

令和元年6月14日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2018

課題番号：17H04806

研究課題名(和文)カンチレバーを用いたベリー位相磁場の力学的検出

研究課題名(英文) Mechanical detection of Berry-phase magnetic fields using cantilever structure

研究代表者

塩見 雄毅 (SHIOMI, YUKI)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：10633969

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、近年物性物理学で注目を集めるトポロジ概念との関係が未だ実験的に開拓されていない、物質の力学的効果に注目し、電子の波動関数の幾何学的位相(ベリー位相)に由来する新奇トポロジカル力学現象の開拓研究を行った。本研究課題で構築した測定系を用いて、スピン流の緩和に誘起されるカンチレバー振動の世界初観測や、低対称磁性金属における磁気圧電効果の世界初観測などに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カンチレバーの運動はセンサーの基礎技術などに応用されており、また物質の低対称性に起因した電気-機械変形結合効果である圧電効果もエレクトロニクス素子などに広く応用されている。本研究では、カンチレバー運動や圧電効果の研究を磁性とトポロジの観点から行い、新しい力学応答を開拓することに成功した。これらの成果により、磁性による機械運動の制御が可能となり、トポロジ効果を利用することによる機械応答の巨大化に向けた指針が得られた。

研究成果の概要(英文)：The relation between topological concepts that have attracted much interest recently in condensed matter physics and mechanical phenomena has not been explored experimentally. In this research project, we focused on topological mechanical effects that stem from the geometric phase (berry phase) of the wave function of electrons. Using the measurement system constructed for the detection of tiny sample vibrations, we succeeded in the first observation of cantilever vibration induced by relaxation of spin currents, and also the first observation of the magnetopiezoelectric effect in a low-symmetry magnetic metals.

研究分野：スピントロニクスを中心とした物性物理学

キーワード：ベリー位相 カンチレバー トポロジ ホール効果 圧電効果

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

1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまで磁性体におけるベリー位相に由来するホール効果について基礎研究を行ってきており、その成果は例えば書籍『Anomalous and Topological Hall Effects in Itinerant Magnets』(Springer社)にまとめられ出版されている。ホール効果とは、伝導体に外部磁場下で電流を流した際に、外部磁場と電流の両方に垂直な方向に電場が生じる現象である(図1)。ローレンツ力に由来するこのホール効果は正常ホール効果と呼ばれるが、磁性体中では正常ホール効果に加えて電子のスピン自由度に由来するホール効果が生じる(図2)。この磁性体特有のホール効果は異常ホール効果やトポロジカルホール効果と呼ばれ、申請者を含めた近年の精力的研究により電子の波動関数が持つ幾何学的位相(ベリー位相)に由来することが確立された。

理論的には、ベリー位相に由来するホール効果は、固体中に現れるベリー位相磁場によるローレンツ力として表現することができる。ここで重要なことは、そのベリー位相磁場の大きさは一般に外部磁場よりも遥かに大きいことである。特に螺旋磁性体や反強磁性体においてはその巨大さは顕著であり、例えばカイラル磁性体 MnGe 合金においては 1000 テスラものベリー位相磁場が生じることが実験的に示されている。このように物質の内部では仮想的な磁場による巨大ローレンツ力が期待されるわけであり、ベリー位相効果を力学応答に活かすことは応用物理上も興味深い課題である。しかしながら、研究開始当初においては固体物理学におけるベリー位相効果と力学応答の関係はあまり実験的に研究されていなかった。そこで本研究ではトポロジ効果による力学応答の開拓を実験的に開拓することを目指して研究を行った。

