

## 格子振動による熱流が磁場で曲がることを発見

### 1. 発表者：

杉井 かおり （東京大学物性研究所 特任研究員）  
中辻 知 （東京大学物性研究所 教授）  
山下 穰 （東京大学物性研究所 准教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ 絶縁体を伝わる熱（熱流）が磁場によって曲げられる熱ホール効果を観測。
- ◆ 絶縁体におけるスピン励起による熱ホール効果の観測例はあったが、格子振動による熱ホール効果を広い温度範囲で初めて観測。
- ◆ 格子振動による熱ホール効果の温度依存性が初めて明らかになったことで、今後の理論研究の発展につながる。

### 3. 発表概要：

東京大学物性研究所の杉井かおり特任研究員、中辻知教授、山下穰准教授らの研究グループは、絶縁体ペロブスカイト型銅酸化物  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$  で、熱流が磁場によって曲げられる「熱ホール効果」が起きていることを発見しました。そして、熱ホール効果が原子の格子振動（フォノン）（注1）によるものであること、また広い温度範囲の観測により熱ホール効果の温度依存性を明らかにしました。

このフォノンによる熱ホール効果は、熱流の方向を横方向に制御するもので、過去に1例しか報告がなく、しかも測定温度が一点のみに限られていた極めて珍しい現象であり、その詳細は全くわかっていませんでした。今回、温度依存性を広い温度範囲で測定することに成功したため、この未知の現象の解明が進むことが期待されます。また、この現象の起源にはスピンと格子との間の強い相関が関係していると考えられ、謎の多いスピン液体（注2）形成の起源の解明にもつながる成果であると期待されます。

本研究は米国科学誌「Physical Review Letters」（3月31日（金）オンライン）で公開される予定です。

### 4. 発表内容：

#### ①研究背景

磁場の大きさを計測することができるホールセンサーは、スマートフォンの中の磁気センサーなど、身の回りの様々な機器で使われています。ホールセンサーは金属が示す「ホール効果」を利用して磁場を計測しています。ホール効果は磁場の大きさに比例した電圧が電流の向きと磁場の向きの両方に直行する方向に現れる現象で、磁場の中を移動する電子にフレミング左手の法則で表されるローレンツ力が働くことがその起源です。そのため、電気の流れない絶縁体では観測されません。

ところが最近、絶縁体中でもホール効果が観測される場合があることがわかり、その起源の解明に注目が集まっています。絶縁体中では電気は流れませんが、絶縁体の片側を温めると冷たい方に向かって熱が流れます（熱流）。金属中のホール効果によって電圧が現れたのと同様に、この熱流が磁場によって曲げられると熱流と磁場の向きの両方に垂直な向きに温度差が現れます。この現象は熱ホール効果（図1）と呼ばれます。絶縁体では、熱の流れは主に物質を

構成する原子のフォノンによって伝わりますが、フォノンは電氣的に中性なので磁場の影響を受けて曲がることは通常ありえません。ところが、先行研究において、絶縁体であるテルビウム化合物で熱ホール効果が観測された（2005年）ことから、フォノンによる熱ホール効果が存在する可能性が指摘されていました。しかし、このテルビウム化合物の実験では、5 K (-268°C) という温度一点における実験結果しか報告されなかったために、その温度依存性の詳細は不明でした。また、テルビウム化合物ではスピンの熱を運んでいる可能性を排除できないため、本当にフォノンによる熱ホール効果が生じているかどうかは不明でした。

## ②研究内容

本研究では、量子スピン液体の候補物質である絶縁体ペロブスカイト型銅酸化物  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$  における熱ホール効果を調べたところ、絶縁体であるにもかかわらず、2~60 K (-271~-213°C) の広い温度領域で熱ホール伝導率が観測されました（図2）。熱輸送特性を詳しく調べたところ、この物質のスピン励起はこの温度領域ではほとんど観測されなかったことから、主にフォノンが熱を運んでいることがわかりました。この結果から、熱ホール効果はフォノンによるものであることが明らかになりました。

また、この物質の熱伝導率は、類似の化合物と比べて非常に低くなっていることがわかりました。特に、その温度依存性は結晶であるにもかかわらず、ガラス物質で観測されるような温度依存性を示すことから、フォノンによる熱伝導が強く阻害されていることがわかりました。類似物質との結晶構造の比較から、ペロブスカイト型銅酸化物  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$  に特有の結晶構造がフォノンを散乱しており、この散乱がフォノンの熱ホール効果を引き起こしている可能性が示唆されました。

## ③今後の展望

本成果では、フォノンによる熱ホール効果の広い温度範囲での観測に初めて成功しました。電荷をもたないフォノンの運動が磁場によって曲げられているという現象はとても不思議であり、今後の研究によりこの機構が解明されれば、熱流の方向を磁場で制御できる可能性を示しています。本研究成果は、この未知の現象の機構解明に大きな飛躍をもたらす研究成果であると期待されます。

本研究は、日本学術振興会、科学研究費（15K17691、16K17743、16H02209）、新学術領域研究（15H05882、15H05883）、頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム（R2604）、山田科学振興財団、東レ科学振興会の助成を受けて行われました。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」（米国時間3月31日にオンライン掲載予定）

論文タイトル：Thermal Hall effect in a phonon-glass  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$

