

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

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 (小林研)

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 (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工学分野 (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 (山田研)

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端電子材料分野 (藤田研)

情報学研究科 (大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (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 (守倉研)

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)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

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 (松田哲研)

エネルギー科学研究科 (大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (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

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)

学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアルイゼーション研究分野

(小山田研)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野

(中村裕研)

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/>

確率制御理論とネットワーク制御系

不確実な現象の評価や予測に、しばしば「確率」が用いられる。身近なところでは天気予報の降水確率や、宝くじの当選確率などがあげられる。初期不良が発生する確率や、入試に合格する確率などもある。これらの確率はいずれも、関連する特定の事象が起きるかどうかが事前にわかれば、考える必要はないものである。しかし現実には、特定の事象が起きるかどうかが事前にはできないため、上記のような確率を日常的に参考にすることになる(例えば降水確率が高いから傘を持って外出する等)。自動制御においても、制御する対象の振る舞いが不確実である場合には、確率論および統計学の知見を活用することが重要と考えられる。そのような背景から、当研究室ではテーマの1つとして、動特性が確率的であるような対象を制御するための理論整備に取り組んでいる。以下ではその活用例として、通信遅延が確率分布を用いて表されるネットワーク制御系の安定化制御について紹介する。

図1のネットワーク制御系を考える。ただし、 P_c は連続時間制御対象、 Ψ は離散時間制御器、 S はサンプラ、 H は0次ホールドである。この系は制御対象と制御器が点線で描かれたデジタル通信路を介してつながっており、その通信路に離散時間 k の1ステップ毎に τ_k^{up} , τ_k^{dw} だけ信号を実時間で遅らせる要素 D^{up} , D^{dw} が想定されている。サンプラとホールドは同期しており、ホールドに信号が届き次第サンプラが動作する状況を想定すると、 τ_k^{up} , τ_k^{dw} が確率分布に従うとき、このネットワーク制御系全体の動特性は確率的になる。そのような系を安定化する制御器 Ψ は、文献[1]の成果を活用することで設計できる。

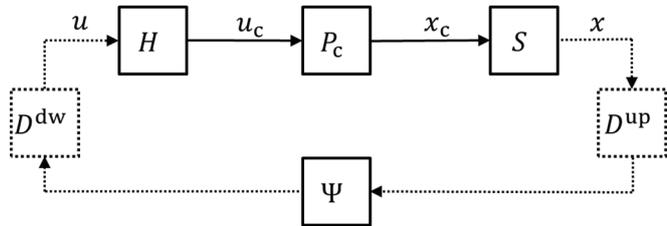


図1：ネットワーク制御系

制御対象 P_c として、質量の無視できる棒の先に質点がある図2の倒立振子の、鉛直上方での線形近似モデルを考える。ただし、質量 $M=1$ 、重力加速度 $g=9.8$ 、棒の長さ $r=0.2$ であり、 τ は入力トルク、 θ は鉛直上方からの振子の角度である。また通信遅延は指数分布 Exp を用いて $\tau_k^{up} = \xi_k^{up} + 0.01$, $\tau_k^{dw} = \xi_k^{dw} + 0.01$, $\xi_k^{up} \sim \text{Exp}(0.01)$, $\xi_k^{dw} \sim \text{Exp}(0.02)$ と表されるとする(指数分布は待ち行列理論で用いられており、パケットの到着間隔等を表現する典型的な分布の一種である)。このような設定のもと、振子を遠隔で倒立させる制御器 Ψ を文献[1]の成果に基づいて設計すると、ネットワーク制御系の応答は図3のようになった。時間の経過とともに θ が0に収束しており、鉛直上方での倒立が達成できていることがわかる。本例題のように P_c が不安定であり、かつ通信遅延の範囲が非有界であっても安定性を保証した制御系設計が可能であることは、確率論的なアプローチの強みの1つである。

[1] Y. Hosoe and T. Hagiwara, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 64, No. 11, pp. 4764–4771, 2019.

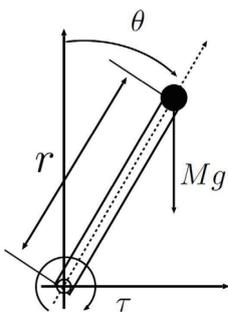


図2：倒立振子

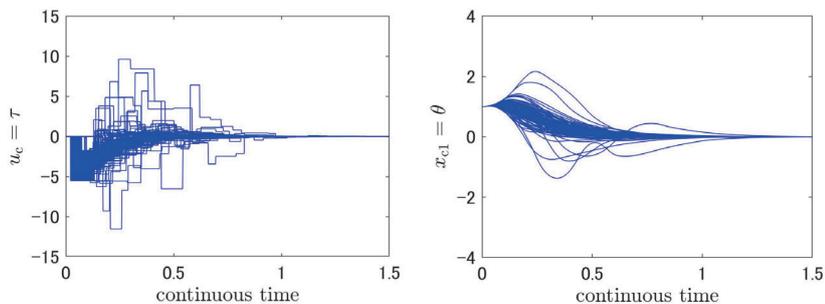


図3：ネットワーク制御系の応答 (標本数 100)

生体医工学講座 複合システム論分野 (土居研究室)

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

「膵臓ランゲルハンス島における細胞群による血糖値制御」

胃の奥（背中側）にある膵臓は、生命維持のために（全く働きの異なる二つの機能である）外分泌機能と内分泌機能を担っている。膵管を通して十二指腸に種々の消化酵素を含む膵液を分泌するのが外分泌であり（消化管内部は、身体の外側なのである）、インスリンやグルカゴンなどの血糖値調節に関わるホルモンを身体の内側に分泌するのが内分泌である。外分泌を行う細胞は人では膵臓の98%程度を占めており、内分泌細胞は極めて少数である。また、（血糖値を上昇させる）グルカゴンを分泌する α 細胞や（血糖値を下降させる）インスリンを分泌する β 細胞などの内分泌細胞からなる細胞群は、膵臓内で局所に集まって存在しランゲルハンス島（膵島）を形成し、これら膵島が膵臓内に散らばって点在している。膵臓の中では極少数の膵島細胞群が、生体における血糖値制御という重要な役割を担っている。この血糖値制御機能に問題が生じる糖尿病は、現時点では完治させる方法はなく、（膵島の移植手術などを除けば）対症療法的治療や生活習慣の改善に頼るしかない。

当研究室では数理的・システム論的アプローチにより電気生理現象に関する研究を行っているが、脳・神経系や心臓・筋肉細胞だけではなく、膵島におけるホルモン分泌においても電気生理現象が本質的な役割を担っている。例えば膵臓 β 細胞では、図1に示したような（バースト振動と呼ばれる）特徴的な電気信号（活動電位）が生成され、それによってインスリンが分泌される（膵島における他の細胞も、それぞれに特徴的な活動電位を生成する）。糖尿病で用いられる薬剤として代表的なスルホニル尿素薬は、膵 β 細胞の K^+ イオンチャネルを阻害することで、このようなバースト振動を（無理やり）促し、インスリンの分泌を促進させようとする（なお、 K^+ チャネルを阻害することが活動電位を促すことは、当学科における授業「生体工学の基礎」を受講すれば、理解できるようになる）。

ところが、このような個別攻撃的・局所的戦術では糖尿病の根治には至らない。なぜなら、糖尿病は、ホルモン分泌細胞の個別的機能不全による疾患ではなく「システム」の機能不全による疾患だからである。健常者の血糖値は実に精緻に制御されているが、それは膵島内の種々の細胞が互いに情報をやり取りしながら、膵島細胞群全体がシステムとして血糖値制御を行っていることによると考えられている。図2に示した概念図は、膵島内の α 、 β 、 δ 細胞が互いにそれらが分泌するホルモンを介して行う相互作用（傍分泌作用）を表している。しかし、本研究では、これらの内分泌細胞が互いに近接して存在しているのは、細胞間で（ホルモンだけではなく）電気信号を用いて情報のやり取りを行いながら精緻な血糖値制御を行っているのではと考え、（傍分泌作用だけではなく）電気生理現象をも考慮した数理モデルを用いて、膵島の細胞群全体がシステムとしてどのような制御を行っているかを明らかにする研究を進めている。

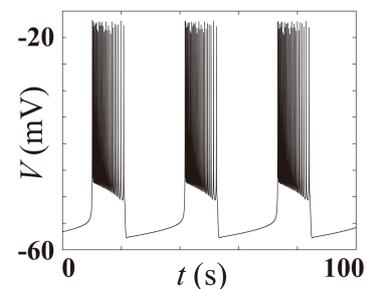


図1：膵 β 細胞の膜電位波形

参考文献

[1] 伊藤・土居：膵 α 、 β および δ 細胞の傍分泌メカニズム解明のための膵島細胞の電気生理に関する研究，信学技報 NLP2017-111, pp.51-56 (2018).

[2] 杉浦・土居：解糖系を含む膵 β 細胞モデルのベクトル場の遅速分解と分岐解析に基づく解析 ～外部入力と血糖値の影響に注目して～，信学技報 NLP2019-117, pp.25-30 (2020).

[2] Y. Nishide, S. Doi: Influence of the electrical activity of pancreatic beta cells on the electrical activity of alpha cells through the insulin secretion, Proc. of NOLTA2020, pp.476-479 (2020).

