

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18890

研究課題名（和文）反強磁性スピンメカトロニクスの開拓：スピン注入による反強磁性体の駆動

研究課題名（英文）Study of antiferromagnetic spin-mechatronics

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：近年のスピン트로ニクス分野において、漏れ磁場がなく超高密度記憶素子の実現が可能な反強磁性体材料が注目を集めている（反強磁性スピン트로ニクス）。本研究では、反強磁性スピン트로ニクスに力学機能を初めて追加し、反強磁性スピンメカトロニクスを開拓することを目的とした。具体的には、スピン角運動量の流れであるスピン流によって反強磁性体の変形を引き起こす、あるいはその逆効果として、反強磁性体の変形によりスピン流輸送を変調することを目指した。実際に、反強磁性絶縁体 -Fe₂O₃にPt薄膜を接合した系で一軸歪みによる純スピン流現象の変調を観測することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

反強磁性絶縁体 -Fe₂O₃にPt薄膜を接合した系で一軸歪みによる純スピン流現象の変調を観測することができたことは、反強磁性スピンメカトロニクス開拓の第一歩と言える。観測された歪みによるスピン流変調が、予想していた圧磁気効果に由来するものであるかどうかは今後の精査が必要であるが、逆効果によりスピン角運動量の流れであるスピン流によって反強磁性体の変形を引き起こすことが期待できる。圧磁気効果を利用した物体駆動は物質開発により巨大化が狙えるため、低消費電力な純スピン流を利用した効率的な磁性体駆動技術開発につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：Recently, antiferromagnetic materials have attracted much attention in the field of spintronics, since they have no leakage magnetic field and enable the realization of ultra-high density storage devices (antiferromagnetic spintronics). The aim of this study is to develop a mechanical function in the antiferromagnetic spintronics for the first time and to explore antiferromagnetic spin mechatronics. Specifically, we aimed to drive the motion of antiferromagnets by spin current, a flow of spin angular momentum, and, as an opposite effect, to modulate the spin current transport by deformation of the antiferromagnets. In fact, we successfully observed the modulation of pure spin current transport by uniaxial pressure in antiferromagnetic insulator -Fe₂O₃/Pt systems.

研究分野：物性物理学、スピン트로ニクス

キーワード：スピンメカニクス 反強磁性体 圧磁気効果 スピン流

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスにスピン自由度を組み込んだスピントロニクス分野の基礎研究において、スピン角運動量の流れであるスピン流によって物体を駆動する技術の開発が注目を集めている。このような研究はスピンメカトロニクス(あるいはスピンメカニクス)と総称され、強・フェリ磁性体のナノ・マイクロ構造を中心に研究が行われてきた。一方、近年のスピントロニクス分野においては、ネット磁化を有する強・フェリ磁性体に代わって、反強磁性体材料が注目を集めている。反強磁性体はネット磁化が無く漏れ磁場がないため、更なる高度情報化社会の実現に向けた超高密度な磁気記録デバイスの実現が期待されている(反強磁性スピントロニクス)。反強磁性スピントロニクス素子に適合したスピンメカトロニクス機能の開発は喫緊の課題であるが、研究開始当初にはスピンメカトロニクス研究に反強磁性体が用いられた実験例は見当たらなかった。

研究代表者は、スピンポンピングやスピンゼーベック効果といったスピン流注入の実験技術を武器として、様々な物性物質材料に対して新しいスピン流機能を開拓してきた(Y. Shiomi et al. Nature Phys. 15, 22-26 (2019), 2020年日本物理学会若手奨励賞(領域3)など)。代表的な成果の一つに、スピンと力学運動との相互作用を研究するスピンメカトロニクスに関する研究成果がある。具体的には、FIB法で加工したフェリ磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット(YIG)梁構造にスピン流注入することで、梁構造の駆動に成功した(K. Harii, Y. Shiomi, et al. Nat Commun 10, 2616 (2019))。自身の研究室立ち上げ後(2018~)は、梁構造の微小振動計測で培った動的歪み計測技術を活かして、バルク物質における逆圧電効果研究も行ってきた。ヘリウム温度までの低温下での動的歪み計測手法を確立し、磁性金属における新しい圧電応答である磁気圧電効果の世界初観測を達成している(Y. Shiomi et al. Phys. Rev. Lett. 122, 127207 (2019))。

