

磁気力顕微鏡

Magnetic Force Microscopy

齊 藤 準

Hitoshi Saito

秋田大学大学院理工学研究科

要 旨 磁場の勾配を検出する磁気力顕微鏡 (MFM) は、数 10 nm 程度の空間分解能を有し、観察試料に特別な調整が不要であることから、磁性材料や磁気デバイスの研究開発の現場で磁区観察の汎用ツールとして広く用いられている。近年、空間分解能や機能性の向上が強く求められている。このため、筆者らは従来の MFM の性能を大幅に向上させた交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を新たに開発した。A-MFM は非共振の交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調を利用する。A-MFM では、1) 試料表面近傍での磁場検出を実現することで、磁気記録ヘッドの交流磁場計測や高密度磁気記録媒体の直流磁場計測において、空間分解能 5 nm を可能にし、2) 磁場のベクトル計測、ストロボ計測を磁場の位相情報処理により可能にし、併せて試料磁極 (N 極, S 極) の極性の直接検出を可能にした。本稿では、MFM における最近の進展について報告する。

キーワード：磁気力顕微鏡、磁場イメージング、磁気記録ヘッド、磁気記録媒体、永久磁石

1. はじめに

磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscopy; MFM) は、尖った探針をプローブに用いて試料表面等を走査し探針試料間の相互作用を画像化する走査プローブ顕微鏡の中で、力勾配を検出する非接触原子間力顕微鏡 (Non-Contact Atomic Force Microscopy; NC-AFM) の一形態であり、磁場を発生する観察試料に対して磁性体の探針を用いることにより、試料と探針の間に働く磁気力を利用して磁気イメージングを行う顕微鏡である¹⁻³⁾。MFM が検出する磁場は遠距離力であるので、試料の表面が保護膜等の非磁性体で覆われていても観察でき、試料に特別な調整を要せずに非破壊で観察できることから、磁性材料や磁気デバイスの磁区観察に広く用いられている。一般的な汎用の MFM では近距離力であるファンデルワールス力などの表面力が主となる探針試料間距離で表面凹凸情報を取得した後に、探針試料間距離を増加させて磁気力が表面力より大きくなる領域で磁場勾配を計測している。MFM はこれまで直流磁場の計測に主に用いられており、空間分解能は 10 nm 程度であるが、近年の磁性材料や磁気デバイス等の進展によりさらに高い空間分解能が求められている。

MFM を磁気イメージングに用いられる他の走査プローブ顕微鏡であるスピン偏極走査トンネル顕微鏡 (SP-STM)、走

査ホール素子顕微鏡、SQUID 顕微鏡と比較すると、試料と探針間のトンネル現象で遷移する電子のスピンを検出する SP-STM は、試料の最表面の磁性原子のスピンの方向や大きさの変化を原子オーダーの高い空間分解能で観察できる特徴がある⁴⁾。ただし清浄表面が必要であるので超高真空雰囲気が必要となる。探針としてホール効果素子を用いる走査ホール素子顕微鏡や、SQUID 素子を用いる SQUID 顕微鏡は、磁場を画像化する顕微鏡であり MFM が検出する磁場勾配と比較して測定する物理量の定量性に優れる特徴がある。空間分解能は検出素子の寸法に依存し、走査ホール素子顕微鏡では空間分解能として、50 nm 程度の値が得られている⁴⁾。

MFM の空間分解能の向上には、探針試料間距離を減少させ、試料表面近傍で磁場のみを計測することが有効である。著者らは近年、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 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) を開発し、空間分解能および機能性を大幅に向上させることに成功している⁵⁾。本稿では A-MFM を汎用 MFM と比較し、向上した顕微鏡性能や新たに付加された機能性について紹介する。

2. 交番磁気力顕微鏡による顕微鏡性能の向上

A-MFM と汎用 MFM との装置構成上の違いは、A-MFM には探針に交番磁気力を印加するための交流磁場源が付加されていることにある。交番磁気力を探針試料間の磁氣的相互作用を利用して磁性探針に加える。A-MFM では、強制振動させた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

