

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2014～2018

課題番号：26103003

研究課題名（和文）電気的スピン変換

研究課題名（英文）Electrical spin conversion

研究代表者

白石 誠司（SHIRAIISHI, MASASHI）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30397682

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 195,200,000円

研究成果の概要（和文）：スピン角運動量を電気的に他の物理量に変換する、という着眼点から新しい変換物理の発見や、従来の変換機構の効率化を目指した。研究の結果、(1)「トポロジカルスピン変換」という新概念に基づくスピン変換を発見できた、(2)金属を極めて薄くした状態に強い電界をかけることで非線形なスピン変換が生じることを発見した、(3)原子膜材料におけるスピン変換機構を見出した、(4)従来の1桁効率のよいスピン変換信号を新しい磁気トンネル接合を作製することで達成した、など傑出した成果を発信した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究開始当初、電気的スピン変換は極めて限定的な材料系・実験条件で可能な現象だ、という理解であったが、本研究の推進によりスピン変換においてはスピンスと結合する物理量が枢軸的に重要であるという基盤学理の理解、特にに k （波数）と L （軌道角運動量）が前者はトポロジカルなスピン変換、後者はスピン軌道相互作用による変換として大きな役割を果たすため極言すればスピン変換の場は遍在（ユビキタス）し、極めて多様な異種界面・表面、またバルク材料がスピン変換のステージとなりうることを理解・実証することができた。またスピン変換効率を決定する微視的要因の理解を大きく進め知的財産権の創出にも至った。

研究成果の概要（英文）：Discovery of (1) Topological spin conversion, (2) non-linear spin conversion, (3) a novel spin conversion mechanism in atomically flat materials, (4) more efficient spin conversion using magnetic tunnel junction are realized in the research project.

研究分野：固体物理・スピントロニクス

キーワード：スピン変換 半導体 電気的 トポロジカル 非線形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

20世紀には実用上も現代情報化社会の礎となったエレクトロニクスに代わり、スピンの流れ、いわゆる「スピン流」という新概念が登場した。21世紀に入ると、その理解は単なる電流とは異なる角運動量を運ぶ流れとして一段と深まっている。最近では、このような角運動量流が、固体電子を媒介として、光、スピン、熱等と相互に変換することが分かってきた。例えば、電子スピンに着目すると、伝導電子のスピン角運動量は、交換相互作用を介して角運動量保存則により磁化に加わる回転力(スピントルク)に変換される。これにより磁化は歳差運動、もしくはその向きを反転する。この現象が外部磁場を用いない磁気共鳴励起あるいは磁気記録の書き込み原理として応用され、スピントルク発振子あるいはスピントルク磁気固体メモリとして広く知られている。同様に光も時計回りあるいは反時計回りの円偏光として角運動量を局在スピンに受け渡して磁化反転を誘起する。熱に目を向けると、熱やマイクロ波等の擾乱は磁化の歳差運動を励起する。強磁性体と非磁性体金属の接合を考えると、歳差運動する磁化から伝導電子スピンを経由して、熱が電気に変換される。このように、伝導電子スピン、局在電子スピン、フォトン、フォノンなど多様な粒子・準粒子の間にまたがる相互変換現象を総称してスピン変換と呼ぶ。このスピン変換は、新奇な物性現象の宝庫であり、最近になってやっと発見された現象が数多く存在する。

スピン変換に関わる最近の研究動向を眺めると、我が国の研究者は際立った成果を挙げており、巨大スピンホール効果、巨大スピン蓄積・純スピン流誘起磁化反転、スピントルクダイオード効果、スピンゼーベック効果、絶縁体へのスピン注入、スピン起電力、強磁性超薄膜の磁気異方性電圧制御など日本発の新しいスピン変換に関わる物性の研究報告は、枚挙に暇がない。このように、スピントロニクス研究の著しい発展には我が国の研究者の貢献が極めて大きく、物質科学に実験と理論の両面から多くの知見を与え、活発かつ魅力的な研究分野に成長させた。その結果、基礎研究としてだけでなく、実際に役に立つスピン変換応用を見据えたエレクトロニクス産業の関心を勝ちとるに至っている。

