

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14316

研究課題名(和文)トポロジカル物質中での磁壁・スキルミオンの制御に基づく情報素子の開発

研究課題名(英文) Manipulation of magnetic domain walls and skyrmions in topological materials toward development of information devices

研究代表者

荒木 康史 (Araki, Yasufumi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・任期付研究員

研究者番号：10757131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、物質の磁化(スピン)が局所的に非一様な構造を持った、「磁壁」「スキルミオン」と呼ばれる磁気構造の新奇な性質を探ることを目的として、特殊な電子状態(バンド構造)で特徴づけられる物質群「トポロジカル物質」に着目し、その中での磁気構造の性質を理論的に調べた。3次元の「ワイル半金属」においては、磁気構造があると電子が局在して帯電し、磁気構造の運動に伴い電流が誘起されることを示した。「トポロジカル絶縁体」の2次元界面においては、磁気構造の存在によって電子の異常な輸送現象が誘起されることを示した。これらはいずれも電子の特殊な性質に起因しており、通常の磁性体では見られなかったものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性体の中では一様な磁化の他に、壁状の構造「磁壁」、渦状の構造「スキルミオン」など、局所的に非一様な構造が現れることがある。磁性体の磁化操作の技術応用を目指す「スピントロニクス」において、非一様な磁気構造を情報の担い手として情報素子に活用する試みが活発に行われている。本研究課題では、新たな電子状態を持つ物質「トポロジカル物質」を使うことにより、磁性体の磁気構造と電子の間に今まで見られなかった関係が発現することを示した。この性質を使うことにより、磁気構造を外部から電氣的に操作・検出することが可能になると示唆され、ナノスケールの情報素子をデザインする際に役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：This research project has focused on novel characteristics of non-uniform magnetic textures in materials, e.g. magnetic domain walls and skyrmions, formed in topological materials characterized by nontrivial electronic states (band structure). In three-dimensional materials categorized as Weyl semimetals, it has been found that electrons localize at a magnetic texture, and that dynamics of a magnetic texture induces electric current flowing along the texture. In two-dimensional surface states of materials categorized as topological insulators, it has been found that magnetic textures induces transverse electric conductivity, namely the anomalous Hall conductivity. These characteristics stems from the spin structure of electrons in topological materials, and are not seen in conventional magnetic materials. Such novel characteristics are expected to be helpful in designing nanoscale magnetic devices utilizing magnetic textures as carriers of information.

研究分野：物理学(理論・物性)

キーワード：トポロジカル物質 磁性体 トポロジカル絶縁体 ワイル半金属 磁壁 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

磁性体の磁化を構成するスピン自由度を操作する技術「スピントロニクス」は、物質科学における磁性体の基礎的性質と、情報素子の開発等の応用面の橋渡しをする学問領域として活発に研究が続けられている。よく知られた通常の強磁性体においては、磁性体中の全てのスピンの基底状態では一様に同じ方向を向いており、強磁性体を対象とした理論研究でもこのような基底状態に基づいて議論が行われてきた。一方で磁性体中では励起モードとして、数十 - 数百ナノメートル程度のスケールで、局所的に非一様な構造をもつ磁気構造が現れることがある。典型的な例として、異なる磁化領域を隔てる磁壁、スピンの渦巻き状に配位したスキルミオン等が知られている。これらの磁気構造は形状を保ったまま移動できるため、スピントロニクスの領域においては、磁性体中の個々の磁気構造を情報の担い手として用いることにより、より高効率な情報素子の開発に活用する試みが進められている。

