MFM 像を用いた媒体の磁気クラスタ構造の 2 次元解析

Two-dimensional Analysis of the Magnetic Microstructure of Media Using MFM Images

武隈育子*・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)

†科技団戦略的基礎

I. Takekuma,* M. Haseyama,* K. Sueoka,* and K. Mukasa*†

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

†JST, CREST

This paper analyzes two-dimensional features of the magnetic microstructure of longitudinal thin-film media. Several MFM analyses of the magnetic cluster size have been presented, but the two-dimensional features of the clusters are not well understood. In order to determine these features, we focused on the distribution of magnetic poles at the boundaries of magnetic clusters, and quantitatively analyzed it by using two kinds of image processing methods: binarization and thinning methods. The results were as follows: (1) we found that some media showed dependence on the specific direction in the distribution of magnetic poles in the dc-erased state, whose features are closely related to the magnetization fluctuations in transition regions, and (2) media with larger fluctuations in the transition region had larger N_m/S_0 values and partial erasure (PE) probabilities.

Key words: MFM, recording media, magnetic cluster, magnetization ripples, partial erasure (PE), magnetic pole density distribution

1. はじめに

トランジションノイズは、媒体の記録密度を制限する主要因となっている¹⁾。したがって、高密度化のためにはトランジションノイズの原因となる現象を把握し、記録再生特性との関係を明らかにする必要がある。トランジション領域における記録磁化状態は、DC 消去状態における媒体の磁気クラスタ構造に依存すると考えられており、DC 消去状態では媒体の局所的な磁化の揺動を反映した磁化リップル (magnetization ripples) と呼ばれる構造をとることが知られている^{2), 3)}。これまでは主に磁化の揺動の波長を反映するクラスタサイズに着目した解析が行われてきた⁴⁾が、リップルのブランチ (branch)^{2), 3)}に着目した磁気クラスタ構造の解析はほとんど行われていなかった。リップルのブランチは、磁気クラスタの境界部分に存在する磁極領域に相当し、媒体の磁化方向の分布やクラスタ形状などの特徴が反映される。したがって、これらの特徴に着目してトランジション領域の磁化状態との関係を調べれば、トランジションノイズの生成メカニズムを解明するための新たな知見が得られる可能性がある。

本論文では、媒体の MFM (Magnetic Force Microscopy) 観察像を用い、リップルのブランチに相当する磁極領域の分布に着目した特徴解析を行う。また、得られた結果により、DC 消去

状態における磁気クラスタ構造と、トランジション領域における磁化状態や記録再生特性との関係を調べる。その結果、DC 消去状態において磁化の局所的な分散が大きく、磁極分布に特定の方向依存性が強く現れる媒体では、トランジション領域の磁化状態の揺らぎや、PE (Partial Erasure) 生成確率が大きくなることが明らかになった。また、PE 生成確率に伴い、規格化媒体ノイズの値も大きくなることが確認された。

2 章では実験条件を述べ、3 章の 3.1 節で MFM 観察像を用いた磁極領域の抽出と、その解析手法について述べる。3.2 節では 3.1 節の手法を実際の媒体の MFM 観察像に適用し、DC 消去状態における磁極分布の解析結果を示す。4 章では比較的低密度記録を行った際 (150 kFCI, Flux change per Inch) のトランジション領域における磁化状態の評価と、高密度記録状態 (250 kFCI) における PE 生成確率の評価を行う。5 章では 3 章で得られた DC 消去状態における磁極分布の傾向と磁気クラスタ構造の関係について考察する。また、DC 消去状態のクラスタ構造と高密度記録状態におけるトランジション領域の磁化状態の関係についての考察も行う。