著者：K. Sugii, M. Shimozawa, D. Watanabe, Y. Suzuki, M. Halim, M. Kimata, Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, and M. Yamashita

## 6. 用語解説：

(注1) 格子振動 (フォノン)

物質中の原子の振動。原子の振動が波となって物質内を伝わることで、音や熱が伝わる。理論的にはこの波を量子化して粒子として取り扱う事が可能であり、量子化された格子振動はフォノンと呼ばれる。電気の流れない絶縁体において、熱は主にこのフォノンによって運ばれている。

(注2) スピン液体

低温で磁気秩序するはずのスピンの、量子揺らぎの効果によって磁気秩序しないままの状態に留まること。この状態では、スピンは気体のように互いがバラバラになっておらず、スピン同士で強く結びついている。それにもかかわらず固体のように整列しない(磁気秩序をもたない)ために、「液体」と表現される。スピン液体状態が実現している場合、未知の量子現象が現れる可能性があり、その物性が盛んに研究されている。

## 7. 添付資料：

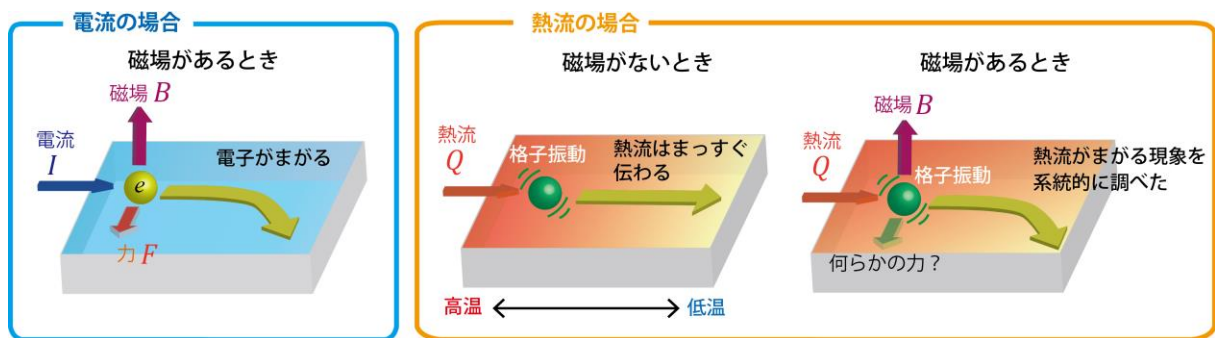


図1 金属におけるホール効果 [電流の場合] と絶縁体における熱ホール効果 [熱流の場合]。

[電流の場合] 金属中を流れる電子に磁場 ( $B$ ) が作用すると、ローレンツ力 ( $F$ ) が働く。このため、電流と磁場の両方に垂直な方向に電流が曲がる現象があらわれる。

[熱流の場合 (左)] 絶縁体において磁場がない場合、熱はまっすぐ伝わる。

[熱流の場合 (右)] 絶縁体において磁場がある場合、熱流 ( $Q$ ) によって金属と同様のホール効果が起こることがある。この場合、電流ではなく熱流が曲がる現象が起こる。研究グループは今回、格子振動によって伝わる熱流が曲がる現象を系統的に調べた。

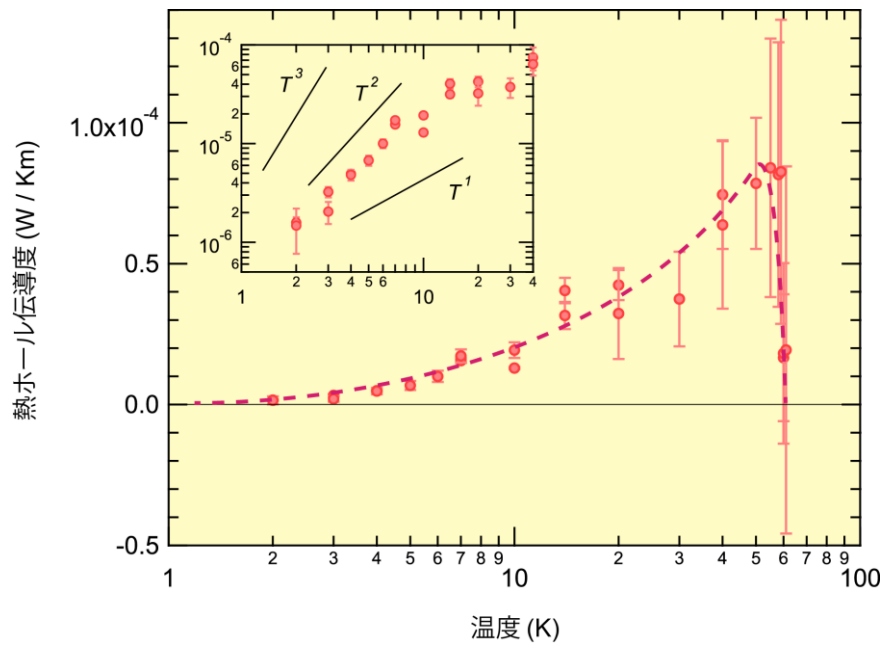


図2 ペロブスカイト型銅酸化物  $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$  において観測された熱ホール伝導率の温度依存性。低温で温度の2乗に依存する温度依存性  $\kappa_{xy} \propto T^2$  が観測された。