前述の通り、既にフェリ磁性絶縁体 YIG 梁構造において、スピン流の格子系への緩和に由来する振動を観測している(K. Harii, Y. Shiomi, et al. Nat Commun 10, 2616 (2019))。しかし、観測された振動の振幅は非常に小さい(最大 2 nm 程度)。加えて、ネット磁化をもつ強・フェリ磁性体の振動は、漏れ磁場の時間変動をもたらし、電磁誘導ノイズを生む。これはスピントロニクスがターゲットとする超微細電子回路に組み込むには大きなデメリットとなる。これらの課題を解決するためには、ネット磁化の無い反強磁性体を用い、物質パラメータの制御により効率化が可能な新しいメカニズムによるスピンメカトロニクス機能の開拓が重要である。

スピン流により物体を駆動するこれまでの試みは、角運動量交換のメカニズムに基づいており、YIG 梁構造においてはスピン緩和におけるスピン角運動量と格子角運動量の交換を利用している。このメカニズムでは巨大な応答を得るのは難しいと思われる。そこで、本研究では先行研究とは全く異なるアプローチをとり、ピエゾ磁気効果(圧磁気効果)に基づく動作原理を用いる。ピエゾ磁気効果は対称性の低い反強磁性体で観測され、磁化の方向の反転で収縮・膨張が変化する。この性質を利用することで、スピン流注入するスピンの偏極方向を時間とともに周期的に切り替えることで反強磁性体に動的歪みを生成することができる。この新しいアプローチにより、ネット磁化の無い反強磁性体における物体駆動が可能になり、反強磁性スピントロニクス分野が誕生する。

ピエゾ磁性に基づくスピンメカトロニクス機能は、物質によらず普遍的な機構である角運動量交換に比べて、物質の「個性」が強く現れる。すなわち、ピエゾ磁気効果の大きさ(歪みとスピン蓄積の比)は物質に依存し、物質開発によりピエゾ磁気効果は巨大化できる可能性がある。物質開発によるスピントロニクス機能の開発は研究代表者の専門とするところであり、研究代表者の優位性が活かせる。また、このような物質開発の余地が大きい点は、多くの後続研究が生まれる見込みが高いことを意味し、一分野として確立する蓋然性が高いと考えた。

2. 研究の目的

以上の背景を受け、本研究では、研究代表者のこれまでの知見・技術を活かして反強磁性絶縁体における新スピンメカトロニクス現象を開拓することを目指した。特に、スピン流により反強磁性体の効率的駆動を可能にする新原理を世界で初めて開拓することは応用物理として重要である。(逆)圧電効果は電場によって歪みが生じる現象であるが、ここで提案するメカニズムは圧磁気効果(ピエゾ磁気効果)に基づき、スピン流注入に伴うスピン蓄積により歪みが生じる。このメカニズムは従前の強磁性スピントロニクス研究で用いられてきたアプローチである格子系へのスピン緩和(スピン角運動量と格子角運動量の交換)とは全く異なり、反強磁性体の駆動を可能にするだけでなく、物質開発により効率化が期待できる。

