

## 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

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 (米澤研)

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

#### 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

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

#### 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 (海老原研) \*

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

## 先端電気システム論講座

<https://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

### 「SiC MOSFET の性能を引き出すデジタルアクティブゲート駆動技術の開発」

電力を所望の形へと変換する機能を担う電力変換回路の性能を左右するのが、大きな電圧・電流のオン・オフを切り替えるパワー半導体素子である。近年、次世代半導体材料として期待される炭化ケイ素 (SiC) パワー素子の研究開発および実用化が進展しており、その優れた電氣的・熱的特性を活かした電力変換回路の小型集積化が期待されている。一方で、その高速な過渡が誘起するノイズやサージ等が回路動作に支障をきたす恐れがある。それらを防ぎつつ、SiC 素子のポテンシャルを最大限引き出す回路技術の開発が課題となっている。

そこで着目されているのが、アクティブゲート駆動 (AGD) 技術である。AGD は、パワー素子を駆動する IC であるゲートドライバの出力を数ナノ秒単位で調整することで、電流や電圧の立ち上がり / 下がりの速度やタイミング等を制御し、所望の特性を得る技術である。その有効性は多くの研究において実証されているが、その設計に高度なノウハウが必要になるほか、素子や適用する回路に応じた個別設計が必要となり、汎用性に難がある。

本研究室では、同技術をデジタル化し、計算機の援用を受けた最適化システムを構築することを目指している。信号領域で用いられるデジタル・アナログ変換技術に着想を得て、ゲート駆動回路へと応用したデジタルアクティブゲート駆動回路 (DAGD) を開発した [1]。その回路図と写真をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。同回路は、従来のような 1/0 の 2 状態での制御ではなく、ゲート電圧の波形を時系列データとして扱うことで、AGD 動作の調整を組み合わせ最適化問題として解くことを可能にした。ハードウェアを一般化し、動作の変更をすべてソフトウェアが担当することで、ノウハウに頼らない汎用な AGD 技術の確立が期待できる。さらに、素子のばらつきや劣化など、事前の予測が困難な、不確かさを有する要因による回路動作の不良に対しても、センシングデータ等に基づく動作調整によって、オンラインでの対応が可能となる。

そのようなシステムの実証例として、メタヒューリスティクスの一つである遺伝的アルゴリズムによる最適化システムを開発した。SiC パワー素子の駆動波形を図 3 に示すように遺伝子表現し、所望の目的関数を最小化するような各変数の組み合わせを探索することで、様々な条件下で最適な駆動波形が得られることを確認した [2]。

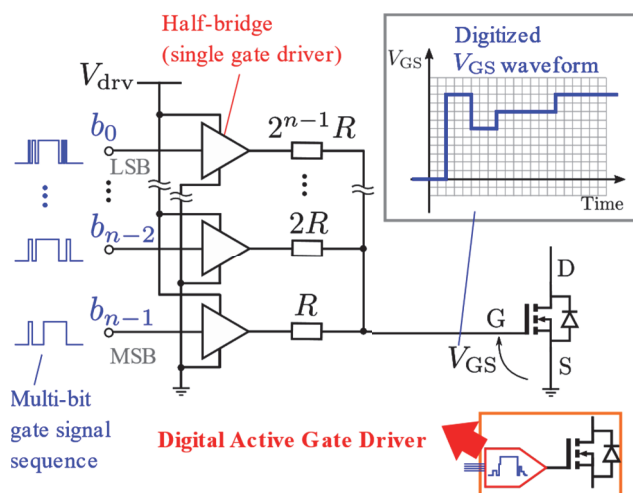


図 1 DAGD の回路構成

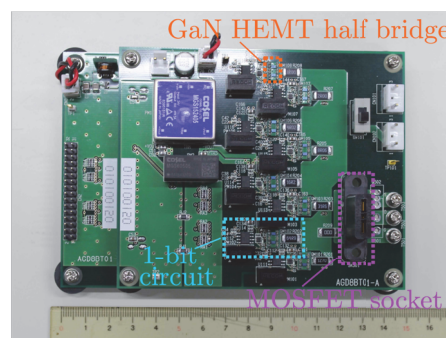


図 2 開発した DAGD の写真

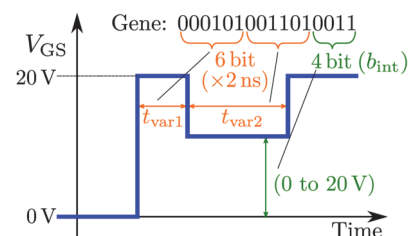


図 3 AGD 動作時のゲート電圧波形の遺伝子表現

- 文献 [1] H.Takayama, T. Okuda, T. Hikihara, *Int J Circ Theor Appl.* **50** (1), 183-196 (2022).  
 [2] H.Takayama, S. Fukunaga, T. Hikihara, *Proc. EPE2022 ECCE EUROPE* (2022).



## システム基礎論講座 システム創成論分野 (阪本研究室)

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

## 「電波による非接触心拍・脈波計測のためのレーダ人体イメージング」

医療やヘルスケアの分野において、レーダによる非接触人体計測への期待が高まっている。特に、心拍や呼吸などの生体計測では、計測される人体部位によって異なった特徴がみられるため、特定部位のみを選択的に計測することが重要である [1]。これを実現するためには、人体の形状および電波の反射部位を特定する人体イメージング [2] が不可欠であるが、レーダイメージングの生体計測応用は報告が極めて少ない。そこで、我々は生体計測で注目されるアレーレーダを円弧状に機械走査させるレーダシステムを試作し、人体イメージングを試みた。本稿で紹介する技術の詳細については [3] を参照されたい。

本研究では中心周波数 79 GHz、帯域幅 4 GHz、送信 6 素子、受信 8 素子の 2 次元アレーを有するミリ波帯多入力多出力 (MIMO) アレーレーダ (図 1) を用いた。同レーダの 2 次元アレーにより、2 方向の角度分解能に加え、距離分解能を用いて 3 次元イメージングが可能となる。同レーダは  $yz$  平面の原点  $O$  を中心とする半径  $R=1.1$  m の円弧上を機械走査される (図 2)。レーダアンテナが走査される中、一定の間隔で 3 次元レーダ画像を生成するため、アンテナ位置に応じた複数の画像が得られる。これらの複数 3 次元画像を統合することで、特定の視線方向からの画像では得られない広範囲の画像を得ることができ、これにより人体イメージングの性能向上が期待できる。

開発技術の性能を検証するため、仰臥位 (仰向け) の被験者 1 人 (健康な成人男性) に対してミリ波レーダおよび 3 次元レーザスキャナ iReal 2E による計測を行った (図 2)。計測データに開発レーダイメージング法を適用して人体画像が得られることが確認された (図 3)。図 3 では、3 次元レーザスキャナにより得られる参照用の形状データを水色で示している。両者の比較により、頭部・胸部・腹部・両肩の形状が提案法で得られていることが確認できる。今後、開発技術を用いて人体の対象部位の座標を特定し、そこから、その部位の心拍・脈波の計測に最も適したレーダ位置を自動的に推定し、レーダを移動させたいうで、心拍・脈波を高精度で計測するシステムを整備する予定である。同システムにより、対象者の位置や姿勢に依存せず、安定した精度でのレーダ計測の実現が期待される。

参考文献 [1] T. Sakamoto *et al.*, *IEICE Trans. Commun.*, vol. E104-B, no. 4, pp. 463-471, 2021.

[2] T. Sakamoto *et al.*, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 2, pp. 658-670, 2016.

[3] 加藤雅也, 阪本卓也, 信学技報, vol. 122, no. 365, EST2022-99, pp. 125-128, 2023.

