

## 高分解能 MFM の開発：低ノイズ化と高分解能探針の作製

## Reduction of Noise and Fabrication of High-Resolution Tips for a High-Resolution Magnetic Force Microscope

齊藤 準・夏目貴史・砂原亮介・林 映雨\*・石尾俊二 H. Saito, T. Natsume, R. Sunahara, Y. Rheem,\* and S. Ishio

秋田大学工学資源学部, 秋田市手形学園町 1-1 (〒010-8502)

Faculty of Resource Science and Engineering, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita 010-8502, Japan

\*秋田大学ベンチャービジネスラボラトリー, 秋田市手形学園町 1-1 (〒010-8502) (現在 カリフォルニア大学・リバーサイド校)

\*Venture Business Laboratory, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita 010-8502, Japan (currently at the University of California, Riverside, USA)

A high-resolution magnetic force microscope (hr-MFM) with 10 nm resolution was developed by reducing the noise and improving the magnetic sensitivity of tips. The MFM noise was reduced by cooling the tips to 130 K and the fabrication of high-coercivity FePt tips with enabled us to observe high density magnetic recording media with high-resolution. A further attempt was made to fabricate tips of a new type using an exchange spring trilayer, to attain the theoretical resolution.

**Key words:** magnetic force microscope, high spatial resolution, reduction of MFM noise, high-resolution MFM tip, simulation of MFM resolution

## 1. はじめに (MFM の空間分解能の理論的予測)

高密度磁気記録技術等の急激な進展に伴い、ナノサイズでの磁性材料の磁気特性の制御が必要とされてきている。このため、高い空間分解能をもつ磁気イメージング技術が強く求められている。磁性薄膜の磁区観察に広く用いられている磁気力顕微鏡 (MFM) においても、その分解能を nm サイズまで向上させることは極めて重要な課題である<sup>1),2)</sup>。はじめに、どうすれば MFM で高分解能が達成できるのかを原理的な側面から考えてみる。

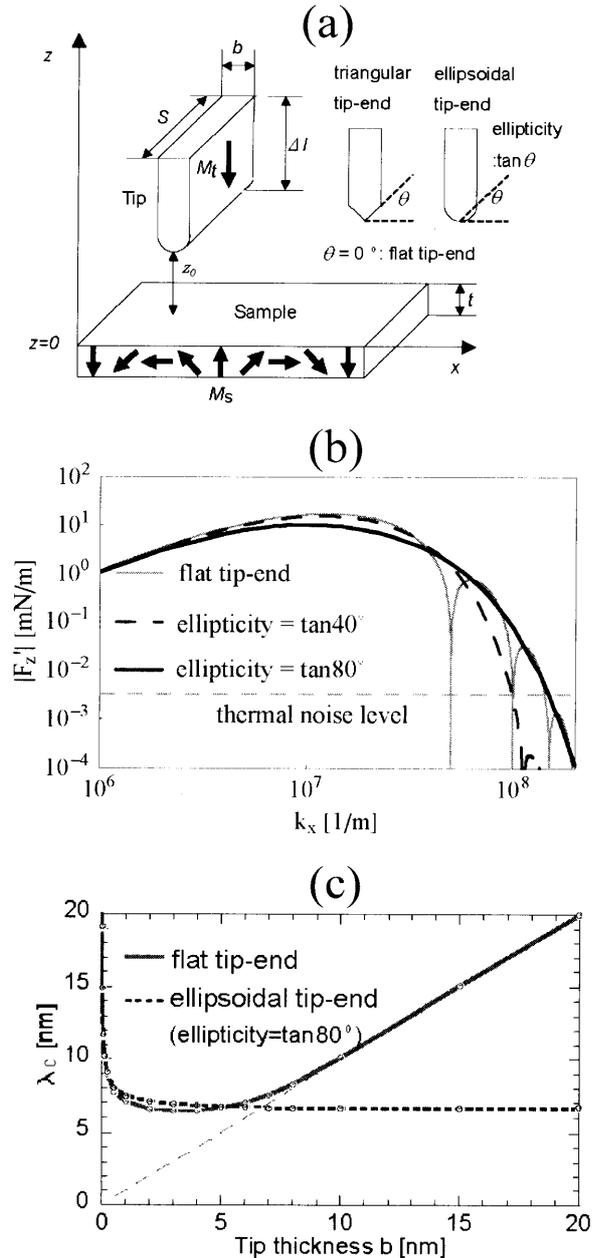
MFM は、観察試料から発生する漏洩磁場の勾配を検出して画像化する装置である<sup>3)</sup>。MFM は、観察試料の磁極 (試料磁極) を信号源として、MFM 探針の磁極 (探針磁極) に働く磁気力により、MFM 探針部における力勾配を計測するシステムととらえることができる<sup>4)~6)</sup>。

