

超常磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 垂直磁気記録ヘッドの広帯域・高周波磁場イメージング

鈴木 魁智、M. Makarova、園部 博、松村 透、齊藤 準
(秋田大理工)

Wideband high-frequency magnetic field imaging of perpendicular magnetic recording head
by alternating magnetic force microscopy with superparamagnetic tip
K. Suzuki, M. Makarova, H. Sonobe, T. Matsumura, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに

ハードディスクドライブの高密度化には、主要部品である磁気記録ヘッドの動作時の高周波磁場を高空間分解能で観察することが有効となる。このため我々は、試料表面近傍の交流磁場を高空間分解能で観察可能な、交番磁気力顕微鏡(Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM)を開発し、加えて探針磁化が印加される磁場に比例する超常磁性探針を用いて、磁場より近距離的な力となる磁場エネルギーを検出することで高い空間分解能を実現している¹⁾。本報告では、超常磁性探針において高い周波数までの磁場応答性および異なる磁場周波数での磁場応答の重ね合わせが可能であることに着目して、垂直磁気記録ヘッドについて、100 kHz から磁気記録ヘッドの動作周波数付近の 1 GHz までの交流磁場イメージングを行った結果を述べる。

実験方法

探針には Co-GdO_x 系超常磁性探針(磁性膜厚 100nm)を用い、垂直磁気記録ヘッドを観察した。磁気記録ヘッドの高周波磁場を A-MFM が検出できる周波数に変換するために、磁気ヘッドには高周波数 ω_H の電流を低い周波数 ω_L で振幅変調した電流を印加して、振幅変調磁場 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0^{ac} (1 + \alpha \cos(\omega_L t)) \cos(\omega_H t)$ を発生させた。ここで ω_H はキャリア周波数、 ω_L は変調周波数、 α は振幅変調率である。探針磁化 \mathbf{m}^{tip} は探針に印加される磁場に比例するので ($\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$)、磁気力勾配 $F'_z = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$ の ω 成分は、 $F'_z(\omega_L) = \alpha \chi (\partial^2 (\mathbf{H}_0^{ac})^2 / \partial z^2) \cos(\omega_L t)$ となり、交流磁場の 2 乗の勾配になることから交流磁場エネルギーの勾配による交番磁気力が発生する。この交番磁気力を振動した探針に加えることで発生する探針振動の周波数変調信号を、復調後にロックイン検出することで高周波磁場のイメージングを行った。観察では、 ω_H を 100 kHz から 1 GHz まで変化させ、 ω_L は 89 Hz、 α は 0.9 で一定とした。

実験結果

Fig. 1(a), (b), (c)に各々、交流磁場周波数 ω_H が 100 kHz, 10 MHz, 1 GHz の場合の主磁極付近の A-MFM 像 (Lock-in X 像) を示す。図中の破線は垂直磁気記録ヘッドの主磁極の輪郭を示している。全ての周波数で主磁極から発生する交流磁場が明瞭に観察できることがわかる。像の明暗コントラストは交流磁場エネルギーの周期的な時間変化の方向が逆であることを示しており、明部で磁場エネルギーが増加しているときには、暗部で磁場エネルギーが減少している。主磁極付近の明部と左右の暗部は隣り合っていることから、主磁極表面から発生した磁場エネルギーが左右の主磁極の側断面に吸い込まれている²⁾ ことがわかる。講演ではこれらの詳細について述べる。

参考文献

- 1) 今, 齊藤 他, 第 44 回日本磁気学会学術講演概要集, 15pD-1, 125 (2020).
- 2) P. Kumar, H. Saito et al., J. Appl. Phys, 123(2018) 214503

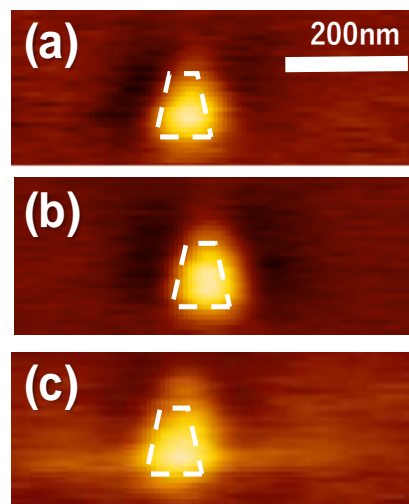


Fig. 1 A-MFM images of perpendicular magnetic recording head by using a Co-GdO_x superparamagnetic tip. [(a) 100 kHz, (b) 10 MHz, and (c) 1 GHz]

交番磁気力顕微鏡を用いた高周波磁場イメージングに向けた マイクロ波磁場照射機構の開発

梅田 尚優希、M. Makarova、園部 博、松村 透、齊藤 準
(秋田大理工)

