垂直記録媒体の記録再生過程

Recording and Reproducing Characteristics of Perpendicular Magnetic Media

古谷伸昭・住田勲勇・松田信英・中山靖彦

松下技研(株), 川崎市多摩区東三田 3-10-1 (〒214)

N. Furuya, I. Sumita, N. Matsuda and Y. Nakayama

Matsushita Research Inst. Tokyo, Inc.,
10-1, Higashimita 3-chome, Tama-ku, Kawasaki, 214

Recording and reproducing characteristics of perpendicular magnetic media by single pole heads have been studied and compared with the results of analysis of a surface magnetic potential model. CoCr/FeNi double layer media were prepared by D.C. magnetron sputtering. The dependences of recording density and reproduced voltage of the media on the thickness of the CoCr layer and perpendicular coercive force are discussed. Those dependences are well explained qualitatively by the consideration of inplane magnetization and transition width of the surface magnetic potential of the CoCr layer.

1. ま え が き

垂直記録方式は記録密度の向上が期待され、2層媒体に単磁極ヘッドの組合せについても詳細な研究が発表されてきた^{1)~4)}。本研究では2層媒体の媒体諸定数と単磁極ヘッドによる録再特性の関係を実験的に調べ、その結果を磁化分布のモデル解析結果と比較した。

従来、数値的な解析は多いが^{2), 5)~8)}、本研究では面内方向磁化と遷移幅 α を考慮して、解析的に媒体定数と録再特性の全体的な関係を考察した。その結果、実験結果と定性的によく一致する解析結果が得られた。

2. 実験方法

CoCr/FeNi の2層媒体を連続直流マグネトロンスパッタ法で作成した。媒体定数は、垂直抗磁力 $H_{c\perp}$ ~ 300 Oe, 飽和磁化 M_s ~ 400 emu/cc, CoCr 膜厚 d ~ 0.2 μ m, FeNi 膜厚 d_{FeNi} ~ 0.5 μ m を中心にして、グループ No. 1 は CoCr 膜厚 d を 0.09 μ m から 1.6 μ m まで膜厚を変化させた。またグループ No. 2 は垂直抗磁力 $H_{c\perp}$ を 240 Oe から 900 Oe まで変化させた。記録再生用ヘッドは単磁極の補助磁極励磁型ヘッド (AP ヘッド) および主磁極励磁型ヘッド (CMF ヘッド) を使用した⁹⁾。AP ヘッドは主磁極厚み T_m = 0.8 μ m で、CMF ヘッドは T_m = 0.9 μ m である。記録再生は 5.25 インチのフレキシブルディスク装置で、半径 50 mm, 回転数 30 ~ 120 rpm で使用した。再生出力 E_p は単位巻線 (T),

単位トラック幅 (mm), 単位相対速度 (m/s) 当たりの再生電圧の o-p 値で示した。

3. 実験結果

Fig. 1 (a) は AP ヘッドでグループ No. 1 の媒体を録再した時の CoCr 膜厚 d に対する ED_{50} である。ここで ED_{50} とは、記録密度-再生出力特性曲線の主磁極厚みに対応する多くのピークの頂点を結ぶエンベロープ曲線が、低記録密度の出力の半分となる記録密度である。 d の増加で ED_{50} は低下する特徴を示す。

Fig. 2 (a) は AP ヘッドでグループ No. 2 の媒体を測定して垂直抗磁力 $H_{c\perp}$ と出力 E_p および ED_{50} の関係を示したものである。媒体の $H_{c\perp}$ の増加は E_p を増加するが反対に ED_{50} を減少させ、高記録密度には逆効果となる結果が得られた。

Fig. 3 (a) は CMF ヘッドでグループ No. 1 の媒体を測定し、CoCr 膜厚 d に対して、低記録密度 (1 Kbpi) と高記録密度 (70 Kbpi) の出力 E_p を比較した結果である。低記録密度の出力は d とともに単調増加するが、高記録密度の出力は d = 0.2 ~ 0.3 μ m でピークを生じ、それ以上では逆に減少する。これは高記録密度では CoCr 膜厚 d に最適厚みが存在することを示している。

4. 解析モデル

Fig. 4 (b) に示すように2層媒体の孤立遷移付近の磁

Fig. 1 Dependence of the envelope D_{50} on the thickness of the CoCr layer.