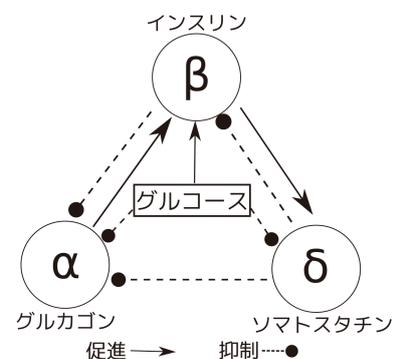


図2：膵島細胞間の傍分泌作用

生体医工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

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

「脳内の機能的結合の直接計測に向けた MRI スピンロック撮像の検討」

我々の知覚、認知、思考、動作などのプロセスを司る脳機能は、様々な計測法により明らかにされてきたが、未だ解明されていない多くの謎が残されており、ヒトの脳機能計測に関する研究の進展が望まれている。中でも、脳機能ネットワークという観点から、脳内の異なる領域がどのような機能的な関連性を持ち、如何に協調的活動をしているのかについて関心が持たれるようになった。これを機能的結合というが、この機能的結合を直接検出できる計測手法は未だ開発されていない。

数多くの計測手法の中でも機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) は、脳活動部位をミリメートル単位の空間分解能で非侵襲に計測できることから、非常に有望な手法である。しかしながら、従来の fMRI は脳神経細胞が賦活する際に生じる血行動態の変化 (BOLD 効果) に基づいており、神経活動から数秒遅延することや、活動部位より広範な領域で反応が見られることなど、機能的結合を観測する際に問題となる欠点も指摘されている。

我々はこれに対して、スピンロック撮像法を用いることにより機能的結合の直接的な計測を目指している。スピンロック撮像法は、脳神経活動にともなって生じる振動磁場により、生体内に存在する水分子中のプロトンの磁化の歳差運動に二次的な磁気共鳴を引き起こす手法である。通常のスピンロック撮像法では、信号の位相情報を取得することはできないが、磁化のフリップアングルを調整することで、位相情報を取得することが可能になる (図 1) [1]。複数の脳領域間で得られる脳神経磁場の相関関係を調べることで、離れた脳領域間の機能的結合を解明することができる。図 2 に、本手法をダイポールファントムに適用した結果を示す。ダイポール電極に印加される磁場の初期位相の変化が観測されていることがわかる。本手法では数百 pT の磁場が検出できるため、0.1 ~ 1 nT 程度の極微弱な脳磁場の検出や機能的結合の計測への応用が期待できる。

本手法は、BOLD 効果の表れにくい低磁場 MRI にも適用できるため [2]、大きな波及効果が期待できる。今後は実際にヒトの脳活動の計測を行い、本研究の有用性を検証して行く予定である。

[1] Y. Ito, M. Ueno and T. Kobayashi, Scientific Reports 10, 5463 (2020).

[2] H. Ueda, Y. Ito, T. Oida, Y. Taniguchi and T. Kobayashi, J. Magn. Res. 319, 106828 (2020).

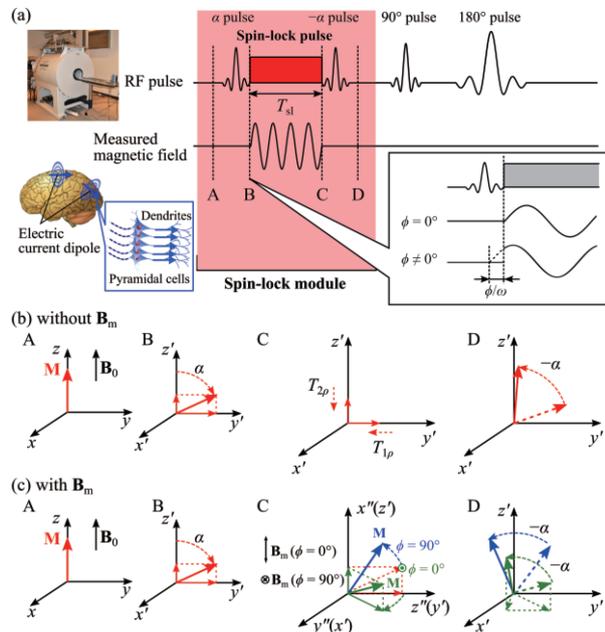


図 1 改良したスピンロック撮像法

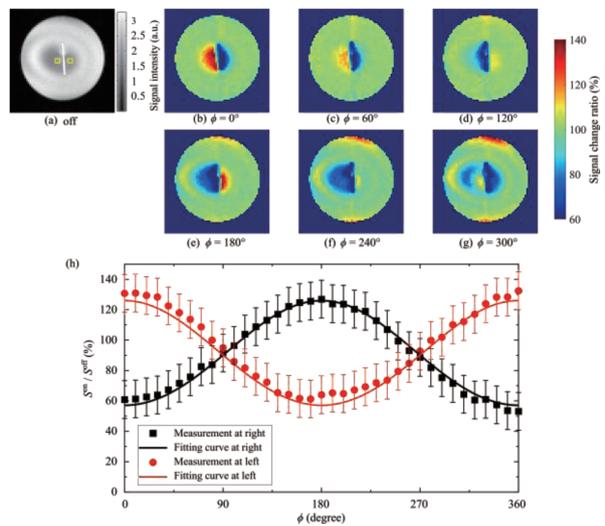


図 2 ダイポールファントムによる検証実験。生理食塩水内のダイポール電極に印加する磁場の初期位相を変化させると、MR 画像のダイポール電極近傍の信号強度の増減として捉えられる。

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/>
 「放射の反作用を含む単導体の伝送線路モデル」

伝送線路モデルは高い周波数で動作する回路の設計において不可欠のモデルであるが、本研究室ではその拡張として、明示的な帰路線をもたない単導体伝送線路の回路モデル化を行っている。このような明示的な帰路線を持たない伝送線路は、テラヘルツ波などの高周波で実際に使われる一方、線状のアンテナやコモンモードによる放射とも密接に関係し、その放射の仕組みを適切な形で回路モデルに取り入れることが重要になっている。

放射による損失を回路モデルに取り込むとき、遠方界として出ていくエネルギーを回路の損失として表現する放射抵抗モデルがよく用いられるが、これはエネルギーの関係のみを用いるため、実際の回路上で生じる損失の位置や時間も含めた表現は難しい。そこで、単導体線路上の電流が作る電磁界が自身にフィードバックする形で放射の反作用を表現するモデルを提案した [1]。光速 c とし、導体上の線電荷密度 Q と電流 I の波動方程式 (Sommerfeld の主波) において、入射電界に加えて自身が作る電界をフィードバックとして入れると次式になる。

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} cQ \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -jk \\ -jk & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cQ \\ I \end{bmatrix} + \left[\sum_m \frac{j\chi(k_m)}{Z_0} \begin{Bmatrix} \hat{E}_{ex}(k_m) + \hat{E}_{tr}(k_m) - \hat{E}_{fin}(k_m) \\ 0 \end{Bmatrix} e^{-jk_m z} \right]$$

ここで、 z は導体長手方向の空間座標、 k は自由空間波数、右辺第二項にある 3 つの電界は、それぞれ入射波の z 成分 (ex)、進行波の作る放射の反作用 (tr)、有限長効果 (fin) の電界である。このモデルにより、線路上の電流は図 1 のように、入射波により発生する散乱波のソース電流 (I_{sc})、線路上の進行波電流 (I_f, I_b)、進行波が端点で作る放射の反作用による電流 (I_{re}) の 3 つの成分に分けられ、入射波に対する散乱と再放射の違いも明確になる。また、この 3 つの成分に分けることにより、図 2 に示す斜め入射で励振された一見複雑な遠方界の分布 (中図) が、物理的な意味が明確な 3 つの成分に分けられる (右図)。このような放射に対してもコンシステントな線路モデルを用いて、屈曲や分岐などの構造も回路として設計可能にすることを進めている。

参考文献 [1] D.Tashiro, T. Hisakado, T. Matsushima, O. Wada, "Single-Conductor Transmission Line Model Incorporating Radiation Reaction," IEEE Trans. EMC, Accepted.

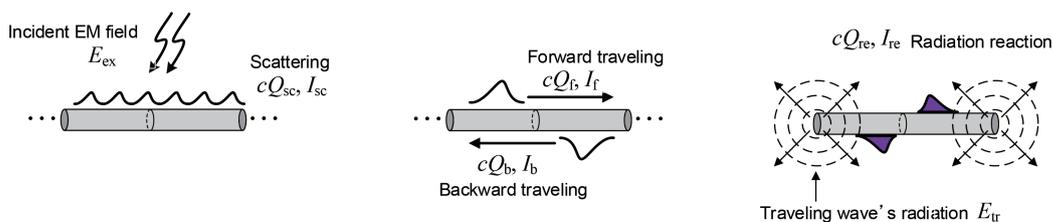


図 1 単導体伝送線路の 3 つの電流要素 (入射波の散乱のソース、進行波、端点による放射の反作用)

