

## 博士論文概要

### [課程博士一覧]

片山 慎治	「A Feasible Design of Power Packet Dispatching System」 (電力パケット伝送システムの実現可能な設計)	令和4年3月22日授与
Luo Xijie	「Conditions of Protection against Quench and Thermal Runaway of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnets」 (伝導冷却高温超伝導マグネットのクエンチおよび熱暴走に対する保護可能な条件についての研究)	令和4年3月23日授与
松島 真之	「Study on spin-charge conversion in Bi-based systems」 (Biを基軸とする材料系におけるスピンの変換現象の研究)	令和4年3月24日授与
杉浦 健太	「Investigation of spectral properties of broadband photon-pairs generated by four-wave mixing in an on-chip ring resonator」 (リング共振器内で四光波混合により発生する広帯域光子対のスペクトルに関する研究)	令和4年3月23日授与
立木 馨大	「Short Channel Effects and Mobility Improvement in SiC MOSFETs」 (SiC MOSFETにおける短チャネル効果と移動度向上に関する研究)	令和4年3月23日授与
張 開鋒	「プラズモン薄膜導波路プローブを用いた低バックグラウンド探針増強ラマン分光法に関する研究」	令和4年3月23日授与
森田 遼平	「フォトリック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に関する研究」	令和4年3月23日授与
Arseny Tolmachev	「Enhancing Morphological Analysis and Example Sentence Extraction for Japanese Language Learning」 (日本語学習のための形態素解析と例文抽出の高度化)	令和4年3月23日授与
清丸 寛一	「Studies on Fundamental Problems in Event-Level Language Analysis」 (イベントレベルの言語解析における基礎的課題に関する研究)	令和4年3月23日授与
中村 道春	「メモリ多項式モデルを用いた電力増幅器の非線形歪み補償に関する研究」	令和4年3月23日授与
鍋谷 寿久	「サイバーフィジカルシステム実現に向けた無線LANシステムの高度化に関する研究」	令和4年9月26日授与
原園 友規	「A Study on Field Work Support in Nuclear Power Plants Utilizing 3D Reconstruction Model and Tagging」 (3次元再構成モデルとタギングを活用した原子力発電プラントの現場作業支援に関する研究)	令和4年5月23日授与
的池 遼太	「ヘリオトロンJ 3次元磁場における周辺プラズマ輸送およびダイバータ熱負荷に関する研究」	令和4年3月23日授与

---

高 林 伸 幸	「Power Beaming and Receiving Systems for Microwave Power Transmission to Fly Drone」 (ドローン飛行のためのマイクロ波電力伝送のパワービーミング及び受電システムに関する研究)	令和4年7月25日授与
田 中 勇 気	「IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムの開発」	令和4年9月26日授与

片山 慎治 (引原隆士 教授)  
「A Feasible Design of Power Packet Dispatching System」  
(電力パケット伝送システムの実現可能な設計)  
令和4年3月22日授与

再生可能エネルギーの導入拡大をうけ、直流配電システムの利用が拡大している。本論文は、電力パケット伝送システムという、直流配電システムにおけるエネルギーマネジメント手法の一つについて、実験的事実に基づいて、実現可能なシステム設計の提案を行うものである。

電力パケットは、伝送する直流電力に対して、その電源や宛先の負荷といった情報を付与した伝送単位である。電力と情報を同時に伝送できる点は、エネルギーマネジメントにおいて、制御に同期した実際の系の運用を実現する上でメリットが大きい。

先行研究では、ハードウェアの開発やネットワークの解析などが行われてきたが、設計は実験系に基づいて議論されてこなかった。本研究はこの点に着目し、ハードウェアからネットワークといった各レイヤーについてシステムの達成しうる性能を検討し、得られた結果をもとに設計を検討した。検討内容は主に以下の4点である。

1. ハードウェアによる性能制約に関する検討

電力パケットの伝送を行うルータと呼ばれる機器について、伝送に与える制約を検討し、その制約を緩和できる構造を提案、動作を実証した。本検討により、機器そのものがシステムに与える性能制約を明らかにし、その決定要因を指摘した。

2. 機器間伝送に必要な情報量の検討

ルータ間における電力パケットの伝送に着目し、ショート回避して伝送するために必要な情報量を算出した。検討に際しては、実際にショートが懸念される設定において情報通信で用いられるプロトコルを適用することで、ショート回避しながら電力パケットを伝送できることを実証した。

3. 電源—負荷感伝送の特性

電源負荷間において電力を伝送する場合、電力パケット伝送システムでは、ルータ同士の接続関係と電力の伝送時間が出力に影響を与える。実験とシミュレーションによってその特性を明らかにし、設計に応用可能な接続と時間幅の条件を明らかにした。

4. 1. から 3. に基づくシステム設計の提案

1. から 3. の内容より、電源や負荷の特性と求める性能、システムにおける機器の配置から、シミュレーションによってシステムが設計できることを示した。

以上より、本検討によって、システムの一定性能での動作を保証する設計法を示した。この結果により、先行研究において取られてきたハードウェアとネットワークそれぞれに基づくアプローチの統合を図り、システムの実用化を果たすことが期待される。

Luo Xijie (雨宮尚之 教授)

「Conditions of Protection against Quench and Thermal Runaway of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnets」

(伝導冷却高温超伝導マグネットのクエンチおよび熱暴走に対する保護可能な条件についての研究)

令和4年3月23日授与

The REBCO coated conductor is expected to be the suitable conductor for high-temperature superconducting magnets because its critical current density is considerably higher than those of common LTSs (e.g., Nb-Ti and Nb<sub>3</sub>Sn) at the same operating temperature and external magnetic field. However, quench/thermal runaway detection and protection can be more difficult in superconducting magnets wound with REBCO coated conductors than those wound with LTSs because of the slow NZPV. Some novel quench/thermal runaway detection methods (such as Rayleigh-backscattering interrogated optical fibers) or protection methods (such as non-insulation winding coils) are proposed. However, these methods are complex or only applicable to certain types of superconducting magnets wound with REBCO coated conductors. The conventional quench/thermal runaway detection and protection method, *i.e.*, detecting quench using VTs and dumping the stored energy in an external dump resistor, is an attractive option because it is simple, and its hardware is well-established. However, the applicability of the conventional quench/thermal runaway detection and protection method to the superconducting magnet wound with REBCO coated conductor was not clarified well. To apply the conventional quench/thermal runaway detection and protection method to a superconducting magnet wound with REBCO coated conductor, the protectable conditions (*i.e.*, conditions under which no degradation appears after quench/thermal runaway), which are necessary to design the quench/thermal runaway detection and protection system in a superconducting magnet, are studied.

In this study, short-sample experiments were conducted to study the quench/thermal runaway detection and protection instead of burning expensive superconducting coil. To simulate the quench/thermal runaway detection and protection processes in superconducting magnets, an FPGA module was used to monitor the voltage in short samples and control the power supply. In this case, quench is detected by voltage, and protection is provided by decreasing the operating current exponentially (simulating the current decay using an external resistor). The hot-spot temperature during the protection process, which directly affects protection, is calculated based on voltage and the temperature-resistivity relationship of copper and current-sharing model. The fast-turnaround short-sample experiments enabled the collation of data on hot-spot temperatures under various conditions in addition to the conditions for successful/failed quench detection and protection.

