

2024年4月9日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

磁性の微視的情報からスピン流の挙動を予測可能

— 大幅な省エネを実現するスピントロニクスへの進歩に貢献 —

【発表のポイント】

- スピントロニクス^(注1)の研究では情報処理の担い手となるスピン流^(注2)が重要ですが、微視的な観点からの理解は進んでいませんでした。
- 磁性絶縁体で生じるスピン流の温度変化が、磁気励起^(注3)分散およびマグノン極性の情報から予測可能であることを見出しました。
- 磁気励起の微視的情報によって絶縁性磁性体におけるスピン流の予言が可能となり、スピン流伝搬の高効率化に適した物質の開発に繋がることが期待されます。

【概要】

大幅な省エネを実現するスピントロニクス技術では、スピン自由度の流れ、つまりスピン流が重要な要素です。これまでは生成されたスピン流を電圧の情報に変換して巨視的に観測することが一般的でした。しかし、運動量・エネルギー空間における情報など、微視的な視点での理解は進んでいませんでした。エレクトロニクスにおける電流と同様に、スピントロニクスにおけるスピン流は構成要素である点で重要ですが、その温度変化の予言も難しい状況でした。

東北大学金属材料研究所の川本陽大学院生（研究当時）と南部雄亮准教授らの研究グループは、磁性絶縁体に対して熱的に生成したスピン流の信号測定と偏極中性子散乱^(注4)実験を行い、スピン流の温度変化が磁気励起分散とマグノン極性（磁気モーメントの歳差運動の回転方向）の情報によって理解できることを明らかにしました。

本研究により、絶縁性磁性体におけるスピン流の予言が可能となり、スピントロニクスやその進化系であるマグノニクス^(注5)の分野において新たな展望が開かれることが期待されます。

本研究結果は、米国物理学協会（AIP）が発行する Applied Physics Letters の Special Collection “Magnonics”において、2024年3月27日付けで公開されました。さらに Featured Article（注目論文）と AIP Publishing Showcase に選出されました。

【詳細な説明】

研究の背景

電子の持つ自由度の中で電荷を活用したエレクトロニクスに代わり、スピンを用いたスピントロニクスが近年注目を集めています。スピントロニクスではスピン自由度の流れ、つまりスピン流の生成や制御が重要な要素となります。

これまでは、光学的、電磁気学的、熱的に生成されたスピン流を、電圧の情報に変換することで巨視的に観測していました。変換された電圧は運動量空間における情報の総和を与えるため、物質内部をスピン流がどのように伝搬するかを解明することは困難でした。スピントロニクス研究において、スピン流の高効率化、高寿命化が目指されている現状では、スピン流伝搬を時空間に分解した微視的な情報を用いて理解する必要があります。

微視的な情報を観測するには中性子散乱が有用です。中性子は、時空間をフーリエ変換した運動量・エネルギー空間において、原子核と電子スピンの情報を分解して測定することが可能であり、スピントロニクス物質の微視的情報に迫るには最適なプローブです。

今回の取り組み

今回の研究では、スピントロニクス研究における代表的な磁性絶縁体のイットリウム・鉄・ガーネット ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$: YIG) 中の非磁性イットリウム (Y) を磁性元素であるテルビウム (Tb) に置換した $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (TbIG) を用いました。TbIG に対してスピンゼーベック効果^(注6)を用いてスピン流信号の温度変化を測定し、非偏極・偏極中性子散乱実験を国内外で実施しました。

実験の結果、スピン流信号の温度変化は磁気補償温度において符号が反転すること、低温領域では降温に従って信号が減衰していくことを突き止めました(図1)。非偏極中性子散乱によって得られた結果から TbIG には主要な二つの磁気励起分散が存在し、これらはスピン波と呼ばれる理論体系によって理解可能なことがわかりました。さらに、我々が開発した偏極中性子散乱手法により磁気励起分散における磁気モーメントの歳差運動の回転方向(マグノン極性)を測定し、磁気補償温度上下においてマグノン極性が反転することを明らかにしました。マグノン極性はスピン流の伝搬方向を決めており、スピン流信号の符号反転と整合していることがわかります。

TbIG の磁気励起分散は双方とも有限のギャップエネルギーを持ち、これはギャップエネルギーのない磁気励起分散を持つ YIG とは対照的です。TbIG において、ギャップエネルギーに対応する温度以下ではスピン流を伝搬するキャリアが存在せず、スピン流信号が低温で減衰するのだと理解されます。実際、スピン流信号の温度変化を解析すると有限のギャップを持ち指数関数的に減衰し、そのギャップは中性子の結果と整合しています。これらの結果は、絶縁性磁性体の磁気励起分散の温度変化とマグノン極性の情報が得られれば、その物質の

