



強磁性細線における 単一磁壁のダイナミクス

— 電流で磁化状態を制御する —

小野 輝男

京都大学 化学研究所 教授

金属人工格子における巨大磁気抵抗効果の発見は、電気伝導への電子スピンの重要性を認識させ、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分野へと発展してきました。私は、この分野の創成期である巨大磁気抵抗効果研究に微細加工技術を導入して以来、三次元的に構造制御されたナノ磁性体の作製とその新規物性探索を中心課題として研究してきました。本稿では、磁場ではなく電流で磁化状態を制御した研究をご紹介します。

1.はじめに

19世紀初頭にエルステッドが導線を通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、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ました。コンピューターや最近のビデオに備わっているハードディスクドライブは磁化方向で情報を蓄えています。ここでの情報の書き込みも磁場で行われています。現在のデバイスでは、磁化状態を制御するために磁場を発生させる部分が必要です。

私たちのグループでは、磁化の境目である磁壁といわれる部分を^[1]、磁場ではなく電流によって動かすことに成功しました^[2-3]。

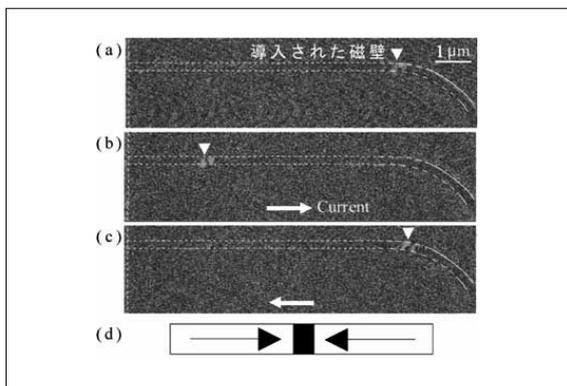


図1 磁気力顕微鏡による観察結果

- (a) 白破線で囲まれた領域が強磁性細線：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) 磁化状態の概念図：N極とN極がぶつかった磁壁ができています。

2.研究の成果

幅240nm、厚さ10nmの強磁性細線（ $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 合金）を微細加工によって作製しました。磁壁を細線内に導入した後の磁気力顕微鏡観察結果を図1 (a) に示します。白破線で囲まれた領域が強磁性細線です。磁気力顕微鏡は試料から漏れる磁場を検知する顕微鏡であり、図1 (a) の中の明るいコントラストが磁壁です。この実験では、明るいコントラストはN極からの漏れ磁場を示し、暗いコントラストはS極からの漏れ磁場を示しています。したがって、図1 (a) の状態の磁化状態は図1 (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)

であることがわかります。図1 (a) の観察の後、パルス電流 ($6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2, 5 \mu\text{s}$) を図の左から右へ流した後の磁気力顕微鏡観察像が図1 (b) です。磁壁は電流と逆方向（つまり電子の移動方向）へと移動しました。次に、逆方向のパルス電流を流すと磁壁も逆方向に動き、図1 (c) に示される位置に磁壁が移動しました。ここで観察された電流による磁壁移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いました。つまり、S極とS極がぶつかったtail-to-tail磁壁で同じ実験を行いました。電流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すが、tail-to-tail磁壁の移動方向はhead-to-headの場合と同じであることがわかり、誘導磁場による磁壁移動の可能性を否定することができました。

図2は、電流パルスを短くして ($6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2, 0.5 \mu\text{s}$) 磁壁の移動を連続観察した結果です。磁壁は1パルスごとに電流と逆方向にほぼ同じ距離動いています。したがって、パルス電流の方向、強さ、パルス長を調整することで磁壁を任意の位置に動かすことができます。またこの実験結果からパルス電流が流れている間の磁壁の移動速度が約3m/sであることがわかります。パルス電流の電流密度を増やすと磁壁の移動速度も大きくなるということもわかりました。

どうして電流を流すだけで磁壁が動いたのでしょうか？ 強磁性体の中では電気伝導を担う伝導電子のスピンの向きが揃っている、というところに秘密があります。このことを概念的に示したのが図3です。図3 (a) の矢印が強磁性体の磁化を生む磁気モーメントです。磁気モーメントは図3 (a) の左側では右向きに、図3 (a) の右側では左向きに揃っていますが、その間で連続的に方向を

変えています。この磁気モーメントの向きが徐々に変化している領域が磁壁です。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みます(図3(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、スピン方向が変化してしまいます。このことは、伝導電子のスピンの角運動量が変化してしまったことを意味します。このスピンの角運動量の変化分は何処へ行ってしまったのでしょうか? 角運動量保存則から、伝導電子のスピンの角運動量の変化分は相互作用の相手である磁壁の中の磁気モーメントへ移動したはず

です。結果として、磁壁中の磁気モーメントは図3(c)のように回転し、磁壁が移動することになります。

3. 今後の展開

強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ることがわかりました。したがって、本稿で紹介した現象は、磁気ランダムアクセスメモリへの情報書き込み、磁壁移動を利用した論理演算素子^[4]や磁気スイッチ^[5]の無磁場動作などに応

