

大学の研究・動向

# スピントロニクス技術を用いたメモリデバイス

工学研究科 電子工学専攻 電子物理工学講座 極微電子工学分野  
 教授 白石 誠 司  
 准教授 安藤 裕一郎  
 助教 大島 諒  
 助教 重松 英

## 1. はじめに

これまでエレクトロニクスは、ムーアの法則に従い集積回路の性能向上に貢献してきましたが、それも限界に近付きつつあり、技術革新が求められています。その有力な候補となっているのが、スピントロニクスです。エレクトロニクスでは電子の「電荷」のみを用いますが、スピントロニクスではそれに加え、「スピン」と呼ばれる電子の自由度を利用します。スピンは磁性の源としての性質を持っています。例えば図1に示すように、金や銅といった非磁性体では、一つ一つのスピンの方向がランダムな方向を向いており、マクロに見るとスピンの打ち消し合いのため、磁性を有していません。一方鉄やコバルトなどの強磁性体では、一つ一つのスピンの方向が同じ方向にそろっているため、マクロに見ても磁性が生じます。ここで、スピンの流れである「純スピン流」について説明します。通常の電流は、アップスピンとダウンスピンが同量存在するため、スピンを輸送することができません(図2)。一方で、もしアップスピンのみが右へ、ダウンスピンのみが左へ移動するような流れがあれば、スピンのみを輸送することができます。この純スピン流は微小磁石の流れとしての特徴を持つため、エレクトロニクスとマグネティクスの複合が生み出す、大幅な技術革新が期待されます。

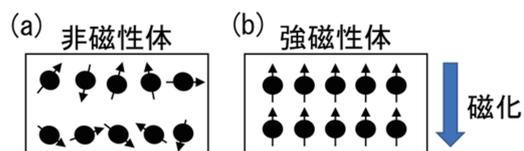


図1 (a)非磁性体と(b)強磁性体中のスピン

	電荷	スピン
電流	4	0
純スピン流	0	4

図2 電流と純スピン流

## 2. スピン流の生成

### 2.1 スピン軌道相互作用とスピンホール効果

純スピン流をどのように生成するか考えましょう。電流から純スピン流を生成する手法はいくつか存在しますが [1]、ここではスピン軌道相互作用(SOI)による生成を考えます。ここでは古典的モ

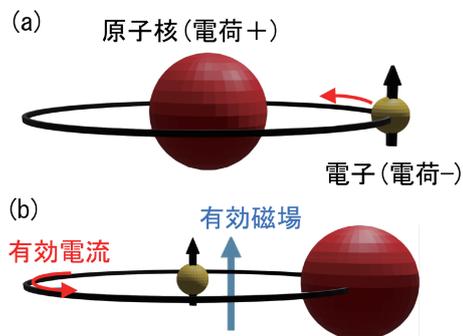


図3 (a) 原子核の周囲を移動する電子の原子核視点と (b) 電子視点。(ここでは電子の矢印は磁気モーメント)

デルで SOI を説明します。図 3(a)にあるように、伝導電子が原子核の周囲を歳差する状況を電子の視点で考えると、図 3(b)のように原子核が電子の周囲を歳差しているように見えます。原子核は正の電荷を持っているので、これは円環電流が流れている場合と等価になります。電流はアンペールの法則により磁場を生成します。この実効的な磁場と反平行を向いているスピンは、もう一方のスピンと比較しエネルギー的に有利になりますので、特定のスピンの優先的に原子核の方向へ軌道が曲げられます。ここで電子のスピンと磁気モーメントは逆向きであることに注意してください。このように、スピンの方向が電子軌道に作用する効果を SOI と呼びます。この古典的モデルでも分かるように、原子番号が大きい元素ほど、原子核の電荷量が増えるため、SOI が増加する傾向があります。

## 2.2 スピンホール効果

SOI により、電流を担うアップスピン電子とダウンスピン電子は、それぞれ逆の方向へ軌道が曲げられますので、結果的に電流と垂直方向に純スピン流が生成されることとなります。この現象は、電子が磁場によるローレンツ力で軌道が曲げられ、電流、磁場と垂直方向に電界が生じる「ホール効果」[(図 4(a))との類似性から、「スピンホール効果」[図 4(b)]と呼ばれています。スピンホール効果による電流 - スピン流変換効率率は「スピンホール角」と呼ばれ、Pt、Ta、W などの重金属で 0.1 程度の大きさで見積もられています [2,3]。近年のスピントロニクスにおける研究では、スピンホール角の大きな物質の探索が盛んに行われており、重金属のみならず、トポロジカル絶縁体 [4,5] やワイル半金属 [6,7] といった特殊なバンド構造を有する物質群において、巨大なスピンホール角が続々と報告されています。