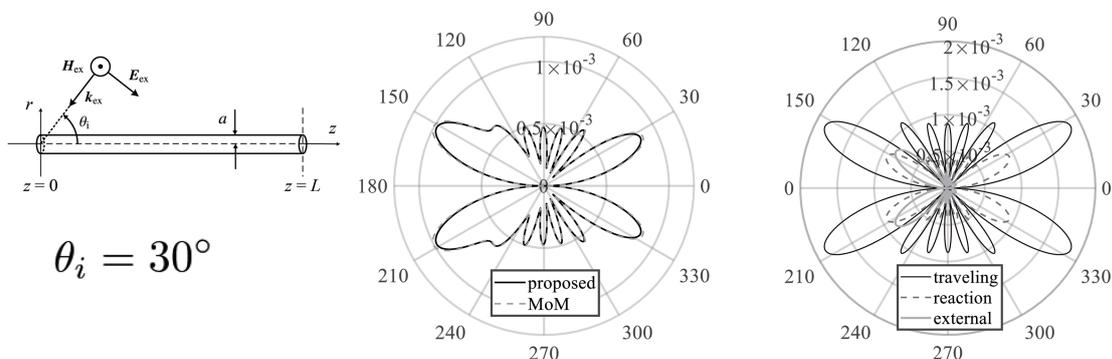


図 2 斜め入射で励振された場合の遠方界とその 3 成分への分解 (MoM はモーメント法)

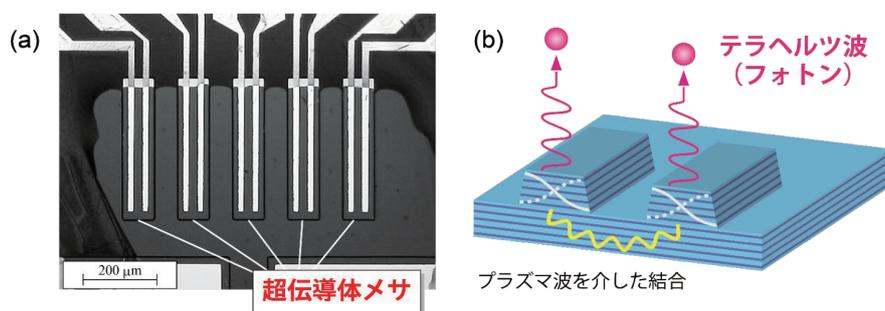
集積機能工学講座

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

「偏光解析による高温超伝導テラヘルツ光源の同期発振現象の解明」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ (THz) 領域はこれまでに 1 mW を超える実用的な強度を持つ固体光源が得られていませんでした。マイクロ波領域のようにキャリアのダイナミクスを利用しようとしても半導体の移動度の上限から周波数が制約され、LED のように量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要となるからです。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。2007 年に高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ ($\text{Bi}2212$) からの結晶外への THz 波放射が初めて観測された後の研究により、単色でありながら 0.3 から 11 THz という広い可変周波数範囲、最大 0.6 mW という高い放射効率という際立った特性が現在までに報告されています。これは、 $\text{Bi}2212$ 単結晶表面に形成されたメサ構造に含まれる 1000 程度の「固有」ジョセフソン接合が同期して振動する結果と考えられています。高い放射強度を目指して試みられているのが、複数メサ構造素子の同期発振です。同一の超伝導体上に形成した複数のメサ構造素子を並列または直列に接続して直流電圧を印加することで、それぞれのメサ構造素子で励起される巨視的なジョセフソンプラズマ振動が同期した結果、素子数の 2 乗に比例して強度が増加し、放射強度 0.6mW を達成したと報告されています。しかしながら、同期発振をもたらす素子間の結合の微視的な機構はほとんど理解されておらず、高強度発振器を設計することは極めて困難であった。そこで私たちは、放射されるテラヘルツ波の偏光観測から素子に励起されたジョセフソンプラズマ振動の状態を推定し、素子を結合する超伝導単結晶基板を介した結合メカニズムを解明する手法を提案した。

図のように、単結晶基板上に形成した 2 つのメサ構造素子から放射されるテラヘルツ波の強度、周波数、そして偏光を単独動作と並列接続同時動作の場合で観測しました。偏光観測により、電磁波の位相が推定できるので、発振状態をベクトル表現することが可能になります。その結果、同時動作の発振状態が 2 つの素子の単独動作を基底とする線形結合で記述できることを示しました。この成果は、パラメータを変えた測定を進めていくことにより、2 つのメサ構造に励起されたジョセフソンプラズマ振動の相互作用行列を推定することを可能にし、高強度放射素子設計の道筋をつけただけでなく、テラヘルツ量子通信デバイスの可能性も提案しています。本研究成果は京都大学ホームページ 2020 年 5 月 15 日付「最新の研究成果」で公開されています。https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-05-15-1



図：(a) 超伝導体メサ（台地）を 5 つ並べたアレイ構造の顕微鏡写真。上下に伸びた電極からメサに電流を注入するとテラヘルツ波が発生する。(b) 同期する超伝導体メサの概念図。隣り合うメサが超伝導体プラズマ波を介して結合し、高強度なテラヘルツ波（フォトン）を発生する。

電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

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

「学理に基づいた酸化膜 /SiC 界面欠陥の大幅な低減」

耐圧 1~3 kV 級の SiC (炭化珪素) パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードは実用化が始まり、各種の電源、太陽電池用パワコン、電車、電気自動車などで顕著な省エネ効果が示されています。しかしながら、SiC パワー MOSFET の特性は SiC 固有のポテンシャルから大きく乖離し、本来の性能を発揮できていません。この最大の原因は、MOSFET の根幹を担う酸化膜と SiC の界面に非常に高密度の欠陥が存在し、ゲート電圧で誘起された反転層キャリアが界面欠陥に捕獲されてしまうからです。この酸化膜 /SiC 界面欠陥は、当該分野で過去 20 年に亘って顕著な進展がありませんでしたが、今回、界面欠陥の大幅な低減に成功しましたので紹介いたします。

従来、SiC MOSFET に用いるゲート酸化膜は、Si MOSFET と同様に熱酸化により形成されてきました。しかしながら、SiC と O_2 の反応により SiO_2 を形成する過程において、母体原子である炭素が界面近傍および酸化膜中に残留し、高密度欠陥を形成すると理論的にも推測されています。当研究室では、SiC を熱酸化すると界面近傍に高密度の炭素欠陥が不可避的に形成されることを突き止め、これを根本的に解決する手法を探索してきました。この結果、(1) SiC の熱酸化を排除した酸化膜形成プロセスの確立、(2) SiC 表面近傍に存在する欠陥を、酸化膜形成前に水素エッチングにより除去するプロセスの確立を通じて、品質の高い界面を形成することに成功しました。

図 1 に従来の酸化膜形成プロセス、および今回提案する二種類の酸化膜形成プロセスのフロー図を示します。新たに提案するプロセス A では、水素エッチング後に Si 薄膜を堆積し、これを SiC の酸化が全く進行しない温度で酸化することにより SiO_2 に変換します [1]。またプロセス B では、水素エッチング後に堆積法により SiC 表面に SiO_2 膜を形成します [2]。なお、両方のプロセス共に、酸化膜形成後に高温で窒素処理を施し、界面窒化を行うことが欠陥低減に有効であることを見出しています。

図 2 に、容量一電圧特性の解析により求めた酸化膜 /SiC 界面欠陥密度のエネルギー分布を示します。ここでは、SiC パワー MOSFET の特性に大きな影響を与える伝導帯端 (E_c) 近傍のエネルギー範囲における界面欠陥密度を示しています。単に熱酸化のみを行った場合には界面欠陥密度が $10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 以上と極めて高くなります。熱酸化後に NO ガスによる界面窒化を施すと欠陥は大幅に低減しますが、その密度は伝導帯端近傍で $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 以上となります。両方とも伝導帯端に近づくにつれて欠陥密度が指数関数的に増大する結果となります。一方、今回、当研究室が提案するプロセス A、B では界面欠陥密度が $(1\sim4) \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ であり、伝導帯端付近で比較的フラットな欠陥分布となっています。この結果、欠陥密度の積分値で比較すると、従来プロセスに比べて約 1/5~1/10 に低減できています。幸い、本成果を元に 2 回のプレス発表を行い、多くの新聞、雑誌、インターネットで取り上げていただくことができました。今後は、この高品質界面を用いたトランジスタの作製を行う予定です。

[1] T. Kobayashi et al., Appl. Phys. Express, 13, 091003 (2020). [2] K. Tachiki et al., Appl. Phys. Express, 13, 121002 (2020).

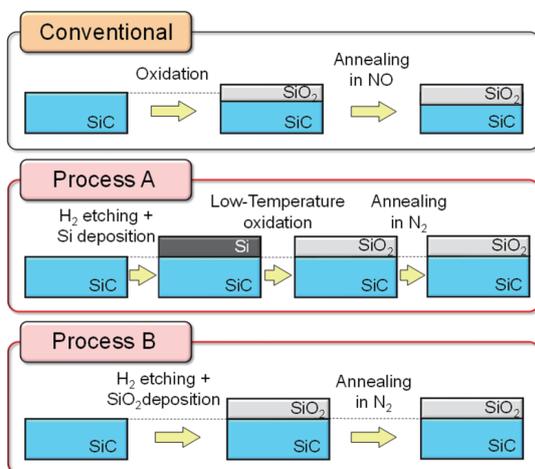


図 1 提案する酸化膜形成プロセスのフロー

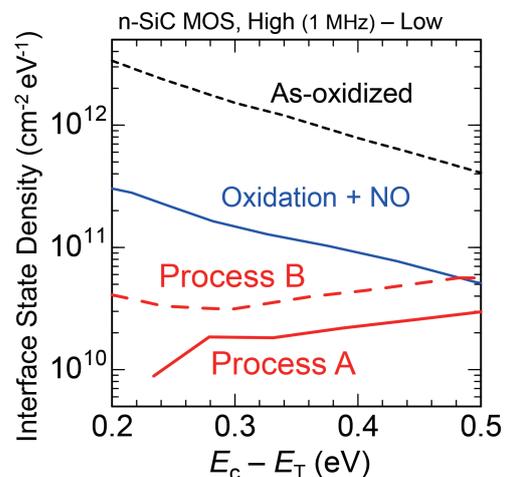


図 2 酸化膜 /SiC 界面欠陥密度の低減

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野 (山田研究室)

