

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 (稲垣研) *

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野 (松田一研)

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

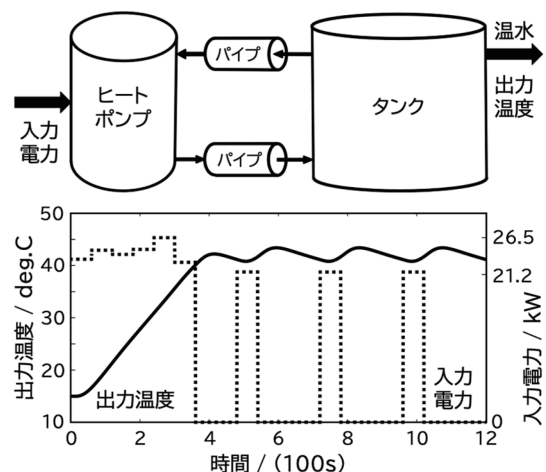
～クープマン作用素による非線形システムの形式設計とエネルギーシステムへの応用～」

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プマン作用素がある [1,2]。クープマン作用素とは、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プ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、クープ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プマン・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、クープ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変性が前提とされている。本研究では、クープ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、クープ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プマン 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プマン 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氣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は、数値電磁界解析技術が必要で、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。

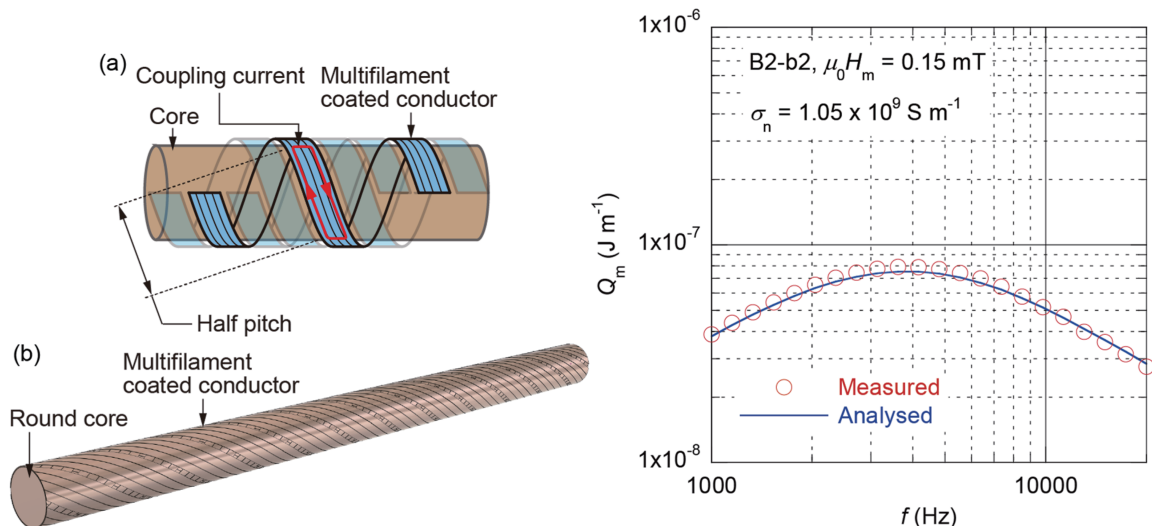


図1 スパイラル銅安定化多芯薄膜高温超伝導導体の概念図 [1]

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が、多数の設計要件を満足する形状を得るためには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モデル、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。

