Influence of Mechanical Scratches on Recorded Magnetization Stability of Perpendicular Recording Media

Katsumasa Nagano, Syota Sasaki, and Masaaki Futamoto

Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

The stability of recorded magnetization on hard disk drives (HDDs) is influenced by external environments, such as temperature and magnetic fields. Small scratches are frequently formed on an HDD medium surface on contact with the magnetic head. The influence of a perpendicular magnetic field and mechanical scratching on the magnetization structural stability of perpendicular recording media was investigated by using a magnetic force microscope. The magnetization structure started to change at lower magnetic fields in an area near and below mechanical scratches when compared with normal areas with no scratches. A quantitative analysis of variations in the magnetization structure was carried out by taking into consideration the difference in MFM images observed for the same sample area before and after exposing the sample to different magnetic fields.

Keywords: perpendicular recording media, mechanical scratches, magnetization stability, magnetic force microscope

垂直磁気記録媒体の記録磁化安定性に及ぼすスクラッチの影響

長野克政・佐々木翔太・二本正昭

中大理工, 東京都文京区春日 1-13-27 (〒112-8551)

1. はじめに

2005 年に垂直記録方式がハードディスクドライブ (HDD) に導入されて以来, 記録密度は年率 40~50%で増大し続けている. 記録密度の増大に伴ってビット内に含まれる磁性結晶粒の数や寸法が減少し, 磁性結晶粒の磁気エネルギーが低下するため, 温度や外部磁場などの外部環境に対する記録ビットの安定性が問題となる. 記録磁化状態の安定性は, これまでにコンピュータシミュレーション^{1,2)}, スピンスタンドを用いた記録信号強度の時間変化測定^{3,4)}, 磁気力顕微鏡 (MFM) を用いた磁化状態観察^{5,7)}などの方法で検討されている.

一方, HDD の高密度化に対応してヘッドとディスク間の距離を近づける必要があり, スペーシングは既に 10 nm 以下となっている. 狭スペーシング条件下では, HDD の動作中にヘッドがディスクに接触し, 接触によってディスク表面にスクラッチが形成される可能性が増大する. スクラッチが形成された場合, HDD の記録磁化状態に及ぼす影響などが調べ始められている^{8,9)}. 面内磁気記録方式による HDD ディスク表面に記録磁性層まで達するスクラッチが形成されるとそのスクラッチ領域の記録ビットが物理的なダメージを受けて記録磁気情報が消失することが報告されている⁹⁾. また, スクラッチ深さが記録磁性膜に達しない浅い場合でも, コンタクト時の応力の影響により垂直磁気記録媒体のキャップ磁性層とグラニューラー磁性層が塑性変形することによって c 軸が傾斜し, 外部からの磁場により減磁が起こり易くなることが報告されている¹⁰⁾. しかしながら, 垂直磁気記録方式による HDD ディスクについて記録磁性層に達するスクラッチが存在した場合, 温度や磁場などの外部環境が記録ビットの安定性に及ぼす影響を調べた研究報告例は殆どない. 我々は最近, 記録磁性層にまで達するスクラッチが形成された垂直媒体の記録磁化状態の安定性に及ぼす温度の効果を調べ, スクラッチの直下および周囲部領域はスクラッチの無い領域に比べて低い温度で磁化状態の変化が生じ始

めることを明らかにしている¹¹⁾. 本研究では, HDD ディスク表面上に記録磁性層に達するスクラッチを形成し, スクラッチの深さを変えた場合, スクラッチの直下および周辺部の記録磁化状態に及ぼす外部磁場の影響を詳細に調べることを目的とした. 垂直磁気記録媒体に垂直方向で磁場印加処理を行った場合の磁化状態変化を MFM により観察した. スクラッチを形成した磁気ディスク試料において, スクラッチ下部では深さが記録磁性層に達している領域と達していない領域を区別し, さらにスクラッチ周辺部について記録磁化状態の安定性に及ぼす外部磁場の影響について検討を行った.

2. 実験方法

2.1 観察試料および実験装置

観察試料には, 市販の垂直記録方式の HDD ディスクを用いた. HDD を PC に装着してランダムデータを記録した後, ディスクを小片に切断し, これを観察試料として用いた. この HDD ディスクの最大面記録密度は 163 Gb/in²である. カー効果を用いて室温で測定した磁化曲線を Fig. 1 に示す. 保磁力は 4.7 kOe である. HDD ディスクの膜面垂直方向の膜厚測定を X 線による反射率測

Fig. 1 Kerr hysteresis loop of sample.

