

ノンコリニアスピントロニクス

Non-Collinear Spintronics

課題番号：19H05622

深見 俊輔（FUKAMI Shunsuke）

東北大学・電気通信研究所・教授



研究の概要

電子デバイス、情報処理の高性能化、超低消費電力化に革新をもたらすスピントロニクスにおいてこれまで開拓されていないノンコリニア（非共線的）な磁気構造の持つ機能性とその利用方法を明らかにする。カイラルスピン構造の電流駆動や、仮想磁場の機能性素子利用などに取り組み、不揮発性メモリ、脳型情報処理の新基盤を構築する。

研究分野：応用物性関連

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

電子の持つ電氣的性質と磁氣的性質を同時利用するスピントロニクスにより、磁性体の集団的磁気秩序の電氣的な制御が可能となる。これはここ約20年のスピントロニクス研究の中心的課題であり、新原理、新材料の導入により、新機能を有した素子の実現への道が拓かれてきた。例えば量子効果の一つであるs-d交換相互作用に由来するスピン移行トルクにより高効率での磁化反転が実現され、これはSTT-MRAMのコア技術として実用化が開始されている。

本研究課題の代表者、分担者は近年のこの分野の研究に従事し、磁気秩序の新しい電氣的制御手法に立脚した超高性能不揮発性メモリ、脳型情報処理の実現に向けた材料・素子研究を展開してきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、この領域でこれまで注目されてこなかったノンコリニア（非共線的）な磁気構造に着目し、その機能性と利用方法を明らかにすることを目指している。これまでこの分野ではコリニア（共線的）な磁気秩序が主な研究対象として扱われてきたが、ここに近年興味深い物性の発現が報告されているノンコリニアな磁気構造を導入することで新たなパラダイムが創成されると期待される。本研究課題ではそれを「ノンコリニアスピントロニクス」と名付け、代表者、分担者らがこれまで培ってきた知見とスキルを基礎に、この新領域を世界に先駆けて開拓するものである。

3. 研究の方法

本研究課題では、期間前半はコリニア系スピントロニクス材料・素子の発展的な測定を行い、従来パラダイムであるコリニアスピントロニクスの限界を極めるとともにノンコリニアスピントロニクスを開拓するための地図と道具を確立し、並行してノンコリニアスピントロニクスに向けた材料基盤技術を構築する。そして期間後半ではこれらを組み合わせ、ノンコリニアな磁気構造を有する様々なヘテロ構造を作製して多角的に評価し、従来パラダイムでは不可能な新現象の観測などを通して、スピントロニクスの新しい可能性を明らかにするという計画となっている。

4. これまでの成果

以下、これまでに得られている成果から、①従来のコリニアスピントロニクスの限界を極める研究、②ノンコリニアスピントロニクス開拓のための材料技術構築とその後の展開、③研究開始後に進展したノンコリニアとコリニアを横断する理論研究、の3つに分け、代表的な成果を紹介する。

① コリニアスピン素子の超高速動作

これまでの知見を駆使し、コリニア強磁性スピン素子の高速動作の限界を明らかにすることを目的とし、スピン移行トルク（STT）とスピン軌道トルク（SOT）を高度に融合した素子を開発し、その高速動作限界を調べた。あらゆるスピン素子で世界最速クラスとなる200 psでの磁化反転を無磁場・低電流で実現し、コリニアスピン素子の究極の高性能

動作の実現方針を明らかにした。また数値計算との比較から、この 200ps という値は、ほぼコリニア系の性能限界であることが分かった（発表論文 7 番）。

② ノンコリニアスピン素子材料基盤技術
ノンコリニア反強磁性ヘテロ構造素子の機能性の解明に不可欠な、配向制御エピタキシャル薄膜の形成に取り組んだ。室温でノンコリニア反強磁性を示す代表的な材料である Mn_3Sn に関して、仮想磁場の方向が膜面内、膜面直方向を向く C 面配向、M 面配向の高品質エピタキシャル膜の形成技術を確認した（発表論文 2 番）。

次にこのエピタキシャル Mn_3Sn とスピン・軌道重金属から成るヘテロ構造を作製し、 Mn_3Sn のカイラルスピン構造の電流駆動実験を行った。カイラルスピン構造の無磁場中での恒常的回転という、従来の材料系とは全く異なる特異な現象の観測に成功し、その新機能性素子利用の可能性を明らかにした（論文出版予定）。

