

## 部分励磁した Wiegand ワイヤの磁化過程評価

酒井貴史、山田努、竹村泰司  
(横浜国立大学)

Evaluation of magnetization process of partially excited Wiegand wire

Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura

(Yokohama National University)

### はじめに

Wiegand ワイヤにおける大バルクハウゼンジャンプを伴う急峻な磁化反転は、検出コイルにパルス電圧を誘起する<sup>1)</sup>。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、無電源センサなどへの応用が期待されている<sup>2)</sup>。本研究では、ホール効果を用いて Wiegand ワイヤから出る磁束から磁壁移動を測定した。

### 実験方法

ホール素子(ASAHI KASEI 社 HG-166A-2G)をワイヤ近傍に2つ設置し、励磁コイルによって磁化反転させた。励磁位置に対して片一方に2つのホール素子を設置し(Fig.1)、一方向の磁壁移動を測定した。また、ホール素子と同じ位置に検出コイルを2つ設置して磁壁移動に伴うパルス電圧も同時に測定し、ホール素子と検出コイルのそれぞれの距離と出力の時間差から磁壁移動を観測した。

### 実験結果

設置したホール素子から得た磁束と検出コイルから得たパルス波形を最大値で規格したものを Fig. 2 と Fig. 3 に示す。ホール素子と検出コイルどちらの場合においても励磁コイルからの距離に対応した波形に時間差が観測された。しかし、検出コイルから得られた時間差に比べ、ホール素子から得られた時間差が大きいことが分かった。これにより、ホール素子で観測される磁束の変化は Wiegand ワイヤ全体の磁化過程を示しており、ワイヤ内部の磁化過程の解明に有用であると考えられる。磁化過程の詳細については当日発表する。

### 参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 2) Y. Takemura, N. Fujinaga, A. Takebuchi, and T. Yamada, *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 4002706, (2017)

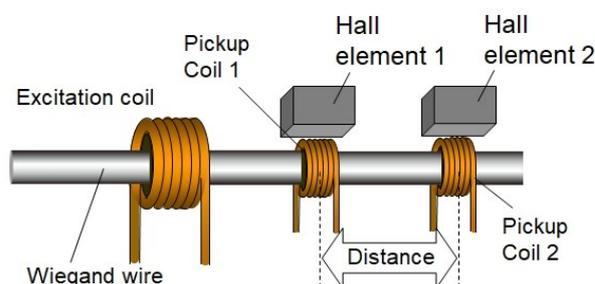


Fig. 1 Configuration of wire, coil and Hall element.

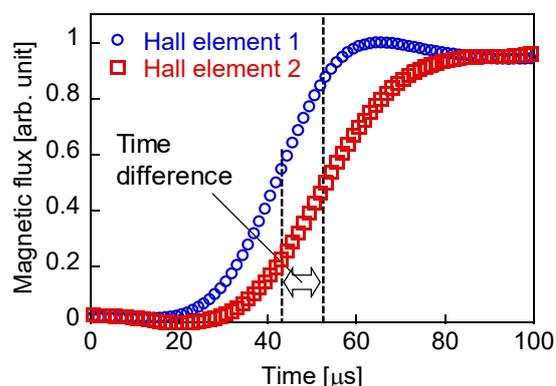


Fig. 2 The magnetic flux measured by Hall element.

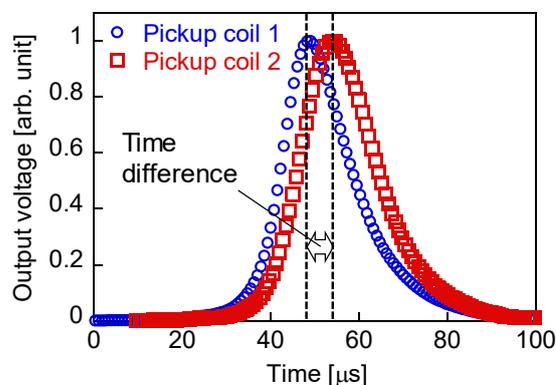


Fig. 3 The output voltage of pickup coil.