Fig. 2 (a) AFM image of perpendicular recording medium with two mechanical scratches. (b) Cross-sectional profile of medium surface measured along dotted line in (a).

Fig. 3 MFM images of area with no mechanical scratches. Variations in MFM image after perpendicular magnetic fields of (a) 0, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, and (f) 6 kOe were applied.

定で行い、保護膜厚として 5 nm、記録磁性層膜厚として 28 nm の値を得た。

ディスク試料へのスクラッチ形成にはダイヤモンド被覆した Si 製探針を用いた。原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、ダイヤモンド被覆探針のカンチレバーのたわみ量を適切に制御することによって、深さの異なるスクラッチをディスク試料表面に形成した。スクラッチの幅や深さの計測には AFM を用いた。測定時に使用した AFM 探針の曲率半径は 20 nm である。ディスク試料の外部磁場処理は、室温で電磁石を用いて行った。磁場印加強度を 1 kOe ごとに 6 kOe までステップ状に増大しながら膜面垂直方向へ印加した。磁場印加の時間は 30 秒とした。磁場印加を行う毎に、ディスク試料の AFM および MFM 観察を SII ナノテクノロジー社製の環境制御型走査プローブ顕微鏡 (SPA300HV/SPI4000) を用いて行った。MFM 探針には、同社製の SI-MF40 を用いた。探針への被覆磁性体材料、膜厚、保磁力、曲率半径はそれぞれ CoCrPt, 50 nm, 200 Oe, 35 nm である。

本実験では、ディスク試料のプローブ顕微鏡への装脱着を繰り返し行って、しかも同一箇所の MFM 像観察を行った。この際、試料位置合わせでは既開発技術⁷⁾を採用し、さらに繰り返し観察に伴う MFM 画像のドリフトは AFM 像を参照して補正した。補正による画像変形誤差は 1 ピクセル以内に抑えることができた¹²⁾。

2.2 スクラッチの形成および評価

スクラッチの形成は、ダイヤモンド被覆探針を AFM に取り付けてディスク試料と探針を接触させた状態で直線方向に走査することによって行った。探針先端にかかる荷重調整は、ダイヤモンド

被覆探針のカンチレバーのたわみ量を適切に制御することによって行った。探針先端にかかる荷重は、6~10 μN の範囲でほぼ一定値に保って、2.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ の走査速度で直線方向に探針を 30 秒間往復させてスクラッチを形成した。Fig. 2(a)に、この様な方法でディスク試料表面に形成した 2 つのスクラッチの AFM 像を示す。Fig. 2(b)は、Fig. 2(a)の AFM 像に示す点線上で測定した断面プロファイル像である。断面プロファイル像より、スクラッチの最大深さは A の場合 13 nm, B の場合 7 nm であり、幅は A の場合 369 nm, B の場合 222 nm であることが分かる。A の場合は、X 線測定で決定した保護膜厚 (5 nm) を考慮すると、ディスク保護膜を超えて記録磁性膜中に 8 nm 程度の深さまで達していることになる。また、記録磁性層にまで達している領域はスクラッチの幅 369 nm のうち 197 nm である。一方、深さが最大 7 nm と浅い B の場合は、記録磁性膜中への損傷は 2 nm 程度の深さに止まっておらず、A と比べると磁性層に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。B の場合、記録磁性層にまで達している領域はスクラッチ幅 222 nm のうち 65 nm である。また、これら A, B のスクラッチと記録トラックの成す角度は 80 度であり、スクラッチはほぼクロストラック方向と平行に形成されている。

3. 実験結果

3.1 記録磁化状態に及ぼす外部磁場の影響

Fig. 3 に、初期状態およびディスク面に対して垂直に外部磁場を 2 kOe から 6 kOe まで 1 kOe ごとにステップ状に増大しながら印加処理した後に観察した同一領域の一連の MFM 像を示す。Fig.

Fig. 4 AFM and MFM images of sample with a mechanical scratch. (a) AFM image of sample in Fig. 1 for area of A. (b)-(h) MFM images of the areas corresponding to AFM images observed after perpendicular magnetic fields of (b) 0, (c) 1, (d) 2, (e) 3, (f) 4, (g) 5, and (h) 6 kOe were applied.

Fig. 5 AFM and MFM images of sample with a mechanical scratch. (a) AFM image of sample in Fig. 1 for area of B. (b)-(h) MFM images of area corresponding to AFM images observed after perpendicular magnetic fields of (b) 0, (c) 1, (d) 2, (e) 3, (f) 4, (g) 5, and (h) 6 kOe were applied.

