

Cue

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.48 SEPTEMBER 2022

[第48号]

卷頭言

松本 紘

大学の研究・動向

スピントロニクス技術を用いたメモリデバイス

工学研究科 電子工学専攻

電子物理工学講座 極微電子工学分野

産業界の技術動向

オムロンサイニックエックスにおける

機械学習研究の最先端

オムロンサイニックエックス株式会社 米谷 竜

新設研究室紹介

研究室紹介

令和3年度修士論文テーマ紹介

高校生のページ

学生の声

教室通信

編集後記

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

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

cue 48 号 目次

巻頭言

慣れと挑戦	昭和 40 年卒 京都大学名誉教授 松本 紘	1
-------	------------------------	---

大学の研究・動向

スピントロニクス技術を用いたメモリデバイス	工学研究科 電子工学専攻 電子物理工学講座 極微電子工学分野	2
-----------------------	--------------------------------	---

産業界の技術動向

オムロンサイニックスにおける機械学習研究の最先端	オムロンサイニックス株式会社 米谷 竜	8
--------------------------	---------------------	---

新設研究室紹介	15
---------	----

研究室紹介	17
-------	----

令和 3 年度修士論文テーマ紹介	34
------------------	----

高校生のページ

宇宙線による情報システムの誤動作—メカニズム解明と対策技術の開発を目指して—	情報学研究科 通信情報システム専攻 超高速信号処理分野 橋本 昌宜	57
--	-----------------------------------	----

学生の声

Some Insights from Reading Articles	工学研究科 電気工学専攻 土居研究室 博士後期課程 2 年 吳 遼倫	61
自由を享受する	工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程 2 年 和泉 孝紀	61

教室通信

エレクトロニクス・スプリングキャンプの実施	サマーキャンプ運営委員会 松尾 哲司、中西 俊博、佐藤 丈博、上田 博之、金子 光顕	62
-----------------------	---	----

編集後記	64
------	----

卷頭言

「慣れと挑戦」

昭和40年卒 京都大学名誉教授 松 本 紘



大学の学部、修士課程で専門教育を受け、その後、大学や研究機関で研究者としてのキャリアを積み重ねていけば、専門知識は深まり、研究者として成長し、専門分野について自信も持てるようになる。しかしながら、それとともに専門領域は狭まることが多い。そのような時は、私は専門外の分野にも関心を持つことをお勧めする。専門外の分野に取り組むことは新たな挑戦である。経験のある専門領域に取り組むことは安全な選択であり、心理的な不安は少ないし、実績も上げやすい。しかし、専門分野のみに留まっていると、社会とのつながりは限定されたものとなり、多様な他者との交流も期待できない。挑戦する分野は、電気系以外の工学、理系全般、人文社会系などの文系といくらでも広がっている。

新たに挑戦する分野では、改めて新たな知識を学ぶ努力が必要であり、成果が出せるかも分からない。しかし、失敗を恐れずに挑戦する姿勢は、変化の激しい今の時代に求められる資質である。新しい分野における挑戦は、多様な背景を持つ他者との協働などを通じて、リーダーシップ、忍耐力、専門性を高めるために必要な学び続ける力などを養う機会となる。挑戦することにより、人や社会とのつながりは広がっていく。

私自身も研究とは別の分野の役職に就き、新しい分野に挑戦せざるを得ないことが幾度かあった。慣れない分野に取り組むときは、戸惑い、不安があるし、苦労することも多い。それでも挑戦し続けることは、学び続けることであり、自身の可能性を広げていく。また、理系、文系の枠を超えた知識、教養を身につけることにもつながるだろう。国際会議などでは、自身の専門以外の分野、例えば、日本の文化、歴史、宗教などについて、意見を求められることもある。その際に、幅広い知識、教養が備わっていれば、自信を持って発言できる。これは研究者としての強みとなる。一般的に言って、日本人は国際舞台で積極的に発言することが苦手な人が多い。学校教育法では、大学の役割として、「教育」「研究」「社会貢献」の3つを掲げているが、日本の大学の教育システムは国際標準とは少しずれてしまっている。

人生100年時代に豊かな人生を築くためには、知識や専門性、外国語コミュニケーション力などとともに、飽くなき探求心や挑戦する気持ちを持ち続けることが大切である。特に、若い方たちには新しい分野に挑戦して、専門分野を超えて知識を深め、活躍の場を広げられることを期待している。

大学の研究・動向

スピントロニクス技術を用いたメモリデバイス

工学研究科 電子工学専攻 電子物理工学講座 極微電子工学分野

教授 白石誠司
准教授 安藤裕一郎
助教 大島諒
助教 重松英

1. はじめに

これまでエレクトロニクスは、ムーアの法則に従い集積回路の性能向上に貢献してきましたが、それも限界に近付きつつあり、技術革新が求められています。その有力な候補となっているのが、スピントロニクスです。エレクトロニクスでは電子の「電荷」のみを用いますが、スピントロニクスではそれに加え、「スピン」と呼ばれる電子の自由度を利用します。スピンは磁性の源としての性質を持っています。例えば図1に示すように、金や銅といった非磁性体では、一つ一つのスピンがランダムな方向を向いており、マクロに見るとスピンが打ち消すため、磁性を有していません。一方鉄やコバルトなどの強磁性体では、一つ一つのスピンが同じ方向にそろっているため、マクロに見ても磁性が生じます。ここで、スピンの流れである「純スピン流」について説明します。通常の電流は、アップスピンとダウ nsピンが同量存在するため、スピンを輸送することができません(図2)。一方で、もしアップスピンが右へ、ダウ nsピンが左へ移動するような流れがあれば、スピンのみを輸送することが出来ます。この純スピン流は微小磁石の流れとしての特徴を持つため、エレクトロニクスとマグнетイクスの複合が生み出す、大幅な技術革新が期待されます。

2. スピン流の生成

2.1 スピン軌道相互作用とスピンホール効果

純スピン流をどのように生成するか考えましょう。電流から純スpin流を生成する手法はいくつか存在しますが [1]、ここではスpin軌道相互作用(SOI)による生成を考えます。ここでは古典的モ

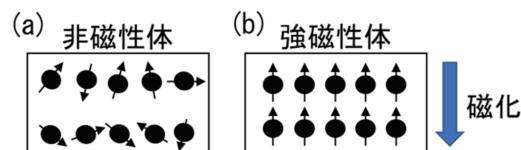


図1 (a) 非磁性体と(b) 強磁性体中のスピン

	電荷	スpin
電流	4	0
純スpin流	0	4

図2 電流と純スpin流

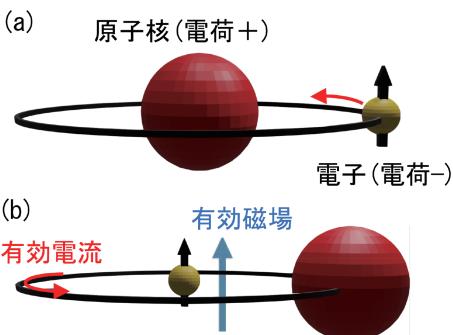


図3 (a) 原子核の周囲を移動する電子の原子核視点と (b) 電子視点。(ここでは電子の矢印は磁気モーメント)

モデルで SOI を説明します。図 3(a)にあるように、伝導電子が原子核の周囲を歳差する状況を電子の視点で考えると、図 3(b)のように原子核が電子の周囲を歳差しているように見えます。原子核は正の電荷を持っているので、これは円環電流が流れている場合と等価になります。電流はアンペールの法則により磁場を生成します。この実効的な磁場と反平行を向いているスピンは、もう一方のスピンと比較しエネルギー的に有利になりますので、特定のスピンが優先的に原子核の方向へ軌道が曲げられます。ここで電子のスピンと磁気モーメントは逆向きであることに注意してください。このように、スピンの方向が電子軌道に作用する効果を SOI と呼びます。この古典的モデルでも分かるように、原子番号が大きい元素ほど、原子核の電荷量が増えるため、SOI が増加する傾向があります。

2.2 スピンホール効果

SOI により、電流を担うアップスピン電子とダウンスピン電子は、それぞれ逆の方向へ軌道が曲げられますので、結果的に電流と垂直方向に純スピン流が生成されることになります。この現象は、電子が磁場によるローレンツ力で軌道が曲げられ、電流、磁場と垂直方向に電界が生じる「ホール効果」(図 4(a))との類似性から、「スピンホール効果」(図 4(b))と呼ばれています。スピンホール効果による電流 - スピン流変換効率は「スピンホール角」と呼ばれ、Pt、Ta、Wなどの重金属で 0.1 程度の大きさと見積もられています [2,3]。近年のスピントロニクスにおける研究では、スピンホール角の大きな物質の探索が盛んに行われており、重金属のみならず、トポロジカル絶縁体 [4,5] やワイル半金属 [6,7] といった特殊なバンド構造を有する物質群において、巨大なスピンホール角が続々と報告されています。

3. メモリデバイスへの応用

3.1 スピントルク

1 章でスピン流は微小磁石の流れであると説明しましたが、ここでは具体的にスピン流が磁化にどう作用するのかを考えます。何らかの効果により、強磁性体に外部から純スピン流が注入される場合を考えましょう。純スピン流が強磁性体の磁化を担う局在スピンを通過する際、角運動量を交換することで、磁化が少し傾けられます(図 5)。これはスピン流による磁化(角運動量)の変化に相当するので、「スピントルク」[8] と呼ばれています。

3.2 スピン軌道トルク磁気抵抗メモリ

図 6 のように、重金属などの非磁性体上に磁性体(フリー層)/絶縁体/磁性体(固定層)3 層構造(磁気トンネル接合)があるような構造を考えます。この構造で重金属に電流を流すと、重金属の SOI によりスピンホール効果が発生します。生成された

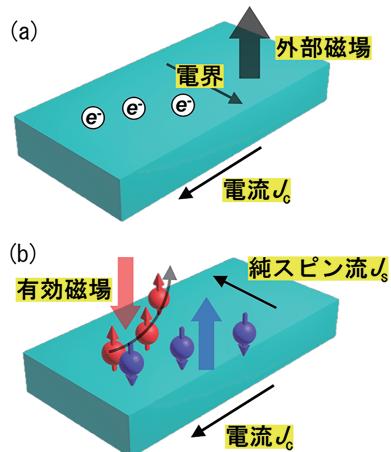


図 4 (a) ホール効果と (b) スピンホール効果

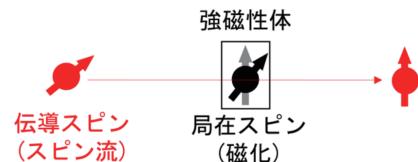


図 5 スピン流が与えるスピントルク

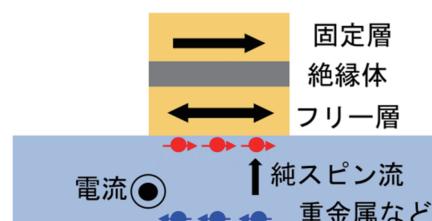


図 6 SOT-MRAM のデバイス構造

スピントルクは上部の強磁性体へと注入され、磁化にスピントルクを与えます。注入されるスピントルクの大きさが、磁性体の磁化と反平行ならば、電流を増大させることでフリー層のみの磁化反転が可能です。磁気トンネル接合に対し、縦方向に電流を流した際の電気抵抗が、磁化の平行 or 反平行で変化する「トンネル磁気抵抗効果 [9]」を利用し、フリー層の磁化方向を検出します。磁化の平行 or 反平行を2進数の「0」と「1」に対応付けることで、図6の構造に情報を格納、すなわちメモリとして用いることができます。このようなメモリデバイスは「スピントルク磁気抵抗メモリ(SOT-MRAM)」と呼ばれています。磁化は電源を切っても情報が保持される「不揮発性」を有することから、コンピュータの待機電力の大幅削減が期待され、次世代メモリとして注目されています [10]。

4. 整流効果を用いたスピントルク磁化反転の検出

実現に向けた最も大きな課題の一つは、書き込み時の電流密度です。この解決のためには、巨大なスピントルク角を有する材料探索、トポロジカル絶縁体などの新奇物理現象、回路設計、磁性体の最適化など、様々なアプローチから学理を構築することが必要です。しかしながら、磁気トンネル接合の作成には高度な技術を要し、多様な材料 / 構造に対する機動的探索には向きません。こうした課題を解決するため我々は、磁気トンネル接合を用いて測定可能である、整流効果に着目しました。一般的に整流効果を生じるためには、電流方向に応じた抵抗の変化(非相反伝導)が必要です。したがってオームの法則に従う限り整流効果は生じませんが、重金属 / 強磁性体2層構造では、磁化による時間反転対称性の破れ、重金属中の電流によるアンペール磁界、重金属中のスピントルク効果等により、抵抗の値は電流の正負で少しだけ違います。ここに交流電流を印加すると、非相反伝導による電圧は、(電流の振動) \times (抵抗の振動) ですので振動成分の2乗、すなわち2倍で振動する成分と直流成分の和として現れます。そのためローパスフィルタにより直流成分のみ取り出すことで、非相反伝導を検出することができます。上の非相反伝導の起源はいずれも磁化による時間反転対称性の破れです。そのため、検出信号は磁化方向に対応した極性を示します。これにより磁化反転の検出が可能となります。図7にPt/Py(NiとFeの合金)2層構造における、Ptのスピントルク効果を利用したPyの磁化反転の検出信号を示します。Pyのサイズは100 nmと非常に微小ですが、明瞭な信号が検出されました [11-13]。この手法では磁気トンネル接合といった複雑な構造を用いないため、極論を言えば、電流を流すことさえできればスピントルク磁化反転を実証することができる。したがって、新奇材料が次々と発見される現代において、上記の手法は非常に強力なツールとなると言えます。

5. 高効率化へ向けた研究

これまでスピントルク磁化反転の検出に焦点を当ててきました。ここからは、実際にどのように高効率化を目指すかについて、我々の研究を基にご紹介いたします。

5.1 2パルス磁化反転

スピントルクは、注入スピントルクを σ 、磁化を M とすると、 $M \times \sigma \times M$ に比例することが

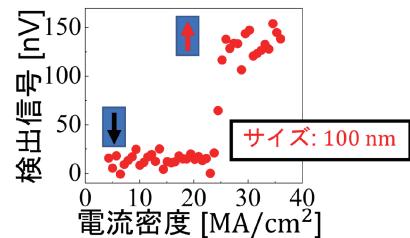


図7 スピントルク磁化反転の検出信号

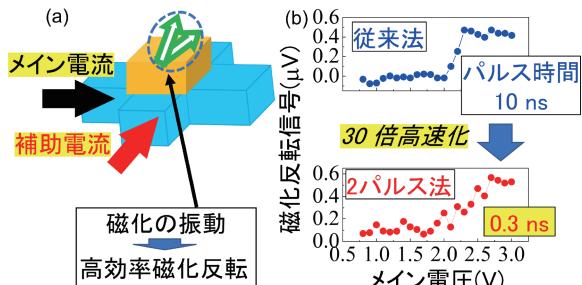


図8 (a) 2パルス磁化反転のセットアップと (b) 実験結果

知られています。ですので注入スピントルクが平行 / 反平行の場合はトルクがゼロ、それ以外の場合は有限となるわけです。強磁性体として面内に磁化容易軸を持つ材料を使う際、磁化と平行のスピントルクを注入することで磁化反転を行うのですが、先に述べたように平行状態ではトルクは働きませんので、反転の初期状態においては熱擾乱による磁化揺らぎが必要です [14]。このことが磁化反転の高速化を妨げています。そこで図 8(a)にあるような十字型の構造を作成しました。電流方向をベクトル的に制御できるため、スピントルク効果による注入スピントルクの方向も、それぞれの方向からの電流量を調整することで 2 次元的に制御できます。最もトルクが働きやすいように制御することで、磁化反転効率は 30 倍も高速化されることを実証しました [図 8(b)]。

5.2 自己誘起スピントルク

これまで非磁性体 / 強磁性体 2 層構造で、非磁性体のスピントルク効果により磁性体へ注入されるスピントルクを考えました [図 9(a)]。ここでは同様の構造で、強磁性体のスピントルク効果について考えてみましょう。強磁性体にスピントルク効果がある場合、非磁性体と隣接する側の界面では、

蓄積したスピントルクは流出することができます [図 9(b)]。例えばアップスピントルクが非磁性体へと流出している場合、時間反転対称性から、ダウンスピントルクが強磁性体へと注入される像と全く等価になります。すなわち、強磁性体のスピントルク効果も、非磁性体のスピントルク効果と全く同様に磁化に作用するのです [15]。これを「自己誘起スピントルク」と呼びます。この効果を確かめるため、強磁性体由来と非磁性体由来のスピントルクが互いに逆向きである、Ta/Co 2 層構造を対象に調査を行いました。強磁性体である Co の膜厚増加と共に Co のスピントルク効果由来のスピントルクが増大し、最終的に Ta 由来のスピントルクを打ち消してゼロになる傾向が確認され、自己誘起スピントルクの存在を確認できました [16]。本研究により、非磁性体と強磁性体の適切な組み合わせにより、スピントルク磁化反転が高効率化されるという、新たな知見を得ることが出来ました。

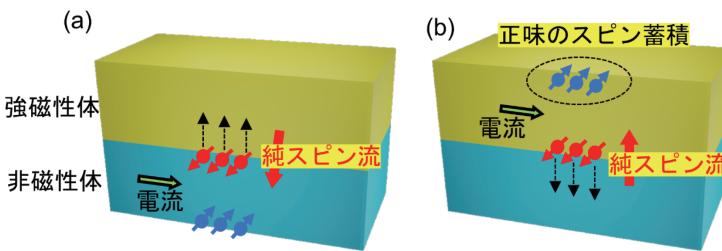


図 9 (a) 非磁性体から強磁性体へのスピントルク注入と (b) 強磁性体から非磁性体へのスピントルク流出

5.3 反転対称性の破れの利用

これまで、磁化容易軸が面内方向である強磁性体を考えました。面内磁化膜はサイズが小さくなるにつれて、反磁界の効果により磁性が弱まるため、集積化に不向きという問題があります。一方で面内方向と垂直に磁化容易軸を持つ強磁性体は、サイズ減少に伴う反磁界の影響を受けず、集積化に向いています。しかしながらスピントルク効果で

注入できるスピントルクは面内であるため、一般的に面内磁化膜の磁化反転はできません。ここで空間反転対称性の破れによるスピントルク効果について考えましょう。例えば 2 層構造の界面では、仕事関数の違いによる電界が生じています。したがって、界面に存在する電子視点で考えれば、片方の物質は相対的に + の電荷を持っているように見

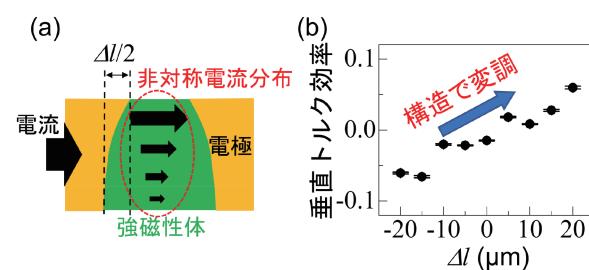


図 10 (a) デバイス構造と (b) 垂直トルクの測定結果

えます。電流を担う電子、つまり移動する電子視点で考えれば、+の電荷が後ろに移動しているように見えますが、この相対的電流が生成する磁界が自身のスピンと作用することで、アップスピンとダウンスピンにエネルギー差が生じ、スピン蓄積が生まれます。これはラシュバ-エーデルシュタイン効果 [17,18] と呼ばれています。このように面直の対称性の破れが面内のスピン、そして隣接磁性体にトルクを与えることに着目すれば、面内の対称性を破ることで 90 度異なる面直方向へトルクが生成されると予想できます。面直方向のトルクは垂直磁化膜の磁化反転を可能にするため、応用上の観点からも、近年注目されています。我々の研究室では、図のように電極の構造を工夫し、電流の分布をあえて非対称にさせた場合の電流誘起トルクを調査しました。その結果、垂直トルクの大きさ、符号を構造の非対称性で自由自在にコントロールすることができました [19]。電流の非対称性は、デバイス作成段階の設計次第で簡単に導入できるため、垂直磁化膜を用いた SOT-MRAM の実現に大きく貢献できると期待しています。

6. まとめ

今回はスピントルク磁化反転について紹介しましたが、これはスピントロニクス研究のほんの一部に過ぎません。我々の研究室に限っても、スピントルクを用いた脳型コンピューティング、磁性の波であるマグノン準粒子を利用した量子計算、トポロジカル超伝導体、2 次元材料と、研究内容は多岐に渡ります。加えてスピントロニクスは比較的若い学問分野であるため、新規物理現象、そして次世代技術のマイルストーンであると言えます。今後も新現象の発見による基礎物理学への、そして「デバイス」実現による世の中への貢献を目指し、基礎、応用、両方の観点から研究を進めたいと思います。以下に参考文献を示します。

参考文献

- [1] Y. Ando and M. Shiraishi, *Spin to Charge Interconversion Phenomena in the Interface and Surface States*, J. Phys. Soc. Japan **86**, 011001(2017).
- [2] T. Tanaka, H. Kontani, M. Naito, T. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue, *Intrinsic Spin Hall Effect and Orbital Hall Effect in 4d and 5d Transition Metals*, Phys. Rev. B **77**, 165117 (2008).
- [3] S. Dushenko, M. Hokazono, K. Nakamura, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, *Tunable Inverse Spin Hall Effect in Nanometer-Thick Platinum Films by Ionic Gating*, Nat. Commun. **9**, 3118 (2018).
- [4] Y. Ando, *Topological Insulator Materials*, J. Phys. Soc. Japan **82**, 102001(2013).
- [5] Y. Ando, T. Hamasaki, T. Kurokawa, K. Ichiba, F. Yang, M. Novak, S. Sasaki, K. Segawa, Y. Ando, and M. Shiraishi, *Electrical Detection of the Spin Polarization Due to Charge Flow in the Surface State of the Topological Insulator Bi 1.5 Sb 0.5 Te 1.7 Se 1.3*, Nano Lett. **14**, 6226(2014).
- [6] K. Manna, Y. Sun, L. Muechler, J. Kübler, and C. Felser, *Heusler, Weyl and Berry*, Nat. Rev. Mater. **3**, 244(2018).
- [7] L. Leiva, S. Granville, Y. Zhang, S. Dushenko, E. Shigematsu, T. Shinjo, R. Ohshima, Y. Ando, and M. Shiraishi, *Giant Spin Hall Angle in the Heusler Alloy Weyl Ferromagnet Co₂MnGa*, Phys. Rev. B **103**, L041114(2021).
- [8] J. C. Slonczewski, *Currents and Torques in Metallic Magnetic Multilayers*, J. Magn. Magn. Mater. **247**, 324(2002).
- [9] M. Julliere, *Tunneling between Ferromagnetic Films*, Phys. Lett. A **54**, 225(1975).

- [10] Q. Shao, P. Li, L. Liu, H. Yang, S. Fukami, A. Razavi, H. Wu, K. Wang, F. Freimuth, Y. Mokrousov, M. D. Stiles, S. Emori, A. Hoffmann, J. Akerman, K. Roy, J.-P. Wang, S.-H. Yang, K. Garello, and W. Zhang, *Roadmap of Spin-Orbit Torques*, IEEE Trans. Magn. **57**, 1(2021).
- [11] M. Aoki, E. Shigematsu, M. Matsushima, R. Ohshima, S. Honda, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *In-Plane Spin-Orbit Torque Magnetization Switching and Its Detection Using the Spin Rectification Effect at Subgigahertz Frequencies*, Phys. Rev. B **102**, 174442(2020).
- [12] M. Aoki, E. Shigematsu, M. Matsushima, R. Ohshima, S. Honda, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *Enhancement of Low-Frequency Spin-Orbit-Torque Ferromagnetic Resonance Signals by Frequency Tuning Observed in Pt/Py, Pt/Co, and Pt/Fe Bilayers*, AIP Adv. **11**, 025206(2021).
- [13] M. Aoki, E. Shigematsu, R. Ohshima, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *Coexistence of Low-Frequency Spin-Torque Ferromagnetic Resonance and Unidirectional Spin Hall Magnetoresistance*, Phys. Rev. B **104**, 094401(2021).
- [14] J. Z. Sun, *Spin-Current Interaction with a Monodomain Magnetic Body: A Model Study*, Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. **62**, 570(2000).
- [15] K.-W. Kim and K.-J. Lee, *Generalized Spin Drift-Diffusion Formalism in the Presence of Spin-Orbit Interaction of Ferromagnets*, Phys. Rev. Lett. **125**, 207205(2020).
- [16] M. Aoki, E. Shigematsu, R. Ohshima, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, Submitted.
- [17] V. M. Edelstein, *Spin Polarization of Conduction Electrons Induced by Electric Current in Two-Dimensional Asymmetric Electron Systems*, Solid State Commun. **73**, 233(1990).
- [18] S. Lee, H. Koike, M. Goto, S. Miwa, Y. Suzuki, N. Yamashita, R. Ohshima, E. Shigematsu, Y. Ando, and M. Shiraishi, *Synthetic Rashba Spin-Orbit System Using a Silicon Metal-Oxide Semiconductor*, Nat. Mater. **20**, 1228(2021).
- [19] M. Aoki, E. Shigematsu, R. Ohshima, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *Current-Induced out-of-Plane Torques in a Single Permalloy Layer with Lateral Structural Asymmetry*, Phys. Rev. B **105**, 144407(2022).