# 90度磁気結合膜の偏極中性子線反射率による微細磁気構造解析

鍾永師<sup>1</sup>, 永島玄<sup>1</sup>, 堀池周<sup>1</sup>, 花島隆泰<sup>2</sup>, 黒川雄一郎<sup>1</sup>, 湯浅裕美<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>九州大シス情,<sup>2</sup>CROSS)

## The fine magnetic structure of magnetic multilayer with 90 degrees magnetic coupling layer by using Polarized Neutron Reflectivity analysis

Y. Zhong, G. Nagashima, S. Horiike, T. Hanashima, Y. Kurokawa, H. Yuasa

(<sup>1</sup> Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, <sup>2</sup> CROSS)

Recently antiferromagnetic (AFM) spintronics are drawing attention owing to the high resonance frequencies and zero stray fields. It has been theoretically reported that spin transfer torques (STT) in AFM materials can be obtained [1]. However, it is hard to directly observe spin torque oscillation (STO). Comparing to this, we fabricated the novel quasi-AFM layer which has multiple domains with alternatively antiparallel magnetization by using biquadratic magnetic coupling between two ferromagnetic (FM) layers through Fe-O layer. The magnetic property of the quasi-AFM layer is expected to have properties that are intermediate between AFM and FM. The macroscopic result of its magnetic property is shown in ref. [3], and the crystal structure was also reported in ref. [4]. And to analyze the magnetic structure, we carried out polarized neutron reflectivity (PNR) analysis by BL17 SHARAKU in MLF, J-PARC.

The Ta/Ru/IrMn/CoFe(A)/Fe-O/CoFe(B)/Cu/CoFe(C)/Cu/Ta films were sputtered on thermal oxidized Si wafers and annealed in a field to fix the magnetization of CoFe(A) in x direction by IrMn. We measured the polarized neutron reflectivity of this film and used the software named GenX to fit the data, from which we can find out the magnetization direction and magnetic moment of the film.

Fig.1 (a) shows the M-H curve of the film, which means the magnetization of CoFe(A) and CoFe(B) were coupled with angles of about  $\pm 90$  degrees through Fe-O and the CoFe(B) had become the quasi-AFM. The schematic magnetization images and fitting result is shown in Fig.1 (b). We can see that the magnetization of CoFe(A) was fixed in x direction and the magnetization of CoFe(C) had reversed in low field. The CoFe(B) is expected to be quasi-AFM and the x component of magnetization should be zero. However, the result indicates the CoFe(B) had magnetization of  $1.35\mu_B$  in x direction, which means the biquadratic coupling was not strong enough and the magnetization of it was not completely antiparallel. The average angle between the magnetization of CoFe(A) and CoFe(B) was estimated as  $\pm 42$  degrees from  $\cos^{-1}(1.35\mu_B / 1.82\mu_B)$ . In presentation, we will show the process how we fitted it and explain the result in detail.

This work was supported by The Canon Foundation.

