

研究終了報告書

「トポロジカルフォノンクスと革新的な音波・熱物性の開拓」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：新居 陽一

1. 研究のねらい

近年の物性物理学では、スピンホール効果、トポロジカル絶縁体、マルチフェロイクスなど、スピン軌道相互作用に由来する質的に新しい電子状態が注目を集めている。これらは実空間や波数空間において、電子の内部自由度であるスピン角運動量と軌道角運動量が相対論効果を介して絡み合い、質的に新しい電子状態が作り出されることに起因している。このスピン軌道相互作用は、電子のみならずフォトンやマグノンにも適用できることが分かってきており、現在の物性物理学の中心的概念となっている。これらの自然な拡張として、フォノンにおいてもスピン軌道相互作用が働くことで非自明なフォノン状態をもたらし質的に新しい応答が生じるのではないかと予測される。とくにフォンは音波や熱の主たるキャリアであるため、これによって新しい音波・熱機能の開拓に繋がると予想される。このような背景において着目したのは、2014年 Zhang と Niu によって提唱された「フォノン角運動量」という新しい内部自由度である[Z. Zhang and Q. Niu, PRL(2014)]。これはフォノンに対する擬スピン自由度とみなせ、これを源泉として様々な現象を予想することができる。例えば電子系とのアナロジーから、フォノン版のトポロジカル状態、非相反輸送、ラシュバ分裂、エーデルシュタイン効果など、これまでのフォノン物性ではあまり考えられてこなかった性質をいくつも考えることができる。ただフォノン物性を調べるための弾性波実験や熱測定を行える研究グループは世界的に見てもそれほど多くないため、こういった観点からのフォノン研究は世界的にもそれほど進んでいなかった。

本研究では対称性の破れやトポロジーといった概念を取り入れることで生じるフォノン状態を開拓することで、高機能な音波・熱デバイスの礎となる機能創出を目指した。とくに GHz と THz 領域に分け、前者は表面弾性波と呼ばれる表面に局在する音波を対象とし、後者は熱励起されるような高周波のフォノンを対象とした。これらに対してメタマテリアルと呼ばれる人工物質から磁性体までを舞台とし、トポロジーや対称性の破れがもたらす新奇フォノン物性の創出を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では GHz 領域の表面弾性波と熱励起フォノンを対象とし研究を行い、トポロジカル音響導波路の実現(Phys. Rev. Applied [主な研究成果 1])、磁化制御(Nat. Commun. [主な研究成果 2])、熱流非相反性(Sci. Adv.)など、これまで観測されていなかった音波・熱現象を開拓した。

GHz 表面弾性波に関しては中心的な研究課題としてトポロジカル音響導波路の実現を目指し研究した。これによって音波版のバレーホール状態を実現し、トポロジカルエッジ状態を直接観測することにも成功した。

また表面弾性波がもつフォノン角運動量と磁性体との角運動量変換現象に着目した研究も行った。電子系では電流誘起磁化反転として、伝導電子のスピン偏極を利用した磁化制御が活発に行われているが、ここではフォノンによる磁化反転を試みた。その結果、表面弾性波のもつフォノン角運動量に応じて強磁性 Ni の磁化の符号を選択的に制御できることを明らかにした。これは音波によって初めて磁化制御を行った成果として *Nature Communications* に発表しプレスリリースも行った。熱励起フォノンに関しては、対称性の破れに起因するフォノンの性質を研究した。キラル磁性体 MnSi の音響フォノン分散を非弾性 X 線散乱と第一原理計算によって調べた結果、キラリティの効果は明瞭に観測されたが、磁場効果は観測限界以下の極めて小さいものであることが分かった(Phys. Rev. B [主な研究成果 3])。またマルチフェロイク物質 TbMnO₃ において非相反熱伝導現象の探索を行った結果、Tb の磁気モーメントが秩序化することに伴って熱の整流効果を観測した。単一物質における熱整流効果の観測は初めてである(Sci. Adv.)。以上のように、本研究によって従来考えられてこなかったフォノン物性が幾つも開拓できた。