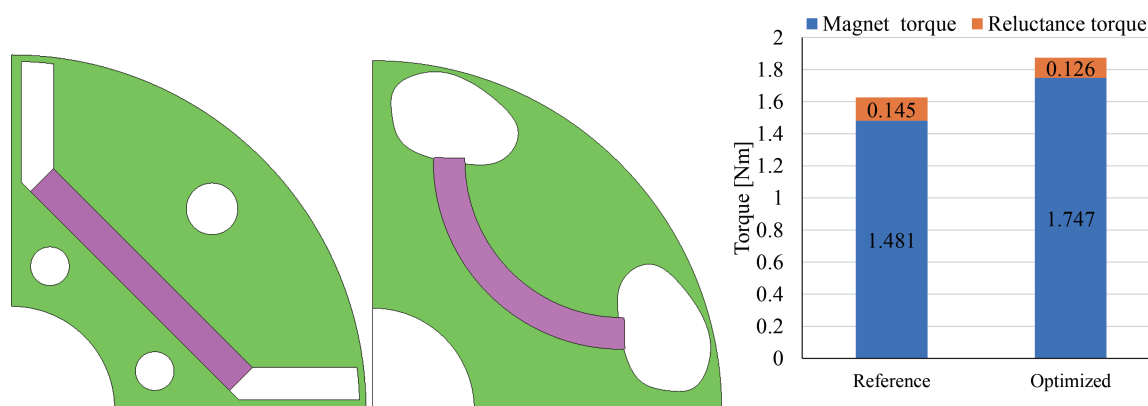


図 1 リファレンスモデル (左) と最適化モデル (中央)、最適化形状のトルク比較 (右)

[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」

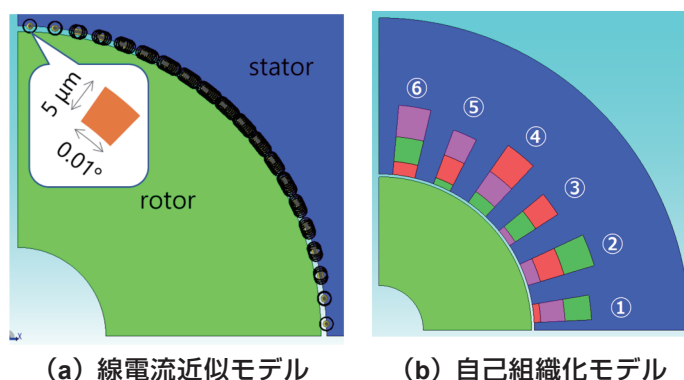
当研究室では、交流回転機における電気-機械エネルギー変換過程の一般的表現法ならびに新しい設計法の確立を目標として、回転座標系の電磁現象を第一原理に立ち戻って研究している。巨視的な大きさの一般的回転機では、上記エネルギー変換には磁束の変調が用いられ、例えば三相固定子巻線が作る回転磁界に、回転子が作る磁極や誘導電流、あるいは磁氣的突極構造を作用させてトルクを実現している。その際、電気エネルギーを注ぎ込むことになるが、その媒体として導体が用いられる。地球上で容易に手に入る導体の代表格である銅線やアルミ線では、積極的な冷却をしない場合の許容電流密度が5 A/mm²程度であり、もし特殊な方法でマイナス200℃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/mm²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导体断面積を確保する必要がある、一般には積層鉄心コア内にスロットを穿孔して導体を收容することになる。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關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的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 μm × 0.01° (≒5 μm))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导体断面形状(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 (AlN) 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气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 (AlN) 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 AlN の基礎物性解明に取り組み、AlN 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、AlN の誘導放出過程に関する物性評価を行った。

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 AlN 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 にかけて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、AlN 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、AlN 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).

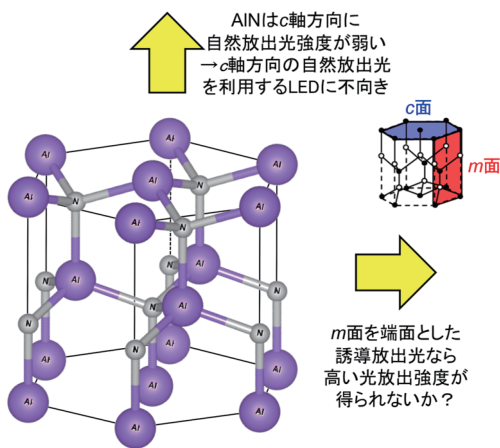


図 1. AlN の結晶構造 [3]

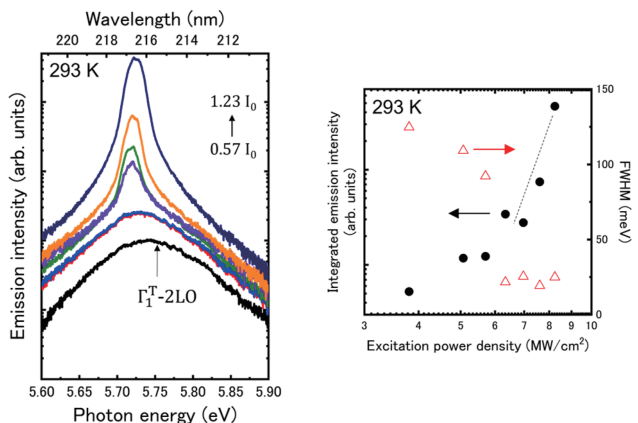


図 2. 室温下における AlN の光放出スペクトルの励起強度依存性

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 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 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5～10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).

