

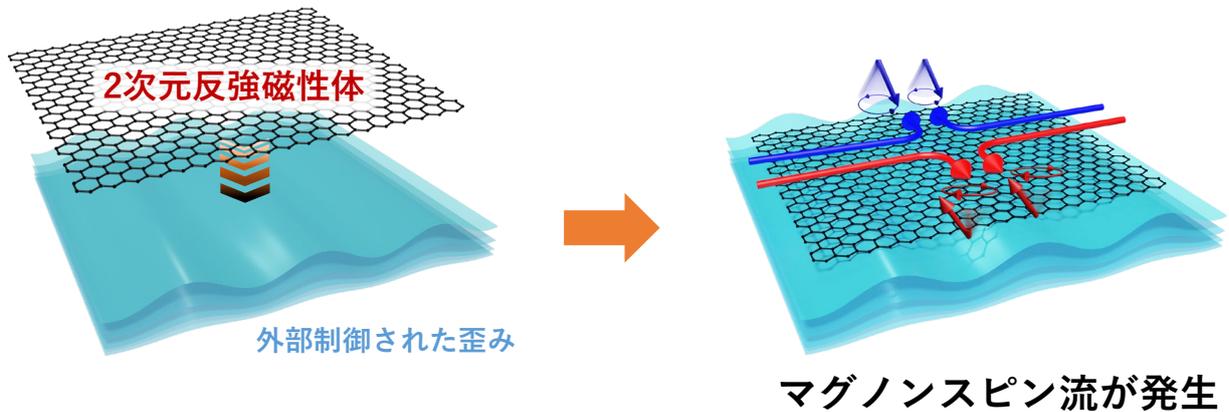
歪みが引き起こす反強磁性マグノンスピホール効果を予言 —2次元ファンデルワールス反強磁性体の新たな磁気測定手法として期待—

概要

京都大学大学院理学研究科 佐野涼太郎博士課程学生（日本学術振興会特別研究員）、中国科学院大学カブリ理論科学研究所 松尾衛准教授、および大湊友也同博士研究員（研究当時、現：早稲田大学高等研究所 講師）らの研究グループは、2次元ファンデルワールス反強磁性体に対する新たな磁気測定手法として外部から制御された歪みが引き起こすマグノンスピ流^{注1)}が有効であることを理論的に予言しました。

近年、次世代コンピューティングや情報処理技術の新たな候補として、これまで利用されてきた電子に代わり、磁性体中のマグノンが情報担体として検討され始めています。特に、最近実現されつつある2次元磁性体は将来のエレクトロニクスを支える新たな候補物質として有望視されていますが、その次元性に由来して測定手法に制約があることが大きな課題となっていました。そこで本研究では、「2次元物質は外から曲げやすい」という性質に着目することにより、この問題を解決する指針を与えることに成功しました。同時に本成果は、これまで応用が難しいとされてきた反強磁性体における新たなスピ流生成のメカニズムを解明したものであり、今後の反強磁性体を活用した次世代エレクトロニクスの実現へと繋がることが期待されます。

本成果は、2024年6月5日に米国の国際学術誌「*Physical Review Letters*」にオンライン掲載されました。



外部から歪みを加えることにより、反強磁性体中の二種類のマグノン（赤と青）が互いに逆方向に流れるため、正味のマグノンスピ流が垂直方向に発生する（ホール効果）。

1. 背景

電子は日常生活でよく目にする電気的な性質のみならず、「スピン」と呼ばれる電子の自転運動に由来する磁気的な性質も兼ね備えています。スピントロニクスと呼ばれる分野は、これら2つの性質を巧みに利用することにより、スピンの輸送現象^{注2)}を中心にこれまで情報社会に大きく貢献してきました。

最近では、スピンを運ぶ情報担体として電子に代わって新たに、磁性体中のマグノンが大きな注目を集めています。電子とは異なり、マグノンは電気的な性質を持たないため、スピンを運ぶ際にジュール熱^{注3)}が発生しないことが大きな特長です。これはデバイス応用の際に大量集積化の可能性を秘めていることを意味します。

こうした観点から近年注目を集めているのが2次元ファンデルワールス磁性体と呼ばれる物質群です。最近まで2次元磁性体の実現は難しいとされてきましたが、2000年代初頭にグラフェン等のファンデルワールス物質^{注4)}の研究で培われた劈開技術^{注5)}を用いることにより、実際に2次元磁性体が次々と発見され始めています。これらの多くは絶縁体であるため、ジュール熱を発生させることなくマグノンを輸送することが可能であり、さらには2次元物質であることも相まって、よりコンパクトで低消費電力なデバイスを作製する上で有利な条件が揃っています。その中でも遷移金属リントリカルコゲナイド^{注6)}は元素の選び方に応じて多彩な磁性を示す反強磁性体であるため、上記の利点に加えて反強磁性体^{注7)}ならではの特長を活かしたこれまで以上に高速なデバイスの実現が期待されます。

ところが、応用を見据えた研究を行う際に必要となる物質の磁性に関する詳細な情報を得る上で、磁化測定^{注8)}や中性子散乱^{注9)}といった従来の磁気測定手法はこうした2次元磁性体には適していないことが知られています。特に反強磁性体は正味の磁化を持たないため、磁気光学 Kerr 効果^{注10)}も有効な手段ではありません。最近になって、これらの困難を打開しようとラマン分光法^{注11)}や第二次高調波発生^{注12)}などの光学的手法による磁気構造の特定が試みられているものの、2次元の反強磁性体に適した包括的な手法は未だ存在しません。

