

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03828

研究課題名(和文) 非相反フォノン流の巨大化とその逆効果の開拓

研究課題名(英文) Nonreciprocity and its inverse effect in phonon transport

研究代表者

新居 陽一 (Nii, Yoichi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：80708488

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：フォノンの非相反物性に関連して4つの成果を得た。キラル磁性体MnSiにおいてフォノン版ラッシュバ分裂が生じていることを明らかにした。一方、磁場効果は観測されず小さなものであることが分かった。表面弾性波をもちいて強磁性Niの磁化を選択的に制御できることを明らかにした。巨大な磁気弾性結合を示すTb₂Ti₂O₇の超音波・磁歪測定から低温の四極子秩序温度よりずっと高温から四極子相関が存在していることを明らかにした。ナノスケールの人工フォノンニック結晶を作成しGHz領域におけるトポロジカル音波状態を実現し、エッジ状態を直接観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数年間大きく発展してきた非相反研究分野であるが、本研究ではフォノンに焦点をあて研究を推し進めることで、主に電子系で発展してきたスピン軌道物性の類似現象が、フォノンにおいても生じていることを明らかにした。特にフォノンによる磁化制御やフォノンバンド分裂などは、対称性の破れと角運動量自由度が結びつくことを示した実験例であり、これを一つの契機としてより多くの新現象開拓へと発展する可能性がある。またトポロジカル表面弾性波の実現は、表面弾性波デバイスや量子トランステューサなど関連する応用分野へ貢献する可能性もある。

研究成果の概要(英文)：Four results were obtained during this project: The first one is the observation of phononic version of Rashba-type phonon-band splitting in a chiral magnet MnSi. The second one is magnetization control by surface acoustic wave via angular momentum transfer from phononic to magnetic system. The third one is the observation of relatively high onset temperature of quadrupole correlation in spin-liquid candidate Tb₂Ti₂O₇. The fourth one is the realization of topological surface acoustic waveguide at gigahertz range in a honeycomb latticed surface phononic crystal.

研究分野：物性物理(実験)

キーワード：フォノン 非相反性 トポロジー 対称性の破れ

1. 研究開始当初の背景

- (1) 新奇物性開拓という観点からは、近年の電子系の発展と比較するとフォノン系の進展は乏しい。しかし近年提唱されたフォノン角運動量という概念を電子系のスピン自由度に見立てると、そのアナロジーから幾つもの未開拓なフォノン状態が予想された。
- (2) なかでも進行方向の正負で性質の異なる非相反伝搬に関しては電子や光において多くの研究報告があり、我々もフォノン非相反性において、いち早く観測していた。
- (3) 一方で他に予想される多くの新奇フォノン状態に関してはあまり研究されておらず、特に実験的にはほぼ未開拓であり不明な点が多かった。

2. 研究の目的

本研究では、フォノン角運動量を一つのキーワードとして、電子系とのアナロジーから予想される新しいフォノン状態を開拓することを目的とした。特に対称性の破れがフォノンにどのような影響を及ぼすか？、またトポロジカルな視点からフォノンにどのような新しい性質が生じるのか？などを明らかにすることを目的とした。これによって従来のフォノンの概念を大幅に拡張した、フォノンニクスの学理構築を行う。

3. 研究の方法

- (1) フォノンに対する対称性の破れやトポロジの影響を明らかにするため、キラル磁性体 (MnSi) や量子磁性体 (Tb₂Ti₂O₇) のほか、人工物質 (メタマテリアル) なども作成し、対称性の破れた系や非自明なフォントポロジを持つ実験舞台を準備した。
- (2) 低周波のフォノンは超音波 (MHz) や表面弾性波 (GHz) を用い、一方高周波フォノンに関しては非弾性 X 線散乱によって THz 領域に及ぶ高波数のフォノン状態まで調べることで、新奇フォノン状態の探索を行った。

4. 研究成果

(1) キラル磁性体 MnSi のフォノン分散

電子系においては、空間反転対称性や時間反転対称性が破れると、ラシュバ分裂やゼーマン分裂として知られる電子スピンの依存したバンド分裂が広く生じることが知られている。他方、フォノンバンドにおいて対称性の破れがどのような影響を及ぼすか？といった観点での研究はあまり知られていない。そこで本研究ではキラル磁性体である MnSi のフォノン分散を放射光非弾性 X 線散乱や第一原理計算を組み合わせ検証した。その結果、キラリティに起因したフォノン版のラシュバ分裂が生じており、ここではフォノン角運動量が波数 k と平行もしくは反平行に偏極した状態が固有状態となり、バンド分裂していることが明らかになった (図 1)。一方で、磁気転移温度以下の 10K で磁場を加えてフォノンに対する磁場効果も検証したが、有意な変化は観測されず、外部磁場とフォノンの結合は極めて小さいことが分かった。

