

自己冷却型発電デバイスの研究開発 報告書

早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科
寺嶋真伍

1. はじめに

近年、IoT 技術やウェアラブルデバイスの発展に伴い、人体や機械から生じる未利用熱を活用して発電する熱電発電デバイスが注目されている[1,2]。特に、ウェアラブルデバイスを代表とする人の皮膚や曲面熱源へ設置する場合は、フレキシブル性を有する熱電発電デバイスの重要性が高まっている。一方で、従来のフレキシブル熱電発電デバイスは、フレキシブル性を重視するあまり、熱電素子内の温度差が小さくなり発電量が低下するという課題を抱えていた[3-5]。これに対し申請者は、切り紙構造を基板へ導入した切り紙型熱電発電デバイス (K-TEG) を提案し、高いフレキシブル性と高出力を両立できることを示してきた。さらに、K-TEG は発電機能だけでなく、短い時間 (およそ 30 分以内) において、人の体表面温度が $32\pm 1^{\circ}\text{C}$ から $28\pm 1^{\circ}\text{C}$ まで低下するといった高い放熱・冷却能力を有する可能性が示唆されている。

切り紙型熱電発電デバイス (申請者提案)

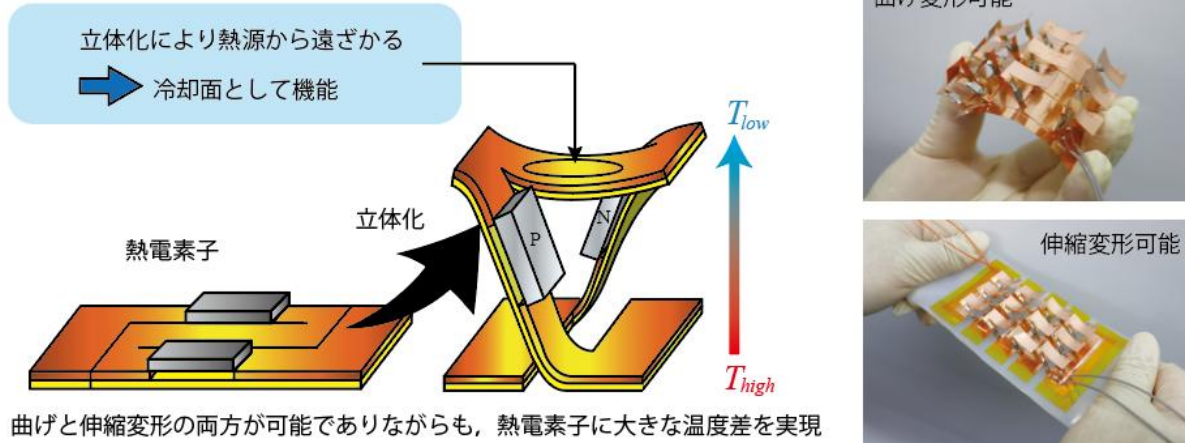


図 1 K-TEG の概略図とアレイ化デバイスの曲げ・伸長変形

2. 着目した課題

K-TEG は、高いフレキシブル性と高い発電性能を両立可能な新しい熱電発電デバイスであるが、その熱輸送メカニズムや冷却特性については未解明な部分が多い。特に、熱電素子寸法や切り紙構造の変形状態が熱流束や発電性能へ与える影響、さらには無線送信回路などの電子機器を接続した実使用状態における熱流変化については知見が不十分な状態である。また、K-TEG を冷却デバイスとして応用するためには、熱流束や放熱に関する基礎特性を定量的に把握し、発電と冷却を両立するための設計指針を確立する必要がある。そのため本研究では、K-TEG 内部の熱流に着目し、熱電素子寸法や電子回路接続条件が放熱へ与える影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

3. 熱電素子形状の修正

本研究では、外部回路として温度センサーが具備された無線送信回路を使用する予定である。しかしながら現状の K-TEG のままでは電圧が不安定であるため、たとえアレイ化した熱電発電デバイスであっても、外部回路を継続して駆動させることが困難である。具体的には、外気温度（低温側温度）が夏日のような場合、人の体表面温度と外気温度との温度差が小さく、熱電発電デバイスにて生じる電圧が低いため、図 2(a)に示すように、外部回路の駆動点に届かない。そこで本研究では、はじめに熱電素子の形状を修正することにより、電圧向上を図った。現行の K-TEG に実装している熱電素子の寸法は、長さが 4 mm、幅が 3 mm、厚みが 1 mm であるのに対して、素子体積を一定とする制約を設け、 $6 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ と $8 \times 1.5 \times 1 \text{ mm}^3$ の熱電素子を切り出し、1 対の K-TEG を作製した。つまり、合計で 3 種類の K-TEG を用意した。性能試験の結果は図 2(b)に示す。このとき、高温熱源温度は 40°C 、低温熱源温度（外気温度）は 22°C であるため、実験環境の温度差は 18°C である。結果を見ると、熱電素子の長さが長くなるにつれて出力が低下しているが、これは熱電素子の断面積が狭小となり、長さが長くなったためである。ただ、出力に関しては、元より十分であったため考慮する優先順位は低い。本研究で重要な性能は電圧であり、素子長さが 4 mm の場合は 3.0 mV、素子長さが 6 mm の場合は 3.4 mV、素子長さが 8 mm の場合は 3.8 mV であった。本提案研究では、K-TEG を人の首や手首に装着することを考えているため、デバイス体