産業界の技術動向

オムロンサイニックスにおける機械学習研究の最先端

オムロンサイニックス株式会社
米 谷 竜

1. はじめに：オムロンサイニックスについて

オムロンサイニックス（OSX）は2018年に設立されたオムロンの子会社です。大学から転職してきたメンバーが非常に多く、十数名の小さな会社でありながら、社長も含めてメンバーの多くが博士号を取得しています。JSPSやJSTの競争的資金にも応募できまし、大学との共同研究も活発に行われています。そして何より、会社全体の活動として、学術的にハイインパクトな成果を見据えた基礎研究に邁進しています。それぞれのメンバーはインターンとともに研究することもあれば、メンバー同士で協力して研究を進めることもあります。ただし、いずれのケースにおいても、研究活動における重要なマイルストーンとして国際会議・ジャーナルでの論文発表があり、成果のオープンソースソフトウェア化がありおます。つまり、成果をオープンにすることに関して OSX は非常に積極的であり、それがメンバーやインターンにとっての魅力・原動力になっています。

もちろん、事業的な側面を全く無視しているわけではありません。オムロンサイニックスという名前は、オムロン創業者である立石一真が提唱した「SINIC (Seed-Innovation to Need-Impetus Cyclic Evolution) 理論」が元になっています。要点を言うと、科学が技術の種となり、それが社会を革新する — 一方で、社会からのニーズが技術の開発を促進し、ひいては新たな科学の創出へつながる — これらのサイクルにより社会を発展させていく、ということになります。個人的には、事業的なニーズをできる限り普遍的な課題へと抽象化し、基礎研究の世界においてその課題を解決する技術体系を創出するとともに、その過程で得られた知見をニーズ側にフィードバックする、という営みとして SINIC を理解し、また実践しています。また、OSX を特徴づけるもう一つの要素として、「近未来デザインからのバックキャスト」という考え方があります。つまり、現状の社会情勢、課題、技術から将来のあり方を予測(フォアキャスト)するのではなく、まず先に目指す近未来のあり方を具体的に思い描き、その実現に必要な戦略を明確化しようということです。これを常に意識することで、目の前にある技術的・事業的課題を近視眼的に解決しようとするのではなく、より長期的な視点をもって、広がりのある研究に取り組むことができます。

2021年10月22日に開催された電気系懇話会では、OSXで取り組まれている研究プロジェクトのうち、とりわけ機械学習に関連したものを取り上げて紹介しました。本稿ではそのいくつかについて改めて振り返ります。

2. モデル統合に基づく分散環境からの機械学習

データセントリック AI という言葉があります。AI、より狭義には機械学習モデルを学習するためには、良質・大量・多様な学習データが不可欠であるという、いわばデータ中心的な考え方です。実際、どれほど複雑な処理が可能な機械学習モデルであっても、その処理のお手本となるデータが十分になければ、学習されたモデルは期待する性能を発揮することができません。

一方で、分野によってはそもそもデータを大規模に収集することが難しい状況もあります。たとえば、

医用画像処理という分野ではX線画像等から異常部位の検出や臓器領域の抽出を行うために機械学習が利用されることがあります。しかしながら、このような画像やそこから得られる処理結果はもともと特定の個人と紐づくものであり、適切なデータ取得や利用、保守には多くの手続きや労力を要します。ほかにも、製造業における基盤検査や外観検査といった課題においても機械学習は有力なアプローチですが、製造中の製品に関する情報は多くの場合機密に扱う必要があり、たとえば各地に点在する工場からデータを吸い上げて一つのサーバで保管するといった、ともすれば機械学習分野では自然と考えられる前提を満たすことがそもそも難しいことがあります。

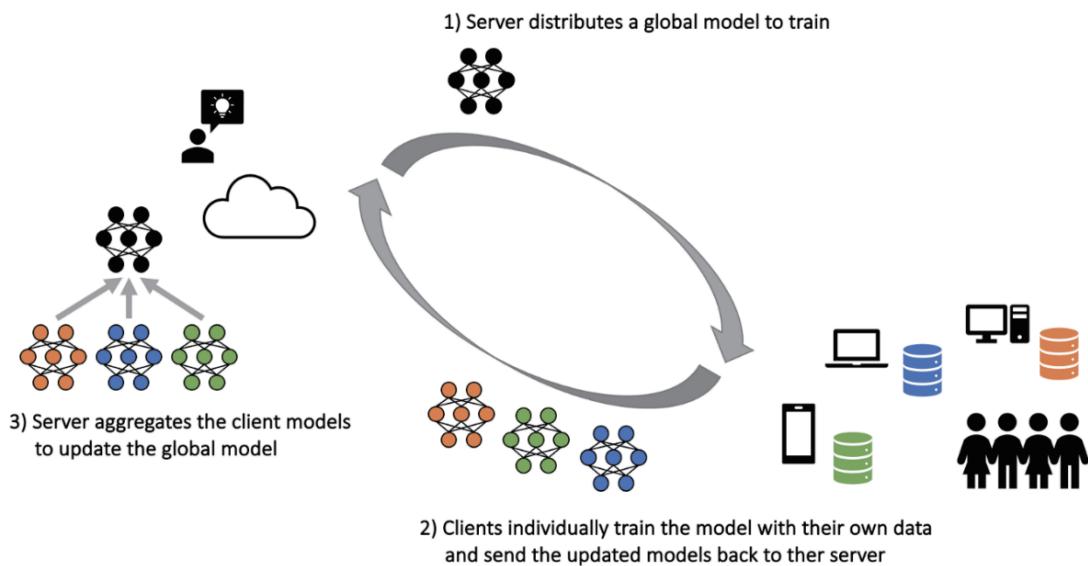


図1 モデル統合に基づく分散環境からの機械学習

このような困りごとを抽象化していくと、一つの学術問い合わせが見えてきます — データを計算サーバに集約することなく、かつそのデータの中身に直接アクセスすることもせず、しかしそのデータを用いて機械学習モデルを学習することはできるでしょうか？

この問い合わせに対する一つの有力なアプローチが、「モデル統合に基づく分散環境からの機械学習」です。図1に示すように、複数のクライアントがそれぞれ独自にデータを保持している状況を考えます。これに対してサーバは、クライアントのデータに直接アクセスすることなく、しかしそれらのデータを活用することで機械学習モデルを学習することを目指します。より具体的には、(1) まずサーバが各クライアントに対してモデルを配布し、(2) クライアントはそのモデルを自身のデータを用いて学習、サーバに返送します。(3) その後、サーバはクライアントから送られてきた学習済みモデルを蒸留(distillation)と呼ばれる方法で統合することで、全モデルの学習結果を反映したかのような、より良いモデルを獲得します。これにより、サーバがクライアントのデータそのものにアクセスする必要がなくなるのです。

上記のような基本アイデアのもと、具体的に解きたい機械学習の問題の種類にあわせて実際の学習パイプラインを構築することになります。たとえば、文献[1]では画像分類という典型的な教師あり学習に関して、それぞれのクライアントが持つデータの分布や学習可能なモデルの大きさが異なる状況に適したモデル統合方法および全体のパイプラインを提案しています（図2）。また文献[2]では、強化学習において各クライアントが異なる環境からデータを収集した状況をとりあげ、新たな未知環境でモ

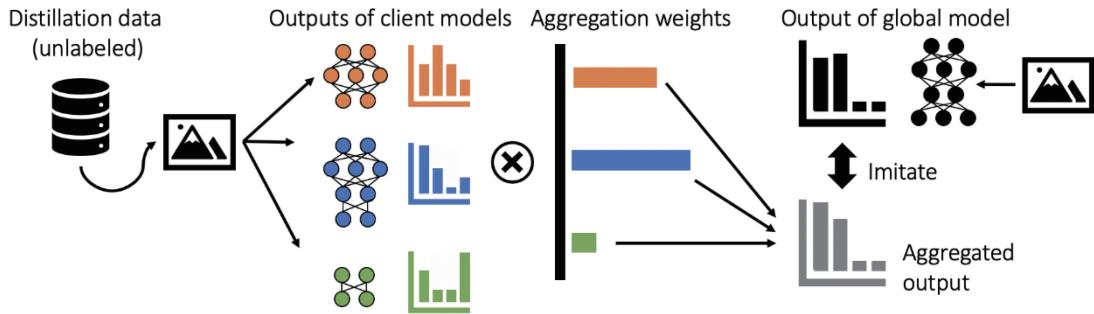


図2 モデル統合に基づく教師あり学習の一例 [1]

モデルを効率的に学習する課題に取り組んでいます。さらに文献 [3] では、同様の考え方を実際のロボット操作に応用しています。このように、アイデア自体はシンプルながら人工知能、ロボティクスという複数領域にわたって成果を論文化することができました。

とはいったものの、上記の研究群はあくまでモデル統合に基づく学習方式、アルゴリズムのみに特化したものであり、これを実課題で運用しようとするべき点は非常に多くなります。たとえば、あるクライアントからサーバに対してモデルを送信する際には、どのようなセキュリティ対策を考える必要があるでしょうか。また、送られてきたモデルに欠損がある場合や、あるいは悪意のあるクライアントが意図的に低い性能のモデルを送ってきた場合には、どのように対処すべきでしょうか。それぞれのクライアントが異なる個人や企業であった場合、そもそもモデルを共有させるためのインセンティブはどのように設計すべきでしょうか。こういった周辺課題についても、その分野の専門家や事業的な出口に近い部門も交えて検討を続ける必要があります。

3. データ駆動型アプローチによる経路計画技術の高度化

移動 —これは私達にとって最も基本的な行動の一つです。自宅の中での寝室からキッチンへの移動から通勤、買い物、あるいは旅行など、移動は日常生活のさまざまな場面で必要となります。このような人の営みをロボットによって支援するためには、ロボット自身も人と同様に洗練された自律的な移動機能を備える必要があります。実際、工場や倉庫における物品の搬送から屋内の清掃、さらには公共空間における自動運転まで、自律移動は多くの応用シーンにおいて不可欠な技術となっています。

経路計画は自律移動における最も基本的な構成要素の一つです。ある与えられた環境において、ロボットは自身のスタート地点からゴール地点まで移動するために、障害物に衝突することなく、かつできるだけ短い距離で両者をつなぐことのできる経路を探索する必要があります。ロボットが障害物の位置をあらかじめ知ることができ、かつその障害物が移動しない場合は、A*探索をはじめとした古典的なアルゴリズムにより、効率的にそのような経路を導き出すことができます。

これに対して私達は、このような古典的アルゴリズムが過去の経路計画の事例をうまく活用できるようになれば、新たな問題に対してより良い経路計画が実現できるのではないかと考えました。実際に私達は、与えられた環境の地図を一目見れば、障害物の配置を把握し、先驗的な知識や過去の経験から、スタートからゴールへの効率的な移動経路を思い描くことができます。「地図を見て」「知識・経験と照合することで」「経路を探索する」— このような知的活動を、コンピュータビジョン、機械学習、経路探索アルゴリズムの融合によって実現できるでしょうか。

4. Neural A*: 微分可能な A* 探索による知的な経路計画

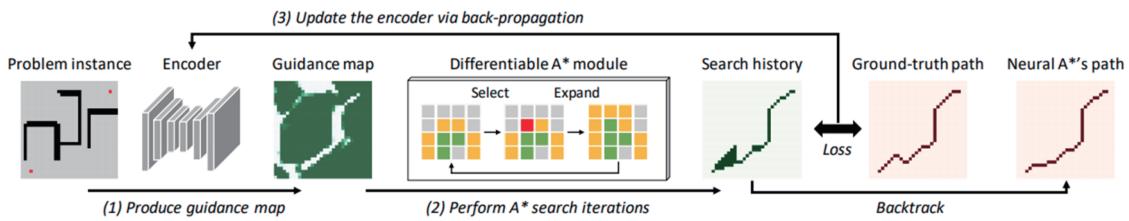


図 3 Neural A* [4] のモデルアーキテクチャ

Neural A* は上記のような考え方を最も直接的に実現する機械学習モデルです。図 3 に示すように、このモデルは、与えられた環境地図を A* 探索によって解きやすい形に変形する深層ニューラルネットワークベースのエンコーダと、同じくニューラルネットワークの中で経路計画が可能な「微分可能 A* モジュール」から構成されます。微分可能 A* はその名の通り、A* 探索を微分可能な手続きで書き下したものであり、アルゴリズムの各ステップにおける振る舞いがどの程度理想的であったかを、誤差逆伝播によってエンコーダに伝えることができます。これと経路計画に関する大量の事例を組み合わせることで、たとえば「より探索効率を向上させるエンコーダ」や「障害物位置が未知であっても経路計画が可能なエンコーダ」を学習し、新しい経路計画問題において活用することができます。

実際に私達の成果では、Neural A* が通常の A* 探索や最新の学習ベース探索と比較して経路計画の効率を向上させられることや、入力がドローンによる空撮のような実画像であっても適切に学習されたエンコーダによって経路計画が可能であることが示されています（図 4、図 5）。この成果は機械学習分野におけるトップ国際会議の一つである International Conference on Machine Learning (ICML) に採録された（文献 [4]）ほか、日経ロボティクスをはじめとした各種メディアに掲載されるなど、国内外で高い評価をいただきました。

5. CTRMs: 連続空間におけるマルチエージェント経路計画のためのロードマップ生成

倉庫内での自動搬送など、実用上は複数のロボットを協調的に移動させる必要があるケースが多く存在します。このような課題はしばしばマルチエージェント経路計画と呼ばれ、人工知能・ロボティクス分野で長らく研究されてきました。多くの場合は与えられた環境をグリッド（碁盤目）で表現し、その

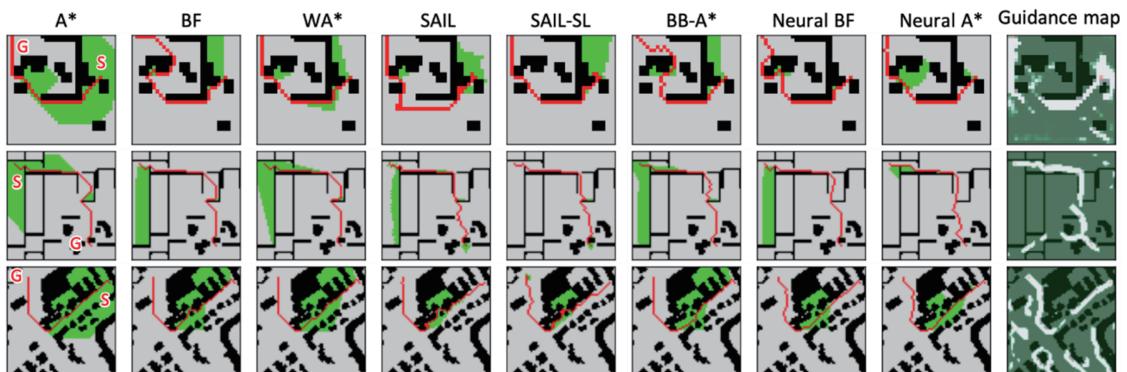


図 4 Neural A* を用いた効率的な経路計画。A*: 従来の A* 探索、BF: 最良優先探索、WA*: 重み付き A* 探索、SAIL, SAIL-SL, BB-A*, Neural BF: 既存の学習ベースアプローチ、Neural A*: 提案手法、Guidance map: エンコーダの出力

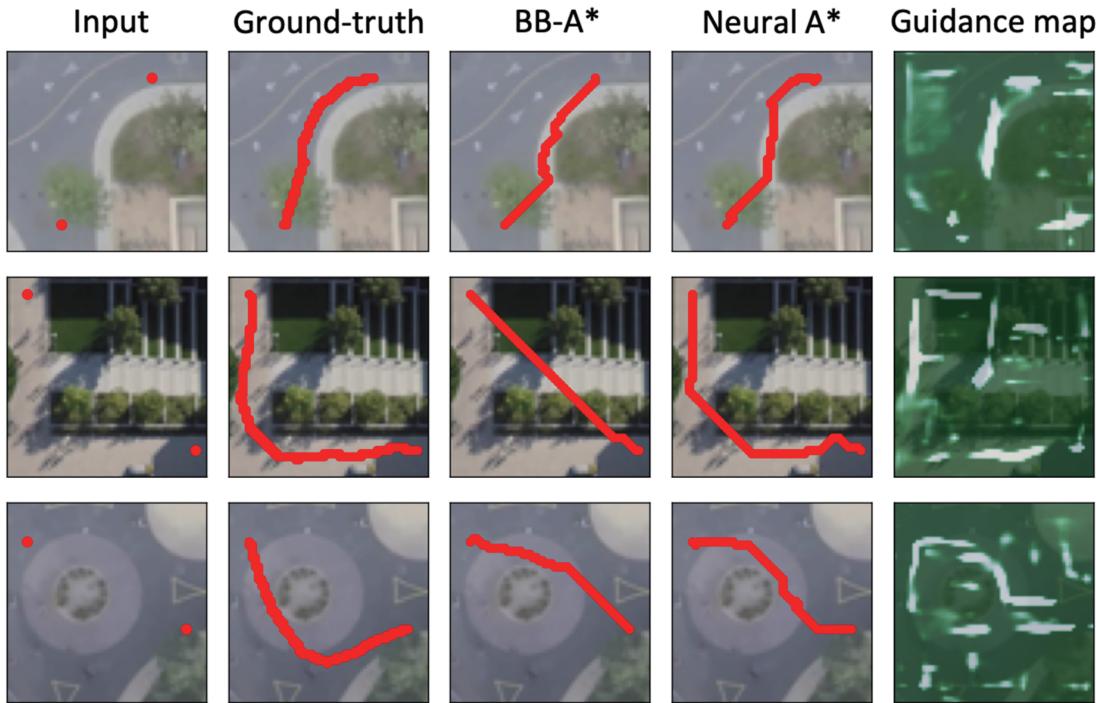


図5 Neural *Aを用いた実画像からの経路計画。Ground-Truth: 人間の歩行軌跡、BB-A*: 既存の学習ベースアプローチ、Neural A*: 提案手法、Guidance map: エンコーダーの出力

上を前後左右に移動するエージェントを想定します。一方で、実際のロボットは前後左右以外の方向にも自由に動けますし、そのような動きを想定することで、目的地までのより短い経路を計画することもできます。

そこで、エージェントの移動する環境をグリッドではなく連続空間として扱うマルチエージェント経路計画を考えます。既存手法では多くの場合、このような連続空間をランダムに配置された頂点から構成されるグラフ（ロードマップ）に近似し、そのグラフ上で複数エージェントが互いに衝突せず自身のゴールに到達するための経路を探索します。このとき、頂点数が多ければ多いほど探索可能な経路も増え、より短い経路の組み合わせを得られる可能性が高まりますが、一方で探索にかかる計算コストも急増します。逆に、頂点数が少なければ少ないと計算コストも低減できますが、場合によってはエージェント同士が衝突しない経路を得られない可能性があります。すなわち、連続空間を近似するグラフの頂点をどのように与えるかという点と、その結果どれほど良い解が得られるか、という点の間にはトレードオフがあることが知られています。

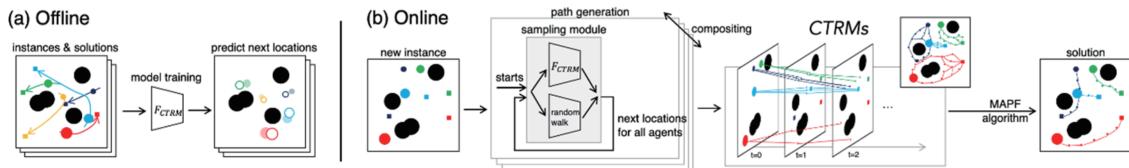


図6 機械学習を用いたマルチエージェント経路計画のためのグラフ構築

これに対して私達は、機械学習技術を活用することで、できるだけ少ない頂点数で良い解が得られるようなグラフを構成するアプローチを開発しました。鍵となるアイデアは、与えられた複数エージェントの位置関係から、それぞれのエージェントが次にどちらの方向に移動すれば、互いに衝突せずに自身

のゴールに近づけるかという、「見込みのある次ステップ」を予測するモデルを学習することです（図6）。このようなモデルは、マルチエージェント経路計画問題とその解となる経路の組を（長い時間をかけて）あらかじめ大量に生成しておき、それを学習データとしてすることで獲得できます。また、モデルには「条件付き変分オートエンコーダ（conditional variational autoencoder; CVAE）と呼ばれる生成モデルを用いることで、ある与えられた複数エージェントの位置関係から、見込みのある次ステップを多数生成し、成功率の向上につなげることができます。

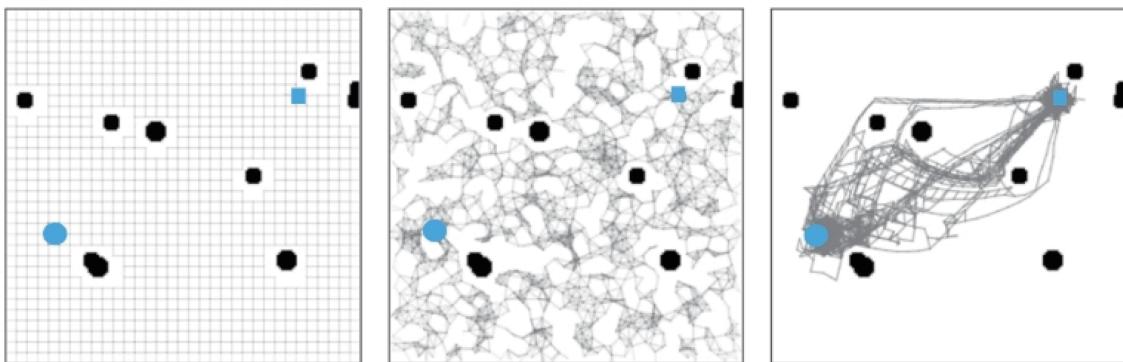


図7 左から順にグリッド、ランダム頂点によるグラフ、提案手法によるグラフ

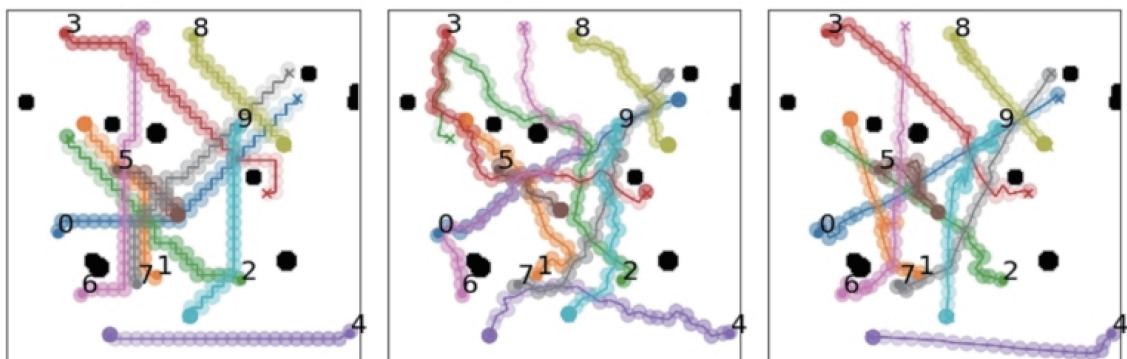


図8 左から順にグリッド、ランダム頂点グラフ、提案手法を用いた経路計画

図7, 8に結果の一例を示します。このように、既存手法であるグリッドやランダムな頂点から構成されるグラフと比較し、提案手法のロードマップは各エージェントのスタート地点からゴール地点までの経路を効率的にカバーしていることが分かります。実際このようなグラフを用いて経路計画をすることにより、従来手法より効率的に、それでいて同等の成功率、経路長の結果を得ることができました。この成果はマルチエージェント分野における主要国際会議である International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS) に採録されています（文献 [5]）。

6. おわりに

私自身は2013年に京大情報学研究科で博士号取得後、5年間ほど東京大学生産技術研究所で助教として研究に取り組んできました。OSXへの転職のお誘いがあった際には「企業ではどうしても事業に直結する研究開発が中心になるのでは」という先入観があつて尻込みもしたのですが、蓋を開けてみると大学在籍時と変わらず基礎研究を継続しています。もちろんこれを企業全体に一般化はできないですが、一方で博士号や大学での研究活動の業績を適切に評価し、より長期的な視点でのハイインパクトを見据えた基礎研究を積極的に推進する研究チームが国内企業で増えてきていることも、とりわけAI・

ロボティクス分野では確かに感じます。今後もこの流れが継続・発展し、産官学すべての場所において自由で活発な研究活動が起こることを期待しています。

参考文献

- [1] Jiaxin Ma, Ryo Yonetani, Zahid Iqbal, "Adaptive Distillation for Decentralized Learning from Heterogeneous Clients" , International Conference on Pattern Recognition(ICPR), 2020
- [2] Mohammadamin Barekatain, Ryo Yonetani, Masashi Hamaya, "MULTIPOLAR: Multi-Source Policy Aggregation for Transfer Reinforcement Learning between Diverse Environmental Dynamics" , International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI), 2020
- [3] Kazutoshi Tanaka, Ryo Yonetani, Masashi Hamaya, Robert Lee, Felix von Drigalski, Yoshihisa Ijiri, "TRANS-AM: Transfer Learning by Aggregating Dynamics Models for Soft Robotic Assembly" , International Conference on Robotics and Automation(ICRA), 2021
- [4] Ryo Yonetani, Tatsunori Taniai, Mohammadamin Barekatain, Mai Nishimura, Asako Kanezaki, "Path Planning using Neural A* Search" , International Conference on Machine Learning(ICML), 2021
- [5] Keisuke Okumura, Ryo Yonetani, Mai Nishimura, Asako Kanezaki, "CTRMs: Learning to Construct Cooperative Timed Roadmaps for Multi-agent Path Planning in Continuous Spaces" , International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems(AAMAS), 2022

新設研究室紹介

システム基礎論講座 システム創成論分野（阪本研究室）

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

「生体システムの数理モデリングとワイヤレス人体センシング応用」

当研究室では、電波による人体の非接触センシング技術を中心に、人体の形状・運動・生体信号などをシステムとして抽象化する数理モデリングに取り組み、得られた数理モデルを応用した先進的な人体計測技術を開発しています。呼吸に伴う横隔膜や肋間筋などの活動、心拍に同期した心臓の収縮・拡張および脈波の動脈に沿った伝播により、人体の皮膚は複雑な変位波形を示します。呼吸や心拍などの生体信号については、医学・生理学分野において膨大な知見が蓄積されてきましたが、それらによる皮膚変位を数学的に抽象化する試みは、未踏のフロンティアといえます。また、複雑な変位を伴う皮膚表面によるミリ波などの電波の散乱を調べるには、波長よりはるかに大きく複雑な人体形状および人体組織の電気特性を考慮した大規模な電磁界解析が必要となり、その解明は容易ではありません。私たちは、こうした「人体」と「電波」の接点に見られる未着手の課題に取り組み、謎を解き明かしつつ、その応用としてのワイヤレス人体センシング技術を開発しています。

(1) 多人数のバイタル信号ワイヤレス計測

これから到来する超スマート社会では、職場・学校・病院など多くの場面で、その場のすべての人の体調をさりげなく見守るサービスが当然のインフラとなると考えています。その場合、複数人を同時かつ非接触で計測できるワイヤレス人体センシングの活躍が期待されます。古典的な電波計測技術に加え、計測対象である人体をシステムと見なして算出される個人差を反映した特徴量を活用した高精度センシング技術を開発しています（図1）。

(2) 睡眠時無呼吸症候群のワイヤレス計測

現在、睡眠時無呼吸症候群の診断に用いられる終夜睡眠ポリソムノグラフィー検査では、多くのセンサを就寝中の対象者に装着するため、不快感が避けられません。ワイヤレス人体センシングは非接触であるため、センサを装着せず、衣服や布団などを透過して計測でき、革新的な医療機器開発への展開が期待されています。京大病院を始め、さまざまな医療機関との連携を進め、臨床検査のワイヤレス化を目指しています（図2）。

(3) 血圧のワイヤレス計測

血圧や血管のモニタリングは、心血管疾患の予防や治療に不可欠です。こうしたモニタリングには、カフ型のセンサが広く用いられていますが、装着の手間や不快感により常時計測には適しません。複数のアンテナ素子をもつアレーアンテナにより、人体の複数部位の変位を同時かつ非接触で計測し、部位間を伝播する脈波速度を推定する技術を開発してきました。今後、血圧計測や動脈硬化検査などへの応用を進めてゆきます（図3）。



図1 電波による多人数の同時計測



図2 病室への電波センサ設置

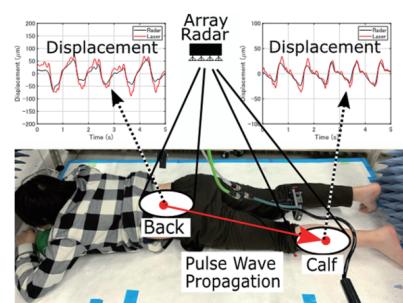


図3 電波による複数部位の計測

エネルギー理工学研究所エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稻垣研究室）

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/index.html>

非平衡開放系プラズマの状態はどのようにして選ばれるのか？

核融合エネルギー開発を指向したプラズマの実験研究をエネルギー理工学研究所の Heliotron-J 装置を用いて行なっています。強力な電磁波を用いて水素を電離し、水素プラズマを磁場により閉じ込めています。しかし、主にプラズマ中に励起される電磁的揺らぎによってプラズマは損失します。このためプラズマを維持するには外部からエネルギーと水素を注入し続けなければならず、プラズマは基本的に非平衡開放系となります。非平衡開放系の物理は平衡系の物理と比べると分かっていない事がたくさんあります。例えば平衡系ではエントロピー最大の原理が成り立ちますが、非平衡系ではそれが成り立つかどうか、あるいはエントロピーに代わる何らかの量が最大化 / 最小化するのか、は分かっていません。実際、プラズマは、構造を形成し秩序を作り出す、同じ環境で複数の状態を取りその間を何度も流転する、といった平衡系では見られない活性で動的な性質を示します。このようなプラズマのダイナミクスを理解しようとしています。以下に例を示します。

