

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

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

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電磁環境探査分野 (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)

システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

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

一般的な確率的動特性をもつ離散時間システムの制御

システムの動特性を表現するモデルとして、次の離散時間状態方程式がしばしば用いられる。

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k$$

ただし、 k は離散時間を、 x_k と u_k は一般に多次元の状態ベクトルと入力ベクトルを表す。係数行列 A_k と B_k により、システムの状態がどう遷移するかが決定される。多くの場合、これらの係数行列は確定的であるとみなしてさまざまな議論が展開される。一方当研究室では、これらが行列値確率過程で与えられる状況、つまり動特性が確率的である状況を想定した制御理論の研究を、テーマの1つとして遂行している。そのような研究の成果として、ここでは主に文献[1]を紹介する。

文献[1]では、安定性（より正確には2次モーメント安定性）を定義する上で必要となる最小限の仮定を除き、係数行列 A_k 、 B_k に一切の仮定を置かないという最も一般的な状況下で、システムの安定性を必要十分の意味で特徴づけるリアプノフ不等式等の導出に成功している。制御理論分野では従来、有限モードマルコフ連鎖で決まるもののように、取り扱いの容易なある特定のクラスの係数行列に議論を限定した研究が行われており、成果が活用できるためにはシステム（の係数行列）が適切な仮定を満たしている必要があった。これは裏を返すと、適切な仮定を満たさないシステムを扱う場合には成果を活用する術がないことを意味し、制御理論側の立場からニーズファーストでさまざまな実問題の解決に貢献することが難しいという課題があった。この課題を安定化制御に関して解決したのが文献[1]である。その文献では最も一般的な状況を想定して制御理論を構築しており、少なくとも理論上は、どのような確率的動特性をもつシステムであっても、対応する安定条件をその成果より得ることができる。既存研究と同様の仮定を係数行列に課す場合には、得られる安定条件はすでに知られた結果に一致する。また、そのような既存のものに限らず、いかなる仮定であっても扱うことが可能なため、ニーズファーストで新たなクラスの係数行列を想定して、システムの安定性を議論することも可能である。

上記成果の活用が期待される分野の1つとして、当研究室ではインターネットを用いた遠隔制御に注目している（図1）。遠隔地からインターネットを介して制御対象を制御するとき、インターネット部分で生じる通信遅延の影響が避けられない。とくにフィードバック形式の遠隔制御では、制御対象と制御器がごく短い時間間隔で互いに信号の送信を繰り返すことになるが、このとき通信遅延は送信の試行毎にランダムにばらついてしまう。遠隔制御においてこのばらつきを考慮できるようにすることは重要な課題の1つである。文献[2]では、ある簡単なクラスの確率過程を通信遅延のモデルとして想定することで、確率制御理論によりそのようなばらつきの考慮を可能にしている。また、この成果はさらに、文献[3]にて自動車の遠隔型自動運転に応用されている。文献[1]の成果を活用すれば、より高度な通信遅延モデルも扱うことが可能であり、このような遠隔制御方式の発展への寄与が期待される。



図1 インターネットを介した遠隔制御

[1] Y. Hosoe and T. Hagiwara, On second-moment stability of discrete-time linear systems with general stochastic dynamics, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 67, No. 2, pp. 795–809, 2022.

[2] Y. Hosoe, Stochastic aperiodic control of networked systems with i.i.d. time-varying communication delays, Proc. 61st IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3562–3567, 2022.

[3] S. Kameoka and Y. Hosoe, Remote control of vehicles in a random communication delay environment and experimental results, Proc. 10th IFAC Symposium on Robust Control Design, pp. 214–217, 2022.

生体医工学講座 複合システム分野 (土居研究室)

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

「並列スタック積み込み問題に関する研究」

港湾や貨物駅のコンテナヤードでは、コンテナを積み上げて一時保管します。また、製鋼工程における半製品であるスラブ（板状の鉄）も、スラブヤードに保管する際は何段にも積み重ねます。コンテナヤードやスラブヤードでは、荷物（コンテナ・スラブ）の垂直方向一列分をスタックと呼びます。各スタックへの積み込み・取り出しは上側からしか行えないため、一番上に積まれた荷物以外を取り出すには、その上に積まれた荷物を別の場所に積み替える必要があります。しかし、荷物をスタックに積み込む際に将来の取り出しも考慮して積み込み先を決定すれば、このような積み替えを減らせると考えられます。

並列スタック積み込み問題（parallel stack loading problem）は、荷物の積み込み・取り出しにおける積み替え作業の低減化を目的として、上述の状況を一般化した問題です。この問題の目的は、並列された複数のスタックにアイテムを到着順に積み込むものとして、取り出し時の積み替えの手間が最小になる積み込み計画を求めことです。図1に、アイテム数10、スタック数3、スタック容量4の例を示します。箱内右上の番号が到着順（アイテム番号）を、中心の番号が取り出し順を表しています。

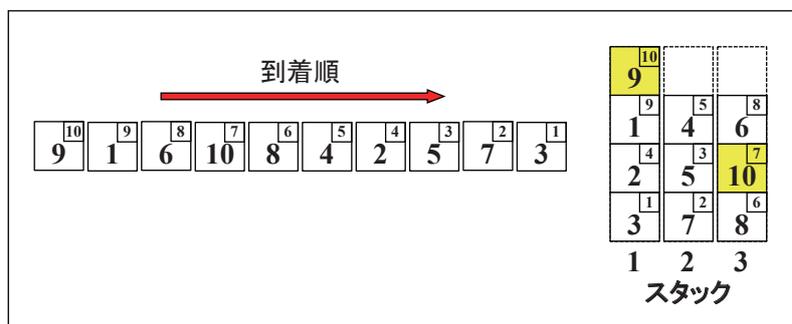


図1：並列スタック積み込み問題の例（アイテム数10、スタック数3、スタック容量4）

この問題を最適化問題として扱うには、各積み込み計画に対して積み替えの手間を評価しなければなりません。積み替え専用のスペースを確保できなければ、邪魔なアイテムは他のスタックへ積み替えることとなります。そうすると、そのスタックから別のアイテムを取り出す際、また積み替えが発生してしまいます。図1の例では、スタック1の3段目に積まれたアイテム9を取り出すために、その上に積まれたアイテム10をスタック3に積み替えると、アイテム8を取り出す際にアイテム10をもう一度積み替えることとなります。積み替えの手間を総積み替え回数で評価するのが自然と思われそうですが、このように総積み替え回数は積み替え手順に依存するため、扱いが煩雑となります。実際、与えられた積み込み計画に対して最小の積み替え回数でアイテムを取り出す問題は、ブロック積み替え問題と呼ばれるNP困難な組合せ最適化問題です。このため、並列スタック積み込み問題に対する従来研究では、より簡単に計算できる評価指標を最適化していました。そのような評価指標の一つに、「必ず1回は積み替えなければならないアイテムの総数」（図1ではアイテム7とアイテム10の2つ）があります。この指標の最小化を目的としたスタック積み替え問題も、残念ながら一般にNP困難なのですが、我々は、スタックの容量に制限がなければ多項式時間で解けることを示しました[1]。具体的には、この問題を多項式時間で求解可能な別の問題—到着したアイテムの一部のみを積み替えなしに取り出せるよう積み込むものとして、積み込むアイテム数を最大化する問題—に帰着できることを示しました。また、総積み替え回数を評価指標とした問題も研究しています[2]。この問題を解くには、積み込み計画と積み替え手順の両方の最適化が必要となります。そこで、おのおのを別の分枝限定法で解く2段階の解法を構成して、他の評価指標を最適化した場合と比較しました。その結果、総積み替え回数を最適化した場合と、その他の評価指標を最適化した場合とで、得られる積み込み計画に大きな隔たりがあることがわかりました。

[1] S. Tanaka and S. Boge: Polynomial-time algorithm for the parallel stack loading problem with unlimited stack capacity, スケジューリング・シンポジウム 2022, pp. 26-31 (2022)

[2] S. Tanaka, M. ElWakil, M. Gheith, and A. Eltawil, Exact minimization of the number of relocations in the parallel stack loading problem, 投稿中

生体医工学講座 生体機能工学分野

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

「超高感度な小型光ポンピング磁気センサモジュールと生体磁気計測」

光ポンピング磁気センサ (Optically Pumped Magnetometer: OPM) は、液体ヘリウムなどの冷媒を必要とせず、pT から fT 程度の極微弱な磁場を検出可能な磁気センサである。アルカリ金属原子のガスにレーザー光を照射することで、 $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ を切るような超高感度が実現されている。近年、ヘリウムの流通が滞っていることから、超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device: SQUID) を用いた高感度な磁気センサの利用が難しくなっていることもあり、OPM は磁気計測、特に脳磁界計測 (Magnetoencephalography: MEG) や心磁計測 (Magnetocardiography: MCG) などの生体磁気計測の分野で非常に注目されている。