③ 創発インダクタの内因・外因性調整能
ファラデーの電磁誘導の法則に基づく古典的なインダクタンスとは異なる、量子版のインダクタンスが 2020 年 10 月に理研のグループから報告されたが、ここでは実験値と理論値に大きな乖離があった。本研究ではこれまでのスピントルク、スピン起電力の理解をもとに、物質中のスピン・軌道相互作用と非断熱スピン移行過程を考慮することで、この乖離が説明されることを理論的に解明した（発表論文 8 番）。

この他、これまでに人工反強磁性スキルミオンの形成と電流駆動の実現（発表論文 1 番）、シリコン集積回路と互換性のある多結晶反強磁性ヘテロ構造のネールベクトルの電流制御（発表論文 6 番）、3 次元自己組織化ナノ構造・ジャイロイドの複雑な磁気構造の電子線ホログラフィによる解明（発表論文 3 番）などを報告している。

5. 今後の計画

研究期間後半は、これまで確立した上述の技術、知見を基礎に、ノンコリニアな磁気構造の機能性とその利用方法を明らかにするとともに、集積回路・新原理コンピューティングへの応用に向けた研究開発を展開し、加えて、ノンコリニアスピントロニクスを開拓することで見えてくるスピントロニクス全体に有効な新たな体系の構築を目指す。具体的な研究課題として、カイラルスピン構造の電流による恒常的な回転の詳細評価と新概念素子の原理実証、創発インダクタンス理論の一般化とその検証などに取り組む。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

発表論文

1. T. Dohi, S. DuttaGupta, S. Fukami, and H. Ohno, "Formation and current-induced motion of synthetic antiferromagnetic skyrmion bubbles," *Nat. Commun.* **10**, 5153 (2019).
2. J. Yoon, Y. Takeuchi, R. Itoh, S. Kanai, S. Fukami, and H. Ohno, "Crystal orientation and anomalous Hall effect of sputter-deposited non-collinear antiferromagnetic Mn_3Sn thin films," *Appl. Phys. Express* **13**, 013001 (2019).
3. J. Llandro, D. M. Love, A. KovácsJan, J. Caron, K. N. Vyas, A. Kákay, R. Salikhov, K. Lenz, J. Fassbender, M. R. J. Scherer, C. Ciorra, U. Steiner, C. H. W. Barnes, R. E. Dunin-Borkowski, S. Fukami, and H. Ohno, "Visualizing Magnetic Structure in 3D Nanoscale Ni-Fe Gyroid Networks," *Nano Lett.* **20**, 3642-3650 (2020).
4. K. V. De Zoysa, S. DuttaGupta, R. Itoh, Y. Takeuchi, H. Ohno, and S. Fukami, "Composition dependence of spin-orbit torque in $Pt_{1-x}Mn_x/CoFeB$ heterostructures," *Appl. Phys. Lett.* **117**, 012402 (2020).
5. G. K. Krishnaswamy, A. Kurenkov, G. Sala, M. Baumgartner, V. Krizakova, C. Nistor, F. Maccherozzi, S. S. Dhesi, S. Fukami, H. Ohno, and P. Gambardella, "Multidomain Memristive Switching of $Pt_{38}Mn_{62}/[Co/Ni]_n$ Multilayers," *Phys. Rev. Appl.* **14**, 044036 (2020).
6. S. DuttaGupta, A. Kurenkov, O. A. Tretiakov, G. Krishnaswamy, G. Sala, V. Krizakova, F. Maccherozzi, S. S. Dhesi, P. Gambardella, S. Fukami & H. Ohno, "Spin-orbit torque switching of an antiferromagnetic metallic heterostructure," *Nat. Commun.* **11**, 5715 (2020).
7. C. Zhang, Y. Takeuchi, S. Fukami, and H. Ohno, "Field-free and sub-ns magnetization switching of magnetic tunnel junctions by combining spin-transfer torque and spin-orbit torque," *Appl. Phys. Lett.* **118**, 092406 (2021).
8. J. Ieda and Y. Yamane, "Intrinsic and extrinsic tunability of Rashba spin-orbit coupled emergent inductors," *Phys. Rev. B* **103**, L100402 (2021).

受賞

深見俊輔, 丸文研究奨励賞（一般財団法人丸文財団）, 2021/03

7. ホームページ等

<http://www.spin.riec.tohoku.ac.jp/>