日本応用磁気学会誌 23, 1073-1076 (1999)

MFM像の確率信号解析によって得られる分散の解釈

Analysis of MFM Images as Stochastic Signals and Interpretation of their Variances

武隈育子*, 安井雅彦**, 長谷山美紀*, 末岡和久*[†], 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) クボタ, 八尾市神武町 2-35(581-8686) [†]さきがけ研究 21, ^{††}科技団戦略的基礎

I. Takekuma^{*}, M. Yasui^{**}, M. Haseyama^{*}, K. Sueoka^{*†} and K. Mukasa^{*††} *Graduate School of Engineering, Hokkaido Univeirsity,*Kita-13,Nishi-8,Kita-ku, Sapporo 060-8628*

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

[†] JST, PRESTO, ^{††} JST, CREST

(1998年10月14日受理, 1999年1月21日採録)

Magnetic force microscopy (MFM) has been widely used to investigate magnetized states of recording media, and a method of analyzing MFM images as stochastic signals has been proposed. Through the analysis of the variance computed by this method, a parameter L/W was found. However, the relation between the variance variation and the recorded state of media is not well understood. In this study, in order to determine the relation, MFM output signals are simulated by using the micro-track model, and the variation in the variance around the transition region is considered. The relation between the L/W and some media parameters is investigated by means of the above simulation.

Key words: MFM, recording media, stochastic signals, variance, L/W

1.はじめに

高密度記録に適した媒体を開発するためには,記録磁化状態をより高分解能で評価し,記録と媒体の磁化状態の関係を 明らかにする必要がある.その手段の一つとして,磁気力顕 微鏡 (MFM) が広く用いられている^{1),2)}

これまで、MFM 像に対する定量的解析手法の一つとして、 著者らは確率信号の概念を用いた解析手法を提案した³⁾. こ の手法は、MFM 像が確率信号の標本系列の集まりであると みなし、確率統計論に基づいた特徴解析を行うものである. また、文献 3)では、得られる統計的特徴量の一つである分散 に着目した解析を行い、評価値 L/Wを見出した. しかしなが ら、分散と媒体の磁化状態の関係、媒体のパラメータと L/W の関係については十分に検討されていなかった.

本論文では MFM 出力信号をマイクロトラックを用いて計 算し、先に述べた文献 3) の手法により得られる分散を求め、 媒体の記録磁化状態と分散の関係の解明を試みる. 媒体の遷 移領域の揺らぎを考慮すると、計算によって求めた MFM 出 力信号の分散と、媒体の MFM 観察像から得られる分散の特 徴が一致することがわかった. さらに、この計算を用いるこ とにより、文献 3) では明らかにされていなかった媒体のパラ メータと L/W の関係が明確となった.

2. 孤立遷移の MFM 像から得られる分散

文献3)で得られた分散の特徴が、孤立遷移においても確認 できるか調べるために、孤立遷移の MFM 観察を行い、分散 を求める.

MFM 観察を行った媒体 A は, Al 合金に Ni-P をメッキした 基板を用い,Cr 下地膜 (40nm) 上に Co-13Cr-6Ta-4Pt 膜, 保 護膜として C(10nm) を成膜したもので, Hc = 2400 Oe, Mrt= 0.86 memu/cm², $S^* = 0.8$ である. 記録には 1Gbits/in² 用の MR ヘッドを用い, 書込ギャップ長 $0.5 \pm 0.08 \mu m$, 書込 トラック幅 $2.9 \pm 0.5 \mu m$, 磁気スペーシング 50nm, 書込電流 30mA, 周速 9.4m/s で行った. MFM は Digital Instruments 社製の Nano Scope III を用い, 測定は Tapping Mode, リ フトハイト 15nm で行った. 探針は AFM 専用 Si 探針上に CoCr 系磁性膜を蒸着したものを使用し, 測定に先立ち試料に 対して垂直な方向に着磁した. カンチレバーは試料に平行な 方向に対して約 10° 傾いている. また共振周波数は約 80kHz であった.

