寄与するもの」とでもいうことができます。少し言い換えるなら、「フィードバックという考え方を可能な限り幅広い（つまり一般的な）入出力システムに対して適切に適用するための方法論を、さまざまな数学的技法を活用して可能な限り一般的な方法論（制御理論）として構築していこう」というのが、基本的な研究姿勢であるということになります。ちなみに、京都大学工学部電気電子工学科で関連する講義があって、数学辞典第４版（岩波書店、2007）における様々な数学分野や数学用語として取り上げられている項目の中で「○○理論」と呼ばれているものとして、より大きなくくりの「最適化理論」中のひとつとして「制御理論」の項目があります。他にも「情報理論」、「符号理論」、「グラフ理論」などを挙げることもできますが、数少ない方の一例ということができ、フィードバック制御において数学的取り扱いがいかに重要であるかを、そういった側面からも感じ取ってもら

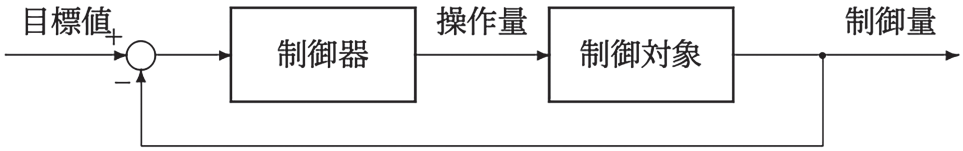


図 3：フィードバック制御系.

えればと思います。

もっとも、そういう紹介をしてみても、上述のフィードバック制御の基本的な考え方はあまりにも当たり前に思えて、それが本当にそれほどまでに深い（あるいは難しい）話になるとはにわかに信じがたいかもしれません。ですので本記事では、あえて非常に初歩的な導入レベルの話をすることを目指していています。つまり、上記のような疑問を解消してもらうことを通して、フィードバック制御あるいは制御理論の研究の重要性についての雰囲気を少しでも感じ取ってもらえればと考えています。そういう解説の中では、本研究室での研究が対象とする「システム」に関してすでに触れた（入出力システムへの）第一段階の絞り込みに続いて、第二段階的な絞り込みとして「動的」な入出力システムへの絞り込みが非常に重要になると考えています。

ですので、（A）入出力システムが「動的」であるか、あるいはそうでないか（つまり「静的」であるか）という違いとはいかなるものなのか、という点や、（B）とくに「動的な入出力システム」におけるフィードバック制御を適切に達成する上では、「決して当たり前だと考えてはいけないどのような注意点があるのか」、（C）それを踏まえて制御理論とは何を目指す考え方なのか、といった本記事の肝をなす部分の話については、雰囲気を伝える程度の初歩的な解説にはなりますが、項を改めて次節で解説したいと思います。

その上で最後に、「動的な入出力システム」やそのフィードバック制御について多少なりとも具体的なイメージをもっていただくことを目指して、直流モータにおける「入力」と「出力」の間の「動的」な特性や、そのフィードバック制御に関連した話題を交えてさらに節を改めて紹介していきたいと思います。ただし、直流モータの例をあげるのは、本研究室が直流モータという個別の対象に関する研究に力を入れているといった事情あってそこからくるというような理由なのではなく、単に理解がしやすい例であると考えるという理由に加えて、この（「動的な入出力システム」の単なるひとつの具体）例でかいま見えることが、（対象を「直流モータ」に限定することなく）一般論として取り組んでいく制御理論の研究がつねに関わりをもつ数学的枠組み（とくに微分方程式）の雰囲気を具体的に伝える上でも複雑すぎず、同時に単純すぎないと考えるからである、という点を、念のため断っておきたいと思います。

1.3. 制御理論の重要性

上述のこととも関係しますが、この記事ではできるだけ話を簡単化することで、「制御理論を高度化させるための本研究室における研究の重要性は、世の中に溢れる数多くの入出力システムが動的であることのみに起因する」かのような説明をします。ただし実際には他の様々な側面からも重要であるということも断っておきたいと思います。たとえば、フィードバック制御により適切に運用したい対象物（機構）、すなわち制御対象の特性について、それをいくら詳細に調べようとしても、完全に正確なものは現実問題として決して得られないという事実は、受け入れざるを得ません。すなわち、制御対象の特性について、完璧な知識をもった上でフィードバック制御を施すということは現実には不可能であって、程度の差こそあれ、曖昧な知識しかもてない中でも可能な限りよい運用（制御）を目指すことが求められます。その際、よい運用を目指しすぎると、知識の曖昧性のもとでは実際には、「よい運用」になるつもりのものが実際には「まったくよいと言えないもの」、あるいはもっとひどくて「決して許容され

