

# 量子効果で 10 倍以上の磁気熱電効果を室温で実現

～新しい熱電変換、環境発電への応用へ期待～

量子物質研究グループ 中辻研究室 助教 酒井 明人、教授 中辻 知

## (1) はじめに

近年、物質中のトポロジーが物性に重要な役割を果たすことが理解され始めています。トポロジーには  $KT$  転移やスカーミオンに代表される実空間(磁気構造など)のトポロジー、量子ホール系やトポロジカル絶縁体などに代表される波数空間(電子構造)のトポロジーなどがあります。これらはトポロジーを由来とした特異な物性を示し、磁気メモリを始め次世代デバイスにつながる可能性を秘めています。特に、磁気秩序により縮退の溶けたディラックコーン(=ワイル点)を持つワイル磁性体は、ワイル点周りの巨大なベリー曲率による巨大な非対角応答(異常ホール効果、異常ネルンスト効果、カー効果等)を示し、大変注目を集めています[1-4]。その中でも、異常ネルンスト効果は熱流に垂直方向に発電するというこれまで研究されてきた(ゼーベック効果に基づく)熱電変換にはなかった特徴を持つため、薄膜化や大面積化が容易であり新たな熱電デバイスにつながる可能性があります[5]。以下本稿では立方晶ホイスラー化合物  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  において発見された巨大な異常ネルンスト効果についてご紹介します[6]。

## (2) 研究の背景

工場や自動車から出る熱を始め、空調や給湯など家庭から出る熱、太陽や地熱など自然界の熱に至るまで、私たちの周りには様々な熱が利用されずに存在しています。これらの熱を電気に変換して利用することは省エネ社会の実現のため、あるいはIoT社会の自立電源確保のため非常に重要であり、世界中で研究が行われています。その中でも熱電変換素子を用いた熱発電と呼ばれる方法は、タービンなど大型の装置を用いる方法に比べ小型で静音、メンテナンスフリーなどの利点を持ち、様々な潜在的用途が考えられています。しかし、既存の非磁性半導体を用いる熱電変換素子は発電方向が温度差の方向と同じであるため(ゼーベック効果)、立体的で複雑な構造になり(図 1a, c)、大型化や高集積化に伴う製造コストに問題を抱えています。一方、磁性体の異常ネルンスト効果は温度差の方向に垂直に発電するため、立体構造は不要で、テープ化などにより熱源に沿った大面積の発電が容易です(図 1b, d)。しかしこ

れまで知られている異常ネルンスト効果は非常に小さく、熱電応用からは非常に遠いと考えられてきました。

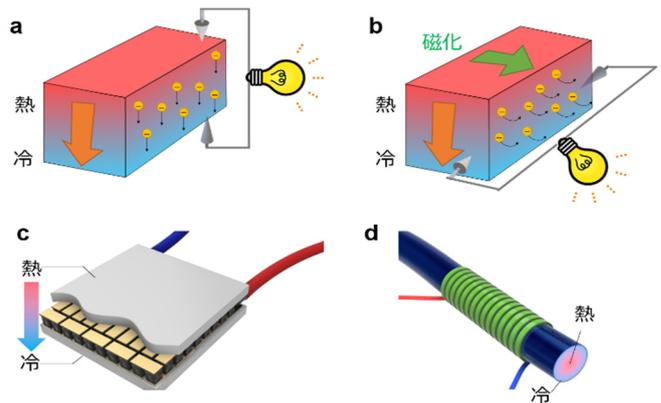


図 1. 従来の熱電変換技術(ゼーベック効果, a, c)と磁性体を用いた新技術(異常ネルンスト効果, b, d)の違い

## (3) 研究内容と成果

本研究では強磁性金属間化合物  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ (図 2a)が、過去に知られている最高値より 10 倍以上大きな異常ネルンスト効果を室温で示すことを明らかにしました(図 2b)。この値は室温以上の高温ではさらに上昇します(図 2c)。広い温度範囲をカバーするため、様々な温度の熱源で発電が可能です。また製造コストが安く、無毒な材料できており、耐久性、耐熱性にも優れているため様々な場所で利用可能です。

本研究で発見された巨大な異常ネルンスト効果はワイル点と呼ばれる電子構造のトポロジーと密接に関係しています。第一原理計算によって図 3a のようなワイル点がフェルミ面近くにあることがわかりました。実験的にも、ワイル点が存在する有力な証拠となるカイラル異常と呼ばれる現象が観測されました。このようなワイル点が存在すると一般に異常ホール効果や異常ネルンスト効果が大きくなるということが知られていますが、今回の結果はそれだけでは説明できないほど大きな増大でした。

計算を行うと、異常ネルンスト効果を大きくするには、ワイル点を作っているバンドの状態密度も同時に大きくす



また本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」研究領域(研究総括：谷口研二、研究副総括：秋永広幸)における研究課題「トポロジカルな電子構造を利用した革新的エネルギーハーヴェスティングの基盤技術創製」課題番号 JPMJCR15Q5(研究代表者：中辻知)並びに文部科学省 科学研究費補助金新学術領域(研究領域提案型)「J- Physics：多極子伝導系の物理」課題番号 15H05882(研究代表：播磨尚朝)における研究計画班「A01: 局在多極子と伝導電子の相関効果」課題番号 15H05883(研究代表者：中辻知)の一環として行われました。関係者各位に深く御礼申し上げます。

- [1] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, T. Higo, *Nature* **527**, 212–215 (2015).
- [2] K. Kuroda, T. Tomita et al., *Nature materials* **16**, 1090–1095 (2017).
- [3] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani and S. Nakatsuji, *Nature Physics* **13**, 1085–1090 (2017).
- [4] T. Higo, H. Man, D. B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O. M. J. van 't Erve, Y. P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M.-T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C. L. Chien, R. Arita, R. D. Shull, J. Orenstein and S. Nakatsuji, *Nature Photonics* **12**, 73–78 (2018).
- [5] Y. Sakuraba et al. *Appl. Phys. Express* **6**, 033003 (2013).
- [6] A. Sakai, Y. P. Mizuta, A. A. Nugroho, R. Sihombing, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, N. Takemori, R. Ishii, D. N.-Hamane, R. Arita, P. Goswami and S. Nakatsuji, *Nature Physics*, **14**, 1119–1124 (2018).

