

磁性細線の研究動向

宮本泰敬

当所では、高精細で高フレームレートな小型・高性能カメラへの適用を目指して、磁性 細線を用いた映像記録用シーケンシャルメモリーの研究開発を進めている。半導体微細 加工技術を用いて作製した磁性細線では、その長さ方向に電流を流すことで情報を記録 した磁区を高速で移動させることができる。磁性細線のこの特性を利用することで記録 デバイスの小型・軽量化や高速化が実現できると期待される。また、機械的に可動する 部分が無いので、高い信頼性が得られる。ここでは、電流を印加したときの磁性細線中 での磁区の移動の原理などについて述べた後、磁性細線を適用した記録デバイスの研究 開発の動向を紹介する。

1. まえがき

機動性の高い超小型カメラを実現するためには、それに適用する記録装置も小型で軽量でなければならない。また、近年、映像の分野においては、高精細化、すなわち、空間解像度の向上が急速に進むとともに、動画像の画質を改善するために、フレームレート,すなわち、時間解像度も高くする傾向にある。従って、記録装置にも高精細化と高フレームレート化に対応する大容量化と高速化が求められている。現在、代表的な記録デバイスとして、磁気テープ、ハードディスク、光ディスク、半導体メモリーなどがあるが、例えば、画素数約3,300万、フレームレート120Hzのハンドキャリータイプのスーパーハイビジョンカメラを想定した場合、これに適用可能な記録デバイスは現状ではSSD (Solid State Drive) などの不揮発性半導体メモリーに限定される。上記のスペックのスーパーハイビジョンでは映像信号のデータレートが144Gbps (144×10⁹ビット/秒)と高く、記録・再生速度の遅い磁気テープやハードディスク、光ディスクでは数十台〜数百台の機器を並列に動作させなければならず、装置の小型・軽量化が困難なためである。また、可動部のあるデバイスでは信頼性が劣ることも要因の1つである。一方、他の記録装置より動作速度の速い半導体メモリーを用いた記録装置においても、現状の動作速度は十分ではない。

そこで,当所では,小型・軽量で高速動作が可能な記録装置を実現するために,磁性 細線と呼ばれる微小構造を利用した新たな磁気記録デバイスの研究開発に取り組んでい る。半導体メモリーを用いた記録装置の動作速度はハードディスクなどの機械的動作部 を持つ現状の磁気記録装置の動作速度よりも速く,1ビットの情報の記録時間は原理的 には約1nsである。一方,機械的動作部の無い究極の磁気記録における記録時間は原理 的には数10ps~100psであり,磁気記録の方が格段に速い¹⁾。この記録時間の差は記録原



理の違いによっている。1図に示すように、半導体メモリーでは「記憶セル」の電子を 物理的に移動させ、電子の有無で情報を記録している。一方、磁気記録では磁石を構成 している電子の自転方向をその場で変え、磁石のN極とS極の向きを変えることで情報を 記録している。物理的に電子を移動させる必要がないので、磁気記録の方が高速になる。 磁性細線は高速な磁気記録を利用したもので、ハードディスクにおけるデータトラック を取り出して、直線状に伸ばしたようなものである。また、ハードディスクではディス クを回転させて情報の記録・再生を行うので動作速度が遅いが、磁性細線では機械的動 作の代わりに長さ方向に電流を流し、磁性細線中の微小な磁区を順次、移動させて情報 を記録・再生するので高速動作が可能である。磁性細線では機械的動作部も無く、高速 動作と高い信頼性が期待できる。

本稿では,磁性細線の構造や電流印加による磁区移動の原理を述べた後,磁性細線を 適用した記録デバイスの研究開発の動向を紹介する。

2. 磁性細線

磁性細線の構造を概説した後、磁性細線中の磁区を移動させる方法を述べる。

2.1 磁性体と磁区

磁性体とは一般に磁石に引き寄せられる材料であり,磁性体は複数の磁区と呼ばれる 磁気モーメント*¹が揃った領域に分割されている。**2**図(a)に示すように,外部に磁界 * 1 磁石の強さおよび向きを表すべ クトル量。



が無い場合には、例えば、各磁区は閉じたループを構成し、互いの磁力を打ち消し合っ て磁極(N極またはS極)を形成しない。一方、磁性体に外部から磁界を印加し、その強 度を大きくしていくと、2図(b),(c)に示すように、磁区と磁区を隔てている磁壁が 移動して、印加した磁界の向きと同じ向きに磁化している磁区の面積が増加し、最終的 に、その方向に磁化している磁区だけになる。この状態を磁性体が磁化された状態と呼 ぶ。磁性体を用いた工学的な応用は非常に幅広いが、いずれの場合も外部の磁界や電流 で磁性体の内部の磁区の構造を制御している。

