

## 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)

集積システム工学講座超高速信号処理分野

##### 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圏航行システム工学分野 (小嶋研) #

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

#### 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ラ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/>

「ロバスト制御の基盤としてのスモールゲイン定理の一般化—因果性の定義の再考とともに」

### 1. ロバスト制御とスモールゲイン定理

フィードバック制御系の解析と設計に関する制御理論の研究において、図1の閉ループ系を扱うことは極めて重要である。その際、 $G_1$  が制御対象であり  $G_2$  が制御器である状況は、もっとも標準的なものといえる。一方、ロバスト制御の枠組みにおいては、 $G_1$  は制御対象と制御器からなる閉ループ系に対応し、 $G_2$  は制御対象のモデル化に際して不可避免的に生じる誤差に対応する。実際、前者の標準的な状況において制御対象がそのモデルとモデル化誤差の並列結合で表されるとき、モデル化誤差を  $G_2$  と見て、残りの部分を  $G_1$  と見ると、後者のような解釈に至ることは理解できよう。ロバスト制御とは、ラフに言って、モデル化誤差  $G_2$  自体は未知であるがその存在範囲だけなら既知とみなせる状況において、不正確でしかない制御対象のモデルに対して定められた制御器が閉ループ系の安定性（さらには所望の制御性能）を達成することを保証するように制御器を系統的に設計することをいう。そのための理論を発展させることが、あらゆる実システムの制御において極めて重要であることはいままでもない。

一方、スモールゲイン定理とは、やはりラフに言って、 $G_1, G_2$  のゲインをそれぞれ適切に定義したとき、それらの積が1未満であるという条件（スモールゲイン条件と呼ばれる）が満たされれば、図1の閉ループ系が安定であることを保証する定理である。これは基本的には安定性の十分条件を与える定理であるが、ロバスト制御の枠組みにおいて、「想定しうるモデル化誤差  $G_2$  に対する閉ループ系の中で、不安定になるものはない」と言えるか、という問としてとらえた場合には、しばしば必要十分条件を与えるものとなり、そのためロバスト制御のための理論基盤として極めて重要な定理となっている。

### 2. 既存のスモールゲイン定理の限界とそれを回避した一般化

図1の閉ループ系に対する外部入力時間が経過とともに0に収束するとき、スモールゲイン定理はラフに言って、スモールゲイン条件のもとで  $G_1, G_2$  の入出力も0に収束することを保証する。これは、スモールゲイン条件が、信号が閉ループを一巡するごとに減衰を繰り返すことを意味するためと直感的には解釈できようが、それは粗すぎる理解に留まる。一般にフィードバック制御が扱う  $G_1, G_2$  は動的システムであり、それらのゲインは各時刻ごとの入出力の間では実際には定義できないからである。むしろ、無限区間にわたる（あらゆる入力の中でもっとも不都合な）入力とそのもとでの出力の間で（それらの大きさを測る尺度、つまりノルムの定義に沿って）定まるものである。このことから、ゲインが各時刻ごとの入出力間に当てはまるのならば極めて自明なものと感じられるかもしれないスモールゲイン定理の証明は、数学的に決して自明でない。

標準的な証明は、 $G_1, G_2$  の因果性という概念を適切に定義しそれを利用するものであるが、その議論では  $G_1, G_2$  について暗黙の仮定をおくことになり、適用可能範囲が制限を受けている。実際、input-intolerant と呼ばれ、許容入力に制限のある系（そのような非線形系は数多く存在する）や、output-unsolitary と呼ばれ、与えられた許容入力に整合しうる出力が複数存在する系（やはり非線形系ではこのような状況が生じ得る他、初期条件に関する仮定を一切おかない場合にも生じる）が扱えない。

従来考えられてきた因果性の定義は、スモールゲイン定理の証明の鍵を握っているものの、より一般的な input-intolerant や output-unsolitary な動的システムに対しては不適切であることを明らかにするとともに、そのような系に対しても意味をなす因果性の新たな定義について論じ、それを利用して適用可能な  $G_1, G_2$  に対する制約を大きく緩和したスモールゲイン定理を下記参考文献では導出している。この成果は、ロバスト制御などの制御理論への基盤的貢献となることが期待される。

Y. Nagira, Y. Hosoe and T. Hagiwara, European Journal of Control, Vol. 50, pp. 51-61 (2019).



図1：閉ループ系

## 生体医工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

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

### 「精神・神経疾患の病態解明と診断支援に向けた新たな MRI 技術開発」

当研究室では、先端の量子センシング技術の開発とその脳機能の解明や医療、福祉分野への応用研究を行っている。中でも磁気共鳴画像 (MRI) を中心とした機能や形態の計測とイメージングを主要なテーマと位置づけている。MRI は、現在広く臨床における画像診断に用いられているが、近年、超低磁場 MRI への関心が高まってきている<sup>[1]</sup>。我々はこれまで、超高感度光ポンピング原子磁気センサ (OPAM)<sup>[2]</sup>の研究・開発を行ってきたが、さらにそれを用いて脳磁図などの生体磁気信号の同時計測も可能なマルチモーダルな超低磁場 MRI システムの実用化を目指している。OPAM のように低周波数帯域で超高感度な磁気センサを用いれば静磁場強度が  $1\mu\text{T} \sim 10\text{mT}$  で MRI を撮像可能な超低磁場 MRI の実現も可能であり、形態と機能の同時計測を可能とする次世代の医用イメージングシステムとしてその開発に大きな期待が寄せられている。

この研究に加えて、当研究室では MRI を用いて脳内の水分子の拡散情報を捉える拡散 MR 画像 (Diffusion MRI) の新たな解析法の研究も進めており、これまで、東大病院、阪大病院、広島大病院、順天堂大病院などと連携して、各施設において 3T-MRI により撮像された統合失調症、大うつ病、パーキンソン病などの臨床画像データに対して、白質神経線維の自動抽出ならびに各神経線維束に沿って病変を反映する拡散情報を定量的に求める新手法開発を行ってきた<sup>[3]</sup>。開発したソフトウェアを医学系の研究者に提供ないしは臨床データを共有する形で、医工連携研究として各疾患群と対照とするマッチングのとれた健常者群の拡散 MRI データの詳細な解析と比較・検討を行い、さらに各疾患のモデルマーマセット群と健常マーマセット群の拡散 MRI データの解析結果との対応づけを行うことを通して、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路の同定を目指して研究を行ってきた。

開発した拡散 MRI データの自動解析法においては、全神経線維束の自動クラスタリング (図 1) 並びに各神経線維束に沿った拡散情報のプロフィール解析が可能であり、精神・神経疾患の疾患横断的・特異的な病態神経回路の同定と病態解明において、resting-state fMRI から得られる機能的結合情報に対して相補的かつ重要な構造的結合情報を提供できることの意義は非常に大きい。拡散 MRI は、精神・神経疾患の病態解明、診断、治療効果の評価に有用であり、今後も医学系の研究者との密な連携により医療や脳科学に貢献する研究を進める。

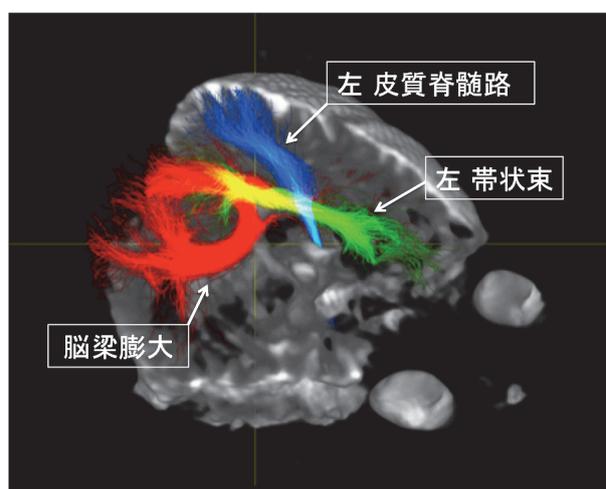


図 1 自動抽出された代表的白質神経線維束の例

- [1] 小林哲生, “医用工学と放射線技術科学との融合～期待される新技術：光ポンピング原子磁気センサと超低磁場 MRI”, 日本放射線技術学会雑誌, Vol. 74, No. 2, pp. 179-182 (2018)
- [2] 小林哲生, “SQUID & 光ポンピング原子磁気センサ”, 日本磁気学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 135-143 (2018)
- [3] S. Okuhata, et al, “An atlas-based whole-brain fiber-tracking method with automatic setting of an optimal starting plane in all parcels”, Journal of Neuroscience & Biomedical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 28-36 (2019)

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

「Ethernet に対するパルス性妨害波の影響評価及びモデル化」

自動車の自動運転やロボット、工場内の機器自動化に象徴されるように、これからの電気電子システムには今まで以上の高信頼性が要求される。その多くはデジタル信号処理を伴うが、高速デジタルシステムの本質は高周波アナログである。また同時に、デジタル信号への妨害波の影響は、ビットエラーやパケットエラー等であり、通信・変調の方式に強く依存し、アナログ信号への妨害とは振舞いが全く異なる。そこで、外部からの電磁的妨害によるエラーが通信方式ごとにどのように異なるか調査し、さらに妨害波に強いデジタル通信システムの実現を目指した研究を行っている。

