

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

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：26103002

研究課題名（和文）磁気的スピン変換

研究課題名（英文）Magnetic spin conversion

研究代表者

大谷 義近（Otani, Yoshichika）

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：60245610

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 263,800,000円

研究成果の概要（和文）：本計画研究では、非線形スピン・電流変換の開拓およびスピン軌道相互作用を通じて出現する新奇な界面スピン変換物性の開拓を二つの主研究課題に設定した。その結果、スピン揺らぎに起因して大きなスピンホール効果の抑制が生じること、超伝導体中に生じる準粒子状態に着目して行った実験から、スピンホール効果が非線形に増強することを見出し、理論と実験の両面から現象を解明した。その他、表面や界面に生じるエデルシュタイン効果を利用して高効率なスピン・電流相互変換を実現した他、バルクで生じるワイル型の電流・スピン変換やワイル反強磁性体に新奇な磁気ホール効果が生じることを実験と理論の両面から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気的スピン変換で設定した研究成果は、磁気メモリー素子や論理素子等のスピントロニクス素子応用に密接に関係する基本的なスピン伝導物性の知見を与えるものである。具体的には、スピン軌道トルクを用いた磁化反転素子の低消費電力化を実現するための設計指針を提供するだけでなく、高効率なスピン・電流変換手法の確立は、今後発展が期待されるエネルギーハーベスティングの主要原理になることから、社会的な波及効果極めて大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we studied following two subjects, 1) development of non-linear spin charge currents conversion and 2) exploration of novel interfacial spin-charge currents conversion. As a result, we discovered strong suppression of the spin Hall effect in the spin grass state. We found a strong enhancement of the spin Hall effect in superconductors and clarified the mechanism experimentally and theoretically. Apart from the above, we realized highly efficient spin-charge conversion via Edelstein effect occurring at the surface and interface states. More interestingly, Weyl type bulk symmetry was found to result in the charge-spin conversion where magnetization is induced by passing charge current. Furthermore we demonstrated experimentally as well as experimentally that the novel magnetic spin Hall effect could take place in Weyl antiferromagnets.

研究分野：物性物理学

キーワード：スピンホール効果 スピントルク スピン流 エデルシュタイン効果 スピン・電流変換

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

「スピン変換」とは角運動量流が、固体電子を媒介として、光、スピン、熱等と相互に変換する現象の総称である(図1<sup>1)</sup>)。固体中の伝導電子はスピン角運動量を運んでおり、交換相互作用を介して磁化に回転力を加える。これがスピントルクである。これにより磁化は歳差運動したり、その向きを反転したりする。この現象が外部磁場を必要とし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、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応用が期待されていた。

同様に、強磁性体と非磁性重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、金属中のスピン軌道相互作用により電流に変換される。このように、伝導電子・伝導電子スピン・局在電子スピンの間で生じる相互変換現象を「磁気的スピン変換」と呼ぶ。この磁気的スピン変換は、スピントロニクス研究の中核となる現象であり、本研究領域発足時期に数多くの関連現象が発見されていた。中でも、本計画研究に参画する研究者は、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、強磁性超薄膜の磁気異方性電圧制御など「磁気的スピン変換」に関わる多くの研究成果を報告して、世界を先導していた。

上述のように、研究開始時点で我が国の研究者は、磁気的スピン変換研究の著しい発展に極めて大きく貢献しており、その結果、「磁気的スピン変換」研究は、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として成長していた。さらに、基礎研究としてだけではなく、実際に役に立つスピン変換応用を見据えた国際的にエレクトロニクス産業の関心を勝ちとるに至っていた。

## 2. 研究の目的

以上を考慮して、本研究計画では、多彩な磁気的スピン変換機能を発現させるための基礎物性を、実験的視点から調べると共に、理論研究者と連携しながら、その基礎となる学理を構築し、新機能の創出を目指すこととした。研究成果や実験手法は、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。