2.2 磁性細線

磁性体を1方向に細くしていくと形状磁気異方性*²が現れ,3図に示すように,外部 磁界を印加していない状態でも磁極がその両端に現れ,長さ方向に磁区が生じる。磁性 体の幅をサブミクロンオーダーまで細くした構造が磁性細線である。一般的な磁性細線 では、1つの磁区の向きは磁性細線の長さ方向に揃うことが知られており,このような 状態の磁性細線を「長手方向に面内磁化した磁性細線」と呼んでいる²⁾。この長手方向に 面内磁化した磁性細線では,磁壁でN極とN極,または、S極とS極が向き合って反発し, 磁壁を挟む磁区でお互いの磁化を逆方向に弱めるので,磁区の安定性が低下する。特に, 磁性細線を高密度記録媒体として用いる場合には,磁区内のN極とS極の距離が短くな り,隣接する磁区からの影響が大きくなるので,安定性が更に低下する。

一方,磁性細線の厚さ方向にN極とS極が生じる材料を用いて作製した垂直磁化磁性細線 では,4図に示すように,ある磁区から漏れた磁力線は隣接する逆向きの磁区へそのま

*2 磁性体の形状, 寸法によって生 じる磁気的な偏りで, 特定の方 向に強く磁化する性質。



ま入り,閉じたループを形成する。このような磁力線は磁区を極めて安定に保つことが できる。これは、2本の棒磁石を逆向きの極性でくっつけて保管することで棒磁石を極 めて安定に保管できるのと同じである。また、記録密度を高くしても、隣接する異なる 磁極の磁区が近くになり、磁力線がより小さな閉ループを形成し、より強固になるので、 安定性は更に増加する。ただし、垂直磁化を示す材料は限られており、コバルト/白金、 コバルト/パラジウム、コバルト/ニッケルなどの積層膜か、コバルトークロム合金、 テルビウム-鉄-コバルト合金などのコバルト系合金か、一部のフェライト(鉄の酸化 物)に限定されている^{3)~5)}。

2.3 磁区の生成と駆動技術

磁性細線を記録デバイスとして利用するためには、磁性細線中に磁区を生成する技術 と生成した磁区を移動させる技術が必要である。

磁区を生成する最も簡単な方法は,**5**図に示すように,ハードディスクの磁気ヘッド*3と同じようなものを用いて局所的に強い磁界を印加する方法である。磁界が印加された部分では,その磁界の方向と同じ向きにN極とS極が生じ,磁性細線中に磁区が生成される。

一方,磁性細線中に生成した磁区を移動させる方法としては磁性細線に電流を流す方 法がある。この方法はBergerが約30年前に理論的に予測した「電流によって磁壁を動か すことができる」という原理^{6)~8)}に基づいている。当時は,磁性体の微細加工が未熟で 磁性細線を用いた検証が困難であったが,近年,電子線リソグラフィー*4などの加工法 の進展に伴って磁性細線を比較的容易に作製できるようになり,Bergerの予測が正しい ことが証明された。磁区が移動する概念を6図に示す。6図に示すように,磁性細線の 長さ方向に電流を流すと,磁性細線の内部にある磁壁が電子の注入方向に移動する。こ の方法では,磁性細線中の複数の磁壁が同時に等距離を移動するので,磁区がそのまま の状態で移動したように見える。ただし,この現象は磁性細線中を流れる電流の密度が あるしきい値を超えたときだけ現れ,そのときの電流密度の値は磁性細線の材料や構造 に依存する。この磁壁が移動する現象を,7図を用いて,より詳細に説明する。磁性細 *3 ハードディスクや磁気テープな どの磁気記録媒体に磁界を印加 する記録ヘッドと媒体からの磁 界を検出する再生ヘッドの総称。

