

界面を利用して磁気の定在波を音波の進行波へ変換

[1] 要旨

絶縁材料でスピン角運動量や熱の伝搬において主要な役割を果たす音波とスピン波は、電流や電磁波によって信号を伝える電子回路に代わる材料系の信号キャリアとして注目されている。非磁性物質固体表面に磁性薄膜を接合した系において、スピンの定在波から一方向に進む表面音波が生成できることが理論的に明らかにされた。この機構は、センサーや情報機器への音波・スピン波の応用上、伝搬方向を制御する技術として重要な役割を果たすことが期待される。

[2] 本文

電子回路では、金属材料や半導体を介して電流や電磁波が信号を伝えている。近年、省エネや高機能化の観点から、ジュール発熱のない絶縁材料を用いた信号やエネルギーの伝達技術に注目が集まっている。絶縁体において信号やエネルギーの担い手となるのは、固体の小さな変形や歪みが振動として伝わる音波、および磁性体の場合に局所的な磁化の揺らぎが波として伝わるスピン波である。音波は固体中の運動自由度としては減衰率が非常に小さく、また圧電素子を用いて比較的容易に発生・検出が可能であるため、センサーや高周波信号のフィルタリング等で既に広く活用されている。一方、スピン波は、微小磁石を記憶素子として用いた場合の情報通信において有用と考えられることから、スピントロニクス分野で近年盛んに研究されてきた。しかし、実用的なデバイスの実現にはまだ課題が多く、発展途上と言える。最近の試みとして、減衰しにくく制御性の良い音波と磁気記憶装置と相性の良いスピン波を組み合わせる可能性が模索されつつある。また、音波やスピン波はともに熱の運び手でもあり、環境発電等の観点からも注目されている。このように、音波とスピン波の相互作用を研究し、それらの伝搬を制御する技術を開発することは、センサーや情報機器への応用だけでなく、排熱の有効利用においても重要だと考えられている。

音波の中でも磁性と相性が良いと考えられているのが「レイリー波」と呼ばれる、固体の変形がその表面に沿ってのみ伝わるタイプの波である。レイリー波が伝搬する際、固体表面の粒子は、波が右に進むときは反時計回り、左に進むときは時計回りにそれぞれ回転運動をしている。一方で磁化の運動は、磁気秩序による時間反転対称性の破れを反映して、常にある軸回りに一方向への回転であり、よってスピン波は伝搬方向によらず一定方向の回転運動を伴っている。これら2種類の回転運動が結合することで、回転を伴わない通常の音波では見られない様々な現象を引き起こす。その中でも顕著なものとして、弾性体の表面に貼った磁性薄膜をレイリー波が通過する際に、音波の伝搬が一方通行となることが明らかにされている。このような音波のダイオード機能は信号制御において重要性が高く、物理現象としても一方向にしか伝搬しない波は興味深い。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターのメンバーを中心とする研究グループは、レイリー波の回転運動と磁石の結合を利用することで、右にも左にも伝搬しないスピン波の定在波を入力として一方向のみに伝わる音波の進行波を得ることができることを理論的に示した。この現象は音波の一方通行性の逆効果と呼べるものであり、やはり音波・スピン波を用いた高周波信号制御において重要な役割を担う可能性がある。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2020 年 11 月号に掲載された。

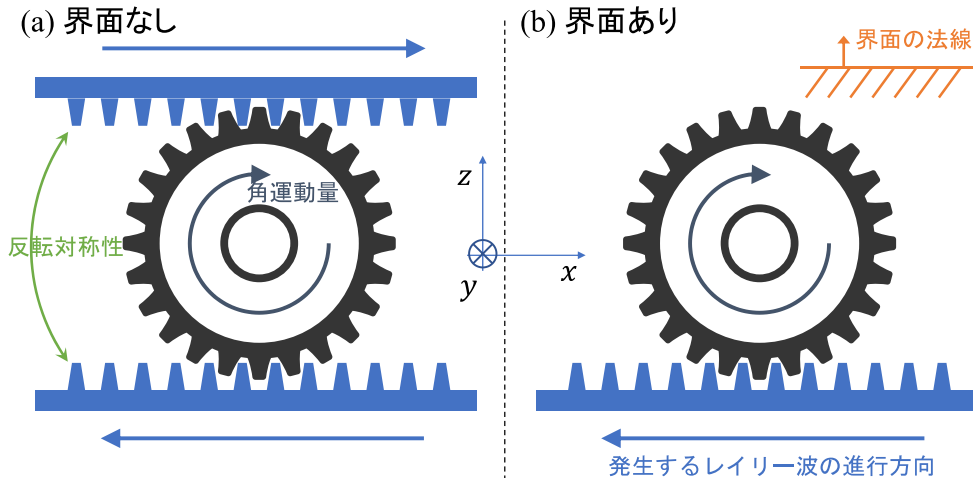


図:物質界面における反転対称性の破れと回転運動から並進運動への変換機構の関係

定在波は、左右に進行する波を等しい振幅で重ね合わせたものであり、全体としては右にも左にも移動しない。このように左右対称な入力から左右非対称な出力を得るための鍵は、スピン波が持つ回転運動の時間反転対称性の破れと固体表面における反転対称性の破れの組み合わせにある。図に示すようにスピン波はその伝搬方向にかかわらずある一つの軸(ここでは y 軸)周りの角運動量を持っており、その定在波はある一方向に回転する歯車に見立てることができる。他方、音波は一般にスピン波の角運動量と結合しており、 x 方向に伝わる平面波を歯のついた板で表すことができる。角運動量による回転運動は歯車によって音波の並進運動に変換される。しかし、図(a)に示すように、界面がない場合、あるいは界面から離れている場所においては、通常空間反転対称性が成り立つため必ず左右に伝わる波が同じ量だけ生じて、重ね合わせによって定在波しか現れない。しかし、図(b)のような界面においては空間反転対称性が破れ、回転運動から一方向に伝わる進行波が生じることが可能になる。

図に示した力学系によるアナロジーからも分かる通り、このような現象は音波に限った話ではなく、物質の界面において磁気回転運動からエネルギーが受け渡される時には普遍的に起こる。スピントロニクスにおいては、白金のようなスピン軌道相互作用が強い金属の表面に接した磁性薄膜においてスピン波を励起することで一方向に流れる電流を取り出す逆スピンホール効果(逆エーデルシュタイン効果とも呼ばれる)が、スピン角運動量の検出技術として幅広く用いられている。本研究成果で提案された一方向への表面音波発生機構は、逆スピンホール効果の絶縁体への一般化の一つと考えることができる。絶縁材料における磁気や熱の制御技術研究においてこの機構がスピン角運動量検出技術としての役割を担う可能性もあり、今後の展開が期待される。

原論文(10月7日公開済)

[Non-reciprocal Pumping of Surface Acoustic Waves by Spin Wave Resonance](#)
 K. Yamamoto, W. Yu, T. Yu, J. Puebla, M. Xu, S. Maekawa, and G. Bauer, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 113702 (2020).

<情報提供:山本 慧 (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター)>