垂直磁気記録メディアにおける熱磁気緩和の記録密度依存性

Bit Density Dependence of Thermal Relaxation in Perpendicular Magnetic Recording

姜 文紅・村岡裕明・田河育也・中村慶久

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-77)

W. H. Jiang, H. Muraoka, I. Tagawa, and Y. Nakamura

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77

Thermal relaxation in perpendicular double-layered media was examined by simulation and experiments, using a single-pole writing head and an MR flying head. A new FEM simulation with a curling switching model is expanded in association with the exponential relaxation theory. The simulation indicates that the relaxation is less at high densities than at low densities. Only a 2% output deterioration due to thermal relaxation was actually confirmed experimentally for about 10^5 seconds at 5 kFRPI, and there was almost no deterioration at 130 kFRPI. In contrast to longitudinal recording, less output reduction is observed for higher linear densities; this is well explained by the nature of the demagnetization field in perpendicular magnetic recording.

Key words: thermal relaxation, FEM simulation, curling switching model, demagnetization field, perpendicular double-layered media

1. はじめに

最近の磁気記録媒体では高分解能化, 低ノイズ化を図るために, 粒子の微細化と磁氣的孤立化が促進され, 熱磁気緩和による記録磁化の不安定性が懸念されるようになってきた。筆者らはこれまでに垂直磁気記録による高密度記録の検討に垂直二層膜媒体を用いてきた。垂直磁化モードは比較的厚い記録層でも高密度記録が達成できるので実効的な粒子体積(表面からみた粒子直径と厚さの積)を大きくでき, この熱磁気緩和の制約をゆるくできるものと期待され始めている。一方で, 垂直媒体の熱磁気緩和による減磁が大きいとの主張もある¹⁾。垂直磁化では直流磁化状態では強い減磁界を受けて熱緩和に対抗する異方性エネルギーが実効的に低下し, 見かけ上減磁を生じるおそれがあるので, 評価に用いる記録状態を吟味して調べる必要がある。

筆者らはシミュレーションと実測から垂直磁気記録におけるこの熱緩和現象の評価を行い, その基本的な性質を抽出することを試みた。特に, 減磁界が高記録密度ほど減少するという垂直磁気記録が本来持つ性質に着目した検討を行った。

2. シミュレーション

2.1 手順

まず, 垂直磁気記録における熱緩和についてその傾向を把握するために, 単磁極ヘッドを用いて二層膜媒体に記録する場合を想定してシミュレーションを行った。ここでの媒体は筆者らが標準的に用いているものに基づいているが, その諸元は

Table 1 に掲げるとおりである。 H_k 分布は正規分布で与えた。シミュレーションはカーリング型の磁化反転を導入して媒体磁化機構をモデリングした有限要素法によった²⁾。シミュレーションの手順は以下に示すとおりである。

まず, 熱緩和の影響はないものとして与えられた記録密度で記録過程をシミュレートして初期記録磁化分布を求めた。この残留磁化分布に対する媒体内の各要素点での減磁界を求めて, これをカーリング型反転での反転磁界に相当する保磁力から差し引いて得られる各点での実効的な異方性磁界から異方性エネルギー K_u を計算した。次に粒子体積を v , 絶対温度を T , ボルツマン定数を k とするとき, 時定数 τ を,

$$\tau = 10^{-9} \times \exp(K_u \cdot v / kT)$$

から計算して, 次に, Δt の時間経過ステップに対して各要素点での磁化を指数関数,

$$M(t) = M(t_0) \times \exp(-(t_0 + \Delta t) / \tau)$$

で減衰させ, 各時刻での磁化を逐時的に求めた。磁化が減衰した状態のままではセルフコンシステント性が崩れているおそれがあるので, ここでは改めてセルフコンシステントな収束計算を行った上で, 経時変化した磁化分布を決定した。