*4 スポット径が数十nmの非常に細 い電子線を用いて微細なパター ンを加工・作製する方法。



線中に上向き(↑)の磁区と下向き(↓)の磁区が存在している場合には、磁区の内部 では上向きまたは下向きの磁気モーメントが連続的につながっている。また、磁壁では 磁気モーメントが上向きから下向き(または、下向きから上向き)へなだらかに回転し ている。このような磁性細線に左側から電子を注入すると、導体の中ではばらばらで あった電子の自転方向が磁区内部の磁気モーメントの方向(7 図では上向き)に整列す る。この自転方向の揃った電子は磁区内を右側に向かって進み、磁壁に達すると磁壁部 分の磁気モーメントの回転方向に沿って電子の自転方向が少しずつ曲げられる。電子の 角運動量を変化させる力の反作用で磁壁部分の磁気モーメントにはそれまでの回転方向 とは逆方向に回転させる力が働く(スピントルクトランスファー効果)。従って、相当量 の電子が注入された場合には、磁壁部分の磁気モーメントに働く力が大きくなり、7 図 の下の図に示すように、磁壁が右側に移動したように見える。磁気モーメントが下向き から上向きに変化する磁壁についても同様な現象が起こる。すなわち、磁壁の移動は注 入された電子の角運動量が磁気モーメントに転移されることで生じる現象と言える。

磁壁の移動は理論的には電流を遮断すると瞬時に停止すると考えられているが、実際 には配線などに付随するリアクタンス成分やコンダクタンス成分、周囲温度(熱エネル ギー)の影響などにより、電流を遮断してもしばらくの間は、磁壁は振動しながら移動 する。また、磁性細線に過剰な電流を流した場合には、注入した電子の運動エネルギー が磁性細線の電気抵抗によってジュール熱に変換され、最悪の場合には磁性細線が溶け て局所的に破壊される。なお、磁性細線に直流電流を印加したときには、発生した ジュール熱によって磁性細線の抵抗値が上昇し、発熱量が更に増えるという悪循環を繰 り返すので、パルス電流を印加して適切な冷却期間を設けるのが良い。このように、磁 性細線中の磁区を移動させる場合には、小さな電流で効率よく磁区を移動させるための 電流量やパルス電流の最適な印加条件を見いだす必要があり、この観点からさまざまな 研究が進められている⁹⁾¹⁰。

3. 磁区駆動に関する研究動向

電流を流すと磁区が移動するという現象を解明し、それを応用するための研究が活発 に行われている。特に、それを記録デバイスへ応用するための研究は、①磁区の移動開 始に必要な電流密度を低減するための研究、②磁区が移動しているときの電流を低減す るための研究、③磁区の移動速度を向上させるための研究、④磁区を安定に停止させる ための研究に大別できる。

①に関する研究では、完全に静止した状態の磁区を移動させ始めるときに必要な電流 密度は磁性細線の幅を狭くするほど、厚さを薄くするほど、また、磁壁の幅を狭くする ほど低減できることが明らかにされている。そのために、最先端の電子線リソグラ フィー技術を用いて非常に細い磁性細線を試作することや、その内部に薄い磁壁を挿入 した場合の電流印加時の磁区の挙動を解明するための研究が進められている¹¹⁾。

②に関する研究では、一度、移動を始めた磁区は移動開始時に必要な電流よりも小さ な電流で移動が継続できることが明らかにされている。しかし、磁区の移動に要するエ ネルギーの総量を低減するために、この電流を更に小さくすることが求められている。

③に関する研究では、さまざまな材料を用いて磁性細線中での磁区の移動速度の向上 が図られている。これまでに報告されている磁区の移動速度は100m/s~300m/sであり、 最高速度の300m/sは一般的なハードディスクにおける磁気ヘッドとディスクの相対速度 (約30m/s)の約10倍である。現在、更なる高速化を目指して新たな材料の開発が進めら れている。②と③の研究は密接な関連があり、磁区の移動速度 v と移動の継続に必要な 電流密度 i の関係は(1)式で与えられることが報告されている¹²⁾。

 $v = \frac{\mu_B p i}{e M_s}$

—— (1)

ここで、 μ_B はボーア磁子と呼ばれる電子の磁気モーメントの基本単位、pは電子の自転の向きの偏りを表すスピン分極率*⁵、eは電子の電荷量、 M_s は磁性材料の磁化の総量である。(1)式は磁区の移動速度vは電流iに比例し、磁化の総量 M_s に反比例することを示している。 M_s を小さくするためには、磁性細線中の磁性原子の数を減らすことが効果的であるが、磁性原子を減らしすぎると安定な記録ができなくなる。従って、原子レベルで強磁性体*⁶と常磁性体*⁷の積層数を調整するなど、最適な磁性原子の割合を探求する研究が進められている。現在、磁性細線に最もよく用いられている材料はコバルト/ニッケル積層膜であるが、構成原子がどちらも強磁性体なので磁化の総量が大きく、②と③の目的を同時に解決することは難しいと考えられている。当所では、②と③の条件を両立させるために、磁性細線には安定な垂直磁化膜であるコバルト(強磁性体)/パラジウム(常磁性体)積層膜を使用している。また、磁化の総量 M_s を小さくするために、強磁性体であるコバルト層を2原子層~3原子層まで薄くしている¹³⁾。