Fig. 2 Dependence of the normalized reproduced voltage and the envelope D_{50} on the perpendicular coercive force.

Fig. 3 Dependence of the normalized reproduced voltage on the thickness of the CoCr layer at low (1 Kbp) and high (70 Kbp) recording density.

化は反磁界の減少で増加している。CoCr 磁化層表面の磁気ポテンシャルは (a) のように変化し、磁気ポテンシャルの変化幅 α を図に示すように決めると、 α は磁気ポテンシャルの実効的な遷移幅となる。Fig. 4 (b) の孤立

遷移点 O より十分離れた A 点のポテンシャル V_r は反磁界係数を 1 とし、媒体の角形性が良い¹⁰⁾ ので $H_{c\perp}d$ となること、ポテンシャルの x 方向変化が横磁界であることから、孤立遷移 O 点の表面での横磁界 H_{x0} が求まる。

$$H_{x0} = 2V_r/\alpha = 2M_{r\perp}d/\mu_0\alpha = 2H_{c\perp}d/\alpha \quad (1)$$

具体的に $H_{c\perp} = 1000$ Oe, $d = 0.5 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.2 \mu\text{m}$ の値を例題として代入すると、 $H_{x0} = 5000$ Oe と非常に大きな横磁界が発生し、遷移点付近は面内方向磁化を考慮する必要がある。以上の考察より、実際の磁化分布には Fig. 4 (c) で示すように遷移点付近に横磁化 M_x が発生した磁化分布が推定される。そこでこの磁化分布を簡便化したモデル磁化分布を使用した。

低記録密度 ($\lambda > 2\alpha$) では孤立遷移の繰り返しとして、Fig. 4 (d), (e) にモデルのポテンシャルと磁化分布を示した。ポテンシャル $V_m(x)$ は折線近似している。上述したように、遷移点付近に面内磁化 M_x を考え、 y 方向依存性を考慮して $M_x(y)$ とした。遷移点付近は反磁界が少いため M_s とし遷移領域外は $M_{r\perp}$ とした。横磁界 $H_x(y)$ は $y=0$ の表面では H_{x0} で、 $y=-d$ の高透磁率層表面では零であること、および y の正方向にも距離 α 程度で減少するので、Fig. 4 (h) に示す分布に近似した。また CoCr 磁化層の面内磁化曲線を Fig. 4 (i) の PR と近似して、 $H_x(y)$ より面内磁化分布 $M_x(y)$ を求め Fig. 4 (j) とした。これらより、次の (2), (3) 式を得る。

$$M_{x0} = M_s(H_{x0} - H_{c//})/H_k \quad (2)$$

$$h = d(H_{x0} - H_{c//})/H_{x0} \quad (3)$$

ここで、遷移領域の磁束の連続より (4) 式が得られる。(詳細は付録を参照)

$$\frac{1}{2}(M_s\alpha - \mu_0 V_r\alpha/2d) = \frac{1}{2}(M_{x0}h + \mu_0 H_{x0}d + \mu_0 H_{x0}\alpha) \quad (4)$$

以上の (1) ~ (4) 式より、媒体定数 (d , $H_{c\perp}$, $H_{c//}$, H_k , $M_{r\perp}$, M_s) から遷移幅 α および横磁界 H_{x0} が求まる。計算式は MKS 単位系を用いた。

$$\alpha = 2M_{r\perp}d/\mu_0 H_{x0} \quad (5)$$

$$H_{x0} = \frac{M_{r\perp}H_k - M_s H_{c//}}{M_s + \mu_0 H_k} (\sqrt{Q+1} - 1)$$

$$Q \equiv \frac{(2M_s M_{r\perp} H_k - M_s H_{c//}^2/\mu_0 - M_{r\perp}^2 H_k)(M_s + \mu_0 H_k)}{\mu_0 (M_{r\perp} H_k - M_s H_{c//})^2} \quad (6)$$

ただし、ここで (1) 式で示した関係 $M_{r\perp} = \mu_0 H_{c\perp}$ を用いている。このように、媒体定数から遷移幅 α と遷移点での横磁界 H_{x0} が求まり、折線近似したポテンシャル

Fig. 4 Configuration of the analysis model with the surface magnetic potential. (a), (b) and (c) Isolated transition with a transition width α . (d) and (e) Low recording density in the case of $\lambda > 2\alpha$. (f) and (g) High recording density in the case of $\lambda < 2\alpha$. (h) and (i) Dependence of the inplane magnetic force and magnetization on the y axis for the analysis model.

