

# 強磁性体金属ナノ構造における 磁化ダイナミクス

林 将 光\*

## 1. はじめに

本稿では、強磁性体細線中の磁壁を制御する技術について紹介する。サブミクロン幅の強磁性体細線中に閉じ込められた磁壁の位置や速度、その移動機構を明らかにした最近の実験結果について記述する。また、近年発見されたスピントルクと呼ばれる現象を利用して、強磁性体の磁化を電気で操作する手法や、その技術を生かした次世代メモリ<sup>(1)</sup>について触れる。

## 2. 強磁性体細線中の磁壁

細線の作製には微細加工技術を用いている。スパッタ法などで製膜した薄膜を、電子線リソグラフィや Ar イオンミリングなどの微細加工技術を用いて、サブミクロン幅の細線に加工する。電気抵抗測定を行えるよう、Ru や Rh など、表面が酸化しても比較的電気伝導度が大きい材料を電極に用いた。

強磁性体細線中の磁壁の運動は、磁気構造を形状によって制御しやすいソフト磁性材料(結晶磁気異方性が形状磁気異方性よりも小さい)を中心に研究がおこなわれてきた。特に、パーマロイ(Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>)はその扱いやすさから、薄膜やナノ構造において多くの実験結果が報告がされている。

ソフト磁性材料を細線状に加工した場合、形状磁気異方性によって磁化は通常細線の長さ方向を向く。細線の幅が厚さより大きい系においては、Neel 磁壁と呼ばれる磁化構造をもつ磁壁がエネルギー的に安定である<sup>(2)</sup>。Neel 磁壁では磁壁の磁化が主に面内を向いているが、細線の断面積の大きさ

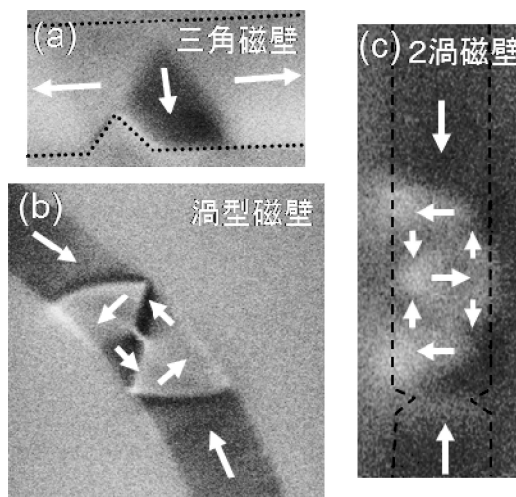


図1 パーマロイ細線において観測されるおもな磁壁。測定には磁気力顕微鏡を用いた。細線幅、厚さによって安定的磁壁の内部構造は変化する。(a)幅 200 nm, 厚さ 10 nm, (b)幅 200 nm, 厚さ 20 nm, (c)幅 300 nm, 厚さ 20 nm。

によっては複雑な内部構造をとり得る<sup>(3)(4)</sup>。図1には、パーマロイ細線において現在観測されているおもな磁壁の内部構造を、磁気力顕微鏡を用いて測定した結果を示す。断面積が小さい(幅が狭い)細線では、Neel 磁壁の原型ともいえる三角磁壁が確認される。幅が数百ナノメートル程度の細線では、三角磁壁とともに磁壁内部の磁化構造が渦を巻く渦型磁壁も多く観測される。細線幅や厚さがさらに大きくなると、磁壁の中に渦構造を二個以上もった複雑な磁化構造をもつ磁壁が観測されるようになる。磁壁の内部構造は、特に電流で

\* 物質・材料研究機構磁性材料センター 主任研究員(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)  
Magnetization Dynamics in Magnetic Nanostructures; Masamitsu Hayashi (Magnetic Materials Center, National Institute for Materials Science, Tsukuba)  
Keywords: magnetic nanowires, domain walls, spin transfer torque, magnetization dynamics, NiFe  
2010年3月29日受理

