

針状磁気プローブによる低透磁率材料の微小残留磁気の測定

南谷 保, 若浦 大, 山田 外史
(金沢大学)

Measurement of minute remnant magnetization by Needle Type Magnetic Probe
Tamotsu Minamitani, Dai Wakaura, Sotoshi Yamada
(Kanazawa University)

はじめに

地磁気レベル以下の微小な残留磁気($10^{-8} \sim 10^{-6} \text{T}$)を簡易な測定器にて測定することは、古代の地磁気、雷電流の挙動の解明などに大きく貢献することが期待されている。しかし、これまで微小な残留磁化の測定には磁気シールド、高感度の磁気センサが必要であり大規模な測定システムとなっていた。そこで、磁気シールドなしで汎用の磁気センサ（たとえばMI, GMR センサ）を用いて、2次元成分の残留磁気を簡易に測定できることを報告した¹⁾。課題は3次元成分の測定であり、そのためには穴径を小さくすることが必要であった。そこで、GMR センサを付けた針状磁気プローブを用い、直交する小さな2個の穴にて3方向成分を測定することを行ったので報告する。

測定原理

立方体形状の円筒穴中では磁束密度ベクトルがほぼ均一であることを利用して、Fig. 1 の測定システムを考案した。センサは試料の円筒穴中央分に配置し、センシング方向を穴に対し垂直方向（ x 軸方向）とする。この装置ではセンサを固定し、試料を回転させる構造となっている。磁気センサからみて、地磁場は均一成分であり直流成分、試料の磁化成分は円筒穴の磁束密度は回転させることで交流成分として検出される。磁気センサの直流成分をカット、交流成分を取り出すことで、穴と直交する円筒穴内の磁束密度の振幅と x 軸に対する磁化方向が推定できる。

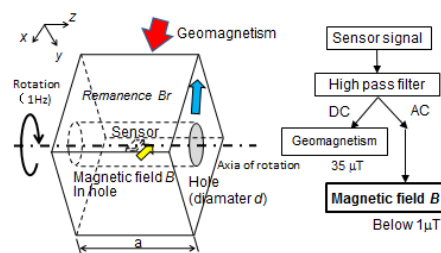


Fig. 1 Detection system of remanent magnetization.

試料サイズと磁束密度の関係

針状磁気プローブの針形状の寸法は $0.4 \times 0.4 \text{ mm}$ 、長さ 30 mm であり、MI²センサ ($11 \times 2 \text{ mm}$) より円筒穴径を小さくできる。これにより、試料のサイズはこれまでの試料 ($a=35$, $d=13 \text{ mm}$) より大幅に小型化が可能となる。かつ、試料寸法比 a/d (試料長/穴直径) と穴内の磁束密度の大きさは Fig. 2 の関係があり、小型化により円筒穴内の磁束密度が数%大きくなる。

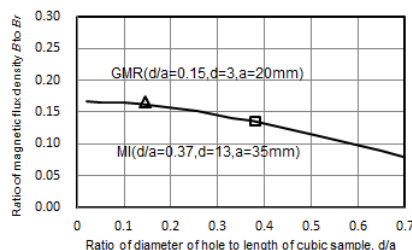


Fig. 2 Ratio of B in the center of hole to remanence B_r .

実験結果と考察

測定試料 ($a=20$, $d=3 \text{ mm}$) は、マグネタイトの微粒子をエポキシ系樹脂に重量濃度 1.0% で混ぜ固めて作成した。針状磁気プローブを用いて試料の円筒穴内の磁束密度を測定した結果を Fig. 3 に示す。この信号をロックインアンプにて処理することにより、 10^{-6} T レベルの磁束密度、信号の位相から磁化方向が測定できることが確認できた。

以上から、径の小さな針状 GMR 磁気プローブを用いることで、小さな試料サイズで方向の異なる 2 穴を開け、2 穴内の磁気計測を行うことで 3 方向成分の測定が可能となる。

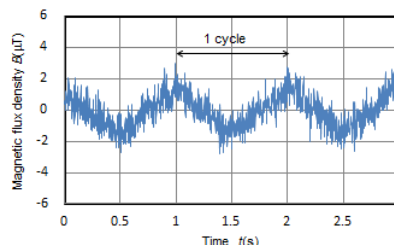


Fig. 3 Measured signal by GMR probe.