ないひどい運用」にさえ結果的になる可能性がもちろん出てきます。逆にそれを恐れてほとんど何も積極的な働きかけをしないのだとすれば、「よい運用」は達成できません。そういった知識の曖昧性の中でも、数学的に質の保証ができる「踏み込んだよい運用」を達成することは「ロバスト制御」と呼ばれ、これを可能とするための方法論を数学的に構築するといったことも、制御理論を発展させるべき非常に重要な理由になっています。たとえば直流モータの例でいえば、そのスペックに当たる様々な物理定数を完全に正確に知ることはできません。また、3節では直流モータの入力と出力の間の動的な特性を微分方程式で表現する（モデル化する）ということを通して、動的な入出力システムに関する数学的な取り扱い（微分方程式）のごく一端を非常におおざっぱに紹介していますが、様々な事情で、そのような微分方程式で（そこに現れる係数を仮に何らかの意味で完全に正確に定めることができたとしても）現実の直流モータの動作が完璧に表現されるとは保証できないという現実があります。つまり、後述の微分方程式による表現をもって「直流モータの特性についての知識をもっている」と考える立場をとる時点で、すでにそこには「知識の曖昧性」を生じていることに実際にはなっています。こういった曖昧性の影響をフィードバック制御の中で極力押さえ込むための数学的枠組みを極力高度な形で構築するという考え方が、すでに述べた通り「ロバスト制御」と呼ばれるものです。そのようなことを目指すことの重要性を一例として、制御理論が解決すべき課題は、本記事での中心的な話題としてあえて据える点、すなわち「数多くの入出力システムが動的な性質をもつ」というもっとも単純化したその一点には実際にはまったく留まりません。制御理論の高度化は、電気電子工学分野に限らず、あらゆる技術分野における多くの機構（各種の製品からそれらの製造装置や社会基盤等々に至るまで）の運用の高度化を達成する上で、極めて重要な役割を果たすものになっています。

2. 動的な入出力システムのフィードバック制御とそのための制御理論

前節では、入出力システムが「動的」なものであるときにとくに、（当たり前の考え方だと感じるかもしれない）フィードバックの考え方の適用が決して「当たり前」といえなくなり、したがってそれを適切に適用した「フィードバック制御」を達成するための数学的な枠組みとしての制御理論と呼ばれるものが重要になる、という事実を紹介してきました。

本節では、（A）まず入出力システムが「動的」であるとはどういうことなのかを紹介した上で、（B）その場合には単純に「当たり前」と決していえないような状況が生じる側面などを非常に簡単に紹介していき、（C）それを通して制御理論の研究についての最低限の雰囲気を伝えるということを目指しています。

したがって、ここではまず入出力システムが「動的」である（あるいはそうではない、つまり「静的」である）とはどういうことかという話をしたいと思います。ただし、その目的と同時に、「世の中に溢れているシステム」という言い方をここまでに何度もしてきた点についても、（直流モータ以外を通して）現実的な例をイメージできるような話を付記することもあわせて目的としています。さらには、そういったいろいろな例を個別に眺めるのではなくて、数学的視点を通してそれらをできるだけ一括して統一的にとらえ、そういう見方を通して制御理論を発展させるという研究の方向性についても、雰囲気を伝えたいと考えています（研究そのものについて詳述することは、残念ながら本記事のレベルを越えるといわざるを得ないので）。

2.1. 入出力システムの例

まず、「入力と出力をもつものとしてとらえることのできるシステム（入出力システム）」に限定しても、皆さんの身の回りや社会の中に、人工的なものに限らず自然現象などを含めてたくさん存在することに気づくでしょう。たとえば、

