

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年2月18日現在

スピンホールナノエレクトロニクス  
Spin Hall Nanoelectronics

課題番号：26220604

安藤 和也（ANDO KAZUYA）

慶應義塾大学・理工学部・准教授



研究の概要

本研究は、スピン流と磁化ダイナミクスの相関現象を用いることで、物質中の相対論的效果によって現れるスピン流－電流変換「スピンホール効果」を基軸とする電子物理・技術「スピンホールナノエレクトロニクス」を開拓し、既存原理では到達困難な次世代省エネルギー電子技術に貢献する。

研究分野：応用物性

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

ナノ領域における電子物性にはスピン自由度が顕著に表れ、電子のスピン・電荷が素励起と共に織り成す多彩な物理現象が発現する。物質中の電子スピンの流れ「スピン流」物理の体系化はスピン物性及び電子スピンを用いた電子技術における本質的課題であり、この実現に必須となる汎用的スピン流生成手法の確立が希求されてきた。このような中、代表者らは、スピン流と磁化ダイナミクスの相関現象により発現する動的スピン流生成現象が、あらゆる物質への巨大スピン流注入を実現することを明らかにした。これにより極めて広範囲の物質群・環境における電流－スピン流変換現象の系統的測定が可能となり、スピン伝導に関する新現象の発見とスピン物性の解明が相次ぐこととなった。

2. 研究の目的

本研究の狙いは、スピン流と磁化ダイナミクスの相関現象を用いることで、物質中の相対論的效果によって現れるスピン流－電流変換「スピンホール効果」を基軸とする電子物理・技術を開拓し、新時代のエレクトロニクスの物理基盤を構築することにある。

巨大磁気抵抗効果の発見を契機に長足の進歩を遂げたスピントロニクスは、電子スピン及びスピン流の制御により、電荷自由度をベースとする現代のエレクトロニクス機能を凌駕する次世代電子技術への道を拓くものである。本研究は、スピン軌道相互作用により発現するスピン流－電流相互変換現象を用いたスピン流物性開拓により、これまで

のスピントロニクスでは実現困難であったスピン流生成・変換の体系的物理構築を目指す。スピン流生成・変換はあらゆるスピンの電子技術の基盤であり、本研究遂行により新原理の電子技術「スピンホールナノエレクトロニクス」を開拓し、既存原理の延長線上にはない次世代省エネルギー電子技術に貢献する。

3. 研究の方法

スピン軌道相互作用を基軸とした新原理の電子技術構築に必要な本質的要素は、金属・絶縁体を含むヘテロ構造におけるスピン流－電流変換の体系的理解と制御・増大手法の確立である。本研究は、スピン流・磁化の動的交換相互作用とスピン軌道相互作用によるスピン－電荷変換を組み合わせることで、空間対称性の低いヘテロ接合におけるバルク・界面・表面スピン伝導物性を開拓する。研究計画時からの変更点として、交換相互作用型スピン流の観測に向けた実験の優先順位を下げると同時に、導電性高分子中のスピン流－電流変換の定量的理解に向け、金属/磁性絶縁体接合におけるマグノンから伝導電子スピン流へのスピンキャリア変換測定を新たに加える。これにより絶縁体からのスピン流注入における非線形スピントロニクス効果の学理を構築し、ホッピング伝導系におけるスピンホール効果の理解へと繋げる。

4. これまでの成果

これまでに得られた主要な成果は以下の3点に集約される。

## 1. 金属/絶縁体界面におけるスピン変換

スピンホール効果を用いることで、金属/磁性絶縁体界面における伝導電子-マグノン間のスピンキャリア変換を非線形領域まで含め系統的に測定することが可能となる。本研究では、スピン流検出の時間分解測定手法を確立し、磁性絶縁体からのスピン流生成におけるマグノン相互作用及びマグノン寿命の重要性を明らかにした。これにより、非線形スピン流生成現象の体系的知見が得られ、磁性絶縁体からのスピン流生成における統一的理解へ大きく前進した。

