

# 磁気力顕微鏡によるパターン媒体の磁化状態観察及び磁化反転特性の検討

## Investigation of magnetization structure and magnetic dot reversal behavior of bit patterned media by magnetic force microscopy

電気電子情報通信工学専攻 佐々木 翔太  
Syota SASAKI

### 1. はじめに

近年の情報通信産業の発達に伴い、社会で流通する情報量は爆発的な増加を続けている。そのため、主要なデータストレージであるハードディスクドライブ (HDD: Hard Disk Drive) の高密度化が重要な課題となっている。

現在の HDD に用いられている垂直磁気記録方式で高密度化を行う場合、1 bit の情報を記録する領域を小さくするためには結晶粒の微細化が必要となるが、それに伴い外部の熱により磁化状態が不安定になる「熱揺らぎ」と呼ばれる現象が発生する。そのため、結晶粒の微細化と熱安定性を両立するには磁気異方性エネルギーの大きな材料を用いる必要があるが、磁気異方性エネルギーの大きな材料は磁化方向を反転させるのに必要な磁界も大きくなり、記録効率を低下させてしまう。<sup>1)</sup>

ビットパターンドメディア (BPM: Bit Patterned Media) はこれらの問題を解決し、さらなる高密度化を実現する記録方式として期待されている<sup>1)</sup>。BPM は磁性ドットを人工的に規則正しく配列した記録媒体であり、1 ドットを熱揺らぎの限界まで縮小でき、ドット内において磁性粒子同士が磁気

的に強く結合した状態が求められることから、磁気異方性エネルギーの大きな材料を用いても磁化反転が起こるスイッチング磁界が極端に大きくならないという利点がある。

Fig.1 に垂直磁気記録媒体と BPM の模式図を示す。

パターンドメディアの実用化における課題の一つとして、スイッチング磁界のばらつきの制御が挙げられる<sup>2,3)</sup>。スイッチング磁界が不均一な場合、Fig. 2 のような近接ドットへの意図しない書き込み及び消去が発生し、ビット誤り率が增大してしまう。そのため、スイッチング磁界分散 (SFD: Switching field distribution) 等磁気特性の計測・評価技術が重要となり、磁化曲線からスイッチング磁界の分布を類推し、SFD を算出するという方法が広く用いられている<sup>4)</sup>。

しかし、この方法は媒体全体の平均的な特性を把握することはできるが、個々のドットの磁化反転挙動までは調べることが出来ない。

そこで、本研究では磁気力顕微鏡法 (MFM: Magnetic Force Microscopy) を用いて試作 BPM サンプルの磁化状態観察を行い、磁性ドットの磁気特性の計測・評価を行うことを試みた。MFM による磁気特性の計測・評価は個々のドットの磁化状態から反転ドット数やスイッチング磁界の分布を直接的に測定できる点が特長として挙げられる<sup>5,6)</sup>。

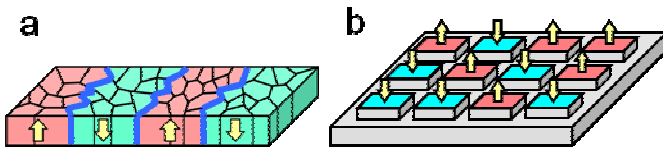


Fig. 1. Schematic diagram of (a) perpendicular recording media (b) bit patterned media.

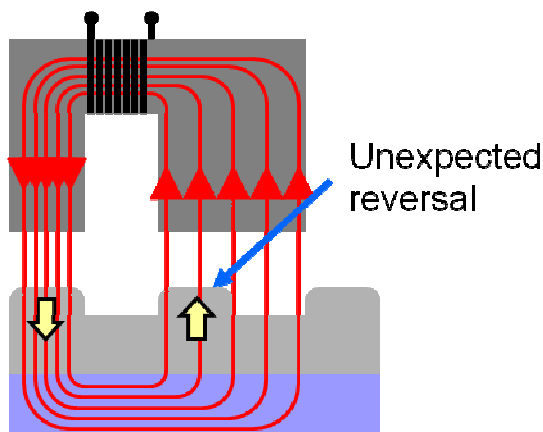


Fig. 2. Error by unexpected magnetization reversal

### 2. 実験方法

実験には BPM サンプルは金属ガラス膜をナノインプリント法によって微細加工したものを用いた。分離した磁性ドットは、規則的に配列された円柱状の穴を備えた金属ガラス膜上に Co/Pd 多層膜を形成した後、アンチスパッタリングによってエッチングをすることで作製された<sup>7)</sup>。ドットの半径は 30 nm、ドット間のピッチは 58 nm である。Fig.3 に BPM 試料の模式図を示す

