

# 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イメージングにおける面内磁場強度依存性

成田 裕<sup>1</sup>、大阪 飛翔<sup>1</sup>、園部 博<sup>1</sup>、Jong-Ching Wu<sup>2</sup>、齊藤 準<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>秋田大理工、<sup>2</sup>National Changhua University of Education)

Magnetic imaging of domain wall movement of permalloy patterned thin films by alternating magnetic force microscopy and dependence of in-plane magnetic field intensity

Y. Narita<sup>1</sup>, T. Osaka<sup>1</sup>, H. Sonobe<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** ソフト磁性材料の性能向上には、磁区構造を交流磁場下で観察し制御することが重要となる。しかしながら、磁気力顕微鏡(MFM)においては強磁性探針からの漏洩磁場により試料の磁区構造が変化しやすく、磁区構造の観察は無磁場下でも容易ではなかった。我々は昨年、ソフト磁性薄膜の交流磁場下での磁区構造観察を目的として、試料表面近傍で交流磁場を検出可能な交番磁気力顕微鏡(Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM)に、残留磁場がゼロの超常磁性探針を用いる磁壁移動のイメージング法を提案し、交流磁場下でパーマロイ・パターンド薄膜を観察して、磁壁の移動範囲やピンポイントが容易に検出できることを報告した。本研究では、薄膜に印加する面内磁場成分を制御することで、磁壁を静止状態から移動範囲が変化するまで連続的に観察した結果を報告する。

**実験方法** A-MFM は探針の共振周波数と異なる非共振の探針試料間の交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調を利用して磁場をロックイン検出する手法である。ソフト磁性薄膜の磁壁移動イメージングでは、超常磁性探針の磁気モーメントの大きさを外部交流磁場源の磁場方向に周期的に変化させた状態で、磁壁移動により磁壁から発生する磁場が探針に周期的に加わることで発生する交番磁気力を利用して、探針位置における磁壁移動の有無を検出する。A-MFM 観察には、自作した Co-GdOx 超常磁性探針 (磁性膜厚 100 nm) を用い、パーマロイ・パターンド薄膜 (4 μm 角、膜厚 75 nm、Ta キャップ層 2nm) を大気中で観察した。外部交流磁場源としてフェライトコアを用い、試作した三点支持台上に設置して試料と探針に印加する交流磁場の方向を、試料の膜面垂直方向を中心としてわずかに変化させた。交流磁場の周波数は 89 Hz であり、振幅を 50~400 Oe で変化させた。A-MFM 像はロックイン信号 ( $X + iY = R \exp(i\theta)$ ) から選択して取得した。

**実験結果** Fig.1(a)にパーマロイ・パターンド薄膜の面内磁場がゼロで磁壁が静止している状態での A-MFM 磁場像 (ロックイン  $X$  信号)、図(b)に磁場強度像 ( $R$  信号) を示す。ここで磁場の検出方向は膜面垂直方向で

あり垂直磁場を検出している。図(b)より磁壁の中心部の垂直磁場はゼロであり、図(a)により磁壁の両側で反対方向の垂直磁場が検出されることから、磁壁は図(c)に模式図を示したネール磁壁であることがわかる。Fig.2(a)に面内交流磁場を図の $\pm y$ 方向に 0.8 Oe 印加した場合に得られた A-MFM 磁場像 ( $X$  信号) を示す。磁壁が移動する範囲内でのみ、探針は磁壁からの磁場を検出するので、磁壁の移動範囲を反映した像が得られる。図(b)、(c)に図(a)より識別した磁壁の最大移動位置の模式図を示す。面内磁場方向に平行な磁区の面積が増加するように磁壁が移動し、その最大移動位置では 90°磁壁以外に 180°磁壁も発生していることがわかる。学会ではこれらの詳細と共に、A-MFM 像に及ぼす交流磁場波形の影響についても報告する。

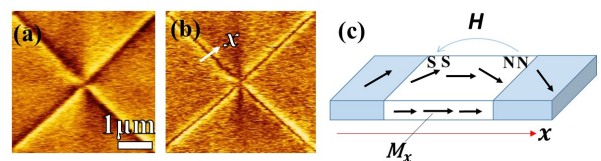


Fig.1 A-MFM images of lock-in  $X$  signal [(a)] and lock-in  $R$  signal [(b)] without in-plane magnetic field and schematic figure of magnetic field distribution from Neel wall [(c)].

