The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	磁気力顕微鏡による電流誘起磁壁移動の直接観察
Author(s)	山口, 明啓; 谷川, 博信; 小野, 輝男 他
Citation	大阪大学低温センターだより. 2004, 128, p. 1-6
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10464
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

研究ノート

磁気力顕微鏡による電流誘起磁壁移動の直接観察

基礎工学研究科　山口明啓、谷川博信*、小野輝男*、
那須三郎（内線　6430）
（＊現所属：京都大学化学研究所）
E-mail: akinobu @moss.mp.es.osaka-u.ac.jp

1．はじめに

金属人工格子で発見された巨大磁気抵抗効果を利用した読取りヘッドによってハードディスク（HDD）の劇的な高密度化が実現され、トンネル磁気抵抗効果の発見は大容量・高速・低消費電力な不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）の開発へ結びついた。これらのデバイスのように電子の二つの自由度である電荷とスピンの両方を利用するスピントロニクスと呼ばれるエレクトロニクスの新しい分野が急速に発展している[1]。強磁性体を用いたスピントロニクスデバイスでは、強磁性体の磁化方向を制御することが必須となる。

図１に現在開発競争が行われている MRAM の基本構造概念図を示す。MRAM は強磁性体／絶縁体／強磁性体を基本構成とする強磁性トンネル接合（TMR 素子）の電気抵抗が２つの強磁性体の相対磁化方向に依存することを利用するメモリである。TMR 素子は二つの強磁性体の磁化の方向が平行と反平行の場合で、トンネル抵抗値が異なる。この特性を利用して、磁化の方向に対応した二つの状態を作り出し、かつ、エネルギーを消費することなく二つの状態を保持する（不揮発性）ことができる。情報の読出しは二つの状態のトンネル抵抗の違いを利用し、書込みは一方の強磁性体の磁化の向きを変える（磁化反転）ことで行う。図に示されるように、この情報書込みに対応する磁化反転は、ビット線と書込みワード線に流れる電流によって発生する磁場を用いて行われてい

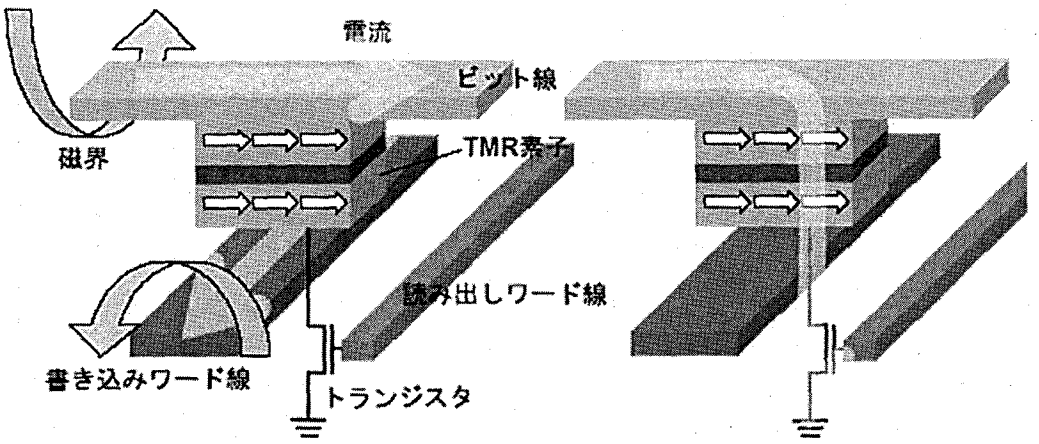

図１　MRAM 基本構造概念図

る。電車の切符、ビデオテープ、ハードディスクなど強磁性体の磁化で情報を蓄えるすべての機器で、情報書込みは磁場を用いて行われている。1819年にエルステッドが導線を流れる電流によって方位磁針の向きが変わるのを発見して以来200年近く、磁石の磁化の向きは電流によって作られる磁場で制御されてきた。量子力学に基づくトンネル素子をコアに持つ21世紀の MRAM が、この古典的方法で動作しているというのは何ともお粗末な話ではないか。