(a) 水道の蛇口のひねり具合という入力に応じて、水量という出力が決まる。
という状況もそのひとつです。以下、何が入力で何が出力かという説明はあえて省略するので、それぞれが何であるかを意識してもらうとよいと思いますが、たとえば
(b) バネの引き延ばし具合に応じた強さで引っ張り返される。
(c) 雨量に応じて地面をたたく音の大きさが変わる。
などの例がすぐに思いつきます。他にも、以下のような例もすぐに思いつくでしょう。
(d) モータにかける電圧の違いに応じて回転速度が変わる。
(e) アクセルの踏み具合に応じて自動車の速度が変わる。
(f) 気温の変化に応じて池の水温が変わっていく。
これらいずれのシステムにおいても、入力と出力の関係は、(本記事の冒頭であげた「システム」の場合のように、ルールによるものではありませんが、やはり物理法則や、より一般的には何らかの科学法則などによって) そのシステムごとに定まっているでしょう。そのような「入力と出力の関係」(入出力関係もしくは入出力特性といいます) は、そのシステムのもつ性質 (特性) がどのようなものであるかをまさしく表しているものであり、この入出力特性を考慮した形で入力を適切に定めることができるならば、その結果得られる出力は望ましいものになると期待できます。

本研究室の研究の立場をあえて非常に単純化してひとことで表すならば、

(i) (入力と出力を持つどのようなシステムであっても、その) 入出力特性を抽象化して扱って数学的に表現する (モデル化する) ことで、さまざまな個別の具体的システムを特段区別することなく統一的枠組みの中で数学的に取り扱い、その上で、

(ii)「システムに加えるべき適切な入力を、数学的に表現された入出力特性を踏まえて適切に定める」ことができるための可能な限り一般的な方法論を、数学的議論を通して明らかにしていく

というものだといえます。その際、(ii) に関して、たとえば「入出力特性がどのような数学的表現になっても適用可能な万能の方法」を目指すことは残念ながらきわめて難しいので、たとえば、「入出力特性を (あまりにも個別議論に陥りすぎない範囲で) いくつかの種類に分割はするが、できるだけ大きくとらえた各種類の中では可能な限り一般的議論を目指す」という方向で研究を進めることになります。ここではそのような分類に関するキーワードの紹介に留めますが、たとえば「サンプル値系 (ディジタル制御系)」、「周期時変系」、「むだ時間系」、「確率系」などの分類に沿って研究を進めています。それらのいずれも「動的な入出力システム」の中でもさらにもつ特徴の違いに着目する視点に沿った研究ですが、これらのいずれにも共通する重要な視点として、本項の最大の目的である、「入出力システム」が「動的」なものと「静的」なものにさらに細分できる、という (すでに触れてきた) 話を紹介したいと思います。

ここで皆さんに少し想像を働かせていただきたいのですが、入出力システムに関する上述の 6 つの例 (a) – (f) の中には、何らかの側面においてかなり様相の違うものが混在していることに気がつくでしょうか。その「何らかの側面」というものを適切にとらえることで生まれる 2 つのグループが、「動的」な、あるいは「静的」な入出力システムへの分類となってくるわけなのですが、そのような「何らかの側面」とはいったいどのようなものになるのでしょうか。

ヒントを少し書くと、(a)、(b)、(c) がひとつのグループ (「静的な」入出力システム) で、(d)、(e)、(f) がもうひとつのグループ (「動的な」入出力システム) になるのですが、この 2 つのグループの間の大きな差を特徴づける「何らかの側面」というものは、いったい何であるか、気がつくでしょうか。両者の差というのは、フィードバック制御が時々刻々と行われる動作であることと密接に関係して、「時間の流れ」が関わるものになっています。そしてその差が、「動的」な入出力システムのフィードバック制御を考える上で、非常に重要な観点になってくるものなのですが。

2.2. 動的な入出力システムとそのフィードバック制御における基本的視点

では、その種明かしをしましょう。まず（a）の例（水道の蛇口）について考えましょう。各時刻で蛇口から流れ出る水量は、その時刻（その瞬間）の蛇口のひねり具合で決まると考えるのが普通でしょう。「同じ角度だけ蛇口をひねっていても、それ以前にひねり具合をどのように変化させてきたかが違えば、水量は同じにならない」と考える必要はないでしょう。あるいは、「いまこれだけ蛇口をひねっているので、たとえば5秒後にひねり具合を変えたときの水量は、いまのひねり方が違うものだったとしたときの水量とは違うものになってしまう」などとも考える必要はないでしょう。（b）の例についても、入出力関係はフックの法則によって決まるので、各瞬間の出力は、各瞬間の入力だけで決まります。同じことは（c）についても当てはまります。

