

ボルボサイトにおけるフラストレート磁性と熱輸送現象にマイクロな視点から迫る

[1] 要旨

銅鉬物ボルボサイト ($\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) は、相互作用間の競合から多彩な現象が生じるフラストレート磁性体の好例として関心を集めてきたが、そのマイクロな視点からの理解は長年の課題であった。これに関し、同物質の隠れたトライマー構造に基づいた理論解析が行われた。特に、異方的相互作用によりマグノンの熱ホール効果が起きることが示され、熱輸送実験と定性的に合致する振舞が得られた。また、磁場の印加方向に強く依存した磁気相図が予言された。ボルボサイトは、量子系のフラストレーション効果を理論・実験の比較のもとで明らかにできるモデル・ケースになると期待される。

[2] 本文

三角形上に並んだ3つのスピンの辺ごとに反平行状態を好むとき、全ての辺の相互作用を同時に満足させることができない。フラストレーションとして知られるこの効果により、磁性体においては通常の磁気秩序が不安定化され、多彩な物性が創発する。三角形を辺共有あるいは頂点共有させることで得られる三角格子および籠目格子は、フラストレーションの典型的舞台である。興味深いことに、地球上で長い年月を経て生成された銅鉬物には、スピン 1/2 を持つ銅イオンが籠目格子上に並ぶ物質が多数存在し、それらを人工的に再現した合成鉬物が盛んに研究されている。ボルボサイト (バナジン銅鉬) もその一つであり、2001年にその磁性が初めて研究されて以降、その多彩な磁場誘起特性が研究者を魅了してきた。特に最近の単結晶を用いた研究では、磁場を籠目面に垂直に印加するもとの、磁場 28 T より始まる広大な 1/3 磁化プラトー相が観測された。それより下の磁場では、5~23 T でスピン密度波相、26~28 T でマグノン束縛状態の凝縮相が観測されている。また、温度勾配の垂直方向に熱伝導が生じる熱ホール効果が、スピン密度波相の領域 (~15T) で観測され、さらにこの効果は高温の無秩序相においても存在することが観測されている。しかし、磁気相図の磁場の方向に対する依存性や熱ホール効果のマイクロな機構は未解明であった。

最近、慶應義塾大学理工学部の古川俊輔氏、理化学研究所の桃井勉氏は、この問題に関し、スピンの3つずつ強く結合した「結合トライマー模型」[図 1(a)]に基づく理論解析を行った。この模型は、近年、第一原理計算により提案されたものである。この模型においては、強い反強磁性相互作用 J により形成されたトライマー [図 1(a)の赤の太線] が他の相互作用 J' , J_1 , J_2 を通して互いに結合する。さらに、各ボンドにおいてジャロシンスキ-守谷(DM)相互作用 $\mathbf{D}_{ij} \cdot (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j)$ が存在する[図 1(a)]。多数のパラメータを含む複雑な模型であるが、低温において各トライマーに形成される擬スピン 1/2 自由度に着目することで、異方的三角格子上の有効模型[図 1(b)]が導かれる。このとき、DM 相互作用は一つの有効 DM ベクトル \mathbf{d}_1 に集約され、問題が単純化される。磁化プラトー相 (擬スピンの偏極状態) を出発点としたマグノン気体描像により、有効 DM 相互作用 \mathbf{d}_1 が熱ホール効果を生み出すことが示され、熱輸送実験と定性的に合致する振舞が得られた。また、 J_2 の強い擬一次元極限からの有効場の理論により低温での磁気相図が解析され、磁場が弱いとき、または b 軸方向に印加されるときに、DM 相互作用誘起の直交磁気秩序が安定化することが予言された。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2020 年 3 月号に掲載された。

一般に DM 相互作用は交換相互作用に比べて一桁以上小さいが、様々な状態が擬似縮退するフラ

ストレート系では重要な役割を果たしうる。ボルボサイトは、そのようなフラストレート系の敏感さによる多彩な物性を研究できる舞台であり、本研究はその理論的土台を与えている。今回予想された磁気相図の検証に加え、マグノン束縛状態の凝縮相（ネマティック相）への DM 相互作用の影響、熱ホール効果におけるマグノンと分数励起の間のクロスオーバーなどの多方面へ理論・実験研究が進展することが期待される。

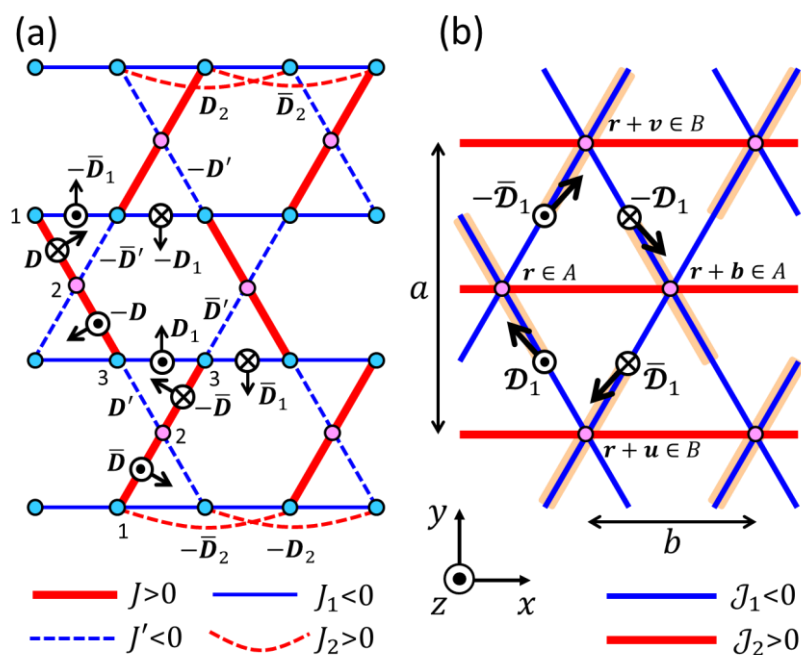


図 1. (a) ボルボサイトの結合トライマー模型。各ボンドにおいて、交換相互作用 $J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$ および DM 相互作用 $\mathbf{D}_{ij} \cdot (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j)$ が存在する。バーは x 軸周りの π 回転を表す。(b) 擬スピン 1/2 有効模型。

原論文(2月28日公開済)

[Effects of Dzyaloshinskii-Moriya Interactions in Volborthite: Magnetic Orders and Thermal Hall Effect](#)
S. Furukawa and T. Momoi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 034711 (2020).

<情報提供：古川俊輔（慶應義塾大学理工学部 専任講師）
桃井勉（理化学研究所 専任研究員）>