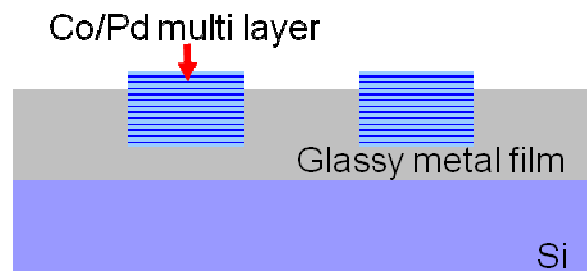


Fig. 3. Schematic diagram of BPM sample.

観察用の MFM 探針として、市販の原子間力顕微鏡用に製造された Si の探針に 30 nm の Co 薄膜を形成したものをを用いた<sup>8)</sup>。

外部磁界を電磁石によって試料の垂直方向に磁界を印加することで、磁性ドットの外部磁界に対する磁化反転挙動の検討を行った。まず、すべてのドットの磁化方向を一様にするため、試料に+10 kOe の磁界を印加する。そして次に逆方向の磁界を試料に印加する。逆方向に印加する磁界の強度を一定間隔で徐々に-10 kOe まで上げていく。さらにその後、再び逆方向の磁界を試料に印加し、一定間隔で+10 kOe まで磁界強度を上げていき、磁性ドットの磁化反転挙動の検討を行う。

MFM 観察は磁界処理を試料に施した後に、試料を観察装置へ移すことで行った。また、異なる大きさの外部磁界を印加した際にも、試料の同一視野の観察を行うことを試みた。観察実験は室温、MFM 装置(SII Nano-Technology Inc. SPI4000/SPA-300HV)に備え付けられた 0.1 Pa の真空環境下で行った。

また、観察に用いた Si 探針に膜厚 30 nm の Co 薄膜を MFM 探針は、10-15 nm 程度の分解能を持つ。<sup>8)</sup>

### 3. 実験結果

#### 3.1 磁性ドットの磁化反転挙動観察

Fig. 3 に BPM 試料の(a) 形状像、(b)それに対応した初期磁化状態の MFM 像をそれぞれ示す。Fig. 4 に示すように、MFM 像の明コントラストのドットが上向きドットに、暗コントラストのドットが下向きドットに対応している。

Fig.3(a)に示すように、各磁性ドットのドット径は 30 nm、間隔が 58 nm であり、各ドットはおよそ 2 nm ほど金属ガラスから隆起している。こちらの試料においても磁性ドットが垂直上方向または下方向に磁化しており、その比がほぼ 1:1 であることが Fig.1 の MFM 像からわかる。

Fig.6(a)及び(b)-(f)は同一視野において試料の磁化方向を揃えた後、逆向きの磁界を印加していく一連の磁界印加処理を施した MFM 像である。Fig 3(a)に示すように、+10 kOe の磁界を印加した際、すべてのドットが垂直上方向に磁化していることがわかる。

Fig. 6(b)-(f)から、逆向きの磁界の強度の増加に伴い、逆向きの下方向に磁化したドットの数が増え、最終的にすべてのドットは-10 kOe の磁界印加により逆方向に磁化することがわかった。

#### 3.2 スイッチング磁界分布の算出

磁化反転したドットの数と印加磁界の相関性を Fig. 7 に示す。標本として観察されたドットの合計は 518 個である。

磁性ドットの磁化反転は-1.2 kOe の磁界が印加された時から始まり、-3.8 kOe の磁界が印加されたときにすべての磁性ドットの磁化方向は反転した。大部分のドットは 2.0 kOe から 3.0 kOe の磁界が印加されたときに磁化反転を生じ

