

## 磁化がほぼ打ち消し合う反強磁性体でもスピンの流が流れることをマイクロに解明

### [1] 要旨

温度勾配からスピン流を生成する代表的な方法であるスピントロニクス効果の研究は、2008年の発見以来、多彩な磁性体において展開されている。反強磁性体は最も基本的な磁性体の1つであるにもかかわらず、そのスピントロニクス効果に関する既存の理論は現象論的な側面が強く、微視的理解は十分深化していない。本研究では、反強磁性体のマイクロなハミルトニアンを出発点として、スピン波理論と非平衡 Green 関数法に基づいた熱的トンネルスピン流の定量評価にはじめて成功し、その解析から、実験で観測されるスピントロニクス転移前後でのスピン流の符号反転、低温におけるスピン流の非単調な磁場依存性、スピン流と中性子散乱スペクトルの定量的関係、などについて統一的な解説と予言が導かれている。

### [2] 本文

エレクトロニクスにスピン角運動量の自由度を巧く取り込み、より革新的な情報処理の技術を開発させることを目指すスピントロニクスが前世紀末から急速に進展している。エレクトロニクスにおける情報伝達の主役は電流であるが、これに対応するスピントロニクスにおける情報伝達の主役はスピン偏極方向が揃ったスピン角運動量の流れであり、これをスピン流と呼ぶ。スピン流はマグノン(スピン波)などの磁気的準粒子がキャリアとなり磁性絶縁体中でも流れる。これは電流とは質的に異なる特徴であり、電流を伴わないスピン流は、例えば、ジュール熱を抑えた情報伝達を実現させる可能性を秘めている。しかし、スピン流は物質中で一般に保存流ではなく、マイクロメートル程度で減衰する欠点も併せ持つ。近年のナノ技術により、この微小スケールのスピン流やスピン蓄積が検出できるようになり、スピン流の物理学は発展を続けている。

エレクトロニクス技術により電流の高精度生成・制御法は確立しているのに対し、スピン流における「電圧」を準備することは容易ではない。それゆえ、スピン流の生成・制御方法はスピントロニクスの重要課題であり、スピントロニクス効果(Spin Seebeck Effect: SSE)は代表的なスピン流生成方法の1つとして研究されてきた。SSE 実験では、図1のように、対象とする磁性体にスピン軌道相互作用の強い常磁性金属(Pt など)を接合した二層構造を用意し、温度勾配により生成する磁性体中のスピン流を金属に注入する。スピン流は減衰し易く直接検出が困難であることから、金属中に

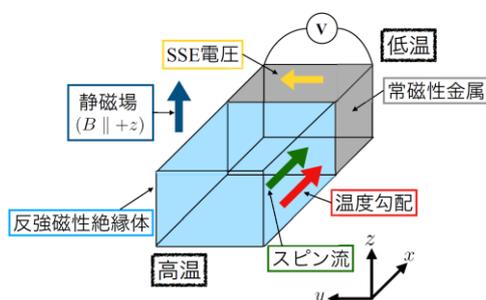


図1：スピントロニクス効果の実験設定の模式図。注目する磁性体と金属の2層系に温度勾配を印加し、温度勾配と垂直方向に静磁場を印加して、スピン分極方向を揃える。

スピン流を注入し、金属内の逆スピン Hall 効果によってスピン流を電流に変換する間接検出法が標準的に利用される。つまり、注目する磁性体に金属を接合することは本質的に重要と言える。これは、熱電効果の代表例であるゼーベック効果の実験が、注目する金属や半導体の単体で実現する