④に関する研究では、磁性細線にくびれのような磁区のトラップサイトを設ける研究 が行われている。磁性細線に電流が印加されていない状態では磁区は安定に停止してい なければならないが、磁性細線中の不安定な位置にある磁区は室温の熱エネルギーに よって微妙に振動し、移動することがある。この移動を確実に止めるためには磁性細線 に磁区のトラップサイトを設ける方法が有効である。くびれの形状などによって磁区を 止める効果は異なり、効果が弱いと磁区を完全に停止させることができず、逆に、効果 が強すぎると磁区の移動開始に必要な電流密度が大きくなる。現在、最適なくびれの形 状や作製法の研究が精力的に進められている¹³⁾¹⁴⁾。 *5 電子が全て上向きの場合にはp=1,上向きの電子と下向きの 電子の数が同じ場合にはp=0である。なお、上向きの電子か ら必ず充満していくので、下向 きの電子の数が上向きの電子の 数より多くなることはない。

* 6

ー般的に磁石に引き寄せられる 材料。磁界を印加すると急激に 磁化の強さが非線形的に増大す る性質を持つ。常温で強磁性を 示す元素は鉄、コバルト、ニッ ケルだけである。

* 7

外部に磁界が無いときには磁化 されないが、磁界を印加すると その方向にごく弱く磁化する材 料。金、銀、銅や強磁性体以外 の大多数の金属は常磁性体であ る。



4. 磁性細線を用いた記録デバイスの研究開発動向

磁性細線をさまざまな形態で組み込んだ記録デバイスが提案されている。ここでは, 代表的な記録デバイスとして,磁壁移動型磁気抵抗ランダムアクセスメモリーとレース トラックメモリーの研究動向について述べる。また,当所で取り組んでいる映像記録用 シーケンシャルメモリーの研究概要を紹介する。

4.1 磁壁移動型磁気抵抗ランダムアクセスメモリー

磁気抵抗ランダムアクセスメモリー (MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory) は磁性体で構成された記憶セルをアレイ状に配置したものである。半導体メ モリーと同様にランダムアクセスが可能で,高速アクセス,不揮発性,無限回の書き換 えが可能という特徴がある。MRAMは,現在,最も有望視されている次世代メモリーの 1つである。MRAMで情報を記憶セルに書き込む方式としては,①電流磁界を用いる方 式,②スピン注入磁化反転を用いる方式,③磁壁移動を用いる方式の3種類があるが, ここでは③の磁壁移動を用いる方式を説明する。8図に磁壁移動を用いたMRAMの1 ビットの記憶セルの動作原理を示す¹⁵⁾。8図のMRAMでは,磁性細線中の磁壁を外部電 流で移動させてデータを書き込む。読み出しは磁性細線の中央の直上に設けた磁界セン サーで行い,直下の磁化方向が上向きか下向きかを検出する。実際のMRAMでは、シリ コン基板上に多数の制御用トランジスターとアレイ状の電極を形成し,その上に磁性細 線と磁界センサーを形成する。制御用トランジスターの形成時に磁性材料などの不純物 が混入することがないので,安定に動作するメモリーを再現性よく作製することができ る。

磁壁移動型MRAMには、データの書き込みに必要な電流が小さく、データの保持耐性 が高いという特徴がある。また、データの書き込み時と読み出し時の電流経路が異なっ ているので、電流磁界やスピン注入磁化反転を用いた方式のMRAMより高速化が図りや すいという特徴がある。

4.2 レーストラックメモリー

レーストラックメモリーは磁性細線を基板に対して垂直方向にも延伸させたU字型の3 次元構造を持つ極めて独創的なメモリーである¹⁶⁾。9図に構造を示す。このメモリーで は、書き込みヘッドで磁性細線中に磁区を生成し、パルス電流を印加してその位置を動 かしてデータを記録する。再生時には、読み出したいデータ(磁区)が読み出しヘッド の直下に来るまでパルス電流を印加して磁区を移動させる。パルス電流は右方向、左方 向のどちらの方向にも印加でき、読み出したい情報が端部にある場合には多少時間がか かるが、ランダムアクセスの機能も持っている。これまでに、ニッケル鉄合金から成る 磁性細線を平面上に形成したプロトタイプを用いて原理検証実験が行われ、3ビットの データを記録・再生できることが確認されている¹⁷⁾。