2. 実験条件

評価に用いた媒体の特性を Table 1 に示す。これらは、すべてテクスチャのない CoCrPtTa/CrMo 媒体である。記録ヘッドの書込ギャップ長は 0.3 μm 、書込トラック幅は 1.5 μm 、浮上量は約 50 nm であった。媒体の観察手段として MFM (Digital Instruments 社製: Nano Scope III) を用い、測定は Tapping Mode、リフトハイト⁵⁾ 15 nm 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。また共振周波数は約 80 kHz であった。Table 1 には文献 4) の手法を用いて求めた DC 消去状態におけるクラスタサイズの値も示す。

3. DC 消去状態における磁極分布の解析

3.1 解析手法

本論文では、磁化方向の分布などの媒体の二次元クラスタ構造の特徴が反映されるブランチの方向性に着目した解析を試みる。このような解析を行うためには、リップルのブランチ^{2), 3)}に相当する磁極領域 (磁気クラスタの境界部分に存在) を抽出し、その分布を解析すれば良い。具体的には、以下の二つの手順により解析を行う。

Fig. 1 MFM image of medium A in the dc-erased state, (b) result of thinning for (a), (c) MFM image of medium B in the dc-erased state, (d) result of thinning for (c), (e) MFM image of medium C in the dc-erased state, (f) result of thinning for (e).

磁極領域の抽出: MFM 観察像を閾値 th を用いて二値化し、正または負の磁極存在領域を抽出する。ここで最適な閾値を決定するために、あらかじめ GA⁶⁾ による手法⁷⁾を用いて磁極領域を抽出し、その領域の平均画素値によって閾値を決定する。次に、磁極領域の方向性の特徴を抽出しやすくするために領域の細線化⁸⁾を行う。細線化とは芯線化とも呼ばれ、線図形の認識のために用いられる一般的な手法である。

分布の方向性の解析: 磁極分布の方向性について定量的に解析するために、細線化された画像に対し、ハフ変換⁹⁾を行う。ハフ変換では、細線化によって認識された線要素から主要な直線成分を検出することが可能であり、線状に分布する傾向の度合いや、分布の方向性を定量的に評価することができる。ハフ変換の簡単な例を Appendix に記述する。

具体的な手順は、以下のとおりである。

1. 細線化により抽出された画素の x - y 座標 (x_i, y_i) に対し、以下の式に従って θ - ρ 空間上に曲線を描く。

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (i=1, \dots, N). \quad (1)$$

ただし、 N は細線化により検出された画素数を示す。

2. N 個の (x_i, y_i) に対して 1 の手順を繰り返す。

3. 最終的に得られる θ - ρ 空間において、多くの曲線が交差している (θ, ρ) から、対応する x - y 空間における主要な直線成分を検出する。

3.2 解析結果

DC 消去領域として 10 kFCI で記録したビット領域を解析の対象とした。実際に負（ここで用いた MFM 観察像では白で表される領域に相当）の磁極領域に対し、細線化を行った例を Fig. 1 に示す。媒体 A (Fig. 1(b)) では、他の媒体に比べクラスタサイズが大きいことを反映し、長い線成分が確認できる。ただし、検出されている線成分の長さは、クラスタ境界に存在する磁極存在領域⁷⁾の長さを表しており、文献 4) の手法を用いて求めたクラスタサイズの値 (Table 1) との相関はあると考えられるが、厳密には異なる量である。

次に、細線化された複数の画像に対してハフ変換を行い、抽出された線成分の傾き θ の分布 (ヒストグラム) を求める。それぞれの媒体について得られた結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 には θ の値と、トラック方向 (平均の磁化方向) との関係も示す。媒体 A (Fig. 2(a)) および媒体 B (Fig. 2(b)) ではトラック方向に対し、ほぼ対称な方向に強いピークが現れており、クラスタ境界部に存在する磁極領域の分布に特定の方向依存性がみられる。一方、媒体 C (Fig. 2(c)) のヒストグラムは、媒体 A および媒体 B に比べ扁平な形状をしていることが確認できる。