これらの先進的研究で発見されたスピン変換現象の多くは、磁性体、非磁性体、半導体、絶縁体等の異種物質の比較的単純な接合構造で発現しており、次に述べる2つの重要な特徴を有する。第一に、スピン変換現象は優れた汎用性・応用性を持っており、様々な物質やそれらの接合を選択できることから自由度の大きな機能設計が可能となる。第二に、こうしたスピン変換現象の背後に、普遍的な学理があることを意味している。このスピン変換現象を、統一的に理解し学問的に統合することができれば、新しい学術領域を創成するだけでなく、日本が得意とする磁性研究を基として発展してきたスピントロニクス領域を新たなステージに引き上げ、国際的な日本の学術的プレゼンスをより一層高めることができると考える。

2. 研究の目的

以上を考慮して、本研究領域では、多彩なスピン変換機能を発現させるための基礎物性を、磁気的スピン変換、電気的スピン変換、光学的スピン変換、機械・熱的スピン変換の四つの実験的視点から調べると共に、理論の立場からスピン変換機能設計を行い、実験・理論の連携研究からその基礎となる学理を構築し、新機能の創出を目指す。成果や研究手法は、物性物理学の基礎となり、ひいては我が国の物質科学全体の学術水準を押し上げ、基礎研究の質的な進展をもたらすことは確実である。

そこで、本領域ではこれらの点を踏まえて磁気的、電気的、光学的、機械・熱的スピン変換の全てが密接にかかわる異種物質接合の変換機能に着目して、次のように研究領域の達成目標を設定する。

- (1) スピン変換による新物性の創出：異種物質間の接合状態とスピン変換機能の探索を軸に磁気的、電気的、光学的、機械・熱的スピン変換物理を実験と理論の両面から解明し、卓抜なスピン変換物性を創出する。
- (2) 非線形スピン変換制御技術の確立：従来の線形なスピン変換とは異なる非線形スピン変換過程を開拓し、制御手法の確立を目指す。
- (3) スピン変換の統一的な学理の構築：磁性体・半導体・絶縁体におけるマグノン、フォトン、フォノン等の多様な準粒子間の相互変換を実験と理論の両面から統一的に理解し、ナノスピン変換科学の物理体系構築を目指す。

3. 研究の方法

スピン変換という物理現象は異種界面においてスピン流およびスピン蓄積が誘起される現象であり、異種界面において局所的なスピン偏極が生じることを意味する。これらスピン偏極を検出するには、逆スピンホール効果を利用して起電力を発生させる等の手法が一般的であり同時に強力なツールとなってきた。本提案で目指す新スピン変換物性現象の発見、非線形なスピン変換現象の実現、統一的学理の理解、を電気的スピン変換の視座から達成するためにはスピン変換を増強又は阻害している微視的な要因が何であるか等の基礎的なスピン変換物性における知見の蓄積と従来の枠組みに捕われない新構想に基づくスピン変換機能の実現を達成する。

4. 研究成果

本研究期間を通じ、 についてはトポロジカル絶縁体の表面スピン偏極の電气的スピン変換による計測を通じた「トポロジカルスピン変換」の実現と当該領域の創出を突破口に、結晶トポロジカル絶縁体におけるスピン変換やグラフェンへの外的なスピン軌道相互作用の導入によるトポロジカル絶縁体化の成功など、トポロジカルスピン変換というコンセプトに基づく学理の大きな広がりを実現した。 に関しては超薄膜 Pt に強電界を印加することによって Pt のスピン流電流変換機構を非線型かつ大幅かつ自在に変調できる新奇な非線型スピン変換を発見しスピン変換効率を決定する微視的要因の理解を大きく進め知的財産権の創出にも至った。 に関してはスピン変換においてはスピン s と結合する物理量が枢軸的に重要であるという基盤学理の理解に至った。特に A02 班では主に k (波数) と L (軌道角運動量) が前者はトポロジカルなスピン変換、後者はスピン軌道相互作用による変換として大きな役割を果たすため、極言すればスピン変換の場は遍在 (ユビキタス) し、極めて多様な異種界面・表面、またバルク材料がスピン変換のステージとなりうることを理解・実証することができた。

