

奨励金No.1574

IoT 機器への通年給電を可能にする環境発電の実現

久保 若奈
東京農工大学 教授



Environmental powering device for IoT devices

Wakana Kubo

Tokyo University of Agriculture and Technology, Full Professor

本研究は環境に拡散する未利用熱エネルギーをエネルギー源とし、昼夜問わず半永久的に IoT 機器を駆動できるメタマテリアル電源の実現を目的とする。その実現のために本年は、IoT 機器への通年給電を可能にする環境発電源、メタマテリアル熱電変換アレイデバイスの作製およびデバイス特性の評価を行った。さらには磁気、温度、振動センサといった IoT 機器を駆動するのに必要な広帯域メタマテリアル構造の最適化を、深層強化学習手法を利用し、実施した。

This study aims to realize a metamaterial-based environmental power supply device that can drive IoT devices by utilizing waste heat energy diffused in the environment.

In this year, we fabricated a metamaterial thermoelectric array device and evaluated its performance. Furthermore, we optimized broadband metamaterial structures suitable for operating IoT devices such as magnetic, temperature, and vibration sensors by employing deep reinforcement learning techniques.

1. 研究内容

本研究は環境に拡散する未利用熱エネルギーをエネルギー源とし、昼夜問わず半永久的に IoT 機器を駆動できるメタマテリアル電源の実現を目的とする。これを実現できれば、これまでエネルギー源として捉えていなかった環境からも電気を作りだすことが可能になり、IoT 機器に半永久的に給電できる電源に展開できると期待できる。

本年は、IoT 機器への通年給電を可能にする環境発電源、メタマテリアル熱電変換アレイデバイスの作製およびデバイス特性の評価を行った。さらには磁気、温度、振動センサといった IoT 機器を駆動するのに必要な広帯域メタマテリアル構造の最適化を、深層強化学習手法を利用し、実施した。

メタマテリアル熱電変換は環境中の熱エネルギー（熱輻射）を吸収し、その熱を熱電変換素子

に与えて電気に変換する機構である。従来の熱電変換素子とは異なり、均一な熱輻射環境においても発電する。これまで実施した原理検証の実験では、メタマテリアルの熱輻射吸収効果によって熱電発電が行われていることを可視化するために、単体の熱電素子のみで構成される単素子デバイスを活用していた。しかし実デバイスの展開を考える上で、単体の熱電素子のみで構成されるメタマテリアル熱電デバイスは現実的でない。

そこで本研究は、p 型および n 型の熱電素子で構成される熱電アレイデバイスを構築した。さらにそのデバイス表面にメタマテリアル基板を装着した、メタマテリアル熱電アレイデバイスの作製を試み、そのデバイス特性を評価した。ただ現時点で利用できる装置の制約上、作製できたデバイスサイズは 1 cm 角であり、本研究が目的とする IoT デバイスの駆動には依然不十分なサイズとい

える。

そこでメタマテリアルの熱輻射吸収特性を向上させることで、磁気や振動、温度センサといったIoT機器を駆動にする着想に至った。これまで本研究で利用していたメタマテリアルは、狭帯域吸収性を有する。一方、熱輻射スペクトルは広帯域性を持つことから、メタマテリアル熱電変換に利用するメタマテリアルも広帯域吸収性を持つことが望ましい。そのためこれまでに、様々な広帯域メタマテリアルが提案・作製されてきた。その一つがハイパーボリックメタマテリアル（Hyperbolic Metamaterial: HMM）である。その広帯域吸収特性を活用した、放射冷却やイメージングなどの応用例が報告されている。

一般にHMMは台形の構造を有し、金属層と誘電体層の積層構造で構成される。HMM構造のディスク径は吸収する波長に、また各層の膜厚は吸収特性に関わることから、HMM構造の吸収特性を、広帯域な熱輻射スペクトルに合わせるためには、これらの構造パラメータを最適化する必要がある。一般に、メタマテリアルの構造や材質と、吸収特性を調査するのに利用されるのが有限要素法や有限差分時間領域法である。特に有限要素法は、メタマテリアル構造を要素に分解して各点における計算をすることから、解を得るまでに時間がかかり、メタマテリアル構造の一つ一つのパラメータを振っていくには膨大な時間を必要とするため、様々な構造パラメータを調査するHMM構造の最適化では、妥当な手法とはいえない。