〒010-8502 秋田市手形学園町1-1 秋田大学大学院理工学研究科
附属理工学研究センター

TEL: 018-889-2455; FAX: 018-837-0409

E-mail: hsaito@gipc.akita-u.ac.jp

2017年9月7日受付、2017年11月10日受理

ことにより、カンチレバーの振動に発生する周波数変調(FM)現象を利用する⁶⁾。カンチレバーをその共振周波数近傍で強制振動させた場合には、カンチレバー振動の振幅は変化せず、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。ここでFMのキャリアは探針の強制振動であり、FMの信号は非共振の交番磁気力である。カンチレバー振動の周波数変調信号を周波数復調した後、ロックインアンプで同期検波することにより、試料表面近傍の磁気力が表面力と比較して小さな領域においても磁気力のみ抽出ができるので、磁場の単独検出が可能になる。また、非共振の交番磁気力がない場合にはカンチレバー振動に周波数変調は発生しないので、磁場のゼロ検出も可能になる。

表1に、A-MFMと汎用MFMとの性能比較を示す。汎用MFMの測定対象は主に直流磁場である。汎用MFMでは、計測感度が高くなる真空雰囲気中(探針振動の際の空気粘性

表1 汎用の磁気力顕微鏡と交番磁気力顕微鏡の性能比較

	Conventional MFM (従来の磁気力顕微鏡)	Alternating MFM (交番磁気力顕微鏡)
Measuring Object (計測対象)	Mainly DC magnetic field (主に直流磁場)	DC magnetic field (by soft magnetic tip) AC magnetic field (by hard magnetic tip) (直流磁場) (ソフト磁性探針を使用) (交流磁場) (ハード磁性探針を使用)
Detecting signal (検出信号)	Change of tip oscillation by magnetic force (磁気力による探針振動の 変化) 【Scalar Signal】 (Resonant frequency shift, Amplitude or phase change of tip oscillation) (スカラー信号) (共振周波数変化、 振幅変化、位相変化)	Frequency modulation by non-resonant alternating magnetic force (非共振の交番磁気力による探 針振動の周波数変調信号) 【Vector Signal】 (Intensity & phase of frequency modulation, In-phase & quadrature signal) (ベクトル信号) (周波数変調の強度&位相、 交番磁気力源に対する同相 &直交信号)
Detection of only magnetic field (磁場の単独検出)	×	○
Polarity & zero detection (磁場の極性検出 &ゼロ検出)	×	○
Magnetic measurement near sample surface (磁場の試料表面 近傍での検出)	×	○
Spatial resolution (空間分解能)	10 nm~ (necessary for vacuum atmosphere) (真空雰囲気が必要)	5 nm~ (Air atmosphere is OK) (大気雰囲気でもよい)
Vector measurement of DC magnetic field (直流磁場の ベクトル検出)	×	○
Stroboscopic measurement of AC magnetic field (交流磁場の ストロボ計測)	×	○

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¹⁻³⁾。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残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。

A-MFMの計測原理は以下のように定式化できる。MFMの磁性探針に、非共振の交番磁気力(角周波数 ω_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⁶⁾。

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

ここで、 m は探針の有効質量、 γ は振動の減衰定数、 k_0 は探針固有のバネ定数、 Δk_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、 ω_m は交番磁気力の角周波数、 F_0 および ω_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。 Δk_0^m は探針固有のバネ定数 k_0 と比較して非常に小さいので($\Delta k_0^m \ll k_0$)、探針振動に狭帯域の周波数変調が発生する⁶⁾。

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

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な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。

$$\Delta k_m(t) \cong M_z^{ac} (\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2) \cos(\omega_m t) \quad (6)$$

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

ここで、 $F_m(t)$ は探針に働く磁気力、 q_{tip}^{dc} は H_z^{dc} 下での探針先端の直流磁極、 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あるいは超常磁性探針を用いる。

1) の交流磁場計測用のハード磁性探針については、探針磁化が磁場により変化しない場合、 $q_{tip}^{ac} = 0$ で q_{tip}^{dc} のみとなるので、式 (3) 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⁷⁻⁹⁾。ハード磁性探針の磁気特性が不十分な場合に探針磁化の一部が交流磁場により変化すると、 $q_{tip}^{ac} \neq 0$ 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、 $\cos(2\omega_m t)$ 成分による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) の直流磁場計測用のソフト磁性探針については、ソフト磁性探針に、空間的に一様な交流磁場を外部から磁性探針の振動方向である z 方向に印加して、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。観察試料がこの交流磁場により磁化が変化しないハード磁性材料である場合、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) は、