3(a)は、初期状態（磁場印加処理前）のMFM像である。MFM像の水平方向が記録トラック方向に対応している。隣接記録トラックがほぼ接触して観察されており、トラック間のガードバンドは認められない。印加磁場強度2 kOeでは、初期状態と比べて記録ビットの磁化状態に変化は殆ど認められない。しかし、3 kOeの磁場印加処理により、(c)中のC部をはじめ暗コントラストビットの端部に僅かながら磁化反転に対応する明コントラスト領域が認められ始めている。3 kOeはこのディスク試料の保磁力（4.7 kOe）に比べて36%低い磁場である。4 kOeの磁場印加処理後のMFM像(d)では、磁化反転が更に進行し、D部に示すように、暗コントラスト内部に明コントラスト領域が周囲から拡大侵入しているのが認められる。保磁力以上の5 kOeの磁場を印加後には、明コントラスト領域の面積が更に拡大しており、記録磁化状態が全体的に変化していることが分かる。更に6 kOeの磁場印加処理後では、

明コントラスト領域の面積が更に拡大し、初期状態の磁化情報は殆ど失われている。

3.2 深いスクラッチの影響（最大深さ13 nm、幅369 nm）

Fig. 4に、スクラッチを形成したディスク試料の磁化状態の観察結果を示す。Fig. 4(a)はAFM像、Fig. 4(b)~(h)はMFM像で、(b)は磁場無印加状態、(c)~(h)は1~6 kOeの外部磁場をそれぞれステップ状に印加後に観察した同一箇所のMFM像である。Fig. 4(a)に形態像で示した領域は、Fig. 2(b)の断面プロファイルとして示したスクラッチAに対応しており、スクラッチの最大深さは13 nmである。Fig. 4(b)の磁場無印加状態では、スクラッチが保護膜厚を超えて記録磁性層にまで及んでいる領域（スクラッチ左端から197 nmまでの範囲）では磁化状態が既に變形し、本来の記録情報が失われていることが分かる。この領域は、磁場印加後

Fig. 6 MFM images variation is after applying magnetic field (first row) and difference images (second row). White contrast in the difference images shows the regions where the local magnetization structure has changed on applying perpendicular magnetic field when compared with the initial magnetization structure (0 kOe). (a) AFM image, MFM images, and difference images of an area with no mechanical scratches. (b), and (c) correspond to similar data taken around the mechanical scratches of A and B.

度 2 kOe (Fig. 4(d)) まで磁化状態の変化は殆ど認められないが、3 kOe の磁場印加処理後の MFM 像 (Fig. 4(e)) では、明コントラストから暗コントラストに変化し始めている。5 kOe (Fig. 4(g)) および 6 kOe (Fig. 4(h)) の磁場印加により、直線帯状の暗 MFM コントラストが認められ始めている。MFM 像で観察された直線帯状の暗コントラストが現れた理由として MFM 測定における磁気情報と形態情報の重複効果が考えられる。ディスク試料面と探針間距離を接近させた場合、試料に凹部が存在するとこの部分では探針に働く原子間力が減少する。磁化強度変化量が全体的に低下した磁気情報にこの様なスクラッチの形状情報がオーバーラップしたため、暗コントラスト領域として観察されていたものと解釈される。

次に、スクラッチ形成領域において深さが記録磁性膜に達して

いない領域 (スクラッチ左端から 197~369 nm の範囲) について検討する。この領域は、印加磁場強度が 1 kOe 程度 (Fig. 4(c)) までは、スクラッチ周辺の記録ビットの磁化状態に変化は殆ど認められないが、2 kOe の磁場印加処理 (Fig. 4(d)) を行うことにより、E で示したスクラッチの左端から約 270 nm 離れた領域において暗コントラストビットが明コントラストビットに変化し、スクラッチの左端より約 320 nm 離れた F で示した領域においても磁化状態の変化が認められている。スクラッチが存在しない場合 (Fig. 3)、印加磁場強度 2 kOe では磁化状態変化が生じないのに比べ、より低い磁場強度で磁化状態の変化が起り始めている。この磁場強度は媒体保磁力の 43 % であり、スクラッチ形成された場合は保磁力の半分以下の外部磁場強度で記録磁化状態の変化が生じ始めることを示すものと解釈される。この記録磁化状態変化

