

磁気力顕微鏡(MFM)とその高密度記録への応用

大久保俊文・岸上 順一・柳沢 佳一・金子 礼三

NTT 境界領域研究所 〒180 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

(1992年7月3日受理)

Magnetic Force Microscopy and Its Application to High-density Recording

Toshifumi OHKUBO, Junichi KISHIGAMI, Keiichi YANAGISAWA
and Reizo KANEKO

NTT Interdisciplinary Research Laboratories
9-11, Midori-Cho 3-Chome, Musashino-Shi, Tokyo 180

(Received July 3, 1992)

走査型トンネル顕微鏡を基礎として、さまざまな物理量を画像化できる走査型プローブ顕微鏡 (SPM) 技術が進展している。本稿では、SPM ファミリのひとつとしてサンプルの磁化状態を大気中で非接触、非破壊のまま測定できる磁気力顕微鏡 (MFM) について、その測定原理を中心に概説するとともに、これを用いた測定例を紹介する。さらに MFM を評価・分析装置としてのみならず、積極的にサンプルに働きかける磁気的なマニピュレータとの考えから、これを高密度記録に応用するための基礎検討の経過と最近の結果についても言及する。

1. はじめに

原子を直接観察する手段¹⁾、原子を動かす究極のマニピュレータ²⁾としての走査型トンネル顕微鏡 (STM) は、すでに表面や分析を専門とする研究者以外にも、一般に馴染み深いものとなってきている。STM のようにトンネル電流に基づいて、鋭いティップを固体表面上空に飛翔させ、その制御信号からトポグラフィを画像化する方法は、トンネル電流を他の物理量に置き換えた相似系の構成が可能との考え方から、原子間力顕微鏡 (AFM)³⁾をはじめ、多くのファミリを生んでいる。サンプルからの漏洩磁場中に磁性ティップを飛翔させ、その受ける磁気力や磁気力勾配を、ティップを支持する片持ち梁のたわみや振動特性に変換して測定⁴⁾するのが磁気力顕微鏡 (MFM)⁵⁻⁸⁾であり、STM の代表的なファミリのひとつとして、ミクロな磁気情報の解明に威力を発揮し始めている。

MFM におけるティップの精密位置決め、移動制御および信号・画像処理などは STM と共通であるのでむしろ STM 関係の解説をご参考にしていただくとして、

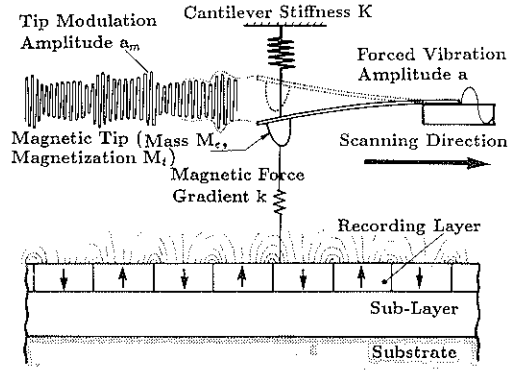
本稿では MFM に特有なティップ、磁気力・磁気力勾配の検出方法を概説するとともに、測定例をご紹介をしたい。また、近年は STM ティップを用いた原子マニピュレーション⁹⁾に代表されるように、測定・分析の立場から転じて、むしろ積極的に対象 (サンプル) に働きかけ (表面修飾) を行う研究が活発化している。このうち電荷や磁化は単に与える (修飾する) のみならず、取り去る (消去) ことも容易であるため、超高密度のメモリへの展開を前提とした記録・再生応用の研究も始まっている⁹⁻¹¹⁾。これらの一例として、鋭い MFM ティップを用いて、磁気媒体の磁化を局所的に反転 (記録) させるなどで直径数 100 nm のビット (ドットパターン) を記録し、再び MFM ティップ自身によって検出 (再生) した結果についてもあわせて述べる¹²⁾。