これに対し、磁場ではなく磁石を流れる電流で磁化状態を制御しようという研究が最近盛んとなってきた[2,3]。電流を運ぶ伝導電子と磁化を担う磁気モーメントとの直接相互作用を利用した磁化反転は、素子以外の空間へ広がってしまう磁場を使うより、はるかに効率的であると考えられる。私たちのグループでは、磁化の境界である磁壁といわれる部分を[4]、電流によって動かす研究を行っている[5]。この磁壁の電流駆動という現象は、はじめ Berger によって理論的に指摘された[6-8]。彼は実験グループとともに、パーマロイ薄膜を用いた先駆的な実験も行っている[9,10]。彼らの実験では、薄膜を用いていたために磁壁を動かすために数十アンペアもの大電流が必要であった。このため、電流誘導磁場の影響を無視できない、デバイス応用の可能性が低いなどの理由で暫くの間大きな展開は見られなかった。しかし、近年のスピントロニクス実現へ向けた機運の高まりとともに彼らの実験は見直され、微細加工技術を駆使して作製した試料を用いた研究が盛んに行われている[5,11-15]。ここでは、サブミクロン幅の磁性細線中に閉じこめたひとつだけの磁壁が電流によって動く様子を磁気力顕微鏡で直接観察した結果を紹介する。

2．磁気力顕微鏡観察

試料は電子線リソグラフィーとリフトオフ法を用いて作製されたパーマロイ（$Ni_{81}Fe_{19}$）磁性細線である。図２に試料の概念図を示す。試料には磁壁注入源として機能するパッド部[16]と注入された磁壁の移動を止めるための湾曲部が存在する[17]。試料の磁性細線の厚みは10nm であり、４つの電極部分は厚み20nm の銅端子である。MFM 観察部分は図２の網線部分である。

磁壁を細線内に導入した後の MFM 観察像が図３(a)である。磁性細線の湾曲部の明るいコントラストは N 極からの漏れ磁場を示し、このコントラストが磁性細線に導入された単一磁壁を示している。したがって、図３(a)の状態の磁区構造は図３(d)に示されるように、N 極と N 極がぶつかった構造（head-to-head）である。図３(a)の観察の後、パルス電流（1.2×10^{12}A/m^2, 5 μs）を図の左から右へ流した後の MFM 観察像が図３(b)である。磁壁は電流と逆方向の右から左へと移動した。次に、電流方向を逆にする

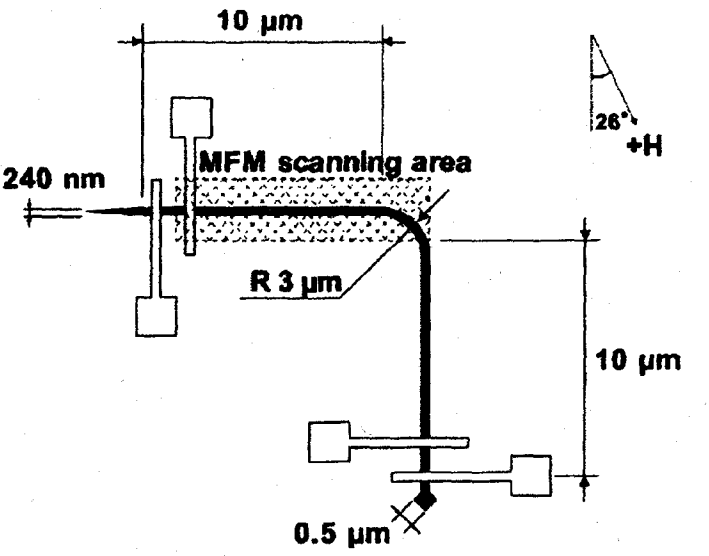

図２　試料概念図。磁気力顕微鏡の観察範囲は図の網掛け部分である。

と磁壁も逆方向に動き、図3(c)に示される位置に磁壁が移動した。

上述した磁壁の電流駆動がパルス電流の作り出す磁場による効果ではないことを示すために、磁壁の極性を変えた実験を行った。磁壁の極性は、磁場掃引過程を磁場方向だけ逆にすれば変えることができる。誘導磁場が磁壁を動かしているならば、極性の異なる磁壁の移動方向は逆になるはずである。しかし、図4(a)−(c)に示されるように、暗コントラスト（S極からの漏れ磁場に対応）の移動方向は明コントラストの場合と同じ振る舞いをすることがわかった。このことから、誘導磁場による磁壁の電流駆動は否定された。そして磁壁は極性にかかわらず必ず電流の向きと反対に（つまり電子の移動する方向に）移動することがわかった。