民生用や工場で使用される 100 BASE-TX の Ethernet 信号に幅の異なるパルス妨害波を印加した際のエラーの振る舞いを図 1 に示す [1]。妨害波を図 (a) のように差動信号線間に直接印加したとき、(b) に示すように、ちょうど通信の 1bit 時間 (8 ns) に近いパルス幅で、エラーレートが 2 桁以上上昇した。

同様の実験を車載用の 1Gbps Ethernet (1000 BASE-T1) について実施した結果を図 2 に示す [2]。妨害波パルス注入法は同図 (a) のように、現在 IEC 国際規格で審議されている方法に近いものとしている。この場合は、Ethernet ケーブルの長さを変化させると (b) に示すようにエラーレートが上昇するパルス幅が異なることが判明した。

上で述べた 2 例は、エラー発生状況は異なるが、特定のパルス幅で大幅にエラー率が上昇するという、従来は報告されていない現象であり、その原因を究明しモデル化することでエラーが起きにくい通信方式の開発につながることを期待している。また、電気信号による通信は電磁妨害を受けやすいので、電線の代わりに光ファイバーを用いる光 Ethernet を自動車内の通信に使用することが計画されており、その妨害波に対する信頼性評価法の開発と国際標準化を行っている。

このような電気電子回路とシステムのハードウェアとしての信頼性 (System Integrity: システム完全性) の確保は、半導体デバイスや回路の設計に加えて意図しない高周波電磁結合の制御も要求する。さらに通信方式やソフトウェアとも連携することで、次世代の高信頼信号処理系の実現を目指す。

参考文献: [1] S. Matsushima, T. Matsushima, T. Hisakado, O. Wada, "Trends of EMC standards for automotive network devices and communication quality of Ethernet in relation to parameters of pulse disturbances", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 7, No. 1, pp. 46-50, 2018. [2] 矢野ほか, "パルス性妨害波による車載 Ethernet の通信品質劣化に関する調査", 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-4-55, 2019.9.

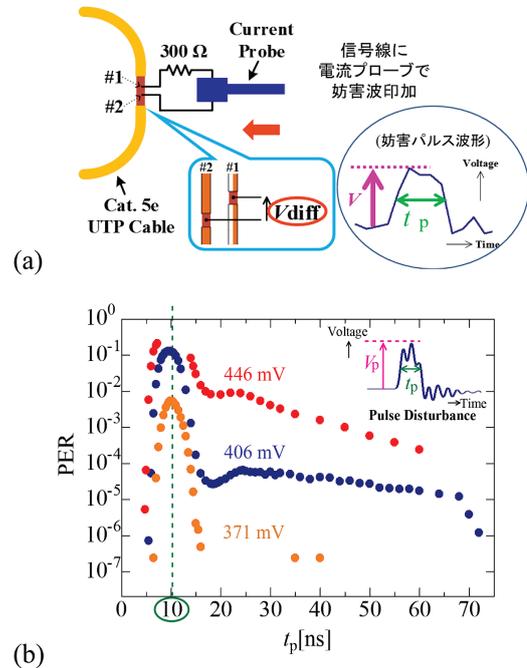


図 1 100 BASE-TX のエラー特性

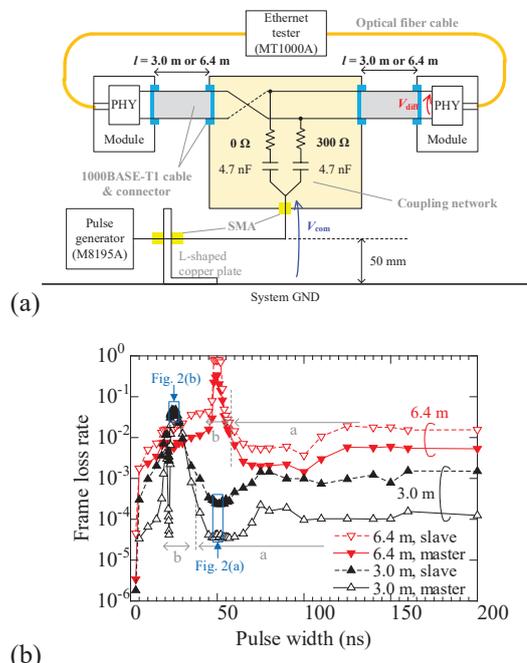


図 2 車載用 1000 BASE-T1 のエラー特性

## 電子物理工学講座 応用量子物性工学分野 (竹内研究室)

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

## 「ヘリウムイオン集束イオンビーム装置による高 Q 値ナノ光ファイバブラッグ共振器の開発」

光は、光子の集まりで出来ています。近年、この光子を自在に制御・計測することで、盗聴不可能な量子暗号通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータに関する研究が行われています。これらを実現する上で鍵となるのが、光子をひとつずつ発生させる単一光子源です。その場合、単一光子源から発生した光子を、単一モード光ファイバへ結合させる効率が課題でした。

これを克服するため、我々は、単一モード光ファイバの一部を波長程度まで細く引き延ばしたナノ光ファイバに共振器を組み込んだ、ナノ光ファイバブラッグ共振器 (NFBC) を開発、単一半導体量子ドットを結合させ、その発光を約 3 倍増強させることに成功しました [1]。しかし、発光体から発生する光子と NFBC との結合効率をさらに向上させる必要がありました。

これには高い光閉じこめ効率 (Q 値) を持つ NFBC の開発が不可欠です。しかし、これまで作製された NFBC の Q 値は 250 程度に限られていました。この原因として、加工に用いた集束イオンビーム (FIB) 装置の分解能が 20 nm と低いこと、光ファイバ内に残留したガリウム (Ga) イオンによる吸収の影響が懸念されていました。

今回、NFBC の高 Q 値化をめざし、1 nm 以下の高分解能と残留イオンの影響がないヘリウム (He) イオン FIB 装置を用いました。図 1 (a) に、作製した NFBC の走査イオン顕微鏡像を示します。320 nm 間隔のグレーティングが間隔をあけて二組加工されていることがわかりました。図 1 (b) は、片側 80 周期のグレーティングの場合の透過スペクトルです。Ga イオン FIB 装置を用い、同じ条件で作製した場合 (図 1 (c)) に比べ、共鳴ピークが明瞭に観測されるようになりました。このピークの半値全幅 (1.5 nm) から推定される Q 値は 450 と、Ga イオンの場合よりも向上しました。図 2 (a) は時間領域差分 (FDTD) 法を用いて計算した電場強度分布です。電場強度が共振器中央部で強くなっていることがわかりました。図 2 (b) は FDTD 法を用いて計算した透過スペクトルです。実験結果とほぼ一致するスペクトルが得られました。我々は、さらなる Q 値の向上をめざし、320 周期のグレーティングからなる NFBC を作製しました。その結果、4000 を超える Q 値をもつ NFBC を実現しました。これにより、単一発光体から発生する光子を 80% 以上の効率で単一モード光ファイバへ結合できるようになると推定されます [2]。

今後は、このように高い Q 値を持つ NFBC と単一発光体との結合に取り組んでいく予定です。

[1] Schell, Takashima, Kamioka, Oe, Fujiwara, Benson and Takeuchi, *Sci. Rep.* **5**, 9619 (2015)

[2] Takashima, Fukuda, Maruya, Tashima, Schell, and Takeuchi, *Optics Express*, **27**, 6792-6800 (2019)

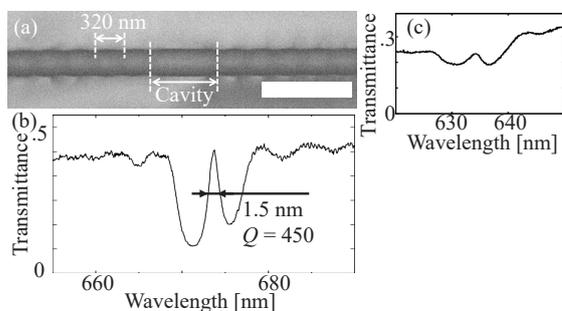


図 1 (a) He イオン FIB 装置を用いて作製した NFBC の走査イオン顕微鏡像。(b) 作製した NFBC の透過スペクトル。(c) Ga イオン FIB により作製した場合の透過スペクトル。

