

1. 氏名	小野瀬 佳文
2. 所属機関	東北大学金属材料研究所
3. 研究題目	ヘリカルスピントロニクスの開拓
4. 研究の目的:	<p>ヘリカル磁性体とは、磁気モーメントがらせん状に整列する磁性体である。この磁気構造には、らせんの巻き方(キラリティ)に関する自由度が存在しており、結晶の対称性が高ければ二つの状態は完全に縮退している。絶縁体のヘリカル磁性体のキラリティは電場制御することが出来ることが分かっていたが、スピントロニクスに適応可能な金属のヘリカル磁性体におけるキラリティ制御法は最近まで明らかでなかった。小野瀬らは、金属ヘリカル磁性体におけるキラリティを、電流磁場の同時印加により制御することに世界で初めて成功した(Jiang, Onose et al., Nature Communications 2020)。さらに、共同研究者の関とともに室温ヘリカル磁性体 MnAu₂(転移温度 363K)の薄膜においてキラリティ制御が可能であることを示した。本研究では、これらの研究成果をもとに、ヘリカル磁性体のキラリティ自由度を情報の担体として用いたスピントロニクスの研究を推進する。具体的には、キラリティ自由度を利用した磁気メモリデバイスを創成に向けて、大きな外部磁場を必要としない効率的なキラリティメモリの読み出し法を開拓する。</p>

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

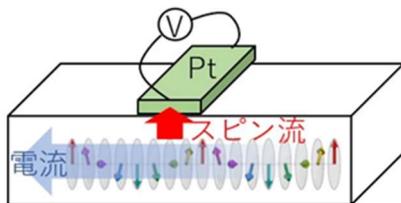


図1: キラリティ読み出しの概念図

以前の研究では、キラリティは抵抗率の2次高調波(入力交流電流の2倍の周波数の電圧応答の係数)における磁場依存性を測定して検出していた。このような方法は、デバイス応用には極めて不適當である。そこで、理論的に知られているキラリティに依存したスピンの生成を利用してキラリティをゼロ磁場で高感度に検出する方法を開拓する。ヘリカル磁性体薄膜とスピンホール物質の2層デバイスを作成

し、左図のようにヘリカル磁性体に電流を流すと、キラリティ依存したスピン角運動量の蓄積が起こり、他の金属との接合がある場合にはそこにスピンの流が流れ込むことが理論的に明らかになっている(Phys. Rev. B 94, 125143)。接合する物質が Pt などスピン軌道相互作用が大きくスピン流電流変換機能があるものと起電力が発生するが、その符号はキラリティに依存している。したがって、電氣的にキラリティの符号を検出することが出来ると期待される。本研究では、ゼロ磁場でキラリティ検出のために、ヘリカル磁性体 MnAu₂ とスピンホール物質 Pt の2層デバイスを作成し、電流誘起の横起電力つまり横抵抗の測定を行った。図2に実験結果を示す。この測定の前に、ヘリカル磁気状態から強制強磁性状態への転移磁場よりも高い磁場 H_0 と電流 I_0 を印加した後、電流を保持しながら磁場をゼロ磁場まで掃引した。小野瀬らの以前の研究により、この操作を行うと磁場 H_0 と電流 I_0 が平行か反平行かに依存して、キラリティが制御されることが分かっている。a, b は、このキラリティ操作の後に行った従来のキラリティ測定法である2次高調波の抵抗率の非対称な磁場依存成分を示している。a が $H_0 > 0$ で b が $H_0 < 0$ のデータである。この符号は明らかに、 H_0 と I_0 が同符号か異符号かに依存しており、キラリティを反映していることが明らかである。本研究の中心となる横抵抗の磁場依存性を示しているのが c, d である。c は $H_0 > 0$ で d が $H_0 < 0$ のデータである。2次高調波抵抗率と同様

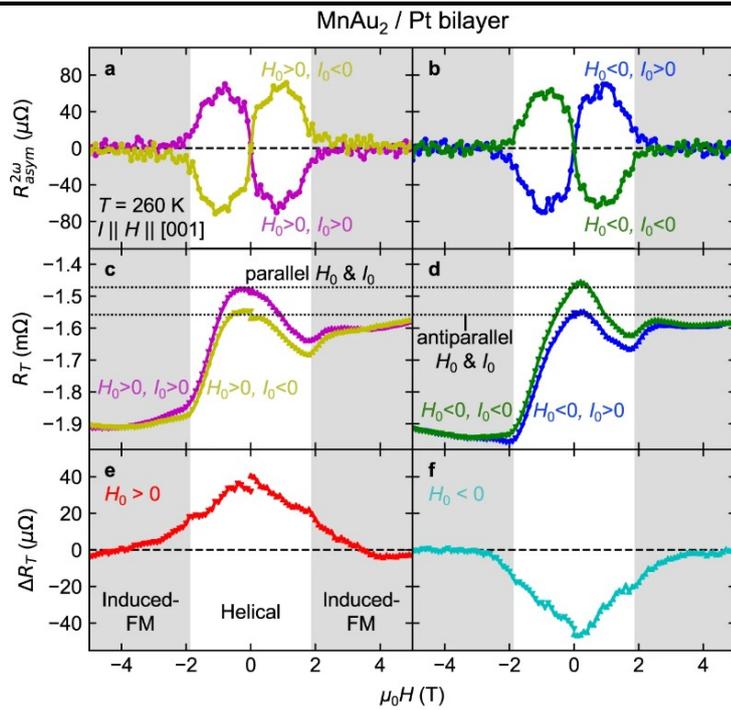


図2: MnAu₂/Pt2層デバイスにおけるキラリティ検出

a,b: 従来法である2次高調波によるキラリティ検出。c,d: 横抵抗の磁場依存性。e,f 制御電流 I_0 に依存する横抵抗成分。a,c,e は制御磁場 $H_0 > 0$ のデータで、b,d,e は $H_0 < 0$ のデータである。

