

## 解説

# 高分解能・交番磁気力顕微鏡の開発とその磁性材料・磁気デバイスへの応用

齊藤 準\*\*

## Development of high-resolution alternating magnetic force microscopy and its application to advanced magnetic materials and devices

Hitoshi Saito

## Abstract

We have developed novel magnetic force microscopy named as alternating magnetic force microscopy (A-MFM) for DC and AC magnetic fields imaging with ultra high spatial resolution of less than 5 nm. A-MFM utilizes frequency modulation of cantilever oscillation induced by applying off-resonant alternating magnetic force to high sensitive homemade magnetic tip. A-MFM is the first magnetic force microscopy which enables near-surface magnetic imaging. A-MFM has several new functionalities such as, a) zero detection of magnetic field, b) polarity detection of magnetic field, c) stroboscopic AC magnetic field imaging and d) vector DC magnetic fields imaging with selectable measuring axis.

## 1. はじめに

磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscopy; MFM) は汎用の磁区観察ツールとして, 様々な磁性材料や磁気デバイスの磁区構造の観察に広く用いられている. MFM は非接触原子間力顕微鏡 (Non-Contact Atomic Force Microscopy; NC-AFM) の一形態であり, 探針に磁性体を用いることで, 観察試料が発生する磁場勾配を磁気力として検出する. 磁気力は遠距離力であるので, MFM では観察試料が非磁性体で被覆されていても磁区観察を行うことができ, 空間分解能は数 10 nm に達している<sup>(1)</sup>. 近年の高密度磁気記録技術やナノサイズ磁性体に係わる研究の進展等により, MFM にはさらなる高分解能化と高機能化が求められている. 本報告では, MFM の高分解能化および高機能化を目的として, 我々が近年, (独)科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発プログラムの下で開発を進めてきた, 交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) の進捗とその磁性材料・磁気デバイスへの応用例について述べる.

## 2. 交番磁気力顕微鏡の特徴および計測原理

Table 1 に, 交番磁気力顕微鏡と汎用の磁気力顕微鏡との性能比較を示す. 以下では汎用の磁気力顕微鏡を汎用 MFM と略称する. 汎用 MFM の測定対象は主に直流磁場である. 汎用 MFM では, 計測感度が高

Table 1 Characteristics of conventional MFM and alternating MFM.

	Conventional MFM	Alternating MFM
Measuring Object	Mainly DC magnetic field	DC magnetic field by soft magnetic tip AC magnetic field by hard magnetic tip
Detecting Signal	【Scalar Signal】 Change of cantilever oscillation signal (amplitude, phase, resonant frequency) caused by magnetic force	【Vector Signal】 Frequency modulation signals of cantilever oscillation (amplitude & phase, in-phase & quadrature signals) caused by off-resonant alternating magnetic force
Magnetic measurement near sample surface	×	○
Zero detection of magnetic field	×	○
Polarity detection of magnetic field	×	○
Spatial resolution	10 nm~ (Vacuum atmosphere is needed for high-resolution.)	5 nm~ (in air atmosphere)
Vector measurement of DC magnetic field	×	○
Stroboscopic measurement of AC magnetic field	×	○

くなる真空雰囲気中 (探針振動の際の空気粘性が小さくなる) での計測においても, 空間分解能は 10 nm 程度に留まっている<sup>(1)</sup>. その主な理由は, 磁気力が大きく, かつ磁気力分布が急峻になる試料表面近傍での磁気力計測が汎用 MFM では困難であるからである. 試料表面近傍では, 表面近傍のファンデルワールス力等の近距離力が遠距離力である磁気力より大きくなるため, 汎用 MFM では, 磁気力が主となる探

2015年8月26日受理

\*\*秋田大学大学院工学資源学研究科附属理工学研究センター, Research Center for Engineering Science, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

針試料間距離まで探針を遠ざけて計測を行う必要がある。さらに汎用 MFM では、探針を遠ざけたとしても、磁気力の単独検出および磁気力のゼロ検出は、磁気力に近距離力が加わっているために困難である。

一方、A-MFM の測定対象は直流磁場および交流磁場である。A-MFM では試料表面近傍において磁気力のみを検出が可能であり、最近では先鋭な高分解能探針の開発により 5 nm 以下の空間分解能が大気雰囲気において得られている。また、磁気力の振幅情報に加えて位相情報も利用できるため、後に述べるように、直流磁場に関してはベクトル磁場計測が、交流磁場に関してはストロボ磁場計測が可能になる。

