# 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

<u>工学研究科(大学院)</u> 電気工学専攻 先端電気システム論講座 システム基礎論講座自動制御工学分野(萩原研) システム基礎論講座システム創成論分野(阪本研) 生体医工学講座複合システム論分野(土居研) 生体医工学講座生体機能工学分野(吉井研) 電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研) 電磁工学講座電磁回路工学分野(松尾研) 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座(中村武研)

電子工学専攻

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

光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

<u>情報学研究科(大学院)</u> 知能情報学コース **知能メディア講座言語メディア分野** 知能メディア講座コンピュータビジョン分野(西野研)

通信情報システムコース 通信システム工学講座ディジタル通信分野(原田研)☆ 通信システム工学講座知的通信網分野(大木研) 集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤研) 集積システム工学大規模集積回路分野(新津研) 集積システム工学講座超高速信号処理分野(橋本研) システム科学コース システム情報論講座論理生命学分野(石井研) システム情報論講座医用工学分野(野村研)\*

<u>エネルギー科学研究科 (大学院)</u> 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

<u>エネルギー理工学研究所</u> エネギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(長崎研) エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野(稲垣研) エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野(松田研)

生存圈研究所

中核研究部 生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研) 生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(橋口研) 生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野(小嶋研) 生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(海老原研) 生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)

### 先端電気システム論講座

## https://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/ 「無線電カパケットルータの開発とロボット給電への応用」

電力の伝送を情報のパケット通信のようにパケット化する、電力パケット伝送システムの提案がある [1]。電力パケットは時間的に分割されたパルス状の電力に、由来や宛先などを示す情報タグを物理層で 付与した伝送単位である(図 a)。電力パケットはルータとよぶ機器が複数接続されたネットワークを介 して、情報タグに基づいた回路スイッチングによるルーティングの結果として電源から負荷へと伝送さ れる(図 b)。これにより、多数の電源負荷を含むネットワークにおいて、電源から負荷への全経路に おいて各パケットが物理的に区別され、識別可能な状態で伝送される。これは、電力の由来や負荷の優 先度などに応じた電源容量と負荷需要の間の動的な割当を(総量に対する割合にもとづく仮想的配分と は異なり)物理的保証をもって実現できることを意味する。

本研究では、これまで有線接続を前提としていた電力パケットルーティングを、中近距離の無線チャ ネルを介し実現することに取り組んでいる。無線給電技術はモバイルデバイスの非接触充電、ロボット 可動部への適用による配線除去、移動体への走行中給電など、幅広い応用を視野に研究が進められてい る。とくに中近距離における無線給電技術として、回路の共振現象を用いた磁界共振結合方式があり、 高い効率などの特徴から注目を集めている。しかし同方式は、伝送特性の駆動周波数に対する鋭敏性に より、複数の送受信器間でチャネルを分けた選択的な伝送が困難であるという課題がある。本研究では 無線電力伝送のパケット化によりこの課題にアプローチしている。これまでに、有線の場合と同様に電 力伝送の時間領域での分割と情報タグの付与によるパケット化を実現する無線電力パケットルータを開 発した [2]。送信側ルータは振幅変調により電力へのタグ付けを行う。受信側ルータはタグ波形を電力 波形から分離する回路を備えており、タグ情報をもとに自身が関与するパケットについてのみ選択的に 受領と転送を行う(図 c)。これにより、無線チャネルを介した給電においても電力伝送の識別可能性が 担保される。また、電力パケット伝送システムでは、電力伝送がパケットごとに分離されているため、ネッ トワークの一部の加除を他の伝送に影響を与えることなく行える。開発した無線ルータおよび伝送方式 は無線結合部分を除いて有線ルータと互換性があり、両者を混合したルータネットワーク(図 b)の構 築はネットワークの拡張性や経路選択の自由度の向上に寄与する。

さらに、本システムの応用例として、多指ロボットハンドの無線電力パケットによる駆動実験(図 d) を行った [3]。タグ情報として、給電する指モータの識別情報に加え、その目標変位に関する情報を付 与することで、各指モータへの選択的な給電のみならず、従来別チャネルで行われていた制御情報の伝 送を統合できることを示した。

**文献** [1] 引原,情報処理, Vol.51, No.8, pp.943-950 (2010). [2] T. Mamiya, S. Mochiyama, and T. Hikihara, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.* Vol.5, No.2, pp.475-487 (2024). [3] T. Mamiya, S. Mochiyama, and T. Hikihara, *In Proc. 2023 IEEE 32nd Int. Symp. Ind. Electron.* pp.1-6 (2023).



図:電力パケットの無線伝送ルータの開発とロボット給電への応用。詳細は文献 [2,3] を参照。

## 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 「レーダによる心拍成分の高調波を用いた高精度バイタル計測」

呼吸や心拍といった生体信号を接触センサによらず、離れたところから電波で計測する技術は、対象 者に不快感や拘束感を与えず、着脱の煩わしさもないため、長期あるいは常時の人体モニタリングに適 している。レーダによる生体信号計測は、人体の皮膚表面の微小な変位を計測することにより実現され るが、生体信号のなかでも心拍は、健康な成人の場合、周期がおよそ 0.6-1.0 s 程度の準周期関数でモデ ル化でき、その変位は最大で 0.5 mm 程度、典型的には数十ミクロン程度の小さな変位しか生じない。 このような小さな変位を計測するため、ミリ波帯のような高い周波数を用いることで、反射波の位相を 介して変位波形を推定する手法が主流であった。その一方、呼吸は、周期がおよそ 3.0-5.0 s 程度の準周 期関数でモデル化でき、その変位は最大で 12.0 mm にもおよび、心拍成分よりもはるかに大きい。そ のため、実際のレーダ計測では呼吸と心拍の成分が重畳した変位により変調を受けた信号が受信され、 呼吸成分の高調波が心拍成分の基本波成分に干渉し、心拍計測精度が大幅に低下するという課題が避け られなかった。