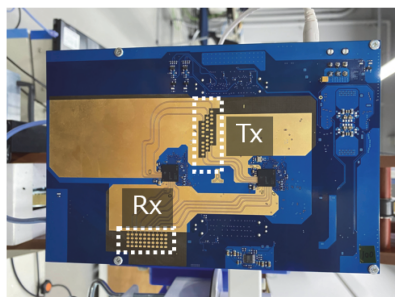


図 1 計測に用いるミリ波帯多入力多出力アレーレーダ

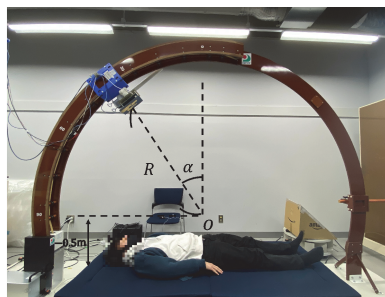


図 2 円弧状にレーダを機械走査して被験者を計測する様子

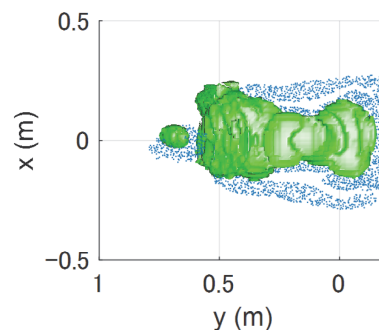


図 3 開発技術により実現されたレーダ人体イメージング

## 電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

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

## 「液体・ガスヘリウムで冷却された複合多芯超伝導線の結合時定数測定法の構築」

超伝導体を電線にした超伝導線は、多くの場合、非常に細い超伝導線（超伝導フィラメントと呼ぶ）を多数集合化した構造をとっています。このような超伝導線を複合多芯超伝導線と呼び、マルチフィラメント化することによって超伝導状態の安定性が高く、かつ交流損失と呼ばれる超伝導体特有の損失が低くなるという効果が得られます。複合多芯超伝導線では超伝導フィラメント間は母材と呼ばれる常伝導金属を介して電氣的に接続されています。複合多芯超伝導線に外部から磁界が印加されると、母材を介して超伝導フィラメント同士をつなぐように流れる電流ループが生じます。このループ状の電流を結合電流と呼びます。結合電流が流れている状態は超伝導フィラメント同士が電氣的に一体となっている（結合している）状態であり、フィラメント化の効果が得られなくなるため、実用上は結合電流が十分に減衰し、超伝導フィラメント同士が結合していない条件で使用する必要があります。この結合電流が減衰するまでに要する時間が結合時定数であり、複合多芯超伝導線を応用できる条件を決定する極めて重要な特性です。結合時定数は母材の電気抵抗に強く支配され、一般に母材の電気抵抗は温度依存性をもつため、結合時定数は温度依存性を持ち、これを実験的に評価する手法が必要です。

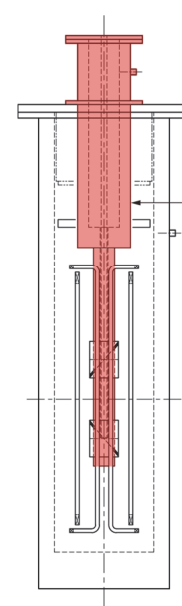
我々の研究室では、液体・ガスヘリウムで超伝導線を冷却し、複合多芯超伝導線の結合時定数を測定することができる装置を開発しました。測定装置の外観と概念図を図1に示します。図1 (a) はクライオスタットと呼ばれる冷却容器であり、これに液体・ガスヘリウムを充填します。図1 (a) 下部の細くなっている領域に試料を配置し、この部分を図1 (c) のようにマグネット (図1 (b)) に挿入することで、液体・ガスヘリウムで冷却されている試料に磁界を印加し、結合時定数を測定します。また、クライオスタットはGFRPと呼ばれる非金属の材料で製作されている、あまり一般的ではないものです。これは、もし金属製クライオスタットを使用すると外部から試料に磁界を印加するときにクライオスタットに渦電流が誘導されてしまい、これがガスヘリウムの温度上昇の原因となったり、試料への磁界印加の妨げとなったりするためです。この測定法によって、より広い温度領域における超伝導応用に向けて必要となる、種々の超伝導線の結合時定数測定が可能になります。



(a) クライオスタット



(b) マグネット



(c) (a) と (b) の組合せの概念図

図1 液体・ガスヘリウム中での結合時定数測定装置

## 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室）

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

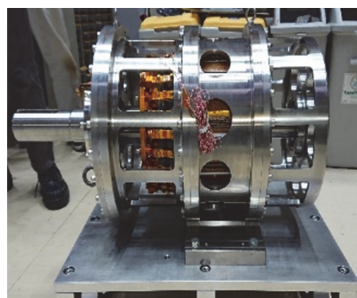
### 「高温超伝導誘導同期モータの非超伝導駆動に関する研究」

当研究室では、かご形回転子巻線を高温超伝導体によって構成する高温超伝導誘導同期モータ（High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM）の研究を行っている [1]。同機は、高温超伝導体の非線形電流輸送特性を効果的に利用することで、同期トルクと非同期（すべり）トルクの両立など従来機に無い特性を実現することができる [1]。現在では、基本回転特性の明確化、最適化設計技術、非線形ベクトル制御技術などを確立しつつあり、実用化を目指した研究開発を複数企業と共に進めている。例えば、水素サプライチェーン構築に向けた企業主体型の NEDO プロジェクトが採択され、HTS-ISM を用いた液体水素サブマージドポンプの開発を開始している [2]。また、2023 年 5 月 27 日～28 日に富士スピードウェイ（静岡県小山町）にて開催された「ENEOS スーパー耐久シリーズ 2023 第 2 戦 NAPAC 富士 SUPER TEC24 時間レース」において、メディア・関連企業・政府関係者向けに当研究室が開発した 20 kW 級 HTS-ISM のデモ試験を行い、液体水素搭載水素エンジン向け HTS-ISM の可能性についてプレゼンテーションを行った [3]。HTS-ISM は、いよいよ高温超伝導回転機として世界初となる実用化を達成するフェーズにある。

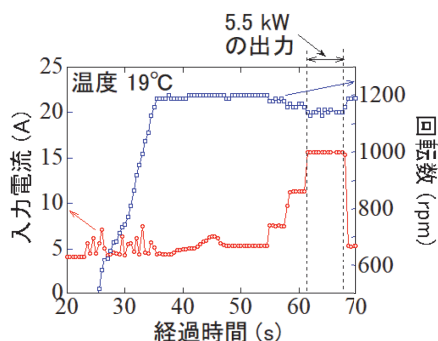
上記実用化を確かなものにするためには、高温超伝導モータの安全性や信頼性を保証する技術の実現が極めて重要である。特に、高温超伝導モータの一般的特長として高出力密度特性が挙げられるが、例えば冷却系の故障に伴って蓄積しているエネルギーが一気に放出されれば甚大な事故に直結することになる。当研究室は、HTS-ISM の豊富な試験データを元にして、さらなる安全性や信頼性を保証するため、高温超伝導体と常伝導体を並列化するハイブリッドかご形巻線構造を提案している [4]。回転磁界によって供給される速度起電力に対して、上記巻線が超伝導状態のときには高温超伝導巻線に流れる超低損失電流が発生トルクを支配する。一方で常伝導状態では、高温超伝導体が酸化物であることからその抵抗値が非常に大きく、誘導電流の抑制に伴って焼損が回避される。一方で、当該状態では常伝導巻線に Ohm の法則に従う電流が誘導され、低出力ながら運転が継続される。図には、50 kW 級機（同図 (a)）を用いた温度 19℃ における回転試験結果（同図 (b)）を示すが、5.5 kW 出力を実現している。今後は、HTS-ISM に本特性をフェールセーフ機能として付与し、実用化を目指していく予定である。

#### 参考文献

- [1] (応用物理学会 HP) <https://www.jsap.or.jp/columns/gx/e2-11> (2023 年 8 月 6 日閲覧)
- [2] (NEDO HP) <https://www.nedo.go.jp/content/100961947.pdf> (2023 年 8 月 6 日閲覧)
- [3] (Motor-Fan HP) <https://motor-fan.jp/mf/article/141777/> (2023 年 8 月 6 日閲覧)
- [4] T. Nakamura, et al., Superconductor Science and Technology, 22 (4) (2009) 045022
- [5] T. Nakamura, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 33 (5) (2023) 5200205



(a) 外観写真



(b) 室温 (19℃) における回転試験結果

図：50 kW 級 HTS-ISM の室温 (19℃) における回転試験例 [5]



## 電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

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

## 「トポロジカル物質でのベリー曲率双極子の強誘電的不揮発制御」

近年、トポロジカル材料が固体物理学において大きな着目を浴びている。トポロジーとは、「穴の数」や「表裏が区別可能か」などの図形の持つ不変な指標のことである。この考え方を電子の波動関数に適用することで、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体などの新規材料が発見され、近年盛んに研究されている。電子の波動関数のトポロジーを定義する上での重要な物理量としてベリー曲率があげられる。ベリー曲率は電子に対して仮想的な磁場のような作用を持つ物理量であり、磁化や外部磁場が存在しない環境下でも、印加電流に対して横方向の起電力をもたらし、一種のホール効果を生じることができる。空間反転対称性の破れたトポロジカル物質では、電流の向きと大きさによってベリー曲率が変化する。この変化の程度を表す指標をベリー曲率双極子 (BCD) と呼ぶ [1]。BCD が存在すると電流により仮想的な磁場を生むことになるため、電流に依存した横方向電圧の変化 (非線形ホール効果) を測定することで、BCD の観測が可能である。従来から、BCD はいくつかの材料で観測されてきたが、BCD の発現や制御は低温に限られてきた。さらに BCD の向きを反転させた状態で不揮発に保持する性質は未発見であった。BCD の「室温」における「不揮発」な制御が実現すれば、トポロジカル材料と BCD のさらなる応用可能性が示される。

これを実現するために我々が着目したのがトポロジカル結晶絶縁体の材料である  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  (PST) である。PST は結晶対称性によりトポロジカルな性質を有する材料であるとともに、原子中の陽イオンと陰イオンが逆方向に配位することで強誘電体的な分極を示す点が特徴的な材料である。結晶対称性に保護されたトポロジーと分極により任意の向きの結晶対称性が破られるという性質を利用することで、BCD の向きの制御が可能となることが期待される。分極を制御するためのパルス電界を与えた後に、BCD を観測するための非線形ホール効果の測定を行った。図 1 にパルス電界を  $x$  方向の正方向と負方向から加えた後に測定した後に測定した非線形ホール電圧を示す。正方向 (赤) と負方向 (青) の結果で明らかに信号の符号が反転していることが分かる。これは分極が反転したことで BCD の向きが反転したことを示しており、パルス電界を加えた後も反転した BCD が不揮発に保持されていることを示す結果である (図 2)。さらに特筆すべき点はこれまで低温で観測されてきた BCD の制御とは異なり、室温 (300 K) での不揮発制御が達成された点である。また、理論式を用いて実験結果から BCD の大きさを算出したところ、150 nm 程度の先行研究と比較しても大きな値が得られた。本研究では BCD の不揮発制御を、室温という応用展開に重要な領域で達成しており、メモリー材料などとしてのトポロジカル材料の新たな応用可能性を展開する結果であると言える [2]。

[1] I. Sodemann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 216806 (2015). [2] T. Nishijima, M. Shiraishi *et al.*, Nano Lett. **23**, 2247 (2023).