The results of this study indicate that the conventional quench/thermal runaway detection and protection method is applicable to a superconducting magnet wound with REBCO coated conductors. The conditions for providing successful protection could be estimated using short samples in experiments instead of burning expensive coils. These experiments provide guides to solve the problem of designing the protection system of a superconducting magnet wound with REBCO coated conductors. Although this study focused on the conditions for providing protection against quench/thermal runaway using the conventional detection and protection method, other detection and protection methods can be evaluated using a similar setup. Moreover, short-sample experiments can be conducted not only to study the protection of magnets wound with REBCO coated conductors but also to investigate the characteristics of various conduction-cooled superconductors.

松島真之 (白石誠司 教授)

「Study on spin-charge conversion in Bi-based systems」

(Bi を基軸とする材料系におけるスピントリクス現象の研究)

令和4年3月24日授与

スピントロニクス分野では、情報担体としての電子のスピントリクス角運動量が非保存量であることから、スピントリクス角運動量と保存量である物理量との間の変換（スピントリクス変換）の実現とその背景学理の理解が主要な研究対象である。スピントリクス角運動量の流れをスピントリクス流と呼ぶが、スピントリクス流と電流との相互変換は、固体中のスピントリクス軌道相互作用（SOI）が重要な役割を果たす。SOIの大きさは変換効率を決定する主要な因子の1つであり、その大きさは大凡原子番号の4乗に比例することから、重元素が主な研究対象となる。中でもビスマス（Bi）は、非放射性元素の中で最も元素番号が大きく、スピントリクス変換の文脈の中で重要な材料と位置づけられている。実際に、Biを不純物やBiを用いたヘテロ構造界面においてSOIの増大が報告されており、大きなスピントリクス変換も観測されている。一方で、Bi単体については10年前から研究されているが、未だその大きなSOIを反映した巨大なスピントリクス変換現象は観測されておらず、スピントリクス物性物理における未解決問題の一つとなっている。本研究では、Biを基軸とした材料系におけるスピントリクス変換物性物理について研究した。得られた成果を以下に示す。

1. Biは、Agと接合することで界面での対称性の破れに起因する有効磁場（Rashba場）による大きなスピントリクス変換を示すことが報告されている。本研究では、Bi/Agのスタック順序の置換（Rashba場の極性反転）によるスピントリクス変換の変化、ならびに各層でのスピントリクス緩和・スピントリクス変換を考慮した新たな理論モデル構築による系統的な実験とその解析により、Bi/Ag界面におけるスピントリクス変換物性をより詳細に研究した。その結果、従来方向されてきたBi/Ag界面でのスピントリクス変換は変換効率が過大評価されている可能性を指摘し、より厳密な評価モデルで得られた変換効率を得た。
2. Biは、その大きなSOIから巨大なスピントリクス変換が期待されているが、実験的には非常に小さな変換効率（高々0.01程度）が報告されている。また、その膜厚により変換の極性が変化するなどといった報告もある。本研究では、近年発展したスピントリクス変換評価手法であるスピントリクス強磁性共鳴（ST-FMR）法と呼ばれる手法を用いてBiにおけるスピントリクス変換を評価した。その結果、スピントリクス変換効率がBi膜厚に対し0.03-0.06の範囲で変化するという結果を得た。これは従来研究の中で最も大きな値の1つであり、膜厚に依存した極性変化も観測されなかった。
3. 従来のBiスピントリクス変換研究では、Biの融点が低いことなどの理由から、基板上に良質なBi単結晶成長が困難であり、スピントリクス変換物性の理解を阻んでいる1つの理由となっていた。本研究では、MgO（001）基板上にFe（001）単結晶を成長する技術を基盤とし、そのFe上に基板冷却の下成長した高配向Bi（110）結晶を用いてスピントリクス変換を評価した。測定手法では、上記と同様にST-FMR法を採用した。その結果、最大で0.36もの巨大なスピントリクス変換効率を実現した。この値は他の単一元素材料でのスピントリクス変換効率と比較しても最大級であり、Biの結晶性や方位がスピントリクス変換において大きな役割を示すことを示唆する結果を得た。

以上のように、本研究は、Biを基軸とした材料系として、Bi/Agの2層膜や高配向Bi（110）結晶を用いたスピントリクス変換現象について研究し、Biにおけるスピントリクス変換物性を理解する指針を得た。特に、Biについてはその結晶性が大きな役割を果たすことを示唆する結果を得た。

杉浦 健太 (竹内繁樹 教授)

「Investigation of spectral properties of broadband photon-pairs generated by four-wave mixing in an on-chip ring resonator」

(リング共振器内で四光波混合により発生する広帯域光子対のスペクトルに関する研究)

令和4年3月23日授与

古典論では説明できない相関を持つ量子もつれは量子情報技術の根幹をなす。中でも、周波数でもつれている光子対は、周波数の自由度を用いた量子計算や量子計測の光源として着目されている。そのような周波数もつれ光子対をより広帯域で生成することができれば、大規模な量子計算や高分解能な量子計測が可能になる。これまで、広帯域な光子対の生成に  $j$  は擬似位相整合素子などのバルク素子用いられてきた。しかし、そのような素子は集積化が困難であり、系の大規模化や技術の実用化などにおいて問題となる。

そこで、既存の CMOS 互換技術で作製されるオンチップ光子源に着目した。光導波路の材料として、二光子吸収の影響がなく透過帯域が広い高屈折率コントラストドープガラスと窒化シリコンを用いた。また、光子対生成に重要な非線形性を増強するために、導波路構造としてリング共振器を採用した。これらの材料のリング共振器を用いて以下の成果が得られた。

1. 高屈折率コントラストドープガラスは、二光子吸収がないとされていたが、パルス光励起での検証はされていたものの、連続光励起における検証はされていなかった。連続光励起は量子計測技術で一般に使用されるため、連続光励起時の光子対生成における二光子吸収の影響の確認は重要である。そこで、100 mW までの連続光を用い、発生光子数の入力光強度依存性を測定した。その結果、発生光子数が二次的に増加し飽和が見られないことを確認した。これより、100 mW までの連続光で二光子吸収の影響は無視できるほど小さいことが分かった。
2. これまでリング共振器を用いた光子対生成の研究は報告されてきたが、どの程度の帯域で発生するのかについては実験的に検証されていなかった。そこで、高屈折率コントラストドープガラスリング共振器と窒化シリコンリング共振器から発生する光子対の joint spectral intensity を測定することにより発生帯域を測定した。加えて、デバイスの分散等のパラメータから理論的に発生帯域を計算し、実験結果の妥当性を確認した。窒化シリコンリング共振器の測定では、51.25 nm の帯域で光子対の発生を確認した。この結果は、現在リング共振器を用いた光子対生成において世界最大の値である。
3. 近年、リング共振器を用いた光子対生成の理論的な研究がいくつか報告されている。中でも、[Phys. Rev. A. **91**, 033820 (2016)] では、発生する光子のスペクトルと、入力レーザ周波数やリング共振器の線幅や分散、非線形性などのパラメータとの関係が報告された。この論文によると、上記パラメータによって光子のスペクトルは周波数モードごとに形状が変化し、条件によっては 10 GHz 程度の分裂したピークをもつ。これは、周波数領域での量子干渉において問題が生じる可能性があることを示唆している。そこで、高 Q 値なリング共振器の温度を精密にコントロールすることによって可変な 1 GHz 程度の狭帯域フィルタを実現することで、発生する光子のスペクトルを測定した。その結果、理論論文の通りのスペクトルの変化を確認した。加えて、理論論文の中では議論されていなかった、光子対の joint spectral intensity と実験パラメータの関係についても理論と実験の両面から検証を行った。
4. 一般的に、光子対の発生帯域の測定には、光子対の joint spectral intensity 測定が用いられる。しかしこの方法では、光子対の帯域が広がるほど測定時間は長くなることに加え、帯域に応じて狭帯域かつ広帯域で動作可能な周波数フィルタが必要となる。そこで、新たな測定方法として、マイケルソン干渉計を用いた方法を考案した。2つの異なる周波数の干渉信号の積の内、2つの周波数の差で変化する成分に着目した。周波数相関を持つ光子の干渉信号の周期は、周波数相関を持たない光子の干渉信号周期の半分になる。この方法を実験的に検証した結果周波数相関に起因する信号を測定することに成功した。

