



丸文研究奨励賞 受賞者

酒井 明人
東京大学 大学院理学系研究科 講師

トポロジカル磁性体における
室温巨大異常ネルンスト効果の発見
薄膜を用いた熱流センサー&熱電デバイスの発展に貢献

研究の背景

物質中の電子状態はバンド構造として表現され、金属、磁性、半導体、超伝導など様々な物性をよく説明する。近年、バンド構造のトポロジーに着目することにより「トポロジカル物質」と呼ばれる新たな物質群が出現した。その端緒は2次元電子系の量子ホール効果であり、バンド構造の特異点が波数空間の仮想磁場（ベリー曲率）の湧き出しや吸い込みとして働くことで、ホール効果を始めとする横方向の応答に寄与する[1,2]。

そのような横方向の応答の中でも、異常ネルンスト効果は温度差と磁化に垂直方向に起電力が発生する現象である。縦方向の熱電変換（ゼーベック効果）では温度差と平行に起電力が生じるためp型・n型の半導体を交互に並べた立体的なデバイス構造が必要であるのに対し(図1右)、異常ネルンスト効果では平面内に素子を展開した薄膜デバイスも容易である(図1左)。しかし、当時は異常ネルンスト効果の室温での

値はわずか $S_{xy} \sim 0.1 \mu\text{V}/\text{K}$ にとどまっていた。熱電応用を目指した研究はほとんどなかった。

研究の成果

そうした状況の中、我々は世界の競合グループに先駆けて新規トポロジカル物質の開発を行い、それらの物質において、従来の値より一桁以上大きい異常ネルンスト効果が室温で発現することを実験的に示した[2-5]。以下ではその中でも代表的な2つの物質について紹介する。

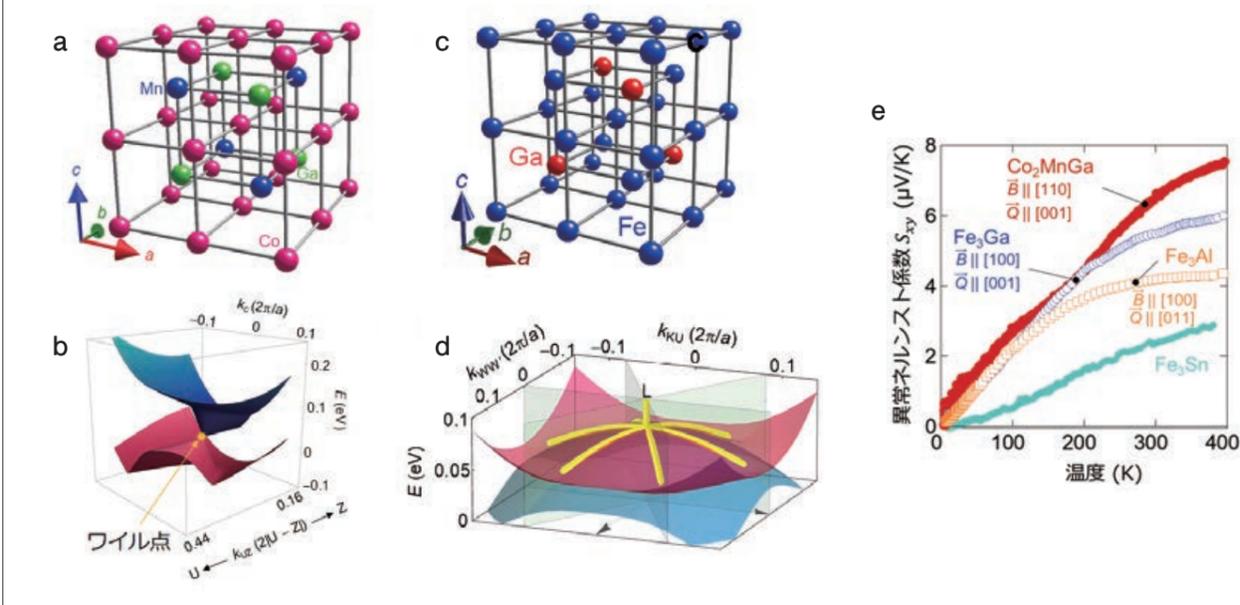
1. ワイル磁性体 Co_2MnGa における
巨大異常ネルンスト効果[3]

Co_2MnGa はキュリー温度694 Kの強磁性体であり、立方晶フルホイスラー合金として知られている(図2a)。ホイスラー合金はスピントロニクスに有用なハーフメタルの候補として古くから精力的に研究が行われていた物質群であるが、トポロジカル電子構造を持つとして近年再注目されている。

我々は Co_2MnGa の純良な単結晶を育成し、異常ネルンスト効果が室温で約 $6 \mu\text{V}/\text{K}$ 、400 Kでは約 $8 \mu\text{V}/\text{K}$ まで上昇することを明らかにした(図2e)。また異常ホール伝導率も室温で約 $1000 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ と非常に大きい。これらは第一原理計算と比較的よく合うことから、(不純物散乱などで生じているのではなく)電子構造由来の本質的な効果と考えられる。また第一原理計算から、図2bに示すワイル点がフェルミ面近くに存在することが明らかになった。実験的にも、ワイル点の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た。 Co_2MnGa におけるワイル点は傾いており、(傾いたワイルコーンがフェルミ面を形成する)タイプIIワイル点と、(ワイル点一点がフェルミ面を形成する)タイプIワイル点の量子臨界状態にあり、その結果異常ネルンスト効果が増大していることが明らかとなった。