2. 測定原理および測定例

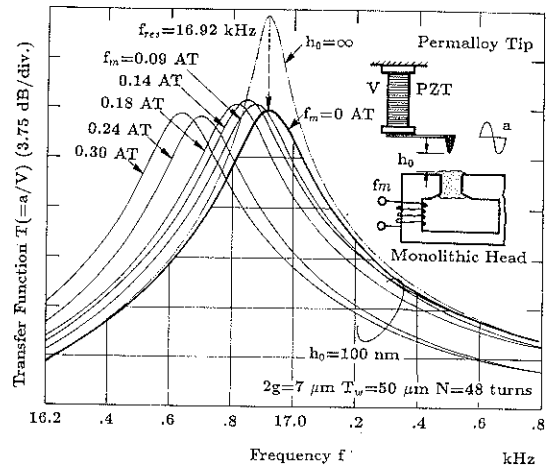
MFM の測定の基本は、サンプル磁場中に置かれた磁性ティップの受ける力あるいは力勾配を、ティップの載った片持ち梁のたわみあるいは振動特性の変化としてとらえ、画像化するものである。いずれにしても磁性ティ

ップの受ける力もしくは力勾配は微弱であるので、梁は機械的な外乱やチップのサンプルへの吸着による破損がない程度に十分柔であるとともに、高感度な変位検出が要求される（チップの受ける力、あるいは力勾配の値は、サンプルの磁化やチップの磁気特性によってさまざまであるが、力としては 10^{-9} N $\sim$ 10^{-12} N、また力勾配としては 10^{-3} N/m $\sim$ 10^{-5} N/m の範囲の値が報告されている。またチップとサンプルとのすきまは、（接触形 MFM を除いて）20 nm $\sim$ 500 nm 程度といわれている）。

チップに作用する磁気力を梁のたわみとして検出する方法は、直感的に最も理解しやすい。この方法では微小な変位を測定するために、トンネル電流（STM チップ）がしばしば用いられる。具体的には、磁性チップの載った片持ち梁の背面から STM チップを近接させて片持ち梁との間の微小変位を測定したり、鋭角に加工した磁性フォイルを STM チップをかねてサンプルに近接させ、フォイルと媒体間に流れるトンネル電流を検出してすきまを制御することで⁹⁾、サンプルのもつ磁気情報を得る方法もある。これらの方法では、磁気力に起因して梁の受ける準静的な変位を測定するとの意味で DC 法と考えられ、チップのもつ磁化の広がり（分布）を無視すれば、得られる信号はチップ磁化方向の磁場勾配に対応する。一方、図 1(a) に示すように、チップの載った片持ち梁をその共振周波数近傍で強制加振させ、チップ（梁）の振動特性を検出することで⁴⁾ チップに作用する磁気力勾配を測定する方法もある。この測定方法は、力学的にはつぎのように説明できる。いま振動するチップについては、その等価質量 m_e （磁性チップと梁の一部からなる質量）は、梁の剛性 K とチップに作用する磁気力勾配 k によって動的に支持されている。磁気力勾配 k は、サンプルの場所々々によって、また媒体からの飛翔高さによっても変化する（磁気力勾配が、吸引か反発かによって k の符号も変わる）。その結果、梁の共振周波数 $f_r = \sqrt{(K+k)/m_e}$ は k の変化に対応して微妙に変化する。そこで、梁の共振点の変化（シフト）を検出することで、 k すなわちチップに作用する磁気力勾配を測定することができる。もちろん共振点がシフトすることによって梁の機械的な伝達特性（強制加振振幅に対するチップの振動振幅の特性）も変化する。したがって、共振点近傍の特定周波数で強制加振を持続する場合においても、梁の振動振幅および、加振信号に対する梁の応答の位相も変化するのので、これらを検出することによっても、同様に測定が可能である。この方法は、チップ（梁）の動的な応答を利用するとの意味で、前者の DC 法に対して AC 法と見られ、や