立木 馨 大 (木本恒暢 教授)

「Short Channel Effects and Mobility Improvement in SiC MOSFETs」  
(SiC MOSFET における短チャネル効果と移動度向上に関する研究)

令和 4 年 3 月 23 日授与

電力の高効率利用には、電力変換を担う半導体トランジスタの高性能化（通電損失の低減）が重要である。現在パワー用トランジスタの材料としてシリコン（Si）が広く用いられているが、その性能はSiの物性値から決まる理論限界に達しつつある。そこで、Si トランジスタの限界を打破し、飛躍的な低損失化を実現するトランジスタ材料として炭化ケイ素（SiC）に注目が集まっている。SiC 金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ（MOS型トランジスタ）は同耐圧のSi トランジスタに対し、理論上、通電損失を約 1/500 に低減できる。したがって、Si トランジスタを SiC に置換することができれば、電力の大幅な削減が実現される。

SiC MOS 型トランジスタは、市販も始まっているものの、現状、通電損失はSiの場合の約 1/10 程度であり、SiC の物性から期待される性能からは程遠い。その高い通電損失の起源は、SiC/ 酸化膜 (SiO<sub>2</sub>) 界面に存在する高密度界面欠陥に由来した高いチャネル抵抗である。したがって SiC MOS 型トランジスタのさらなる性能向上を図るには、チャネル抵抗の低減が必須である。チャネル抵抗低減の有効なアプローチとして、チャネル長の短縮や高密度界面欠陥の低減によるチャネル移動度の向上が存在する。この目的を達成するため本研究では、1. デバイス特性を劣化させないチャネル長の下限（臨界チャネル長）決定 2. 高密度界面欠陥低減によるチャネル移動度向上の二つの研究課題に取り組んだ。

臨界チャネル長決定の研究では、まず、短チャネル化したときの SiC MOS 型トランジスタに特有のしきい値電圧（トランジスタをオンオフする電圧）の変化の解明を行った。SiC/SiO<sub>2</sub> 界面に特有な高密度界面準位のエネルギー分布と、そこからの電子放出を考慮し、しきい値電圧の低下を精度よく予測するモデルを確立した。また、ドレイン電流の飽和特性に着目し、界面準位の影響を受けにくい臨界チャネル長の決定手法を提案した。本手法を用いて決定した臨界チャネル長は、界面準位の影響で、SiC の物性値から予測される臨界チャネル長からわずかに長くなるという結果が得られた。

界面欠陥低減手法の研究では、酸化膜形成後の高温 (> 1400℃) 窒化処理や酸化膜形成前の水素処理が、界面欠陥の低減に効果的であることを示した。特に、SiO<sub>2</sub> 堆積前の H<sub>2</sub> エッチングが高密度界面準位の低減に効果的であることを示し、同時に SiC の熱酸化が、界面欠陥を増加させることを示した。さらに、H<sub>2</sub> エッチングを用いて作製した SiC MOS 型トランジスタは、従来業界で用いられている界面欠陥低減手法と比較して、チャネル移動度が最大 100 倍向上されることを示した。

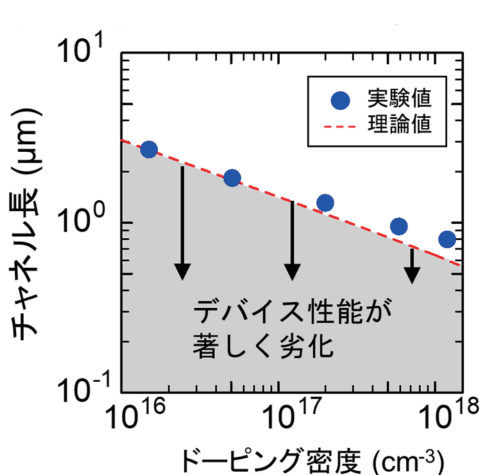


図 1 実験および計算から求めた臨界チャネル長のドーピング密度依存性。

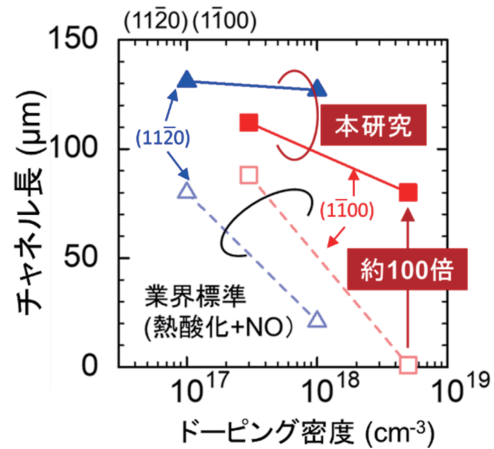


図 2 作製した SiC (1120) および (1100) MOSFET のチャネル移動度のアクセプタ密度依存性。

張 開 鋒 (山田啓文 教授)

「プラズモン薄膜導波路プローブを用いた低バックグラウンド探針増強ラマン分光法に関する研究」

令和4年3月23日授与

探針増強ラマン分光法 (Tip-enhanced Raman Spectroscopy: TERS) は、材料の化学情報をナノメートルの空間分解能で抽出できる走査型プローブ顕微鏡をベースとした光学的なアプローチであり、有機分子の相互作用や幾何配置の解明、機能性材料の物理・化学特性の分析、生体システムの研究などに広く利用されている。しかし、これまで多く採用されている直射照射型 TERS においては、励起光に照射された部分から強い蛍光や目標測定位置周辺からラマン信号 (Far-field 信号) がバックグラウンドとして励起されることがある。これらの信号は目標測定位置のラマン信号 (近接場信号)、つまり TERS 信号を圧倒し、TERS スペクトルの信号コントラスト (近接場信号 / Far-field 信号) を劇的に低下させる可能性がある。そのため、これまで蛍光体の表面や、基板上に置くことができないバルク試料を TERS で測定することは極めて困難であった。

本研究では、上記の課題を解決するために、間接照射型 TERS 用のプローブを開発した。表面プラズモン共鳴が発生できる薄膜導波路を利用し、入射レーザー光を平坦な入射面に入射させることで、高効率に表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polaritons: SPPs) が導波路上で安定的に励起され、探針 (プローブ) の先端に伝搬する。よって、励起光のエネルギーは SPPs を介して、プローブ先端に伝搬・蓄積することで、プローブ先端で局所電解集中が発生し、励起光の入射箇所と空間的に離れた強い近接場スポットが形成される。この近接場スポットを照射エネルギー源として試料に照射すると、低バックグラウンドの安定的な TERS 測定が可能となる (図 1)。このプローブを用いて、ダイヤモンドプレートからの近距離場と遠距離場の信号のコントラストが明らかな TERS スペクトルを取得することができた。また、シンプルな製造プロセス、安定したコーティング材料、独自の 2 次元 SPPs 励起法により、金基板上有機単分子フィルムを用いた TERS の研究では、製作したプローブが優れた信号安定性と再現性を示し、10 nm 以下の空間分解能を実現し、探針先端集中電場の実効サイズと相関を確認できた (図 2)。

