

51. スピントロニクス材料としての多自由度磁性体

東京大学 先端科学技術研究センター 助教 北折 暁

概要

次世代省電力技術として期待されるスピントロニクスの発展に向け、「磁化・カイラリティ・極性」といった複数の向きを同時に扱える多自由度磁性体の開拓を目的として研究を実施した。従来は磁化の上下で情報を表現していたが、空間対称性の破れに由来する新たな自由度の活用に着目した。方法として、単結晶合成が困難であった希土類化合物やサマリウム含有合金の育成技術を確立し、物性評価を実施した。その結果、 Tb_5Sb_3 において特異なカイラル磁気構造と巨大応答を発見し、さらに空間反転対称性の破れを持つ新規 Altermagnet の単結晶合成にも成功した。当該物質は小さな磁化にもかかわらず巨大な異常ホール効果を示し、従来材料を大きく上回る信号強度を有することが確認された。これにより、多自由度を活用した高性能スピントロニクス材料としての有望性が示された。

背景および目的

本研究は、スピントロニクスを発展させる材料を開拓するべく、複数の向き・自由度が共存する「情報密度の高い磁性体」としての「多自由度磁性体」を開拓することを目的とした。現行のエレクトロニクスは現代の情報社会の基盤となっている一方、その消費電力量は膨大なものになっているため、より省電力のエレクトロニクス代替技術が盛んに研究されている。なかでもスピントロニクスは、固体中の電子が持つ電荷だけでなくスピンも工学的に利用する、次世代省電力計算回路の主流と目される方式の一つである。過去のスピントロニクス研究においては、強磁性体を用いてスピンや磁化が上向き ($\uparrow\uparrow$) の状態を 0、下向き ($\downarrow\downarrow$) の状態を 1 と定義することで情報を取り扱ってきた。

しかし、固体中で向きを定義できる自由度は磁化だけではない。らせん構造の右巻き/左巻き (= カイラリティの向き)・極性の向きのような、空間構造の対称性の破れと呼ばれる属性もまた、向きを定義可能である。本研究では、空間構造の対称性が破れており、かつその向きを制御可能なスピントロニクス材料を探索する。特に代表研究者が先月に単結晶合成方法を見出したある物質を用いると、「磁気構造によって (仮想的な) 磁化の向き・カイラリティ・極性の 3 つが出揃う」という三つの自由度を共存・発現することができる。そしてこうした多自由度の系では、複数の自由度を反映した光ダイオード効果などを期待することが可能となる (図 1)。

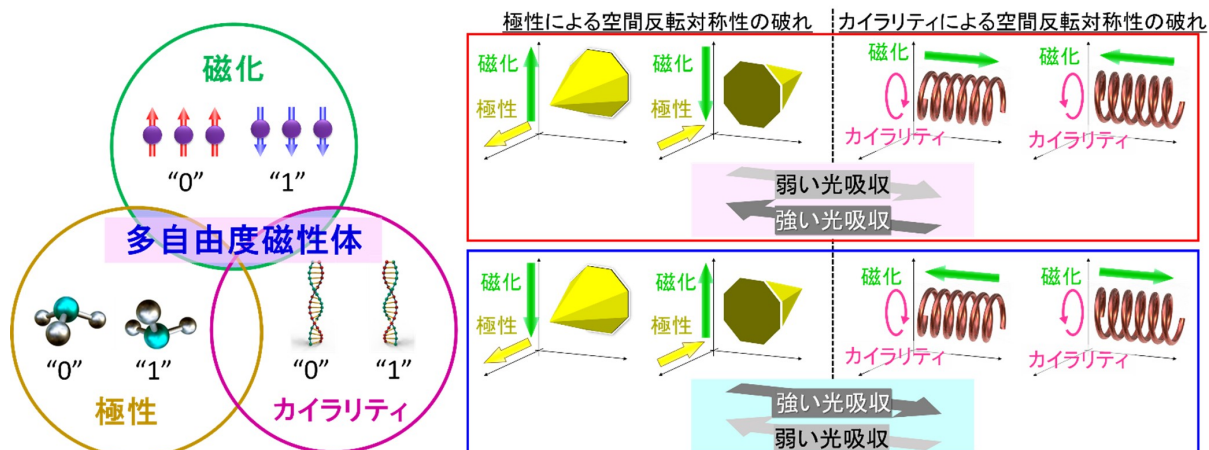


図 1. 磁化とカイラリティ / 極性を併せ持つ多自由度磁性体と、そこで期待される光ダイオード効果.