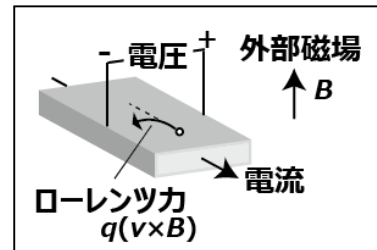


図1: 正常ホール効果

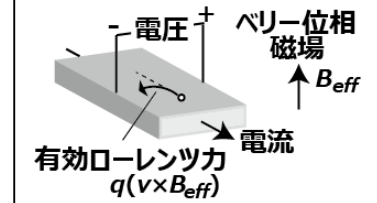


図2: 異常ホール効果

2. 研究の目的

ベリー位相効果と力学応答の関係を明らかにし、新しいトポロジカル力学応答を開拓するのが本研究の目的である。具体的には、異常ホール効果およびトポロジカルホール効果で発現するベリー位相磁場に誘起されるローレンツ力の力学的検出を、図3に示すような微小力測定を可能にするマイクロカンチレバー構造を用いて達成することを目指した。ベリー位相磁場によるローレンツ力を用いたカンチレバー駆動は、計測を行う室温においては電子系と格子系との間の相互作用により実験的に観測される可能性があり、また電子と正孔の輸送が絡みあうような物質材料を用いればその効果はより増幅させられる可能性があると考えた。近年のトポロジカル物質に関する研究の流行により、異常ホール効果およびトポロジカルホール効果を発現する物質例は近年ますます増加している。カンチレバー上に接合する磁性金属の種類を様々な物質材料に変えることで信号の巨大応答化を狙うことを計画当初の最終目標とした。

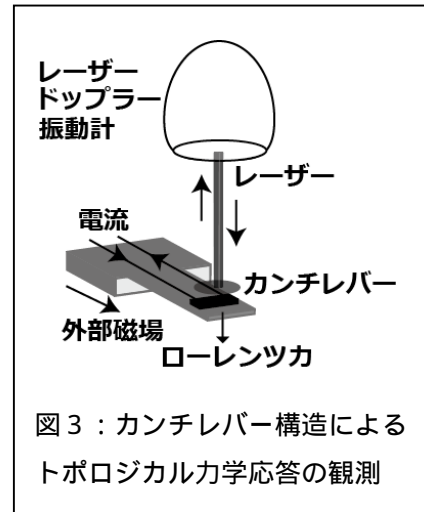


図3: カンチレバー構造によるトポロジカル力学応答の観測

研究期間内に研究代表者が2度の異動(初年度後期に一回、第二年度後期に一回)を行ったことにより、研究環境が大きく変わることとなった。異動を契機として当初の計画になかった新しいトポロジカル力学応答として、磁気圧電効果の世界初観測を狙うことにした。磁気圧電効果とは磁性金属における圧電効果(電場印加により歪みが生じる現象およびその逆効果)であり、圧電効果は通常絶縁体や半導体でしか観測されないが、磁性による対称性の破れを利用することで金属でも発現されることを特徴とする。近年の理論的な研究によれば、磁気圧電効果にはベリー位相に由来する成分が含まれていることが指摘されており、その世界初観測は本課題において大目標とした新しいトポロジカル力学応答の開拓と目的が合致する。また、動的変位測定として当初計画と同様の実験手法が有効に使えるため相乗効果が狙える。さらに、力

