

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23423

研究課題名（和文）ワイル反強磁性体における磁気スピンホール効果の解明

研究課題名（英文）Magnetic spin Hall effect in Weyl antiferromagnet

研究代表者

水野 隼翔（Mizuno, Hayato）

東京大学・物性研究所・特任研究員

研究者番号：30846499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、ワイル反強磁性体と呼ばれる物質における磁気的な秩序とスピンホール効果との関係に注目が集まっている。本研究では、同物質の表面に生じるスピン蓄積を検出すること及び、磁気秩序との関係を明らかにすることを目的とした。ワイル反強磁性金属であるMn₃Snの多結晶薄膜をT字型素子へと微細加工し、強磁性金属細線を組み合わせることによってスピン蓄積信号の検出を可能にした。また、温度依存性測定から、本信号はMn₃Snの磁気秩序が消失する温度以下においても生じることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子のもつ電荷とスピンの二つの自由度を利用するスピントロニクス分野において、角運動量の流れであるスピン流の制御は重要課題の一つである。本研究により、反強磁性体のスピンホール効果を簡便に測定可能な手法を確立したことは、今後の反強磁性体やワイル金属を用いた電流-スピン流変換の研究を発展させるものである。また、本研究にて用いたT字型の素子構造は、不揮発性のスピントロニックデバイスへの応用が提案されており、機能性反強磁性材料を用いた性能の向上が期待される。

研究成果の概要（英文）：In recent years, antiferromagnetic Weyl semimetal and the magnetotransport properties have attracted much attention due to the unique electronic structure. In this study, we measure the spin accumulation on the surface of Mn₃Sn and investigate the relationship between magnetic order and spin Hall effect of it. We prepare a Mn₃Sn polycrystalline thin film. The film was patterned into a T-shaped structure with a ferromagnetic metal wire. This simple structure allowed us to detect the spin accumulation signal of Mn₃Sn. It was also found that the spin Hall signal can be detected even below the transition temperature where the magnetic order of Mn₃Sn disappears.

研究分野：薄膜磁性

キーワード：スピンホール効果 反強磁性金属

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

電子スピンのもつ磁気的な特徴をデバイスに応用することを目的としたスピントロニクス分野において、スピン偏極した電子の流れであるスピン流の制御は重要課題の一つである。これまで主に、電流とスピン流との変換現象であるスピンホール効果がスピン流の電気的な生成・検出手段として用いられ、Ptなどの非磁性重金属が幅広く使われてきた。

一方、ワイル反強磁性体と呼ばれる Mn_3Sn 合金において、電流を印加した際に表面に現れるスピン蓄積ベクトルの向きが外部磁場によって反転するという磁気スピンホール効果が発見された[1]。本物質は反強磁性体でありながら強磁性体の 1/1000 程度の微小磁化を有し、10 mT 程の小さな磁場でその磁気秩序を制御することができる。そして、フェルミ面近傍にワイル点と呼ばれる特異な電子構造を持つことにより、運動量空間に 100~1000 T 程の仮想磁場が存在し、強磁性体と同程度の磁気輸送現象を示す[2]。磁気スピンホール効果においてもこの巨大な仮想磁場が起源であるとされ、磁気的な秩序との相関に注目が集まっている。しかし、その詳細な関係は実験的に明らかにされていない。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、ワイル反強磁性体の表面に生じるスピン蓄積を検出すること及び、磁気秩序との関係を明らかにすることを当初の目的とした。同スピン蓄積ベクトルが、ワイル反強磁性体のスピン配列の変化に対してどのように応答するかを測定し、また温度依存性から、磁気相転移に対するスピン蓄積の変化を明らかにする。国内外では、強磁性体における異常ホール効果を利用したスピン流の生成及び、磁気メモリデバイスへの適用に向けた研究が行われ始めている。しかし、磁気秩序がどのような役割を果たすのかは解明されていない。本研究は、反強磁性体を用いたスピン流の新たな生成・検出手法確立への足掛かりとなる。

3. 研究の方法

本研究では、初めにスピンホール効果を簡易的に測定可能な素子[3]の作製を行った。同効果を発現することが既に知られている Pt の薄膜をサブミクロンスケールの T 字型に微細加工し、上部に強磁性細線(FM: FeNi, CoFe)を設置した。図 1a の様に電流 I_x を印加することで強磁性体から Pt へスピン偏極電流を注入し(図 1b)、外部磁場を x 方向に掃引しながら y 方向の電圧を検出することにより、逆スピンホール効果による信号が測定できることを確認した。

次に、同素子構造をワイル反強磁性金属である Mn_3Sn 合金に適用すべく、微細加工の条件出しを行った。同薄膜は加工した際に、酸化による電気抵抗率の上昇や磁気特性の劣化が懸念される。そこで、薄膜作製後の Ar イオンミリング法による表面酸化層のクリーニングと、絶縁層の積層によって表面及び側面からの酸化を防ぐことにより、加工前と同等の電気抵抗率及び異常ホール抵抗率を示すことを確かめた。