本成果は、ワイル点に由来するベリー曲率によって、巨大な異常ネルンスト係数が室温で実現することを初めて実験的に示

図2 a, b ワイル磁性体 Co_2MnGa の結晶構造(a)とワイル点(b)。
c, d ノーダルウェブ磁性体 Fe_3Ga の結晶構造(c)とノーダルウェブ(d)。
e Co_2MnGa , Fe_3Ga , Fe_3Al , Fe_3Sn の異常ネルンスト係数の温度依存性[3-5]。



したものであり、その後の物質探索における重要な指針となった。また、ワイル磁性体の典型例として、光電子分光によるワイル点の直接観測、横ヴィーデマン・フランツ則の破れ、巨大スピンホール角の発見など様々な研究に発展した。さらに、異常ネルンスト効果を活用した革新的熱電デバイスの実用化への道を初めて拓いた点でも極めて意義深い。

2. ノーダルウェブ磁性体 Fe_3X ($\text{X}=\text{Ga}, \text{Al}$)
における巨大異常ネルンスト効果[4]

異常ネルンスト効果に基づく熱電変換をさらに発展させるためには、性能の向上に加え、使用する材料の改善も不可欠である。そこで我々は、地球上に豊富に存在し、加工性にも優れた鉄に着目し、新たな物質探索を進めた。この探索においては、理論グループによるハイスループット計算も活用し、効率的なアプローチを取った。その結果 Fe_3X ($\text{X}=\text{Ga}, \text{Al}$)が巨大異常ネルンスト効果を示すことを発見した(図2e)。第一原理計算との比較により、この巨大な異常ネルンスト効果は2つのバンドが線で接している「ノーダルライン構造」が高対称点で密集し、かつフラットバンドを形成していることに起因することが分かった

(図2d)。この新たなトポロジカルな電子構造は「ノーダルウェブ」と名付けられ、巨大ベリー曲率を物質中で実現するための新たな鍵として、学术界から大きな注目を集めている。

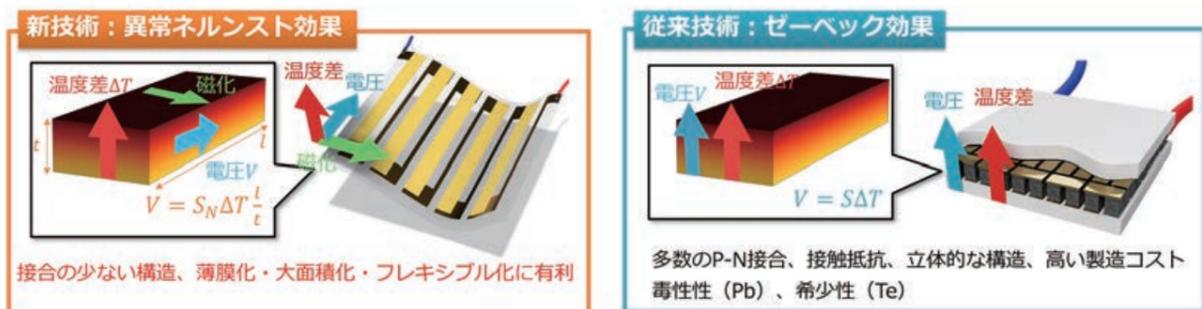
また、応用の観点においてもこの物質系は極めて有望である。安価かつ地球上に豊富に存在する材料で構成されていることに加え、加工性にも優れ、薄膜でも高い性能を維持する。これらの特長により、本発見を契機に、異常ネルンスト効果に基づく熱流センサーや環境発電デバイスの開発が一層加速した。

将来の展望

大量生産に適したroll-to-rollスパッタで作製されたフレキシブル熱流センサー[6]を

始め異常ネルンスト効果に基づく様々なデバイスが報告されており、その有効性が実証されつつある。一方、特に発電性能に関しては、まだ改善の余地がある。例えば、本研究で発見されたトポロジカル電子構造による異常ネルンスト効果の増強に加えて、マグノンなど外因的な機構も取り入れることで、さらなる増強が期待される。今後これらの研究開発がさらに発展し、エネルギー管理、ナノ・電子・化学産業、ヘルスケア・医療など多様な分野に波及するとともに、Society 5.0や省エネ・脱炭素社会を実現する革新的技術となることが期待される。

図1 異常ネルンスト効果を用いた熱電デバイスの特長



References (参考文献)

[1] D. Xiao, M.-C. Chang and Q. Niu Rev. Mod. Phys., 82, 1959 (2010).
[2] A. Sakai and S. Nakatsui, Sci. Technol. Adv. Mater. 26, 2554047 (2025).
[3] A. Sakai et al., Nature Physics 14, 1119 (2018).
[4] A. Sakai et al., Nature 581, 53 (2020).
[5] T. Chen et al., Science advances 8, eabk1480 (2022).
[6] H. Tanaka et al., Adv Mater. 35, 2303416 (2023).