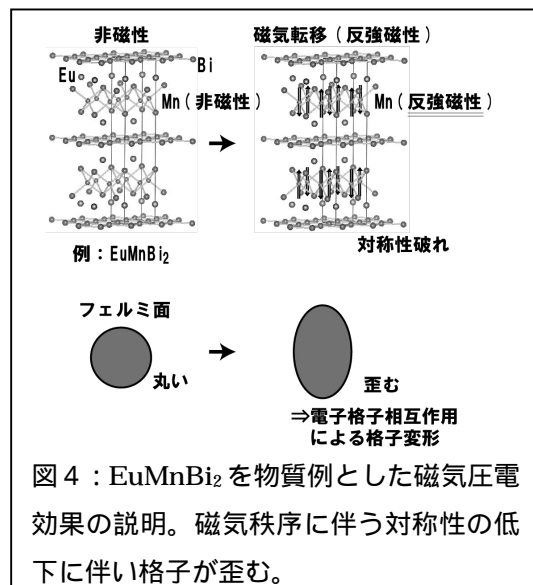


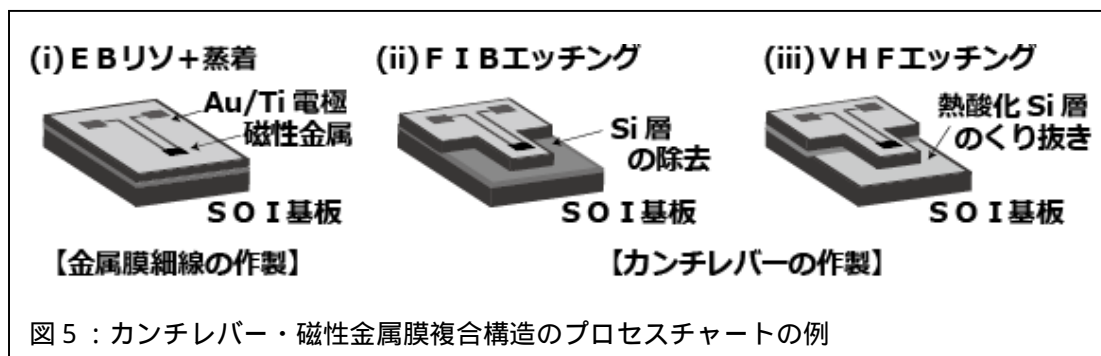
図4: EuMnBi<sub>2</sub>を物質例とした磁気圧電効果の説明。磁気秩序に伴う対称性の低下に伴い格子が歪む。

ンチレバー構造を用いた当初の計画内容と異なり、磁気圧電効果はカンチレバー構造という微細加工を必要としないため、通常の圧電素子のように実用への可能性が高い。

以上の通り、本研究の目的は(1)カンチレバー構造を用いた磁性金属におけるトポロジカル力学応答の観測と、(2)対称性の低い磁性金属における磁気圧電効果の観測の2つである。

### 3. 研究の方法

カンチレバー構造を用いたトポロジカル力学応答の開拓には、カンチレバー・磁性金属膜複合構造を作製する必要があるが、その作製法の確立自体が前例も少ないため大きな課題である。初年度は試料の作製法の確立と動的変位測定系の構築を目指した。シリコンウエハにおけるカンチレバー構造の一般的な作成方法を参考にすると、以下のようなプロセスが試料作製の一つの典型例となる。



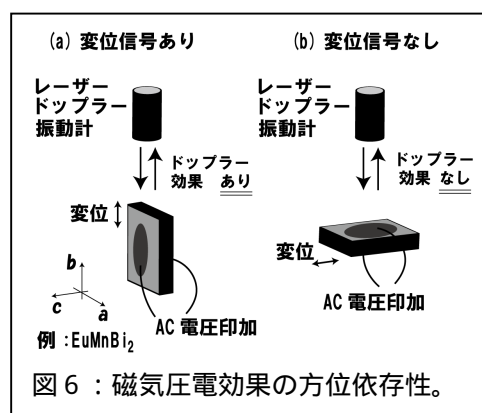
簡単に図5に示したプロセスについて以下に説明を行う。最初のプロセス(i)として、SOI基板上に電子ビームリソグラフィ法とスパッタリング製膜法を組み合わせ、金属膜細線構造を作製する。ここで、カンチレバーの先端部分に配置する金属膜は目的物質である磁性金属膜とし、それ以外の部分は電極となる非磁性Au/Ti膜を用いる。電流を流す際に外部からワイヤボンダにより配線するための電極パッドも配置する。SOI基板としては、最上部Si層の厚さは0.1ミクロン、中間のSiO<sub>2</sub>層の厚さは1ミクロン以上とし、カンチレバーが十分振動できる距離を確保する。金属膜の幅は数ミクロン程度、厚みは50nm程度とする。

