

2023年9月5日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

トポロジカル物質の潜在的に優れた特性を理論と実験で実証 — スピントロニクス素子のさらなる低消費電力化に期待 —

【発表のポイント】

- トポロジカル物質^(注1)の一つであるコバルト・スズ・硫黄化合物 ($\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$) をベースに、スピンホール効果（電流を流すと横方向にスピンの流れ（スピン流^(注2)）が生じる現象）を最大化するための材料設計を理論提案し、実験的に実証しました。
- 低温で磁石になる $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の一部をインジウム (In) またはニッケル (Ni) に置換した材料について、低温での異常ホール効果^(注3) と室温でのスピンホール効果^(注4) を評価し、2つのホール効果の相関を確認しました。
- 異常ホール効果の情報をもとにスピンホール効果の大きさを理論予測できるため、材料探索の高速化が期待されます。

【概要】

スピンの流れ（スピン流）を積極的に利用し、スピンの方向で情報を記憶するスピントロニクス素子は、半導体エレクトロニクスだけでは難しい機能性（例えば低消費電力化など）を実現できるデバイスとして期待を集めています。しかしながら電流とスピン流との変換効率をいかに向上させるかが高性能化の鍵であり、高い変換効率の材料を探し出すための材料探索指針を示すことが切望されていました。

今回、東北大学金属材料研究所のラウ ヨンチャン (Yong-Chang Lau) 特任助教（研究当時：現中国科学院物理研究所准教授）と関剛斎准教授、東北大学大学院理学研究科の小沢耀弘大学院生（研究当時）らの研究グループは、トポロジカル物質の電子状態に着目することで、磁石の中に現れる「異常ホール効果」と非磁石の「スピンホール効果」の大きさをそれぞれ理論計算から予測し、実験的にその材料探索指針を実証することに成功しました。今回の成果は、高いスピン変換効率を示す材料を探し出すための指針となり、トポロジカル物質をスピントロニクスに利用するための材料開発が加速し、将来の半導体エレクトロニクスに貢献するものと期待されています。

トロニクス素子の低消費電力化に大きく寄与するものと期待されます。

本研究成果は、2023 年 8 月 25 日付で、米国物理学会の専門誌 Physical Review B に注目論文 (Editors' Suggestion) としてオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）に代表されるスピントロニクス素子は、磁石の性質を持つ強磁性体^(注5)の磁石の分極（磁化方向）で情報の記憶を行い、スピン角運動量の流れであるスピン流を利用して、情報の書き込みや読み出しを行います。これらの特徴から、半導体エレクトロニクスのみでは困難な「不揮発性・超高集積化・低消費電力化・高速性・高信頼性」を実現できるポテンシャルを有しており、次世代エレクトロニクスの中核を担う素子として注目を集めています。情報の書き込みと読み出しの電流経路を分けて動作する3端子型スピントロニクス素子では、誤書き込みの抑制や書き込みの速度の高速化という利点がある一方、書き込みエネルギーの低減が重要課題となっています。情報書き込みには、電流からスピン流を創り出し、そのスピン流を記憶層となる強磁性体の磁化に作用させて磁化方向をスイッチングさせますが、いかに効率よくスピン流を生成するかが省エネルギー化の鍵となります。

電流からスピン流への変換には、磁石の性質を持たない非磁石（非磁性体あるいは常磁性体^(注6)）の中で生じるスピンホール効果の利用が有力な手法です。高効率なスピン流への変換を達成するためには、大きなスピンホール効果を示す材料の創製が不可欠となりますが、そのような材料を探索する指針は明確になっておりませんでした。

今回の取り組み

今回、研究グループは、177 K（零下 96℃）以下の低温では強磁性体となり、室温では常磁性体となるコバルト・スズ・硫黄化合物（ $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ）に着目し、異常ホール効果とスピンホール効果を理論計算と実験の両面から調べました。 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ はトポロジカル物質の一つであり、強磁性体になるとその特徴的な電子構造に起因して巨大な異常ホール効果を示します。研究グループは、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ が強磁性体および常磁性体になるときの電子状態を理論計算し双方を比較したところ、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に電子をドーピングするとスピンホール効果が大きくなることが予測されました（図 1）。そこで、この理論予測を実験的に検証するため、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に対して電子を増やすニッケル（Ni）と、逆に電子を減らすインジウム（In）をそれぞれ $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の一部に置換した試料を合成し、異常ホール効果とスピンホール効果を調べました。その結果、異常ホール効果は何も置換していない $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ が最大値を示し、一方でスピンホール効果は電子がドーピングされた $(\text{Co}_2\text{Ni})\text{Sn}_2\text{S}_2$ で最大値を示しました（図 2）。この実験結果の傾向は理論予測と良く一致しており、異常ホール効果の情報をもとにスピンホール効果を最大化するための指針が得られることを実証しました。

