

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13842

研究課題名(和文)反強磁性体を用いたスピン流学理の構築

研究課題名(英文) Investigation of spin current in antiferromagnets

研究代表者

関 真一郎 (Seki, Shinichiro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：70598599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、反強磁性体中のマグノン、スピン角運動量の流れであるスピン流の伝送媒体として活用することを目指している。具体的には、スピンゼーベック効果の観測を介して、熱的に励起された反強磁性マグノンがスピン流の担い手になれることを実験的に明らかにした。また、スピン波分光測定を通じて反強磁性マグノンの実空間における伝搬特性の直接評価を行い、反強磁性マグノンが強磁性マグノンと遜色のない伝搬長を備えていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempt to utilize the magnon in antiferromagnetic materials as the carrier of spin current, i.e. the flow of spin angular momentum. Through the measurement of spin Seebeck effect, we experimentally demonstrated that the antiferromagnetic magnon can indeed carry the spin current. In addition, by performing the propagating spin wave spectroscopy measurements, we revealed that the antiferromagnetic magnon has comparable magnitude of decay length with its ferromagnetic counterpart.

研究分野：物性物理

キーワード：スピントロニクス マグノン スピン流 反強磁性体

1. 研究開始当初の背景

スピン角運動量の流れであるスピン流は、電荷の流れである電流とは異なりジュール発熱を生じないため、省電力な電子素子を実現するための切り札として、近年盛んに研究が行われている。スピン流の担い手としては、金属中の伝導電子と絶縁体中のスピン波の2つが知られており、特に後者は非常に長い伝播長を持つため、応用面からの期待も大きい。一方で、従来のスピン波スピン流の研究対象は、ごく少数の強磁性絶縁体(YIG など)に限られており、磁性絶縁体の大多数を占める反強磁性体中におけるスピン流の振る舞いは、全く明らかにされていなかった。理論的には、反強磁性スピン波も強磁性スピン波と同様にスピン角運動量を運ぶとされており、スピン流の担い手となることが強く期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、反強磁性体中におけるスピン波がどのようにスピン流を運ぶのか、その振る舞いを明らかにすることを目指して研究を行った。一般に反強磁性スピン波には、強磁性スピン波に比べて、一般的な共鳴周波数が2~3桁高い、異なるスピン角運動量を運ぶ複数のモードが存在する、磁気双極子相互作用による影響を受けにくい、という特徴があることが知られており、これらはそのまま高速通信への適性、モード選択によるスピン流の制御、磁気的な外乱に対する高い耐性、といった新たな機能につながると期待される。

一般に、スピン波の励起方法としては、磁気共鳴によるコヒーレントなスピン波の生成、温度勾配を与えることによる熱的励起プロセスによるインコヒーレントなスピン波の生成、の2つのアプローチが考えられる。強磁性体の場合には、Ptなどの重金属との接合系を作ること、逆スピンホール効果と呼ばれる現象を通じてスピン流を電気的に検出できることがわかっており、反強磁性体に対しても同様の手法によるスピン流の検出が可能であると考えられる。

本研究では、こうした手法によってスピン波を励起することで、反強磁性スピン波が担うと期待されるスピン流を実験的に生成・検出するとともに、その伝搬特性を評価することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、

- (1)反強磁性体における熱的なスピン波スピン流の生成・検出
- (2)反強磁性体における磁気共鳴を介したスピン波スピン流の生成・検出
- (3)反強磁性体におけるスピン波スピン流の伝搬特性の評価

の3つのテーマに取り組んだ。このうち、(1),(2)については、まず反強磁性体物質のバルク結晶の表面を研磨した上で、スピンホール効果を生じるPtとの接合系を作成した。それぞれマイクロ波照射による磁気共鳴、あるいは温度勾配による熱的励起を起こすことによって反強磁性体中にスピン波スピン流を生成し、界面を介してPt側に注入されたスピン流を逆スピンホール効果による起電力として計測することで、生成されたスピン流の大きさを評価した。また、(3)については、一对のコプラナー導波路を基板上に作成し、その上に試料を載せた上で、マイクロ波帯域の相互インダクタンスのスペクトルを計測することで、磁気共鳴によって励起されたスピン波スピン流の伝搬特性を直接的に評価した。