(a) AC 検出法の力学モデル

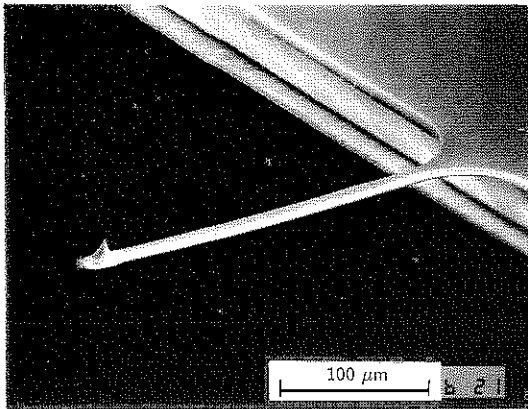


(b) チップ（片持ち梁）の振動特性におよぼす磁場勾配の影響

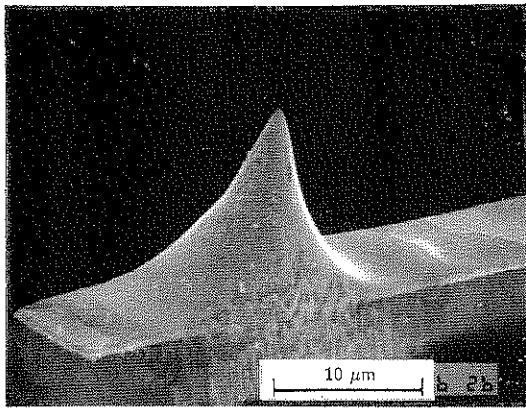
図 1 磁気力顕微鏡 (MFM) の検出原理

はりチップのもつ磁化の広がりを無視できれば、測定される量はチップ磁化方向の磁場勾配の微分（磁場の 2 階微分）に相当する。図 1(b) は、上述の AC 法による測定を検証する目的で、磁気ヘッドを磁場（勾配）の発生源として用い、梁の振動特性を測定した結果を示す¹³⁾。ここでは印加電流（同図では、印加電流とコイルの巻数との積 f_m で表示している）をパラメータとして、ピエゾ振動子を一定の駆動電圧で周波数スキャンした場合の梁の振幅の特性を示す。ヘッド磁場はチップに吸引力として作用する方向に順次増加させており、このため、磁性チップを主体とする振動系の等価質量を支える実効的な剛性が減少するので、共振周波数は低周波数側にシフトすることとなり、本図からこれが確認できる。

磁性チップは、磁場の検出感度や空間分解能を左右する最も重要な要素であり、これの作製には磁性線材の電解研磨^{5-8,23-25)}、磁性フォイルのエッチング^{9,14)}、フ



(a) 磁性ティップおよび片持ち梁の全容



(b) 磁性ティップ

図2 フォトリソグラフィにより作製したマイクロティップのSEM写真

ォトリソグラフィに基づくスパッタもしくはエッチングなどの方法^{12,20)}のほか、鋭い原子間力顕微鏡(AFM)の非磁性ティップ(これらも、スパッタおよびエッチングを含めたフォトリソグラフィによって作製される¹⁶⁾)を利用して、これに磁性薄膜をスパッタなどでコーティングする方法¹⁷⁻¹⁹⁾もある。検出感度にも大きく影響する梁の振動特性や、ティップの磁気的性質の精密な制御が行いやすい点¹⁷⁾で、磁性薄膜のコーティングを含めたフォトリソグラフィによる手法が注目されつつある。図2は、フォトリソグラフィにより作製したMFMティップのSEM写真を示す。片持ち梁はSiO₂製で長さ約200 μm、ティップはパーマロイ(Ni-Fe合金)製で高さ約10 μm、先端半径は0.1 μm程度である。いずれもSi基板上にスパッタデポジションによって一括製作されたものである²⁰⁾。

MFMの測定対象として、磁気ヘッドを用いて長手媒体^{7,8,18,25)}および垂直媒体¹⁵⁾に記録したビット(図3参照)や光磁気媒体に半導体レーザを用いて記録したビット^{6,19,21,22)}のほか、パーマロイのドメインなどの観察²³⁾が行われている。MFMの場合には、STMにおけるグラファイトやAFMにおけるマイカのような極微でかつ周期構造を示す一般的なサンプルがないため、空間分解能を規定することはやや困難と思われる。こうした中でMFMの空間分解能のチャンピオンデータとして、Si基板上に形成したTbFeCo膜の周期的な磁区構造を、ティップを10 nmのオーダまで近接させることで、25 nm分解能で測定した報告や²⁴⁾、磁気ヘッドを用いて記録した磁化反転記録密度 $D=5000$ fr/mm (flux reversals

