



丸文研究奨励賞 受賞者

安藤 和也
慶應義塾大学 理工学部
准教授

金属・絶縁体ヘテロ接合を用いた 絶縁体スピンドロニクス源の開拓

スピンドロニクスに基づくスピントロニクスの新展開

研究の背景

電子の電荷と電流だけでは実現困難なデバイス機能創出の指導原理として、電子スピンとスピンドロニクスに基づくスピントロニクスがある。1988年の巨大磁気抵抗効果の発見以来、長足の進歩を遂げてきたスピントロニクスは、2000年代のスピントロニクス効果の予言・観測によって新たな展開を迎えた。スピントロニクス効果とその逆効果を用いることで、スピンドロニクス相互作用を介して電流とスピンドロニクスを相互に変換することが可能となり、スピンドロニクス相互作用を基盤とした新原理のスピンドロニクスデバイス構築とスピンドロニクスによって発現する新現象・新機能発現への道が拓けたのである。

電荷の流れである電流と異なり、電子スピンの流れであるスピンドロニクスは、金属・半導体中のみならず絶縁体中さえ伝導する。また、スピンドロニクスは、角運動量の交換によってナノ領域の磁気構造・ダイナミクスと相互作用し、多様な物性を発現させる。このため、広範囲の物質群にわたるスピンドロニクス物性の体系的な理解が求められてきた。このような背

景の下、本研究では、金属・絶縁体ヘテロ接合におけるスピンドロニクス相互作用と磁気ダイナミクスに注目し、スピンドロニクス物理学の新領域開拓を目指した。

研究の成果

本研究により得られた主な成果は以下の3項目に集約される。

1. 磁化ダイナミクスを用いたスピンドロニクス生成手法の確立

磁性体を含むヘテロ構造において、磁化のダイナミクスが広範囲の物質・環境におけるスピンドロニクス生成を可能とすることを明らかにし、スピンドロニクス物性の系統的測定ルートを明らかにした(図1) [1]。また、本手法を用いることで、金属から導電性高分子に至るまでスピンドロニクス研究を展開し、半導体Si中のスピントロニクス効果観測、導電性高分子を用いたスピンドロニクス検出の実証とスピンドロニクス相互作用に支配されたポーラロニクススピンドロニクスの緩和機構解明など、広範囲の物質群におけるスピンドロニクス物性の理解へと繋がった [2, 3, 4]。この

一連の進展によってスピンドロニクス研究の舞台が大きく広がり、現在では本手法はスピンドロニクスの標準的研究手法として浸透している。

2. スピンドロニクス変換の制御原理開拓

スピンドロニクス素子における空間反転対称性の破れに注目し、スピンドロニクス変換の制御原理を開拓した。特に、スピンドロニクス素子の酸化というこれまでにないアプローチによって、電流からスピンドロニクスへの変換効率が劇的な増大を示す現象を見出し、自然酸化したCuが、スピンドロニクスで最も広く用いられてきたPtに匹敵するスピンドロニクス源となることを明らかにした(図2) [5]。これを契機に、金属酸化物に注目したスピンドロニクス変換に関する研究を展開し、トポロジカル絶縁体に匹敵する高いスピンドロニクス変換効率を示す電圧制御可能な絶縁体スピンドロニクス源を実現した(図3) [6]。また、この界面スピンドロニクス変換の精密測定によって、絶縁体スピンドロニクス源によるスピンドロニクス生成の起源はヘテロ界面のベリー曲率にあることを見出し [7]、このような界面スピンドロニクス相互作用により駆動さ

図1 磁化ダイナミクスによるスピンドロニクス生成の模式図と測定結果の例

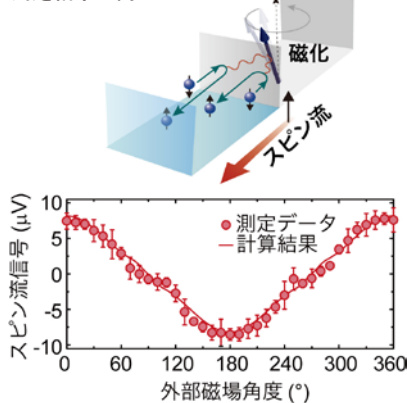
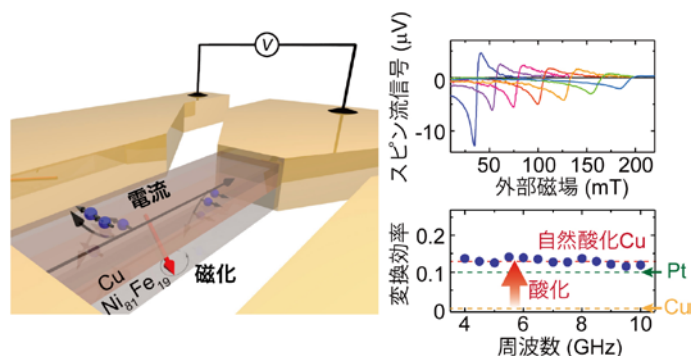


図2 スピンドロニクス強磁性共鳴を用いたスピンドロニクス測定の方法と測定結果の例



れるスピン流素子の性能最大化には、ヘテロ界面における電子波動関数の非対称性の精密制御が本質的であることを明らかにした[8]。

3. スピン流変換を用いたスピントロニクス現象の開拓

スピン軌道相互作用によるスピン流変換をプローブとして用いることで、新たなスピントロニクス現象の開拓も可能となる。本研究では、ラッシュバ電子系と磁化の非局所結合に起因する新たな磁気抵抗効果を見出し、これをラッシュバ・エデルシュタイン磁気抵抗効果と名付けた[9]。さらに、この新原理の磁気抵抗効果を用いることで、スピントロニクス素子への自己組織化有機単分子膜の形成によるスピン流変換の分子・光制御を実現した(図4)[10]。スピン軌道相互作用の制御性が高い半導体に対し、金属系におけるスピン流変換の制御は困難であると考えられてきた。この結果は、スピントロニクス現象における素子表面・界面の電子状態変調の重要性を示すものである。また、スピン流変換を用いることで、磁性絶縁体中で顕在化する非線形スピントロニクス現象にもアプローチし、時間領域測定によるスピン流増大現象機構の解明やフォノン・マグノン混成状態によるスピン流生成の観測に至った[11, 12]。これらは、固体中の電子・マグノン・フォノンの相互作用によって発現するスピントロニクス現象の体系的理解へと繋がること期待される。