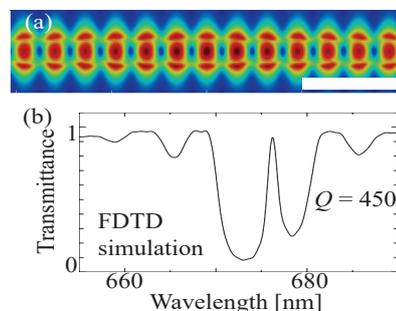


図 2 (a) 時間領域差分 (FDTD) 法で計算した電場強度。(b) FDTD 法で計算した透過スペクトル。

## 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>

## 「高温環境動作 SiC 集積回路実現に向けた電子デバイスの開発」

シリコン集積回路はパソコン、携帯電話をはじめとして、現代の人々の生活に無くてはならないものとなっています。近年、集積回路技術の恩恵をより広げようと、高温環境で動作可能な集積回路に注目が集まっています。例えば、航空機や自動車のエンジン燃焼室の燃焼効率向上に向け、燃料混合比のその場センシング・制御が望まれますが、燃焼室内の温度は最高 600℃に達します。既存のシリコン集積回路は、n 型および p 型の金属 - 酸化物 - 半導体 (MOS) デバイスを利用した相補型 MOS (CMOS) 回路で構成されていますが、シリコンが約 200℃で真性領域に入り、n 型と p 型の区別がつかなくなるため、それ以上の温度では原理的に動作不可能となります。200℃以上の高温環境下でも電子デバイス動作が可能な材料として、SiC (炭化ケイ素) を代表とするワイドギャップ半導体に注目が集まっています。SiC は広範囲の n 型、p 型の伝導型制御が可能のため、集積回路作製に適した材料と言えますが、高温環境で安定した回路動作を実現するためには、回路を構成するデバイス自身の特性を理解し、最適なデバイス・回路構成の選択が必要となります。今回は、接合型電界効果トランジスタ (JFET) を用いた高温環境動作 SiC 集積回路開発の取り組みを紹介いたします。

JFET を用いた回路構成として、ノーマリーオフ型 JFET による相補型 JFET (CJFET) 回路を提案しています。例としてインバータの回路構成を図 1 に示します。CMOS 回路の nMOS と pMOS を nJFET と pJFET で置き換えた単純な回路構成となっています。図 1 のインバータの室温 -900K における伝達特性の計算結果を図 2 に示します。計算には、高温環境における SiC の物性を反映させています。900K という高温であってもインバータ動作が見込めることがわかります。

CJFET の構成にはノーマリーオフ型 nJFET と pJFET を同一基板上に作製する必要があります。通常、JFET はエピ成長層をチャンネル部として使用しますが、n 型と p 型のエピ層を同一基板上に集積するのは結晶成長の都合上困難です。そこで、デバイス構造全てをイオン注入で作製することにより nJFET と pJFET の同一基板上への作製を試みました。実際にデバイスを作製したところ、nJFET、pJFET 共に室温から 400℃まで良好なトランジスタ動作を示し、その電気的特性はエピ成長した (高品質) SiC の移動度等の物性から予測される特性で解析可能であることがわかりました [1]。更に、デバイス構造を工夫することで、閾値電圧の制御性を向上させ、室温から 400℃におけるノーマリーオフ動作を達成しました (図 3) [2]。現在、作製したノーマリーオフ JFET を用いて CJFET の高温動作実証に向けて研究を進めています。

[1] M. Kaneko and T. Kimoto, IEEE Electron Device Lett. **39**, 723 (2018).

[2] M. Nakajima et al., IEEE Electron Device Lett. **40**, 866 (2019).

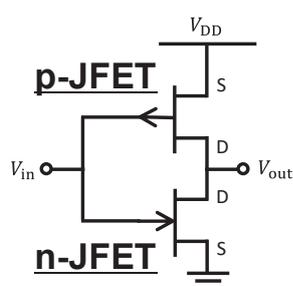


図 1 : CJFET インバータ

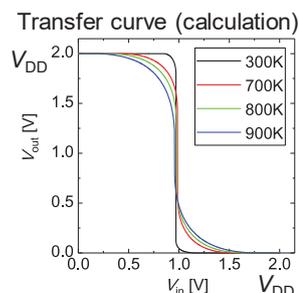


図 2 : 室温 -900K における伝達特性の計算結果

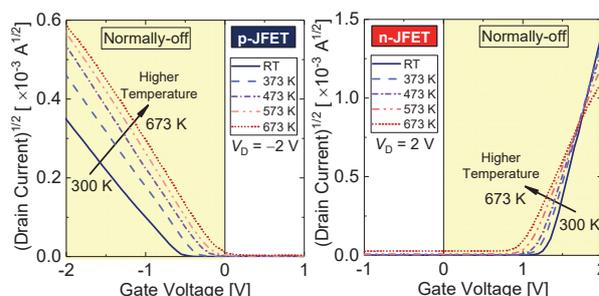


図 3 : 作製した JFET の室温 -400℃におけるゲート特性

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/>

「原子間力顕微鏡を用いたナノスケール表面下構造の可視化に関する研究」

近年、材料・デバイス解析やバイオ・医療分野において、集積回路における欠陥分析や細胞内診断の需要が高まっており、ナノスケール空間分解能をもつ非破壊・非侵襲の内部診断法の開発が強く求められている。原子間力顕微鏡 (AFM) は、原子レベルで尖った探針をもつマイクロスケールの板ばね (カンチレバー) を用いて、探針と試料表面との間にはたらく原子・分子間力を検出し、試料表面の微細形状やナノ物性を計測する手法として広く利用されてきた。このカンチレバーは、ばね振動系 (調和振動系) として、特定の周波数 (共振周波数) の外力によって共鳴的に振動し、その周波数応答は共振スペクトルを示す。また、外力を与えなくても、周辺環境から与えられる熱エネルギーによってカンチレバーは常に振動しており (熱雑音振動 = 熱振動)、熱振動スペクトルも共振スペクトルを示す。探針が試料に接触した状態では、カンチレバーの共振周波数は、接触部の試料表面の固さ (= 弾性率) に応じて変化するため、熱振動スペクトルから共振周波数を算出すれば、外力を与えずに弾性率を求められると予想し、AFM において走査領域の全ての点において熱振動スペクトルを計測し、表面形状と同時に弾性率分布を可視化する走査型熱振動顕微鏡法 (STNM) を開発した。ここでは、STNM により厚い高分子膜内部に埋もれた金ナノ粒子の非破壊検出事例を紹介する。

図 1 (a) は、STNM による、高分子膜下の金ナノ粒子検出実験の模式図である。ポリイミド基板上に金ナノ粒子 (直径 40 nm) を散布し、これを膜厚 300 nm の高分子 (フォトポリマー) の膜で覆った試料に対し、コンタクトモード AFM の探針走査中に、走査領域内の各点において、カンチレバーの熱振動スペクトルを計測した。図 1 (b) は、高分子膜の表面形状像であり、図 1 (c) は各点で得られた振動スペクトルから算出された熱振動スペクトルのピーク周波数、すなわち接触共振周波数像である。図 1 (c) においていくつか見られる輝点は、接触共振周波数が高い領域、つまり弾性率が高い領域を示しており、表面下の金ナノ粒子の有無に対応していることが分かった。つまり、厚い高分子膜に埋もれた金ナノ粒子の検出に成功した。詳細なメカニズムはまだ明らかになっていないが、金の弾性率は高分子膜の弾性率より約 1 桁高いため、表面下の金ナノ粒子が探針の接触条件に影響をおよぼし、カンチレバーの接触共振周波数が変化することで表面下構造が可視化されたものと考えられる。

今後、基板・ナノ構造・高分子膜の材質や構造を変えて実験を行い、また理論計算との比較により可視化メカニズムを解明し、応用範囲を広げる研究を行っていく。また、本手法における測定時間を短縮することで、より実用的な計測手法として確立したい。

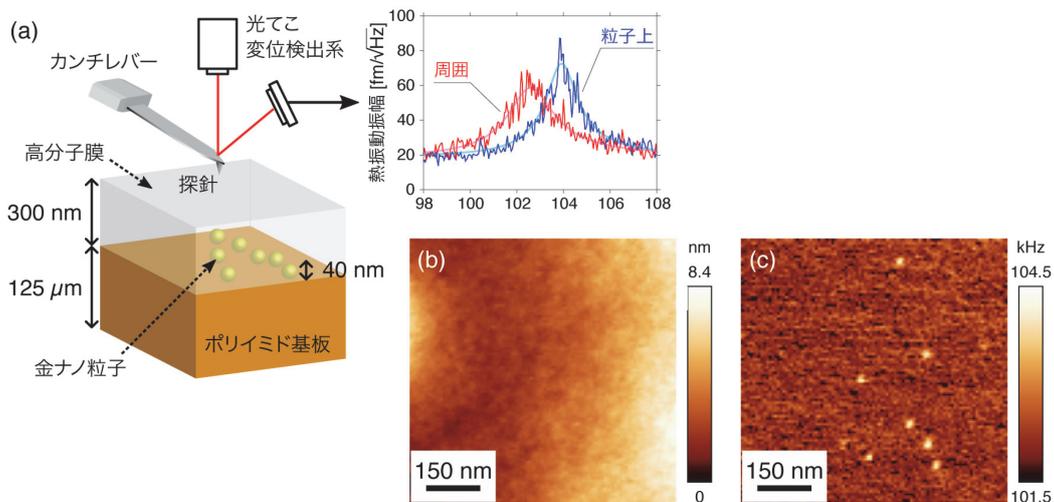


図 1 : (a) 走査型熱振動顕微鏡 (STNM) による高分子膜の内部に隠れた金ナノ粒子の可視化の模式図。(b) コンタクトモード AFM による高分子膜表面の表面形状像 (c) 同一領域の接触共振周波数像。

