

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月15日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04008

研究課題名(和文)フォノン・弾性波伝搬における相対論効果

研究課題名(英文)Relativistic effect on phonon and acoustic wave propagations

研究代表者

小野瀬 佳文(Onose, Yoshinori)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：80436526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：フォノンの相対論効果に関する三つの成果を挙げた。一つ目は、時間反転対称性、空間反転対称性が破れた場合の素励起の伝搬において、波数方向の正負によって伝搬強度や位相速度が異なるようになる非相反性という現象が表面弾性波においても観測されることを明らかにしたことである。二つ目は、マルチフェロイクス圧電体を用いて磁場に応答する表面弾性波デバイスを作製したことである。三つめは、テルビウム酸化物においてフォノン起源の熱ホール効果を観測したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子やマグノンなどで研究されてきた物質中の相対論効果がフォノンにも大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。この結果は、異なる素励起においても成り立つ普遍性があることが明らかになったことと、磁気弾性結合などフォノンにおける相対論効果の微視的起源の特徴が明らかになったことが学術的意義として挙げられる。非相反性や磁場変化を示す表面弾性波デバイスと熱ホール効果は、それぞれ、情報通信や熱制御などの産業応用に貢献する可能性もある。

研究成果の概要(英文)：We have obtained three scientific results relevant to the relativistic effect of phonons. The first one is the observation of nonreciprocal propagation of surface acoustic wave induced by the simultaneous breaking of time reversal and spatial inversion symmetries. The second one is the fabrication of multiferroic surface acoustic device, in which the signal is modulated by the external magnetic field. The third one is the observation of phononic thermal Hall effect induced by the magnetoelastic coupling in Tb oxides.

研究分野：物性物理学

キーワード：フォノン 弾性波 相対論効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物質中の相対論効果は、ディラック方程式に由来するスピンモーメントと軌道角運動量モーメントの間に働くスピン軌道相互作用として現れることが知られている。この相互作用は磁性体の磁気異方性や磁気モーメントの値の補正といった比較的小さな効果を生み出すものとして考えられていたが、近年スピンホール効果やトポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導、マルチフェロイクスといった、質的にも非常に新しい電磁気現象が、相対論的スピン軌道相互作用によって誘起されることが明らかになってきており、現在の物性物理学の中心的テーマの一つになっている。

物質中の相対論効果を端的に言えば、波数やスピン・軌道に強く依存した電子状態を作り出し、それによって非自明な電磁現象が生み出されることである。例えば、極性を持つ物質におけるラッシュバ効果においては、波数方向に依存してスピン分裂したバンドが形成されることが知られている。一方で、バンド交差点などでスピン軌道相互作用が働くと、スピン・軌道が波数空間でトポロジカルな構造を持ち、ベリー位相誘起の異常ホール効果やスピンホール効果が発現する。そして、一つのバンドがトポロジカル不変量を持つ場合にはトポロジカル絶縁体やスピンホール絶縁体など非自明な端状態を有する半導体になる。

このような相対論効果は、電子のみならずフォトン(光)やマグノン(スピン波)など電子以外の量子にも強く影響を及ぼすことが明らかになってきた。光子バンドのトポロジカル効果によるフォトンのホール効果は、小野田らによって理論的に予言され、その後実験でも観測されている(Onoda et al., PRL 2004)。また、空間反転・時間反転対称性が破れた磁性体(いわゆるマルチフェロイクス)においては、相対論効果に由来して光の波数方向によって屈折率(フォトンバンドの群速度)が変わる方向二色性も観測されている(例えば、「マルチフェロイクス物質中の電磁気学の新展開」有馬孝尚書 共立出版)。

マグノンの相対論効果に関しては小野瀬が大きな役割を果たしてきた。2010年にマグノンのホール効果を熱輸送の方法を用いることによって初めて観測し(Onose et al., Science 2010)、結晶格子依存性がジャロシンスキー守谷相互作用(相対論的磁気相互作用)に由来するベリー位相に基づく理論と一致することを明らかにした。また最近では、空間反転対称性が破れた強磁性体 LiFe_5O_8 において、ジャロシンスキー守谷相互作用によって $+k$ と $-k$ で励起周波数などが異なる非相反なマグノン伝搬を観測している(Y. Iguchi, S. Uemura, K. Ueno, Y. Onose, PRB 2015)。

