

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

2019年度 実績報告書

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

能崎チームは、電気伝導率をナノメートルスケールで空間的に傾斜変調させた非磁性材料(以下、傾斜材料という)を作製し、普遍的な物理法則である「角運動量保存則」を用いた全く新しい原理に基づき、「スピン流」と呼ばれる磁気の流れを生み出すことを目指す。これにより、スピン流を利用するすべてのスピントロニクスデバイスについて、従来の希少物質依存型材料開発からの根本的脱却を実現する。傾斜材料によるスピン流生成を実現するためには、固体中に含まれる回転運動(角運動量)がスピン流に変換される物理の解明が不可欠である。つまり、大きさや周波数が定義された回転運動によるスピン流生成実験が求められる。2019年度は、能崎チームがシーズ研究でスピン流生成を実証した金属結晶格子の局所回転運動について、その大きさ(1兆分の1メートル(ピコメートル)程度)と空間分布を電氣的に検出する実験を行った。さらに、原子層オーダーの成膜制御による傾斜材料の作製に向けた基礎実験、および傾斜材料のスピン流生成能力の実験的評価と計算機による予測に不可欠な理論モデルの検討を進めた。

今から約100年前に発見されたパーネット効果(磁石を回転させると磁気に変化する効果)と、結晶格子が1秒間に10億回以上回転しながら固体表面を伝搬する音波(レイリー波)を組み合わせることにより、磁気波(スピン波)の共振現象がNiFe合金薄膜に現れることを発見した(図1)。さらに、そのスピン波強度が、既知のNiFe合金の磁気特性と、結晶格子の回転の大きさ・周波数によって決定できることを明らかにし、6.3ピコメートルの局所回転運動によるスピン波が検出されたことを実験により確かめた。また、スピン波の伝搬を一方通行化する磁気弾性効果(格子ひずみが磁気を変化させる効果)が固体表面からの深さ方向で変化することに着目し、伝搬方向の反転によるスピン波振幅の変化から、半導体Siと強磁性体Niからなる複合膜を伝搬するレイリー波の縦ひずみとせん断ひずみ成分の深さ方向分布を実験により決定することに初めて成功した(図2)。これらの成果は、回転運動によるスピン流生成の物理を定量的に明らかにする上で極めて重要な結果である。一方、本研究で発見したスピン波の巨大な一方通行性(図2)や、磁気弾性効果を必要としないスピン波励起現象(図1)は、スピン波の伝搬と干渉を論理演算に利用するスピン波デバイスの性能向上に資する成果であり、基礎・応用の両面から今後の発展が期待できる。

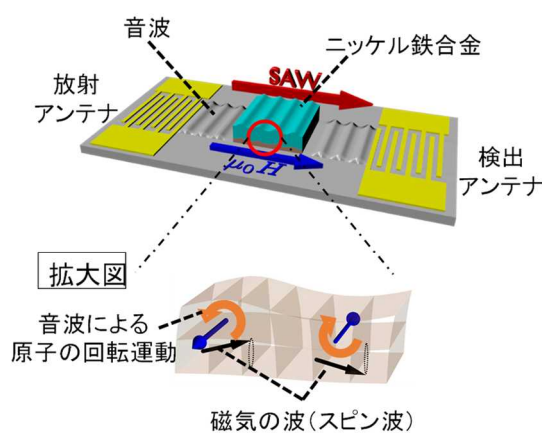


図1

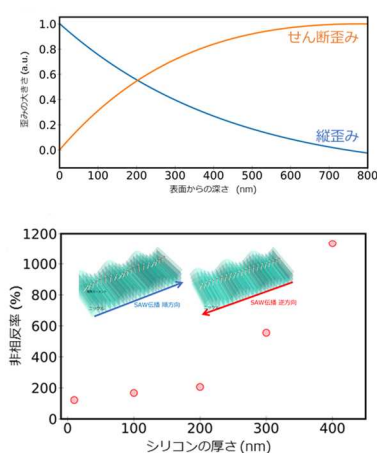


図2

【代表的な原著論文】

1. Shoma Tateno and Yukio Nozaki
"Highly nonreciprocal spin waves excited by magnetoelastic coupling in a Ni/Si bilayer"
Physical Review Applied, vol. 13, 034074 (5 pages), 2020.
2. Taisuke Horaguchi, Mamoru Matsuo, and Yukio Nozaki
"Highly Accurate Evaluation of Spin-torque Efficiency by Measuring In-plane Angular Dependence of Spin-torque Ferromagnetic Resonance"
Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 505, 166727 (5 pages), 2020.
3. Florian Lange, Satoshi Ejima, Tomonori Shirakawa, Seiji Yunoki, and Holger Fehske
"Block-Lanczos density-matrix renormalization-group approach to spin transport in Heisenberg chains coupled to leads"
Journal of the Physical Society of Japan, vol. 89, No. 4, 044601 (6 pages), 2020.

§ 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柚木計算物性物理研究室 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