

2019 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	磁気熱量効果を用いた量子スピン液体状態の研究
キーワード	①スピンプラストレーション、②量子スピン液体、③熱物性

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	イソノ タカユキ 磯野 貴之	所属等	学習院大学 理学部 助教
プロフィール	物質を多重極限環境下（ -273°C (0.1 ケルビン) 以下の極低温下、1 万気圧以上の高い圧力や、強い磁場、強い電場を加えた状況）に置いたときに現れる、特異な量子現象や新しい機能性を追究しています。特に近年は、スピンプラストレーションが強く効いた磁性体を研究対象としています。		

1. 研究の概要

スピンプラストレーションを持つ新しい三角格子反強磁性体 $\text{Cu}_3(\text{OH})_4(\text{HCO}_2)_2$ における磁気状態を、交流比熱測定および磁気熱量効果測定によって詳しく調べた。その結果、物質中の全ての電子スピンの内の $2/3$ の割合のスピンのみが、比較的高温で一重項を形成して、残りの $1/3$ のスピンのみが、低温における磁性を担っていることを突き止めた。

2. 研究の動機、目的

身近にある普通の磁石（磁性体）では、原子核の周りにおける電子のスピンの向きを揃えて整理している（図 1 左は反対向きに揃う場合）。一方、三角格子を形成する特殊な磁性体の場合、スピンを三角形の各頂点に互いに反対向きに（反強磁性的に）並べようとするとき、1, 2 番目のスピンの向きを決めると、3 番目のスピンの向きが決まらなくなる（図 1 右）。このようなスピン配列の競合を、スピンプラストレーションと呼ぶ。

スピンプラストレーションを持つ磁性体では、通常のスピン配列（磁気秩序）がエネルギー的に不安定になり、量子スピンアイスや量子スピン液体、マグノン結晶などの新しいスピン状態が実現する。これらの状態では、しばしば、物質に外部から磁場を加えたときに、飽和磁化の分数倍の値で磁化が一定になる珍しい現象（磁化プラトー）が見られる。この磁化プラトーは、特異なスピン状態の起源を知るための貴重な情報を与えてくれる。

三角格子を形成する反強磁性体では、飽和磁化の $1/3$ の値で磁化プラトーが見られることが知られている。このプラトーの原因は、磁場を加えたときに、基本となる三角形上で $\uparrow\downarrow$ 向きのスピン配列が安定になることとして理解されている。最近発見された三角格子反強磁性体 $\text{Cu}_3(\text{OH})_4(\text{HCO}_2)_2$ においても、 $1/3$ 磁化プラトーが見られる。しかしながら、この物質の磁化率は、三角格子反強磁性モデルによって単純には説明できないことから、私は、磁化プラトーの原因が、通常の三角格子反強磁性体と異なるのではないかと考えた。

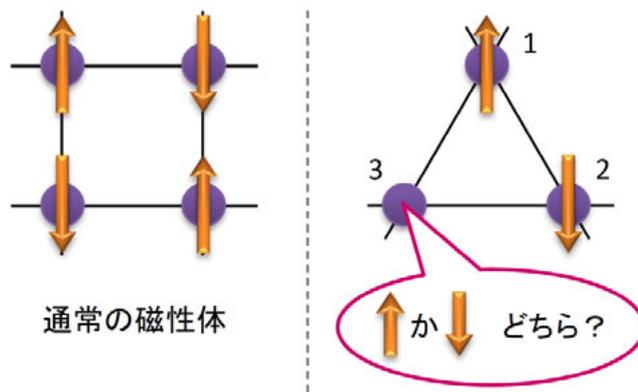


図 1. (左) 通常の磁性体における電子のスピンの配列。紫色の丸が原子を、橙色の矢印がその原子の電子のスピンを示している。(右) 三角形のスピンプラストレーションの様子。

3. 研究の結果

本研究において、私は、交流法を用いた比熱測定、および磁気熱量効果の測定システムを新たに立ち上げて (図 2)、0.3 ケルビンまでの極低温下、7 テスラまでの強磁場中における $\text{Cu}_3(\text{OH})_4(\text{HCO}_2)_2$ のスピン状態を詳しく調べた。その結果、物質中の全ての電子スピンの内の $2/3$ の割合のスピンのみが、比較的高温で強く二量化 (ダイマー化) して自由度を失い、残りの $1/3$ の割合のスピンのみが、低温における磁性を担っていることを突き止めた。図 3 に示すように、比熱の温度変化は、デバイ模型による格子比熱、および孤立ダイマー模型と三角格子反強磁性ハイゼンベルグ模型の和による磁気比熱によって説明できることが分かった。本物質の $1/3$ 磁化プラトーは、低温まで生き残った $1/3$ スピンが、磁場を加えることによって完全に分極したことが原因であり、通常の三角格子反強磁性体における磁化プラトーとは異なるメカニズムにより生じていることを明らかにした。

以上の成果は、Journal of the Physical Society of Japan 誌の 7 月号に掲載された。

掲載論文

題目 : Low-temperature magnetism in a triangular-lattice antiferromagnet, $\text{Cu}_3(\text{OH})_4(\text{HCO}_2)_2$, studied by calorimetry

雑誌 : Journal of the Physical Society of Japan, 89 073707 (2020)

URL : <https://doi.org/10.7566/JPSJ.89.073707>



図2. 極低温・強磁場における比熱、および磁気熱量効果の測定システム

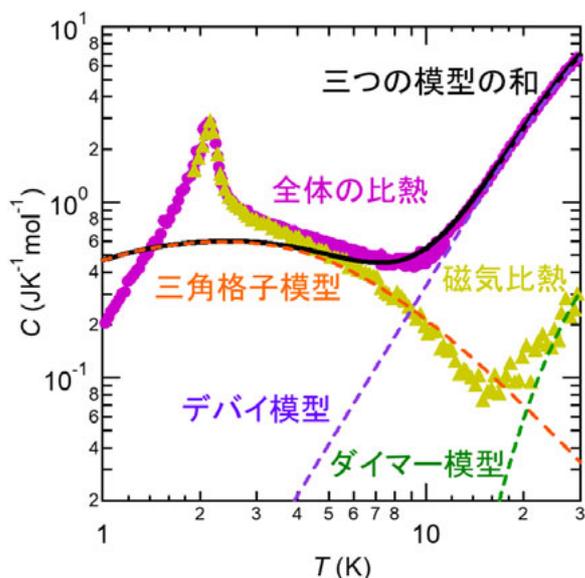


図 3. $\text{Cu}_3(\text{OH})_4(\text{HCO}_2)_2$ の比熱の温度依存性。測定結果（プロット）とモデル計算（実線、破線）を比較すると、4 ケルビンから 30 ケルビンの広い温度範囲で、両者が良く一致していることが分かる。

4. 研究者としてのこれからの展望

磁性体の比熱は、断熱法や緩和法といった従来の測定法では、格子系、電子スピン系、および核スピン系の寄与の和として得られ、通常、それぞれの成分に分解することは難しいことが知られています。ところが、私は、本研究を遂行する過程で、交流法を利用することで、比熱の目的の成分のみを取り出せる可能性を見出しました。この手法を確立できれば、フラストレート磁性研究だけでなく、非従来型超伝導や異常金属状態など、現代の固体物理における主要な研究分野の理解が飛躍的に進むと期待されます。

5. 社会に対するメッセージ

本奨励金の支援により、上述の 1-3 の成果を挙げて、学術論文を發表することができました。また、4 で紹介したような、さらに大きな研究に繋がるきっかけを得ることに成功しました。ここに厚く感謝いたします。