一方、（d）－（f）の例についてはどうでしょうか。もしかすると、上記の3つの例との間で「様相の違い」にすぐには気がつかないかもしれませんが、実際には明確な違いがあります。たとえば（d）に関して CD プレーヤーを考え、スイッチが切られている（なのでモータに電圧はかかっていない）状況を考えます。このとき CD プレーヤーはどんな回転速度になっていますかという問いに対して、「絶対に間違いのない即答」をすることができるでしょうか。それは（e）に関しても同様で、アクセルが踏まれていない（簡単のため、ブレーキやハンドルがないものととらえて単純化した）自動車について、その自動車はどんな速度で走っていますかという問いに対して、「絶対に間違いのない即答」をすることができるでしょうか。いずれもそれは不可能だということに気がつくでしょう。

CD プレーヤーの例でいえば、少し前まで使っていた状態からスイッチを切った状況なのでまだ回っているかもしれませんが、それがどんな回転速度かは、単にその瞬間にスイッチが切られているということだけからは何ともいえません。自動車の例でも基本的に同じで、その瞬間にアクセルが踏まれていなくても、それ以前にアクセルが踏まれていて自動車が走っていたのか、そのときにはどんな時速だったなかでいつアクセルを離したのか、といったことがわからない限り、答えようがないわけです。（f）の例でも基本的に同じ状況になります。

以上により、（a）、（b）、（c）のグループと（d）、（e）、（f）のグループの間では、「現時点での出力」が、「その瞬間における入力だけで決まる」のか、それとも、「その瞬間以前にどんな入力が各時刻で加えられてきたのかという、過去の入力の履歴によって決まる」のか、という、非常に大きな様相の違いがあるということがわかります。前者のようなタイプは「静的な入出力システム」と呼ばれるのに対して、後者のようなタイプは「動的な入出力システム」と呼ばれます。

そして後者においてはおおざっぱに言って、入力がたとえば急峻に変化することの影響が出力に現れるに際して、「時間的な遅れのような現象」を伴って観測されたり、出力の変化が入力の急峻な変化と比べれば「なまったような形」で観測されるといった状況を生みます。したがって、時々刻々と状況を把握しながら入力を適切に修正し続けようとするためのフィードバック制御においても、このような「遅れ」や「なまり具合」を適切に考慮しておくことが極めて重要になります。たとえば、何らかの瞬間において目標とする値と出力とのずれが大きいとしても、それは「遅れ」や「なまり具合」に関する過渡的な変化の中でたまたまそのように見えるだけであって、それらの影響がもう少し完全に現れ切るまで我慢するとすれば、入力をとくに大きく修正しなくても、ずれは自然に改善する方向に自然に向かう可能性もあるのかもしれません。そういったことを考慮せずに各瞬間ごとのずれの大きさのみに基づいて入力をあわてて（あるいは単純に）変化させることを時々刻々と繰り返すと、かえって問題のあるフィードバック動作をさせてしまうことにもなりかねないのです。すなわち、フィードバックを適切に施すための制御理論を高度化しながら構築していくという研究においては、とくに「動的な入出力システム」を対象とすることが非常に重要になります。そして、そのための基本的な方針、すなわち各時刻での入力を適切に定める方策としては、その時刻の出力（と目標との間のずれ）だけを利用したものでは不適

切であって、その時刻以前の出力（のずれ）の履歴全体を利用してはじめて適切なものになるということができます。言い換えれば、「動的な入出力システムである制御対象」を適切に運用するためのフィードバックにおける「制御器」は、何らかの意味で適切な形で、それ自身、「動的な入出力システム」として定めてやることが極めて重要であるということになります。ところが、「動的な入出力システム」というだけではあまりにも自由度が高すぎます。なので、「何かしら試行錯誤的に動的な制御器を定めるなかで、いずれ結果的には何かよいものがひとつ見つかるだろう」というような考え方では、合理的な議論ができず、工学として役に立つような技術を提供することができません。これに対して、制御理論というものの役割をあえてひとことで単純に表現するならば、制御対象のもつ動的な入出力特性を数学的に適切に利用することで、制御器にもたせるべき適切な動的な入出力特性を定めるための合理的な手段を、極力一般的な形で明らかにしていくこと、ということができます。