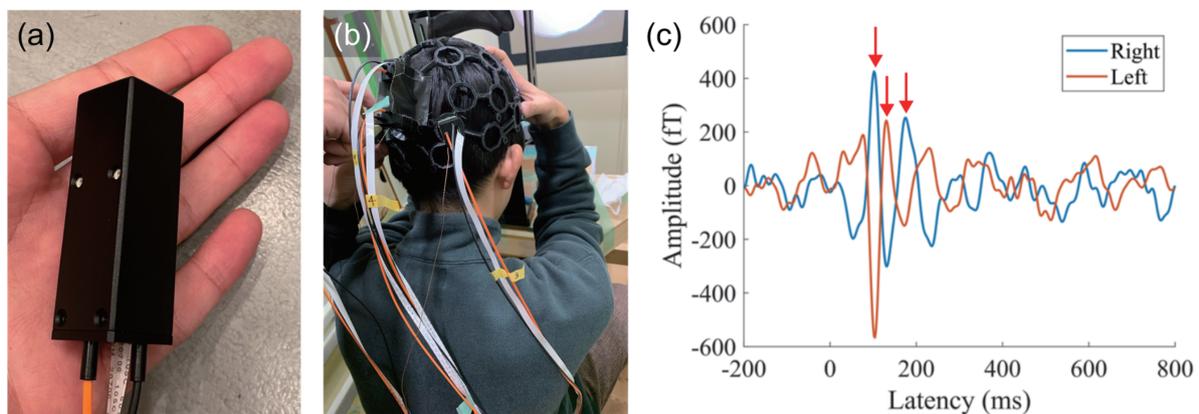
生体磁気計測では、多数のセンサにより計測を行い、そのデータから逆問題を解くことで信号源の推定が行われる。そのため、センサはなるべくコンパクトで省スペースであることが望ましい。しかし、小型化によりアルカリ金属原子がセンサセル壁面と衝突してスピン緩和時間が短くなり、またアルカリ金属をガス化するためのヒータがセンサ部に接近し、そこから生じる熱雑音や擾乱磁場により計測感度が低下するという問題がある。

当研究室では、これらの影響を極力抑え、図 (a) のような小型かつ超高感度な OPM を浜松ホトニクス株式会社との共同研究により開発した [1,2]。このセンサは、センサヘッド部分が $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}$ と小型で、 $20 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 以下のセンサノイズと、 200 Hz を超える周波数帯域幅を実現している。また、静磁場を印加することで、センサの中心周波数を変化させることができるため、幅広い用途に応用が可能である。

今回は、このセンサを用いてチェッカーボード刺激に対する視覚誘発磁界を計測した (図 (b))。チェッカーボード刺激は白黒のタイルを敷き詰めたものをスクリーン上に投影したものであり、この白黒が反転したときに、呈示されている視野の対側の視覚野が賦活することが知られている。図 (c) に、各視野について後頭部に配置した OPM で計測した波形を、チェッカーボードパターンの反転をトリガとして 300 回ほど加算平均したものを示す。刺激呈示から約 100 ms 後に有意なピークが現れ、その極性は刺激呈示した視野で反転していることがわかる。本研究結果は、開発した OPM の有効性を示しており、生体磁気計測の普及につながるものと期待される。

[1] 加藤ほか、“生体磁気計測のための光ポンピング磁気センサモジュールアレイの開発”、生体医工学 Annual 59 巻、p.556 (2021)。

[2] <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products-and-technologies/2022/20220224000000.html>



図：(a) 開発した小型 OPM モジュール。(b) 視覚誘発磁界計測の実験風景。被験者の後頭部に OPM モジュールを配置し、被験者の前に置かれたスクリーンにチェッカーボード刺激が呈示される。(c) 視覚誘発磁界の計測結果。チェッカーボードの白黒が反転するタイミングを 0 秒としている。潜時が 100 ms 程度でピークがいくつか観測されており、刺激の呈示された視野によって極性が反転して観測されている。

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

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

「微細 MOS トランジスタの統計的性質を利用した高精度な CMOS 温度センサ」

温度センシングは集積回路チップの自己診断や環境モニタリングに必須である。温度センサにおいて広い電源電圧動作が求められる一方、高い精度も必要である。従来、MOS トランジスタに存在する様々なリーク電流は電源電圧や温度に関して高い依存性を持っているため、これらの同時達成は難しかった。本研究では、トランジスタ特性の統計量の温度依存性に注目し、統計処理により誤差要因を排除できることを実証した [1,2]。

MOS トランジスタのサブスレッショルド電流は次の式で表される。

$$I_{ds} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} n^2 \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \exp \left(\frac{V_{gs} - V_{th} + \lambda V_{dd}}{nkT/q} \right) \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-V_{dd}}{kT/q} \right) \right).$$

ここで、 μ は移動度、 C_{ox} は単位面積当たりのゲート容量、 W はゲート幅、 L はゲート長、 k はボルツマン分布、 q は電荷素量、 T は絶対温度、 V_{gs} はゲートソース間電圧、 V_{th} はしきい値電圧、 V_{ds} はドレインソース間電圧、 n はサブスレッショルド係数、 λ はドレイン電圧依存係数である。統計の性質により、対数をとった電流の標準偏差を求めると、固定の項はすべて排除され、 $T \cong \frac{q \cdot \sigma_{V_{th}}}{nk \sigma_{\ln(I_{ds})}}$ が得られる。

この方式によりノイズ成分や電源電圧に依存する項が排除されるため、回路工夫が可能となる。図1に大量 MOS トランジスタの微弱なサブスレッショルド電流を測定する回路を示す。この回路を商用の 65nm プロセスにてチップ試作し、提案方式の妥当性を実証した。図2に設計した回路のチップ写真とレイアウトを示す。大量の微細トランジスタを自動設計により配置配線し、実用性を大幅向上した。図3に恒温槽を用いた測定環境を示す。図4に電流の対数の標準偏差を温度に対して示している。6つのチップにおける特性が高い線形性を持っている。-20℃ から 120℃ の範囲において推定温度誤差は -0.54/+0.43℃ であり、100℃ の壁を世界で初めて突破した (図5)。0.8V から 1.2V の電源電圧範囲において推定誤差が 0.8℃ 以内に収まり、低電圧依存性を実現した。今後は電流測定回路の低消費電力化とキャリブレーション点数を 2 から 1 に減らすことを目標に研究を進める予定である。

参考文献： [1] S. Ota, M. Islam, T. Hisakado, and O. Wada, "Wide temperature- and voltage-range temperature sensing utilizing statistical property of sub-threshold MOSFET current," SSDM, September 2022, pp. 788-789. [2] S. Ota, M. Islam, T. Hisakado, and O. Wada, "Wide-range and low supply dependency MOSFET-based temperature sensing utilizing statistical properties of scaled MOSFETs," Japanese J. Applied Physics, accepted (DOI 10.35848/1347-4065/acb94e).

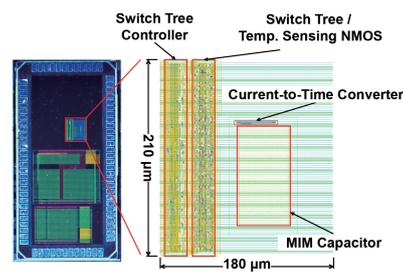
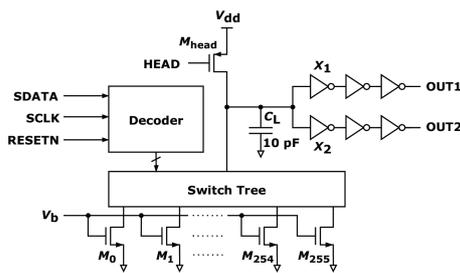


図1:大量 MOS トランジスタの電流を測定する回路。 図2:65nm プロセスにて試作した回路のレイアウト。



図3: 恒温槽による測定環境。

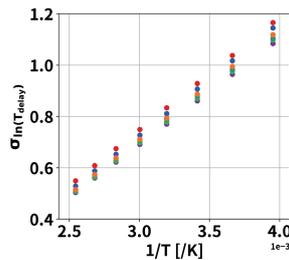


図4: 温度に対する電流統計量の変化。

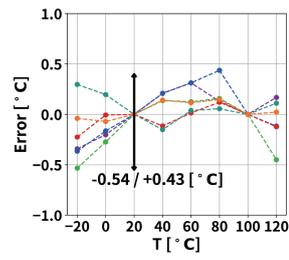


図5: 温度に対する推定誤差。

集積機能工学講座

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

「電界放出微小電子源アレイを用いた耐過酷環境能動デバイス・撮像デバイスの開発」

半導体製造技術で培われた薄膜作製や微細加工技術を利用すれば、微小な半導体電子デバイスを作製することができるだけでなく微小な真空管を作ることも可能です。従来の真空管では熱陰極を用いていたため微細化には限界がありましたが、冷陰極である電界放出陰極を用いれば微細化することはむしろ必然ということもできます。真空電子デバイスは電子の走行媒質が真空であることから、温度不感な特性や放射線環境下でも利用できる可能性を秘めています。当研究グループでは、これまで電界放出微小電子源アレイ（以下フィールドエミッタアレイ、FEA）を用いた能動デバイス（真空トランジスタ）や増幅回路、周波数混合器などの開発を行うとともに、これらのデバイスの高温や低温における特性評価を行ってきました [1]。

2011年の東日本大震災の際に、東京電力福島第一原子力発電所は外部電源喪失により原子炉のメルトダウンを起こし廃炉を余儀なくされています。廃炉のためには格納容器内の様子を観察することのできるカメラが必要ですが、容器内の放射線の線量率は 100 Gy h^{-1} 近くにも及び半導体を利用した撮像デバイスでは長時間の使用には耐えられない可能性があります。他方、撮像管はその高い耐放射線性から放射線環境で現在でも使用されています。しかしながら、撮像管では受光面の電荷を、電子ビームを走査しながら読み取るためブラウン管同様長い筒状構造となり、格納容器の内部に入るロボットに搭載することは難しいのが現状です。電子銃とその走査系を、二次元に配置したFEAアレイで置き換えれば薄型化が可能です。その構造は図1に示したようなもので、このようなデバイスは撮像板と呼ばれています。