この課題を解決すべく、我々はレーダ計測で得られた信号に含まれる心拍基本波ではなく高調波成分 を用いた高精度バイタル計測技術を開発した。開発技術は、変位波形ではなく、受信された複素信号の 2 階微分の絶対値を用い、心拍の高調波成分を強調したうえで、ブラインド信号分離の一種である変分 的モード抽出法によりその心拍高調波成分を選択的に分離抽出する。抽出された心拍高調波成分は、当 研究室で開発してきたトポロジー法と呼ばれる手法により、瞬時心拍数へと変換される。この手法の詳 細については、[1] をご覧いただきたい。開発手法の性能を評価するため、79 GHz 帯ミリ波レーダにより、 レーダアンテナから 1.0 m 離れた位置に着座した健康な成人被験者を計測した。図1 (a) に示すとおり、 従来手法では心電計による参照値 (青破線) とレーダ計測による推定値 (黒点) が大きく乖離しているが、 図1 (b) に示すとおり、開発した手法を用いると、両者はよい一致を示し、大幅な精度改善が達成さ れている。今後、この手法を用いたヘルスケア・医療への応用など、非接触心拍計測技術の社会実装が 期待される。

参考文献 [1] I. Iwata, K. Sumi, Y. Tanaka, and T. Sakamoto, "Accurate radar-based heartbeat measurement using higher harmonic components," arXiv:2407.07380 [eess.SP], Jul. 2024.



図1 ミリ波レーダを用いて(a)従来手法、(b)提案手法により推定された心拍間隔(黒点)および 心電計により得られた心拍間隔の参照値(青破線)。相関係数は従来法 -0.29に対して提案法 0.93、 RMS 誤差は従来法 71.7 ms に対して提案法 19.5 ms となり、精度改善を達成。

## 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 スパイラル薄膜高温超伝導導体を対象とするクエンチ解析技術

高温超伝導線を核融合用電磁石や回転機巻線等に適用するための研究が世界で進められています。現 在実用化が最も近いと考えられている高温超伝導線は、テープ形状をもつ薄膜高温超伝導線であり、機 械的自由度や電流容量の問題のため、これを単体で使い巻線することは現実的ではありません。我々の 研究室では、複数本の薄膜高温超伝導線を円断面の金属コアの周囲にらせん状(スパイラル)に何層に も巻き付け、多数本の薄膜高温超伝導線を集合化した導体(スパイラル薄膜高温超伝導導体、図1)が、 上述の問題を解決するためのカギとなると考え、研究を進めています [1], [2]。

高温超伝導技術の実用化において重要な課題の一つが、クエンチと呼ばれる現象です。クエンチとは、 超伝導線内部に電気抵抗がゼロではない常伝導部がなんらかの要因で発生し、そこに電流を流し続けた 場合にその常伝導部が拡大していく現象です。クエンチが発生したときに適切に検出し、保護を行うこ とができなかった場合、巻線全体の温度上昇、最悪の場合には線材が焼け機器の破損に至ってしまうこ とも考えられます。スパイラル薄膜高温超伝導導体は複数の薄膜高温超伝導線を集合化した導体であり、 薄膜高温超伝導線間及び、薄膜高温超伝導線 - 金属コア間は一般的には絶縁されず、接触抵抗を介して 電気的に接続されます。この構造は、ある薄膜高温超伝導線に常伝導部が生じたとき、その薄膜高温超 伝導線に流れている電流が他の薄膜高温超伝導線または金属コアに逃げることを可能にします。この現 象は分流と呼ばれ、分流が可能であるという特徴により、スパイラル薄膜高温超伝導線はクエンチに対 するロバスト性(安定性)が高い導体であると考えられていますが、実際にクエンチが発生した時にど のような特性を示すのかは明らかになっていませんでした。

我々は、スパイラル薄膜高温超伝導導体を対象としたクエンチ解析技術を構築し、その特性を明らか にしようとしています。クエンチ現象は電磁気的な現象と熱的な現象が複雑に関わるマルチフィジック スな現象ですが、スパイラル薄膜高温超伝導導体を簡単な回路モデル(図2)で表現し、そのクエンチ 特性を調べています。スパイラル薄膜高温超伝導導体を構成する抵抗要素として、薄膜高温超伝導線に おける超伝導層と銅層の合成抵抗*R*<sub>cc</sub>、金属コアの抵抗*R*<sub>Cu</sub>、超伝導線間または超伝導線-金属コア間 の接触抵抗*R*<sub>ct</sub>、導体両端における電源との接続抵抗*R*<sub>ter</sub>を考慮しています。ただし、*R*<sub>cc</sub>については、 超伝導層は電流に対する依存性をもつ非線形抵抗と呼ばれる抵抗です。熱の流れについても同様に、回 路網のような単純化したモデルにより定量的に計算し、クエンチ特性を評価しようとしています。



## 伝導導体の概念図

1 pitch

 $R_{\rm ct}$ 

### 参考文献

[1] J. D. Weiss, et al., Supercond. Sci. Technol., 30, 014002, 2017.

[2] Y. Sogabe, Y. Mizobata, and N. Amemiya, Supercond. Sci. Technol., 33, 055008, 2020.

#### 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 ダーウィン近似マクスウェル方程式による高周波電磁界解析

高周波インダクタの設計においては、抵抗とインダクタンスといった基本的な値を設計するとともに、 寄生容量を考慮することが重要である。従来のインダクタ設計では、抵抗とインダクタンスのみを考慮 すれば十分であり、寄生容量による変位電流の影響は無視することが一般的であった. 高周波インダク タの設計において、寄生容量の影響を考慮するには、変位電流項を考慮して通常のマクスウェル方程式 を解けばよいと考えられるが、方程式が二階の時間微分項を含むために時間領域解析が問題となる、こ のようなことを背景に、時間の一階微分のみを含み寄生容量を考慮可能な手法としてダーウィン近似が 注目されている。ダーウィン近似では、変位電流を誘導電界由来の成分とクーロン電界由来の成分に分 解し、アンペアの法則において誘導電界由来の成分を無視する近似を行う、ダーウィン近似のもとでマ クスウェル方程式は一階の時間微分項しか含まず,時間領域解析が容易であるという利点がある.そこ で本研究室におけるダーウィン近似マクスウェル方程式に関する数理的検討に基づく最近の取り組みに ついて紹介する.