ここで, 実際の媒体では粒子体積の分布が無視できないことを考えて, 上式中の粒子体積 v の分布は正規分布で与えた。なお粒子間相互作用は, 静磁気相互作用だけを mean-field 近似³⁾を用いて考慮しており, 粒子間の交換相互作用は考えていない。ヘッド再生電圧は相反定理によっている。

想定した粒子体積は, 底面直径 50 nm の円柱に相当する $7 \times 10^4 \text{ nm}^3$ (厚み 100 nm) を基準としたが, AFM などの観測からはおおむね妥当な値と考えられる。この体積から換算した $K_u v / kT$ は室温で約 400 程度になる。

2.2 シミュレーション結果

Fig. 1 に熱磁気緩和による再生電圧の経時変化をプロットする。なお, ここで, 粒子体積分布の標準偏差を平均値で割ったもの (σ/μ) をパラメータとして定義し, 0.1, 0.2, 0.3 として与えた。記録密度 5 kFRPI, 130 kFRPI に対して記録密度と体積分布のいずれにも大きく依存して変化しており, 熱緩和減磁の議論にはこれら因子を考慮した議論が不可欠であることがわかる。すなわち, 体積分布はこの程度でも大きな依存性を示しており, 平均体積より小さい粒子の減磁が全体の緩和に対して大きな影響を及ぼす。この点は媒体作製上重要で十分に留意すべきである。

さらに同図より, 垂直磁気記録では高記録密度ほど減磁が小さいことが明らかである。したがって, 垂直磁気記録の熱緩和

Table 1 Medium specification for the simulation

Saturation magnetization	430 emu/cm ³
Anisotropy field	4,360 Oe
Anisotropy field distribution	0.21
Coercive force	1,100 Oe
Thickness	100 nm
Mean volume of particles	70,000 nm ³
Temperature	293 K

Fig. 1 Relaxation for simulation at various densities and volume deviations.

の測定では、低密度記録状態や VSM による直流磁化状態は垂直磁気記録が用いられるであろう高密度記録状態での減磁を必ずしも正しく表さないといえる。これは低密度ほど減磁界が減少して、直流磁化状態が最も安定になる長手磁化とは対照的な性質である。

次に、より微細な粒子を想定して、粒子体積を $1 \times 10^4 \text{ nm}^3$ から $6 \times 10^3 \text{ nm}^3$ の間で変化させた計算結果を Fig. 2 に示す。ここでは記録密度は 130 kFRPI、また、粒子体積分布のパラメータ σ/μ を 0.1 としている。粒子体積が $1 \times 10^4 \text{ nm}^3$ (100 nm 厚さの同柱を仮定すると、粒子直径は 11 nm に相当) から $6 \times 10^3 \text{ nm}^3$ (粒径 8.7 nm) に変化することで、約 10^5 秒後の経時変化は約 5% の低下から 25% と低下量が大きくなる。この場合の $K_u V/kT$ は 57 から 34 程度に相当している。10 nm 程度の粒径でもこの程度の減磁量にできるのはその厚みが 100 nm と大きいためであり、この点で垂直磁気記録の利点を確認できる。

3. 実験と結果

実験には、コンタクト単磁極ヘッドで記録し、浮上型 MR ヘッドで再生する録再分離構成のヘッド系で二層膜垂直媒体を用いた。ここで、単磁極ヘッドはオフトラックの影響を避けるために十分広いトラック幅のヘッドとした。ヘッド諸元は Table 2 に掲げる。記録後は単磁極ヘッドをアンロード状態にし、MR ヘッドで再生出力の連続観測を行った。環境温度は室温である。測定に用いた二層膜媒体の諸元を Table 3 に示すが、記録層膜厚、保磁力 H_c 、保磁力分散 $\Delta H_c/H_c$ に着目して、サ

Fig. 2 Relaxation for simulation at various particle volumes.

