

物質中の「磁石」をジグザグに整列させて電気の流れをコントロール —新しい電流制御で超小型・省エネ・高機能デバイスへの道を拓く—

附属国際超強磁場科学研究施設 須藤 健太

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・強相関アクチノイド科学研究グループ 木俣 基

神戸大学研究基盤センター 赤木 暢

公立大学法人富山県立大学・工学部教養教育センター 谷田 博司、柳 有起

対称性の破れは物理学における重要な概念の一つであり、とりわけ物性物理学においては、時間反転対称性および空間反転対称性の破れに起因して多様な交差相関現象が発現することが知られている。代表例として、マルチフェロイクス物質における電気磁気効果が挙げられる。これは、磁性絶縁体に磁場を印加することで電気分極が誘起され、逆に、電場印加により磁化が生じる、電気・磁気結合現象である。このような電気・磁気結合現象を統一的に理解することは、物性物理学における重要課題の一つであり、従来は主に絶縁体を対象として研究が進められてきた。一方、近年では伝導電子を有する金属系においても類似の交差相関応答が見出されており、電流・スピンの相互に結びつく新たな電子機能の探索が活発に進められている。

金属系では、電気分極は伝導電子によって遮蔽されるため、一般には実現しない。一方で、時間・空間反転対称性の破れは、電子バンド構造の変化を通じて多様な輸送現象として現れることが知られている。代表例として、電流印加により磁化が誘起される「電流誘起磁化」[1]や、本研究で対象とする「非相反伝導」[2,3]が挙げられる。これらは、金属系における電気・磁気結合現象として位置付けられる。特に、図1に示すように時間反転対称性と空間反

転対称性の双方が破れた系では、バンド構造が運動量空間において非対称となる。その結果、電流の正負に応じて電気伝導特性が異なる「非相反伝導」が発現する。これは、電流方向によって電気の流れやすさが変化する、ダイオードの整流効果に類似した現象である。

これまで、非相反伝導は主に空間反転対称性を持たない物質に外部磁場を印加することで観測されてきた。一方、本研究では、ジグザグ構造を有する反強磁性体 $\text{NdRu}_2\text{Al}_{10}$ において、反強磁性秩序に伴うゼロ磁場非相反伝導を観測した[4]。 $\text{NdRu}_2\text{Al}_{10}$ では、図2に示すように、4つのRu原子が配位したNd原子がジグザグ状に配列している。

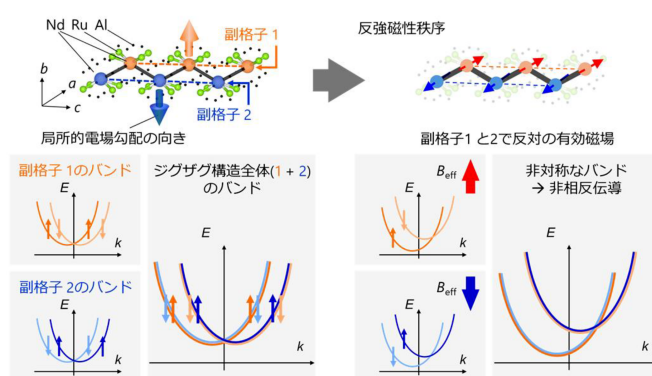


図2 ゼロ磁場非相反伝導の発現機構を示した概念図。ジグザグ構造は、橙色原子および青色原子がそれぞれ直線状に配列した二つの副格子から構成されるとみなすことができる。このとき、各副格子では局所的な対称性の破れに起因して、電子バンドが互いに逆向きにスピン偏極する。一方、両副格子のバンドを重ね合わせると、結晶全体としては空間反転対称性が保たれていることが分かる。反強磁性秩序に伴う内部磁場によりバンドは変調される(図の右側)。その結果 k 空間における非対称性が現れ、非相反伝導が発現する。

結晶全体としては空間反転対称性が保たれているものの、各副格子に着目すると、 b 軸に垂直な鏡面に対する鏡映対称性が破れている。その結果、各副格子には互いに反対向きの局所的電場勾配が生じ、副格子ごとに逆向きのスピン

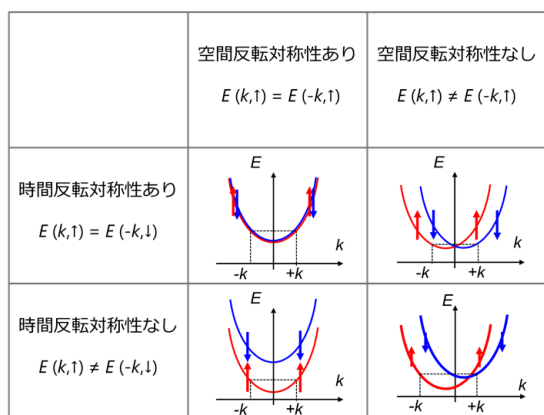


図1 時間・空間反転対称性の破れに伴うバンド構造の変化の概念図。

これらの結果は、図 4(c)に示すような反強磁性ドメイン構造によって説明できると考えられる。ドメイン A とドメ

- [1] T. Furukawa, Y. Shimokawa, K. Kobayashi, and T. Itou, Observation of current-induced bulk magnetization in elemental tellurium, *Nat. Commun.* 8, 954 (2017).
- [2] T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa, and Y. Iwasa, Bulk rectification effect in a polar semiconductor, *Nat. Phys.* 13, 578 (2017).
- [3] K. Sudo, Y. Yanagi, T. Takahashi, K.-K. Huynh, K. Tanigaki, K. Kobayashi, M.-T. Suzuki, and M. Kimata, Valley polarization dependence of nonreciprocal transport in a chiral semiconductor, *Phys. Rev. B* 108, 125137 (2023).
- [4] K. Sudo, Y. Yanagi, M. Akaki, H. Tanida, and M. Kimata, Large Spontaneous Nonreciprocal Charge Transport in a Zero-Magnetization Antiferromagnet, *Phys. Rev. Lett.* 136, 016503 (2026).