4. 研究成果

- (1)反強磁性体における熱的なスピン波スピン流の生成・検出

ヘキサフェライトは磁気的なフラストレーションに起因して多段階のメタ磁性相転移を示すことが知られており、らせん磁性相やファン磁気相といった複雑な磁気構造が現れる。この物質に対して、熱的なプロセスによるスピン波スピン流の生成・検出を試みた。この結果、一連の多段階磁気構造相転移の過程において、どの磁気相においても磁化に比例した大きさのスピン波スピン流が熱的に生成されていることが判った(図1)。このことは、当初の期待通り、複雑な磁気構造を有する反強磁性体においても、スピン波がスピン流の担い手となれることを実証する結果となっている。また、らせん磁性相では右巻・左巻のらせん磁気ドメインが発現することが知られており、そのドメインの比率は外部電場によって制御することが可能であることが知られている。実際に、らせん磁気ドメインを電場で揃えた場合・揃えなかった場合のそれぞれで前述の測定を行った結果、どちらの場合も生成されるスピン流の大きさに差がないことがわかった。この結果は、反強磁性ドメイン壁の存在によってスピン流の伝搬が妨げられないことを示しており、従来の強磁性ドメイン壁の場合とは大きく異なる特徴を示していると言える。

- (2)反強磁性体における磁気共鳴を介したスピン波スピン流の生成・検出

熱的なプロセスはあらゆる波数・エネルギーのスピン波をボーズ分布に従って励起してしまう。このため、現象のより深い理解のため、磁気共鳴を介したコヒーレントな反強磁性スピン波によるスピン流生成も試みた。具体的には、GHz帯の低い共鳴周波数を持つ反強磁性体RbMnF₃の単結晶を作成し、白金と

の接合系で磁気共鳴を起こすことによって白金側にスピン流を注入し、それを電流に変換して検出する手法(スピンプンピング)を用いた。その結果、実際に磁気共鳴に伴う電流の生成を確認することができたものの、この電流成分は基本的に磁場反転に対して偶な振る舞いを示しており、ほぼ熱起電力を起源としていることがわかった。反強磁性共鳴は、磁化の小ささを反映してマイクロ波の入力に対する励起強度が弱いため、これが検出を難しくしている可能性がある。

(3) 反強磁性体におけるスピン波スピン流の伝搬特性の評価

このため、異なるアプローチの実験として、図2に示すような計測系を用いることで、 RbMnF_3 に対して「伝搬スピン波分光測定」と呼ばれる測定を行い、反強磁性スピン波の実空間における伝搬特性の直接評価を行った。この結果、反強磁性体中のスピン波のコヒーレントな伝搬に由来した信号を実験的に検