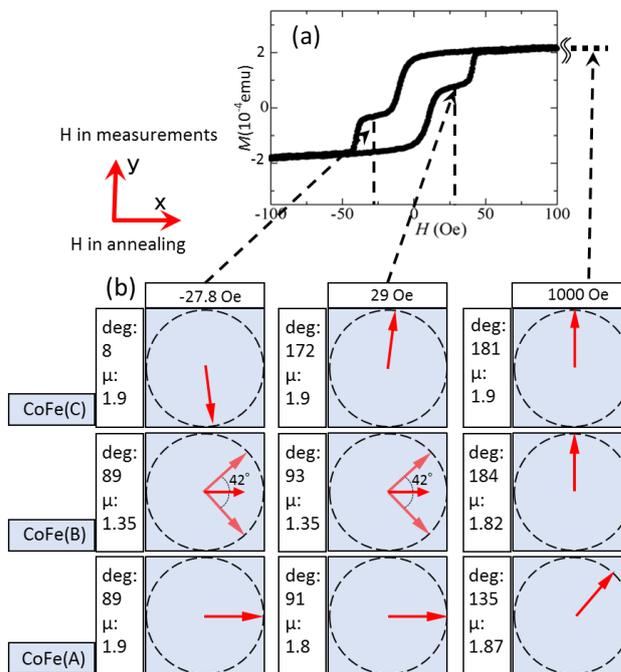


Fig. 1 (a) M-H curve, (b) schematic magnetization images in field of -27.8 Oe, 29 Oe and 1000 Oe.

[1] A. S. Núñez *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 214426 (2006).  
 [2] T. Jungwirth *et al.*, Nature Nanotechnology, **11**, 231 (2016).  
 [3] G. Nagashima *et al.*, JSAP Spring **65**, 17P-p10-17 (2018).  
 [4] Y. Zhong *et al.*, JSAP Spring **66**, 9p-PB1-30 (2019.)

# 交番磁気力顕微鏡を用いた直流磁場と交流磁場の交差エネルギー項の検出による磁気記録ヘッドの局所磁化計測

P. Dubey, P. Kumar, 園部 博, 齊藤 準  
(秋田大)

Local magnetization measurement of magnetic recording head by detecting energy cross term of DC and AC magnetic field by alternating magnetic force microscopy

P. Dubey, P. Kumar, H. Sonobe, H. Saito  
(Akita Univ.)

**はじめに** 垂直磁気記録ヘッドでは記録磁場の高強度・高収束化が図られており、磁気ヘッドの更なる性能向上にはその微視的な磁気特性を把握することが重要となる。筆者らは、磁気力顕微鏡の分野で試料表面近傍の磁場の計測を可能にすることで空間分解能を大幅に向上させた交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM)を開発し、さらに高磁化率の Co-GdO<sub>x</sub>系超常磁性探針を開発することで、磁気ヘッドから発生する交流磁場に対してその2乗値に対応する磁場エネルギー計測を可能にし、さらなる空間分解能向上を実現している<sup>1,2)</sup>。本研究では、磁気ヘッドに直流磁場を重畳させた交流磁場を発生させて、直流磁場と交流磁場との交差エネルギー項を解析することで磁気記録ヘッドの局所的な磁化測定を試みた。

**方法** Co-GdO<sub>x</sub>超常磁性探針 (磁性膜厚 100 nm) を用いて磁気ヘッドの A-MFM 観察を行った。超常磁性探針には磁気ヘッドからの交流磁場  $H \cos(\omega t)$  による交流磁化  $m^{ip} = \chi H \cos(\omega t)$  が発生するので探針の磁気力は  $\chi(\partial^2 H^2 / \partial z^2) \cos^2(\omega t) \propto \cos(2\omega t)$  となり、磁場の2乗に対応する磁場エネルギー信号 (周波数  $2\omega$ ) を検出することで交流磁場のエネルギーを画像化できる。ここで直流バイアスした電流  $I = I_{dc} + I_{ac}^0 \cos(\omega t)$  を磁気ヘッドに印加した場合、磁気ヘッド面に垂直方向の磁化  $M_{\perp} = M_0 \sin \theta$  ( $\theta$  はヘッド磁化のヘッド面からの立上り角度) は、 $I_{dc}$  と  $I_{ac}$  による直流磁場および交流磁場により、 $M_{\perp} = M_s \sin(\theta + \Delta\theta \sin(\omega t))$  で周期的に変化する。ここで交流磁場が直流磁場に対して小さい場合 ( $\Delta\theta \ll \theta$ ) には、