A-MFM の計測原理を述べる。強制振動しているカンチレバーの一端に形成されている磁性探針にカンチレバーの共振周波数と異なる非共振の交番磁気力を加えると、カンチレバー振動に周波数変調が発生する<sup>(2)</sup>。カンチレバーをその共振周波数  $\omega_0$  近傍で励振した場合には、カンチレバー振動の振幅は変化せず、カンチレバー振動の周波数のみが、加えられた交番力の周波数で時間変化する。したがって、交番磁気力によるカンチレバー振動の位相情報を利用した磁場計測が可能になる。なお、カンチレバー振動の振幅情報は、汎用の磁気力顕微鏡と同様に探針試料間距離を一定に保つように制御するのに利用できる。

MFM の磁性探針に、非共振の交番磁気力（角周波数  $\omega_m$ ）を印加すると、カンチレバーのバネ定数は実効的に変化し、カンチレバー先端の磁性探針の運動方程式は次式で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$m(d^2z(t)/dt^2) + m\gamma(dz(t)/dt) + (k_0 + \Delta k_0^m \cos(\omega_m t))z(t) = F_0 \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

ここで、 $m$  は探針の有効質量、 $\gamma$  は振動の減衰定数、 $k_0$  は探針固有のバネ定数、 $\Delta k_0^m$  は交番磁気力により周期的に変化する探針の実効的なバネ定数の振幅、 $\omega_m$  は交番磁気力の角周波数、 $F_0$  および  $\omega_0$  は探針に機械的に加える励振力の振幅および角周波数である。 $z$  方向は探針の振動方向であり、通常の NC-AFM では探針を観察する試料面に垂直方向に励振する。

探針の強制振動の運動方程式に、バネ定数が交番磁気力により見かけ上変化する項（ $\Delta k_0^m \cos(\omega_m t)$ ）が加わるところが、A-MFM の汎用 MFM との差異である。 $\Delta k_0^m$  が探針固有のバネ定数  $k_0$  と比較して小さな場合（ $\Delta k_0^m \ll k_0$ ）には、磁性探針の振動は次式で与えられ、探針振動に狭帯域の周波数変調が発生する<sup>(2)</sup>。 $z(t) = (F_0/(m\gamma\omega_0))\sin(\omega_0 t) + (\Delta k_0^m/(m\gamma\omega_0))\cos(\omega_m t)$

$$\cong (F_0/(m\gamma\omega_0))\sin(\omega_0 t) + (F_0/(m\gamma\omega_0))(\Delta k_0^m/(m\gamma\omega_0))(\cos[(\omega_0 + \omega_m)t] + \cos[(\omega_0 - \omega_m)t]) \quad (2)$$

空間分解能の向上に有効となる探針試料間距離が小さな領域では、磁性体探針の磁化が探針の長手方向に向いている場合に探針先端の磁極の寄与が大きくなる単磁極型で近似できる。このとき、磁性探針の振動方向である  $z$  方向に交流磁場  $H_z^{ac}$  を印加した場合の磁性探針の実効的バネ定数の時間変化  $\Delta k_m(t)$  の一般式は次式で与えられる。ここでは、カンチレバーのバネ定数は異方的であり、試料面に垂直方向の  $z$  方向のみに変形すると仮定している。また、試料面に垂直方向の直流磁場  $H_z^{dc}$  も考慮している。

$$\begin{aligned} \Delta k_m(t) &= \Delta(\partial F_m(t)/\partial z) \\ &\cong \partial/\partial z((q_{tip}^{dc} + q_{tip}^{ac} \cos(\omega_m t))(H_z^{dc} + H_z^{ac} \cos(\omega_m t))) \\ &= (q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{dc}/\partial z) + (q_{tip}^{ac}/2)(\partial H_z^{ac}/\partial z)) \\ &\quad + (q_{tip}^{ac}(\partial H_z^{dc}/\partial z) + q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}/\partial z))\cos(\omega_m t) \\ &\quad + (q_{tip}^{ac}/2)(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(2\omega_m t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $F_m(t)$  は探針に働く磁気力、 $q_{tip}^{dc}$  は  $H_z^{dc}$  により探針が磁化して探針先端に生じる直流磁極、 $q_{tip}^{ac}$  は  $H_z^{ac}$  により探針が磁化して探針先端に生じる交流磁極である。式(3)では探針の磁化が磁場に対して線形応答することを仮定している。

