

磁気力顕微鏡における探針磁化状態と観察結果について

金井 靖*, 石井 生**, 末岡和久**, 武笠幸一**

(平成8年10月30日受理)

Relationship between Magnetization State of Ferromagnetic Tip and Observed Results in a Magnetic Force Microscope

Yasushi KANAI*, Izuru ISHII**, Kazuhisa SUEOKA** and Koichi MUKASA

This paper investigates the relationship between image obtained by Magnetic Force Microscope (MFM) and the Magnetization distribution in a ferromagnetic tip. Stray field of a ferrite recording head is measured by an MFM using Co coated ferromagnetic tip. Asymmetrical images are obtained with respect to the current flow. To understand the images obtained by MFM, finite element calculations are carried out and derivatives of force acting on the tip are obtained, where both tip-head magnetic interaction and nonlinearity of Co tip and head material are taken into account. By comparing the MFM image and calculated derivative of force, close agreement is found. The relationship between calculated magnetization states of Co tip and the MFM images is also discussed. We found that it is indispensable to understand the magnetization state of a ferromagnetic tip in order to understand the MFM images.

Key words: magnetic force microscope, ferromagnetic tip, magnetization state, recording head, finite element calculation

1. はじめに

磁気記録の面記録密度は、近年では年率60%の伸びを示しており、すでに2-3 Gb/in²は現実のものとなり、現在は10-20Gb/in²の達成を目指した研究、開発が進められている。これに対して、磁気記録技術は材料、加工、プロセス、信号処理、数値解析など様々な周辺技術により支えられているが、磁気記録の諸現象はマイクロな領域で、かつ、高速で起こることから、記録密度の向上とともに、現象解明がますます困難になっている。

微小領域の磁化、磁界分布観測技術には、カー効果偏向顕微鏡、スピン編極走査電子顕微鏡、電子線ホログラフィー、磁気力顕微鏡、電子線CT(Computerized Tomography)法などがある¹⁾。このうち磁気力顕微鏡(Magnetic Force Microscope: MFM)はトンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscope: STM)の研究の過程で生まれたもので、探針として磁性体を用い、磁性体の試料に近接したときに受ける引力、または斥力を測定するものである。MFMは動的な計測が不可能であるなどの欠点があるが、空間分解能が数十nmと高い、試料に対する制限が緩やかで大気中での観測が可能などの理由により広く用いられている。

しかしながら、試料が軟磁性材料の場合、磁性探針からの漏洩磁界により試料の磁区構造、磁化分布、磁界分布を乱す恐れがあり、またMFM像が磁性体探針の磁区構造および先端の形

* 情報電子工学科 助教授

** 北海道大学大学院 工学研究科 電子情報工学専攻

状に大きく依存することが以前より指摘されている²⁾。これらMFMにより観察された像を解析するに当たり、探針の磁化状態を一定と仮定して、探針に働く力およびその微分を解析的に求めた例はある³⁾が、磁気ヘッドからの漏洩磁界(約3 kOe)中で計測する場合には、磁性探針の保磁力(100-300 Oe程度)は漏洩磁界に比し1/10以下であり、磁化状態を一定と仮定することには無理がある。

本報告では、まず、フェライト磁気ヘッドからの記録磁界中でMFMによる計測を行なったが、この際検出される物理量は探針に作用する力の微分量である。次に、探針-試料間の相互作用および磁性探針、フェライトの磁気的非線形性を考慮し、有限要素計算により磁性探針に働く力の微分値を求めた。計測と計算により求めた結果を比較することにより、両者はよく一致することを確認した。さらに、磁性探針内部の磁化分布を計算により求め、ヘッド記録磁界と磁化分布との関係を考察した。これらより、MFMにより得られた観察結果から漏洩磁界を討論する際には、磁性探針内部の磁化分布を知ることが必須であることが判明したので報告する。

2.磁気力顕微鏡によるヘッド磁界の測定

本報告で用いた計測装置は市販のMFM(セイコー電子工業製SPI3700)である。また、探針は同社製原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)用Siマイクロカンチレバー上にCoを100 nmスパッタ成膜し、これを8 kOeの磁界により探針先端がN極となるように、着磁して用いた。探針にスパッタした際と同様の条件で、Co膜を石英板上に100 nm成膜した。Fig.1に面内方向のM-H曲線を示すが、保磁力 $H_c=150$ Oe, 飽和磁化 $M_s=550$ emu/ccであることが分かる。

