

磁石によるうろこ模様で回る音波を制御

—人工格子デザインで「左回り」「右回り」の読み出しに成功—

物性研究所・ナノスケール物性研究部門 大谷 義近
日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 山本 慧

【研究の背景】

物理現象にはさまざまな二値性が存在する。例えば電極の正負や磁石のN極S極などはあらゆるところで応用されている。これらの性質に0と1をビットとして割り振ることでCPUやメモリなどの演算・記憶装置において情報処理を実現する。

グラフェンの発見によりバレー(valley, 谷)と呼ばれる新たな二値性が認知されるようになった。バレーは結晶のように周期的な構造を持つ材料にだけ見られる現象で、そこを伝わる波の種類が実効的に2倍に増える。例えばグラフェンにおける電子の波や結晶格子変形の疎密波はバレーの自由度を持っており、バレーに対応した二つの状態はそれぞれ左回りと右回りのある種の回転する波と見なすことができる[1]。このため、グラフェンに電圧をかけると右回りと左回りの2種類の電子が流れる。しかし両者が等量含まれるため、回転は打ち消し合い全電流には反映しない。したがって、左または右回転を区別するためには磁気的な測定が必要となる。

これまで、このバレー自由度を実験的に分離・観測し、さらに左回りと右回りを個別に制御する研究が盛んに行われてきた。これは、バレー自由度の存在を直接確認することが基礎的に重要であるだけでなく、この新しい二値性に将来的に情報処理に役立つ可能性があると期待されているからである。しかし、バレー自由度が現れる波の波長が、結晶の周期に対応して、1ナノメートル程度以下と非常に小さいことから、グラフェンの様な自然界に存在する結晶材料での実験が困難であった。

【実験の概要】

本研究では、人工的に作製した周期構造を用いてバレー自由度を生成することにより、結晶材料よりもはるかに制御しやすい1マイクロメートル(μm 、 $1\mu\text{m}$ は100万分の1メートル)ほどの波長領域で行う実験を計画した[2]。対象とする音波として固体表面を伝播する表面弾性波を選択した。表面弾性波はスマートフォンなどにおいて電波のフィルターに応用されており、ごく薄い金属膜を圧電物質表面に配

置することで、その性質を精密に制御することができる。

今回、図1に示すように、強磁性金属のニッケル20nmとチタン15nmの2層膜を圧電物質であるニオブ酸リチウム基板上にうろこ型パターン周期構造(三角格子)状に形成した。うろこ型パターン領域の左右に配置した楕円電極を使って表面弾性波を発生させ、周期構造を透過する際の透過率を測定した。周期構造の外側から入射する波は進行方向と垂直な波面を持つ平面波である。この平面波は周期構造によってさまざまな方向に散乱されるが、波長を周期構造の周期と合致させる正三角形の辺方向に沿って伝わる波だけが干渉によって強め合って生き残るように設計されている(図2a)。これによって左から右に周期構造を透過する表面弾性波は正三角形を右方向に回る(左回り)波面を、右から左に透過するものは左方向に回る(右回り)波面を、それぞれ持つようになる。この左または右に回転する波面の区別がバレー自由度と呼ばれており、周期構造が形成された領域では実効的に表面弾性波が2種類に増えた状態になる。この領域におけるこれら二つの回転状態が、表面加工されていない領域でそれぞれ左または右に伝わる波に変換されるため、左または右への透過率を別々に測定することで、バレー自由度を分離して調べることが可能となる。ここで、強磁性周期構造に磁場を印加していない状態では、ニッケルは磁化していないため左右のどちらから流しても透過率は同じになるが(図2a)、磁場を印加することで時間反転対称性を破ると透過率に有意な差が表れる(図2b)。

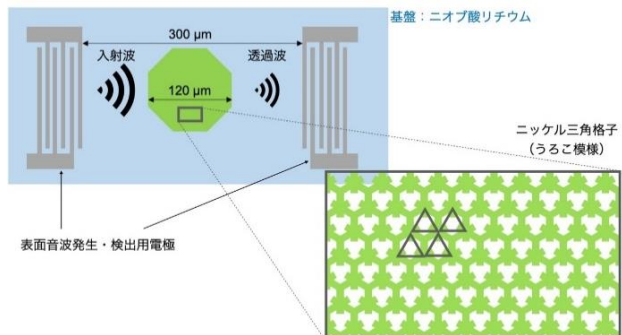


図1 基盤の表面に表面弾性波の入力・出力両用の電極と磁石であるニッケルを用いた三角格子を作製。三角格子に入射した表面弾性波は散乱・吸収されて減衰したのち、透過波として観測される。