## 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/>

## 「機械学習を用いたフォトニック結晶ナノ共振器の設計」

2次元フォトニック結晶(2D-PC)スラブ(薄板)をもちいたナノ共振器<sup>1)</sup>は、波長程度の微小領域への長時間の光閉じ込めが可能という特長をもつ。我々はこれまで、理論と実験の両面から2D-PCナノ共振器の低損失化(=高Q値化)とその応用に取り組んできた<sup>2,4)</sup>。理論的には、2014年までにヘテロ構造共振器の空気孔位置の微調整によって1億以上の高い設計Q値をもつ構造を見出し、実験的には2017年に波長程度の微小共振器としては世界最高のQ値である1100万という値をSi製共振器において達成した。このような2D-PCナノ共振器は図1に示すように多数の空気孔から構成されており、非常に高い構造自由度をもつが、高自由度構造の最適化は一般的に困難であり、これまで最大でも10個程度の構造パラメータの調整に留まっていた。これを解決すべく、我々は最近、機械学習を活用した最適手法を提案した<sup>5)</sup>。本稿ではその一部を紹介する。

2D-PCスラブ共振器は3次元構造であり、その解析には計算量の多い第一原理計算が必要とされる。そこで、適当な個数の訓練データを用いた機械学習により、構造パラメータからQ値を近似的に予測できる回帰関数を構築し、これを用いて構造最適化を行った。まず訓練データとしては図1に示すようなランダムに対称に穴位置をシフトさせた共振器を1000個生成し、そのQ値を第一原理計算で求めた。そのうち900個を用いて図2(a)のニューラルネットワークを訓練したところ、図2(b)に相関を示すような回帰関数が構築できた。次に、この回帰関数を用いて予測Q値の全穴シフトパラメータに対する勾配を逆伝搬法で計算し、予測Q値が高くなる方向に構造を変化させていった。最適化結果の一例を図3に示す。この例では50個の穴位置を最適化した結果、すでに手動での最適化が行われていた基準構造の10倍以上の高いQ値が得られた。この他にも我々は2つのモードのQ値を同時に最適化することや、学習・最適化を繰り返し行うことで学習範囲を自動的に拡大してより大域的な構造最適化を行う手法<sup>6)</sup>などを提案・実証している。これらの手法は、共振器を含めた様々なフォトニックナノ構造の性能向上に有効であると考えられる。

## 参考文献

1) S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, *Nature* **407**, 608 (2000). 2) Y. Sato, T. Asano, S. Noda et al., *Nat. Photonics* **6**, 56 (2012). 3) R. Konoike, H. Nakagawa, M. Nakadai, T. Asano, and S. Noda, *Sci. Adv.* **2**, e1501690, (2016). 4) Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, *Nature* **498**, 470 (2013). 5) T. Asano, S. Noda, *Opt. Express* **26**, 32704 (2018). 6) T. Asano, S. Noda, *Nanophotonics* **8**, 2243 (2019).

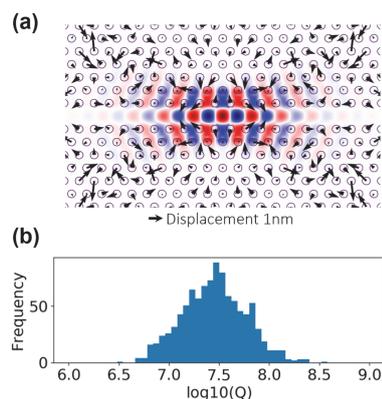


図1: (a) 学習に用いたランダム構造の一例、カラープロットは電界分布、矢印は空気孔の基準位置からの変位を表す。(b) 学習データとして準備した1000個のランダム構造のQ値の分布。

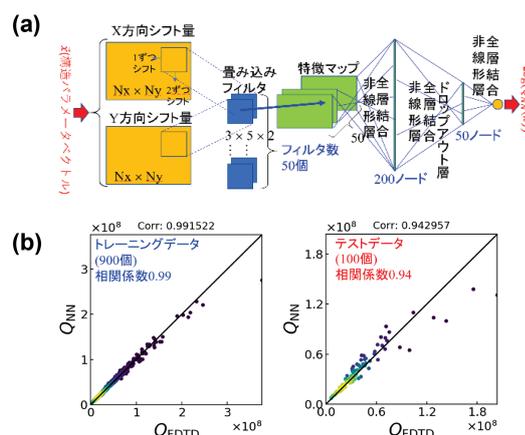


図2: (a) 用いたニューラルネットワークの構造。(b) 学習後のニューラルネットワークが構造から予測したQ値( $Q_{NN}$ )と第一原理計算で得られたQ値( $Q_{FDTD}$ )の相関。

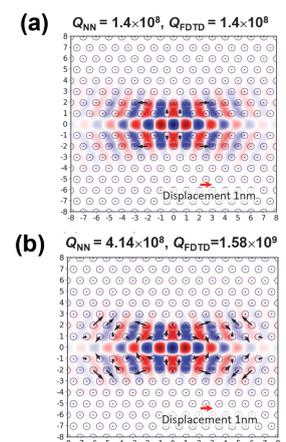


図3: 構造最適化の結果。(a) 基準構造。(b) 本手法で最適化された構造。

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野

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

## 「モード同期チタニウム・サファイアレーザーによる光周波数コムへの位相同期」

原子の共鳴線を基準とする発振器は原子時計とよばれ、非常に正確な周波数を出力する。近年、光領域にある共鳴線にレーザーの周波数をフィードバック制御した、光時計とよばれる原子時計の開発が進んでいる。その不確かさは、単位“秒”の定義と直結するマイクロ波原子時計の $10^{-16}$ をこえて、 $10^{-18}$ 前後に達するものが報告されてきた。一方、光周波数を直接電氣的に測定する方法が以前はなかったが、モード同期レーザーというパルスレーザーから発せられる光を利用する方法が2000年に発明された。モード同期レーザーの周期的な出力パルス光を周波数軸で見た姿は、広い周波数幅にわたり等間隔で発振しているレーザー光（モード）の集合になっている。その形状からこの光は光周波数コム（コム＝櫛）とよばれ、その等間隔性は $10^{19}$ 台まで確認されている。このモード間隔周波数（＝パルス繰り返し周波数）をマイクロ波原子時計に位相同期させることにより、マイクロ波周波数を基準としたレーザー周波数の測定が可能となった<sup>†</sup>。しかし、マイクロ波原子時計の不確かさは、光時計より劣る。不確かさ $10^{-18}$ で光時計どうしを比較する、そして、光時計から電氣的に利用できる基準マイクロ波周波数を不確かさ $10^{-18}$ で発生させるためには、光時計を構成するレーザーの方にコムを位相同期する必要がある。

本研究に関する前回の報告では（cue33号）、レーザーに対するコムへの位相同期を完全には実現できていなかった。これを達成するには、コムモード周波数をより高速で制御する素子が必要となる。そこで我々は、レーザー共振器を構成するミラーの位置を、ピエゾ素子を高速化して制御することとした。ピエゾ素子を高速化する方法の中で、ピエゾ素子を固定するマウントを工夫するものを試した。マウントは指先ほどの大きさの銅の内部をくりぬいて鉛を詰めたもので、その先端にピエゾ素子を接着して素子の機械的共振を減衰させ、位相変化を防ぐ（詳細は[1]を参照）。

このようなピエゾ素子を用いて、レーザー（#1）に対してコムへの位相同期を行った。制御帯域はピエゾ素子としては高速な80 kHzを実現した。図1は、位相同期中のレーザーとコムモードとのビート信号をスペクトラムアナライザで測定したものである。完全に位相同期が達成されているため、ビート信号のスペクトルの中心は、拡大してもアナライザの分解能で鋭く見えるだけである。図2は位相同期中のコム別の波長のモードと別のレーザー（#2）とのビート信号を示す。2台のレーザーの周波数は、同一の光共振器の（波長の異なる別の）共鳴に安定化されている。したがって、図2のスペクトルが制御帯域80 kHz以内で図1とほぼ同じとなっていることは、コムすべてのモードがレーザー#1に位相同期されていることを示す。原理的には図2のスペクトルの中心を拡大してもアナライザの分解能が確認できるだけのはずだが、実際には10 Hz以下ではあるが有限の幅と、100 Hz以内の領域で位相雑音の拡大が観測された。光ファイバーでレーザー光を伝送中に付加される位相雑音や、2台のレーザーの周波数安定化回路が原因として疑われる。なお、本研究の詳細は[2]に報告している。

（<sup>†</sup>正確には、コムモード周波数は、パルス繰り返し周波数の整数倍とこれをゼロまで外挿したあまり、オフセット周波数の和である。オフセット周波数は独立にRF基準周波数に位相同期しておく。）

[1] T.C. Briles *et al.*, *Optics Express*, **18**, 9739 (2010). マウントは井戸哲也氏（情報通信研究機構）よりご提供いただいた。

[2] S. Hatanaka, *et al.*, *Applied Optics*, **56**, 3615 (2017).