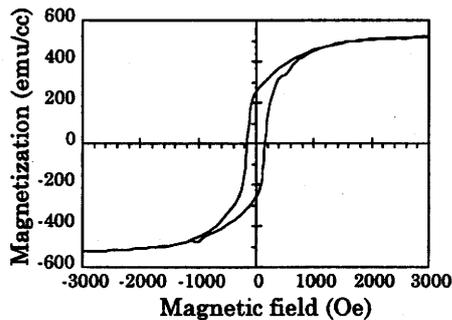


Fig. 1 Measured M-H loop for Co film.

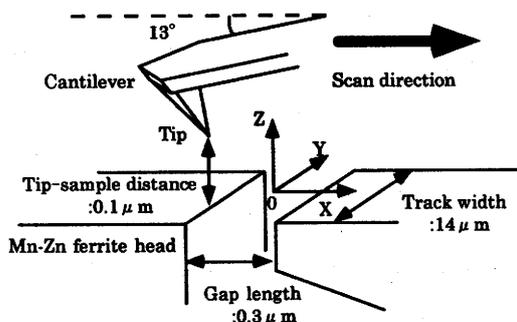


Fig. 2 Schematic arrangement of MFM tip and magnetic recording head.

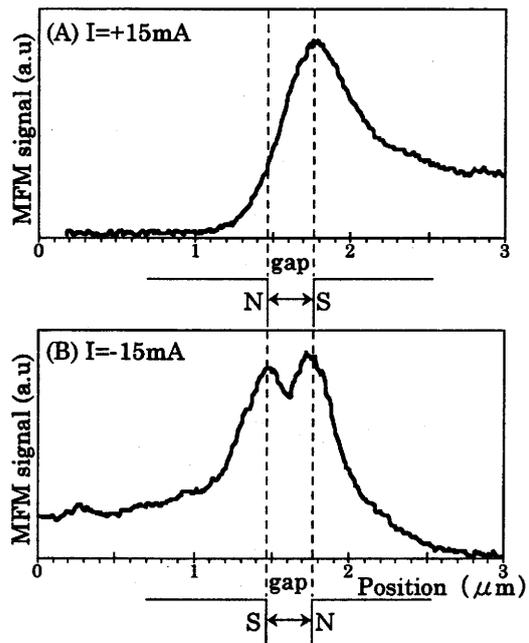


Fig. 3 Line profiles of stray field from recording head measured by MFM.

測定試料として用いた磁気ヘッドはMn-Znフェライトヘッド（ギャップ長: 0.3 μm , ギャップ深さ: 20 μm , トラック幅: 14 μm , コイル巻数: 13回 x 2組）である。本ヘッドより発生する磁界はギャップ中心面に関し対称であり, Karlqvist の式で表わされる分布に近いことが有限要素計算により確認されている。

Fig.2に探針と磁気ヘッドの模式的な配置を示す。探針-ヘッド間を 100 nm に保ち, 磁界の y 方向成分が零であるトラック中央の磁界を計測した。これは, 次節で 2 次元磁界解析と比較するためである。同図から分かるように, 探針はヘッド表面に対し 13° 傾いている。

Fig.3に磁気ヘッドを+15mAおよび-15mAの直流電流で励磁して得られたMFM像を示す。ここで, 記録磁界の面内 (x方向) 成分が正となるときの, 電流を正方向としている。同図から分かるように, 電流が正の場合には探針の先端がギャップ右端にあるときのみMFM信号が極大となり, ギャップの左右端で信号強度に差がみられる。これに対し, 電流が負の場合にはギャップ両端で信号が極大となる。すなわち, 磁界の向きにより得られるMFM信号は非対称となるが, この理由について次節で討論することにする。

3. 磁界解析計算による探針に働く力の算出とMFM像の解釈

MFMによる観察結果は磁性体探針の磁区構造および先端の形状に大きく依存することが指摘されている。すなわち, 先端形状と磁区構造の効果を解析するために, 探針の磁化状態を一定と仮定して, 探針に働く力およびその微分を解析的に求めてはいるが, 磁気ヘッドからの漏洩磁界(約3 kOe)に対しては, 磁性体探針の保磁力 (100 - 300 Oe程度) は漏洩磁界に比し1/10以下で, 磁化状態を一定と仮定するのは現実的ではない。