Fig.1 は孤立遷移 (1kFCI)の MFM 観察像である. 文献 3) で提案した手法に従い,トラック幅方向の信号系列毎に算出



Fig. 1 MFM image of an isolated transition in Medium A.



Fig. 2 Average profile and variance variation of Fig. 1

した平均,分散を Fig.2 に示す. ただし平均は,一般の解析に 用いられている²⁾ 平均プロファイルに相当する. 同じ媒体の 50kFCI で見られた分散³⁾の特徴(磁化反転部分で極小値を とり,両端に二つのピークが現れる)と同様の傾向が孤立遷 移においても確認できた. したがって記録密度が比較的低い 場合(10,30,50kFCI で確認),文献3)の手法により得られる 複数遷移(multiple transition)の分散の特徴は,孤立遷移の 解析により解釈できると考えられる. これは,磁気ヘッドに よる再生信号の解析における考え方と同じである.

3.MFM 出力信号の計算により求めた分散

文献3)に述べた手法に従って得られる分散の特徴と媒体 の記録磁化状態の関係を明らかにするために、MFM 出力信 号を計算によって求める.2節で述べたように、書き込みが 良好に行われていると予想される記録密度までは、孤立遷移 の解析による解釈が複数遷移の分散の特徴把握に応用できる と考えられる.したがって、ここでは孤立遷移における分散 の特徴について検討する.

Fig.2 で見られるように、磁化遷移部分で高分散になってい ることから、分散は主に媒体の遷移領域における揺らぎを反 映してると予測できる.そこで媒体の遷移領域における揺ら ぎを表現できるモデルとして、マイクロトラックモデル⁴¹を 採用する.これまでマイクロトラックモデルは主に遷移領域 の揺らぎと媒体ノイズの関係の解析に用いられていた⁵¹.こ のモデルでは、一つのトラックが大きさの等しい N 個の小ト ラック(以後、マイクロトラックと呼ぶ)から構成されている と考える(Fig.3).遷移領域ではマイクロトラック毎に異なっ た磁化遷移が起こっており、それらの磁化遷移位置、幅の揺ら ぎを遷移領域の揺らぎと考える.

ここで、マイクロトラック幅Sに対して MFM 探針の分解 能は十分高いと仮定すると、i 番目のマイクロトラックから 得られる平均 MFM 出力信号 $F_i(t)$ はトラック幅方向が無限 であるとする 2 次元の MFM 応答解析¹⁾によって求める事が できる. ただし、t はトラック方向を示す. 求めた平均 MFM 出力信号 $F_i(t)$ の集合を MFM 像と考えると、文献 3) の手法 にしたがって得られる平均 $\mu(t)$ 、分散 $\sigma^2(t)$ は以下の式で表さ れる.

$$\mu(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} F_i(t)$$
 (1)

$$\sigma^{2}(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (F_{i}(t) - \mu(t))^{2}$$
(2)

 $F_i(t)$ の計算にあたり、扱いが簡単かつ有効な近似を与える point-dipole 探針を仮定した¹⁾. また媒体の磁化遷移形状 M(t)は、arctangentを仮定した⁶⁾.

$$M(t) = \frac{2Mr}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t-t_0}{a}\right) \tag{3}$$

式(3)中の"a"は磁化遷移幅を特徴づけるパラメータである. したがって、磁化遷移幅の揺らぎを a の揺らぎと考える. 全 てのマイクロトラックの磁化遷移形状が arctangent である と仮定した場合, aの揺らぎ, 及び磁化遷移位置 t_0 の揺らぎ を, それぞれ δa , δt で表すと, i 番目のマイクロトラックの磁化 遷移形状は以下のようになる⁸⁾.

$$M_i(t) = \frac{2Mr}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - t_0 - \delta t_i}{a + \delta a_i} \right)$$
(4)

パラメータ a の揺らぎ δa_i , 磁化遷移位置の揺らぎ δt_i を共 に平均が0(nm) であるガウス分布と仮定する. それぞれの標



Fig. 3 Micro-track model.