参考文献

- 1) T.Minamitani, D.Wakaura, S.Yamada, *Digest of 2014 JIEE Annual Conference*, 2-127, 2014.
- 2) Nanotesla sensor, Aichi Micro Intelligent Co.: http://www.aichi-mi.com/magnetometer/type-dh_en.htm.

耐酸化保護層を形成した磁性膜被覆磁気力顕微鏡探針

加藤慶一・大竹充・二本正昭・稲葉信幸*・桐野文良**

(中央大, *山形大, **東京藝大)

Magnetic Force Microscope Tip Prepared by Coating with Magnetic Film and Oxidation Protection Layer

Keiichi Kato, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Nobuyuki Inaba*, and Fumiyoshi Kirino**

(Chuo Univ., *Yamagata Univ., **Tokyo Univ. Arts)

はじめに 磁気力顕微鏡 (MFM) は磁気記録媒体などの磁化状態解析に幅広く用いられている。MFM探針は、一般的に、Siなどの非磁性探針に磁性膜を被覆することにより作製され、観察試料から漏洩する磁場勾配を探針で検出し、磁化状態を観察する。そのため、探針形状に加えて、磁性探針の先端半径や磁性膜の酸化状況などが観察分解能に大きな影響を及ぼす。しかしながら、被覆膜の酸化が探針性能に及ぼす影響について検討した報告は殆どない。本研究では、耐酸化保護層を形成することにより、酸化耐性に優れたMFM探針の作製を試みた。

実験方法 膜被覆には、超真空スパッタリング装置を用いた。市販の先端半径 4 nmのSi探針に 20 nm厚の磁性膜および 2 nm厚の保護層を被覆することによりMFM探針を作製した。磁性膜材料としてFeを、保護層材料としてC, B, Siなどを用いた。また、比較のため、保護層無しのMFM探針も作製した。恒温恒湿槽を使用して磁性探針の酸化を行い、保存日数が分解能に及ぼす影響を調べた。磁気力顕微鏡の分解能評価では、真空排気型MFMを用いた。また、構造および磁気特性の評価には、膜被覆時に同時にSi基板上に形成した磁性膜を使用した。

実験結果 Fig. 1にSi基板上に形成したC保護層有りおよび無しのFe膜の飽和磁化 (M_s) の酸化試験経過日数依存性を示す。保護層無しの膜では、1日経過で M_s が急激に減少し、日数の増大に対応して継続的に減少する傾向が確認される。一方、保護層有りの膜の M_s は、ほぼ一定値を保っていることが分かる。次に、分解能評価を行うために、500~1800 kFCIで記録された試作垂直媒体のMFM観察を行った。Fig. 2(a)に酸化試験前の保護層無しのMFM探針を用いて観察を行った結果を示す。また、Fig. 2(b)には、記録ビット像のパワースペクトルを示す。1700 kFCI (ビット長: 14.9 nm) までは、ビット像およびパワースペクトルにおけるピークを確認することが出来る (Fig. 2(a-4), (b-4))。しかしながら、1800 kFCI (ビット長: 14.1 nm) で記録されたビットを識別することはできない (Fig. 2(a-5), (b-5))。したがって、分解能は $14.9/2=7.5$ nm と $14.1/2=7.1$ nmの間の 7.3 ± 0.2 nmと評価できる。Fig. 3にC保護層有りおよび無しのMFM探針の分解能の酸化試験経過日数依存性を示す。保護層無しの場合、被覆磁性膜の酸化に伴い、分解能が低下していることが分かる。一方、C保護層を用いることで、酸化耐性が向上し、恒温恒湿槽に保管を継続しても、分解能がほぼ一定に保たれていることが分かる。当日は、保護層の種類が分解能の酸化耐性に及ぼす影響についても報告する。

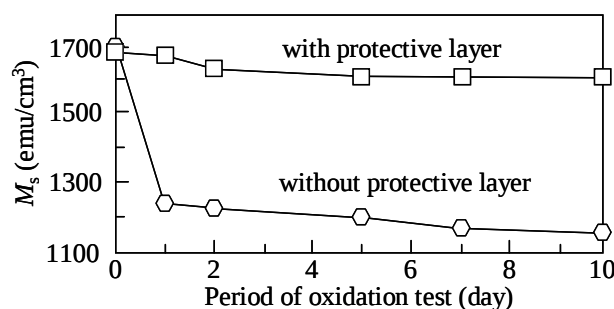


Fig. 1 Saturation magnetization values of Fe films without and with C protective layer deposited on flat Si substrates.

