

スピントロニクスとスピンポンピング

Keyword: スピントロニクス, スピントルク, スピン流, スピンポンピング

ここでは、主に金属磁性体をベースとするスピントロニクス、スピンポンピングと呼ばれる現象、ならびに関連するキーワードについて述べる。

1. 電荷からスピンへ

一般に導体に磁場を印加すると電気抵抗が変化する現象を磁気抵抗効果という。これは古くから知られた物理現象であり、直感的には電子軌道がローレンツ力で曲がることによる、いわば電子の電荷が元になる現象である。1990年の前後に、ナノメートルオーダーの厚みの金属磁性体と非磁性体を積層した人工構造で、室温で大きな変化を示すいわゆる巨大磁気抵抗効果（2007年ノーベル物理学賞）やトンネル磁気抵抗効果が相次いで発見された。図1(a)(b)に層に垂直に電流を流す場合の巨大磁気抵抗効果の概念図を示す。磁性体内部の電子スピンは、交換相互作用に起因する強い実効的な磁場が働くため、伝導電子は磁化（マクロなスピン）の方向に依存して、上向きあるいは下向きに分極している。磁化が平行の場合には電子は同じ極性の磁場を感じるため通りやすいが、反平行の場合には逆向きの磁場を量子力学的なポテンシャルの山として感じるため通りにくく、磁化の配列に依存して大きな抵抗の変化が生じる。これが巨大磁気抵抗効果の素朴な描像であり、電子のもつスピンの決定的な役割を演じている。これら新しい磁気抵抗効果の発見が契機となり、スピンと（エレクトロ）ニクスを足した造語であるスピントロニクス、という分

野の研究が始まった。その本質は、スピンを積極的に利用した新しい物性の創出であり、同時に新機能を有するデバイスの創製までを含むものと思われる。¹⁾

2. 磁化をトルクで制御する

図1(a)(b)のような素子構造は、磁化の方向を回転すると電流の流量が変わることから、水の蛇口にたとえられてスピンバルブとも呼ばれる。水の蛇口のたとえを一步進め、蛇口についたバルブを閉める際の摩擦が少ない状況を考えてみる。水道の圧力を上げていくと、ある水圧で水がバルブに与えるトルクが摩擦のトルクに打ち勝ち、バルブが開いて水が流れ出すだろう。似たようなことが磁気抵抗素子でも観測でき、ある閾値を超えた電流を流すと、磁化を反転させることができる。素子に電流が流れていると、磁化は電流と共に流れるスピンと相互作用するため、電子を跳ね返すが、逆に磁化も常にその反作用（トルク）を感じている。このような電流の作るトルクをスピントルクという。²⁾ 他方、磁性体の磁化は、磁性体内の電子や格子振動とも相互作用しており、磁気には固有の磁気摩擦（磁気緩和）が働いている。スピントルクは電流の大きさに比例するため、スピントルクが磁気摩擦トルクに打ち勝つと磁化が反転する（図1(c)）。適切な素子サイズと物質を選択すれば、磁場よりもずっと効率よく磁化を反転できる。また、ある条件のもとでは、スピントルクによって磁化の歳差運動の自励発振が起きることも知られている。²⁾ これはなにも図1(a)(b)のような素子構造ばかりではなく、電流に伴うスピンとバックグラウンドにある磁化の相互作用がある場合にはスピントルクが常に働き、例えば磁性体内の磁壁や磁気渦といった磁気構造を駆動することもできるため、能動的なスピントロニクス素子を実現できる。これは、磁化を制御するのにもはや磁場（あるいはその源である電流）が不要であることを意味している。

3. 電流からスピン流へ

スピントルクはスピン分極した電流と磁化の相互作用によって生じる現象であるものの、電流というよりはむしろそれに伴うスピンの流れが現象の本質である。そのようなスピンだけの流れをスピン流という。そのプリミティブな概念は、古くはスピン拡散という形でスピン磁気共鳴の研究過程で見いだされた。スピン流は直感的に図2(a)のように説明できる。空間中を右に進む上向きスピンをもつ電子と、左に進む下向きスピンをもつ電子があると、電荷の

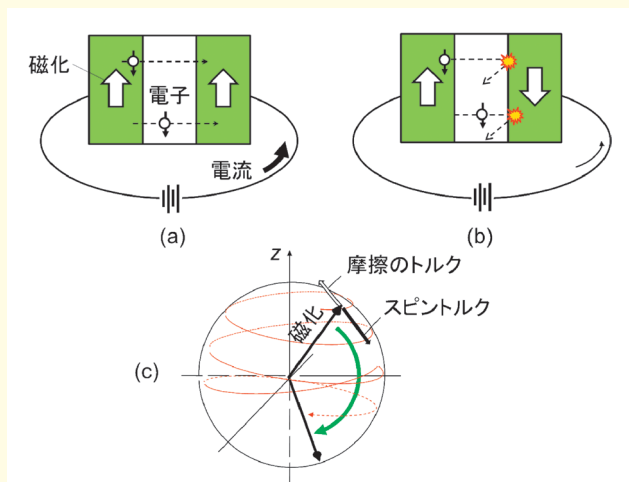


図1 磁性金属と非磁性金属からなる磁気抵抗素子。磁化の配列が平行の場合 (a) と反平行の場合 (b) では流れる電流の大きさが異なる。(c) スピントルクの概念図。磁性体の磁化にはたらくスピントルクが磁化の運動を制動する摩擦トルクを超えると磁化が反転する。