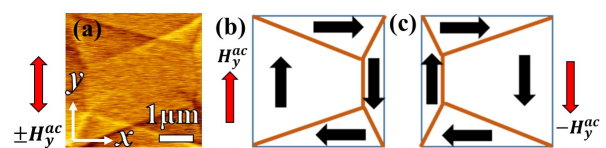


Fig.2 A-MFM images of lock-in  $X$  signal under in-plane magnetic field [(a)] and schematic figures of domain wall position with maximum domain wall movement. [(b), (c)]

# 交番磁気力顕微鏡を用いた磁気記録ヘッドの 高空間分解能・磁場エネルギーイメージング — 直流磁場と交流磁場の交差エネルギーによる信号強度の増大 —

今 裕史、園部 博、松村 透、齊藤 準  
(秋田大理工)

High-resolution magnetic field energy imaging of magnetic recording heads by using energy cross term  
of AC and DC magnetic field on alternating magnetic force microscopy

H. Kon, H. Sonobe, T. Matsumura, H. Saito  
(Akita Univ.)

**はじめに** ハードディスクドライブの主要部品である磁気記録ヘッドにおいては高密度化のためにヘッド素子の小型化が進んでおり、磁気記録ヘッドから発生する交流磁場に対して高い空間分解能でのイメージングが求められている。我々はこれま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) に高磁化率の Co-GdOx 系超常磁性探針を用いることで、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のイメージング手法を提案し、従来の磁場イメージングと比較して高い空間分解能を得ている<sup>1)</sup>。本研究では、測定磁場の高周波化に向けて課題となる信号強度の増大のために、直流磁場と交流磁場の交差エネルギーを利用した高感度化を検討した。

**実験方法** A-MFM 観察は自作した Co-GdOx 超常磁性探針 (磁性膜厚 100 nm) を用いて大気中で行った。観察試料には垂直磁気記録用の磁気記録ヘッドを用い、交流電流  $I^{ac}$  および直流電流  $I^{dc}$  を以下の範囲で印加した。 $I = I^{dc} + I^{ac} \cos(\omega t)$  ( $I^{dc}$ : 0 ~ 5.0 mA,  $I^{ac}$ : 0 ~ 4.7 mA,  $\omega/2\pi = 89$  Hz)  
電流印加により磁気力

$$F'_z = (\partial^2 / \partial z^2)(\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) = (\partial^2 / \partial z^2)(\chi^{tip} \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) = \chi^{tip} (\partial^2 H^2 / \partial z^2)$$

( $H^2 = (\mathbf{H}^{dc} + \mathbf{H}^{ac} \cos(\omega t)) \cdot (\mathbf{H}^{dc} + \mathbf{H}^{ac} \cos(\omega t))$ ) が発生する。本研究では、直流磁場と交流磁場の交差エネルギー像に対応する  $F'_z(\omega t)$  像 ( $F'_z(\omega t) = 2\chi^{tip} (\partial^2 (H^{ac} H^{dc}) / \partial z^2) \cos(\omega t)$  (1))、交流磁場エネルギー像に対応する  $F'_z(2\omega t)$  像 ( $F'_z(2\omega t) = \chi^{tip} / 2 (\partial^2 (H^{ac})^2 / \partial z^2) \cos(2\omega t)$  (2)) をイメージングし、その信号強度を比較した。

**実験結果** Fig.1 に磁気記録ヘッドの主磁極付近の  $F'_z(2\omega t)$  像 ( $I^{ac} = 4.7$  mA,  $I^{dc} = 0$  mA) および  $F'_z(\omega t)$  像 ( $I^{ac} = 4.7$  mA,  $I^{dc} = 5.0$  mA) を示す。 $F'_z(\omega t)$  像では  $F'_z(2\omega t)$  像と比較して信号強度が大きく、鮮明な像が得られた。Fig.2 に  $F'_z(\omega t)$  像と  $F'_z(2\omega t)$  像の主磁極中心部での信号強度の  $I^{ac}$  依存性を示す。信号強度は概ね  $F'_z(\omega t)$  信号では  $I^{ac}$  に比例し、 $F'_z(2\omega t)$  信号では  $I^{ac}$  の 2 乗に比例して変化しており、式(1)および (2)にしたがって変化していることがわかる。全ての  $I^{ac}$  の範囲で、直流電流  $I^{dc}$  の印加により信号強度が増加しており、直流磁場と交流磁場の交差エネルギーを利用することで信号強度の増大が図られていることがわかる。講演ではこれらの詳細とともに周波数を増加させた結果について述べる。

参考文献: 1) P. Kumar et al., Appl. Phys. Lett., 111,183105(2017)

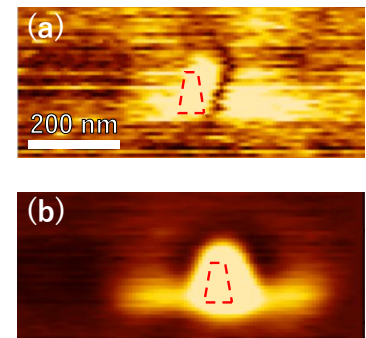


Fig.1 A-MFM images of AC magnetic field energy [(a)] and energy cross term of AC and DC magnetic field [(b)].

