

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分

平成30年5月22日現在

研究課題名（和文） **スピンオービトロニクスの学理構築と  
デバイス展開**  
研究課題名（英文） **Spin-orbitronics and device application**  
課題番号：15H05702  
研究代表者  
小野 輝男 (ONO TERUO)  
京都大学・化学研究所・教授



研究の概要：本研究の目的は、スピンと軌道の相互作用に基づく効果を積極的に利用して、新物質・新機能を創成するスピンオービトロニクスという分野を開拓し、革新的デバイスのイノベーションへ展開することである。

研究分野：総合理工

キーワード：スピンドバイス

#### 1. 研究開始当初の背景

ノーベル賞受賞となった巨大磁気抵抗効果の発見以降、スピンと電荷の2つの自由度を利用するスピントロニクスが急速に発展してきた。巨大磁気抵抗効果がハードディスクの読み取りヘッドに利用され、トンネル磁気抵抗効果を利用した不揮発性磁気メモリが開発されるなど、スピントロニクスは基礎現象の発見と理解がイノベーションに直結する魅力的な研究分野である。

研究代表者は、基盤研究(S)「新規スピンドイナミクスデバイスの研究」において、当初目的を達成するのみならず、以下の研究開始時には予期されなかった成果をあげることができた。

(1) スピンホールトルクによる磁壁駆動 (Appl. Phys. Exp. 7 (2014) 053006)

(2) 電界による磁性制御・磁壁移動制御 (Nature Mater. 10 (2011) 853; Nat. Commun. 3 (2012) 888)

(3) 磁気コア運動に伴うスピン起電力の検出 (Nat. Commun. 3 (2012) 845)

これらの現象の共通起源は「スピン軌道相互作用」であることを認識し、スピン軌道相互作用を利用してスピントロニクスに軌道という新たな自由度を加えることが可能なのではないかという着想に至った。

#### 2. 研究の目的

本研究の目的は、スピン軌道相互作用を利用してスピントロニクスに軌道という新たな自由度を加えることで、「スピンオービトロニクス」という新しい学理を構築し、革新的デバイスイノベーションへ展開することである。この目的達成のために、以下の研究項目を展

開する。

- (1) スピン軌道相互作用を利用した物質探索
- (2) 新規スピン操作

#### 3. 研究の方法

スピン軌道相互作用が増強される構造として、反転対称性のない原子単位の人工積層構造に着目して物質と物性の探索を行う。さらに、比較的単純な構造を対象とするため、第一原理計算による物性予測と実験による確認の両輪によって研究を推進する。

#### 4. これまでの成果

- (1) スピン軌道相互作用を利用した物質探索

Pt/Co系は巨大磁気異方性物質の候補でありPtに誘起される磁性の理解が重要である。電界によるPtの電子構造と磁性の変化が、フェルミ準位の変位および軌道混成の変化というミクロなメカニズムから生じていることを明らかにした (Phys. Rev. Lett. 120, 157203 (2018))。

強磁性金属の結晶性や接する非磁性金属の種類によって強磁性金属の磁気弾性効果が大きく変化することを示し、歪みセンサー応用を実証した (Nature Electron. 1, (2018) 124)。

巨大ジャロシンスキー守谷相互作用物質の探索のためには、そのミクロなメカニズムの理解が不可欠である。SPring8での放射光実験によって、Co/Pt系のジャロシンスキー守谷相互作用と軌道モーメントの異方性の間に強い相関があることを見出した。実験結果は第一原理計算によって説明可能で、第一原理計算による物質デザインの可能性が期待される (Nature Comm. 9 (2018) 1648)。

#### [ 4. これまでの成果 (続き) ]

Pt/Co/Pd 構造において、Pt と Pd 層の位置を逆転させることで、ジャロシンスキー守谷相互作用による有効磁界の符号が逆転していることも明らかにした (AIP advances. 7 (2017) 085123)。

ジャロシンスキー守谷相互作用によって磁壁移動がソリトンのようになることを明らかにし、さらに、磁壁の最高速度からジャロシンスキー守谷相互作用の大きさを定量的に評価することが可能であることを示した (Nature Physics 12, 157 (2016))。

Pt/Co 構造の Co 表面を自然酸化することで、スピン軌道トルクを数倍向上できることを示した (Appl. Phys. Lett. 111 (2017) 132404)。