同様な相対論効果はフォノンにおいても期待できる。現在のところ、相対論効果の研究少ないがいくつか報告例があるのがホール効果である。実験的には、テルビウムガーネット酸化物 $\text{Tb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ においてわずかな熱流の曲がり報告され(Strohmer et al., PRL 2005)、それがフォノンのホール効果であるとされた。この結果に刺激され、フォノンのホール効果を生み出す理論の提案もいくつかなされた。しかしながら、その後の実験的な報告例はあまりなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、フォノンの相対論効果の集中的な研究を行い新奇な現象を開拓しその学理を構築した。

3. 研究の方法

本研究では二つの方法により、研究を行った。一つは圧電性を用いて高周波を弾性波に変換し表面弾性波の伝搬を測定する方法である。これにより、表面弾性波伝搬における磁性の影響を明らかにした。もう一つは、試料にヒータと抵抗温度計二つを取り付け、熱流を流したときの縦、横の温度勾配を計測し、熱ホール伝導度を求める方法である。これによりフォノンホール効果を測定した。

4. 研究成果

以下のような、相対論効果によってフォノンが示す新奇な現象を開拓した。

(1) マルチフェロイクスにおける表面弾性波発生とその磁場効果[Ishii et al., Phys. Rev. Appl. 9, 034034 (2018), R. Sasaki et al., Phys. Rev. B 99, 014418 (2019)]

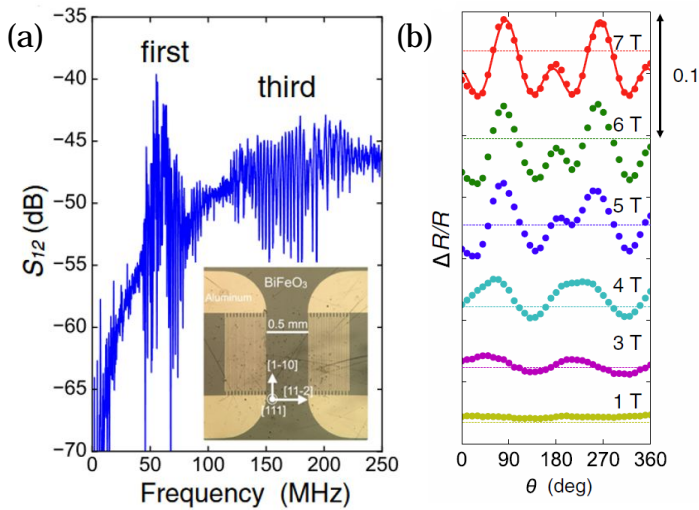


図 1 (a) BiFeO₃ 表面弾性波デバイスの透過強度の周波数依存性。挿入図は作製したデバイスの光学顕微鏡像。(b)透過強度のデバイス面内における磁場方向依存性。

性をもつマルチフェロイクスに変えると磁場で透過強度などが変調できる表面弾性波デバイスが期待できる。我々は、マルチフェロイクスの BiFeO₃ を基板として用いて、表面弾性波デバイスを作製した。図 1 (a)の挿入図は作製したデバイスの光学顕微鏡像である。二つのすだれ状電極を電子ビームリソグラフィーと電子ビーム蒸着によって作製した。図 1 (a)は、すだれ状電極間の透過強度の周波数依存性である。50MHz 付近のピークが表面弾性波励起によるものである。150MHz 付近のブロードなピークは 3 倍波の寄与と考えられる。図 1(b)には磁場を面内で回転させたときの透過強度の変化を示す。磁場回転によって透過強度が大きく変調されていることが分かる。以上のように、BiFeO₃ 基板を用いたデバイスにおいて表面弾性波励起を観測して、その大きな磁場変化を観測することが出来た。類似の結果は、別のマルチフェロイクス CuB₂O₄ を基板として用いた場合にも得られた。

(2) Ni/LiNbO₃ 二層デバイスにおける表面弾性波の非相反伝搬の観測[R. Sasaki et al., Phys. Rev. B 95, 020407(R) (2017)]