また、これまでの報告^{2), 3), 10)}では、トラック方向に対し垂直な方向にブランチが分布する縦波モードのリプル構造 (longitudinal ripple structure)^{15), 16)}が観察されているが、いずれの媒体においてもトラック方向 (平均の磁化方向: $\theta = \pi/2$) に平行な θ 成分が多く検出されており、縦波モードのリプル構造と異なる傾向を示している。この点についての詳細な検討は 5 章で行う。

4. トランジション領域の磁化状態解析

3 章で用いた媒体と同じ媒体について、150 kFCI と 250 kFCI の二つの記録密度におけるトランジション領域の磁化状態の解析を行う。以下にそれぞれの記録密度における評価方法について記述する。

低密度領域における磁化状態の揺らぎの解析: 150 kFCI では比較的低密度な記録を行った際における遷移領域の磁化の揺らぎを評価する。評価には、ビット領域に与える磁化の揺らぎの度合いを評価するパラメータ L/W ^{11), 12)} の値を用いる。ただし、 L/W の値が小さいほどトランジション領域における磁化

Table 1 Properties of the media

Media	Br _t (Gμm)	S	S*	H _c (Oe)	N _m /S ₀ at 250 kFCI (μm ^{1/2} μV _{rms} /μV _{pp})	Cluster size ⁴⁾ (nm)
Medium A	70	0.64	0.65	2782	0.0195	95
Medium B	60	0.61	0.61	2785	0.0231	86
Medium C	40	0.61	0.40	2349	0.0181	89

(These are CoCrPtTa/CrMo media prepared by the Storage Research Consortium in Japan.)

Fig. 2 (a) Distribution of θ for medium A, (b) distribution of θ for medium B, (c) distribution of θ for medium C and the relation between θ and the track direction.

状態の揺らぎが大きいことに対応する。

高密度記録領域における PE の解析: 高密度領域においては隣接トランジション間の相互作用が生じ、孤立トランジションの線形重ね合わせでは説明することができない非線形現象が起こる¹⁾。その非線形現象の一つである PE は、高密度領域における媒体ノイズと密接な関係があることが知られている^{13), 17)}。PE が生成していない低密度領域においては、トランジション領域の磁化状態の評価値として L/W が適しているが、高密度領域における L/W の値には、トランジション領域における磁化状態の揺らぎと PE などの非線形現象の双方が反映されるため、値の解釈が困難になる。そこで、高密度領域においては L/W を用いずに PE のみの評価を試みる。

PE は記録トランジションの一部で磁化の転移が消失する現象であり、PE が生じると記録トランジション以外の不規則な磁極領域が存在する^{13), 14)}。したがって、3章で行った解析を高密度記録磁化状態の MFM 観察像に適用すれば、PE が生成している領域を検出することができる。実際に 250 kFCI における媒体 A の MFM 観察像を用い、負の磁極存在領域に対して細線化を行った例を Fig. 3 に示す。記録されたトランジションの線成分のほかに、PE が起こっている領域で線成分が検出される (例: Fig. 3(b) の円で囲んだ部分)。本章では、この線成分の現れる頻度を用いて PE 生成確率の評価を行う。

それぞれの媒体の MFM 観察像を用いて L/W (150 kFCI), PE 生成確率 (250 kFCI) の値を求め、それらの値を Fig. 4 に示す。Fig. 4 では、250 kFCI における規格化媒体ノイズの値もプロットした。PE 生成確率が大きい媒体では、規格化媒体ノイ

ズの値も大きな値を示していることがわかる。また Fig. 4 から、比較的低記録密度 (150 kFCI) において遷移領域の揺らぎが大きい (L/W の値が小さい) 媒体では、高密度記録 (250 kFCI) を行った際の PE 生成確率や媒体ノイズの値が大きくなる傾向が確認できる。

