

熱電性能は熱電材料だけでは決まらない —電極や熱の流れまで含めた新しい設計理論を開発—

1 ポイント

- 熱電材料だけでなく、電極や熱の逃げ方(熱リーク)まで含めて熱電特性を統一的に記述できる新しい理論的枠組みを開発しました。
- 熱と電気が時間とともにどのように絡み合うのかを明らかにし、時間応答に共通して成り立つ普遍的な法則(スケーリング則)を発見しました。
- 材料・電極・測定系を一体として最適化する新しい設計指針となり、高性能な熱電デバイスや高精度な性能評価への応用が期待されます。
- 本研究成果は Journal of Applied Physics に掲載され、編集部が特に優れた論文として選ぶ Featured Article に選出されました。

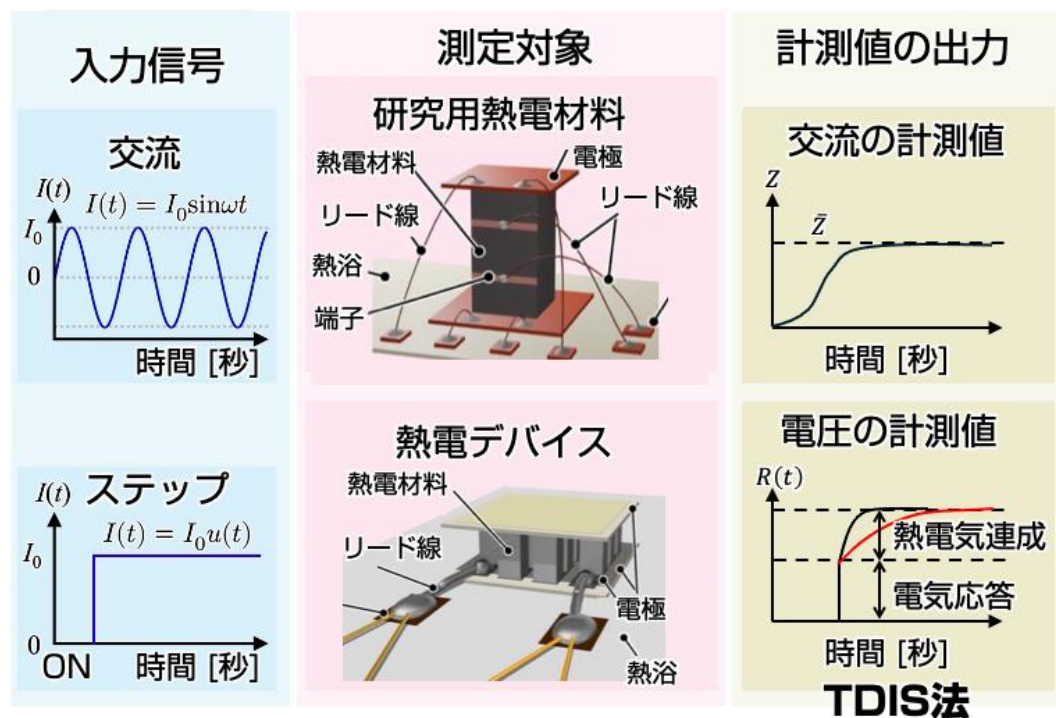


図1 時間領域インピーダンス分光法(TDIS)による評価手法の概念図。熱電デバイスは熱電材料のみならず、電極、バインダー、絶縁プレートなど様々な部材で構成されている。本研究は、熱と電気の連成に着目した TDIS による立ち上がり時間が熱電デバイスの様々な部材に依存することを明らかにし、その挙動から新しい設計理論を提案した。