$M_{\perp} \cong M_s (\sin \theta + \Delta\theta \cos \theta \sin(\omega t))$  となる。このとき磁気ヘッド面近傍では  $M_{\perp}$  によりヘッド面に垂直方向のヘッド磁場  $H_z = H_z^{dc} + H_z^{ac}$  が発生する。ここで  $H_z^2$  において  $H_z^{dc}$  と  $H_z^{ac}$  の交差磁場エネルギー項が、 $H_z^{dc} H_z^{ac} \cong \Delta\theta M_s^2 \sin \theta \cos \theta \sin(\omega t) \propto \sin 2\theta$  となることに着目すると、交差エネルギー項 (周波数  $\omega$ ) の信号強度  $S(\omega)$  は  $\sin 2\theta$  に比例することになる。そこで  $I_{ac}^0$  を固定して  $S(\omega)$  の  $I_{dc}$  依存性を解析することで磁気ヘッドの局所的な磁化計測を行った。

**結果** 図 1(a)に  $I_{dc} = 3 \text{ mA}$  での磁気ヘッドの交流磁場エネルギー像とその中心部での直流磁場と交流磁場の交差エネルギー項  $S(\omega)$  (最大値を 1 で規格化) の  $I_{dc}$  依存性を示す。  $S(\omega)$  は  $I_{dc}$  の増加に伴い急激に増加し、 $I_{dc} = 3 \text{ mA}$  付近で最大値をとった後に徐々に減少することがわかる。図 1(b)に  $S(\omega)$  が最大となるときの磁化の立上り角度  $\theta$  を  $45^\circ$  として、 $S(\omega)$  が  $\sin 2\theta$  に従うとして求めた  $\theta$  を用いて、ヘッド面に垂直方向の磁化曲線 (ヘッド磁化の飽和値で規格化)  $M_{\perp} / M_s = \sin \theta$  を示す。磁化は  $I_{dc}$  の増加に伴い急激に増加しその後、飽和に近づいていくことがわかる。講演ではこの解析の詳細について述べる。

**謝辞** 磁気記録ヘッドの磁場エネルギーイメージングに関する議論に対して、(株)日立ハイテクファインシステムズ様に感謝いたします。

**参考文献** 1) Kumar et al., Appl. Phys. Lett., 111, 183105 (2017),  
2) P. Kumar et al., J. Appl. Phys., 123, 214503 (2018)

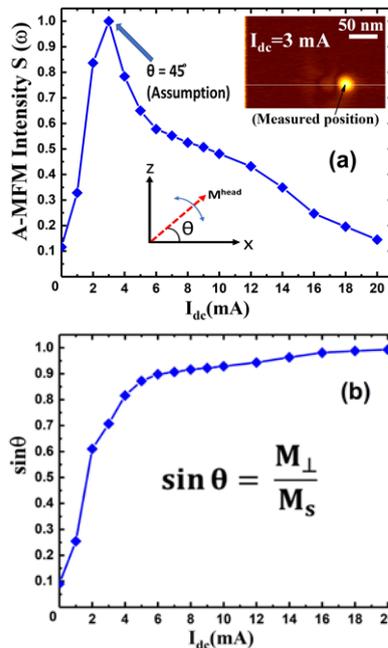


Fig. 1 (a)  $I_{dc}$  dependence of normalized  $S(\omega)$ , (b)  $I_{dc}$  dependence of normalized  $M_{\perp}$ .