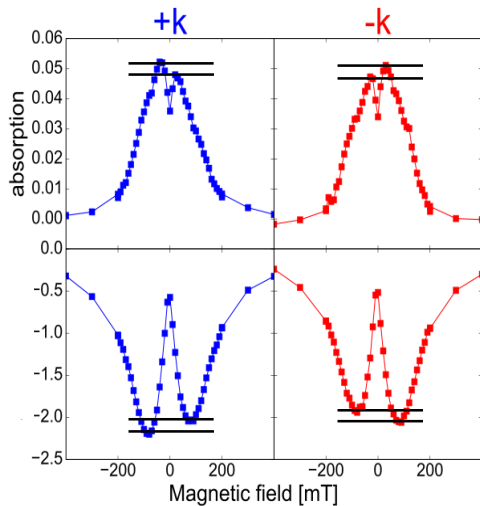


図 2 Ni/LiNbO₃ 表面弾性波二層デバイスにおける吸収強度(上段)と位相のずれ(下段)の磁場依存性。

の磁場依存性を示す。二つの量とも非対称な磁場依存性を示しており、波数 k の方向を反転するとその非対称性も反転することが明らかになった。これらは、表面弾性波の非相反性が生じていることを示している。その微視的起源については、磁気弾性結合による楕円偏光を持つ表面弾性波と磁気共鳴モードとの相互作用によって理解できる。

表面弾性波とは文字通り物質の表面を伝搬する弾性波のことである。圧電体においては、すだれ状電極を利用することにより表面弾性波を生成、検出することが可能になる。すだれ状電極の電極線の周期が励起する周波数における弾性波の波長と一致するとき、高周波信号が弾性波へと変換される。一方、線の周期と弾性波の波長が一致しないときには弾性波は励起できない。このような性質を利用して、圧電体にくし型電極を二つ付けたデバイス(表面弾性波デバイス)は、周波数フィルタとして携帯電話などに利用されている。もし、通常用いられている非磁性の圧電体基板を、磁

時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れた物質においては、光や電子などの物質中の素励起の分散関係が波数空間で非対称になる。その結果、伝搬・伝導が方向の正負で異なる非相反性と呼ばれる現象が観測される。この現象は、はじめ光で観測され、その後 X 線やマイクロ波、電気伝導、マグノンの伝搬など広い範囲で観測されることが分かってきた。我々は、弾性波においても非相反性が現れることを明らかにした。用いたのは前の節と類似の表面弾性波デバイスである。典型的な圧電体 LiNbO₃ を基板として用い、二つのすだれ状電極を基板表面に作製し、その間に強磁性体の Ni を蒸着した。表面弾性波は表面の現象であるので、空間反転対称性はやぶれており、Ni の強磁性により時間反転対称性も破れる。

図 2 に表面弾性波の吸収強度と位相のずれ

(3)テルビウム酸化物におけるフォノンホール効果[Y. Hirokane et al., Phys. Rev. B 134419 (2019).]

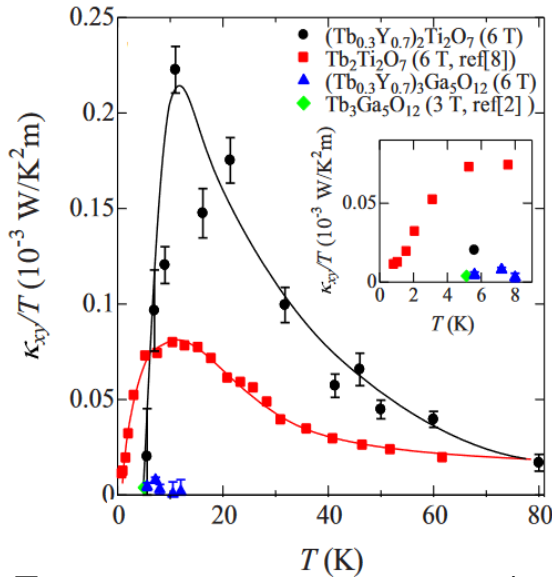


図3 (Tb_{0.3}Y_{0.7})₂Ti₂O₇, (Tb_{0.3}Y_{0.7})₃Ga₅O₁₂における熱ホール効果。比較のため文献で報告されているTb₂Ti₂O₇とTb₃Ga₅O₁₂の値も載せている。