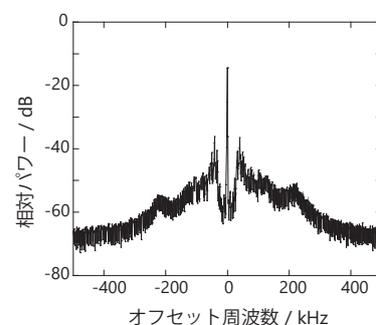


図1 コムとレーザー #1 とのビートスペクトル（分解能：1 kHz）

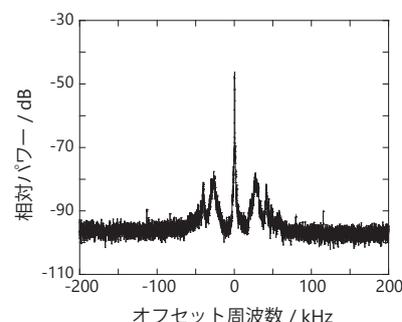


図2 コムとレーザー #2 とのビートスペクトル（分解能：30 Hz）

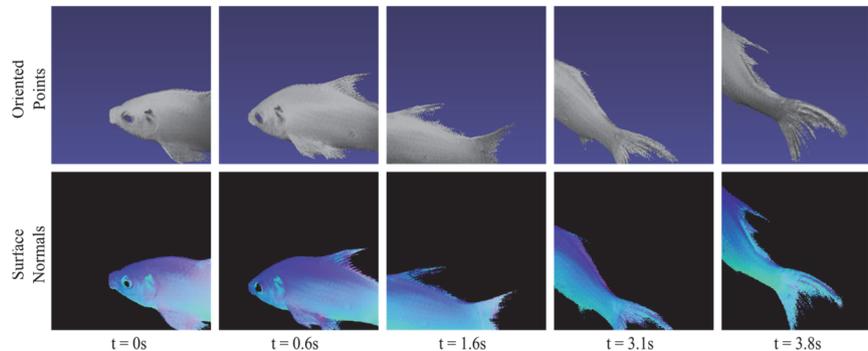
## 知能メディア講座 コンピュータビジョン分野 (西野研究室)

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

### 「水による光の吸収および反射を用いた三次元形状復元」

水は無色透明であるが、これはあくまでも可視光範囲内に限ったことであり、近赤外波長領域においては、水は光を吸収する。特に 800 ~ 1000nm の波長領域では、その吸収率がほぼ線形に変化する。そのため水中を伝搬する近赤外光は、この吸収率に比例した光路長のべき乗分だけその強度が減衰

する。この特性に着目し、異なる 2 つの波長の近赤外光の同一水中光路における観測輝度の比を用いて、光路長自体を算出する方法を我々が近年導出し、実時間での水中物体三次元形状復元を実現した。しかし、この手法は水中物体表面の各点の水面からの距離を求めるため、微細な形状の復元までは行えなかった。そこで、波長の異なる光の吸収率の差だけではなく、さらに物体表面への入射角度の変化から法線まで算出する手法を新たに導出した。求めた手法では、最低 4 つの近赤外光により照射された水中物体表面の各点について独立した推定値としてその三次元位置と法線を求めることができ、より細かな物体形状を捉えることができる。図に示すように、水中において動的にその表面を変化させる魚のヒレなど、微細な物体表面形状を各フレームそれぞれ独立して推定できることをさまざまな物体を例に実証した。光源のカメラに対する配置等の自由度も高く、用いられる光学機器が非常に簡便であるため、今後は内視鏡への組み込みなど、医療分野への応用を念頭に入れている。



水中を泳ぐ魚の法線を含む精密な三次元形状復元



水面反射を含む単一画像からの見えと三次元形状の復元

さらに、水による光の反射に着目した新たな三次元形状復元手法を開発した。京都観光などにおいて、神社仏閣をその前に広がる池などによる水面反射と共に捉えた写真を一般的によく撮像する。これは正面から捉えた仏閣等の建

物に加え、水面が鏡となって反射して得られる反射像を一枚の画像に捉えたものとなる。鏡面による反射は、その奥に配置される仮想視点からの写像となるため、実はそのような水面反射画像は（正面および水中から見上げた）2つの視点から同一の物体を撮像していることになり、上下のステレオ視により得られたものとなる。さらに、水面における光の反射がフレネル反射で記述でき、その角度依存性により撮像対象を最低 2 つの輝度で観測していることになる。これらの事実に着目し、対象物体の三次元形状を復元するのみならず、その見えも本来のダイナミックレンジの広い明るさに補正できることを示した。図に示すように、観光などで気軽に撮像された単一画像から、豊かな見えを持つ三次元モデルとして対象物体を復元できることを、様々な画像を例に実証した。この手法により、日々の写真の新たな利活用につながることを期待できる。

## 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/>

### 「機械学習の予測モデルを用いた通信ネットワークの優先制御」

大木研究室では新熊准教授を中心に「機械学習の予測モデルを用いた通信ネットワークの優先制御」の研究に取り組んでいる [1]-[4]。

車の交通量や、人々の群移動（人流）、路面状態といった実空間情報のリアルタイム予測が、ナビゲーションや、運転支援、自動運転といったスマートモビリティに特に有効であると期待されている。その予測を可能にしたのは昨今の機械学習技術の発展である。加えて、スマートフォンや、自動車、ドローンといったモバイル機器がカメラなどのイメージセンサを搭載するようになったこと、および、イメージ処理技術により車両のナンバープレートの認識や、歩行者・車両の検出が可能になったことも大きく寄与している。通信ネットワークは、モバイル機器で取得された大容量のイメージデータを予測を行うサーバに到達させる必要がある。しかしながら、通信帯域の制限により、そのような大容量データをリアルタイムに遅延なく送ることは難しいという問題がある。

そこで、機械学習の予測モデルを用いた通信ネットワークの優先制御を提案してきた [1]-[4]。教師あり機械学習の手法を用いた場合、その予測モデルから各々の入力データが精度向上にどれくらい寄与するか、つまり、データの重要度を抽出することができる。これは特徴選択と呼ばれ、機械学習の手法とともに様々な手法が提案されてきた。抽出された入力データの重要度を通信ネットワークの優先制御にマッピングし、重要なデータほど優先的に送られるよう制御することにより（図1）、予測精度の向上に寄与するデータがサーバに到達するため、一部のデータによる予測でも高い予測精度を達成できる。実データを用いたシミュレーション評価により、モバイルネットワークでの有効性（図2） [1][2]、無線基地局-サーバ間の有線ネットワークでの有効性 [3] を示した。また、提案する優先制御は複数のサーバがデータや計算リソースを共有するネットワークでも有効であることが示されている [4]。これまでの研究はイメージデータの処理を理想化していたため、今後はその処理も考慮した検討を行なう。

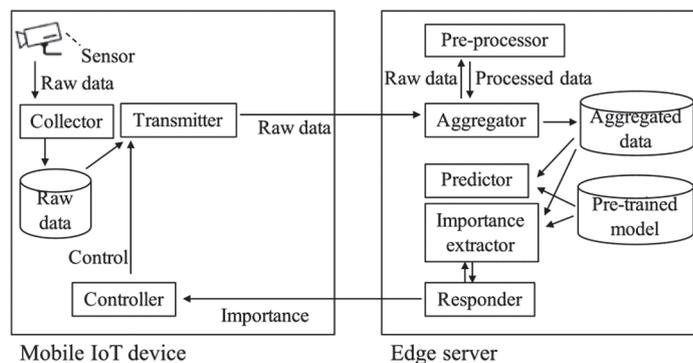


図1：システム構成

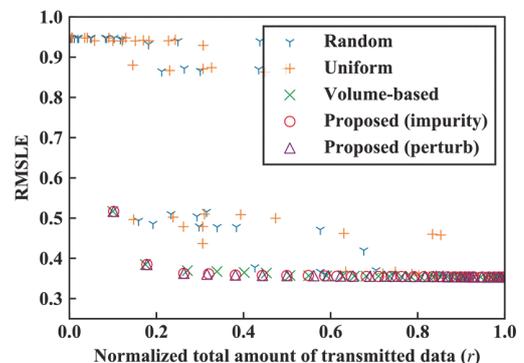


図2：通信帯域に対する予測精度

- [1] Y. Inagaki, R. Shinkuma, T. Sato, and E. Oki, "Prioritization of Mobile IoT Data Transmission Based on Data Importance Extracted from Machine Learning Model," IEEE Access, July 2019
- [2] K. Sato, R. Shinkuma, T. Sato, E. Oki, T. Iwai, T. Onishi, T. Nobukiyo, D. Kanetomo, and K. Satoda, "Modeling of Utility Function for Real-time Prediction of Spatial Information," IEEE Globecom, Dec 2019
- [3] Y. Yamada, R. Shinkuma, T. Sato, and E. Oki, "Feature-selection based data prioritization in mobile traffic prediction using machine learning," IEEE Globecom, Dec 2018
- [4] 上林, 新熊, 佐藤, 大木, "実空間情報のリアルタイム予測のためのエッジサーバ間連携," 信学会和文論文誌 B, 2019年11月