すなわち、MFM の振舞は、試料磁極を入力信号として、探針磁極を介した力勾配を出力信号とする探針伝達関数で表すことができる。したがって、検出される MFM 信号の強度は、探針の形状および探針に使用される磁性材料の磁気特性に依存する探針磁極の分布形態より変化する。一方、MFM 信号は、MFM 装置のノイズ (MFM ノイズ) と比較して、その強度が大きな場合に検出することができる。ここで、有限温度における MFM ノイズの下限値は探

針の熱振動ノイズで決定される<sup>7)</sup>。したがって、MFM の高分解能化のためには、1) MFM 信号を高感度で検出できる実効体積が小さな MFM 探針の開発、2) MFM ノイズの低減、が必要となる。それでは、まず、分解能の理論的上限値を見積もってみよう。

Fig. 1(a) に計算モデルを示す<sup>8)</sup>。ここでは、磁性探針の形状を細長い薄板状とし、探針の磁化方向を薄板の長手方向とした。探針を細長い薄板状にすることで、探針は双極子型ではなく、単磁極型として振舞うことになり、感度が向上する。すなわち、探針が受ける力は、探針先端部分の磁極が受ける磁気力が主となり、探針の他端にある異符号の磁極が受ける逆向きの磁気力が無視できるようになる。計算では、観察試料として、ビットアスペクト比の大きな磁気記録媒体を想定して、試料を擬一次元の正弦波記録媒体とし、また磁性探針の断面を長方形とした。分解能近傍の高い空間周波数域では、試料が矩形波記録されていたとしても、探針伝達関数の性質<sup>4)~6)</sup>より、MFM は記録波形の基本波成分を主に検出することになる。したがって、分解能の評価には正弦波記録媒体を用いた計算モデルで十分である。ここでは、探針および試料を Co および CoCr 系媒体とし、計算には以下の値を用いた<sup>9)</sup>。 ( $M_t=1.78$  T,  $b=20$  nm,  $S=100$  nm,  $\Delta l=1$   $\mu$ m,  $M_s=0.37$  T,  $t=70$  nm) また探針試料間距離  $z_0$  は 10 nm とした。計算では、観察中に探針の磁化方向が変動しない理想的な状況を想定している。後でも述べるが、探針の磁気異方性が十分に大きくない場合、試料からの漏洩磁場により探針の磁化方向が変動し探針先端の磁極が試料から遠ざかることで探針の感度が低下することになる。

Fig. 1(b) に、一例として、探針の先端が平坦な探針 (平坦探針) および探針の断面が楕円形の先端形状をもつ探針 (だ円探針) について、探針が受ける力勾配の空間周波数依存性を示す<sup>8)</sup>。同図には、室温 (298 K) での探針の熱振動によるノイズレベルも示した。熱振動ノイズは MFM ノイズの理論的下限に対応する。MFM 信号が計測可能な信号ノイズ比を 1 以上とすると、MFM が検出する力勾配の最小



**Fig. 1** (a) Calculation model of an MFM signal. (b) Spatial frequency dependence of  $|F'_z|$  for ellipsoidal tips with several ellipticities ( $b=20$  nm,  $z_0=10$  nm). (c) Tip thickness dependence of  $\lambda_c$  for tips with flat tip-ends and ellipsoidal tip-ends ( $z_0=10$  nm).

値  $(F'_z)_{\min}$  は、熱振動ノイズと等しくなり、次式<sup>7)</sup>で与えられる。

$$(F'_z)_{\min} = \sqrt{4kTc\Delta B/(\omega_0QA^2)} \quad (1)$$

ここで、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は探針の絶対温度、 $c$  は探針のバネ定数、 $\Delta B$  は測定時の周波数バンド幅、 $\omega_0$  は探針の共振角周波数、 $Q$  は探針振動の性能指数、 $A$  は駆動している探針振幅の実効値である。

