

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団  
奨励研究助成 成果報告書

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団  
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2026 年 8 月 20 日

氏名 山田 林介  
所属 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻  
職位 助教

## 1. 申請研究の題目

強相関物質における電荷秩序揺らぎを活用した熱電ネルンスト効果の開拓

## 2. 研究の目的

熱を電気へ変換する熱電効果は、工場や輸送機器などから生じる未利用熱を回収する技術として重要である。一般的なゼーベック効果では、温度差と同じ方向に電圧が生じる。一方、ネルンスト効果では、温度差に対して横方向に電圧が生じるため、電極を面内に配置でき、簡潔なデバイス構造へつながる可能性がある。しかし、実用化にはネルンスト応答の大きな物質を見出し、その増大機構を理解することが不可欠である。

申請者は先行研究において、磁気秩序の揺らぎと電子状態の形状が熱電ネルンスト効果を大きく変化させることを示してきた。本研究ではこの考え方がどの程度普遍性を有するのかを検証するため、他の磁性体や電荷秩序を示す強相関物質を対象として研究を行った。磁気秩序や電荷秩序が形成される前後で電子の散乱時間がどのように変わり、それが横方向の熱電応答へどの程度反映されるかを明らかにすることが目的である。

## 3. 研究の内容

磁気秩序や電荷秩序に由来するネルンスト応答を評価するには、転移温度近傍（転移前後）における磁気・電荷秩序およびその揺らぎによる効果と、キャリア密度や電子状態の形状による効果を分けて調べる必要がある。そこで研究期間中は、電荷秩序による効果を探索するための物質候補の検討と、比較基準となる物質を用いて、ネルンスト応答を支配する要因を系統的に切り分ける手法の整備を進めた。

比較基準にはゼロギャップ半導体  $\text{GdPtBi}$  を用いた。この物質では、電子バンドとホールバンドが接するエネルギーの近くに特徴的なフェルミ面が形成される。 $\text{Pt}$  サイトの一部を  $\text{Au}$  で置換してフェルミ準位を調整し、電子状態の異なる複数試料について、横方向の熱電応答であるネルンスト信号の温度・磁場依存性を測定した。得られた結果を電気抵抗およびキャリア密度の測定結果と比較することで、キャリア密度と散乱時間が観測信号へ与える影響を評価した。

$\text{GdPtBi}$  のネルンスト効果は、試料のフェルミ準位に応じて大きく変化した。低磁場領域におけるネルンスト効果の傾きを各試料について抽出し、その温度依存性をさらに解析した。その結果、キャリア密度に由来する効果を2キャリアモデルにより差し引く方法を見出し、本研究が着目する散乱時間のエネルギー依存性に由来するネルンスト成分を定量的に算出することができた。この結果は、現在論文原稿にまとめている段階である。

この検討と並行して、電荷密度波転移を示す物質について、キャリア密度の寄与を差し引くことが可能かという視点に立ち戻り、候補物質の整理を行った。なるべく単純なバンド構造を持ち、2 キャリアモデルで記述可能な遷移金属ダイカルコゲナイド等が今後の研究の有力な候補として考えられる。

#### 4. 研究の成果と結論、今後の課題

GdPtBi の比較測定では、ネルンスト効果がフェルミ準位に強く依存することが分かった。特に、フェルミ準位がバンド接触点に近い試料で大きなネルンスト応答が現れた。これは、電荷秩序の揺らぎを議論する場合にも、電子状態の形状やキャリア密度を独立に評価しなければ、散乱時間の変調による効果を正しく取り出せないことを示している。

本研究の成果は、電荷秩序系におけるネルンスト効果を検証するための比較軸を明確にした点にある。すなわち、熱電応答の磁場・温度依存性を詳細に測定し、電子状態の違いを押さえた上で、転移近傍に現れる追加成分を抽出するための解析方針を整理した。一方、電荷密度波揺らぎに起因するネルンスト増大を特定の物質で直接実証する段階には至っておらず、これは今後の主要課題である。

今後は、候補物質について電荷秩序転移をまたぐ温度領域で測定を行い、試料間のばらつきと転移温度の関係を確認する。さらに、磁場依存性と温度依存性を組み合わせ、通常の電子状態に由来する成分と電荷秩序揺らぎに由来する成分を分離する。最終的には、どのようなフェルミ面形状と散乱過程の組合せが大きなネルンスト応答を生むかを、物質横断的な設計指針としてまとめる。

#### 5. 成果の価値

##### 5-1. 学術的価値

ネルンスト効果は、電子状態、キャリア散乱、磁氣的・電荷的な秩序の影響を同時に受けるため、大きな信号が得られても原因を一つに定めることが難しい。本研究では、組成によってフェルミ準位を系統的に変えた比較測定を基準とし、電子状態の寄与と秩序揺らぎの寄与を段階的に切り分けるための評価枠組みを検討した。これは、電荷秩序の揺らぎを熱電応答に利用するという仮説を、定量的かつ反証可能な形で検証するための基盤となる。また、磁気揺らぎで見いだされた機構を電荷秩序へ拡張できるかを問うことで、強相関物質における横熱電応答の一般原理の構築にもつながる。

##### 5-2. 社会的価値

ネルンスト効果を利用した熱電変換では、熱流と電圧を直交させられるため、熱源の形状に合わせて電極を配置しやすく、従来方式とは異なる柔軟な素子設計が期待される。磁気秩序や電荷秩序に伴う散乱時間の変化を利用できれば、希薄キャリア半導体だけでなく、より広い強相関材料群を熱電材料候補として検討できる可能性がある。現段階は基礎原理の検証段階であるが、将来的には 200℃未満の低温排熱を含む未利用熱の回収に向け、候補材料の探索範囲を広げるための基盤となり得る。

#### 6. 研究成果

- ・研究論文（原著）

以下はいずれも本助成の支援を謝辞に記載した関連成果である。

○ R. Nakano, R. Yamada, J. Bouaziz, M. Colling, M. Gen, K. Shoriki, Y. Okamura, A. Kikkawa, R. Misawa, P. R. Baral, S. Kitou, Y. Nakamura, H. Ohsumi, Y. Tanaka, H. Sagayama, H. Nakao, Y. Ishihara, K. Gautam, O. Fabelo, Y. Taguchi, Y. Takahashi, M. Tokunaga, T. Arima, Y. Tokura, R. Arita, J. Masell, S. Hayami, and M. Hirschberger, “Perfectly harmonic spin cycloid and multi-Q textures in the Weyl semimetal GdAlSi,” Nature Communications 17, 3056 (2026).  
R. Yamada, D. Kurebayashi, Y. Fujishiro, S. Okumura, D. Nakamura, F. S. Yasin, T. Nakajima, T. Yokouchi, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Tokura, O. A. Tretiakov, and M. Hirschberger, “Emergent electric field induced by dissipative sliding dynamics of domain walls in a Weyl magnet,” Nature Physics 22, 239–244 (2026).  
R. Yamada, M. T. Birch, P. R. Baral, S. Okumura, R. Nakano, S. Gao, M. Ezawa, T. Nomoto, J. Masell, Y. Ishihara, K. K. Kolincio, I. Belopolski, H. Sagayama, H. Nakao, K. Ohishi, T. Ohhara, R. Kiyonagi, T. Nakajima, Y. Tokura, T. Arima, Y. Motome, M. M. Hirschmann, and M. Hirschberger, “A metallic p-wave magnet with commensurate spin helix,” Nature 646, 837–842 (2025).

・国際会議発表、特許、受賞、マスコミ報道

該当なし

以上