そこで本計画研究では、①非線形スピンドイナミクスとスピン変換の相関物性および②スピン軌道相互作用を通じて出現する界面磁気異方性制御や新奇なスピン変換物性の開拓を二つの主研究課題に設定した。より具体的には、①に関しては、非線形スピン揺らぎを起源として生じる異常スピンホール効果の一つの例とし、新奇な非線形スピン変換機構を開拓することを目指す。②については、異種物質の接合の界面に誘起されるスピン軌道相互作用とそれにより生じるラッシュバ効果やジャロシンスキー守谷相互作用とスピンドイナミクスの相関物性を探求し、電場などを用いた新奇な制御手法を開拓することを目指す。

## 3. 研究の方法

項目①及び②のスピン・電流相互変換実験に関しては、本計画研究に参画する研究者が開発した非局所スピン吸収法を用いて、スピンホール効果による電流・スピン相互変換の測定を行った。また、相補的な測定としてマイクロ波スピンポンピング法をスピン注入法として逆スピンホール効果であるスピン流・電流変換測定やスピントルク強磁性共鳴法を用いた電流・スピン流変換測定を行った。項目②の実験に関しては、磁壁移動速度の電氣的測定やホール効果測定法を用いて行った。その他、強磁性体にとどまらず反強磁性体も研究対象に含めて研究を推進した。

## 4. 研究成果

研究項目①に関しては、最初非線形効果は弱い強磁性体である Pd-Ni 合金のキュリー温度近傍のスピン揺らぎと相関をもって観測されたことから、CuMn スピングラス合金に内在するスピン揺らぎに着目し、Bi との三元合金のスピンホール効果を測定した。その結果、スピングラス温度より十分高い温度では Cu-Bi 合金と同じ強度のスピンホール効果が観測されること、スピングラス状態の出現により大きくスピンホール効果が抑制されることが明らかとなった[1]。この現象の発見を契機として、スピン揺らぎをスピンホール効果増強に応用する実験試みが世界的になされている。発展研究として非線形効果が発現する候補物質として強いスピン軌道相互作用を有する Nb や NbN 等の超伝導体に着目し、準粒子を媒介とするスピンホール効果を調べたところ、図2に示すように、スピンホール効果が常伝導状態と比べて 2000 倍以上

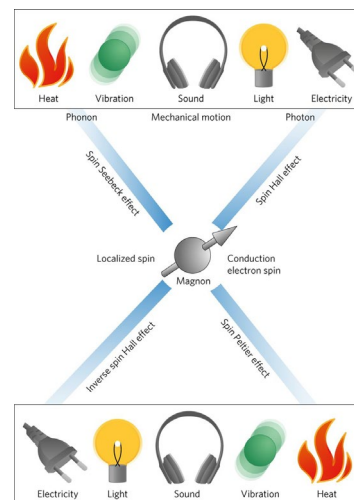


図1 ナノスピン変換科学の概念図  
引用文献1)より

に低温で増強することを発見した。この効果の起源が準粒子状態におけるスピン緩和時間の増大に起因することをA05班の理論グループとの共同研究より明らかにした[2]。

半導体/金属接合を用いた非局所スピン注入実験において、スピン蓄積信号のバイアス電圧依存性に非線形な変化を観測し、それがフェルミ準位近傍の状態密度の変化に起因することを実験的に検証することに成功し、この現象を説明する理論を構築した<sup>2)</sup>。一方で、酸化物  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  と非磁性金属界面においてスピン軌道相互作用を通じてラッシュバースピン分裂が生じ、それによるスピン・電流相互変換現象（エデルシュタイン効果）が生じることを実験的に明らかにした。さらに、この実験を他の非磁性金属と  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  の界面に発展させ、公募班の第一原理計算との詳細な比較から界面における仕事関数の差が小さいほど大きなラッシュバースピン分裂を示すこと、電荷移動によってその符号が決定されることを明らかにした。

また、同様の実験手法をトポロジカル絶縁体の表面状態に応用し、フェルミ準位依存性を系統的に調べることで、52%におよぶ大きなスピン・電荷変換効率を実現することに成功した[3]。