図に見るように、平坦探針では、MFM信号がゼロとなる空間周波数（ゼロ周波数）が存在するが、探針先端を楕

円形状に先鋭化していくと、ゼロ周波数が消滅することがわかる。平坦探針では、ゼロ周波数は、図中の探針厚み  $b$  が記録波長の整数倍に等しくなった場合に、探針内で磁気力が打ち消されることにより生じる。探針先端が先鋭化していくとゼロ周波数が消滅するのは、探針中心部分の磁気力が主となり、打ち消し合いが探針内で起こらなくなるためである。ここで、MFMの空間分解能は、信号とノイズが等しくなる空間周波数  $k_x$  に対応する波長（临界波長  $\lambda_c=1/k_x$ ）の半分 ( $\lambda_c/2$ ) で定量的に定義できる。この空間分解能は観察可能な最小の記録ビット幅に対応する。だ円探針においては、楕円率の値が  $\tan 80^\circ$  付近で最も高い分解能を示す<sup>8)</sup>。

Fig. 1(c) に最も高い分解能を示す楕円率が  $\tan 80^\circ$  の楕円探針における  $\lambda_c$  の探針厚み  $b$  に対する依存性を示す<sup>9)</sup>。図には、平坦探針の場合も同時に示してある。平坦探針では、 $\lambda_c$  は最小のゼロ周波数で決定され、その値は探針厚みにほぼ等しくなるのに対して、楕円探針では、 $\lambda_c$  は探針厚みによらずほぼ一定の値となる。ここでは、探針先端を先鋭化することで分解能として  $3\sim 4$  nm 程度が得られることがわかる。さらに、記録媒体のビット形状として最も面記録密度を高くできるビットアスペクト比が 1 の記録媒体についても、シミュレーションにより市松模様状の正弦波記録パターンに対して分解能を見積もったところ、探針形状を先鋭化し回転だ円体とすることで分解能が室温で 7 nm 程度となることがわかった<sup>10)</sup>。しかしながら、現在までのところ、MFMの分解能は上記の理論的な限界値までは至っていない。本稿では、MFMで nm 分解能を達成することを目的として、筆者らが最近行った、1) MFMノイズ解析および探針冷却による低ノイズ化、2) 高分解能 MFM探針の作製およびさらなる高分解能化に向けた試み、について紹介する。

## 2. MFMノイズ解析および探針冷却による低ノイズ化

ここでは、実際の MFM 装置において、高分解能を実現するうえで重要となる MFM 装置のノイズ低減を目的として、探針冷却を行った結果<sup>11)</sup>について述べる。これまで低温 MFM 装置の開発に関する報告<sup>12), 13)</sup>はあるが、分解能に及ぼす影響については十分な解析がなされていない。そこで、探針冷却機構を試作し、ノイズ低減による高分解能化を検討した。Fig. 2 に試作した探針冷却機構を市販の MFM 装置 (SPA-300HV, エスアイアイ・ナノテクノロジー製) 内に設置した際の模式図を示す。探針を冷却するために、探針ホルダーと試料冷却用の冷却ブロックの間を、銅製のロッドおよび板を用いて接続した。本機構により、短時間 (1 時間以内) かつ安定した温度 (変動が 1 K 以下) での探針の冷却が可能になり、得られた探針の最低温度は 130 K であった。MFM ノイズの測定は、圧電素子による探針の強制励振がない状態で、MFM 探針の機械振動

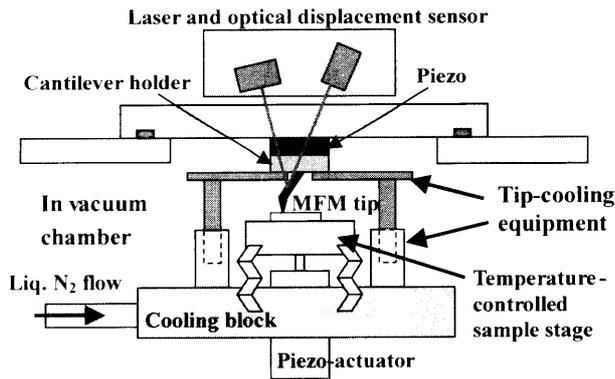


Fig. 2 Schematic view of the tip-cooling equipment in the MFM apparatus.