申請後の展開として、磁気的な“向き”に関して、強磁性体のみならず反強磁性体をも活用可能であることが認知されてきた。近年ドイツのグループにより、スピンの互い違い ($\uparrow\downarrow$) に揃う反強磁性体の場合でも非磁性元素の存在を考慮すると、ある種の物質においては 0/1 状態の区別が可能となることが理論的に提案された。この新物質群 Altermagnet は反強磁性体のメリットと強磁性体のメリットを併せ持ち、新規スピントロニクス材料として大変有望である。

そこで、本研究では「空間反転対称性が破れている強磁性体 (および関連磁性体)」「空間反転対称性が破れている Altermagnet (および関連磁性体)」についてそれぞれ開拓を行った。

方法

空間反転対称性が破れている強磁性体 (および関連磁性体) に関しては、傾斜横コニカル構造を有するらせん磁性体の合成を行った。今回注目したのは Mn_5Si_3 型構造を有する希土類-アンチモン化合物であるが、この構造の物質群は多数の非共線磁性体を擁する豊かな物質群であるが、同構造を有する希土類-アンチモン間の化合物はインコングルエントな組成であるため単結晶育成が困難であった。しかし我々は当該カテゴリーの単結晶育成法を確立している。

空間反転対称性が破れている Altermagnet (および関連磁性体) に関しては、サマリウムを含む極性希土類合金に注目した。こちらに関しても単結晶合成の困難さゆえに研究は進展してこなかった歴史がある。

以上の物質群に関して、単結晶育成と各種物性測定を実施した。

結果および考察

Mn_5Si_3 型構造を有する希土類-アンチモン化合物の一つである磁性体 Tb_5Sb_3 にて、我々は乱れた傾斜コニカル磁気構造という珍しいタイプのカイラル磁気構造を見出し、このカイラリティと磁化の自由度を有する構造が高い機能性 (巨大な創発インダクタンス) を生み出していること等を発見・報告している。本研究では当該成果をさらに進展させ、Photonics & Electromagnetics Research Symposium Abstracts (2025/11/07) にて A. Kitaori “Disordered Chiral Spin Systems for Large Emergent Electro-magnetic Response” として招待講演発表を行った。

空間反転対称性が破れている Altermagnet (および関連磁性体) に関しても、サマリウムを含む極性希土類合金に適切な反強磁性体を見出し、単結晶を合成することに成功した。こちらは現在論文化に向けて詰めの作業を行っている。情報の読み出しをバルク結晶の状態でも安定して行うことができる初の Altermagnet としては、既に注目を集めている物質に (研究代表者も含めたグループにより報告された) FeS が存在する。むしろ、これ以外の Altermagnet では、2026 年 3 月現在、ホール効果を通じたバルクでの安定した磁気的な 0/1 情報の読み書きが報告されていない。しかし FeS は空間反転対称性の破れを伴っていないだけでなく、異常ホール効果が小さい

め 0/1 情報の読み取りに際しては高感度な電圧測定が求められてしまうという問題があった。今回発見・合成に成功したサマリウムを含む極性希土類合金は、結晶構造自体が極性を有しているため空間反転対称性が破れている (= 極性に基づく向きが定義できる) うえ、単結晶試料を用いたホール抵抗測定によって時間反転対称性が破れている (= 磁気的な”向き”が定義および制御できる) ことも確認された。当該物質は典型的な強磁性体であるニッケルの 1/10 以下の磁化しか有さないにもかかわらず、ニッケルと同等の高い異常ホール伝導率を示すことが明らかになった。ホール角・異常ホール抵抗率・異常ホール伝導率と、どの指標においても本物質の異常ホール効果は強磁性体と同等以上であり、FeS と比較したときには 10000 倍以上の信号強度 (異常ホール伝導度) である。磁気転移温度も希土類合金としては高く 100 K を超えており、今後は本物質に関して論文にて報告した後、本物質をプラットフォームとした多自由度系デバイスの作製を実施する予定である。

(完)

発表

- 1) A. Kitaori “Disordered Chiral Spin Systems for Large Emergent Electro-magnetic Response”
(Photonics & Electromagnetics Research Symposium Abstracts, 2025/11/07)