本研究で用いた物質材料は、ピエゾ磁性体と呼ばれる反強磁性体の一群である。ピエゾ磁性体は歪みと磁化の間の線形応答を示す物質であり、66 の磁気点群に属する対称性の低い反強磁性体が候補となる。対称性の制約は圧電効果よりも弱い、測定が難しかったこともあり研究例は多くない。スピントロニクス技術が成熟した今、ピエゾ磁気効果の精密測定が可能であり、強・フェリ磁性体におけるスピンメカトロニクス研究に実績を有する研究代表者は本研究を遂行するのに最適である。本研究では、モデル物質として典型的なピエゾ磁性体である反強磁性絶縁体 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を主として用いて反強磁性スピントロニクス機能の開拓を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、市販の反強磁性絶縁体 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 単結晶基板を用いて、2つのアプローチで反強磁性スピンメカトロニクス機能の開発を目指した。2つのアプローチとは、いわゆる正効果と逆効果である。正効果の測定においては、(i) 梁構造に加工された反強磁性絶縁体 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の上に Pt 薄膜を成膜し、室温において Pt 薄膜からのスピン流注入によりスピン蓄積(=非平衡磁化)を生成し、 piezo 磁気効果による歪み応答を観測する。また、その効果の逆効果として(ii) Pt/ $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ に歪みを印加することにより、スピン流輸送現象の歪み変調を観測する。(i)において梁構造は機械共振を用いた高感度な歪み測定に必要であり、FIB法を用いて試料のマイクロ梁構造への加工を行った。動的歪みの測定には、研究代表者が得意とするレーザードップラー振動計を用いた。

一方、(ii)の測定には、piezo素子を用いて一軸歪み印加用の治具を作製し、試料に最大0.1%程度の一軸歪みを印加しながら典型的なスピン流輸送現象であるスピンホール磁気抵抗効果を測定した。スピンホール磁気抵抗効果は Pt 層から $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ に注入するスピン流のスピン偏極方向と $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 層のネールベクトルの向きの相対角度によって磁気抵抗が変化する現象である。通常の4端子抵抗測定法が用いられるため簡便であるが、磁場印加の方向を変化させる必要がある。室温で電磁石を用いて試料に磁場を印加し、試料を面内回転させることで電流方向に平行な場合と垂直な場合の2通りの条件でスピンホール磁気抵抗効果の測定を行った。研磨された(0001)面をもつ $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 単結晶基板を購入し、5 nm厚の Pt 薄膜をスパッタ法により成膜したものを試料として用いた。

4. 研究成果

研究期間である2年間の内、初年度はFIB法を用いて反強磁性絶縁体 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 基板をマイクロ梁構造に加工することを試みた(図1)。FIB法によるマイクロ試料加工に多くの経験を有する研究室助教の横内博士と共に数回の試行を行ったが、加工後の梁構造が垂れ下がってしまい、梁として機能しなかった。すなわち、レーザードップラー振動計を用いた動的歪み測定においても熱エネルギーによる振動は観測できず、機械共振が見られる梁構造は作製できなかった。加工に多くの時間がかかり時間的および金銭的負担が大きいこともあり、(i)正効果の測定はひとまず中断し、(ii)逆効果の測定に移った。

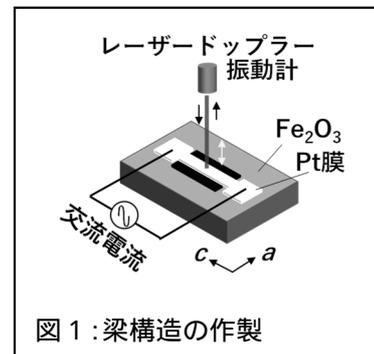


図1: 梁構造の作製

(ii)の逆効果の測定に先立ち、カー効果の測定を用いることで、 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ に歪みを印加することで piezo 磁気効果によりネット磁化が生じる現象を直接観測することを試みた。結果として、歪みに依存したカー効果の信号が観測されたが、同時に計測レーザーのスポット位置がずれることによるアーティファクト信号が重畳することがわかった。レーザー径を大きくするなどの工夫により、piezo 磁気効果に由来すると思われるより信頼性の高いデータの取得に成功した。

