

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13494

研究課題名（和文）フォノン角運動量とフォノンの異常伝搬に関する研究

研究課題名（英文）Phonon angular momentum and anomalous phonon response

研究代表者

新居 陽一（Nii, Yoichi）

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：80708488

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年提唱されたフォノン角運動量という概念は、フォノンに対する擬スピンとしての役割を果たす。この概念を積極的に取り込めば電子系との類推から様々な新奇フォノン物性が予想される。本研究では、この概念を鍵として空間反転対称性の破れたキラル磁性体におけるフォノン版ラッシュバ状態の観測、時間反転対称性の破れたTb酸化物におけるフォノンのホール効果、更には時空間の対称性が同時に破れたマルチフェロイク物質における熱流非相反性を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によりフォノン角運動量という概念が新奇フォノン物性の理解に極めて重要であることを示した。また、本研究を基軸として例えばトポロジカルなフォノン状態など、いくつもの新奇物性を開拓する道筋が示された。これらの成果によって将来的には新機能を備えた音波や熱デバイスの実現へと繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：Phonon angular momentum plays an important role as a pseudo-spin degree of freedom in phononic system. According to analogy of electronic system, number of novel phonon responses may emerge by taking this concept into account. Here we report several results such as phononic Rashba state in a chiral magnet, phonon Hall effect in Tb oxides, and nonreciprocal thermal current in a multiferroic.

研究分野：磁性

キーワード：フォノン角運動量 対称性の破れ 非相反性 表面弾性波

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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的效果によって結合することが本質的に重要である。一方、最近フォノン角運動量という概念が理論的に提唱され、フォノン版のスピンとも言える新しい内部自由度が導入された(L. Zhang and Q. tNiu, PRL (2014))。電子系との類似で考えれば、フォノンにおけるスピン軌道相互作用は、フォノン版ラシュバ効果やフォノンスピンホール効果など、質的に新しいフォノン物性の源泉となる可能性を秘めている。しかし、フォノン角運動量に関しては理論的な研究が先行し、実験的には2005年に報告されたフォノンのホール効果(C. Strohm et al, PRL (2005))の解釈に使われる程度であり、新奇物性の開拓を含め進展していない。一方、申請者は得意とする弾性波測定を駆使して、これまで軌道揺らぎ(Y. Nii et al., PRB (2012))や磁気スキルミオンの弾性(Y. Nii et al., PRL (2015))など磁性体のフォノン物性を中心に成果を挙げてきた。また2017年にはフォノン測定技術を駆使することで、表面を伝搬するフォノン(表面弾性波)の非相反性を発見してきた(R. Sasaki, Y. Nii et al., PRB (2017))。これは表面弾性波のもつフォノン角運動量に起因した物性として理解される。このようにフォノン角運動量を露わに取り扱うことで様々な新奇現象が期待された。

2. 研究の目的

本研究では表面弾性波や熱伝導測定など様々なフォノン計測を駆使して「フォノン角運動量」に由来する異常フォノン物性の開拓を行う。

3. 研究の方法

新奇フォノン物性として具体的にはフォノン版ラシュバ状態、フォノンのホール効果、非相反性などに着目し、表面弾性波デバイスや熱伝導度測定、非弾性X線散乱などを駆使して、これらの新奇フォノン物性の実証を試みた。

4. 研究成果

(1) マルチフェロイクスにおける表面弾性波伝搬[Phys. Rev. B 99, 014418 (2019), Phys. Rev. Applied 9, 034034 (2018)]

表面弾性波を対象として空間反転や時間反転に対する対称性の破れの効果を調べるためには、対称性の破れた物質群において表面弾性波を励起することが重要となる。非相反性を観測したNi/LiNbO₃においては圧電基板と強磁性薄膜を組み合わせた人工マルチフェロイクスを対象としていたが、単一のマルチフェロイクス物質における表面弾性波励起は報告がなかった。そこで我々は、大きな圧電効果が予測されているBiFeO₃および光やマイクロ波などで非相反性が報告されているCu₂O₄の二つのマルチフェロイクスに着目し、表面弾性波実験を行った。その結果、図1にしめすように明確な表面弾性波励起が観測された。またこれらは磁気状態に依存することが分かり、BiFeO₃では反強磁性ドメインの回転に伴って、Cu₂O₄では反強磁性マグノンと結合に由来して音速や音波吸収は大きく変動することも明らかにした。

