日本応用磁気学会誌 25,563-566 (2001)

垂直磁気記録方式における記録再生・熱減磁特性予測

Read/Write and Thermal Decay Estimation of Perpendicular Magnetic Recording

黒田敦子・西田靖孝・中村敦・棚橋究・高野公史・成重真治*・青井基*・中村慶久**

(株)日立製作所中央研究所、東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280(〒185-8601)

*(株)日立製作所ストレージシステム事業部、神奈川県小田原市国府津 2880 (〒256-8510)

**東北大学電気通信研究所、宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

A. Kuroda, Y. Nishida, A. Nakamura, K. Tanahashi, H. Takano, S. Narishige, H. Aoi and Y. Nakamura

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280 Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601

^{**}Data Storage & Retrieval System Div., Hitachi, Ltd., 2880 Kozu, Odawara-shi, Kanagawa 256-8510 ^{**}Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577

(2000年10月6日受理、2001年1月24日採録)

Perpendicular magnetic recording is expected to be a prominent candidate for ultra-high-density recording at more than 100 Gb/in². We have developed an analytical method for estimating the read/write performance and thermal decay characteristics. This report focuses discussion on the analysis of low-frequency relaxation process such as hysteresis loops and magnetization decay. The magnetization reversal induced by thermal energy was calculated using Neel-Arrhenius-type model. The calculation conditions which reproduced a practical hysteresis loop could predict the thermal decay characteristics of the written pattern. The accuracy of this estimation is verified by the data from a 52.5 Gb/in^2 demonstration, and the specifications for an areal recording density of 100 Gb/in² is proposed based on this analysis.

Key words: perpendicular magnetic recording, thermal decay, single-pole head, double-layer medium, hysteresis loop, read/write characteristics, Neel-Arrhenius model

1. はじめに

現在,垂直磁気記録方式の実用化に関する研究開発が急速に活 性化してきている.垂直磁気記録方式を用いた磁気ディスク装置 の記録再生(R/W)系の設計には,熱減磁やノイズの特性を精度よ く予測できる解析手法の構築が必須である.そこで我々は,単磁 極ヘッドと二層膜媒体を組み合わせた垂直磁気記録における分解 能・信号対雑音比率(SNR)・熱減磁特性をヘッド・媒体変数と R/W 条件から一括して高精度に予測する解析モデルの構築を試みた. 本報告では,特に熱減磁特性の予測手法について,既に報告した 面記録密度 52.5 Gb/m²の実測データ¹⁾をもとに精度検証を行った. その結果,実測の磁化曲線を再現できる計算条件をもとに磁化の 経時変化を高精度に予測できること,並びに記録磁化状態の熱的 安定性は媒体内の反磁界のモデル化により説明できることがわか った.更に本手法を用いて 100 Gb/m²実現に必要な仕様の算出を 試みた.

2. R/W 特性予測

今回開発した解析手法は、ヘッド・媒体変数とR/W 条件から分解能・媒体ノイズ・熱減磁特性を一括して予測することができる。計算過程はFig.1に示す通り、記録磁化状態計算部、再生出力・ノイズ計算部、熱減磁計算部の3つの部分に分類することができる。まず、熱減磁計算部で磁化曲線を計算し、それをもとに記録磁化状態計算部で孤立磁化転移幅を計算する^{2),3)}.記録密度に対応した磁化状態は、孤立磁化転移の重ね合わせで表されるとした。再生出力・ノイズ計算部⁴⁾では、記録磁化状態と再生ヘッド感度分布を組み合わせて再生出力を計算し、分解能・ノイズ特性を予測する.さらに、再び熱減磁計算部で記録磁化状態の経時変化を算出する.

2.1 熱減磁計算

磁化曲線や記録磁化状態の経時変化では、各磁性粒子の 持つ熱エネルギーによる熱的な緩和過程が支配的である と考えられるため、温度 T における磁化量の変化は Neel-Arrhenius のモデル⁵⁾ に従うと仮定した. すなわち、各粒 子の磁化量の期待値は時間とともに指数関数的に減衰す るとし、このときの時定数 τ を、ボルツマン定数 k_0 、エネ ルギー障壁 E_b 、周波数因子 f_0 を用いて次のように表した.

 $1/\tau = f_0 \exp(-E_b / k_0 T)$ (1)

エネルギー障壁 Eb は以下のようなエネルギーモデルに基



Fig. 1 Estimate of R/W characteristics.

