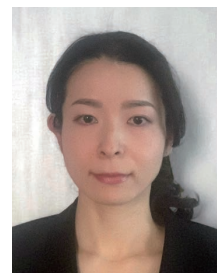


奨励金No.1574

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、環境中に拡散する未利用熱エネルギーを活用し、昼夜を問わず半永久的に IoT 機器を駆動可能なメタマテリアル電源の実現を目的としている。本年度は、多様な IoT 機器への電力供給を可能とするハイブリッド給電システムを提案した。本システムは、均一な熱放射環境下で発電するメタマテリアル熱電変換と、通信機器への電力供給を担う光無線給電を融合したものである。これまでにメタマテリアル熱電変換による発電を実証していることから、本年度は薄膜吸収体を用いた光無線給電の実証を行い、ハイブリッド給電システムの実現可能性を検証した。

This study aims to realize a metamaterial-based power source that utilizes unused thermal energy dispersed in the environment and can semi-permanently drive IoT devices regardless of day or night. In this fiscal year, we proposed a hybrid power supply system capable of powering various IoT devices. This system integrates metamaterial thermoelectric conversion, which generates electricity under a uniform thermal radiation environment, with optical wireless power transfer for driving communication devices. Since metamaterial thermoelectric conversion has already been demonstrated, this year we focused on demonstrating optical wireless power transfer using a thin-film absorber and evaluated the feasibility of the proposed hybrid system.

1. 研究内容

本研究では、環境中に拡散している未利用熱エネルギーを有効活用し、昼夜を問わず半永久的に IoT 機器を駆動可能なメタマテリアル電源の実現を目的としている。近年、インフラ監視、環境計測、ヘルスケア、スマートシティなどの分野において、多数の IoT センサを広範囲に設置することが求められている。しかし、これらの IoT 機器を長期間安定に駆動するためには、電池交換や配線、定期的な保守が大きな課題となる。特に、橋梁や高速道路など、人が容易にアクセスできない場所に設置される IoT 機器では、メンテナンスフリーで駆動可能な自立電源技術の開発が不可欠である。

この課題に対し、本研究では、環境中に常に存

在する未利用エネルギーの再利用に着目をした。従来の熱電変換では、高温部と低温部の間に温度差が必要であり、温度が様な環境では発電が困難であった。これに対し、我々はこれまでに、メタマテリアル吸収体を熱電変換素子の一端に導入することで、均一な熱放射環境下においても局所的な温度勾配を形成し、発電を可能にするメタマテリアル熱電変換を提案・実証してきた。この技術は、環境中の熱放射を直接利用できる点で、従来の熱電変換や太陽電池とは異なる新しい環境発電手法である。

一方で、メタマテリアル熱電変換により得られる電力は、環境熱をエネルギー源とするため比較的小さい。2024 年度には、深層強化学習手法を用

いて、メタマテリアル構造を最適化することで、メタマテリアル熱電変換の特性向上を図ったが、依然その出力は磁気や温度といった低消費電力センサの駆動に適した程度であり、無線通信など一時的に大きな電力を必要とする動作を単独で駆動するには課題が残る。そこで本年度は、メタマテリアル熱電変換による常時発電と、必要時に外部から光を照射して追加電力を供給する光無線給電を組み合わせたハイブリッド給電システムを提案した。本システムでは、平常時には環境中の熱放射を利用して IoT 機器の待機動作やセンシングを行い、通信時や高負荷動作時には光無線給電により補助的な電力を供給する。これにより、小電力から比較的大きな電力を必要とする IoT 機器まで、広範な用途に対応可能な自立電源システムの実現を目指した。

本年度は、このハイブリッド給電システムの実現可能性を検証するため、薄膜吸収体を搭載した熱電変換素子による光無線給電特性を評価した。光無線給電には一般に太陽電池が用いられるが、太陽電池は光子を直接電気に変換するため、照射光の波長が材料のバンドギャップに制限される。また、十分な出力を得るためには受光面全体への比較的一様な照射が必要となる。一方、熱電変換を用いた光無線給電では、入射光を吸収体で熱に変換し、その熱によって生じる温度差を電気に変換するため、吸収体の設計によって動作波長を柔軟に選択できる。また、局所的に発生した熱が吸収体基板内を拡散することで、光が直接照射されていない熱電素子も発電に寄与できる可能性がある。この点は、太陽電池型の光無線給電にはない熱電型光無線給電の特徴である。

実験では、Ag、フラーレン、Au からなる薄膜吸収体を Cu 電極上に作製し（図 1）、これをビスマスアンチモンテルル（ Bi_2Te_3 ）系熱電変換素子の一端に実装した（図 2）。薄膜吸収体は、金属層と高損失誘電体層の多重反射干渉を利用して可視光を強く吸収するように設計した。作製した薄膜

