

トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出
2018 年度採択研究代表者

2021 年度 年次報告書

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、現状のシリコントランジスター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。本研究では、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を既存の強磁性体から電子構造のトポロジーを利用した機能性反強磁性体材料に置き換えることで、革新的スピントロニクスデバイスの創製を目指している。

今年度も引き続き、メモリやセンサに適したトポロジカル磁性体の開発を進めた。新たな機能性反強磁性体として期待される共線反強磁性体や巨大なネルンスト効果を示すトポロジカル磁性体の開発を目標に、強相関第一原理計算による物質探索を行った。その結果、ワイル強磁性体 Co_2MnGa と同様に量子リフシツ転移近傍にあるワイル半金属状態での臨界挙動を示すハーフホイスラー型強磁性体 CoMnSb や、新しいトポロジカル電子構造であるノーダルプレーンを有するカゴメ格子強磁性体 Fe_3Sn の開発に成功し、巨大な異常ネルンスト効果を観測した。

ワイル反強磁性体 Mn_3Sn を用いたデバイス基盤技術開発も進展している。時間分解磁気光学カー効果を用いた磁気八極子ダイナミクスの測定から、 Mn_3Sn を用いることによりテラヘルツ領域で超高速動作するデバイスが開発可能であることを強く示唆する結果を得た。また、スピントルク強磁性共鳴実験からは、磁気スピンホール効果に由来した面直スピン蓄積による有効面直磁場(フィールドライクトルク)が従来の白金などの遷移金属に比べて数倍程度大きいことが分かった。磁気スピンホール効果では磁気八極子モーメントによりスピン偏極の方向を制御できる特性が既に知られていたが、磁気スピンホール効果がもたらすスピントルクも巨大であるという結果は、 Mn_3Sn が磁性材料の磁化方向を制御するために用いられるスピントルク源としても有用なことを示している。以上のように、トポロジカル磁性体を用いたメモリとセンサの実用化に向けた研究開発が順調に進んでいる。

§ 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
 - ・トポロジカル反強磁性体の実験的開発と評価
 - ・トポロジカル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
 - ・電流・スピン流による磁気ドメイン反転技術の開発
 - ・ワイル磁性体の薄膜作製と熱流センサー開発
 - ・ワイル反強磁性体の磁気ダイナミクスの実験的機構解明

(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
 - ・磁気スピンホール効果の学理構築とそのスピントロニクス技術の応用展開
 - ・磁気ダイナミクスと磁壁状態の実験的確認

(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
 - ・共線型の磁気構造をもつ機能反強磁性体の強相関第一原理計算
 - ・磁気構造データベースの構築

(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 新原理コンピューティング研究センター 研究チーム長)
- ② 研究項目
 - ・ワイル反強磁性体デバイス作製プロセス開発
 - ・ワイル反強磁性体薄膜の開発

【代表的な原著論文情報】

- 1) K. Kondou, H. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, T. Higo, A. H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani, “Giant field-like torque by the out-of-plane magnetic spin Hall effect in a topological antiferromagnet”, Nature Commun. 12, 6491 (2021)
- 2) S. Miwa, S. Iihama, T. Nomoto, T. Tomita, T. Higo, M. Ikhlas, S. Sakamoto, Y. C. Otani, S. Mizukami, R. Arita, S. Nakatsuji, “Giant Effective Damping of Octupole Oscillation in an

Antiferromagnetic Weyl Semimetal”, *Small Sci.* **1**, 2000062 (2021)

3) Hiroto Nakamura, Susumu Minami, Takahiro Tomita, Agustinus Agung Nugroho, and Satoru Nakatsuji, “Logarithmic criticality in transverse thermoelectric conductivity of the ferromagnetic topological semimetal CoMnSb”, *Phys. Rev. B* **104**, L161114 (2021)

4) Taishi Chen, Susumu Minami, Akito Sakai, Yangming Wang, Zili Feng, Takuya Nomoto, Motoaki Hirayama, Rieko Ishii, Takashi Koretsune, Ryotaro Arita, Satoru Nakatsuji, “Large anomalous Nernst effect and nodal plane in an iron-based kagome ferromagnet”, *Sci. Adv.* **8**, eabk1480 (2022)

5) Hanshen Tsai, Tomoya Higo, Kouta Kondou, Shoya Sakamoto, Ayuko Kobayashi, Takumi Matsuo, Shinji Miwa, Yoshichika Otani, Satoru Nakatsuji, “Large Hall Signal due to Electrical Switching of an Antiferromagnetic Weyl Semimetal State”, *Small Sci.* **1**, 2000025 (2021)

6) Takafumi Nakano, Tomoya Higo, Ayuko Kobayashi, Shinji Miwa, Satoru Nakatsuji, and Kay Yakushiji, “Fabrication of polycrystalline Weyl antiferromagnetic Mn₃Sn thin films on various seed layers”, *Phys. Rev. Mater.* **5**, 054402 (2021)

7) Shinji Miwa, Satoshi Iihama, Takuya Nomoto, Takahiro Tomita, Tomoya Higo, Muhammad Ikhlas, Shoya Sakamoto, Yoshi Chika Otani, Shigemi Mizukami, Ryotaro Arita, Satoru Nakatsuji, “Giant Effective Damping of Octupole Oscillation in an Antiferromagnetic Weyl Semimetal”, *Small Sci.* **1**, 2000062 (2021)

8) Kouta Kondou, Hua Chen, Takahiro Tomita, Muhammad Ikhlas, Tomoya Higo, Allan H. MacDonald, Satoru Nakatsuji, and Yoshi Chika Otani, “Giant field-like torque by the out-of-plane magnetic spin Hall effect in a topological antiferromagnet”, *Nat. Commun.* **12**, 6491 (2021)