Nat. Commun. 15, 1999 (2024)より転載。

に、測定前に電流 I_0 、磁場 H_0 を用いたキラリティ制御操作を行っている。横抵抗の値は H_0 、 I_0 に依存しており、例えばゼロ磁場の横抵抗の値は、横の点線で強調されているように、 H_0 、 I_0 が同符号か異符号かに依存している。より明確にキラリティ依存性を示すために、 I_0 の正負で差をとったものを e,f に示している。ヘリカル磁性相で差が有限となっており、その符号は H_0 に依存している。つまり、キラリティに依存する横抵抗の成分が確かにあることが分かる。

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

研究の成果と結論

本研究の結論は、ヘリカル磁性体とスピンホール物質の2層デバイスにおいてはキラリティ依存な横抵抗が生じるということである。この大きさはゼロ磁場が最も大きく、磁場を印加していくと減少する。これは、言い換えれば、磁場が不要で簡便なヘリカル磁性体におけるキラリティ検出法が得られたということである。従来の方法では、非相反伝導と呼ばれる抵抗率の第二高調波の磁場依存性が非対称な成分によってキラリティを検出していた。この場合には、外部磁場が必要であり第二高調波という簡便でない方法であるためデバイス応用には不向きであったが、本研究の方法は電流に比例した電圧の測定であり磁場も必要ではないためキラリティを利用した磁気メモリの検出に利用可能である。

本研究の結果は、基礎科学的な意味においても重要である。横抵抗の起源は、ヘリカル磁性層における電流によるスピン蓄積である。このようなスピン蓄積は、非共線的な磁気構造における伝導において重要な役割を示すゲージ場の働きの帰結である。本研究の結果は、逆に言えばそのようなゲージ場が確かに働いているということを証明していることになる。

今後の課題

本研究は、当初、キラリティ検出法と制御法の両方の開拓を目的としていた。上記のように検出法に関しては大きな進展があったが、制御法に関する成果はなかった。今後は、簡便なキラリティ制御法も確立をしたいと考えている。特に、強磁性体とヘリカル磁性体の接合デバイスを作製し、磁場なしでキラリティを制御する方法を確立したい。下図は、キラリティ制御法の概念図を示している。電流と強磁性磁化が平行か反平行に依存してキラリティが制御されることが期待できる。

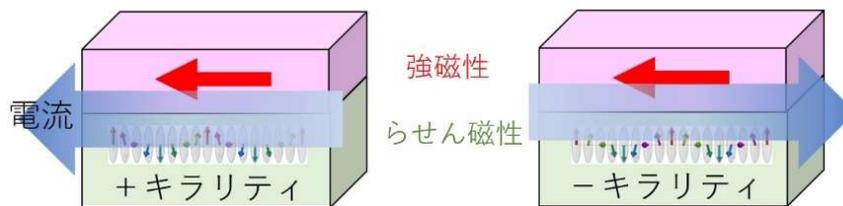


図3 キラリティ制御法の概念図

将来的には、これらの研究を通じてヘリカル磁気構造のキラリティをメモリとするデバイス応用へとつなげたい。現在、強磁性をもとにした磁気抵抗メモリ MRAM の開発が進められているが、MRAM における強磁性ビットは磁気双極子由来の漏れ磁場を生じ、これが隣接した他のビットに影響するという問題が指摘されている。また、制御速度が強磁性共鳴周波数(数 GHz)で律速されているという問題もある。ヘリカル磁性体を磁気メモリとして利用できれば、これらの問題を解決することが可能である。

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

MnAu₂/Pt₂層デバイスにおいて、キラリティに依存する横抵抗が観測されたことは、非共線的な磁気構造における伝導におけるゲージ場が働いて、キラリティ依存のスピンの蓄積を起こしていることを示している。このようなヘリカル磁性体における電流誘起スピン蓄積は、理論的には指摘されていたが実験的には初めて確かめられた。

7.2 社会的価値:

MnAu₂/Pt₂層デバイスにおいて、キラリティに依存する横抵抗が観測されたことは、簡便で磁場が必要でないキラリティ検出法が開発されたことを意味する。これは、将来のヘリカル磁性を基にした磁気メモリへとつながる可能性がある。

7.3_研究成果:

「研究論文」

Hidetoshi Masuda, Takeshi Seki, Jun-ichiro Ohe, Yoichi Nii, Hiroto Masuda, Koki Takanashi, and Yoshinori Onose, Room temperature chirality switching and detection in a helimagnetic MnAu₂ thin film, Nature Communications 15, 1999 (2024).

プレスリリース <https://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/news/results/detail---id-1572.html>

日刊工業新聞 <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00704851>

eetimes <https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2403/15/news070.html>

「国際会議発表」

Yoshinori Onose “Magnetic domain control by the inverse of nonreciprocal responses”

Conference of Condensed matter physics 2023 [招待]

Yoshinori Onose “Chirality control and detection in metallic helimagnets”

International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023