づき計算する。まず、各粒子の持つ単位体積あたりのエネ ルギーの総和 ε_{tot} は,異方性エネルギー ε_k ,静磁エネルギ ー ε_d ,粒子間交換相互作用エネルギー ε_{int} ,ゼーマンエネ ルギー ε_z で表される.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_k + \varepsilon_d + \varepsilon_{int} + \varepsilon_z \tag{2}$$

これらのエネルギーは、異方性定数 K_u , 膜面垂直方向から 磁化容易軸方向への角度 ϕ , 同様に磁化の回転角度 θ , 粒 子自身の持つ磁荷が誘起する反磁界 \mathbb{H}_{d-self} , 粒子の外部か らの実効的な磁界 H_{eff} , 磁化量 M, 飽和磁化量 M_s を用い て, 次のように与えられる.

$$\begin{cases} \varepsilon_{k} = K_{u} \sin^{2}(\theta - \phi) \\ \varepsilon_{d} = -\frac{1}{2} \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_{d-self} \\ \varepsilon_{int} + \varepsilon_{z} = -M_{s} H_{eff} \cos\theta \end{cases}$$
(3)

式(3)で用いられる各種磁界の中で,まず,媒体内の各粒子にかかる反磁界は,粒子自身の持つ磁荷による反磁界 H_{d-self}と,周囲の粒子が持つ磁荷による反磁界 H_{d-out}に分けて以下のように定義される.

$$\begin{cases} \mathbb{H}_{d-self} = -4\pi [\mathbb{N}]\mathbb{M} \\ H_{d-out} = -4\pi (1-N_z) < M_z > (4) \end{cases}$$

円柱状粒子の構造因子を表す対角行列[N],行列[N]のz成 分 N_z を用いることで,粒子半径や媒体膜厚を反映している. 粒子自身のつくる反磁界 \mathbb{H}_{d-self} を考慮することにより,粒 子のアスペクト比が大きくなり粒子形状が容易軸方向に 細長くなると磁化が反転しにくくなり,逆に粒子のアスペ クト比が小さくなり粒子形状が扁平になると磁化が反転 しやすくなる効果をとり入れている.一方,周囲の粒子か らの反磁界 H_{d-out} は平均場近似⁶⁾で与えている.平均場近 似は,Fig. 2 の模式図に示したように周囲の粒子の平均的 な磁化 $<M_z >$ を用いて磁界を近似する方法で,これにより 反磁界 H_{d-out} は中心となる粒子の形状を反映しており,磁 性膜面に平行な反磁界は平均的に見るとほぼゼロになる と考えている.粒子間交換相互作用磁界 H_{int} は,係数 α を 用いて H_{d-out} の一 α 倍で与えている.以上の磁界をもとに, 実効磁界 H_{eff} を次のように表した.

$$\mathcal{H}_{eff} = \mathcal{H}_{ex} + \mathcal{H}_{d-out} + \mathcal{H}_{int} \tag{5}$$

ここでは外部磁界が膜面に垂直な場合を考え,実効磁界は



Fig. 2 Image of mean field approximation.

564

垂直成分のみを持つものとした. このモデルから, 粒子体 積 v を掛け合わせたエネルギーの総和 $E_{tot} = \varepsilon_{tot} \cdot v$ をもとに, 一方の極小値を与える磁化の回転角度 θ_1 と他方 θ_2 の間 の状態変化におけるエネルギー障壁 E_b を算出した. 実効磁 界と磁化は常にセルフコンシステントであるとし, エネル ギー障壁 E_b は媒体内の磁化と実効磁界の変化にともなっ て逐次的に変化するとした. 磁化量の経時変化は, エネル ギー障壁とともに逐次変化する時定数 τ に従って算出し た.

以上の熱減磁計算に必要な入力変数は Table 1 に示した とおりで、媒体変数のうち粒径、異方性定数、容易軸方向 に分散を持たせている.磁化曲線の計算では外部磁界のス ウィープ速度を、記録磁化状態の経時変化の計算では線記 録密度と記録トラック幅を用いた.以下に示す計算結果は、 面記録密度 52.5 Gb/in²デモンストレーション¹⁾の条件に基づくも ので、主なパラメータは文末の Table 2 に記載し、詳細については 文中に記した.

2.2 磁化曲線と磁化の経時変化

磁化曲線の計算では、所定のスウィープ速度で外部磁界 を変化させ、磁化が緩和していく過程を計算した.まず、 異方性定数 K_u と粒子間交換相互作用係数αをフィッティ ングパラメータとし、実測の磁化曲線を再現する.外部磁 界は膜面に垂直な方向に印加されるとし,スウィープ速度 は VSM 測定を模擬して 10 Oe/s とした. Fig. 3 は室温 25 ℃ での磁化曲線の実測と計算結果を表している. Fig. 3 の磁 化曲線と Fig. 4(a)の VSM で測定した熱減磁は CoCrPt 単層 **膜媒体に関するもので、記録層は記録再生評価に用いた二** 層膜媒体とほぼ同じ磁気特性を持つものである。このとき、 フィッテングパラメータとした異方性定数 K_u はトルク測 定により得られる実測値 1.3 × 10⁶ erg/cm³の約 1/2 の値 を用いている. このフィッティングによって定めた実効的 に小さい異方性定数 K, とトルク測定で得られる異方性定 数 Ku との比率は、媒体の材料系に大きく依存し、磁性膜の 初期成長層⁷⁾や表面磁気異方性,粒子の偏析や欠陥などに

