Magnetic Force Microscopy of Magnetic Recording Media at Low and Elevated Temperatures

Y. Yasui, K. Shimomai, and M. Futamoto

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

The recorded magnetization structures of longitudinal and perpendicular recording media were investigated by magnetic force microscopy in a temperature range between -50 and 300 °C. We found that when the sample temperatures are increased, variations in recorded magnetization occur preferentially in regions recorded with shorter bit lengths for longitudinal media. On the contrary, they tend to occur in regions recorded with longer bit lengths for perpendicular media. The behaviors of variations in magnetization structures with heating differ slightly bit by bit even for similar bit lengths.

Key words: *in-situ* observation, magnetic force microscopy, longitudinal media, perpendicular media

冷却・加熱時における磁気記録媒体の MFM 観察

安井佑介・下舞恵介・二本正昭

中央大学理工学部, 東京都文京区春日 1-13-27 (〒112-8551)

1. はじめに

磁気記録の高記録密度化が進み, 記録密度が 100 Gbit/in^2 を超えるハードディスクドライブ (HDD) が出荷され始めた. HDD の高記録密度化に伴い記録ビットの微細化が進行し, 従来の面内記録方式では熱ゆらぎ現象による記録磁化情報の不安定化が問題となりつつある. 高記録密度領域で面内記録に比べて耐熱ゆらぎ性に優れる垂直記録方式を採用した HDD も実用化され, 市場に登場し始めている. 磁気記録の高密度化は今後も継続的に進展するものと予測され, 外部磁界や温度などの環境変化に対する HDD の信頼性の確保がますます重要となっている. 温度などの環境が高密度磁気記録した媒体の磁化状態に及ぼす影響が調べられ始めている¹⁻⁴⁾.

本研究では, 温度が記録磁化状態に及ぼす影響を調べることを目的として, 面内及び垂直磁気記録媒体の記録磁化状態を磁気力顕微鏡 (MFM) で観察した. HDD 記録媒体のビット形態を, 温度を制御しながらその場観察を行い, 変化の様子を調べた.

2. 実験方法

MFM 観察には, 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 SPA-300HV / SPI4000 を用いた. MFM 探針には, SII ナノテクノロジー社製 SI-MF40 を用いた. 探針の磁性体の材料, 膜厚, 保磁力はそれぞれ CoPtCr, 50 nm, 200 Oe であり, 磁化方向は垂直方向とした. この場合, MFM は試料面に垂直な方向の磁場勾配を検出することとなり, 面内記録媒体では記録磁

区の境界が明暗で現れる. 一方, 垂直記録媒体では記録磁区そのものが明暗で現れる. 試料の温度を冷却時は -50 °C ~ 室温 (RT), 加熱時は RT ~ 300 °C の範囲の一定温度で制御しながら磁気像の観察を行った. 試料室内の真空度は, $8 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-5}$ Pa であった. 観察試料として, 市販の面内記録方式の HDD と垂直記録方式の HDD を用いた. 面内記録方式の HDD は最大面記録密度が約 80 Gbit/in^2 の AFC 構造を持つ媒体である. この媒体は 300 °C までの加熱サイクルによる磁気基本特性の変化はほとんどなかった. 垂直記録方式の HDD は最大面記録密度が約 110 Gbit/in^2 であり, 垂直方向で測定した保磁力は 5.0 kOe であった. この媒体は 250 °C 以下の温度への加熱処理では M-H 曲線はほとんど変化しなかったが, 300 °C 加熱では加熱処理によって保磁力が 4.4 kOe に低下した. それぞれの HDD を PC に装着して, 面内磁気記録媒体にはランダムデータを, 垂直磁気記録媒体には特定のビット配列を繰り返し記録した.

試料加熱しながらその場観察を行った際の試料温度と時間経過の例を Fig. 1 に示す. RT で MFM 像を観察した後, 試料を昇温速度 6 °C/min で一定の温度に加熱した. 昇温直後は熱ドリフトにより試料が移動するため, 所定の温度に達してから $30 \sim 60$ 分後に, MFM 像観察を開始した. この際, 昇温前と同じ観察位置になる様にステージ位置を調整し同一領域の観察を行った. 高温加熱後, 試料を RT まで自然冷却し同様の観察を行った.