次のプロセス(ii)でカンチレバー構造の土台を作る。集束イオンビーム(FIB)法によるエッチングにより、(i)で作製した金属膜細線を傷つけないようにカンチレバー構造を成形する。このプロセスでは、最上部のSi層を除去し、下のSiO<sub>2</sub>層が露出するまでの加工となる。

最後の(iii)のプロセスで、HF気相(VHF)エッチング法により、露出したSiO<sub>2</sub>膜を除去し、カンチレバー構造を作製する。磁性金属膜細線が先端部分に配置されたSiカンチレバーの下部全体のSiO<sub>2</sub>層がくり抜かれていることを電子顕微鏡(SEM)画像から確認する。カンチレバーの長さは100ミクロン程度、幅は10ミクロン程度とし、カンチレバーの共振周波数が1~10kHz程度になるように調整する。室温でのQ値が1000以上である高感度なカンチレバーを作製し、室温で十分にローレンツ力が検出できる感度(~10<sup>-16</sup>N)を達成する。

カンチレバーの計測については、本課題で計上するレーザードップラー振動計を用いて行った。試料に弱い面内磁場を印加しながらレーザードップラー振動計によりカンチレバーの動的変位を検出した。計測されたカンチレバーの動的変位はFFTアナライズにより時間に対して数値積分することで、動的変位へと変換した。カンチレバーにおいては試料のサイズで決まる共振周波数があり、共振周波数における電流応答を計測することで高感度な実験を行う。

もう一つの研究課題である対称性の低い磁性金属における磁気圧電効果の観測は、上記のカンチレバーの動的変位検出実験と同じく磁性金属に対して電流を印加し、それに応答する動的変位を観測することで実験を行う。従って、上記実験で構築したレーザードップラー振動計の設備が有効に使えるが、カンチレバー構造を作製する必要がなく、バルク形状の磁性金属試料で実験が可能である。磁気圧電効果の計測においては、信号の温度変化が重要と考えられるため、既存の液体窒素オプティスタットと組み合わせることで、液体窒素温度から室温まで温度を変調して実験を行った。磁気圧電効果は物質の有する対称性に依存して、変位信号の発生する結晶方向が決まる。本研究で



対象とした反強磁性金属 EuMnBi<sub>2</sub>においては、対称性から考察すると、面直(c軸)方向への電流印加により面内(a軸)方向には動的変位が発生すると期待されるが、c軸方向には発生しないと期待される。本実験では試料の固定方向を変化させることで方位依存性も調べた(図6)。



#### 4. 研究成果

本研究課題では、近年物性物理学で注目を集めるトポロジ概念との関係が未だ実験的に開拓されていない力学的効果に注目し、電子の波動関数の幾何学的位相（ベリー位相）に由来する新奇力学現象の開拓研究を2か年計画で行った。初年度の目標は、力学効果を計測するための基本的試料構造となるカンチレバー・金属膜複合デバイス構造の作製手法の確立と、レーザードップラー振動計による力学振動の測定手法の確立であった。

まず、カンチレバー・磁性金属膜複合デバイス構造の作製について、図5に示すプロセスチャートに沿って、EB蒸着法およびEBリソグラフィ法、気相フッ酸エッチング法等を用いてSOI基板上でデバイスの作製を行った。何度かの試行の後にカンチレバー・磁性金属膜複合試料の作製に成功したが、作製した試料においてカンチレバー本体部分を構成するシリコンと蒸着した金属膜の熱膨張係数の差に由来すると思われるカンチレバーの反り上がりが見られた。作製したデバイスに対し、磁性金属膜に磁場で電流を流し誘起される力学振動をレーザードップラー振動計で計測したが、計測誤差の範囲内で有意な信号は得られなかった。