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

となり、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¹⁰⁻¹²⁾。

ここで、永久磁石材料のように観察試料からの直流磁場が大きな場合には、ソフト磁性探針では探針磁化が飽和し、外部からの交流磁場に探針磁化が追従しなくなる。この場合には、磁気飽和がなく磁化が常磁性体より大きな超常磁性探針を用いることができる。超常磁性探針は磁場を印加した方向のみに磁気モーメントを持ち、探針に交流磁場を磁性探針の振動方向である z 方向に印加した際に発生する磁気モーメントを $M_z^{ac} \cos(\omega_m t)$ とした場合、式 (3) は、

となり、直流磁場の計測方向が、探針に印加する交流磁場の方向と一致した高精度の磁場計測が可能になる¹³⁾。

さらに、A-MFM が汎用 MFM と大きく異なる特徴として、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 θ 、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、 $Re^{i\theta} = X + iY$ で与えられる。A-MFM ではこのベクトル信号の 1 周期内の時間変化をロックインの参照信号の位相を変化させて計測することにより、3) 交流磁場計測ではストロボ磁場計測¹⁴⁾ が、4) ソフト磁性探針を用いた直流磁場計測ではベクトル磁場計測^{15,16)} が実現できる。

3. 磁性材料・磁気デバイスの観察例

ここでは、近年の磁性材料、磁気デバイスについて、産業界からの要望を背景として A-MFM を用いて観察した事例を紹介する。図 1 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、表面形状像 (a)、交流磁場の振幅像 (b)、交流磁場の位相像 (c)、ならびにそれらのラインプロファイル (d, e)、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 (f) を示す。

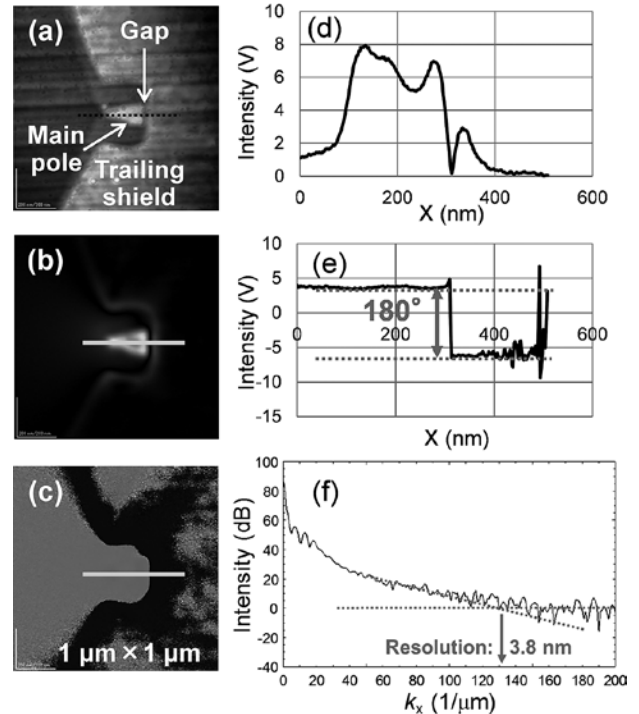


図 1 A-MFM を用いて観察した、磁気記録ヘッドの表面形状像 (a)、交流磁場の振幅像 (b)、交流磁場の位相像 (c)、交流磁場の振幅像と位相像のラインプロファイル (d, e)、および交流磁場の振幅像のラインプロファイルの空間スペクトラム (f)。

交流磁場像の観察時の探針試料間距離は2～3 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1 (a) の表面形状像の中央に見られる三角形の部分に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ド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ド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ドを結ぶ方向の成分（面内磁場成分）のみとなる。

図1 (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1 (d)）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ドで極大値をとり、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1 (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1 (e)）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°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上向き/下向きの極性の変化を示している。

図1 (f) 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（S/N = 1）波数に対応する波長の半値と定義して求めた空間分解能は4 nm弱となり、10 nm以上の汎用のMFMと比較して大幅に向上した。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以上の高保磁力を有する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。

