

磁気力顕微鏡の原理と応用



山岡 武博

1 はじめに

1982年に走査型トンネル顕微鏡 (STM: scanning tunnel microscope) が誕生して以後、原子間力顕微鏡 (AFM: atomic force microscope) を主体とする走査型プローブ顕微鏡 (SPM: scanning probe microscope) は急速な進歩を遂げ、今や半導体、電磁気材料、高分子材料、バイオテクノロジーをはじめ幅広い分野で、ナノテクノロジーの基盤技術として応用されている。SPMはナノ領域における表面形状の観察技術のみならず、同時に様々な表面物性 (硬さ、摩擦、誘電率、電気力、磁気力、光学情報等) を検出し、マッピングできることも大きな特徴である。

磁気力顕微鏡 (MFM: magnetic force microscope)¹⁾は、SPMにおける代表的な顕微鏡の一つであり、AFMで使用されるカンチレバーに磁性膜をコートした探針を用いて試料表面の磁気情報を得ている。MFMは、1980年代から研究が始まり、商用機が登場したのは1990年代前半である。MFMのほかに磁気情報をマッピングする技術としては、磁気コロイド粒子を塗布する方法、光が磁性体を透過する際の偏光を利用した方法、電子線と磁性体の相互作用を利用した方法、超伝導量子

干渉素子またはホール素子等を利用した走査型顕微鏡などが挙げられる。それらの技術の中で、最も手軽に高分解能磁区観察が行える手法がMFMである。

MFMの代表的な用途としては、第一にハードディスクや磁気テープ等の磁気記録媒体における磁気記録ビットの観察が挙げられる。次に多いのは、電子線リソグラフィー等の技術により作製された微細な磁性パターン of 磁区構造の研究である。MFMの登場で、メソスコピック領域における磁区、磁壁の挙動に関する物理は、より進歩したと言える。この分野での成果は、新しいタイプの磁気応用デバイスとして、例えばパターンドメディアや、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) 等にも応用されている。ほかにも強磁性体にかかわる磁性材料評価や、磁気ヘッドが作る記録磁界の評価などがある。ここでは、MFMの原理をハードディスク測定例も含めて簡単に説明し、磁性パターンの磁区構造についてMFMを応用した具体例等を紹介する。また、最近の新しいMFM応用の話題も提供したい。

2 MFMの原理と磁気記録媒体への適用

従来から、光や電子線が磁性体と相互作用することを利用した磁区観察手法はあるが、MFMでは磁石同士に作用する異極間 (N極とS極) の引力作用、同極間 (N極とN極、またはS極とS極) の斥力作用を利用している。MFM探針は板ばねの先端に取り付けられた微小な磁石という構造になっている。実際は、シリコン製の長さ数100 μm の板ばね (カンチレバー) 先端に作製された高さ10 μm 程度の先の尖った探針に、スパッタ成膜により数10~100nm程度の厚みの磁性膜 (CoPtCrやCoTaなど) をコートし、それを磁化してMFM探針とする。MFM探針と磁性体試料との間に作用する引力や斥力を画像化するとMFM像が得られる。図1(A)はMFM探針の磁化状態とハードディスク断面の磁化及び漏れ磁界を模式的に表している。このハードディスクは水平磁化媒体であり、水平磁化の向きの違いで情報が記録されている。探針磁化 m と、試料からの漏れ磁界 H との間に働く力 F は $F = \nabla(m \cdot H)$ と表される。この力をカンチレバーのたわみ量として直接検出する手法はスタティックMFMと呼ばれる。通常のハード