縦に並んだエミッタラインと横に並んだゲートラインそれぞれ一つを選んで電圧印加することで両者が交差する場所のFEAから電子を放出、受光面の電荷を読み出します。撮像板は当初、超高感度撮像デバイスとして研究開発が行われました [2]。当研究グループは、産業技術総合研究所、静岡大学、木更津工業高等専門学校等デバイス開発に直接関連する大学・研究機関及び大阪公立大学、学内の原子核工学専攻、複合原子力科学研究所の放射線関係の研究者と協力して撮像板を耐放射線性という観点から見直し、耐放射線性を持つ光電変換膜の選択 [3] や撮像板小型化のためのFEAの改良 [4]、耐放射線性の評価を行ってきました。これまでに個々の構成要素の

1 MGy までのガンマ線照射に対する耐性を確認するとともに、構成した撮像デバイスが1 MGy のガンマ線照射を受けても光検出が可能なことを示しました [5]。現在、撮像デバイスを内蔵する可搬型真空容器の試作を行い、放射線環境下における撮像動作の検証に向けて準備を進めています。

(参考文献)

- [1] Y. Gotoh, J. Vac. Soc. Jpn. **60**, 55 (2017) [in Japanese].
- [2] Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota, and N. Egami, J. Vac. Sci. Technol. B **33**, 012205 (2015).
- [3] T. Okamoto, T. Igari, Y. Gotoh, N. Sato, M. Akiyoshi, and I. Takagi, Phys. Status Solidi (c) **13**, 635 (2016).
- [4] M. Nagao, Y. Gotoh, Y. Neo, and H. Mimura, J. Vac. Sci. Technol. **34**, 02G108 (2016).
- [5] Y. Gotoh, H. Tsuji, M. Nagao, T. Masuzawa, Y. Neo, H. Mimura, T. Okamoto, T. Igari, M. Akiyoshi, N. Sato, and I. Takagi, IEEE Trans. ED **67**, 1660 (2020).

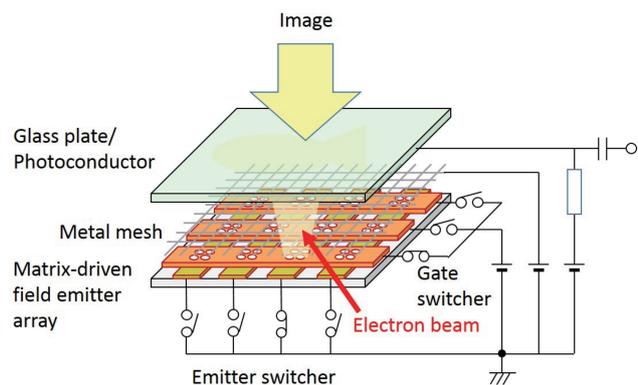


図1 FEAを用いた耐放射線撮像板の構成

電子物理工学講座 応用量子物性分野 (竹内研究室)

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

「可視光源と可視光検出器で実現する赤外領域の量子分光」

赤外波長域には分子構造や化学状態を反映した数多くの光吸収が存在します。このため赤外光学スペクトルを評価することで、非侵襲かつ高速に物質の鑑別同定や、不純物の定量解析などを行うことができます。現在赤外分光は基礎科学のみならず、材料、医薬などの開発研究のツールとして幅広い分野で利用されています。オンサイトの環境センシングやセキュリティなどの用途には、分光装置の更なる小型化高感度化が望まれますが、従来分光技術には赤外光源や赤外光検出器に由来する技術的な制約が多く存在します。

量子赤外分光法は上述の問題を解決する新奇な赤外分光法として、近年提案された量子計測技術です。本手法は技術的に成熟し小型かつ高性能な可視光源と検出器のみを用いて赤外分光を行うことを可能とします。その測定原理は、量子相関をもつ可視光子と赤外光子のペア（可視-赤外もつれ光子対）の発生過程間の量子干渉を利用するというもので、これにより赤外波長域における光学吸収を相関する可視光子発生数の変動を通して評価することができます。しかしながら、これまでに報告されていた量子赤外分光法は大型の可視分光器を利用しており、システムが大型化、高コスト化するという問題がありました。

今回我々はシングルピクセル検出器を用いてコンパクトな分光系が構築可能な新奇測定手法「フーリエ変換型量子赤外分光法（量子FTIR）」を提案し、その実証実験を行いました。図は実際に量子FTIRシステムで計測される量子干渉信号を示しています。横軸は光路長差、縦軸は可視光子発生数を示しています。図(a)は測定経路上に試料を配置しない場合の参照信号（図(a)上）と測定試料である赤外波長フィルターを挿入した場合の信号（図(a)下）を示しています。これらの信号にフーリエ変換を施し、その比をとることで図(b)のように赤外域の透過スペクトルを算出することができます。今回の測定では波長

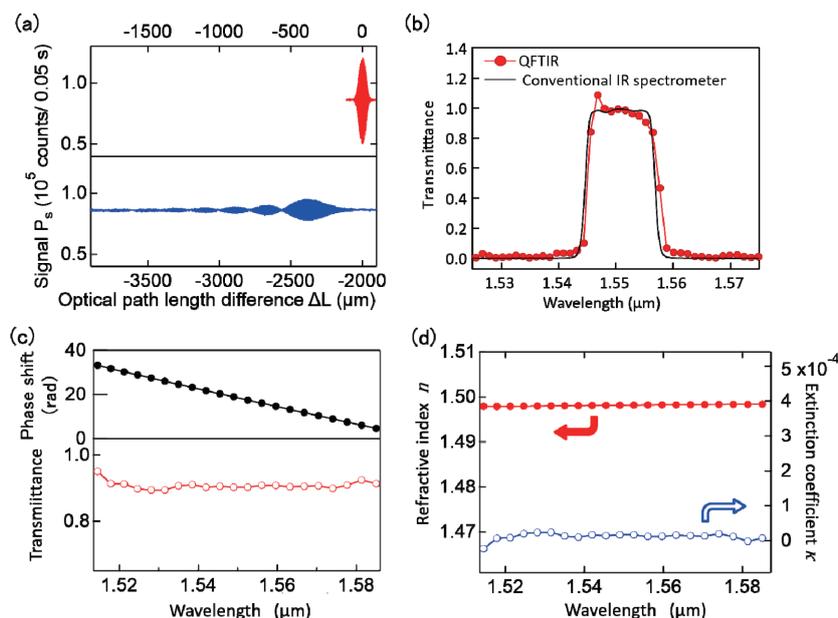


図. 実験結果

810nm の光子測定を通して、波長 1550nm 帯の赤外透過スペクトルの計測に成功しています。測定結果は古典的な赤外分光法による結果とも定量的によく一致しています。更に量子 FTIR では試料による透過光の位相変化量の測定も可能です。図 (c) は溶融石英ガラスの複素透過スペクトルの測定結果を示しており、透過率の絶対値がほぼ一定であるのに対し、波長ごとに異なる位相変化スペクトルを観測しています。この結果から図 (d) に示すように、試料の複素屈折率を算出することも可能となります。算出された屈折率は実部、虚部共に既知の石英ガラス光学特性と整合することが確認できます。このように光学吸収と分散の同時取得を可能とする量子 FTIR は、複雑な組成や構造をもつ物質に対する詳細な分光解析への応用が期待できます。

現在この量子赤外分光技術の高度化に向けた研究を、Q-LEAP プロジェクトの支援のもと推進しています。

参考文献：Y. Mukai, M. Arahata, T. Tashima, R. Okamoto, and S. Takeuchi, “Quantum Fourier-Transform Infrared Spectroscopy for Complex Transmittance Measurements” *Physical Review Applied*, 15, 034019 March (2021).

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡によるトラップ電荷拡散過程の可視化

近年、簡便なプロセスで柔軟かつ軽量のトランジスタとして有機薄膜トランジスタ (organic thin-film transistor: OTFT) が注目を集めている。実用化へ向けた課題の1つが、金属電極—有機薄膜界面におけるチャネル注入障壁やキャリアトラップによる性能律速である。そこで、電極界面やチャネル内におけるキャリア分布をナノスケール分解能で評価でき、デバイスの律速要因を明らかにできる手法として、原子間力顕微鏡 (AFM) をベースとした表面電位分布計測手法であるケルビンプローブフォース顕微鏡 (Kelvin-probe force microscopy: KFM) が期待されている。しかしながら、通常のKFMでは1枚の画像を取得するのに通常数分から数十分もの長い時間を要するため、表面電位像を取得している途中でキャリアのデトラップ (脱離) が生じてしまうと、キャリアの空間的/時間的変化の切り分けが困難となる。

そこで本研究では、動作中のOTFTのチャネル部における表面電位の過渡的な変化を評価できる時間分解KFM法を開発し、動作直後のデバイスに残ったトラップ電荷が拡散していく過程を可視化することに成功した。図1 (a) に、時間分解KFM法によるOTFT測定の概略図を示す。OTFTのドレイン電極とソース電極を接地した状態でAFMにより表面形状を取得している最中に、探針があらかじめ定めた測定点の直上に来る度に、ゲート電極へのバイアス電圧印加 (-3 V) により有機半導体層にキャリアを注入・蓄積し、直ちにバイアス印加をターンオフ、その後の表面電位変化を一定時間記録した。図1 (b) に示すように、得られたデータを各時間の表面電位像に再構成することができ、キャリア分布の時間変化を知ることができる。さらに、チャネル上の各点で取得した表面電位の時間変化を解析すると、表面電位は指数関数的に減衰していることが分かった。このゲート電極ターンオフ後の電位の減衰曲線に対して指数関数フィッティングを行い、チャネル上の各点における電位の減衰の時定数マップを作成した (図1 (c))。この時定数マップから、ソース・ドレイン電極電極の近傍の領域では、トラップ電荷は比較的速やかに電極へ拡散するため、減衰時定数が小さいこと (150 ms 程度)、一方、電極から離れたチャネル中央付近における時定数は比較的大きく、キャリアが長時間トラップされている (450 ms) ことが分かった。

参考文献

- 1) Y. Yamagishi, K. Kobayashi, T. Kimura, K. Noda, and H. Yamada, *Organic Electronics* 57, 118 (2018).