2. 研究手法・成果

そこで本研究では、研究対象が非常に柔軟性の高い2次元物質であるという事実を逆にとることにより、外部から加えた歪みが引き起こすマグノンスピン流が新たな磁気測定手法となることを予言し、この問題への解決の糸口を見出すことに成功しました。2次元ファンデルワールス磁性体の多くはハニカム格子と呼ばれる六角形の格子構造を取りますが、こうした物質に外部から歪みを加えると、磁性体中に住むマグノンは外力を感じて動き始めます。この効果は、電子が電場（ゲージ場）によって駆動される現象と酷似していることから、歪みゲージ場と呼ばれます。特に重要なのは、電子は負の電荷を持つため制御が容易な電場によって駆動することができますが、電荷を持たないマグノンはそうではないということです。ところが、この歪みゲージ場を用いることにより、マグノンの動きを外部から人工的に制御することができるようになります。

今回の研究ではまず、歪みゲージ場の助けを借りることにより、外部制御された歪みがマグノンスピン流を生成することを発見し、さらにはそれが磁性体の情報を与える磁気測定手法として有効であることを理論的に予言しました。これにより、これまで難しかった2次元反強磁性体の測定が容易になると期待されます。

加えて、本手法により生成したマグノンスピン流は伝播距離が長いこと、大きなサイズのエレクトロニクスデバイスへの応用にも有用であることが期待されます。さらに、今回対象としている物質は反強磁性体であるため、従来の手法で生成したマグノンスピン流は打ち消し合ってしまうか、あるいは非常に小さな量になってしましますが、歪みゲージ場を用いることによって上手く打ち消し合いを回避し、実験的に十分に測定可能なマグノンスピン流を作り出せることを予言しました。このように、これまで応用が難しいとされてきた反強磁性体においてマグノンスピン流を生成する新たなメカニズムを解明したことにも意義があると言えます。

3. 波及効果、今後の予定

今回提案した「外部から歪みを印可してマグノンスピンを生成する」という方法により、これまで以上に2次元ファンデルワールス磁性体に関する基礎及び応用両面の研究が大きく前進することが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業・特別研究員奨励費(JP22J20221, JP22KJ1937)、同・基盤研究(B)(JP20H01863, JP23H0183)および同・基盤研究(A)(JP21H04565)の支援を受けて行われました。

<用語解説>

- 注1)** **マグノンスピ流**：磁性体内部で整列したスピンの揺らぎを量子力学的に取り扱い、粒子として捉え直したものがマグノンであり、そのマグノンが運ぶスピンの流れのこと。
- 注2)** **輸送現象**：物体中を電気や熱などの物理量が流れる現象の一般的な呼称。
- 注3)** **ジュール熱**：金属や半導体など電気抵抗を持つ物質に電流を流した際に発生する熱。これにより無駄なエネルギーを消費してしまう。また発生した熱は適切に放熱することが求められる。
- 注4)** **ファンデルワールス物質**：一層のシートを積み重ねたような層状の結晶構造を持つ物質の総称。1つの層内での結合は強い一方、層間はファンデルワールス力によって弱く結合しているため、その面に沿って随時結晶を剥がすことにより、究極的には一層にまで薄片化することができる。
- 注5)** **劈開技術**：原子間の結合が弱い結晶面（劈開面）で物質を断裂し加工する技術。特にファンデルワールス物質では、粘着テープを繰り返し用いることで原子1個分の薄さにまで劈開できるようになった。
- 注6)** **遷移金属リントリカルコゲナイド**：組成式 MPX_3 ($M = Ni, Co, Mn, Fe; X = S, Se$)によって表記される物質群の総称。磁性元素である遷移金属 M が六角形の頂点に配置されることで、ハニカム格子を構成する。
- 注7)** **反強磁性体**：原子スケールではミクロな磁気モーメントを有するが、全体としては磁化を持たないような物質の一般的な呼称。磁場などによる外部からの制御が難しいものの、将来の超高速なデバイスへの応用が期待されている。
- 注8)** **磁化測定**：物質に外部磁場を印可しながら磁化を測る一般的な実験手法。その信号の強さは対象物質の体積に比例する。そのため、2次元物質に対する信号は非常に小さくなってしまう。
- 注9)** **中性子散乱**：物質に打ち込んだ中性子の磁気モーメントの変化を調べることで、対象物質のミクロな磁気構造を探る実験手法。中性子との相互作用が弱いため、体積の小さな2次元物質に対する信号は微弱なものになってしまう。
- 注10)** **磁気光学 Kerr 効果**：直線偏光した光を磁性体に照射した際に、その反射光の偏光面が回転する現象。あるいはこの現象を用いて磁性体の磁化を調べる実験手法のこと。一般にその回転角は磁性体の磁化の大きさに比例する。そのため、正味の磁化を持たない反強磁性体には適さない。
- 注11)** **ラマン分光法**：物質に入射した光とは異なる周波数で散乱された光の性質を調べることにより、その周波数の変化の度合いから、対象物質の分子構造や結晶構造を探る実験手法。
- 注12)** **第二次高調波発生**：非線形光学効果に基づいて、照射した光の2倍の周波数の光を発生させる現象。この現象を用いた光の波長の変換（色の変換）の応用例として、緑色レーザーがよく知られている。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Acoustomagnonic Spin Hall Effect in Honeycomb Antiferromagnets

(ハニカム反強磁性体における音響マグノンスピンホール効果)

著者：Ryotaro Sano, Yuya Ominato, and Mamoru Matsuo

掲載誌：Physical Review Letters DOI：[10.1103/PhysRevLett.132.236302](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.236302)