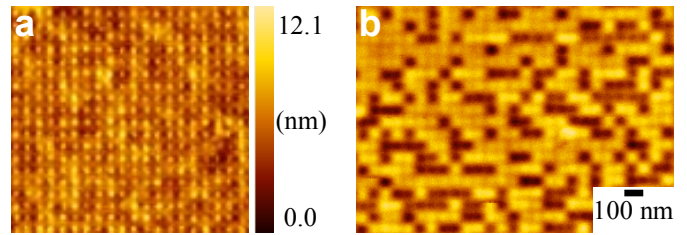


Fig. 4. (a) AFM image and (b) a corresponding MFM image of a BPM sample before exposing to magnetic field.

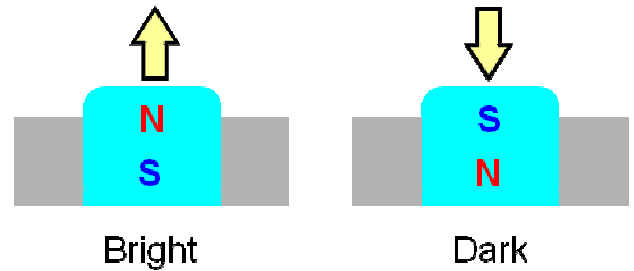


Fig. 5. Corresponding of magnetization direction and contrast of MFM images

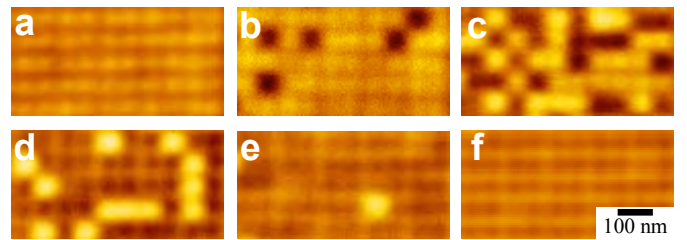


Fig. 6. (a)-(f) MFM images of the same area observed after applying perpendicular magnetic fields of (a)+10 kOe, (b)- 2.0 kOe, (c)-2.5 kOe, (d)-3.0 kOe, (e)-3.5 kOe, and (f)-10 kOe.

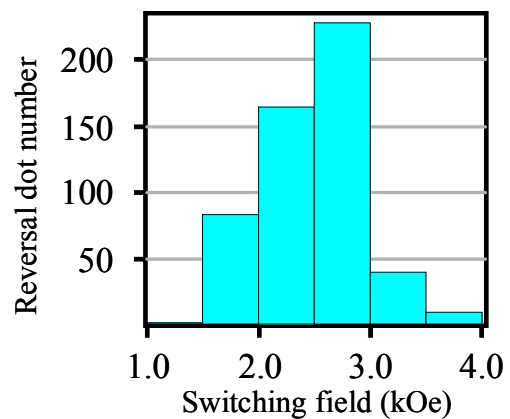
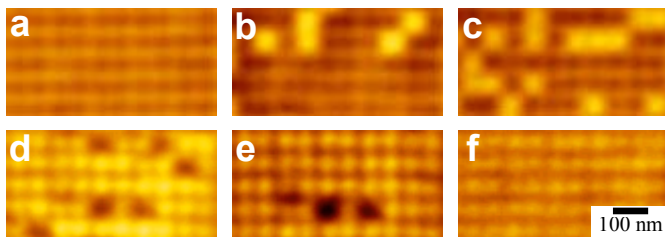


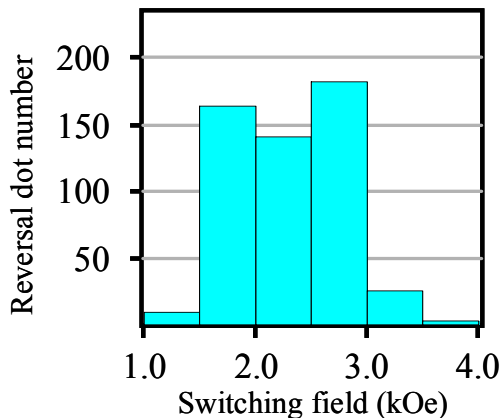
Fig. 7. Relationship between magnetic field and reversed magnetic dots