磁壁を駆動しようとした場合に閾値電流密度に影響を及ぼすため<sup>(5)</sup>, 材料や形状とともに重要な評価パラメータとなる。

### 3. 電流駆動による磁壁の移動

強磁性体の磁化の操作には従来磁場の印加が用いられてきた。しかし近年、強磁性体細線中に電流を流すことで、磁壁移動を誘起できることが発見された<sup>(6)-(8)</sup>。このような、電流による磁壁の移動は、スピントルク<sup>(9)(10)</sup>と呼ばれる、強磁性体中の磁気モーメントを形成する局在電子と、スピン分極電流を形成する伝導電子との交換相互作用によって起こる。電流を用いて強磁性体細線中の磁壁を動かす試みは、スピントルク理論が提唱された1996年以降、活発化している。

電流駆動による磁壁の移動と、従来用いられてきた磁場による磁壁の運動の大きな違いは、細線中に2個以上の磁壁が存在した場合に顕著に現れる。図2にパーマロイ細線の磁化構造を模式的に表したものを示す。磁区と磁区の境界をなす磁壁は、隣接する磁区の磁化方向によって、2つのタイプに分けられる。隣り合う磁区の磁化が磁壁の方を向いている場合、磁壁はHead to head (HH)と呼ばれ、逆の場合はTail to tail (TT)と呼ばれる。単純に磁石のN極同士またはS極同士が向き合っているかの違いである。

この系に、磁場を印加すると隣り合う磁壁はそれぞれ逆の方向に進む。図2(a)の場合、左方向に磁場が印加されているため、左向きの磁化が安定状態となり、右向きの磁化を持つ真中の磁区の面積を縮小する方向に磁壁が動く。つまり、2つの磁壁は反対方向に動く。(右向きの磁場を印加した場合、ここでは磁壁は反発するように動く。)一方、この系に電流を流した場合、2つの磁壁は同じ方向に進む(図2(b))。磁壁の進行方向は一般的には電流と逆向き、すなわち電子の流れと同じ方向である。

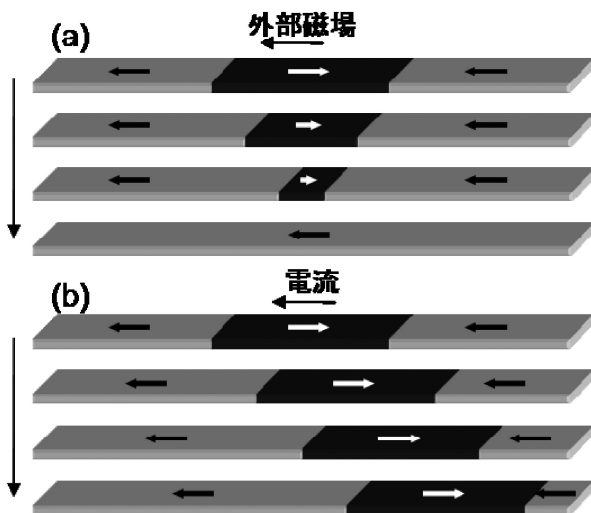


図2 細線中に2個の磁壁が存在した場合の、磁壁の磁場、電流に対する応答の違い。(a)は外部磁場、(b)は電流を印加し続けた場合の細線の磁化状態の経時変化を上から下に示した。

電流の注入による磁壁の移動原理はスピントルク理論を用いて説明されている<sup>(11)-(15)</sup>。強磁性体中の伝導電子は、スピン依存散乱によって、そのスピンの向きが磁化と同じ方向を向いているように見える<sup>(16)</sup>。強磁性体細線に電流を流すと、電子がひとつの磁区から磁壁を介して次の磁区に進入する。例えば図2(b)のように電流を流した場合、電子は左向きの磁化を持つ磁区から、磁壁を通過して右向きの磁化を持つ磁区に進入する(その後、また左向きの磁化を持つ磁区に入るがここでは考慮しない)。磁壁を通過する際、伝導電子のスピンもまた左向きから右向きに方向転換する。スピンの向きの変更は、(スピン)角運動量を損失したことに対応する。その角運動量を保存するための一つの方法として、磁壁移動が生じるのである。この場合、隣接する磁区の磁化方向にかかわらず、電流の向きのみによってその移動方向が決定されるため、図2(b)のように2つの磁壁が同じ方向に動くのである。このようにスピントルクを用いれば、細線に電流を流すことによって、細線内の多数の磁壁を一斉に、かつ同じ方向に移動させることができる。磁壁移動メモリはこの原理を利用して情報操作を行う。