カー効果を用いた予備実験の結果を受けて、(ii)逆効果の測定に進んだ(図2)。すなわち、市販の piezo 素子を用いて Pt/ $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料に引っ張り歪みを印加できる治具を作製し、一軸歪みを印加しながら Pt 層の磁気抵抗効果を測定した。まず、スピンホール磁気抵抗効果が観測されていることを確認するために、歪みを印加しない状態で磁気抵抗測定を行ったところ、 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 薄膜を用いた先行研究(A. Ross, et al, Phys. Rev. B 102, 094415(2020))と合致する符号の磁気抵抗信号が得られた。

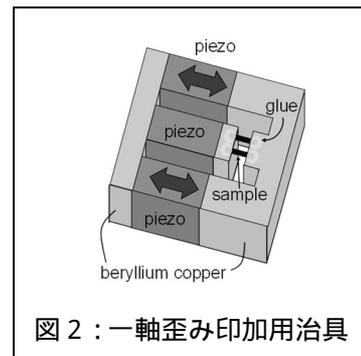


図2: 一軸歪み印加用具

作製された Pt/ $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料においてスピンホール磁気抵抗効果が確認されたので、続けて、一定の一軸引っ張り歪みを印加しながらスピンホール磁気抵抗効果の測定を行った。その結果、0.01%~0.1%程度の引っ張り歪みによって、スピンホール磁気抵抗効果は歪みに線形に変調されることがわかった。スピンホール磁気抵抗効果の変調は、外部磁場を電流方向に印加した場合にも、面内の垂直方向に印加した場合にも見られる。測定精度の範囲内では磁場角度依存性は見られなかった。複数の試料で引っ張り歪みにより同様の信号変化が見られることを確認した。

観測されたスピンホール磁気抵抗効果の歪み変調は、背景や目的に述べた piezo 磁気効果の影響である可能性がある。つまり、piezo 磁気効果によって歪みから磁化が誘起されたことで、純スピン流現象が変調されたと考えられる。しかし、今回の実験においては印加される歪みの方向は結晶軸に対して一定であり、それにより生成されるネット磁化の向きも同じであることを踏まえると、観測された磁場角度依存性とは相容れない。むしろ歪みにより対称性が低下し、異方性が生じることによる反強磁性ドメインの整列に由来すると考えた方が実験結果をうまく説明できる。その他、引っ張りによる Pt 層の電子状態の変化や、引っ張りによる Pt/ $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 界面での散乱の変調などの影響も考えられるため、現在詳細な実験結果の解析を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Miyazaki Yu, Yokouchi Tomoyuki, Shiomi Yuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Trapping and manipulating skyrmions in two-dimensional films by surface acoustic waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-29022-z	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 Yokouchi Tomoyuki, Ikeda Yuya, Morimoto Takahiro, Shiomi Yuki	4. 巻 130
2. 論文標題 Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl Semimetal WTe ₂ Induced by Diverging Berry Curvature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 136301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.136301	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 Zhang Siyue, Miyazaki Yu, Yokouchi Tomoyuki, Shiomi Yuki	4. 巻 121
2. 論文標題 Phase-change control of anomalous Hall effect in ferromagnetic MnBi thin films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 262402 ~ 262402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0121284	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 Yokouchi T., Shiomi Y.	4. 巻 16
2. 論文標題 Enhancement of Current-Induced Out-of-Plane Spin Polarization by Heavy-Metal-Impurity Doping in Fe Thin Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 54001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.16.054001	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 Ogata K., Kikkawa T., Saitoh E., Shiomi Y.	4. 巻 120
2. 論文標題 Modulation of spin Seebeck effect by hydrogenation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 072405 ~ 072405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0083012	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1件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Yuki Shiomi
2. 発表標題 Reconfigurable single-material Peltier effect using magnetic phase junctions
3. 学会等名 Young Research Leaders Group Workshop: Spins, Orbits, Charges, and Heat in Magnets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Tomasz Blachowicz, Andrea Ehrmann, 塩見 雄毅	4. 発行年 2021年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 336
3. 書名 スピントロニクスの基礎と応用 理論、モデル、デバイス	

〔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
---------	---------