$V_m(x)$ が得られた。

次に Fig. 4 (f), (g) に示す高記録密度 ($\lambda < 2\alpha$) の場合はポテンシャル $V_m(x)$ に平坦部分がない三角波となって磁化分布も (g) のようになるが、上述した ($\lambda > 2\alpha$) の場合と類似の計算より H_{x0} が (7) 式と求まる。

$$H_{x0} = (B + \sqrt{B^2 - AH_{c1}^2})/A$$

$$A \equiv 1 + \mu_0 H_k \{1 + (\lambda/2d) + (\lambda^2/16d^2)\}/M_s$$

$$B \equiv H_{c//} + \lambda H_k/4d \quad (7)$$

これより、($\lambda < 2\alpha$) の場合のポテンシャル $V_m(x)$ が得られる。

5. ヘッド出力

単磁極ヘッド出力を前章で求めた $V_m(x)$ およびヘッド磁気抵抗より導出する。エアースペースの磁気抵抗 R_s と単磁極ヘッドから媒体高透磁率層までの全磁気抵抗 R_c を用いて、単磁極ヘッドを流れる磁束 $\phi(x)$ は (8) 式となる。

$$\phi(x) = \frac{1}{R_s + R_c} \cdot \frac{1}{T_m} \int_{x-T_m/2}^{x+T_m/2} V_m(x) dx \quad (8)$$

よってヘッド出力は、ヘッドに流入した磁束 $\phi(x)$ とコイルを鎖交した磁束の比である磁気効率を K とし、コイル巻数 N 、速度 v より (9) 式と求まる。

$$E(t) = N \frac{d}{dt} \{K\phi(x)\} = NKv \frac{d}{dx} \phi(x) \quad (9)$$

$E(t)$ の時間変化の最大値最小値からヘッドの p-p 出力 E_p が求まる。前章で得られた $V_m(x)$ を代入すると、ヘ

ッド出力 E_p が解析的に求まり、低記録密度 ($\lambda > 2\alpha$) と高記録密度 ($\lambda < 2\alpha$) および、主磁極厚み T_m 、波長 λ 、遷移幅 α の関係で三つに区分して、p-p 出力を具体的に求めた結果を以下に示す。

$\lambda > 2\alpha$, $n\lambda - \alpha < T_m < n\lambda + \alpha$ の場合、

$$E_p = \frac{4NvT_wKM_{r1}d|T_m - n\lambda|}{(d_s + d_c)\alpha} \quad (10)$$

$\lambda > 2\alpha$, $n\lambda + \alpha < T_m < (n+1)\lambda - \alpha$ の場合、

$$E_p = \frac{4NvT_wKM_{r1}d}{d_s + d_c} \quad (11)$$

$\lambda < 2\alpha$ の場合、

$$E_p = \frac{2NvT_wK\mu_0H_{x0}|T_m - n\lambda|}{d_s + d_c} \quad (12)$$

ただし、 $d_s \equiv R_s\mu_0T_mT_w$, $d_c \equiv R_c\mu_0T_mT_w$ で、 T_w はトラック幅、 n は上述の場合を分ける不等式を満たす整数であり、 n が 1 以上は T_m に依存する 2 次以上のピークを表す。

またヘッドが近接すると、表面のポテンシャルは多少減少すると予想される。このため、本モデルではヘッドの無い状態のポテンシャルを用いて出力を計算するので、出力の上限値を与えていると考えられる。

6. 解析と実験結果の比較

前章で解析的に求めたヘッド出力 E_p に具体的な媒体定数を代入して実験結果と比較した。媒体定数は $H_{c1} = 400$ Oe, $H_{c//} = 250$ Oe, $H_k = 4000$ Oe, $d = 0.5 \mu m$, $M_s =$

Fig. 5 Dependence of the normalized reproduced voltage on the recording density with different perpendicular coercive force.