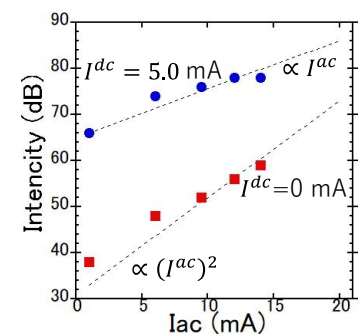


Fig.2 Dependences of AC current on A-MFM signal intensity at main pole with and without DC current.

## 交番磁気力顕微鏡を用いた垂直磁気記録媒体薄膜の ジグザグ状磁化反転境界の高分解能検出

田中 花道、和田 真羽、松村 透、齊藤 準

(秋田大理工)

High-resolution detection of zigzag magnetic reversal boundary of perpendicular magnetic recording media film by alternating magnetic force microscopy

H. Tanaka, S. Wada, T. Matsumura, H. Saito

(Akita Univ.)

**はじめに** 磁気力顕微鏡 (MFM) において、磁気記録媒体は顕微鏡開発当初からの観察対象であり、高密度磁気記録媒体を構成する 5 nm 程度の磁性結晶粒サイズに起因する nm オーダーのジグザク形状の磁化反転境界の検出が、MFM の空間分解能の究極的な目標となり得る。このため我々の研究グループでは、MFM の空間分解能を向上させるため、これまで困難であった試料表面近傍での磁場の単独検出が可能な交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) を開発し、さらに逆磁歪効果を利用することで測定感度を高めた Fe 系非晶質高磁歪ソフト磁性探針を開発して、高密度垂直磁気記録媒体に対して 3 nm 程度の空間分解能を空間スペクトルの評価により得ている。本研究では高い空間分解能を実空間で実証するために、保護膜のない高密度磁気記録媒体薄膜の A-MFM 観察を行い、さらに A-MFM の磁場勾配値のゼロ検出機能を利用して、磁場極性が反転する磁化反転境界を抽出した結果について報告する。

**実験方法** A-MFM による直流磁場計測では探針に外部から交流磁場を印加し、探針の磁気モーメントの方向を周期的に変化させることで、試料からの直流磁場との相互作用により探針振動に誘起される周波数変調から直流磁場を検出する。ここでは、周波数変調した探針振動信号を周波数復調後に、交流磁場の駆動電圧を参照信号としてロックイン検出することで直流磁場に係わる画像信号 ( $X+iY = R \exp(i\theta)$ ) を得る。垂直磁気記録媒体薄膜 (グラニューラ媒体・粒径 5 nm 程度で保護膜なし) を測定試料とし、A-MFM 観察を大気中で行った。用いたソフト磁性探針は、非晶質  $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$  ソフト磁性合金を Si 探針母材に 15 nm 程度成膜して自作した。A-MFM 観察では、探針に交流磁場 (振幅 150 Oe、周波数 89 Hz) を小型フェライトコアにより印加した。A-MFM 像の解析には、像信号の正負が反転する画素を抽出するプログラムを作成し、磁化反転境界の可視化を行った。

**実験結果** Fig 1 (a)に 1 画素を 2.5 nm 角で観察した垂直磁気記録媒体薄膜の A-MFM 像 (ロックインアンプの X 信号)、図(b)に図(a)で信号の正負が反転する画素を抽出して得た磁化反転境界像、図(c)に図(b)の拡大像を示す。図(c)では画素サイズをメッシュで表している。図(b)では、5 nm 程度のジグザグ形状の磁化反転境界が観察でき、その大きさは像の空間スペクトルで評価した空間分解能 (5 nm) とも対応している。さらに結晶粒径の異なる垂直磁気記録媒体薄膜

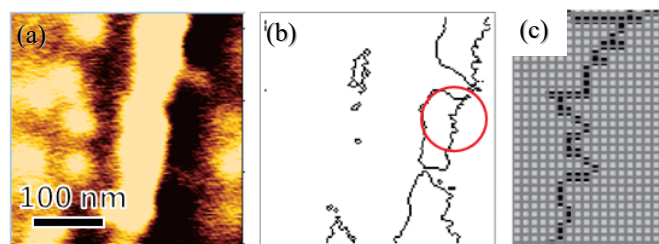


Fig.1 A-MFM images of lock-in X signal [(a)], magnetic reversal boundary detected image from the image (a) [(b)], and enlarged view of (b) [(c)] for a perpendicular magnetic recording media film.