熱ホール効果とは、磁場と温度勾配の両方に垂直な方向に熱流が流れる現象である。金属では、この効果は電気的なキャリアが運ぶ熱流がローレンツ力によって曲げられたため起こると理解される。しかし、絶縁体では電的に中性なフォノンやマグノンなどによって熱流が運ばれるためこのような自明なメカニズムによっては、熱ホール効果は起こらない。しかしながら、2005年にStrohmらによって常磁性絶縁体Tb₃Ga₅O₁₂における熱ホール効果が報告されて以来、いくつかの磁性絶縁体において熱ホール効果が報告されてきた。そのなかのいくつかは、ジャロシンスキー守谷相互作用によって誘起されたマグノンのホール効果によって説明されるが、その他の系における熱ホール効果はそれほどよく分かっていない。特に、フラストレーション系で観測されている熱ホール効果は、エキゾチックな磁気励起によるものかフォノンホール効果によるものか見分けるのが難

しい。我々は、磁気的な希釈つまり部分的に磁気モーメントを持つイオンを非磁性のイオンに置き換えることがこれを見分けるのに有効であることを見出した。磁気励起によって熱ホール効果が誘起されている場合、磁気励起で運ばれる熱流が希釈によって抑えられるため、熱ホール効果の大きさは希釈によって大きく減少することが期待される。一方、フォノンホール効果の場合には局所的な磁気弾性結合によって誘起されていると考えられるため、希釈の効果はより緩やかである。我々は、大きな熱ホール効果が観測されているTb₂Ti₂O₇において、磁性イオンのTbの70%を非磁性のYに置換した試料の熱ホール効果を測定した。図3に測定結果を示す。希釈した試料では希釈前の試料と同程度かむしろより大きい熱ホール効果を観測した。このことはこの系の熱ホール効果がフォノンのホール効果によることを示している。さらに、磁性を希釈したガーネット酸化物(Tb_{0.3}Y_{0.7})₃Ga₅O₁₂においても同様に熱ホール効果を観測した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

“Phononic thermal Hall effect in diluted terbium oxides” Y. Hirokane, Y. Nii, Y. Tomioka, and Y. Onose, Phys. Rev. B 99, 134419/1-5 (2019). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.99.134419

“Designing Rashba-Dresselhaus effect in magnetic insulators” M. Kawano, Y. Onose, and C. Hotta, Communications Physics 2, 27/1-8 (2019). 査読有 DOI: 10.1038/s42005-019-0128-6

“Surface acoustic wave coupled to magnetic resonance on multiferroic CuB2O4” R. Sasaki, Y. Nii, and Y. Onose, Phys. Rev. B 99, 014418/1-8 (2019). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.99.014418

“Microwave nonreciprocity of magnon excitations in the noncentrosymmetric antiferromagnet Ba2MnGe2O7” Y. Iguchi, Y. Nii, M. Kawano, H. Murakawa, N. Hanasaki, and Y. Onose, Phys. Rev. B 98, 064416/1-5 (2018). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.98.064416

“Magnetically Controlled Surface Acoustic Waves on Multiferroic BiFeO3”, Y. Ishii, R. Sasaki, Y. Nii, T. Ito, and Y. Onose, Phys. Rev. Applied 9, 03434/1-4 (2018). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.03434

“Magnetotransport properties in the noncentrosymmetric itinerant ferromagnet Cr11Ge19”, N. Jiang, Y. Nii, R. Ishii, Z. Hiroi, and Y. Onose Phys. Rev. B 96, 144435/1-5 (2017). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144435

“Magnetolectrical control of nonreciprocal microwave response in a multiferroic helimagnet” Y. Iguchi, Y. Nii, and Y. Onose, *Nature Commun.* 8, 15252/1-5 (2017). 査読有 DOI: 10.1038/ncomms15252

“Microwave magnetochiral effect in the non-centrosymmetric magnet CuB₂O₄” Y. Nii, R. Sasaki, Y. Iguchi, and Y. Onose, *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 24707/1-8 (2017). 査読有 DOI: 10.7566/JPSJ.86.024707

“Nonreciprocal propagation of surface acoustic wave in Ni/LiNdO₃” R. Sasaki, Y. Nii, Y. Iguchi, and Y. Onose, *Phys. Rev. B* 95, 020407(R)/1-5 (2017). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.95.20407

[学会発表](計 23 件)

Ryo Sasaki, Yuta Ishii, Yoichi Nii, Toshimitsu Ito, Yoshinori Onose “Magnetically Controlled Surface Acoustic Waves on Multiferroic BiFeO₃” American Physical Society March meeting 2019