今後の展開

異常ホール効果の研究の歴史は長く、すでに多くの物質において異常ホール効果の大きさが報告されています。さらに、トポロジカル物質群の電子状態についても直近の 10 年間で急速に理解が進んでいます。そのような物質の電子状態を注視することで、異常ホール効果をライブラリとした新たなスピンホール材料の探索が可能となります。今回の成果は、高い電流-スピン流変換効率を示すスピントロニクス材料を探し出すための指針を構築したと位置付けられます。今回の成果を基盤としてスピントロニクス材料開発が活発化し、スピントロニクス素子の省エネルギー化が加速するものと期待されます。

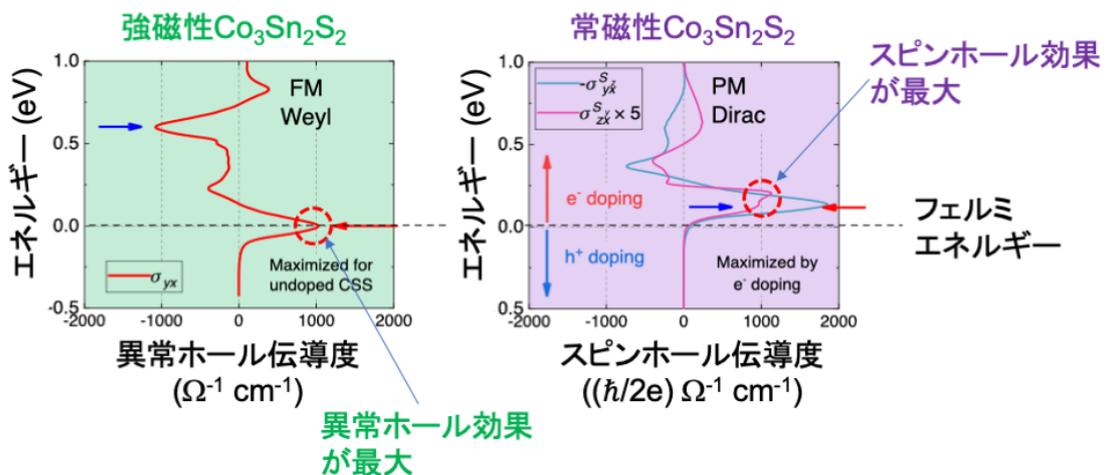


図 1. 強磁性 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ における異常ホール伝導度、常磁性 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ におけるスピンホール伝導度の理論計算結果。最大となるエネルギーが各々異なっている。

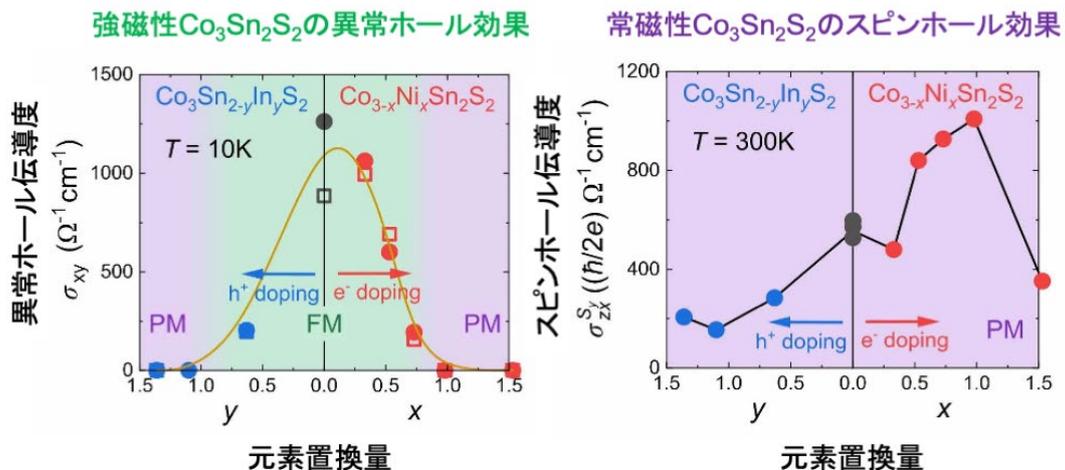


図 2. 強磁性 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ における異常ホール伝導度、常磁性 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ におけるスピンホール伝導度の実験結果。(左図) 何も置換していない $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ が最大値を示す。(右図) 電子がドーピングされた $(\text{Co}_2\text{Ni})\text{Sn}_2\text{S}_2$ で最大値を示す。

