



ナノスケール磁性体における 磁壁ダイナミクスと 伝導現象の理論

— 次世代磁気メモリに向けた基礎研究 —

多々良 源

首都大学東京 都市教養学部理工学系 准教授
科学技術振興機構さきがけ 研究員

目的、背景

現代の情報機器は半導体からつくられるCPUなどの演算装置と、結果や情報を記録をする記録装置からなっています。記録装置には大抵の場合ハードディスクなどの磁気記録が用いられています。磁気記録では情報は微小磁石のNS極の向きとして記録されます。情報機器分野は高性能化が著しく、ハードディスクを例にとると10年ほど前では100MB程度だったものが、今は1000倍の容量を持つ100GB規模のものが標準となってきています。大容量化が実現されるためには、記憶単位の微小磁石サイズをどんどん小さくすること、また同時に、情報読み取りの感度の向上の2つが必須です。既に微小磁石サイズは1マイクロン(=0.001ミリ)よりも小さいものになっていますので、将来に向けて高密度化を進めるためには、ナノサイズの磁石の制御が必須の技術となってきます(ナノ=0.001マイクロン)。これらを制御するためにはまずナノ磁石の持つ性質を理解することが必要で、このためには現代物理学の理論体系を用いた理論面からの研究も不可欠です。ナノの世界には量子性という変わった性質があり、またナノ磁石は決して孤立しているわけではなく、特に読み取りに関しては電流などと相互作用しているのを正しく記述すること、つまりたくさんの自由度が相互

作用しているという複雑な状況を記述することが必要となるからです。こうした理論的記述には、元々素粒子物理学で構築された場の量子論という枠組みが非常に有効です。

微小磁石の電流による制御

磁石の発見はおそらく何千年も前にさかのぼりますが、人が磁石の向きを磁場で制御できるようになったのは19世紀で、以来ずっと磁場で制御してきました。最先端の磁気記録でも微小磁石の向き(磁化とよばれます)を磁場で反転させて記憶させることには変わりありません。しかしこれは磁場発生のための回路を別に用意する必要があり、高集積化においてはあまり得ではありません。磁場を用いない磁石の制御方法としては、早くも1978年頃から磁石の磁区の境界である磁壁を内部を流れる電流で直接動かすというアイデアに基づき、Bergerにより一連の先駆的理論研究が行われました。1996年にはIBMのSlonczewskiにより、微小磁性多層構造というデバイスに用いやすい構造での提案が行われ、以後精力的な研究が始まり現在に至っています。電流による制御が実現すれば高集積化した磁気抵抗メモリ(MRAM)の開発につながり、電源を切ってもメモリに情報が残った不揮発性コンピュータの実

用につながると期待されています。こうした不揮発性コンピュータでは、今のように毎回使う度に電源を入れて起動するのを待つ必要がなくなり、瞬時に起動し前回の作業を即続けることができるようになります。Bergerの磁壁移動メカニズムの磁気抵抗メモリへの応用はIBMのParkinが研究しています。我々の研究はこの電流による磁壁移動が対象です。

主要な研究成果

これまでに、確かにナノ磁石の磁壁は電流で制御できることが実験的に確認されてきています。しかしまだ磁壁移動にはかなりの大電流密度(金属系では 10^{12} [A/m²]、磁性半導体で 10^9 [A/m²]程度)が必要で、効率のいい記録デバイスには程遠いのが現状です。つまり低電力化が今の最も重要な課題であるわけです。このためには電流による磁化反転のメカニズムを正しく理解して、必要な電流(臨界電流)は何かを決めているのかを知る必要があります。私たちの研究では、Bergerの電流による磁壁移動のアイデアを、現代的視点から見直し微視的定式化を行い、現象の理解と応用を念頭に磁化反転の効率化に向けての研究を進めています^{[1-4])}。その研究により、ナノの世界では磁石と電流は強い影響を及ぼし合っており、それを利用してナノ磁石

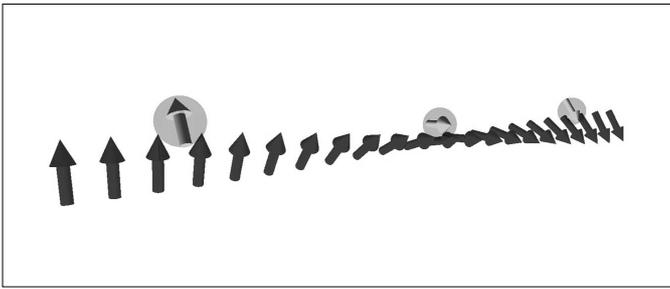


図1 磁壁とそこを通り抜ける電子の概念図。磁壁は多数のスピンの(矢印)がねじれた構造で、矢印を持つ丸が電子とそのスピンである。

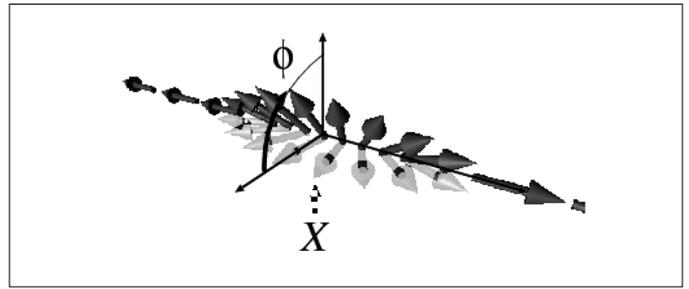


図2 磁壁の運動は位置Xとスピンの傾き ϕ で記述される。

に対しての様々な制御が電流によって行えることが明らかになってきています。また、ナノスケール原子接合における磁気抵抗の研究など、微小磁石の情報読み取りにつながる基礎研究も行っています^[6]。代表的な成果は次のようなものです。