ている。

スイッチング磁界の期待値及び標準偏差はそれぞれ 2.5 kOe, 0.4 kOe と求められた。両値から SFD の値は 16% と算出されたが、この数値は実用的にはかなり大きい数字とされており<sup>9)</sup>、実用には、さらに SFD の値を減らすことが必



**Fig. 8.** (a)–(f) MFM images of the same area to that for Fig.2 observed after applying perpendicular magnetic fields of (a)–10 kOe, (b)+2.0 kOe, (c)+2.5 kOe, (d)+3.0 kOe, (e)+3.5 kOe, (f)+10 kOe.



**Fig. 9.** Relationship between magnetic field and reversed magnetic dots when magnetic fields were applied in the reverse direction.

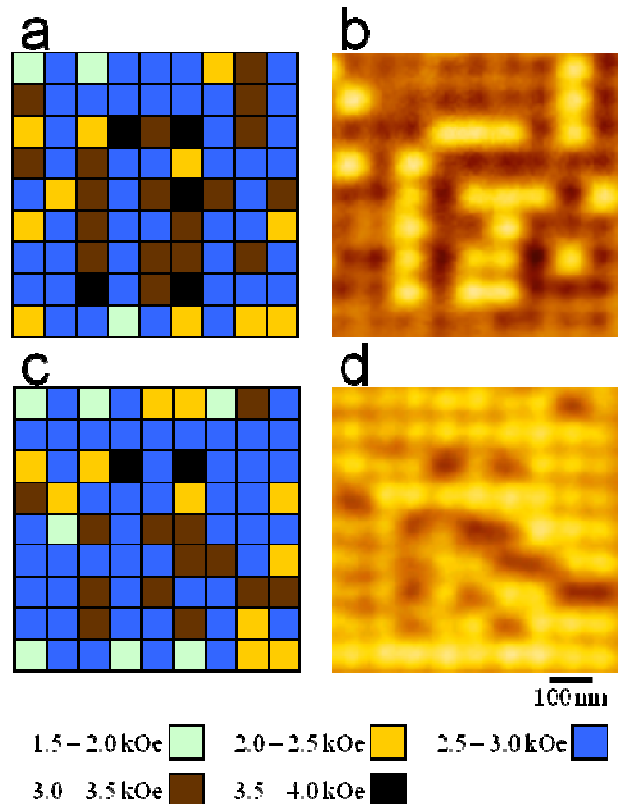
要であると考えられる。このように、BPM の基礎的な磁気特性を、MFM 観察により直接的に得られることが示された。

### 3.3 磁化反転の再現性の検討

試料に再び逆方向の磁界を印加することで、磁性ドットの磁化反転の再現性を検討することを試みた。Fig.8 に示すように、これまでの実験と同様、逆向きの磁界強度の増加に伴い、磁化反転を生じたドットの数が増えている。なお、Fig.8 において観察を行ったのは、Fig. と同一の視野である。それゆえに、これら2つの一連のMFM像を比較することにより、逆方向の磁界を印加した際の磁化反転挙動の再現性を検討することができる。例えば、Fig.2 (b)(+2.0 kOe)と Fig.4 (b)(-2.0 kOe)を比較することにより、反転した5つのドットの内、4つが一致していることが示される。

Fig.9 は逆方向から磁界を印加した際の、印加磁界強度と反転ドット数との関係を示す。標本として観察された磁性ドットは Fig.5 と同一である。大部分のドットは2.0 kOe から3.0 kOe の磁界が印加されたときに磁化反転を生じており、Fig.3 とよく類似していることがわかる。しかしながら磁化反転が生じるスイッチング磁界には僅かな違いが存在することも同時に見て取れる。

このことは、磁性ドットの磁化反転は外部から印加される磁界のみならず、何か他の要因にも影響を受けることを示唆している。しかし、大部分のドットは上向き、下向きの磁化反転方向に関わらず、再現性を持って磁化反転を生じることが



**Fig. 10.** Switching field map of dots reversed from (a) upward to downward and from (c) downward to upward. (b), (d) MFM images observed after applying the same but opposite direction magnetic field of +3.0 kOe and -3.0 kOe, respectively.

