確率信号としての磁気力顕微鏡像の解析手法

A Method for Analyzing MFM Images as Stochastic Signals

武隈育子*・安井雅彦**・奥村善信**・秋田 憲**・末岡和久*[†]・長谷山美紀*・武笠幸一*^{††}

*北海道大学大学院工学研究科, 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 (☎060-8628)

**株式会社クボタ, 八尾市神武町 2-35 (☎581-8686)

[†]科学技術振興事業団 さきがけ研究 21^{††}科学技術振興事業団 戦略的基礎研究I. Takekuma,* M. Yasui,** Y. Okumura,** M. Akita,** K. Sueoka,*[†]M. Haseyama,* and K. Mukasa*^{††}

*Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-8628

**Kubota Corporation, 2-35 Jinmu-cho, Yao, Osaka 581-8686

[†]JST, PRESTO^{††}JST, CREST

Magnetic force microscopy (MFM) is widely used to directly observe magnetized states with sub-micron resolution. The average profile, which is commonly used in the conventional quantitative analysis of MFM images, does not contain enough information to evaluate recording media. We introduce the concept of a stochastic process into MFM image analysis. By acquiring the statistical parameters—the average, the variance, and the histogram of the image—we reveal that the distribution of the fluctuation in the magnetic transition region is different from the Gaussian distribution. We also suggest a new evaluation value, L/W , which is related to the S/N of the read-back signal. With our model, it may be possible to obtain higher-order statistical parameters, which are important for achieving more precise characterization in the magnetic transition region.

Key words: magnetic force microscopy, recording medium, stochastic process, average profile, variance, histogram

1. はじめに

MR ヘッド (Magnetoresistive Head) の登場により高密度記録技術の開発がさらに進み, 長手磁気記録方式においては 20 Gbits/in² を超える記録密度の実現に向けてさまざまな研究が行われている¹⁾. 高密度記録が可能である媒体として特に CoCrPtTa 系やそれに希土類元素を添加した媒体²⁾ が注目されており, このような媒体に高密度記録を行った際の磁化状態を高分解能で評価し, 記録と媒体の磁化状態の関係を明らかにすることが重要な課題となっている.

磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscope: MFM) は微小空間における漏洩磁場を数十 nm の空間分解能で観察できることから, 媒体の記録磁化状態をサブミクロンオーダーで評価する手段として用いられている. これまでに行われてきた媒体の MFM 像に対する解析には, トラックエッジ, オーバーライトなどの評価に見られる定性的解析³⁾ や, MFM 像から具体的な値を定義し, それによって評価を行う定量的解析^{4)~7)} があ

る. 後者の代表的な手法においては MFM により観測された信号 (以降 MFM 信号) をトラック幅方向に平均して得られる “平均プロファイル” が用いられている. これらは平均値に着眼して評価を行うものであり, 処理が簡易である. しかしながら平均値のみでは媒体の MFM 像の特徴を十分に把握することができない場合がある.

本論文では媒体の MFM 像のより詳細な特徴抽出を可能とする信号解析手法を提案する. 提案手法では MFM 像を同じ確率密度関数に従う信号系列の集合とみなし, その信号系列ごとに統計的特徴量を算出する. この手法を用いれば平均値だけでなく分散やヒストグラムなど他の統計量を得ることができ, これらに注目することによって媒体の MFM 像のより詳細な特徴解析が可能になる. その例として本論文では得られた統計量の一つである分散の変化を解析し, 媒体の MFM 像に対する新たな評価を試みた.

2. 従来手法

従来行われてきた媒体の MFM 像に対する定量的解析^{4)~7)} で

Fig. 1 Analysis directions of an MFM image: (a) in the track direction in conventional analysis, and (b) in the cross-track direction in our model using a concept from the stochastic process.

Fig. 2 (a) Actual MFM image of a 50-kFCI recorded medium; (b) sample image with the same average profile as (a).