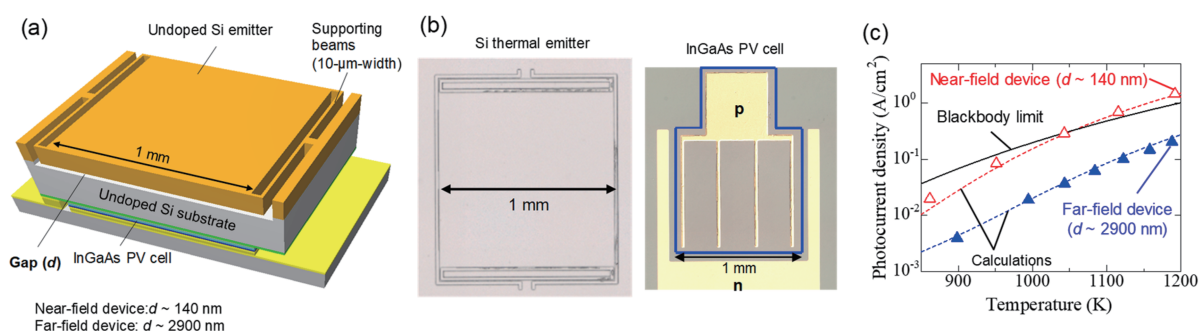


Fig. 1. (a) Schematic of near-field TPV device integrating 20- μ m-thick Si thermal emitter and InGaAs PV cell. (b) Microscope images of fabricated near-field TPV device. (c) Measured (triangles) and calculated (dashed lines) photocurrent density of the near-field and far-field devices as a function 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タ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.

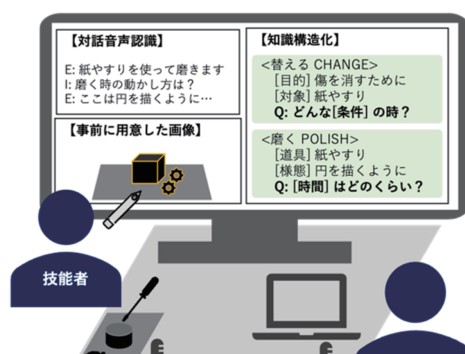


図1 インタビュー支援システムのイメージ

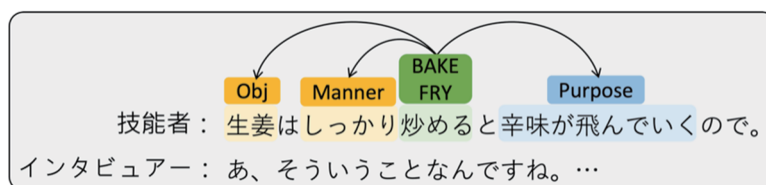


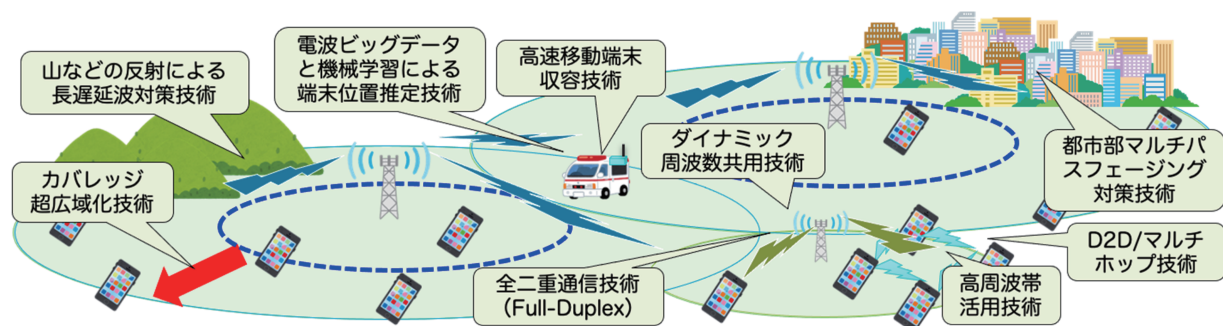
図2 料理イベント自動解析の例

通信システム工学講座 デジタル通信分野 (原田研究室)