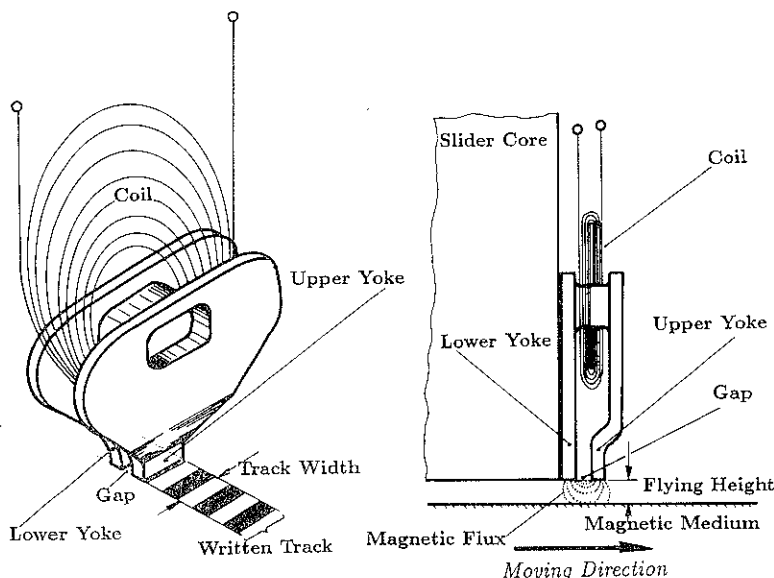
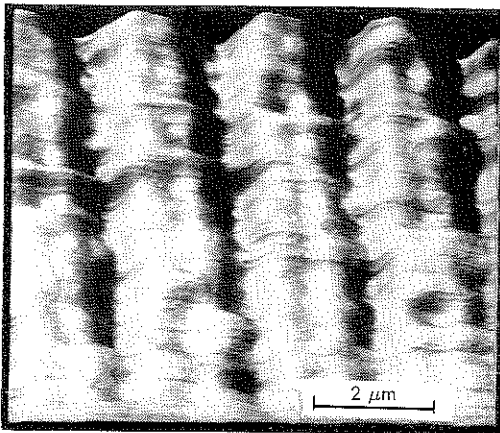


図3 薄膜ヘッドによる磁化パターンの記録

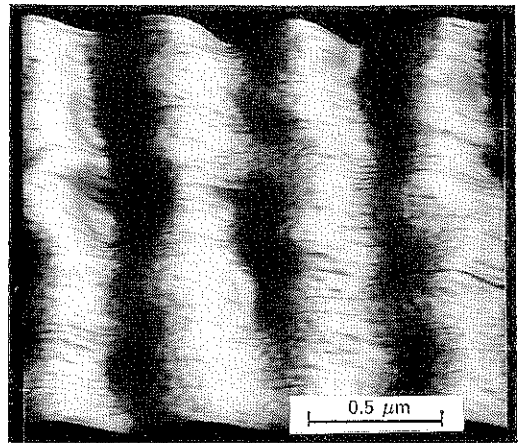
per mm: 磁化反転間隔 $=0.2\mu\text{m}$)の繰返し記録トラックの信号を画像検出した報告²⁵⁾もある。

図4は、薄膜磁気ヘッドの交番磁界の周期(記録密度)を変えて、長手ハードディスク媒体に記録したトラック(図3のWritten Trackと記載部分)をMFMで再生した結果¹⁵⁾を示す(深い谷ほど、サンプル面に向かう吸引力勾配が大きくなるように表示している)。長手記録の場合には、ちょうど、記録方向に棒磁石(この長さが、磁化反転間隔 τ に当たる)がその極を対向させながら、N-SS-NN-SS-N…と配列した状態にある。極の対向部分(磁化遷移領域)であるSSまたはNN近傍は最も磁気力勾配が大きく、図4(a)および(b)に交互に現れる深い谷、浅い谷がこれに相当する。この状態をより明瞭に示すために、図4(a)の記録方向の断面(磁気力勾