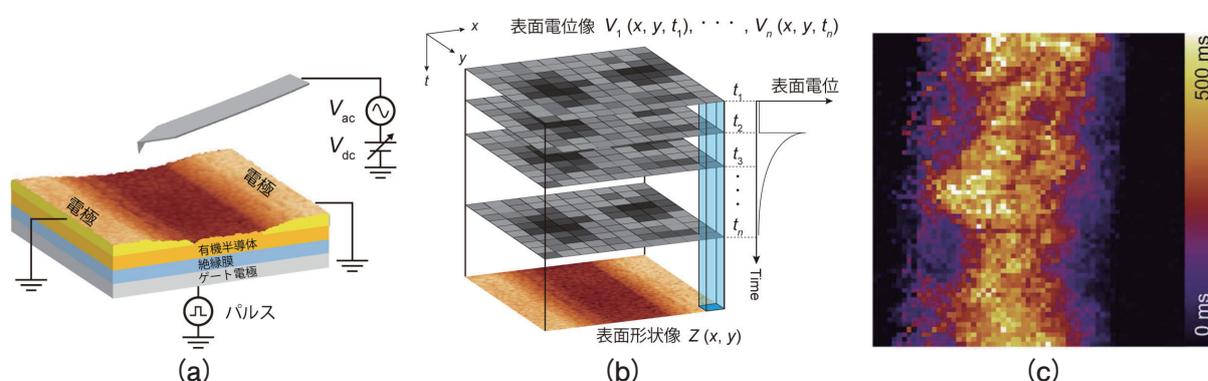


図1: (a) 時間分解KFM法による測定の概略図. (b) 集録されたデータの再構成によって電位の時間変化を可視化する概念図. (c) 表面電位の減衰時定数マップ.

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

フォトニック結晶レーザーを用いた小型 LiDAR の開発とスマートモビリティ応用

来るべき超スマート社会 Society 5.0における、工場や倉庫におけるロボット、農機・建機、さらには自動車等の自動運転のために、光を用いた測距システムである LiDAR が極めて重要となっている。この LiDAR (Light Detection and Ranging) の心臓部であるレーザー光源には、小型・安価・高効率といった特長を有する半導体レーザーが主に用いられている。しかしながら、従来の LiDAR では、ビーム拡がりが大きくかつ非対称な従来型の半導体レーザーを用いているため、ビーム整形のための複雑な外部レンズ系や精密調整が必要となり、サイズ、コスト、性能に課題を抱えている。そこで、我々は、従来の半導体レーザーの課題を解決し、LiDAR の小型化、低コスト化、さらには性能や機能の向上を可能とする新たな半導体レーザーとして、フォトニック結晶レーザー [1] の研究・開発を行っている。

フォトニック結晶レーザーは、ナノスケールで制御された周期構造をもつフォトニック結晶を活用することで、原理的に大面積でもコヒーレント動作が可能であり、高出力かつ極めて狭い拡がり角のビームを得ることが出来る。そのため外部レンズ系を必要としない小型システムによって長距離・高分解能な測距が可能となる。実際に我々は、2020年にこのようなフォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR システムの開発に世界で初めて成功している [2]。さらに今回、フォトニック結晶レーザーのレンズフリー特性を活かし、従来機ではシステム内に別々に配置されていた光源部と受光部を一体化することによって、図 1 (a) に示すように、高分解能でありながらシステムを従来の 1/3 の体積へと大幅に小型化し、名刺サイズというクラス最小の LiDAR の開発に成功した。そして、開発した小型 LiDAR を用いたスマートモビリティ応用の一例として、工場や倉庫で用いられる自動搬送ロボットへの適用を試みた。図 1 (b) に実際に LiDAR を組み込んだ様子を示すように、システムが小型であるため、限られたスペースにも設置することが可能である。図 1 (c) にデモンストレーションの様子を示す。小型 LiDAR によって周囲の人及びロボットの位置を高精度に検出しながら、自動追従が実現出来ており、スマートモビリティの実証に成功したと言える。この成果は、フォトニック結晶レーザーおよびそれを搭載した小型 LiDAR が、今後の超スマート社会 Society 5.0 に向けて極めて有望であることを示すものである。参考文献: [1] M. Imada, S. Noda, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 316 (1999). [2] M. Yoshida, S. Noda, *et al.*, *J. Phys. Photonics* **3**, 022006 (2021).

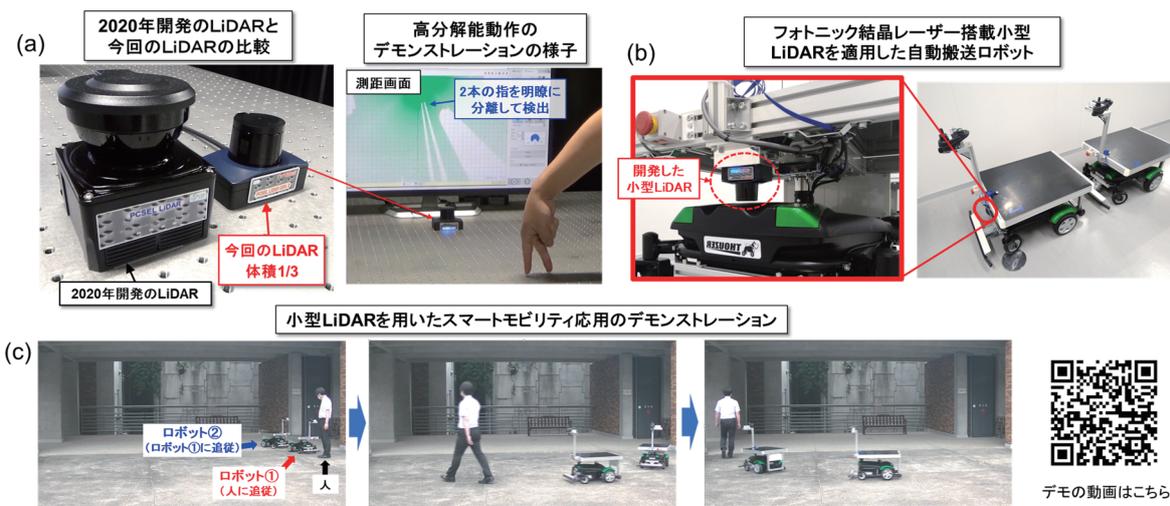


図 1. (a) 2020 年開発の LiDAR と今回開発した小型 LiDAR の比較、及び高分解能での測距動作の様子。(b) 開発した小型 LiDAR を適用した自動搬送ロボット。(c) 小型 LiDAR を用いたスマートモビリティ応用のデモンストレーション (QR コードから動画を再生可能)。

量子機能工学講座 量子電磁工学分野

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

BIC 状態の変調による電磁波の保存と再生

メタマテリアルとは、電磁波の波長より小さい人工構造の集合体のことで、構造の設計によってマイクロ波から光領域まであらゆる波長に対する光学/電磁特性を自在に制御できることから注目を集めている。現実の原子・分子がもつ光学特性を模倣することも可能である一方、負の屈折率や透明マントなどの自然界にない特性を実現することもできる。本研究室では、電磁波を保存し、任意のタイミングで再生することのできるメタマテリアルについて長く研究してきた [1,2]。この研究では、原子系の光保存・再生の方法として研究されてきた電磁誘起透明化現象と呼ばれる効果をメタマテリアルで疑似的に実現することで、マイクロ波の保存と再生を実現している。そして、今回 BIC (Bound state in the continuum) 状態の変調を利用する全く異なる手法を考案した。

図 1 (a) を単位構造とする周期的メタマテリアルにおいて、水平偏光が入射された場合を考えたとき、構造が対称になる $w=0$ のとき BIC 状態と呼ばれる伝搬電磁波と結合しない状態となる。一方、非対称な状態 ($w \neq 0$) は非 BIC 状態となり、伝搬波と電磁的に結合した状態となる。初期状態を非 BIC 状態として、電磁波を入射すると、エネルギーは結合によってメタマテリアルへ蓄積される。そして、状態を BIC 状態へ変化させることで蓄積された電磁エネルギーは放出されなくなる。そして、再び非 BIC 状態に戻すことで、保存されていたエネルギーがメタマテリアルから再放射される。電磁界シミュレーションで計算した結果を図 1 (b) に示す。BIC 状態では透過波は観測されず、非 BIC 状態に戻すことで、外部に電磁波が取り出されていることが確認できる。更に詳しい解析を行った結果、保存時にはメタマテリアルに共振状態としてエネルギーが保存されているだけでなく、DC モードと呼ばれる直流電流が形成するモードにもエネルギーが保存されていることが分かった。この DC モードはこれまで電磁現象としてあまり注目されてこなかったモードで、このように状態を変えることで外部励起することができる [3]。このような、状態変化を利用する時変メタマテリアルは現在研究が盛んになってきた分野であり、更なる研究の進展が期待できる。