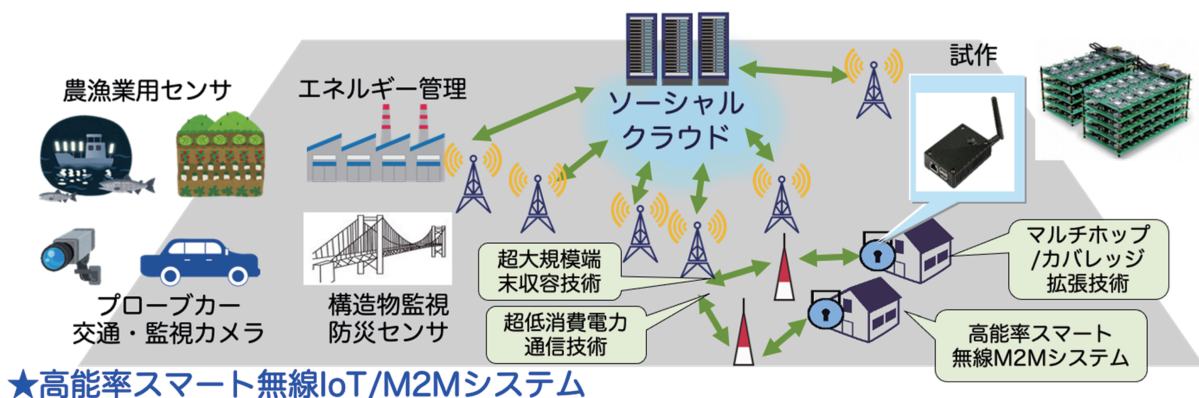
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

第6世代ブ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ク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取まらない、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、超広域ブロードバンド移動通信システム、全二重通信 (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「全二重通信セルラシステム」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世代ブ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

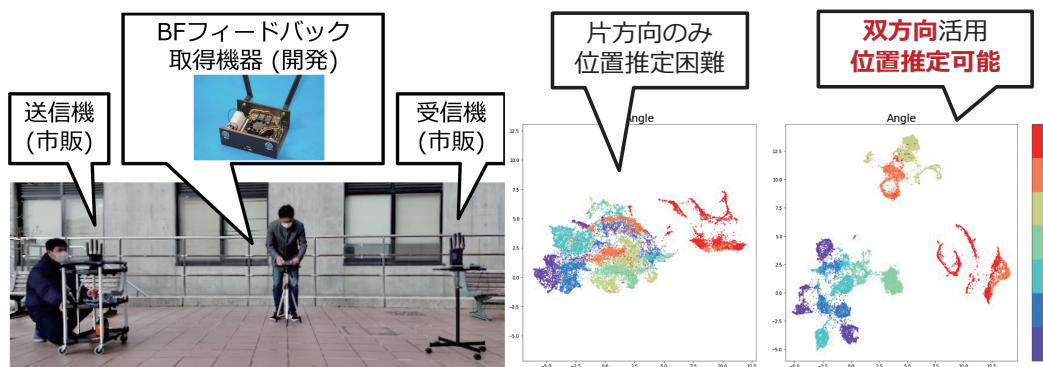
<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>
 「制御信号を用いた無線 LAN センシング」

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的环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されてきた。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、到来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単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そ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。