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

液中原子間力顕微鏡による免疫反応の分子レベル可視化に関する研究

生物には、免疫系という外部からの侵入物に対する防衛機構が備わっている。特に、脊椎動物以上の生物には、侵入した病原体を特異的に認識して排除するという高度な獲得免疫機構がある。獲得免疫系では、体内で産生される抗体分子が病原体の一部（抗原性分子）と特異的に結合することで、免疫機能を発現している。この特異的結合は抗原-抗体反応と呼ばれるが、特定の分子間のみでの結合であることから、分子認識センサや分子標的などに応用されており、生化学・医学的側面だけではなく、工学的側面においても幅広く関心を集めている。一方、原子間力顕微鏡（AFM）は、液中環境下においても分子スケールでの観察が可能な手法であり、DNA 二重らせん構造の直接観察など、生体試料の分子レベル解析などに広く用いられている。AFM による抗原-抗体反応の直接観察は、分子レベルでの免疫機構の解明に大きく貢献するとともに、新規バイオセンサへの応用などに発展して行くことが期待される。われわれは、これまでの研究で、抗体分子の一種である IgG（免疫グロブリン G）分子が、生理環境下において自己組織的に 6 量体を形成し、さらにこの 6 量体が 2 次元結晶化することを AFM 観察によって初めて見出した¹⁾。本稿では、IgG 抗体分子 6 量体に抗原性分子が結合することを示す AFM 観察結果について紹介する²⁾。

図 1 (a) に IgG 抗体分子（単量体）の AFM 像を示す。抗体分子は特徴的な Y 字構造を有しており、抗原に結合する二つの Fab 領域と、細胞受容体に結合する Fc 領域とに分かれていることが明瞭に可視化された。図 1 (b) は、IgG 分子が自己組織的に環状の 6 量体を形成した結果を示す。IgG 分子は Fc 領域（図中の明るい環）を中心に、Fab 領域（図中の 12 個の輝点）を外側に向けて 6 量体を形成している。さらに、これら IgG 分子 6 量体上に、抗原性分子を含む溶液を滴下した後の AFM 像を図 2 に示す。環状の 6 量体の外側に位置する Fab 領域に抗原性分子が結合し、AFM 像では輝点として観察されている。この輝点の数の変化を測定することで、抗原性分子の結合量の時間依存性を計測することが可能となり、結合速度定数を求めることに成功した。これら一連の研究によって、特異結合過程を分子レベルで理解する上で、AFM 可視化は極めて有用な手法となることが示された。今後、AFM による構造・機能可視化をさらに進めることで、分子レベルでの免疫機構の詳細が明らかになることを期待している。

参考文献

- 1) S. Ido, H. Kimiya, K. Kobayashi, H. Kominami, K. Matsushige, H. Yamada *Nature Materials* **13**, 264 (2014).
- 2) H. Kominami K. Kobayashi, H. Yamada *RSC Advances* **8**, 29378 (2018).

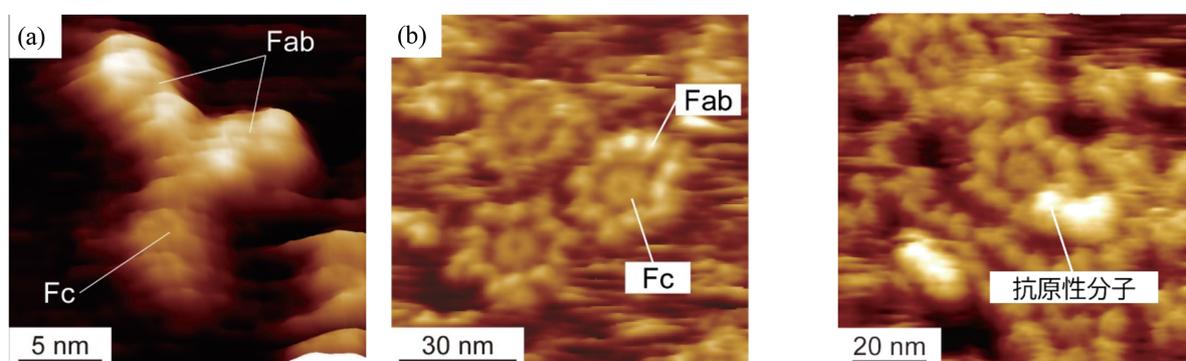


図 1: (a) IgG 分子単量体の AFM 像。(b) IgG 分子 6 量体の AFM 像。

図 2: 抗原性分子が結合した IgG 抗体分子 6 量体の AFM 像。

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

「高出力・狭ビーム発散角フォトニック結晶レーザーを用いた光測距システムの開発」

近年、自動車やロボットの自動走行に代表されるスマートモビリティを支える光センシング技術として、LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれるレーザー光を用いた光測距システムの技術開発が盛んに行われています。このLiDARの心臓部であるレーザー光源には、小型・安価・高効率といった特徴を有する半導体レーザーが主に用いられています。しかしながら、現状のLiDARでは、ビーム品質が悪く、ビーム発散角が大きくかつ非対称な従来型の半導体レーザー (図1左) 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ます。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・簡素化、低コスト化、さらには性能や機能の向上を可能にする新たな半導体レーザーとして、高出力・狭ビーム発散角動作可能なフォトニック結晶レーザー¹⁾の研究・開発を行っています。

フォトニック結晶レーザー (図1右) は、ナノスケールの周期構造を持つフォトニック結晶をレーザー共振器として活用することで、原理的に大面積でもコヒーレント動作が可能です。このため、高出力 (大面積発光) でも、高いビーム品質を維持できるので、極めて狭い発散角のビームを得ることが出来ます¹⁾。図2には、このような特徴を表す例として、出射されたビームを、レンズを用いることなく長距離伝播させた様子を示します。比較のために示した通常の半導体レーザーでは、短い距離を伝播しただけでビームが大きく拡がってしまうのに対して、フォトニック結晶レーザーでは、ビームがほとんど拡がることなく伝播し、30mという遠方においても僅か5cm程度の狭いビーム径が維持できています。これは、フォトニック結晶レーザーを用いることで、外部レンズ系を必要としない小型・簡素なシステムによって、長距離かつ高分解能な測距が実現可能なことを意味します。図3には、本レーザーを搭載したLiDARを用いて、実際にリアルタイムでの測距を行った様子の一例を示します。同図より、二人の人物A、Bまでの距離や、手を広げている様子などが、細かく捉えられていることが見て取れます。また、フォトニック結晶レーザーには、以上のような優れた特徴に加えて、様々な新たな機能の付加 (例えば、電気的2次元ビーム走査²⁾や、サブナノ秒の短パルス化³⁾など)も可能なため、今後、さらなる小型化や高性能化、高機能化の実現に繋がっていくことが期待されます。

参考文献 [1] M. Yoshida, S. Noda, et al., Nat. Mater. **18**, 121 (2019). [2] R. Sakata, S. Noda, et al., Nat. Commun. **11**, 3487 (2020). [3] 森田, 野田他, 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 10p-Z18-14 (2020).

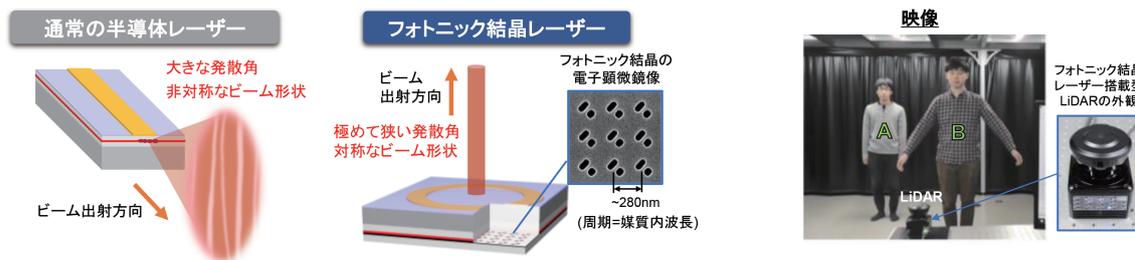


図1: 通常の半導体レーザーとフォトニック結晶レーザーの違いの一例

	15cm	1m	10m	30m
通常の半導体レーザー			確認不可	確認不可
フォトニック結晶レーザー				

※1m以下ではビーム径が小さすぎて見えにくいことに注意

図2: 出射ビームを、レンズ無しで長距離伝播させたときの様子



図3: フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDARによる測距のデモンストラレーションの様子 (なお、ここではリアルタイム測距時のスナップショットを図示していません。)

量子機能工学講座 量子電磁工学分野

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

二酸化バナジウムを導入したメタ表面による動的 1/4 波長板の実現

メタ材料は電磁波の波長に対して十分小さい人工構造の集合体を指し、負屈折をはじめとした自然の物質では実現できないような現象を実現するものとして注目されている。2次元的な構造をもつメタ材料は特にメタ表面と呼ばれ、電磁波の波面操作や偏光操作を波長より薄い素子で実現できることからマイクロ波から光領域まで広い分野で研究が進んでいる。そして、メタ表面に可変要素を組み込むことで特性が動的に調整可能な動的メタ表面の研究も近年大きく進展している。