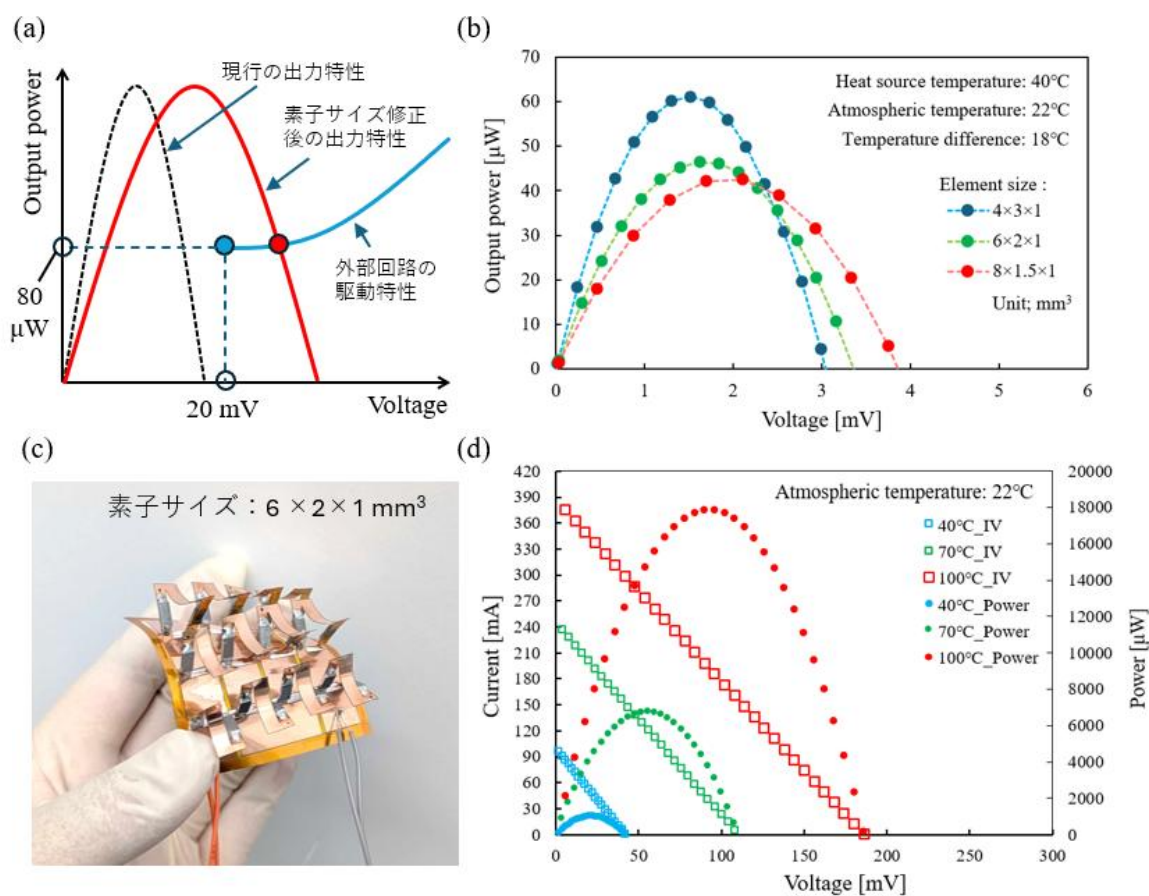


図 2 K-TEG の電圧と外部回路駆動との関係。(a) 素子サイズ修正前後における外部回路駆動との関係。(b) 各熱電素子サイズにおける電圧の変化。(c) サイズ $6 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ の熱電素子を 12 対実装した K-TEG の外観。(d) 12 対の熱電素子を実装したアレイ状 K-TEG の出力特性。