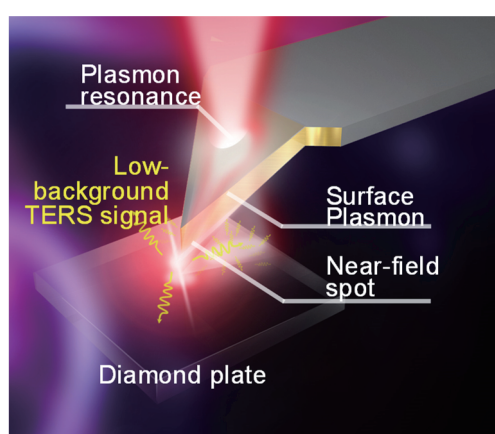


図 1 プラズモン薄膜導波路付プローブ

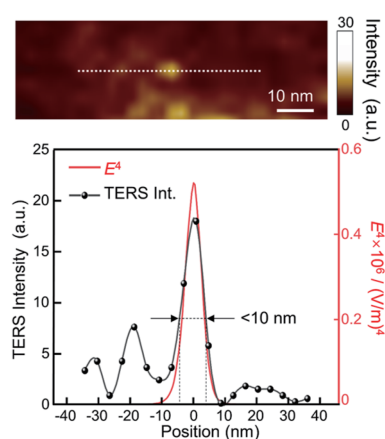


図 2 TERS マッピング結果と分解能評価



森田 遼平 (野田進 教授)

「フォトニック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に関する研究」

令和4年3月23日授与

パルス幅ピコ秒オーダーの短パルス・高ピーク出力なレーザーは、自動車の自動運転等で需要の高まる光距離計測や、金属材料などのレーザー微細加工、二光子吸収を用いたバイオイメージングなど、多岐にわたる技術への応用が期待されている。特に、小型・安価・高効率な特長を有する半導体レーザー素子単体で、上記応用を可能とするレーザー光源の実現が可能となれば、上記計測システムや加工システムなどの大幅な小型化・低コスト化が期待される。しかし、端面出射型などの従来型半導体レーザー素子単体における短パルス動作は、ピーク出力が10 W程度に留まっており、上記応用を可能とする100 Wを超えるピーク出力は未だに実現されていなかった。そこで、本論文では、高出力と高ビーム品質の両立が可能な特徴を有するフォトニック結晶レーザーにおいて、短パルス・高ピーク出力動作を可能とする新たなデバイス構造を提案し、実証を行った。

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶のフォトニックバンド端における大面積共振効果を利用した面発光型の半導体レーザーである。本論文では、このフォトニック結晶レーザーにおける短パルス動作を実現するために、共振器損失を動的に変化させるQスイッチングの原理を利用したデバイス構造を提案した。本構造には以下の2つの特徴がある。

(i) 電流注入領域の一部に水素イオンを注入し、絶縁化およびキャリア寿命低減を行うことで、可飽和吸収領域を導入する。その際に、図1(a)に示すような円環型の形状とすることで、ビーム品質の劣化に繋がる高次モード発振を抑制しつつ、基本モードの吸収損失を増加させることが可能となる。この領域によって、レーザー発振開始直後に可飽和吸収効果によって吸収損失が減少する。

(ii) フォトニック結晶共振器の格子定数に、図1(b)に示すような放物面分布を導入する。これにより、バンド端周波数に大域的な分布が生じるため、モードギャップによってデバイス中央部に光が閉じ込められ、放射損失の高い状態(図1(c))となる。レーザー発振直後、光密度の高い中央部において誘導放出が過剰に生じることで空間的ホールバーニングが生じる。その際、図1(d)に示すように、キャリアプラズマ効果によって中央部の屈折率が大きく変化するため、バンド端周波数分布が平坦化し放射損失が減少する。

上記2つの効果により、レーザー発振直後に共振器損失の大きな変化が生じ、ピークの高い短パルス動作が期待される。この原理に基づいてデバイスを作製した結果、ビーム拡がり角0.15度程度の高いビーム品質を維持しつつ、図2に示すように、パルス幅30ピコ秒程度・ピーク出力200 W級の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功した。

以上のように、本論文で実現した高ビーム品質かつ短パルス・高ピーク出力動作を可能とする短パルスフォトニック結晶レーザーは、半導体レーザー素子単体ではこれまで実現が困難であった、高いビーム品質と高いピーク出力(先行研究の数十倍)の両立を実現し、半導体レーザーの応用分野を広げる大きな成果といえる。

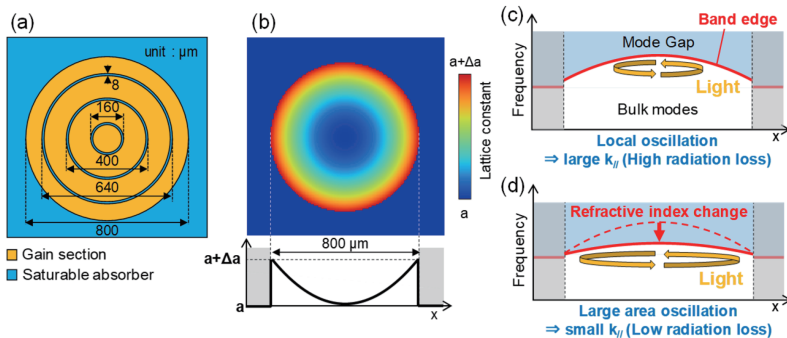


図1. (a) 可飽和吸収領域分布の模式図。(b) 格子定数分布。(c) バンド端周波数分布(発振直前)。(d) バンド端周波数分布(発振直後)。

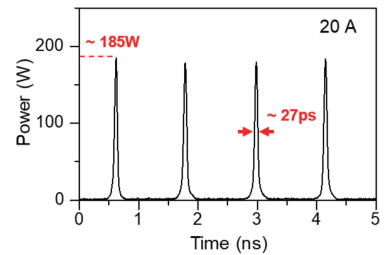


図2. 時間波形の測定結果。電流20A注入時。

Arseny Tolmachev (黒橋禎夫 教授)

「Enhancing Morphological Analysis and Example Sentence Extraction for Japanese Language Learning」

(日本語学習のための形態素解析と例文抽出の高度化)

令和4年3月23日授与

グローバル化した現代社会において、言語学習の重要性はますます高まっている。また、言語学習の方法や教材も変化している。言語学習の教材作成などを自動化するための手段として、自然言語処理のツールや手法は有用である。本論文では日本語学習に着目し、日本語の単語分割と品詞タグ付けの基盤と、質の高い日本語例文の自動抽出手法を提案した。

日本語は分かち書きを行わないため、文を単語に分割することさえも自明ではない。単語分割は日本語の自然処理パイプラインにとって重要であり、品詞タグ付けと同時に行われることが多く、合わせて形態素解析と呼ばれる。解析の精度、特に文法の品詞タグ付けの精度は教育応用において極めて重要である。加えて、形態素解析は実用上、高速であることとコンパクトであることも必要である。