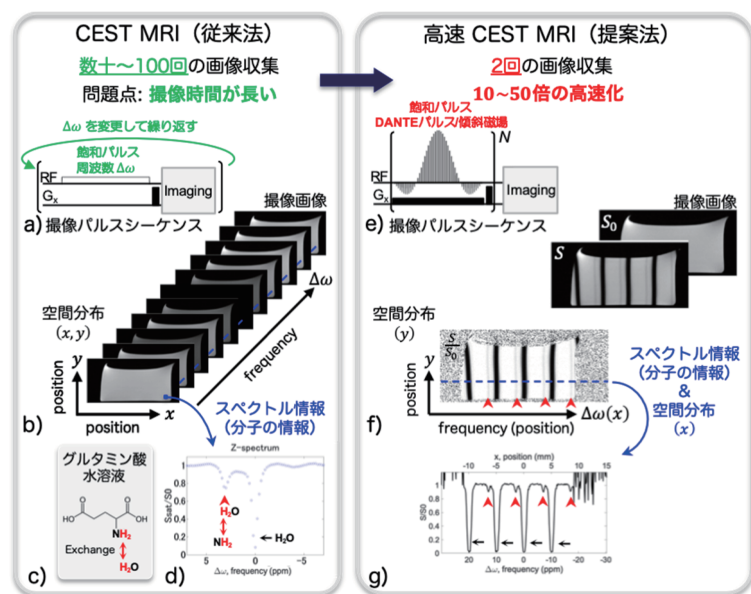


図 CEST MRI (従来法) と高速 CEST MRI (提案法) の概要

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、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。

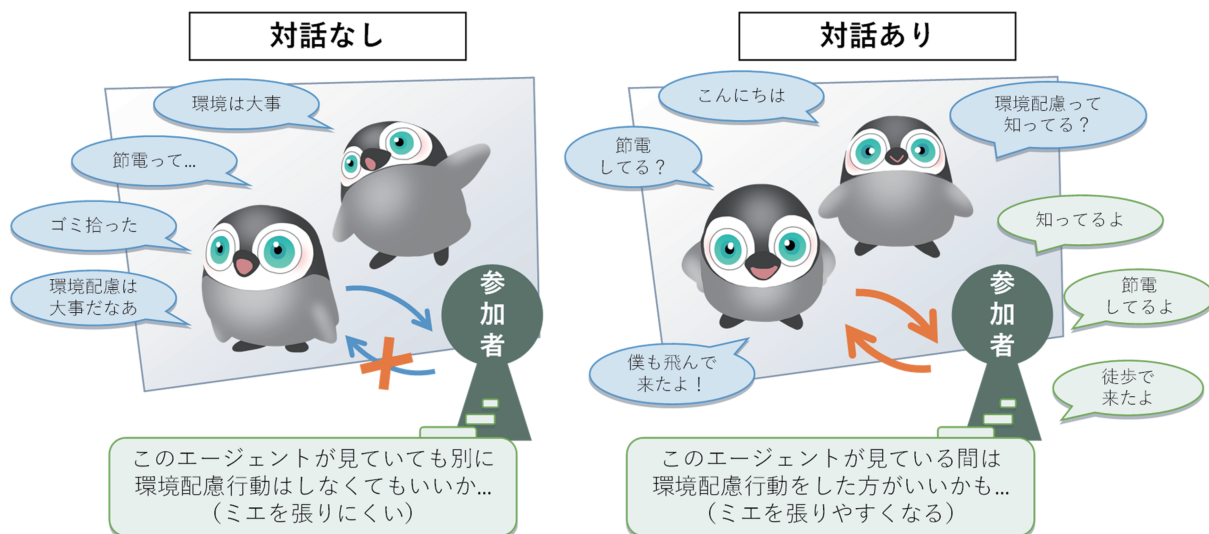


図1 対話なし条件・対話あり条件それぞれのエージェントと接した際のイメージ

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 ウェハ上に薄膜 Li イオン電池の作製を目指している。ポリマーや Si 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。（ α, β ）=（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 [01-4] 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 LiPF_6 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 ウェハ上に 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。