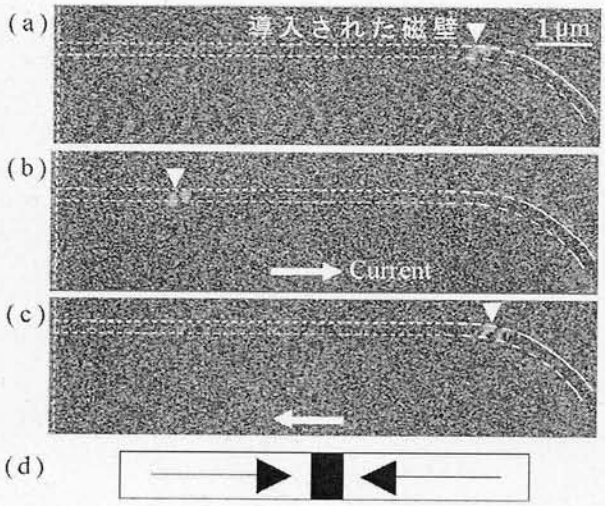

図3　磁気力顕微鏡による観察結果。
(a)　白破線で囲まれた領域が磁性細線。明るく見える部分が磁壁。
(b)　パルス電流を流した後に磁壁は電流と逆方向（電子の移動方向）に動いた。
(c)　電流の方向を逆転すると磁壁も逆方向へ動いた。
(d)　磁区構造の概念図。N極とN極がぶつかった磁壁ができている。

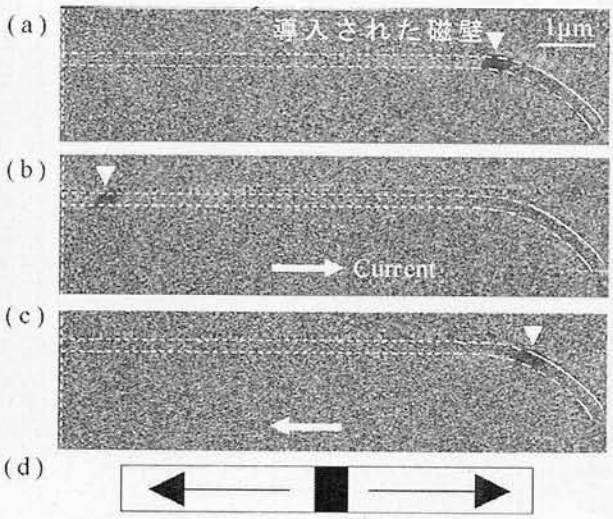

図4　磁気力顕微鏡による観察結果
(a)　暗く見える部分がS極とS極がぶつかった磁壁。
(b), (c)　S極とS極がぶつかった磁壁でも電流と逆方向に動いた。これは電流によって誘起された磁場が磁壁を動かしたのではないことを示している。

磁壁のMFM観察結果とマイクロマグネティクスシミュレーションを比べることで、磁壁の内部構造を決定することが可能である。実験で用いた試料サイズの磁性細線に対して様々な初期条件でシミュレーションを行うと図5(c)と5(d)の2通りの磁気構造が得られた。エネルギーは図5(c)の渦構造が低かった。これら二つの磁気構造に対してMFM像のシミュレーションを行った結果が図5(e)と5(f)であり、図5(g)の磁壁部分を拡大したMFM像と比べると、実験で実現した磁壁は渦構造を持つことが分かる。