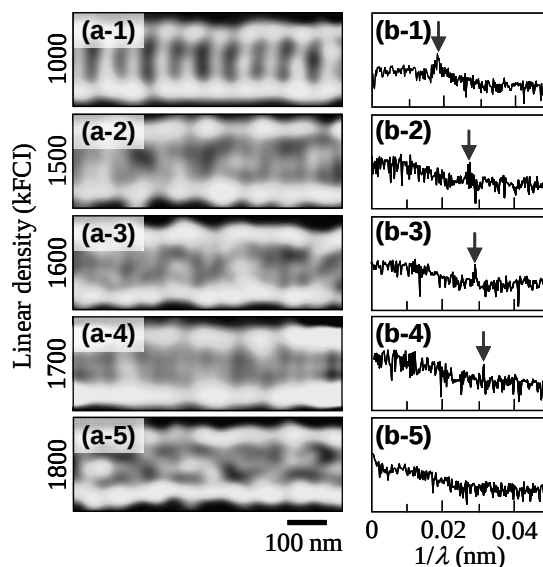


Fig. 2 (a) MFM images of a perpendicular recording medium observed by using an MFM tip coated with Fe film without C protective layer. (b) Power spectra analyzed for the magnetic bit images in (a).

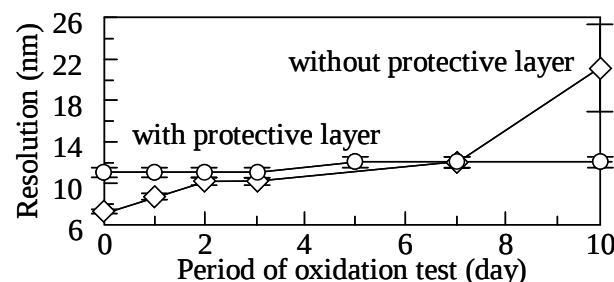


Fig. 3 Resolutions of MFM tips coated with Fe films without and with C protective layer.

Co フェライトを用いた磁気力顕微鏡用プローブの作成とその特性

深谷周作

高橋尚孝

劉小晰

(信州大学)

Preparation and properties of magnetic force microscope probes using Co-Ferrite

Syusaku Fukaya Naotaka Takahashi Xiaoxi Liu

(Shinshu University)

はじめに

Nd-Fe-B のように強力な薄膜磁石の表面の磁区構造の観察を行う際、商用の MFM プローブの保磁力が小さく計測試料の漏洩磁界の影響によりプローブの磁化の方向が反転してしまい正確な観察が行えない。そのため高い保磁力を持つ MFM プローブの製作が必要になる。

本研究では、Si 製の AFM プローブ上に磁性薄膜を成膜することにより高い保磁力を持つ MFM プローブ作製を目的としている。本研究における磁性材料として Co フェライトを選択した。Co フェライトは安価であり、酸化による影響が少ないと考えられるのでプローブの寿命が長くなると考えられる。

実験方法

成膜方法には対向ターゲット式スパッタリング装置(FTS)を用いる。今回 FTS を用いたのはプラズマによる基板へのダメージが DC マグネトロン式スパッタリング装置と比べ少なく、これまでの研究からカンチレバー上に成膜した場合 FTS のほうがより先鋭的になることが確認されているからである。¹⁾