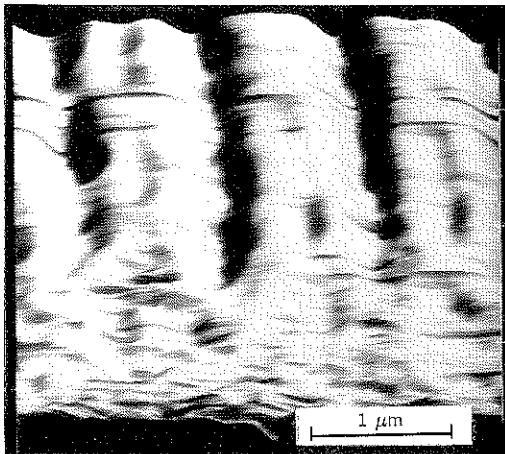
配の軌跡)を、図4(d)に走査すきまを変えて示した。このような磁気力勾配の軌跡を示す理由は、チップの固有磁化によって磁化反転間隔 τ ごとに現れる谷、山、谷、山…の軌跡と、媒体磁界によってチップに誘導される磁化により、やはり τ ごとに谷、谷、谷、谷…となる軌跡とが重畳されたためと考えられる(誘導される磁化の成分が、固有磁化成分による磁気力勾配の軌跡の山(反発力勾配)を打ち消し、さらに浅い谷(弱い吸引力勾配)にまで引き下げている)。図4(c)のような高い記録密度(磁化反転密度 $D=4000\text{ fr/mm}$)では、相対的にチップ先端に分布する磁化の広がりの影響が顕在化して空間分解能が低下するので、磁化遷移領域における詳細な磁気力勾配の変化はもはや識別困難となり、磁化反転間隔 τ の倍周期 2τ の応答のみが観察される。



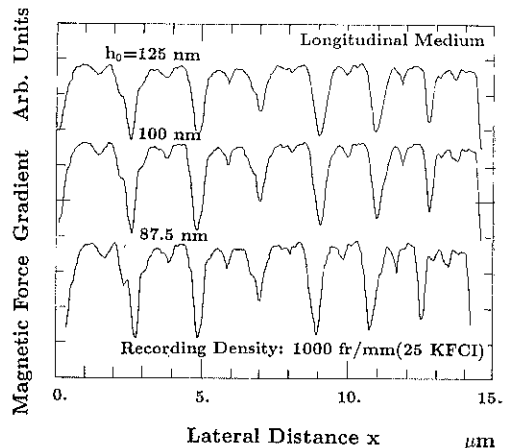
(a) 磁化反転間隔 $\tau=1\mu\text{m}$ で記録した磁化パターンの検出画像



(c) 磁化反転間隔 $\tau=0.25\mu\text{m}$ で記録した磁化パターンの検出画像



(b) 磁化反転間隔 $\tau=0.5\mu\text{m}$ で記録した磁化パターンの検出画像



(d) 磁化反転間隔 $\tau=1\mu\text{m}$ で記録した磁化パターンの検出軌跡(検出すきまをパラメータとした磁気力勾配の軌跡)

図4 薄膜ヘッドによる記録磁化パターンのMFMによる検出

3. MFM を用いた記録と再生

すでに述べたように、STM から派生した走査型プローブ顕微鏡によって、種々の物理量の画像化が可能となっている。加えて近年、先鋭なティップを用いて積極的に表面に働きかける表面修飾あるいは原子マニピュレーション²⁾が、STM の分野を中心に盛んとなってきた。電荷や磁化は、それ自身表面の機械的な状態を変化させることなく、おのおのの局所的な物性を変えることができ、容易にもとの状態に戻す、もしくはいったん変化した状態にさらに重畳させて新たな状態を与えることができることから、高密度のメモリとして好ましい基本的性質を有しているといえる。

われわれも磁気を用いた高密度メモリへの応用展開を目的に、磁気記録ビットセル（磁化領域）の微小極限を追求するとの観点から、MFM を利用して微細な磁気記録ビット（ドット）パターンの自己記録・再生を進めており¹²⁾、ここではその経過の一端を述べることにする。まず記録・再生系の概要を図5に示す。先鋭なティップを近接させて記録磁界を与えやすいこと、微細な記録磁化（微小な磁石）が安定に保持される等々の理由から、垂直記録媒体（磁化方向が面の法線方向）を用いた。MFM ティップに直接巻線を施すことで単磁極ヘッド（主磁極励磁ヘッド）が構成できるが、多巻線を含めた作製プロセスが困難であることから、磁性 MFM ティップと記録媒体を挟んで励磁コイルを対向させて、上記ヘ