図6はパルス電流（1.2×10^{12}A/m^2, 0.5μs）ごとのMFM観察結果である。磁壁は1パルスごとにほぼ同じ距離移動し、パルス電流によって磁壁の位置を任意に変えることが可能であることを示している。図7に磁壁移動距離の電流パルス幅依存性を示す。電流密度は1.2×10^{12}A/m^{2}である。磁壁移動距離はパルス幅にほぼ比例し、磁壁の移動速度が3 m/sと求まった。パルス電流の電流密度を増すと磁壁の移動速度も大きくなるという結果も得られている。

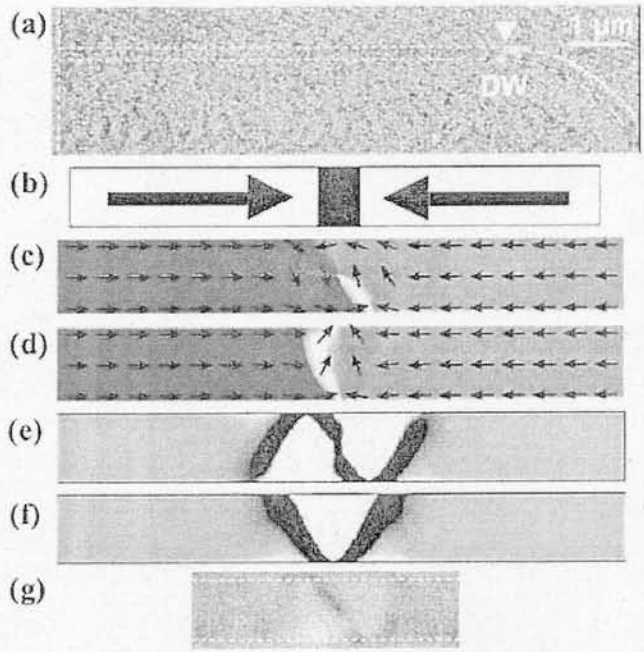

図5　マイクロマグネティクスシミュレーション結果から計算したMFM像と実際のMFM観察像を比較すると、磁壁は渦構造を持つことがわかる。

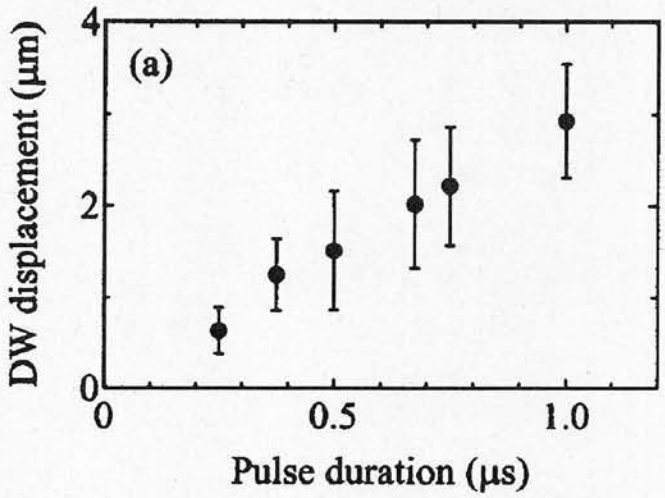

図7　磁壁移動距離の電流パルス幅依存性。電流密度は1.2×10^{12}A/m^{2}である。磁壁移動距離はパルス幅にほぼ比例し、磁壁の移動速度は3 m/sである。