チャンパー内の到達圧力は 5.0×10^{-4} Pa 以下とし、Ar ガスを導入してスパッタガス圧を 4.0×10^{-4} Pa、基板加熱温度を 150 °C から 400 °C まで変化させ成膜を行った。また、それらの試料に対して大気中での熱処理を行った。次に室温においてガス圧を 0.5 Pa から 0.1 Pa まで変化させ成膜した。試料振動型磁力計(VSM)を用いて磁気特性を、X 線回折(XRD)を用いて結晶構造を評価し、さらに最適な条件を確認後 MFM プローブの作製を行う。

実験結果

Fig. 1 に各基板加熱温度における熱処理前と熱処理後の保磁力について示す。全体において熱処理を行うことによって保磁力の増加が確認された。最大の保磁力は、基板加熱 350°C、ポストアニール 400°C 5 時間行うことで垂直方向において約 6.8 kOe、面内方向において 6.1 kOe の保磁力が確認された。同条件において MFM プローブ上に成膜を行い、Nd₂Fe₄B 薄膜の観察を行った。Fig. 2 が得られた MFM 画像である。しかし、同プローブのアルミ製反射膜に剥離が認められた。

この問題の解決のために室温において高い保磁力を得るためにガス圧を変化させてスパッタを行った。Fig. 3 に各ガス圧に対する保磁力を示す。この図が示すように保磁力は 0.1 Pa の時に最も大きく垂直方向で約 4.9 kOe、面内方向に約 3.5 kOe となりガス圧の上昇とともに減少が見られた。このように室温においても熱処理を行った場合に近い保磁力を得ることに成功した。

各試料の結晶構造、室温で作製したプローブでの観察結果等のデータについては学会時に報告する。

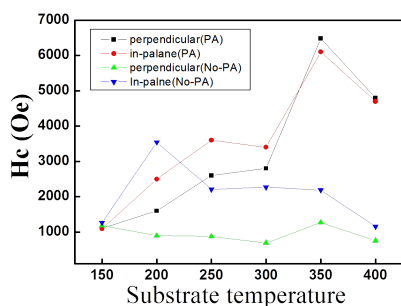


Fig.1 Coercivity of each substrate heating temperature

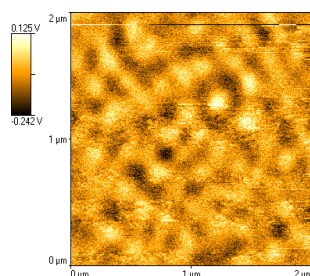


Fig.2 MFM image

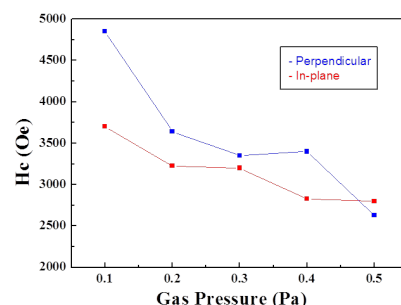


Fig.3 Coercivity of each gas pressure

参考文献

- 1) X. liu, S. Isomura, A. Morisako, IEEE Trans. MAG, 48(11), 3673-3676, (2012)

交番磁気力顕微鏡を用いた高磁化率 Ag-Co 超常磁性探針による FePt 永久磁石厚膜の表面近傍磁場イメージング

中山翔太、岩井 航、江川元太、木下幸則、吉村 哲、齊藤 準

(秋田大学)

Near-contact magnetic field imaging on FePt hard magnet films by alternating magnetic force microscopy with a high-susceptibility superparamagnetic Ag-Co tip

S. Nakayama, W. Iwai, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura and H. Saito

(Akita University)

はじめに 我々は、試料表面近傍での磁場計測を可能にする交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発し、高密度磁気記録媒体に対してソフト磁性探針を用いて、直流磁場の高空間分解能観察に成功している^{1),2)}。ここでは、励振している探針に探針の共振周波数と異なる交流磁場を印加して探針磁化を周期的に反転させて探針試料間に非共振の交番磁気力を発生させ、この交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用して、試料からの直流磁場を計測している。しかしながら、永久磁石等の極めて強い直流磁場を発生する試料の観察時には、ソフト磁性探針の、1) 試料表面への磁気吸着、2) 探針磁化が試料からの直流磁場により飽和し、周波数変調現象が生じない、等の問題があり、解決策として、探針磁化が磁場に比例し飽和せず、磁化値を磁場で制御できる新たな探針が必要になる。本研究では、我々が最近開発した高い磁化率を有するグラニューラー構造の Ag-Co 超常磁性探針³⁾を用いて、永久磁石薄膜の磁区観察を試みた結果を報告する。