本研究室ではメタ表面の対称性を動的に制御することで電磁波の偏光を操作するメタ表面に着目し、テラヘルツ波に対する動的 1/4 波長板を広帯域で実現する方法について研究を行った。メタ表面の概略を図 (a) に示した。この2次元構造は金属と可変抵抗膜から構成される。可変抵抗膜は金属状態と絶縁状態の切り替えが可能な物質で構成される。可変抵抗膜が絶縁状態の場合のメタ表面の構造を同図 (b) に、金属状態の場合の構造を同図 (c) に示す。これらの構造は、金属部と絶縁部を入れ替えて90度回転させることで重なるという対称性をもつ。このような構造に対して、各偏光（垂直偏光、水平偏光）に対する透過率には関係がある [1]。図 (b) の構造が各偏光に対して透過率が等しく、位相差が90度である場合には、(c) の構造の透過率も各偏光で等しく、位相差は図 (b) の場合と逆転する。これは、図 (b) の構造も (c) の構造も 1/4 波長板のように働き、その速軸と遅軸は逆転していることを表している。つまり、図 (a) のメタ表面に対して、可変抵抗膜の状態を切り替えることで、動的 1/4 波長板を実現できることを意味している。

このメタ表面をテラヘルツ領域で実現するために、可変抵抗膜として二酸化バナジウム膜を利用した。

二酸化バナジウムは65度前後で絶縁体-金属転移を起こす物質であり、低温ではテラヘルツ波に対するよい絶縁体、高温ではよい伝導体として機能する。作成した素子の全体図を図 (d) に示し、そのメタ表面の拡大図を図 (e) に示す。金属部はアルミニウムで構成されている。このメタ表面全体には電流を流すことが可能で、電流印加による加熱で二酸化バナジウムの相転移を引き起こすことができる。各偏光に対する透過測定をテラヘルツ時間領域分光法で行い、動的 1/4 波長板として機能していることを実証した。このメタ表面

は前研究 [2] に比べ構造の最適化が行われており、4.2 倍もの広帯域動作が可能になった [3]。

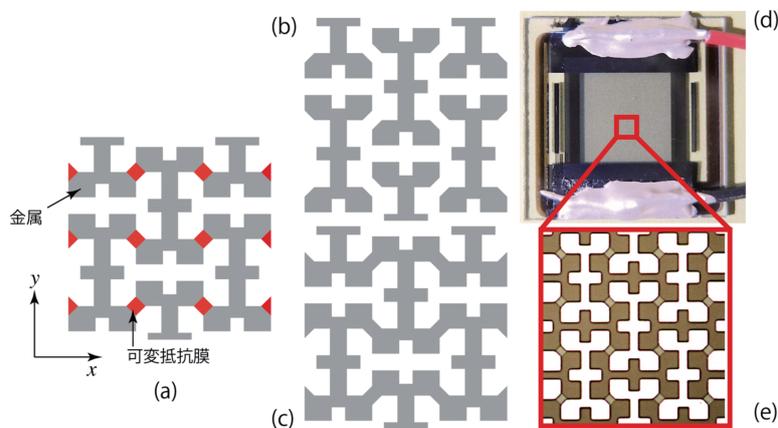


図 (a) メタ表面の構造 (b) 可変抵抗膜が絶縁されている状態 (c) 可変抵抗膜が金属化した状態 (d) 素子の全体図 (e) メタ表面の拡大図

参考文献

- [1] Y. Nakata, Y. Urade, K. Okimura, T. Nakanishi, F. Miyamaru, M. W. Takeda, and M. Kitano, Phys. Rev. Appl. 6, 044022 (2016).
- [2] Y. Nakata, K. Fukawa, T. Nakanishi, Y. Urade, K. Okimura, and F. Miyamaru, Phys. Rev. Appl. 11, 044008 (2019).
- [3] T. Nakanishi, Y. Nakata, Y. Urade, and K. Okimura, Appl. Phys. Lett. 117, 091102 (2020).

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/>

「サービスチェイニングにおける仮想ネットワーク機能配置および経路決定モデル」

大木研究室は、スマートフォンやIoTデバイス、データセンター、クラウド、および様々なアプリケーションを相互接続し、データが人々にもたらす恩恵を最大化できるような、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。本稿では、研究トピックの1つであるサービスチェイニングについて紹介する [1]-[3]。

ファイアウォールやパケットフィルタリング、動画最適化等といったネットワーク機能を、汎用サーバ上で動作する仮想ネットワーク機能 (VNF: Virtual network function) として実装する技術の研究開発が活発に行われている。従来専用のハードウェアで実装されていたネットワーク機能をソフトウェアとして実現することにより、ハードウェアの設置コストの削減や、ネットワークの需要変動に応じた性能の調整、機能の容易な追加・削除等を実現する。

サービスチェイニングは、VNFの連鎖をネットワーク上で構成し、所望のネットワークサービスをユーザに提供する手法である。各ユーザ宛てのトラフィックは、ユーザが要求したVNFを所定の順序で通過するように制御される。図1にサービスチェイニングにおけるVNF配置および経路決定の例を示す。大木研究室では、各サービスの要求条件を満足しながら、伝送容量や計算能力等のネットワーク資源を効率的に使用し、かつサービスの継続的な提供を実現するためのサービスチェーンの資源割り当てモデルの研究を行っている。

一部の種類のVNFは、図2のようにトラフィックが通過する順序を入れ替えても、提供されるネットワークサービスの性能に大きな影響がないことが指摘されている。また、図3のようにサービスチェーンの経路制約を緩和し、折り返しやループを許容することで、複数のサービスチェーン間でVNFを共用できる可能性が高まる。[1] および [2] では、VNFの順序制約と経路制約の両方を緩和したモデルについて検討し、リンク使用およびVNF配置にかかるコストを最小化する整数線形計画問題として定式化した。また、大規模な問題でも実用的時間内に解を得るために、列生成法を利用した発見的アルゴリズムを検討した。

[3] では、ネットワーク上に配備された計算機資源の利用可能時間に基づいて、サービスチェーンの連続利用可能時間を最大化するVNF配置モデルについて検討した。遺伝的アルゴリズムをベースにした発見的手法を開発した。また、本研究の発展として、計算機資源の利用可能時間に不確実性があるシナリオや、あらかじめVNFのバックアップを作成しておくことが可能なシナリオについても検討を行っている。

[1] N. Hyodo, T. Sato, R. Shinkuma, and E. Oki, "Virtual Network Function Placement for Service Chaining by Relaxing Visit Order and Non-Loop Constraints," IEEE Access, vol. 7, pp. 165399-165410, Aug. 2019.

[2] T. Sato, A. Kikuchi, R. Shinkuma, and E. Oki, "Column Generation Based Algorithm for Service Chaining Relaxing Visit Order and Routing Constraints," IEEE GLOBECOM, Dec. 2020.

[3] R. Kang, F. He, T. Sato, and E. Oki, "Virtual Network Function Allocation to Maximize Continuous Available Time of Service Function Chains with Availability Schedule," IEEE Transactions on Network and Service Management (to be published).

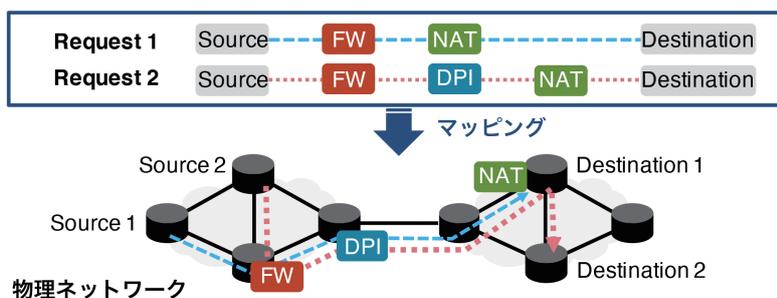


図1 サービスチェイニングの例

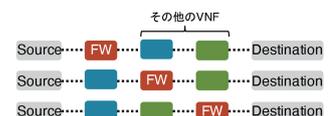


図2 順序制約の緩和

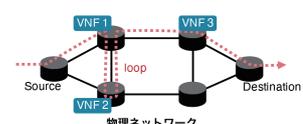


図3 経路制約の緩和

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/>

「(Ring-)LWEに基づく耐量子計算機鍵交換向け演算アーキテクチャの提案」

量子計算機に関する技術の発展により、素因数分解問題や離散対数問題など現在広く利用されている暗号アルゴリズムの基となっている数学的問題が現実的な時間で解けるようになりつつある。このため、現在の暗号の多くは今後20年程度で安全性が失われることが懸念されている。これを受けて、米国の国立標準技術研究所が耐量子計算機暗号アルゴリズムの標準化に向けた議論を進めており、その候補の一つとしてLearning with Errors (LWE) 問題に基づく暗号アルゴリズムが有力視されている。当研究室では、これら耐量子計算機暗号アルゴリズムのハードウェアおよびソフトウェア実装について研究を行っている。

図1, 2は、LWEベースの鍵交換方式であるFrodo向けに提案した乗算器アーキテクチャFilianoreである[1]。Filianoreでは、LWEで実行される乗算では乗数が常に小さいことに着目して、乗算器を加算器1個とマルチプレクサ2個のみで実現している。これにより、高速化と低電力化が実現できる。