## 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/>

「有機薄膜トランジスタのバイアス・ストレス劣化の主要因特定と回復成分を考慮可能な特性変動モデルの提案」

有機薄膜トランジスタ (Organic thin-film transistor; OTFT) は、印刷プロセス等により柔軟な基板上に製造可能である特長により、ウェアラブル・デバイス等への応用が期待されている。しかし、OTFT は、電圧印加によるバイアス・ストレスや大気中の水分や酸素との反応によってその電気的特性が変動することが知られている。こうした特性変動があっても正しく動作するロバストな OTFT 回路を、回路シミュレーションを用いて低コストに設計するため、経時的な特性変動を正確に表現できるトランジスタモデルが求められている。

本研究では、図 1 に示す構造を持つ、低電源電圧で動作する OTFT を対象として、テストチップ (図 2) を試作してその特性変動を求めた。ゲート電圧のみを印加し電流を流さないバイアス条件と、ゲート電圧とチャネル電流がともに作用するバイアス条件での特性変動を比較した結果、ゲート電界が特性変動を大きく左右することがわかった (図 3)。これは、OTFT の特性劣化が、主として絶縁膜、半導体層、およびそれら界面へのキャリア捕獲により生じるとするモデルを支持する結果である。そこで、キャリアの捕獲・放出に基づいて特性変動を表現する OTFT のトランジスタモデルを新たに作成した。具体的には、モデルパラメータである閾値電圧とキャリア移動度を、バイアス電圧とその印加時間の関数として記述することで、電流特性の経時的な変化を表現する。キャリア捕獲による特性劣化に加えて、キャリア放出による特性の部分的な回復についても正確に表現できる点が特長であり、回路の長期的な特性予測に役立つものと考えられる。提案モデルを用いて計算される閾値電圧とキャリア移動度を適用することで、バイアスを与えない場合 (no bias)、固定バイアス ( $V_{GS}$ ) および異なるバイアス電圧を組み合わせる場合 ( $V_{GS}/no\ bias$ ) について、OTFT の経時的な電流変動を正確に表すことが可能となった (図 4)。

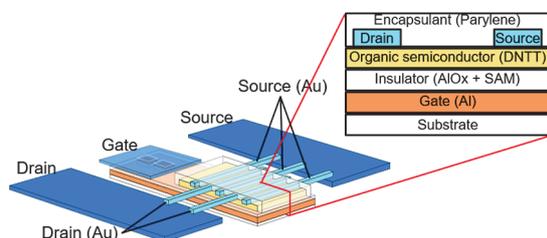


図 1 OTFT の構造

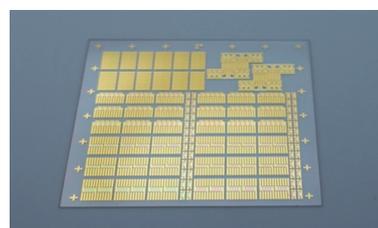


図 2 測定に用いた OTFT チップ

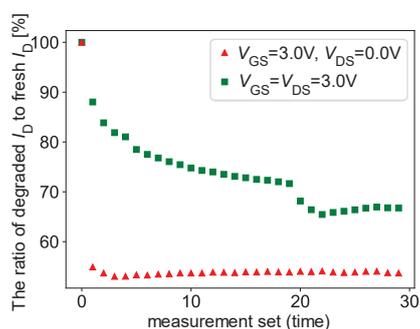


図 3 バイアス条件の相違による電流劣化量の比較

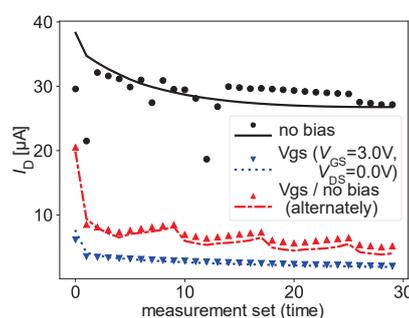


図 4 測定 (点) と提案モデル (曲線) のオン電流変化の比較

## 参考文献

- [1] K. Oshima, M. Shintani, K. Kuribara, Y. Ogasahara, and T. Sato: "Recovery-Aware Bias-Stress Degradation Model for Organic Thin-Film Transistors Considering Drain and Gate Bias Voltages," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 59, SGGG08 (2020), DOI: 10.7567/1347-4065/ab6460.

## システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

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

## 「脳波を用いたブレインデコーディング」

頭皮に取り付けた電極によって脳活動を観測する脳波は、測定機器の利便性の高さ、時間解像度の高さから、神経科学や工学の研究分野で広く使われており、近年では商業利用もされている。脳波は、多数の神経の電気活動の総和が、頭蓋骨や頭皮を通して観測される信号であるため、他の計測機器と比べて得られる情報は少ない。また、電極の揺れや頭皮の状態によって雑音が乗りやすい。そのため、脳波から意味のある情報を抽出するためには、最先端の信号処理・パターン認識・機械学習による数理的な手法が必要である。当研究室では、こうした数理的な手法の開発に加え、脳波の工学的な応用を目指した研究課題に挑戦してきた。ここでは、近年、当研究室で行った脳波研究を二つ紹介する。

**生体認証：**指紋や顔を使った生体的な特徴を使った個人認証は、スマートフォンをはじめ広く普及している。生体的な特徴の一つである脳活動は、「他者が特徴を観測することが難しい」、「複製が難しい」という利点を持つことから、より安全な認証を実現する可能性がある。脳波による個人認証では、測定環境やユーザ自身に起因する信号変動への対処が課題である。たとえば、電極位置のずれや、インピーダンスの変化、身体的な成長や精神状態の変化がこれにあたる。個人認証の場合、ユーザ登録と、認証は別日に行われるため、変動に頑健な個人固有の特徴を抽出する必要がある。この変動の影響を調査するために、連続しているとは限らない2日間、それぞれ午前と午後の合計4ラウンドにわたる脳波(電極の着脱も含む)を、20名分計測した。同一ラウンド内で計測された脳波で登録と認証を行うと、認証成功率はほぼ100%であったが、ある1ラウンドで登録して他3ラウンドの脳波を認証すると、認証成功率は大幅に低下した。これは、計測機器の着脱や時間経過が脳波に影響し、認証システムが個人特徴を捉えられていないためである。そこで、個人特徴を頑健に抽出するために共通辞書学習を提案した。提案法では、「脳活動パターンはユーザやラウンドで共通する少数のパターンの組み合わせで表現でき」、「組み合わせによって表現される脳活動パターンがユーザ固有の変換フィルタを通して、実際に脳波として計測される」ことを仮定した。このような仮定の下、共通辞書学習により、ラウンド間の変動による影響とユーザ固有の脳活動パターンをそれぞれ同定した。これにより変動の影響を受けない個人特徴を抽出することに成功し、チャンスレベル(5%)をはるかに上回る約50%の認証成功率を達成した。

**感情状態推定：**人の感情は健康や対人関係、意思決定に大きく影響する。客観的に感情を推定する技術は、人の「こころ」の理解に不可欠であり、医療やマーケティングなどへの応用が期待できる。しかし、感情は言語化が難しく、その定義・分類はいまだに確立していない。そこで、脳波をクラスタリングし、その結果によって感情状態を客観的に定義・分類することを試みた。具体的には、実験参加者に短い動画を見せたときの感情に関する回答と、動画鑑賞中の脳波が対になったデータセットを用意した。感情に関する回答で実験参加者は、4つの感情指標(興奮度、快感、支配度、好み)に対してそれぞれ強い弱いかを答えた。脳波を教師なし学習によって2つのクラスタに分け、クラスタと感情指標回答の結果を比較した。教師なし学習は、脳波の周波数スペクトルや統計量といった特徴量をハイパーグラフに埋め込み、グラフ上でクラスタリングを行うものである。結果として、各感情指標の強弱によってクラスタが分かれていることが示された。この結果から、脳波から得られるハイパーグラフは、感情に関連する脳波特徴を捉え、感情指標の強弱を表現できているといえる。このように、教師なしクラスタリングにより脳波が分類可能であることが示され、今回の実験で用いた感情指標以外の指標でも、脳波に基づき客観的に定義・分類できる可能性が示された。