### 4. 磁壁移動メモリ

磁壁移動メモリ<sup>(1)(17)</sup>とは、強磁性体細線の中に多数の磁区を形成し、各磁区の磁化方向、例えば右向きか左向きかで、情報のビット、0か1かを記録するメモリである。各細線には数個から100程度のビットを形成(磁区を形成)し、1本の細線に対して情報の読み込み素子、書き込み素子がそれぞれ1つずつ配置されている(図3参照)。情報の読み込みや書き替えには、制御したい磁区を読み込み・書き込み素子まで動かして各操作を行う。これには細線中の全磁区(磁壁)を同時に、かつ同じ方向へ移動させなければならないため、スピントルクを利用した電流注入による磁壁の位置制御が必要となる。

磁壁移動メモリの動作原理のイメージとして、ハードディスクの動作原理を想像するとわかりやすい。ハードディスクドライブで読み書きをする際には、記録・再生ヘッドが、情報が記録されているメディアに機械的に近づき、目的のビットの読み込み・書き込みを行う。一方、磁壁移動メモリでは、読み書きを行いたいビットの移動を電氣的に行う。すなわちメディアの中の磁化構造を電氣的に動かすことで記録・再生素子の近傍まで目的のビットを動かすのである。磁壁移

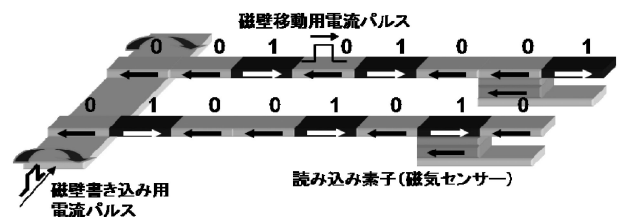


図3 磁壁移動メモリの原理図。

動メモリは、機械的に動く部品がないため、固体メモリとしての信頼性、動作速度が期待でき、さらにハードディスク並み、またはそれ以上のストレージ容量の実現が原理的に可能である。「ストレージクラスメモリ」と呼ばれる次世代メモリの候補のひとつとして期待されている。また、最近では磁壁の電流駆動を利用した超高速メモリの試作も発表されている<sup>(17)</sup>。

## 5. 電流駆動による磁壁の位置制御

細線に電流を注入することで磁壁の位置を制御できる様子を磁気力顕微鏡で観察した結果を図4(b)に、その様子を模式的に表したものを図4(a)に示す。図4(a)では、まず細線に磁壁を1個注入し(状態1)、電流パルスを右から印加(電流は左向きに流れる)した後の細線の磁化状態を状態2に示す。次に、状態2において電流パルスを右から印加し、その後の磁化状態を状態3に示す。この過程で磁壁が電流と逆向きに動いていく様子が見て取れる。同様に、状態4、5では電流パルスを左から注入し、その後の磁化状態を状態5、6にそれぞれ示した。

図4(b)には、(a)で模式的に示した実験について、磁気力顕微鏡を用いて測定した結果を示す<sup>(1)</sup>。ここでは、細線中に多数のノッチ(三角形の欠陥)を加工した細線を用いた。ノッチが形成されている場所は磁壁にとってエネルギー的に安定な場所となるため、磁壁がピン止めされやすい。また、磁壁移動メモリにおいては、細線中にこのようなノッチを加工することで、ハードディスクの記録媒体のビット長に対応する区間を物理的に定義することができる(ノッチとノッチの間の空間が1ビットとなる)。