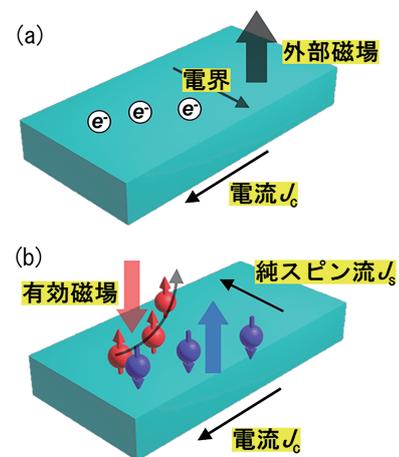


図 4 (a) ホール効果と (b) スピンホール効果



図 5 スピン流を与えるスピントルク

## 3. メモリデバイスへの応用

### 3.1 スピントルク

1章でスピン流は微小磁石の流れであると説明しましたが、ここでは具体的にスピン流が磁化にどう作用するのかを考えます。何らかの効果により、強磁性体に外部から純スピン流が注入される場合を考えましょう。純スピン流が強磁性体の磁化を担う局在スピンを通過する際、角運動量を交換することで、磁化が少し傾けられます(図 5)。これはスピン流による磁化(角運動量)の変化に相当するので、「スピントルク」[8]と呼ばれています。

### 3.2 スピン軌道トルク磁気抵抗メモリ

図 6 のように、重金属などの非磁性体上に磁性体(フリー層)/絶縁体/磁性体(固定層)3層構造(磁気トンネル接合)があるような構造を考えます。この構造で重金属に電流を流すと、重金属の SOI によりスピンホール効果が発生します。生成された

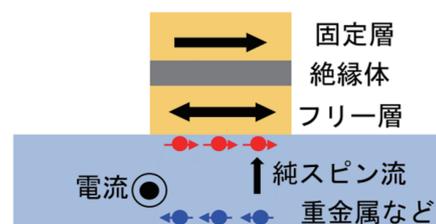


図 6 SOT-MRAM のデバイス構造

スピン流は上部の強磁性体へと注入され、磁化にスピントルクを与えます。注入されるスピンの磁気モーメントが、磁性体の磁化と反平行ならば、電流を増大させることでフリー層のみの磁化反転が可能です。磁気トンネル接合に対し、縦方向に電流を流した際の電気抵抗が、磁化の平行 or 反平行で変化する「トンネル磁気抵抗効果 [9]」を利用し、フリー層の磁化方向を検出します。磁化の平行 or 反平行を 2 進数の「0」と「1」に対応付けることで、図 6 の構造に情報を格納、すなわちメモリとして用いることができます。このようなメモリデバイスは「スピン軌道トルク磁気抵抗メモリ (SOT-MRAM)」と呼ばれています。磁化は電源を切っても情報が保持される「不揮発性」を有することから、コンピュータの待機電力の大幅削減が期待され、次世代メモリとして注目されています [10]。

#### 4. 整流効果を用いたスピン軌道トルク磁化反転の検出

実現に向けた最も大きな課題の一つは、書き込み時の電流密度です。この解決のためには、巨大なスピンホール角を有する材料探索、トポロジカル絶縁体などの新奇物理現象、回路設計、磁性体の最適化など、様々なアプローチから学理を構築することが必要です。しかしながら、磁気トンネル接合の作成には高度な技術を要し、多様な材料/構造に対する機動的探索には不向きです。こうした課題を解決するため我々は、磁気トンネル接合を用いずに測定可能である、整流効果に着目しました。一般的に整流効果を生じるためには、電流方向に応じた抵抗の変化(非相反伝導)が必要です。したがってオームの法則に従う限り整流効果は生じませんが、重金属/強磁性体 2 層構造では、磁化による時間反転対称性の破れ、重金属中の電流によるアンペール磁界、重金属中のスピンホール効果等により、抵抗の値は電流の正負で少しだけ違うのです。ここに交流電流を印加すると、非相反伝導による電圧は、(電流の振動) × (抵抗の振動) ですので振動成分の 2 乗、すなわち 2 倍で振動する成分と直流成分の和として現れます。そのためローパスフィルタにより直流成分のみ取り出すことで、非相反伝導を検出することができます。上の非相反伝導の起源はいずれも磁化による時間反転対称性の破れです。そのため、検出信号は磁化方向に対応した極性を示します。これにより磁化反転の検出が可能となります。図 7 に Pt/Py(Ni と Fe の合金) 2 層構造における、Pt のスピンホール効果を利用した Py の磁化反転の検出信号を示します。Py のサイズは 100 nm と非常に微小ですが、明瞭な信号が検出されました [11-13]。この手法では磁気トンネル接合といった複雑な構造を用いないため、極論を言えば、電流を流すことさえできればスピントルク磁化反転を実証することが可能です。したがって、新奇材料が次々と発見される現代において、上記の手法は非常に強力なツールとなると言えます。