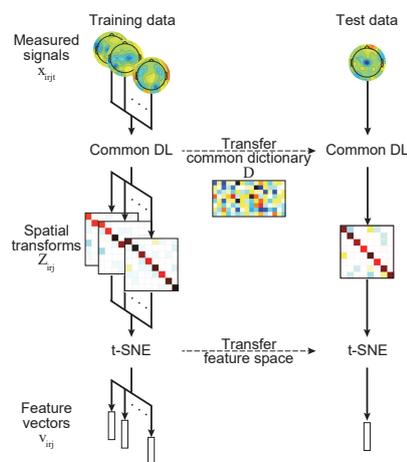


図1 共通辞書学習による個人特徴の抽出

## 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.kyoto-u.ac.jp>

### 「核融合原型炉に向けた 3 次元 MHD 平衡解析」

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。

現在、核融合研究では科学技術的実証炉である ITER (国際熱核融合実験炉) が南仏に建設中であり、2025 年頃から実験が始まり、最終的には加熱に必要なエネルギーの 10 倍以上の核融合エネルギーを制御した状態で持続的に発生させる計画です。これらの核融合研究の進捗に合わせて、国内ではオールジャパン態勢で次の段階の原型炉の検討が始まっています。

超高温プラズマの磁場閉じ込めを考える場合、最初に検討する必要があるのは、プラズマの圧力勾配による力とそれを抑え込むための電磁力がバランスした状態、磁気流体力学的 (MHD) 平衡を見つけることです。この MHD 平衡計算は単純そうなのですが、軸対称性を持たないプラズマの平衡計算では、3 次元計算が必要となるため、数値計算も容易ではありません。ITER や検討中の原型炉はプラズマ中に大きな電流を流すことで閉じ込め磁場を形成するトカマク型閉じ込め装置であり、一般的には軸対称性を有しており 2 次元の解析で平衡が求められると考えられています。しかし、近年の研究の進展に伴い、詳細な実験や計測、数値解析が可能になると、無視できると考えられていた様々な磁場の非軸対称性がプラズマやアルファ粒子の閉じ込めなどに影響を及ぼす可能性が指摘されてきました。磁場の非軸対称性をもたらす要因は様々あり、当研究室でも種々の解析を進めていますが、特に比較的古くから問題とされてきたのはトロイダル磁場コイルの離散性 (図 1) に起因するトロイダル磁場 (TF) リップルです。図に示した TF コイルの離散性により、コイル間の磁場はコイル直下の磁場より僅かに弱くなり、これが磁場の非軸対称性をもたらします。TF リップルは、核融合反応により生成しプラズマの加熱にも必須であるアルファ粒子の損失につながるため、原型炉ではその閉じ込めの最適化が望まれます。

従来の TF リップルの解析では、軸対称平衡に TF リップルを重畳する方法で、アルファ粒子の損失が解析されてきましたが、TF リップルが MHD 平衡そのものに影響を及ぼす可能性が指摘されており、本研究室では原型炉における TF リップルの影響を、3 次元平衡を用いて調べています。

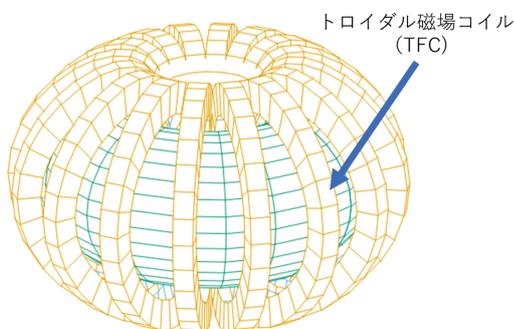


図 1 トロイダル磁場コイルの離散性

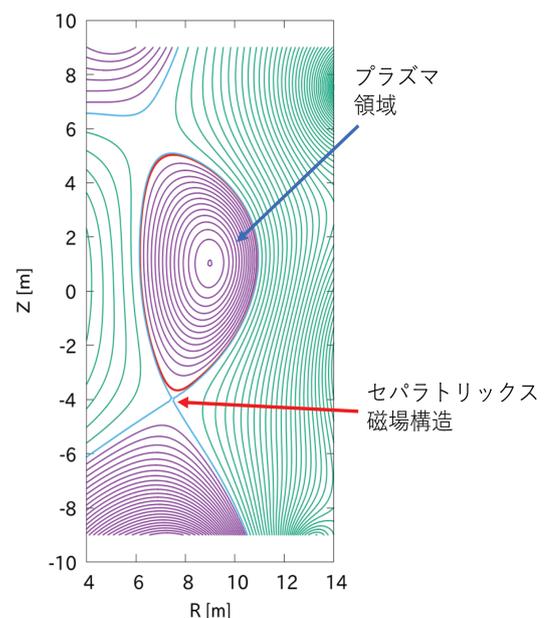


図 2 原型炉の MHD 平衡 (図はトロイダル磁束の等高線を示し、セパトリックス磁場構造に囲まれた部分がプラズマ領域)

## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野 (長崎研究室)

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index_j.html)

## 「プラズマに高速の粒子ビームを入射してプラズマを加熱する」

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・高密度で閉じ込める事のできる磁気容器(磁場配位)の最適化を行っています。最適かどうかを判断する手段として、プラズマに加熱電力を入力し、その応答を計測することで熱の輸送を調べる方法があります。プラズマも気体や流体のような物質と同じく、密度・流れ・圧力があり、質量・運動量・エネルギーの保存則に基づいた輸送方程式を解くことで、それぞれの輸送の性質(輸送係数等)を調べることができます。ところでプラズマはどのように加熱するのでしょうか?外部磁場を使って閉じ込められたプラズマの加熱方法の一つとして、電磁波を利用する方法と、今回紹介する中性の粒子ビーム(中性粒子ビーム入射:NBI)を使う方法があります。なぜ”中性”かは、イオンビームでは外部磁場によるローレンツ力で軌道が曲がってしまい、所定の位置に加熱パワーを入力する事が難しくなるからです。

NBIは大まかに大電流イオン源・中性化セル・偏向電磁石・受熱板(ビームダンプ・カロリメーター)・ドリフト管・真空排気装置、およびこれらを動作・制御するための各種電源・制御装置で構成されています(図1参照)。高電圧・大電流を発生させる高圧電源を始めとして、高速遮断・ノイズ対策・アーク放電・高真空および、これらを統合する制御装置等、電気電子工学でなじみ深い技術が多く使われています。ヘリオトロンJには加速電圧30kV・イオンビーム電流50A・パルス幅0.2秒の水素イオン源が2台ずつ、2系統設置されています。イオン源から引き出された水素イオンビームは水素ガスとの衝突により中性の水素(要は水素原子)ビームとなり、磁場に曲げられることなくプラズマ中に入射されます。水素ビームはプラズマ(イオン・電子)との衝突により電離され高速のイオンとなり、プラズマとのクーロン衝突を繰り返すことでイオンや電子にエネルギー・運動量を与えます。

電磁波を利用した加熱では、磁場強度に対する共鳴周波数やプラズマの密度に対する遮断周波数が存在するため、使用する電磁波の周波数によって運転領域が制限されますが、NBIを用いた加熱では磁場や密度に対する適用範囲が広く、これが利点となります。また直接プラズマに運動量を与えることができるので、容易にプラズマの流速を制御することができます。ヘリオトロンJではNBI加熱プラズマで高密度化( $\sim 1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ )に成功しています。磁気容器の幾何形状を変えると流速が変化することも実験的に明らかになり<sup>1)</sup>、理論的な予想と良く一致していることがわかりました。

## 参考文献

- [1] H. Lee, S. Kobayashi, K. Nagasaki, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **55** 035012 (2013).

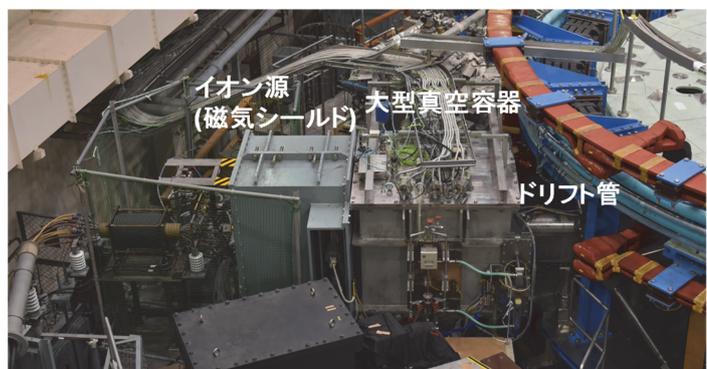
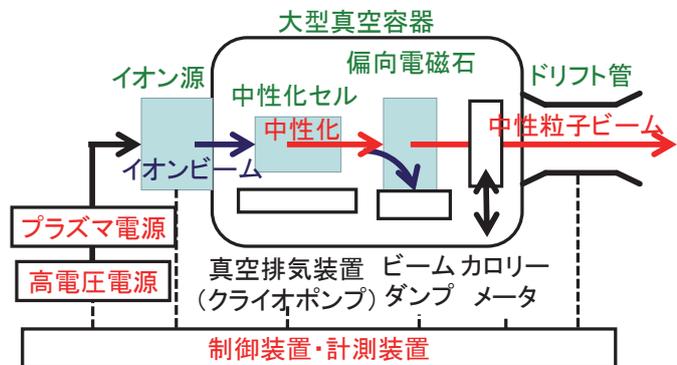