マクスウェル方程式を数値的に解く方法として有限要素法がよく用いられる。ダーウィン近似マクス ウェル方程式を有限要素法により離散化し、連立方程式を解くことで数値的に解を得ることができる。 しかしながら、実際に反復法により解いてみると、ダーウィン近似マクスウェル方程式はほとんど収束 せず解を得ることが困難であることが多いという実験事実が確認される.これはダーウィン近似によっ て方程式が悪条件になっているためで,この問題を解決するために,本研究室ではダーウィン近似に補 助変数を導入する手法を研究している[1]. 図1に補助変数を導入することで収束性を改善した例を示す. ダーウィン近似マクスウェル方程式を離散化すると、方程式の次元は(節点数+辺の数)となる、さら に補助変数を導入すると、方程式の次元は(節点数×2+辺の数)となるため、反復一回当たりの計算 コストは増大することがわかる.しかしながら、補助変数による収束改善効果によって、収束までの反 復回数を大幅に削減することができるため、全体の計算時間を短縮することが可能である.

ダーウィン近似における補助変数の導入による収束性改善のメカニズムは、マクスウェル方程式を解 く際のA法とA-V法の関係に関連している. A法では、磁気 ベクトルポテンシャルを変数としてマクスウェル方程式を解 Darwin 10<sup>-5</sup> Augmented Darwin く.一方で、A-V法では、磁気ベクトルポテンシャルに加え て冗長な変数である電気スカラポテンシャルを変数としてマ 相 20-10 10-10 クスウェル方程式を解く. 両者はマクスウェル方程式のゲージ 不変性により数学的・物理的に等価であるが、数値計算的には 異なる振る舞いをし,多くの場合で A 法よりも A-V 法の方が

計算時間が短くなる. これはダーウィン近似マクスウェル方程 式における補助変数の導入による収束性の改善と同じメカニ ズムであることが言える. 補助変数を導入することで収束性を改善するというアイ

ディアは普遍的なものであり、数値電磁界解析を高速化する重 要なツールであると考えられる. 今後は収束性の改善に関する 数理的なメカニズムをより詳細に議論し普遍的な法則を見出 すことが数値電磁界解析の発展に重要と考えられる.



ダーウィン近似マクスウェル方 図 1 程式(Darwin)と補助変数を導入し た方程式(Augmented Darwin)の反 復求解における収束特性の比較

[1] K. Yoshida, T. Mifune, T. Matsuo, H. Kaimori, A. Kameari and T. Iwashita, "Efficient Preconditioning Technique for Frequency Domain Finite Element Simulation of the Darwin Model," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 60, no. 3, pp. 1-4, March 2024, Art no. 7400404

# 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

### 「希土類系積層永久磁石の絶縁層厚最適化と Halbach モータの高性能化に関する研究」

希土類系永久磁石は、佐川氏らによる発明[1]以来精力的な研究開発が行われ、例えば自動車主機用 モータにおいて広範に実用に供されている。一方で、モータに要求される重要な性能の一つとして高出 力密度化が挙げられ、即ち単位質量若しくは単位容積当たりの出力を向上することが求められる[2]。出 力密度を向上する一方法として、その高回転数化が考えられる。しかしながら、回転数を高くすると相 対的に永久磁石内部の渦電流損失が増加してしまい、効率低下や温度上昇を招いてしまう。

そこで、当研究室は(株)NDFEBとの共同研究として永久磁石の積層化に取り組んでいる。一般に、 強磁性体(ケイ素鋼板他)の積層化技術については多くの研究があり、既に広く各種電気機器に利用さ れている。一方で、永久磁石の積層化に関する研究は希少なことから、まず絶縁層厚の最適化設計に取 り組んだ。図1には、3次元渦電流損失解析モデル図を示す[3]。同図は、実験結果との対照を容易にす るために測定系をそのままモデル化しており、即ち希土類系積層永久磁石をC型ヨークのギャップ部に 設置し、かつコイルによって励磁する構造となっている。図2には解析結果の一例を示すが、絶縁層厚 を厚くするほど渦電流損失が低減している。一方で、絶縁層厚が厚くなると相対的に永久磁石部の体積 分率が低下してしまい、その結果着磁束量が低下する。従って、渦電流損失値と着磁束量のトレードオ フから絶縁層厚には最適値が存在すことが明らかになり、希土類系積層永久磁石の設計に際しての重要 な知見が得られた。なお、図2の解析結果の定性的傾向については実験結果によって実証済みである[3]。

上記結果を元に、絶縁層厚 10 µm の積層永久磁石を用いた Halbach 構造の軽自動車向 10 kW 級表面 磁石同期モータの3次元電磁界解析を行った。紙面の都合で解析結果の説明は割愛するが、永久磁石を 積層化することで機械出力や効率を大きく改善することに成功した [4,5]。本結果をもとに、今後実機試 作と実証試験を実施すべく検討を行っている。

### <u>参考文献</u>

- [1] M. Sagawa, et al., J. Appl. Phys., 55 (1984) 2083-2087
- [2] 中村 武恒, 電気学会誌, 144(1)(2024) 26-29
- [3] T. Nakamura, et al., in preparation for submission
- [4] 言美 龍二郎,他,自動車技術会 2024 年春季大会(パシフィコ横浜)(2024 年 5 月 23 日) No. 189
- [5] R. Gombi, et al., in preparation for submission



図1:希土類系積層永久磁石の3次元渦電流損 失解析モデル[3]



図 2:永久磁石の導電率 σ<sub>P</sub>= 7 × 10<sup>5</sup> S/m、 周波数 f = 500 Hz の場合の渦電流損失解 析例 [3]

## 電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室) http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp 「界面磁気異方性制御による超薄膜強磁性体の磁気緩和変調」

強磁性体中の磁化が集団的に励起すると、スピン波と呼ばれる磁化歳差による波を形成します。この スピン波を量子化した準粒子をマグノンと呼びます。マグノンを制御し工学応用を目指す分野はマグノ ニクスと呼ばれ、電子スピンを制御するスピントロニクスから派生した分野です。マグノンは電荷の輸 送を伴わず数 mm の角運動量の伝搬が可能という優れた伝搬特性や、フォトンやフォノンといった他の 量子系との結合性を有しており、マグノンの豊富な物理を用いた様々なデバイス開発が期待されます。 そうしたマグノンデバイスの機能を決定する上で重要なマグノンの性質は、分散関係とマグノンの緩和 量です。これらの物性の制御は、マグノン素子としての幅広い機能の実現に繋がり、マグノンデバイス を実用に向けた重要なステップに押し上げることが期待されています。特にマグノン緩和量は、マグノ ンの伝搬長やマグノンによって構成された結合系の状態を決定する上で不可欠なパラメーターであり、 その制御はマグノニクス分野における重要な研究対象です。