揺らぎの共存と競合：非平衡系を特徴づける量として空間勾配があります。特に核融合プラズマでは1mでおよそ一億度の温度差が保持されます。勾配が0である平衡状態からは非常に遠い系といえます。この勾配をエネルギー源として様々な不安定性が熱揺らぎから励起されます。そして物理的な淘汰を経て、いくつかの不安定性が共存した状態が実現します。生き残った不安定性の中には相反する作用を及ぼすものがあります。通常、不安定性は温度勾配を小さくする輸送を駆動します。しかし、密度勾配等、他の勾配で励起された揺動は温度勾配を上げる効果を持っています。このため物理的淘汰後の状態は多くの不安定性と輸送がお互いせめぎ合ってギリギリの均衡を保っています（図1 (a)）。
自己組織化臨界現象：系の一箇所でこの均衡が破れると連鎖的に均衡が破れて、プラズマ全体が雪崩のように応答します（図1 (b)）。この雪崩では熱や物質は弾道的に輸送され、平衡近傍の醉歩的な熱伝達とは質的にも大きさ的にも全く異なります。実験では雪崩の際の揺らぎのハースト指数0.7程度が観測されており、長期記憶が現れています。
ガウス分布からの解放：この雪崩の発生確率分布には図1 (c) のようにべき乗分布が現れます。ランダム事象の確率統計数理や統計熱力学ではガウス分布（正規分布）が現れます。ガウス分布は平衡を統計的に特徴づけるといえます。一方でべき分布は非平衡系を特徴づけるのかも知れません。

プラズマの構成要素であるイオンと電子の間の相互作用や電磁場の振る舞いは全てわかっています。しかし、プラズマ全体のダイナミクスは予測できていません。決定論的描像を離れ、プラズマをせめぎ合う系として理解し、その実現する状態を決める物理的淘汰の機構を明らかにし、プラズマのダイナミクスを予測します。

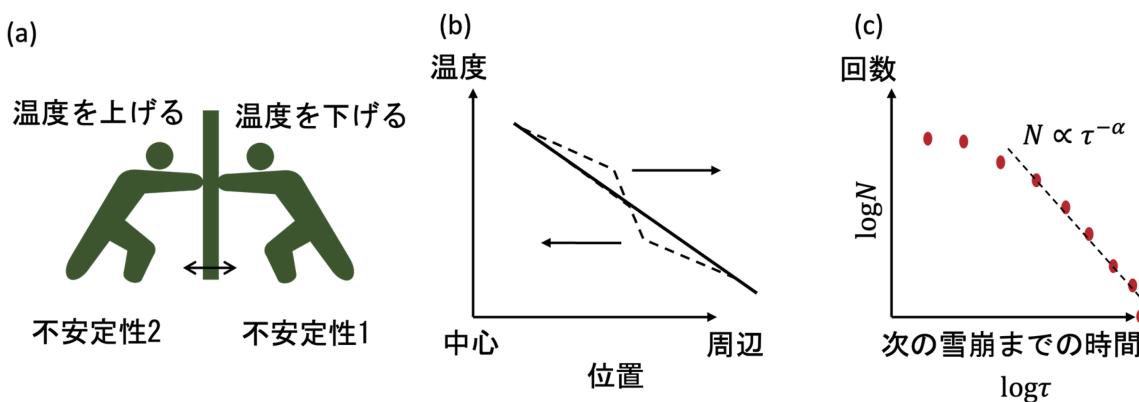


図1 プラズマにおけるせめぎ合い (a) 多くの電磁揺らぎの共存と相反する揺らぎ間の競合、(b) プラズマに見られる自己組織化臨界現象（熱雪崩）、(c) 雪崩の発生確率分布

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（引原研）

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

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（和田研）

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野（松尾研）

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研）

電子工学専攻

集積機能工学講座

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

デバイス創生部門先進電子材料分野

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（黒橋研）

知能メディア講座コンピュータビジョン分野（西野研）

通信情報システム専攻

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伝送メディア分野

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）

集積システム工学講座超高速信号処理分野（橋本研）#

システム科学専攻

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

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（白井研）

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野（長崎研）

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稻垣研）*

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研）

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（大村研）

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野（篠原研）

先端電気システム論講座（引原研究室）

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

「力学系理論とソフトウェア工学との融合展開

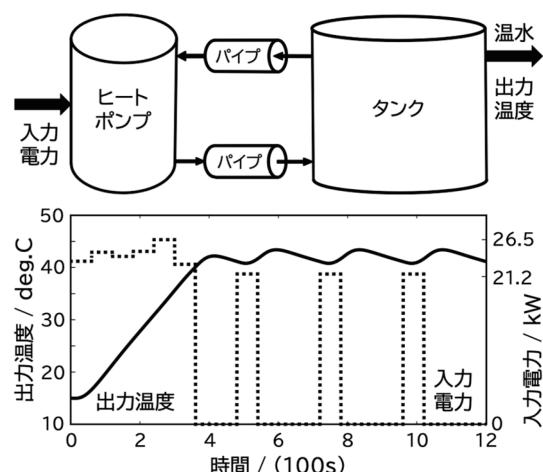
～クーブマン作用素による非線形システムの形式設計とエネルギー・システムへの応用～」

実世界の複雑システムをデータより解析・設計するための数学的枠組みとして、非線形システムのクーブマン作用素がある [1,2]。クーブマン作用素とは、非線形システムより誘導される無限次元の線形作用素であり、力学系理論の対象である。この枠組みの要点は、多様なダイナミクスを表わす非線形システムの数理構造を、関数空間とその上に作用する線形写像の性質として解き明かしていく点にある。線形写像の性質として帰着されると、線形性をベースとする数値計算技法（数値線形代数や機械学習など）を活用し、時系列データよりクーブマン作用素やそのスペクトルを推定することで、非線形システムの数理構造が抽出できる。この点は、データサイエンスや AI と親和性があり、発展性を有する。最近では、上の解析に加えて、クーブマン作用素による複雑システムの設計にも注目が集まり、時系列データと実時間最適化とを活用したクーブマン・モデル予測制御（MPC）などが報告されている [1,2]。

本研究では、クーブマン作用素によるシステム設計の新たな方向性として、ソフトウェア工学で発展してきた形式手法との融合による非線形システムの設計に取り組んでいる。形式手法とは、プログラムの動作を表わす遷移システムを主に対象として、システムの仕様の記述から開発、検証までを数学的に厳密に実行する方法論であり、仕様に従い「正しく」動作するプログラムの開発を目指すものである。最近では、遷移システムで対象となる離散値変数にとどまらず、実世界のダイナミクスに関わる連続値変数のシステムに形式手法の方法論が拡張されており、記述のための言語として信号時相論理（STL）などがある。この拡張に関する先行研究ではシステムの線形時不变性が前提とされている。本研究では、クーブマン作用素の線形性を活用することにより、形式手法の方法論により、所望の仕様に従い--- 標語的に言えば---「正しく」動作する非線形システムの設計を目指している。本研究は、クーブマン作用素による非線形システムの数理研究、多様な時系列データの可用性向上、実時間最適化に関わる計算環境の進展などの相乗効果として可能になってきた。現時点までに、STL による仕様記述を拘束条件として有するクーブマン MPC を提案し、透析医療施設をモデルとした温水供給システムへの応用により、その原理と有効性の検証を行った [3]（下図）。医療施設という特性により、エネルギーの継続供給はシステムに要求される必須の仕様である。本研究により、制御対象の非線形性に対処しながら、継続性などの仕様を満足するエネルギー供給を実現している。

本研究は、力学系理論とソフトウェア工学という、実世界である物理空間とサイバー空間に関わる分野の融合展開である。ここでは、非線形システムの数理の探究と、プログラムの検証や計算といった情報に関わる探究とが交錯する。本研究では、実世界と情報が織りなす 10 年先あるいはその先を見越したシステム科学の構築を、レジリエントなエネルギー・システムの実現という電気電子工学の応用を出口として進めている。

[1] A. Mauroy, I. Mezic, and Y. Susuki (editors), *The Koopman Operator in Systems and Control: Concepts, Methodologies, and Applications* (Springer Nature, 2020). [2] 薄, 計測と制御, vol.61, no.2, pp.133-138 (2022). [3] 宮下, 薄, 石亀, システム制御情報学会 研究発表講演会, 321-2 (2022).



図：温水供給システムを対象として、出力温度の制御仕様を STL で記述した上で、制御対象の非線形性を考慮したクーブマン MPC を実行した結果を示す。詳細は [3] を参照。

電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

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

スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体を対象とする数値電磁界解析技術

応用に向けた研究が世界で進められている薄膜高温超伝導を種々の交流電気機器に適用しようとする場合、交流損失と呼ばれる超伝導体特有の損失低減が必要不可欠です。交流損失は薄膜高温超伝導線の幅に依存することが知られており、薄膜高温超伝導線を幅方向に複数の素線（フィラメント）に分割する多芯化が、交流損失低減に有効です。一方で、各フィラメントが電気的に絶縁されている場合、あるフィラメントが常伝導状態に戻ってしまった時、そのフィラメントが発熱し薄膜高温超伝導線全体が焼損する現象（クエンチ）が発生する可能性があります。これを回避するため、全てのフィラメントを覆うように銅をメッキし、フィラメント間で電流が乗り移れるようにしたものを銅安定化多芯薄膜高温超伝導線と呼びます。銅安定化多芯薄膜高温超伝導線に外部から磁界が印加されると、フィラメント間をまたがるように流れる渦電流（結合電流）が誘起されます。結合電流が流れている間は、薄膜高温超伝導線全体が一体のように振舞い、多芯化による交流損失低減の効果が得られないため、結合電流を素早く減衰させることが重要です。我々の研究室では、銅安定化多芯薄膜高温超伝導線を円筒状の心材（コア）の周りにスパイラル状に巻き付けることで結合電流を素早く減衰させることができることを指摘し、これをスパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体（図1）と呼んで研究を進めています[1]。

スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体の特性を調べるためにには、数値電磁界解析技術が必要です。数値電磁界解析とは、対象の内部での電磁現象を数式によって表現し、その振舞いを予測する技術です。我々の研究室では薄膜高温超伝導線を対象とした数値電磁界解析技術を構築しており[2]、同技術をスパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体に適用することを試みています。スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体において重要な結合電流の振舞いを正確に予測し、かつ大規模な解析を可能にするため、薄板近似、代数マルチグリッド法、階層型行列法といった手法を導入し、図2に示すように、スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体における結合電流による損失を、実験結果と比較して精度よく評価できるようになりました。この数値電磁界解析技術によって、より低損失な導体やコイルの設計などが可能になります。

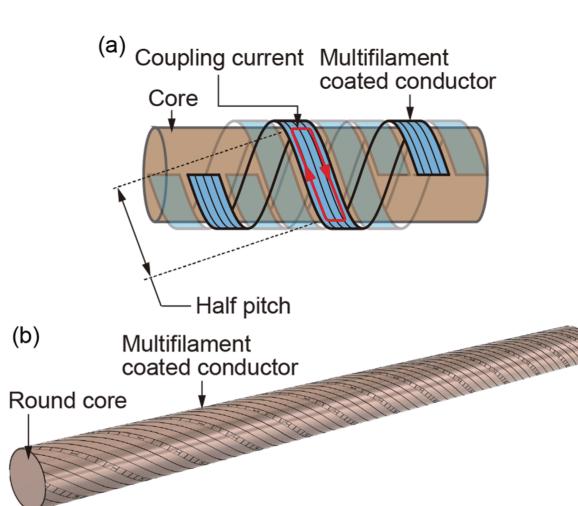


図1 スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体の概念図 [1]

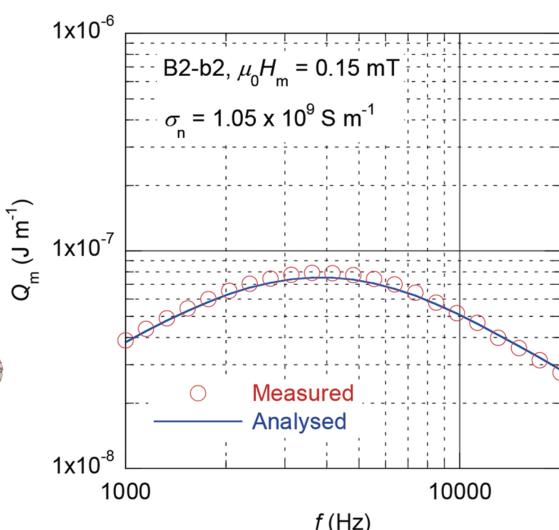


図2 実験及び解析によって得られた結合電流による損失の周波数依存性

参考文献

- [1] Y. Sogabe, Y. Mizobata, and N. Amemiya, *Supercond. Sci. Technol.*, 33, 055008, 2020.
- [2] T. Mifune, N. Amemiya, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, 32, 094002, 2019.

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (松尾研究室)

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

モータの自動設計のためのトポロジー・パラメータ最適化手法の開発と応用

永久磁石モータは高効率・小型・軽量といった特徴を備え、制御性に優れたモータである。埋込型永久磁石同期モータ (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM) は回転子部分にネオジム磁石が埋め込まれた構造をしており、表面型永久磁石同期モータと比べて複雑な磁路を有している。磁路を工夫することによって性能を向上させることができると、多数の設計要件を満足する形状を得るために膨大な試行錯誤が必要となる。また通常の最適設計に用いられるパラメータ最適化では複雑な磁路を表現するためのパラメータ設定を事前知識なしに行えないという問題点がある。そこで本研究室では、形状を柔軟に表現できるトポロジー最適化をベースにした自動設計手法の開発と応用に取り組んでいる。

本研究では形状を表現するために放射基底関数 (Radial Basis Function: RBF) ネットワークの一つである NGnet (Normalized Gaussian NETwork) を用いる。NGnet は基底関数の重みを変化させることによって任意の関数を近似することが可能である。トポロジー最適化においては、NGnet が張る 2 次元曲面のゼロ等高線を異種材料 (鉄芯や空気など) の材料境界とみなすことで任意の断面形状を表現している。局所基底関数の重みを変化させることで NGnet の曲面とゼロ等高線が変化し、それによって形状が変化することが分かる。すなわち、最適な形状を求めるトポロジー最適化問題は、最適な有限個の重みを見つけるパラメータ最適化に帰着する。このことを利用すると従来のパラメータ最適化とトポロジー最適化を同時に実行することも可能になる。

図 1 に IPMSM に対してトポロジー・パラメータ最適化手法 [1] を適用した例を示す。図 1 左は最適化前のリファレンスマルク、中央は最適化後の形状である。緑色の領域は磁路となる電磁鋼板、白色の部分は磁路を妨げるフラックスバリア、ピンクの部分は永久磁石を表す領域である。トポロジー・パラメータ最適化では永久磁石の曲率をパラメータとして変化させ、同時にフラックスバリアの形状をトポロジーとして最適化した。リラクタンストルクとマグネットトルクを比較したものを図 1 右に示す。最適化された形状ではリラクタンストルクが劣っているものの、マグネットトルクを増大させることで全体のトルクを大きくしていることが分かる。マグネットトルクは磁束が固定子に通る量で決まるためフラックスバリアの形状の最適化の効果が表れていることが分かる。

今後の課題として製造可能な形状の作成や RBF ネットワークの設計変数の削減と計算コスト削減に取り組む予定である。製造可能な形状の作成のためには応力に関する制約を加える必要があるため、マルチフィジクスな解析が必要となる。また設計変数の削減として基底関数の数を大幅に減らし局所基底関数の中心位置や分散をパラメータとするようなネットワークの設計が考えられる。

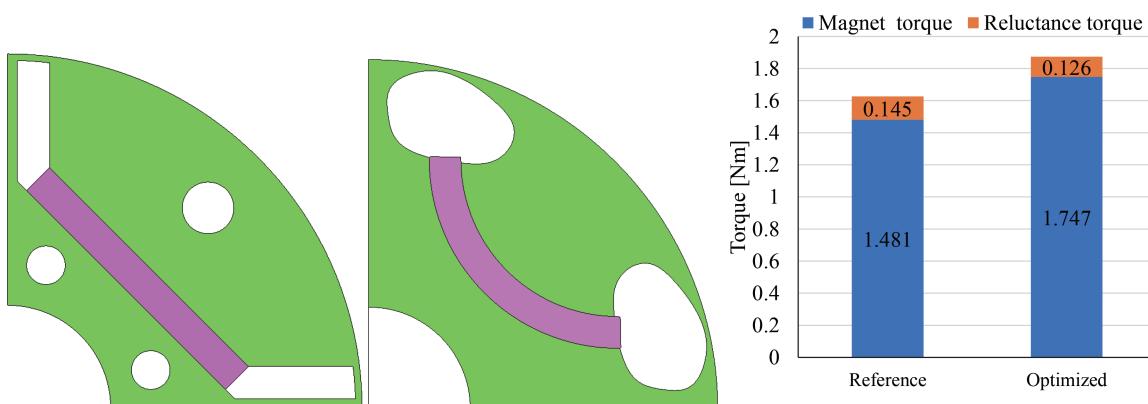


図 1 リファレンスマルク (左) と最適化モデル (中央)、最適化形状のトルク比較 (右)

[1] S. Hiruma, M. Ohtani, S. Soma, Y. Kubota and H. Igarashi, IEEE Trans. Magn., vol. 57, no. 7, pp. 1-4, July 2021.

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室）

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

「交流回転機の自己組織化設計法に関する研究」

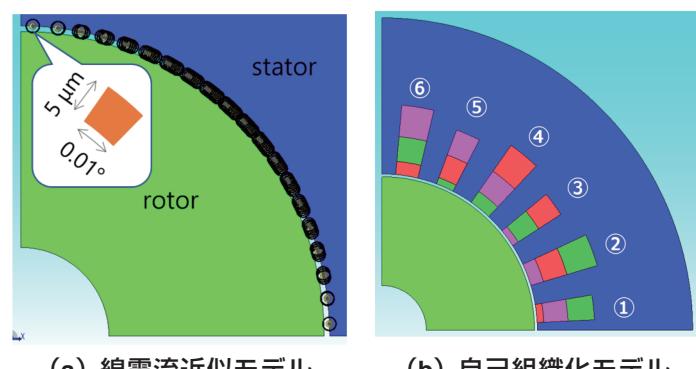
当研究室では、交流回転機における電気－機械エネルギー変換過程の一般的表現法ならびに新しい設計法の確立を目標として、回転座標系の電磁現象を第一原理に立ち戻って研究している。巨視的な大きさの一般的回転機では、上記エネルギー変換には磁束の変調が用いられ、例えば三相固定子巻線が作る回転磁界に、回転子が作る磁極や誘導電流、あるいは磁気的突極構造を作用させてトルクを実現している。その際、電気エネルギーを注ぎ込むことになるが、その媒体として導体が用いられる。地球上で容易に手に入る導体の代表格である銅線やアルミ線では、積極的な冷却をしない場合の許容電流密度が 5 A/mm^2 程度であり、もし特殊な方法でマイナス 200°C 程度の極低温環境を得られれば、超伝導材料を用いることで極めて低損失で 1000 A/mm^2 を超える電流を流すことができる。いずれにしても、回転磁界の発生に必要な電流を回転機内に流し込むために、上記導体の許容電流密度に応じた導体断面積を確保する必要があり、一般には積層鉄心コア内にスロットを穿孔して導体を収容することになる。しかしながら、上記した電気－機械エネルギー変換過程において本質的に空間に展開すべき物理量は磁束であり、そのエネルギーを供給するためのスロットは“擾乱”でしかない。このスロットは経験則によって設計されており、電気－機械エネルギー変換過程との物理的関係が必ずしも明確で無く、例えば大学学部教育で教授できるような一意的決定法が存在しない。

以上の背景に基づき、本研究では回転機のスロット形状を一意に決定するための自己組織化設計法を考案した[1]。具体的には、図(a)に示すように、まず線電流近似が可能な微小断面積(図(a)では $5\text{ }\mu\text{m} \times 0.01^\circ (\approx 5\text{ }\mu\text{m})$)の導体を単位として、PWM(Pulse Width Modulation)変調法に基づいて当該導体を並べることで理想的な空間磁束密度分布を実現する(線電流近似モデル)。一方で、回転機の仕様によって決まる電流値を上記微小断面積に流せばその電流密度が非現実的に大きくなるため、対象とする導体の許容電流密度になるまで自己組織化法によって導体断面形状(スロット形状)を大きくしていく。即ち、線電流近似モデルから出発して、局所的かつ大域的合成条件[2,3]を用い、図(b)のように系統的かつ一意性を保証するスロット形成を行った。なお、本検討では線材配置に伴う本質的空間磁束密度分布を議論するため、鉄心コアの磁気特性は線形(透磁率一定)と仮定している。また、図では固定子スロットの影響のみ議論するために、回転子には磁石やかご形巻線等は配置していない。解析の結果、図(b)において不均一のスロット形状になっているが、回転磁界が実現されている[2,3]。

さらに、コンピューターEV用途の最大出力 24 kW 級かご形誘導モータを回転子巻線も含めて自己組織化法に基づいて設計したところ、免疫遺伝アルゴリズムによる従来設計結果よりも高い出力の実現可能性を見出すことができた[2,3]。本成果は、NEDOのプロジェクト(グリーンイノベーション基金事業 次世代蓄電池・次世代モーターの開発)[4]において、日本電産(株)様他と共に次世代EV駆動システム向け高出力誘導モータの設計に展開していく予定である。

参考文献

- [1] 中村 武恒, 木戸 勇志, 特願 2021-158009 (2021), [2] 中村 武恒, 木戸 勇志, 自動車技術会 2022年春季学術講演会(パシフィコ横浜), 自動車主機用モータの理論, 設計, 解析, 2022年5月25日, [3] Y. Kido and T. Nakamura, in preparation, [4] (日本電産HP) <https://www.nidec.com/jp/product/news/2022/news0419-01/>



図：自己組織化設計法による固定子スロットの設計例[2,3]

量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

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

「超ワイドバンドギャップ半導体窒化アルミニウム（AIN）からの高輝度 Far-UVC 光誘導放出」

人体に害を与えることなく空気中を漂うインフルエンザ・コロナウイルスを不活化する Far-UVC 光（波長 207~222 nm の光とされている）に注目が集まっている [1]。文献 [1] では、KrCl エキシマランプから放射される紫外光を 222 nm を中心波長とするバンドパスフィルターで単色化した光源によって原理実証されているが、この手法はその性質上原理的に光電変換効率が低い。そこで、そもそも Far-UVC 領域の単色光を発生させる光源の実現が望まれており、我々はその発光材料として超ワイドバンドギャップ半導体である窒化アルミニウム（AIN）に注目している。当研究室では、これまで 10 年以上にわたって AIN の基礎光物性解明に取り組み、AIN の自然放出線の解釈などで世界に先駆けた成果を挙げてきたが [2]、この自然放出光を従来の LED 構造で高効率に取り出すことは困難であることも同時に明らかとなった（図 1 参照）。そこで Einstein が提唱した、発光過程には自然放出と誘導放出の 2 種類が存在するとの原理に立ち返って、AIN の誘導放出過程に関する光物性評価を行った。

測定試料には、共同研究先の株式会社トクヤマにより HVPE 法で作製された *c* 面 AIN 基板を用いた。この試料を *m* 面を端面として劈開し、ArF エキシマレーザを励起光源として試料を矩形状に光励起し分光測定を行った。図 2 に室温下における光放出スペクトルの励起強度依存性を示す。ある励起強度で光放出強度の急激な増大とスペクトル先鋭化を確認し、これを持って誘導放出の観測とした。なお、本測定は試料を冷凍機に入れて行うことで極低温の 11 K から室温の 293 K にかけた温度領域で行っており、全温度領域で誘導放出を観測している。また自然放出・誘導放出スペクトルを比較することで、誘導放出線の起源が教科書に良くある縮退電子正孔プラズマではなく励起子が関与したものである、など物理的に大変興味深い結果などが得られているが、ここでは割愛し詳細は文献 [4] を参考にされたい。工学的に面白い点として、試料からの誘導放出光は受光側に減光フィルタを挿入しないと検出器が飽和してしまうほどの光強度を誇っており、AIN からの高輝度 Far-UVC 光誘導放出を観測したことが挙げられる。本成果は光励起による原理実証に留まるものであるが、AIN の Far-UVC 発光材料としての素性の良さを示すものであり、デバイス化の可能性を探るべく研究を進めている。

- [1] D. Welch et al., *Scientific Reports* **8**, 2752 (2018), M. Buonanno et al., *Scientific Reports* **10**, 10285 (2020).
- [2] M. Funato, K. Matsuda, R. G. Banal, R. Ishii, and Y. Kawakami, *Applied Physics Express* **5**, 082001 (2012), R. Ishii, M. Funato, and Y. Kawakami, *Physical Review B* **87**, 161204 (R) (2013), **102**, 155202 (2020) など。
- [3] K. Momma and F. Izumi, *Journal of Applied Crystallography* **44**, 1272 (2011).
- [4] R. Ishii, M. Funato, and Y. Kawakami et al, *Physical Review B* **105**, 205206 (2022).

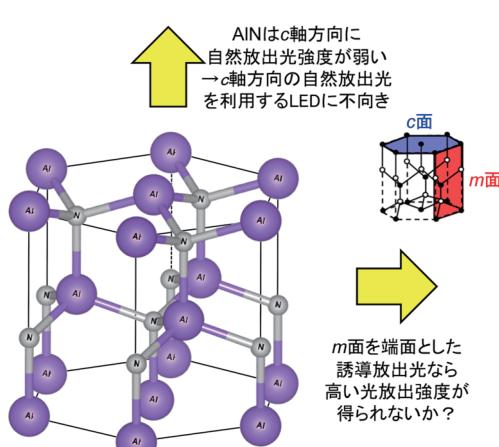


図 1. AIN の結晶構造 [3]

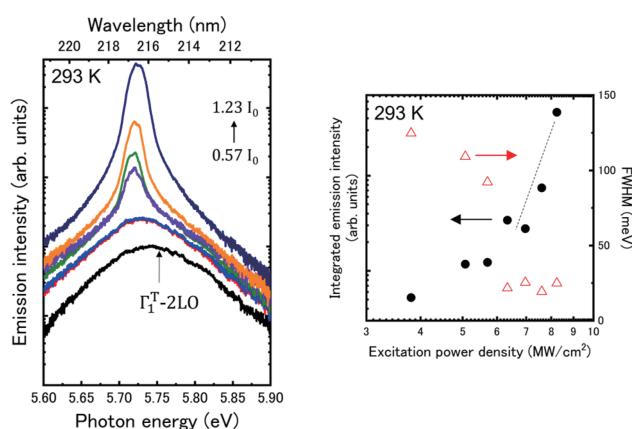


図 2. 室温下における AIN の光放出スペクトルの励起強度依存性

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野

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

「黒体限界を超える高密度の光電流を生成可能な近接場熱光発電デバイスの開発」

一般に、物質を高温に加熱すると、物体内部の電子の熱運動によって発光（熱輻射）が生じる。この熱輻射を太陽電池に照射することで熱を電力に変換する発電方式は熱光発電と呼ばれ、太陽光や工場廃熱等の各種熱エネルギーの有効利用を可能とする発電方式の1つとして、近年、注目を集めている。しかしながら、物体から外部の自由空間に取り出すことが出来る熱輻射パワーには、Planckの放射則で決まる上限（黒体限界）が存在するため、従来の熱光発電システムでは、太陽電池にて取り出すことが出来る電力に限界があり、このことが、熱光発電システムの高出力化・高効率化を妨げる課題となっていた。本稿では、上記の課題を解決するべく、高温の熱輻射体 ($>1100\text{ K}$) と、室温に保った太陽電池を、透明中間基板を介して光の波長よりも十分小さな距離 ($<140\text{ nm}$) まで近づけることにより、近接場光を介した黒体限界を超える熱輻射の伝達を生じさせ、従来限界を超える光電流密度の生成に成功した研究成果について紹介する [1,2]。なお、本研究は、電子工学専攻光量子電子工学研究室と共同で行った。

開発した近接場熱光発電デバイスの模式図を図1(a)に示す。本デバイスでは、Siを材料とした熱輻射光源とSiを材料とした透明中間基板が、微小な空隙 (140 nm 未満) を隔てて一体化されており、その裏側に、InGaAsを材料とした太陽電池が一体化されている。本構造では、光源内部で発生した熱輻射のうち、通常であれば光源と自由空間の境界で全反射する成分についても、近接場光を介して透明基板側（太陽電池側）に直接引き出すことが可能となり、その結果、従来の限界を超える電流密度を生成することが可能になる。なお、同図(a)に示すように、Si熱輻射光源を細長い梁で支持することで、光源から梁を通して逃げる熱を極力減らしつつ、梁の水平方向への変形によって熱応力を緩和することが可能になり、光源と中間基板の間の微小な空隙を維持しつつ、光源部のみを 1000 K 以上の高温に加熱出来るように工夫している。作製した発電デバイスの熱輻射光源部（表面）および太陽電池部（裏面）の光学顕微鏡写真を同図(b)に示す。熱輻射光源と太陽電池の大きさは 1 mm 角であり、両者を距離 140 nm 未満の距離まで近づけた近接場デバイスと、比較用の遠方場デバイスの作製を行った。同図(c)に、両デバイスにおいて、熱輻射光源を加熱した際に得られた太陽電池の光電流密度の測定結果を示す。遠方場デバイス（青線）と比較して、近接場デバイス（赤線）では $5 \sim 10$ 倍の光電流が得られており、さらに光源温度 1050 K において、黒体限界（黒線）を超える高密度な光電流を得ることに成功した。今後、デバイス構造の最適化により、さらなる高出力密度化・高効率化を実現することで、太陽光や各種熱エネルギーの有効利用が可能となり、将来の脱炭素社会の実現への貢献が期待される。

参考文献 [1] T. Inoue, S. Noda, *et al.*, *Nano Lett.* **19**, 3948 (2019).