ッドと同様な動作を可能とした（補助磁極励磁ヘッド）。すなわち、励磁コイルに印加された記録電流は、記録磁界となって磁気抵抗の低い MFM ティップ近傍に集中し、媒体磁化を局所的に反転させて微小磁気ビットを記録することができる。再生は、すでに説明した MFM の原理に基づき、非接触走査を行って磁気力勾配を検出（画像化）して行う。図6に、MFM ティップを用いて磁気ビットを自己記録・再生した結果（画像）を示す。おのおの画像中央において、いったん縦にビット列を記録し、横方向の走査を順次上から下へ行って画像を得た。ここではビット領域の微細化を検討するアプローチとして、記録間隔 τ ごとに励磁コイルの記録磁界の方向を反転して、先行して記録したビットに順次後続のビットを重ね記録している。図6(a)および(b)は先端直径が約 $1.5\mu\text{m}$ の、また図6(c), (d)は同 $0.2\mu\text{m}$ のティップを用いて実験した結果である。最小ビットとしては、幅 $0.4\mu\text{m}$ 、長さ $0.2\mu\text{m} \sim 0.25\mu\text{m}$ 程度のものまで画像として確認できている。ただし、現状では先鋭なティップを用いた場合でも、記録ビットの磁化領域の寸法は、磁気記録の極限といわれる数十 nm 角程度の寸法²⁶⁾に比べてまだ1~2けた程度の隔りがある。再生分解能に限って言えば十 nm~数十 nm 分解能を得たとの報告もあり^{19,24,25)}、さしあたってのネックは、記録材料を含めた微細ビットの「記録方法」にあると思われる。加えて、メモリとしての実用的な観点から考えると、単に記録ビット寸法の微小化のみならず、高速検出、高速ア

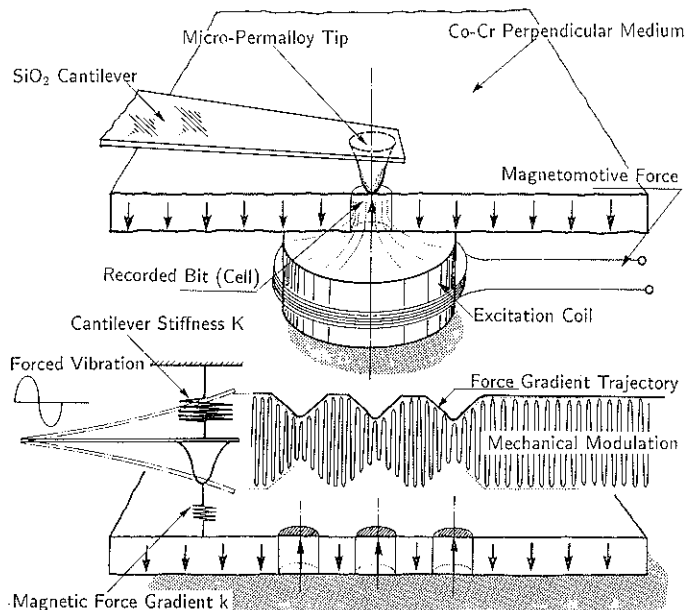
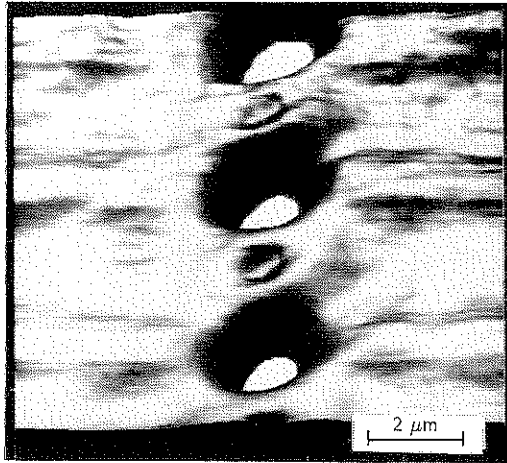
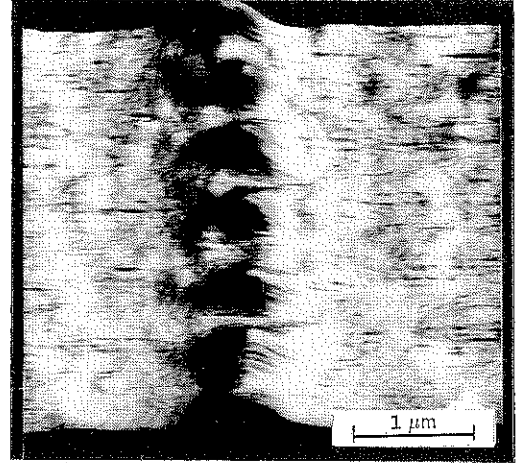


