

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14667

研究課題名（和文）トポロジカルスピン構造での実空間ベリー位相起源の高効率スピン電荷変換現象の開拓

研究課題名（英文）High-efficient spin-charge conversion originating from real-space Berry phase of topological spin structures

研究代表者

横内 智行 (Yokouchi, Tomoyuki)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：20823389

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：実空間スピン構造に由来したベリー位相は様々な新奇な現象を引き起こす。本研究ではトポロジカル磁気構造に由来する実空間ベリー位相によるスピン電荷変換の理解を目指した。そして、スキルミオン物質でのスピン電荷変換を測定した。さらに、その結果の理解を深めるために、時間反転対称性の破れた系でのスピン電荷変換の機構についても研究を行った。また、スキルミオンの制御方法や、実空間ベリー位相に由来した新規輸送現象を開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、スピン構造による実空間ベリー位相によって生じる輸送現象・スピン電荷変換現象への理解が深まったといえる。ベリー位相に関連した物理現象を開拓しその起源を解明していくことで、次世代のエレクトロニクス的发展へつながっていくことが期待される。また、スキルミオンは次世代メモリへの応用が期待されているため、その新たな制御方法を開拓できたことは、スキルミオンの応用へつながることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Berry phase originating from real-space spin structures gives rise to various unique phenomena. In this study, we have investigated the spin-charge conversion phenomena related to real space Berry phase arising from topological spin structures. We succeeded in the spin-charge conversion in magnets hosting skyrmions. Then, to further deepen our understanding of these results, we have investigated spin-charge conversion phenomena in a system with broken time-reversal symmetry. In addition, we also explored a novel method for the skyrmion creation and novel transport phenomena associated with the real-space Berry phase.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スキルミオン ベリー位相

1. 研究開始当初の背景

高速かつ低消費エネルギーな情報処理方法や新たな発電方法の実現は、快適で持続可能な社会の実現に不可欠である。一方、従来のエレクトロニクスは、原理的にこれ以上の性能向上が難しい。この問題を解決するために、電子のもつ電荷とスピンという二つの自由度により生じる物理現象を、工学的に利用・応用するスピントロニクスが注目されている。例えば、電荷の流れを伴わないスピンの流れ「純スピン流」を用いた理論演算素子や低電力揮発性メモリ、純スピン流を用いることで効率的かつ簡単な素子構造で熱エネルギーを電気エネルギーに変換する発電素子などが研究されている。これらの素子では、純スピン流と電流の相互変換（スピン電荷変換）が動作の核の一つとなる。一方で、社会実装のためにはスピン電荷変換の低コスト化や高効率化が十分でないのが現状である。そこでスピン電荷変換現象の理解を深化させ、それに基づいて高効率かつ安価なスピン電荷変換を開発することが望まれている。

これまでの研究で、大きなスピン軌道相互作用を有する物質においては、運動量空間のバンド構造に由来する高効率スピン電荷変換が存在することが明らかになっている。例えば、伝導電子が運動量空間で「ベリー位相」と呼ばれる量子力学的位相を獲得すると、それが仮想磁場として電子に働き「スピンホール効果」と呼ばれるスピン電荷変換が生じる。このとき、白金といったスピン軌道相互作用が大きい重金属元素ではベリー位相も大きくなり、高効率変換が実現できる。しかし重金属元素は希少で高価である。スピン電荷変換を用いるデバイスの社会実装には実用化コストを下げる必要があり、高価な元素を必要とするこれら従来の機構は不向きである。

一方近年「スキルミオン」に代表される、実空間トポロジカルスピン構造において、高価な元素を用いなくても巨大なベリー位相・仮想磁場を創出可能であることが明らかになってきた。スピン構造のトポロジカルな性質のために、スピン構造上を運動する伝導電子は実空間ベリー位相すなわち仮想磁場を獲得する。例えば、この仮想磁場はスキルミオンの直径が小さいほど大きくなるため、小さなスキルミオンほど仮想磁場が大きくなる。近年スキルミオンの直径には、スピン軌道相互作用とバンド構造が重要で、特に化学ポテンシャルを制御することで、比較的スピン軌道相互作用が小さい元素からなる物質でも、小さなスキルミオンを作ることが可能であることが明らかになった。例えば比較的安価な元素から構成される $\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{Ge}$ という物質では直径が 5 nm と非常に小さく、150 テスラ程度の巨大な仮想磁場を有するスキルミオンが報告されている。したがって、この巨大な実空間ベリー位相による高効率なスピン電荷変換が実現すれば、高価な元素を使わない高効率スピン電荷変換の実現が期待できる。しかし現在のところ、実空間ベリー位相によってスピン電荷変換が出来るのかさえ実験的報告はなく、その理解はほとんどされていない。

2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究ではトポロジカルスピン構造における実空間ベリー位相に起因するスピン電荷変換現象の包括的な理解することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、スキルミオン物質において、スピン構造に由来する実空間ベリー位相によるスピン電荷変換を、「スピンプンピング」と呼ばれる強磁性共鳴を用いたスピン注入方法を用いて検