磁気記録ヘッドにおいては、磁気記録媒体への書き込み性能を向上させるためにヘッドギャップ部分で急峻な磁場変化を得ることが重要になるので計算機シミュレーションを用いた設計が行われているが、磁気記録ヘッドの磁場分布を観察するのはこれまで容易ではなかった。本手法は磁気記録ヘッドに特別な前処理を施すことなく、磁場分布を画像化できるので磁気ヘッドの設計に有用となる。

図2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）(a)、表面形状像 (b)、記録ビット部分のラインプロファイル (c)、およびその空間スペクトラム (d) を示す¹¹⁾。観察には自作したFeCoSiB系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2 (d) の空間スペクトラムから磁場信号とノイズ

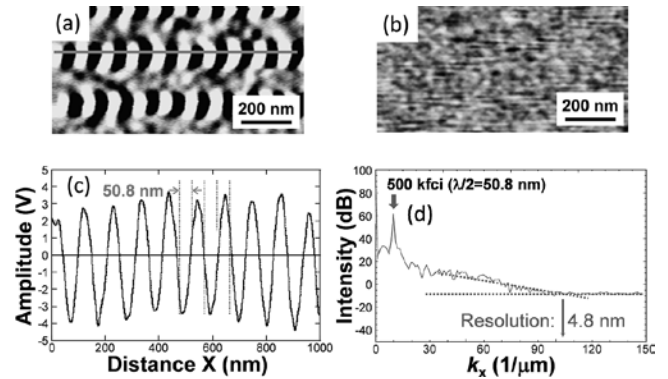


図2 A-MFMを用いて観察した、垂直磁気記録媒体の直流磁場像 (a)、表面形状像 (b)、記録ビット部分の直流磁場像のラインプロファイル (c)、およびその空間スペクトラム (d)。

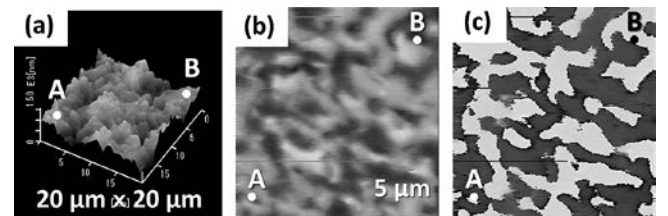


図3 A-MFMを用いて観察した、Srフェライト異方性焼結磁石のc面での破断面の消磁状態における表面凹凸像 (a)、直流磁場像 (b) および直流磁場の極性像 (c)。

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。

磁気記録媒体においては、高密度の記録ビットの磁区観察及び、ノイズ低減の観点からは記録ビットを構成する非磁性粒界層で囲まれた5 nm程度の磁性結晶粒の磁化状態を把握することが重要となる。本手法は高い空間分解能で磁性結晶粒の磁気的な結合を評価できるので、高密度磁気記録媒体の開発に有用となる。

図3に、A-MFMを用いて観察した、結晶粒径が1 μm程度のSrフェライト異方性焼結磁石のc面での破断面の消磁状態における表面凹凸像 (a)、計測磁場方向が紙面に垂直方向の直流磁場像（ロックインアンプの同相信号Xの像）(b) および直流磁場の極性像（ロックインアンプの位相信号θの像）(c) を示す¹³⁾。観察には、FeCo-Al₂O₃系超常磁性探針を用いた。ここでは交流磁場を試料ステージに垂直方向に印加して、直上の超常磁性探針を励磁しており、超常磁性探針の周期的に時間変化する磁化は交流磁場方向のみに成分をもつ

ので、探針に印加する交流磁場と同方向の試料からの直流磁場を計測できる。表面の凹凸は約 $1.5\ \mu\text{m}$ であり、A-MFM では表面の結晶粒を反映した明瞭な磁区構造が図 3 (b) の直流磁場像で観察され、図 3 (c) の直流磁場の極性像では垂直磁場の上向き/下向き (表面磁極の極性) を位相角が 180° 異なる 2 値画像として明瞭に識別できる。明部と暗部の境界線は、図 3 (b) の直流磁場像での強度がゼロである箇所に対応しており、表面凹凸が大きいにもかかわらず、磁区構造が明瞭に観察できることがわかる。この理由は、超常磁性探針が磁場の計測方向である探針の真下からの垂直磁場を主に捉えているためと推察される。なお汎用 MFM では、ハード磁性探針を用いても磁気コントラストから磁区構造を特定することは困難であった。