ここでは, 第1に探針-試料間の相互作用, すなわち探針, 試料の磁化状態は相互作用の結果, 互いに変化し合うものとし, 第2に磁性体探針, フェライトの磁気的非線形性を実際の磁化曲線を取り込むことで考慮し, 有限要素計算により磁性体探針に働く力の微分値を求めた。

計算は市販の有限要素法による磁界解析ソフトウェア (ANSOFT社製 MAXWELL) を用いた。本ソフトウェアは永久磁石の非線形特性 (B-H曲線の第1, 2象限) は考慮可能であるが, ヒステリシスは考慮できない。また, 永久磁石の着磁方向と反対方向に大きな磁界を加えることを想定しておらず, 本来的

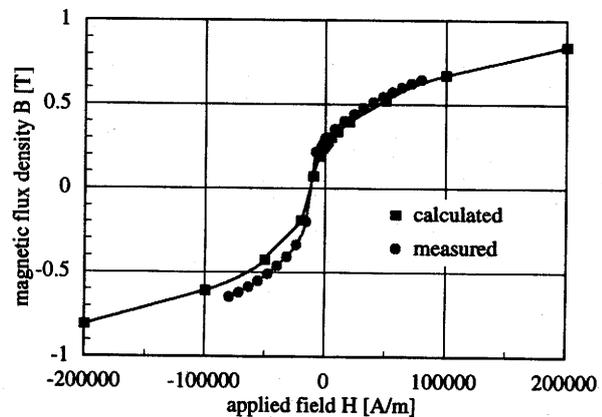


Fig. 4 Comparison of measured and calculated B-H curves.

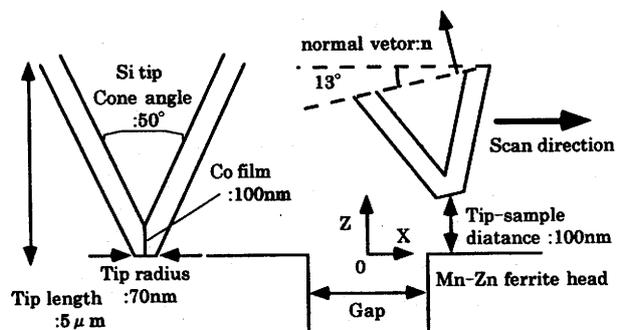


Fig. 5 Model used for finite element calculations.

にはB-H曲線の第3象限に関しては考慮していない。そこで、まず、前節で述べたCo薄膜のメジャーリングを入力し、B-H曲線が適当に再現されるかを確認した。ここで用いたモデルは、加えた磁界を理論的に算出可能な無限長（長さ方向が直径に比し十分長い）ソレノイドである。Fig.4に入力したB-H曲線と計算により得られた曲線の比較を示すが、本ソフトウェアで永久磁石のメジャーリングが適当に表現されることが分かる。

Fig.5に探針に働く力Fの算出に用いた探針の形状モデルを示す。得られた力より微分値 F' は

$$F' = n \cdot \nabla(n \cdot F) \quad (1)$$

により求められるが、探針がヘッド表面に対し13°傾いていることから、式(1)は

$$F' = 0.051 \frac{\partial F_x}{\partial x} - 0.219 \frac{\partial F_z}{\partial x} - 0.219 \frac{\partial F_x}{\partial z} + 0.949 \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (2)$$

となる。ここでFxおよびFzはそれぞれ探針に作用する力のxおよびz成分である。

Fig.6に正および負の電流に対して、探針に働く力の微分値を示す。同図から分かるように、電流値が正の場合にはギャップ右端のみで力の微分値が極大となる。一方、電流値が負の場合にはギャップの両端で2つの極大値をとる。これは、Fig.4で示したMFMによる観察結果と定性的に良く一致している。ただし、同図に示すようにギャップ間の力の微分値は滑らかではなく、さらに精度の高い計算が必要である。