電流のもとでの磁壁の運動の定式化^[2]

磁壁と電流との相互作用は微視的には電流を運ぶ電子のスピンの磁化をつくるスピン(磁化)との交換相互作用から生じます。この相互作用は2種類のスピンの互いの回りを歳差運動させるような力を生じ、これにより電流が磁化を回転させ、結果的に磁壁を動かすことになります。磁壁はその位置Xと、磁化の傾き ϕ の二つの変数で記述されます。このことを非平衡グリーン関数を用いて定式化し、磁壁の運動方程式を導出しました。その方程式を解いた結果、磁壁は電流をかけても ϕ で表される形状の変形をするだけで動き始めない領域があることがわかりました。これは磁壁が通常の粒子とは異なり内部構造を持つことの顕著な現れです。応用のためには動かすために必要な電流(臨界電流)を小さくすることが必要で、これにはサンプルの形状を工夫し磁気異方性エネルギーを制御することが有効であることが予想されます。

電流による磁壁生成^[3]

電流で磁壁を動かせれば磁気メモリとしてみれば情報消去ができることになりすが、書き込みを従来のように磁場でやるのではあまりメリットはありません。我々は理論計算によって、書き込み、つまり磁壁生成も原理的には電流で行えることを示しまし

た。これも磁壁を強く変形させるほどの大電流が必要で、応用のためには動作電流を下げるのが課題です。

交流電流による磁壁操作^[4]

慶応大のグループは、最近ナノ磁性体に磁壁を閉じ込め交流電流をかけることで「磁壁粒子」を共振させ効率よく動かすことに成功しました。共鳴の様子から「磁壁粒子」の質量や摩擦係数、働いている力や磁壁による電気抵抗^[5]などの特徴の正

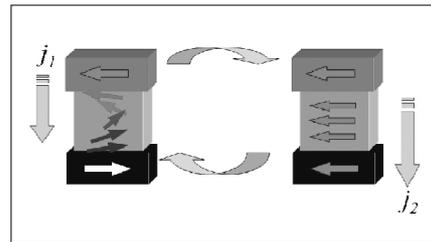
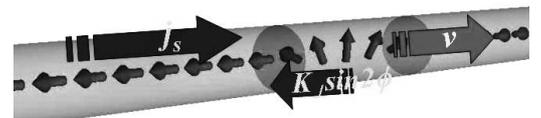


図3 電流による磁壁移動と生成を用いたメモリサイクルの概念図。

確な同定にもはじめて成功しました。磁壁デバイスとしてみると低電力での20MHzの動作に成功したことになります。この実験に理論面からのサポートを行いました。

今後の展望

以上我々の理論研究を中心に紹介しましたが、現状では金属系での実験結果は完全には理解されていません。これに対して理論面から新たな提案もされています。例えばスピン緩和などから新しい形のトルクが生じたり、それと連動して外的なピン止め磁壁移動に大きく影響する可能性があり、我々も微視的立場からそうした可能性を調べています。今後実験と理論のつきあわせにより現象の理解をさらに進め、2桁小さい電流値での磁壁移動を実現することが目標です。



補足説明

- スピン
電子などの持つ量子力学的自由度。微小な磁石と思っ
て良い。通常の磁石もスピンの多数の集まりからなっ
ている。
- 磁化
磁性体の磁石としての向きと強さの分布を体積当たり
で表した量。各点でのスピンの向きに比例する。
- 磁壁
強磁性体などで磁化が空間的に変化する時に現れるね
じれた構造。長さはだいたい10-100nm程度である。

References (参考文献)

- [1] 多々良源、河野浩、柴田純也、齊藤英治、固体物
理40, 545-558 (2005)。
- [2] Gen Tatara and Hiroshi Kohno, Phys. Rev.
Lett. 92, 086601 (2004)。
- [3] Junya Shibata, Gen Tatara and Hiroshi
Kohno, Phys. Rev. Lett. 94, 076601 (2005)。
- [4] Eiji Saitoh, Hideki Miyajima, Takehiro
Yamaoka and Gen Tatara, Nature, 432, 203 (2004)。
- [5] Gen Tatara and Hidetoshi Fukuyama, Phys.
Rev. Lett. 78, 3773 (1997)。
- [6] Gen Tatara, Yuwen-W. Zhao, Manuel Munoz,
and Nicolas Garcia, Phys. Rev. Lett. 83, 2030
(1999)。