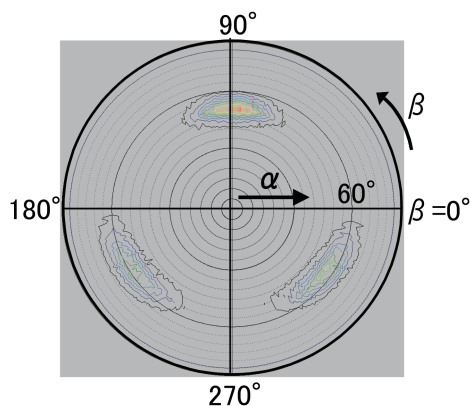


図 1 LiCoO_2 の (104) 極点図

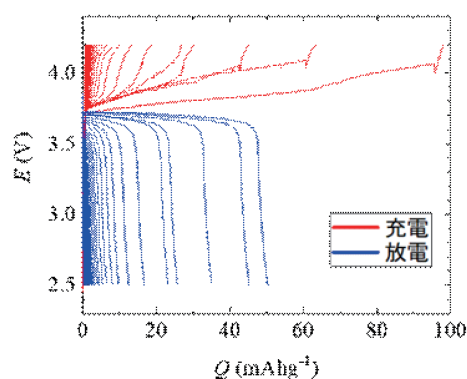


図 2 LiCoO_2 薄膜を正極にして作製した試験電池の充放電測定結果

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 撚線 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 撚り線および MgB₂/Cu/CuNi 撚り線を製作し、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 撚り線の、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 撚り線では 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撚った Cu 線に流れ熱暴走に到らなかった。一方で、MgB₂/CuNi/CuNi 撚り線では、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 熱流束が上昇し、熱暴走する電流値が大きくなることを確認した。

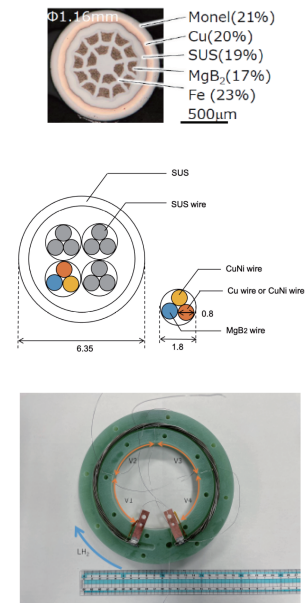


図 1 CICC 撚線模擬導体

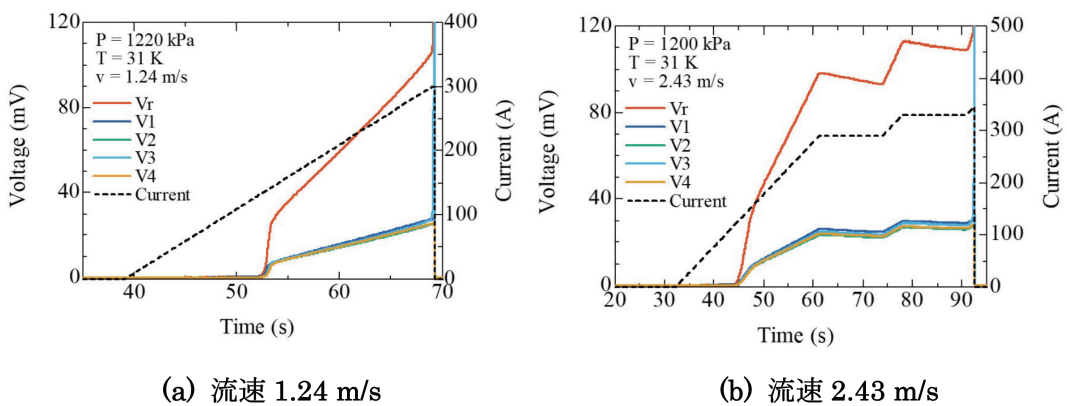


図 2 過電流通電試験の電流・電圧の時間変化 (MgB₂/CuNi/CuNi 撚り線)

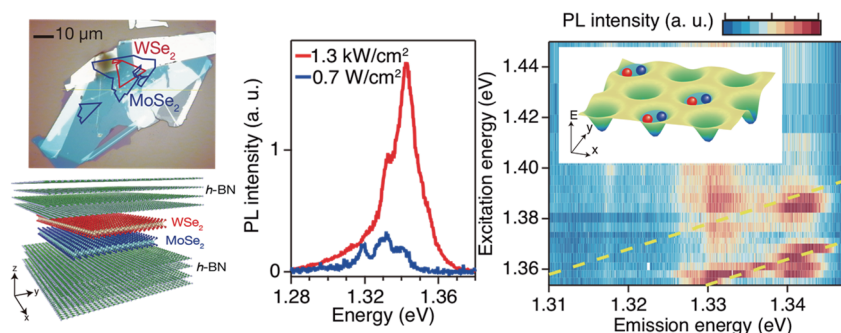
エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田一研究室）

<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ド (MX_2 ; $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$; $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$) 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「スピン」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、二セレン化タング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示す。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).