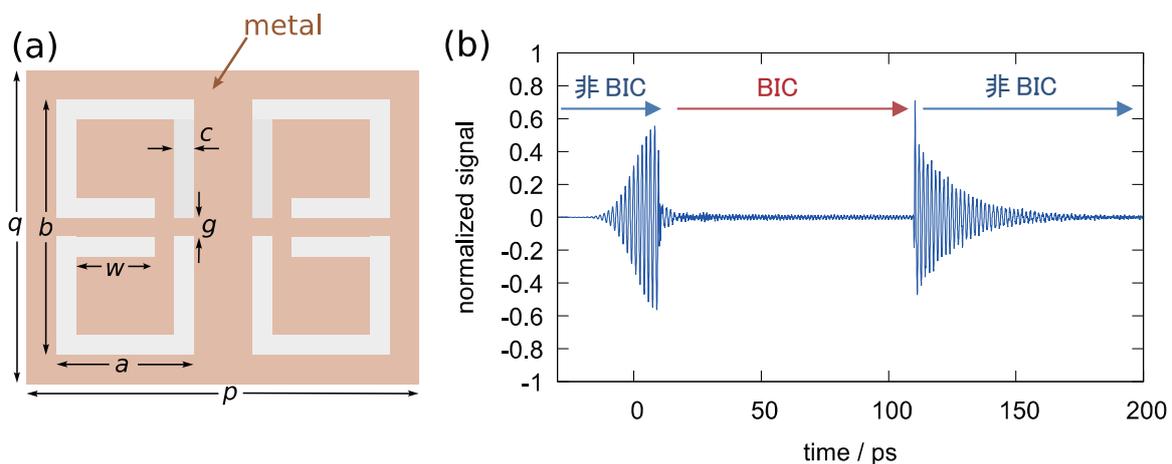


図 1 (a) 単位構造 (b) 透過波波形

参考文献

- [1] T. Nakanishi, T. Otani, Y. Tamayama, and M. Kitano, Phys. Rev. B **87**, 161110 (2013).
- [2] T. Nakanishi and M. Kitano, Appl. Phys. Lett. **112**, 201905 (2018).
- [3] F. Miyamaru, C. Mizuo, T. Nakanishi, Y. Nakata, K. Hasebe, S. Nagase, Y. Matsubara, Y. Goto, J. Pérez-Urquiza, J. Madéo, and K. M. Dani, Phys. Rev. Lett. **127**, 053902 (2021).

知能メディア講座 コンピュータビジョン分野 (西野研究室)

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

車載映像における死角道路領域推定

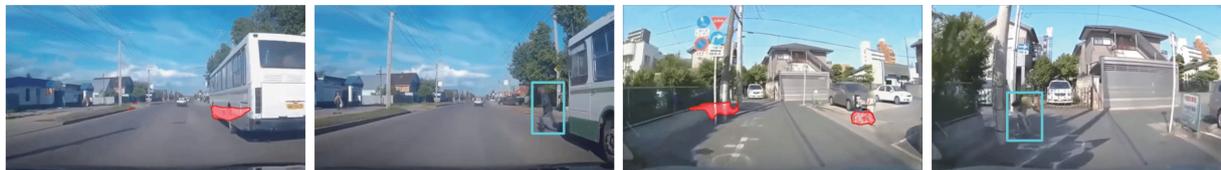


図1 歩行者の飛び出しシーンでの死角推定結果

コンピュータビジョンを用いた安全な自動運転の実現に向けて、数多くの研究が行われている。例えば、車載映像からの物体検出技術は、自動ブレーキや追従ドライブ機能に应用されている。しかし、これらの研究の多くは、見えるもののみに着目しており、映像に映っていないが潜在的に危険な状況に取り組む研究はまだ少ない。映像には映らないが安全運転にはその認識が欠かせないもの一つに見えない道路領域、すなわち死角がある。歩行者が死角から飛び出してくる場合、歩行者を検出してからではブレーキが間に合わないことが多い。自動運転のみならず、手動運転においても、このような死角からの飛び出しによる事故を避けるには、危険の潜む死角を事前に検出する技術が必須となる。

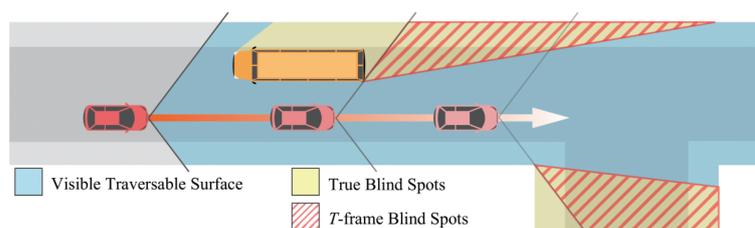


図2 本研究における死角 (T-frame Blind Spot) の定義

車載映像からの死角検出は非常に困難である。カメラから見えている景色が立体的に把握できれば死角を検出できるが、車載映像から道路シーンの精緻な3次元復元を行うのは、計算時間の観点からも現実的ではない。深層学習などを利用して学習により死角を画像から直接検出すれば、リアルタイムでの実装が現実的になるが、学習に必要な死角の教師データが現状存在しない。また、人の手で死角の教師データを作成しようにも、そもそも見えていない領域である死角をラベル付けすることは不可能に近い。

本研究では、死角の近似として、車載映像から計算可能な T-frame Blind Spot を導入し、死角の教師データを自動的に作成する手法を提案するとともに、作成した教師データを使って学習を行う死角推定ニューラルネットワークモデルを導出した [1]。T-frame Blind Spot を、「現在見えていないが、将来見えるようになる道路領域」として定義することで、本来見えない領域である死角を、将来の映像によって決定できるようになる (図2)。すなわち、動画を逆再生し、見えている道路領域を現在位置における視角に投影することで、現在のカメラに映る死角領域を得られる。既存のセマンティックセグメンテーション・単眼深度推定・自己位置推定の手法を組み合わせることで、231本の車載映像から計21,667枚の死角教師データを自動的に作成した。

さらに、この大量のオフラインで作成された死角教師データを用いて、オンラインで車載映像の視野における死角を推定する深層学習モデルを導出した。自動的に作成された大量の教師データにより訓練を行うことで、実際に歩行者が飛び出してきたものも含め、様々なシーンに対して死角を推定できることを示した (図1)。本技術は、死角が検出された領域付近では減速・迂回するような制御を行う自動運転技術や、死角領域を可視化することで運転者の注意を向ける運転者支援技術など、様々な利用法が想定される。また、運転教習教材への応用など、様々な側面から、安全運転に貢献できると考える。(修士二回生 福田太一)

[1] Fukuda, T., Hasegawa, K., Ishizaki, S., Nobuhara, S., Nishino, K.: BlindSpotNet: Seeing where we cannot see. In: Proc. of European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops – Autonomous Vehicle Vision Workshop (2022), <https://vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp/research/bsn/>

通信システム工学講座 知的通信網分野 (大木研究室)

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

「Software-defined network (SDN) における資源割り当て」

大木研究室は、高速性、信頼性、柔軟性を兼ね備えたネットワークの研究開発を行っている。理論から実装まで幅広いアプローチで取り組んでいる。本稿では、研究トピックの1つである「Software-defined network (SDN) における資源割り当て」について紹介する。

SDNはネットワーク仮想化技術の1つであり、物理ネットワーク上に様々なサービスの提供に適した論理ネットワークを柔軟に構成し運用することを実現する。SDNでは、図1に示すように、従来個々のルータが備えていた、パケット転送の機能と転送経路制御の機能が分離される。パケット転送を担うSDNスイッチと、それらを集中制御するSDNコントローラが配置される。コントローラが経路を計算し、パケット転送のためのフローエントリを各スイッチに格納する。大木研究室ではこのような仮想化技術を導入したネットワークにおいて、トラフィック観測やユーザの要求に基づく制御を行い、数値最適化や機械学習等の手法を用いて、ネットワーク資源の利用効率化を図る技術进行研究している。

[1]では、SDNスイッチに格納されるフローエントリ数を最小化するマルチキャスト経路決定モデルを検討している。各スイッチが持つメモリの容量には限りがあるため、格納するフローエントリ数をできるだけ削減しながら、各送信者～受信者間でのパケット転送を実現することが求められる。従来モデルでは単一のマルチキャスト要求のみを考慮してフローエントリを設定していた。これを複数のマルチキャスト要求が発生する状況に適用すると、フローエントリが格納されるスイッチが分散し、必要なエントリ数が増加する問題があった。提案モデルでは、図2に示すように、複数のマルチキャスト要求間におけるフローエントリの共有を促進する。数値評価により、提案モデルは従来モデルと比較して、フローエントリ数を削減しながらマルチキャストサービスの提供を実現可能であることを示している。