そこで短時間で容易に構造の最適パラメータを求めるにあたって有用なのが深層強化学習である。筆者らはHMM構造二つを配列したデュアルHMM構造を採用し、HMMの左右の底面ディスク径、金属層として用いた銀（Ag）膜、および誘電体層として用いたフッ化カルシウム（ CaF_2 ）膜厚のパラメータを、深層強化学習によって最適化し、広帯域HMM構造の設計を試みた。

すでに存在するビックデータを利用できる深層

学習のケースとは異なり、メタマテリアルの最適化においては、訓練データなどを有限要素法などによってあらかじめ準備する必要がある。先述のとおり、有限要素法によるメタマテリアルの吸収特性の算出は膨大な時間を要するため、有限要素法で準備する訓練データ類のデータ数はできるだけ少ないことが望ましい。十分な量のデータセットが確保される場合は、得られる最適解は利用するアルゴリズムによってほとんど変わらないのが一般的であるが、メタマテリアル構造の最適化のように、利用するデータセット数が限られる場合は、利用するアルゴリズムによって得られる最適解の精度が大きく変化する。そこで本研究ではHMMの最適化を実施する際に、異なるアルゴリズムを用いて得られた最適解の妥当性を評価し、加えて各アルゴリズムの予測精度も確認した。

今回利用したアルゴリズムはNeural Net、Random Forest、そしてXGBoostである。これらのアルゴリズムを用いて、深層強化学習によりHMMの構造最適化を実施した。この際、深層強化学習における環境はHMMの左右のディスク径（ D_R , D_L ）、Ag膜厚（ h_{Ag} ）および CaF_2 膜厚（ h_{CaF_2} ）とし、また報酬は熱輻射吸収エネルギー量とした。

各アルゴリズムを利用して最適化したHMM構造の吸収スペクトルと、有限要素法により計算したHMM構造の吸収スペクトルを比較したところ、Random ForestとXGBoostを用いて最適化したHMMは広帯域吸収特性を示し、有限要素法で計算した吸収スペクトルともよい一致を示すことを確認した。一方、Neural Netを用いて最適化したHMMの吸収スペクトルは、有限要素法で計算したスペクトルとは大きな乖離を示した。Neural Netで最適化したHMM構造の吸収スペクトルが、有限要素法で計算したスペクトルに対し大きな乖離を示した原因として、Neural Netがトレーニングデータに過剰に適合し、未知のデータの吸収スペクトルを正確に予測できなかったと推測した。この結果から、利用できるデータセット数が限ら

れているメタマテリアル構造の最適化などの場合は、複数のアルゴリズムを利用し最適解の妥当性を評価することが重要といえる。

さいごに、最適化したHMM構造を適用した場合の、373 Kにおける均一な熱輻射環境における発電特性とInternet of Things (IoT) デバイスの駆動電力の比較を行った。XGBoostを利用して最適化したHMM構造を熱電デバイスに装着した際の、推測発電量は $62.4\ \mu\text{W}$ であった。HMMの構造最適化により我々が達成した従来の発電量と比較し、約4倍の発電特性の向上が得られると確認した。またこの発電量は磁気や温度、振動センサーといったIoTデバイスの駆動電力（ $10\sim 40\ \mu\text{W}$ ）を上回っており、HMMを電極に適用した熱電変換によりこれらのIoTデバイスを駆動することが計算的に予測できた。

2. 発表（研究成果の発表）

論文

K. Hamada, Hui-Hsin Hsiao, and W. Kubo*, “Comparison of Algorithms using Deep Reinforcement Learning for Optimization of Hyperbolic Metamaterials”, Sci. Rep., 14, 31842 (2024).

総説

久保若奈 “メタマテリアル熱電変換と非放射冷却”、『メタマテリアル／メタサーフェス実用展開の可能性～メタレンズ・通信・エネルギー・音響等応用に向けた研究動向～』、情報機構、289-297. 2025. 5.

国際会議招待講演

1. W. Kubo, “Optical wireless power through metamaterial thermoelectric conversion”, SPIE Optics + Photonics 2024, San Diego, USA, 2024. 8. 20.
2. W. Kubo, “Non-radiative cooling”, META2024,

Toyama, Japan, 2024. 7. 16.

3. W. Kubo, “Metasurface thermoelectric power generation”, IUMRS, Hong Kong, China, 2024. 5. 18.