A-MFM では、1) 交流磁場計測用にハード磁性探針を、2) 直流磁場計測用にソフト磁性探針を用いる。これらの場合に対応する式(3)を以下に述べる。

## 2.1 ハード磁性探針を用いた交流磁場計測

保磁力が大きく角形比が 1 の理想的なハード磁性探針では探針磁極は以下の条件を満たす。

$$q_{tip}^{dc} \gg 1, q_{tip}^{ac} = 0 \quad \text{このとき式(3)の時間変化項は,} \\ \Delta k_m(t) = q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(\omega_m t) \quad (4)$$

となり、観察試料（ソフト磁性材料等）から発生する交流磁場勾配  $(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(\omega_m t)$  の計測が可能になる<sup>(2)-(6)</sup>。ハード磁性探針の磁化が交流磁場で変化する場合には、 $q_{tip}^{ac} \neq 0$  となり、 $\Delta k_m(t)$  に  $(q_{tip}^{ac}/2)(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(2\omega_m t)$  成分が加わる。ハード磁性探針のハード磁気特性が交流磁場の計測に際し十分であるかどうかは、 $\cos(2\omega_m t)$  成分を変調源とした周波数変調が小さいかどうかにより判断することができる。

## 2.2 ソフト磁性探針を用いた直流磁場計測

ソフト磁性探針に空間的に一様な交流磁場を外部から印加して探針先端の磁極を  $q_{tip}^{ac} \cos(\omega_m t)$  のように周期的に変化させる。観察試料をこの交流磁場により磁化が変化しないハード磁性材料とすると、観察

試料からは交流磁場が発生せず、外部から印加する交流磁場は空間的に一様であるので、 $(\partial H_z^{ac}/\partial z) \ll 1$  となり、式(3)の時間変化項は、

$$\Delta k_m(t) \cong q_{tip}^{ac} (\partial H_z^{dc} / \partial z) \cos(\omega_m t) \quad (5)$$

となるので、ハード磁性材料から発生する直流磁場勾配  $(\partial H_z^{dc} / \partial z)$  の計測が可能になる<sup>(7)-(9)</sup>。

さらに、A-MFM の汎用 MFM と大きく異なる特徴として、汎用 MFM が磁気力の変化に伴うスカラー信号である探針振動の変化量（共振周波数、振動振幅、振動位相）を検出するのに対して、A-MFM では、交番磁気力により誘起される周波数変調信号を周波数復調後にロックイン検出したベクトル信号（周波数復調信号の振幅  $R$  および位相  $\theta$ 、またはロックインの参照信号に対する同相成分  $X$  および直交成分  $Y$ ）を検出する。ここでベクトル信号間の関係は、 $R e^{i\theta} = X + i Y$  で与えられる。

A-MFM ではこのベクトル信号に着目することにより、3) 交流磁場計測ではストロボ磁場計測<sup>(6)</sup>が、4) 直流磁場計測ではベクトル磁場計測<sup>(10)</sup>が実現できる。

### 2.3 交流磁場のストロボ磁場計測

磁気記録ヘッド等において、交流電流  $I_0 \cos(\omega_m t)$  を励磁コイルに印加して、試料を構成する強磁性体から交流磁場を発生させている場合、試料の磁化は時間変化している。交流磁場が試料の磁化の回転磁化成分により発生している場合、回転磁化は交流電流と位相が同一の同相磁化成分、 $M_0 \cos(\omega_m t)$  と、位相が  $90^\circ$  異なる直交磁化成分、 $M_0 \sin(\omega_m t)$  をもつので、これらの磁化成分が発生する交流磁場の位相は  $90^\circ$  異なる。したがって式(3)の時間変化項は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta k_m(t) &= q_{tip}^{dc} (\partial H_z^{ac} (M_0 \cos(\omega_m t)) / \partial z) \\ &\quad + \partial H_z^{ac} (M_0 \sin(\omega_m t)) / \partial z) \\ &= q_{tip}^{dc} \cos(\omega_m t) (\partial H_z^{ac} (M_z) / \partial z) \\ &\quad + q_{tip}^{dc} \sin(\omega_m t) (\partial H_z^{ac} (M_x) / \partial z) \end{aligned} \quad (6)$$

ロックインアンプを用いてこれらの磁化成分から発生する交流磁場勾配を抽出し、一定間隔で位相を変化させることで、試料磁化から発生する交流磁場勾配の空間分布の時間変化に係わるストロボ磁場計測が可能になる<sup>(6)</sup>。