最近、希土類磁石においては、磁区観察にこれまで用いられてきた表面平滑な機械研磨面では、磁石内部と比較して弱い磁場で磁化反転が起こり、粒界破断面では磁化反転が内部と同様の磁場で発生することが、放射光を用いた走査型軟 X 線 MCD 顕微鏡の観察より報告されている¹⁷⁾。したがって本手法は今後、永久磁石で重要となる粒界破断面での磁区観察に有用となると考えられる。

4. まとめ

本稿では、筆者らが産業界からのニーズを背景として開発した高い空間分解能を有し、機能性に優れた交番磁気力顕微鏡とその磁性材料や磁気デバイスへの応用例について紹介した。今後の方向性として、さらなる空間分解能、時間分解能、機能性の向上がますます重要となると考えられる。磁気力顕微鏡は、これらの新たな技術を開発・発展させることにより、磁性材料の解析ツールとしてますます有用となるものと考えている。

謝 辞

本稿の中で紹介した交番磁気力顕微鏡に係わる研究は、(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 (H23-H26) の支援の下、秋田大学、(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、他との共同研究の成果である。また、情報ストレージ技術推

進機構の委託研究の助成の成果である。フェライト磁石は日立金属 (株) 様からご提供いただいた。ここに関係の方々へ深謝する。

文 献

- 1) 石尾俊二, 齊藤 準, 山岡武博: 日本磁気学会編 磁気イメージングハンドブック 第 4 章 磁気力顕微鏡, 共立出版, 東京, 95-130 (2010)
- 2) Thiaville, A., Miltat, J. and Garcia, J.M.: In Hopster, H. and Oepen H.P. (Eds.), *Magnetic Microscopy of Nanostructures*, Springer, Berlin 225-250 (2005)
- 3) Abelmann, L., vanden Bos, A. and Lodder, C.: in Hopster, H. and Oepen H.P. (Eds.), *Magnetic Microscopy of Nanostructures*, Springer, Berlin 253-283 (2005)
- 4) 二本正昭: 日本磁気学会 (編) 磁気便覧 4.5 磁気イメージング, 丸善出版, 東京, 545-566 (2016)
- 5) Saito, H.: *Magnetics Jpn.*, 11, 214-220 (2016)
- 6) Saito, H., Ikeya, H., Egawa, G., Ishio, S. and Yoshimura, S.: *Journal of Applied Physics*, 105, 07D524 (2009)
- 7) Lu, W., Li, Z., Hatakeyama, K., Egawa, G., Yoshimura, S. and Saito, H.: *Applied Physics Letters*, 96, 143104 (2010)
- 8) Saito, H., Lu, W., Hatakeyama, K., Egawa, G. and Yoshimura, S.: *Journal of Applied Physics*, 107, 09D309 (2010)
- 9) Lu, W., Hatakeyama, K., Egawa, G., Yoshimura, S. and Saito, H.: *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 1479-1482 (2010)
- 10) Saito, H., Ito, R., Egawa, G., Li, Z. and Yoshimura, S.: *Journal of Applied Physics*, 109, 07E330 (2011)
- 11) Saito, H., Ito, R., Li, Z., Egawa, G. and Yoshimura, S.: Abstracts of InterMag 2012, AF-02 (2012)
- 12) Kapa, S.R., Okayasu, S., Qi, H., Zheng, F., Egawa, G., Kinoshita, Y., Yoshimura, S. and Saito, H.: The International Conference on Magnetism (ICM 2015), MO.E.2_04 (2015)
- 13) 中山翔太, 江川元太, 木下幸則, 吉村 哲, 齊藤 準: 日本金属学会 第 158 回日本金属学会春期講演大会概要, 10 (2016)
- 14) Li, Z., Hatakeyama, K., Egawa, G., Yoshimura, S. and Saito, H.: *Applied Physics Letter*, 100, 222405 (2012)
- 15) Saito, H., Li, Z., Ito, R., Egawa, G. and Yoshimura, S.: Abstracts of MMM 2011, DG-04 (2011)
- 16) Li, Z., Li, X., Liu, D., Saito, H. and Ishio, S.: *Nanoscale*, 6, 11163-111168 (2014)
- 17) 中村哲也, 小谷佳範, 広沢 哲: 日本磁気学会 第 39 回日本磁気学会学術講演会概要集, 10pA-1, 181 (2015)