

Title	スピントロニクスで電子デバイスに革新を：ナノ電子デバイス技術の向上に貢献する
Sub Title	
Author	渡辺, 馨(Watanabe, Kaoru)
Publisher	慶應義塾大学工学部
Publication year	2012
Jtitle	新版 窮理図解 No.10 (2012. 7) ,p.2- 3
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	研究紹介
Genre	Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50001002-00000010-0002

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

スピントロニクスで 電子デバイスに革新を

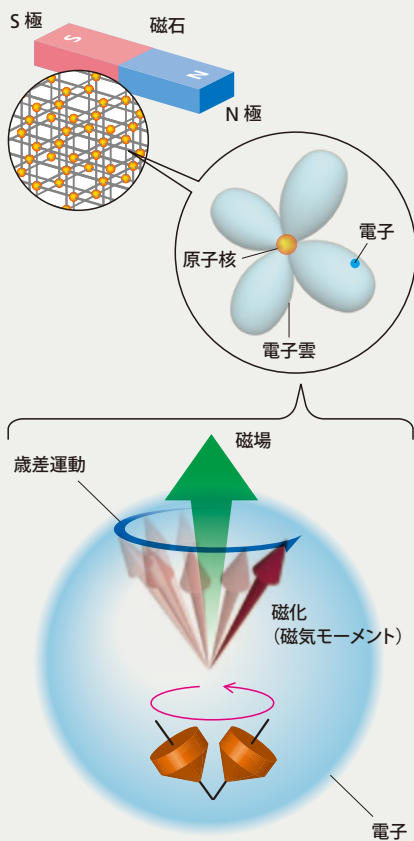
ナノ電子デバイス技術の向上に貢献する

最も小さな磁石、それが電子スピンだ。電子スピンには2種類の向きがあり、この違いが磁石のN極とS極を生み出す。しかも2種類ある電子スピンは磁場や電流の影響を強く受け、その向きが入れ替わることもある。この磁場や電流と電子スピンの関係性に注目しているのがスピントロニクスだ。比較的若い研究分野だが、世界中の注目を集めている分野でもある。その実用化を目指して研究に取り組む能崎准教授を訪ねた。

磁石の源となる電子スピン

「磁石とは、周囲に磁場を作るN極とS極を持つ物質のことですが、その磁性の源ともいえるのが電子スピンという現象です。このスピン現象により、電子そのものが小さな永久磁石として働くのです」と能崎幸雄准教授が磁石の基本原理解を説明する。

では、電子スピンとは何か。ミクロな世界の現象なのでまだ不明確な部分も多



いとしながらも能崎さんは「電子スピンとは、2回転しないと元に戻らないような奇妙な自転運動です。磁気モーメントを持つため、磁場中で歳差運動をします(図1)。イメージとしては、回転するコマが回転軸を傾けて首振り運動をしている様子が近いでしょう。ただし、時間が経つと摩擦により回転が止まるコマとは違い、電子スピンはずっと回転し続けます。これは、電子が波としての性質も持っているからです。その電子スピンの作る磁場が磁性体の磁力の源になっています」と話す。

スピントロニクスとは、この電子スピンの向きを自在に操る研究分野のことで、電子デバイスの性能を飛躍的に向上させる技術として注目を集めている(図2)。

こうした特徴を持つ電子スピンだが、磁場や電流、電場、熱、マイクロ波などを刺激として与えると歳差運動が大きくなり、スピンの向きが反転してしまう。つまり物質のN極とS極が入れ替わる。この現象は磁化反転と呼ばれ、パソコンなどで使われているハードディスクドライブ(HDD:磁化の向きに1と0を割

図1 電子スピンはミクロな世界の磁石

原子核の周りにある電子がスピン状態になることで磁化(磁気モーメント)が起こり、1つの永久磁石として振る舞う。電子スピンには上向きと下向きの2種類あり、この向きによってN極とS極が決まる。