### 2.4 直流磁場のベクトル磁場計測

2.2 節ではソフト磁性探針を、探針先端の磁極密度が変化する単磁極型探針として扱ったが、ここでは

近似を高め、ソフト磁性探針を、探針の磁化が外部からの一様な交流磁場により回転する双磁極型探針として定式化する。この場合、探針の磁化は同方向の磁場の勾配を検出するので、実効バネ定数の時間変化項は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta k_m(t) &= M_z^{ac} (tip) \cos(\omega_m t) (\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2) \\ &\quad + M_x^{ac} (tip) \sin(\omega_m t) (\partial^2 H_x^{dc} / \partial z^2) \\ &\cong q_{tip}^{ac} \cos(\omega_m t) (\partial H_z^{dc} / \partial z) \\ &\quad + M_x^{ac} (tip) \sin(\omega_m t) (\partial^2 H_x^{dc} / \partial z^2) \end{aligned} \quad (7)$$

したがって、 $\Delta k_m(t)$  は外部からの交流磁場源に対して、位相が同一の同相磁化成分である  $(\partial H_z^{dc} / \partial z)$  を含む第1項と、位相が  $90^\circ$  異なる直交磁化成分である  $(\partial^2 H_x^{dc} / \partial z^2)$  を含む第2項をもつ。ロックインアンプを用いてこれらの成分を抽出することでベクトル磁場計測が可能になる。さらにこれら成分の位相を調節することで、試料面から任意の角度をもつ計測軸に対しての直流磁場勾配の計測が可能になる<sup>(10)</sup>。

## 3. 計測原理システム

A-MFM の交流磁場および直流磁場に対する計測システムの一例を、各々、Fig.1, Fig.2 に模式図で示す。磁性探針に非共振の交番磁気力を発生させるのに、探針に非共振の交流磁場（角周波数  $\omega_m$ ）を加えることは共通である。Fig.1 の交流磁場計測の場合、試料からの交流磁場が、ハード探針先端の直流磁極に加わることで角周波数  $\omega_m$  の交番磁気力が発生する<sup>(2)</sup>。Fig.2 の直流磁場計測の場合、外部からの交流磁場が、ソフト磁性探針の磁化を変化させ、試料からの直流磁場と相互作用して角周波数  $\omega_m$  の交番磁気力が発生する<sup>(7)</sup>。ここでは、観察試料は、探針に印加する交流磁場により磁化状態が変化しないものを用いる。これらの磁性探針に加わる交番磁気力が探針振動に周波数変調を生み出す。フォトディテクタ

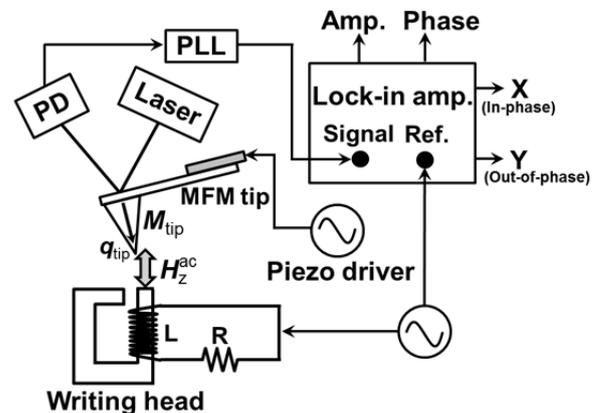


Fig.1 Schematic diagram of A-MFM for measuring AC magnetic field gradient.

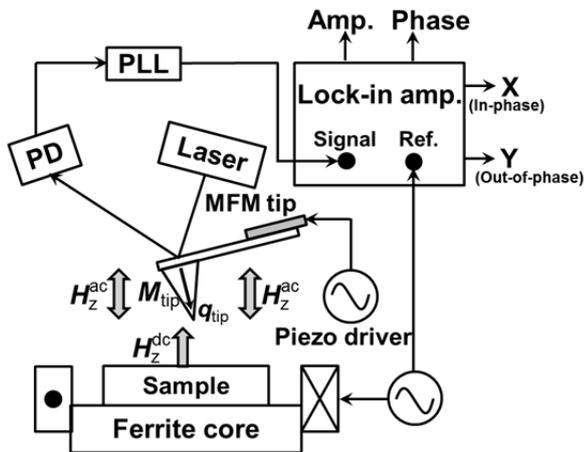


Fig.2 Schematic diagram of A-MFM for measuring DC magnetic field gradient.