Development of microwave radiation system for high frequency magnetic field imaging
by using alternating magnetic force microscopy

N. Umeda, M. Makarova, H. Sonobe, T. Matsumura, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 近年、磁気記録におけるマイクロ波アシスト方式や高周波無線通信技術の進展等により、マイクロ波領域における磁性材料の微視的な強磁性共鳴現象や電磁波吸収特性等の理解が重要になってきている。このため我々は、これまでに開発した、交流磁場を試料表面で単独検出可能な高空間分解能を有する交番磁気力顕微鏡において、高周波磁場イメージング技術の開発を進めている。高周波磁場イメージングを種々の磁性材料に応用するには、観察試料にマイクロ波磁場を照射する機構を交番磁気力顕微鏡に組み込む必要がある。このため我々はこれまで導波管スリットアンテナに着目して周波数特性のよい進行波型アンテナを目指してきたが、導波管内の定在波をなくすることができず照射マイクロ波強度の増大に課題があった¹⁾。

本研究では、新たに、電磁波の導波管の一端を開放した開口型アンテナに金属反射板を付加することで、試料台の背面からマイクロ波を照射できる機構を開発したのでその結果を報告する。

結果 Fig. 1 に試作したマイクロ波磁場照射機構の模式図を示す。マイクロ波増幅器からの出力を、一端を開放した導波管(WRJ220)に同軸導波管変換器を用いて接続した。導波管は TE₁₀ モードで使用し、その周波数帯域は 17.6~26.7 GHz である。導波管を反射波のない進行波アンテナとするため、インピーダンス整合用のスリットを広壁の中央に設け、スリット部にマイクロメータに固定した金属針を接触させた状態で、マイクロ波増幅器の出力端子に接続した方向性結合器の反射電力が最小になるように、金属針挿入位置と挿入深さを調整してインピーダンス整合を行った。

Fig. 2 に導入電力に対する進行波電力の比率の周波数依存性を示す。この比率は方向性結合器で投入電力と反射波電力を測定して求めた。全ての周波数で進行波電力の比率を 99.9% 以上に調整できることがわかった。

このインピーダンス整合された導波管アンテナから放射されるマイクロ波を、図のように金属薄膜を用いた反射板に 45° 入射させることで、反射したマイクロ波を試料台の背面から照射する機構を試作した。マイクロ波の電場と磁場の方向は図の通りであり、垂直磁化膜および面内配向磁化膜については、強磁性共鳴に必要な、磁化容易方向と直交方向からマイクロ波磁場を印加することができる。

現在、このマイクロ波磁場照射機構の交番磁気力顕微鏡への組み込みを進めており、振幅変調マイクロ波を用いることで、試料台上で電磁場を検出できることを確認できている。開発したマイクロ波照射源は微視的な強磁性共鳴や電磁波吸収等のイメージングに資するものと考えている。学会では、本機構の詳細と共に、試料台に種々の磁性薄膜を設置した場合の電磁波強度の計測結果についても報告する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤 駿介, 齊藤 準, 他, 第 45 回日本磁気学会学術講演概要集, 02aA-2, 141 (2021)

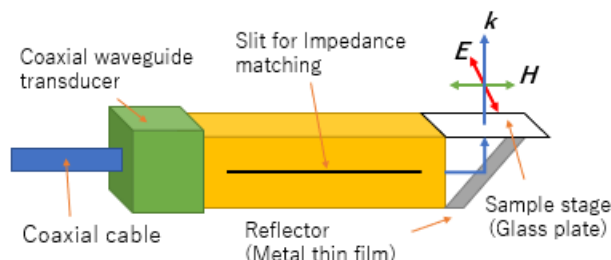


Fig. 1 Schematic figure of present microwave radiation system.

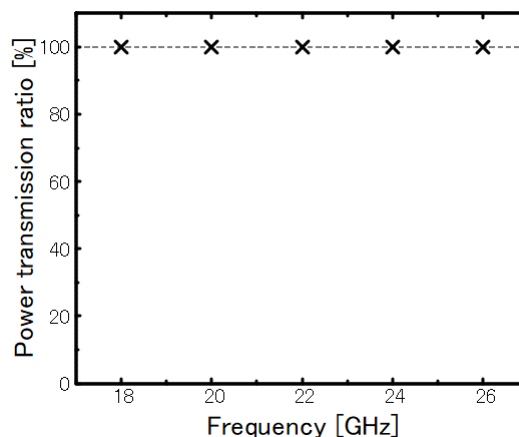


Fig. 2 Frequency response of Power transmission ratio.

超常磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 永久磁石の直流磁場の定量イメージング

江原 廉、三浦 健太、松村 透、齊藤 準

(秋田大理工)

Quantitative magnetic field imaging by using alternating magnetic force microscopy with
superparamagnetic tip

R. Ehara, K. Miura, T. Matsumura, H. Saito

(Akita Univ.)