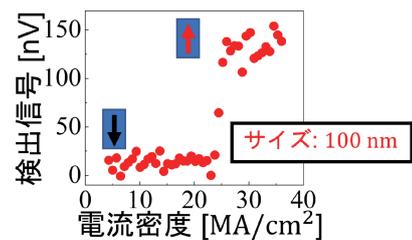


図 7 スピントルク磁化反転の検出信号

#### 5. 高効率化へ向けた研究

これまでスピントルク磁化反転の検出に焦点を当ててきました。ここからは、実際どのように高効率化を目指すかについて、我々の研究を基にご紹介いたします。

##### 5.1 2パルス磁化反転

スピントルクは、注入スピンを  $\sigma$ 、磁化を  $M$  とすると、 $M \times \sigma \times M$  に比例することが

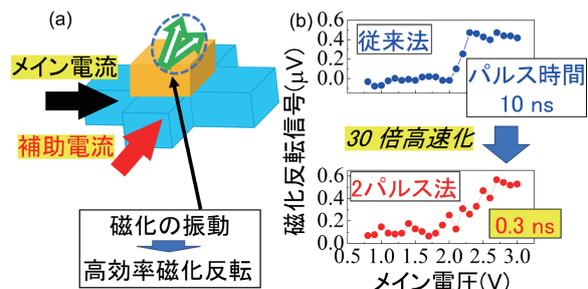


図 8 (a) 2パルス磁化反転のセットアップと (b) 実験結果

知られています。ですので注入スピンと磁化が平行 / 反平行の場合はトルクがゼロ、それ以外の場合は有限となるわけです。強磁性体として面内に磁化容易軸を持つ材料を使う際、磁化と平行のスピンを注入することで磁化反転を行うのですが、先に述べたように平行状態ではトルクは働きませんので、反転の初期状態においては熱擾乱による磁化揺らぎが必要です [14]。このことが磁化反転の高速化を妨げています。そこで図 8(a)にあるような十字型の構造を作成しました。電流方向をベクトル的に制御できるため、スピンホール効果による注入スピンの方向も、それぞれの方向からの電流量を調整することで 2 次的に制御できます。最もトルクが働きやすいように制御することで、磁化反転効率 は 30 倍も高速化されることを実証しました [図 8(b)]。

## 5.2 自己誘起スピントルク

これまで非磁性体 / 強磁性体 2 層構造で、非磁性体のスピンホール効果により磁性体へ注入されるスピン流を考えてきました [図 9 (a)]。ここでは同様の構造で、強磁性体のスピンホール効果について考えてみましょう。強磁性体にスピンホール効果がある場合、非磁性体と隣接する側の界面では、

蓄積したスピンは流出することができます [図 9(b)]。例えばアップスピンが非磁性体へと流出している場合、時間反転対称性から、ダウンスピンが強磁性体へと注入される描像と全く等価になります。すなわち、強磁性体のスピンホール効果も、非磁性体のスピンホール効果と全く同様に磁化に作用するのです [15]。これを「自己誘起スピントルク」と呼びます。この効果を確認するため、強磁性体由来と非磁性体由来のスピントルクが互いに逆向きである、Ta/Co 2 層構造を対象に調査を行いました。強磁性体である Co の膜厚増加と共に Co のスピンホール効果由来のスピントルクが増大し、最終的に Ta 由来のスピントルクを打ち消してゼロになる傾向が確認され、自己誘起スピントルクの存在を確認できました [16]。本研究により、非磁性体と強磁性体の適切な組み合わせにより、スピントルク磁化反転が高効率化されるという、新たな知見を得ることが出来ました。

