

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610109

研究課題名(和文)トポロジカルなスピネクスタチアを利用した巨大スピ起電力の観測

研究課題名(英文)Observation of giant spin motive force associated with topological spin texture

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、粒子性を伴った渦状のスピ構造体「スキルミオン」の共鳴振動を駆動することで、量子力学的なベリー位相に由来して伝導電子が感じる創発電場(スピ起電力)を実験的に検出することを目的としている。70ナノメートル程度の直径のスキルミオンを伴ったキラルな結晶構造の強磁性金属FeGeに焦点を絞って、磁気共鳴と同じ周波数で発現するスピ起電力の測定を試みた。この結果、スキルミオン磁気相において、磁気共鳴の条件下においてのみ、実際に50 μ V程度(電極間距離は10 μ m、磁場振幅は10e程度)の起電力が発現することを発見した。この大きさは、理論的に予測されている値と概ね符合する結果となっている。

研究成果の概要(英文)：In this work, we attempted to experimentally detect the spin motive force associated with the resonant oscillation of magnetic skyrmion (i.e. vortex-like swirling spin texture with particle nature), which arises from the contribution of quantum mechanical Berry phase. Here, we performed the measurement of spin motive force for FeGe hosting skyrmions with the size of 70 nm. In the skyrmion phase, the sizable magnitude of motive force oscillating with the same frequency as the excitation magnetic field, has been detected only at the magnetic resonance frequency. The observed magnitude of motive force is almost consistent with the theoretical prediction.

研究分野：物性物理

キーワード：スピントロニクス 磁性

1. 研究開始当初の背景

スピン起電力とは、伝導電子が非一様なスピン構造の下で感じる余分な起電力のことである。一般的な電磁気学の教科書によれば、電磁誘導に伴う起電力 $E = -d\Phi/dt$ は、あるループ内を貫く磁束 Φ の時間変化という形で与えられる(ファラデーの法則)。通常、この磁束 Φ は外部から与えられた磁場によって決まっているが、伝導電子が磁性体中の非一様なスピン構造の下を運動する場合には、量子力学的なベリー位相の獲得を通じて、スピン構造の「渦度」に比例した余分な仮想磁束 Φ_{spin} を感じる事が知られている。この仮想磁束 Φ_{spin} を時間変化させる(=スピン構造を何らかの方法で動かす)と、前述のファラデーの法則に沿って、伝導電子が「スピン起電力」と呼ばれる余分な起電力を感じる事が最近提案され、新しいスピン・電場変換機能として、大きな注目を集めている。

しかしながら、通常の磁性体はこうしたスピン構造の渦度を持たないため、スピン起電力の実験的な観測はまだ殆ど報告されていない。最近になり、強磁性ディスクに生じる渦状スピン構造を振動磁場で共振させたりする方法により、実際に数十~数百 nV 程度のスピン起電力を観測したとの報告がされたが、観測されたスピン起電力は今のところ非常に小さく、より渦度の高いスピン構造を利用したスピン起電力の巨大化が強く求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、キラルな結晶構造を伴う特殊な磁性体中で申請者らが発見した「スキルミオン」と呼ばれる直径 5 nm~100 nm 程度のスピンの渦構造を用いて、巨大なスピン起電力を得ることを目的としている。適当な温度・磁場範囲では、スキルミオンは自発的に最密格子を組んで空間を埋め尽くす性質があるため、この状態で振動磁場によって磁気共鳴を起こすことによって、従来にない巨大なスピン起電力を誘起できる可能性が強く期待される。本研究では、こうしたスキルミオンの共鳴運動に由来した巨大なスピン起電力の観測を試みた。

3. 研究の方法

本研究では、スキルミオンを伴うキラル磁性体中で磁気共鳴を起こしながら、それと同じ周波数で生じる振動電圧を観測することで、スピン起電力の評価を行った。具体的には、Si 基板上に作成した GHz 帯域用の waveguide(port1)の上に、キラル磁性金属 FeGe の微小単結晶を FIB 加工により作成し、その両端に起電力測定用の別の waveguide(port2)を作成して、終端を FeGe 試料と短絡させた。この状況で、port

1,2 をネットワークアナライザに接続し、port1 側で磁気共鳴を励起し、発生した起電力を port2 側で測定することで、スピン起電力の直接観測を行った。

4. 研究成果

今回は特に、70 ナノメートル程度の直径のスキルミオンを伴ったキラルな結晶構造の強磁性金属 FeGe に焦点を絞って、スピン起電力の測定を試みた。

まず、FeGe の GHz 帯における吸収スペクトルの磁場依存性を、様々な温度で詳細に調べた。その結果、磁気スキルミオンが発現する温度・磁場領域においてのみ、新しい磁気共鳴モードが現れることを発見した。これは、先行する理論研究を参照するとスキルミオンの回転振動モードに対応していると考えられ、このモードの共鳴周波数と同じ周波数でスピン起電力が観測できることが期待される。