3. 実験結果

3.1 面内磁気記録媒体

Fig. 2 に面内磁気記録媒体の温度を室温から 300 °C まで変化させて同一領域を MFM 観察した結果を示す. 観察領域は 7 トラック (T1 ~ T7) であり, ランダムパターンが記録されている. 150 °C 加熱 (Fig. 2(b)) ではビット形状は RT とほとんど変わっていないが, 短いビット長の信号が連続して記録された T3 左側などの領域ではコントラストが低下しているのが確認できる. この傾向は 200 °C 加熱 (Fig. 2(c)) でも同様であるが, 250 °C 加熱 (Fig. 2(d)) になると短いビット長の信号が記録された部分ではビットに対応するコントラストがほとんど消失している領域が認

Fig. 1 Typical time-temperature program for MFM observation at elevated temperatures.

Fig. 2 MFM images of longitudinal recording media observed at (a) RT, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C, (e) 300 °C, and (f) RT after heating at 300 °C.

められる (T-6 中央). また長いビットではその形状が変化して隣接ビットに浸食している傾向が認められる. 300 °C加熱 (Fig. 2(e)) では短いビット長の信号が記録された部分ではそのコントラストが完全に崩れており, 記録信号の再生が困難な状態になっていることが分かる. また長いビットは RT で観察した MFM 像と同位置に存在しているのが確認できるが矩形性が大きく損なわれている. 隣接したトラック間で同じ磁化方向を持つビット同士が結合しているような箇所も認められる. トラック間で磁気干渉による磁化状態変化が生じているものと思われる. T-4 中央部に存在する記録ビットの左右の長距離に及ぶ一方向記録のコントラストは, RT では一様にあるのに対し, 加熱温度上昇とともに数十~100

nm オーダの揺らぎが顕在化する傾向が認められる. この変化を可視化するために MFM 像の T-4 左側におけるラインプロファイルを Fig. 3 に示し RT と 300 °C で比較する. ラインプロファイルでの縦軸の大小は, MFM 像における明暗に対応する. RT から 300 °C に加熱することで磁気コントラストに数十~100 nm スケールの凹凸が生じ, 形状が変化していることが確認できる. これは, 加熱に伴って一方向記録状態の熱緩和が起こり, 記録媒体の微細構造に起因する磁気クラスター構造が観察され始めたものと解釈することができる. 長矩の記録ビットが記録された領域でも, 加熱温度が上昇するにつれて数十~100 nm オーダの揺らぎコントラストが重なって観察される傾向が認められる. 記録状態の熱緩和に伴って, 媒体の微細構造に起因する磁気クラスター構造が顕在化しているものと思われる. 300 °C 加熱では比較的長いビットに対するコントラストは認められるが, 磁気クラスターを反映すると思われる数十~100 nm オーダの揺らぎが顕在化し, 短ビットに対するコントラストは完全に失われているのが分かる. この媒体を RT まで冷却して観察した結果 (Fig. 2(f)) は 300 °C で観察した結果 (Fig. 2(e)) とほぼ等しい像となっている. 300 °C の加熱によって不可逆な磁化状態の変化が生じたことが分かる.

加熱によって生じた変化を解析するために, MFM 像の T-3 のラインプロファイルの加熱温度による変化を Fig. 4 に示す. これらのラインプロファイルは各トラックの中心線上で測定した MFM 信号強度の変化である. A で示した短いビット長の信号が連続し

Fig. 3 MFM signal intensity variations of T-4 observed at RT and 300 °C.

Fig. 4 MFM signal intensity variations of T-3 observed at (a) RT, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C, and (e) 300 °C.

で記録された領域では、温度上昇に従ってその波形の強度が低下し、磁化状態の変化が他の領域より大きくなっていることが分かる。B は比較的長いビット長に対応する領域で、台形状の信号波形が RT で観察されている (Fig. 4(a))。これは探針の保磁力が十分でなく、記録媒体の漏れ磁界の面内成分により探針の磁化が面内方向に傾き、面内磁場勾配を検出していることが考えられる。この台形状のプロファイルが温度上昇に伴って狭くなっていく。これは長いビットでも、ビット境界近傍で磁化の緩和が起こっていることを示しているものと解釈される。

Fig. 6 MFM images of perpendicular recording media observed at (a) RT, (b) 200 °C, and (c) RT after heating at 300 °C.

Fig. 5 MFM image of longitudinal recording media observed at -50 °C.