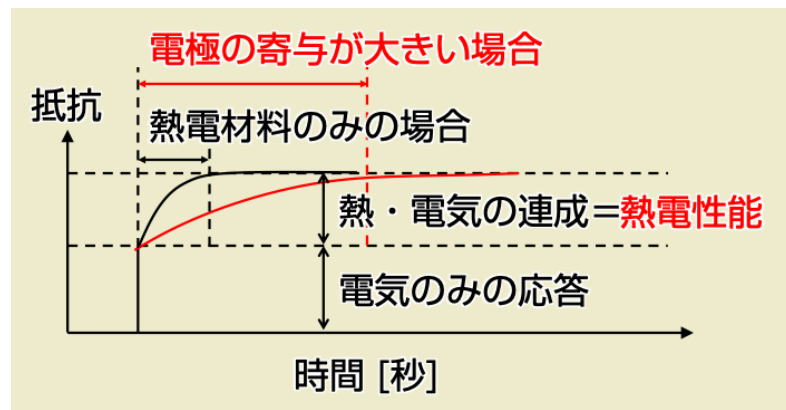


図2 本研究では TDIS による立ち上がり時間の関数を理論的に解析し、電極や熱の逃げなどが存在する場合の熱電デバイスの性能や設計方針を解析する方法を提案した。

2 概要

熱電材料は、これまで利用されずに捨てられていた熱を電気へ直接変換できることから、省エネルギー技術として期待されています。しかし、熱電材料の性能は材料そのものだけで決まるわけではありません。電極の材質や構造、周囲への熱の逃げ方（熱リーク）も性能に大きな影響を与えます。

これまでの研究では、温度や電氣的な状態が十分に安定した後に求められる無次元性能指数 (zT) の評価が中心であり、熱電現象が時間とともに形成される過程や、材料・電極・熱リークがそれぞれどのような役割を果たしているのかは十分に理解されていませんでした。熱電材料には、温度差から電気を生み出す働きだけでなく、逆に電流を流すことで熱を一方から他方へ運ぶ働き（ペルチエ効果）もあります。本研究では、この性質を利用する時間領域インピーダンス分光法 (TDIS) に着目しました。TDIS では、熱電材料に一定の電流を急に流し始め、その後、電気抵抗が安定するまでの時間変化を測定します。

埼玉大学大学院理工学研究科 長谷川靖洋准教授の研究グループは、本研究において、時間領域インピーダンス分光法 (TDIS) の時間応答 (図1) を理論的に解析し、熱電材料・電極・熱リークを統一的に扱える新しい理論的枠組みを構築しました。さらに、時間応答が共通の法則（スケーリング則）に従うことを明らかにし、熱電システム全体を理解・設計するための理論的基盤を示しました。

この成果は、高性能な熱電材料の探索だけでなく、電極構造や熱設計を含めた熱電デバイス全体の最適化や、高精度な性能評価への応用が期待されます。本論文は 2026 年 7 月 30 日に Journal of Applied Physics に掲載され、編集部が特に優れた論文として選ぶ Featured Article に選出されました。

3 研究の背景

熱電材料は、熱を直接電気へ変えることができるため、工場や自動車などから排出される未利用熱を有効利用する技術として期待されています。熱電材料に電流を流すと、電流だけでなく熱も同時に運ばれます。そのため、材料内部の温度分布が時間とともに変化し、その温度変化が再び電気の流れに影響を与えます。このような「電気と熱が互いに影響し合う現象」が熱電現象の本質です。さらに、実際の熱電デバイスでは、熱電材料だけでなく、電極やリード線、周囲への熱の逃げ方も時間応答や発電性能に大きく影響します。しかし、これまではそれらを個別に扱うことが多く、熱電システム全体を統一的に理解する理論はありませんでした。本研究では、時間領域インピーダンス分光法 (TDIS) を用いて時間応答を解析し、材料・電極・熱リークを扱える新しい理論的枠組みを構築しました。

4 研究内容

本研究では、TDIS で観測される時間応答を詳細に解析し、熱電現象が時間とともに形成される仕組みを明らかにしました。TDIS では、熱電材料へ電流を流した直後から、電気抵抗が安定するまでの時間変化を測定します(図2)。電流を流した直後には、まず電氣的な応答が現れます。その後、電流によって熱が運ばれ、材料内部の温度分布が変化するとつれて、電気抵抗も徐々に変化します。しかし、この時間変化には、熱電材料だけでなく、電極、リード線、さらには周囲への熱の逃げ方など、多くの要因が重なって現れるため、それぞれがどのような役割を果たしているのかを理解することは困難でした。