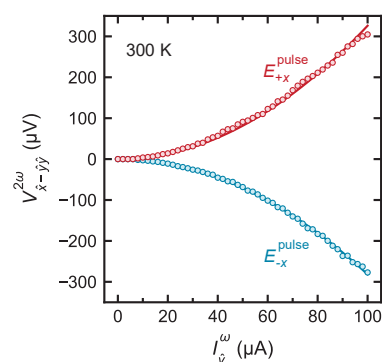


図 1 分極制御後の非線形ホール電圧の電流依存性。

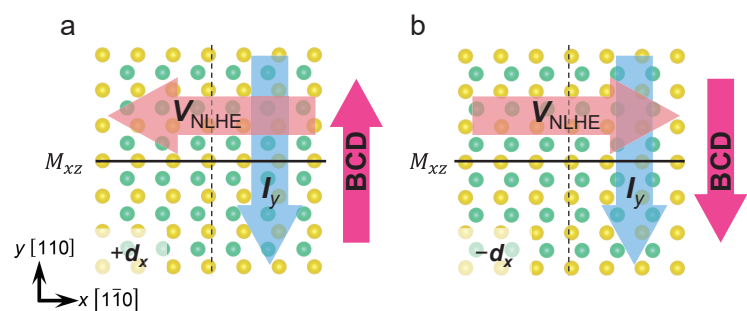


図 2 分極  $d$  の向きと BCD、非線形ホール電圧  $V_{NLHE}$  の関係図。a と b で分極の向きが反転しており、それに伴い BCD と  $V_{NLHE}$  も逆向きになっている。

## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

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

## 「自在な構造制御に基づく窒化物半導体 InGaN 系多波長発光ダイオード」

窒化物半導体 InGaN を用いた量子井戸構造は、可視光領域の高効率な発光ダイオード (LED) やレーザーダイオード (LD) の発光層として重要である。特に近年では、テラレーザ照明、可視光通信 (Li-Fi)、マイクロ LED ディスプレイなど、高スペクトル制御性への要請が高まっている。しかし、従来の量子井戸は平坦な積層構造であり、面内均一なバンドギャップの InGaN 量子井戸からの単色発光となるため、多波長発光スペクトルの合成・制御は困難である。代替技術として、青色 LED と黄色蛍光体を組み合わせた白色 LED が広く普及しているが、蛍光体と LED の発光を独立に制御できないことや、蛍光体での色変換によるエネルギー損失など、多くの課題がある。当研究室では、2000 年代中頃から、選択成長法によって自然形成される複数の結晶面で囲まれたマイクロ構造 (マルチファセット構造) をベースに、蛍光体フリーな多波長発光構造を提案してきた [1]。ただし、選択成長法で現れる結晶面は少数の安定面に限られ、構造の制約があった。そこで本研究では、テンプレート上に自在なマイクロ構造をあらかじめ形成することで、微傾斜の効果によって多波長発光が得られることを示す。

本研究で作製したマイクロレンズ構造の概要図を図 1 に示す [2]。(0001) 面からのオフ角が構造内で連続的に変化するため、結晶成長時の In 取り込みの面方位依存性によって InGaN 層の In 組成分布が形成される [2]。作製方法は次の通りである。始めに、サファイア基板上 (0001) 面 GaN テンプレート上に、フォトリソグラフィによって円形レジストを形成した。次に、サンプルをホットプレート上で加熱し、レジストを凸レンズ形状に熱変形させた (サーマルリフロー法)。そして、ドライエッチングによりレジスト形状を GaN 表面に転写し、最後に有機金属気相成長法によって n-GaN 層、InGaN 量子井戸層、p-GaN 層を成長した。

LED 構造の作製に先立って、GaN マイクロレンズ構造上 InGaN 量子井戸 (p-GaN 層無し) の形状と発光波長分布を評価した。成長後のマイクロレンズ構造は、(0001) 面からのオフ角が  $0^\circ$  から  $8^\circ$  程度まで連続的に変化する非常に緩やかな三次元構造であった [2]。一方で、InGaN 量子井戸の発光ピーク波長は、構造頂点部の 490 nm から構造底部の 400 nm まで連続的に変化し、多波長発光特性が確認された (図 2) [2]。最後に、GaN マイクロレンズ構造上 InGaN LED を作製し、デバイス動作特性を評価した。通常の平坦膜 LED と同じ電極デザインを用い、複数のマイクロレンズ構造に同時に電流注入される構造とした。電流-電圧特性は明瞭な整流性を示し、多波長発光特性によって 380 nm から 520 nm 付近まで広がる広帯域な EL スペクトルを示した (図 3) [3]。将来的には、各波長領域に独立電極を形成することで、自在なスペクトル制御が可能になると期待される。

[1] M. Funato *et al.*, *Applied Physics Letters* **93**, 021126 (2008). [2] Y. Matsuda *et al.*, *Applied Physics Express* **15**, 105503 (2022). [3] Y. Matsuda *et al.*, *Applied Physics Express* **16**, 015511 (2023).

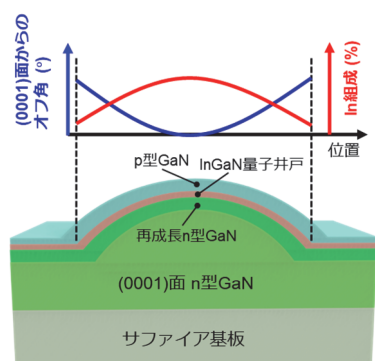


図 1. マイクロレンズ構造による多波長 LED の断面の概要図。

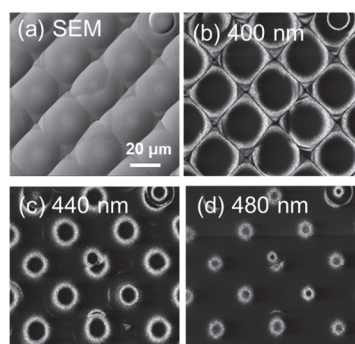


図 2. GaN マイクロレンズ構造上 InGaN 量子井戸の (a) 表面 SEM 像と (b-d) 各モニター波長における CL マッピング像

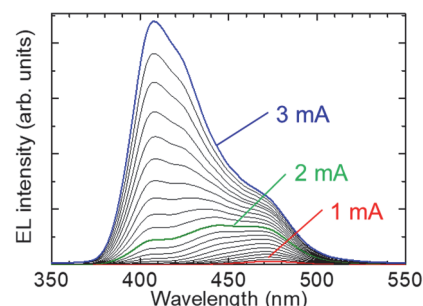


図 3. マイクロレンズ LED からの EL 発光スペクトル。

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野  
<http://www.nano.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「高速自己変化可能なフォトニックナノ構造による高ピーク出力・短パルス光の発生」

来るべき超スマート社会 (Society 5.0) においては、自動運転等のスマートモビリティにおいて必須である高精度光センシングや、熱の影響を受けない超精密なレーザー加工を実現するため、数 10 ピコ秒以下の極めて短いパルス幅をもつ高ピーク出力光源が必要とされている。しかしながら、従来の半導体レーザーは、高出力化のために光出射面積を増大すると、発振モードが多モード化してビーム品質が劣化するため、ピーク出力の限界 (1~10 W 程度) が存在する。本研究では、従来の限界を大幅に超えるピーク出力の短パルス発振を得るための新たな工夫として、数 10 ピコ秒以下という僅かな時間の間に、面内の共振波長分布が自己変化するフォトニックナノ構造を考案し、それを面発光レーザーの内部に導入することで、パルス幅 30 ピコ秒未満で、ピーク出力 80W 超の短パルス発振を実現した [1]。なお、本研究は、電子工学専攻光量子電子工学研究室と共同で行った。

