



令和元年6月13日

科学技術振興機構 (JST)
日本原子力研究開発機構
東北大学金属材料研究所
東北大学材料科学高等研究所 (AIMR)
理化学研究所
東京大学 大学院工学系研究科

スピン流が機械的な動力を運ぶことを実証 ～ミクロな量子力学からマクロな機械運動を生み出す新手法～

ポイント

- スピン流が運ぶミクロな回転がマクロな動力となることを実証した。
- 磁性体で作製したマイクロデバイスにスピン流を注入した結果、電流による影響を排除した純粋なスピン流のみでデバイスを振動させることに成功した。
- 電気配線なしで振動を起こせるため、配線が困難なマイクロ機械デバイスの動力に応用できる可能性がある。

JST 戦略的創造研究推進事業において、ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクトの針井 一哉 研究員 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 特定課題推進員)、齊藤 英治 研究総括 (研究当時 東北大学 金属材料研究所・材料科学高等研究所 教授、現 東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授 兼任)、前川 禎通 グループリーダー (理化学研究所 創発物性科学研究センター 上級研究員)らの研究グループは、マイクロメートルスケールの磁性絶縁片持ち梁 (カンチレバー)^{注1)} を作製し、そこに磁気の流れであるスピン流^{注2)} を注入することでカンチレバーを振動させることに成功しました。カンチレバーは絶縁体なので、電流は一切流れず、磁気の流れであるスピン流だけを流すことができます。この結果により、スピン流が運ぶミクロな量子力学的回転がマクロな動力となることが実証されました。

今回作製した素子では、加熱によってスピン流を注入するため、カンチレバー上に電気配線することなく振動を起こすことができます。そのため、本手法は配線が困難なマイクロ機械デバイスの動力などに応用できる可能性があります。

本成果は2019年6月13日 (英国時間) 「Nature Communications」オンライン版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究 (ERATO)

研究プロジェクト「齊藤スピン量子整流プロジェクト」

研究総括 齊藤 英治 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

研究期間 平成26年11月～令和2年3月

上記研究課題では、電子スピンの持つ整流性に注目し、これを基礎とした物質中のゆらぎの利用原理の構築と、スピンを用いた新たなエネルギー変換方法の開拓を目指します。

<研究の背景と経緯>

電子は電氣的な性質に加えてスピンと呼ばれる自轉的な性質を持っており、物質の磁氣的な性質はスピンの流れのことで、「磁氣の流れ」ともいえます。スピン流は電流と同じように情報を伝送するキャリアとして利用できると考えられており、例えば、強磁性体（磁石）にスピン流を流し込むことで磁石の向きを反転することができます。この現象は磁石の向きでビットを表す次世代メモリーである磁氣ランダムアクセスメモリー（MRAM）の基本技術となっています。

一方で、スピンは自轉的な性質なので、ミクロな回轉と見なすこともできます。それでは物体の回轉運動をはじめとするマクロな機械運動をスピン流によって引き起こすことはできないのでしょうか。本研究では、スピン流によって物体の機械運動が生み出せることの実証を目的としました。

<研究の内容>

本研究では磁性絶縁体を加工して作製したマイクロメートルスケールの構造体に磁氣的な波としてスピン流を注入することで、その構造体の機械運動を生み出せることを検証しました（図1）。まず、スピン流が流れやすいイットリウム鉄ガーネット（YIG： $Y_3Fe_5O_{12}$ ）を用いて、集束イオンビーム加工装置^{注3)}によりカンチレバー構造を作製しました。さらに、このカンチレバーにスピン流を注入するために、カンチレバーの根元付近に白金（Pt）細線からなるヒーターを熱源として形成しました。このヒーターに交流電流を流すことで熱流が発生し、スピンゼーベック効果^{注4)}によって生成されたスピン流がカンチレバーの先端に向かって伝搬していきます。

一般に、物体には振動しやすい固有周波数というものがあります。この固有周波数と同じ周波数の外力を与えると共鳴が生じ、小さな外力でも大きな振動を作ることができます。今回の実験では、熱流由来の力とスピン流由来の力が発生するため、両者を分離して、スピン流由来の振動だけを測定する必要があります。そこで、ヒーターの交流周波数と試料に加えた外部磁場の周波数を変化させ、スピン流由来の力のみがカンチレバーの共鳴周波数に一致するように設定しました。この時、熱流は磁場の周波数変化の影響を受けないため、熱流の効果を除外することができます。

このような実験系を用いてスピン流を注入し、カンチレバーの振動を測定しました。スピン流を注入しない状態では、環境のノイズによるカンチレバーの微小な振動のみが観測されました（図2挿入図の小さなピーク）。ここにスピン流を注入すると、カンチレバーの振動に明瞭なシグナルが現れました（図2）。電流の有無や磁場の向きを変えた測定から、このシグナルが現れる条件がスピン流注入によって生じる力と整合していることが確認されました。

<今後の展開>

今回作製した磁性絶縁体のマイクロ機械構造体（カンチレバー）では、カンチレバー上に電氣の配線を作り込む必要がありません。そのため、配線の作り込みが困難な機械構造体を駆動する手段の1つとして、磁性体を利用したマイクロ機械デバイスやナノ機械デバイスへの応用が期待されます。