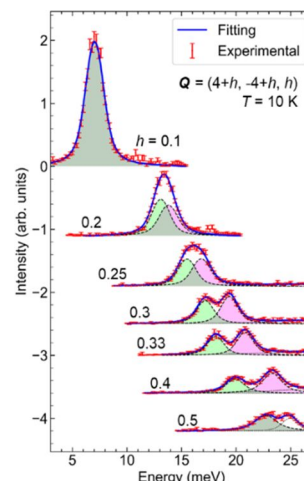


図 1. キラル磁性体 MnSi のフォノン版ラシュバ分裂。音響フォノンモードが波数に依存し分裂しており、これが逆符号のフォノン角運動量をもつことを明らかにした。

(2) 表面弾性波における強磁性磁化の選択的制御

本研究では表面弾性波 (特にレイリー波) のもつフォノン角運動量を利用することで、強磁性体の磁化を選択的に制御できることを示した (図 2)。フォノンは一般に中性粒子であり電荷や磁化はもたないが、本研究によって磁気弾性結合を通じてフォノン系と磁気系の角運動量変換が行われることが明らかになった。また磁気弾性結合を考慮した数値計算からも磁化制御が円偏向の弾性波によって生じることを示した。角運動量変換現象は、光や格子回転とスピンなどで広く研究

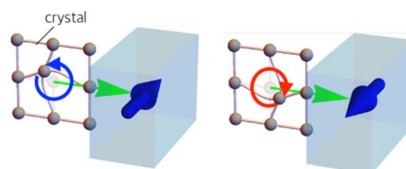


図 2. フォノン角運動量による磁化の選択的制御。

されてきたが、本研究ではフォノンと磁性の間の新しい角運動量変換を開拓した。

(3) トポロジカル表面弾性波の実現

トポロジーの視点からのフォノン研究は近年活発に研究が進んでおり、特に人工構造を用いた研究が盛んである。本研究では人工フォノン結晶を作成し、2.4GHz というこれまでで最も高い周波数領域におけるトポロジカル表面弾性波を実現した(図 3)。電子ビームリソグラフィなどの微細加工によってサブミクロンスケールのトポロジカルフォノン結晶を作成し、表面弾性波の伝搬の様子を走査型マイクロ波顕微鏡によってナノスケールで可視化した。その結果、表面弾性波のバンドギャップに対応する周波数 (~2.38GHz)において、エッジモードが明瞭に観測された(図 4)。GHz 領域におけるトポロジカル音響導波路の報告はこれまで一例しかなく、しかも表面弾性波デバイス上に実装した例は本研究が初めてである。これによって将来的な音響デバイスへの応用や、また近年活発に研究されている量子トランスデューサとして活用などに繋がると期待される。

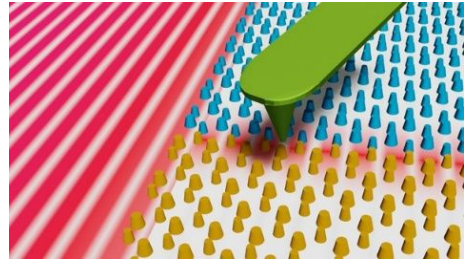


図 3. 実現したトポロジカル音響導波路の概念図。赤と白の縞々が GHz の表面弾性波を示し、その伝搬の様子を走査型マイクロ波顕微鏡で直接可視化している。

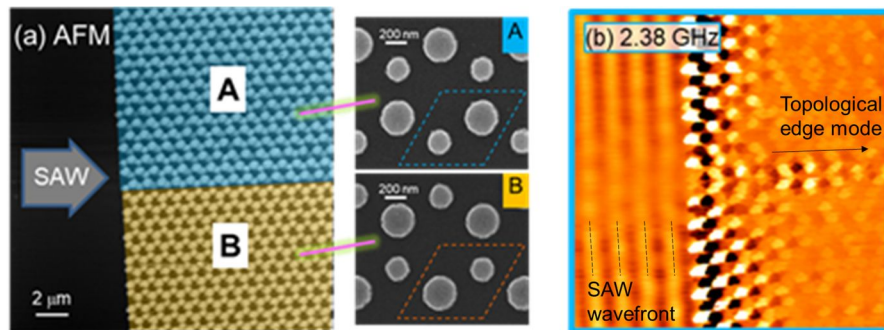


図 4. トポロジカル音響導波路の可視化。(a)作成したバレーフォノン結晶の AFM 像。(b) 2.38GHz の表面弾性波の伝搬の様子。左から右に伝搬してくる平面波の大半はフォノン結晶の左端で反射される。これはエネルギーギャップの開いた”絶縁体”状態であることに対応する。一方で AB の境界にそって伝搬する様子も観測され、これがトポロジカルモードに対応する。