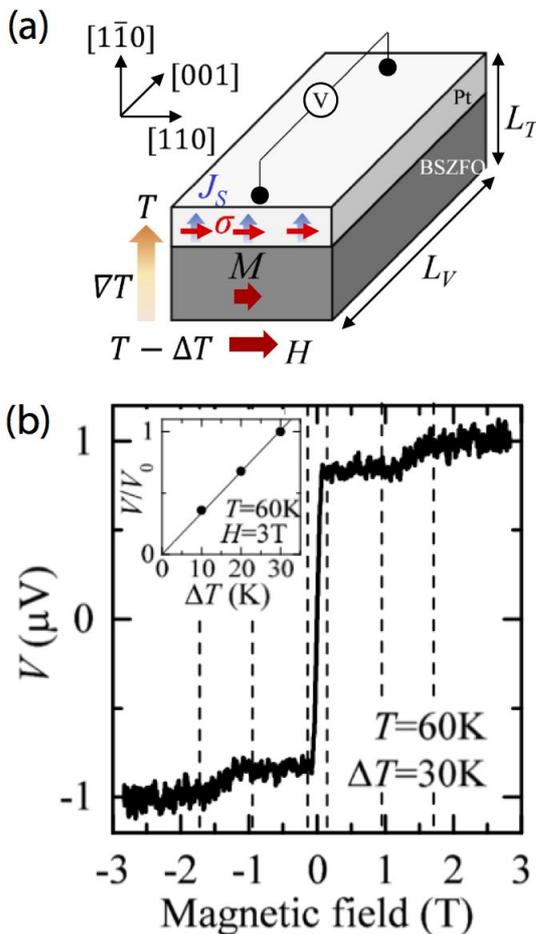
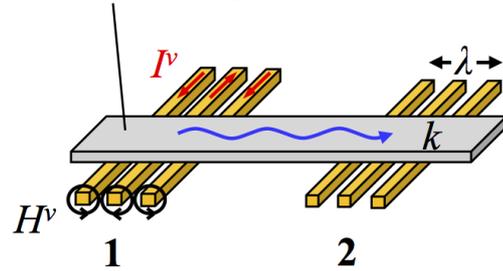


図1：(a)温度勾配による熱的なプロセスによるスピン波スピン流の生成・検出(スピンプンピング効果)のための測定配置。(b)ヘキサフェライト試料において、温度勾配によって生成されたスピン流(白金中の起電力に相当)の磁場依存性。

(a) Antiferromagnet



(b) RbMnF_3 10 K 0.6T

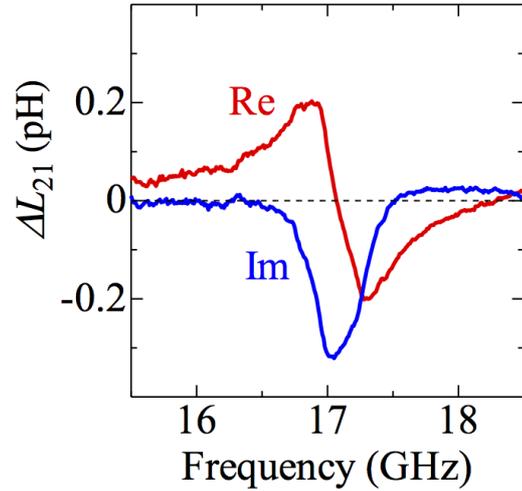


図2：(a)反強磁性スピン波の伝搬特性を評価するための測定系の模式図。(b) RbMnF_3 において観測された反強磁性スピン波の伝搬スペクトル(1対のコプレーナ導波路の間の相互インダクタンスに相当)。

出することに初めて成功した。励起強度の減衰率から見積もると、反強磁性スピン波は少なくとも数百マイクロメートルの距離にわたってコヒーレントに伝搬できることが明らかになり、上記の結果は、反強磁性マグノンが強磁性マグノンと遜色のない情報伝搬特性を備えていることを示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

“Low-field bi-skyrmion formation in a noncentrosymmetric chimney ladder ferromagnet”

R. Takagi, X. Z. Yu, J. S. White, K. Shibata, Y. Kaneko, G. Tatara, H. M. Ronnow, Y. Tokura, S. Seki

Phys. Rev. Lett. 120, 037203 (2018). [査読有]

“Stabilization of magnetic skyrmions by

uniaxial tensile strain”
S. Seki, Y. Okamura, K. Shibata, R. Takagi, N. D. Khanh, F. Kagawa, T. Arima, Y. Tokura
Phys. Rev. B 96, 220404(R) (2017). [査読有]

“ Noncentrosymmetric magnets hosting magnetic skyrmions ”
N. Kanazawa, S. Seki, Y. Tokura
Adv. Mater. 29, 1603227 (2017). [査読有]