将来の展望

スピン軌道相互作用が主役となるスピントロニクスに関する研究は近年著しく発展し、不揮発記憶素子、ナノスケールマイ

クロ波・テラヘルツ波源、スピン流を介した熱電素子やニューロモルフィック素子に至るまで、現代のエレクトロニクス原理では実現困難なデバイスの物理基盤となった。スピンホール効果の発見以来、スピン軌道相互作用によって現れるスピン流変換は10年以上にわたり膨大な研究が行われてきたが、現在でも新たな物理の発見が相次いでいる。今後の研究により、スピン軌道相互

作用を基軸としたスピン流の物理工学のさらなる発展が期待される。

謝辞

本研究は、多くの方々のご支援・ご協力のもとに行われたものです。学生時代よりご指導いただきました東京大学 齊藤英治教授をはじめ、国内外の共同研究者および学生の皆様に深く感謝申し上げます。

図3 電圧による酸素駆動を用いた絶縁体スピン流源制御の模式図と測定結果の例

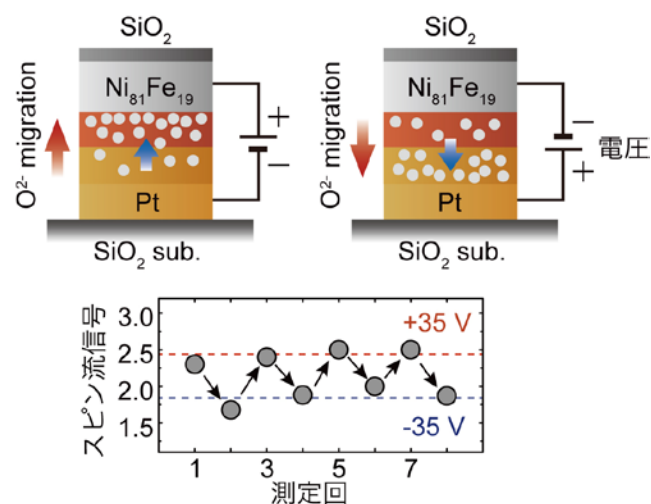
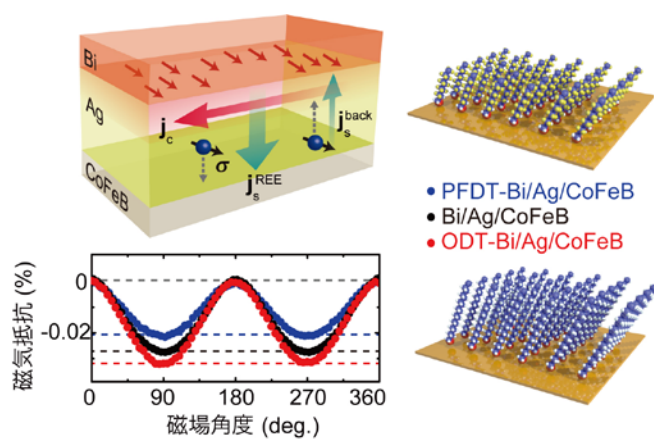


図4 ラッシュバ・エデルシュタイン磁気抵抗効果の模式図と自己組織化有機単分子膜を形成した試料における測定結果の例



References(参考文献)

- [1] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, S. Maekawa, and E. Saitoh, Nature Materials 10, 655 (2011).
- [2] K. Ando and E. Saitoh, Nature Communications 3, 629 (2012).
- [3] K. Ando, S. Watanabe, S. Mooser, E. Saitoh, and H. Sirringhaus, Nature Materials 12, 622 (2013).
- [4] S. Watanabe, K. Ando, K. Kang, S. Mooser, Y. Vaynzof, H. Kurebayashi, E. Saitoh, and H. Sirringhaus Nature Physics 10, 308 (2014).
- [5] H. An, Y. Kageyama, Y. Kanno, N. Enishi, and K. Ando, Nature Communications 7, 13069 (2016).
- [6] H. An, T. Ohno, Y. Kanno, Y. Kageyama, Y. Monnai, H. Maki, J. Shi, and K. Ando, Science Advances 4, eaar2250 (2018).
- [7] T. Gao, A. Qaiumzadeh, H. An, A. Musha, Y. Kageyama, J. Shi, and K. Ando, Physical Review Letters 121, 017202 (2018).
- [8] Y. Kageyama, Y. Tazaki, H. An, T. Harumoto, T. Gao, J. Shi, and K. Ando, Science Advances 5, eaax4278 (2019).
- [9] H. Nakayama, Y. Kanno, H. An, T. Tashiro, S. Haku, A. Nomura, and K. Ando, Physical Review Letters 117, 116602 (2016).
- [10] H. Nakayama, T. Yamamoto, H. An, K. Tsuda, Y. Einaga, and K. Ando, Science Advances 4, eaar3899 (2018).
- [11] H. Sakimura, T. Tashiro, and K. Ando, Nature Communications 5, 5730 (2014).
- [12] H. Hayashi and K. Ando, Physical Review Letters 121, 237202 (2018).