



図 2 (a) 室温 (300 K) でのホール抵抗率 ρ_H とホール抵抗 R_H 、面直磁化 M の磁場 B 依存性。強磁性体の 1/1000 程度の磁化しか持たない一方で、非常に大きな異常ホール効果を示している。(b) ゼロ磁場異常ホール抵抗率 $\rho_H(B=0)$ と抵抗率 ρ の温度依存性。

室温で得られた巨大な異常ホール効果が 260 K から低温に向かって急激に減少する振る舞いが観測された (図 2b)。この振る舞いは、巨視的な時間反転対称性 (TRS) の破れによりワイル金属状態が実現している Inverse triangular スピン構造 (260 – 430 K) から、TRS の破れない Helical スピン構造 (< 260 K) への相転移に対応するものだと考えられる。以上の結果は、今回作製した Mn_3Sn 薄膜がバルク単結晶試料と同様の特性を持ち、 Mn_3Sn の特徴的な磁気構造や電子構造がもたらす巨大なベリー曲率に由来する異常ホール効果が Mn_3Sn 薄膜においても現れていることを強く示唆している。

デバイス化した際に読み出し信号として用いられる異常ホール抵抗 R_H は膜厚 d に反比例して大きくなるため、薄膜化することで信号強度が増強されるが、今回作製した薄膜では異常ホール抵抗の変化量 ΔR_H が約 0.8 Ω となり、 Mn_3Sn のバルク試料に比べて実に 500 倍ほど大きな信号が得られた (図 2a)。この信号は、 $CuMnAs$ [7] 等の反強磁性体薄膜において近年観測された異方性磁気抵抗効果と比較しても 100 倍程度大きい。異常ホール効果は、メモリ内で記憶する情報である“0”と“1”に対応する 2 値の信号が異なる符号を持つため、読み取り時の測定誤差を抑えることが可能であるという利点を持っている。

今後の展開

強磁性体と同様に電気や光、熱に対して巨大な応答を示す反強磁性体 Mn_3Sn は、強磁性体と反強磁性体の両方の機能性を併せ持つ次世代の磁性材料であり、本研究の成果

である薄膜技術を用いることで、今後実用化を目指した機能性反強磁性体の応用研究が急速に進んでいくことが期待される。その具体的な応用例として、今回、本研究グループが薄膜試料において観測した「異常ホール効果」を用いた高速・高密度な不揮発性磁気メモリがまず挙げられるが、バルク試料で既に確認されている熱や光に対する応答や新奇な電流-スピン流変換特性[9]を用いることで、さらに幅広い展開も期待できる。たとえば、熱などの未利用エネルギーを用いて発電を行うエナジーハーヴェスティング分野で注目されている異常ネルンスト効果を用いた熱電変換素子への適用が考えられる。異常ネルンスト効果では、熱流に垂直に配置された電極間に電圧が生じるため、本薄膜作製技術を用いて素子の大面積化・高集積化を行うことで、より大きな発電電圧を得ることが可能となる。

謝辞

本研究は、米 Johns Hopkins 大の Yufan Li 氏、C. L. Chien 氏との共同研究、Lippma Mikk 氏、Jiyeon Lee 氏、高橋竜太氏、石井理恵子氏によるサポート、三輪真嗣氏、近藤浩太氏、小林鮎子氏、西川尚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)、JST-CREST「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」研究領域(研究総括：上田 正仁)課題番号 JPMJCR18T3

(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)、「ナノスピンの変換科学」課題番号 26103002 (研究代表：大谷 義近)、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」(担当者：瀧川 仁)の一環として行われた。

- [1] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, *Nature* **527**, 212 (2015).
- [2] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji. *Nat. Phys.* **13**, 1085 (2017).
- [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, and S. Nakatsuji, *Nat. Photon.* **12**, 73 (2018).
- [4] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, *Phys. Rev. B* **95**, 094406 (2017).
- [5] 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).
- [6] T. Higo, D. Qu, Yufan Li, C. L. Chien, Y. Otani, and S. Nakatsuji, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 202402 (2018).
“Featured Articles”
- [7] P. Wadley *et al.*, *Science* **351**, 587 (2016).
- [8] M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P.-K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, A.-H. MacDonald, S. Nakatsuji & Y. Otani, *Nature* **565**, 627 (2019).