提案するフォトニックナノ構造の模式図と、短パルス発振が生じる原理を図 1 (a) および図 1 (b) に示す。本構造は、楕円空孔と真円空孔を 2 次的に周期的に並べつつ、その周期  $a$  を面内一方向 (図の  $u$  軸方向) に沿って徐々に増大させていることを特長とする。同構造では、構造の周期に応じて共振波長が面内で異なっており、発振初期 [図 1 (a)] においては、光の侵入を妨げる禁制帯の存在により、光は図の左下の狭い領域に局在する。この状態は、面外への光漏れの大きい高損失状態となるため、レーザー発振が生じるまでに、通常よりも多くのキャリアがレーザー内部に蓄積される。一方、レーザー発振が開始された後 [図 1 (b)] は、誘導放出による屈折率変化に伴って、発振領域の長波長化が生じるため、デバイス全体の共振波長分布がより平坦な分布へと自己変化し (self-evolution)、光は面全体に広がるようになる。このとき、共振器の面外に光が漏れる損失は減少するため、等価的な  $Q$  スwitchング動作が生じ、高いピーク出力の短パルス発振を得ることが可能となる。

以上の原理に基づき、実際に自己変化フォトニックナノ構造を導入した直径 1 mm のレーザーデバイスの作製を行い、出射光強度の空間的および時間的変化を、ストリークカメラを用いて測定した。注入電流 20 A のときに、得られたストリークカメラ画像を図 1 (c) に示す。同図において、時間方向に断続的に光が検出されていることから、作製したレーザーから断続的な短パルス光が射出されていることが確認出来る。また、各パルスに注目すると、光が  $u$  軸方向に移動している様子が観測され、図 1 (a) (b) に示した光の移動を実験的に観測することに成功した。図 1 (d) には、取得したストリークカメラの画像を空間的に積分することで得られた、光出力の時間変化を示す。パルス幅 30 ps 未満で、ピーク出力 80 W 以上の短パルス・高ピーク出力発振の実現に成功した。今後、デバイスのさらなる面積化およびフォトニックナノ構造の改良により、さらなる高ピーク出力化 (>kW) が実現し、冒頭で述べた各種応用への展開が可能になると期待される。

参考文献 [1] T. Inoue, R. Morita, M. De Zoysa, S. Noda, *et al.*, *Nature Commun.* **14**, 50 (2023).

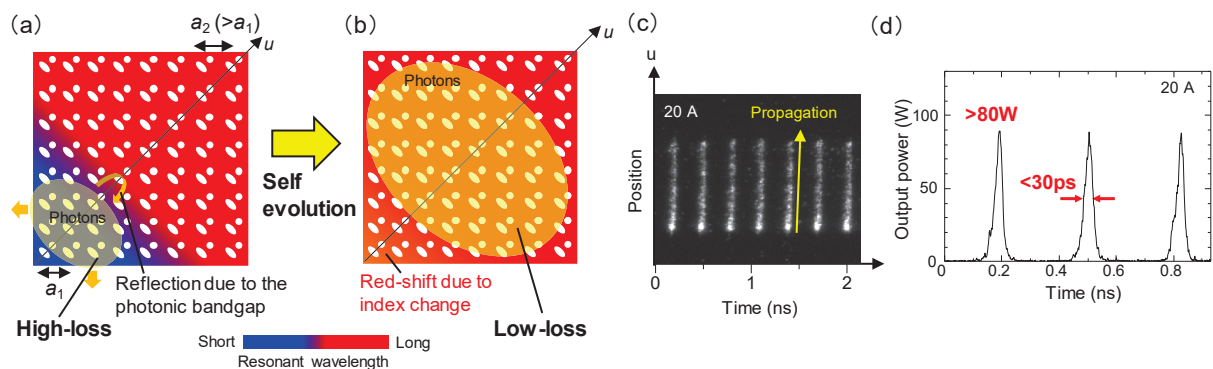


Fig. 1. (a) (b) Schematic and working principle of self-evolving photonic nanostructures. (c) (d) Measured streak camera image and temporal waveform of the fabricated surface-emitting laser with self-evolving photonic nanostructures at 20A.



## 知能メディア講座 言語メディア分野

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

### 「言語ステガノグラフィ」

ChatGPT に代表される対話型 AI の急激な性能向上により、我々の研究室が取り組んでいる自然言語処理は変革期を迎えています。対話型 AI の技術的中核は大規模言語モデルです。大規模言語モデルは、その名の通り大規模であることが特徴で、2019 年頃からの大規模化競争により、数十億から数千億規模のパラメータを持つに至った人工ニューラルネットワークです。ただし、言語モデル自体の歴史は 20 世紀までさかのぼります。

言語モデルの役割は、単語列  $w_1, w_2, \dots, w_{n-1}$  が与えられたとき、次の単語  $w_n$  の確率  $P_\theta(w_n | w_1, w_2, \dots, w_{n-1})$  を予測することです。ここで  $\theta$  はモデルのパラメータ集合で、大規模なテキスト集合を使った訓練により推定されます。要するに、次に来る単語を正しく予測できるようにひたすら  $\theta$  を調整しているだけなのですが、大規模なモデルであれば、文法はもちろん、この世界に関する広範な知識を獲得できることが経験的にわかってきました。

言語モデルを使うと、テキスト生成が再帰的に行えます。 $w_1, w_2, \dots, w_{n-1}$  が与えられたとき、何らかの方法で次の単語  $w_n$  を選べるとすると、同様にして、次は  $w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n$  に続く単語  $w_{n+1}$  を選べます。単語の選び方はいろいろ考えられます。モデルが予測した確率分布  $P_\theta(- | w_1, w_2, \dots, w_{n-1})$  にしたがってサンプリングしても良いですし、もっと単純に、確率が最大の単語を選んでかまいません。

大規模言語モデルは外形的にはまったく違和感のないテキストを生成できますが、中の仕組みは人間の言語生成のモデルとして自然でしょうか？ AI と人間の関係は飛行機と鳥に似ていて、飛行機が羽ばたかずに飛ぶように、AI も人間離れした使い方ができます。言語モデルのそうした応用例の一つが言語ステガノグラフィです。

言語ステガノグラフィは第三者が気づかないようにテキストに秘密のメッセージを埋め込む技術です。任意の離散情報はビット列で表せますので、ビット列を埋め込むことにします。右図の例では、Hello my name ... という何の変哲もないテキストに 10000100... というビット列が隠されています。送信者がテキストに秘密のメッセージを埋め込む手続きと、それと対になる、受信者がテキストから秘密のメッセージを取り出す手続きをうまく定められれば完成です。

秘密のメッセージ: 10000100...

$P(w_1)$			$P(w_2   w_1)$			$P(w_3   w_1, w_2)$		
単語	確率	符号	単語	確率	符号	単語	確率	符号
A	0.21	00	my	0.25	00	friend	0.35	00
The	0.20	01	world	0.21	01	name	0.25	01
Hello	0.15	10	three	0.20	10	cell	0.12	10
Once	0.13	11	fellow	0.13	11	new	0.09	11

言語ステガノグラフィは言語モデルを使うと簡単に実現できます。送信者は言語モデルを使って 1 単語ずつテキストを生成します。送信者は、各時点で言語モデルが予測した確率分布をもとに、適当な手続きに従って単語候補に符合を割り当て、割り当てられた符合が秘密のメッセージに対応する単語を選びます。受信者は言語モデルと符合割り当て手続きを事前に共有しておけば、送信者の操作を順番になぞることで秘密のメッセージが取り出せます。言語モデルを使ってステガノグラフィを実現するというアイデア自体は昔からありましたが、言語モデルの能力が急激に向上したことで、単なる概念実証を超えた実用化が射程に入ってきました。

ところで、言語モデルは有限語彙（例えばサイズ 3 万）を仮定しますが、実際の語彙サイズは事実上無限です。この問題に対応するために低頻度の単語を細分割するサブワードという手法が広く用いられています。例えば、低頻度語 unusable は un ##us ##able と分割されるかもしれません（## は後続サブワードを表す特殊記号）。

言語ステガノグラフィの場合、第三者にこのような素のサブワード列を見せるわけにはいかないので、送信者は分割を解除して unusable を送信することになります。問題は、受信者が元の分割を再現できるとは限らないことで、例えば、un ##usable と分割すると、メッセージの抽出に失敗してしまいます。そこで、我々はこの曖昧性問題が発生しないようなアルゴリズムを提案しました [1]。この手法は、分かち書きしない日本語にも応用できます。

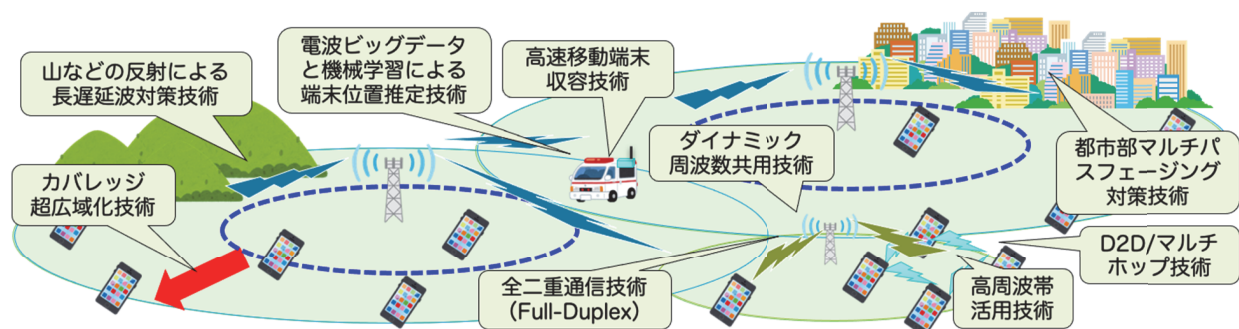
[1] Jumon Nozaki and Yugo Murawaki. Addressing Segmentation Ambiguity in Neural Linguistic Steganography. In Proc. of ACL-IJCNLP 2022.