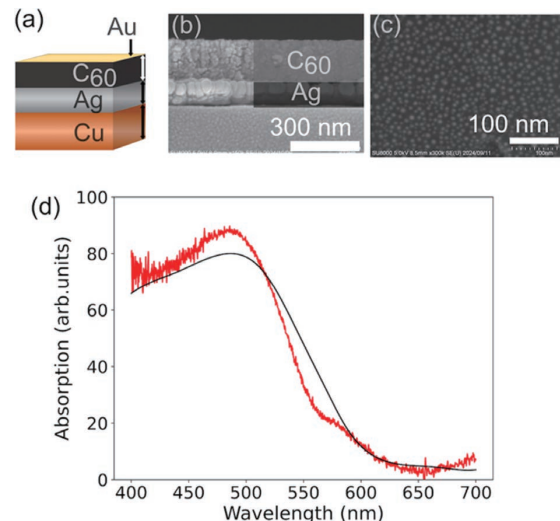


図 1 薄膜吸収体の、(a) 模式図、(b) 断面および (c) 電子顕微鏡図。(d) 薄膜吸収体の実測（赤線）と計算（黒線）で求めた吸収スペクトル。

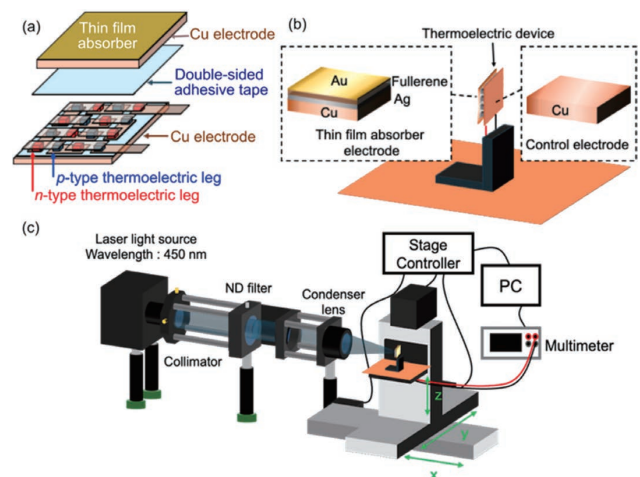


図 2 (a) 熱電デバイスの分解図。(b) ステージに装着した熱電デバイスの模式図と、(c) 実験セットアップ。

吸収体は、486 nm 付近において約 90%の強い吸収を示し、計算結果とも良い一致を示した。これは、フラーレン層内での干渉効果により反射が抑制され、入射光が効率的に熱へ変換されていることを示している。

次に、波長 450 nm のレーザー光を薄膜吸収体側から照射し、熱電変換素子から得られる出力電圧、電流、出力電力を測定した。入射光強度 1 W の条件において、薄膜吸収体を照射した場合には 44 mV の出力電圧が得られ、対照電極を照射した

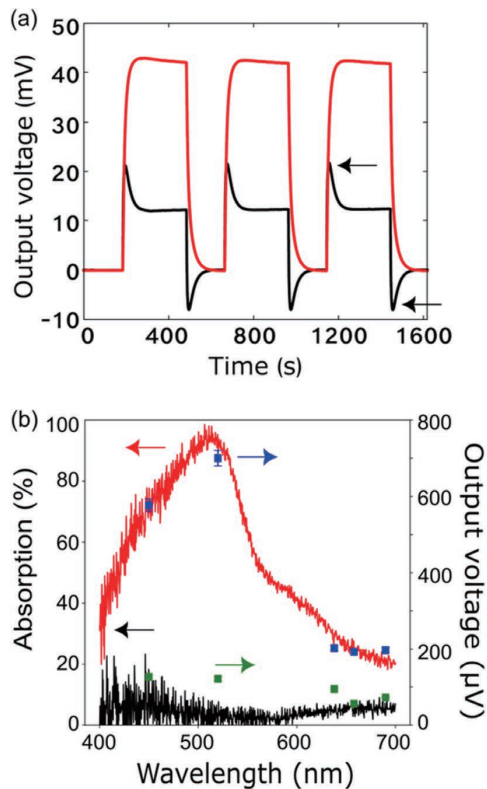


図 3 (a) 薄膜吸収体電極（赤）と銅電極（黒）に光を照射した際の出力電圧の時間推移。(b) 薄膜吸収体電極（赤）と銅電極（黒）の吸収スペクトルと各波長における出力電圧の比較。

場合の 15 mV と比較して約 2.9 倍大きな電圧が得られた（図 3 (a)）。また、出力電力は 2.0 mW に達し、対照電極照射時と比較して約 8.1 倍大きな値を示した。さらに、光照射強度を変化させたところ、出力電圧および出力電力は入射光強度に対してほぼ線形に増加した。この結果は、薄膜吸収体による光吸収量の増加が熱電変換素子内の温度差を増大させ、結果として出力向上に寄与していることを示している。

また、照射波長を変化させた測定では、薄膜吸収体の吸収スペクトルと出力電圧スペクトルが良く対応することを確認した（図 3 (b)）。このことから、得られた熱電出力は薄膜吸収体による光吸収に起因するものであり、吸収体の光学設計によって光無線給電特性を制御できることが示された。さらに、入射光強度 1 W、出力電力 2.0 mW の条件から、光無線給電の変換効率は 0.2% と見