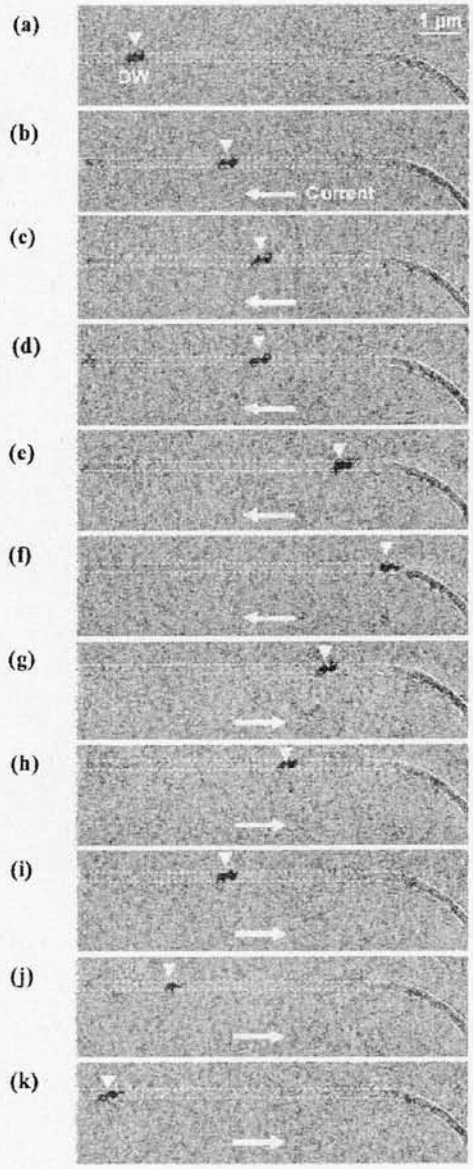

図6　パルス電流（1.2×10^{12}A/m^2，0.5 μs）ごとのMFM観察結果。磁壁は1パルスごとにほぼ同じ距離移動している。

3．スピントランスファー効果

阪大の多々良と河野によって、磁壁の電流駆動現象の定式化が行われた[18]。多々良・河野理論では、伝導電子の運動量が磁壁に与えられる効果と伝導電子のスピン角運動量が磁壁に与えられる効果（スピントランスファー効果）が同等に扱われている。今回の実験のように、伝導電子のフェルミ波長に比べて磁壁の幅が大きい場合は、スピントランスファー効果の寄与が大きいと考えられる。図8は、スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明図である。矢印で示される磁

気モーメントは、磁壁中で徐々に回転し、磁壁の左右で逆向きになっている。電流を右から左に流すと伝導電子が左から右に磁壁を横切って進む（図８(b)）。この際、小さな矢印で示される伝導電子のスピンは、磁気モーメントに沿って回転し、スピン方向が変化する。これは、伝導電子の角運動量が変化したことを意味する。角運動量保存を考慮すれば、伝導電子のスピン角運動量の変化分は磁気モーメントへ移動したはずである。結果として、磁壁中の磁気モーメントは図８(c)のように回転し、磁壁が移動することになる。