本論文では形態素解析器 Juman++ の改良を考案した。改良版は、従来の解析器と同程度の速度でありながら、新聞ドメインにおける分割 F1 スコア 99.5 以上という非常に高い解析精度を達成した。高速化は、現代のアウトオブオーダー CPU を効率的に利用する等のアルゴリズム上・実装上の工夫により実現した。また、部分的にアノテーションされたデータでの学習をサポートし、アノテーションのないコーパスから曖昧性のある文を選別するための能動学習ツールも提供した。

次に、辞書データを明示的にモデルに含まない形態素解析のニューラルモデルを提案した。提案モデルは、辞書を用いるのではなく、従来の解析器による大規模な解析結果を学習データとすることにより、その解析器が参照する辞書データを暗黙的に学習する。提案モデルは、従来の解析器と比較すると同等以上の精度を達成しながら、辞書データを明示的にモデルに含めないことでモデルサイズを 20 分の 1 に削減した。

最後に、日本語学習のための高品質な例文の自動抽出システム (図 1) を提案した。本システムは、目的語周辺の構文構造が多様な例文候補を大量に選択する分散検索エンジンと、互いに非類似かつ独立に「良い」例文を選択するフィルタリングのステップから構成される。日本語学習者と日本語教師を対象にブラインド実験を行ったところ、提案システムが 2 つのベースラインシステムよりも選好された。

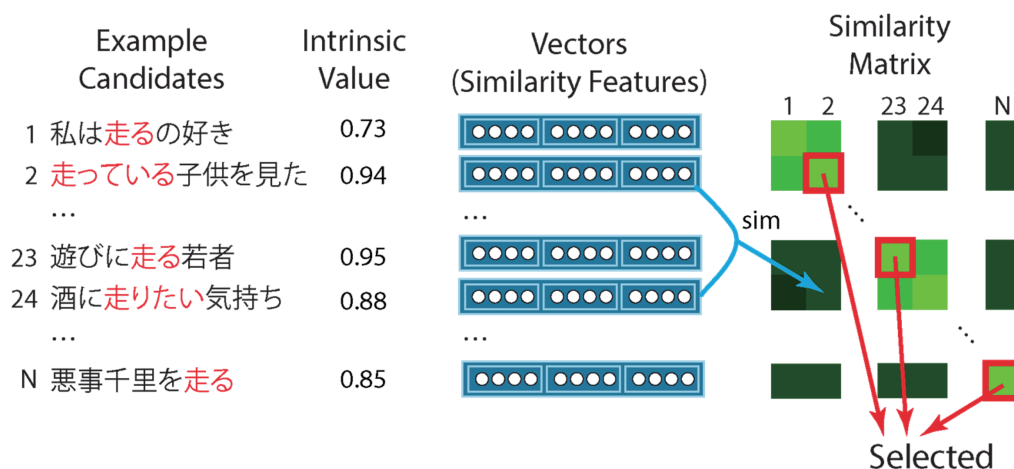


図 1 例文抽出の概要

清丸 寛一 (黒橋 禎夫 教授)

「Studies on Fundamental Problems in Event-Level Language Analysis」

(イベントレベルの言語解析における基礎的課題に関する研究)

令和4年3月23日授与

テキスト情報を整理することはさまざまな価値を生み出す。商品・サービスのレビューを整理すれば、それは消費の判断基準となる。社会問題の因果関係に関する記述を整理すれば、それは解決の糸口となる知見や気付きに繋がる。アクセス可能なテキスト情報は日々増え続けており、テキスト情報を整理することはますます多くの場面で有用となっている。

テキスト情報を整理する上で重要な役割を果たすのが言語解析である。言語解析は、テキストを人が理解可能な意味単位——語や句、文など——の集まりとして捉え、それらの意味と関係を解析するものである。

本研究では、状態や行為を表す意味単位、イベントを処理単位とする言語解析に取り組んでいる。イベントはおおよそ言語学でいうところの節に対応する。例えば「感染症が心配なのでマスクを購入した」という文は「感染症が心配だ」と「マスクを購入した」の2つのイベントからなる。イベントは実世界のできごとや人々の意見を整理するのに丁度良い意味単位であり、冒頭で述べた顧客フィードバックの分析や因果関係の整理といった応用はイベントレベルの言語解析によって実現できる。

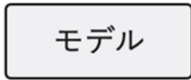
イベントの意味を捉えるには、イベントを構成する語句の意味とそれらの関係を理解する必要がある。これは長らく難しい問題で、イベントレベルの言語解析は単純化されたイベント表現（例えば述語と目的語だけを取り出したタプル等）のもとで行われてきた。しかしここ数年でニューラルネットワークに基づく言語処理技術が進展し、イベントの意味がかなり柔軟に捉えられるようになったことで、イベントレベルの言語解析に本格的に取り組む下地が整った。

イベントレベルの言語解析はイベント分類、イベント間関係解析、イベント予測の3クラスに大別でき、本論文では、各クラスの基礎的課題である意志性分類、談話関係解析、後続イベント予測に取り組んでいる（図参照）。意志性分類はイベントが意志的な行為かどうかを認識するタスク、談話関係解析はイベント間の意味的關係（因果関係など）を認識するタスク、後続イベント予測はあるイベントの次に起こるイベントを予測するタスクである。

基礎的な言語解析は組み合わせによって真価を発揮する。例えば、意志性分類がそれ単体で実現できる魅力的な応用はあまりない。しかし、感情極性分類と談話関係解析を組み合わせれば、冒頭の例文において「マスクを購入した」のは「感染症が心配だ」というネガティブな状況を理由に取った意志的な行為だと分かり、これらの情報から両者が問題と解決策の関係にあると推測できる。このように基礎的な言語解析はその組み合わせによってテキスト情報を整理する軸を無数に生み出すことができる。その意味で、本研究はイベントレベルの言語解析に基づくテキスト分析に広く資するものと考えられる。

イベント分類

財布を落とす →



- 意志的: 0.1
- 非意志的: 0.9

イベント間関係認識

タバコを吸う →

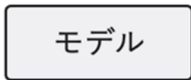
ガンになる →



- 時間: 0.1
- 因果: 0.7
- 比較: 0.1
- 展開: 0.1

イベント予測

感染症が蔓延 →



病院が混む

図1 イベント分類（イベント意志性分類）、イベント間関係認識（談話関係解析）、イベント予測（後続イベント予測）の例

中村道春（原田博司 教授）

「メモリ多項式モデルを用いた電力増幅器の非線形歪み補償に関する研究」

令和4年3月23日授与

ワイヤレス移動通信システムは、携帯電話やスマホからあらゆるモノへと適用範囲を広げ、生活・産業を支える基幹インフラとして今後も発展し続けていくことは間違いない。その際、消費するエネルギーを増大させないことが、地球環境保護の観点から重要な課題である。本研究では、ワイヤレス移動通信システムの中でも多くのエネルギーを消費する電力増幅器の高効率化に資する信号処理に関する検討を行った。