図4(b)では、状態1-7において電流パルスを右から印加し(電流は左向きに流れる)、その後の細線の磁化状態を状態2-8にそれぞれ示した。磁気力顕微鏡像から磁壁が電流の流れる方向と逆方向に移動していく様子が見て取れる。同様に、状態9-14において電流パルスを左から印加する(電流は右向き)と、磁壁が左に動く様子が見て取れる(状態10-15)。

電流パルスを印加後、磁壁が細線中のいずれかのノッチの近傍にとどまっていることがわかる。電流パルスの長さが短いため、1回のパルス印加によって磁壁が1ビット分の距離(隣接するノッチ間の距離)を移動している。原理的には、電流パルスの長さを変えることで、移動距離を制御することが可能である(文献(5)に電流パルスの長さを変調することで、磁壁の位置を制御できることを示した結果が報告されている)。

ここでは、ノッチによってピン止めされた磁壁を動かすために、大きな電流パルス(26 mA、電流密度にして $\sim 3 \times 10^{12}$  A/m<sup>2</sup>)を印加している。これまでの実験結果ら、パーマロイ細線では磁壁を動かすのに必要な電流密度が、ピン止めの強さにおよそ比例していることが報告されている<sup>(1)</sup>。メモリーを作製するためには、外的な攪乱から磁壁が動くのを防ぐために、可能な限りピン止めを大きくしなければならない。し

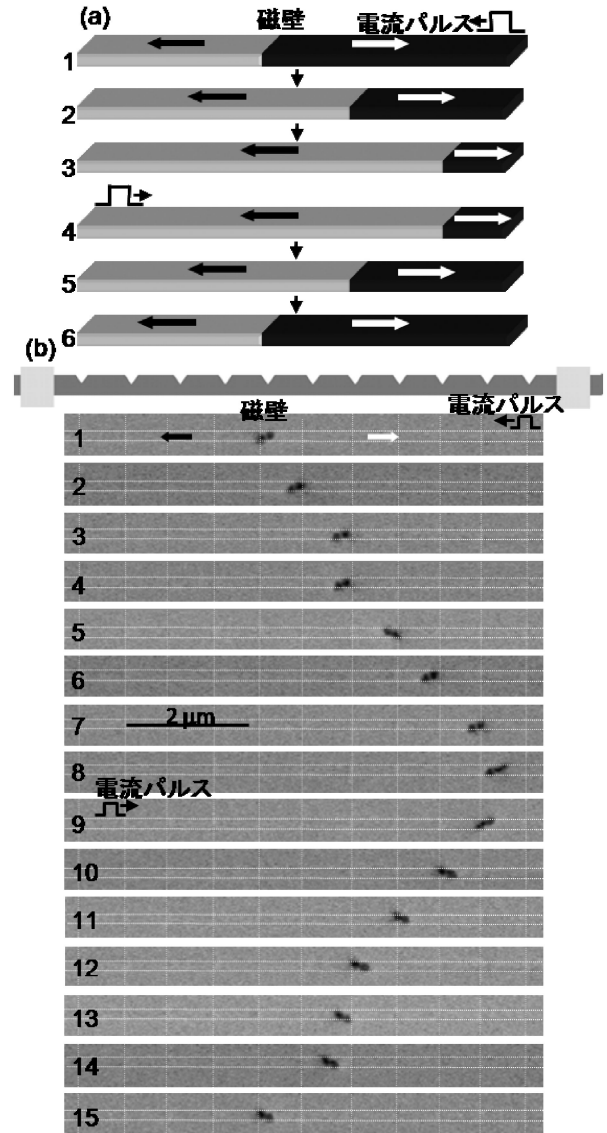


図4 (a)強磁性体細線中に磁壁を1個注入し、電流パルスを印加して磁壁が移動する様子を模式的に表した。1, 2で電流パルスを左から印加し、その後の磁化状態を2, 3にそれぞれ示した。同様に、4, 5では右から電流パルスを印加し、5, 6にその後の磁化状態を示した。(b)パーマロイ細線に磁壁を挿入し、電流パルスを印加した際の磁壁の応答を磁気力顕微鏡を用いて観察した様子。1-7において右から電流パルスを印加し、2-8にその後の磁壁の位置をそれぞれ示す。9-14は電流パルスを左から印加。用いた電流パルスは26 mA、14 ns。細線には11個のノッチが加工してあり、ノッチの位置を縦の白点線で示す。細線中の矢印は磁区の磁化状態を表している。