ľa	ble	:1	Parameters	for ca	lculating	; thermal	decay.
----	-----	----	------------	--------	-----------	-----------	--------

Medium	Saturate magnetization M_s Thickness t_{mag} Interparticle exchange α Anisotropy K_u Dispersion σ_{Ku} Particle diameter D Dispersion σ_D Dispersion of easy axis $\Delta \theta_{50}$
Head	Track width T_{ww}
M Others	Linear Density Sweep rate of external field Temperature T Time t

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001





起因すると考えられ、さらに詳細な計算モデルの構築が課 題である.

保磁力 H_c 付近の磁化曲線の傾きは主に異方性定数の分 散 σ_{Ku} と粒子間交換相互作用 α の大きさで決まっている. 分散 σ_{Ku} は保磁力分布の半値幅 $\Delta H_c^{2)}$ の実測結果を参考に, 平均値 K_u の 10%とし,比例定数 α は 0.5 とした.また,粒 径の平均値が小さくなると,粒径分散の影響で外部磁界が ゼロの付近の形状が丸みを帯びてくるとともに,保磁力付 近の傾きも緩やかになる.計算に用いた分散 σ_D は,実測 磁化曲線の形状を再現できる値として平均値 D の 20%と しており,実効的な磁性粒径の分散は TEM で観測される 値 30~40%よりも小さいと考えた. $\Delta \theta_{50}$ は実測から 5 degree とした.

磁化曲線と同様の計算条件のもとで,外部磁界ゼロとしたときのFig.3の残留磁化*M*,からの磁化の経時変化を計算した結果をFig.4(a)に示す.時間の対数軸に対して緩やかなカーブを描きながら大きく減磁しており,計算と実験結果がよく一致した.

これに対し,記録磁化状態の熱減磁は VSM で測定され る熱減磁に比べて小さくなる.これは,まず,媒体内の反





日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001



Fig. 5 Calculated magnetization decay of written pattern: (a) 100 kFCI and (b) 200 kFCI.

磁界が、磁化が一様である場合に比べて低減されているた めと考えられる. ビット長とトラック幅が有限であること により、反磁界に分布が生じる. すなわち, 垂直記録媒体 では磁化の転移領域が占める割合が多くなるほど反磁界 が小さくなる.また、二層膜媒体を用いているため、軟磁 性裏打ち層により磁性層裏面の磁荷の効果が緩和され、反 磁界がより小さくなる.計算では,裏打ち層への完全鏡像 を仮定し、この効果を考慮した. ヘッド走行方向の反磁界 の分布が熱減磁に与える影響を確認するために、線記録密 度 100, 200 kFCI での記録磁化状態を仮定して経時変化を 計算した結果を Fig. 5 に示す. 100 kFCI においては,磁化 転移中心から離れた反磁界が大きい領域で熱減磁が大き くなっているが、一方、200 kFCI では磁化転移位置が接近 し、反磁界が大きい領域が少なくなるため、全体的に熱減 磁が小さくなっていることがわかる. すなわち, 面記録密 度が高くなるとヘッド走行方向の磁化転移位置の接近に 加えてトラック幅も狭まることにより媒体内の反磁界が 低減され,記録磁化状態が熱的に安定になると考えられる.

以上の反磁界低減モデルをもとに計算した記録磁化状態の経時変化と実測の再生出力の経時変化を規格化して 比較すると, Fig. 4(b)のようにほぼ一致することが確認された.媒体内の反磁界低減の考え方により,記録磁化状態の熱的安定性が説明できることがわかった.

2.3 分解能・媒体ノイズ計算

再生出力は、二層膜媒体と GMR ヘッドを組み合わせた 場合に得られるヘッド感度分布⁸⁾を用い、相反定理により 算出した.媒体ノイズは、磁気クラスタ径、ヘッド磁界勾 配、媒体保磁力分散をもとに導出している⁴⁾.ここで、磁 気クラスタ径は粒子間の交換相互作用により複数個の磁 性粒子で形成される磁区の最小単位で,媒体ノイズ計算の 主たる指標としている.今後の高記録密度化において,熱 減磁特性の劣化を引き起こさずに媒体ノイズを抑制して 必要 SNR を確保するためには,粒子間交換相互作用を低 減して粒子を孤立させることで磁気クラスタ径を小さく することが必要となる.