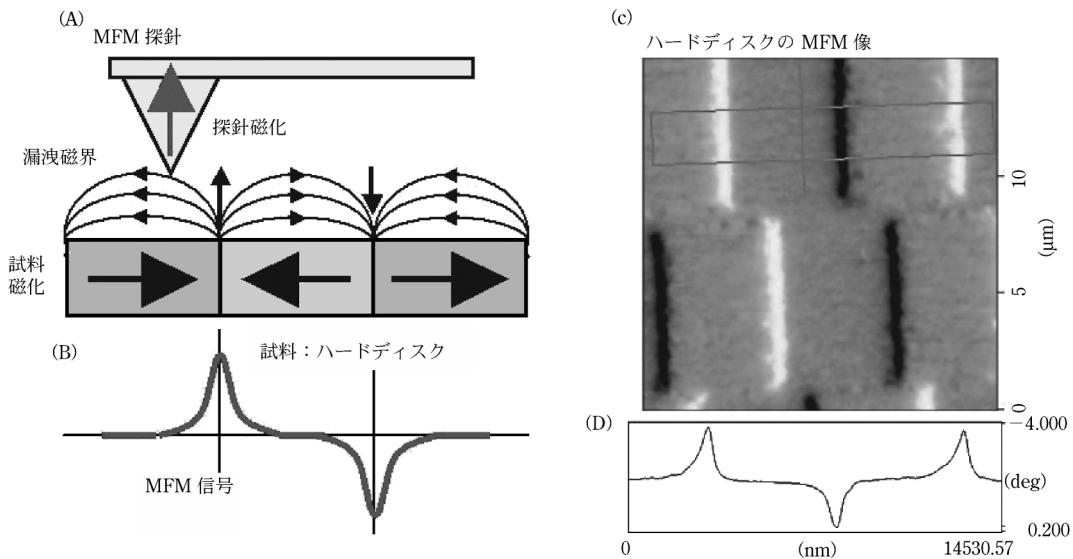


図1 MFMの原理

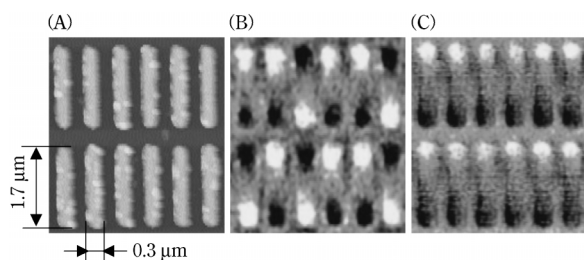
Principle and Application of Magnetic Force Microscopy.

ディスクなどではカンチレバーのたわみ量が小さすぎるため、スタティック MFM では十分な感度が得られない。そこで、カンチレバーをその共振周波数付近でレバーと垂直 (Z) 方向に振動させながら、試料からの漏れ磁界によって生じる振動の変化 (振幅, 位相, 周波数) を高感度検出する交流検出手法が使われるのが一般的である (ダイナミック MFM)。この場合、検出される物理量は「磁気力」 $F = \nabla(m \cdot H)$ ではなく、「磁気力勾配」 ∇F_z となる。図 1(B)には MFM 信号の模式図を示した。引力と斥力の違いで MFM 信号が反転していることがわかる。図 1(C)は、実際のハードディスクの MFM 像、図 1(D)はその断面信号プロファイルである。このハードディスクは MFM 誕生の頃のもので、MFM 画像で明るい引力部分と暗い斥力部分の距離は約 $5 \mu\text{m}$ と大きい。現在、 100 Gb/平方インチ を超える超高密度記録のための研究 (垂直磁気記録方式等) では、この記録ビット間の距離が 20 nm よりも小さくなってきており、このようなナノレベルの簡便な磁区観察は MFM の独壇場となっている。

3 MFM の応用

MFM を磁性パターンに応用した例を紹介する。図 2 は、電子線リソグラフィにより作製された合計 10^6 個ものパーマロイ微粒子集合体の一部分を測定して得た表面形状像と MFM 像である²⁾。1 個の微粒子は、長さ $1.7 \mu\text{m}$ 、幅 $0.3 \mu\text{m}$ 、高さ $0.12 \mu\text{m}$ という極微細な棒状に作製されており、形状異方性のため、棒磁石と似たように磁化が長軸方向のいずれかの向きをとる構造になる (厳密には、棒磁石は多磁区構造、このパーマロイ微粒子の場合は単磁区構造という違いがある)。要するに、平面上に固定された棒磁石の集合体とみなしてよい。一般に、棒磁石の両極 (N 極と S 極) 付近は最も磁力が強く、棒磁石の胴体付近の磁力は弱い。このパーマロイ微粒子の場合でも同様で、その両端で引力、斥力の作用が強くなっていることがわかる {図 2(B), (C)}。一般に、試料に交流の磁界を印加しながら、だんだんその磁界を弱めて試料の磁化を消す方法を交流消磁と呼ぶ。この試料の場合、実際は上下方向にランダムに向いた棒磁石の集合となっており、それぞれの棒磁石に生じている磁化の総和がゼロ付近になる (交流消磁状態)。図 2(B)では計 12 個の微粒子のうち 7 個が上向き、5 個が下向きで磁化の総和はゼロになっていないが、もう少し個数を多く測定すれば、ほとんど磁化の総和はゼロになる。一方、図 2(C)の MFM 像では、直流の磁界を印加後、すぐ磁界をゼロにした場合、試料に残留する磁化が、1 個 1 個すべて直前まで印加されていた磁界と同じ向きの磁化の集合になっていることがわかる (残留磁化状態)。