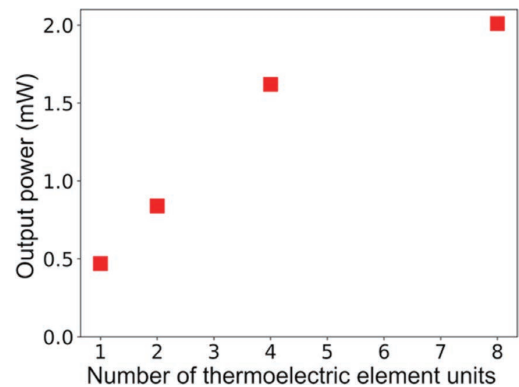


図 4 薄膜吸収体を搭載した熱電デバイスの熱電素子数と出力電圧の関係

積もられた。太陽電池と比較すると効率は低いものの、本研究で用いた熱電型光無線給電は、メタマテリアル熱電変換との統合を前提としたハイブリッドシステムの一部として位置づけられるため、単独の高効率発電素子ではなく、常時発電を補完する補助電源として有効である。

さらに、本研究では、熱電変換素子数を変化させることで、局所光照射によって発生した熱がどの範囲まで発電に寄与するかを評価した（図 4）。その結果、光スポットが直接照射している領域は一部であるにもかかわらず、複数の熱電素子が同時に発電に寄与することが分かった。これは、薄膜吸収体で発生した局所的な熱が基板内を横方向に拡散し、光が直接当たっていない熱電素子にも温度差を与えたためである。このような熱拡散を利用した発電寄与の拡大は、太陽電池型光無線給電では実現できない特徴であり、熱電型光無線給電の大きな利点である。すなわち、本方式では受光面全体を精密に照射する必要がなく、小スポット照射によっても複数素子から出力を得られるため、実環境における光軸ずれや部分照射に対して比較的高い許容性を持つと考えられる。

以上の結果から、本年度は、薄膜吸収体を用いた熱電型光無線給電を実証し、メタマテリアル熱電変換と組み合わせたハイブリッド給電システムの実現可能性を示した。提案するシステムでは、メタマテリアル熱電変換が環境中の熱放射を利用

(i) Self-powered IoT sensing by
metamaterial thermoelectric conversion
in an environment with uniform thermal radiation

Driving IoT sensors by
Metamaterial thermoelectric conversion



(ii) Wireless data transmission
(thermoelectric-based OWPT)

OWPT with a thin-film absorber
to drive wireless communication devices

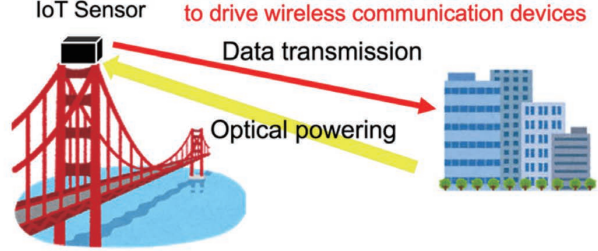


図 5 熱電型光無線給電とメタマテリアル熱電変換を組み合わせたハイブリッド給電システムの駆動概念図。

して IoT 機器の常時待機・センシング動作を支え、光無線給電が通信時などの高電力動作を補助する。これにより、昼夜や天候に依存せず、かつ必要時には外部から選択的に電力を供給できる新しい IoT 用自立電源プラットフォームの構築が期待される。

今後は、薄膜吸収体の光吸収波長や熱拡散特性をさらに最適化するとともに、熱電変換素子の熱抵抗・電気抵抗の低減、メタマテリアル熱電変換部との一体化設計、および実際の IoT 機器駆動に向けた電力管理回路の導入を進める。これにより、環境中の未利用熱と外部光を相補的に利用するメンテナンスフリー電源の実現を目指す。本研究成果は、電池交換が困難なインフラ監視センサ、遠隔環境モニタリング、スマートシティ、災害監視システムなどに展開可能であり、持続可能な IoT 社会の実現に貢献する基盤技術になると期待される。

2. 発表（研究成果の発表）

1. H. Tamehiro, A. Ueno, H. Wang, Md. Abdur Rahman, Joel K.W. Yang, and W. Kubo*, “Optical Wireless Power Transfer by Thermoelectric Device with Thin Film Absorber”, the IEEE Journal on Wireless Power Technologies, 1,0300106–0300106 (2026).

2. 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).

国際会議招待講演

3. W. Kubo, “Nonradiative Cooling”, META2025, Tremolinos, Spain, 2025.7.22.
4. W. Kubo, “Metamaterial thermoelectric conversion and nonradiative cooling”, 2025 Taiwan Physical Society Annual Meeting (TPS2025), Kaohsiung, Taiwan, 2025.1.15.

国内会議招待講演

5. 久保若奈、“メタマテリアル熱電変換と非放射冷却”、第 86 回応用物理学会秋期学術講演会、名古屋、2025.9.9