で検出した探針振動の周波数変調信号を、位相同期ループ回路 (PLL) により周波数復調し、ロックインアンプを用いて、参照信号を交流磁場源の出力信号にとりロックイン検出する。画像化信号は、先に述べた周波数復調信号の振幅  $R$ 、位相  $\theta$ 、または参照信号に対する同相成分  $X$ 、直交成分  $Y$  から適宜選択することができる。

#### 4. 磁性材料・磁気デバイスへの応用

Fig. 3 に、垂直磁気記録用の高磁場収束型磁気記録ヘッドの交流磁場を A-MFM を用いて観察した、(a) 表面形状像、(b) 交流磁場の振幅像、(c) 交流磁場の位相像、ならびにそれらのラインプロファイル [(d), (e), (f)], (g) 交流磁場の振幅像のラインプロファイルの空間スペクトラム、を示す。交流磁場像の観察時の探針試料間距離は  $2 \sim 3$  nm である。磁気記録ヘッドに流す交流電流は 80 mA、周波数は 211 Hz とした。観察雰囲気は大気中である。観察には自作した FePt-MgO 系ハード磁性探針 (磁性膜厚 15 nm) を用いた。観察前にハード磁性探針の磁化が試料面に垂直になるように探針を着磁し、磁場の計測方向を試料面に垂直方向とした。

図(a)の表面形状像の中央に見られる三角形の部分が磁気記録ヘッドの主磁極であり、内部に埋め込まれた薄膜コイルに交流電流を流すことにより強い交流磁場が発生する。主磁極の表面から発生した交流磁場は、ギャップを通過してトレーリングシールの表面に吸い込まれる。交流磁場は主磁極とトレーリングシールで試料面に垂直な成分 (垂直磁場成分) を持ち、ギャップ部分で垂直磁場成分はゼロとなり、試料面に平行で主磁極とトレーリングシールを結ぶ方向の成分 (面内磁場成分) のみとなる。

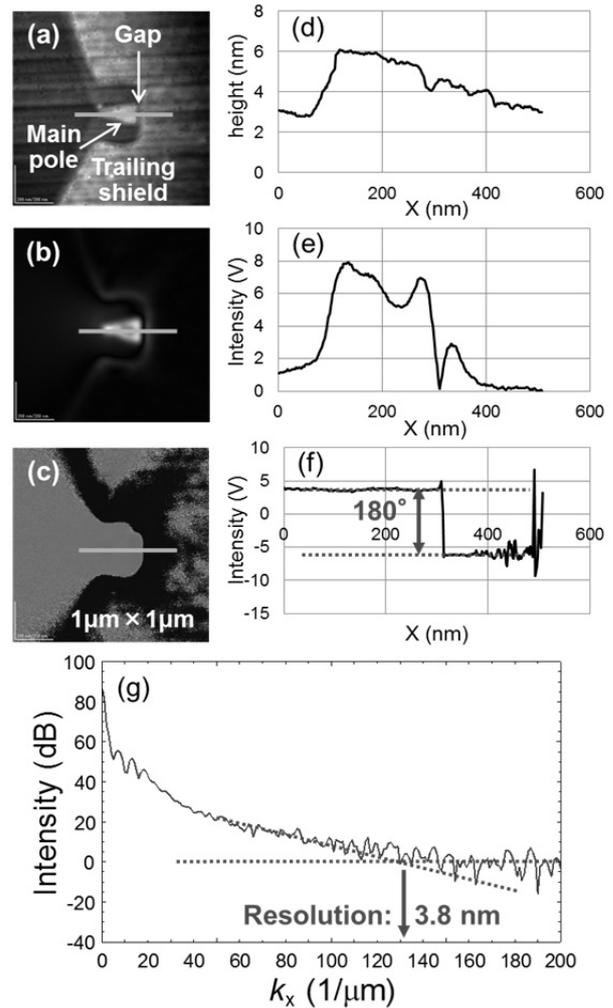


Fig. 3 A-MFM images of AC magnetic field gradient [(a), (b) and (c)] and their line profiles [(d), (e) and (f)], the spectrum of AC magnetic field gradient for a magnetic writing head [(g)].