が生じた理由は、スクラッチの形成により記録磁性膜を構成する磁性結晶粒が機械的な変形と応力を受けて、この部分の磁気異方が低下し、また磁性結晶粒間に働いている磁気的な相互作用の影響によりスクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域まで磁化反転が起こり易くなっているためと考えられる。この結果、保磁力より低い磁場印加条件下でも磁化反転が生じ始めたものと考えられる。3 kOe の磁場印加処理後の磁化状態 (Fig. 4(e)) では、明コントラスト領域がスクラッチの左端から約 400 nm 離れた領域まで拡大しているのが認められる。また、スクラッチ端から約 600 nm 離れた G に示す領域でも暗コントラストビットの端部から僅かながら明コントラスト面積が拡大する傾向が認められるが、この変化はスクラッチが存在しない場合 (Fig. 3) とほぼ同様である。この様な観察結果より、スクラッチ A の近傍では垂直磁場を印加した場合、磁化反転がスクラッチの影響を受けて起こり易くなる傾向はスクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域まで及んでいることが明らかになった。

3.3 浅いスクラッチの影響 (最大深さ 7 nm, 幅 222 nm)

Fig. 5 に、ディスク試料に浅いスクラッチを形成した場合の磁化状態の観察結果を示す。Fig. 5(a) は AFM 像、Fig. 5(b)~(h) は MFM 像で、(b) は磁場無印加状態、(c)~(h) は 1~6 kOe の外部磁場をそれぞれステップ状に印加後に観察した同一箇所の MFM 像である。このスクラッチは Fig. 2(b) の断面プロファイル B に対応しており、最大深さは 7 nm である。スクラッチ部および近傍の MFM 像から明らかに、磁場無印加状態 (Fig. 5(b)) では、スクラッチの直下と周辺部の記録ビット形状の変化は認められず、スクラッチが記録磁化状態に影響を殆ど与えていないことが分かる。先に観察した最大深さが 13 nm のスクラッチ A の場合、スクラッチ直下の記録磁化情報が変形していたのに対し、最大深さが 7 nm のスクラッチ B では記録磁化情報の変形は殆ど生じていない。ディスク試料の保護膜厚 (5 nm) と記録磁性膜厚 (28 nm) を考慮すると、スクラッチの最大深さが記録磁性膜厚の約 30 % に及ぶ場合 (スクラッチ A) では記録磁化情報が失われているのに対し、約 7 % 程度と少ない場合 (スクラッチ B) では磁場を印加しない状態では磁化状態に殆ど変化が起こっていないことになる。この試料に磁場印加を行った場合、1 kOe 程度までは、記録ビットの磁化状態に変化は殆ど認められないが、2 kOe の磁場印加処理を行うことにより (Fig. 5(d)), H 部で示すスクラッチが保護膜厚を超えて記録磁性層にまで及んでいる領域 (スクラッチ左端から 65 nm までの範囲) で暗コントラストビットが縮小して明コントラストに変化しているのが認められる。また、I 部で示したスクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域 (スクラッチ左端から 65 ~ 222 nm の範囲) においてスクラッチの左端から約 140 nm 離れた領域においても磁化状態の変化が起こり始めている。スクラッチ深さが記録磁性層膜厚の 7 % 程度と浅い場合でも外部磁場の影響を受けて、磁化状態変化が起こり易くなっていることが分かる。更に、J 部に示すようにスクラッチ端部から約 90 nm 離れた領域においても磁化状態の変化が認められている。2 kOe の外部磁場印加した場合、スクラッチ A では (Fig. 4(d)), スクラッチの左端から約 320 nm 離れた領域まで磁化状態変化が生じているのが認め

められたのに比べ、より狭いスクラッチ B の場合はスクラッチ左端から約 140 nm 離れた領域までの範囲で磁化状態変化が起こり易くなっているのが分かる。磁化状態変化の起こり易さに及ぼすスクラッチの影響は深さだけではなくその幅も関係していると考えられる。これら二要因が磁化状態変化に及ぼす効果の違いを調べるためには、例えばスクラッチ深さを一定として幅を変えた試料を用いた実験を行う必要がある。今後の研究課題であると考えられる。3 kOe の外部磁場印加処理により、スクラッチ直下および端部においても大きな磁化状態変化が生じ始めていることが分かる (Fig. 5(e))。また、K 部に示すようにスクラッチ端部から約 360 nm 離れた領域で磁化状態変化が認められているが、これはスクラッチが存在しない場合の傾向 (Fig. 3) とほぼ同様であり、スクラッチ端部から 300 nm 以上離れた領域ではスクラッチによる影響は殆ど及んでいないものと思われる。一方、4 kOe 磁場印加後 (Fig. 5(f)) では、例えば L 部に示すようにスクラッチ直下および端部で暗コントラスト領域の拡大が認められる。この現象はスクラッチ A で観察されたのと同様に、MFM 測定におけるディスク試料と探針間に働く原子間力の影響が主な原因であると考えられる。