磁気構造を磁性体中で電気的に操作するためには、電子の運動の自由度とスピンの自由度が強く相関する、スピン-軌道相互作用が重要となる。この指導原理に基づき、多種多様な磁性体のデザインが理論計算と試料生成の双方から進められている。このような背景に基づき、研究代表者(荒木)はスピン-軌道相互作用が極めて支配的となる物質として、トポロジカル物質と総称される物質群に着目した。トポロジカル物質は、内部が絶縁体で表面に金属的な状態を持つトポロジカル絶縁体、バンド交叉点を持つ特殊な電子状態によって特徴づけられるワイル/ディラック半金属などに分類され、これらの電子状態はスピン-軌道相互作用によるバンド反転に起因して実現される。実際に、これらのトポロジカル物質において電子の自由度と磁化が強く相関することは広く知られており、代表的な現象としては物質の磁化が電子の輸送係数に反映される、異常ホール効果がある。

このように、磁化を持ったトポロジカル物質の性質は、トポロジカル物質の研究の黎明期から広く調べられてきた。一方でこれらの研究は、磁化が一様である(並進対称性を持った)場合を扱ったものが大半であり、局所的な磁気構造の性質に関してはあまり注目されてこなかった。トポロジカル物質ではスピン-軌道相互作用が支配的となるため、短い長さスケールで現れる磁気構造に対してはスピン-軌道相互作用がより重要な影響を及ぼすことが期待される。以上の背景に基づき、本研究課題ではトポロジカル物質における局所的な磁気構造の、静的・動的な性質を理論面から理解することを目的とした。

2. 研究の目的

本研究課題は、磁化を持ったトポロジカル物質中で磁壁・スキルミオン等の磁気構造が持つ性質を調べ、情報素子の開発において役立つと期待される現象を理論面から提言することを目的とした。特に、磁気構造の存在下でトポロジカル物質の電子が得る新たな性質、逆に電子系の運動により磁気構造が受ける影響について着目し、磁気構造を電気的に検出・駆動する新たな手法の提案に繋げることを目指した。具体的には、主に以下の2点の課題を取り扱った。

(1) 磁性ワイル半金属における磁気構造の性質

電子のバンド構造がバンド交叉点を示す「ワイル半金属」のうち、特に磁性を持つワイル半金属については、特異なバンド構造に起因した異常ホール効果や表面状態の観点から理論面で盛んに議論が行われてきた。2017年には、理論計算によって予言された $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ が、輸送測定と光電子分光(ARPES)の実験によりワイル半金属であることが確認された。以後も Co_2MnAl 、 Fe_3Sn 、 EuCd_2As_2 など多くの物質が、強磁性体であるワイル半金属の候補として理論・実験の双方から注目されている。このような近年の研究の進展に基づき、本研究課題では磁性ワイル半金属の中に磁気構造、特に磁壁が構成された場合の性質について、以下の2つの側面から理解することを目指した。

磁壁が存在する場合に、その近傍に存在する電子が得る性質。

磁壁(及び他の磁気構造)が移動している場合に誘起される、電子の輸送現象。

(2) トポロジカル絶縁体表面における磁気スキルミオンの性質

磁性金属中に現れるスキルミオン構造は、電子の輸送において磁場に直接起因しないホール伝導に寄与することが測定により確認されている。これはスキルミオン構造の実空間内でのトポロジーによって理解され、トポロジカル・ホール効果として知られている。一方、磁化を持つトポロジカル絶縁体は表面状態にギャップを持ち、量子化されたホール伝導度を示すことが実験により確認されている(異常量子ホール効果)が、これは理論的には運動量空間のトポロジーにより理解される。最近の実験により、磁化を持つトポロジカル絶縁体の界面でスキルミオン構造が現れることが示唆されており、スキルミオン構造が電子の輸送特性に与える影響を理解することが求められている。以上の背景に基づき、磁化を持つトポロジカル絶縁体の表面(界面)状態において、スキルミオン構造による電子の散乱効果と、それに起因したホール伝導度への寄与

を評価することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) この一連の研究では、スピン-運動量ロッキングが働くワイル半金属の模型を基に、電子スピ
ンが磁気構造を構成するスピンと結合した場合の電子系の性質について解析を行った。