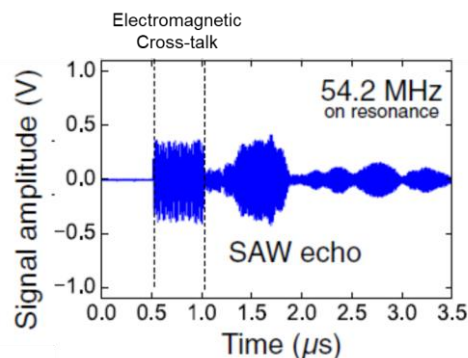


図1. BiFeO₃単結晶における表面弾性波の伝搬信号。

(2) MnSiにおけるフォノン版ラシュバ効果の観測

ラシュバ効果として知られているように空間反転対称性が破れた電子系ではスピン偏極に応じたバンド分裂が生じる。フォノン角運動量をフォノン系における擬スピン自由度と見なすと、空間反転対称性が破れた物質ではフォノン角運動量の方法と運動量が結合したフォノン版のラシュバ分裂が生じると期待される。実際、表面ではレイリー波と呼ばれる表面固有の円偏モードが存在することが知られており、これはフォノン版のラシュバ状態と見なせる。一方、バルクの対称性が破れた系がフォノンの偏向に及ぼす効果は実験的にはあまり理解されていない。そこで本研究では、典型的なキラル磁性体であるMnSiフォノン分散を精密に調べ、空間反転対称性や時間反転対称性がフォノン系にどのような影響を与えるかを検証した。実験はMnSi単結晶を用いてSpring-8 BL43LXUの非弾性X線散乱装置を用いて行った。まずは室温(常磁性相)での空間反転対称性の破れの影響を調べた。G点からR点方向へのエネルギースペクトルを調べたところ、二重縮退した横波音響フォノンが、R点に近づくに入れて分裂していく様子が認められた。また第一原理計算の結果と比較すると、これらのモードは右円偏向と左円偏向の横波フォノンモードに対応しており、まさにヘッジホッグ状にフォノンバンド分裂が生じていることが分かった。現在、時間反転対称性の破れの効果を調べるために低温磁場下での実験を予定しており、これと併せて論文にまとめる予定である。

(3) $Tb_2Ti_2O_7$ におけるフォノン物性と四極子秩序 [Phys. Rev. B 99, 134419 (2019)]

$Tb_2Ti_2O_7$ はパイロクロア格子上に Tb^{3+} ($J = 6$)が位置した磁気フラストレーション系であり、量子スピンスピンアイス候補物質として活発に研究されてきた物質である。一方、弾性ソフト化や磁歪が観測されるなど格子系とも強く結合するため、フォノン物性の観点からも興味深い物質である。本研究では熱伝導および超音波を用いた測定によって $Tb_2Ti_2O_7$ 中のフォノンに対する時間反転対称性の破れの効果に着目した。

まずフォノンのホール効果の観測を試みた。 $Tb_2Ti_2O_7$ においては有限の熱ホール効果が既に報告されているが、そこでは量子スピン系特有の磁気励起を起源にするものと理解されており、フォノンの寄与は否定されている。一方、我々はラマン型のスピフォノン結合によってフォノンのホール効果も生じていると考え、それを実証するため Tb を非磁性元素 Y で希釈した $Tb_{2-x}Y_xTi_2O_7$ において熱ホール効果の測定を行った。 $Tb_{2-x}Y_xTi_2O_7$ は絶縁体であり、また Tb を 70% 程 Y で置換することで磁気的な相関は弱く磁気励起による熱伝導は無視できると予想される。したがって熱ホール効果が観測されればフォノンによる可能性が高い。実験の結果、図 2 に示すように有限のホール伝導度が観測された。加えて $Tb_2Ti_2O_7$ より大きな熱ホール効果を示すことが分かった。これは $Tb_{2-x}Y_xTi_2O_7$ における熱ホール効果の起源がフォノンによるものであることを強く示唆するものである。

このように磁気弾性結合はフォノン系に有効的な磁場を与えることができる。そこで我々はフォノンに対するほかの磁場効果として音響ファラデー効果の観測を試みた。この効果は光のファラデー効果の音波版であり、磁場に比例して横波音波の偏向面が回転する現象である。当初、この観測を試みて超音波実験を繰り返したが、音波の複屈折による効果との切り分けが難しく、現象を実証するに至らなかった。一方、超音波実験を詳細に測定することで $Tb_2Ti_2O_7$ の四極子状態に関する新たな知見が得られた。特に 3He 冷凍機を用いて 0.4K 以下まで冷却すると、弾性ソフト化がハード化に転じることを発見した。本物質の四極子秩序に関してはこれまでも提案されていたがその直接観測は報告されていなかった。本研究で用いた超音波は四極子揺らぎを直接プローブできるため、弾性ハード化は四極子秩序を直接観測した可能性が高い。この結果に関しては現在投稿準備中である。

(4) $TbMnO_3$ における熱の非相反性 [arXiv:2004.03801]