Fig. 5 に試料を -50 °C に冷却して観察した MFM 像を示す。RT で観察した MFM 像と比較すると、冷却により記録磁化状態はほとんど変化しなかったが、ビット境界の急峻性が增大しており、観察分解能の向上効果が認められた。MFM 観察時におけるカンチレバーの温度が低くなり、熱ノイズが抑えられ分解能が向上した効果が働いているものと思われる⁹⁾。

3.2 垂直磁気記録媒体

Fig. 6 に垂直磁気記録媒体の温度を変化させて同一領域を MFM 観察した結果を示す。観察領域は 8 トラック (T-A~T-H) であり、全てのトラックで同じビット列が記録されているのが確認できる。200 °C 加熱 (Fig. 6(b)) により、ビット形状が変化し、さらに 300 °C 加熱ではビット形状に対応するコントラストが失われることが分かった。300 °C まで加熱してから RT まで冷却した像 (Fig. 6(c)) では、観察領域内にビット列の存在は認められず、磁気クラスターと思われる 20~40 nm 径の粒状の像が確認できる。

MFM 像より 3 トラック (T-A, T-D, T-G) を選び、同様のビット列が記録されている部分の MFM 信号強度ラインプロファイルを図 7 に示す。Fig. 7(a) は RT、Fig. 7(b) は 200 °C で測定したラインプロファイルである。RT で測定したラインプロファイルは同様のビット列であることに对应して 3 トラックの波形は類似しているが、A 部などで若干の差異が認められる。200 °C 加熱によ

Fig. 7 MFM signal intensity variations of perpendicular media observed at (a) RT and (b) 200 °C.

り、ラインプロファイルが RT の場合に比べて明瞭に変化している。A 部では加熱によって波形の相対強度が明らかに低下し、形状も変化している。トラックが異なるとプロファイルの変化の様子も違っていることが分かる。例えば矢印 B で示す部分では、RT では 3 トラックとも互いに類似しているが、200 °C 加熱ではその形状がトラックごとに異なっている。このような観察結果から、ビット形状の変化はビット配列が同一であっても必ずしも同様の変

化とならないことが分かる。記録媒体の微細構造や媒体を構成する磁性結晶粒間の磁気的相互作用などがビットパターンの変化に影響しているものと思われる。

特定のビット形状の変化に注目すると、C で示す長いビットでは、加熱によりその波形が 3 トラックとも異なった変化をしており、ピーク位置がトラックによって数 nm 程度ずれていることが分かる。これに対し D に示す短いビットでは、その変化は長いビット (C 部) に比べて小さくなっている。面内記録媒体において長いビットではビット境界近傍から磁化が熱緩和していく傾向が認められたが、垂直記録媒体ではビット中心部の形状が変化した点で面内記録媒体の場合とは異なっていることが分かった。これは、垂直記録媒体では面内記録媒体と異なり、磁化の緩和が必ずしもビット境界から始まらないことを示しているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、面内記録方式及び垂直記録方式の HDD 媒体について温度を制御しながら MFM 観察を行った。その結果、いずれの記録方式の媒体でも加熱することによって磁化状態の変化が認められた。その傾向は、面内磁気記録媒体ではビット境界近傍から熱緩和が始まり、短いビット長が連続して記録された領域において劣化が激しかった。これに対し、垂直磁気記録媒体ではビット中心部で熱緩和が起きる傾向が観察され、短いビットよりも長いビットにおいて劣化が激しかった。また、同一ビット列であっても、トラックによって熱緩和の傾向は大きく異なる様子が観察された。これは、媒体の微細構造が磁区構造の熱緩和に影響を与えたものと考えられる。

謝辞 垂直磁気記録媒体の基本磁気特性の測定では、(株)日立製作所中央研究所の平山義幸主任研究員に協力をいただきました。また本研究は文部科学省研究費 (基礎研究 C17560292) の補助を受けて行ったものであり、ここに謝意を表します。

References

- 1) Y. Honda, Y. Hirayama, A. Kikukawa, and M. Futamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, Suppl. S2, 49 (1999).
- 2) M. Futamoto, Y. Hirayama, N. Inaba, Y. Honda, K. Ito, A. Kikukawa, and T. Takeuchi: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2802 (1999).
- 3) B. Bian, M. Avenell, J. Tsoi, L. Mei, S. Malhotra, and G. Bertero: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 648 (2005).
- 4) Y. Nakatani, N. Hayashi, Y. Uesaka, and H. Fukushima: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2036 (2002).
- 5) H. Saito, R. Sunahara, Y. W. Rheem, and S. Ishio: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 4394 (2005).

2006 年 10 月 20 日受理, 2007 年 5 月 16 日採録