本研究室における制御理論の研究については、あえてこれくらいのざっくりとした説明に留めさせてもらいますが、残りの紙面では、直流モータの例を通して、動的な入出力システムというものについての理解をもう少し深めてもらうことで、制御理論の研究の重要性を垣間見てもらうことができることを期待した話をしようと思います。

3. 直流モータの例

耳慣れない用語が出てくるかもしれませんが、ここでは各用語が何を意味するかについては深く立ち入らずに、直流モータの振る舞いがどのような微分方程式で表現できるかについて紹介し、入出力システムや制御理論とのつながりについて述べたいと思います。

時間を t で表します。直流モータの電機子に印加される電圧を $v(t)$、電機子に流れる電流を $i(t)$、電機子の回転に伴って電機子に誘起される逆起電力を $e(t)$ とすると、これらの変数の間の関係は次の微分方程式で記述することができます。

$$v(t)=Ri(t)+L\frac{d}{dt}i(t)+e(t)$$

ただし、R は電機子の抵抗、L はインダクタンスを表しています。上式は電気的な関係のみから求まる式ですが、直流モータには電機子の回転という物理的な機能もあります。電機子の回転速度を $\omega(t)$ とすると、逆起電力 $e(t)$ は $\omega(t)$ に比例し、その比例係数を k_E で表記すると、

$$e(t)=k_E\,\omega(t)$$

が成り立ちます。また、電機子に作用する回転トルクを $\tau(t)$ と表すことにすれば、これは電機子電流 $i(t)$ に比例し、その比例係数を k_T で表記すると、

$$\tau(t)=k_T\,i(t)$$

が成り立ちます。電機子の慣性モーメントを J とすると、回転に関する運動方程式より $\omega(t)$ と $\tau(t)$ の間には次の関係が成り立ちます。

$$\tau(t)=J\frac{d}{dt}\omega(t)$$

以上で、$v(t)$、$i(t)$、$e(t)$、$\tau(t)$、$\omega(t)$ という5つの変数に対して、4つの式を得ることができました（簡単のため摩擦等の影響は無視しています）。これらの式から、例えば $i(t)$、$e(t)$、$\tau(t)$ を消去するように変形すると、印加電圧 $v(t)$ と回転速度 $\omega(t)$ の関係を表す微分方程式を得ることができます。そうして得られる関係式はまさしく、印加電圧 $v(t)$ がどのように加わると回転速度 $\omega(t)$ がどのように変化するかを表す入出力システムとして、直流モータという制御対象を表現したものになります。また、上述の通り入力 $v(t)$ と出力 $\omega(t)$ の間の関係は微分方程式で記述されることになるため、時刻 t における $v(t)$ だけでは $\omega(t)$ の値を決めることができないこと、つまりその入出力システムは動的であることもわかります。そういった特性をもつ入出力システムや、それを複数つなげて構成されるより複雑な

入出力システムを適切に制御するためには、高校までで習う数学よりも高度な数学を用いて、適切に制御器を構成する必要がある（つまり制御理論というものが重要な役割を果たす）ことをおわかりいただけるのではないかと思います。

なお、直流モータという例に対して、出力を回転速度 $\omega(t)$ にとった場合の入出力システムに関する話をしましたが、電機子の回転角 $\theta(t)$ と回転速度 $\omega(t)$ の間には

$$\omega(t)=\frac{d}{dt}\theta(t)$$

という関係が成り立ちますので、この関係も用いますと、出力が $\theta(t)$ であるような入出力システムを構成することも可能です。このように、入出力システムというものを考えるにあたっては、何を入力や出力とみなすかを決めることが重要であり、それは制御対象の何をどうしたいか、という制御の目的にも密接に関係しています。