(2) 詳細

研究テーマ A「GHz 領域のトポロジカル音響導波路の創出」

本研究では GHz 表面弾性波を対象とし、音波版のバレーホール状態や量子ホール状態を実現することを目的とした。バレーホール状態に関しては、金属ナノピラーの人工格子を作成することでトポロジカルエッジ状態を実証した(図 1)。これは GHz 領域の表面弾性波における初めてのトポロジカル音響導波路であり、Phys. Rev. Appl. の editor's suggestion に選出され、プレスリリースも行った。一方で磁性体を用いることで音波版量子ホール状態の実現も目指したが、これに関しては達成できなかった。以下もう少し詳細を述べる。



図 1. 実現したトポロジカル音響導波路の概念図。赤と白の縞々が GHz の表面弾性波を示し、その伝搬の様子をカンチレバー（緑）で直接可視化している。

これまでにも音波のトポロジカル状態は活発に研究されていたが、主には kHz 領域であった。実験難易度が上がる MHz 以上はあまり研究されておらず、GHz 領域はトポロジカルエッジモードを観測すること自体も難しくなるため、研究されていなかった。本研究では微細加工によってナノスケールのピラー格子を作成し、伝搬の様子をマイクロ波顕微鏡と呼ばれる先端計測手法によ

って直接可視化した(図 2)。これによって初めて GHz 表面弾性波におけるトポロジカルエッジ状態を実証することに成功した。実用的には GHz 表面弾性波デバイスは周波数フィルタとして不可欠な通信デバイスである。したがって本研究で実証したトポロジカル音響導波路を実装することで散逸の抑制された高機能な表面弾性波デバイスの実現に繋がると期待される。

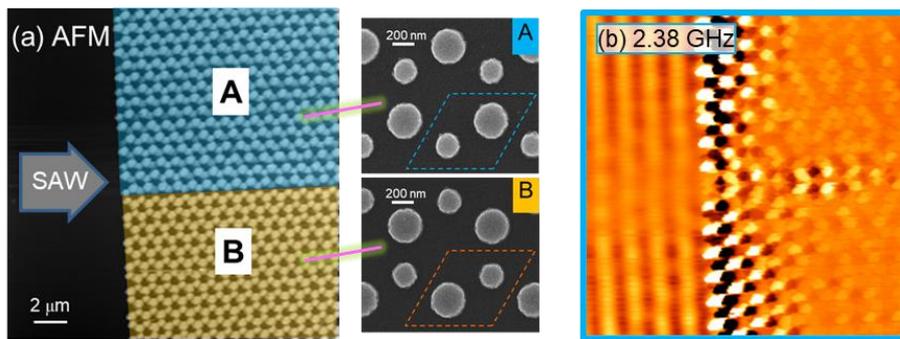


図2. 走査型マイクロ波顕微鏡によるトポロジカル音響導波路の可視化。(a)作成したバレーフォニック結晶の凹凸像。A, B はそれぞれ異なるトポロジカル不変量をもつ。(b) 2.38GHz の表面弾性波の伝搬の様子。左から右に伝搬してくる平面波の大半はフォニック結晶の左端で反射される。これはエネルギーギャップの開いた”絶縁体”状態であることに対応する。一方で AB の境界にそって伝搬する様子も観測され、これがトポロジカルモードに対応する。

研究テーマ B「表面弾性波のもつフォノン角運動量と磁性体の結合」

円偏向フォノンが持つ角運動量はフォノン角運動量と呼ばれ、これを電子系の電子スピンの類似で取り扱うことで、フォノン物性においても角運動量依存に依存した様々な現象が予想される。本研究では表面弾性波のもつフォノン角運動量と磁性体の結合に由来する新奇現象の開拓に取り組みフォノンによる磁化制御を世界で初めて発見した。

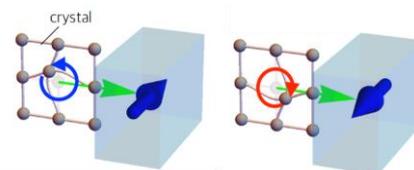


図3. フォノン角運動量と磁性体の結合に起因する新現象。

電子系では表面の伝導電子がスピン偏極していることを利用した電流誘起磁化反転が盛んに研究されている。本研究ではこのフォノン版を考え、表面弾性波がもつ角運動量を磁性体に転写することで磁化の制御を試みた (図3)。その結果、フォノン角運動量の符号に応じて選択的に磁化制御できることを実験的に確かめ、これを理論的に再現した。これは音波で選択的磁化制御を初めて行った研究として Nature Communications に論文発表しプレスリリースも行った。

