

平成 28 年 7 月 19 日  
東京大学物性研究所

## スピン液体状態における熱ホール効果の発見

磁場の中を移動する電子は、フレミング左手の法則で表されるローレンツ力を感じ、その軌道が曲げられます。その結果、磁場の大きさに比例する電圧が現れることが知られています。ホール効果として知られるこの現象は、金属中の電子に対する基礎物性測定から、スマートフォンの中の磁気センサへの応用まで様々なところに利用されている現象です。このホール効果は金属中を流れる電子に対するローレンツ力がその起源であるため、電気の流れない絶縁体には存在しません。ところが最近、絶縁体中の磁性を担う「スピン」が類似のホール効果を示すことが理論的に提案され、注目を集めています。

今回、東京大学物性研究所の山下穰准教授らの研究グループは、京都大学理学研究科、東京大学新領域創成科学研究科の研究グループと共同で、このスピンによる熱ホール効果を新しい磁性体「スピン液体」（注1）の研究に応用して、スピン液体状態に熱ホール効果が観測されることを見出しました。さらに、この熱ホール効果の大きさがスピン液体の形成と関連していることを初めて明らかにしました。スピン液体状態は未知の量子凝縮状態で、普通の磁性体とは異なる新しい量子現象が現れることが期待されていますが、その詳細はよくわかっていません。本研究はスピン液体研究に対する新しい研究手法を提案するものであり、今後のさらなる展開が期待されます。

本研究は米国科学誌「Proceedings of the National Academy of Sciences, USA」で公開されます。

### <発表者>

- 渡邊 大樹（研究当時：京都大学大学院理学研究科 博士課程3年、現所属 コニカミノルタ株式会社）  
杉井 かおり（東京大学 物性研究所 特任研究員）  
下澤 雅明（東京大学 物性研究所 助教）  
鈴木 喜貴（研究当時：東京大学大学院 新領域創成科学研究科 修士課程2年、現所属 ルネサス エレクトロニクス株式会社）  
矢島 健（東京大学 物性研究所 助教）  
石川 孟（研究当時：東京大学大学院 新領域創成科学研究科 博士課程3年、現所属 Max Planck Institute ポスドク研究員）  
廣井 善二（東京大学 物性研究所 教授）  
芝内 孝禎（東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授）  
松田 祐司（京都大学大学院理学研究科 教授）  
山下 穰（東京大学 物性研究所 准教授）

## <発表のポイント>

- 電気を流す金属中でしか観測されないホール効果と同様の現象が、絶縁体における熱ホール効果として観測された。
- 磁石のように電子スピンの向きが揃った強磁性絶縁体での観測例はあったが、磁気秩序が幾何学的フラストレーションの効果で抑制されたスピン液体で初めて観測された。
- スピン液体の性質はまだ謎だらけで、その性質を調べる新しい手法になる可能性がある。

## <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、我々の身の回りの様々な機器で使われているセンサーです。このホールセンサーは金属の示す「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、絶縁体中の磁性を担う「スピン」が類似のホール効果を示すことが理論的に提案され、注目を集めています。ここでいう「スピン」とは物質を構成する電子の持つ磁気的性質であり、このスピンの向きが揃って強磁性体になったものが磁石です。このスピンは電気を運びませんが、熱を運ぶため、このホール効果は磁場の大きさに比例した温度差として現れる「熱ホール効果」として観測されます。例えば、スピンの向きが揃った強磁性体では「マグノン」と呼ばれるスピンの波が熱を運びます。このマグノンは電荷をもっていないためにローレンツ力によるホール効果は表れませんが、磁性体の持つトポロジ効果によって熱ホール効果が表れることが知られています。

このスピンによる熱ホール効果を、新しい磁性体「スピン液体」(注1)の研究に応用したのが本研究です。「スピン液体」とはスピンの向きが極低温まで整列せず、その向きが量子力学的に揺らいでいる状態で、「量子液体」とよばれる状態の一種だと考えられています。この量子液体の最も有名な例は液体ヘリウムです。通常、世の中のほとんどの物質は温度の低下によって固化するのですが、ヘイゼンベルグの不確定性原理による量子ゆらぎの影響が顕著なヘリウムでは、絶対零度まで固体になれずに液体のままです。絶対零度近傍での液体は、我々の周りには全く異なる超流動などの量子力学的性質を示すことから、「量子液体」と呼ばれています。「スピン液体」は量子液体のスピン版ともいえる状態なのでこう呼ばれています。このスピン液体も、スピンの向きがただバラバラなだけの常磁性状態とは違う性質を示すことが期待されているのですが、その詳細はよくわかりませんでした。