Fig. 6 Flux flow in the isolated transition region.

400 emu/cc, $M_{x\perp} = \mu_0 H_{c\perp}$ を用い, $T_m = 1.0 \mu\text{m}$ とする場合を標準条件とした。標準条件から d , $H_{c\perp}$, T_m などを変化させ、各々の記録密度-再生出力特性を (10) ~ (12) 式で計算した。

Fig. 5 に $H_{c\perp}$ を 400 Oe から 1500 Oe まで変えた記録密度-再生出力特性の計算結果を示す。 $H_{c\perp}$ の増加で低記録密度の出力は増大するが高記録密度の出力は増加しない。この関係を $H_{c\perp}$ を横軸にエンベロップ D_{50} と E_p を縦軸に示した図が Fig. 2 (b) であり、実験結果の (a) と定性的によく一致する。

Fig. 1 (b), Fig. 3 (b) は各々実験結果の Fig. 1 (a), Fig. 3 (a) に対応して、よく傾向が一致している。特に Fig. 3 (b) では高記録密度出力が山型でピークをもつ特徴をよく説明している。

7. 結 び

単磁極ヘッドと2層媒体の組合せで、垂直磁気記録の媒体諸定数と録再特性の関係を実験的に検討し、水平記録と異なる特徴を得た。さらに、モデルと比較した結果、実験結果と定性的に良い一致を示した。今回は未検討である M_s , H_k , $H_{c\parallel}$ などの媒体定数についても、今後さらに実験を行い、計算値と比較して行くつもりである。

謝 辞 ご指導戴いた、東北大学岩崎教授、中村助教授、大内助手、および NHK 総合技術研究所横山氏に感謝致します。

付 録 Fig. 6 に示す遷移領域でトラック幅方向を単位長さにとって、AB 間、BC 間、CD 間を通る磁束を ϕ_{AB} , ϕ_{BC} , ϕ_{CD} とすると磁束連続より次式を得る。

$$\phi_{AB} = \phi_{BC} + \phi_{CD} \quad (13)$$

AB 間の平均の磁束密度 $\bar{B}$ は平均磁界 $\bar{H}$ と平均磁化 $\bar{M}$ より求まる。

$$\bar{B} = \bar{M} + \mu_0 \bar{H} = M_s - \mu_0 V_x / 2d \quad (14)$$

よって ϕ_{AB} は次式となる。

$$\phi_{AB} = \bar{B} \cdot \alpha / 2 = \frac{1}{2} (M_s \alpha - \mu_0 V_x \alpha / 2d) \quad (15)$$

ϕ_{BC} , ϕ_{CD} も同様に平均磁界と平均磁化より得られる。

$$\phi_{BC} = \frac{1}{2} (M_{x0} h + \mu_0 H_{x0} d) \quad (16)$$

$$\phi_{CD} = \frac{1}{2} \mu_0 H_{x0} \alpha \quad (17)$$

(13) 式に (15) ~ (17) 式を代入して、(4) 式が得られる。

文 献

- 1) 岩崎, 大内, 高, 佐藤: 昭 58 信学会総合全国大会, S15-8.
- 2) 斉藤, 佐竹, 河副, 鶴岡, 本多: 昭 58 応用磁気学会誌, 7, (2), p. 103 (1983).
- 3) S. Iwasaki, Y. Nakamura and H. Muraoka: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-17**, 6, p. 2535 (1981).
- 4) K. Yamamori, R. Nishikawa, T. Asano and T. Fujiwara: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-17**, 6, p. 2538 (1981).
- 5) T. Suzuki and S. Iwasaki: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-18**, 2, p. 769 (1982).
- 6) R. I. Potter and I. A. Beardsley: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-16**, 5, p. 967 (1980).
- 7) 佐竹, 斉藤, 法橋: 昭 56 信学会半導体・材料全国大会, S7-7.
- 8) 中田, 井上, 遠藤: 昭 55 信学会技報, MR 80-39.
- 9) 古谷, 渡辺, 松田, 坂内, 水谷, 中山: 昭 58 信学会半導体・材料全国大会, 56.
- 10) 岩崎, 大内, 中塚: 昭 56 信学会技報, MR 81-6.

1983 年 12 月 10 日受理, 1984 年 2 月 14 日採録