ワイル半金属の格子模型に基づき、いくつかの特徴的な磁壁構造 (Bloch 型、Neel 型、
head-to-head 型など呼ばれる) を格子模型上に構築し、磁壁と結合した電子系の固有状態を
数値計算により導出した。得られた固有関数を用いて、磁壁存在下での電子 (電荷) の空間分
布を計算した。

ワイル半金属の連続体模型に基づき、時間変動する磁気構造と電子スピンの相互作用を導
入した模型を用いて解析を行った。電子のスピン-運動量ロッキングに起因して、磁気構造と
の結合が実効的な電磁場との結合と同一視できることを用いて、磁気構造の移動により電子
系に誘起される電流と、その結果となる電荷分布の時間変動について計算を行った。

(2) トポロジカル絶縁体の表面電子のスピンにスキルミオン構造を結合させた連続体模型から
出発し、スキルミオン存在下での電子の固有状態を導出した。得られた固有関数を用いて、電子
がスキルミオンに入射した際に散乱される、散乱振幅 (散乱断面積) の角度分布を計算した。こ
の計算結果に基づき、スキルミオンが多数存在する中での電子の伝導度を、半古典的輸送理論
(ボルツマン理論) を用いて見積もった。

4. 研究成果

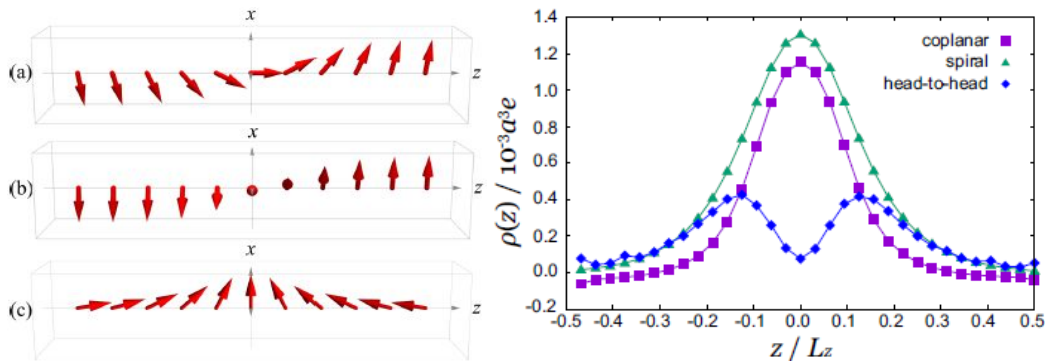


図 1: (左) 研究(1)- で導入した磁壁構造の模式図。(右) 磁壁構造によって誘起された電荷
分布。 が左図の(a)、 が(b)、 が(c)に対応する。

(1) 図 1 左のような磁壁構造の下でワイル電子の波動関数を調べた結果、磁壁の近傍に局在
した波動関数を持つ電子状態が現れることが確認された。この局在状態に起因して、電荷分布は
図 1 右のように磁壁においてピークを持つ、すなわち磁壁が帯電することが示された。このよ
うな磁壁と電荷の結合は通常の磁性体においては見られず、ワイル半金属のスピン-運動量ロッ
キングに起因するものである。この特徴は、外部電場により静電的に磁壁を操作できることを示
唆しており、スピントロニクスで磁壁
を情報の担い手として活用するにあ
たって有用な性質となることが期待
される。この研究成果は Physical
Review B 誌に論文として発表した。

ワイル半金属の連続体模型に基づ
き、ワイル電子と磁気構造 (渦構造)
との結合は実効的な磁場、磁化の時
間変動は実効的な電場との結合と対
応付けられることを確認した。この対
応関係によれば、時間変動する磁気
構造との結合では実効的な磁場と電
場の両方が存在するため、電場に起
因するドリフト電流、磁場に起因す
る電流 (カイラル磁気効果) に加え、電場と