Fig. 4 Calculated average profile and variance variation for $\sigma_a = 20$ (nm), and $\sigma_t = 0$ (nm).



Fig. 5 Calculated average profile and variance variation for $\sigma_a=0$ (nm), and $\sigma_t=20$ (nm).



Fig. 6 Calculated average profile and variance variation for $\sigma_a=5$ (nm), and $\sigma_t=20$ (nm).

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 4-2, 1999

準偏差を σ_a , σ_t と記述する.以上の仮定のもとに,式(1),(2) によって算出された MFM 出力信号の平均と分散を Fig.4~6 に示す.計算には2節に述べた媒体Aのパラメータを使用 した. パラメータ a は Williams-Comstock モデル⁷⁾により 計算し,a=80nm とした. また使用したカンチレバーの傾き $\theta_c = 10^{\circ}$ も考慮した. Fig.4 はパラメータ a の揺らぎのみが存 在した場合 ($\sigma_a = 20$ (nm), $\sigma_t = 0$ (nm)), Fig.5 は磁化遷移位置 の揺らぎのみが存在した場合 ($\sigma_a=0(nm), \sigma_t=20(nm)$)の計 算結果である.パラメータ aの揺らぎ,磁化遷移位置の揺ら ぎが共に存在しない場合 ($\sigma_a = 0(nm), \sigma_t = 0(nm)$) における MFM 出力信号の最大値で $F_i(t)$ を規格化した. 但しマイク ロトラック数 N=500 とした. N の値を変化させても得られ る分散の特徴に差異は認められないが、N は標本系列数を表 し、この数が少ないと式(1)及び(2)から算出した値の信頼 性が低くなることから、通常用いられる値よりも大きな値に 設定した. また探針を point-dipole で近似したことにより, 計算結果の平均プロファイルの半値幅 (FWHM) は, MFM 観察像から実際に得られる平均プロファイルに比べて小さく なっている¹⁾. Fig.4, Fig.5 により, 分散はパラメータ aの揺 らぎによって、平均プロファイルの極値部分でピークを持ち、 磁化遷移位置の揺らぎによって、平均プロファイルの勾配が 大きい部分でピークを持つことが確認できる.

Fig.4, Fig.5 では, a 及び磁化遷移位置の揺らぎのいずれか が存在していると仮定したが,実際には, a,磁化遷移位置の揺 らぎの両者が存在している.2節で用いた媒体の膜厚の変動 幅が±5%以内であることから,Williams-Comstock モデル ⁷⁾を用いて a の揺らぎを見積もると σ_a は数 nm 程度と考えら れる.また実際の MFM 観察像において MFM 信号が極値 をとる位置を調べ,その標準偏差を求める事により磁化遷移 位置の揺らぎを見積もると、 σ_t は約 20nm となる.したがっ て媒体 A の場合, a の揺らぎは磁化遷移位置の揺らぎに比べ て小さいことが予測できる.そこで σ_a =5nm, σ_t =20nm の揺 らぎを共に与えた場合に得られる分散の結果を Fig.6 に示す. ただし, a と磁化遷移位置の揺らぎは互いに独立なものとして 計算した.

Fig.2 に示した実際の MFM 像から得られている分散と比較すると、磁化反転部分で極小値をとり、両端に二つのピークが現れるという特徴が共通していることが確認できる。したがって磁化遷移部分に現れる分散の特徴は、媒体の遷移領域における磁化状態(磁化遷移位置、幅)の揺らぎを反映していると解釈できる。

式(4)で表される磁化遷移領域の揺らぎが存在すると仮定 した場合,文献3)の手法に従って得られる分散は以下の式⁸⁾ によって近似される.

$$\sigma^{2}(t) = \sigma_{t}^{2} \left(\frac{\partial F}{\partial t}\right)^{2} + \sigma_{a}^{2} \left(\frac{\partial F}{\partial a}\right)^{2}$$
(5)

ただし*F*は揺らぎが存在しない場合 ($\delta a_i = 0$ (nm), $\delta t_i = 0$ (nm)) の MFM 出力信号 $F_i(t)$ である. 第一項は磁化遷移位置の揺 らぎ, 第二項は磁化遷移幅の揺らぎによって生じる分散を表 している.

