室温で情報の読み書きが可能なコリニア反強磁性体の発見

凝縮系物性研究部門 高木 里奈 附属中性子科学研究施設 中島 多朗 附属物質設計評価施設 山浦 淳一

磁性体の代表である強磁性体の歴史は古く、古代ギリシ ャでは磁鉄鉱が天然磁石として知られていたと言われてい ます。強磁性体では、磁気モーメントが互いに平行に整列 し、磁化(磁気モーメントの総和)を持ちます。現在、磁気 情報の記録には主に強磁性体が利用されており、磁気モー メントがすべて上向きに揃った状態と下向きに揃った状態 は、時間反転対称性の破れによって区別可能であることが 利用されています。この時間反転対称性の破れがもたらす 代表的な物理現象の一つに、ホール効果があります。導体 に電場を加えると通常、電子は電場の方向に運動しますが、 磁場が存在すると進行方向が曲げられ、横方向に電圧(ホ ール電圧) が発生するホール効果が生じます。強磁性金属 では、外部磁場が存在しなくても磁化によってホール電圧 が生じることがあり、これは異常ホール効果と呼ばれます。 異常ホール効果によって生じる電圧は、磁化の向きによっ て符号が変化するため、磁気状態の電気的な読み出し手法 として利用することができます。

一方、隣接する磁気モーメントが互いに反平行に整列している反強磁性体では、全体としての磁化はゼロとなります。このため、反強磁性体では異常ホール効果の発現は期待されてきませんでした。しかし近年、非共線型や非共面型のスピン配列を持つ反強磁性体において、強磁性体と同程度の大きな異常ホール効果が観測されてきており、磁化ではなく、電子のバンド構造の幾何学的性質である「ベリー曲率」が電子系に対する仮想磁場としてはたらき、異常ホール効果の起源となっていることが明らかにされてきています。

さらに最近では、より単純な磁気構造のコリニア反強磁性体(スピンが同一直線方向に反平行に整列)であっても特定の結晶対称性を伴えば異常ホール効果を示すことが提案されています。たとえば、非磁性イオンが図 1(b)挿入図のように交互に配置されている場合、[↑↓] と [↓↑] のスピン構造は空間的な並進操作によって一致せず、区別可能になります。

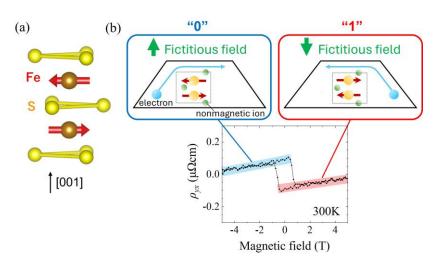


図 1: (a)FeS の原子配列と磁気構造。(b)室温で測定した FeS のホール抵抗 ρ_{yx} の磁場依存性。反強磁性秩序が誘起する仮想磁場によって大きなホール抵抗が観測されている。また、外部磁場を正→ゼロと変化させた場合と、負→ゼロと変化させた場合で、異なる符号を示していることから、外部磁場の向きによって異なる磁気状態を実現できることがわかる。したがって、[0] と [1] の情報に対応する [2] つの状態を、不揮発に保持・書き換え・読み出しが可能である。

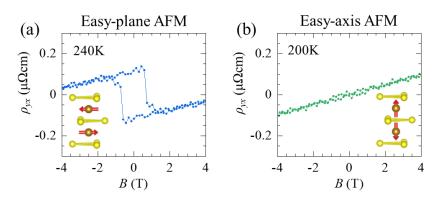


図 2: 磁気モーメントが面内を向いている容易面型反強磁性相(a)でのみ異常ホール効果が観測され、磁気モーメントが面直方向を向いた容易軸型反強磁性相(b)では異常ホール効果が生じない。

我々は、こうした時間反転対称性の破れたコリニア反強磁 性体の物質開拓を行い、FeS という磁性半導体において、 室温で異常ホール効果が発現することを発見しました。 FeS は図 1(a)のように、磁性を持つ Fe イオンが、非磁性 のSイオンの三角格子層に挟まれた構造をしており、上記 のような非磁性イオンの交互配置が実現されています。 FeS は 600 K 以下でコリニア反強磁性秩序を示し、Morin 転移温度 $T_{\rm M}$ = 220 K 以上では容易面型反強磁性(磁気モー メントが [001] 軸に垂直な方向を向く)、 $T_{
m M}$ 以下では容 易軸型反強磁性(磁気モーメントが [001] 軸に平行な方向 を向く)となります。これらの反強磁性相の磁気空間群か ら、容易面型のときには時間反転対称性が破れており異常 ホール効果の発現が許されますが、容易軸型の場合には時 間反転対称性が保たれており、異常ホール効果の発現が許 されないことがわかります。また、容易面型反強磁性相は、 [001] 方向に磁化した強磁性相と同じ磁気空間群に属する ことから、[001] 方向に仮想磁場が生じることが期待され ます。

そこで、[001] 軸方向に磁場を印加してホール抵抗率の磁場依存性を測定したところ、容易面型反強磁性相である室温において、明らかに磁化に比例しない異常ホール効果が生じていることを見出しました(図 1(b))。ここでは、図1(b)の挿入図に示すような2種類の反強磁性ドメインが、外部磁場を正から0とする場合と負から0とする場合とで切り替わっていると考えられます。そして、この2種類のドメインは時間反転操作によって移り変わることから、互いに逆向きの仮想磁場を持つと考えられます。我々の詳細な解析から、観測した異常ホール効果は磁化ではなく、反強磁性秩序に起因する仮想磁場に由来することが示されま

した。また、この異常ホール効果は、TM以上の容易面型 反強磁性相でのみ観測され(図 2(a))、TM以下の容易軸型 の場合には発現しないことから(図 2(b))、対称性に基づく 理論的予測と一致していることが確認されました。我々は TMにおいて確かに磁気モーメントの方向が90度回転し、その際に結晶構造には大きな変化がないことを中性子・X線散乱によって確かめ、さらに、電子バンド構造に対する第一原理計算においても、FeSの異常ホール効果は容易面型のコリニア反強磁性を起源とすることが示されました。一方、第一原理計算によって予測された異常ホール伝導度は観測結果より1桁以上大きい値であることから、フェルミ準位の系統的な制御によって異常ホール効果を増大できることが期待されます。

以上のように、本研究では、コリニア反強磁性体であっても、適切な結晶対称性のもとでは異常ホール効果を生じることを室温において実証することに成功しました。本研究成果は、磁気状態の電気的読み出しや操作が可能な反強磁性体のさらなる物質開拓や機能解明に繋がることが期待されます。従来の磁気記録では、強磁性体の磁化の向きを情報として活用してきましたが、そこでは磁化に由来した漏洩磁場が生じるため、情報の高密度化に限界があることが指摘されています。一方、大きな磁化を持たない反強磁性体を情報記録へ活用することができれば、漏洩磁場の問題は生じず、高密度化が可能となり、今後の反強磁性スピントロニクスの発展に向けて、大きな意義があると考えられます。

参考文献: R. Takagi et al., Nat. Mater. 24, 63-68 (2025).