5. 考 察

3章で得られた磁極分布の傾向と媒体の磁気クラスタ構造の関係について考察を行う。これまでに報告されている DC 消去状態におけるリップル構造^{2), 3), 10)}は、縦波モードと呼ばれる構造^{15), 16)}である (Fig. 5(a))。このような構造をとっている場合、媒体における磁極はトラック方向 (平均の磁化方向) に対し垂直な方向に沿った分布を示す (Fig. 5(b))。しかしながら解析の対象とした媒体の磁極分布は、いずれもトラック方向に沿った方向 ($\theta = \pi/2$) の分布が顕著であり (Fig. 2)、縦波モードのリップル構造を反映した方向の分布 ($\theta = 0, 2\pi$) は、ほとんど確認できない。解析に用いた媒体が平坦 ($R_{\max}$ 値 = 5~10 nm) であることから、表面磁極の存在が無視できると仮定した場合、これらの媒体が縦波モードのリップル構造をとっている可能性は低いと考えられる。そこで、磁化が平均の磁化方向に対し面内でランダムに分布している構造について考える。この構造ではすべての位置における磁化は独立であり、平均磁化方向に垂直な方向の磁化がそう傾向を示す縦波モードのリップル構造に比べ、各クラスタが孤立している。

Fig. 5(c) に示すように局所的な磁化 M_L を平均の磁化 M_{ave} からのずれ θ_L で表現し、磁化は面内のある角度内でランダムな方向をもつと仮定する。ただし、 $|M_L|$ は一定とし、 θ_L は特定の範囲内で一様分布 (確率密度関数が一定値である分布) に従う。磁極密度分布 $\rho(r)$ は以下の式によって計算することができる。

$$\rho(r) = -\nabla \cdot M_L(r). \quad (2)$$

$|\theta_L| \leq 5^\circ$ の場合における磁極密度分布の計算例を Fig. 5(d) に示す。ここでは白が負の磁極、黒が正の磁極を示す。また、計算によって得られた磁極密度分布から得られた磁極領域の方向性の解析結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) は $|\theta_L| \leq 5^\circ$ の場合、Fig. 6(b) は $|\theta_L| \leq 22.5^\circ$ の場合の結果を示す。Fig. 6(a), (b) いずれの場合も、平均の磁化方向 ($\theta = \pi/2$) に沿った分布が多くみられ、Fig. 2 と類似した傾向が確認できる。

したがって、解析の対象とした媒体は、縦波モードのリップ

Fig. 3 (a) MFM image of medium A at 250 kFCI, (b) thinning result for (a).

Fig. 4 Comparison of L/W at 150 kFCI and N_m/S_0 of the read-back signal and the PE probability at 250 kFCI.

ル構造に比べ各クラスタが孤立した構造をとっていることが推測できる。これは、いずれも S^* が小さい、つまり粒間相互作用が小さい媒体であることから妥当と考えられる。ただし、これまでに報告されている^{2), 3), 10)}縦波モードのリップル構造は、いずれもローレンツ TEM によって観察されたものであるため、MFM 観察によって得られた傾向 (Fig. 2) との差異には、観察手段や試料の状態 (TEM 試料は前処理が必要) の違いなどの影響も反映されている可能性がある。したがって、より厳密な解釈を行うためには、同一媒体について MFM とローレンツ TEM による観察像の比較を行う必要がある。

次に 4 章で評価を行ったトランジション領域の磁化状態と DC 消去状態における磁化状態との関係について考える。Table 1 に示すように、媒体 B は平均クラスタサイズが最も小さいにもかかわらず、高密度記録状態における PE 生成確率が高い値を示す。これはクラスタサイズだけでは、高密度記録状態における媒体ノイズの傾向を予測できないことを示唆している。以下では、3 章で得られた DC 消去状態における磁極分布の解析結果から、トランジション領域における磁化状態の揺らぎや PE について考察を行う。