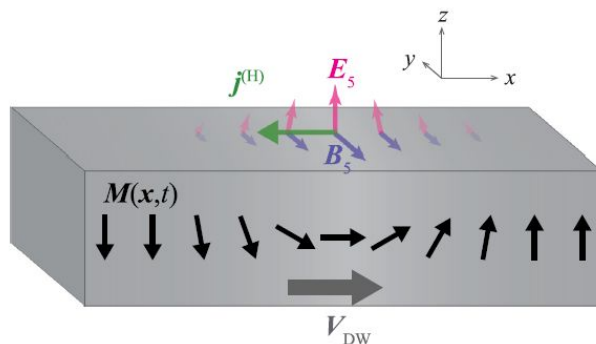


図 2: 研究(1)- で導入した磁壁の運動 [V_{DW}]、それ
に対応する実効的な電場 [E_s]・磁場 [B_s] と、それによ
って誘起されたホール電流 [$j^{(H)}$]。

磁場の両方に起因するホール電流が誘起されることを示した。

具体例として、図2に示したような、一定の速度で動いている磁壁を考えた。この磁壁の運動に対応する実効的な電場・磁場により、ホール電流は磁壁の運動に沿って流れる。したがって動いている磁壁は電荷を運んでいると解釈でき、運ばれる電荷は示した局在電荷に対応していることを示した。誘起されたホール電流を測定することにより、磁気構造の時間変動を電氣的に検出できることが示唆され、スピントロニクスで磁壁を検出するにあたって有用な性質となることが期待される。この研究成果はPhysical Review Applied誌に論文として発表した。

また、磁性ワイル半金属の磁気構造に関する以上の一連の研究成果を解説記事としてまとめ、Annalen der Physik誌に発表した。

(2) スキルミオン1個による電子散乱の角度分布をトポロジカル絶縁体界面で解析したところ、図3下のように非対称となることが示された。この非対称性のため、スキルミオンが多数ある中で電場をかけると異常ホール電流が誘起され、その効果は既知の同様磁化下での異常ホール電流に比べても十分強いものであることが計算により示された。また、通常の磁性体中でのスキルミオンと異なり、トポロジカル絶縁体界面ではスピン運動量ロッキングに起因し、スキルミオンの形状によって異常ホール伝導度が異なる値を示すことを確認した。この効果は、スキルミオン構造を情報の担い手として活用するにあたって、スキルミオンの存在を検出する際に有用な手段となると期待される。この研究成果は、Physical Review B誌に論文として発表した。

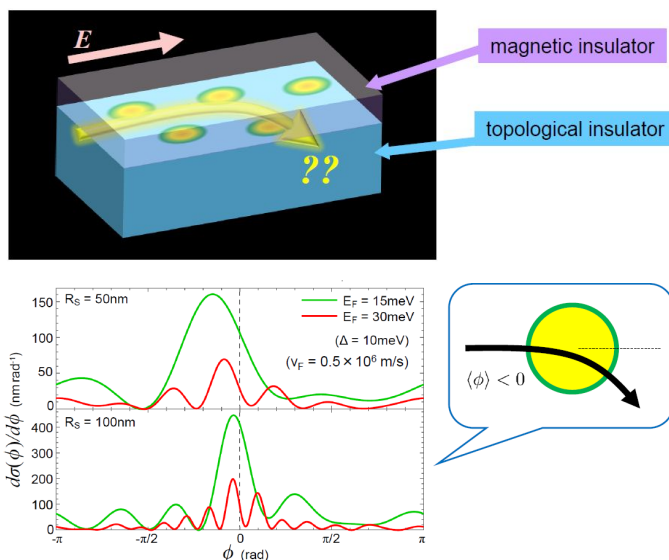


図3:(上)研究(2)の設定の模式図。トポロジカル絶縁体の界面にスキルミオン構造が存在する場合、電場をかけるとそれに垂直な異常ホール電流が流れる。(下)スキルミオン1個による電子の散乱角度の分布。散乱の非対称性により、異常ホール効果が現れる。

