

カゴメ格子上のスピン軌道結合した電子が生む多彩な磁気秩序

[1] 要旨

近年、カゴメ格子構造を持つ磁性体を舞台として、スピン軌道相互作用に由来したトポロジカル電子状態の研究が幅広く展開されている。カゴメ層状物質は組成に応じて強磁性や反強磁性 120 度構造などの多彩な磁気秩序を発現し、その性質は千差万別である。本論文は、これらの多彩な磁気秩序が、電子のスピン軌道結合がもたらす実効的なスピン間相互作用により生み出されることを示している。実現される秩序は、単層カゴメ格子上的電子充填率とスピン軌道相互作用に依存し、多彩な振る舞いを見せる。ここで得られた知見は、カゴメ層状物質において元素置換などにより磁気秩序を変化させ、トポロジカル電子状態をデザインする際の定性的な指導原理になると期待される。

[2] 本文

近年の固体電子物性の研究において、磁性を持ったトポロジカル物質は重要な位置を占めており、理論と実験の双方から活発に議論されている。中でもいくつかのカゴメ層状物質はトポロジカル電子物性の観点からは非自明なバンド構造（ディラック点・ワイル点）を示し、磁性の観点からはカゴメ格子構造によるフラストレーションを有するため、様々な物質で幅広く研究が進められている。例えば Mn_3Sn は反強磁性の面内 120 度構造を示し、電子バンドにワイル点構造を有する。一方で $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は同じくワイル点構造を示すが、磁気秩序は面直強磁性である。他方 Fe_3Sn_2 は面内強磁性秩序を持ち、電子バンドは有限質量のディラック分散を示す。このように、カゴメ層状物質では磁気秩序、電子のバンドとも、多彩な構造が調べられている。しかしながら、磁性と電子状態の関係については統一的理解には至っておらず、それぞれの物質ごとに性質が議論されてきた。

最近、東北大学金属材料研究所（現 九州大学理学研究院物理学部門）のメンバーを中心とする研究グループは、電子系と局在スピンの結合を記述するモデル（近藤格子モデル）にスピン軌道相互作用を導入し、磁気相図を調べた。その結果、電子の充填率、およびスピン軌道相互作用の強さに依存して、強磁性や反強磁性 120 度構造、磁気スパイラルなどの多彩な磁気秩序が実現されることを明らかにした。以上の成果は、JPSJ の 2022 年 8 月号に掲載された。

電子の充填率、及びスピン軌道相互作用の強さをパラメータとして、基底状態で実現される磁気秩序を相図として示したものが図 1 である。ここでスピン軌道相互作用としては、結晶中の局所的な空間反転対称性の破れに起因した Kane-Mele 型 (λ_{KM}) と、表面・界面での空間反転対称性の破れに起因した Rashba 型 (λ_{R}) の 2 種類を考慮している。本モデルから得られた磁気秩序は、バンド構造と関連して以下の 3 つの傾向が見られる：(i) 充填率 1/3 以下、及び 2/3 以上では、強磁性秩序が現れる。これは、電子のフェルミ準位近傍に存在するフラットバンドの大きな状態密度、またはスピン軌道相互作用によりディラック点に開いたエネルギーギャップに起因するものとして理解される。(ii) 半充填（充填率 1/2）近辺では、反強磁性 120 度構造が現れる。これは、2 つのスピン状態の混成によって生じる大きなエネルギーギャップによって安定化されるものとして理解される。(iii) スピン軌道相互作用を導入することで、反強磁性 120 度構造や磁気スパイラルといったノンコリニア磁気秩序が安定化される。2 種類のスピン軌道相互作用に応じて、スピン間の実効的な相互作用が変化し、それに対応して安定化される磁気構造も変化する。

本研究で示された上記(i)-(iii)の傾向は、磁気秩序を持つカゴメ層状物質を設計するにあたっての理論的な基盤となり得る。電子充填率、及びスピン軌道相互作用はいずれも元素置換により制御できるため、たとえば既知の物質に対する元素置換の効果を理解する際の手がかりとして役立つであろう。本成果は物質設計にあたっての統一的な指導原理を与え、デバイス応用に向けた磁性トポロジカル物質の探索を大きく加速することが期待される。

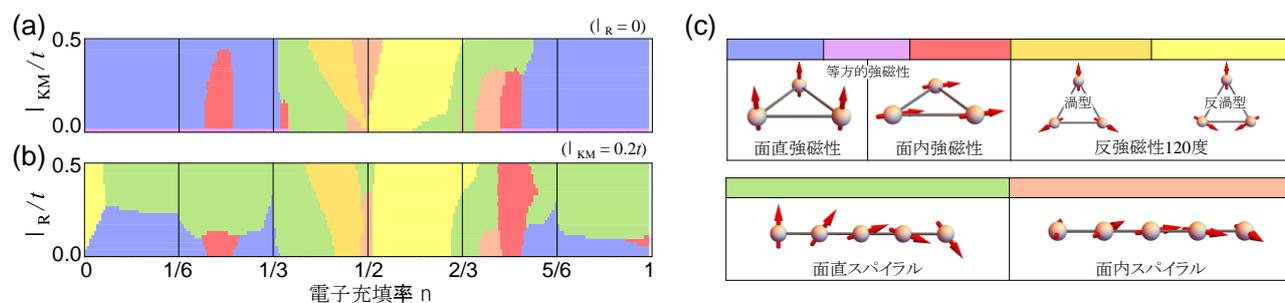


図1 (a)(b)カゴメ格子における電子充填率とスピン軌道相互作用に対する磁気相図。(c)カゴメ格子上で実現される磁気構造の凡例。磁気相図(a)(b)中の各色の領域において、表(c)で示した色に対応する磁気構造が現れる。

原論文 (2022年7月4日公開済)

[Magnetic Orderings from Spin-Orbit Coupled Electrons on Kagome Lattice](#)

Jin Watanabe, Yasufumi Araki, Koji Kobayashi, Akihiro Ozawa, and Kentaro Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 083702 (2022).

<情報提供：荒木 康史（日本原子力研究開発機構）
 小林 浩二（九州大学理学研究院）
 小沢 耀弘（東北大学金属材料研究所）
 野村 健太郎（九州大学理学研究院）>