

丸文研究奨励賞 受賞者



**肥後 友也**  
 東京大学 大学院理学系研究科  
 特任准教授

# トポロジカル反強磁性体Mn<sub>3</sub>Snにおける電子機能開拓

対称性とトポロジーに基づく反強磁性体での巨大応答の検出と制御

## 研究の背景

PCやスマートフォンなどの通信端末やIoT・AI技術の発展により、データ流通量は30年後には現在の数千倍に達することが予想され、情報処理技術の低消費電力化が求められている。磁石として知られる強磁性体の磁化の向きを「0」と「1」の情報として記録する磁気抵抗メモリ(MRAM)は、低消費電力性と共に高書換耐性を満たし得る不揮発性メモリであり、次世代半導体技術の本命として期待されている。MRAMの

更なる高性能化に向けた研究指針として、反強磁性体での強磁性体の代替が検討されている。反強磁性体で期待される記録速度がTHz帯と強磁性体(GHz帯)に比べて2-3桁速いこと、漏れ磁場を出さず高集積化に適していることが主な理由である。しかし、発見から70年もの間、磁化を持たない反強磁性体では、強磁性体で見られるような磁化を自由度とする応答の検出や制御が困難であり、応用上の大きな課題だと考えられていた(図1)。

## 研究の成果

この状況は近年の反強磁性スピントロニクス分野の発展に伴い大きく変わってきた[1]。その代表例の一つが、ワイル点と呼ばれるトポロジカル電子構造を持つ反強磁性体Mn<sub>3</sub>Snでの巨大な異常ホール効果の観測である[2]。Mn<sub>3</sub>Snでは、時間反転対称性を巨視的に破るノンコリニア反強磁性秩序が運動量空間に100 T級の仮想磁場の源となるワイル点を誘起し、異常ホール効果などの巨視的な応答が室温で現れる。本研究では、トポロジカル反強磁性体Mn<sub>3</sub>Snを舞台に、反強磁性体の表面や膜・界面における電子機能の開拓を進め、以下の成果を得てきた。

### 1. トポロジカル反強磁性体の

#### 表面における巨大応答の観測

磁化に依存しない巨大な異常ホール効果[2]の観測以降、その発現機構の理解が進み、Mn<sub>3</sub>Snでは複数サイトのスピンの作るクラスター磁気八極子を自由度としてワイル点由来の仮想磁場とその応答を制御できることが分かってきた(図2a,b)。我々はクラスター磁気八極子の特性を理解し、磁化と同じように検出・制御を可能とすることで、Mn<sub>3</sub>Snの電子機能を開拓できると考えた。光を用いた非破壊・非接触の表面観察手法として知られる磁気光学カー効果の測定と磁区イメージングを室温で行った結果、これまで磁気光学応答が現れないと信じられていた反強磁性金属において、クラスター磁気八極子に由来した巨大な磁気光学カー効果の観測とクラスター磁気八極子の磁区のイメージングに成功した(図2c)[3]。本結果は、上記の異常ホール効果の観測と併せて、「反強磁性体では巨視的な応答の検出・制御が困難」という従来の教科書的な理解を覆し、反強磁性体が強磁性体と同様に電子機能材料として有用であることを示した。