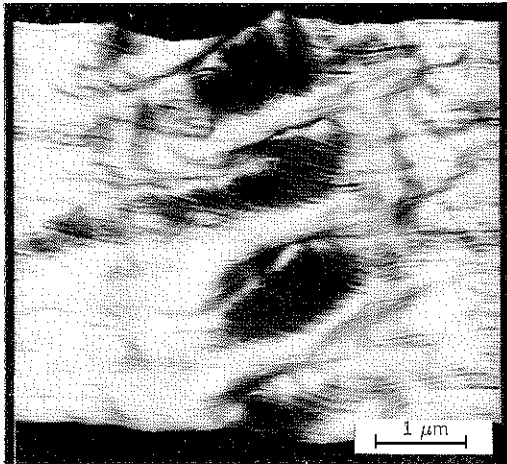
図5 MFM ティップによる微細磁気ビット（ドットパターン）の記録と再生



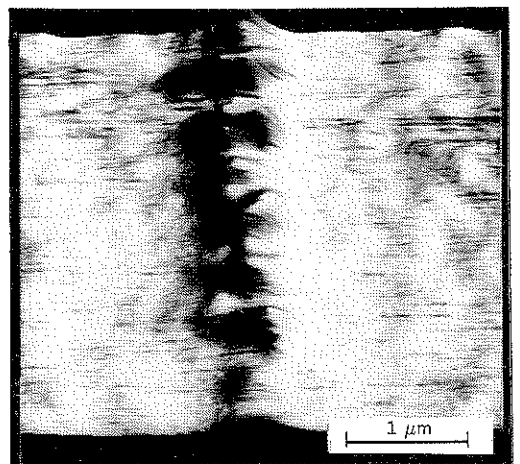
(a) 先端直径 $d=1.5\mu\text{m}$ のチップにより記録
間隔 $\tau=1.5\mu\text{m}$ で交番記録したビット



(c) 先端直径 $d=0.2\mu\text{m}$ のチップにより記録
間隔 $\tau=0.3\mu\text{m}$ で交番記録したビット



(b) 先端直径 $d=1.5\mu\text{m}$ のチップにより記録
間隔 $\tau=0.75\mu\text{m}$ で交番記録したビット



(d) 先端直径 $d=0.2\mu\text{m}$ のチップにより記録
間隔 $\tau=0.25\mu\text{m}$ で交番記録したビット

図 6 記録ビットの自己検出画像

クセス、大記憶容量（記録面積）の確保など、解決すべき課題も多い。

4. む す び

磁気力顕微鏡 (MFM) に関して、その検出原理、磁性サンプルの測定例について概説した。MFM はその簡易な構成にもかかわらず、大気中において数十～百 nm オーダの空間分解能で（非破壊）測定が可能なることから、特に磁気記憶装置に関連したマイクロマグネティックスの研究分野で注目されはじめている。MFM の測定・分析装置としての観点からは、検出される信号の物理的意味をより厳密に同定する必要があり、チップ磁化（分

布）の解明が急務となろう。空間分解能を高めるためには、磁性チップとサンプルとのすきまを近接することが本質的に必要となるが、磁気力と他の表面間力との分離やすきまを制御するためのもうひとつのセンシング量の導入が課題となろう。MFM のメモリ応用展開のためには、主として単位ビット当りの磁化領域の微小化と高速検出が大きな柱であり、前者に関しては媒体材料を含めた記録方法のブレイクスルーが、後者に関しては、現在の機械検出から高速性のポテンシャルを有する電気的検出法の適用が不可欠と思われる。