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野 (原田研究室)

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

### 「第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究」

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでのように人と人の通信のみならず、物と物 (M2M) との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。2020年からは世界各国で5Gのサービスが開始されましたが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。現在、すでに5G以降のシステム (Beyond 5G) および6Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G/6Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、全二重通信 (Full-duplex) セルラシステム、周波数共有システム、新信号波形・新物理層方式、ミリ波帯、テラヘルツ帯等高周波帯活用技術、高度ソフトウェア無線技術、大規模高密度マルチホップ国際標準無線通信システム Wi-SUN、機械学習の通信システムへの応用、仮想空間における電波模擬システム技術の高度化などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。特にVHF帯広域無線通信システムは、200 MHz帯周波数において公共ブロードバンド移動通信システムとして実用化され、1ホップ100km伝送や、30ホップ伝送に成功しています。また開発した新信号波形技術 (UTW-OFDM) は、商用ローカル5Gシステムにおいて実用化され、さらに6Gに向けた高度化を推進しています。大規模高密度マルチホップ国際標準無線通信システム Wi-SUNは、電力スマートメータの分野で広く実用化され、最近では1000台のWi-SUN無線機を利用した大規模マルチホップメッシュ型多段中継通信実証試験に成功しています。



#### 本研究室における第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



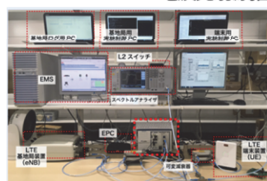
実用化したVHF帯公共ブロードバンド移動通信システム装置  
(左: 5W出力機, 右: 1W出力機)



VHF帯公共ブロードバンド移動通信システムの電波と機械学習による  
電波発射源推定システムの実証試験



大規模マルチホップメッシュ型多段中継通信実証試験



UTW-OFDM方式搭載LTEシステム



ミリ波電波伝搬実験システム

#### 本研究室における最近の主な研究成果



集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (橋本研究室)

<https://vlsi.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「多様な中性子施設で半導体ソフトエラー評価を可能にするエラー率換算技術」

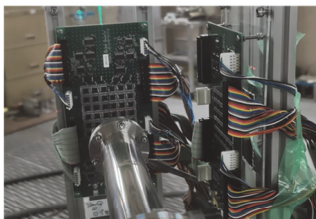
今日の社会は、大量のコンピュータや情報通信機器によって支えられており、これらに誤作動が生じた場合、重大な被害を引き起こされるリスクがあります。コンピュータや情報通信機器の中核は半導体チップであり、安心・安全の観点から半導体チップの信頼性確保が重要となっています。

半導体チップの誤作動の原因の一つにソフトエラーと呼ばれる現象があります。ソフトエラーとは半導体チップ内で宇宙線によって引き起こされる一時的な誤作動であり、半導体チップ内に保持されているデータが宇宙線により誘起されたノイズにより書き換わることで発生します。地上環境では宇宙線に含まれる中性子がソフトエラーを引き起こす主要因と考えられています。中性子を遮蔽することは困難なため、ソフトエラーが発生する前提で半導体チップの設計を進める必要があります。特に、高い信頼性が求められる半導体チップの設計では、ソフトエラーが発生する頻度(ソフトエラー率)の把握が不可欠です。ソフトエラー率の評価は、地上環境を再現する中性子源を用いて行う方法が一般的です。地上に降り注ぐ中性子はさまざまなエネルギーを持っており、そのエネルギー分布を再現する中性子源がソフトエラー率評価に用いられてきました。しかし、そのような中性子源は世界に5つ程度しかなく、半導体チップのソフトエラー率評価には不十分な状況にあります。

様々な中性子施設でソフトエラー測定実験を行うとともにシミュレーションによる解析を行い、任意の中性子源による1つの測定結果とシミュレーションを組み合わせることにより、地上ソフトエラー率を求める手法を開発しました(図1)。半導体チップのソフトエラー発生確率は中性子のエネルギーとエラー発生に必要なノイズ電荷量( $Q_{fit}$ )によって異なります(図1③左)。図2の測定に用いた中性子源のエネルギー分布、シミュレーションによって求めたソフトエラー発生確率を用いて、測定結果を再現する $Q_{fit}$ を求めます(図1②)。 $Q_{fit}$ が求めると、ソフトエラー発生確率と中性子のエネルギーの関係が分かるので、地上の中性子エネルギー分布(図1③右)と組み合わせて計算することで、地上のソフトエラー率を求めることができます。65nm設計ルールの1V動作SRAM(Static RAM)を用いた実験で、用いた中性子源によるソフトエラー率の違い(最大値と最小値の比)が、2倍以内に収まることを確認しました(図3)。本研究成果により、世界中に多数ある中性子源を活用して半導体チップのソフトエラー率の評価が可能となります。

(参考) プレスリリース: <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2023-06-08>

① 任意の中性子源で測定  
(地上環境を再現しない施設で良い)



② 測定結果からシミュレーションの $Q_{fit}$ を決定

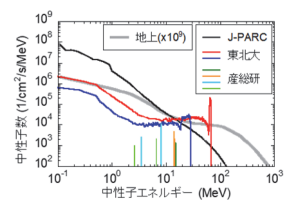
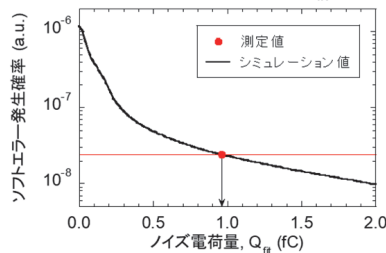


図2. 研究で用いた地上と異なる中性子源のエネルギー分布

③ シミュレーションで得たソフトエラー発生確率に地上の中性子スペクトルを乗じて積分

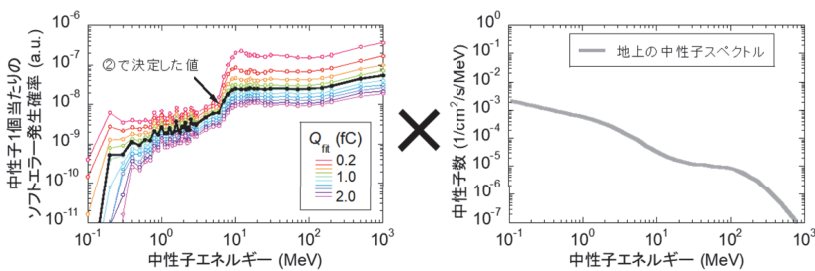


図1. 地上環境のソフトエラー率の見積もり手順

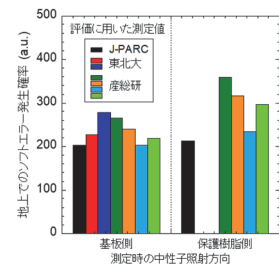


図3. 各測定値を用いたソフトエラー率の見積結果



## システム情報論講座 医用工学分野

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

## 「MRI による生体内分子の時空間動態イメージング」

生体内には、疾患に関連する様々な分子が存在する。その時空間動態を可視化する分子イメージング技術は、疾患の診断、進行度や悪性度の評価、発症メカニズムの解明などへの利用が期待されている。当研究室では、磁気共鳴イメージング (MRI) による分子イメージング技術の開発研究を進めている。本稿では、その試みのひとつを紹介する。