[2] T. Inoue, S. Noda, *et al.*, *ACS Photonics* **8**, 2466 (2021).

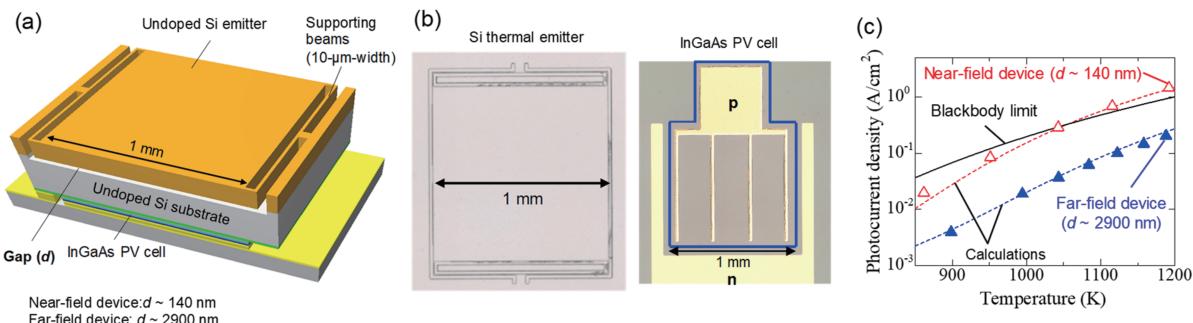


Fig. 1. (a) Schematic of near-field TPV device integrating 20-μm-thick Si thermal emitter and InGaAs PV cell. (b) Microscope images of fabricated near-field TPV device. (c) Measured (triangles) and calculated (dashed lines) photocurrent density of the near-field and far-field devices as a function of the average emitter temperature. Photocurrent density overcoming the far-field blackbody limit is obtained for the near-field device at the emitter temperature of 1192 K .

知能メディア講座 言語メディア分野 (黒橋研究室)

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

「技能者へのインタビュー支援システム」

言語処理の高度化によって、近年様々な対話システムが開発されています。一口に対話と言っても、我々が日常行っている対話には、雑談のような楽しむことを目的としたものだけでなく、インタビューのような他者から情報を引き出すことを目的とした対話も含まれています。本研究室では、技能者から知識やコツを引き出すことを目的としたインタビューを支援するシステムの開発に取り組んでいます。本稿では、現在開発中の技能者へのインタビュー支援システムを紹介します。

このインタビュー支援システム（図1）は、音声認識によって技能者とインタビュアーの発話をリアルタイムで書き起こしながら、インタビュアーが技能者から引き出した知識を構造化し、提示します。また、技能者は事前に用意した画像に対してインラクティブな操作が可能で、この情報も言語情報とともに記録されます。このようなシステムをインタビューに導入することで、技能者からコツを引き出すことを促すとともに引き出した知識を構造化した上で蓄積できます。

上記システムの開発には、インタビュー対話中に登場する知識が互いにどのような関係性で結びつくのかを明らかにする必要があります。そこで、コツが必要でありながら、技能者の数が比較的多い、料理のドメインに着目し、ウェブ会議システムを用いて約 15 分 × 300 対話の料理インタビュー対話コーパスを構築しました[1]。さらに、対話中に登場する料理に関する述語を “DIVIDE” や “HEAT” など 11 個の料理イベントに分類し、各々の料理イベントの項 (“Object” や “Manner” 等) やイベント詳細 (“Purpose” や “Condition” 等) となる要素を対話データ中から抽出し、インタビューにおいて引き出されている知識構造のアノテーションを行いました。この知識構造データを学習データとし、技能者とインタビュアーの対話中に自動で知識を構造化するシステムを開発しています（図2）。

将来的には、このシステムを他のドメインにも適用可能なものとすることで、今日の産業界で課題となっている技能伝承問題の解決に貢献するインタビュー支援システムへと発展させる予定です。

[1] Taro Okahisa, Ribeka Tanaka, Takashi Kodama, Yin Jou Huang and Sadao Kurohashi. Constructing a Culinary Interview Dialogue Corpus with Video Conferencing Tool, in LREC 2022.

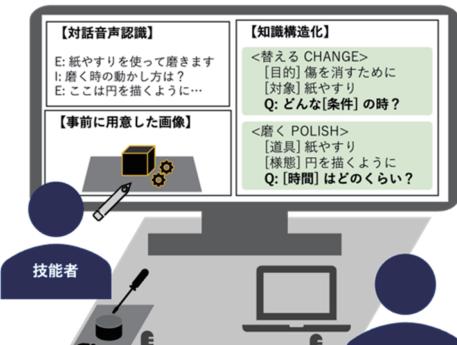


図1 インタビュー支援システムのイメージ

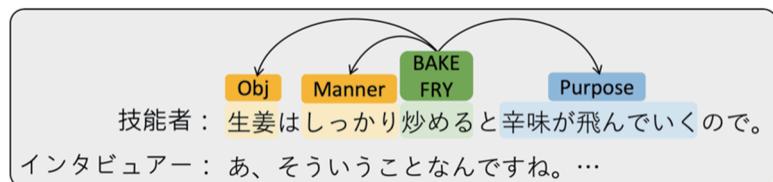


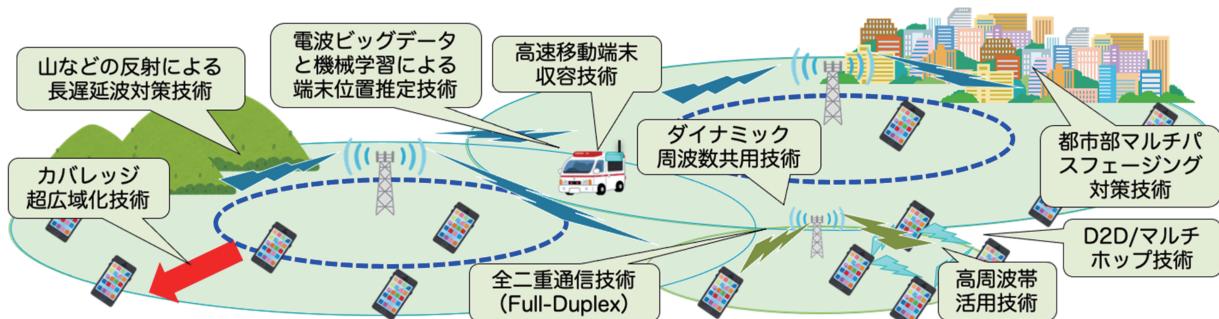
図2 料理イベント自動解析の例

通信システム工学講座 ディジタル通信分野 (原田研究室)

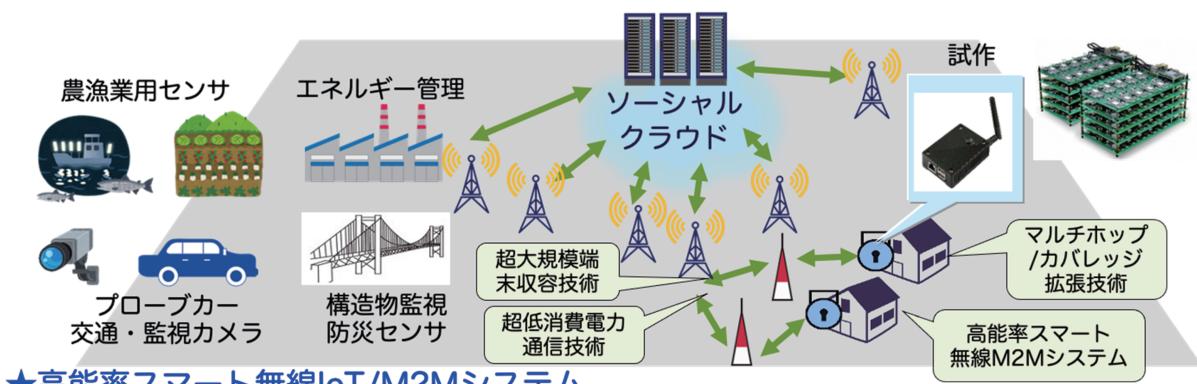
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

第6世代プロードバンド移動通信システムに関する研究

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、4GシステムとしてLTEなどの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでおり、また2020年からは世界各国で5Gのサービスが開始されました。しかし、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。現在、すでに5G以降のシステム（Beyond 5G）および6Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G/6Gに関する研究として、超広域プロードバンド移動通信システム、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、周波数共用システム、新信号波形・新物理層方式、高周波帯活用技術、高能率スマート無線M2M通信システム、機械学習の通信システムへの応用、仮想空間における電波模擬システム技術の高度化などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。なお「全二重複信セルラシステム」に関する研究開発は総務省委託研究「第5世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発（JPJ000254）」の一環として、また「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化」に関する研究開発は総務省委託研究「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発（JPJ000254）」の一環として実施しています。また「機械学習の通信システムへの応用」および「高能率スマート無線M2M通信システム」に関する研究開発は総務省SCOPEの委託研究（JP196000002）の一環として実施しています。



本研究室における第6世代プロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



★高能率スマート無線IoT/M2Mシステム

本研究室におけるスマート無線M2Mシステムに関する研究開発概要

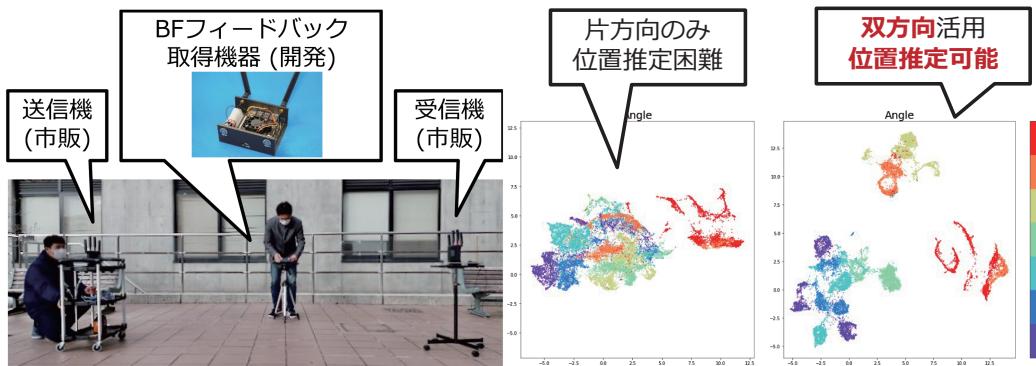
通信システム工学講座 伝送メディア分野 <http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/> 「制御信号を用いた無線 LAN センシング」

複数の送受信アンテナを持つ無線 LAN 機器間の MIMO (Multiple Input Multiple Output) 通信においては、その送受信信号処理のために、送受信アンテナ間でインパルス応答を観測している。インパルス応答は、送受信機の位置や、人体などを含む周辺の環境によって変化するため、このインパルス応答を、本来の目的である送受信信号処理に加え、無線環境のセンシングに用いることが可能である。これを無線 LAN センシングと呼ぶ。観測されたインパルス応答を送受信機器から取り出すには、一般に特殊なファームウェアが必要である。

一方、最新の無線 LAN 規格 IEEE 802.11ac/ax に準拠した機器間では、ビームフォーミングフィードバック (BFF) と呼ばれる制御フレームが暗号化なく送られており、第三者による傍受が可能である。この BFF フレームには、インパルス応答に基づいた情報（インパルス応答をフーリエ変換した周波数応答行列を、周波数毎に特異値分解した右特異行列と、全周波数で平均化した特異値）が含まれている。これまでに、インパルス応答の代わりに BFF フレームを機械学習の入力特徴量として用いることで、送受信機の位置や、人体の位置推定が可能であることが示してきた。一方で、BFF フレームはインパルス応答そのものではないため、インパルス応答自体を用いたセンシングよりも精度が劣化することが懸念されるが、どのような状況で精度劣化が大きいかは明らかではなかった。

まず送信アンテナが、素子間隔が半波長より小さい等間隔リニアアレーの場合には、上記右特異行列に基づき MUSIC (multiple signal classification) 法と呼ばれる基本的な波源推定手法を適用すれば、原理上出射角が推定可能であり、これを実機実験により確認した [1]。

一方、MIMO 通信においては一般にアンテナ素子間の相関を下げるため、上記のような等間隔リニアアレー形状ではない。そこで、BFF フレームを機械学習の入力特徴量とした場合、受信機の位置や、人体の位置推定を行う際、送信機からの出射角の推定精度が、到來角推定精度より有意に高いことを実機実験により確認した。加えて、2 局間で送り合う BFF フレーム両方を用いることで、センシング精度を高められることを確認した [2]。一方でこれらの結果は、悪意のある盗聴者が傍受した BFF フレームから無線 LAN センシングが可能という、潜在的なプライバシーリスクを示唆している。



本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 JP196000002) の委託を受けたものである。

(参考文献) [1] S. Itahara, S. Kondo, K. Yamashita, T. Nishio, K. Yamamoto, and Y. Koda, "Beamforming feedback-based model-driven angle of departure estimation toward legacy support in WiFi sensing: An experimental study," IEEE Access, vol. 10, Jun. 2022. [2] S. Kondo, S. Itahara, K. Yamashita, K. Yamamoto, Y. Koda, T. Nishio, and A. Taya, "Bi-directional beamforming feedback-based firmware-agnostic WiFi sensing: An empirical study," IEEE Access, vol.10, Apr 2022.

システム情報論講座 医用工学分野
<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp>
MRI による高速分子イメージング法の開発

MRI (Magnetic Resonance Imaging) では、形態診断に加えて組織性状の診断や生体内の様々な化合物を対象とした分子イメージングなど、幅広い応用が期待されている。近年、化学交換（分子を構成する一部の原子が他の分子の原子と交換する現象）を利用した CEST (Chemical Exchange Saturation Transfer) 法が MRI による新しい分子イメージング法として臨床応用されつつある。

水溶液中において、溶質分子に含まれるアミド基やアミノ基の水素原子は化学交換により溶媒である水の水素原子と絶えず交換し平衡状態となっている。これら溶質プロトンの核磁気共鳴周波数は水プロトンと数 ppm だけ異なるが、溶質プロトンに共鳴する單一周波数の電磁波を与えると、溶質分子のプロトンのみが核磁気共鳴法における飽和という状態となる。この飽和プロトンが化学交換により水分子に移動すると、豊富に存在する水分子のプロトンの一部が飽和状態となり、水分子の核磁気共鳴信号が低下する。このように化学交換による飽和の移動を利用して溶質分子を検出する方法が CEST 法である。CEST 法の計測対象となる分子は交換性プロトンを有している必要がある。例えば、グルタミン酸は水溶液中においてアミノ基のプロトンが水のプロトンと交換可能であり CEST 法の計測対象となる(図 c)。CEST 法において飽和に用いる電磁波を飽和パルスと呼び、予め飽和パルスを与えた後に水の信号を取得するが、これを様々な周波数の飽和パルスについて繰り返す(図 a,b)。このようにして収集した水の信号から、飽和させない場合の信号強度に対する相対値を算出し、飽和パルスの周波数に対してプロットしたものを Z-スペクトルと呼ぶ(図 d)。Z-スペクトル上において、溶質プロトンの共鳴周波数では CEST 効果により信号強度が低下し(図 d, 赤矢印)、水の共鳴周波数では水プロトンの直接飽和により信号が低下する(図 d, 黒矢印)。基本的な CEST 法では、Z-スペクトルを得るために異なる周波数の飽和パルスを用いて数十から百回程度の撮影を繰り返す必要があり、測定に長時間を要するという問題がある。

当研究室では、2 回の画像収集で複数の領域から Z-スペクトルを計測する新たな高速 CEST MRI 法を提案し、その実現を目指した研究開発を行っている。提案手法では、飽和パルスとして周波数領域で周期性を持つ DANTE パルスと、磁場強度が空間軸に沿って線形に変化する傾斜磁場を導入する(図 e)。DANTE パルスは、多数の電磁波パルスを規則正しく繰り返すことでの帯域幅を狭くし尖鋭化する手法であるが、この尖鋭化した帯域が周期的に現れることを利用する。傾斜磁場の存在下で DANTE パルスを照射することにより周波数領域で周期的に現れる電磁波の強度分布を空間分布に変換し、MRI 画像における画像領域の幅に一致した間隔で空間的に繰り返す飽和パルスを実現する。これにより、画像化の際には各画像領域から連続的な Z-スペクトルが得られ、従来の CEST MRI における問題点であった計測時間の短縮を達成する。提案手法を実証するため、グルタミン酸水溶液を対象として研究用 MRI 装置を用いた撮影実験を行い、複数の領域から Z-スペクトルを取得可能であることを実験的に示した(図 f,g)。この結果をもとに、生体を対象とした撮像や臨床応用を目指した研究開発を進めている。

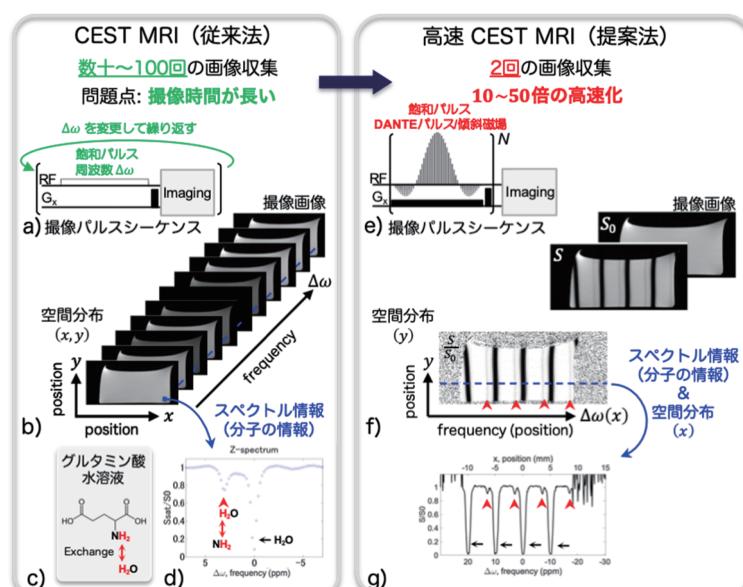


図 CEST MRI (従来法) と高速 CEST MRI (提案法) の概要

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野 (下田研究室)
<https://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/wp/>
エージェントの対話性がユーザの環境配慮行動に与える影響の実験評価

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化をはじめとする地球環境の変化が問題視されている。これらの問題を解決するための対策として、一人ひとりが環境配慮行動（PEB: Pro-environmental Behavior）を実施することが重要とされている。PEBは社会のためになる行動（向社会的行動）のひとつとして知名度が高く、人々はPEBを重要なものだと考えている。しかし、PEBは手間や負担が大きく、実際の行動にはいたらないことが多い。そのため、人々にPEBを促すためには何らかの介入・動機づけが必要である。

介入手段のひとつとして、他者に行動を観察させる、観察者の配置がある。実際に、他者の視線が存在することによって、「ミエを張る気持ち」が強まり、PEB等の向社会的行動が促進されることが知られている。しかし、実用上は人間を配置するのは困難であるため、画面に表示されるバーチャルエージェントを観察者として用いてPEBを促進する手法の実現を目指す。本研究では、エージェントの対話性の有無がユーザの環境配慮行動に与える影響について次のふたつの仮説を立て、人を対象とした実験による仮説の検証を目的とした。

仮説1 人は観察者であるエージェントと対話がある方が、対話がない場合と比較してより「ミエ」を張りたいと思う

仮説2 人はエージェントと接した時に対話がある方が、対話がない場合と比較してよりPEBが促進される

仮説検証のための実験では、人と接するときに、実験参加者が名前を言ったら復唱する、実験参加者に質問をしてその答えに応じた返答をするなどのインタラクションを行うエージェントを用いる「対話あり条件」、インタラクションを行わない、つまり一方的に情報を発するエージェントを用いる「対話なし条件」を設定し、比較した。

実験には72名が参加し、うち32名が対話あり条件、32名が対話なし条件でそれぞれエージェントと接した後、PEBの実施度合いを評価する実験タスクPEBT(Pro-environmental Behavior Test)を実施し、対話感や好意、ミエ等についての0-6の7段階で問うアンケートに回答した。実験の結果、ミエについて対話あり条件で平均3.6、対話なし条件で平均2.3となり、対話あり条件で有意に高くなった。これにより、仮説1が支持された。また、PEBTの結果を元に算出したPEB実施度合いについても、対話ありで平均5.5、対話なしで平均2.7となり、有意な差が見られた。これにより、仮説2も支持される結果となった。

本研究により、エージェントをPEB促進に利用する際に、対話性の実装が重要であると示唆された。実用に向けて、実験室実験だけでなく、実際にフィールドに導入した際の効果についても検討する必要がある。

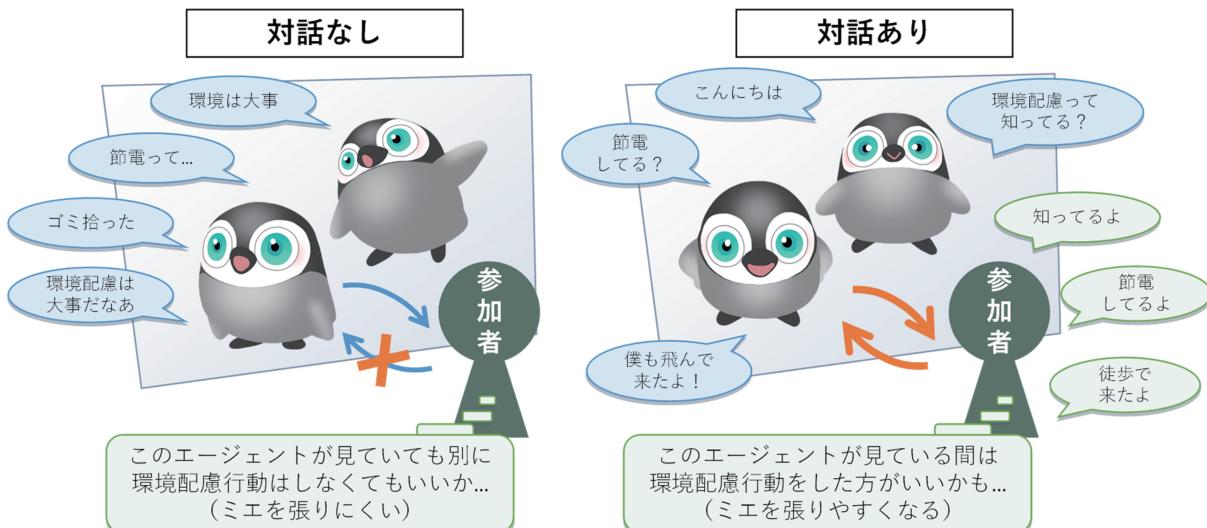


図1 対話なし条件・対話あり条件それぞれのエージェントと接した際のイメージ

エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野 (土井研究室)
<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/>
「薄膜型全固体リチウムイオン電池の室温作製技術の開発」

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

IoT センサの普及には小型化と低価格化が必須の要件であり、そのためには多様な基板上にセンサ素子、通信素子、メモリ、プロセッサ、発電素子、蓄電素子を混載することが望ましいが、蓄電素子に関する研究は少ない。そこで、我々はポリマーなどのフレキシブルな基材や Si ウエハー上に薄膜 Li イオン電池の作製を目指している。ポリマー上に Li イオン電池を作製するためには低温で結晶化した Li イオン電池材料薄膜を形成する技術が必要になるが、我々はイオンビームアシストパルスレーザー蒸着法により、室温で（恐らく）世界で初めて結晶化した LiCoO_3 正極薄膜の作製に成功した。

図 1 に、ガラス基板上に室温（加熱無し）でイオンビームを照射しながらパルスレーザー蒸着（PLD）法で作製した LiCoO_3 正極薄膜の X 線（104）極点図を示す。 $(\alpha, \beta) = (55, 90), (55, 210), (55, 330)$ の位置に回折強度の強い反射が観測されている。このことから、室温で成膜したにもかかわらず結晶化した LiCoO_3 薄膜が作製できたことが確認できた。また、イオンビーム照射方向 // LiCoO_3 結晶の [01-1] 方向、かつ基板法線 // LiCoO_3 結晶の [012] 方向、の関係を満たすように全ての LiCoO_3 結晶の向きが単結晶のように揃っていることが分かった。

図 2 に、正極を室温で成膜した LiCoO_2 薄膜、負極を Li 金属箔、セパレータに不織布、電解液に LiPF6 をエチレンカーボネート系有機溶媒に溶解した液体を使用して作製した試験電池の充放電曲線を示す。サイクルを重ねるにしたがって充放電容量が急激に低下しているものの、電池として動作することが確認できた。

この結果は、ポリマーなどの低コスト可撓性シート上や Si ウエハー上に Li イオン電池を作製することが可能であることを意味し、今後、幅広い応用展開が期待できると考えている。

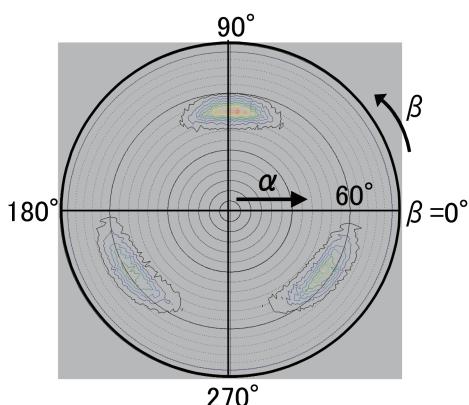


図 1 LiCoO_2 の(104) 極点図

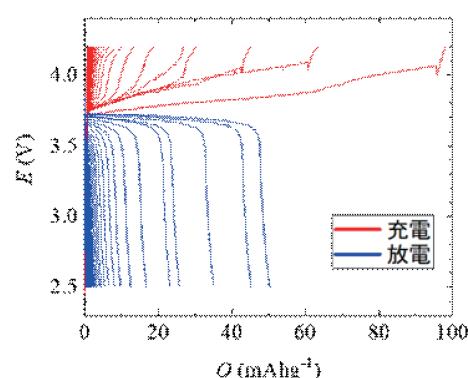


図 2 LiCoO_2 薄膜を正極にして作製した試験電池の充放電測定結果

エネルギー科学研究科（エネルギー応用科学専攻）プロセスエネルギー学分野（白井研究室）
<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>
「液体水素強制対流冷却 CICC 超電導マグネットの開発」

