

研究成果報告書

所属機関
東京大学

職名 氏名
助教 山田 林介

研究テーマ

電子トポロジを活用した高効率熱電変換材料の探索

研究報告

1. 研究の背景と目的

環境問題が深刻化する現代においては、持続可能な社会を実現するために未利用のエネルギーの活用に向けたハードウェア技術の構築が喫緊の課題です。例えば、工場の操業や自動車の走行で生じる200℃以下の低温排熱はエネルギー廃熱量収支の7割以上を占めるにもかかわらず、その多くが回収されずに未活用となっています。本研究課題では、環境技術分野における基礎的な技術として、熱エネルギーを電気エネルギーに変換する熱電変換技術に着目しました。

未利用エネルギーの活用に向けて近年では、熱電変換デバイスの設計を飛躍的に向上させる可能性を秘めたネルンスト効果と呼ばれる熱電応答が注目されています。従来の熱電変換技術では起電力が熱流と同じ方向に発生するゼーベック効果が用いられてきたが、起電力が熱流と垂直方向に生じるネルンスト効果を用いると、シンプルなデバイス設計が可能となります[図1]。その結果、熱電モジュールの小型化や製造工程の簡略化ができると期待されています。しかしながら、ネルンスト効果はゼーベック効果に比べると起電力が小さく、ネルンスト効果の巨大化、つまり熱流と垂直方向に高い熱電変換効率を示す物質の開拓が熱電技術の応用に向けた課題となっています。

本研究課題では、本研究課題では、創発磁場が重要な役割を果たすトポロジカル半金属と呼ばれる物質群に着目し、量子機能材料の開拓に向けて、巨大熱電ネルンスト効果の探索を行いました。特に、複雑な磁気構造を有するトポロジカル半金属に着目し、電子バンド構造と磁気構造の相互作用により発現する、新規な熱電ネルンスト効果を探索しました。

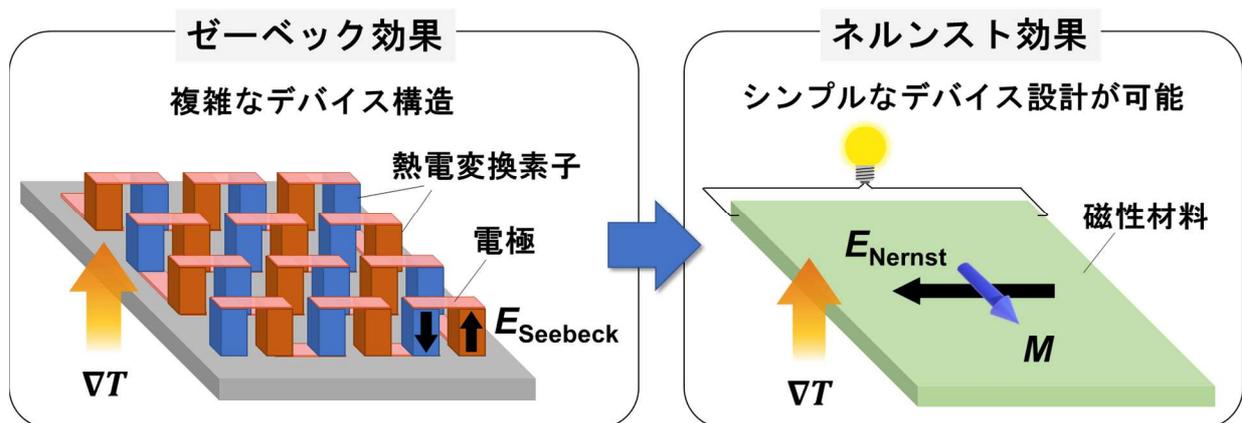


図1：ネルンスト効果を用いた高効率熱電変換デバイス

2. 研究成果および考察

磁性トポロジカル半金属における新規な熱電効果探索に向けて、下記の研究課題に取り組みました。

- ① 新規なトポロジカル半金属RAISi (R =希土類)の単結晶試料育成
- ② 熱電測定による巨大熱電ネルンスト効果の探索

申請者はアルミニウムフラックス法を用いることで、 $R=La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd$ の6種類の希土類について、 $3 \times 3 \times 0.5$ mm程度の大きさの板状のRAISi単結晶試料の合成に成功しました。これらの試料について、X線回折法を用いたキャラクタライズおよび電気抵抗測定を行いました。特に、NdAISiについて

は低温において高移動度かつ量子振動を示す高品質試料が得られたため、それらについて熱電効果測定を行いました。これらの純良な単結晶試料を得るためには、希土類をアーク炉においてプリメルトすることが重要な要素の一つであり、貴財団のご支援により本研究が実現可能となったことを感謝申し上げます。

