

反強磁性金属における巨大な磁気光学カー効果と磁気八極子ドメインの直接観察

ナノスケール物性研究部門（量子物質研究グループ併任）

肥後 友也

量子物質研究グループ

中辻 知

研究の背景

磁気光学カー効果(ファラデー効果)は、直線偏光した光を磁性体に照射した際にその反射光(透過光)の偏光面が回転する現象である。これらの線形磁気光学効果は、光磁気ディスクや通信線路などで用いられる光アイソレータ等の磁気光学素子の原理であるほか、磁気特性や電子状態といった基礎物性や磁気ドメインを非破壊・非接触で、かつ、簡便に測定する手段として基礎~応用研究に広く用いられている。一般に、これらの線形磁気光学効果は、マクロな磁化とスピン軌道相互作用により生じると考えられており、磁化を持つ強磁性体やフェリ磁性体において精力的に研究が行われてきたが、一方で、磁化がゼロの反強磁性体ではその検出が困難であると考えられてきた。

しかし、最近の研究の進展により、磁気光学効果は異常ホール効果と同様の対称性の議論からその振る舞いを考察することが可能であり、つまり、時間反転対称性が巨視的に破れ、有限のベリー曲率を運動量空間に有する系では、磁化を持たない反強磁性体においても巨大な磁気光学カー効果が現れることが理論的に明らかになってきた[1]。

本研究では、反強磁性体において初めて異常ホール効果が観測された非共線スピン構造を持つ反強磁性金属 Mn_3Sn において、巨大な磁気光学カー効果や反強磁性ドメインを観測することを目的に実験を進めてきた。以下では、その結果について紹介する。

実験結果

反強磁性体 Mn_3Sn は図 1(a)に示すように、空間群 $P6_3/mmc$ に属する六方晶の系で、磁性元素 Mn からなるカゴメ格子が ABAB の順序で積層した構造を持ち、逆 120 度構造と呼ばれる非共線スピン構造が $T = 430 \text{ K}$ という高温から現れる[2]。この反強磁性スピン構造は、磁化ゼロの状態においても強磁性秩序の場合と同様に巨視的に時間反転対称性が破れた状態を実現するが、これは図 1(b)に示すように、2 層のカゴメ格子に 3 つの副格子からなるスピンを 6 つ配置されたスピン構造(クラスター磁気八極子[3])を秩序変数とした際に、この磁気八極子が強的に秩序していることから理解できる。実際の系では、対称性から許される強磁性体の $1/1000$ 程度の微小なキャント磁化

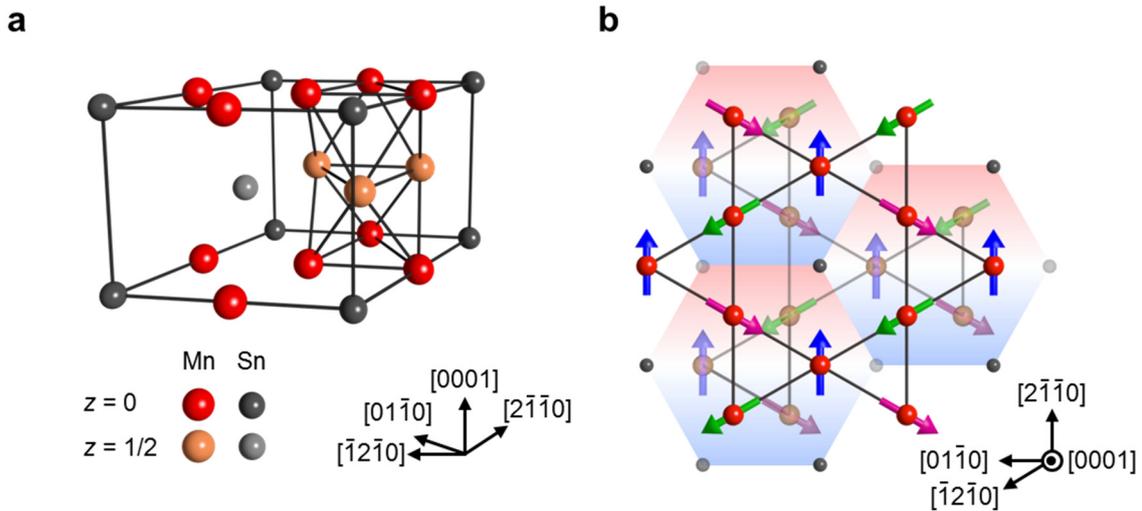


図 1 反強磁性金属 Mn_3Sn の結晶構造(a)と磁気構造(b)。(a) $[0001]$ 方向に二層のカゴメ格子が積層した構造をもち、磁性元素 Mn は正三角形の頂点に配置されている。(b) Mn のスピンは各カゴメ格子の層で逆 120 度構造というスピン構造をとる。二層のカゴメ格子上の 6 つのスピンを見てみると、六角形で囲まれているように、クラスター磁気八極子と呼ばれるスピン秩序のユニットを持っていることがわかる。

磁気光学カー効果が見れないと考えられていた無磁場かつ磁化ゼロの反強磁性状態においても巨大なカー回転が見れることを明らかにした。

さらに、磁気光学顕微鏡を用いて観察することにより、磁気八極子を持つ反強磁性ドメイン(≒カー回転角の正負の符号)の反転に伴ったコントラストの変化をイメージングすることに初めて成功した(図3(a)と3(b))。コントラストを示す2つの反強磁性ドメインは巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果の起源である符号の異なる100 Tの仮想磁場を持つ磁気八極子ドメインに対応していると考えられる。