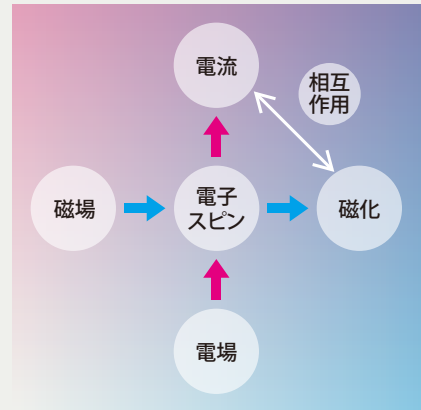


図2 スピントロニクスの概念

電場が誘引する電流と、磁場が誘引する磁化が、物質中で相互作用する。これを利用して電流で磁化を、磁化で電流を制御できる。

り当てた磁気記録装置)にも応用されている。現在のHDDは、磁場による磁化反転をデジタル情報の書き換えに採用している。しかし、この方法ではHDDの省電力化や高記録密度化などが限界に達しつつあるという指摘もある。そこで能崎さんは、電流による磁化反転に着目し、電子スピンの反転を省エネかつ高速に制御するための研究を進めている。

電子スピン制御の鍵は 4つのトルクの解明

電子スピンを制御する際に鍵となるのが、電子スピンに作用する力(トルク)である。このトルクには、①ダンピングトルク、②歳差運動トルク、③スピントランスファートルク、④非断熱トルクの4つの種類がある(図3)。電子スピんに磁場や電流を刺激として与えた時、この4つのトルクが作用して電子スピンの向きが反転する。このことは理論的に明らかにされており、特に磁場を与えた時のトルクの作用と磁化反転の関係はすでに紹介したHDDの例もあるように、先行研究も多い。「それに対し、電流による磁

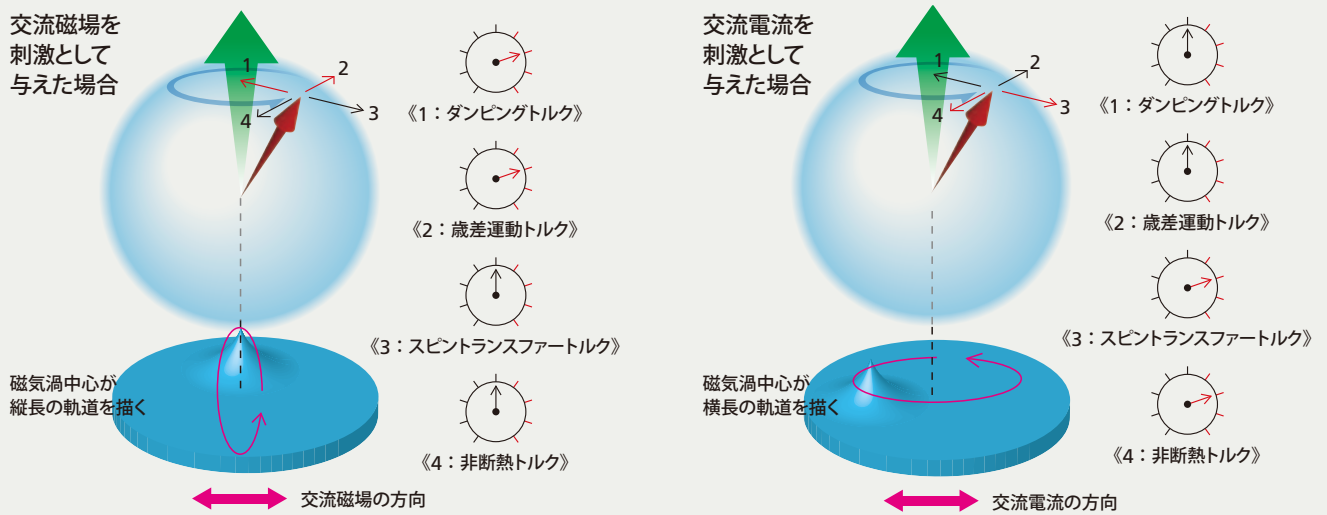


図3 電子スピンの4つのトルク

電子スピンの4つのトルクが作用しており、磁気モーメントの向きや運動を決定する要素とされている。4つのトルクは、すべて磁気モーメントと直交して作用するため、磁気モーメントの大きさを変わらずにその方向を変える効果を持つ。刺激として与える磁場や電流の周波数を変えると、各トルク的作用が変わり、それが磁気渦の旋回軌道の変化として現れる。そのため、与えた刺激と磁気渦の変化を解析すると、刺激に対する各トルクの変化を定量化できる。

