

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05485

研究課題名(和文) スピン軌道結合磁性体における異常スピン電磁応答

研究課題名(英文) Anomalous spin electromagnetic responses in spin-orbit coupled magnets

研究代表者

野村 健太郎 (nomura, kentaro)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：00455776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ワイル半金属において、スピン運動量ロッキングは電子の軌道運動を背景の磁気テクスチャと関連させることを明らかにした。磁性ワイル半金属の磁性組織のダイナミクスが、ジュール熱のない励起電流を誘導することを示した。このポンピング電流は磁気テクスチャに相当する軸方向の電磁場によって誘導されるホール電流と見なすことができる。磁壁が移動する場合には、磁壁が局所的な電荷に対応するポンピング電流を生成することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクス分野では電子の電荷とスピンの自由度を制御し、電気と磁気との非自明な結合など基礎研究から、磁気メモリーや磁気センサーに応用などが行われている。本研究において我々は磁性ワイル半金属を中心とするトポロジカル物質が従来の強磁性金属に比べ、低損失でかつ堅牢なスピン電荷変換現象が起こることを理論的に示した。特に電流や電場によって磁壁が駆動する現象は従来の強磁性金属とは異なりバンドトポロジーの効果による下であること、磁気異方性の影響を受けにくい、すなわち高精度の磁気デバイスの可能性があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Spin-momentum locking in Weyl semimetals correlates the orbital motion of electrons with background magnetic textures. We show here that the dynamics of a magnetic texture in a magnetic Weyl semimetal induces a pumped electric current that is free from Joule heating. This pumped current can be regarded as a Hall current induced by axial electromagnetic fields equivalent to the magnetic texture. Taking a magnetic domain wall as a test case, we demonstrate that a moving domain wall generates a pumping current corresponding to the localized charge.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジカル物質 スピントロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属をベースとするスピントロニクスデバイスは高いキュリー温度と安定な磁気構造を有し、スピン移行トルクやスピンポンピングなどのスピントロニクス現象の実現で成功を納めたが、高いジュール熱の発生をいかに低減するかが課題として残っていた。一方、磁性半導体の分野では半導体独自の電流制御性と、強磁性秩序を用いたメモリー機能の両面を併せ持った次世代デバイスの候補として、高いキュリー温度を有する半導体強磁性相の探索が長年行われている。従来の強磁性半導体である(In,Mn)As や(Ga,Mn)As では、強磁性を発現するためには多量のキャリアドーピングが必要なため、その電気的性質は半導体というよりは金属的であり、半導体的な応用が難しい。散逸を最小に抑えたスピン磁化の電気的制御が基礎科学研究への要請である。

2. 研究の目的

スピン軌道相互作用を有する磁性体の研究は、異常ホール効果のメカニズム解明に始まり、近年ではトポロジカル絶縁体やワイル半金属の発見など目覚ましい発展が続いている。トポロジカル絶縁体表面やワイル半金属は、スピン-運動量ロッキングにより、スピンの磁気的自由度がディラック-ワイル電子の電気的自由度と強く結合し、質的に新しい現象が発現する。本研究では強いスピン軌道相互作用を有する強磁性体および反強磁性体におけるスピン電磁応答として、非自明な磁気輸送現象の探索から、新しい磁化制御・スピン流生成法の開拓といったスピントロニクスデバイスへの応用までを目指す。絶縁体あるいはゼロギャップ半導体ゆえに、低散逸でかつ外的摂動に対し強固なトポロジカル量子現象であることが期待される。本研究ではスピン軌道相互作用を有する電子系に磁性不純物をドーピングした系を舞台として発現する新しいスピン電磁応答の探索とスピントロニクスへの応用である。