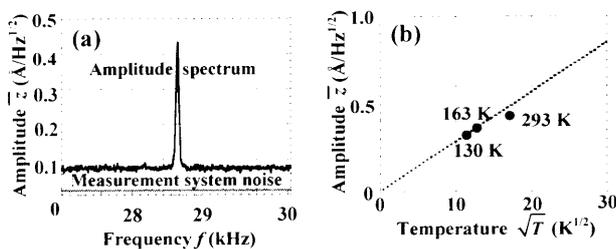


Fig. 3 (a) Spectrum of amplitude of MFM tip vibration at room temperature without forced oscillation and measurement system noise. (b) Dependence of temperature of the tip on the amplitude of MFM tip vibration at the resonance frequency without forced oscillation. The dotted line shows the theoretical dependence caused by thermodynamic noise.

を、半導体レーザーを用いた光でこの法によりフォトディテクタで検出して行った。測定雰囲気は真空中である。

Fig. 3(a)にスペクトラムアナライザを用いて室温で測定したMFMノイズスペクトルを示す。使用した探針は、市販のCoCrPt合金を用いた薄膜をSi探針に成膜したものであり、そのバネ定数は1.7 N/mである。図には半導体レーザーをオフにした状態で測定した計測システムのノイズレベルも同時に示してある。図に見るように、MFMのノイズは計測システムの電気的ノイズより大きく、MFM探針の振動振幅は圧電素子による強制励振がない場合でも、探針の共振周波数で極大をとることがわかる。一方、MFM探針の振動の位相は共振周波数付近においてもランダムであることが、振動波形をフーリエ解析することにより確認できた。位相がランダムであることは、熱振動の重要な特徴である。

Fig. 3(b)に探針を強制励振せずに測定した探針の振動振幅の実効値の温度依存性を示す。探針の $Q$ が十分高い場合には、熱振動振幅の実効値、 $\bar{z}$ は次式で与えられる<sup>13)</sup>。

$$\bar{z} = \sqrt{kT/c} \quad (2)$$

図中には、(2)式で与えられる理論値も同時に示してある。図に見るように、振幅の実効値は理論式とよい一致を示す

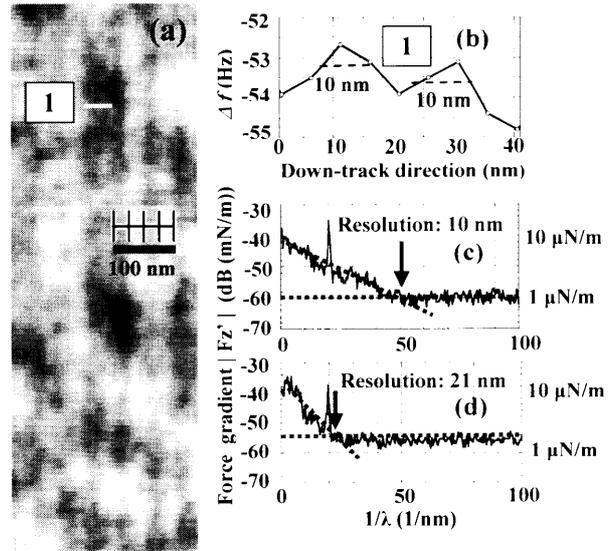


Fig. 4 (a) MFM image at a tip temperature of 130 K and (b) cross-section of the selected area [1] for a CoCrPt-SiO<sub>2</sub> granular medium (linear recording density: 1000 kFCI). (c), (d) MFM spectra of the medium at tip temperatures of 130 K and 293 K, respectively.

ことから、MFM装置のノイズの主因は探針の熱振動ノイズであり、探針冷却によりノイズが低減することが確かめられた。次に、探針冷却がMFMの分解能に及ぼす効果について検討した。

Fig. 4にこの冷却機構を用いて、探針温度が130 Kで得られたMFM像[(a)、その断面プロファイル[(b)およびMFMスペクトル[(c)]を示す。Fig. 4(d)には比較のため、冷却前の室温におけるMFMスペクトルも同時に示している。観察した試料は線記録密度が1000 kFCIのCoCrPt-SiO<sub>2</sub>グラニューラ媒体であり、MFM観察はバネ定数が40 N/mの市販のCoCrPt合金薄膜探針を用いて、真空中で位相検出法により行った。ここで探針の $Q$ 値は約6000、探針試料間距離は5 nmである。Fig. 4(a)に見るように、ビット長25 nmの1000 kFCIの記録ビットが明瞭に観察される。また、Fig. 4(b)に見るように、半波長が10 nm程度の磁気コントラストも観察される。Fig. 4(c), (d)を比較すると、探針冷却により約3 dBのノイズレベルの低下が見られ、分解能が20 nm程度から10 nmに大幅に向上していることがわかる。ここでノイズレベルの低下量は(1)式とよい一致を示す。探針冷却により分解能が大幅に向上したのは、ノイズレベルの低下のほか、空間周波数の増加に伴うスペクトル強度の減衰率が減少したからである。この原因として、探針伝達関数の性質<sup>4), 5)</sup>から、実効的な探針試料間距離の減少が考えられる。すなわち、使用したCoCrPt合金探針の保磁力 $H_c$ は、0.3 kOe程度であり<sup>14)</sup>、観察した媒体と比較して低いので、観察中に媒体からの漏洩磁場により探針の磁化方向が変動しているものと