班内・班間連携も順調に発展し A01~A05 班のすべての班、及び班内の公募研究班すべてのメンバーとの共同研究による論文発表に至っており本新学術領域研究を「場」とする新しい研究の発展を十分に達成した。更に、契約書を取り交わした上での日本企業との共同研究が 2 件、国際共同研究も 9 件を数え、研究の国際化と応用展開も順調に進んだ。

以下に主な成果を箇条書きで示す。

計画研究班成果

強磁性半導体 InFeAs 上に超伝導体 Nb ナノギャップ構造を作製し、InFeAs の proximity 超伝導の実現に世界で初めて成功した。Fraunhofer パターンの観測と解析から InFeAs 内に 3 重項超伝導が実現されていることが明らかになった (A02 班文献 [2]、公募班大矢 GP との共同研究)。

薄さ 2 nm という超薄膜 Pt にイオン液体ゲートを用いた強電界を印加することによって Pt のスピン流電流変換機構を非線型かつ大幅に変調できる非線型スピン変換の新しい効果を発見した (A02 班文献 [3])。

空間反転対称性の破れたグラフェン/YIG 系におけるスピン変換機構の解明に成功した (A02 班文献 [6])。

動力学的スピン変換による Ge 中の室温スピン輸送を達成し (A02 班文献 [7])、スピン緩和機構の解明に発展した (A02 班文献 [5])。

3 次元トポロジカル絶縁体 BiSbTeSe において表面スピン流を、新たな電气的スピン変換手法によって計測しその物性を明らかにした (A02 班文献 [8])。発展研究として、グラフェンにスピン軌道相互作用を導入することで理論的に予言されていたトポロジカル絶縁体への転移を検証した (A02 班文献 [4]) ほか、公募研究で結晶トポロジカル絶縁体 SnTe におけるスピン変換に成功 (A02 公募班文献 [14]) した。

公募班成果

単一電子移動から生じるスピン状態の変化についてミクロなモデルによる背景学理の解明に成功した (A02 公募班文献 [9])。

van der Waals ヘテロ構造を利用した原子膜超伝導体接合系におけるジョセフソン接合の創出に成功した。 ((A02 公募班文献 [12, 15]))

5. 主な発表論文等

計画研究班

- 1) ©(材料)▲公募班との共同研究(斉藤・大矢) T. Kanaki, S. Matsumoto, S. K. Narayananellore, H. Saito, Y. Iwasa, M. Tanaka, and *S. Ohya, " Room-temperature side-gate-induced current modulation in a magnetic tunnel junction with an oxide-semiconductor barrier for vertical spin MOSFET operation ", Appl. Phys. Express, 査読有, 12, 023009-1~4, 2019.
- 2) ©(量子)▲公募班との共同研究(勝本・大矢) *T. Nakamura, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka and S. Katsumoto, "Evidence for Spin-Triplet Electron Pairing in the Proximity-Induced Superconducting State of an Fe-Doped InAs Semiconductor", Phys. Rev. Lett., 査読有, 122, 107001-1~5, 2019.
- 3) ©(材料)▲*S. Dushenko, M. Hokanozo, K. Nakamura, Y. Ando, T. Shinjo and *M. Shiraishi, "Tunable inverse spin Hall effect in nanometer-thick platinum films by ionic gating", Nature Communications, 査読有, 9, 3118~1-7, 2018.
- 4) ©(材料)▲K. Hatsuda, H. Mine, T. Nakamura, J. Li, R. Wu, S. Katsumoto and *J. Haruyama, "Evidence for a quantum spin Hall phase in graphene decorated with Bi₂Te₃ nanoparticles", Science Advances, 査読有, 4, eea6915-1~7, 2018.
- 5) ©(材料)▲M. Yamada, Y. Fujita, M. Tsukahara, S. Yamada, K. Sawano, and *K. Hamaya, "Large

impact of impurity concentration on spin transport in degenerate n -Ge”, Physical Review B, 査読有, 95, 161304(R)-1~5, 2017.

6) ◎(材料)▲S. Dushenko, H. Ago, K. Kawahara, T. Tsuda, S. Kuwabata, T. Takenobu, T. Shinjo, Y. Ando and *M. Shiraishi, "Gate-tunable spin-charge conversion and a role of spin-orbit interaction in graphene", Phys. Rev. Lett., 査読有, 116, 166102-1~6, 2016.