熱電測定の結果、磁気転移温度(7 K)直上の15 K付近において熱電ネルンスト効果が急激に増大することが明らかになりました。さらに、熱電ネルンスト効果の磁場依存性を説明するための2キャリアを用いたモデルを初めて構築し、その解析を行いました。キャリアが1種類の場合のモデルは良く知られているが、2種類以上のキャリアについてのネルンスト効果の解析手法を確立した点において、本研究の新規性があります。この解析により、増大したネルンスト効果がNdAlSiの磁気構造および電子構造と密接に関連していることを明らかにしました。すなわち、NdAlSiのフェリ磁性構造に伴う磁気的な周期性により、NdAlSiの電子構造が部分的に変調されることで熱電ネルンスト効果が増大することが分かりました。本研究成果を論文にまとめ、現在、Physical Review X誌へと投稿中です。

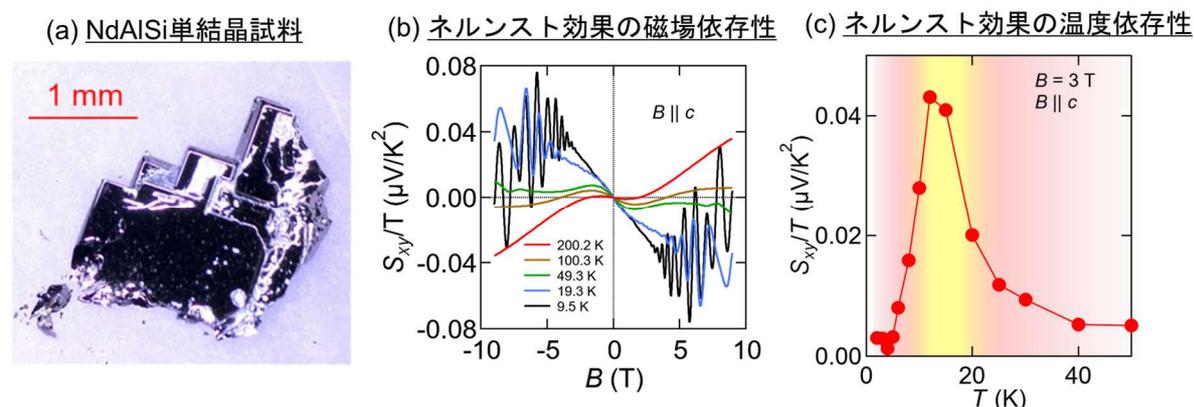


図2 (a) フラックス法により合成した単結晶NdAlSi試料。(b) NdAlSiのネルンスト効果の磁場依存性。(c) 磁気転移温度(7 K)直上におけるネルンスト効果の増大。

3. 将来展望

本研究では新たな熱電効果発現のメカニズムを明らかにすることができましたが、観測された温度が低く、シグナルもそれほど大きくないという問題点があります。この熱電効果は、より高い磁気転移温度を持つ物質や、より大きなエネルギースケールを有するような電荷の疎密が空間的に変調する電荷密度波転移を示す物質においても発現する可能性があります。これまでの熱電効果は希釈キャリア半導体を中心に探索が行われてきましたが、高温で磁気転移や電荷密度波転移を示す物質を含めた広い範囲で更なる物質開拓を進めていくことが重要となります。

4. 研究発表

投稿論文：

Rinsuke Yamada, Takuya Nomoto, Atsushi Miyake, Toshihiro Terakawa, Akiko Kikkawa, Ryotaro Arita, Masashi Tokunaga, Yasujiro Taguchi, Yoshinori Tokura, Max Hirschberger, “Nernst effect of high-mobility Weyl electrons in NdAlSi enhanced by a Fermi surface nesting instability”, Physical Review X, under Review

口頭発表：

- 1) **山田林介**, 野本拓也, 有田亮太郎, 吉川明子, 田口康二郎, 三宅厚志, 徳永将司, 十倉好紀, Max Hirschberger, 「ワイル半金属 NdAlSi におけるフェルミ面のネスティングに起因したネルンスト効果の増大」、日本物理学会 第 78 回年次大会、東北大学 (仙台)、2023 年 9 月 16 日
- 2) R. Yamada, T. Nomoto, R. Arita, A. Kikkawa, Y. Taguchi, A. Miyake, M. Tokunaga, Y. Tokura, M. Hirschberger, “Nernst effect of high-mobility Weyl electrons in NdAlSi enhanced by a Fermi surface nesting instability”, The IEEE Around-the-Clock Around-the-Globe Magnetism Conference, online, Sep. 27th 2023