は、主に MFM 信号をトラック幅方向に平均して得られる平均プロファイルを用いていた (Fig. 1(a)). 代表的な手法として、平均プロファイルを周波数解析することにより得られた S/N を用いる手法^{4),5)}、平均プロファイルのピークの半値幅により磁化遷移幅を評価する手法⁷⁾などがある。これらの手法で用いられる平均プロファイルはヘッドで得られる再生信号を近似するという点においては有用であると考えられる。しかし平均プロファイルのみでは媒体の MFM 像の特徴を十分に把握できない場合がある。以下にその例を示す。Fig. 2(a) は実際に取得された MFM 像である。Fig. 2(a) と同じ平均プロファイルをもつ画像例を作製し、Fig. 2(b) に示す。つまり平均プロファイルを用いた従来の定量的解析では (a), (b) に対して同じ評価が得られることになり、媒体の MFM 像の特徴を十分に反映しているとはいえない。

本研究では MFM 信号を確率信号と見なした解析手法の提案を行う。提案手法を用いれば、従来法では反映しきれなかった媒体の MFM 像の特徴を定量的に解析することが可能になる。

3. 解析手法

媒体の MFM 像に対し確率信号の概念を導入した信号解析手法の提案を行う。この手法では与えられた MFM 像と同じ確率密度関数に従う複数の信号系列の集まりと考える。ただし本論文で用いた MFM 像は 512×512 点において探針が受けた磁気力の勾配を 16 bit に量子化し、その量子化値を画素の濃度値とする画像である。以下に信号処理手法を提案し、さらにこの手法が確率統計論的に有意であることを確認する。

トラック幅方向にほぼ垂直に取得した MFM 像に対し、信号の分布の様子を調べる目的で領域分割⁸⁾を行った。なお領域分割についての詳しい説明については Appendix 1 で記述する。Fig. 3 に結果の例を示す。分割された領域の境界線を黒線で示した。同一領域内の濃淡分布は領域分割時に用いた閾値 675 の範囲に限られる。トラック方向の境界線に比べ、トラック幅方向に沿った境界線が強く現れているため、濃淡値の近い信号はほぼトラック幅方向に沿った分布をしているといえる。この結果により、得られた MFM 信号のトラック幅方向の系列は同じ確率密度関数に従う確率変数であるという仮説をたてた。次に

Fig. 3 (a) MFM image of a 50-kFCI recorded medium; (b) a result of region segmentation of (a). The lines in (b) are boundaries of the segmented regions. The lines approximately follow along the cross-track direction.

定常性の検定 (test for stationary)⁹⁾を行うことにより、この仮説の妥当性を確認した (Appendix 2). したがって媒体の MFM 像をトラック幅方向に同じ確率密度関数をもつ N 個の信号系列 (Fig. 1(b) における $S(t)$) の集まりと見なす。ただし本論文で実際に解析した MFM 像は 512×512 画素で構成されているため、 $N=512$, $t \in \{1, 2, \dots, 512\}$ である。

よって本論文で提案する解析手法とは、MFM 像と同じ確率密度関数に従う信号系列 $S(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_N(t)\}$ の集合とみなし、その信号系列ごとに統計的特徴量を算出することである。この統計的特徴量を解析すれば、これまで得ることのできなかった新たな特徴が得られる可能性がある。本論文ではまず、平均 $\mu(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t)$ 、分散 $\sigma^2(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i(t) - \mu(t))^2$ 、ヒストグラム $h(t)$ を求め、それらの解析を行った。なお分散は不偏推定量¹⁰⁾としての値を用いたので分母は $N-1$ となっている。

4. 実験条件

3 章で提案した信号解析手法を、媒体を観測して得られた実際の MFM 像に適用する。評価に用いた媒体は Al 合金に Ni-P をメッキした基板を用い、Cr 下地膜上に Co-13Cr-6Ta-4Pt 膜、保護膜として C を成膜したものを用いた (下地膜厚は 40 nm, 保護膜厚は 10 nm)。 $H_c = 2400$ Oe, $M_s t = 0.86 \times 10^{-3}$ emu/cm², $S^* = 0.8$ である。記録には 1 Gbits/in² 用の MR ヘッドを用い、書込ギャップ長 $0.5 \pm 0.08 \mu\text{m}$ 、書込トラック幅 $2.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 、磁気スペーシング 50 nm、書込電流 30 mA、周速 9.4 m/s で行った。MFM 測定は Digital Instruments 社製の Nano Scope III を用い、Tapping Mode のリフトハイト 15 nm で行った。使用した探針は、長さ $225 \mu\text{m}$ 、幅 $32 \mu\text{m}$ 、厚み $4.3 \mu\text{m}$ である AFM 専用 Si 探針上に CoCr 系磁性膜が蒸着されたものを使用し、共振周波数は約 80 kHz であった。ただし、探針は測定に先立ち試料に対して垂直な方向に着磁を行った。