なお、本モデルのように微小な領域を扱う場合、厳密にはマイクロマグネティクスを考慮した計算⁴⁾を行なう必要があるが、ここで行なった計算は実験を適当に表現していることが分かる。これより、ここで用いたモデルにおける探針内部の磁化分布を求め、前節で得られたMFM信号が電流方向に関し非対称性を示す理由を考察する。

まず、磁気力に有効に寄与する部分を求めるために以下のような計算を行なった。すなわち、探針の長さを5μm一定と仮定し、長さ方向に6分割した。次に、探針先端から100nmまでの部分に働く力、探針先端から200nmまでの部分に働く力（以下同様）

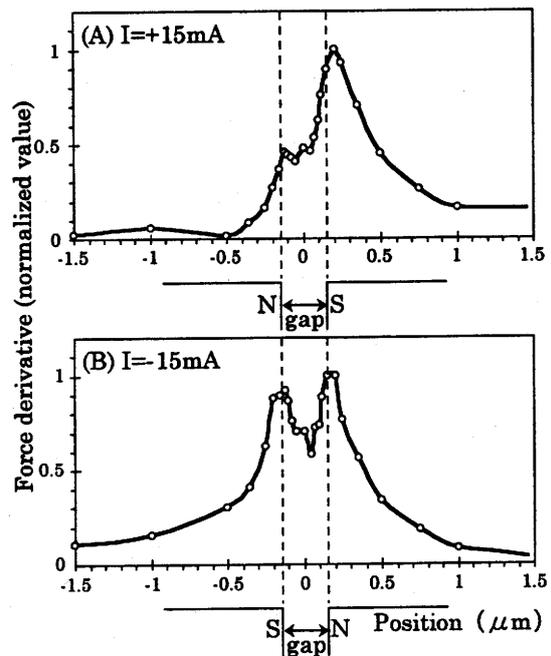


Fig. 6 Calculated derivatives of force acting on ferromagnetic tip.

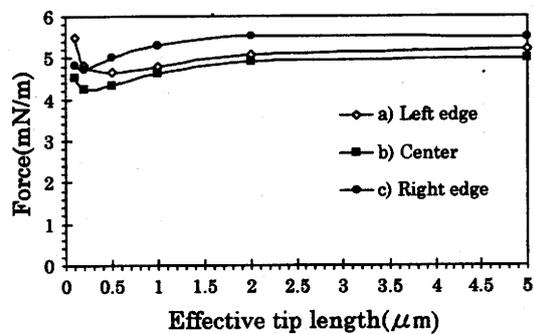


Fig. 7 Calculated effective tip length vs. force acting on ferromagnetic tip.

を励磁電流を-15mAとし探針がギャップのa)左端, b)中央, c)右端にあるときについて求めた。これを Fig. 7 に示す。同図から分かるように、探針先端から100 nm までに働く力が全体に働く力とほぼ同じ値であることから、MFM信号に寄与する部分も先端から100 nm 程度であると考えられる。Fig. 8 に電流値が+15 mA および -15 mA のときの、探針先端から100 nm までの探針内磁化状態の計算結果を示す。同図に探針を考慮しない場合のヘッド磁界分布を Stray field として併記するが、探針先端部では磁化がヘッド磁界に追従していることが分かる。これは、ヘッド磁界(3 kOe)が探針の保磁力(150 Oe)に比して十分大きいためである。さらに、探針はヘッド表面に対し 13° 傾いていることから、ギャップの左右端で磁化分布は非対称となっている。これより、実測により得られるMFM信号がギャップ中心面に対し非対称になる原因は、探針内部の磁化分布が非対称になっているためと結論づけられる。

Fig. 9 に探針がヘッド表面に対し垂直に配置された場合の力の分布を示す。この場合、電流を反転することにより力の分布はギャップ中心面に関し対称となる。この結果は、ここで用いたMFMにより得られた信号がギャップ中心面に関し非対称となる上記理由を裏付けるものである。

以上の考察から明らかのように、MFMにより得られる観察結果は探針内部の磁化分布に大きく依存しており、観察結果より磁界分布を得るためには探針内部の磁化分布を正確に知ることが必須である。さらに、ここで用いた計測装置のように探針が試料表面に対し傾いた配置では、得られた像に磁界の方向に関し対称性がないことになり、この点に関しても留意する必要がある。

