# 反強磁性ワイル半金属ナノ細線の磁気イメージング - 簡易的・高空間分解能の新手法を用いて-

物性研究所 ナノスケール物性研究部門 一色 弘成、大谷 義近

## 【背景と目的】

カゴメ格子を持つ反強磁性ワイル半金属 MnsSn は、反 強磁性体でありながら異常ホール効果を示す特異な物質で あり、次世代スピントロニクス素子の材料として大いに注 目されている [1]。MnsSn の磁気秩序はカゴメ面内のクラ スター磁気八極子で表され、磁気的な応答を議論する際に はこれをマクロな磁化として扱うことができる [2]。この ような磁気多極子の空間分布を可視化することは、 MnsSn をはじめとするトポロジカル磁性材料の研究にお いて大変重要である。しかし、MnsSn に適用可能な従来 の測定法には空間分解能が低いことや測定原理に由来する 制約などさまざまな問題があり、応用上重要なナノ細線化 された試料に対しての磁気イメージングは報告されていな かった。

そこで我々は最近、異常ネルンスト効果(ANE)に着目し、 Mn<sub>3</sub>Sn ナノ細線にも適用可能な磁気イメージングの新手 法を開発した。ANE は図 1(a)に示すように、自発磁化を 持つ強磁性体等の導体に温度勾配を加えると、磁化と温度 勾配の直交方向に電場が発生する磁気熱電現象である。 我々の測定法では図 1(b)に示すように、原子間力顕微鏡 (AFM)の探針を試料に接触させることで局所的な温度勾 配を誘起し、その際に生じる ANE の電圧をマッピングす るする。これにより、約 80 nm の空間分解能で磁気像を 得ることができる [3]。この測定法を強磁性 Weyl 半金属 Co<sub>2</sub>MnGa でデモンストレーションした成果については、 物性研だより第63巻 第2号の『熱流注入で磁気を観る』 の記事でも紹介した。本研究ではこの測定法を Mn<sub>3</sub>Sn 多 結晶のナノ細線に適用し、クラスター磁気八極子領域の可 視化を試みた。

#### 【実験の概要】

本実験に用いたのは、カゴメ面と磁気八極子が膜の面内 方向に配向された  $Mn_3Sn$  多結晶膜である。実験のために、 図 1(b)に示すような試料細線とヒーターからなる素子を電 子線リソグラフィーと Ar エッチングにより作製した。 我々の測定法では、ヒーターで加熱した試料に AFM 探針 を接触させた際、局所的に面直の温度勾配( $\nabla_z T$ )が誘起



図 1. (a)異常ネルンスト効果。(b)本測定法の概略図。

される。その際、Mn<sub>3</sub>Sn の磁気八極子が細線の幅方向 (y 方向)を向いているとき、細線両端で ANE による電圧 (V<sub>x</sub>)が検出される。したがって、AFM 探針を接触モード でスキャンして ANE による電圧の空間分布をマッピング することにより、磁気八極子のイメージングが可能である。

図 2(a)には、MnaSn ナノ細線のトポグラフィー像と、 磁場印加前後の ANE の電圧マッピング像を示す。電圧マ ッピング像の中の赤と青(正の電圧と負の電圧)の領域は、 それぞれクラスター磁気八極子が+y 方向および-y 方向を 向いている事を示している。図 2(b)に示す磁場印加前の像 では、数百ナノメートルサイズの赤と青の磁気八極子領域 がランダムに表れていることが見える。この結果は、結晶 粒内に閉じ込められた磁気八極子が初期状態でランダムな 方向を向いていると解釈できる。磁気的応答を調べるため に、+y 方向に外部磁場を印加してクラスター磁気八極子 を飽和させた後で外部磁場を取り去り、同じ領域を測定し たのが図 2(c)である。磁場印加後、全体的に赤の領域が広

物性研だより第 64 巻第 3 号 6

がり、青の領域が完全に消失していることがわかる。これ は、外部磁場を取り去った後でも Mn<sub>3</sub>Sn の磁気八極子が ナノ細線の幅方向(+y 方向)に残留することを示している。 形状磁気異方性が小さい反強磁性体ならではの結果である が、ナノ細線で実際に可視化されたのは初めてである。ま た、図 2(c)で白い領域が見られることは、多結晶の試料に おいては ANE を発現しない結晶粒が存在することを示し ている。このように、本測定法を適用することによりに、 Mn<sub>3</sub>Sn ナノ細線のクラスター磁気八極子領域を可視化す ることができた。



図2. 多結晶 Mn<sub>3</sub>Sn ナノ細線に対する測定結果。(a)試料細線のト ポグラフィー像。(b)初期状態に対する異常ネルンスト電圧マッピ ング像。(c)クラスター磁気八極子を細線幅方向に飽和させた後の 異常ネルンスト電圧マッピング像。(b), (c)ではゼーベック効果に よる非磁気的な信号は取り除いた。

# 【まとめと今後の展開】

我々は、新しい測定法を用いて Mn<sub>3</sub>Sn 多結晶配向膜の ナノ細線の磁気イメージングを行った [4]。得られる磁気 像は、漏れ磁場を検出する N-V センター磁気測定 [5]とは 本質的に異なり、磁気八極子の情報を直接的に反映してい る。この新手法は、簡易的ながら約 80 nm と比較的高い 空間分解能を持ち、異常ネルンスト効果を示す様々な物質 に適用可能である。近年、垂直方向の一軸異方性を示す Mn<sub>3</sub>Sn エピタキシャル薄膜が作製され、スピン軌道トル クによるクラスター磁気八極子の完全な反転が実現されて いる [6]。我々の新手法を Mn<sub>3</sub>Sn エピタキシャル薄膜に適 用することで、Mn<sub>3</sub>Sn の磁壁構造やスピン軌道トルクの 機構を新たな視点から研究できるようになると期待される。

### 参考文献

- S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Large Anomalous Hall Effect in a Non-Collinear Antiferromagnet at Room Temperature, Nature 527, 212 (2015).
- [2] M. T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, Cluster Multipole Theory for Anomalous Hall Effect in Antiferromagnets, Phys. Rev. B 95, 1 (2017).
- [3] N. Budai, H. Isshiki, R. Uesugi, Z. Zhu, T. Higo, S. Nakatsuji, and Y. Otani, *High-Resolution Magnetic Imaging by Mapping the Locally Induced Anomalous Nernst Effect Using Atomic Force Microscopy*, Appl. Phys. Lett. **122**, 102401 (2023).
- [4] H. Isshiki, N. Budai, A. Kobayashi, R. Uesugi, T. Higo, S. Nakatsuji, and Y. Otani, Observation of Cluster Magnetic Octupole Domains in the Antiferromagnetic Weyl Semimetal Mn3Sn Nanowire, Phys. Rev. Lett. 132, 216702 (2024).
- [5] G. Q. Yan et al., Quantum Sensing and Imaging of Spin–Orbit - Torque - Driven Spin Dynamics in the Non - Collinear Antiferromagnet Mn 3 Sn, Adv. Mater. 34, (2022).
- [6] T. Higo et al., Perpendicular Full Switching of Chiral Antiferromagnetic Order by Current, Nature 607, 474 (2022).

7 物性研だより第 64 巻第 3 号