我々の研究室では、数nm程度の超薄膜金属に強電界印加することにより、本来材料によって固有で あると考えられている物性変調の実現を目指しています。CoやFeを使った超薄膜強磁性体においても、 強電界を印加することで磁性が変調されることも報告されています。したがって超薄膜CoやFe、その 合金におけるマグノン励起は、電界ゲート変調実現可能性を大きく向上させ、マグノンデバイスへのさ らなる応用が期待できます。しかし超薄膜強磁性体でのマグノン励起で大きな障害となるのが、超薄膜 領域におけるマグノン緩和の増大です。通常、界面における有限波数のマグノンへの遷移によって起こ る2-マグノン散乱は、数十nm程度の厚膜の強磁性体では無視できるのに対し、数nm程度の膜厚では 急激に増加し無視できなくなり支配的になります。我々の研究室では、2マグノン散乱の大きさが界面 磁気異方性に依存することに着目し、強磁性体の隣接層の制御による超薄膜強磁性体のマグノン緩和の

変調手法を研究しました。図の(a)に用意した試料とマグノン 緩和評価のための強磁性共鳴の測定セットアップを示します。 この研究においては、CoFe 合金と MgO キャップの界面磁気異 方性をキャップの膜厚で制御し、2-マグノン散乱を変調する手 法を実現させました。図(b)が界面磁気異方性と2-マグノン 散乱の大きさの相関図を示していますが、理論に則った非常強 い正の相関が確認され、界面磁気異方性の制御により超薄膜 CoFe においてマグノン緩和が制御可能であることを示していま す。この手法はある特定の強磁性体に限定される手法ではなく、 全て強磁性体に適用できると期待でき非常に汎用的な設計原理 を示しています。すでに磁性分野において界面磁気異方性の制 御手法の研究は、活発に行われており、そうした知見も将来的 に超薄膜強磁性体におけるマグノン研究に用いられ、電界ゲー ト可能なマグノン研究が加速することを期待しています。

参考文献: Shugo Yoshii *et al.*, "Significant suppression of twomagnon scattering in ultrathin Co by controlling the surface magnetic anisotropy at the Co/nonmagnet interfaces" Phys. Rev. B 106 (17), 174414 (2022).

Shugo Yoshii *et al.*, "Significant modulation of Gilbert damping in ultrathin ferromagnetic films by altering surface magnetic anisotropy" Phys. Rev. B 109 (2) L020406 (2024).



図:(a) FMR 測定のセットアップ とサンプルのスタック構造。(b) 2-マグノン散乱と界面磁気異方性の相 関図。

# 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/

「フラッシュ照射光源とビーム走査光源を搭載した新たな非機械式3次元 LiDAR の開発」

Light detection and ranging(LiDAR)システムは、ロボットの自動走行、車の自動運転、ドローン の自動操縦等に必要不可欠である。なかでも、フラッシュ照射光源と測距カメラを用いたフラッシュ型 LiDAR は、非機械式で3次元測距を可能にするシステムとして期待されている。しかしながら、これ までのフラッシュ型 LiDAR においては、フラッシュ光源で広範囲を一括に照射するため、照射パワー 密度が低く、測定範囲(Field of View: FoV)に低反射物体が含まれる場合に、その物体からの反射光 が弱くなり、測距が困難であるという、根本的な課題を抱えていた。また、このような LiDAR 用のフラッ シュ光源としては、垂直共振器型面発光レーザー(VCSEL)アレイと外部光学素子を組み合わせたも の等が用いられているが、システムの小型化に限界がある状況である。そこで、我々は、上記のような 課題が解決できる新たな小型 LiDAR システムの開発に取り組んで来た[1]。新たな LiDAR システムでは、 フラッシュ光源に加えて、ビーム走査光源も備えることで、低反射物体が FoV 内に含まれる場合に、 それをビーム走査光源で十分なパワー密度でスポット照射し、測距を可能にするものである。本稿では、 開発した新たな小型 LiDAR システムについて紹介する。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。

開発した小型 LiDAR システムを図1(a)に 示す。本システムの上 部に、外部光学素子等 を使わずにオンチップ で広範囲フラッシュ照 射およびビーム走査が 可能な変調フォトニッ ク結晶レーザー (PCSEL) [2] を設けて いる。左側に 30°× 30° の範囲を照射出来るフ ラッシュ光源を設けて おり、右側に 30°× 30° 範囲を3°毎にスポット 照射が出来る10×10 素子から成るビーム走 査光源を設けている。 LiDAR システムの下



Fig.1 (a) : Photograph of the developed non-mechanical 3D LiDAR system implementing PCSEL-based wide-range flash illumination and beamscanning laser sources. (b): Camera image of evaluation targets. (c): Distance measurements obtained by the LiDAR system using only the flash illumination. (d): Distance measurements achieved by the LiDAR system with flash and beam-scanning illumination.

部には測距カメラユニットを設置している。PCSEL、駆動回路や FPGA 等を含む制御系も全てが本シ ステムに内蔵しており、そのフットプリントは、名刺サイズ以下の超小型になっている。開発した LiDAR システムの評価のために、図1(b)に示すように、FoV内に、高反射率の白い物体(反射率 ~98%)と低反射率の黒い物体(反射率~2%)を配置して、測距実験を行った。まず、フラッシュ照射 のみで、測距を行った結果を図1(c)に示す。同図より、高反射物体は測距出来ているのに対して、低 反射物体の距離は測定出来ていないことが分かる。次に、ビーム走査光源で、2つの低反射物体を同時 にスポット照射して測距を行った結果を図1(d)に示す。同図より、スポット照射によって、フラッシュ 照射のみでは測距出来なかった低反射物体の測距が出来ていることが見て取れる。さらに、本システム では、画像認識により、自動的にFoV内の低反射物体を検知し、ビーム走査光源を用いてスポット照 射することによる全自動測距や、物体の軌跡の計測等も可能である。現在、測距カメラを高感度化する ことで、より長距離測距への展開等を行っている。

参考文献 [1] M. De Zoysa, R. Sakata, K. Ishizaki, T. Inoue, M. Yoshida, J. Gelleta, Y. Mineyama, T. Akahori, S. Aoyama, and S. Noda, *Optica*, **10**, 264 (2023). [2] R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, K. Kitamura, T. Inoue, J. Gelleta, and S. Noda, *Applied Physics Letters -Perspective-*, **122**, 130503 (2023).