レーストラックメモリーでは、U字型の3次元構造を作製する方法の開発など、解決す べき課題は多いが、磁性細線を長くすることで単位面積当たりの記録密度を大幅に高く することができるので、その開発に期待が寄せられている。

4.3 映像記録用シーケンシャルメモリー

当所では、高精細で高フレームレートな小型カメラへの適用を目指して、磁性細線を 用いた映像記録用シーケンシャルメモリーの研究開発を進めている。このメモリーは、 10図に示すように、並列に配置された複数の磁性細線、各磁性細線の両端に配置された 記録ヘッドと再生ヘッドおよびパルス電流源で構成される。シーケンシャルな映像デー タが高速で入力されると、データは適切に分割され、各記録ヘッドに送られる。各記録 ヘッドは磁性細線に順次、磁区を形成しデータを記録する。その際、データの1ビット に対応する磁区を形成する度に、磁性細線にパルス電流を印加して磁区を右にシフトさ せる。なお、再生時には磁区を1ビットずつ移動させながら再生ヘッドでその情報を読 み出す。

このメモリーには,機械的な可動部が無く,高い信頼性と小型・軽量化が期待される。 また,磁性細線中の磁区を一方向だけに動かすシーケンシャルメモリーなので,動作速



度が速く,制御系が単純であるという特徴がある。更に,磁性細線1本当たりの線記録 密度(長さ方向の記録密度)は,将来,現行のハードディスク並に達すると考えられている。

これまでに、11図に示すように、コバルト/パラジウム積層膜から成る幅150nmの垂 直磁化磁性細線を複数、平行に配置した試料を作製した。また、一度固定した磁区は電 流を流さない限り、形状の変化はなく、安定であることを確認した。更に、幅250nm の磁性細線を用いて、直流電流を印加したときの磁区の変化を調べた結果、12図に示す ように、電流密度2×10⁷A/cm²の直流電流を短時間印加することで、磁性細線中の複数 の磁区がそのパターンを保ったまま250nm移動することが確認できた。しかし、電流を 印加した際に、他の磁区とは異なる挙動を示す磁区がまれに存在することが分かった。 その一例を13図に示す。2つの磁性細線に同じ電流を印加したとき、場所AとBでは磁 区は450nm移動したが、場所Cでは磁区は図の範囲外まで移動した。すなわち、磁性細線 の場所によって磁区の移動量が異なるという現象が現れた。これは、何らかの原因で移 動を開始した磁区が電流を遮断した後でも停止しなかったからではないかと考えている。 映像記録用シーケンシャルメモリーでは磁区をデータ1ビットの書き込みに要する距離 (*L_d*) だけ移動させればよいので、電流印加時の磁区のオーバーランを防止するために、 距離*L_d* ごとに磁区を停止させるためのトラップサイトを磁性細線に設けることとした。 試作実験の結果、トラップサイトとして磁性細線にくぼみなどを設けることで、磁区を



一定の距離で確実に停止させることができ,映像記録用シーケンシャルメモリーの記録 媒体に磁性細線が利用できるという見通しを得た。この詳細は本特集号の報告「原子間 力顕微鏡を用いた磁性細線上の磁区トラップサイトの作製」を参照していただきたい。

これまで,磁性細線の磁区の移動を全て直流電流を印加することで行っていたが,信 頼性を向上させ,駆動電力を低減するために,現在,パルス電流を印加して磁区を移動 させる実験を行っている。また,記録・再生が可能なプロトタイプを試作するために必 要な要素技術の開発に取り組んでいる。

5. あとがき

磁性細線に電流を印加することで磁区が移動する原理や、磁性細線を用いた記録デバ イスの研究開発の動向を紹介した。

磁性細線を用いた記録デバイスでは、小型・軽量化や高速化、信頼性の向上などが期 待できる。当所では、磁性細線を用いた映像記録用シーケンシャルメモリーの開発に着 手し、これまでに原理検証実験をほぼ終え、現在、記録・再生が可能なプロトタイプを 試作するために必要な要素技術の開発を進めている。

磁性細線を用いた映像記録用シーケンシャルメモリーはスーパーハイビジョンカメラ に適用可能な記録デバイスとして期待されており,早期の実現を目指して,研究開発を 加速する予定である。