方法 上記の A-MFM において、探針に超常磁性探針を用いた場合には、探針の交流磁化は、試料からの直流磁場による探針の直流磁化とは独立に、交流磁場方向のみに磁場に比例して発生することから、探針試料間の磁気力勾配は次式となる。 $(\partial F_z / \partial z) = (M_z^{dc} + M_z^{ac} \cos(\omega_m t)) (\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2 + \partial^2 H_z^{ac} \cos(\omega_m t) / \partial z^2)$ (1) ここで探針に空間的に均一な交流磁場を印加する場合、 $(\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) \ll 1$ より(1)式の ω_m 成分は以下となる。 $(\partial F_z / \partial z)(\omega_m t) \equiv M_z^{ac} (\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2) \cos(\omega_m t)$ (2) したがって、(2)式により誘起される周波数変調の ω_m 成分を、探針振動波形を周波数復調後にロックイン検出することで、交流磁場方向に平行な直流磁場の勾配を計測することができる。自作した FePt 磁石厚膜 (膜厚 300 nm) の観察は、市販の走査型プローブ顕微鏡 (L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製) に、探針に交流磁場を印加するための電磁石を試料側に付加して A-MFM 装置系を構成し、大気中で行った。探針は、磁化率 4.5×10^{-7} H/m の Ag-Co 薄膜 (100 nm) を成膜した超常磁性探針を用いた。

結果 Fig.1 に、膜面垂直方向に直流消磁した FePt 磁石厚膜の表面像(a)、磁場強度 (振幅) 像(b)、磁場極性 (位相) 像(c)、をそれぞれ示す。磁場強度像において得られた明部分の形状やサイズが、通常の MFM 測定で観察された磁区の形状や大きさとほぼ同じであること、また磁場極性像において得られた明および暗の部分の面積比が、ほぼ 1 : 1 であることから、本 A-MFM で得られた像が、FePt 磁石厚膜の消磁状態を反映した明瞭な垂直方向の磁場像で有ると言える。Fig.2 の(d) および (e) に、Fig.1 の(b) 磁場強度像および (c) 磁場極性像におけるラインプロファイルをそれぞれ示す。垂直磁場の強度がゼロとなる場所を境として磁場極性の反転 (位相差は 180° 変化) が明瞭に観察されており、かつ磁場極性像のラインプロファイルでは、位相が一定値を示しているプラトーな部分においてノイズが非常に小さい傾向もみられた。このことは、本超常磁性探針の磁化が、印加した交流磁場 (FePt 厚膜面垂直) 方向のみに成分をもって時間変化し、磁化曲線にヒステリシスがないことを示唆する。

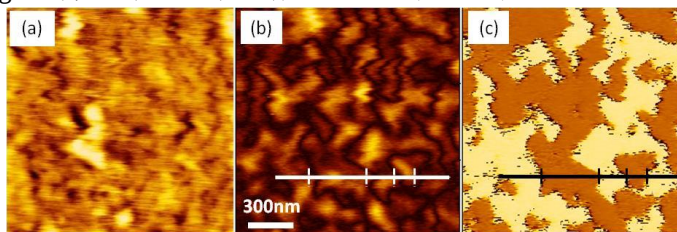


Fig.1 (a) Topographic image, (b) Amplitude image, and (c) phase image of FePt thick film.

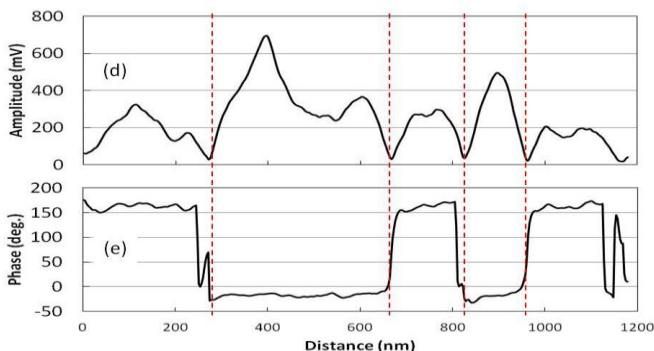


Fig.2 Line profiles of (d) Amplitude image and (e) phase image of FePt thick film.