## 知能メディア講座 言語メディア分野 https://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/ Reformulating Domain Adaptation of Large Language Models as Adapt-Retrieve-Revise

While large language models (LLMs) like GPT-4 have recently demonstrated astonishing capabilities in general domain tasks, they often generate content containing false information (also known as hallucination) in specific domains such as law and medicine, hindering the application to real-world scenarios. This is because LLMs are trained primarily on web crawled text, while domain-specific data is usually located in specialized systems and cannot be directly accessed. Even when domain data is eventually collected, a **pressing challenge** is that **it is not feasible to continually train an LLM with GPT-4's scale**.



Figure 1. Overview of the Adapt-Retrieve-Revise pipeline for Chinese legal domain QA, which requires LLMs to generate the corresponding legal provision and the rationale for the judgment, given a brief case description as the query.

We propose a simple yet effective **adapt-retrieve-revise** approach (Figure 1) for adapting GPT-4 generation to Chinese legal domain QA. The initial step is to **adapt an affordable small 7B LLM** to the target domain by continually training it on newly collected domain data. When solving a task query, we leverage the small domain LLM to generate a draft answer. The draft answer is then used to **retrieve multiple pieces of supporting evidence** from an external in-domain knowledge base. Finally, the draft answer and evidence candidates are concatenated into one whole prompt to let GPT-4 **assess the correctness of evidence** and **revise the draft answer** to generate the final answer. Our approach combines the advantages of the efficiency of adapting a small domain model with the evidence-assessing and revision capability of GPT-4, effectively preventing GPT-4 from generating hallucinatory content.

[1] Wan Zhen, Yating Zhang, Yexiang Wang, Fei Cheng, Sadao Kurohashi. Reformulating Domain Adaptation of Large Language Models as Adapt-Retrieve-Revise: A Case Study on Chinese Legal Domain. In Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2024.

### 集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (橋本研究室) https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ 磁化電流の近似計算の実現にたる京連めの磁性体配置物にロバストな磁界式位置推定

磁化電流の近似計算の実現による高速かつ磁性体配置物にロバストな磁界式位置推定

私たちの身の回りのあらゆる「モノ」をインターネットに接続し、様々な情報を包括的に収集するこ とで、我々の生活環境の改善を図る Internet of Things(IoT,モノのインターネット)技術は私たちの 生活を支えるインフラ技術の一部となりつつあります。近年の半導体技術の向上に伴って、数多くの小 型センサや高性能センサが生み出されつつあり、従来よりも高精度かつ広範な情報の取得が可能になっ てきています。そうしたセンサが取得した情報は、センサの位置情報と結び付けられることで真価を発 揮しますが、センサが設置される屋内で位置推定を行う技術は、現在発展途上にあります。

従来、屋内におけるセンサの位置推定は、図1左図に示すような3点測量によって行われてきました。 3点測量には、複数の基地局を正確に設置せねばならず、設置コストや運用コストが高いという課題が あります。本研究では、図1右図に示すように、単一の基地局コイルが生成する磁界の「強度」と「方向」 の両方の情報を使うことで、センサと基地局の「距離」と「方角関係」を導出します。導出した距離情 報と方角情報の両方を利用することで、単一基地局による位置推定を実現しました。

磁界を位置推定に利用すると、鉄などの強磁性体を使用した機材等によって、位置推定精度が低下す るという課題があります。磁性体が磁界を歪めてしまうためです。図2(a)は原点に設置したコイルが 生成する磁界の強度をヒートマップで、磁界の方向を矢印で示しています。図2(b)は(a)の環境の(y, z) = (100, 100) [mm]の位置に一辺が50mmの立方体状の磁性体を置いたものです。図2の(a)と(b) を比較すると、磁性体付近で磁界の向きや強度が大きく変化しており、位置推定精度を悪化させること が分かります。従来、磁性体が磁界に与える影響を解析するには膨大な計算コストがかかり、高速かつ 高精度な磁界式位置推定は困難でした。そこで本研究では図3に示すように、磁性体が磁界の歪みを生 み出す原因となる「磁化ベクトル」と呼ばれる要素を、磁性体表面に流れる電流で近似して、位置推定 に活かす方法を実現しました。図4は実際の位置推定結果を示しています。従来手法では磁性体周辺で 位置推定精度が大きく悪化する一方で、提案手法は磁性体の近傍であっても、0.1 秒以下の時間で高精 度な位置推定を行うことができている様子がわかります。







図 3: 磁性体が磁界を歪める要因となる「磁化ベクト ル」を等価な電流で近似する様子







## 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/ 「認知アーキテクチャを用いた知的集中状態変化のメカニズム解明|

オフィス等室内で行われる知的労働の効率、知的生産性を向上させることに関心が集まっている。知 的生産性に関する研究の一環として、執務環境を制御し知的労働に対する知的集中を向上させることで 知的生産性が向上することが分かっている。しかし、知的集中状態が何を要因として変化しているのか は明らかにされておらず、執務環境と知的集中の関係を厳密に議論できていない。そこで、この研究では、 情報処理の観点から知能の性質を扱う認知神経科学の分野で用いられる認知アーキテクチャを使用し、 知的集中状態変化のメカニズム解明を試みている。なかでも人間の反応や脳の活性化パターンを予測し 人の認知と知的集中の関係を調べることができる ACT-R を用いている。ACT-R は、過去の多くの心理 学実験から得られる理論や認知神経科学の知見をベースに作成された認知アーキテクチャであり、下図 に示すように、人間の脳を複数のモジュールとみなし、それぞれのモジュールが並列に動作し情報を取 得及び保存するよう設計されている。プロダクションモジュールは、人間の脳の大脳基底核に相当し、 各モジュール間の相互作用を媒介する役割を持ち、各モジュールへの命令や各モジュールの状態に依存 する一連の処理(手続き)をルールとして記述し格納することができる。その他の各モジュールは人間 の大脳皮質の部位とそれぞれ対応する機能に相当する。外部環境との情報の入出力や知識の保存などが 記号として表現され、それらはプロダクションモジュールによる監視や照合のために使われる。各モ ジュールで処理する際にはシミュレーションパラメータによって処理の進行パターンを変えたり、処理 に必要な時間的コストを変化させたりすることができる。認知プロセスを仮定しパラメータを適切に設 定することで、人間の認知行動そのものやその認知行動にかかる時間を再現することができる。