証した。スピンプンピング実験では、測定対象の物質と強磁性体の接合デバイス作成の必要がある。そこで、収束イオンビームを用いた微細加工技術を応用しデバイスを作成した。さらに、時間反転対称性が破れた系におけるスピン電荷変換現象の理解を深めるために、カー効果を用いた電流誘起磁化の測定も行った。また、スピン構造における実空間ベリー相の理解を深化させるために、スピン構造に由来したベリー位相によって引き起こされる輸送現象の測定も行った。

4. 研究成果

集束イオンビームなどの微細加工技術を駆使することで、スキルミオンを有するバルク結晶をスピン電荷換効率の測定のためのデバイスに加工した(図1)。そして、スピンプンピングによって純スピン流を注入することで、スキルミオン物質においてスピン電流変換に由来する信号の観測に成功した(図2)。

一方で、当初はスキルミオン相でのみスピン電流変換に由来する信号が観測されることを予想していたが、実際はスキルミオン相以外でもある程度の大きさの信号が観測され、その大きさはスキルミオン相とそれ以外の磁気相で大きな違いはなかった。このことは、スピン電荷変換の起源が、当初の予想していたスキルミオンのベリー位相由来のものではないことを示唆している。一方で、その信号の磁場依存性は、従来のスピン電荷変換の機構から予想されるものとは異なることも明らかになった。これらのことは、スキルミオン物質において、従来の機構とは異なるスピン電流変換の機構が存在していることを示唆している。

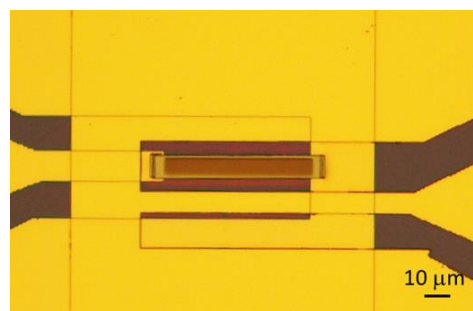


図1スピンプンピング用のデバイス

対称性の観点から、この信号は時間対称性の破れに起因している可能性が考えられる。そこで、時間対称性の破れた系におけるスピン電荷変換現象の理解のために、カー顕微鏡を用いて磁性体におけるスピン電荷変換を測定した。そして、非磁性体とは異なる磁場依存性を示すスピン電荷変換の観測に成功した。さらにこのスピン電荷変換の起源を明らかにするために、ドープ依存性などを調べることでその機構を考察した。この結果をまとめた論文を執筆中である。

スキルミオンを用いたスピン電荷変換を実際の素子に应用するには、スキルミオン自体の制御を効率的に行う必要がある。そこで、表面弾性波を用いることで、従来の手法に比べ発熱を抑えてスキルミオンを生成することに成功した。この結果を論文にまとめ発表した。

また、スピン構造に由来する実空間ベリー位相によって引き起こされる輸送現象の研究を行い、スピン構造における実空間ベリー相に由来した物理現象の理解をさらに深めた。具体的には、らせん磁性体が電流で駆動された際に生じる実空間のベリー位相によって生じるインダクタンスを測定した。この結果を論文にまとめ発表した。

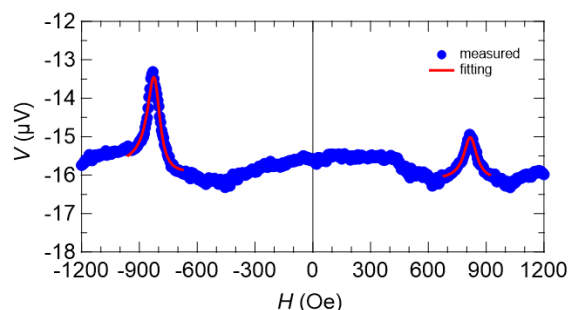


図2観測されたスピンプンピングの信号

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yokouchi Tomoyuki, Sugimoto Satoshi, Rana Bivas, Seki Shinichiro, Ogawa Naoki, Kasai Shinya, Otani Yoshichika	4. 巻 15
2. 論文標題 Creation of magnetic skyrmions by surface acoustic waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 361 ~ 366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-020-0661-1	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 Tomoyuki, Kagawa Fumitaka, Hirschberger Max, Otani Yoshichika, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori	4. 巻 586
2. 論文標題 Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 232 ~ 236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2775-x	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4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Yokouchi, S. Sugimoto, B. Rana, S. Seki, N. Ogawa, S. Kasai, and Y. Otani
2. 発表標題 Creation of magnetic skyrmions by surface acoustic waves in Co/Pt/Ir trilayer films
3. 学会等名 Joint European Magnetic Symposia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yokouchi, S. Sugimoto, B. Rana, S. Seki, N. Ogawa, S. Kasai, and Y. Otani
2. 発表標題 Creation of skyrmions and control of domain wall velocity by surface acoustic waves in Pt/Co/Ir trilayer films
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Yokouchi
2. 発表標題 Reservoir computing using dynamics of magnetic skyrmions
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Yokouchi
2. 発表標題 Observation of emergent electromagnetic induction in Gd ₃ Ru ₄ Al ₁₂
3. 学会等名 CREST Workshop on "Physics of helical and skyrmion phases"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔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