再生出力と媒体ノイズについても本手法を用いて高精 度な予測ができることを確認している. Fig. 6 は, 52.5 Gb/in²条件における, 孤立波出力で規格化した再生出力と, 孤立波出力の zero-to-peak 値と媒体ノイズの rms 値との比 で定義する媒体 SNR を記録密度に対してプロットしたも ので,計算結果は実験結果と定性的に一致している.

3. 100 Gb/in²仕様案

本手法を用いて算出した100 Gb/in²仕様案をTable 2に示 す.まず,52.5 Gb/in²デモンストレーションに用いた信号 処理方式を適用すると仮定し,媒体ノイズとアンプノイズ の和から算出される SNR 20.5 dB,分解能 6~7%がビット エラーレート 10⁻⁵ を確保するために必要な目標仕様とし た.媒体記録層の膜厚は,粒子体積の減少による熱減磁特



Fig. 6 Measured and calculated (a) Rolloff curve and (b) media SNR.

1 able 2 Specifications of 100 GD/m system
--

			Intermag 2000	Estimate
Areal]	Density	Gb/in ²	52.5	100
BPI/T	PI		6.6	6.0
Linear Density		kBPI	590	780
Head	Magnetic spacing h_{m}	nm	20	15
	Shield spacing G_s	nm	80	60
	Track width T_{ww}	nm	250	160
Media	Coercive field H_c	kOe	2.6	6.0
	Saturation magnetization M.	emu/cm ³	250	250
	Thickness t _{mag}	nm	20	20
	Particle diameter D	nm	12	9.5

性への影響を回避するため、52.5 Gb/in²条件と同じ 20 nm とした. BPI/TPI=6.0 とすると最高線記録密度は 780 kBPI となり、必要 SNR を満たすためには粒径を 9.5 nm まで低 減することが必要となる⁴⁾.ここでは粒子間の交換相互作 用が十分に小さく、磁気クラスタ径と粒径がほぼ一致して いると仮定した.さらに、垂直記録媒体では低記録密度ほ ど大きく熱減磁するため、熱減磁特性の最悪条件を最高記 録周波数の 10 分の 1 とし、温度 70 ℃での特性を算出した. この際、飽和磁化量 M_s と異方性定数 K_u の温度依存性を考 慮している.その結果、分解能と熱減磁特性が同時に仕様 を満足するためには保磁力 6 kOe が必要と予測される.

4. まとめ

単磁極ヘッドと二層膜媒体を組み合わせた垂直磁気記 録方式に対応した記録再生特性の予測手法を開発した。そ の結果、熱的緩和現象が支配的と考えられる磁化曲線と記 録磁化状態の経時変化は、熱エネルギーによる減磁確率を 計算する Neel-Arrhenius のモデルを用いることにより、実 測結果を精度よく予測できることがわかった. また, 各記 録密度における記録状態の熱的安定性は、磁化曲線を精度 よく再現する計算条件に加え、媒体内の反磁界のモデル化 により説明できることがわかった。分解能・媒体ノイズに 関しても予測精度を検証した.本手法をもとに 100 Gb/in² 仕様案を算出した結果, 粒径を 9.5 nm まで低減させた状態 で保磁力6kOeを確保することのできる媒体が必要となる ことがわかった. このときの飽和磁化は 250 emu/cm³であ る.尚,ヘッド磁界強度は媒体中心で12 kOe,保磁力付近 のヘッド磁界勾配は 96 Oe/nm と仮定しており,狭トラッ ク幅でも強力な垂直磁界を印加できる単磁極ヘッドの開 発も必要となることがわかる.

文 献

- H. Takano, Y. Nishida, M. Futamoto, H. Aoi and Y. Nakamura: Digest of Intermag, AD-06 (2000).
- 2) Y. Nakamura: J. Appl. Phys., 87, No. 9, 4993 (2000).
- 3) 黒田敦子,西田靖孝,高野公史,中村慶久:第 23 回 日本応用磁気学会学術講演概要集,5aB-6 (1999).
- Y. Nishida, H. Sawaguchi, A. Kuroda, H. Takano, H. Aoi and Y. Nakamura: to be presented in PMRC 2000, 26pA-18.
- Y. Zhang and H. N. Bertram: *IEEE Trans. Magn.*, 34, 3786 (1998).
- 6) 成重真治,鈴木博之,片岡宏之:第24回日本応用磁 気学会学術講演概要集,12pA-6 (2000).
- 7) 中村敦,原美紀,高野公史:電子情報通信学会技術研 究報告掲載予定 (2000).
- Y. Suzuki and Y. Nishida: to be presented in The 8th joint MMM-INTERMAG conference, FR-07 (2001).

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001