1. はじめに

核融合用超伝導マグネットや超伝導エネルギー貯蔵装置など、高磁場でエネルギー密度の高い大型のマグネットを必要とする機器では、高い臨界磁場と臨界温度を持つ高温超伝導材料（REBCO や BSCCO など）を用いた開発がすすめられている。その導体として粘性の小さい液体水素強制対流冷却 CICC (Cable In Conduit Conductor) とすることを提案し、冷却安定性を検討した。

2. MgB₂ 摊線 CICC 導体の強制対流冷却下通電試験

MgB₂ 超電導線（図 1）を用いて、MgB₂/CuNi/CuNi 摊り線および MgB₂/Cu/CuNi 摊り線を製作し、図に示す FRP ブロックに設けた円形流路に収めて、液体水素で強制対流冷却しながら過電流通電試験を実施した。実験は JAXA 能代ロケット実験場に設置した「差圧駆動式強制対流試験装置」を用いて実験を行った。

図 2 は MgB₂/CuNi/CuNi 摊り線の、液温を 31 K、流速 1.24, 2.43 m/s での試験結果である。ともに 130A 付近でタップ電圧が現れ、流速 1.24 m/s では 300A で、流速 2.43 m/s では 360A で熱暴走が確認された。これに対して、MgB₂/Cu/CuNi 摊り線では 400A (電源容量) の電流を流しても熱暴走は確認されなかった。MgB₂ 線が常電導転移すると電流は主に摺った Cu 線に流れ熱暴走に到らなかつた。一方で、MgB₂/CuNi/CuNi 摊り線では、電流は主に MgB₂ 内の Cu 層に流れ、熱暴走が発生したと考えられる。また、流速増加によって膜沸騰に到る DNB 热流束が上昇し、熱暴走する電流値が大きくなることを確認した。

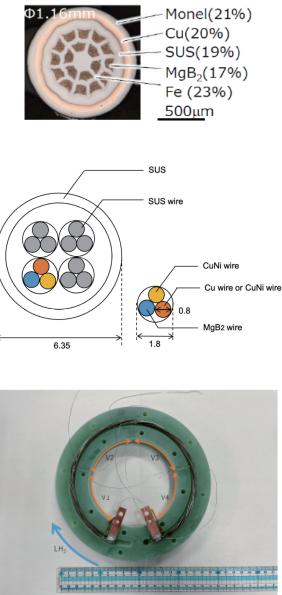


図 1 CICC 摊線模擬導体

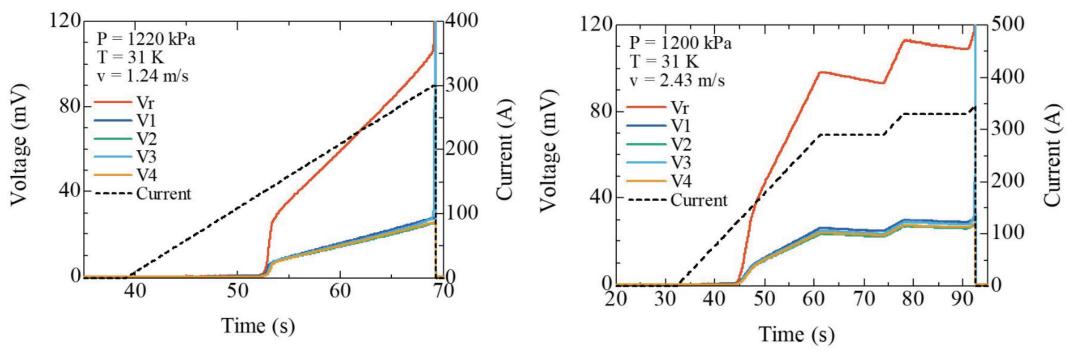


図 2 過電流通電試験の電流・電圧の時間変化 (MgB₂/CuNi/CuNi 摊り線)

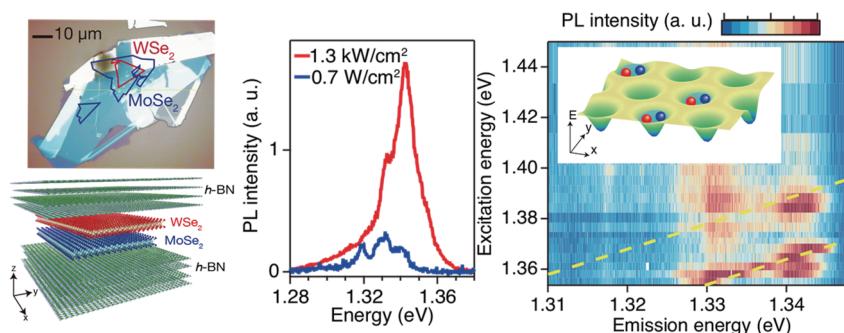
エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研究室）

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

「二次元半導体人工ヘテロ構造のモアレ物理と量子光学現象」

わずか炭素原子一層からなる究極の物質と呼ばれるグラフェンの発見を契機として、単層遷移金属ダイカルコゲナイト（ MX_2 ; M=Mo, W; X=S, Se）など、わずか原子数層からなる新たな二次元半導体の光科学やその応用研究が精力的に進められている [1]。二次元半導体中に光励起で生成された電子とホールは、クーロン力で互いに強く束縛し励起子を形成するとともに、波数空間上で「バレー」と「 спин」が結合したバレースピンという新しい物理自由度を有するバレー励起子として振る舞う。このバレー励起子は、二次元半導体の特異な光学的性質を担うとともに、そのバレースピン自由度を利用した新たなフォトニクスであるバレースピンフォトニクスが期待される。また、二つの二次元半導体を角度をつけて重ねることで、モアレ長周期構造が形成され、これにより新奇な物理現象が発現することが明らかになりつつある。このような周期的な原子配列に由来する長周期的なモアレ縞によって、励起子（もしくはバレー励起子）がそれぞれの原子位置でエネルギーの違いを感じ、それが量子閉じ込めポテンシャルとして機能する。そのため原子層厚とこのモアレポテンシャルによって、励起子を0次元的に局在化させ（モアレ励起子）、規則的に配列させることができる。この原子配列は積層角度で自在制御できることから、角度によってモアレポテンシャルの深さや間隔、つまり励起子間距離や相互作用を制御できる魅力的なシステムである。我々は、これらモアレ物理が発現する二次元半導体において、先端的な分光手法やデバイス作製技術を用いて、新しい光科学の研究の開拓とバレースピンフォトニクスに向けた研究を進めている [2,3]。

ここでは実際に、二セレン化タンゲステンと二セレン化モリブデンからなる $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$ 二次元半導体人工ヘテロ構造について、発光スペクトルや発光励起スペクトルなどの手法を用いて、その基礎光学特性の解明を目指した。図は、角度約 10° で積層した $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$ の光学顕微鏡像、その模式図を示している。さらに、低温かつ弱励起下での発光スペクトルでは、複数の鋭い発光ピークが観測されており、モアレポテンシャルにより閉じ込められた励起子からの発光が生じていることを示している。次に、光吸収に相当する情報を得るために発光励起分光測定を行い、それを二次元等高線マップの形で示したものを見せる。この結果から、モアレポテンシャルに捕捉された励起子の共鳴は離散的であり、確かに0次元系特有の振る舞いを示している。それに加え、この二次元マップからフォノン共鳴が観測され、モアレ励起子とフォノンの結合が生じている事が明らかとなった。これらの知見から、周期的に配列したバレースピン自由度を有するモアレ励起子を利活用し、将来の高速・省エネルギーな新たな光電子デバイスとバレースピンフォトニクスに向けた更なる研究進展が期待される。



参考文献

- [1] Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda, and K. Matsuda, *Nat. Commun.* **9**, 2598 (2018).
- [2] K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, *Nano Lett.* **21**, 5938 (2021).
- [3] Y. Zhang, H. Kim, W. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, and K. Matsuda *Adv. Mat.* **34**, 2200301 (2022).

生存圈診断統御研究系大気圏精測診断分野（橋口研究室）

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

レーダーインバージョン法による速度場推定法の開発

大気レーダーは、大気の屈折率変化により生じる電波散乱を利用して風速等物理量の推定を行うことを基本的な目的とする。特に風速を測定することを目的として設置されるレーダーのことをウインドプロファイラーと呼ぶ。従来その推定手法・原理は簡単に、電波ビームを鉛直上方付近の複数方向に照射し、それぞれ大気エコーを受信することで各視線方向に沿ったドップラー速度が観測され、1次方程式を解くことにより風の3次元速度を求めることができる、と説明されてきた。この理解は極めて定性的発想に基づいており、例えば、風と共に移動する座標系に乗って見たとしても屈折率の場が時間的に変化することや、ビームに有限の幅があることなどが全く考慮されていない。このため、従来は高次統計量（例えば風速スペクトルの分散など）の推定において精度に問題があることが知られていた。近年、大気散乱の精密な時空間モデル（数理モデル）に基づく厳密な観測理論（スペクトル観測理論）と、この理論に基づく正確な物理量の導出アルゴリズムが提案され、数値シミュレーションや実データ解析など様々な角度からこの新しい理論の正しさが実証されつつある。

この新しい観測原理はレーダー干渉計（独立にデータを取得できる複数の受信アンテナ群で構成されるものなど）などレーダーの高機能な実装形態へも展開することが可能である。レーダー干渉計では複数の受信データの相関関数からターゲットの（アンテナ面と）平行方向の移動に起因する遅延時間が推定できる。つまり原理的にレーダー干渉計では大気が電波ビームを横切る（クロスラジアルあるいはクロスドップラー）速度の推定が可能であり、従来よりこの手法に基づく観測は一定の利用がなされている。しかし、この原理も定性的理解に基づいて構築されており、現実には原因不明の大きな推定誤差を伴うことが知られていた。そこで、上述のスペクトル観測理論に基づく観測モデルを干渉計に適用することにより、正確なクロスドップラー速度成分の推定が可能となることが予想される。つまり、当然推定可能なドップラー成分と合わせることで、ビームのスキャンを前提とすることなく、ビームを向けた先の風速が3次元ベクトルとして取得できることを意味する。本研究ではこのような原理に基づく（3次元）ベクトル型レーダーあるいはウインドスキャナーと呼んでおり（図1）、数値シミュレーションや実験による精度検証を進めている（図2）。

これまで従来型のウインドプロファイラーは気象庁により国内に30数カ所設置されており、風速分布を不等間隔離散的に観測しパソコンを用いた大気・気象モデルに同化することにより国内のあらゆる点における気象を予測することに用いられて来た。もっとも昨今ゲリラ豪雨などと言われる局所的な気象擾乱が甚大な被害を出していることが知られるように、時空間分解能、精度ともに十分な観測、予測がなされるに至っていない。さらには、航空機の離発着で問題となるマイクロダウンバーストなど数百メートルスケールとなる超局所擾乱などを観測することは望むべくもない。水平方向を幅広くカバーし、かつ風速場を3次元ベクトル場として観測することが可能となるベクトル型レーダーを実現することにより、国内の気象場を稠密かつ連続に観測することで、局所擾乱に起因する気象災害や航空機事故を低減することが本研究の最終的な目標である。

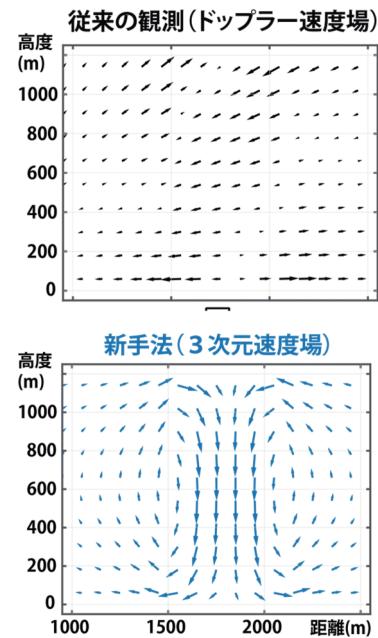


図1. ドップラー速度からベクトル速度の観測へ

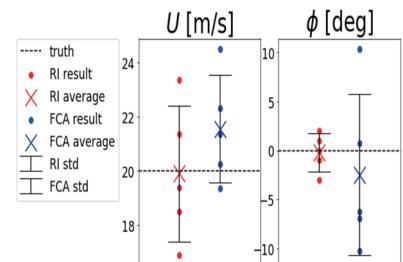


図2. シミュレーションによる推定精度

生存圈開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研究室)

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/omura-lab/>

「VLF 帯ホイッスラーモード・トリガード放射の計算機実験」

宇宙空間で頻繁に観測されるホイッスラーモード波は高緯度の大気中でおこる雷放電や主に潜水艦との通信用に地上局から送信される VLF 帯 (3kHz-30kHz) の電波が地球の磁力線に沿って磁気圏プラズマ中を伝搬する際の電磁波である。また、太陽風の変動により地球磁場が乱れる磁気嵐やサブストームの際に内部磁気圏に運ばれる高エネルギー電子によっても周波数変動を伴う大振幅のホイッスラーモード波が自発的に発生し、これはコーラス放射と呼ばれている。このコーラス放射は高エネルギー電子の一部を光速に近い相対論的速度にまで加速・散乱することができ、地球を取り巻く放射線帯の変動の要因となっている他、高エネルギー電子の磁力線に対するピッチ角を散乱し極域大気へ降下させてオーロラを発光させている。最近では、このコーラス放射を宇宙空間で人工的に発生させて放射線帯の電子フラックスを制御する試みとして人工衛星から VLF 帯の電波を放射する能動実験が行われている。我々はこの能動実験を計算機実験で再現し、その特性を調べた。

1次元電磁粒子コードにおいて地球の赤道面付近のダイポール磁場の効果を高エネルギー電子の運動方程式に取り入れて大規模計算機実験（超粒子数：約 10 億個）を実行し、磁気赤道付近から一定周波数のホイッスラーモード波をトリガー波として注入するとコーラス波と同様の周波数変動を伴うトリガード放射が新しく励起される非線形過程を再現することに成功した [1]。

放射過程では、① トリガー波が赤道から高緯度へ磁力線に沿って伝搬し、② その下流側で周波数変動を伴う波がトリガードされ（図 1）、③ 周波数上昇に従って発生領域が次第に赤道よりも上流側へと移動することが確認できた（図 2）。その移動速度は高エネルギー電子の共鳴速度とホイッスラーモード波の群速度の和となっていることを見出した。発生領域の上流側への移動が、コーラス放射の非線形成長理論 [2] で想定されている絶対不安定性の必要条件となっていることが判明した。

[1] Nogi, T., & Omura, Y., Nonlinear signatures of VLF-triggered emissions: A simulation study, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127, e2021JA029826, 2022.

[2] Omura, Y., Nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus and hiss emissions in the magnetosphere, Earth Planets Space 73, 95, 2021.

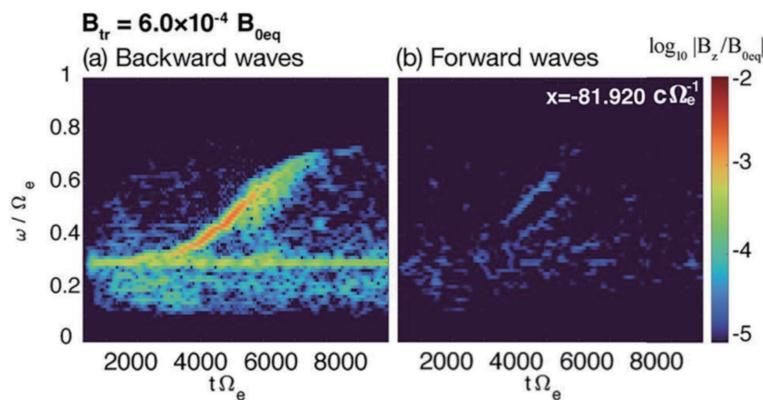


図 1 赤道から離れた地点で観測されるホイッスラーモード・トリガード放射の後進波と前進波の周波数ダイナミックスペクトル

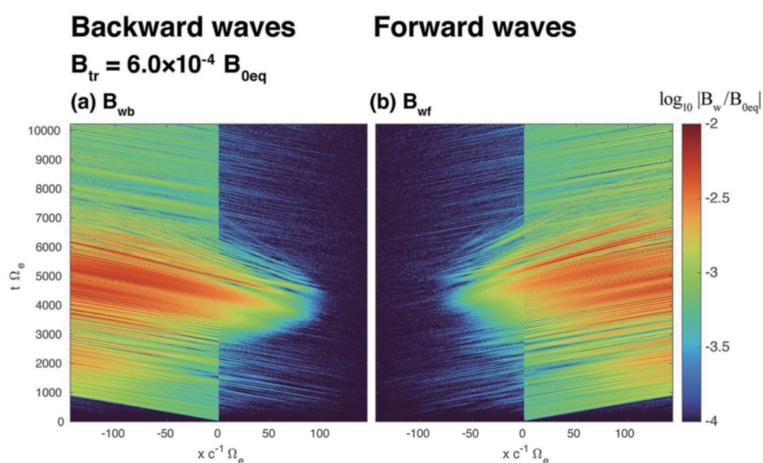


図 2 赤道から入力される一定周波数のトリガー波および周波数が上昇するトリガード放射（前進波と後進波に分離）の振幅の時空間発展

令和3年度修士論文テーマ紹介

工学研究科 電気工学専攻

池田 大輝（引原教授）「高周波で動作する非反転バックブーストコンバータの変調と制御」

本論文は、非反転バックブーストコンバータにおけるバックブーストモードのスイッチング変調法を提案し、コンバータの制御方式について検討したものである。提案したスイッチング変調法において高効率となる条件を数値的と実験的に検討した。このコンバータが高効率となる条件において制御方式を提案し、数値計算において負荷変動を抑制するために提案した制御方式が有効であることを示した。

佐部利哲士（引原教授）「遅延時間を含む位相同期系の次元に基づく過渡解析と同期特性」

本論文は、状態が過渡的に有する次元を定義して、遅延微分方程式の解の次元がどのように時間変化しているのかを検討したものである。位相同期系を対象として、平衡点に収束する場合とオンオフ間欠性を有する場合について、次元のダイナミクスの解析を行った。同時に Galerkin 法によって近似された系に対して相空間解析を行うことで、同期特性の把握を行った。

塩貝 優（引原教授）「SiC デバイスを用いた高効率電力変換のための中点分離モジュール設計」

本論文は、電力変換回路の出力電流全領域において、電力変換効率を向上させる方法を検討したものである。中点分離モジュール設計を組み込んだ電力変換回路において、出力電流に応じて動作するデバイス数を変更することで、これを達成できることを明らかにした。

藤原直樹（引原教授）「仮想同期発電機を含むマイクログリッドの微分ゲームに基づく運用に関する数値的検討」

本論文は、仮想同期発電機を含むマイクログリッドの安全状態を保つ運用方法を微分ゲームの観点から検討したものである。安全性の観点を与える微分ゲームに基づく解析と制御より、同モデルの安全運用が実現可能であることを示した。

志賀亮介（萩原教授）「サンプル値系の非負性とその L_q/L_p 誘導ノルム・ハンケルノルム解析への応用」

非負システムに関する理論をサンプル値系へと拡張するため、サンプル値系の非負性を定義し、その判定条件を導いた。さらに応用として、非負のサンプル値系の L_q/L_p 誘導ノルム・ハンケルノルムの効率的な数値計算法を導出した。

滝田大暉（萩原教授）「隠れマルコフモデルで動特性が定まる確率系の安定化状態フィードバック設計」

状態が確率的に遷移する離散時間線形系の安定条件や安定化制御器設計について論じた。特に、状態の遷移に寄与する確率過程が隠れマルコフモデルで表される場合を取り扱い、系の係数行列が満たす性質に応じて数種類の安定条件や設計のための条件式を導出した。

張 瑞 奇 (萩原教授) 「i.i.d.確率過程により動特性が定まる離散時間系の多目的状態フィードバック制御」

確率的な動特性をもつ離散時間線形系の H_2 性能設計と H_∞ 性能設計に関する既存成果に対して補助変数の導入による線形行列不等式 (LMI) の拡張を行った。そして、数値例検証により多目的状態フィードバック制御器設計の際に生じる保守性の低減への寄与を確認した。

小山田 祐 志 (阪本准教授) 「ミリ波アレーレーダによる複数部位脈波計測を用いた非接触血圧モニタリング技術」

本研究では、レーダによる非接触血圧計測を対象とし、血圧に依存する脈波速度を計測するため、人体の2部位からの反射波をアレーレーダにより分離計測し、各部位の皮膚変位波形間の時間差から血圧を推定する手法を開発し、実験による精度評価を行った。

香 田 隆 斗 (阪本准教授) 「呼吸の特徴量を用いたミリ波アレーレーダ人体計測技術」

本研究では、レーダによる非接触呼吸計測に関する課題のうち、「複数人体の非接触呼吸計測」および「睡眠時無呼吸の非接触検出」の2つを取り上げ、対象とする呼吸運動の特徴量に着目した手法をそれぞれ提案し、計測精度の向上を実験により明らかにした。

後 田 尚 紀 (土居教授) 「相互結合した心臓洞房結節細胞モデルの分岐解析に基づくイオン電流変化がペースメーカ活動に及ぼす影響に関する研究」

心臓の拍動は、洞房結節に存在するペースメーカ細胞群の周期的振動によって支配されている。複数のペースメーカ細胞が結合した数理モデルを解析することで、細胞間の結合や細胞膜に存在するイオンチャネルの異常が、心臓の拍動に及ぼす影響を明らかにした。

杉 田 昌太郎 (土居教授) 「二次元共振回路アレイにおける局在モードの近似解の構成と非接触給電システム設計手法への適用」

二次元共振回路アレイにおける局在モードの近似解を構成し、局在モードの波形や周波数とコイル間の結合係数との関係を明らかにした。また、非接触給電システムにおいて局在モードの局在性や周波数を一定に保つための設計指針を得た。

LEE Jungjin (土居教授) 「磁気結合 2 自由度振動子列を用いた移動型非線形局在振動の数値的研究」

磁気的な結合を有する棒バネを1列または3列に整列させた結合振動子において、移動型非線形局在振動の存在条件や安定性に関する数値的研究を行った。その結果、3列配置の方がより高エネルギーの局在振動が移動できることなどを明らかにした。

大 谷 康 介 (小林教授) 「光ポンピング磁気センサを用いた脳磁図の多チャンネル同時計測法に関する検討」

脳磁図を計測する場合、複数の計測点で得られた信号から信号源を推定する必要がある。本研究では、開発した多チャンネル光ポンピング磁気センサと、複数の小型センサモジュールとをヒト脳磁図計測に適用し、それぞれの有用性について評価した。

後 藤 達哉（小林教授）「地磁気環境下におけるスカラー型光ポンピング磁気センサの動作に関する検討」

生体磁気計測には従来高額な磁気シールドを必要とするため、幅広い普及には至っていない。本研究では、磁気シールドフリーでの生体磁気計測の実現を目指し、地磁気環境下におけるスカラー型光ポンピング磁気センサの動作について理論的・実験的に検討した。

齋 藤 航 太（小林教授）「神経磁場シミュレーションによる光ポンピング磁気センサを用いた平面型脳磁図システムの検討」

全頭型の脳磁図システムは、被験者に圧迫感や不快感を与えるため、本来観測したい情報が得られない可能性がある。これを解決するため、平面上に光ポンピング磁気センサを並べたシステムについて提案し、その有効性を数値シミュレーションにより検討した。

堀 壮吾（小林教授）「光ポンピング磁気センサを遠隔検出器とした超低磁場 MRI に関する研究」

超低磁場 MRI は、装置の小型化や金属インプラントを有する被験者の撮像も可能であるなど利点が多いが、SNR が低いという欠点がある。本研究では、検出器に高感度な光ポンピング磁気センサを用いて MR 画像を取得し、理論的・実験的にその有効性を調べた。

陳 妙鑫（雨宮教授）「Experimental Study on Dynamic Resistances of Copper-Plated Striated Coated Superconductors」（銅安定化多芯薄膜高温超伝導線の動的抵抗に関する実験的検討）

直流電流を輸送している超伝導線に交流外部磁界が印加されると動的抵抗と呼ばれる抵抗が発生する。多芯化の有無、またスパイラル化の有無を組合せた四種類の試料を対象に動的抵抗を測定し、スパイラル多芯薄膜高温超伝導線において動的抵抗が低減されることを確認した。

八鳥 孝志（雨宮教授）「数値電磁界解析によるスパイラル高温超伝導導体の交流損失特性の形状依存性評価」

スパイラル高温超伝導導体を対象とする大規模数値電磁界解析技術を構築し、その妥当性を実験との比較によって評価した。また同解析技術を用い、現時点では実験で評価困難な、高磁界下における形状の異なるスパイラル高温超伝導導体の交流損失特性を評価した。

趙一帆（雨宮教授）「Voltage-Current Characteristics Along and Across Copper-Plated Multifilament Coated Conductors」（銅安定化多芯薄膜高温超伝導線の長手及び幅方向電圧・電流特性）

銅安定化多芯薄膜高温超伝導線に通電した場合の長手方向及び幅方向の発生電圧を実験的に測定した。銅安定化層を介した分流を実験的に確認し、銅安定化多芯薄膜高温超伝導線の臨界電流定義のためには高電界領域における電圧・電流特性が重要であると指摘した。

大井 凌也（和田教授）「マルチドロップ車載 Ethernet 10BASE-T1S の伝達特性補償法と高周波妨害波の影響評価」

車載通信用 10BASE-T1S バスの実装法に関して、各ノードの容量による信号劣化を抑制するため提案されている特性補償法が多重反射により特定周波数妨害波による通信特性劣化を発生する問題点を指摘し、その改善法についてシミュレーションにより検討した。

石 口 博 尚（和田教授）「单導体線路モデルにおける放射の反作用の制御電源を用いた表現」

帰路線をもたない单導体線路は放射の影響が大きく、単純な伝送線路として扱えない。本論文では進行波に応じた制御電流源を線路端に加えることにより、单導体線路を伝送線路としてモデル化できることを理論的に示し、エネルギーの関係も満たすことを確認した。

遠 藤 光 太（和田教授）「Tubular Wave Coupler の構造変更による TWC 試験法の妨害波注入特性の改善」

ISO 11452-4 で規定される車載電子機器イミュニティ試験法（TWC 法）について、適用周波数範囲の高周波拡張および妨害波注入時の方向性改善を目的として、TWC の構造を等価回路モデル化し、回路解析と三次元電磁界解析の併用により TWC の改善構造を検討した。

北 村 健 浩（和田教授）「オフセット電圧の順序統計量に基づいた低消費電力なフラッシュ型 ADC」

多数のコンパレータをチップ上に搭載し、目標の参照電圧に近いオフセット電圧を持つコンパレータを順序統計量に基づき自動選択し、参照電圧の生成なしに微細トランジスタを利用した ADC 設計を可能にした。さらに、65nm プロセスの試作チップにより提案手法を実証した。