無線信号を通信に必要な電力レベルに増幅する電力増幅器は、比較的高効率で動作できる非線形領域を含めて動作させると、信号の品質が劣化し、かつ、周波数スペクトルの広がりが増加する周波数を使用するシステムに妨害を与える。このため、プリディストータを用いた非線形歪み補償を行うことが通常である（図1）。プリディストータは、電力増幅器の入出力特性の逆特性を学習したビヘイビオラルモデルを用いた信号処理を行う。適用するビヘイビオラルモデルは、プリディストータ実行時の処理負荷軽減のため構成の簡単なものであり、かつ、学習に要する信号処理についても負荷の軽いものであることが望まれる。

本研究では、プリディストータに適用するビヘイビオラルモデルとして比較的簡単な構成でリーズナブルな非線形歪み補償特性が得られるメモリ多項式モデルを取り上げ、周波数ドメインで演算を行う学習方法について提案し、その有効性を検証した。

まず始めに、周波数ドメインで演算を行うメモリ多項式モデルの学習方法を確立した。確立した学習方法は、時間ドメインでの畳み込み演算が周波数ごとの演算にできること、および、信号の周波数スペクトルが存在する周波数のみで演算を行えば良いことから、学習に要する信号処理負荷が軽減され、かつ、数値安定性にも優れたものである。

次に、構成が複雑ではあるが非線形特性を詳細に表すビヘイビオラルモデルを、構成の簡単なメモリ多項式モデルに変換してプリディストータに適用するシナリオを想定した場合、確立した周波数ドメインの演算を展開することにより、プリディストータに適用するメモリ多項式モデルは、構成が複雑な元のビヘイビオラルモデルの入出力データを用意して学習する必要はなく、そのパラメータおよび送信する信号の統計的情報から決定論的に導くことができることを導出した。これにより、最も厳しい動作条件に対応するビヘイビオラルモデルを準備しておけば、電力増幅器の使用時の要求条件に応じ、適切なメモリ多項式に適宜変換してプリディストータに適用することが可能になる。

一方、実測した電力増幅器の入出力データから逆特性を学習しプリディストータに適用するシナリオにおいては、非線形次数ごとに分離した学習の目標値が得られない。そのため、メモリ多項式モデルの非線形ベース関数を直交する多項式とすること、および、学習を低い非線形次数から順に行い、学習済みの低次の非線形成分を目標値から減算して高次の学習を行う段階的な学習とすることを実施した。これらにより、時間ドメインで最小二乗法を用いる従来の学習方法に比して約半分の信号処理量で電力増幅器の逆特性の学習が可能となる。また、学習したメモリ多項式モデルによるプリディストータにより十分な非線形歪み補償特性が得られることを確認した。

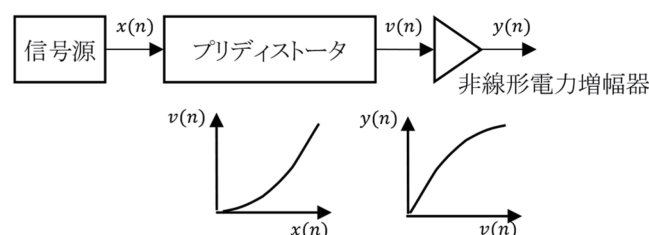


図1 プリディストータによる電力増幅器の非線形歪み補償

## 鍋谷 寿久 (原田博司 教授)

「サイバーフィジカルシステム実現に向けた無線 LAN システムの高度化に関する研究」  
令和 4 年 9 月 26 日授与

近年、様々な社会課題の解決に向けて、コンピュータで構成されるサイバー空間とフィジカル空間と呼ばれる実世界を高度に融合させたサイバーフィジカルシステム (CPS: Cyber Physical Systems) に関心が高まっている。CPS 実現のためには、サイバー空間とフィジカル空間を繋ぐ通信が必要不可欠となるが、有線通信に比べて多くのメリットが見込める無線通信への期待が高く、中でも無線 LAN (Local Area Network) は高速・大容量通信が免許不要な自営網ネットワークとして低コストに導入可能な無線システムであることから特に期待を集めている。しかしながら、CPS を想定した場合、無線 LAN には解決すべき幾つかの課題があり、無線 LAN の更なる高度化を図ることが重要となる。

本論文では、このような問題に対し CPS に無線 LAN を適用した場合の主要課題として、多数端末取容に伴うスループット低下の改善、通信の高信頼化、更なるシステム容量の増大および低遅延化の 3 つを挙げ、それら課題の意義を明確化した上で各課題に対して検討を行った。

多数端末取容に伴うスループット低下の改善に関しては、DL-MU-MIMO (Down-Link Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) 伝送向けサウンディング方式を提案した。従来の無線 LAN 規格である IEEE 802.11ac で規定されているサウンディング方式と比較し、提案方式は端末台数が増加するほど無線伝搬路情報の取得に要する所要時間の短縮効果が得られ、その結果サウンディングオーバーヘッド削減によりシステムスループットを改善できるため、課題に対して有効な方式であることを定量的に明らかにした。本手法は、IEEE 802.11ac の次世代規格として規格化された IEEE 802.11ax のサウンディング方式として正式採用されている。

高信頼化に関しては、各端末が複数の AP (Access Point) と同時に通信を行う新たなマルチ AP ダイバーシチ方式を提案し、計算機シミュレーションにより、本手法を用いない従来無線 LAN と比較して通信信頼性が向上できること、また従来のマルチ AP ダイバーシチ方式と比較して MAC (Medium Access Control) プロトコル効率の観点で高い優位性を有していることを明らかにした。加えて、試作機を開発し、提案方式の動作実現性を実証するとともに、実工場環境下における無線性能評価により提案方式の有効性を実験的にも明らかにした。また、高信頼化に向けては、通信自身の高信頼化手法の必要性も当然ながら、実運用を見据えると実際にターゲット環境での無線伝搬特性の把握も非常に重要になる。そこで、CPS 導入の期待が高い現場の 1 つである火力発電プラント内での無線伝搬特性評価を実施し、発電プラント環境特有の無線伝搬特性を有することを明らかにした。

更なるシステム容量の増大および低遅延化に関しては、Full Duplex 技術に着目し、無線 LAN への Full Duplex 技術適用に向けた検討を行った。IEEE 802.11 無線 LAN 標準化における Full Duplex 適用に向けた方向性を明らかにした上で、想定される Full Duplex 適用による低遅延効果を明らかにすべく定量的な遅延性能評価を行い、無線 LAN Full Duplex の有効性を示すとともに実用化に向けて更なる検討課題を明らかにした。

以上に述べたように、本研究成果は無線 LAN を適用した CPS 実現に向けて必要となる無線 LAN の各課題解決に大きく寄与できるものと考えられる。無線 LAN の更なる高度化により、無線 LAN システムを適用した CPS を実現することが可能となり、これまでは様々な理由で CPS 化ができなかった現場や用途での CPS の普及拡大を見込むことが期待できる。



図 1：無線 LAN を適用した CPS

原 園 友 規 (下田宏 教授)

「A Study on Field Work Support in Nuclear Power Plants Utilizing 3D Reconstruction Model and Tagging」

(3次元再構成モデルとタギングを活用した原子力発電プラントの現場作業支援に関する研究)

令和4年5月23日授与

国内外の原子力発電所では、継続的な運転に必要な設備の耐久性を維持・向上させるための保全作業や、廃炉となる原子炉の解体作業に関して大きな需要がある。これらの保守・解体作業では重大な事故を起こさないよう細心の注意を払い、安全に実施する必要がある。これらを実現するために、原子力分野では、情報通信技術 (ICT) を活用した作業改善や作業支援に関する多くの研究開発が行われている。特に近年では、LiDAR等の計測機器の普及や画像・点群処理技術の進歩によって、環境の3次元センシングや3次元モデルを活用した作業改善や研究開発に注目が集まっている。