スピン流の温度変化が本質的に予言可能であることを示しています。

今後の展開

本研究で示した、絶縁性磁性体の微視的情報からスピン流の温度変化に至る予測は他の磁性体にも適用可能です。本手法を用いることで、スピン流伝搬の高効率化に資する新物質開発に繋がることが期待されます。またスピン流の微視的な視点からの理解が今後さらに進むことにより、スピントロニクスや、その進化系であるマグノニクスの分野において新たな展望が開かれることが期待されます。

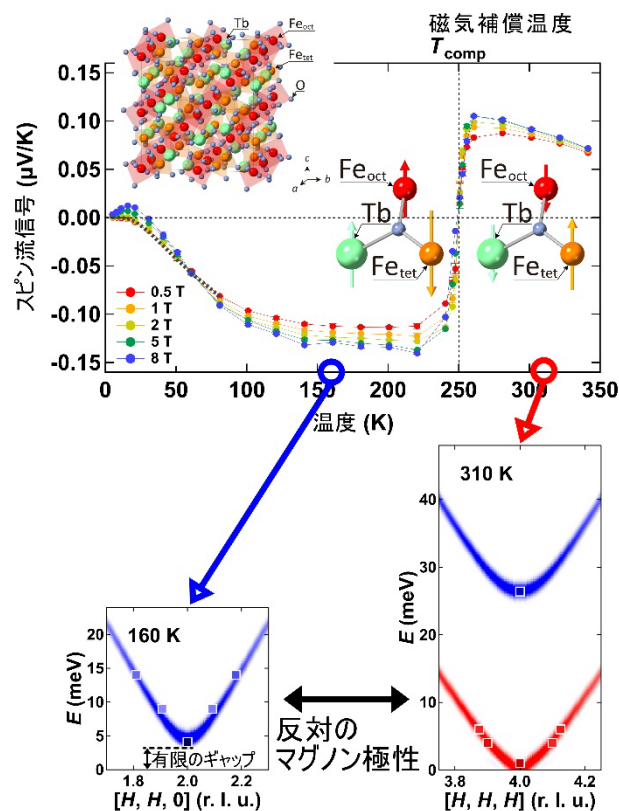


図 1. スピン流信号の温度依存性と偏極中性子散乱により観測された 310 K と 160 K における磁気励起分散のマグノン極性。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (JP21H03732, JP22H05145, JP19K21031, JP19H05600, JP22K18686, JP22H05114)、科学技術振興機構 (JPMJER1402, JPMJCR20C1, JPMJCR20T2, JPMJFR202V)、東北大学 GP-Spin プログラム、東北大学金属材料研究所先端エネルギー材料理工共創研究センター、東京大学 Beyond AI 研究推進機構の助成を受けて実施されました。

【用語説明】

注1. スピントロニクス

従来の電子の電荷としての性質を利用するエレクトロニクスに電子が持つ磁石の性質（スピン）を取り入れる技術のこと。

注2. スピン流

電荷の流れである電流と対比して、電子スピンの流れのこと。

注3. 磁気励起

磁性体における全体のエネルギーが最も低い安定な状態（基底状態）からエネルギーが高い状態（励起状態）への遷移のこと。

注4. 偏極中性子散乱

中性子の持つスピン自由度に注目した中性子散乱手法のこと。散乱前後の中性子スピンの向きを観測することにより、中性子スピンを揃えない非偏極散乱の場合と比べて得られる情報が増える。

注5. マグノニクス

磁性体において、スピン波や量子化されたマグノンを制御することでデバイス応用を目指した次世代技術のこと。スピントロニクスはスピンを電子と一体のものとして扱うのに対し、マグノニクスでは、電子とスピンを切り離し、主にスピン波の非線形ダイナミクスや干渉効果などを利用することを目的とする。

注6. スピンゼーベック効果

測定試料に温度勾配を印加し、誘起されるスピン流信号を測定する手法のこと。スピン流誘起には光学的、電磁気学的、熱的手法が存在するが、熱的なスピンゼーベック効果が最も簡便な方法であり、エネルギー変換素子への応用に期待が寄せられている。

【論文情報】

タイトル : Understanding spin currents from magnon dispersion and polarization: Spin-Seebeck effect and neutron scattering study on Tb₃Fe₅O₁₂

著者 : Y. Kawamoto, T. Kikkawa, M. Kawamata, Y. Umemoto, A. G. Manning, K. C. Rule, K. Ikeuchi, K. Kamazawa, M. Fujita, E. Saitoh, K. Kakurai, and *Y. Nambu

*責任著者 : 東北大学金属材料研究所 准教授 南部雄亮

掲載誌 : Applied Physics Letters **124**, 132406 (2024).

DOI : 10.1063/5.0197831

URL:

<https://pubs.aip.org/aip/apl/article/124/13/132406/3279667/Understanding-spin-currents-from-magnon-dispersion>

【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 南部雄亮

TEL : 022-215-2327

Email : nambu@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 : 022-215-2689 FAX : 022-215-2482

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