以上の結果より、スクラッチがディスク試料に形成されると、そのスクラッチの直下および周辺部で磁化状態変化が起こり易く、しかもその変化はスクラッチの深さだけではなく幅も影響を与えているものと解釈される。

3.4 MFM 画像処理による磁化反転領域の抽出

磁場印加処理によって記録磁化状態に変化が生じた領域の二次元分布を抽出するため、初期状態 (磁場印加処理前) と磁場印加処理後に観察した MFM 画像の差分二値化を試みた。Fig. 6(a) にスクラッチが存在しない場合の MFM 像 (上段) および磁場印加処理後と初期状態の差分二値化像 (下段) を示す。ここでは媒体保磁力 (4.7 kOe) 未満の 4 kOe までの磁場印加処理を行った場合の変化を示している。差分二値化では、初期状態 (磁場印加処理前) と各磁場印加処理後の MFM 像の間で画像差を取り、変化が生じた箇所を白コントラストとして抽出している。二値化差分像から明らかに、1 kOe および 2 kOe の磁場印加処理では、明コントラストビットと暗コントラストビットの境界に相当する磁化遷移領域で初期状態から僅かながら磁化状態が変化しているのが観察されている。磁場印加強度が増大するにつれて、トラック境界部領域において磁化状態変化が優先的に生ずる傾向が認められる。MFM 像間の比較だけでは磁化状態変化が生じているか判断しにくい場合でも、差分像を得ることによって磁化状態の小さい変化まで明瞭に観察できることが分かる。

Fig. 6(b), (c) にディスク試料表面にスクラッチを形成した場合の磁場印加処理後の MFM 像 (上段)、磁場印加処理後と初期状態の差分二値化像 (中段) および AFM 像に差分二値化像を重ね合わせた像 (下段) をそれぞれ示す。これらの観察箇所は Fig. 2(b) の断面プロファイル中の A 部および B 部に対応している。Fig. 6(a), (b) の AFM 像に差分二値化像を重ね合わせた像 (下段) の 2 kOe 外部磁場印加処理において、前項で説明した通り、スクラッチの直下および端部領域から変化が顕著に起こっていることが認めら

れる。

次に、記録磁化状態変化量を面積比として定量解析を行うため、得られた差分二値化像の変化率を求めた。1 画像を 212×83 ピクセルの中で白コントラストのピクセル数が占める割合を求めることにより磁化状態が変化した領域の面積比を算出した。画像ドリフトの補正による画像の変形は 1 ピクセル以内に抑えることができるため、この処理に伴う変化率の最大誤差は 4 % になる。Fig. 6(a) に示した試料表面にスクラッチが存在しない場合の変化率は、1 kOe, 2 kOe, 3 kOe および 4 kOe 外部磁場印加の場合、それぞれ 5.6 %, 9.1 %, 13.5 %, 19.9 % となった。1 kOe ~ 2 kOe 外部磁場印加では変化率は大きくないが、外部磁場印加強度を 3 kOe, 4 kOe と増加させることにより記録ビット境界およびトラック境界付近で優先的に変化が起り、変化率が增大することが分かる。ここで、1 kOe および 2 kOe の外部磁場印加を行った場合の変化率が最大誤差の 4 % を上回っているが、この原因として二値化処理において中間色領域の判別誤差が含まれていることが考えられる。Fig. 6(b) および (c) に試料表面にスクラッチを形成した場合の変化率を求めた結果を示す。スクラッチの最大深さが 13 nm の場合 (Fig. 6(b)) の磁化状態変化率として、1 kOe, 2 kOe, 3 kOe および 4 kOe 外部磁場印加により、それぞれ 6.3 %, 12.6 %, 23.4 %, 43.2 % の値が得られた。また、スクラッチの最大深さが 7 nm の場合 (Fig. 6(c)) の磁化状態変化率として、1 kOe, 2 kOe, 3 kOe および 4 kOe 外部磁場印加により、それぞれ 8.1 %, 10.2 %, 14.3 %, 25.3 % の値が得られた。スクラッチが存在しない場合の変化率と比較すると、スクラッチが存在する場合は 2 kOe の外部磁場印加をすることにより変化率変動が顕著に増大していることが明らかとなった。また、スクラッチ幅が広い場合、幅が狭いスクラッチに比べて変化率の増加が大きいことが明らかである。