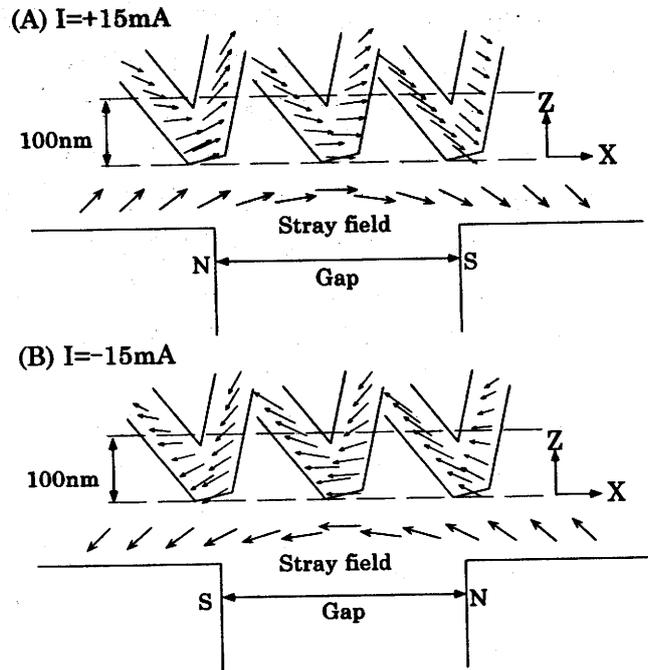


Fig. 8 Calculated magnetization distribution in ferromagnetic tip.

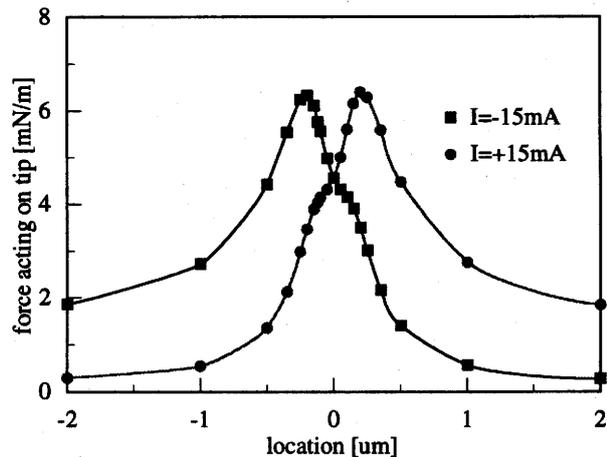


Fig. 9 Calculated force acting on ferromagnetic tip, where tip is perpendicular to sample surface.

4. おわりに

Co探針を用いた磁気力顕微鏡 (MFM) により磁気ヘッドの記録磁界を計測した。励磁電流の方向を変えることにより、得られる観察像はギャップ中心に関し非対称となった。また、探針-ヘッド間の磁氣的相互作用、探針およびヘッド材料の非線形特性を考慮した有限要素計算を行ない、探針に作用する力の微分値を求めた。実測結果と計算結果を比較することにより、MFMにより得られる観察結果は探針内部の磁化分布に大きく依存し、観察結果より磁界分布を得るためには探針内部の磁化分布を正確に知る必要があることを述べた。さらに、ここで用いた装置のように探針が試料表面に対し傾いた配置をとると、得られた像は磁界の方向に関し対称性が失われることについても述べた。

今後、観察結果をより厳密に解釈するために、マイクロマグネティクスを考慮した解析計算を行ない、探針をより正確にモデル化する必要があるものとする。また、より精密な計測を行なうためには、得られた計算結果を計測装置、探針の設計に反映することが重要である。

参考文献

- 1) 内山晋 編著：「アドバンストマグネティクス」第6章，pp.193-217，培風館(1994).
- 2) 菊池，斉藤，石尾：「MFMによる長手磁気記録媒体の面内磁場解析」，第20回日本応用磁気学会学術講演概要集，20aA-9，p.9(1996).
- 3) A. Wadas and P. Gruetter, "Theoretical approach to magnetic force microscopy," *Physical Review B*, Vol. 39, No. 16, pp.12013-12017 (1989).
- 4) 高野，金井：「薄膜磁性体のマイクロ磁化分布シミュレーション」，電気学会 静止器・回転機 合同研究会資料，SA-96-20(1996).