参考文献 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, 109, 07E330 (2011). 2) 伊藤 他, 第 35 回日本磁気学会学術講演概要集, 27pD-2. 3) 吉村 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演会 発表予定

ソフト磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 磁気記録ヘッドの交流磁場イメージング

伊集院寛仁、滝口史典、江川元太、木下幸則、吉村 哲、齊藤 準
(秋田大学)

AC magnetic field imaging of magnetic writing heads by alternating magnetic force microscopy
using a soft magnetic tip

Hirohito Ijuin, F. Takiguchi, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura and H. Saito
(Akita University)

はじめに 磁気記録ヘッドの性能評価には、発生する交流磁場を高い周波数まで画像化することが有用である。我々は先に開発した交番磁気力顕微鏡(A-MFM)および 10 kOe 以上の保磁力を有する FePt ハード磁性探針を用いることで、磁気記録ヘッドの垂直磁場のヘッド表面近傍での高分解能観察(空間分解能 10 nm 以下)に成功している[1]。本研究では、さらに高い周波数の磁場を計測するために、高周波磁場応答に有利であり、より大きな飽和磁化を有するソフト磁性探針に着目し、A-MFM の磁気記録ヘッド検査装置への展開を視野に入れて、MHz 帯までの磁場観察を目的として、垂直磁気記録ヘッドを FeCo ソフト磁性探針により観察した。

実験方法 A-MFM は探針の共振周波数と異なる非共振の磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用している。ここでソフト磁性探針が交流磁場 $H_0^{\text{ac}} \cos(\omega_m t)$ により同期して磁化される場合、磁気力による探針の実効的なバネ定数の変化は以下となる。

$$(\partial F_m / \partial z) = \Delta k_{\text{eff}} = \left(M_0^{\text{ac}} \cos(\omega_m t) \right) \left(\partial^2 H_0^{\text{ac}} \cos(\omega_m t) / \partial z^2 \right) \equiv (q_{\text{tip}} / 2) \left(\partial H_0^{\text{ac}} / \partial z \right) (1 + \cos(2\omega_m t)) \quad (1)$$

本研究では、探針を 2 次共振周波数(周波数 $f_{r2} = \omega_{r2} / (2\pi)$)で機械励振し、磁気記録ヘッドの非共振交流磁場(周波数 f_m)を、探針の 1 次共振周波数(周波数 f_{r1})との関係において、 $f_{r2} - 2f_m = f_{r1}$ を満たすように調整することで、磁気記録ヘッドの交流磁場により探針の 1 次共振周波数の振動を誘起し、その振動強度をロックインアンプで計測した。ここで、 $f_{r2} = 408.5 \text{ Hz}$, $f_{r1} = 69.1 \text{ Hz}$, $f_m = 169.7 \text{ Hz}$ であった。実験には市販の走査型プローブ顕微鏡(JEOL・JSPM-5400)を用い、大気雰囲気中で行った。用いた FeCo ソフト磁性探針は Si 探針に FeCo 薄膜を 30 nm 成膜して自作した。ヘッド電流は 40 mA_{p-p} とし、リフト高さは約 10 nm とした。

実験結果 Fig.1 (a), (b)に観察した交流磁場の振幅像とそのラインプロファイルを示す。図より明瞭な交流磁場像が観察されていることがわかる。ソフト磁性探針を用いた場合、探針磁化が交流磁場に同期して変化していると考えられるが、(1)式の探針磁化と磁場勾配の積は、発生磁場の方向で最大となり、そのときの強度がロックイン検出されるので、磁場方向によらずに磁場の大きさが計測されることになる。図に見るように、強い磁場は主磁極内部で発生していることがわかる。このことは、主磁極内部で強い垂直磁場が発生していることによるものと推察される。一方、ヘッドギャップにおいては、強度はゼロにならないが、これは面内磁場を主に計測しているものと推察される。本手法では、試料表面近傍での磁場計測が可能であるので、講演では磁場強度の探針-試料間距離の距離依存性の結果を報告する。あわせて、(1)式の実効バネ定数の直流変化項による探針振動の位相変化を用いた従来手法[2]や、ハード磁性探針を用いた A-MFM との比較を行い、本手法の特徴を明らかにする。