次に、異なるスクラッチ幅が及ぼす磁化状態変化の定量解析を行うため、得られた AFM 像に差分二値化像を重ね合わせた像から磁化状態変化が生じた領域を抽出した。このときの計測方法は、スクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域において磁化状態変化が生じた場所を 10 箇所プロットして、スクラッチ左端からその距離の平均値を算出した。スクラッチの最大深さが 13 nm の場合 (Fig. 6(b)) の磁化状態変化が生じた領域の平均値として、1 kOe, 2 kOe, 3 kOe および 4 kOe 外部磁場印加により、それぞれ 310 nm, 330 nm, 380 nm, 400 nm の値が得られた。スクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域 (スクラッチ左端から 197 ~ 369 nm の範囲) を考慮すると、2 kOe 以下の磁場印加処理ではこの領域の磁化状態変化が優先的に生じていることが分かる。また、スクラッチの最大深さが 7 nm の場合 (Fig. 6(c)), 1 kOe, 2 kOe, 3 kOe および 4 kOe 外部磁場印加により、それぞれ 105 nm, 135 nm, 225 nm, 250 nm の値が得られた。スクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域はスクラッチの左端から 65 ~ 222 nm であるため、3 kOe の外部磁場印加処理までこの領域内の変化が著しいことが分かる。また、スクラッチ幅が広い場合、幅が狭

いスクラッチに比べて磁化状態変化が生じる範囲も広いことが分かった。以上より、スクラッチの深さが記録磁性膜に達していない領域では、保磁力よりも遥かに低い外部磁場によって磁化状態変化が起り易いことが確認された。

4. まとめ

本研究では、垂直磁気記録方式のハードディスク表面にスクラッチが存在した場合、記録磁化状態に及ぼす外部磁場の影響を明らかにすることを目的に、磁気力顕微鏡を用いて磁化状態観察を行った。ディスク試料表面にスクラッチが存在しない場合、媒体保磁力より 30 % 程度低い外部磁場印加処理により、主としてビット端部付近から磁化状態が変化し始める様子が観察された。一方、ディスク試料表面にスクラッチが存在すると、保磁力の半分以下の外部磁場印加処理を行うことにより、磁化状態変化がスクラッチの直下および周辺部より優先的に変化することが分かった。また、スクラッチの幅が広い程、外部磁場印加をしたときの磁化状態の変化が大きいことが認められた。MFM 像の二値化差分像を取り磁化状態変化の変化率を求めることにより、磁化状態変化の定量解析が可能であることを示した。

謝辞 観察試料の磁気特性測定では(株)日立製作所中央研究所の平山義幸主任研究員のご協力を頂きました。また、本研究の一部は NEDO の援助を受けて行いました。ここに謝意を表します。

References

- 1) M. Igarashi, M. Hara, Y. Suzuki, A. Nakamura, and Y. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 2303 (2003).
- 2) J. W. Wang, M. Z. M. Yuan B. Liu, and J. Ding: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2686 (2000).
- 3) B. Valcu, R. Brockie, Y. Nan-Hsiung, and H. J. Richter: *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2115 (2007).
- 4) E. N. Abarra, H. Sato, M. Suzuki, and I. Okamoto: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2450 (2000).
- 5) Y. Yasui, K. Shimomai, and M. Futamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 312 (2007).
- 6) H. Takahoshi, H. Saito, S. Ishio, T. Yamaoka, and I. Okamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 284 (2002).
- 7) T. Yoshimura, S. Oshika, and M. Futamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 199 (2009).
- 8) T. Liew, W. W. Siong, K. C. Shiau, and T. L. Chwee: *Tribol. Int.*, **33**, 611 (2000).
- 9) M. Suk, and D. Jen: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1711 (1998).
- 10) J. Xu, M. Furukawa, A. Nakamura, and M. Honda: *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 893 (2009).
- 11) K. Nagano, S. Sasaki, and M. Futamoto: *J. Phys. Conf. Ser.*, **200**, 102006 (2010).
- 12) W. Pei, H. Saito, and S. Ishio: *IEICE Tech. Rep.*, **30**, 11 (2006)

2009年10月20日受理, 2010年2月1日再受理, 2010年3月17日採録