

実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新
2019 年度採択研究代表者

2020 年度 年次報告書

能崎 幸雄

慶應義塾大学 理工学部
教授

ナノ構造制御と計算科学を融合した傾斜材料開発とスピンドバイス応用

§ 1. 研究成果の概要

本研究では、量子多体系におけるマルチスケール角運動量変換を活用し、電流渦から磁気の流れ(スピン流)を生み出すことのできる傾斜材料(電気伝導率をナノメートルスケールで傾斜変調させた非磁性材料)を開発する。スピン輸送と非慣性系の非平衡ダイナミクスが絡む量子多体問題であり、磁気・弾性・スピン輸送・電荷輸送・熱輸送のバルク特性とその非線形効果、これらの界面効果も密接に絡みあう。これらを微視的理論だけで決定することは困難であり、複雑な多体系、多様な物質系に対して系統的に物理現象を俯瞰する実験との相補的研究が不可欠である。

そこで本年度は、弾性体表面を伝搬する音波に含まれる局所的な格子回転から生み出されるスピン流を定量化し、音波の振幅や、周波数、媒体の電気伝導度やスピン軌道相互作用の強度に対する依存性を調べることにより、マルチスケール角運動量変換のメカニズム解明を目指した。まず、スピン軌道相互作用(SOI)の強い白金と弱い銅について、音波により生成されるスピン流を測定したところ、両者とも周波数の 3 乗に比例し、同一周波数ではスピン流強度が同程度であることが分かった。この結果は、格子回転と電子スピンのマルチスケール角運動量変換には、これまで結晶格子と電子スピンの結合に不可欠とされていた SOI が重要ではないことを示す。また、一般相対論的な効果として格子回転を取り入れた理論では、音波に含まれる格子回転の渦度とその時間微分がスピン流のソースとなり、前者由来のスピン流は周波数の 3 乗、後者は 4 乗に比例すると予想されていた。本実験結果は GHz オーダーの周波数域では格子回転の渦度がスピン流のソースになることを示しており、電流渦の渦度が時間変化しない傾斜材料でも傾斜幅をナノメートルスケールにまで狭小化することによりスピン流生成可能であることが確認された。

§ 2. 研究実施体制

(1) 能崎グループ

- ① 研究代表者: 能崎 幸雄 (慶應義塾大学 理工学部、教授)
- ② 研究項目
 1. 不均一スピン依存散乱効果を用いたスピン流生成の微視的機構解明
 2. 酸素・窒素反応性スパッタを用いた傾斜材料の作製
 3. 金属傾斜材料のスピン流生成とナノ構造・物質パラメータ依存性の解明
 4. 半導体傾斜材料を用いたスピン流生成とゲート制御

(2) 介川グループ

- ① 主たる共同研究者: 介川 裕章 (物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点、主幹研究員)
- ② 研究項目
 1. 膜構成・組成のナノスケール制御による傾斜材料の作製と技術移転
 - (1) 酸化・窒化による傾斜変調

- (2)異種物質の傾斜変調
- (3)固溶体エピタキシャル組成変調
- 2. 傾斜材料のナノ構造、スピン輸送特性の評価
- 3. 傾斜材料のスピン流を用いたナノ磁性体素子の作製とナノ磁性体磁化反転

(3)渡邊グループ

- ① 主たる共同研究者:渡邊 紳一 (慶應義塾大学 理工学部、教授)
- ② 研究項目
 - 1. 非一様スピン依存散乱の定量化に向けたレイリー波の光学的評価
 - 2. スピン流に由来するスピン蓄積信号の光検出法の開発
 - 3. 光を用いたキャリア変調によるスピン流の制御

(4)柚木グループ

- ① 主たる共同研究者:柚木 清司 (理化学研究所 開拓研究本部、主任研究員)
- ② 研究項目
 - 1. 非一様系のスピン流シミュレータの開発
 - 2. 第一原理計算による傾斜材料のナノ構造と電子状態の数値解析
 - 3. スピン流シミュレータによる傾斜材料のスピン流計算と網羅的材料探索

【代表的な原著論文情報】

- [1] Y. Kurimune, M. Matsuo, and Y. Nozaki, “Observation of gyromagnetic spinwave resonance in NiFe films”, *Phys. Rev. Lett.*, 124, 217205 (6 pages) (2020).
- [2] Y. Kurimune, M. Matsuo, S. Maekawa and Y. Nozaki, “Highly nonlinear frequency-dependent spin-wave resonance excited via spin-vorticity coupling”, *Phys. Rev. B*, 102, 174413 (7 pages) (2020).
- [3] S. Tateno, G. Okano, M. Matsuo, and Y. Nozaki, “Electrical evaluation of the alternating spin current generated via spin-vorticity coupling”, *Phys. Rev. B*, 102, 104406 (9 pages) (2020).
- [4] F Lange, S Ejima, T Shirakawa, S Yunoki, H Fehske, “Block-Lanczos density-matrix renormalization-group approach to spin transport in Heisenberg chains coupled to leads” *J. Phys. Soc. Jpn.* 89, 044601 (2020).
- [5] F Lange, S Ejima, J Fujimoto, T Shirakawa, H Fehske, S Yunoki, S. Maekawa, “Generation of current vortex by spin current in Rashba systems”, *Phys. Rev. Lett.* 126, 157202 (2021).