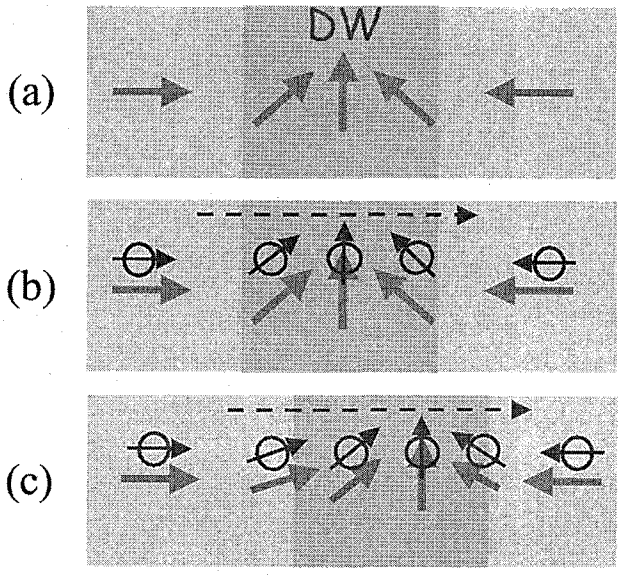

図８　スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明図

(a)　磁壁の概念図。矢印が磁気モーメントを表し、磁気モーメントが連続的に方向を変えている部分が磁壁である。

(b)　電流を流すとこで伝導電子が磁壁を通過する。小さな矢印で示される伝導電子のスピンは、磁気モーメントに沿って回転し、スピン方向が変化する。

(c)　伝導電子のスピン角運動量の変化分は磁気モーメントへ移動し、磁壁中の磁気モーメントは回転する。

４．まとめ

磁気力顕微鏡を用いて電流誘起磁壁移動を直接観察した実験を紹介した。磁性細線へ流すパルス電流の強さ・長さ・極性を調整することで、磁壁の位置を自由に制御することができた。したがって、最近提案された磁壁移動を利用した論理演算素子[19]や磁気スイッチ[20]などのデバイスを、磁場ではなく電流で動作させることが可能であるがわかった。既に述べたように、現状の MRAM では、電流によって発生する磁場を用いて素子の磁化方向を反転することで情報の書込みを行っている。実際、４Mbit ～16Mbit のプロトタイプは既に発表されている。しかし、この書込み方式では磁気抵抗素子を微小化すると書込みに必要な電流値が急激に増大してしまうため、集積化は64Mbit ～128Mbit 程度が限界であるといわれている。本稿で紹介した電流誘起磁壁移動を用いれば、MRAM を構成するトンネル磁気抵抗素子の二つの強磁性体の一方の強磁性体だけに電流を流すことで磁化を反転し情報を書き込むことが可能である。この方法では動作原理が伝導電子と磁気モーメントとの直接の相互作用に基づいているため、素子の微細化にともなって必要な電流が減少する。したがって、電流誘起磁壁移動を用いた書込みは本質的に集積化に適している。応用へ向けては、磁壁を動かすために必要な臨界電流密度の低減が課題となるが、材料や試料形状を最適化することで解決できるだろう。

5．謝　辞

本研究は、三宅耕作（東北大学工学研究科）、壬生攻（京都大学低温物質科学研究センター）、新庄輝也（国際高等研）の各氏との共同研究である。多々良源（大阪大学理学研究科）、河野浩（大阪大学基礎工学研究科）、鈴木義茂（大阪大学基礎工学研究科）、湯浅新治（産総研）の各氏には貴重な議論をしていただいた。本研究は、文部科学省 COE プログラム「多元環境下の強相関電子相」、文部科学省科学技術振興調整費先導的研究等の推進「ナノスピントロニクスのデザインと創製」の援助を受けた。

参考文献

[1]　「スピンエレクトロニクスの最前線」、シーエムシー出版(2004).

[2]　J. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater., **159**, L1 (1996).

[3]　J. A. Katine *et al.*, Phys. Rev. Lett., **84**, 3149 (2000).

[4]　外部磁場による磁壁の移動については、パリティ2001年5月号の「走るN極とS極の境目」、あるいは、T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto K. Mibu, N. Hosoito, T. Shinjo, Science, **284**, 468 (1999).

[5]　A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, T. Shinjo, Phys. Rev. Lett., **92**, 077205 (2004).

[6]　L. Berger, J. Appl. Phys., **49**, 2156 (1978).

[7]　L. Berger, J. Appl. Phys., **55**, 1954 (1984).

[8]　L. Berger, J. Appl. Phys., **71**, 2721 (1992).

[9]　P. P. Freitas and L. Berger, J. Appl. Phys., **57**, 1266 (1985).

[10]　C. -Y. Hung and L. Berger, J. Appl. Phys., **63**, 4276 (1988).

[11]　L. Gan *et al.*, IEEE Tran. Magn. **36** 3047 (2000).

[12]　H. Koo, C. Krafft, R. D. Gomez, Appl. Phys. Lett., **81**, 862 (2002).

[13]　N. Vernier *et al.*, Europhys. Lett. *65 (2004) 526.*

[14]　J. Grollier *et al.*, Appl. Phys. Lett., **83**, 509 (2003).

[15]　M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura, H. Ohno, Nature, **428**, 539 (2004).

[16]　K. Shigeto, T. Shinjo, T. Ono, Appl. Phys. Lett., **75**, 2815 (1999).

[17]　D. A. Allwood, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **81**, 4005 (2002).

[18]　G. Tatara and H. Kohno, Phys. Rev. Lett. **92**, 086601 (2004).

[19]　D. A. Allwood *et al.*, Science, **296**, 2003 (2002).

[20]　J. J. Versluijs, M. A. Bari, and J. M. D. Coey, Phys. Rev. Lett., **87**, 026601 (2001).