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野（橋口研究室）

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

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ィ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（数値モデル）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的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ィンドスカナーと呼んでおり（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ィ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スパコンを用いた大気・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。

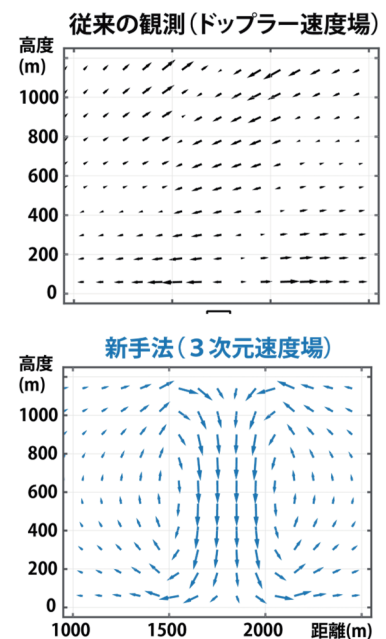


図1. ドップラー速度からベクトル速度の観測へ

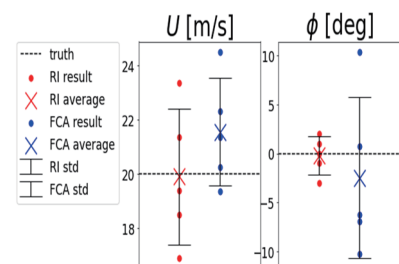


図2. シミュレーションによる推定精度

生存圏開発創成研究系 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.

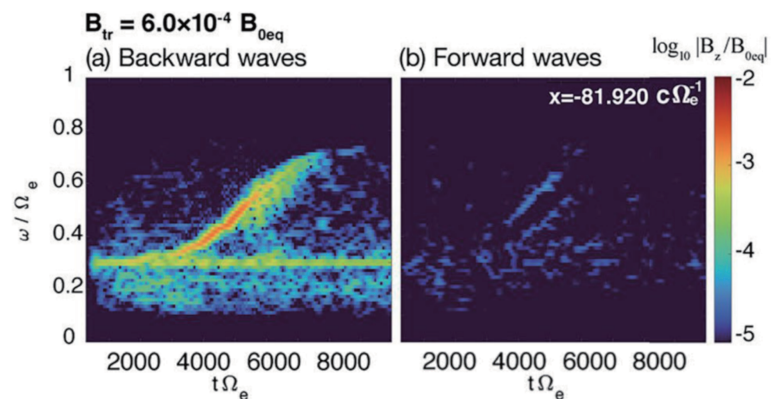


図1 赤道から離れた地点で観測されるホイッスラーモード・トリガード放射の後進波と前進波の周波数ダイナミックスペクトル

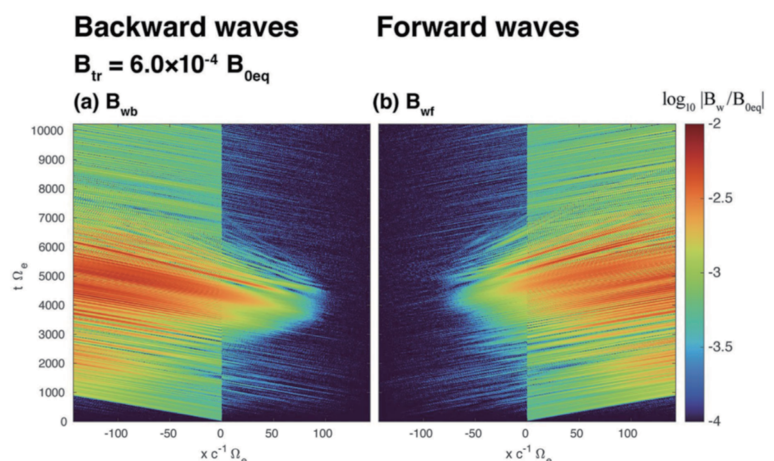


図2 赤道から入力される一定周波数のトリガー波および周波数が増えるトリガード放射(前進波と後進波に分離)の振幅の時空間発展