この研究では、まず認知課題を設計し知的集中状態変化を伴う認知行動を計測する実験を実施し、次 に、ACT-R を用いて計測結果のうち知的集中状態変化が表れている認知行動時間のばらつきを精緻に 再現するシミュレーションモデルを構築する。さらに、認知神経科学の観点から構築したシミュレーショ ンモデルが持つモデル構造やパラメータを解釈し、知的集中状態変化のメカニズムを解明することを試 みる。実験では、25名の参加者を対象に、モチベーションを変化させることで知的集中状態変化を促し、 認知行動として認知課題の解答時間と解答中の視線移動推移を計測した。シミュレーションモデルの構 築では、認知課題の解答に必要な認知プロセスに加え、認知プロセス進行を短時間一時的に停止させる 中断状態を確率分布に従い介入させることで、シミュレーション結果による計測結果の再現精度を向上 させた。また、計測結果を基に多目的遺伝的アルゴリズムを用いて最適化することでパラメータを調整 した。結果として、知的集中状態変化は、認知的機能に刺激を与える抑制性ニューロン数の変化により 生じる可能性を示唆した。現在、モデル構築方法および提案したメカニズムの妥当性を評価し、執務環 境における知的集中状態変化のメカニズムについて検討している。



図. ACT-R の構成

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/

「Cu テープ上に導電性酸化物をバッファ層としてエピ成長させて作製する高温超伝導線材」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、 強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置(MRI)、リニア中央新幹線、核 磁気共鳴装置(NMR)、粒子加速器、核融合炉などの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる1群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に 浸漬して冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、これを用いた電線(超伝導線材)を実用化で きれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導 線材の使用が広がることが確実視されています。また、核融合発電装置のプラズマ閉じ込め用マグネッ トに使用することで小型化・低コスト化が実現できたり、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、 それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球 上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります(GENESIS 計画:<u>G</u>lobal <u>Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1])。</u>

我々は半導体製造分野で発展させられてきた薄膜成長技術(エピタキシャル成長技術)と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に向いた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数 km の長さに渡って単結晶のように揃える(3 軸結晶配向)新技術の開発に成功しています [2]。具体的には圧延と加熱によって3 軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ

層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体 (YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>)をエピタキシャル成長させた高温超伝導線 材の開発に成功しました。このようにして単結晶的に結 晶方位を揃えた高温超伝導層を電気抵抗ゼロで流れる電 流の電流密度は液体窒素中(77 K)で30,000 A/mm<sup>2</sup>以 上に達しています。最近では、高性能を維持しながら劇 的な低コスト化を達成するために貴金属である Agを不 使用とした新規構造(図1)の開発に成功し[3]、現在、 実用化に向けて開発に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は様々なエネルギー デバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めて います。現在、全固体薄膜電池、燃料電池などへの応用 も研究中です。



図1 開発中の高温超伝導線材の概略構造

#### 参考文献

- [1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. 8 (2000) 53-60.
- [2] 土井俊哉、堀井滋、" 金属系および高温超電導線材の高性能化",応用物理,第85巻,2015,pp.419-422.
- [3] T. Doi et al., "High critical current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> coating on conductive Nb-doped SrTiO<sub>3</sub> and Ni double-buffered {100}(001) textured pure Cu tape for low-cost coated conductors without generation of any insulative oxides at interfaces", Applied Physics Express **12** (2019) 023010.

## エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野 https://dpe.energy.kyoto-u.ac.jp/ イオンビームアシスト成膜法を用いた高性能電池材料の開発

近年、携帯デバイスの小型化が進んでいるが、充電なしで長期動作が求められる医療用ウェアラブル デバイスや、環境測定用センサーなどの超小型 IoT デバイスへの応用を進めるためには、さらに小型で 軽量かつ柔軟性の高い高性能な薄膜型電池が期待されている。そのような薄膜電池の高性能化には、低 コスト、高容量かつポリマーなどの低融点の基板でも成膜可能な正極活物質の開発が鍵を握っている。

我々は、上記のような特徴を持つ新規な電池正極材料の合成手法として、イオンビームアシスト成膜 (IBAD)に注目している。IBADは、成長中の薄膜にArなどのイオンビームを照射しながら成膜を行 う手法であり、他の合成手法にはない特徴を有している。一つは、加速したイオンの運動エネルギーが 物質の結晶化エネルギーに転換されるため、薄膜の成長温度を下げることが可能である点である。さら に、イオンの照射方向に依存した、特定の配向が優先的に成長することが報告されている。本手法によ り薄膜の配向や特定の原子の欠陥密度などを制御することにより、低温合成が可能かつイオン伝導度の 高い物質が作製できる可能性があると我々は考えており、新規な正極材料や固体電解質の探索手法とし ての有用性を検証している。

今回我々は、ベースの成膜法としてパルスレーザー蒸着(PLD)を用いた IBADを用いて、Li イオ ン電池の典型的な正極材料である LiCoO<sub>2</sub> (LCO)薄膜をヒーター加熱なしで作製し、その組成、構造お よび Li イオン電池の正極としての特性を評価した。その結果、IBAD によって作製した LCO 薄膜の構 造は通常 Li イオン電池正極に用いられる層状岩塩型ではなく、Li と Co がランダムに岩塩構造のカチオ ンサイトを占有する無秩序岩塩型構造(DRS)であることが分かった。図(a)は IBADを用いた場合 と用いなかった場合の DSR-LCO のインピーダンス測定の結果である。通常、DRS-LCO は Li イオンの 伝導度が小さく、正極に適していないと考えられているが、IBAD を用いることによりイオン拡散領域 のインピーダンスが減少していることを示している。さらに図(b)は膜厚が約 80 nm と非常に薄い LCO 薄膜を正極とした Li イオン電池の充放電特性であるが、放電容量が約約 150 mAhg<sup>1</sup>と層状岩塩 構造を超える容量を示した。インピーダンスの減少および容量増加の詳細なメカニズムはまだ明らかに なっておらず、膜厚を増加させると容量が低下するなど、現状ではまだ課題も多くあるが、これらの結 果は、IBAD が、従来電池材料として十分な性能を持たない電極や固体電解質の特性向上に有効である 可能性を示している。