以上(1)(2)の研究のほか、スピン輸送に関する研究として、

- ・捻りのあるディラック半金属ナノワイヤーにおけるスピン流生成 (Scientific Reports 誌)
 - ・量子スピンホール絶縁体の端状態におけるスピンポンピング (Physical Review B 誌)
- に関する研究を行い、それぞれ論文誌に論文として発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Araki Yasufumi	4. 巻 532
2. 論文標題 Magnetic Textures and Dynamics in Magnetic Weyl Semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annalen der Physik	6. 最初と最後の頁 1900287
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/andp.201900287	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 Araki Yasufumi, Misawa Takahiro, Nomura Kentaro	4. 巻 2
2. 論文標題 Dynamical spin-to-charge conversion on the edge of quantum spin Hall insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23195
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.023195	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 Araki Yasufumi, Yoshida Akihide, Nomura Kentaro	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 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45302
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 Araki Yasufumi, Nomura Kentaro	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 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14007
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 Araki Yasufumi	4. 巻 8
2. 論文標題 Strain-induced nonlinear spin Hall effect in topological Dirac semimetal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-33655-w	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 Yasufumi Araki and Kentaro 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 Physical Review 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 -

[学会発表] 計17件(うち招待講演 2件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Takahiro Misawa, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Dissipative spin pumping in two-dimensional quantum spin Hall insulator
3. 学会等名 International Workshop on New Trends in Topological Insulators 2019 & Variety and Universality of Bulk-edge Correspondence 2019 (NTTI 2019 and BEC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木康史、三澤貴宏、野村健太郎
2. 発表標題 2次元トポロジカル絶縁体における散逸的スピンプンピング
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Takahiro Misawa, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Adiabatic and resonant spin pumping in two-dimensional quantum spin Hall insulator
3. 学会等名 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Takahiro Misawa, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Dissipative spin pumping into two-dimensional quantum spin Hall insulator
3. 学会等名 10th Joint European Magnetic Symposia Conference (JEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Takahiro Misawa, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Spin-to-charge conversion on the edge of quantum spin Hall insulator
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasufumi Araki
2. 発表標題 Strain-induced nonlinear spin Hall effect in topological Dirac semimetal
3. 学会等名 APS March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木 康史
2. 発表標題 トポロジカルディラック半金属における格子歪みによる 非線形スピホール効果
3. 学会等名 「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」第4回領域研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasufumi Araki
2. 発表標題 Strain-induced nonlinear spin Hall effect in topological Dirac semimetal
3. 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木 康史
2. 発表標題 トポロジカルディラック半金属における格子歪みによる 非線形スピホール効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (物性)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasufumi Araki
2. 発表標題 Charge pumping induced by magnetic texture dynamics in Weyl semimetals
3. 学会等名 ICM 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Quantum oscillations of conductivities induced by magnetic skyrmions on topological insulators
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Quantum Oscillation of Anomalous Hall Conductivity Induced by Magnetic Skyrmions on Topological Insulator Surfaces
3. 学会等名 EP2DS-22 / MSS-18 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasufumi Araki
2. 発表標題 Skyrmion-induced anomalous Hall conductivity on topological insulator surfaces
3. 学会等名 E-MRS 2017 Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Skyrmion-induced anomalous Hall conductivity on topological insulator surfaces
3. 学会等名 2017 MMM Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasufumi Araki, Kentaro Nomura
2. 発表標題 Skyrmion-induced anomalous Hall conductivity on topological insulator surfaces
3. 学会等名 Advances in Dirac and Weyl Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasufumi Araki
2. 発表標題 Magnetic Textures and Charge Transport in Weyl Semimetals
3. 学会等名 World Congress of Smart Materials-2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒木康史、野村健太郎
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体表面における磁気スキルミオンによる異常ホール効果
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
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