その他、項目②の電場による効果に関しても一連の成果を得た。具体的には、高抵抗磁気トンネル接合素子を用いて電場による世界最小の磁化反転エネルギー（6.3 fJ/bit）を達成したことである[4]。その他、研究が活発化しているフェリ磁性体  $\text{GdFeCo}$  合金を用いた磁壁移動速度の詳細な測定より、角運動量補償温度では磁壁形状の不安定性を起源とする Walker breakdown が生じないことから磁壁移動速度が劇的に増大することを見だし、この効果が角運動量補償温度での反強磁性的スピンドायナミクスに由来することを明らかにした[5]。この仕事は、その後の反強磁性スピントロニクス研究を活発化させたことは間違いない。

新しい研究の展開として特筆すべきことを次に纏める。公募班が、上述のような2次元表面や界面状態を利用したスピン・電流変換だけではなく、3次元のキラル半導体であるテルル単結晶における電流誘起磁化を、磁気光学カー効果の測定を通じて検出することに成功した。この結果は、キラル系における Weyl 型のスピン分裂を介して、新しい選択則のスピン・電流変換を実現できていることを示した[6]。

新物質である非共線 Weyl 反強磁性体である  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  を用いたスピン変換実験から、従来のスピンホール効果とは質的に全く異なる磁気スピンホール効果を発見した。図3に示すようにこの現象は反強磁性スピン配列の作る磁気八極子が強的な秩序を有し、印加磁場によるスピン反転に伴ってスピンホール効果の符号を変えるだけでなく、試料表面に対し立ち上がったスピン蓄積が生じる。これらの特異なスピンホール効果の発現機構を海外活動支援班の枠組みを利用して、テキサス大学オースチン校のマクドナルド教授グループとの共同研究から理論的にも明らかにした[7]。

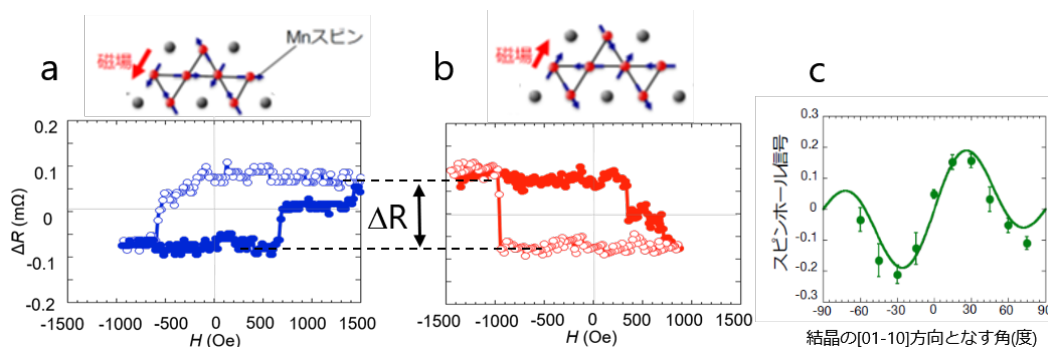


図3 新しく発見された磁気スピンホール効果によるスピン蓄積信号とその磁場及び磁化方向依存性[1] a 観測されたスピン蓄積信号。 b 逆方向への外部磁場印加により、Mnのスピン方向を反転させた場合のスピン蓄積信号。このときヒステリシスの反転が観測された。 c スピンホール信号の磁場角度依存性。

#### 引用文献

- 1) Y. Otani, M. Shiraishi, A. Oiwa, E. Saitoh, and S. Murakami, "Spin conversion on the nanoscale", Nature Physics 13, 829-832, 2017.
- 2) A. Spiesser, H. Saito, Y. Fujita, S. Yamada, K. Hamaya, S. Yuasa and R. Jansen, "Giant spin accumulation in silicon nonlocal spin-transport devices", Phys. Rev. Appl. 8, 064023, 2017.

