

空間反転対称性の破れた固体素子におけるスピン流量子物性

KiPAS 主任研究員 安藤和也（物理情報工学科）

【研究の概要】

電荷と電流に基づく現代のエレクトロニクスに対し、電子スピンとスピン流を中心とした凝縮系物理・材料科学・デバイス工学の複合領域としてスピントロニクスがある。スピントロニクスは、スピン流の自在な制御、電子スピンと電荷・光・熱などの他自由度との相互作用に起因する量子現象の創発により、電荷自由度のみでは実現困難なデバイス機能創出を可能とする。本研究は、電荷とスピンの結合が顕在化する空間反転対称性の破れた固体素子におけるスピン流量子物性を開拓し、スピントロニクスの新たな展開を目指すものである。

1) 2023 年度の研究活動内容

A. スピンホール効果によるスピン流・スピン軌道トルクの生成

スピン流は非保存量であり、典型的には数ナノから数百ナノメートル程度で緩和する。スピン流の緩和機構の理解はスピン流の物理・スピントロニクスの基盤であり、これまで蓄積されてきた膨大な実験データから、強磁性体のスピン緩和は spin dephasing 機構に支配されていると考えられてきた。このような中、2023 年度の研究により、強磁性体中のスピンホール効果は、スピン流のスピン偏極と磁化の相対角に依存せず等方的であることを見出した[1]。これは強磁性体中のスピンホール効果が生成するスピン流には spin dephasing 機構が作用しないことを実験的に初めて明らかにしたものであり、スピン流の基本的理解に重要な情報を与えるものである。

スピンホール効果は、上記のようにスピン流物性開拓の重要な現象であるだけでなく、これが生み出すスピン軌道トルクを介した電氣的磁化制御は不揮発記憶素子やマイクロ波発振素子といったスピントロニクス素子の基盤となっている。巨大なスピンホール効果を示す物質群の一つに Bi 系半金属があり、これを強磁性金属と接合することで基本的なスピントロニクス素子となる。このような異種物質の接合界面では、界面近傍におけるキャリア移動によってエネルギー障壁が自発的に形成されるが、スピン軌道トルク生成におけるこの役割は明らかでなかった。2023 年度の研究では、半金属 $\text{Bi}_{0.1}\text{Sb}_{0.9}$ /強磁性金属接合におけるスピン軌道トルク生成は自発的に形成された界面障壁が支配しており、仕事関数に注目した界面エンジニアリングによってスピン軌道トルクの生成効率を一桁程度向上でき、Bi 系半金属がスピントロニクスで最も広く用いられている Pt を超えるスピン軌道トルク源となることを明らかにした[2]。

B. 軌道流物性の開拓

スピン角運動量の流れ「スピン流」の物性開拓は、スピントロニクスの中心である。一方、物質中の電子が持つもう一つの角運動量である軌道角運動量の流れ「軌道流」の重要性は認識されていながら、この存在を示す実験的証拠はなかった。2020 年度の研究において軌道流の存在を示唆する結果を得たことを契機としてスピン流と軌道流を包括する角運動量流の物性開拓を進め、これまでに軌道ラシユバ効果・軌道ホール効果に起因する軌道トルクを見出し、強磁性体における軌道流の長距離伝導を観測することに成功している。

2023 年度は、軌道流が主役となる新現象として、「軌道ポンピング」の観測に成功した[3]。軌道ポンピングは磁化のダイナミクスが軌道流を生成する現象であり、軌道流が磁化のダイナミクスを駆動

する軌道トルクの逆効果である。また、軌道流生成現象である軌道ホール効果と軌道流・磁化の相互作用に起因して素子抵抗が変化する「軌道ホール磁気抵抗効果」も見出した[4]。さらに、海外グループと共同で超短パルスレーザー励起による軌道流の生成及び軌道流から電流への変換を時間領域で測定することに成功し、「逆軌道ラッシュバエデルシュタイン効果」を観測するに至った[5]。スピンホール効果の発見以来、20年近くのスピン트로ニクス研究によって、スピン流が誘起する多彩な現象が次々と明らかになってきた。これらのスピン流誘起現象には軌道流対応物が存在することが期待され、今回の結果はこれら新現象群開拓の契機となるものである。

2023年度は、軌道流のデバイス応用においても重要な成果が得られた。スピンホール効果によるスピン軌道トルクは、強磁性金属だけでなく磁性絶縁体の磁化の電氣的制御さえ可能にすることが知られている。典型的な素子は $\text{Pt/Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ であり、Pt のスピンホール効果はフェリ磁性絶縁体 $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の垂直磁化の電氣的制御を可能にする。今年度の研究により、軌道ホール効果を示す Ta を組み込んだ Ta/Pt/Tm₃Fe₅O₁₂ 構造において、Ta の軌道ホール効果と Pt 中のスピン軌道相互作用による軌道-スピン変換により、電流誘起トルクの生成効率がスピン流のみを用いた場合と比較して一桁向上し、磁化反転に必要な電流密度が一桁減少することを明らかにした[6]。これは現在知られている中で最も高効率な絶縁体磁化の電氣的制御を実現したものである。また、軌道流が強磁性体中を長距離伝導することに注目し、強磁性体を介した非局所磁化制御を実現した[7]。これは、スピン流では実現不可能な軌道流特有の機能の一つ明らかにしたものである。

2) 研究成果・業績 下記他 5 編

- [1] N. Soya, M. Yamada, K. Hamaya, and **K. Ando**, "The isotropic spin Hall effect in an epitaxial ferromagnet," **Physical Review Letters** **131**, 076702 (2023).
- [2] T. Gao, A. Qaiumzadeh, R. E. Troncoso, S. Haku, H. An, H. Nakayama, Y. Tazaki, S. Zhang, R. Tu, A. Asami, A. Brataas, and **K. Ando**, "Impact of inherent energy barrier on spin-orbit torques in magnetic-metal/semimetal heterojunctions," **Nature Communications** **14**, 5187 (2023).
- [3] H. Hayashi, D. Go, S. Haku, Y. Mokrousov, and **K. Ando**, "Observation of orbital pumping," **Nature Electronics** (in press).
- [4] H. Hayashi and **K. Ando**, "Orbital Hall Magnetoresistance in Ni/Ti bilayers," **Applied Physics Letters** **123**, 172401 (2023). [Selected as a Featured Article]
- [5] T. S. Seifert, D. Go, H. Hayashi, R. Rouzegar, F. Freimuth, **K. Ando**, Y. Mokrousov, T. Kampfrath, "Time-domain observation of ballistic orbital-angular-momentum currents with giant relaxation length in tungsten," **Nature Nanotechnology** **18**, 1132 (2023).
- [6] T. Li, L. Liu, X. Li, X. Zhao, H. An, and **K. Ando**, "Giant orbital-to-spin conversion for efficient current-induced magnetization switching of ferrimagnetic insulator," **Nano Letters** **23**, 7174 (2023).
- [7] M. Taniguchi, H. Hayashi, N. Soya, and **K. Ando**, "Nonlocal orbital torques in magnetic multilayers," **Applied Physics Express** **16**, 043001 (2023).

3) 今後の計画

これまでの研究により、その存在と基本的性質が明らかになってきた軌道流に関する研究を最も重要なテーマと位置づけ、軌道流の基礎物性に関する実験と軌道流が誘起する新現象開拓を継続する。特に、電子の軌道自由度は結晶場を介して格子と強く結びつくことから格子ダイナミクスと軌道流の強い相互作用が期待され、これによる軌道流の生成現象の観測を目指す。