図(b)の交流磁場の振幅像およびそのラインプロファイル (図(e)) に見るように、垂直磁場成分はゼロ信号のギャップを隔てて主磁極とトレーリングシールで極大値をとり、ギャップ近傍でゼロとなっている様子が明瞭に観察されている。また、主磁極で垂直磁場成分の強度が最大になっている。

図(c)の交流磁場の位相像およびそのラインプロファイル (図(f)) に見るように、位相像は明瞭な明暗の2値画像となっており、位相の値がギャップ部で  $180^\circ$  変化していることがわかる。この位相の変化は垂直磁場成分の極性の変化を示しており、次式に対応している。

$$\begin{aligned} \Delta k_m(t) &= q_{tip}^{dc} (\partial(-H_z^{ac}) / \partial z) \cos(\omega_m t) \\ &= q_{tip}^{dc} (\partial H_z^{ac} / \partial z) \cos(\omega_m t \pm \pi) \end{aligned} \quad (8)$$

空間分解能を、図(g)の空間スペクトラムを用いて、磁気力信号がホワイトノイズレベルと等しくなる

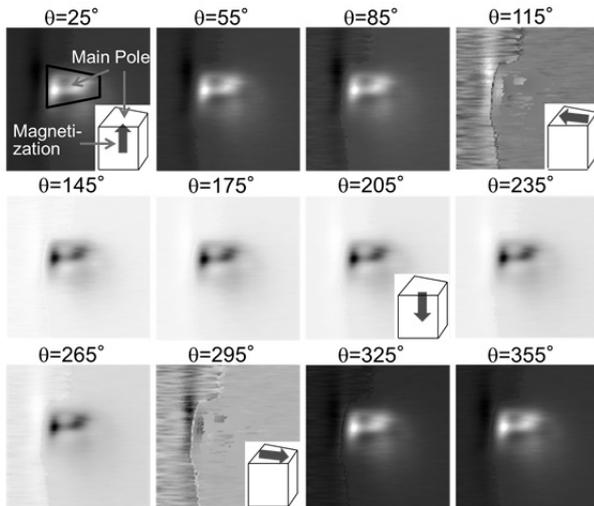


Fig. 4 Stroboscopic images of AC magnetic field gradient from a magnetic writing head using A-MFM.

( $S/N=1$ ) 波数に対応する波長の半値と定義して求めると 5 nm 弱と、汎用の MFM での 10 nm 以上と比較して大幅に向上した値が得られた。ここで、高い空間分解能の実現には、15 nm 以下の膜厚で 15 kOe 以上の保磁力を有する FePt-MgO グラニューラー合金薄膜を均一に極薄形成した探針を用いることが効果的であった。

Fig. 4 に、汎用型の磁気記録ヘッドにおける、A-MFM による交流磁場のストロボ磁場計測画像を示す<sup>(6)</sup>。試料面に垂直方向の磁場を、試料面に垂直方向の磁化を持つように着磁した FePt ハード磁性探針を用いて大気雰囲気中で計測している。交流磁場像に対して、磁気ヘッドの励磁電源との間の位相をロックインアンプで調整することで、交流磁場の 1 周期の間の時間変化をストロボ的に観察することができる。磁場の発生源である主磁極部分（ヘッド表面に現れる台形部分が断面方向に奥行きをもつ）では、励磁電流により磁化が 1 回転するのに伴う磁場変化が観察される。主磁極磁化が試料面に垂直のときには、主磁極面から磁場が発生し、主磁極の側面からは磁場が発生していないのに対して、主磁極磁化が試料面に平行のときには、逆に主磁極の側面から磁場が発生し、主磁極面からは磁場は発生していない。磁気記録ヘッドでは、磁気異方性付与による磁化の回転軸方向の制御が重要であり、この評価には、ストロボ磁場計測が有効と考えられる。

Fig. 5 に、NiFe ソフト磁性探針 (NiFe 膜厚 30 nm) を用いた A-MFM により大気雰囲気中で観察した、垂直磁気記録媒体 (線記録密度 200 kfc/i, 記録ビット長 125 nm) の直流磁場の (a) 強度像, (b) 極性像, および (c)

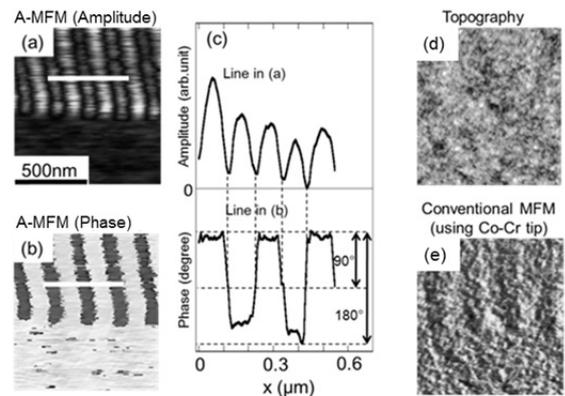


Fig. 5 A-MFM images of DC magnetic field gradient [(a), (b)] and (c) their line profiles, (d) topographic and (e) conventional MFM images for a perpendicular magnetic recording medium.