## 5.3 反転対称性の破れの利用

これまで、磁化容易軸が面内方向である強磁性体を考えてきました。面内磁化膜はサイズが小さくなるにつれて、反磁界の効果により磁性が弱まるため、集積化に不向きという問題があります。一方で面方向と垂直に磁化容易軸を持つ強磁性体は、サイズ減少に伴う反磁界の影響を受けず、集積化に向いています。しかしながらスピンホール効果で注入できるスピン方向は面内であるため、一般的に面直磁化膜の磁化反転はできません。ここで空間反転対称性の破れによるスピン生成について考えましょう。例えば 2 層構造の界面では、仕事関数の違いによる電界が生じています。したがって、界面に存在する電子視点で考えれば、片方の物質は相対的に + の電荷を持っているように見

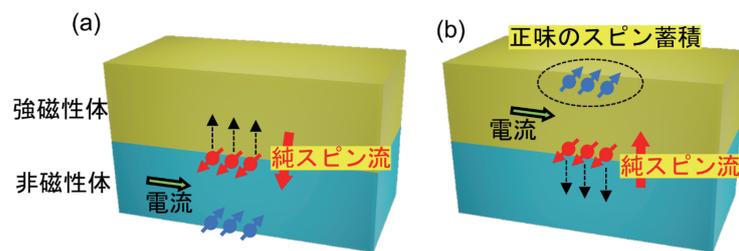


図 9 (a) 非磁性体から強磁性体へのスピン注入と (b) 強磁性体から非磁性体へのスピン流出

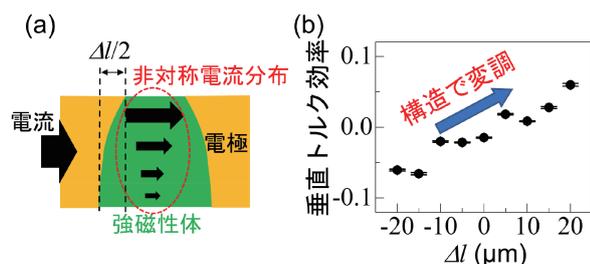


図 10 (a) デバイス構造と (b) 垂直トルクの測定結

えます。電流を担う電子、つまり移動する電子視点で考えれば、+の電荷が後ろに移動しているように見えますが、この相対的電流が生成する磁界が自身のスピンの作用することで、アップスピンとダウンスピンにエネルギー差が生じ、スピン蓄積が生まれます。これはラシュバ-エーデルシュタイン効果 [17,18] と呼ばれています。このように面直の対称性の破れが面内のスピン、そして隣接磁性体にトルクを与えることに着目すれば、面内の対称性を破ることで90度異なる面直方向へトルクが生成されると予想できます。面直方向のトルクは垂直磁化膜の磁化反転を可能にするため、応用上の観点からも、近年注目されています。我々の研究室では、図のように電極の構造を工夫し、電流の分布をあえて非対称にさせた場合の電流誘起トルクを調査しました。その結果、垂直トルクの大きさ、符号を構造の非対称性で自由自在にコントロールすることができました [19]。電流の非対称性は、デバイス作成段階の設計次第で簡単に導入できるため、垂直磁化膜を用いた SOT-MRAM の実現に大きく貢献できると期待しています。

## 6. まとめ

今回はスピントルク磁化反転について紹介しましたが、これはスピントロニクス研究のほんの一部に過ぎません。我々の研究室に限っても、スピン流の性質を利用した再構成可能な論理回路、スピントルクを用いた脳型コンピューティング、磁性の波であるマグノン準粒子を利用した量子計算、トポロジカル超伝導体、2次元材料と、研究内容は多岐に渡ります。加えてスピントロニクスは比較的若い学問分野であるため、新規物理現象、そして次世代技術のマイルストーンとも言えます。今後も新現象の発見による基礎物理学への、そして「デバイス」実現による世の中への貢献を目指し、基礎、応用、両方の観点から研究を進めたいと思います。以下に参考文献を示します。