積が小さく現状の熱電発電デバイスよりも高電圧を実現可能であることが好ましい。このため、素子サイズを $6 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ とした。さらに、アレイ化した際の対数を検討する。素子サイズが $6 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ の場合における開放端電圧が 1 対で 3.4 mV であること、および使用する外部回路の最低電圧が 20 mV である (図 2(a)を参照) ことを考量すると熱電素子数は 12 対が好ましいと考えた。12 対の熱電素子をアレイ状に配置した K-TEG の電圧は、それぞれ 36.0 mV(素子長さ 4 mm)、40.8 mV(素子長さ 6 mm)、45.6 mV(素子長さ 8 mm)と計算できる。素子サイズ $6 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ の熱電素子を実装して作製したアレイ状 K-TEG (12 対) の外観を図 2(c)に示す。また、その出力特性を図 2(d)に示す。最大出力は $999.8 \mu\text{W}$ 、開放端電圧は 42.7 mV であったため、外部回路の駆動には十分である。

4. 熱流束の計測

図 3(a)のように、熱流センサーを介して、人の腕にアレイ状 K-TEG を貼付した。本実験で使用した熱流センサーには熱電対が具備されており、熱流束と温度を同時に計測可能である。K-TEG と外部回路を接続しない場合、つまり K-TEG と無線送信回路やセンサーなどを接続しない場合における熱流束データと温度データは図 3(b)のようになった。計測の初期において、熱流束が上昇と減少を繰り返しているが、これは腕の温度だけでなく、K-TEG の下面・熱電素子表面・放熱側の温度も時間とともに変化するためと考えられる。例えば、腕から熱が流れて K-TEG 全体が温まると、腕と K-TEG の温度差が小さくなるため熱流束は減少する。その一方で、外気との温度差により K-TEG が少し冷えると、温度差が大きくな

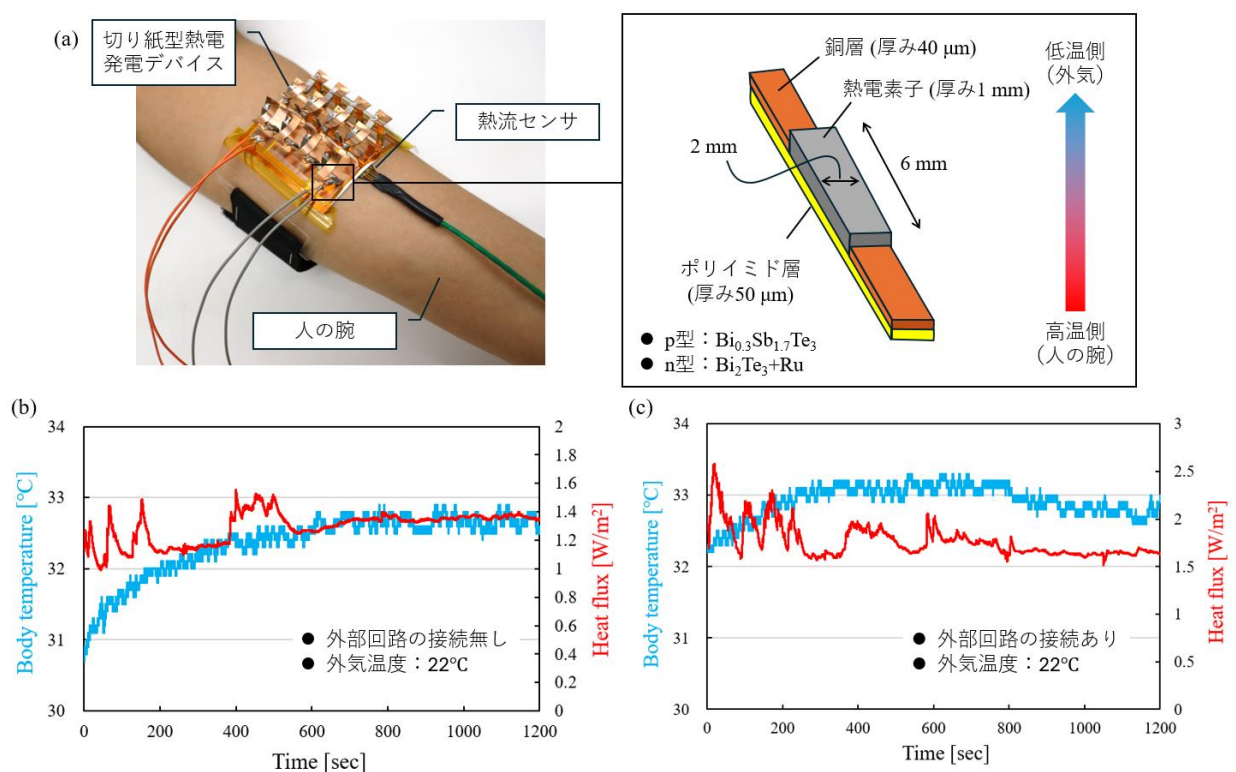


図 3 実験セットアップと熱流特性。(a) K-TEG を熱流センサとともに腕に設置した際の様子。(b) 外部回路を接続していない場合における熱流変化と体温変化。(c) 外部回路を接続した場合における熱流変化と体温変化。