<参考図>

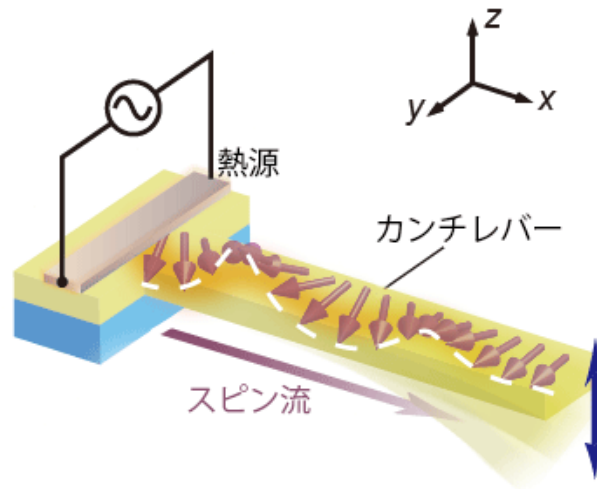


図1 実験のセットアップ図

イットリウム鉄ガーネット（YIG：黄色部分。並んでいる紫の矢印がスピン）により構成されるカンチレバーの根元部分に、スピン流検出用の白金（Pt：茶色部分）からなる熱源（ヒーター）を形成した。ヒーターに電流を加えて熱流を発生させることによりカンチレバー先端方向（x方向）に向かってスピン流（紫矢印の振動）を引き起こし、カンチレバー先端を上下矢印の方向（z方向）に振動させる。

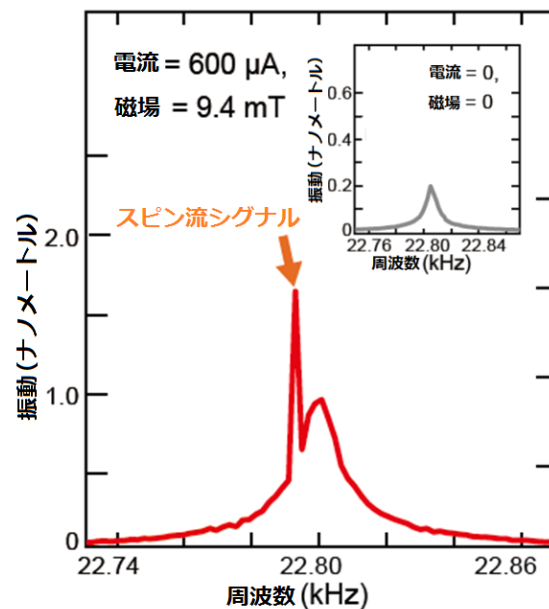


図2 カンチレバーの振動特性

スピン流を注入した際のカンチレバー振動特性。スピン流を注入しない状態では環境からのノイズによる小さなピークのみが観測された（挿入図）が、スピン流注入によりシャープなシグナルが現れている。電流の有無や磁場の向きを変えた測定から、このシャープなシグナルが現れる条件がスピン流注入によって生じる力と整合していることが確認された。

<用語解説>

注1) 片持ち梁 (カンチレバー)

板飛び込みの飛び板のように、一端を固定し、もう一端を固定せず自由に行っている構造体のこと。

注2) スピン流

スピン角運動量の流れ。例えば電子は電氣的な自由度である電荷と、磁氣的な自由度であるスピン角運動量を持っており、前者の流れを電流、後者の流れをスピン流と呼ぶ

注3) 集束イオンビーム加工装置

イオンを電界で加速し細く絞ったビームを用いて、試料を加工する装置。ナノスケールでの微細加工が可能である。

注4) スピンゼーベック効果

磁性体に温度差を与えることによってスピン流が生成される現象で、齊藤 英治 教授らが2008年に発見した。スピントロニクス分野において、汎用性の高いスピン流源としての応用が期待されるとともに、スピン流と垂直な方向に起電力が発生する現象（逆スピンホール効果）と組み合わせることで熱電変換素子としての応用可能性が示唆されている。

<論文タイトル>

“Spin Seebeck mechanical force”

(スピンゼーベック効果による機械的な力)

DOI : 10.1038/s41467-019-10625-y

<関連サイト>

- ・ ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクトWEBサイト :

<https://www.jst.go.jp/erato/saitoh/ja/index.html>

本プロジェクトにおける過去の研究成果を掲載しています。

- ・ スピンワールド :

<http://www.spinworld.jp/>

ERATO 齊藤量子スピン整流プロジェクトのアウトリーチサイトです。スピン科学やその基礎となる磁石の物理をやさしく解説しています。

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

齊藤 英治 (サイトウ エイジ)

ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト 研究総括

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

東北大学 材料科学高等研究所 (AIMR) / 金属材料研究所 教授

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

< J S T の事業に関する事 >

古川 雅士 (フルカワ マサシ)

科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K' s 五番町

< 報道担当 >

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

日本原子力研究開発機構 広報部報道課

〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2 - 2 - 2

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 - 1 - 1

東北大学 材料科学高等研究所 広報・アウトリーチオフィス

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 - 1 - 1

理化学研究所 広報室 報道担当

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2 - 1

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

〒113-8656 東京都文京区本郷 7 - 3 - 1