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 4-2, 1999

文献3)では磁化遷移部分で分散に二つのピークが現れる ことが確認できたが、両者の高さには差があり、その差異が 何を表しているのか言及されていなかった.これは上の計 算結果と式(5)によって、以下のように説明することができ る. Fig.4 と Fig.5 を比較すると, Fig.5 の磁化遷移位置の揺 らぎのみを考慮した場合に、磁化反転部分で二つのピークを 持つという特徴が顕著に表れている. したがって分散の二つ のピークは主に磁化遷移位置の揺らぎに起因していると予測 できる. そこで式(5)の第一項に着目すると,分散のピーク の高さの差が MFM 出力信号の勾配^{∂F}/_{4t}の違いにより生じて いると解釈できる.異なる MFM 出力信号の勾配^{∂F}の要因 として、まずカンチレバーの傾きの影響があげられる.しか しながら測定中の探針の磁化状態が一定であるという仮定を すると、カンチレバーの傾きの影響だけでは、一枚の MFM 観察像において見られる二つのピーク高さの差のばらつき³⁾ を説明することができない. その他の理由としては、非対称 な磁化遷移形状の影響が考えられる. 上の計算では全ての マイクロトラックの磁化遷移形状を arctangent と仮定した が、実際にはマイクロトラック毎にその形状が揺らいでおり、 arctangent のような左右対称の形状だけではなく、非対称な 形状も存在していると考えられる.非対称な磁化遷移形状が 存在すれば、MFM 出力信号の勾配に反映されるので、分散 のピーク高さの差に影響を与えると推測できる.

4.評価値 L/W

式 (1)~(4) を用いて、評価値 L/W^3)(W:書き込みビット 数,L:低分散部分が現れるビット数)を計算により求め,いく つかの媒体のパラメータとの関係を調べる. L/Wは分散と 平均プロファイルを併用して求める評価値であり,ビット領 域で低分散部分が現われる確率を示す.前節で述べた方法に 従って互いに独立な遷移領域の揺らぎを持つ二つの孤立遷移 を求め,それを W 回線形に重ね合わせることによって L/Wを計算した. 媒体 A のトラック幅方向の相関長を見積もると ⁹⁾, 100~200 nm 程度であったので,計算は媒体 A のトラッ ク中央部を $2\mu m \times 2\mu m$ のスキャン範囲で MFM 測定した場 合を想定し,マイクロトラック数 N は 15 とした (相関長 約 133nm).

まず、 $\sigma_t \ge L/W$ の関係を調べる. σ_t =20(nm)、40(nm)、 60(nm)の場合における L/W(W=30)の記録密度に対する 変化を Fig.7 に示す. いずれの計算も媒体 A のパラメータ値 を用い、 σ_a =5nm で計算した. 揺らぎの程度 (σ_t)が大きいほ ど低記録密度側では L/Wの値が小さいという傾向が確認で きる. しかしながら、高密度側 (200kFCI 以上)では、 σ_t が小 さいほど L/Wの値は大きい値を示し、低密度側とは逆の傾 向がみられる.

Table 1 Properties of media

	Hc (Oe)	S*	$Mrt (memu/cm^2)$
Medium B	2420	0.82	0.72
Medium C	2380	0.86	1.58
Medium D	2280	0.87	2.44

1075



Fig. 7 Calculated values of L/W.



Fig. 8 Calculated values of L/W.



Fig. 9 Comparison of the L/W in Media B, C, and D.

次にパラメータ $a \ge L/W$ の関係を調べる. a = 50(nm), 80(nm), 110(nm) の L/W(W=30) の記録密度に対する変化 を Fig.8 に示す. Fig.7 の計算と同様, 媒体 A のパラメータを 用い, $\sigma_a = 5$ nm, $\sigma_t = 20$ (nm) で計算を行った. a が大きいほ ど低記録密度側で L/Wの値が減少する傾向が確認できる.