### 参考文献

- [1] Y. Ando and M. Shiraishi, *Spin to Charge Interconversion Phenomena in the Interface and Surface States*, J. Phys. Soc. Japan **86**, 011001 (2017).
- [2] T. Tanaka, H. Kontani, M. Naito, T. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue, *Intrinsic Spin Hall Effect and Orbital Hall Effect in 4d and 5d Transition Metals*, Phys. Rev. B **77**, 165117 (2008).
- [3] S. Dushenko, M. Hokazono, K. Nakamura, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, *Tunable Inverse Spin Hall Effect in Nanometer-Thick Platinum Films by Ionic Gating*, Nat. Commun. **9**, 3118 (2018).
- [4] Y. Ando, *Topological Insulator Materials*, J. Phys. Soc. Japan **82**, 102001 (2013).
- [5] Y. Ando, T. Hamasaki, T. Kurokawa, K. Ichiba, F. Yang, M. Novak, S. Sasaki, K. Segawa, Y. Ando, and M. Shiraishi, *Electrical Detection of the Spin Polarization Due to Charge Flow in the Surface State of the Topological Insulator Bi<sub>1.5</sub>Sb<sub>0.5</sub>Te<sub>1.7</sub>Se<sub>1.3</sub>*, Nano Lett. **14**, 6226 (2014).
- [6] K. Manna, Y. Sun, L. Muechler, J. Kübler, and C. Felser, *Heusler, Weyl and Berry*, Nat. Rev. Mater. **3**, 244 (2018).
- [7] L. Leiva, S. Granville, Y. Zhang, S. Dushenko, E. Shigematsu, T. Shinjo, R. Ohshima, Y. Ando, and M. Shiraishi, *Giant Spin Hall Angle in the Heusler Alloy Weyl Ferromagnet Co<sub>2</sub>MnGa*, Phys. Rev. B **103**, L041114 (2021).
- [8] J. C. Slonczewski, *Currents and Torques in Metallic Magnetic Multilayers*, J. Magn. Magn. Mater. **247**, 324 (2002).
- [9] M. Julliere, *Tunneling between Ferromagnetic Films*, Phys. Lett. A **54**, 225 (1975).

- 
- [10] Q. Shao, P. Li, L. Liu, H. Yang, S. Fukami, A. Razavi, H. Wu, K. Wang, F. Freimuth, Y. Mokrousov, M. D. Stiles, S. Emori, A. Hoffmann, J. Akerman, K. Roy, J.-P. Wang, S.-H. Yang, K. Garello, and W. Zhang, *Roadmap of Spin-Orbit Torques*, IEEE Trans. Magn. **57**, 1(2021).
- [11] M. Aoki, E. Shigematsu, M. Matsushima, R. Ohshima, S. Honda, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *In-Plane Spin-Orbit Torque Magnetization Switching and Its Detection Using the Spin Rectification Effect at Subgigahertz Frequencies*, Phys. Rev. B **102**, 174442(2020).
- [12] M. Aoki, E. Shigematsu, M. Matsushima, R. Ohshima, S. Honda, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *Enhancement of Low-Frequency Spin-Orbit-Torque Ferromagnetic Resonance Signals by Frequency Tuning Observed in Pt/Py, Pt/Co, and Pt/Fe Bilayers*, AIP Adv. **11**, 025206(2021).
- [13] M. Aoki, E. Shigematsu, R. Ohshima, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *Coexistence of Low-Frequency Spin-Torque Ferromagnetic Resonance and Unidirectional Spin Hall Magnetoresistance*, Phys. Rev. B **104**, 094401(2021).
- [14] J. Z. Sun, *Spin-Current Interaction with a Monodomain Magnetic Body: A Model Study*, Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. **62**, 570(2000).
- [15] K.-W. Kim and K.-J. Lee, *Generalized Spin Drift-Diffusion Formalism in the Presence of Spin-Orbit Interaction of Ferromagnets*, Phys. Rev. Lett. **125**, 207205(2020).
- [16] M. Aoki, E. Shigematsu, R. Ohshima, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, Submitted.
- [17] V. M. Edelstein, *Spin Polarization of Conduction Electrons Induced by Electric Current in Two-Dimensional Asymmetric Electron Systems*, Solid State Commun. **73**, 233(1990).
- [18] S. Lee, H. Koike, M. Goto, S. Miwa, Y. Suzuki, N. Yamashita, R. Ohshima, E. Shigematsu, Y. Ando, and M. Shiraishi, *Synthetic Rashba Spin-Orbit System Using a Silicon Metal-Oxide Semiconductor*, Nat. Mater. **20**, 1228(2021).
- [19] M. Aoki, E. Shigematsu, R. Ohshima, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Ando, *Current-Induced out-of-Plane Torques in a Single Permalloy Layer with Lateral Structural Asymmetry*, Phys. Rev. B **105**, 144407(2022).