

—超高速かつ低消費電力での磁気シフトレジスタの実現へ道—

物性研究所・ナノスケール物性研究部門 大谷 義近

【研究の背景】

磁壁は、電流を印加すると、電流と磁化の相互作用であるスピン移行トルクによって動かすことができる。この磁壁の電流駆動現象は、磁壁の位置で情報を記録する磁気シフトレジスタの基本的な駆動原理となっている。したがって、磁壁の移動速度はシフトレジスタの動作速度に、磁壁の駆動電流値は消費電力に直結する。これまで、強磁性体やフェリ磁性体を用いた研究で、磁壁の高速電流駆動が実証されてきたが、反強磁性体に関しては報告がなかった。

近年、反強磁性体を使うことで、従来の強磁性体よりもはるかに高速で磁壁を駆動できることが理論的に予測されており[1~4]、その実験的な実証が期待されていた。しかし、反強磁性体は一般的に磁化状態を電気的に検出しにくいため、磁壁駆動などの磁化ダイナミクスを解明することが難しかった。

そこで本研究では、最近注目を集めている磁性材料であるカイラル反強磁性体(図1 Mn_3Sn および Mn_3Ge 、 Mn はマンガン、 Sn はスズ、 Ge はゲルマニウム)に着目した。この物質は、特殊なバンド構造を持つワイル磁性体で、反強磁性体でありながら強磁性体のように磁化状態を電気

的・光学的に検出できる。この反強磁性体を用いて、磁壁の電流駆動ダイナミクスを実験的に検証した[5]。

【実験の概要】

最初にカイラル反強磁性体(Mn_3Sn および Mn_3Ge)の単結晶を集束イオンビームで精密加工し、幅 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ $46\text{ }\mu\text{m}$ 、厚さ約 800 nm の細線に成形した(図 2a)。この加工技術により、反強磁性体の結晶方位に依存する特性を詳細に評価するための微細構造が得られ、これまで困難だった精密な実験が可能となった。

まず、反強磁性細線内に磁壁を導入し(図 2b 上図)、その状態で細線の長手方向にナノ秒単位のパルス電流を印加した。その結果、磁壁の移動が確認され、磁気光学カー効果を用いた磁気イメージング法でその移動過程が可視化された。観測された磁壁の移動方向は、印加したパルス電流の逆方向(電子の流れの方向)であり、これまで強磁性体で報告されてきたスピン移行トルクによる駆動メカニズムと一致する結果となった(図 2)。この発見は、カイラル反強磁性体の磁壁駆動が、強磁性体で確立された理論と同様の物理現象に基づいていることを示唆している。

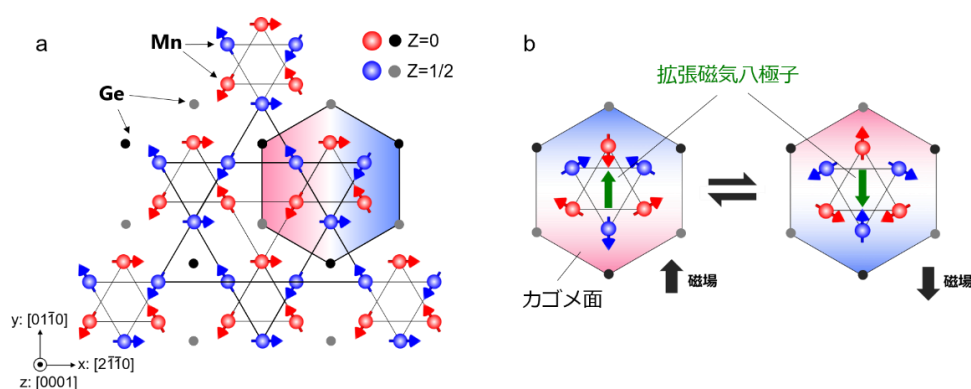


図1 カイラル反強磁性体 Mn_3Ge の磁気構造

- (a) カイラル反強磁性体 Mn_3Ge の磁気構造。Mn 原子が三角格子(カゴメ格子)上に並び、それぞれのスピンは 120° ずつ傾きながら配置している(カイラル反強磁性秩序)。そのため、正味の磁化は非常に小さな反強磁性体となる。
- (b) 磁場による Mn_3Ge の磁化反転。この反強磁性体の磁化方向は、カゴメ格子上に配置された六つのスピンの一つのユニットとして考えた拡張磁気八極子の向き(緑矢印)として捉えることができる。

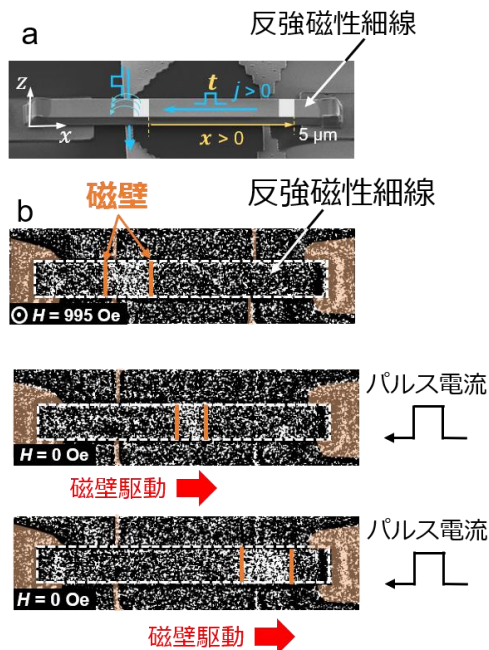


図2 反強磁性細線における磁壁の電流駆動
(a) カイラル反強磁性体の細線デバイス(走査電子顕微鏡写真)。
(b) 反強磁性細線における磁壁の電流駆動の様子。上から下にいくにつれて時間が経過している。