LEE Minseong（和田教授）「Ethernet 通信のデータエラー発生機構と帰路線追加 UTP によるコモンモード特性改善法」

Ethernet 通信規格 100BASE-TX、1000BASE-T、1000BASE-T1 においてパルス性妨害波パラメータとデータエラー率の関係を明らかにし、データエラー発生機構を調査した。また、T1 UTP に帰路線を追加したケーブルによるコモンモード特性と終端条件の改善を提案した。

LI Haobin（和田教授）「Visual Analytics for Deriving PDE Using Neural Network」（ニューラルネットワークを使った PDE 導出に資する視覚分析）

物理量が定義された点群データより偏微分方程式の導出を支援するための、物理ベース学習技術を利用した視覚的分析システムを開発した。移流拡散方程式の厳密解を点群データとみなし、その方程式がうまく復元できるかどうかの観点でシステム評価を行った。

香 月 啓之進（松尾教授）「依存領域の概念を用いた時空間有限積分法の数値安定性に関する研究」

陽的時間進行法を用いて時空間有限積分法による電磁界計算を実行する際、解析的依存領域が数値的依存領域に含まれることを条件として数値的に安定な時間刻み幅を評価する方法を考案し、その有効性を様々な 3 および 4 次元時空間格子に対して検証した。

清 水 秀 広（松尾教授）「单板磁気試験器による測定に基づく電磁鋼板ベクトル磁化特性の応力依存性に関する研究」

可縮性の圧電フィルムを鋼板試料に貼り付けることにより、電磁鋼板磁化特性の応力依存性を測定するシステムを整備した。構成した測定システムにより、応力方向と励磁方向が異なる場合の応力依存磁化特性を計測し、2 種類の等価応力モデルの有効性を検証した。

下 西 徹（松尾教授）「誘導機モデル縮約における表現精度に対する空隙部空間高調波の影響に関する研究」

CLN 法を用いた誘導モータの縮約モデルは固定子と回転子の縮約モデルを空隙部空間高調波にて接続して得られる。まず空間高調波間の相互作用を無視することにより周波数領域の縮約表現を導出した。次に効率的な縮約表現のため高調波成分の削減法を検討した。

園 田 尚 之（松尾教授）「渦電流解析および Darwin 近似解析における誤差修正法とその収束性に関する研究」

電磁界解析における高コストな線形反復求解に関して、誤差修正法による収束加速と効率化について検討した。渦電流モデルにおける誤差修正法の補助行列のスパース化、Darwin 近似モデルにおける収束加速に取り組み、特に後者では計算コストの劇的な削減を実現した。

飛 田 美 和（松尾教授）「非線形モデル縮約法の理論的検討と誘導モータ解析への応用」

モデル縮約法である CLN 法を非線形化する手法について、パラメータ化の観点に基づいて定式化し、厳密な状態方程式の導出とその近似的な回路表現の精度を検討した。その手法を誘導モータの非線形モデル縮約に応用し、高精度で高効率な縮約モデルを導出した。

松 木 健次郎（中村（武）特定教授）「次世代 EV の実現に向けた直接駆動型高温超伝導モータシステムの設計と評価ならびに始動制御手法に関する検討」

現在急務である EV 駆動システムの高性能化に対し、高トルク密度・低損失化が実証されている高温超伝導誘導同期モータの適用が期待されている。本研究では、同モータを用いた EV システムの設計、解析的評価、及び高効率駆動のための始動手法の検討を実施した。

工学研究科 電子工学専攻

中 村 公 大（掛谷准教授）「テラヘルツ時間領域分光法による高温超伝導強磁性二層膜界面における近接効果」

テラヘルツ時間領域分光法により、LSAT 基板上に育成した $\text{Pr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ エピタキシャル 2 膜のテラヘルツ領域交流伝導度を測定した。2 層膜における外部磁場の有無による複素伝導率の虚数部から、強磁性体への超伝導近接効果を示唆する結果が得られた。

青 木 基（白石教授）「スピン軌道トルク磁化反転の高感度検出と高効率化に関する研究」

高速・高耐久な不揮発メモリ実現への切り札となる「スピン軌道トルク磁化反転」に関して、簡易なデバイス構造での直接検出手法、及び磁化反転効率の間接評価手法を開発した。本手法を用い、2 パルス法、自己誘起スピン軌道トルク、垂直トルクなどの新奇物理・手法を提案した。

芳 井 崇 悟（白石教授）「強磁性 / 非磁性金属界面磁気異方性制御による超薄膜 Co における低マグノン緩和の実現」

超薄膜 Co の下地として非磁性下地層を選択し、超薄膜 Co / 非磁性金属の FMR 信号を観測し、マグノン緩和を測定した。非磁性下地層の種類により強磁性 / 非磁性金属界面の磁気異方性を制御でき超薄膜 Co のマグノン緩和が大きく抑制されることを確認した。

蒲 優樹（竹内教授）「超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を用いた中赤外光子検出とその応用に関する研究」

本研究では、まず、超電導ナノワイヤ単一光子検出器を用いた中赤外光子の検出について、その検出効率や暗計数といった基本的な性能を精密に評価した。また、それを応用した中赤外光子の量子テレポーテーションの実現に向けて、必要なパラメータを理論的に計算し、その結果を元に実験系を設計した。

藤田一夢（竹内教授）「周波数もつれ光子対の空間光変調器を用いた分散制御に関する研究」

本研究では、周波数もつれ光子対の分散を、空間光変調器を用いて制御する手法を確立した。構築した分散制御系に周波数もつれ光子対を入射、空間光変調器を適切に制御することで、2光子時間相関幅の圧縮に成功した。

堀野智康（竹内教授）「量子光干渉断層撮影におけるアーチファクトの除去アルゴリズムに関する研究」

本研究では、量子光干渉断層撮影で生じるアーチファクトを、撮像結果に後処理を行うことで除去するアルゴリズムを開発した。アーチファクト除去をグラフの最大クリーク問題に帰着させる方法を着想、その計算量が素朴な最小二乗法を用いる場合と比較して大幅に改善することを実証、さらにその有効性を実際に実験で得られた断層撮像結果で確認した。

嶋崎幸之介（竹内教授）「シリコン欠陥中心内包極微ナノダイヤモンドの創生とファイバ結合単一光子源への応用に向けた研究」

本研究では、ファイバ結合高効率単一光子源実現に向け、シリコン欠陥中心内包極微ナノダイヤモンドおよび共振器内蔵ナノ光ファイバの開発を行った。また、原子間力顕微鏡を用いたナノダイヤモンドのマニピュレートシステムを開発、ナノダイヤモンドをナノ光ファイバ上に結合させることに成功した。

石川諒弥（木本教授）「4H-SiCにおける電子・正孔移動度の異方性」

4H-SiCは縦型パワーデバイス用半導体として有望であるが、重要性能であるオン抵抗を決めるc軸方向の移動度が未知である。本研究ではSiCのa面基板上にHallバー構造を作製し、c軸およびa軸方向の電子、正孔移動度を決定した。また、移動度のドーピング密度依存性、温度依存性も明らかにし、その科学的解釈を与えた。

井室充登（木本教授）「 $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_x$ 抵抗変化素子における組成制御による初期リセット電圧の低減」

PrCaMnO (PCMO)は、電圧印加によって特異な抵抗変化特性を示すことが知られており、抵抗変化型メモリやニューロモルフィックデバイス用材料として期待されている。本研究では、PCMO薄膜の酸素組成を意図的に変化させることによって、抵抗変化特性、特に初期リセット電圧の改善を達成し、そのメカニズムについて考察を行った。

佐藤瑞起（木本教授）「GeSnナノワイヤにおける電子状態および電子輸送特性の理論解析」

最先端LSIでは、短チャネル効果を抑制しながら電流駆動力を向上できるナノワイヤMOSFETが注目されている。本研究では、SiおよびGeナノワイヤを上回る可能性のあるGeSnナノワイヤに着目し、そのバンド構造、移動度のナノワイヤ構造および結晶方位依存性を理論的に明らかにすると共に、GeSnナノワイヤMOSFETの基本特性を予測した。

金 祺 民（木本教授）「半絶縁性 SiC におけるイオン注入層の注入原子分布および電気的性質評価」

SiC に適切な深い準位を導入することによって、極めて高い抵抗を有する基板（半絶縁性基板）を作製可能である。本研究では、厳環境動作可能な SiC 集積回路を目指して、半絶縁性 SiC にイオン注入した領域の電気的性質、点欠陥の種類と密度、および注入イオンの横方向拡がりを定量的に明らかにした。

DO Euihyeon（木本教授）「SiC パワー半導体における積層欠陥の拡大および抑制技術に関する研究」

SiC ウェハ中に存在する基底面転位の近傍で電子・正孔の再結合が発生すると、基底面転位がすべり運動を起こして積層欠陥が拡大するという問題がある。本研究では、機械的な外部応力により導入された基底面転位の構造解析と積層欠陥の拡大抑制に有効なデバイス構造に関する検討を行った。

野 本 健 斗（木本教授）「高濃度ドープされた SiC ダイオードの特性評価」

SiC は禁制帯幅が広いため、金属 / SiC 界面のショットキー障壁高さが大きく、高濃度ドープを行っても良好なオーム性接触を得ることが困難である。本研究では、高濃度ドープ SiC 上に様々な金属薄膜を堆積し、順方向および逆方向特性を精密に測定すると共に、その伝導機構をトンネル電流の基本式に立ち戻って解析した。

木 村 一 世（山田教授）「液中原子間力顕微鏡を用いた膜タンパク質の表面構造および物性計測」

液中原子間力顕微鏡を用いて、マイカ基板上に吸着した膜タンパク質であるバクテリオロドプシン (bR) の表面構造および物性を評価した。マイカと bR の細胞質面の界面には水和水層が存在するが、マイカをポリリジンでコーティングすると、その影響を抑制できることを見だし、bR の表面電荷およびヤング率の計測に成功した。

熊 谷 隼太郎（山田教授）「液中原子間力顕微鏡による生体由来ナノワイヤの高分解能観察および水和構造・物性計測」

液中原子間力顕微鏡を用いて、DNA やコラーゲンによって構成される生体由来ナノワイヤの表面構造および物性を評価した。DNA 由来の G ワイヤにおける糖一リン酸鎖やコラーゲンにおける 3 重らせん鎖の高分解能観察に成功した。また、3 次元フォースマッピング法により表面電荷やヤング率の分布を計測した。

西 田 拓 志（山田教授）「ケルビンプローブ原子間力顕微鏡によるペロブスカイト太陽電池の局所光起電力評価」

ペロブスカイト太陽電池を作製し、ケルビンプローブ原子間力顕微鏡 (KFM) を用いて表面光起電力を評価した。比較的光電変換効率が低い 2 元系試料ではグレイン境界が負帯電しており表面光起電力が小さいが、高効率の 5 元系試料ではグレイン境界が正帯電しており、表面光起電力が大きいことを明らかにした。

船 戸 開（山田教授）「走査型熱振動顕微鏡法を用いた表面下ナノ粒子可視化に関する研究」

走査型熱振動顕微鏡法を用いて、表面下に埋め込まれたナノ粒子の可視化実験を行った。微細加工により溝を形成した Si 基板上に、ポリスチレンナノ粒子を堆積した後に高分子膜で覆った試料でのナノ粒子の可視化に成功し、埋め込まれた粒子の深さと粒子上の高分子膜の弾性率に相関があることを明らかにした。

杉 本 篤 洋 (川上教授) 「深紫外近接場顕微分光用ファイバープローブの設計と試作」

波長 250 nm 以下で利用可能な近接場光学顕微鏡は、半導体やバイオ分野などで応用が期待されている。本研究では、深紫外域に適した、ファイバープローブへの被膜金属材料をシミュレーションにより探索し、作製したプローブを用いて AlGaN 量子井戸からの発光 (210 nm 励起、約 260 nm 発光) を観測した。

班 栄 呂 (川上教授) 「Efficiency and thermal droops in InGaN blue LEDs studied by micro-photoluminescence and -electroluminescence spectroscopies」(顕微 フォトルミネッセンスとエレクトロルミネッセンス分光法による InGaN 青色 LED の効率ドループと熱ドループ現象に関する研究)

波長約 470 nm で発光する InGaN 系 LED に対して、フォトルミネッセンスとエレクトロルミネッセンスを様々な温度、キャリア注入条件で比較した。温度上昇に伴う効率低下には非輻射再結合の増加が、高電流注入時の効率低下には、素子構造に起因した電流集中が重要な役割を果たしていることがわかった。

船 戸 壮 太 (川上教授) 「サーマルリフロー法を用いた GaN マイクロレンズ構造の作製による InGaN 量子井戸発光の広帯域化への取り組み」

レジストのサーマルリフローと RIE により GaN 上にレンズ状の構造を形成したのち、InGaN 系量子井戸構造を結晶成長した。レンズ構造で傾斜が連続的に変化することに伴って発光波長が 400 から 500 nm にわたり連続的に空間分布することを実験的に示した。広帯域発光素子として有望であると考えられる。

石 崎 悠 哉 (川上教授) 「高効率紫外発光素子に向けた極薄 GaN/AlN 多重量子井戸の設計と MOVPE 成長」

波長 250 nm 以下の半導体発光素子の高機能化に向け、極薄 GaN/AlN 量子井戸の作製と評価を行った。シミュレーションでは、井戸の多重化によりデバイスの高性能化が期待されることがわかった。実際に作製した多重量子井戸構造から、理論計算で期待される波長近傍での発光を得ることに成功した。

井 上 和 輝 (野田教授) 「光ナノ共振器間の電気的一方向光転送実現のための超高 Q 値プロセスの開発」

光ナノ共振器結合系において一方向に光を転送する方式を新たに考案し、その実現に取り組んだ。電気的な制御系を含む共振器結合系の作製において保護膜を用いる等の検討を行い、光保持用共振器の Q 値を従来の 200 万程度から 300 万程度まで向上させ、制御用共振器でも Q 値 200 万程度を得ることに成功した。

勝 野 峻 平 (野田教授) 「二重格子フォトニック結晶レーザーの高出力連続動作に関する研究」

フォトニック結晶レーザーの CW 発振特性を解析可能とする、キャリア・光子・熱の相互作用を考慮した自己無撞着解析手法を構築した。これを用いて電流分布制御による共振領域の温度分布の均一化の検討を行い、直径 2mm という大面積デバイスにおいて 30W 級の高出力 CW 動作を実証した。

鈴木 泰樹（野田教授）「近接場熱光発電の発電効率向上に向けたデバイス作製手法の改善および輻射リサイクリングの導入」

近接場熱光発電の発電効率向上を目指して、Si 热輻射光源と太陽電池の間の微小な近接距離を安定して実現するためのデバイス作製手法の改善を行った。また、反射鏡を用いた輻射リサイクリングの導入による、熱光発電デバイスの効率向上効果に関して、詳細な理論解析を行うとともに、その原理実証実験にも成功した。

廣瀬 正輝（野田教授）「GaN 系フォトニック結晶レーザーの高ビーム品質・高出力連続動作に関する研究」

GaN 系材料を用いた青色発光フォトニック結晶レーザーについて、高ビーム品質を実現するフォトニック結晶構造の設計と高反射裏面電極の導入による効率向上等を行い、連続動作において GaN 系面発光レーザーとして世界最高出力となる 325mW の出力かつ、ビーム拡がり角 0.2° 以下と非常に狭い単峰状のビームを得ることに成功した。

吉川 真由香（野田教授）「複合変調フォトニック結晶レーザーによる広範囲照射・ライン照射と測距への応用に関する研究」

複合変調フォトニック結晶を用いて、オンチップでレンズや回折光学素子を用いることなく広範囲照射やライン照射が可能なレーザーの提案を行い、評価を行った。さらに、本レーザーの応用として、複合変調フォトニック結晶レーザーによるフラッシュ光源とビーム走査光源を融合した、新たな測距システムの実証にも成功した。

KIM Taejoon（野田教授）「フォトニック結晶レーザーのスペクトル線幅の解析および評価」

フォトニック結晶レーザーにおけるスペクトル線幅の計算手法を確立し、自然放出光雑音で決まるスペクトル線幅（ローレンツ線幅）として 1 kHz 未満が得られることを解析により明らかにした。また、スペクトル線幅の実験的評価を初めて行い、光源の冷却方法および駆動に用いる電流源の工夫により、1.9 MHz の実効線幅と 12.8 kHz のローレンツ線幅の測定に成功した。

趙花純（杉山准教授）「単一¹⁷⁴Yb⁺ 時計遷移分光を用いたマイクロ運動最小化の評価」

波長 411nm の時計遷移を単一¹⁷⁴Yb⁺ で分光し、单一イオンを光の波長サイズ以下、いわゆるラム・ディッケ領域へ閉じ込めるための条件を調べた。マイクロ運動の 3 次元最小化にくわえて、冷却レーザー光の飽和の影響を見出し、そのパワーと離調を適切に設定してキャリアが最強となるスペクトルを得た。

光・電子理工学教育センター

増田将紀（Menaka 講師）「可飽和吸収効果を有するフォトニック結晶レーザーの高ピーク出力・単一短パルス発振に関する研究」

可飽和吸収領域を内部に導入したフォトニック結晶レーザーにおいて、パルス幅ナノ秒程度の電流注入を行うことにより、高ピーク出力・単一短パルス発振の実現を目指した。フォトニック結晶構造の改良や大域的バンド端周波数分布の導入を行った結果、ピーク出力 120W 級、パルス幅 30 ピコ秒未満の単一短パルス発振の実証に成功した。

中 川 祐一朗 (Menaka 講師) 「機械学習法を活用した分割電極フォトニック結晶レーザーのビーム形状制御に関する研究」

電流注入分布の制御によるビーム形状制御が可能な分割電極フォトニック結晶レーザーにおいて、機械学習法を活用して、電流分布とビーム形状との相関関係を学習させ、電流注入分布からビーム形状の予測および、ビーム形状から電流注入分布の予測を 95%以上の高い精度で行うことに成功した。

高 根 倫 史 (金子講師) 「サファイア基板上 α -Ga₂O₃ における欠陥生成過程および欠陥による電気特性への影響に関する研究」

準安定相 α -Ga₂O₃ の成長メカニズムとその欠陥導入過程、トラップ準位密度について、断面 TEM 観察や Spring-8 の高強度 X 線を用いた回折測定、PHCAP による測定・解析をする事で解明した。さらに α -Ga₂O₃ のキャリ輸送特性において転位散乱の寄与が多大である事を突き止めた。

赤 石 智 悠 (金子講師) 「p 型伝導ワイドギャップ酸化物半導体の結晶成長と物性に関する研究」

p 型酸化物として酸化クロム、酸化イリジウムに着目し、2 値イオンのドーピング等によるキャリア輸送特性の変化を測定・解析した。さらに、熱重量変化が少ない IrBr₃ を前駆体に用いる事で成長速度が大きく結晶性が高い α -Ir₂O₃ 薄膜の成長を実現した。

情報学研究科 知能情報学専攻

GU Weiqi (Chu 特定准教授) 「Video-guided Machine Translation with Spatial Hierarchical Attention Network」(空間階層注意ネットワークを用いた映像付き機械翻訳)

本研究では、映像付き機械翻訳における原言語文中の名詞の曖昧性を解消するために、空間階層注意ネットワークを提案した。実験の結果、英中・英葡言語対において機械翻訳の質が大幅に改善できることを示した。

馬 越 雅 人 (黒橋教授) 「対訳テキストを用いたニューラル転移学習によるゼロ照応解析」

本研究では、ゼロ照応解析においてニューラル転移学習を通じて対訳テキストを活用する手法を提案した。機械翻訳と翻訳言語モデルを中間タスクとする実験を行い、両者が大幅に精度を向上させることを示した。また、特に後者が優れた中間タスクであることを示した。

吉 越 卓 見 (黒橋教授) 「文脈に基づき明示的に主題性を考慮する対話システム」

本研究では、文脈に基づいて明示的に主題性を考慮する対話システムを提案した。自動評価と人手評価の結果から、提案システムは文脈のみを考慮する従来の対話システムと比べて主題に沿った応答を行えることを示した。

尾 崎 立 一 (黒橋教授) 「弱教師学習に基づく症例報告の構造的要約」

本研究では、症例報告の構造的要約（内容をグラフ構造で表現したもの）の作成を情報抽出として定式化し、弱教師学習で解くことを提案した。実験の結果、医師が構造的要約を作成する際に十分に参考となるレベルであることが示唆された。

新 隼 人 (黒橋教授) 「文脈に応じて質問と確認を切り替える対話システム」

本研究では、質問と確認の切り替えが可能な対話システムを提案した。ターゲット発話が質問か確認

かを判定し、その結果に対応するラベルを用いて対話システムを学習した。実験の結果、入力ラベルに応じて生成される応答の質問と確認が切り替わることを確認した。

野 中 聰 馬（西野教授）「視線—頭部—胸部方向の時系列依存関係を利用した視線推定」

自由に行動する人物を写した監視カメラ映像を入力として、その人物の三次元視線方向を推定する手法を提案した。頭部および胸部運動と視線方向の時間的依存関係を学習することにより、眼球を直接計測できない場合であっても視線方向推定が可能であることを実証した。

深 尾 圭 貴（西野教授）「汎化マイクロファセット BRDF モデルとその単一偏光画像による計測」

実世界の物体表面における光の反射に伴う偏光と輝度の変化を正確に表現する、gemBRDF と呼ぶ新しい物理ベースの反射モデルを提案するとともに、そのパラメータを 1 枚の偏光画像から計測する手法を提案してその有効性を実験により検証した。

孫 邦（西野教授）「Interaction-aware Trajectory Prediction for Heterogeneous Traffic Agents」（道路上の異なるエージェントの相互作用を考慮した軌道予測）

自動運転車両で撮影された映像を入力として、他車、歩行者、自転車の移動先を予測する手法として、多様な移動体同士の相互インテラクションをグラフ畳み込みニューラルネットワークによってモデル化する手法を提案し、公開ベンチマークにおいて従来法を上回る性能が得られることを確認した。

梁 雨 芮（西野教授）「Multimodal Material Segmentation」（マルチモーダル素材セグメンテーション）

自動運転車両によって撮影した道路画像を材質ごとに領域分割するタスクにおいて、可視光に加えて近赤外光および偏光撮影画像を利用した CNN による手法を提案し、可視光では見分けをつけることが困難な領域であってもより正確に領域分割が可能であることを示した。

情報学研究科 通信情報システム専攻

荒 川 侑 也（原田教授）「帯域内全二重セルラシステムにおける高信頼大容量化技術」

ミリ波帯セルラシステムに帯域内全二重通信（IBFD）を導入し、セルラシステムの通信容量を増大できるシステムを提案した。さらに Sub-6 GHz 帯セルラシステムにおいて、IBFD 導入により通信容量拡大と低遅延高信頼性の向上を両立するシステムを提案した。

落 合 英 智（原田教授）「OFDM 変調を用いた無線 IoT システムにおける高速移動・大容量通信方式」

大規模マルチホップ IoT 無線ネットワークである Wi-SUN FAN の次世代物理層候補 OFDM の高速移動対応受信方式を提案した。さらにこの OFDM を Wi-SUN FAN に導入した場合の上位層も含めた伝送特性を評価し、その実現性・有効性を示した。

富 田 晋 伍（原田教授）「周波数共用無線システムにおける高能率電波保護領域推定技術」

周波数共用無線システムにおいて、無線システム同士の干渉を高効率に防ぐことを目的とした電波保護領域推定技術を提案した。提案手法では従来の電波伝搬モデルに実環境情報に基づく伝搬損失を考慮し、実際の伝搬実験によりその有効性を示した。

平 川 恵（原田教授）「高伝送効率経路構築法を用いた大規模マルチホップ IoT 無線ネットワーク」

大規模マルチホップ IoT 無線ネットワークである Wi-SUN FAN の基礎伝送特性を明らかにするための大規模シミュレータおよび実機評価環境を開発し、高頻度パケット発生時の伝送特性劣化要因を解析した上で、高伝送効率経路構築法を提案し、その有効性を示した。

平 田 謩（原田教授）「端末位置推定のための遅延プロファイルクラスタリングと機械学習法」

遅延プロファイルと機械学習を用いた端末位置推定手法を提案した。遅延プロファイルの物理的性質を考慮した位置クラスタリング手法、および時系列性を考慮した機械学習モデルの導入手法を提案し、実際の電波伝搬測定結果を用いた性能評価によりその有効性を示した。

板 原 壮 平（山本（高）准教授）「Communication-Efficient Semi-Supervised Federated Learning based on Cooperative Distillation」（高通信効率な知識蒸留を用いた半教師あり連合機械学習）

連合機械学習に自己教師あり学習の枠組みとアンサンブル学習の考えを導入することで、非常に小さな通信トラフィックで高いモデル精度を獲得する手法を提案した。複数のベンチマークデータセットにおいて提案手法の有効性を確認した。

紀 平 悠 人（山本（高）准教授）「Robust Access Point Coordination Against Uncoordinated Interference with Adversarial Reinforcement Learning」（敵対的強化学習を用いた非協力的な干渉に強いアクセスポイント協調制御）

ロバスト敵対的強化学習を導入することで、アクセスポイント間協調制御を行う際に障害となる非協調なアクセスポイントからの干渉に対して頑強な制御方策の獲得手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。

小 寺 駿乃祐（山本（高）准教授）「Latency-Aware 11ax Resource Allocation Using Deep Deterministic Policy Gradient」（Deep Deterministic Policy Gradient を用いた遅延考慮型 11ax 無線 LAN リソース制御）

無線 LAN における OFDMA リソース割当について、リアノフ最適化と深層強化学習 DDPG を利用した、遅延考慮型割当を提案した。シミュレーション評価により、比較方式よりも遅延指標を抑制し、かつ公平性の高い割当が可能であることを確認した。

角 南 智 也（山本（高）准教授）「Single-anchor and Single-antenna RSSI Localization with Computer Vision Technology」（コンピュータビジョン技術を用いた単一アンカーかつ単一アンテナによる RSSI 端末位置推定）

コンピュータビジョン技術による電波伝搬環境の観測情報を活用した単一アンテナかつ単一アンカーによる RSSI 端末位置推定手法を提案した。具体的には、移動物体による遮蔽現象または反射現象を利用した。屋内実験でその推定精度を評価した。

山 下 鼎 太（山本（高）准教授）「Penalized Contextual Multi-armed Bandit for Decentralized WLAN Channel Allocation」（分散型 WLAN チャネル割当のための罰則あり文脈付きバンディット学習）

無線 LAN チャネル選択において、コンテンツドリブンな特徴抽出を用いた文脈付きバンディット手法を提案し、比較手法に対する優位性を示した。また、文脈付きバンディットに罰則を導入し、チャネル割当の収束確率の向上をシミュレーションにより確認した。

伊 藤 潤 紀（大木教授）「Backup Capacity Allocation Models with Probabilistic Protection in Cloud」（クラウドにおける確率的保護を用いたバックアップ容量割り当てモデル）

本論文は、物理マシンの故障に対して、リソースの使用を最適化しながらある一定レベルの生存性を保証するバックアップ容量割り当てモデルを提案した。また、不確かな容量の要求のもとで、複数の物理マシンの故障に対して必要なバックアップ容量を最小化する最適化モデルを提案した。

柳 瀬 創 平（大木教授）「Modeling and Analysis for Distributed Server Allocation」（分散サーバーへのユーザー割り当てのモデリングと分析）

本論文は、分散サーバー割り当ての運用開始時の予防的最適化アルゴリズムを提案した。また、時間とともにユーザーが到着・離脱する状況下で、サービスを受けながら、ユーザーが別のサーバーへ移ることのできるマイグレーションモデルを提案した。

ZHU Mengfei（大木教授）「Modeling and Analysis of Resource Allocations Considering Workload-Dependent Failure Probability」（処理負荷に依存する故障確率を考慮した資源割り当てと解析）