MRI の原理である核磁気共鳴 (NMR) 現象を生じる核種として  $^1\text{H}$  や  $^{13}\text{C}$  があるが、同じ核種でも分子構造が異なるとその共鳴周波数が異なるため、周波数スペクトルのパターンの違いから分子を同定できる。このような NMR 計測に空間情報を付与した磁気共鳴スペクトルイメージング (MRSI) は分子の空間分布を観測できるが、生体内分子を対象とした MRSI には次のような課題がある。1) 生体内には多種多様な分子が混在するため、その選択性の向上が必要である。2) 生体内分子は低濃度で存在するため、検出感度の向上が必要である。これらの課題を解決するため、当研究室では MRSI への  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC 法の導入を提案した。 $^{13}\text{C}$  は異なる分子間での共鳴周波数の違いが  $^1\text{H}$  よりも大きいため、分子の選択性が高い。一方で、 $^1\text{H}$  の NMR 信号強度は  $^{13}\text{C}$  よりも強いため、分子の検出感度が高い。これら二つの核種の特徴を活用し、分子の選択性と検出感度を両立する手法が  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC 法である。しかしながら、 $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC MRSI 法により周波数スペクトルの空間分布を再構成するには、多数の計測信号を収集する必要があるため、撮影に膨大な時間を要するという欠点がある。例えば、生体内では様々な代謝過程を通じて分子種が変化するが、このような時間変化を追跡する目的には利用できない。そこで、 $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC MRSI 撮影の高速化手法として、再構成に必要な全ての信号をサンプリングするのではなく、アンダーサンプリングしたデータから圧縮センシング (CS) を用いて再構成する手法を提案した。ここでは、分子の時空間分布のスパース性と時間変化の滑らかさを事前知識とした。また、分子の周波数スペクトルを再構成するのではなく、基底スペクトルを用いて分子の時空間分布を直接再構成することにより、単一のタイムフレームあたりに必要なサンプリング数を大幅に削減可能とした。本手法を実験動物のデータセットに対して適用した例を図に示す。ここでは、担癌マウスの腹部にグルコースを投与した際のグルコースとその代謝産物である乳酸について、体内動態および代謝過程を時間分解能 4 秒で再構成した。図には再構成画像の一部のタイムフレームを示すが、腫瘍部位特異的にグルコースが乳酸に代謝し蓄積していく過程 (ワールブルグ効果) が明瞭に観察できている。従来の  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC MRSI の時間分解能は 4.5 時間であったが、提案手法により大幅な時間分解能の向上を達成し、生体内分子の時空間動態を追跡可能であることを実証した。

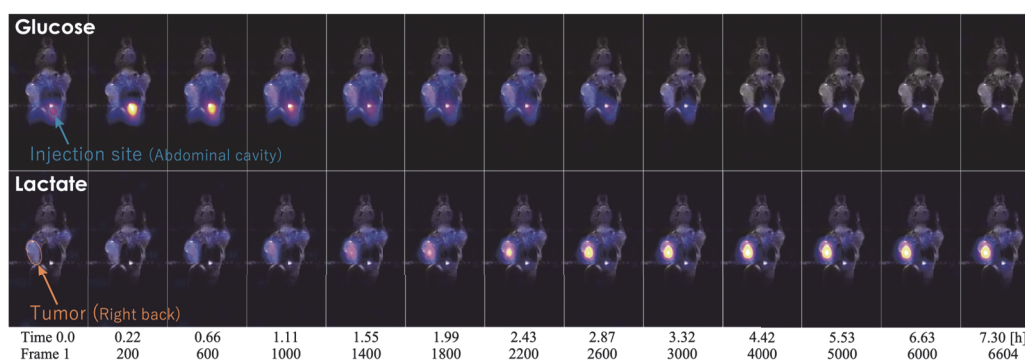


図. 担癌マウスにおけるグルコース投与後のグルコースおよび乳酸の時空間動態再構成画像。

参考文献: U. Yamamoto, H. Imai, K. Sano, M. Ohzeki, T. Matsuda, T. Tanaka. Spatio-temporal reconstruction of substance dynamics using compressed sensing in multi-spectral magnetic resonance spectroscopic imaging. *Expert Systems With Applications* (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120744>.

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野 (下田研究室)

<https://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/wp/>

「コンフリクトが生じる合意形成実験タスクの設計と好感度変化に着目した分析」

エネルギー・環境問題が深刻化する現在、合意形成はますますその重要性を増しており、適切な合意形成の方法について考えることはエネルギー・環境問題を解決する上で重要である。そして、合意形成後の双方の円満な関係のためには、意見調整の際に快適なコミュニケーションを実現することが重要であり、そのために「感性」が重要な役割を果たす。ここで、合意形成を感性の観点から分析することで、円満な合意形成を実現するための示唆を得ることができ、エネルギー・環境問題の解決に貢献できる可能性がある。また、実験室環境で合意形成実験を行う場合には、①実際の重要な場面の合意形成を模倣するために、譲り合いではなくコンフリクトが生じる、②分析に十分なデータを得るために必要な、合意形成の発言数および対話時間が確保できる、という条件を満たすタスクが重要であるが、このようなタスクは開発されていない。

そこで、本研究では「コンフリクトが生じ、十分な発言数・対話時間が確保できる合意形成タスクを開発すること」により「主観的評価に基づいて合意形成を分析し、感性、とりわけ好感度と合意形成との関連を調べることを」を目指した。そのために、食品を交渉材料として用いることで、「実験終了後にどちらが3時間後まで何もせずにひたすら待つか」を決定する「NoForT (Negotiation on Favorites or Time) ゲーム」というタスクを設計し40件の合意形成実験を実施した。ゲームの概要を図1に示す。実験はテキストチャットシステムを用いて行い、メッセージ受信時には「相手への好感度変化」を、メッセージ送信時には「相手からの好感度変化の予想」を回答してもらった

その結果、NoForT ゲームにより、①譲り合いではなくコンフリクトが生じること、②分析に必要な合意形成の発言数および対話時間が確保できることがわかった。また、図2に示すように、合意形成のステージが進むにつれて、同じ発言に対する相手への好感度変化(真値)と相手からの好感度変化の予想(予想値)との差が大きくなるということがわかった。



図1 NoForT ゲームの概要

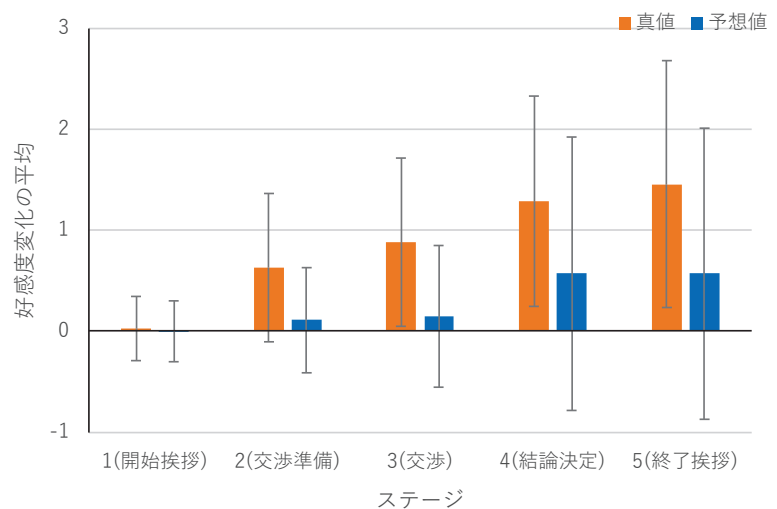


図2 ステージ毎の好感度変化の真値と予想値

## エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野 (土井研究室)

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

「ポリイミドシート上へのリチウムイオン電池正極活物質  $\text{LiCoO}_2$  の室温成膜」

自動運転や工場の完全自動化のためには膨大な数の IoT センサをネットワークに接続して情報のやり取りをする必要があるが、その際にはデータのやり取りと同時に IoT センサへの電源供給も必要である。有線でデータ通信や電源供給を行う場合、配線数、配線距離が膨大になるため現実的ではない。データのやり取りは IoT センサとネットワーク間の無線通信によって解決することができる。しかし、IoT センサは様々な場所に設置される必要があるため、給電装置（送信機）と IoT センサ（受信側）の間に障害物が存在する可能性が高く、膨大な数の IoT センサ全てに無線で給電を行うことは難しい。そこで、使用環境に応じて、太陽光発電、熱電発電、振動発電などのエネルギーハーベスティング技術を用いることになると考えられるが、それらは常時発電しているわけではなく、また発電時の電圧、出力も一定ではないため、蓄電デバイスとの組み合わせが望まれる。

IoT センサの普及には小型化と低価格化が必須の要件であり、そのためには多様な基板上にセンサ素子、通信素子、メモリ、プロセッサ、発電素子、蓄電素子を混載することが望ましいが、蓄電素子に関する研究は少ない。そこで、我々はポリマーなどのフレキシブルな基材や Si ウェハ上に薄膜 Li イオン電池の作製を目指している。ポリマーや Si 上に Li イオン電池を作製するためには低温で結晶化した Li イオン電池材料薄膜を形成する技術が必要になるが、我々はイオンビームアシストパルスレーザー蒸着法により、室温で（恐らく）世界で初めて結晶化した  $\text{LiCoO}_3$  正極薄膜の作製に成功した。