考えられる。一方、この探針を冷却することにより、探針材料の一軸結晶磁気異方性が増加して探針磁化方向の変動が抑制され、実効的な探針試料間距離が実際の探針試料間距離に近くなり、スペクトル強度の空間周波数に対する減衰率が減少したものと推察される。これより、探針用の磁性材料にはハード磁気特性が必要であることがわかる。以上、市販のMFM装置のノイズを評価したところ、探針の熱振動ノイズが支配的であることが確認できた。この事実は、先にシミュレーションで示したような高分解能探針を作製できれば、理論的上限值である nm 分解能が達成できることを意味する。次に高分解能探針開発の試みについて述べる。

### 3. 高分解能 MFM 探針の作製

先に述べたように、MFM の高分解能化には、観察試料からの漏洩磁場を高感度で検出できる実効体積が小さな磁性探針が求められる。したがって、探針用の磁性材料として、ハード磁気特性を有し、かつ飽和磁化  $M_s$  の大きな材料が求められる。また同時に、実効体積を低減させるために、探針先端での先鋭化やナノサイズ化が求められる。高分解能探針に関しては、これまで、探針磁性材料として単一の磁性合金を用いて、1) 探針先端部の CoCr 磁性膜に細孔を開け、細孔部に発生する磁極を利用したもの<sup>15)</sup>、2) 真空中で電子ビームを探針先端に照射することにより探針先端に生成するコンタミ炭素よりなる棒状炭素に Ni 薄膜を成膜したもの<sup>16)</sup>、3) イオンビーム加工を用いて探針先端に幅が狭い Co 薄膜を残したもの<sup>17)</sup>、4) カンチレバー先端に断面の厚みが 100 nm 以下の薄板を作製し、その断面に Co 薄膜を成膜したもの<sup>18)</sup>、5)  $L1_0$ -CoPt 合金探針を FIB で微細加工したもの<sup>19)</sup>、6) カーボンナノチューブに Co 薄膜などを成膜したもの<sup>20,21)</sup>、などが報告されている。ここで、文献 19 および 21 においては 10 nm 程度の分解能が報告されている。

ここでは、最初に、大きな一軸結晶磁気異方性を有する  $L1_0$  型 FePt 規則合金に着目して、筆者らが試作した FePt 合金探針の場合について示す。本探針は、FePt 合金を Si 探針に 20 nm 程度成膜した後、規則化による高保磁力化のための熱処理を行って作製した。ここで、成膜した FePt 合金の膜厚は、通常の市販探針の磁性薄膜の厚さより薄くした。また、ハード磁気特性を劣化させる熱処理時の FePt と Si との合金化を抑制するため、下地膜として  $SiO_2$  を 8 nm 程度成膜した。

Fig. 5(a), (b) に作製した FePt 合金探針および市販の CoCrPt 合金探針を用いて、室温で観察した線記録密度が 900 kFCI の長手磁気記録媒体の MFM 像を示す。また、Fig. 5(c), (d) には Fig. 5(a), (b) より求めた MFM スペクトルを示す。試料の観察条件は先の Fig. 4 の場合とほぼ同様である。図に見るように、FePt 合金探針を用いた場合、

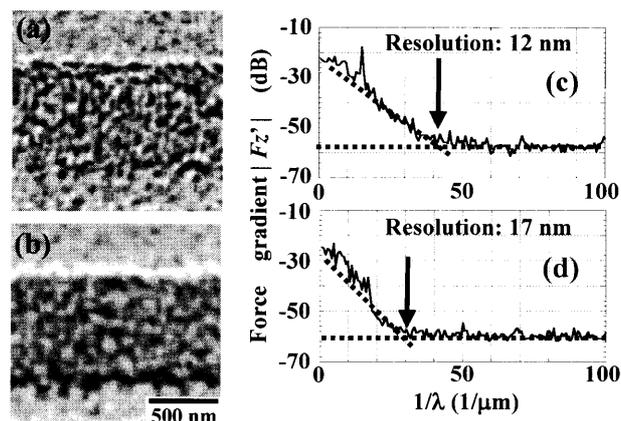


Fig. 5 MFM images of a longitudinal magnetic recording medium (linear recording density: 900 kFCI) measured with an FePt tip [(a)] and a commercial FeCrPt tip [(b)] at room temperature. (c) and (d) shows the corresponding MFM spectra of MFM images (a) and (b), respectively.