そこで、シリコンでカンチレバー構造を作製して上部に磁性金属膜をつけるのではなく、磁性体を直接FIB法によりカンチレバー構造に加工するやり方で同様の実験を行ったところ、磁性に関係する動的変位信号が得られた。特筆すべき成果として、スピン流の緩和に誘起されるカンチレバー振動を世界初観測し、学会発表を行い、論文として投稿した。現在論文査読中である（図7）。

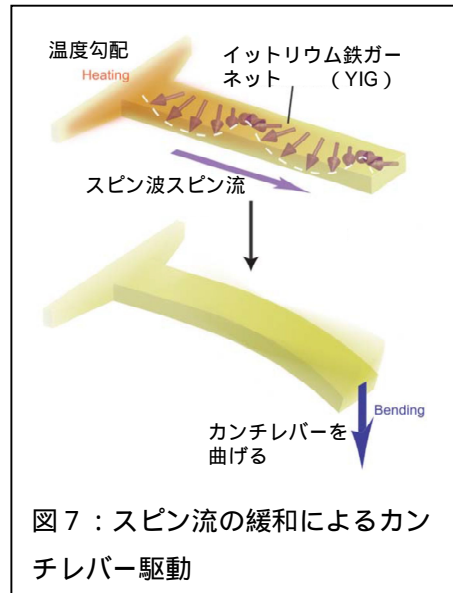


図7：スピン流の緩和によるカンチレバー駆動

さらに、研究代表者が異動したことに伴い、レーザードップラー振動計による力学振動の測定手法を有効に利用できる新しいトポロジカル力学応答の探索研究として、磁気圧電効果の研究も開始した（第一年度後期から）。まず、圧電応答の計測系のテストも兼ねて、 $\text{AgCrSe}_2$ におけるAgイオンの超イオン伝導を利用した圧電効果の研究を行った。 $\text{AgCrSe}_2$ 試料の合成中に起きたAg欠損に由来する伝導電子の電気伝導度が高い試料においてはスクリーニング効果による圧電応答の抑制がみられたが、一番絶縁的な試料においては超イオン伝導の効果（電場に強く応答してイオンの変位を起こす効果）により従来圧電材料に匹敵する大きさの圧電効果を観測した（Adv. Electron. Mater. 4, 1800174 (2018)）。この成果は伝導性を利用した新しい圧電応答であり、鉛フリー圧電材料開発の新指針として大きな意義をもつ。

室温における圧電効果計測系が完成したので、第二年度において液体窒素オプティスタットと組み合わせて低温実験へと展開し、ベリー位相と関係した物質の機械変形効果の一つである磁気圧電効果の研究を行った。磁性カンチレバーの機械変形計測で培った実験技術を用いて研究期間内において複数の物質試料で磁気圧電効果の計測をトライした。実際に、反強磁性金属  $\text{EuMnBi}_2$  において磁気圧電効果の世界初観測に成功し、速報として発表した（Phys. Rev. Lett. 122, 127207 (2019)）。図8に示す通り、液体窒素温度において面内方向には電流に起因した変位信号が観測されたが、面直方向には観測されなかった。これは図6に示した磁気圧電効果の対称性と一致する。さらに、温度変化を計測すると、温度が上がるほど電流に誘起された変位信号は単調に減少することがわかった。これは伝導度が高いほど信号が大きいと期待される磁気圧電効果と合致している。通常の圧電効果であれば伝導度が高いほどスクリーニング効果により信号が小さくなるため好対照であり、磁気圧電効果由来の信号が観測されたことを強く示唆する。