4. 研究成果

まず初めに、スピンホール物質(Pt)と強磁性金属(FeNi)を組み合わせた T 字型素子における磁気輸送特性について調べた。その結果、強磁性体における異方性磁気抵抗(AMR)効果が逆スピンホール効果に重畳し、測定信号の外部磁場依存性を複雑にすることが分かった。本影響を抑えるために、AMR 比の小さい CoFe 合金を強磁性層として用いた。

次に、 Mn_3Sn 薄膜と CoFe を組み合わせて T 字型素子を作製し、 Mn_3Sn 表面のスピン蓄積信号を測定した。本素子構造の特徴は、スピン偏極電流を強磁性層からスピンホール物質に直接注入することにより、従来の非局所測定手法に比べて大きなスピンホール信号が得られる点にある[3]。実際に、スピンホール効果及びその逆効果の両測定配置において、室温にて 10 mΩ と非局所測定法の 10~100 倍のスピン蓄積信号を検出することができた(図 2a)。抵抗差から見積もったスピンホール角は約 2% であり、符号は Pt と同じであった。一方で、単結晶を用いた先行研究[1]とは異なり、 Mn_3Sn の微小磁化方向に依存してスピン蓄積のスピン偏極方向が変化する振る舞いは見られなかった。これは、本研究における Mn_3Sn 薄膜が多結晶であり、磁気スピンホール効果によって生じるスピン蓄積の面内成分が補償しているためだと考えられる。高配向の試

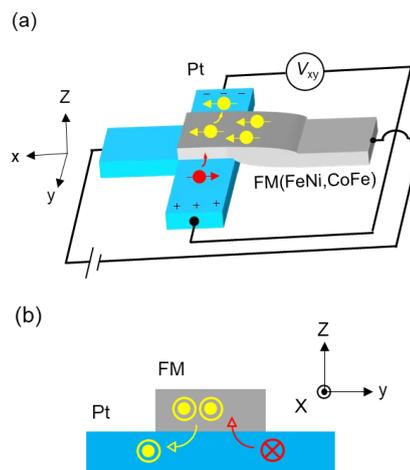


図 1. T 字型素子測定の概略図
(a)俯瞰図 (b)断面図

料を用いることや、垂直磁化膜を強磁性電極に使用しスピン蓄積の面直成分を検出することが今後の課題である。本研究により、T字型素子構造が反強磁性金属 Mn_3Sn のスピン蓄積の検出に有用であることを示した。

その後、得られたスピンホール信号の温度依存性を測定した(図 2b)。重畳する強磁性金属の異常ホール効果は対照実験から取り除いた。同素子における Mn_3Sn の異常ホール効果の温度依存性との比較を行った所、異常ホール効果のほぼ消失する 150 K 以下においてもスピンホール信号が生じており、外因性機構の寄与を示唆する結果を得た。今後、バンド構造由来の内因性機構との関係を明らかにすることが重要となる。これらの成果に関して、論文発表の準備を進めている。

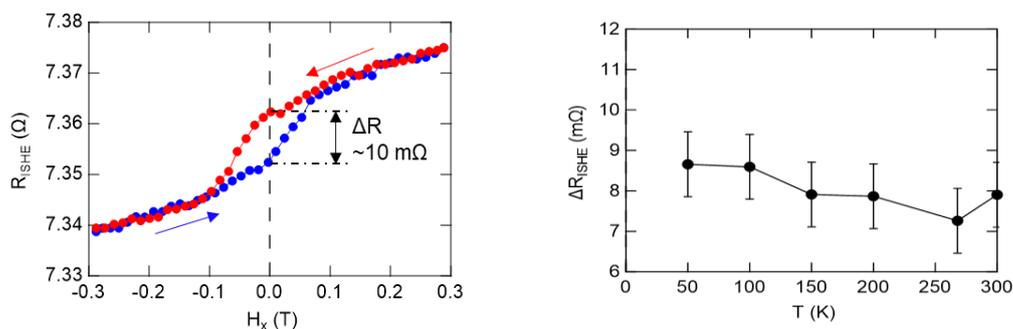


図 2. Mn_3Sn 多結晶薄膜におけるスピン蓄積測定結果

(a) 図 1a における y 方向の抵抗(= V_{xy}/I_c)の外部磁場依存性。ヒステリシスは CoFe 電極の磁化反転に対応している。

(b) 得られたスピン蓄積信号の温度依存性

参考文献

- [1] M. Kimata, *et al.*, Nature **565**, 627 (2019). [2] S. Nakatsuji, *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).
 [3] V. T. Pham, *et al.*, Nat. Electron. **3**, 309 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------