それらのラインプロファイルを示す。同時に図には比較のため真空雰囲気型の汎用 MFM を用いて観察した表面形状像 (d), および A-MFM と同様の探針試料間距離において観察した磁気像 (e) を示す<sup>(8)</sup>。

図 (a) の強度像 (ロックインアンプの振幅出力像) およびそのラインプロファイル (図 (c)) では、記録ビットの境界部で信号強度がゼロに近づいていることがわかる。垂直磁気記録媒体の記録ビットの境界部では試料面に垂直な磁場 (垂直磁場) がゼロで、試料面に平行で隣接する記録ビットに向かう磁場 (面内磁場) が最大となることを考慮すると、直流磁場強度像においては垂直磁場が計測されていることがわかる。図 (c) の極性像 (ロックインアンプの位相出力像) およびそのラインプロファイル (図 (d)) では、明暗の 2 値画像となっている極性像の明部と暗部の位相差は 180° 程度であり、垂直磁場の極性が記録ビットの境界部を隔てて反転していることが明瞭に観察される。この極性の変化は次式で説明できる。

$$\begin{aligned} \Delta k_m(t) &= q_{tip}^{ac} (\partial(-H_z^{dc}) / \partial z) \cos(\omega_m t) \\ &= q_{tip}^{ac} (\partial H_z^{dc} / \partial z) \cos(\omega_m t \pm \pi) \end{aligned} \quad (9)$$

一方、図 (e) の汎用 MFM を用いて、A-MFM と同様の探針試料間距離で観察した磁気像では、記録ビットによる磁気コントラストに、図 (d) の表面形状情報が重畳しており、A-MFM において空間分解能の向上に有効となる試料表面近傍では、汎用 MFM では磁場計測が困難であることがわかる。

Fig. 6 に、A-MFM を用いて大気雰囲気中で観察した、高密度垂直磁気記録媒体 (線記録密度 500 kfc/i, 記録ビット長 50.8 nm) の、(a) 垂直磁場像 (ロックインアンプの参照信号に対する同相成分  $X$  の像), (b) 表面形状像, (c) 記録ビット部分のラインプロファイル,

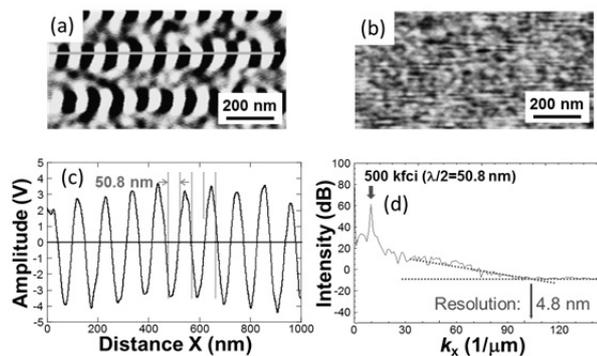


Fig.6 (a) A-MFM image of DC magnetic field gradient, (c) its line profiles, (b) topographic image, (d) the spectrum of DC magnetic field gradient for a perpendicular magnetic recording medium.

および(d)そのラインプロファイルから求めた空間スペクトラムを示す<sup>(9)</sup>.

観察には自作した FeCoSiB 非晶質ソフト磁性探針 (磁性膜厚 25 nm) を用いた. 探針試料間距離は 2~3 nm である. 外部より探針に印加した交流磁場の強度は 300 Oe, 周波数は 89 Hz とした.

図(d)の空間スペクトラムから磁場信号とノイズ強度が等しくなる波長の半値より空間分解能を求めると, 5 nm 弱の高い空間分解能が得られた. 高い空間分解能の実現には, 高い飽和磁束密度を有する FeCoSiB 非晶質合金薄膜を均一に極薄成膜した探針を用いることが有効であった. A-MFM は磁場のゼロ検出ができるので, 垂直磁場像のラインプロファイルは, 磁場のゼロレベルを有しており, 同時に磁場の符号の正負は試料面に垂直方向に対して, 磁場の上向きあるいは下向きを示している. A-MFM は, 高い空間分解能に加えて, 磁場極性ならびに磁場の発生源である表面磁極の極性の検出も可能である.