を観察したところ、粒径の大小に相関した磁化反転境界が観察できた。さらに垂直磁気記録媒体の記録ビットのビット境界においてもジグザグ形状の磁化反転境界の観察に成功した。これらの詳細は学会で報告する。

**謝辞** 観察に用いた垂直磁気記録媒体薄膜は、JX 金属(株)様からご提供いただきました。ここに感謝申し上げます。

# スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡による アモルファス磁性ワイヤの磁区構造観察

立松峻一、下出晃広、岩永吉広、鈴木雅彦\*、山内泰\*  
(愛知製鋼、\*物材機構)

Magnetic domain structure observation of amorphous magnetic wires  
by spin-polarized low energy electron microscopy

S. Tatematsu, A. Shimode, Y. Iwanaga, M. Suzuki, Y. Yamauchi  
(Aichi Steel Corporation, \*NIMS)

## 1. はじめに

MI センサは、MI (Magneto-Impedance, 磁気インピーダンス) 効果を利用した小型で高感度、且つ低消費電力の磁気センサであり、近年では磁気マーカを使用した自動運転やスポーツ計測におけるモーションセンサとして利用されている。その原理は、コア材料であるアモルファス磁性ワイヤにパルス電流を通電した際の、外部磁場に応じたインピーダンス変化を出力電圧に変換するものである。センサ性能として、これまでに  $3\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@10\text{Hz}$  の磁気分解能が得られているが、更なる低ノイズ化の方策として、ワイヤ表層の磁区構造に着目して開発を進めている。一方、従来ワイヤに適用されてきた磁区構造観察手段では、研磨などにより観察面の調整を行う必要があるため、形状や残留応力分布が磁気異方性へ及ぼす影響が損なわれた磁区構造が観察されている懸念がある。本研究では、極表層の磁化方向の観察手段であるスピン偏極低エネルギー電子顕微鏡を使用し、ほぼ非破壊でワイヤ表層の磁区構造の観察を試みるとともに、その構造と磁気特性や加工条件との対応を調査した。

## 2. 実験方法

回転液中紡糸法により CoFeSiB 系および CoFeNiSiBMo 系アモルファス磁性ワイヤを作製し、所望の線径になるよう伸線した。磁気特性は張力熱処理により調整した。磁区構造観察には、物材機構に設置されているスピン偏極低エネルギー電子顕微鏡を使用した。試料はアセトンで超音波洗浄を施したのち、図1に示すように試料ホルダーに固定した。観察直前には6~12時間  $\text{Ar}^+$ スパッタ処理し、表面堆積物のクリーニングを行った。

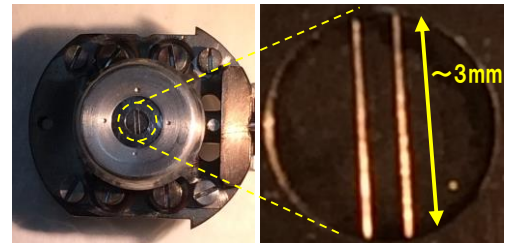


図1 観察したワイヤの外観

## 3. 実験結果

線径  $\phi 13\ \mu\text{m}$ 、円周方向の異方性磁界(Hk)18 Oe に調整した CoFeNiSiBMo 系アモルファス磁性ワイヤの磁区構造観察結果を図2に示す。試料の曲率による影響のためワイヤ表層の一部分のみではあるが、ほぼ非破壊で磁区構造が観察できている。この試料では、ワイヤ表層の磁区はほぼ円周方向を向いている。また磁壁内での磁化回転はワイヤ表層面内のみで垂直成分が無く、円周方向の磁気異方性が支配的であることが分かる。当日は他のワイヤの観察結果を示すとともに、磁気特性や加工条件との関係についても言及する。