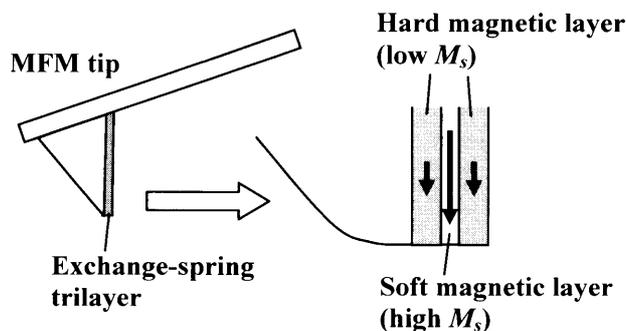
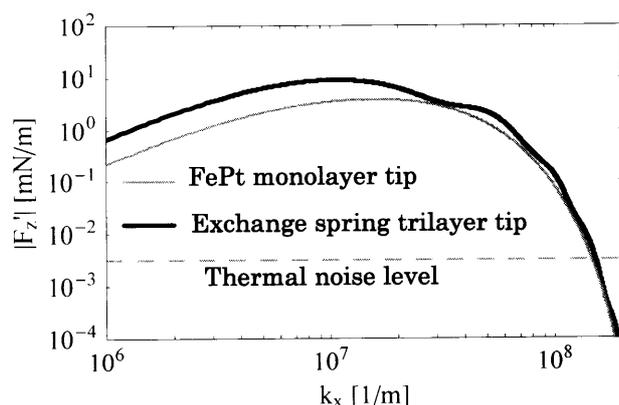


Fig. 6 Schematic drawing of a new MFM tip using the cross-section of an exchange-spring trilayer film.

CoCrPt 合金探針の場合と比較して、記録ビットのみならず磁気クラスターも明瞭に観察できることがわかる。MFM スペクトルより求めた分解能は FePt 合金探針では 12 nm、市販の CoCrPt 合金探針では 17 nm であり、探針にハード磁性材料を用いることで、スペクトル強度の空間周波数増加に伴う減衰率が低下し、分解能が向上することがわかる。本 FePt 合金探針でさらなる高分解能化を図るには、探針先端の先鋭化やナノサイズ化が必要となる。しかしながら、探針に単一のハード磁性材料を用いる場合には、高分解能化に際し以下の問題点が考えられる。1) ナノサイズ加工は容易ではない。2) ナノサイズ化によるハード磁気特性の劣化が懸念される。3) 探針の感度がハード磁性材料の飽和磁化  $M_s$  で制限される。

そこで、筆者らは探針の物理的先鋭化が探針の磁気的先鋭化と同等であることに着目して、MFM 探針として非磁性探針に成膜した交換スプリング磁石薄膜の断面を用いる新規な探針(交換スプリング型探針)を提案した<sup>22)</sup>。Fig. 6 にその模式図を示す。本探針には 3 層型の交換スプリング



**Fig. 7** Spatial frequency dependence of  $|F_z'|$  for an FePt monolayer tip with a thickness of 5 nm and an exchange-spring trilayer tip of [HM(20 nm)]/[FeCo(5 nm)]/[HM(20 nm)]. The  $M_s$  of FeCo and HM are 2.4 T and 0.24 T, respectively. The tip-sample distance is 10 nm.