文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: *Phys. Rev. Lett.* **49**, 57 (1982).
- 2) D.M. Eiglar and E.K. Schweizer: *Nature* **344**, 524 (1990).
- 3) G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber: *Phys. Rev. Lett.* **59**, 930 (1986).
- 4) Y. Martin, C.C. Williams and H. K. Wickramasinghe: *J. Appl. Phys.* **61** (10), 4723 (1987).
- 5) Y. Martin and H.K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.* **50** (20), 1455 (1987).
- 6) Y. Martin, D. Rugar and H.K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.* **52** (13), 244 (1988).
- 7) H.J. Mamin, D. Rugar, J.E. Stern, B.D. Terris and S.E. Lambert: *Appl. Phys. Lett.* **53** (16), 1563 (1988).
- 8) D.W. Abraham, C.C. Williams and H.K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.* **53** (15), 1446 (1988).
- 9) J. Moreland and P. Rice: *Appl. Phys. Lett.* **57** (16), 310 (1990).
- 10) O. Watanuki, Y. Sonobe, S. Tsuji and F. Sai: *IEEE Trans. on Mag.* **27** (6), 5289 (1991).
- 11) R.C. Barrett and C.F. Quate: *J. Appl. Phys.* **70** (5), 2725 (1991).
- 12) T. Ohkubo, J. Kishigami, K. Yanagisawa and R. Kaneko: *IEEE Trans. on Mag.* **27**, 5286 (1991).
- 13) 大久保俊文, 岸上順一, 柳沢佳一, 金子礼三: *日本応用磁気学会誌* **16** (3), 532 (1992).
- 14) P. Grütter, A. Wadas, E. Meyer, H. Heinzelmann, H.-R. Hidber and H.-J. Guntherodt: *J. Vac. Sci. Technol.* **A 8** (1), 406 (1990).
- 15) T. Ohkubo, J. Kishigami, K. Yanagisawa and R. Kaneko: *Proc. Perpendicular Magnetic Recording Conference '91* **15** (S2), 469 (1991).
- 16) T.R. Albrecht, S. Akamine, T.E. Carver and C.F. Quate: *J. Vac. Sci. Technol.* **A 8** (4), 3386 (1990).
- 17) P. Grütter, D. Rugar, H.J. Mamin, G. Castillo, S.E. Lambert, C.-J. Lin, R.M. Valletta, O. Wolter, T. Bayer and J. Greschner: *Appl. Phys. Lett.* **57** (17), 1820 (1990).
- 18) D. Rugar, H.J. Mamin, P. Guethner, S.E. Lambert, J.E. Stern, I. McFadyen and T. Yogi: *J. Appl. Phys.* **68** (3), 1169 (1990).
- 19) A.J. Den Boef: *Appl. Phys. Lett.* **56** (20), 2045 (1990).
- 20) K. Yanagisawa, A. Tago, T. Ohkubo and H. Kuwano: *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, 120 (1991).
- 21) H.W. van Kesteren, A.J. den Boef, W.B. Zeper, J.H.M. Spruit, B.A.J. Jacobs and P.F. Carcia: *J. Appl. Phys.* **70** (4), 2413 (1991).
- 22) 菊川 敦, 保坂純男, 本多幸雄, 中村純子: 第39回応用物理学関係連合講演会予稿集, 382 (1992).
- 23) H.J. Mamin, D. Rugar, J.E. Stern, R.E. Fontana, Jr. and P. Kasiraj: *Appl. Phys. Lett.* **55** (3), 318 (1989).
- 24) P.C.D. Hobbs, D.W. Abraham and H.K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.* **55** (22), 2357 (1989).
- 25) C. Schönenberger and S.F. Alvarado: *Z. Phys. B Condensed Matter* **80**, 373 (1990).
- 26) Y. Nakamura: *Proc. Perpendicular Magnetic Recording Conference '91* **15** (S2), 497 (1991).