## 交番磁気力顕微鏡を用いたパーマロイ・パターンド薄膜の磁壁移動の動的観察

大阪 飛翔<sup>1</sup>, Jong-Ching Wu<sup>2</sup>, 齊藤 準<sup>1</sup>

(秋田大学, National Changhua University of Education)

Dynamic observation of domain wall movement of patterned permalloy thin films  
by alternating magnetic force microscopy

T. Osaka<sup>1</sup>, J. C. Wu<sup>2</sup>, H. Saito<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Akita Univ., <sup>2</sup>National Changhua University of Education)

**はじめに** 磁性材料の性能向上には磁区構造を観察し制御することが重要となる。近年、ソフト磁性薄膜では使用する磁気デバイスの微細化・高周波化により、磁区観察には高い空間分解能および時間分解能が求められている。ここで直流磁場を検出する従来の磁気力顕微鏡(MFM)は、強磁性探針から発生する漏洩磁場によりソフト磁性薄膜の磁壁位置を乱すので磁区観察に難がある。そこで本研究ではソフト磁性薄膜の磁区観察をMFMで実現することを目的として、研究グループが開発した交流磁場を検出できる交番磁気力顕微鏡<sup>1)</sup>(A-MFM)と残留磁化がない超常磁性探針を用いてパーマロイ・パターンド薄膜の磁区観察を試みた結果を報告する。

**実験方法** 熱酸化Si基板上に作製したパーマロイ・パターンド薄膜(Taキャップ層2nm)について、MFM観察、A-MFM観察を大気中で行った。A-MFM観察ではフェライトコアを試料ステージ直下に配置し、膜面垂直方向に交流磁場( $H_z^{ac} = H_{z0}^{ac} \cos(\omega t)$ ;  $H_{z0}^{ac} = 0 \sim 250$  Oe,  $\omega/2\pi = 89$  Hz)を印加した。MFM観察には市販のCoCrPt探針を、A-MFM観察には自作したCo-GdO<sub>x</sub>系超常磁性探針を用いた。観察条件として、交流磁場強度、探針試料間距離、探針走査方向を種々変化させた。

**実験結果** Fig.1に一例として4×4 μm角のパーマロイ・パターンド薄膜のMFM像およびA-MFM像を示す。

Fig.1(a)のMFM像では、90°磁壁からなる還流磁区が観察されるが、磁壁は曲線状であり探針磁場の影響による湾曲が懸念される。図(b)~(d)のA-MFM像では、90°磁壁の移動が最大位置として観察され、磁壁の移動は磁壁の湾曲なく起こり、移動幅は交流磁場の増加に伴い増加した。ここでフェライトコアからの交流磁場は試料面に概ね垂直であるが、わずかに残る弱い図中の上下方向の面内磁場により磁壁が移動しているものと推察される。

Fig.2 (a), (b)に磁壁の最大移動位置の模式図を示す。A-MFM像の像コントラストのシミュレーションによる解析により磁壁の最大移動位置は一方で暗く、他方で明るいことがわかった。この結果から磁壁は図の左右方向に移動していることがわかった。Fig.2 (a), (b)の紫色の点は磁壁が交流磁場を印加しても移動せずに拘束されており、磁壁のピンポイントと推察される。本手法はソフト磁性薄膜の磁壁を動的に観察するので、従来の静的観察と比較して、磁壁位置を少ない画素数で検出でき、その後倍率を上げて観察することが容易である。また、交流磁場による磁壁の移動距離を一度の観察で測定することができ、磁壁のピンポイントの評価も可能であることから、ソフト磁性薄膜の磁区構造や磁壁移動の評価に有用と考えている。講演では本手法の詳細について報告する。

**参考文献** 1) W. Lu, H. Saito et al., Appl. Phys. Lett., 96, 143104 (2010)

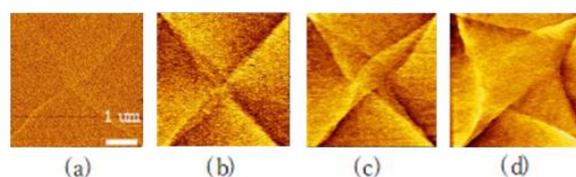


Fig.1 MFM image of permalloy patterned thin film (a) and A-MFM image (b)-(d) {(a)  $H_{ac0} = 0$  Oe, (b)  $H_{ac0} = 50$  Oe, (c)  $H_{ac0} = 100$  Oe, (d)  $H_{ac0} = 250$  Oe }.