Fig. 2 に示すように媒体 C の磁極分布 (Fig. 2(c)) は、媒体 A, B に比べ扁平な形状をしていることから、局所的な磁化方向の分布の偏りが小さく、均一な磁気クラスタ構造をしていると考えられる。このような DC 消去状態の磁化状態を反映し、媒体 C ではトランジション領域における磁化状態の揺らぎの度合いや PE 生成確率が小さい値を示したと考えられる。一方、媒体 A および B では磁極分布に特定の方向依存性が確認でき、いずれも高い PE 生成確率を示す。Fig. 2(a), (b) から、媒体 A, B の最も強いピーク間の角度 $\Delta\theta_{p-p}$ を見積もると、それぞれ、約 33° , 19° であった。ここで、磁極分布に特定の方向性が現れることが、その方向に静磁気的相互作用あるいは交換相互作用が強く働くことを反映していると仮定し (Fig. 7(b)), ピークが現れる角度とトランジション領域の磁化状態の関係について考察する。トラック方向に対して、 θ_L 方向に相互作用が強く働く場合、隣接トランジション間における θ_L 方向に沿った相互作用距離 y^* は以下の式によって表すことができる (Fig. 7 (a)).

$$y^* = x_{\text{bit}} / \cos \theta_L. \quad (3)$$

x_{bit} は隣接トランジション間の距離であり、 θ_L の値は $\Delta\theta_{p-p}$

Fig. 5 (a) Schematic illustration of the longitudinal ripple structure,^{15), 16)} (b) example for calculation of the magnetic pole density distributions of (a), (c) relation between the average magnetization M_{ave} and the local magnetization M_L , (d) example for calculation of the magnetic pole distributions with random distribution of θ_L .

の約半分の値として見積もることができる (Fig. 2 においてピークはトラック方向に対し、ほぼ対称に現れているので)。ここで、式 (3) で表される隣接トランジション間における θ_L 方向の相互作用距離 y^* の値は、同じ記録密度 (x_{bit} 一定) では θ_L の値が小さいほど小さくなる。したがって、トラック方向に対し最も浅い角度のピークが現れている (θ_L の値が小さい) 媒体 B において、同一記録密度における θ_L 方向の相互作用距離 y^* の値が最も小さいと考えられる。その結果、隣接トランジション間の相互作用¹⁷⁾が起りやすくなり、トランジション領域の揺らぎや PE 生成確率が大きくなったと考えられる。一方、磁気異方性の誘起を意図していない (テクスチャがない) にもかかわらず、媒体 A や媒体 B において磁極分布に特定の方向依存性が得られた要因については、現段階では明らかになっておらず、さらなる検討が必要である。

また、Fig. 6(a), (b) を比較すると、 θ_L の分布の範囲が大きいほど θ の分布が広がっていることが確認できる。つまり、磁化方向の分散が大きいほど、 θ の分布が広がることを示している。媒体 B (Fig. 2(b)) は、他の媒体に比べてトラック幅方向 ($0 \leq \theta \leq \pi/4$, $3\pi/4 \leq \theta \leq \pi$) の磁極分布が多く検出されており、平均磁化方向に対し大きな $|\theta_L|$ の値をもった磁化が多数存在していることが推測できる。したがって、DC 消去状態における磁化方向の局所的な分散が大きいことも、高密度記録磁化状態の劣化要因の一つであると考えられる。

Fig. 6 (a) Distribution of θ with a random distribution θ_L ($|\theta_L| \leq 5^\circ$), (b) distribution of θ with a random distribution θ_L ($|\theta_L| \leq 22.5^\circ$).

Fig. 7 (a) Schematic drawing of the adjacent transitions at the high recording density, (b) schematic drawing of the magnetic cluster.