Fig.8 の計算結果を確認するために、実際に a が異なる媒体の MFM 像から L/Wを求める.同じ材料の磁性膜の厚さを変化させる事は a を変化させる事に対応する⁷⁾と考えられるので、a の値の異なる媒体として、基板、下地膜、磁性膜、保護膜の材料は同じで、Mrt のみが異なる媒体 (B,C,D)を作製した.各々の媒体の磁気特性を Table1 に示す.用いた基板、下地膜、磁性膜、保護膜の材料および膜厚、記録、MFM 測定の条件は媒体 A と同じである.これらの媒体の MFM 観察を行い、実際に L/Wを求めたものを Fig.9 に示す.ただしFig.9 の L/W の値は、各媒体の各々の記録密度において、3枚の MFM 観察像 (スキャン範囲 $2\mu m \times 2\mu m$) から得られた値の平均である.Fig.9 に示すように、低密度側 (~120kFCI)

では Mrt の値が大きい (a の値が大きい) ほど L/W の値が 小さくなっており,Fig.8 で示した結果と対応している.しか し高密度側においては, a に依存した傾向をはっきりとは確 認できない.この原因としては,(1)MFM 測定回数が少ない, (2) 高密度側では孤立遷移の線形重ね合わせのみで説明でき ない現象が起こっている,(3) 遷移領域ではガウス分布とは異 なる揺らぎをもっていること等が考えられる.

5. まとめ

確率信号とみなした MFM 像の解析によって得られる分散 と媒体の磁化状態の関係を、マイクロトラックを用いた MFM 出力信号の計算により明らかにした.その結果、分散は主に 媒体の磁化遷移位置の揺らぎを反映した特徴量であることが わかった.また、得られる分散の特徴が媒体の特徴量と結び つけられたことにより、確率信号としての MFM 像解析の妥 当性を確認できた.さらに分散の近似式を導入し、磁化遷移 部分に現れる分散の二つのピークの高さの違いについて考察 を行った.その結果、カンチレバーの傾きや非対称な磁化遷 移形状によって生じる MFM 出力信号の勾配の差が、分散の ピーク高さの差異の原因として考えられることがわかった.

孤立遷移を線形に重ね合わせることにより L/W の計算を 行い、磁化遷移位置の揺らぎと L/W の関係、及び磁化遷移幅 と L/W の関係を調べた. その結果、σtが大きいほど低密度 側では L/W は小さな値を示すが、高密度側では逆の傾向に なることがわかった.また、パラメータ a の値が大きいほど L/W の値が小さくなることがわかった.

パラメータ a と L/W の関係については, 実際に a の異な る (Mrt の異なる) 媒体の MFM 像から L/Wを求め, 計算に よって得られる傾向と比較した. その結果, 低記録密度側では 同じ傾向を示したが, 高密度側では異なる傾向を示した. こ の原因はいくつかあげられるが, ガウス分布を仮定した計算 結果との相違が見られたことは, 文献 3) で既に確認されてい る遷移領域におけるトラック幅方向の MFM 信号の分布が, ガウス分布からずれている可能性をさらに示唆したことにな る.

参考文献

- D.Ruger, H.J.mamin, P.Guethner, S.E.Lambert, J.E.Stern,
 I.McFayden, and T.Yoji : J.Appl.Phys., 68, 1169 (1990)
- 2) P.Gliger, E.N.Abara, H.Kisker, and T.Suzuki: *IEEE Trans.* Magn., **32**, 3557(1996)
- 3) 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:日本応用磁気学会誌,22, No.9, 1251(1998)
- H.N.Bertram:Theory of Magnetic Recording, Cambridge Unversity Press, p.317 (1994)
- 5) J.Caroselli and L.K.Wolf:*IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3917(1996)6) p.95 in ref.[4]
- 7) M.L.Williams, R.L.Comstock: AIP Conf. Proc., $\mathbf{5}$, 735(1971)
- 8) p.311 in ref.[4]
- 9) G.N.Phillips and T.Suzuki:IEEE Trans. Magn., 34, 390(1998)

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 4-2, 1999