図 AI 基板上に作製した LCO 薄膜正極とし、金属 Li を負極としたコインセル型 Li イオン電池の(a) インピーダンス測定および(b)充放電試験結果。

## エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野(稲垣研) https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/ 「核融合プラズマの自励振動現象」

エネルギーが外部から継続的に与えられている非平衡な系では様々な非線形現象が観測される。外部 入力は非振動的(多くの場合一定)であるにも関わらず、系の特性によって振動が生じる。(似たよう な現象に共鳴があるが、外部入力が非振動的である点が異なる。)核融合プラズマは外部からのエネル ギー注入により維持されている非平衡系である。核融合プラズマでも自励振動が観測されている。自ら の核融合反応で維持されている自律燃焼プラズマの場合、プラズマの温度や密度が振動すると反応出力 も振動する。するとプラズマの振動に正あるいは負のフィードバックがかかる。正のフィードバックが かかるとプラズマが壊れてしまう。このため自励振動のメカニズムの理解は重要である。

ヘリオトロン J の低密度プラズマにおいて自励振動が観測されている。自励振動のメカニズムの一つ に捕食者―非捕食者モデルがある。これを微分方程式で表したものが以下のロトカ・ボルテラ方程式で ある [1]

$$\frac{dx}{dt} = ax - bxy, \quad \frac{dy}{dt} = -cy + dxy$$

ここで x として平均密度 n<sub>e</sub>、 y として磁場揺らぎ強度 B<sub>tor</sub> (env) を選出した。磁場揺らぎ強度では低周 波成分 (<500 Hz) をローパスフィルタで抜き出し、envelope を計算している。このロトカ・ボルテラ モデリングの結果を図1に示す。モデルは観測をよく説明できる。ここでは平均密度が非捕食者であり、 磁場揺動が捕食者である。平均密度は周辺の密度勾配のインデックスと考えると、周辺の密度勾配の上 昇により磁場揺らぎが成長し、揺らぎが駆動する輸送により密度勾配が減少し、磁場揺らぎも減少する。 そして輸送が改善したことから再び周辺密度勾配が大きくなる [2]。このような時間遅れのある相互作 用が周期性を生み出していると推定される。また、モデルから得られたパラメータの値から振動の周期 は (閉じ込め時間×乱流減衰率)<sup>12</sup>程度となる事が明らかになった。

ロトカ・ボルテラ方程式ではわずかな実験条件の違いにより自励振動が生じたり、生じなかったりす る特徴を再現することはできないため、ロジスティク性による飽和特性を導入しモデルを拡張している。 密度の上昇はある程度で飽和する、密度勾配が大きくなっても磁場揺動の成長は飽和する、という効果 を考慮した結果、方程式の係数の一つの値が変わることでリミットサイクル振動する解と、振動が減衰 し定常状態になる解に分岐する事を示す事ができた。しかし、自励振動が生じない場合のモデルと観測 を一致させるようなパラメータセットは未だ得られていない。特に振動の減衰過程が観測では明らかに なっていない。このため更なる観測とモデルの改善に取り組んでいる。



- [1] Berryman, A. A. Ecology **73** (1992) 1530.
- [2] Yagi, M. Nucl. Fusion **39** (1999) 1013.

## エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野(松田研) http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/ 「二次元半導体人エヘテロ構造でのモアレ励起子による量子光学」

近年、単層遷移金属ダイカルコゲナイド(MX<sub>2</sub>:M=Mo, W; X=S, Se)などに代表される、わずか原子 数層の極めて薄い厚みを有す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。この二次元半導体を光励起すると電子とホール対が生成され、それらがクーロン力で互いに強く束 縛し水素原子様の励起子を形成する。この極めて薄い二次元半導体に閉じ込められた励起子は、その量 子閉じ込めと誘電遮蔽効果によって安定に存在し、二次元半導体の特異な光学的性質を担っている。そ の一方で、このような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、モアレ の物理と呼ばれる新たな物理現象が発現することが明らかになりつつある。周期的な原子配列に起因す るモアレ長周期構造によって、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、これが面内で の量子閉じ込めポテンシャルとして機能する。そのため、原子数層の厚みとこのモアレポテンシャルに よる量子閉じ込めによって、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。我々は、この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量子光学に向けた研究を進めている[1-5]。

ここでは実際に、WSe<sub>2</sub>/MoSe<sub>2</sub>(二セレン化タングステン/ニセレン化モリブデン)からなる二次元 半導体人工ヘテロ構造について、このモアレ励起子を利用した量子光学に向けた研究例を紹介する[5]。 実験では、二次元半導体人工ヘテロ構造に微細加工を施しモアレポテンシャル数を制限することで、光 の回折限界の制限下で単一モアレ励起子からの非常にシャープな発光信号を観測することに成功した。 さらに図1(a)に示すように単一のモアレポテンシャルからの発光を分割しその間の干渉信号であるイ ンターフェログラムを測定した結果を示す。このインターフェログラムの信号の減衰は、単一のモアレ 励起子の量子力学的なデコ

ヒーレンス時間を反映して いる。この結果から、モア レ励起子の量子コヒーレン ス時間は、10ピコ秒以上の 時間であり、確かに0次元 系特有の量子二準位系とし て振る舞っていることが明 らから、周期的に配列した バレースピン自由度を有す る来の量子光学に向けた更 なる研究進展が期待される。



図 1 (a) 二次元半導体ヘテロ構造のモアレ励起子の発光信号インター フェログラム、(b) モアレ励起子による本研究のイメージ

#### 参考文献

- 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] K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, ACS Nano 16, 16862 (2022).
- [4] H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, ACS Nano 17, 13715 (2023).
- [5] H. Wang, H. Kim, D. Dong, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, Nat. Commun. 15, 4905 (2024).

