

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15163

研究課題名（和文）幾何学的スピン構造を利用した非相反スピントロニクスの開拓

研究課題名（英文）Nonreciprocal spintronics based on geometric spin structures

研究代表者

千葉 貴裕（Chiba, Takahiro）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：90803297

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁性体/非磁性体接合における非相反伝導現象の解明と巨大化を目指して、その磁気近接界面の電子状態と輸送特性を調査した。また同系における界面状態の電圧制御と磁化ダイナミクスを研究した。第一原理バンド計算に基づいて磁気近接効果によりバンド反転が生じることを見出した。これにより磁性ワイル半金属相や磁性トポロジカル絶縁体相へのトポロジカル相転移が生じることが明らかになった。さらに同系において界面の電子状態を電圧制御することにより外部磁場を必要としない低消費電力な磁化反転手法を開発した。今後の展開として、同系における磁気近接界面を活用した新規スピントロニクス機能の創発が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、磁性体/非磁性体接合における磁気近接界面の電子状態と輸送特性を調査した。また同系における界面状態の電圧制御と磁化ダイナミクスを研究した。第一原理バンド計算に基づいて見出した磁気近接効果によるバンド反転は、今後トポロジカル物質を設計する上で新たな指針となることが期待される。開発した磁化反転手法は、界面電子状態の電圧制御に基づいているため、動作時の消費電力を大幅に抑えることができる。また外部磁場を必要としないことから素子の集積化にも有利である。今後、同系における磁気近接界面を活用した更なるスピントロニクス機能の創発が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, with the aim of elucidating and enhancing nonreciprocal transport phenomena, we investigated the electronic state and transport properties in magnetic/nonmagnetic junctions. We also studied voltage control of the interface state in the same system and control of magnetization dynamics. Based on the first-principles calculation, it was found that a band inversion occurs due to the magnetic proximity effect. It was revealed that this can lead to topological phase transitions to a magnetic Weyl semimetal phase as well as a magnetic topological insulator phase. Furthermore, based on voltage control of the interface electronic state in the same system, we developed a low-power magnetization reversal method that does not require an external magnetic field. As future developments, it is expected that new spintronic functionalities based on the magnetic proximity interface will emerge.

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 トポロジカル絶縁体 トポロジカルディラック半金属 磁気近接効果 第一原理計算 磁気抵抗効果 磁化反転 電圧制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、磁性体がもつ幾何学的なスピン構造を情報の媒体とした不揮発メモリの研究・開発が盛んに行われている。図1に示すように磁性体内には異なる局在スピンの方向を持った磁気ドメイン(磁区)があり、磁区の境界面に磁壁や磁気渦と呼ばれる幾何学的スピン構造が存在する。図1に示す磁壁移動型メモリ[*Science* (2008)]では、磁性体細線中の磁区における磁化方向を情報として利用する。そのため実用化には、磁性体との界面(磁気近接界面)を介した磁壁への情報の書き込みおよび読み出し方法の確立が重要となる。

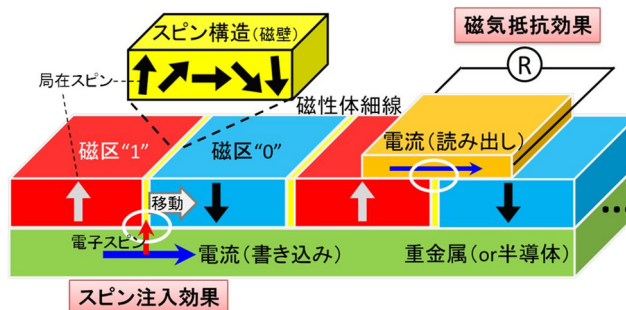


図1:磁壁移動型メモリ。「スピン注入」により磁壁を移動させ、磁区の磁化方向を反転させることで情報を記録する。情報の読み出しは「磁気抵抗効果」により磁壁の有無を識別する。

しかし、実用化までの道のりにはボトルネックが存在する。まず、情報の書き込みでは、重金屬がもつスピン軌道相互作用を利用して磁壁を動かす方法が提案されている。この方法は、図1のように磁性体/重金屬の二層膜に電流を流し、スピン軌道相互作用を介して磁壁にスピン注入することで、磁壁の高速移動を実現している[*Nat. Nanotech.* (2015)]。しかし、実用的には現状よりも小さい電流で磁壁を動かす必要があり、スピン注入効率の向上が求められている。次に、情報の読み出しでは、磁性体での異方性磁気抵抗効果を利用するため、情報の読み出しに必要な抵抗変化率が数%と小さいことが課題である[*Phys. Rev. Lett.* (2006)]。これらの問題を解決するためには、磁性体とその近接界面において、電子状態がスピン構造から受ける影響の解明を通じて、スピン注入効果と磁気抵抗効果を増強させる必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、様々なスピン構造をもつ磁性体とその近接界面において、「幾何学的スピン構造による反転対称性の破れが電子状態に与える影響」と「電荷とスピンの非相反伝導現象」の相関関係を明らかにし、スピン注入効果と磁気抵抗効果を巨大化するための新しい指針を示すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、数理モデルと第一原理計算を併用して、様々なスピン構造をもつ磁性体とその近接界面において、界面電子状態と非相反伝導現象の研究を行い、本現象の微視的機構の解明を通じて、スピン注入効果と磁気抵抗効果の巨大化への指針を探索する。