5. 平均と分散

提案手法を用いて得られる基本的な統計量 (平均, 分散) が

さらに書き込みビット数 W に対し、低分散部分が現れるビット数 L の割合 (L/W) を求めると再生ヘッドによる S/N

Fig. 5 Low-variance portions. Each filled circle, which indicates a low-variance portion, is plotted on the average profiles for (a) 100-kFCI and (c) 180-kFCI. (b) and (d) show the variances of MFM images with the averages for (a) and (c), respectively. The value of L/W is 6/6 for (a), and 1/12 for (b). W is the number of recorded bits observed in the MFM image and L is the number of the bits that have low-variance portions.

6. ヒストグラム

分散によってトラック幅方向における MFM データのばらつき具合を示したが、ヒストグラムを求めるとさらにばらつきの分布の様子がわかる。記録密度 50 kFCI で記録した媒体の MFM 像に対するヒストグラムを求めた。Fig. 1(b) に示した縦系列 $S(t)$ ごとに、各画素値がどの程度の割合で存在するかを調べるためにヒストグラム $h(t)$ を求める。まず 16 bit (0～65,535) を等間隔な n 個の階級 (Fig. 7 では $n=256$ を用いた) に分割し、縦系列 $S(t)$ ごとにすべての信号 $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_N(t)\}$ の画素値を調べ、それぞれの階級に入る画素数を求める。画素値を横軸、各階級の画素数を縦軸にとると Fig. 7(a)～(c) のようなグラフが得られ、画像のヒストグラム、または濃淡ヒストグラム¹¹⁾と呼ばれている。ただし (a)～(c) はそれぞれ $S(221), S(311), S(411)$ のヒストグラムである。ヒストグラム $h(t)$ の包絡線を連続的に示したもの (ヒストグラムの形状) はトラック幅方向における MFM 信号の確率密度関数を近似する。

得られたヒストグラムについて考察する。標本データの分布がガウス分布に従うのなら左右対称なヒストグラムが得られるはずであるが、遷移領域で示すヒストグラム (Fig. 7(b), (c)) は非対称である。その非対称性を定量的に検証する。検証はガウス分布に実際の標本信号の確率密度関数が適合しているかを調べる χ^2 検定 (chi-square goodness-of-fit test)¹²⁾ で用いられる評価値により行う。縦系列 $S(t)$ における N 個の信号 (本論文では $N=512$) をクラス間隔と呼ばれる K 個の階級に分割し、上に述べた手順と同様にしてヒストグラムを求める。ここで階級

の幅 Δ_k は検定でよく用いられる値 $0.4\sqrt{\sigma^2(t)}$ を用いた。 k 番目のクラスに入る実際の信号の数を観測度数 f_k で示し、 $S(t)$ と同じ平均、分散をもつガウス分布の信号が k 番目のクラスに入ると期待される度数を期待度数 F_k で示すと各クラスにおける期待度数と観測度数との差は $f_k - F_k$ となる。全差異をはかる評価値 $X^2(t)$ は以下のように示される。

$$X^2(t) = \sum_{k=0}^K \frac{(f_k - F_k)^2}{F_k}$$

それぞれ $S(t)$ ($t=1, 2, \dots, 512$) の系列について求めた $X^2(t)$ をプロットした例が Fig. 7(B) である。遷移領域において特に $X^2(t)$ 値が大きな値を示す傾向があり、ガウス分布との差異が認められた。ガウス分布に従う確率変数であれば平均と分散のみで統計的特徴を記述することができるが、差異が大きな領域では平均、分散以外の高次の統計量が意味をもち、MFM 像の統計的性質を決めている可能性がある。提案手法を用いれば高次の統計量を求めることが可能であり、媒体の MFM 像に対するより詳細な特徴解析が期待できる。高次の統計量が表すものには、媒体の磁化状態以外に MFM 応答の非線形性などに起因したものも含まれていると考えられる。したがってこれらの統計量は MFM 測定における応答関数の影響を考える上でも、その利用が期待される。