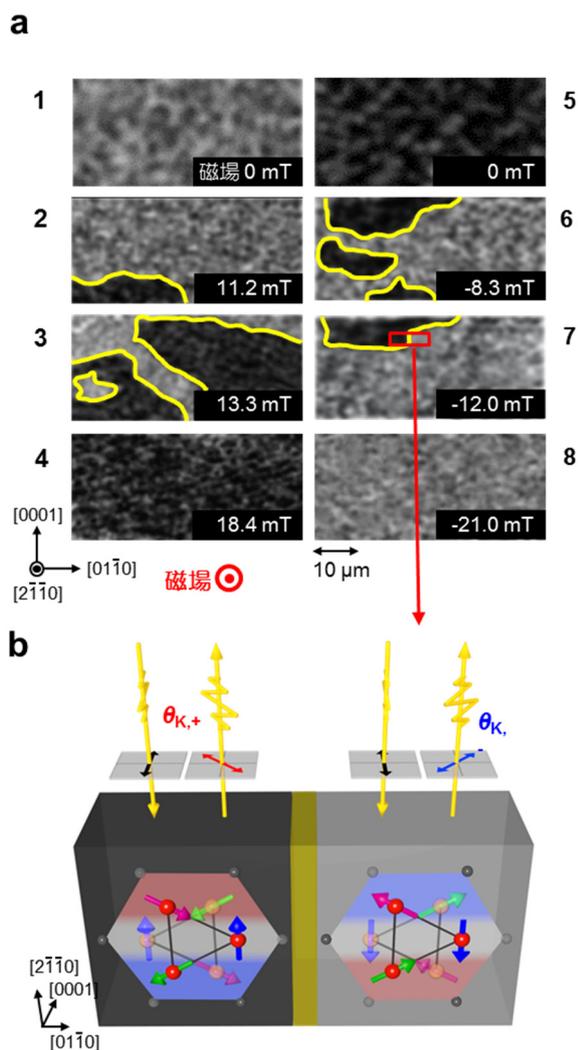


図3 反強磁性金属 Mn_3Sn の磁気光学カー効果による磁気八極子ドメインの直接観察像。(a)室温での試料表面の観察像。1-8の番号は図2(a)中での各点における測定に対応している。面直方向へ加えられる外部磁場によりコントラストが変化(灰色⇄黒色)している。黄色部分は磁壁を示している。(b)コントラストに対応した磁気八極子ドメインの概要図。

今後の展開

現在、漂遊磁界がゼロ・高速応答が可能な不揮発性磁気メモリ等の磁気デバイス開発への期待から、機能性反強磁性体に関する研究が盛んに行われている。中でも、強磁性体に匹敵する巨大な電気-磁気応答・熱-磁気応答・光-磁気応答特性の開拓に特に注目が集まっており、これらの特性を創出する起源と考えられているクラスター磁気多極子秩序の機構解明とその観測・制御方法の確立が望まれている。本研究において行われた反強磁性体 Mn_3Sn での磁気八極子由来の巨大な磁気光学効果の観測や反強磁性ドメインのイメージングは、反強磁性体を用いたデバイス研究への広範囲な応用展開が可能である。通常、反強磁性体の磁気ドメインの可視化には中性子散乱や放射光実験が行える巨大施設が必要だが、テーブルトップで、かつ、試料を非破壊・非接触で測定可能な磁気光学カー効果による反強磁性ドメインのイメージングは、我々が現在精力的に研究している異常ネルンスト効果を用いた磁気熱電デバイス等の反強磁性体を用いたデバイスの特性を評価する上でも非常に有用な技術であり、本手法を用いた研究が急速に進んでいくことが期待される。

謝辞

本研究は、東大物性研の H. Man 氏、M. Ikhlas 氏、理研 CEMS の是常隆氏(現：東北大)、鈴木通人氏(現：東北大)、有田亮太郎氏、米国 NIST の R.D. Shull グループ、UCB の J. Orenstein グループ、U.S. NRL の O.M.J. van't Erve 氏、JHU の C.L. Chien グループとの共同研究、大谷義近氏、H. Chen 氏をはじめとする数多くの方々との議論を通して得られた成果である。

また、本研究は、JST-CREST「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」研究領域(研究総括：谷口研二、研究副総括：秋永広幸)課題番号 JPMJCR15Q5(研究代表者：中辻知)、文科省 科研費 新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」課題番号 15H05882(研究代表：播磨尚朝)、課題番号 15H05883(研究代表：中辻知)、日本学術振興会 戦略的国際研究交流推進事業「頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム」における事業課題「新奇量子物質が生み出すトポロジカル現象の先導的研究ネットワーク」(主担当者：瀧川仁)の一環として行われた。

- [1] H. Chen, Q. Niu, and A.H. MacDonald, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 017205 (2014); W. Feng, G.-Y. Guo, J. Zhou, Y. Yao, and Q. Niu, *Phys. Rev. B* **92**, 144426 (2015).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, *Nature* **527**, 212 (2015).
- [3] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, *Phys. Rev. B* **95**, 094406 (2017).
- [4] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji, *Nat. Phys.* **13**, 1085 (2017).
- [5] H. Yang, Y. Sun, Y. Zhang, W.-J. Shi, S.S.P. Parkin, and B. Yan, *New J. Phys.* **19**, 015008 (2016).
- [6] K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A.A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo, and S. Nakatsuji, *Nat. Mater.* **16**, 1090 (2017).
- [7] T. Higo, H. Man, D.B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O.M.J. van 't Erve, Y.P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M.-T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C.L. Chien, R. Arita, R.D. Shull, J. Orenstein, and S. Nakatsuji, *Nat. Photon.* **12**, 73 (2018).