また、LWE問題の亜種であるring-LWE問題を基礎とする鍵交換方式NewHope[2]向けに、図3に示す乗算器R-Filianoreを提案した。これは、NewHopeにおいて特に負荷の大きい処理である数論変換と多項式のモジュラー乗算および加算を1つのモジュールで実行可能な乗算器となっている。処理に応じて入出力のビット幅が最小限となるように専用ハードウェアとして実装することにより、メモリ帯域幅の節約を可能にしている。加えて、内部で実行される剰余演算を全て加算とビットシフトにより実現しており、演算コストの削減に貢献する。

さらに、NewHope向けの乗算器の最適化を行い、剰余演算回路の配置を変更することで一層の省面積化を実現する図4に示す演算アーキテクチャを提案した[3]。このアーキテクチャでは、入出力および内部乗算器のビット幅の増加と引き換えに、剰余演算回路の数と演算ステップ数を削減できる。

これらの演算アーキテクチャを用いることで、一連の鍵交換処理において演算器が消費するエネルギーの削減と、その回路面積の縮小を同時に実現している。

参考文献

[1] S. Bian, M. Hiromoto and T. Sato, "Filianore: Better multiplier architectures for LWE-based post-quantum key exchange," in *Proc. Design Automation Conference*, June 2019.
 [2] E. Alkim, Leo Ducas, T. Poppelmann, and P. Schwabe, "Post-quantum key exchange - a new hope," in *Proc. Usenix Security Symposium*, 2016.
 [3] T. Ono, S. Bian and T.Sato, "Improved multiplier architecture on ASIC for RLWE-based key exchange," in *Proc. Workshop on Synthesis and System Integration of Mixed Information Technologies*, Oct. 2019.

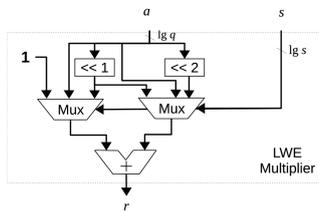


図1 Filianore 内部の乗算回路

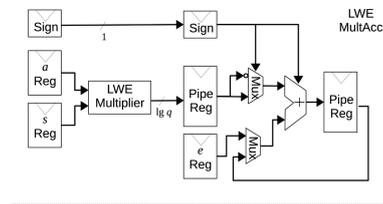


図2 Filianore のブロック図

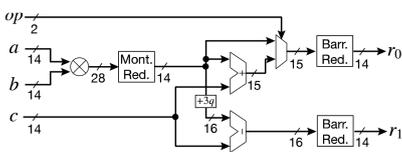


図3 R-Filianore

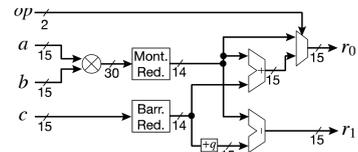


図4 R-Filianore の省面積版

システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研)

URL: <http://ishiilab.jp/kyoto/>

モジュール型予測コードに基づくオンライン動作生成

人物（キャラクタ）による自然な動作生成は映画・ビデオゲームの作成やバーチャルリアリティサービスなどで多くの応用がある。これまでの手法では、デモンストレータの動きをモーションキャプチャ計測し、それに基づきアニメーションが作成されることが多かった。しかしその計測データはデモンストレータの動作特性（キネマティクス）に依存しているため、単純にデモンストレータの運動をキャラクタに模倣させるだけでは、自然な動作の生成はできても、キャラクタ側での環境の変化に追従できないものとなっていた。

この問題に対応するため、キャラクタの運動モデルとデモンストレータの動作（モーションキャプチャ計測）データを統合することで、自然な動作を生成しつつ、キャラクタ側の環境変化にロバストになるオンライン動作生成法を開発した。その際に、脳の学習モデルとして長年研究されてきた予測コード（階層ベイズ学習）を実行するモジュール型アーキテクチャを開発した。これによると、キャラクタの内部状態からキャラクタの動作特性に応じた予測が外界からの観察（デモンストレータの運動）に一致するように、内部状態およびモデルパラメータがオンラインで更新される（図1）。

提案手法を、スケルトンモデルとして定式化されたキャラクタの動作生成に応用した（図2）。多くのキャラクタは多自由度であり、またキャラクタ独自の動作制約を有する。例えば図2(左上)では、人間の歩行運動を模倣する動作生成ができていたが、このキャラクタが外部から衝撃を受ける場合、デモンストレータは経験していないことで模倣のためのデータには含まれないにも関わらず、キャラクタ側での最適化問題を解くことで、自然な復帰動作が生成できる。また、モジュール型のアーキテクチャとすること

ことで関節など運動単位ごとの並列的最適化が可能となり、効率良いオンライン動作生成ができる。現在、この手法を発展させ、デモンストレータである動物の動作を人工物（ロボット）の運動に転移するための研究を実施中である。その他の動作生成(例)については youtube に掲載しているので参照されたい。

<https://www.youtube.com/watch?v=Ytd1dPMg94o&t=201s>

当分野では、自然な知能（脳）と人工の知能（AI）とを融合することで、脳の計算メカニズムを解明しつつ、実社会において役に立つ知的システムの開発を進めている。

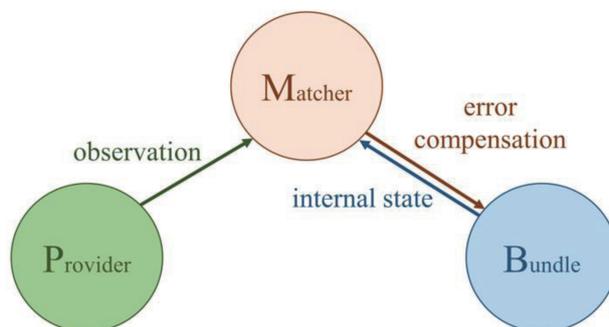


図1：提案手法はデモンストレータの動きを観察する Provider、キャラクタの内部状態を管理する Bundle とそれらの違いを吸収する Matcher からなる

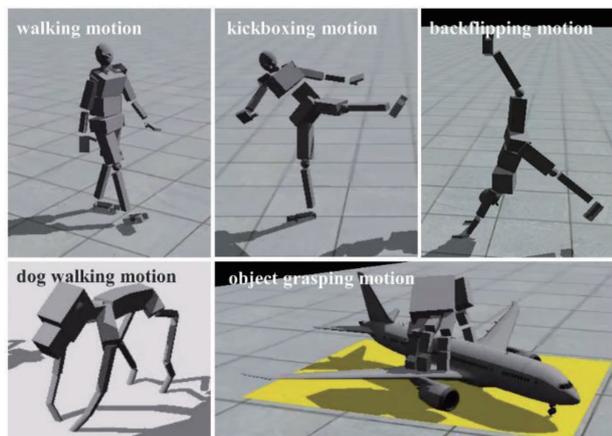


図2：提案手法により生成された運動の例

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乱流輸送の圧力依存性に関する研究」

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、スーパーコンピュータを用いて行われている高温プラズマ閉じ込めにおける乱流現象に関する研究について紹介します。

強い磁場により閉じ込められた高温プラズマにおいては、以下の機構により対流が発生します。磁場閉じ込め核融合炉ではトーラスプラズマの中心部（芯）が高温になり、一方プラズマ表面は低温となるので、強い温度勾配があります。そして、磁場により閉じ込められたプラズマは芯に向かって重力が働いているような状態にあるので、対流が起こります。この対流は大小さまざまな渦を駆動し、プラズマは乱流状態になります。図1は、スーパーコンピュータを用いた乱流の計算結果を図示したもので、大小さまざまな渦が現れていることを示します。この乱流により、中心部の熱が拡散し（乱流輸送と呼ばれます）、プラズマ閉じ込めの悪化が起こります。一方、磁場に閉じ込められたプラズマは磁場に関連した構造を自発的に形成します。図1でトーラス断面において同心状の模様が見られていることは、この自発的な構造形成を意味します。この構造を制御することにより、乱流または対流の発生を妨げて、自

発的に芯の部分の熱を逃がさないようにし、プラズマの閉じ込めを良くすることが期待されています。

このような乱流による熱輸送のプラズマ圧力依存性は、重要な研究テーマとなっています。なぜなら、核融合を起こすためにはプラズマの圧力を上昇させる必要があるからです。従来は、プラズマ圧力の上昇とともに磁場揺動が強くなり、対流を起こす不安定性が安定化され、その結果、乱流輸送も抑えられると考えられていました。我々は、プラズマ圧力の上昇とともに閉じ込め磁場の構造が変化することに着目し、この効果を取り入れて、スーパーコンピュータを用いて、乱流の計算を行いました。その結果、磁場構造変化により磁場揺動が変質し、乱流輸送は抑えられないことを明らかにしました [1]。これは、プラズマ圧力の上昇とともに磁場揺動が変質し、対流を起こす不安定性の安定化効果が抑制されるとともに乱流を抑える自発的な構造形成も抑制されることが原因であることを突き止めました。

[1] A. Ishizawa, D. Urano, Y. Nakamura, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, *Physical Review Letters*, 025003 (2019).