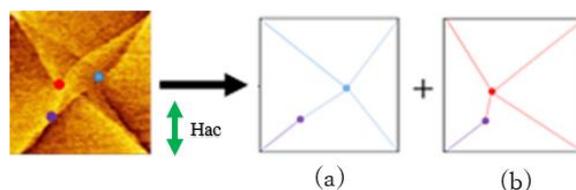


Fig.2 Schematic figure of domain wall movement. (a) Maximum movement position on the right side of the domain wall and (b) maximum movement position on the left side of the domain wall.

# 交番磁気力顕微鏡を用いた永久磁石の3次元磁場計測 — 探針伝達関数に基づいた計測磁場方向の変換 —

和田 真羽, Zhao Yue, 松村 透, 齊藤 準  
秋田大学

Three-dimensional magnetic field measurement of permanent magnet by alternating magnetic force microscopy: Conversion of measuring magnetic field direction based on MFM tip transfer function

S. Wada, Y. Zhao, T. Matsumura, H. Saito  
(Akita Univ.)

## はじめに

我々は磁気力顕微鏡(MFM)において、非共振の磁気力が探針振動に誘起する周波数変調現象を利用して、試料面近傍の磁気力を高感度・高空間分解能で計測できる交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発し、さらに超常磁性探針を用いることで計測磁場方向の精度の高い磁気イメージング手法を実現し、表面凹凸の大きな永久磁石においても試料ホルダーに垂直な磁場成分のみを計測することで、明瞭な磁区構造の観察に成功している。本研究ではこの高い計測磁場方向精度を活かして、探針伝達関数<sup>2)</sup>による計測磁場方向の変換処理を検討した結果、計測磁場方向を任意に設定することで3次元磁場解析が可能になったので報告する。

## 方法

MFM が検出する磁気力勾配信号は、 $\partial F_z / \partial z = m_x (\partial^2 H_x / \partial z^2) + m_y (\partial^2 H_y / \partial z^2) + m_z (\partial^2 H_z / \partial z^2)$  で表される。ここで  $(m_x, m_y, m_z)$  は直交座標系での探針磁化成分であり、 $z$  方向を試料面に垂直方向とする。本研究では、探針伝達関数を用いた計測磁場方向の変換用の測定データとして、Co-GdO<sub>x</sub> 超常磁性探針を用いた A-MFM 観察により得た永久磁石試料の垂直磁場勾配信号  $\partial F_z / \partial z = m_z (\partial^2 H_z / \partial z^2)$  を用いた。計測磁場方向の変換は自作した信号処理プログラムを用いて行い、空間スペクトル上での空間周波数フィルター処理後、フーリエ逆変換により磁気像に戻すことで所望の計測磁場方向の A-MFM 像を得た。

## 結果

図1に表面が平滑なNdFeB焼結磁石をA-MFM観察して得た探針磁化方向が試料面に垂直な  $m_z$  の場合の垂直磁場勾配像  $m_z (\partial^2 H_z / \partial z^2)$  [(a)] および信号変換により求めた探針磁化を試料面に平行方向の  $m_x$  および  $m_y$  とした場合の面内磁場勾配像  $m_x (\partial^2 H_x / \partial z^2)$  [(b)],  $m_y (\partial^2 H_y / \partial z^2)$  [(c)] を示す。

図に見るように、計測磁場方向を変換した面内磁場像では探針磁化方向に垂直方向の磁場成分を検出できないので、概ね探針磁化方向に沿った像コントラストが得られていることがわかる。所望の計測磁場方向の像は、探針磁化  $(m_x, m_y, m_z)$  が極座標系では