さらに、磁壁の移動速度と電流密度の関係を詳しく調べたところ、強磁性体に比べて約2桁も高い磁壁移動度を示すことが明らかになった(図3a)。移動度とは、単位電流密度あたりの磁壁移動速度を指し、これは材料がより効率的に駆動できる性能指標となる。これにより、磁壁の電流駆動を基本原理とする磁気シフトレジスタの応用において、強磁性体の代替としてカイラル反強磁性体を使用することで、低消費電力でかつ高速な動作が実現できる可能性が示された(図3b)。

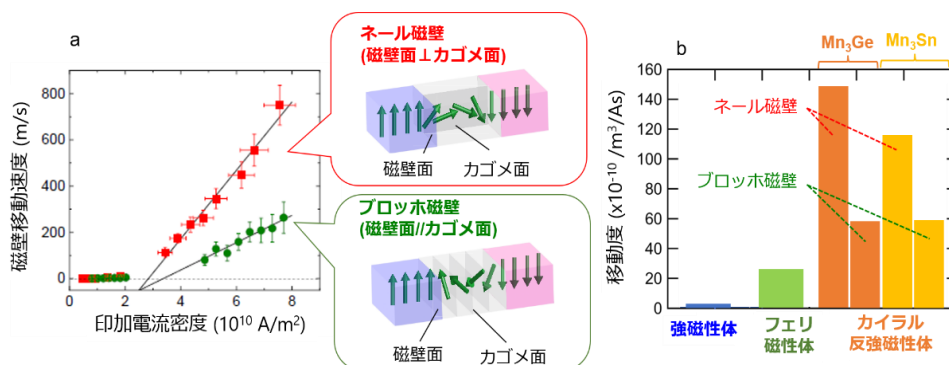


図3 磁壁移動速度の電流密度依存性と磁壁移動度の比較

- (a) 磁壁構造に依存した磁壁移動速度。濃い灰色の四角がカゴメ面を表しており、これが磁壁と直交するか平行になるかで、ネール磁壁かブロッホ磁壁かが決まる。ネール磁壁がブロッホ磁壁よりも移動速度が速い。
(b) 強磁性体とフェリ磁性体、カイラル反強磁性体の磁壁移動度の比較。カイラル反強磁性体の移動度が高い。

さらに、カイラル反強磁性体のもう一つの特筆すべき特徴は、図1に示すカゴメ格子面(カゴメ面)が磁化容易面である点である。これは、磁気モーメントがこの面内で向きを揃えやすく、拡張磁気八極子がカゴメ面内で回転するため、細線を加工する際に選択する結晶方位によって、異なる磁壁構造を実現できることを意味する(図3a)。具体的には、ネール磁壁とブロッホ磁壁の2種類の磁壁構造を結晶方向と細線方向を揃えることで選択的に生成することが可能であり、これは磁壁の動作特性を調整する上で大きな利点となる。この実験では、ネール磁壁がブロッホ磁壁よりも高い速度で電流駆動されることが確認された(図3a、b)。

これらの結果から、カイラル反強磁性体を用いた磁壁駆動の特性は、従来の強磁性体よりも優れた電流駆動性能を持つことが示された。

【まとめと今後の展開】

本研究の成果により、従来の強磁性体やフェリ磁性体を用いたシステムに対して、反強磁性体を使用することで1桁以上高速に駆動可能な磁気シフトレジスタの実現への道が示された。これにより、次世代のスピン트로ニクスデバイスにおいて、より高速で省エネルギーな動作が期待できる。特に、JST 未来社会創造事業で開発が進められているスピン트로ニクス光電融合デバイスにおいて、本研究が基盤となる駆動原理として活用される可能性がある。

今後の課題としては、カイラル反強磁性体をさらに薄膜化・微細化し、実際のデバイス構造に近い形状での高精度な磁壁駆動の実現が挙げられる。これにより、実際のデバイスに応用できるレベルでの高速磁壁駆動と、それを活用したデバイスの実証が期待されている。この技術が確立さ

れば、スピントロニクスデバイスの性能が飛躍的に向上し、より効率的で高速な情報処理を可能にする未来が見えてくるだろう。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成(研究代表者：中辻知)」(課題番号：JPMJMI20A1)、同戦略的創造研究推進事業 CREST「電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成(研究代表者：中辻知)」(課題番号：JPMJCR18T3)、同戦略的創造研究推進事業さきがけ「第一原理計算に基づくトポロジカル磁性材料探索(研究代表者：野本拓也)」(課題番号：JPMJPR20L7)、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業挑戦的研究(萌芽)「反強磁性ドメインの形成と制御の理論研究(研究代表者：鈴木通人)」、同基盤研究(A)「マルチポロニクスの第一原理物質設計(研究代表者：有田亮太郎)」による支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] R. Cheng, and Q. Niu, Phys. Rev. B **89**, 081105(R) (2014).
- [2] O. Gomonay et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 017202 (2016).
- [3] T. Shiino et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 087203 (2016).
- [4] T. Nomoto and R. Arita, Phys Rev. Res. **2**, 012045(R) (2020).
- [5] M. Wu et al., Nature Communications **15**, 4305 (2024).