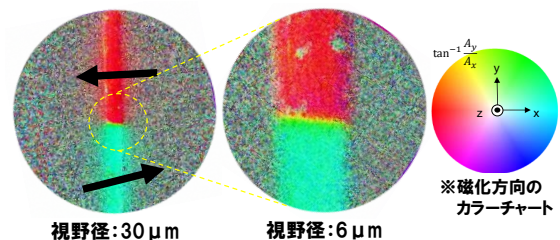


図2 SPLEEM で観察したワイヤの磁区構造

## 参考文献

- 1) L. V. Panina and K. Mohri: Applied Physics Letter, 65(1994), 9, 1189-1191

# 半導体レーザー光源を用いた時間分解磁気光学顕微鏡の開発

小笠原剛、中村遼\*、山口明啓\*

(産業技術総合研究所、\*兵庫県立大)

Development of a time-resolved magneto-optical microscope using a semiconductor laser light source

Takeshi OGASAWARA, Ryo Nakamura\*, Akinobu Yamaguchi\*

(AIST, \*Univ. of Hyogo)

磁区ダイナミクスの観察は、磁気デバイス等の研究・開発において強力な手法である。しかし、現在の放射光施設やモードロックレーザー等を用いる方法は、誰もが簡単に利用できる手法とは言い難い。また、これらの光源はパルス光の繰り返し周期が固定されているため、試料を光源の周期に合わせて準備する必要があった。本研究では、ピコ秒パルス半導体レーザーを光源に用いることにより、取り扱いが容易で、ピコ秒クラスの時間分解能をもち、任意の繰り返し周期での測定が可能で、時間分解磁気光学顕微鏡の開発を行った。

図1に、本研究で開発した時間分解磁気光学顕微鏡の構成を示す。半導体レーザーは、中心波長が 405 - 450 nm、最小パルス幅が 50 ps、最大繰り返し周波数が 200 MHz である。レーザー光は、ボイスコイルで振動させたマルチモードファイバーを通すことにより、干渉によるスペckルを均一化している。マルチモードファイバーのモード分散によりパルス幅は約 30 ps 広がり、時間分解能は最小で 80 ps 程度と考えられる。ベースとなる磁気光学顕微鏡はこれまでに筆者らが開発した高分解能磁気光学顕微鏡<sup>1)</sup>で、従来の磁気光学顕微鏡に比べて高い空間分解能を持ち、磁化の3成分ベクトル観察が可能である。照明光の波長が 405 nm の場合、理論的な空間分解能は 260 nm である。

図2に、開発した磁気光学顕微鏡を用いて観察した磁区ダイナミクスの例を示す。試料はコプレーナ導波路上にパーマロイの微細構造を作製したもので、導波路にパルス電流を流すことにより幅 10 ns のパルス磁場を印加して磁区を変化させている。数マイクロメートル程度の微細構造中の磁区の運動も鮮明に観察できている。

## 参考文献

- 1) Takeshi Ogasawara, Japanese Journal of Applied Physics **56**, 108002 (2017).

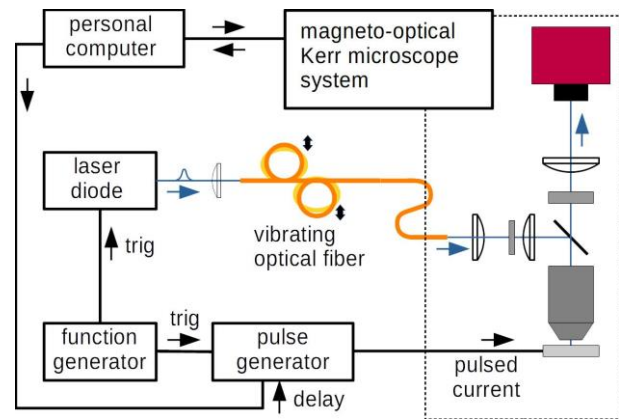


図1 : Schematic configuration of the time-resolved magneto-optical microscope system.

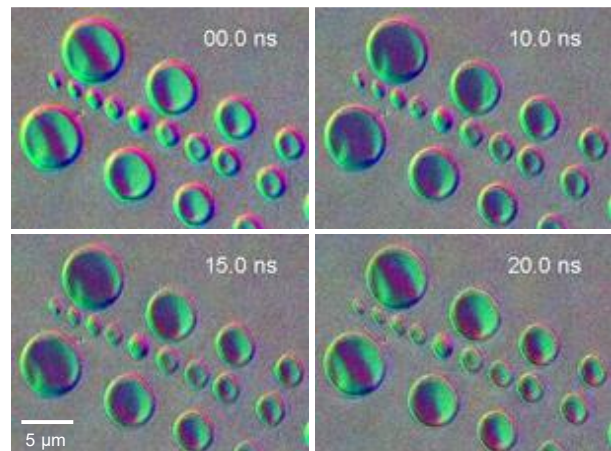


図2 : Magnetic domain dynamics observed by the time-resolved microscope.