7. 考 察

提案手法により得られた分散の記録密度の増加に伴う特徴的变化について考察する。考察に当たって MFM 像を探針がマイクロトラック¹³⁾ を走査して得られる信号の集まりと考える (Fig. 8)。ただしマイクロトラック数は 10 とした。一つ一つの MFM 走査信号プロファイルの磁化遷移部分に見られるピークの幅 (例えば Fig. 4 の a-c 間) を MFM 遷移領域と定義する。Fig. 8 では簡単のため MFM 遷移領域を 2 種類のハッチングで示し、それぞれ -1, 1 の値を割り当て、ハッチングしていない部分を 0 とする。Fig. 8(a) の理想トランジション中心 (Ideal Center of Transition) 間の距離 T を 12 とすると (b) では T が 8 のモデル図である。

まず、Fig. 8(a) に注目する。5 章と同様にして Fig. 8(a) 上のモデル図から得られた分散を Fig. 8(a) 下に示す。それぞれのマイクロトラックにおける磁化遷移位置や幅の大きさがばらついている現象を『遷移領域の揺らぎ』と考える。このように考

Fig. 7 $X^2(t)$ variation and histograms. (A) is the average profile of a 50-kFCI recorded medium. (B) is the $X^2(t)$ distribution, i.e., the deviation from the Gaussian distribution in the cross-track direction. (a), (b), and (c) show typical histograms in a bit region and transition regions marked on the average profile (A).

Fig. 8 Micro-track model. The dotted lines indicate the positions of the "Center of ideal transition." In model (a), $T=12$, and in model (b), $T=8$. The graphs show the variance of (a) and (b), respectively.

えると、MFM 信号は遷移領域の位置や幅の違いによって変化する¹⁴⁾ので、5 章に述べた遷移領域に現れる分散のダブルピーク (Fig. 8(a) の a, b 点) は、上に述べた磁化遷移位置や幅の揺らぎを反映しているといえる。

一方、記録密度が高くなることはすなわち T が小さくなることに対応する。ここで理想トランジション中心位置には含まれた区間を理想ビット領域 (Ideal Bit Region) と定義すると、記録密度の増加に伴い、理想ビット領域に入り込んでくる隣接 MFM 遷移領域の割合が増加する。そのため低記録密度においてビット領域に現れていた低分散部分 (Fig. 8(a) の c 点) が、記録密度が上がるとしだいに見られなくなることが予測できる。この現象が起こる例を Fig. 8(b) に示す。ただし Fig. 8(b) は (a) の遷移領域の揺らぎを変えずに T のみを小さくした単純なモデル図である。Fig. 8(b) の d 点では Fig. 8(a) の c 点で現れていたビット領域における低分散部分が失われていることが確認できる。このように Fig. 8 の (a) と (b) を比較することで、高密度化に伴いビット領域における低分散部分が見られなくなる現象を簡単なマイクロトラックモデルにより説明できた。したがってビット領域で低分散部分が現れる確率を示す評価値 L/W (5 章) は、各マイクロトラックの磁化遷移位置や幅のばらつきがビット領域へ与える影響の度合いを定量的に示していると考えられる。

しかし、実際には T が小さくなると隣接トランジション間の相互作用などによって遷移領域の揺らぎも変化すると考えられる。このような変化は上に示した単純なモデルでは十分に表現できないため、より厳密に媒体の磁化状態を示すモデルを考察することが必要である。すでに 6 章で述べたように遷移領域では非対称なヒストグラムが観測されていることから高次の統計量がこのモデルに新たな知見を与える可能性がある。

8. まとめ

媒体の MFM 像を同じ確率密度関数に従う信号系列の集合

Fig. 9 Example of region segmentation. (b) shows the result of region segmentation of (a). (a) is made up of the profiles shown in the lower graph. The lines in (b) are the boundaries of the segmented regions.