かしながら、現状ではピン止めを強くすると、駆動電流密度が増加してしまうため、実用化にあたって大きな課題となっている。

図5(b)には図4と同様の細線に磁壁を2個注入し、電流パルスを印加した際の磁気像の観察結果を示す<sup>(1)</sup>。実験の模式図を図5(a)に示す。電流パルスの印加によって、2つの

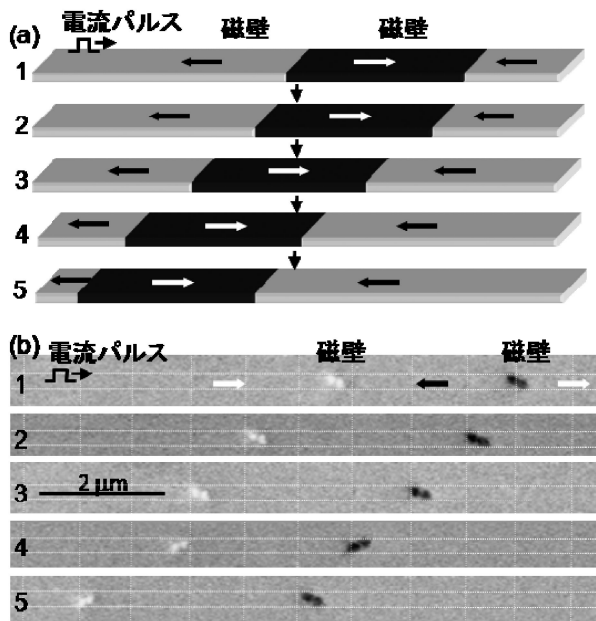


図5 図4と同様のパーマロイ細線に2個の磁壁を挿入し、26 mA、14 nsの電流パルスを印加した際の磁壁の応答を磁気力顕微鏡を用いて観察した結果(b)。(a)には(b)の実験の模式図を示す。1-4で左から電流パルスを印加(電流は右向き)、2-5にその後の磁壁の位置をそれぞれ示す。

磁壁がそれぞれ、電子の移動方向と同じ方向へ移動していることがわかる。従来用いられてきた磁場による磁壁の位置制御では隣接する磁壁を同じ方向に動かすことはできない。この結果は、スピントルクを介した電流による磁壁の位置制御が磁場のそれと大きく異なっていることを明確に示している。

## 6. 磁壁の移動速度測定

最後に、細線中の磁壁がどのような速度で移動するのかわかる。ノッチなどを加工していない(まっすぐな)パーマロイ細線において調べた結果を図6に示す。磁壁の移動速度<sup>(18)(19)</sup>を測定するための手法として、ここではパーマロイの異方性磁気抵抗(AMR)効果を利用した時間分解電気伝導測定を用いた。パーマロイは比較的大きな異方性磁気抵抗効果を示すため、電気抵抗測定によって細線中の磁壁の存在の有無を確認できる。パーマロイの異方性磁気抵抗比は、薄膜で通常1.5-2%程度<sup>(20)</sup>の抵抗変化を示し、電流と磁化の向きが平行のときの方が、それぞれが垂直の場合より抵抗が高い。そのため、細線中に磁壁を注入すると、磁壁がない場合と比較して細線の抵抗が下がる。磁壁の移動速度は、例えば、細線の左端から磁壁を挿入し、磁場や電流を印加して、磁壁が右端から出て行くまでの時間を細線の抵抗測定から求めることで導出できる。