(4) フラストレート磁性体 $Tb_2Ti_2O_7$ における異常な四極子揺らぎの観測

フォノン物性という観点で Tb イオンはとても重要であり、例えば初めてフォノンホール効果が発見されたのは $Tb_3Ga_5O_{12}$ であり、初めて単一物質の熱流非相反性が観測されたのは $TbMnO_3$ である。これは Tb イオンが大きな磁気モーメントを持つことに加えて有限の四極子モーメントを持つことが大きな要因である。本研究では、Tb 化合物の新規フォノン応答の探索を見据え、量子スピン液体の候補物質としても考えられている $Tb_2Ti_2O_7$ の基礎物性(超音波や磁歪)測定を行った。その結果、クロスオーバー温度(~10K)が見いだされ、その温度以下では単一イオンモデルと実験のずれが顕著となった(図 5)。このことは 10K 以下という比較的高温から四極子間の強い相関が生じていると理解された。四極子秩序は 0.4K と低温であることから、フラストレーションによって秩序化が抑制されていると考えられる。本物質における特異な磁気弾性応答に重要な役割を演じていると考えられる。

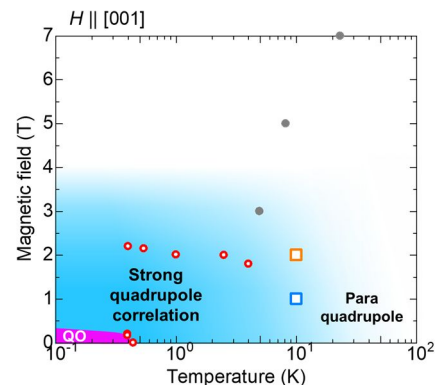


図 5. 磁歪・弾性定数測定で得られた $Tb_2Ti_2O_7$ の相図。四極子秩序(QO)よりはるか高温から四極子相関が観測された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nii Y., Onose Y.	4. 巻 19
2. 論文標題 Imaging an Acoustic Topological Edge Mode on a Patterned Substrate with Microwave Impedance Microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.19.014001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nii Y., Hirokane Y., Nakamura S., Kabeya N., Kimura S., Tomioka Y., Nojima T., Onose Y.	4. 巻 105
2. 論文標題 Elastic study of electric quadrupolar correlation in the paramagnetic state of the frustrated quantum magnet Tb ₂ Ti ₂ O ₇	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94414
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.094414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nii Y., Hirokane Y., Koretsune T., Ishikawa D., Baron A. Q. R., Onose Y.	4. 巻 104
2. 論文標題 Effect of symmetry breaking on short-wavelength acoustic phonons in the chiral magnet MnSi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L081101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.L081101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jiang N., Nii Y., Arisawa H., Saitoh E., Ohe J., Onose Y.	4. 巻 126
2. 論文標題 Chirality Memory Stored in Magnetic Domain Walls in the Ferromagnetic State of MnP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 177205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.177205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki R., Nii Y., Onose Y.	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetization control by angular momentum transfer from surface acoustic wave to ferromagnetic spin moments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-22728-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akaike M., Nii Y., Masuda H., Onose Y.	4. 巻 103
2. 論文標題 Nonreciprocal electronic transport in PdCrO ₂ : Implication of spatial inversion symmetry breaking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.184428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang N., Nii Y., Arisawa H., Saitoh E., Ohe J., Onose Y.	4. 巻 126
2. 論文標題 Chirality Memory Stored in Magnetic Domain Walls in the Ferromagnetic State of MnP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 177205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.177205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirokane Yuji, Nii Yoichi, Masuda Hidetoshi, Onose Yoshinori	4. 巻 6
2. 論文標題 Nonreciprocal thermal transport in a multiferroic helimagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabd3703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abd3703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yoichi Nii
2. 発表標題 Topological transport of GHz surface acoustic wave
3. 学会等名 The13th international Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新居 陽一
2. 発表標題 対称性の破れた物質における 非相反性とトポロジカル機能
3. 学会等名 第144回 東北大学金属材料研究所講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新居 陽一
2. 発表標題 対称性の破れとトポロジー に起因したフォノン応答の開拓
3. 学会等名 金研研究会 ~ 強相関物質における創発物性研究の現状と将来展望 ~ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoichi Nii
2. 発表標題 Nonreciprocal phenomena and its inverse effect in noncentrosymmetric magnets
3. 学会等名 Trends in Topological Materials Science and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新居 陽一、小野瀬 佳文
2. 発表標題 走査型マイクロ波顕微鏡を用いた トポロジカル表面弾性波の観測
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoichi Nii
2. 発表標題 Nonreciprocal transport and its inverse effect in noncentrosymmetric magnets
3. 学会等名 Summit of Materials Science 2022 and GIMRT User Meeting 2022 Affiliated with KINKEN WAKATE 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoichi Nii
2. 発表標題 Effect of symmetry breaking on phonons in noncentrosymmetric magnets
3. 学会等名 Workshop on meV-Resolved Inelastic X-ray Scattering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoichi Nii
2. 発表標題 Nonreciprocal phenomena of phonon in noncentrosymmetric magnets
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online "Magnon-Phonon Coupling" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------