[2]では、SDNコントローラの故障を考慮したコントローラ配置モデルを提案している。コントローラはパケット転送経路の決定のために計算能力やメモリを消費するため、できるだけ配置数を削減することが望ましい。一方で、コントローラが故障した場合、各スイッチにおける適切なパケット転送ができなくなる可能性がある。そのため、故障を考慮した上でコントローラの配置を決定することが求められる。従来モデルでは各スイッチからの負荷が1つのコントローラにかかるため、コントローラの計算能力を効率良く利用できないという問題があった。提案モデルでは、各スイッチがコントローラにかかる負荷を複数のコントローラに分散させ、故障発生時には別のコントローラが不足分の計算容量をカバーする。数値評価により、提案モデルが従来モデルと比較して、コントローラ数を削減した配置を実現可能であることを示している。

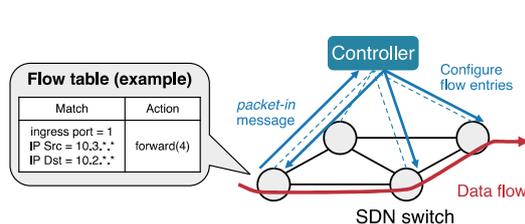


図1 SDN アーキテクチャ

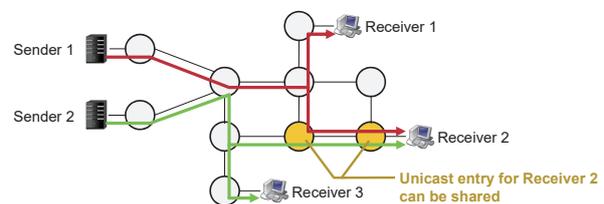


図2 SDN におけるマルチキャスト

[1] S. Kotachi, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, "Multicast Routing Model to Minimize Number of Flow Entries in Software-Defined Network," IEICE Transactions on Communications, vol. E104-B, no. 5, pp. 507-518, May 2021. (電子情報通信学会論文賞)

[2] S. Kotachi, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, "Fault-tolerant Controller Placement Model by Distributing Switch Load among Multiple Controllers in Software-defined Network," IEICE Transactions on Communications, vol. E105-B, no. 5, pp. 533-544, May 2022.

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤研究室)

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「準同型暗号による情報処理：秘匿プロセッシング技術」

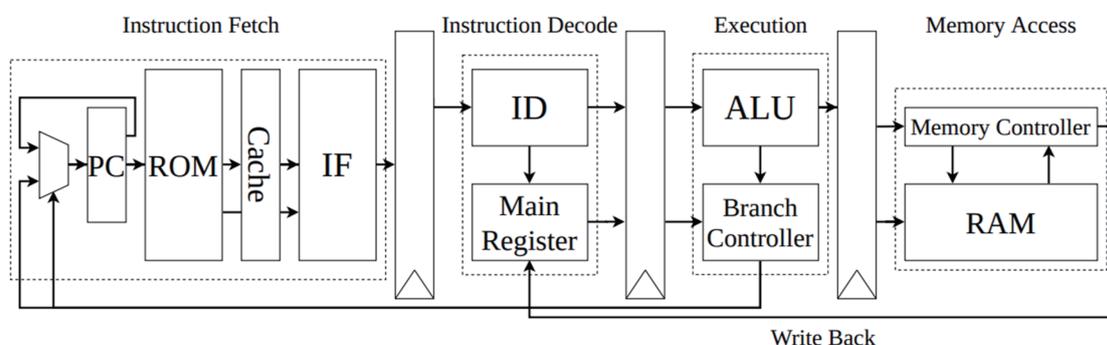
計算やデータの保管を外部サーバに委託する、クラウドサービスの利用が一般的となった。写真、文書、メール、センサにより取得されたバイタルデータ、ひいては私達の日常の行動等が、サーバに蓄積されている。そうした外部資源を用いて個人情報に関わるデータを転送し保存する際には、安全性確保の観点から暗号化による保護がなされることが一般的である。しかし、暗号化されたデータを利用するには、一度復号する必要がある。このため、攻撃者による不正アクセスやクラウドサービス内部の関係者による不正等に対して情報漏えいを防ぐことは難しい。この対策として、データを暗号化した状態のまま処理することで情報漏えいを防ぐ暗号化状態処理（準同型暗号に基づく秘匿計算）が注目されている。同処理は、暗号化されたデータ間の演算（例えば、暗号化データの加算結果は、対応する平文データの加算結果を暗号化したものと一致する）を実現できる。

我々の研究グループでは、準同型暗号を用いる汎用プロセッシング技術を開発している。これは、クラウドサーバ等の第三者に対して、データとともに実行するプログラムも秘匿した上で計算委託を行う事ができる二者間での秘匿計算技術である。本研究では、準同型暗号を用いることで効率的な処理を実現し、従来手法に対し計算コストを大幅に低減する。具体的には、暗号化状態での論理演算を実現可能なトラス型完全準同型暗号（TFHE）と呼ばれる方式を用いて暗号化論理ゲートを実現し、暗号化論理ゲートの組み合わせによりプロセッサ回路を実現する。本技術を用いることで、プログラム、データ、およびプロセッサの動作、全てを秘匿したまま、計算を実行できる [1]。

TFHE による暗号化論理ゲートの実装、暗号化論理関数の評価エンジン、準同型暗号を用いる汎用プロセッサ、コンパイラ等、概念実証のためのプロトタイプ Virtual Secure Platform を、GitHub にまとめて公開している [2]。暗号化論理ゲートは、プロセッサを作成する以外にも、任意の論理回路の評価に活用できる。興味を持たれた方は、是非試してみたい。

[1] K. Matsuoka, R. Banno, N. Matsumoto, T. Sato, and S. Bian, "Virtual Secure Platform: A Five-Stage Pipeline Processor over TFHE," 30th USENIX Security Symposium, pp. 4007-4024, August 2021.

[2] <https://github.com/virtualsecureplatform/kvsp>



秘匿プロセッシングの概念実証のための秘匿プロセッサの構成 [1]。
全ての回路ブロックは暗号化論理ゲートで実現している。

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (中村祐司研究室)

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

「プラズマ閉じ込めにおけるヘリカルコア形成に関する研究」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

今回は、トカマクプラズマにおいて、トーラスの芯の部分からせん状にねじれた平衡状態になるヘリカルコアという現象に関する研究について紹介します。

世界7極の協力のもと建設が進められている国際熱核融合実験炉 (ITER) では、標準放電実験に加えて、より高いプラズマ閉じ込め性能を得るために先進トカマク配位であるハイブリッドシナリオ実験が予定されています。このハイブリッドシナリオで用いられるプラズマ閉じ込め磁場配位は、磁力線のねじれが強い領域がプラズマ断面全体に大きく広がることが特徴です。近年、ITERのハイブリッドシナリオを模擬したこのような磁場配位において、トーラスの芯の部分からせん状にねじれた平衡状態が観測されており、ヘリカルコアと呼ばれています。

従来、このヘリカルコア平衡状態は、トカマクプラズマに流れる電流によって駆動される不安定性の成長が飽和して実現されると考えられていました。我々は、ヘリカルコアにはもう1種類あり、2種類あることを示しました [1]。そして、新しい種類のヘリカルコアが、トカマクプラズマの圧力勾配が駆動する不安定性によって形成

されることを明らかにしました。図は、トロイダル角 $\phi = 0, 0.44\pi, \pi$ におけるプラズマ断面上の等圧面を示します。トロイダル角が異なる断面でコア領域の変位方向が異なることは、らせん状にコア領域が変形していることを表します。上段は、コア領域が剛体的にらせん状に変形します。一方、下段は、上段の剛体的な変形と比較して中心に限られた領域が大きく変形しています。これは、上段のヘリカルコアはプラズマに流れる電流が駆動する不安定性によって形成されており、一方、下段のヘリカルコアは、プラズマの圧力勾配によって駆動された不安定性により形成されたことを示しています。そして、下段のようなヘリカルコアは、プラズマを閉じ込める磁力線のねじれの動径方向変化が小さいほど起こりやすいことが、明らかになりました。

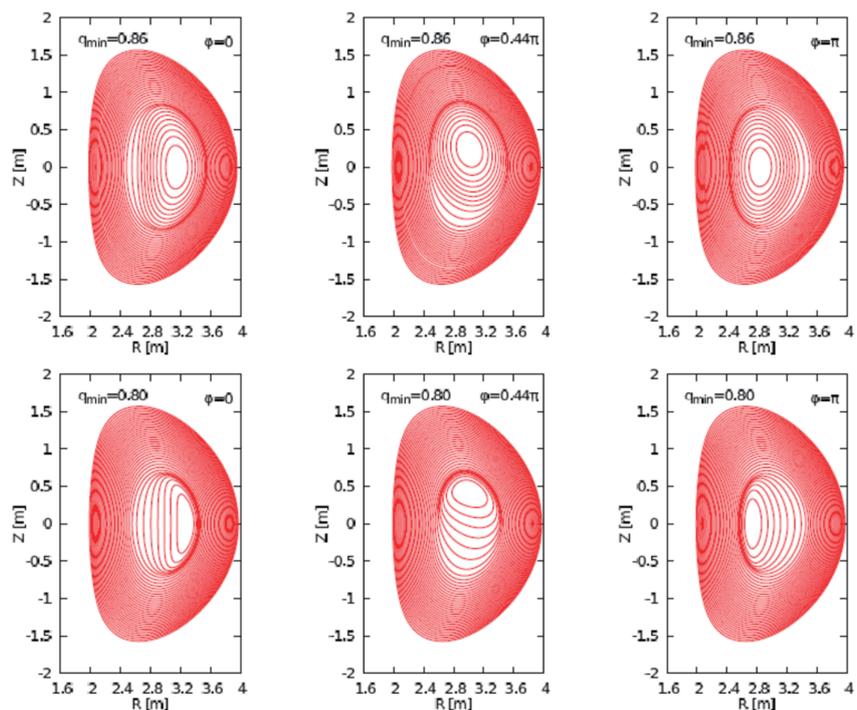


図 トカマクプラズマのトロイダル角 $\phi = 0, 0.44\pi, \pi$ における等圧面形状 (楕円度 $\kappa = 1.6$ 、三角度 $\delta = 0.344$ 、プラズマベータ $\beta = 3\%$)。上段：電流駆動型不安定性によるヘリカルコア平衡状態。下段：圧力駆動型不安定性によるヘリカルコア平衡状態。

[1] S. Kawagoe, A. Ishizawa, N. Aiba, Y. Nakamura, Plasma Physics and Controlled Fusion **64**, 105004 (2022).