3. 研究の方法

(a) トポロジカル絶縁体(半金属)/強磁性体接合で生成されるマグノンスピン流

トポロジカルに非自明な絶縁体および半金属の特徴として新奇な表面状態が存在する。トポロジカル絶縁体の表面は、特にシンプルな場合には、質量ゼロのディラック電子系が実現する。このディラック表面電子系は、電場印可の下で電流に伴いスピン密度が誘起される。強磁性体との接合系では、交換相互作用によって、ディラック電子のスピン密度が強磁性体の局在磁化に影響を与える。このメカニズムによって発生するトルクはスピン軌道トルクとして知られているが、本研究ではこのときに磁性体に発生するスピン流を微視的モデルに基づき計算する。まずスピン流の演算子を強磁性体のスピン演算子の時間微分として導入する。トポロジカル絶縁体に印可された電場を摂動として、強磁性体中に誘起されるマグノン・スピン流の期待値を線形応答理論とダイアグラム展開を用いて計算する。現実の物質パラメーターを用いて強磁性体中のスピン流とトポロジカル絶縁体表面上の電流の比を見積もる。同様の解析を、モデルを3次元化することで、Cd₃As₂などのトポロジカルディラック半金属と強磁性体の界面の問題に拡張する。

(b) スピン軌道結合系におけるスピントルクの系統的研究、微視的理論 スピン軌道相互作用の強い電子系に磁気ドーピングをした系において、電気的に発生する局在スピンに作用するトルクを統一的に解析する。申請者はワイル半金属において誘起されるスピントルクを現象論的に導いた。本研究ではこれをスピン軌道相互作用をもつ一般の微視的なモデルハミルトニアンに基づき、乱れが存在する状況下で、存在しうる全てのタイプのスピントルクを計算する。交換相互作用によって局在スピンに働くトルクは一般に $T=JM \times \langle s \rangle$ とかける。ここで $\langle s \rangle$ は伝導電子のスピン密度である。電磁場下では様々な機構で $\langle s \rangle$ が誘起される。トルクとして、Tanomalyに加えて、スピン移行トルク、スピン軌道トルク、磁化散逸による項トルクなどの存在と乱れの影響を系統的に検証する。

4. 研究成果

スピントロニクスの分野では電子の電荷とスピンの自由度を制御し、電気と磁気の非自明な結合など基礎研究から、磁気メモリーや磁気センサーに応用などが行われている。本研究において我々は磁性ワイル半金属を中心とするトポロジカル物質が従来の強磁性金属に比べ、低損失で

