

金属酸化物スピン軌道エレクトロニクスの開拓

研究代表者

安藤 和也 慶応義塾大学理工学部 准教授



1. 研究の背景と達成目標

巨大磁気抵抗効果の発見を契機に、スピン流を基軸とするスピントロニクスが長足の進歩を遂げた。電子スピンの流れであるスピン流は、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、電荷自由度だけでは実現困難なデバイス機能創出を可能とする。このようなスピン流デバイスの基盤となるのは、スピン軌道相互作用を介して実現される電流とスピン流の相互変換である。特に、強磁性体を含むヘテロ構造素子における電流からスピン流への変換は、スピン流から磁化への角運動量移行によりスピン軌道トルクと呼ばれる磁化に作用する電流誘起トルクを生み出し、自在な磁化制御を可能とする。この重要性から、スピン軌道トルクに関する膨大な研究がこれまでに行われてきたが、そのターゲットは強いスピン軌道相互作用が期待される重金属ヘテロ構造に集中していた。しかし、スピン軌道トルクの生成に重要となる固体素子におけるスピン軌道相互作用は、原子固有のスピン軌道相互作用のみならず、素子内の電子の空間分布と密接に関連する。このことは、強い原子スピン軌道相互作用に依らないスピン軌道トルク制御の可能性を示唆している。本研究は、スピントロニクス素子の酸化レベル制御という独自のアプローチによりスピン流変換・スピン軌道トルク生成の新領域を開拓し、スピン流変換のメカニズム解明、その変換効率向上の指針を明らかにするとともに、磁化制御素子応用への道を拓くことを目指した。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・金属酸化物によるスピン軌道トルク生成のメカニズムを明らかにし、さらにトルク生成効率最大化における界面酸化レベルの精密制御の重要性を示した。これは、強磁性金属/金属酸化物ヘテロ界面におけるスピン軌道相互作用を中心としたスピントロニクスデバイス設計に重要な指針を与えるものである。
- ・強磁性金属/金属酸化物ヘテロ素子において、界面スピン軌道相互作用に起因するスピン軌道トルク・磁気異方性・ジャロシンスキー守谷相互作用の関係を明らかにした。この中で、界面スピン軌道相互作用に起因するこれらのパラメータを独立に制御可能な系が見いだされたことは、スピン軌道相互作用により安定化されるトポロジカルに非自明なスピン構造の制御に基づくデバイス構築に向けた重要な知見となる。
- ・自然酸化銅ではスピン流では説明困難な現象が発現していることを見出した。このことは、スピン軌道相互作用に依らないスピントロニクス素子構築への可能性を拓くものである。

3. 研究成果

本研究では、強磁性金属/金属酸化物ヘテロ構造における界面スピン軌道相互作用に注目し、これにより発現するスピン軌道トルクの系統的測定を行った。スピン軌道トルクの温度依存性測定から、 CuO_x では内因性

機構が支配的であることが明らかになった一方、PtO_xによるスピン軌道トルクは異なる温度依存性を示した。この結果を詳細に検討するため、強磁性金属/PtO_x構造における異常ホール効果を調べた結果、界面における外因性機構の寄与が観測された。さらに、強磁性金属/金属酸化物界面におけるスピン軌道相互作用の効果をも明らかにするため、スピン軌道トルクと同じく界面スピン軌道相互作用に起因する磁気異方性及びジャロシンスキー守谷相互作用を定量した。この結果、微視的メカニズムが異なるのにも関わらず、ヘテロ界面における磁気異方性とスピン軌道トルクは強磁性原子と酸素原子の結合が現れる同一の酸化レベルで最大化することを見出した(図1)。一方、Ni₈₁Fe₁₉/PtO_xにおいて定量に成功したジャロシンスキー守谷相互作用は、Ptの酸化レベルにほとんど依存しないことが見出され、界面酸素の役割が他の現象と本質的に異なることが初めて明らかになった。

以上の結果は、強磁性金属/金属酸化物ヘテロ構造における界面スピン軌道相互作用に起因するスピン軌道トルク生成のメカニズムを明らかにしただけでなく、界面スピン軌道トルクの最大化指針を明らかにしたものである。さらに、自然酸化銅による電流誘起トルク生成は、スピン流では説明困難な現象であることを見出し、これを用いた磁化反転を実現した。

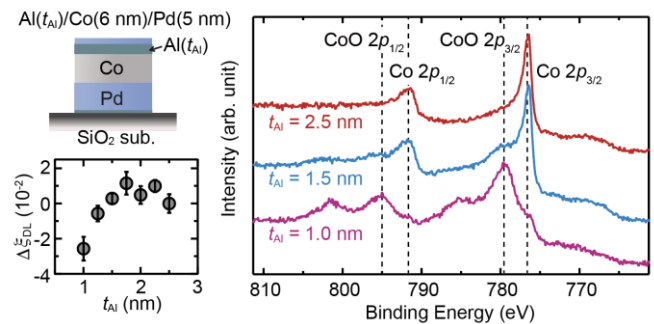


図1: 界面酸化レベルとスピン軌道トルク効率

4. 今後の展開

本研究により得られた成果は、近年発展著しいスピン軌道相互作用を中心としたスピントロニクスにおいて、素子の酸化レベル制御の重要性を明らかにしたものである。これは、金属酸化物を中心としたスピン流変換・スピン軌道生成に基づく不揮発性記憶素子、スピン流を介した熱電効果やスピン波デバイス、スピン光素子といった展開を期待させるものであり、強い原子スピン軌道相互作用を示す重金属を中心として発展してきたスピントロニクスの新たな方向性を拓くものである。

5. 発表実績

- [1] A. Musha, N. Soya, T. Gao, T. Harumoto, and K. Ando, "Tunable spin-orbit torques and perpendicular magnetic anisotropy at oxidized Al/Co interfaces," *Appl. Phys. Lett.* **118**, 052410 (2021).
- [2] S. Haku, M. Akira, T. Gao, and K. Ando, "Role of interfacial oxidation in the generation of spin-orbit torques," *Phys. Rev. B* **102**, 024405 (2020).
- [3] Z. Chen, C. Pan, N. Wang, M. Qiu, T. Lin, J. Liu, S. Li, P. Han, J. Shi, K. Ando, and H. An, "Manipulation of perpendicular exchange bias and spin-orbit torques via MgO in Pt/Co/MgO films," *J. Magn. Mater.* **507**, 166822 (2020).
- [4] H. Hayashi, A. Asami, and K. Ando, "Anomalous Hall effect at PtO_x/Co interface," *Phys. Rev. B* **100**, 214415 (2019).
- [5] Y. Kageyama, Y. Tazaki, H. An, T. Harumoto, T. Gao, J. Shi, and K. Ando, "Spin-orbit torque manipulated by fine tuning of oxygen-induced orbital hybridization," *Sci. Adv.* **5**, eaax4278 (2019).
- [6] (招待講演) 安藤和也, "スピントロニクス素子における電流誘起トルク," 第76回日本物理学会年次大会シンポジウム「スピントロニクスによる古典情報と量子情報科学技術の融合」, 2021年3月12日, オンライン.