

中辻 知

東京大学物性研究所
特任教授

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に向けて情報通信や人工知能技術の高度化への要求が高まっており、現状のシリコントランジスタ技術の限界を超えた革新的デバイスの基盤技術の構築が急務である。その主要な技術である不揮発性磁気メモリや磁気センサは、これまで強磁性体を中心に研究が行われてきた。今後、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。2019 年度は、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、とりわけメモリデバイスの開発に資する技術の開拓を行うと同時に、新規トポロジカル物質の開発を進めた。

主要な課題である「反強磁性体を用いたメモリの作製」に向けて、ワイル反強磁性体の電子構造のトポロジーが生み出す巨大応答を電氣的に制御する手法の開発が必須である。我々は、強磁性体で用いられているスピン軌道トルクによる磁化反転がワイル反強磁性体 Mn_3Sn においても適用可能かを検証した。その結果、 Mn_3Sn と Pt もしくは W を積層させた素子において、非磁性金属層に 10^{10-11} A/m² の電流を流すことで Mn_3Sn の反強磁性（磁気八極子）秩序とワイル点が創る巨大なベリー曲率由来のホール電圧が反転可能であることを発見した（図 a）。実験結果を良く説明する反転機構を考案し実験・理論双方から研究を進めることで、ノンコリニアな反強磁性秩序の電流・スピン流による応答の理解が進んだ。まさに、世界で初めて、ワイル粒子の作る巨大電圧信号を利用した不揮発性メモリ素子の原理の提案とその検証実験に成功したことになる。本素子では、書き込み電流の大きさによってホール電圧の大きさをアナログ的に制御することもでき、脳型計算機の開発へとつながることが期待される（図 b）[1]。

次に、トポロジカルな電子構造を持つ材料開発のためには、第一原理計算により電子構造を求め、ベリー位相が大きな材料をデザインする手法が有効である。我々は、計算コストを減らす新しいコード(<https://github.com/wannier-utils-dev/cif2qewan/>)を開発し、約 1400 種類の強磁性体について横磁気熱電係数 α_{yx} の計算を行った。計算で見出された新規トポロジカル磁性体 Fe_3Ga と Fe_3Al のバルク・薄膜試料を作製し、物性測定を行った結果、室温で過去最大値に匹敵する巨大異常ネルンスト効果を示すことを見出した。異常ネルンスト効果における同一面積・温度差当たりの発電量は従来技術を凌駕するほど大きく、薄膜型熱電デバイスへの発展が期待される。また本研究で見出された巨大な異常ネルンスト効果は、ノーダルウェブ(複数のフラットな分散を持つノーダルラインが交差した構造)というトポロジカルなバンド構造に由来していることが明らかになった。ノーダルウェブという新たなトポロジカルな電子構造の発見は、新規トポロジカル材料探索の指針となる [2]。

最後に、電気的制御手法の開発が進むワイル反強磁性体の磁区構造や磁壁のダイナミクスに関する研究を進めるために、 Mn_3Ge の単結晶試料を用いた磁気光学カー効果の測定を試みた。表面の処理方法の最適化の結果、 Mn_3Sn に匹敵する大きな極カー効果信号 (約 8.2 m deg.) の観測に成功した。カー効果では非破壊・非接触で磁区・磁壁構造が観察可能であるため、今後反強磁性体で期待される高速で移動する磁壁ダイナミクスの観察へ発展が期待できる [3]。

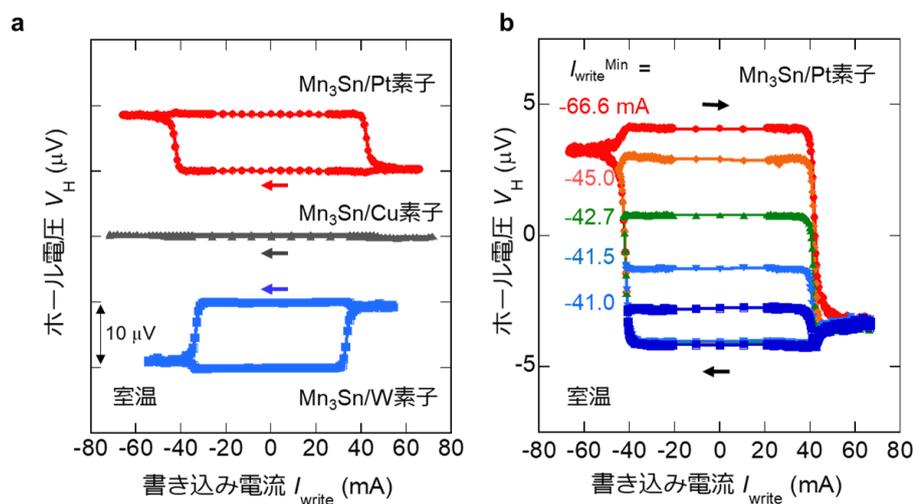


図: a. Mn_3Sn と Pt、Cu、W との積層膜を用いたホール素子における、ホール電圧の書き込み電流依存性。b. 多値記憶の実証実験。書き込み電流の下限 $I_{\text{write}}^{\text{Min}}$ を変えることで、ホール電圧が多値化していることが分かる。

【代表的な原著論文】

1. Hanshen Tsai*, Tomoya Higo*, Kouta Kondou, Takuya Nomoto, Akito Sakai, Ayuko Kobayashi, Takafumi Nakano, Kay Yakushiji, Ryotaro Arita, Shinji Miwa, YoshiChika Otani, and

Satoru Nakatsuji, “Electrical Manipulation of a Topological Antiferromagnetic State” *Nature* 580, 608–613 (2020).

2. Akito Sakai*, Susumu Minami*, Takashi Koretsune*, Taishi Chen*, Tomoya Higo*, Yangming Wang, Takuya Nomoto, Motoaki Hirayama, Shinji Miwa, Daisuke Nishio-Hamane, Fumiyuki Ishii, Ryotaro Arita & Satoru Nakatsuji, “Iron-based binary ferromagnets for transverse thermoelectric conversion” *Nature* 581, 53–57 (2020).

3. Mingxing Wu, Hironari Isshiki, Taishi Chen, Tomoya Higo, Satoru Nakatsuji, and YoshiChika Otani, “Magneto-optical Kerr effect in a non-collinear antiferromagnet Mn_3Ge ”, *Applied Physics Letters*, 116, 132408 (2020).

§ 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、特任教授)
- 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
 - ・ホール素子メモリのデザイン
 - ・不揮発性ホール素子メモリの作製
 - ・不揮発性ホール素子メモリの性能評価