磁石薄膜（ハード磁性層（低  $M_s$ ）/ソフト磁性層（高  $M_s$ ）/ハード磁性層（低  $M_s$ ））を用いる。ここで、各磁性層の磁化の方向は探針の長手方向である。磁気的先鋭化に適した形態である中央のソフト磁性層が薄い3層型交換スプリング磁石薄膜においては、交換スプリング磁石の機構<sup>23)</sup>から、ソフト磁性層部分で高い  $M_s$  と高い  $H_c$  が同時に実現できる。

Fig. 7 に計算機シミュレーションにより求めた交換スプリング磁石探針の MFM スペクトルを示す<sup>24)</sup>。交換スプリング探針の構成は、ソフト磁性層が 5 nm の FeCo ( $M_s = 2.4$  T) で、その両側のハード磁性層の膜厚が 20 nm である。ここでハード磁性層の  $M_s$  をソフト磁性層の  $M_s$  の 10% である 0.24 T とした。計算では探針全体の形状を、Fig. 1(a) の  $\theta = 0^\circ$  の場合のように探針先端が平坦な細長い薄板状とし、ソフト磁性層およびハード磁性層の磁化方向を探針の長手方向に固定した。ここで膜厚以外の探針の寸法は Fig. 1 の場合と同一とし、以下の値を用いた。 ( $S = 100$  nm,  $\Delta l = 1$   $\mu$ m,  $t = 70$  nm,  $z_0 = 10$  nm) 同図には比較のため、膜厚が 5 nm の探針先端が平坦な FePt 合金探針についても示した。図に見るように、交換スプリング磁石探針はそのソフト磁性層と同じ膜厚の FePt 合金探針と比較して、高い空間周波数域のみならず、低い空間周波数域でも高い検出感度を示し、FePt 合金探針より高い分解能を示すことがわかる。ここで、高分解能実現には、低  $M_s$  のハード磁性層を用いることが重要となる。本交換スプリング探針では、ソフト磁性層の磁化の値が一様であるので、先に Fig. 1 で述べたゼロ周波数が存在することになるが、さらにソフト磁性層の磁化値を界面近傍でハード磁性層の値に近づけることによって、さらなる分解能の向上を図ることができる。

筆者らは、交換スプリング型探針用の磁性薄膜として、

最初に FePt/FeCo/FePt 系交換スプリング磁石薄膜を選択し、その作製を検討した<sup>22)</sup>。その結果、FePt/FeCo 界面に中間層として C/Ta 二層膜を導入して熱処理することで、FePt 合金のハード磁性化に必要となる  $L1_0$  規則化のための熱処理の際に、交換スプリング磁石積層膜の作製を阻害する FePt/FeCo 界面の合金化を抑制でき、かつ層間の交換結合も保持できることが明らかとなった。この原因として、FePt/FeCo 界面に高融点化合物である TaC 化合物が粒状に生成したことが推察される。

中間層の Ta/C 二層膜の膜厚が TaC 化合物の 3 格子分の 0.88 nm に対応する [FePt(30 nm)]/[C/Ta(0.88 nm)]/[FeCo(10 nm)]/[Ta/C(0.88 nm)]/[FePt(30 nm)] 積層薄膜において、873 K で 10 分間熱処理後に、最も  $H_c$  の大きな交換スプリング磁石が得られ、その  $H_c$  の値は 3 kOe であった。ここで FePt 相は配向性を示さないことから、FePt 磁石層は等方性であるものと考えられる。本薄膜の断面を MFM 探針の先端に用いることで、高分解能化に有効な探針の物理的先鋭化と同等な効果が期待できる。本薄膜を用いた MFM 探針の作製およびさらなる高分解能化に必要なハード磁性層の磁化の低減については今後の課題である。

#### 4. ま と め

磁気力顕微鏡 MFM で nm 分解能を実現するため、装置の低ノイズ化および高分解能探針の作製について検討した結果を述べた。MFM の分解能は、現在までのところ理論的な限界値まで至っていないが、これらの検討を進めることにより、nm 分解能が期待される。本稿が MFM の高分解能化に向けた参考となれば幸いである。

**謝 辞** 本研究は秋田県地域結集型共同研究事業「次世代磁気記録技術と脳医療応用技術開発」ならびに情報ストレージ研究推進機構 (SRC) の援助を受けて行われた。ここに深謝いたします。

#### References

- 1) S. Ishio, J. Bai, H. Takahoshi, and H. Saito: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**, 834 (2004).
- 2) S. Ishio, H. Saito, H. Takahoshi, H. Ito, and T. Yamaoka: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 1034 (2002).
- 3) D. Rugar, H. J. Marmin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Stern, I. McFadyen, and T. Yogi: *J. Appl. Phys.*, **68**, 1169 (1990).
- 4) H. J. Hug, B. Stiefel, P. J. A. Schendel, A. Moser, R. Hofer, S. Martin, H.-J. Güntherodt, S. Porthun, L. Abelmann, C. Lodder, G. Bochi, and R. C. O'Handley: *J. Appl. Phys.*, **83**, 5609 (1998).
- 5) H. Saito, J. Chen, and S. Ishio: *J. Magn. Magn. Mat.*, **191**, 153 (1999).
- 6) H. Saito and S. Ishio: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 1221 (2000).
- 7) T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, and D. Rugar: *J.*