$(m_0 \sin \theta \cos \phi, m_0 \sin \theta \sin \phi, m_0 \cos \theta)$  で表されるので、 $\theta$  と  $\phi$  を変化させて探針磁化成分の重み付けを変えることで得ることができる。さらに磁場勾配像の各画素で探針磁化方向を変化させて磁場勾配信号が最大となる方向を求めることで、磁場方向の可視化も可能になる。発表時にはこれらの詳細について述べる予定である。本研究で用いたNdFeB磁石は日立金属(株)様からご提供いただきました。

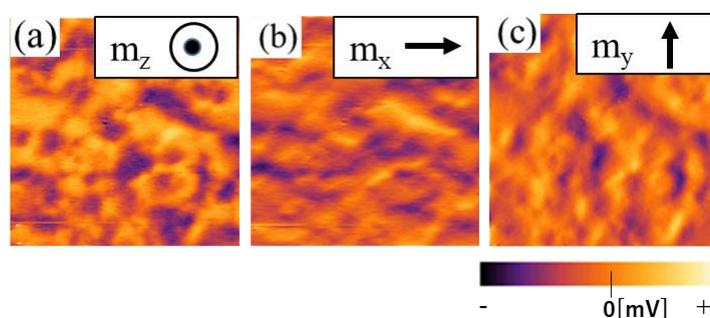


Fig.1 Measured  $(\partial^2 H_z / \partial z^2)$  image [(a)], signal transformed  $(\partial^2 H_x / \partial z^2)$  image [(b)] and signal transformed  $(\partial^2 H_y / \partial z^2)$  image [(c)] of NdFeB sintered magnet.

## 参考文献

- 1) H. Saito et al., J. Magn. Magn. Mater., 191 (1999) 153
- 2) Y. Cao, H. Saito et al., J. Appl. Phys., 123 (2018) 224503

# Co-GdO<sub>x</sub> 超常磁性 MFM 探針の高周波磁場応答性の X バンド・導波管スロットアンテナを用いた評価

上村 拓, 園部 博, 松村 透, 伊藤 桂一, 齊藤 準  
秋田大, 秋田高専

Evaluation of high frequency magnetic field response for Co-GdO<sub>x</sub> superparamagnetic MFM tip by X-band waveguide slot antenna

T. Kamimura, H. Sonobe, T. Matsumura, K. Ito, H. Saito  
(Akita Univ., National Institute of Technology, Akita College)

**はじめに** 磁気力顕微鏡(MFM)は様々な磁性材料・磁気デバイスの磁区観察に広く用いられており、近年、空間分解能や機能性の向上により計測対象が拡大している。我々は最近、磁気ヒステリシスがなく保磁力ゼロの Co-GdO<sub>x</sub>系高磁化率・超常磁性探針を開発し、磁気記録ヘッドから発生する磁場の高分解能計測を実現している。本研究では、磁気力顕微鏡で高周波磁場計測が可能になれば更なる用途拡大がマイクロ波アシスト記録等で期待できると考え、高い強磁性共鳴周波数が予測される超常磁性探針について、高周波磁化率の評価を目的として X バンドの導波管スロットアンテナを用いてその高周波磁場応答性を検討した。

**方法** 自作した X バンドの導波管スロットアンテナを用いて、Co-GdO<sub>x</sub> 超常磁性探針を含む種々の探針を MFM に装着して、振幅変調したマイクロ波を印加した。ここで超常磁性探針の磁化がマイクロ波磁場に追従する場合、マイクロ波磁場を  $H$ 、探針磁化を  $m^{tip}$  とし、超常磁性探針の磁化率を  $\chi$  とすると、

$$H = H_0(1 + \alpha \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_c t) = H_0 \cos(\omega_c t) + (\alpha H_0 / 2) \cos((\omega_c - \omega_m) t) + (\alpha H_0 / 2) \cos((\omega_c + \omega_m) t)$$

$$m^{tip} = \chi H_0(1 + \alpha \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_c t) = \chi H_0 \cos(\omega_c t) + (\alpha \chi H_0 / 2) \cos((\omega_c - \omega_m) t) + (\alpha \chi H_0 / 2) \cos((\omega_c + \omega_m) t)$$