研究テーマ C「空間反転対称性の破れた物質における熱フォノンの研究」

① フォノンにおける対称性の破れの影響

キラル磁性体 MnSi のフォノン分散を低温磁場下で調べ、フォノン版のラッシュバ分裂とも言える状態を観測した。これは空間反転対称性の破れによってフォノン角運動量に依存した分裂が生じたものと理解できた。他方で磁場効果に関しては測定分解能以下であることが分かった。このことはフォノンと磁場の露わな結合は極めて小さく、磁場効果を顕在化するうえではマグノンや結晶場励起など磁気的な励起と結合することが重要であることがわかった。

② TbMnO₃ における熱流整流効果の発見

空間反転対称性に加えて時間反転対称性が破れると、電子系と同様に熱励起したフォノンにも非相反性が生じると予測される。しかしこれまで単一物質における観測例はなかった。本研究では、熱流非相反性の観測のため、磁気的励起をもち磁場とフォノンの結合が強い Tb イ

オンを含む物質を探索した。その結果、マルチフェロイク物質 TbMnO_3 が要件も満たすことがわかった。そこで本物質を対象とし熱流整流効果を検証した結果、約 10K 以下において Tb の磁気モーメントが秩序化することに伴って熱整流効果を観測した。単一物質における熱整流効果はこれまで実現した例がなく初めての実現となった。

3. 今後の展開

[基礎的な観点からの研究展開]

本研究では、対称性の破れやトポロジーに起因して生じる新しいフォノン物性を実験的に実証してきた。これらの多くは電子スピンをフォノン角運動量に置き換えることで演繹される現象であるが、研究開始当初はあまり認識されていなかったように思える。研究展開としては、本研究で実証できた幾つかの現象を皮切りとして、他にも予想される新現象(たとえばフォノンスピンホール効果や熱流誘起磁化など)の開拓に発展すると期待している。これらが完成した暁には、対称性の破れやトポロジーと密接に関連した機能としてフォノンニクス理解が深化するものと期待される。

[社会実装に必要な展開とその時間]

社会実装に向けた応用的観点からは GHz トポロジカル音響導波路の研究がもっとも関連する。既存の表面弾性波デバイスは大きな動作損失があることが知られている。仮にこれがトポロジカル音響導波路にとって代われれば、携帯電話のバッテリー消費を大幅に抑えられるなど大きな可能性を秘めている。しかし現時点のデバイスは金属材料(Au)に起因する損失が大きくトポロジーの恩恵を十分には得ていない。今後、Si など絶縁性の材料を念頭に最適化することで改善の余地が十分にある。物質や構造の最適化を含めると社会実装まで 10 年程度のスパンの研究になると考えている。

4. 自己評価

● 研究目的の達成状況

本研究では対称性の破れやトポロジーといった概念によって初めて生じるフォノンニクス機能の開拓を目指し、その達成率は 6 割と考えている。理由は、GHz 領域では当初予定していたトポロジカル音響導波路の実現に成功し、THz 領域では熱流非相反性といった新しい熱応答を見出したからである。加えて、フォノン角運動量に関連する現象としてフォノンによる磁化制御やフォノン版ラッシュバ分裂など発展した方向へと開拓できたことが挙げられる。一方で、トポロジーが直接関連する熱機能や表面弾性波の量子ホール版は実現できなかった。また派生研究として進めたマイクロ波顕微鏡の高度化に関しては研究期間内ではまとまっていない。これらを総合すると、自己評価は 60%の達成率と結論した。

● 研究の進め方

実施体制としては 2022 年 7 月に東北大金研において助教から准教授へと昇進した。研究費に関しては多くを光学窓付きの無冷媒超電導磁石とその周辺装置の導入に利用した。この装置の導入によって低温磁場下の実験が滞りなく行うことができ、研究速度を上げることができた。