参考文献

[1] H. Saito, W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa and S. Yoshimura, J. Appl. Phys. 107, 09D309(2010)

[2] 張 開鋒 他, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 30a-A8-5 (2013 春)

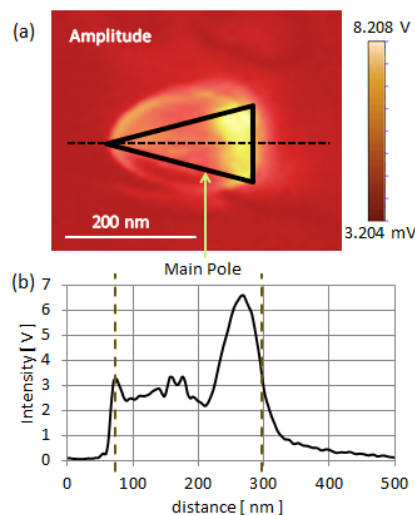


Fig.1 Amplitude image of AC magnetic field [(a)] and its line-profile [(b)] for a perpendicular magnetic writing head.

磁気力顕微鏡におけるソフト磁性探針の交流磁場応答を用いた性能評価方法の提案

H. Qi², 岡安慎介¹, F. Zheng², 江川元太¹, 木下幸則², 吉村哲¹, 齊藤準¹

¹秋田大学, ²秋田大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー

Proposal of evaluation method of soft magnetic MFM tip's performance by AC magnetic field response

H. Qi², S. Okayasu¹, F. Zheng², G. Egawa¹, Y. Kinoshita², S. Yoshimura¹, and H. Saito¹

¹Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

²Venture Business Laboratory, Akita University

はじめに 磁気力顕微鏡(MFM)は、磁性体試料と磁性探針の相互作用を利用して磁場を画像化するので、探針の磁気特性の把握は重要である。磁気力顕微鏡探針としては、ハード磁性探針が主に用いられているが、近年ではソフト磁性探針もその磁場応答性を利用した用途に使用されてきている^{1, 2)}。したがってソフト磁性探針の磁場応答性の評価は重要である。本研究ではソフト磁性探針の交流磁場応答性から探針性能である飽和磁場、計測感度を評価する方法を提案する。

方法 磁性探針に交流磁場を印加したときの磁気力の勾配は、探針の振動方向を z 方向とし、この方向に交流磁場 $H_z^{ac} \cos(\omega_m t)$ を印加した場合に次式で与えられる。 $(\partial F_z / \partial z) = (M_z^{dc} + M_z^{ac}(t)) (\partial^2 H_z^{ac} \cos(\omega_m t) / \partial z^2)$ (1) ここで、 M_z^{dc} は時間変化しない探針磁化成分、 $M_z^{ac}(t)$ は時間変化する探針磁化成分である。理想的なハード磁性探針の場合 $M_z^{ac}(t) = 0$ であり、理想的なソフト磁性探針の場合 $M_z^{dc} = 0$ である。 $M_z^{ac}(t)$ が交流磁場に比例して変化する場合 ($M_z^{ac}(t) = M_z^{ac} \cos(\omega_m t)$)、(1)式は以下となる。

$$(\partial F_z / \partial z) = (M_z^{ac} / 2) (\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) + M_z^{dc} (\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) \cos(\omega_m t) + (M_z^{ac} / 2) (\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) \cos(2\omega_m t) \quad (2)$$