本論文は、サーバの処理負荷に依存する故障確率を考慮して、最大使用不可時間期待値を最小化するプライマリおよびバックアップのリソース割り当てモデルを提案した。また、保護優先ポリシーの下で、処理負荷に依存する故障確率を備えた複数のバックアップリソース割り当てモデルを提案した。

李 崇 宇（大木教授）「Real-time data processing for three-dimensional image sensing network with multiple sensors」（複数のセンサを備えた三次元画像センシングネットワークにおけるリアルタイムデータ処理）

本論文は、複数の三次元画像センサを用いたリアルタイム三次元画像センシングのための方式を提案した。提案方式は複数のセンサからのデータを統合する際の課題を解決し、厳しい帯域制限の中でデータ量を削減し、リアルタイムに高いデータ品質を維持できることを示した。

岡 誠 道（大木教授）「Feature-based differentiation control for point-cloud data communication」（点群データ通信のための特徴ベースの差別化制御）

本論文は、厳しく制限された通信帯域幅で点群データを送信するために 2 つの特徴ベースの差別化通信制御方式を提案した。点群の空間的特徴を基にした優先度順位付け方式、および、個々の点の特徴を基にしたダウンサンプリング方式を提案した。

増 田 大 輝 (大木教授) 「Real-time management of streaming data using blockchain in image sensor networks」(イメージセンサネットワークにおけるブロックチェーンを用いたストリーミングデータのリアルタイム管理)

本論文は、画像センサネットワークを用いたスマートシティにおけるリアルタイムモニタリングのためのブロックチェーンフレームワークを提案した。センサが生成するストリーミングデータを、オーバーフローを防止しながらリアルタイムで登録するスケジューリング方法を開発した。

河 野 恵 悟 (大木教授) 「Gradual Control Method for Program File Placement in Hierarchical Cloud-Edge Platform」(階層的クラウドエッジプラットフォームにおけるプログラムファイル配置の漸進的制御手法)

本論文は、ネットワーク上の計算機資源を利用して接続デバイスのタスクを実行するプラットフォームにおいて、プログラムファイル配置の最適解の計算過程で得られる途中解を利用して、計算機資源の効率的な利用を実現する制御手法について提案した。

塩 崎 雅 人 (佐藤教授) 「X線が半導体デバイスの信頼性に与える影響の実験的評価」

パワー MOSFET、フラッシュメモリ、FPGA を対象として、X 線照射が動作特性に与える影響を実験的に評価した。n-MOSFET のしきい値電圧の低下やアナログ回路要素の動作不良が発生すること、特にパワー MOSFET では材料や構造により影響が大きく異なり、また生じた影響が長期間継続することを示した。

白 神 樹 (佐藤教授) 「商用 Wi-Fi デバイスを使用した心拍変動の推定」

個々の心拍間隔のばらつきとして定義される心拍変動を、商用 Wi-Fi デバイスのチャネル状態情報から非接触で推定する方法を初めて示した。信号処理手法の改善と、動的プログラミングに基づく心拍間隔の決定により、従来は困難であった Wi-Fi デバイスを用いる心拍変動の推定を実現した。

下 里 京 平 (佐藤教授) 「ガウス過程による統計的デバイスモデリング」

半導体デバイスの特性ばらつきを低次元の潜在空間で表現する、統計的デバイスモデル dGPLVM を提案した。実デバイスを用いた評価により、dGPLVM は測定データに応じて高い精度が得られること、またモンテカルロ法向けに仮想的なデータセットのサンプリングが可能であることを示した。

清 水 利 宇 (佐藤教授) 「巡回セールスマン問題の Dantzig-Fulkerson-Johnson 定式化に基づくイジング解法」

巡回セールスマン問題 (TSP) を、イジングモデルに基づくアニーリング計算機を用いて、線形整数計画問題として定式化して解く方法を示した。本定式化では隣接行列で定義される TSP を解くことが可能となった。また、従来の定式化と比較し解精度を平均 56%、計算時間を平均 2 倍改善した。

廣 澤 数 馬 (佐藤教授) 「準同型テプリツツ行列乗算を利用したプライバシー保護推論の高速化」

暗号化したままで計算を実行できる準同型暗号を用いるとプライバシーを保護したまま推論を行うことが可能となるが、平文での計算と比較して計算量が非常に大きい。この計算中に現れる行列の特殊な構造に着目して計算を効率化し、また畳み込みを FPGA 実装することで高速化を実現した。

上 野 将 典（橋本教授）「データ処理機能を組み込んだ低電圧スタンダードセルメモリによる近似コンピューティング」

スタンダードセルメモリと呼ばれる低電圧オンチップメモリの読み出し・書き込み回路に近似算術演算回路とデータ符号化回路を埋め込み、データ処理とメモリアクセスを同時に実行する高効率システムを設計した。2次元点群処理アプリケーションで有効性を検証した。

有 働 岬（橋本教授）「ランダムテレグラフノイズ起因の遅延ばらつき評価用リングオシレータ」

リングオシレータの構造及びレイアウトの工夫を行い、高速スイッチング動作時において微細トランジスタに発生するランダムテレグラフノイズの物理現象を遅延の観測により評価可能にした。65nm プロセスの試作チップによりノイズを定量的に評価し、提案構造の妥当性を確認した。

園 田 翔 也（橋本教授）「広範囲な集積回路の動作電圧に対応した最小エネルギー点の実時間追跡システム」

広範囲な集積回路の動作電圧領域で、所定の動作速度を確保しつつ消費エネルギーを最小化する電源電圧と基板電圧の解析モデルを導出した。当該モデルに基づき実時間で電源電圧と基板電圧を最適化する電圧制御システムを実装し、実プロセッサで動作検証した。

**DONG Boyu（橋本教授）「Exploring Logical Operation Method and Its Power-Efficient Implementation towards Tamper-Resistant Photonic Integrated Circuits」
(耐タンパ光集積回路に向けた論理演算手法と低電力実装)**

光の位相・偏波特性を活用した耐タンパ光コンピューティング技術の適用可能性を検討した。光信号の位相に論理情報をのせた耐タンパ光論理ゲートのノイズ耐性を明らかにし、光信号の偏波に論理情報をのせた耐タンパ光論理回路の低電力実装技術を検討した。

情報学研究科 システム科学専攻

大 橋 康 平（石井教授）「直文化法を用いた敵対事例に対する深層強化学習の正則化」

深層強化学習における課題の1つとして、学習後のモデルが敵対ノイズと呼ばれる微小なノイズに対して脆弱になってしまうことが挙げられる。本研究では、深層強化学習モデルを敵対ノイズに対して頑健にするための敵対事例学習法を提案した。

東 大 地（石井教授）「屋内環境の意味的理閲に向けた3次元点群を用いた質問応答」

既存の質問応答課題で用いられている2次元画像では実世界の空間的推論が困難である。そこで3次元点群を用いることを提案し、三次元環境内の物体に関する質問と解答を含むデータセットとベースラインモデル ScanQA を作成した。

森 川 潤（石井教授）「部分観測系に対する逆モデル予測制御」

従来の逆モデル予測制御では、エキスパートから得られるデータが全観測であると仮定している。しかし、現実の制御問題では一部のデータが非観測となる場合が多い。本研究では、部分観測系における逆モデル予測制御を定式化し、最適化アルゴリズムを提案した。

谷 口 泰 地（石井教授）「方向性サンプリング進化戦略による関数最適化」

目的関数の勾配を用いることのできないブラックボックス最適化問題において、進化戦略は有用な最適化手法である。しかし、問題が高次元になると、解が局所的な最適解に陥る可能性が高い。この問題を解決するために、方向性サンプリングを用いた進化戦略を提案した。

田 中 翔 馬（松田（哲）教授）「CEST MRI によるドーパミンの定量を目的としたフィッティング手法の検討」

低濃度分子を観測する CEST MRI 法を用いて、神経伝達物質の一つであるドーパミンを定量する手法を提案した。シミュレーション実験及びドーパミン水溶液を対象とした MRI 撮像実験を行い、提案手法による推定の妥当性と限界を確認した。

戸 田 輝（松田（哲）教授）「カメラ画像からの鉗子圧推定を目指した生体臓器の画像-鉗子圧データベースの構築」

カメラ画像から深層学習に基づいて臓器操作時の鉗子圧を推定する枠組みの構築を目指し、動物の摘出臓器と生体内臓器を対象とした画像-鉗子圧データベースの構築を行った。構築したデータベースと深層学習を用いてカメラ画像のみから鉗子圧の推定誤差を確認した。

羽瀬 拓 視（松田（哲）教授）「識別器からのフィードバック機構を備えた敵対的学习による Cone-beam CT 画像の画質改善」

Cone-Beam CT 画像の画質改善を目的に、識別器から生成器へのフィードバック機構を備えた敵対的学习を提案した。提案手法が従来の CycleGAN より多様な画像特徴に対応した変換を実現し、画質改善に有効であることを確認した。

藤 井 一 輝（松田（哲）教授）「信号の類似度に基づいた CEST MR Fingerprinting における辞書の低次元化」

短時間の MRI 撮影データから生体内分子に関する定量画像を生成する CEST MR Fingerprinting 法において、信号の類似度に基づくクラスタリングにより辞書を低次元化する手法を提案した。提案手法を用いて辞書の次元を約半分に削減できることを確認した。

王 梓 傑（松田（哲）教授）「Shape Reconstruction for Undetectable Regions of Abdominal Organ Based on Graph Convolutional Network（グラフ畳み込みネットワークに基づく腹部臓器における観測不可領域の形状再構築）」

グラフ畳み込みネットワークに基づく腹部臓器における観測不可領域の形状再構築方法を提案した。肝臓を対象に 20% 程度の部分形状から患者固有の形状を再構築できること、CT 画像内で抽出が困難な胃の形状推定にも応用可能であることを確認した。

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

魚 谷 拓 未（下田教授）「デジタルサイネージでの揺動表現を用いた二言語表示法に関する研究」

デジタルサイネージでの従来の多言語表示法の問題点を解決するため、行間を詰めて表示した 2 言語の文章に対してそれぞれ異なる揺動表現を与えて可読性向上を図る「二言語揺動表示」を提案し、従来手法と比較して提案手法の可読性を定量的に評価した。

山脇瑞記（下田教授）「エージェントの対話性がユーザの環境配慮行動に与える影響の実験評価」

エージェントと対話することにより環境配慮行動が促進されるかどうかを、人を対象とした実験を通じて統計的に検証した。また、対話が、エージェントに対する人のどのような主観評価に影響を与えるか、環境配慮行動促進に結び付くのか、そのメカニズムを調べた。

湯村航平（下田教授）「知的作業時の集中の時間変化に着目した分析手法に関する研究」

作業時間全体での集中の変化を表す長期トレンドと1分程度での集中の変化を表す短期変動から集中の時間変化を分析した。長期トレンド分析では、集中の変化でデータを分類し、短期変動解析では集中が低下している低下点を定義し、分析を行った。

山本理恵子（下田教授）「単純課題解答時の認知行動計測に基づく知的集中シミュレーションに関する研究」

単純な認知課題を解いている際の認知プロセスの解明を目的として、2名の参加者に対して認知行動を計測する実験と認知アーキテクチャによるシミュレーションを行った。その結果、参加者間の認知プロセスの共通点や相違点を明らかにできた。

エネルギー科学研究所 エネルギー基礎科学専攻**伊藤幹也（中村（祐）教授）「トカマクプラズマにおけるトロイダルアルフェン固有モードのジャイロ運動論解析」**

高エネルギー粒子によって駆動されるトロイダルアルフェン固有モードの飽和機構を、大域的ジャイロ運動論シミュレーションによって調べた。反磁性効果は不安定性に対し安定化効果がある事およびゾーナル流生成が不安定性の飽和へ寄与する効果は小さいことが示された。

大谷瞭太（中村（祐）教授）「非軸対称性を考慮したMHD平衡計算コードの開発」

トカマクプラズマの電磁流体（MHD）平衡計算には軸対称が仮定されてきたが、近年、非軸対称性の重要性が増している。本研究では、非軸対称MHD平衡計算コードの開発を進め、圧力の評価方法を修正するとともに評価回数を制限することにより計算精度および計算効率を向上させた。

濱田祐輔（中村（祐）教授）「LHDプラズマの交換型不安定性への二流体効果」

大型ヘリカル装置（LHD）の高ベータ放電実験における抵抗性交換型不安定性を二流体シミュレーションによって調べた。その結果、高ベータ放電実験では、抵抗性交換型不安定性が非常に不安定なる事および不安定性の評価には反磁性安定化効果が重要であることを明らかにした。

増井英陽（中村（祐）教授）「有限ベータプラズマにおけるドリフト波乱流の飽和機構」

トカマクプラズマにおいて、イオン温度勾配によって駆動される乱流は閉じ込め悪化の主原因である。この乱流の飽和機構を大域的ジャイロ運動論シミュレーションによって調べ、乱流のエントロピーが移流されて強いゾーナル流が生成され、乱流の飽和が起こることを明らかにした。

山上裕晃（中村（祐）教授）「トカマクプラズマにおけるヘリカルコアの乱流輸送」

トカマクプラズマでは、磁気軸近傍がらせん状にねじれた平衡状態が現れる。このヘリカルコアの乱流輸送への影響をジャイロ運動論シミュレーションにより調べた。その結果、ヘリカルコアはトロイダ

ル方向に熱輸送の強い非対称性を誘起する可能性があることを明らかにした。

山 下 湧志朗（中村（祐）教授）「非軸対称性を考慮したディスラプションシミュレーションコードの開発」

トカマク型核融合炉の実用化に向けた最重要課題の一つが、ディスラプションと呼ばれるプラズマ電流が突然途切れる現象の制御である。本研究では、非軸対称性があるディスラプション過程全体を解析可能なシミュレーションコードの開発を行い、その原型を完成させた。

エネルギー科学研究所 エネルギー応用科学専攻

石 田 祐 樹（土井教授）「Cu を集電体とした薄膜型リチウムイオン電池用正極構造の検討」

正極集電体に Cu を使用した全固体薄膜型リチウムイオン電池の作製を目指し、Cu 基板上に LiCoO₂ 薄膜の作製を試みた。充電時に Cu が酸化されることを防止するために Nb ドープ SrTiO₃ 導電性酸化物層を挿入することが有効であることを見出した。

田 代 達哉（土井教授）「薄膜型 MgB₂ 超伝導線材特性向上に向けたポストアニール条件の検討」

MgB₂ 超伝導線材の特性向上に有効なポストアニール時に問題となっている基材金属テープから MgB₂ 層への金属元素拡散を抑制するためポストアニール時間の短時間化を検討し、従来の 1/100 以下の大幅短時間化に成功した。

正 盛 涼 大（土井教授）「広帯域の交流導電率測定による LiCoO₂ 焼結体の電気伝導特性評価」

交流インピーダンス法とテラヘルツ時間領域分光法を用いて、Li イオン電池の代表的な正極材料である LiCoO₂ の焼結体試料の導電率および誘電率を直流領域から 2 THz までの広い周波数範囲で測定した。

松 村 実 典（土井教授）「新規 YBa₂Cu₃O₇ 高温超伝導線材に向けた Sr_{0.95}La_{x0.05} iO₃ 導電性中間層の連続成膜」

{100}<001> 集合組織をもつ Ni/Cu/SUS316 貼合せテープを基材とした新規 YBCO 線材構造の開発を目的に、導電性中間層の連続成膜技術の開発に取り組み、膜品質と、温度、成膜雰囲気、成膜速度などの成膜パラメータとの相関を明らかにした。

村 本 周 平（土井教授）「有限要素法を用いた新構造 YBCO 線材クエンチ時の電流回避挙動及び温度分布の検討」

YBa₂Cu₃O₇ 高温超伝導超伝導線材の実用化に向けて、クエンチ発生時の電流回避挙動および温度分布の時間変化の解析を行った。

安 藤 豪 祐（白井教授）「GdBCO 無誘導巻試験体を用いた抵抗型超伝導限流器の低熱伝導物質塗布による復帰特性向上の検討」

高温超伝導無誘導巻パンケーキコイルを用いた抵抗型超伝導限流器の実用化に向けた基礎研究として、導線材の表面に部分的に低熱伝導物質（フロロサーフまたは PTFE）を塗布し、限流器の復帰特性（待機状態に戻る時間）に及ぼす影響を調べ、改善効果の検証を行った。

井 上 陽 向（白井教授）「REBCO パンケーキコイルを利用した変圧器磁気遮へい型超電導三相限流器の限流特性」

高温超伝導 REBCO パンケーキコイルを用いた変圧器磁気遮へい型三相超電導限流器を設計、製作し、基礎特性実験を行った。事故種（三相地絡、二相短絡、一線地絡など）に対して、各相間の動作特性への干渉について実験的に検討した、さらに磁場解析により検証し、必要な離間距離を検討した。

川 崎 理香子（白井教授）「液体水素強制対流冷却 MgB2 超電導撲り線の過電流通電特性と液体水素浸漬冷却 BSCCO コイルの励磁特性」

液体水素冷却による超電導機器の開発を想定して、液体水素強制対流冷却における MgB2 超電導撲線導体の過電流通電特性について実験的に検討した。また、液体水素浸漬冷却の BSCCO 超電導パンケーキコイルを設計製作し、励磁試験を行い、臨界電流特性・熱暴走試験を行って、液体水素冷却の優位性を示した。

小 池 茂（白井教授）「配電系統における無効電力補償装置の複数台設置による電圧補償制御モデルの検討」

太陽光発電などの分散電源が導入された配電系統における電圧補償のために、複数台の SVC（静止型無効電力補償装置）を導入した場合の新しい制御方式を提案し、シミュレーションモデルにおいて制御干渉の低減、SVC 容量の平均化などの有効性を検証した。

エネルギー理工学研究所

井 下 圭（長崎教授）「ヘリオトロン J におけるマイクロ波ドップラー反射計を用いた径電場計測」

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において、時間分解能に優れたドップラー反射計を用いて様々な磁場配位の ECH プラズマを対象に実験、解析を行い、径電場構造が磁気面の構造、特に、磁気島の位置に合わせて変化することを明らかにした。

加 藤 悠（長崎教授）「ヘリカル型磁場閉じ込め核融合プラズマにおける電子温度計測に向けた電子バーンシュタイン放射に関する研究」

Heliotron J、LHD といった磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、O-X-B モード変換を用いた電子温度分布計測を行い、観測される ECE 強度が O-X 窓において最も強くなるとともに、磁場強度に合わせて ECE スペクトルのピークがシフトすることを明らかにした。

福 嶋 亮（長崎教授）「ヘリオトロン J プラズマ周辺部の乱流揺動計測に向けたビーム放射分光装置の開発」

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において、プラズマ周辺部に発生する乱流に起因する密度揺動を計測する目的でビーム放射分光装置を開発した。ビーム輝線シミュレーションによる最適な視線、および対物光学系を設計し、初期計測を行うことで、乱流揺動計測に必要な要素を明らかにした。

宮 下 顕（長崎教授）「ヘリオトロン J 周辺部磁気島領域の静電プローブ計測」

磁場閉じ込め核融合装置 Heliotron J において、磁気島が輸送に与える影響を実験的に調べ、閉じ込め領域外側に磁気島構造が存在する場合、磁気島内部では揺動が熱よりも早く応答することを観測し、揺動の伝搬、励起させるプローブである可能性を指摘した。

篠 塚 凌 我（南准教授）「ヘリオトロンJにおける「Nd:YAG レーザーマルチパストムソン散乱計測装置の開発と性能評価」

ヘリオトロンJでは輸送障壁形成の物理機構を解明するためにレーザー光を往復させプラズマ内を複数回通過させるマルチパストムソン散乱計測装置の開発を行っている。この装置の性能評価を行い、その結果を基に改良を実施し5往復以上の往復回数を実現した。

森 敦 樹（門准教授）「高速分光システムを用いたヘリオトロンJにおける水素ペレット溶発雲の2次元電子密度分布計測」

固体水素ペレット入射はヘリオトロンJ プラズマに対する粒子供給の有効な手段の一つである。ペレット溶発に伴う水素原子バルマー β 輝線のシュタルク広がりを、空間2次元かつ高速に観測するための可視分光システムを開発し、溶発雲の進行速度および電子密度の時間変化を推定することに初めて成功した。

鈴 木 琢 土（門准教授）「ヘリオトロンJ plasma中の固体水素ペレット溶発過程に形成されるフィラメント状揺動の時空間構造」

ペレット溶発雲近傍におけるプラズマの特徴的な揺動構造の形成・伝搬を高速カメラによって観測し、その性質を調べた。撮影像から、画像処理によって揺動成分のみを抽出し、ヘリオトロンJの三次元磁場構造と揺動構造を比較した結果、溶発雲近傍の揺動構造が、磁力線に沿って分布し、ポロイダル方向に伝搬していることを見出しました。

麻 生 啓 真（松田（一）教授）「タイプI 原子層二次元物質へテロ構造（MoTe₂/WSe₂）のモアレ励起子とその光物性」

本研究では、原子層二次元物質からなるTypeIバンドアライメントを有する人工へテロ構造（MoTe₂/WSe₂）をドライトランスマサ法で作製し、極低温・強磁場下での発光分光により、モアレ励起子が関与した特異な光学的性質を明らかにしました。

小 林 幹 旺（松田（一）教授）「微小球共振器を用いた原子層物質・へテロ構造の非線形光学特性」

本研究では、微小球共振器構造を施した原子層人工へテロ構造において、ウイスパリングギャラリーモードによって生じる非線形光学特性についてその詳細を調べ、光励起下でのレーザー発振特性を明らかにしました。

生存圏研究所 中核研究部

河 上 晃 治（山本教授）「複数のGNSS衛星群を用いるTEC観測システム開発と改良型トモグラフィー解析のリアルタイム化」

衛星測位（GNSS）受信機の低価格化・高機能化が顕著である。それを用いて十分な性能を持つ電離圏全電子数測定ができる事を示した。国土地理院のGNSS受信網とイオノゾンデを組合せた新しいトモグラフィー解析のリアルタイム化の基礎開発に成功した。

増 田 秀 人（山本教授）「MUレーダー観測とイオノゾンデ自動読み取りシステムを用いた電子密度の長期統計解析」

MUレーダーによる電離圏の電子密度観測は約40年間にわたってデータが蓄積されている。隣接の

イオノゾンデ観測結果から機械学習により電子密度最大値に相当するパラメータを読み取り、電子密度の較正に用いることで長期統計解析を実施した。

劉 鵬（橋口教授）「Statistical Analysis of Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances Over Japan Based on Deep Learning Instance Segmentation」（機械学習個体分割を用いた日本上空中規模伝搬性電離圈擾乱の統計解析）

国土地理院のGNSS受信機網から観測される中規模伝搬性電離圈擾乱を深層学習を用いて自動で検出し、その波長や伝搬パラメータを導出するシステムを開発した。その統計解析結果から、従来の定説とは異なる太陽活動依存性等が明らかにされた。

矢 吹 諒（橋口教授）「MUレーダー外付け受信専用アンテナを用いたアダプティブクラッター抑圧システムの開発」

MUレーダーに受信専用の外付けアンテナを付加し、信号劣化の少ないアダプティブクラッター抑圧手法の開発を行った。特に外付けアンテナが主アンテナから距離がある影響を考慮した手法を提案し、実時間処理により抑圧性能を大幅に改善した。

田 村 亮 祐（橋口教授）「レーダー干渉計インバージョンによる3次元風速場推定の研究」

大気乱流散乱モデルとレーダーシステムの送受信モデルに基づいたスペクトル観測理論をレーダー干渉計に拡張し、インバージョン法による3次元風速場推定手法を開発した。シミュレーションとMUレーダー観測実験から、高精度に推定可能であることを実証した。

寺 田 一 生（橋口教授）「衛星-地上2周波ビーコン観測にもとづくプラズマバブルに繋がりうる電離圈長波長変動に関する研究」

低緯度周回衛星COSMIC-2からの2周波ビーコン波をタイ・ベトナムで観測した。低緯度電離圈に顕著なプラズマバブルの発生要因とされる長波長変動の統計解析を行い、波長400～800km、位相速度は数十m/sで西向き卓越、等を見出した。

深 澤 伊 吹（小嶋教授）「Simulation Study on Characteristics of Electric Field Sensors in Space Plasmas」（宇宙プラズマ中の電界センサー特性のシミュレーション研究）

プラズマ波動の電界成分を科学衛星で計測するセンサー特性は、宇宙プラズマのパラメータに大きく依存する。本研究では、全粒子計算機シミュレーションの領域内に、電界センサー、衛星を配置した上で、磁化プラズマ中における電界センサー特性インピーダンスの複雑な様相を明らかにした。

伊 藤 友 哉（小嶋教授）「プラズマ波動から電子温度を計測する Thermal Noise Receiver の小型集積化に関する研究」

プラズマの熱運動が科学衛星の電界センサーに誘起する Thermal noise を捉えて、電子温度を導出する「Thermal noise receiver」の小型化をアナログASICにより行った。解析的にスペクトル強度を導出した上で、ASIC上に実現する receiver のスペックを決定して設計・試作を行いその性能を確認した。

藤 原 悠也（大村教授）「Simulation study on nonlinear generation process of whistler-mode triggered emissions in a space plasma with homogeneous magnetic field」（一様磁場の宇宙プラズマにおけるホイッスラーモード・トリガード放射の非線形発生過程のシミュレーション）

1次元電磁粒子シミュレーションコードを使って、高エネルギー電子を含む一様磁場のプラズマに一定周波数のホイッスラーモード波を注入することにより、周波数が時間とともに上昇する波と下降する新しい波が放射されることを示した。

矢 野 有 人（大村教授）「3次元 Hall-MHD シミュレーションを用いた磁気圏・電離圏電流系の研究」

3次元ホール電磁流体シミュレーションを開発し、アルベン波を軸とした磁気圏と電離圏の3次元結合過程を調べた。多くの先行研究で用いられている薄層近似では得がたい3次元電流系や、分極などを支える素過程、エネルギー輸送過程を明らかにした。

LIU Yin（大村教授）「Simulation study of nonlinear generation process of whistler-mode hiss emissions in the Earth's inner magnetosphere」（地球内部磁気圏におけるホイッスラーモード・ヒス放射の非線形発生過程のシミュレーション研究）

プラズマ圏ヒスの発生機構を解明するために1次元電磁粒子コードによる計算機シミュレーションを実行し、外部磁場のモデルとして放物線状に変化する磁場勾配を変更してヒスの非線形波動成長率が外部磁場勾配に依存して変化することを明らかにした。

片 岡 瑞 貴（篠原教授）「マイクロ波送電における目標自動追尾方式の干渉低減手法に関する研究」

本研究はマイクロ波送電における方向追尾手法であるレトロディレクティブ方式の干渉問題を主題とし、干渉を解決するためのシステム構築に取り組んだ。本研究ではパイロット信号として2倍周波数を用いるレトロディレクティブを提案し、開発を行い、干渉抑制の有用性を示した。

間瀬瑞季（篠原教授）「OAM モードによる無線電力情報同時伝送の研究」

本研究では、OAM ((Orbital Angular Momentum) モードの直交性を利用した同じ周波数帯を使い、情報用と電力用の電磁波を分ける手法による SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) の実現及び OAM モードの直交性が SWIPT に与える効果の解明を行った。

見 渡 洋 挥（篠原教授）「空間伝送型ワイヤレス給電用 5.8 GHz 帯整流回路の大電力化に関する研究」

本研究では、空間伝送型ワイヤレス給電用 5.8 GHz 帯整流回路における大電力化に取り組んだ。そのために1) 通常弱電用に用いられる、チャージポンプ整流回路の大電力化、2) 新たに R 級整流回路の開発、3) 通常の整流回路では用いられない GaN HEMT を用いた整流回路の開発、等を行い、大電力化に成功した。