本論文では、3次元センシングによって得られる、環境の状態を忠実に反映した3次元再構成モデルを活用した作業ミスや事故を低減させる支援手法として、物体や箇所と情報とを紐づける、「タギング」を活用した支援方法を提案した。タギングによる実世界指向かつオブジェクト指向な情報の入出力によって、従来用いられてきた紙媒体等での記録とは異なる、より直観的な情報の入出力の実現を狙う。

本論文では、原子力発電所における保守・解体作業での作業計画検討及び作業時の情報共有と、原子力関連施設での緊急時対策訓練における訓練環境構築の2点の状況に関してタギングを用いた支援を適用し、タギングを適用した際の支援の有用性を検証した。加えて、容易なタギングの実現を目的として、原子力関連施設の作業員のような、画像処理やセンシングの専門的知識を持たないユーザでも容易にタギング可能な3次元再構成モデルが作成できる、拡張現実感 (Augmented Reality; AR) を用いたスキャン支援システムを提案・開発し、その有効性を検証した。

原子力発電所における保守・解体作業での作業計画検討及び作業時の情報共有における支援では、作業現場をスキャンして得られた3次元再構成モデルを活用することで、ユーザは現場に赴くことなく現場の状況を確認できる。また、3次元再構成モデルに対して作業情報をタギングすることによって、作業者は作業実施時に各箇所に対応する情報を、ARデバイスを通じて参照できる。これらを実現する作業支援システムを開発し、解体作業中の実際の原子力発電所にて作業者を対象とした評価者実験を実施した。その結果、作業計画検討での現場滞在時間の短縮と作業時の現場での作業ミスの低減に有効であることが示された。

原子力関連施設における訓練環境構築における支援では、原子力関連施設の実空間内の様々な箇所に訓練シナリオを構成する情報を表すブロックを直接配置することで、ARで体験可能な様々な内容の非常時対策訓練をプログラミングスキルの無いユーザでも容易に作成できるAR訓練環境構築支援システムを開発し、実際の原子力関連施設の職員を対象とした評価者実験を実施した。その結果、従来のテキストベースのプログラミング経験のないユーザでも数十分程度で実空間で体験可能なAR訓練を作成できることが示された。

池 遼 太 (長崎百伸 教授)

「ヘリオトロン J 3次元磁場における周辺プラズマ輸送およびダイバータ熱負荷に関する研究」

令和 4 年 3 月 23 日授与

核融合炉の実現に向けた課題として、ダイバータ機器の受ける熱負荷があり、ダイバータ機器設計のためには3次元磁場中における熱・粒子輸送の理解が不可欠である。トラスプラズマのうち、ヘリカル型装置は生来3次元構造を持ち、また、トカマク型装置は本来軸対称であるが、共鳴摂動磁場による3次元構造が導入されている。そのため、トラスプラズマ共通の課題として3次元磁場下における SOL 輸送の物理現象の理解が必要である。磁場構造の制御性に優れた先進ヘリカル装置であるヘリオトロン J において、3次元周辺輸送コード EMC3-EIRENE を適用し、モデル計算を行うことで、ダイバータレグや磁気島といった周辺磁場構造や電子密度や輸送係数といったパラメータが周辺輸送に与える影響を評価した。

ヘリオトロン J における典型的な3種類の磁場配位を対象として、周辺プラズマ分布および真空容器上の熱負荷分布について磁力線長分布との比較および電子密度依存性を評価したところ、コアプラズマの電子密度上昇に伴って、ダイバータ熱負荷における分布が平坦化し、また、ピーク位置がシフトする結果が得られた (図 1) [1]。プラズマ対向壁全体のグローバルな熱の分配を評価するために、新たな熱流束分布関数を導入し解析した結果、高密度化によって熱流束ピークが減少すること、低熱流束の増加すること、また、低い熱流束も無視できない量の熱を壁に伝えていることが明らかとなった (図 2)。この熱流束分布関数の導入により、熱の分配において磁場配位制御が高熱流束の低減につながる事が期待される。

ポロイダル断面における流束や圧力の分布において、小半径方向に SOL 領域を内側と外側の2領域に分割するような境界構造が見られた。この構造は SOL 中の磁力線長分布を反映しており、磁力線に沿った熱流束である平行熱流束においても見られている。内側領域にあたるダイバータレグの根元側と外側にあたるダイバータレグの先端側に2つのピークが存在し、コアプラズマ密度の変化に応じて位置や強度が変化する。このような分布の変化は壁の受ける熱負荷の密度依存性に対しても矛盾ない結果である。

プラズマ実験において静電プローブ計測を用いて周辺プラズマのフロー構造を計測したところ、X-point の両側で反対方向のプラズマフローが観測され、モデリング計算と一致する結果が得られた。また、ダイバータ構造制御のため、回転変換制御によるダイバータ磁場配位の数値計算を行い、回転変換が低次の有理面となったとき周辺領域における磁気島構造を評価した。プラズマ実験では電子密度・温度分布が回転変換に依存することが観測されており、周辺磁気島構造がプラズマ閉じ込め・輸送に重要な役割を果たしている。

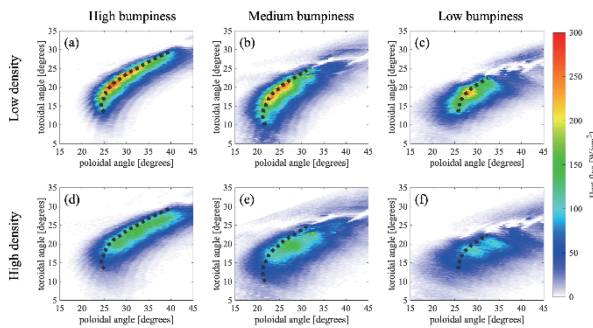


図 1 Heliotron J 装置における周辺プラズマ分布および真空容器上の熱負荷分布 [1]

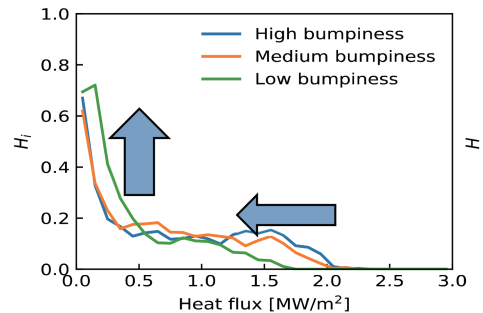


図 2 熱流束分布関数の磁場配位依存性 [1]

[1] R. Matoike, et al., Plasma. Physc. Control. Fusion 63 (2021) 115002

高林 伸幸 (篠原真毅 教授)

「Power Beaming and Receiving Systems for Microwave Power Transmission to Fly Drone」  
(ドローン飛行のためのマイクロ波電力伝送のパワービーミング及び受電システムに関する研究)

令和4年7月25日授与

本論文はマイクロドローンへのマイクロ波電力伝送 (MPT) 用パワービーミング/受電システムに関する技術・開発に関してまとめたものである (図1)。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 通信分野で主に利用され、MPT 技術における有効性も示唆されてきたフラットトップビーム (FB) が、受電デバイスであるレクテナアレイの直流変換効率および出力 DC 電力の向上に大きく寄与することを、解析、シミュレーション、実測の3手法により示した。