図1 強磁性体・反強磁性体の諸物性

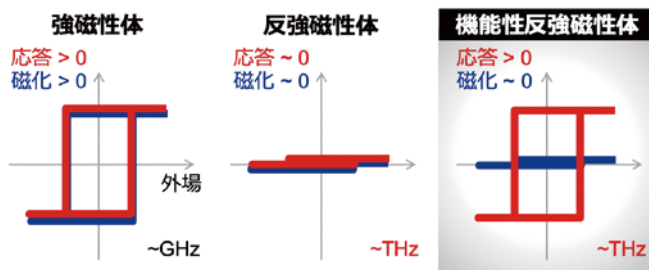
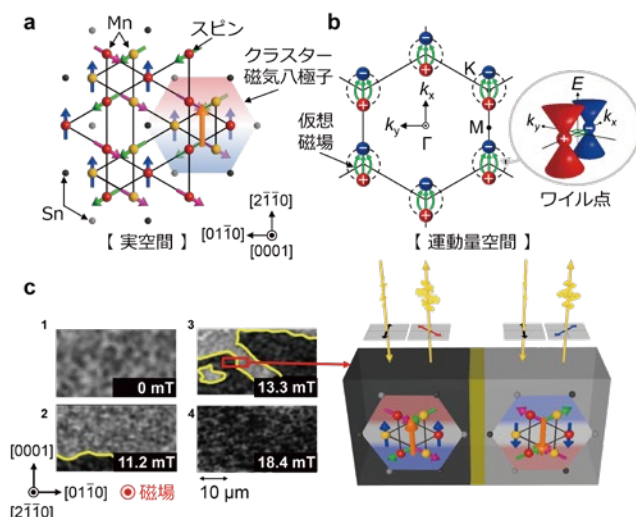


図2 Mn<sub>3</sub>Snの磁気(a)・電子(b)構造とクラスター磁気八極子磁区の磁気光学イメージング像(c)



## 2. トポロジカル反強磁性体の

### 薄膜と電氣的制御技術の開発

Mn<sub>3</sub>Snでの巨大応答の研究では主にバルク試料が用いられてきた。一方で、デバイス開発を進めるには薄膜試料が必要となる。我々はスパッタ法を用いて、巨大な異常ホール効果、異常ネルスト効果、磁気光学カー効果に加え、カイラル異常と呼ばれるトポロジカル電子構造由来の磁気輸送現象を室温で示すMn<sub>3</sub>Sn薄膜を作製した[4]。この薄膜と重金属層からなる多層デバイスを用いて、クラスター磁気八極子の電氣的制御と異常ホール効果による検出に成功した。本結果は、スピン軌道トルクにより磁気八極子を介してワイル点と仮想磁場を制御でき、反強磁性体でも強磁性体と同様のデバイス構造・制御技術を用いて情報記録が行えることを実証した[5]。より最近では、分子線エピタキシー法によるMn<sub>3</sub>Snエピタキシャル薄膜を作製し、エピタキシャル歪みにより生じたクラスター磁気八極子の垂直二値状態を電氣的に制御することに成功した(図3a-c)。本結果は、超低消費電力かつ、信頼性の高い記録技術として用いられる「垂直磁気記録」を反強磁性体において実現できたことを示している[6]。

### 3. 反強磁性体の持つ新たな電子機能の開拓と新原理デバイスへの展開

反強磁性体では主に超高速性と高集積性が着目され研究されている。我々は新たな機能の開拓を試み、Mn<sub>3</sub>Sn薄膜を用いて「反磁場が非常に小さく自己減磁に強い」という特性を実験的に示した。この特性は、Mn<sub>3</sub>Snが示す巨大応答が磁化ではなく磁気八極子を自由度とし、通常は磁化に比例し大きくなる反磁場の影響を無視できるため現れる。この特性の機能を示すために、Mn<sub>3</sub>Sn薄膜をもとにした幅5 μm、総長1 mの細線からなる異常ネルスト効果を用い

図3 Mn<sub>3</sub>Sn/重金属(W)多層膜デバイス(a)におけるホール電圧の磁場(b)・電流(c)制御実験

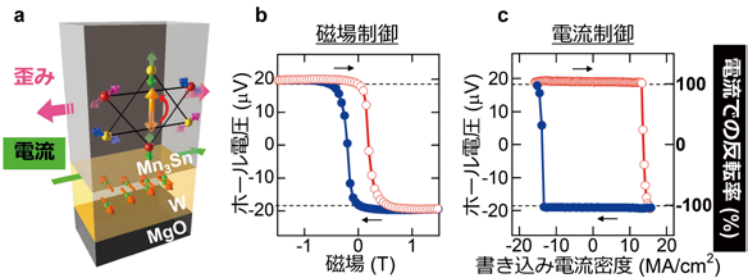
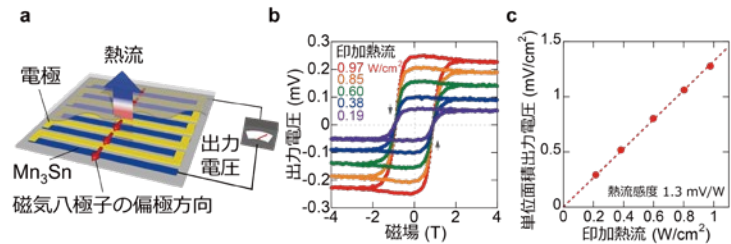