ことと対照的である。

応用科学的観点から長らく強磁性体が SSE の主要な研究対象であったが、2015 年以降、反強磁性体やフェリ磁性体、さらには、よりエキゾチックな量子スピン液体やスピネマティック磁性体の SSE も研究されはじめ、研究対象が拡大している。これらの研究により、SSE は応用科学的に重要なだけでなく、多彩な磁性体の磁気励起や輸送特性を解明する為の基礎科学の道具としても有用であることが明らかになってきた。この流れの中で、反強磁性絶縁体は最も基本的な磁性体の 1 つとして、その SSE 実験が精力的に行われている。反強磁性体は強磁性体より高周波数(テラヘルツ)帯にマグノン励起を持つため、高速情報処理を目指す高速スピントロニクス of 典型的舞台としても注目されている。さらに、反強磁性体では磁化がほとんど打ち消し合い、漏れ磁場が小さいという特性も持つ。にもかかわらず、これまでの反強磁性体の SSE の理論研究は現象論的な性格を帯びたものが多く、ミクロな理論は十分発展していない。現象論は実験を簡単に説明する上で非常に有用であるが、ミクロな機構を解明し新たな現象を予言する能力は低い。

そこで最近、茨城大学大学院理工学研究科の増田圭佑氏と千葉大学大学院理学研究院の佐藤正寛氏は、反強磁性体のミクロなハミルトニアンを出発点として、スピン波理論と非平衡 Green 関数法に基づき、反強磁性体から金属に流れ込むトンネルスピン流を評価するミクロ理論をはじめて構築した。その結果、一様磁化が小さな反強磁性体でもスピン流が十分流れること、ネール相とキャント相を分けるスピントロニック転移前後でのスピン流の符号反転(図 2)、スピン流の符号が支配的に流れるマグノンの分極の向き(アップまたはダウンスピン)に対応し、さらにスピン流が中性子散乱スペクトル強度(図 2)と定量的に関係すること、キャント相のスピン流が低温で磁場に非単調に依存すること、などを 1 つの枠組みで予言および説明することに成功した。また現象論では困難な「異なる磁性体のトンネルスピン流の定量比較」もミクロ理論では可能であり、実際、理論的に見積もられた強磁性体と反強磁性体のスピン流値が実験結果を良く説明することも確認された。これらの成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2024 年 3 月号に掲載された。

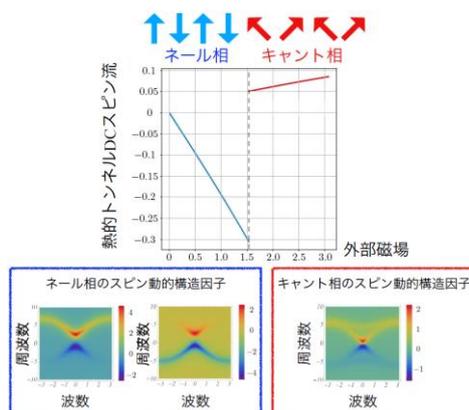


図 2：反強磁性絶縁体のネール相とキャント相における SSE のトンネルスピン流の磁場依存性(上パネル)と 2 相における中性子散乱で観測されるスピン動的構造因子(下パネル)。

スピントロニクスの研究対象の多くは非平衡現象であり、それゆえ、一般にミクロな理論を構築することは一筋縄ではいかない。従って、実験家も応用し易い現象論的な結果は重宝される傾向が強い。しかし、最近のスピントロニクスの理論研究ではミクロな視点からの考察の土壌が日々成長

しており、今後もその傾向は継続すると考えられる。ミクロな理論の発展はスピントロニクス of 各種現象の理解を深め、関連する新現象の予言を促す。さらに、スピントロニクス of 多くの現象は、同分野の重要な研究課題であると同時に、非平衡統計物理学や輸送現象 of 具体的なプラットフォームを提供しているとも言える。本研究で得られた知見は、反強磁性体 of SSE に貢献するだけでなく、今後のスピントロニクスや非平衡物理学において、未開 of 非平衡ダイナミクスを理解する一助になると期待される。

原論文 (2024 年 2 月 6 日公開済)

**Microscopic Theory of Spin Seebeck Effect in Antiferromagnets**

K. Masuda and M. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 034702 (2024).

< 情報提供 : 増田圭佑 (茨城大学大学院理工学研究科)  
佐藤正寛 (千葉大学大学院理学研究院) >