とみなし、その系列ごとに統計量を算出するという新たな解析手法を提案した。この手法に従って実際に統計的特徴量 (平均、分散、ヒストグラム) を求め、得られた統計量の一つである分散により、媒体の MFM 信号のトラック幅方向における揺らぎの特徴解析が可能になった。

提案手法に基づいて得られた分散と従来法で用いられている平均プロファイルを併用することにより、新たな評価値 L/W を見いだした。また、記録密度の増加に伴う分散の特徴的变化について簡単なマイクロトラックモデルを用いた説明を試みた。本論文では同じ媒体について記録密度を変化させた場合に L/W が記録密度の増加に伴い減少するという傾向を確認したが、異なる媒体の L/W を比較することも可能であり、遷移領域の揺らぎが少ない高密度対応の媒体を知る一つの有効な目安となる。また実際に得られた L/W が磁気ヘッドによる S/N と同様の傾向を示したことから、トラック幅方向の MFM 信号の揺らぎが S/N 劣化の原因の一つであることが予想できる。しかし L/W がヘッドによる S/N と同様の傾向を示した詳細な理由についてはさらなる検討が必要である。

今後は遷移領域の揺らぎを特徴づける統計量の抽出を行うために非ガウスの分布に注目した解析を行う。

Appendix 1

領域分割 (region segmentation): 画像データを局所的な特徴の一様な部分画像に分割する手法。本研究では、隣接画素間の濃淡差に閾値を設定して分割を行う単純領域拡張法を用いた Fig. 9(a) はグラフの示すプロファイルをもつ同じ信号を縦方向に 512 本並べた 16 bit 階調のサンプル画像であり、その領域分割結果が Fig. 9(b) である。閾値として 220 を用いた。プロファイルの勾配が大きい部分では隣接画素間の濃淡差が大きい

Table 1 Result of a test for a stationary

We performed a test for the MFM image of a 50-kFCI recorded medium. $S(211)$ represents the longitudinal series in the bit region, and $S(291)$ the longitudinal series in the transition region.

j	$\mu[D_1(211)]$	$\sigma^2[D_1(211)]$	$\mu[D_1(291)]$	$\sigma^2[D_1(291)]$
1	28760 -	4473155 +	23681 +	11867940 +
2	28129 -	2561125 -	17311 -	3070376 -
3	29273 +	4610124 +	17899 -	4144231 -
4	28090 -	1811723 -	23710 +	2755342 -
5	28679 -	1791237 -	25196 +	9985637 +
6	28564 -	1730531 -	23883 +	3472758 -
7	28448 -	2860457 -	22682 +	2836786 -
8	29529 +	1595870 -	27427 +	15028646 -
9	28866 -	2579870 -	22512 -	15739192 +
10	29715 +	2890133 -	27829 +	8200857 -
m	28902 -	3102997 -	22570 -	8621019 -
r	-	6	-	4

値をもつので、他の部分に比べ領域が多く発生している。Fig. 9(b) で黒く見える部分は領域が多く存在するために境界線が密集していることを示す。このサンプル画像では縦方向には信号の濃淡差は存在しないので、境界線は縦方向に沿ったものが得られている。

Appendix 2

定常性の検定の手順を以下に示す。MFM 像から任意に縦の系列信号 $S(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_N(t)\}$ (Fig. 1(b)) を選び、それを各々 p 個の画素をもつ I 個の区間に分割する (p は N を I で割った商)。それぞれの区間の信号系列 $D_j(t)$ は $D_j(t) = \{x_{1+p(j-1)}(t), x_{2+p(j-1)}(t), \dots, x_{p+p(j-1)}(t)\}$, $j \in \{1, 2, \dots, I\}$ のように示される。