Table 2 Head specification

Main pole material	Co-Zr-Nb amorphous
Main pole thickness	300 nm
Track width	50 μm
Number of turns	26

Table 3 Media specification

Medium		#A	#B	#C
Co-Cr	Underlayer Thickness(μm)	0.97	0.99	0.75
	Ms(emu/cm ³)	430	470	500
	Thickness(nm)	100	50	50
	Hc(Oe)	1,100	1,270	2,000
	$\Delta H_c/H_c$	0.61	0.86	0.1

ンプルを選んだ。

測定の結果を Fig. 3 に示す。5 kFRPI ではわずかな減少が見られたが、シミュレーションから予測されるとおり 100 kFRPI の高密度では、この時間範囲では再生出力の変化が見られず、高密度では垂直磁気記録は熱緩和の影響が小さいことがわかった。Fig. 1 に示した減磁量との対比からは、ここで用いた媒体の粒子体積分布のパラメータ σ/μ は 0.1 程度に対応する。

さらに、媒体の記録層膜厚が 100 nm と 50 nm の二つの媒体の減磁を測定した結果を Fig. 4 に示す。わずかではあるものの、厚い媒体の方が減磁が小さい。一般に膜成長に伴って粒子体積は増加すると思われるので、この結果は平均粒子体積の増加に対応して上式の $K_u V$ で表されるブロッキングエネルギーが大きくなり、熱緩和による減磁が軽減された結果であると考えている。

一方、媒体の磁気特性を変化させ高保磁力で保磁力分散の小さい媒体の減磁を調べた。この結果を Fig. 5 に示す。高保磁力、低保磁力分散の媒体では減磁を小さくできている。ここで用いた媒体は保磁力分散が小さいと同時に保磁力も大きいので、どちらの因子が支配的かは不明だが、媒体定数を変更することで熱緩和による再生減磁を軽減できることを示している。

Fig. 3 Relaxation for experiments at various recording densities.

Fig. 4 Relaxation for experiments at various recording layer thicknesses.

ここで、保磁力の絶対値だけでなく保磁力分散も減磁に影響があると考えているが、その切り分けについては今後明らかにしていく必要がある。

Fig. 6 は市販長手媒体に対する同様の経時変化を測定したものである。ヘッドには上記の測定で用いたマージ型の MR ヘッドである。磁気特性や粒子サイズなどの媒体諸因子が明確でないためその電圧減少量そのものは議論できないが、上に示した垂直磁気記録媒体とは逆に、高密度ほど若干ではあるが減磁が大きいことが確認できた。長手媒体においても異方性の増加など減磁を抑制する改善は今後進むとは思われるが、記録密度に対する依存性は本質的なものであり、将来においても長手記録では高記録密度の熱磁気緩和による減磁については留意しておく必要があると考えられる。

4. ま と め

垂直磁気記録の熱緩和現象による再生減磁を測定とシミュレーションから調べ、粒子体積分布の影響が大きいこと、記録密度が高いほど減磁が小さくなることを示した。室温ではある

Fig. 5 Relaxation for experiments with coercive force deviation.

Fig. 6 Relaxation of longitudinal media at various densities.

が、100 kFRPI では 10^4 秒で 2~4% 程度とかなり小さい値が測定でも得られた。垂直磁気記録で用いられるであろう数 100 kFRPI の高密度では、変調パターンによってはより低密度状態が現れることを考慮しても、その熱磁気緩和の影響は小さいと考えられる。

さらに超高密度記録のための 10 nm 程度の粒径の超微細粒子媒体の挙動についても、本研究で得られた粒子体積の分布の幅を小さくすることで、減磁を抑圧した低ノイズ垂直媒体が実現できることが期待される。ただし、交換相互作用を含めた粒子間相互作用の効果をより正確に取り込んだ定量的な検討をしておくことが必要と考えている。

文 献

- 1) W. Cain, A. Payne, M. Baldwin, and R. Hempstead: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 97 (1996).
- 2) Y. Nakamura and I. Tagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 4159 (1989).
- 3) I. Tagawa and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3981 (1993).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録