

マルチフェロイクスにおける巨大なホール効果を発見 —磁性絶縁体における効率的な熱流制御に期待—

1. 発表者：

井手上 敏也（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教）
車地 崇（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 基礎科学特別研究員）
石渡 晋太郎（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 准教授／JST さきがけ研究者）
十倉 好紀（理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長／東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆磁性と誘電性が結合したマルチフェロイクス（注1）において過去最大の熱ホール効果（注2）が生じることを発見した。
- ◆マルチフェロイクス特有の強い格子・スピン結合に由来した新しい機構のホール効果であることが示唆される。
- ◆本研究成果が、マルチフェロイクスにおける新物性の開拓を促進させると同時に、磁性絶縁体における効率的な熱流制御技術の構築に期待。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の井手上敏也助教、理化学研究所創発物性科学研究センターの車地崇基礎科学特別研究員、東京大学大学院工学系研究科の石渡晋太郎准教授、十倉好紀教授（理化学研究所 創発物性科学研究センターセンター長兼任）らの研究グループは磁気秩序と強誘電秩序を合わせ持つマルチフェロイクス $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 、 $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ において巨大な熱ホール効果が生じることを発見した。

熱ホール効果は、縦方向に流した熱流が曲げられて横方向に温度勾配が生じる現象である。通常の金属では電荷を持つ電子が磁場下で電磁気学的な力を受けて曲げられることによってホール効果が生じるが、電荷を持った素励起が存在しない絶縁体中では熱流は通常直進し、ホール効果が起こることは極めて稀である。現在までに、格子振動の素励起（フォノン（注3））や磁性秩序相における磁気励起（マグノン（注4））の熱ホール効果が特殊な物質で報告されていたが、熱流の曲がる程度を表す熱ホール伝導度はいずれも非常に小さかった。本研究では、磁気秩序と強誘電秩序を合わせ持つマルチフェロイクス $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 、 $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ において熱ホール効果を観測し、熱ホール伝導度がこれまで報告されているものより一桁以上大きな巨大な値を示すことを明らかにした。従来のようにフォノンやマグノンといった個々の素励起がホール効果を起こしているのではなく、マルチフェロイクスに特有の強い格子・スピン結合に由来した新しい機構のホール効果が起きていることが示唆される。

本研究成果は、マルチフェロイクスにおける磁性と誘電性が結合した新物性の開拓を促進させると同時に、磁性絶縁体における効率的な熱流制御技術の構築に寄与することが期待される。

本研究成果は、英国科学雑誌『Nature Materials』に日本時間 5 月 16 日午前 0 時（英国時間 5 月 15 日午後 4 時）に掲載される。

4. 発表内容：

①背景

ホール効果とは、縦方向に刺激を与えた時に、それとは垂直な横方向に応答が生じる現象である。通常の金属では電荷を持つ電子が磁場下で電磁気学的な力を受けて曲げられることによって、横方向に電圧や温度勾配が生じる電気ホール効果や熱ホール効果が生じることが知られており、特に電気ホール効果は金属中の電子数を見積もる重要な実験手法であると同時に、磁場の強さを精密に測定するホール素子等にも利用されている。一方で、電荷を持った素励起が存在しない絶縁体中では、格子振動の素励起であるフォノンや磁性秩序相における磁気励起であるマグノンがエントロピーや熱といった物理量を運ぶことが知られているが、これら中性の素励起は通常直進し、ホール効果が起こることは極めて稀である。現在までに、限られた特殊な絶縁体において、これらの素励起がホール効果を示すことが熱ホール効果（図 1 (A)）の観測によって報告されているが、熱流の曲がる程度を表す熱ホール伝導度はいずれも非常に小さかった。

②研究内容

本研究では、強誘電秩序を持つ磁性絶縁体 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 、 $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の熱伝導を系統的に測定した。その結果、本物質がフェリ磁性相（注 5）において巨大な熱ホール効果を示すことを発見し、熱ホール伝導度が従来報告されているものより一桁以上大きな値であることを明らかにした（図 1 (B)）。空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 、 $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ は強誘電秩序と磁性秩序が共存したマルチフェロイクスと呼ばれる物質の一つであり、格子とスピンの自由度が強く結合しているため、観測されたホール効果は現在までに報告されていたようなフォノンやマグノンといった個々の素励起のホール効果では説明できない。比熱や磁化の振る舞い、熱ホール伝導度 (κ_{xy})、縦方向の熱伝導度 (κ_{xx}) およびそれらの比の温度・磁場依存性等を詳細に測定することにより、本系で観測された巨大なホール効果が、非従来型の格子・スピン結合によるフォノン散乱を起源とする、絶縁体中における新しい機構のホール効果であることが示唆された。