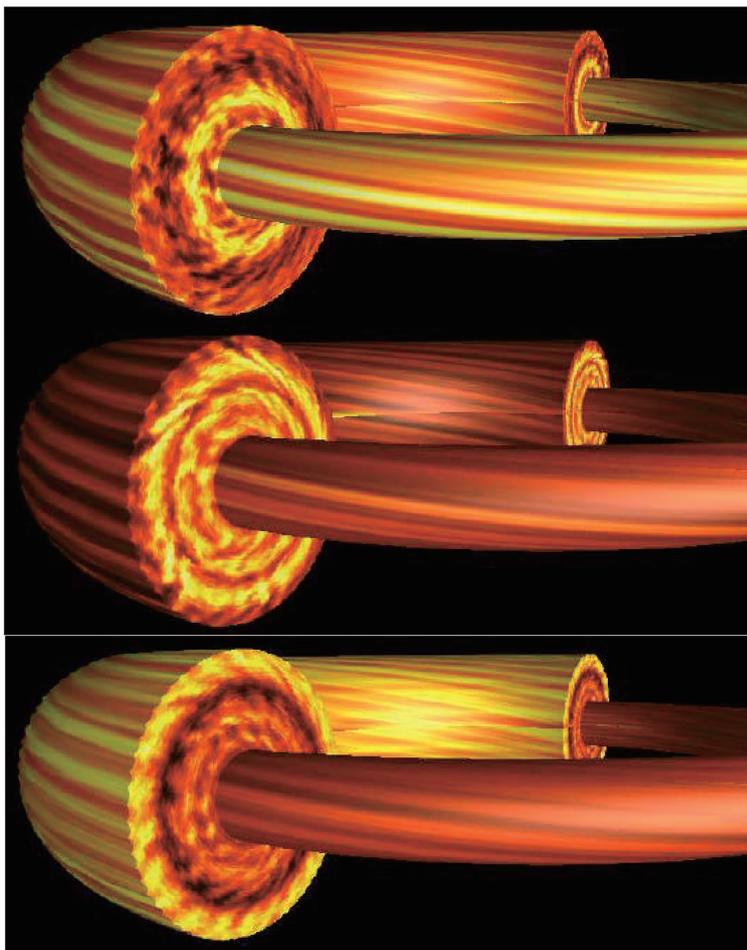


図1 磁場閉じ込めプラズマにおける乱流（静電ポテンシャル揺動）。上段：規格化圧力（閉じ込め磁場で規格化した圧力）0.4%。中段：規格化圧力0.8%。下段：規格化圧力1.2%。

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

「マイクロ波を利用した核融合プラズマでの MHD 不安定性の抑制」

本研究室では、荷電粒子と電磁界の相互作用を高度・高精緻に制御することにより、21世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす磁場閉じ込めプラズマ核融合の基礎研究を進めています。特に、マイクロ波を用いた電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動 (ECH/ECCD) による高温プラズマの生成・加熱・電流駆動、電磁流体力学的 (MHD) 不安定性の抑制に加え、大型イオン源を用いた中性粒子ビーム入射による高密度プラズマの生成・制御、および閉じ込め改善に関する研究を進めています。

核燃焼プラズマでは、自己点火プラズマ保持の観点から重水素-三重水素核融合反応により生成されたアルファ粒子の良好な閉じ込めが必要とされています。3.52MeV のエネルギーを有するアルファ粒子は電子との衝突による減速過程でアルヴェン速度と同程度となり、図1に示すように、シアアルヴェン波などの MHD 不安定性と共鳴的相互作用を起こします。この共鳴的相互作用は熱化前にアルファ粒子の異常輸送を引き起こすため、自己点火プラズマ保持が困難になったり、高エネルギー粒子損失によりプラズマ対向機器が損傷してしまったりする恐れがあります。そのため、共鳴的相互作用の物理機構解明、ならびに高エネルギー粒子の異常輸送・損失の低減が求められています。MHD 不安定性の特性・安定性は磁場のフーリエスペクトルや回転変換の分布といった磁場配位に依存するため、Heliotron J 装置において MHD 不安定性の安定化と物理機構の解明を目指した研究を進めています [1]。70 GHz ECCD によって NBI プラズマに 3kA 程度のトロイダル電流を駆動した結果、MHD 不安定性を安定化できる結果が得られました。Heliotron J は低磁気シア配位であり、電流駆動によって磁気シアが変わることから、シアアルヴェンスペクトルでの連続減衰が大きくなるのが大きな要因です。一方、ECH を中性粒子ビーム加熱プラズマに印加した場合は、図2に示すようにモードの揺動強度が変化する結果が得られました。一般的に ECH による電子温度上昇で高速イオン圧力は増加するため揺動強度は増加すると考えられますが、実験では、安定化の傾向が見られています。現在、CIEMAT (スペイン)、マックスプランクプラズマ物理研究所 (ドイツ)、核融合科学研究所 (日本) との国際共同研究を行い、装置間比較によってその物理機構を明らかにする研究を進めています。

- [1] 長崎百伸, 他, 「プロジェクトレビュー Heliotron J 実験」、プラズマ・核融合学会誌 96 (2020) 475
- [2] S. Yamamoto, et al., "Effect of ECH/ECCD on energetic-particle-driven MHD modes in helical plasmas", Nucl. Fusion 60 (2020) 066018

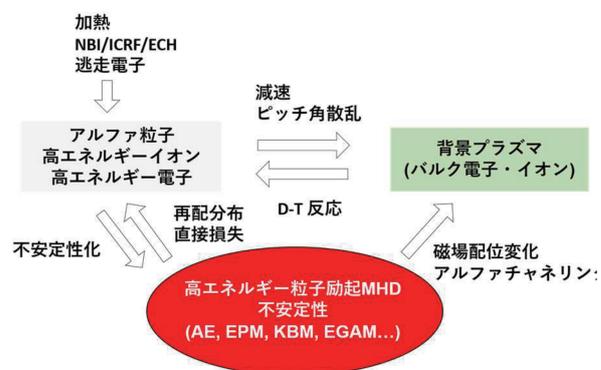


図 1. 高エネルギー励起 MHD 不安定性の励起機

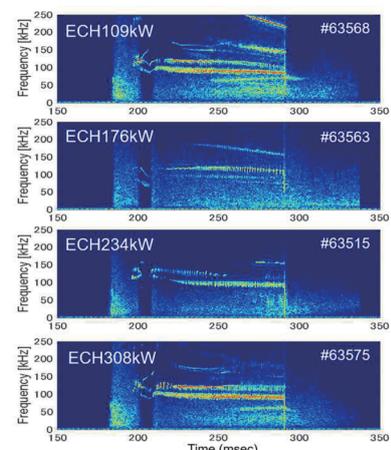


図 2. 高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の ECH パワー依存性

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/>

「衛星＝地上間の電離圏全電子数観測の開発」

衛星から地上までの電波伝搬を用いた電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) の観測手法の開発状況について概観する。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、一方で群速度は低下する。その変化の程度は周波数の二乗に反比例するため、同じ経路に複数の周波数の電波を伝搬させ、その位相変化あるいは変調波の伝搬速度を測定することによって、TEC が測定できる。

この観測手法は、人工衛星の最初期から計画されてきた古典的なものであるが、電離圏電子密度の水平構造を求める上では現在においても有効である。例えば、赤道・低緯度の電離圏に発生する赤道プラズマバブル (Equatorial Plasma Bubble, EPB と略記) は最も強い電離圏擾乱のひとつであるが、その研究に活用されている。EPB は、磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象であり、太陽活動度の活発期に増大する。長年にわたって研究されてきたが、EPB を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。

我々が開発してきた観測手法を2つ紹介する。まずひとつ目は、衛星から地上までの2周波ビーコン観測である。従来からは、150MHz と 400MHz で周波数比が正確に3対8の電波が利用されてきた。我々は、2007年ごろから、衛星からの電波を受信するデジタル受信機 GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) を開発してきた。GRBR の観測網をアジア・アフリカに展開することで、赤道付近の電離圏に東西の波長数百 km の大規模構造が発達するときに、EPB の発声比率が増大する等の結果を得ている。

2019年には新しい衛星 FORMOSAT-7/COSMIC-2 (6機編隊) が打ち上げられ、新たに401MHz/966MHzの電波を用いた2周波ビーコン観測が開始された。我々はこちらに対応して、新しいデジタル受信機 GRBR-2 を開発している。観測は、2019年9月から始まっており、図1に示すように、これまでタイ2か所・ベトナム1か所、インドネシア1か所への設置を済ませ、すでに1年間以上にわたって観測データを蓄積している。図2には、2019年12月26日に東南アジアを中心に発生した日食時の電子密度の減少の観測結果を示す。日食の前後で、前日に比して10パーセント程度の電子密度の低下があることがわかった。

最後に、GNSS (Global Navigation Satellite System、衛星測位つまりGPSとその類似システムの総称) を用いた TEC 観測 (以下では、GNSS-TEC 観測) について紹介する。GNSS-TEC 観測は世界中で広く実施されている。さらに米国・中国・ロシア・EUによって異なるGNSS衛星群の配備が進んでおり、今では地球上のどこでも常に上空に20機程度のGNSS衛星が存在するような状況が現出している。一方、受信機の価格が劇的に下がっており、数年前にはついに2-3万円の2周波受信機が現れた。アンテナまで含めたセット価格で1/10を超えるような価格破壊に至っている。この流れに沿って、現在、Ublox社が開発した2周波GNSS受信LSIであるF9Pを用いたGNSS-TEC観測システムを開発中である。非常に簡単に電離圏TECの多点観測が容易化することで、更なる研究の進展が期待される。