● 研究成果の科学技術および社会経済への波及効果

フォノン分野は電子機能やスピン物性と比較してあまり着目されておらず、対称性の破れやトポロジックといった電子系で発展してきた角度からの研究アプローチは少なかった。本研究で発見した幾つかの現象は、ここに一石を投じる成果である。本研究成果を含め分野として成熟することで、従来の理解を超えたフォノン工学の確立へと繋がっていくと考えられる。

また社会的にもエネルギーの有効利用という観点から音波や熱制御は極めて重要である。本研究は原理実証レベルであるが、これが巨大化され広く利用できるようになれば、非散逸な表面弾性波フィルタや熱アイソレータなどに繋がる。したがって将来的に発展した暁には消費電力の大幅削減や環境廃熱の制御などエネルギー問題に貢献できると期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:9件

1. Y. Nii and Y. Onose, Imaging an Acoustic Topological Edge Mode on a Patterned Substrate with Microwave Impedance Microscopy, *Physical Review Applied*, 2023, 14, 014001

本研究は GHz 表面弾性波におけるトポロジカルエッジ状態を初めて実現したものである。弾性波に対するトポロジカル状態の研究は盛んに行われていたが、主には kHz 領域に限られ、高周波帯では実現していなかった。特に GHz 領域は表面弾性波デバイスとして実用上重要であったが、その実験は皆無であった。本研究はマイクロ波顕微鏡を用いて、GHz のトポロジカル音響導波路を初めて実証した。

2. R. Sasaki, Y. Nii, and Y. Onose, Magnetization control by angular momentum transfer from surface acoustic wave to ferromagnetic spin moments, *Nature Communications*, 2021, 12, 2599

本研究は音波によって磁性体の磁化制御を初めて実現したものである。電子系においては、電流を流すことで磁性体の磁化制御は盛んに行われていたが、磁気モーメントを持たない音波のアナロジーは知られていなかった。本研究では、表面弾性波と呼ばれる表面音波が持つ角運動量を用いて、強磁性体の磁化を選択的に制御できることを発見した。

3. Y. Nii, Y. Hirokane, T. Koretsune, D. Ishikawa, A. Q. R. Baron, and Y. Onose, Effect of symmetry breaking on short wavelength acoustic phonons in the chiral magnet MnSi, *Physical Review B*, 2021, 104, L081101

フォノン版のラシュバ分裂を実験と理論を組み合わせたアプローチで実証した。水晶のような空間反転対称性の破れた物質では、右円偏向と左円偏向のフォノン分散が運動量に依存して分裂することは古くから知られていた。本研究ではフォノン角運動量の観点からキラル磁性体 MnSi のフォノン分散を調べた結果、フォノン角運動量に依存した音響モードの分裂を観測した。他方で、磁場による影響は観測限界以下の小さいものである

ことが分かった。

(2) 特許出願

該当なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

① 招待講演(1)

Yoichi Nii, “Nonreciprocal phenomena of phonon in noncentrosymmetric magnets”, CEMS Topical Meeting Online “Magnon-Phonon Coupling”, Online

② 招待講演(2)

Yoichi Nii, “Effect of symmetry breaking on phonons in noncentrosymmetric magnets”, Workshop on meV-Resolved Inelastic X-ray Scattering, Online

③ 受賞

Yoichi Nii and Yoshinori Onose, “Imaging Acoustic Topological Edge Mode on a Patterned Substrate with Microwave Impedance Microscopy”, Physical Review Applied Editor’s suggestion, American Physical Society.

④ プレスリリース(1)

「数学の原理で高周波の新型音響導波路を開発 ～ 超低エネルギー損失な次世代高周波フィルタやセンサへの応用目指す～」

東北大、JST 共同プレスリリース, 新居 陽一、小野瀬佳文

“Imaging Acoustic Topological Edge Mode on a Patterned Substrate with Microwave Impedance Microscopy”, Physical Review Applied, 19, 014001 (2023)

2022 年 12 月 28 日

⑤ プレスリリース(2)

「音波による磁石の向きの制御に世界で初めて成功 – 携帯電話などに用いる男性はデバイスの高度化に期待-」

東北大、JST 共同プレスリリース, 佐々木 遼, 新居 陽一、小野瀬佳文

“Magnetization control by angular momentum transfer from surface acoustic wave to ferromagnetic spin moments”, Nature Communications, 12, 2599 (2021)

2021 年 5 月 7 日