③今後の展望

本研究では、空間反転対称性が破れた磁性体で観測される巨大なホール効果を発見し、スピンと格子の結合に起因した新しい機構のホール効果の存在を明らかにした。このような現象は様々な空間反転対称性の破れた物質で観測できる可能性があり、今後、様々な空間反転対称性の破れた磁性絶縁体における検証が望まれる。また、熱ホール効果は縦方向の熱流を横方向の熱流へ変換する熱流制御技術と捉えることができ、さらにマルチフェロイクスでは電場や磁場によって磁性や強誘電秩序を制御できるため、本研究で発見した巨大な熱ホール効果は絶縁体中の熱流を制御する基本的な技術になり得ると考えられる。微視的機構を解明することで、より巨大な応答の探索やその電場制御等、新規技術構築が期待できる。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Materials」（オンライン版：5月15日午後4時：英国時間）

論文タイトル：Giant thermal Hall effect in multiferroics

著者：T. Ideue*, T. Kurumaji, S. Ishiwata, Y. Tokura

DOI 番号：10.1038/NMAT4905

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター
助教 井手上 敏也 (いどうえ としや)

7. 用語解説：

注1：マルチフェロイクス

強磁性・強誘電性・強弾性等の複数の自発的秩序を有する物質。

特に、磁気秩序と強誘電秩序が共存し、それらの秩序が結合している物質では、磁場による強誘電性の制御や電場による磁性の制御等、通常とは異なる物性制御が実現可能であり、新規メモリー素子やセンサー等、応用を念頭にした研究も近年著しく進展している。

注2：ホール効果

縦方向に刺激を与えた時に、それとは垂直な横方向に応答が生じる現象。通常の金属や半導体中の電子は磁場中でローレンツ力と呼ばれる電磁気学的な力を受けることによって軌道が曲げられ、横方向に電圧や温度勾配が生じる電気ホール効果や熱ホール効果が生じることが知られている。一方、絶縁体では電荷を持っているキャリアが存在しないため、格子振動であるフォノンやスピン秩序に由来する素励起であるマグノンといった中性の素励起が熱を運び、それらの素励起のホール効果は熱ホール効果として観測される。

注3：フォノン

固体中の格子振動を量子化した素励起。電気の流れない絶縁体においても存在し、熱を運ぶ。

注4：マグノン

固体中の磁性秩序相における磁気励起。磁気モーメントの振動であるスピン波を量子化した素励起。フォノンと同様、電気の流れない絶縁体においても存在し、熱を運ぶ。

注5：フェリ磁性

磁性秩序の一種で、結晶中に逆方向のスピンを持つ2種類の磁性イオンが存在し、それぞれの磁気モーメントの大きさが異なるため全体として磁化を持つ磁性。

8. 添付資料：

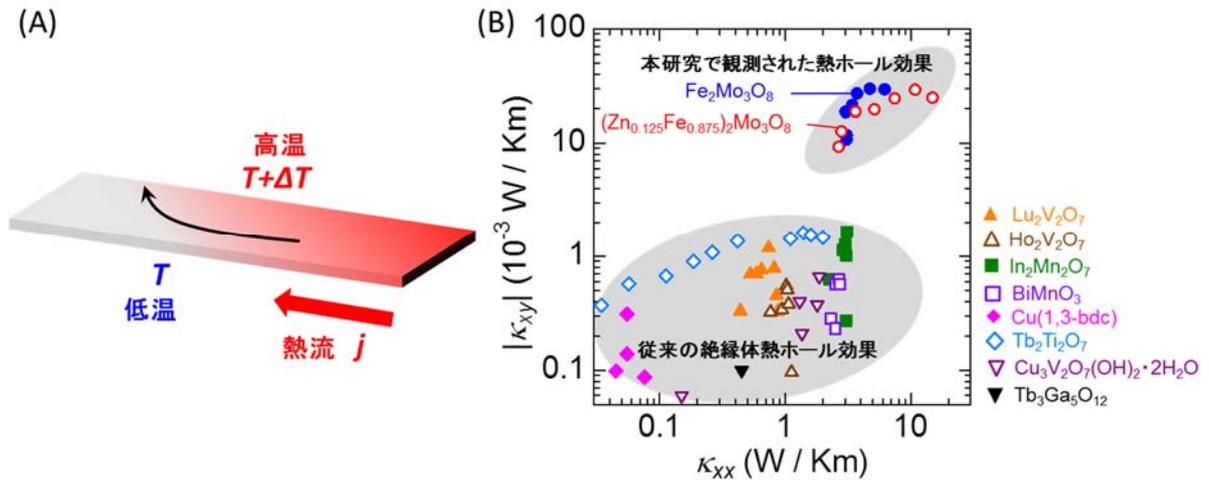


図 1. (A)熱ホール効果の模式図。

熱流が曲げられて、横方向に温度勾配が生じる。

(B)様々な絶縁体の熱ホール伝導度 (κ_{xy}) と熱伝導度 (κ_{xx}) 。

本研究で観測された $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 、 $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ における熱ホール伝導度が従来報告されたものよりも巨大であり、熱伝導度・熱ホール伝導度の振る舞いの違いから非従来型の新しいホール効果であることが示唆される。