図4 Mn<sub>3</sub>Sn薄膜を用いた熱流センサー(a)における異常ネルスト効果由来の出力電圧の磁場依存性(b)と印加熱流依存性(c)。



た熱流センサー(図4a)を作製し、センサーが室温でも高い熱流感度を維持したまま、①形状磁気異方性の影響を受けないこと、②外部磁場に対する安定性が強磁性体の場合に比べて10-100倍向上することを実証した(図4b,c)[7]。自己減磁や外部磁場擾乱に強いという特性はデバイス形状の自由度が高くなるという利点に加えて、不揮発性メモリでの多値記録を可能にするなどの機能に繋がり、新原理の電子デバイス開発への展開が期待できる。

## 将来の展望

本研究で着目したMn<sub>3</sub>Snに代表される巨視的な時間反転対称性が破れた反強磁性体では、クラスター磁気八極子などの自由度を用いることで、通常は磁化の極性変化に対応し現れる応答を検出・制御できる。そのため、強磁性体に代わる電子材料群として、現在、様々なグループにおいて研

究が進められている。最近では、薄膜技術の高度化により作製が可能となった清浄な界面を持つ磁気トンネル接合において、より実践的な情報の読出手法であるトンネル磁気抵抗効果も実現でき[8]、不揮発性メモリへの展開も現実味を帯びてきた。その一方で、THz帯(ピコ秒)での情報記録や発振、読出信号の更なる増強機構の開発など、基礎・応用両方の観点で極めて重要となる未踏の研究領域が多数残されている。反強磁性体の実用化の一助となる電子機能の開拓を夢見て、引き続き研究に尽力したい。

## 謝辞

本研究は東京大学・中辻知教授研究室を中心に、同大学・大谷義近教授研究室、ジョンスホプキンス大学・C.L. Chien教授研究室の所属時に、数多くの研究室との共同研究のもと行われました。共同研究者の皆様のご支援に深く御礼申し上げます。

## References(参考文献)

- [1] V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, T. Moriyama, T. Ono, Y. Tserkovnyak, Rev. Mod. Phys. 90, 015005 (2018).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature 527, 212 (2015).
- [3] 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, S. Nakatsuji, Nature Photon. 12, 73 (2018).
- [4] T. Higo, D. Qu, Y. Li, C.L. Chien, Y. Otani, S. Nakatsuji, Appl. Phys. Lett. 113, 202402 (2018).
- [5] H. Tsai†, T. Higo†, K. Kondou, T. Nomoto, A. Sakai, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, R. Arita, S. Miwa, Y. Otani, S. Nakatsuji, Nature 580, 608 (2020).
- [6] T. Higo†, K. Kondou†, T. Nomoto, M. Shiga, S. Sakamoto, X. Chen, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, S. Miwa, S. Nakatsuji, Nature 607, 474 (2022).
- [7] T. Higo, Y. Li, K. Kondou, D. Qu, M. Ikhlas, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, C. L. Chien, Y. Otani, S. Nakatsuji, Adv. Funct. Mater. 31, 2008971 (2021).
- [8] X. Chen†, T. Higo†, K. Tanaka†, T. Nomoto, H. Tsai, H. Idzuchi, M. Shiga, S. Sakamoto, R. Ando, H. Kosaki, T. Matsuo, D. Nishio-Hamane, R. Arita, S. Miwa, S. Nakatsuji, Nature 613, 490 (2023).

(† : equal contribution)