ここで、交流磁場の周波数 ω_m が探針の共振周波数 ω_0 と異なる場合、(2)式の磁気力の周期的変化により、探針振動に周波数変調が発生する³⁾。したがって、周波数変調による探針振動の側帯波成分 ($\omega_0 \pm n\omega_m$; n は周波数変調の次数) の強度を測定することにより、探針磁化の磁場応答性の評価が可能になる。そこで、本研究では市販の走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製)に、探針に交流磁場を印加するための電磁石を付加して、磁性探針に 89 Hz の交流磁場を印加し、その振動スペクトルをスペクトラムアナライザーで測定した。

結果 Fig.1 に Ni-Fe 探針における探針振動スペクトルの一例と 2 次の周波数変調の側帯波成分の強度 $I(2\omega_m)$ の交流磁場振幅 H_{ac} 依存性を示す。 $I(2\omega_m)$ は H_{ac} の増加に伴い、その 2 乗に比例して増加した後 1 乗に比例して変化する。この現象を理解するために、 $(\partial F_z / \partial z) = M_z(t) (\partial^2 H_z(t) / \partial z^2) \propto M_z(t) H_z(t)$ の関係を用い、Fig.2(a) のように探針磁化が磁場に比例して増加した後飽和する磁化曲線を仮定し、探針に交流磁場を印加した際の $M_z(t) H_z(t)$ の時間変化波形の一例として交流磁場振幅が探針の飽和磁場 H_s の 2 倍の場合のものを Fig.2(b) に、Fig.2(c) に $M_z(t) H_z(t)$ の $2\omega_m$ のフーリエ級数成分 $I(2\omega_m)$ の H_{ac} 依存性の計算結果を示す。Fig.2(c) のように、 $I(2\omega_m)$ は H_{ac} の増加に伴い、実験結果と同様に、その 2 乗で H_s まで増加した後 1 乗に比例して変化する。したがって、本手法により、ソフト磁性探針の飽和磁場を求めることが可能になることがわかる。さらに、 H_s での $I(2\omega_m)$ の値を様々な探針について比較することで、探針の計測感度の評価が可能となる。講演では、実験で観測される高次の探針振動スペクトルについても計算結果と比較検討した結果および評価した探針により観測される MFM 像との相関についても述べる。

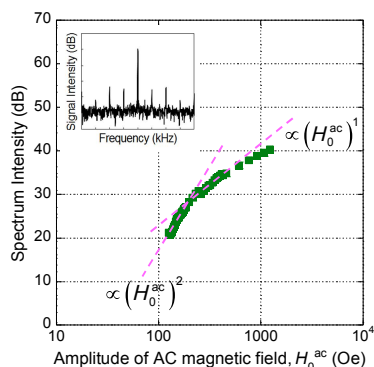


Fig.1 Dependence of AC magnetic field amplitude on the intensity of second harmonics of tip's frequency modulated oscillation for Ni-Fe MFM tip.

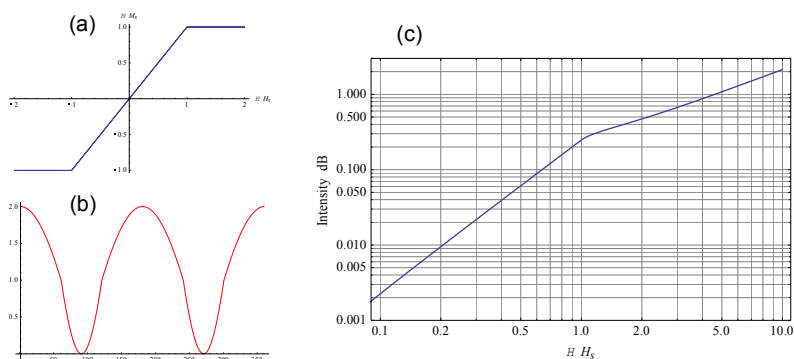


Fig.2 (a) Model of MFM tip's M - H curve, (b), waveform of $M_z(t)H_z(t)$, (c) Dependence of AC magnetic field amplitude on the intensity of calculated second harmonics of tip's frequency modulated oscillation for MFM tip.

参考文献 1) 伊藤 他, 第 35 回日本磁気学会学術講演会概要集, 27pD-2. 2) S. Okayasu et al., 2nd ICAUMS, 2pPS-109 (2012). 3) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, **109**, 07E330 (2011).