エネルギー工学研究所 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)
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index_j.html
 「共鳴のない電磁波を入射して電子を加速しプラズマを着火する」

私たちの研究室では、プラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いて磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的には、プラズマを高温・高密度で閉じ込め、その輸送を調べることで、最適な磁場配位を探す研究を行っています。磁場閉じ込めにおけるプラズマ生成として電磁波を利用する方法があり、電子のサイクロトロン周波数に相当する周波数の電磁波を入射するサイクロトロン共鳴が用いられます。この手法は、電磁波によって電子が磁力線に垂直方向に加速されることで効率良くプラズマを生成することができるため、広く用いられてきました。一方で、サイクロトロン周波数は磁場強度に比例するため、発振源の周波数が制限されると、共鳴条件を満たすために磁場強度が制限されてしまいます。もし仮に、共鳴条件に関係なくプラズマ実験ができるとどうでしょうか？広いパラメータ範囲で輸送を調べることができ、新しい知見が生まれることが期待されます。今回は、共鳴がない条件の電磁波を入射し、プラズマ着火に成功した成果について述べます。

ヘリオトロンJで非共鳴のマイクロ波 (2.45GHz) を強磁場 (~1T) 中に入射する実験を行ったところ、以下の現象が観測されました^[1]。(1) 10^{16} ~ 10^{18} m⁻³ 台の電子密度を持つ初期プラズマが生成される、(2) このプラズマでは炭素イオンの輝線は発光するが、酸素イオンの輝線は観測されず、酸素イオンの電離電圧 (80eV) を超える電子はほとんどいない、(3) シンクロトロン放射計測から、わずかながら高速電子が存在し、そのエネルギーは2~3MeVと非常に高いと推定される (図1参照)。一方で、非共鳴の電磁波は吸収率が悪く、この実験の初期には計測用コイルを焼損するというトラブルにも見舞われ、漏洩電磁波の対策が必要になりました。ですが、このプラズマ生成法を利用して引き続き高パワーの中性粒子ビーム加熱を行うことで、磁場強度を広範囲にスキャンする高温・高密度プラズマ実験が可能になりました。

まだ非共鳴プラズマ着火の物理機構は十分に解明できていませんが、例えば、閉じ込め周辺部領域の電子が非共鳴電磁波の電界によって磁力線平行方向に加速され、ドリフトの効果でプラズマ中心まで到達し、衝突によってプラズマを生成するというモデルが考えられます (図2参照)。また、高速電子は非共鳴電磁波の電界との確率的な相互作用で生成されると考えられ、これは、超新星爆発や地磁気圏における荷電粒子の加速機構として考えられている統計加速と良く似ています。宇宙プラズマの実験室模擬という観点からも、統計加速の基礎過程を解明できるポテンシャルを持った、非常に興味深い現象です。

[1] S. Kobayashi, K. Nagasaki et al., Plasma Phys. Control. Fusion 62 (2020) 065009.

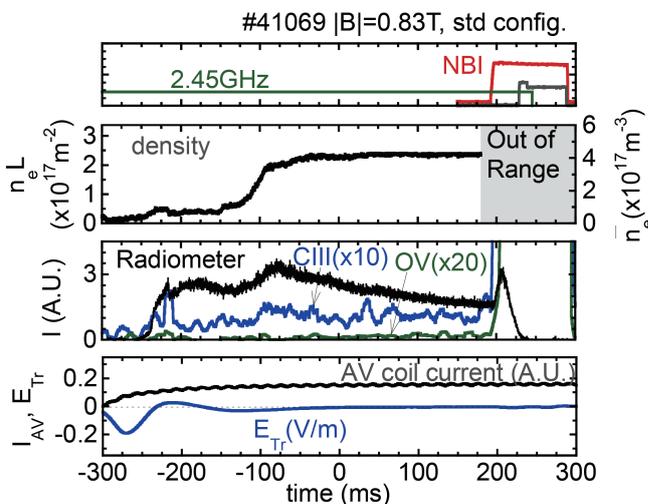


図1. 非共鳴マイクロ波を入射したプラズマ着火実験

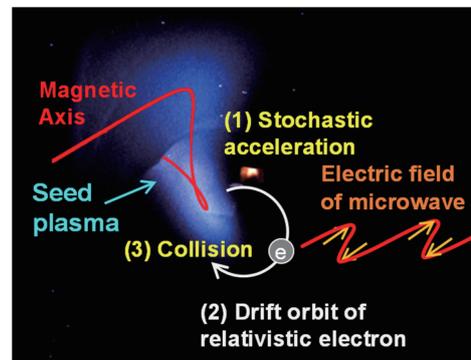


図2. 高速電子の加速とそれを介したプラズマ生成モデルの模式図

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

「観測ロケット-地上間の電離圏全電子数観測用送信機・アンテナの開発と観測結果」

観測ロケットから地上までの電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) の観測について報告する。電波はプラズマ中において真空中に比して電波の位相速度は速くなり群速度は低下する。変化の程度が周波数の二乗に反比例するため、複数の周波数を用いることで、相対的な位相変化から TEC が測定できる。今回、我々は JAXA 宇宙科学研究所の観測ロケット S-520-32 号機を用いて 150MHz と 400MHz の 2 周波ビーコン (Dual-Band Beacon; DBB) 観測を実施した。

今回の観測ロケットに搭載される送信機とアンテナを新規開発した。送信機は両方の周波数でそれぞれ 1W 出力であり、発振器として最大で 4 つの位相の揃ったタイミング信号が発生できる PLL LSI である Si5338 を用いた。アンテナは、1 台から 2 つの周波数が放射できる逆 L 型アンテナを設計した (図 1 の右図)。図 1 の左図に示すようにロケット周囲に 4 台のアンテナを均等配置することで、円偏波の DBB 波を地上に放射する。搭載機器は打上げ時の衝撃や振動に耐えるため厳しい環境条件が課せられる。特にロケット外壁に取り付けられるアンテナは、上昇時の空気摩擦によってアンテナ本体が摂氏 200 度、先端では摂氏 300 度という高温環境にさらされる。JAXA からの協力を得て素材や構造を検討しつつ、研究室内で大学院生の参加を得て設計・開発・試験を進めた。

観測ロケットは 2022 年 8 月 11 日 23 時 20 分 (日本標準時) に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から東南方向に打上げられた。図 2 にロケットの飛行中に地上 (内之浦) で受信された電波の時間変化を示す。全飛行時間にわたって安定な送受信が行われた。図 3 に本観測で得られた TEC 値を示す。高度約 90km 以上の区間において TEC が上昇下降の様子が求められた。観測ロケットの高度が最高でも E 層と F 層の間までだったため、観測ロケットから地上までの間で観測されたのは、ほぼ高度 100km 付近にあるスプラディック E 層からの寄与のみで最大 0.1 TECu 程度と非常に小さい値であったが、他の観測装置と整合的な結果が得られた。

以上、観測ロケット搭載機器を大学内で設計開発し、DBB 観測を成功させることができた。

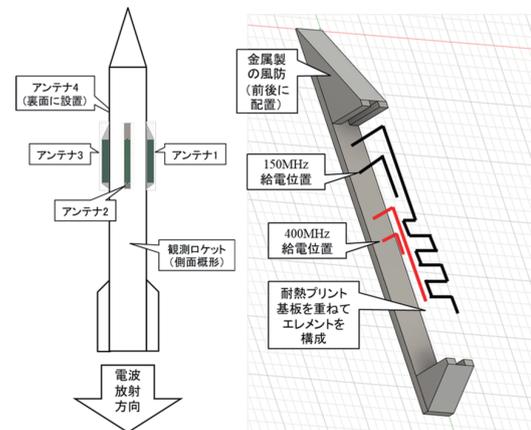


図 1 観測ロケット外壁のアンテナ設置状況 (右図)、アンテナの内部構造 (左図)。

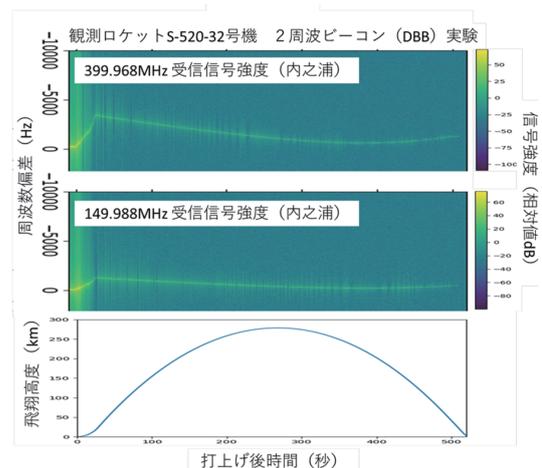


図 2 2022 年 8 月 11 日 23:20JST に打上げられた観測ロケットから地上までの電波伝搬状況。受信信号スペクトル (上図・中図)、ロケット高度 (下図)