7) ◎(材料)▲S. Dushenko, M. Koike, Y. Ando, T. Shinjo, M. Myronov and *M. Shiraishi, "Experimental demonstration of room-temperature spin transport in n-type Germanium epilayers”, Phys. Rev. Lett., 査読有, 114, 196602, 2015.

8) ◎(材料・量子)▲*Yu. Ando, T. Hamasaki, T. Kurokawa, F. Yang, M. Novak, S. Sasaki, K. Segawa, Yo. Ando and *M. Shiraishi, "Electrical Detection of the Spin Polarization Due to Charge Flow in the Surface State of the Topological Insulator Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3}", Nano Lett., 査読有, 14, 6226~6230, 2014.

公募班

1) ◎(量子)▲*T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, S. Li, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and *S. Tarucha, " Difference in charge and spin dynamics in a quantum dot-lead coupled system ", Physical Review B, 査読有, 99, 085402-1-5, 2019.

2) ◎(材料)▲Y. Sata, *R. Moriya, N. Yabuki, S. Masubuchi, *T. Machida, "Heat Transfer at the van der Waals Interface between Graphene and NbSe₂", Physical Review B, 査読有, 98, 035422-1~7, 2018.

3) ◎(材料)▲T. Ishii, H. Yamakawa, T. Kanaki, T. Miyamoto, N. Kida, H. Okamoto, M. Tanaka, and *S. Ohya, "Ultrafast magnetization modulation induced by the electric field component of a terahertz pulse in a ferromagnetic-semiconductor thin film", Sci. Rep., 査読有, 8, 6901/1-6, 2018.

4) ◎(材料)▲Y. Yamasaki, *R. Moriya, M. Arai, S. Masubuchi, S. Pyon, T. Tamegai, K. Ueno, *T. Machida, "Exfoliation and van der Waals Heterostructure Assembly of Intercalated Ferromagnet Cr_{1/3}TaS₂", 2D Materials, 査読有, 4, 041007-1~10, 2017.

5) ◎(量子)▲*T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, P. Stano, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and *S. Tarucha, " Higher-order spin and charge dynamics in a quantum dot-lead hybrid system ", Scientific Reports, 査読有, 7, 12201-1-7, 2017.

6) ◎(材料・量子)▲*S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, and M. Tanaka, "Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping", Phys. Rev. B, 査読有, 96, 094424/1-5, 2017.

7) ◎(材料)▲N. Yabuki, *R. Moriya, M. Arai, Y. Sata, S. Morikawa, S. Masubuchi, and *T. Machida, "Supercurrent in van der Waals Josephson junction”, Nature Comm., 査読有, 7, 10616-1~5, 2016.

主な受賞

1. 2017年度文部科学大臣表彰科学技術賞研究部門(白石誠司)
2. 2018年度第36回大阪科学賞(白石誠司)
3. 2018年度応用物理学会論文賞(山田道洋・浜屋宏平他)
(当研究によるメンバーの受賞:他10件)

[雑誌論文](計約100件)

[学会発表](計約300件)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計2件)

名称:

発明者:齋藤秀和、湯浅新治

権利者:齋藤秀和、湯浅新治

種類:トンネルダイオード及びその製造方法

番号：特願 2018-199861

出願年：2018

国内外の別： 国内

発明者：セルゲイ・ドゥシェンコ、白石誠司、外園将也、安藤裕一郎

権利者：セルゲイ・ドゥシェンコ、白石誠司、外園将也、安藤裕一郎

種類：スピントロニクス素子、スピントランジスタ及び磁気抵抗メモリ

番号：特願 2018-126805

出願年：2018

国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：浜屋宏平

ローマ字氏名：Kohei Hamaya

所属研究機関名：大阪大学大学院

部局名：基礎工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：90401281

(1)研究分担者

研究分担者氏名：勝本信吾

ローマ字氏名：Shingo Katsumoto

所属研究機関名：東京大学

部局名：物性研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：10185829

(1)研究分担者

研究分担者氏名：齋藤秀和

ローマ字氏名：Hidekazu Saitoh

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：スピントロニクスセンター

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：50357068

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。