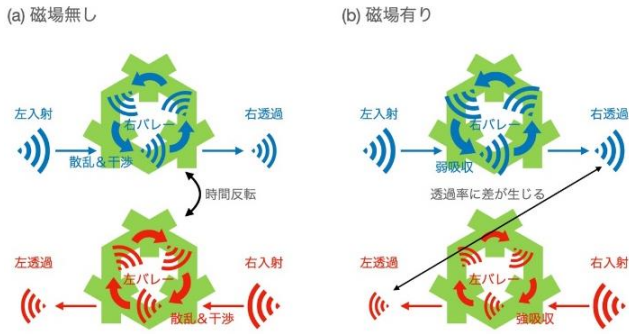


図 2 (a)三角格子に入射した音波はさまざまな方向に散乱されるが、適当に波長を調整することで正三角形の辺方向への散乱波だけが干渉で強め合う状況を作ることができる。この場合左から入射する表面弾性波は右回転する波面を、右から入射する表面弾性波は左回転する波面を作り、それらは時間反転対称性によって全く等価な性質を持つ。(b)磁場をかけると時間反転対称性が破れ、左回転する波面を持つ表面弾性波だけが磁石によって強く吸収される状況を作ることができる。

図 3 に表面弾性波の透過率測定の結果を示す。縦軸は左に透過する表面弾性波の振幅から右に透過する表面弾性波の振幅を引いた量を全透過率で規格化した値である。横軸は外部から印加した磁場の大きさである。磁場がゼロのときはニッケルが磁化していないため左右の回転運動が時間反転対称になっており、その結果、左右透過率の差もゼロとなる。面直磁場をかけるとニッケルが磁化して、時間反転対称性が破れる。三角格子を伝わるバレー表面弾性波はニッケルの磁化と磁気弾性結合によって相互作用するが、右回転の表面弾性波と左回転の表面弾性波では磁化との結合の強さが異なる。例えば基板に垂直に磁化した場合は右回転する表面弾性波が左回転する表面弾性波よりも強く磁化と結合するため、より強くニッケルに吸収される。

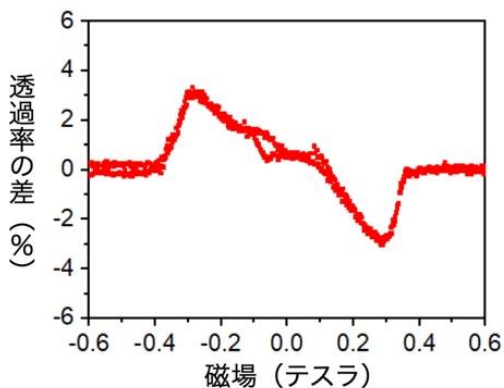


図3 表面弾性波透過率の差の磁場依存性の測定結果
縦軸は適当に規格化された透過率の差で、左右からそれぞれ入射され透過する表面弾性波の振幅が等価でない度合いの指標となる。横軸は外部印加磁場の値で、磁場の符号の正負と左右の回転は対応しているため、透過率の差も磁場の正負によって符号を変える。

このため、左への透過率が右への透過率よりも小さくなる。逆に、磁場の符号を変えるると磁化の方向も反転して左回転の結合が強くなり、透過率の差の符号も反転する。

【まとめと今後の展開】

本研究は、三角格子構造と磁性体の磁場制御を組み合わせることにより、表面弾性波のバレー自由度を選択的に透過させることが可能であること、すなわち、人工的な周期構造を用いることでバレー制御が可能であることを示した。表面弾性波は、電流やスピン波と比べてエネルギー損失が小さく、省エネルギー化に役立つ可能性がある。熱や放射線の影響も受け難く、過酷な環境での使用にも適している。今後さらに工夫された周期構造がデザインされて多種多様なバレー自由度を有する弾性波が実現されれば実用的な技術が発展していくと期待される。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤 S「コヒーレント磁気弾性強結合状態に基づく高効率スピン流生成手法の開拓 (研究代表者：大谷義近)」、LANEF Chair of Excellence, QSPIN project, at University Grenoble Alpes (研究代表者：大谷義近) の支援を受けて行われました。

参考文献

[1] M. Yan, J. Lu, F. Li, W. Deng, X. Huang, J. Ma, and Z. Liu, On-chip valley topological materials for elastic wave manipulation, Nat. Mater. **17**, 993 (2018).

[2] L. Liao, J. Puebla, K. Yamamoto, J. Kim, S. Maekawa, Y. Hwang, Y. Ba, and Y. Otani, Valley-selective phonon-magnon scattering in magnetoelastic superlattices, Phys. Rev. Lett. **131**, 176701 (2023).