わかった。

Fig.10 は BPM 試料の同一箇所においてスイッチング磁界分布を比較したものである。Fig.6(a)は上向きから下向きに磁化反転させたときのスイッチング磁界分布のマッピングを、Fig.10(c)は下向きから上向きに磁化反転させたときのスイッチング磁界分布のマッピングをそれぞれ示しており、81個のドットに関してその磁氣的スイッチングの再現性を検討

することができる。Fig.10(b)及び(d)において、同一の大きさ、しかし逆方向の磁界それぞれ+3.0 kOe、-3.0 kOeを印加した際の同一視野でのMFM像を例として挙げた。

特筆すべきこととして、逆方向の磁界を印加した際においても、磁性ドットの磁化反転の再現性が非常によく一致していることが挙げられる。518個のドットのうち、441個のドット、すなわち85%のドットが同一の大きさの外部磁界を印加した際に磁化反転を起こしている。

これらの結果から、磁性ドットの磁化反転挙動は本来的には再現性が存在することが示された。

### 4. まとめ

本研究において、規則的にパターンニングされた磁性ドットの磁化状態を、異なる磁界を印加するたびMFMによって同一視野を繰り返し観察し、その磁化反転挙動を直接観察

することを試みた。それにより、85%という比較的高い比率のドットが同一磁界を印加した際に再現性を持って磁化反転を生じる、という結論を得ることができた。

個々のドットの磁化反転、スイッチング磁界の分布、磁化反転の再現性や、スイッチング磁界の期待値、標準偏差やSFD等、BPMにおける種々の基礎的な磁気特性をMFMによって直接検討することができた。

これらの結果から、MFM観察がBPMの磁氣的性質の調査に非常に有用であると示された。

**謝辞** 本研究を行うに当たり懇切丁寧にご指導いただきました二本正昭教授に深く感謝いたします。本研究の一部は、同二本研究室の大竹充さん、長野克政さん各氏の協力のもとに行われました。ここに感謝の意を示します。

## References

- 1) B.D. Terris, *J. Mag. Mag. Mater.*, 321, 512 (2009).
- 2) H.J. Richter, A.Y. Dobin, R.T. Lynch, D. Weller, R.M. Brockie, O. Heinonen, K.Z. Gao, J. Xue, R.J.M.v.d. Veerdonk, P.Asselin, M.F.Erden, *Appl. Phys. Lett.* 88, 222512 (2006).
- 3) R.J.M.v.d. Veerdonk, X.Wu, and D. Weller, *IEEE Trans. Magn.*, 39, No.1, 590 (2003).
- 4) D.Engle, A. Ehresmann, J. Schmalhorst, M. Sacher, V. Höink, and G. Reiss, *J. Mag. Mag. Mater.*, 293, 849 (2005).D.Engle, A. Ehresmann, J. Schmalhorst, M. Sacher, V. Höink, and G. Reiss, *J. Mag. Mag. Mater.*, 293, 849 (2005).
- 5) R. Sbiaa, E.L. Tan, K.O. Aung, S.K. Wong, K. Srinivasan, and S.N. Piramanayagam, *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, No.2, pp. 828 (2009)
- 6) B.D. Belle, F.Schedin, N. pilet, T.V. Ashworth, E.W. Hill, P.W. Nutter, H.J. Hug, and J.J. Miles, *J. Appl. Phys.*, 101, 09F517 (2007)
- 7) N. Nishiyama, K. Takenaka, N. Togashi, H. Miura, N. Saidoh, Akihisa Inoue, *Intermetallics*, 18, 1983 (2010).
- 8) K. Nagano, K. Tobar, S. Sasaki, M. Ohtake, and M. Futamoto, *IEICE Tech. Rep.*, MR 2010-24, 11 (2010).
- 9) J.M. Shaw, W.H. Rippard, S.E. Russek, T. Reith, and C.M. Falco, *J. Appl. Phys.*, 101, 023909 (2007).