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野(橋口研究室) http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi\_lab/ 「機動的な車載複合ライダーによる大気微量成分の3次元センシング」

大気中には、様々な微量成分物質が存在しています。各成分の構成割合は場所や高さにより異なり、 とりわけ発生源に近い地表面付近では、燃焼活動などから排出された人為起源物質と、植生活動、土埃、 波飛沫等から放出された自然起源物質が混在しています。これら微量成分の複雑な拡散・輸送・変質・ 沈着過程は、PM<sub>25</sub>に代表される大気エアロゾル濃度予測や気候影響評価の際の不確実性の要因の一つ であり、その動態の正確な理解は、健康や植物の成長などに関与する生活に密接した重要な課題となっ ています。

当研究室では、光・電波・音波を用いた大気リモートセンシング技術の開発に取り組んでいます。そのうち、光学計測では、大気微量成分や水蒸気・気温の鉛直分布を計測する大気ライダー手法の高度化 を行ってきました。大気ライダーは、レーザと集光・検出器で構成された自動運転に用いられている距 離計としてのLiDAR (Light Detection And Ranging)と基本原理は同じですが、大気からの微量な散 乱光を検知し、かつ成分や形状を区別して計測する必要があるため、送信レーザの出力や波長、受光系

の分光・検出部が異なります。また、集光 効率を高めるため、受信には口径の大きい 望遠鏡(約100 mm ~ 800 mmø)を用いる 必要があります。口径が大きくなるほど、 受信視野と送信ビームの視野重なりの関係 から近傍の計測ができなくなりますが、新 たに考案したウェッジプリズム光学系によ り近傍の可測領域を約100 mから7 mにま で近づけることができました。このライダー を小型・小電力化、さらにレーザのアイセー フ化に対応して車に登載することで、地上 付近からの大気成分立体観測が可能となり ました。

高層ビル街に囲まれた東京都心での車載 ライダーによる大気エアロゾル移動観測で は、大気汚染物質を多く含む安定した夜間 の都市境界層が日射や海陸風によって解消 されていく様子を立体的に捉えることがで きました。また、地上定点観測と衛星リモー トセンシング観測との空間ギャップを埋め る移動計測を、海上橋や山岳域等で実施し てきました。この車載ライダーは、水平移 動観測にも対応しています。最近では、そ の機動性を生かして水田や畑などの圃場直 上の気象・大気環境や飛翔性昆虫をモニター する、スマート農業用環境センサへの応用 に向けた取り組を行っています。



図1 大気ライダー用ウェッジ プリズム光学系。観測視野方向 が異なる複数のウェッジプリズ ムを組み合わせることで、信号 飽和を抑えながら近傍からの計 測を可能としている。



図 2 車載ライダーによる東京都心・湾岸地域の夜間都 市境界層の観測例(2022/12/24 3:58-5:28 JST, 消散係 数波長 355 nm)



図3 山谷風の影響を受ける富士山麓周辺の山岳大気観 測例(2023/7/18 21:30-23:30 JST, 消散係数波長 355 nm)

## 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (海老原研究室) https://space.rish.kyoto-u.ac.jp/ebihara-lab/ 計算機シミュレーションによる放射線帯粒子の変動が地球磁気圏に与える影響

地球周辺の宇宙空間には、放射線帯と呼ばれる高エネルギー粒子が集まっている領域があります。高エ ネルギー電子は宇宙飛行士の被ばくや、地球を周回する人工衛星、国際宇宙ステーションなどの宇宙機 の表面帯電や内部帯電を引き起こすことがあり、電子のエネルギー分布とその時空間発展を理解し、予 測することは重要です。電磁サイクロトロン波は放射線帯電子と容易に相互作用することができ、数秒 という短い時間で電子を効率的に加速し、また電子の進行方向(ピッチ角)を変えることができます。 そのため、電磁サイクロトロン波との相互作用は放射線帯の生成と放射線帯電子が大気へ降り込む(オー ロラの発生原因の一つ)メカニズムの一つと考えられています。計算機シミュレーションを用い、電子 と電磁波動との相互作用についてマクロ過程とミクロ過程の連関の観点から研究を進めており、安心・ 安全な宇宙環境の利用に貢献したいと考えています。

### 放射線帯の生成について

放射線帯内における荷電粒子の局所的な加速効率を研究しています。非線形理論と人工衛星観測データ を用い、異なる振幅や伝搬角を持つ電磁サイクロトロン波のモデルを構築し、テスト粒子シミュレーショ ンを実施し、非線形波動粒子相互作用の効果を含む数値グリーン関数のデータベースを作成しました。 このデータベースでは、電磁サイクロトロン波による 10 keV から6 MeV までのエネルギーを持つ電子 の加速効率がテーブル化されており、グリーン関数の畳み込み積分を繰り返し実行することにより長時 間にわたる共鳴電子の加速やピッチ角散乱の変動を再現することができます [1]。理論的に求めた電子 のピッチ角の時間変化と、数値グリーン関数の結果と比較することで、各共鳴がもたらす電子ピッチ角 散乱過程と、波の振幅・伝搬角・周波数・周波数変化率・背景磁場強度の空間勾配などのパラメータ依 存性を解明することに成功しました (図1)。keV帯の電子を MeV レベルの放射線帯電子まで加速する のに必要な時間は、わずか数分であることが分かりました。

#### 放射線帯電子の大気への降下について

電磁サイクロトロン波によって超高層大気へ降下する電子の軌道を再現し、降下電子フラックスの波動 の振幅および伝搬角に対する依存性を明らかにしました。背景磁場に対して斜めに伝搬する波動の場合 の方が、平行伝搬する波動の場合と比べて多くの MeV 電子を降下させることが判明し、斜め伝搬電磁 波による多重共鳴に起因した二段階のピッチ角散乱が引き起こす電子降下プロセスを提案しました [2]。 広い範囲の伝搬角を持つ電磁波により、数十 keV から数百 keV までの磁気圏電子が電離層に急降下す るメカニズムが明らかになりました。

- [1] Y.-K. Hsieh et al., Nonlinear evolution of radiation belt electron fluxes interacting with oblique whistler mode chorus emissions. *JGR: Space Physics* **125**.2, e2019JA027465 (2020).
- [2] Y.-K. Hsieh et al., Energetic electron precipitation induced by oblique whistler mode chorus emissions. *JGR: Space Physics* **127**.1, e2021JA029583 (2022).



図 1. 非線形トラップ電子のピッチ角散乱と電子加速の関係