Fig. 7 に, A-MFM を用いて観察した高密度磁気記録媒体のベクトル磁場計測像を示す<sup>(10)</sup>. 観察には自作した Ni-Fe ソフト磁性探針 (NiFe 膜厚 30 nm) を用いた. A-MFM で得られた直流磁場像に対して, ソフト磁性探針を励磁している交流電源との間の位相をロックインアンプを用いて調整することにより直流磁場の計測軸を試料面に垂直方向から任意の角度に調整することができる. 図の角度  $\theta$  は位相調整角である. 計測軸方向を変化させることにより, 試料面に垂直方向の磁場 ( $\theta=4.5^\circ, 184.5^\circ$ ) や, 試料面に平行方向の磁場 ( $\theta=94.5^\circ, 274.5^\circ$ ) 等の任意の角度をなす計測軸方向で磁場計測が可能になる. ここで磁場の計測軸は, 記録ビット中央の磁場が垂直磁場成分のみとなる位置で, 位相を変化させたときに信号が符号を変える際にゼロを通過する位相角を, 磁場の計測

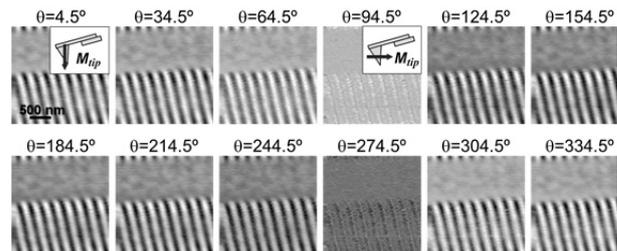


Fig.7 A-MFM images of DC magnetic field gradient for a perpendicular magnetic recording medium by rotating the measuring axis.

軸が試料面に平行方向であるとして定めた. ベクトル磁場計測手法は, 試料から発生する直流磁場の方向を検出するうえで有用な手法と考えられる.

## 5. まとめ

汎用の磁気力顕微鏡 (MFM) で困難であった技術課題を解決し, 空間分解能を向上させるとともに機能を追加した, “交番磁気力顕微鏡” とその磁性材料・磁気デバイスへの応用例を紹介した. 本顕微鏡は磁性材料・磁気デバイスの微細磁区構造の解析に有用となるものと期待している.

## 謝辞

本研究は, (株)日立ハイテクサイエンス, 日東光器(株), 秋田県産業技術センター, および秋田大学の吉村哲・准教授, 木下幸則・助教, 江川元太・技術職員, 研究グループの博士研究員, 学生諸氏との共同研究の成果である. 本研究は(独)科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発プログラムの支援を受けた. ここに関係の方々に深謝する.

## 参考文献

- (1) 石尾俊二, 齊藤準, 山岡武博: 磁気イメージングハンドブック (第4章 磁気力顕微鏡), (日本磁気学会編), (共立出版), 95-130 (2010).
- (2) H. Saito, H. Ikeya, G. Egawa, S. Ishio, and S. Yoshimura, *Journal of Applied Physics*, **105**, 07D524 (2009).
- (3) W. Lu, Z. Li, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and H. Saito, *Applied Physics Letters*, **96**, 143104 (2010).
- (4) H. Saito, W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa, and S. Yoshimura, *Journal of Applied Physics*, **107**, 09D309 (2010).
- (5) W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and

- H. Saito, *IEEE Transactions on Magnetics*, **46**, 1479-1482 (2010).
- (6) Z. Li, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and H. Saito, *Applied Physics Letters*, **100**, 222405 (2012).
- (7) H. Saito, R. Ito, G. Egawa, Z. Li, and S. Yoshimura, *Journal of Applied Physics*, **109**, 07E330 (2011).
- (8) H. Saito, R. Ito, Z. Li, G. Egawa, and S. Yoshimura, *The International Magnetism Conference (Intermag 2012)*, AF-02 (2012).
- (9) S. R. Kapa, S. Okayasu, H. Qi, F. Zheng, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura, and H. Saito, *The International Conference on Magnetism (ICM 2015)*, MO.E.2\_O4 (2015).
- (10) H. Saito, Z. Li, R. Ito, G. Egawa, and S. Yoshimura, *The 56th Conference of Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2011)*, DG-04 (2011)