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費・基盤研究(S) (JP18H05246)、若手研究 (Grant No. JP20K15156)、基盤研究 (A) (JP20H00299)、基盤研究 (B) (JP20H01830)、JST CREST (JPMJCR18T2)、および次世代研究者挑戦的研究プログラム (Grant No. JPMJSP2114)の支援を受けて実施されました。感謝いたします。

【用語説明】

注1. トポロジカル物質

固体中の電子の運動はバンド構造（原子軌道の集合体）によって特徴づけられ、その幾何学的性質の観点から物性を理解しようとする研究が進められている。従来の金属や半導体とは異なるバンド構造の幾何学的性質をもつ物質群をトポロジカル物質とよぶ。今回研究グループが用いた $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は、磁石としての性質（強磁性）をもつトポロジカル物質の一種として物性物理学分野で注目を集めているが、スピンホール効果を示す材料としての性質は未解明であった。

注2. スピン流

スピン角運動量の流れ。電子スピンは自転しており、スピン角運動量を持っている。この電子スピンを上向きスピンと下向きスピんに区別すると、上向きスピンの流れ J_{\uparrow} と下向きスピンの流れ J_{\downarrow} を用いて電流は $J_{\uparrow} + J_{\downarrow}$ と表すことができる。一方で、スピン流は $J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で表される。上向きスピンと下向きスピンの同数存在する非磁性体や常磁性体では J_{\uparrow} と J_{\downarrow} が逆方向に流れることにより $J_{\uparrow} - (-J_{\downarrow})$ の純スピン流を生成することができる。

注3. 異常ホール効果

x 、 y および z から成る直交座標系において、導体物質の x 方向に電流を流し、 z 方向に磁場を印加すると、 y 方向に電圧（ホール電圧）が生じる。これは電子のうけるローレンツ力に由来し、ホール効果と呼ばれる。磁化を持つ磁性体では、ホール電圧に磁化の寄与が加わる。これが異常ホール効果と呼ばれる。

注4. スピンホール効果

スピン軌道相互作用の大きな非磁性体や常磁性体に電流を流すと、電流の横方向にスピン流が生じる現象。電流はスピン分極していないが（上向きスピンと下向きスピンの数は同数で $J_{\uparrow} - J_{\downarrow} = 0$ となるが）、スピン軌道相互作用により上向きスピンと下向きスピンの逆方向に散乱されることにより、電流の横方向に $J_{\uparrow} - (-J_{\downarrow})$ のスピン流を発生できる。これは電荷の流れを伴わない純スピン流となる。

注5. 強磁性体

物質の中の原子一つ一つが微小な磁石（原子磁石）としての性質を持っていて、その原子磁石が結晶の中で同じ向きに並んでいる物質。例えば、磁

石を近づけると強く吸い付く鉄（Fe）やニッケル（Ni）など。

注6. 非磁性体、常磁性体

非磁性体とは、磁石を近づけると反発する反磁性という性質が観測される磁石にくっつかない物質。常磁性体とは、強磁性体とは違い原子磁石が規則的な配列を示さず、磁石にくっつく性質を持たない物質。非磁性体、常磁性体ともに磁石にならない。強磁性体もある温度（キュリー温度と呼ばれる）以上では原子磁石の向きがバラバラになり、常磁性体となる。つまり磁石ではなくなる。

【論文情報】

タイトル : Intercorrelated anomalous Hall and spin Hall effect in kagome-lattice $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ -based shandite films

著者 : Yong-Chang Lau*, Junya Ikeda, Kohei Fujiwara, Akihiro Ozawa, Jiaxin Zheng, Takeshi Seki*, Kentaro Nomura, Liang Du, Quansheng Wu, Atsushi Tsukazaki, and Koki Takanashi

*責任著者 : 東北大学金属材料研究所 特任助教 Yong-Chang Lau (現中国科学院物理研究所准教授)

東北大学金属材料研究所 准教授 関剛斎

掲載誌 : Physical Review B

DOI : 10.1103/PhysRevB.108.064429

URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.108.064429>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学金属材料研究所

准教授 関剛斎

TEL:022-215-2097

Email: takeshi.seki@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学金属材料研究所

情報企画室広報班

TEL: 022-215-2144

Email: press.imr@grp.tohoku.ac.jp