かつ堅牢なスピン電荷変換現象が起こることを理論的に示した。特に電流や電場によって磁壁が駆動する現象は従来の強磁性金属とは異なりバンドトポロジーの効果による下であること、磁気異方性の影響を受けにくい、すなわち高精度の磁気デバイスの可能性があることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakai Ryota, Nomura Kentaro	4. 巻 101
2. 論文標題 Weyl superconductor phases in a Weyl-semimetal/superconductor multilayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094510 1 - 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.094510	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 Misawa Takahiro, Nomura Kentaro	4. 巻 9
2. 論文標題 Semi-quantized Spin Pumping and Spin-Orbit Torques in Topological Dirac Semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19659 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-55802-7	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 Kobayashi Koji, Takagaki Masaki, Nomura Kentaro	4. 巻 100
2. 論文標題 Robust magnetotransport in disordered ferromagnetic kagome layers with quantum anomalous Hall effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161301(R) 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.161301	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 Misawa Takahiro, Nakai Ryota, Nomura Kentaro	4. 巻 100
2. 論文標題 Real-time evolution and quantized charge pumping in magnetic Weyl semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155123 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.155123	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 Ozawa Akihiro, Nomura Kentaro	4. 巻 88
2. 論文標題 Two-Orbital Effective Model for Magnetic Weyl Semimetal in Kagome-Lattice Shandite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123703 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.123703	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 Ominato Yuya, Yamakage Ai, Nomura Kentaro	4. 巻 88
2. 論文標題 Phase Diagram of a Magnetic Topological Nodal Semimetal: Stable Nodal Line in an Easy-Plane Ferromagnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114701 ~ 114701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.114701	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 Kim Sehoon, Kurebayashi Daichi, Nomura Kentaro	4. 巻 88
2. 論文標題 Electrically-driven Domain Wall Motion in Quantum Anomalous Hall States	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 083704 ~ 083704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.083704	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 Kurebayashi Daichi, Nomura Kentaro	4. 巻 9
2. 論文標題 Theory for spin torque in Weyl semimetal with magnetic texture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5365 - 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-41776-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 K. Kobayashi, Y. Ominato, and K. Nomura	4. 巻 87
2. 論文標題 Helicity-protected domain-wall magnetoresistance in ferromagnetic Weyl semimetal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 073707 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.073707	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 Y. Araki and K. Nomura	4. 巻 10
2. 論文標題 Charge pumping induced by magnetic texture dynamics in Weyl semimetals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Applied.	6. 最初と最後の頁 014007 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.10.014007	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 Y. Ominato and K. Nomura	4. 巻 97
2. 論文標題 Spin susceptibility of three-dimensional Dirac/Weyl semimetals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B.	6. 最初と最後の頁 245207 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.245207	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 Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, K. Nomura, T. Takahashi, S. Hasegawa,	4. 巻 30
2. 論文標題 Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys.: Condens. Matter	6. 最初と最後の頁 305701 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aaccc4	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 Y. Araki, A. Yoshida, and K. Nomura	4. 巻 98
2. 論文標題 Localized charge in various configurations of magnetic domain wall in a Weyl semimetal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 045302 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.045302	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 Y. Ominato, S. Tatsumi, and K. Nomura	4. 巻 99
2. 論文標題 Spin-orbit crossed susceptibility in topological Dirac semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 085205 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.085205	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 1.D. Kurebayashi and K. Nomura	4. 巻 9
2. 論文標題 Theory of spin torque in Weyl semimetals with magnetic texture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 5365 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-41776-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 Y. Araki and K. Nomura	4. 巻 96
2. 論文標題 Skyrmion-induced anomalous Hall conductivity on topological insulator surfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 165303-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.165303	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 R. Akiyama, Y. Takano, Y. Endo, S. Ichinokura, R. Nakanishi, K. Nomura, S. Hasegawa	4. 巻 110
2. 論文標題 Berry phase shift from 2 to in bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 233106- 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4984958	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 N. Ito and K. Nomura	4. 巻 86
2. 論文標題 Anomalous Hall Effect and Spontaneous Orbital Magnetization in Antiferromagnetic Weyl Metal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 063703- 1 - 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.063703	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14件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Quantized spin pumping and spin torques using helical surface modes
3. 学会等名 NIMS-IMR Workshop Program on Spin Phononics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村健太郎
2. 発表標題 トポロジカル半金属の輸送特性とスピン機能
3. 学会等名 新学術領域トポロジカル物質科学 第11回トポロジー連携研究会「トポロジカル半金属」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Spintronics functionalities of topological semimetals
3. 学会等名 Purdue University-Tohoku university, Spintronics Workshop II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Chiral anomaly and spin-electromagnetic responses in topological materials
3. 学会等名 Frontiers in Mathematical Science Research Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村健太郎
2. 発表標題 熱ホール効果一般についてのレビュー
3. 学会等名 第12回トポロジ-連携研究会「マヨラナ励起の実証に向けて」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Magnetism and anomalous transport in Kagome shandites
3. 学会等名 The 2nd NIMS-IMR Workshop on Spin Phononics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村健太郎
2. 発表標題 トポロジカル物質
3. 学会等名 CREST チュートリアル・ワークショップ「物質のトポロジカル相の理論的探究」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村健太郎
2. 発表標題 トポロジカル半金属の電磁応答とスピントロニクス現象
3. 学会等名 物性理論のフロンティアと社会への展開 東京大学(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村健太郎
2. 発表標題 ワイル半金属における軸性アノマリーと磁化ダイナミクス
3. 学会等名 量子多体系の素核・物性クロスオーバー 高エネルギー加速器研究機構(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村健太郎
2. 発表標題 トポロジカル物質のスピン機能創出
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 シンポジウム「低次元トポロジカル絶縁体・スピン物性の新展開」九州大学(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Spintronic functionalities of topological Dirac-Weyl materials
3. 学会等名 One-Day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Materials The University of Tokyo Kashiwa Campus Station Satellite (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Spintronics functionalities of topological semimetals
3. 学会等名 KITS Workshop 2018 "COLLECTIVE SPIN DYNAMICS IN NANOSTRUCTURES" Kavli ITS, Beijing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Nomura
2. 発表標題 Anomalous magnetotransport and magnetization dynamics in Weyl semimetals
3. 学会等名 TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop, Topological magnets and topological superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村健太郎、紅林大地、小林浩二、荒木康史
2. 発表標題 ワイル磁性体における磁化ダイナミクス
3. 学会等名 スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク
4. 発表年 2018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
---------	---------