図1. (上) NBI装置概略図。(下) ヘリオトロンJに設置されているNBI装置写真

## 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/>

### 「新しいビーコン観測衛星に対応した受信機 GNU Radio Beacon Receiver 2 (GRBR2) の開発」

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り、太陽活動度の活発期に増大する。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、研究のホットトピックであり続けてきた。しかしながら EPB を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。衛星から 2 周波数の電波を放射し地上で受信することで、電離圏の全電子数 (Total Electron Content、TEC と略記) が計測できる。この手法は EPB 発生予兆の研究に有効とされており、我々も活用してきた。約 10 年前に、我々はデュアルバンド (150MHz/400MHz) ビーコン実験用に GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) を開発した。これは非常に成功し、日本および東南アジアにおける TEC 観測から、特徴ある研究成果を得てきた。しかし多くのビーコン衛星は老朽化し、利用可能な衛星の数が激減していた。

新しい衛星群を用いた衛星 = 地上ビーコン実験が始まろうとしている。それらの 1 つは、SRI International による Tandem Beacon Explorer (TBEx、3U サイズの cubesate 2 機編隊) であり、もうひとつは、台湾 / 米国による FORMOSAT-7/COSMIC-2 (以下では COSMIC-2) プロジェクトである。COSMIC-2 は 6 機の衛星で構成され、第 1 の任務として GNSS 掩蔽観測を実施するが、サブペイロードとして多周波数のビーコン送信機を搭載している。これら 2 種類の衛星は 2019 年 6 月 25 日に Falcon Heavy ロケットの 1 回のフライトによって、低軌道傾斜角が 24 度 (COSMIC-2) と 28 度 (TBEx) の軌道に打上げられた。今回、これらの衛星計画に対応する新しいビーコン受信機 GNU Radio Beacon Receiver 2 (GRBR2) の開発を行った。今回は、150MHz、400MHz、966MHz、1067MHz の 4 周波数を同時に受信できる装置となっている (図 1)。アンテナの設計開発は東京工科大学の松山真由美博士にご担当いただいた。すでにタイ・ベトナム・インドネシアへ配備済みであり、2019 年 9 月 6 日に COSMIC-2 からビーコン電波が送信された時点で即座に観測開始した (図 2)。その後も順調にデータ取得を進めている。TBEx 衛星は調整に時間を要したが、もうすぐビーコン電波の発射を迎える。

EPB は電離圏を通過する電波伝搬に大きく影響する。GPS 測位は、民間航空管制への応用が始まるなど社会インフラとして重要性が高まっているが、電離圏擾乱によって測位精度が低下したり測位ができなくなったりする、という悪影響が懸念されている。GRBR2 を活用した新たな赤道・低緯度電離圏研究を展開し、社会的要請に応えていきたい。

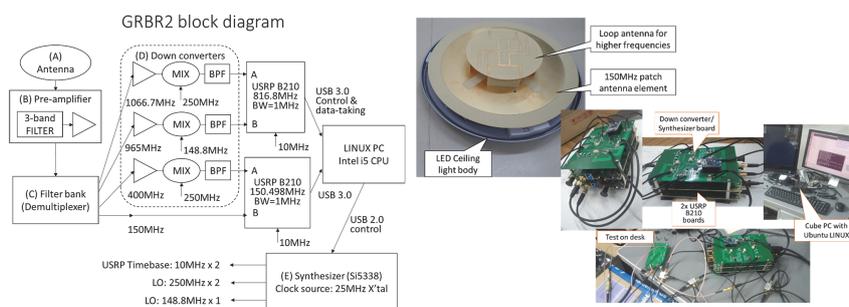


図 1 GRBR2 のシステムブロック図 (左図) とアンテナおよび受信ハードウェアの写真 (右図)

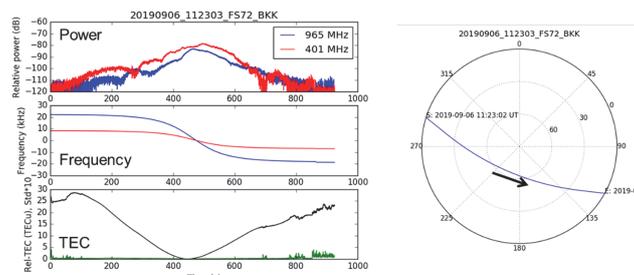


図 2 COSMIC-2 衛星と GRBR2 による初めての TEC 観測 (2019 年 9 月 6 日、タイ・バンコクからの観測) 左図：上から受信電力、周波数偏移、相対 TEC 値、右図：COSMIC2 衛星の方向 (西から東に飛翔)

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://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「マルチパス環境における MIMO (Multi In Multi Out) マイクロ波送電の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、エネルギー応用という観点からマイクロ波技術を捉え、マイクロ波を用いたワイヤレス給電(マイクロ波送電)に関する研究や、マイクロ波送電を用いた宇宙太陽発電所 SPS 実現を目指した研究、マイクロ波加熱応用研究等を行っている。これまでマイクロ波送電は電波法上に規定がなく、技術のみでは超えられない実用化の壁が存在した。しかし現在、米国のいくつかのベンチャー企業が進めるマイクロ波送電を用いたバッテリーレス IoT (Internet-Of-Things) デバイスシステムが連邦通信委員会 FCC から公式の許可を取り(2018-2019)、米国ではマイクロ波送電システムの販売を始められるようになったり、日本でも電波を管轄する総務省が情報通信審議会にマイクロ波送電を諮問にかけ、来年春以降の電波関連の省令の形成を目指して議論を始めたり(2018.12 から)しており、マイクロ波送電の実用化の機運が世界中で高まっている。

当研究室では、マルチパス環境における MIMO (Multi In Multi Out) マイクロ波送電に関し、現在研究を行っている。これはもともと米国 Ossia 社の "Cota" と名付けられたシステムで、ユーザーから送られてきたパイロット信号電波を送電フェーズドアレイアンテナで受信し、位相共役を取ることで高速に正確にマイクロ波エネルギーをユーザーに送ることのできる技術である(図1)。このシステムはレトロディレクティブと呼ばれ、これまで当研究室を含め [1] 世界中で研究が行われているが、これまでの研究は単一のユーザーのみでしかも反射がない直達波環境 (Line-Of-Sight (LOS)) のみで研究・実証が行われてきた。Cota はマルチパス環境であれば LOS 環境でなくても有効に動作するため、人体等にマイクロ波ビームを当てることなく高効率にユーザーにマイクロ波電力を送ることのできるシステムである(図2)。当研究室ではこれをさらに発展させ、複数のユーザーから放射された独立のパイロット信号をマルチパス環境下でレトロディレクティブを動作させても、複数のマイクロ波ビームを自動的に形成し、高効率でマイクロ波送電を可能とすることを実証した(図3)。これは他の方法で位置を既知としたユーザーへマイクロ波ビームを最適化する手法や、時分割でビーム方向を切り替える手法よりも高効率で高速にマイクロ波送電を行うことができることも証明されている [2]。今後は実験でこの効果を実証していく予定である。

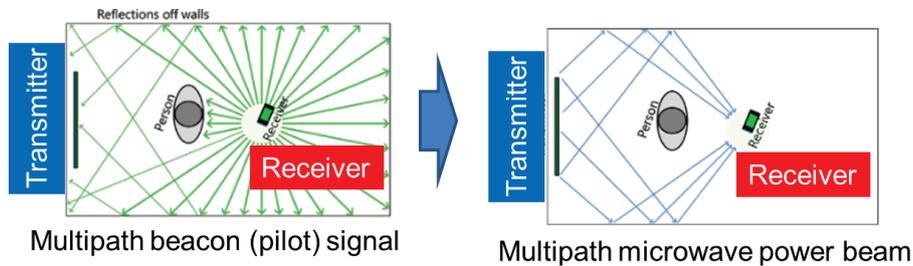


図1 マルチパスレトロディレクティブ (Cota) の動作原理

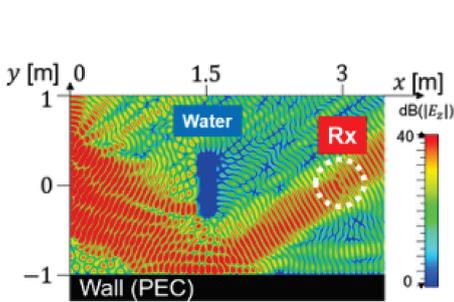


図2 障害物がある場合のマルチパスレトロ・マイクロ波ビーム

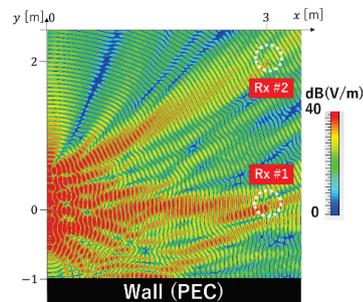


図3 マルチパス環境での MIMO マイクロ波ビーム

参考文献

- [1] cue41 号, 生存圏電波応用分野 (篠原研究室) の研究紹介, 2018
- [2] Sasaki, T., et al. Proc. APMC2019, pp. 831-833