検定の前に I の値を決定する必要がある。 I の値を小さく設定すると得られる信号系列 $D_j(t)$ の個数が少なくなってしまうため、検定を行うことができない。一方、 I の値を大きくしすぎると一つの区間に含まれる信号はすべて同一の磁気クラスタに属することになり、各区間内の信号が問題となる媒体の非定常性(磁気クラスタの状態)を適切に反映していないことになる。本論文で対象とした MFM 像に見られる磁気クラスタ¹⁵⁾の直径は約 100~200 nm (本論文で用いた MFM 像の走査範囲は $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ であるので約 26~51 画素に相当する)程度であることから、 $I=10$ ($p=51$, 約 200 nm) とした。このように I の値を設定することで、各々の区間の信号が特定の磁気クラスタによる濃淡値の特徴のみを反映することなく、適切に検定を行うことができると考えられる。次に各々 $D_j(t)$ の平均 $\mu[D_j(t)]$ を求め、得られた平均の系列 $\{\mu[D_1(t)], \mu[D_2(t)], \dots, \mu[D_I(t)], \dots, \mu[D_I(t)]\}$ の中央値 m を求める。中央値より値が大

きい場合は+、小さい場合は-とし、+と-で表された列において+または-が連続している部分を一つの連と見なす。この連の数 r によって定常性を検定する。連の数は縦系列 $S(t)$ における信号が同じ確率密度関数に基づいて生成される確率信号であるかどうかの目安を与えるものである。実際に行った検定の結果例を Table 1 に示す。遷移領域、ビット領域共に任意に選んだ系列の連の数は 3 以上 7 以下となった。すでに導出されている連の数とガウス分布の関係¹⁶⁾に基づいて計算すると 5% の有意水準で定常であることが許容された。分散の列 $\{\sigma^2[D_1(t)], \sigma^2[D_2(t)], \dots, \sigma^2[D_I(t)], \dots, \sigma^2[D_I(t)]\}$ に関しても同様な結果が得られた。

文 献

- 1) 日本応用磁気学会第 93 回研究会試料 (1996).
- 2) H. Mutoh, H. Kanai, I. Okamoto, Y. Ohtsuka, T. Sugawara, J. Koshikawa, J. Toda, Y. Uematsu, M. Shinohara, and Y. Mizoshita: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3914 (1996).
- 3) D. Ruger, H. J. Mamin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Stern, I. McFayden, and T. Yogi: *J. Appl. Phys.*, **68**, 1169 (1990).
- 4) P. Gligler, E. N. Abarra, H. Kisker, and T. Suzuki: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3557 (1996).
- 5) P. Gligler, J. M. Sivertsen, J. H. Judy, C. S. Bhatia, M. F. Doerner, and T. Suzuki: *J. Appl. Phys.*, **79**, 5327 (1996).
- 6) X.-B. Yang, Y. Okawa, and Y. Okumura: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28**, 221 (1995).
- 7) X.-B. Yang, M. Maeda, M. Yasui, Y. Okumura, and Y. Okawa: *J. Magn. Magn. Mat.*, **148**, 466 (1995).
- 8) 高木幹雄, 下田陽久監修: "画像解析ハンドブック", p. 689 (東京大学出版会, 東京, 1993).
- 9) J. S. Bendat and A. G. Piesol: "Random Data Analysis and Measurement Procedures," p. 342 (Wiley-Interscience Publication, New York, 1986).
- 10) J. S. Bendat and A. G. Piesol: "Random Data Analysis and Measurement Procedures," p. 77 (Wiley-Interscience Publication, New York, 1986).
- 11) 安居院 猛, 中嶋正之: "画像情報処理", p. 46 (森北出版, 東京, 1991).
- 12) J. S. Bendat and A. G. Piesol: "Random Data Analysis and Measurement Procedures," p. 91 (Wiley-Interscience Publication, New York, 1986).
- 13) J. Caroselli and J. K. Wolf: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3917 (1996).
- 14) A. Wadas, P. Grutter, and H.-J. Guntherodt: *J. Appl. Phys.*, **67**, 3462 (1990).
- 15) 竹尾昭彦他: 信学技報 No. 485, **MR96-84**, 15 (1996).
- 16) J. S. Bendat and A. G. Piesol: "Random Data Analysis and Measurement Procedures," p. 96 (Wiley-Interscience Publication, New York, 1986).

1998 年 2 月 27 日受理, 1998 年 6 月 9 日採録