新居陽一, 廣金優二, 榊原烈桜, 富岡泰秀, 小野瀬佳文 「Tb₂Ti₂O₇ における磁気音響効果」日本物理学会 2018 年秋季大会

Yoshinori Onose, “Nonreciprocal propagation of microwaves, magnons, and acoustic waves in multiferroics” 10th APCTP workshop on multiferroics

Yoshinori Onose “Nonreciprocal propagation of electromagnetic waves, magnons, and acoustic waves in noncentrosymmetric magnets” International Conference on Magnetism 2018

Yoshinori Onose “Nonreciprocal propagation of electromagnetic waves, magnons, and acoustic waves in noncentrosymmetric magnets” The 5th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies

Yoshinori Onose “Nonreciprocal propagation of electromagnetic waves, magnons, and acoustic waves in multiferroics” KINKEN-KIST joint symposium 2018

佐々木遼, 新居陽一, 小野瀬佳文 「マルチフェロイック物質 CuB₂O₄ における表面弾性波」日本物理学会 第 73 回年次大会

廣金優二, 富岡泰秀, 小野瀬佳文 「Tb イオンを含む常磁性絶縁体の熱ホール効果」日本物理学会 第 73 回年次大会

Ryo Sasaki, Yoichi Nii, Yoshinori Onose “Surface acoustic wave on a multiferroic material CuB₂O₄ and magnon-phonon coupling” APS March meeting 2018

Yusuke Iguchi, Yoichi Nii, Hiroshi Murakawa, Noriaki Hanasaki, Yoshinori Onose “Non-reciprocal microwave response of antiferromagnetic magnons in a multiferroic Ba₂MnGe₂O₇” APS March meeting 2018

Nan Jiang, Yoichi Nii, Rieko Ishii, Zenji, Hiroi, Yoshinori Onose “Magnetotransport properties in the noncentrosymmetric itinerant ferromagnet Cr₁₁Ge₁₉” APS March meeting 2018

小野瀬佳文 “Effect of inversion symmetry breaking on antiferromagnetic magnons” 平成 29 年度スピン変換年次報告会

小野瀬佳文 “Exploration of phononic phenomena induced by spin-orbit interaction” 平成 29 年度スピン変換研究会

川野雅敬, 小野瀬佳文, 堀田知佐 「反転対称性の破れた反強磁性体のマグノン励起」日本物理学会 2017 年秋季大会

井口雄介, 新居陽一, 小野瀬佳文 「マルチフェロイクス Ba₂MnGe₂O₇ における反強磁性マグノンのマイクロ波応答」日本物理学会 2017 年秋季大会

濱原義明, 新居陽一, 井口雄介, 小野瀬佳文 「超伝導回路共振器を用いたマルチフェロイクスにおける非相反現象観測の試み」日本物理学会 2017 年秋季大会

Y. Onose “Nonreciprocal propagation of elementary excitations in noncentrosymmetric magnets” DPG Spring meeting 2017

石井優太, 佐々木遼, 新居陽一, 伊藤利充, 小野瀬佳文 「マルチフェロイック物質 BiFeO₃ における表面弾性波伝搬」日本物理学会第 72 回年次大会

蔭男, 新居陽一, 小野瀬佳文 「空間反転対称性が破れた遍歴磁性体 Cr₁₁Ge₁₉ 単結晶における磁気輸送特性」日本物理学会第 72 回年次大会

Y. Iguchi, Y. Nii, Y. Onose “Magnetolectrical control of nonreciprocal microwave response in a multiferroic helimagnet” American Physical Society March Meeting 2017

21 R. Sasaki, Y. Nii, Y. Iguchi, Y. Onose “Nonreciprocal propagation of surface acoustic wave in Ni/LiNbO₃” American Physical Society March Meeting 2017

22 Y. Onose “Nonreciprocal propagation of elementary excitations in noncentrosymmetric magnets” International workshop on computational science 2017

- 23 井口雄介、新居陽一、小野瀬佳文 「強誘電体らせん磁性体における非相反マイクロ波応答の電場制御」日本物理学会 2016 年秋季大会

〔その他〕

ホームページ等

<http://onoselab.imr.tohoku.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

無し

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：新居陽一

ローマ字氏名：Nii Yoichi