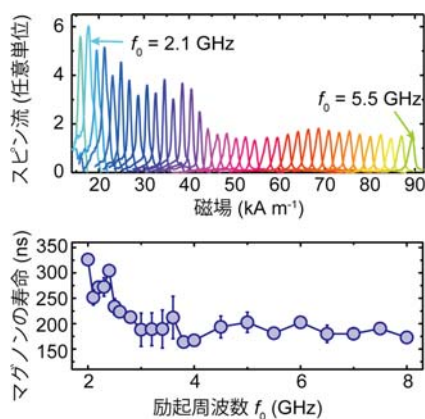


図 1. 非線形スピン流生成。

## 2. 界面スピン軌道相互作用効果

スピンホール効果は、物質バルクのスピン軌道相互作用に起因する電流-スピン流変換現象である。一方、バルクのみならず、電子構造が不連続となる金属表面或いは界面における Rashba スピン軌道相互作用の存在が、光電子分光により古くから明らかとなっていた。本研究は、巨大な Rashba スピン軌道相互作用を示す Ag/Bi 界面における電流-スピン流の相互変換を観測し、これを用いたスピントルク生成を初めて実現した。更に、本現象により駆動される新原理の磁気抵抗効果「Rashba-Edelstein magnetoresistance」を観測することに成功した。

## 3. スピン軌道トルク生成効率の劇的増大

スピンホール効果によりスピン流を効果的に生成するためには、Pt をはじめとするスピン軌道相互作用の強い貴金属が必須であるというのが常識であった。本研究では、金属の酸化というこれまでにないアプローチにより、スピン軌道相互作用が弱い物質においてもスピンホール効果が劇的に増強されることを明らかにし、自然酸化を制御した Cu が、Pt と並ぶスピン軌道トルク生成源となることを見出した。

## 5. 今後の計画

スピンホール効果を用いたスピン伝導物

性に関するこれまでの研究により、非線形スピン流生成の体系的理解が得られるとともに、界面及びバルクスピン軌道相互作用により発現する新現象が発見されるなど、当初の予想を上回る成果が得られている。今後、スピンキャリア変換の体系的理解を用いたホッピング伝導系におけるスピンホール効果の解析に加え、界面スピン変換現象の制御原理開拓と酸化によるスピン軌道トルク効率増大現象の微視的メカニズム解明を目指す。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] H. An, Y. Kageyama, Y. Kanno, N. Enishi, and K. Ando, "Spin-torque generator engineered by natural oxidation of Cu," *Nature Commun.* **7**, 13069 (2016).
- [2] H. Nakayama, Y. Kanno, H. An, T. Tashiro, S. Haku, A. Nomura, and K. Ando, "Rashba-Edelstein Magnetoresistance in Metallic Heterostructures," *Phys. Rev. Lett.* **117**, 116602 (2016).
- [3] H. An, H. Nakayama, Y. Kanno, A. Nomura, S. Haku, and K. Ando, "Spin-orbit torques in asymmetric Pt/Co/Pt structures," *Phys. Rev. B* **94**, 214417 (2016).
- [4] M. Fukami, Y. Tateno, K. Sekiguchi, and K. Ando, "Wave-vector-dependent spin pumping as a probe of exchange-coupled magnons," *Phys. Rev. B* **93**, 184429 (2016).
- [5] Y. Tateno, M. Fukami, T. Tashiro, and K. Ando, "Time-resolved spectroscopy of spin-current emission from magnetic insulator," *Phys. Rev. B* **93**, 174423 (2016).
- [6] T. Tashiro, S. Matsuura, A. Nomura, S. Watanabe, K. Kang, H. Sirringhaus, and K. Ando, "Spin-current emission governed by nonlinear spin dynamics," *Scientific Rep.* **5**, 15158 (2015).
- [7] A. Nomura, T. Tashiro, H. Nakayama, and K. Ando, "Temperature dependence of inverse Rashba-Edelstein effect at metallic interface," *Appl. Phys. Lett.* **106**, 212403 (2015).
- [8] H. Sakimura, T. Tashiro, and K. Ando, "Nonlinear spin-current enhancement enabled by spin-damping tuning," *Nature Commun.* **5**, 5730 (2014).

ホームページ等

<http://www.ando.appi.keio.ac.jp>