はじめに 磁気力顕微鏡は磁場勾配を検出しているため、空間分解能は優れるものの測定量の定量性に劣ることが課題であった。我々は昨年、試料表面の磁気力を高空間分解能で単独検出できる交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) に、超常磁性探針 (探針磁化が磁場印加により磁場方向に印加磁場強度に比例して発生) と、交流磁場を発生する空芯コイル (磁場の空間分布が既知) により超常磁性探針を励磁することで、直流磁場の定量イメージング法を提案した。また、永久磁石を観察試料として、一様な外部直流磁場を印加することで、磁場値の校正の可能性を示した。本報告では、永久磁石試料の A-MFM 像から抽出した磁場像について、上記の手法を用いて、等高線図を重ねることで磁場の定量イメージングを試みた結果を述べる。

実験方法 観察試料として表面磁場強度が 2.3[kOe]程度の市販の NdFeB 磁石を用いた。超常磁性探針は Si 探針母材に Co-GdOx 超常磁性薄膜を 100 nm 成膜して作製した。超常磁性探針の励磁には 2 層の空芯コイル (内径、外径等) を用い、試料の観察面が空芯コイルの高さの中央になるように設置し、試料面に垂直方向の交流磁場 $H_z^{ac} \cos(\omega t)$ を前記の探針に印加した。ここで、探針にかかる磁場 \mathbf{H} は試料から発生する直流磁場を \mathbf{H}^{dc} とすると、

$\mathbf{H} = \mathbf{H}^{dc} + H_z^{ac} \cos(\omega t) \mathbf{e}_z$ になるため、探針磁化 \mathbf{m}^{tip} は磁場に比例する ($\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$)。そこで、A-MFM が検出する磁気力勾配 $F_z' = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$ の ω 成分は、 $F_z'(\omega t) = 2\chi(\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2) \cos(\omega t)$ となる。前式を展開することで現れる空芯コイルの H_z^{ac} , $\partial H_z^{ac} / \partial z$, $\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2$ の値は既知であるため、これらを定数として、磁場に係わる試料の H_z^{dc} 像、 $\partial H_z^{dc} / \partial z$ 像、 $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$ 像を、探針伝達関数に基づく空間周波数フィルター処理を行うことにより抽出した (参考文献)。試料の H_z^{dc} 像の磁場値の校正は、空芯コイルの下に設置した電磁石による一様な直流磁場より求められた H_z^{dc} 像の信号強度の変化量を用いて行なわれた。

実験結果 Fig1(a) に外部直流磁場がゼロの時の試料の A-MFM 像 ($\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2$ 像) を、Fig1(b) に Fig1(a) から抽出した試料の磁場像 (H_z^{dc} 像) を示す。なお、探針試料間距離は 200 nm である。図 (b) の H_z^{dc} 像には、校正された磁場値の等高線をあわせて示している。この磁場値の校正は、外部直流磁場 (-300[Oe]) を印加して測定した A-MFM 像から抽出した H_z^{dc} 像の等高線において、ゼロ値線での磁場値を 300[Oe] として、元の像信号を磁場値に変換することにより行われた。-300[Oe] 印加においては、測定した $\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2$ 像が磁場印加前後で変化しないことから、試料の磁化状態は直流磁場印加で変化していないことを確認している。なお、A-MFM 像から抽出した H_z^{dc} 像から空間周波数フィルター処理により $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$ 像を求めると、外部直流磁場の有無によらず同様であり観察した A-MFM 像と区別がつかないことから、A-MFM 像は $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$ 像と見なすことができることがわかった。これらの詳細は学会で述べる。

参考文献

1) 齊藤 準、三浦 健太、他：第 45 回日本磁気学会学術講演概要集 02aA-1, 140 (2021)

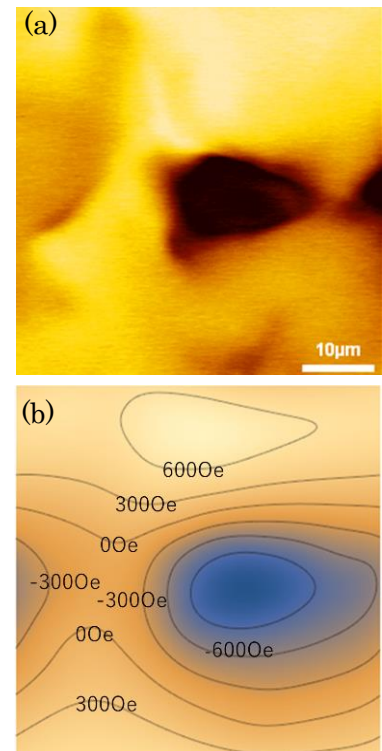


Fig1 A-MFM image and contour of extracted magnetic field imaged

交番磁気力顕微鏡における超常磁性探針の 高機能磁気イメージングへの応用

齊藤 準
(秋田大理工)