## <研究内容>

本研究では、ボルボサイトと呼ばれるカゴメ格子を持つ磁性体(図2)の熱ホール効果を測定することで、常磁性状態からスピン液体へと変化するようにして熱ホール効果が現れることを見出しました。ボルボサイトは磁性を担う銅原子がカゴメ格子状に並んだ磁性体で、カゴメ格子の持つ幾何学的フラス

トレーション（注2）の効果によってある種のスピン液体状態が実現していることが期待されている物質です。

今回我々がこのボルボサイトの熱ホール効果を測定したところ、高温の常磁性状態から低温のスピン液体状態に移り変わるにしたがって熱ホール効果が現れることがわかりました(図3)。これは未だわからないことの多いスピン液体の特徴をとらえた大きな成果だと期待しています。

### <社会的意義・今後の予定>

本研究は直ちに産業利用につながる研究ではありませんが、スピン液体状態という未知の凝縮状態の研究に大きな飛躍をもたらす研究成果だと期待しています。本研究で用いたカゴメ格子を持つ物質以外でもスピン液体状態が発見されており、本研究の成果を他の物質へ応用することで基礎研究の進展に寄与できると考えています。

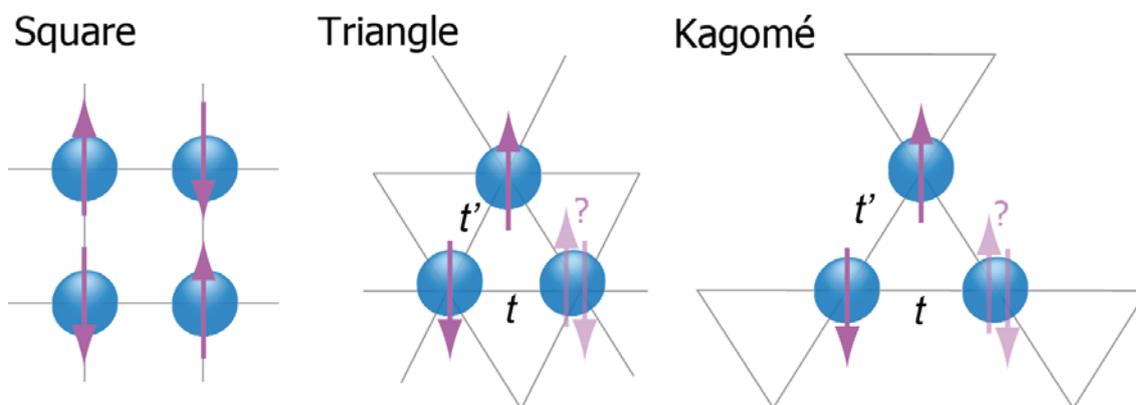
### <用語解説>

#### (注1) スピン液体

低温で磁気秩序するはずのスピンが量子揺らぎの効果によって磁気秩序しないまま留まること。気体のように互いがバラバラではなく、スピン同士が強く結びついているのに、固体のように整列しないために液体と呼ばれる。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。

#### (注2) 幾何学的フラストレーション

スピンには隣のスピンと反対の向きをとろうとする性質をもつスピンがいる。こうしたスピンが四角格子（下図の左）の上に並んでいる際には互いに反対を向いて並ぶことができるが、三角格子（下図の中央）やカゴメ格子（下図の右）の上に並んでいる場合はすべてのスピンを互いに反対向きに並べることはできない。これを幾何学的フラストレーションと呼び、磁気秩序を抑制してスピン液体状態を実現するための重要な効果であると考えられている。



<参考図>

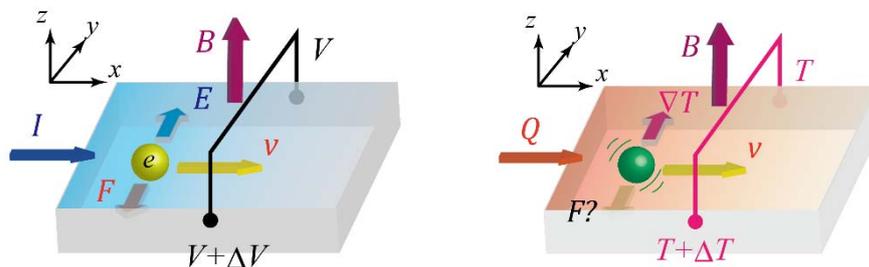


図1 金属におけるホール効果（左）と絶縁体における熱ホール効果（右）。（左）金属中を流れる電子に磁場( $B$ )が作用すると、ローレンツ力( $F$ )が働く。この為、電流と磁場の両方に垂直な方向に電圧( $\Delta V$ )が発生する。（右）同様の現象が熱流( $Q$ )が流れている状況で発生すると、電圧の代わりに温度差( $\Delta T$ )として観測される。