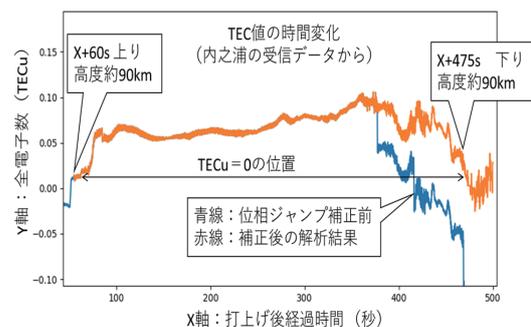


図 3 観測から得られた全電子数 (TEC)

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏電磁環境探査分野 (小嶋研究室)

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

地球上層電離大気の宇宙流出を捉えるロケット実験

地球大気の上層部は、太陽からの紫外線等により電離してプラズマの状態になっています。この電離大気が、北極、南極上空から宇宙空間に大量に流出し続けていることがわかっています。流出量は一日あたり、数10トンから数100トンと見積もられており、この量は、数日で電離大気全体が入れ替わってしまう程の量といわれています。この電離大気流出は、地球に大気が生成された太古の昔より継続して発生している可能性があり、地球の大気進化に対し、重要なファクターとなっていると考えられます。

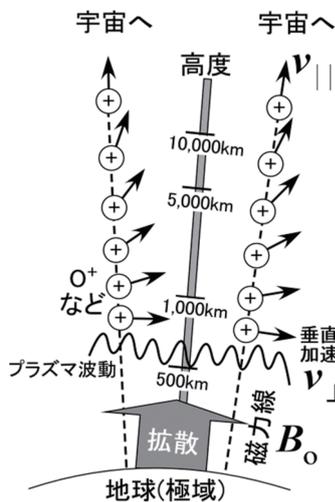


図1：電離大気が極域から流出するモデル。

実は、この流出機構がよくわかっていないのです。プロトン、酸素イオンといえど、地球の重力から脱出するには、第二宇宙速度(約11.2km/s)を超える必要があります。そのためには、これらの粒子にエネルギーをあたえるエネルギー源が必要です。そのエネルギー源の第一候補とされているのが、プラズマ波動になります。プラズマ波動とは、プラズマ中に存在する電波のことで、通常、私達が通信などに利用している電波とは異なった様相を示します。特に重要なのは、プラズマを構成するイオンや電子と、直接、プラズマ波動はエネルギーのやりとりができる、ということです。プラズマ波動は、イオンや電子からエネルギーをもらって強度を増したり、逆に、エネルギーをわたしてイオンや電子を加速したりできます。図1が、現在考えられているプラズマ波動による電離大気宇宙流出のモデルです。地球電離大気は、「じわじわ」と高度数100km程度まで拡散していきませんが、そのままでは、宇宙空間の流出には至りません。それが、高度500km以上の空間でプラズマ波動により、地球磁場と垂直方向に加速され、そのエネルギーが高度の上昇とともに、磁場と平行方向に変換されて宇宙空間流出につながる、というものです。

このプラズマ波動によるイオンの加速現場を直接捉える目的で計画されたのが、JAXA SS-520-3号機ロケットで、私達の研究室が中心となって全国の共同研究者と開発したプラズマ波動観測器を搭載しました。このプラズマ波動観測器は、これまで開発に取り組んでいたアナログASIC化小型プラズマ波動観測器で、従来A5サイズの基板で実現していた回路を、5mm x 5mmサイズにチップ化したものです。開発から10年以上を要しましたが、今回、初めて宇宙空間での利用が実現しました。ロケットは当初2017年の打上予定でしたが、延期が重なり、2021年11月4日ノールウェー・スバルバードロケット実験場から打ち上げられました(図2)。ロケットは高度約700kmに到達しプラズマ波動とイオン、磁場などの観測が行われデータを無事に取得することができました。当研究室では、小型プラズマ波動観測器で得られた電界の波形データを中心に、同時に得られたイオン観測データを相互参照しつつ解析を行っています。



図2：ノルウェー・スバルバードから打ち上げられたSS-520-3ロケット(©Gregory Tran-PIXOPHIL)(<https://www.andoyaspace.no/articles/sounding-rocket-ss-520-3-launched-from-svalbard>).

生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野 (篠原研究室)

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

「電磁界結合を利用した新たなマイクロ波加熱方式の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、マイクロ波エネルギー応用の一環としてマイクロ波加熱に関する研究開発を行っている。これまで、木質バイオマス前処理用マイクロ波照射装置の研究開発 (cue 27 号、2012) や、マイクロ波を用いた震災瓦礫処理システムの開発と実証実験 (cue33 号、2015) を紹介した。今回は、電磁界結合を利用した新たなマイクロ波加熱方式の研究について紹介する。

本研究の着想は、21 世紀以降に登場した電磁界結合型無線電力伝送に起因する。電磁界結合型無線電力伝送とは、同じ共振周波数を有する 2 つの共振器を近接配置することで電磁界結合させ、一方の共振器から他方の共振器に電磁界エネルギーを送る手法であり、電磁誘導型よりも送受電間距離を伸長できるとともに外部への電磁波漏洩の少ない無線電力伝送方式として期待されている。電磁界結合型無線電力伝送は主に 10 MHz オーダ以下の周波数帯での研究開発が活発に進んでいるが、本研究ではこの電磁界結合を GHz 帯でのマイクロ波加熱に応用する。

電磁界結合型マイクロ波加熱の概要図を図 1 左に示す。誘電体基板上に周波数 2.45 GHz で共振する共振器 (本研究では方形の銅箔により作成した半波長共振器) を設置し、同一周波数で共振する 2 つの共振器を図 1 のように対向させて設置する。一方の共振器には入力端からマイクロ波を入力し、他方の共振器は出力端においてインピーダンス調整を行う。入力端から共振周波数に等しい周波数をもつマイクロ波を入力すると、共振器間において電磁界が結合し、出力端にマイクロ波が伝送されるとともに誘電体基板間から外部へはほとんどマイクロ波が漏れない状況となる。この状況下において被加熱物を共振器間に設置することで、金属筐体で囲わない開放系において低漏洩なマイクロ波加熱の実現が期待される。既存のマイクロ波加熱装置は、電磁波漏洩防止の観点から加熱エリアは金属筐体で囲われているものがほとんどであるが、図 1 のようなマイクロ波加熱方式が実現できれば、被加熱物の出し入れが容易となるだけでなく、多数のサンプルを連続的に搬送・循環させるようなマイクロ波加熱等も実現できる。

現在まで、図 1 右の写真に示すマイクロ波加熱装置を試作した。試験管に純水 4.3ml を入れた試料に対して、周波数 2.45GHz、出力 10W (標準的な電子レンジの 1/50 ~ 1/150 の出力) のマイクロ波を照射したところ、300 秒で室温から 80℃ まで純水を加熱できることを確認した。また、誘電体基板上に共振器を複数設置することにより、2 つの試料を同時にマイクロ波加熱することにも成功した [1]。今後は、電磁界結合を利用したマイクロ波加熱方式を 2 次元および 3 次元に拡張し、さらに多数の試料を同時にマイクロ波加熱することを目指す。

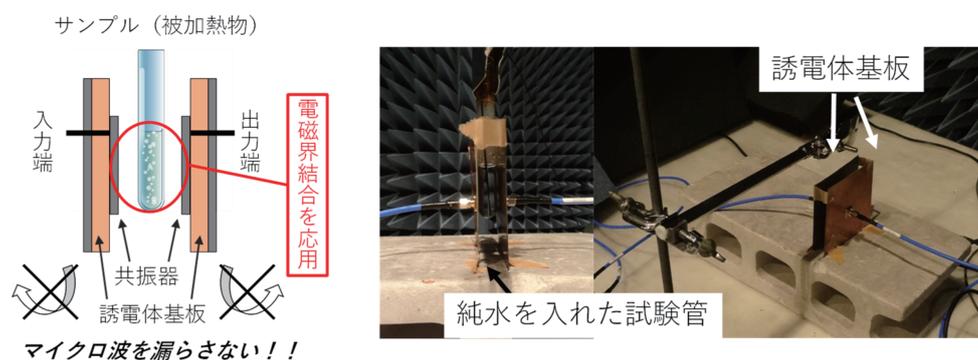


図 1 電磁界結合型マイクロ波加熱の概要図 (左) および原理検証実験写真 (右)

[1] T. Mitani, D. Nishio and N. Shinohara, "Feasibility Study on a Microwave Heating Applicator Using Electromagnetic Coupling", Proc. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018), Nov.6-9, 2018.