用できると考えられます。磁場を作り出すための導線は不要となり、単純なデバイス構成が可能となるでしょう。動作原理が伝導電子と磁気モーメントとの直接的相互作用に基づいているため、ナノ磁気デバイスの駆動に向いていることも将来の応用への期待を膨らませます。

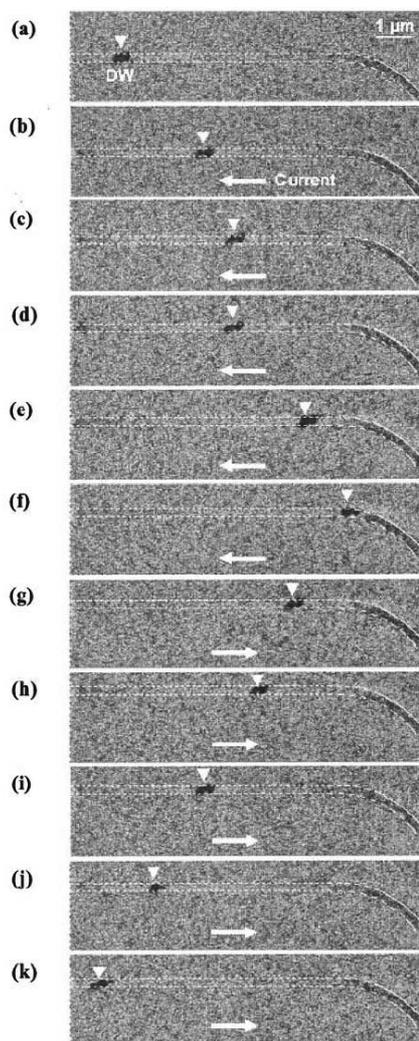


図2 パルス電流 ($6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2, 0.5 \mu\text{s}$) ごとの磁気力顕微鏡観察結果。磁壁は1パルスごとにほぼ同じ距離移動している。

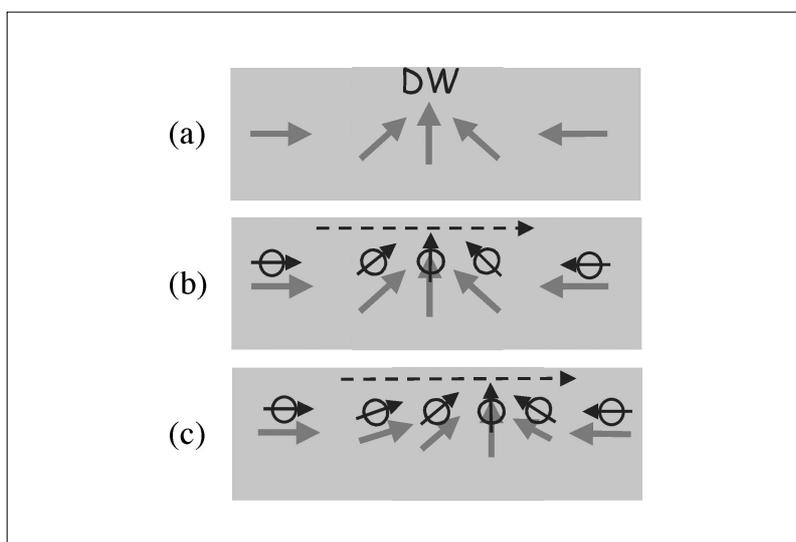


図3 スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明図
(a) 磁壁の概念図: 矢印が磁気モーメントを表し、磁気モーメントが連続的に方向を変えている部分が磁壁である。
(b) 電流を流すと伝導電子が磁壁を通過する。小さな矢印で示される伝導電子のスピンは、磁気モーメントに沿って回転し、スピン方向が変化する。
(c) 伝導電子のスピンの角運動量の変化分は磁気モーメントへ移動し、磁壁中の磁気モーメントは回転する。

References (参考文献)

- [1] T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto, K. Mibu, N. Hosoi and T. Shinjo, "Propagation of a Magnetic Domain Wall in a Submicrometer Magnetic Wire", *Science* 284 (1999) 468-470.
- [2] A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, T. Shinjo, "Real-space observation of current-driven domain wall motion in submicron magnetic wires", *Phys. Rev. Lett.*, 92 (2004) 077205.
- [3] A. Yamaguchi, S. Nasu, H. Tanigawa, T. Ono, K. Miyake, K. Mibu, and T. Shinjo, "Effect of Joule heating in current-driven domain wall motion", *Appl. Phys. Lett.*, 86 (2005) 012511.
- [4] D. A. Allwood, Gang Xiong, M. D. Cooke, C. C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier, R. P. Cowburn, "Submicrometer Ferromagnetic NOT Gate and Shift Register", *Science*, 296 (2002) 2003.
- [5] J. J. Versluijs, M. A. Bari, and J. M. D. Coey, "Magnetoresistance of Half-Metallic Oxide Nanocontacts", *Phys. Rev. Lett.*, 87 (2001) 026601.