流れは相殺され、あたかも上向きのスピン角運動量が右に進む流れ（あるいは下向きのスピン角運動量が左に進む流れ）だけがあるように見える。スピン角運動量はベクトル量であるから、例えば時間的にスピン角運動量ベクトルの方向の変化するスピンの流れも考えることもでき、電流や熱流といった流れとは異なるテンソル量である。導体中のキャリアには様々なスピンの緩和機構があるため、スピン流は電流と異なり短い時間で散逸してしまうものの、電流がエレクトロニクスにおいて主要な概念であることに対応し、スピン流はスピントロニクスを特徴付ける概念であるといえる。そのため、スピン流の学理の究明が現在のスピントロニクスにおける研究の大きな潮流となっている。³⁾

4. スピンポンピング—スピン流のダイナモ

スピン流の発生方法は大きく分けて二つある。一つは電流や熱流などからスピン流を作り出す方法であり、もう一つは物質中に非平衡なスピン分極もしくは磁化の運動を発生させ、それを一種のスピン電池のように用いてスピン流を発生させる方法である。例えば、図2(b)のような磁性

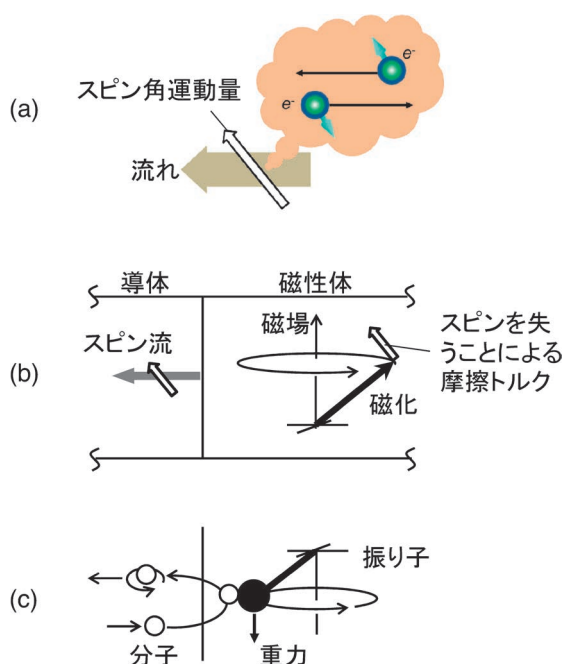


図2 (a) 電流の伴わないスピン流の模式図。互いに反平行のスピンと速度をもつ電子があると、スピン角運動量だけが運ばれる流れとみなせる。(b) 磁化の歳差運動によって発生するスピン流（スピンポンピング）の模式図。スピン流が発生するとスピンの保存則によりスピン流のスピンのベクトルと平行に摩擦のトルクが発生する。(c) スピンポンピングの粗い類推。振り子が磁化の歳差運動に対応し、非磁性導体の電子を空気分子に例えている。飛んできた分子は界面で振り子とこすれて自転運動をはじめ、もとの方向に戻る。このとき分子の正味の流れはないので、角運動量とエネルギーだけが流れるように見える。

体と非磁性体が接合した系で、磁化のラーマー歳差運動をマイクロ波などで励起する。接合界面では非磁性体のスピンと磁化に強い相互作用が働き、磁化の歳差運動は、いわばスピントルクの逆効果によって、それ自身のもつスピン角運動量とエネルギーを非磁性体の電子に受け渡すことでスピン流が磁性体から流出する。この現象はモーターを機械的に回すことで電流が発生する発電機（ダイナモ）とも似ているが、もう少し直感的な説明としては、図2(c)に示したように、回転する振り子と空気分子が界面付近でこすれあうことで回転運動が受け渡されるような描像である。他方、回転運動の受け渡しは、振り子の側から見れば摩擦を受けることになるが、これは、磁化のラーマー歳差運動にとっても同様で、スピン流の発生による反作用として磁化の磁気摩擦（磁気緩和）は増強される。言い換えれば、スピン角運動量保存則によってスピン流の発生は磁気の摩擦と不可分の関係にある。この磁化の歳差運動の発生するスピン流は、古くは磁気共鳴の実験で提案されたのちしばらく忘れ去られていたものの、近年、極薄膜磁性体の磁気緩和の増強現象を通じて再び見いだされ、量子力学的な「スピンポンピング」理論の提案に至った。⁴⁾

5. 展望

当初、スピンポンピングの研究はスピンのダイナミクスに焦点をあてた研究が主なものであったが、数年前にスピンポンピングによって発生するスピン流を、電流に変換し電圧として観測できることが示された（逆スピンホール効果）。⁵⁾ この発見により、スピンポンピングと逆スピンホール効果は、金属のみならず絶縁体や半導体をベースとする様々な異種接合におけるスピン流研究の強力な手法となっている。これは、当初誰も予想していなかったことであり、新しい研究領域がスピントロニクスの中に形成され始めているといえ、今後ますます発展していくことが期待される。

参考文献

- 1) 宮崎昭宣：『スピントロニクス—次世代メモリ MRAM の基礎』（日刊工業新聞社、2004）。
- 2) 鈴木義茂、久保田 均：『スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線』監修：高梨弘毅（シーエムシー出版、2009）第4章。
- 3) 斉藤英治、村上修一：『スピン流とトポロジカル絶縁体—量子物性とスピントロニクスの発展』（共立出版、2014）。
- 4) 初期の研究については、水上成美、安藤康夫、宮崎昭宣：日本応用磁気学会誌 **27** (2003) 934 や、Y. Tserkovnyak, A. Brataas, G. E. W. Bauer and B. I. Halperin: Rev. Mod. Phys. **77** (2005) 137 などを参照されたい。
- 5) E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima and G. Tatara: Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 182509。

水上成美（東北大学原子分子材料科学高等研究機構）

（2014年11月26日原稿受付）