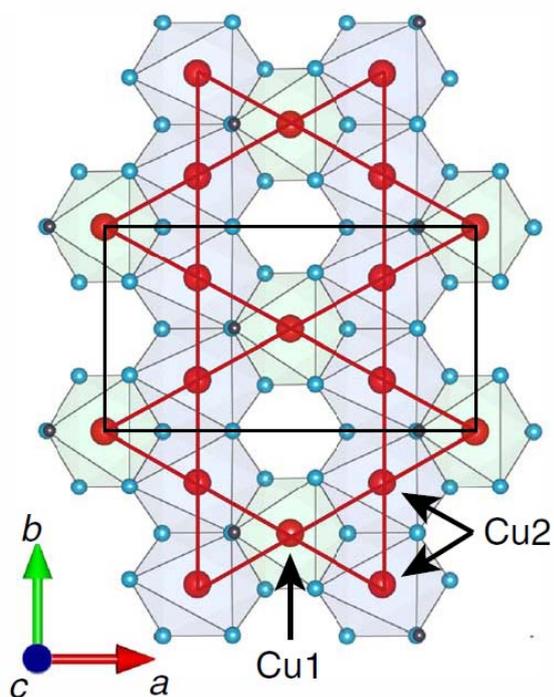


図2 カゴメ鉱物ボルボサイト( $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )の結晶構造。図中の赤点で示されるのが磁性を担う銅原子の位置で、カゴメ格子状に並んでいることがわかる。

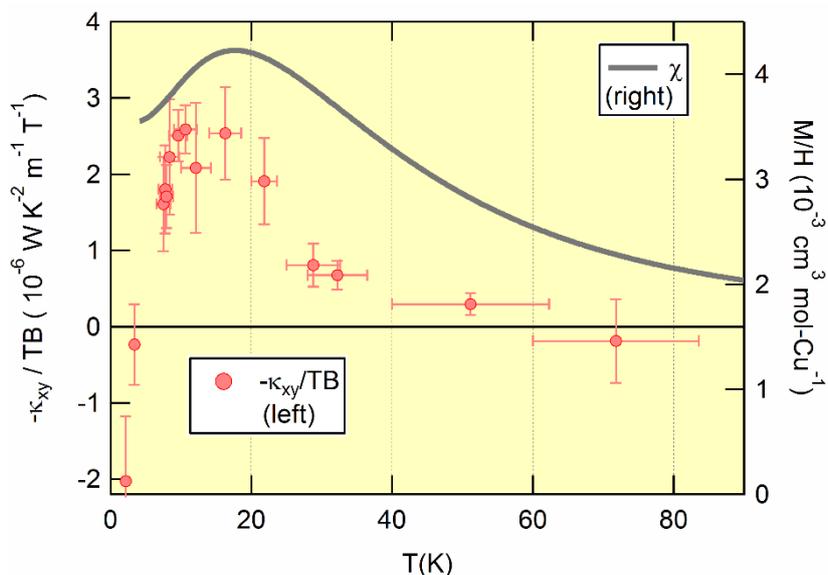


図3 ボルボサイトで観測された熱ホール伝導率( $\kappa_{xy}$ )と磁化率( $M/H$ )の温度依存性。低温でスピン間相関が強くなるにしたがって熱ホール伝導率が上昇していることがわかる。

### <掲載論文情報>

発表雑誌名：「Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States America」

論文タイトル：Emergence of nontrivial magnetic excitations in a spin-liquid state of kagomé volborthite

著者：Daiki Watanabe, Kaori Sugii, Masaaki Shimosawa, Yoshitaka Suzuki, Takeshi Yajima, Hajime Ishikawa, Zenji Hiroi, Takasada Shibauchi, Yuji Matsuda, and Minoru Yamashita

DOI 番号 10.1073/pnas.1524076113

アブストラクト URL [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1524076113](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1524076113)

### <問い合わせ先>

東京大学物性研究所 准教授 山下穰

TEL: 04-7136-3350

E-mail: [my@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:my@issp.u-tokyo.ac.jp)