Application of superparamagnetic tip to advanced magnetic imaging
on alternating magnetic force microscopy

H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 筆者により提案された交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) は、振動させた磁性探針にその共振周波数と異なる非共振の交番磁気力を印加することで発生する探針振動の周波数変調現象を利用した磁気力顕微鏡であり、試料表面近傍の磁気力を単独検出できることから高空間分解能が得られ、探針に用いる磁性体を選択することで磁気記録媒体や永久磁石材料の直流磁場、および磁気記録ヘッド等からの交流磁場を観察することができる¹⁾。

本稿の超常磁性探針は、A-MFM で強磁性探針を用いた場合に磁気ヒステリシスや磁気飽和により発生する不具合の解決のために開発を進めたものであり、高磁化 Co-GdO_x 探針 (グラニューラー型超常磁性合金中の Co 粒子の体積分率が 44 vol% 程度) の開発に成功している²⁾。超常磁性探針は、1) 磁気ヒステリシスがなく探針磁化が印加磁場に比例して印加磁場方向に可逆的に発生し、2) 探針磁化が GHz 以上の高い周波数でも磁場に応答し、また異なる周波数の磁場応答の重ね合わせが可能である特徴を有する。本報告では、強磁性探針には見られないこれらの超常磁性探針の特徴を利用することで可能になる高機能磁気イメージングについて紹介する。

直流磁場の定量イメージング 磁気力顕微鏡は磁場勾配を検出しているため、空間分解能は優れるものの測定量の定量性に劣ることが課題とされてきた。本手法では、超常磁性探針の交流磁化方向を外部交流磁場方向に揃えることができること (計測磁場方向を外部交流磁場方向に固定)、および超常磁性探針の直流磁化が試料からの直流磁場に比例することを利用する。試料面に垂直方向の交流磁場 $H_z^{ac} \cos(\omega t)$ を探針に印加した場合、探針にかかる磁場 \mathbf{H} は、試料から発生する直流磁場を \mathbf{H}^{dc} とすると、 $\mathbf{H} = \mathbf{H}^{dc} + H_z^{ac} \cos(\omega t) \mathbf{e}_z$ となる。探針磁化を \mathbf{m}^{tip} は、磁場に比例する ($\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$) ので、A-MFM が検出する磁気力勾配 $F_z' = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$ の ω 成分 (探針振動の周波数変調を引き起こす交番磁気力) は、 $F_z'(\omega t) = 2\chi (\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2) \cos(\omega t)$ となる。

ここで交流磁場源に空芯コイルを用いることで、前式の展開により現れる H_z^{ac} , $\partial H_z^{ac} / \partial z$, $\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2$ が既知となるのでこれらを定数として、試料からの磁場に係わる H_z^{dc} , $\partial H_z^{dc} / \partial z$, $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$ を、探針伝達関数に基づく空間周波数フィルター処理を行うことにより抽出できる。磁場値の校正は、試料に一樣な外部直流磁場を印加した際に抽出される H_z^{dc} 信号の変化を利用する。以上により磁場の定量イメージングが可能になる。

交流磁場の高周波イメージング 磁気力顕微鏡では、高い周波数の交流磁場の計測が困難であることが課題とされてきた。本手法では、超常磁性探針が GHz 以上の高い周波数で磁場に応答し、異なる周波数での磁場応答の重ね合わせが可能であることを利用する。高周波数の交流磁場を A-MFM が検出できる周波数で検出するために、高周波磁場を低周波数で強度変調 (振幅変調) する。 ($\mathbf{H} = \mathbf{H}_0^{ac} (1 + \alpha \cos(\omega_L t)) \cos(\omega_H t)$)

探針磁化 \mathbf{m}^{tip} は磁場に比例するので ($\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$)、磁気力勾配 $F_z' = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$ の ω 成分は、 $F_z'(\omega_L) = \alpha m (\partial^2 (H_0^{ac})^2 / \partial z^2) \cos(\omega_L t)$ となる。この交番磁気力を、振動した探針に加えることにより探針振動に周波数変調が発生し、GHz 以上の高周波磁場の計測が可能になる。

超常磁性探針を使用することで新たに実現できる高機能磁気イメージングの詳細は学会で報告する。

参考文献

- 1) H. Saito, まぐね/Magnetics Jpn., Vol.11, No.4, 214-220, 2016
- 2) Y. Cao, H. Saito, *et al.*, J. Magn. Magn. Mater., Vol.462, 119-126, 2018