現在、最先端の研究レベルでは、実用化を目指した超高密度のパターンメディア開発が行われており、図 2 のような棒



(A) 表面形状像, (B) 交流消磁状態, (C) 残留磁化状態

図 2 パーマロイ微粒子格子の MFM 測定例

磁石を平面に寝かせた構造ではなく、棒磁石を平面に垂直に立てた構造で、単位面積当たりの棒磁石の本数 (記録密度) をかせいでいる。例えば 1 個の円柱の直径 50 nm 、ピッチ 65 nm の磁性ドットアレイ (約 150 Gb/平方インチ 相当) が作製され、MFM により 1 個 1 個のドットの磁化状態が観察されている³⁾。

スピントロニクス分野でも MFM は有効であり、実現の兆しが見えてきた MRAM⁴⁾ や、将来の量子コンピュータ等を目指した磁性半導体の研究においても MFM による解析がなされている⁵⁾。

高分子やバイオテクノロジーの分野でも、MFM は全く無縁ではない。磁性細菌など生体磁気に関する研究において、MFM は以前から使われている⁶⁾。また最近では、磁性金属元素を含まないラジカル高分子化合物において、 π 電子に起因するスピン整列による強磁性発現に関する研究に MFM 観察が利用された例もある⁷⁾。

MFM は極微小部の磁区が簡便に観察できるという点で有利だが、磁性体同士に作用する磁気力の検出が測定原理となっているため、探針の作る磁界が試料の磁化を乱す、または試料の作る磁界が探針の磁化を乱すということがあり、MFM 像の解釈も難しくなることがある。MFM を様々なアプリケーションに適用する際には、測定対象や探針自体の磁化特性に注意して測定を行うことにより、MFM の最大の特徴である簡便かつ高分解能な磁区観察あるいは磁性の解析を行うことが可能となる。

4 おわりに

以上、MFM の原理と応用例を簡単に解説した。MFM 応用としては、外部磁場印加その場 MFM 観察によるダイナミックな磁化過程の研究や、カンチレバー共振の鋭さを制御し磁気検出を更に高感度化する技術等、SPM 装置の拡張性の良さも相まって、より高度で多彩な使い方もなされてきている。また、MFM が応用可能な分野も広がりを見せ始めている。SPM も世の中になりに普及してきており、多くの技術者が MFM を使う機会が高まってきた。今後、MFM の更なる技術展開に期待したい。

文 献

- 1) Y. Martin, H. K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1455 (1987).
- 2) 中谷 功: までりあ, **35**, 854 (1996).
- 3) 青山 勉, 佐藤勇武, 石尾俊二: 応用物理, **72**, 298 (2003).
- 4) 小池伸幸, 手束展規, 猪俣浩一郎, 杉本 論: 日本応用磁気学会誌, **27**, 316 (2003).
- 5) G. A. Medvedkin, T. Ishibashi, T. Nishi, K. Hayata, Y. Hasegawa, K. Sato: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 949 (2000).
- 6) H. Suzuki, T. Tanaka, T. Sasaki, N. Nakamura, T. Matsunaga, S. Mashiko: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 1343 (1998).
- 7) M. Miyasaka, Y. Saito, H. Nishide: *Adv. Funct. Mater.*, **13**, 113 (2003).



山岡武博 (Takehiro YAMAOKA)

エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)応用技術部 (〒270-2222 千葉県松戸市高塚新田 563)。九州大学大学院理学専攻科修士課程修了。◀現在の研究テーマ▶走査型プローブ顕微鏡による応用計測技術。