参考文献

- C.D. Stanciu, F. Hansteen, A.V. Kimel, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk and T. Rasing : "Ultrafast Interaction of the Angular Momentum of Photons with Spins in the Metallic Amorphous Alloy GdFeCo," Phys. Rev. Lett., Vol.98, No.20, pp.207401.1–207401.4 (2007)
- A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu and T. Shinjo : "Real-Space Observation of Current-driven Domain Wall Motion in Submicron Magnetic Wires," Phys. Rev. Lett. Vol.92, No.7, pp.077205.1–077205.4 (2004)
- S. Jung, W. Kim, T. Lee, K. Lee and H. Lee : "Current-induced Domain Wall Motion in a Nanowire with Perpendicular Magnetic Anisotropy," Appl. Phys. Lett., Vol.92, No.20, pp.202508.1–202508.3 (2008)
- 4) T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi and T. Ono: "Observation of the Intrinsic Pinning of a Magnetic Domain Wall in a Ferromagnetic Nanowire," Nature Materials, Vol.10, No.3, pp.194–197 (2011)
- S. Li, H. Nakamura, T. Kanazawa, X. Liu and A. Morisako : "Current–Induced Domain Wall Motion in TbFeCo Wires With Perpendicular Magnetic Anisotropy," IEEE Trans. Magn., Vol.46, No.6, pp.1695–1968 (2010)
- L. Berger : "Low Field Magnetoresistance and Domain Drag in Ferromagnets," J. Appl. Phys., Vol.49, No.3, pp.2156–2161 (1978)
- L. Berger : "Exchange Interaction between Ferromagnetic Domain Wall and Electric Current in Very Thin Metallic Films," J. Appl. Phys., Vol.55, No.6, pp.1954–1956 (1984)
- 8) L. Berger : "Motion of a Magnetic Domain Wall Traversed by Fast-rising Current Pulses," J. Appl. Phys., Vol.71, No.6, pp.2721–2726 (1992)
- 9) G. Malinowski, A. Lörincz, S. Krzyk, P. Möhrke, D. Bedau, O. Boulle, J. Rhensius, L. J Heyderman, Y. Cho, S. Seo and M. Kläui : "Current-induced Domain Wall Motion in Ni80 Fe20 Nanowires with Low Depinning Fields," J. Phys. D : Appl. Phys., Vol.43, No.4, pp.045003.1–045003.9 (2010)
- 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., Vol.86, No.1, pp.012511.1–012511.3 (2005)
- 11) H. Tanigawa, K. Kondou, T. Koyama, K. Nakano, S. Kasai, N. Ohshima, S. Fukami, N. Ishiwata and T. Ono : "Current-Driven Domain Wall Motion in CoCrPt Wires with Perpendicular Magnetic Anisotropy," Appl. Phys. Express., Vol.1, No.1, pp.011301.1-011301.3 (2008)
- 12) 小野:スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線,シーエムシー出版, pp. 75-82 (2009)
- M. Okuda, Y. Miyamoto, M. Kishida and N. Hayashi : "Magnetic Properties of Magnetic Nanowires with Ultra – small Trap Sites Fabricated by Anodic Oxidation and Nanoindentation using Scanning Probe Microscopy," IEEE Trans. Magn., Vol.47, No.10, pp.2525–2527 (2011)
- 14) S. Noh, Y. Miyamoto, M. Okuda, N. Hayashi and Y. Kim : "Effects of Notch and Anti-notch on Magnetic Domain Wall Motion in Nanowires with In-plane or Perpendicular Magnetic Anisotropy," J. Appl. Phys., (to be published in Apr. 2012)

- 15) 深見, 鈴木, 永原, 大嶋, 尾崎, 齊藤, 根橋, 崎村, 本庄, 森, 五十嵐, 三浦, 石綿, 杉林: "垂直磁化磁壁移動セルを用いた高速低電流MRAM,"信学技報, SDM2009-114, pp.91-95 (2009)
- S.S.P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomasy : "Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory," Science, Vol.320, Issue 5873, pp.190–194 (2008)
- M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner and S.S.P. Parkin : "Current-Controlled Magnetic Domain-Wall Nanowire Shift Register," Science, Vol.320, Issue 5873, pp.209 –211 (2008)



1998年入局。同年より放送技 術研究所において垂直磁気記 録、スピントロニクス、磁性 デバイスの研究に従事。スタ ンフォード大学客員研究員、 NTT物性科学基礎研究所交流 研究員併任を経て,現在,放 送技術研究所撮像・記録デバ イス研究部専任研究員。博士 (工学)。