り、熱流束は増加に転じる。これらの繰り返しが計測の初期において見られたということになる。温度については、20分経過までに温度が低下する傾向は見え、冷却できているとは言えない。

K-TEG と外部抵抗を接続する場合、つまり K-TEG と無線送信回路やセンサーなどを接続する場合における熱流束データと温度データは図 3(c)のようになった。計測の初期において熱流束が上昇と減少を繰り返す理由については、上記と同様の考察である。温度については、およそ 10 分経過後から温度が低下傾向に転じており、人の体表面を冷却できていると言える。これは、外部回路の接続の有無による最も大きな差である。K-TEG と外部回路とを接続した場合に、人の体温が低下に転じた原因として「無線送信回路が発電した電力を消費することで、熱電発電デバイスがより多くの熱を人体から吸熱する状態になった」と考えられる。具体的な説明は以下の通りである。本実験で使用した K-TEG では、人体側が高温側であり、外気側が低温側としてなっており、人体側から熱が流れることで発電できる。発電された電力を使わない（開放状態）場合、電流 $I=0$ であるためゼーベック効果による電圧は発生しても電流は流れない。その一方で、無線送信回路を接続すると $I>0$ となり電流が流れる。このとき熱電素子内部では、 $Q=STI-P^2R/2+K\Delta T$ で表される熱流量 Q が生じる。 S はゼーベック係数、 K は熱コンダクタンスである。右辺第一項はゼーベック（ペルチェ）効果による熱量を、第二項はジュール熱による熱量を、第三項は熱伝導による熱量を表している。このうち、今回の現象に大きく関与している項は STI のゼーベック（ペルチェ）効果による項である。すなわち、熱電発電時に電流が流れると熱電素子自身が熱を運ぶ能力を持つため、開放状態よりも人体から熱を引き出し易くなった。

以上の実験結果および考察より、人の体温ほどの低い熱源であっても、発電可能でありながら冷却することのできる新規デバイスの実現可能性を示すことができたと言える。

5. まとめ

本研究では、切り紙型熱電発電デバイス（K-TEG）の冷却に関する基礎特性の解明を目的として、熱電素子形状の最適化と人体装着時の熱流束と体温計測を行った。まず、熱電素子の体積を一定としたまま寸法を変更し、発電性能を評価した。その結果、素子長さの増加に伴い、出力電力は減少するものの電圧は向上することを把握した。外部回路の駆動に必要な電圧とデバイス体積とのバランスを考慮して素子長さ 6 mm を採用した。さらに、人体に装着した K-TEG の熱流束と温度を計測したところ、外部回路を接続しない場合には温度低下が見られなかった一方で、無線送信回路を接続した場合には体表面温度の低下が確認された。これは発電によって電流が流れることで熱輸送が促進され、人体からの吸熱量が増加したためと考えられる。以上より、K-TEG の発電性能と冷却性能の関係に関する重要な基礎的知見を得た。今回の研究を一文でまとめると、「人の体表面を冷却しながらも、発電して、必要なデータを無線送信可能である」ことがわかった。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- [1]. M. Haras, T. Skotnicki, "Thermoelectricity for IoT- A review," *Nano Energy*, 54(2018), 461-476.
- [2]. R. He, G. Schierning and K. Nielsch, "Thermoelectric Devices: A Review of Devices, Architectures, and Contact Optimization," *Adv. Mater. Technol.*, 3(2018), 1700256.
- [3]. Shi. Y., Stretchable thermoelectric generator for wearable power source and temperature detection applications, *Energy Conversion and Management* 253 (2022) 115167

- [4]. K. Chen, Y. Yan, X. Sun, X. Li, D. Ma, Y. Li, S. Li, W. Zhang and Y. Deng, “Mechanical-Thermal Co-Design of Flexible Thermoelectric Devices with Solid-Liquid Electrodes for Enhanced Stretchability and Power Generation,” *Adv. Energy Mater.* (2025), e03184.
- [5]. J. W. Park, C.S. Kim, H. Choi, Y. J. Kim, G. S. Lee, and B. J. Cho, “A flexible micro-thermoelectric generator sticker with trapezoidal-shaped legs for large temperature gradient and high-power density.” *Adv. Mater. Technol.* 5(2020), 2000486.