“ Emergence and magnetic-field variation of chiral-soliton lattice and skyrmion lattice in the strained helimagnet Cu₂OSeO₃ ”
Y. Okamura, Y. Yamasaki, D. Morikawa, T. Honda, V. Ukleev, H. Nakao, Y. Murakami, K. Shibata, F. Kagawa, S. Seki, T. Arima, and Y. Tokura
Phys. Rev. B 96, 174417 (2017). [査読有]

“ Spin-wave spectroscopy of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction in room-temperature chiral magnets hosting skyrmions ”
R. Takagi, D. Morikawa, K. Karube, N. Kanazawa, K. Shibata, G. Tatara, Y. Tokunaga, T. Arima, Y. Taguchi, Y. Tokura, S. Seki
Phys. Rev. B 95, 220406(R) (2017). [査読有]

“ Directional electric-field induced transformation from skyrmion lattice to distinct helices in multiferroic Cu₂OSeO₃ ”
Y. Okamura, Y. Yamasaki, D. Morikawa, T. Honda, V. Ukleev, H. Nakao, Y. Murakami, K. Shibata, F. Kagawa, S. Seki, T. Arima, Y. Tokura.
Phys. Rev. B 95, 184411 (2017). [査読有]

“ Transition to and from the skyrmion lattice phase by electric fields in a magnetoelectric compound ”
Y. Okamura, F. Kagawa, S. Seki, and Y. Tokura
Nature Communications 7, 12669 (2016). [査読有]

“ Magnetic reversal of electric polarization with fixed chirality of magnetic structure in a chiral-lattice helimagnet MnSb₂O₆ ”
M. Kinoshita, S. Seki, T. J. Sato, Y. Nambu, T. Hong, M. Matsuda, H. Cao, S. Ishiwata, and Y. Tokura
Phys. Rev. Lett. 117, 047201 (2016). [査読有]

“ Magneto-chiral nonreciprocity of volume spin wave propagation in chiral-lattice ferromagnets ”

S. Seki, Y. Okamura, K. Kondou, K. Shibata, M. Kubota, R. Takagi, F. Kagawa, M. Kawasaki, G. Tatara, Y. Otani, and Y. Tokura
Phys. Rev. B 93, 235131 (2016). [査読有]

“ Thermal generation of spin current in a multiferroic helimagnet ”
R. Takagi, Y. Tokunaga, T. Ideue, Y. Taguchi, Y. Tokura and S. Seki
APL Mater. 4, 032502 (2016). [査読有]

「反強磁性体中のスピン流」
関真一郎
パリティ 31, 11月号, 22 (2016) [査読有]

[学会発表](計7件)

“ Magnetoelectric Dynamics of Skyrmions ”
(Skyrmionics: Materials, Phenomena and Applications, Santa Fe (USA), 2017年8月7日)
S. Seki

「絶縁体中のキラリティと強磁性」
(豊田理研ワークショップ「キラリティ対称系の電磁応答」2016年11月19日 トヨタ産業技術記念館)
関真一郎

“ Thermal generation of spin current in antiferromagnets and helimagnets ”
(Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM), New Orleans (USA), 2016年11月1日)
S. Seki

“ Emergent phenomena in chiral-lattice ferromagnetic insulators ”
(Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) Workshop on Multiferroics, Shanghai (China), 2016年10月9日)
S. Seki

“ Control of skyrmions by electric field and mechanical strain ”
(International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, Dresden (Germany), 2016年8月19日)
S. Seki

“ Chirality and Ferromagnetism ”
(Gordon Research Conference on Multiferroic and Magnetoelectric Materials, Lewiston (USA), 2016年8月10日)

日)
S. Seki

“ Spin current in antiferromagnets and
multiferroics ”
(Spin Caloritronics 7, Utrecht
(Netherland), 2016年7月15日)
S. Seki

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
[http://www.cems.riken.jp/en/laboratory/
esru](http://www.cems.riken.jp/en/laboratory/esru)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関 真一郎 (SEKI Shinichiro)
国立研究開発法人理化学研究所・創発物性
科学研究センター・ユニットリーダー
研究者番号：70598599

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()