本研究では、これらの要因を理論的に分離して解析し、それぞれが時間応答へ与える影響を定量的に明らかにしました。その結果、これまで一つの複雑な信号としてしか捉えられていなかった時間応答を、「熱電材料」「電極」「熱リーク」など各要素の寄与として理解できるようになりました。さらに、この理論から、時間応答は異なる材料や測定条件でも共通した法則(スケーリング則)に従うことを見いだしました。これは、熱電現象の時間発展を統一的に記述できることを示しています。

本研究の最大の特徴は、熱電材料だけでなく、電極や熱リークを含めた熱電システム全体を設計できる点にあります。従来は、材料性能と測定系の影響を切り分けて考えることが困難でしたが、本理論により、それぞれの寄与を定量的に評価し、目的に応じた電極構造や熱設計を事前に予測できるようになります。今後は、高性能な熱電材料の開発だけでなく、熱電デバイス全体の最適設計や、より信頼性の高い性能評価法の確立につながることを期待されます。

5 今後の展開

本研究で開発した理論により、熱電材料だけでなく、電極や熱の逃げ方を含めた熱電システム全体を設計できるようになります。

これまでは、測定条件や電極の構造は、経験や試行錯誤を重ねながら決めることが少なくありませんでした。本研究の理論を用いることで、どのような電極構造や測定条件にすれば、目的とする熱電現象を最も分かりやすく観測できるかを、あらかじめ予測できるようになります。

さらに、この理論は、熱電材料そのものの性能だけでなく、電極や周囲への熱の逃げ方が熱電特性にどのような影響を与えるかを明らかにできます。そのため、熱電材料の性能評価だけでなく、高効率な熱電デバイスの設計や、新しい測定技術の開発にも役立つことが期待されます。

本研究は、熱電材料だけを見る従来の考え方から一歩進めて、材料・電極・測定系を一つの「熱電システム」として設計する新しい研究の枠組みを示すものです。今後、未利用熱を電気として有効活用する技術の発展につながることを期待されます。さらに、ウェアラブル冷却機器や電子機器の熱マネジメントなど、高速な応答が求められる熱電デバイスの設計への応用も期待されます。

6 論文情報

掲載誌	Journal of Applied Physics
論文名	Scaling dynamics of electrothermal coupling in thermoelectric materials probed by time-domain impedance spectroscopy
著者名	Yasuhiro Hasegawa
DOI	10.1063/5.0340443
URL	https://doi.org/10.1063/5.0340443

7 研究支援

本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 ALCA-Next(先端のカーボンニュートラル技術開発)(課題番号 JPMJAN24B3)、日本学術振興会(JSPS)科研費(JP23K23073, JP23K17828)、三豊科学技術振興協会の支援を受けて行われました。

8 用語解説

熱電材料(Thermoelectric materials): 熱を電気に、また電気を熱に直接変換できる材料です。工場や自動車などから排出される未利用熱を電力として回収できることから、省エネルギー技術への応用が期待されています。

電気と熱の相互作用: 熱電材料では、電流を流すと電流とともにペルチェ熱が輸送され、材料内の温度分布が変化します。この温度変化は電気的な応答にも影響を与えるため、電気と熱が互いに影響し合いながら時間とともに変化します。

時間領域インピーダンス分光法(TDIS: Time-Domain Impedance Spectroscopy): 熱電材料にステップ状の電流を印加し、そのときの電気抵抗の時間変化を解析する測定・解析手法です。本研究では、電流とともに輸送されるペルチェ熱を時間的に精密に制御できることを利用して、電気・熱連成の動特性を理論的に解析しました。

無次元性能指数(zT): 熱電材料の性能を表す代表的な指標です。ゼーベック係数、電気抵抗率、熱伝導率、絶対温度から決まり、一般に値が大きいほど熱電変換性能が高いとされます。