測定した磁壁の移動速度を、印加磁場、電流に対してプロットしたものを図6に示す<sup>(1)</sup>。まず、低磁場で移動速度が

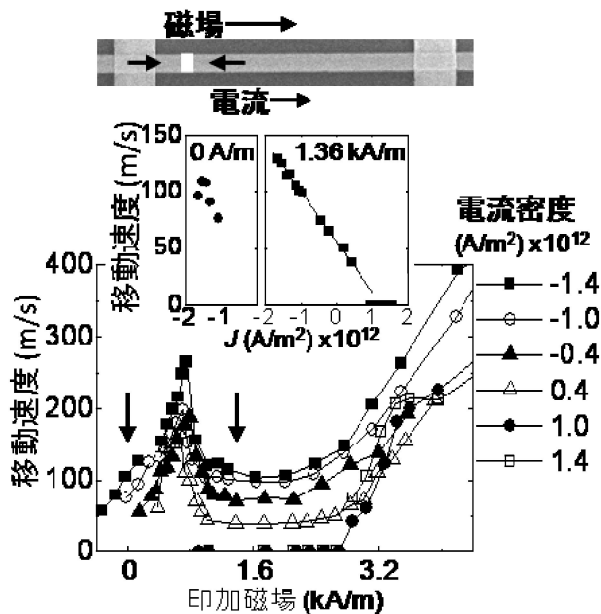


図6 パーマロイ細線における磁壁の移動速度と印加磁場、電流密度の関係。

一度ピークをとっていることがわかる。この現象は1970年代の磁気バブルメモリの研究において明らかにされており、Walker breakdown として知られている<sup>(21)</sup>。シミュレーションや実験結果から、 $H_{WB}$ (速度がピークをとる磁場を $H_{WB}$ とする)より小さな磁場を印加した場合、磁壁は最初の内部構造を保って移動することがわかった<sup>(22)</sup>。一方、 $H_{WB}$ より大きな磁場を印加した場合、磁壁は内部構造を変化させながら移動する。例えば、シミュレーションからは、三角磁壁と渦型磁壁が交互に出現しながら磁壁が移動していることが予想されている。低磁場では磁場印加によって得られたエネルギーを磁壁の推進力に利用しているが、 $H_{WB}$ 以上の磁場ではそのエネルギーが推進力のみならず内部構造の変化にも割り当てているため、移動速度が落ちることがわかっている<sup>(22)(23)</sup>。

磁場で駆動している磁壁に電流を印加した場合、移動速度は電流の向き、大きさによって変化する(図6挿入図右)。磁場による力と、スピントルクの向き(電子の流れの向き)が同じ場合、速度は電流の大きさと共に増加する。一方、それぞれの向きが逆の場合、移動速度は電流の増加と共に減少し、ゼロに近づく。さらに電流の増加を図った場合、磁壁は磁場と反対方向に、電流と同じ向きに移動する(本測定手法ではこの領域の測定はできないため、図6には示していない)。

印加磁場を小さくした場合、ある閾値磁場で磁壁の駆動が難しくなる。これは、細線のエッジや表面におけるランダムな欠陥によるピン止めによって、磁壁が途中で止まってしまうからである。この閾値磁場は臨界駆動磁場と呼ばれ、その値が小さいほど磁壁は抵抗なく細線中を移動できる。図6における細線の臨界駆動磁場はおよそ $\sim 400$  A/mである。

これ以下の印加磁場では、電流で磁壁を駆動しなければならない。図6挿入図左には、磁場が印加されていないときの移動速度の変化を電流密度に対してプロットしたものを示す。電流で駆動した場合の磁壁の移動速度は電流密度が $\sim 10^{12}$  A/m $^2$ で $\sim 100$  m/s程度であることがわかる。磁壁の移動速度は磁壁移動メモリの動作速度を決定するため、重要な制御パラメータとなる。磁壁移動メモリでは、低電流密度の電流パルス印加で高速移動する磁壁を有する材料、構造が求められている。図6において、速度は電流と共に増加しているが、最大電流値で速度が若干減少している。この原因は明らかになっていないが、ジュール加熱(最大電流値で150-200 K程度の温度上昇)による影響も推測される。