スピン流生成機構の起源を調べるため、熱流-スピン流変換現象を調査した。その結果、理論的に予測されていたスピネルンスト効果の観測に成功した (Science Advances 3, e1701503 (2017))。熱流によって生成されるスピン流は、スピンホール効果を介して電流で生成されるスピン流とスピンの向きが逆であり、フェルミ面近傍の電子がどのようにスピン流生成に寄与するかを解明する手がかりを得た。

#### (2) 新規スピン操作

CoGa とフェリ磁性体 Mn<sub>2</sub>Ga の 2 層構造を調べた結果、スピン軌道トルクを利用することで低電流磁化反転を誘起できることがわかった (arXiv:1706.05846)。垂直磁気異方性が大きく、磁化が小さい Mn<sub>2</sub>Ga は低電流で磁化制御ができるだけでなく、強磁性共鳴周波数が大きいために THz 波デバイスにも応用できることが期待される。

磁区構造の電界変調現象を詳細に調査し、その起源が電界印加による交換相互作用作用の変調に由来することを明らかにした (Appl. Phys. Lett. 109, 022401 (2016))。さらに交換相互作用の電解変調の大きさから提案するデバイスにおける電界駆動磁壁移動の有効磁場の大きさを見積もった (Jpn. J. Appl. Phys. 56, 050305 (2017))。

また、電界により局所的な磁化反転を起こす機構として、磁壁移動が優位な場合と磁区の核生成が優位な場合で、電界効果による保磁力の変化の方向が異なることが明らかとなった (Phys. Rev. B 96 (2017) 224409)。

申請時に IrMn 合金で見いだされていた反強磁性体を介したスピン流伝搬を、FeMn や NiO などの他の反強磁性体においても確認し (Appl. Phys. Lett. 106, 162406 (2015))、反強磁性体を介したスピン流伝搬の理論構築を行った (Phys. Rev. B 92, 020409 (R) (2015))。さらに、この反強磁性体を介したスピン流伝搬が反強磁性体中のスピン構造に依

存することを見出した (Phys. Rev. Lett. 119, 267204 (2017))。

#### 5. 今後の計画

本研究は当初の目標に向けて順調に研究が進展している。フェリ磁性体の角運動量補償温度における反強磁性スピンドイナミクス (Nature Materials 16, 1187 (2017)) など、当初予定していなかった成果に関しても研究を推進し、スピノービトロニクスの学理を構築しデバイスへの展開を目指したい。

#### 6. これまでの発表論文

(1) S. Kim, K. Ueda, G. Go, P-H. Jang, K-J. Lee, A. Belabbes, A. Manchon, M. Suzuki, Y. Kotani, T. Nakamura, K. Nakamura, T. Koyama, D. Chiba, K. Yamada, D-H. Kim, T. Moriyama, K-J. Kim, T. Ono, "Correlation of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction with Heisenberg Exchange and Orbital Asphericity", Nature Communications 9, 1648 (2018).

(2) K. T. Yamada, M. Suzuki, A.-M. Pradipto, T. Koyama, S. Kim, K.-J. Kim, S. Ono, T. Taniguchi, H. Mizuno, F. Ando, K. Oda, H. Kakizakai, T. Moriyama, K. Nakamura, D. Chiba, and T. Ono, "Microscopic Investigation into the Electric Field Effect on Proximity-Induced Magnetism in Pt", Phys. Rev. Lett. 120, 157203 (2018).

(3) Kim, K.-J.; Kim, S. K.; Hirata, Y.; Oh, S.-H.; Tono, T.; Kim, D.-H.; Okuno, T.; Ham, W. S.; Kim, S.; Go, G.; Tserkovnyak, Y.; Tsukamoto, A.; Moriyama, T.; Lee, K.-J.; Ono, T., "Fast Domain Wall Motion in the Vicinity of the Angular Momentum Compensation Temperature of Ferrimagnets", Nature Materials 16, 1187 (2017).

(4) T. Moriyama, M. Kamiya, K. Oda, K. Tanaka, K-J. Kim, T. Ono, "Magnetic Moment Orientation-Dependent Spin Dissipation in Antiferromagnets", Phys. Rev. Lett. 119, 267204 (2017).

(5) Y. Yoshimura, K-J. Kim, T. Taniguchi, T. Tono, K. Ueda, R. Hiramatsu, T. Moriyama, K. Yamada, Y. Nakatani, T. Ono, "Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction", Nature Physics 12, 157 (2016).

(他 82 報)

ホームページ等

<http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~onoweb/>