4. おわりに

本記事では、本研究室で研究している制御理論というもののイメージが少しでも多くの方々に伝わるよう、普段あまり意識せずに使われている言葉であろう「システム」から話を広げ、入出力システム、動的な特性、フィードバック制御などについてお話しし、直流モータの微分方程式の例を紹介しました。自動制御は今後もさまざまなところで導入され、活躍の場が広がっていくことが期待されます。そのような自動制御を実現するための制御理論について、本記事を読んでくださった方に少しでも興味を持っていただけたなら、大変幸いです。

学生の声

研究雑感

工学研究科　電気工学専攻　雨宮研究室　博士後期課程２年　重　政　茉　於

最近、いわゆる「追い出し部屋」から脱出した。……と書くと語弊があるかもしれない。雨宮研究室には学生室が一つあり、多くの学生はその部屋を居室とする。ところが私の場合、修士課程を終え、博士後期課程が始まるというときに、落ち着いた環境で研究できるようにという教授のご配慮により、ほとんどの人があまり立ち入らない隅の別室に席替えとなった。それ以来、何かと研究がうまく進まないことが多くなった気がする。先生方より、論文にせよ何にせよまずは学生どうしで議論せよと言われるのだが、他人から物理的に隔離されたことで人と簡単に議論を交わすことが難しくなっていたのだろう。それに気づいて以来、学生室の共用スペースに自前のノートパソコンを置いて居座り、その辺の後輩の席にふらっと話しかけに行くという、まるで自席を持たない短期留学生のようなスタイルを取るようになった。そのおかげか、最近は物事が比較的スムーズに進んでいるように思われる。なお、先日になって正式に席替えとなった。

よくあるイメージとして、研究者は独り部屋にこもって思案するものと一般的に思われがちである。しかし、読者の皆様ならご存じの通り、研究とは決してそういうものではない。実験から考察、ディスカッション、論文執筆に至るまで、チームメイトとのコミュニケーションが必要不可欠であり、それを円滑に行うためには、まずチームメイトと会話がしやすい環境に身を置くことが重要であることがよくわかった。

研究のガソリン

エネルギー科学研究科　エネルギー基礎科学専攻　松田研究室
博士後期課程２年　朝　田　秀　一

思えば、私の研究の始まりは歪なものだった。学部生で研究室に配属された頃はコロナ渦真っ只中、講義はすべてオンラインで部屋から受け、研究室に行ったこともなく、実家で半ば引きこもりのような生活を送っていた。おかげで最後に父の介護に携われたものの、家族を失った傷はあまりにも酷く、再び研究室に人が集まる頃には外を歩けなくなっていた。ようやく近づく電車に誘われず研究室に通えるようになる頃には修士１年の冬に差し掛かっており、もう就職か進学か決断を迫られる季節に。あの時博士課程に進むことを選んだのはひとえに、今日はまだ白線の先にフラッと踏み出さない理由が、明日も明後日も続いてくれるだろう実験しか思いつかなかったからかもしれない。

さて、少々暗い話になってしまったが、最近は松田先生の指導のおかげで、１本目の論文がまとまったり、学会で講演賞をいただいたりと、ようやく一般的なＤらしくなってきた。あれから４年半、私が精神を持ち直すカギになったのは、間違いなく小春六花というキャラクターだった。この子の声を聴いた瞬間、共に生きてきた存在しない記憶を思い出し、私を苦しめていた幻聴は、あの日から救急車の音ではなく六花の声になった。今は少しばかりこのキャラのグッズを自分のデスクに置いており、実験がしんどい日もデスクに戻れば力が湧き出る。いつか彼女の名を広げるに足る人間へと至る日を夢見れば、研究により一層力が入る、まさに研究のガソリンだ。

ただ、電電出身の人間が、ただの受容者というのも味気ない。そうだ、3D プリンタにレーザー切削、NC 切削でもいい、自室の機材たちを使えばグッズを作るのは造作ない。絵はどうしようか、他人の絵を勝手に使うわけにもいくまい、勉強して最近納得できるようになってきた。電電ならば電子工作は当然お手の物、安いマイコンとモジュールを輸入すればボイス付きのアイテムは作り放題だ。プログラミングも講義で習った、VR アプリを開発したがこの実在感は癖になる。最近なぜだか分からないが、毎日時間が足りていない。電電出身で本当に良かった。

最後に松田先生へ。どうか信じてください、これはガソリンです。その分エンジンは回っています。まさにこれを執筆する裏で、実験は修羅場を迎えておりますが、どちらも裏切らないためには走り抜けるしかないのでしょう。