学術情報メディアセンター

張 キンヨウ（中村（裕）教授）「Pairwise 比較法による Neutral-Negative 間の表情変化認識」

生活の場での経時的な QOL (生活の質) モニタリングなどを目的として、微妙な表情変化の自動認識に関する研究を行った。深層ネットワークを用いた比較を行うことによって、不快（嫌悪、怒り、悲しみ他）感を表わす小さな表情変化でも検出できることを確認した。

王 岳（中村（裕）教授）「Hand-Object Interaction Definition and Recognition for Analyzing Manual Assembling Behaviors」（組立作業における手と物体のインタラクションの定義と認識）

工場での組み立て作業の分析やモニタリングに応用することを目的として、手と物体のインタラクション（掴む、運ぶ、回す、他）の自動認識の研究を行った。複数のインタラクションが同時に起こることを考慮した検出や、空間的位置の詳細な認識などを提案した。

高校生のページ

宇宙線による情報システムの誤動作 —メカニズム解明と対策技術の開発を目指して—

情報学研究科 通信情報システム専攻 超高速信号処理分野
橋 本 昌 宜

1. はじめに

AI や IoT (モノのインターネット； Internet of Things) などの発達により、社会はますます情報システムに依存するようになってきています。人命や財産を取り扱う情報システム、さらにはその中核を担う半導体集積デバイス (LSI や VLSI と呼ばれることが多いです) には高い信頼性が求められます。トランジスタの微細化によってもたらされた集積デバイスの極低電力化・極小体積化は、環境に溶け込んで存在に気づかないコンピューティングを実現しつつあります。一方で、トランジスタの微細化が不透明さを増す中、新しい原理に基づいたコンピューティングの模索が続いている。本分野では「コンピューティング基盤を創る」を掲げて、以下の項目に答えるべく研究を行っています。

- 信頼できる高性能コンピュータをいかに設計するか
- 新原理次世代コンピューティングをどう実現するか
- 我々の生活を変えるコンピューティングシステムはなにか

cue46 号の新設研究室の紹介で、それぞれの概要を紹介しましたので、今回は集積デバイスの信頼性に注目し、宇宙線による誤動作問題を取り上げたいと思います。

2. 地上に降り注ぐ宇宙線とソフトエラー

宇宙線は、宇宙空間を飛び交う高いエネルギーを持つ放射線のことです。主な成分は陽子です。原子核は、陽子と中性子と呼ばれる粒子から構成されていて、陽子は水素イオン (H^+) です。中性子は原子番号に影響せず電荷を持ちませんが、陽子とほぼ同じ質量を持っており、質量数に影響します（宇宙のスケールから、原子核、陽子や中性子、さらには素粒子までの大きさの違いを直感的に理解する動画を紹介します <https://www.youtube.com/watch?v=44cv4l6bKP4>）。

宇宙線は、地球磁場の影響で大気圏に侵入はしにくくなっているものの、常時飛来しています。大気圏に突入した宇宙線は、大気を構成する原子核に衝突し、2 次粒子を発生させます。この現象が連鎖的に生じ、大気中で大量の 2 次粒子が発生する現象は空気シャワーと呼ばれています（図 1）。大量発生する 2 次粒子には、中性子やミューオンが含まれています。ミューオンは電子と同じ電荷量を持ち、

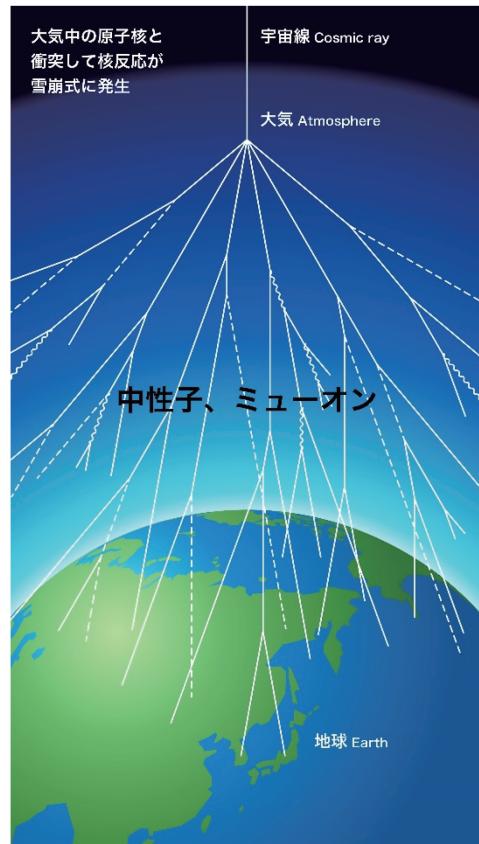


図 1：宇宙線と空気シャワー

電子より 207 倍重い粒子です。

中性子やミューオンは高い物質透過性を持ちます。例えば、ミューオンはピラミッドや火山も透過するため、その特性を使って内部構造を調べる取り組みがあります。NHK スペシャルなどでご覧になつた方もいるかも知れません。当然、我々の体の中も透過しています。手のひらをかざすと、毎秒 1 個程度の高速な中性子やミューオンが突き抜けています。

一方で運が悪いと（つまり低い確率で）物質中の原子核と中性子やミューオンが相互作用を起こします。同様に集積デバイスを構成する原子核とも相互作用を起こします。一例を図 2 に示します。シリコン原子が中性子と反応し、この例では酸素原子に変化しています。また、陽子や α 粒子（ヘリウムイオン）が生成され、トランジスタ近傍を移動しています。これらの粒子はエネルギーを電子生成に費やして、最終的にエネルギーがなくなつて止まります。その結果、粒子が移動した軌跡上の電子の密度が高くなり、トランジスタにノイズ電流を与える。

集積デバイス中には、デジタルの 0, 1 を覚えておくためのメモリ素子が多数存在します。メモリ素子にはトランジスタが含まれており、先に述べた電流ノイズによって記憶値が 0 から 1 に変わったり、1 から 0 に変わったりします。このように起こる値の反転をソフトエラーと呼びます。トランジスタなどのハードウェアが壊れてしまうのではなく、ただ値だけが全く痕跡を残さず壊れ、その後も動作し続けることができるので、「ソフト」エラーと呼ばれています。

3. ソフトエラーが社会に与える影響

パソコンやスマートフォンでみなさんの写真やメッセージなどのデータはもちろん、プログラムや計算の途中結果などもメモリ素子に置かれます。例えば写真的表示プログラムでは、1 ビットのデータの値が 0 から 1 に変化しても多くの場合は気づかないと思います。一方で、同じ画像を入力としても、自動運転の車が歩行者を見つけるプログラムでは、歩行者の有無を表すデータが間違うと大惨事になる可能性があります。介護ロボットが誤動作すると、人間が怪我をする可能性があります。他にも、銀行口

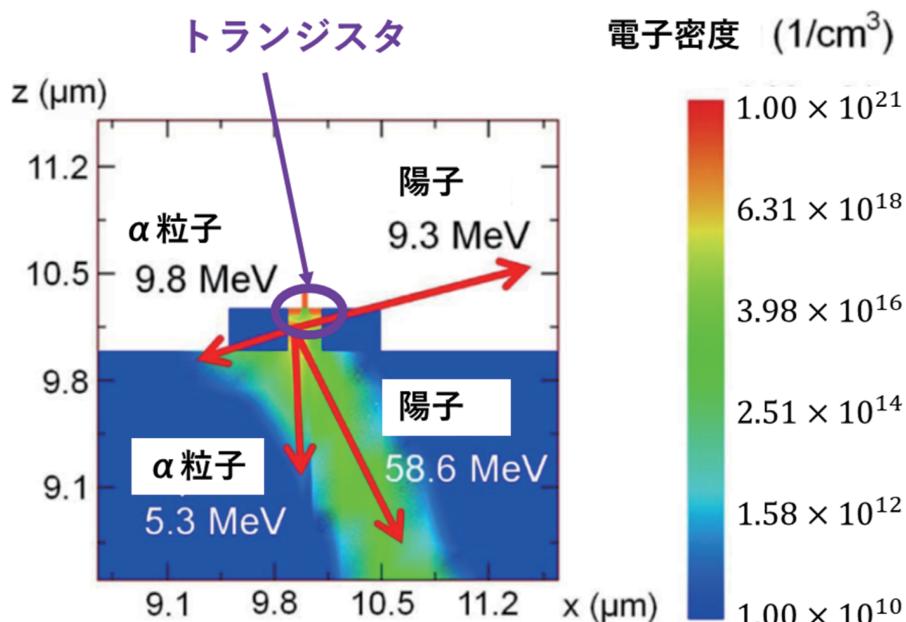


図 2：トランジスタ近傍での核反応例 ($n + ^{28}Si \rightarrow 3n + 2p + 2\alpha + ^{16}O$)。核反応によって原子番号が変化し、陽子、 α 粒子などが飛散している。陽子や α 粒子によって、トランジスタ近傍の電子の数が増えている。 n は中性子、 p は陽子、 α は α 粒子、原子番号の左上の数字は質量数。MeV はエネルギーの単位。

座の管理も電子化されていますので、例えば残高が変わってしまうかもしれません。実際に飛行機の急降下事故の要因として、ソフトエラーの影響の可能性が最も高いとした海外のレポートがあります。

情報がオンラインシステム上にあり、それらが連携する社会システムが広がっています。これは高い信頼性で情報システム、さらにそれを構成する集積デバイスが高い信頼性で動作することを前提としています。もちろん、集積デバイスの信頼性が高くても、ソフトウェアにバグがあれば誤動作しますが、高い信頼性を必要とするシステムでは、ソフトウェアも信頼性を高める設計方法が導入されています。一方で、宇宙線を起因とするソフトエラーは確率的に起こる現象で、完全に取り除くことができません。例えば、なにかの材料で覆って中性子やミューオンが入ってこないようにしようとしても、高い物質透過性を持っているので効果がほとんどありません。したがって、確率は低いもののエラーが起こる前提で高信頼システムを設計する必要があります。

ここで、確率の低さには注意が必要です。例えば1台のコンピュータに注目すると10年に一度しかソフトエラー起こらない場合でも、10万台のコンピュータが動作していると、1時間に一度はいずれかのコンピュータにエラーが起こります。スマートフォンだと多くは再起動すれば済む話だと思います（そもそもソフトウェアのバグの影響のほうが大きいと思います）が、大規模なスーパーコンピュータでは、再起動が頻繁すぎて計算どころではなくなってしまいます。実際、スーパーコンピュータではこの問題がよく理解されており、神戸のポートアイランドに設置された京や富岳などでも最後に紹介するエラーを訂正する設計が取り入れられています。他にも、多数あるネットワーク通信装置で、ソフトエラーが原因の誤動作が頻繁に起こっていることも新聞報道されました。

4. ソフトエラーの評価方法の研究

ソフトエラーは不可避の問題ではあるものの、確率が低いのも事実であり、社会の脅威となるかは、慎重に見極める必要があります。この見極めには、実際に大量の粒子からなるビームを集積デバイスに照射する加速試験が一般に行われます。図3に実際に我々が実験を行っている一例を紹介します。この写真では上部からビームが飛んできます。その軌跡の上にメモリやプロセッサなどを並べて動作させ、エラーの頻度を評価します。

地上に届く中性子は様々なエネルギーを持っています。地上で動作する集積デバイスのエラー確率の評価には、地上のエネルギー分布を持つビームを照射すべきです。しかし、地上のエネルギー分布を持つビームが出力できる施設は世界に4箇所しかありません。これらの施設は物理実験が主目的であり、集積デバイスの評価には不足しています。

そこで、我々は企業や大学、研究機関の方と力を合わせて、地上のエネルギー分布

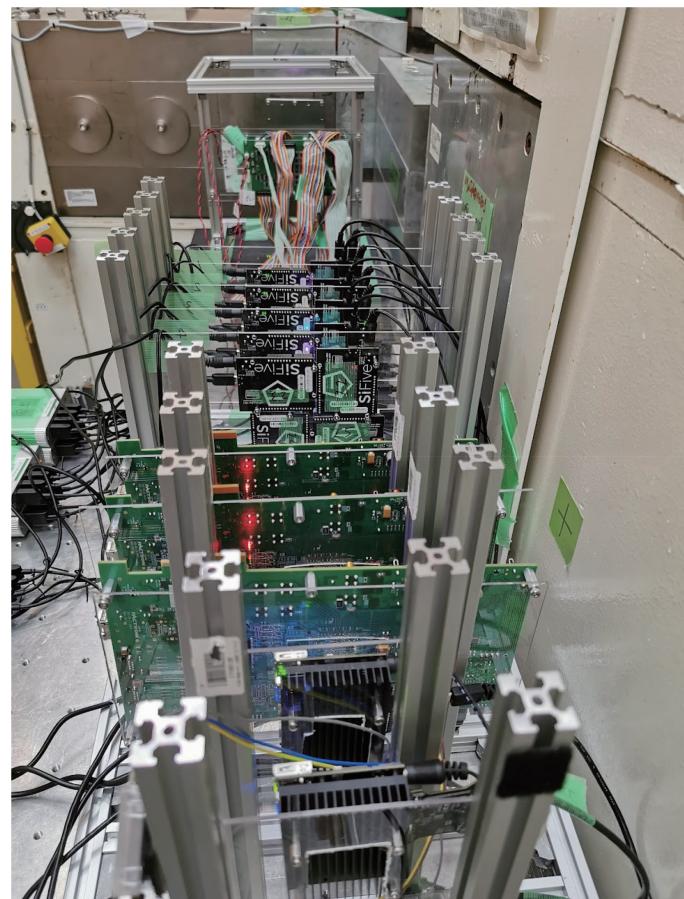


図3：粒子ビームを用いたソフトエラー確率評価実験の実験風景

を持たないビームであってもエラー確率の評価に利用できるようにする手法の開発を進めています。現在は、開発した手法が有効かどうかを、様々な集積デバイスで評価する検証段階にあります。将来的には、世界標準となる評価手法にしたいと考えています。

5. ソフトエラーの動向

集積デバイスは、御存知の通りトランジスタが微細化されることで、性能向上を続けてきました。近年は微細化だけでなく、トランジスタ形状も進化を続けています。ソフトエラーの観点では、トランジスタ形状の変化は、ノイズ電流量の変化や、ノイズ耐性の変化につながるため、常に最新のトランジスタでの状況を把握し、その傾向がシミュレーションで確認できるように調査し続ける必要があります。

トランジスタの微細化は、新たな粒子の脅威を生む可能性があります。冒頭に、中性子とミューオンがソフトエラーを起こすと紹介しましたが、つい最近までミューオンはソフトエラーを起こす要因とは考えられていませんでした。我々のグループが、実験でミューオンがソフトエラーの驚異となりうることを世界に先駆けて確認しました。その後も、微細化したトランジスタへの影響調査や、ミューオンがソフトエラーを起こす現象をシミュレーションで再現する研究を継続して行っていて、将来の影響の大きさを明らかにする研究を進めています（図4）。この研究は、理学部の先生や学生との共同研究となっており、理学と工学の興味が重なる面白い研究テーマとなっています。

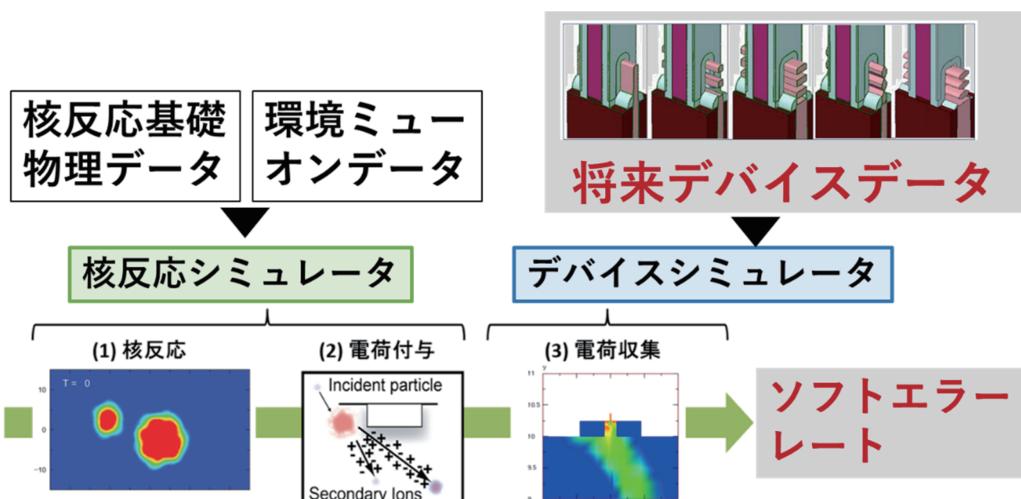


図4：ミューオンによるソフトエラーをシミュレーションで再現し、将来動向を見極める研究

6. 今後の展開

最初に説明したようにソフトエラーは集積デバイス中に必ず発生します。したがって、エラーが発生してもシステム全体が問題を起こさないようにする必要があります。例えば、集積デバイス内では、エラーを見つけたり訂正したりできるエラー訂正符号の利用がメモリに対して進められています。しかし、エラー訂正符号が適用できない回路部分も多く存在します。ソフトエラーがシステム内をどのように伝搬するのかを把握し、エラーをいち早く見つける技術が求められています。これらの技術開発は、集積デバイスの中だけでなく、オペレーティングシステムやソフトウェアとも強調して進めていく必要があります。一方でこれらのエラー対策技術は性能を低下させたり、製品コストを上昇させたりする要因となります。我々も組み込みプロセッサやGPUと呼ばれる並列プロセッサに注目して、エラーを素早く効率よく見つける方法の開発を進めています。必要十分な対策が施された安全安心な社会システムの実現に向けて、研究活動を今後も進めていきます。

学生の声

Some Insights from Reading Articles

工学研究科 電気工学専攻 土居研究室 博士後期課程2年 吳 遼 倫

I want to share a few insights from reading articles so far. I have spent nearly a year deciding on a research topic for my doctoral program. The topic of the master's program was the Elevator Group Control System. After discussing with my supervisor, I extended my research to logistic systems with a broader application field. Thus, I decided on Supply Chain Management, a tremendous research direction that has been highly studied. Focusing on a topic and considering something new worth studying requires a lot of literature review. However, due to my lack of experience, I did not know how to evaluate papers to see if it is helpful to my research. Moreover, I cannot always distinguish right from wrong for papers with different quality levels. Hence, there were many misguided cases and wasted time.

The lesson from my reading literature inefficiently for nearly a year is that: to evaluate a paper, I need to think more and dare to suspect. My supervisor always told me that I could not simply swallow the contents of an article or be convinced that they are all true because some authors emphasize their studies' advantages but prove them inadequately. Indeed, I should not only respect the authors but also dare to doubt whether the contents are reasonable. Besides, thinking more from both authors' and researchers' angles helps comprehensively understand and evaluate articles. For instance, If I realize that the model or method mentioned in a paper is deficient, and I have ideas for improvement, I need to raise such questions: why did the authors not think of them? Did the authors think of them but have not done them yet.

The same is true when considering social happenings. Such a set of meticulous and logical thinking rules helps judge a complex event.

自由を享受する

工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程2年 和 泉 孝 紀

「人間は自由の刑に処されている」というサルトルの言葉がある。私を含め、一部の学生の間では、冗談半分に、桂キャンパスを刑務所と揶揄することもあるが、その意味では、桂キャンパスを含め、「自由の学風」を掲げる京都大学全体が、真に刑務所なのかもしれない。しかし、この刑務所の囚人たちの一部は自由 = 刑などとは感じず、むしろ自由を糧にし、学問・研究に没頭し、キャンパスに活気ある雰囲気をもたらしているように思える。(もちろんサークルや部活動などに勤しむ学生の活気もあるが、図書館や研究室などで議論する彼らの姿も負けず劣らず活気に溢れていないだろうか。)

研究生活5年目を迎える私自身は、この自由に苦しみつつも、一方で自由との付き合い方に少しづつ慣れはじめ、様々な得難い経験をしている。研究では、理論解析からデバイス設計・作製、実験までの、上流から下流までを見渡す、貴重な機会を得ている。このように広い範囲を見渡すため、一筋縄にいかないことが多いものの、広範な専門知識をもつ先生方や企業の共同研究員の方々、学生(先輩・後輩・卒業生)の皆さんに支えられつつ、何とか研究を進められている。そして、何よりも私にとって得難いと感じるものは、このような方々との研究に関する議論や、他研究室・大学を含む先生方、学生の皆さんとの議論や日常会話である。これらの自由闊達で刺激的な議論の中で、日々、新たな知識・見解を認識し、知的好奇心を掻き立てられている。

このような研究生活を過ごす中で、恥ずかしながら、「自由の学風」の真の意味を漸く理解できた気がする。そして、この学風を引き継いだ、先生方をはじめ、多くの方々の支えのお陰で、私が自由を享受できていることを痛感している。このような方々への感謝の気持ちを体現化する意味でも、今後の研究生活をより充実したものとしつつ、微力ながら「自由の学風」を引き継ぐ一翼を担うことができればと思う。

この原稿の執筆(乱筆?)にあたり、読者を誰に据えるか大分悩んだが、進路を迷っている学生と勝手に設定した。これらの学生方は、私がそうであり、そうであったように、進路決定に際し、きっと自由の刑を強く感じているのではないかろうか。もしそうであるなら、自由を享受している他の京大生をヒントにしてみてはいかがだろうか。

教室通信

エレクトロニクス・スプリングキャンプの実施

サマーキャンプ運営委員会

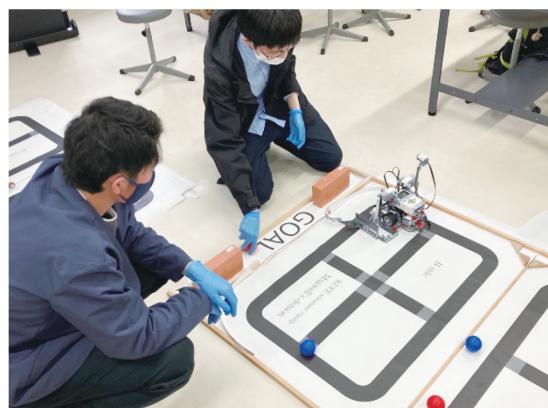
松尾哲司、中西俊博、佐藤丈博、上田博之、金子光顕

2008 年の開始以来、「エレクトロニクス・サマーキャンプ」は恒例の夏の学科行事として定着しており、2019 年 CUE41 号でも実施状況を報告させて頂きました。ところが、2020 年と 2021 年の夏にはコロナ禍の影響により、中止のやむなきに至りました。昨年の中止決定は、参加募集を終えた後だっただけに、参加予定だった学生からは多数の失望の声が上がりました。また、本キャンプは、学生 TA が主体的に企画・運営を継続しているため、2 年間の活動休止はそのノウハウの継承が失われることを意味しています。そこで、春の代替開催を望む学生の声に推され、2022 年 3 月 28-30 日のスプリングキャンプとして実施することにいたしました。コロナ対策に大変気を使ってはいましたが、準備期間中に TA にコロナ陽性者が確認されたりと、コロナ禍の中で実施に難しさも感じながらの開催となりました。それでも TA の皆さんのがんばりと参加者の皆さんの積極性により、（歓声は控えつつも）これまでと同様に熱のこもったキャンプとなりました。

各学年のテーマは前回報告時と同じですが、以下に今回の実施状況を簡単にまとめます。

1 回生「LEGO Mindstorms によるロボット製作」(参加者 20 人)

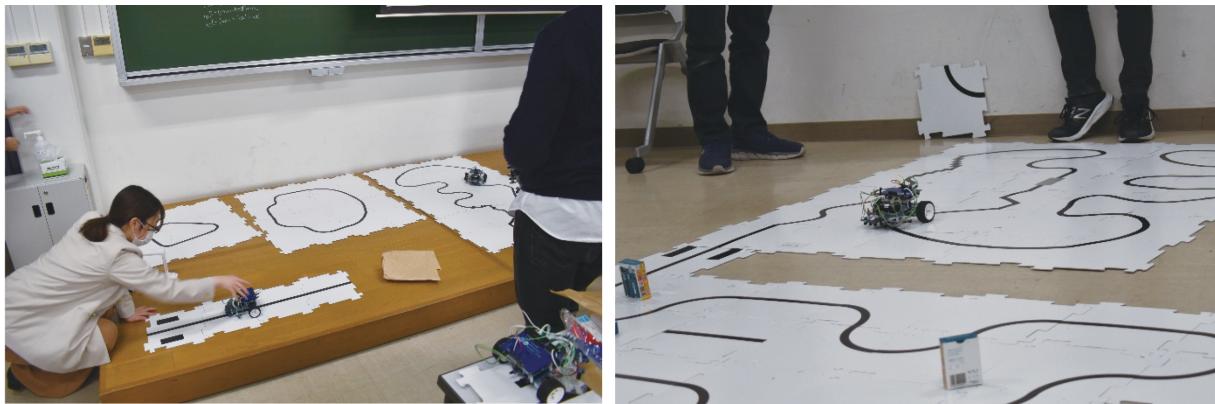
サマーキャンプの立ち上げから 10 年以上が経ち、老朽化が進んでいたため、機器の更新を行っての開催となりました。1 回生は専門的知識がまだ少ないため、直感的にプログラミングが可能な LabVIEW ベースのソフトを使ってロボットの制御を行いました。2-3 人で 1 グループとし、グループごとの対戦形式でコンテストが行われました。自分のフィールドにあるボールをボールの色に応じて自陣、相手陣地に飛ばすという内容ですが、機器の更新に伴い利用できるモーターの数が増えたこともあり、戦術の幅も広くなり、これまで以上にハイレベルで白熱した試合が繰り広げられました。



2 回生「Arduino を用いてライントレーサをつくろう！」(参加者 8 人)

2 回生はプログラミングの知識をつけ始めた段階であり、それを活かす目的でワンチップマイクロコンピュータを利用したテーマが定番となっています。今年はマイコン Arduino を使用し、ライントレーサを作製、コース走破の時間を競うというコンテスト内容となりました。競技コースはコンテスト当日

まで発表されず、どのようなコースであっても対応可能なコードの開発が肝となりました。ほとんどの参加者が完走を果たし、TA の最速タイムに迫るマシンも現れるなど、参加者のポテンシャルの高さに驚かされました。



3回生「倒立振子の自動制御コンテスト」(参加者7人)

2018年度にテーマを変更して以来、3度目の実施となりました。コンテスト内容を毎年調整している段階ですが、今年は2018年度と同様に2輪型倒立振子姿勢制御を基本とし、曲道や坂道が用意されているコースをどこまで進むことができるかを競いました。3回生ということもあり、難易度を難しめに設定している関係上、3日間という限られた時間で自立させること自体が難しい内容ですが、コースを最後まで走破する参加者もみられ、盛り上がりを見せました。



以上の活動は、洛友会の後援や卒業生からのご寄付など多くの支援に支えられて維持することができます。この場をお借りしてみなさまのご支援に改めて感謝申し上げます。サマー／スプリングキャンプの様子については学科 Web ページにも掲載しておりますのでどうぞご覧ください

<https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/summercamp>



編集後記

ようやく海外出張が可能となりました。しばらく疎遠となっていた研究者の方々と議論をしたり、刺激を受けたりするのが楽しみでなりません。新たな人とのつながりが生まれたり、特に聴講予定でなかった発表から新たなアイデアが浮かんだりと、セレンディピティの機会もオンライン参加のメリットと思います。学生の教育的効果も高まり、研究の活性化を期待します。

最後になりましたが、お忙しい中、cue48号にご寄稿・ご執筆いただきました皆様に、心より御礼申し上げます。

[M.H. 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
口一ム株式会社

発行日：令和4年9月

編集：電気系cue編集委員会
川上 養一、山本 衛、下田 宏、
橋本 昌宜、田中 俊二、山本 高至、
デゾイサ メーナカ、佐藤 亨（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