図 1 に、ポリイミドシート上に集電体としてアルミニウムを蒸着し、その上に室温（加熱無し）でイオンビームを照射しながらパルスレーザー蒸着（IBAPLD）法で  $\text{LiCoO}_3$  正極薄膜を作製した試料断面の走査型電子顕微鏡（SEM）観察結果を示す。界面での拡散、反応のない良好な積層膜が得られていることが確認できる。X 線回折測定結果から、 $\text{LiCoO}_3$  からの回折ピークが観測され、室温で成膜したにもかかわらず結晶化していることが確認できた。また  $\{100\}$  極点図測定の結果、イオンビーム照射方向  $//\langle 100 \rangle$  方向、かつ基板法線  $//\langle 111 \rangle$  方向の関係を満たすように全ての  $\text{LiCoO}_3$  結晶の向きが単結晶のように揃っていることが分かった。

図 2 に、正極を室温で成膜した  $\text{LiCoO}_2$  薄膜、負極を Li 金属箔、セパレータに不織布、電解液に  $\text{LiPF}_6$  をエチレンカーボネート系有機溶媒に溶解した液体を使用して作製した試験電池の充放電曲線を示す。サイクルを重ねるにしたがって充放電容量が低下しているものの、電池として動作することが確認できた。

この結果は、ポリマーなどの低コスト可撓性シート上や Si ウェハ上に Li イオン電池を作製することが可能であることを意味し、今後、幅広い応用展開が期待できると考えている。

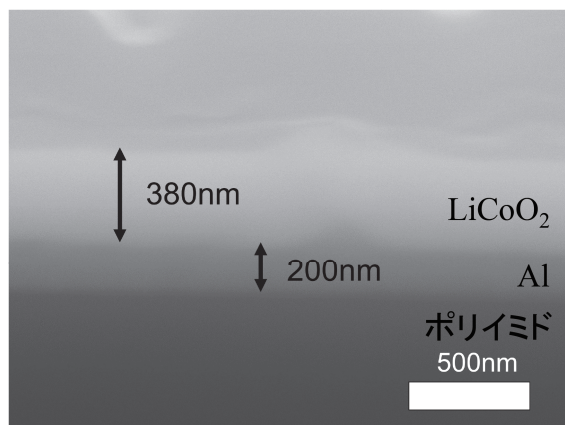


図 1 試料断面の SEM 観察結果

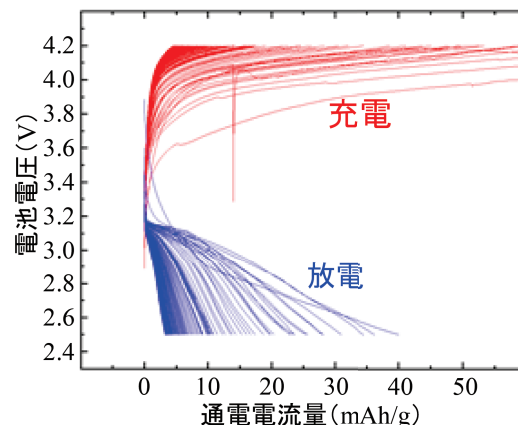


図 2 ポリイミドシート上  $\text{LiCoO}_2$  薄膜電極の特性



## エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野

<https://dpe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

## 「テラヘルツ放射顕微鏡による半導体デバイス表面 / 界面評価」

我々は、フェムト秒パルスレーザーを試料に照射することにより発生するテラヘルツ (THz) 波を利用した材料・デバイスの評価技術として、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 / 分光 (LTEM/LTES) の開発を進めている。本手法を用いて、様々な材料やデバイスの表面および内部における電荷のダイナミクスや電界分布・分極構造の計測・可視化を行っている。我々が注目している材料の一つが、ワイドギャップ半導体である GaN や GaN をベースとしたヘテロ接合構造である。結晶表面やヘテロ接合界面から発生する THz 波を計測し、ワイドギャップ半導体材料・デバイスの評価手法として確立することを目指している。GaN は青色 LED などの光デバイスとして広く普及しており、また、省エネルギーパワーデバイス材料や太陽電池材料としても期待されており、c 軸方向に自発分極を持ち、加えて構造歪みより piezo 分極が発生する。これらの分極により、ノーマリーオフ動作が困難であることが課題となっている一方、InGaN/GaN ヘテロ構造界面に誘起される自発・piezo 分極を利用し高濃度な 2 次元電子ガスが実現されており、このように積極的に分極構造を利用する「分極エンジニアリング」と呼ばれる研究も精力的に行われている。

近年、我々は GaN ベースの HEMT 構造や InGaN/GaN 多重量子井戸構造にフェムト秒パルスレーザーを照射することにより誘起される様々な超高速現象を、テラヘルツ電磁波放射として観測した [1-2]。図 (a) に示すように、InGaN/GaN 多重量子井戸構造にフェムト秒パルスレーザーを照射すると、図 (b) に示すような波形をもつ THz 波が観測された。この現象は、1) InGaN/GaN 界面の歪みより生じた内部電界の光励起キャリアによる遮蔽、2) 歪みの緩和により生成された音響フォノンが衝撃波となり結晶表面に到達、3) 多重量子井戸がナノキャパシタの役割を果たし量子井戸内で電荷が振動、の 3 つの要因により THz 波が励起され、自由空間に放射されたためと解釈できる。この結果は、ワイドギャップ半導体デバイス内部の高速電荷ダイナミクスを時空間で分析できることを示しており、様々なデバイス開発における性能向上に貢献できると考えている。また、それぞれの THz パルス時間差から保護層の厚さを広範囲で 10nm 精度で分析できるため、デバイス実用化レベルでの工程管理への応用も可能と考えている。

[1] A. Mannan *et al.*, "Terahertz emission spectroscopy of GaN-based heterostructures", *Journal of Applied Physics* Vol. 129, 245702 (2021)

[2] A. Mannan *et al.*, "Ultrafast Terahertz Nanoseismology of GaInN/GaN Multiple Quantum Wells", *Advanced Optical Materials*, Vol. 9, 2100258 (2021)

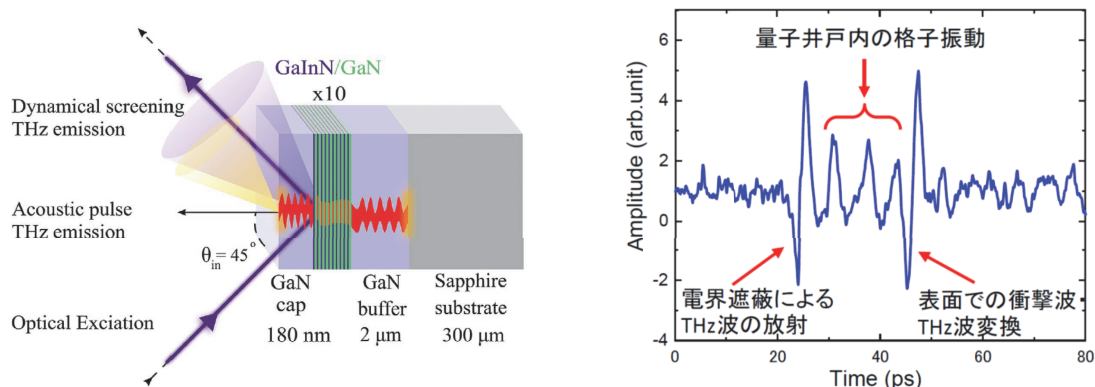


図 (a) InGaN/GaN 多重量子井戸構造を有する試料から発生する THz 放射の模式図、および (b) 発生した THz 波の波形。

## エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野（松田研）

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/>

## 「二次元半導体人工ヘテロ界面における自発的光起電力の発生とそのデバイス応用」

近年、その厚みが原子数層（1 nm 以下）の二次元層状半導体に関する研究が注目を集めている。それら二次元層状物質を、ファンデルワールス力で積層し形成された人工ヘテロ構造界面は、その様々な物質の組み合わせと、個々の物質では見られない物性発現の観点から、新たな研究対象となっている [1,2]。このような人工ヘテロ構造界面において、特定の角度で異なる回転対称性を持つ二次元層状物質を積層することで、面内の空間対称性が一つの鏡面对称性のみから縮退し対称性が破れ、面内分極が発現することが報告された [3]。この面内で発現する分極は、どちらも非分極物質の組み合わせである二セレン化タンゲステン ( $\text{WSe}_2$ ) / 黒リン (Black Phosphorene: BP) ヘテロ構造で報告されている。この面内分極により、従来の太陽電池（光起電力）デバイスで用いられている半導体 pn 接合なしに、自発的な光起電力効果を示している。しかしながら、このような二次元半導体人工ヘテロ構造界面における、自発的光起電力特性の報告は非常に限られており、その起源とされるシフト電流についても未解明の部分が多い。加えて pn 接合を用いないため、将来的に太陽電池デバイスの光電変換効率における重要な因子である、開放電圧がバンドギャップに制限されないことが期待される。