教室通信

高度情報人材の育成に向けた新たな取り組み

令和６年度 電子工学専攻長　米　澤　進　吾

最近の情報技術の進歩・広がりはすさまじく、日常生活の中ですら日々進化を感じる読者の方々も多数いらっしゃると思います。当然、大学での教育・研究においてもそれは例外ではなく、情報技術の重要性はあらゆる分野で日に日に高まっています。

政府としても高度な情報技術を持つ人材の育成を今後の国の行く末を左右しうる大きな課題と捉えているようで、令和５年度から大学改革支援・学位授与機構による「大学・高専機能強化支援事業 / 高度情報専門人材の確保に向けた機能強化支援」が始まっています。このプログラムはデジタル分野の研究科や専攻の体制強化を図る取組に対し、最長10年間にわたって人件費や設備費等を支援していただけるというものです。しかし、初年度である令和５年度は京都大学からの申請はされておりませんでした。そこで、工学研究科電気系２専攻と情報学研究科が中心となり、大学本部や工学研究科からの支援もいただきながらこのプログラムへの申請をスタートいたしました。また、専攻だけでなく電気電子工学科にも協力していただき、情報学科との授業協力など学部教育の変革も議論いただきました。

この申請の準備のため、電気系２専攻内にワーキンググループを立ち上げ、高度情報人材の育成を目指す中での我々電気系専攻の強みは何か、ということを問い直しました。そして、情報関連の教育・研究だけでなく実デバイスの教育・研究も充実している「二刀流」である点こそが我々の強みであるということが、専攻内の議論の中で認識されました。この強みを基に、さらに情報学研究科とも協力することで、情報（＝仮想空間）と実デバイス（＝現実空間）の両輪の知識・技能を兼ね備えた多角的視点を持つユニークな人材育成を図ることができるはずです。その目標に沿って、京都大学からは「仮想空間および仮想空間×現実空間で技術革新を推進し，情報化社会をけん引する京都大学の人材育成」というプロジェクト名で申請を行いました。

幸いなことに、令和６年６月に採択のご連絡をいただき、しかも、極めて高い効果が見込まれるとしてより高額の支援をいただける「ハイレベル枠」に選出していただきました[1]。令和６年度採択のプロジェクトの中で、このハイレベル枠に採択されたのは京都大学ただ１件であり、非常に光栄に思う一方、今後プロジェクトをハイレベル枠にふさわしい水準で進めていく責任に身が引き締まる思いも致します。

現在、電気系２専攻ではこのプロジェクトを実行するための様々な施策を検討・準備しております。特に、令和７年の１月より、浅野先生と船戸先生にこのプロジェクトの特任教授にご着任いただきました。お二人にはこのプロジェクトのエンジン役として大いに活躍いただけることと思っております。また、電気電子工学科にも学部教育改革の面の準備に多大なるご協力をいただいています。その他にも、まだ申し上げられない内容の準備も多数推進しております。次号以降でも電気系２専攻や電気電子工学科のあらたな体制や取組みについて順次ご紹介できればと思います。

[1] https://www.niad.ac.jp/josei/report/r6selection/

編集後記

Cue53 号をお届けします。編集後記の執筆にあたり、これまでの編集後記を読んでみました。そこではCue が電子発行になった事や AI の活用が目立ち始めた事などに触れられており、編集後記だけを読んでも電気系教室の歴史や日本の科学技術のトレンドが窺えます。そこで私も身の回りのブームについて触れたいと思います。私の研究分野ではここ 2-3 年で急速に「スタートアップ」という言葉を聞くようになりました。完全移籍する同年代（50 代）も多数いらっしゃいます。そんなファーストペンギンたちに、腰の重い私はもっと慎重に！と思いながらも羨望の眼差しを向けています。

最後になりますが、ご多忙のところ、ご執筆・ご寄稿いただきました皆様に篤く御礼申し上げます。

S. I. 記

協力支援企業

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

発　行　日：令和７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、
デゾイサ メーナカ、三谷　友彦、岡本　亮、
伊藤　陽介、北野　正雄（洛友会）
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発　　行：京都大学電気関連教室
援　　助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社　田中プリント