$Tb_2Ti_2O_7$ 系でフォノンホール効果が観測されたようにフォノン物性に及ぼす Tb イオンの影響は極めて大きい。ホール効果は時間反転対称性の破れによるが、空間反転対称性も同時に破れた場合は非対称なフォノンバンドが現れ非相反性（整流効果）が生じると予想される。フォノンホール効果が熱ホール効果として観測されたように、フォノンの非相反性は熱整流性として観測されると期待できる。そこで本研究では、Tb イオンを含みかつ空間反転対称性が破れた物質として、マルチフェロイクの代表物質である $TbMnO_3$ を対象とした。 $TbMnO_3$ は Mn スピンのらせん磁気秩序に伴って自発分極が生じる。このとき時空間の対称性が破れるため、フォノン（熱）の非相反性が生じて良い。これを確かめるために $TbMnO_3$ の熱伝導度を調べたところ、磁場に対して熱伝導度が奇になる成分が観測された（図 3）。更にこれが電気分極の反転に伴って反転することが分かった。対称性の観点からは、磁場や電気分極の反転は、それらを固定して熱流を反転したものと等価である。したがって観測された効果は熱流非相反性そのものである。また温度依存性を調べると、強誘電転移よりもずっと低温の 8K 以下で非相反性が生じ始めることが分かった。この温度は Tb 磁気モーメントの秩序化に対応しており、これは Tb の磁気弾性結合がカギとなって、熱流非相反性が生じたことを示唆している。

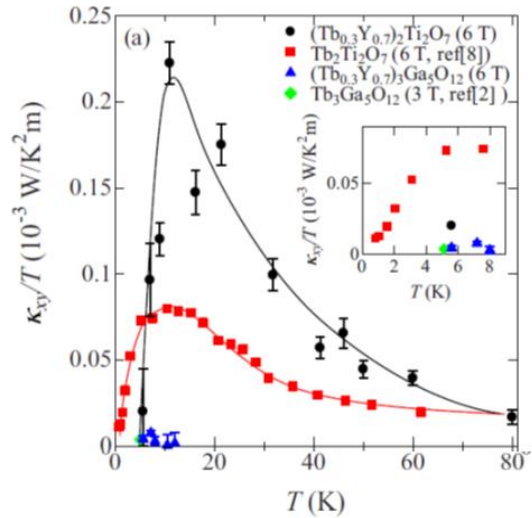


図 2. $Tb_{2-x}Y_xTi_2O_7$ における熱ホール伝導度の温度依存性。

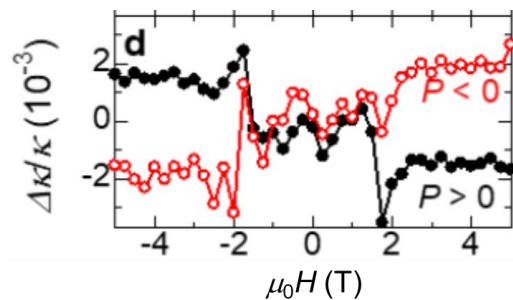


図 3. 4.2K における $TbMnO_3$ の熱伝導度。 $\Delta\kappa\kappa$ は磁場で反対称化した熱伝導度で非相反成分に対応し、これが電気分極 (P) に応じて反転する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Y. Iguchi, Y. Nii, M. Kawano, H. Murakawa, N. Hanasaki, and Y. Onose | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Microwave nonreciprocity of magnon excitations in the noncentrosymmetric antiferromagnet Ba ₂ MnGe ₂ O ₇ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B | 6. 最初と最後の頁 64416 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.064416 | 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 R. Sasaki, Y. Nii, and Y. Onose | 4. 巻 99 |
| 2. 論文標題 Surface acoustic wave coupled to magnetic resonance on multiferroic CuB ₂ O ₄ | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B | 6. 最初と最後の頁 14418 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.014418 | 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 Yuji Hirokane, Yoichi Nii, Yasuhide Tomioka, and Yoshinori Onose | 4. 巻 99 |
| 2. 論文標題 Phononic thermal Hall effect in diluted terbium oxides | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B | 6. 最初と最後の頁 134419 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.134419 | 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 - |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yoichi Nii |
| 2. 発表標題 Nonreciprocal surface acoustic wave via magnon-phonon coupling |
| 3. 学会等名 The 60th REIMEI International Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 新居 陽一 |
| 2. 発表標題 マグノン、フォノン、電流の非相反性とその逆効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年春季大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 新居 陽一，蔣男，有沢洋希，南部雄亮，池田陽一，大石一城，藤田全基，齊藤英治，小野瀬佳文 |
| 2. 発表標題 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンヘリシティの電流制御 |
| 3. 学会等名 IMR-CROSS workshop, J-PARCとJRR-3の相補利用による偏極中性子科学の新展開 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 新居陽一，廣金優二，榊原烈桜，富岡泰秀，小野瀬佳文 |
| 2. 発表標題 Tb ₂ Ti ₂ O ₇ における磁気音響効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 R. Sasaki, I. Yuta, Y. Nii, I. Toshimitsu, and Y. Onose |
| 2. 発表標題 Magnetically Controlled Surface Acoustic Waves on Multiferroic BiFeO ₃ |
| 3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019(Los Angeles) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|