そこで本研究では、二次元半導体人工ヘテロ界面として二硫化モリブデン ( $\text{MoS}_2$ ) / 四硫化クロム燐 ( $\text{CrPS}_4$ ) と四端子電極からなるヘテロ構造デバイスを実際に作製し（図 1 (a) 挿入図）、その光起電力特性を詳細に調べた（図 1 (a)）。ここで用いる層状物質である  $\text{CrPS}_4$  は大気中で比較的安定であり、図 1 (b) に示すように結晶構造として二回回転対称性と一軸の鏡面对称性を有する。そのため、三回回転対称性と三軸の鏡面对称性を有する二次元半導体  $\text{MoS}_2$  と適切な角度で積層することにより、界面で空間対称性が破れ、面内分極の発生が期待される。実際に、この  $\text{MoS}_2/\text{CrPS}_4$  ヘテロ構造デバイスに、波長 532 nm のレーザーを照射しながらその電流・電圧特性を測定した。図 1 (c) に示すように、まずレーザー照射しない場合には（Dark）、電圧 0 V において起電力が生じていないことがわかる。これに対してレーザーを照射しながら、ヘテロ構造界面において分極発生が期待できる方向 ( $P_{||}$ ) で検出した電流・電圧特性では、電圧印可なしの状態において自発的起電力が生じ、レーザー光の強度に応じて増大している様子がわかる。さらに、分極方向と垂直方向 ( $P_{\perp}$ ) で検出した電流・電圧特性では、自発的光起電力が生じていない。このことから、確かにヘテロ構造界面において面内分極が生じ、シフト電流が発生している。さらに  $\text{CrPS}_4$  は 40 K において、常磁性・反強磁性転移を示すことから、空間反転対称に加え、時間反転対称性の破れに起因する自発的起電力の実験結果も参考にしながら、シフト電流の物理の理解を進めるとともに、デバイス特性の向上に対する新たな指針を得ることを目指して研究を進めている。

[1] K. Shinokita, K. Matsuda *et al.*, ACS Nano **16**, 16862 (2022)

[2] K. Shinokita, K. Matsuda *et al.*, Nano Lett. **21**, 5938 (2021)

[3] T. Akamatsu *et al.*, Science **372**, 68 (2021)

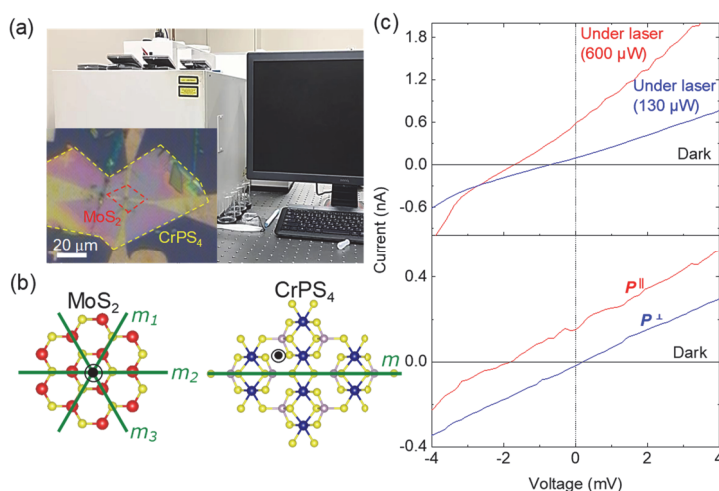


図 1 (a) 測定システムの写真、挿入図： $\text{MoS}_2/\text{CrPS}_4$  ヘテロ構造デバイスの光学顕微鏡写真、(b)  $\text{MoS}_2$  と  $\text{CrPS}_4$  の面内結晶構造の模式図、(c) ヘテロ構造デバイスの電流・電圧特性

## 生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (橋口研究室)

[http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi\\_lab/](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/)

## 「大気観測用 MIMO レーダーの開発」

当研究室は、先端的大気レーダー・リモートセンシング技術を開発し、大気圏の諸現象の解明に挑んでいる。MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, マイモ) は、送信・受信の双方で複数のアンテナを使う技術で、通信分野において古くから研究されており、通信速度や通信品質を向上させるために実用されている。ここでは、MIMO 技術を我々の大気レーダーに応用する研究について紹介する。レーダー観測における空間分解能 (ビーム幅) は一般にアンテナ開口の大きさで決まるが、MIMO 技術を用いると、物理的なアンテナより広い開口を仮想的に得ることができ、空間分解能を向上させることが可能となる。MIMO レーダーの基本原則を図 1 に示す。フェーズドアレイレーダーにおいて、直交性のある信号を異なる送信 (Tx) アンテナから同時送信し、受信 (Rx) アレイで取得された信号を送信アンテナ毎に分離・処理することで、少数のアンテナ素子で仮想的に大開口を得て、鋭いビームを形成するものである。通信分野では今世紀に入って広く使われ出した技術であるが、特に大出力のレーダーに実用された例はない。

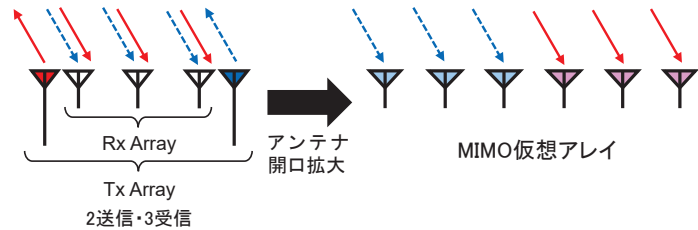


図 1. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) レーダーによるアンテナ開口拡大の基本原則

MU レーダーは滋賀県甲賀市信楽町に設置された、直径 103m の敷地に 475 基の八木アンテナが設置されたアクティブ・フェーズドアレイ・システムの大型大気レーダーである。柔軟なシステム設計により多様な新観測技術の開発を行うことが可能で、MU レーダーを用いて MIMO 技術の実証実験を行っている。前述の通り、MIMO レーダーでは直交性のある複数の信号を異なるアンテナから同時に送信し、複数のアンテナ (受信機) で受信する。信号処理により、これらの送信信号を同一とみなすことで、受信仮想開口を形成する。直交信号を得るため、ドップラー分割多重アクセス (DDMA) 方式という、ドップラー領域で送信信号を分離する方法を用いた実験を行った。図 2 に MU レーダーの物理アンテナ位置 (赤) および 6 波で構成される直交送信信号により得られる仮想アンテナ位置 (緑) を示す。MIMO による仮想開口が物理面積より大きく形成できることがわかる。1MW の送信出力を有する MU レーダーでは、38 万 km 離れた月からの反射エコーを受信可能である。MIMO 技術による空間分解能向上の検証として、月面反射エコーを用いた実験を実施した。結果は良好で、メインビームにおいてほぼ理論通りの分解能向上が見られ、MIMO 仮想開口が形成できていることが確認できた。さらに、MIMO によりチャンネル数が大幅に増えるので、Capon 法などのアダプティブ信号処理を適用することで、さらに分解能を向上することも確認された。

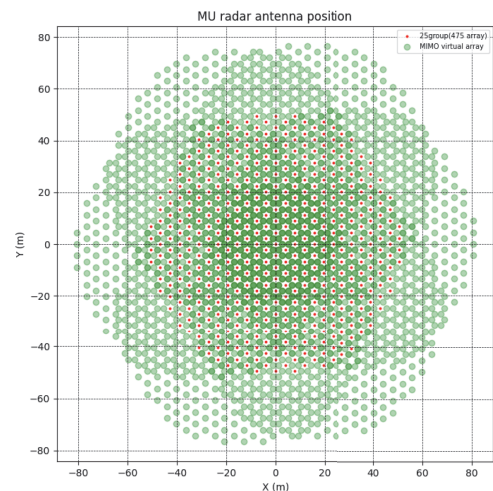


図 2. MU レーダーの物理アンテナ位置 (赤) および MIMO による仮想アンテナ位置 (緑)。

地球温暖化や都市化の影響で、いわゆるゲリラ豪雨と呼ばれるような極端な豪雨現象の頻度が増しており、毎年のように被害が発生している。このような降水現象の全貌を捉えるために気象レーダーは非常に強力な測器であるが、気象庁が現業利用しているようなパラボラアンテナを用いた通常の気象レーダーでは 10 仰角程度の全天観測に 5 ~ 10 分の時間がかかるため、特に急発達する降水雲の時間変化を捉えることは困難である。近年、研究用にいくつかのフェーズドアレイ気象レーダーが開発されているが、その最大の利点は時間分解能 30 秒で 100 仰角以上の観測が可能なことである。これは多数のアンテナ素子を用いてデジタルビームフォーミングにより仰角方向に複数のビームを形成する技術によって実現可能となったものである。しかし、フェーズドアレイレーダーは大気レーダー以外ではまだ普及しておらず、多数のアンテナ素子が必要なためコスト面での課題が大きく、気象庁や国交省の現業気象レーダーに実用されるには至っていない。少数のアンテナ素子で十分な空間分解能が得られる MIMO 技術が、その解決策になる可能性がある。現在、MU レーダーよりも高周波で気象レーダーにより近い、1.3GHz 帯ウィンドプロファイラーに MIMO 技術を応用する研究も進めている。