- Appl. Phys.*, **69**, 668 (1991).
- 8) H. Saito, A. G. van den Bos, L. Abelman, and J. C. Lodder: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 3447 (2003).
  - 9) L. Abelman, S. Porthun, M. A. M. Haast, J. C. Lodder, A. Moser, M. E. Best, P. J. A. Schendel, B. Stiefel, H. J. Hug, G. P. Heydon, A. Farley, S. R. Hoon, T. Pfaffelhuber, R. Proksch, and K. Babcock: *J. Magn. Magn. Mat.*, **190**, 135 (1998).
  - 10) H. Saito, Y. W. Rheem, and S. Ishio: *J. Magn. Magn. Mat.*, **287**, 102 (2005).
  - 11) H. Saito, R. Sunahara, Y. W. Rheem, and S. Ishio: *IEEE Trans. Magn.*, in press.
  - 12) H. J. Hug, B. Stiefel, P. J. A. van Schendel, A. Moser, S. Martin, and H.-J. Güntherodt: *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 3625 (1999).
  - 13) M. Roseman and P. Grütter: *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 3782 (2000).
  - 14) T. Natsume, T. Washiya, H. Saito, and S. Ishio: unpublished.
  - 15) L. Folks, M. E. Best, P. M. Rice, B. D. Terris, and D. Chapman: *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 909 (2000).
  - 16) P. B. Fischer, M. S. Wei, and S. Y. Chou: *J. Vac. Sci. & Technol. B*, **11**, 2570 (1993).
  - 17) G. N. Phillips, L. Abelman, M. Siekman, and J. C. Lodder: *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 865 (2002).
  - 18) A. van den Bos, I. Heskamp, M. Siekman, L. Abelman, and C. Lodder: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2441 (2002).
  - 19) L. Gao, L. P. Yue, T. Yokota, R. Skomski, S. H. Liou, H. Takahoshi, H. Saito, and S. Ishio: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2194 (2004).
  - 20) Z. Deng, E. Yenilmez, J. Leu, J. E. Hoffman, E. W. J. Straver, H. Dai, and K. A. Moler: *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 6263 (2004).
  - 21) H. Akinaga, H. Kuramochi, M. Yasutake, T. Uzumaki, and A. Tanaka: Digest of the 28<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetics, 21aD-4 (2004).
  - 22) Y. W. Rheem, H. Saito, and S. Ishio: *IEEE Trans. Magn.*, in press.
  - 23) E. F. Kneller and R. Hawig: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 3588 (1991).
  - 24) H. Saito, Y. W. Rheem, and S. Ishio: unpublished.

(2005年5月16日受理)



齊藤 準 さいとう ひとし  
 昭63 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了, 同年 三井石油化学工業(株)機能材研究所入社, 平6 秋田大学鉱山学部講師, 平10 同大学工学資源学部講師(学部名称変更による)を経て, 同大学同学部助教授, 平14 トウエンテ大学客員研究員, 現在に至る.  
 専門 磁性材料, 磁気計測 (工博)



夏目貴史 なつめ たかし  
 平16 秋田大学大学院工学資源学研究科材料工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る.  
 専門 磁性材料, 磁気計測



砂原亮介 すなはら りょうすけ  
 平16 秋田大学大学院工学資源学研究科材料工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る.  
 専門 磁気計測, 磁性材料



林 映雨 いむ よんう  
 平15 韓国忠南大学物質工学部博士課程修了, 平15 秋田大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー研究員および韓国忠南大学先端磁性材料研究センター研究員, 平17 カリフォルニア大学リバーサイド校研究員, 現在に至る.  
 専門 磁性材料 (工博)



石尾俊二 いしお じゅんじ  
 昭55 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了, 同年 東北大学工学部助手, 平2 同講師, 平4 同助教授, 平5 秋田大学鉱山学部教授, 平10 同大学工学資源学部教授(学部名称変更による), 平14 同大学VBL長, 現在に至る.  
 専門 磁気物性, 磁性材料 (工博)