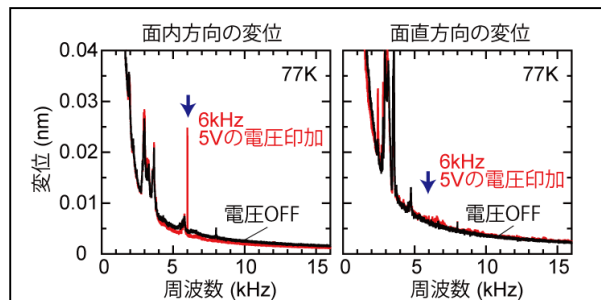


図8： $\text{EuMnBi}_2$ における面内方向および面直方向の変位信号。印加電圧（電流）にตอบสนองして面内方向にのみ変位信号が現れる。

磁気圧電効果の世界初の観測は画期的な成果ではあるが、観測された変位信号の大きさは  $\text{EuMnBi}_2$  においては一般的な圧電材料の圧電応答よりも非常に小さく、また低温でしか観測されなかった。トポロジに関係した成分は外部磁場を印加することで増幅させられると期待されるため、今後さらに研究展開してトポロジに関する力学効果の開拓を継続して行っていく予定である。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計10件)

- 1 . Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, and S. Ishiwata, “ Observation of a Magnetopiezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal  $\text{EuMnBi}_2$  ”, Phys. Rev. Lett. 122, 127207 (2019), 査読有 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.127207)
- 2 . Yuki Shiomi, Jana Lustikova, Shingo Watanabe, Daichi Hirobe, Saburo Takahashi, and Eiji Saitoh, “ Spin pumping from nuclear spin waves ”, Nature Phys. 15 22-26 (2019) , 査読有 (DOI: 10.1038/s41567-018-0310-x)
- 3 . J. Lustikova, Y. Shiomi, N. Yokoi, N. Kabeya, N. Kimura, K. Ienaga, S. Kaneko, S. Okuma, S. Takahashi, and E. Saitoh, “ Vortex rectenna powered by environmental fluctuations ”, Nat. Commun. 9, 4922 (2018) , 査読有 (DOI: 10.1038/s41467-018-07352-1)
- 4 . Maki Umeda, Yuki Shiomi, Takashi Kikkawa, Tomohiko Niizeki, Jana Lustikova, Saburo Takahashi, and Eiji Saitoh, “ Spin-current coherence peak in superconductor/magnet junctions ”, Appl. Phys. Lett. 112, 232601 (2018) , 査読有 (DOI: 10.1063/1.5027456)
- 5 . Yuki Shiomi, Tomoki Akiba, Hidefumi Takahashi, and Shintaro Ishiwata, “ Giant Piezoelectric Response in Superionic Polar Semiconductor ”, Adv. Electron. Mater. 4, 1800174 (2018) , 査読有 (DOI: 10.1002/aelm.201800174)
- 6 . Y. Shiomi, R. Takashima, D. Okuyama, G. Gitgeatpong, P. Piyawongwatthana, K. Matan, T. J. Sato, and E. Saitoh, “ Spin Seebeck effect in the polar antiferromagnet  $\text{Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7$  ”, Phys. Rev. B 96, 180414(R) (2017) (Editors' suggestion) , 査読有 (DOI: 10.1103/PhysRevB.96.180414)
- 7 . Y. Shiomi, R. Takashima, and E. Saitoh, “ Experimental evidence consistent with a magnon Nernst effect in the antiferromagnetic insulator  $\text{MnPS}_3$  ”, Phys. Rev. B 96, 134425 (2017) , 査読有 (DOI: 10.1103/PhysRevB.96.134425)

### 〔学会発表〕(計8件)

1. 塩見雄毅, 「低次元トポロジカル物質におけるスピン流現象」, 日本物理学会第74回年次大会(招待講演), 2019年
2. Y. Shiomi, “ Thermal generation of spin current in transition metal trichalcogenides ”, One-Day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Materials (招待講演)(国際学会), 2018年
3. Y. Shiomi, “ Spin-charge conversion induced by spin pumping into topological materials ” APS March Meeting 2018 (招待講演), 2018年
4. Y. Shiomi, “ Thermal Generation of Spin Current in Zigzag-Chain Antiferromagnets ” Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop "New Excitations in Spintronics" (招待講演)(国際学会), 2018年

## 6 . 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

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。