

中辻 知

東京大学物性研究所 教授

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

§ 1. 研究成果の概要

超スマート社会の実現のための主要技術である不揮発性磁気メモリーや磁気センサーは、これまで強磁性体とその心臓部に用いてきた。強磁性体の限界を超えた高密度・高速データ処理を実現するために、反強磁性スピントロニクスへの関心が高まっているが、応答の微弱さが応用への大きな妨げとなっている。本研究ではその解決策として「ワイル磁性体」という革新的磁性材料を用いて、強相関電子系におけるトポロジカル現象をスピントロニクスに導入する。この革新的磁性材料では、一般的には磁化に比例して現れると考えられ、反強磁性体では発現しないとされてきた機能（例：異常ホール効果、異常ネルンスト効果）が、電子構造のトポロジーを利用することで実現する。本年度は、研究代表者のグループにて世界に先駆けて開発したワイル反強磁性体 Mn_3Sn を用いたスピントロニクスデバイスの開発に資する技術の開拓を行うと同時に、反強磁性体 Mn_3X におけるワイル磁性状態の理論的・実験的確認を進めた。

新規スピントロニクス機能として、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn のスピンホール効果を明らかにするために、集束イオンビームや電子線リソグラフィ等の微細加工技術を用いて、バルク単結晶から μm サイズのスピンホール効果測定用素子を作製した。 Mn_3Sn 素子に電流を流すことで、発生した表面のスピン蓄積の印加磁場方向依存性を系統的に測定し、スピン蓄積ベクトルの方向が Mn_3Sn 中の構成スピンの回転に伴い変化することを見出した（下図 a,b,c 参照）。これは従来のスピンホール効果とは異なり、磁気構造に応じて変化することから、「磁気スピンホール効果」と名付けた。この新現象は、従来未開拓であったスピンホール効果と磁性との協奏現象であり、より効率的に動作する磁気記録素子の創製に貢献することが期待される [1]。

また、新規ワイル磁性状態の候補物質である Mn_3Ge の単結晶合成に成功し、元素置換効果によるフェルミエネルギーの制御を行い、異常ホール・異常ネルンスト効果の測定を様々な条件下で行った。また第一原理計算を用いて得られた Mn_3Ge の電子構造から期待される物性と照らし合わせることで、電子構造のトポロジーと巨大応答の関係についての理解を深化させた。

このほか、デバイス開発における根幹的な要素であるワイル反強磁性体 Mn_3Sn の薄膜化をスパ

ッタ法により試み、現行のエレクトロニクス技術に親和性の高い Si/SiO₂ 基板上に、初めて成膜に成功した。この薄膜試料はバルク単結晶試料に匹敵する巨大な異常ホール効果を示す [2]。量産化に向け、実験室系での成膜から大型スパッタ装置を用いたワイル反強磁性体の成膜開発への移行も順調に進められている。並行して、強相関トポロジカル電子相の代表例として知られている「ラッティンジャー半金属」Pr₂Ir₂O₇ の薄膜作製も行なった。Pr₂Ir₂O₇ は、歪みや磁場によりワイル半金属となることが理論的に予測されており、世界 10 箇所以上で薄膜化が試みられて来たが、物性評価はおろか薄膜作製に関する報告も無かった。その中、我々は Pr₂Ir₂O₇ の高品質エピタキシャル薄膜の作製に初めて成功した。さらに、磁気輸送特性測定から、本物質が歪みや磁場によってワイル半金属となることを実験的に初めて明らかにした。高品質な Mn₃Sn 薄膜や Pr₂Ir₂O₇ 薄膜が得られたことにより、強相関トポロジカル相の更なる理解やデバイス応用の進展が期待される [3]。

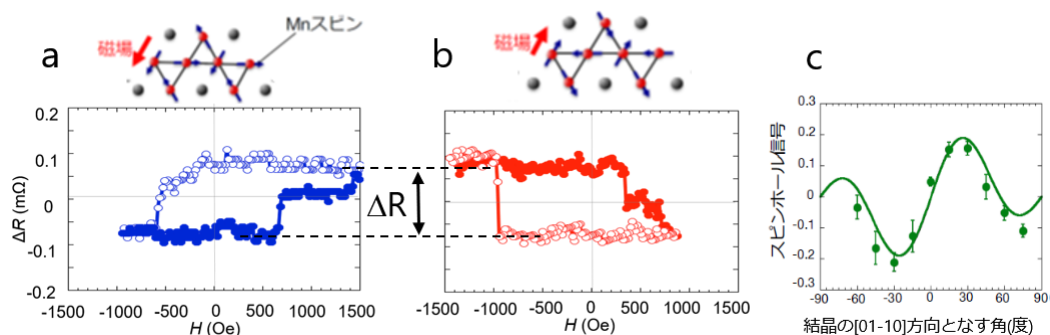


図:新しく発見された磁気スピンホール効果によるスピン蓄積信号とその磁場及び磁化方向依存性[1] **a** 観測されたスピン蓄積信号。 **b** 逆方向への外部磁場印加により、Mn のスピン方向を反転させた場合のスピン蓄積信号。このときヒステリシスの反転が観測された。 **c** スピンホール信号の磁場角度依存性。

【代表的な原著論文】

1. M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P-K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, A-H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani, “Magnetic and magnetic inverse spin Hall effects in a non-collinear antiferromagnet”, *Nature* **565**, 627-630 (2019).
2. T. Higo, D. Qu, Y. Li, C. L. Chien, Y. Otani, and S. Nakatsuji, “Anomalous Hall effect in thin films of the Weyl antiferromagnet Mn₃Sn”, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 202402 (2018). “Editor’s Suggestion”
3. T. Ohtsuki, Z. M. Tian, A. Endo, M. Halim, S. Katsumoto, Y. Kohama, K. Kindo, M. Lippmaa, and S. Nakatsuji, “Strain-induced spontaneous Hall effect in an epitaxial thin film of a Luttinger semimetal”, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **116**, 8803 (2019).

§ 2. 研究実施体制

(1) 中辻グループ

- ① 研究代表者: 中辻 知 (東京大学物性研究所 教授)
- ② 研究項目
 - ・ワイル反強磁性体の実験的開発と評価
 - ・ワイル反強磁性体の薄膜作製
 - ・ワイル反強磁性体と他の金属との接合による磁気抵抗効果の開拓

(2) 大谷グループ

- ① 主たる共同研究者: 大谷 義近 (東京大学物性研究所 教授)
- ② 研究項目
 - ・ワイル反強磁性体 Mn_3Sn 単結晶の微細加工技術の最適化
 - ・微細加工した単結晶試料を用いたスピン-電荷相互変換現象の実験的実証
 - ・磁気ドメインの検出・生成・駆動技術の開発

(3) 有田グループ

- ① 主たる共同研究者: 有田 亮太郎
(理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー)
- ② 研究項目
 - ・ワイル反強磁性体の理論的開発
 - ・磁気多極子ドメインの制御手法の理論構築

(4) 薬師寺グループ

- ① 主たる共同研究者: 薬師寺 啓
(産業技術総合研究所スピントロニクス研究センター 研究チーム長)
- ② 研究項目
 - ・磁気ドメインの熱安定性の確認
 - ・ホール素子メモリーのデザイン
 - ・不揮発性ホール素子メモリーの作製
 - ・不揮発性ホール素子メモリーの性能評価