より、探針の磁気力  $F_z^{tip}$  に、 $F_z^{tip} = \alpha \chi (\partial H_0^2 / \partial z) \cos(\omega_m t) + (\alpha^2 \chi / 2) (\partial H_0^2 / \partial z) \cos(2\omega_m t) + \dots$  で表される低周波の交番磁気力が発生する。この交番磁気力は探針振動の周波数変調現象を引き起こすので交番磁気力顕微鏡を用いることで画像化できる。本研究では探針振動の周波数変調を計測し探針の高周波磁場応答性を評価した。

**結果** 図 1 に、MFM 内の導波管スロットアンテナ上に設置した(a)ガラス基板、(b) Co-GdO<sub>x</sub> 超常磁性薄膜(膜厚 100 nm)を、Co-GdO<sub>x</sub> 超常磁性探針(膜厚 100 nm)を用いて走査したときの探針振動スペクトルの一例を示す。マイクロ波のキャリア周波数は 11 GHz、振幅変調周波数は 89 Hz、振幅変調率は 90%である。探針は共振周波数  $\omega_d$  近傍で加振した。(a),(b)とも探針の加振スペクトル  $S(\omega_d)$  の近傍に、矢印の周波数変調による 1 次側帯波スペクトル  $S(\omega_d \pm \omega_m)$  が観察され、超常磁性薄膜を設置することで、 $S(\omega_d)$  と  $S(\omega_d \pm \omega_m)$  の電力比  $S(\omega_d) / S(\omega_d \pm \omega_m)$  が基板の場合と比較して 3.8dB 増加した。側帯波は探針が導電性であればマイクロ波電場でも同様に発生するので、側帯波の起因を探るため、非磁性の Au 探針、ソフト磁性の FeCoB 非晶質探針を加えて測定した電力比  $S(\omega_d) / S(\omega_d \pm \omega_m)$  を表 1 に示す。表に見るように、ガラス基板と比較して超常磁性薄膜の場合に電力比が大きく増加するのは、超常磁性探針のみであることから、超常磁性薄膜がマイクロ波磁場により磁化することで薄膜から発生するマイクロ波磁場も合わせて超常磁性探針が検出しており、Co-GdO<sub>x</sub> 超常磁性探針の比透磁率を電力比の増加率から見積もると 3 弱であった。講演では、マイクロ波周波数を変化させた結果も合わせて報告する予定である。

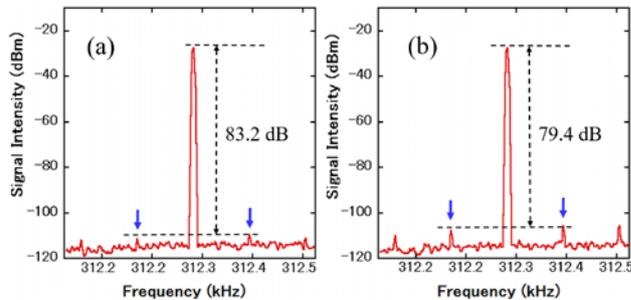


Fig.1 Oscillation spectrum of Co-GdO<sub>x</sub> superparamagnetic tip on (a) glass substrate and (b) Co-GdO<sub>x</sub> superparamagnetic film.

Table 1 Power ratio (dB) between the oscillation spectrum and the first side band spectra of frequency modulated tip oscillation on glass substrate and Co-GdO<sub>x</sub> superparamagnetic film by various tips.

Tip	Au tip	FeCoB tip	Co-GdO <sub>x</sub> tip
Sample			
Glass substrate(A)	80.4	79.5	83.2
Co-GdO <sub>x</sub> Superpara magnetic film(B)	80.3	84.9	79.4
A-B	+0.1	-5.5	+3.8