### 4. 研究成果

#### (1)磁気近接効果によるトポロジカル相転移

トポロジカルディラック半金属(TDS)は強いスピン軌道相互作用と結晶の対称性に起因してバルクに点接触する線形バンド構造をもつ物質である。また時間反転対称性と空間反転対称性の両方を有することから、バンド構造が二重にスピン縮退している。したがって、時間反転対称性を破る磁性体との接合を用いてスピン縮退を解くことにより、バルクバンドにヘッジホック的なスピン構造(スピン運動量ロッキング)を有する磁性ワイル半金属へとトポロジカル相転移することが期待される。一方で、空間反転対称性が破れたワイル半金属において巨大な非相反輸送現象が発現するという理論予測が提案されている。そこで本研究では、磁性体/TDS 接合系において非相反輸送現象及び界面状態を理論的に解明することを目指した。

本研究では、TDS として  $\alpha$ -Sn [Adv. Mater. **33**, 2104645 (2021)], 磁性体として Fe, FeAs, InFeSb を想定した。第一原理バンド計算に基づいて磁性体/TDS 接合系における界面電子状態の計算を行った。その結果、磁性体の  $d$

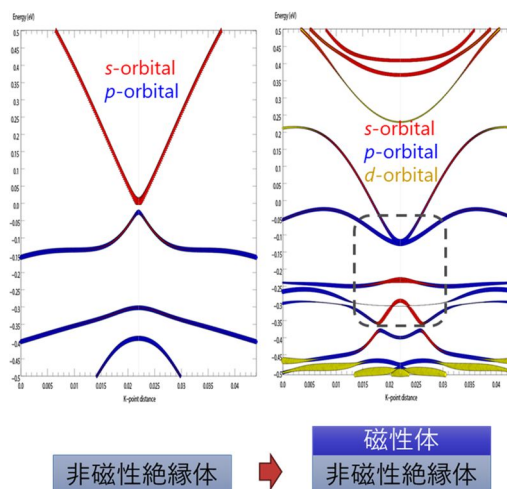


図2:磁気近接効果によるバンド反転の様子。

電子軌道と **TDS** の  $p$  電子軌道の混成により、いずれの場合も **TDS** のバルクバンドにバンド反転が生じることを見出した。さらに同系における **TDS** 層の膜厚依存性を調査したところ膜厚の薄い領域においても磁気近接効果に起因したバンド反転が確認された。これにより磁性ワイル半金属相や磁性トポロジカル絶縁体相へのトポロジカル相転移が生じうることを明らかにした。磁気近接効果によるバンド反転は、トポロジカル物質を設計する上で新たな指針となることが期待される。

## (2) トポロジカル界面状態を活用した磁化ダイナミクスの電圧制御

磁性トポロジカル絶縁体(**TI**)表面におけるスピン軌道トルクおよび磁気異方性に関して研究を行った。**TI** は強いスピン軌道相互作用と時間反転対称性に起因して表面にギャップレスな金属状態をもつ物質である。その表面状態は波数空間においてヘリカルなスピン構造(スピン運動量ロッキング)を有している。したがって、**TI** 表面に電場を印加することでスピン運動量ロッキングによりスピン蓄積が誘起され(**Rashba-Edelstein** 効果)、磁性 **TI** では自身の磁化に対してスピン軌道トルクを及ぼす。一方でスピン運動量ロッキングの性質は磁気異方性にも影響を及ぼすことが知られている。しかしながら、これまでの研究では、磁性 **TI** の磁化反転においてスピン軌道トルクと磁気異方性は独立に扱われていて、特にその同時電圧制御に関する研究は皆無であった。そこで本研究では、磁性 **TI** 表面におけるスピン軌道トルクと磁気異方性に対する電界効果を理論的に解明することを目指した。

電子の低エネルギー(ディラック点近傍)における運動を記述する有効ハミルトニアンに基づき、まず磁性 **TI** 表面におけるスピン軌道トルクと磁気異方性エネルギーをモデル化した。その結果、スピン軌道トルクに対する電界効果が比較的小さい一方で、磁気異方性エネルギーは電圧により大きく変調できることを明らかにした。この結果に基づいて、磁化の運動を記述するランダウ-リフシッツ-ギルバート方程式を用いて磁性 **TI** の磁化反転をシミュレーションしたところ、低温において従来の磁性体よりも一桁小さい電力で磁化反転できることがわかった [**Phys. Rev. Appl.** **14**, 034031 (2020)]。