化反転はまだ研究も少なく、始まったばかりの分野です。しかし電流は磁場と違い、単一の磁性体素子に直接アクセスできるので効率が良く、数十GHzの高速動作を小さい消費電力で実現できるので」と能崎さんは電流による制御のメリットを話す。

能崎さんが取り組んでいるのも電流を刺激として使った時に生じる各トルクを定量化する研究だ。狙いは単にスピンを反転させるだけでなく、より高速に、そしてより小さな刺激で効率的に反転させることにある。

そこで電流を刺激として与えたとき、4つのトルクがそれぞれどのように磁化反転に効いているのかを明らかにしようとした。しかし、個々の電子スピンの変化を観測し、4つのトルクの働きそれぞれについて解析するにはあまりに対象が

小さすぎる。そのため、複数の電子スピンによって作られる磁気構造に注目し、その特徴を活用したという。

「隣り合う電子スピンの間には、互いの向きを平行に保とうとする相互作用が働いています。そのため、磁性体素子をナノメートル規模にまで小さくすると、全体の振る舞いから1つの電子スピンの振る舞いを解析できるようになります。例えば、材料を100ナノメートル程度の大きさになると、すべての電子スピンの同調して動くマクロスピンを実現できます。また、円盤状にすると、電子スピンの互いに調和を取ろうとして一塊の磁気渦を形成します」。これらの磁気構造は極めて安定性が高く、与えた刺激に対してシンプルでリニアな反応を見せるので、4つのトルクの解析もしやすくなる。ただし、サイズが10マイクロメートルを超えると、スピンの複数の場所で異なる安定構造を取ろうとするため、構造が複雑になってしまうという。

して与えると、磁気渦の中心が共鳴し、同心円状に回り出します。この時の共鳴スペクトルの線幅が①ダンピングトルクと、共鳴周波数が②歳差運動トルクとそれぞれ強い関わりがあることはよく知られていました。しかし最近、刺激として与える電流の周波数を大きく変えると、渦の軌道が同心円状から楕円状に変化することを発見したのです。さらに、詳しい計算の結果、楕円軌道の形状から③スピントランスファートルクと④非断熱トルクを求めることができることが分かりました(図3)。今はこの理論の検証実験を進めているところです。

これら4つのトルクと刺激との関係が明らかになると、電流による磁化反転が定量的に解明されるだけでなく、磁気メモリ的高速化や、書き換え可能なスピン演算デバイスの開発といった新たな応用にもはずみがつく(図4)。

「電子スピン制御の高度化が進むと、電流をON/OFFするマイクロなスイッチとしても利用できるようになります。情報の保存だけでなく、様々な機能に書き換え可能な万能型電子回路が実現できるなど、ポスト半導体デバイス技術としても期待されています」。

画期的なデバイスの開発につながる技術として、電子スピンの注目が集まっている。(取材・構成 渡辺馨)

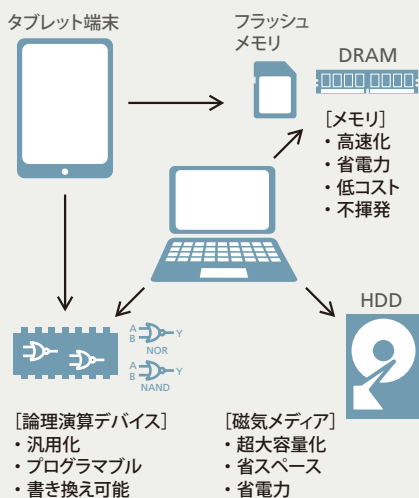


図4 電子スピンのデバイス応用

電子スピンは、待機電力がほぼゼロになる磁気メモリや様々な機能に書き換え可能な電子デバイスへの応用が期待されている。

応用先は磁気メモリから論理演算デバイスまで

マクロスピンや磁気渦に関する研究は日々進展しており、電子スピンの振る舞いが解明されつつあると能崎さんは笑顔を見せる。

「例えば、磁気渦に交流電流を刺激と