

反強磁性体におけるトポロジカルホール効果

関 真一郎 〈東京大学先端科学技術研究センター seki@ap.t.u-tokyo.ac.jp〉

高木 里奈 〈東京大学物性研究所 rina.takagi@issp.u-tokyo.ac.jp〉

電子はスピンに由来する磁気モーメントを持ち、磁気モーメントが平行に整列した強磁性体では、その総和として磁化が生じる。磁気モーメントは円電流と等価であり、**時間反転操作**を行うと電流の向きが反転するため、磁気モーメントの向きも反転する。このため、磁化が生じている状態では巨視的に時間反転対称性が破れ、状態の区別が可能である。現行の磁気記憶素子では、磁化の上向き・下向きの2状態を用いて情報を保持している。

時間反転対称性の破れは、電子の輸送現象にも特徴的な応答をもたらす。その代表例として、電流に直交した方向に電圧が生じるホール効果が挙げられる。外部磁場中で運動する電子はローレンツ力を受け、磁場に比例したホール電圧を生じる（正常ホール効果）。一方、強磁性体では外部磁場がなくても磁化に比例したホール電圧が現れる。これは異常ホール効果と呼ばれ、磁化の向きに応じて符号が反転するため、磁気情報の電氣的読み出しにも利用できる。

これに対し、隣り合う磁気モーメントが逆向きに整列する反強磁性体では、時間反転操作と並進操作の組み合わせにより2つのスピン状態が一致する。その結果、巨視的には時間反転対称性が保たれるため、強磁性体のような情報保持の機能は期待できず、磁化を持たないことから異常ホール効果は観測されないと考えられてきた。しかし近年、特殊なスピン配列を持つ反強磁性体では巨視的な時間反転対称性が破れ、外部磁場や磁化がなくてもホール効果を生じ得ることが指摘されている。

磁化に比例しないホール効果の例として、スピンの**非共面**配置をとる場合に現れる「トポロジカルホール効果」が挙げられる。伝導電子はスピン構造中を運動する際に**Berry位相**を獲得し、あたかも磁場が存

在するかのような効果を受け、運動が横方向に曲げられてホール電圧が生じる。この効果はこれまで、パイロクロア格子（正四面体が頂点共有して3次元的に連結した結晶格子）を持つ磁性体や、**磁気スキルミオン**を示す物質など、主として強磁性的相互作用を持つ系で観測されてきた。したがって、「磁化を持たない反強磁性体で、強磁性体と同等の大きさのトポロジカルホール効果を実現できるのか」という問題は、実験的に十分検証されていなかった。

本稿では、その例として反強磁性体 CoM_3S_6 ($M = \text{Ta}, \text{Nb}$) におけるトポロジカルホール効果を取り上げる。この系では、層状 van der Waals 物質である MS_2 の層間に Co 磁性イオンが挿入され、Co スピンが三角格子を形成する。我々は、Co スピンが非共面配置をとり、巨視的に時間反転対称性が破れていることを見出した。この物質は大きな磁化を持たないにもかかわらず、強磁性体に匹敵する大きさのホール効果が無磁場で観測されている。この現象は、スピン配置の幾何学的性質に由来する仮想磁場によるトポロジカルホール効果として理解される。

このような系では、ホール効果に加えて磁気光学効果やネルンスト効果など多様な応答がスピン配置の幾何学的性質に由来して生じることがわかってきている。また、磁化が小さいことは応用上の利点にもなり得る。漏れ磁場が小さいため素子の高集積化が可能であり、磁気的外乱に対する高い耐性も期待される。非共面の磁気構造に由来するトポロジカルホール効果は、磁化を必要とせずに大きなホール応答や仮想磁場を実現する新しい機構として活用できることが期待され、本物質はその重要な研究舞台を与える。

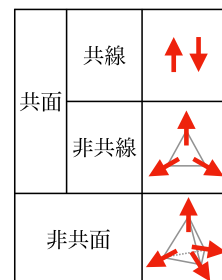
用語解説

時間反転操作：

時間の進行方向を反転させる対称操作のこと。この操作のもとで電子のスピン角運動量は反転し、磁気モーメントや磁化も逆向きになる。磁気モーメントが秩序化した状態では、時間反転操作によって異なる状態に変化することがあり、このとき時間反転対称性が破れているという。

非共面：

磁気秩序を構成するスピンのベクトルが、その原点位置を揃えたときに同一平面上に無い（共面でない）状況を指す。同一直線上に無い（共線でない）場合は非共線と呼ばれる。



Berry位相：

系のパラメータの断続変化に伴って、電子の波動関数に付け加わる幾何学的な位相因子のこと。電子が感じる仮想磁場と密接に関係する。

磁気スキルミオン：

渦状スピン配列の一種。その構成要素となっているスピンを並べ替えると球面をちょうど一周覆うことができることから、トポロジカルに安定な粒子としての性質を持つ。