同様の有効ハミルトニアンに基づき、**3DTI**/磁性体の界面におけるスピンポンピングのフェルミエネルギー依存性をモデル化した。その結果、面内磁化に関するスピンポンピングが電圧により大きく変調できることを明らかにした [**Appl. Phys. Lett.** **118**, 252402 (2021)]。この知見に基づいて、**3DTI**/磁性体の接合系におけるスピン波の伝搬を概算したところ、低温においてはその伝搬を **on/off** できることがわかった。これにより **3DTI**/磁性体の界面を活用した電圧制御スピン演算素子への応用が期待される。

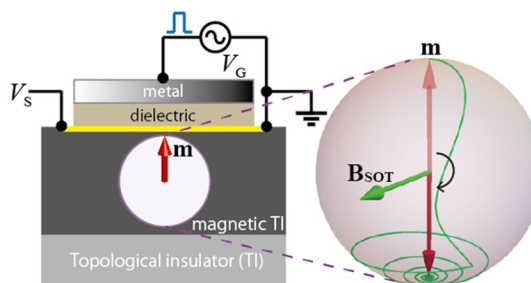


図3: 電圧制御デバイスにおける磁化反転シミュレーションの様子。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takiguchi Kosuke, Anh Le Duc, Chiba Takahiro, Shiratani Harunori, Fukuzawa Ryota, Takahashi Takuji, Tanaka Masaaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Giant gate-controlled odd-parity magnetoresistance in one-dimensional channels with a magnetic proximity effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-34177-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 Chiba Takahiro, Iguchi Ryo, Komine Takashi, Hasegawa Yasuhiro, Uchida Ken-ichi	4. 巻 62
2. 論文標題 Temperature profile of the Thomson-effect-induced heat release/absorption in junctionless single conductors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 037001 ~ 037001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acc3e6	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 Chiba Takahiro, Leon Alejandro O., Komine Takashi	4. 巻 118
2. 論文標題 Voltage-control of damping constant in magnetic-insulator/topological-insulator bilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 252402 ~ 252402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0046217	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 該当する
1. 著者名 Anh Le Duc, Takase Kengo, Chiba Takahiro, Kota Yohei, Takiguchi Kosuke, Tanaka Masaaki	4. 巻 33
2. 論文標題 Elemental Topological Dirac Semimetal Sn with High Quantum Mobility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2104645 ~ 2104645
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202104645	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 Takahiro Chiba and Takashi Komine	4. 巻 14
2. 論文標題 Voltage-Driven Magnetization Switching via Dirac Magnetic Anisotropy and Spin-Orbit Torque in Topological-Insulator-Based Magnetic Heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034031-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.034031	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 Takahiro Chiba and Takashi Komine	4. 巻 10
2. 論文標題 Thermoelectric refrigerator based on asymmetric surfaces of a magnetic topological insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125230-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000005	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13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 千葉貴裕
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体を活用した磁化ダイナミクスの電圧制御とその応用
3. 学会等名 第240回研究会 / 第94回ナノマグネティックス専門研究会「磁気物性に関する計算科学の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千葉 貴裕, Alejandro O. Leon, 小峰啓史
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体に基づいた電圧駆動磁気メモリ
3. 学会等名 2022年度 物質・デバイス領域共同研究拠点 展開共同研究 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小峰 啓史, 綿引 詩門, 千葉 貴裕
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体素子の電圧制御磁化反転における書き込みエラー率の数値解析
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Chiba, Alejandro O. Leon, Takashi Komine
2. 発表標題 Voltage-control of magnetic properties in topological-insulator/magnetic-insulator bilayers
3. 学会等名 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Chiba, Alejandro O. Leon, Takashi Komine
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体磁性ヘテロ構造における磁化ダイナミクスの電圧制御
3. 学会等名 第26回半導体スピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Chiba, Alejandro O. Leon, Takashi Komine
2. 発表標題 Voltage-driven magnetization switching in topological-insulator-based magnetic heterostructures
3. 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Chiba, Alejandro O. Leon, Takashi Komine
2. 発表標題 Voltage-control of magnetic properties in topological-insulator-based magnetic heterostructures
3. 学会等名 The 5th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 4th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉貴裕, Alejandro O. Leon, 小峰啓史
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体二層膜における磁気特性の電圧制御
3. 学会等名 第45回日本磁気学会(MSJ)学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉 貴裕, 小峰 啓史
2. 発表標題 界面ディラック電子に起因した磁気異方性に基づく電圧制御磁化反転
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉 貴裕
2. 発表標題 トポロジカル物質とその工学応用への可能性
3. 学会等名 茨城大学工学部附属教育研究センター グリーンデバイス教育研究センター セミナー 「スピントロニクス」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉 貴裕, 小峰 啓史
2. 発表標題 時限方式における磁性トポロジカル絶縁体の電圧トルク磁化反転
3. 学会等名 第25回半導体スピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Chiba, Takashi Komine
2. 発表標題 Electric-Field Control of Spin-Orbit Torque and Magnetic Anisotropy in Topological Insulator Heterostructures
3. 学会等名 2020 Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Takiguchi, Le Duc Anh, Takahiro Chiba, Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Giant gate-controlled odd-parity magnetoresistance in one-dimensional channels with a magnetic proximity effect
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (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
---------	---------