2. MPT に適した FB を放射するアレイアンテナは、ビーム効率を向上させるためアレイ素子数を増やして指向性を高めなければならない。また軸比改善の観点からシーケンシャルアレイ化が必須である。シーケンシャルアレイを考慮した大規模アレイの分配回路設計は非常に煩雑となり、新たに簡略かつ有効な FB のアレイウェイトの給電手法が必要であった。本論文ではブロック型シーケンシャルアレイと分岐点での電力分配比を最小化するマイクロストリップラインでの給電手法を導入し、受電電力の変動係数 (CV) が 0.2 程度で受電面内の軸比が 3dB 以下のフラットトップビームを 0.8m の伝送距離で形成することに成功した (図2)。

3. マイクロドローンに搭載するレクテナアレイの要件として出力電力 20W 以上、電力質量比 334mW/g 以上を満たすレクテナアレイは先行研究では見られない。本論文では、レクテナアレイのアンテナ層はアラミドハニカム基板、整流回路は 0.127mm の誘電体基板と GaAs ショットキーバリアダイオードで形成されている。開発したレクテナアレイの実測出力電力、電力質量比はそれぞれ 27W、720mW/g を示し、マイクロドローンへの搭載要件を満たすレクテナアレイの開発に成功した。

4. 受電面内で均一電力密度分布、低軸比分布を持つ FB と最大 27W 出力可能な軽量レクテナアレイを用いてマイクロドローンに 80cm 先から無線給電を行った。バッテリーレスのマイクロドローンがマイクロ波による無線電力のみで7分間連続飛行できることを実証した (図3)。

5. 画像認識機能を持つアクティブフェイズドアレイの開発を行った。画像認識は送電エリア内への人体の侵入検知、受電アンテナ位置の座標検知の2つの役割を担う。画像認識により取得された座標を基に2素子の同期したシンセサイザー IC の出力位相をコントロールしアンテナでの受電電力を 3dB 以上向上させることに成功した。

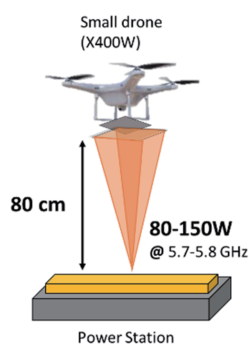


図1：提案する MPT マイクロドローン

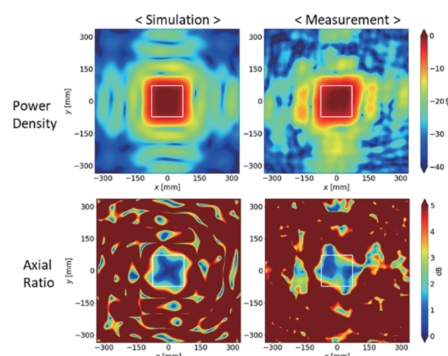


図2：FBのシミュレーション結果と実測値

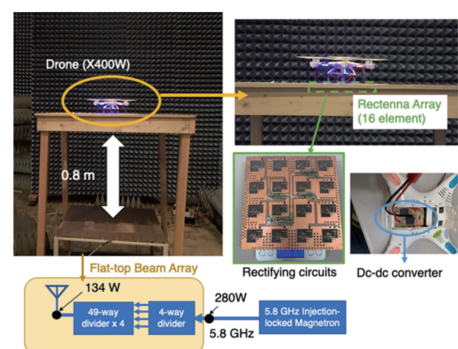


図3：MPT マイクロドローンの実証実験結果



## 田中 勇氣 (篠原真毅 教授)

### 「IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムの開発」

令和 4 年 9 月 26 日授与

本論文は IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムに関する要素技術・システム開発に関してまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 金属や人体の近傍で動作が可能な小型高効率アンテナの構成を提案し、試作・評価を通して有効性を確認した。設計したアンテナは同一寸法の板状逆 F アンテナ (PIFA) と比較して良好な放射指向性特性を有しながら 12.1% の小型化を実現した。
2. バッテリーレスで動作可能な WPT 受電端末には無電源で動作するアンテナ用 RF スイッチが必要である。本論文で提案するバラクタダイオードを用いた RF スイッチは無電源で動作し、1 台のアンテナを電力と通信の両用とすることができる。試作されたスイッチは挿入損失が -0.38 dB と良好な特性を有することを確認した。
3. IoT 用の受電デバイスには広い指向性特性が要求される。本論文では複数のアンテナを近接して配置しハイブリッドカプラを介して複数の整流回路と接続することにより広い指向性と高い受電電力を両立可能であることが述べられている。試作したレクテナは実測の結果ハイブリッドカプラを用いない場合と比較して 1.3 倍の平均受電電力を得られることを確認した。
4. 整流回路の効率を高めるためには入力電力に応じた負荷インピーダンスを接続する必要がある。本論文で提案するリアルタイム MPPT 回路はアナログ回路のみで構成され、従来の MPPT 回路と比較して高速かつ広範囲な追従性能を有する。
5. 提案アンテナ、スイッチと従来 MPPT 制御を採用したバッテリーレスセンサ端末の設計と試作を行った。センサ端末の設計方法について述べられているとともに、動作実験においては既存の RFID リーダを送電器として 12 m の動作距離を確認した。
6.  $N$  台の送電アンテナを配置し、周波数を同期した上で位相を最適値に制御する DWPT システムについて提案した (図 1)。位相最適化により受電電力が最大  $N$  倍となることを示し、従来のビームフォーミングと比較した場合の優位性をシミュレーションにより示した。
7. DWPT システムを実証するために、ボックスキャッチ信号を用いて位相を最適化する手法について提案した。ボックスキャッチ信号を受信し位相制御を行うための台形位相変調アルゴリズムを提案し、SDR デバイスと GNU Radio を用いてシステムの実証を行った (図 2)。実験では 16 台の送電アンテナから 300 mW を送電し、6.5 mW の電力を受電するとともに、シミュレーション結果と良好に一致する結果を得た (図 3)。
8. スケーラブルな DWPT システムを実現するために、周波数同期構成として Cascaded 構成を提案した。Cascaded 構成を実現する送電器の開発を行い、低コストな構成でありながら位相変調誤差  $\pm 1.5$  度の性能を確認した。本構成で実証実験を行い、理論値と良好に一致する受電電力を確認し、提案構成の有用性を示した。

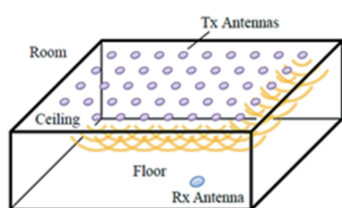


図 1 : DWPT のアンテナ配置

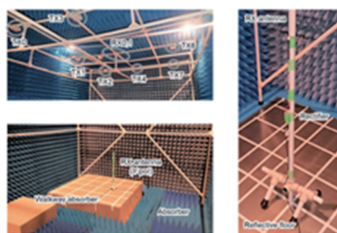


図 2 : DWPT の実験写真

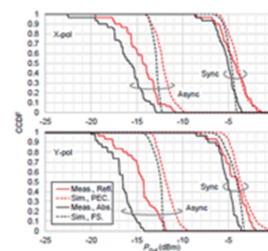


図 3 : 受電電力の CCDF の実験値