## 7. まとめと今後の展望

本稿では、強磁性体細線における磁壁の運動制御に関する研究について記述した。細線中の磁壁の電流駆動位置制御を利用して、磁壁移動メモリを実現するための研究は最近各地で盛んにおこなわれている。これまでに、パーマロイ細線を用いて磁壁移動メモリの基礎となる、磁壁を使ったシフトレジスタの作製は可能であることが報告された<sup>(5)</sup>。しかしながら、磁壁移動メモリの実現に当たってはいくつかの課題が残る。特に問題となるのが、磁壁を駆動するための閾値電流密度が大きいことである。細線の材料、構造、あるいは強磁性体の磁気緩和時間や磁気異方性などの磁気的特性、さらには磁壁の内部構造など、閾値電流密度を下げるために最適化しなければならないパラメータは多い。ストレージクラスメモリとして期待が大きい磁壁移動メモリの実現に向けて、基礎と応用の両側面から研究が進むことを期待したい。

この研究を進めるにあたり、多くの方に御協力いただきました。特に、IBM Almaden Research Centerのスタッフの方々に感謝いたします。

## 文 献

- (1) S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas: *Science*, **320** (2008), 190-194.
- (2) A. Hubert and R. Schafer: *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*, Springer, (2001).
- (3) R. D. McMichael and M. J. Donahue: *IEEE Trans. Magn.*, **33** (1997), 4167-4169.
- (4) Y. Nakatani, A. Thiaville and J. Miltat: *J. Magn. Magn. Mater.*, **290**(2005), 750-753.
- (5) M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner and S. S. P. Parkin: *Science*, **320**(2008), 209-211.
- (6) A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu and T. Shinjo: *Phys. Rev. Lett.*, **92**(2004), 077205.
- (7) M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura and H. Ohno: *Nature*, **428**(2004), 539-542.
- (8) L. Thomas, M. Hayashi, X. Jiang, R. Moriya, C. Rettner and S. S. P. Parkin: *Nature*, **443**(2006), 197-200.
- (9) J. C. Slonczewski: *J. Magn. Magn. Mater.*, **159**(1996), L1-L7.
- (10) L. Berger: *Phys. Rev. B*, **54**(1996), 9353-9358.
- (11) L. Berger: *J. Appl. Phys.*, **55**(1984), 1954-1956.
- (12) G. Tatara and H. Kohno: *Phys. Rev. Lett.*, **92**(2004), 086601.
- (13) S. Zhang and Z. Li: *Phys. Rev. Lett.*, **93**(2004), 127204.
- (14) A. Thiaville, Y. Nakatani, J. Miltat and Y. Suzuki: *Europhys. Lett.*, **69**(2005), 990-996.
- (15) S. E. Barnes and S. Maekawa: *Phys. Rev. Lett.*, **95**(2005), 107204.
- (16) N. F. Mott: *Proc. Roy. Soc., London*, **A153**(1936), 699-717.
- (17) R. Nebashi, *et al.*: *ISSCC Dig. Tech. Papers*, (2009), 462.
- (18) T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto, K. Mibu, N. Hosoiito and T. Shinjo: *Science*, **284**(1999), 468-470.
- (19) D. Atkinson, D. A. Allwood, G. Xiong, M. D. Cooke, C. C. Faulkner and R. P. Cowburn: *Nat. Mater.*, **2**(2003), 85-87.
- (20) T. R. McGuire and R. I. Potter: *IEEE Trans. Magn.*, **11**(1975), 1018-1038.
- (21) N. L. Schryer and L. R. Walker: *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 5406-5421.
- (22) M. Hayashi, L. Thomas, C. Rettner, R. Moriya and S. S. P. Parkin: *Nat. Phys.*, **3**(2007), 21-25.
- (23) J.-Y. Lee, K.-S. Lee, S. Choi, K. Y. Guslienko and S.-K. Kim: *Phys. Rev. B*, **76**(2007), 184408.



林 将光

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
2002年 東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了  
2007年 米国スタンフォード大学大学院工学研究科博士後期課程修了  
同年 IBM Almaden Research Center, Research fellow  
2008年9月- 現職  
専門: 電子スピン物性  
◎金属・酸化物ナノ構造における電子スピンの制御に関する研究に従事。  
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★