6. ま と め

DC 消去状態における媒体の記録磁化状態に対し、磁化リップルのブランチに着目した特徴解析を行い、新たに得られたクラスタ構造の特徴とトランジション領域における磁化状態、記録再生特性との関係を調べた。本論文では、MFM 観察像からブランチに相当する磁気クラスタ境界部の磁極領域を抽出し、その分布の方向性について解析を行った。その結果、解析の対象とした媒体は、縦波モードのリップル構造よりむしろ個々のクラスタが孤立した構造になっている可能性が示された。また、DC 消去状態の磁極領域の分布に特定の方向依存性がみられる媒体では、トランジション領域における記録磁化状態の揺らぎや PE 生成確率が大きい傾向が確認された。さらに、磁極領域の抽出手法を用いて高密度記録磁化状態の PE 生成確率を評価した結果、PE 生成確率は規格化媒体ノイズの値と同様な

Fig. 8 Example of the Hough transform. (a) x - y space, (b) θ - ρ space for (a).

傾向を示し、いずれも低密度記録状態における遷移領域の揺らぎとの相関が確認できた。これらは従来の解析には反映されなかった傾向であり、本論文で行った手法で得られる磁極分布の方向性の傾向を、従来のクラスタサイズなどの特徴と合わせて考えると、高密度記録磁化状態における媒体ノイズ生成メカニズムがより明確になると考えられる。しかしながら現段階では、磁極が特に強く分布する方向と媒体の特性や記録との詳細な関係は明らかになっていない。この関係を解明することは、低ノイズ媒体を設計するための指針を得ることにつながると期待できる。

Appendix

ハフ変換の例を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) の x - y 空間上の画素 (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3$) を、それぞれ式 (1) に従って変換すると、曲線 $C(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, 3$) が得られる (Fig. 8(b)). x - y 空間上において (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3$) は直線 K 上に並んでいるため、変換された θ - ρ 空間の曲線 $C(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, 3$) は 1 点 $P(\theta_K, \rho_K)$ で交差している。この $P(\theta_K, \rho_K)$ を式 (1) に代入すると、対応する x - y 空間上の直線 K が得られる。

謝 辞 本研究の一部は、情報ストレージ研究推進機構 (SRC) の研究助成を受けて行われた。また、解析に用いた媒体 (SRC 共通媒体) は、SRC 媒体部会より提供していただいた。

文 献

- 1) H. N. Bertram: Theory of Magnetic Recording, Cambridge University Press (1994).
- 2) T. Chen: *IEEE Trans. Magn.*, **17**, 1181 (1981).
- 3) T. Chen and T. Yamashita: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2700

- (1988).
- 4) M. Takahashi, A. Kikuchi, H. Hata, and H. Shoji: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1573 (1998).
 - 5) K. L. Babcock, V. B. Elings, J. Shi, D. D. Awschalom, and M. Dugas: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 705 (1994).
 - 6) D. E. Goldberg: "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," (Addison Wesley Publishing Company, 1989).
 - 7) 武隈育子, 長谷山美紀, 末岡和久, 武笠幸一: 日本応用磁気学会誌, **24**, 303 (2000).
 - 8) C. J. Hiltch: "Linear Skeletons From Square Cupboards," *Machine Intelligent 4*, p. 403 (Edinburgh Univ. Press, 1969).
 - 9) 安居院 猛: "画像情報処理" (昭晃堂, 1993).
 - 10) K. Tang, M. R. Visokay, C. A. Ross, R. Ranjan, T. Yamashita, and R. Sinclair: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 4130 (1996).
 - 11) 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**, 1251 (1998).
 - 12) I. Takekuma, M. Haseyama, K. Sueoka, K. Mukasa, and M. Yasui: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2685 (1999).
 - 13) T. K. Taguchi, A. Takeo, and Y. Tanaka: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1973 (1998).
 - 14) T. K. Taguchi, A. Takeo, and Y. Tanaka: *Technical Report of IEICE*, MR98-12 (1998).
 - 15) H. Hoffman: *J. Appl. Phys.*, **35**, 1790 (1964).
 - 16) K. J. Harte: *J. Appl. Phys.*, **39**, 1503 (1968).
 - 17) T. C. Arnoldussen and H. C. Tong: *IEEE Trans. Magn.*, **22**, 889 (1986).

(2001年3月7日受理, 2001年7月11日採録)