続いて、このスキルミオン磁気相において、磁気共鳴の条件下で、同じ周波数で生じるスピン起電力成分の観測を行った。この結果、スキルミオンの回転共鳴振動が生じている条件でのみ、実際に 50 μ V 程度(電極間距離は 10 μ m、磁場振幅は 10e 程度)の起電力が発現することを発見した(図)。この値は先行する理論研究から予測されている値と概ね符合するものである。一方で、スキルミオン相以外の磁気相においても、大きさは異なるものの、やはり磁気共鳴に伴って共鳴周波数でのみ有限の起電力が生じていることがわかった。最近の理論的な研究によると、空間反転対称性の破れた結晶構造を伴う金属中では、スピン軌道相互作用に由来した電子バンドのスピン分裂に由来して、一般的な強磁性共鳴の場合でも有限のスピン起電力が生じて良いとされている[G. Tataru *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 054403 (2013).]。こ

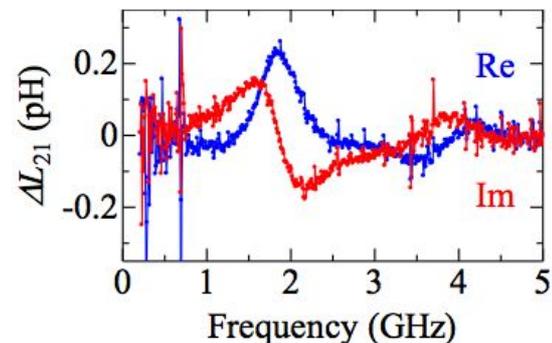


図: FeGe 試料に対して 280K, 300 Oe の環境下で測定した、スキルミオン磁気相におけるインダクタンス(スピン起電力)の周波数依存性。スキルミオンの回転振動モードは 2GHz 付近に位置しており、この周波数でのみ共鳴的にスピン起電力が増大していることがわかる。

のため、今回観測された起電力は、(1)実空間におけるスキルミオン・(2)逆格子空間におけるスピン分裂、の2つの機構によるスピン起電力を反映している可能性があると考えられ、現在その詳細な解析を進めている。

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 6 件)

"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 (in press). [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]

"Thermal generation of spin current in an antiferromagnet"

S. Seki, T. Ideue, M. Kubota, Y. Kozuka, R. Takagi, M. Nakamura, Y. Kaneko, M. Kawasaki, and Y. Tokura

Phys. Rev. Lett. 115, 266601 (2015). [査読有]

"Microwave Magneto-chiral Dichroism in the Chiral-Lattice Magnet Cu₂OSeO₃"

Y. Okamura, F. Kagawa, S. Seki, M. Kubota, M. Kawasaki, and Y. Tokura

Phys. Rev. Lett. 114, 197202 (2015). [査読有]

"Ultrafast optical excitation of magnetic skyrmions"

N. Ogawa, S. Seki and Y. Tokura

Scientific Reports 5, 9552 (2015). [査読有]

"Dynamical magnetoelectric phenomena of multiferroic skyrmions"

M. Mochizuki, S. Seki

J. Phys.: Condens. Matter 27, 503001 (2015). [査読有]

[学会発表](計 9 件)

「磁気スキルミオンの生成と制御」
(日本物理学会 2016 年春季大会 東北学院大

学 領域 3 (21aAU-3), 2016 年 3 月 21 日)

関真一郎

「キラリティと強磁性」

(物性研短期研究会「量子物質研究の最前線」
2015 年 東京大学, 2015 年 12 月 8 日)

関真一郎

「キラルな強磁性絶縁体 Cu₂OSeO₃ におけるスピン波スピン流の非相反伝播特性」

(日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学 領域 3 (17aCG-5), 2015 年 9 月 17 日)

関真一郎、岡村嘉大、近藤浩太、柴田基洋、久保田将司、高木里奈、賀川史敬、川崎雅司、多々良源、大谷義近、十倉好紀

「Chirality and Ferromagnetism」

(物性研国際シンポジウム "New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics" 2015 年 東京大学, 2015 年 6 月 11 日)

関真一郎

"Spin dynamics in chiral multiferroic insulators with magnetic skyrmions"

(2015 International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, Sydney, 2015 年 5 月 20 日)

S. Seki

"Magnetoelectric Skyrmions in Multiferroics"

(2015 INTERMAG, Beijing, 2015 年 5 月 15 日)

S. Seki

「反強磁性体を用いたスピン流生成」

(日本物理学会 2015 年春季大会 早稲田大学 領域 3 (21aAD-10), 2015 年 3 月 21 日)

関真一郎、井手上敏也、久保田将司、小塚裕介、中村優男、金子良夫、川崎雅司、十倉好紀

"Observation and Manipulation of Magnetic Skyrmions"

(2015 Annual Meeting of German Physical Society (DPG), Berlin, 2015 年 3 月 18 日)

S. Seki

「マルチフェロイック物質中の磁気スキルミオン」

(日本磁気学会第 52 回スピンエレクトロニクス専門研究会 2015 年 東北大学, 2015 年 1 月 28 日)

関真一郎

[図書](計 1 件)

"Skyrmions in Magnetic Materials"

S. Seki, M. Mochizuki

(2015, Springer, ISBN 978-3-319-24649-9)

〔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

<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

なし

(3) 連携研究者

なし