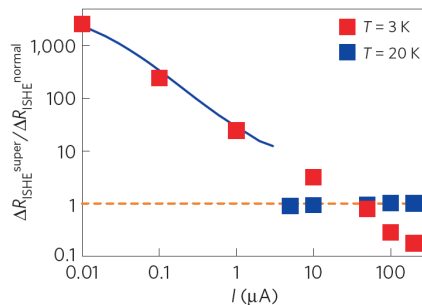


図2 窒化ニオブ(NbN)のスピンホール効果の超伝導状態と常伝導状態の比較。超伝導状態の3 Kでは、印加電流を減少させるとスピンホール効果が常伝導状態に比べて約2000倍に増大する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 157 件)

- [1] M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P-K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, A-H. MacDonald, S. Nakatsuji and Y. Otani, "Magnetic and magnetic inverse spin Hall effects in a non-collinear antiferromagnet", Nature 565, 627-630, 2019.
- [2] T. Nomura, X.-X. Zhang, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, Y. Tokura, N. Nagaosa, S. Seki, "Phonon Magnetochiral Effect", Phys. Rev. Lett., 査読有, 122, 145901-1~4, 2019.
- [3] K.-J. Kim, S. K. Kim, Y. Hirata, S.-H. Oh, T. Tono, D.-H. Kim, T. Okuno, W. S. Ham, S. Kim, G. Go, Y. Tserkovnyak, A. Tsukamoto, T. Moriyama, K.-J. Lee, T. Ono, "Fast Domain Wall Motion in the Vicinity of the Angular Momentum Compensation Temperature of Ferrimagnets" Nature Materials, 査読有, 16, 1187-1192, 2017.
- [4] S. Kanai, F. Matsukura and H. Ohno, "Electric-field-induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with high junction resistance", Applied Physics Letters, 査読有, 108, 192406-1~3, 2016.
- [5] K. Kondou, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Fukuma, J. Matsuno, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura, and Y. Otani, "Fermi-level-dependent charge-to-spin current conversion by Dirac surface states of topological insulators", Nature Physics, 査読有, 12, 1027-1031, 2016
- [6] T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa, and Y. Otani, "Quasiparticle-mediated spin Hall effect in a superconductor", Nature Materials, 査読有, 14, 675-678 2015.
- [7] Y. Niimi, M. Kimata, Y. Omori, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, A. Fert, and Y. Otani, "Strong Suppression of the Spin Hall Effect in the Spin Glass State", Physical Review Letters, 査読有, 115, 196602-1~5, 2015.

〔学会発表〕(計 669 件)

- [1] Y. Otani, "Novel functions observed in a topological antiferromagnet Mn<sub>3</sub>Sn", (招待講演) 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, January 2019.
- [2] K. Kondou and Y. Otani, "Efficient charge-spin conversion using surface state", (招待講演), XXVII International Materials Research Congress, Cancun, Mexico, August 2018.
- [3] Y. Otani, "Spin currents and spin conversion phenomena", (基調講演), 10<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials and Devices(ICAMD 2017), Jeju, Korea, December 2017.
- [4] Y. Niimi "Spin current as a probe to detect spin dynamics" Collaborative Conference on Spin Dynamics, (招待講演), Jeju, Korea, May 2017
- [5] S. Kanai, Y. Nakatani, H. Sato, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric field control of magnetism and magnetization switching in CoFeB-MgO", (招待講演) 13th Joint MMM-Intermag Conference, San Diego, US, 11-15 January 2016.

〔その他〕

ホームページ等

ナノスピコン変換科学 : <http://www.spinconversion.jp/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 : 新見 康洋

ローマ字氏名 : NIIMI, Yasuhiro

所属研究機関名 : 大阪大学

部局名 : 理学研究科

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 00574617

研究分担者氏名：Jansen Ronald

ローマ字氏名：JANSEN, Ronald

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域

職名：主席研究員

研究者番号（8桁）：40600250

研究分担者氏名：松倉 文礼

ローマ字氏名：MATSUKURA, Fumihiro

所属研究機関名：東北大学

部局名：国際集積エレクトロニクス研究開発センター

職名：教授

研究者番号（8桁）：50261574

研究分担者氏名：木村 崇

ローマ字氏名：KIMURA, Takashi

所属研究機関名：九州大学

部局名：理学研究院

職名：教授

研究者番号（8桁）：80360535

## (2)研究協力者

研究協力者氏名：小野 輝男

ローマ字氏名：ONO, Teruo

※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。