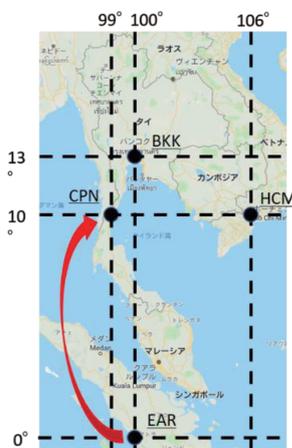


図1 GRBR2の配置図

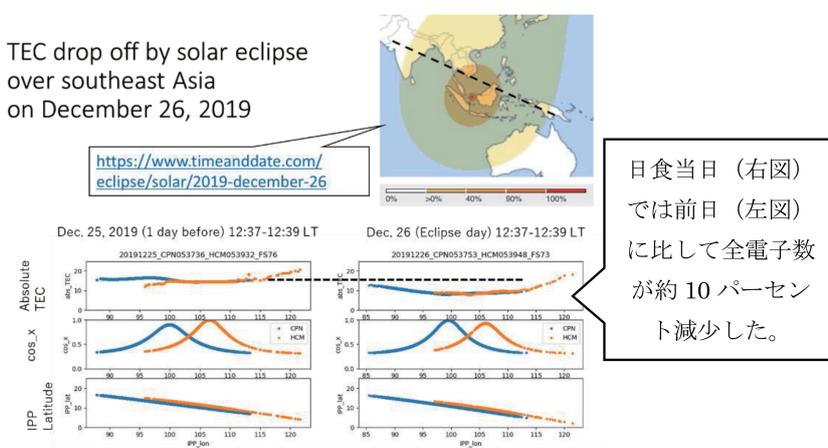


図2 2019年12月26日の日食に伴う電離圏電子密度の減少

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/>

「あらせ衛星によるホイッスラーモード波動による急速な電子加速過程の実証」

地球大気の外側の宇宙空間には、現代社会の生活に欠かせない気象衛星や通信衛星・GPS衛星が周回しています。この衛星が飛翔する領域は、地球大気とは異なって何もない、静かな世界と思われている方が多いかもしれません。実際には、非常に希薄ながら、電離した気体である「プラズマ」で満たされ、その中を色々な特徴をもつ電磁波である「プラズマ波動」が飛び交っています。この宇宙空間のプラズマの興味深い点は、密度が薄いために衝突を介してのエネルギー交換が一般的には起こらない点にあり、プラズマ波動が、衝突の代わりにエネルギー交換を担っています。プラズマとプラズマ波動とのエネルギー交換の過程を波動粒子相互作用と呼び、宇宙空間のプラズマにダイナミックな変化を引き起こしていることが知られています。

地球周辺のプラズマは、太陽から吹き出しているものが主な起源と考えられています。太陽から吹き出すプラズマを構成する電子・イオンのエネルギーは、数十から数百電子ボルトであるのにも関わらず、地球の周辺には、十キロ電子ボルトを越えて、メガエレクトロンボルトに達するような高いエネルギーを持つ電子が存在しています。このような、非常に高いエネルギーの電子は、人工衛星の機器に障害を引き起こす可能性があり、人間の活動に影響を及ぼしうる驚異と考えることができます。このような高エネルギーの電子が生まれる要因として、プラズマ波動との波動粒子相互作用が考えられており、当研究室では、宇宙空間の電磁環境を理解するための研究を進めています。具体的には、科学衛星に搭載するプラズマ波動を観測する機器開発、衛星搭載に向けた試験に加え、打ち上げ後のデータ解析と、すべてのことを行っています。

2016年12月、当研究室が中核を担ったプラズマ波動観測器を搭載した、「あらせ」衛星が打ち上げられました。あらせ衛星の科学目的は、地球周辺の宇宙電磁環境を探査し、高エネルギー電子の数が変化する過程を理解することです。高エネルギー電子加速過程の理論・モデル研究として、波動粒子相互作用を拡散過程とみなすアプローチが長い間行われてきました。このアプローチに基づけば、電子が加速される時定数は、数十キロ電子ボルトで数時間程度と見積もられてきました。一方で、近年の理論研究から、拡散では記述できない電子の加速過程が起こりうる事が提案されてきており、時定数は拡散過程に比べ遥かに短いことが指摘されています。あらせ衛星に搭載された最新鋭の電子計測器・プラズマ波動観測器を組み合わせたデータ解析から、この「急速な電子加速」が実際に起きていることが示されています [Kurita et al., 2018]。このような急速な電子加速のメカニズムは、これまで構築されてきたモデルでは考慮されてこなかったため、地球周辺の宇宙空間における高エネルギー電子の成因の再検討の必要性を迫る成果が、あらせ衛星の観測により得られています。当研究室では、あらせ衛星のデータ解析を継続して行っており、宇宙の電磁環境の理解に向けたさらなる研究を推進しています。

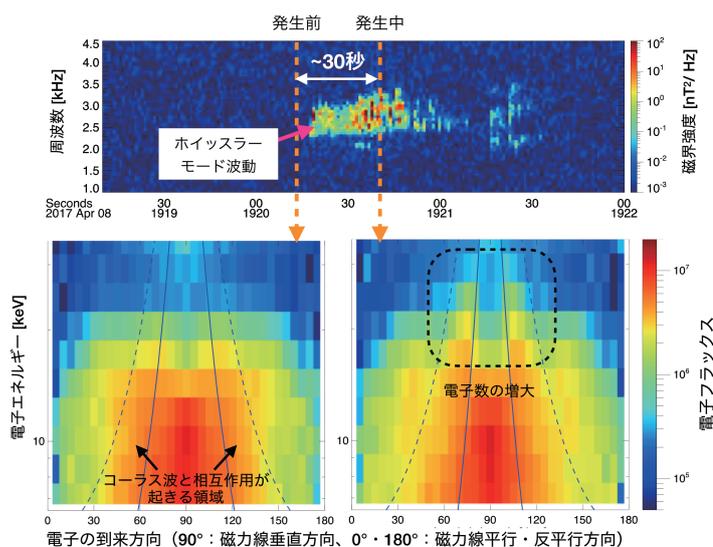


図1. あらせ衛星が捉えたホイッスラーモード波動による急速な電子加速の例。波動の出現後30秒程度で、高エネルギー電子数が増大している [Kurita et al., 2018 より改訂]

参考文献: Kurita et al., 2018, *GRL*,
<https://doi.org/10.1029/2018GL079104>

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>

「位相制御マグネトロンによる電力・情報同時ワイヤレス伝送の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、マイクロ波帯の電波をエネルギー伝送媒体として利用した空間伝送型ワイヤレス電力伝送に関する研究を行っている。空間伝送型ワイヤレス電力伝送は、送受電アンテナを介して電波を空間中に放射してワイヤレス給電する方式であり、電磁誘導や電磁界結合に類される近接結合型ワイヤレス電力伝送と比較して長距離のワイヤレス給電が可能である。今回は、マグネトロン（電子レンジのマイクロ波源として普及している電子管）をワイヤレス給電および無線通信に応用し、電力と情報を同時にワイヤレス伝送する研究の取り組みについて紹介する。

マグネトロンは自励発振する電子管デバイスであり、その発振周波数は駆動電圧や印加磁界、温度、個体差等の要因で変化する。したがって、マグネトロンの発振周波数を安定化させるためには、基準となるマイクロ波（例えば信号発生器からの出力）の周波数にマグネトロンの発振周波数を同期させる必要がある。具体的には、基準周波数を与えるマイクロ波をマグネトロンのアンテナ側から注入する「注入同期法」により、マグネトロンの発振周波数を基準周波数に同期させる。加えて、マグネトロンの出力位相制御を実現するためのフィードバック回路を構築する。このような手法により、発振周波数や出力位相が制御可能となったマグネトロンのことを「位相制御マグネトロン」と呼ぶ。位相制御マグネトロンの周波数および位相は、基準となる周波数および位相に追従する。よって、基準周波数や基準位相に変調をかければ、マグネトロン出力にも同様に変調がかかる。この原理を利用して、周波数変調機能や位相変調機能を有するマグネトロン送信機が実現できる。

本研究室では、これまで2.45GHz帯電子レンジ用マグネトロンおよび5.8GHz帯マグネトロンを用いた周波数変調および位相変調の研究を実施し、FSK変調およびPSK変調において10Mbpsの伝送レートを達成した[1]。また、図1に示すように2.45GHz帯位相制御マグネトロンをFM送信機、兼ワイヤレス電力送電機として用い、受電側にレクテナ（アンテナ+整流回路）とFM復調機を備えたモニタを設置することで、モニタへの電力をワイヤレス給電するとともに映像情報を送受信することにも成功した。5.8GHz帯位相制御マグネトロンに関しては、スロットアンテナを有する位相制御マグネトロン4台を2×2素子の2次元アレー状に配置し、各々の出力位相を制御することによるアクティブフェーズドアレーの実証に成功した[2]。これらの研究は、将来的には遠くに離れた移動体への電力・情報同時伝送やワイヤレスセンサネットワークのセンサ端末への電力・情報同時伝送等への応用が期待される。



図1 2.45GHz帯位相制御マグネトロンを用いた電力・情報同時ワイヤレス伝送の実験写真

[1] B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Evaluation of the Modulation Performance of Injection-Locked Continuous-Wave Magnetrons", IEEE Transactions on Electron Devices, vol.66, no.1 pp. 709-715, Jan. 2019.

[2] B. Yang, X. Chen, J. Chu, T. Mitani, and N. Shinohara, "A 5.8-GHz Phased Array System Using Power-Variable Phase-Controlled Magnetrons for Wireless Power Transfer", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.68, no.11 pp. 4951-4959, Nov. 2020.